

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

博士学位论文

黄淮海平原人工牧草生态系统主要特征研究

-以禹城市为例

潘国艳

指导教师 于强 研究员 博士 中国科学院地理科学与资源研究所

欧阳竹 研究员 博士 中国科学院地理科学与资源研究所

申请学位级别 博士 学科专业名称 生态学

论文提交日期 2010 年 3 月 论文答辩日期 2010 年 5 月

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 许越先

Classification No. _____

Confidential _____

UDC _____

No. _____

Graduate University of Chinese Academy of Sciences
Doctoral Dissertation

**Main ecological characteristics of the ecological
systems forage cultivars in Huang-Huai-Hai Plain
— A case study from Yucheng City**

Pan Guoyan

Supervisor Yu Oiang Professor

Ouyang Zhu Professor

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CA S

Application Degree Ph. D Major Eceology

Submitted Date March, 2010 Defence Date May, 2010

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

Degree Awarding Unit Graduate University of Chinese
Academy of Sciences

Chairman of Committee Xu Yuexian

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或其它教育机构的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已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名:

时间： 年 月 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名:

时间： 年 月 日

导师签名:

时间： 年 月 日

摘 要

黄淮海平原农区畜牧业的发展需要牧草,建立三元种植结构。为此,我们选择 11 种优质牧草作为研究材料,通过研究揭示黄淮海平原主要人工牧草及不同的种植系统的生物产量、耗水量及耗水规律、生物多样性等生态特征,为黄淮海平原人工牧草种植的光、温、水、土资源高效利用提供科学依据,也为农田生态系统健康和可持续发展提供思路。

试验于 2005-2009 年,在中国科学院禹城综合试验站牧草试验场(36°49′52″N, 116°34′19″E, 23m a.s.l.) 进行,供试牧草品种有:黑麦、小黑麦、高丹草、青饲玉米、籽粒苋、苜蓿、串叶松香草、红三叶、白三叶、菊苣和鲁梅克斯。经过 5 年的种植形成了 5 种植系统:一年生禾本科牧草轮作系统,一年生苋科-禾本科牧草轮作系统,一年生禾本科牧草与多年生牧草轮作系统,串叶松香草,苜蓿。将保护行冬小麦-夏玉米轮作系统作为对照的系统。在水分充分供应条件下进行试验,得出以下结论:

1.生物产量

(1)年均产草量:串叶松香草的鲜草产量 $92.14\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$,干草产量 $16.87\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$,苜蓿分别为 $71.51\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$, $8.62\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ 。籽粒苋干草产量比其他一年生牧草低,鲜草产量稍高;青饲玉米干、鲜草产量都较高;黑麦和小黑麦刈割两次的鲜草产量比刈割一次的高,干草产量比只刈割一次的低。

(2)苜蓿和串叶松香草第一年(2005)年产量最低,第二年产量升高,随后下降,至第五年串叶松香草产量继续下降,但苜蓿产量有所上升。禾本科牧草轮作系统和苋科-禾本科牧草轮作系统鲜草产量波动小,每年的鲜草产量基本稳定在 $80\text{--}100\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,禾本科牧草与多年生牧草轮作系统鲜草产量波动较大,在第二年达到高产,2007 和 2008 年有所降低,至 2009 年产量略有上升。干草产量的年变化规律与鲜草产量基本一致。

(3)不同降雨条件下:除青饲玉米和小黑麦全生育期处理外,其他一年生牧草鲜草产量均是多雨条件最高,多年生牧草鲜草产量少雨条件下均最高。干草产量除青饲玉米外,其他牧草均是在多雨条件产量最高。高丹草平常产量低,多雨条件和少雨条件下产量接近。青饲玉米多雨条件的产量最低,降雨量高于 696.5mm 产量降低。籽粒苋其他季节产量是多雨条件的一半左右。多年生牧草干

草产量在少雨条件下产量最高，串叶松香草在多雨条件产草量会有所降低。

(4) 测定的 8 种牧草生育盛期净光合速率午前迅速增加，在 10:00-12:00 光合速率达到最大值后缓慢下降，青饲玉米、高丹草和籽粒苋等 C_4 光合速率高于 5 种 C_3 牧草。光饱和点的大小依次为苜蓿>鲁梅克斯>籽粒苋>青饲玉米>高丹草>黑麦>菊苣>串叶松香草；最大净光合速率的大小依次为籽粒苋>高丹草>鲁梅克斯>青饲玉米>苜蓿>黑麦>菊苣>串叶松香草；不同层次叶片的光响应曲线差异也较大。 C_4 牧草的光补偿点为 $100\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ， C_3 牧草约为 $50\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2. 不同降雨条件下耗水规律与水分利用效率：

(1) 耗水量：黑麦、青饲玉米和串叶松香草少雨>平常>多雨，小黑麦、籽粒苋和苜蓿则平常>少雨>多雨，高丹草在多雨>少雨>平常。一年生牧草少雨条件下日均耗水量最高，除黑麦和高丹草外，其他牧草多雨的日耗水量最小；多年生牧草串叶松香草和苜蓿，日均耗水量平常>少雨>多雨。黑麦和小黑麦降雨较少条件下成熟期比其他季节提前 2-10 天，高丹草和青饲玉米提前 2-13 天，籽粒苋则提前 28-76 天。

(2) 牧草平常耗水量与 E601 同期的水面蒸发量接近，除苜蓿略高外，其差值小于 9%。黑麦 Kc 值少雨>多雨>平常；其他牧草 Kc 值少雨>平常>多雨。

(3) 高丹草、籽粒苋、青饲玉米和串叶松香草多雨条件下不需要灌溉，在少雨条件下灌溉需求量大。黑麦的灌溉量在 221.5-316.3mm，多雨条件灌溉量稍高；小黑麦为 170.1-280.7mm。串叶松香草多雨条件仍需要微量的灌溉；苜蓿多雨条件灌溉量小，平常灌溉量为 380.1mm，多雨条件为 445.0mm。

(4) 黑麦和小黑麦多雨条件下水分利用效率(WUE)最高，少雨条件最低；高丹草和籽粒苋的 WUE 也是多雨条件最高，但少雨 WUE 并不是最低的；多年生牧草的 WUE 在少雨最高。青饲玉米在平常条件的 WUE 最高，达到 $62.0\text{Kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。黑麦返青期比小黑麦提前 15d 左右，这两种牧草可以适应华北平原的棉花等春播作物的种植，是解决华北平原早春淡季青绿饲草的供应和冬闲田地开发利用的首选优质牧草。

3. 牧草种植农田的土壤理化性质和氮素平衡研究结果表明：

(1) 牧草种植的种植降低了 5-10cm 土壤的容重。与传统小麦—玉米轮作相比，牧草轮作系统降低了 $0.21-0.28\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，串叶松香草降低了 $0.08\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，苜蓿降低 $0.03\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

(2) 2009 年的土壤养分平均状况与 2005 年比较, 有机质、全氮和全磷分别增加 6.82%、12.50%、5.26%; 全钾的含量减少 1.28%; pH 增加 2.23%; 含盐量减少 45.45%。0-5cm 微生物碳、氮含量均在 $150 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 以上, 5-10cm、10-20cm 依次降低。不同牧草种植系统 0-5cm 生物碳含量苜科-禾本科牧草轮作系统最高, 苜蓿次之, 其他 3 个系统的比较接近; 5-10cm 各系统的差别不大; 10-20cm, 禾本科牧草与多年生牧草轮作系统和苜蓿的稍高, 其他系统较接近。0-5cm 微生物氮含量串叶松香草最高, 其他牧草种植系统较为接近, 5-10cm、10-20cm 土壤的微生物氮含量, 轮作系统的较多年生的高。

(4) 禾本科牧草轮作系统、苜科-禾本科牧草轮作系统氮的投入最高, 串叶松香草最低, 禾本科牧草与多年生牧草轮作系统与苜蓿系统的投入相当; 支出主要是收获移走的氮。牧草种植系统的氮平衡均为负值, 说明牧草种植能有效的利用土壤中的氮。

4. 土壤微生物多样性

(1) PLFA 测定共检测出 17 种磷脂脂肪酸, 总数共计 324 个。在 17 种 PLFA 中, 15:0、16:0、18:0、16:1 ω 7c、18:1 ω 8t、a15:0、a17:0、i16:0、i18:0 等 9 种占 81-91% 的丰度, 真菌占 28% 的丰度, 细菌占 72%。检测出真菌共 90 个, 革兰氏阳性细菌 116 个, 革兰氏阴性细菌 9 个, 其他细菌 109 个。禾本科牧草与多年生牧草轮作系统的 PLFAs 个数最多, 其他系统比较接近, 在 43-51 之间。含量最高的是 苜科-禾本科牧草轮作系统, 为 $55.4 \text{ ug} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次是禾本科牧草与多年生牧草轮作系统, $53.6 \text{ ug} \cdot \text{g}^{-1}$, 然后依次是串叶松香草、苜蓿、冬小麦-夏玉米轮作系统。

(2) 主成分分析表明, 第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 两个主成分累计贡献率达到 88.29%, 其他种类占 11.71%。

5. 牧草昆虫种群动态

(1) 苜蓿、串叶松香草和黑麦草, 4 月下旬天敌的密度平均为 $18.29 \text{ 头}/\text{m}^2$, 是小麦的 2.93 倍; 5 月上旬, 为 $16.9 \text{ 头}/\text{m}^2$, 是小麦的 1.87 倍。

(2) 5 月上旬, 麦田寄生蜂和瓢虫种群分别滞后于麦蚜 5~10 d 和 15~20 d, 小麦抽穗期, 牧草的天敌密度高于麦田的约 2~3 倍, 表明牧草在麦蚜种群生态调控中具有潜在利用价值。

关键词 黄淮海平原 人工牧草 生态系统 生态特征

Abstract

Rural areas of Huang Huai Hai Plain are both provisionment and also meat, eggs and milk offering base. Stock raising developed rapidly in these areas right now. But the high quality forage is not adequate in this area which became a limited factor to develop stock raising. So we need to develop three-component cropping system in rural areas of Huang Huai Hai Plain.

The aim of this research was to examine the ecological facets of forage cultivars and their five different cropping systems. In this study, we quantified productivity, water requirement, water use efficiency of seven forage varieties under climate variability (especially precipitation). We also examined soil quality and nitrogen balance of five forage cropping systems, soil biological diversity and multi-population dynamics of aphids and natural enemies on forage cultivars. So a field experiment was conducted in Yucheng Integrated Experiment Station (36°49'52''N, 116°34'19''E, 23 m a.s.l) during 2005 and 2009. We designed a system of water budget and forage production for eleven varieties of forages, i.e., Wintergrazer-70 (*Secale cereale* L.), triticale (*X Triticosecale* Wittmack), sorghum hybrid sudangrass (*Sorghum biolor* × *Sorghum Sudanense* c v), ensilage corn (*Zea mays* L.), prince's feather (*Amaranthus paniculatus* L.) for annual varieties, and alfalfa (*Medicago sativa* L.), cup plant (*Silphium perfoliatum* L.), red clover (*Trifolium pretense* L.), white clover (*Trifolium repens* L.), Common chicory(*Cichorium intybus* L.), rumex (*Rumex patientia* × *Rtinschanicus* cv.·Rumex K-1) for multi-annual varieties, under amply water supply. The main results were as follows:

1. For productivity, water requirement and water use efficiency:

(1) ET of each forage cultivar in the wet seasons is the highest, followed by the normal seasons and the dry seasons, while ET of wintergrazer-70 (full stage) and sorghum hybrid sudangrass in wet seasons are a little higher than in dry seasons. Annual varieties consumed 0.1-1.4 mm^d⁻¹ more daily water under low rainfall situations, except alfalfa and cup plant consumed more water each day in the normal years. The sequence for wintergrazer-70 and triticale-830 under the climate patterns

are on the contrary of ET.

(2) Wintergrazer-70 and triticale-830 had mature ahead 2-10 days in the dry years than in the other years, for sorghum hybrid sudangrass and ensilage corn are 2-13 days, for prince's feather is 28-76 days, that indicated that the prince's feather is sensitive to climate changes.

(3) Ensilage corn has the highest WUEy ($62.0 \text{ Kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) in the normal years than in other years, it may be concluded by the highest dry biomass. Comparison with long term rainfall of climate record (for spring and summer / autumn seasons), ensilage corn is the best choice for its high forage yield. Winter grazer-70 and triticale-830 have the advantage of growing in the fallow state after cotton harvest in Huang Huaihai Plain. Sorghum hybrid sudangrass is another forage cultivar grown well in all the climate patterns. Prince's feather may achieve its high yield in wet seasons. For multi-annual varieties, alfalfa is better than cup plant in the dry seasons.

2. Soil quality analysis and N balance

(1) Forage cultivars planting can improve the status of the soil surface, making the soil bulk density reduced at the 5-10 cm layers. Compared with the traditional wheat-maize rotation, annual forage rotation system had reduced $0.21\text{-}0.28 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, *Silphium perfoliatum* reduce $0.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, alfalfa to reduce $0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

(2) The average soil organic matter and total nitrogen, total phosphorus were increased by 6.82%, 12.50%, 5.26%, respectively from 2005 to 2009. Total potassium content decreased 1.28%. The soil pH increased 2.23%, salt content reduced 45.45%.

(3) Both the microbial carbon and nitrogen content of the different cropping systems reached up to $150 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ in the 0-5cm soil layer, however, in the layer 5-10cm and 10-20cm reduced in turn. For CAG system, 0-5cm microbial carbon content in the highest, followed by alfalfa, the other three systems closer, while there was no dramatically difference in the 5-10cm layer, 10-20cm CGF system, alfalfa, slightly higher, closer to other systems.

(4) Pastures of different cropping systems from 2005 to 2009 showed that the nitrogen balance of payments situation, the total annual nitrogen input forage rotation system was the highest, *Silphium perfoliatum* minimum, annual grass and CGF system and

alfalfa systems invest a considerable amount. The mainly expenditure of nitrogen is caused by crop harvest, especially for high forage yield and high protein content. Forage cropping systems of the nitrogen balance were neglect, indicating the income of pasture cropping systems of nitrogen was less than the output of nitrogen can be an effective use of soil nitrogen.

3. Biodiversity:

(1) Phospholipid fatty acid analysis detected 17 kinds of phospholipid fatty acids, a total of 324. In the 17 PLFA in, 15:0,16:0,18:0,16:1 ω 7c, 18:1 ω 8t, a15: 0, a17: 0, i16: 0, i18: 0 accounted for 81-91 % of the abundance, fungi accounted for 28% of the abundance, bacteria together accounted for 72%. PLFA detected a total of 90 fungi, Gram-positive bacteria 116, 9 Gram-negative bacteria, other bacteria 109. CGF system is the largest number of the other five the number of the system closer to that in between 43-51. PLFA content of the highest for CAG system, for the $55.4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, followed by CGF system to $53.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, CS, CM, CG and WM system.

(2) Six cropping systems at different levels of soil 17 the amount of principal components analysis of fatty acids, the first principal component PC1 and the second principal component PC2 cumulative contribution rate of two principal components reached 88.29%, other types of accounts for 11.71%.

(3) Population growth rate of wheat aphids was negatively correlated with natural enemy population densities, and the correlation with lady beetle population density was significant. The heading stage of winter wheat from late April to early May was a key period for outbreak of wheat aphid population which was mainly caused by the low density of natural enemies and large ratio of prey and predator. From late April to early May, the enemy population density on forage was 2-3 times higher than that on winter wheat, which implied a potential application of forage to the ecologically-based management of wheat aphids.

Keywords: Huang Huaihai Plain; Forage cultivars; Cropping systems; Ecological characteristics

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	I
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 农区人工饲草需求与草业发展趋势.....	1
1.1.2 黄淮海平原农区畜牧业发展与人工牧草建设.....	3
1.1.3 牧草生态系统是农田生态系统的重要内容.....	4
1.2 国内外研究进展.....	5
1.2.1 牧草耗水规律的研究进展.....	5
1.2.2 牧草农田生态系统养分循环的研究.....	10
1.2.3 农田生态系统氮素平衡研究.....	11
1.2.4 牧草生态系统的生物多样性研究.....	14
1.2.5 存在的问题.....	17
1.3 研究目标、研究内容与思路.....	17
1.3.1 研究目标.....	17
1.3.2 研究内容与研究思路.....	17
第二章 试验设计与数据采集.....	19
2.1 试验区概况.....	19
2.1.1 试验区概况.....	19
2.1.2 试验区气温与降雨状况.....	20
2.2 试验材料.....	22
2.3 试验处理与试验小区布置.....	24
2.4 主要观测项目与方法.....	26
2.5 试验田间管理.....	33
2.6 所测数据分析方法.....	33
第三章 牧草的生物产量.....	35
3.1 不同牧草和牧草不同种植系统的生物产量.....	35
3.1.1 不同牧草的产草量.....	35
3.1.2 牧草在不同降雨条件下的产草量.....	36
3.1.3 不同牧草种植系统的产草量.....	37
3.2 不同牧草的生物量积累规律.....	39
3.2.1 不同牧草的最大叶面积指数.....	39
3.2.2 不同牧草的叶面积指数变化.....	39
3.2.3 不同牧草的生物量积累过程.....	42

3.3 不同牧草的光合作用.....	42
3.3.1 不同牧草的光合日变化.....	42
3.3.2 不同牧草的光响应曲线.....	44
3.4 冬牧 70 黑麦与中新 830 的生长发育进程.....	44
3.4.1 株高变化.....	44
3.4.2 叶面积指数动态变化.....	45
3.4.3 生物量动态变化.....	45
3.4.4 冬牧 70、中新 830 与冬小麦比较.....	46
3.2 本章小结.....	47
第四章 牧草的耗水量与耗水规律.....	49
4.1 牧草的耗水量.....	49
4.1.1 牧草在不同的降雨年型下的耗水量.....	50
4.1.2 牧草不同种植模式下的耗水量.....	51
4.2 牧草的耗水规律.....	52
4.2.1 牧草不同降雨年型下的作物 (Kc).....	52
4.2.2 牧草在不同降雨条件下的灌溉需求量.....	54
4.3 牧草的水分利用效率.....	54
4.3.1 不同牧草的水分利用效率.....	55
4.3.2 不同种植系统的水分利用效率.....	55
4.4 冬牧 70 黑麦与中新 830 耗水量和生物量积累规律.....	56
4.4.1 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦耗水量与耗水规律.....	56
4.4.2 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的耗水模系数.....	58
4.4.3 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的作物系数(Kc).....	58
4.4.4 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的水分利用效率.....	58
4.5 本章小结.....	59
第五章 不同牧草种植系统土壤质量与氮素平衡.....	61
5.1 不同牧草种植系统与土壤物理性状.....	62
5.2 不同牧草种植系统对土壤养分的影响.....	63
5.2.1 牧草种植前后 0-20cm 土壤养分和盐分的变化.....	63
5.2.2 不同牧草种植系统的土壤养分分析.....	64
5.3 不同牧草种植系统对土壤微生物量碳、氮的影响.....	67
5.3.1 牧草种植前后 0-20cm 土壤养分和盐分的变化.....	67
5.3.2 牧草种植系统微生物碳氮比(MBC / MBN).....	69
5.4 牧草不同种植系统下的氮收支与平衡.....	69
5.4.1 牧草种植系统的氮收支项目.....	69

5.4.2 不同种植系统的氮收支与平衡	70
5.4.3 不同种植系统的氮收支与平衡	71
5.5 本章小结	72
第六章 不同牧草及其种植系统的生物多样性	74
6.1 不同种植系统土壤的微生物群落的差异	74
6.1.1 磷脂脂肪酸 (PLFA)的命名和分类	75
6.1.2 不同种植系统土壤PLFA含量及种类	76
6.1.3 不同种植系统土壤PLFA主成分分析	78
6.2 牧草和小麦上的蚜虫与天敌种群动态	78
6.3 本章小结	80
第七章 主要结论与讨论	81
7.1 牧草生产力	81
7.1.1 牧草及不同种植系统年产草量	81
7.1.2 不同降雨条件下的产草量	81
7.1.3 不同牧草的光合作用	82
7.2 耗水规律与水分利用效率	82
7.2.1 不同降雨条件下牧草的耗水量	82
7.2.2 不同降雨类型下牧草生育期	83
7.2.3 不同降雨类型下牧草的作物系数K _c 和灌溉需求量	83
7.2.4 不同降雨类型下牧草的水分利用效率	83
7.2.5 冬牧 70 黑麦与中新 830 小黑麦的比较	84
7.3 土壤理化性质和系统的氮素平衡研究	84
7.3.1 牧草种植对土壤容重的影响	84
7.3.2 牧草种植对土壤养分和微生物碳氮的影响	84
7.3.3 牧草种植系统的氮素平衡	85
7.4 土壤微生物多样性	85
7.5 牧草昆虫种群动态	85
7.6 论文创新点与不足	86
参考文献	87
致 谢	97

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 农区人工饲草需求与草业发展趋势

畜牧业与种植业是农业生产的两大支柱，是农业的主要组成部分，畜牧业占农业总产值的比重往往被用来衡量一个国家农业现代化的发达程度。纵观世界，农业发达的国家均是畜牧业发达的国家，他们将畜牧业作为农业的主导产业来对待，对畜牧业在社会经济发展中的重要作用均给予了高度的重视，畜牧业产值占农业总产值的比重均在 50%以上，比如美国畜牧产值占到农业总产值的一半；西欧的德国占 61%，法国占 70%以上，英国占 60%以上；北欧国家则以畜牧业为主，丹麦、瑞典则占到 90%；东欧各国的畜牧业比重均占 50%以上；大洋洲的澳大利亚为 60%，而新西兰则高达 80%以上；亚洲的日本二次世界大战后大力发展畜牧业，现在比重已达 30%以上(胡成波, 2004; 薛书超, 2003; 裘望, 2006; 朱丕荣, 2009)。我国畜牧业自 20 世纪 80 年代以来得到了快速的发展，畜牧业产值占农业总产值的比重由 1978 年的 15%左右，经过 30 年的发展，到 2001 年开始超过 30%，2008 年畜牧业生产总值突破 2 万亿元，约占农业总产值比重的 35%(中国畜牧业协会, 2009; 孙政才, 2009; 李小健, 2009)，但离世界发达国家的 50%以上仍有较大差距。对比国外发达国家，我国农区畜牧业仍有很大的潜力可挖。

然而，畜牧业的发展离不开草业的发展。我国从生产结构看，生猪是我国畜产品的主体，每年畜牧业耗粮约占全国粮食消耗量的 1/3，2005 年，猪肉产量占肉类总产量的 64.7%，而牛羊肉产量只占 14.8%(刘加文, 2008)。世界发达国家肉类主要来源于草食动物，牛羊肉产量占肉类总产量一般都在 50%以上，如美国人的肉食中 73% 由草转化而来，澳大利亚约 90%，新西兰接近 100%，而我国只有 6%~8%，其余 90%依靠粮食转换而来。世界人均奶类年占有量约 103kg，发达国家平均为 312kg，新西兰约 2700kg;发展中国家平均为 36.50kg，而中国 2007 年为 26.70kg(中国畜牧业协会, 2009)。与肉奶的产量相应，世界上农业比较发达的国家，草地畜牧业都占 50%左右 (梁小玉等, 2003)。他们要么拥有得天独厚的天然草地资源，要么人工牧草建设发达。比如澳大利亚，天然草地占国土面积的一半以上；新西兰，牧草四季常青。我国统一草地资源调查资料显示，我国天

然草地面积约 4 亿公顷, 占世界草地面积的 13%, 小于澳大利亚, 大于美国, 是世界第二草地大国(殷耀, 任会斌, 2004)。其中 3 亿公顷为北方草原, 西藏自治区面积最大, 占到全国草地面积的 21.40%; 依次是内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、青海省, 四省区草地面积之和占全国草地面积的 64.65%; 1 亿公顷为南方草山草坡(孟有达, 2001)。但是, 北方草原大都地处北方的寒冷地带, 冷季长达 6~7 个月, 受无霜期短、寒冷、干旱的威胁, 天然草场退化严重, 草料普遍缺乏; 而南方草山草坡开发利用难度大, 潜力有限。我国天然草地的生产力水平很低, 资源质量远远低于澳大利亚和新西兰等国。

除了天然草地资源, 人工和半人工草地在保障家畜饲草供给和畜牧业生产稳定发展中起着重要的作用。美国从 20 世纪 50 年代起就在草原牧区提倡人工种草, 不断提高优质牧草(特别是苜蓿)的播种面积比重, 人工草场在全部草地面积中的比重已达 15%。加拿大为 24%, 英国为 59%, 法国为 32%, 澳大利亚为 6%(侯武英, 2001); 荷兰、爱尔兰等人工牧草种植面积占到整个耕地面积的 60% 以上(刘加文, 2008)。目前, 目前我国人工草地面积占全部草地面积的比例只有 3%。借鉴国外畜牧业发达国家的经验, 我国要想畜牧业发展上新的台阶, 就要大力发展人工牧草的种植。在保证粮食作物和经济作物的前提下, 应努力扩大高产饲料作物的种植, 以有限的耕地, 生产出更多的饲料来。

我国人工牧草种植与国家政策有很大关联。1992 年, 在国务院发表的《我国中长期食物发展战略与对策》报告中, 提出了“要将传统的粮食作物和经济作物的二元结构, 逐步转变为粮食作物—经济作物—饲料作物的三元结构。”1993 年, 国务院制订的《90 年代中国食物结构改革与发展纲要》重申了这个观点, 并指出要制订饲料生产形成相对稳定高效的扶持政策。

上世纪 90 年代至本世纪初, 人工牧草的研究主要集中在“三元结构”方面的试验研究和论述(卢良恕, 1994, 1995, 1996, 1997; 侯满平, 郝晋珉等, 2003, 2004; 陈阜, 1995), 缺少对人工牧草品种选择、引种、不同牧草在不同地区的适应性, 以及牧草的农田生态环境效应等方面的试验研究。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 对畜产品的需求大幅度增加, 为满足畜牧业对饲料的需求, 发展饲草业成为畜牧业, 特别是奶牛业稳定、快速发展的重要途径(刘自学, 2002)。因此, 开展对人工种植牧草的生态效应方面的研究, 不仅丰富了人工牧草生态系

统的研究内涵，而且对促进我国畜牧业的发展具有现实意义。

1.1.2 黄淮海平原农区畜牧业发展与人工牧草建设

我国虽然拥有较大面积的天然牧场，但退化超载，生产潜力不大，进一步发展农区畜牧业的重点区域在黄淮海平原。

黄淮海平原泛指黄河，淮河和海河下游冲积平原，总面积 35 万 km²，包括京，津，冀，鲁，豫，苏，皖五省二市，316 个县(市)，人口 2.138 亿，约占全国总人口的 18%；耕地 25343.7 万亩，约占全国耕地面积的 13.8%，人均占有耕地 1.18 亩，低于全国平均水平(2001-2005 年平均)。但是据黄淮海平原 5 省 2 市 2004 年的统计资料，粮食产量、肉类总产量、牛肉产量、羊肉产量、禽肉产量、牛奶产量、禽蛋产量分别占全国总产量的 20.23%、37.0%、49.1%、41.3%、43.7%、31.1%和 58.6%。据资料分析，我国城乡居民口粮总消费量逐年减少，饲料用粮消耗快速增长，饲料用粮与口粮消费的比重由 1985 年的 1:2.63 降至 2002 年的 1:1.06，也就是说，饲料用粮与口粮消费基本持平。随着我国畜牧业的快速发展，饲料用粮将大幅度增长，当今粮食问题的实质即是饲料问题(任继周，2002，2004)。目前，黄淮海平原饲料用粮达 1.6 亿吨，占当地粮食产量的 63.1%。可见黄淮海平原农区承受着粮食生产和畜牧业发展的双重压力。减轻粮食压力的途径就是加大草食畜禽的饲养。

近 10 余年来，黄淮海地区奶牛业发展迅速，肉牛、肉羊等草食牲畜也得到了快速发展，优质饲草的短缺已成为主要制约因素。

长期以来，农区畜牧业主要依靠粮食(精饲料)和秸秆(粗饲料)。按这种传统畜牧业发展模式，饲料营养也达不到要求。用作饲料的谷物的蛋白质含量大约在 7%左右，远远低于畜禽蛋白质要求 15%以上的标准(高德海,1997)。随着我国农业综合生产能力的提高，秸秆资源数量呈增长趋势，成为世界第一秸秆资源大国，毕于运等(2009)估算，2005 年我国农作物秸秆总产量达 8.42 亿吨。但目前作物秸秆饲料利用率很低，不足 30% (钟华平等,2003; 王秋华,1994)。

牧草是天然的全价饲料，营养全面，饲料转化率高。相同的生长季节，牧草可获得比农作物高几倍的营养产量和蛋白质含量。据研究，多花黑麦草的产奶净能和粗蛋白含量分别是小麦(含秸秆)的 1.34 倍和 2.32 倍；紫花苜蓿的产奶净能

和粗蛋白产量分别是大豆(含秸秆)的 2.5 倍和 2.12 倍(毛玉胜,1998)。且牧草饲料作物的养分比农作物具有更高的利用率。禹城试验站“十五”国家科技攻关计划一区域持续高效农业综合技术与示范对牧草与秸秆配比饲喂效果进行了比较,结果显示:秸秆配以一定量的青绿饲料,其利用效率大大提高;各种青绿饲草对提高奶牛产奶量均表现出显著效果,增产 10%-15%。

黄淮海平原是我国重要的乳业基地,奶牛发展很快,发展牧草业已引起广泛关注,在河北省的黑龙巷地区和山东省的黄河三角洲地区已经建成了两大草业基地。据统计,黄淮海平原冬闲地资源达 667.5 万公顷,这为黑麦草的种植提供了广阔的空间。然而,发展牧草种植,缺乏对牧草需水规律的系统研究,因为黄淮海平原人均水资源占有量仅为 257m^3 ,仅为全国人均占有量的 12.1%。水资源的缺乏制约了黄淮海农区的粮食生产和可持续发展(Wang et al., 2001; Zhang et al., 2005; Fang et al., 2007, 2010),该地区的作物水分利用及灌溉制度等主要集中在小麦、玉米轮作系统中(Zhang et al., 2004; Zhang et al., 2005; Yu et al., 2006; Sun et al., 2006; Fang et al., 2007, 2010; Li & Yu, 2007),相比之下,牧草系统的研究则较少,更缺乏系统性。

综上所述,人工牧草建设,是黄淮海平原农区畜牧业发展的当务之急,而发展牧草种植,首要解决的问题是水资源合理利用,因此,需要对牧草耗水规律、牧草的环境效应,以及可持续发展进行深入研究。

1.1.3 牧草生态系统是农田生态系统的重要内容

据统计,我国每年粮食种植面积占全国耕地面积的 80%左右,经济作物约为 10%,绿肥仅占 5%左右,基本上没有形成粮、经、饲作物的三元种植结构。

我国农田生态系统普遍种植结构单一,生物多样性下降,为了维持高产量,而采取高水、高肥、高农药的措施,造成结构功能退化,土壤养分循环比例失调,病虫害数量增加。化肥的过量施用和农药的滥用,对环境造成了污染。

农田生态系统是半自然人工生态系统(李新旺,门明新,王树涛等,2008),既受人工的控制,也遵循一般自然规律。牧草引入农田生态系统,不仅能从一定程度上解决农区优质青饲料短缺的问题,具有经济效益,而且具有重要的生态价值。牧草种植能改善土壤理化性状,特别是豆科牧草固氮能力,培肥地力;牧草种植

能增加农田生态系统生物多样性,打破农田病虫害发生规律,为生物防治提供途径。草田轮作可以减少化肥和农药的施用,减轻对环境的污染,有利于保护生物多样性,为农业的可持续发展提供途径。

长期以来,农区的牧草生产没有被重视,牧草的种植起步较晚,与小麦、玉米、棉花、大豆一类的作物生态系统相比,我国农区牧草生态系统的结构功能研究尚少,生态效应方面的研究比较零散,南方稻田研究主要集中在黑麦草的应用,北方的研究一般只涉及单个牧草的一两年的试验资料,并没有多年的试验资料的支持。对于牧草生态效应的机理等的认识大部分停留在论述的阶段,缺乏长期试验的验证。

国外畜牧业发展的实践可供借鉴,大部分西欧国家都是在人均占有粮食不足 350kg 时,进入了以牧草畜牧业为主的时代。自 1982 年以来,我国人均占有粮食已经超过了 350kg,因此,农区开展高产优质牧草种植的时机已经成熟。

目前,海河低平原和黄河三角洲牧草的种植已有一定的规模,取得了良好的经济效益和生态效益。在这种情况下,应当不失时机开展农区牧草生态系统的研究。

综上所述,牧草生态系统的研究不仅对生产实践具有指导作用,也为农田生态系统健康和可持续发展提供新的思路,丰富了农田生态学的理论基础,也对农业结构的战略性调整具有现实的指导作用。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 牧草耗水规律的研究进展

在作物生长发育过程中,有 99%的水分是通过蒸散消耗而损失掉的,只有 1%用于光合作用。程维新等把通常测定蒸发量的方法归纳为液态水分消耗测量与水汽传输测量两类,其中前者包括水量平衡法、蒸发器与蒸发池法、蒸发仪渗透法和植物生理测定技术,后者分为空气动力学法、热量平衡法、空气动力学数量平衡联立法和涡度相关法,随着计算机技术的发展,遥感技术也被运用于蒸发的测量(程维新,康跃虎,2002)。所谓作物需水量,是指农田充分供水条件下作物蒸腾量和棵间土壤蒸发量之总和(左大康,1992)。有的也称之为农田耗水量或作物耗水量,水利部门一般称农田需水量或作物需水量。按照联合国粮农组织《作

物需水量》一书的定义，作物需水量是满足健壮作物生长因蒸发蒸腾损耗而需要的水量深度。

中国科学院禹城综合试验站长期从事农田蒸发与作物需水量研究，在农田蒸散与作物耗水规律方面进行了系统的研究，出版了一系列的研究和论文。许多单位和高等院校也相继开展了作物需水量的试验研究，大部分集中在华北平原地区，主要研究华北平原地区的冬小麦、夏玉米、夏大豆、棉花等作物的需水量与耗水量规律。

国内有关牧草耗水研究主要集中在黄土高原、内蒙古、青藏高原高寒草甸区和辽西北等草地资源集中和人工牧草地集中的地区，测定牧草种类以苜蓿居多(杨启国,张旭东等,2003; 陈曦, 任树梅等, 2005;侯刚,顾明德等, 2005; 万素梅,王龙昌等, 2005), 对农区农田种植牧草的耗水研究较少。其实早在上世纪八九十年代已有关于草地牧草耗水研究(梁一民,李代琼等,1990; 卢宗凡,张兴昌等, 1995; 李英年, 曹广民等,1996; 周立华,李一兴等,1997; 魏广祥,冯革尘等, 1999; 杜世平, 王留芳等, 1999)。梁一民等研究发现在黄土丘陵区人工沙打旺草地的总耗水量稍大于降雨量,其中蒸腾量占 72%,随生长年限增长其根系每年向下延伸 1.0~2.0m,对土壤水分的利用能力很强(梁一民,李代琼等, 1990)。李英年等在研究高寒草甸植被一年中耗水量变化呈单峰型曲线变化,7月最高,返青期的5月最低(李英年,曹广民等,1996)。魏广祥等对辽西北丘陵漫岗区不同土壤湿度与沙打旺产量、生长速度的关系的研究表明,沙打旺对水分盈亏十分敏感,是需水量较多的人工牧草,其产量及生长速度与土壤湿度成正比例关系,且需水强度最大的是初花期,日耗水强度 5~7mm,阶段需水量最多是盛花期,占全生育期需水总量的 20%~35%,需水临界期为分枝期(魏广祥,冯革尘等, 1999)。早期的研究牧草耗水主要依靠的是土壤含水量的变化,根据水量平衡估算的结果。土壤含水量都是采用土钻取土烘干法,这种方法测定土壤含水量有一个最大的局限就是不能连续在同一个地方测定。随着中子仪、TDR 等测定土壤含水量的技术的采用,逐渐测定土壤含水量由烘干法和中子仪、TDR 等多种方法结合使用。比如周立华等就采用中子仪测定小麦、水稻、玉米三种主要农作物的土壤含水量,并据内蒙牧区水利科所研究成果中的 Kc 值和联合国《作物需水量》一书中提供的作物系数,用彭曼公式计算出银北地区主要牧草和果树需水量值,苜蓿全生育期需水量

484.06mm, 高丹草 640mm(周立华,李一兴等,1997)。21 世纪牧草耗水的研究仍然集中在黄土高原地区,测定方法和技术上有了进步,光合仪器的使用使得牧草光合蒸腾生理生态特性研究多了起来,试验上也设计了丰富的内容,不单纯研究牧草的耗水,还将耗水研究与环境因子结合、灌溉等因素结合研究,为生产实践服务。谢田玲,沈禹颖等对甘肃红豆草、沙打旺,东方山羊豆和多年生香豌豆牧草地,不光用中子仪测定土壤含水量,还用光合仪测定其净光合速率、蒸腾速率的日变化进程等生理生态特征(谢田玲,沈禹颖等,2004)。温达志等用便携式 LCA4 光合-蒸腾仪测定广东省曲江县粤北第二示范牧场的墨西哥玉米、矮象草、杂交狼尾草、皇草 4 种禾本科牧草的光合蒸腾特性,指出 4 种牧草具有忍受或适应华南夏季炎热高温气候的能力或潜力,其中墨西哥玉米、杂交狼尾草、皇草通过维持气孔扩张最大程度地蒸腾水分以降低叶温,矮象草则通过关闭气孔以减轻因水分过度消耗带来的伤害来适应正午前后高光强高温(温达志,张德强等,2000)。熊伟,王彦辉等利用盆栽试验,土钻取土烘干测含水量,每天用电子天平称重,差值计算蒸散量,对宁夏南部地区 3 种主要牧草苜蓿、长芒草和芨芨草的蒸散量进行了对比研究,结果表明,在生长季中后期人工牧草苜蓿蒸散量的日平均值为 4.15 mm,分别比芨芨草和长芒草高出 24.34%和 29.88%,3 种草本植物的蒸散量与土壤含水量呈高度相关(熊伟,王彦辉等,2003)。不同土地利用方式的比较,孙泽强,李子忠等运用水分平衡原理研究河北坝上地区天然草地、人工草地和农田等 3 种土地利用方式的耗水规律,分析了水分利用效率、经济效益和生态效益,得出人工草地耗水量为 213.2 mm,比天然草地少 14 mm;人工草地水分利用效率最高为 $0.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,是农田的 1.7 倍;人工草地的经济效益较好产投比是农田的 4.6 倍(孙泽强,李子忠等,2003)。耗水研究与气候年型、经济效益结合,如郭海英等 2004 年至 2005 年在甘肃省西峰农业气象试验站试验地对冬小麦、紫花苜蓿、黄花菜的耗水量、水分利用率及经济效益进行了对比分析,认为陇东塬区紫花苜蓿种植经济效益较高,约为冬小麦和黄花菜经济效益的 2.4~2.5 倍,冬小麦种植气候风险最大,经济效益较差,在底墒较差的偏旱年份(有春旱),冬小麦耗水量接近紫花苜蓿,全生长季耗水量 386mm,春季生长期耗水量 210mm,但基本没有经济效益(郭海英,赵建萍等,2007)。耗水研究与灌溉结合,比如胡跃高,李国辉等 1996 年至 2000 年四年间在河北的吴桥试验站对青刈黑麦进行了系统的试验研

究, 结果表明每次灌水后均出现一次耗水高峰, 水分利用效率不浇水>浇一水>浇二水, 灌水次数越多, 灌水量越大, 水分利用效率越低(胡跃高, 李国辉, 2000)。而马兴祥, 尹东等 2003~2005 年在甘肃省武威市凉州区对人工灌溉牧草草地不同深度不同时间灌水前后的水分变化特征进行研究, 发现 0~40 cm 含水率变化大而且快, 称多变层, 40~80 cm 牧草水分利用层, 80~100 cm 稳定贮水层; 用土壤水分平衡法估算美国大叶、沙打旺的全年耗水量表明, 在干旱缺水地区种植美国大叶是发展草产业的较好品种 (马兴祥, 尹东等, 2009)。耗水与不同播种密度和模式的结合, 张晓红, 王惠梅等于 2004~2005 年在长武农业生态试验站研究了不同播种密度和模式的人工草地(苜蓿、沙打旺和达乌里胡枝子)在建植次年对土壤水分的消耗利用情况, 在田间完全旱作条件下采用不同个密度和单、混播种方式观察土壤水分的消耗利用情况, 土壤水分的消耗量和水分利用效率均是苜蓿>沙打旺>达乌里胡枝子, 消耗量分别为苜蓿 249.9 mm、沙打旺 180.2 mm、胡枝子 136.6 mm, 全生育期平均水分利用效率为三混播> 双混播> 单播(张晓红, 王惠梅等, 2007)。

与人工牧草栽培相适应, 国外有干旱和半干旱地区有关人工牧草耗水的试验研究比较多, 并且多与种植制度相结合研究, 耗水的计算方法有试验测定与模型估算等方法。牧草种植较多的国家早已经将牧草引入了种植系统, R.A.Latta 等在澳大利亚西部 Moora 地区发现紫花苜蓿的种植为澳大利亚州西部小麦种植带更大的利用水资源提供了机遇(Latta et al., 2001)。接着他们又比较了澳大利亚西部紫花苜蓿(二年生)与一年生豆科牧草在牧草-小麦轮作沙地酸性土壤的适应性, 试验测定了土壤水分含量、产草量、土壤养分等等, 与一年生牧草相比, 紫花苜蓿能利用夏季的降水从而获得了较高的生物产量, 更适合在澳大利亚西部种植, 其中土壤水分的测定是借助于中子仪(Latta et al., 2002)。也有研究更深入的, 与免耕相结合进行研究, 例如 Latta J. 和 O'Leary 对澳大利亚的 Mallee 长期试验站半干旱地区休耕-小麦 (FW), 牧草-小麦 (PW)和牧草-休耕-小麦(PFW) 三种不同的轮作模式的长期研究的分析发现: 在相同的条件下 PFW 系统获得的小麦不论是干旱年份还是湿润年份产量都是最高的, 水分利用效率也是最高的, 除个别年份外 PFW 的产量都显著高于 FW 和 PW, 并且 PFW 的 0-100cm 土壤含水量显著高于 PW(Latta & O'Leary, 2003)。在这个长期实验中 140cm 土壤含水量也是用中子仪测定的, 表层是采用烘干法测定(O'Leary & Incerti, 1993; Latta &

O'Leary, 2003)。耗水是用播种与收获时的土壤贮水量差值加上生育期内的降雨量计算得来(Latta & O'Leary, 2003)。还有试验测定与水量平衡的方法, Lothar Mueller 等用德国柏林附近的蒸渗仪的方法测定了不同质地的土壤上的地上生物量, 蒸发量, 地下灌溉水比例和水分利用效率, 蒸渗仪内用 TDR 监测土壤湿度, 结果表明春大麦消耗 10-60mm 的地下水, 冬小麦 20-250mm, 牧场和草场牧草 80-300mm, 玉米 100-400mm, 玉米水分利用效率最高, 其次是小麦, 潮湿植物也产生了大量的生物量, 但消耗更多的水, 其水分利用效率均小于 1.5(Lothar Mueller et al., 2005)。对于大的草原的蒸散量的估算, 主要是借助于气象数据, 采用模型的方法。例如由美国航天局和美国农业部发起的, 1997 年 6 月和 7 月在俄克拉何马州, 美国南部大平原的水文实验(SGP97), 从记录结果看从 0.71 至 0.91 之间的几个草原网站的能量平衡闭合, 建议用能量平衡闭合来支持波文比, 这些对长期的水量平衡有重要意义(Twine et al., 2000)。Sumner 等采用涡度相关方法, 测定了美国佛罗里达州中部的一个无灌溉牧场草地, 自 2000 年底至 2002 年间 19 个月每半小时的实际蒸散量(ETa), 比较了 Penman-Monteith 模型 (PM), Priestley-Taylor 模型 (PT), 参考蒸散量(ET0)以及水面蒸发模型(Ep)发现, PT 模型是一个将叶面积指数和太阳辐射与实际蒸散量相关很好的模型, 与 ETa 相比标准误差仅为 0.11 mm/天, 准确计算 ETa 旨在为水资源的合理规划做依据 (Sumner et al., 2005)。其实 PT 模型就是简化了的彭曼方程, 一般用来计算土壤水分限制条件下的蒸散量(Flint & Childs, 1991)。作者还提出牧草的蒸散量计算可以与遥感相结合(Sumner et al., 2005), 这对计算大面积的草场的耗水很实用。牧草水分利用效率与氮素利用相结合研究, 例如 Pala 等研究发现小麦与豆科(小扁豆)轮作, 氮素的增加不仅能获得产量的持续增加, 而且由于水氮耦合规律使得系统的水分利用效率得到了提高(Pala et al., 2007)。

随着奶牛业的发展, 加之华北平原水资源紧缺, 近年来, 许多学者开展了牧草需水量的试验研究(胡跃高, 1997, 1998; 陈曦, 2005; 赵风华 2004; 马兴林, 1995; 孙洪仁, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009), 但多数偏重于紫花苜蓿, 其它牧草较少涉及。因此, 需要对适应该地区的主要优质牧草进行耗水规律进行深入研究。

1.2.2 牧草农田生态系统养分循环的研究

土壤是农业生产的基础(朱祖祥,1983),研究土壤生态系统功能就需要搞清楚土壤的生物活动、有机质动态和养分的循环(Coleman et al., 2004; Lavelle & Spain,2001)。牧草对比作物具有更好的碳氮蓄积能力(Rasmussen et al.,1998),特别是豆科牧草的固氮作用得到了大家的高度肯定(Carlsson & Huss-Danell,2003; Crews & Peoples, 2004; Jensen et al., 2004; Badgleya,2007), 豆科牧草也成为农田轮作种植的首选牧草。

澳大利亚在十九世纪50年代由于养羊业的发展,在原来单一小麦种植的基础上引入了豆科牧草的种植,牧草的种植提高了羊的存栏量,并且土壤有机质和氮储量也随着不断的增加(Connor, 2004)。特别是牧草种植对少雨地区环境的改进作用被认为是“澳大利亚的革命”(Smith, 2000; Connor, 2004)。牧草和作物不再是各自独立的种植,而是轮作,这样后续的作物就可以利用前茬牧草积累的肥力(Rovira, 1992, 1993)。Bolinder等对加拿大年净初级生产力、农业土壤碳蓄积进行了估算,发现牧草具有更大的根冠比,地下净生产力比作物要高,也能固定更多的碳(Bolinder et al., 2007)。Poudel等对加利福尼亚大学农场有机系统(依靠有机肥和豆科作物)和低投入(低化肥和低农药投入)四种种植方式下10年来的研究发现,有机种植系统表层0-15cm的土壤有机氮含量比其他种植系统高达 $1.46\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Poudel et al., 2001)。Wani等在加拿大 Alberta大学的 Hendrigan 试验站开展了一系列关于草田轮作系统的研究得出了相同的结果,对多年生牧草-豆科牧草系统(CF)、持续的作物(大麦)系统(CG)和一个包括大麦,蚕豆,红三叶草,雀麦草和紫花苜蓿的8年轮作系统(AER)这三个不同种植制度试验分析发现,牧草进入轮作系统明显的增加了土壤的总氮量,有效氮含量,微生物量、真菌数量和菌根(Wani et al., 1991a,b, 1994a,b; Ross et al., 2008)。

沈益新论述了农田种植牧草在自然资源利用、减轻水土流失和农业环境污染、培肥土壤、促进农区畜牧业发展及增强农业生产系统的稳定性等方面的作用(沈益新, 2004)。韩建国等对河北坝上农牧交错带退耕还草土壤的有机质和氮磷钾进行了测定,表明农牧交错带种植多年生禾草可明显改善土壤的营养状况,草地 0-20cm 土壤有机质和全氮含量比小麦地有明显改善(韩建国等,2004; 郭艳玲, 韩建国,2006,2007),对 0-20cm 土层微生物量 C、N 测定结果表明无芒雀麦和冰

草混播,或者单播牧草与单播小麦相比能明显增加土壤微生物量 C、N (韩永伟等,2004)。杨中艺等鉴借日本的经验,利用水稻冬闲田种植多花黑麦草,提出了“黑麦草—水稻”草田轮作生产体系(IRR 系统),从 1990 年开始在深圳进行了黑麦草的引进工作和使后作水稻增产的机理进行了持续的研究,田间试验观测表明冬种意大利黑麦草对不光使得后作水稻生长和产量增产 7-14%,同时使土壤理化形状得到了改善,速效 N、P、K 的含量在种草区比对照区分别高 11%、26%和 57%,土壤微生物总量高 39%(杨中艺,1994,1996,1997; 辛国荣等,1998)。祝廷成等对东北平原区吉林省长岭县和农安县主要粮食、牧草及经济作物轮作对土壤养分状况、土壤酶活性、土壤微生物组成和数量以及主要粮食、牧草及经济作物生物产量的研究表明豆科牧草对提高土壤有效养分水平有显著作用(祝廷成等,2003)。王丽宏等 2005 - 2006 年研究了湖南双季稻区的 6 种不同土质的稻田土壤在晚稻收获后免耕种植黑麦草的生产性能和土壤微生物量 C、N 的变化,结果表明 6 种土壤冬季种植黑麦草后,土壤微生物量碳(SMBC)和土壤微生物量氮(SMBN)除灰泥田外均大于冬闲田(王丽宏等,2008)。任素坤(1999)研究发现,豫北砂土冬闲田种植冬牧 70 黑麦比冬闲后种一季花生增产 27.6%,经济效益提高 87.3%,土壤有机质增加 48.1%。

我国在人工牧草和草田轮作方面的研究还没有形成规模,多流于论述层面,缺少试验数据的验证,即使有小区试验也集中在草地研究方面,田间试验集中在南方的冬闲田种植黑麦草的研究。

我国在牧草农田生态系统中,对多种不同种植结构牧草的土壤总氮量、有效氮含量、碳氮蓄积、微生物量、真菌数量和菌根等方面的综合研究还相当薄弱需要加强这些方面的试验研究。

1.2.3 农田生态系统氮素平衡研究

土壤氮素是粮食生产的主要限制因子,维持土壤氮的水平对农业生产的可持续发展至关重要(Korsaeth et al.,2000),施用氮肥是提高作物产量的重要措施。全世界的氮肥利用率在 50%左右(Smil, 1999; Eickhout et al., 2006),而我国目前氮肥的利用率平均只有 30~40%(朱兆良, 1994, 2000, 2008)。全球变暖、富营养化和酸雨这些问题的产生与碳氮循环有关,农田氮素的剩余量增多,对大气和地下水的

影响日益严重(朱兆良, 2002; 张福锁, 巨晓棠, 2002; 吕殿青等, 2002)。John Lawton 将氮素污染称为仅次于生物多样性衰减和气候变化的全球性环境威胁(Giles, 2005), 对农业生产而言, 氮肥利用的关键问题是如何投入足够的氮素维持高产而又避免让富余的氮素进入到水体和大气, 给环境造成污染(朱兆良, 2002; Galloway et al., 2004; Giles, 2005 ; Ross et al., 2008)。据统计, 全球耕地面积约 $1397.656 \times 10^6 \text{hm}^2$, 占全球陆地面积的 10.75% (FAO, 2004), 农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分。因此, 农田生态系统中氮素平衡的研究, 是陆地生态系统氮循环研究的重要组成部分, 同时对农业的可持续发展和环境保护具有重要的理论和现实意义。

农业生态系统的氮素平衡有两个水平, 一是农场总体的平衡(Farm-gate balance), 二是土壤层面的平衡(Soil-surface balance), 这两种方法均可以用于计算不同类型和不同尺度农业系统的氮素平衡状况(武兰芳, 欧阳竹, 2008)。运用氮收支来定量评价系统的氮素利用已有超过 100 年的历史(Watson & Atkinson, 1999; Lawes et al., 1882), 至今仍被广泛应用于氮素平衡的研究。

国内农田氮平衡的研究主要集中在小麦-玉米轮作、水稻等作物系统, 很少涉及农田牧草种植系统。国内关于农田氮素平衡研究以田间试验为主, 模型模拟氮循环某个环节的较多。张玉铭等于 2003-2004 年等对中国科学院栾城生态农业试验站 1 公顷小麦-玉米轮作农田氮素硝化-反硝化损失、氨挥发、硝态氮淋溶损失等氮素循环转化途径分别进行了定量测定, 并对轮作系统的农田氮素循环与平衡状况进行了计算, 结果表明轮作系统总的氮素平衡处于盈余状态, 盈余达 $75.9 \sim 123.8 \text{ kg/hm}^2$, 且小麦明显高于玉米季(张玉铭, 胡春胜等, 2006)。王西娜等通过田间小区试验研究了在黄土高原南部旱地在传统施肥方式不同施氮水平下冬小麦-夏玉米轮作体系中土壤的氮素平衡, 当两季作物累计施氮量超过 360 kg/hm^2 时, 作物吸收的氮量呈现降低的趋势, 表观损失率呈下降趋势, 但氮肥利用率也降低了(王西娜, 王朝辉等, 2006)。国内许多学者运用各种氮循环模型模拟了国家尺度、区域尺度的氮平衡。例如, Sun 等用非季节性 Box-Jenkins 模型或指数模型预测表明中国耕地的总的氮盈余很可能会从 2004 年的 142.8 kg ha^{-1} 上升到 2015 年的 168.6 kg ha^{-1} (Sun et al., 2008)。邱建军等在 GIS 区域数据库支持下运用 DNDC 模型模拟中国农田氮素的输入输出平衡状况以及量化氮素损失,

结果表明 1998 全国农田土壤氮素平衡状况表现为总体过剩,总过剩量为 456~962 万 t , 化肥的大量投入是造成农田土壤氮素过剩的主要原因;通过 NH_3 挥发和氮淋溶丢失了大量的氮素,分别占总支出量的 35%和 15%(邱建军,李虎等, 2008)。王激清等建立了中国农田生态系统氮素平衡模型, 估算 2004 年农田生态系统损失的氮为 1132.8 万 t, 盈余在农田生态系统土壤中的氮为 1301.2 万 t, 氮养分负荷高风险地区均集中在中国的东南沿海和部分中部地区(王激清,马文奇, 2007)。朱兆良(2008)在总结国内研究结果的基础上,对我国农田中化肥氮的去向做出了初步的估计:作物吸收 35%、氮挥发 11%、表观硝化-反硝化 34% (其中 N_2O 排放率为 1.0%) 、淋洗损失 2%、径流损失 5%,以及未知部分 13%。

与国内缺乏农田牧草种植氮平衡的研究相比, 国外的许多学者对农田不同种植制度下的氮收支与氮平衡进行了研究, 得出了一致的结论: 牧草的种植使得农田生态系统的氮量增加, 同时对环境的污染减少 (Korsaeth et al., 2000; Poudel et al., 2001; Mahdi et al., 2005; Ross et al., 2008)。Korsaeth 等在挪威的Apselsvoll 研究中心对6种不同的种植制度进行的N平衡的研究,发现牧草系统中N流失是最小的(Korsaeth et al., 2000)。Poudel等对加利福尼亚大学农场进行四种种植方式下的农田生态系统氮蓄积和氮流失做了比较,发现有机(依靠有机肥和豆科作物)和低投入(低化肥和低农药投入)种植制度比传统种植为土壤提供更多的碳,具有蓄积氮素的能力,并且减少了对环境的污染 (Poudel et al., 2001)。Ross研究了加拿大 Alberta大学的Hendrigan试验站对多年生牧草-豆科牧草系统(CF)、持续的作物(大麦)系统(CG)和一个包括大麦,蚕豆,红三叶草,雀麦草和紫花苜蓿的8年轮作系统(AER)这三个系统自1980年来24年氮收支与平衡,得出轮作系统的中以有机氮的输入是作物系统化肥氮投入的两倍左右,而在牧草系统中氮的流失是最低的,收获的土壤N明显超过净N投入,估计豆科牧草固氮是该系统一个较大的来源 (Ross et al., 2008)。

因为我农田还是以作物为主, 农田种草的比例 1992 年仅为 1.2%, 牧草种植基本没有形成规模(洪绶曾, 2000)。牧草生态系统的氮平衡研究基本处于空白状态。国外诸多学者研究对象主要是豆科牧草,特别是草田轮作和间套作系统氮素的研究较多,但是对于不同牧草种植结构条件下氮素平衡的比较研究比较少见。

1.2.4 牧草生态系统的生物多样性研究

生态系统的生物多样性包括植物、动物和微生物的多样性。农业生产的集约化使许多农田鸟类、杂草、传粉昆虫、地表节肢动物以及土壤动物和土壤微生物等物种丰富度下降, 农业是生物多样性丧失的主要驱动力之一(王长永等, 2007)。土壤的动物和植物的多样性多农田生态系统健康起着关键的作用, 土壤动物深刻影响着土壤的食物网和能量流(Moore & de Ruiter, 1991, 2000; Coleman et al. , 2004)。

在过去近20年内, 欧洲、北美和大洋洲的许多科学家以现代常规农业生产系统作为对照, 开展了有机农业对农田生物多样性影响的研究(Holed et al. , 2005 ; Bengtsson et al. , 2005)。研究表明农田生物多样性越丰富系统越稳定, 自我调节能力越强(Altieri , 1999)。过去对害虫单纯进行化学农药防治所带来的“3R”(Resistance, Resurgence, Residue)问题, 农田生态系统多样性的降低, 加剧某些物种(天敌)的濒危, 导致另一些物种(害虫)的猖獗(吕昭智等, 2005; 盛承发, 2002; 尤民生等, 2004; Altieri & Letourneau , 1982)。草田轮作是防止作物病虫害的一项重要措施, 这是因为作物轮作打破了害虫和病害的生活周期, 并有助于杂草控制和减少农业化学物质的应用(邹应斌, 2004), 是农田生物多样性的课题之一。草田轮作是发展养殖业、提高地力、防治病虫害、提高产量的一项有效措施(刘成龙, 2007)。经研究发现, 蚜虫是小麦的主要害虫, 常年可使小麦减产10%, 严重发生年份减产达30%以上(王美芳等, 2006)。有关该地区麦蚜及其天敌的主要种类和种群动态方面已有很多研究(李锐等, 2003; 白莉等, 2005; 张乃芹等, 2007), 但对小麦与相关牧草的害虫与天敌的综合关系方面缺乏深入了解。

国外对牧草特别是苜蓿生物防治方面做的比较多, 早期主要是发现那些牧草能涵养天敌, 近几年主要是进一步研究牧草与作物等系统害虫和天敌的数量动态和他们的迁移规律。在英国 Easterbrook 和 Tooley 研究发现欧洲国家选中的作为甘菊阻止盲蝽对草莓的危害的“陷阱植物”, 并不总能发挥作用, 有时滞效应(Easterbrook & Tooley , 1999)。在美国 Giles 等 2002 年试验研究发现不同苜蓿品种: 易感的('OK08' or 'CUF-101')和有抗性的('54H55')的紫花苜蓿品种涵养聚长足瓢虫和七星瓢虫的区别, 发现紫花苜蓿'54H55'品种并不比'OK08' or 'CUF-101'苜蓿更好的涵养苜蓿无网长管蚜这种蚜虫, 即他们在涵养蚜虫天敌瓢虫方面没有差

别(Giles et al., 2002)。而 Pansa 和 Tavella 在 2005-2007 年在意大利西北部进行了苜蓿管理对草莓盲蝽危害的影响试验,他们调查了盲蝽在这两种植物上存活繁殖情况,发现苜蓿可以吸引草莓田的盲蝽,因此建议在盲蝽数量较大的时候,对苜蓿使用杀虫剂,从而使草莓田害虫为害在经济水平以下(Pansa & Tavella, 2008)。Roda 等 1990-1995 年间试验研究发现,在苜蓿与雀麦草等混作,能使苜蓿的马铃薯叶蝉成虫的种群发生迁移,减少了叶蝉对苜蓿的依赖,为生物防治提供途径,(Roda et al., 1997, 1997)。Evans 和 Toler 在美国犹他州对苜蓿瓢虫对多个猎物的响应试验,研究瓢虫对空间范围内潜在的多种猎物的反应,这对苜蓿的引种具有重要的意义(Evans & Toler, 2007)。

早在20世纪70年代以马世骏为代表的我国学者就指出要以生态平衡、生态系统的概念来指导农业研究(李文华,2004)。近年来很多国内外专家学者对农业生态系统健康做出了探讨(王小艺,2001;梁文举等,2002;彭涛,2004;章家恩,2004)。少数人对农业生态系统健康做出了定量的评价(武兰芳,2003,2004)。以上研究表明农业生态系统健康逐渐受到人们的重视,但都是农业系统的宏观研究,未涉及农田层次的组分。高旺盛等指出土壤健康是农田生态系统健康的关键和核心,作物生态系统由于结构单一导致多样性下降,要发展生物多样性的农田种植制度(高旺盛等,2008)。国内有关农田生态系统多样性与害虫生物防治的论述比较多(徐克章,1999;侯茂林,1999;耿金虎,2003;吕昭智等,2005),牧草生物多样性在生物防治方面的研究也有开展但不是很多。张润志等提出了相生植保的概念,即:充分利用生态系统中固有的动物、植物、菌物之间相互依存的自然规律,通过对环境中其他植物或相关因素的适当调节,达到一种植物的最大产量,同时又不对另外的生物及周围环境造成伤害(张润志等, 1998, 1999)。并且在1997-1998年在新疆的田间试验中得到了成功的运用,在新疆,苜蓿比棉花长得快,因此蚜虫也长得比小麦多,等棉蚜进入棉田的始期,苜蓿带已经繁育了大量的棉蚜天敌,总量达到棉田的6.94倍,等到棉蚜进入棉田后的数量激增阶段,苜蓿带中已经自然繁育了大量棉蚜的天敌,此时苜蓿带中棉蚜总数量达到棉田的13.65倍,在棉蚜数量激增的初期,刈割苜蓿迫使天敌进入棉田,对棉蚜有很好的控制效果 (张润志等, 2000; Zhang et al., 2004)。

农田种植牧草增加了系统的植物(生产者)种类,会对系统内动物、微生物种

类,以及土壤环境产量影响,反过来农田生态系统的特性也使得牧草生态系统有别与草原生态系统。土壤微生物是农田生态系统的重要组成部分,在系统物质转化和能量流动过程中起着主导的作用,对农田碳氮过程和养分的循环起着主导作用,国内农田人工牧草对土壤微生物多样性的研究还不多见。只有辛国荣、杨中艺等研究了广州冬种黑麦草对土壤生物性状的影响,发现冬种黑麦草增加了土壤酶的活性,使脲酶活性提高了2.75倍,转化酶活性提高了92.6%;土壤微生物生物量增加13倍;改善了土壤的微生物区系,细菌数量增加1.2倍,放线菌数量增加3.4倍,真菌数量下降了44%(辛国荣等,1998;杨中艺,1997),这些也是种植黑麦草对后续水稻种植增产的原因所在。对牧草的生物多样性在土壤微生物的研究主要还集中在草原生态系统,如国内目前已对新疆平原荒漠盐渍草地、东北草原、东北羊草草原、长江三峡地区退化生态系统、川西北退化草地、海北高寒草甸、天祝高寒草地、青海高寒草原蘑菇圈及碱茅草地等不同地域、不同草地类型土壤微生物的生态分布、数量和生物量等进行了较系统的研究(姚拓,2005)。微生物总生物量季节变化规律为:春夏积季较高,秋季略减少,冬季最低;微生物活性与根系分布关系密切;细菌、放线菌和真菌是草地土壤微生物数量最大的3个类群,细菌的数量最多占到90%以上,但各类群的生物量以真菌较大,约占微生物生物量的50%左右(赵吉等,1999;郭继勋,祝廷成,1997;姚拓,2005)。李敏等对四川省大英县蓬莱镇对果-林间作土壤中的微生物和酶活性进行了测定,通过通径分析发现:脲酶、硅酸盐细菌、纤维分解酶是促进有机质积累的主要生物因素,蔗糖酶是影响N、P、K速效养分的最主要因子,过氧化氢酶、多酚氧化酶、纤维分解菌只是选择性地对有机质的积存和N、P、K速效养分的形成起作用(李敏,吴长友,2007)。

草田轮作是防止作物病虫害的一项重要措施。草田轮作打破了害虫和病害的生活周期,并有助于杂草控制和减少农业化学物质的应用。蚜虫是小麦的主要害虫,但对小麦与相关牧草的害虫与天敌的综合关系方面缺乏深入了解。牧草具有与农作物不同的生物多样性。根据近两年的试验,牧草冬牧70黑麦、小黑麦等越冬牧草和多年生牧草紫花苜蓿、鲁梅克斯和串叶松香草等由于返青早,生长快,繁育大量蚜虫天敌,对麦蚜、棉蚜有很好的控制效果。因此,草田生态系统是今后以虫治虫生态防治的重要方面。

1.2.5 存在的问题

国外对牧草的研究与其人工牧草种植的历史相一致,研究对象主要集中在牧草与作物轮作上,重点研究了豆科作物对农田生态系统碳氮积累和农作物害虫防治的影响方面,偏重于一个方面或者解决某一个方面问题的研究,系统而全面的试验没有涉及。牧草耗水量的研究也集中在苜蓿的研究上,很少涉及其他种类。国内对人工牧草生态系统的研究起步晚,主要集中在三元结构的论述和对草原牧草生理生态的试验研究,对其在农田生态效应影响方面试验研究比较少见,系统的长期试验更是少见。21世纪以来,研究主要集中在黄土高原、新疆、内蒙等草地畜牧业为主的地区,近年来,华北平原牧草耗水量研究有所加强,主要集中在紫花苜蓿。国内还未见有对多种人工牧草不同种植系统的产量、耗水、土壤以及氮平衡方面的系统研究。

1.3 研究目标、研究内容与思路

1.3.1 研究目标

通过对多种牧草的试验研究,提出不同种类牧草的需水量、耗水规律与水分利用效率;提出牧草不同种植系统对土壤质量的影响;牧草不同种植系统的氮收支与平衡;牧草地上、地下部分的生物多样性。为牧草在黄淮海平原种植的时空布局提供科学依据,对建设健康的草田生态系统有重要意义。

1.3.2 研究内容与研究思路

在农区开展三元结构种植制度,是一个涉及到种植业、畜牧业、以及社会经济等各方面的综合课题,需要进行社会效益、经济效益和生态效益诸方面开展综合研究,进行适口性、营养价值、产量水平、经济效益、生理生态特性等诸方面的综合分析与评价。

禹城综合试验站“十五”国家科技攻关计划—区域持续高效农业综合技术与示范课题,先后引进 30 余个青绿饲草品种,通过适宜播期、不同播量不同施肥量与平衡施肥技术、不同刈割时期、饲草生长速率与不同时期主要营养成分含量以及饲喂效果等系列试验,筛选出冬牧 70 黑麦、高丹草、菊苣等适于当地栽培的高产优质品种。本论文是在“十五”研究工作的基础上,开展人工牧草,

农田生态系统的一系列生态特征的研究,即通过对几种优质牧草 2005 至 2009 年以来田间种植的耗水测定,及对农田土壤环境效应和昆虫种群动态的田间试验和实验室测定,对牧草的农田生态效应进行分析,并展开评价。通过田间试验和室内测定,得出不同种植模式下牧草的耗水规律、水分利用效率;牧草不同种植系统的氮收支与平衡;土壤理化性质的影响;地上部与土壤中生物多样性的影响与意义。研究思路如下图:

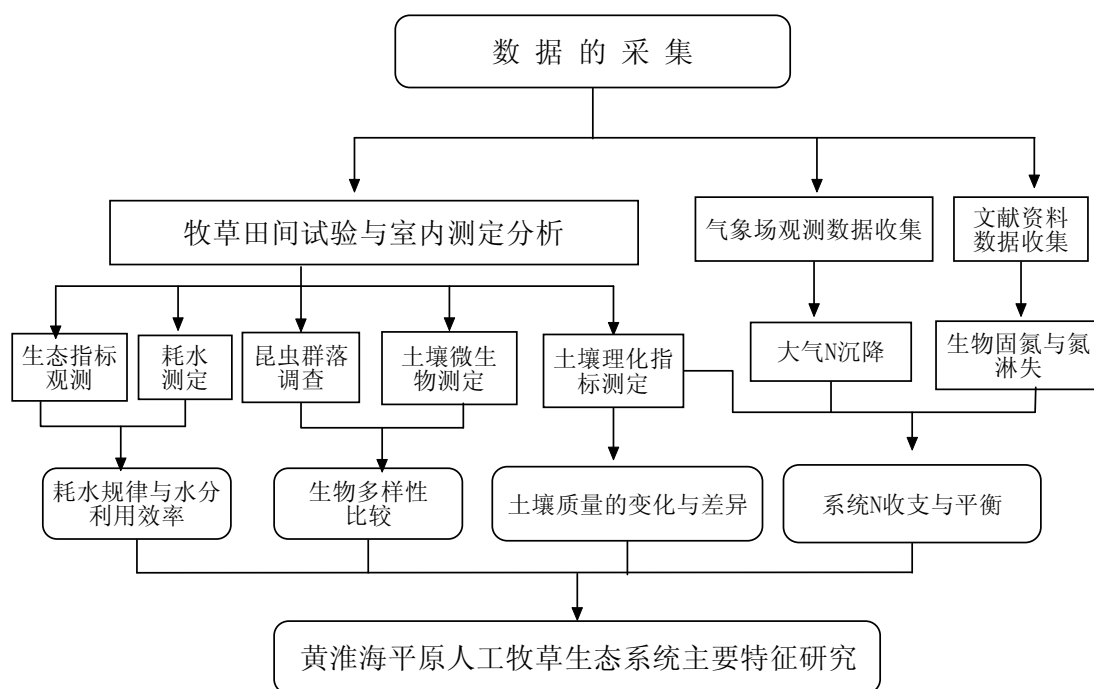


图 1.1 研究的思路框架

Fig1.1 Conceptual framework for the study

第二章 试验设计与数据采集

2.1 试验区概况

2.1.1 试验区概况

试验在中国科学院禹城综合试验站牧草试验场 ($36^{\circ}49'52''\text{N}$, $116^{\circ}34'19''\text{E}$, 23m a.s.l.) 进行, 开始于 2005 年 4 月。禹城试验站是中国科学院生态网络(CERN)台站, 也是国家野外台站之一。

禹城站位于山东省禹城市(图 2.1), 地处鲁西北黄河冲积平原, 属暖温带半湿润季风气候, 多年平均气温 13.1°C , 年平均降水量为 580.8mm (1951-2009), 降水主要集中在 6-8 月, 占全年降水的 75%左右, 年太阳辐射总量 $5225\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 日照时数 2640 小时, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温为 4951°C , 无霜期 200 天, 光热资源丰富, 雨热同期, 有利于农业生产。该地区主要的种植制度是冬小麦和夏玉米, 一年两季。地下水位一般在 1.5-4.0m, 地下水资源丰富; 地貌类型为黄河冲积平原, 土壤母质为黄河冲击物, 土壤以潮土和盐化潮土为主, 表土质地为轻、中壤土。禹城市粮食产量已居较高水平, 2005-2009 年粮食亩产已超吨粮。该地区的自然条件和农业生产水平在黄淮海平原具有代表性和典型性。

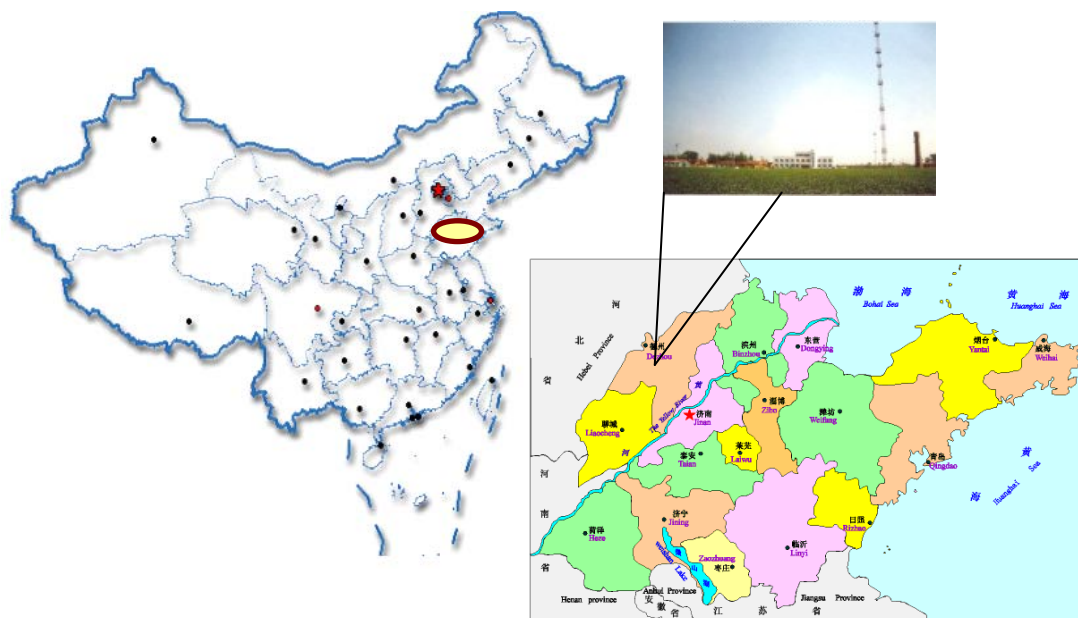


图 2.1 中科院禹城综合试验站的地理位置

Fig 2.1 The North China Plain and the locations of Yucheng Comprehensive Experimental Station

禹城试验站已有 30 多年的研究历史, 在农田(小麦、玉米、大豆、棉花等)的生产力形成, 作物—水分关系等方面进行了大量的研究, 积累了丰富的数据和经验, 为试验的顺利进行提供了便利条件。

2.1.2 试验区气温与降雨状况

1. 气温和降雨的概况

2005-2009 年的逐月降雨量和月均温度见图 2.2 和 2.3, 降雨量每年的变化较大, 与长年的平均值波动也较大, 而月均温度变化趋势不是很明显, 接近长年的同期平均值。资料来源, 1961-1979 年的数据来源于禹城市气象局的观测资料, 1980-2005 年的为禹城试验站的气象站的资料。

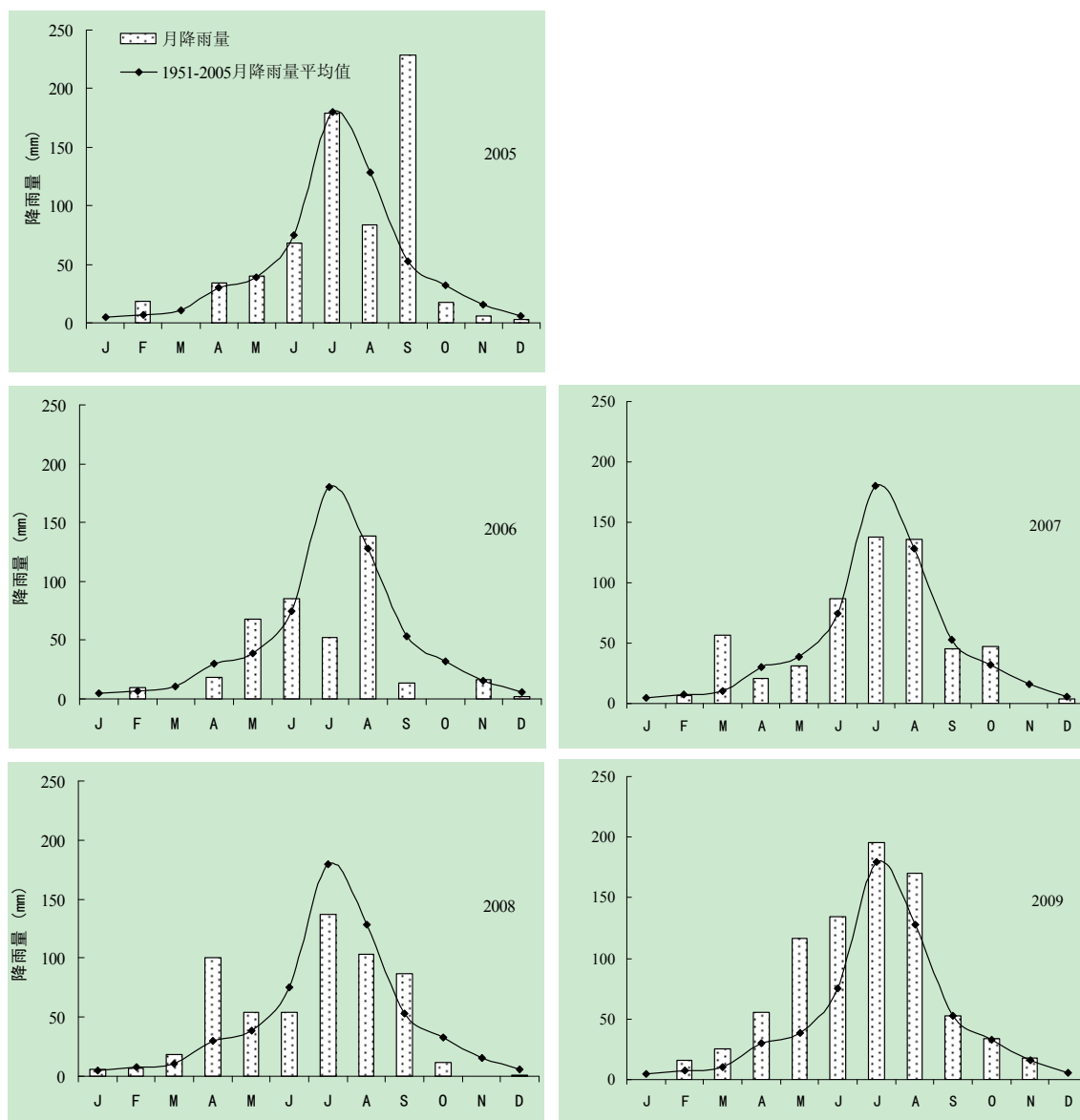


图 2.2 试验区 2005-2009 年每月降雨量与 1951-2005 年月均降雨量

Fig 2.2 Monthly precipitation (2005–2009) and long-term average monthly precipitation (1951–2005) at Yucheng Station. Zero means no precipitation occurred in that month.

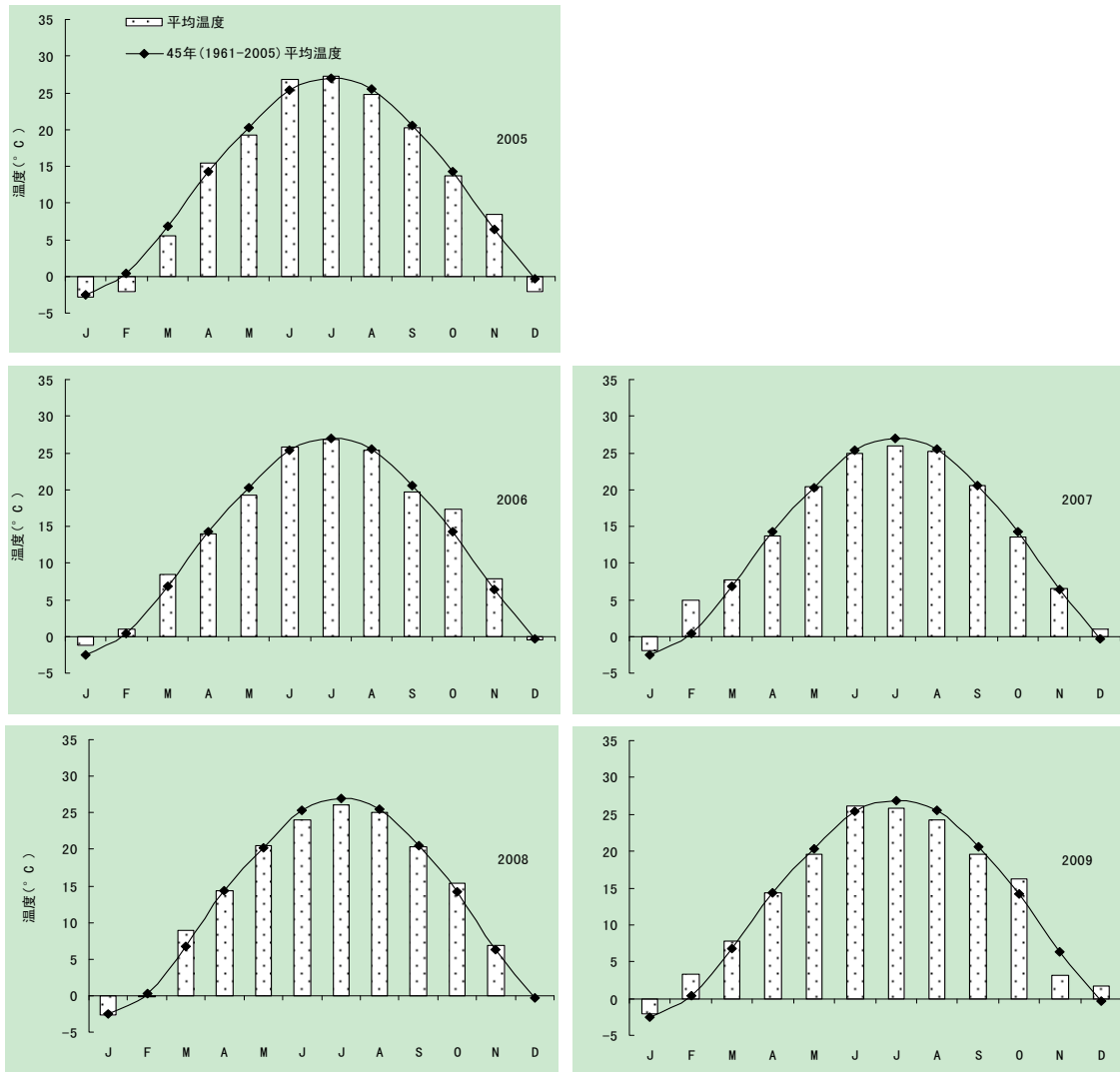


图 2.3 试验区 2005-2009 年月均温度与 1961-2005 年月均温度

Fig 2.3 Mean monthly temperature (2005-2009) and long-term average monthly temperature (1961-2005) at Yucheng Station.

因此，可以将 2005-2009 年试验期间的自然条件按照降雨的特征划分为不同的类型，寻求在不同降雨类型条件下牧草的生长规律。

2. 降雨的条件划分

试验区自 1951 至 2005 年 55 年间的年平均降雨量为 580.4mm，将这个值的 20% 作为一个标准，把这 55 年划分为三个类型见表 2.1，年降雨量大于等于 $580.4 \times (1+20\%)$ mm 的年份为多雨条件，小于等于 $580.4 \times (1-20\%)$ mm 定为少雨条件，其他的为平常条件。这样，2005-2009 年的年降雨量分别为 678.4mm，403.6mm，571.7mm，579.1mm，816.4mm，照此标准，2005 与 2009 年属于多雨，2006 年属于少雨，2007 与 2008 年属于平常。该划分方法对于苜蓿和串叶松香草这两种多年生的牧草适用，在考察这两种牧草的产量和耗水规律的时候采用该划分方法。

表 2.1 1951-2005 年 55 年间的年降雨量特征划分

Table 2.1 Characteristics of annual rainfall from 1951-2005

年型	年降雨量	年数	试验年
多雨	$\geq 696.5 \text{ mm}$	13	2005/2009
平常	$<696.5 \text{ mm}, >464.4 \text{ mm}$	28	2007/2008
少雨	$\leq 464.4 \text{ mm}$	14	2006

冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦的生长季节集中在 10 月到第二年的 4 月,玉米、高丹草和籽粒苋则集中在当年的 5 月到 9 月,因此,按照这两个生长季节将降雨做划分,分别见表 2.2 和表 2.3。

表 2.2 1951-2005 年 55 年间的麦季降雨量特征划分(10 月至第二年 4 月)

Table 2.1 Characteristics of rainfall for 1951-2005 in ryegrass and triticale growing seasons (October the previous year to April the year after)

年型	降雨量	季节数量	试验年
多雨	$\geq 133.8 \text{ mm}$	10	2007-2008
平常	$< 133.8 \text{ mm}, >80.3 \text{ mm}$	24	2006-2007 ; 2008-2009
少雨	$\leq 80.3 \text{ mm}$	20	2005-2006

1951 至 2005 年 55 年间有 54 个麦季,平均降雨量是 107.03mm,将降雨量大于等于 $107.03 \times (1+25\%) \text{ mm}$ 的季节定为多雨,小于等于 $107.03 \times (1-25\%) \text{ mm}$ 定为少雨条件下,其他的为平常。

表 2.3 1951-2005 年 55 年间的玉米季降雨量特征划分(5 月至 9 月)

Table 2.3 Characteristics of rainfall for 1951-2005 in ensilage corn mays growing seasons (May to September)

年型	降雨量	季节数量	试验年
多雨	$\geq 592.9 \text{ mm}$	13	2005 ; 2009
平常	$<592.9 \text{ mm}, >592.9 \text{ mm}$	15	2007; 2008
少雨	$\leq 592.9 \text{ mm}$	27	2006

同样,1951 至 2005 年 55 年间有 55 个玉米季,平均降雨量是 474.3mm,将降雨量大于等于 $474.3 \times (1+25\%) \text{ mm}$ 的季节定为多雨,小于等于 $474.3 \times (1-25\%) \text{ mm}$ 定为少雨,其他的为平常。

2.2 试验材料

试验牧草品种和播种收获情况见表 2.4,试验品种有禾本科黑麦属一年生草本植物冬牧 70 黑麦(*Secale cereale* L. cv. Wintergrazer-70)、中新 830 小黑麦(*X Triticosecale* Wittmack cv. Triticale-830)、高丹草(*Sorghum bicolour* * *Sorghum Sudanense* CV)和青饲玉米(*Zea mays* L.); 一年生苋科牧草籽粒苋(*Amaranthus paniculatus* L.); 多年生豆科牧草苜蓿(*Medicago sativa* L.)、红三叶(*Trifolium pratense* L.)、白三叶(*Trifolium repens* L.); 菊科多年生草本植物串叶松香草(*Silphium perfoliatum* L.)、菊苣(*Cichorium*

表 2.4 试验牧草的品种和播种情况(2005-2009)
Table2.4 Varieties and sowing dates for study (2005-2009)

牧草	品种	播种日期 年-月-日	播种 方式	播种 行距 cm	刈割 时期	留茬 高度 cm	收获 次数
苜蓿	WL323HQ	2005-4-27	条播	30	初 花 期 (10%开花)	4~5	3†
串叶 松香草	普通品种	2005-4-27	条播	50	50-70 cm 高	5~10	2‡
鲁梅克斯	鲁梅克斯 k1	2005-4-27	条播	40	入冬前	0	1
菊苣	普那	2005-4-27	条播	40	入冬前	0	1
白三叶	普通品种	2006-9-6 2009-4-23	条播	30	入冬前	0	1
红三叶	普通品种	2006-9-6 2009-4-23	条播	30	入冬前	0	1
高丹草	润宝	2005-4-27	条播	40	140 cm 高	5	2
	润宝	2006-6-3					2
	超级 2 号	2007-5-18					2
	超级 2 号	2008-5-20					2
	超级 2 号	2009-5-24					2
籽粒苋	普通品种	2005-4-27	条播	40	60-80 cm 高	20~30	2
		2006-6-3					1
		2007-5-18					2
		2008-5-20					2
		2009-5-24					2
青饲玉米	新青 1 号	2005-4-27	点播	60	蜡熟期	0	1
	科多 4 号	2006-6-3					1
	科多 4 号	2007-5-18					1
	饲宝 1 号	2008-5-20					1
	饲宝 1 号	2009-5-24					1
黑麦	冬牧 70	2005-10-18	条播	20	拔节期	5	2
	冬牧 70	2006-9-14					2
	冬牧 70	2007-10-17					2
	冬牧 70	2008-10-11					2
	冬牧 70	2009-9-23					2
小黑麦	中新 830	2005-10-18	条播	20	拔节期	5	2
	中新 830	2006-9-14					2
	中新 830	2007-10-17					2
	中新 830	2008-10-11					2
	中新 830	2009-9-23					2

注： † 2007 年收获了 4 次, ‡ 2005 只收获了 1 次

intybus L.)；蓼科酸模属多年生牧草鲁梅克斯(*Rumex patientia* × *Rtinschanicus* cv.·*Rumex* K-1)。

2.3 试验处理与试验小区布置

试验共有 24 个小区，经过多年的种植，形成了 5 个不同的种植系统，CG、CAG、

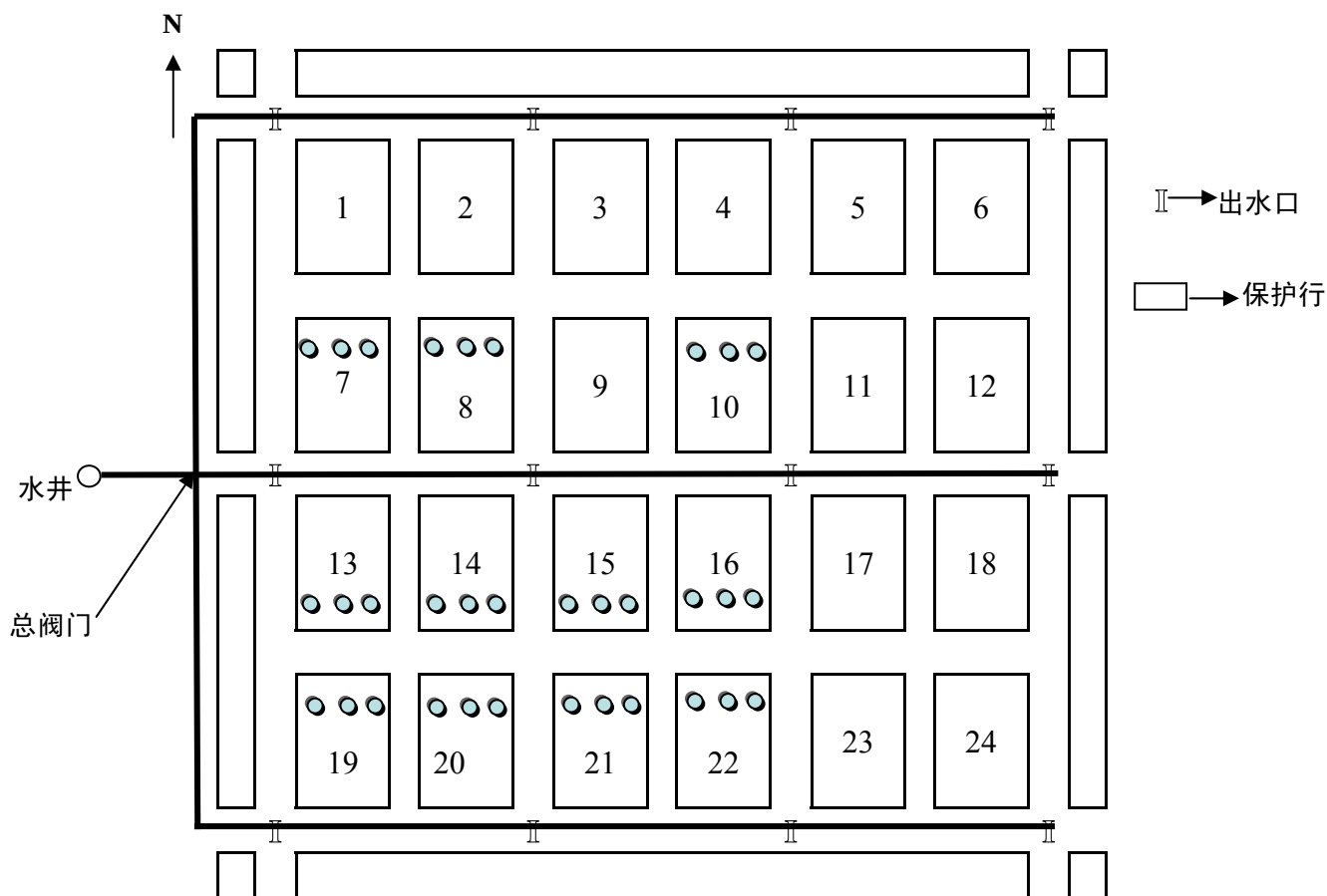


图 2.4 试验小区示意图

Fig 2.4 Schematic diagram of experimental plot

- 注：1.西侧和南侧保护行是 2m 宽的苜蓿条带，东侧和北侧是常规冬小麦—夏玉米农田；
2.小区西侧有水井，深度为 30m，井水矿化度小于 $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ；
3.黑色线条为灌溉水管布设，总阀门处安有水表，与 II 出水口处阀门控制每个小区的灌溉量。

CGF、CS 和 CM，小区示意图如图 2.4 所示。每个小区规格 $5\text{m}\times 10\text{m}$ (南北向 10m，东西向 5m)，依 FAO 标准建设。图中有数字的小方框代表小区，数字代表小区编号，用圈标注的为安装有耗水测定装置的小区，每小区安装有三套状态，作为三个重复。

CG 处理为一年生禾本科牧草轮作系统(a continuous annual grass system)，CAG-一年生苋科-禾本科牧草轮作系统(a continuous annual amaranthaceae-grass system)，CGF-一年生禾本科牧草与多年生牧草轮作系统(a continuous annual grass-perennial

forage system), 两个多年生牧草系统: CS-串叶松香草(a continuous *Silphium perfoliatum* system), CM-苜蓿(a continuous *Medicago sativa* L. system)。还有一个对照的系统, 即当地占优势的种植模式 WM-冬小麦-夏玉米轮作(Winter wheat-maize double cropping systems), 以实验地东边保护行替代。

表 2.5 牧草种植系统与小麦玉米轮作系统(2005-2009)

Table 2.5 The cropping systems (2005-2009)

种植系统	轮作制度	代号
一年生禾本科牧草轮作	青饲玉米(3)-高丹草(2)- 小黑麦(1)-黑麦(4)	CG
	高丹草(3)-青饲玉米(2)-小黑麦(4)-黑麦(1)	
	高丹草(5)-小黑麦(1)-黑麦(4)	
一年生苜蓿科-禾本科牧草轮作	籽粒苋(2)-青饲玉米(3)-小黑麦(1)-黑麦(4)	CAG
	籽粒苋(4)-青饲玉米(1)-小黑麦(5)	
	籽粒苋(5)-小黑麦(2)-黑麦(3)	
一年生禾本科牧草与 多年生牧草轮作	高丹草(2)-小黑麦(1)-黑麦(1)-苜蓿	CGF
	籽粒苋(2)-青饲玉米(1)-小黑麦(1)-黑麦(2)-苜蓿	
	青饲玉米(2)-黑麦(2)-苜蓿	
	菊苣-青饲玉米(1)-高丹草(2)-小黑麦(1)-黑麦(1)-苜蓿	
串叶松香草		CS
苜蓿		CM
冬小麦-夏玉米轮作		WM

苜蓿和串叶松香草于 2005 年 4 月 26 日播种, 同时播种的有当季的籽粒苋、青饲玉米和高丹草。种植 5 年后, 形成了 5 种植系统, 表 2.5。

播种前整地均施有机肥 $45\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播种时测定土壤背景值, 结果见表 2.6。试验地有灌溉条件, 井水矿化度小于 $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 土壤水分含量保持在田间持水量的 70%以上。

表 2.6 2005 年春季播种时土壤背景值测定结果

Table 2.6 Initial soil physicochemical properties (Sampling 18 May 2005)

层次 (cm)	有机质 (%)	全 N (%)	全 P_2O_5 (%)	全 K_2O (%)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	PH 值	电导率 (ms/cm)	含盐量 (%)
0-20	1.32	0.08	0.19	2.35	48.12	21.96	144.21	8.52	0.36	0.11
20-40	0.87	0.05	0.15	2.36	27.24	5.79	88.31	8.77	0.22	0.07

2.4 主要观测项目与方法

1 生态指标观测

(1).生物量测定：每隔 7 天测定地上部生物量鲜重、干重。

三叶草、苜蓿与冬牧 70 黑麦取样量为每个试验小区取 30cm 长度的地上部分植株，串叶松香草取长势均匀的 3 个单茎、籽粒苋、高丹草和青饲玉米每个试验小区取 3 株植株。鲜重直接测定，干重的获取是采取的鲜样测重量以后放入烘箱，先 105℃ 下杀青 1.5 个小时，再 75℃ 下烘。鲜重用十分之一天平称量、干重用百分之一天平称量。

(2).叶面积测定：使用 Li-3000 便携式叶面积仪与 Li-3050C 透明胶带输送机配件

(图 2.5)组合测定，观测频度与生物量一致，其中苜蓿叶面积采用比叶重法测定，即将全部叶片充分混匀后，按 4 分法，取出 1/4(m')测定其面积 $S_{m'}$ ，并分别测定 1/4(m')和剩下的

3/4(m'')叶烘干重，根据叶面积与叶干重的比例关系，所取样的叶面积

即为： $S = S_{m'} \times \frac{m' + m''}{m'}$

(2-1)

(2-1)式中 S 为 30cm 行长的苜蓿叶面积， $S_{m'}$ 为 4 分法测量的叶面积，

$m' + m''$ 为 30cm 行长的苜蓿叶总干重， m' 为 4 分法的分得的 1/4 的苜蓿叶

干重， m'' 为剩下的 3/4 未测定的叶面积的苜蓿叶干重。

(3).株高观测：测定频度与生物量一致，每个小区选取 1 米 3 行具有代表性的植株，测定从地面到最高叶尖(包括花序在内)的高度。

(4).产量测定：在牧草的每个收获期，每个重复取一个 3 行×2m 的样方，用磅秤称地上部总鲜重 $B_{总鲜}$ ，采用比重法测定干重。即将所取样品充分混匀后，采用 4 分法取出 1/4，茎叶分开，分别称取鲜重 $B_{测茎鲜}$ 、 $B_{测叶鲜}$ ，然后烘干分别测定干重 $B_{测茎干}$ 、 $B_{测叶干}$ ，得出样方的总干重 $B_{总干}$ 为：

$$B_{总干} = \frac{(B_{测茎干} + B_{测叶干}) * B_{总鲜}}{(B_{测茎鲜} + B_{测叶鲜})} \quad (2-2)$$



图 2.5 叶面积测定装置

Fig 2.5 Leaf area meter (Li-3000& Li-3050C)

(5).发育期观测：每天观测一次牧草的生长发育状况，记录牧草的各个发育期。

2 光合观测

选择晴好天气，采用美国 Li-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合测定仪对牧草生育盛期叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)以及生态环境要素的日变化进行测定，日变化观测时段为夏季 6:00-18:00，春季和秋季 8:00-18:00，观测频度为每两个小时观测一次。Li-6400 光合作用测定系统设计了专门测定光合作用—光响应曲线的光发生系统，设定的光量子通量密度(PFD)为 3500、3000、2500、2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、100、50、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 等 16 个水平。在每种牧草生育盛期选择有代表性的 3 株植株，每株测定基部(下层)、中部(中层)和上部(上层)叶位的三片叶的光合作用日变化和光合作用—光响应曲线。在 2005 年做了本观测项目的观测。

3 牧草需水量测定

草需水量采用注水式土壤蒸发器测定(程维新, 1994, 2002)，注水式土壤蒸发器包括蒸发器和渗漏桶两个部分(图 2.6)，蒸发器的截面积为 3000cm²，高为 80cm，底呈锥形圆筒，锥形底部设有一个出水口，由导管与渗漏桶连接，用来排泄蒸发器内的渗漏水。为了防止出水口堵塞，锥形口上部采用带网眼的钢板做一个保护罩，其上部铺一层纱布、再铺砾石和粗沙形成一个反滤层，以便排泄渗漏水。渗漏桶内放置一个带柄的集水小桶，小桶沿与出水口接近，渗漏桶上加盖，以防止降雨进入和集水桶内水分蒸发，影响观测结果。

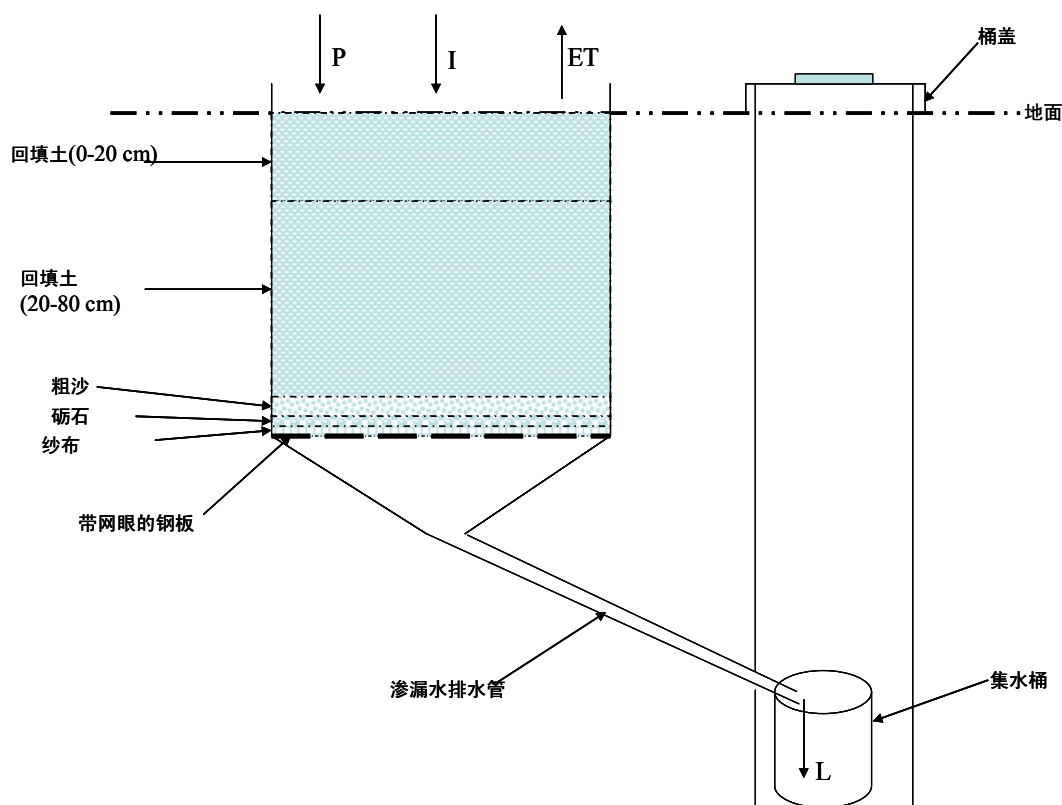


图 2.6 注水式蒸发器示意图

Fig 2.6 Schematic diagram and water balancing by irrigated lysimeter

该仪器的基本原理是水量平衡方程： $ET_c = P + Q - F - R \pm \Delta W$ (2-3)

(2-3)式中 P 为时段降水量， Q 为注水量， ET_c 为蒸发量， F 为地表经流量， L 为渗漏量， ΔW 为土体内贮水量变化。

试验过程中，蒸发器内的土壤水分维持在田间持水量的 70%以上。如图 2.7，当第一次(T_1 时刻)注水器内土壤含水量 w_1 达到田间持水量 FC ，当器内土壤水分含量降低到 w_2 ($FC > w_2 > 70\%FC$) 时，第二次(T_2 时刻)向器内注水，直到超过田间持水量，出现渗漏水，这时器内土壤含水量 $w_3 = FC$ ，因此， T_1 与 T_2 时间段内的总的土壤贮水量变化为 0，即 $\Delta W = 0$ ，(2-3)式就转化为：

$$ET_c = P + Q - F - R \quad (2-4)$$

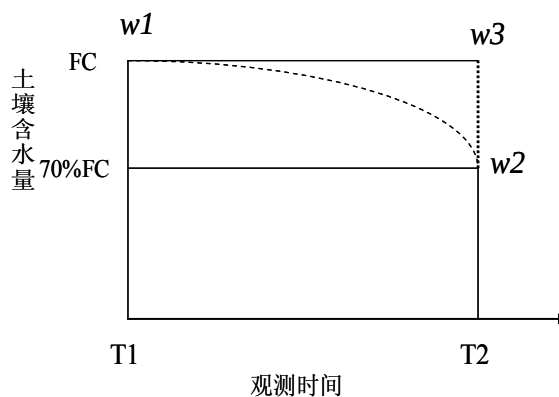


图 2.7 注水式蒸发器土壤含水量变化

Fig 2.7 Variation of soil water content in lysimeter between irrigation days

由于蒸发器口沿高出地面，无地表经流产生， $F=0$ ，因此，

$$ET_c = P + Q - R \quad (2-5)$$

根据(2-5)式即可计算出牧草的需水量，(2-5)式中各个变量的单位均为 mm，P 为观测时段内的降雨量，Q 为注入蒸发器的水量，R 为蒸发器排出的水量。

该仪器可观测测时段的蒸发量，栽培牧草时，一般测量时段的蒸发量，灌溉量的多少视土壤性质、牧草种类、天气状况和水面蒸发量来而定。总体上讲，器内的土壤水分维持在田间持水量的 70% 以上，每次的灌水量超过田间持水量，出现渗漏水。由注水式土壤蒸发器测定的蒸发量可视为作物的需水量。

牧草耗水特性系数(K_c)的确定采用蒸发比的方法：

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (2-6)$$

式中 ET_c 为测定的不同种类牧草需水量； ET_0 资料采用试验站水面蒸发场 E-601 蒸发器的水面蒸发观测数据。根据中国科学院禹城综合试验站 1986--2006 年水面蒸发的试验的结果，E-601 蒸发器与 20m² 水面蒸发池测得的蒸发量关系最好，折算系数为 1.014。E-601 蒸发器观测资料具有代表性。

产量水平水分利用效率(WUE_y) 确定：

$$WUE_y = Y / ET_c \quad (2-7)$$

式中： WUE_y —产量水平水分利用效率(kg · hm⁻² · mm⁻¹)；Y—生物产量(kg · hm⁻²)； ET_c —作物需水量(mm)。

4 土壤含水量测量

每个试验小区装有中子管一根，使用 CNC503DR 型中子仪测定土壤体积含水量，测深 100 cm，测深间隔为 20cm。观测频度是每 7 天一次，冬季(黑麦收获以后，10 月 30 左右)每 10 天一次，降雨、灌溉、刈割后加测。

5 土壤理化生物学特性及植株养分测定

1). 土壤容重测定

2009 年 5 月 18 至 20 日，采用环刀法测定 0-5cm、5-10cm 的土壤容重，重复 3 次(见图 2.8，左)。使用试验站刘恩民老师的土钻(见图 2.8，中，右)测定每个小区 10-20cm、20-40cm、40-60cm、60-80cm 的土壤容重，此方法测定土壤容重简单易行，对周围土壤的干扰小。



图 2.8 测定容重装置：环刀和土钻

Fig.2.8 Instruments for soil bulk density determinations

2). 土壤样品取样方法

用土钻沿 S 型路线采用 7 点混合法，每个小区取 0-5cm、5-10cm、10-20cm 三个层次的土壤样品(2005 年春季播种时取的是 0-20cm、20-40cm 两个层次)，取样时表层取样以剔除腐殖层和半腐殖层露出表土为准，取出的土样装入事先准备的无菌塑料袋内。取回的土壤鲜样，采回的土样混匀后，采用四分法一半立即过 2mm 筛，

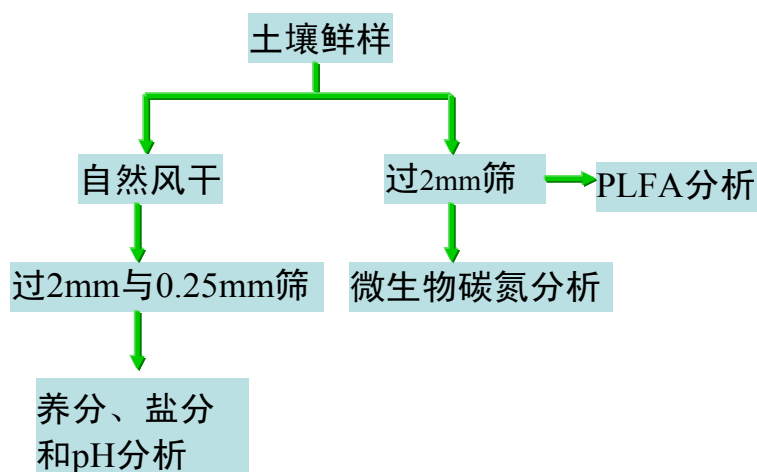


图 2.9 土壤生物化学分析流程图

Fig. 2.9 Procedure for the fractionation method of soil chemical and phospholipid fatty acid analysis

剔除植物根和土壤动物及其他杂质，筛新鲜土样过程中注意消毒器具避免污染，并且土样采用无菌塑料袋保存。取过筛的鲜土 200g 做微生物量碳、氮的分析，新鲜土壤立即浸提，浸提液不能立即分析的冷冻保存；再取 50g 过筛的鲜土，零下 20℃ 保存，留做微生物群落分析(PLFA)。剩下的一半为过筛的鲜土样风干，分别过 2mm 与 0.25mm 筛，留做土壤化学分析。

3).土壤化学分析

取风干土样化验养分、盐分和 PH，测定方法见表 2.8。本实验化验的土样取样时间分别是 2005 年 5 月 18 日、2005 年 9 月 6 日、2009 年 5 月 20 日。

表 2.8 土壤化学分析项目与方法标准
Table 2.8 Projects and methodological standards of soil chemical analysis

项 目	方 法 标 准	项 目	方 法 标 准
全 氮	开氏法(GB7173-87)	PH 值	1:5 土水浸体酸度计法
全 磷	碱熔—钼锑抗比色法(GB7852-87)	速效磷	碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色(GB7853-87)
有机质	重铬酸钾氧化—外加热(GB7857-87)	速效钾	乙酸铵浸提—火焰光度法(GB7856-87)
全 钾	火焰光度计法(GB7854-87)	总盐量	采用电导法

4).植株养分测定

取 2.4.1 测产的烘干植株的茎、叶，粉碎，采用硫酸-高氯酸消煮法，制作待测液，测定植株的全氮、全磷、全钾(GB7888-87)。全氮测定采用开氏法；全磷采用钼锑抗比色法；全钾采用火焰光度计法。

5).土壤微生物碳氮的测定

土壤微生物碳氮采用的是氯仿熏蒸提取法，Vance 等(1987)建立的基于熏蒸和提取过程的(Fumigation extraction, FE)方法(Vance E.D. et al., 1987; 吴金水等, 2006)，本研究采用的水土比 1 : 2。浸提液中的碳采用 $K_2Cr_2O_4$ 加热氧化， $FeSO_4$ 滴定法；氮采用过硫酸钾氧化-紫外可见分光光度计测 NO_3-N 的方法。

6).土壤微生物群落的测定

土壤微生物群落的测定采用修正的 Bligh-Dyer 方法提取和分析 PLFA(Bligh E G, Dyer W. J., 1959; Blume et al., 2002; 颜慧 , 钟文辉等, 2008)，该方法能定量测定不同种类微生物的结构，具体步骤如下：

一、土壤微生物 PLFA 提取

1. 取 6g 土壤(-20℃冰冻)到 Teflon 离心管中, 用氯仿、无水甲醇和 0.15M pH 4.0 柠檬酸缓冲液的混合液 30ml(1:2:0.8, v/v/v), 避光(锡纸包住, 4℃), 静置过夜, 取上清液。

2. 继续加混合液 15ml(1:2:0.8, v/v/v), 避光(锡纸包住, 4℃), 静置 1h, 取上清液。

3. 向上清液中加入 7.5ml 氯仿、7.5ml 柠檬酸, 振荡, 静置分层后, 用一次性注射器吸除上清液, 再用长的吸管吸走杂质膜, 收集下层氯仿相(用一次性注射器收集), N₂ 吹干(150Pa, 分压 0.25Pa)。

二、纯化(过柱, 吸管贴柱壁加液)

1. 将硅胶(100-200 目)在烘箱中 100℃活化 1h, 然后用氯仿浸泡。

2. 将浸泡的硅胶倒入柱中(约 8cm), 氯仿面与硅胶面分开达到平衡。

3. 将吹干的样品用 300ul 氯仿溶解, 震荡摇匀, 将样品倒入柱中, 待液面下去后用 5ml 氯仿洗脱中脂, 待液面下去后, 用 10ml 丙酮洗糖脂, 待丙酮液面消失, 柱子颜色变淡后, 下面改用试管收集, 然后用 10ml 无水甲醇洗磷脂, 收集甲醇洗脱液至试管, 氮气吹干。注意不要让硅胶面干

三、甲酯化

1. 上步取样品加入 1ml 甲醇: 甲苯(1:1,v/v)和 1ml 0.2mol/L KOH: 甲醇, 将溶液于 37℃下水浴反应 15min。

2. 冷却至室温后, 每个样品加 0.3ml 乙酸中和, 再加 2ml 氯仿正己烷(1:4,v/v)混合液和 2~3ml 超纯水静置 30min, 取上清液(正己烷相), 氮气吹干, -20℃贮存。

四、质谱测定

1. 吸取 1.5ml 3.3ug/ml 的内标液加入甲酯化的样品中, 轻微震荡, 注射器吸取, 经有机相膜, 注入 clean glass。操作过程中要注意避免破坏原始脂肪酸结构, 轻微震荡, 不可剧烈摇。

2. 上样。取 1.5ml 正己烷(机相膜过滤)做空白, 用色谱纯的正己烷(机相膜过滤)洗针。

气相色谱-质谱联用仪采用的是 HP6890 气相色谱-HP5973 质谱联用仪对样品中的磷脂酸甲酯进行定性和定量分析。

6 昆虫调查

采样从 2008 年 4 月小麦孕穗前后开始, 至 2008 年 6 月黑麦草收割前 1 天, 2009

年从3月牧草返青开始，每隔5天采集一次各牧草上的所有昆虫，将其按天敌和猎物分类，并分别记录个体数量。同时在试验小区比邻的小麦田采集昆虫。这项试验与中国科学院动物所张润志课题组合作，昆虫鉴定工作主要由该课题组完成。

采样时先选取小区对角线上的3个四等分点为取样点，罩上一个无底无盖的虫笼，然后采用英国 Burkard Scientific 公司生产的 Univac 便携吸式采样器在虫笼内吸2分钟，再将采集的样本按天敌和猎物分类并计数。

2.5 试验田间管理

全部牧草在无水分胁迫和养分胁迫的条件下生长，基础条件一致；杂草采取人工拔除；刈割后追肥、灌水。生长期间没有施用任何化学农药。

2.6 所测数据分析方法

所测数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS14.0 软件进行方差分析和主成份分析。

第三章 牧草的生物产量

光合作用是绿色植物生长发育和产量形成的基础,植物通过光合作用,利用太阳光能同化二氧化碳和其他无机物,形成的有机物,生态学称为总初级生产量(gross primary production, GPP); 初级生产量减去植物呼吸消耗的能量(R), 剩下的部分称为净初级生产量(net primary production, NPP)。某一特定时刻生态系统单位面积内所积存的生活有机物质量叫生物量(biomass), 牧草的地上部生物量即是牧草的产量。

生物量是牧草净初级生产力的基础,是植被碳库的度量,是评价牧草生态系统结构、功能的重要参数。生物量对研究生态系统的营养物质分配和碳循环具有重要意义,是反映牧草生长发育的一个重要指标,是衡量不同种类牧草生产力大小的标准之一 (周文辉等, 2009; 张保田等, 2006; 孙启忠等, 2008), 也是牧草在一个地区种植适宜性的重要指标。牧草在不同气候(降雨)条件下的产量规律为牧草在不同季节和不同地区的合理配置, 提供科学依据。

3.1 不同牧草和牧草不同种植系统的生物产量

3.1.1 不同牧草的产草量

不同牧草 5 年的产草量年平均值见表 3.1, 黑麦与小黑麦为 4 个生长季的平均值。串叶松香草和苜蓿是多年生牧草, 生育期比一年生牧草长, 因此, 产

表 3.1 不同牧草的年均产草量(2005-2009 年平均)

Table 3.1 Average yield of different forage cultivars (2005-2009 average)

牧草品种	鲜草产量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	标准差	干草产量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	标准差
籽粒苋	61.94	29.90	6.53	3.38
小黑麦	47.97	8.64	8.36	1.87
黑麦	49.05	4.95	9.05	1.94
高丹草	74.88	32.23	10.45	4.19
黑麦(全)	33.80	2.26	11.87	4.01
小黑麦(全)	37.62	4.51	12.78	3.32
青饲玉米	40.58	7.65	15.20	7.34
串叶松香草	92.14	60.45	16.87	10.92
苜蓿	71.51	37.25	18.62	13.65

注: (全)为只刈割一次的处理, 即在乳熟期至蜡熟期一次性刈割, 其他未注明的为按照刈割时期刈割多次的产量, 下同。

量比一年生牧草的普遍要高，串叶松香草的鲜草产量略高于苜蓿，但是干草产量苜蓿的稍高一些。籽粒苋产干草产量比其他一年生牧草的低，但鲜草产量稍高。青饲玉米表现较好，干、鲜草产量都较高。越冬牧草黑麦和小黑麦刈割两次的鲜草产量比只刈割一次的产量要高，但干草产量比只刈割一次的低，这可能是由于只刈割一次的粗纤维多，而再生的柔嫩多汁。

3.1.2 牧草在不同降雨条件下的产草量

在第二章里，将历史降雨和试验期间的降雨按照牧草的不同生长季节做了不同的划分，这一节将探讨牧草在不同降雨条件下的产量，为牧草在不同降雨条件下的产量预测以及种植规划做出科学依据。

表 3.3, 3.4 是不同降雨条件下牧草的生物量鲜重和干重，即牧草的鲜草产量、干草产量。一年生牧草的鲜草产量除青饲玉米和小黑麦全生育期处理外，其他牧草鲜草产量均是多雨条件最高；而多年生牧草鲜草产量均是少雨条件最高，这表明串叶松香草和苜蓿在降雨较少的气候下依靠灌溉能够获得较高的鲜草产量，降雨量大的时候反而产量低。

表 3.3 牧草多年平均和不同降雨条件下的鲜草产量

Table 3.3 Fresh yield of forage cultivars under different climate patterns

牧草品种	单位: $t \cdot hm^{-2} \cdot y^{-1}$			
	多雨	平常	少雨	多年平均
黑麦(全)	34.69	34.1	32.3	33.80
小黑麦(全)	33.94	36.17	44.19	37.62
黑麦	55.2	46	48.99	49.05
小黑麦	55.6	45.34	45.61	47.97
籽粒苋	78.69	46.13	60.07	61.94
高丹草	98.89	54.55	67.54	74.88
青饲玉米	36.98	48.57	31.81	40.58
苜蓿	59.27	51.84	135.3	71.50
串叶松香草	50.6	109.03	159	92.14

干草产量除青饲玉米外，其他牧草均是在多雨条件产量最高。黑麦和小黑麦只刈割一次时，在平常和少雨条件，较好灌溉条件下产量接近；刈割两次时在少雨时产量有所降低，黑麦对降雨量的多少较为敏感；分析结果表明了这两种牧草有较强的适应性，适合在黄淮海平原广泛种植。高丹草在平常季

表 3.4 不同降雨条件下牧草的干草产量

Table 3.4 Dry yield of forage cultivars under different climate patterns

牧草品种	多雨	平常	少雨	多年平均
黑麦(全)	14.66	11.02	10.8	11.9
小黑麦(全)	15.63	11.8	11.87	12.8
黑麦	10.67	9.44	6.65	9.1
小黑麦	10.56	7.77	7.32	8.4
籽粒苋	9.27	4.92	5.51	6.8
高丹草	13.13	7.68	10.62	10.5
青饲玉米	9.65	23.06	10.56	15.2
苜蓿	13.85	11.4	42.59	18.6
串叶松香	11.89	22.29	25.32	16.9

节产量低，多雨和少雨产量接近。青饲玉米多雨产量反而最低，表明该牧草的生长降雨量大于 696.5mm 情况下容易减产。因为北方夏季降雨多伴有风，青饲玉米容易倒伏，造成减产。籽粒苋对降雨量反应敏感，平常和少雨产量是在多雨条件下产量的一半左右，应当选择黄淮海平原降雨条件较好的地区种植籽粒苋，才能获得较高的干物质产量。多年生牧草干草产量在少雨，较好灌溉条件下产量最高，串叶松香草在多雨的条件，即当年降雨大于 696.5mm 时，产草量会降低。

3.1.3 不同牧草种植系统的产草量

不同种植系统 2005 至 2009 年 5 年的产草量见表 3.5，鲜草产量一年生禾本科轮作系统(CG)和籽粒苋与黑麦草、小黑麦轮作系统(CAG)的较高，其次是串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)和一年生禾本科与多年生牧草轮作系统(CGF)，显著性检

表 3.5 不同种植系统五年的干鲜草总产量(t·hm⁻²)Table 3.5 Total biomass yield of different cropping systems (t·hm⁻²)

种植系统	CG	CAG	CS	CM	CGF
鲜草产量	468.0(85.6) a	467.9(56.5) a	442.3(103.6) a	368.7(17.9) b	298.3(17.6) b
干草产量	97.0(8.0) a	95.3(8.4) a	85.7(32.0) ab	81.2(6.3) ab	70.4(5.7) b

注：括号中的数字代表标准偏差，括号后的字母代表 0.05 的显著水平

验结果表明 CG、CAG、CS 三者的鲜草产量无显著性差异，但与 CM 和 CGF 差异达到显著水平。各系统干草产量高低规律与鲜草产量规律基本相同，但鲜草产相比，CM 系统的干草产量相对较高，与前三个系统无显著性差异，CGF 系统

的干产量也是最低的，与其他系统有显著差异。

5 种植植系统的 2005-2009 年每年的鲜草、干草产量见图 3.1。苜蓿和串叶松香草的鲜草产量波动较大，2005 年产量最低，种植第二年(2006)达到高产，第三、四年产量有所下降，串叶松香草第五年产量持续下降，但是苜蓿产量有所上升。轮作系统中，CAG 和 CG 的鲜草产量波动小，每年的鲜草产量年基本稳定在 80-100t·hm²，CGF 的鲜草产量波动较大，在 2006 年达到高产，2007 和 2008 年有所降低，至 2009 年产量略有上升。2006 年，两个多年生牧草鲜草产量在 125 t·hm² 以上，比 3 个轮作系统高，轮作系统的鲜草产量十分接近，都在 105 t·hm² 左右。

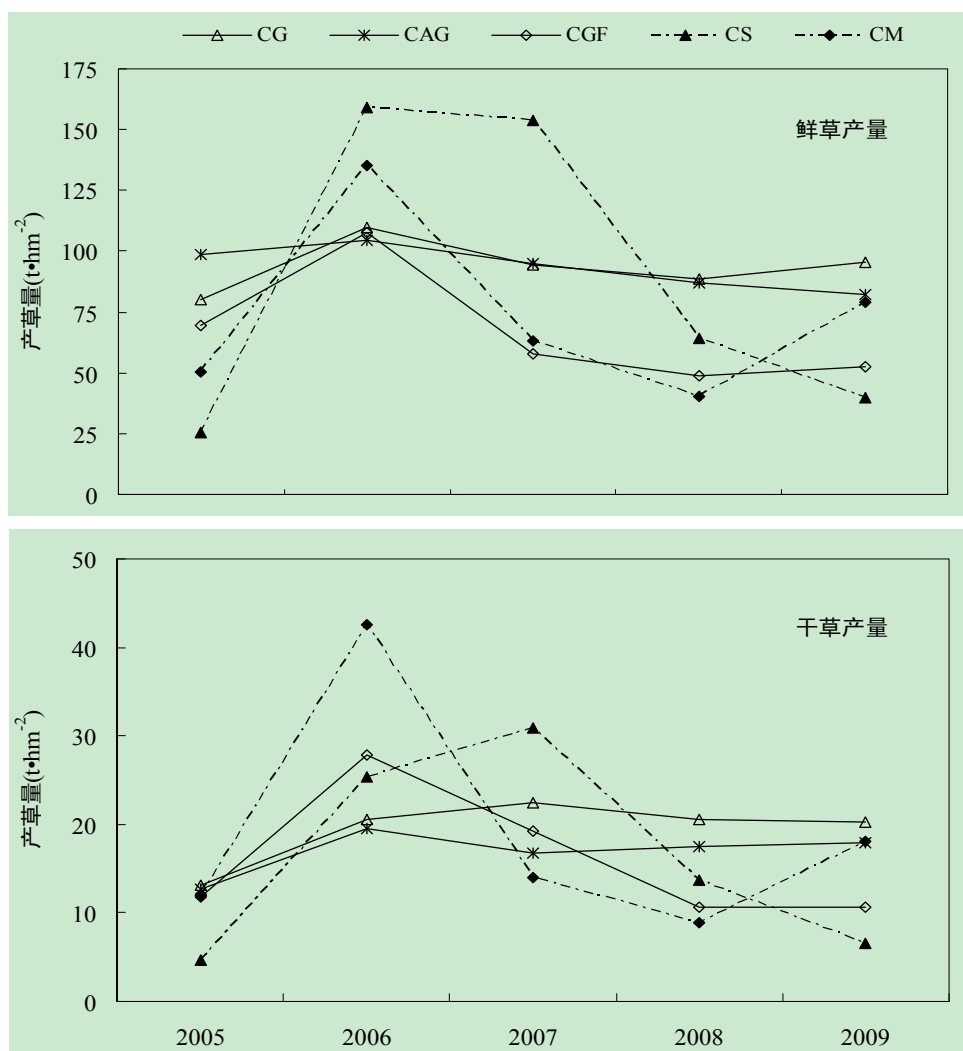


图 3.1 不同种植系统各年鲜草和干草产量 (2005-2009)

Fig.3.1 Variation of yearly fresh and dry biomass yield for five cropping systems from 2005 to 2009

干草产量的年变化规律与鲜草产量基本一致。干草产量苜蓿年际间的变化

最大，2006 年干草产量快速上升后，2007、2008 年迅速下降，但 2009 年又开始回升，串叶松香草干草产量前三年先上升，后两年逐年下降。轮作系统各年的干草产量 CG 系统比 CAG 系统的略高，CGF 系统 2006 年比 CG、CAG 系统高，但 2007 年开始下降，至 2008 年和 2009 年干草产量比前两者都要低，但高于串叶松香草。

3.2 不同牧草的生物量积累规律

3.2.1 不同牧草的最大叶面积指数

叶面积指数 (leaf area index, LAI)又叫叶面积系数，是一块地上作物叶片的总面积与占地面积的比值是构成生物量的重要指标之一。我们测定了各种牧草不每 7 天的叶面积指数，图 3.2 是不同牧草最大叶面积指数，由图可见轮作系统中的高丹草、籽粒苋与青饲玉米最大叶面积指数高于黑麦、菊苣和苜蓿的，这与产草量的结果基本一致，不同的苜蓿属于多年生牧草，生长季节比轮作系统长，一年可以刈割数次，所以保证了较高的生物量。

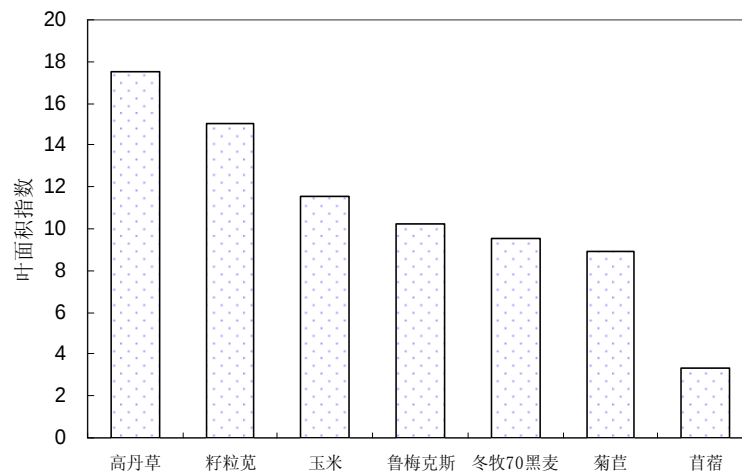


图 3.2 不同牧草最大叶面积指数

Fig. 3.2 Maximum leaf area index of different forage cultivars

3.2.2 不同牧草的叶面积指数变化

从叶面积指数动态可以看出牧草生物量积累的过程，图 3.4，3.5，3.6 是各牧草的叶面积指数变化规律。

图 3.4 是小麦和黑麦各处理的叶面积指数变化规律。由图可知两种牧草全

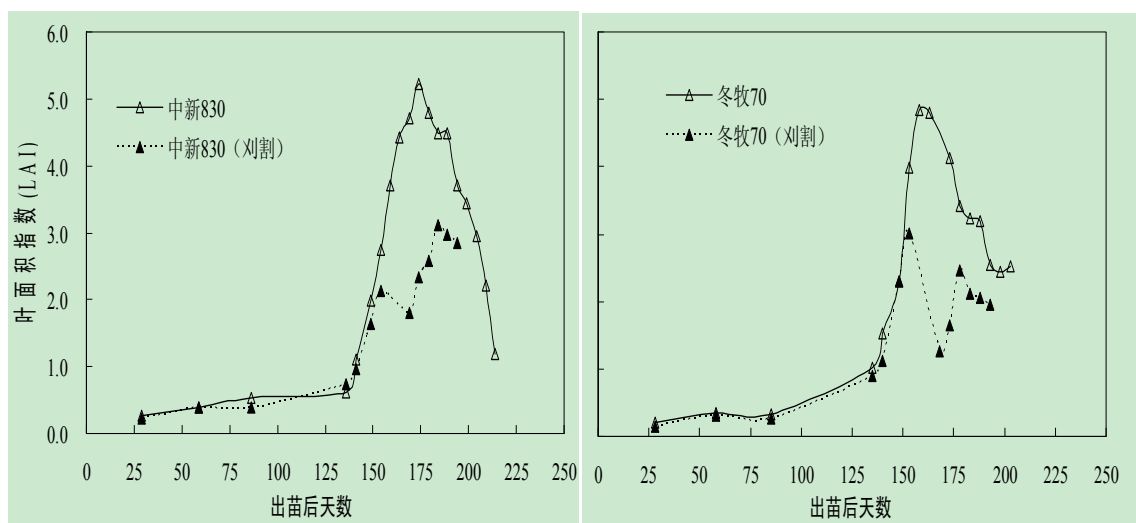


图 3.4 中新 830 小麦与冬牧 70 黑麦生育期内叶面积指数变化

Fig 3.4 Variation of leaf area index for Triticate-830 and Wintergrazer-70

注：括号标注处理为拔节期第一次刈割，再生后孕穗期第二次刈割，未标注为全生育期处理，即乳熟期至腊熟期一次性刈割

生育期内叶面积指数在出苗后至入冬叶面积指数缓慢增加，但在 0.2-0.4 之间徘徊，第二年返青时的叶面积指数开始增加，达到 1.0，叶面积随着生长进程的变化逐渐增大，至孕穗期前后达最大值，而后逐渐减小。刈割两次处理的叶面积变化曲线呈双峰型，在出苗后 168 天第一次刈割后叶面积迅速降低，但随后又开始上升，达峰值后开始下降。

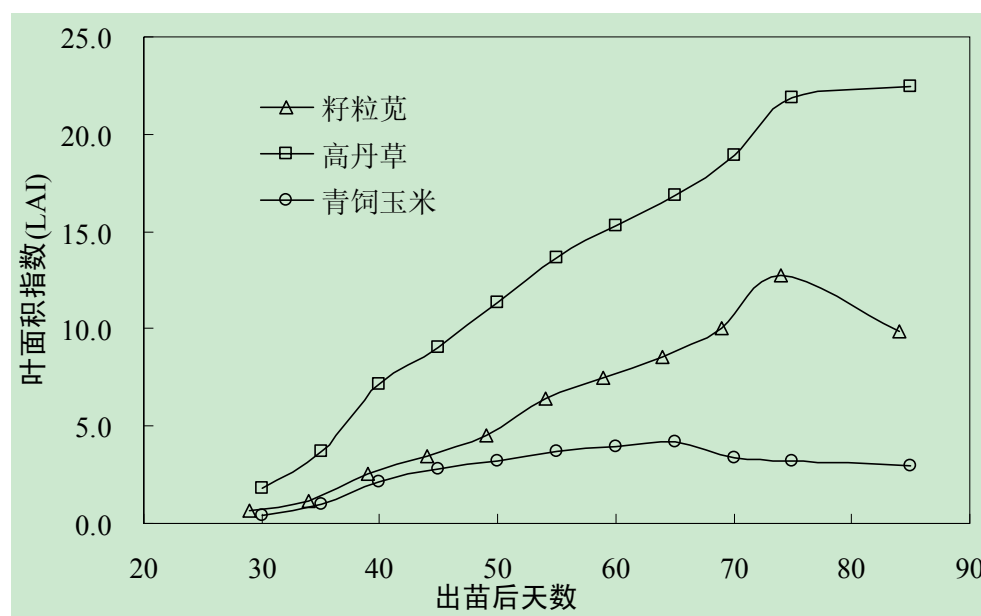


图 3.5 籽粒苋、高丹草和青饲玉米生育期内叶面积指数变化

Fig 3.5 Variation of leaf area index for prince's feather, sorghum hybrid sudangrass and ensilage corn

图 3.5 是籽粒苋、高丹草和青饲玉米的叶面积指数动态，由图可知，出苗后一个月左右，各牧草的叶面积便表现出大小的差异，高丹草的叶面积指数是这三种牧草中最高的，同时间高丹草的叶面积指数是籽粒苋的 2-3 倍，是青饲玉米的 3-8 倍。三种牧草叶面积指数都是先升高，达峰值后再降低，高丹草仍有缓慢的增加，峰值出现的先后顺序为：青饲玉米、籽粒苋、高丹草。

图 3.6 是红三叶、白三叶和串叶松香草返青后的叶面积指数动态，由图可知，红、白三叶草叶面积指数动态显示了一致的规律，返青后叶面积指数不断增加，在返青 70 天(5 月中下旬)左右出红三叶出现一个拐点，这个时期正是三叶草由营

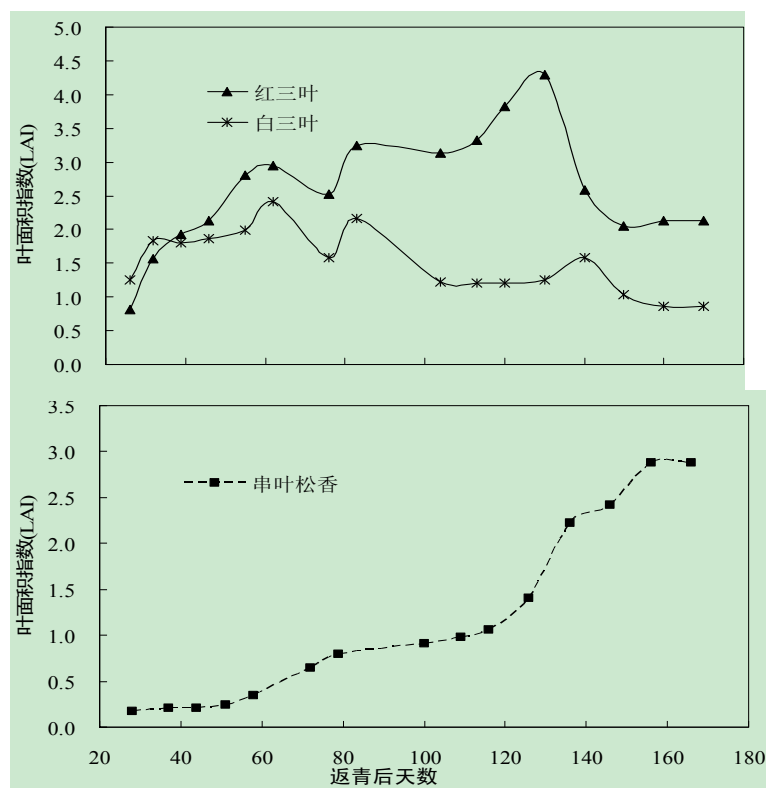


图 3.6 红三叶、白三叶和串叶松香草返青后叶面积指数变化

Fig 3.6 Variation of leaf area index for red clover, white clover and cup plant

养生长转向生殖生长的阶段，白三叶的叶面积指数自返青一个月后比红三叶高，但后期红三叶的叶面积指数一直比白三叶高。由于串叶松香草是簇生的植物，叶面积指数每个小区只测定了 3 个单茎的叶面积，图中是单茎的叶面积指数动态，单茎的叶面积指数呈缓慢上升趋势，至返青后 160 天左右叶面积指数达峰值，其后不再增加。

3.2.3 不同牧草的生物量积累过程

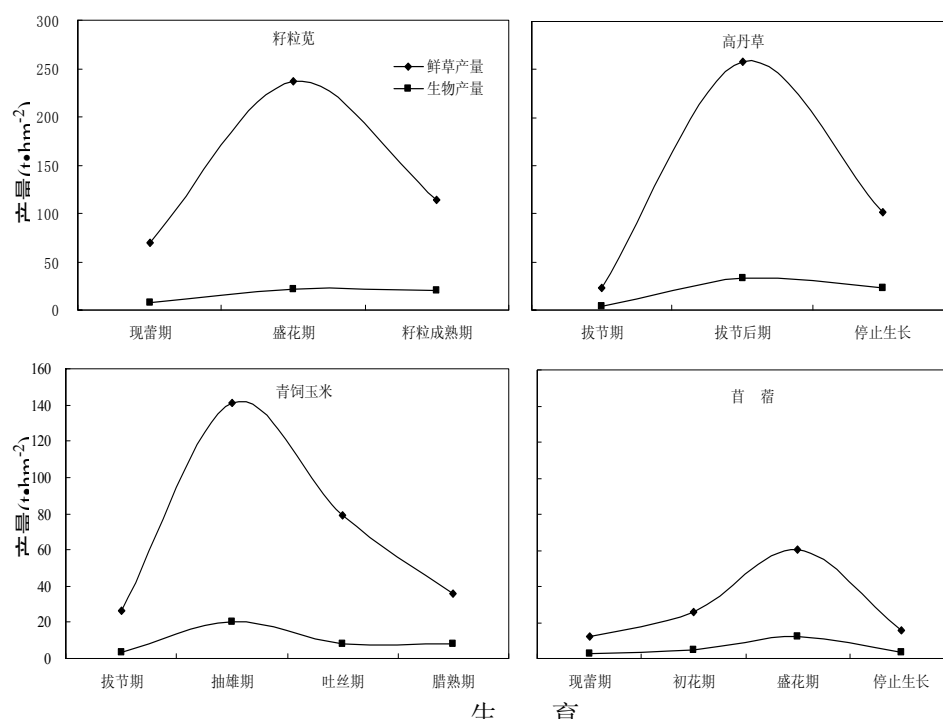


图 3.7 不同牧草生物量积累过程

Fig.3.7 Accumulation dry biomass yield for different forage cultivars

图 3.7 是籽粒苋、高丹草、青饲玉米和苜蓿的生物量积累过程，由图可知籽粒苋和高丹草在不同生育期产量要高于青饲玉米和苜蓿，在整个生育期中苜蓿各个时期产量最小。籽粒苋在盛花期产量最大，高丹草在拔节后期，青饲玉米在抽雄期，苜蓿在盛花期产量达到最大，这为牧草在本地区的最佳收获时间确定提供了产量的依据。但是最佳收获时期的确定是由产量、营养和后续利用等因素综合决定的。

3.3 不同牧草的光合作用

光合作用是牧草生产的基础过程，叶片是牧草光合作用的功能单元。叶片对太阳能的捕获效率及其利用效率决定了牧草的生产能力。因此，2005 年我们利用 Li-6400 系统对各牧草生育盛期的光合速率日变化和光响应曲线进行了测定。

3.3.1 不同牧草的光合日变化

表 3.6 是牧草生育盛期叶片光合速率平均值，根据表 3.6 结果，属于 C_4 牧草

高

表 3.6 牧草生育盛期叶片光合速率平均值($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (2005)

牧草名称	生育期	光合速率	牧草名称	生育期	光合速率
青 饲	拔节期	12.33	鲁 梅	叶簇期	10.73
玉 米	腊熟期	7.52	克 斯	现蕾期	7.65
高 丹 草	拔节期	10.55	菊 苣	现蕾期	7.62
	拔节后期	5.42		莲座叶簇期	6.06
	再生期	10.64		抽薹期	7.79
籽 粒 苋	现蕾期	12.38	串 叶 松香草	抽茎期	8.30
	开花期	9.07		开花期	9.85
	籽粒成熟期	9.46		莲座期	6.54
黑麦	拔节期	9.39	紫 花	现蕾期	14.93
黑 麦	孕穗期	8.01	苜 蓿	分枝期	10.37

丹草、青饲玉米、籽粒苋等光合速率平均值为 $9.67\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (3 个品种 8 个生育期)，高于属于 C_3 牧草的黑麦黑麦、苜蓿、串叶松香草、菊苣和鲁梅克斯等平均值为 $8.91\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (5 个品种 12 个生育期)。

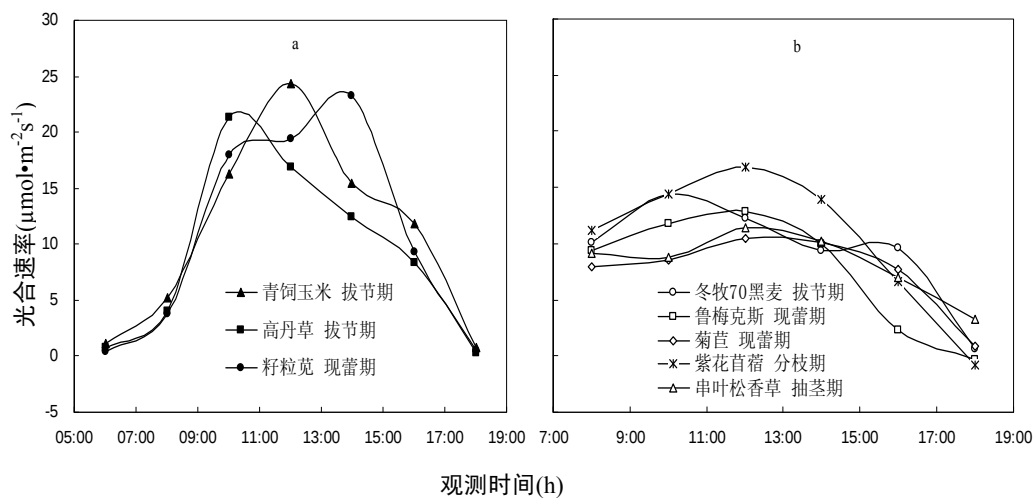


图 3.8 不同牧草生育盛期叶片净光合速率日变化曲线

图 3.8 是不同牧草生育盛期净光合速率日变化，由图可见，上午 9:00 以后， C_4 牧草光合速率均高于 C_3 牧草。 C_4 牧草(图 3-8a)光合速率日出后快速增长，中午 12:00 前后达最大值，午后又骤然下降，日变化变化曲线属剧增骤降型。 C_3 牧草(图 3-8b)光合速率日变化曲线变化比较平缓，上午高，下午 15:00 开始下降。 C_3 牧草峰值带较宽， C_4 牧草的峰值带较窄。

3.3.2 不同牧草的光响应曲线

植物的光合作用-光响应曲线是光合作用随着光照速率改变的系列反应曲线,这种曲线的测定对于判定牧草的光合能力非常有用。从曲线上可以计算并判断植物的光补偿点(light composition point, LCP), 光饱和点(light saturation point, LSP)及最大光合速率(maximum photosynthetic rate, P_{nmax})。

图 3.9 是 8 种牧草光合作用-光响应曲线的综合。不同牧草的光合作用-光响应曲线不同, 光补偿点和光饱和点也有很大差异。

C_4 牧草(图中虚线部分)的光补偿点为 $100\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 高于 C_3 牧草(图中实线部分) $50\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。光饱和点和点以苜蓿最高, PFD 大于 $3500\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 串叶松香草最低, 为 $1200\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。8 种牧草的光饱和点的大小依次为

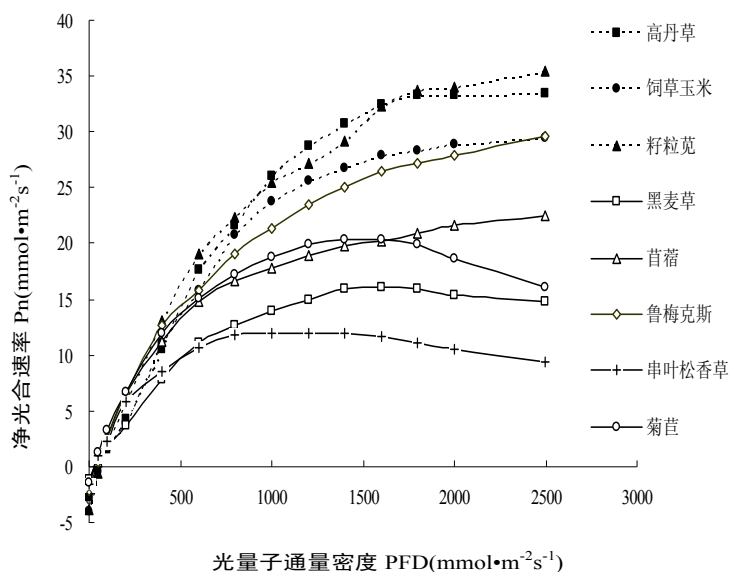


图 3.9 8 种牧草光合作用-光响应曲线

苜蓿>鲁梅克斯>籽粒苋>饲料玉米>高丹草>黑麦黑麦>菊苣>串叶松香草。最大净光合速率的大小依次为籽粒苋>高丹草>鲁梅克斯>饲料玉米>苜蓿>黑麦黑麦>菊苣>串叶松香草。

3.4 冬牧70黑麦与中新830的生长发育进程

3.4.1 株高变化

从二者的株高变化规律(图 3.10)来看, 冬牧 70 黑麦返青较早, 株高增长较快, 一直高于中新 830 小黑麦。与冬小麦比较, 返青后 45 天左右植株高度接近, 此后, 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦生长速度加快, 75 天左右达到峰值。中新 830 小黑麦株高为 147.7cm, 冬牧 70 黑麦株高为 165.0cm, 而维麦 8 小麦为 74.4cm, 济麦 20 小麦为 69.5cm。两者相差 1 倍以上。

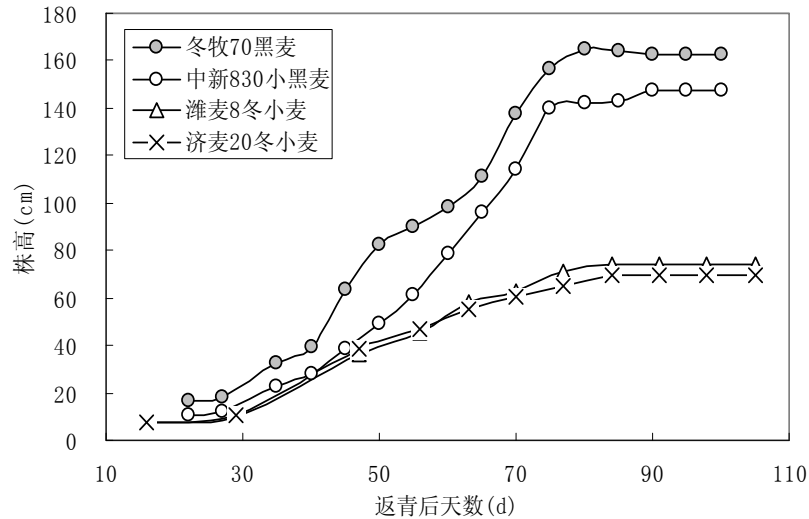


图 3.10 冬牧 70、中新 830 和冬小麦株高变化

Fig.3.8 Variation of plant height for Wintergraze-70, Triticate-830 and winter wheat

3.4.2 叶面积指数动态变化

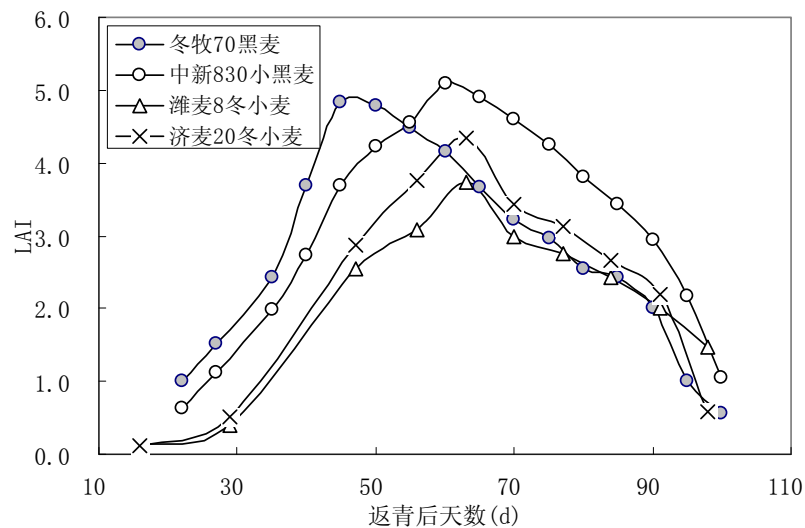


图 3.11 冬牧 70、中新 830 和冬小麦叶面积指数变化

Fig.3.11 Variation of plant leaf area index for Wintergraze-70, Triticate-830 and winter wheat

自拔节开始，叶面积指数增长迅速，冬牧 70 黑麦，LAI 最大值为 4.8，出现在返青后的第 45 天前，而中新 830 小黑麦的 LAI 最大值为 5.1，冬牧 70 黑麦属于返青早的早熟品种 LAI 最大值比中新 830 小黑麦提前约 15 天左右(图 3.11)。

3.4.3 生物量动态变化

两种牧草的生物量动态变化趋势基本相似。冬牧 70 黑麦在返青后的 65 天内

的生物量增长速度高于中新 830 小黑麦，此后直至成熟期，中新 830 小黑麦生物量高于冬牧 70 黑麦。到乳熟期冬牧 70 黑麦的生物量平均值为 $19.8\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，中新 830 小黑麦为 $21.5\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ （图 3.12）。

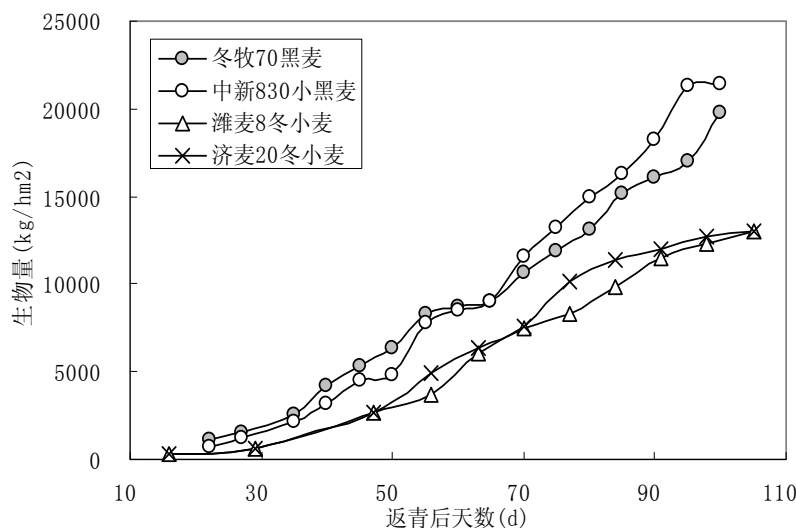


图 3.12 冬牧 70、中新 830 和冬小麦叶面积指数变化

Fig.3.10 Variation of biomass for Wintergraze-70, Triticate-830 and winter wheat

3.4.4 冬牧 70、中新 830 与冬小麦比较

表 3.7 冬牧 70、中新 830 与冬小麦比较

Table 3.7 Comparison of plant height, biomass and max LAI for Wintergraze-70, Triticate-830 and winter wheat

作物品种	冬牧 70 黑麦	中新 830 小黑麦	潍麦 8 冬小麦	济麦 20 冬小麦
最大株高(cm)	165.0	147.7	74.4	69.5
乳熟期生物量	19791	21450	13016	13044
最大叶面积指数	4.8	5.1	3.7	4.3

黑麦与小麦相比株高相差 1 倍以上。冬牧 70 黑麦株高分别比冬小麦高 90.6~95.5cm，中新 830 小黑麦株高分别高出 73.3~78.2cm。表明这两种牧草有利于获得较高的生物产量。

冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦的生物量均高于冬小麦。冬牧 70 黑麦的生物量分别比潍麦 8 冬小麦和济麦 20 冬小麦高 52.11%和 51.79%，中新 830 黑小麦分别高 64.80%和 64.44%。

3.2 本章小结

(1)牧草 2005-2009 年的产草量年平均值：串叶松香草鲜草产量 $92.14 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ，干草产量 $16.87 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ，苜蓿分别为 $71.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ， $8.62 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ 。籽粒苋产干草产量比其他一年生牧草的低，但鲜草产量稍高。青饲玉米干、鲜草产量都较高。黑麦和小黑麦刈割两次的鲜草产量比只刈割一次的产量要高，但干草产量比只刈割一次的低。

(2)苜蓿和串叶松香草 2005 年产量最低，种植第二年(2006)达到高产，第三、四年产量有所下降，串叶松香草第五年产量持续下降，但是苜蓿产量有所上升。轮作系统中，CAG 和 CG 的鲜草产量波动小，每年的鲜草产量年基本稳定在 $80\text{--}100 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，CGF 的鲜草产量波动较大，在 2006 年达到高产，2007 和 2008 年有所降低，至 2009 年产量略有上升。2006 年，两个多年生牧草鲜草产量在 $125 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上，比 3 个轮作系统高，轮作系统的鲜草产量十分接近，都在 $105 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。干草产量的年变化规律与鲜草产量基本一致。

(3)鲜草产量一年生牧草除青饲玉米和小黑麦全生育期处理外，其他牧草鲜草产量均是多雨条件最高，多年生牧草鲜草产量均是少雨条件下最高。干草产量除青饲玉米外，其他牧草均是在多雨条件产量最高。黑麦和小黑麦只刈割一次时，在平常和少雨条件下，较好灌溉条件下产量接近；刈割两次时在少雨条件下产量有所降低。高丹草在平常产量低，多雨条件和少雨条件下产量接近。青饲玉米在多雨条件的产量最低，表明该牧草生长期降雨量大于 696.5mm 容易减产。籽粒苋对降雨量反应敏感，平常和少雨条件下的产量是在多雨条件产量的一半左右。多年生牧草干草产量在少雨条件下较好灌溉条件下产量最高，串叶松香草在降雨量大大于 696.5mm 时，产草量会降低。

(4)不同种植系统 2005 至 2009 年 5 年的总鲜草产量一年生禾本科轮作系统(CG)和籽粒苋与黑麦草、小黑麦轮作系统(CAG)的较高，其次是串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)和一年生禾本科与多年生牧草轮作系统(CGF)。与鲜草产相比，CM 系统的干草产量相对较高，与前三个系统无显著性差异，CGF 系统的干产量也是最低的，与其他系统有显著差异。

(5) 牧草生育盛期净光合速率日变化：光合速率午前迅速增加，在 10:00—12:00 光合速率达到最大值后缓慢下降，青饲玉米、高丹草和籽粒苋等 C_4 光合速

率高于其他 5 种 C_3 牧草。 C_3 饲料作物大豆的蒸腾速率为 C_4 牧草籽粒苋的 1.52 倍；水分利用效率籽粒苋比大豆高出 1 倍左右。不同种类牧草的生物学特性光合作用—光响应曲线存在差异。光饱和点的大小依次为苜蓿>鲁梅克斯>籽粒苋>青饲玉米>高丹草>黑麦>菊苣>串叶松香草；最大净光合速率的大小依次为籽粒苋>高丹草>鲁梅克斯>青饲玉米>苜蓿>黑麦>菊苣>串叶松香草；不同层次叶片的光响应曲线差异也较大。 C_4 牧草的光补偿点为 $100\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ， C_3 牧草约为 $50\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。 C_4 牧草的光响应曲线变化趋势一致，差异较小；而 C_3 牧草的光响应曲线走向差异较大。

(6)试验结果表明，全生育期小黑麦生物产量达 $26.05\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，黑麦为 $18.92\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。4 月中旬收割，黑麦可获得 $5.67\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物量，需小黑麦为 $8.70\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

第四章 牧草的耗水量与耗水规律

小黑麦、黑麦种植是黄淮海平原棉花冬闲田利用的重要途径,既不影响棉花生产又能填补冬春青饲料的不足,籽粒苋、青饲玉米、高丹草等是适口性较好产量又高的青绿牧草,串叶松香草和苜蓿也是该地区种植表现较好的牧草。但是黄淮海平原水资源严重匮乏,人均水资源占有量仅为 257m^3 ,仅为全国人均占有量的 12.1%,并且水资源分布不均。因此,在该地区引入人工牧草种植,首先需要对牧草的耗水量和水规律进行深入研究。

而该地区人工牧草耗水量的研究较少,并且缺少长年的观测资料,大多数是根据气象资料和土壤水分计算的结果。为了探讨生长在田间条件下不同牧草的耗水特性,确定其耗水量,我们采用注水式土壤蒸发器 (Irrigated Lysimeter) 测定了牧草在没有水分胁迫下的耗水量。并结合水面中国科学院禹城综合试验站水面蒸发场 20m^2 蒸发池和 E601II 型蒸发器蒸发量为参考蒸发 (ET_0),确定了牧草的耗水系数(K_c)。耗水量与耗水系数的测定,为牧草在该地区种植合理布局提供科学依据。

4.1 牧草的耗水量

不同种类牧草的耗水量受土壤理化性质、气象因子和作物生物学特性的影响,是一个相当广泛而又复杂的过程。在土壤和气象因子相同条件下,不同牧草的耗水特性,决定了各种牧草对水分的消耗状况和利用程度。气候变化是近几年研究的热点问题,以往对牧草耗水量的试验研究只涉及到一年或者两年的资料,很少有人进行连续多年的试验研究牧草在不同的气候条件下的耗水规律。

黄淮海平原降雨资源分布不均,不同季节不同地区间差异大。首先,降雨季节分布不均,年降雨量主要集中在夏季,6-8 月份的降雨量占全年的 75%,冬小麦生长季节缺水严重;降雨量地区分布不均,南方淮河流域降雨量达 900mm y^{-1} ,而北方却只有 480mm y^{-1} (Yu, Saseendran et. al, 2006); 同一地区降雨量年际差异大,据中国科学院禹城试验站的降雨资料和禹城市气象局的降雨资料显示,1951 年至 2005 年 45 年间的降雨量年际间差异大,降雨量最小的为 2002 年,只有 279.4mm,而 1964 年降雨量为 45 年来最大,达到 1027.7mm。因此,本研究利用连续五年的田间试验数据,结合试验站的气象资料,对牧草及其不同种植系统

在气候变化条件下（主要是不同的降雨条件下）的耗水量与耗水规律进行了分析，为牧草的种植时空配置提供更翔实的科学依据。

4.1.1 牧草在不同的降雨年型下的耗水量

这一节将牧草 2005-2009 年的耗水量按照不同降雨条件进行归类整理，结果见表 4.1。

表 4.1 牧草在不同的降雨条件下的耗水量

Table 4.1 ET for forage cultivars under different climate patterns

牧草品种	耗水量(mm)			
	多雨	平常	少雨	多年平均
小黑麦	310.3	362.1	353.1	346.9
小黑麦(全)	394.8	423.2	468.7	427.5
黑麦	349.2	355.9	404.5	366.4
黑麦 (全)	421.6	396.2	484.4	424.6
籽粒苋	311.8	354.4	333	333.1
青饲玉米	354.7	372.1	402.3	371.2
高丹草	381.9	328.6	378.4	359.9
串叶松香草	517.2	652	667.6	601.2
苜蓿	721	841.7	820.9	789.3

牧草在不同降雨条件下的耗水量能解释牧草在过去不同年份的耗水量，比如，小黑麦(一个生长季节刈割 2 次)在少雨条件(2005-2006 年)的耗水量为 353.1mm，能代表过去 20 年的情形，并且可以根据对降雨的预测该牧草需要的灌溉量等等。

由于生长期长，多年生牧草生育期的需水量比一年生的牧草普遍要高。牧草需水量不同的季节不同，大部分是少雨高于平常，多雨需水量最低，但是小黑麦、籽粒苋和苜蓿的规律略有不同，平常的需水量最高，少雨次之，多雨最少；高丹草在多雨的耗水量却高于少雨和平常。

牧草在不同降雨类型的日均耗水量，即总的需水量与生育期天数的比值。由图 4.1 可以看出，在少雨条件下，一年生牧草的日均耗水量比其降雨条件下要大，一年生牧草的日均耗水量，少雨条件最高。对于一年生的牧草，除黑麦和高

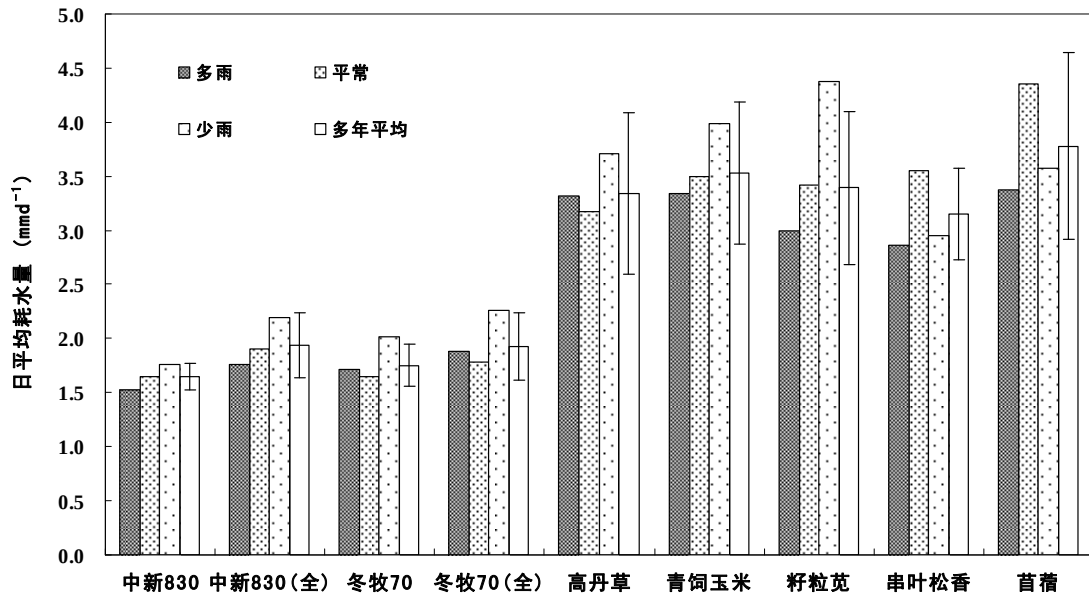


图 4.1 各牧草在不同降雨条件下的日均耗水量

Fig.4.1 Mean daily water demand forage cultivar under different climate patterns

丹草外,其他牧草均是多雨的日耗水量最小。对于多年生牧草串叶松香草和苜蓿,平常的日均耗水量最高,其次是少雨,多雨的最低。

气候变化会影响牧草的生育期,干旱(少雨)会造成一年生牧草的生育期提前,黑麦和小黑麦在少雨条件下成熟期比其他季节要提前 2 至 10 天,高丹草和青饲玉米生育期比其他季节提前 2 至 13 天,而籽粒苋则提前 28 至 76 天,这说明籽粒苋对气候变化,特别是降雨量的多少响应敏感。

4.1.2 牧草不同种植模式下的耗水量

由注水式土壤蒸发器测定的牧草 2005 年 4 月牧草开始播种,到 2009 年 5 月 19 日黑麦草收获时间段的耗水总量与整个生育期间日均耗水量,结果见表 4.2。多年生苜蓿(CM)的耗水量最大, LSD 比较检验显示其与一年生禾本科牧草

轮作体系(CG)、串叶松香草(CS)和苋科-禾本科轮作体系(CAG)差异达到显著水平。而苋科-禾本科轮作体系的耗水水量最小,只有 2675.7mm。但是两种多年生牧草的日均耗水量均比其他处理的高。

表 4.2 不同种植系统耗水总量与日均耗水量

Table 4.2 Total water demand and average daily water consumption of different cropping systems

处理	耗水总量 (mm)	P=0.05	日均耗水量 (mm·d ⁻¹)
苜蓿(CM)	3877.1 ± 57.4	a	2.6
一年生禾本科-多年生牧草(CGF)	3573.5±474.9	ac	2.6
串叶松香草(CS)	3380.4±160.3	bc	2.3
一年生禾本科轮作(CG)	3061.0±231.4	bd	2.6
苋科-禾本科轮作(CAG)	2675.7±199.5	d	2.3

试验期间的降雨总量为 2339.8mm，均小于各系统的耗水量，这说明在该地区种植牧草需要有一定的灌溉条件。该降雨主要集中在 6-9 月，在早春牧草返青时节，需要浇返青水；春季需要灌溉，夏季和秋季的降雨超过了牧草的需水量，冬季牧草根据情况选择浇越冬水。

4.2 牧草的耗水规律

植物对水分要求及其消耗状况，是植物长期适应自然的结果，具有较为稳定的遗传性。因此，每种牧草都有与之相适应的生理需水要求。已有的研究表明，对于同一种作物而言，作物耗水量与同期水面蒸发量的比值趋近于一常数(程维新等,赵家义,胡朝炳, 1994)，这是由于某种作物覆盖下的农田蒸发与水面蒸发受制于同一气象条件。但对于不同种类的牧草来讲，农田蒸发除受制于气象因素外，在很大程度上决定于牧草本身的耗水特性。由于每种牧草都有相应的耗水特性，因此，牧草的耗水特性系数也因牧草种类而异。不同牧草耗水系数 K_c 值的确定，能为估算牧草耗水量提供重要的参考，为种植布局和灌溉等活动提供依据。

4.2.1 牧草不同降雨年型下的作物 (K_c)

牧草的作物系数(K_c)采用蒸发比的方法：

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (4-1)$$

(4-1)式中 ET_c 为试验测定的不同种类牧草在充分供水条件下的耗水量， ET_0 采用的是同期 20m² 蒸发池和 E601 蒸发器观测的蒸发量。E601 水面蒸发资料与 20m² 蒸发量相关性较好(图 4.2)。

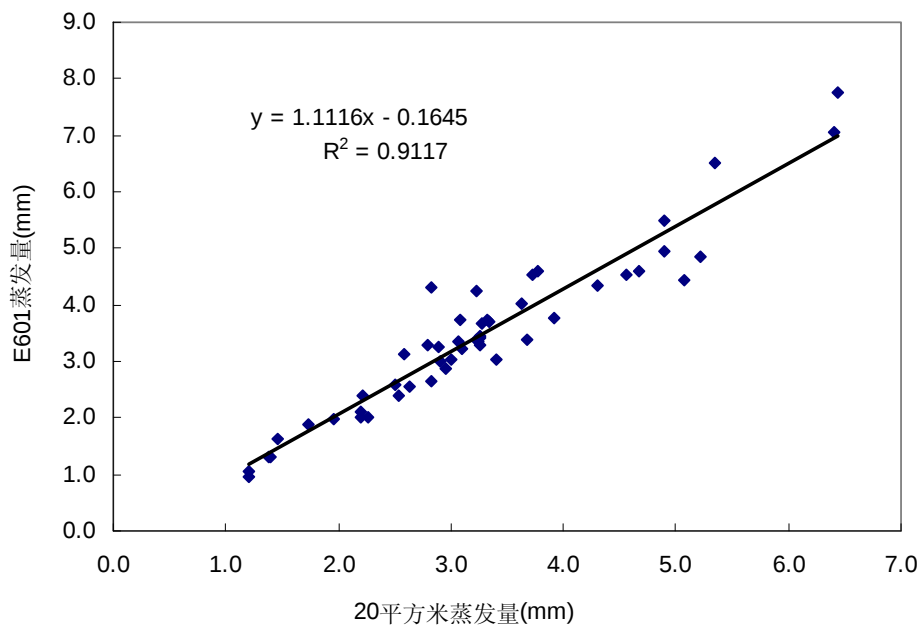


图 4.2 20 平方米蒸发池和 E601 蒸发器日蒸发量比较

Fig.4.2 Comparison the evaporation of 20square meters pool and E601 II pond at Yucheng Station

是水利部推荐的全国各地广泛使用的水面蒸发器，资料容易获取。 20m^2 蒸发池虽然能代表大水面蒸发状况，反应大水体的蒸发能力，但只有少数水面蒸发场才有这方面的数据。因此，本论文在计算 K_c 时采用的是 E601 蒸发器的蒸发量。

表 4.3 不同降雨条件下各牧草的耗水系数

Table 4.3 Crop coefficient for cultrivals under variance climate patterns

	多雨	平常	少雨
黑麦 (全)	1.01	0.99	1.27
黑麦	1.01	0.93	1.20
小黑麦(全)	0.95	1.06	1.23
小黑麦	0.90	0.92	1.05
籽粒苋	0.70	1.00	1.10
高丹草	0.81	0.92	0.99
青饲玉米	0.86	0.96	1.06
苜蓿	1.08	1.14	1.10
串叶松香	0.78	1.01	0.90

根据试验结果，计算各牧草在不同降雨条件下的作物系数(K_c)如表 4.3。平常条件各牧草的蒸发量基本上等同于 E601 水面蒸发量，除苜蓿略高外，其差值一般小于 9%，此时，牧草耗水量可以直接参考当地的 E601 水面蒸发量。冬牧 70 黑 K_c 值少雨条件最大，多雨次之，平常最小；其余牧草 K_c 值少雨条件最大，平常次之，多雨最小，在多雨条件其耗水量小于同期的 E601 水面蒸发量。

4.2.2 牧草在不同降雨条件下的灌溉需求量

表 4.4 牧草在不同降雨类型下的需水量与降雨量的差值, 即灌溉需求量, 该值可以为不同降雨条件下的灌溉量提供依据。高丹草在该地区除了干旱(少雨)需要少量的灌溉以外, 其他季节不需要灌。籽粒苋、青饲玉米和串叶松香草多雨条件下不需要灌溉, 平常需要少量的灌溉, 灌水需求主要在少雨条件下。对于小黑麦和黑麦, 生育期内的降雨均达不到生长所消耗的水量, 需要灌溉才能维持

表 4.4 牧草在不同降雨条件下的灌溉需求量

Table 4.4 Irrigation demand for each climate patterns (mm)

牧草品种	多雨	平常	少雨	多年平均
高丹草	0	0	88.7	0
籽粒苋	0	23.2	152.1	0
青饲玉米	0	41	112.6	19.2
串叶松香草	0	176.5	291.7	73.6
黑麦 (全)	316.3	234.2	288.9	268.4
黑麦	280.7	250.8	221.5	251.0
小黑麦	241.8	255.8	170.1	230.9
小黑麦(全)	289.5	261.2	273.2	271.3
苜蓿	22.3	380.1	445	250.0

生长和达到较好的产量, 黑麦生育期内的灌溉需求在 221.5-316.3mm, 多雨条件灌溉量稍高; 小黑麦为 170.1-280.7 mm。苜蓿在多雨条件基本不需要灌溉, 平常灌溉量为 380.1mm, 多雨条件下需要 445.0mm。

4.3 牧草的水分利用效率

水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE), 可以分为叶片、群体和产量等三个不同的层次。本研究中牧草的水分利用效率采用的是产量水平的水分利用效率(WUE_y), 是单位水量所生产的产量, 公式 4-2。产量可表示为净生产量(考虑到植株各部分的呼吸消耗)或经济产量, 对牧草而言主要指的是生物产量, 对农作物而言经济产量更接近农业生产实际。在耗水量中包括土壤表面的无效蒸发, 这里采用试验测定的牧草的需水量。

$$WUE_y = Y / ET \quad (4-2)$$

式中: WUE_y——产量水平上水分利用效率 (kg·hm⁻²·mm⁻¹)

Y——产量(牧草的生物产量, 干重, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);

ET——牧草的耗水量 (mm)。

4.3.1 不同牧草的水分利用效率

牧草在不同降雨条件下的水分利用效率见表 4.5, 同一牧草在不同的降雨类型条件下的 WUE_y 大小规律与生物量干重一致。黑麦和小黑麦在不同降雨条件的水分利用效率规律一致, 即多雨条件下 WUE_y 最高, 少雨条件下最低; 高丹草和籽粒苋的水分利用效率也是多雨条件下最高, 但少雨的水分利用效率并不是最低的; 多年生牧草的水分利用效率在少雨却是最高的。串叶松香草平常接近少雨状况, 多雨最低, 苜蓿却是在平常最低。

图 4.5 牧草在不同降雨条件下的水分利用效率

Table4.5 Water use efficiency (WUE) under different climate patterns ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)

牧草品种	水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)			
	多雨	平常	少雨	多年平均
小黑麦	34	21.4	20.7	24.1
小黑麦(全)	39.6	27.3	25.3	29.9
黑麦	30.6	26.6	16.5	24.7
黑麦 (全)	34.8	26.8	22.3	28.0
籽粒苋	28.9	13.9	16.5	20.4
青饲玉米	28.8	62	26.2	40.9
高丹草	36	23.6	28.1	29.0
串叶松香草	14.5	36.5	37.9	28.1
苜蓿	20	14.3	51.9	23.6

青饲玉米在平常的水分利用效率最高, 达到 $62.0 \text{ Kgha}^{-1}\text{mm}^{-1}$, 并且在少雨和多雨的 WUE_y 均是一年生牧草中较高的, 这可能得益于较高的生物产量, 和较低的耗水量, 这与 Lothar Mueller 等采用地下供水式蒸渗仪测定的结果一致 (Lothar Mueller et al., 2005)。

4.3.2 不同种植系统的水分利用效率

根据公式 (4-2)计算不同系统产量水平水分利用效率(WUE_y), 结果如下:

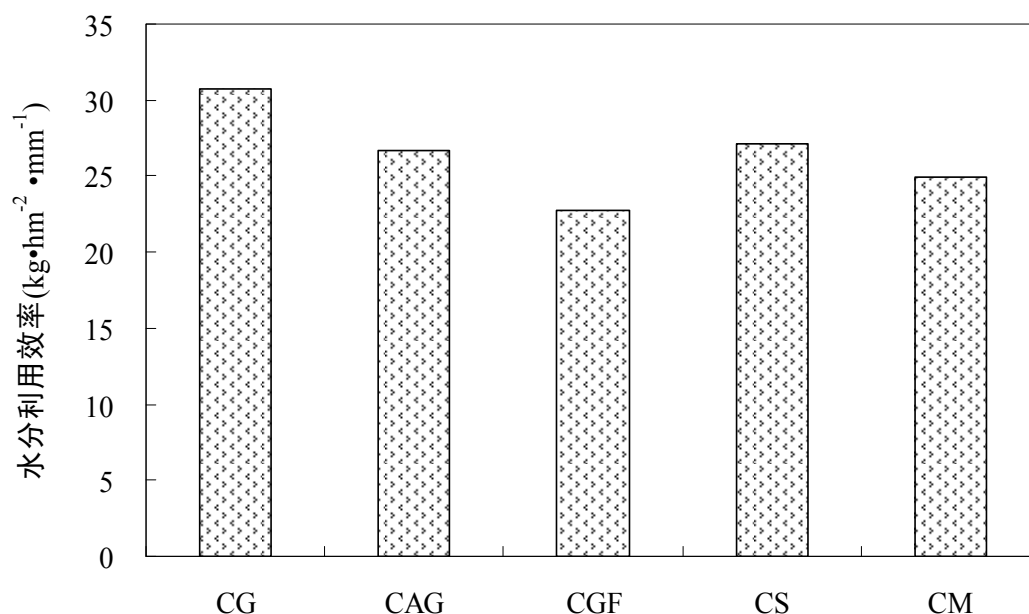


图 4.3 不同种植系统多年平均水分利用效率

Fig.4.3 The average water use efficiency for different planting systems from 2005 to 2009

不同种植系统的水分利用效率年平均值在 22.7-30.7 Kg $\text{ha}^{-1}\text{mm}^{-1}\text{y}^{-1}$ ，由图 4.3 知，禾本科牧草轮作系统 CG 水分利用效率最高，其次是苋科禾本科轮作 CAG 与串叶松香草 CS 系统，苜蓿 CM，禾本科与多年生牧草轮作 CGF 最低，与年均干草产量规律基本一致，与年均需水量规律呈现出相反的趋势。

4.4 冬牧70黑麦与中新830耗水量和生物量积累规律

中新 830 小黑麦(*Triticale-830*)和冬牧 70 黑麦(*secale cereale.l.cv. wiatergrazer-70*)能充分利用初冬和早春低温期的光热资源，具有耐低温速生的特性，通过在试验站多年试种，表现良好。其中，中新 830 小黑麦是较好的晚熟品种，冬牧 70 黑麦是表现比较好的早熟品种，可以和多种作物轮作，既不影响作物生产又能填补冬春青饲料的不足，在冬闲田地利用中占据重要地位。

4.4.1 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦耗水量与耗水规律

通过蒸发器的测量，2005-2006 年冬牧 70 黑麦全生育期耗水量为 380.6mm，中新 830 小黑麦为 367.1mm。图 4.4 为这两种牧草耗水量累计值变化规律。

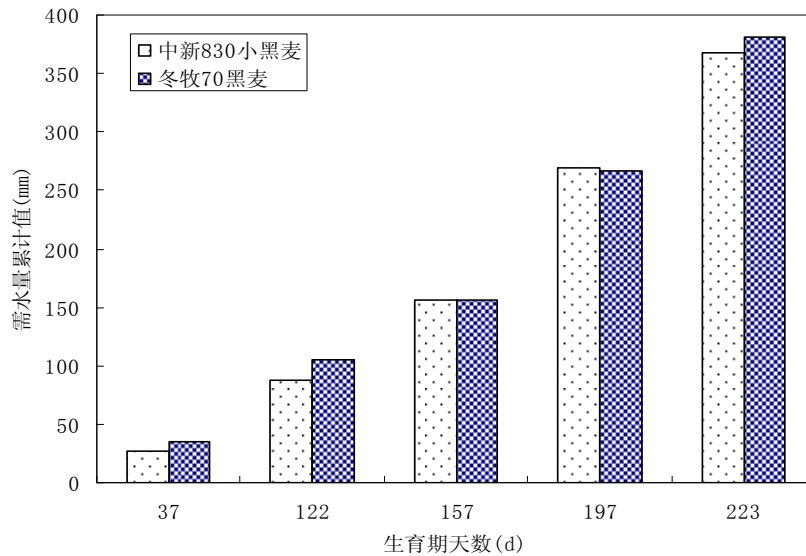


图 4.4 冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦需水量累计值变化

Fig.4.4 Accumulative water demand for Wiatergazer-70 and Triticate-830

两种牧草于 2005 年 11 月 18 日播种, 2006 年 5 月 29 日收获。冬牧 70 在播种后的 122 天耗水量比中新 830 大, 但此后中新 830 的日耗水量比冬牧 70 增加快, 至 157 天返青期二者耗水量持平, 197 天孕穗期中新 830 累计耗水量超过冬牧 70。牧草的耗水量与牧草的生长进程关系密切, 累计耗水量的多少反应了牧草的生长速度。

表 4-6 是在土壤水分适宜条件下冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦各生育期的耗水强度。从表中可知, 牧草幼苗期和越冬期, 由于叶面积指数较小、气温低、

表 4.6 冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦耗水强度(mm · d⁻¹)

Table 4.6 Accumulative ET for Wiatergazer-70 and Triticate-830

生育期	苗期	越冬期	返青—拔节	孕穗—开花	灌浆—乳熟	全生育期平均
冬牧 70 黑麦	0.87	0.84	1.44	2.83	4.38	1.71
中新 830 小黑麦	0.71	0.71	1.41	3.43	5.17	1.65

耗水强度变化不大, 冬牧 70 黑麦耗水强度为 0.87-0.84mm · d⁻¹, 中新 830 小黑麦的耗水强度为 0.71 mm · d⁻¹; 自返青后, 随着气温的增高和生长速度的加快, 牧草耗水量随之增多, 到灌浆-乳熟期达到最大, 冬牧 70 黑麦耗水强度达 4.38 mm · d⁻¹, 中新 830 小黑麦达 5.17 mm · d⁻¹; 全生育期耗水强度冬牧 70 黑麦为 1.71 mm · d⁻¹, 中新 830 小黑麦为 1.65 mm · d⁻¹。

4.4.2 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的耗水模系数

耗水模系数是作物各生育阶段耗水量占总耗水量的权重,它不仅反映了作物各生育阶段的蓄水特性与要求,也反映出不同生育阶段对水分的敏感性。

表 4-7. 冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦耗水模系数(%)

Table 4.7 Accumulative water demand for Wiatergazer-70 and Triticale-830

生育期	苗期	越冬期	返青—拔节	孕穗—开花	灌浆—乳熟	全生育期
冬牧 70 黑麦	8.51	18.66	13.22	29.69	29.92	100
中新 830 小黑麦	7.18	16.50	18.77	30.81	26.92	100

由表 4-7 可知,冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦苗期耗水模系数分别为 9.00% 和 7.18%,越冬期长达 85d,但是模系数分别为 18.55%和 16.50%。

耗水模系数主要决定于牧草的耗水强度和生育时段的长短。总体来看,两种牧草的耗水模系数的变化趋于一致。拔节至乳熟期为 52d, 占全生育期天数的 23.32%, 但耗水量却占全生育期的 59.31%和 57.55%。

4.4.3 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的作物系数(Kc)

中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦各生育期的 Kc 值计算结果列于表 4-8。由表中可知,两种牧草苗期至返青期 Kc 值接近,变化在 0.5 上下。返青后逐渐增大,灌浆-乳熟期达到最大值,冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦分别为 1.33 和 1.55。全生育期 Kc 平均值分别为 0.94 和 0.90。Kc 值的确定为华北平原两种牧草的需水估算提供了依据。

表 4-8 各生育阶段的作物系数(Kc)

Table 4.8 Crop coefficient for Wiatergazer-70 and Triticale-830

生育期	苗期	越冬期	返青—拔节	孕穗—开花	灌浆—乳熟	全生育期
冬牧 70 黑麦	0.55	0.59	0.44	0.92	1.33	0.94
中新 830 小黑麦	0.42	0.51	0.50	1.02	1.55	0.90

4.4.4 中新 830 小黑麦和冬牧 70 黑麦的水分利用效率

冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦是水分利用效率较高的牧草,全生长期(生长

表 4-9 成熟期收割的水分利用效率

Table 4.9 Accumulative water demand for Wiatergazer-70 and Triticale-830

牧草名称	刈割日期	生长天数	生物产量	耗水量	水分利用效率
中新 830 小黑麦	5.29	223	15.63	367.1	42.58
冬牧 70 黑麦	5.29	223	14.14	380.6	37.15

期 223d)的水分利用效率分别为 $36.97\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $42.59\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (表 4-9)。

刈割两茬的和一次性收割的水分利用效率见表 4-10, 4-11, 刈割两茬的水分利用

表 4-10 刈割两次的水分利用效率

Table 4.4 Accumulative water demand for Wiatergazer-70 and Triticale-830

牧草名称	生长天数 (d)	生物产量 (t · hm ⁻²)	耗水量 (mm)	水分利用效率 (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
中新 830 小黑麦	203	26.05	285.5	91.24
冬牧 70 黑麦	203	18.92	264.1	71.64

效率高于只刈割一次的, 中新 830 的耗水量与冬牧 70 接近, 但是由于产量高, 所以水分利用效率教冬牧 70 高。

表 4-11. 一次性收割的水分利用效率

Table 4.4 Accumulative water demand for Wiatergazer-70 and Triticale-830

牧草名称	生长天数 (d)	生物产量 (t · hm ⁻²)	耗水量 (mm)	水分利用效率 (kg · hm ⁻² · mm)
中新 830 小黑麦	177	8.70	185.0	47.04
冬牧 70 黑麦	177	5.67	202.8	27.96

4.5 本章小结

1) 多年生牧草生育期的耗水量比一年生的牧草普遍要高。牧草不同降雨条件下耗水量不同, 黑麦、青饲玉米和串叶松香草耗水量干旱季高于平常年份, 多雨条件耗水量最低, 但是小黑麦、籽粒苋和苜蓿的规律略有不同, 平常年份的耗水量最高, 少雨条件下次之, 湿润年份最少; 高丹草在多雨条件的耗水量却高于少雨条件下和平常年份。

2) 牧草在不同降雨类型的日均耗水量分析表明, 一年生牧草的日均耗水量, 少雨条件下最高, 除黑麦和高丹草外, 其他牧草均是多雨条件的日耗水量最小。多年生牧草串叶松香草和苜蓿, 平常的日均耗水量最高, 其次是少雨条件下, 多雨条件的最低。

3) 干旱(生育期内降雨量小)会造成一年生牧草的生育期提前,黑麦和小黑麦在少雨条件下成熟期比其他季节要提前 2 至 10 天,高丹草和青饲玉米生育期比其他季节提前 2 至 13 天,而籽粒苋则提前 28 至 76 天。

4) 作物系数 K_c : 根据试验结果,平常各牧草的蒸发量基本上等同于 E601 水面蒸发量,除苜蓿略高外,其差值一般小于 9%,此时,牧草耗水量可以直接参考当地的 E601 水面蒸发量。冬牧 70 黑 K_c 值少雨条件下最大,多雨条件次之,平常最小;其余牧草 K_c 值少雨条件下最大,平常次之,多雨条件最小,在多雨条件其耗水量小于同期的 E601 水面蒸发量。

5) 灌溉需求量,高丹草在该地区除了少雨条件下需要少量的灌溉以外,其他季节不需要灌。籽粒苋、青饲玉米和串叶松香草多雨条件不需要灌溉,平常年份需要少量的灌溉,灌水需求主要在少雨条件下。中新 830 和冬牧 70 不论干湿季节降雨均达不到生长所消耗的水量,需要灌溉才能维持生长和达到较好的产量,冬牧 70 黑麦生育期内的灌溉需求在 221.5-316.3mm,多雨条件灌溉量稍高;中新 830 小黑麦为 170.1-280.7mm。苜蓿在多雨条件仍然需要微量的灌溉。苜蓿在多雨条件基本不需要灌溉,平常灌溉量为 380.1mm,多雨条件需要 445.0mm。

6) 冬牧 70 黑麦和中新 830 小黑麦在不同季节的水分利用效率规律一致,即多雨条件 WUE_y 最高,少雨条件下最低;高丹草和籽粒苋的水分利用效率也是多雨条件最高,但少雨条件下的水分利用效率并不是最低的;多年生牧草的水分利用效率在少雨条件下却是最高。串叶松香草平常接近干旱状况,多雨条件最低,苜蓿却是在平常最低。青饲玉米在平常的水分利用效率最高,达到 $62.0 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$,并且在少雨条件下和多雨条件的 WUE_y 均是一年生牧草中较高的。

7) 试验结果表明,冬牧 70 黑麦返青期比中新 830 小黑麦提前 15d 左右,全生育期中新 830 小黑麦耗水量为 367.1mm,水分利用效率达 $72.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$;冬牧 70 黑麦分别为 380.6mm、 $49.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。4 月中旬收割,冬牧 70 黑麦耗水量为 202.8mm;中新 830 小黑麦耗水量为 185.0mm。这两种牧草可以适应华北平原的棉花等春播作物的种植,是解决华北平原早春淡季青绿饲草的供应和冬闲田地开发利用的首选优质牧草。

第五章 不同牧草种植系统土壤质量与氮素平衡

目前, 比较公认的土地质量的概念, 是 1991 和 1992 年在美国召开的土壤质量(Soil Quality)会议, 以及 Doran 和 Parkin 在 1994 年刊行的《土壤质量与持续环境》一书中给出的概念。所谓土壤质量, 是土壤在生态系统的范围内, 维持植物和动物的生产力、保护环境质量以及促进动植物(包括人类)健康的能力 (Doran & Parkin, 1994; 赵其国, 1997; 曹志洪, 2002; 刘世梁, 2006)。土壤质量的诊断分为描述性和分析性两部分, 其中分析性指标包括物理学、化学和生物学的指标。Singer 和 Ewing(1999) 给出了土壤质量分析常用的指标见表 5.1 (Singer & Ewing, 1999; 张华, 张甘霖, 2001)。土壤质量状况是农田生态系统健康评价的重要内容, 是农业可持续发展的基础。

表 5.1 常用土壤质量分析性指标

Table 5.1 Commonly used indicators of soil quality analysis

土壤质量物理指标	土壤质量化学指标	土壤质量生物学指标
通气性	盐基饱和度(BS%)	有机碳
团聚稳定性	阳离子交换量(CEC)	生物量
容重	污染物有效性	C 和 N
粘土矿物学性质	污染物浓度	总生物量
颜色	污染物活动性	细菌
湿度	污染物活动状态	真菌
障碍层深度	交换性钠百分率(ESP)	潜在可矿化 N
导水率	养分循环速率	土壤呼吸
氧扩散率	pH	酶
粒径分布	植物养分有效性	脱氢酶
渗透阻力	植物养分含量	磷酸酶
孔隙连通性	钠交换比(SAR)	硫酸脂酶
孔径分布		生物碳/总有机
土壤强度		呼吸/生物量
土壤耕性		微生物群落指纹
结构体类型		培养基利用率
温度		脂肪酸分析
总孔隙度		氨基酸分析
持水性		

土壤 N 循环是 N 生物地球化学循环中的重要环节, 其模拟是作物估产、环境评价、农田管理、决策制定和长期预测的重要依据, 对提高氮肥利用率、防止或减轻环境污染具有重要的理论和实践意义。

本章的目的在于查明牧草种植的各个系统自 2005 年种植以来的氮收支与氮平衡是怎样的，对环境到底有何影响。

本研究对人工牧草土壤的部分质量指标进行了测定，研究人工牧草种植对土壤质量的改变，为农田生态系统健康评价提供依据。其中微生物脂肪酸的分析结果将在第 7 章生物多样性中介绍。

5.1 不同牧草种植系统与土壤物理性状

土壤容重是指土壤在未受到破坏的自然结构的情况下，单位体积中的重量，通常以 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 表示，其高低是判断土壤坚实度的指标之一。一般来讲，容重小的土壤具有较大的非毛管空隙度，有利于土壤的气体交换和渗透性的提高。

牧草、牧草与作物轮作，因种植方式和牧草特性不同，其种植系统对土壤容重影响不同。其中多年生牧草和串叶松香草种植后几年不再耕作；轮作的牧草，除了青饲玉米为点播免耕外，其他牧草均为是耕作后播种。保护行采用免耕机械播种。

2009 年 5 月 18 至 20 日土壤容重测定的结果如图 5.1，苜蓿(CM)和串叶松香草(CS)耕层的土壤容重 $1.35\text{-}1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右，自表层至 20cm，容重有所增加，20cm 以下，土壤容重略有减少，40cm 以后容重趋于稳定在 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。一年生牧草轮作系统 0-10cm 土壤容重 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右，10-20cm 略有增加，20cm 以下开始降低。保护行小麦—玉米轮作系统(WM)，因免耕秸秆还田，0-5cm 秸秆丰富，容重最小，只有 $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，10cm 以下容重趋大，是几个系统中最大的。

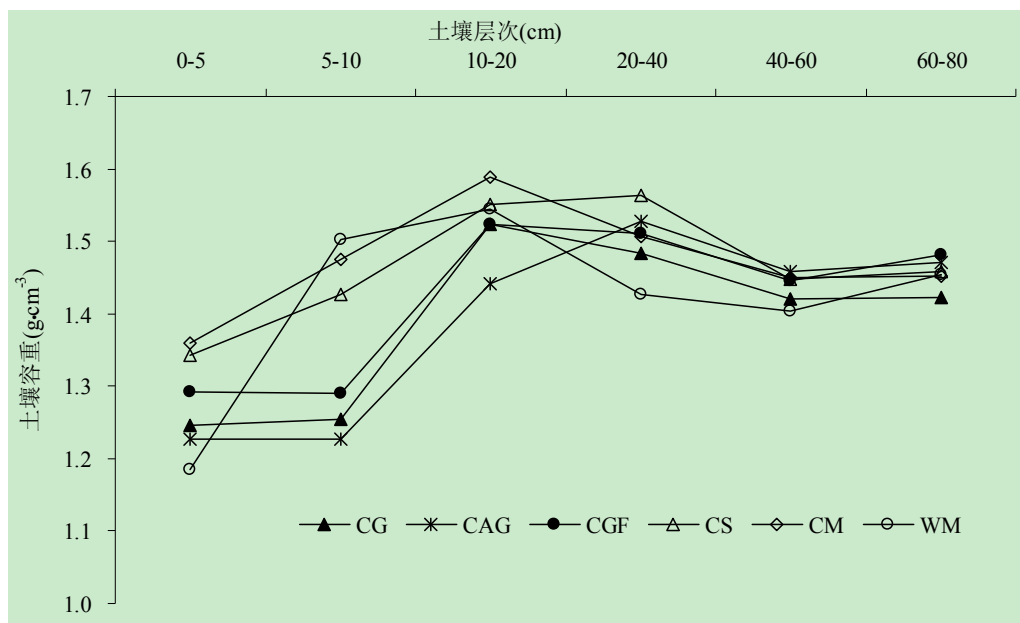


图 5.1 不同种植系统的土壤容重层次变化

Fig 5.1 Variation of soil bulk density at different soil levels

牧草轮作系统，耕作层容重减少明显；保护行免耕作物种植，0-5cm 容重减少最明显，但 5cm 以下土壤容重比其它两系统都大；多年生牧草种植系统对容重的影响，介于以上两者之间。可见免耕能增加表层土壤的透气性，降低表层土壤的容重。牧草的种植降低了 5-10cm 土壤的容重，与传统小麦—玉米轮作相比，牧草轮作系统降低了 $0.21\text{--}0.28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，串叶松香草降低了 $0.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，苜蓿降低 $0.03\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。表明牧草种植能改善土壤表层的状况，利于根系的深入和营养的吸收。需要指出，供试的牧草种植仅四年，其有机质积累和根系对土壤容重的影响还需作进一步观测。

5.2 不同牧草种植系统对土壤养分的影响

5.2.1 牧草种植前后 0-20cm 土壤养分和盐分的变化

比较 2005 年播种时各小区的 0-20cm 土壤养分状况，与 2009 年的平均状况相比(表 5.2)，2009 年的资料为牧草各小区的含量的平均值。由表可知，在牧草种植 5 年以后，土壤各养分的平均值变化为：有机质和全氮、全磷分别增加 6.82%、12.50%、5.26%，全钾的含量有所减少，少 1.28%。pH 有所增加，增加 2.23%，含盐量减少 45.45%。

表 5.2 试验地 2005 与 2009 年 0-20cm 土壤养分和盐分的比较

Table 5.2 Soil nutrient and salinity comparison by 0-20cm soil layers from 2005 to 2009

0-20 (cm)	有机质 (%)	全 N (%)	全 P ₂ O ₅ (%)	全 K ₂ O (%)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	PH 值	电导率 (ms/cm)	含盐量 (%)
2005	1.320	0.080	0.190	2.35	48.12	21.96	144.21	8.5	0.36	0.11
CG	1.383	0.088	0.209	2.32	81.17	19.65	62.00	8.6	0.17	0.05
CAG	1.379	0.088	0.212	2.35	71.53	18.23	60.80	8.7	0.18	0.06
CGF	1.417	0.089	0.205	2.31	75.79	13.83	72.25	8.8	0.16	0.05
CS	1.364	0.089	0.185	2.33	64.20	11.20	93.30	8.7	0.22	0.07
CM	1.438	0.096	0.193	2.28	71.71	8.30	81.98	8.7	0.18	0.06
WM	1.670	0.091	0.238	2.35	76.38	22.27	129.00	8.5	0.20	0.07
2009 平均	1.410	0.090	0.200	2.32	72.37	14.29	77.90	8.7	0.18	0.06

对各个种植系统而言，有机质和全氮含量每个种植系统有不同程度的增加，有机质增加最多的是传统的小麦玉米轮作系统，增加了 26.54%，其次是苜蓿，而全氮含量苜蓿增加的最多。全磷含量轮作系统增加在 7.88-25.48%之间，而串叶松香草却比 2005 年减少了 2.69%。全钾和速效钾含量均有略微的减少。碱解氮均有 33%-70%的增加。而速效磷除了 WM 系统，其他系统均有不同程度的减少。牧草系统种植使得土壤的 pH 值略有上升，而传统农田系统下降了 0.35%。电导率和含盐量均降低有一半左右。

5.2.2 不同牧草种植系统的土壤养分分析

不同牧草种植系统与不同土壤层的营养物质含量测试结果如表 5.3。

表 5.3 不同牧草种植系统土壤养分和盐分的比较

Table 5.3 Soil nutrient and salinity comparison for different cropping systems

土层 (cm)		CG	CAG	CGF	CS	CM		CG	CAG	CGF	CS	CM
0-5	有机 质(%)	1.58	1.52	1.59	1.80	1.92	碱解 N (mg/kg)	97.86	89.63	91.75	93.10	94.40
5-10		1.40	1.43	1.48	1.33	1.39		81.93	71.84	75.12	59.93	75.34
10-20		1.17	1.19	1.18	0.96	1.00		63.74	53.13	60.50	39.58	45.38
0-5	N (%)	0.09	0.10	0.10	0.11	0.13	速效 P (mg/kg)	22.29	21.46	17.91	15.80	9.52
5-10		0.09	0.09	0.09	0.09	0.09		24.93	20.15	13.84	9.64	7.91
10-20		0.08	0.07	0.07	0.06	0.07		11.73	13.09	9.75	8.15	7.48
0-5	K ₂ O (%)	2.35	2.43	2.34	2.39	2.34	速效 K (mg/kg)	67.60	71.20	81.11	144.33	103.93
5-10		2.25	2.30	2.31	2.31	2.27		57.40	54.40	72.43	72.07	73.27
10-20		2.37	2.32	2.28	2.28	2.24		61.00	56.80	63.20	63.50	68.73
0-5	P ₂ O ₅	0.22	0.22	0.21	0.22	0.20	电导率	0.13	0.13	0.15	0.17	0.17

5-10	(%)	0.22	0.21	0.21	0.17	0.19	(ms/cm)	0.16	0.19	0.14	0.24	0.17
10-20		0.19	0.20	0.19	0.17	0.18		0.22	0.22	0.19	0.26	0.20
0-5		8.55	8.72	8.69	8.58	8.67	含盐量 (%)	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06
5-10	pH 值	8.69	8.74	8.81	8.70	8.71		0.05	0.06	0.05	0.08	0.06
10-20		8.69	8.75	8.83	8.78	8.76		0.07	0.07	0.06	0.09	0.07

注：CAG 一年生苋科-禾本科牧草轮作系统，CG 代表一年生禾本科牧草轮作系统，CGF 一年生禾本科牧草与多年生牧草轮作系统，CM 多年生苜蓿，CS 多年生串叶松香草。

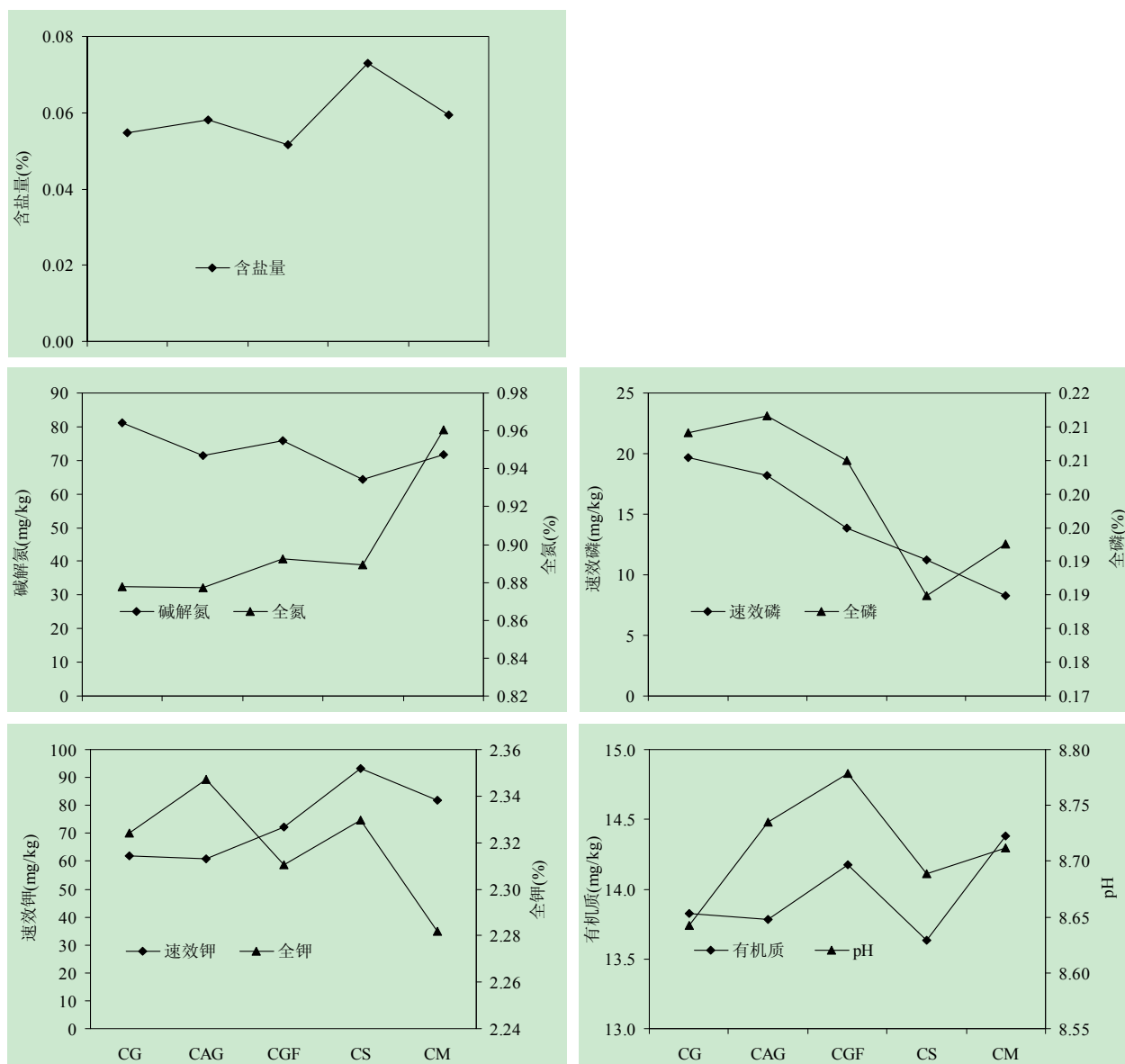


图 5.2 不同种植系统的土壤养分(0-20cm)

Fig 5.2 Variation of soil nutrition for different cropping systems(0-20cm)

表 5.3 和图 5.2 显示：

有机质：表 5.3 显示，以多年生牧草（苜蓿和串叶松香草）种植的 0--5cm 土壤有机质含量（1.8—1.9%）高于几种禾本科牧草种植的土地。但 5—10cm、10-20cm

的有机质含量，几种禾本科牧草种植土壤（1.48%、1.19%）高于多年生牧草种植土壤（1.33%、0.96%）。从 0-20cm 有机质含量分布图看，也是多年生牧草种植土壤含量最高，表明多年生牧草有利于有机质积累，但因土壤不翻动，与禾本科牧草轮作相比，有机质多集中在上层土壤。

氮元素：全氮，0-5 cm 土层，以多年生牧草种植土壤含量（0.13%）高于禾本科牧草种植（0.09%），5cm 以下，各种种植土壤的全氮含量差异不明显（0.95、0.6-0.7%）。速效氮，0-5 cm 土层，多年生牧草种植土壤含量（94.4 mg/kg）低于一年生禾本科牧草（97.86 mg/kg），但高于两种轮作牧草。5-10 cm、10-20 cm 多年生草土壤速效氮（59.93 mg/kg、39.58 mg/kg）均低于禾本科牧草（81.93 mg/kg、63.74 mg/kg）。从氮元素在 0-20 cm 含量分布看，全氮以多年生牧草种植土壤最高。速效氮则是禾本科牧草种植高于多年生牧草种植土壤。对这一结果的合理解释是，多年生牧草属豆科作物（苜蓿），既能固定氮（有机），也比禾本科牧草消耗较多的氮（速效）。

磷元素：全磷（ P_2O_5 ），0-5 cm 土壤的全磷含量，几种牧草之间没明显差异（0.1—0.2%）。5-10 cm、10-20 cm 土壤，多年生牧草（0.17%、0.19%）低于禾本科牧草（0.19%、0.22%）。速效磷，三个土层的含量，都是多年生牧草（7.48 mg/kg、15.8 mg/kg）明显低于禾本科牧草（9.75 mg/kg、24.93 mg/kg）。从磷元素在 0-20 cm 含量分布看，三种禾本科种植的全磷、速效磷均高于多年生牧草。这表明多年生牧草对磷元素消耗高于禾本科牧草，黄淮海平原土壤中磷元素相对较缺，长期种植牧草，对磷元素消耗与积累问题值得研究。

钾元素：全钾（ K_2O ），三个土层全钾含量（2.34%、2.27%、2.24%）均是多年生牧草低于禾本科牧草种植（2.43%、2.31%、2.37%）。速效钾，各层含量则是多年生牧草（114.33 mg/kg、73.27 mg/kg、68.73 mg/kg）明显高于禾本科牧草种植（81.11 mg/kg、72.41 mg/kg、63.20 mg/kg）。从钾元素在 0-20 cm 土层分布看，也是禾本科牧草种植高于多年生牧草。速效钾则是禾本科牧草种植低于多年生牧草种植。表明禾本科牧草既利于钾（有机）积累，也消耗较多钾（速效）。

含盐量：3 个轮作系统的各层土壤含盐量比较接近。其中苜蓿和串叶松香草系统的盐分含量稍高。从总体看，含盐量均在 0.09% 以下，已属非盐渍化土壤，已

无盐碱危害。但对以后的土壤盐分动态还需继续监测, 因为试区曾是盐渍化区, 每项农业措施的改变, 都需对土壤盐分的动态作较长期的监测。

全磷, 速效氮和速效磷含量从表层 0-5cm 到 5-10cm, 至 10-20cm 依次降低。而全钾禾本科轮作系统(CG)10-20cm 最高, 表层次之, 5-10cm 最低, 苋科禾本科轮作系统(CAG)表层最高, 中层次之, 10-20cm 又开始增加, 速效钾也有相同的规律, 其他种植系统的钾含量都是从表层至 20cm 依次降低。pH 几个种植系统规律相同, 即随着层次的增加, 值越高。电导率基本越往表层, 值越小。含盐量随着层次的增加而增加。

含盐量, 3 个轮作系统比较接近, 而苜蓿和串叶松香草系统的盐分含量稍高, 其中串叶松香草含量高于苜蓿。5 个系统的速效钾规律与含盐量基本一致, 但全钾含量禾本科与多年生牧草轮作系统比其他轮作系统稍低, 并且低于串叶松香草土壤全钾的含量, 苜蓿是系统中最低的。碱解氮 5 个系统比较接近, 略有浮动, 土壤全氮苜蓿含量最高, 并且远高于其他系统, 显除了豆科牧草的固氮优势。速效磷和全磷含量轮作系统的较多年生的高, 其中苜蓿的全磷比串叶松香草要高, 速效磷略低。土壤有机质的大小与 pH 有相同的规律。

5.3 不同牧草种植系统对土壤微生物量碳、氮的影响

土壤微生物生物量碳、氮在土壤全碳和全氮含量中所占的比例很小, 但它是土壤有机质中最为活跃的部分, 它调节着土壤养分的释放和吸储, 对提高土壤养分的生物有效性和利用率起着积极的作用。土壤微生物生物量可以反映出土壤养分有效性状况以及土壤生物活性, 是土壤质量的敏感性指标, 农田生态系统微生物数量的变化影响着系统的物质循环和能量的流动。土壤微生物量碳(Soil microbial biomass C)是指土壤中所有活微生物体中碳的总量, 通常占微生物干物质的 40%~45%, 是反映土壤微生物生物量大小的最重要的指标。微生物量氮(Soil microbial biomass N)是指土壤中所有活微生物体内所含有的氮的总量, 其含量能够综合体现土壤微生物对氮素的矿化和固持作用。

5.3.1 牧草种植前后 0-20cm 土壤养分和盐分的变化

对 2008 年 9 月 20 日所采土壤样品进行分析, 得出 0-20cm 土壤微生物碳、

氮的含量分别为 $140\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$, $45.70\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 。不同种植系统的微生物碳、氮含量均是表层 0-5cm 最高, 都在 $150\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以上, 5-10cm、10-20cm 依次降低 (图 5.3)。

表层微生物碳含量苜蓿与禾本科轮作(CAG)系统的最高, 苜蓿次之; 其他 3 个系统的比较接近, 5-10cm 土壤微生物碳的含量, 各系统的差别不大; 10-20cm 土壤, 禾本科与多年生轮作(CGF), 苜蓿(CM)系统的稍高, 其他系统较接近。微生物氮含量表层串叶松香草最高, 其他系统较为接近, 5-10cm、10-20cm 土壤的微生物氮含量, 轮作系统的较多年生的高。

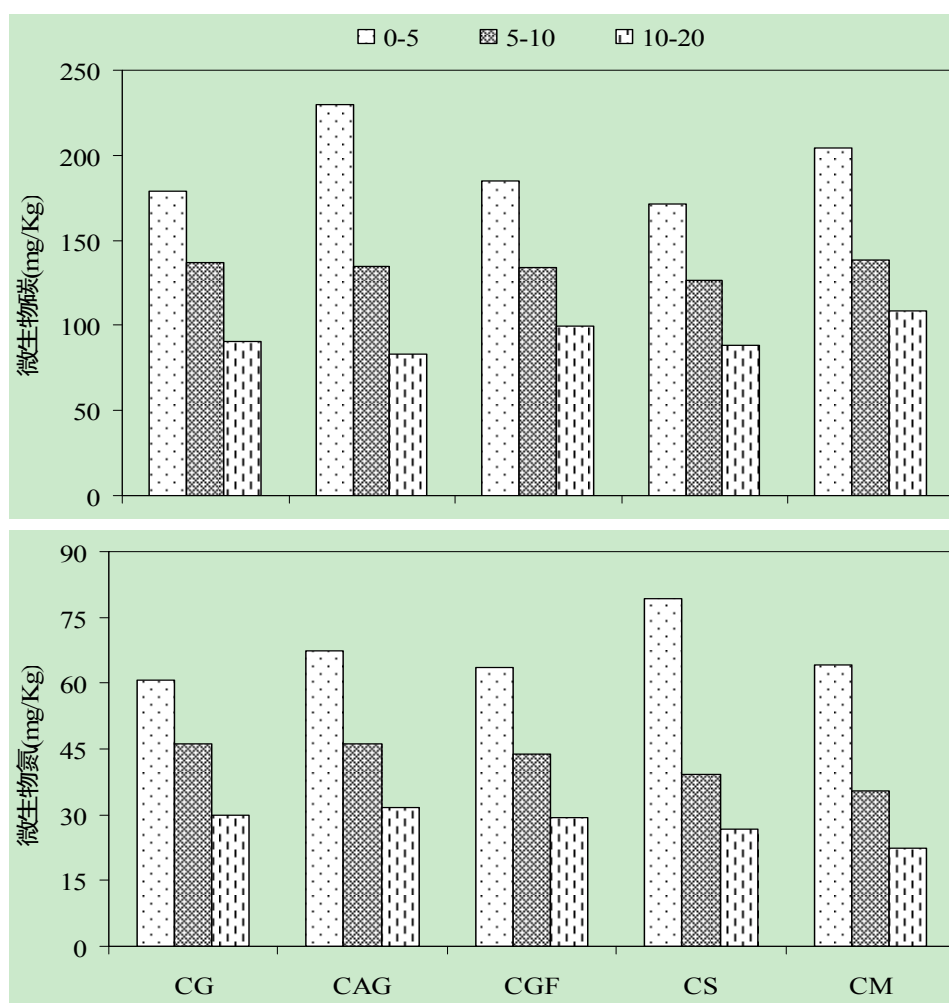


图 5.3 不同种植系统的土壤微生物碳、氮的含量

Fig 5.3 Variation of soil microbial carbon and nitrogen content for different cropping systems

5.3.2 牧草种植系统微生物碳氮比(MBC / MBN)

土壤微生物碳氮比(MBC/ MBN)层次之间并没有明显的规律,除了轮作系统 CAG 是从表层到低层降低以外,其他系统均是从表层往下比值不断增高。高的微生物碳氮比(MBC/ MBN)表明土壤微生物中包含较多的真菌,较低的比值表

表 5.4 不同种植系统的土壤微生物碳、氮的比值

Table 5.4 The ratio of soil microbial carbon and nitrogen for different cropping systems					
土壤层次 (cm)	牧草种植系统				
	CG	CAG	CGF	CS	CM
0-5	2.94	3.41	2.90	2.16	3.19
5-10	2.96	2.92	3.06	3.23	3.92
10-20	3.03	2.61	3.38	3.31	4.86

明有大量的细菌存在于微生物群落中(Cmapbelletal., 1991),因此,说明多年生牧草的细菌数量表层较高,越往低层真菌越多。

MBC/ MBN 的提高也许是说明植物和土壤微生物之间存在竞争,更高的 MBC/MBN 比值表明微生物量固持氮的潜力更大,而更低的 MBC/M BN 比值说明微生物量释放氮的潜能更大(Friedel et al.,2001)。

5.4 牧草不同种植系统下的氮收支与平衡

5.4.1 牧草种植系统的氮收支项目

不同种植系统的氮收支其实是以试验小区为单元的,是田块尺度的氮平衡。将一个试验小区作为一个系统来看待,见图 5.4,示意图的方框为系统的边界,黑色的粗线为地面,箭头指向系统内部的为收入(共 7 项),箭头由系统指向外部的为支出(共 4 项)。

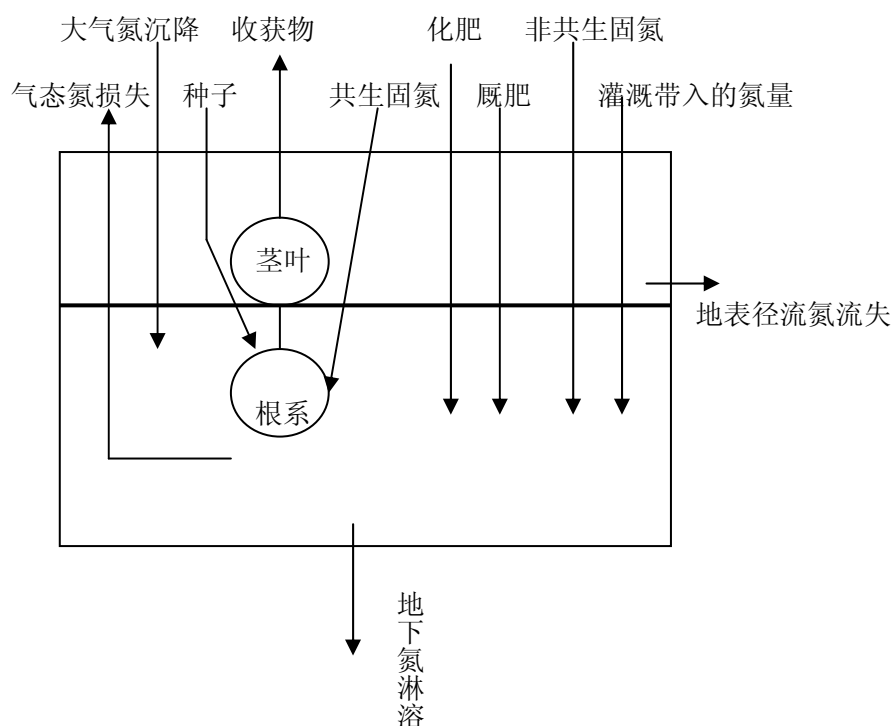


图 5.4. 系统的氮输入与输出示意图

Fig.5.4 Schematic representation of the components of the plant-soil system and inputs and outputs of N for the N budget of the experiment plots.

注：1. 方框为研究的系统边界；2. 箭头指向系统内为 in，指向系统外为 out

由于试验小区无径流产生，所以氮素支出中的地表径流损失为 0，输入项种子、化肥、厩肥和灌溉带入的氮量采用试验观测的数据；共生固氮与非共生固氮、大气氮沉降参考相关文献，结合试验估计数据。输出项目收获带走的氮量采用实测数据计算；气态氮损失、地下淋溶损失采用文献数据。

5.4.2 不同种植系统的氮收支与平衡

氮收支项目中，大气氮沉降量：大气氮沉降包括湿沉降（降雨和降雪）和干沉降，干沉降主要以气态 NO ， N_2O ， NH_3 以及 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 粒子和吸附在其它粒子上的氮；湿沉降主要是 NO_3^- 和 NH_4^+ ，以及少量的可溶性有机氮。氮沉降来源除大气中 N_2 外，工农业生产活动，化石燃料(特别是煤、石油)燃烧所排放的大量氮氧化物，起了巨大的作用。大气氮沉降主要依靠试验监测，在监测站点安装降水降尘自动收集仪，收集然后测定收集的样品的硝态氮和铵态氮的含量。张颖等 (2006) 在华北平原的 9 个监测点测定了大气的氮沉降量，在 $19.2\text{--}38.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ 之间 (张颖,刘学军, 张福锁等, 2006)，本研究取监测站点距离试验站

最近的山东惠民 (37° 29' N, 117° 32' E) 与河北曲周 (36° 52' N, 115° 01' E) 两个站点的平均值 $21.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 。

生物固氮量：豆科植物的根瘤菌共生固氮研究已有一百多年的历史，早在 1886 年，德国植物化学家 Hellriegel 和 Wilfarth 等人研究证明豆科植物根瘤是由细菌感染引起，并能固定大气中的氮素；1888 年，荷兰学者 Beijerinck 从豆科植物根瘤中分离出固氮细菌，并命名为根瘤菌；而在 1895 年 Nobbe 和 Hiltner 将根瘤菌接种剂第一次用于试验室接种生产并在英、美申请了豆科植物接种剂专利 (师尚礼, 2005)。共生固氮量测定方法最早应用最多的是全氮差异法，直到上世纪 40 年代后期和 60 年代中期，先后发展了同位素 ^{15}N 法和乙炔还原法，灵敏度比全氮差异法有很大的提高 (徐福利, 张金水, 吕殿青, 1993)。张婉娴等 (1987) 用全氮法和乙炔还原法测定紫花苜蓿的共生固氮量在 $11.64\text{--}16.04 \text{ kg/亩}$ (张婉娴, 栾双, 1987)；徐福利等 (1993) 利用同位素 ^{15}N 法测出的苜蓿共生固氮量为 $9.36\text{--}18.72 \text{ kg/亩}$ ，平均为 13.59 kg/亩 。本研究紫花苜蓿的年固氮量取 14 kg/亩 。非共生固氮，采用 0.27 kg/亩 (武兰芳, 欧阳竹, 2008)。

气态氮损失：农田的气态氮损失主要有 NH_3 和 N_2O 等，由于试验过程中，追肥采用的是条沟深施， NH_3 挥发甚微，根据文献综合结果，估计底肥损失 2%，黑麦草季的 NH_3 占施氮量的 0.8%，青饲玉米、高丹草和籽粒苋大约在 1.2% (崔玉亭, 李季, 靳乐山, 2000; 苏芳, 丁新泉, 高志岭等, 2007; 王珏, 巨晓棠, 张丽娟等, 2009)，苜蓿和串叶松香草估计在 0.4% 左右 (FAO, 2001; 苏成国, 尹斌, 朱兆良等, 2005)。 N_2O 排放量大约为施肥量的 1% (Dobbie, 1999; 李楠, 陈冠雄, 1993; 侯爱新, 陈冠雄, 1998; 彭世彰, 杨士红, 丁加丽等, 2009)。

N 淋失主要发生在施肥，灌溉和降雨后，在施 N 量小于 225 kg/hm^2 时，淋失量(肥料氮和土壤氮) 按施氮量的 1% 计，施氮量达 225 kg/hm^2 时左右的，按 2% 计算 (袁锋明, 陈子明, 姚造华等, 1995; 沈善敏, 1998; 余贵芳, 毛知耘, 石孝均等, 1999; 朱兆良, 孙波, 2000)，计算结果与张玉铭等 (2006) 试验结果接近，每年 $6\text{--}84 \text{ kg/hm}^2$ (张玉铭, 胡春胜, 张佳宝等, 2006)。

5.4.3 不同种植系统的氮收支与平衡

根据实测数据，参考文献资料，得出牧草五种种植系统的 2005 至 2009，5

表 5.5 牧草不同种植系统年均氮收入与氮支出(2005-2009 年平均)

Table 5.5 Annual inputs and outputs of N for five cropping systems (mean 2005 to 2009)

		CG	CAG	CGF	CS	CM
		kg·hm ⁻² ·y ⁻¹	kg·hm ⁻² ·y ⁻¹	kg·hm ⁻² ·y ⁻¹	kg·hm ⁻² ·y ⁻¹	kg·hm ⁻² ·y ⁻¹
氮收入	种子	3.39	3.38	1.15	0.003	0.11
	化肥	342.0	348.9	216.6	115.6	143.3
	有机肥	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4
	灌溉	1.8	1.9	1.7	1.3	1.9
	氮干湿沉降	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2
	生物固氮	6.4	6.2	86.7	3.2	168.0
	总收入	414.2	421.0	366.8	180.7	373.9
	氮收获	1283.7	807.9	864.7	389.6	469.6
氮支出	淋失	6.4	6.6	4.1	2.2	2.7
	气态损失	7.2	7.4	4.5	2.4	2.7
	总支出	1297.3	821.9	873.3	394.2	475.0
氮平衡		-883.1	-400.9	-506.6	-213.5	-101.1

年间的氮收支明细 (表 5.5)。种子的氮投入与播种次数有很大关系, 一年生牧草轮作系统基本一致, 比多年生的高。化肥投入, 轮作系统主要发生在黑麦播种时的底肥和牧草刈割后的追肥, 多年生牧草的化肥投入主要是播种时的底肥, 以及 2009 年春季的追肥。生物固氮量的大小明显体现了豆科苜蓿和三叶草的固氮优势。总的氮投入一年生牧草轮作系统最高, 串叶松香草最低, 一年生牧草与豆科牧草轮作系统(CGF)与苜蓿系统的投入相当。氮的支出主要是收获移走的氮, 因为牧草系统是提供茎叶为主, 与作物系统不同不存在秸秆还田, 因此不同牧草收获移走的氮是生物量干重与该牧草的氮含量的乘积, 高的产草量和高蛋白质含量都能形成高的氮支出。

计算所得的牧草种植系统的氮平衡都是负值, 说明牧草种植系统氮的收入小于氮的产出, 能有效的利用土壤中的氮。

5.5 本章小结

不同牧草种植系统土壤质量与氮素平衡研究结果表明:

1)牧草种植能改善土壤表层的状况, 使得土壤容重降低, 利于根系的深入和营养的吸收。牧草的种植降低了 5-10cm 土壤的容重。与传统小麦—玉米轮作相比, 牧草轮作系统降低了 0.21-0.28 g·cm⁻³, 串叶松香草降低了 0.08 g·cm⁻³, 苜蓿降低 0.03 g·cm⁻³。

2) 2009 年的土壤养分平均状况与 2005 年比较, 有机质和全氮、全磷分别增加 6.82%、12.50%、5.26%, 全钾的含量有所减少, 少 1.28%。pH 有所增加, 增加 2.23%, 含盐量减少 45.45%。

3) 对 2008 年 9 月 20 日所采土壤样品进行分析表明, 不同种植系统的微生物碳、氮含量均是表层 0-5cm 最高, 都在 $150 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 以上, 5-10cm、10-20cm 依次降低。

4) 苜蓿与禾本科轮作(CAG)系统 0-5cm 微生物碳的含量最高, 苜蓿次之, 其他 3 个系统的比较接近; 5-10cm 各系统的差别不大; 10-20cm 禾本科与多年生轮作(CGF), 苜蓿(CM)系统的稍高, 其他系统较接近。微生物氮含量 0-5cm 串叶松香草最高, 其他系统较为接近, 5-10cm、10-20cm 土壤的微生物氮含量, 轮作系统的较多年生的高。

5) 土壤微生物碳氮比(MBC/MBN)轮作系统 CAG 是从表层到低层降低, 其他系统均是从表层往下比值不断增高。

6) 牧草不同种植系统的 2005 至 2009 年间的氮收支状况表明, 总的氮投入一年生牧草轮作系统最高, 串叶松香草最低, 一年生牧草与豆科牧草轮作系统(CGF)与苜蓿系统的投入相当; 氮的支出主要是收获移走的氮, 高的产草量和高蛋白质含量都能形成高的氮支出。牧草种植系统的氮平衡均为负值, 说明牧草种植系统氮的收入小于氮的产出, 能有效的利用土壤中的氮。

第六章 不同牧草及其种植系统的生物多样性

生物多样性这一概念由美国野生生物学家和保育学家雷蒙德(Ramond.F. D.) 1968 年在其通俗读物《一个不同类型的国度(A different kind of country)》一书中首先使用的。生物多样性是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和, 由遗传(基因)多样性, 物种多样性和生态系统多样性三个层次组成。生物多样性是地球生命的基础, 生物多样性的保护是国际关注的焦点问题之一, 引起了许多国家的重视。

农田生态系统生物多样性是全球生物多样性的重要组成部分, 生物多样性是农业发展的基础。农业生产的集约化是生物多样性丧失的主要驱动力之一(王长永等, 2007), 目前农田地力普遍下降, 生物结构单一, 生物多样性下降。有研究表明农田生物多样性越丰富系统越稳定, 自我调节能力越强(Altieri, 1999)。研究农田生态系统的多样性对农业生产的可持续发展有重要意义。

土壤是农业生产的基础, 土壤微生物结构的多样性是土壤质量判定的新指标和热点问题, 能及时反应土壤的退化程度和肥力水平, 是牧草种植对土壤恢复的功能判别指标之一。牧草引入农田生态系统, 为草田生物病虫害防治提供了途径, 节约了农药的使用, 减少对环境的污染, 并且为维持农田的生物多样性带来了契机。

6.1 不同种植系统土壤的微生物群落的差异

土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的组成部分, 推动着生态系统的能量流动和物质的循环, 维持着生态系统的正常运转, 动植物残体的分解离不开它, 如果没有微生物的分解作用生态系统将失衡崩溃。土壤微生物也是土壤生态系统的重要组成部分之一, 几乎所有的土壤过程都直接或间接地与土壤微生物有关。土壤的结构、通气性、水分状况、养分状况等对土壤微生物均有重要影响(Noah et al., 2003)。近年来, 土壤微生物在养分循环、有害物质综合防治、土壤保持和生态系统恢复等方面的作用, 越来越受到人们的关注(Bardgett, et al, 1999; Boopathy, 2000; 俞慎, 李勇, 王俊华等, 1999; 周丽霞, 丁明懋, 2007; 颜慧, 钟文辉, 李忠佩等, 2008)。土壤微生物群落结构主要指土壤中各主要微生物类群(包括细菌、真菌、放线菌等)在土壤中的数量以及各类群所占的比率, 其结构和功能的变化与土壤

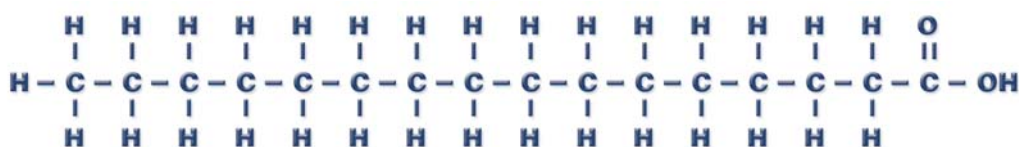
理化性质的变化有关。土壤微生物多样性的试验研究方法大致上包括以下几类：传统的微生物平板纯培养方法、Biolog 微平板分析方法、磷脂脂肪酸(PLFA)分析方法、分子生物学方法等，PLFA方法与其他方法相比更敏感，反应的信息更多，费用适中，近年来是应用的热门。

因此，采用PLFA方法对不同牧草种植系统的21个土壤样品 (CGF鉴定了两个处理)进行了测定，鉴定每个土壤样品的PLFAs的组成及含量，分析不同种植系统土壤微生物群落结构特征，揭示牧草种植下土壤微生物结构特征。

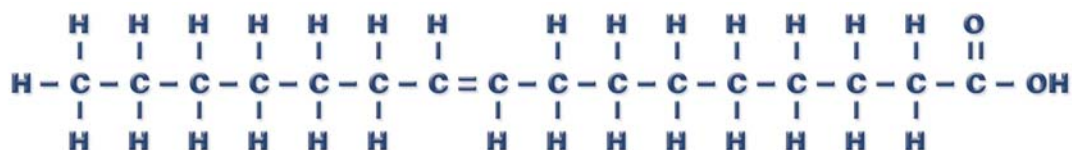
6.1.1 磷脂脂肪酸 (PLFA)的命名和分类

磷脂脂肪酸(phospholipid fattyacids , PLFA)是活体微生物细胞膜的组分，它具有结构多样性和生物特异性，对环境因素敏感，土壤中PLFA的存在及其丰度可揭示特定微生物种或种群的存在及其丰度，可用于了解微生物群落结构。通过对PLFA的定量分析可了解土壤微生物群落结构和微生物生物量。

PLFA一般以总碳数：双键数和双键距离分子末端的位置来命名，c和t分别表示顺式和反式，i和a分别表示支链的异构和反异构，10Me表示一个甲基团在距分子末端第10个碳原子上，cv表示环丙烷脂肪酸等(周丽霞, 丁明懋, 2007)。例如：



有 16 个碳，0 个双键，名称即为 16:0，



有 16 个碳，在距离末端的第 7 个碳上有一个反式的双键，名称即为：16:1 ω 7t。

Microbial ID, Inc. 125 Sandy Drive • Newark, DE 19713

从已有的研究结果可以发现，作为革兰氏阳性细菌的标记 PLFA 大多带有枝链，如：i14:0、a15:0、i15:0、i16:0、i17:0、a17:0；革兰氏阴性细菌的标记 PLFA 含有较大比例的羟基脂肪酸：cy17:0、cy19:0；真菌的 PLFA 大多含不饱和键：16:1 ω 5、18:1 ω 7、18:1 ω 9、18:2 ω 6,9。10Me18:0、16Me16:0 则用作放线菌的标记(王曙光,侯彦林,2004; 钟文辉,蔡祖聪,2004;周丽霞, 丁明懋, 2007)。

6.1.2 不同种植系统土壤PLFA含量及种类

试验一共鉴定了 6 个种植系统的 21 个土壤样品 (CGF 鉴定了两个处理), 每个样品两个重复, 共 42 个 PLFAs, 共检测出 15:0、16:0、17:0、18:0、16:1 ω 7c、16:1 ω 10t、18:1 ω 8c、18:1 ω 8t、18:1 ω 9c、18:1 ω 9t、18:2 ω 6,9、a15:0、a17:0、cy17:0 ω 7c、i16:0、i17:0、i18:0 等 17 种磷脂脂肪酸(图 6.1), 总数共计 324 个。其中真菌 90

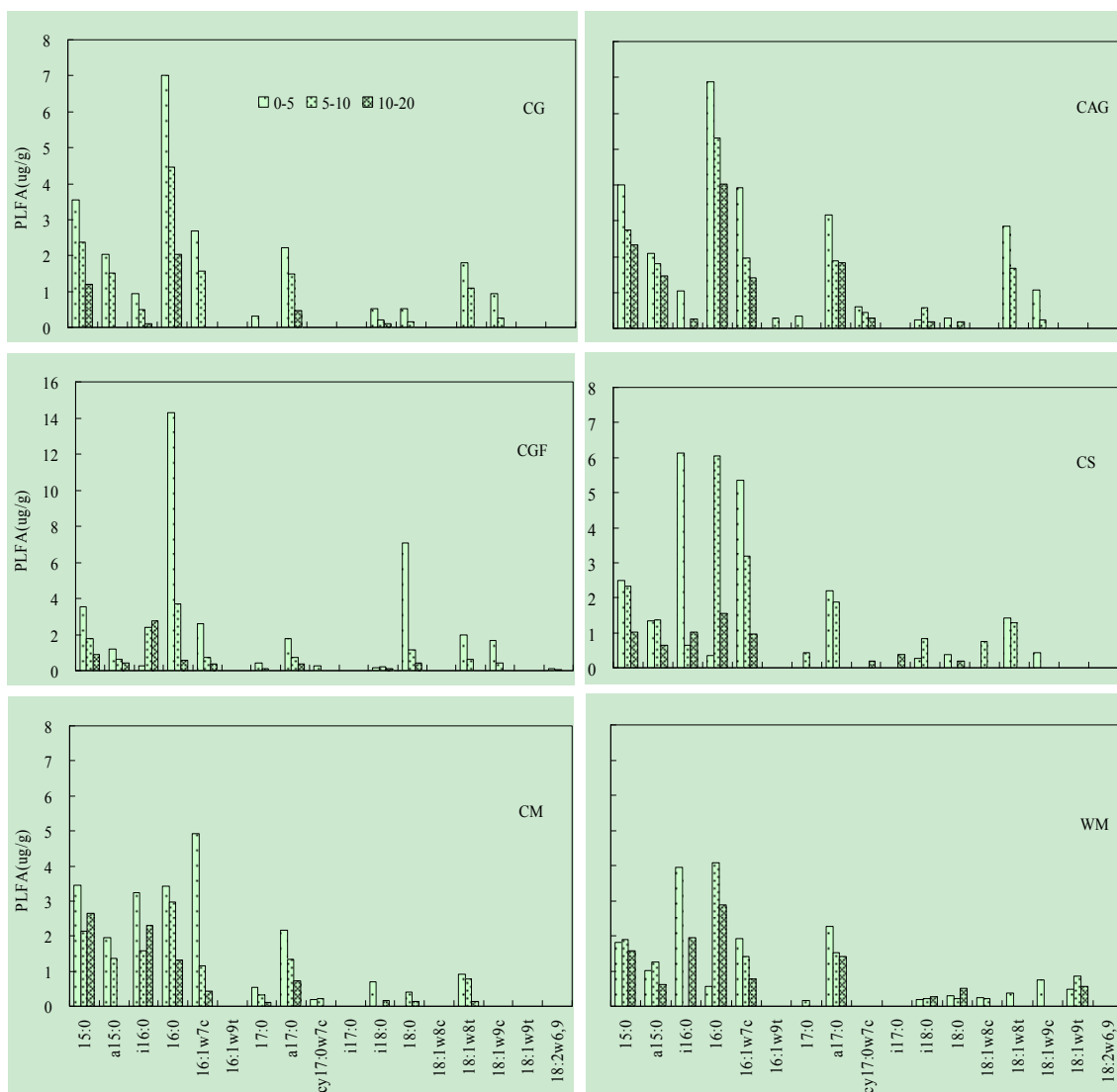


图 6.1 PLFAs 图谱

Fig. 6.1 The PLFAS profile of the tested soils under different layers

个, 革兰氏阳性细菌 116 个, 革兰氏阴性细菌 9 个, 其他细菌 109 个。

检测到的不同种植系统的 PLFA 总个数见图 6.2, CGF 系统的个数是最多的, 另外五个系统的个数比较接近, 在 43-51 之间。在 17 种 PLFA 中, 15:0、16:0、18:0、16:1 ω 7c、18:1 ω 8t、a15:0、a17:0、i16:0、i18:0 等 9 种 PLFA 占到 81-91% 的丰度, 真菌占 28% 的丰度, 其余为不同类型的细菌。

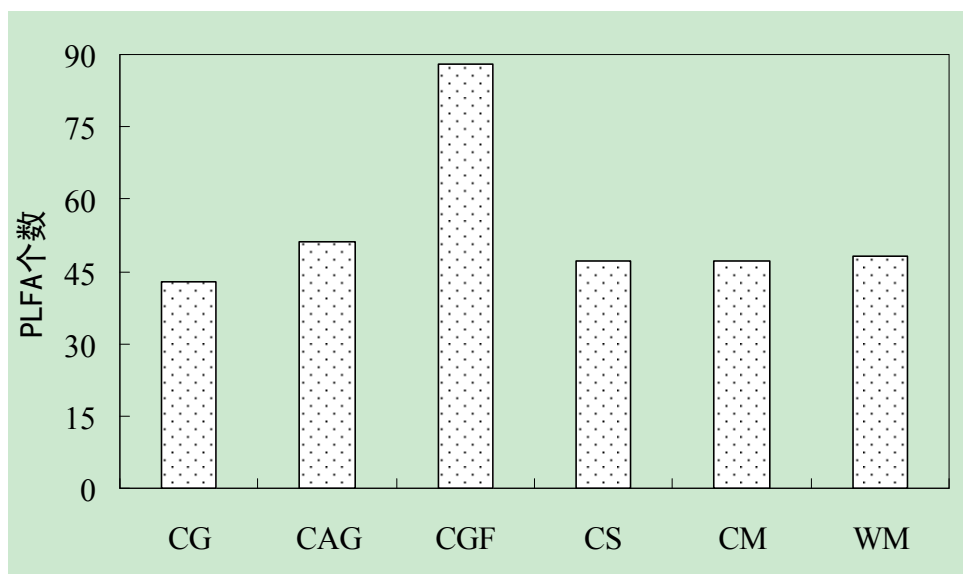


图 6.2 不同种植系统的磷脂脂肪酸个数

Fig. 6.2 Number of PLFAS for six cropping systems

土壤 PLFA 含量最高的是苋科-禾本科牧草轮作系统(CAG), 为 $55.4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次是禾本科与豆科牧草轮作系统(CGF)为 $53.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)、禾本科牧草轮作(CG)和传统小麦玉米轮作系统(WM), 见图 6.3。

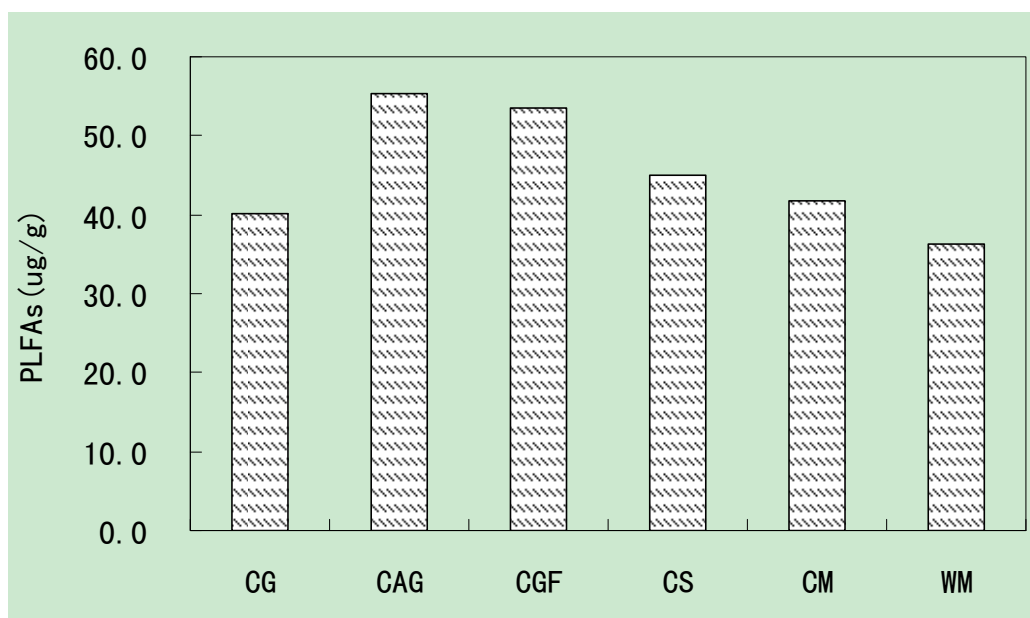


图 6.3 不同种植系统 PLFAs 含量

Fig. 6.3 PLFAS in the soil of six different cropping systems

6.1.3 不同种植系统土壤PLFA主成分分析

6 个种植系统土壤不同层次的 17 种脂肪酸的量主成分分析见图 6.4，第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 两个主成分累计贡献率达到 88.29%，其他种类占 11.71%。

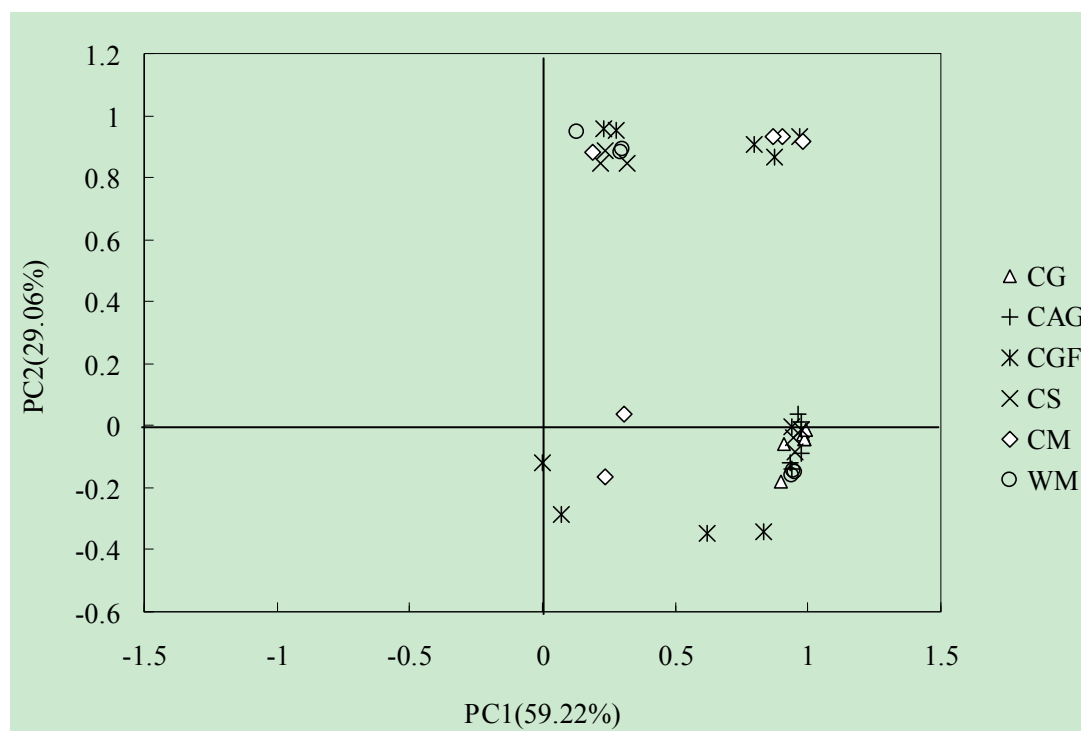


图 6.4 六种植植系统土壤 PLFAs 的主成分分析

Fig. 6.4 Principal component analysis of PLFAs under different cropping systems (PC1 stand for first principal component, PC2 for second principal component)

6.2 牧草和小麦上的蚜虫与天敌种群动态

2008 年 4 月小麦孕穗前后开始，至 2008 年 6 月黑麦草收割，每隔 5 天调查一次牧草与比邻麦田的昆虫种类以及数量。

试验结果见表 7.1，小麦上的猎物密度在 4 月 30 日以后均显著高于牧草，但天敌密度在 4 月下旬至 5 月上旬显著低于牧草，此后逐渐上升，与牧草上的差异不显著；牧草上的天敌在 4 月下旬有下降的趋势。

4 月下旬，三种牧草的天敌密度平均为 18.29 头/平方米，是小麦的 2.93 倍，其中苜蓿、松香草和黑麦草的寄生性天敌密度分别是小麦的 0.67、1.67 和 1.83 倍，但差异不显著；捕食性天敌密度分别是小麦的 4.99、8.64 和 4.32 倍，差异分别为极显著、极显著和显著；天敌总体密度是小麦的 2.11、4.00 和 2.67 倍，

表 7.1 小麦与牧草的天敌与猎物密度比较 (头/m²)Table 7.1 Comparisons of natural enemies and preys density among the wheat and the forage cultivars (individuals/ m²)

调查日期 Date	猎物与天敌 Prey and natural enemy	小麦 Winter wheat	牧草 Forage			平均 Mean
			苜蓿 Alfalfa	串叶松香草 Rosinweed	黑麦草 Winter grazer	
4 月 30 日 30 th April	蚜虫 Aphids	195.14 ± 15.89 a	15.97 ± 3.99 c	20.14 ± 2.37 c	124.31 ± 9.97 b	53.47
	其他猎物 Other preys	45.83 ± 15.40 b	106.94 ± 20.68 a	47.22 ± 11.51 b	46.53 ± 11.02 ab	66.90
	猎物小计 Total preys	240.97 ± 12.49 a	122.92 ± 22.18 b	67.36 ± 9.78 c	170.84 ± 4.61 ab	120.37
	捕食性天敌 Predators	2.09 ± 1.33 c	10.42 ± 2.08 b	18.06 ± 0.80 a	9.03 ± 2.08 b	12.50
	寄生性天敌 Parasites	4.17 ± 0.80 a	2.78 ± 1.61 a	6.95 ± 2.41 a	7.64 ± 1.33 a	5.79
	天敌小计 Total enemies	6.25 ± 1.33 c	13.20 ± 2.86 bc	25.00 ± 1.97 a	16.67 ± 3.40 b	18.29
5 月 5 日 5 th May	蚜虫 Aphids	1460.42 ± 242.97 a	22.92 ± 6.35 c	13.89 ± 5.44 c	130.56 ± 30.70 b	55.79
	其他猎物 Other preys	17.36 ± 6.04 b	140.28 ± 42.70 a	161.81 ± 34.72 a	68.75 ± 24.04 a	123.61
	猎物小计 Total preys	1477.78 ± 247.86 a	163.20 ± 48.05 b	175.69 ± 33.88 b	199.31 ± 16.01 b	179.4
	捕食性天敌 Predators	4.86 ± 1.33 a	5.56 ± 3.00 a	5.56 ± 2.27 a	6.25 ± 3.08 a	5.79
	寄生性天敌 Parasites	4.17 ± 1.79 b	20.14 ± 3.08 a	6.95 ± 2.66 b	6.25 ± 2.37 b	11.11
	天敌小计 Total enemies	9.03 ± 3.08 b	25.70 ± 3.08 a	12.5 ± 4.17 b	12.5 ± 4.61 b	16.90
5 月 10 日 10 th May	蚜虫 Aphids	5064.58 ± 667.22 a	37.50 ± 11.20 c	4.87 ± 0.70 d	205.56 ± 55.29 b	82.64
	其他猎物 Other preys	12.50 ± 5.38 b	121.53 ± 38.81 a	146.53 ± 20.58 a	113.89 ± 55.00 a	127.31
	猎物小计 Total preys	5077.08 ± 664.86 a	159.03 ± 44.77 c	151.39 ± 20.83 c	319.44 ± 68.39 b	209.95
	捕食性天敌 Predators	3.48 ± 0.7 a	0.00 ± 0.00 b	2.78 ± 1.13 ab	4.17 ± 1.79 a	2.32
	寄生性天敌 Parasites	13.89 ± 1.13 a	15.97 ± 4.99 a	7.64 ± 2.37 a	8.33 ± 1.96 a	10.65
	天敌小计 Total enemies	17.36 ± 1.33 a	15.97 ± 4.99 a	10.42 ± 2.86 a	12.50 ± 3.67 a	12.96
5 月 15 日 15 th May	蚜虫 Aphids	7762.50 ± 190.68 a	109.03 ± 17.76 c	11.81 ± 3.08 d	197.92 ± 36.19 b	106.25
	其他猎物 Other preys	22.22 ± 1.13 b	240.97 ± 153.31 a	173.61 ± 22.15 a	236.11 ± 98.02 a	216.90
	猎物小计 Total preys	7784.72 ± 191.42 a	350.00 ± 169.19 bc	185.42 ± 21.56 c	434.03 ± 100.14 b	323.15
	捕食性天敌 Predators	1.39 ± 1.39 a	1.39 ± 1.39 a	5.56 ± 2.27 a	3.48 ± 1.33 a	3.48
	寄生性天敌 Parasites	34.72 ± 7.31 ab	20.14 ± 6.35 b	11.11 ± 1.97 b	47.22 ± 9.82 a	26.16
	天敌小计 Total enemies	36.11 ± 6.61 ab	21.53 ± 6.04 b	16.67 ± 3.00 b	50.70 ± 9.71 a	29.63

注:表中昆虫包括成虫和幼虫(若虫),捕食性天敌包括捕食性昆虫和蜘蛛;其他猎物指蚜虫和天敌以外的昆虫。同一行(即同一日期同一类群)进行比较,字母相同表示差异不显著($\alpha=0.05$)。该数据是与动物所张润志老师课题组合作完成

差异分别为不显著、极显著和显著。5月上旬,三种牧草的天敌密度平均为 16.9 头/平方米,是小麦的 1.87 倍,其中苜蓿、松香草和黑麦草的寄生性密度分别是小麦的 4.83、1.67 和 1.50,差异分别为极显著、不显著和不显著;捕食性天敌密度分别是小麦的 1.14、1.14 和 1.29 倍,差异均不显著;天敌总体密度是小麦的 2.85、1.38 和 1.38 倍,差异分别为极显著、不显著和不显著。结果表明,麦田寄生蜂和瓢虫种群分别滞后于麦蚜 5~10 d 和 15~20 d。寄生蜂和瓢虫种群密度与麦蚜种群增长率呈负相关,其中与瓢虫的相关性显著。小麦抽穗期,天敌密度底、

害益比高是麦蚜种群爆发的重要原因。而此时三种牧草的天敌密度高于麦田的约 2~3 倍,表明牧草在麦蚜种群生态调控中具有潜在利用价值。这可能是由于牧草均为宿根植物,越冬后牧草复苏得比小麦快;越冬后的蚜虫率先在牧草上取食和繁殖,吸引了更多的越冬天敌来此捕食和寄生。

6.3 本章小结

从土壤微生物多样性和牧草昆虫种群动态两方面探讨了牧草生态系统的生物多样性,结果如下:

1) 磷脂脂肪酸采用PLFA分析方法对不同牧草种植系统的土壤样品进行了鉴定,共检测出15:0、16:0、17:0、18:0、16:1 ω 7c、16:1 ω 10t、18:1 ω 8c、18:1 ω 8t、18:1 ω 9c、18:1 ω 9t、18:2 ω 6,9、a15:0、a17:0、cy17:0 ω 7c、i16:0、i17:0、i18:0 等17种磷脂脂肪酸,总数共计324个。在17种PLFA中,15:0、16:0、18:0、16:1 ω 7c、18:1 ω 8t、a15:0、a17:0、i16:0、i18:0等9种PLFA占到81-91%的丰度,真菌占28%的丰度,细菌合计占到72%。

2) PLFA检测出真菌共90个,革兰氏阳性细菌116个,革兰氏阴性细菌9个,其他细菌109个。CGF系统的个数是最多的,另外五个系统的个数比较接近,在43-51之间。

3) PLFA含量最高的是苜科-禾本科牧草轮作系统(CAG),为55.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其次是禾本科与豆科牧草轮作系统(CGF)为53.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)、禾本科牧草轮作(CG)和传统小麦玉米轮作系统(WM)。

4) 6个种植系统土壤不同层次的17种脂肪酸的量主成分分析,第一主成分PC1和第二主成分PC2两个主成分累计贡献率达到88.29%,其他种类占11.71%。

5) 对牧草和小麦的昆虫种类以及数量调查表明,4月底,苜蓿、松香草和黑麦草三种牧草的天敌密度平均为18.29头/平方米,是小麦的2.93倍。5月初,三种牧草的天敌密度平均为16.9头/平方米,是小麦的1.87倍。

6) 5月初,麦田寄生蜂和瓢虫种群分别滞后于麦蚜5~10 d和15~20 d,寄生蜂和瓢虫种群密度与麦蚜种群增长率呈负相关,其中与瓢虫的相关性显著。小麦抽穗期,牧草的天敌密度高于麦田的约2~3倍,表明牧草在麦蚜种群生态调控中具有潜在利用价值。

第七章 主要结论与讨论

论文主要从以下四个方面对人工牧草的生态效应进行了试验研究：生产力；耗水量、耗水规律与水分利用效率；土壤质量的和牧草不同种植系统的氮收支与平衡；土壤微生物多样性和牧草在麦蚜防治中的作用。

7.1 牧草生产力

7.1.1 牧草及不同种植系统年产草量

牧草 2005-2009 年的产草量年平均值分析表明，串叶松香草鲜草产量 $92.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ ，干草产量 $16.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ ，苜蓿分别为 $71.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ ， $8.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ 。籽粒苋干草产量比其他一年生牧草的低，但鲜草产量稍高。青饲玉米干、鲜草产量都较高。黑麦和小黑麦刈割两次的鲜草产量比只刈割一次的产量要高，但干草产量比只刈割一次的低，本试验所测黑麦干、鲜草产量水平与陈宏等 1995-1997 年在天津市蓟县尤古庄镇和下仓的田间试验产量接近（陈宏,曹志田,王成球,1999）。苜蓿和串叶松香草 2005 年产量最低，种植第二年(2006)达到高产后，第三、四年产量有所下降，串叶松香草第五年产量持续下降，但是苜蓿产量有所上升，苜蓿干草产量的年变化规律与张丽妍等 2007 年在内蒙古民族大学实验农场试验结论一致(张丽妍,杨恒山,张宏宇, 2010)。

对牧草不同种植系统，轮作系统中 CAG 和 CG 的鲜草产量波动小，每年的鲜草产量年基本稳定在 $80\text{-}100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，CGF 的鲜草产量波动较大，在 2006 年达到高产后，2007 和 2008 年有所降低，至 2009 年产量略有上升。2006 年，两个多年生牧草鲜草产量在 $125 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上，比 3 个轮作系统高，轮作系统的鲜草产量十分接近，都在 $105 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。干草产量的年变化规律与鲜草产量基本一致。

7.1.2 不同降雨条件下的产草量

黄淮海平原年降雨量差异显著，并且不同地区的降雨量也有差异，我们将试验年份的降雨按照牧草的生育期和历史资料规律进行了划分，鲜草产量一年生牧草除青饲玉米和小黑麦全生育期处理外，其他牧草鲜草产量均是多雨条件最

高, 多年生牧草鲜草产量均是少雨条件下最高。干草产量除青饲玉米外, 其他牧草均是在多雨条件产量最高。黑麦和小黑麦只刈割一次时, 在平常和少雨条件下, 较好灌溉条件下产量接近; 刈割两次时在少雨条件下产量有所降低。高丹草在平常产量低, 多雨条件和少雨条件下产量接近。青饲玉米在多雨条件的产量最低, 表明该牧草生长期降雨量大于 696.5mm 容易减产。籽粒苋对降雨量反应敏感, 平常和少雨条件下的产量是在多雨条件产量的一半左右。多年生牧草干草产量在少雨条件下较好灌溉条件下产量最高, 串叶松香草在降雨量大大于 696.5mm 时, 产草量会降低。

不同种植系统 2005 至 2009 年 5 年的总鲜草产量一年生禾本科轮作系统(CG)和籽粒苋与黑麦草、小黑麦轮作系统(CAG)的较高, 其次是串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)和一年生禾本科与多年生牧草轮作系统(CGF)。与鲜草产相比, CM 系统的干草产量相对较高, 与前三个系统无显著性差异, CGF 系统的干产量也是最低的, 与其他系统有显著差异。

7.1.3 不同牧草的光合作用

牧草生育盛期净光合速率午前迅速增加, 在 10:00—12:00 光合速率达到最大值后缓慢下降, 青饲玉米、高丹草和籽粒苋等 C_4 光合速率高于其他 5 种 C_3 牧草。不同种类牧草的生物学特性光合作用-光响应曲线存在差异。光饱和点的大小依次为苜蓿>鲁梅克斯>籽粒苋>青饲玉米>高丹草>黑麦>菊苣>串叶松香草; 最大净光合速率的大小依次为籽粒苋>高丹草>鲁梅克斯>青饲玉米>苜蓿>冬牧 70 黑麦>菊苣>串叶松香草; 不同层次叶片的光响应曲线差异也较大。 C_4 牧草的光补偿点为 $100\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, C_3 牧草约为 $50\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。 C_4 牧草的光响应曲线变化趋势一致, 差异较小; 而 C_3 牧草的光响应曲线走向差异较大。

7.2 耗水规律与水分利用效率

7.2.1 不同降雨条件下牧草的耗水量

不同降雨类型下, 黑麦、青饲玉米和串叶松香草耗水量干旱季高于平常年份, 多雨条件耗水量最低, 但是小黑麦、籽粒苋和苜蓿的规律略有不同, 平常年份的耗水量最高, 少雨条件下次之, 湿润年份最少; 高丹草在多雨条件的耗水量高于

少雨条件下和平常年份。日均耗水量分析表明，一年生牧草的日均耗水量，少雨条件下最高，除黑麦和高丹草外，其他牧草均是多雨条件的日耗水量最小。多年生牧草串叶松香草和苜蓿，平常的日均耗水量最高，其次是少雨条件下，多雨条件的最低。

7.2.2 不同降雨类型下牧草生育期

试验研究发现，干旱(生育期内降雨量小)会造成一年生牧草的生育期提前，黑麦和小黑麦在少雨条件下成熟期比其他季节要提前 2 至 10 天，高丹草和青饲玉米生育期比其他季节提前 2 至 13 天，而籽粒苋则提前 28 至 76 天。

7.2.3 不同降雨类型下牧草的作物系数 K_c 和灌溉需求量

根据试验结果，平常各牧草的蒸发量基本上等同于 E601 水面蒸发量，除苜蓿略高外，其差值一般小于 9%。黑麦 K_c 值少雨条件下最大，多雨条件次之，平常最小；其余牧草 K_c 值少雨条件下最大，平常次之，多雨条件最小，在多雨条件其耗水量小于同期的 E601 水面蒸发量。

灌溉需求量，高丹草在该地区除了少雨条件下需要少量的灌溉以外，其他季节不需要灌。籽粒苋、青饲玉米和串叶松香草多雨条件不需要灌溉，平常年份需要少量的灌溉，灌水需求主要在少雨条件下。小黑麦和黑麦不论干湿季节降雨均达不到生长所消耗的水量，需要灌溉才能维持生长和达到较好的产量，黑麦生育期内的灌溉需求在 221.5-316.3mm，多雨条件灌溉量稍高；小黑麦小黑麦为 170.1-280.7mm。串叶松香草在多雨条件仍然需要微量的灌溉。苜蓿在多雨条件基本不需要灌溉，平常灌溉量为 380.1mm，多雨条件需要 445.0mm。

7.2.4 不同降雨类型下牧草的水分利用效率

黑麦和小黑麦多雨条件 WUE_y 最高，少雨条件下最低；高丹草和籽粒苋的水分利用效率也是多雨条件最高，但少雨条件下的水分利用效率并不是最低的；多年生牧草的水分利用效率在少雨条件下却是最高。青饲玉米在平常的水分利用效率最高，达到 $62.0 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 。这可能得益于较高的生物产量，和较低的耗水量，这与 Lothar Mueller 等采用地下供水式蒸渗仪测定的结果一致(Lothar

Mueller et al., 2005)。

7.2.5 冬牧 70 黑麦与中新 830 小黑麦的比较

冬牧 70 黑麦返青期比中新 830 小黑麦提前 15d 左右, 全生育期中新 830 小黑麦耗水量为 367.1mm, 水分利用效率达 $72.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$; 冬牧 70 黑麦分别为 380.6mm、 $49.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。4 月中旬收割, 冬牧 70 黑麦耗水量为 202.8 mm; 中新 830 小黑麦耗水量为 185.0 mm。这两种牧草可以适应华北平原的棉花等春播作物的种植, 是解决华北平原早春淡季青绿饲草的供应和冬闲田地开发利用的首选优质牧草。

7.3 土壤理化性质和系统的氮素平衡研究

7.3.1 牧草种植对土壤容重的影响

牧草的种植降低了 5-10cm 土壤的容重。与传统小麦—玉米轮作相比, 牧草轮作系统降低了 $0.21\text{--}0.28 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 串叶松香草降低了 $0.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 苜蓿降低 $0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。本试验时间虽然有 5 年的时间, 但土壤容重是长期形成的结果, 因此本研究得出的结果只是初步的结论, 还需要进一步的验证。

7.3.2 牧草种植对土壤养分和微生物碳氮的影响

2009 年的土壤养分平均状况与 2005 年比较显示, 有机质和全氮、全磷分别增加 6.82%、12.50%、5.26%, 全钾的含量有所减少, 少 1.28%。pH 有所增加, 增加 2.23%, 含盐量减少 45.45%。

不同种植系统的微生物碳、氮含量均是表层 0-5cm 最高, 都在 $150 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 以上, 5-10cm、10-20cm 依次降低。苜蓿科与禾本科轮作(CAG)系统 0-5cm 微生物碳的含量最高, 苜蓿次之, 其他 3 个系统的比较接近; 5-10cm 各系统的差别不大; 10-20cm 禾本科与多年生轮作(CGF), 苜蓿(CM)系统的稍高, 其他系统较接近。微生物氮含量 0-5cm 串叶松香草最高, 其他系统较为接近, 5-10cm、10-20cm 土壤的微生物氮含量, 轮作系统的较多年生的高。

7.3.3 牧草种植系统的氮素平衡

牧草不同种植系统的 2005 至 2009 年间的氮收支状况表明, 总的氮投入一年生牧草轮作系统最高, 串叶松香草最低, 一年生牧草与豆科牧草轮作系统(CGF)与苜蓿系统的投入相当; 氮的支出主要是收获移走的氮, 高的产草量和高蛋白质含量都能形成高的氮支出。牧草种植系统的氮平衡均为负值, 说明牧草种植系统氮的收入小于氮的产出, 能有效的利用土壤中的氮。

7.4 土壤微生物多样性

磷脂脂肪酸采用PLFA分析方法对不同牧草种植系统的土壤样品进行了鉴定, 共检测出17种磷脂脂肪酸, 总数共计324个。在17种PLFA中, 15:0、16:0、18:0、16:1 ω 7c、18:1 ω 8t、a15:0、a17:0、i16:0、i18:0等9种PLFA占到81-91%的丰度, 真菌占28%的丰度, 细菌合计占到72%。PLFA检测出真菌共90个, 革兰氏阳性细菌116个, 革兰氏阴性细菌9个, 其他细菌109个。CGF系统的个数是最多的, 达88个, 另外五个系统的个数比较接近, 在43-51之间。

PLFA含量最高的是苜科-禾本科牧草轮作系统(CAG), 为55.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次是禾本科与豆科牧草轮作系统(CGF)为53.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 串叶松香草(CS)、苜蓿(CM)、禾本科牧草轮作(CG)和传统小麦玉米轮作系统(WM)。

6个种植系统土壤不同层次的17种脂肪酸的量主成分分析, 第一主成分PC1和第二主成分PC2两个主成分累计贡献率达到88.29%, 其他种类占11.71%。

7.5 牧草昆虫种群动态

对牧草和小麦的昆虫种类以及数量调查表明, 4月底, 苜蓿、松香草和黑麦草三种牧草的天敌密度平均为18.29头/平方米, 是小麦的2.93倍。5月初, 三种牧草的天敌密度平均为16.9头/平方米, 是小麦的1.87倍。

5月初, 麦田寄生蜂和瓢虫种群分别滞后于麦蚜5~10 d和15~20 d, 寄生蜂和瓢虫种群密度与麦蚜种群增长率呈负相关, 其中与瓢虫的相关性显著。小麦抽穗期, 牧草的天敌密度高于麦田的约2~3倍, 表明牧草在麦蚜种群生态调控中具有潜在利用价值。

7.6 论文创新点与不足

论文创新点:

1)首次提出了华北平原 11 种栽培牧草及其不同种植系统的生产力、耗水量、水分利用效率与耗水系数。

2)首次提出了华北平原 11 种栽培牧草及其不同种植系统的土壤质量状况和氮的收支平衡。

论文不足之处:

1) 试验结论是在水分充分供应条件下的,没有设置不同的水分处理,需要进一步研究牧草在非充分灌溉条件下的耗水规律及其与生产力的关系。

2) 试验时间虽然有 5 年的时间,但土壤容重是长期形成的结果,因此本研究得出的结果只是初步的结论,还需要进一步的验证。

3) 由于时间和精力有限,土壤微生物只测定了一个季节,做了不同系统的之间的比较,并没有做出微生物在不同的季节变化。

参考文献

- [1] 白莉,尹青云,李锐,王孝威,郑王义,任东植,曲运琴,李希平.麦长管蚜种群时空动态的初步研究. 麦类作物学报. 2005,25(1): 90-93.
- [2] 毕于运,高春雨,王亚静,李宝玉.中国秸秆资源数量估算.农业工程学报. 2009, 25(12):211-217.
- [3] 曹志洪.解译土壤质量演变规律,确保土壤资源持续利用.世界科技研究与发展,2000,21(3):28 - 32.
- [4] 陈阜,蒋建平,魏炳传,李文娟.我国种植业结构调整之策略[J].农业现代化研究.1995,16(5):310-312.
- [5] 陈宏,曹志田,王成球,但汉斌,朱珠,唐柳. 冬牧70黑麦在天津地区的产量与播量试验初报.天津师大学报(自然科学版).1999, 2: 45-48.
- [6] 陈曦,任树梅,杨培岭等.京郊地区苜蓿草地土壤水分状况与产草量的研究.农业工程学报. 2005 (21):218-220.
- [7] 陈曦,任树梅,杨培岭,郝仲勇,刘洪禄.京郊地区苜蓿草地土壤水分状况与产草量的研究.农业工程学报,2005(21):218-220.
- [8] 程维新,康跃虎.北京地区草坪耗水量测定方法及需水量浅析.节水灌溉.2002(5):12-14.
- [9] 程维新,赵家义,胡朝炳,张兴权等.田蒸发与作物耗水量研究.北京:气象出版社,1994.
- [10] 崔玉亭,李季,靳乐山.化肥与生态环境保护. 北京:化学工业出版社.2000,102.
- [11] 邓国取.我国农区畜牧业产业布局战略研究.地域研究与开发.2008,2:109-112
- [12] 杜世平,王留芳,龙明秀.宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究. 草业科学.1999,16(1):12-16.
- [13] 高德海.种草养畜—农区畜牧业持续稳定发展的必然趋势[J].生态经济.1997(3):33-37.
- [14] 高旺盛,陈源泉,段留生,李建民.中国粮食主产区农田生态健康问题与技术对策探讨[J].农业现代化研究.2008,29(1):90-91,111.
- [15] 耿金虎,沈佐锐.农田生态系统生物多样性与害虫综合治理[J].植保技术与推广.2003,23(11):30-32.
- [16] 郭海英,赵建萍,杨兴国,黄斌,张谋草,王宁珍.陇东塬区适生农作物水分利用率及经济效益对比分析.土壤通报.2007,38(4):709-712.
- [17] 郭继勋,祝廷成.羊草草原土壤微生物的数量和生物量[J].生态学报.1997, (1) :78-82.
- [18] 郭艳玲,韩建国.北方农牧交错带几种禾本科牧草对土壤有机质的影响[J].内蒙古草业.2006,18(4):7-9
- [19] 郭艳玲,韩建国.华北农牧交错带种植禾本科牧草对土壤N、P、K的影响[J].草业科学.2007,24(4):70-74.
- [20] 韩建国,韩永伟,孙铁军,王小山.农牧交错带退耕还草对土壤有机质和氮的影响[J].草业学报.2004, 13(4):21-28.
- [21] 韩永伟,韩建国,王堃,张蕴薇.农牧交错带退耕还草对土壤微生物量C、N的影响[J].农业环境科学学报.2004,23(5):993-997.
- [22] 洪绂曾.谈谈饲料作物和牧草与种植业结构调整的问题.作物杂志.2000(2):1-4.
- [23] 侯爱新,陈冠雄.不同种类氮肥对土壤释放N₂O的影响.应用生态学报.1998, 9(2):176-180.
- [24] 侯刚,顾明德,王汉全,刘今河,李新建,万素梅. 十二个紫花苜蓿品种第一茬草土壤水分状况研究.塔里木大学学报.2005,17(2):16-18.
- [25] 侯满平,郝晋珉,李新波,覃莉.黄淮海平原农业结构调整及其模式探讨[J].农业工程学

- 报.2004,20(3):286-261.
- [26] 侯满平, 郝晋珉, 刘平辉, 李旭霖.WTO 对黄淮海平原农业发展的挑战、机遇及对策研究[J].2003,24(4):267-290.
- [27] 侯茂林,盛承发.农田生态系统植物多样性对害虫种群数量的影响[J].应用生态学报.1999,10(2):245-250.
- [28] 侯武英.国外草业现状[EB/OL]. <http://www.grassland.net.cn/lecture/149.htm>,2001.7.
- [29] 胡成波.法国畜牧业的特点.当代畜牧. 2004,(4):43-44.
- [30] 胡跃高,李国辉.青刈黑麦产业化生产技术[M]. 北京:中国科学技术出版社.2000.3
- [31] 胡跃高,李志坚,王海滨等.黄淮海区青刈黑麦栽培及发展前景.作物杂志,1997,(6):26~28.
- [32] 黄顶成,张润志,董兆克,高凤娟,潘国艳,欧阳竹.小麦和牧草上的蚜虫与天敌种群动态及其相互关系.环境昆虫学报.2008,30(4):325-330.
- [33] 蒋静艳,黄耀.农业土壤N₂O排放的研究进展. 农业环境保护.2001,1(51-54).
- [34] 李敏,吴长友.几种土壤生物因子对土壤养分的影响[J]. 土壤通报.2007,38(10):43-46.
- [35] 李楠,陈冠雄.植物释放N₂O速率及施肥的影响.应用生态学报.1993,4(3):295-298.
- [36] 李锐,李生才,郑王义.麦长管蚜种群动态的模糊聚类分析. 山西农业大学学报(自然科学版).2003,23(4): 312-315.
- [37] 李小健.中国畜牧业的一次大“抽检”.中国人大. 2009,12:30-32.
- [38] 李新旺,门明新,王树涛,齐跃普,杜博洋,许皞.基于过程的河北平原农田生态系统稳定性评价. 自然资源学报.2008,23(3):430-439.
- [39] 李英年,曹广民,鲍新奎.高寒草甸植被生育期耗水量和耗水规律的分析.农业气象,1996,1:41-43.
- [40] 李志坚,胡跃高,李国辉,张鹏.灌溉对青刈黑麦生产影响的研究.作物杂志.1999,4:16-19.
- [41] 梁文举, 武志杰, 闻大中.21 世纪初农业生态系统健康研究方向[J].应用生态学报, 2002,13(8):1022- 1026.
- [42] 梁小玉,张新全. 对发展我国生态畜牧业的探讨[J]. 四川草原, 2003, 6:46-48.
- [43] 梁一民,李代琼,从心海.沙打旺草地产量动态及水分利用研究.水土保持学报,1990, 4(3) :29-35.
- [44] 梁一民,李代琼.吴旗沙打旺草地土壤水分及生产力特性的研究.水土保持通报,1990,10(6):113-118.
- [45] 刘成龙,王静,郭亚男.草田轮作粮食增产效果分析.内蒙古农业科技2007(6):58
- [46] 刘加文.南方草业大有可为.草业科学. 2008,25(9):54-58.)
- [47] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,马克明.我国土壤质量及其评价研究的进展.土壤通报.2006,37(1):137-143.
- [48] 刘自学.中国草业的现状与展望.草业科学.2002,19(1):6-8.
- [49] 卢良恕, 顾晓君.用现代食物观念指导结构调整实现新增粮食一千亿斤. 科学决策.1996,2:4-8.
- [50] 卢良恕,刘志澄,梅方权,蒋建平等.“浅论农业三元结构工程”1994年11月21日《科技日报》.
- [51] 卢良恕,梅方权,顾晓君. 论中国现代集约持续农业.中国软科学.1995,10:10-19.
- [52] 卢良恕.21世纪的农业和农业科学技术. 自然杂志.1996,18(5):261-266.
- [53] 卢良恕.面向21世纪,加快现代农业建设.世界科技研究与发展,1997,19(4):3-15.
- [54] 卢宗凡,张兴昌,苏敏,林和平.黄土高原人工草地的土壤水分动态及水土保持效益研究.干旱区资源与环境.1995, 9(1):40-49.
- [55] 吕殿青,Ove Emteryd,同延安等.农用氮肥的损失途径与环境污染.土壤学报,2002,39(增刊):77-89.

- [56] 吕昭智,李进步,田卫东,田长彦. 生物多样性在害虫控制中的生态功能与机理. 干旱区研究.2005,22(3):400-404.
- [57] 马兴祥,尹东,蒋菊芳,刘明春,魏育国,刘惠兰.灌溉地不同人工牧草草地土壤水分及生长特征变化.草原与草坪. 2009,2:62-67.
- [58] 毛玉胜.谈草食家畜在持续农业中的功能与增产对策.草与畜杂志.1998:1-3.
- [59] 孟有达. 我国草地资源概况[EB/OL]. <http://www.grassland.net.cn/lecture/15.htm>,2001.7.
- [60] 彭世彰,杨士红,丁加丽,徐俊增.农田土壤N₂O排放的主要影响因素及减排措施研究进展. 河海大学学报(自然科学版).2009, 27(1):1-6.
- [61] 彭涛,高旺盛,隋鹏.农田生态系统健康评价指标体系的探讨.中国农业大学学报, 2004, 9(1):21-25.
- [62] 邱建军,李虎,王立刚.中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究.农业工程学报,2008,24(8):40-44.
- [63] 裘望.国外的畜牧业.北京:中国社会出版社,2006.A
- [64] 任继周. 藏粮于草施行草地农业系统. 草业学报, 2002, 11 (2) : 123.
- [65] 任继周.饲料用粮—我国粮食安全的真正压力.中国农业通讯.2004(9):6.
- [66] 任素坤,武继承,寇长林等.砂土冬闲田种植利用技术研究.黄淮海平原农业可持续发展研究.气象出版社.1999:216-221.
- [67] 沈善敏.中国农业持续发展的土壤肥力管理对策. 沈善敏主编.中国土壤肥力.北京:农业出版社, 1998,450-484.
- [68] 沈益新.农田种草的生态学意义和作用[J].畜牧与兽医.2004,36(4):1-3.
- [69] 盛承发.关于害虫生态防治若干概念的讨论[J].生态学报,2002,22(4):597-603.
- [70] 师尚礼. 苜蓿根瘤菌固氮研究进展及浅评.中国草地.2005,27(5):63-68.
- [71] 苏成国,尹斌,朱兆良,沈其荣.农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应.土壤. 2005, 37(2): 113~120.
- [72] 苏芳,丁新泉,高志岭,黄彬香,陈新平,张福锁.华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氮挥发.中国环境科学. 2007, 27(3)409-413.
- [73] 孙洪仁,关天复,孙建益,武瑞鑫,李品红.不同年限紫花苜蓿(生长)水分利用效率和耗水系数的差异.草业科学.2009, 26(3):39-42.
- [74] 孙洪仁,刘国荣,张英俊,高飞,逯涛林,韩建国.紫花苜蓿的需水量,耗水量,需水强度,耗水强度 and 水分利用效率研究[J].草业科学,2005,22(12):24-30.
- [75] 孙洪仁,马令法,何淑玲,李品红,刘爱红.灌溉量对紫花苜蓿水分利用效率和耗水系数的影响. 草地学报.2008,16(6):636-639,645.
- [76] 孙洪仁,张英俊,韩建国,逯涛林,高飞.北京平原区紫花苜蓿建植当年的需水规律.中国草地学报.2006,4: 35-38,44.
- [77] 孙洪仁,张英俊,韩建国,逯涛林,高飞.紫花苜蓿的蒸腾系数和耗水系数.中国草地,2005,27(3):65-70.
- [78] 孙洪仁,张英俊,历卫宏,逯涛林,高飞,韩建国.北京地区紫花苜蓿建植当年的耗水系数和水分利用效率.草业学报. 2007,16(1):41-46.
- [79] 孙启忠,玉柱,徐丽君,赵淑芬,张志茹.尖叶胡枝子和达乌里胡枝子地上生物量累积研究.干旱区研究.2008,1:82-89.
- [80] 孙泽强,李子忠,龚元石.农牧交错带不同土地利用方式土壤水分利用效益的比较.中国农业大学学报.2003,8(1): 43~46.
- [81] 孙政才.农业农村改革发展30年:腾飞的畜牧业.北京:中国农业出版社,2009.A
- [82] 万素梅,王龙昌,顾明德,王汉全,王丽艳.渭北旱塬丘陵沟壑区紫花苜蓿品种适应性的研

- 究.干旱地区农业研究. 2005, 23 (4):94-97.
- [83] 王长永,王光,万树文,钦佩.有机农业与常规农业对农田生物多样性影响的比较研究进展.生态与农村环境学报.2007,23(1):75-80
- [84] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用.农业工程学报, 2007, 23 (8) : 210- 215.
- [85] 王珏,巨晓棠,张丽娟,张家铜,袁丽金.华北平原小麦季氮肥氨挥发损失及影响因素研究.河北农业大学学报. 2009, 32(3): 5-11.
- [86] 王丽宏,杨光立,曾昭海,张薇,肖小平,张帆,胡跃高. 稻田冬种黑麦草对饲草生产和土壤微生物效应的影响(简报).草业科学.2008,17(2):157-161.
- [87] 王美芳, 原国辉, 陈巨莲, 雷振生, 吴政卿, 2006. 麦蚜发生危害特点及小麦抗蚜性鉴定的研究. 河南农业科学, (7): 58-60.
- [88] 王秋华. 我国农村作物秸秆资源化调查研究[J].农村生态环境.1994 , 10 (4) : 67-71.
- [89] 王曙光,侯彦林.磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用.微生物学通报.2004, 31(1):114- 117.
- [90] 王西娜,王朝辉,李生秀.黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡.植物营养与肥料学报2006,12(6):759-764.
- [91] 王小艺, 沈佐锐. 农业生态系统健康评估方法研究概况[J].中国农业大学学报, 2001, 6(1): 84-90.
- [92] 魏广祥, 冯革尘, 宋晓华,孟凡林,石景春.半干旱风沙区人工牧草沙打旺需水规律的研究.草业科学. 1999,11(5):46-47.
- [93] 温达志,张德强,周国逸,丁明懋,黄得光,罗仲良,李德明.四种禾本科牧草植物光合特性的初步研究.热带亚热带植物学报.2000,增刊III:59-66.
- [94] 温达志,张德强,周国逸,丁明懋,黄得光,罗仲良,李德明.四种禾本科牧草植物蒸腾速率与水分利用效率的比较.热带亚热带植物学报.2000,增刊III:67-76.
- [95] 吴金水,林启美,黄巧云,肖和艾.土壤微生物生物量测定方法及其应用北京:气象出版社, 2006.6.
- [96] 武兰芳,欧阳竹.种养结合生产区农田氮素平衡分析-以山东省禹城为例.农业环境科学学报.2008,27(4):1312-1319.
- [97] 辛国荣,孙斌,黎国喜,吴瑾,杨宇洁,王宇涛,杨中艺. 广东不同地区冬种意大利黑麦草根际AM生理生态研究. 中山大学学报(自然科学版).2008,47(2):79-83,88.
- [98] 辛国荣,岳朝阳,李雪梅,杨中艺.“黑麦草- 水稻”草田轮作系统的根际效应3,黑麦草根系对土壤生物性状的影响.中山大学学报(自然科学版).1998,37(6):94-96.
- [99] 熊伟,王彦辉,程积民,虎久强,安永平,杨明义.三种草本植物蒸散量的对比试验研究.水土保持学报. 2003,17,1:170-172.
- [100] 徐福利,张金水,吕殿青. 对苜蓿共生固氮量测定法的比较研究.土壤通报.1993, 24(3):237-139.
- [101] 徐克章.生物多样性及其在农田作物生产中的意义和作用.吉林农业大学学报 1999,21(2):73~77.
- [102] 薛书超.赴新西兰、澳大利亚考察畜牧业的启示.河南畜牧兽医, 2003, 24(4): 46-47.A
- [103] 颜慧,钟文辉,李忠佩,蔡祖聪.长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响.应用生态学报.2008, 19(1): 71- 75.
- [104] 杨启国,张旭东,杨兴国.甘肃中部半干旱区紫花苜蓿耗水规律及土壤水分变化特征研究.中国农业气象.2003,24,(4):37-40.
- [105] 杨中艺, 辛国荣, 岳朝阳, 简曙光, 菅原和夫.黑麦草- 水稻”草田轮作系统的根际效应

- 接种稻田土壤微生物对黑麦草生长和氮素营养的影响[J].中山大学学报(自然科学版).1997,36(2):1-5.
- [106] 杨中艺, 岳朝阳, 辛国荣. 稻田冬种黑麦草对后作水稻生长的影响及其机理初探[J]. 草业科学, 1997, 14 (4) : 20-25.
- [107] 杨中艺. 黑麦草-水稻草田轮作系统中的研究VI, 冬种意大利黑麦草对后作水稻生长和产量的影响[J]. 草业学报. 1996, 5(2): 38-4
- [108] 姚拓, 龙瑞军. 天祝高寒草地不同扰动生境土壤三大类微生物数量动态研究[J]. 草业科学. 2006, 15(2): 93-99.
- [109] 姚拓, 马丽萍, 张德罡. 我国草地土壤微生物生态研究进展及浅评[J]. 草业科学. 2005, 22(11): 1-7.
- [110] 殷耀; 任会斌. 天然草原剩几多. 记者观察. 2004, 12: 33-37.
- [111] 尤民生, 刘雨芳, 侯有明. 农田生物多样性与害虫综合治理. 生态学报. 2004, 24(1) : 117-122.
- [112] 余贵芳, 毛知耘, 石孝均, 刘洪斌. 氮素在紫色土中的移动和淋失研究. 西南农业大学学报, 1999, 21 (3): 228-232.
- [113] 俞慎, 李勇, 王俊华, 车玉萍, 潘映华, 李振高. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. 土壤学报. 1999, 36(3): 414-422.
- [114] 袁锋明, 陈子明, 姚造华, 周春生, 傅高明, 宋永林, 李小平. 北京地区潮土表层中NO₃-N的转化积累及其淋洗损. 土壤学报, 1995, 32(4): 388-399.
- [115] 岳绍先, 孙鸿良, 唐德富. 籽粒苋在中国的研究与开发. 1993.
- [116] 张宝田, 穆春生, 金成吉. 松嫩草地2种胡枝子地上生物量动态及其种间比较. 草业学报, 2006, 15(3): 36-41.
- [117] 张福锁, 巨晓棠. 对我过持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 41-55.
- [118] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法. 土壤. 2001, 6: 326-330, 333.
- [119] 张丽妍, 杨恒山, 张宏宇, 葛选良, 谷永丽. 灌溉条件下不同生长年限紫花苜蓿生长及生产能力的研究. 草业科学. 2010, 1: 85-91.
- [120] 张乃芹, 侯传本, 于凌春, 王明友. 麦田主要天敌昆虫种群动态及对麦蚜控制效应的研究. 山东农业科学. 2007, (5): 86-88. (5): 86-88.
- [121] 张润志, 梁宏斌, 田长彦, 张广学. 利用棉田边缘苜蓿带控制棉蚜的生物学机理. 科学通报. 1999, 44(20): 2175-2178.
- [122] 张润志, 张广学. 相生植物在生物防治中的作用. 中国生物防治. 1998. 14(4): 176-180.
- [123] 张润志, 张广学. 有害生物治理的新途径-相生植保学(MPP). 科学(上海). 1999, 51(1): 37-39.
- [124] 张润志, 田长彦. 发展农区牧草产业实现棉花害虫生态治理. 中国科学院院刊. 2000, 15(5) : 346-348.
- [125] 张婉嫔, 栾双. 紫花苜蓿培肥土壤及年固氮量的测定. 东北农学院学报. 1987, 18(1): 85-88.
- [126] 张晓红, 王惠梅, 徐炳成, 李凤民. 黄土塬区3种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究. 西北植物学报, 2007, 27(7): 1428-1437.
- [127] 张颖, 刘学军, 张福锁, 巨晓棠, 邹国元, 胡克林. 华北平原大气氮素沉降的时空变异. 生态学报. 2006, 26(6): 1633-1639.
- [128] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 李晓欣, 董文旭. 太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究植物营养与肥料学报. 2006, 12(1): 5-11.
- [129] 章家恩, 骆世明. 农业生态系统健康的基本内涵及其评价指标. 应用生态学报, 2004,

- 15(8):1473- 1476.
- [130] 赵风华,陈阜. 北京地区引种饲用苜蓿耗水规律初探.作物杂志.2004,(3):12-14.
- [131] 赵吉,廖仰南,张桂枝,邵玉琴.草原生态系统的土壤微生物生态.中国草地.1999,(3) :57-67.
- [132] 赵其国.土壤质量与持续环境,土壤质量的定义及评价方法.土壤,1997,29 (3) : 113- 120.
- [133] 中国畜牧业协会.中国畜牧业改革发展的30年.中国禽业导刊. 2009,1: 22-25.
- [134] 钟华平,岳燕珍,樊江文.中国作物秸秆资源及其利用.资源科学.2003,25(4):62-67.
- [135] 钟文辉,蔡祖聪.土壤微生物多样性研究方法.应用生态学报.2004, 15(5): 899- 904.
- [136] 周立华,李一兴,孙武刚.银北主要农作物、蔬菜、牧草、树木的需水量和需水规律.宁夏农学院学报. 1997,18(2):82-85.
- [137] 周丽霞,丁明懋.土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用.生物多样性.2007,15 (2) :162-171.
- [138] 朱丕荣.世界畜牧业发展趋向.农业展望., 2009,06: 19-22.
- [139] 朱兆良,孙波.农田中氮肥的损失与对策.土壤与环境 2000,9(1): 1-6.
- [140] 朱兆良.氮素管理与粮食生产和环境[J].土壤学报.2002,39(增刊):3-11.
- [141] 朱兆良.农业生产中化学氮肥的损失及其对策.北京农业.1994, 9:16.
- [142] 朱兆良.中国土壤氮素研究.中国科学院南京土壤研究所. 土壤学报..2008, 5: 779-783.
- [143] 朱祖祥.土壤学(上册)[M].北京:农业出版社,1983.
- [144] 祝廷成,李志坚,张为政,梁存柱,杨海军,周守标.东北平原引草入田,粮草轮作的初步研究. 草业学报.2003,12(3):34-43
- [145] 邹应斌.国外作物免耕栽培的研究与应用.作物研究.2004,3:127-132.
- [146] 左大康.华北平原的适水种植问题.农业用水有效性研究.北京:科学出版社,1992:29-34.
- [147] A.L. Flint, S.W. Childs, 1991.Use of the Priestley-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut, Agricultural and Forest Meteorology 56 , 247-260.
- [148] Altieri M.A., Letourneau D.K., 1982. Vegetation management and biological control in agroecosystems .Crop Protection.1, 405-430.
- [149] Altieri M.J., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agric. Ecosyst. Environ. 74, 19-31.
- [150] Badgleya C., Moghtadera J., Quinteroa E, Zakema E, Chappella M. J., Vázquez K. A., Samulona A., Perfectoa I., 2007.Organic agriculture and the global food supply. Renewable Agriculture and Food Systems .Cambridge University Press. 22,86-108.
- [151] Bardgett R. D., Lovell R. D., Hobbs P. J., Jarvis S.C.1999. Seasonal changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperate grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 31: 1021-1030.
- [152] Bengtsson J., Ahnstrom J., Weibull A.C., 2005. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a metaanalysis. J. Appl. Ecol. 42(2), 261-269.
- [153] Bligh E G, Dyer W. J., 1959.A rapid method of total lipid extraction and purification.Can J Biochem phs.37 (8) :911-917.
- [154] Bolinder M.A., Janzen H.H., Gregorich E.G, Angers D.A., VandenBygaart A.J., 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. Agric. Ecosyst. Environ.118, 29-42.
- [155] Boopathy R.2000. Factors limiting bioremediation technologies. Bioresource Technology, 74, 63-67.

- [156] Carlsson G., Danell K.H., 2003. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field . Plant Soil. 253, 353-372.
- [157] Campbell C.A., Biederberk V.O., Zentner R.P., Lafond G.P.1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin black Chernozem. Can J Soil Science, 71, 363-376.
- [158] Coleman D.C., Crossley D.A.Jr., Hendrix P.F., 2004. Fundamentals of soil ecology. Elsevier Academic Press.
- [159] Connor D.J., 2004. Designing cropping systems for efficient use of limited water in southern Australia . Europ. J. Agronomy. 21, 419-431.
- [160] Crews T.E., Peoples M.B., 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs . Agric. Ecosyst. Environ. 102, 279-297.
- [161] David M. Sumner, Jennifer M. Jacobs, 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. Journal of Hydrology , 308(1-4), 81-104.
- [162] Dobbie K E, McTaggart I P, and Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. Journal of Geophysical Research. 1999, 104(D21): 26 891-26 899.
- [163] Doran J. W., Parkin T. B. Defining and assessing soil quality[A] . In : Dorman J W. et al. ed. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment [M] . Soil Science Society of American Publication No 35. Inc , Madison , Wisconsin , USA. 1994. 3 - 21.
- [164] E. Blume, M. Bischoff, J.M. Reichert, T. Moorman, A. Konopka and R.F. Turco, 2002. Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season, Applied Soil Ecology 20, 171–181.
- [165] Easterbrook M.A., Tooley J.A., 1999. Assessment of trap plants to regulate numbers of the European tarnished plant bug, *Lygus rugulipennis*, on late-season strawberries. Entomol. Exp. Appl. 92(2), 119-125.
- [166] Eickhout, B., Bouwman, A.F., van Zeijts, H., 2006. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. Agric. Ecosyst. Environ. 116, 4–14.
- [167] Evans, E.W., Toler, T.R., 2007. Aggregation of polyphagous predators in response to multiple prey, ladybirds (Coleoptera , Coccinellidae) foraging in alfalfa. Popul. Ecol. 49, 29-36.
- [168] Fang Q. X., Chen Y. H., Qiang Yu, Ouyang Z., Li Q. Q., Yu S. Z., 2007, Much improved irrigation use efficiency in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. Journal of Integrative Plant Biology, 40(10): 1517-1526.
- [169] Fang Q. X., Ma L. W., Qiang Yu, Wang J., Chen Y. H., Ahuja L. R. 2010. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain. Agric. Water Manage. (2009) , doi:10.1016/j.agwat.2009.02.012.
- [170] FAO Statistical Yearbook 2004. FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations. Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy. http://www.fao.org/statistics/yearbook/vol_1_1/site_en.asp?page=resources.
- [171] FAO, IFA. Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. Rome: published by International Fertilizer Industry Association (IFA) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2001, 1-84.
- [172] Friedel J.K., Gabel D., Sthar K. 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under

- dieffernt duration of organic farming: II: Source- and -sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plant? J. Plant Nutri Soil Sci. 164, 421-429.
- [173] Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R. and Vorosmarty, C. J., 2004. Nitrogen cycles: Past, present and future. Biogeochem. 70:153-226.
- [174] Giles J. 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. Nature. 433, 791-791. doi:10.1038/433791a News .
- [175] Giles, J. 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. Nature. 433: 791.
- [176] Giles, K. L., Berberet, R. C., Zarrabi, A. A., Dillwith, J. W., 2002. Influence of alfalfa cultivar on suitability of *Acyrtosiphon kondoi* (Homoptera: Aphididae) for survival and development of *hippodamia convergens* and *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). J Econ Entomol. 95, 552-557.
- [177] Holed G, Perkins A. J., Wilson J. D., 2005. Does organic farming benefit biodiversity. Biol. Conserv. 122(1), 113-130.
- [178] Jensen H. H., Loges R., Jorgensen F. V., Vinther F. P., Jensen E. S., 2004. An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. Agric. Syst. 82, 181-194.
- [179] Korsæth A., Eltun R., 2000. Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. Agric. Ecosyst. Environ. 79, 199-214.
- [180] Latta, R. A., Blacklow, L. J., Cocks, P. S., 2001. Comparative soil water, pasture production and crop yields in phase farming systems with lucerne and annual pasture in Western Australia. Aust. J. Agric., 52, 295-303.
- [181] Latta J., O'Leary G. J., 2003. Long-term comparison of rotation and fallow tillage systems of wheat in Australia. Field. Crop. Res. 23(2), 173-190.
- [182] Lavelle P., Spain A. V., 2001. Soil ecology. Kluwer Academic Publishers.
- [183] Lawes J. B., Gilbert J. H., Warrington R., 1882. On the amount and composition of the rain and drainage waters collected at Rothamsted. J Royal. Agric Soc Eng Series. 2(17), 241-279.
- [184] Li L. H., Qiang Yu, 2007, Quantifying the effects of advection on canopy energy budgets and water efficiency in an irrigated wheat field in the North China Plain. Agricultural Water Management, 89: 116-122.
- [185] Lothar Mueller, Axel Behrendt, Gisbert Schälitz, Uwe Schindler, 2005. Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate. Agricultural Water Management. 75(2), 117-136.
- [186] Mahdi M. A., Xinhua Yin, Mark A. L., 2005. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. Agric. Ecosyst. Environ. 105(4), 635-647.
- [187] Michael J. Singer, Stephanie Ewing. Soil quality. In: Interdisciplinary aspects of soil science, 1999.
- [188] Moore, J. C., de Ruiter, P. C., Hunt, H. W., Coleman, D. C., Frekman, D. W., 1996. Micros -osms and soil ecooge: critical linkages between field studies and modeling food webs. Ecology. 77, 694-705.
- [189] Moore, J. C., de Ruiter, P. C., 2000. Invertebrates in detrital food webs along gradients of

- [190] Noah F, Joshua PS, Patricia AH .2003. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 167-176.
- [191] O'Leary, G. J., Incerti, M., 1993. A field comparison of three neutron moisture meters. *Aust. J. Exp. Agric.* 33, 59–69.
- [192] P.E. Rasmussen, S.L. Albrecht and R.W. Smiley, 1998. Soil C and N changes under tillage and cropping systems in semi-arid Pacific Northwest agriculture, *Soil Till. Res.* 47, 197–205
- [193] Pala M., Ryan J., Zhang H., Singh M., Harris H.C., 2007. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Arg. Water Manage.* 93, 136-144.
- [194] Pansa M.G., Tavella L., 2008. Alfalfa management affects infestations of *Lygus rugulipennis* (Heteroptera: Miridae) on strawberries in northwestern Italy . *Crop. Prot.* 1-6.
- [195] Poudel D.D., Horwath W.R., Mitchell J.P., Temple S.R., 2001. Impacts of cropping systems on soil nitrogen storage and loss. *Agric. Syst.* 68, 253-268.
- [196] Qiang Yu, Saseendran S. A., Ma L. W., G. N. Flerchinger, Green T. R., Ahuja L. R., 2006. Modeling a winter wheat-corn double cropping system using RZWQM and the RZWQM-CERES Hybrid, *Agricultural System*, 89:457-477.
- [197] R.A.Latta, P.S.Cocks, C. Matthews, 2002. Lucerne pastures to sustain agricultural production in southwestern Australia. *Agricultural Water Management*, 53(1-3), 99-109.
- [198] Roda, A.L., Landis, D.A., Coggins, M.L., 1997. Forage grasses elicit emigration of adult potato leafhopper (Homoptera: Cicadellidae) from alfalfa-grass mixtures. *Environ Entomol.* 26, 745-753.
- [199] Roda, A.L., Landis, D.A., Miller, J.R., 1997. Contact-induced emigration of potato leafhopper (Homoptera: Cicadellidae) from alfalfa forage grass mixtures. *Environ Entomol.* 26, 754-762.
- [200] Ross S.M., Izaurrealde R.C., Janzen H.H., Robertson J.A., Mc Gill W.B., 2008. The nitrogen balance of three long-term agroecosystems on a boreal soil in western Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127, 241-250.
- [201] Rovira, A.D., 1992. Dryland Mediterranean farming systems of Australia. *Aust. J. Exp. Agric.* 32, 808–809.
- [202] Rovira, A.D., 1993. Sustainable Farming Systems in the Cereallivestock Areas of the Mediterranean Region of Australia. Cooperative Research Centre for Soil and Land Management. Glen Osmond, South Australia.
- [203] Smil, V., 1999. Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochem. Cycl.* 13, 647–662.
- [204] Smith, D.F., 2000. Natural Gain: In the Grazing Lands of Southern Australia. UNSW Press, Sydney.
- [205] Soil Water Using and Consume of Three Legumes on Highland of Loess Plateau. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*
- [206] Sun b, Shen R-P, A. F. Bouwman., 2008. Surface N Balances in Agricultural Crop Production Systems in China for the Period 1980-2015. *Pedosphere*. 18(3):304-315.
- [207] Sun H.Y., Liu Ch.M., Zhang X.Y., Shen Y.J., Zhang Y.Q., 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water*

- Management, 85(1-2), 211-218.
- [208] T.E. Twine, W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks and M.L. Wesely, 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. 103, 279–300.
- [209] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial C . *Soil. Biol.Biochem.*19, 703-707.
- [210] Wang H.X., Zhang L., W. R. Dawes, Liu Ch.M., 2001, Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain-measurements and modelling. *Agricultural Water Management*, 48(2), 151-167.
- [211] Wani, S.P., McGill, W.B., Haugen-Kozyra, K., Juma, N.G., 1994a. Increased proportion of active soil N in Breton loam under cropping systems with forages and green manures. *Can. J. Soil Sci.*, 74, 67-74.
- [212] Wani, S.P., McGill, W.B., Haugen-Kozyra, K., Robertson, J.A., Thurston, J.J., 1994b. Improved soil quality and barley yields with fababeans, manure, forages and crop rotations on a Gray Luvisol. *Can. J. Soil Sci.* 74, 75-84.
- [213] Wani, S.P., McGill, W.B., Robertson, J.A., 1991a. Soil N dynamics and N yield of barley grown on Breton loam using N from biological fixation or fertilizer. *Biol. Fertil. Soils*.12, 10-18.
- [214] Wani, S.P., McGill, W.B., Tewari, J.P., 1991b. Mycorrhizal and common-root rot infection, and nutrient accumulation in barley grown on Breton loam using N from biological fixation or fertilizer. *Biol. Fertil. Soils*. 12,46-54.
- [215] Watson C.A., Atkinson D., 1999. Using nitrogen budgets to indicate nitrogen use efficiency and losses from whole farm systems: a comparison of three methodological approaches. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 53,259-267.
- [216] ZHANG R. Zh., REN L., WANG Ch. L., LIN R.H., TIAN Ch. Y., 2004. Cotton aphid predators on alfalfa and their impact on cotton aphid abundance. *Appl. Entomol. Zool.* 39 (2), 235-241.
- [217] Zhang X.Y., Chen S.Y., Liu M.Y., Pei D., Sun H.Y. 2005. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain. *Agron. J.* 97: 783-790.
- [218] Zhang Y.Q., Eloise Kendy, Yu Q., Liu Ch.M., Shen Y.J., Sun H.Y.,2004, Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 64(2), 107-122.

致 谢

本文是在导师欧阳竹研究员和于强研究员的悉心指导下完成的。从论文的选题、研究工作的开展、试验的布置、数据的分析、论文的撰写、修改和定稿，每一步，无不凝结着欧阳老师的心血和汗水，几年来欧阳老师引导我在农田生态系统优化管理领域学习分析问题、发现问题的技能。欧阳老师敏捷的思维方式、开阔的知识面、忘我的工作精神、宽厚待人的风格使我获益良多。学习期间导师为我创造了舒适的工作条件，提供了良好的学习和生活环境，使我能安心的学习工作，恩师之情，终身难忘。于强老师为人谦和，不论是生活还是学习上都给予了很多的指导，于老师的学者风范令人敬佩。

在论文的选题、设计和写作过程中也得到了程维新研究员的悉心指导和帮助，在此表示特别的感谢。张兴权研究员、罗毅研究员、谢贤群研究员和唐登银研究员对研究工作和论文的修改提出了宝贵的意见，十分感谢，诸位老师的提点我都铭记在心。同时感谢李运生副研究员、武兰芳副研究员、娄金勇老师、马军花老师和秘书任萌在论文工作的完成中给与的帮助。感谢朱农和蔡晓光老师，几年来在生活上的照顾，试验上提供的热心支持和便利，你们的努力付出使得我们的生活、工作顺利进行。感谢刘恩民、王春晶、刘振民、于延春、田振荣、李汉侠、黄满湘、赵风华和李发东等老师的帮助，不管是生活和试验的支持，还是关心的话语，都鼓励着我不断向前。特别感谢王吉顺老师，从试验小区布置、仪器安装到数据的采集，花费了大量的心血，并在试验过程中给予了很多的指点，使我从一个不懂种地闹笑话的本科毕业生，变成了现在能独立开展试验，独当一面的研究生。感谢禹城试验站所有的观测人员，你们的努力和辛勤劳动，保证了学生们试验的顺利进行。特别感谢实验员李滨，自2005年布置试验以来，负责协助，和我一起为试验奋战，对试验认真负责，兢兢业业，付出了辛劳和汗水。

在求学期间，得到了杨长明、杨艳敏、董玉红、张银辉、孙志刚、张磊、詹和平、尹志芳、任鸿瑞、李鹏、刘蕾、郭伟、孙艳丽、姚玉刚、王靖、邬定荣、房全孝、陈超、孙善彬、尤勇、杜群、苑晶晶、戴晓琴、来剑兵、杨学兵、刘鹏飞、刘玉洁、陈博、刘丽平、宋小青、孙振中、侯瑞星、李贺丽、刘铁钢、姜学兵、李付杰、季漩、杨枚、朱银霞、张艳、顾沛、刘波、史志鹏、刑洪涛、肖薇、李晓炜、杨小亚、赵刚、马轩龙、谢莹莹等师兄姐妹的帮助，几年的朝夕相处使我们亲如

兄弟姐妹。我们一起学习、试验、探讨问题，试验站的饭后散步是夕阳西下的一道风景，为我的求学之路留下了美好的回忆。感谢舍友马蓓蓓、赵玉萍、李茂勋、杨白洁、张淑杰、聂承静，在安宁里的日子里，和谐相处，相互谦让，营造了良好的氛围。

感谢中科院动物所张润志老师，博士生黄顶成、董兆克、高凤娟，为牧草昆虫试验的合作所付出的努力和辛劳。感谢中科院地理所樊江文老师，耐心为我解答牧草方面的疑问，并给予了建设性的建议。感谢中国农业科学院土壤肥料研究所的林治安老师、许建新老师在试验过程中给予的指导和提供的帮助。感谢中国农业大学的曾昭海老师，对试验提出了好的意见和建议，并为我提供参考资料。感谢中国科学院研究生院的候彦林老师、齐晔等老师，在研究生院学习过程中给予的指导和帮助。感谢生态环境中心的白志辉老师、黄武仁老师，在微生物试验过程中给予的指导和帮助，感谢学友刘杰、李文颖、谷立坤、姜丹、王新新、何素雯、孟镇、杨凯、戴安娜、于清，我在生态环境中心做试验的这段日子里，给予的无私帮助和鼓励。感谢中国科学院华南植物园的傅声雷老师，在土壤取样和测定方面给予的指点，虽未谋面，但每次提问都耐心讲解，令我感动。感谢华南植物园的周丽霞老师，数次的电话和邮件联系，以及北京的短暂会面，耐心回答了我很多疑问，对工作的务实、敬业精神也让我佩服和感动。感谢美国农业部 Dr. Timothy R. Green，很 kind 的美国大朋友，细心的帮忙修改文章，并提出了建设性的意见。感谢 Dr. Robert Malone，热心的为文章提出建议，敏捷的思维方式和个性，北京之行留下深刻印象。

感谢研究生部谭寨璐、陈力、王淑强、储小红、黄文力等老师，从入学到毕业、从学习到生活，细致入微的工作，凝结了你们的辛劳，也赢得了我们每一个同学的尊敬和感谢。

最后还要特别感谢我的家人，谢谢父母几年来的理解和支持，7年多来，很少回家看望二老，但你们从未抱怨；谢谢公公婆婆，尽心帮忙照看孩子，数年来，对我的学业给予了大力支持和鼓励；感谢孩子，你是我前进的动力源泉，是你让我变得坚强、成熟，在你尚幼最需要妈妈的时候，我在外求学，不能在身边陪伴，未尽到做母亲的责任，是我今生最大的遗憾；感谢爱人，这几年来的默默支持和奉献。

衷心感谢所有关心、帮助、指导和批评过我的朋友们！

潘国艳
2010年5月