

密级:

论文编号:

中国农业科学院 学位论文

黄淮海北部平原区资源节约型种植制度研究

Study on Resource-saving Cropping Systems
in Northern Region of Huang-huai-hai Plain

硕士研究生: 王海霞

指导教师: 逢焕成 研究员

申请学位类别: 农学硕士

专业名称: 作物栽培学与耕作学

研究方向: 资源节约型农作制

培养单位: 农业资源与农业区划研究所

研究生院

提交日期 2011 年 6 月



Secrecy:

No.

**Chinese Academy of Agricultural Sciences
Master Dissertation**

**Study on Resource-saving Cropping Systems
in Northern Region of Huang-huai-hai Plain**

Ms. Candidate: Wang Haixia

Advisor: Prof. Pang Huancheng

Major: Crop Cultivation and Farming System

Specialty: Resource-saving Farming System

Chinese Academy of Agricultural Sciences

June, 2011

本研究得到公益性行业（农业）科研专项（200803028）和公益性行业（农业）科研专项（201103001）项目资助。

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农业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：

孙海霞

时间：2011年 6 月 20 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业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。同意中国农业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)

论文作者签名：

孙海霞

时间：2011年 6 月 20 日

导师签名：

李正

时间：2011年 6 月 20 日

中国农业科学院

硕士学位论文评阅人、答辩委员会签名表

论文题目		黄淮海北部平原区资源节约型种植制度研究				
论文作者		王海霞	专 业	作物栽培学与耕作学	研究方向	资源节约型农作制
指导教师		逢焕成		培养单位（研究所）		农业资源与农业区划研究所
姓名		职称	硕（博）	单 位	专 业	签 名
评 阅 人	任天志	研究员	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	生态学	
	张海林	副教授	硕导 <input checked="" type="checkbox"/> 博导 <input type="checkbox"/>	中国农业大学农学与生物技术学院	作物栽培学与耕作学	
答 辩 主 席	陈 卓	教授	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业大学农学与生物技术学院	农业区域发展	陈卓
答 辩 委 员	任天志	研究员	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	生态学	任天志
	王 璞	教授	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业大学农学与生物技术学院	作物栽培学与耕作学	王璞
	周 卫	研究员	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	植物营养学	周卫
	刘宏斌	研究员	硕导 <input checked="" type="checkbox"/> 博导 <input type="checkbox"/>	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	植物营养学	刘宏斌
	严昌荣	研究员	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所	生态学	严昌荣
	邹国元	研究员	硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input checked="" type="checkbox"/>	北京市农林科学院植物营养与资源研究所	植物营养学	邹国元
			硕导 <input type="checkbox"/> 博导 <input type="checkbox"/>			
会议记录（秘书）		李继峰				
论文答辩时间地点		2011.6.11 资源区划所南楼2楼会议室				

摘 要

黄淮海平原区是我国农业生产中面临各种效益冲突的典型地区,有限的水、肥、耕地资源能否可持续利用直接关系到该区乃至全国农业的可持续发展。发展资源节约型农作制技术是实现我国以及该区农业资源高效利用和保证粮食安全的重要途径。因此,从资源合理高效利用和可持续发展角度考虑,在该区开展获取典型区域不同作物生长基础参数的田间试验研究显得十分必要,这能为我们探索构建资源节约、高效利用的种植制度与配套技术体系提供理论基础和实践依据。

研究以河北省吴桥县为试验基地,开展了节水、节肥、节地等资源节约、高效利用试验,系统研究了不同灌溉模式、施肥模式、水肥模式对冬小麦-夏玉米的生长发育、产量、耗水特征、水肥利用的影响,并比较了不同种植模式下各种作物的产量、资源利用及经济效益等,目的是筛选适合当地生产的比较效益最优的节水灌溉模式、节肥模式、水肥高效利用模式和种植模式。研究的主要结果如下:

1.节水灌溉模式试验研究结果表明:(1)三种灌溉模式下,冬小麦全生育期对土壤水的消耗随灌溉量的增加而减少,夏玉米季总耗水量随冬小麦季灌溉量的增加而增加。浇两水(底墒水+拔节水, W2)处理和浇三水(底墒水+拔节水+灌浆水, W3)处理周年作物总产量均显著高于浇一水(底墒水, W1)处理,增幅分别为 8.7%和 12.5%。W2 处理冬小麦水分利用效率(WUE)比 W3 高 11.1%,而其夏玉米水分利用效率(WUE)与 W3 处理差异不显著。W2 和 W1 处理的周年水分利用效率(WUE_T)分别为 21.28 和 21.60 kg/mm/hm²,比 W3 处理分别高 7.8%和 9.4%。综合周年产量、耗水量和水分利用效率,W2 是较好的节水丰产灌溉模式。(2)不同冬小麦品种间节水潜力有较大差异。相同灌溉量下,石麦 15 的产量均高于济麦 22,其中石麦 15 浇二水处理(T22)的 WUE 最高,达 20.22 kg/mm/hm²,比济麦 22 浇二水(T12)高 21.9%,比济麦 22 浇三水(T13)高 7.4%。这说明,石麦 15 有一定的节水高产优势,在水资源紧缺的黄淮海北部平原区将适宜的品种与优化的灌溉相结合,有利于冬小麦当季节水增产,且冬小麦季进行节水栽培(W2)能保证周年作物高产稳产和较高的水分利用效率。

2.节肥模式试验研究结果表明:(1)节肥方案 1(FS1:冬小麦、夏玉米均每公顷基施纯 N、P₂O₅、K₂O 分别为:157.5kg、138kg、112.5kg)的冬小麦长势相对较好,产量最高,达 7897.6kg/hm²,显著高于其它四种施肥模式。FS1 模式下冬小麦的 WUE 最高,比 CK(不施肥)的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t分别提高 57.7%、43.9%和 27.0%。FS1 较其它四种施肥模式的氮素生理效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率都保持了较高水平,表明 FS1 模式对提高冬小麦氮肥效应有显著作用。(2)FS1 模式下冬小麦-夏玉米的总产量高于其它四种模式。周年籽粒 WUE 以 FS1 模式为最高,周年氮肥农学效率以 FS1 最高。结合耕层土壤养分含量在不同施肥模式下的变化,FS1 施肥模式综合效应较好,优于其他模式,该模式保证了冬小麦-夏玉米的高产和高水肥利用效率并且较好的改善了土壤养分含量,效益显著。

3.水肥模式试验研究结果表明:(1)五种水肥模式(分别为水肥方案 A、B、C、D、E)周年实际总产量表现为:A>D>B>C>E,相对于 E,A、D、B、C 模式分别提高的幅度为 23.3%、11.34%、8.04%和 6.19%。(2)冬小麦-夏玉米周年总耗水量随冬小麦季灌水量的增加而增加,A 模式达最高为 938.8mm,比 D 模式高出 129.9mm。周年籽粒 WUE 以 D 模式最好,为 22.57kg /mm/hm²,

比 A、B、C、E 四种模式分别高出 10.5%、13.4%、8.7%和 13.9%，表明冬小麦季浇返青水的 B 模式只是增加了总耗水量，对产量的增加和水分利用效率的提高几乎无贡献。(3) 周年氮素生理效率，D 模式稍高于其他模式，但五种模式基本相同。周年氮肥偏生产力表现为 $D > C > E > A > B$ ，表明，D、C 的氮肥评价效应要好于 A、B、E，而 D 模式相对 C 要更胜一筹。从经济、节水的角度综合来看，水肥投入均较少的 D 模式（冬小麦一底一拔节水+氮肥一底一追配合夏玉米氮肥一底一追）为最佳水肥高效利用模式。

4. 种植模式试验研究表明：(1) 一年两熟制三种模式的年平均产量大于两年三熟制三种模式的年平均产量，大于一年一熟制的春棉花。两年内，一年两熟制的冬小麦—夏玉米模式的总产量最高，显著高于其他种植模式。(2) 三种熟制两年总耗水量表现为：一年两熟 > 一年一熟 > 两年三熟，以两年三熟最为省水。七种模式总 WUE 以冬小麦-夏玉米最高，达到 18.0kg/mm/hm^2 ，春玉米→冬小麦-夏玉米次之，为 16.6kg/mm/hm^2 。(3) 从用水效益来看，研究区一年一熟制的春棉花和一年两熟制的冬小麦—夏玉米经济效益最大。(4) 从产投比考虑，两年内春棉花、春玉米→麦-玉和冬小麦—夏玉米三种模式较好，其中，春棉花模式产投比最高达 2.71，且两年内系统纯收益也以这三种模式显著高于其它四种模式。(5) 综合分析表明，适合研究区的种植模式为：一年两熟制的冬小麦—夏玉米、春棉花单作，两年三熟制的春玉米→冬小麦-夏玉米，而其它四种模式因各方面的效益较低，因此可以考虑适当压缩种植面积。因两年内春玉米→麦-玉种植模式比冬小麦—夏玉米总耗水量节省 257.3mm，且考虑到该区严重缺水的现实，春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟模式可能是未来的较佳的熟制选择。

关键词：黄淮海平原，资源节约，种植制度，节水，节肥，水肥高效利用

Abstract

Huang-huai-hai Plain was the typical area of benefit conflicts on agricultural production in China. Whether the limited water and fertilizer and arable land resources in this area could be sustainable utilization or not was directly related to the sustainable development of national agriculture. Developing resource-saving farming system technology in this area and in China was the important way to get highly-efficient use of agricultural resources and ensure food security. So, from the view of resource efficient utilization and sustainable development, the field experiment researches to obtain different crop growth parameters in typical regions of Huang-huai-hai Plain were imperative. These works could provide us with the theoretical and practical basis to explore resource-saving and highly-efficient use farming systems in this area to construct the resource-saving farming systems and technical systems.

The experimental base, was located in Wuqiao County, Hebei Province. We regarded the resource-saving and highly-efficient use farming system as the primary content to study the effects of different water-saving, fertilizer-saving and water-fertilizer-saving modes on the crop growth, yield, water consumption, water and fertilizer use efficiency of winter wheat-summer maize. Also we studied different crops yield, resource utilization and economic benefits of different cropping systems. Our purpose was to choose the optimal water-saving modes, fertilizer-saving modes and cropping systems whose relative benefits were best to fit for local production. The main results were as follows:

1. The water-saving irrigation experiments results indicated that: (1) With the three irrigation modes, the soil water consumption in winter wheat season decreased with increasing irrigation amounts, while water consumption in summer maize season increased with the increasing irrigation amounts of winter wheat season. The increment of the annual yield of winter wheat-summer maize with irrigation mode W2 (irrigated before sowing and at jointing stage: 75mm+90mm) and W3 (irrigated before sowing, at jointing stage and at filling stage: 75mm+90mm+60mm) was 8.7% and 12.5% higher than that with W1 (irrigated before sowing: 75mm), respectively. The WUE of winter wheat with the irrigation mode W2 was 11.1% higher than that with W3, but the WUE of summer maize had less difference between irrigation modes W2 and W3. The annual WUE (WUE_T) of W2 and W1 was 21.28 kg-mm-hm⁻² and 21.60 kg/mm/hm², being 7.8% and 9.4% higher than that of W3, respectively. Considering the annual yield, water consumption and WUE, irrigation mode W2 could be the advisable mode for water-saving and high-yielding. (2) There was different water-saving potential between winter wheat varieties. The results show that the yields of Shimai15 (T2) were higher than that of Jimai22 (T1) under three irrigation modes. The WUE of T22 was the highest one which was up to 20.22 kg/mm/hm², and it was 21.9% higher than that of T12 and 7.4% higher than that of T13. It was very clear that Shimai15 had water-saving and higher yield advantages. The water-saving irrigation experiments showed that combining suitable varieties and optimized irrigation modes were helpful for saving water and increasing yield in northern region of Huang-huai-hai Plain which was short of water resources.

2. The tests of fertilizer-saving modes experiments results indicated that: (1) With the fertilizer-saving modes 1 (FS1: The N, P₂O₅, K₂O applied to winter wheat and summer maize were all

157.5kg/hm²、138kg/hm²、112.5kg/hm²), winter wheat grew well and its yield was 7897.6kg/hm² which was significantly higher than other four fertilizer modes. The WUE of FS1 of winter wheat was the highest one which is respectively 57.7%, 43.9%, 27.0% higher than CK (without fertilizer) in Grain WUE, Biological WUE, WUE_t. The N physiological efficiency, Nitrogen partial productivity and Nitrogen agronomic efficiency of FS1 were relatively higher and the results suggested that fertilizer modes FS1 was better in improving the nitrogenous fertilizer effect of winter wheat. (2) The annual yield of winter wheat-summer maize of FS1 was higher than other four fertilizer modes. The increase rate of annual yield of FS1 was the largest. The Grain WUE of FS1 was the highest one. The integrated effect of FS1 was better than the other four modes considering the changes of soil nutrient content in topsoil. The fertilizer modes FS1 ensured the high yield and high water-fertilizer use efficiency of winter wheat-summer maize system and it improved the soil nutrient content, so its benefits were outstanding.

3. The water and fertilizer modes experiments results indicated that: (1) With five water and fertilizer modes which were represent by A, B, C, D, E respectively, the annual yield of winter wheat-summer maize were A>D>B>C>E. The annual yield of A, D, B, C were respectively 23.3%, 11.34%, 8.04%, 6.19% higher than that of E. (2) The total water consumption of winter wheat-summer maize increased with increasing irrigation amount of winter wheat. The water consumption of A was the highest up to 938.82mm and it was 129.9mm higher than that of D. The annual Grain WUE of D was the highest one which was up to 22.57kg/mm/hm². The annual Grain WUE of D was respectively 10.5%, 13.4%, 8.7%, 13.9% higher than that of A, B, C, E. The results indicate the mode B irrigated "Regreening stage irrigation water" just increased the total water consumption with little to increase yield and WUE. (3) The annual N physiological efficiency of five modes were nearly equal but the mode D was slightly higher than the other modes. The annual nitrogen partial productivity were D>C>E>A>B. These results showed the nitrogen fertilizer evaluation effects of D, C are better than A, B, E while the effect of D even better than C. Considering economic benefit and water-saving effect, the mode D (The winter wheat was irrigated and fertilized before sowing and at jointing stage, the summer maize was fertilized before sowing and at jointing stage) which was input less water and fertilizer was the better mode of high water and nitrogen use efficiency.

4. The planting modes experiments results indicated that: (1) The average yield of double cropping systems were more than that of three crops in two years and cotton sole cropping. In two years, the total yield of winter wheat-summer maize was significantly higher than other cropping systems. (2) In two-year rotation circle, the total water consumption of double cropping systems were more than that of sole cropping and more than that of three crops in two years. Analysing the WUE of two years, the total WUE of winter wheat-summer maize was the highest one which was up to 18.0kg/mm/hm², spring maize→wheat-maize was next up to 16.6 kg/mm/hm². (3) The economic benefits of cotton sole cropping and winter wheat-summer maize double cropping system were better from the perspective of using water more efficiently. (4) In two years, the ratio of outputs to inputs of cotton were the highest one which was up to 2.71 and that of spring maize→wheat-maize and winter wheat-summer were

higher than other planting modes. Also, the net benefits of the three modes were higher. (5) The synthetical analysis results indicated that winter wheat-summer maize, spring maize→wheat-maize and cotton were suitable to be planted in study region while the other four planting modes should be reduced. Considering the fact of severe water shortages in study region, the mode spring maize→wheat-maize could be the best planting mode in the future because its total water consumption in two years was 257.3mm less than that of winter wheat-summer maize.

Keywords: Huang-huai-hai Plain, resource-saving, cropping system, water-saving, fertilizer-saving, efficient use of water and fertilizer

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景、目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 节水模式及技术研究	3
1.2.2 节肥模式研究	4
1.2.3 水肥高效利用研究	5
1.2.4 高产高效种植模式研究	7
1.3 研究内容和技术路线	7
第二章 不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米产量与水分利用的影响	9
2.1 材料与方法	9
2.1.1 试验地概况	9
2.1.2 试验设计	9
2.1.3 样品采集与测定	10
2.1.4 数据、公式计算	10
2.2 结果与分析	11
2.2.1 不同灌溉模式对冬小麦生长发育的影响	11
2.2.2 不同灌溉模式对冬小麦产量的影响	12
2.2.3 不同灌溉模式对冬小麦土壤水分动态和水分利用效率的影响	13
2.2.4 小结	15
2.2.5 不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米周年产量的影响	16
2.2.6 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米周年水分效应分析	17
2.2.7 小结	20
第三章 不同施肥模式对冬小麦-夏玉米产量与水氮利用的影响	21
3.1 材料与方法	21
3.1.1 试验地概况	21
3.1.2 试验设计	21

3.1.3 样品采集与测定	22
3.1.4 数据、公式计算	23
3.2 结果与分析	23
3.2.1 不同施肥模式对冬小麦生长发育及产量的影响	23
3.2.2 不同施肥模式对冬小麦土壤水分动态及水分利用效率的影响	25
3.2.3 不同施肥模式对冬小麦氮素吸收利用的影响	27
3.2.4 小结	29
3.2.5 不同施肥模式对夏玉米及周年体系产量和水分利用效率的影响	30
3.2.6 不同施肥模式对夏玉米及周年体系氮素吸收利用的影响	31
3.2.7 不同施肥模式对土壤肥力平衡状况的影响	33
3.2.8 小结	34
第四章 不同水肥模式对冬小麦-夏玉米产量与水肥利用的影响	36
4.1 材料与方法	36
4.1.1 试验地概况	36
4.1.2 试验设计	36
4.1.3 样品采集与测定	37
4.1.4 数据、公式计算	37
4.2 结果与分析	37
4.2.1 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米生长发育的影响	37
4.2.2 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米穗部性状及产量的影响	41
4.2.3 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米耗水及水分利用效率分析	42
4.2.4 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米养分吸收利用的影响	44
4.3 小结	49
第五章 不同种植模式的产量、经济效益及水分效应比较	51
5.1 材料与方法	51
5.1.1 试验地概况	51
5.1.2 试验设计及目的	51
5.1.3 样品采集与测定	52

5.1.4 数据、公式计算	52
5.2 结果与分析	53
5.2.1 不同种植模式的系统产量比较	53
5.2.2 不同种植模式的经济效益比较	54
5.2.3 不同种植模式的水分效益比较	54
5.2.4 不同种植模式两年内土壤养分变化情况	58
5.3 小结	59
第六章 主要结论	61
参考文献	63
致 谢	69
作者简介	70

第一章 绪 论

1.1 研究背景、目的和意义

我国人口众多耕地面积少, 虽是农业自然资源总量的大国, 但却是人均资源量的小国, 特别是人均耕地和人均水资源量仅分别为世界平均值的 $1/3$ 左右和 $1/4$ (李荣生, 1999), 是世界上农业资源严重匮乏的国家之一。农业自然资源短缺、浪费与不合理利用并存, 这些问题与生态环境问题交织在一起, 严重困扰着我国农业与农村经济的持续稳定发展。而作为我国粮食主产区的黄淮海平原在水土资源十分紧张的情势下, 仍面对着巨大的粮食生产压力, 为此研究适宜该区的资源节约型农作制模式就显得十分必要。

黄淮海平原作为中国的第二大平原它位于黄河下游, 地势低平且多在海拔 50 米以下, 是典型的冲积平原, 主要由黄河、淮河、海河、滦河冲积而成。黄淮海平原属于暖温带半湿润气候, 热量充足, 季节分明, 该区从北到南年平均降水量为 500mm~800mm, 从年平均值看, 能够维持雨养型农业。但是, 黄淮海平原的降水主要受太平洋季风的强弱和雨区进退的影响, 地区上分布不均匀, 季节间和年际间变化更是剧烈 (姜文来, 等 2007)。作为重要的农业生产基地, 该区存在水资源不足, 水土资源组合不佳的问题, 这些问题正日益成为限制该区农业生产发展和制约作物正常生长的主要障碍因素 (刘昌明, 等 1996, 1997), 黄淮海成为中国水资源承载能力与经济社会发展最不适应的地区 (刘昌明, 等 2001)。

按照我国九大农区划分, 黄淮海平原包括北京、天津、河北、江苏、安徽、山东、河南等 7 个省市的 376 个县市区。据统计, 黄淮海平原土地面积为 $44.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国土地面积的 4.6%; 总人口为 27439 万人, 占全国总人口的 21.1% (2004 年); 耕地面积为 $2289.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 18.6% (2003 年) (吴凯, 等 2006)。该地区不仅是中国政治、经济、交通及文化的中心地带, 而且也是重要的粮食生产基地, 特别是冬小麦、夏玉米和棉花的具有比较优势的区域, 对我国粮棉油等作物的供应具有不可替代的作用 (刘巽浩, 等 1985; 孙颖, 1994)。2002 年底, 华北地区粮食产量为 1.25 亿吨, 是全国粮食总产量的 27.32% (宋文浚, 2006), 该区是带动中国中西部地区发展的主要地区, 是解决中国 13 亿人口温饱问题的主要粮食产区, 对各种资源的需求量大, 农业资源供需矛盾尤其突出, 这些尖锐的矛盾主要表现在以下几个方面:

一、水资源与耕地资源短缺矛盾尖锐

(1) 我国的水资源总量为 28124 亿 m^3 , 位居世界第六位 (刘涛, 2004), 但由于我国人口众多, 人均水资源占有量仅约为 2200 m^3 , 相当于世界人均占有量的 $1/4$ (张岳, 1998; Tsutsui.H, 1993; 姜文来, 等 2001; 杨旭, 等 2006)。平均每公顷耕地占有水资源量 21600 m^3 (吴景社, 等 2001), 耕地亩均占有水量为世界平均水平的 $2/3$, 被列为世界十三个贫水国之一 (隋鹏, 2005)。随着经济的发展和人口数量的增多, 我国水资源面临的形势将更为严峻。我国年供水总量约为 5000 亿吨, 而农业用水量占全国总用水量的 70% 左右 (山仑, 等 2002), 其中农田灌溉用水量占农业用水总量的 90% (汪恕诚, 2003)。短缺与浪费并存是中国农业用水紧张的主要特征 (张明生, 等 2005)。作为我国粮食主产区的黄淮海平原水资源供需矛盾尖锐, 压力巨大, 其独有的特征: 一是水资源贫乏, 黄淮海流域水资源总量仅占全国的 7.6%, 人均均为 453 m^3 , 为全国人均水平 $1/5$, 是中国水资源承载能力与经济社会发展最不适应的地区 (刘昌明, 等 2001)。二是水资源时

空分布不均,与农业生产的需求及耕地分布的匹配不佳,该地区水资源在时间分布上具有明显的季节性,全年降水的60%~80%集中在6~9月(朱希刚,1998)。而农业生产最需水的季节是3月至5月,两者极不匹配,长期以来农业生产极不稳定。三是地表水资源的缺乏以及长期以来由于该地区实行不节制灌溉,各种因素造成地下水资源采补失衡,在部分地区如:河北省的石家庄、沧州和天津等地形成严重的地下漏斗(刘明,2008;李玉义,等2008)。并且该区由于人口增加,城市的扩张,非农用水量也日益增加,气候环境变化及作物熟制改变,农业用水量加大。由于各种因素的胁迫作用,该地区的水资源成为其农业发展的最大障碍。有人计算,2000年该平原三大农作物的耗水量为 $819.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总需水量的82.2%,缺水率达17.8%(侯满平,等2004)。

(2)我国人均耕地为0.094公顷,不到世界平均水平的1/2。黄淮海平原地区耕地面积占全国的1/6,耕地数量及垦殖率均居全国各一级农区首位。2000年全国人均耕地占有量为 $0.101 \text{ hm}^2/\text{人}$,黄淮海各地区都小于全国平均水平,尤其是北京($0.038 \text{ hm}^2/\text{人}$)、河南($0.052 \text{ hm}^2/\text{人}$)人均耕地面积少表现突出。近20年来耕地面积呈减少趋势,年均减少 $7.89 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。耕地中中低产田占全区耕地面积的84.5%(吴凯,等2001),大面积中低产田的存在是制约该平原农业发展的重要因素,也是影响农民收入增加以及农村经济发展的重要原因。

二、水肥资源综合利用效率低

(1)2006年我国的农业用水占总用水量的63.2%,主要用于灌溉。而我国灌溉水的利用率仅为43%左右,只有国际先进水平的60%(唐华俊,等2008),旱地自然降水的利用率平均不到50%,北方灌区的大部分灌溉定额高出作物实际需要的2~5倍。水资源利用率只相当于世界先进水平的1/2左右。黄淮海平原地区虽然水资源紧张、用水紧缺,但该区农作物的水分利用效率仍然很低,并且由于地表水资源缺乏,地下水已经成为重要的灌溉水源。黄淮海地区农业灌溉面积为 $0.23 \times 10^8 \text{ hm}^2$,占全国的42%(龚宇,2007),而节水灌溉面积只占耕地面积的26.21%,最低的河南只占15.35%(姜文来,等2007)。

(2)我国作为世界人口大国,随着经济的发展和人口的增多,耕地的逐年减少,粮食自给面临严峻局面,提高粮食单产是解决粮食自给的主要途径。而粮食的增产离不开施肥,自2002年以来作为目前世界上肥料(化肥)用量最多的国家,2005年中国化肥表观消费量已经达到5538万吨(张卫峰,2007),消费总量占全球35%(Heffer P, et al.2006),全国单位播种面积化肥施用量已超过 $350 \text{ kg}/\text{hm}^2$,约为世界平均水平的2倍(李长生,等2006)。由于科学施肥理论与节肥型农作技术未取得重大突破,农户化肥用量越来越大而肥料效率不断下降。尤其是经济较发达的集约化农业区,大田作物氮肥施用量已达到 $450\sim 600 \text{ kg (N)}/\text{hm}^2$ (张福锁,等2009),但是氮肥的当季利用率平均只有30%左右(伍宏业,等1999)。化肥用量不断增长的状况在带来资源紧张、效益下降的同时,也因过量施肥导致了土壤中养分的大量累积,增加了营养物质向环境中排放的风险。黄淮海平原也面临同样严峻的问题,化肥的施用量逐年增加但肥料利用率却不见提高,例如:有人研究在华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系中,传统施氮肥条件下,当季作物对化肥氮的吸收率为25%,0~100cm土壤残留率为25%~45%,一个轮作周期的吸收率为28%,损失率为40.4%,两个轮作周期的吸收率为33.6%,损失率为49.8%(潘家荣,2001)。损失的氮肥以各种形式排放到环境中,产生一些列环境问题如地下水硝酸盐含量超标、水体富营养化、温室气体的排放等,也给当地居民的生活生产带来不良后果,其严重影响地区发展的社会、经济以及生态效益。

三、资源矛盾尖锐但却是保障我国粮食安全的重要地区

黄淮海地区农业在全国农业中占有重要地位,是我国重要的粮食生产基地。近十年,在粮食作物中,冬小麦播种面积占全国的 36%~40%,产量约占全国的 50%;棉花播种面积占全国播种面积的 32%~42%,产量约占全国的 40%;夏玉米播种面积占全国的 27%~29%,产量约占全国粮食总量的 30%;大豆播种面积占全国播种面积的 18%~19.4% (姜文来,等 2007),粮食总产量占全国总量的 35.4% (屈宝香,等 2003),可见该区在全国农业生产中的作用。近年来,尽管黄淮海地区农业发展存在下滑的趋势,但在全国农业的重要地位没有动摇,它是保障我国未来食品安全的主要区域。在当前与未来中国食物安全问题形势严峻的情况下,黄淮海维系区域粮食安全的作用不可忽视,尤其是保障冬小麦和夏玉米等粮食作物的供给上。

维持或提高作物产量,减少生产风险,降低对自然资源的消耗和对土壤、水质的破坏,实现经济、生态和环境效益的结合同样是可持续农业追求的目标 (FAO, 1993)。黄淮海平原是我国农业生产中面临的各种效益冲突的典型地区,该区水土资源的可持续利用直接关系到全区乃至全国农业的可持续发展以及增长态势。要保障粮食安全、提高农业整体效益、促进农业可持续发展关键在于能否建立起资源节约型的农业结构。而发展资源节约型农作制技术是实现我国以及该区农业资源高效利用和保证粮食安全的重要途径。为此,本研究着重在该区探讨研究节水、节肥、节地等资源节约和高效利用的农作制模式,构建区域资源节约型农作制模式与配套技术体系。集约、高效、节约地利用有限的农业资源,缓解人口持续增加而造成的人均资源日趋短缺的矛盾,达到提高效率、降低成本、降低环境风险,促进经济、社会和生态效益协调发展,最终保证农业的可持续发展。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 节水模式及技术研究

据估算,全世界干旱半干旱地区现有耕地 6 亿多公顷,约占世界耕地面积的 42.9% (张义丰,等 2002)。世界各国都很重视农业节水技术的研究与发展,高新技术在节水农业中的应用日益广泛,新技术、新材料和新设备与传统农业节水技术得到了有机融合,突出表现在节水种植技术、覆盖节水技术、节水生化制剂、现代微喷技术和水肥信息采集与预警系统等方面得到了很大的创新性发展、取得许多成功的经验 (武雪萍,等 2005)。工程节水方面,如日本的田块扩大、激光平地技术和管道输水,美国的喷滴灌、先进的地面灌溉、非充分灌溉技术,法国的渠道系统控制和自动化等。农艺技术方面,如抗旱节水作物品种的应用、保护性耕作、田间覆盖、节水生化制剂 (保水剂、吸水剂、种衣剂) 和旱地专用肥等技术,也都有广泛应用 (严冬,等 2004)。总的来看,高科技、高效益成为现代节水型农作制的发展方向,调减高耗水的大田粮食作物,建立以经济型产业 (品) 等为主导的效益型种植业结构,成为节水农作制的发展途径 (武雪萍,等 2005)。发达国家在农业生产实践中把提高灌溉 (降) 水的利用率、单方水的利用效率、水资源再生利用等作为研究重点和主要目标。

节水农作制是以农业生产结构的调整和布局优化、农业节水技术组装集成及管理水平提高为主要手段,改善农业用水结构和水分利用效率,从总体上提高区域的水资源利用效率和水分利用经济效益,最大限度地实现区域水资源的持续高效利用。具体的农业节水生产模式有:调整种植

制度节水技术模式、耕地整理节水技术模式、节水灌溉技术模式、水肥一体化调控节水技术模式等(孔箫铎, 2009)根据区域和种植区的水资源实际情况, 调整和优化种植结构, 建立以水分均衡利用和农林牧结合协调发展的可持续农作系统是新近发展起来的、更高层次的节水农作制度研究领域(唐华俊, 等 2008)。以色列 20 世纪 70 年代开始对农业结构进行大幅度调整, 实行以园艺业生产为主的出口主导型农业结构, 实现了农业由低效耗水型向节水高效型的转变(陈俊华, 等 2000)。美国德克萨斯州高平原地区建立了棉花-饲料-畜牧综合系统, 减少了 23% 的灌溉量和 40% 的施氮量, 总体经济效益较单作系统提高了 90% (V.G.Allen, et al.2005)。澳大利亚在不同降水区建立了不同的农作系统, 同时针对地区因地下水位升高引起的盐渍化问题将多年苜蓿、林木引入种植-畜牧系统, 建立了以水分均衡利用和农林牧综合协调发展的可持续农作系统 (M.L.Poole, et al.2002; E.Wang, et al.2008; David J., et al.2004; Groantiwar S D., et al.2005)。埃及也展开了不同节水农作制预案研究, 如: 选育耐盐节水品种、种植节水高价值作物替代水稻、甘蔗等高耗水作物、退出低洼盐碱地种植以保证新垦耕地和传统高产田灌溉等以选择适合本地区的节水种植模式来应对干旱缺水等问题 (H.M.El-shajxr, et al.1997)。

我国节水农业的发展始于 70 年代, 80 年代以来受到政府和社会各界的普遍关注(罗其友, 1999), 在借鉴国外成功节水农业经验的基础上结合我国国情, 适时调整农业布局和种植结构, 因地制宜地提出适宜的节水农作制技术及发展模式体系。北方地区主要以冬小麦、夏玉米为主间套复种经济作物高产高效节水种植模式, 南方地区主要是以稻田为主立体种养的高效节水发展模式。如: 中国农业大学与中国农业科学院农田灌溉研究所合作在河北吴桥进行冬小麦、夏玉米两作节水高产栽培技术研究, 提出冬小麦生产四统一技术模式(王志敏, 等 2006)。河南豫西、豫西北在严重缺水的丘陵山区推广应用的集雨补灌节水技术(武继承, 等 2003)。陕西渭北采用的全膜覆盖双垄集雨沟播栽培, 融合覆盖抑蒸、集雨补水、增温保墒为一体, 强化农艺农机技术结合的旱地春夏玉米高产高效栽培技术模式(闫武斌, 等 2010)。甘肃定西旱地农业区将保护性耕作与不同的轮作方式配套使用的节水耕作模式(黄高宝, 等 2006)。东北地区的旱地保护性耕作节水模式, 旱地夏玉米垄膜沟种微集水高产种植模式、寒地水稻机械覆膜等距穴播节水栽培模式、大豆节水高产优质栽培模式等(逢焕成, 等 2008)。宁南半干旱地区的灌溉农田高效多熟的种植模式等(王龙昌, 等 2000)。在一些传统的节水栽培模式上通过合理搭配年内、年际间的作物种类及作物面积的比例也可达到空间上和时间上的节水(郭清毅, 等 2005)。

我国的节水农作制研究工作对提高作物水分利用效率、节约用水、改善农田土壤环境和提高作物产量等方面起到了重要作用。但是, 有关的农作制节水技术推广速度慢、效果相对较差, 农业水资源管理和落实跟不上, 造成了农业节水技术的潜力没有得到真正发挥, 也浪费了很多水资源(毛学森, 等 2003), 因此, 在重视节水农作制技术和模式研究工作的同时应综合农业节水的实体因地制宜地全面推广农业节水技术和模式。

1.2.2 节肥模式研究

化肥在我国粮食生产上具有不可替代的作用, 施用化肥显著提高了农作物的产量。目前, 我国单位面积化肥施用量位于世界前列, 且用量持续增长。化学肥料的大量投入在促进农业迅速发展的同时, 也引起了一些列环境、资源和产投比降低等问题(朱兆良, 2008)。据估算, 我国的

氮肥利用率只有 28%~41%，平均为 35%，磷肥为 20%~40%，钾肥为 30%~40%，与发达国家相比尚有很大差距（于青，2009）。化肥的持续大量使用（尤其是氮肥），一方面造成肥料的增产效果下降、氮肥利用率降低，施肥经济效益下降；另一方面，过量的氮素在土壤中积累造成了环境污染，土壤中的氮肥大约 30%~50% 经土壤淋溶进入地下水导致地下水中硝酸盐含量上升，严重污染了地下水，还有一部分氮被转化为 NO 和 N₂O 进入大气环境中，引起大气质量的严重恶化。而磷肥在土体中的大量累计也会造成巨大的环境风险，另外长期不平衡施肥还造成土壤污染和其它养分元素的耗竭，导致土壤肥力下降等问题。因此，在改善作物营养状况的同时提高养分利用效率、减少环境污染，是目前农业领域研究的重点。现阶段土壤氮肥的施用，如：深施氮肥、缓效肥料、硝化和脲酶抑制剂、氮高效品种选育等，是国内外较为常用的提高氮肥利用率的有效方法。

由于化肥利用率与其施用方式和肥料品种间的搭配密切相关，不同的肥料品种、施用时间和施用方法则导致了不同的利用率，尤其以单质氮肥效果明显。如：小麦、玉米等粮食作物追施氮肥深施，比表土撒施后浇水可提高肥效 1 倍左右（朱兆良，等 1990），尿素深施比表土撒施可提高肥效 1/3 左右（李士敏，等 1999），氮、磷、钾配施不仅可以大大提高作物产量，同时可以降低土体中 NO₃⁻-N 残留量（孙克刚，等 1999）等。近年来，我国各地对施肥进行了广泛研究，各地进行了大量氮、磷、钾肥料试验，在推荐施肥和节肥增产工作上也有了很大进展，如：蔬菜平衡施肥研究（程季珍，1997），小麦、玉米分期定量补氮法（田远任，1990），小麦氮素调控施肥技术（黄德明，1994）和冬小麦生产四统一施肥法（朱兆良，2008）等。我国在借鉴国外土壤养分研究成果的基础上，通过综合分析，建立了植物快速测试推荐施肥体系。中国农业大学在多年深入细致研究的基础上，提出了利用作物肥料效应函数模型确定需肥总量（李志宏，等 1997），根据播前土壤无机氮测试确定基肥施用量，并在作物的关键生育期利用作物氮素营养状况速测诊断技术推荐追肥用量的氮肥管理模式。目前，氮肥推荐体系已经在小麦（黄生斌，等 2002）、玉米（钟茜，等 2006）、水稻（彭显龙，等 2006）、棉花（陈志超，等 2006）、蔬菜（张宏彦，等 2003）等多种农作物上得到研究应用。因此，深入研究土壤养分的转化和去向，并在定量研究各种氮肥损失的基础上，建立科学的施肥技术，是进行氮肥运筹进一步提高肥料利用率的重要环节。

1.2.3 水肥高效利用研究

水分和养分是作物生长不可缺少的因素，它们对作物生长的影响是相互的。合理的水肥配合，能达到以水促肥、以肥调水，水肥高效利用的目的。研究表明（吴海卿，等 2000），水分既影响土壤养分的有效性，也影响作物生长及养分吸收、转运与同化，水肥之间有着明显的交互作用。

目前，水分和养分对作物生长的单因素影响及相互作用方面的研究较多，尤其以对水分与氮素的研究更多。K.Latiri-Souki（1998）等研究认为灌水可显著增加砂质土壤的地上部分干物质量，而在粘质土壤上则无效果，但施用氮肥在两种质地土壤上均可获得正效应。Goods（1999）等研究表明，在水分胁迫条件下，适当供应某些肥料有利于作物生长。施肥能补偿水分胁迫下冬小麦生长发育缓慢、叶面积减小、叶片伸展缓慢和产量下降等不良反应所造成的损失。Michele Rinaldi（2004）研究认为，播种时土壤含水量对硬质小麦发芽、出苗及生长有重要作用，且同时影响土

壤氮素含量、吸收及作物生产力,并运用 CERES 小麦模型进行了播种时不同作物有效水分含量条件下的氮素优化分析。A.L.Garcia (1996) 等研究了三种不同氮素水平对番茄渗透调节的影响,表明中等浓度水平的氮素可增加叶片渗透浓度,并提高其耐受性。王朝辉 (2004) 等发现在不同生长期缺水及分蘖期补充灌水均能显著降低冬小麦对氮素的吸收,增加矿质态氮的残留。杨海川 (2008) 等,研究表明肥料中氮的利用或在土壤中的积累在很大程度上受作物供水的影响。增加水肥对产量有增加的作用,随着施肥量的增加产量呈递增趋势,但增加氮肥投入需同时增加浇水次数,浇水少时,氮肥投入到一定量后再增加氮肥产量反而降低。申云霞 (1995) 等通过人工控制土壤含水量的方法,对冬小麦水肥产量的交互效应研究结果表明,增加施肥量可提高冬小麦对土壤水分的利用程度,但低供水高施肥和高供水低施肥土壤水分的无效消耗增加,不利于提高水分生产效率。山仑 (1996) 研究认为,水分过多,易引起养分淋失 (特别是硝酸盐),造成土壤通气状况不良,产生反硝化脱氮损失,影响作物根系的呼吸作用,不利于作物吸收养分。水分亏缺影响土壤有机物的转化速率 (矿化过程),土壤缓效养分向速效养分的释放过程明显变慢、变少。

合理的肥料运筹以及农艺措施的使用可使土壤贮水量增加,提高作物的水分利用效率。在适宜的范围内,肥料越充足,作物根系越发达,吸水能力越强,水分利用率越高。肥料对水分效应的影响一方面增加作物的养分供应,促进根系生长,提高水分利用效率;另一方面则影响土壤溶液浓度,浓度过高时反而抑制根系的生长和对水分、养分的吸收。近年来,我国在水肥耦合效应方面的研究有很大进展。孟兆江 (1997) 等在夏玉米上研究了氮、磷、水三因素的综合效应。结果表明,水肥配合存在阈值。尹光华 (2004) 等发现水肥单因子对小麦水分利用效率有显著影响,影响顺序为:水>磷>氮。其中,氮、磷施用量对水分利用效率的提高是正效应,而灌水量对水分利用效率是负效应。金柯 (1999) 等、李法云 (2000) 等、巫东堂 (2001) 等在半干旱区也提出了相应的影响顺序。黄元仿 (2001) 等在区域农田土壤水、氮素行为模拟计算的基础上,建立了多目标混合最优化模型,采用线性加选择法优选水氮处理。建立水肥耦合模型,能拟合一定区域研究条件下的水肥产量效应,通过预测底墒、降水量确定目标产量,拟定合理的施肥量,达到以肥调水、以水促肥、肥水协调,提高水分与肥料的利用效率。另外,水肥一体化技术按照作物需水、需肥规律,根据土壤墒情和养分状况,通过低压管道系统将可溶性固体肥料或液体肥料配兑而成的肥液与灌溉水一起以较小的流量均匀、准确、定时、定量地直接输送到作物根部附近的土壤表面或土层中浸润作物根系发育生长区域,使主要根系土壤始终保持疏松和适宜的含水量,达到了肥效快,水分、养分利用率高的效果 (马建芳, 2008; 刘建英, 等 2006), 避免了铵态和尿素态氮肥施在地表挥发损失的问题。

有研究表明 (汪德水, 1999), 一般情况下随水、肥投入的增加作物产量增加,但水肥的利用率却随之下降,即高产与水肥一般不能同时高效。而黄淮海地区水资源有限,除应根据该区降水资源的时空分布特征和作物的需水特性,合理调整作物布局,选用耐旱,水分利用率高的作物品种外,还应重点突破水肥、产量高效一般不能两全的问题,应考虑如何采取合理的水肥配合措施以更好发挥水分和养分的协同效应,达到提高产量并同时使有限的水肥资源获得更高利用效率的目的

1.2.4 高产高效种植模式研究

种植模式是指一个地区或生产单位的作物组成、配置、熟制与种植方式等相互联系的一套技术体系。我国种植模式丰富多样,主要以间套作、复种和作物布局优化为主,如:高秆谷类作物与矮秆作物间作,麦田套作两熟与三熟;南方盆地丘陵区一年三熟不足两熟有余的情况下,旱地发展小麦(油菜)-玉米(大豆)-甘薯三熟制,也称传统旱三熟;云南烟、豆、菜、薯秋冬立体高效种植技术;把牧草纳入传统种植制度中的新型高产、优质、高效种植模式(付登伟,2010)以及果草间作、稻草轮作、小麦预留行间种草、四边地种草模式;冀西北高原聚水土水肥高效利用种植模式(文宏达,2006),河西绿洲灌区马铃薯间作绿肥高效种植模式(王婷,等2010);鲁中地区小麦、玉米高产种植模式(孙哲,等2010)等。研究表明,不同种植模式通过作物间的搭配起到节水高效效应,曹敏建(2002)认为,通过作物的轮作,在很大程度上会影响土壤水分的分配和利用,同时,集约的作物种植和轮作方式可以增加系统的水分利用效率(N.Islam, et al.2006; A.W.Lenssen, et al.2007)达到节水的目的。

为推进农业稳定、持续、高效发展,高效种植模式成为我国农业资源高效利用的必然选择。而黄淮海平原地区存在多种不同种植模式,在目前农业生产中,仍存在水资源短缺和肥料(氮肥)利用率低的问题,隋鹏(2005)对黄淮海平原多种种植模式进行了宏观的生态经济分析,得知该区农业生产发展是以牺牲巨大的水资源为生态代价且该区的农作模式的生态可持续性相当脆弱。针对该区水资源短缺矛盾尖锐的问题,许多学者开展了大量研究。对黄淮海地区的主要种植模式冬小麦/夏玉米一年两熟制的产量及水肥利用效率的相关研究比较多,如:刘振兴(2004)等提出滦河流域沙区土壤上冬小麦/夏玉米一次性底肥技术。刘文臣(2006)等研究的冬小麦-夏玉米周年一体化高产栽培技术。张新明(1999)等在山东恒台提出冬小麦套种夏玉米系统中以有机肥和氮肥相结合的生态系统全年安全合理施氮技术。王志敏(2006)等在河北省吴桥县多年研究出的冬小麦节水省肥简化高产“四统一”栽培技术等。这些高产高效种植制度在当地推广后,实现了水肥高效利用与超高产的统一。李志勇(2001),巨晓棠(2002)等研究证实,冬小麦夏玉米一年两熟制在应用水氮优化技术后,取得了大幅度节省水氮、保持产量不降低的良好效果。这些技术在研究区都取得了良好的应用,但均限于研究区小范围内,对跨地区推广还有一定的难度,并且针对黄淮海地区其他作物种植模式的研究相对较少,因此有必要对不同种植模式间的生态和经济效益进行综合比较,以优化不同生产目标下的各种种植模式并且有必要总结吸收已有的高产栽培经验,制定适合黄淮海平原大部分地区应用,即“普适型”高产高效种植模式。

1.3 研究内容和技术路线

以河北省吴桥县为试验基地,通过开展以资源节约和高效利用为主要内容的种植模式试验研究,获取典型区域作物水、肥、地等资源利用的一些基础参数,筛选适合当地生产的比较效益最优的节水灌溉模式、节肥模式、水肥高效利用模式和种植模式,以制定该区资源节约型农作模式、构建资源节约型农业结构。最终目标是通过“三节”(即节水、节肥、节地)实现“三增”(即增产、增收、增效),促进农业可持续发展。

具体研究内容有:(1)通过对不同灌溉模式下冬小麦、夏玉米单季及轮作体系作物的生长、物质生产、耗水特征以及水分利用的分析,探讨何种灌溉模式可适应研究区域,并筛选比较效益

最优的冬小麦-夏玉米种植体系的节水灌溉方案。(2)通过对不同的施肥模式应用于农作物的生长,研究不同施肥模式对冬小麦、夏玉米单季及轮作体系的生长、物质生产及水氮利用等的影响,分析最佳施肥方案,寻求适合研究区农业资源节约和可持续发展要求的施肥模式。(3)通过不同的水肥模式应用于冬小麦-夏玉米轮作体系,揭示不同水肥模式下作物的物质生产、养分吸收、耗水特征和水肥利用情况等,筛选适合研究区的最佳水肥高效利用模式。(4)通过比较研究区不同种植模式下各种作物的产量、水分和资源利用及不同种植制度的经济效益等,探求不同种植模式的资源节约潜力,筛选适宜当地生产的最佳种植模式,实现以较少的农业用地产生较大效益的目的。其技术路线如下图 1-1。

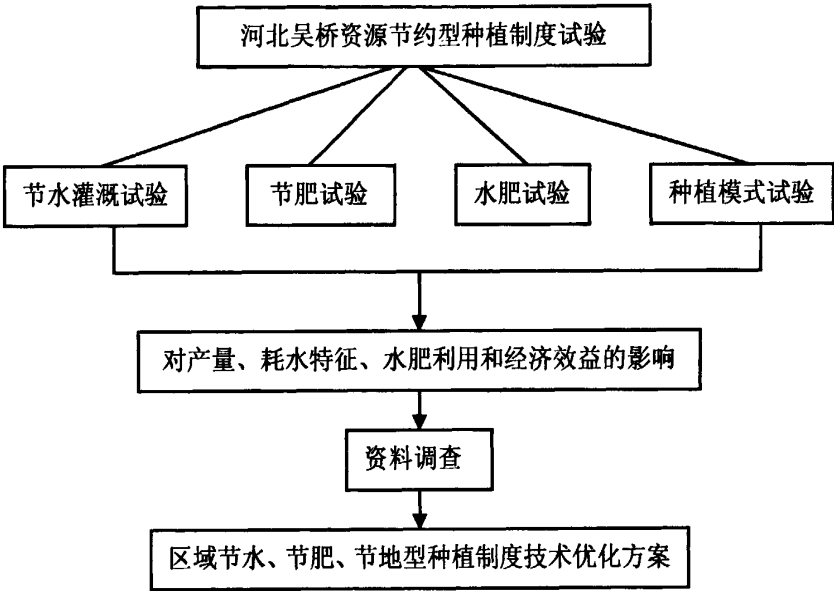


图 1-1 技术路线

Fig.1-1 Technical Route

第二章 不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米产量与水分利用的影响

2.1 材料与方法

2.1.1 试验地概况

试验于2008~2009年度在河北省吴桥县曹洼乡（37°4'102" N，116°37'23"E）进行，该区属于黄淮海平原黑龙港流域中部，海拔14m~22m，地势平坦，地下水位7m~9m。供试土壤为壤质底粘潮土，0~20cm土层养分含量为有机质10.21g/kg，全氮0.70g/kg，碱解氮62.73mg/kg，有效磷10.37mg/kg，速效钾35.93mg/kg，pH8.13；20~30cm土层分别含有有机质9.69g/kg，全氮0.55g/kg，碱解氮45.00mg/kg，有效磷 6.79mg/kg，速效钾30.49mg/kg，pH7.76。该区属于温带大陆性季风气候，冬季寒冷干燥、夏季高温多雨，多年平均气温12.9℃，平均降雨量为552.7mm，近10年冬小麦生长季平均降水93.0mm。试验期间的年总降水量为708mm，其中冬小麦全生育期降水量为148.1mm，夏玉米生长季(6~9月)降水559.9 mm，占全年总降水量的79.1%。

2.1.2 试验设计

试验于2008年秋开始，冬小麦播前测定土壤墒情，浇底墒水，并整地施肥，每公顷底施复合肥（N-P₂O₅-K₂O：18-18-18）750kg。2008年10月16日播种，播种量为262.5kg/hm²，2009年06月07日收获。夏玉米于2009年06月12日播种，播种前同样测定土壤墒情，浇底墒水（75mm），并整地施肥，底施复合肥（N-P₂O₅-K₂O：30-12-12）300kg/hm²+控释肥（N-P₂O₅-K₂O：25-10-15）37.5kg/hm²。播种量为52.5 kg/hm²，2009年10月01日收获。

具体试验采用裂区设计，主区为当地常用两冬小麦品种：济麦 22 和石麦 15；副区为三种灌溉模式：浇底墒水（W1：一水，75mm）、浇底墒水+拔节水（W2：二水，75mm+90mm）、浇底墒水+拔节水+灌浆水（W3：三水，75mm+90mm+60mm）。小区面积为 6m×15m，重复间设1m 隔离带、重复内不同灌溉处理之间设 0.5m 隔离带防止水分侧渗，随机排列，重复 3 次，共 18 个试验小区（具体试验灌溉量设计见表 2-1）。三次灌溉的时间分别为：2008 年 10 月 14 日（底墒水）、2009 年 04 月 10 日（拔节水）、2009 年 05 月 15 日（灌浆水），采用水表严格控制每次灌水量。

表 2-1 冬小麦灌溉处理方案

Table.2-1 The scheme of winter-wheat irrigation treatments

处理	代号	底墒水(mm)	拔节水(mm)	灌浆水 (mm)	总灌水量 (mm)
济麦 22 W1	T11	75	0	0	75
济麦 22 W2	T12	75	90	0	165
济麦 22 W3	T13	75	90	60	225
石麦 15 W1	T21	75	0	0	75
石麦 15 W2	T22	75	90	0	165
石麦 15 W3	T23	75	90	60	225

夏玉米在冬小麦季试验的基础上只做品种区别未做灌溉处理，即：在种植济麦 22 的试验地收获后全部种植郑单 958，在种植石麦 15 的试验地收获后全部种植浚单 20。两品种搭配的轮作体系分别为：济麦 22-郑单 958 和石麦 15-浚单 20（图 2-1）。

本章 2.2.5 节的试验结果以石麦 15-浚单 20 品种体系为例进行周年综合分析。

试验期间的除草、病虫害及其他管理同一般田间操作。

保护行	W1: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W3: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W2: 济麦 22-郑 单 958	一米 间隔带	W2: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W3: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W1: 济麦 22-郑 单 958	一米 间隔带	W2: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W1: 济麦 22-郑 单 958	隔离带	W3: 济麦 22-郑 单 958	保护行
中间观察道			中间观察道			中间观察道			中间观察道			中间观察道			中间观察道			
保护行	W1: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W3: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W2: 石麦 15-浚 单 20	一米 间隔带	W2: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W3: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W1: 石麦 15-浚 单 20	一米 间隔带	W2: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W1: 石麦 15-浚 单 20	隔离带	W3: 石麦 15-浚 单 20	保护行

图 2-1 灌溉处理田间示意图

Fig.2-1 The field schematic diagram of irrigation treatments

2.1.3 样品采集与测定

1.3.1 生长指标：测定作物株高、叶面积、地上部干物质量。冬小麦分别于拔节期、开花期和灌浆期在每小区取一米一行完整植株样带回试验室内进行考苗：株高采用钢卷尺测量法，叶面积采用长宽测量法，地上部干物质量则先于 105℃下杀青 40min~50min，再在 75℃下烘干至恒重。夏玉米季分别于拔节期、小口期、抽雄期、灌浆中期在每小区选取五株长势一致的完整植株带回室内进行考苗，方法同冬小麦考苗操作。

1.3.2 产量指标：冬小麦收割前每小区取 2m² 的典型样本进行室内考种，测其单位面积的穗数、每穗粒数、千粒重并计算产量和生物量；夏玉米收获前每小区测产面积为 6×2 m²，在田间测量鲜穗总重，取部分鲜穗分籽粒和穗轴烘干测含水量折算干重，并以籽粒入库含水量 13.5%为准计算经济产量和生物产量。

1.3.3 土壤含水率：在冬小麦、夏玉米播前和收后及关键生育期以 20cm 为一土层，用取土烘干法测定每小区 0~200cm 的土壤含水率。

2.1.4 数据、公式计算

土壤质量含水率 (%) = (烘干前土重-烘干后土重) /烘干后土重

土壤贮水量 (mm) =∑ (Δθi×Ci×Zi)，式中Δθi 为某一层土壤质量含水率 (%), Ci 为某

一层次土壤容重 (g/cm^3), Z_i 为土层厚度 (mm), i 为土壤层次。

农田耗水量: 利用水量平衡方程式计算总耗水量 (因试验地平坦, 未考虑地表径流渗漏等):
 $ET = \text{播种前土壤 } 0\sim 200\text{cm 贮水量 (mm)} + \text{生长期有效降雨量 (mm)} + \text{生长期总灌溉水量 (mm)} - \text{收获后土壤 } 0\sim 200\text{cm 贮水量 (mm)}。$

水分利用效率 $WUE [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = Y/ET$, 其中 Y 为单位面积作物的经济产量 (kg/hm^2), ET 为作物的总耗水量 (mm)。

灌溉水水分利用效率 $WUE_i [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = \text{作物籽粒产量}/\text{灌水量}。$

周年水分利用效率 $WUE_a [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = \text{冬小麦与夏玉米周年总产量}/\text{周年总耗水量}。$

试验数据采用 Excel 2003 和 DPS 6.85 数据处理系统进行分析。

2.2 结果与分析

2.2.1 不同灌溉模式对冬小麦生长发育的影响

2.2.1.1 对冬小麦株高的影响

冬小麦植株高度是决定倒伏发生与否的关键因素, 株高主要受品种和环境条件的影响 (张忠学, 等2003)。图2-2是不同灌溉模式下冬小麦不同生长期的株高变化。由图2-2可见, 不同灌溉处理对株高的影响不同, 随灌溉次数的增加, 植株高度随之增加。开花期时, 两品种均为浇过拔节水处理的株高显著高于未浇拔节水处理的株高, 且石麦15的植株高度与济麦22基本相同。灌浆中期时, 浇二水和浇三水的石麦15的株高基本相同且均高于浇二水和浇三水的济麦22, 但未达显著差异。而浇一水的石麦15的株高显著高于浇一水的济麦22, 与浇二水和浇三水的济麦22基本相同。以上分析说明, 石麦15的生长能力要好于济麦22。

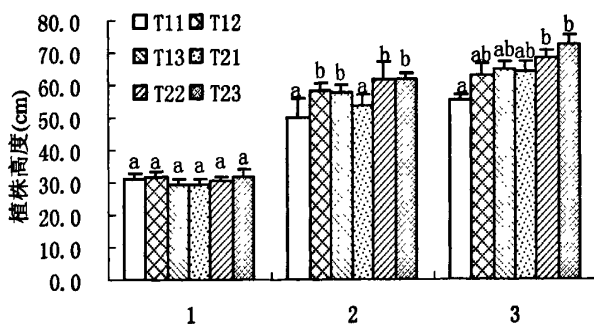


图 2-2 不同灌溉模式下冬小麦不同生长期的株高变化

Fig.2-2 Winter wheat height changes of different growing stage under different irrigation modes

图中: 1.拔节期 jionting satge; 2.开花期 flowering stage; 3.灌浆中期 medium milk stage

图中不同英文字母表示在 5% 水平上差异显著 Different letters in the figure mean significant at 5% level. 下同 Same as follows.

2.2.1.2 对冬小麦叶面积指数的影响

图 2-3 所示, 拔节期石麦 15 (T21、T22、T23) 的平均叶面积指数 (LAI) 高于济麦 22 (T11、

T12、T13), 平均高出 17.4%。开花期两个品种的 LAI 均为浇拔节水的处理显著大于未浇拔节水的处理, 说明拔节水对冬小麦的叶面积指数有显著影响, 而石麦 15 的 LAI 均略高于济麦 22, 平均高出 11.2%, 但差异不显著。灌浆中期两个品种各灌溉处理的 LAI 大幅下降, 但浇三水的石麦 15 (T23) 的 LAI 要显著高于其它几个处理, 说明灌浆水对石麦 15 生长后期的叶面积有一定的维持效应。

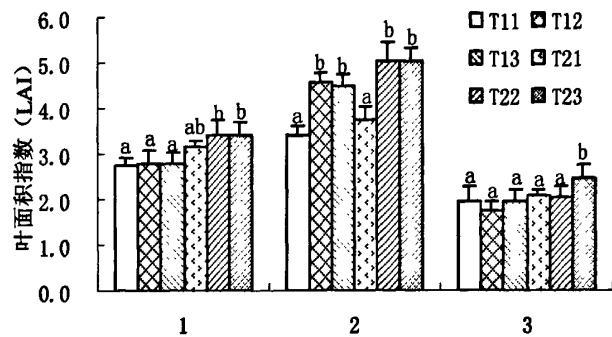


图 2-3 不同灌溉模式下冬小麦不同生长期的叶面积指数变化

Fig.2-3 Winter wheat LAI changes of different growing stage under different irrigation modes

图中: 1.拔节期 jointing satge; 2.开花期 flowering stage; 3.灌浆中期 medium milk stage

2.2.2 不同灌溉模式对冬小麦产量的影响

2.2.2.1 对冬小麦生物产量的影响

干物质生产是作物产量形成的基础, 图 2-4 可知, 成熟期两个品种的干物质量均为随灌溉量的增加而增加。其中 T23 的干物质量高于 T21 与 T22, 平均高出 14.4%, 而 T22 稍高于 T21, 但二者无显著差异。T13 显著高于 T11 和 T12, 平均高出 35%, 但 T11 与 T12 之间无显著差异。品种间比较, T21>T11、T22>T12, 且石麦 15 三种灌溉处理的平均干物质量高于济麦 22, 但 T13 与 T23 基本相同。以上结果说明, 石麦 15 对水分的敏感度低于济麦 22, 即使灌溉不充分也能维持较高的生物量, 抗旱性较好。而济麦 22 对水分的需求量相对较大, 仅浇底墒水和拔节水的生物量并不占优势, 灌浆水有明显提高其生物量的作用。

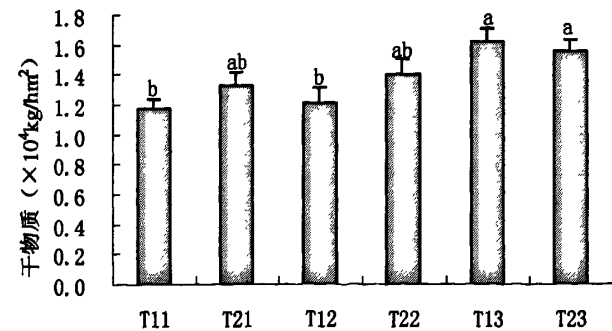


图 2-4 不同灌溉模式下冬小麦成熟期的干物质比较

Fig.2-4 Dry matter production of winter wheat in mature stage under different irrigation modes

2.2.2.2 对冬小麦经济产量的影响

冬小麦经济产量是由单位面积穗数、穗粒数及千粒重三个因素确定。不同灌溉模式的产量构成因素如表 2-2。由表 2-2 可见，不同灌溉处理对两品种冬小麦的单位面积穗数有显著影响，均表现为随灌溉量增加而单位面积穗数也增加。其中 T23 单位面积穗数最多，T11 穗数最低。两品种冬小麦产量均为随灌溉量的增加而增加，石麦 15 各灌溉处理产量均比相同灌溉处理的济麦 22 的产量高。品种内比较，T22 比 T21 增产 9.7%、T23 比 T21 增产 12.8%；而 T12 比 T11 增产 14.8%、T13 比 T11 增产 25.6%。以上结果说明，石麦 15 比济麦 22 抗旱节水，在非充分灌溉时也能保证较高的产量。

表 2-2 两品种冬小麦不同灌溉模式的产量及产量构成因素对比

Table 2-2 Yield and yield components of two wheat cultivars under different irrigation modes				
处理	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)
T11	598.1 d	25.6 b	43.1 a	6606.6 b
T12	685.8 bc	27.1 ab	40.7 ab	7587.0 ab
T13	689.4 bc	28.5 a	42.3 a	8296.4 a
T21	667.5 cd	27.4 a	40.6 ab	7452.4 ab
T22	752.6 ab	28.2 a	38.5 b	8175.6 a
T23	792.3 a	27.7 a	38.4 b	8407.5 a

表中不同英文字母表示在 5%水平上差异显著 Different letters in the table mean significant at 5% level. 下同 Same as follows.

2.2.3 不同灌溉模式对冬小麦土壤水分动态和水分利用效率的影响

2.2.3.1 对冬小麦田间土壤水分动态的影响

分析冬小麦田间土壤水分变化规律可以为田间灌溉及节水措施的实行提供科学依据。如图 2-5 (a) (b) (c) 所示为：两品种冬小麦在不同灌溉模式下不同生育期土壤质量含水率变化的剖面比较，其中图 (a) 为拔节期 (09.04.10 测定，即：拔节水浇之前，所有处理均只浇过底墒水)；(b) 为开花期 (09.05.02 测定，拔节水浇后 20 天)；(c) 为成熟期 (09.06.06 测定，灌浆水浇后 22 天)。

由图 (a) 可见，拔节期两品种冬小麦 0~200cm 土体的土壤含水率变化趋势基本相同，都是随土体深度的增加含水率升高，济麦 22 (T1) 在 100cm 以上的土层含水率要略高于石麦 15 (T2)，但差异不显著。而 100cm 以下的土层含水率也有区别，在 100~120cm 土层，石麦 15 土壤含水率要明显低于济麦 22。由 (b) 图可见，受灌水影响 120cm 以上土层含水率变化剧烈，浇过拔节水的处理 (T12、T13、T22、T23) 在 120cm 以上的土壤含水率要明显高于未浇拔节水的 T11 和 T21，而 120cm 以下的土层不受灌水的影响或所受影响很微弱，未呈现特定的规律。相比前一个测定时期 (a)，开花期 (b) 在 120cm 以下的土壤含水率与其基本相同，可见，冬小麦从播种至开花期的生长主要利用土壤 120cm 以上的水分，从石麦 15 在 100~120cm 处的含水率明显低于其他处理

也可以说明这点，并且此现象可进一步说明石麦 15 这一品种对土壤深层水的吸收能力强于济麦 22。(c) 为成熟期即将收获时测定，可见，水分变化剧烈的土层为 140cm 以上。0~40cm 表层土未浇灌浆水的四个处理的土壤含水率明显低于浇过灌浆水的两处理 (T13、T23)，这主要是由灌浆水补充了表层土壤的水分所致。在 80-120cm 土层，T11 土壤含水率明显低于 T21，说明灌浆至成熟这一时期，济麦 22 在此土层对土壤水的吸收高于石麦 15，可能的原因是在没有灌溉下，干旱刺激了济麦 22 的根系下扎，到后期才加大了对深层土壤水的吸收利用。40~100cm 浇过拔节水的济麦 22 (T12) 要明显低于浇过拔节水的石麦 15 (T22)，说明济麦 22 在灌浆到成熟这一时期对土壤水分的吸收利用要高于石麦 15。而 40~100cm T13 和 T23 的土壤含水率明显高于 T12 略高于 T22，主要是由于两品种冬小麦在有了灌浆水的补充，即相应地减少了对土壤水的吸收。纵观三幅图可知，在时间分布上，无论是哪一品种哪一灌溉模式，在 0~140cm 均随冬小麦的生长发育土壤含水率逐渐降低。

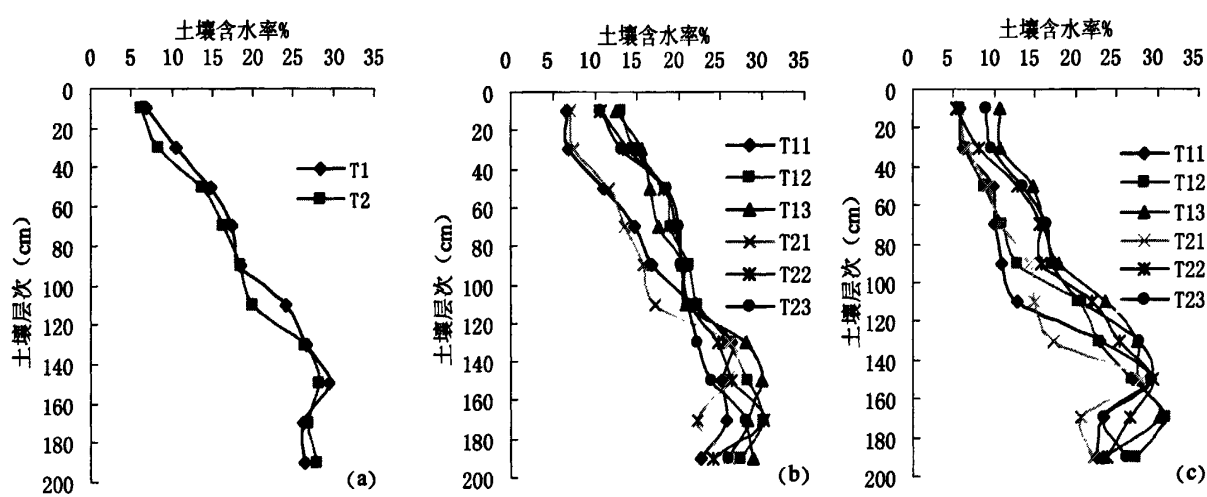


图 2-5 不同灌溉模式下两品种冬小麦关键生育期土壤水分变化动态

Fig. 2-5 Soil water content in different growth stages of two wheat cultivars under different irrigation modes

图中：a.拔节期 Jointing stage (09.04.10)；b.开花期 Flowering stage (09.05.02)；c.成熟期 Mature stage (09.06.06)。

2.2.3.2 对冬小麦耗水和水分利用效率的影响

灌溉次数及灌水量对冬小麦水分利用效率等影响的研究已较多（郭天财，等2002；李升东，等2009；吴永成，等2008；房全孝，等2004；孔箫铎，等2009；王伟，等2009；许振柱，等2003；董宝娣，等2007），但研究结果不尽一致。从图2-6和表2-3可知，全生育期冬小麦土壤贮水消耗量随灌水量的增加而减少，且冬小麦总耗水量与土壤贮水消耗量之间呈一定的负相关关系，这与增加灌溉后冬小麦先消耗灌溉水而后消耗土壤水有关。对于水分利用效率，并非灌水越多产量和水分利用效率就越高，而是在一定灌溉范围内，产量和水分利用效率有一个最佳组合。其中，T22处理的WUE最高，比T12高21.9%，比T13高7.4%，说明，T22处理在六个处理当中水分利用效率

方面最具优势，既能充分利用水资源又保证了产量。T23处理与T13处理二者的产量无显著差异，且WUE相差无几。T21与T23与对应的T11与T13土壤贮水消耗量基本持平。整个生育期T22较T12少消耗土壤水53 mm。而灌溉水水分利用效率在两品种上均为随灌溉量的增加而降低。综合以上不同灌溉模式下冬小麦整个生育期土壤贮水消耗量、产量及WUE状况来看，石麦15二水处理（T22）不仅能减少灌溉水量，而且能够同时发挥生物节水的特性，为最佳组合模式。

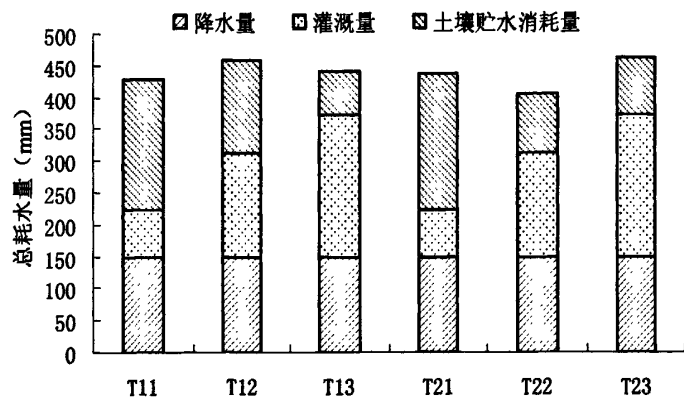


图 2-6 不同灌溉模式下两品种冬小麦全生育期耗水构成

Fig. 2-6 The components of water consumption at full growth period of two wheat cultivars under different irrigation modes

表 2-3 两麦品种冬小不同灌溉模式下的水分利用效率（WUE）

Table 2-3 Water use efficiency of two wheat cultivar under different water modes

处理	济麦 22			石麦 15		
	T11	T12	T13	T21	T22	T23
降水量(mm)	148.1	148.1	148.1	148.1	148.1	148.1
灌溉量(mm)	75	165	225	75	165	225
土壤贮水消耗量 (mm)	204.3	144.3	67.4	215.7	91.2	88.9
总耗水量(mm)	427.4	457.4	440.5	438.8	404.3	462.1
产量(kg/hm ²)	6606.6 b	7587.0 ab	8296.4 a	7452.4 ab	8175.6 a	8407.5 a
WUE (kg /mm/hm ²)	15.5	16.6	18.8	17.0	20.2	18.2
WUE _t (kg /mm/hm ²)	88.1	46.0	36.9	99.4	49.6	37.4

2.2.4 小结

试验结果表明，从产量和水分利用效率两方面看，石麦 15 比济麦 22 有一定的节水优势。在各灌溉处理下，石麦 15 产量均高于济麦 22，石麦 15 浇二水处理有较高的籽粒产量和最高的水分利用效率。这一研究结果也表明，优化的灌溉模式离不开适宜的品种为基础，将适宜的品种与优化的灌溉方式相结合，是提高冬小麦产量和水分利用效率的有效途径。同时，对于水资源紧缺的黄淮海平原冬小麦-夏玉米一年两熟地区而言，选用适宜的节水高产冬小麦品种与优化的灌溉模式

相结合，不仅有利于冬小麦当季节水增产，而且由于此组合的冬小麦对土壤水消耗较少，也为下茬作物夏玉米创造了良好的底墒，因此也将有利于保证全年两季作物均衡高产。

2.2.5 不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米周年产量的影响

2.2.5.1 不同灌溉模式对生物产量的影响

由图 2-7 可知，成熟期冬小麦的生物量表现为随灌溉量的增加而增加，W3 处理的生物量高于 W2、显著高于 W1，分别高出 10.8%和 17.7%，W2 高于 W1，但二者无显著差异。夏玉米成熟期生物量与冬小麦季趋势相同，为 W3>W2>W1。冬小麦季 W1 和 W2 处理对夏玉米成熟期生物量无显著影响，二者基本持平，W3 处理比 W2 和 W1 分别高出 4.1%和 4.5%，但三者差异不显著。综合冬小麦、夏玉米两季生物量，周年总生物量仍为 W3 处理最高，且显著高于 W1 和 W2 处理。以上结果说明，冬小麦季进行一定的灌溉对夏玉米的生产有影响，冬小麦季只浇底墒水（W1）和浇底墒水及拔节水（W2）处理的周年总生物量所占优势不大，而灌浆水有明显提高其生物量的作用。

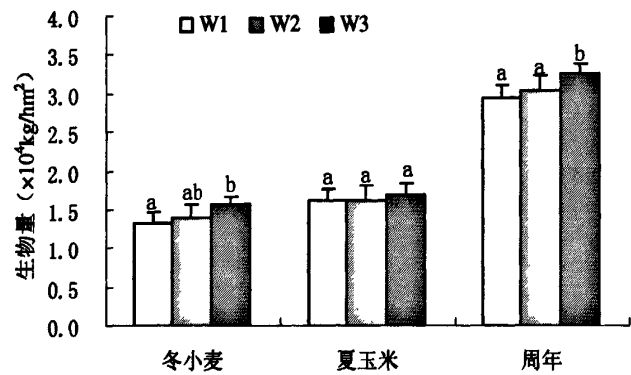


图 2-7 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米成熟期的生物量

Fig. 2-7 Biomass of winter wheat and summer maize in mature stage under different irrigation modes

2.2.5.2 不同灌溉模式对经济产量及其构成因素的影响

冬小麦和夏玉米的经济产量是由单位面积穗数、穗粒数及千粒重三个因素确定。不同灌溉模式下的产量及构成因素如表 2-4，可见，（1）不同灌溉模式对冬小麦单位面积穗数的影响为：随灌溉量的增加单位面积有效穗数增加，其中 W3 处理单位面积的有效穗数显著大于 W1，且大于 W2 但二者差异不显著。穗粒数在三种灌溉模式下无显著差异。千粒重 W1 处理最高，但三种灌溉模式下差异均不显著。冬小麦的理论产量表现为：W3>W2>W1，其中，W2 比 W1 增产 9.7%，W3 比 W1 增产 12.8%且二者差异显著。纵观冬小麦的理论产量，差异主要由穗数引起，说明穗数是决定冬小麦最终产量的关键因素，拔节水和灌浆水有明显提高单位面积有效穗数的作用。（2）夏玉米在冬小麦季三种不同灌溉模式下，其产量构成三因素变异均较小，说明夏玉米在降水充沛（试验夏玉米季降水 559.9mm）的情况下其生长受前茬冬小麦季灌溉的影响较小。穗粒数虽然也表现为：W3>W2>W1，但三者差异均不显著。综合产量构成的三因素，夏玉米理论产量的差异主要是由穗粒数不同导致，其中，W2 比 W1 增产 7.8%，W3 显著高于 W1，高出 12.2%。（3）综

合两季作物，周年产量变化规律为：W3 较 W2 增产幅度小，二者无显著差异，但均显著高于 W1 处理，分别高出 12.5%和 8.7%。以上结果表明，冬小麦季生育期进行一定的灌溉，是保证作物单季及周年高产、稳产的重要因素。

表 2-4 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米的产量及构成因素

Table 2-4 The yield and yield components of winter wheat and summer maize under different irrigation modes									
灌溉模式	冬小麦				夏玉米				周年
	穗数(×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数(个/穗)	千粒重(g)	理论产量(kg/hm ²)	穗数(×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数(个/穗)	千粒重(g)	理论产量(kg/hm ²)	总产量(kg/hm ²)
W1	667.5 b	27.4 a	40.6 a	7452.4 b	5.913 a	454.0 a	341.9 a	9159.0 b	16611.4 b
W2	752.6 ab	28.2 a	38.5 a	8175.6 ab	5.921 a	489.2 a	341.1 a	9876.1 ab	18051.7 a
W3	792.3 a	27.7 a	38.4 a	8407.5 a	5.914 a	499.9 a	347.6 a	10281.6 a	18689.1 a

表中不同英文字母表示在 5%水平上差异显著。Different letters in the table mean significant at 5% level.

2.2.6 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米周年水分效应分析

2.2.6.1 不同灌溉模式下冬小麦、夏玉米不同生育期的土壤水分变化动态

田间土壤水分变化可以反映作物对土壤水的吸收利用情况，为了确切反映不同灌溉模式下的土壤水分状况，选取降水或灌溉一段时间后的测定值进行比较（张忠学，等 2000），如图 2-8 所示为冬小麦、夏玉米生育期土壤质量含水率的变化情况，选取两作物的两个关键生育期进行对比分析。可见（1）A：由于拔节水对土体的补充，W2 和 W3 处理在抽穗期（拔节水浇后三周，水分在土壤中的运移已稳定）0~120cm 各土层的含水率明显高于未浇拔节水的处理（W1），说明由播种至抽穗期间冬小麦生长主要利用土壤 120cm 以上的水分。B：成熟期 W3（浇过灌浆水）各土层含水率与 W2 各土层含水率均高于 W1，且 W3 和 W2 间差异不大，可能的原因除了冬小麦的吸收利用外，此时气候因素导致的土壤无效蒸发增强，所以 W3 各土体含水率较 W2 基本持平，并未显著提高其整个土体的含水率。（2）从夏玉米季土壤含水率来看，虽然前茬冬小麦实行了不同的灌溉模式，但由于生长季降雨量大，土体水分得到较多补给，因此，至 C 十叶展时期三个处理夏玉米在 0~120cm 各土层含水率已基本持平。而 120~200cm 土层可能由于冬小麦季灌浆水的影响下渗到下部土体的水分亦增加，所以 W3 土壤含水率明显高于 W1 和 W2。至 D 成熟期三个处理 0~60 cm 土层含水率已达 20%左右，且随土层加深含水率呈上升趋势。可见，夏玉米播种至成熟整个生长季的大量降水可满足其生长需要，且最终使土壤含水率维持在较高水平，此时，冬小麦季不同灌溉处理在夏玉米季降水充沛的条件下成为影响夏玉米当季土壤含水率的次要因素。

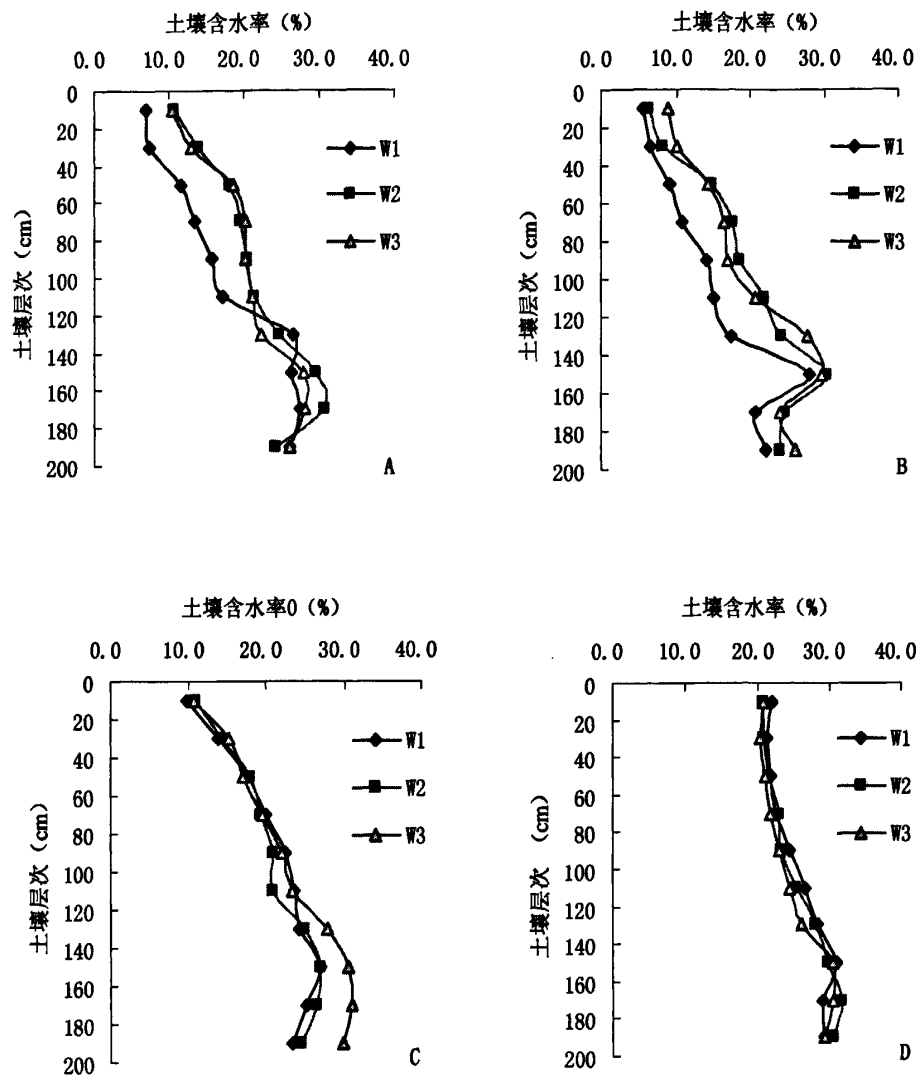


图 2-8 不同灌溉模式下冬小麦、夏玉米关键生育期土壤水分动态变化

Fig. 2-8 Soil water content in different growth stages of winter wheat and summer maize under different irrigation modes

图中：A 冬小麦抽穗期 Heading stage of winter wheat (09.05.02)；B 冬小麦成熟期 Mature stage of winter wheat (09.06.06)；
C 夏玉米十叶展期 10-leaf stage of summer maize (09.07.16)；D 夏玉米成熟期 Mature stage of summer maize (09.10.01)。

2.2.6.2 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米的耗水及其组成

由表 2-5 可见，(1) 不同灌溉模式下，冬小麦全生育期对土壤贮水的消耗量随灌溉量数的增加而减少，W2 比 W1 土壤贮水消耗量的减少幅度 (124.6mm) 远大于 W3 比 W2 的减少幅度 (2.2mm)。随灌溉的增加，灌溉量占总耗水量的比例增大，土壤贮水消耗量占总耗水量的比例下降，而降水量所占总耗水量的比例基本相同。以上说明，在有灌溉的条件下冬小麦的生长充分利用灌溉水之后才消耗土壤水。(2) 夏玉米全生育期的土壤贮水消耗量由冬小麦季的正值变为负值，说明此时由于降水的影响夏玉米生长主要消耗自然降水，土壤贮水未被消耗而是进行了蓄水，且

随冬小麦季灌溉的增多蓄水量减少,由于 W1 在冬小麦收获后 0~200cm 土体含水率很低(图 2-8B) 因此土壤贮水量最高,达 304.8mm。夏玉米季总耗水量与冬小麦季不同,表现为: W3>W2>W1, 即在冬小麦季灌溉增加的处理相应的夏玉米季总耗水量也增加。而随冬小麦季灌溉的增加,夏玉 米季灌溉量和降水量占当季总耗水量的比例下降,但均为 W2 比 W1 的降低幅度远大于 W3 比 W2 的降低幅度。

表 2-5 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米的耗水量及其组成

Table 2-5 The water consumption and their components of winter wheat and summer maize under different irrigation modes

灌溉 模式	冬小麦季								夏玉米季							
	总耗水量				土壤贮水				总耗水量				土壤贮水			
	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
W1	438.8	75	17.1	148.1	33.7	215.8	49.1	330.1	75	22.7	559.9	169.6	-304.8	-92.3		
W2	404.3	165	40.8	148.1	36.6	91.2	22.5	444.0	75	16.9	559.9	126.1	-190.9	-43.0		
W3	462.1	225	48.7	148.1	32.1	89.0	19.2	484.1	75	15.5	559.9	115.6	-150.8	-31.1		

2.2.6.3 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米的水分利用效率

由表2-6可知,(1)冬小麦WUE在W1和W3处理下表现均不理想,在W2处理由于产量提高幅 度较大(表2-4)、耗水量相对较低(表2-5) WUE达最高,分别比W1和W3高出19.1%和11.1%。(2) 夏玉米季的WUE随冬小麦季灌溉的增加而降低,其中,W1处理由于总耗水量较低(表2-5)其 WUE达27.74 kg/mm/hm²远高于其它两处理,W2比W3处理的WUE高1.01 kg/mm/hm²,两者差别 较小。(3)周年总耗水量随灌溉的增加而增加,周年WUE随灌溉的增加而减少。三种灌溉模式下, W1处理的周年WUE最高主要是由于周年耗水量最低,但三个处理周年WUE均差异较小,W2比 W1处理的周年WUE仅低0.32 kg/mm/hm²,二者相差无几。结合两季作物的产量,并综合以上分 析,W2处理能保证冬小麦-夏玉米体系有较高的总产量和总WUE,且周年总耗水量适中,是该年 型下较好的灌溉模式。

表 2-6 不同灌溉模式下冬小麦-夏玉米的水分利用效率 (WUE)

Table 2-6 The WUE of winter wheat and summer maize under different irrigation modes

处理	W1		W2		W3	
	冬小麦	夏玉米	冬小麦	夏玉米	冬小麦	夏玉米
单季水分利用效率						
WUE (kg/mm/hm ²)	16.98	27.74	20.22	22.25	18.20	21.24
周年总耗水量(mm)	768.90		848.21		946.11	
周年水分利用效率						
WUE _a (kg/mm/hm ²)	21.60		21.28		19.75	

2.2.7 小结

节水农业解决的关键问题是提高自然降水和灌溉水的利用效率(山仑, 等 1991), 研究表明, 实行冬小麦节水栽培有利于提高整个轮作周期的水、氮利用效率(李建民, 2000), 冬小麦生育期进行合理的水分管理是实现高产的关键(巨晓棠, 等 2002)。华北平原地区冬小麦-夏玉米是主要种植作物, 一般为一年两作接茬平播种植(王树安, 1991)。有研究指出, 鲁西北地区冬小麦-夏玉米一年两熟制年耗水量在 800mm, 而年降雨量 500~600 mm 仅能满足作物耗水量的 50%~60% (任鸿瑞, 等 2004)。因此, 冬小麦季需进行一定的灌溉。合理高效的灌溉制度能够优化冬小麦耗水结构, 降低灌溉量及总耗水量, 并能显著提高产量水平和水分利用效率(张胜全, 等 2009)。

本研究采用平播种植, 从水分角度出发, 在单季施氮量和氮肥类型分别相同的情况下, 综合研究冬小麦-夏玉米在不同灌溉模式下单季及轮作体系周年的产量、耗水量和水分利用效率的差异。结果表明, (1) 冬小麦季降水较少其产量受灌溉的影响较大, 生育期水分充足可保证较高产量。夏玉米季由于降水充分, 受冬小麦季不同灌溉模式的影响较小, 但产量也有差异。两季作物周年总产量为: W3与W2处理无显著差异, 均显著高于W1处理, 分别高出12.5%和8.7%。可见, 冬小麦季生育期进行一定的灌溉是保证作物单季及周年高产、稳产的重要因素。(2) 冬小麦全生育期的耗水中, 土壤水的消耗量与灌溉量密切相关, 而夏玉米的耗水主要来自于降雨。研究认为, 麦田总耗水量随着灌溉量的增加而增加(黄德明, 1994; 程宪国, 等1996), 土壤水的消耗量随灌溉次数的增加而减少(李建民, 等1999), 土壤水消耗量占总耗水量的比例随灌溉量的增加而降低(王德梅, 等2008), 这些结论与本试验结果一致。冬小麦和夏玉米的单季耗水、WUE的变化趋势各不相同, 而轮作体系周年总耗水量随灌溉量的增加而增加, 周年WUE随灌溉的增加而减少。三种灌溉模式下的周年WUE差异较小, W2比W1仅低0.32 kg/mm/hm²。冬小麦W2处理对土壤水消耗较少保证冬小麦-夏玉米轮作体系有较高的总产量和总WUE, 是较好的节水丰产灌溉模式。

第三章 不同施肥模式对冬小麦-夏玉米产量与水氮利用的影响

3.1 材料与方

3.1.1 试验地概况

试验于2008年至2009年在中国农业大学吴桥实验站进行,气象等参数同第二章1.1。试验区基础地力为:0~20cm土层养分含量为有机质11.91g/kg,全氮0.67g/kg,碱解氮60.02mg/kg,有效磷9.37mg/kg,速效钾35.65mg/kg, pH8.0; 20~40cm土层分别含有有机质4.97g/kg,全氮0.45g/kg,碱解氮35.03mg/kg,有效磷 7.08mg/kg,速效钾30.72mg/kg, pH7.66。

3.1.2 试验设计

(1) 冬小麦季

依据调查当地农户在冬小麦、夏玉米实际生产中的施肥情况,结合实验在冬小麦季以肥料总量为标准进行施肥,设置以下五种方案,分别为:(1) CK:空白,不施肥;(2) F:农民施肥法,亩施复合肥($N-P_2O_5-K_2O$: 18-18-18) 50kg;(3) FS1:节肥方案1,亩施二铵 20kg+尿素 15kg+硫酸钾肥 15kg;(4) FS2:节肥方案2,亩施 15kg 包衣尿素缓控肥+35kg 普通尿素;(5) FS3:节肥方案3,亩施 50kg 和庄牌复混肥(含肥料增效剂,其 $N-P_2O_5-K_2O$: 15-4-6)。各个处理在上季夏玉米秸秆还田、浇底墒水后并进行整地施肥,所有肥料于冬小麦播种前作底肥一次性施入后期不再追肥。2008年10月16日播种,品种为济麦22,播种量为225kg/hm²,2009年06月07日收获。实验的五个处理随机区组排列,重复三次,共15个试验小区,每小区面积7m×8m,具体小麦种植的田间处理如图3-1。冬小麦全生育期两次灌水时间分别为:2008年10月14日(底墒水:75mm)、2009年04月10日(拔节水:90mm)。采用水表严格控制每次灌水量。

(2) 夏玉米季

与前茬冬小麦季试验处理相对应,夏玉米的5个具体施肥方案如下:(1) CK(空白,不施肥,与冬小麦季CK处理对应);(2) F:农民施肥法,亩施复合肥($N-P_2O_5-K_2O$: 18-18-18) 56.5kg,与冬小麦季F处理对应;(3) FS1:节肥方案1,亩施二铵 20kg+尿素 15kg+硫酸钾肥 15kg,与冬小麦季FS1处理对应;(4) FS2:节肥方案2,亩施 17kg 包衣尿素缓控肥+39.5kg 普通尿素,与冬小麦季FS2处理对应;(5) FS3:节肥方案3,亩施 56.5kg 和庄牌复混肥(含肥料增效剂,其 $N-P_2O_5-K_2O$: 15-4-6),与冬小麦季FS3处理对应)。以上各肥料处理在前茬冬小麦秸秆还田、浇底墒水(75mm)后并进行整地,于夏玉米播前一次性施入后期不再追肥。夏玉米于2009年06月12日播种,品种为郑单958,播种量为67.5 kg/hm²,2009年10月01日收获。夏玉米季全生育期不进行灌溉。

试验期间总降水量为708mm,其中冬小麦全生育期降水量为148.1mm,夏玉米全生育期降水量为559.9 mm,占全年降水量的79.1%。整个试验期间,灌水、除草、病虫害等其它农业管理措施完全按照当地农民普遍采用的方式进行。

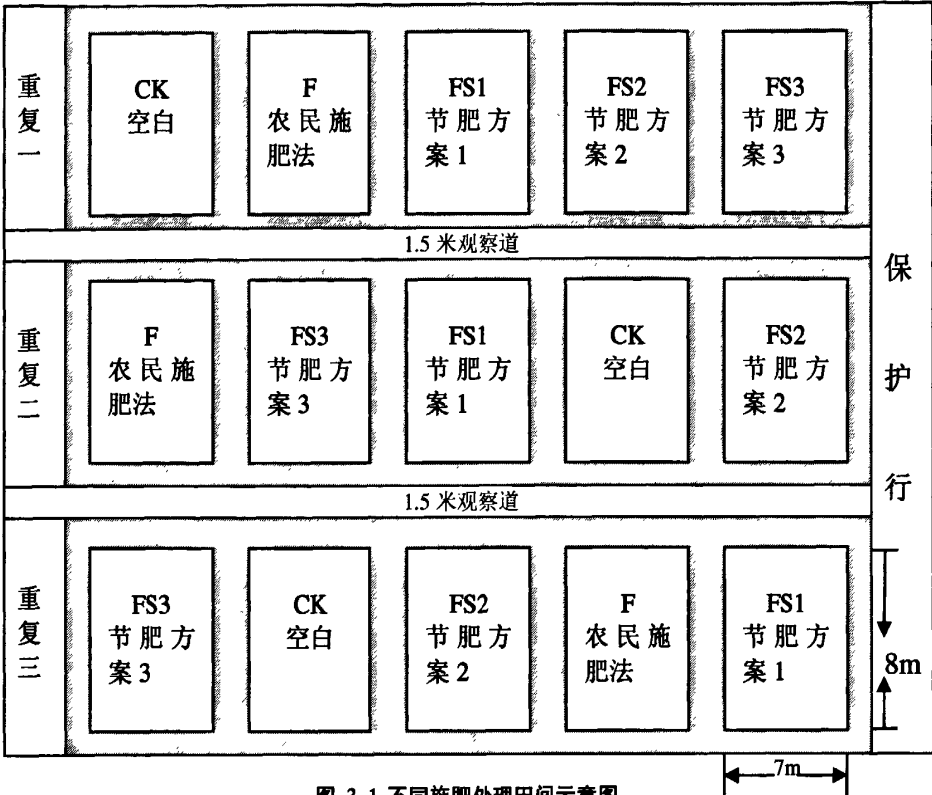


图 3-1 不同施肥处理田间示意图

Fig. 3-1 The field schematic diagram of different fertilizer treatments

表 3-1 冬小麦季和夏玉米季不同施肥模式的纯氮、磷、钾养分含量

Table 3-1 The N,P,K content of different fertilizer treatments at winter wheat season and summer maize season						
处理	冬小麦季施肥量			夏玉米季施肥量		
	纯 N	P ₂ O ₅	K ₂ O	纯 N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)
CK	0	0	0	0	0	0
F	135	135	135	152.5	152.5	152.5
FS1	157.5	138	112.5	157.5	138	112.5
FS2	345	0	0	389.8	0	0
FS3	112.5	30	45	127.1	33.9	50.8

3.1.3 样品采集与测定

1.2.1 作物生长发育状况测定：测定冬小麦株高、叶面积、地上部干物质量。分别于拔节期、抽穗期、开花期、灌浆中期、成熟期在每小区取一米一行完整植株样带回试验室内进行考苗：株高采用钢卷尺测量法，叶面积采用长宽测量法，地上部干物质量则先于 105℃下杀青 40min~50min，再在 75℃下烘干至恒重。夏玉米分别于拔节期、小口期、抽雄期、灌浆中期、成熟期在每小区选取五株长势一致的完整植株带回室内进行考苗，方法同冬小麦考苗操作。

1.3.2 作物产量指标测定：冬小麦收割前每小区取 2m^2 的典型样本进行室内考种，测其单位面积的穗数、每穗粒数、千粒重等并计算产量和生物量；夏玉米收获前每小区测产面积为 $6\times 2\text{m}^2$ ，在田间测量鲜穗总重，取部分鲜穗分籽粒和穗轴烘干测含水量折算干重，并以籽粒的入库含水量 13.5% 为准计算经济产量和生物产量。

1.3.3 植株与土壤养分测定：分别于冬小麦、夏玉米收获后取植株样品测定全氮、全磷、全钾含量。在不同施肥模式的冬小麦、夏玉米播前及收后测定 0~20cm, 20~40cm 土层的养分，包括：碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾、有机质等。

1.2.2 土壤含水量的测定：

在冬小麦、夏玉米播前、收后及关键生育期以 20cm 为一土层，用取土烘干法测定每小区 0~200cm 的 10 个土层的土壤质量含水率。

3.1.4 数据、公式计算

土壤质量含水率 (%) = (烘干前鲜土重 - 烘干后干土重) / 烘干后干土重

土壤贮水量 (mm) = $\sum (\Delta\theta_i \times C_i \times Z_i)$ ，式中 $\Delta\theta_i$ 为某一层次土壤质量含水率 (%)， C_i 为某一层土壤容重 (g/cm^3)， Z_i 为土层厚度 (mm)， i 为土壤层次。

土壤贮水消耗量 (mm) = 播种前土壤 0~200cm 贮水量 (mm) - 收获后土壤 0~200cm 贮水量 (mm)

农田总耗水量 (mm)：利用水量平衡方程式计算（因试验地平坦，未考虑地表径流渗漏等）：
 $\text{ET} = \text{土壤贮水消耗量 (mm)} + \text{生长期有效降雨量 (mm)} + \text{生长期总灌溉水量 (mm)}$ 。

水分利用效率 $\text{WUE} [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = \text{产量} / \text{总耗水量}$ 。

灌溉水水分利用效率 $\text{WUE}_i [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = \text{作物籽粒产量} / \text{灌水量}$ 。

周年水分利用效率 $\text{WUE}_t [\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)] = \text{冬小麦与夏玉米周年总产量} / \text{周年总耗水量}$ 。

氮收获指数 (Nitrogen harvest index) = 籽粒吸氮量 / 植株吸氮量 (地上部分)

氮素生理效率 (kg/kg) = 经济产量 / 植株吸氮量

氮肥偏生产力 (PFP, kg/kg) = 经济产量 / 施氮量

氮肥农学效率 (kgN/kg) = (施氮区籽粒产量 - 无氮区籽粒产量) / 施氮量 (夏晓亮, 等 2010)

试验数据采用 SAS9.0、Excel 2003 和 DPS 6.85 数据处理系统进行分析。

3.2 结果与分析

3.2.1 不同施肥模式对冬小麦生长发育及产量的影响

3.2.1.1 叶面积指数及株高比较

不同施肥模式下冬小麦不同生育期的群体 LAI 和株高调查结果如图 3-2 和图 3-3，可见，(1) 不同施肥模式对 LAI 有显著影响，CK 在各个生育期的 LAI 均显著低于其他四个处理，自抽穗期开始 FS3 处理的 LAI 均较低，低于其他三个施肥模式，而 F、FS1 和 FS2 各生育期 LAI 基本一致，无显著差异。(2) 拔节期五个施肥模式间的株高有差异但不显著。自抽穗期至灌浆中期 CK 均低于其他处理，而 F 株高均达最高，且显著高于其他四个施肥模式。FS1 和 FS2 间各生育期株高基

本一致。可见，不同施肥模式对冬小麦的生长发育有一定影响，合理配比的肥料混施可提高冬小麦的株高和群体叶面积，其中 CK 和 FS3 模式效果相对较差，F、FS1 和 FS2 对冬小麦生长的影响基本类同。

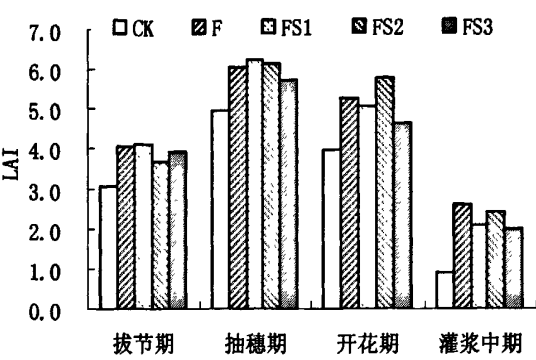


图 3-2 不同施肥模式下冬小麦不同生育期的 LAI 变化
Fig.3-2 Winter wheat LAI changes of different growing stages at different fertilizer modes

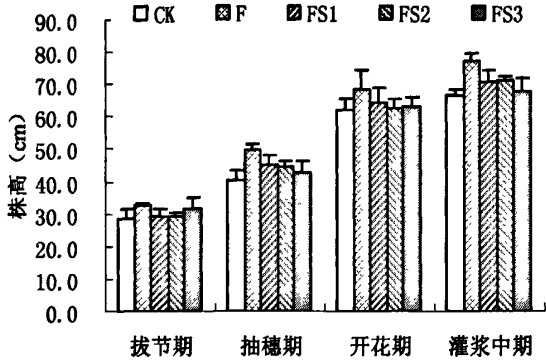


图 3-3 不同施肥模式下冬小麦不同生育期的株高变化
Fig.3-3 Winter wheat height changes of different growing stages at different fertilizer modes

3.2.1.2 干物质积累动态比较

干物质生产是籽粒产量的物质基础，图 3-4 显示了不同施肥模式下冬小麦群体地上部分干物质质量的动态变化，可见，各施肥模式下冬小麦在各生育期的干物质积累的变化趋势一致，不施肥（CK）的冬小麦生产力相对较低，干物质积累量自灌浆中期均明显低于其它各模式。至成熟期各施肥模式生物量较灌浆中期均稍有提高，其中，以 FS1 提高幅度最大并且生物量最高，其次是 F 和 FS2，但三者间生物量差异不显著，而 CK 生物量最低与 FS3 均显著低于 F。以上说明，在该区适当配比的底肥能促进冬小麦的生产。

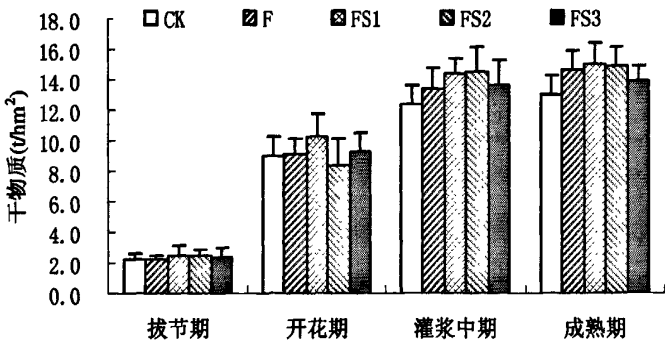


图 3-4 不同施肥模式下冬小麦不同生育期的干物质积累动态
Fig.3-4 Dry matter accumulation trends of winter wheat at different growing stages at different fertilizer modes

3.2.1.3 经济产量及产量构成比较

不同施肥模式下冬小麦的产量及产量构成如表 3-2，可见，不同施肥模式对冬小麦产量及其

构成因素的影响程度不同。各施肥模式的有效穗数间均无显著差异；F、FS1 和 FS2 的穗粒数差异不显著但均显著高于 CK，略高于 FS3；千粒重为 CK 和 FS1 基本相同均显著高于其他三种模式；理论产量表现为 FS1>FS2>F>FS3>CK，FS1 产量达 7897.6kg/hm² 显著高于其它四种模式，对比 CK 增产幅度最大为 27.11%；其次是 FS2 对比 CK 增产为 14.33%，并显著高于 CK、F 和 FS3，而 FS2 和 FS3 的增产效果相对较差。由此可知，在该区并非施纯氮越多越好，而合理配比的肥料使产量构成更协调能保证冬小麦有较高的产量。

表 3-2 不同施肥模式下冬小麦产量及产量构成

Table 3-2 Yield and yield components of winter wheat at different fertilizer modes					
处理	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	对比 CK 增产
CK	636.0 a	24.3 b	40.3 a	6212.9 c	—
F	670.3 a	28.0 a	36.3 b	6790.8 bc	9.30%
FS1	664.5 a	30.2 a	39.4 a	7897.6 a	27.11%
FS2	674.7 a	28.9 a	36.4 b	7103.3 b	14.33%
FS3	649.9 a	27.3 ab	36.7 b	6495.0 bc	4.54%

注：表中不同英文字母表示在 5%水平上差异显著 Different letters in the table mean significant at 5% level. 下同 Same as follows.

3.2.2 不同施肥模式对冬小麦土壤水分动态及水分利用效率的影响

3.2.2.1 不同施肥模式下冬小麦不同生育期的土壤水分动态变化

不同施肥模式下冬小麦关键生育期土壤含水率动态变化如图 3-5，可见，四个生长期下不同施肥模式的冬小麦 0~140cm 土体的土壤含水率的变化趋势基本相同，均随土体深度的增加含水率升高，而 140cm 以下的土层未呈现特定规律。拔节期（A）和开花期（B）表层土（0~40cm）的土壤含水率波动较大，开花期 CK 和 FS3 表层土壤含水率相对较高，可能的原因是这两种模式的冬小麦长势相对较弱对表层土壤水的吸收利用也较低，40-140cm 的土壤含水率的变化趋势基本一致。受灌水（拔节水）的影响，开花期 0-60cm 各土层土壤含水率均高于拔节期。灌浆中期（C）水分变化剧烈的土层为 0-100cm，各施肥模式间的土壤含水率差异显著，FS1 和 FS3 模式下 0~100cm 各土层的含水率相对较高高于其它三种模式。成熟期（D）对比之前的生长时期 0~140cm 各土层的含水率明显降低，这是由于天然降水量远远不能满足冬小麦的耗水需要，冬小麦更多地消耗土壤贮水为主。而各施肥模式间在成熟期 0-140cm 土层土壤水分均变化剧烈，各土层含水率均以 FS1 达最高，CK 最低，各模式间差异显著，而 F、FS2 和 FS3 三种模式在 0~140cm 土体的总贮水量基本一致。以上说明，施肥模式影响冬小麦对土壤水分的吸收利用状况。

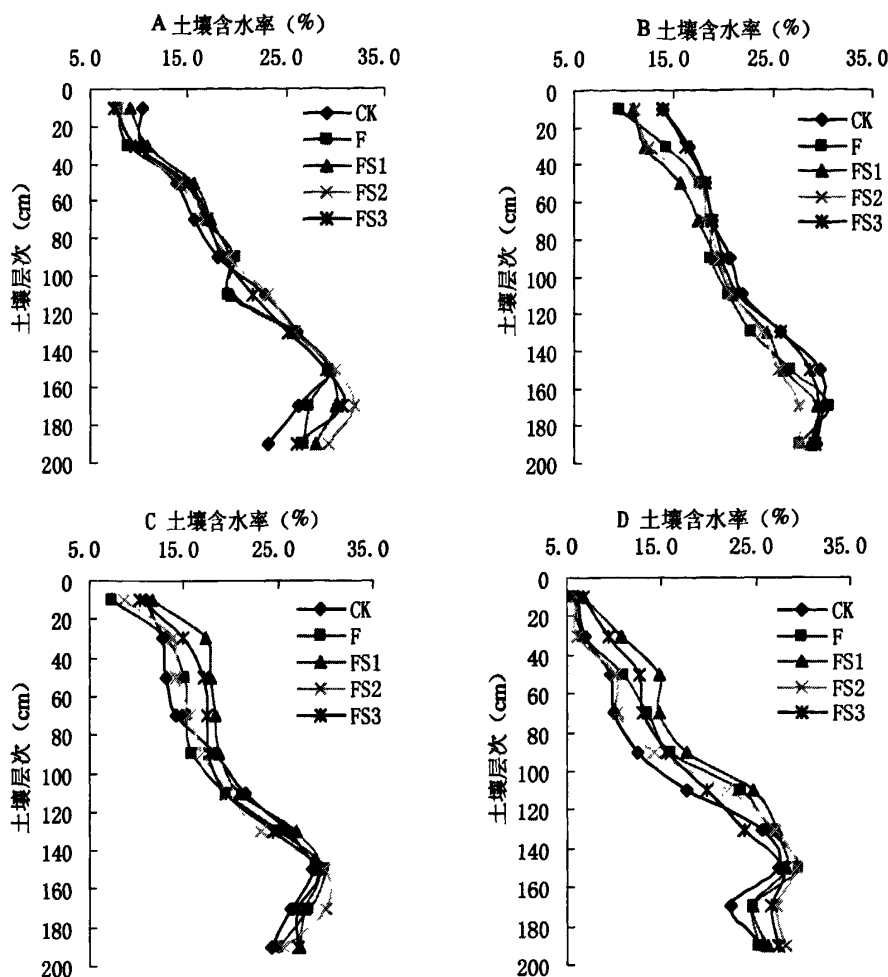


图 3-5 不同施肥模式下冬小麦关键生育期土壤水分动态变化

Fig. 3-5 Soil water content in different growth stages of winter wheat at different fertilizer modes

图中: A 拔节期 Jointing stage; B 开花期 Flowering stage; C 灌浆中期 Medium milk stage; D 成熟期 Mature stage

3.2.2.2 不同施肥模式下冬小麦的耗水及水分利用效率比较

冬小麦的耗水和水分利用效率如图 3-6 和表 3-3，可知，不同施肥模式对冬小麦整个生育期的耗水量有一定影响，主要体现在冬小麦对土壤贮水的消耗量不同，FS1 模式总耗水量最低为 385.5mm，CK 总耗水量最高为 479.4mm，比 FS1 高出 24.4%，而 F、FS2 和 FS3 的总耗水量居中且基本持平，可能的原因是施肥提高了冬小麦的分蘖数和叶面积，冬小麦群体增大，增加了地表覆盖度，棵间蒸发较少，故对麦田的耗水量相对较少。由于总耗水量和产量的不同，五种施肥模式的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t 也各不相同，但基本趋势一致 (图 3-7)，FS1 模式下冬小麦的 WUE 均显著提高，相对 CK 的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t 分别提高了 57.7%、43.9% 和 27.0%。而 F、FS2 和 FS3 模式的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t 均基本持平，高于 CK 低于 FS1。由以上结果并结合产量 (表 3-2) 分析可知，不同施肥模式下冬小麦的耗水和水分利用效率各不相同，合理配比的肥料投入不仅能增加产量而且有一定的节水效应，其中，FS1 模式的节水增产

效果最为显著，以总量相同的肥料投入来比较，显然 FS1 模式最经济。

表 3-3 不同施肥模式下冬小麦的水分利用效率（WUE）

Table 3-3 Water use efficiency of winter wheat at different fertilizer modes

处理	CK	F	FS1	FS2	FS3
降水量(mm)	148.1	148.1	148.1	148.1	148.1
灌溉量(mm)	165	165	165	165	165
土壤贮水消耗量(mm)	166.3	117.7	72.4	117.1	111.5
总耗水量(mm)	479.4	430.8	385.5	430.2	424.6
籽粒 WUE(kg /mm/hm ²)	13.0	15.8	20.5	16.5	15.3
生物 WUE(kg /mm/hm ²)	27.1	34.0	39.0	34.5	32.7
WUE _I (kg /mm/hm ²)	37.7	41.2	47.9	43.1	39.4

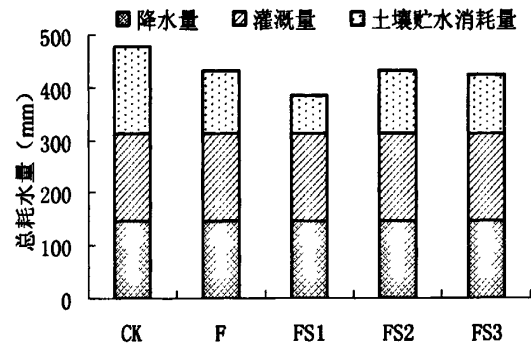


图 3-6 不同施肥模式下冬小麦全生育期耗水构成

Fig. 3-6 The components of water consumption of winter wheat in full growth period at different fertilizer modes

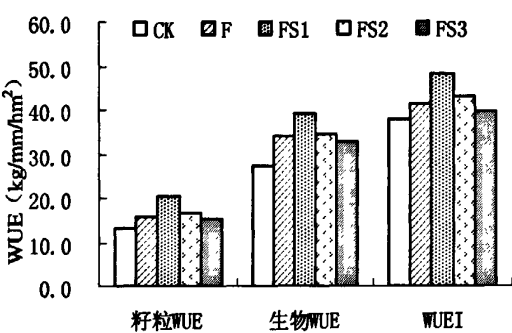


图 3-7 不同施肥模式下冬小麦的 WUE

Fig. 3-7 The WUE of winter wheat at different fertilizer modes

3.2.3 不同施肥模式对冬小麦氮素吸收利用的影响

3.2.3.1 不同施肥模式对冬小麦氮素吸收利用的影响

不同施肥模式下冬小麦对氮素的吸收利用如表 3-4，可知，不同比例的氮与磷钾肥配施对冬小麦氮素吸收的影响不同，随着施纯 N 水平的增加，籽粒吸氮量有增加趋势为：FS1>FS2>F>FS3>CK，但并非施纯 N 越高吸氮量就越高，FS2 模式的施纯 N 量最高为 345kg/hm² 但吸氮量并非最高，为 168.35 kg/hm² 比 FS1 模式低 13.29 kg/hm²，这可能与单施氮肥而无磷钾肥配施影响冬小麦对养分的吸收利用有关，因此以施肥总量来看，FS2 模式的氮肥吸收利用效果相对较差。秸秆吸氮量与籽粒吸氮量趋势稍有不同，表现为：F>FS2>FS1>FS3>CK。从籽粒吸氮量占植株总吸氮量的比例来看（即氮收获指数），FS1 模式最高，达 75%；FS2 模式次之，为 73%，CK 最低为 70%。可见，适当比例的氮肥有利于提高冬小麦地上部的吸氮量，但施纯 N 量过高(FS2) 无磷钾肥配施时效果并非理想。

表 3-4 不同施肥模式下冬小麦籽粒、植株吸氮量及氮收获指数

Table 3-4The grain,plant nitrogen content and nitrogen harvest index of winter wheat at different fertilizer modes

处理	籽粒		秸秆		植株吸氮量 (kg/hm ²)	氮收获指数
	含氮比例 N	吸氮量 N	含氮比例 N	吸氮量 N		
	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)		
CK	1.81	112.45	0.67	45.57	158.03	0.71
F	2.43	165.02	0.86	67.38	232.40	0.71
FS1	2.30	181.64	0.84	59.92	241.56	0.75
FS2	2.37	168.35	0.81	62.66	231.01	0.73
FS3	2.05	133.15	0.77	56.77	189.92	0.70

3.2.3.2 不同施肥模式下冬小麦的氮肥效应评价

研究不同施氮水平的氮肥利用情况对于指导农户科学合理用肥、提高肥料利用率和评价施肥模式优劣有重要的参考价值。本研究选取三项利用指标：氮素生理效率，氮肥偏生产力，氮肥农学效率来作为氮肥效应的评价。具体五种施肥模式下冬小麦氮肥效应评价结果如表 3-5 和图 3-8。结果表明，不同施肥模式对冬小麦氮肥效应产生了不同影响，由于 FS2 模式纯氮量过高的原因，其氮肥偏生产力显著降低，分别比 F、FS1 和 FS3 降低 144.3%、143.5%和 180.4%，而施纯氮量相对较低的 FS3 模式的氮肥偏生产力最高，但对比 F 和 FS1 的提高幅度不大，分别提高了 14.8% 和 15.1%。氮素生理效率反映作物吸氮量对产量的贡献大小，是衡量氮利用效率高低的指标之一，五种模式下氮素生理效率呈 CK>FS3>FS1>FS2>F，由于 CK 的植株吸氮量最低导致氮素生理效率最高，而其它四种模式差别不大，基本持平。FS1 模式的高产量致使其氮肥农学效率最高，分别比 F、FS2 和 FS3 高出 150.0%、314.7%和 326.3%。

纵观试验结果，FS1 模式较其它四种模式氮素生理效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率都保持了较高水平，表明 FS1 模式对提高冬小麦氮肥效应有显著作用，F 和 FS3 模式的氮效应也相对较好但效果低于 FS1。因此，该区五种施肥模式下 FS1 肥料配比最合理为最佳推荐施肥模式。

表 3-5 不同施肥模式下冬小麦的氮肥利用比较

Table 3-5 The nitrogen utilization of winter wheat at different fertilizer modes

处理	施纯氮量 (kg/hm ²)	植株吸氮量 (kg/hm ²)	籽粒产量 (kg/hm ²)	氮素生理效率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥农学效 率(kg/kg)
CK	0	158.03	6212.9 c	39.32	—	—
F	135	232.40	6790.8 bc	29.22	50.30	4.28
FS1	157.5	241.56	7897.6 a	32.69	50.14	10.70
FS2	345	231.01	7103.3 b	30.75	20.59	2.58
FS3	112.5	189.92	6495.0 bc	34.20	57.73	2.51

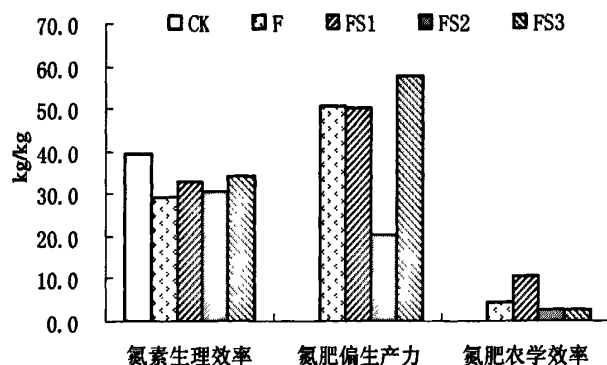


图 3-8 不同施肥模式下冬小麦的氮肥效应评价

Fig. 3-8 The effects of nitrogen fertilizer of winter wheat at different fertilizer modes

3.2.4 小结

(1) 不同施肥模式影响冬小麦的生长和产量, FS1 模式下冬小麦的长势相对较好。冬小麦的理论产量为 FS1 模式最高, 达 $7897.6\text{kg}/\text{hm}^2$ 显著高于其它四种模式, 对比 CK 增产幅度最大为 27.11%; 其次是 FS2 对比 CK 增产为 14.33%, 相比之下, FS2 和 FS3 的增产效果较差。可见, 该区肥料配比合理的 FS1 模式使产量构成更协调保证了冬小麦的稳产高产。

(2) 冬小麦整个生长期中, FS1 模式总耗水量最低为 385.5mm, CK 总耗水量最高为 479.4mm, 比 FS1 高出 24.4%, 而 F、FS2 和 FS3 的总耗水量居中且基本持平。FS1 模式下冬小麦的 WUE 均为最高, 相对 CK 的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t 分别提高 57.7%、43.9% 和 27.0%。而 F、FS2 和 FS3 模式的籽粒 WUE、生物 WUE 和 WUE_t 均基本持平, 高于 CK 低于 FS1。可见, 不同施肥模式影响冬小麦的耗水和水分利用效率, FS1 模式的肥料投入不仅能增加产量而且有一定的节水效应, 其节水增产效果最为显著。

(3) 不同施肥模式下冬小麦对氮素的吸收利用随施纯 N 水平的增加籽粒吸氮量有增加趋势, 但并非施纯 N 越高吸氮量就越高, FS2 模式的施纯 N 量最高为 $345\text{kg}/\text{hm}^2$ 而吸氮量却并非最高, 比 FS1 模式低 $13.29\text{kg}/\text{hm}^2$ 。从氮收获指数来看, FS1 模式最高, 达 75%; FS2 模式次之, 为 73%。因此, 适当比例的氮肥有利于提高冬小麦地上部的吸氮量, 五种模式中 FS1 对冬小麦吸氮量的提高效果最明显。

(4) 五种施肥模式中 FS1 较其它四种模式氮素生理效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率都保持了较高水平, 表明 FS1 模式对提高冬小麦氮肥效应有显著作用, F 和 FS3 模式的氮效应也相对较好但效果低于 FS1。因此, 该区 FS1 模式肥料配比最合理为最佳推荐施肥模式。

从冬小麦生长、产量、水分利用效率、氮肥效应几方面总体考察, 对于水资源紧缺的华北平原黑龙港地区, FS1 施肥模式下的冬小麦显然有一定的节水增产和高效利用肥料的作用, 由于此模式的冬小麦对土壤水消耗较少, 为下茬作物夏玉米的生长也创造了良好的底墒。FS1 施肥模式不仅提高了经济效益还有一定的节水生态效益。因此, 在吴桥地区冬小麦季因地制宜的推荐使用 FS1 施肥方法, 对提高作物产量和实现农业可持续发展有重要的意义。

3.2.5 不同施肥模式对夏玉米及周年体系产量和水分利用效率的影响

3.2.5.1 对夏玉米及周年体系产量的影响

五种施肥模式对夏玉米及周年体系产量的影响如表 3-6。可见，夏玉米的产量构成三因素变异均较小，除穗粒数表现为 CK 显著低于其它四种模式外，有效穗数和千粒重五种施肥模式间均无显著差异。综合产量构成三因素，夏玉米理论产量的差异主要是由穗粒数不同引起，其中，F、FS1 和 FS2 三种模式的产量无显著差异，均显著高于 FS3 和 CK，且相比 CK 的增产幅度均在 30% 以上，说明，这三种施肥模式对夏玉米产量的提高效果基本相同，而 FS3 也显著高于 CK，对比 CK 增产 24.8%。综合冬小麦、夏玉米两季作物，周年产量表现为：FS1>FS2>F>FS3>CK，且 FS1 模式总产量高于 FS2、F，显著高于 FS3 和 CK，其周年总产量增产幅度最高（较 CK 增产 28.7%），这主要是由冬小麦季产量显著最高导致。结合冬小麦产量分析可知，F、FS1 和 FS2 三种施肥模式对夏玉米产量的提高效果大于对冬小麦产量的提高效果，但冬小麦季产量影响的差异更为显著。

表 3-6 不同施肥模式下夏玉米的产量及周年体系总产量

Table 3-6 The yields of summer maize and rotation system at different fertilizer modes

处理	夏玉米季				周年体系		
	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 (个/穗)	千粒重(g)	理论产量 (kg/hm^2)	对比 CK 增 产	理论产量 (kg/hm^2)	对比 CK 增 产
CK	5.99 a	391.2 a	325.9 a	7412.8 c	—	13625.7 c	—
F	5.92 a	496.4 b	343.8 a	9822.8 a	32.51%	16613.6 ab	21.92%
FS1	5.87 a	479.3 b	342.9 a	9638.5 a	30.02%	17536.1 a	28.70%
FS2	5.82 a	472.6 b	342.8 a	9714.1 a	31.04%	16817.4 ab	23.42%
FS3	5.75 a	447.1 b	348.5 a	9251.5 b	24.80%	15746.5 b	15.56%

3.2.5.2 对夏玉米耗水及水分利用效率的影响

不同施肥模式下夏玉米季土壤水分动态平衡和 WUE 如表 3-7，可知，CK 在冬小麦收获后 0~200cm 土体含水量最低为 478.96mm，比 FS1 模式低 93.9mm，在充沛降雨下其土壤贮水量在五种模式中达最高为 231.28mm，而 FS1 模式由于较高的底墒其土壤贮水量最低。受降雨影响夏玉米季生长不消耗土壤水，其总耗水量变异幅度大于冬小麦季，且与冬小麦季总耗水量趋势基本相反（表 3-3），即 FS1 模式由冬小麦季的总耗水量最低在夏玉米季变为最高，而 CK 的耗水量变为最低仅为 403.62mm，其它三种模式的夏玉米总耗水量和土壤水变化量基本持平。FS1 模式的夏玉米籽粒 WUE 由于其总耗水量最高表现并不理想为 18.56 kg/mm/hm²，与 CK 接近，低于其他三种施肥模式。

表 3-7 不同施肥模式下夏玉米的水分消耗及籽粒 WUE

Table 3-7 The water consumption amount and grain WUE of summer maize at different fertilizer modes							
处理	播前 2m 土体 含水量(mm)	收后 2m 土体 含水量(mm)	土壤水变化 量(mm)	灌水量 (mm)	降水量 (mm)	总耗水量 (mm)	WUE (kg /mm/hm ²)
CK	478.96	710.24	-231.28	75	559.9	403.62	18.37
F	527.53	683.98	-156.45	75	559.9	478.45	20.53
FS1	572.86	688.49	-115.63	75	559.9	519.27	18.56
FS2	528.12	690.79	-162.67	75	559.9	472.23	20.57
FS3	533.78	693.32	-159.54	75	559.9	475.36	19.46

3.2.5.3 对冬小麦、夏玉米周年体系 WUE 的影响

五种施肥模式下冬小麦、夏玉米周年 WUE 比较如图 3-9，可知，施肥的四种模式 WUE 显著高于不施肥处理（CK）。尽管 FS1 模式下夏玉米季的籽粒 WUE 较低（表 3-7），但对周年籽粒 WUE 的影响不大，FS1 模式周年籽粒 WUE 仍为最高，这主要是由于其周年总产量最高而致，F、FS2 模式的籽粒 WUE 稍低于 FS1，但三者间差异不显著。周年生物 WUE 与籽粒 WUE 趋势稍有不同，表现为 FS2 模式最高为 33.76 kg/mm/hm²，而 F、FS1、FS2 和 FS3 四种模式间差异较小，均显著高于 CK，分别高出 15.9%、14.5%、18.9%和 12.1%。总之，不同施肥模式对周年 WUE 影响不同，仅从周年 WUE 角度看，FS1、F 和 FS2 三种施肥模式效果相当，但综合周年产量分析，显然高产的 FS1 模式优于其它几种施肥模式。

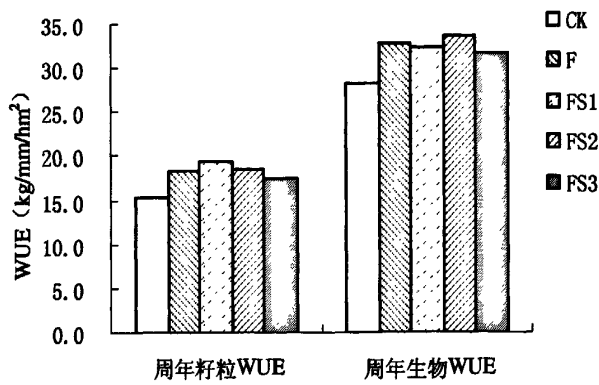


图 3-9 不同施肥模式下冬小麦、夏玉米的周年 WUE

Fig. 3-9 The total WUE of winter wheat and summer maize at different fertilizer modes

3.2.6 不同施肥模式对夏玉米及周年体系氮素吸收利用的影响

3.2.6.1 对夏玉米及周年体系氮素吸收利用的影响

不同施肥模式对夏玉米及周年体系氮素吸收利用的影响如表 3-8，可见，F、FS1、FS2 和 FS3

模式的夏玉米籽粒氮吸收量均高于 CK，分别高出 38.9%、34.5%、29.3%和 22.8%，夏玉米籽粒吸氮量的趋势与冬小麦季略有不同，说明冬小麦、夏玉米的氮素吸收对几种施肥模式的响应有差别。F 模式的夏玉米籽粒吸氮量和植株吸氮量均达最高并且氮收获指数与 FS1 模式相等为 0.73，高于其它模式，说明其它三种模式下夏玉米植株体内吸收氮素向籽粒转移和分配能力相对较低。综合来看，周年籽粒吸氮量和植株吸氮量趋势相同，均为 FS1>F>FS2>FS3>CK，但 FS1 和 F 二者无显著差异。五种施肥模式下夏玉米季氮收获指数和周年氮收获指数与冬小麦季氮收获指数（表 3-4）表现一致，均是 FS1 模式表现最好，F 和 FS2 次之，说明 FS1 模式下冬小麦、夏玉米总体对氮素的吸收利用较好。

表 3-8 不同施肥模式下夏玉米及周年体系的氮素吸收利用

Table 3-8 The N uptake and utilization of summer maize and rotation system at different fertilizer modes						
处理	吸氮量 (kg/hm ²)				氮收获指数	
	夏玉米籽粒	夏玉米植株	周年籽粒	周年植株	夏玉米季	周年系统
CK	104.44	155.23	216.89	313.26	0.67	0.69
F	145.08	198.60	310.10	431.00	0.73	0.72
FS1	140.53	191.41	322.17	432.97	0.73	0.74
FS2	135.05	196.05	303.40	427.06	0.69	0.71
FS3	128.25	185.24	261.40	375.16	0.69	0.70

3.2.6.2 不同施肥模式下冬小麦、夏玉米周年体系氮肥效应评价

氮肥偏生产力用来表示不考虑土壤氮素变化的情况下施氮量所引起的产量效应，它反映了作物当季施氮量对经济产量的贡献大小，用以衡量氮肥施用的经济效益高低（易镇邪，等 2008）。表 3-9 是对单季作物及周年系统的氮肥效应评价。与冬小麦季相比，由于夏玉米产量的提高幅度远大于施纯氮的增加幅度，因此，四种施肥模式的夏玉米季氮肥农学效率和氮肥偏生产力均高于冬小麦季。因 FS2 模式的冬小麦季和夏玉米季施纯氮量过高，导致单季及周年系统的氮肥农学效率和氮肥偏生产力均过低。从轮作体系来看，周年氮肥农学效率为 FS1>F>FS3>FS2，与冬小麦单季的趋势基本相同。而夏玉米季由于产量的增加趋势与冬小麦季不同（夏玉米季产量为 F>FS2>FS1>FS3>CK），因此，其农学效率也表现出不同的趋势为 F>FS3>FS1>FS2，但 F、FS3 和 FS1 间差异不显著。四种施肥模式中，FS3 模式的冬小麦季和夏玉米季施纯氮量因最低致使 FS3 模式的单季及周年体系氮肥偏生产力均最高，FS3 周年氮肥偏生产力达 65.72kg/kgN，比 FS1、F 和 FS2 分别高出 18.0%、13.7%和 187.1%。FS3 模式的结果说明低纯氮量的施用可大幅提高单季作物及周年体系的氮肥偏生产力。但评价不同施肥模式的优劣仅此一项指标并不能全面说明问题，应结合其他结果综合考虑。尽管在轮作体系中氮肥评价的各项指标 FS1 模式不占绝对优势，但效果基本与 FS3 模式持平，且 FS1 模式在冬小麦季各项氮肥评价指标中最好，因此，相对来看，FS1 模式仍不失为最佳施肥模式。

表 3-9 不同施肥模式下冬小麦、夏玉米周年体系氮肥效应评价

Table 3-9 The effects of nitrogen fertilizer of wheat-maize rotation system at different fertilizer modes

处理	作物	氮肥农学效率 (kgN/kg)	周年体系氮肥农 学效率(kgN/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	周年体系氮肥偏 生产力(kg/kg)
CK	冬小麦	—	—	—	—
	夏玉米	—		—	
F	冬小麦	4.28	10.39	50.30	57.79
	夏玉米	15.80		64.41	
FS1	冬小麦	10.70	12.41	50.14	55.67
	夏玉米	14.13		61.20	
FS2	冬小麦	2.58	4.34	20.59	22.89
	夏玉米	5.90		24.92	
FS3	冬小麦	2.51	8.85	57.73	65.72
	夏玉米	14.47		72.79	

3.2.7 不同施肥模式对土壤肥力平衡状况的影响

土壤全量养分作为养分的储藏库是生产潜力的重要标志，而速效养分则是供肥强度的重要反应，易受栽培、耕作、施肥等措施的调控。本研究在冬小麦、夏玉米收获后分别取耕层土壤样品分析其全量和速效养分，表 3-10 是 0-20cm 土层的测定结果，可见，不同施肥模式对耕层土壤养分含量有不同影响。(1) 冬小麦、夏玉米收获后五种模式下土壤有机质含量均比本底值有所升高，且升高幅度差异较小，可能的原因是冬小麦、夏玉米种前上茬作物均秸秆还田致使有机质的积累大于矿化。(2) 冬小麦收获后 (2009.06) 各模式耕层土壤全氮含量表现为：FS1>F>FS3>FS2>CK，其中，FS1 与 F 基本相等，FS1、F、FS3 和 FS2 分别比 CK 增加 39%、38%、35%和 26%，说明四种施肥（氮）处理耕层土壤全氮含量都有不同程度的增加，无肥处理（CK）土壤全氮含量降低，表明氮肥的施用对提高土壤全氮有重要作用。而夏玉米收获后（2009.10），各处理耕层土壤全氮含量基本相同均低于冬小麦收获后的含量，保持在 0.57~0.59 g/kg，产生这一结果的原因除了与夏玉米的吸收利用有关外，还可能与夏玉米生长期的外界条件导致土壤养分转化流失有关。(3) 五种模式的土壤全钾含量在冬小麦收获后的值均比夏玉米收获后含量高，且不同模式间差别较大，但相比土壤本底值未表现出一定的规律。(4) 冬小麦、夏玉米收获后除 CK 外，其它四种模式土壤有效磷含量较本底值均有所提高，但提高幅度以 FS2 模式最低，这可能与施用氮肥可促进土壤中磷素转化为有效磷有关，并且由于 F、FS1 和 FS3 三种施肥模式含有磷肥补充了土壤中有有效磷的含量。(5) 土壤全磷和速效钾的含量在有磷钾肥施用的模式（F、FS1、FS3）两季作物收获后都有不同程度的增加，而无磷钾肥施用的模式（CK、FS2）土壤全磷和速效钾含量均降低，这是因为作物在生长中不断吸收土壤磷和钾素，使无磷钾肥施用的土壤全磷和速效钾含量降低。

表 3-10 不同施肥模式下的土壤表层（0~20cm）肥力变化

Table 3-10 The changes of soil fertility of soil surface layer (0-20cm) at different fertilizer modes							
处理	测定日期	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
本底值	2008.10	11.91	0.67	0.80	17.01	9.43	45.33
CK	2009.06	13.55	0.59	0.74	16.94	9.27	35.65
	2009.10	13.70	0.57	0.65	16.77	9.04	42.00
F	2009.06	13.77	0.97	0.91	17.24	12.03	48.34
	2009.10	13.15	0.57	0.81	15.33	10.43	65.93
FS1	2009.06	13.87	0.98	0.83	16.62	12.46	47.38
	2009.10	13.90	0.59	0.95	15.09	10.15	62.15
FS2	2009.06	12.03	0.85	0.70	16.36	9.77	39.17
	2009.10	13.46	0.59	0.78	12.77	11.04	40.59
FS3	2009.06	13.93	0.94	0.84	17.40	11.29	50.30
	2009.10	13.64	0.58	0.86	13.55	10.01	58.83

3.2.8 小结

研究区（吴桥）位于黄淮海平原黑龙港地区，主要种植方式为冬小麦/夏玉米轮作。施用肥料是该地区主要的农业增产措施，但近年来，化肥投入量增加而作物产量并未随之同步增长，甚至有部分地区出现了产量下降的现象。分析其原因，主要是在该区农民氮肥过量施用比较普遍，而对磷钾肥未引起足够的重视。

本研究针对以上问题设计五种施肥方案，通过田间试验，分析了不同施肥条件对冬小麦/夏玉米轮作体系作物的生长、产量、水肥吸收利用及土壤养分变化的影响，旨在探索和掌握吴桥地区最佳的氮磷钾配比的施肥模式，为合理施肥提供科学依据。主要结果如下：

- (1) F、FS1 和 FS2 三种施肥模式对夏玉米产量的提高效果大于对冬小麦产量的提高效果，但在三种模式对冬小麦季产量影响的差异更为显著。FS1 模式下冬小麦、夏玉米两季作物的总产量高于 FS2、F，显著高于 FS3 和 CK，并且周年总产量增产幅度最高（较 CK 增产 28.7%）。
- (2) 五种处理下，施肥的四种模式冬小麦、夏玉米及周年籽粒 WUE 和生物 WUE 显著高于不施肥处理（CK）。尽管 FS1 模式下夏玉米籽粒 WUE 较低，但对周年籽粒 WUE 的影响不大，FS1 模式周年籽粒 WUE 仍为最高。不同施肥模式对周年 WUE 影响不同，仅从周年 WUE 角度看，FS1、F 和 FS2 三种施肥模式效果相当，但综合周年产量分析，显然高产的 FS1 模式优于其它几种施肥模式。
- (3) 从轮作体系来看，周年氮肥农学效率为 FS1>F>FS3>FS2，与冬小麦单季的趋势基本相同。四种施肥模式中，FS3 模式的冬小麦季和夏玉米季施纯氮量由于最低使 FS3 模式的单季及周年体系氮肥偏生产力均最高，FS3 周年氮肥偏生产力达 65.72kg/kgN，比 FS1、F 和 FS2 分别高出 18.0%、13.7%和 187.1%。综合考虑来看，尽管在轮作体系中氮肥评价的各项指标 FS1 模式不占

绝对优势,但效果基本与 FS3 模式持平,且 FS1 模式在冬小麦季各项氮肥评价指标中最好,因此,FS1 模式仍不失为最佳节肥模式。

(4) 不同施肥模式对耕层土壤养分含量有不同影响。施肥的四种模式土壤耕层的某些养分含量有不同程度的增加,而有磷钾肥配施的三种模式均提高了土壤氮磷钾养分的含量(此结果与众人研究结果一致(杨博, 2008; 张桂兰, 等 1999))。具体结果如下:冬小麦收获后四种施肥(氮)处理耕层土壤全氮含量都有不同程度的增加。除 CK 外,冬小麦、夏玉米收获后其它四种模式土壤有效磷含量较本底值均有所提高,但提高幅度以 FS2 模式最低,这可能与施用氮肥可促进土壤中磷素转化为有效磷有关。土壤全磷和速效钾的含量在有磷钾肥施用的模式(F、FS1、FS3)两季作物收获后都有所提高,而无磷钾肥施用的模式(CK、FS2)土壤全磷和速效钾含量均降低。

综合以上结果,研究区内 FS1 施肥模式综合效应较好,优于其他模式,该模式保证了冬小麦/夏玉米高产、水肥利用效率高并且较好的改善了土壤养分含量,经济效益和生态效益显著。因此,在该区推广应用 FS1 施肥模式,可达到提高作物产量、节约水资源、以及保持农业资源可持续利用与发展的目的。

第四章 不同水肥模式对冬小麦-夏玉米产量与水肥利用的影响

4.1 材料与方法

4.1.1 试验地概况

试验于2009年至2010年在中国农业大学吴桥实验站进行，气象和地力等参数同第二章1.1。试验期间的年总降水量为539.2mm，其中夏玉米生长季(6~9月)降水467.6 mm，占全年总降水量的86.7%。

4.1.2 试验设计

4.1.2.1 冬小麦季

水肥模式试验于 2009-2010 年进行，冬小麦季设置 5 种不同的水肥组合处理（具体试验灌水、施肥方案见表 4-1）。2009 年 10 月 14 日播种，品种为济麦 22，播种量为 225kg/hm²，2010 年 06 月 16 日收获。试验设三次重复，小区面积为 7m×5.2m，共 15 个试验小区，不同灌水处理小区之间设 1m 隔离带防止水分侧渗，灌水时间分别为：2009 年 10 月 11 日（底墒水）、2010 年 03 月 22 日（返青水）、2010 年 04 月 11 日（拔节水）和 2010 年 05 月 20 日（灌浆水），采用水表严格控制每次灌水量，病虫害防治同大田管理。

表 4-1 冬小麦水肥模式试验设计

Table 4-1 The experimental design of winter wheat of different water and fertilization modes		
处理	灌溉方案	施肥方案
水肥方案 A	一底三水	每亩基施二铵 20kg+尿素 30kg+钾肥 15kg
	（底墒 90mm+返青 75mm+拔节 75mm+灌浆 75mm）	即：每亩共施 N：17.4kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg；K ₂ O 7.5 kg
水肥方案 B	一底二水	每亩基施二铵 20kg+尿素 30kg+钾肥 15kg
	（底墒 90mm+返青 75mm+拔节 75mm）	即：每亩共施 N：17.4kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg；K ₂ O 7.5 kg
水肥方案 C	一底一拔节水	每亩基施二铵 20kg+尿素 20kg+钾肥 15kg
	（底墒 90mm+拔节 75mm）	即：每亩共施 N：12.8kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg；K ₂ O 7.5 kg
水肥方案 D	一底一拔节水	每亩基施二铵 20kg+尿素 10kg+钾肥 15kg+拔节期追施尿素 10kg
	（底墒 90mm+拔节 75mm）	即：每亩共施 N：12.8kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg；K ₂ O 7.5 kg
水肥方案 E	只浇底墒水	每亩基施二铵 20kg+尿素 20kg+钾肥 15kg
	（90mm）	即：每亩共施 N：12.8kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg；K ₂ O 7.5 kg

4.1.2.2 夏玉米季

夏玉米季全生育期不进行灌溉，在冬小麦试验地块的基础上进行。由于夏玉米生长季降水充沛，因此没有进行水分处理。在前茬冬小麦秸秆还田、浇底墒水（75mm）后进行整地、施肥。夏玉米于2010年06月24日播种，品种为郑单958，播种量为67.5 kg/hm²，2009年10月03日收获。夏玉米具体试验施肥方案设计见表4-2。

表 4-2 夏玉米水肥模式试验设计

Table 4-2 The experimental design of summer maize of different water and fertilization modes		
处理	施肥方案	
A（对应小麦季方案 A）	每亩基施二铵 20kg+尿素 30kg	即：共施 N：17.4kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg
B（对应小麦季方案 B）	每亩基施二铵 20kg+尿素 30kg	即：共施 N：17.4kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg
C（对应小麦季方案 C）	每亩基施二铵 20kg+尿素 15kg	即：共施 N：10.5kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg
D（对应小麦季方案 D）	每亩基施二铵 20kg+尿素 7.5kg+小口期追施尿素 7.5kg	即：共施 N：10.5kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg
E（对应小麦季方案 E）	每亩基施二铵 20kg+尿素 15kg	即：共施 N：10.5kg；P ₂ O ₅ ：9.2 kg

4.1.3 样品采集与测定

同第三章 1.3

4.1.4 数据、公式计算

同第三章 1.4

4.2 结果与分析

4.2.1 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米生长发育的影响

4.2.1.1 不同水肥模式对冬小麦分蘖动态的影响

不同水肥条件下冬小麦分蘖动态如图 4-1，在相同播种量条件下，冬小麦各生育期五个处理茎蘖消长趋势基本一致，即均在拔节期达到最大，之后部分茎蘖凋萎分蘖数开始下降，在成熟期降到最低。A、B、C 三个处理在拔节期的茎蘖数高于 D、E，成熟期 A 和 E 模式相对拔节期的茎蘖数下降幅度最大。纵观冬小麦整个分蘖动态趋势，E 处理由于未浇拔节水，在分蘖数达到最大时部分茎蘖迅速消亡有效茎蘖数降低，说明拔节水促进了后期茎蘖数的维持。从成熟期的有效穗数来看，A、B、C 和 D 处理基本持平，成穗率分别为 51.8%、56.9%和 52.6%和 57.8%，均高于 E 处理（50.65%），说明冬小麦需水高峰期灌水（拔节水）对成穗率有一定贡献。

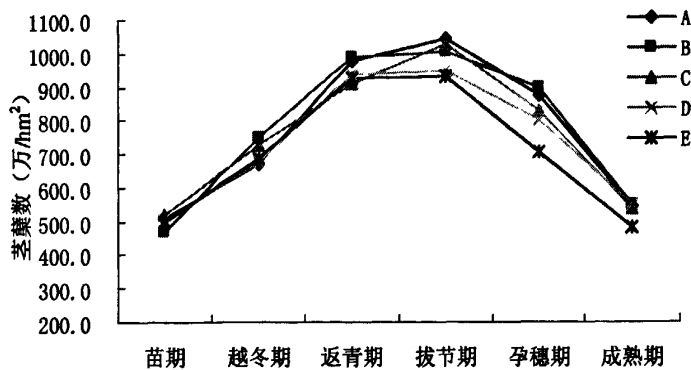


图 4-1 不同水肥模式下冬小麦的分蘖动态比较

Fig. 4-1 The trends of tillering of winter wheat at different water and fertilization modes

4.2.1.2 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米各生育期株高的影响

不同水肥模式下，冬小麦和夏玉米在不同生育期株高如图 4-2 和图 4-3，可见，（1）冬小麦拔节期五个处理间的株高略有差异但不显著。孕穗期 C 处理最高且与 A、B 均显著高于 E 处理，D 处理株高介于 A、B、C 和 E 之间。至孕穗期，D 处理的高度与 A、B、C 持平均显著高于 E 处理，而成熟期的趋势与开花期相同。表明 D 处理在拔节期进行一定的追施尿素对冬小麦的生长有很好的促进作用。（2）夏玉米在播后 20 天各处理的株高有一定的差异，除了试验处理本身导致也与测量误差有一定关系。至拔节期 A、B 的株高高于其他三个处理，这可能与冬小麦的高肥处理的后效有关也与当季的较高的底肥有关。灌浆中期的株高虽然表现为 A、B 和 D 模式的株高高于 C 和 E 模式，但五个处理间无显著差异。

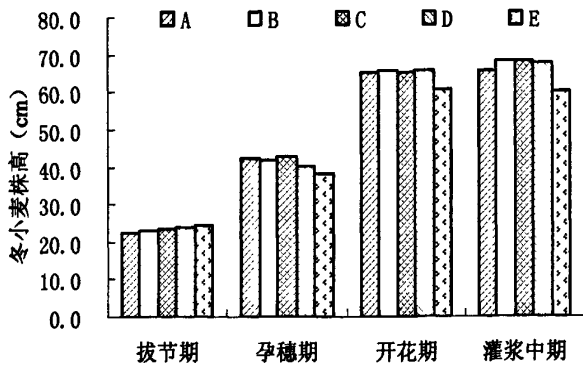


图 4-2 不同水肥模式下冬小麦各生育期的株高变化

Fig.4-2 Winter wheat height changes of different growing stages at different water and fertilization modes

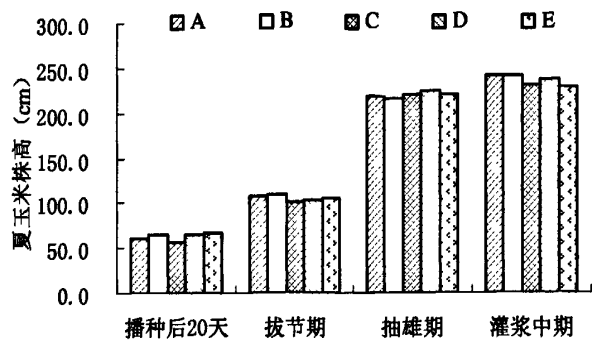


图 4-3 不同水肥模式下夏玉米各生育期的株高变化

Fig.4-3 Summer maize height changes of different growing stages at different water and fertilization modes

4.2.1.3 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米各生育期叶面积指数的影响

不同水肥模式对冬小麦和夏玉米不同生育期叶面积的影响如表 4-3，可见，（1）冬小麦季不同水肥模式对 LAI 有显著影响，表现为：孕穗期 A、B 和 C 模式的 LAI 显著高于 D 和 E 处理，可见，拔节水对冬小麦的生长发育有明显的促进作用，显著提高了冬小麦的群体叶面积，其促进效应与同时浇过返青水和拔节水的 A 和 B 处理相当。至开花期，D 处理的 LAI 升高与 A、B 高于 C 显著高于 E；灌浆中期，LAI 为 A>B>D>C>E，且均显著高于 E，说明在冬小麦生长期间进行一定的灌溉能维持生育期的叶面积，拔节水的作用对于冬小麦中期的生长很重要，而灌浆水对于冬小麦生育后期的叶面积维持作用明显。E 处理由于整个生长期没有灌水因此在干旱胁迫下表现为绿叶早衰和早熟。（2）夏玉米季由于生育期降水充沛，在生长前中期即：拔节期和抽雄期的 LAI 五种处理下无显著差异，至灌浆中期叶面积指数表现为 A>B>D>E>C，且 A、B 显著高于 C、E。结合夏玉米的株高，在五种模式中 A、B 两种高氮肥模式效果基本类同均好于 C、E 两种低氮肥模式，而相对于 C、E 模式，在底肥减少的氮肥量追施在小口期的 D 模式基本上提高幅度不明显。

表 4-3 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米各生育期的 LAI 变化

Table 4-3 The LAI changes of winter wheat and summer maize in different growing stages at different water and fertilizer modes

处理	modes					
	冬小麦 LAI			夏玉米 LAI		
	孕穗期	开花期	灌浆中期	拔节期	抽雄期	灌浆中期
A	5.60 a	7.03 a	5.11 a	1.91 a	4.13 a	4.58 a
B	5.67 a	6.58 a	5.02 a	2.13 a	4.10 a	4.31 a
C	5.59 a	5.87 ab	3.72 b	1.87 a	4.23 a	3.71 b
D	4.65 b	6.49 a	4.14 b	1.98 a	4.44 a	4.13 ab
E	4.92 b	4.69 b	2.13 c	2.16 a	4.30 a	3.97 b

4.2.1.4 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米不同生育期干物质积累的影响

不同水肥模式下冬小麦和夏玉米地上部分群体干物质积累动态如图 4-4 和图 4-5，结果表明，

(1) 冬小麦的干物质积累在拔节期（返青水浇后 16 天，拔节水浇之前）的生物量在五种水肥处理下差异不显著，说明返青水对干物质积累无明显影响；孕穗期（5 月 1 日测定：拔节水浇后 20 天）干物质积累开始有差异，至开花期干物质积累量迅速增加（5 月 15 日测定：灌浆水浇之前）五种水肥模式下 D 和 E 生物量高于其它三个处理，可能的原因是一直未浇水的 E 处理在干旱胁迫下根系活力增强，根层深度加大，促进冬小麦吸收更多的水分和养分，发育进程提前差异变大。灌浆中期（6 月 2 日测定：灌浆水浇后 12 天）由于 E 模式一直处于缺水状态、生产力较低，因此显著低于其他四个水肥处理，至成熟期 A、B 两模式生物量积累相当显著高于 C、D 模式，而 C、D 模式也显著高于 E 模式。

(2) 夏玉米的干物质积累动态符合一般的生长趋势，即“S”型曲线，前期和后期生长缓慢、中期生长迅速类似直线型（图 4-5）。拔节期之前，五种模式的干物质积累基本相同，抽雄期开始产生差异，至灌浆中期各处理间差异显著，表现为：A>B>D>E>C。成熟期的干物质积累较灌浆中期增加幅度相对较小，但五个处理的干物质量大小与灌浆中期表现趋势一致。

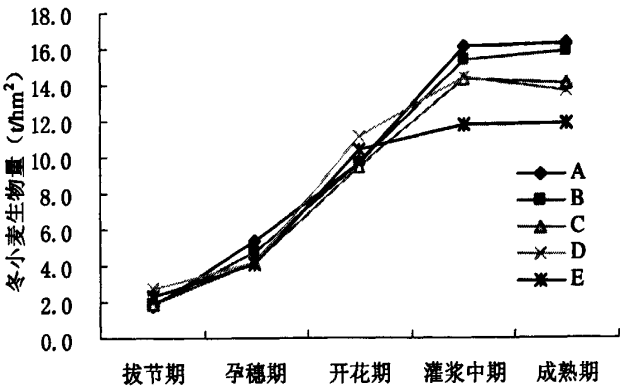


图 4-4 不同水肥模式下冬小麦不同生育期的干物质积累动态

Fig.4-4 Dry matter accumulation trends of winter wheat in different growing stages at different water and fertilizer modes

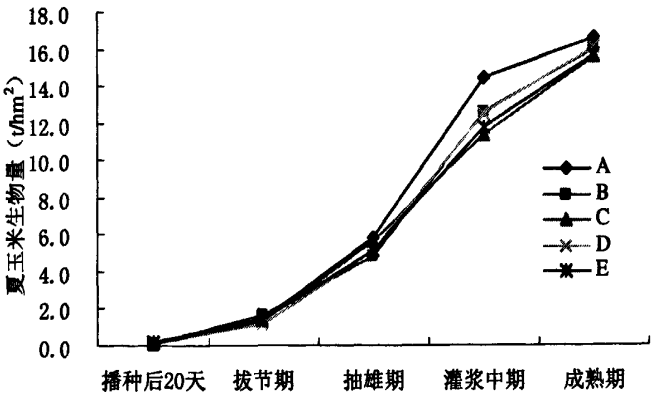


图 4-5 不同水肥模式下夏玉米不同生育期的干物质积累动态

Fig.4-5 Dry matter accumulation trends of summer maize in different growing stages at different water and fertilizer modes

4.2.2 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米穗部性状及产量的影响

4.2.2.1 不同水肥模式对冬小麦穗部性状和产量的影响

不同水肥模式下冬小麦的穗部性状、产量及产量构成如表 4-4，可见，不同水肥模式对冬小麦产量及各因素的影响程度不同。五种水肥模式下的穗长、有效穗数和穗粒数均为 A、B、C、D 间无明显差异均显著高于 E 模式；每穗小穗数间差异不显著；败育小穗数为 E>B>D>C>A，且 B、C、D 间差异不显著。千粒重表现为 A 显著高于 B、D，且 B、D 间差异不显著，而 B、D 又显著高于 C、E，且 C、E 间差异不显著。综合产量构成三因素，理论产量间的差异更主要是由千粒重引起的，可见，五种水肥模式对千粒重的影响程度最大。理论产量为 A>D>B>C>E，A、D、B、C 相对于 E 分别提高 65.7%、55.8%、49.9%和 25.6%。而处理间实际产量的差异趋势与理论产量基本相同。由此可见，一定的水肥措施能大幅提高冬小麦的产量，相同底肥的情况下，灌水和减施的底肥在拔节期追施对产量的提高幅度较大（D），而 B 模式虽然相对 D 多了返青水和较高的底肥，但产量并没有高于 D 模式，这可能跟当年的气候因素有关，由于冬小麦进入返青期时温度仍然很低，因此浇过返青水的 A、B 处理地温回升缓慢，部分麦苗受冻长势较差，因此返青水对冬小麦产量的提高作用几乎没有显现，而 A 模式的产量较 B 模式的提高部分更主要是由灌浆水引起的。从经济和节水的角度考虑，由于 A 模式的大水大肥虽然产量相对于 E 模式的提高幅度很大，但是结合实际生产投入来看，A 比 D 提高幅度仅为 6.3%，由此可见 A 的大水大肥效益相对 D 较差，D 模式在实际生产中应优先考虑，而 C 模式虽然水肥量与 D 相同，但由于肥料为底肥一次性投入，在冬小麦生育后期肥料促进冬小麦生长的作用降低，因此增产效果较弱。

表 4-4 不同水肥模式下冬小麦的穗部性状和产量比较

Table 4-4 The main ear characters and yield of winter wheat at different water and fertilizer modes								
处理	穗长 (cm)	每穗小穗 数(个/穗)	败育小穗 数(个/穗)	有效穗数 ($\times 10^4$ /hm ²)	穗粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm ²)	实际产量 (kg/hm ²)
A	7.82 a	14.18 a	0.52 c	541.11 a	34.55 a	44.93 a	8389.92 a	7284.66 a
B	7.80 a	13.73 a	0.92 ab	573.33 a	33.12 a	40.01 b	7589.56 ab	6165.11 ab
C	7.85 a	14.38 a	0.63 bc	539.63 a	33.25 a	35.59 c	6359.71 bc	5260.96 b
D	7.67 a	13.57 a	0.68 bc	549.26 a	35.01 a	38.41 b	7892.14 ab	6224.81 ab
E	7.15 b	13.68 a	1.17 a	476.30 b	29.71 b	35.42 c	5062.47 c	4570.92 b

4.2.2.2 不同水肥模式对夏玉米穗部性状和产量的影响

不同处理下的夏玉米穗部性状、产量及产量构成如表 4-5，可知，五种不同水肥模式对夏玉米穗部各性状、产量构成因素以及产量均无显著影响，理论产量虽然表现为：A>C>D>E>B，但差异不显著，说明夏玉米季不同量的底肥（氮肥）以及拔节期追施的少量氮肥对其产量均未产生明显影响，而冬小麦季不同的处理方式对夏玉米生长的后效也不显著，由于夏玉米季降水充沛，在冬小麦季产量表现最差的 E 模式夏玉米的产量也较高，说明夏玉米生长期水分对其影响远大于氮肥量对其的影响。

表 4-5 不同水肥模式下夏玉米的穗部性状和产量比较

Table 4-5 The main ear characters and yield of summer maize at different water and fertilizer modes								
处理	穗长 (cm)	行粒数 (个/行)	秃尖长 (cm)	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	理论产量 (kg/hm^2)	实际产量 (kg/hm^2)
A	16.59 a	34.55 a	0.91 b	4800	514.68 a	291.16 a	10792.00 a	9703.15 a
B	15.87 a	33.13 a	1.24 ab	4800	488.30 a	283.97 a	9985.55 a	8721.70 a
C	16.18 a	34.21 a	1.41 a	4800	508.08 a	284.78 a	10444.55 a	9370.45 a
D	16.67 a	34.15 a	1.46 a	4800	510.28 a	281.97 a	10368.10 a	9117.40 a
E	16.37 a	34.09 a	1.47 a	4800	492.18 a	284.68 a	10105.75 a	9208.10 a

4.2.2.3 不同水肥模式对冬小麦-夏玉米轮作体系周年（实际）产量的影响

不同水肥模式下冬小麦\夏玉米周年总（实际）产量如图 4-6 所示，周年实际总产量的趋势为：A>D>B>C>E，且 A 与其它模式间差异显著，由于夏玉米季的产量五个模式间基本持平，所以周年体系总产量的差异主要是由冬小麦产量差异引起的。相对于 E 模式，A、D、B、C 模式分别提高的幅度为 23.30%、11.34%、8.04%和 6.19%，A 比 D 提高 10.7%，可见，水肥投入均较少的 D 模式相对效益最好，生产上不提倡以大水大肥的 A 模式换取产量的微幅提高，应综合考虑整体效益最高的 D 模式，尤其是在缺水的黑龙港地区，可以考虑不浇返青水。

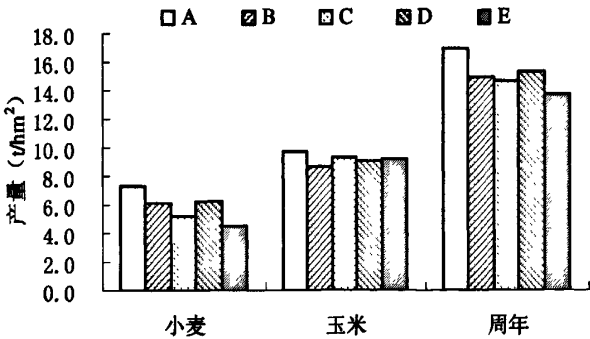


图 4-6 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米周年体系的（实际）产量

Fig. 4-6 The total yield of wheat-maize rotation system at different water and fertilizer modes

4.2.3 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米耗水及水分利用效率分析

4.2.3.1 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米全生育期耗水及其构成

五种水肥模式下冬小麦和夏玉米生育期耗水量及其构成由表 4-6 及表 4-7 可见，（1）冬小麦全生育期对土壤贮水消耗量以及所占总耗水量的比例随灌溉量的增加而减少，C、D 由于灌水量相同，土壤贮水消耗量及所占比例基本持平。而随灌溉量的增加，灌溉量占总耗水量的比例也增

加。A 模式比 B、C、D、E 模式的总耗水量分别增加 23.3mm、82.3mm、72.4mm 和 151.6mm。

(2) 受上茬冬小麦季灌溉的影响，其夏玉米播种之前的土壤底墒有一定差异，因此夏玉米在五种模式下生育期总耗水量有一定差异，加之产量的影响，致使夏玉米的 WUE 间无显著差异。夏玉米全生育期的土壤贮水消耗量由冬小麦季的正值变为负值，说明此时由于降水的影响夏玉米生长主要消耗自然降水，土壤贮水未被消耗而是进行了蓄水，且随冬小麦季灌溉量的增多蓄水量呈减少趋势，其中，D 模式的蓄水量最高为 246.15mm，其次为 C 模式蓄水量 235.79mm，B 模式为 221.10mm，三者均高于 E 模式。夏玉米总耗水量与冬小麦季不同，表现为：A>E>B>C>D，D 模式的总耗水量最低，而 E 模式的耗水量反而较高，可能的原因是 E 这种水肥模式由于冬小麦季水分缺乏影响了小麦的生长，小麦对土壤养分的吸收相对较少，土壤中的残留养分较 D、C 模式土壤养分相对高一些，因此在玉米季水分充足的情况下，E 模式的玉米长势也较好、耗水量也较多，其产量也相对较高。

表 4-6 不同水肥模式下冬小麦全育期耗水量及其构成

Table 4-6 The water consumption and their percentages of total water consumption of winter wheat in full growth period at different water and fertilizer modes

处理	灌溉量		降水量		土壤贮水消耗量		总耗水量
	(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%	(mm)
A	315	53.86	71.6	12.24	198.29	33.90	584.89
B	240	42.74	71.6	12.75	249.99	44.51	561.59
C	165	32.83	71.6	14.25	265.98	52.92	502.58
D	165	32.20	71.6	13.97	275.88	53.83	512.48
E	90	20.77	71.6	16.52	271.70	62.71	433.30

表 4-7 不同水肥模式下夏玉米全生育期耗水量及其构成

Table 4-7 The water consumption and their percentages of total water consumption of summer maize in full growth period at different water and fertilizer modes

处理	灌溉量		降水量		土壤贮水消耗量		总耗水量
	(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%	(mm)
A	75	21.19	467.6	132.12	-188.67	-53.31	353.93
B	75	23.33	467.6	145.44	-221.10	-68.77	321.50
C	75	24.45	467.6	152.41	-235.79	-76.86	306.81
D	75	25.30	467.6	157.73	-246.15	-83.03	296.45
E	75	22.59	467.6	140.84	-210.60	-63.43	332.00

4.2.3.2 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米单季及周年体系水分利用效率的影响

由表4-8可知，冬小麦-夏玉米体系周年总耗水量随小麦季灌水量的增加而增加，A模式达最高为938.82mm，与E模式相比，A、B、C、D的总耗水量分别高出22.7%、15.4%、5.8%和5.7%。从水分利用效率方面看，冬小麦的籽粒WUE以D模式最高，其次为A和B，C、E模式均较低。A、

B、C、D四处理的籽粒WUE分别比E处理高出22.8%、15.7%、8.3%和31.8%，可见，D模式的WUE提高幅度最大。与籽粒WUE不同，A和D模式的小麦生物WUE表现不理想，均低于其他三种处理，但A与E基本无差别。夏玉米的籽粒WUE和生物WUE趋势表现相同，均以A、E两模式为最低，D模式最高。夏玉米的籽粒WUE中C、D基本持平，而生物WUE中B、C基本持平。周年籽粒WUE以D模式最好，为22.57kg/mm/hm²，其次是C和A，B模式与E模式基本相同，表明浇返青水的B模式只是增加了总耗水量，对产量的增加和水分利用效率的提高几乎无贡献。D模式周年籽粒WUE最高，比A、B、C、E四种模式分别高出10.47%、13.4%、8.7%和13.9%。而周年生物WUE也是D模式最高但与C、E模式相差无几，而A模式为最低。

表 4-8 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米的单季及周年体系水分利用效率

Table 4-8 The seasonal WUE and total WUE of winter wheat and summer maize at different water and fertilizer modes							
处理	周年总耗 水量	冬小麦		夏玉米		周年	
		籽粒 WUE	生物 WUE	籽粒 WUE	生物 WUE	籽粒 WUE	生物 WUE
		(kg /mm/hm ²)	(kg /mm/hm ²)	(kg /mm/hm ²)	(kg /mm/hm ²)	(kg /mm/hm ²)	(kg /mm/hm ²)
A	938.8	14.34	27.90	30.49	46.70	20.43	34.98
B	883.1	13.51	28.29	31.06	49.48	19.90	36.01
C	809.4	12.65	28.18	34.04	50.52	20.76	36.65
D	808.9	15.39	26.69	34.97	54.07	22.57	36.72
E	765.3	11.68	27.94	30.44	47.11	19.82	36.25

4.2.4 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米养分吸收利用的影响

4.2.4.1 不同水肥模式对冬小麦养分吸收利用的影响

4.2.4.1.1 对氮素吸收利用的影响

不同水肥模式下冬小麦对氮素的吸收利用如表 4-9，可见，C 模式的籽粒和秸秆含氮比例均为最高，但由于产量相对较低其籽粒吸氮量仅高于 E 模式。A、B、D 和 E 四种模式的籽粒和秸秆含氮比例差别不大，他们的籽粒和秸秆吸氮量的差异主要是由其经济产量和生物产量的显著差异引起的。从总吸氮量来看，其趋势表现为随总施氮肥量的增加而增加，其中，A 模式达最高为 205.7 kg/hm²，而 C、D 两模式的总吸氮量基本相同，均稍低于 B 模式，显著高于 E 模式。由于 B 模式仅比 A 模式少浇一次灌浆水，其总吸氮量就比 A 模式低 7.1%，可见灌浆水对小麦地上部分群体吸氮量的影响较大，灌浆水对小麦群体氮素吸收有一定的促进作用。而 B 模式比 C、D 模式多浇一次返青水和多施 150kg/hm² 尿素做底肥，其提高效果并不是很大，分别比 C、D 模式的总吸氮量仅提高 4.3%和 3.5%。从氮收获指数来看，仍是 D 和 A 模式占优势，分别为 0.83 和 0.80，其次为 B、C，而 E 模式最低仅为 0.71。五种模式均为氮、磷、钾肥配施，除了氮肥总量有区别外，总灌水量的区别也较大，但小麦群体氮素的吸收利用在不同水肥模式下有较大差异（C 与 E，D 与 E，A 与 B），这表明，一定配比的肥料必须与合理的灌溉措施相结合才能有较好的增产效果。

表 4-9 不同水肥模式下冬小麦的氮素吸收利用

Table 4-9 The N uptake and utilization of winter wheat at different water and fertilizer modes						
处理	籽粒		秸秆		植株吸氮量 (kg/hm ²)	氮收获指数
	含氮比例(%)	吸氮量	含氮比例	吸氮量		
		(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)		
A	1.97	165.28	0.51	40.42	205.70	0.80
B	1.94	147.23	0.54	44.81	192.04	0.77
C	2.16	137.37	0.60	46.81	184.18	0.75
D	1.97	155.48	0.52	30.10	185.57	0.83
E	1.93	97.71	0.56	39.44	137.15	0.71

4.2.4.1.2 对磷素吸收利用的影响

表 4-10 是不同水肥模式下冬小麦对磷素的吸收利用情况。可见，籽粒吸磷量以 A 模式最高，分别比 B、C、D、E 高出 23.3%、31.9%、2.7%和 118.4%。但秸秆吸磷量以 D、E 最低均低于其他三种模式。总吸磷量表现为：A>D>B>C>E，B 仅比 C 高出 1.17kg/hm²。可见，大水大肥的 A 模式小麦地上部分群体吸磷量也最高，但比相对投入较低的 D 仅提高 7.7%。，比较效益较低。

表 4-10 不同水肥模式下冬小麦的磷素吸收利用

Table 4-10 The P uptake and utilization of winter wheat at different water and fertilizer modes					
处理	籽粒		秸秆		植株吸磷量 (kg/hm ²)
	含磷比例(%)	吸磷量(kg/hm ²)	含磷比例 (%)	吸磷量(kg/hm ²)	
A	0.29	24.33	0.029	2.30	26.63
B	0.26	19.73	0.023	1.91	21.64
C	0.29	18.44	0.026	2.03	20.47
D	0.30	23.68	0.018	1.04	24.72
E	0.22	11.14	0.013	0.92	12.05

4.2.4.1.3 对钾素吸收利用的影响

表 4-11 是不同水肥模式下冬小麦对钾素的吸收利用情况。可见，籽粒和秸秆的吸钾量仍以 A 模式为最高。小麦群体地上部总吸钾量为：A>B>C>D>E，随总氮肥量的增加小麦从土壤吸收的钾量也增加，这一趋势与总吸磷量的趋势不同，说明在钾肥用量相同的情况下，较高的氮肥和灌水量能促进小麦对钾素的吸收。而由于地上部分生物量相对较低，C、D 两种模式的总吸钾量并不理想，分别比 A 和 B 低 42.04 kg/hm²、57.35 kg/hm²和 25.77 kg/hm²、41.08kg/hm²。

表 4-11 不同水肥模式下冬小麦的钾素吸收利用

Table 4-11 The K uptake and utilization of winter wheat at different water and fertilizer modes					
处理	籽粒		秸秆		植株吸钾量 (kg/hm ²)
	含钾比例(%)	吸钾量(kg/hm ²)	含钾比例 (%)	吸钾量(kg/hm ²)	
A	0.47	39.43	1.95	154.56	193.99
B	0.45	34.15	1.73	143.57	177.72
C	0.50	31.80	1.54	120.15	151.95
D	0.47	37.09	1.72	99.55	136.64
E	0.45	22.78	1.58	111.27	134.05

4.2.4.2 不同水肥模式对夏玉米养分吸收利用的影响

4.2.4.2.1 对氮素吸收利用的影响

表 4-12 是不同水肥模式下夏玉米对氮素的吸收利用，可知，五种模式的籽粒含氮比例基本相同，而受产量的影响，吸氮量以 A、D 稍高于 B、C、E。而秸秆含氮比例以 E 最高、D 最低，但五种模式间差异不大。植株总吸氮量以 A 最高，分别比 B、C、D、E 高出 4.7%、9.8%、6.1%和 5.8%，可见夏玉米季由于降水充沛，加之较高的底肥（氮肥）促进了其群体对氮素的吸收（A、B）。氮收获指数 C、D 相等为 0.73，其次是 A 为 0.72，B、E 相同为 0.70，A、C、D 间基本持平。

表 4-4 不同水肥模式下夏玉米的氮素吸收利用

Table 4-12 The N uptake and utilization of summer maize at different water and fertilizer modes						
处理	籽粒		秸秆		植株吸氮量 (kg/hm ²)	氮收获指数
	含氮比例 (%)	吸氮量 (kg/hm ²)	含氮比例 (%)	吸氮量 (kg/hm ²)		
A	1.17	126.27	0.87	49.89	176.16	0.72
B	1.18	117.83	0.85	50.35	168.18	0.70
C	1.13	118.02	0.84	42.46	160.49	0.73
D	1.17	121.31	0.79	44.72	166.03	0.73
E	1.15	116.22	0.91	50.32	166.55	0.70

4.2.4.2.2 对磷素吸收利用的影响

表 4-13 是不同水肥模式下夏玉米对磷素的吸收利用，可见，籽粒吸磷量 E 为最高，A 次之，B、D 基本相等，C 为最低，除 E 比 C 高出 3.43 kg/hm² 之外，其他几个模式间差异较小。而秸秆吸磷量 A、B 相差无几，高于 C、D、E。从植株吸磷量来看，由于产量的原因，E 模式最高为 25.38 kg/hm²，其次为 A、B、D，C 为最低，低于 E 3.75 kg/hm²。可见，A、B 这两个较高底肥（氮肥）的处理在磷素吸收利用上并无明显优势。

表 4-5 不同水肥模式下夏玉米的磷素吸收利用

Table 4-13 The P uptake and utilization of summer maize at different water and fertilizer modes					
处理	籽粒		秸秆		植株吸磷量 (kg/hm ²)
	含磷比例(%)	吸磷量 (kg/hm ²)	含磷比例 (%)	吸磷量(kg/hm ²)	
A	0.20	21.58	0.060	3.44	25.02
B	0.20	19.97	0.057	3.38	23.35
C	0.18	18.80	0.056	2.83	21.63
D	0.19	19.70	0.051	2.89	22.59
E	0.22	22.23	0.057	3.15	25.38

4.2.4.2.3 对钾素吸收利用的影响

表 4-14 是不同水肥模式下夏玉米对钾素的吸收利用情况。由此可知，籽粒的含钾比例五种模式下基本相同，而籽粒吸钾量之间基本无差别。秸秆含钾量以 C 为最低，比其他四个处理平均低出 10.9 kg/hm²。植株吸钾量仍以 C 为最低，分别比 A、B、D、E 低 14.0%、13.0%、15.8%和 8.7%。这说明，在钾素吸收利用方面，小麦季几种水肥模式以及玉米季不同量的底肥除了对 C 处理的夏玉米有一定影响外，其他四个处理间几乎无差别，受影响微弱。

表 4-6 不同水肥模式下夏玉米的钾素吸收利用

Table 4-14 The K uptake and utilization of summer maize at different water and fertilizer modes					
处理	籽粒		秸秆		植株吸钾量 (kg/hm ²)
	含钾比例(%)	吸钾量(kg/hm ²)	含钾比例 (%)	吸钾量(kg/hm ²)	
A	0.33	35.61	1.23	70.54	106.15
B	0.33	32.95	1.22	72.26	105.21
C	0.32	33.42	1.18	59.65	93.09
D	0.33	34.21	1.30	73.59	107.80
E	0.35	35.37	1.19	65.86	101.23

总之，五种模式的夏玉米对养分的吸收利用稍有区别，可见，其不同量的底肥（氮肥）措施以及上茬冬小麦不同水肥模式的后效对夏玉米的养分吸收利用的影响较小。夏玉米季由于降水充沛当季不同量的底肥（氮肥）措施对其生长发育以及产量、养分吸收的影响程度较小麦季要低。

4.2.4.3 不同水肥模式对冬小麦、夏玉米周年养分吸收利用的影响

不同水肥模式下冬小麦、夏玉米周年氮素吸收利用如下表 4-15，由于冬小麦在不同水肥模式下吸氮量受影响较大，使周年系统吸氮量呈现不同的变化。周年系统的籽粒和植株吸氮量均以 A 为最高。其次是 B、D，E 为最低，而 C 也较差。周年氮收获指数为 D>A>C>B>E，且最高与最低之间相差 0.09。可见，在相同投入下，D 的效果好于 C，而 A 比 B 效果好主要是小麦季的灌浆水导致，二者相比水肥投入均较低的 D 模式，其相对效益较差。

表 4-15 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米的周年氮素吸收利用

Table 4-15 The N uptake and utilization of wheat-maize rotation system at different water and fertilizer modes

处理	周年系统		周年氮收获指数
	籽粒吸氮量(kg/hm ²)	植株吸氮量(kg/hm ²)	
A	291.55	381.86	0.76
B	265.06	360.22	0.73
C	255.39	344.67	0.74
D	276.79	351.60	0.79
E	213.93	303.70	0.70

4.2.4.4 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米单季及周年体系的氮肥效应评价

不同水肥模式下冬小麦、夏玉米单季及周年系统的氮肥效应评价如表 4-16 和图 4-7，可见，由于吸氮量较低而经济产量较高，五种模式下的夏玉米的氮素生理效率均显著高于冬小麦。冬小麦的氮素生理效率以 D 为最高，除了显著高于 C、E 外，与 A、B 的差别不大；夏玉米的氮素生理效率 C 最高为 65.08kg/kg，但五种模式间差异较小；周年的氮素生理效率，D 模式稍高于其他处理，但五种模式基本相同。单季及系统的氮肥偏生产力处理间差异较大，冬小麦由于其产量的提高幅度较大而施纯氮量却低于 A、B，因此 D 模式的氮肥偏生产力显著高于其他处理，分别比 A、B、C、E 高出 27.8%、41.3%、24.1%和 55.8%。夏玉米因其产量间无显著差异而 C、D、E 比 A、B 少施 225kg/hm² 尿素，所以 C、D、E 的氮肥偏生产力基本持平均显著高于 A、B，平均高出 65%左右。周年的氮肥偏生产力表现为 D>C>E>A>B，与小麦季稍有不同。综合两项指标，C、D 的氮肥评价效应要好于 A、B、E，而 D 模式相对 C 要更胜一筹。

表 4-7 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米单季及周年体系的氮肥效应评价

Table 4-16 The effects of nitrogen fertilizer of seasonal-crop and wheat-maize rotation system at different water and fertilizer modes

处理	氮素生理效率 (kg/kg)			氮肥偏生产力 (kg/kg)		
	冬小麦	夏玉米	周年	冬小麦	夏玉米	周年
A	40.79	61.26	50.23	32.15	41.35	36.75
B	39.52	59.37	48.79	29.08	38.26	33.67
C	34.53	65.08	48.75	33.12	66.31	48.08
D	42.53	62.45	51.93	41.10	65.83	52.25
E	36.91	60.68	49.94	26.37	64.16	43.40

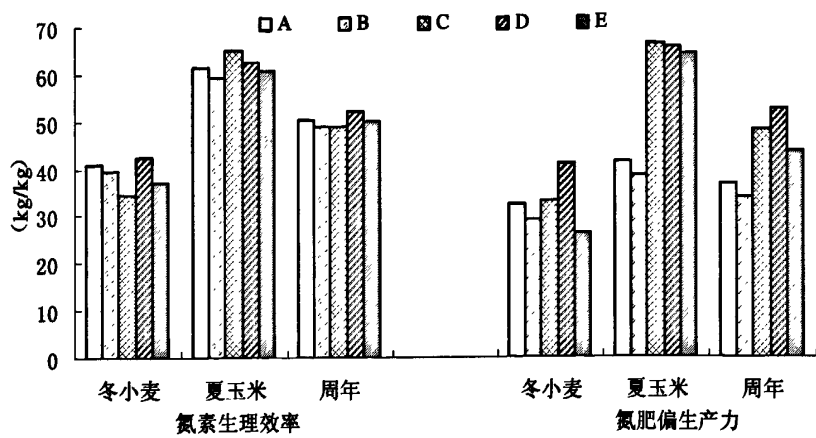


图 4-7 不同水肥模式下冬小麦、夏玉米单季及周年体系的氮肥效应评价

Fig. 4-7 The effects of nitrogen fertilizer of seasonal-crop and wheat-maize rotation system at different water and fertilizer modes

4.3 小结

从冬小麦、夏玉米的生长发育、产量、水肥利用效率等方面，探究了研究区不同水肥模式对单季作物和轮作体系的影响，主要结果如下：

（1）五种水肥模式对千粒重的影响程度最大，冬小麦理论产量间的差异主要是由千粒重引起，表现为 A>D>B>C>E，A、D、B、C 相对于 E 分别提高 65.7%、55.8%、49.9%和 25.6%。表明一定的水肥措施能大幅提高冬小麦的产量，相同底肥的情况下，灌水和减施的底肥在拔节期追施对产量的提高幅度较大（D），从经济和节水的角度考虑，由于 A 模式的大水大肥虽然产量相对于生长期无灌溉水的 E 模式提高幅度很大，但是结合实际生产投入来看，A 比 D 提高幅度仅为 6.3%，效益相对 D 较差，D 模式在实际生产中应优先考虑。而夏玉米季模式间不同量的底肥（氮肥）以及拔节期追施的少量氮肥对其产量均未产生明显影响，各产量无显著差异。而周年实际总产量的趋势为：A>D>B>C>E，A、D、B、C 模式分别比 E 模式提高的幅度为 23.3%、11.34%、8.04%和 6.19%。可见，水肥投入均较少的 D 模式相对效益是最好的，生产上不提倡以大水大肥的 A 模式来换取产量的微幅提高，应综合考虑整体效益最高的 D 模式，尤其是在缺水的黑龙江地区，可以考虑不浇返青水。

（2）冬小麦-夏玉米体系周年总耗水量随小麦季灌水量的增加而增加，A 模式达最高为 938.82mm，与 E 模式相比，A、B、C、D 的总耗水量分别高出 22.7%、15.4%、5.8%和 5.7%。从水分利用效率方面看，冬小麦的籽粒 WUE 以 D 模式最高，其次为 A 和 B，C、E 模式均较低。A、B、C、D 四处理的籽粒 WUE 分别比 E 处理高出 22.8%、15.7%、8.3%和 31.8%，可见，D 模式的 WUE 提高幅度最大。夏玉米的籽粒 WUE 和生物 WUE 趋势表现相同，均以 A、E 两模式为最低，D 模式最高。周年籽粒 WUE 以 D 模式最好，为 22.57kg /mm/hm²，比 A、B、C、E 四种模式分别高出 10.47%、13.4%、8.7%和 13.9%。表明浇返青水的 B 模式只是增加了总耗水量，对产量的增加和水分利用效率的提高几乎无贡献。

(3) 周年的氮素生理效率, D模式稍高于其他处理, 但五种模式基本相同。D模式冬小麦由于其产量的提高幅度较大而施纯氮量却低于A、B, 因此D模式的氮肥偏生产力显著高于其他处理, 分别比A、B、C、E高出27.8%、41.3%、24.1%和55.8%。夏玉米因其产量间无显著差异而C、D、E比A、BZ少施225kg/hm²尿素, 所以C、D、E的氮肥偏生产力基本持平均显著高于A、B, 平均高出65%左右。周年的氮肥偏生产力表现为D>C>E>A>B, 与小麦季稍有不同。综合以上分析表明, C、D的氮肥评价效应要好于A、B、E, 而D模式相对C要更胜一筹。

第五章 不同种植模式的产量、经济效益及水分效应比较

5.1 材料与方法

5.1.1 试验地概况

试验于2008年至2010年在中国农业大学吴桥实验站进行，气象和地力等参数同第二章1.1。

5.1.2 试验设计及目的

试验于 2008 年秋开始，设置不同熟制的七种植植模式，其中有一年两熟制的冬小麦—夏玉米、冬小麦—夏大豆、冬小麦—夏花生，两年三熟制的春花生→冬小麦-夏玉米（简称春花生→麦-玉）、春大豆→冬小麦-夏玉米（简称春大豆→麦-玉）、春玉米→冬小麦-夏玉米（简称春玉米→麦-玉）和一年一熟制的春棉花单作。七种模式中的作物品种、播种量和其它相关信息如表 5-1。施肥方式除夏花生和夏大豆为中期追肥外，其他作物均为底肥一次性施入，且用量一致。灌水、病虫害管理等管理均为当地常规管理。每试验区面积为 20m×7m，无重复，随机排列。

表 5-1 种植作物相关信息
Table 5-1 The related information of experimental crops

模式	作物	品种	播种量 (kg/亩)	种子价格 (元/kg)	收购价格(元/kg)		产量(kg/亩)	
					2009	2010	2009	2010
春棉花	春棉花	华农 7 号	5	36	6.1	10	259.6	228.5
春玉米 →麦-玉	春玉米	东单 8 号	4.5	6.6	春玉米 1.7	冬小麦 2.1 夏玉米 1.82	春玉米 683.2	冬小麦 403.2 夏玉米 517.5
春大豆 →麦-玉	春大豆	—	5.5	7	春大豆 3.2	冬小麦 2.1 夏玉米 1.82	春大豆 171.1	冬小麦 430.6 夏玉米 535.1
春花生 →麦-玉	春花生	白莎	15	9.2	春花生 3.8	冬小麦 2.1 夏玉米 1.82	春花生 167.5	冬小麦 419.5 夏玉米 493.5
冬小麦 —夏花生	夏花生	花育 25	15	10	冬小麦 1.9 夏花生 3.8	冬小麦 2.1 夏花生 4.2	冬小麦 432.3 夏花生 162.3	冬小麦 447.3 夏花生 152.8
冬小麦 —夏大豆	夏大豆	—	6	7.5	冬小麦 1.9 夏大豆 3.2	冬小麦 2.1 夏大豆 3.5	冬小麦 428.5 夏大豆 170.2	冬小麦 430.5 夏大豆 160.8
冬小麦 —夏玉米	夏玉米	东单 60	4.5	9.6	冬小麦 1.9 夏玉米 1.62	冬小麦 2.1 夏玉米 1.82	冬小麦 457.7 夏玉米 620.7	冬小麦 395.3 夏玉米 577.1

一年两熟制的三种植植模式为连续轮作无休闲期，冬小麦的种植时间是当年 10 月至次年 06 月，夏玉米种植时间为当年 6 月中旬至 10 月。两年三熟制第一年为春花生、春大豆、春玉米单作，种植时间为当年 4~5 月至 9~10 月，2008 年 10 月至 2009 年 4 月为休闲期；第二年的冬小麦-夏玉米模式与一年两熟制一致。一年一熟制春棉花单作的种植时间为当年的 4~5 月份至 10~11 月，其余时间为休闲期。种植方式均为平作，耕作措施同当地的常规方式。六种模式中的冬小麦品种

均为济麦 22, 播种量为 225kg/hm²; 两年三熟制的夏玉米品种均为郑单 958, 播种量为 67.5kg/hm²。

研究主要通过田间试验并结合走访调查, 比较研究区不同种植模式下不同作物生育期内的物质投入、单项及系统水分利用效率、经济效益及不同种植模式对土壤基础地力的影响等来说明不同种植模式的经济、生态及社会效益的优劣, 探求不同种植模式的资源节约潜力, 从而筛选出适宜当地生产的最佳种植模式, 实现以较少的农业用地产生较大效益的目的。

5.1.3 样品采集与测定

同常规试验操作方法。

5.1.4 数据、公式计算

总纯收益 (Yuan/ hm²) =总产值-总成本

产投比=产值/投入

水分利用效益=产值/总耗水量

其它公式同第三章 1.4

总产值为产量乘以当年当地冬小麦、夏玉米、春棉花以及其它作物的收购价格。依据对当地农户调查和实验的平均结果, 各种生产投入物质的价格信息列于下表 5-2。作物生产物质投入包括种子、肥料(化肥)、杀虫剂或拌种剂、除草(菌)剂、地膜、灌溉水(按每方水的电价计算)、农机具的雇佣费用和劳动用工, 均按当地市场价格计算。以估算不同种植模式各种作物和轮作体系的经济效益(副产品作物秸秆直接还田不计入经济收益)。

表 5-2 作物生产物质投入信息
Table 5-2 The input prices during crop production

项目	种类(单位)	平均价格							
		冬小麦	夏玉米	夏大豆	夏花生	春花生	春大豆	春玉米	春棉花
种子	不同种子(元/ hm ²)	585	405(郑单 958) 648(东单 60)	675	2250	2070	577.5	445.5	2700
肥料	纯 N(元/kg)	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35
	纯 P(元/kg)	9.53	9.53	9.53	9.53	9.53	9.53	9.53	9.53
	纯 K(元/kg)	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
杀虫剂或拌种剂	元/ hm ²	75	—	120	150	150	120	—	150
除草剂或除菌剂	元/ hm ²	—	60	75	75	75	75	60	60
地膜	元/ hm ²	—	—	—	—	—	—	—	450
灌溉水	元/m ³	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
人工费	元/天	—	—	30	30	30	30	—	30
农机具	翻耕犁(元/ hm ²)	750	750	750	750	750	750	750	750
	旋耕机(元/ hm ²)	600	600	600	600	600	600	600	600
	播种机(元/ hm ²)	600	600	600	600	600	600	600	600
	收割机(元/ hm ²)	750	750	—	—	—	—	750	—

5.2 结果与分析

5.2.1 不同种植模式的系统产量比较

不同种植模式的产量比较表明（表 5-3），单季作物产量相比较，春玉米>夏玉米>冬小麦>春棉花，春花生、春大豆、夏花生、夏大豆四种作物的产量无显著差异均显著低于前四种作物。两年内一年两熟制的冬小麦-夏玉米模式的总产量最高，显著高于其他几种种植模式。从不同熟制来看，一年两熟制三种模式的年平均产量大于两年三熟制三种模式的年平均产量大于一年一熟制的春棉花。不同作物产量在年际间的增加趋势不相同，但一年两熟制的三种模式的几种作物在年际间产量表现基本一致，无太大波动。综合分析表明，种植模式的产量随复种指数的提高而提高，且主要由玉米、小麦决定最终产量的高低。

表 5-3 不同种植模式的产量
Table 5-3 The yield of different planting modes

种植模式	年份	作物	单季产量 (kg/hm ²)	系统总产量 (kg/hm ²)
春棉花	2008-2009	春棉花	3894.0	7321.5
	2009-2010	春棉花	3427.5	
春玉米→麦-玉	2008-2009	春玉米	10248.0	24058.5
	2009-2010	冬小麦	6048.0	
		夏玉米	7762.5	
春大豆→麦-玉	2008-2009	春大豆	2566.5	17052
	2009-2010	冬小麦	6459.0	
		夏玉米	8026.5	
春花生→麦-玉	2008-2009	春花生	2512.5	16207.5
	2009-2010	冬小麦	6292.5	
		夏玉米	7402.5	
冬小麦—夏花生	2008-2009	冬小麦	6484.5	17920.5
		夏花生	2434.5	
	2009-2010	冬小麦	6709.5	
		夏花生	2292.0	
冬小麦—夏大豆	2008-2009	冬小麦	6427.5	17850
		夏大豆	2553.0	
	2009-2010	冬小麦	6457.5	
		夏大豆	2412.0	
冬小麦—夏玉米	2008-2009	冬小麦	6865.5	30762
		夏玉米	9310.5	
	2009-2010	冬小麦	5929.5	
		夏玉米	8656.5	

注：表中系统总产量为各作物经济产量的简单相加；春棉花产量为籽棉产量。

5.2.2 不同种植模式的经济效益比较

对不同种植模式进行经济效益评价,如表 5-4 所示,采用综合评价法对单季作物和不同种植模式两年系统的投入、产出、产投比和经济收益进行评价。可以看出,春棉花、春花生和夏花生的投入较高,均在每公顷地 8000 元以上,但产值却是春棉花远高于春花生和夏花生。而冬小麦、春玉米、夏玉米的平均投入最低但其产值却远高于春花生和夏花生。产投比由于 2010 年的市场收购价格的影响,春棉花在 2010 年的产投比最高达 3.12。除春棉花外,单季作物的产投比以春玉米、夏玉米较高达 2.5 元/元以上,均高于其他几种作物。

由于研究针对的是不同种植模式整体经济效益的评价,因此重点对两年体系各方面的总效益进行比较,可知,除春棉花单作外,随种植茬数增加,系统总投入相应提高,但系统总投入的增加与系统总产值的增加并非同步。两年内一年两熟制的冬小麦-夏花生体系的总投入最高为 30262.7 元,但其两年系统纯收益却较低仅为 15025.4 元,其系统产投比为 1.50 元/元;其次是冬小麦-夏大豆模式的投入为 28299.8 元,系统纯收益却最低为 14084.9 元。这两种模式的产投比相同,在七种植植模式中为最低,说明这两种模式的费工矛盾很突出。两年三熟制的春花生→麦-玉和春大豆→麦-玉模式的产投比均在 2.0 元/元以下,经济效益也较差。从产投比考虑,春棉花、春玉米→麦-玉和冬小麦→夏玉米三种模式较好,而最高的一年一熟制春棉花模式主要是由 2010 年的市场籽棉收购价格过高(超出正常价格)导致,若较高的籽棉收购价格不能保持则其效益也会降低。而两年内的系统纯收益也以这三种模式显著高于其它四种模式,春棉花单作模式和冬小麦-夏玉米一年两熟制模式两年内的系统纯收益均在三万以上,总体经济效益最好。综合以上结果说明,正常年份适合研究区的种植模式为:春棉花单作、一年两熟制的冬小麦-夏玉米,两年三熟制的春玉米→麦-玉,而其它四种模式效益较差,可考虑适当压缩种植面积。

5.2.3 不同种植模式的水分效益比较

5.2.3.1 不同种植模式的水分利用效率比较

不同种植模式的耗水和水分利用效率见表 5-5,从单季作物来看,总耗水量受降雨的影响较大,冬小麦整个生育期的耗水中土壤水的消耗量与降雨量密切相关,降雨多的年份(2008-2009)对土壤水的消耗相对较少,而降雨少的年份(2009-2010)则对土壤水的消耗加大。夏玉米、夏花生、夏大豆、春玉米、春花生、春大豆和春棉花的耗水则主要是来自于降水。且夏玉米、夏花生、夏大豆和春棉花年际间总耗水量因受降水量影响而变异幅度大于冬小麦。可能的原因是,冬小麦上层土壤在含水量较少的情况下其发达的根系可以继续利用较深层的地下水,而其他作物则主要利用的上层土壤水。而除冬小麦和春棉花外,其他作物的整个生育期由于降水量的原因,不消耗土壤水。从单季作物的 WUE 来看,以夏玉米的 WUE 为最高,各种模式中夏玉米的 WUE 均在 $22\text{kg}/\text{mm}/\text{hm}^2$ 以上,与其他作物的 WUE 差异较大。其次是春玉米和冬小麦的 WUE 也相对较高,而其他作物的 WUE 均在 $7\text{kg}/\text{mm}/\text{hm}^2$ 以下,且年际间的差异也较大。而夏花生、夏大豆、春花生、春玉米和春棉花的产量相对冬小麦、春玉米、夏玉米产量较低也是其水分利用效率很低的直接原因,并且直接导致了其不同轮作体系两年的总 WUE 也较低。

除了对不同种植模式的单季作物耗水、水分利用效率进行分析外,对三种种植制度的七种种

植模式两年的结果作为整体进行分析,可更加清楚地比较一年两熟制、两年三熟制和一年一熟制的差异,同时也能排除干旱和多雨年对结果造成的影响。两年的轮作周期结束后,三种种植制度在两年生育期内总耗水量表现趋势平均为:一年两熟>一年一熟>两年三熟,其中两年三熟中的春大豆→麦-玉模式是七种模式中耗水量最低的,两年总耗水量为 1258.1mm。冬小麦—夏玉米、冬小麦—夏大豆、冬小麦—夏花生、春花生→麦-玉、春玉米→麦-玉和春棉花模式的两年总耗水量分别比春大豆→麦-玉模式高出 35.9%、38.1%、36.9%、12.0%、15.5%和 15.2%。可见,一年两熟制的三种种植模式的总耗水量均较高且基本一致,而两年三熟制中除了春大豆→麦-玉模式外,其余两种模式的总耗水与一年一熟的春棉花单作的总耗水量基本相同。而两年内,春玉米→麦-玉种植模式总耗水量比冬小麦—夏玉米低 257.3mm。

从耗水项所占的比例来看,一年两熟制的各耗水项所占总耗水量的比例也基本一致,而两年三熟制之间各项比例稍有差异。从两年系统的总 WUE 来看,以一年两熟制的冬小麦-夏玉米模式和两年三熟的春玉米→麦-玉和春大豆→麦-玉模式较高,分别为 $18.0\text{kg}/\text{mm}/\text{hm}^2$ 、 $16.6\text{kg}/\text{mm}/\text{hm}^2$ 和 $13.6\text{kg}/\text{mm}/\text{hm}^2$,其中尤以冬小麦-夏玉米模式为最好。可见,在该地区相同耗水量的情况下,以冬小麦-夏玉米模式为水分利用效率最佳模式,其次为春玉米→麦-玉模式。而其他总耗水量相对较低的模式其水分利用效率也最低。

表 5-4 2008-2010 年不同种植模式的经济效益 (元/hm²)

Table 5-4 The economic efficiency of different planting modes during 2008 to 2010 (yuan/hm²)

种植制度	种植模式	年份	作物	投入	产值	产投比 (元/元)	收益	系统总投入	系统总产值	系统产投比	系统纯收益
一年一熟	春棉花	2008-2009	春棉花	10402.8	23753.4	2.28	13350.6				
		2009-2010	春棉花	11002.8	34275.0	3.12	23272.2	21405.6	58028.4	2.71	36622.8
两年三熟	春玉米→麦-玉	2008-2009	春玉米	6798.3	17422.1	2.56	10623.8				
		2009-2010	冬小麦	7447.8	12700.8	1.71	5253.0	19289.9	44250.7	2.30	24960.85
			夏玉米	5043.75	14127.8	2.80	9084.1				
		2008-2009	春大豆	7380.3	8213.3	1.11	833.0				
	春花生→麦-玉	2009-2010	冬小麦	7447.8	13563.9	1.82	6116.1	19871.9	36385.4	1.83	16513.55
			夏玉米	5043.75	14608.2	2.90	9564.5				
		2008-2009	春花生	8861.6	9546.9	1.08	685.3				
		2009-2010	冬小麦	7447.8	13214.3	1.77	5766.5	21353.2	36233.8	1.70	14880.65
	冬小麦—夏花生		夏玉米	5043.75	13472.6	2.67	8428.9				
		2008-2009	冬小麦	6773.6	12320.6	1.82	5547.0				
			夏花生	8017.8	9251.1	1.15	1233.3				
		2009-2010	冬小麦	7447.8	14090.0	1.89	6642.2	30262.7	45288.1	1.50	15025.4
	冬小麦—夏大豆		夏花生	8023.5	9626.4	1.20	1602.9				
		2008-2009	冬小麦	6773.6	12212.3	1.80	5438.7				
			夏大豆	7312.8	8169.6	1.12	856.8				
		2009-2010	冬小麦	7447.8	13560.8	1.82	6113.0	28299.8	42384.7	1.50	14084.9
	冬小麦—夏玉米		夏大豆	6765.6	8442.0	1.25	1676.4				
		2008-2009	冬小麦	6773.6	13044.5	1.93	6270.9				
			夏玉米	5286.75	15083.0	2.85	9796.3				
		2009-2010	冬小麦	7447.8	12452.0	1.67	5004.2	25094.9	56334.3	2.24	31239.4
			夏玉米	5586.75	15754.8	2.82	10168.1				

表 5-5 不同种植模式下作物的耗水和水利用效率

Table 5-5 The water consumption and WUE of several crops of different planting modes

种植制度	种植模式	年份	单季					两年内				
			作物	灌溉量/mm	降水量/mm	土壤贮水消耗量/mm	总耗水量/mm	WUE(kg/mm/hm ²)	灌溉量/mm	降水量/mm	土壤贮水消耗量/mm	总耗水量/mm
一年一熟	春棉花	2008-2009	春棉花	90	647.9	77.1	815	4.8				
		2009-2010	春棉花	90	501.4	43.1	634.5	5.4	180	1149.3	120.2	1449.5
两年三熟	春玉米→麦-玉	2008-2009	春玉米	120	617.2	-79.7	657.5	15.6				
		2009-2010	冬小麦	150	71.6	242.9	464.5	13.0				
	春大豆→麦-玉	2008-2009	春大豆	120	396.6	-23.27	493.3	5.2				
		2009-2010	冬小麦	150	71.6	176.6	398.2	16.2				
	春花生→麦-玉	2008-2009	春花生	105	617.2	-68.53	653.7	3.8				
		2009-2010	冬小麦	150	71.6	207.4	429	14.7				
	冬小麦→夏花生	2008-2009	冬小麦	150	467.6	-176.0	366.6	21.9	345	935.8	-22.7	1258.1
		2009-2010	夏玉米	75	467.6	-216.7	325.9	22.7	330	1156.4	-77.8	1408.6
	冬小麦→夏花生	2008-2009	冬小麦	165	148.1	145.8	458.9	14.1				
		2009-2010	夏花生	90	559.9	-185.7	464.2	5.2				
一年两熟	冬小麦→夏大豆	2008-2009	冬小麦	150	71.6	254.8	476.4	14.1				
		2009-2010	夏花生	90	467.6	-234.2	323.4	7.1	495	1247.2	-19.3	1722.9
	冬小麦→夏玉米	2008-2009	冬小麦	165	148.1	145.8	458.9	14.0				
		2009-2010	夏大豆	90	559.9	-197.2	452.7	5.6				
	冬小麦→夏玉米	2008-2009	冬小麦	150	71.6	260.5	482.1	13.4				
		2009-2010	夏玉米	90	467.6	-213.7	343.9	7.0	495	1247.2	-4.6	1737.6
	冬小麦→夏玉米	2008-2009	冬小麦	165	148.1	145.8	458.9	15.0				
		2009-2010	夏玉米	75	559.9	-130.2	504.7	18.5				
	冬小麦→夏玉米	2008-2009	冬小麦	150	71.6	204.4	426	13.9				
		2009-2010	夏玉米	75	467.6	-221.5	321.1	27.0	465	1247.2	-1.5	1710.7

5.2.3.2 不同种植模式系统的水分利用效益比较

单位水量的经济收益可表示用水的有效性，这一指标在各个领域得到广泛应用。本研究采用了不同种植模式下两年的总产值与总耗水量的比值来表征水分利用效益(EBWU)，如表 5-6 所示，可见，七种植植模式两年的总水分利用效益以春棉花单作最高为 4.00，这可能与 2010 年棉花的市场收购价格很高有关（2010 年籽棉的收购价格为 10 元/kg）。其次为冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式，平均每消耗一方水产生 3.29 元经济效益，而春花生→麦-玉和冬小麦-夏花生、冬小麦-夏大豆的水分利用效益相对较低均为每消耗一方水产生 2.5 元左右的经济效益，这也主要是由春花生、夏花生和夏大豆的产量较低引起的。而春大豆→麦-玉的 EBWU 为 2.89，低于春玉米→麦-玉（3.04）。总体来看，一年两熟制模式的平均 EBWU 与两年三熟制的平均 EBWU 基本相同都低于春棉花一年一熟制。从用水有效性的角度来看，该地区种植一年一熟制的春棉花和一年两熟制的冬小麦—夏玉米效益最大，对于其他水分利用效益较低的种植模式如：春花生→麦-玉、冬小麦—夏花生、冬小麦—夏大豆可以考虑适当压缩种植面积，以发展其他水分利用效益和经济效益高的种植模式。

表 5-6 不同种植模式的水分利用效益
Table 5-6 The EBWU of different planting modes

种植模式	两年总耗水量/mm	产值/yuan·hm ⁻²	EBWU/ yuan·m ⁻³
春棉花	1449.5	58028.4	4.00
春玉米→麦-玉	1453.4	44250.7	3.04
春大豆→麦-玉	1258.1	36385.4	2.89
春花生→麦-玉	1408.6	36233.8	2.57
冬小麦—夏花生	1722.9	45288.1	2.63
冬小麦—夏大豆	1737.6	42384.7	2.44
冬小麦—夏玉米	1710.7	56334.3	3.29

5.2.4 不同种植模式两年内土壤养分变化情况

研究于 2008 年冬小麦、2009 年春季作物播种之前和 2010 年各种夏播作物收获后分别取耕层（0~20cm）土壤样品分析其全量和速效养分。不同种植模式在两年内土壤基本养分变化情况如表 5-7，可见，由于施肥和上茬作物秸秆还田的影响，土壤全量养分的变化趋势比较一致，全氮、全磷和全钾均比本底值有不同程度升高，其中以全钾的升高幅度最大，但不同种植模式的三种全量养分的提高幅度差异均较小，说明不同种植模式的作物对土壤养分的吸收利用差异不显著。而速效养分的趋势表现为，碱解氮和速效钾均是比本底值有所提高，速效钾的增加幅度较大，平均为 30 mg/kg 左右；碱解氮的提高幅度相对较低，平均提高 7mg/kg 左右；不同种植模式间碱解氮的提高幅度无显著差异，而速效钾以春玉米→麦-玉、冬小麦—夏花生、冬小麦—夏大豆、冬小麦—夏玉米的含量均为 90mg/kg 以上，其提高幅度高于其他几种种植模式，说明一年两熟制的三种模式对土壤的速效钾的提高效果好于其他熟制的种植模式。土壤有效磷是唯一一个养分有下降的指

标，其中，春棉花、春花生→麦-玉和冬小麦—夏花生三种模式的有效磷含量比本底值有所降低，其他的种植模式均有所升高，可能的原因是棉花和花生对磷素的需求量高于其他作物。综合两年不同种植模式对土壤养分指标的影响，可以看出，两年不同种植模式对土壤养分含量的影响除了有效磷之外，其他模式间基本无显著区别。从养分的升高幅度来看，一年两熟制的冬小麦—夏大豆、冬小麦—夏玉米并没有因为种植茬数多而使土壤基本养分降低而是与两年三熟制的春玉米→麦-玉模式均一定程度地提高了其养分值。

表 5-7 不同种植模式两年内表层土壤（0~20cm）养分变化

Table 5-7 The changes of soil fertility of soil surface layer (0~20cm) in two years at different planting modes

处理	测定日期	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
本底值	2008.10	0.67	0.80	17.0	58.59	9.43	56.27
春棉花	2010.11	0.77	0.86	22.8	61.22	8.12	86.8
春玉米→麦-玉	2010.10	0.89	0.92	22.7	66.40	11.24	93.6
春大豆→麦-玉	2010.10	0.89	0.93	22.3	69.01	11.01	84.5
春花生→麦-玉	2010.10	0.80	0.88	22.1	66.40	8.45	80.7
冬小麦—夏花生	2010.10	0.84	0.91	23.0	67.70	6.43	91.6
冬小麦—夏大豆	2010.10	0.85	0.96	22.9	68.4	12.49	95.2
冬小麦—夏玉米	2010.10	0.81	0.94	22.6	62.50	10.08	92.6

5.3 小结

- 综合两年的研究结果，从产量、经济效益和水分效益来比较，主要结论如下：
- （1）种植模式的产量随复种指数的提高而提高，并且主要由春玉米、夏玉米和冬小麦单季的产量决定最终产量的高低，两年内一年两熟制的冬小麦-夏玉米模式的总产量最高，显著高于其他几种种植模式。从不同熟制来看，一年两熟制三种模式的年平均产量大于两年三熟制三种模式的年平均产量大于一年一熟制的春棉花。可见，一年两熟制轮作体系物质生产能力最高。
- （2）从各种模式两年内系统的投入、产出和净效益比较，春棉花、春花生和夏花生的投入较高，均在每公顷地 8000 元以上，但产值却是春棉花远高于春花生和夏花生。而冬小麦、春玉米、夏玉米的平均投入最低但其产值却远高于春花生和夏花生。冬小麦-夏大豆和冬小麦-夏花生模式产投比相同均为 1.50 元/元，在七种植植模式中为最低，说明这两种模式的费工矛盾很突出。从产投比考虑，春棉花、春玉米→麦-玉和冬小麦—夏玉米三种模式较好，而两年内的系统纯收益也以这三种模式显著高于其它四种模式，春棉花单作模式和冬小麦—夏玉米一年两熟制模式两年内的系统纯收益均在三万以上，总体经济效益最好。
- （3）两年的轮作周期结束后，三种植植制度在两年生育期内总耗水量表现趋势平均为：一年两熟>一年一熟>两年三熟，其中两年三熟中的春大豆→麦-玉模式是七种模式中耗水量最低的，两年总耗水量为 1258.1mm。一年两熟制的三种植植模式的总耗水量均较高且基本一致，而两年

三熟制中除了春玉米→麦-玉模式外,其余两模式的总耗水与一年一熟的春棉花单作的总耗水量基本相同。而两年内,春玉米→麦-玉种植模式总耗水量比冬小麦—夏玉米低 257.3mm。从两年系统的总 WUE 来看,以一年两熟制的冬小麦—夏玉米模式和两年三熟的春玉米→麦-玉和春大豆→麦-玉模式较高,分别为 18.0 kg/mm/hm^2 、 16.6 kg/mm/hm^2 和 13.6 kg/mm/hm^2 ,其中尤以冬小麦-夏玉米模式为最好。

(4) 七种植模式两年的总水分利用效益以春棉花单作最高为 4.00,这可能与 2010 年棉花的市场收购价格很高有关。其次为冬小麦—夏玉米一年两熟种植模式,平均每消耗一方水产生 3.29 元经济效益,而春花生→麦-玉和冬小麦-夏花生、冬小麦-夏大豆的水分利用效益相对较低均为每消耗一方水产生 2.5 元左右的经济效益。而春大豆→麦-玉的 EBWU 为 2.89,低于春玉米→麦-玉 (3.04)。从用水有效性的角度来看,该地区种植一年一熟制的春棉花和一年两熟制的冬小麦—夏玉米经济效益最大。

(5) 因施肥和上茬作物秸秆还田的原因,土壤全量养分的变化趋势比较一致,均比本底值有不同程度升高,其中以全钾的升高幅度最大,不同种植模式的三种全量养分的提高幅度差异均较小。速效养分中的碱解氮和速效钾均是比本底值有所提高且速效钾的增加幅度较大,一年两熟制的三种模式对土壤的速效钾的提高效果好于其他熟制的种植模式。一年两熟制的冬小麦—夏大豆、冬小麦—夏玉米并没有因为种植茬数多而使土壤基本养分降低而是与两年三熟制的春玉米→麦-玉模式均一定程度地提高了其养分值。

该地区相同耗水量的情况下,以冬小麦-夏玉米模式为水分利用效率的最佳模式,其次为春玉米→麦-玉模式,且产量和经济效益均较好,而春棉花虽然耗水量相对较高但其经济效益最好,其他总耗水量相对较低的模式其水分利用效率也最低,在种植可以不予考虑。

综合以上结果说明,正常年份适合研究区的种植模式为:一年两熟制的冬小麦—夏玉米、春棉花单作,两年三熟制的春玉米→麦-玉,而其它四种模式因各方面的效益较低,因此可以考虑适当压缩种植面积。因两年内春玉米→麦-玉种植模式比冬小麦—夏玉米总耗水量节省 257.3mm,且考虑到该区严重缺水的现实,春玉米→麦-玉两年三熟模式可能是未来的较佳的熟制选择,但如何进一步通过技术手段来提升春玉米的产量是关键。

第六章 主要结论

本研究系统比较了不同节水灌溉模式、施肥模式、水肥模式对冬小麦-夏玉米单季及周年轮作体系作物的生长发育、产量、耗水特性及水肥利用效率的影响,并比较了不同种植模式下各种作物的产量、水分和资源利用及不同种植制度的经济效益等。研究取得的主要结果如下:

1.不同灌溉模式下冬小麦、夏玉米的产量与水分利用效率

(1) 对两品种冬小麦在不同灌溉模式下的生长发育、产量和 WUE 进行比较,发现品种间的节水效果差异显著。石麦 15 比济麦 22 有一定的节水优势。在各灌溉处理下,石麦 15 产量均高于济麦 22,石麦 15 浇二水处理有较高的籽粒产量和最高的水分利用效率。这表明,优化的灌溉模式离不开适宜的品种为基础,将适宜的品种与优化的灌溉方式相结合,是提高冬小麦产量和水分利用效率的有效途径。(2) 冬小麦季降水较少其产量受灌溉的影响较大,生育期水分充足可保证较高产量;夏玉米季由于降水充分,受冬小麦季不同灌溉模式的影响较小,但产量也有差异。两季作物周年总产量为:W3 与 W2 无显著差异,均显著高于 W1,分别高出 12.5%和 8.7%。轮作体系周年总耗水量随灌溉量的增加而增加,周年 WUE 随灌溉的增加而减少。冬小麦 W2 处理对土壤水消耗较少保证了冬小麦-夏玉米轮作体系较高的总产量和总 WUE,是较好的节水丰产灌溉模式。以上说明,冬小麦季生育期进行一定的灌溉是保证单季作物及周年体系高产、稳产的重要因素,而节水栽培(W2)有利于提高整个轮作周期的水分利用效率。

2.不同施肥模式下冬小麦、夏玉米的产量与水氮利用

(1) FS1 模式下冬小麦、夏玉米两季作物的总产量高于 FS2、F,显著高于 FS3 和 CK,并其周年总产量增产幅度最高(较 CK 增产 28.7%)。FS1、F 和 FS2 三种施肥模式周年 WUE 效果相当,显然高产的 FS1 模式结合水分利用效率来看优于其它几种施肥模式。(2) 周年氮肥农学效率为 $FS1 > F > FS3 > FS2$,与冬小麦单季的趋势基本相同。在轮作体系中氮肥评价的各项指标 FS1 模式不占绝对优势,但效果基本与 FS3 模式持平,且 FS1 模式在冬小麦季各项氮肥评价指标中最好,因此,FS1 模式仍不失为最佳施肥模式。(3) 施肥的四种模式土壤耕层的养分含量有不同程度的增加,土壤全磷和速效钾的含量在有磷钾肥施用的模式(F、FS1、FS3)两季作物收获后都有所提高,而无磷钾肥施用的模式(CK、FS2)土壤全磷和速效钾含量均降低。

以上说明,研究区内 FS1 施肥模式综合效应较好,优于其他四种模式,是吴桥地区最佳的氮磷钾配比施肥模式。该模式保证了冬小麦、夏玉米高产,其水肥利用效率高并且较好的改善了土壤养分含量,经济效益和生态效益显著。因此,在该区使用 FS1 模式,对提高作物产量、节约水资源方面有重要作用。

3.不同水肥模式下冬小麦、夏玉米的产量与水肥利用

(1) 一定的水肥措施能大幅提高冬小麦的产量,相同底肥的情况下,灌水和减施的底肥(D 模式)在拔节期追施对产量的提高幅度较大。从经济和节水的角度考虑,由于 A 模式的大水大肥虽然产量相对于生长期无灌溉水的 E 模式提高幅度很大,但是结合实际生产投入来看,A 比 D 提高幅度仅为 6.3%,效益相对 D 较差,D 模式在实际生产中应优先考虑。从周年冬小麦-夏玉米总产量看,水肥投入均较少的 D 模式相对效益是最好的,生产上不提倡以大水大肥的 A 模式来换取产量的微幅提高,应综合考虑投入少、整体效益最好的 D 模式,尤其是在缺水的黑龙江地区,

可以考虑不浇返青水。(2) 冬小麦籽粒 WUE 以 D 模式的 WUE 提高幅度最大。夏玉米的籽粒 WUE 和生物 WUE 也以 d 模式为最高。周年籽粒 WUE 以 D 模式最好, 为 22.57kg/mm/hm^2 , 比 A、B、C、E 四种模式分别高出 10.47%、13.4%、8.7% 和 13.9%, 说明浇返青水的 B 模式只是增加了总耗水量, 对产量的增加和水分利用效率的提高几乎无贡献。(3) 冬小麦由于其产量的提高幅度较大而施纯氮量却低于 A、B, 其 D 模式的氮肥偏生产力显著高于其他处理, 分别比 A、B、C、E 高出 27.8%、41.3%、24.1% 和 55.8%。周年的氮肥偏生产力表现为 $D > C > E > A > B$ 。C、D 的氮肥评价效应要好于 A、B、E, 而 D 模式相对 C 要更胜一筹。

4. 不同种植模式下的产量、经济效益及水分效应

(1) 种植模式的产量随复种指数的提高而提高, 并且主要由春玉米、夏玉米和冬小麦单季的产量决定最终产量的高低, 一年两熟制轮作体系物质生产能力最高。(2) 从产投比考虑, 春棉花、春玉米→麦-玉和冬小麦—夏玉米三种模式较好, 而两年内系统纯收益也以这三种模式显著高于其它四种模式, 春棉花单作和冬小麦-夏玉米一年两熟模式两年内系统纯收益均在三万以上, 总体经济效益最好。(3) 三种植植制度在两年生育期内总耗水量表现趋势平均为: 一年两熟 > 一年一熟 > 两年三熟。两年系统的总 WUE 为一年两熟制的冬小麦-夏玉米模式和两年三熟的春玉米→麦-玉和春大豆→麦-玉模式较高(4) 从用水有效性的角度来看, 该地区种植一年一熟制的春棉花和一年两熟制的冬小麦—夏玉米经济效益最大。两年总水分利用效益以春棉花单作最高为 4.00, 其次为一年两熟冬小麦-夏玉米模式为 3.29, 春花生→麦-玉和冬小麦-夏花生、冬小麦-夏大豆的水分利用效益相对较低, 均为每消耗一方水产生 2.5 元左右的经济效益, 春大豆→麦-玉的 EBWU 为 2.89, 低于春玉米→麦-玉 (3.04)。

综合以上结果说明, 正常年份适合研究区的种植模式为: 一年两熟制的冬小麦—夏玉米、春棉花单作, 两年三熟制的春玉米→麦-玉, 而其它四种种植模式因各方面的效益较低, 因此可以考虑适当压缩种植面积。因两年内春玉米→麦-玉种植模式的总耗水量比冬小麦—夏玉米节省 257.3mm, 且考虑到该区严重缺水的现实, 春玉米→麦-玉两年三熟模式可能是未来较佳的熟制选择。

参考文献

1. 曹敏建.耕作学[M].北京:中国农业出版社, 2002: 132-152
2. 陈俊华, 杨兴礼, 岳云华.以色列种植业结构的演变及原因探析[J].干旱地区农业研究, 2000, 18 (1): 129-134
3. 陈志超, 田长彦, 马英杰, 等.应用土壤无机氮测试进行棉花氮肥推荐研究[J].棉花学报, 2006, 18 (4): 242-247
4. 程季珍.蔬菜平衡施肥技术的研究[J].植物营养与肥料学报, 1997, 3 (4): 272-275
5. 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等.不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J].中国农业科学, 1996, 29 (4): 67-74
6. 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨等.小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J].农业工程学报, 2007, 23 (9): 27-33
7. 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等.灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J].农业工程学报, 2004, 20 (4): 34-3
8. 付登伟.四川紫色丘陵区不同粮草种植模式效应研究[D].四川: 西南大学, 2010
9. 龚宇.沧州农业用水形成机制、资源潜力与优化配置研究[D].北京: 中国农业大学, 2007
10. 郭清毅, 黄高宝, Guangdi Li, 等.保护性耕作对旱地麦-豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报, 2005, 9 (3): 165-169
11. 郭天财, 彭羽, 王晨阳, 等.节水灌溉对两个冬小麦品种影响效应的初步研究[J].干旱地区农业研究, 2002, 2 (2): 86-89
12. 侯满平, 郝晋珉, 李新波, 等.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): 286-291
13. 黄德明.京郊小麦氮素调控施肥技术.土壤管理与施肥[M].北京: 中国农业科技出版社, 1994
14. 黄高宝, 郭清毅, 张仁险, 等.保护性耕作条件下旱地农田麦豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J].生态学报, 2006, 26 (4): 1176-1185
15. 黄生斌, 陈新平, 张福锁.不同品种冬小麦土壤及植株测试氮肥推荐指标的研究[J].中国农业大学学报, 2002, 7 (5): 26-31
16. 黄元仿, 李韵珠, 李保国, 等.华北平原农田水、氮优化管理[J].农业工程学报, 2001, 17 (2): 37-41
17. 姜文来, 贾大林.农业水资源增值研究[J].中国农业资源与区划, 2001, (2): 37-40
18. 姜文来, 唐华俊, 罗其友等.黄淮海地区农业综合发展战略研究[J].现代农业, 2007 (3): 34-37
19. 金柯, 汪德水, 蔡典雄, 等.旱地农田肥水耦合效应及其模式研究[J].中国农业科学, 1999, 32 (5): 104-106
20. 巨晓棠, 刘学军, 张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].中国农业科学, 2002, 35 (11): 1361-1368
21. 孔霄铎, 张海林, 陈阜, 等.不同灌溉水平对冬小麦耗水构成及利用效率的影响[J].干旱地区农业研究, 2009, 27 (4): 37-41

22. 孔繁铎.京郊主要种植模式水分利用研究—以通州区为例[D].北京: 中国农业大学, 2009
23. 李长生, 李茂松, 马秀枝, 等.黄淮海地区农田污染对粮食生产的制约及防治对策[J].自然灾害学报, 2006, 15 (6): 286-291
24. 李法云, 宋丽, 上官春云, 等.辽西半干旱区农田水肥耦合作用对春小麦产量的影响[J].应用生态学报, 2000, 11 (4): 535-539
25. 李建民, 王璞, 周殿玺, 等.灌溉制度对冬小麦耗水及产量的影响[J].生态农业研究, 1999, 7 (4): 23-26
26. 李建民, 周殿玺, 王璞, 等.冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[M].北京: 中国农业大学出版社, 2000
27. 李荣生.论资源节约型农业结构[J].资源科学, 1999, 21 (2): 18-23
28. 李升东, 王法宏, 司纪升, 等.旱地保护性耕作条件下不同冬小麦品种部分生理指标与 WUE 的关系[J].麦类作物学报, 2009, 29 (5): 855-858
29. 李士敏, 张书华, 朱红.尿素深施对作物产量及氮素利用率影响效果浅析[J].耕作与栽培, 1999 (5): 52-53, 62
30. 李玉义, 逢焕成.对黄淮海地区节水农作制度发展的思考[A].唐华俊, 逢焕成, 任天志, 等.节水农作制度理论与技术[C].北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 28-32
31. 李志宏, 王兴仁, 张福锁.我国北方地区几种主要作物氮营养诊断及追肥推荐 IV 在小麦、玉米轮作中的应用[J].植物营养与肥料学报, 1997, 3 (3): 262-267
32. 李志勇, 王璞, 翟志席.两种不同水氮措施对小麦生育及产量的影响[J].耕作与栽培, 2001 (5): 19-21
33. 刘昌明, 陈志恺.中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M].北京: 中国水利水电出版社, 2001: 109-120
34. 刘昌明, 何希吾, 等.中国 21 世纪水问题方略[M].北京: 科学出版社, 1996
35. 刘昌明.论雨水利用及其农业供水的意义[J].生态农业研究, 1996, 4 (4): 9-12
36. 刘昌明.土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J].地理学报, 1997, 54 (4): 366-372
37. 刘建英, 张建玲, 赵宏儒.水肥一体化技术应用现状、存在问题与对策及发展前景[J].内蒙古农业科技, 2006 (6): 32-33
38. 刘明.华北平原不同种植制度水氮高效利用及 DSSAT4.0 模型模拟与预测[D].北京: 中国农业大学, 2008
39. 刘涛.我国水资源面临的形势与可持续利用对策研究[J].生态经济, 2004 (1): 49-51
40. 刘文臣, 宋加全, 马作民.冬小麦夏玉米周年性一体化节水高效栽培技术[J].山东农业科学, 2006, (3): 89-90
41. 刘巽浩, 韩湘玲.黄淮海平原作物布局种植制度与结构的研究[A].黄淮海平原“六五”科技攻关报告论文集[C], 1985
42. 刘振兴, 张树林, 刘自华, 等.冬小麦夏玉米种植模式一次性底肥的产量和效益分析[J].北京农学院学报, 2004, 19 (4): 13-15
43. 罗其友.21 世纪节水农业持续推进的战略思考[J].农业技术经济, 1999, (3): 5-9
44. 马建芳.蔬菜水肥一体化高效节水技术试验研究初探[J].天津农林科技, 2008 (6): 3

45. 毛学森, 刘昌明, 张永强, 等. 农业节水的理论基础与技术体系[J]. 节水灌溉, 2003 (2): 19-20
46. 潘家荣. 冬小麦/夏玉米轮作体系中化肥氮的去向[D]. 北京: 中国农业大学, 2001
47. 逢焕成, 李玉义, 王婧. 中国北方地区节水种植模式[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008
48. 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 等. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39 (11): 2286-2293
49. 屈宝香, 周旭英, 张华, 等. 黄淮海地区种植业结构调整与水资源关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2003, 24 (5): 29-32
50. 任鸿瑞, 罗毅. 鲁西北平原冬小麦和夏玉米耗水量的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 37-39
51. 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002, (9): 27-31
52. 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2 (1): 70-76
53. 山仑. 旱地农业中有限水高利用的研究[J]. 水土保持研究, 1996, (3): 8-21
54. 申云霞, 唐拴虎, 王长发, 等. 冬小麦水肥产量交互效应模拟研究[J]. 西北植物学报, 1995, 15: 138-141
55. 宋文浚. 华北地区水资源供需浅析[J]. 山西水利, 2006 (3): 30-31
56. 隋鹏. 黄淮海平原节水种植模式生态经济分析及优化配置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005
57. 孙颖. 中国农业自然资源与区域发展[M]. 江苏科学技术出版社, 1994
58. 孙克刚, 李锦辉, 姚健, 等. 不同施肥处理对作物产量及土体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累的长期定位试验[J]. 土壤肥料, 1999 (6): 18-20
59. 孙哲, 曹继安, 苏波, 等. 泰安地区小麦玉米高产种植模式研究[J]. 山东农业科学, 2010, (10): 50-52
60. 唐华俊, 逢焕成, 李玉义. 构建节水农作制度、实现我国水资源与粮食双重安全[A]. 唐华俊, 逢焕成, 任天志, 等. 节水农作制度理论与技术[C]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 3-12
61. 唐华俊, 逢焕成, 任天志, 等. 节水农作制度理论与技术[C]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008
62. 田远任. 土壤诊断与小麦玉米的氮肥分期定量补差施肥法[J]. 土壤, 1990, 22 (4): 208-209
63. 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式 [M]. 北京: 北京气象出版社, 1999
64. 汪恕诚. 资源水利—人与自然和谐相处[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003
65. 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收冀土壤残留氮的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (8): 1339-1343
66. 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (9): 1965-1970
67. 王龙昌, 贾志宽, 蒋骏, 等. 宁南半干旱区灌溉农田高效多熟种植模式研究[J]. 西北农业学报, 2000, 9 (4): 58-62
68. 王树安. 吨粮田技术[M]. 农业出版社, 1991
69. 王婷, 包兴国, 舒秋萍, 等. 河西绿洲灌区马铃薯间作绿肥高效种植模式研究[J]. 甘肃农业科技,

- 2010, (10): 12-15
70. 王伟, 蔡焕杰, 王健, 等. 水分亏缺对冬小麦株高、叶绿素相对含量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28 (1): 41-43
71. 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006 (5): 22-23
72. 文宏达. 冀西北高原聚水土种植模式及水肥高效利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006
73. 巫东堂, 李红梅, 焦晓燕, 等. 旱地麦田水肥关系及对产量的影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17 (5): 39-42
74. 吴海卿, 杨传福, 孟兆江. 应用 N15 示踪技术研究土壤水分对氮素有效性的影响[J]. 土壤肥料, 2000 (1): 16-18, 37
75. 吴景社, 李英能, 黄修桥, 等. 推广节水灌溉是中国现阶段先进生产力的发展要求[J]. 节水灌溉, 2001, (2): 19-21
76. 吴凯, 黄荣金. 黄淮海平原水土资源利用的可持续性评价、开发潜力及对策[J]. 地理科学, 2001, (5): 390-395
77. 吴凯, 卢布, 袁璋. 我国重点农区农业可持续发展对水利的要求及其战略建议[J]. 农业现代化研究, 2006, 27 (4): 270-273
78. 吴永成, 张永平, 周顺利, 等. 不同灌水条件下冬小麦的产量、水分利用与氮素利用特点[J]. 生态环境, 2008, 17 (5): 2082-2085
79. 伍宏业, 曾宪坤, 黄景梁, 等. 论提高我国化肥利用率[J]. 磷肥与复肥, 1999 (1): 62-64
80. 武继承, 张长明, 王志勇, 等. 河南省降水资源高效利用技术研究与应用[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (3): 152-155
81. 武雪萍, 梅旭荣, 蔡典雄, 等. 节水农业关键技术发展趋势及国内外差异分析[J]. 中国农业资源与区划, 2005, 26 (4): 28-32
82. 夏晓亮, 石祖梁, 荆奇, 等. 氮肥运筹对稻茬冬小麦土壤硝态氮含量时空分布和氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47 (3): 490-496
83. 许振柱, 于振文. 限量灌溉对冬小麦水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (1): 6-10
84. 闫武斌, 闫志林. 渭北旱地春夏玉米高产高效栽培技术模式[J]. 农业科技通讯, 2010, (5): 178-179
85. 严冬, 王修贵, 等. 国外节水制度建设[J]. 节水灌溉, 2004 (4): 47-52
86. 杨博. 山西省典型农业生态区冬小麦/夏玉米轮作养分资源管理[D]. 山西: 山西大学, 2008
87. 杨海川, 李萍, 李学玲. 水肥对藁优 9415 冬小麦产量和品质的影响研究[J]. 农业科技通讯, 2008 (6): 83-84
88. 杨旭, 曾赛星, 张金萍, 等. 我国农业节水技术进步贡献率的测算[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22 (1): 9-13
89. 易镇邪, 王璞, 屠乃美. 氮肥类型对夏夏玉米及后作冬小麦产量与水、氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26 (2): 11-17
90. 尹光华, 刘作新, 李桂芳, 等. 水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2004,

- 18 (6): 156-158
91. 于青.华北平原小麦-玉米两熟区保护性耕作及施肥技术研究[D].内蒙古: 内蒙古农业大学, 2009
92. 孟兆江, 刘安能, 吴海卿.商丘试验区夏玉米节水高产水肥耦合数学模型与优化方案[J].灌溉排水, 1997, 16 (4): 18-21
93. 张福锁, 马文奇.肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J].土壤与环境, 2009 (2): 36-38
94. 张桂兰, 宝德俊, 王英, 等.长期施用化肥对作物产量和土壤性质的影响[J].土壤通报, 1999, 30 (2): 64-67
95. 张宏彦, 陈清, 李晓林, 等.利用不同土壤 Nmin 目标值进行露地花椰菜氮肥推荐[J].植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 342-347
96. 张明生, 王丰, 张国平.中国农业用水存在的问题及节水对策[J].农业工程学报, 2005, 21 (2): 1-6
97. 张胜全, 方保停, 王志敏, 等.春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J].生态学报, 2009, 29 (4): 2035-2044
98. 张卫峰.中国化肥供需关系及调控战略研究[D].北京: 中国农业大学, 2007
99. 张新明, 吴文良, 李季, 等.麦玉两熟两熟高产农田生态系统氮素的合理调控[J].应用生态学报, 1999, 10 (3): 297-300
100. 张义丰, 王又丰, 刘录祥, 等.中国北方旱地农业研究进展与思考[J].地理研究, 2002, 21 (3): 305-312
101. 张岳.中国水资源与可持续发展[J].中国农村水利水电, 1998 (5): 3-6
102. 张忠学, 温金祥, 吴文良. 华北平原冬小麦夏玉米不同培肥措施的节水增产效应研究[J].应用生态学报, 2000, 11 (2): 219-222
103. 张忠学, 于贵瑞.不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报, 2003, 22 (2): 1-4
104. 钟茜, 巨晓棠, 张福锁.华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J].植物营养与肥料学报, 2006, 12 (3): 285-293
105. 朱希刚.华北平原水资源农业利用问题[J].调研世界, 1998, (4): 9-12
106. 朱兆良, 文启孝.中国土壤氮素[M].江苏: 江苏农业科技出版社, 1990
107. 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报, 2008, 5 (15): 778-783
108. A.L.Garcia,V.Fuentes,J.Gallego.Influence of nitrogen supply on osmoregulation in tomato (*Lycopersicon Esculentom* Mill)plants under moderate water stress[J]. Plant Science, 1996, (115): 33-38
109. A.W.Lenssen,G.D.Johnson,G.R.Carlson.Cropping sequence and tillage system influences annual crop production and water use in semiarid Montana,USA[J].Field Crops Research,2007,(100):32-43
110. David J.Connor.Designing cropping systems for efficient use of limited water in southern Australia[J].Europ.J.Agronomy,2004(21):419-431
111. E.Wang, H.Cresswell, Z.Paydar, et al.Opportunities for manipulating catchment water balance by

- changing vegetation type on a topographic sequence: a simulation study[J].Hydrological Processes, 2008,22(6):736-749
112. FAO, World soil resources.An explanatory note on the FAO world soil resources map at 1:25000000 scale, Rome.1993:71
113. Goods,R.,J.Schimelfenig,J.A.Bock,et al.Response of spring wheat to nitrogen fertilizers of different nitrification rates.Agor[J].1999,(91):287-293
114. Groantiwar S D,Smout I K.Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes:A framework for evaluation.Irrigation and Drainage Systems,2005(19):1-36
115. H.M.El-shajxr, C.Rosenzweig, A.Iglesias, et al.Impact of climate change on possible scenarios for Egyptian agriculture in the future[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.1997 (1):233-250
116. Heffer P. and M.Prud'homme.2006.Medium term outlook for global fertilizer demand, supply and trade.International Fertilizer Industry Association(IFA)
117. http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/PDF/2006_cape_town_ifa_summary.pdf
118. K.Latiri-Souki,S.Nortcliff,D.W.Lawlor.Nitrogen fertilizer can increase dry matter,grain production and radiation and water use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions[J].European Journal of Agronomy,1998,(9):21-34
119. M.L.Poole, Neil C.Turner, J.M.Young.Sustainable cropping systems for high rain fall areas of southwestern Australia[J].Agricultural Water Management, 2002,(53):201-211
120. Michele Rinaldi.Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat:a seasonal analysis with the CERES-Wheat model[J].Field Crops Research,2004,(89):27-37
121. N.Islam,W.W.Wallender,J.Mitchell,et al.A comprehensive experimental study with mathematical modeling to investigate the affects of corpping practices on water balance variables[J].Agricultural Water Management,2006(82):129-147
122. Tsutsui.H.World irrigation present problems and future concerns[J].Irrigation Engineering and Rural Planning,1993,(24):19-24
123. V.G.Allen, C.P.Brown, R.Kellison, et al.Integrating cotton and beef production to reduce water withdrawl from the Ogallala aquifer in the southern high plains[J].Agron.J.2005,(97):556-567
124. V.G.Allen, M.T.Barker, E.Segarra, et al.Integrated irrigation crop-livestock systems in dry climates[J]. Agron.J.2005(99):346-360

致 谢

本研究是在导师逢焕成研究员的精心指导和大力支持下完成的。从课题选择、试验设计、方案实施直到论文撰写，逢老师都始终给予我悉心的指导和不懈的支持。恩师开阔的视野、渊博的知识、清晰的思路、严谨的治学精神和精益求精的工作作风，不仅授我以文，而且教我做人，历时三载，更是终生受益。对逢老师的感激之情是无法用言语表达的。

尤其感谢任天志研究员和李玉义副研究员在试验进程和论文写作中给予我的指导和帮助，两位老师真诚仁爱 and 虚怀若谷的为人作风是我学习的榜样。在试验进程中，李玉义老师经常为我指点迷津，帮我开拓思路，精心点拨，热诚鼓励，在此对李老师表示由衷的感谢！还要感谢农业大学吴桥实验站的鲁来清副站长、隋鹏副教授、李超农艺师、于国建技术员及其他工作人员在大田试验过程中给予我的帮助和支持。感谢农业资源与农业区划研究所现代耕作制研究室为我提供了良好的试验条件，感谢实验室的工作人员对我的支持与帮助。感谢中国农业科学院研究生院各位老师，以及中国农业科学院农业资源与农业区划研究所的领导和各位老师。

论文即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入课题到论文的顺利完成，可敬的师长、同学、朋友都给予了我许多无私的帮助。包括博士后王婧、在读博士于天一、在读硕士赵永敢、杨雪，已毕业硕士刘高洁、董鲁浩等，在此表示衷心的感谢！

特别感谢抚养我长大含辛茹苦的父母，衷心感谢我的男友岳涛对我的理解、鼓励和支持，你们是我坚强的后盾和前进的动力！

最后，谨向所有关心、支持和帮助我的师长、同学、朋友和亲人表示最诚挚的谢意和祝福！

王海霞

2011年6月于北京

作者简介

王海霞，女，中共党员，山东烟台人，2008年毕业于青岛农业大学农业资源与环境专业，获得学士学位。2008年9月至2011年7月在中国农业科学院农业资源与农业区划研究所师从逢焕成研究员攻读硕士学位，研究方向为资源节约型农作制度。

硕士期间参与项目

农业部 948 项目“节水农作制度关键技术引进与创新”，2006-2009 年；

公益性行业专项“资源节约型农作制技术研究示范”，2008-2010 年；

公益性行业专项“粮食主产区高产高效种植模式及配套技术集成研究与示范”，2011-2015 年。

硕士期间获得奖项

2010 年 11 月：荣获中国农业科学院“孟山都”奖学金。

2010 年 10 月：荣获中国农业科学院研究生院“社会活动积极分子”称号。

硕士期间发表论文

1. 王海霞，李玉义，任天志，等. 不同灌溉制度对两品种冬小麦产量与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2010，29（6）：112-114
2. 王海霞，李玉义，任天志，等. 冬小麦季不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米产量与水分利用的影响[J].应用生态学报，2011，22（7）
3. 逢焕成，李玉义，王婧，王海霞，等. 中国北方地区节水种植模式[M].北京：中国农业科学技术出版社，2008