资源科学
第31卷 第9期 2009年9月 2009,31(9):1477-1485
Resources Science
Vol.31,No.9 Sept.,2009

文章编号:1007-7588(2009)09-1477-09

华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟

陈 超[1,2],于 强[3],王恩利[4],夏 军[1]
(1.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;
2.中国科学院研究生院,北京 100049; 3.悉尼科技大学环境科学系,悉尼 2007;
4.澳大利亚联邦科学与工业研究组织土地与水资源研究所,堪培拉 2601)

摘 要:提高作物水分生产力(Water Poduetivity)是节水农业研究的最终目标,定量分析作物WP对干旱和半干旱地区水资源管理和决策制定具有重要意义。华北平原是我国重要的粮食生产基地,但水资源问题已成为制约该区可持续发展的瓶颈,明确该区作物WP时空变化特征及其与气候的关系,对指导该区农业生产和水资源高效利用具有重要作用。本文首先利用华北平原3个代表性试验站各连续3~4年的小麦-玉米轮作田间试验资料,校准验证澳大利亚开发的APSIM模型,然后利用校准后的APSIM模型和研究区域32个气象站1961年~2005年逐日气象数据,结合GIS技术,对华北平原不同供水情景下冬小麦、夏玉米WP空间分布特征进行了模拟研究。模拟结果表明:①当不考虑作物品种变化时,华北平原小麦、玉米WP_{ET}(产量与蒸散量比值)分布响应于该区平均气候状况,具有明显的空间分布特征;②充分供水情景下全区小麦WP_{ET}为(1.38~1.69)kg/m^3,平均值为1.53kg/m^3,玉米WP_{ET}为(1.69~2.05)kg/m^3,平均值为1.83kg/m^3;非充分供水情景(仅满足作物水分需求一半)下两作物WP_{ET}分布与充分供水情景下相似;雨养情景下小麦WP_{ET}为(0.29~1.57)kg/m^3,平均值为0.77kg/m^3,玉米WP_{ET}为(0.86~2.13)kg/m^3,平均值为1.47kg/m^3;③饱和水汽压差(VPD)是影响作物水分生产力的主要气象因子,研究区域小麦生长季VPD北高南低的趋势使得小麦WP_{ET}呈北低南高分布特征;而玉米生长季VPD西高东低,玉米WP_{ET}呈西低东高的趋势。改善灌溉管理可提高作物WP,减少由土壤蒸发损失的非生产性耗水对提高作物WP也具有重要意义。

关键词:APSIM模型;小麦;玉米;水分生产力;华北平原

1 引言

华北平原(图1)是我国重要的粮食生产基地,种植制度主要为冬小麦-夏玉米一年两熟,两作物产量约占全国小麦、玉米总产量的1/5[1]。该区域地处大陆季风带,属半干旱半湿润气候区,降水和温度等气候要素时空分布不均。年均降水量由南部的900mm向北逐渐减少到480mm[2],年降水量的80%集中在6月~9月,小麦生长需水关键期(3月~5月)降水稀少,灌溉是该区农业获得稳产高产的重要手段。但是,华北平原水资源严重匮乏,地下水严重超采,为了保护环境和保证农业的可持续发展,必须有效利用有限的水资源,实现优化配置和合理利用,提高水资源利用效率。

作物水分生产力(Water Productivity,WP)是指单位耗水量所获得的作物产出量[3]。此概念表达了水分管理过程中各项水分消耗产生的价值和收益,对干旱和半干旱地区水资源管理和作物生产具有重要意义。提高作物水分生产力,是节水农业研究的最终目标[4~6]。明确作物水分生产力的变化特征,可以确定一个地区的节水潜力,便于制定水资源合理分配决策和方案。

国内外有关作物水分生产力的研究较多[7~11],但现有研究多采用田间试验为手段,利用模拟模型方法在国外也开展了一些工作[12~14],国内相关研究还不多见。基于生理生态过程的农业系统模型已被广泛认为是探索气候、土壤及管理措施等对作物

收稿日期:2009-06-05;修订日期:2009-07-06
基金项目:科技部国际合作项目(编号:2006DFA21890)。
作者简介:陈超,女,辽宁人,博士生,主要从事农业生态系统模拟、气候波动/变化影响评价研究。E-mail:ccchenchao2009@163.com
通讯作者:于强,E-mail:Qiang.Yu@uts.edu.au

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

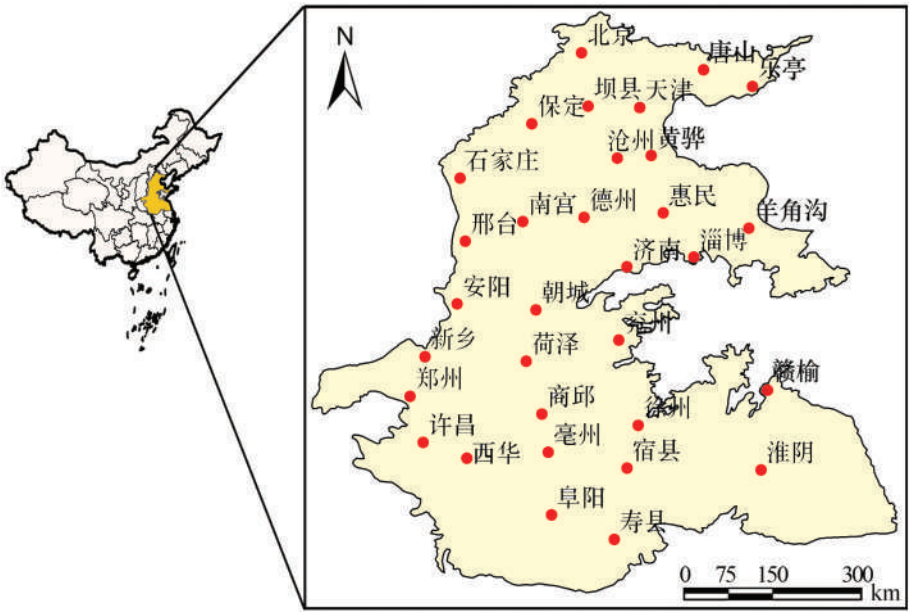

图1 华北平原范围及所选气象站点位置

Fig.1 The Location of North China Plain and location of the meteorological stations where data were used in the study

生长和水文过程影响的有效手段[15,16],是分析作物水分生产力变化特征的有利工具。本文以华北平原32个气象站1961年~2005年气象数据为基础,利用验证的APSIM模型,模拟不同灌溉供水情景下小麦-玉米轮作系统中两作物水分生产力,探讨研究区域气候波动背景下小麦、玉米水分生产力区域分异规律,研究结果为该地区优化水资源配置和制定科学灌溉管理决策提供依据,对提高水资源利用效率具有重要实际意义。

2 研究方法

2.1 农业生产系统模拟模型-APSIM

APSIM(Agricultural Production System Simulator)是由澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统小组(APARU)联合开发的农业系统模拟模型,可用于农业生产系统各主要组分的机理模拟[17,18]。APSIM最早的开发理念是:模型可以精确模拟气候波动背景下不同管理措施对农业系统的影响。目前,该模型系统已在世界各地得到了广泛应用[19~22],在农业生产管理决策、气候变化评估、土地资源评价、水资源合理利用、农业环境影响评价等方面发挥了强大作用。该模型以"日"为时间步长,通过其中心引擎将作物、牧草、土壤水分、养分等模块集成在一起,可以灵活地模拟不同气候、土壤和管理措施等因子对作物或作物系统的影响[18]。APSIM模型框架的灵活性允许用户通过选择一系列作物、土壤和管理等子模块配置或构建自己的作物系统。本研究模拟小麦-玉米轮作系统应用的主要模块包括:小麦(APSIM-Wheat)、玉米(APSIM-Maize)、土壤水(SoilWat2)、土壤氮(SoilN2)、残茬(SurfaceOM)、管理(Manager)、灌溉(Irrigate)和施肥(Fertiliz)等模块。

APSIM模型运行所需的数据包括:气象数据(逐日最高、最低温度、降水和辐射等)、土壤数据(包括土壤分层、各层土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎含水量、容重、土壤养分状况等)、栽培措施和品种数据(包括品种类型、播种期、播深等)。

2.2 参数调试与模型验证

采用"试错法"对APSIM模型的作物参数进行调试、确定。用于验证模型的资料包括:1998年~2001年在中国科学院栾城农业生态试验站进行的小麦-玉米水分池试验[23];1997年~2001年在中国科学院禹城综合试验站进行的小麦-玉米大田水氮耦合试验[2]、2002年~2005年进行的通量观测试验[24];2003年~2006年在中国科学院封丘农业生态试验站进行的小麦-玉米常规监测试验。3个试验站分别位于研究区域即华北平原的中部、东部和南部,在区域生态环境条件上具有代表性。模型模拟的小麦、玉米产量、土壤含量水和蒸散(ET)与实测值拟合情况良好(图2),表明该模型应用于华北平原小麦、玉米生长与水分利用的研究是适宜的。

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

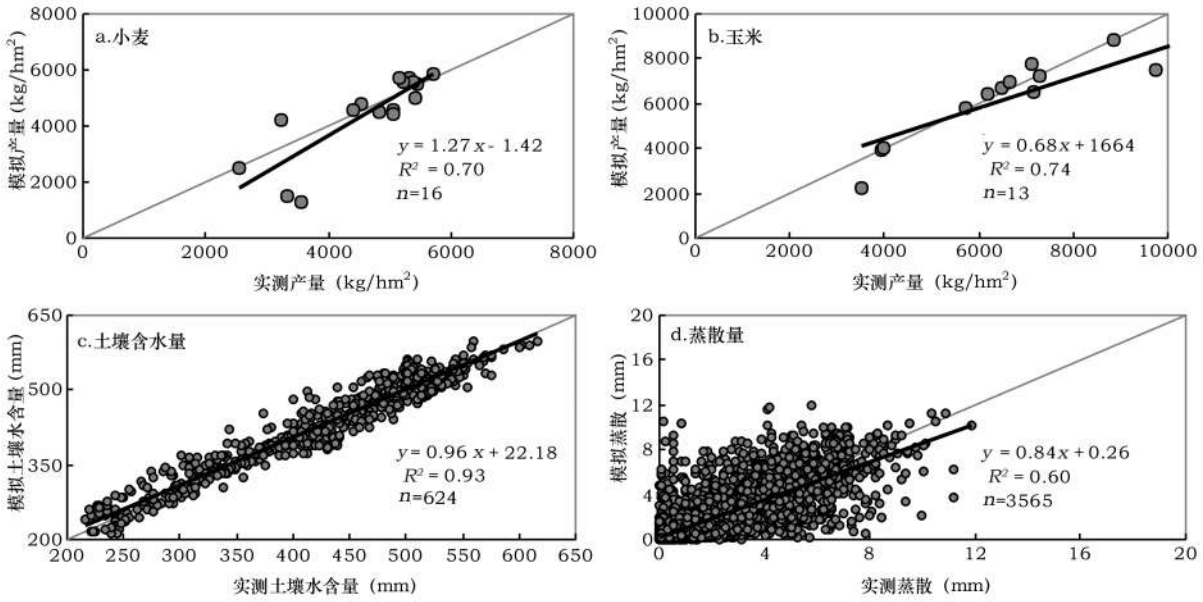

图2 APSIM模型模拟与实测的小麦产量、玉米产量、土壤水含量与逐日蒸散的拟合情况

Fig.2 Comparison between simulated and measured grain yield of wheat, grain yield of maize, soil water content and daily ET.

2.3 灌溉情景设定

本文模拟分析了3种灌溉情景下研究区域冬小麦、夏玉米水分生产力空间分布特征:

(1)充分灌溉:整个作物生长季土壤含水量保持在田间持水量,即当作物最大根系层土壤含水量小于田间持水量时,补充灌溉到田间持水量;

(2)无灌溉(雨养):整个作物生长季不灌溉,作物需水由自然降水供给;

(3)非充分灌溉:考虑到研究区域水资源严重匮乏,未来农业生产不可能充分满足作物水分需求,但另一方面研究区域多数年份降水稀少,雨养条件下的一年两熟作物产量很低,需补充灌溉来稳定和提高作物产量,因此设置了介于前两种情景之间的非充分灌溉情景。灌溉量为作物灌溉需求的1/2,并根据灌溉量多少确定灌溉时间和每次灌溉量。对于两作物,如果灌溉量<80mm,灌于播前;如果80mm<灌溉量<150mm,则分2次灌,分别灌于播前和拔节,每次灌总量的1/2;如果150mm<灌溉量<250mm,则分3次灌,分别灌于播前、拔节和灌浆期,每次灌总量的1/3;如果灌溉量>250mm,则分4次灌,对于小麦分别灌于播前、越冬、拔节和灌浆;对于玉米分别灌于播前、拔节、开花和灌浆,每次灌总量的1/4。

2.4 作物水分生产力计算

本研究分析2种产量水平的作物水分生产力,见表1。

表1 两种作物水分生产力的定义

Table 1 Water productivity expressed as grain yield per unit amount of water used

作物水分生产力的定义	计算	单位
作物水分生产力(WP_{ET})	作物产量 / 蒸散量	kg/m^3
作物蒸腾水分生产力(WP_T)	作物产量 / 蒸腾量	kg/m^3

3 区域模拟及结果输出

模拟中设定整个区域采用的作物品种为模型校准验证时禹城站1997年~2001年采用的小麦、玉米品种,即小麦秩轩1号,玉米掖单22。小麦播期依据当地耕作习惯设定,从北到南大致在10月5日~11月10日之间;玉米的播期从南到北大致在6月6日~6月15日之间。气象数据包括华北平原32个代表性气象站(图1)1961年~2005年共45年的逐日最高、最低温度、日照时数和降水量,由中国国家气象局提供。对于无辐射资料的站将日照时数换算成相应的太阳辐射。土壤数据根据《中国土种志》及相关文献资料确定[25~28]。

采用作物模型与GIS相结合,将各站点的模拟结果导入GIS,采用反距离权重(IDW)内插方法直观地显示各要素的空间分异特征。

4 结果分析

4.1 充分灌溉情景下作物水分生产力分布

图3是模拟的研究区域充分灌溉情景下小麦、玉米WP_{ET}的分布。结果显示:充分满足作物需水

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net http://www.resci.cn

时，模拟的全区小麦 WP_{ET} 变化在(1.38～1.69)kg/m³之间，平均值为1.53kg/m³(图3)。饱和水汽压差(VPD)是影响作物蒸腾(T)水分利用效率的主要气象因子，而作物生长季ET中大部分为T，因而VPD对作物WP也有重要影响，VPD越大，作物WP越低。由于研究区域小麦生长季VPD从南到北逐渐增大(图4)，当不考虑作物品种变化时，模拟的小麦 WP_{ET} 从南到北逐渐降低；且因华北平原东部沿海地区VPD小于西部地区，小麦 WP_{ET} 等值线略有偏斜，即同纬度下，东部的小麦 WP_{ET} 高于西部。模拟的玉米 WP_{ET} 全区为(1.69～2.05)kg/m³，平均为1.83kg/m³(图3)，玉米生长季正值降水集中季节，VPD南北差异不如东西差异明显，玉米 WP_{ET} 呈更明显的东西分布，表现为西部低东部高。

4.2 非充分灌溉情景下作物水分生产力分布

当水资源不足，可用水资源只能满足作物灌溉

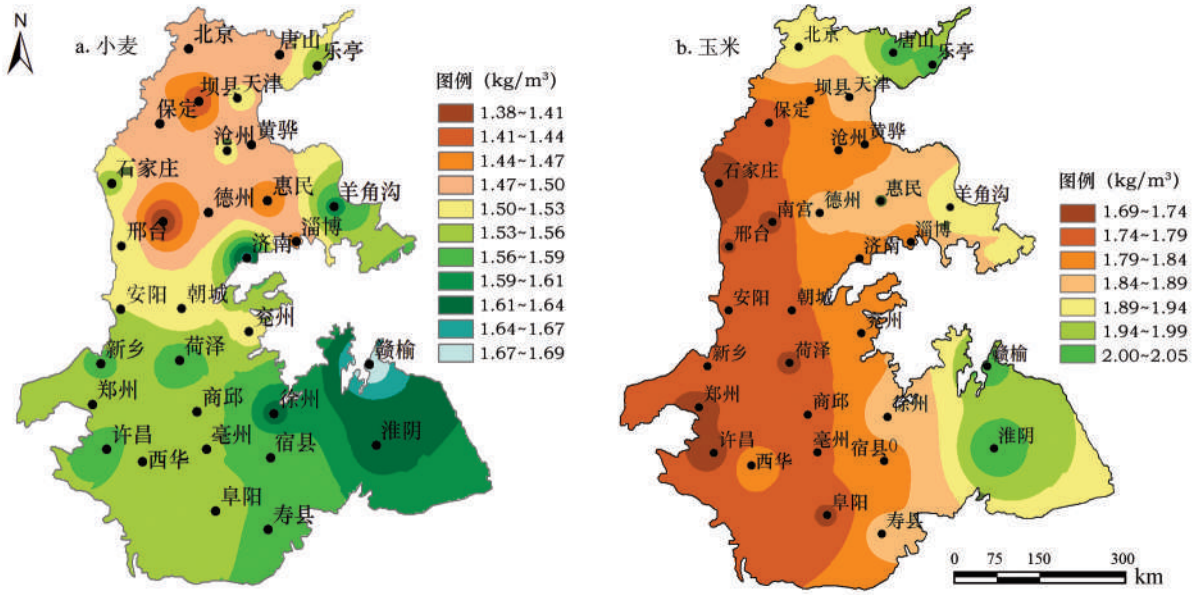

图3 华北平原充分灌溉情景下小麦、玉米的水分生产力分布

Fig.3 WP_{ET} for wheat and maize under full irrigation in North China Plain

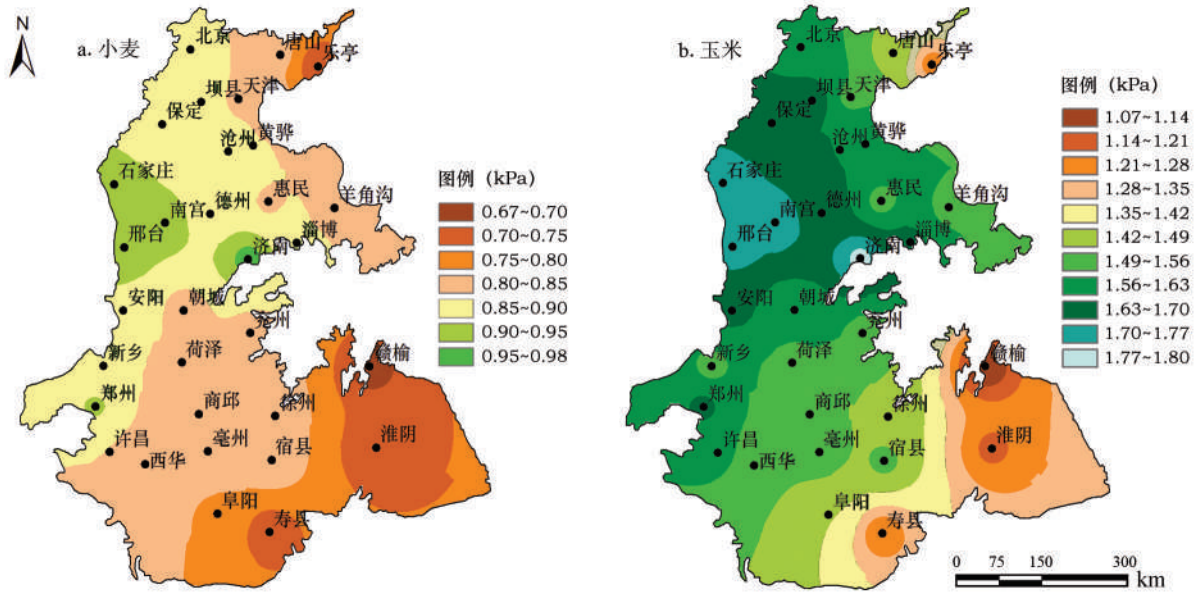

图4 华北平原小麦和玉米生长季饱和水汽压差

Fig.4 VPD during wheat and maize growing season in the North China Plain

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

需求的一半时,模拟的全区小麦 WP_{ET} 为(1.14~1.79)kg/m³,平均值为1.41kg/m³;模拟的全区玉米 WP_{ET} 为(1.73~2.14)kg/m³,平均为1.91kg/m³(图5)。非充分灌溉情景下的小麦、玉米 WP_{ET} 空间分布特征与充分灌溉情景下两作物 WP_{ET} 分布特征的相似。相对于充分灌溉,非充分灌溉情景下的玉米灌溉投入量减少了一半,但全区玉米 WP_{ET} 平均值却增加了0.08kg/m³(5%),由此说明,改善灌溉水管理,可以提高作物WP。

4.3　无灌溉情景下作物水分生产力分布

雨养条件下全区小麦 WP_{ET} 为(0.29~1.57)kg/m³,平均值为0.77kg/m³(图6)。降水是华北平原冬小麦生长发育的主要限制因子,不灌溉时小麦 WP_{ET} 的大小主要决定于降水量的多少。研究区域降水南多北少,因而,雨养小麦 WP_{ET} 也基本呈南高北低的趋势。比较灌溉(图3)和无灌溉(图6)两种情景下的小麦 WP_{ET} 可以看出,前者的小麦 WP_{ET} 明显高

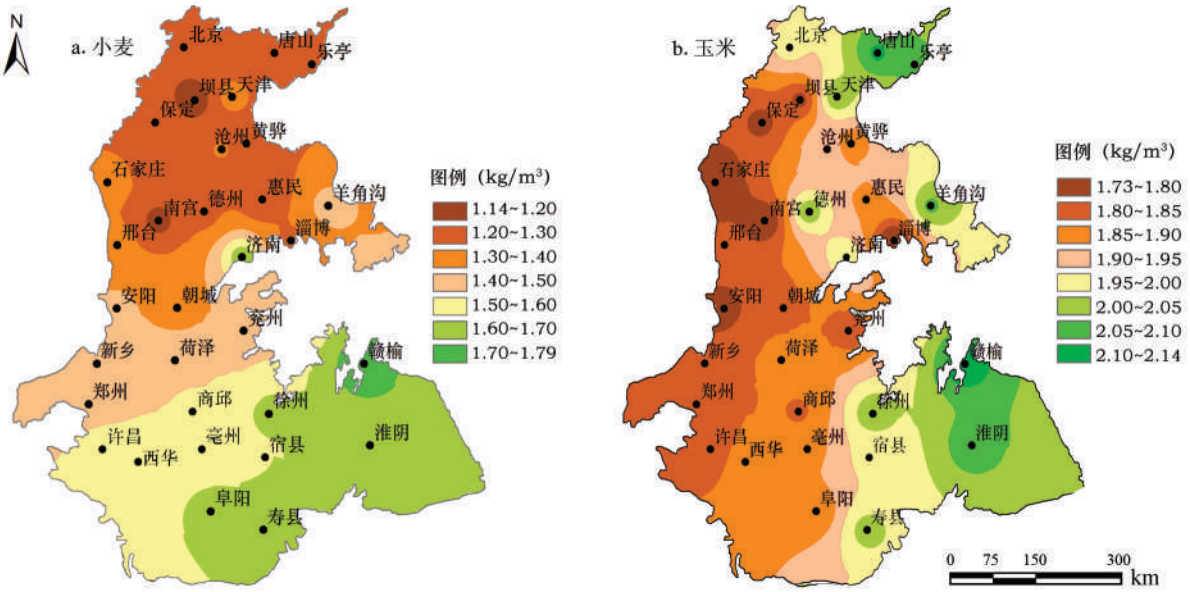

图5　华北平原非充分灌溉情景下小麦、玉米水分生产力分布

Fig.5　WP_{ET} of wheat and maize under the scenario to meet half of the irrigation demand

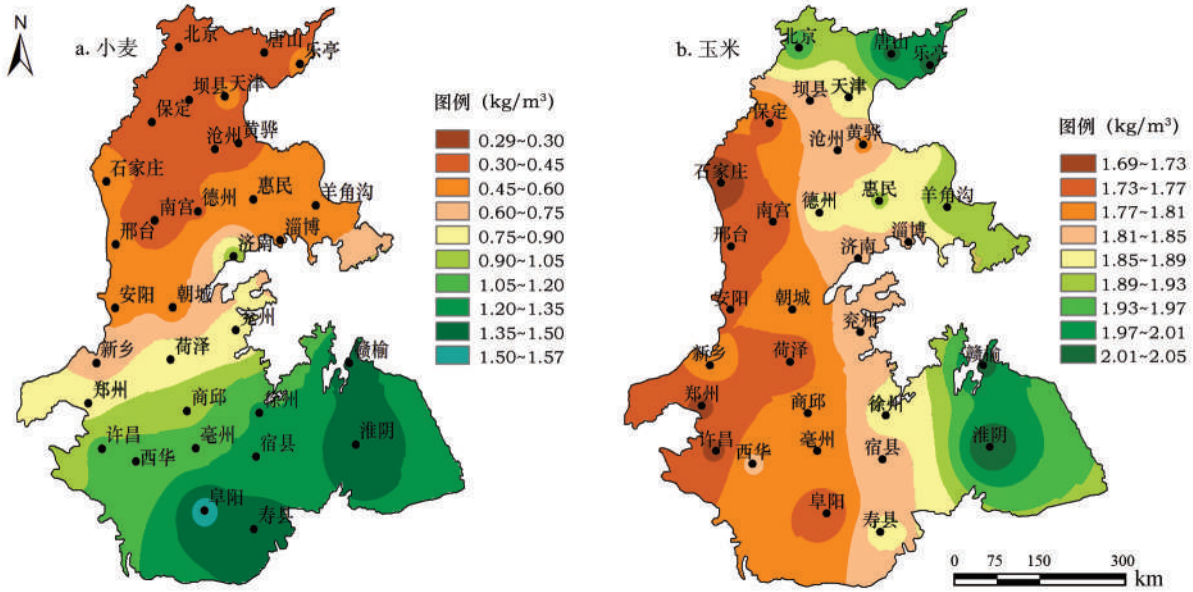

图6　华北平原雨养条件下小麦和玉米水分生产力分布

Fig.6　WP_{ET} of wheat and maize under rain-fed condition

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net　http://www.resci.cn

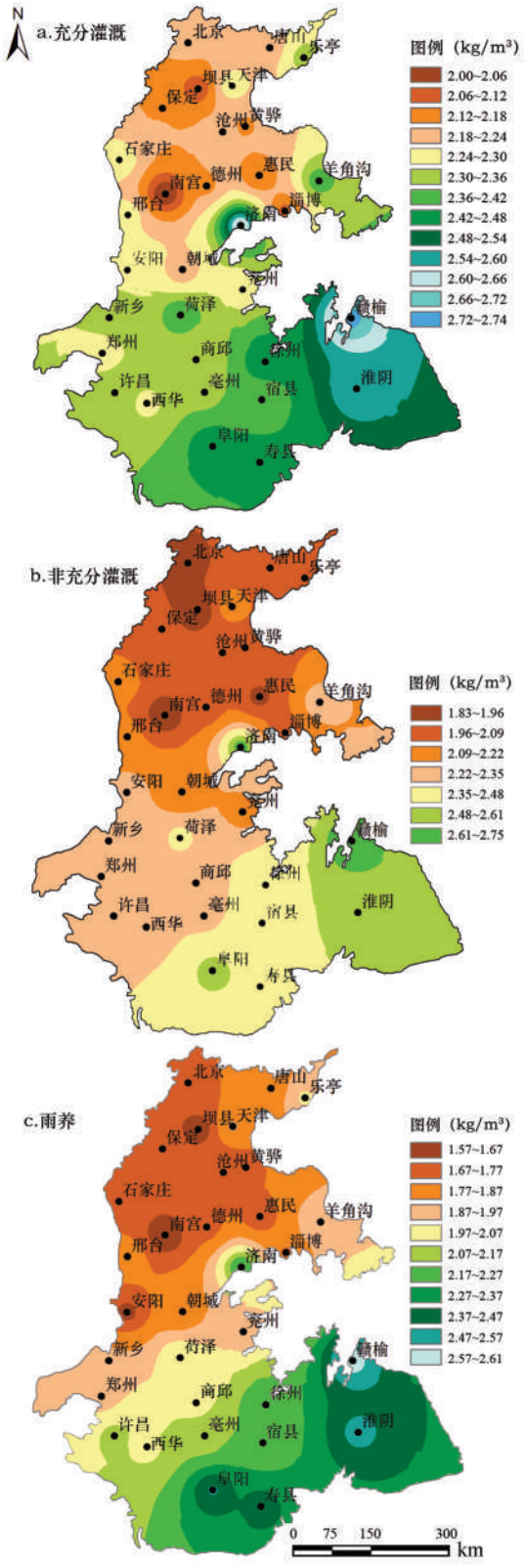

图7 华北平原充分灌溉、非充分灌溉与雨养条件下的小麦蒸腾水分生产力

Fig.7 WP_T of wheat under full irrigation, half supply of irrigation water demand and rain-fed conditions

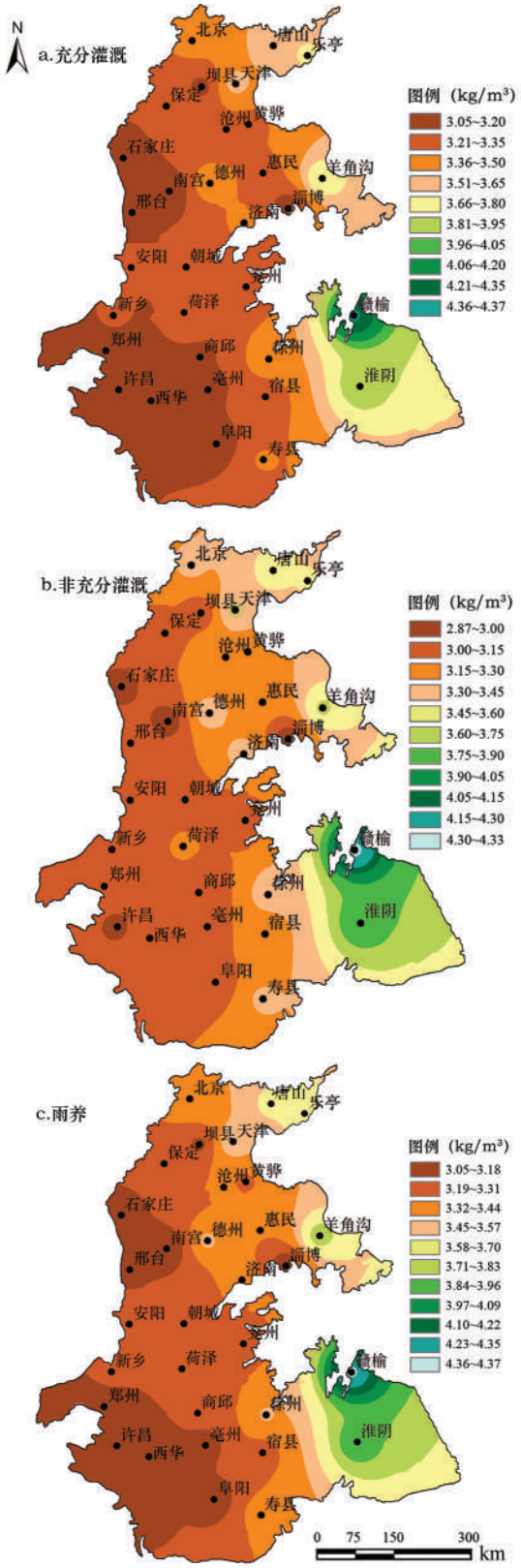

图8 华北平原充分灌溉、非充分灌溉与雨养条件下的玉米蒸腾水分生产力

Fig. 8 WP_T of maize under full irrigation, half supply of irrigation water demand and rain-fed conditions

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于后者,说明研究区域自然降水无法满足小麦生长发育水分需求,靠自然降水小麦产量很低,不能充分利用自然降水资源,而灌溉可以适时满足小麦水分需求,从而获得更高产量。但是小麦WP_{ET}与灌溉量不成正比关系,从不灌溉到满足灌溉需求的一半,全区平均值增加0.64kg/m^3,而从灌溉满足水分需求一半到充分灌溉,全区平均值仅增加0.12kg/m^3(图6)。雨养条件下的玉米WP_{ET}与灌溉条件下的分布特征相似,基本成东西分布,波动范围为(1.60~2.05)kg/m^3。

4.4 WP_{ET}与WP_T水分生产力的比较

图7为华北平原充分灌溉、非充分灌溉和雨养情景下的小麦WP_T的分布,充分灌溉情景下小麦WP_T为(2.00~2.74)kg/m^3,全区平均值为2.31kg/m^3;非充分灌溉情景下小麦WP_T为(1.83~2.75)kg/m^3,平均为2.22kg/m^3;雨养条件下小麦WP_T为(1.57~2.61)kg/m^3,全区平均为1.96kg/m^3。

图8为华北平原充分灌溉、非充分灌溉和雨养情景下玉米WP_T的分布:充分灌溉情景下玉米WP_T为(3.05~4.37)kg/m^3,全区平均值为3.34kg/m^3;非充分灌溉情景下玉米WP_T为(2.87~4.33)kg/m^3,平均为3.24 kg/m^3;雨养条件下玉米WP_T为(1.78~4.21)kg/m^3,全区平均为2.76kg/m^3。

WP_T随灌水量的增高,说明在有灌水补给的条件下,单位蒸腾水分消耗对产量的贡献大。3种灌溉情景下小麦、玉米WP_{ET}与相应情景下的WP_T相比,充分灌溉情景下全区小麦WP_{ET}比WP_T平均低30%,全区玉米WP_{ET}比WP_T平均低45%;非充分灌溉情景下全区小麦、玉米WP_{ET}比WP_T平均低37%和40%;雨养条件下小麦WP_{ET}比WP_T低64%,玉米低45%。由此可见,减少蒸散中土壤蒸发的比例是提高作物WP的重要措施之一,改善农业管理措施如秸秆覆盖等可以减少通过土壤蒸发产生的非生产性水分的消耗。

5 讨论

农业系统模型APSIM在研究区域3个代表性站点的校准与验证表明该模型可以较好地模拟研究区域不同气候条件和管理措施下作物产量及水分利用过程,可将其应用于华北平原的作物模拟和水分研究。

利用校准的APSIM模型,结合GIS技术,模拟分析了华北平原不同灌溉情景下冬小麦、夏玉米水分生产力空间分布特征。分析表明,华北平原小麦、玉米WP_{ET}分布特征响应于该区平均气候状况,具有明显的空间分布特征。受生长季饱和水汽压差北高南低影响,小麦WP_{ET}呈北低南高趋势;而玉米生长季饱和水汽压差西高东低的趋势使玉米WP_{ET}呈西低东高的趋势。小麦、玉米WP_{ET}不随灌水量的增加而线性增加,当供水超过一定量时,作物WP_{ET}反而会下降。在水资源严重不足的华北平原,以水资源利用效率最大化为目标制定水资源利用决策,合理利用有限的水资源,对缓解水资源不足的矛盾具有重要意义。作物生长季农田总耗水中有很大一部分为土壤蒸发损失的非生产性耗水,改善农业管理措施,减少由土壤蒸发损失的非生产性耗水占农田总耗水的比例对提高作物WP具有重要意义。

参考文献 (Reference):

[1] 刘昌明,周长青,张士锋,等. 小麦水分生产函数及其效益的研究[J]. 地理研究,2005,24(1):1~10. [LIU Cangming, ZHUO Changqing, ZHANG Shifeng, *et al*. Study on water production function and efficiency of wheat [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):1~10.]

[2] Yu Q, Saseendran S A, Ma L, *et al*. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 89(2~3):457~477.

[3] Molden D J. Accounting for water use and productivity[R]. Colombo,Sri Lanka:International Irrigation Management Institute, 1997.

[4] 沈荣开,杨路华,王康. 关于以水分生产率作为节水灌溉指标的认识[J]. 中国农村水力水电,2001,(5):9~11. [SHEN Rongkai, YANG Luhua, WANG Kang. The cognition of water productivity considered as the index of water-saving [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2001, (5):9~11.]

[5] Droogers P, Bastiaanssen W. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, 128(1):11~18.

[6] Kijne J, Barker R, Molden D. Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement[R]. Wallingford, UK: Comprehensive assessment of Water Management in Agriculture, CABI Press, 2003.

[7] Tanner C B, Sinclar T R. Efficient water use in crop production: Research or research. In: Taylor H M, Jordan W R, Sinclair T R, eds. Limitation to Efficient Water Use in Crop Production[R]. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1983.

[8] Sinclair T R, Tanner C B, Bennett J M. Water use efficiency in crop production [J]. *BioScience*, 1984, 34:36~40.

[9] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize [J].

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Agricultural Water Management, 2004, 69: 115~133.

[10] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34~39. [FANG Quanxiao, CHEN Yuhai, LI Quanqi, *et al.* Effect of irrigation on water use efficiency of winter wheat [J]. *Transact ions of the CSAE*, 2004, 20(4): 34~39.]

[11] Kang S Z, Shi W J, Zhang J H. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation[J]. *Field Crop Research*, 2000, 67(3): 207~214.

[12] Liu J G, Williams J R, Zehnder A J B, *et al.* GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale [J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2): 478~493.

[13] Singh R, van Dam J C, Feddes R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(3): 253~278.

[14] Droogers P, Kite G. Water productivity from integrated basin modeling [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 1999, 13: 275~290.

[15] Howden S M, Reyenga P J, Meinke H. Global Change Impacts on Australian Wheat Cropping [M]. Canberra: Report to the Australia Greenhouse Office, 1999.

[16] Hartkamp A D, White J W, Hoogenboom G. Interfacing geographic information systems with agronomic modeling: A review [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 761~772.

[17] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, *et al.* An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3~4): 267~288.

[18] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, *et al.* APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research [J]. *Agricultural Systems*, 1996, 50(3): 255~271.

[19] Wang E L, van Oosterom E J, Meinke H, *et al.* The new APSIM-Wheat model-performance and future improvements[A]. Unkovich M., O'Leary G. In '11th Australian Agronomy Conference'[C]. Geelong, Vic.: Australian Society of Agronomy, 2003.

[20] Lilley J M, Kirkegaard J A. Seasonal variation in the value of subsoil water to wheat: simulation studies in southern New South Wales [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(12): 1115~1128.

[21] Asseng S, van Keulen H, Stol W. Performance and application of the APSIM wheat model in the Netherlands [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12(1): 37~54.

[22] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106~110. [SUN Ning, FENG Liping. Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(2): 106~110.]

[23] 姜杰, 张永强. 华北平原灌溉农田的土壤水量平衡和水分利用效率[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 61~65. [JIANG Jie, ZHANG Yongqiang. Soil-water balance and water use efficiency on irrigated farm land in the North China Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 61~65.]

[24] Zhao F H, Yu G R, Li S G, *et al.* Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93, 99~108.

[25] 朱克贵. 中国土种志[M]. 北京:中国农业出版社, 1995. [ZHU Kegui. Soil Species of China (Volume Ⅳ) [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995.]

[26] 熊毅席, 承藩.华北平原土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1965. [XIONG Yixi, CHENG Pan. The Soil in the North China Plain [M]. Beijing: Science Press, 1965.]

[27] 李承绪. 河北土壤[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1990. [LI Chengxu. The Soil in Hebei Province [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 1990.]

[28] 阎鹏, 许世良. 山东土壤 [M]. 北京:中国农业出版社, 1994. [YAN Peng, XU Shiliang. The Soil in Shandong Province [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1994.]

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Modeling the Spatial Distribution of Crop Water Productivity in the North China Plain

Chen Chao[1,2], Yu Qiang[3], Wang Enli[4], Xia Jun[1]

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China;*
3. *Department of Environmental Sciences, University of Technology Sydney, PO Box* 123, *NSW* 2007, *Australia;*
4. *CSIRO Land and Water, GPO Box 1666, Canberra ACT* 2601, *Australia*)

Abstract: The North China Plain (NCP) is the largest agricultural production area in China with a dominant wheat-maize double cropping system. Excessive use of ground and surface water for irrigation has caused rapid decline in groundwater tables and surface water resources. Crop water productivity (WP) is the amount of water required per unit of yield, the increase of which is the ultimate objective of water-saving agriculture. In order to use water resources more efficiently, a better understanding of how WP responds to climate variations and irrigation strategies is required. This paper uses a modeling approach to investigate the responses in the NCP. The Agricultural Systems Model software APSIM is validated by using 14 years of experimental data at three sites. The validated model, together with long-term climate data from 32 weather stations are then used to simulate WP of wheat-maize double cropping system as it responds to climate variations and irrigation scenarios. The simulation results show that considerable spatial variations in WP values exit for both wheat and maize, which correspond to the average conditions in the NCP. WP_{ET} (the ratio of gain yield to evapotranspiration during crop growing season) for wheat rang from 1.38 to 1.69 kg/m^3 with an average of 1.53 kg/m^3 under full irrigation, decreasing from south to north of the NCP due to the increasing vapor press deficit (VPD). Under this irrigation scenario, WP_{ET} for maize rang from 1.69 to 2.05 kg/m^3 with an average of 1.83 kg/m^3. Due to the relatively concentrated rainfall during the maize season, there are no significant differences in VPD and WP for maize has no great differences between south and north; however, it decreases from east to west as a result of the increasing VPD. WP_{ET} for wheat and maize under the irrigation scenario can partially meet crop water demand and is slightly higher than that under full irrigation. WP_{ET} for wheat under rain irrigation decreases from south to north, ranging from 0.29 to 1.57 kg/m^3 with an average of 0.77 kg/m^3, as a result of decreasing rainfall in the growing season from south to north in this area. The range of WP_{ET} for rain irrigated maize is from 0.86 to 2.03 kg/m^3 with an average of 1.47 kg/m^3. Improving irrigation water management can increase crop WP. Reducing the loss of water through evaporation can also increase crop WP.

Key words: APSIM model; Wheat; Maize; Water productivity; North China Plain

http://www.resci.cn
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net