

分类号\_\_\_\_\_

U D C \_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院 博士学位论文

## 华北平原气象因子时空变异 对作物产量和水分利用的影响

邬定荣

指 导 教 师 于 强 研究员 中国科学院地理科学与资源研究所  
申请学位级别 理学博士 学科专业名称 生态学  
论文提交日期 2005年10月 论文答辩日期 \_\_\_\_\_  
培 养 单 位 中国科学院地理科学与资源研究所  
学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

**Chinese Academy of Sciences**

**Ph. D Dissertation**

**Effects of spatial and temporal variation of radiation, temperature and  
rainfall on the yield and evapotranspiration of winter wheat and  
summer maize in the North China Plain**

Wu Dingrong

Supervisors: Yu Qiang Professor

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,  
Chinese Academy of Sciences

Date: October, 2005

# 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。

尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院研究生院或其它教育机构学位或证书而使用过的材料。

与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均在论文中已作明确说明并表示了谢意。

研究生签名： 邬定荣      时间： 2005年10月19日

(作为最后提交三本正式学位论文的扉页)

本论文得到地理科学与资源研究所前沿项目 (CXIOG-C003-03)、中国科学院知识创新项目 (KZCX-SW-317-02)的资助

This study was jointly supported by the Special Fund for Major State Basic Research Project, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science (No. CXIOG-C003-03), by the Innovation Knowledge Project of Chinese Academy of Sciences (Grant NO. KZCX-SW-317-02) and the “973” Project for Yellow River (Grant NO. ....) of Ministry Sciences.

## 摘 要

基于生理生态机理的作物生长模拟模型,可以定量和动态地描述作物生长、发育和产量形成的过程,现已成为农业生态系统研究最有力的工具。作物生长模型描述作物生长与环境因子的数量关系,是农田生态系统生产力研究的核心。目前在国际农学、生态学、地理学和气象学界已把农田生态系统中作物生长模型的综合研究与全球变化研究、精准农业发展紧密结合起来,形成了本领域内的热点和前沿问题。

本文的主要研究内容是,本研究以 WOFOST 模型为研究工具,借地理信息系统(GIS),利用作物生长模型进行华北平原作物生长的模拟。首先引进了荷兰瓦赫宁根农业大学(WAU)开发的 WOFOST 模型,以禹城综合试验站的实验数据对其进行校正与验证,随后将之应用于华北平原的研究。最后用华北平原多年的气象数据,分别进行潜在生产与水分限制生长的模拟,得到整个区域多年的潜在条件下雨养条件下的产量和蒸散量,结合 GIS 手段进行分析,得到区域上多年生产力状况的分布图,对其进行分析以得出其内在的规律。同时结合气象资料,分析气象要素的波动引起的产量的波动,最终揭示华北平原生产力的随时间与空间的变化规律。

本研究得到的主要结论如下:

### (1) 模型的适用性

WOFOST 模型的机理性强,对作物生长的光合作用、同化物的分配等过程描述详尽,非常适合本文的研究目的。模型对叶面积指数、干物质积累和产量的模拟虽有一定的差异,但总体来看,模拟结果能良好地反映冬小麦与夏玉米的生长过程。通过参数敏感性分析,确定了一些如单叶片光能利用率、蒸腾速率的校正因子、比叶面积、可见光的消散系数等等对模拟结果影响最重大的参数。由于模型未考虑华北平原特有的一些过程,如冬小麦的越冬过程与灌浆期遭遇的干热风等等,因此与实际情况相比,模拟结果存在一定的误差。

本研究布置的实验观测到的数据真实可信,校正后的 WOFOST 模型在本研究地区的模拟结果基本可靠,可以用来做进一步的研究和利用。

### (2) 冬小麦

降水在年内的分布极为不均,冬小麦生育期降水仅点全年降水量的1/4左右,年际变化很大,对冬小麦的生长非常不利。

对华北平原冬小麦潜在与雨养状态下的模拟结果表明,冬小麦的潜在产量较高,但是各地受程度不一的水分亏缺程度的影响,雨养产量较潜在产量大为减少,导致了潜在产量呈北高南低的趋势而雨养产量却北低南高,由此可看出平原内生育期降水量与产量存在明显的互补关系。辐射与积温各地的变异都较小,因此潜在产量的变异也较低。雨养产量由于考虑了变异程度较大的降水量,因此各地雨养产量的变异程度都比较高。

冬小麦生长季内的降水远不能满足作物耗水的需要,尤以平原中北部为甚,生长季内潜在条件下的蒸散与雨养条件下的蒸散的差额巨大,因此利用地下水和引黄水灌溉及采用抗旱品种、提高作物的水分利用效率对于保证冬小麦稳产高产至关重要。

受气象因素的影响,各地冬小麦的产量呈现不同的特点。平原北部辐射强,积温较小,生育期较长,因此同化的干物质较多,经济产量高,但是平原北部降水严重不足,雨养产量极其低下。平原南部辐射较北方低,积温较高,生长期较

北方短，因此经济产量不如北方高，但是南部降水亏缺的现象不如北方严重，因此雨养产量反倒比北部高。这说明，在平原北部，降水量对实际产量起支配作用，但在南部水分的限制作用不足。对此更详细的分析可为调水的分配方案作为参考依据。

### (3) 夏玉米

对华北平原夏玉米潜在与雨养状态下的模拟结果表明，夏玉米的潜在产量较高，呈北高南低的趋势，但各地受程度不一的水分亏缺程度的影响，雨养产量较潜在产量都略有减少，其中以平原中部程度最重，平原北部次之，南部最缓，因此雨养产量呈平原中部最低，北部高一些，南部最高的趋势。夏玉米生长期中，辐射与积温各地的变异都较小，相对的潜在产量变异也较低。由于华北平原各地年降水量大部集中在夏玉米生长季，各地内的降水量都比较大，因此降水量的变异系数较冬小麦生长季内的小，相应的雨养产量的变异系数也比冬小麦的要小。

夏玉米生长季内的降水相对充足，平原各处基本上都无需灌溉，生长季内潜在条件下的蒸散与雨养条件下的蒸散的差额不大，基本处于可接受的状态，即借助良好的管理方式可削弱水分亏缺对作物造成的不利影响，但是一些站点降水的年际变化仍比较大，为了保证夏玉米的高产稳产，一些站点在某些干旱年型内仍需一定的灌溉保证。

### (4) 综合分析

由于冬小麦漫长越冬期的存在，冬小麦潜在产量与辐射总量的关系不显著，而夏玉米生长季内温度高，作物生长迅速，因此潜在产量与辐射总量的正相关关系明显，各站点夏玉米产量波动主要也是受辐射波动的影响所致。由于模型中认为生育期受积温的控制，平原北部温度比较底，因此生育期长，导致冬小麦与夏玉米的产量都较南部高。积温的变异对冬小麦与夏玉米的产量波动的影响不显著。

结合冬小麦与夏玉米蒸散的模拟结果可以看到，华北平原中北部是水分亏缺最严重的区域，尤其是沧州、南宫，黄骅一带，年降水量基本不能满足作物耗水的需要，降水量年际与生长季大的波动更加剧了这种现象。平原南部降水相对较充足，年降水量基本能满足一年两熟的需要，最南端站点的年降水量甚至超过了冬小麦与夏玉米的潜在蒸散量。

从本研究可以看出，华北平原作物产量的提高主要受水分供应的限制，但各地受限制的程度不一，因此落实到具体的实施方式时需区别对待。

关键词：华北平原；冬小麦；夏玉米；潜在产量；雨养产量；作物模型；WOFOST

## Abstract

Based on crop physiological processes, crop growth model can quantitatively and dynamically depict crop growth, development and yield formation, has been the most powerful tool for agroecosystem research. As it can reflect the complicated relations between crop growth and environmental factors, crop growth model has been focus of the research of agroecosystem productivity. Now, researchers on agronomy, ecology, geography and meteorology have combined comprehensive researches of crop growth model with global change, precision farming. Several hot topics of these projects are being focused on these fields.

In this study, we simulate the growth of winter wheat and summer maize in the North China Plain (NCP) using WOFOST model combined with Geographical Information System (GIS) based on long term historical daily meteorology data. We first introduced the WOFOST model, calibrated and validated it using experimental data conducted in the Yucheng Comprehensive Experimental Station (YCES) for the use of the NCP. After that, WOFOST model was used in the simulation of the productivity and evapotranspiration of winter wheat and summer maize in the NCP during the year from 1961 to 2000. Simulation results were linked with GIS system to carry out spatial analysis and mapping final results. Combined with the analysis of the fluctuation of meteorological factors, spatial and temporal productivity of winter wheat and summer maize in the NCP was advanced.

Main conclusions of this study were as follows:

### (1) Model suitability

WOFOST is a robust mechanistic model, which detailed photosynthesis, distribution of assimilation processes and how those processes affected by environmental factors. Model simulated the growth of winter wheat and summer maize well, though it has minor errors in the simulation of LAI, dry matter accumulation and yield as the model disregard some special processes that happened in this area, such as over winter dormancy process and hot-dry wind in filling stage. Some parameters which have great effect on final results are confirmed after sensibility analysis, such as temperature sum, specific leaf area, extinction coefficient for diffuse visible light, light-use efficiency of single leaf, etc.

After calibration and validation, WOFOST model is ready to be used in the simulation study in the NCP.

### (2) Winter wheat

Winter wheat growth season is the dry season of the NCP. Total rainfall is only 25% of the annual rainfall, which has great negative impact on wheat growth.

Results of winter wheat yield under potential and rainfed condition showed that potential yield in the NCP very high, but as affected by water deficit, which are different in different areas, rainfed yield is much lower than potential yield, causing the situation that potential yield is higher in the north and lower in the south while rainfed yield is on the contrary.

Potential yield varied slightly as a result tiny variation of radiation and temperature sum in winter wheat duration, whereas rainfed yield is on the contrary as rainfall varied greatly in winter wheat growth season.

Gap of evapotranspiration under potential and rainfed condition is great, especially in the middle and north plain. As rainfall in winter wheat growth season is far away from the needs of the crop, the utilization of groundwater and Yellow River runoff, improve water use efficiency and development drought-tolerant crop variety have becomes very important to insure the high and steady yield of winter wheat.

Affected by meteorological factors, winter wheat yield in different area has different characteristics. In the north plain, high radiation and long growth season (caused by low temperature) are two decisive factors of high potential yield in the north plain. But rainfed yield is extremely low because water deficit is very serious there. Lower radiation and shorter growth season (caused by high temperature) are the key reasons of lower potential yield in the south plain. However, water deficit here is not as severe as the north plain. As a result, rainfed yield in the south plain is much higher than that of north plain. Detailed analysis can offer scientific basis to the regional water resource redistribution.

### (3) Summer maize

Potential yield of summer maize in the NCP is higher in the north and lower in the south. As affected by water deficit, rainfed yield is decreased at every station, but the middle plain is the most severely affected area, while north plain is better and south plain was slightly affected. So, middle plain has the lowest rainfed yield, while north plain is higher and south plain has the highest rainfed yield. Potential yield varied slightly as both radiation and temperature sum have little variation during summer maize duration. Because great amount of annual rainfall happened in summer maize duration, rainfall in the NCP is much higher than rainfall in winter wheat duration, and thus its variation index is also smaller, causing smaller variation index of rainfed yield of summer maize.

As rainfall is abundant in its growth season, summer maize do not needs irrigation. Gap of evapotranspiration under potential and rainfed conditions is small and acceptable, i.e., adverse impact of this amount of deficit can be offset by scientific management. But rainfall in some places has considerable variation. Essential irrigation is still very important to maintain maize yield in a extreme dry year.

### (4) Comprehensive analysis

Long over winter dormancy stage is a great waste of radiation. As a result, winter wheat potential yield showed no obvious relations with radiation sum. Summer maize growth season is the hottest season of the NCP and crop growth rate is rapid. As a result, summer maize potential yield and its variation showed obvious relations with radiation sum and its variation, respectively.

Temperature sum is crucial in the simulation as the model use temperature sum to determine crop growth duration. Lower temperature will result in long growth season, and thus high yield, but variation of temperature sum showed has no obvious relations

with yield variation, both winter wheat and summer maize.

From the simulation results of winter wheat and summer maize, we can see that middle and north plain is the area that suffers the most severe water distress, especially the area around Cangzhou, Huanghua and Nangong. In this area, annual rainfall is far away from potential evapotranspiration. Considered highly variation of annual rainfall, agriculture in the middle and north plain is greatly in needs of irrigation water. As in the south, annual rainfall is enough to support the rotation system of winter wheat followed by summer maize. Annual rainfall in several stations locate in the south edge of the plain exceeds the evapotranspiration sum of winter wheat and summer maize under potential condition.

Results of this study showed that water resource is the limiting factors to the crop growth in the NCP, but different in different areas.

**Key words:** the North China Plain (NCP); Winter wheat; Summer maize; Potential yield; Rainfed yield; Crop model; WOFOST

<b>第一章 引言</b> .....	1
<b>第一节 研究意义</b> .....	1
1.1 国际前沿项目关注的焦点.....	1
1.2 气候变异和气候变化对作物影响评价研究的有力工具.....	2
1.3 农业生产决策支持系统的组成部分.....	3
1.4 华北平原农业生产面临紧迫的问题.....	4
<b>第二节 国内外研究进展</b> .....	4
2.1 作物生长模型研究进展.....	5
2.1.1 作物生理模型研究进展.....	5
2.1.2 土壤养分模块研究进展.....	8
2.1.3 国内发展概况.....	10
2.1.4 作物模型发展的新阶段-植物生长可视化研究.....	12
2.1.5 模型应用中存在的问题.....	14
2.1.6 模型研究中的局限性.....	14
2.2 作物生长模型在区域尺度上的应用.....	15
<b>第三节 研究目标、内容与方法</b> .....	17
3.1 研究目标.....	17
3.2 研究内容.....	18
3.3 研究方法.....	18
<b>第四节 研究思路与基本框架</b> .....	18
<b>第二章 WOFOST 模型简介</b> .....	20
第一节 模型简介.....	20
第二节 功能.....	20
第三节 模型的主要结构.....	23
3.1. 气候数据处理模块.....	23
3.1.1 蒸散量的计算.....	23
3.1.2 日长和太阳高度角.....	24
3.2. 作物参数处理模块.....	25
3.2.1 作物发育过程.....	25
3.2.2 日同化.....	26
3.2.3 LAI 的生长与老化.....	27
3.3. 土壤参数处理模块.....	28
3.4 模型参数.....	29
3.4.1. 气象数据.....	30
3.4.2. 作物数据.....	30
3.4.3. 土壤数据.....	30

第三章 华北平原的界定与概述.....	31
第一节 华北平原范围的界定.....	31
第二节 华北平原的气候资源.....	33
2.1 太阳辐射.....	33
2.2 温度.....	34
2.3 降水量.....	35
第三节 华北平原的农业生产状况.....	36
第四章 模型的校正与验证.....	42
第一节 自然条件和试验地概况.....	42
1.1 禹城综合试验站研究概况和试验条件.....	42
1.2 气候条件.....	42
1.3 土壤条件.....	42
第二节 冬小麦生长的校正.....	43
2.1 试验设计和方法.....	43
2.1.1 试验布置.....	43
2.1.2 冬小麦生长指标观测.....	44
2.1.3 模型参数.....	45
2.2 冬小麦校正验证与结果分析.....	46
2.2.1 生物量的校正验证.....	46
2.2.2 蒸散的校正验证.....	49
第三节 夏玉米生长的模拟.....	50
3.1 试验地概况.....	50
3.2 模型的校正验证与结果分析.....	51
3.2.1 生物量的校正验证.....	51
3.2.2 蒸散的校正验证.....	53
第四节 模型参数的敏感性分析.....	55
4.1 作物参数敏感性分析.....	55
4.2 气象要素对模拟结果的敏感性.....	56
第五节 本章小结.....	57
第五章 产量模拟.....	59
第一节 气象数据的整理.....	59
1.1 最高最低温度、风速、水汽压和降雨量的整理.....	59
1.2 日照时数的整理.....	59
第二节 华北平原冬小麦生长季的气候资源.....	62
2.1 辐射.....	63
2.2 温度.....	63

2.3 降水.....	64
第三节 冬小麦生长的模拟.....	64
3.1 数据准备.....	65
3.2 模拟结果.....	66
3.2.1 模拟产量的空间分布.....	66
3.2.2 模拟产量的时间分布.....	67
第四节 华北平原夏玉米生长季的气候资源.....	70
4.1 辐射.....	70
4.2 温度.....	71
4.3 降水.....	71
第五节 夏玉米生长的模拟.....	72
4.1 数据准备.....	73
4.2 模拟结果.....	73
4.2.1 模拟产量的空间分布.....	73
4.2.2 模拟产量的时间分布.....	75
第六节 冬小麦—夏玉米生长的模拟.....	77
第七节 WOFOST 模型优缺点讨论.....	79
<b>第六章 华北平原冬小麦和夏玉米蒸散的模拟.....</b>	<b>83</b>
第一节 WOFOST 模型对蒸散的计算.....	83
1.1 潜在蒸散的计算.....	84
1.2 实际蒸散的计算.....	86
第二节 冬小麦蒸散的模拟.....	88
2.1 潜在生长条件下的蒸散.....	88
2.2 雨养生长条件下的蒸散.....	90
2.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差.....	92
第三节 夏玉米蒸散的模拟.....	93
3.1 潜在生长条件下的蒸散.....	93
3.2 雨养生长条件下的蒸散.....	95
3.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差.....	96
第四节 生长季蒸散的模拟.....	98
4.1 潜在生长条件下的蒸散.....	98
4.2 雨养生长条件下的蒸散.....	99
4.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差.....	101
4.4 降水与潜在蒸散和雨养蒸散之差.....	102
第五节 结论与讨论.....	104

第七章 结论与讨论.....	107
第一节 主要结论.....	107
第二节 研究不足之处.....	109
第三节 研究展望.....	109
参考文献.....	115

## 第一章 引言

### 第一节 研究意义

我国是一个人口众多、农业水土资源相对贫乏的国家。农业问题，特别是粮食问题一直是国家的基本国策，在经济发展过程中始终把农业发展和粮食生产问题放在第一位。建国以来，特别是改革开放以来，农业的发展取得了举世瞩目的成熟。1998年我国粮食达到了  $4.9 \times 10^8$  t，超过人均 400 kg 的世界平均水平。棉花总产达到  $440 \times 10^4$  t，解决了  $12 \times 10^8$  人口的温饱问题。随着人民生活水平的不断提高，对农产品种类和质量的需求也不断增大，据有关学者预测，2030 年我国人口达到  $15.3 \times 10^8 \sim 16.3 \times 10^8$  人，粮食总需要  $7250 \times 10^8$  kg。我国对粮食需要为农业生产带来了巨大的压力，农业的发展前景依然严峻。我国粮食安全问题再度成为世界关注和我国经济发展、社会稳定、国泰民安的焦点。农业结构调整和粮食生产安全成为新时期农业发展的重点问题。

限制我国农业发展和粮食增长的主要自然因素是土地资源和水资源的总量不足及土地质量和光、温、水等自然要素的不协调以及农业的快速发展需求与水土资源间的矛盾日益尖锐。由于我国水土资源可供农业外延性发展的空间有限，只有能过土地和水资源、光温资源、科学技术的有效耦合，以此发挥最大的区域生产力，来不断地提高农产品的生产数量和质量。

我国的土地资源和水资源高效利用对粮食生产还有较大的潜力。有关专家计算：小麦的平均灌溉定额在华北地区为  $1725 \sim 2325 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，而我国实际平均灌溉用水为  $6450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，比小麦、玉米、水稻等需水高出  $2040 \sim 4740 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，约占水资源总供给量的 30%。该潜力的发挥，需要对土地资源和水资源进行高效配置和利用进行分析和评价，在时空定量分析和决策的基础上，通过节水技术和工程措施的实施，实现水土资源的高效利用，缓解粮食增产需求与资源约束之间的矛盾，保证我国的粮食生产安全。

#### 1.1 国际前沿项目关注的焦点

由于农业系统内在的复杂性，模型研究直至 19 世纪六十年代才起步。在信息技术与农业领域迅速积累的知识的支撑下，作物模型在过去近 40 年里飞速发展，至今已开发出各种各样的、功能各异的模型数百种，发表的科技文章数也呈迅猛增长的趋势。在 CROP-CD of CAB Abstracts 上在文章名上用“模型”和“模拟”搜索，发现发表的与模型有关的文章从 70 年代的每年 82 篇迅速上升到 90 年代的每年 270 篇，发表这类文章的主要杂志是：Transaction of ASAE, Agricultural Systems, Agricultural and Forest Meteorology, Agronomy Journal 和 Field Crops Research。文章名就提及作物模型的文章从 1973 到 1988 年仅有 11 篇，而在 1988 年到 1993 年则有 77 篇。这表明作物模型

研究已经成为国际国内相关领域研究的热点，且目前正朝深化应用及多学科融合的方向发展。随着研究的不断深入，知识也不断地积累，模型不断地改善，新的模型也层出不穷。同时，由于更多的人可以接触到模型和使用经验的不断地积累，人们对模型方法越来越有信心，模型也必将在更广泛的层次上得到应用。

我国作物计算机模拟研究起步于 20 世纪 80 年代。经过国内科学家们的努力，中国作物模型的研究在这二十多年里飞速发展，目前已形成了一定的研究规模，研制了一批有实用性质的模型(如 RCSODS, 高亮之等, 1992)，但与国外同行的研究相比仍有一定的差距，特别在建模、模型区域应用、模型与 GIS 和 RS 的结合上仍存在不少差距。

本研究将以田间试验结果为基础，以校正后的作物生长模型(WOFOST v7.1)的模拟结果为依据，以地理信息系统、系统分析、数理统计等手段，结合前人研究的成果，综合分析华北平原这一我国最重要的农产品主产区冬小麦-夏玉米轮作制中小麦和玉米生产中存在的问题及可能的解决途径；在此基础上分析该地区未来小麦和玉米生长的主要可能限制因子-水对这一地区农业可持续发展的影响，以期对该地区农业可持续发展的定量化研究提供科学依据。

## 1.2 气候变异和气候变化对作物影响评价研究的有力工具

气候变异和气候变化对农业的影响主要体现在影响种植制度、影响作物生产潜力和对灾害性气候的影响这几方面。气候变异和气候变化对农业的影响是综合的，例如，气候变暖会由于生长期延长而使得作物的产量提高。但气候变暖后，如果没有新的适应技术，主要作物的生长期会普遍缩短，这会对物质积累和籽粒产量有负作用。同时，热量资源增加对作物生长发育的影响很大程度上受降水变化的制约，如果降水不能相应增加，会对农作物的生长产生不利影响。为了研究气候变异和气候变化对农业的影响，需要建立农作物和气候因子相联系的作物生长模型，因此，作物生长模型成为了评价气候变异和气候变化对农业的影响的不可缺少的工具，如 Hulme 等(1999)用 EuroWheat 模型模拟了人为引起的和自然发生的气象变异对欧洲小麦产量和地表径流的影响；Jane 等(2000)用 DSSAT 未来气候与气候变异对美国中西部地区玉米产量的影响等等。在中国，陶战等(1994)和王馥棠(1999)的研究认为，气候变暖，作物可供生长的季节变长，对我国的种植制度影响重大，在水热的综合作用下，我国的耕地复种指数和二熟制、三熟制区域的北线将大幅度北移。

冯利平(2003)在 WHEATSM 的基础上完成“气候异常对我国华北冬小麦生产影响评估模型(WHT MOD)”，简单实用，适于区域评估，可与短期气候预测业务系统相配套，预测和评估短期气候变化对我国华北冬小麦生产影响，并实现评价结果的 GIS 表达。我国在作物模拟模型研究上取得的进展为探索气候变化对中国农业的影响及农业生产可持续发展的策略提供了有利条件。

近些年来，作物模拟技术已经被应用于气候变化影响评估、预测区域气候变化情

景下的农业生产力、评估作物生产气候风险等。如 Hammer(1993, 1994, 1995)等用作物模拟模型评估澳大利亚高粱、花生、向日葵等作物生产的气候风险; Horie(1993, 1995)通过水稻模型 SIMRIW 与气象数据自动获取系统 AMeDAS 的结合, 预测了日本水稻的地区性气候生产力; Matthews 等(1995a, 1997)将 ORYZA1 与大气环流模型 GCMS 连接分析了未来气候变化对东南亚各国水稻生产的可能影响; 熊伟等(2001)利用中国随机天气模型将 IPCC 的气候模式与 CERES-RICE 模型相连接, 模拟了未来气候情景下我国主要水稻产区产量的变化趋势等。今后, 随着作物模拟技术不断完善和决策支持技术、3S 技术等新技术的应用, 作物模拟技术动态性、综合性、时效性的优点必将在气候影响评价以及气候应变管理决策中得到良好的体现。

### 1.3 农业生产决策支持系统的组成部分

决策支持系统(Decision Support System)是以计算机技术为基础的对决策支持的知识信息系统, 用于处理决策过程中的半结构化和非结构化问题。经过 20 多年的研究, 决策支持系统已在农业、工业、商业和贸易等方面得到了应用, 为高层或基层的管理决策和策略的制定提供了辅助决策的工具。

农业决策支持系统是在农业信息系统、作物生长模型和农业专家决策系统的基础上发展起来的, 作物生长模型是其重要的组成部分。在作物模型得到迅速发展后, 它被广泛地用于解决农业过程中的半结构化问题。如美国夏威夷大学的 IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 推出的 DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)系统, 就是由作物模拟模型支持的决策支持系统, 除了数据支持以外, 还提供了计算、解题的方法, 为决策者提供决策的结果。到 90 年代初期, 农业决策支持系统又有了进一步的发展, 形成了以知识库系统或以专家系统支持的智能化的农业决策支持系统。如 1992 年美国 Florida 大学农业工程系 Lal 等(1992)研制的 FARM-SYS(Farm Machinery Management Decision Support System)和 Kline 等(1989)研制的农场级智能决策支持系统(FINDS)。近年来, 随着地理信息系统(GIS)的广泛应用, 农业决策支持系统的研制向更深层次的方向发展。美国佛罗里达大学农业工程系 Calixte 等(1992)将 DSSAT3.0 结合地理信息系统(ArcView)集成了农业环境地理信息系统的决策支持系统 AEGIS (Agricultural and Environmental Geographic Information System), 1994 年该系统在 Windows 环境下发展为 AEGIS/Win (Thomas et al., 1997)。作物模型支持下决策支持系统的大量涌现极大地促进了农业信息化的发展。

农业决策支持系统发展的未来趋势随着信息技术和网络技术的发展, 已向群决策支持系统和网络决策支持系统方向发展。因此, 在不久的将来, 农业决策支持系统将作为农业可持续发展中必不可少的辅助决策工具。目前, 农业决策支持系统的研制已引起我国农业各领域和各部门的关注, 将对我国农业现代化发展起到重大的推动作用。作为其重要组成部分, 作物生长模型也必将得到不断的发展与完善。

## 1.4 华北平原农业生产面临紧迫的问题

华北平原是我国最重要、人口最密集的灾区之一。该区人口占全国总人口的 1/5 左右，耕地和粮食产量分别占全国的 23.5% 和 26.2%。冬小麦-夏玉米轮作是该地区的主要耕作制度，小麦总产量占全国小麦总产量的 50% 左右。区内光热丰富，土地肥沃，土层深厚，有着巨大的农业生产潜力。半湿润半干旱季风气候使得本区降雨主要集中在夏季，年内分配不均，变率较大，因此，灌溉成为保证农业生产得以顺利发展的主要措施。

然而，由于作为灌溉水源的地表水和地下水，经过多年开发，利用程度已位居全国之冠(胡毓骥等, 1995)，地表水已达 80%，地下水也因连年超采形成多处大面积漏斗区，难以再生，且近年地下水位下降速度有加快之势，以太行山山前平原的栾城为例，近年地下水位平均以每年近 1 m 的速度下降，已降到地下 27 m 左右，最深时达 29 m，长此下去，必将导致地下水枯竭、生态失衡，社会经济的持续发展将受到严重威胁。可以预计，若不采取必要的补救措施，这些问题在近二三十年内即会突显出来。

目前，本区的农业生产已受到水资源不足的制约，生产潜力不能进一步发挥。缺水危机迫在眉睫，已成为困扰华北平原农业乃至整个国民经济继续快速发展的头等难题。水资源的已经无源可采，且随着工业和城市的迅速发展，这种危机已变得越来越严重。据“七五”期间的研究，本区现状农业用水供需缺口为 32-102 亿  $m^3$ ，即使南水北调中线方案实施后，本区的农业用水配额也仅有 25.9 亿  $m^3$ ，远不能满足需求，即使如此，到 2000 年，农业用水供需缺口仍将扩大到 50-170 亿  $m^3$ (陶陶等, 1994)。因此，节流成为缓解本区水资源紧缺的主要途径，且当前农业用水管理较粗放，仅输水一项年可节水达 20 亿  $m^3$ (刘昌明, 王会肖, 1995)。发展节水农业，推行农业节水措施，无论对实现市郊农业用水、解决当前农业用水供需矛盾，或更深意义上来说，实现本区农业的持续稳定发展，无疑都是非常必要的。

## 第二节 国内外研究进展

20 世纪 60 年代起，随着对作物生理生态机理认识的不断和计算机技术的迅猛发展，作物生长模型的研究得到了飞速发展，目前已经迈向了实用化阶段。基于生理生态机理的、考虑作物生长与大气、土壤、生物乃至人文等环境因素的相互作用的作物生长动态模拟模型已成为农业研究最有力的工具之一。作物生长模型在集成已有科学研究成果、作物种植管理科学化以及在决策制定中所起的作用已逐渐为大家所认识，其应用的领域也在不断扩大。

然而，作物模型的研究和应用还存在许多问题。例如，在研究方面，由于对许多生理生态过程的认识仍然不够透彻，对一些过程的描述仍然是经验性的，从而影响到了作物模型的普适性。在应用方面，作物模型区域应用的要求日益迫切，但是区域地表参数和作物参数以及其它环境参数的获取非常困难，这是作物模型区域应用面临的

最主要的问题。本节将回顾国内外作物模型的发展历程，介绍作物模型在研究和应用中存在的问题，讨论作物生长模型的开发应用前景。

## 2.1 作物生长模型研究进展

作物计算机模拟是指用数学概念和方法表达作物的生长过程。Curry 认为，作物模拟应尽可能用数学公式描述作物的动态过程，以替代用黑箱方法和专家系统方法进行的最优估计(Curry, et al., 1990)。Thomas 和 Seligman 回顾了作物生长模型的发展历史后提出，作物模拟是借助于计算机手段，对作物各种生长过程进行综合的数学模型(Thomas and Seligman, 1996)。Monteith 也给出了类似的定义，认为作物模拟是通过给定一系列生物系数和相应的环境变量，用来模拟、预测作物的生长、发育和产量的定量模拟系统(Monteith, 1996)。我国著名作物模型专家高亮之在长期从事作物模拟研究的基础上，对作物模拟下过以下的详细定义：作物模拟是从系统科学的观点出发，将作物生产看成是一个由作物、环境、技术、经济四要素构成的整体，不仅可以通过建立数学模型或子模型对作物过程及其与环境之间的复杂关系进行动态描述，还可以兼收并蓄相关学科的理论 and 实验成就(高亮之等, 1989)。这些模型或子模型经过检验、反馈和修改，最终“装配”在一起，形成在计算机上模拟作物生产全过程的大型软件系统。尽管上述各种定义的表述不同，但有一点是共同的，即用数学概念和方法描述作物生长的动态过程。这也是它有别于并优于其它农业研究方法之处。因此，作物模型，或更广义地说，作物模型将是农业资源优化管理的核心。

### 2.1.1 作物生理模型研究进展

自 de Wit 提出作物生长模拟理论以来，作物生长模型的研究取得了巨大的进展，出现了许多考虑作物生理学特点和环境因子对作物生长影响的综合模拟模型，即作物模型(Crop Model)。因为农业生态系统涉及的问题广泛、所以目前欧美等发达国家通过长期的大量的人力物力投入，开发了数以百计的农田生态系统模型，并实现了商业化，在农业决策、生产管理与科学研究中发挥着巨大的作用，如荷兰的 WOFOST 系列、美国的 CERES 等等都是通过组织多学科的专业人员，通过巨额的资金投入，历经数十年开发出来的。

作物生长模型的研究可以为其它相关学科提供基础的研究手段和就读，促进资源环境科学、生态学、农业科学信息科学的发展。同时还可以为提高我国农业决策的现代化水平，推动农业向信息化、智能化的方向发展：(1)它是计算全球或区域初级生产力、评价作物生长和资源利用效率的基础模型；(2)在全球变化与农田生态系统的相互作用机理与对策等研究中，作物生长模型成为基本手段；(3)农业生态系统的 CO<sub>2</sub> 同化和冠层蒸散伴随一系列的物质与能量传输，是地球表层能量物质迁移和生物地球化学循环的重要组成部分。作物生长模型为这些研究提供了有力的工具；(4)在土地适宜性评价和土地覆被、土地利用格局变化研究中，作物生长模型可发挥重要的作用；(5)与遥感、全球定位系统、地理信息系统、机电智能化控制系统结合，在精准农业、信

息农业和作物长势监测、产量预报中，作物生长模型可提供强有力的预测和管理决策支持。

作物生长模型早期的研究是荷兰学者 de Wit 等和美国学者 Duncan 开创的(de Wit, 1965; Duncan et al., 1967)。他们相继发表了两个能在计算机上模拟玉米生产过程的模型，这标志着作物模拟技术的问世。但上述模型主要以解释和描述作物本身的生理过程为目标，对环境因子考虑得较甚少，所采用的方法基本上是以分析试验数据的统计方法为主，涉及的变量较多，而各变量之间又存在着复杂的关系，故很难在农业生产中应用。

70-80 年代，针对早期作物模型机理性不足、应用性较差的弊病，作物模拟研究领域逐渐分化成以荷兰 de Wit 和美国 Ritchie 为代表的两大学派。荷兰学者注重作物生长过程的机理表达，即利用现有知识、理论或假说，首先构建作物过程的模拟模型或子模型，然后再将模拟结果与实验数据进行比较，看现有的知识、理论或假说能否圆满解释生长发育、光合作用、干物质分配和产量形成等生理过程。如果实验数据与现有理论不相符合，则为了增进对问题的认识与理解，又对现有理论或假说进行补充修改，重新构建模型并重复上述步骤，直至提出新的理论、假说或见解。这一思想贯穿在他们先后推出的 ELCROS（初级作物生长模拟模型）、BACROS(基本作物生长模拟模型)、SUCROS(简单和通用作物生长模拟模型)、MACROS（一年生作物的模拟模型）和 WOFOST(世界粮食作物研究模型)等模型中(van Ittersum, et al., 2003)。荷兰学者研制的模型结构严谨，理论性和综合性强，一定程度上代表了本领域研究的最高水平。如 de Wit 等（1970）最早将呼吸作用纳入作物模型；Penning de Vries(1974)通过模拟试验，找出了生长性呼吸与光合同化物之间的数量关系；Goudrian（1977）将微气象学理论引入模型，实现了作物冠层阻抗对气、热交换影响的模拟；van Keulen 和 de Wit(1982)提出的作物生长 4 个层次水平的概念，等等，都对作物生长模型的发展做出了杰出的贡献。但这些模型对一些作物过程描述得过于详尽，包含了许多难于获得的参数和变量；另一方面，又将许多具有不同生长特性的作物都归纳为一种通用的作物模拟模型，似有繁简失当之嫌，因此他们的模型只能供科研和教学使用，难以面向生产实际。

美国学者则主张作物模拟模型既要在理论上可行，又要便于应用。因此在他们研制的模型中，一方面包含了动力学和生理过程，同时也包含以试验为基础的经验公式或参数。这种模型被称为基于作物过程的模拟模型，最具代表性的是著名的 CERES(作物-环境综合系统)模型系列，目前已覆盖了玉米、小麦、水稻、大麦、高粱、粟、马铃薯、大豆、花生、木薯等多种作物模型。所有这些模型，在 DSSAT（农业技术传播决策支持系统）外壳软件的支持下，采用相同的标准化格式输入天气、土壤和管理变量，并输出模拟结果，不仅可以动态地模拟环境因子、栽培管理和遗传特性对作物生长发育和产量形成的影响，还能模拟土壤的养分平衡和水分平衡(IBSNAT, 1990)。1982 年之后，CERES 模型已在美国和其他许多国家、特别是发展中国家得到了广泛

验证,并用于一些农业先进技术的传播。同一时期或稍后,颇具影响的作物模型还有: WINTER WHEAT (冬小麦模型)、GOSSYM (棉花生长模拟模型)(Baker, 1983)、RICEMOD(水稻模型)、SICM(大豆综合作物模型)、EPIC(土壤侵蚀影响生产力模拟模型)、SIMRIW(水稻-天气模拟模型)、ORYZAL(水稻生产基本模型)等。上述作物模型涉及的不仅是作物过程本身,还包括了影响作物过程的其他要素,如病虫害、土壤侵蚀、气候变化和经济条件等。

美国学者十分重视作物模拟模型在生产上的可靠性,荷兰学者则强调实验室测定的重要性。为此,他们投入了大量的人力、财力,用于模型的检验和校准。上述模型,特别是美国的模型,在许多宏观分析中,如土地资源管理、大面积作物估产、全球气候变化影响评价等方面都发挥了良好作用,但在比较微观的作物生产管理决策方面还不尽如人意,其中一个很重要的原因就是没有考虑作物生产管理中的优化问题。因此,他们研制的作物生长模型,只有模拟模型部分,没有优化模型部分。只能回答在一定气候、土壤和栽培管理条件下“作物怎么生长”的问题,却无法解决“作物应该怎样种”的问题。虽然国外有些学者主张将作物模拟模型与农业专家系统结合起来,但由于农业专家的经验常受地域和品种的限制,效果并不好。

90年代之后,作物模拟继续朝着应用多元化方向发展,荷、美两大学派也出现了合流趋势,即一致主张机理性与应用性并重。同时,对作物生产中的优化问题亦更为重视。这段时间,研究的重点放在提高模型的普适性、准确性和操作的简易性等方面,并主张与其他学科模型相衔接,与其他信息技术相结合,并成为其中重要的组成部分。这是当今作物模拟发展的大趋势。

在与其他学科模型相衔接方面,最成功的例子是将作物模拟模型与大气环流模型(GCM)耦合,用以评价全球气候变化对粮食生产的影响。在与其他信息技术结合方面,较典型的例子有:德、美科学家联手开发的AEGIS(农业与环境地理信息系统, Thomas et al., 1997),其核心技术是作物模拟和地理信息系统(GIS)相结合。近10年来在美国悄然兴起的“精准农业”,亦是以全球定位系统(GPS)、GIS和作物模拟的集合技术为支撑的,尽管目前在与作物模拟模型的联系方面还做得不够。在英国,纽尔卡斯大学为本国与其他国家的一些流域地区设计的水污染模型与遥感(RS)监控系统相结合,可及时有效地提出各种优化治理方案或对策,获得了很好的经济效益。

农业土地利用规划的内容是确定合适的土地利用方式,以使利益最大化同时保持良好的生态环境,包括在田间、农场、流域和区域尺度。最佳土地利用方式的确定需要综合考虑经济与生态环境的因素,因此就需要使用基于生物物理的模拟模型。这些模拟模型把作物生长与产量、计算土壤和植物的水分与养分平衡,看成是环境因素与管理措施的函数。一般情况下,这些模型只能进行站点上的模拟。大多数模型的输入没有反应出环境因子的空间变异。但是大多数模型的输出却是具有空间属性,如各个田块或各种尺度上实测的产量。以图件方式对模拟结果进行可视化表达可以极大地加深对模拟结果的理解与解释。这就需要一种软件来在区域尺度上组织数据与定义土地

利用方式, 模拟对不同土地利用方式的反应, 并对模拟结果进行分析与表达。

在过去的几年中, 有较多的决策支持系统被开发出来用于在区域上评价农业措施对产量的影响, 通常这些决策支持系统都把数据库和专家系统与 GIS 结合。一些系统, 如牙买加地理信息系统(JAMGIS; Batjes, 1989)和多米尼加共和国专家农业地理信息系统 (DREAGIS; Mendez 和 Grabski, 1992)等, 包含了数据库与地图, 它们专为那些发展中国家的土地利用评价而量身定做。农业环境地理信息系统 AEGIS (Calixte et al., 1992; Lal et al., 1993)则结合了一个作物生长模型, 用来计算评价不同土地利用方式的影响, 但仅限于波多黎各的三个区域的应用。AEGIS\_2 (Papajorgji et al., 1993)是个通用性更强一点的系统, 能适用于不同的区域, 它把作物生长模型 DSSAT2.5 (Hoogenboom et al., 1993)和 GIS 软件 ARC/INFO (ESRI, 1993)。Hoogenboom et al. (1993)和 Wei et al. (1994)发展了许多 GIS 和作物模型的链接方式, 方便了作物模型在研究与农户层次上的应用。

其它把作物模型与 GIS 结合起来的还有 Bachelet et al. (1993)、Carbone et al. (1996)、Han et al. (1995)、Magnusson 和 Soderstrom (1994)、Singh et al. (1993)、Stoorvogel (1995)。对于作物模型的建模人来说, 一个非常不利的方面是, 建立这样的系统需要对 GIS 有相当深入的了解。这些系统有基于 Unix 的 ARC/INFO (Carbone et al., 1996; Wei et al., 1994), 还有基于 DOS 的 PC-ARC/INFO (Han et al., 1995; Hoogenboom et al., 1993)及其它 GIS 软件包的, 这些软件的费用不菲, 没有大的支持与赞助难以购买, 因此得不到广泛的推广。

在基础理论上, 作物生长模型方面也经历了多年的发展。黄秉维先生(1978)较早地提出了光合生产潜力的概念, 即在其它因素适宜的条件下, 由太阳辐射决定的作物生产潜力。这对于认识作物产量的限制因子, 发现改善的途径有重要意义。荷兰学者进一步提出了作物产量按照影响因素划分的三个水平: (1) 潜在产量(potential yield): 在适宜的土壤水肥条件下, 只受太阳辐射和温度决定的作物产量; (2) 可获得产量(obtainable yield): 当土壤水肥资源短缺的时候形成的作物产量; (3) 实际产量(actual yield): 受到病虫因素影响而形成的最终产量(van Ittersum, et al., 2003)。对于这些因素的分析可以获得资源的投入与产出的数量关系。资源的优化就是基于在上述特征产量区间的资源利用效率的研究。

### 2.1.2 土壤养分模块研究进展

作物模型一般都包括三大模块: 作物生理模块、土壤水分养分动态模块、气象数据输入处理模块。其中气象数据处理模块利用各种的气象数据, 如逐日、月平均等精度不一的数据, 作为模型的驱动; 作物生理模块描述作物对各种环境因子的动态响应; 土壤水分养分动态模拟描述土壤水分养分运移过程, 并据此计算作物受到水分养分胁迫的大小, 其中养分目前主要是以氮素的研究为主。土壤水分养分运移过程由于内在机理的复杂性、测定上的困难性及土壤的不均质性, 其研究一直都是作物模型的薄弱环节。

国外有关农田土壤水分的模拟研究主要包括三个方面工作：第一，运用土壤水分平衡原理研究土壤水分动态。例如，五十年代末，Thornthwaite 和 Mather 提出了气候水分平衡的簿记方法，用来计算逐日土壤水分亏缺和盈余量(Thornthwaite and Mather, 1957)。70 年代，英国气象局建立了降水和蒸发计算系统(MORECS)，可在计算蒸发量的基础上，利用水分平衡公式对土壤水分、蒸发及有效降水等进行估算，Shuttle 等建立的稀疏植被蒸散模型及大气稳定度订正模型，通过对土壤水分进行动态模拟，证实了 MORECS 的有效性(Ragab, et al., 1997)。Lockwood(1989)等在英国北部进行了大规模的水分试验，并利用 MORECS 模型预报土壤水分；Ritchie 在 CERES-Wheat 中增加了面向用户的小麦土壤水分平衡模型，可预测因土壤和植株水分亏缺引起的小麦减产(Ritchie, 1991)。90 年代，Baier（加拿大）改进了建立于 1966 年的多功能土壤水分平衡模型 VSMB，使其模拟功能更加完善(Baier and Robertson, 1996)。第二，运用土壤水分动力学理论进行土壤水分动态预报。属于这类研究的有：Philip（1966）提出的 SPAC（土壤-作物-大气系统）中的水流运动概念，以及此后 Cowan、Goldstein、Lambert、Nimah、Cemon、Feddes、Hansen、Powan、Van Bave、Federer、Norman 和 Choudhury 等人的工作，特别是 Vanden Honert、Philip、Gardner、Monteith 和 Cowan 等人的工作，为 SPAC 水流模型发展奠定了基础(朱首军等, 2000)。SPAC 系统中水流运动的研究是以土壤物理、植物生理和农田微气象学为基础的，近年来由于数学、物理学、化学、生物学向这一领域的不断渗透以及计算机的广泛应用，使这一领域研究不断深化。例如，Penning de Vries 在其研制的 TROIKA 模型中，考虑了土壤水分在根茎中的移动、叶片水热传输及根系吸水阻抗等；Lenmon 等提出的 SPAC 模型考虑了冠层内水汽、动量和热量廓线方程等；Nimah 和 Hanks 在 SPAC 模型中考虑了非稳定、非线性源汇等(Nimah and Hanks, 1973)。此外，Wesseling 等通过结合土壤水分一维运动模型和作物生长模型，得出了计算土壤水分动态变化的数值模型 SWATRE，可以有效地制定农业管理系统的灌溉决策(Belmans, et al., 1983)。第三，运用数理统计等综合方法研究土壤水分与作物生产、旱作生产管理、休闲管理之间的关系，并对作物根区水质模型进行研究。比较有代表性的有 Е.П.Г а л я м и н 和 Rao 的工作(Seng Lung et al., 1995)。

关于氮素模拟，国外早在 20 世纪 70 年代就开展了研究。Warrick 等(1971)模拟了未饱和土壤中水溶物质的移动；Beek(1973)模拟了土壤的氮素动态；Claassen 和 Barber(1976)根据土壤物质运移和扩散以及根吸收依赖于根表面吸附养分浓度的原理，建立了可描述植物生长过程中吸收养分的机理性模型，并用温室内玉米的钾吸收对模型进行了检验，Schenk 和 Barber(1979)用盆栽玉米的磷吸收测定值进一步检验了模型。Donigian(1983)利用已建立的氮素动态模型研究了有机废物和过量施肥造成的污染；van Veen(1988)等提供了微生物水平上的各种转化函数；Watts 和 Hanks(1978)模拟了多种土类中氮的转化及作物对氮的吸收。

80 年代后，有关氮素动态的模拟引起了更多的关注，研究内容逐渐深入到土壤和

磷、钾及一些微量元素的动态模拟上。其中,最具代表性的是 Seligman 和 van keulen(1981)研制的 PAPERAN 模型,可用来模拟水分和氮素限制条件下的干物质生产。此外,模拟研究还涉及到氨挥发 (Parton et al., 1988)、氮素淋溶过程 (Burns, 1980; Addiscott and Whitmore, 1987)、氮素反硝化过程 (Smith, ; Leffelear and Wessel, 1988)、根区的水分和氮素运移等。虽然这些模型都对土壤中氮素转化和运移过程中的某个方面进行了细致的研究,但缺乏整体性和动态性。此后, Molina 和 Richards(1984)建立了一种综合、确定性的植物-土壤系统模型 NCSWAP,可模拟作物受温度、雨量、微生物活动的影响以及土壤碳、氮的季节性变化。NCSWAP 模型的建立,标志着土壤和植株氮素动态模拟达到了较高的水平。Jones 和 Kiniry(1986)在 CERES-Maize 和 CERES-Wheat 的基础上,分别加进了氮素动态模块,建立了 CERES-N 模型,全面描述了与作物残茬腐解有关的矿化和固持、硝化、反硝化、硝态氮淋溶以及作物的氮吸收和利用等,使 CERES 模型更趋完善。90 年代初,氮素的模拟研究主要集中在以下几个方面:(1)硝态氮淋溶预测 (Addiscott and Whitmore, 1991; Bergstrom and Jarvis, 1991; Ramos and Carbonell, 1991);(2)氮素转化和动力学模拟 (Molina et al., 1990; Bergstrom et al., 1991; Hutson and Wagenet, 1992);(3)有机质转化 (Wolf and van Keulen, 1989);(4)作物产量和氮素吸收 (Clay et al., 1997);(5)有机肥氮动力学 (Borg et al., 1990);(6)耕作效应 (Clay et al., 1985)。

土壤-作物模型的发展趋势体现在综合性加强、模型之间的相互渗透加强。土壤-作物模型以作物生长和土壤水热、能量平衡为基本模块,趋向于包含碳氮循环、农药在土壤中的迁移和降解等过程。近期,模块化设想直接导致目标模拟系统 OMS(Object Modeling System) 的提出,它便于模型的开发和连接。

### 2.1.3 国内发展概况

我国作物计算机模拟研究起步于 20 世纪 80 年代。1983 年,江苏省农科院高亮之等在美国俄勒冈州立大学合作研究期间发表的 ALFAMOD-苜蓿生产的农业气象计算机模拟模式,是中国学者最早的有关作物模拟的研究论文 (Hannaway and Gao, 1983)。此后,中科院上海植生所黄策和王天铎(1986)发表了“水稻群体物质生产的计算机模拟模型”,江西农业大学戚昌翰等(1989)提出了 RICAM (水稻生长日历模型),高亮之等(1992)在长江流域大规模水稻气候生态试验的基础上研制成 RICEMOD(水稻计算机模拟模型),均在学术界产生重要影响。1988 年,江苏省农科院邀请美国密歇根大学教授、著名 CERES 模型的主要研制者 Ritchie 博士来南京举办专题讲座,对国内开展作物模拟模型研究起到积极的推动作用。至 90 年代,江苏省农科院高亮之、金之庆和黄耀等将作物模拟技术与水稻栽培的优化原理相结合,完成了我国第一个大型的作物模拟软件 RCSODS (水稻栽培模拟优化决策系统)。此后,中国农科院曹永华等将 CERES-Maize 模型汉化;江苏省农科院金之庆等采用 GCM 与 CERES 模型耦合,系统地评价了全球气候变化对中国粮食生产的影响;华南农业大学骆世明等(1992)研制成 RSM (水稻模拟模型);南京农业大学曹卫星(1995)等建立了小麦温光反应及小麦

发育进程的模拟模型；中国农业大学潘学标等(1996)、冯利平等(1999)分别研制成 COTGROW（棉花生长发育模拟模型）和 COTSYS（棉花栽培计算机模拟决策系统）；江苏省农科院黄耀等(1999)研制成水稻田甲烷释放模拟模型；于强等(1999)建立了作物光温生产潜力的数学模型，分析了我国南方稻区水稻的适宜生长期；刘建栋等(1999)建立了小麦和玉米的气候生产潜力模型，并分析了华北平原作物的气候生产力分布；中科院植物所尚宗波等(2000)发表了玉米模拟模型的系列文章等，都一定程度地反映了我国在作物模拟研究领域的水平。最近，江苏农科院高亮之、金之庆等(2000)又推出了 WCSODS（小麦栽培模拟优化决策系统），他们还在建立水稻理想株型的计算机模型以及作物光合-蒸散耦合模型等方面开展了深入研究。

在国内已研制的众多的作物模拟模型中，大多还只是停留在论文阶段，真正形成应用软件并在实际中应用的尚不多见。其中，江苏省农科院研制的水稻/小麦模拟优化决策系统（RCSODS/WCSODS）被国内学术界公认为是较成功的大型作物模型软件。它采用的技术路线是将先进的作物模拟技术与稻麦高产栽培的优化原理相结合。因此整个系统具有较强的机理性、应用性、综合性、普适性和灵活性，可以针对各地不同的气候、土壤、品种和栽培方式，进行模拟、优化、决策。

九十年代以来，我国学者针对不同地区、不同作物的土壤水分模拟开展了研究，并在旱地麦田土壤水分预测、冬小麦灌溉决策等方面进行了应用。龚元石（1995）建立了适用于华北地区的冬小麦和夏玉米田土壤分层水分平衡模型，并利用模拟结果研究了冬小麦和夏玉米田的水分变化规律，计算了农田实际蒸散量和土壤分层根系吸收量；巫东堂等(1996)建立了旱地麦田土壤水分预测模型；曹宏鑫(1998)等对长江下游地区麦田土壤水分动态进行了模拟研究。

在土壤水分动力学等研究方面，夏北成(1990)采用多元回归方法建立了描述土壤含水量变化的经验模型，并将该模型应用于小麦需水量及小麦病虫害发生规律的研究；李会昌(1997)根据水分动力学理论，探索了 SPAC 水流运动机理以及在不同条件下应用土壤水分运动参数的问题；刘多森和汪枳生(1996)应用土壤水分动力学模型对土壤水分状况进行了辨识；王西平(1998)等利用 VSMB 土壤水分平衡模型对河北省平原地区冬小麦田土壤墒情进行了区域性监测研究；王会肖等(1997)利用 WAVES 模型进行了土壤水分平衡模拟及灌溉对华北平原作物产量影响的研究；罗毅等(2000)利用土壤水分平衡模型对根区下限的毛管水上升进行了定量研究。

国内自 20 世纪 80 年代起开始进行土壤溶质运移模拟方面的研究，对土壤盐分运移的一维模拟有一些报导，且多为简单的对流-弥散动力学传输研究。90 年代以来，关于土壤钾分解与吸收的动力学方程和大麦响应的关系(吕晓男和陆允甫，1995)、田间条件下土壤氮素运移的模拟模型等有所报导(黄元仿等，2001)。江苏省农业科学院建立了土壤与植株氮素动态模型，并将其连接到 RCSODS 系统中，用于施肥和变量施肥(金之庆等，2003)决策。1999-2001 年，曹宏鑫等进行了长江下游地区马肝土小麦生长期土壤氮素动态模拟，较早开展了基于模型的作物生态平衡施肥决策研究(曹宏鑫

等, 1999)。但是我国在农田土壤氮素动态和植株氮素动态模拟的研究方面与国际水平相比还存在较大差距, 需要多做工作。

作物模拟技术的发展经历了从早期偏重于解释一些作物生理生态过程或现象(如作物生理过程和生长发育过程等)到逐渐考虑了环境、基因型、病虫害、田间管理等因子, 从而对作物生产有一定的咨询价值; 在涉及作物种类上从一种到多种; 研究地区从创始国到多国; 并且在应用模拟模型来研究引起系统行为的机理及过程(如作物冠层结构分布、气孔行为、光合作用、叶面积增长、干物质积累等)方面更为细致和深入, 具有较高的理论水平, 对气候、土壤与作物生长发育间的模拟研究弥补了经验统计模型的不足。尽管如此, 这些模型都难以解决作物生产中的一些具体问题。究其原因, 主要在于作物模拟研究多偏重于作物生长的实况模拟, 绝大多数模型结构复杂, 参数众多, 而忽视了将作物生长模拟与作物栽培的优化原理结合起来, 对应用于生产管理的优化农艺措施决策考虑较少。我国作物模拟研究有较好的工作基础, 和国外研究相比也具有自己的特色。但以往的研究, 大多集中在稻麦等少数作物上, 覆盖面较窄, 还没有形成象美国 CERES 那样的大型模型系列。这明显不符合全国当前种植结构调整和农业信息化的要求。目前在国际农学、生态学、地理学和气象学界已把农田生态系统中作物生长模型的综合研究与全球变化研究、精准农业发展紧密结合起来, 形成了该领域的热点和前沿问题。综合归纳国际、国内关于作物生长模型研究与应用情况得出如下几点认识:

(1) 在国际上, 作物生长模型研究无论是从单一功能模型研究还是从多功能综合模型的研究上来说, 都十分活跃。尤其是多功能综合模型的研究, 通过有效地组织人力和投入大量的财力, 通过数十年的积累取得了巨大的成果; 以综合的农田生态系统生产力模型为核心的决策支持系统的研究也取得了很高的成就, 在决策持续与生产管理中发挥巨大作用。

(2) 我国作物生长模型中有着过程的机理机制研究还是比较活跃的, 也出现了一些功能比较单一的模型, 主要为研究服务, 但农业生态系统的综合模型的研究则较少, 总体水平与国际水平相比仍存在较大的差距。究其原因, 主要在于对模型的研究、引进、开发缺乏有效的组织和集中的财力投入; 绝大多数单位缺乏相应的实验手段, 无法猎取完备的、可靠的实验资料对引进模型进行评价、改进与再开发。

#### 2.1.4 作物模型发展的新阶段-植物生长可视化研究

近 40 年来, 以作物群体阶段发育和干物质积累为对象的作物生长模拟研究得到了长足发展, 各种模型及基于模型的作物辅助决策系统在农业生产中也已得到初步应用。但以个体或群体形态结构为研究对象的植株可视化却是近几年才发展起来的, 目前已成为作物模拟研究新的领域。可视化研究是植物结构模拟技术和虚拟现实技术在作物生长模拟中的应用。随着信息农业的发展, 作物生长过程可视化必将进一步深入。

植物可视化(亦可称为虚拟植物)是指以植物个体或群体的形态结构为研究对象, 应用虚拟现实技术, 在计算机上再现植物在三维空间的生长过程。

从外在形态看,植物可分为冠层和根系两部分。由于这两者观测上的难易差异,因此植物生长过程的可视化研究同样包括冠层和根系两部分。植物的形态结构是指植物占有空间的形式和植株器官的配置与排列方式,即植物冠层和根系在三维空间的占据方式。因此,植物可视化的研究内容主要包括植物形态结构特征的提取及可视化实现。植物形态结构特征的提取方法主要有常规测量和三维数字化仪测定,分析方法常用 L 系统、多尺度树形图和曲线拟合等。可视化实现是指植物形态结构特征在计算机上的显示与虚拟表达,亦即将上述植物拓扑结构描述方法与几何形态参数反演成具体的植物空间形态;对于非几何特征的可视化实现,如植株生长过程中的颜色变化、叶茎的纹理特征、植物在光照下的阴影等,一般结合开放图形库(Open Graphic Library)加以实现。

20 世纪 90 年代后,随着基于力学、声学、磁学等原理研制的三维数字化仪的问世,植物形态结构数据的获取变得既快捷又便宜,促进了植物形态结构三维重建及相关研究。植物三维重建是指应用三维数字仪获取植物器官的三维空间坐标,然后直接将这些数据输入计算机,进行植物在实际三维空间的形态反演,并根据这些特征分析植物个体或群体对资源的利用与竞争。这类模型可用来研究与植物空间结构相关的性质。如 Smith 等(1992)依据测量数据,实现了猕猴桃果实与藤架形态结构的三维重建,并采用不同颜色来表征果实及其各项属性,分析了植株结构空间规律与果实物理、化学成分、产后品质等相关关系。Ivanov 与 Andrieu(1995)等利用两个照相机获取玉米冠层的结构数据,进行了冠层的三维重建,并分析了冠层的光能利用。郭焱等(1999)利用三维数字技术对不同生育期玉米冠层形态结构进行了精确测定,然后建立了玉米可视化模型,可分析玉米冠层的三维结构特征和形态结构对玉米冠层空间光分布的影响。Pommel (2001)等对不同行株距的玉米冠层进行三维重建后,分析了不同行株距下冠层的光分布。Jean Dausat (2001)对咖啡树进行了三维重建,并分析了叶片水平方向上的气孔阻抗和能量平衡,模拟了叶面蒸腾和植株伤流。

植物形态的三维重建能够精确地再现植物的形态结构,用来分析植物形态结构的定性和定量特征,研究与植物结构有关的生理生态过程,如进行植物冠层光截获的分析、农田作物蒸腾的研究、作物形态结构对遥感监测精度的影响等。但这项工作的局限性在于须直接使用大量的测定数据,而测定的植株往往又不具有代表性;同时亦不能反映植物形态结构的动态规律和预测植物结构的动态变化。

至目前为止,植物可视化研究一般将冠层与根系分开讨论,而对冠层与根系的耦合研究较少。由于植物生长是地上部与地下部的协同生长,植物对逆境的适应是通过冠层与根系的协同作用得以实现的。干旱时,根系通过向深处生长以获取地下水,冠层叶片亦通过卷曲等措施减少植物的水分蒸腾、湿润时,根系通过发生侧生根或支根,加强对水分和养分的吸收,叶片的蒸腾也处于无胁迫状态。因此,构建根冠耦合的可视化模型,可更好地体现生态环境和栽培措施对植物生长的影响。Prusinkiewicz 等(1997)利用植物体冠层与根系通过物质流实现平衡生长的原理,构建了冠层与根系耦

合生长的模型。但上述模型对耦合机制的生理生态影响未作深入分析。当然，根冠耦合的生理生态机制将涉及土壤中的水分和养分迁移运转、土壤与根系的养分与水分交换、植物体的水分运输、冠层与大气的水分交换等一系列过程。因此，加强多学科融合是植物可视化研究的必然选择，植物根冠耦合研究势必成为植物可视化未来的研究重点。

### 2.1.5 模型应用中存在的问题

作物模型在实际生产应用中主要是以决策支持系统的形式出现，但包容作物模型的决策系统在实际应用中仍不很成功。这是因为许多决策支持系统所包含的农业技术知识仍然有限，多数系统仍然主要是强调科学问题而不是实际应用，造成系统中知识密集性不足。此外，许多模型仍然不允许灵活的、即时决策输入系统，决策仍然是在一次模拟结束后或开始前就作出，模型决策方式与实际生产决策方式难以匹配。还有，决策支持系统的终端用户究竟是面向农户还是政府，仍然困扰着软件开发人员。如果是单个农户，则以每一个农场为单位的需求太大，获取难度可想而知；如果是政府，则需求的用户数可能又不足，涉及的空间尺度又太大，指导生产的意义相对要降低。另外，软件开发并非按照现代软件工程标准进行，客户投入兴趣不足，也是千万模型推广应用不足的原因之一。

就科学问题而言，造成模型应用不好还有三个方面的原因。一是由于决定作物产量变化的主要因素仍然是天气条件，决策支持系统要达到成功应用还依赖于用长期历史资料进行分析或用天气发生器产生死而后已数据。而现在的死而后已发生器的空间尺度较大，不足以精确反映气象要素的空间变异也是一个限制因素。二是缺乏准确的土壤和作物数据输入，由于土壤和作物参数所具有的空间变异性圈套，如果没有足够精确的环境数据来运行和验证模型，如果没有 GIS 手段，即使是在大田尺度，模型矛盾的准确性也是要大打折扣的。三是模型起源于单点试验，常用于大田尺度，而其研制的许多假设条件都是基于田间均一的生产情形(如潜在生产情形和水分限制生产情形)的，而实际上，在农田时在，几种限制因素可能同时起作用，使外界条件超出了模型边界条件的有效范围。作物模型在生产中应用的出路之一是，在作物生长模型操作过程中，可用田间观测、遥感等其它信息源输入定时对状态变量进行调节。

### 2.1.6 模型研究中的局限性

作物模型的研究总的趋势是朝向于基于过程的动态机理模型这样一个目标的，但是，目前已经研制的模型即使是号称机理模型，模型中作物生长或环境动态的某些过程(如 LAI 的发展动态、叶片衰老过程、干物质分配等)仍然是建立在经验关系之上的。例如，在早期的作物模型中，LAI 的计算是用叶片生物量通过比叶重得来的，这样一种计算方法通常由于这样一个正反馈循环而导致 LAI 对比叶重测定误差的调试敏感：叶片重-叶面积-冠层光合作用-叶片生长-叶片重(Penning de Vries et al., 1989)。此外，与实际生产密切相关的病虫害影响模型和经济人文因素模型的研究不足，也是现有作物模型研究的一个主要不足之处。

在总体上，国内与国际上作物生长模型研究中还存在着以下两方面的问题：

(1) 作物生长模型中描述环境物理过程的模型有较为明确的机理意义，地区的适应性较强。而目前的作物生理模型部分经验性较强，是限制模型普适性的重要因素，如叶面积指数动态、干物质分配和灌浆过程与环境条件的关系等。为此，需要着重探讨物理过程与生理过程的平衡问题。

(2) 现有的作物生长模型大多以农学模型为中心，有较强的针对性，也有很大的局限性。在研究资源与环境问题的作物生长模型方面，在综合的程度、考虑问题的全面性等方面仍然很不够，需要开展深入的研究。

## 2.2 作物生长模型在区域尺度上的应用

作物生长模型在单点尺度的应用得到了很好的检验。越来越多的研究者开始尝试将作物生长模型用于不同的空间尺度，因为这对粮食生产者、贸易商以及决策者都有巨大的潜在效益。从研究角度讲，随着气候变化研究的兴趣，出于对气候变化对区域粮食生产的影响和需要采取相应对策的考虑，使得作物生长模型在区域尺度上的应用研究越发得到重视。出于商业化利益的需要，通过早期估算作物产量以调整市场策略也促进了作物生长模型的区域化应用。

作物生长模型的区域应用还存在许多问题。尤其是区域地表土壤和作物参数以及其它环境参数的获取困难是困扰作物生长模型区域应用的主要问题。鉴于 GIS 技术对海量数据强大的管理和分析处理能力，以 GIS 为辅助的作物生长模型在区域尺度上的研究已经成为生态系统过程研究的重要研究方向。

由于生态系统过程研究的尺度通常是基于区域尺度的，作物生长模型区域应用的尺度问题是显而易见的。作物生长模型在区域尺度应用遇到的问题主要是：

首先，随着空间尺度的增大，土壤、气候和农业管理措施的空间变异性增大，因而，传统的模型验证方法即在每一地块进行验证的方法就显得费时、费资金，从而不具有可操作性；

其次，在区域尺度上运行模型所需要的空间数据库通常是不完备的，即不可能获得区域上每块农田的已拥有的有关数据，或者是空间数据的尺度不能完全反映空间变异性；

再有，运行模型所需要的许多变量是离散的，不能简单地利用已有数据通过插值来获取。例如，两地之间的日降水相关关系就与距离、地形和天气状况都紧密相关。

针对这些问题，大尺度模拟就不可能考虑得像单点模型那么细，某些对气候要素不那么敏感的反应过程可以通过参数化的方法进行处理，甚至以忽略。充分利用 GIS 技术可能是量理想的解决手段之一。

对空间数据的存储、管理、分析和可视化而言，GIS 是一个非常有力的工具。以往多数基于过程的作物生长模型都是用单点数据进行检验，输出结果也就仅能代表特定的一点。实际上，农业生产活动是空间行为，用空间数据代替单点数据来分析农业

生产的空间变异性，是一个趋势，空间变异性考虑的范围因为研究问题类型的不同而不同。因此，在涉及时空交互效应时引入 GIS，可能是解决作物生长模型区域应用的最好技术手段。

将 GIS 引入作物生长模型等过程模型研究，最吸引人的还在于它有助于对过程的时空变异的解释。GIS 的空间可视化技术不仅有利于我们理解模型模拟的结果，更重要的是 GIS 的空间分析技术能更好地分析模拟结果。

在过程模型中结合 GIS 技术从 20 世纪 80 年代中期就开始了，但是这些模型都相对简单，基于过程的模型基本上没有引入 GIS 技术。这主要是因为这种复杂模型的市场潜力有限，GIS 开发商缺乏足够的动力来开发如此复杂的模型。因此，具有 GIS 功能的过程模型就只能由一些非 GIS 专业的研究人员就自己的研究领域来开发。基于这些因素，目前仍然尚未很好地建立基于 GIS 的过程模型的理论框架、数据格式、过程处理框架以及运行标准。

作物模型与 GIS 结合，使作物模型方便地从单点应用拓展为多点应用，从战术型应用拓展为战略型应用。作物模型与 GIS 的结合一般有紧密结合与松散结合两种方法，前者需在作物模型里嵌入地理信息系统，或在地理信息系统软件中用宏语言编写作物模型，其优点是二者作为一个整体，使用时较为方便和协调，缺点是开发不便，工作量和开发难度较大，而且很难使二者都开发得很好。后者可利用现成的优秀商用 GIS 软件，只需开发模型软件，甚至可采用已有的作物模型或进行部分改进，可充分利用成熟的 GIS 软件的图形处理和分析优势，避免繁重的重复工作，使用效果较好，缺点是无独立版权，用户需购置用于支撑的 GIS 软件，使用时需要进行文件链接，对用户不够方便(潘学标，1999)。

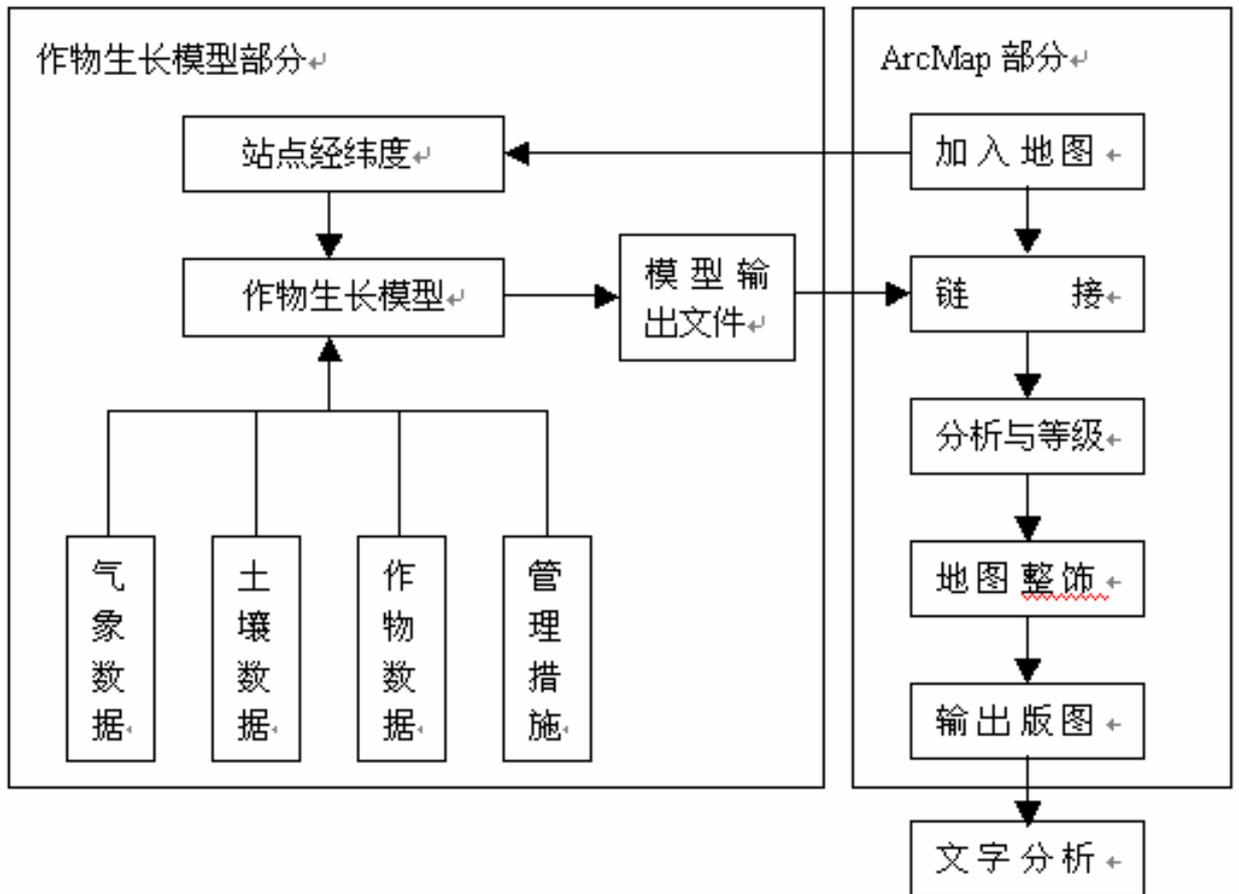


图 1.1 作物模型与 GIS 的连接

Figure 1.1 Link between crop growth model and GIS system

本研究采用第二种方法。其基本思路是利用现有的成熟的作物模型，并设计好输出文件，文件中包含有模拟地点的经纬度信息和用于空间分析的模拟结果。在模型运行前，先在 GIS 软件中选好或绘制要模拟的区域地图，确定要模拟的地点。模型运行后对输出结果进行必要的处理，使其成为适于 GIS 读取的数据库文件。然后启动 GIS 软件，加入相应的地图，加入模拟结果的数据库文件，即可进行分析和制图。其过程见图 1.1。

### 第三节 研究目标、内容与方法

#### 3.1 研究目标

本研究的目的是在对 WOFOST 模型进行站点上的校正后，用 2000 年的气象数据模拟得到各站点的 LAI 及产量数据，结合同期同区域 MODIS 的 NDVI 图像进行综合分析，以评价模型区域应用的适用性。然后将之用于华北平原的模拟研究，阐明在华

北平原这个相对均一的区域上，光温水等要素随纬度变化的规律，进而揭示这些要素如何影响作物的潜在生产力与水分限制生产力，最后给出华北平原冬小麦多年生产力与水分限制生产力的时空分布状况，为相关的研究提供科学依据。

### 3.2 研究内容

WOFOST 模型在华北平原站点上的校正与验证。利用禹城站的常规观测项目的数据，对 WOFOST 模型进行校正与验证，以便于模型在华北平原的应用。

利用华北平原多年的气象数据，模拟华北平原的潜在生产力与水分限制生产力，结合气象数据进行综合分析。分析模拟结果多年分布的特征并计算不同保证率下的作物产量。结合播种面积等社会统计数据，分析整个区域的潜在产量与水分限制产量。

### 3.3 研究方法

将作物模型应用于中国的区域研究，探索模型区域应用时的方法与路线。对研究中出现的问题尝试多种解决方法并确立优选方案。

评价华北平原冬小麦生产力的时空布局。结合气象资料，分析气象要素的年际波动如何引起的产量的波动，借以分析产量波动的原因并揭示其趋势。

作物生长模型与气象数据发生器的结合，研究典型年份的生产力分布，真正揭示区域生产力的现状与趋势。

作物模型与 RS 的结合。借助 GIS、RS 分析模拟结果，揭示华北平原生产力随时间的变化和随空间变化的规律。

## 第四节 研究思路与基本框架

按照图前述的研究思路，本文共分 8 章。

第一章为引言，介绍论文的研究背景和意义，通过对国内外作物模型研究与气候变化及波动对农业的影响的综述，确定了论文研究的目标、内容与方法。

第二章对研究所采用的 WOFOST 模型进行了简单的介绍，内容包括模型的总体框架、具体包含的模块及一些重要公式的介绍等等，

第三章确立了研究区域，并对研究区域的过去四十年粮食生产状况、自然资源条件和气候资源进行了介绍。

第四章对 WOFOST 模型在华北平原上的应用进行了校正与验证，包括冬小麦与夏玉米。介绍了实验的布置、数据的采集、校正验证的结果，最后对该模型在华北平原的应用性进行综合评价。

第五章应用该模型模拟了华北平原 1961~2000 年冬小麦与夏玉米的潜在产量与雨养产量，结合 GIS 对模拟进行了分析，并把冬小麦与夏玉米累加起来，进行华北平原冬小麦与夏玉米轮作制下潜在产量和雨养产量的状况分析。

第六章先介绍了 WOFOST 模型关于蒸散方面的计算公式，然后模拟了华北平原 1961~2000 年潜在生长与雨养生长状况下冬小麦与夏玉米的的蒸散量，结合生育期内的降水量进行了分析，并把冬小麦与夏玉米累加起来，进行华北平原冬小麦与夏玉米轮作制下的潜在蒸散量和雨养蒸散量状况分析。

第七章对前述工作进行了概括与总结，综述主要的研究成果并提出本研究的不足之处。

## 第二章 WOFOST 模型简介

WOFOST是荷兰瓦赫宁根大学开发的众多模型之一，C.T de Wit教授对此做出了突出贡献。相关的比较成熟的模型还有SUCROS模型、Arid Crop模型、Spring Wheat模型、MACROS和ORYZA1模型等等。

### 第一节 模型简介

在过去的十几年中，WOFOST模型取得了极大成功，它的各个版本及其派生模型应用在许多研究中。WOFOST擅于分析产量的年际变化、产量和土壤条件的关系、不同品种的差异、种植制度、气候变化对产量的影响、区域生产力的限制因素等等。模型已被用于产量预测、土地的定量评价，比如评价区域潜在生产力水平，评价通过灌溉和施肥可获得的最大经济收益，评价作物种植的不利因素。有的人还将作物模型进行扩展，使之能够用于森林和牧草的模拟，还有的对源程序进行修改，用更详细的程序子序代替原有的子程序，达到对某个方面进行更详细的模拟的目的。

WOFOST起源于世界粮食研究中心（CWFS）组织的多学科综合的世界粮食潜在产量的研究项目。荷兰瓦赫宁根大学生态理论产量系（WAU-TPE）和荷兰瓦赫宁根的DLO中心的农业生物室（CABO-DLO，现在改为AB-DLO）参与合作。1988年，随着CWFS的解散，模型的开发转由DLO-Wind Staring Center (SC-DLO)负责，并在AB-DLO和WAU-TPE的合作下完成。

在世界各国科学家的努力下，WOFOST模型自面世以来获得了极大的发展，模型从WOFOST3.1发展到WOFOST7.1，应用范围不断扩大，它的适应性及应用研究在世界各地进行，反馈的结果反过来又促进了模型的发展。

值得一提的是WOFOST6.0，它是个极为成功的作物生长模型，在1989-1994年间不断完善和发展。它是为预报产量而发展起来的，用于预报欧共体各个国家、地区的作物产量。它还被作物生长监测系统（CGMS）结合，是其中一个重要的子模块。目前，WOFOST6.0被用于各种目的，如教学、验证、试验等等，成了一个广泛的应用平台。

WOFOST系列都采用类似的子模块，用光截获和CO<sub>2</sub>同化作为作物生长的驱动过程，用物候阶段控制作物的生长，仅在描述土壤水分平衡和作物N的吸收上有些差异。本次验证采用的WOFOST7.1系WOFOST6.0发展而来且带有图形用户界面，操作界面十分友好。

### 第二节 功能

以前作物生长经常是由一个经验模型来描述，一般是一个回归方程。有时也会把环境变量，如太阳辐射、降雨量等包括在内。这些模型可以计算出很准确的结果，尤其是在那些回归系数是建立在准确的、大量的实验数据的基础上。然而，这些模型的应用仅限制在与回归分析相近的区域。这些经验性的、描述性的模型没有深刻理解所

观测到的产量变化的原因。

WOFOST是个机理性模型，它解释了作物基本的发育过程和这些过程如何被环境条件所影响，如光合作用和呼吸作用等等。机理性模型的模拟并不是每次都很准，然而，我们应该认识到，模型模拟过程中的每个参数都只有一定的精度，每个参数产生的误差会不断积累，最终导致了产量的较大差异。

WOFOST模型基于作物基本和发育过程，解释了作物的生长，如光合作用和呼吸作用，并描述了这些过程如何受环境条件的影响。作物干物质积累的计算可以用作物特征参数和气象参数，如太阳辐射、温度、风速等等的函数来表示。气象数据经常采用每日详细数据，这就是为什么模拟步长为一天的原因。也就是说，作物生长的模拟是以每日数据为基础的，图2.1说明了WOFOST内的主要过程。

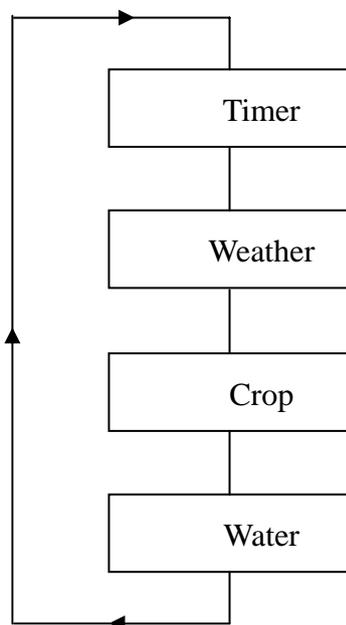


图 2.1 每日作物生长的模拟计算

Figure 2.1 Daily calculations of the simulation of crop growth

#### Timer

在WOFOST内，用 Euler积分法来对作物生长过程与时间的函数积分。因此，模型必须时时更新时间以及每天计算时与时间有关的变量。由子程序TIMER来计算，它主要应用Euler积分法。Euler积分法将在第三章介绍。

#### Weather

WOFSOT模型使用的气象数据为：最高温度、最低温度、全球辐射、风速、水汽压、蒸散量与降雨量。WOFOST模型用Penman方法来计算蒸散量。相关介绍将在第四章进行

关于参数中的全球辐射和降雨量，必须说明的是在JRC改进的WOFOST其它版本中将可选择其它方法来计算。目前，在WOFOST6.0的两个版本中，当太阳辐射没有实测值时将采用埃斯屈朗方程(Ångström Formula)来计算太阳辐射。埃斯屈朗方程用日照时数作为输入项。假如日照时数也不可，在随后JRC的版本中，全球太阳辐射将

采用Supit(1994)或Hargreaves(1985)提出的公式来计算。由Supit提出的方法是根据每日最大最小云量来计算，其估算准确度接近埃斯屈朗方程。Hargreaves公式仅仅采用最高最低气温，其估算准确度比以上二者要低。

目前，埃斯屈朗方程的经验系数须由使用者提供。在JRC版的WOFOST中，那些系数将由模型根据气象站的纬度自动计算。

两个版本都用实际降雨量为输入项，然而在普通版中可以由模型生成降雨量数据。

### Crop

作物生长以日净同化量为基础，而日净同化量又以光截获为基础。光截获是入射太阳辐射和作物叶面积指数(LAI)的函数。根据吸收的辐射及作物光合能力可以计算每日潜在同化速率。由于水分、氧分胁迫引起的蒸腾量的下降降低了同化量。同化物在多个器官上进行分配，下面有对它更详细的介绍。

### Water balance

一个作物生长模拟模型还必须跟踪土壤水分变化以确定作物何时、多大程度上感受到水分胁迫。这通过水量平衡公式可以计算出来。它比较两个时间土体内的输入水量和输出水量它们的差额即是土壤水分含量变化量。WOFOST模型区分三种情况。一是土壤水分含量保持在田间持水量，作物生长达到其潜在生长水平。二是考虑了土壤水分通过的蒸散和下渗而散失的影响，作物由于可利用水的减少而减产。三是不仅考虑水分的蒸散和下渗，而且考虑地下水影响。图2.2 说明了WOFOST里的这三种情况。

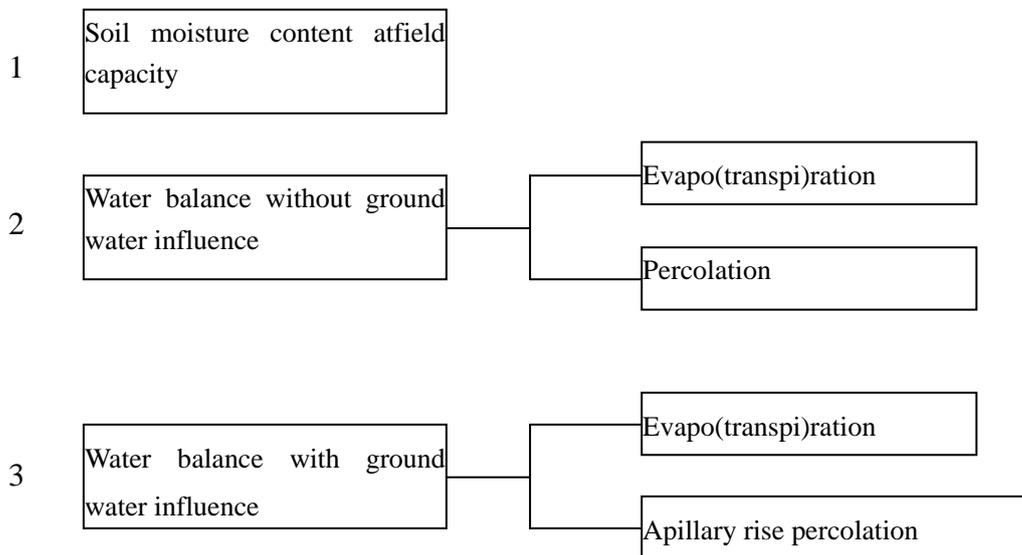


图 2.2 WOFOST6.0 考虑的三种可能的水平衡情况

Figure 2.2 the three possible situations of the water balance which are distinguished by WOFOSt6.0

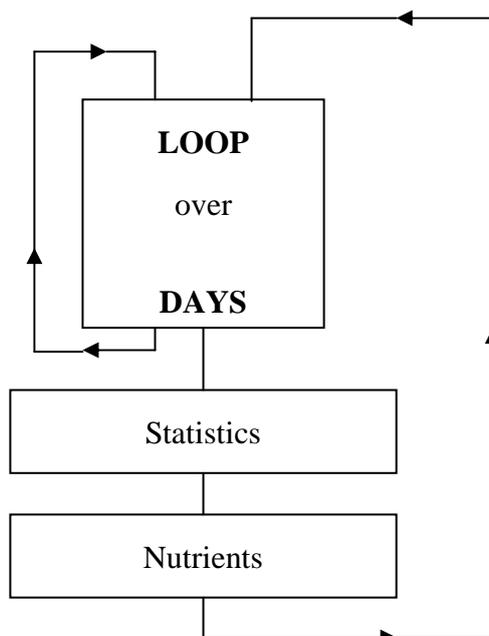


图 2.3 WOFOST 模型的每年计算流程

Figure 2.3 Yearly calculations of the WOFOST model

如前文所述，作物生长的模拟以每日数据为基础，也就是说，模型以为步长进行循环。WOFOST 同时还可以模拟许多生长季节。一个作物年内只能模拟一个生长季节。图 2.3 描述了每年的计算流程(以年为单位循环)养分对产量的影响和产量统计是以年来计算的。

### 第三节 模型的主要结构

WOFOST是个机理性模型，它描述作物基本生理过程，如光合作用、呼吸作用，并描述这些过程如何受环境的影响。计算过程主要是通过气候、作物、土壤参数计算三个模块完成。气候参数与作物参数的计算可以得出潜在生产力，再加上土壤方面描述土壤水文学的参数就可算出水分限制生产力。它应用的公式较多，也较复杂。本文不可能对它们详细进行描述，下面仅对这三个模块进行说明。

#### 3.1. 气候数据处理模块

这个模块主要是计算作物冠层的蒸散、裸土和水面蒸发的。

##### 3.1.1 蒸散量的计算

水分从植物体上损失叫蒸腾，通过地面或自由水面直接散入大气叫蒸发。蒸散则包括蒸腾和蒸发。蒸腾的驱动因子是蒸发面与空气水汽压差，蒸发面的水汽压基本上等于当前温度下的饱和水汽压，空气水汽压是环境温度与相对湿度的函数。蒸发的速

率与蒸发面与空气间的扩散阻力有关，扩散阻力的大小取决于风速。相对湿度、风速这两个参数决定了空气的“蒸发需求”。

Penman公式(公式2.1)由两部分组成，一是热力学部分，计算吸收的净辐射，二是空气动力学部分，计算空气的蒸发需求(Choisnel et al., 1992; Frere and Popov, 1979; Penman, 1956, 1948)。二部分合成后可以用来计用来水面、裸土面的潜在蒸发和作物冠层的潜在蒸散。

$$ET0 = \frac{(\Delta R_{na} + \gamma EA)}{\Delta + \gamma} \quad (2.1)$$

式中， $ET0$ ：蒸散量 [mm d<sup>-1</sup>]

$R_{na}$ ：净辐射折算成的蒸发量 [mm d<sup>-1</sup>]

$EA$ ：蒸发需求。 [mm d<sup>-1</sup>]

$\Delta$ ：饱和水汽压曲线的斜率 [kPa °C<sup>-1</sup>]

$\gamma$ ：干湿球常数 [kPa °C<sup>-1</sup>]

上述方法存在一个问题，那就是蒸发面的湿度较难获得，因为常规气象观测一般不测此项。蒸发1 m<sup>2</sup>上1 mm的水层需要2.4 MJ的能量，因此可以通过能量平衡来计算蒸发。蒸发所需的能量由净辐射提供，净辐射是入射的太阳短波辐射减去散发的长波辐射后的值。空气乱流所产生的能量交换忽略不计。光合作用只消耗5-8%的净辐射，因此，在蒸发的能量平衡中也被忽略。呼吸作用所产生的能量对于蒸发所需的能量来说也是微不足道的，理应被忽略。为了简化计算，WOFOST里假定蒸散只由太阳辐射、蒸发需求两个因素决定。

### 3.1.2 日长和太阳高度角

由子程序ASTRO计算。日长是太阳高度角的函数。太阳高度角是入射太阳光线与地面水平面的夹角，它由纬度、一年中的日期以及一天中的时辰所决定。

日长是太阳对于地球水平面角度(太阳高度角)的函数。太阳高度角是入射太阳光线与地面水平面的角度。太阳高度角取决于纬度、一年中的日期和一天中的时间。

一天中的时间好处理。太阳每天升起和落下，日出前和日落后太阳高度角都为零。当太阳经过赤道时，正午太阳时间12点太阳直射地面，用下式计算：

$$\sin \beta = \cos(15(t_h - 12)) \quad (2.2)$$

式中， $\beta$ ：太阳高度角 [degrees]

$t_h$ ：一天中的时间 [h]

太阳高度角是随时变化的，因为地球每24小时围绕地轴旋转一周，换算成角度是15每小时(=360/24)。

### 3.2. 作物参数处理模块

WOFOST根据作物的品种特征参数和环境条件，描述作物从出苗到开花、开花到成熟的基本生理过程。模型以一天为步长，模拟作物在太阳辐射、温度、降水、作物自身特性等等影响下的干物质积累。干物质生产的基础是冠层总CO<sub>2</sub>同化速率，它根据冠层吸收的太阳辐射能量和作物叶面积来计算。通过吸收的太阳辐射和单叶片的光合特性计算出作物的日同化量。部分同化产物——碳水化合物被用于维持呼吸作用而消耗，剩下的被转化成结构干物质，在转化过程中又有一些干物质被消耗（生长呼吸作用）。产生的干物质在根、茎、叶、贮存器官中进行分配，分配系数随发育阶段的不同而不同。叶片又按日龄分组，在作物的发育阶段中，有一些叶片由于老化而死亡。发育阶段的计算是以积温或日长（由用户确定）来计算。各器官的总重量通过对每日的同化量进行积分得到。基本过程如图2.4所示。

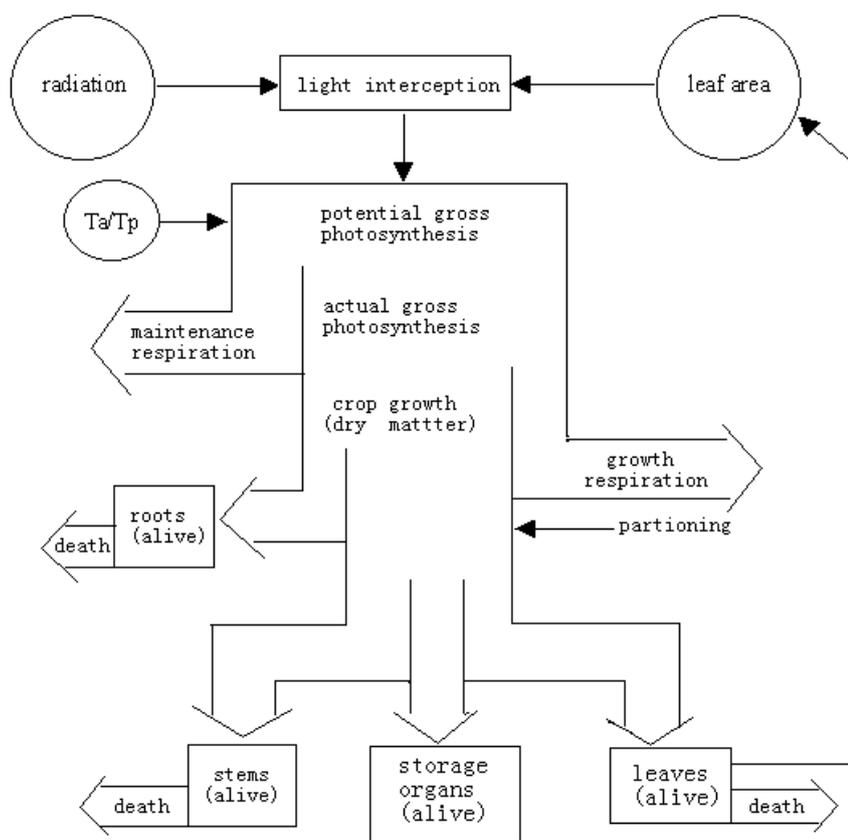


图 2.4 作物生长过程 (Ta 和 Tb 分别为实际、潜在呼吸作用速率)

Figure 2.4 Crop growth process of WOFOST model (Ta and Tb are actual and potential respiration rate)

模型中采用的主要公式与计算方法简单介绍如下：

#### 3.2.1 作物发育过程

WOFOST是个以光合作用为驱动因子的模型，作物生长的模拟从出苗开始，由于

程序CROPSI或CRSIM来计算。作物出苗可以看作是播种至出苗有效积温的函数。当活动积温与出苗所需积温(TSUMEM)相等时模型即认为出苗。TSUMEM随作物品种不同而不同,需用户自己确定。每日有效积温取决于下限温度(低于这个温度作物发育停止)和上限温度(高于这个温度作物发育速率不再加快),它们的值都取决于作物特性。

作物生长需要经过一个连续的发育阶段。每一阶段的长短取决于发育速率。开花前或开花后的发育速率可由日长或温度控制。在模型中,开花前温度和日长可对发育阶段进行控制,但是开花后,只能由温度来控制。

温度是影响发育速率的主要的环境因子。高温使发育速率加快并缩短发育时间。可根据一个线性关系来确定温度对发育速率的影响。对许多作物来说,发育速率可用数学的方法来表示。从0到2,0表示出苗,1表示,2表示成熟。发育速率用一天所占总发育时间的比例来计算。比如,作物从出苗到开花用了50天,那么该作物开花前的平均发育速率就是1/50或0.02d<sup>-1</sup>。发育阶段也可以用温度来控制,以“度日”来表示,即出苗到开花或开花到成熟时的日平均温度之和。发育速率就可以表示为每天的积温占总积温的比例(van Heemst, 1986a; 1986b)。

### 3.2.2 日同化

日同化物的生产是模型描述得最为详尽的部分,作物CO<sub>2</sub>同化速率由截获到的光驱动,可以通过对一天内瞬时CO<sub>2</sub>同化速率的积分得到。瞬时CO<sub>2</sub>同化速率由子程序ASSIM计算,对它的积分由子程序TOTASS计算。两个程序都采用Gaussian积分法进行积分(Scheid, 1968),它是一个简单而快速的数学积分法。这种积分法将在附录1中详述。对于计算日同化总量,这种三点式积分法表现得非常好(Gaudriaan, 1986; Spitters, 1986)。

为了计算整个冠层CO<sub>2</sub>总的日同化速率,必须对整个时间段进行积分。对于给定的光合有效辐射,计算一天中的三个不同时间的总同化速率。然后三个时间分别乘以不同的权重,对冠层CO<sub>2</sub>总的日同化速率和时间进行积分。

为了计算整个冠层CO<sub>2</sub>总的瞬时同化速率,必须对冠层不同深度的瞬时同化速率进行积分。因此要计算冠层三个深度的瞬时同化速率,之后才在对三个不同深度的瞬时同化速率加权重后进行积分。

一天中选取三个时间段,分别求出他们的冠层同化速率,对时间进行积分得到的冠层总同化速率,分别乘以不同的权重,再乘上日长就得到日CO<sub>2</sub>总同化速率。

$$A_d = D \frac{A_{c,-1} + 1.6A_{c,0} + A_{c,1}}{3.6} \quad (2.3)$$

式中,  $A_d$ : 总同化速率 [kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>]

$D$ : 日长 [h]

$A_c$ : 整个冠层总的瞬时同化速率,  $p = -1,0,1$  [kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>]

冠层瞬时同化速率的计算方法与此类似。冠层内三个深度的瞬时同化速率,它们

加权平均后得到冠层每单位叶面积总的瞬时同化速率。瞬时同化速率的计算则是在区分分阴叶和阳叶的基础上，在冠层内选定三个深度，计算其叶面积指数、吸收的辐射的量、叶CO<sub>2</sub>的同化量。

### 3.2.3 LAI 的生长与老化

绿色叶面积是光吸收和冠层光合作用的决定性因素。在理想状况下，光强与温度是影响叶片伸展的主要环境因子。光强决定光合速率因此也影响分配到叶片的同化物。温度影响叶片的伸展和细胞的分裂(Ng & Loomis, 1984; Sheehy et al., 1980; Acock et al., 1978)。在作物发育的早期阶段，温度是最重要的环境因子。由于温度影响叶片的伸展和细胞的分裂，作物出苗时第一片叶的伸出和最后一片叶的大小都与温度有极大的关系，这时同化物的供给对叶片生长的作用倒居于次要位置(Hunt, 1982; Causton & Venus, 1981; van Dobben, 1962)。作物在早期的生长呈指数式增长。一些未公开的田间试验数据表明指数增长阶段必须限制在  $D_{s,t} < 0.3$  或  $LAI < 0.75$  的时期。但在模型中假定叶面积指数呈指数式增长直到受干物质供给限制的增长速率等于指数式增长的速率。也就是说，受干物质供给限制的增长速率不能超过指数式增长的速率。

在作物发育的早期阶段，即LAI呈指数式增长的阶段，其在单位时间步长的增长可依下式计算：

$$L_{Exp,t} = LAI_t RLT_e \quad (2.4)$$

式中， $L_{Exp,t}$ ：在指数增长的阶段， $t$  时间的LAI的增长速率 [ha ha<sup>-1</sup>]

$LAI_t$ ： $t$  时间的LAI [ha ha<sup>-1</sup>]

$RL$ ：LAI的最大相对增长速率 [°Cd<sup>-1</sup>]

$T_e$ ：日有效温度 [°C]

叶片的老化更为复杂。老化是指叶片丧失了完成基本生理生态过程的能力并且损失了其生物量的过程。老化的基本过程包括生理老化与蛋白质的分解。很难对这些过程进行定量的描述。WOFOST在叶片在完成其生命过程后就设定其老化死亡。水分胁迫和相互遮阴可能加快叶片老化死亡的速率，因此模型把叶片的老化区分为生理老化、受水分胁迫导致的老化、相互遮阴引起的老化。下面以受水分胁迫导致的老化为例说明计算过程。

由于水分胁迫引起叶片死亡的潜在死亡速率可以依下式计算：

$$\Delta W_d^1 = W_{lv} \left(1 - \frac{T_a}{T_p}\right) g_{\max,lv} \quad (2.5)$$

式中， $\Delta W_d^1$ ：由于水分胁迫引起叶片死亡的潜在死亡速率 [kg ha<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>]

$g_{\max,lv}$ ：由于水分胁迫引起的死亡的最大死亡速率 [kg ha<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>]

$W_{lv}$ : 叶片的总干物质重 [kg ha<sup>-1</sup>]

$T_a$ : 实际蒸腾速率 [cm d<sup>-1</sup>]

$T_p$ : 潜在蒸腾速率 [cm d<sup>-1</sup>]

已经死亡的叶片的重量要从最老的叶片组中减去。即使只有一个叶片组，它的值也应该是正数。如果有多个叶片组的话，最老的那个组可能会被完全清空，如果还不够的话那就还要从下一个组中减去。这样持续清空最老的叶片组，直到减完为止，这时剩余的叶片重量仍然是个正数。这一阶段结束后，所有叶片组均向前移动一个时间步长。

### 3.3. 土壤参数处理模块

作物生长是通过叶片气孔开启，空气中的CO<sub>2</sub>进入气孔实现光合作用而完成的。在这个过程中，植物散失了吸收的大部分水。其日累积量比较大，在完全晴天，总量可达到0.4cm/天。假如作物失去的水分得不到补充，作物就会逐渐失水，并最终枯萎。

存在水分胁迫时，土壤的保水力与作物吸水是相等的，这种土壤的水的保持能力又称土水势，是可以测量的。作物吸水存在一个最适宜的范围，在这个范围内作物可以自由吸水，低于或超过这个范围作物就会感到水分胁迫。作物通过控制叶片气孔开启与关闭来适应这个胁迫，从而影响了光合作用的，也就影响了产量。因此，WOFOST通过水分平衡方程来计算土水势，并据此计算出何时、在多大程度上作物感受到水分胁迫。WOFOST在水平衡的计算上有两种，一种是考虑地下水的影响，另一种是不考虑地下水的影响，二者在计算公式上稍有不同。在考虑土壤的下渗性、饱和导水率、pF曲线等等多个参数后，模型可以计算出作物的实际蒸散。

下面介绍WOFOST的土壤水分平衡方程。它的作用是估算每日实际土壤水分含量，它将影响水分的吸收和植物的蒸腾。

实际土壤水分含量可依下式计算(Driessen, 1986):

$$\theta_t = \frac{IN_{up} + (IN_{low} - T_a) \Delta t}{RD} \quad (2.6)$$

其中  $IN_{up} = P + I_e - E_s + SS_t / \Delta t - SR$

$$IN_{low} = CR - P_{erc}$$

式中,  $\theta_t$ :  $t$  时间实际土壤水分含量 [cm<sup>-3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$IN_{up}$ : 通过根区上边界进行土壤的水分 [cm d<sup>-1</sup>]

$IN_{low}$ : 通过根区下边界进行土壤的水分 [cm d<sup>-1</sup>]

$T_a$ : 作物的实际蒸腾速率	[cm d <sup>-1</sup> ]
$RD$ : 实际根长	[cm]
$P$ : 降水强度	[cm d <sup>-1</sup> ]
$I_e$ : 有效日灌溉量	[cm d <sup>-1</sup> ]
$E_e$ : 土壤蒸发速率	[cm d <sup>-1</sup> ]
$SS_t$ : 土表贮存的水	[cm]
$SR$ : 地表径流丧失的水	[cm d <sup>-1</sup> ]
$CR$ : 毛管上升水	[cm d <sup>-1</sup> ]
$P_{erc}$ : 下渗水	[cm d <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$ : 时间步长	[d]
$Z_t$ : 地下水位	[cm]

土壤水分平衡各因子的关系见图3.5。

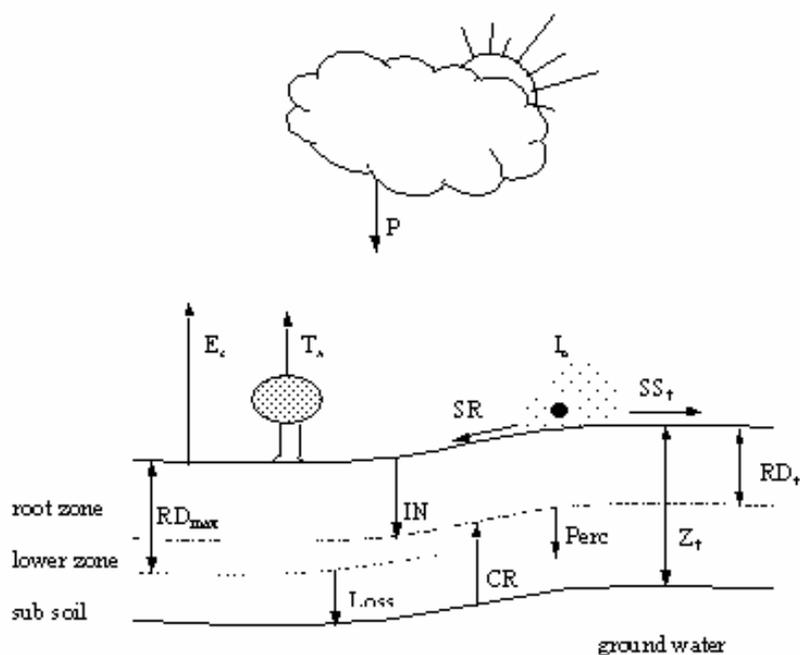


图 3.5 土壤水分平衡各分组的

### 3.4 模型参数

WOFOST是个评价区域生产力的模型，主要用于宏观的、大范围的模拟，这就决定了它在参数的选取、使用方面不可能考虑得太细，于一些公式、常数的选取比较概

略。它使用的参数分为三大类：作物、土壤、气候。另外还有一些模拟中必须由使用者确定的选项，比如有无地下水影响及地下水的深度等等。详细参数介绍如下：

### 3.4.1. 气象数据

共包括：太阳辐射(kj/m<sup>2</sup>\*d)，最高、最低气温(°C)，水汽压(kPa)（早八点），200 cm高平均风速(m/s)、降雨量(mm/d)、降雨天数，以上均为逐日数据。

由于有些天风速不是模型所要求的200厘米标准高度上测量的，引用一条对数风速廓线来计算200 cm高度上的风速(\*\*\*54)。如果风速在高H处测定，则方程为：

$$U_{200} = U_H * \ln(200 / Z_0) / \ln(H / Z_0)$$

Z<sub>0</sub>为表面的粗糙度长度，由于大部分气象观测是在低矮的绿色草地上进行的，Z<sub>0</sub>可能接近2 cm。这样，方程可以简化为：

$$U_{200} = 4.61 * U_H / \ln(H / 2)$$

由此计算出200 cm高度上的平均风速，加上自动气象站的数据，完备了气象数据。本次验证采用了1999-2001的气象数据，其中不包括2001年6月30日以后的数据。

### 3.4.2. 作物数据

作物数据是比较难获取的数据。它主要包括：

叶片最大CO<sub>2</sub>同化速率，蒸散量的校正参数，同化产物的转化效率，发育期最长日长和临界最短日长，积温日增量，收获期，单叶片同化CO<sub>2</sub>中光能的利用效率，干物质积累中分配各器官中的比例，可见光的消散系数，初始叶面积指数，由水分胁迫引起的叶片最大死亡速率，温度改变10°C时呼吸作用的变化率，初始的根深，成熟作物的根深度，根、茎死亡率，叶面积指数的最大日增量，各器官的维持呼吸作用速率，根长的最大日增量，各阶段的叶面积，在35°C时叶片生命期，叶片老化时的临界最低温，出苗时的临界最低温，初始干物质重，出苗时最高有效温度，由低温引起的同化速率的减少率，播种至出苗的积温，出苗至开花期的积温，开花至成熟期的积温。另外还有模型考虑但本次验证不考虑的参数，如茎与穗的面积、植物器官N的最高最低浓度等等。

作物数据的获取主要是对观测数据进行计算而得，如分配系数等，其中有些参数是根据冬小麦的生物特性而确定的，如临界最低温等。

### 3.4.3. 土壤数据

临界土壤空气含量，由表层向底土下渗的最大速率，饱和水状态下的土壤水分传导率，田间持水量，土壤水保持力，枯萎点的土壤水含量，土壤饱和水分含量，根部的最大下渗速率以及土壤氮、磷、钾含量等等。由于已假设土壤养分条件最优，所以土壤肥力数据不在本次验证重点研究范围内，本文着重的是土壤水文学方面的参数，这对模型模拟水分限制生长有重大影响。

## 第三章 华北平原的界定与概述

### 第一节 华北平原范围的界定

近年来,关于华北平原的研究越来越多地出现在国内外期刊上。这区域上的资源利用与发展的问題受到了重视。但是,目前华北平原的定义处于混乱状态,这种混乱可归为两类,一是华北平原区域界定的混乱;二是与黄淮海平原概念的混用。目前盛行的华北平原区域的界定一般有以下四种,一是按行政区域划分,二是按自然区域划分,三是按自己特定的研究目的划分。多项可靠资料表明,华北平原与黄淮海平原概念上并无多大差别,实际上指的是同一区域。实际应用中的华北平原概念的混乱在以上所述的各项层次中都存在。研究人员采用来源不同、年份不同的统计数据来描述华北平原,因而十分混乱。概念的混乱导致了许多不良后果,甚至可能会导致结论的相左。随着社会经济的发展,华北平原已经存在的问题会更加突出,一些以前未表现出来的问题也将显山露水。针对这种状况,本章先对研究区域作个科学的界定。

华北平原所包括的地区和范围,各部门、各专业的认识是不一致的,划法各异。例如,地理界地貌工作者认为,平原应以平原与山地、丘陵在形态上最明显的转折点为界;水利界华北平原又称黄淮海平原,则应以黄河、海河、淮河流域为界;土壤学家认为,应以土壤的成土母质、土壤选择性以及地带分布来划分平原的范围;农学家则又多根据作物的生长、农业布局来考虑问题。这样,各家看法不同,划分范围的办法各异,结果造成对黄淮海平原一些基本要素统计数字上的极大差异,仅已有的平原总面积数,差别就很大,有的文章写 26 万平方公里,有的是 30 万平方公里,有的为 35 万平方公里,有的是 40 万平方公里。总面积统计上的,必然会导致其它一些重要数据,如人口、土地、耕地、产量等方面的差。这样大的差异,以哪个标准来对平原的开发利用进行区域与规划呢,便成为一个难题被提出来,需要我们去探讨研究。

60 年代以前的地理、地质、土壤、水利、农业等方面的文献资料中尚未见“黄淮海平原”一词,一般均以“华北平原”相称。六十年代以后,特别是 1963 年以来,中央提出对黄淮海平原旱、涝、盐碱综合治理以后,遂有以“黄淮海平原”一词取代“华北平原”之称。1963 年召开的全国农业科学技术工作会议上提出“在黄淮海平原中选定适当地址,以解决河北、山东、河南、苏北、皖北等省区的旱、涝、盐碱综合治理和全面发展农业生产的科学技术问题。”

在平原界定方面,本文认为,“平原”首先是一个地貌专业术语,并非行政分区,因此界定的依据是平原的定义。鉴于此,本研究中使用华北平原范围的定义采用**龚国元(1985)**划分的标准,累计约包括 320 个县市,面积约 35 万平方公里,包括北京两市和河北、山东、河南的大部及江苏与安徽北部,具体情况见图 3.1。



春季的华北平原常出现低压槽，西来低压槽超过太行山脉下沉而加深，加上华北平原春季的干旱少雨，春温高，进一步加深了华北地形槽的发展，得西南干热风成为华北晚春初夏的主要灾害，严重影响冬小麦的生长。

渤海为我国内海，本区近海地区受其影响。渤海海面向西收缩成渤海湾，有利于偏东风的加强。因而河北东部的滨海平原多回流天气，常伴有低云降雨，冬季多回流低云降雪天气。由于受海洋影响远较西部平原明显，沿海一带秋温高于春温，最热月为8月。

纬度对本区气候的影响，虽被下垫面的状况有所掩盖，但由于本区覆盖纬度范围大，因此对水热的影响还是很明显。

## 第二节 华北平原的气候资源

### 2.1 太阳辐射

本区位于北纬 $31^{\circ} 25'$ 至 $40^{\circ} 16'$ 。由图3.2可见，由于其大小受到天文辐射、大气透明度、云状云量和海拔高度的影响，本区的太阳辐射南北差异很大。

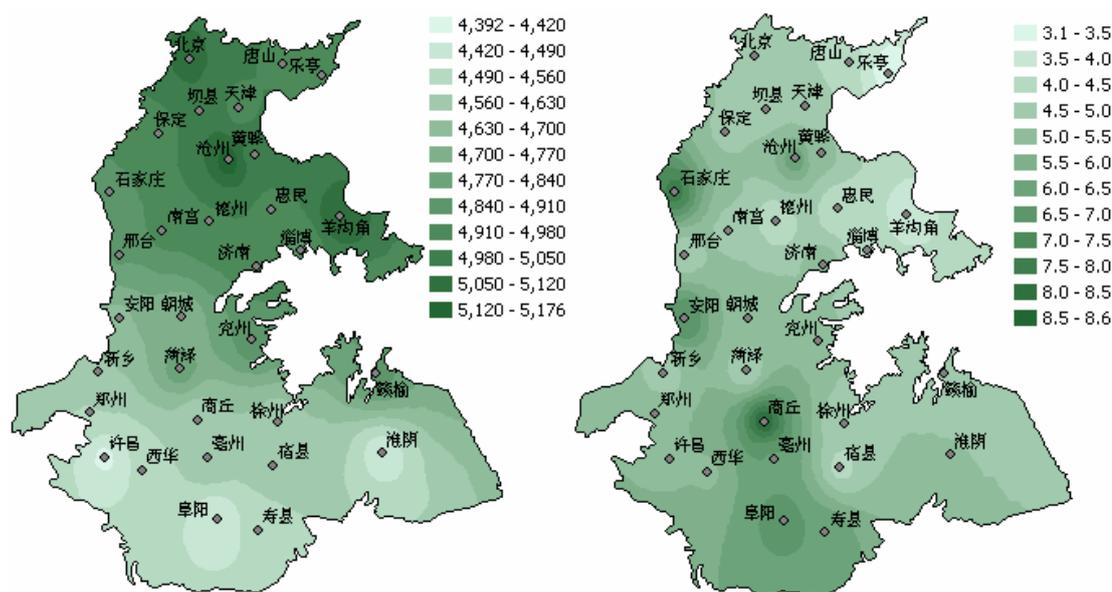


图3.2 华北平原多年平均的年辐射总量(单位： $\text{MJ m}^{-2}$ )及其变异系数(单位：百分比)

Figure 3.2 Yearly averaged radiation sum in the NCP (in  $\text{MJ m}^{-2}$ ) and its coefficient of variation (in percent).

本区月总辐射最小值均出现在12月，最大值北京地区多出现在5月，往南逐渐推迟，至伏牛山、淮河以南地区多出现在7月。这是因为我国东部地区受东南季风的影响，雨带由南向北推进的原因。

年总辐射量约在4390~5180 MJ m<sup>-2</sup>之间。年总辐射量的地区分布大致是由南向北递增。冀西山地和燕山山脉及其以北地区年总辐射量在5000 MJ m<sup>-2</sup>以上，其中张北高原西部和桑洋盆是全区年总辐射最大的地区。冀东南到鲁北的渤海沿岸一带的年总辐射也比较高。河南大部地区的年总辐射较低，为4800 MJ m<sup>-2</sup>以下。苏北及皖北是本区年总辐射最低的地区，多为不足4500 MJ m<sup>-2</sup>。

年总辐射是个比较稳定的值，年变幅很小，变异系数最大的地区如商丘、石家庄等也不过8.3，其它地区年总辐射的变异系数多在3.4~6.0之间，没有明显的地区分异。

本区年日照时数北部为2800小时，南部为2300小时。日照时数年内分配特点：3-5月在700小时以上，南部偏少为500多小时；6-8月有750小时以上，同样南部略偏少。

本区光照条件比江南优越得多，尤其3-5月日照时数比我国南方要多300-400小时，而多雨的6-8月也比南方多100-200小时。3-5月期间光照条件好，气温回升快，相对温度低，使麦类作物光合率高，病害少。7-8月光、热、水同季，在灌溉条件好的地区，充分发挥光资源的作用，作物增产潜力大。9-10月雨日少，光照足，十分有利于秋收作物灌浆及棉花的吐絮成熟。

## 2.2 温度

气温是重要的气象要素之一，它也是一种重要的自然资源，广泛地被人们所利用。例如一个地区的作物各类、品种、种植制度以及各种农事活动、农田管理措施等等在很大程度上都与气温条件密切相关。

影响气温分布的主要地理因子有纬度、海拔、焚风效应、海洋及其它局地地形等。受其影响，华北平原年平均气温的分布趋势是由南向北降低。在东西方向上，由沿海向内陆增高，再由内陆向山区降低。

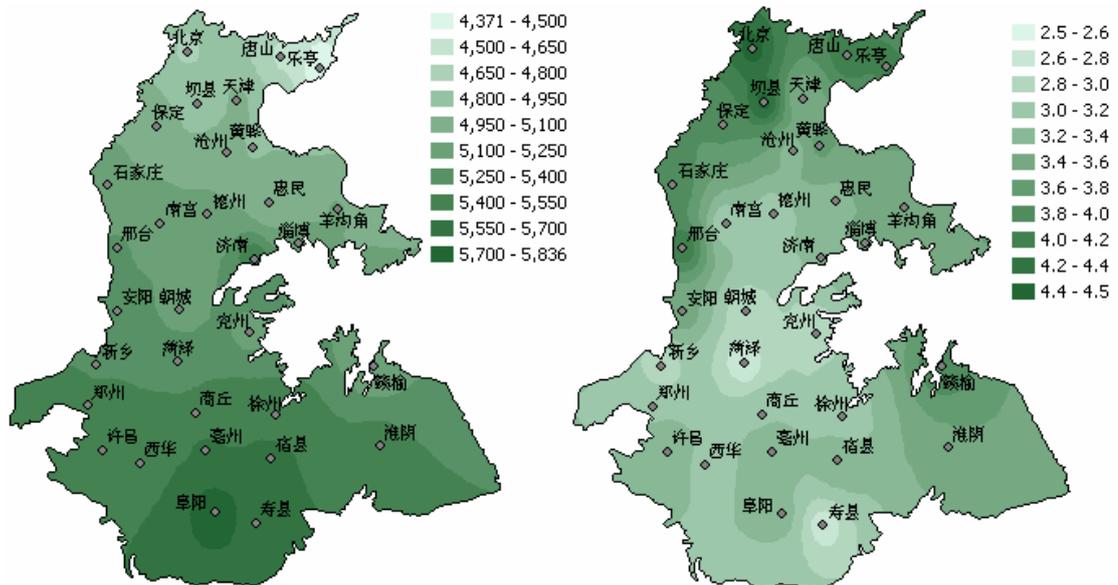


图3.3 华北平原多年平均的零度以上积温(单位: °C d)及其变异系数(单位: 百分比)

Figure 3.3 Yearly averaged temperature sum above 0 °C in the NCP (in °C d) and its coefficient of variation (in percent).

零度以上积温(图3.3)由南向北沿纬度平缓递减,一般变化在4370~5840°C d之间。受海洋的影响,近海地区的积温较小。积温的年际变化幅度很小,变异系数多在2.5~3.6之间。平原北部和西北部由于受山脉的影响,年积温的变异位居本区最大,约为4.4左右。

### 2.3 降水量

华北平原是季风气候明显的地区,降水具有地区分布差异显著,季节分配不均、年际变化大等特点。本区属半湿润半干旱气候区,水资源非常短缺,干旱频繁,但降水多而集中的年份又易发生严重的洪涝灾害。

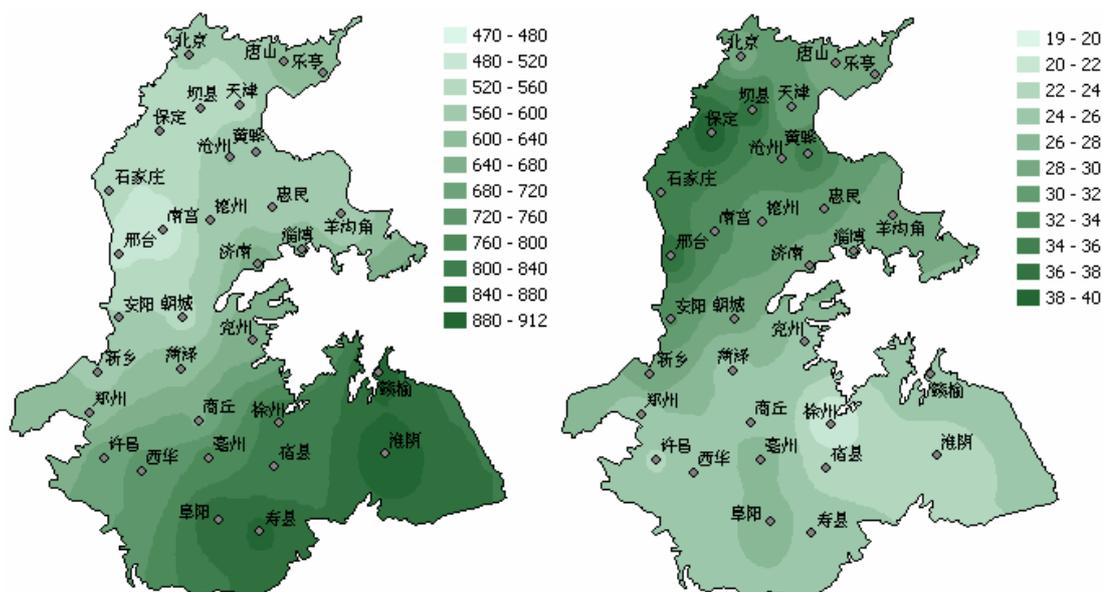


图3.4 华北平原多年平均的年降水量(单位: mm)及其变异系数(单位: 百分比)

Figure 3.4 Yearly averaged rainfall in the NCP (in mm) and its coefficient of variation (in percent).

由于夏季风是自南向北推进,并自北向南撤退,形成南部平原降水量多、雨季长,而北部降水量少、雨季短。因此,由图3.4可见,华北平原年降水量地区变化很大,全区域的一般变化在470~912 mm之间。其分布的主要特点是南部与东南部多、北部与西北部少,基本呈沿纬度递减的趋势,但受海洋的影响,等值

线倾斜较大。

河北邢台、南宫、保定及天津一线是华北平原的少雨中心，年降水量约为500 mm左右。整个平原北部的降水量差异不大，都小于550 mm，沿纬度向南过华北平原中部后，等值线密集，降水量迅速增加至700~800 mm。平原最南端的寿县一带是平原降水量最多的地方，多年平均降水量约为910 mm。

由于夏季风各年进退的迟早及势力强弱差异很大，因此华北平原年降水量的变率很高，仅次于我国西北干旱地区。华北平原各地年降水量的变异系数以河北中南部平原最高，达36~40。河南南部、苏北及皖北的变异系数多低于22，其它大部地区为25-30。

本区年降水量为500-800mm，干燥度为0.9-1.5左右，因受海洋、纬度及地形影响，降水量由北向南、由内陆向沿海逐渐增多，北部及西北部地区年降水量偏少，为500-600mm。河北省中南部的衡水一带降水量<500mm、干燥度>1.5，为易旱地区。黄河以南地区降水量由700 mm向南逐渐增加到900mm，基本上能满足两熟作物的需要。本地区年降水量主要集中在秋作物生长季节。4-10月降水量占全年降水量的85-99%(400-800 mm)，6-8月的降水量占全年降水量的55-73%左右。北部及沿海6-8地区月降水量所占比例大于南部地区。且降水量也多于南部地区，这对秋作物及种麦时的底墒水分供应是有利的。从该区种地春、夏季降水量的分配特点看，其南部地区降水量的年内分配比北部地区均匀，这更有利作物对水分的需求。

另一方面，本地区冬春少雨，冬季降水量占全年降水量的2-7%，南部多于北部；春季(3-5月)降水量占全年降水量的10-20%左右。德州、安阳以北，春季(3-5月)降水量<60mm，远不能满足冬小麦生育的需要，成为小麦生产的限制因素，常年亩产在50公斤以下。若亩产达150-175公斤，全生育期缺水衡水地区为125mm，石家庄、惠民为85mm左右。

本区灾害多样，以旱涝为主，其中旱灾更为突出。

按灾害发生时期划分有春旱、伏旱、秋旱以及夏涝等。其中以春旱、初夏旱频率最大。“十年九旱”，危害也最广。部分地区夏涝、伏旱严重(约30-40%的年份发生)。夏涝主要在低洼地及沙姜黑土易渍地危害较重，伏旱主要发生在黄淮平原及黑龙港地区。由于旱涝灾害频繁，制约了本区丰富的光热资源的有效利用，以及产量的稳产程度的进一步提高。

### 第三节 华北平原的农业生产状况

华北平原由山前平原、低平原与滨海平原三部分组成，为我国三大平原之一，地处亚热带和中温带的过渡带，农业资源条件较为优越。其中山前平原地面平坦开阔，水土条件好，是主要的农业高产区，其产量水平全国领先。华北平原高产区的农业自建国50年以来，已经过中低产变高产、高产再高产的历史过程。建国以来，我国的粮食生产发展历程经过了四个阶段，跨上了三个半台阶，每个台阶

粮食总产约增加 $100 \times 10^9$  kg。华北平原粮食总产也逐年增加，其变化趋势与全国粮食总产的变化趋势相仿。

华北平原粮食总产由1949年的 $400 \times 10^8$  kg上升到2000年的 $1320 \times 10^8$  kg (图3.5)。同时粮食总产在全国中的比重也呈逐年上升趋势，由解放初期的约22%上升到1998年的29.6%。可见，华北平原的粮食生产在我国的粮食生产中的地位日趋重要。

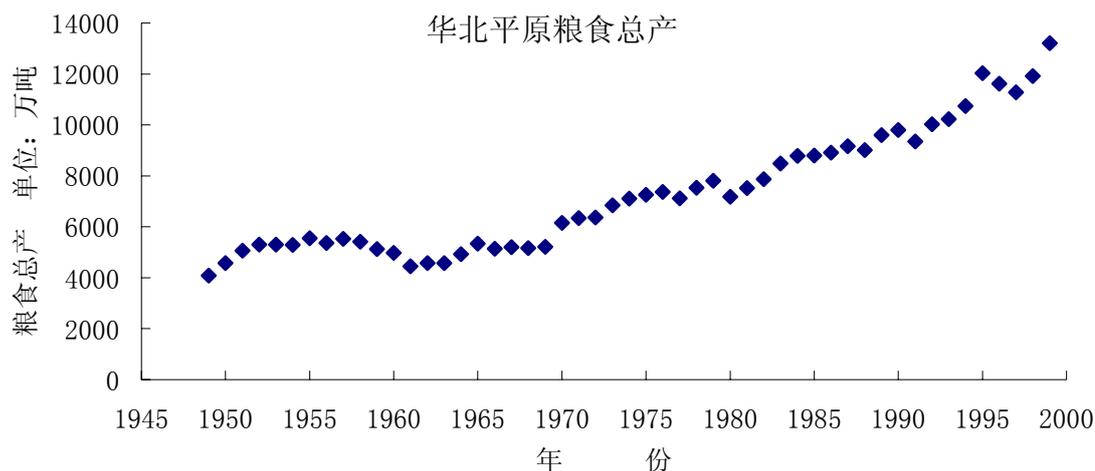


图3.5 华北平原1949-2000年的粮食总产

Figure 3.5. Crop production in the NCP from 1949 to 2000

与李振声()将全国粮食生产分为四阶段相对应，我们也将华北平原的粮食生产分为四阶段：

第一阶段是建国初期到1957年。在此阶段内华北平原粮食总产提高“两条腿走路”，即既有赖于耕地面积的增加(图3.6)，又有赖于单产的提高。该时期是建国后唯一的耕地面积增加的一个阶段，化肥使用量在这期间很少(图3.7)，起的作用非常小。

第二阶段是1958-1978年。耕地面积开始逐年下降是该阶段的显著特征之一。经过过三年严重的自然灾害后，农业生产开始回升，产量逐渐上升，这期间化肥施用量从1958年的27万吨增加到1978年的242万吨，这个明显增加，增加的数量不算多。化肥施用量的增加起了一定的作用，但产量上升的主要驱动力应该主要来自灌溉面积的增加(图3.8)。这十年动乱期间灌溉面积增加得很快，因为文革中大力提倡农业学大寨，学河南的红旗渠，去林县，所以灌溉面积有极大的提高。

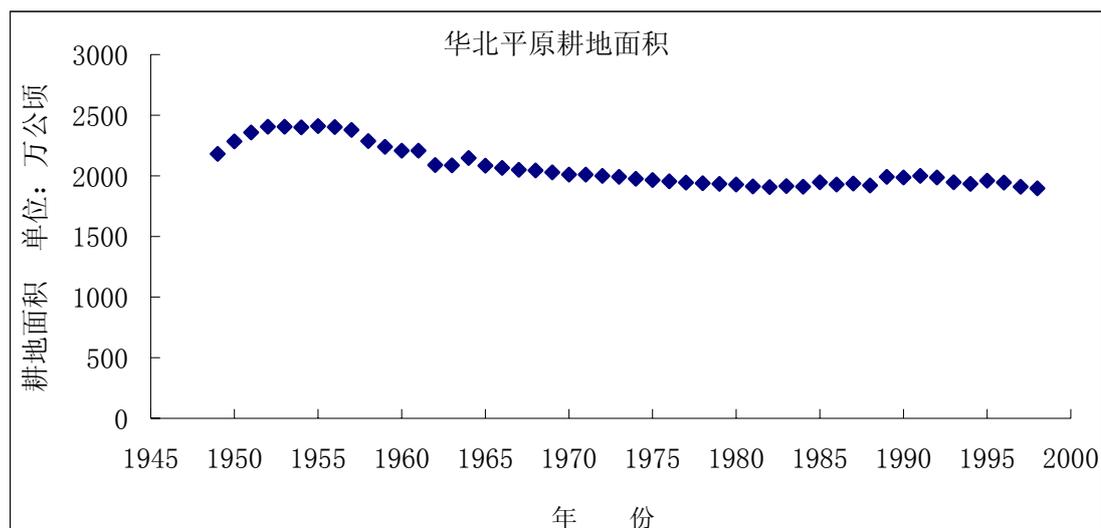


图 3.6 华北平原 1949-2000 年耕地面积的动态变化

Figure 3.6 Area of arable land of the NCP in 1949-2000

第三阶段是1978到1984年，即我国农业生产发展最快的一个时期。这时期耕地面积继续下降，粮食总产的提高靠的还是提高单产。但此时有效灌溉面积没有大的增加，究其原因，可能是灌溉潜力已经将近挖掘完毕之故。变化比较大的是化肥数量的投入，1958年投入化肥242万吨，到了1984年就是519万吨，增加了1倍多，因为在这期间我国开始建设13个大的氮肥基地，因此化肥的用量成倍增加，同时联产承包责任制使人们积极性提高了，主观上人们更愿意加大对农田的投入。

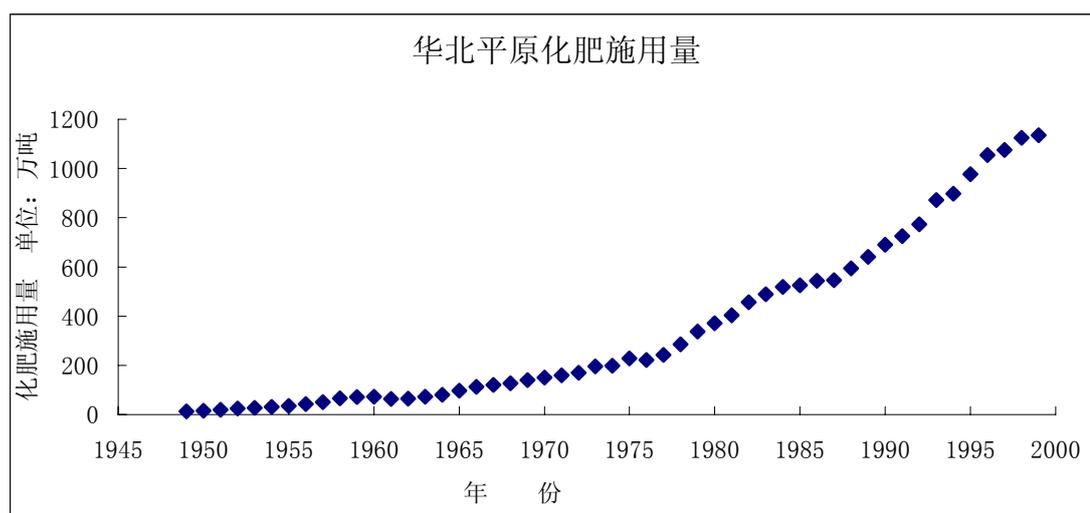


图 3.7 华北平原 1949-2000 化肥施用量的动态变化(折纯量)

Figure 3.7 Chemical fertilizers utility of the NCP in 1949-2000

1984年以后到现在是第四个阶段。耕地面积持续减少，化肥的用量仍迅猛增

加，但增产的效果不像前一段那么明显，有效灌溉面积也只是略有增加。此时粮食总产增加的主要驱动力是品种改良及管理措施与方法的改进。

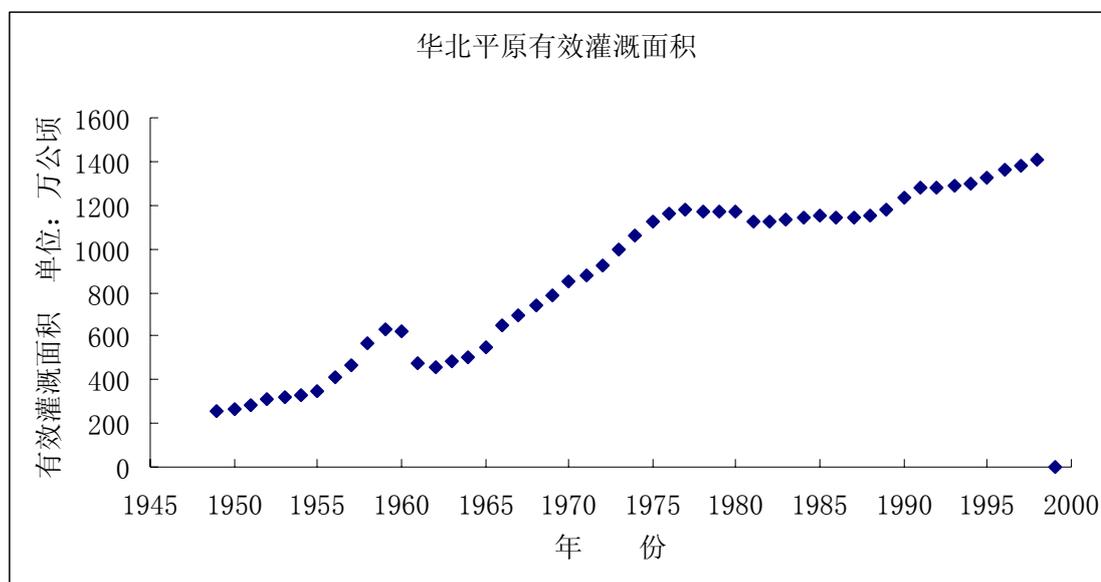


图 3.8 华北平原 1949-2000 年的有效灌溉面积

Figure 3.8 Effective irrigated area in the NCP from 1949 to 2000

中国近50年的粮食总产的统计资料也表明，粮食产量的增加与灌溉面积的发展密切相关。同时，由于华北平原水资源与土地、光热资源匹配不佳，自然降水远满足不了农作物生长的需水要求，粮食单产在很大程度上依赖灌溉，灌溉与非灌溉耕地的粮食单产比为2.775，华北平原的灌溉供水是粮食高产稳产的保证。因此华北平原灌溉农业发展速度高于全国其他地区。1949年有效灌溉面积只占全国10.0%，1965年为15.8%，1985年上升到26.5%。每1000人平均占有的有效灌溉面积，海滦河流域和淮河流域分别为75 ha和59 ha，居于全国各大流域前列。

华北平原耕地灌溉率比较高的地区有：黄河以北的燕山、太行山山前冲积平原，黄河以南的淮河下游地区和沿黄河两岸地带，耕地灌溉率一般高于60%。灌溉率比较低的有：海河下游低平原区和黄河、淮河之间的淮北平原，灌溉率一般低于40%。

由于灌溉农业的发展，促进了粮食产量的提高，1962年全区粮食总产量  $2.3 \times 10^7$  吨，1987年增加到  $8.8 \times 10^7$  吨，是1952年的2.83倍而全国同期只相差1.47倍。图3.8是华北平原1949-2000年的有效灌溉面积的动态变化。由图可见，华北平原在过去的50年里有效灌溉面积呈递增的趋势，建国后土地改革和农业合作化运动，解放了生产力，有效灌溉面积迅速上升，1957-1962年由于“左”的错误，挫伤了农民的生产积极性，加上严重的自然灾害，农业生产力受到很大破坏，有效灌溉面积直线下降。

图 3.9 是根据 1995 年的统计资料, 在华北平原以县为单位的有效灌溉面积占耕地面积比值的图, 这个比值一定程度上反映了该地的灌溉能力或说保证率。由此图可见, 华北平原的山前平原大都具有良好的灌溉能力, 平原南部的灌溉能力也比较高。灌溉能力较差的平原中部被黄河分为南北两部, 这是因为沿黄河两岸, 由于有引黄灌溉的水源, 该地的有效面积比别处更能得到保证, 同时, 黄河从此处经过, 对该处的地下水有补充的作用, 因此, 引地下水灌溉的条件也比别处更佳。灌溉能力最薄的地方是沧州一带, 该地的地下水位非常低, 是著名的沧州漏斗区。据资料, 沧州市于 1967 年开始较为集中利用地下水, 以后开采量逐年增加, 地下水降落漏斗形成并不断扩大。1973 年 6 月沧州市地下水位埋深已达 33 m, 1979 年 10 月为 68 m, 1984 年 12 月为 75.6 m, 1994 年 2 月深达 90.81 m。地下水位的迅速下降使机井的抽水能力明显降低, 单井出水量严重衰减, 乃至有的机井报废不能抽水, 因此灌溉能力比别处明显不如。

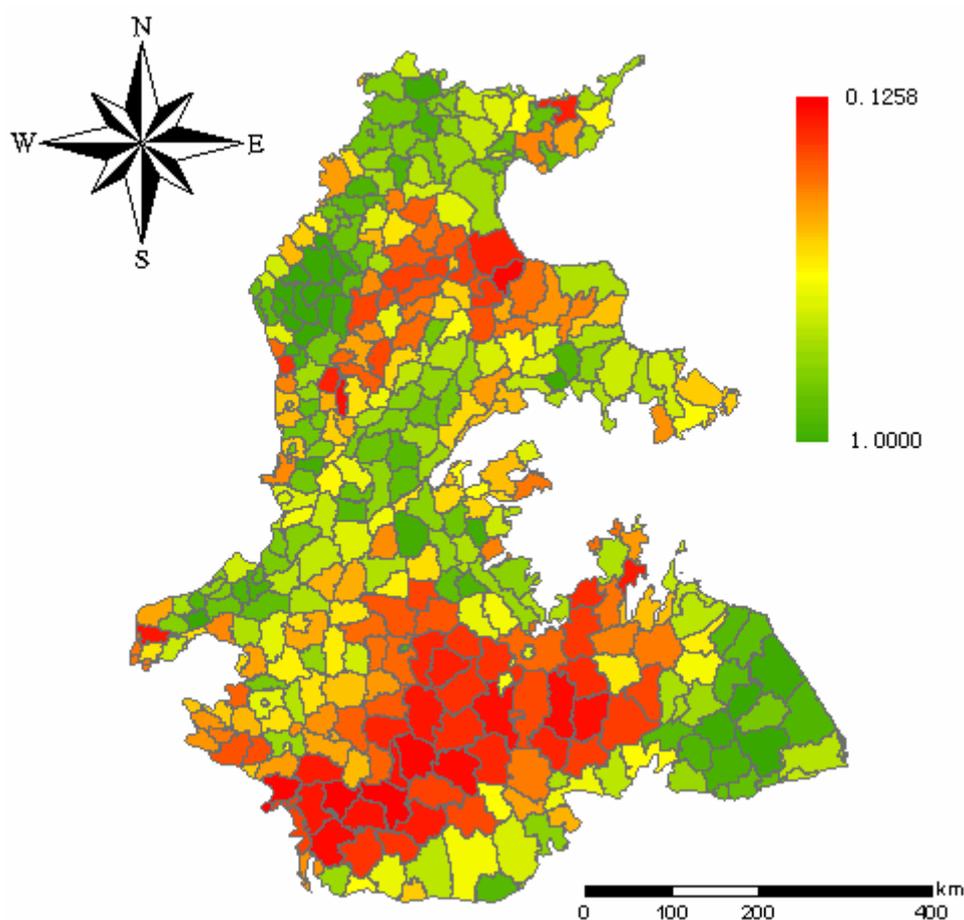


图3.9 华北平原各县市的灌溉能力

Figure 3.9 Irrigation ability of every counties in the NCP.

华北平原经过过去50多年飞速的发展, 现在面临着许多挑战, 尤其是在市场经济下, 如何实现持续高效发展, 问题诸多, 突出地表现在以下方面:

1. 水资源短缺的矛盾日趋尖锐。1997年, 华北地区总用水量为 $1017.68 \times 108 \text{ m}^3$ , 其中农业用水量为 $764.89 \text{ m}^3$ , 占75.2%。工农业用水比例为1: 5, 可见, 农业用水是大户。传统的高产农作体系以消耗大量地下水为主, 千万地下水位逐年下降。华北平原处于季风气候区, 平均年降水量从北往南约470-912 mm。地表水与地下水资源相对紧缺, 农田利用强度大, 耗水多, 地下水长期超采。华北平原地下水的开采大体分三个阶段: 一为采补基本均衡时段, 地下水保持天然流场, 其时间在1964年以前; 二为发生于1965-1975年的地下水位降落漏斗的形成时段, 地下水采补失衡, 且超采数量逐年增加, 陆续出现常年性漏斗; 三是1976年至今的漏斗发展时候, 采补失衡更趋严重, 20年来浅层地下水超采面积大于 $20000 \text{ km}^2$ , 深层水超采区面积达到 $40000 \text{ km}^2$ 以上。图3.8是河北栾城1970-2003地下水水位的动态变化, 由此图可见, 栾城在过去的20年里, 地下水水位基本以每年1 m惊人的速度下降。

如何合理地有序地利用水资源, 已直接关系到华北平原农业的持续发展。

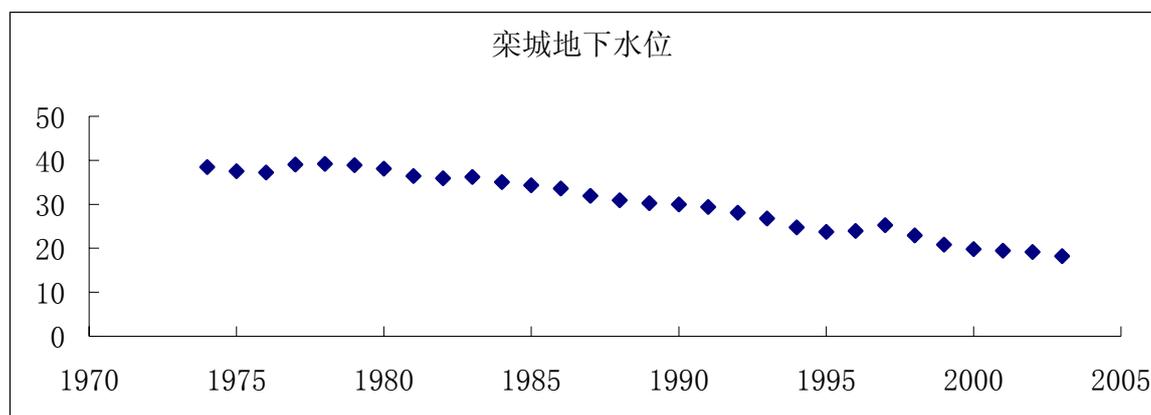


图3.8 栾城1970-2003地下水水位的动态 (单位: 米)

Figure 3.8 Groundwater table dynamics in Luancheng from 1970 to 2003 (unit: m)

2. 华北平原高产区是我国主要的商品粮基地, 从我国人增地减与保障粮食供给大局出发, 保持其高产水平和商品粮供应能力是重要任务。但目前突出的问题是: 一是生产成本低, 由于高产的基础上大量的肥、水等投入, 加之农机、植保、劳力等费用居高不下, 生产总成本已占产值的50%-65%; 二是经济效益差, 由于成本高, 加上市场价值制约, 小麦-玉米一年两熟的纯收益只有3000-5000元/ $\text{hm}^2$ 左右; 三是资源消耗多, 大量的地下水和化肥、农药等投入, 加剧资源紧张的矛盾。

## 第四章 模型的校正与验证

### 第一节 自然条件和试验地概况

#### 1.1 禹城综合试验站研究概况和试验条件

中国科学院禹城综合试验位于山东省境内，在华北平原具有典型性和代表性。禹城综合试验站 20 多年来主要开发农田蒸发研究、SPAC 系统中水分循环过程与测定方法的研究、农田水分与作物生产力形成关系的研究、作物耗水规律与节水技术的研究、试验遥感研究、区域治理与农业开发等多方面的研究，取得了丰硕的成果，禹城综合试验站研究成果为华北地区的中低产田改造、南水北调工程水量平衡计算、农业结构调整及区域特色经济发展起到了巨大的指导和推动作用。

禹城综合试验站观测仪器齐全，有 MAOS-I 小气候自动观测设备 2 套，可自动采集 4 个高度的温度、湿度和风速风向；自动采集太阳辐射、地温、地表热通量等；有一自动小型气象观测站，可观测常规气象参数；大田试验区内有一台称重式大型蒸散仪，精度为 0.016 mm，测定农田蒸散量，土壤水与地下水的交换量等；有测量土壤水分变化的中子水分仪和 TDR 水分测定仪；测量作物光合作用的 CID301 和 Licor-6400 等光合仪器；有直径为 100 mm 和 55 mm 的根钻，测量土壤剖面上根的分布。齐备的试验仪器设备为试验顺利完成提供了可靠保障。

#### 1.2 气候条件

受暖温带半湿润大陆性季风气候的影响，禹城试验区光照充足，热量丰富，春季干旱多风，夏季炎热多雨，秋季降水渐少，冬季干旱寒冷。多年平均气温为 13.1℃，极差温度为 38.6℃。

禹城试区多年(1979-1998)平均降雨量为 515.1 mm，其中 6-9 月份降水量为 371.2 mm，占全年总降水量的 72.1%，10 月份至次年 5 月份降水量为 143.8 mm，占全年降水量的 27.9%。降水在时间上分成的不均匀，使得禹城试验区易出现春旱、秋涝等自然灾害。

#### 1.3 土壤条件

2001 年 10 月在禹城试验站试验田取一个土壤剖面，调查土壤结构和剖面分布。在水分池所在场地周边的农田内，耕地犁底层以下无扰动区域开挖土壤剖面，观测得到在 0-150 cm 深度内，禹城试验站土壤质地以轻壤土为和粉砂土为主。0-50 cm 范围内以轻壤土为主；在 50 cm 左右，稍微有粘土出现，但是并未成层；在 50-100 cm 深度内，以粉砂土为主；在 100 cm 附近有 0-3 cm 左右的粘土层出现，但是试验区内土壤的变异性比较大，不同地方粘土层的厚度不同，100-150 cm

深度内以粉砂土为主。

表 4.1 是禹城综合试验站测量的土壤的一些理化性质。

Table 4.1 Soil properties of the experimental site at Yucheng Comprehensive Experimental Station.

Soil textural class	Wilting point	Saturation	Field capacity	Bulk density	Organic matter	Total nitrogen	Total phosphor	Total potassium	pH
	v/v	v/v	v/v	g/cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	
Sandy loam	0.11	0.36	0.30	1.376	1.25	0.069	1.21	14.68	8.44

\* Data were measured by sampling in the station.

## 第二节 冬小麦生长的校正

试验安排在中国科学院禹城综合试验站进行。该试验站位于山东省禹城市内，地处北纬  $36^{\circ} 57'$ ，东经  $116^{\circ} 36'$ ，海拔 20 m，地貌类型为黄河冲积平原，属暖温带半湿润季风气候区。土壤为黄河冲积物，土壤质地为中壤土，土壤有机质含量为 0.6-0.8%，土壤肥力中等。受引黄灌溉的影响，地下水位较高，常年在 0.5-4.2 m 之间。禹城试区地形平坦，地表水与地下水资源丰富。试验安排在 1999-2000 和 2000-2001 年冬小麦生育期内。

### 2.1 试验设计和方法

#### 2.1.1 试验布置

水分处理实验：实验在水分池中进行。小区由 16 个相同的水分池组成。水分池单池面积为  $6.67 \text{ m}^2$ ，正方形，深 1.5 m，无底，池边用砖质水泥墙面砌抹，可防止水分侧渗。水分池安装有防雨棚。

实验设两个处理，即：维持田间含水量不低于 70%(这时水分供给充足)和雨养状况(不灌水)。每个处理两次重复，其它管理措施同大田。自返青之后开始处理，土壤水分用中子仪观测，每隔五天观测一次，遇降水或灌水加测一次，不足试验设置的土壤水分条件则灌水补足，灌水量用水表控制；遇降水则用防雨棚遮挡。水分池周边为同品种同播期同密度的保护行。试验时间为 1999-2001 年，1999 年与 2000 年冬季播种，分别于 2000 年与 2001 年收获。

大型蒸散仪的观测实验：试验于 1999~2001 年在中国科学院禹城综合试验站进行，土壤为黄河冲积物，土壤质地为轻壤土和粉砂土，土壤有机质含量为 0.6%~1.0%，土壤肥力中等。观测数据能代表鲁西北平原冬小麦和夏玉米的农田蒸散规律(陈建耀，吴凯，1997)。

观测项目主要是农田蒸散的测定，仪器用建于田间的新型大型称重式蒸渗仪

测定。禹城站新型大型称重式蒸渗仪(Lysimeter)建于 1991 年 2 月底, 所设的供排水系统能够补充地下水, 较好地跟踪大田水位, 从而实现对大田农作物耗水较为准确的模拟(器内、外种作物保持一致)。蒸渗仪含原状土体、重约 30 t, 面积 3.14 m<sup>2</sup>, 深 5 m, 测量精度(感量)可达 0.02 mm。蒸渗仪结构包括主体系统、称重系统、供排水系统和数据采集系统。新型蒸渗仪采用的是以重量计量方式, 用称重系统来实现测量能够同时测定蒸散量和地下水对土壤水的补给, 并从土地生产力即作物高产着眼, 研究水分运移、转化和平衡关系, 从而为构造 SPAC 系统的理论模式提供了良好条件。

在地下水位不发生变化时, 加入到土体的水量为地下水对土壤水的补给量, 由土体排出的水量为地下水补给量, 当大田中的地下水位发生变化时, 为了保持仪器内水位与大田水位一致, 必须向土体中加入或者排出一定的水量, 而这部分水量可以直接测得。

### 2.1.2 冬小麦生长指标观测

冬小麦生长指标观测项目主要包括在不同的生育阶段(越冬前、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期)测量冬小麦的分蘖、叶面积、株高、生物量等; 在灌浆前期测量冬小麦根分布; 灌浆以后, 观测小麦籽粒的灌浆过程, 收获时进行考种和测产, 详细情况见表 4.2。

分蘖: 采用定点观测。出苗后在试验田分别选取出苗均匀的 3 行小麦, 每行 1 m, 观测基本苗; 在每个生育期数苗一, 取 3 行的平均值。

叶面积, 生物量: 采用破坏性观测。每个生育期分别从试验田随机选取 20 株小麦, 摘下叶片后迅速用已经标定好的 CID201 测量叶面积, 然后把茎秆和叶片一起放入烘箱在 105℃ 杀青 2 小时, 再在 80℃ 烘干 20 小时, 用百分之一电子天平测量干物重。

株高: 每个生育期分别在试验田随机选取 20 株小麦测量株高, 然后取其平均值。

根重: 在试验田内分别选取 2 点, 每点行上和行间各打一洞, 取样深度为 100 cm, 每 10 cm 为一层。根样放在编织袋中, 经过泡根、冲根、漂根和挑根等过程, 用 CID201 测量根长, 然后在 80℃ 的烘箱中烘干 20 小时, 取出后立即在万分之一天平上称取根干重。

考种: 在小麦收获后, 分别从两种处理的试验田中随机选取 20 株小麦, 测量株高、穗长、结实小穗数、不孕小穗数、穗粒数和千粒重等。

表 4.2 冠层观测项目

Table 4.2 Measurement items of the crop

项目	测定方法	备注
生物量	取长势均一的单茎, 分别测定其叶片、叶鞘、茎秆、穗的鲜重和干重	每五天观测一次, 每次 10 个单茎

旗叶光合速率	采用CID301PS 光合作用测定系统, 选择晴天好天气和长势均一的植株旗叶, 改变叶室倾角以控制光可进行测定	每个处理重复两个
生长状况调查	返青后开始, 每个处理留出不行, 考察其分蘖数、株高、绿叶数	每五天一次, 直至主茎叶片抽完
叶面积	LI-3100 活体叶面积测定仪	每五天一次, 每次五茎
灌浆速率	不同处理抽穗后标定长势均一的小穗 100 株, 每次取 5 穗, 测定其鲜重和干重	每 3 天一次

### 2.1.3 模型参数

WOFOST 是个评价区域生产力的模型, 主要用于宏观的、大范围的模拟, 这就决定了它在参数的选取、使用方面不可能考虑得太细, 于一些公式、常数的选取比较概略。它使用的参数分为三大类: 作物、土壤、气候。另外还有一些模拟中必须由使用者确定的选项, 比如有无地下水影响及地下水的深度等等。详细参数介绍如下:

气象数据 (逐日数据): 太阳辐射( $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), 最高、最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 水汽压( $\text{k Pa}$ ) (上午八点), 200 cm 高平均风速( $\text{m s}^{-1}$ )、降雨量( $\text{mm d}^{-1}$ )、降雨天数。

由于某些天风速不是模型所要求的 200 cm 标准高度上测量的, 因此应用对数风速廓线来计算 200 cm 高度上的风速。

计算出 200 cm 高度上的平均风速, 加上自动气象站的数据, 完备了气象数据。本次验证采用了 1999-2001 的气象数据, 其中不包括 2001 年 6 月 30 日以后的数据。

作物数据: 作物数据是比较难获取的数据。它主要包括:

叶片最大  $\text{CO}_2$  同化速率, 蒸散量的校正参数, 同化产物的转化效率, 发育期最长日长和临界最短日长, 积温日增量, 收获期, 单叶片同化  $\text{CO}_2$  中光能的利用效率, 干物质积累中分配各器官中的比例, 消光系数, 初始叶面积指数, 由水分胁迫引起的叶片最大死亡速率, 温度改变  $10^{\circ}\text{C}$  时呼吸作用的变化率, 初始的根深, 成熟作物的根深度, 根、茎死亡率, 叶面积指数的最大日增量, 各器官的维持呼吸作用速率, 根长的最大日增量, 各阶段的叶面积, 在  $35^{\circ}\text{C}$  时叶片生命期, 叶片老化时的临界最低温, 出苗时的临界最低温, 初始干物质重, 出苗时最高有效温度, 由低温引起的同化速率的减少率, 播种至出苗的积温, 出苗至开花期的积温, 开花至成熟期的积温。另外还有模型考虑但本次验证不考虑的参数, 如茎与穗的面积、植物器官 N 的最高最低浓度等等。

作物数据的获取主要是对观测数据进行计算而得, 如分配系数等, 其中有些

参数是根据冬小麦的生物特性而确定的，如临界最低温等。

土壤数据：临界土壤空气含量，由表层向底土下渗的最大速率，饱和水状态下的土壤水分传导率，田间持水量，土壤水保持力，枯萎点的土壤水含量，土壤饱和水分含量，根部的最大下渗速率以及土壤氮、磷、钾含量等等。由于已假设土壤养分条件最优，所以土壤肥力数据不在本次验证重点研究范围内，本文着重的是土壤水文学方面的参数，这对模型模拟水分限制生长有重大影响。

## 2.2 冬小麦校正验证与结果分析

模型方程中的参数大都是因时、因地、因品种而异，在模型实际应用之前要对这些参数进行修正，使其适合于该区域，这就是参数校正的过程。参数经过校正后，需用另一套独立的观测数据来对其进行验证，经此确定模型是否真正地适合于该区域的模拟。

将计算得到的作物参数、从自动气象站提取的气候数据(灌水记录以及灌水定额折算成降雨量加到气象文件中)以及查阅的土壤参数输入模型，经模拟计算得到输出结果，对输出结果与禹城站的实测值进行比较，得出模型模拟的可靠度。对模拟结果，取模型的主要输出结果，即叶面积指数、茎重和总干物质重与 2002 年的实测值进行比较，根据比较结果的反馈再细微调整部分参数。

### 2.2.1 生物量的校正验证

图 4.1 是 LAI、穗重与地上部分总干重的模型校正验证结果。

在 LAI 的比较中，取潜在生长处理的观测值与模拟结果中的潜在生长比较(图 4.2)。潜在生长模拟中模拟值与实测值较接近，曲线在出苗至越冬期基本上吻合。返青后，冬小麦生长迅速，模拟与实测的误差开始有点增大，但趋势仍保持一致。二者在叶面积指数的最大值略有差距，这是由于 WOFOST 没有考虑养分、病虫害和耕作措施所致。另外可能还有一个原因就是 WOFOST 没有计算冬小麦无效分蘖的死亡。在每年的 4 月初都会有大量的无效分蘖开始死亡，其死亡速率是较快，平均每五天分蘖数要下降 150 万茎/公顷左右。4 月初换算成出苗后的日期就是 180 天左右，正是模拟值与实测值的差距开始增大的时期，因此导致模拟结果不那么理想。

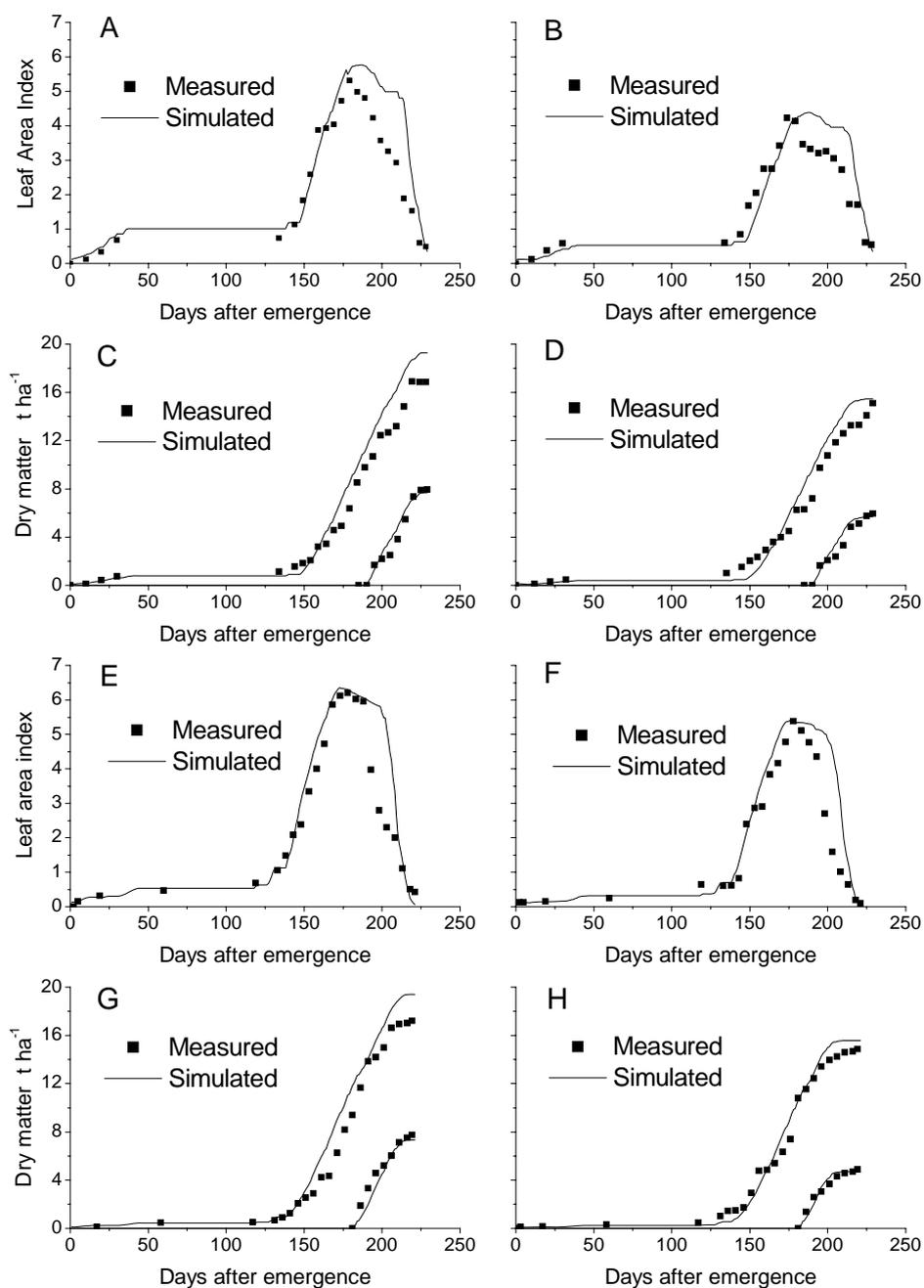


图 4.1 模型的模拟值与观测值的比较。A~D 是校正的结果，E~H 是验证的结果；A、C、E、和 G 是潜在生长条件下的比较，B、F、F 和 H 是雨养条件下的比较。其中 C、D、G 和 H 中，左侧的较大值是地上部分总干重，右侧的较小值的是穗重。

Figure 4.1 Results of the calibration and validation of WOFOST using experimental data from Yucheng Comprehensive Station. On the left hand side simulated and measured values for the potential production situation while on the right hand side for the water-limited production situation. A, B, C, and D refer to the calibration using experimental data from the growing season 1999-2000, and E, F, G, and H refer to the validation using data from

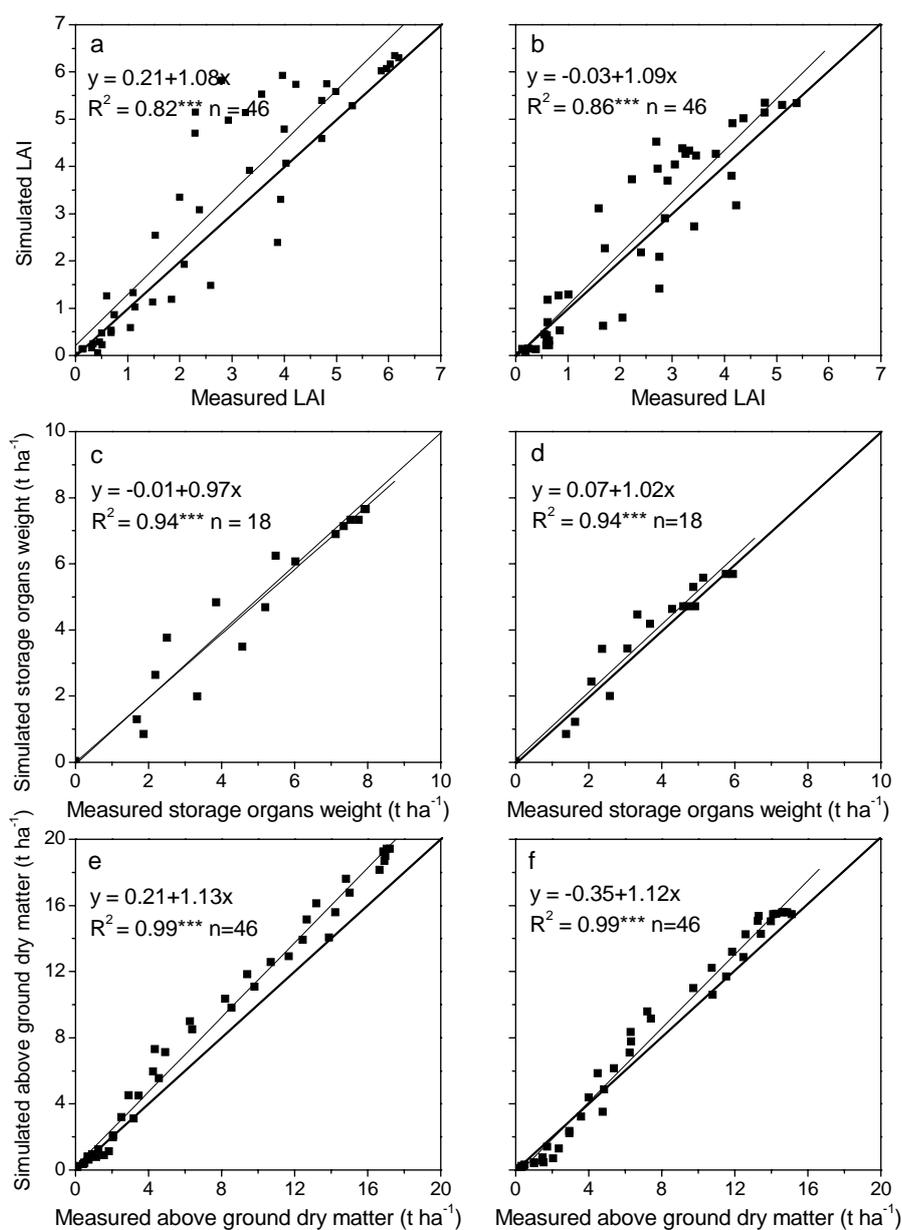


图 4.2 潜在生长(a, c, e)与雨养条件下(b, d, f)模拟的 LAI、穗重与地上部分总干重之间的关系。\*\*\* 显著性水平  $p < 0.001$

Figure 4.2 Relationship between observed and simulated values of LAI, total biomass and grain dry matter under potential (a, c, e) and water-limited (b, d, f) production situation. \*\*\* Significant at  $p < 0.001$ .

图 4.2 是潜在生长与雨养条件下模拟的 LAI、穗重与地上部分总干重之间的关系。从该图可见，模拟值与观测值吻合得很好，显著性水平达到 0.001。

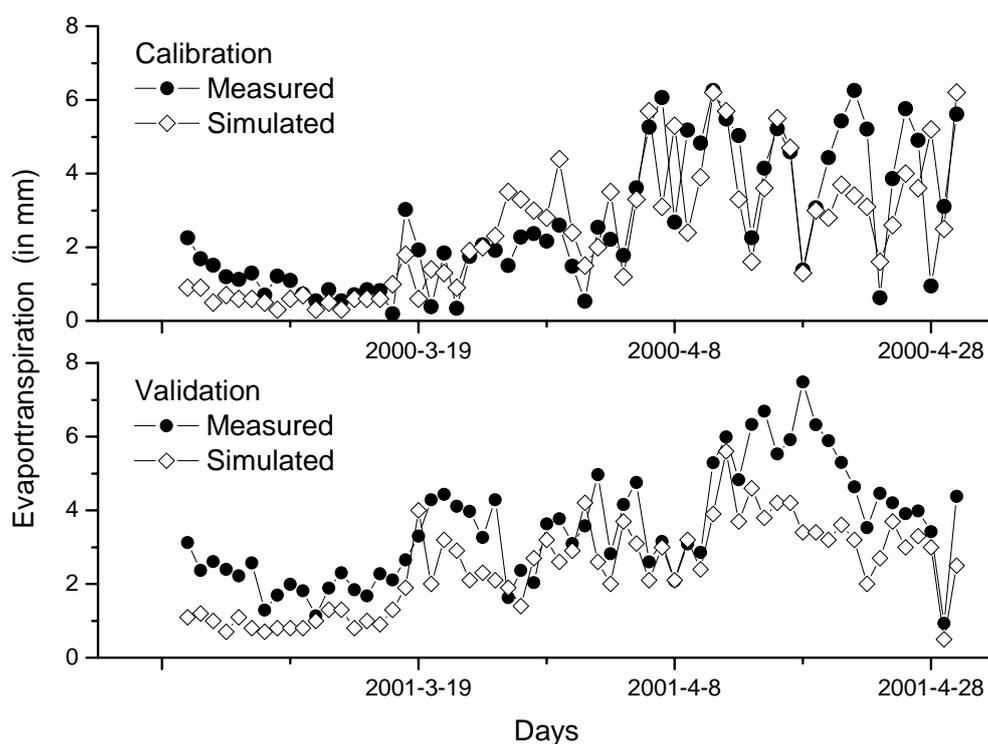


图 4.3 华北平原 3~4 月模拟蒸散与实测蒸散的比较(单位: mm)

Figure 4.3 Simulated and measured evapotranspiration in the NCP from March to April (in mm)

### 2.2.2 蒸散的校正验证

土壤水(Soil Water)指的是由地面向下到地下水水面(潜水面)以上土壤层中的水分。亦称土壤中非饱和带水分(雷志栋等, 1999)。土壤水是联系地表水与地下水的纽带, 在水资源的形成、转化与消耗过程中, 它是不可缺少的成份(雷志栋等, 1999)。目前, 土壤水被认为是农业土壤水资源的主要组成部分, 在学术界已成为共识, 在干旱、半干旱地区它已成为维持作物生长最重要的水资源之一(刘昌明等, 1999)。

蒸散量是土壤水量平衡的关键因子之一, 蒸散量的模拟精度是检验模型模拟精度的重要指标。

本研究利用禹城综合试验站大型蒸散仪的实验资料, 对 WOFOST 模拟的蒸散进行了校正与验证。根据蒸散仪场地的实验布置, 将播种时土壤含水量输入模型, 把蒸散仪的灌水量折合成降水量输入至气象文件来驱动模型, 得到模拟蒸散仪场地实际生长条件下的蒸散量, 并把它与蒸散仪实测的蒸散时进行比较。图 4.3 显示了模型模拟蒸散的校正与验证结果, 即 2000 和 2001 年度模拟的冬小麦生长季实际蒸散与大型蒸散仪测定的作物实际蒸散的比较。

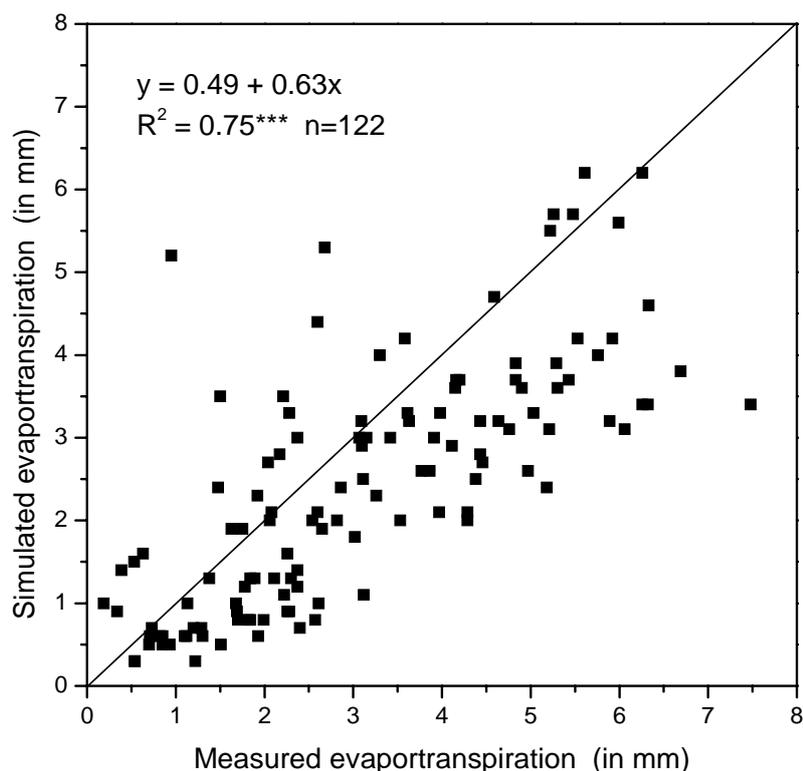


图 4.4 华北平原 3、4 月冬小麦蒸散模拟值与蒸散值的比较

Figure 4.4 Relationship between simulated and measured evapotranspiration of winter wheat in the NCP during March and April.

由此图可见，模型对冬小麦蒸散模拟的精度比较高，模型模拟和实测作物日蒸散量的变化过程非常一致，越冬期间低，在返青后迅速上升。在数值上比较日蒸散量，模型模拟结果与实测结果具有很好的相关性(图 4.4)。

### 第三节 夏玉米生长的模拟

#### 3.1 试验地概况

校正与验证实验在中国科学院禹城综合试验站的综合观测场进行，共进行两年，1998 和 1999，1998 年的取得的试验数据用于模型的校正，1999 年的数据用于模型的验证。本实验采用的夏玉米品种为掖单 22 号，播种量为 105 kg/ha，连续两年都采用同一品种，肥料施用水平也一致。实验田进行良好的耕作，严格防止疾病与虫害的发生。根据土壤水分状况，用大水漫灌的方法灌水。

用中国科学院生产的中子仪测定土壤体积含水量，分层测定，每 10 cm 一层，测至 100 cm。夏玉米生长的观测包括玉米的发育阶段、叶面积指数、茎重、叶重、穗重等等。每 5 d 观测一次，每次取长势均一的 10 个单茎，烘干后测定其

叶片、叶鞘、茎秆、穗的鲜重和干重，总重量计为地上部分总干重。叶面积指数用 CID-201 (CID Inc, USA)测定，最后取 200 m<sup>2</sup> 的样品来测定总产。气象资料方面，资料内容包括：最高最低温度、湿度、降雨量、风速和太阳辐射。气象资料均来自于试验站的自动气象观测站。灌水量折算成降水量计入气象数据文件中。

在选取模型参数时，主要依据华北平原夏玉米的生物学特性及实验观测所得。作物参数如积温根据实验中夏玉米的生育阶段，累积其积温所得；干物质在不同器官上的分配系数、比叶面积、最大光合速率等由实验数据计算。土壤参数通过对禹城土壤采样分析得到。主要是指土壤的物理性质，如枯萎系数、田间持水量、土壤水分下渗速率等等。

夏玉米生长指标观测的方法与冬小麦大致相同，见本章第一节。

### 3.2 模型的校正验证与结果分析

#### 3.2.1 生物量的校正验证

用 WOFOST 模型模拟夏玉米的生长过程，取模拟结果中的叶面积指数 (LAI)、茎重、叶重、地上总干物重与实测值进行比较。根据比较结果确定模型的适用性。图 4.5 是模型校正的比较结果，图 4.6 是模型验证的比较结果。总体上说，模拟值与观测值吻合得相当好。

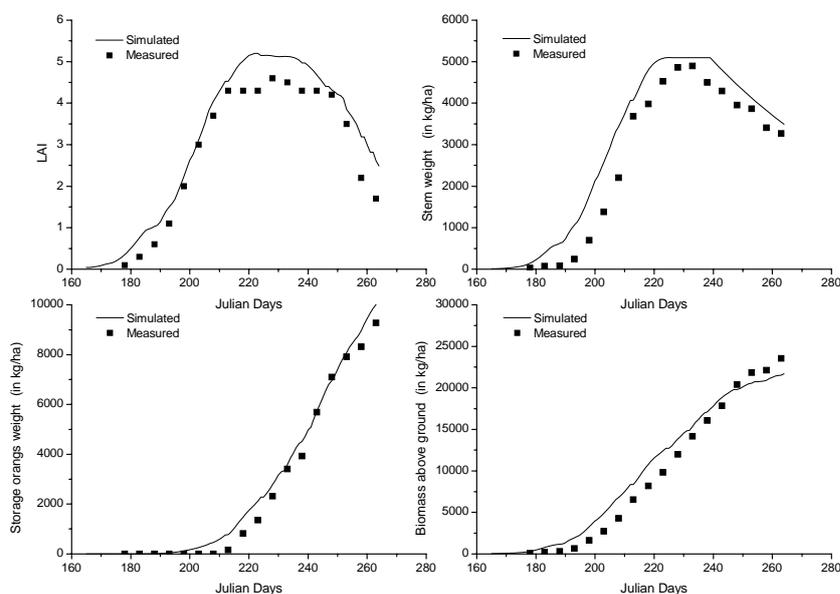


图 4.5 WOFOST 在禹城站模拟夏玉米生物量的模拟值与实测值的校正结果

Figure 4.5 Calibration results of WOFOST using experimental data in the YCES

LAI 模拟得很好，模拟值与实测值基本上吻合在一起。这表明 WOFOST 模型能准确在模拟夏玉米叶片的发育过程。茎重的模拟结果也比较好，但最好的还是对地上部分总干重的模拟。叶重模拟前期较好，但后期趋势有异。原因是观测

过程中, 将已经枯萎或差不多枯萎的叶片也收集上来, 连鲜叶一起测其干重, 而模型模拟值则是舍弃了已经枯萎或差不多枯萎的叶片的干重。这种情况在后期叶片开始较大规模地老化的时候尤其严重, 这是就 LAI 的模拟中, 在近第 250 天后, 实测的 LAI 与模拟的 LAI 差异开始增大的原因。

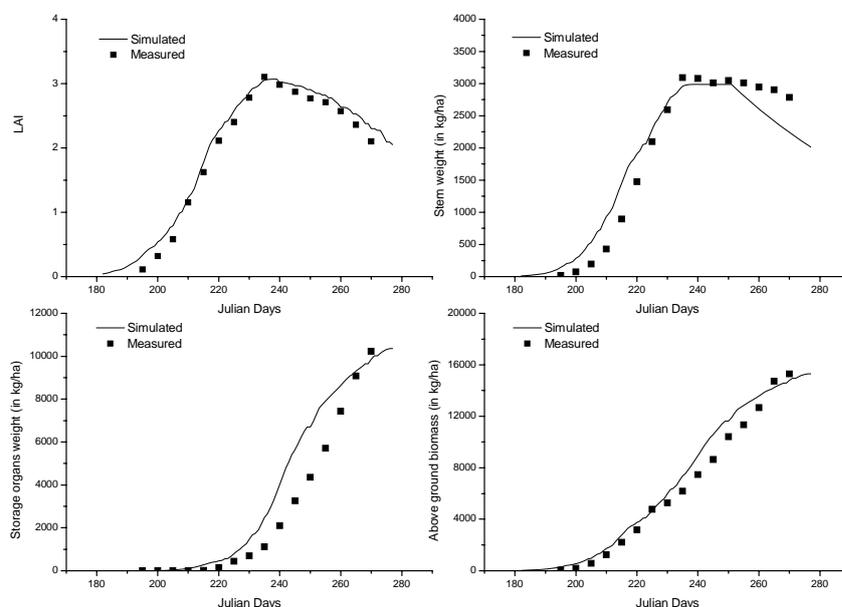


图 4.6 WOFOST 在禹城站模拟夏玉米生物量的模拟值与实测值的验证结果

Figure 4.6 Validation results of WOFOST using experimental data in the YCES.

从模型验证的结果可以看出, 经过参数的校正后, 模型能较好地模拟夏玉米的生长发育。LAI 的模拟比较理想, 但是模拟值略微偏高, 考虑到 WOFOST 模型不考虑、耕作及农田管理和病虫害等方面的问题, 模拟值比实测值偏高是正常的。由于模拟的 LAI 偏高, 茎重、地上部分总干重和叶重的模拟也偏高。但它们总的趋势是一致的, 曲线的峰值点出现的时间也比较一致, 这表明经过校正后 WOFOST 能准确地华北平原夏玉米的生育期。

图 4.7 是模型模拟值与实测值的 1:1 图。它们都具有较高的决定系数值( $R^2$ ), 这说明模型的模拟华北平原夏玉米生长的效果很好。

校正与验证的结果表明, 经过校正后, 该模型适用于华北平原夏玉米的模型研究。

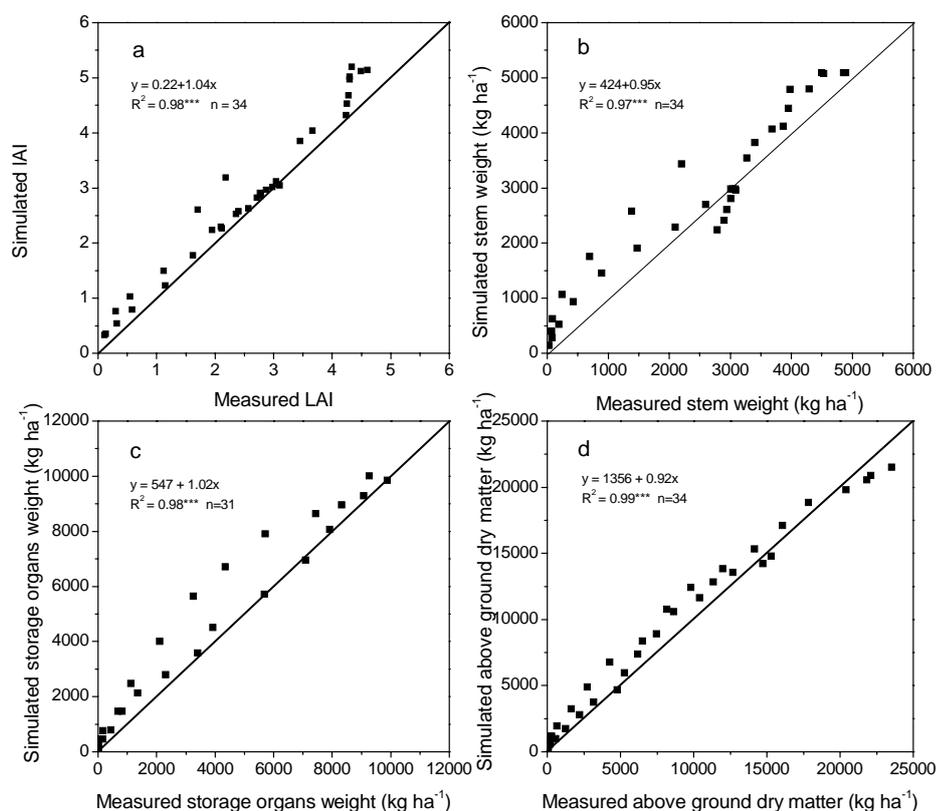


图 4.7 模拟值与实测值的比较，包括 LAI(a)、茎重(b)、穗重(c)和地上部分总干重(d) \*\*\* 显著性水平  $p < 0.001$ .

Figure 4.7 Relationship between observed and simulated values of LAI (a), stems weight (b), storage organs weight and (c) above ground dry matter (d). \*\*\* Significant at  $p < 0.001$ .

### 2.2.2 蒸散的校正验证

本研究利用禹城综合试验站大型蒸散仪的实验资料，对 WOFOST 模拟的蒸散进行了校正与验证。根据蒸散仪场地的实验布置，将播种时土壤含水量输入模型，根据蒸散仪灌水的记录资料，1999 和 2000 夏玉米生长季内均未灌水，因此直接用气象数据驱动模型，得到模拟蒸散仪场地实际生长条件下的蒸散量，并把它与蒸散仪实测的蒸散时进行比较。图 4.8 显示了模型模拟蒸散的校正与验证结果，即 1999 和 2000 年度模拟的夏玉米生长季实际蒸散与大型蒸散仪测定的作物实际蒸散的比较。

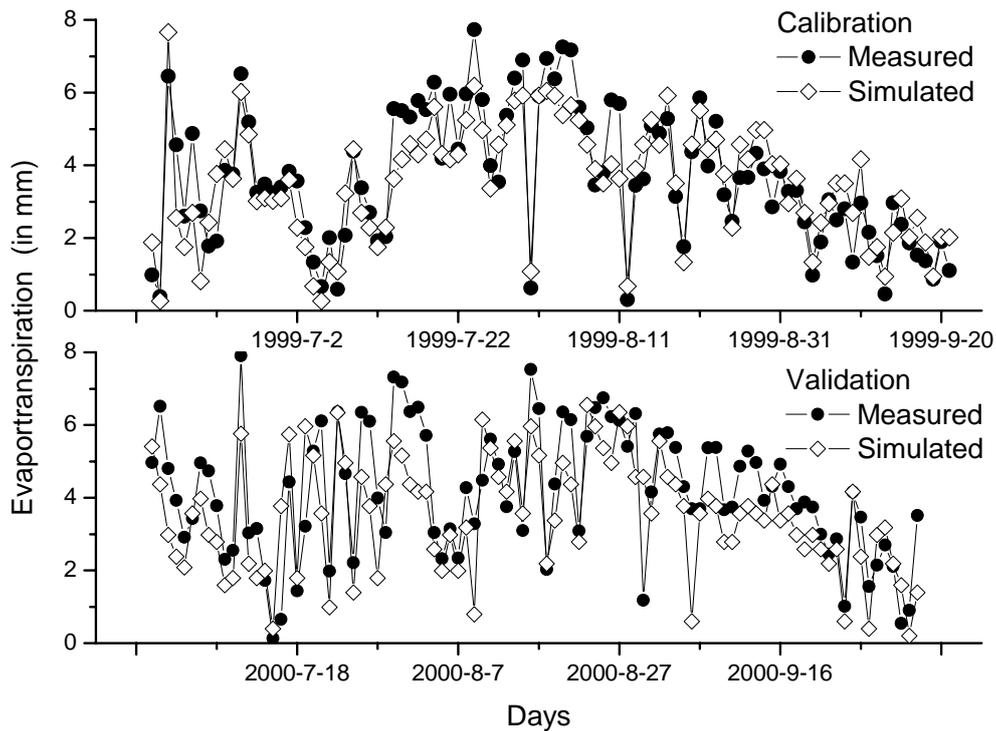


图 4.8 华北平原夏玉米生长季模拟蒸散与实测蒸散的比较(单位: mm)

Figure 4.8 Simulated and measured evapotranspiration in the NCP during summer maize growth season (in mm)

由此图可见,模型对夏玉米蒸散的模拟具有较高的精度,模型模拟和实测作物日蒸散量的变化过程非常一致,并很好地反映了夏玉米蒸散的日变化与月变化。在数值上比较日蒸散量,模型模拟结果与实测结果也具有很好的相关性(图 4.9)。该图中某些时间段,如 1999 年 7 月中旬与 2000 年 7 月底 8 月初,模拟值与实测值出现了较大的误差,究其原因,可能是该日发生了降水,而模型未能准确并及时地模拟降水条件下作物的蒸散量所致。

通过以上对 WOFOST 的各项模拟结果的验证和分析可以得出,由于华北平原地域的特殊性,如冬小麦生育期的干热风等,模型无法体现,因此,模拟值与实测值相比,误差的存在是肯定的,但总体来说,模型对叶面积指数、干物质积累和日蒸散量的模拟值和实测值吻合较好,WOFOST 模型还是能较好地模拟了华北平原冬小麦与夏玉米的生长,因此,将校正后的 WOFOST 模型用于华北平原冬小麦与夏玉米的生物量与蒸散的模拟研究是科学的、可信的。

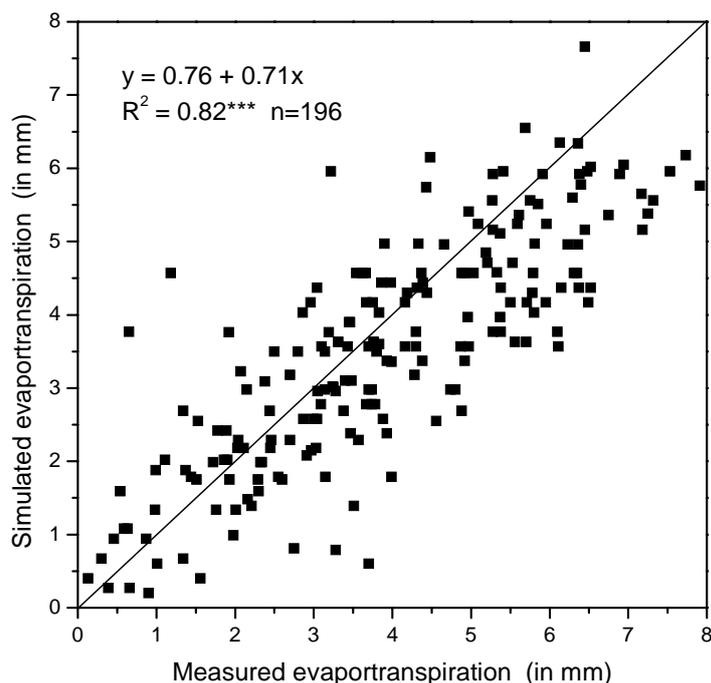


图 4.9 华北平原校正验证年夏玉米蒸散模拟值与蒸散值的比较

Figure 4.9 Simulated and measured evapotranspiration of summer maize in the NCP during its growth season.

#### 第四节 模型参数的敏感性分析

WOFOST 的参数分作物、气象、土壤三类，这里只对作物、气象进行分析。由于参数是一个统一的整体，每个参数起的作用都与其它参数密切相关。因此，敏感分析是以特定的一套参数为基础的，当采用另套参数时，结果有些区别，不过区别应该不大。本次分析利用禹城综合实验站的观测数据的“标准数据”为比较标准，每次改变其中一个，记录下改变量、模拟结果与标准结果的差距，从而得出该参数的敏感性。以 2001 年的模拟、实测结果进行比较，现将结果列出如下：

##### 4.1 作物参数敏感性分析

表 4.3 中数的含义分别是：

TDWI：初始总干物重；

SPAN：叶片在 35℃时的生命期；

KDIFTB：可见光的消散系数，是发育阶段的函数；

EFFTB：单叶片光能利用率，是平均温度的函数；

CVO：光合产物转化成贮存器官（穗）的转化效率；

- Q10: 温度变化 10℃ 时呼吸作用的相对变化;  
 PERDL: 受水分胁迫时叶片最大的死亡率;  
 CFET: 蒸腾速率的校正因子;  
 SLATB: 比叶面积, 是发育阶段的函数;  
 AMAXTB: CO<sub>2</sub> 的最大同化速率, 是发育阶段的函数。

表 4.3 WOFOST 参数敏感性分析 (作物参数)  
 Table 4.3 Sensitivity analysis of crop parameters of WOFOST model

参数	标准值	改变量		模拟结果变化率			
		绝对值	百分比	潜在产量 (ka/ha)	百分比	水分限制产 量(ka/ha)	百分比
标准模拟结果				8347	0	6235	0
TDWI	110.945	-20	-18.03	8215	-1.58	6422	3.00
		+20	18.03	8430	0.99	6073	-2.60
SPAN	31.8	-3	-9.43	7918	-5.14	6219	-0.26
		+3	9.43	8554	2.48	6241	0.10
KDIFTB	0.40	-0.04	-10.00	8404	0.68	6750	8.26
		+0.04	10.00	8221	-1.51	5762	-7.59
EFFTB	0.47	-0.05	-10.64	7284	-12.74	5877	-5.74
		+0.05	10.64	9284	11.23	6497	4.20
CVO	0.72	-0.02	-2.78	8170	-2.12	6106	-2.07
		+0.02	2.78	8523	2.11	6362	2.04
Q10	2.1	-0.2	-9.52	8240	-1.28	6187	-0.77
		+0.2	9.52	8440	1.11	6281	0.74
PERDL	0.04	-0.01	-25.00	8347	0.00	6202	-0.53
		+0.01	25.00	8347	0.00	6268	0.53
CFET	1.7	-0.2	-11.76	8347	0.00	7288	16.89
		+0.2	11.76	8347	0.00	5291	-15.14
SLATB	0.00212	-0.0002	-9.43	7576	-9.24	6438	3.26
		+0.0002	9.43	8775	5.13	5843	-6.29
AMAXTB B	40	-4	-10.00	7897	-5.39	6151	-1.35
		+4	10.00	8711	4.36	6300	1.04

从表 4.3 可以看出, 有些参数对产量有至关重要的影响, 产量变化的速率甚至远超参数本身的变化速率, 因此, 在确定此类参数时必须非常小心, 应当在确切的实验资料的基础上计算此类参数。这些参数包括 EFFTB、CFET、SLATB、KDIFTB 等等。

另外, 由于不方便列表分析比较, 有比较多的与发育阶段有关的实际上作了敏感分析的函数, 如干物质分配系数等没有列入比较。

## 4.2 气象要素对模拟结果的敏感性

以上是作物参数的敏感性分析, 气象参数中, 从时间变化上来看, 只有辐射

与积温的年变化不大，降水量的年变化则相当可观；从空间上来看，辐射、积温与降水的区域差异都较大，因此有必要了解模型对于输入的气象要素的敏感性。气象数据的敏感分析是指在原来每日气象数据的基础上，每日增加或减少一些百分比，比较模拟结果，得出模型对此参数的敏感性。根据 WOFOST 要求的气象参数，分析了气象参数中的太阳辐射、早八点水汽压、降雨量、2 m 高风速，以及温度。由于温度起主要作用的是平均温度，因此对程序所要求的最高、最低气温同时作删减，以达到对平均温度进行删减的目的。对于零下温度的处理是这样的：在减 10% 时，零上的温度乘以 0.9，零下温度乘以 1.1。因为零下温度也乘以 0.9 的话，实际上是升高了温度；在加 10% 时，零上温度乘以 1.1，零下温度乘以 0.9，道理同上。

表 4.4 WOFOST 参数敏感性分析（气象要素）

Table 4.4 Sensitivity analysis of WOFOST model to meteorological data inputs

参数	改变量 (%)	潜在产量 (kg/ha)	模拟结果变化率		
			%	水分限制产量 (kg/ha)	%
标准值	0	8347	0.00	6235	0.00
太阳辐射	-10	6948	-16.76	6682	7.17
	+10	8817	5.63	6112	-1.97
最高、最低气温	-10	8795	5.37	5353	-14.15
	+10	7287	-12.70	6604	5.92
早八点水汽压	-10	8347	0.00	6235	0.00
	+10	8347	0.00	6235	0.00
降雨量	-10	8347	0.00	5842	-6.30
	+10	8347	0.00	6502	4.28
2m 高风速	-10	8347	0.00	6235	0.00
	+10	8347	0.00	6235	0.00

由表 4.4 可见，气象变化对产量的影响较大，温度、太阳辐射、最高最低气温对潜在生长产量和水分限制生长产量有显著的影响。温度降低产量却上升是可以理解的。温度降低了，生育期延长，作物的灌浆期也延长，不象原来那样高温催熟，产量也就上去了。早八点水汽压、降雨量对水分限制产量有较大影响。2 m 高风速与蒸发、蒸腾有关，从而也影响水分限制产量，只是可能改变的幅度小，没有反应到产量的变化上来。

### 第五节 本章小结

模型的实验验证工作是本研究的重要组成部分，它的结果好坏，直接关系到对模拟的正确评价，影响到模型在区域研究的结果。同时模型是否能够得到正确的验证结果涉及到试验场地的条件、试验观测仪器设备和获得的数据质量。本章节较为详细地介绍了作为场所实验验证的场所-中国科学院禹城综合试验站的条

件和代表性，试验站位于研究区域-华北平原的中部，在区域生态环境条件上具有代表性。

本章介绍了 WOFOST 模型的校正过程和验证结果。通过本章研究，得出如下初步结论：（1）在具备合适的参数和模型所必需的输入数据的情况下，模型可以模拟作物的叶面积指数、干物质积累过程、蒸散量等作物生长过程中的主要要素。（2）WOFOST 模型对叶面积指数、干物质积累和产量的模拟虽有一定的差异，但总体来看，模拟结果能良好地反映冬小麦与夏玉米的生长过程。（3）通过参数敏感性分析，确定了一些如 EFFTb、CFET、SLATb、KDIFTb 等等对模拟结果影响最重大的参数。

综上所述，WOFOST 模型在研究地区的模拟结果基本可靠，可以用来做进一步的研究和利用。

## 第五章 产量模拟

### 第一节 气象数据的整理

在华北平原区域上, 选择了 32 个气象站, 利用这些气象站 1961-2000 年共 40 年逐日的气象数据, 用 WOFOST 模型模拟了这些站点冬小麦与夏玉米的潜在产量与雨养产量。申请到的气象数据是文本格式, 包括最高最低温度、日照时数、风速、水汽压和降雨量。由于这些文件是气象数据的默认格式, 因此需要整理成模型需要的格式。这些数据的整理在 Excel 中, 通过录制与编写宏来完成。

#### 1.1 最高最低温度、风速、水汽压和降雨量的整理

这些气象要素的单位是 0.1 ( $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{m s}^{-1}$ 、 $\text{mm}$  等等), 因此只需将原始数据除以 10, 并将文本格式转置成 WOFOST 需要的格式即可。原始气象数据中有些站点个别年份个别日期有缺失的, 用上下两天的平均值代替。在对降水量的处理中, 微量降水(TXT 文件中数值为 32700)视为无降水, 缺测(TXT 文件中数值为 32766)日期视为无降水, 雾、露、霜(TXT 文件中数值为 32xxx)因对作物生长影响可以忽略, 因此均不计入降水量。雪和雨夹雪(TXT 文件中数值分别为 31xxx 和 30xxx)按 10 mm 厚雪等于 1 mm 降水量的标准折算成降水量。

#### 1.2 日照时数的整理

模型中的需要要求的是辐射值, 因此需要把原始气象文件中的日照时数转换成辐射值。可供选择的转换公式较多, 本文采用的公式是埃期屈朗方程(杨守春等, 1990):

$$R_l = R_A(a_A + b_A \cdot nN^{-1})$$

式中,  $R_l$ : 实际接收的辐射 (焦耳/米<sup>2</sup>·日)

$R_A$ : 为 Angot 值, 或假定没有大气时到达地面的辐射理论值(焦耳/米<sup>2</sup>·日)

$A$ : 经验系数 [-]

$B$  : 经验系数 [-]

$n$ : 每日日照时数 [小时]

$D$ : 晴天时每天最长日照时数 [小时]

$R_A$  值与一年中不同日期和纬度呈函数关系, 一般可从现成的表中查到。本文中采用的值见表 5.1。

表 5.1 各个站点不同月份采用的  $R_A$  值Table 5.1 Monthly values of  $R_A$  in 32 stations

站点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
唐山	1.480	2.087	2.875	3.383	3.941	4.149	4.049	3.565	2.835	2.286	1.639	1.338
乐亭	1.495	2.100	2.878	3.385	3.942	4.148	4.049	3.569	2.838	2.290	1.654	1.343
保定	1.530	2.130	2.886	3.390	3.943	4.147	4.048	3.578	2.846	2.301	1.688	1.356
黄骅	1.559	2.155	2.893	3.395	3.945	4.145	4.047	3.586	2.853	2.309	1.716	1.367
石家庄	1.580	2.172	2.898	3.398	3.946	4.144	4.046	3.592	2.858	2.315	1.736	1.375
南宫	1.620	2.207	2.907	3.404	3.948	4.142	4.045	3.602	2.867	2.327	1.775	1.390
邢台	1.639	2.222	2.911	3.406	3.949	4.141	4.044	3.607	2.871	2.333	1.793	1.397
坝县	1.514	2.116	2.882	3.388	3.943	4.147	4.048	3.574	2.842	2.296	1.672	1.350
沧州	1.562	2.157	2.893	3.395	3.945	4.145	4.047	3.587	2.853	2.310	1.719	1.368
北京	1.464	2.074	2.871	3.381	3.940	4.150	4.050	3.561	2.831	2.281	1.624	1.332
天津	1.515	2.117	2.883	3.388	3.943	4.147	4.048	3.574	2.843	2.296	1.673	1.351
德州	1.617	2.204	2.906	3.403	3.948	4.142	4.045	3.601	2.866	2.326	1.772	1.389
惠民	1.613	2.200	2.905	3.403	3.948	4.143	4.045	3.600	2.865	2.325	1.768	1.388
济南	1.663	2.243	2.916	3.410	3.950	4.140	4.043	3.613	2.876	2.340	1.816	1.406
菏泽	1.750	2.317	2.937	3.423	3.954	4.136	4.041	3.636	2.897	2.366	1.900	1.439
兖州	1.730	2.300	2.932	3.420	3.953	4.137	4.041	3.631	2.892	2.360	1.881	1.432
朝城	1.702	2.276	2.926	3.416	3.952	4.138	4.042	3.624	2.886	2.351	1.854	1.421
淄博	1.653	2.235	2.914	3.409	3.950	4.140	4.044	3.611	2.874	2.337	1.807	1.403
羊沟角	1.627	2.212	2.908	3.405	3.948	4.142	4.045	3.604	2.868	2.329	1.781	1.393
安阳	1.697	2.272	2.924	3.415	3.952	4.138	4.042	3.622	2.884	2.350	1.850	1.419
新乡	1.745	2.313	2.936	3.422	3.954	4.136	4.041	3.635	2.896	2.364	1.896	1.438
商丘	1.799	2.359	2.948	3.430	3.957	4.133	4.039	3.649	2.908	2.380	1.947	1.458
许昌	1.825	2.381	2.954	3.434	3.958	4.132	4.038	3.656	2.914	2.388	1.973	1.468
郑州	1.782	2.345	2.944	3.428	3.956	4.134	4.039	3.644	2.904	2.375	1.932	1.451
西华	1.839	2.393	2.957	3.436	3.959	4.131	4.038	3.660	2.917	2.392	1.987	1.473
赣榆	1.775	2.339	2.942	3.427	3.956	4.134	4.040	3.643	2.902	2.373	1.925	1.449
徐州	1.809	2.367	2.950	3.431	3.957	4.133	4.039	3.652	2.910	2.383	1.957	1.462
淮阴	1.850	2.403	2.960	3.438	3.959	4.131	4.037	3.662	2.920	2.395	1.998	1.477
亳州	1.834	2.389	2.956	3.435	3.958	4.132	4.038	3.658	2.916	2.390	1.982	1.471
宿县	1.849	2.401	2.959	3.437	3.959	4.131	4.037	3.662	2.919	2.395	1.996	1.477
阜阳	1.892	2.438	2.969	3.444	3.961	4.129	4.036	3.673	2.929	2.407	2.038	1.493
寿县	1.907	2.451	2.972	3.446	3.962	4.128	4.035	3.677	2.932	2.412	2.052	1.498

$n$  和  $N^l$ : 实际日期时数  $n$  与晴天时每天的最长日照时数( $N$ )的, 两者的单位均为小时。大多数气象站都记录实际日照时数, 而最长日照时数也可从现成的表

中查出。

本文采用的最长日照时数见表 5.2。

表 5.2 各个站点每月最大的日照时数 单位：小时

Table 5.2 Monthly longest sunshine hours in 32 stations (in hours)

站点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
唐山	9.3	10.4	11.5	12.7	13.5	13.9	14.0	13.2	12.6	11.1	9.7	9.0
乐亭	9.2	10.4	11.4	12.4	13.6	13.8	13.8	13.2	12.3	11.1	10.0	9.1
保定	9.2	10.8	11.2	12.5	13.0	13.6	12.9	12.5	11.8	10.4	10.1	9.1
黄骅	9.5	10.3	10.5	12.3	13	13.6	13.4	12.9	12.1	11.2	9.9	9.0
石家庄	9.5	10.0	11.7	12.4	13.3	13.3	13.5	12.8	12.4	10.3	9.9	8.5
南宫	9.6	10.2	11.8	12.6	13.2	13.2	12.7	13.0	12.0	11.1	9.5	8.8
邢台	9.0	10.0	11.4	12.7	13.7	13.7	13.6	13.0	11.5	10.5	9.2	8.4
坝县	8.4	9.8	11.4	12.5	12.9	13.5	12.9	12.7	12.5	10.8	9.5	9.0
沧州	9.4	10.5	12.2	13.0	13.4	13.8	13.9	13.1	12.3	10.7	9.6	9.2
北京	9.3	10.6	11.9	12.9	14.1	14.2	14.2	13.4	12.4	11.1	9.9	8.8
天津	9.3	10.6	11.5	13.4	13.9	14.4	14.1	13.2	12.1	11.3	10.2	9.0
德州	9.3	9.8	11.0	12.2	12.7	13.0	13.4	12.5	11.8	10.4	9.7	8.5
惠民	9.2	10.2	10.6	11.9	12.9	13.0	12.2	12.1	11.4	10.6	9.5	9.3
济南	9.1	10.4	11.2	12.5	13.3	13.6	13.0	12.4	11.9	10.8	9.8	8.8
菏泽	9.1	10.3	11.2	12.2	13.1	13.7	13.1	12.4	12.1	10.4	10.1	9.1
兖州	9.1	10.5	11.1	12.0	13.7	14.0	13.5	13.0	11.8	11.0	9.6	9.2
朝城	8.8	9.7	11.4	12.2	13.1	13.2	11.8	12.3	11.8	10.5	9.2	8.9
淄博	9.1	10.0	11.1	12.5	12.5	12.9	12.8	12.0	11.6	10.5	10.0	8.9
羊沟角	9.1	9.9	11.1	12.2	12.9	13.2	13.3	12.6	11.5	10.7	9.2	8.9
安阳	9.1	9.8	11.1	12.7	12.8	13.1	12.2	12.2	11.3	10.4	9.6	9.1
新乡	9.2	10.1	11.0	11.7	12.5	13.1	12.5	12.2	11.5	10.2	9.2	8.5
商丘	9.4	10.2	11.2	12.6	12.8	13.6	12.8	12.5	11.9	10.7	9.5	9.1
许昌	9.9	10.2	10.9	12.5	13.2	13.5	13.5	12.8	11.8	10.6	9.8	9.2
郑州	9.2	10.2	11.2	12.2	12.9	13.1	12.4	11.9	11.4	10.7	9.6	8.9
西华	9.3	10.0	11.3	12.0	12.9	13.1	13.5	12.3	11.4	10.3	9.7	9.4
赣榆	9.7	10.5	11.5	12.5	13.1	13.1	13.1	12.8	12.2	10.8	9.9	9.3
徐州	9.5	10.4	11.2	12.0	13.2	13.1	12.8	11.9	11.4	10.7	10.2	9.4
淮阴	9.0	9.6	10.7	12.0	12.8	12.9	13.1	11.9	11.4	11.3	10.0	9.1
亳州	9.5	10.3	11.3	12.3	13.2	13.2	12.9	12.3	11.9	10.8	9.8	9.2
宿县	9.2	10.3	11.0	12.4	12.6	12.8	12.9	12.2	11.4	10.6	9.8	9.1
阜阳	9.6	10.2	11.3	12.3	13.1	13.2	13.3	12.1	11.7	10.9	10.0	9.1
寿县	9.5	10.1	11.5	12.6	13.0	13.1	13.2	12.8	11.6	10.7	10.0	9.2

$a_A$  和  $b_B$ : 经验常数。这两个经验常数的取值决定于地理位置或纬度。

Supit(1994)确定了欧洲一些地区的埃斯屈朗系数。表 5.3 提供了一些表征值 (Frere 和 Popov, 1979)。

表 5.3 粮农组织采用的埃斯屈朗系数的表征值

Table 5.3 Values of  $a_A$  and  $b_B$  used by FAO

	$A$	$B$
寒带和温带地区	0.18	0.55
干旱的热带地区	0.25	0.45
湿润的热带地区	0.29	0.42

本文中采用的值是  $a_A=0.18$ 、 $b_B=0.55$ 。

将这些参数的取值代入公式，这样就得到了这些站点逐日的辐射数据。

图 5.1 是利用 1998 和 1999 年观测的辐射数据与通过日照时数用本公式计算得到的辐射的关系图。由此可见，该公式很好反映了禹城站的时数与辐射之间的关系，证明了该公式在华北平原具有很好的适用性。

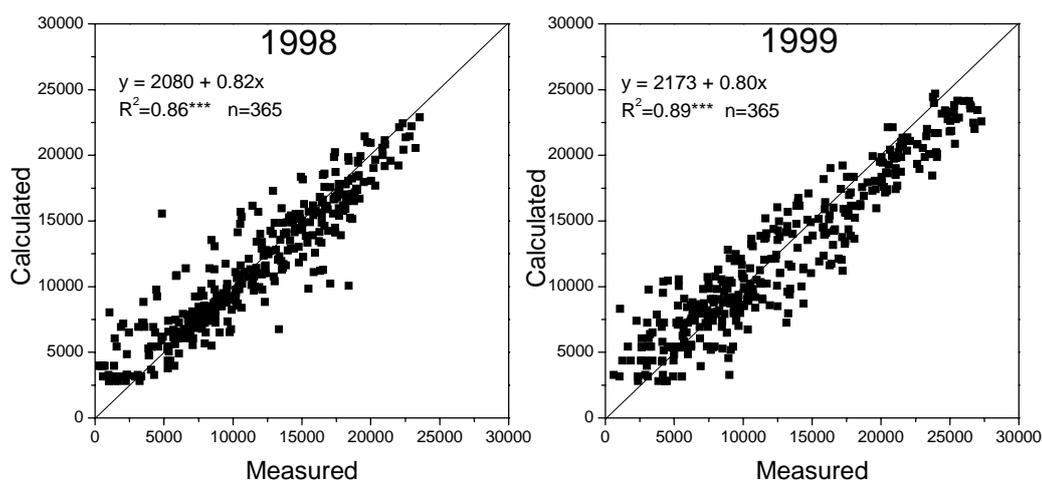


图 5.1 禹城综合实验站计算和观测到的辐射的比较 (单位:  $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

Figure 5.1 Measured and estimated solar radiation ( $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) in YCES

## 第二节 华北平原冬小麦生长季的气候资源

作物产量在不同层次上受制于环境要素，因此，Rabbinge (1993)提出潜在产量与可获得产量的概念。对于潜在产量来说，它就是作物的生长仅受制于气象要素(作物生长决定因子，如太阳辐射和温度)时得到的产量。当考虑土壤条件、水

分状况和养分条件(作物生长限制因子)时,此时的产量就是可获得产量。最后,当把“作物生长减少因子”如病虫害和杂草的影响等等考虑进来时,得到的产量就是实际产量。潜在产量与可获得产量之间的差有着很重要的实际意义。这是因为作物生长决定因子不可控,因此潜在产量实际上是不受人控制的,但人类可通过各项管理措施,改善作物生长限制因子,提高可获得产量。因此,潜在产量与可获得产量之间的差在农学上有很强的现实意义。在过去的几十年中,各项管理措施已经得到极大的提高,潜在产量与可获得产量的差越来越小。

各气象因子在光合作用过程中有以下作用(于强,王天铎,1998): (1)光照 光照的影响可以分为生理和能量两部分,作为原初反应的动力,推动光合生化反应;作为叶片能量的主要来源,决定叶温,从而影响叶的饱和水汽压。(2)温度 空气温度在一定程度上影响叶温水平,决定了光合作用的生化反应速度和饱和水汽压差。光合作用随温度的变化是一 Arrhenus 型的曲线。(3)湿度 空气的实际水汽压起直接作用。通过决定叶片与空气之间的饱和水汽压差,从而影响蒸腾和叶片失水、气孔张缩以至于影响  $\text{CO}_2$  和水汽的进出。(4)风 控制边界层导度改变叶面与环境的  $\text{CO}_2$  浓度和水汽压差,影响叶片的实际水汽和  $\text{CO}_2$  环境。(5) $\text{CO}_2$  浓度 通过影响叶肉细胞间隙的  $\text{CO}_2$  浓度,影响光合作用。因光合作用与气孔导度的相关,从而影响气孔导度,以至于蒸腾作用。

下面对华北平原冬小麦生长季的光温水等气候资源的总量及其变异进行具体的描述(图 5.2)。其中,光温水等气候资源的总量是基于 1961~2000 年的平均,其变异也基于这个时间段计算。冬小麦生长季在此定义为整个华北平原冬小麦生长的季节,即头年 10 月 1 日到次年 6 月 1 日。辐射与降水量为简单累加,积温是零度以上积温。

## 2.1 辐射

华北平原的冬小麦生长季内,辐射总量变化在  $2500\sim 3000 \text{ MJ m}^{-2}$  之间,基本上是北方比南方高,沿海比内陆高。这是由于高纬地区云量较少,在冬小麦生长季内的日照时数较长所致。辐射总量的变化幅度很小,变异系数仅为 3.5~7.7 之间,整个平原的平均变异系数为 5.1。在整个区域内,除石家庄、安阳、商丘三个地方辐射的变异系数偏大外,其它地方之间的变异系数差异都很小。

## 2.2 温度

积温总量的变化趋势与辐射的相反,呈南高北低的趋势,总体变化在  $1730 \text{ }^\circ\text{C d}$  到  $2710 \text{ }^\circ\text{C d}$  之间。积温总量的年际变异系数在 3.8 到 6.5 之间,在平原北部和西北部比较大,南部的变异很小,整个平原的平均变异系数为 4.8。平原北部和西北部比较大的原因可能是受太行山的影响,因为华北平原的北部与西北面是以太行山为边界的。

### 2.3 降水

变化幅度最大的就是降水量，整个平原各站点冬小麦生育期内的降水量变化在 100 到 340 mm 之间，呈北低南高的趋势。其中，平原北部大部地区的降水量很低，维持在 100~120 mm 之间，过了平原中部沿黄河一线后，降水量迅速增加，直至最南边的 340 mm。降水量的年际变化在 27~55 之间，整个平原的平均变异系数为 38.6，变化趋势与积温相仿，也是山前平原变化幅度大，广阔的平原地区变化幅度小，这是由于太行山山前平原地形雨影响的结果。

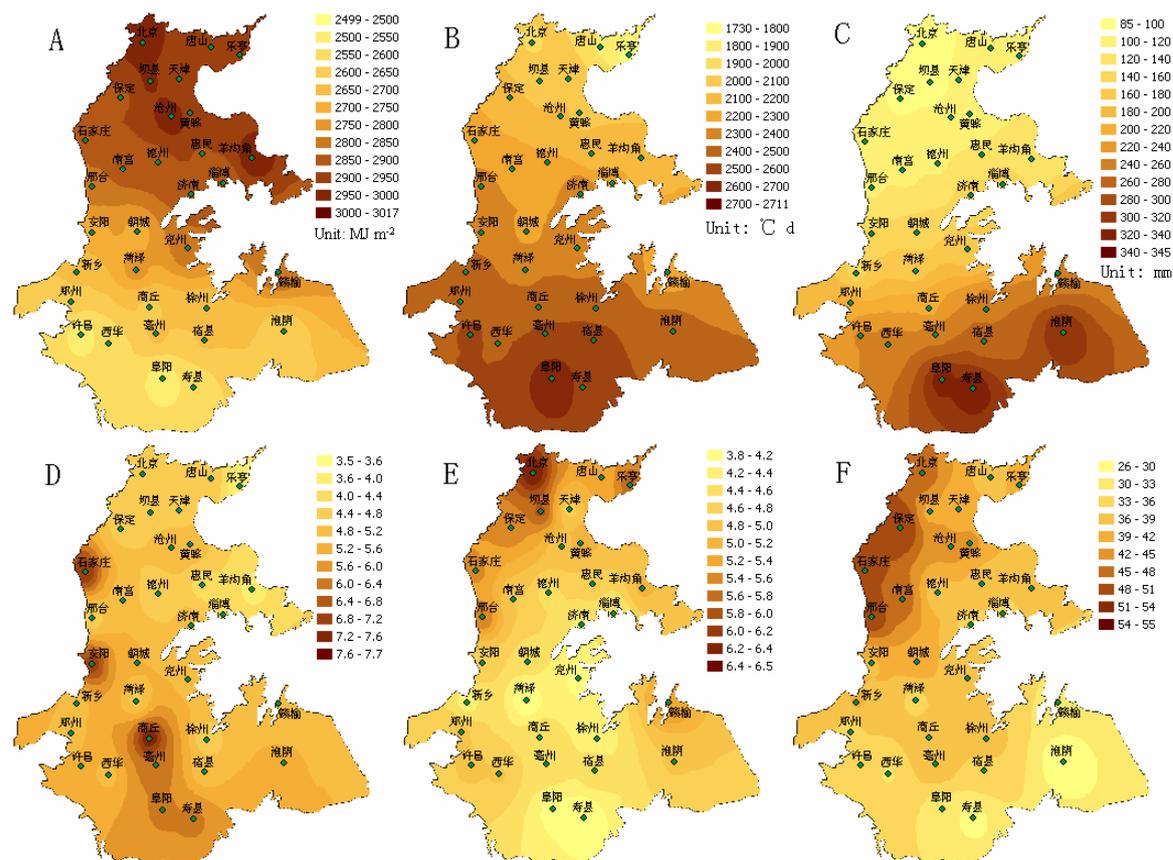


图 5.2 华北平原冬小麦生长季内的(A)辐射总量、(B)积温、(C)降水量。D、E 和 F 分别是它们基于 1961-2000 年计算的变异系数(单位：百分比)

Figure 5.2 (A) Global radiation, (B) accumulated temperature and (C) rainfall in the winter wheat growing season of the NCP. D, E and F indicate the coefficient of variations in global radiation, accumulated radiation and rainfall, respectively (unit: percent).

### 第三节 冬小麦生长的模拟

在第四章用实验数据对 WOFOST 模型进行校正与验证后，将之用于华北平原 32 个气象站点 1961-2000 年冬小麦的潜在产量与雨养产量的模拟。

### 3.1 数据准备

**土壤数据:** 华北平原分布最广泛的土壤类型是沙壤土(Wang et al., 2001)。本研究用沙壤土作典型的土壤类型,通过禹城站的采样测量得到模型所需要的各类土壤参数,如田间持水量、枯萎系数、饱和导水率等等(表 5.4)。在对土壤属性测量的过程中,从 0-150 cm 把土壤分成 6 层,对这 6 层分别进行测定。由于 WOFOST 模型假定土壤是性质均一的土层,观测所得的数据以每层的厚度为权重进行加权平均。另外,在模拟时,整个区域的地下水位都设定为 10 m, 止水位约为整个华北平原平均的地下水水位。

**作物数据:** 模拟中设定整个区域采用的作物品种为校正验证时的品种,即济宁 142。播种日期依当地耕作习惯设定,从南到北大致在 10 月 5 号到 11 月 10 号之间。

**GIS:** 本研究利用地理信息系统来对模拟结果进行分析。首先建立一个数据库,用以衔接模型输出与地理信息系统,这个数据库包括模型输出和统计出的气象要素,主要包括以下内容:潜在产量与雨养产量和生育期内的辐射总量、降水量、零度以上积温,以及这些量的变异系数。通过这个数据库,这些站点的值可被GIS系统以可观的精度内插到整个区域,生成这些变量在整个区域内的分布图。内插方法采用反距离权重法(IDW: Inverse Distance Weighting)。该方法认为与未采样点距离最近的若干个点对未采样点值的贡献最大,其贡献与距离成反比(Fisher et al., 1987)。与其它插值方法相比,在产生表面专题图时,反距离权重插值法运行更快。对反距离权重插值法产生的图划分等值线,形成了我们需要的最终的图件。

在把作物模型应用到区域问题的研究的时候,一般有两种方法可采用:一是先模拟后内插到所有栅格(Calculate first, Interpolate later: CI),二是先内插到所有栅格,后逐栅格地进行模拟(Interpolate first, Calculate later: IC)。Stein et al. (1991)和 Bechini et al. (2000)的研究结果表明 CI 方法的模拟值与观测值的误差比 IC 方法的小,尽管 IC 方法看起来具有更强的理论基础,这可能是因为 IC 方法对多个参数(如各个气象要素等等)进行了内插,从而引入了更大的误差,而 CI 方法只用对最终模拟结果进行内插(如模型输出的产量及其它感兴趣的输出要素等等)。本研究采用的是 CI 的方法。

表 5.4 禹城综合实验站土壤的属性\*

Table 5.4 Soil properties of the experimental site at YCES\*.

Soil textural class	Wilting point	Saturation	Field capacity	Bulk density	Organic matter	Total nitrogen	Total phosphor	Total potassium	pH
	v/v	v/v	v/v	g/cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	
Sandy loam	0.11	0.36	0.30	1.376	1.25	0.069	1.21	14.68	8.44

\* 通过采样观测得到

## 3.2 模拟结果

### 3.2.1 模拟产量的空间分布

图 5.3 是模拟的冬小麦的潜在产量与雨养产量的图。

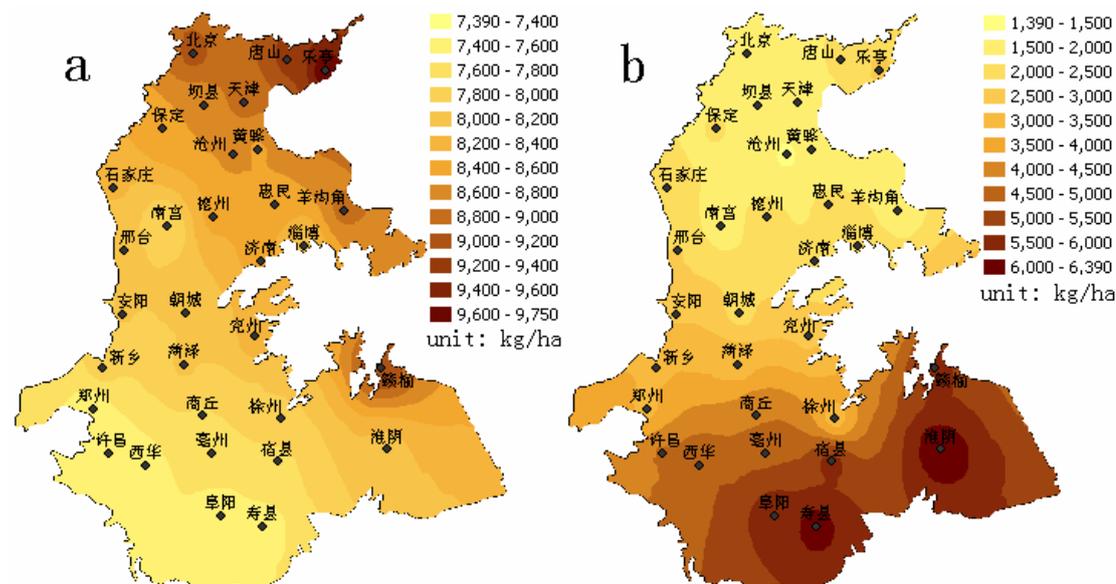


图 5.3 华北平原冬小麦的模拟的潜在产量(a)与雨养产量(b)(1961~2000 年的平均值, 单位: 公斤/公顷)

Figure 5. 3 On the left hand side the simulated potential yields of winter wheat, and on the right hand side the winter wheat yields under water-limited conditions in the NCP (averaged from 1961 to 2000, in  $\text{kg ha}^{-1}$ ).

华北平原冬小麦的潜在产量变化在  $7390 \sim 9750 \text{ kg ha}^{-1}$  之间, 平均值为  $8240 \text{ kg ha}^{-1}$ 。由于从北到南辐射冬小麦生育期内辐射值渐减平均温度上升, 因此模拟的潜在产量从北到南逐渐降低, 基本呈纬向分布, 但因受渤海、黄海及太行山的影响, 等值线略有偏斜, 即同纬度下, 东部的潜在产量比西部的要高。

雨养产量在  $1390$  到  $6390 \text{ kg ha}^{-1}$  之间, 平均值为  $3200 \text{ kg ha}^{-1}$ 。雨养产量从北到南递增, 因为降水量由北向南递增。平原中部的雨养产量特别低, 因为冬小麦生育期内, 中间的降水最低。平原南部降水量多的站点如阜阳等, 雨养产量一般在  $6000 \text{ kg ha}^{-1}$  以上。

冬小麦潜在产量与雨养产量之差变化在  $1170 \text{ kg ha}^{-1}$  到  $7350 \text{ kg ha}^{-1}$  之间, 呈北高南低的趋势, 整个区域的平均值为  $5040 \text{ kg ha}^{-1}$  (图 5.4)。这个产量差具有很强的现实意义, 它表明了由于水分亏缺导致的冬小麦的减产, 换句话说就是这个产量差代表了该地水分的增产潜力, 同时也代表了该地受水分亏缺影响的严重程

度。通过改善水分的供给,提高水分利用效率及改良作物的品种可以缩小这个差。沧州、黄骅一带具有很高的水分增产潜力,高达  $6000 \text{ kg ha}^{-1}$  以上,几乎达到潜在产量的  $3/4$  以上,因此,华北平原北部是非常易受干旱胁迫的地区,具有很大的水分增产潜力,提高平原北部水分的供给能获得很高的经济效益。与平原北部相比,平原南部如阜阳和寿县等地,潜在产量与雨养产量之差比较小,仅为  $1500 \text{ kg ha}^{-1}$  左右,相当于潜在产量的不到  $1/5$ ,因此除个别非常干旱的年份外。该地水分起的限制作用不大。本文的这些模拟结果与其它同类研究具有可比性,与莫兴国(2004)报道得类似。

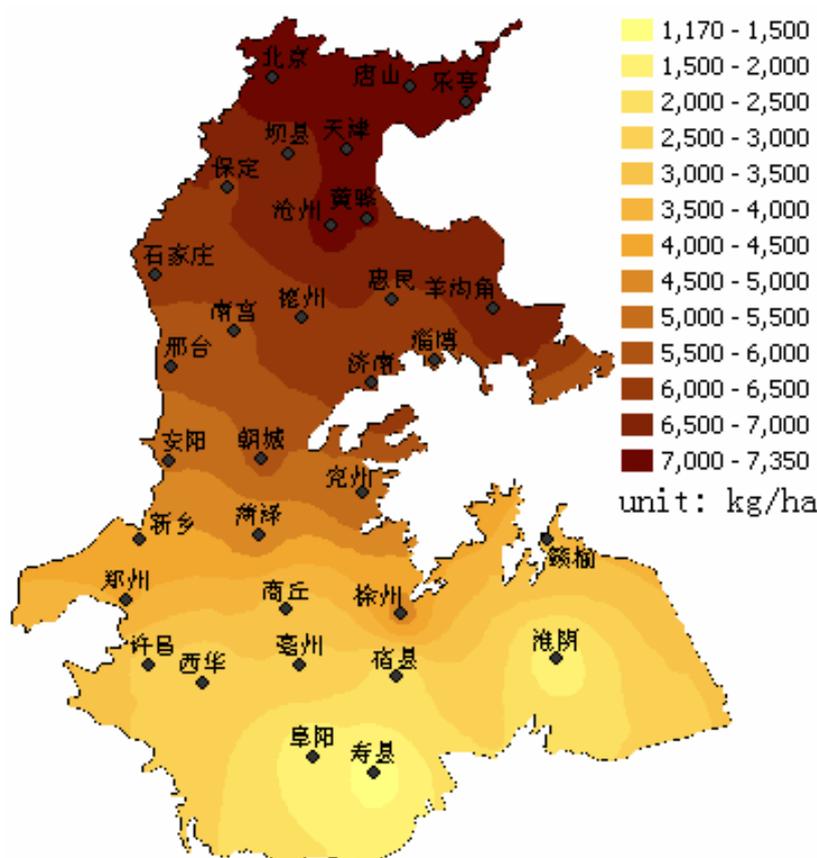


图 5.4 华北平原冬小麦潜在产量与雨养产量之差(单位: 公斤/公顷)

Figure 5.4 Yield gaps between potential and water-limited yields in the NCP (in  $\text{kg ha}^{-1}$ ).

### 3.2.2 模拟产量的时间分布

在潜在生长的条件下,潜在产量的变异只与辐射与积温的变异及它们的配合有关,而在雨养生长的条件下,雨养产量的变异还与降水量的变异及它们的配合有关。在此我们分析了这两种生长状况下冬小麦的产量与气象因子波动之间的关系。在对 40 年气象资料分析的基础上,对六个代表性站点冬小麦潜在产量与雨养产量的情况进行了详细分析,这些站点大致沿纬度平均地分布到从北到南的纵

线上，从北到南它们分别是：北京、黄骅、德州、菏泽、亳州和阜阳。

图 5.5 是这六个站点潜在产量与雨养产量的累积概率图。从图中可见，这些站点潜在产量的累积概率趋势一致，呈平行的分布，这表明辐射与积温的变异在华北平原上比较平均，它们的变异未导致潜在产量的显著变化。而雨养产量则相反，图 5.5 表明潜在产量变化在  $5.8$  到  $11.0 \text{ t ha}^{-1}$  之间，变化幅度为  $5.2 \text{ t ha}^{-1}$ ，而雨养产量则变化在  $1.0$  到  $9.0 \text{ t ha}^{-1}$  之间，变化幅度为  $8 \text{ t ha}^{-1}$ ，雨养产量的变化幅度明显比潜在产量的变化幅度大。因此，在华北平原，辐射与积温的变异只导致了潜在产量的微小变异而降水量的变异导致了雨养产量的大幅变化。而雨养产量各站点累积概率曲线不同的趋势表明不同站点有不同的降水量的变异，且降水量的变异对雨养产量的影响程度各不相同。

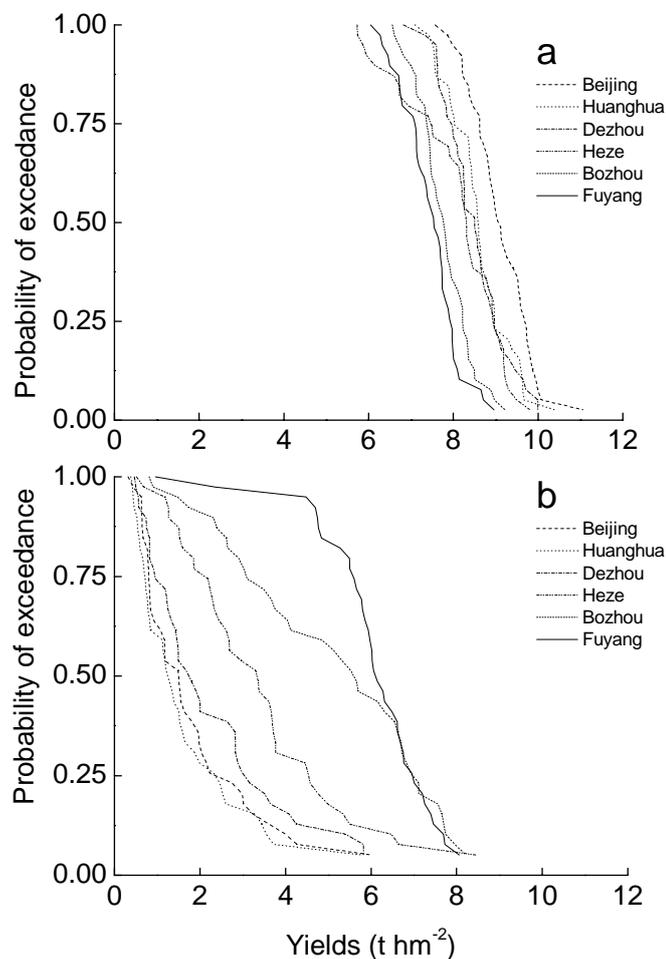


图 5.5 六个代表性站点冬小麦潜在产量(A)与雨养产量(B)的累积概率图

Figure 5.5 Cumulative distribution of (a) potential yield and (b) water-limited yield of winter wheat for six locations in the NCP.

在平原北部，如北京，雨养产量的变化范围很广，曲线呈下凹趋势，这表明北京等站点冬小麦的生长经常受到严重的水分胁迫，雨养产量一直被限制在比较低的水平，只有在不太常见的年份里雨养产量才略微比较大，但雨养产量达到最大值时，也不及潜在产量的  $2/3$ 。平原中部的站点如菏泽等的累积概率曲线以近

似直线的形式下降，这表明菏泽受水分胁迫的程度大致均等地分布，也就是说，从严重胁迫到轻微或不胁迫之间的概率呈大致均匀的分配。在降水量变异系数相同的情况下，由于平原北、中部各站点冬小麦生育期内多年平均降水量普遍比较小，因此更容易受到水分胁迫的危害，而且由于极端干旱出现的概率比较大，因此平原北、中部冬小麦的生长受到严重水分胁迫危害的可能性极大，其中尤以平原北部为甚。

平原南部如阜阳等站点雨养产量的累积概率曲线表明这些站点只是在极少的年份里才会受到较为严重的水分胁迫的危害，如图 5.5 中阜阳雨养产量的那个最低点，在大部分的年份里，它的雨养产量一直维持在一个比较高的水平。实际上比较图 5.5 中的 a 与 b 可以发现，在很多年份中，雨养产量已经等于或很接近潜在产量，因此阜阳等地的雨养产量与其说受制于降水量还不如说受制于潜在产量，也就是说，受制于辐射与温度的配合。

从图 5.5(b) 中可见，6 个站点雨养产量的最低值相近，都处于不到 1 t/ha 的水平，由此可知，整个华北平原，在极端干旱情况下，各地的雨养产量并无显著差异。差异比较大的是，在平原北部，这些极端干旱的情况出现的概率比较大，而在南方出现得比较少。这就提醒我们，平原南部冬小麦的生长虽然降水量比较有保证，但仍有在某些年份受旱而严重减产的可能，因此，建设并维护一定的灌溉设施仍是非常必要的。

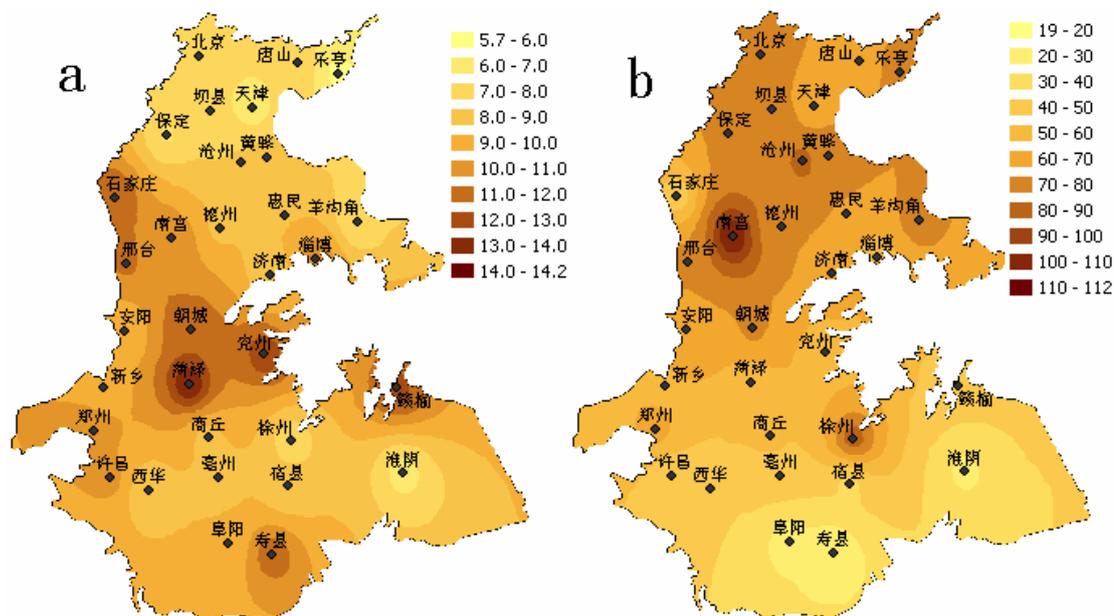


图 5.6 潜在产量(左)和雨养产量(右)的变异系数(单位: 百分比)。通过计算各站点 1961-2000 年潜在产量的雨养产量的变异, 再经过内插得到。

Figure 5.6 On the left hand side, the coefficient of variation of potential winter wheat yields, and on the right hand side the coefficient of variation of water-limited winter wheat yields in the NCP (in percent).

从整个区域上看,模拟的潜在产量远比雨养产量稳定(图 5.6)。这是因为潜在产量仅由辐射与温度的配合决定,雨养产量则加上了降水量,而降水量的变异远比辐射与积温的大。华北平原各站点这四十年来辐射、积温、降水量的平均变异系数分别为 5.1、4.8 和 38.6,由此可见,降水量的变异系数比辐射与积温高了一个数量级,这是导致雨养产量变异系数大的主要原因。

华北平原整个区域上,潜在产量的变异系数在 5.7 到 14.2 之间,平均变异系数为 9.17,雨养产量的变异系数在 19 到 112 之间,平均变异系数为 59.8,因此潜在产量的变异远比雨养产量的小。淄博与菏泽附近潜在产量的变异最大,原因未明,估计极有可能与辐射与温度的配合有关,因此就辐射与积温的总量及变异而言,这两地没有明显突出的地方。雨养产量在南宫与沧州两地具有极大的变异,这两地都是冬小麦生育期降水量非常少的地方。由于降水量少,降水量的些许波动就会造成雨养产量极大的波动,因此导致了较大的雨养产量的变异。

通过影响作物冠层的蒸腾与土壤的蒸发,风速也成为影响雨养产量的另一气象因子。在南宫与石家庄两地,降水量与变异系数均类似,但是雨养产量变异差异却很大,南宫的变异很大而石家庄的变异很小。究其原因,可能就是由于风速的差异造成的。在冬小麦生育期内,南宫的平均风速是  $2.87 \text{ m s}^{-1}$ ,而石家庄的是  $1.84 \text{ m s}^{-1}$ ,南宫的风速比石家庄的高出许多。高的风速导致水分大量从冠层及土壤表面损失,加剧了水分胁迫的程度,这可能是解释南宫的雨养产量变异大些的原因之一。

辐射、积温、降水量是相互作用的因子,它们一起决定了冬小麦的潜在及雨养产量。在一个生长季内,降水量过多将导致作物接收的辐射降低,这会导致潜在产量的下降,同时降水量过多还将导致同期积温的下降。积温的下降会导致生育期延长,有待于产量的提升。三个因素综合作用,常规方法难以计算出综合作用后的结果。作物模型本质上是许多公式的集合体,因此,在对模型进行有效化后,能够模拟出这些因素的综合作用。

#### 第四节 华北平原夏玉米生长季的气候资源

下面就对华北平原夏玉米生长季的光温水等气候资源的总量及其变异进行简单的描述(图 5.7)。其中,光温水等气候资源的总量是基于 1961~2000 年的平均,其变异也基于这个时间段计算。夏玉米生长季在此定义为整个华北平原夏玉米生长的季节,即 6 月 1 日到 10 月 1 日,这个时间段包括了华北平原绝大部分区域的大多数年份的玉米生长季。辐射与降水量为生育期内简单累加,积温是零度以上积温。

##### 4.1 辐射

华北平原的夏玉米生长季内,辐射总量变化在  $1850\sim 2160 \text{ MJ m}^{-2}$  之间,基本上是北方比南方高,沿海比内陆高。这是由于高纬地区云量较少,在冬小麦生

长季内的日照时数较长所致。辐射总量的变化幅度很小，变异系数仅为 4.9~11.2 之间，整个平原的平均变异系数为 6.89。在整个区域内，除石家庄、商丘、阜阳三个地方辐射的变异系数偏大外，其它地方之间的变异系数差异都很小。

## 4.2 温度

积温总量的变化趋势与辐射的相反，呈南高北低的趋势，总体变化在 2790 °C d 到 3170 °C d 之间。积温总量的年际变异系数在 1.75 到 3.28 之间，在平原北部和西北部偏大，南部的变异很小，整个平原的平均变异系数为 2.36。平原北部和西北部比较大的原因与冬小麦类似，可能是受太行山的影响，因为华北平原的北部与西北面是以太行山为边界的。

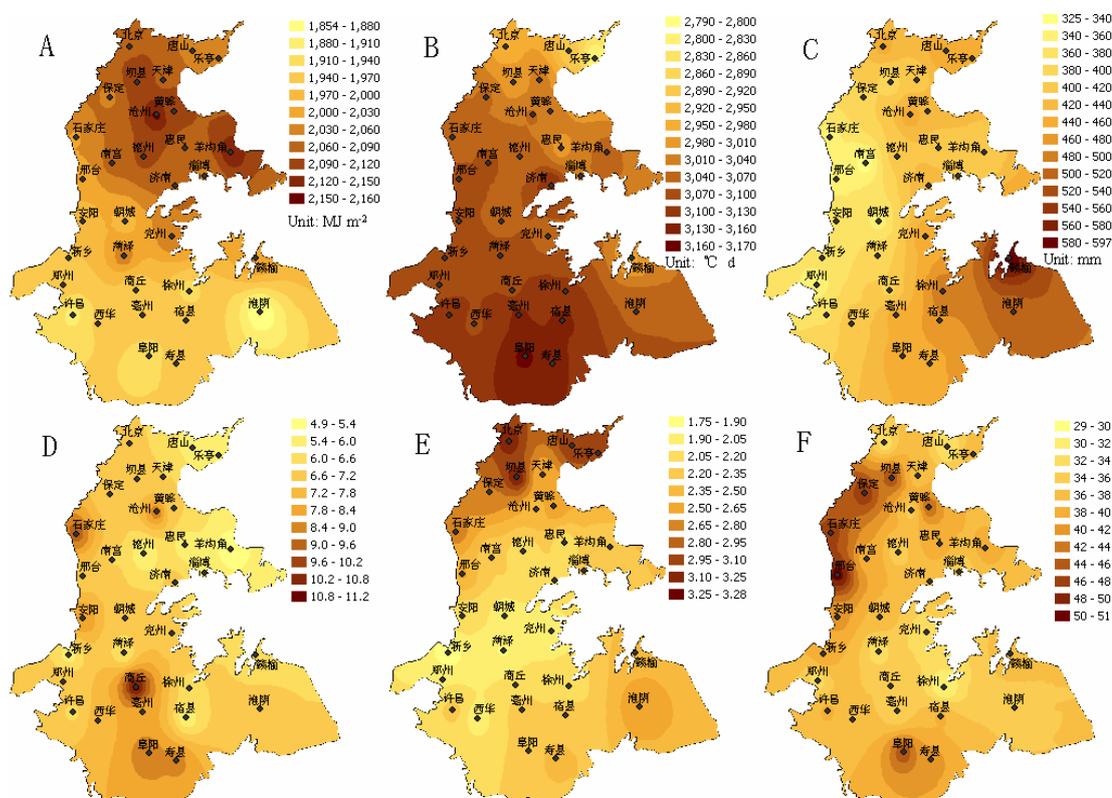


图 5.7 华北平原 1961~2000 平均的夏玉米生长季内的总辐射(A)、积温(B)和降水量(C)，(D)，(E) 和 (F)分别是它们的变异系数。

Figure 5.7 40 year averaged and variation of total radiation, temperature sum and rainfall in the maize growing season in North China Plain: (A) total global radiation, (B) temperature sum, (C) total rainfall. (D), (E) and (F) indicate the coefficient of variations in global radiation, temperature sum and rainfall, respectively.

## 4.3 降水

变化幅度最大的就是降水量，整个平原各站点夏玉米生育期内的降水量变化在 325 到 597 mm 之间，南北高中意低的趋势，其中南部又比北部高出许多。这是因为，虽然一般说来，年降水量在华北平原由低纬向高纬呈递减的趋势。但由

于越到平原北部，年降水越来越集中到夏季，即夏玉米的生长季，一般年份可达 70% 甚至 80% (Zhang 等, 1999)。因此，单就玉米生长季而言，平原北部的降水量比中部的要高。平原南部虽然降水远没有如北方那样集中到夏季，但由于年降水量很大，故夏季的降水量也很大。图 5.8 是几个代表性站点各月降水量占全年降水的比值，由此图明显可见，从南至北，降水量越来越集中在夏季。

平原北部大部地区的降水量维持在 450 mm 之间，平原中部偏西是整个区域降水量最少的地方，多年平均降水量大约维持在 380 mm 左右，然后向南迅速增加。时间变化上，降水量的变异系数在 29~51 之间，整个平原的平均变异系数为 38.0，变化趋势与积温相仿，也是太行山山前平原变化幅度大，广阔的平原地区变化幅度小，这是由于太行山山前平原地形雨影响的结果。受海洋的影响，在平原北部降水量自东向西递减的趋势明显。

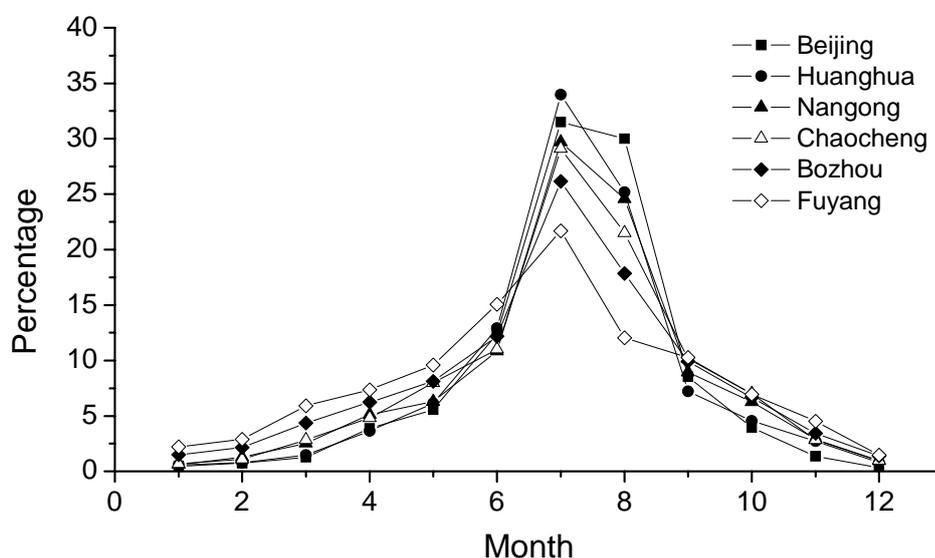


图 5.8 6 个代表性站点多年平均占全年降水的百分比

Figure 5.8 Percentage of yearly averaged monthly rainfall to annual rainfall

### 第五节 夏玉米生长的模拟

华北平原是我国的第二大平原，面积 33 万平方公里 (图 3.1)，该地区的农业生产在全国占有举足轻重的地位，1995 年粮食总产量占全国总产量的 23.4% (朱希刚, 1998)。冬小麦—夏玉米轮作是平原的主要种植制度，其中夏玉米的产量高达全国总产的 39% (Liu and Mu, 1993)。多年来，华北平原一直为国家的粮食安全起着重要的作用。但近些年来，华北平原水资源紧缺的状况越来越严重。由于黄河断流越来越频繁，断流天数与长度也急剧加剧，华北平原水资源的主要来源引黄将有无水可引的危险。华北平原农业水的支撑之一地下水因多年连续高强度的开采，地下水位连年下降，华北平原的一些地方测到了地下水位以一年一

米惊人的下降速度 (Liu et al., 2001)。这些都严重威胁着当地的农业生产，特别是作为主要作物之一的耗水大户夏玉米，其生长季内蒸散量约为 420 mm (Liu et al., 2002)。它不仅消耗了大量的降水，也给接下来冬小麦的生长留下难题。靠引黄及大量开采地下水维持的华北平原的农业，从根本上说是不可持续的。为了当地农业的可持续地发展，必须考虑到将来可能出现的零引黄量及地下水无水可采的情况下的农业生产问题。在此种情况下，研究华北平原夏玉米潜在及雨养条件下的产量状况有着极大的现实意义。

#### 4.1 数据准备

模型通过验证后，在 32 个气象站点上进行夏玉米生长的模拟，这 32 个站点基本上均匀地分布于华北平原 (见图 3.1)。输入各站点 1961-2000 年的气象数据，进行潜在生长与雨养条件下夏玉米生长的模拟。潜在生长意即水分供应充足，产量仅由辐射、温度与作物本身特性决定。雨养条件指夏玉米生长期不灌水，仅依靠降水和土壤水生长的生长条件。这时产量由气象条件与土壤水分平衡状况决定。为了方便模拟，研究中设定华北平原整个区域都采用同一玉米品种。

在这两种条件中，土壤养分都被假定处在最佳状态，田间管理也被设为最佳。土壤类型被设定为沙壤土，这是华北平原分布最广的土壤类型。沙壤土具体的土壤特性在禹城站已经测定 (见表 4.1)。地下水位设定为 10 m。播种日期根据当地的耕作习惯设定，从南到北为第 150 天到第 170 天 (儒略日)。当达到模型需要的积温后，模拟结束，结果输出作分析。最后利用 ArcMap 将站点多年平均的潜在产量、雨养产量及它们之间的差值和降雨量内插成图，同时成图的还有这两种条件下的产量和降雨量在 40 年内的变异系数。

#### 4.2 模拟结果

##### 4.2.1 模拟产量的空间分布

图 5.9 是分别取各站点的潜在与雨养产量的平均值，经过内插后生成的图。华北平原夏玉米的潜在产量变幅在 7,740~10,000 kg/ha 之间，平均为 8,880 kg/ha，基本呈纬向分布，由南向北递减。造成这种分布的主要原因是热量条件和太阳辐射的地域变化。华北平原年积温由北向南递增，辐射由北向南递减。对华北平原的夏玉米而言，高温导致生育期缩短，结果必然使干物质积累减少，生产力下降；辐射低导致光合速率减弱，进而降低了潜在产量。

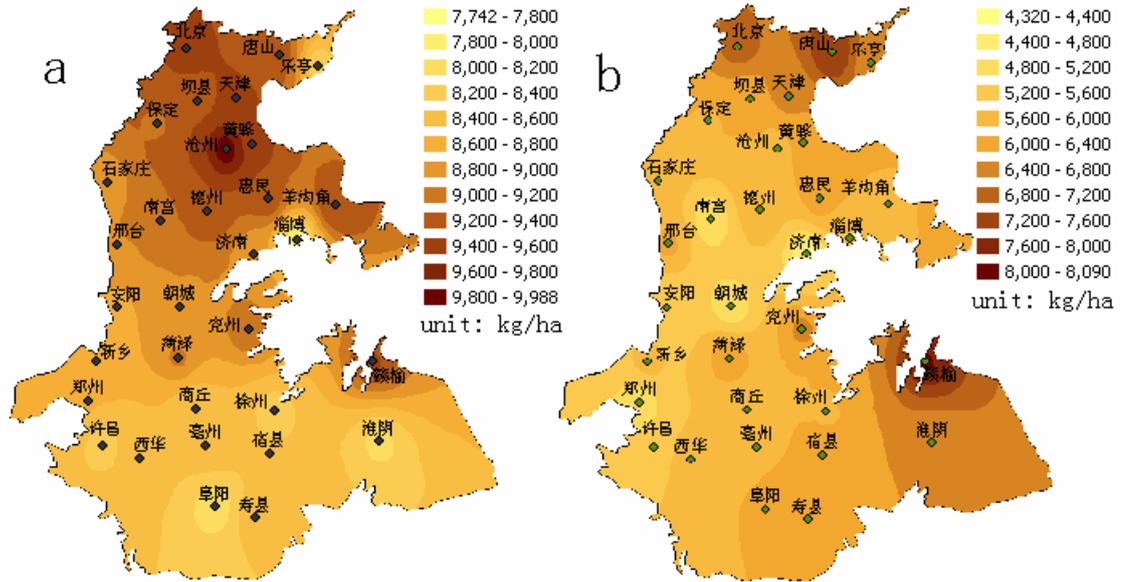


图 5.9 华北平原模拟的夏玉米的潜在产量(a)与雨养产量(b) (单位: 公斤/公顷)  
Figure 5.9 Simulated potential (a) and rainfed (b) yields of summer maize in the North China Plain.

相比之下, 雨养产量的趋势不那么明显。在整个区域内, 雨养产量变幅在 4,320~8,090 kg/ha 之间, 平均为 6,010 kg/ha, 呈南北高, 中间低的趋势。在本次研究中, 雨养产量的主要决定因素是降水量。一般说来, 年降水量在华北平原由低纬向高纬呈递减的趋势。但由于高纬地区年降水多集中在夏季, 即夏玉米的生长季, 一般年份可达 70% (Zhang 等, 1999)。因此, 就单玉米生长季而言, 平原北部的降水量比中部的要高, 如图 5.7 所示, 该图表明, 夏玉米生长季内, 平原北部与中部的降水量的差异并不十分明显, 那为何能引起图 5.9 中雨养产量那么大的差异呢? 这是因为生长季内蒸散量约为 400 mm (Liu et al., 2002)。降水量低于这个值, 由于玉米对水分需要旺盛且玉米生长季正值当地高温时期, 水分供应的稍微不足马上就会引起雨养产量的迅速降低。以处于平原北部的北京与平原中部的朝城为例, 夏玉米生长季内, 北京 1961~2000 年多年平均降水量为 448 mm, 而朝城的仅为 350 mm。一个是略高于玉米生长季蒸散量, 另一个则是大大低于玉米生长季蒸散量。因此, 朝城的雨养产量较低就是正常的了。由于玉米生长季蒸散量仅为 420 mm, 平原南部较多的降水不能转化成生产力, 因此雨养产量与北部相比没有太大的提高。

模拟结果表明, 华北平原夏玉米有较大的水分增产潜力, 但因地而异。水分增产潜力基本上与降雨量的分布一致。平原南部因降雨量普遍超过了夏玉米的需水量, 因此无显著的水分增产潜力。个别站点仅有 1,300~1,500 kg/ha 的增产潜力。平原中部因降雨量偏低, 因此水分增产潜力可高达 4000 kg/ha。平原北部水分增产潜力适中, 约 2000~2500 kg/ha (见图 5.10)。全平原雨养产量的平均值为 2870 kg/ha。



异系数普遍偏大(见图 5.12)。原因是平原中部降雨量低, 导致雨养产量也低, 在降雨量较低的情况下, 同等程度的降雨变异能造成比高降雨量条件下雨养产量的更大变异。

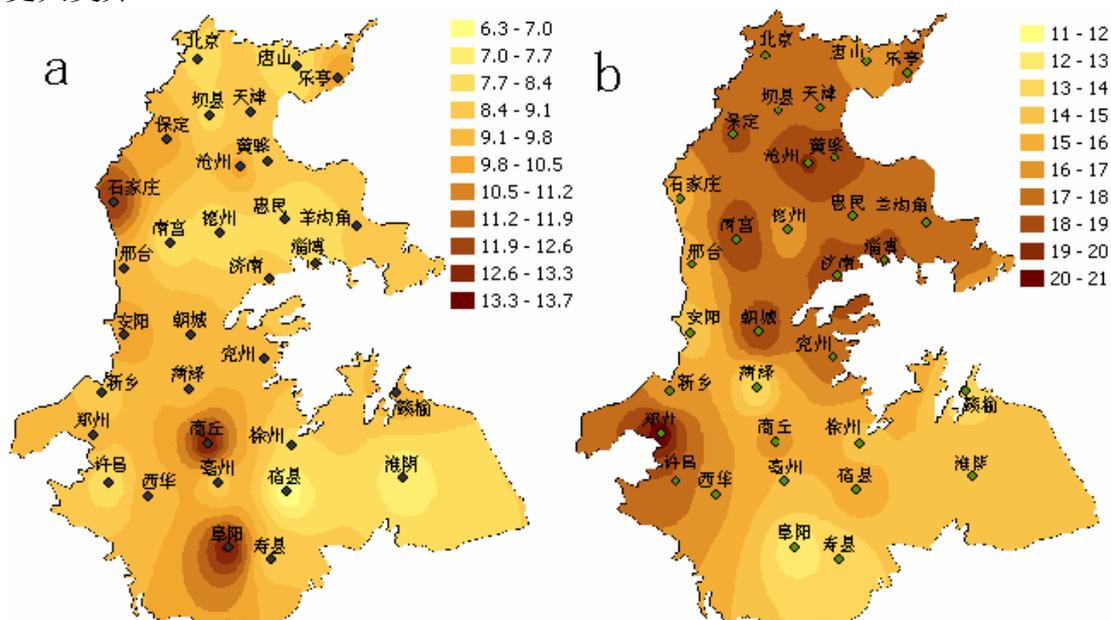


图 5.11 华北平原夏玉米模拟的潜在产量(a)与雨养产量(b)的变异系数

Figure 5.11 Cumulative distribution of (a) potential yield and (b) water-limited yield of summer maize for six locations in the North China Plain.

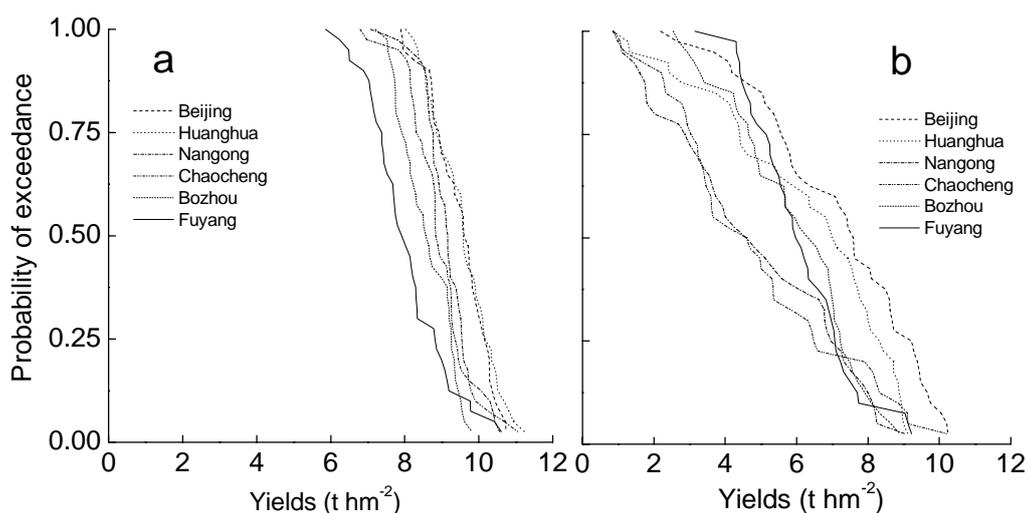


图 5.12 六个代表性站点夏玉米潜在产量(a)与雨养产量(b)的累积概率图

Figure 5.12 Cumulative distribution of (a) potential yield and (b) water-limited yield of summer maize for six locations in the North China Plain.

## 第六节 冬小麦-夏玉米生长的模拟

华北平原 80%的夏收作物为冬小麦，50%左右的秋收作物为夏玉米(胡志全等, 2002)。为简单起见，本文假定华北平原的种植制度为冬小麦-夏玉米轮作制，这是华北平原上最常见的作物种植制度，通常是冬小麦于头年的 10 月播种，次年 6 月左右收割，然后续种夏玉米，于 10 月前后收割。图 5.13 是前面冬小麦与夏玉米模拟结果的简单相加，即华北平原冬小麦-夏玉米轮作制下的潜在产量与雨养产量。

在冬小麦-夏玉米轮作制下，华北平原冬小麦和夏玉米的产量合计可达 15.4~18.8 t/ha，呈东北高西南低的趋势。这是因为无论在冬小麦还是在夏玉米生长季内，平原的东北方向都是辐射高积温低。高的辐射提供了积累更多干物质的可能，低的积温造成生育期更长，因此平原的东北方向比西南方向的潜在产量在高。

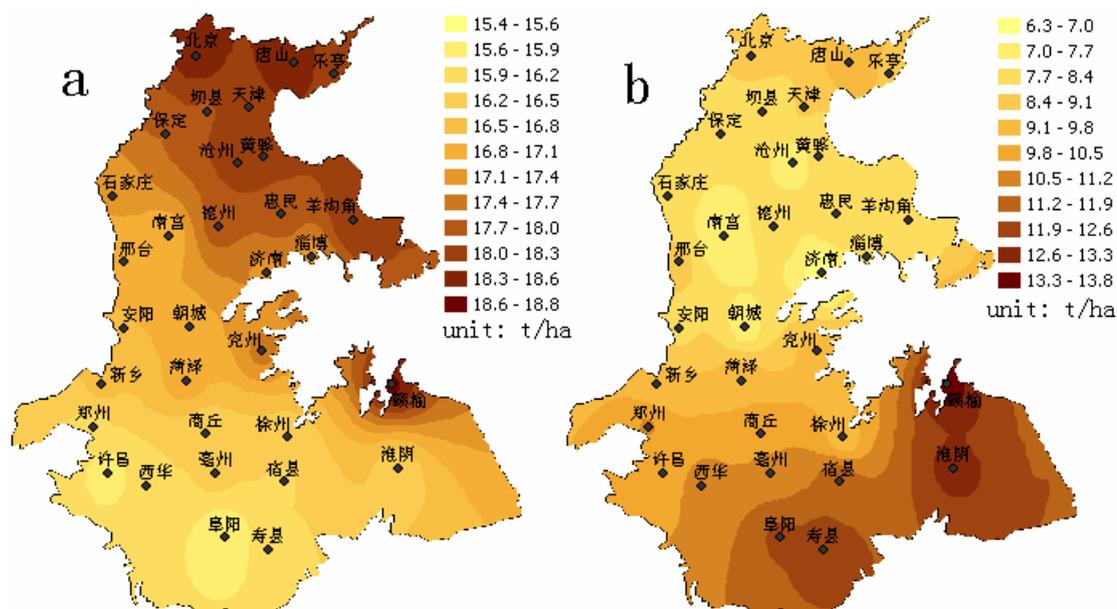


图 5.13 华北平原冬小麦-夏玉米轮作制下的潜在产量(a)与雨养产量(b)

Figure 5.13 Simulated potential (a) and rainfed (b) yields of winter wheat and summer maize rotation system in the NCP.

雨养产量从南到北为 6.3~13.8 t/ha，大体呈北高中间低南边更高的趋势。平原中部的南宫、沧州、朝城和济南一带的雨养产量最低，而平原最南部的阜阳与寿县和江苏北部的赣榆等地雨养产量达到最高。雨养产量的布局主要受降水量的影响(参见图 3.4)。

华北平原潜在产量和雨养产量的布局透射出一个严峻的事实，即平原北部的潜在产量高，具有达到高产量的潜力，但是实际上却受水分胁迫的影响而仅获得一个较低的产量；水分胁迫的现象在平原南部较为不严重，能满足达到更高产量

的需要，但是却受南部低的生产潜力的限制，使实际产量的提高严重受限。所以本研究对冬小麦与夏玉米的实际生产有很强的指导作用。根据这种现象，在平原北部，耕作管理措施应与增加水分的供给与提高水分利用效率为主，大力发展节水农业。平原南部水资源的供需矛盾相应较缓和，应与改善耕作措施为主，尽量使作物的生长免受非气候因素的影响而致减产，努力使实际产量逼近潜在产量。而对于广大的平原中部地区，则应实施“两条腿走路”的策略，既重视水资源的充分有效利用，又重视耕作管理措施的改善。

华北平原潜在产量和雨养产量之差从南到北变化在 3.3~11.0 t/ha 之间，呈北高南低的趋势(图 5.14)。

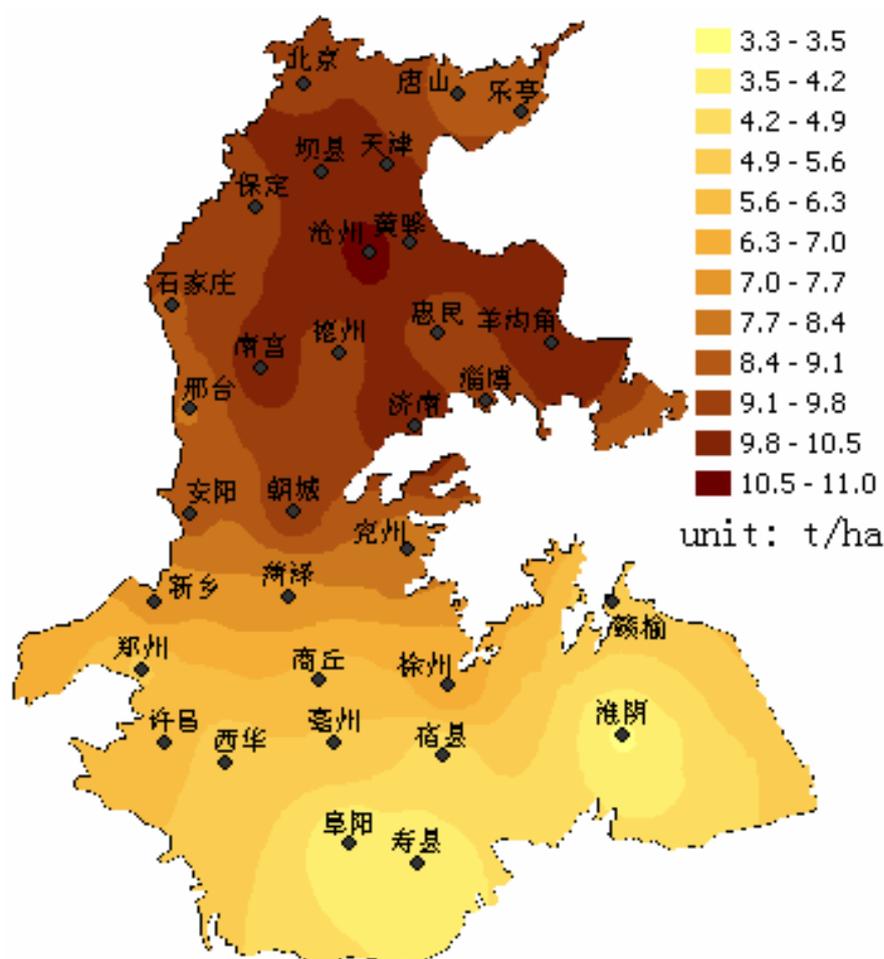


图 5.14 华北平原冬小麦-夏玉米轮作制下潜在产量与雨养产量之差 (单位: 吨/公顷)

Figure 5.14 Gap between simulated potential and rainfed yields of winter wheat and summer maize rotation system in the NCP (unit: t/ha).

## 第七节 WOFOST 模型优缺点讨论

WOFOST 是个机理性很强的作物生长模拟模型，从站上的验证中也可以看出来。在模拟结果的比较中，无论是叶面积指数比较，还是总干物质积累比较表现都不错，至于产量比较更是非常吻合。它有一套完整的、设计合理的作物参数，对这些参数进行精细的校正，模型就可以适于大多数作物。这些参数是相互作用的，调整其中一个会影响另一个的“发挥”，把整套参数协调起来，一般都能实现对一种作物较好的模拟效果。

由于 WOFOST 是个普适性的模型，华北平原特有的一些现象与过程没有考虑到，因此仍存在一定的缺陷，经仔细分析比较，发现不足之处有以下几点：

1. 首先一个比较重要的问题是，WOFOST 在模拟水分限制生长时，对降雨量的计算有误。比如，采用“WCCFORMAT=2”时，有 1998-2001 年四年的气象数据，格式为每日详细数据，模拟 1999-2001 年三年冬小麦的水分限制生长，播种日期为第 288 天。模拟能成功地进行，但打开 1999 水分限制结果看时，却往往发现无水分限制或不明显。仔细分析，原来是它在计算降雨量时，把 1998 年第一天到第 288 天的降雨量全部算在第 288 天，一般总量都在 350 mm 以上，有着这么大的降雨量，作物在后面生长过程中的水分胁迫当然就大为减轻或者没有。一般要求第 288 天的降雨就是当天的降雨，所以，要想模拟 1999 年的水分限制生长，就必须把气象文件中 1998 年前 287 天的降雨量全部设为零。要想模拟 2000 年冬小麦水分限制条件下的生长，就必须把气象文件中 1999 年前 287 天的降雨量全部设为零，所以要模拟三年的水分限制生长，须得准备三套气象文件，把相应的年份的降雨量设为零。虽然问题可以以一种繁琐的方式得以解决，但终究造成了不便，尤其是在长期的模拟中，这种不便更为明显。

2. WOFOST 提供了与 Excel 的接口，允许直接将结果转换为 Excel 格式，极大地方便了数据的统计与分析。但这个结合并很尽善尽美，每次转换时，WOFOST 都新打开一个 Excel 主程序，而不是在打开的主程序中新建一个文件。而且，在 WOFOST 退出允许转换的 Result detailed 与 Result summary 时，都把刚打开的 Excel 程序关闭，且不会提示要不要保存。有时这样会造成数据丢失。事实上，WOFOST 其实并没有彻底关闭它刚刚打开的 Excel 的主程序，虽然它从屏幕上消失了，但只要按下“Alt+Ctrl+Del”时就会发现，Excel 的主程序其实还在后台运行。当不明就里的使用者多次实施转换后，多个 Excel 在后台共同运行，占用大量系统资源，容易造成计算机系统资源不足而导致计算机速度变慢，严重的还会造成死机，对配置低的计算机尤其容易如此。

3. 在 WOFOST 内可以直接将结果以直观的图形来表示，能为使用者提供不少方便。可是此功能也是也有不尽完善的地方，使得这项功能在模拟冬小麦的生长时并不实用。这个功能在模拟不跨年的作物中十分有效，比如春小麦、夏玉米等，但对于冬小麦来说则大不一样。WOFOST 在对结果自动绘图时，一般是以模拟结果为 Y 轴，以 Julian Day 为 X 轴，但 Julian day 的排列以大小为序，对于一年

内生长成熟的作物来说，自动绘制图很正确，不存在任何问题，但对于冬小麦来说，以 Julian day 的大小排列为序行不妥。因为冬小麦播种时一般是第 280-295 天，而成熟时为次年第 150 天前。因此，WOFOST 绘图时将 1-154 排在前面，将 288-365 或 366 排在后面而纵坐标不变。这样，图形就发生了扭曲，如图 5.15 所示。

4. 模型有些地方处理得不太合理。降雨量在模型中除了下暴雨时径流损失外，全部算下渗到土壤中，未考虑降雨的冠层截留。这部分截留水量既不能补充给土壤，对植物也无多大益处，是水分循环过程中最不利的阶段之一。据克拉克在美国中部平原地区的调查，草原与作物区的降水截留损失占降水的 20-70% 不等。信乃全对北京地区冬小麦生长期截留量计算表明，大约有 20% 的降水为小麦冠层截留。由此可见，一个地区的降水量为植物截留的数值是相当可观的，它决定了有多少降水可以达到地面。模型不考虑这部分水量会导致模拟误差，在干旱、半干旱地区尤其如此。禹城站位于黄淮海平原，降雨量偏少，多年平均降水量 593.2mm，降雨强度不大。作物（冬小麦与夏玉米）生长旺盛时叶面积指数高，冬小麦可达 6.5 以上，夏玉米为 5-6 左右，这时的冠层截留量就更多了，少量的降水很难到达地面。这样，容易造成模型在计算水分限制生长时对水分胁迫的估计偏轻。

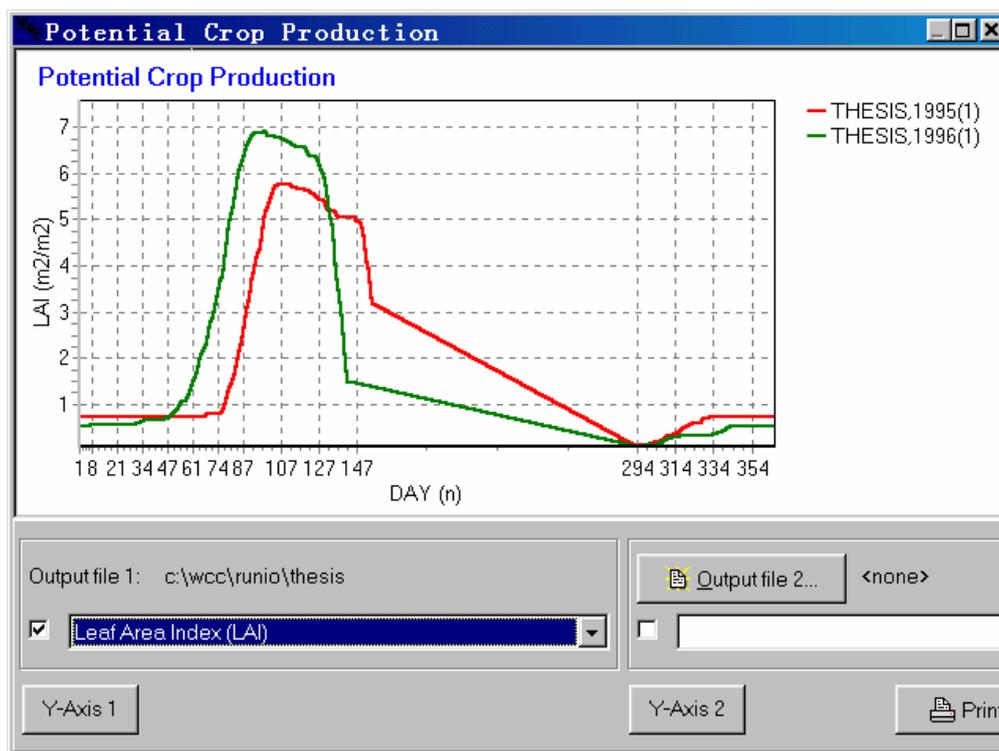


图 5.15 WOFOST 绘制的冬小麦 LAI 图

Figure 5.15 LAI figure plotted by WOFOST

另外，冠层凝露起的作用也不可忽视，凝结水在夜间可阻止呼吸作用，减少作物体内的消耗量，因而可减轻外界不利环境对植物的影响。由于植物表面上有

露的存在,缩短了白天蒸腾作用的时间,这样就减少土壤水分的消耗。根据观测资料,1981-1982年冬小麦生育期凝结水量为75.2mm,为同期降水量的75%。据1998年陆佩玲等的研究结果,在中纬度低平均地区秋季的晴天,大约在下午17:00开始结露,清晨6:00-7:00结束,结露的时间约13-14小时,结露速率在 $0.05-0.07\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。结露速率取 $0.06\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,时间取13小时,则结露量为2.8mm/d。这个量已相当可观,可见,华北平原地区的凝结水分总收入中占有相当的比重。它虽然不能作为可开采资源加以利用,但应作为调节资源加以考虑。这两方面都造成了模拟水分限制生长偏轻。露水的凝结要求温度、相对湿度,计算难度不大,也不需要另外输入数据,因此计算难度不大。WOFOST经改进完全可以实现凝结水量的模拟。

5. 模型中设置了一整套参数,让你有很大的调整的余地。可是,可能由于参数太多的原因,有些参数程序计算时竟然没用上,比如LAIEM(初始叶面积指数)。在模型运行时,无论你怎么调整这个参数,所有的运行结果不会发生任何变化。似乎这可以理解为模型的不断的改进中被废弃不用的遗留参数,但至少也应该在文件中略加说明以便使用者有个明确的概念。

6. 模型使用最高最低气温二者的平均值来计算日平均气温,实际上,日平均气温是以四个时点:2:00、8:00、14:00、20:00温度平均值计算的,这与模型简单的以最高最低气温作平均相比会有误差。以禹城综合试验站2001年上半年温度的观测值为例,至6月30日,模型算的平均气温的总和是2099.12℃日,而四个时点的平均值计算的平均气温总和是2012.3℃日,误差为4.09%。百分比看似不大,但积温绝对值相差85.92℃日,换算成日期一般可都在4天以上,这已足够引起模型模拟的误差。特别模拟的后期处于对产量形成影响重大的时期,生育期4天的误差将会引起较大的模拟误差。

7. 当气象数据采用“WCCFORMAT=2”格式(最常用格式,即逐日的气象数据)时,模型不能模拟2000年作物生长,因为它无法处理文件名后缀是“000”的文件。这不是“千年虫”的问题,这是由于模型是以该格式文件里的第二列的数字为模拟的年份,而且模型指定这一年份的后三个数字作为该文件的后缀名,如1995年的数据,则文件名是“\*.995”。所以,2000年气象文件的后缀是“.000”。模型遇到这类文件名时就会报错。虽说这个问题通过往前或往后挪四年的方法可以解决,可终究客观上给模拟过程带来了不便。

8. WOFOST对分配系数的处理方法是确认它为发育阶段的函数。对于这样一个对产量有重大影响的参数来说,这样处理略嫌简单。在作物生长模型不断完善的过程中,同化物的分配模型一直都是一个薄弱环节。虽然已有许多实验描述了不同作物或在不同环境条件下同化物的分配状况,但用短期的试验资料所建立的模型来预测作物长期的行为时,模型预测值与实测值之间的误差会不断积累,另外,作物会调整其同化物的分配方式以适应环境。同时,同化物的分配是植株各器官对同化产物竞争的结果,它涉及光合作用、同化物的运输及生长等一系列的生理过程,一种环境因子会影响诸多生理过程,而几种环境因子的作用又使得

实验难于设计和实施,因此试验结果一直不太理想。对分配系数的确定经历了从经验模型发展到功能平衡模型、源壑关系模型、机理模型、激素模型等阶段。目前虽然在分配模型的制订方面已有大量的工作,但还没有一个恰当而又适用的模型。WOFOST 在程序里的处理是由用户根据实测的作物干物重的增加,用统计的方法计算出同化物在各器官内的分配,使用的方式还比较简单,停留在七八十年代的水平,对环境因子的变化不能响应。对分配系数计算方式的改变将是以后 WOFOST 的主要改进方面。较好的解决方式应是在分配系数与作物的生长状况以及外界环境条件之间建立某种关联,把影响分配系数的变化及时反映到分配系数的变化上,这样更符合实际。为了避免误差的积累,可以在特定的阶段,由使用者设定阈值对前面计算产生的分配系数进行检查与订正,以免产生较大偏差。

9. WOFOST 虽然可以计算养分限制产量,但是对系统说明的仔细研究表明,模型中养分限制产量的过程考虑得较粗糙,WOFOST 并不擅长分析此项,因此大多数时候不能用它来计算养分限制产量。但在实际生长中,养分限制生长是真实存在的,无论是产量最高可以看作潜在生长的实验地还是产量低下可以看作水分限制生长的实验地,养分限制都在起作用。在模拟值与实测值的比较之间,会因养分作用未考虑产生一定的误差,一般所导致的直接现象就是模拟值高于实测值。

10. 模型没有考虑到越冬的问题,也没有考虑到越冬死苗的问题,这样在模拟冬小麦的生长时会导致后期较大的误差。模型在处理越冬问题时是这样处理的,即在  $0^{\circ}\text{C}$  以下时模型停止运算,考虑到温度再次大于  $0^{\circ}\text{C}$  时再开始,没有计算越冬死苗的模块。这在黄淮海地区不成问题,因为本区越冬死苗问题在大部分年份里都不突出,但如果在中国另一存在这一现象的区域则可能会导致较大的误差。

11. 最后一个问题是 WOFOST 没有考虑后期干物质向籽粒的转移。这是一个比较重大的缺陷,因为它通常会导致模拟的产量偏低,而叶重、茎重偏高。后期的模拟 LAI 可能下降较晚。虽然干物质向籽粒的转移在作物中并不是一种普遍的现象,但对于冬小麦来说,由于干物质向籽粒的转移是众所周知的且有一定的量,所以在详细一点的应用中,WOFOST 可能会导致较大的误差。现阶段开发的作物模型已经普遍开始考虑此过程,如 CERES 与 APSIM 等等。

## 第六章 华北平原冬小麦和夏玉米蒸散的模拟

蒸散为农田生态系统中土壤蒸发和冠层蒸腾之和,是农田生态系统中水分平衡的一个重要指标。也体现了水分交换与太阳辐射之间的本质联系。冠层蒸散和地表蒸发表征了土壤-植被-大气连续体的相互作用,本章介绍了用 WOFOST 模型计算了华北平原 1961-2000 年冬小麦与夏玉米生长季的冠层蒸散和地表蒸发的过程和结果。

在 1961-2000 年冬小麦与夏玉米作物潜在产量和雨养产量模拟的时候,提取出与这些产量对应的潜在蒸散与雨养蒸散,对冬小麦和夏玉米潜在蒸散与雨养蒸散进行的。同时,把冬小麦和夏玉米潜在蒸散逐年简单相加,得到冬小麦-夏玉米轮作制下的潜在蒸散;把冬小麦和夏玉米雨养蒸散逐年简单相加,得到冬小麦-夏玉米轮作制下的雨养在蒸散。冬小麦生长季、夏玉米生长季、冬小麦-夏玉米轮作制下的潜在蒸散减去雨养蒸散,得到这个时间段的水分亏缺额。

第一节先对 WOFOST 模型计算蒸散的公式进行介绍,然后应用模型模拟华北平原冬小麦和夏玉米各生长季的蒸散进行模拟、分析。

### 第一节 WOFOST 模型对蒸散的计算

严格地说,蒸腾是水分的损失通过作物上进行,而蒸发则是水分损失在土壤上或自由水面上进行。蒸散则包括蒸腾和蒸发。

蒸发的驱动力是蒸发面和周围空气的水汽压梯度。蒸发面的水汽压等于当前温度下的饱和水汽压。空气的水汽压是环境温度和相对湿度的函数。蒸发的速率取决于蒸发面和空气之间的扩散阻力。

扩散阻力的大小主要取决于风速,风速与相对湿度这两个环境因素共同决定了空气的“蒸发需求”。

用这个方法计算蒸散时存在一个问题,就是常规气象观测一般不会记录蒸发面的温度。但是蒸发 1 mm 的水层需要  $2.4 \text{ MJ m}^{-2}$  的能量,因此可以通过能量平衡公式来计算蒸发面的温度。蒸发需要大量的能量,这会导致蒸发面温度下降,温度的下降反过来又会导致蒸发需求的降低。因此需要不断补充能量以维持蒸发面的温度,从而也维持水汽压梯度。补充的能量从作物冠层和土壤吸收的净太阳辐射而来。

净辐射是太阳的入射短波辐射减去反射的短波辐射和地球发射的长波辐射后地球所得到的辐射净收入。乱流交换得到的能量收入是能量的另一来源。但它经常是可以忽略不计的,除非作物是长在广大裸地之中(如绿洲等)。净辐射中只有 5-8% 被光合作用所消耗,所以在能量平衡中也可以不考虑。呼吸作用也会产生一点能量。在具体的计算中,为了简化蒸发的计算, WOFOST 略去一些微不足道的因素,假定蒸发只由两个最主要的因素决定:净辐射和蒸发需求。

Penman(1948)首先用物理数学的方法计算了蒸发。他分别计算了为期 10 天

的自由水面、湿裸土和低矮草地的蒸发。不过对于在采用逐日数据的情况下 Penman 公式是否仍然有效的问题人们一直存在争议。采用逐日数据就必须对 24 小时的值进行平均。对于日变幅较大的数据，比如风速，Doorenbos 和 Kassam(1979)建议要进行校正。

根据 Penman 公式计算的是潜在蒸散速率，即不考虑蒸发面水分供应的问题。ET0 值一般是作参考用的，与作物实际水分需求有关。用作物因素把 ET0 转换成作物对水分的需求(如 Doorenbos & Pruitt, 1977; Feddes et al., 1978)。

### 1.1 潜在蒸散的计算

Penman 公式(公式 4.1)由两部分组成，一是热力学部分，计算吸收的净辐射，二是空气动力学部分，计算空气的蒸发需求(Choisnel et al., 1992; Frere and Popov, 1979; Penman, 1956, 1948)。二部分合成后可以用来计用来水面、裸土面的潜在蒸发和作物冠层的潜在蒸散。

$$ET0 = WR_{na} + (1 - W)E_a \quad (6.1)$$

式中， $ET0$ ：蒸散量 [mm d<sup>-1</sup>]

$W$ ：温度的权重因子 [-]

$R_{na}$ ：辐射差额的水分蒸发当量 [mm d<sup>-1</sup>]

$E_a$ ：蒸发需求。 [mm d<sup>-1</sup>]

平均温度取最高最低温度的平均值，这个平均温度也是模型所用的空气温度。最高最低温度每天观测一次。

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (6.2)$$

式中， $T$ ：空气平均温度 [°C]

$T_{\max}$ ：最高温度 [°C]

$T_{\min}$ ：最低温度 [°C]

最高最低温之差可用来计算Penman公式中风速函数的经验系数。

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (6.3)$$

式中， $\Delta T$ ：温度差 [°C]

$T_{\max}$ ：最高温度 [°C]

$T_{\min}$ ：最低温度 [°C]

蒸发需求EA，取决于当前温度下饱和水汽压与实际水汽压之差和风速。计算蒸发需求所用的风速在2 M的高度测定，并乘以一个经验系数。这个经验系数取

决于风速，计算公式如下(Frere,1979):

$$BU = 0.54 + 0.35 \frac{\Delta T - 12}{4} \quad \text{当 } \Delta T \geq 12^\circ\text{C} \text{ 时} \quad (6.4a)$$

$$BU = 0.54 \quad \text{当 } \Delta T \leq 12^\circ\text{C} \text{ 时} \quad (6.4b)$$

式中,  $BU$ : 风速函数中的经验系数 [-]

$\Delta T$ : 最高最低温之差 [°C]

空气温度可以用来计算蒸发潜热。

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \cdot 10^{-3})T \quad (6.5)$$

式中,  $\lambda$ : 蒸发潜热 [MJ kg<sup>-1</sup>]

$T$ : 日平均温度 [°C]

蒸发潜热在常规温度下的变化非常微弱，因此在模型中可设为常数，在WOFOST中， $\lambda$ 的值设定为2.45 MJ kg<sup>-1</sup>(T=20°C)。海平面的气压被用来计算干湿球常数(Brunt, 1932)。

$$\gamma_0 = \frac{C_p P_0}{\varepsilon \lambda} 10^{-3} = 0.0163 \frac{P_0}{\lambda} \quad (6.6)$$

式中,  $\gamma_0$ : 海平面的干湿球常数 [kPa°C<sup>-1</sup>]

$C_p$ : 湿润空气的比热, 为1.013\*10<sup>-3</sup> [MJ kg<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>]

$P_0$ : 海平面的大气压 [kPa]

$\varepsilon$ : 水分子与空气的分子量之比, 为0.622 [-]

$\lambda$ : 蒸发潜热 [MJ kg<sup>-1</sup>]

$\gamma_0$ 在模型中设定为一个常数, 为0.67。在上述公式中, 海平面的大气压取101.3kpa,  $\lambda$ 取2.45 MJkg<sup>-1</sup>就可以得出这个值。然而, 气压和干湿球常数随海拔高度的变化需变化, 因此使用下述公式来校正:

$$P = P_0 e^{\frac{-0.034z}{T+273}} \quad (6.7)$$

式中,  $P$ : 海拔高度为 $z$ 的大气压 [kPa]

$P_0$ : 平面的大气压 [kPa]

$T$ : 日平均温度 [°C]

$z$ : 海拔高度 [m]

$$\gamma = \gamma_0 \frac{P}{P_0} \quad (6.8)$$

式中,  $\gamma_0$ : 海平面的干湿球常数 [kPa°C<sup>-1</sup>]

$\gamma$ : 海拔高度为  $z$  的干湿球常数 [kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$P$ : 海拔高度为  $z$  的大气压 [kPa]

$P_0$ : 海平面的大气压 [kPa]

饱和水汽压与日平均温度有关，可近似地采用如下 Goudriaan 公式计算 (1977):

$$e_s = 0.610588 * e^{\frac{17.32491T}{T+238.102}} \quad (6.9)$$

式中,  $e_s$ : 饱和水汽压 [kPa]

$T$ : 空气温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

对它求导, 可得饱和水汽压—温度曲线的斜率。

$$\Delta = \frac{238.102 * 17.32491 * e_s}{(T + 238.102)^2} \quad (6.10)$$

式中,  $\Delta$ : 饱和水汽压曲线的斜率 [kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$e_s$ : 饱和水汽压 [kPa]

$T$ : 空气温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

实测的水汽压不允许超过同温度下计算出来的饱和水汽压。

## 1.2 实际蒸散的计算

对于潜在生长的模拟, 实际蒸腾速率总是等于最大蒸腾速率, 因为水分的供应是充足的。实际蒸腾速率的计算是从最大蒸腾速率计算而来的, 同时考虑根区水分的亏缺和过剩。根系对水分的吸收取决于植物体内的水势与土水势之差和水汽从气孔扩散到大气的输送过程中的各种阻力 (van Keulen & Seligman, 1987)。与 feddes 等人不同的是, 不是选择土水势而是选择了土壤水分含量作为独立参数 (Gollan et al., 1986; Schulze 1986)。

有一点要注意, 植物体内的水势能进行调节, 以达到潜在蒸腾速率。一个土体中常常进行着从潜在蒸腾速率到蒸腾速率受限制的过程, 因此很难对这些过程进行定量描述。模型中, 水分限制情况下的蒸腾的计算是通过把潜在蒸腾速率乘以一个参数完成的。这个参数介绍如下 (van Diephen et al., 1988):

$$R_{ws} = \frac{\theta_t - \theta_{wp}}{\theta_{ws} - \theta_{wp}} \quad (6.11)$$

式中,  $R_{ws}$ : 水分亏缺时蒸腾量的校正因子 [-]

$\theta_t$ : 实际土壤水分含量 [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\theta_{wp}$  : 枯萎点时土壤水分含量 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$\theta_{ws}$  : 临界土壤水分含量 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

临界土壤水分含量被定义为当土壤水分含量低于这个值时,植物就会感到水分胁迫并开始关闭部分气孔。它不是一个固定的值。水分胁迫使可吸收的水受到限制,这个过程从水分含量较高,此时潜在蒸腾速率还比较高的时候就开始了(Denmead & Shaw, 1962)。这个临界土壤水分含量可以计算如下(van Diephen et al., 1988):

$$\theta_{ws} = (1 - p)(\theta_{fc} - \theta_{wp}) + \theta_{wp} \quad [6.12]$$

式中,  $\theta_{ws}$  : 临界土壤水分含量 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$p$  : 以潜在蒸散为函数土壤水分耗竭因子 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$\theta_{fc}$  : 土壤田间持水量 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$\theta_{wp}$  : 枯萎点时土壤水分含量 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

土壤的田间持水量  $\theta_{fc}$  (简称 SMFCF)和枯萎点时土壤水分含量  $\theta_{wp}$  (简称 SMW), 随土壤的不同而不同, 需要由用户自己确定。它以潜在蒸散 (对于封闭冠层)和作物群体数量(crop group number)为函数, 它将在子程序 SWEAF 中确立。在文献中, 土壤水分耗竭因子常用“容易吸收的土壤水”来表示。“容易获得的水”是位于  $\theta_{fc}$  和  $\theta_{wp}$  之间的土壤含水量, 它可以在植物不会感到水分胁迫的情况下被植物吸收。

在封闭冠层内, 当潜在蒸散的值比较大时, 土壤水分耗竭因子的取值可能低至 0.10 左右, 而在潜在蒸散的值比较小时, 其取值可能高达 0.96。

要注意水分亏缺时蒸腾量的校正因子  $R_{ws}$  (见公式 6.8)在不同的  $p$  值和  $\theta_i$  的组合下其值可能会高于 1.0, 也有可能低于 0.0, 尽管这没有什么实际意义, 但是在模型中  $R_{ws}$  的最大值还是设定为 1.0, 最小值为 0.0。

利用一个经验公式可计算“容易吸收的土壤水” (van Diephen et al., 1988):

$$p = \frac{1}{\alpha_p + \beta_p ET0} - 0.10(5 - No_{cg}) \quad [6.13]$$

式中,  $p$  : “容易吸收的土壤水” 的比例 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$\alpha_p$  : 回归系数(=0.76, van Diephen et al., 1988) [-]

$\beta_p$ : 回归系数(=1.5, van Diephen et al., 1988) [d cm<sup>-1</sup>]

$ET_0$ : 潜在蒸散速率 [cm d<sup>-1</sup>]

$No_{cg}$ : 作物群体数量(1 至 5, Doorenbos et al., 1978) [-]

注意作物群体数量,  $No_{cg}$  (简称 DENPR) 在模型中输入项, 需要由用户自己确定。

对作物群体 1 和 2, 估计值不是那么准确, 需要用 一个参数进行校正以降低估计值, 使之更适合于实际 (van Diephen et al., 1988):

$$p = p + \frac{ET_0 - 0.6}{No_{cg}(No_{cg} + 3)} \quad [6.14]$$

式中,  $p$ : “容易吸收的土壤水” 的比例 [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>]

$ET_0$ : 潜在蒸散速率 [cm d<sup>-1</sup>]

$No_{cg}$ : 作物群体数量(1 至 5, Doorenbos et al., 1978) [-]

当根区完全被水所饱和时也可能引起蒸腾速率的下降。通常, 在排水良好的田地里氧气短缺对作物影响不大。这通常发生在土壤通气的临界水分含量大于土壤的田间持水量及底土几乎不透水的情况下。在进行有地下水影响生长的模拟时, 将会出现有规律的氧气短缺, 但由于在华北平原, 这种现象基本不存在, 因此本文对此模型中计算这个过程不予叙述。

最后, 由于水分胁迫引起的实际蒸腾速率的变化可以依下式计算:

$$T_a = R_{ws} R_{os} T_m \quad (6.15)$$

式中,  $T_a$ : 实际蒸腾速率 [cm d<sup>-1</sup>]

$T_m$ : 最大蒸腾速率(见公式 6.4) [cm d<sup>-1</sup>]

$R_{os}$ : 土壤通气的临界水分含量 [-]

$R_{ws}$ : 水分亏缺时蒸腾量的校正因子 [-]

## 第二节 冬小麦蒸散的模拟

### 2.1 潜在生长条件下的蒸散

从模型输出结果提取出潜在生长与雨养条件下的蒸发与蒸腾量, 二者之和为蒸散量。将模拟的蒸散量与同期的降水量相比有着重大的实际意义。

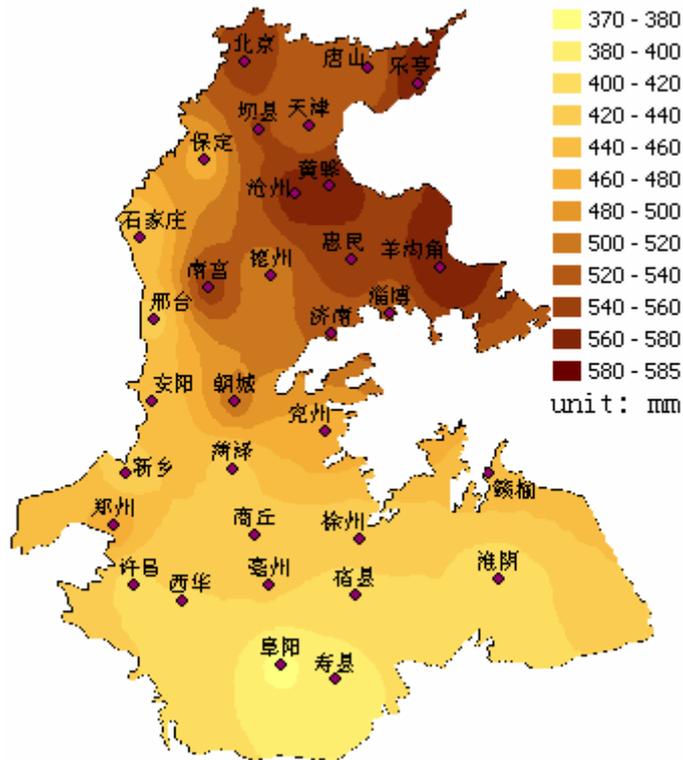


图 6.1 华北平原潜在生长条件下冬小麦的蒸散量(单位: 毫米)

Figure 6.1 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: mm)

图 6.1 是华北平原冬小麦生长季内的潜在蒸散量, 由此图可见, 冬小麦生长季内的潜在蒸散量从南到北变化在 370~585 mm 之间, 呈北高南低的趋势, 整个区域的潜在蒸散平均值为 468 mm, 与禹城综合试验站大型蒸散仪测定的 450 mm 这个多年平均值持平(刘士平, 2000; 任鸿瑞, 罗毅, 2004)。北高南低的趋势由北方具有较高的辐射值、较低的相对湿度造成。平原的中偏北部如沧州、南宫、济南一带是传统的严重受干旱胁迫的地区, 该区域具有平原最高的蒸散值。沿太行山山脉东麓, 潜在蒸散较低, 这是由于有山脉的阻挡, 山脉东麓的风速较平原其它地方普遍偏低, 如在冬小麦生育期内石家庄的风速仅为  $1.84 \text{ m s}^{-1}$ , 而离山脉东麓不远处的南宫同期平均风速则高达  $2.87 \text{ m s}^{-1}$ 。平原南部阜阳、寿县是蒸散值的最低点。

图 6.2 是潜在蒸散量的变异系数在整个平原的分布, 它反映了该地潜在蒸散的年际变化幅度。从整个区域上看, 潜在蒸散的变异系数整体偏小, 一般变化在 7.8~17.2 之间, 整个区域的平均值为 11.8, 最小值与最大值分别出现在唐山与坝县。变异系数在区域的分布无显著的地域规律, 但是略有东部低西部高的现象, 这可能与平原西部是内陆而东部近海的原因有关。

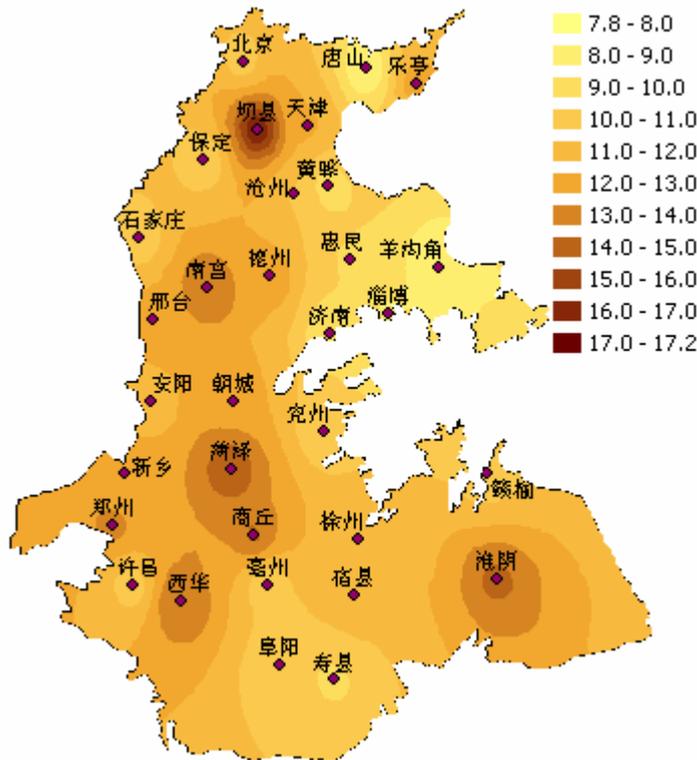


图 6.2 华北平原潜在生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位: 百分比)

Figure 6.2 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: percent)

## 2.2 雨养生长条件下的蒸散

冬小麦雨养条件下的蒸散量从南到北变化在 162~309 mm 之间, 整个区域的雨养蒸散平均值为 219 mm, 呈北低南高的趋势, 与潜在蒸散的分布趋势相反(见图 6.3), 其主要原因是平原北部降水少, 于是用于可供蒸发与蒸腾的水分也少, 因此严重限制了蒸散的量。平原北部与中部的大部, 雨养蒸散偏小, 不足 200 mm。继续往南, 雨养蒸散迅速增加至 300 mm。石家庄的雨养蒸散量为平原最小, 约 162 mm, 北京、保定的雨养蒸散也很少, 都小于 180 mm, 即使在最湿润的年份里, 此两地的雨养蒸散也仅在 250 mm 左右。整个平原雨养蒸散的最大值出现在淮阴, 多年平均值为 309 mm, 某些年份可达 400 mm。阜阳、寿县的雨养蒸散量也在 280 mm 以上, 极端高值都在 350 mm 以上。

图 6.4 是雨养蒸散量的变异系数在整个平原的分布, 从整个区域上看, 雨养蒸散的变异系数比潜在蒸散高出许多, 这是由于影响雨养蒸散的主要因子-降水的变率远比辐射与积温大的缘故。雨养蒸散量的变率一般变化在 10~35 之间, 整个区域的平均值为 17.9, 最小值与最大值分别出现在西华与徐州。除徐州的变异系数在 30 以上外, 整个平原其它区域的多在 20 以下。因此实际上雨养蒸散量的变异系数在整个平原上分布相对均一。扣除徐州这个奇异点的影响, 平原北部雨养蒸散量的变异系数略大于南部, 呈北高南低, 自北向南递减的趋势, 最小值出现在阜阳、寿县、西华一带。

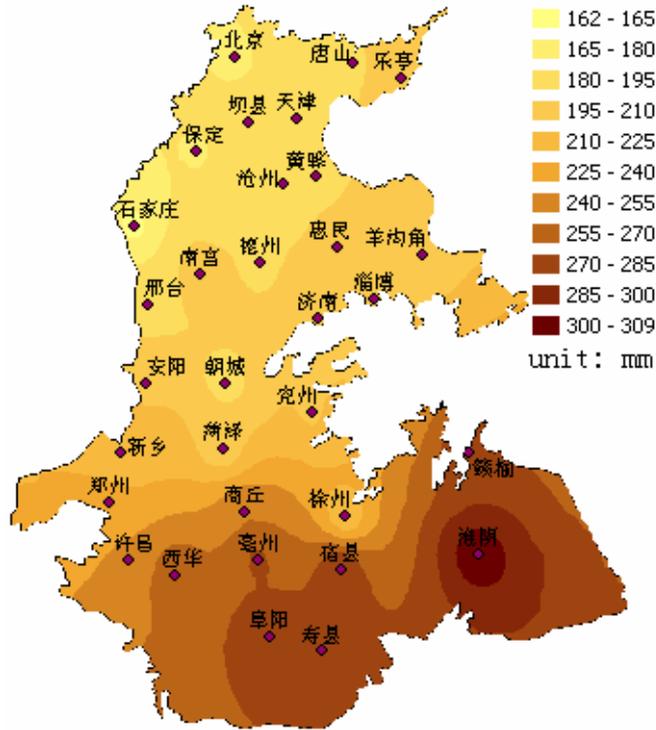


图 6.3 华北平原雨养生长条件下冬小麦的蒸散量(单位：毫米)

Figure 6.3 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: mm)

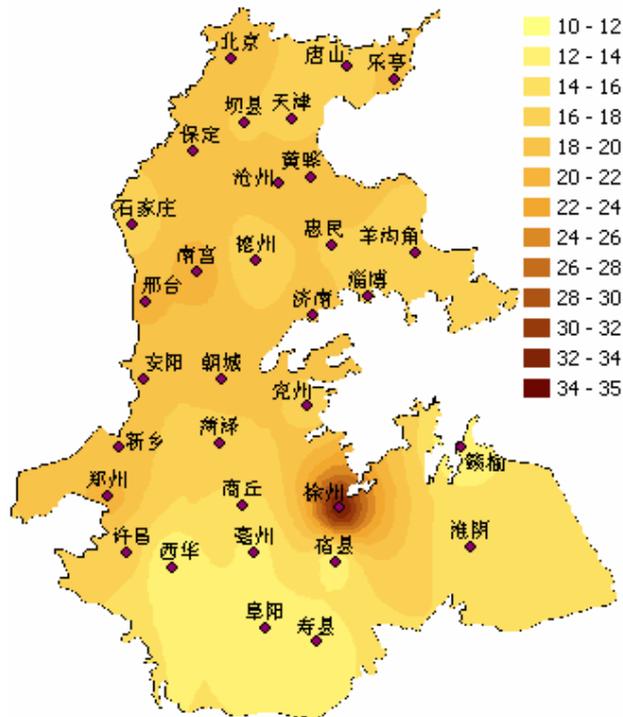


图 6.4 华北平原雨养生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位：百分比)

Figure 6.4 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: percent)

### 2.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差

潜在蒸散和雨养蒸散之差在现实中很有意义,它可近似地看成该地的水分亏缺额,也就是说,该地还缺多少水分冬小麦即可满足潜在生长对水分的需要,同时这个量还可看成是冬小麦灌溉用水量的上限,这是由于潜在蒸散量不考虑耕作措施对蒸散量的影响,因此也没有因耕作措施不当而导致的水分的浪费,但是在实际生长中,可能不真正地需要消耗潜在蒸散量那么多的水资源,这是因为潜在生长条件下,蒸发损失比较大,实际生长中,通过适当的管理措施,如保墒、根层灌溉等待,同时,通过采用适当的品种及调整灌溉方案,可以在不显著地减少作物产量的前提下,有效地减少作物的实际蒸散量(彭世章,朱成立,2003)。

由图 6.5 可见,冬小麦生长季内,各地都有不小的水分亏缺,水分亏缺额变化在 85~394 mm 之间,呈北高南低的趋势,整个平原平均值为 261 mm。以平原中部等值线密集的地方为界,大体可将平原分为北部水分严重亏缺区与南部轻微亏缺区。北部的严重亏缺区水分亏缺额一般都在 300 mm 以上,亏缺最大的地区在沧州一块;南部轻微亏缺区水分亏缺额一般都在 200 mm 以下,亏缺程度最轻的地区在阜阳、寿县、淮阴一带。受前述的潜在蒸散量在太行山山前平原比较小的影响,该处的水分亏缺额也较同纬度的其它地区小。

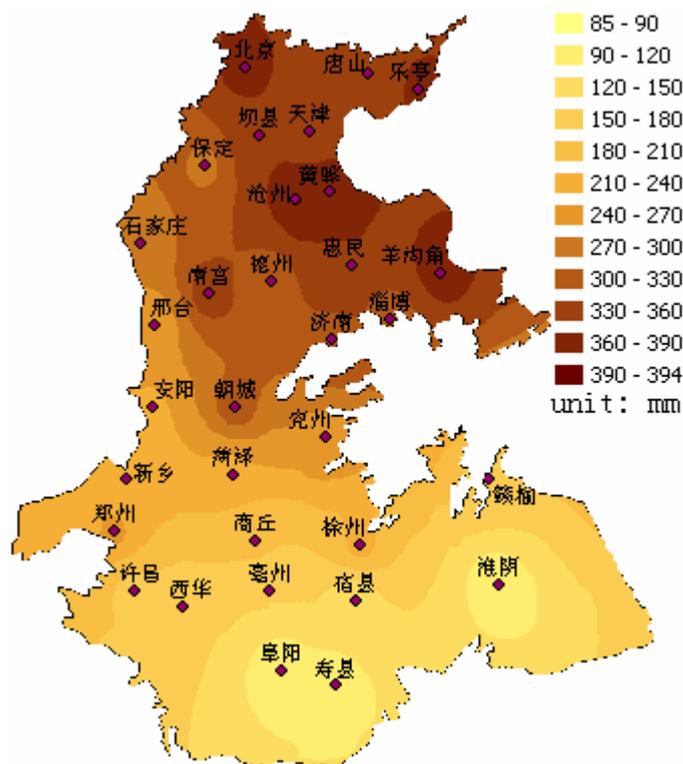


图 6.5 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差(单位: 毫米)

Figure 6.5 Evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in mm)

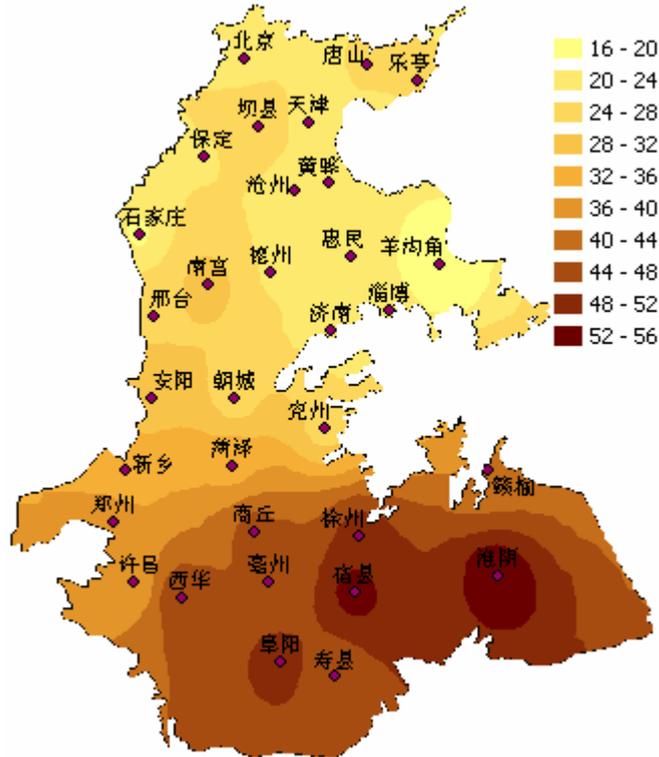


图 6.6 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差的变异(单位: 百分比)

Figure 6.6 Coefficient variation of evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in percent)

图 6.6 是各地水分亏缺额的变异系数, 整个区域上变化在 16~56 之间, 平均值为 32。以平原中偏南处为界, 平原可分为北部相对稳定区南部相对剧变区。北部与中部大部地区的变异系数都在 25 以下, 而平原南部的变异系数一般都在 40 以上。

结合图 6.5 可见, 平原北部的的水分亏缺额大且相对稳定, 因此历来是华北平原水分亏缺最严重的地区, 所以毫无疑问该地要非常重视灌溉工程的建议。平原南部的的水分亏缺额相对较小, 但年际波动大, 因此在许多年份里, 水分亏缺仍有可能对冬小麦的生长造成极大的威胁。

### 第三节 夏玉米蒸散的模拟

#### 3.1 潜在生长条件下的蒸散

图 6.7 是华北平原夏玉米生长季内的潜在蒸散量, 由此图可见, 夏玉米生长季内的潜在蒸散量从南到北变化在 324~405 mm 之间, 呈南北低中间高的趋势, 其中北部又比南部高些, 东部比西部高些, 整个区域的潜在蒸散平均值为 356 mm。北高南低的趋势由北方具有较高的辐射值、较低的相对湿度造成。平原的中偏北部如沧州、济南一带是传统的严重受干旱胁迫的地区, 该区域具有平原最高的蒸散值。蒸散值的最低点出现在平原南部的淮阴。

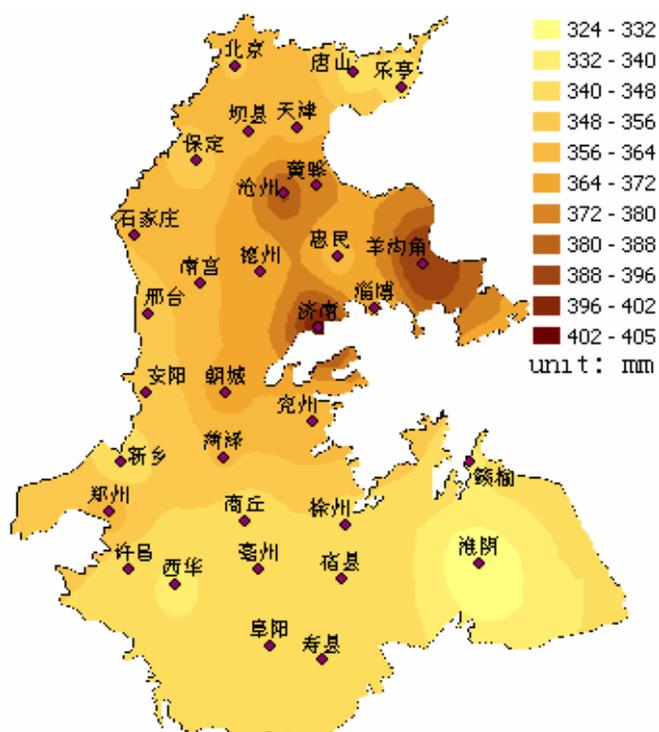


图 6.7 华北平原潜在生长条件下冬小麦的蒸散量(单位：毫米)

Figure 6.7 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: mm)

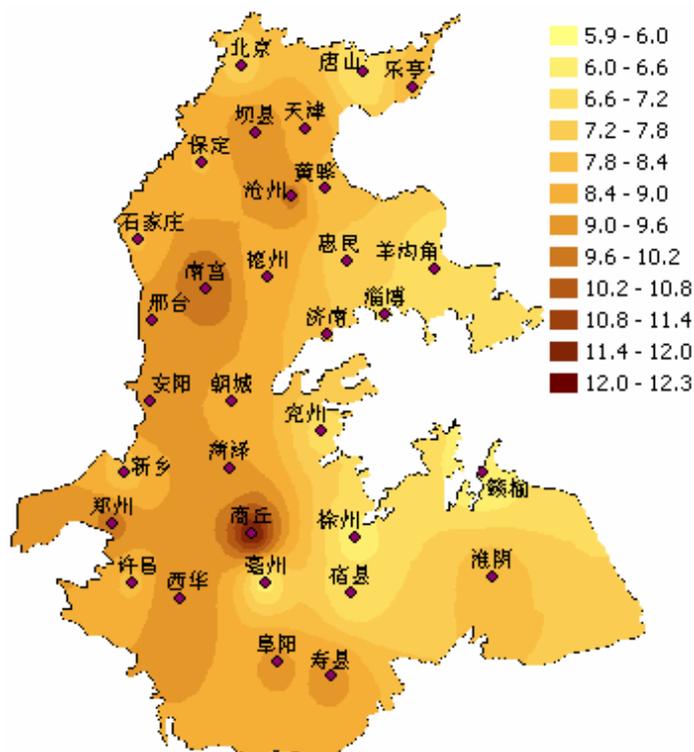


图 6.8 华北平原潜在生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位：百分比)

Figure 6.8 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: percent)

图 6.8 是潜在蒸散量的变异系数在整个平原的分布。从整个区域上看，潜在蒸散的变异系数整体偏小，一般变化在 5.9~12.3 之间，整个区域的平均值为 8.3，最小值与最大值分别出现在赣榆与商丘。和冬小麦一样，变异系数在区域的分布略有东部低西部高的现象。

### 3.2 雨养生长条件下的蒸散

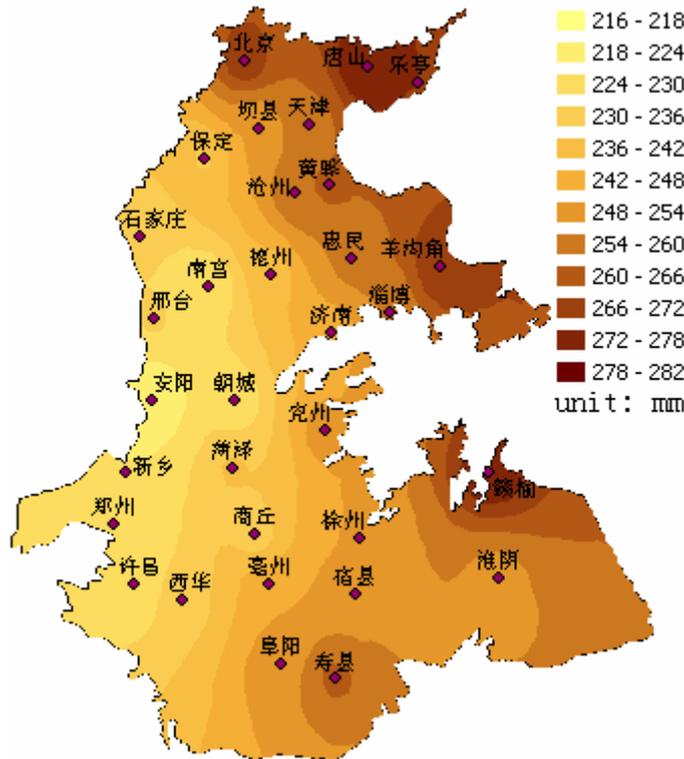


图 6.9 华北平原雨养生长条件下冬小麦的蒸散量(单位：毫米)

Figure 6.9 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: mm)

夏玉米雨养条件下的蒸散量变化在 216~282 mm 之间(图 6.9)，整个区域的雨养蒸散平均值为 247 mm，呈西低东高的趋势，同时北边又比南边略高，与潜在蒸散的趋势有几分类似(见图 6.7)，其主要原因是平原西部边界降水少(见图 5.7)，于是用于可供蒸发与蒸腾的水分也少，因此严重限制了蒸散的量。但由于生育期内各地降水相差不悬殊，因此各地雨养蒸散的差异也比较小。

整个平原雨养蒸散的最大值出现在唐山，多年平均值为 282 mm，某些年份可达 350 mm，最小的年份为 170 mm 左右。雨养蒸散最小的站点是安阳，多年平均值为 216 mm，变化在 164~346 mm 之间。

图 6.10 是雨养蒸散量的变异系数在整个平原的分布，从整个区域上看，雨养蒸散的变异系数比潜在蒸散大不了多少，这是因为玉米生长季高温多湿，一年内超过 70%的降水都发生在玉米生长季，因此不管年型如何，玉米生长季内的蒸散都很旺盛，加上总量较大，导致变异系数与冬小麦雨养蒸散相比比较小。

雨养蒸散量的变率一般变化在 11.9~21.1 之间，整个区域的平均值为 16.6，最小值与最大值分别出现在阜阳与郑州。雨养蒸散量的变异系数在整个平原上分布相对均一。平原北部雨养蒸散量的变异系数略大于南部。除平原中北部这一传统的严重受干旱胁迫的地区外，西南角郑州许昌这一区域雨养蒸散的变异也比较大。除此之外，广大的南部平原和邢台、安阳、菏泽一带的变异比较小。

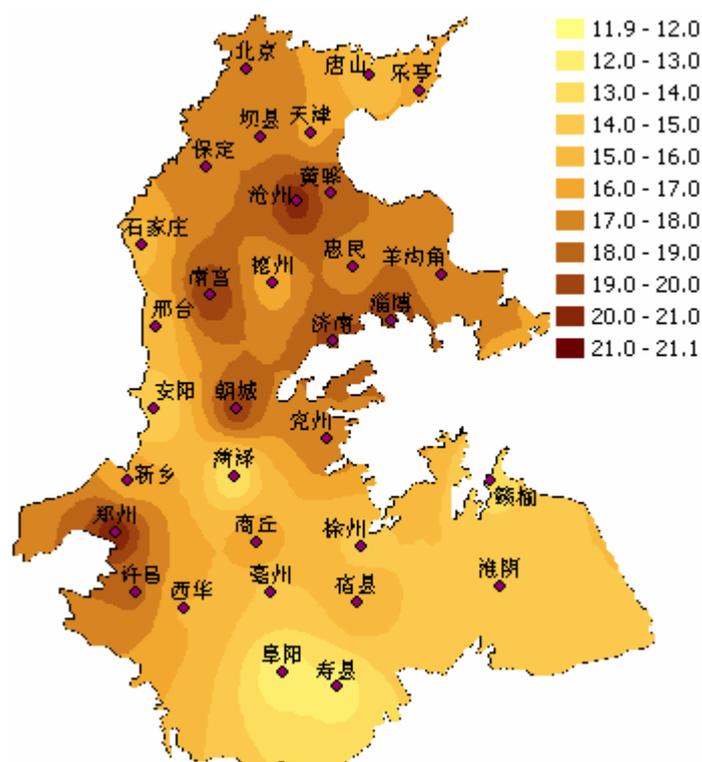


图 6.10 华北平原雨养生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位：百分比)

Figure 6.10 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: percent)

### 3.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差

由图 6.11 可见，夏玉米生长季内，各地的水分亏缺比冬小麦生育期的小许多，水分亏缺额变化在 60~161 mm 之间，呈南北低中间高的趋势，其中北部又比南部高些，整个平原平均值为 109 mm。东西方向上呈东低西高的趋势，因此，水分亏缺额由东北和东南向平原中西部递增。这是由于平原中西部降水量较低所致。亏缺最大的地区在南宫、济南、朝城，程度最轻的地区在寿县、淮阴、赣榆一带。

图 6.12 是各地水分亏缺额的变异系数，整个区域上变化在 34~79 之间，平均值为 51.5，呈南北高中间低的趋势，其中北部又比南部高出许多。

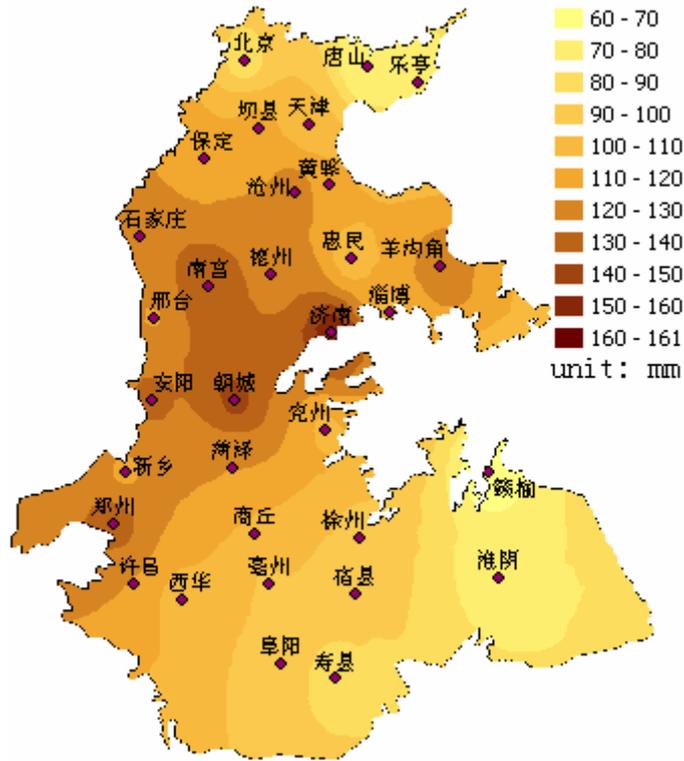


图 6.11 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差(单位: 毫米)

Figure 6.11 Evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in mm)

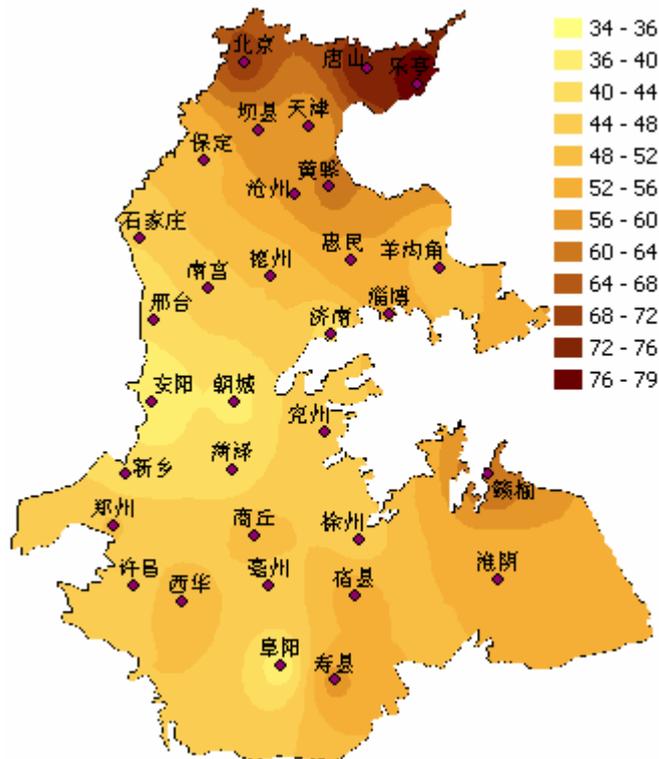


图 6.12 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差的变异(单位: 百分比)

Figure 6.12 Coefficient variation of evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in percent)

结合图 6.11 可见, 平原北部的亏缺额不大, 但年际变化大, 也就是说, 该地年型变化大, 虽然夏玉米生育期水分亏缺不大, 但在干旱的年份里, 如不保证灌溉, 夏玉米的产量仍有严重减产的可能。平原中部是水分亏缺大且相对稳定, 也就是说, 该地缺水缺得厉害, 且每年变化不大, 因此该地是严重的水分亏缺区域。平原南部水分亏缺不大, 变异系数虽大于中部但远小于北部, 因此, 该处是水分亏缺相对不显著的区域。

#### 第四节 生长季蒸散的模拟

华北平原的光热资源适应于冬小麦、夏玉米一年两作的种植制度, 这是华北平原上最常见的作物种植制度, 具体的播种日期与收获日期各地稍有差异, 通常是冬小麦于头年的 10 月播种, 次年 6 月左右收割, 然后续种夏玉米, 于 10 月前后收割。

##### 4.1 潜在生长条件下的蒸散

图 6.13 是前面冬小麦与夏玉米模拟结果的简单相加, 即华北平原冬小麦-夏玉米轮作制下的潜在与雨养条件下的蒸散量。

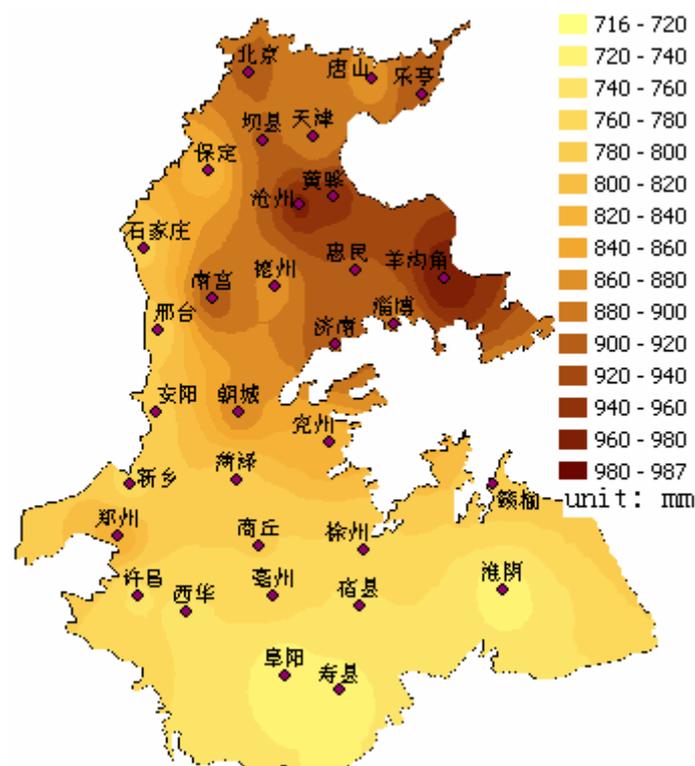


图 6.13 华北平原潜在生长条件下冬小麦的蒸散量(单位: 毫米)

Figure 6.13 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: mm)

由此图可见, 华北平原生长季内的潜在蒸散量为 716~987 mm, 整个区域的

平均值为 836 mm。潜在蒸散量在区域上的分布呈北高南低的趋势，其中，受山脉的阻挡，太行山山前平原的风速普遍比平原其它地方低，因此山前平原的潜在蒸散量比同纬度其它地方低。

潜在蒸散最大值出现在平原中偏北部的黄骅、沧州、南宫一带，这些都是传统的严重受干旱胁迫的地区，其中沧州是著名的沧州漏斗区所在。低值出现在阜阳、寿县、淮阴一带，这些地方的降水量相对充足，空气相对湿度比较大，蒸发需求不如北京旺盛，加上生育期内辐射总量也比平原北部小，因此潜在蒸散不如平原北部。

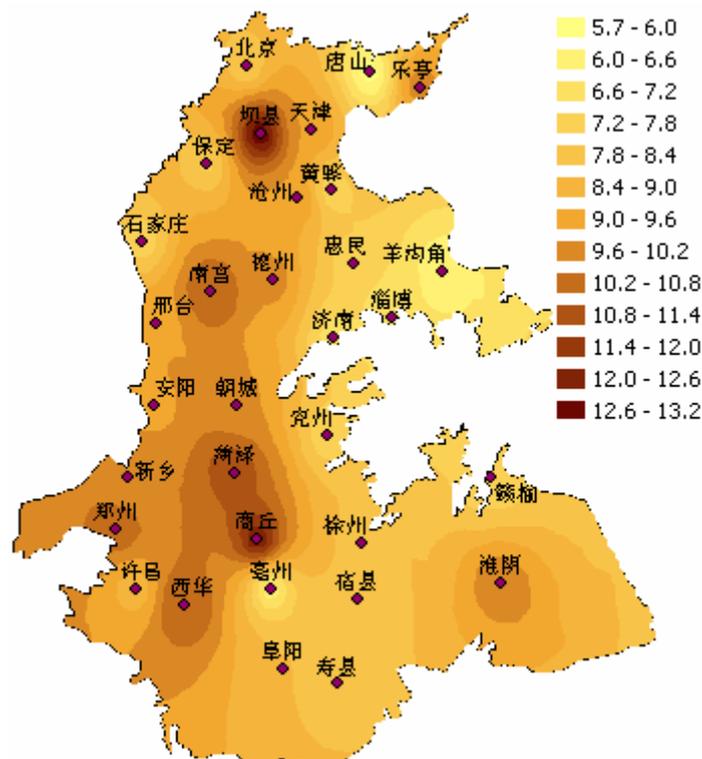


图 6.14 华北平原潜在生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位：百分比)

Figure 6.14 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under potential growth condition (unit: percent)

图 6.14 是潜在蒸散的变异系数。整个平原上，各地的变异变化在 5.7~13.2，平均值为 8.8。由此图可见，潜在蒸散变异系数大的地方集中在平原中北部和西南一块，变异最大的地方分别是坝县、南宫、朝城、荷泽与商丘一带。其它地方的变异系数相对均一，基本稳定在 6.0~9.0 之间。

#### 4.2 雨养生长条件下的蒸散

图 6.15 是华北平原雨养条件下的蒸散量。由此图可见，雨养蒸散为 393~560 mm，整个区域的平均值为 466mm。雨养蒸散量在区域上的分布总体上呈北低南高的趋势，其中平原西侧边界的雨养蒸散量又比东侧低。平原南部的寿县、阜阳与淮阴构成一块高蒸散的区域，而以石家庄为核心的平原中西侧则是低蒸散量的区域。平原北部的蒸散量略高于中西侧，但远小于平原南部。

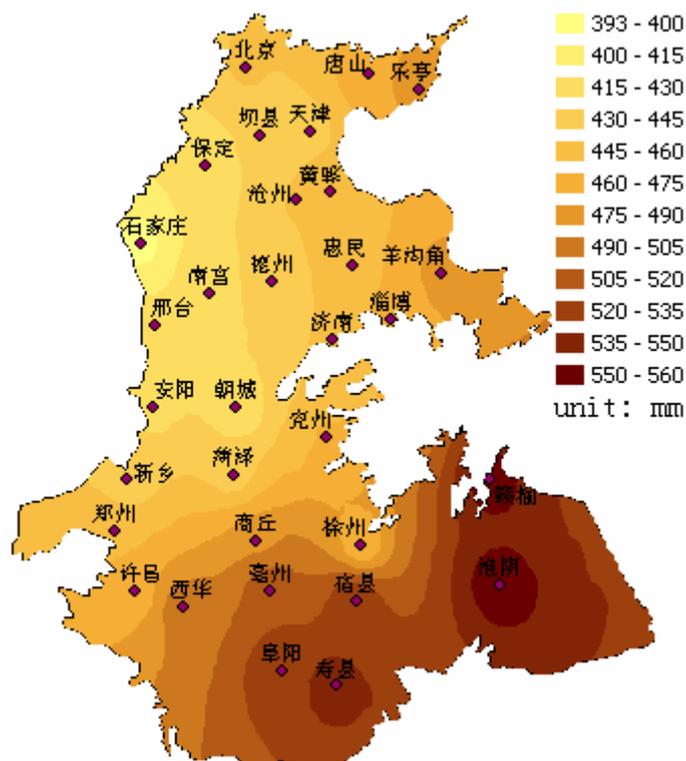


图 6.15 华北平原雨养生长条件下冬小麦的蒸散量(单位：毫米)

Figure 6.15 Evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: mm)

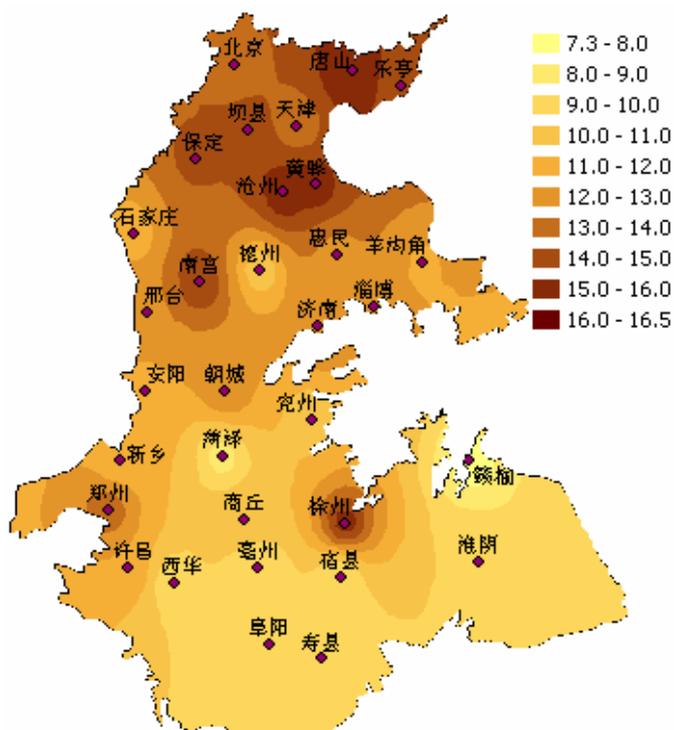


图 6.16 华北平原雨养生长条件下冬小麦蒸散量的变异系数(单位：百分比)

Figure 6.16 Coefficient variation of evapotranspiration of winter wheat in the NCP under rainfed condition (unit: percent)

图 6.16 是雨养蒸散量的变异系数在整个平原的分布，变率一般变化在 7.3~16.5 之间，整个区域的平均值为 12.0，呈北高南低的趋势，其中山前平原又比同纬度的其它地区小。最大值出现在唐山，黄骅与沧州一带位居第二，最小值出现在赣榆，广大的江苏与安徽北部都是低值区。

#### 4.3 潜在蒸散和雨养蒸散之差

图 6.17 是华北平原冬小麦-夏玉米轮作制下潜在蒸散与雨养蒸散之差。这个值可大概地被认为是华北平原的水分亏缺量，也可以近似地理解为华北平原为达到潜在产量而需要的灌溉量。

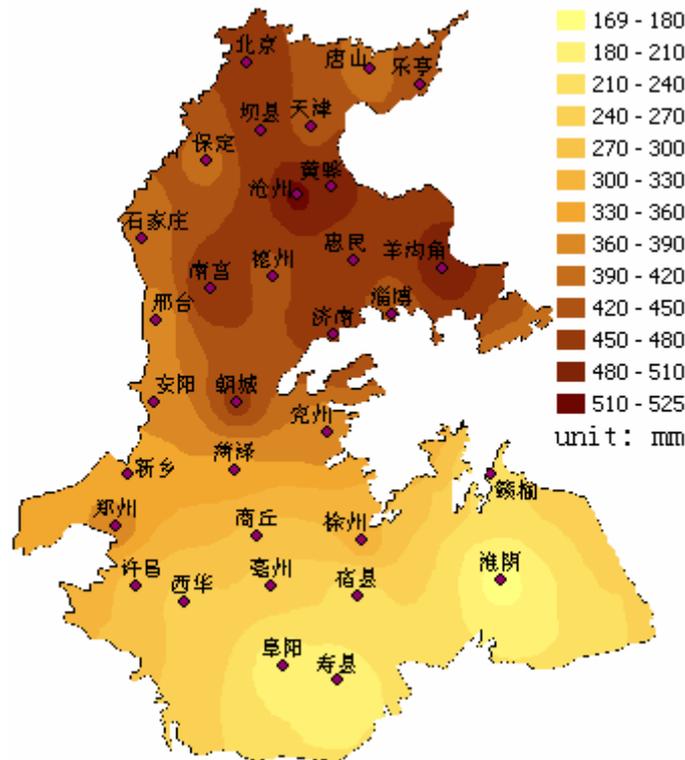


图 6.17 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差(单位：毫米)

Figure 6.17 Evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in mm)

由此图可见，潜在蒸散与雨养蒸散之差变化在 169~525 mm，平均值为 370 mm，呈北高南低的趋势，其中山前平原又比同纬度的其它地区小。以平原中线为界可将平原分成北部水分严重亏缺区和南部轻微亏缺区。北部的水分亏缺大都在 450 mm 以上，年降水量远不能满足作物潜在生产的需要。南部轻微亏缺区年水分亏缺都在 240mm 以下。

图 6.18 是各地水分亏缺额的变异系数，整个区域上变化在 16~41 之间，平均值为 28.1。以平原中偏南处为界，平原可分为北部相对稳定区南部相对剧变区。北部与中部大部地区的变异系数都在 22 以下，而平原南部的变异系数一般都在 34 以上。这主要是由于平原南部的平均值比较小。就潜在蒸散与雨养蒸散之差的绝对变化量来说，各地相差并不大，只是由于平原南部的平均值比较小，因此计算出来的变异系数偏大。

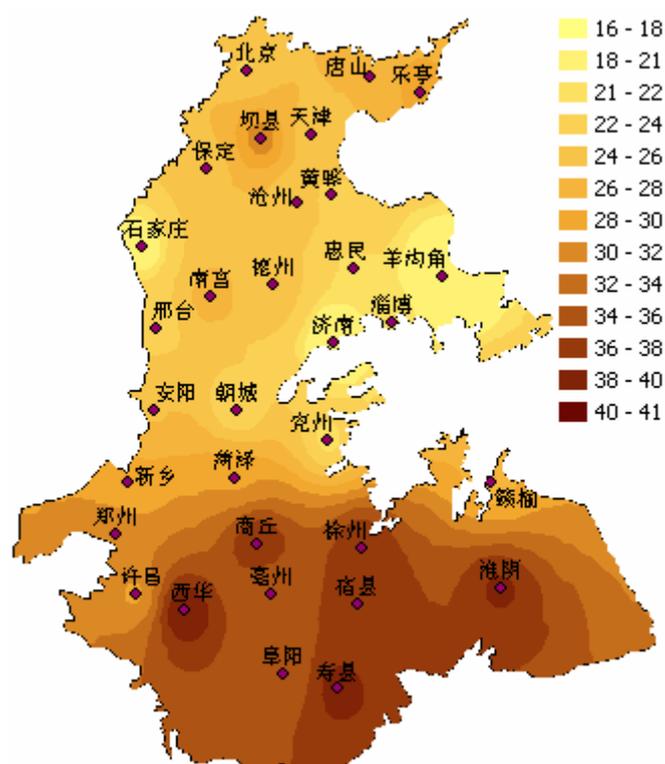


图 6.18 冬小麦潜在蒸散和雨养蒸散之差的变异(单位: 百分比)

Figure 6.18 Coefficient variation of evapotranspiration gap between potential and rainfed conditions (in percent)

#### 4.4 降水与潜在蒸散和雨养蒸散之差

在冬小麦生长季中, 管理人员根据田间的水分状况来决定灌水与否, 水分状况低于一定的阈值后就灌水, 因此用潜在蒸散与雨养蒸散之差来代表灌水量有一定的道理。在轮作制下, 考虑的是农田这整个系统, 此系统中, 降水与灌水分别是水分的两个来源, 蒸散与蒸腾与水分损失的两个渠道。当季作物结束后的水分状况正是下季作物开始时的土壤水分状况, 因此系统相对封闭, 所以这时更应该考虑用降水量与潜在蒸散之差来代表水分亏缺。

降水量和雨养蒸散之差在现实中的意义也很明显, 在农田系统中, 这二者之差就是供水量和需水量的差异。

图 6.19 是降水与潜在蒸散之差, 区域内各站点变化在-490~79 cm 之间, 全平原平均值为-253 mm, 呈北低南高的趋势。由此图可见, 在潜在生长条件下, 平原中部水分亏缺厉害, 各地的水分亏缺都在-300 mm 以上, 此种情况在平原南部稍有改观, 而在平原最南端的阜阳、寿县和淮阴的降水量基本上能维持冬小麦和夏玉米轮作制潜在生长的需要。考虑降水年型的波动后, 实际上整个平原中只有最南端的阜阳、寿县和淮阴一带基本上能保证在大部分的年份里受水分胁迫的危害比较小。平原中部、北部则是易受干旱胁迫的地区, 尤以平原北部的沧州、黄骅、南部为甚。

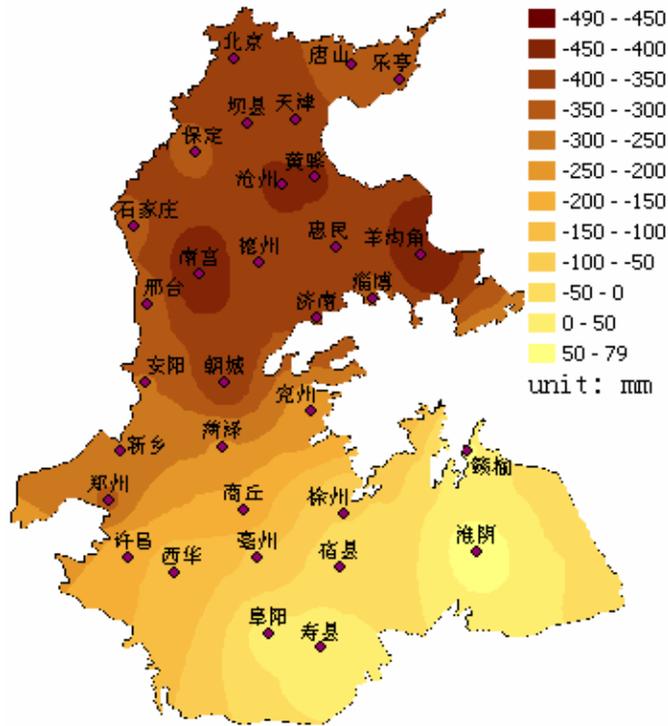


图 6.19 生育季内降水量与潜在蒸散量之差(单位: 毫米)

Figure 6.19 Gap between rainfall and evapotranspiration under potential condition in the winter wheat – summer maize rotation (unit: mm)

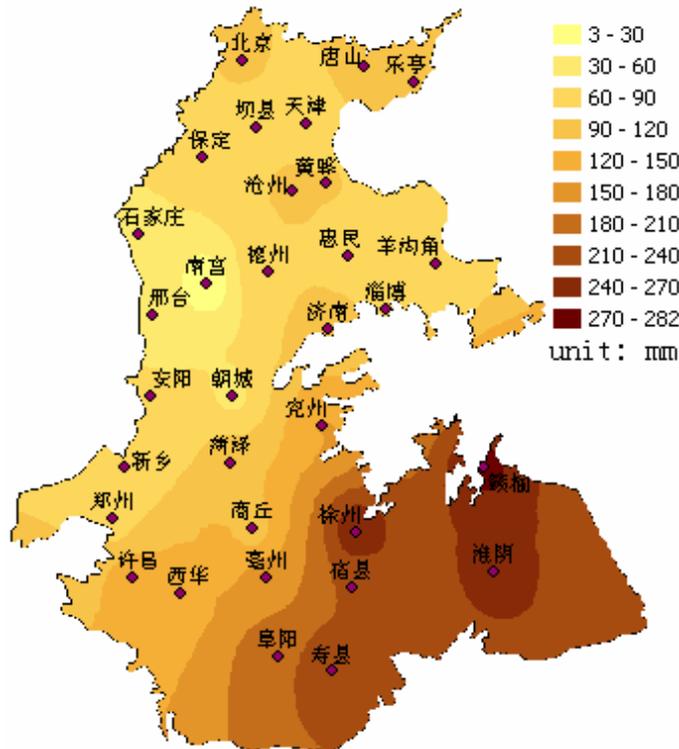


图 6.20 生育季内降水量与雨养蒸散量之差(单位: 毫米)

Figure 6.20 Gap between rainfall and evapotranspiration under rainfed condition

in the winter wheat – summer maize rotation (unit: mm)

图 6.20 是轮作制下降水量与雨养蒸散量之差。由于降水强度不一，在降水强度比较大的时候，有一部分降水通过根系下渗到深层土壤中，受毛管上升水供应的有限及作物根系所达到的深度的限制（例如，冬小麦一般为 1.2 m），这部分水很难为作物再作用。所以降水量与雨养蒸散之差在各地均为正值。此值可近似地被认为是雨养条件下，华北平原各地的水分平衡。

由此图可见，雨养条件下，各地的水分都略有赢余，以南宫为最小，多年平均约为 3 mm，以淮阴与赣榆为最大，约 280 mm。其它地方大小不一，各地平均值为 117 mm，整个平原上呈北低南高的趋势。由图还可见降水分布的水平梯度也很不均匀，南北梯度大，中部梯度小。广阔的平原北部基本保持在 90 mm 以下，然后自平原中部迅速上升，很快达南部的最大值，南部一般都保持在 240 mm 以上。

## 第五节 结论与讨论

农田蒸散是联系土壤—植被—大气连续体水分传输的主要环节，是水循环和水资源研究的重要内容。作物生长模型从土壤-植被-大气连续体理论及生态过程机理出发研究蒸散过程，具有坚实的物理基础，是近来研究蒸散的主要方法之一。

本章的研究目的是通过对 WOFOST 模型模拟的蒸散量的分析，研究华北平原潜在生长与雨养生长条件下的降水量与蒸散量之间的关系。作为农田系统水资源最主要的收入项与支出项，华北平原降水量与蒸散量之间的关系一直为人们所重视。此类研究比较不少，本研究与他们的研究结果具有很高的可比性。宋正山于(1999)提出将华北平原分为三个区域，即：(1)东南部的水资源丰富地区；(2)京津唐水资源相对较多地区和(3)西部水资源缺少区，本研究的结果也证实了这一点。同时，赵昕奕和刘继韩(1999)的研究也表明，冬小麦生育期内，黄河以北作物水分亏缺量在 200-400 mm，该数值与本研究的结果高度一致(见图 6.5)。这说明本章的研究结果是科学的，可靠的，主要结果简述如下：

### 1. 冬小麦生育期内的蒸散量

冬小麦生长季内的潜在蒸散量从南到北变化在 370~585 mm 之间，呈北高南低的趋势，整个区域的潜在蒸散平均值为 468 mm。雨养条件下的蒸散量从南到北变化在 162~309 mm 之间，整个区域的雨养蒸散平均值为 219 mm，呈北低南高的趋势，与潜在蒸散的分布趋势相反。小麦生长季内水分亏缺额严重，全区域变化在 85~394 mm 之间，呈北高南低的趋势。

以平原中部为界，大体可将平原分为北部水分严重亏缺区与南部轻微亏缺区。平原北部的水分亏缺额大且相对稳定，平原南部的水分亏缺额相对较小，但年际波动大，因此在许多年份里，水分亏缺仍有可能对冬小麦的生长造成极大的威胁。

### 2. 夏玉米生育期内的蒸散量

夏玉米生长季内的潜在蒸散量从南到北变化在 324~405 mm 之间，呈南北

低中间高的趋势,其中北部又比南部高些,东部比西部高些,整个区域的潜在蒸散平均值为 356 mm。雨养条件下的蒸散量变化在 216~282 mm 之间,整个区域的雨养蒸散平均值为 247 mm,呈西低东高的趋势,同时北边又比南边略高,与潜在蒸散的趋势有几分类似。

夏玉米生长季内,各地的水分亏缺比冬小麦生育期的小许多,水分亏缺额变化在 60~161 mm 之间,整个平原平均值为 109 mm,水分亏缺额由东北和东南向平原中西部递增。

总体说来,平原北部的亏缺额不大,但年际变化大,也就是说,该地年型变化大,虽然夏玉米生育期水分亏缺不大,但在干旱的年份里,如不保证灌溉,夏玉米的产量仍有严重减产的可能。平原中部是水分亏缺大且相对稳定,也就是说,该地缺水缺得厉害,且每年变化不大,因此该地是的水分亏缺比较严重。平原南部水分亏缺不大,该处是水分亏缺不显著的区域。

### 3. 轮作制下生育期内的蒸散量

华北平原生长季内的潜在蒸散量为 716~987 mm,整个区域的平均值为 836 mm,在区域上的分布呈北高南低的趋势。华北平原雨养条件下的蒸散量为 393~560 mm,整个区域的平均值为 466mm,在区域上的分布总体上呈北低南高的趋势,其中平原西侧边界的雨养蒸散量又比东侧低。冬小麦-夏玉米轮作制下潜在蒸散与雨养蒸散之差变化在 169~525 mm,平均值为 370 mm,呈北高南低的趋势。以平原中部为界也可将平原分成北部水分严重亏缺区和南部轻微亏缺区。北部的水分亏缺大都在 450 mm 以上,年降水量远不能满足作物潜在生产的需要,亏缺超过 60%,亏缺额的年际变异相对稳定。南部轻微亏缺区年水分亏缺都在 240 mm 以下,亏缺约 20%,亏缺额的年际变异较大。

降水与潜在蒸散之差,区域内各站点变化在-490~79 cm 之间,全平原平均值为-253 mm,北低南高。降水量与雨养蒸散之差在各处均为正值,因此各地的水分都略有赢余,以南宫为最小,多年平均约为 3 mm,以淮阴与赣榆为最大,约 280 mm。其它地方大小不一,各地平均值为 117 mm。由图还可见降水分布的水平梯度也很不均匀,南北梯度大,中部梯度小。

4. 区域天然水资源是降水总量,从水量平衡的观点出发,它等于地表径流、地下渗漏和蒸散量之和,从资源利用的角度出发,它等于地表水资源、地下水资源和土壤水资源之和。

从以上结果中可以看出,华北地区冬小麦生育期内的水分亏缺程度存在明显的时间和地域差。由于一年的降水 60%~80%集中在夏季,因此夏玉米生长季内相对不缺水,各地在整个生育期内基本不灌水也很少灌水。冬小麦生育期的缺水情况比较复杂,每个站点的每个年份水分的亏缺情况都不一样。

近年来,由于灌溉面积日益扩大,工业用水不断增加,以及近年来降水减少,造成黄河断流日趋严重,受害最严重的当属位于黄河下游的华北平原。由于地表水资源短缺,人们转而加大地下水开采的力度,严重超采的结果,是出现大面积的地下水下降漏斗区,有的地区地下水已成为不可恢复区,这将对生态环境千万

永久性的破坏。

华北平原农业用水约占国民经济用水的 85% 以上(王菱和倪建华, 2001), 节约农业用水是保护地表水和地下水的关键所在。节约农业用水在于提高作物水分利用效率和减少土壤蒸发, 这是华北平原今后农业发展的主攻方向。

## 第七章 结论与讨论

作物模型与GIS结合是进行区域作物生产模拟及进行宏观分析和管理的办法之一。经过验证的模型也可进行气候变化对区域作物生产影响的评估,而且有可能是很好的评估手段。这种方法不受时间和空间的限制,可以构建各种情景进行模拟研究,尤其是自然界难于进行实验研究的情形,如大范围的CO<sub>2</sub>浓度增加、气候变化以及长期农业管理、土地利用方式对农业持续发展的影响等。

这种方法的难点在于模型必须经过很好的验证。由于模型是作物系统的简化,复杂的模型需要输出的参数非常多,这些参数一般情况下很难获取,而且,简单模型又不能完全反映系统的过程且缺乏适应性。目前的模型中所用的参数也还存在较多的经验成份。此外,利用模型与GIS结合进行区域模拟时需要大量的输入条件,否则进行大区域模拟中模拟的准备工作量非常难于进行。

### 第一节 主要结论

本文利用田间试验数据,在禹城综合试验站这个位于华北平原中部的,在区域生态环境条件上具有代表性的站点对WOFOST模型在华北平原上的应用进行了校正与验证。随后将之用于华北平原32个站点,模拟1961~2000年冬小麦与夏玉米潜在状态与雨养状态下的产量与蒸散量。结合GIS,实现了站点尺度向空间尺度的扩展,并利用GIS强大的空间分析功能,对华北平原冬小麦与夏玉米潜在与雨养状态下的产量与蒸散进行了详细的描述,分析了华北平原冬小麦与夏玉米潜在与雨养状态下的产量与蒸散与气候因子的关系,以及这种关系在华北平原不同地点的不同表现形式。

主要研究结果如下:

#### 1. 模型的适用性

通过在禹城综合试验站布置实验,采集观测到的数据表明,WOFOST在模拟禹城综合试验站冬小麦和夏玉米的生长方面具有良好的适用性。

通过本章的研究,得出如下初步结论:(1)WOFOST模型的机理性强,对作物生长的光合作用、同化物的分配等过程描述详尽,非常适合本文的研究目的。(2)在具备合适的参数和模型所必需的输入数据的情况下,模型可以以较高的精度模拟作物的叶面积指数、干物质积累过程、蒸散量等等。(3)WOFOST模型对叶面积指数、干物质积累和产量的模拟虽有一定的差异,但总体来看,模拟结果能良好地反映冬小麦与夏玉米的生长过程。(4)通过参数敏感性分析,确定了一些如单叶片光能利用率、蒸腾速率的校正因子、比叶面积、可见光的消散系数等等对模拟结果影响最重大的参数。(5)由于模型未考虑华北平原特有的一些过程,如冬小麦的越冬过程与灌浆期遭遇的干热风等等,因此与实际情况相比,模拟结果存在一定的误差。

本研究布置的实验观测到的数据真实可信,校正后的WOFOST模型在本研究地区的模拟结果基本可靠,可以用来做进一步的研究和利用。

#### 2. 冬小麦

降水在年内的分布极为不均,冬小麦生育期降水仅点全年降水量的1/4左右,年际变化很大,对冬小麦的生长非常不利。

对华北平原冬小麦潜在与雨养状态下的模拟结果表明,冬小麦的潜在产量较

高,但是各地受程度不一的水分亏缺程度的影响,雨养产量较潜在产量大为减少,导致了潜在产量呈北高南低的趋势而雨养产量却北低南高,由此可看出平原内生育期降水量与产量存在明显的互补关系。辐射与积温各地的变异都较小,因此潜在产量的变异也较低。雨养产量由于考虑了变异程度较大的降水量,因此各地雨养产量的变异程度都比较高。

冬小麦生长季内的降水远不能满足作物耗水的需要,尤以平原中北部为甚,生长季内潜在条件下的蒸散与雨养条件下的蒸散的差额巨大,因此利用地下水和引黄水灌溉及采用抗旱品种、提高作物的水分利用效率对于保证冬小麦稳产高产至关重要。

受气象因素的影响,各地冬小麦的产量呈现不同的特点。平原北部辐射强,积温较小,生育期较长,因此同化的干物质较多,经济产量高,但是平原北部降水严重不足,雨养产量极其低下。平原南部辐射较北方低,积温较高,生长期较北方短,因此经济产量不如北方高,但是南部降水亏缺的现象不如北方严重,因此雨养产量反倒比北部高。这说明,在平原北部,降水量对实际产量起支配作用,但在南部水分的限制作用不足。对此更详细的分析可为调水的分配方案作为参考依据。

### 3. 夏玉米

对华北平原夏玉米潜在与雨养状态下的模拟结果表明,夏玉米的潜在产量较高,呈北高南低的趋势,但各地受程度不一的水分亏缺程度的影响,雨养产量较潜在产量都略有减少,其中以平原中部程度最重,平原北部次之,南部最缓,因此雨养产量呈平原中部最低,北部高一些,南部最高的趋势。夏玉米生长期内,辐射与积温各地的变异都较小,相对的潜在产量变异也较低。由于华北平原各地年降水量大部集中在夏玉米生长季,各地内的降水量都比较大,因此降水量的变异系数较冬小麦生长季内的小,相应的雨养产量的变异系数也比冬小麦的要小。

夏玉米生长季内的降水相对充足,平原各处基本上都无需灌溉,生长季内潜在条件下的蒸散与雨养条件下的蒸散的差额不大,基本处于可接受的状态,即借助良好的管理方式可削弱水分亏缺对作物造成的不利影响,但是一些站点降水的年际变化仍比较大,为了保证夏玉米的高产稳产,一些站点在某些干旱年内仍需一定的灌溉保证。

### 4. 综合分析果

由于冬小麦漫长越冬期的存在,冬小麦潜在产量与辐射总量的关系不显著,而夏玉米生长季内温度高,作物生长迅速,因此潜在产量与辐射总量的正相关关系明显,各站点夏玉米产量波动主要也是受辐射波动的影响所致。由于模型中认为生育期受积温的控制,平原北部温度比较底,因此生育期长,导致冬小麦与夏玉米的产量都较南部高。积温的变异对冬小麦与夏玉米的产量波动的影响不显著。

结合冬小麦与夏玉米蒸散的模拟结果可以看到,华北平原中北部是水分亏缺最严重的区域,尤其是沧州、南宫,黄骅一带,年降水量基本不能满足作物耗水的需要,降水量年际与生长季大的波动更加剧了这种现象。平原南部降水相对较充足,年降水量基本能满足一年两熟的需要,最南端站点的年降水量甚至超过了冬小麦与夏玉米的潜在蒸散量。

从本研究可以看出,华北平原作物产量的提高主要受水分供应的限制,但各地受限制的程度不一,因此落实到具体的实施方式时需区别对待。

## 第二节 研究不足之处

本研究以WOFOST模型为例,对作物模型与GIS结合进行区域模拟作了初步尝试,旨在探讨多地区模拟与生产评估的方法。结果表明思路与方法基本上是可靠,不足之处有以下几点:

其一是由于试验条件、手段和时间的限制,没有能够对模型中的关键计算模式、参数进行测定,分步验证,分析重要过程的合理性以及存在的总量,这样得出的结果可以为模型的修改提供重要的依据。模型的检验还需要多点。而且,在作物模型应用在区域之前,最好能对其在区域上多点的应用进行校正与验证。本研究受时间的限制,未能完成这一步的工作,仅在平原中部的禹城综合试验站完成验证后就应用在区域上,这可能会对平原北部与南部最后的模拟结果带来一定的误差。

其二是考虑的因素较少,简化了实际情况。模拟过程中仅考虑了光照、温度与降水对作物生长的影响,管理措施也没考虑。华北平原自北向南,作物品种特性存在一定的差异,出于凸现气象因子对作物生长影响的需要,本研究用一个作物品种来表征华北平原所有的作物品种,因此引入了一定的误差。所以,本文的研究结果如产量和蒸散等,可能与实际情况存在一定的差异。如有可能,应根据生长期的变化,选择不同的作物品种。

其三是本研究仅仅对该地区的主要代表性土壤类型-沙壤土进行了试验验证,还没有对其它土壤类型如中壤土和粘壤土进行试验验证,为了完善此项工作,今后需要在不同土壤类型上进行试验验证工作。还有诸如土地利用、土壤分布、地下水分布等没有考虑。研究中假定华北平原的地下水水位均一,没有考虑各地的地下水分布动态,土壤类型也假定为均一的沙壤土,这些都是本研究尚欠缺的地方。华北平原区域广泛,土地利用状况非常复杂多变,本研究忽略了这种状况,没有剔除区域中的非农用地,此项工作还有待以后继续深入。

## 第三节 研究展望

采用模型研究气象因素和作物生长的关系,并以此为基础进行管理和决策是农田生态系统管理的重要方向。该方法在国外已有大师研究与应用,我国应该说牌起步阶段。本研究是在试验观测的基础上对WOFOST模型进行了校正与验证,并应用该模型研究了华北平原光温水对作物产量和蒸散的影响。作者认为今后需要深化研究的领域如下:

### 1. 进一步改进模型

对模型比较敏感的参数进行深入研究,进一步提高模型的模拟精度。受时间的限制,本研究未能对模式进行修改。WOFOST模型是由荷兰开发的,某些过程与设置不太符合中国的实际,例如,华北平原冬小麦生育期间存在较长的越冬休眠期,利用作物模型准确模拟冬小麦越冬过程有利于改善模型的模拟效果。WOFOST机理性虽强,但仍没有考虑到这个问题。在以后的研究中,可以考虑修改模型,调整内部的一些过程,使其能更好地服务于中国的研究。

### 2. 综合考虑水资源状况等因素

本研究对水资源的可供给量和实际情况能支撑多少产量的分析不够。今后的研究可综合考虑华北平原水资源的总量,包括降水量、引黄量和地下水合理开采量,结合南水北调工程的调水量,模拟计算华北平原冬小麦和夏玉米的产量。目

前华北平原的农业从水资源的角度看是不可持续的,综合考虑以上水资源的总量后,可以提出华北平原的农业在可持续的状态下出产的粮食总量。

### 3. 进一步挖掘模拟结果

本研究得到的模拟结果众多,包括每个站点的,分冬小麦与夏玉米生长季的每年逐日的所有的输出,输出项目包括根、茎、叶、穗的干物重及地上部分总干重。此外,LAI、蒸腾、土壤蒸发、水分利用效率等等。本文只对其中的产量与蒸散作了分析,因此仅是对模拟结果作了一个非常概括的描述。而且在对模拟结果的计算与处理的过程中(如计算平均值),信息损失很大。今后应考虑利用新的分析方法对模拟结果进行深度挖掘,同时从广度上利用这些模型结果。

### 4. 与遥感的结合

遥感信息具有时频高、覆盖范围大、成本低、波段范围宽等特点,是很理想的信息源。利用遥感信息监测作物长势,建立光谱反射率与LAI、土壤温度与土壤水势之间的关系,将从遥感信息中提取的LAI和土壤水势输入作物模型,可实现作物模型与遥感的结合,从而将作物模型由点扩展至区域尺度,方便模型应用于区域研究中。作物生长机理模型能够描述农作物的生长发育状况,根据气候条件预测出最终产量和可能的产量波动。但由于模型结构和参数的尺度扩展问题,区域范围的应用受到很大限制,机理模型的优势也一直没有完全发挥出来。随着GIS和遥感技术的发展,结合GIS与遥感的机理模型的区域应用有了很多尝试。

## 参考文献

- Addiscott, T.M. and Whitmore, A.P. 1987. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 109, 141-157.
- Addiscott, T.M. and Whitmore, A.P. 1991. Simulation of solute leaching in soils of differing permeabilities. *Soil Use & Management*. 7(2): 94-102.
- Anderson M.C. 1966, Stand structure and light penetration II .A theoretical analysis. *Journal of Applied Ecology*, 3: 41-54.
- Andrieu B., Ivanov N., Boissard P. 1995. Simulation of light interception from a maize canopy model constructed by stereo plotting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75, 1/3, 103-119.
- Bachelet, D., Herstrom, A., Brown, D., 1993. Rice production and climate change: design and development of a GIS database to complement simulation models. *Landscape Ecol.* 8, 77-91.
- Baier, W., and Robertson, G.W. 1996. Soil moisture modeling - Conception and evolution of the VSMB. IN: Proceedings of the Baier and Robertson Symposium on modeling and measurement of soil water content, CSSS Annual conference, 7-11 July 1996 held in Lethbridge, Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 76, no. 3 (Aug) [special issue]: 251-261.
- Baker, D.M. 1983. GOSSYM, a simulation of cotton crop growth and yield. South Carolina: South Carolina Agriculture Experiment Station. pp.125.
- Batjes, J.H., 1989. Matching of land use requirements with land qualities using the Jamaica physical land evaluation system. Tech. Bull. 15. Soil Survey Project (PRPD). Kingston, Jamaica.
- Bechini, L., Bocchi, S. and Maggiore, T., 2003. Spatial interpolation of soil physical properties for irrigation planning. A simulation study in northern Italy. *Eur. J. Agron.* 19, 1-14.
- Beek, J. and Frissel, M.J. 1973. Simulation of Nitrogen Behavior in Soils. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 67 pages. *Earth-Science Reviews* 10(4):344-345. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Bell, M.A. and Fischer, R.A. 1994. Using yield prediction models to assess yield gains: a case study for wheat. *Field Crops Res.* 36:161-166.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A. 1983 Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology* 63:271-286.
- Bergstrom, L. and Jarvis, N.J. 1991. Prediction of nitrate leaching losses from arable land

- under different fertilization intensities using the SOIL-SOIL N models. *Soil Use and Management* 7:79-85.
- Bergstrom, L., Johnsson, H. and Torstensson, G. 1991. Simulation of soil nitrogen dynamics using the SOILN model. *Fert. Res.* 27: 181–188.
- Boogaard, H.L., van Diepen, C.A., Rötter, R.P., Cabrerav J.C.M.A., van Laar, H.H., 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5. Technical. Document 52, DLO Winand Staring Center, Wageningen, the Netherlands.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88, 704-716.
- Borg, G.C., Jansson, P.E. and Lindén, B. 1990. Simulated and measured nitrogen conditions in a manured and fertilized soil. *Plant Soil* 121:251–267.
- Brisson, N. C., Gary, Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P. Bussie`re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudille`re, J.P., He`nault, Maraux, C., F., Seguin, B. and Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal Agronomy.* 18:309-332.
- Brouwer R. 1962. Distribution of dry matter in the plant. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 10: 361-376.
- Brouwer, R. and de Wit, C.T. 1969. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences, In. W.J. Whittington(Eds): *Root Growth. Proceedings of the 15th easter school in Agri. Science.* University of Nottingham. Butterwords. London, 224-244.
- Burns I.G. 1980. Influence of the spatial distribution of nitrate on the uptake of N by plants: A review and a model for rooting depth. *J Soil Sci.* 31: 155-173.
- Calixte, J.P., Jones, J.W., Lal, H., 1992. Developer's guide for AEGIS v1.00. *Agric. Eng. Dep., Univ. of Florida.* Gainesville.
- Carbone, J.G., narumalani, S., king, M., 1996. Application of remote sensing and GIS technologies with physiological crop models. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62, 171-179.
- Claasen N. and Barber S.A. 1976. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant root system. *Agron. J.* 68: 961-964.
- Clay D.E., Molina, J.A.E., Clapp, C.E., Linden, D.R. 1985. Nitrogen-tillage-residue management: II. Calibration of potential rate of nitrification by model simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:322-325.
- Clay, D.E., Carlson, C.G. Brix-Davis, K., Oolman, J. and Berg, R. 1997. Soil sampling strategies for estimating residual nitrogen. *J. Prod. Agric.* 10:446-452.

- Colson, J., Wallach, D. Bouniols, A. Denis, J.B. and Jones, J.W. 1995. Mean squared error of yield prediction by SOYGRO. *Agronomy Journal*. 87:397-402.
- Cowan, I.R. 1968. The interception and absorption of radiation in plant stands, *Journal of Applied Ecology*, 5: 367-379
- Cowan, I.R. 1977. Stomatal behaviour and environment. *Adv. Bot. Res.* 4:117-228.
- Curry, R.B., Peart, R.M. Jones, J.W., Boote, K. J. and Allen, L.H. 1990. Simulation as a tool for analyzing crop response to climate change. *Trans. of the ASAE*. 33(3): 981-990.
- de Wit C.T., 1970. Dynamic concepts in biology. In: Setlik I (ed.) *Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity*. Pudoc, Wageningen, Netherlands. pp. 17-23.
- de Wit C.T., et al. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1978.141
- de Wit, C.T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Inst. Biol. Chem. Res. Field Crops Herb. Agric. Res. Rep.* 663. Wageningen, Netherlands.
- Delécolle, R., Maas, S. Guérif, J.M. and Baret, F. 1992. Remote sensing and crop production models: present trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 47:145-161.
- Donigan, A.S., Imhoff, J.C. Bicknell, B.R. and Kittle, J.L. 1983. *Guide to the Application of Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF)*. EPA/600/3-89/048a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Duncan W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A. and Hanau, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*. 38:181-205.
- Duncan. W.G. et al. 1971. Simulation of growth and yield in cotton: A computer analysis of the nutritional theory. *Proc. Beltwide Cotton Prod. Res. Conf.* 249.
- Goudriaan, J. 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study*. PUDOC - Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands, 249p.
- Goudriaan, J. 1996. Predicting crop yields under global change. In B. H. Walker and W. Steffen(eds.) *Global change and terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hammer, G.L., McCown, R.L., and Freebairn, D.M. 1993. APSIM: The Agricultural Production Simulator - its role and structure. *Proceedings of the 7th Australian Agronomy Conference*, Australian Society of Agronomy. Australian Institute of Agricultural Science, pp. 232-235.
- Hammer, G.L., Muchow, R.C., 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. 1. Development and testing of a simulation model. *Field Crops Research* 36, 221-234.
- Han, S., Evans, R.G., Hodges, T., Rawlins, S.R., 1995. Linking a geographic information

- system with a potato simulation model for site-specific crop management. *J. Environ. Qual.* 24, 772-777.
- Hannaway, D.B. and Gao, L. 1983. ALFAMOD: An Interactive microcomputer simulation model. *Agron. Abstr.* p. 21.
- Hansen, J.W., Jones, J.W., 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agr. Syst.* 65, 43-72.
- Hart, R.H. and Hanson, J.D. 1990. PASTORAL grazing simulator. *J. Agronomy. Educ.* 19:55-58.
- Hearn A.B., 1994. OZCOT: a simulation model for cotton management. *Agricultural systems*, 44: 257-299.
- Hodges, T., Botner, D., Sakamoto, C. and Hays Haug, J. 1987. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. cornbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40: 293-303.
- Hoogenboom, G., Lal, H., Gresham, D.D., 1993. Spatial yield prediction. ASAE Pap. 93-3550. Am. Soc. Agri. Eng. St. Joseph. Mi.
- Horie, T., 1993. Predicting the effects of climatic variation and effect of CO<sub>2</sub> on rice yield in Japan. *J Agric. Meteor.* Tokyo 48, 567-574.
- Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H.G.S., Kropff, M.J., 1995. The rice model SIMRIW and its testing. In: Matthews, R.B., Kropff, M.J., Bachelet, D., Van Laar, H.H. (Eds.), *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia*. CAB International, Oxon, UK, pp. 51-66.
- Hulme, M. Barrow, M.E., Arnell, W.N., Harrison, P.W., Jonhs, T.C., Downing, T.E., 1999. Relative impacts of humaninduced climate change and natural climate variability. *Nature*. 397, 688-691.
- Hutson, J.L., and Wagenet, R.J. 1992. LEACHM. Leaching Estimation And CHemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in unsaturated zone. Version 3. Dep. of Agronomy, Cornell Univ., Ithaca, NY.
- IBSNAT. Technical report 5: Documentation for IBSNAT crop model input and output files, version 1.1: for DSSAT2.1 IBSNAT project. 1990.2.
- Ivanov N., Boissard P., Chapron M., Andrieu B. 1995. Computer stereo plotting for 3-D reconstruction of a maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75, 1/3, 85-102.
- Jane S., Randolph, J.C., Habeck, M., Doering ,O.C., Pfeifer, R.A., Rao, D.G., Johnston, J.J., 2000. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States, *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 82. 139-158.

- Jassen, B. H. 1989. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils. Department of soil science and plant nutrition, Wageningen Agri. System, 312, 55-65
- Jones J.W. and Ritchie J.T., 1991. Crop growth models. In: Hoffman G J ed. Management of farm irrigation system. St. Joseph, MI: ASAE, 63-89.
- Jones, C. and Kiniry, J. 1986. Ceres-N Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, Temple, TX.
- Kline, D.E., Bebder, D.A., McCarl, B.A., 1989. FINDS: Farm level intelligent decision support system. Applied Engineering in Agriculture, 5, 273-82.
- Lal, H., Jones, J.W., Peart, R.M., Shoup, W.D., 1992. FARMSYS - A whole-farm machinery management decision support system. Agricultural systems 38, 257-273.
- Leffelear, P.A., Wessel, W.W. 1988. Denitrification in a homogeneous closed system: Experiment and Stimulation [J]. Soil Science. 146: 335-349.
- Liu, C.M., Yu, J.J., Eloise, Kendy. 2001. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. Water International. 26: 265-272.
- Liu, Xuejun Ju, Xiaotang Zhang, Fusuo, Pan, Jiarong Christie, Peter. 2003, Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat–maize cropping system in the North China Plain, Field Crops Research 83: 111–124.
- Loague, K. M. and R. A. Freeze. 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. Water Resource Research. 21:229-248.
- Lockwood J G, Jones C A and Smith R T. 1989. The estimation of soil moisture deficits using meteorological models at an upland moorland site in Northern England. Agricultural and Forest Meteorology. 46: 41-63.
- Loomis. R. S. and W. A. Williams. 1963. Maximum crop productivity: an estimate. Crop Science. 3:67-72.
- Luo, Y., Teng, P.S. Fabellar, N.G. and Tegeest, D.O. 1998. The effects of global temperature change on rice leaf blast epidemics: a simulation study in three agroecological zones. Agriculture, Ecosystems and Environment. 68: 187-196.
- Magnusson, B., Söderström, M., 1994. Combining crop growth models and geographical information systems for agricultural management. Acta Agric. Scand. Sect. Soil Plant Sci. 44, 65-74.
- Matthews, R.B., Kropff, M.J., Bachelet, D., van Laar, H.H., 1995a. Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia. IRRI/CAB International, Wallingford, UK, p. 289.
- Matthews, R.B., Kropff, M.J., Horie, T., Bachelet, D., 1997. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. Agric. Syst. 54, 399-425.

- Mayr, E. 1982. The growth of biological thought. Harvard Univ. Press. Cambridge, MA.
- Meinke, H., Hammer, G.L., 1995. A peanut simulation model: II Assessing regional production potential. *Agron. J.* 87, 1093-1099.
- Mendez, D., Grabski, S.V., 1992. A knowledge-based agricultural geographic information system for the Dominican Republic. P. 127-145. In Mann, C.K. and Ruth, S.R. (ed.) *Expert systems in developing countries: Practice and promise.* Westview Press, Boulder, CO.
- Moen T N, Kaiser H M. 1994. Regional Yield estimation using a crop model: concepts and validation. *Agricultural systems*, 46: 79-92
- Molina J.A.E., Hadas Aviva and Clapp, C.E. 1990. Computer simulation of nitrogen turnover in soil and priming effect. *Soil Biol. Biochem.* 22: 349-353.
- Molina, J.A.E., and K. Richards. 1984. Simulation models of the nitrogen and carbon cycle in the soil–water–plant system, NCSWAP. Guide for the preparation of input data files and execution of NCSWAP. Soil Series 116. Dep. of Soil Sci., Univ. of Minnesota, St. Paul.
- Monteith, J. L. 1981. Epilogue: themes and variation. *Plant Soil.* 58:305-309.
- Muchow, R.C., Sinclair, T.R., Bennet, J.M., 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations. *Agronomy Journal.* 82, 338-343.
- Nimah, M.N. and Hanks, R.J., 1973. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 37: 522-527.
- Oreskes, N., K. Shrader-Frechette and K. Belitz. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science (Washington, DC)* 263: 641-646.
- Oumarou Badini, Claudio O. Stöckle and Eldon H. Franz. 1997. Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 64:233-244.
- Pan Deyun. 1989. Simulation of tillering and potential production of indica rice. In: IRRI ed. *Case studies in crop growth simulation.* Manila: IRRI, 6-38.
- Papajorgji, P., Jones, J.W., Calixte, J.P., Beinroth, F.H., Hoogenboom, G., 1993. A generic geographic decision support system for estimating crop performance. P. 340-348. In *Integrated resource management and landscape modifications for environmental protection.* Proc. Conf. Am. Soc. Agri. Eng. St. Joseph. Mi.
- Parton, W.J., Morgan, J.A. Altenhofen, J.M. and Harper, L.A. 1988. Ammonia volatilization from spring wheat plants. *Agron. J.* 80:419-425.
- Pease, C. M. and J. J. Bull. 1992. Is science logical? *BioScience* 42:293-298.

- Peiris, D.R. Crawford, J.W., Grashoff, C. R., Jefferies, A., Porter, J. R. and Marshall, B. 1996. A simulation study of crop growth and development under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79:271-287.
- Penning de Vries et al. Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 1989.271
- Penning de Vries F W T, Jansen D M, Bakema A, Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Pudoc Wageningen* 1989,6
- Penning de Vries FWT, Brunsting AHM, van Laar HH. 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *Journal of Theoretical Biology* 45: 339-377.
- Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, ten Berge, H.F.M., Bakema, A. 1989. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops, Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC), Wageningen, The Netherlands, pp 271.
- Philip J R. Plant water relations:Some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*.1966, (17):245~268.
- Poels, R.L.H., Bijker, W., 1993. TROPFOR, a computer programe to simulate growth and water use of tropical rain forests developed from the "WOFOST" programe. Wageningen University, Dept. of Soil science and geology, Wageningen, The Netherlands.
- Pommel, B., Y. Sohbi, and B. Andrieu. Use of virtual 3D maize canopies to assess the effect of plot heterogeneity on radiation interception. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 110(1 ): 55~67.
- Porter, J. R., P. D. Jamieson and D. R. Wilson. 1993. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, and SWHEATfor non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Research*. 33:131-157.
- Porter, J. R., Semenov, M.A., 1999. Climate variability and crop yields in Europe. *Nature*. 400,724.
- Prusinkiewicz, P., Hammel, M. S., Hanan, J., and Mech, R. *Handbook of formal language: Visual model of plant development* Springer-Verlag, 1996. 535 ~ 597.
- Rabbinge, R. and Rijdsdijk, F.H. 1983. EPIPPE: A disease and pest management system for winter wheat, taking account of micrometeorological factors. *EPPO Bull*. 13: 297-305.
- Ragab, R., Finch, J. and Harding, R. 1997. Estimation of groundwater recharge to chalk and sandstone aquifers using simple soil models. *Journal of Hydrology*. 190(1-2): 19-41.
- Ramos, C. and Carbonell, E.A., 1991. Nitrate Leaching And Soil-Moisture Prediction With The Leaching Model. *Fertilizer Research*, Vol.2-3, Ch.19, No.2-3, pp.171-180
- Rao, V. B., Leonardo D.A. Sá, Sergio, H. Franchito and Kioshi Hada. 1997. Interannual variations of rainfall and corn yields in Northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*. 85: 63-74.

- Ritchie J.T. Classification of crop simulation models. In: Uhler P. F., Carter G C. Crop modeling and related environment data: a focus on applications for arid and semiarid regions in developing countries. 1994, 3~14
- Ritchie, J.T. 1991. Wheat phasic development. p. 31-54. In Hanks and Ritchie (ed.) Modeling plant and soil systems. Agron. Monogr. 31, ASA, CSSSA, SSSA, Madison, WI.
- Ritchies, J.T. Specification of the ideal model for predicting crop yields In: R.C. Muchow and J.A. Bellamy(Eds). Climatic risk in crop production: models and managements for the semiarid tropics and subtropics. CAB international. Wallingford, 1991. 97-121
- Schenk, M.K. and Barber, S.A. 1979. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 880-883.
- Seligman, N.C. and van Keulen, H. 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel, M.J and van Veen, J.A. (Eds.), Simulation of Nitrogen Behavior of Soil-Plant Systems, PUDOC, Wageningen, Netherlands, 191-221.
- Seligman, N.G. 1990. The crop model record: Promise or poor show? p. 249-263. in R. Rabbinge et al. (eds.) Theoretical prediction ecology, reflections and prospects. Pudoc, Wageningen, Netherlands.
- Seng Lung, W.U. and Larson C.E. 1995. Water Quality Modelling of Upper Mississippi River and Lake Peppin. Journal of Environmental Engineering. 121: 691-699.
- Singh, U., Brink, J.e., Thornton, P.K., Christianson, C.B., 1993. Linking crop models with a geographic informations system to assist decisionmaking: Aprototype for the Indian semiarid tropics. Pap. Ser. IFDC-p-19. Int. Fert. Dev. Ctr.. Muscle Shoals, AL.
- Smith GS, Curt JP, Edward C M, A method for analyzing plant architecture as it relates to fruit quality using three-dimensional computer graphics Annals of Botany, 1992, 70: 265-269.
- Stoorvogel, J.J., 1995. Integration of computer-based models and tools to evaluate alternative land-use scenarios as part of an agricultural systems analysis. Agri. Syst. 49, 353-367.
- Supit, I., Hiiijer, A.A. and van Diepen, C.A. 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Brussels, Luxembourg: Joint Research Center, Commission of the European Communities.
- Taylor H.M. and Klepper B. 1978. The role of rooting characteristics in the supply of water to plants. Advances in Agronomy. 30:99-128
- Thomas E., Hoogenboom, Gerrit., Jones, J.W., Wilkens, P.W., 1997. AEGIS/WIN: a computer program for the application of crop simulation models across geographic areas.

- Agronomy Journal. 89, 919-929.
- Thomas R.S. and Seligman No'am G. 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal*. 88:698-704.
- Thomas R.S. and Seligman No'am.G. 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*. 68:165-172.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. (1957): Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology (Publications in Climatology 10), pp. 183-243.
- van Diepen, C.A., van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., Noij, I.G.A.M. and Goudriaan, J., 1987. Simulated variability of wheat and rice in current weather conditions and in future weather when ambient CO<sub>2</sub> has doubled. Simulation reports CABO-TT 14. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen, The Netherlands.
- van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H., Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use Manage.* 5, 16-24.
- van Ittersum, M.K. Leffelaar, P.A. van keulen, Kropff, H.M.J. Bastiaans, L. and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal Agronomy*. 18: 201-234.
- van Keulen, H. and de Wit, C.T. 1982. A hierarchial approach to agricultural prodrction modeling. p. 139-143. In G. Gobulev and I. Shvytov (eds.) *Modeling agricultural-environmental processes in crop production*. Proc. IIASA Symp., Laxenburg, Austria. IIASA, Laxenburg.
- van Keulen, H. and J. Wolf(Eds). 1986. *Modeling of agricultural production: Weather soils and crops*, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 479
- van Keulen, H.. 1975. *Simulation of water use and herbage growth in arid regions*. Simulation monographs, Pudoc , wageningen, 176.
- van Veen J.A. and Frissel, M.J. 1979. Mathematical modeling of nitrogen transformations in soil [M]. In: Gasser J.F.K. eds, *Modeling nitrogen from farm*, Lindon: Applied Science Pub. Ltd., pp: 133-157.
- Wang, H.X., Zhang, L., Dawes, W.R. and Liu, Changming. 2001. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain — measurements and modeling. *Agricultural Water Management*. 48: 151-167.
- Warrick, A.W., Biggar, J.W. and Nielsen, D.R., 1971. Simultaneous solute and water transport for an unsaturated soil. *Water Res. Res.*, 7: 1216-1225.
- Watts, D.G. and Hanks, R.J. 1978. A soil-water-nitrogen model for irrigated corn on sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 492-499.
- Wei, Y., Hoogenboom, G, Mcclendon, R.W., Gresham, D.D., 1994. Impact of climate

- changes on crop production at a farm level. ASAE Pap. 94-3523. Am. Soc. Agri. Eng. St. Joseph. Mi.
- Weiss, A., 1994. From crop modeling to information systems for decision making. p. 285-290. in. J. F. Griffiths(eds.) Handbook of agricultural meteorology. Oxford University Press, New York.
- Whisler, F.D. 1986. Acock B, Baker D.N., Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*. 40:141-207
- Wilkerson, G.G., Jones, J.W., Boote, K.J. and Moshoe, J.W. 1985. SOYGRO V 5.0. Soybean crop growth and yield model. Technical documentation. Agric. En. Dep., Univ. of Florida, Gainesville.
- Williams J.R, Jones C.A. and Dyke P.T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans of the ASAE*, 27(1): 129-144.
- Wilson, T.B., Bland, W.L. and Norman, J.M. 1999. Measurement and simulation of dew accumulation and drying in a potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 93: 111-119.
- Wisnol K., Hesketh J.D. Plant growth modeling for resource management (Vol.1). Boca Raton, Florida: CPC Press Inc, 1987
- Wolf, J. and H. van Keulen, 1989. Modelling long term crop response to fertilizer and soil nitrogen. II. Comparison with field results. *Plant and Soil* 120, pp.23-38.
- Wolf, J. and van Diepen, C.A. 1991. Effects of climate change on crop production in the Rhine basin. Report 52. RIZA, SC-DLO, Wageningen.
- Wu DR, Yu Q, Lu CH, Hengsdijk H (2005) Quantifying production potentials of winter wheat in the North China Plain. *European Journal of Agronomy* (accepted)
- Zhang, H., Wang, X., You, M., and Liu, C., 1999, Water – yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain, *Irrigation Sciences*, 19: 37–45.
- Zhang, X.Y., Pei, D., Hu, C.H., 2003. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. *Irrig. Sci.* 21, 159-166.
- Zsuzsanna Bacsi and Ferenc Zemanovics. 1995. Validation: an objective or tool? Results on a winter wheat simulation model application. *Ecological Modeling*. 81:251-263.
- 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 金之庆, 张继林, 1998, 长江中下游地区小麦生长期土壤水分动态的模拟, *南京农业大学学报*, 21(1):25-30.
- 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 金之庆, 张继林, 1999, 长江下游地区马肝土小麦生长期土壤氮素动态的模拟, *中国农业气象*, 20: 35–38.
- 曹卫星, 1995, 国外小麦生长模拟研究进展, *南京农业大学学报*, 18 (1): 10–14.
- 曹永华, 1997. 农业决策支持系统研究综述, *中国农业气象*, 18, 46-50.
- 陈建耀, 吴凯, 利用大型蒸散仪分析潜水蒸发对农田蒸散量的影响, *地理学报*, 1997

- 年第 52 卷, 439-446.
- 程维新、赵家义、胡朝炳、张兴权, 农田蒸发与作物耗水量研究, 气象出版社, 1994.08
- 崔读昌, 气候变暖对我国农业生产的影响与对策, 中国农业气象, 1992: 16-19.
- 范柯伦 H, 沃尔夫 J 主编; 杨守春、王涌涛、陈同斌等译, 农业生长模型-气候、土壤和作物, 北京: 中国农业科技出版社, 1990
- 冯利平, 韩学信, 1999, 棉花栽培计算机模拟决策系统 (COTSYS), 棉花学报, 11(5):251-254.
- 冯利平、孙宁、刘荣花、汪永钦, 2003, 我国华北冬小麦生产影响评估模型的研究, 中国生态农业学报, 11, 73-76.
- 高亮之, 金之庆, 郑国清, 冯利平, 张立中, 石春林, 葛道阔, 2000, 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS), 江苏农业学报, 16(2):65-72.
- 高亮之、金之庆、黄耀、陈华, 水稻栽培计算机模拟优化决策系统-RCSODS, 农业科技出版社, 北京, 中国, 1992。
- 高亮之、金之庆、黄耀等, 水稻计算机模拟模型及其应用之一: 水稻钟模型—水稻发育动态的计算机模型, 中国农业气象, 1989, (2), 3-10.
- 高亮之等, 1992, 水稻栽培计算机模拟优化决策系统, 北京: 中国农业科技出版社, 124~134.
- 高素华等, CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦、大豆籽粒成份的影响, 环境科学, 1994: 120-135,
- 高素华等, 温室效应对未来农业气候资源的影响问题, 中国农业气象, 1991: 1-5.
- 高素华等, 我国近 40 年温度的变化及其对农业生产的影响, 气象, 1994: 36-41.
- 宫德吉, 近 40 年来气温增暖与内蒙古干旱, 内蒙古气象, 1995: 16-21.
- 龚国元, 1985, 黄淮海平原范围的初步探讨, 见左大康主编, 中国科学院“六五”黄淮海平原科技攻关文集, 黄淮海平原治理和开发, 第一集, 1-8, 科学出版社, 北京.
- 龚元石, 李保国, 1995, 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量, 水科学进展, 6: 16-21.
- 郭焱, 李保国, 玉米冠层的数学描述与三维重建研究, 应用生态学报, 1999, 10(1): 39-41.
- 何维勋等, 北京近 50 年初终霜冻日的变化, 中国农业气象, 1992: 33-36.
- 侯立白等, 辽宁省冬小麦北移种植的可行性与实践, 国外农学—麦类作物, 1995: 42-44.
- 胡毓骐等, 1995, 华北地区节水型农业技术, 中国农业出版社。
- 胡志全, 褚庆全, 吴永常, 黄淮海区耕作制度演变特征及发展对策. 中国农业科技导报, 2002, 4(6): 23-27.
- 黄秉维, 自然条件与作物生产—光合潜力, 中国农业科学院情报所, 1978.
- 黄策、王天铎, 水稻群体物质生产过程的计算机模拟, 作物学报, 1986, 12(1):1-8.
- 黄耀, Ronald L. Sass, Frank M. Fisher, 1999, 水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响, 农业环境保护, 18 (4): 150-154.

- 黄元仿, 李韵珠, 李保国, 陈德立, 2001, 区域农田土壤水和氮素行为的模拟, 水利学报, 11: 87-92.
- 金之庆, 石春林, 葛道阔, 高亮之, 杨星卫, 薛正平, 陆贤, 丁美花, 2003, 基于 RCSODS 的直播水稻清爽施氮模拟模型, 作物学报, 29(3):353-359.
- 金之庆等, 评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响, 作物学报, 1996: 513-524.
- 金之庆等, 全球气候变化影响我国冬小麦生产之前瞻, 作物学报, 1994: 186-197.
- 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 1999, 10(3):311-318
- 李德, 气候变化对安徽省农业气候资源潜力的影响, 中国农业气象, 1993: 33-35.
- 李会昌, SPAC 中水分运移与作物生长动态模拟及其在灌溉预报中的应用研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学博士论文, 1997.9.
- 李淑华, 气候变暖对病虫害影响及防治对策, 中国农业气象, 1993: 41-43.
- 李淑华, 气候变暖对我国农作物病、虫害发生、流行的可能影响及发展趋势展望, 中国农业气象, 1992: 46-49.
- 李玉娥等, 温室效应对我国北方冬麦区粮食作物生产潜力的影响, 中国农业气象, 1992: 37-39.
- 林学椿等, 近 40 年来我国气候趋势, 气象, 1990: 16-21.
- 林忠辉, 2003, 河北平原夏玉米生长与水分利用效率的动态模拟, 中国科学院研究生院硕士学位论文
- 刘昌明, 王会肖, 1995, 农业内涵商榷, 见: 节水农业应用基础研究进展(石元春, 刘昌明主编), 中国农业出版社。
- 刘昌明. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 刘昌明,王会肖著.北京:科学出版社,1999.
- 刘多森, 汪枏生, 1996, 可能蒸散量动力学模型的改进及其对辨识土壤水分状况的意义, 土壤学报, 33: 21-27.
- 刘建栋, 于强, 傅抱璞, 黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究。自然资源学报, 1999, 14 (2): 169-174.
- 刘建栋, 于强, 黄淮海地区夏玉米气候生产力的数值模拟研究, 地理科学进展, 1997, 16: 33-38.
- 刘士平, 杨建锋, 李宝庆, 李运生, 新型蒸散仪其在农田水文过程研究中的应用, 水利学报, 2000, 3: 29-36.
- 陆佩玲、任保华、于强, 玉米冠层凝露的观测与模拟, 生态学报, 1998.09, 第 18 卷第 6 期, 615-620
- 吕晓男, 陆允甫, 1995, 土壤钾解吸的动力学方程和大麦反应的关系, 土壤学报, 32: 69-76.
- 罗毅, 雷志栋, 杨诗秀, 2000, 一个预测作物根系层储水量动态变化的概念性随机模型, 水利学报, 8: 80-83.

- 骆世明, 陈春焕, 刘振宇, 1992, 水稻高产栽培的计算机模拟研究, 山东农业大学学报(增刊), 23(9):87-94.
- 马玉平, 王石立, 张黎, 针对华北小麦越冬的 WOFOST 模型改进, 中国农业气象, 2005, 26(3): 145-149.
- 莫兴国, 林忠辉, 李宏轩, 项月琴, 基于过程模型的河北平原冬小麦产量和蒸散量模拟, 地理研究, 2004, 23(5): 624-632
- 莫兴国, 薛玲, 林忠辉, 华北平原 1981~2001 年作物蒸散量的时空分异特征, 自然资源学报, 2005, 20(2): 181-188.
- 潘铁夫, 吉林省气候变暖与农业生产, 吉林农业科学, 1998: 86-89.
- 潘学标, 1999, 基于 GIS 和作物模型的作物生产信息系统研究-空间分布与变异分析, 中国科学院地理科学与资源研究所博士后研究工作报告。
- 潘学标, 韩湘玲, 石元春, 1996, COTGROW: 棉花生长发育模拟模型, 棉花学报, 8(4): 180-188.
- 彭世章, 朱成立, 节水灌溉的作物需水量试验研究, 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 21-25.
- 戚昌瀚、殷新佑、谢华蔼, 水稻产量形成的生长日历模拟模型的初步研究, 江西农业大学学报(作物模拟模型专刊, 2), 1991, 39-43.
- 气候变化对农业影响及其对策课题组, 气候变化对农业影响及其对策, 北京: 北京大学出版社, 1993, 3-53.
- 气候变化与作物产量编写组, 气候变化与作物产量, 北京, 中国农业科技出版社, 1992, 357-447.
- 任鸿瑞, 罗毅, 鲁西北平原冬小麦和夏玉米耗水量的实验研究, 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 37-39.
- 尚宗波, 杨继武, 殷红, 罗新兰, 赵世勇, 2000, 玉米生长生理生态学模拟模型, 植物学报, 42(2): 184-194.
- 施建忠, 同化物分配模型和小麦冠层不同层次叶片水分利用效率的研究, 中国科学院上海植物生理所研究生毕业论文, 1990.09.1-5
- 宋正山, 杨辉, 张庆云, 华北地区水资源各分量的时空变化特征, 高原气象, 1999, 18(4): 552-563.
- 孙连发, 黑龙江省冬小麦育种中几个策略问题的探讨, 黑龙江农业科学, 1997: 38.
- 陶陶, 罗其友等, 1994. 华北平原节水农业分区指标研究, 见: 华北平原节水农业应用基础研究科研汇编(1993-1994, 石元春, 刘昌明主编)。
- 陶战, 蔡罗保, 杨书润, 1994. 气候变化对我国农业的可能影响及对策。农业环境与发展, 3, 1-7.
- 陶战等, 气候变化对我国农业的可能影响及对策, 农业环境与发展, 1994: 1-7.
- 王春乙等, 模拟大气中 CO<sub>2</sub> 浓度对大豆影响的试验, 生态学报, 1995: 148-153.
- 王馥棠, 1999, 气候变暖与我国粮食发生的可持续发展。科学对社会的影响, 1, 40

—44.

- 王馥棠, 气候变暖与我国粮食发生的可持续发展, 科学对社会的影响, 1999: 40-44.
- 王菱, 倪建华, 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量, 气象学报, 2001, 59(6): 784-794.
- 王石立, 娄秀荣, 沙奕卓, 华北地区小麦水分亏缺状况初探, 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 42-48.
- 王西平, 姚树然, 1998, VSMB 多层次土壤水分平衡动态模型及其初步应用, 中国农业气象, 19(6):27-31.
- 王修兰等, 气候变暖对土壤化肥用量和肥效影响的实验研究, 气象, 1996: 12-16.
- 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 于强, 罗毅. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究, 植物生态学报, 2003, 25(5): 594-602.
- 巫东堂, 焦晓燕, 韩雄, 1996, 旱地麦田土壤水分预测模型研究, 土壤学报, 33(1): 105-110.
- 吴金栋等, 近 30 年我国气候变化的不稳定性及其与农业生产的关系, 气象, 1996: 3-7.
- 夏北成, 麦田生态系统的计算机模拟及最优控制, 北京: 北京大学出版社, 1990.
- 熊伟、陶福祿、许吟隆、林而达, 2001, 气候变化情景下我国水稻产量变化模拟, 中国农业气象, 22, 1-5.
- 许越先, 华北平原灌溉水的利用率和灌溉对环境的影响, 农业用水有效性研究, 许越先、刘昌明、J.沙和伟主编. 科学出版社, 1992, 北京. P45-51.
- 杨恒山等, 近 45 年气候变化对哲盟作物生产潜力的影响, 干旱区研究, 1998: 54-57.
- 杨恒山等, 内蒙古西辽河平原冬小麦种植可行性分析, 农牧产品开发, 2000: 20-24.
- 杨恒山等, 哲里木盟 4 种主要作物气候生产潜力变化及对比分析, 哲里木畜牧学院学报, 1999: 19-24.
- 由懋正, 王会肖, 农业土壤水资源研究, 见: 刘昌明, 于沪宁主编, 土壤-作物-大气系统水分运动实验研究, 北京, 气象出版社, 1997, 200pp.
- 于强, 陆佩玲, 刘建栋等, 作物光温生产力模型和南方水稻适宜生长期的数值分析. 自然资源学报, 1999, 14 (2): 163-168.
- 于强, 王天铎. Physiological responses of C3 plant leaf to environmental factors based on combined photosynthesis transpiration and stomatal conductance model. 植物学报, 1998, 40(8): 740~754.
- 张厚宣, 关于气候变暖对我国农业环境影响及其对策的几点看法, 中国农业气象, 1992: 20-23.
- 张厚宣, 水稻气候生产力对气候变暖的响应问题的模拟计算, 中国农业气象, 1993: 35-40.
- 张强等, 近 30 年气候变化对黄土高原地区玉米生产潜力的影响, 中国农业气象, 1995: 19-23.
- 张宇, 水热变化对冬小麦生长发育的模拟试验, 气象, 1993: 19-32.

- 章基嘉等, 气候变化及其对农作物生产潜力的影响, 气象, 1992: 3-7.
- 赵名茶, 全球气候变化对我国干旱地区影响分析, 干旱资源与环境, 1993: 11-17.
- 赵昕奕, 刘继韩, 黄淮海平原冬小麦生长期旱情分析, 地理科学, 1999, 19(2): 191-185
- 郑有飞等, 未来气候变化时南京地区冬小麦气候生产潜力的估算, 中国农业气象, 1997: 14-18.
- 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦, 2000, 土壤—植物—大气 (SPAC) 系统和农林复合系统水分运动研究综述, 水土保持研究, 7(1): 49-53.

附录 1

## 模型参数及其意义

依作物不同而不同的参数

简称	表示符号	含义	单位
<i>初始值</i>			
LAIEM	—	出苗时的叶面积指数	ha ha <sup>-1</sup>
TDWI	W	作物初始干物质重	kg ha <sup>-1</sup>
RGR LAI	RL	叶面积指数的最大相对增长速率	ha ha <sup>-1</sup>
<i>出苗</i>			
TBASEM	T <sub>b</sub>	下限温度，低于此温度作物发育停止	°C
TSUMEM	R	播种到出苗所需的积温	°C
TEFFMX	R	出苗时的最高有效温度	°C
<i>物候因子</i>			
DLC	D <sub>c</sub>	作物发育的最短日长	h
DLO	D <sub>o</sub>	作物发育的最适 IDSL 日长	h
IDSL	—	作物开花前的发育取决于：1. 温度，2. 日长，3. 二者都是	—
DTSMTB	DT <sub>s</sub>	以温度为函数的积温的日增长量(AFGEN 表格)	°C
TSUM1	$\sum T_i$	出苗到开花时的积温	°C
TSUM2	$\sum T_i$	开花到成熟时的积温	°C
DVSEND	—	收获时的发育阶段	—
<i>绿色面积</i>			
SLATB	S <sub>la</sub>	比叶面积	ha kg <sup>-1</sup>
SPA	SS <sub>so</sub>	比穗面积(相对比叶面积而言)	ha kg <sup>-1</sup>
SPAN	—	叶片在 35°C 时的生命期	d
SSA	SS <sub>st</sub>	比茎面积(相对比叶面积而言)	ha kg <sup>-1</sup>
<i>同化</i>			
AMAXTAB	A <sub>m</sub>	以发育阶段为函数的最大 CO <sub>2</sub> 同化速率	kg ha <sup>-1</sup>
EFF	$\epsilon$	单叶片同化 CO <sub>2</sub> 的光能利用率	kg ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> s
KDIF	k <sub>df</sub>	漫射光的消散系数	—
TMNFTB	—	以 T <sub>low</sub> 为函数的 CO <sub>2</sub> 同化速率的校正因子(AFGEN 表格)	°C
TMPFTB	—	以 T <sub>day</sub> 为函数的 CO <sub>2</sub> 同化速率的校正因子(AFGEN 表格)	°C
<i>同化物转化成生物量</i>			

CVL	$C_{e,lv}$	同化物转化成叶片干物质重的效率	$\text{kg kg}^{-1}$
CVO	$C_{e,so}$	同化物转化成贮存器官干物质重的效率	$\text{kg kg}^{-1}$
CVR	$C_{e,rt}$	同化物转化成根干物质重的效率	$\text{kg kg}^{-1}$
CVS	$C_{e,st}$	同化物转化成茎干物质重的效率	$\text{kg kg}^{-1}$
Q <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	温度升高 10°C 时呼吸作用变化的速率	$\text{kg ha}^{-1}$

#### 维持呼吸作用

FSETB	—	以 DVS(AFGEN 表格)为函数的维持呼吸作用校正因子	—
RML	$c_{m,lv}$	叶的维持呼吸作用	$\text{kg CH}_2\text{O kg}^{-1} \text{d}^{-1}$
RMO	$c_{m,so}$	贮存器官的维持呼吸作用	$\text{kg CH}_2\text{O kg}^{-1} \text{d}^{-1}$
EMS	$c_{m,st}$	茎的维持呼吸作用	$\text{kg CH}_2\text{O kg}^{-1} \text{d}^{-1}$
RMR	$c_{m,rt}$	根的维持呼吸作用	$\text{kg CH}_2\text{O kg}^{-1} \text{d}^{-1}$

#### 分配

FLTB	$pc_{lv}$	以 DVS 为函数的叶的分配系数	—
FOTB	$pc_{so}$	以 DVS 为函数的贮存器官的分配系数	—
FRTB	$pc_{rt}$	以 DVS 为函数的根的分配系数	—
FSTB	$pc_{st}$	茎的分配系数	—

#### 死亡速率

PERDL	$\mathcal{G}_{max,lv}$	由于水分胁迫引起的叶片最大死亡速率	$\text{d}^{-1}$
RDRRTB	$\mathcal{G}_{rt}$	以 DVS 为函数的根的死亡速率	$\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$
RDRSTB	$\mathcal{G}_{st}$	以 DVS 为函数的茎的死亡速率	$\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$
TBASE	$T_{b,age}$	开始生理老化过程的最低温度	$^{\circ}\text{C}$

#### 水分利用

CFET	—	蒸散量的校正因子	—
DENPR	$No_{cg}$	作物群体数量	—
IAIRDU	—	根部分是否形成导气管(1 为有, 2 为没有)	—

#### 根系

RDI	$RD_1$	初始根深	cm
RDMCR	$RD_{crop}$	依作物而定的根的最大根深	cm
RDMSOL	$RD_{soil}$	土壤所允许的最大根深	cm
RRI	$RR_{max}$	根生长的最大日增量	$\text{cm d}^{-1}$

依土壤性质而异的参数

简称	表示符号	含义	
<i>土壤水分的保持</i>			
SMW	$\theta_{wp}$	枯萎点时的土壤水分含量	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
SMFCF	$\theta_{fc}$	田间持水量	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
SM0	$\theta_{\max}$	土壤孔隙度	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
WAV	$W_{av}$	高于枯萎点的初始可利用的水量	cm
NOTINF	$F_1$	降雨时未下渗部分的最大比例	—
CRAIRC	$\theta_c$	土壤临界空气含量	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
CONTAB	$K(pF)$	以 pF 为函数的以 $^{10}\log$ 为底的导水率	$\log(\text{cm})$
<i>下渗</i>			
K0	K	导水率	$\text{cm d}^{-1}$
SOPE	—	根区最大下渗速率	
KSUB	—	底土层的最大下渗速率	$\text{cm d}^{-1}$
SSMAX	$SS_{\max}$	地表最大积水量	$\text{cm d}^{-1}$
DD	DD	排水装置的深度	cm
ZTI	—	初始地下水位	cm
<i>土壤的可适性</i>			
SPADS	$Sp_1$	深播时第一层表土的渗流速率	—
SPODS	$Sp_1$	深播时第二层表土的渗流速率	—
SPASS	$Sp_1$	浅播时第一层表土的渗流速率	—
SPOSS	$Sp_1$	浅播时第二层表土的渗流速率	—
IDESOW	—	最早播种期	—
ODLSOW	—	最晚播种期	—

```

** emergence
TBASEM   =   0.0           ! lower threshold temp. for emergence [cel]
TEFFMX   =   30.0          ! max. eff. temp. for emergence [cel]
TSUMEM   =  130.4         ! temperature sum from sowing to emergence [cel d]

** phenology
IDSL     =   0             ! indicates whether pre-anthesis development depends
                               ! on temp. (=0), day length (=1) , or both (=2)
DLO      = -99.0          ! optimum day length for development [hr]
DLC      = -99.0          ! critical day length (lower threshold) [hr]
TSUM1    = 1175.9         ! temperature sum from emergence to anthesis [cel d]
TSUM2    = 644.0          ! temperature sum from anthesis to maturity [cel d]
DTSMTB   = 0.00, 0.00,    ! daily increase in temp. sum
           32.00, 32.00,    ! as function of av. temp. [cel; cel d]
           45.00, 32.00

DVSI     =   0.           ! initial DVS
DVSEND   =   2.0          ! development stage at harvest (= 2.0 at maturity [-])

** initial
TDWI     = 211.0          ! initial total crop dry weight [kg ha-1]
** ! Not used as input by WOF6_0 model
LAIEM    = 0.13           ! leaf area index at emergence [ha ha-1]
RGRLAI   = 0.00817       ! maximum relative increase in LAI [ha ha-1 d-1]

** green area
SLATB    = 0.00, 0.00212, ! specific leaf area
           0.50, 0.00352, ! as a function of DVS [-; ha kg-1]
           0.60, 0.00212,
           0.75, 0.00202,
           0.90, 0.00202,
           2.00, 0.00202

SPA      = 0.000          ! specific pod area [ha kg-1]
SSATB    = 0.0, 0.000,    ! specific stem area [ha kg-1]
           2.0, 0.000     ! as function of DVS

SPAN     = 25.8           ! life span of leaves growing at 35 Celsius [d]
TBASE    = 0.0           ! lower threshold temp. for ageing of leaves [cel]

** assimilation
KDIFTB   = 0.0, 0.60,    ! extinction coefficient for diffuse visible light [-]
           2.0, 0.60     ! as function of DVS
EFFTB    = 0., 0.47,     ! light-use effic. single leaf [kg ha-1 hr-1 J-1 m2 s]
           40., 0.47     ! as function of daily mean temp.
AMAXTB   = 0.00, 35.00,  ! max. leaf CO2 assim. rate
           0.50, 45.00,  ! function of DVS [-; kg ha-1 hr-1]
           1.80, 45.00,
           2.00, 10.00

TMPFTB   = 0.00, 0.00,    ! reduction factor of AMAX
           4.00, 0.80,    ! as function of av. temp. [cel; -]
           10.00, 1.00,
           33.00, 1.00,
           39.00, 0.03

TMNFTB   = 0.00, 0.00,    ! red. factor of gross assim. rate

```

0.60, 1.00 ! as function of low min. temp. [cel; -]

\*\* conversion of assimilates into biomass

CVL = 0.690 ! efficiency of conversion into leaves [kg kg-1]  
CVO = 0.720 ! efficiency of conversion into storage org. [kg kg-1]  
CVR = 0.720 ! efficiency of conversion into roots [kg kg-1]  
CVS = 0.690 ! efficiency of conversion into stems [kg kg-1]

\*\* maintenance respiration

Q10 = 2.0 ! rel. incr. in resp. rate per 10 Cel temp. incr. [-]  
RML = 0.0250 ! rel. maint. resp. rate leaves [kg CH2O kg-1 d-1]  
RMO = 0.0090 ! rel. maint. resp. rate stor.org. [kg CH2O kg-1 d-1]  
RMR = 0.0100 ! rel. maint. resp. rate roots [kg CH2O kg-1 d-1]  
RMS = 0.0150 ! rel. maint. resp. rate stems [kg CH2O kg-1 d-1]  
RFSETB = 0.00, 0.00, ! red. factor for senescence  
0.60, 0.20 ! as function of DVS [-; -]  
0.80, 0.80  
1.00, 1.00

\*\* partitioning

FRTB = 0.000, 0.500 ! fraction of total dry matter to roots  
0.296, 0.250, ! as a function of DVS [-; kg kg-1]  
0.704, 0.007,  
0.785, 0.005,  
0.812, 0.003,  
1.000, 0.000,  
2.000, 0.000  
FLTB = 0.000, 0.600, ! fraction of above-gr. DM to leaves  
0.296, 0.567, ! as a function of DVS [-; kg kg-1]  
0.554, 0.257,  
0.704, 0.207,  
0.785, 0.100,  
0.812, 0.050,  
0.893, 0.000,  
0.947, 0.000,  
2.000, 0.000  
FSTB = 0.000, 0.400, ! fraction of above-gr. DM to stems  
0.296, 0.433, ! as a function of DVS [-; kg kg-1]  
0.554, 0.743  
0.704, 0.793,  
0.785, 0.900,  
0.812, 0.950,  
0.893, 1.000,  
0.947, 0.000,  
1.000, 0.000,  
1.304, 0.000,  
1.456, 0.000,  
1.608, 0.000,  
2.000 0.000  
FOTB = 0.000, 0.000, ! fraction of above-gr. DM to stor. org.  
0.893, 0.000, ! as a function of DVS [-; kg kg-1]  
0.947, 1.000,  
1.304, 1.000,

1.456, 1.000,  
1.608, 1.000,  
2.000 1.000

\*\* death rates

PERDL = 0.030 ! max. rel. death rate of leaves due to water stress  
RDRRTB = 0.00, 0.000, ! rel. death rate of roots  
1.40, 0.000, ! as a function of DVS [-; kg kg-1 d-1]  
1.4001, 0.020,  
2.00, 0.020  
RDRSTB = 0.00, 0.000, ! rel. death rate of stems  
1.30, 0.015, ! as a function of DVS [-; kg kg-1 d-1]  
1.5000, 0.020,  
2.00, 0.020

\*\* water use

CFET = 1.00 ! correction factor transpiration rate [-]  
DEPNR = 4.0 ! crop group number for soil water depletion [-]  
IAIRDU = 0 ! air ducts in roots present (=1) or not (=0)

\*\* rooting

RDI = 10. ! initial rooting depth [cm]  
RRI = 1.2 ! maximum daily increase in rooting depth [cm d-1]  
RDMCR = 120. ! maximum rooting depth [cm]

\*\* nutrients

\*\* maximum and minimum concentrations of N, P, and K

\*\* in storage organs in vegetative organs [kg kg-1]

NMINSO = 0.0350 ; NMINVE = 0.0070  
NMAXSO = 0.0560 ; NMAXVE = 0.0220  
PMINSO = 0.0027 ; PMINVE = 0.0011  
PMAXSO = 0.0080 ; PMAXVE = 0.0052  
KMINSO = 0.0120 ; KMINVE = 0.0070  
KMAXSO = 0.0260 ; KMAXVE = 0.0240  
YZERO = 200. ! max. amount veg. organs at zero yield [kg ha-1]  
NFIX = 0.75 ! fraction of N-uptake from biol. fixation [kg kg-1]

## 致 谢

论文终于定稿，内心感觉无缘的喜悦。欣喜之余，要对所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友和亲人表示衷心的感谢。

本博士学位论文是在导师于强研究员悉心指导下完成的，论文的选题、研究内容设计、构思方法选择到论文的完成等方面于老师都进行了认真的指导。于强导师渊博的学识、敏锐的思维、忘我的工作精神、严谨的治学态度、求实的科学信念，特别是对国际研究前沿热点和国家重大需求问题的敏锐洞察与把握，对本人影响深远，必将受益终身。于老师对我既是良师，又是益友，在学术问题上不断给予我指导，同时彼此间保持着充分的沟通和交流。在于老师课题组3年多来，我最大的启迪就是在宽松和融洽的学术氛围中能充分发挥自身的潜能，全身心地投入科学研究中去。于老师在生活上给予了我莫大的关心，在此我向他表示最真挚的谢意，祝他身体健康，合家幸福！

水分中心的孙晓敏主任、生态网络中心的于贵瑞研究员对我的博士学位论文进行了认真的审查并提出了许多宝贵的意见，感谢他们在论文答辩方面替我做作的安排与照顾。

感谢吕昌河老师和 Huib Hengsdijk 在文章发表时给予的大力帮助！他们在我提高英文写作技巧方面提供了许多帮助，包括论文的整体框架到逐段的安排及语言的遣词造句方面，让我顺利地完成了英文论文的撰写。

特别感谢栾城试验站鲁全国和栾禄凯都是在平时学习和生活中给予的巨大帮助。许守华秘书在平时的工作中给予了很大的帮助，在此一并致谢！

感谢研究生处的舒晓明、王淑强等老师在学习中的关怀和帮助！

张永强、姜朝阳、王靖、房全孝、李龙辉、王兴武、曲辉等诸位师兄、师弟、师妹在论文完成过程中给予了大力协助，在此深表感谢。感谢刘林山、张香萍等人在 GIS 方面给予的技术帮助！

最后，向关心和帮助我的所有老师、同学、朋友和家人致以由衷的谢忱。