

分类号_____

密

级

UDC _____

编

号

中国科学院研究生院

硕士学位论文

鲁西北平原作物产量和土壤硝态氮动态研究

王兴武

指导教师 于强 研究员 中国科学院地理资源所

申请学位级别 理学硕士 学科专业名称 自然地理

论文提交日期 2004年5月 论文答辩日期 2004年6月

培养单位 中国科学院地理科学与资源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究意义	1
一、氮肥对农业的重要性.....	1
二、中国的氮肥施用状况与存在的问题.....	1
三、研究意义.....	3
第二节 研究进展	4
一、引言.....	4
二、N 淋失研究方法.....	5
三、小麦、玉米产量影响因素.....	6
1.小麦产量影响因素.....	6
1) 施肥和灌水对产量的影响.....	6
2) 气候等因素对产量的影响.....	7
2.玉米产量影响因素.....	7
1) 施肥与灌溉对玉米产量的影响.....	7
2) 气候等因素对玉米产量的影响.....	8
四、影响硝态氮淋失的因素.....	9
1.施肥.....	9
2.降水和灌溉.....	10
3.土壤.....	11
4.耕作方式.....	11
5.植被.....	12
6.气候.....	12
五、土壤氮素形态及转化.....	12
1.土壤中氮素的形态.....	12
2.土壤中氮素的转化.....	12
六、土壤水分特性.....	14
1.潮土的水分状况.....	14
2.降水对土壤水分的影响.....	15
3.土壤水势的变化规律.....	15
第三节 研究思路及内容	18
一、研究目标.....	18
二、研究内容.....	18
三、研究思路.....	18
第二章 试验设计和数据采集	19
第一节 试验地点概况	19
一、农业气候条件.....	19
二、土壤状况.....	19
三、地下水资源.....	20

四、耕作、栽培与施肥现状.....	20
第二节 试验设计.....	20
第三节 田间管理.....	22
1.土地翻耕.....	22
2.施肥管理.....	22
3.灌溉管理.....	22
第四节 数据采集.....	23
1.土壤溶液提取.....	23
2.土壤含水量.....	23
3.硝态氮取样分析.....	24
4.作物产量.....	24
5.气象数据.....	24
6.地下水位观测.....	25
7.土壤水势观测.....	25
8.土壤容重.....	25
9.土壤机械组成.....	26
10.田间作物数据.....	26
11.植物氮素.....	26
12.农事管理记录.....	26
第三章 水、氮措施对作物生长的影响.....	27
第一节 水、氮措施对冬小麦生长的影响.....	27
一、冬小麦耕作管理.....	27
1.施用底肥.....	27
2.翻耕土地.....	27
3.追肥.....	27
二、水、氮管理措施对冬小麦总生物量的影响.....	29
1.双因素统计分析结果.....	29
2.二次回归分析结果.....	29
三、水、氮管理措施对冬小麦经济产量的影响.....	31
1.双因素统计分析结果.....	31
2.二次回归分析结果.....	33
四、水、氮耦合措施对冬小麦经济系数的影响.....	34
五、冬小麦生长动态.....	34
1.冬小麦株高变化.....	34
2.总茎数的变化.....	35
3.叶面积指数曲线.....	37
4.干物质累积曲线.....	37
六、冬小麦产量构成因子对产量的影响.....	37
第二节 水、氮措施对夏玉米生长的影响.....	38
一、夏玉米基本管理情况.....	38
二、水氮措施的作物产量效应.....	39
1.水氮措施与总生物量的关系.....	39
2.水氮措施与经济产量的关系.....	42

三、夏玉米生长动态.....	44
1.夏玉米株高变化.....	44
2.夏玉米叶面积指数变化.....	45
3.水、氮耦合措施与玉米生态指标间的关系.....	45
4.生态指标间的相互关系.....	50
第三节 小结.....	51
第四章 水、氮措施对土壤硝态氮动态的影响	52
第一节 淋失下界面的选择.....	52
第二节 夏玉米生长季水、氮措施对硝态氮淋失的影响.....	53
一、水分对土壤溶液硝态氮的作用	53
1.水分对土壤溶液硝态氮分布的影响.....	53
2.相同水分条件下不同氮素处理对硝态氮分布的影响.....	54
3.集中降水对土壤溶液硝态氮迁移的推动作用	55
二、土体硝态氮储量的变化.....	56
三、淋失界面上硝态氮浓度变化.....	57
四、土壤溶液 pH 值的变化.....	58
第三节 水、氮耦合措施对冬小麦季硝态氮淋失的影响.....	59
一、冬小麦土壤溶液硝态氮的剖面分布	59
二、100 cm 土体硝态氮储量的动态变化	61
三、三年内 100 cm 土体硝态氮储量的动态变化	62
第四节 小结.....	63
附 录.....	65
参考文献.....	69
致 谢.....	74

第一章 绪论

第一节 研究意义

一、氮肥对农业的重要性

到 21 世纪中叶（2050 年），预测我国人口在 15~16 亿之间，按人均粮食年消耗量（包括饲料和工业用粮）450 kg 计，届时约需提供 7.2 亿吨粮食。按 30 亿亩播种面积计，2050 年全国平均每亩耕地的年均产量应该是 240 kg 粮食。1996 年我国粮食总量为 4.9 亿吨，每亩耕地的单产平均为 163 kg。在今后 50 年中粮食单产从每亩 163 kg 提升到 240 kg 确实是十分艰巨的任务。因此 20 世末美国的 Brown 先生及西方一些专家对将来中国能否自己养活中国人提出了质疑。

目前，我国二、三产业迅速发展，仍将继续占用大量耕地。为实施可持续发展战略，保护生态环境，目前中西部地区退耕还林还草计划必须坚持下去。未来我国扩大耕地面积的潜力不大，增加粮食供应主要依靠提高粮食单产。决定单产高低的因子很多，优良品种，也就是说决定品种高产与否的内在基因，是基本因子，粮食品质优劣也是品种决定的。有了优质高产的品种，在实践中能否实现高产，则要靠许多环境因子制约，如：光、温、水、自然灾害以及土壤条件和施肥。其中能够人为主动控制和易于控制的因子中，在过去 50 年中与粮食产量呈直线相关的只有施肥这一个因子，以及一定程度上的土壤条件（曹志洪，1998），国内外都是如此。因此，要想保持稳产、高产必需要有适当的施肥量作保证。

英国洛桑实验站近 150 年长期实验材料表明，在绿色革命之前，每公顷施 144 kg 矿质氮肥，比不施氮肥产量要高出 2 吨/ha 左右。而绿色革命后，随着高产品种引进，同样处理，即每公顷 144 kg 氮肥，粮食产量迅速提高到 6-8 吨/ha。然而，有了好品种若不施肥，产量依然在 1.5~2.0 吨/ha 之间徘徊，与施肥之间的差异迅速扩大到 5~7 吨/ha。由此可见施肥对粮食增产之重要性（曹志洪，1998）。

我国粮食播种面积（8800 万 ha）比印度（10000 万 ha）要小。印度粮食生产的光、热、水、土等条件比中国好。而中国粮食总产量（3.97 亿吨）却超过印度（1.77 亿吨）。究其原因是我国的施肥量（165 kg/ha）是印度（70 kg/ha）的一倍以上（曹志洪，1998）。

二、中国的氮肥施用状况与存在的问题

建国以来，我国无机肥产量和施用量一直以较快的速度（年均 5.9%）增长。60 年代以来的农业“绿色革命”，显示了化学肥料，特别是氮肥的重要农学价值。然而，当时及以后十几年，中国处在特殊的历史时期，经济发展比较落后，化肥

施用面积有限，施用量与发达国家也存在很大差距（表 1-1），这严重制约粮食产量提高。

表 1-1 1982 年各国化肥施用量
Tab. 1-1 World fertilizer usage in 1982

国家	氮肥 (kg/ha)		磷肥 (kg/ha)		钾肥 (kg/ha)	
	N	硫酸	P ₂ O ₅	过磷酸钙	K ₂ O	氯化钾
全世界	26.25	131.25	16.5	132	14.025	22.5
中国	30	150	10.95	87.75	4.125	6.75
朝鲜	98.175	491.25	45.9	367.5	18.15	29.025
苏联	27.525	138	11.85	95.25	15.9	25.35
美国	43.725	218.25	24.3	194.25	24.375	39
英国	122.025	610.5	66.75	534	69.45	111.15
法国	107.55	537.75	126.075	1008.75	107.625	172.2
西德	145.725	728.25	121.35	971.25	153.975	246.375
意大利	72.375	361.5	51.225	409.5	28.8	33.375
荷兰	498.15	2490.75	134.325	1074.75	143.25	229.275
加拿大	11.4	57	10.95	87.75	4.65	7.5
日本	175.725	879	169.8	1358.25	146.625	234.675
印度	11.4	57	3.975	31.5	1.95	3.15

（赵微平，1983）

改革开放以后，随着社会经济文化的发展，科学种田思想深入人心，化肥的施用受到空前的重视，施肥量的增加，遗传育种学也迅速发展，农田单产取得了大幅度提高，为在占世界二十分之一的耕地上养活世界五分之一的人口奠定了物质基础（表 1-2）。1995 年我国无机肥料产量为 2481 万吨（按养分计），位居世界第二。无机肥用量 1995 年为 3595 万吨，占世界用量的 35%。按我国 30 亿亩耕地面积计算，每亩无机肥用量只有 12 kg，属于世界中等水平。目前整体上施肥量，特别是占耕地 60~70% 的中低产田施肥量还很不足。在甘肃、青海、内蒙、西藏等地区每亩施肥量不足 10 kg。要在这样的耕地上获得高产，必须加大化肥的投入，这是高产的物质基础，同时要引进高产优质作物品种，改进种植制度，加强田间耕作管理。

表 1-2 1994 中国、印度、美国的粮食产量和施肥量
Tab. 1-2 Yield and fertilizer usage in China, India and America in 1994

	中国	印度	美国
粮食播种面积 (万 ha)	8800	10000	6400
粮食总产量 (亿吨)	3.97	1.77	3.57
粮食单产 (kg/ha)	4500	1763	5572
施肥量 (kg 养分/ha)	165	70	154

（来自 FAO 和 PPI-IP）

可是，在我国东部沿海农业高产区，如上海、广东、福建、浙江的沿海地区，

江苏的苏南、山东、辽宁、河北的沿海地区以及京津唐等大城市郊区，肥料用量特别是氮肥用量和磷肥用量已成过量，平均每亩 35 kg 以上，不仅肥效不能发挥，肥效递减问题十分突出：1984—1994 的十年中，化肥用量增加了 90.7%，粮食产量却只增加了 9.1%。而且 N、P 对土壤和地下水体的污染威胁严重，地下水硝态氮含量超标、水体富营养化，使人们的饮用水和工业用水都受到影响。在过去的 20 多年中 NO_3^- 对地下水污染呈不断上升趋势。80 年代中期发现我国太湖流域^[3]和北京郊县^[4]化肥使用与浅层地下水 NO_3^- 浓度升高呈明显相关性。1994-96 年，中国农科院土肥所测试了我国北方 15 个市、县、乡镇和农村的地下饮用水，发现 NO_3^- 含量超标率接近 50%^[2]。1993/1994 年世界各国的无机肥料比例氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 为 1: 0.4: 0.26 而我国则是 1: 0.4: 0.16。氮磷比例比较合理，可是氮钾比例中钾肥明显偏低。这一下问题在东部沿海农业高产区尤其突出。

中国农业科学院林葆曾将不同时期氮磷钾肥的肥效作了比较，结果发现总的肥效趋势是：氮肥>磷肥>钾肥，可见氮肥仍是主要的养分制约因子。

氮肥通过挥发、硝化-反硝化损失、硝态氮淋失等多种途径损失严重。无机氮肥利用率一般只有 30-35%。因此提高肥料利用率潜力很大。采取何种措施减少氮素损失，如何提高肥料利用率，值得非常深入地研究。

高化肥施用量，在一定条件下会带来一些环境问题。比如，氮肥过多施用会使植物不能有效吸收氮素，一方面，多余的氮素一部分会以硝酸根的形式淋失到地下水，如果达到一定量，就会对地下水造成污染，影响生活、农业和工业用水的安全；另一方面，由于硝化和反硝化作用，会有更多的氮素以 NO、 NO_2 、 N_2 的形式排放到大气中，加重对大气的污染。

综上所述，一方面为了保证国民经济持续健康稳定的发展，粮食生产必须保持相应的稳定增长，这就要求必须有足够的化肥施用量，尤其是氮肥施用量。另一方面，过量氮肥施用会造成利用率降低、资源浪费，同时会带来一系列严重的环境问题，导致生态环境恶化，危及经济的可持续发展。如何处理这两者之间的平衡关系，成为我们生态学研究的一大世纪性和世界性难题。

三、研究意义

如上所述，在我国东部农业中、高产区，随着氮肥用量不断提升和不合理使用，产量效益递减、地下水 NO_3^- 污染问题越来越突出^[1]。特别是由于人口对农业生产造成的巨大压力，以及人们环保意识相对淡薄，不合理的水肥管理相当普遍。因此从协调农业和环境可持续发展意义出发，寻找兼顾农业产量和环境效益的最佳的肥-水耦合“最佳点”，并通过数学模型定量描述水、氮迁移和转化规律，具有十分重要的理论和现实意义。

从经济学的角度讲，在这一最佳结合点，不仅要获得很高的生物产量，更重要的是考虑投入和产出，最终获得最大利润率，此时产出与投入之比最大；或者，获得最高总利润，此时的投入量要比利润率最大时还要大一些，产出也相应的大些；如果进一步增加投入则利润总量开始减少，也就是说，新增加的经济投入不能有新增加的经济产出所补偿，投资开始亏本，但是如果继续增加经济投入，依然可能会使生物产量增加。考虑市场的因素，把农业生产放到市场中进行分析，这样才能得到更具有实际意义的结果。

从环境意义上讲，地下水是鲁西北平原重要的工业、农业及生活用水来源，水中 NO_3^- 过量会威胁人的健康。饮用水中的 NO_3^- 可以在肠胃中被还原为 NO_2^- ， NO_2^- 氧化血红蛋白导致婴儿高铁血红蛋白症（亦称氰紫症）^[5]，近期研究还表明， NO_3^- 浓度超过 4 mg/L 的农村饮用水与“非何杰金氏”淋巴瘤发病率的升高有联系^[6]。

鲁西北平原是我国重要的粮食产区，主要栽培体制是一年两熟的冬小麦—夏玉米轮作制，降水不均—特征显著区别于南方地区或欧洲国家。张国梁近期在北京地区的研究表明，夏玉米旺盛生长的 7~8 月是氮素淋失“敏感期”，此期由于降雨频繁，当季化肥 N 和土壤原有 N 将被持续地淋滤到根圈以下 (>2m)^[30]，目前本地区的额定施氮量正在使深层土壤溶液硝态氮浓度严重超标，降低氮肥用量已刻不容缓。气候与北京相似的鲁西北平原地区，地下水位普遍较高，地上/地下水交换频繁，但至今尚未开展系统的农田水肥管理与产量和水质关系的研究。在该地区开展氮/水耦合与作物产量和氮素淋失量之间的响应关系研究，寻找和表征在并不显著降低粮食产量，却能显著减少氮素向地下水迁移的水、肥耦合的“最佳点”，获得最优水肥管理模式；并通过模型定量表征施氮、灌溉和降雨与土壤氮素迁移的关系，预测水、氮运移规律，具有十分重要的理论和实践意义。

第二节 研究进展

一、引言

对于一定的作物和耕作制度，水分和肥料管理是提高农业产量，同时制约地下水污染的最关键环节。近年来，西方发达国家以农业和环境的可持续发展为目标，开始制定各种相应法规和农业管理措施。如英国粮农渔业部 (MAFF) 划分出“氮素敏感区”^[7]，美国地质调查局 (USGS) 也于近期完成了地下水 NO_3^- 污染全国风险图^[8]，指导农民合理施肥。特别是欧共体 (CEC) 在 1991~1994 年进行了国际性多学科研究，以确定在并不显著降低粮食产量，却能显著减少氮素在根系残留和向地下水淋滤的“最佳施肥量”^[9]。Bauder 和 Schneider (1979) 指出，优化灌溉和尿素能有效地减少麦田氮素淋失^[10]。就施肥而言，国际上已经从单纯追

求产量的“最大施肥”，经过“效益施肥”，发展到今天兼顾农业和环境最综合效益“最佳施肥”，即“生态施肥”。九十年代初兴起的最佳管理措施（Best Management Practices-简称 BMPs）^[11]，实质就是以产量、经济效益和环境综合效益为目标，优化水肥管理。Diez 等^[12]指出控制土壤对地下水 N 污染的方法是通过测土合理施肥，并改善对灌溉水量的控制。Pier 和 Doerge^[13]提出了一个兼顾经济和环境最佳效益的折中“最佳氮投入量”基准，即 95%最大产量时的施肥量。Sexton 等^[14]研究了“N 输入—产量响应—淋失量”函数关系，表明当施肥量比最大产量时的额定用量时少 5%，淋失量则可显著减少 35%。灌溉与氮素淋失有密切的关系，好的灌溉制度能在保证作物产量的条件下，将根圈水分渗漏和氮素淋失降低到最小。常见的灌溉制度即定额灌溉，灌水量及调配具有一定的经验性。另一种方式为补偿灌溉，是根据定期测定根层（通常 0~60cm）土壤含水量与田间持水量的差额来确定灌溉量。中科院禹城综合试验站研究表明，在冬小麦—夏玉米生长季，补偿灌溉可以比定额灌溉节水 100~150mm，能有效地减少水分渗漏，从而减少氮素淋失。

我国在土壤氮素迁移和转化方面已做了不少工作。如朱济成（1983）^[4]、张福珠等（1984）^[20]、徐志红等（1987）^[21]、衣纯真等（1994）^[22]、王家玉等（1996）^[23]、赵竞英等（1996）^[24]、谢经荣等（1997）^[25]、宋玉芳等（1998）^[26]，通过土柱模拟方法、田间渗滤池、或田间土壤氮素浓度动态分析，初步揭示了施氮量与土壤氮素淋失的关系。黄元仿等（1996）^[27]、王红旗等（1997）^[28]和王超（1997）^[29]等，则在建立土壤水、氮联合模型，模拟土壤氮素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）动态方面做了重要的尝试。不过以往工作仍存在一些不足：（1）尚缺乏以农业产量和地下水水质为综合目标的系统的水、氮措施试验；（2）以小规模的模拟试验为主，在较浅的深度（100 cm）上看待氮素淋失；（3）多数以冬小麦为对象，没能充分反映淋失敏感期（夏玉米）的氮素行为。

二、N 淋失研究方法

氮素淋失量的测定和计算方法大致可分为三种：（一）土壤氮素质量平衡法；（二）排水采集器（Lysimeter）法；和（三）多孔杯—气象数据综合技术^[14]。鉴于精度、可操作性和水通量算法的日益成熟，第三种方法成为主流方法。使用多孔杯可获取根圈氮浓度(C)，而气象数据与土壤水分特征数据结合可用来计算渗漏量(D)。淋失量即 C 和 D 的乘积。Sexton 等^[15]的研究初步表明，产量曲线和淋失量曲线所反映的肥效递减与淋失量递增这一对矛盾有其“收敛”或“交叉”点。这应该是我们实现最佳水肥管理、协调农业和环境可持续发展的前提。

为了模拟作物生长，水、N 平衡，产量，和氮素行为，国外已开发了不少综合模型，如 RZWQM, CERES-Wheat^[16]、CERES-Maize^[17]和 LEACHM^[18] 等。大

多数 N 淋失模型是以对流—扩散原理为基础，并将 N 迁移与转化、吸收等过程加以耦合。其中以水流子模型处理季节性土壤—水循环，包括灌溉和降水，土壤水力学性质，以及蒸散作用；以氮流子模型处理 N 转化、作物对 N 的吸收和 N 的对流—扩散迁移。前者的输出作为后者的输入。同时假定，移动态 N 成分 (NH_4^+ 和 NO_3^-) 的溶质迁移服从对流—扩散方程； NH_4^+ 的离子交换服从可逆一级动力学；硝化、反硝化、矿化和固定服从不可逆一级动力学，植物对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收受可变吸收系数的约束。上述过程可以用多个微分方程来表述，进行同步求解就可获悉某种土壤某时刻移动性 N 的淋失过程^[19]。

研究氮素的淋失，淋失边界的划定非常关键。通常的氮素“淋失”是以根圈底部为边界。根圈是指根系分布的范围，其厚度因作物种类、生长期、土壤和气候条件而异，对于一定地区的具体作物，根圈的范围是相对稳定的。但是由于灌溉水水源和降水的年际变化，土壤水分动态的年际变化会很大。土壤水分年际变化必然使得氮素在土壤中的运移发生跳跃变化，从而增加了对氮素淋失研究的难度。因为根据所谓的活塞理论，一次过量的降雨或灌水，可能使得在根际一下滞留了很久的氮素一次性全部淋失，进入地下水。同时，由于异常的干旱天气，使得土壤深层（根圈以外）的氮素会随着土壤水的向上的毛细运动重新进入根际，被作物利用。可见以根圈为界所计算的氮素淋失，不是绝对的淋失。所以研究实验区的气候变化规律，预测每年不同程度的供水状况所发生的概率，进而确定发生氮素剧烈淋失的概率，具有很重要的意义。

三、小麦、玉米产量影响因素

1. 小麦产量影响因素

1) 施肥和灌水对产量的影响

周凌云等^[110]研究表明，从最佳水肥投入产出的经济效益分析来看，在土壤含水量控制为22%，施氮量为12 kg N/亩，生育期灌水312 mm时，才能获得最佳的经济效益。詹其厚等^[109]通过田间随机区组试验，研究结果表明，适宜的氮肥用量可促进小麦穗部发育，提高单位面积的有效穗数和穗粒数，最终表现为增加产量。于晓秋等^[111]采用旋转回归正交试验，探讨了不同肥量、密度条件下对小麦产量的影响，初步揭示了密度、肥量对小麦产量的影响程度及相互间变化规律，求出理论上小麦产量的最值。刘万代等^[112]研究了总施氮量240 kg/ha 的条件下，氮肥基追比(基肥与追肥比例关系)对不同穗型小麦品种产量与品质的影响。结果表明，增加追氮比例产量增加，品质改善，但不同穗型品种之间存在差异。多穗型品种以氮肥基追比5：5 或3：7 为宜；大穗型品种以7：3 为宜。滕树川等^[113]研究认为不同施氮量对小麦产量的影响较大只有合理适量施用才能获得高产，试验条件下以每亩尿素10千克为最佳施用量，多施或少施都会影响小麦的产量和效

益。赵炳梓等^[114]研究表明,灌溉水平105 mm 时,对小麦产量抑制较为明显;而当施N量<112.5 kg/ha 时,N 素成为增加小麦蒸散耗水和小麦产量的限制因素。但灌溉水平不同,小麦产量随施N 量的增加而变化的趋势亦不同。当灌溉水平为475 mm 时,它们之间关系为典型抛物线。然而小麦水分利用率则随灌溉水量增加而降低。只有当灌溉水平较低时,随着施N 量增加,水分利用率有上升趋势。

2) 气候等因素对产量的影响

徐为根等^[108]研究发现,同一气候区,在小麦生长期的不同旬,降水对产量影响不一样,有时为正效应,有时为负效应;在不同气候区,降水对产量的影响亦不相同。匡霞等^[115]用Logistic 方法,从小麦产量原始序列中分离并剔除非自然因素引起的变化趋势,获得一个相对平稳的气象产量序列。分析表明,小麦产量与前一年8月印度低压的强弱显著相关,前一年8月印度低压加深,则来年小麦减产;相反,如印度低压减弱,则来年青岛地区小麦增产。

于晓秋等^[116] 研究利用数学中函数极大值的概念,结合农业技术经济学的边际效应理论,根据各个试验因素变化对小麦产量的影响,得出小麦高产条件:种植密度410~441 万株/hm²、施氮96~100 kg N/ha、施磷62~66 kg/ha、施用钾37~40 kg/ha、施微肥1004~1116 g/ha²,小麦产量可达到4500 kg/ha。经济效益最大时的各因素投入量,除钾肥、微肥略高外,其它均小于产量最高时的各因素投入量。其结果符合生产实际,具有理论和实用价值。李万昌等^[117],1999~2001 年研究结果表明:随着产量水平的升高单位面积穗数对产量的作用逐渐弱化,穗粒数对产量的作用逐渐增强,单位面积穗数与穗粒数间的相互作用构成限制产量的主要因素,千粒重对产量的作用较稳定;千粒重与单位面积穗数的负相关性较弱、与穗粒数无明显的相关性;在7 500~9 000 kg/ha 水平下,产量结构模式为:504.0~607.5 万穗/ha,33.6~41.3 粒/穗,35.7~42.3 g/千粒重;在9 000~10 500 kg/ha 水平下,产量结构模式为:525~645 万穗/ha,36~50 粒/穗,37~45 g/千粒重。姚金保等^[107]等研究了小麦两个产量构成因素—每穗粒数和粒重的遗传。结果表明,每穗粒数和粒重的遗传均符合加性—显性模型,基因作用方式以加性效应为主,显性程度为部分显性至完全显性。

2.玉米产量影响因素

1) 施肥与灌溉对玉米产量的影响

罗龙学等^[118]试验结果显示,以20%氮肥和40%磷钾肥为深施,25%氮肥和40%磷钾肥浅施,20%磷钾肥和28%氮肥作追施拔节肥,27%氮肥作穗肥为最佳玉米施肥比例。郑若良等^[119]研究表明,化肥与农家有机肥合理配合施用,可以显著增加产量,提高籽粒蛋白质和可溶性糖的含量,降低脂肪和淀粉的含量,以化肥900 kg/ha、有机肥30 000~45 000 kg/ha 的组合相对较好。张玉华^[127]试验研究表明,

玉米长效专用复合肥（N 18%、P₂O₅ 6%、K₂O 6%）不同施肥量与不施肥对照比较，玉米产量增产幅度为22.90 %~57.98 %。差异达到极显著水平；不同施肥量对玉米产量的影响，差异达到显著或极显著水平。从经济施肥角度应选择施肥量1 275.0 kg/ha 为最佳施肥量。张全发^[121]研究表明：渗水膜覆盖玉米全生育期降水量为219 mm，每毫米降水可生产玉米35.6 kg/ha，普通地膜为25.7 kg/ha，露地栽培仅为17.5 kg/ha，渗水膜覆盖栽培是提高自然降水利用率最有效的技术和途径之一。孙聪姝等^[130]长期培肥定位试验表明，在肥料耗竭阶段，从玉米产量的影响来看，和连作不施区相比，农肥的增产率分别为60%，39%；化肥为10%和2%；秸秆为8%和16%。从两个培肥因素的交互作用对产量的影响来看，农肥与化肥、农肥与秸秆之间有明显的正交互作用，而秸秆和化肥也表现出了明显的互补性。

2) 气候等因素对玉米产量的影响

李言照等^[125]在山东省境内采用不同区域分期播种，形成自然条件下光温值的差异，系统分析光、温因子与玉米产量的关系。结果表明，玉米生育期间的积温、日照与产量及产量因素成极显著正相关，积温的直接效应最大，日照通过积温的间接效应最大。开花至成熟阶段的日照时数对穗粒数影响明显，日平均温差与积温呈负相关关系并对千粒重和产量产生负效应。产量和千粒重以鲁西最高，由鲁西向鲁东依次递减，穗粒数以鲁中最高。高产玉米全生育期需积温2500℃左右，日照700 h左右，开花至成熟阶段需积温1150℃左右，日照大于300 h。李学杰^[131]认为鲁西北地区玉米产量提高的限制因子是杂交种不纯，播期晚，种植密度低，一次性定苗，肥料投入少，灌水无保障，防虫、防病意识差和收获偏早。郑洪建等^[129]通过对生态因素与玉米产量关系的研究总结了影响玉米产量的生态因素，认为光、热、水和二氧化碳是玉米生长发育和形成产量的基本要素，在一般情况下，这些要素增多将会增加作物的生产力，但是有时也会带来不利影响。王位泰等^[122]对庆阳地区研究结果表明，玉米产量与当年伏旱关系最为密切，其次为秋旱、春旱和春末夏初旱。

陈国平等^[128]研究表明：（1）空间因子和土壤因子都是影响玉米生长和产量的重要条件，但相比之下，空间因子的作用要大于土壤因子，改善空间因子使单株产量提高17.0%，改善土壤因子只使单株产量提高13.0%。（2）改善空间因子和土壤因子对产量构成要素都产生影响。但总的看来增加地上、地下部的营养空间、对穗粒数的影响要大于对千粒重的影响。（3）改善土壤因子对灌浆速度的影响大于改善空间因子的影响。前者使灌浆最大速率增加14.3%，而后者只使灌浆最大速率增加3.0%。

牟志勇^[120]研究表明：玉米移栽密度的高低，直接关系到有效穗的多少，有效

穗的多少直接影响到产量构成的高低。在一定的密度范围内，产量随密度而增加，因此，只有合理的群体，才能夺取高产。以公顷移栽48000株，产量最高，效益最好。郑常祥^[123]研究了在干旱条件下玉米产量的主要相关性状。结果表明，在干旱条件下，玉米产量主要与果穗性状即千粒重、穗长、穗粗有正相关，与株高也有正相关，但产量与出苗至吐丝日数为负相关。王启柏^[124]试验结果表明，穗长等5个产量构成因素与籽粒产量的遗传相关系数均为正值，且均达到极显著标准；通径分析结果表明，5个产量构成因素与籽粒产量的直接通径系数均为正值，其中穗长对产量的总体效应值最大(0.733)，其次是穗粗(0.698)。选育高产玉米杂交种时，应高度重视选择果穗长而粗、行粒数多的类型，同时，保证一定的千粒重，对穗行数的选择可适当放宽。向道权^[126]利用主基因-多基因遗传模型，研究结果表明：穗长、穗粗、穗重和单株粒重是由多基因模型控制；行粒数和千粒重检测到1对完全显性主基因，穗行数和秃顶长存在2对主效基因，而且穗行数的2对主效基因之间存在互作效应。

四、影响硝态氮淋失的因素

1. 施肥

这里的施肥就是增加土壤中的氮素投入，一般来说，施肥量增加会引起氮素淋失加强。大部分研究结果表明，施入土壤中的氮肥只有超过一定量时，才会发生硝态氮淋失的大幅度增加。黄绍敏、黄埔湘荣等（2001）认为土壤类型决定着硝态氮基础含量，是内因，而施氮量是影响硝态氮淋失的最大外界因素。

据李世清（1999）在半湿润地区红垆土上进行的大田试验表明：连续施用氮肥显著影响硝态氮在土层中的残留累积量，0~20cm 微生物的氮含量和矿物固定的氮量，在每季作物施氮量达到 112.5 kg/ha 时，就会发生残留硝态氮的累积，其累积量并随施氮量的增加而增加；当每季施氮量低于 75.0 kg/ha 时，不会出现想太多残留累积。周凌云（1997）应用 ¹⁵N 失踪法对硝态氮淋失进行研究，结果表明，土壤供水条件在一定范围内（180~360 mm 有效水）氮素淋失与施氮量成正比。孙绍荣（1986~1992）研究表明，施氮量与土壤下渗水的含氮量成直线相关关系。

黄绍敏等（2000）通过三年肥料定位试验，研究了施氮量对 1m 土体硝态氮含量的影响，结果表明：每季施氮量小于 225 kg/ha 时，1m 土体中各个测定时期硝态氮含量变化不大，当施氮量增加到达 300、375 kg/ha 时，1m 土体的硝态氮含量分别增加 4.2 倍和 7.4 倍，0~20 cm 和 80~100 cm 土层硝态氮在每季作物施氮量大于 225 kg/ha 时急剧增加，并对地下水产生污染。范丙全等研究表明潮土施氮在 150 kg/ha 一下时，100~150cm 土层中未发生硝态氮淋失；而施氮量 225~300 kg

/ha 时 100~150cm 土层硝态氮含量明显提高；施氮量 300 kg /ha 时，100~150 cm 土层硝态氮含量达到最高。赵竞英等（1996）在田间渗漏池的实验表明，尿素等不同的氮肥品种，均存在随施氮量的增加及种植时间的加长，0~40 cm 土层硝态氮各季累积值不断上升的趋势，并且 1m 土层以下硝态氮淋失量也随着施氮量的提高而增加。刘春增等（1996）的试验表明，随着施氮水平的提高，淋溶到深层地下水的硝态氮增大。

刘晓宏、郝明德（2001）等在连续轮作施肥 13 年后，研究了土壤剖面硝态氮的分布和累积，指出在黄土干旱地区单施氮肥硝态氮淋失深度达到 150cm。杨学云、张树兰（2001）利用 18 年长期定位试验研究了冬小麦—夏玉米轮作制度下，有机和无机肥料配合施用对壤土剖面硝态氮分布累积的影响，表明硝态氮主要累积在 0~100 cm 土层内，高氮肥处理（120 kg N/ha）及氮肥和有机肥配合施用，硝态氮在剖面出现两个累积峰，并且在 400 cm 处硝态氮的含量接近或超过 10 mg N/kg。

2.降水和灌溉

水是可溶性氮素，尤其是硝态氮，向下迁移的载体。世界各地的调查结果表明，硝态氮淋失损失时间分布与降水是相似的，有的试验报道还表明，氮的淋失量与前日和当日的降雨量之间存在极显著相关性（Kazuo Shibano, 1998），另外，没有超过土壤贮水量的足够降水仍然能引起硝态氮淋失到土体较深部位，而夏季强烈的降雨并不一定引起氮的淋失，低强度而长时间的降雨则能引起大量的氮素损失。

据研究，在渗漏池中，当旬降雨量超过 100 mm 和灌溉量超过 90 mm 时，硝态氮被淋洗到 60 cm 以下土层，在夏、秋季节连降大雨后，硝态氮继续下移，直到被大量淋洗出 120 cm 土层（陈子明，1996）。范丙全（1998）经过试验证明，降水显著增加壤质潮土 0~180 cm 土层的含水量，秋季降水对土壤水分影响的时间比较长；灌溉主要影响 0~60 cm 土层含水量，如果小麦拔节灌水比较早，灌溉水可以入渗到 120 cm 土层，可能有较多的硝态氮随水下渗而淋失到深层土壤。黄元仿等（1994）速度研究表明，灌水量越大，表层土壤硝态氮淋失迹象越明显，淋失也越深；中灌（60 mm）和低灌处理的淋洗深度一般不超过冬小麦根系主要集中区（80 cm 以内），高灌处理（90 cm）的表层硝态氮淋洗深度容易超过 80 cm。周顺利等（2002）指出在夏玉米生长季节 0~100 cm 土体土壤硝态氮的含量均表现为中间土层含量低，上层和下层含量高，一般以表层最高，但受到降雨的影响高氮处理会出现下层高于上层的现象。

Timmons 等（1981）的研究结果表明，高、低灌溉水平下硝态氮淋失分别比不灌溉增加 17%和 5.3%，一次灌水越多，硝态氮的淋洗损失越大，硝态氮淋洗峰

在剖面分布上趋于向下。吕殿青（1999）等研究表明，土剖面中 0~80 cm 土层内的硝态氮残留量，随灌水量的增加而降低；80~320 cm 土层内硝态氮含量与灌水量之间没有明显相关性，320~400 cm 土层内硝态氮含量随灌水量的增加而增加。

S.E. Allaire-Leung 等人的试验数据表明，灌溉状况（土壤水分状况）对氮素运动的影响比以前的研究结果所预测的要小。

李生秀等（2000）在不同深度的渗漏池连续 6 年（11 季作物）研究了半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失，结果表明：在半干旱地区，硝态氮的淋失仍可发生，淋失量与降水量有密切关系，降水越多淋失量越大，不同降水年际表现显著。张思聪（1999）运用模型得出结论：灌溉和降雨了量越大，硝态氮在根区以下的淋失也越大，丰水年的总淋失量大约是枯水年的 6 倍。

3. 土壤

影响土壤氮素淋失的主要土壤性质是土壤的物理性质，比如质地、孔性、结构性以及水分状况等，而土壤的化学性质和生化特性影响到氮素的矿化、固定和累积过程，从而间接地影响到氮素的淋失。孙克刚（2001）等研究了 0~100 cm 土层中硝态氮的分布，得出结论：硝态氮在土壤中的分布不但与施肥量有关，而且还与土壤类型有直接关系，不同土壤类型直接影响硝态氮在土壤剖面的移动。余贵芬（1999）研究表明不同紫色土硝态氮淋失率为：酸性紫色土（2.84%）>钙质紫色土（2.39%）>中性紫色土（2.03%），指出随土壤物理粘粒含量的增加硝态氮淋失率降低。

4. 耕作方式

耕作方式影响了土壤扰动程度和残留物的存在，进而影响了土壤水分的截留和保持，而且耕作方式还改变了土壤容重、导水率、孔隙度等理化性质，进一步影响硝态氮的淋失。Kanwar（1988）在土壤上的降雨模拟研究表明，淋失到 1500 cm 以下的硝态氮呈现：免耕<传统耕作，分别占总含氮量的（6%和 27%）；但随后 3 年的结果与此相反。

赵允格、邵明安（2002）在基于阻水层理论和黄土高原地区传统垄作习惯的基础上研究了成垄压实施肥和传统的平地施肥、垄沟施肥（成垄不压实）条件下土壤硝态氮的迁移动态，结果表明：在供水量相同条件下，由于平地和垄沟条件下水分分布的差异导致平地土壤中硝态氮较垄沟耕作易于迁移。在玉米生育前期，由于作物根系对硝态氮的吸收和拦截，成垄压实与成垄不压实对阻止硝态氮随水迁移差异不大；生育后期，当作物需肥减少时，成垄压实施肥能够阻止硝态氮向深层土壤迁移累计；玉米收获后，3 种施肥方式下土壤硝态氮迁移深度为平地（>60 cm）>（垄沟施肥 45 cm）>（成垄压实<35 cm）；有试验表明：耕作由于改善和增大了土壤孔隙度，从而增加了硝态氮的淋失。

5. 植被

植被系统及其覆盖状况决定着土壤氮素的吸收，同时也影响着地面降水的分配。作物通过根系直接吸收水分和养分，因而氮素的淋失与作物根系的发育和分布有密切关系。而根系的发育和分布因作物的种类、生长期、土壤和气候条件而异。通常具有较深根系的作物如小麦和玉米（1.5~2.0 m）比浅根作物如土豆、花生、豆类等更能有效的吸收氮素，从而减少硝态氮的淋失（Hartemink, 1996）。

6. 气候

气象因素对氮素的淋失是间接和复杂的，它主要是通过改变其他因素而影响氮素淋失。王胜佳（1997）曾指出：土壤中硝态氮在双季稻期间的消长趋势与同期气温和土温的变化趋势基本吻合，渗漏液中硝态氮与同期 0~50 cm 表层土壤的温度有关，表面土壤温度越高，各土层渗漏液中硝态氮也越高；而且在国外旱地土壤上的试验也得到淋溶出液体中硝态氮浓度随季节变化的结论。

此外有关硝态氮淋失的研究还包括不同肥料配施对硝态氮累积、分布的影响：黄绍敏（2000）指出 P、K 配施可以降低土壤硝态氮累积，0~100 cm 土体硝态氮累计量的顺序是 N>NK>NP>NPK>NPK+秸秆还田>NKP+有机肥。

五、土壤氮素形态及转化

1. 土壤中氮素的形态

土壤氮素淋失的主要形态是硝态氮，然而硝态氮只是土壤氮素的一种存在形态，所占比例比较小，与其他形态的氮素之间有着密切联系，因此了解土壤中各种氮素的存在状况，对于研究硝态氮淋失动态有非常重要的意义。

鲁西北地区，表层土壤中的氮素主要以有机态存在，约占土壤全氮的 90%，所以，土壤氮素含量主要取决于有机质的含量。土壤中的大部分有机氮是迟效性的。另有少量的无机氮，主要是铵态氮、硝态氮和极少量的亚硝态氮，可以直接被植物吸收，一般占土壤全氮的 10%以下。土壤中铵态氮和硝态氮也称为速效氮，因为通常用碱解法测定含量，所以又称为碱解氮。它的含量水平常作为衡量土壤供应氮素强度的指标。碱解氮含量与全氮呈明显的正相关，耕地土壤受到施肥影响，碱解氮平均含量明显高于非耕地自然土壤。

该地区不同土类之间的碱解氮含量差异较小，平均在 35~66 ppm。但是，各种土壤碱解氮含量的变异系数普遍较大，一般在 30%~45%。说明不同土壤类型，不同地区，甚至不同地块，由于施肥、耕作水平不同，碱解氮含量差异较大。

2. 土壤中氮素的转化

土壤中的氮在各种推动力下不断转化。主要的转化过程有：有机态氮的矿化（氨化作用）、硝化、反硝化、矿质氮的生物固定、铵的固定、吸持、释放、氨

挥发、生物固氮等。矿化过程中最先产生的无机氮以氨态氮为主。从复杂的有机氮转化为无机氮，需经过复杂的生物、生化和化学过程，绝大部分反应过程都有微生物参与。能进行氨化作用的细菌统称为氨化细菌，影响氨化细菌活性的外界条件都对氨化过程产生影响，如温度、湿度、pH、氧分压等。此外。矿化过程和量受土壤有机质的类型、结构、结合方式和施肥及植物生长等的影响。

有机氮的矿化和矿质氮的生物固持是两个相反的过程。当容易分解的能源物质过量存在时，生物固持作用大于矿化作用，表现为土壤生物量的增加，特别是微生物生物量的增加。这里的生物固定与生物固氮不同，生物固氮专指自然界中的固氮微生物，将空气中的氮分子专变为氨的生物学过程。

从氨态氮转化为硝态氮的氧化过程总称为硝化作用。一般认为土壤的硝化作用主要是由微生物进行的，非生物的硝化过程即使存在，其份额也很小。硝化作用一般由好气自养细菌完成，其硝化过程分为两个阶段：第一阶段由亚硝化细菌把氨态氮氧化为亚硝态氮，需要经过一系列中间过程，其细节尚未明晰；第二阶段由硝化细菌把亚硝酸盐氧化为硝酸盐，可能是简单的脱氢过程。在通气不足的情况下，第二阶段反应受到抑制，可能产生亚硝酸盐的累积，或由亚硝态氮还原为氮气。或许自然界中有一些异养微生物，也进行硝化作用。异养细菌不需要从铵的氧化过程中获得能量，其氧化产物具有多样性。异养菌的氧化能力虽远小于自养菌，但在土壤中数量多，其作用不可忽视。土壤中异养菌和自养菌的连续硝化作用值得注意。不同土壤的硝化活性不一。影响硝化作用的因素有土壤 pH、Eh、温度、水分、有机质、养分、微量元素和土壤质地等。硝化作用的最适温度为 30 摄氏度。低于 5 或高于 40 活动受到抑制。因此，硝化作用发生在排水良好，酸碱适中的土壤中；在高度酸性的土壤中或厌气条件下，硝化作用受到抑制。研究证明，氮在各种环境（碱性、中性、酸性）中进行硝化，都有可能发生氮的损失。施用有机物，较宽的碳氮比（C:N=30）能促使肥料氮更快得固定成有机态，减少氮的损失。硝化过程形成的硝态氮除为植物吸收外，一部分从土壤中淋失进入地下水，一部分经反硝化作用还原成亚硝态氮和氮气。为减少氮素损失和污染，应对抑制和调控硝化作用方面进行深入研究。

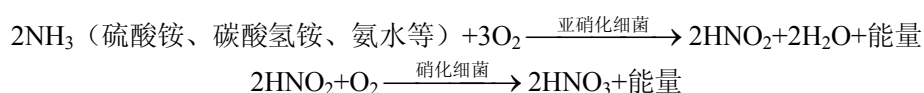


图 1-1 土壤中铵硝化过程
Fig.1-1 Process of ammonium nitration in soil

反硝化作用的生物学过程是一个复杂的过程，参与这个过程的一系列微生物。当土壤中富含有机质时，只有在相对好气条件下，这个过程才进行。而应用

^{15}N 查明，肥料氮的气态损失在施肥后最初 10~30 天内最严重。在嫌气条件下，肥料氮的损失更加强烈。鲁西北地区，夏玉米季降水集中，比较容易出现积水通气不足的情况，因而应该是反硝化的主要发生时期。

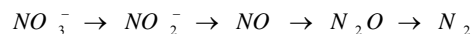


图 1-2 反硝化过程

Fig.1-2 Process of anti-ammonium-nitration in soil

土壤氮素的矿化和供应对于作物的生长具有重要作用。这是因为，第一，土壤氮素的供应量在作物的需要总量中占有较大比例，一般为 40%~75%，并且该比例随着土壤肥力的提高而增大；第二，土壤氮素在作物的整个生长过程中缓慢而持续地供应氮素。

鲁西北地区，化学氮肥是化肥投入中所占比例最大的品种。提高作物对氮肥的利用率，即是提高氮肥增产效果的一个有效途径，也有利于节约资源，保护环境。作物对氮肥的利用率受到作物品种、土壤、施肥方法等多种因素的影响。

尿素是该地区普遍施用的一种氮肥。尿素水解后易发生氨的挥发损失，在石灰性土壤上施用尿素挥发更大。各种施肥方法相比较，以基肥表施的氮素损失量最高，其次是基肥深施，再次为生长旺期表施，而以粒肥深施为最低。本实验考虑到耕作和作物生长，冬小麦播前，随土地翻耕深施 50% 的计划施氮量，在生长旺盛的孕穗期，在随灌水施用另外的 50% 作为追肥。夏玉米季则根据土壤水分和天气条件，穿耕深施或者地表散施。

六、土壤水分特性

土壤中硝态氮的运移主要依附于土壤水分运动，土壤水是硝态氮的最主要驱动因子。在研究硝态氮运移之前，必须搞清楚土壤水的基本动态。

1. 潮土的水分状况

影响潮土土壤水分物理特性的决定因素是土壤质地，潮土质地多种多样，它们的水分物理特性差异很大。凋萎系数随质地变粘而增大，壤土为 3.90%~12.20%，黏土可达 21.72%。由凋萎系数至田间持水量称为有效水范围。粘土的田间持水量虽高，但是凋萎系数也高，因此有效水范围并不大。

潮土的质地不同其毛管水上升高度有较大差异，轻壤土的毛管水上升高度最大，其次是沙壤土和中壤土，重壤土和粘土较低，砂土最低。就毛管水上升的速度而言，砂土的毛管水上升速度最快，其次是壤土，粘土最慢。不同质地的潮土毛管水上升高度也不同。

对潮土来说，地下水位和粘土层与水文状况有密切关系，从而对土壤的形成和作物供水条件有很大影响。潮土的毛管水上升位置可分为两种类型。第一种类

型，地下水位在 200 cm 左右，雨季可以上升到 100 cm，高水位持续时间较长，毛管支持水前锋可以到达耕层或地表，全剖面几乎终年受到毛管上升水的湿润，在旱季上层湿度也不基本低于毛管破裂湿度，在这样的条件下容易形成盐化潮土。另一种类型，地下水位常在 3 m 以下，雨季毛管支持水的前锋也不能达到地表，旱季土壤上层因强烈蒸发而十分干燥，50~100 cm 土层可以降至毛管破裂湿度以下，这种情况容易形成脱潮土。禹城实验站的土壤就属第一种类型。

表 1-3 不同质地的潮土毛管水上升高度

Tab.1-3 Height of water capillary supporting under different soil quality

质地	砂土	沙壤土	轻壤土	中壤土	重壤土	粘土
毛管水上升高度 (m)	0.5	2.0-2.5	2.2-3.0	1.8-2.2	1.3-1.8	0.8-1.0

2. 降水对土壤水分的影响

鲁西北地区，降水是土壤水的主要来源。受到降水和蒸发的影响，土壤水分含量存在明显的季节变化，大致可以分为 4 个自然阶段：

(1) 春季失墒期 春季失墒期，土壤含水量下降，4、5 月是失墒最快的时期，平均达到 1.9~2.8 mm。此时为冬小麦拔节、抽穗期，需水量为 180~200 mm，降水蒸发差变动在 -50~-100 mm 之间，各地自然降水仅能供应作物所需水量的 15~30%，水分供需矛盾很大。春末土壤湿度降到全年的最低水平，上层可降到毛管水破裂湿度或以下，地下水位降到一年中的下限。各地出现不同程度的春旱和初夏旱，需要进行灌溉补给，才能够保证冬小麦高产、稳产。

(2) 夏、秋初增墒期 此期适逢雨季，降水集中，土壤中下淋水量多，下渗水与地下水相接，土壤各层湿润，土壤含水量剧增。雨季后，地下水位达到一年的最高位，毛管支持水前锋达到土壤上层，甚至到地表，有时形成涝灾。7~8 月份平均可增墒 2.5 mm/日，9 月份增 0.65 mm/日。7~8 月份正值夏玉米拔节吐丝期，一般需水量为 200~250mm，降水均能满足其需求，并有节余。

(3) 秋、初冬缓慢失墒期 此期降水少，气温仍然较高，土壤水分消耗大于收入，土壤含水量缓慢下降，地下水位回降。此时作物处于生长后期，但是在雨水少的年份，该区以出现秋旱，并直接影响冬小麦播种和幼苗生长。

(4) 冬季稳定期 此期降水量、蒸发量均小，作物需水极少，地表 20~30 cm 形成冻土层，土体内水分运动基本停止，土壤水分趋于稳定。

禹城实验站所在地的上述降水和土壤水分运动规律十分明显。

3. 土壤水势的变化规律

为观测表层土体内水分的活动规律，在高水区的第二重复 N300 处理小区内，埋设了水传感式水银负压计，其所测定的数值可以在一定程度上作为土壤水分含

量的指标。土壤水势的变化反映了土壤水势的变化情况，也就反映了作物吸收水分的难度。土壤水势一般为负值，也就是说土壤水没有达到饱和状态，具有进一步吸收水分大能力，但是人们习惯上取其绝对值进行计算比较。

土壤水势存在季节性变化，春季最高，夏季（雨季）最低（为便于分析，土壤水势取绝对值）。另外还有日变化，土壤水势的日变化反映了土壤水分在一天内的动态规律，在天气变化比较小的时间内，土壤水势具有比较好的周期性。2003年5月29日早8点至5月31日晚21点进行的观测具体结果(图 1-3)显示，对5月中旬的小麦的土壤表层（0~40cm）而言，一般早晨7~8点左右土壤水势最低，随后由于蒸发加剧，毛细管上升水的补充比较缓慢，不足以抵消蒸发的水分，土壤水势开始升高，一直持续到晚上7~8点才达到最高值，此后蒸发减弱，毛管上升水的补充速度超过蒸发速度，土壤水势开始回落，第二天早上7~8点又降到最低值，一般此时的最低值要比前一天的略高。不同土层具有比较一致的变化周期，周期长度大约都在24小时，随着深度增大，这一变化周期越来越不明显。

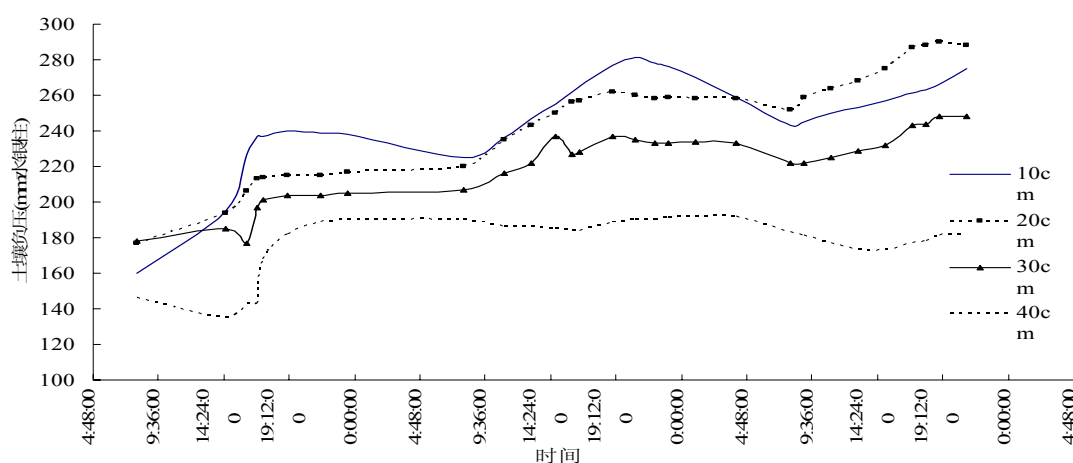


图 1-3 土壤水势日变化

Fig.1-3 Diurnal change of soil water potential

上述小麦土壤水势的周期变化说明了深层土壤水分对表层的补充作用。那么这部分水分是从那个深度开始向上运动的呢？要解决这个问题必须做土壤剖面（0~200 cm）的日变化观测。

在水分运动不平衡的层次（假定土壤水分通过毛细管做上升运动），通过该层的上表面向上运动的水量大于通过该层的下表面补充的水量，这样该层就出现了水分亏缺，水势必然发生变化，发生水势变化的最深层次就是水分来源的最深处。在某些层次会出现动态平衡流，即向上流出该层的水量刚好等于下层补充上来的水量，此时虽然该层也有水分的运动，但是用土壤水势这个指标是观测不到的。这里假设平衡流的流速很小，所以在短时间内平衡流的流量可以忽略，这样水势

发生可观测变化的深度就是水分供应的最深处。

2003年5月10日从早上8点开始,每隔大约2小时进行一次0~200 cm土层范围内的土壤水势观测,直到晚上11点结束。观测结果见图1-4。图中每条线代表在某一时刻,0~200 cm剖面上土壤水势的分布。可见观测时间内,10 cm处的土壤水势变化幅度最大,20 cm处次之,往下各层次的变化幅度依次减小。由于试验仪器和环境的变化,观测结果会存在不可避免的误差,一方面底部水银槽内水银面的微小起伏在观测时忽略不计,必然会产生一定误差,这是仪器的系统误差,另一方面,由于气温的变化造成一起内部的水气压发生变化,所以实际观测到的5 mm以内的微小波动可以归结为观测误差。据此假设可见,70 cm以下土层的土壤水势在观测时间内几乎没有多大波动,可以认为没有水分运动,即可以认为短时间内土壤水分运动只发生在0~70 cm范围。该范围内土壤水势的变化由两个方面原因,一是土壤表面水分蒸发,深层土壤水分通过毛细管运动,再者是植物根系直接从土壤深层吸收水分。考虑到小麦根系内地水分运动速度比土壤毛细管内的水分运动速度快很多,可以比较肯定推测,冬小麦主要是通过0~70 cm土体内根系的直接吸收水分,深层根系吸收水分能力有限。根据以往观测结果,该地区夏玉米的主要根系分布要比冬小麦的根系浅,所以玉米夏的主要根系分布不会超过70 cm范围。

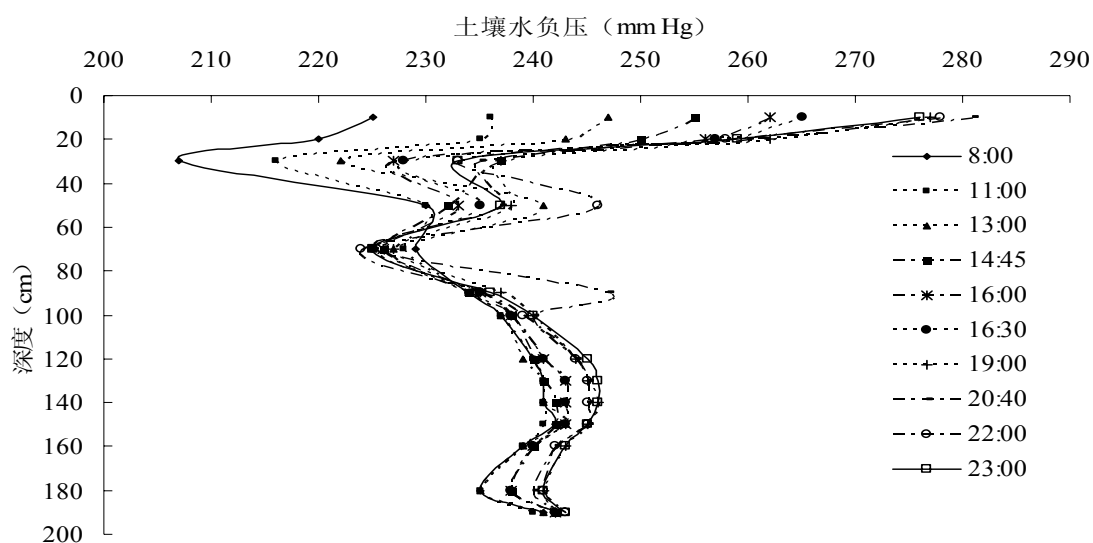


图 1-4 发生土壤水势变化的深度

Fig.1-4 Depth with diurnal change of soil water potential

第三节 研究思路及内容

一、研究目标

本研究的目标有两个。(1) 从协调农业和环境可持续发展出发，针对华北平原东部中、高产区（以中科院禹城综合试验站为基地）的典型农作制和土壤特点，以冬小麦—夏玉米为研究对象，通过小区系列试验对不同水、肥耦合实验条件下产量和氮素淋失量的观测，并对当地高产田化肥氮对地下水的影响作出科学评估。(2) 通过系统的田间（土壤、植物、气象、农业管理措施）综合观测，提出适宜的水肥管理措施。

二、研究内容

1. 施肥量与作物产量的响应关系。
2. 施肥量与氮素动态的响应关系。
3. 定额与补偿灌溉制度对冬小麦和夏玉米产量及水分渗漏的影响。

三、研究思路

以中科院禹城综合试验站为基地，在冬小麦—夏玉米轮作周期内，进行灌水—施氮田间小区试验。测定不同水、N 处理条件下产量和氮素淋失。建立水/N 用量—作物产量函数（产量曲线），水/N 用量—N 淋失量（淋失量曲线）。根据两个曲线“消长”关系确定最佳水—N“用量点”。

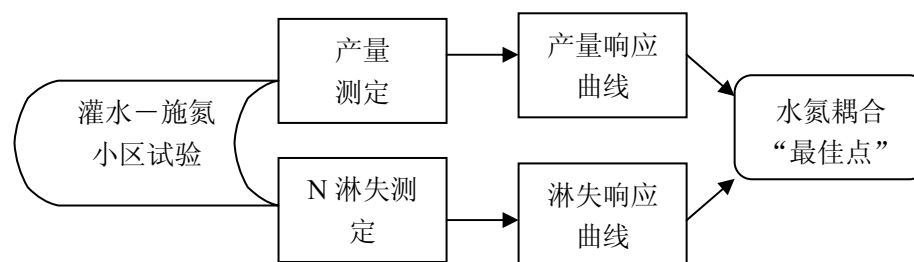


图 1-5 研究思路

Fig. 1-5 Flow chart demonstrating the major components of the study

第二章 试验设计和数据采集

第一节 试验地点概况

试验地设在中科院禹城综合试验站，该站位于山东省禹城市郊（北纬 $36^{\circ}50'$ ，东经 $116^{\circ}34'$ ），海拔高度为20 m，坡降为1/5 000~1/7 000，是鲁西北平原的中心地带。鲁西北平原是黄河下游典型的冲积型平原，历史上属于黄泛区，包括聊城、德州、惠民、东营、济南等地市的29个县（市），总面积2.97万 km^2 ，耕地2463万亩。

近年来，该地区盲目追求产量而忽视环境影响，致使大水漫灌和过量氮肥施用现象相当普遍。这些不良措施不但浪费人力物力，而且造成环境污染。其中过量使用氮肥造成硝态氮对地下水的污染尤其值得关注，因为这里土质疏松，地下水位较高（250~400 cm），升降频繁，极易造成硝态氮的淋失。该地区的水文、气候和地形等特点决定了当地居民的灌溉、饮用水源绝大部分是地下水，尤其是居住在农村的人口，饮用水几乎完全依赖地下水，地下水中硝态氮对人体的危害更加直接，硝态氮淋失成为一个紧迫的环境问题。

一、农业气候条件

该地区属于典型的暖温带大陆性季风气候，四季分明，雨量集中，气候温和，雨热同期。年平均气温12~14 $^{\circ}\text{C}$ ，7月份最高，月平均气温25~27 $^{\circ}\text{C}$ ，极端高温43.4 $^{\circ}\text{C}$ 。一月份最低，平均气温在-0.8~-4.1 $^{\circ}\text{C}$ ，极端低温-25.0 $^{\circ}\text{C}$ 。全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温4000~4800 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，无霜期180~230天。本区光热资源丰富，年总辐射量506.6 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，全年日照时数2640 h。年均降雨量600 mm，降水集中在6~9月份。春季少雨，容易发生春旱，对春小麦生长不利。灌溉水源主要依靠黄河水、和部分地下水。

二、土壤状况

禹城地区地势开阔平坦、土地平整、土层深厚、土质疏松。1979~1983年的禹城市土壤调查表明，本区97%的土壤属潮土。实验点0~65 cm均为轻壤土，65~97cm为砂壤土，97~104 cm为中壤土，并夹带较多粘粒（表2-1）。作为黄河沉积物发育成的潮土，粉粒（0.1~0.001 mm）轻矿物主要是石英、长石和碳酸盐，重矿物以云母和角闪石为主，云母含量占重矿物的一半以上，其次是磷灰石和帘石。潮土的粘土矿物以水云母为主，其次是蒙托石、高岭石，还有少量的绿泥石和蛭石。

表 2-1 试验土壤理化性质
Tab. 2-1 Physical and chemical properties of experimental soil

土层 (cm)	质地	粒径分级 (%)			有机质 (%)	全氮 (%)	pH	有效磷 mg kg ⁻¹	有效钾 mg kg ⁻¹	容重 g cm ⁻³
		2-0.05 (mm)	0.05-0.002 (mm)	< 0.002 (mm)						
0-20	砂壤土	12.85	65.1	22.05	0.86	0.052	8.26	27.5	158.33	1.27
20-65	砂壤土	11.31	67.01	21.69	0.45	0.030	8.14	20.1	85.1	1.36
65-97	砂壤土	28.3	58.02	13.68	0.37	0.024	7.87	15.8	48.3	1.40
97-104	粉砂壤土	6.3	74.01	19.69	0.23	0.019	7.36	16.2	40.7	1.37

三、地下水资源

禹城试验站的地下水资源比较丰富。地下水的补给来源为大气降水，引黄河、徒骇河（1868年8月，捻军著名将领张宗禹投徒骇河而死）灌溉用水，以及抽取地下水灌溉后回归到达地下的补给水。随着农业和工业用水的剧增，加之地表水和地下水的不合理使用和管理，水资源开始紧张，地下水开采逐年增加，地下水水质对工、农业生产，尤其对居民生活的影响越来越大。

四、耕作、栽培与施肥现状

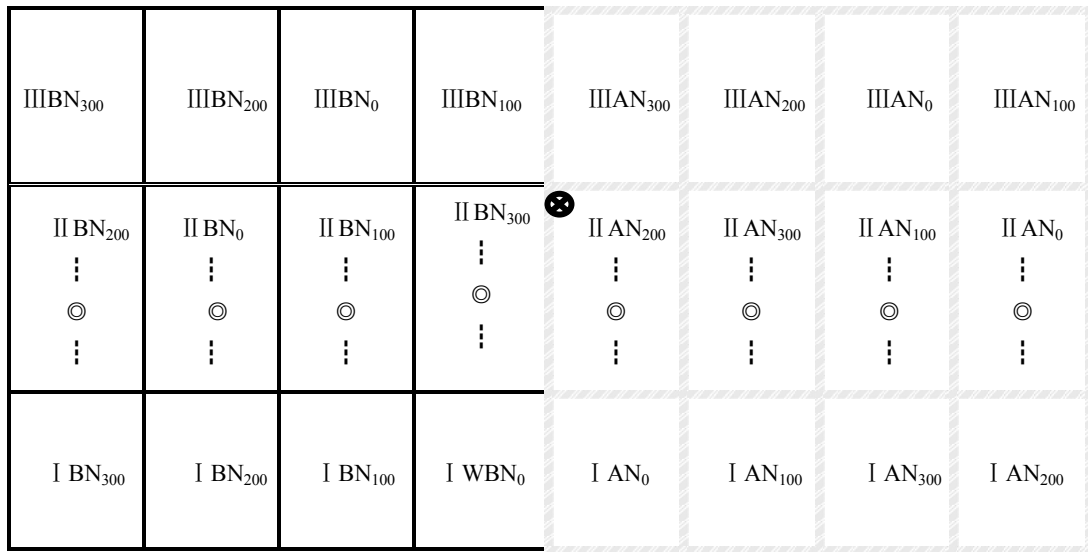
禹城站所在地区属于鲁西北据有代表性的农业中、高产区，主要种植制度为一年两熟的冬小麦—夏玉米轮作制。冬小麦为冬性中、晚熟类型，冬季最冷月平均气温在-8℃以上，冬小麦可以安全过冬；十月初播种，播种前翻耕整地，施足基肥，翌年三月浇水追肥；春季升温很快，冬小麦返青早，4月上旬稳定通过10℃，四月底之五月初浇孕穗-开花水，六月上旬收割。夏玉米在冬小麦收割前套种或收后播种，在玉米拔节及大喇叭口期追肥，9月下旬或10月初收获。由于冬小麦和夏玉米均为高水肥作物，加之当前对产量要求提高，因此该地区肥料施用量，尤其氮肥施用量普遍很高，一般氮肥可以达到每年400~600 kg N/ha。

第二节 试验设计

考虑目前国内国际硝态氮淋溶研究的现状和发展趋势，结合该地区现有作物栽培制度及施肥管理措施中存在的主要问题，本研究主要考察水分、氮肥两因素对作物产量和硝态氮淋失的影响。氮肥处理以作物生长季为单位，下文中所述施肥量皆为单季作物施肥量。全年施肥量应为冬小麦与夏玉米两个生长季内施肥量之和。

试验小区设计面积50m²(12.5m*4m)。小区间设40cm隔离带。隔离带两侧垂直埋设100cm聚氯乙烯隔离板。试验为水、氮双因素裂区设计(图2-1, 图2-2), 共24个小区(2水分*4氮素*3重复)。水分处理为主处理, 分高水(A)、低水

(B) 两个水平。A 定义为在整个生长季, 0~50 厘米土层平均含水量为土壤田间持水量 (FC) 的 85%, 补偿控制幅度为 70%~100%FC。B 则为平均 70%FC, 控制幅度为 55%~85%FC。土体水分控制方式为补偿式灌溉法, 具体操作方法是: 根据中子水分测定仪跟踪 0~50 cm 土壤实际含水量, 观测频度为 5 天一次。就 A 而言, 当 0~50 cm 土壤平均含水量低于 70%FC 时, 则反馈回灌使之达到 100%FC。同理, B 的操作方法为: 一旦发现 0~50cm 土壤含水量下降为 55%FC, 便回灌使之恢复至 85%FC。氮素处理为副处理, 在每个水分处理下设 4 个氮素水平: 0、100、200、和 300 kg N /ha, 分别简称 N₀、N₁₀₀、N₂₀₀、N₃₀₀。



图例: ⊙ 中子管, ∷ 土壤溶液提取器, ⊗ 地下水观测井, I AN₁₀₀ 表示高水 100 kg N /ha 第一重复, II BN₁₀₀ 表示低水 100 kg N /ha 第二重复, 其他代号类似。

图 2-1 裂区设计示意图

Fig.2-1 The layout of experimental sites

作物生长过程中有一个时期, 作物需要的养分, 无论是吸收速度还是绝对数量都是最大的, 此时肥料的作用最明显, 增产效率也最高, 这一时期叫做作物营养最大效率期。作物营养最大效率期往往在作物生长中期。此时作物生长旺盛, 吸收养分能力最强, 生长最迅速。不同的养分对于同一种作物, 或同一种养分对于不同的作物, 最大效率期是不一致的。就氮素而言, 冬小麦在拔节到抽穗, 夏玉米在大喇叭口期。

冬小麦播种前施用 50% 的氮肥作为基肥, 抽穗期追施另外 50% 的氮肥。另外, 冬小麦播种前施 P、K 肥作基肥, 用量分别为过磷酸钙 ($P_2O_5 > 18\%$) 1500 kg hm^{-2} , 硫酸钾 ($K_2O > 52\%$) 450 kg hm^{-2} 。考虑到玉米营养特性及氮素淋失特点, 氮肥也分两次等量追施, 时间分别为玉米拔节期 (约 7 月 6 日) 和抽雄期 (约 8 月 2 日)。所用氮肥品种为尿素 ($N > 46.2\%$)。



图 2-2 水、氮耦合试验区全貌

Fig.2-2 The picture of the experimental site

第三节 田间管理

试验小区的田间管理基本依据当地气候变化和耕作习惯进行。

1. 土地翻耕

每年只对土地翻耕一次，在玉米收割后进行，同时追施底肥。玉米播种前不翻耕，直接在前茬冬小麦收割后播种，如果土壤过于干旱则适当灌水。

2. 施肥管理

在冬小麦播种前施用总氮肥的 50% 作为底肥，在抽穗期再施用另外的 50% 作为追肥，此次施肥应当随着灌水同时进行，否则很难施肥。夏玉米则是在拔节期和抽雄期分别施用总氮肥的 50%，根据具体情况可以铧种或随着灌水施用。

3. 灌溉管理

土壤灌溉管理的依据是中子仪观测到的水分数据。利用中子仪通过埋设在第二重复小区中央的中子管，每 10cm 测定一个值，观测到 150cm 深处。每次观测完成后，及时求出 0~50cm 土壤中的平均含水量 I ，如果低于试验设定的灌水区间的最低值：低水为 0~50cm 平均含水量 55%FC(田间持水量 $FC=0.32v/v$)，高水为 0~50cm 平均含水量 70%FC，则按下式计算所需补偿的灌溉量：

$$0\sim 50\text{cm 土壤平均含水量 } W = 0.5(W_{0\sim 10} + W_{10\sim 20} + W_{20\sim 30} + W_{30\sim 40} + W_{40\sim 50}) \\ (v/v)$$

$$\text{补偿灌水深度} \quad D = 0.5 (FC - W) \quad (\text{m})$$

$$\text{灌水量} \quad I = 50D \quad (\text{m}^3)$$

根据计算结果，通过安装有流量计的水泵，依次对各个小区进行补偿灌溉。

第四节 数据采集

试验主要采用生物取样、土壤溶液提取器和土壤取样相结合的方法。定期对作物进行生物取样，测定生长指标，分析养分含量；用土壤溶液提取器原位抽取土壤溶液，检测土壤溶液硝态氮浓度的变化；土钻取土样，然后以氯化钾溶液提取硝态氮，检测土壤中硝态氮总量的变化；同时应用中子仪检测土壤水分含量的变化。

1. 土壤溶液提取

土壤溶液提取器的工作原理：土壤溶液提取器由陶土头（多孔杯）、取样管、抽气管等组成，与之配套使用的取样设备是地上取样瓶（通常可以用 250 ml 的医用生理盐水瓶）、脚踏式真空泵（要保证可以使取样瓶内产生 0.9 左右的负压）、医用止血钳、橡胶塞、橡胶管、密封铝合金头等部件。陶土头是取样器的最重要部件，由陶土材料烧制而成，整个部件具有无数微细的空隙（<6 μm ）。在湿润后，水分将陶土头的空隙封死，水分毛细作用会产生巨大的吸附力，空气很难通过，但是如果放置在水中以后，陶土头内的水分又会将起到连通的作用，水分和溶质可以进入陶土头内部，因此具有了透气不透水的特性。一般情况下，由于土壤具有相当大吸附力，土壤溶液不会自动通过空隙进入陶土头内部。如果在陶土头内部造成一定的负压，并且负压大于土壤吸附力，土壤溶液就会通过陶土头外壁进入取样器内部，内部空间水分充满后，如果负压足够大，水分会进一步克服重力沿着取水管进入地上取样瓶。然而取样用真空泵所能产生的负压有一个极限，就是一个当地大气压，一般情况下真空泵只能产生 0.9 个大气压。土壤在十分干旱时，吸附力非常大，有时远远大于一个大气压，此时就不能用此法取到土壤溶液。一般在准备取样前一天，用真空泵将取样瓶内的负压抽到 0.8 Mp，第二天瓶内会有数量不等的土壤溶液，将取样瓶内的土壤溶液倒进准备好的塑料瓶内，密封，做好标签，然后在实验室进行化验分析。如果不能及时分析，要将样品放置在冷柜内，低温保存，化验分析时提前取出，在阴凉处解冻，然后过滤，取 5 ml 滤液在紫外分光光度计下分析。

2. 土壤含水量

土壤含水量测定采用土钻取样与中子仪相结合的方法。

土壤样品水分用吕盒烘干法测定：

$$\text{土壤含水量} = \frac{(\text{吕盒和鲜土重}) - (\text{吕盒和干土重})}{(\text{吕盒和干土重}) - \text{吕盒重}} \times 100\%$$

分析采用传统的土钻法：每个试验小区内三点分层取样，每层土样混匀后，用四分法将适量土样装入完好的塑料取样袋内，密封，做好标签，回到实验室及时进行分析。

中子仪的基本原理是，中子源把能量很高的快中子放射出来，与土壤中的原子核相互作用，或被吸收或发生弹性碰撞后损失能量变为慢中子。由于土壤中碰撞快中子的面积比吸收和俘获它的面积大得多，所以在散射源周围会形成一片中子云，利用检测仪器可以测定其密度。对于土壤来说，氢原子对快中子的慢化能力比其他元素都大，可以说氢原子统治了土壤对快中子的慢化作用。氢原子的绝大部分又是以水的形式存在的，土壤含水量越大，单位土体中含有的氢核越多，慢化中子的几率越高，热中子云的密度越大。所以若利用监测器测出中子云的密度，就可以通过率定曲线求得土壤水分的含量。该仪器的主要构造是深度控制器、监测器、液晶显示器等三部分，合装在一个聚氯乙烯制成的防护性被筒里。探测器内装有一个由镅—铍构成的中子源，一个由三氟化硼构成的慢中子云检测器，一个由印刷电路板构成的整流放大器，并和读书显示器相连。工作时将被筒放在预先埋设好的吕质测管上，开启自备电源，由深度控制器将探测器送入测点位置，再拨动计数开关就可以自动观测了。为了保证中子仪测定数据的可比性和可靠性，每半年左右要对其进行一次校正。

3. 硝态氮取样分析

夏玉米土壤硝态氮的取样每三十天左右进行一次，冬小麦在返青后每三十天左右进行一次。土壤取样采用土钻法。用吕盒烘干法测定土壤水分，测定土壤水分后剩余土壤密封后继续在冷柜内保存。测定出土壤含水量后，计算出每 10 g 干土对应的各个土壤样品重量，根据计算结果准确从剩余土壤样品中称取土样。然后用 2 M 氯化钾提取溶液提取土壤硝态氮^[133]，在紫外分光光度计下测定吸光度，根据标准曲线计算出土壤硝态氮含量。取样后应尽快分析，防止氧化作用使样品性状变异过大。

4. 作物产量

作物成熟后，将各小区内作物（小麦或玉米）分别收割，做好标签，在收割晾晒的专用场地风干后称量秸秆全重，然后脱粒、称籽粒重量、计算经济产量。由于施肥不均、灌水不均、土壤变异等原因，有的小区局部区域生长状况与其他部分差异很大。为了排除这些意外因素导致的过大差异，取样时应该取小区内具有代表性的部分，计算产量时根据具体收割面积折算小区单产。

5. 气象数据

气温、风速、太阳辐射、水面蒸发、大气湿度、降水等数据通过实验站气象场观测得到。利用禹城实验站的大型承重蒸渗仪，对水分蒸散进行逐日观测，测

量精度为 0.02 mm，每天 8:00 和 20:00 观测。该仪器距离试验小区大约 200 m，直径 200 cm，深度 3.5 m，种植的作物（小麦和玉米）和农事管理与当地大田作物基本一致。施肥水平大致和试验小区内的 N200 处理相近，灌水水平介于高水（70%FC）和低水（85%FC）处理之间。

6. 地下水位观测

在试验小区的高水处理和低水处理交界处埋设地下水位观测井（图 2-3），深度为 5 m，采用自制的简易观测设备进行观测：将一个外径小于观测井内径，长度约为 7 cm 左右的中空铁管一端用木塞塞紧，木塞中心钉一枚铁钉，钉子头部外露约 1 cm，然后用柔软结实的细线系牢外露部分。观测时，将小铁管沿着观测井缓缓放下，直到听到铁管与水面接触的回音，将铁管缓缓提出，计算井口到铁管上面水线的距离，减去井口距地面的距离，得到地下水位。

7. 土壤水势观测

土壤水势观测所用仪器为水传感式水银负压计（图），观测时间为每日上午 8:00，观测前一天下午 17:00 排气，检查管线的密封性，有问题及时修复，然后注入蒸馏水。

负压计埋设在水氮/耦合试验场 IIW_AN₃₀₀。由水银柱高度值计算出柱高度的公式：

$$H(\text{厘米}) = 12.6 \times 0.1 (h_1 + h_0) - (h - h_0 + h_2)$$

由水柱高度(cm)换算成压力(千帕):

$$P(\text{千帕}) = [12.6 (h_1 + h_0) - (h - h_0 + h_2)] / 10.2$$

由于水银槽内的水银面的变化很小，通常可以忽略不计。所以观测和计算时假设 h_0 为一固定值。

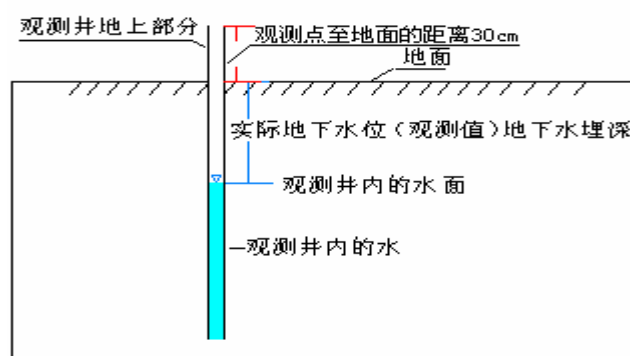


图 2-3 地下水位观测井

Fig 2-3 The drill-log for land water level

8. 土壤容重

采用环刀法测定土壤容重，根据对土壤剖面的观察，分别在 0~20 cm，20~40 cm，40~65cm，65~80 cm，80~97 cm，97~104 cm 分层取样，在 105 摄氏度烘干

至恒重后，称重。

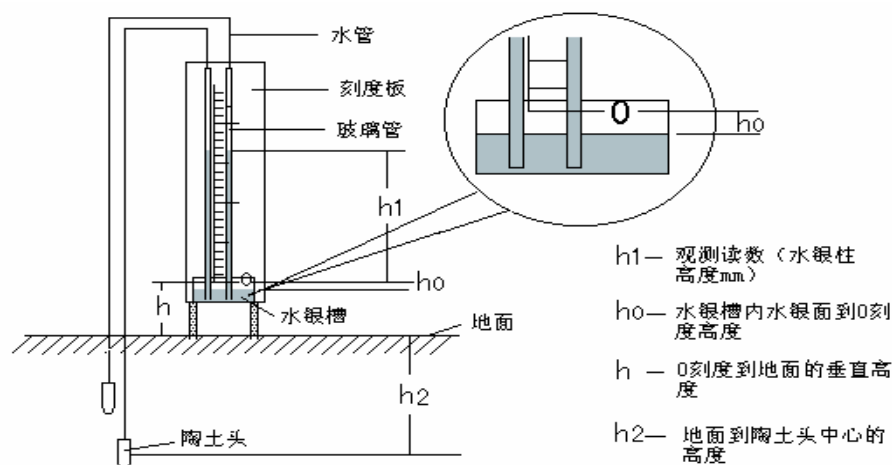


图 2-4 土壤水负压计

Fig.2-4 Soil water potentiometer

9. 土壤机械组成

在测定土壤容重的同时，对同一土壤样品，采用比重计法测定土壤机械组成。

10. 田间作物数据

(1) 观测作物到达不同生育期的日期，要根据经验值，在作物即将达到某一生育期的时间段内，要每天到试验田进行观察。

(2) 利用根钻获取不同深度的作物根系数据，记录根系生长到不同深度的日期，根系在土壤剖面上的分布。根钻取样后及时漂洗，挑根，然后在用仪器测量根长，烘干后称根重。

(3) 不同时期作物株高通过田间随即取样测量获得，每个小区要观测 20~30 株植物。

(4) 叶面积利用叶面积测定仪在取样后立即测量，求出叶面积指数。

(5) 茎秆鲜重和干重、叶片的鲜重和干重、枯黄叶片的干重。

(6) 考种取样，取 25 株，实际用 20 株，多的 5 株作为出现意外时的补充。

11. 植物氮素

植物收获后，烘干粉碎，用硫酸—双氧水消煮法测定全 N。

12. 农事管理记录

根据试验进展和作物生长，跟踪记录所有农事管理：土地翻耕整平、播种、施肥、灌溉、除草、耕作、收割等。试验站有专职的试验观测人员，经过培训和不断的实践，已经具有了熟练的观测和一般田间试验的布置实施能力，本实验的部分观测任务就是由他们或者在他们的协助下完成的。

第三章 水、氮措施对作物生长的影响

第一节 水、氮措施对冬小麦生长的影响

一、冬小麦耕作管理

1. 施用底肥

为操作方便，所有肥料在翻耕前均匀撒施于地表，接着进行翻耕，将肥料埋入土壤深层。在确保马上可以翻耕的情况下地表撒氮肥，如果不能确定马上翻耕，不可提前撒施氮肥。

所施用氮肥为当地普遍采用的品种一尿素（N>46.2%），施用量如下：N300处理小区，1428g/小区，相当于 285.6 kg/ha；N200 处理小区，952g/小区，相当于 190.425 kg/ha；N100 处理小区，476g/小区，相当于 95.175 kg/ha。另外，为保证最高氮肥施用小区的磷、钾供应，同时保证本底值的一致性，所有小区都施用相同数量的磷肥和钾肥。磷肥为过磷酸钙（ $P_2O_5 > 18\%$ ），15 市斤/小区，相当于 1500 kg/ha。钾肥为硫酸钾（ K_2SO_4 ， $K_2O > 52\%$ ），2250g/小区，相当于 450 kg/ha。

2. 翻耕土地

用手扶小型旋耕犁翻耕，为保证深度，应视情况翻 2-3 遍，边角地带用铁锹翻耕，注意保护小区边缘的聚氯乙烯隔离板、中央的中子管、土壤溶液提取管。人工整平土地。

冬小麦品种为兰考 906，播种兰考 906，播种量为 990g/小区，折合 13.2 kg/亩。按南北走向播种，每 25 cm 一行，每小区播 16 行，两侧留 12.5 cm 的空余地带。

3. 追肥

为操作方便，同时考虑冬小麦生长过程中最佳的追肥施用时间之一是抽穗期，在抽穗期施用另外 50%的氮肥作为追肥。一般此次施肥应随灌水同时进行。

表 3-1 2000~2003 冬小麦生育期

Tab. 3-1 Development stages of winter wheat (year-month-day)

年份	播种	出苗	分蘖	停长	返青	拔节	孕穗	抽穗	开花	灌浆	乳熟	收获
第一季	00-10-20	00-10-31	00-11-23	00-12-1	01-3-1	01-4-2	01-4-15	01-4-29	01-5-3	01-5-9	01-5-24	01-6-5
第二季	01-10-7	01-10-15	01-10-30	01-11-28	02-3-4	02-3-30	02-4-14	02-4-19	02-4-28	02-5-8	02-5-15	02-6-4
第三季	02-10-10	02-10-17	02-11-8	02-12-1	03-3-3	03-4-4	03-4-15	03-4-23	03-4-30	03-5-9	03-5-25	03-6-5

表 3-2 水-氮耦合试验地水肥管理
Table 3-2 the management of the experimental site

试验季	生育期	施 肥 日 期	单季 用量	灌 水 日期: A 区/B 区	备 注
第一季	玉米拔节期	2000.07.22	50%		2000.06.12 玉米播种
	玉米抽雄期	2000.08.18	50%		2000.08.19 打药 2000.09.24 收玉米
第二季	冬小麦播前	2000.10.7	50%		2000.10.20 播种小麦
	冬小麦拔节			4.08: 75/52	
	冬小麦抽穗	2001.05.13	50%	4.27: 62/65	2001.06.05 小麦收获
				5.13: 50/46.5 5.20: 59.8/54	
					2001.06.12 播种玉米
第三季	玉米拔节期	2001.07.19	50%	7.19:48.1/34.7	2001.7.17 喷药
		2001.08.10	50%	8.26: 75/69	2001.09.25 收玉米
第四季	冬小麦播前	2001.10.3	50%	无	2001.10.05 播种冬小麦
				11.23: 52.0/48	
				3.4: 63.0/57.0 3.28: 42/46.5	
		2002.4.5	50%	4.17: 64.5/60	2002.6.4 收获冬小麦
		5.9: 57.5/55.5			
第五季	玉米拔节期	2002.7.11	50%	6.7: 65.5/68.5	2002.6.8 播种玉米
	玉米抽雄期	2002.8.4	50%	7.11: 65.5/63 8.4: 63.4/49.0 9.2: 69.0/60.	2002.10.6 收获玉米
第六季	冬小麦播前	2002.10.9	40%	4.7: 66.5/49.5	2002.10.11 播种冬小麦
	冬小麦起身	2003.3.28	40%	5.9: 45.5/37.0	
	冬小麦开花	2003.5.9	20%	5.25: 55.5/40.	2003.6.7 收获冬小麦

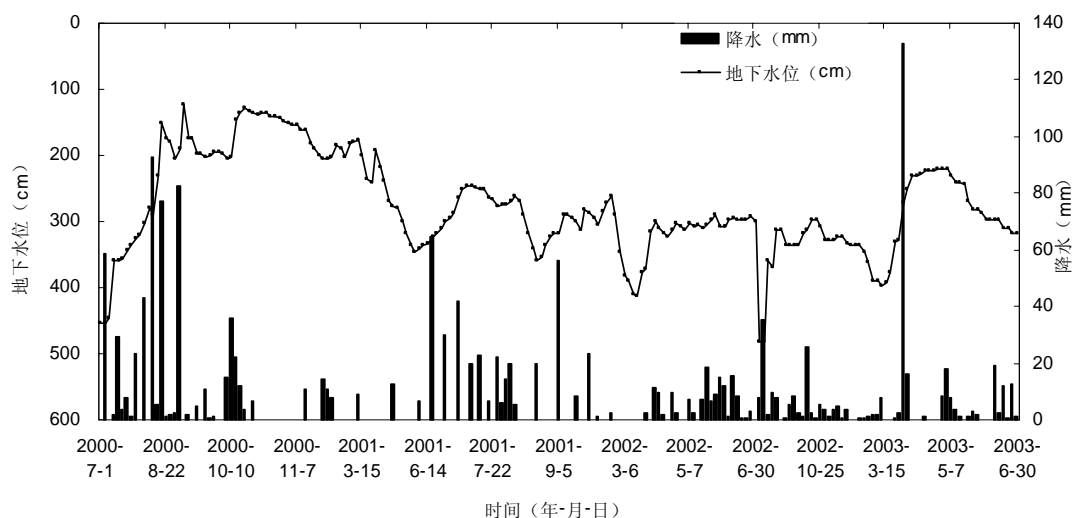


图 3-1 降水和地下水位变化

Fig.3-1 Precipitation and variation of groundwater table during the study period

二、水、氮管理措施对冬小麦总生物量的影响

1. 双因素统计分析结果

用 SPSS (11.0) 统计分析工具所做双因素统计分析表明, 2000、2002 年两季冬小麦所获得的总生物量数据, 从统计学角度来看, 可反映试验条件下的整体情况(表 3-3), 数据所反映出的基本规律具有统计学意义。总体上可见以下几点:

(1) 第一年高水和低水处理间冬小麦总生物量差异不显著, 第三年差异变得显著。(2) 氮素对总生物量的影响显著, 这说明氮肥对作物生长至关重要的作用, 是制约作物生长的关键因素。(3) 水分、氮肥的交互作用始终不显著, 二者间没有明显的相互促进或抑制作用。

不同施肥水平之间差异的显著性具有以下特点:(1) 2000 年冬小麦总生物量, N0 与 N100 间差异的 Sig.=0.013, 小于 0.05, 达到显著水平; N0 与 N200、N300 间差异的 Sig.分别等于 0.002 和 0.000, 都小于 0.01, 达到极显著水平; N100 与 N300 间差异的 Sig.=0.022, 达到了显著水平; 而 N100 与 N200、N200 与 N300 相互间差异的 Sig.都大于 0.05, 差异不显著。(2) 2003 年, N100 与 N200 间差异的 Sig.=0.000, 达到显著水平, 同时 N100 与 N300 之间差异的 Sig.=0.000, 也达到极显著水平, 而 N200 与 N300 之间的差异仍然不显著。以上显著性变化的动态规律很好地说明了, 随着设计施肥、灌溉管理的进行, 不同施肥处理间土壤肥力差异不断增加, 施肥对增加总生物量的作用逐渐显现出来。但是 N200 与 N300 处理间总生物量的显著差异始终没有观察到, 说明在试验条件下, 由于边际效应递减规律的作用, 对于 N200 处理而言, N300 处理所增加的施肥量已经对增产作用不大, 因而 N300 不是经济合理的施肥量。

表 3-3 冬小麦生物量双因素方差分析

因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000-01 年	水分	0.069	N100	0.013	
	氮肥	0.001	N200	0.002	0.410
	水氮交互作用	0.080	N300	0.000	0.022
2002-03 年	水分	0.033	N100	0.000	
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.000
	水氮交互作用	0.321	N300	0.000	0.000

2. 二次回归分析结果

总生物量对施肥量的响应关系(图 3-2)说明, 在不施肥的情况下, 高水处理与低水处理的总生物量都是最小的。这充分证明了德国农业化学家李比希在

1843 年提出的著名植物营养学经典理论---最小养分率：作物的生长和产量受到最缺乏因子的共给水平限制，产量常因该因子供给水平的增减而出现浮动。就试验条件下的冬小麦而言，该限制因子是氮素。土壤氮素供应主要依靠上季耕作中施肥的过剩部分、土壤有机质中氮素的硝化部分、土壤粘粒对铵态氮的释放以及极少一部分大气中的氮素随降水进入农田。这些来源一方面数量有限，方面释放供应很慢；另一方面，冬小麦播种后迅速很快进入漫长的越冬期，在越冬期间虽然冬小麦地上部分已经基本停止了生长，但是其的根生长始终保持在一个比较高而且稳定的水平上，因此对养分供应强度要求并没有减少太多，于是 N0 处理下养分出现供求关系失衡，供不应求，作物生长受到严重抑制。因此不论是在高水处理系列还是低水处理系列中，此时的生物量都最低。随着施肥量的增加，氮素匮乏度降低，作物营养状况得到改善，总生物量开始增加。

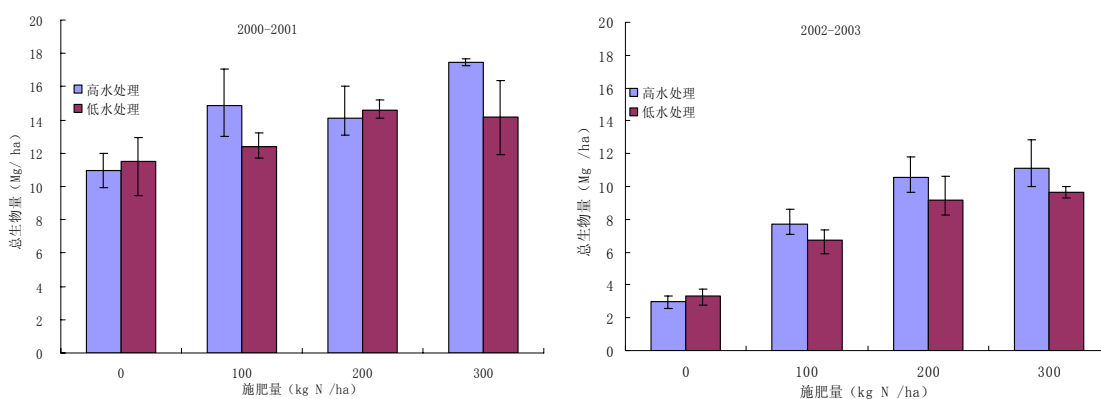


图 3-2 施肥与冬小麦生物量

Fig.3-2 Fertilizer and winter wheat biomass

2000 与 2002 年 N0 处理总生物量间的差异巨大，平均达到 9 Mg/ha，主要还是受到试验布置前长期较高施肥量管理措施的影响，土壤氮素含量比较高，因而第一年整个试验地的肥力比较一致而且都比较高，使 N0 处理的总生物量很高，与其他施肥处理间相差比较小。2002 年所有处理都出现了明显的总生物量降低，这一变化大概是由于土壤肥力变化和气候年际变化，尤其是气候年际变化的影响。

两种水分处理条件下，总生物量与氮肥施用量之间的关系年际变化比较明显（表 3-4）。首先，不论高水处理还是低水处理，第一年总生物量数据的二次回归分析显著性都不好，很显然是受到了土壤肥力本底值和土壤变异性的影响。这与前面双因素统计分析的结果一致。在随后两年中，由于土壤肥力差异显著增加，其变化规律开始与对应施肥处理变化规律趋于一致，二次回归方程显著性提高，都达到了显著水平。

2002-2003 总生物量回归分析结果比较有代表性，高水处理和低水处理回

归方程都基本达到了显著水平。高水处理在施肥量达到292.5 kg N /ha 时，总生物量达到最高值11.51 Mg /ha；低水处理在施肥量达到312.14 kg N /ha 时，总生物量达到最高值10.08 Mg/ha。总生物量的最大值高水处理比低水处理高出1.43 Mg/ha，约高出了14.14%，这是由于水分处理差异造成的；而对应的施肥量却减少了19.64 kg N/ha，约为6.29%，这种减少很有可能是由于水分差异引起，也可能是取样误差造成的。高水处理的肥效为39.35 kg/kg N，高于低水处理肥效32.31 kg/kg N，虽然统计分析没有对水、氮的交互作用的显著性提供有力的数据支持，这似乎可以通过水分促进了作物对氮肥的利用来解释：在高水处理条件下，水分状况良好，作物对土壤中氮素的吸收利用率比较高，因此肥效较高。当然这只是推测，这种交互作用还需要进一步的试验观测数据进行验证。

表 3-4 总生物量回归分析

Tab. 3-4 Quadratic curve fit analysis of biomass

		显著性	b0	b1	b2	Xmax	增幅 (%)	Ymax	增幅 (%)	肥效
00—01 年	高水	0.424	11.40	0.02	-1.00E-05	1130.00	235.64	24.17	64.06	21.39
	低水	0.355	11.33	0.02	-3.00E-05	336.67		14.73		43.75
02—03 年	高水	0.010	2.96	0.06	-1.00E-04	292.50	-6.29	11.51	14.14	39.35
	低水	0.041	3.26	0.04	-7.00E-05	312.14		10.08		32.31

Ymax:最大总生物量 (Mg /ha), Xmax:对应的施肥量 (kg N /ha), 增幅=100*(Xa_max- Xb_max)/Xb_max, 肥效=Ymax/Xmax (kg/kg N)。

三、水、氮管理措施对冬小麦经济产量的影响

1. 双因素统计分析结果

2000、2001、2002 年三季冬小麦所获得的产量数据，从双因素统计分析的结果来看，可以反映试验条件下的整体情况（图 3-3，表 3-5）。冬小麦的经济产量也呈现出比较明显的变化规律：（1）在试验进行的头两年中，高水和低水处理间冬小麦经济产量差异始终不显著，这与总生物量的情况相同；而到了的第三年差异仍然不显著，这就与总生物量不同了。（2）第一年中氮素对经济产量的影响达到了显著水平，到了第二、三年，则都达到了极显著水平。说明施用氮肥对获得经济产量具有至关重要的作用。（3）水分、氮肥的交互作用始终不显著，二者在增加经济产量方面没有明显的相互促进或抑制作用，这与总生物量类似。

另外，不同施肥水平之间差异的显著性具有以下特点：（1）2000 年冬小麦经济产量数据表明，N0 与 N100、N200、N300 间差异的 Sig.都小于 0.01，达到极显著水平；N100、N200、N300 相互间差异的 Sig.都等于大于 0.05，没有达到显著水平。（2）2001-2002 年冬小麦，N100 与 N200、N300 间差异的 Sig.都小于 0.01，达到了极显著水平；而 N200 与 N300 相互间差异的 Sig.大于 0.05，差异不

显著。(3) 2002-2003 年, N200 与 N300 相互间差异的 Sig.大于 0.05, 差异依然不显著。与总生物量类似, 以上经济产量差异显著性的年际变化规律很好地说明了, 随着设计施肥、灌溉管理的进行, 不同施肥处理间土壤肥力差异不断增加, 施肥对增加经济产量的作用逐渐显现出来。但是 N200 与 N300 处理间的显著差异始终没有观察到, 说明在试验条件下, 对于 N200 处理而言, N300 处理所增加的施肥量已经对增产作用不大, 因而 N300 不是经济合理的施肥量。

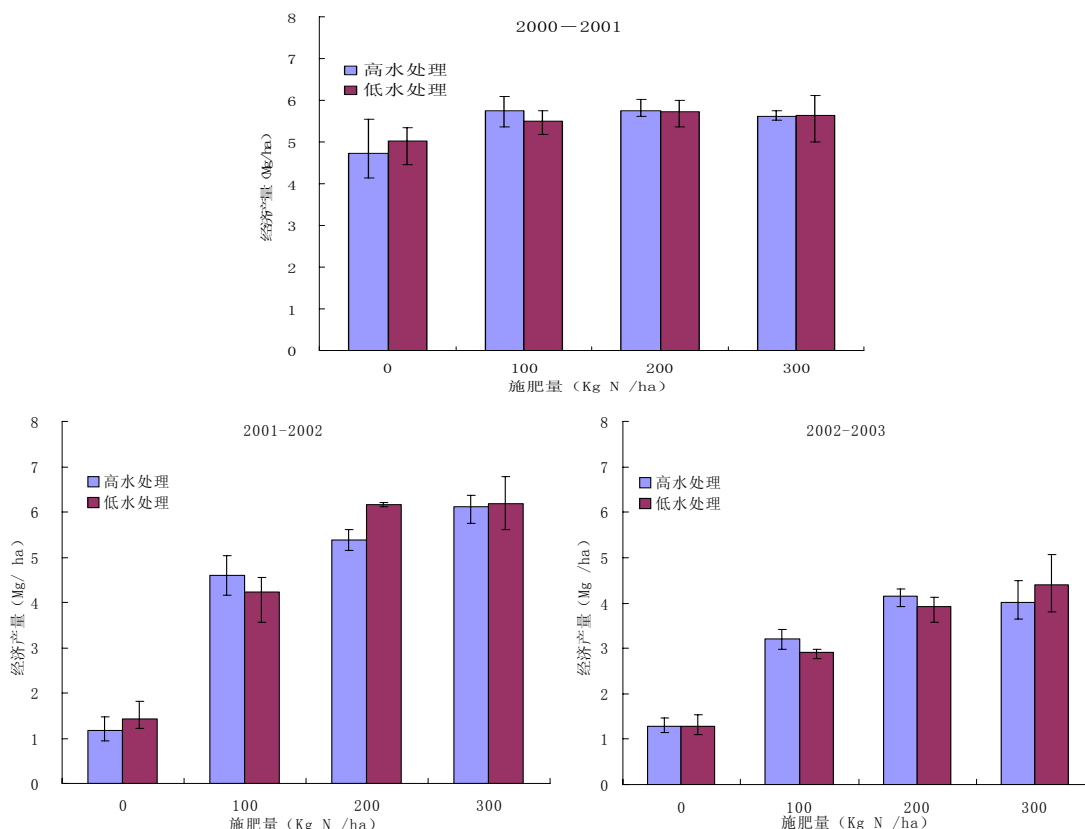


图 3-3 施肥量与经济产量

Fig.3-3 Fertilizer and yield

表 3-5 产量的双因素方差分析

因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
00-01 年	水分	0.815	N100	0.007	
	氮肥	0.012	N200	0.003	0.742
	水、氮交互作用	0.691	N300	0.009	0.895
01-02 年	水分	0.327	N100	0.000	
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.000
	水、氮交互作用	0.121	N300	0.000	0.000
02-03 年	水分	0.844	N100	0.000	
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.000
	水、氮交互作用	0.288	N300	0.000	0.000	0.386

2. 二次回归分析结果

经济产量对施肥量的响应关系（表 3-6）说明，在不施肥情况下，高水处理与低水处理的经济产量都是最小。原因与总生物量类似，也是因为土壤氮素供应不足。2000 与 2002 年 N0 处理经济产量间差异非常大，平均达到 3.6 Mg/ha。主要还是因为受到试验布置前长期较高施肥量管理措施的影响，土壤氮素含量本底值比较高，从而使 N0 处理的总生物量很高，与其他施肥处理间相差比较小。随着施肥灌溉管理的进行，不同处理间土壤水分养分供应状况开始出现较明显差异，所以一年以后，不同氮肥处理间差异的显著性增强。2002 年所有处理都出现了明显的经济产量降低，原因大概气候年际变化和土壤因素。

表 3-6 经济产量回归分析

Tab. 3-6 Quadratic curve fit analysis of biomass

	显著性	b0	b1	b2	Xmax	增幅 (%)	Ymax	增幅 (%)	肥效	
00—01 年	高水	0.229	4.0764	0.012	-3.00E-05	191.67	-39.15	5.18	-13.99	27.02
	低水	0.073	5.0285	0.006	-1.00E-05	315.00		6.02		19.11
01—02 年	高水	0.149	1.325	0.036	-7.00E-05	255.71	-2.19	5.90	-3.86	23.08
	低水	0.052	1.355	0.037	-7.00E-05	261.43		6.14		23.48
02—03 年	高水	0.003	1.2685	0.025	-5.00E-05	248.00	-21.27	4.34	1.71	17.51
	低水	0.008	1.294	0.019	-3.00E-05	315.00		4.27		13.56

Ymax:最大总生物量 (Mg/ha), Xmax:对应的施肥量 (kg N/ha), 增幅=100*(Xa_max- Xb_max)/Xb_max, 肥效=Ymax/Xmax (kg/kg N)。

高水与低水处理，经济产量与氮肥施用量之间的关系年际变化比较明显。第一年经济产量的二次回归分析显著性都不好。在随后两年中，由于土壤肥力差异显著增加，其变化规律开始与对应施肥处理变化规律趋于一致，因而二次回归方程的显著性提高，所以 2002-2003 年冬小麦的都达到了显著水平。

2002-2003 经济产量回归分析结果显示，高水处理在施肥量达到 248.0 kg N / ha 时，经济产量达到最高值 4.34 Mg /ha；低水处理在施肥量达到 315.0 kg N / ha 时，总生物量达到最高值 4.27 Mg/ha。总生物量的最大值高水处理比低水处理高出 0.07 Mg/ha，只高出了 1.71%，这显然不能同总生物量一样，说成是水分处理差异造成的，可见不同水分处理间最高产量非常接近；而对应的施肥量却减少了 67.0 kg N/ha，约为 21.27%，这种减少只可能是由于水分差异引起，而取样误差的可能性比较小。高水处理的肥效为 17.51 kg/kg N，高于低水处理肥效 13.56 kg/kg N，这似乎也可以通过水分促进了作物对氮肥的利用来解释：在高水处理条件下，水分状况良好，作物对土壤中氮素的吸收利用率比较高，因此肥效较高。这同样需要进一步可靠观测数据的支持。

四、水、氮耦合措施对冬小麦经济系数的影响

经济系数是作物经济产量与总生物量的比值，它反映了作物养分在营养器官和生殖器官的分配。对小麦来讲，经济系数是麦粒的干物质量占总生物量的比值，在总生物量一定的条件下该系数越高越好。

水肥措施和小麦经济系数的关系见图 3-4。在试验开始的一年，经济系数随施肥的变化规律与第三年差异很大，对照考虑第一年经济产量和总生物量的数据，可以这样理解第一年经济系数的变化趋势：第一年土壤肥力本底值普遍比较高，所以施肥处理间的实际肥力差异不是十分明显，尤其是 N0 处理土壤肥力并没有比施肥处理差很多，所以经济系数变化规律实际上反映的实际上是第三年经济系数曲线的后半段的规律；即由于试验布置前一季土壤剩余氮素比较多，N0 处理在第一年的肥力水平大概与第三年 N200 相当，所以在第一年经济系数随施肥处理由 N0 到 N300 的变化，实际上与第三年经济系数从 N200 到 N300 的变化一致。经过两年的施肥灌水处理以后，N0 处理的肥力水平明显下降，所以才出现了 2002-2003 年先升高后下降的变化规律。

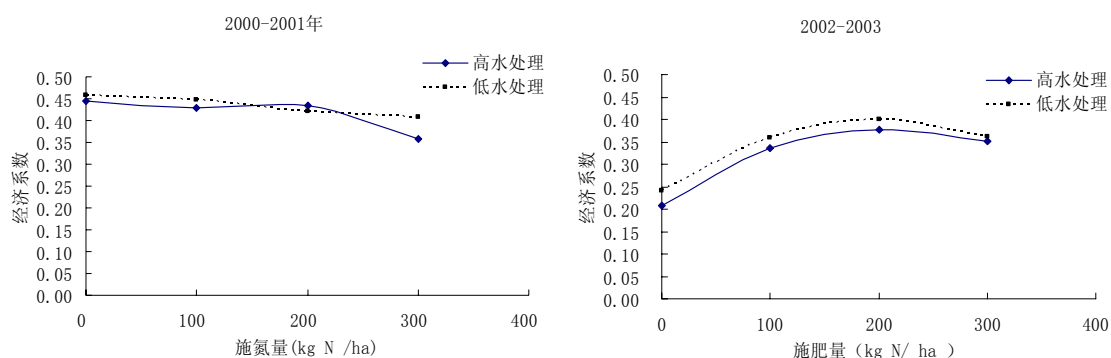


图 3-4 施肥与经济系数

Fig.3-4 fertilizer and yield coefficient

第三年冬小麦数据表明，在高水和低水两种水分条件下，小麦经济系数随氮肥施用量变化的规律基本一致，也就是说从不施肥开始，随着氮肥施用量的增加经济系数首先增加，达到一个最大值，然后开始下降。即在不同的水分处理下，适量施用氮肥可以促进作物营养生长，同时更有效地促进生殖生长，从而使二者间的协作关系向着有利于生殖生长的方向发展，当达到一程度后又发生了逆转，营养生长开始增强，从而使经济系数出现了减小的趋势。

五、冬小麦生长动态

1. 冬小麦株高变化

三年的试验过程中对每一季冬小麦的株高都进行跟踪观测，结果如图 3-5 所示：冬小麦的生长过程基本符合 Logistic 曲线，一般在 5 月 7 日左右达到最高值。

只是在第一年（2000-2001）试验观测到的 N0 处理与施肥处理间的差异很小，其他施肥处理之间则几乎没有差异，其原因还是土壤本底值问题。试验进行一年以后，N0 处理与施肥处理之间的株高差异非常明显，N100 也明显低于 N200、N300，但是 N200、N300 之间没有明显差别。

结合冬小麦产量数据分析株高之间的差异，可见第三年的产量比第二年有大幅度减少，这是由于该季冬小麦生长前期降水很少，直到 4 月 17 号才有一次 132 毫米的降水。而此前的长期干旱已经决定了，50cm 土壤层以下水分不足，作物根系发育收到长期严重制约，到了 4 月中旬其长势已经基本确定，所以该次降水并没有有效地阻止该季作物的减产。但是株高并没有明显的降低，说明株高与产量之间没有直接相关性。

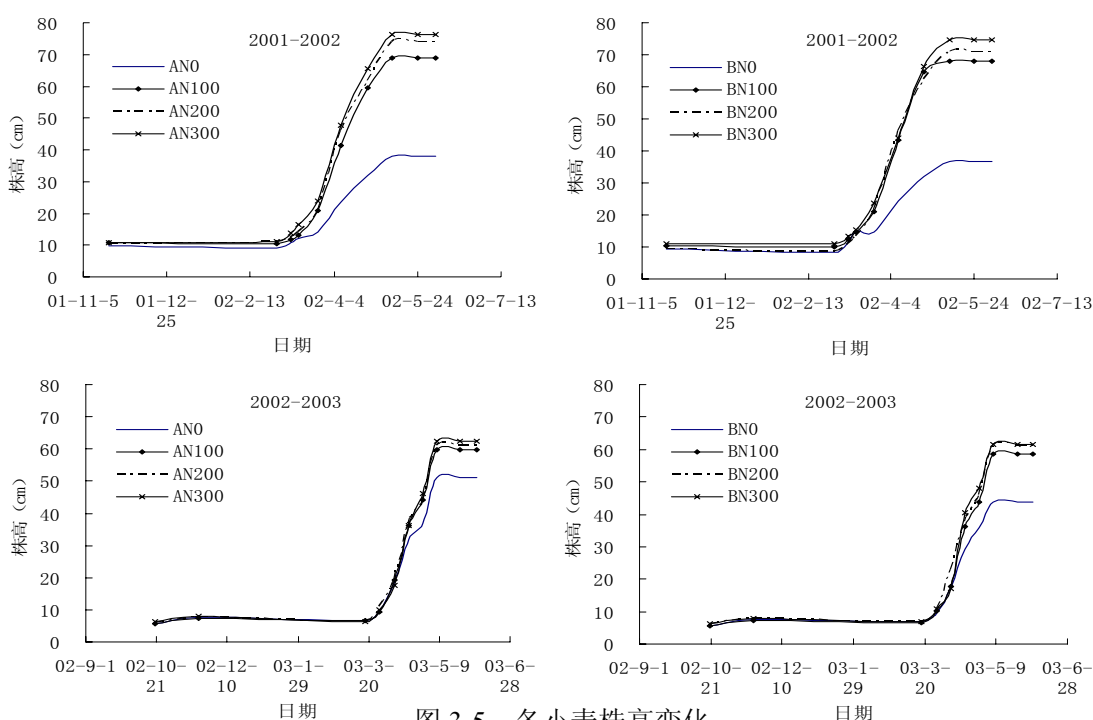


图 3-5 冬小麦株高变化

Fig.3-5 Changes of wheat height

2. 总茎数的变化

麦田的群体结构是指群体的大小、分布、长相、组成和动态变化等。它代表群体的基本特性，与个体发育状况及产量有密切关系。

基本苗是群体发展的起点，也是调节群体结构的基础。它随自然条件、生产水平、品种、播种期和栽培方式而有很大变化。分蘖数反映了分蘖到抽穗阶段麦田的群体变化情况，是生产中控制或促进措施的主要依据。总茎数是指某一时间点上存活的总分蘖的数量，其动态反映了分蘖的产生、存活和死亡过程和数量关系。

冬前分蘖数，即在小麦越冬前停止生长分蘖时每亩分蘖的总数。适时播种，墒情好的麦田，冬前分蘖数占总分蘖数的 70~80%。在群体发育中，以冬前分蘖

最为重要，因为冬前分蘖生长早，叶面积大，根系发达，所以成穗率高，穗部性状好。据以往经验，冬前分蘖过少，即使翌年积极促进春季分蘖成穗，也难以达到计划穗数或者下落穗多。

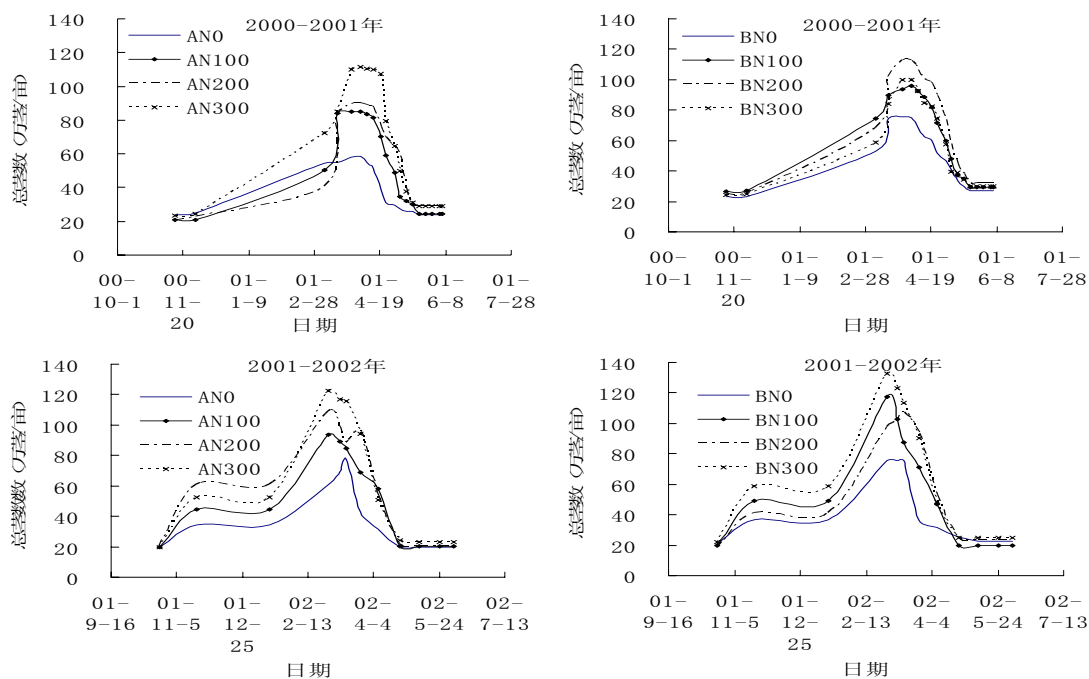


图 3-6 冬小麦总茎数的变化

Fig.3-6 changes of individual winter wheat plant number

试验观测到的数据经统计分析表明，在试验条件下，第一年(2000-2001)越冬前的分蘖状况并不是十分理想，平均只有 23 万茎左右的分蘖数，处理间差异不大。来年(2001)的春季分蘖数量则相当高(图 3-6)，高水处理小区 N0 达到 50 万茎，N100 和 N200 基本相同都达到 85 万茎，N300 则达到了 110 万茎；低水处理小区 N0 达到 70 万茎，N100 和 N200 达到 90 万茎左右，N300 处理则达到 110 万茎。可见在相同水分处理条件下，除了 N100 与 N200 处理之间茎数差异很小以外，其他施肥处理之间都存在明显的茎数差异；而在相同施肥处理下，除了 N0 之外，N100、N200、N300 各处理，在不同水分下茎数之间的差异甚微。

第二年(2001-2002)，高水处理区越冬前分蘖数量分别达到了 N0 处理 34 万茎/亩，N100 处理 44 万茎，N200 处理 60 万茎，N300 处理 52 万茎。这里越冬前的 N200 处理茎数要高于 N300 处理。越冬后的分蘖数则分别达到了 N0 处理 77.4 万茎/亩，N100 处理 84.9 万茎，N200 处理 88.4 万茎，N300 处理 115.6 万茎。在收获时的茎数则分别为 N0 处理 20.0 万茎/亩，N100 处理 20.1 万茎，N200 处理 20.9 万茎，N300 处理 23.2 万茎。可见最终 N300 处理的茎数还是要高于 N200 处理。低水处理区的情况类似，施肥对最终茎数有显著影响，一般随着施肥量的增加茎数增加，但是水分处理对茎数的影响甚微。

3.叶面积指数曲线

叶面积指数（叶面积系数）是指在单位面积上作物叶片的总面积，反映了作物的光合潜能。在一定范围内，叶面积指数越高，总生物量也越高，产量也越高。综合山东省的高产资料，一般认为亩产 400~500 kg/亩的麦田，叶面积指数为冬前 1 左右，起身 1.5~2.0，拔节 3~4，挑旗 5~6，灌浆 3~4 左右。据试验观测（图 3-7），第一年，不论是高水处理还是低水处理，N0 处理的叶面积指数都明显低于施肥处理；氮 N100、N200 处理之间的叶面积指数差异不大，对应的产量差异也甚微；N300 处理叶面积指数最高，基本符合亩产 400~500 kg/亩的叶面积指数指标。测产数据表明，高水 N300 处理产量达到 407.2 kg/亩、低水 N300 处理产量达到 411.5 kg/亩，与经验数据基本吻合。

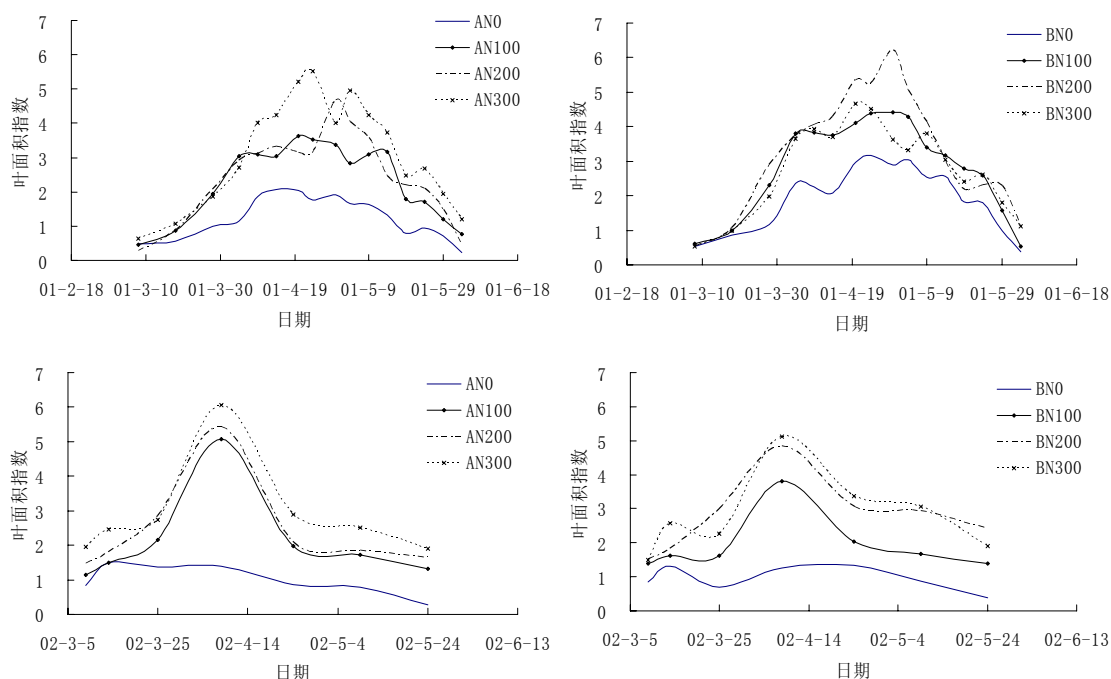


图 3-7 叶面积指数变化

Fig.3-7 changes of wheat leaf area coefficient

4.干物质累积曲线

冬小麦的干物质累积曲线基本符合 Logistic 曲线。变化特征与株高非常相似，第一年，N0 与其他处理之间干物质的差异在灌浆期才表现出来；后两年，差异在拔节以后就开始表现出来。除了 N0 与其他处理又差异巨大外，其他处理之间差异比较小，具体可参见前面对冬小麦总生物量的分析。

六、冬小麦产量构成因子对产量的影响

二元变量的相关分析是指通过计算变量间两两相关的相关系数，对两个或两个以上变量之间两两相关的程度进行分析。二元定距变量的相关分析是指通过计算定距变量间两两相关的相关系数，对两个或两个以上定距变量之间两两相关的

程度进行分析。定距变量又称为间隔变量，它的取值之间可以进行加减计算，可以进行比较大小。比如“高度”、“温度”、“产量”等都是典型的定距变量。

利用三种二元定距变量的相关分析方法，对三年的实际产量、株高、千粒重、穗粒数、茎数进行相关分析得到以下结果(表 3-7)。Pearson 简单相关分析显示，实际产量与株高、千粒重、穗粒数都成极显著相关，但是实际产量与作为产量构成因子之一的茎数之间没有显著关系。通过分析茎数的变化动态可以发现，在收获时不同处理之间的茎数差异不大，也就是处理对茎数的影响不大，所以对实际产量的影响也不大。可是为什么不是产量构成因子的株高到与产量成极显著相关呢？这是因为株高与穗粒数成极显著正相关，株高越高则穗粒数越高，而又穗粒数与实际产量成极显著相关，所以株高才与实际产量成极显著相关。

Kendall 等级相关系数、Spearman 等级相关系数分析结果的与 Pearson 简单相关分析结果基本一致。不同的是前两者都显示千粒重与穗粒数成显著正相关性，即在营养供应充足的条件下每穗的粒数增加，同时籽粒个体的质量也增加，当然这是在一定范围内的规律，超过一定范围籽粒质量将会稳定在一个比较高的水平上。同时说明前两种方法的敏感性要高于 Pearson 简单相关分析。

表 3-7 产量构成因子与产量相关分析
Tab. 3-7 Correlation analysis of yield and its components

分析方法	相关系数	产量	株高	千粒重	穗粒数	茎数
Pearson 简单 相关分析	产量	1.0000				
	株高	0.8072**	1.0000			
	千粒重	0.5224**	0.2743	1.0000		
	穗粒数	0.8783**	0.9258**	0.2540	1.0000	
	茎数	0.2171	-0.0064	-0.4039	0.1485	1.0000
Kendall 等级 相关系数	产量	1.0000				
	株高	0.4828**	1.0000			
	千粒重	0.4638**	0.1924	1.0000		
	穗粒数	0.5408**	0.7055**	0.3085*	1.0000	
	茎数	0.1138	-0.0441	-0.2532	-0.0882	1.0000
Spearman 等 级相关系数	产量	1.0000				
	株高	0.6345**	1.0000			
	千粒重	0.6400**	0.2931	1.0000		
	穗粒数	0.7067**	0.8608**	0.4079*	1.0000	
	茎数	0.1328	-0.1241	-0.3732	-0.1646	1.0000

第二节 水、氮措施对夏玉米生长的影响

一、夏玉米基本管理情况

夏玉米品种为农大 108，生育期长度约为 108 天（表 3-8），播种密度 58000

株/ha。如果在播种前如果遇到特别干旱的天气，土壤墒情比较差，则需要先适量灌水，然后进行播种，为便于控制，灌水使各个小区的水分分别达到设计上限（高水 100% FC，低水 85% FC）。夏玉米播种是在冬小麦收割以后，使用手工播种机械直接播种，不用翻耕。播种完成后要立即喷施除草剂，如果过迟则会对玉米苗产生不利影响。施肥分两次进行，每次施肥量为计划总施肥量的 50%，第一次在玉米拔节期，大约 7 月 5 日，第二在抽雄期，大约 8 月 5 日。具体施肥方式视情况而定，如果在应该施肥之时土壤比较疏松，则使用进行穿播，如果赶上降水较多，则在雨后立即地表撒施。

表 3-8 夏玉米生育期(月-日)

Tab. 3-8		Development stages of summer maize (month-day)									
年份	播种	出苗	三叶	七叶	拔节	孕穗	抽雄	开花	吐丝	乳熟	收获
2000	6-15	6-21	6-30	7-10	7-21	8-2	8-13	8-15	8-18	8-30	9-30
2001	6-12	6-17	6-23	7-9	7-23	8-2	8-12	8-16	8-20	8-27	9-25
2002	6-9	6-16	6-21	7-12	7-24	8-7	8-18	8-21	8-22	9-1	10-2

二、水氮措施的作物产量效应

1. 水氮措施与总生物量的关系

总体上，两种水分处理条件下，总生物量于氮肥施用量之间的关系基本相同（图 3-9）。首先，在不施肥的情况下，高水处理与低水处理的总生物量都是最小的。因为作物的生长和产量受到最缺乏的因子的供给水平的限制，产量因该因子的供给水平的增减而出现浮动。就试验条件下的夏玉米而言，该限制因子是氮素。与冬小麦类似，土壤氮素供应主要依靠上季耕作中施肥的过剩部分、土壤有机质中氮素的硝化部分、土壤粘粒对铵态氮的释放以及极少一部分大气中的氮素随降水进入农田。这些来源一方面数量有限，一方面释放供应很慢；另一方面，玉米播种后迅速进入旺盛生长期，对养分供应强度要求很高，于是养分供求关系失衡，供不应求，作物生长受到严重抑制。因此不论是在高水处理系列还是低水处理系列中，此时的生物量都最低。随着施肥量的增加，氮素匮乏度降低，作物营养状况得到改善，总生物量开始增加。

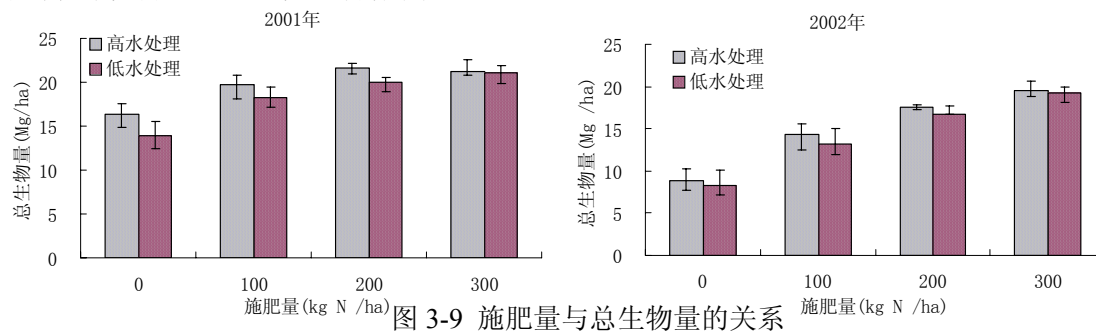


Fig.3-9 The relationship between fertilization and total yield of maize

2000 年不同处理间玉米生长状况差异不明显，N0 处理和 N200 处理玉米生长基本接近，这很显然是由于土壤氮素本底值的比较大，不同施肥处理间氮肥使用量的差异，未对土壤氮肥供应量的产生决定作用。由此推测该季作物观测数据的可信度不高，为了节省人力物力，该季玉米只取样计算了经济产量，未计算总生物量。经过一年的施肥处理后，土壤氮素本底值已经有了比较明显差异，对不同施肥量的响应比较明显。2001、2002 年总生物量数据从统计学角度来看，可以反映试验条件下的整体情况（表 3-9），数据所反映出的基本规律在统计学上是有意义的。由该表可见以下几点：（1）在试验进行的两年中，高水和低水处理间差异不明显，水分处理对总生物量的影响均不显著；氮素对总生物量的影响显著；水、氮交互作用不显著，二者间没有明显的相互促进或抑制作用。因此就总生物量而言，没有必要采用高水管理措施。（2）2001 年，只有 N0 和其他处理之间的差异显著，N100、N200、N300 相互间的差异都不显著，而到 2002 年，所有氮肥处理间的差异都达到了显著水平。这很好地说明随着施肥管理措施的实施时间加长，土壤本底肥力的差异越来越大，从而施肥处理对总生物量的影响变大。

表 3-9 生物量双因素方差分析

Tab. 3-9		Tests of Between-Subjects Effect for biomass				
年份	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2001 年	水分	0.379	N100	0.002		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.204	
	水、氮交互作用	0.768	N300	0.000	0.142	0.828
2002 年	水分	0.902	N100	0.000		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.025	
	水、氮交互作用	0.269	N300	0.000	0.000	0.012

总生物量与施肥量间具有良好的规律性，二次回归拟和方程达到显著水平（表 3-10）。根据拟和的二次回归方程计算最大生物量，及对应的施肥量。分析可见以下规律：（1）高水处理条件下的最高生物量（22.57，20.60）和其对应的施肥量（292.50，478.0）都要分别大于低水处理条件（21.34，19.42；235.0，399.29），

而此时单位肥料所得到的总生物量，即肥效则相反： $77.153 < 90.788$ ， $43.087 < 48.631$ ，即高水肥效小于低水肥效。这证明了边际效应递减规律：随着投施肥量的增加，增加的施肥量的增产效率递减。其原因大概是在高水处理条件下，作物生长更旺盛，所以总生物量增加，但同时淋失或挥发增加，所以效率降低。

（2）在达到最大生物量时，低水处理到高水处理生物量的增幅（5.77%，6.06%）小于对应施肥量的增幅（24.47%，19.71%），这也间接证明了边际效应递减规律。

（3）不论高水低水，2001 年到 2002 年，最高总生物量减小，对应施肥量增加，对应的肥效降低。主要因为 2002 年降水较少，水分供应相对不足，作物对养分

的吸收受到限制；氮素不能及时被作物吸收，在土壤中滞留时间变长，增加了氮素挥发的危险；土壤水分含量比较低的时候，氮素生化反应中产生的许多中间产物，比如一氧化氮、二氧化氮、氧化亚氮，容易通过土壤空隙挥发到大气中，从而导致氮肥的总体投入加大，利用率降低。

表 3-10 总生物量二次回归分析

Tab. 3-10 Quadratic curve fit analysis of biomass

	水分	显著性	b0	b1	b2	Xmax	增幅%	Ymax	增幅%	肥效
2001	高水	0.002	14.012	0.0585	-1.0E-04	292.50	24.47	22.57	5.77	77.153
	低水	0.015	16.365	0.0423	-9.0E-05	235.00		21.34		90.788
2002	高水	0.000	9.171	0.0478	-5.0E-05	478.00	19.71	20.60	6.06	43.087
	低水	0.000	8.258	0.0559	-7.0E-05	399.29		19.42		48.631

Ymax:最大总生物量 (Mg /ha), Xmax:对应的施肥量 (kg N /ha), 增幅=100*(Xa_max- Xb_max)/Xb_max, 肥效=Ymax/Xmax (kg/kg N)。

值得注意的是，通过对 2002 年夏玉米回归方程与 2002-2003 年冬小麦回归方程的比较，发现在两种水分处理下，夏玉米总生物量的极大值所对应的施肥量都分别大于冬小麦产量极大值所对应的施肥量。在高水分处理条件下，2002 年夏玉米总生物量的极大值所对应的施肥量为 478.00 kg N/ha，而 2002-2003 年冬小麦总生物量极大值所对应的施肥量为 292.5 kg N/ha；在低水处理条件下，夏玉米总生物量的极大值所对应的施肥量为 399.29 kg N/ha，而冬小麦总生物量极大值所对应的施肥量为 312.14kg N/ha。

出现这种巨大差异的原因大概有如下：夏玉米一般是在冬小麦收割后立即播种，甚至是在冬小麦收割前套种，当时正值光热条件最好的时期，降水和灌溉条件也比较好的，使得玉米生长十分迅速，在 90 天左右就可以完成整个生育过程。这样的生育特点决定了夏玉米不能充分利用前面冬小麦遗留在土壤中的过剩氮素，也不能充分利用生长期间所施用的氮肥。同时玉米生长正值该地区降水最多，最集中的时候，很容易造成氮素的淋失，从而使得氮素利用率降低。而冬小麦刚好相反，播种时雨季已过，虽然光热条件已经很差，但是冬小麦的特性决定了，在进入漫长的越冬期后，冬小麦根系依然可以稳定的生长，充分利用土壤中的氮素，包括玉米遗留下来的氮素和作为底肥施入的氮素。直到来年春天，冬小麦的根系发育已经非常完善，光热条件适宜时冬小麦进入旺盛的生长期，此时冬小麦对土壤养分的吸收达到高峰，土壤养分含量经过一个冬天也已经减少很多。而我们的施肥计划规定，在冬小麦抽穗期施用另一半氮肥，这样即可以很好地被土壤转化，被土壤胶体吸附，又可以很好地被作物吸收。更重要的是，在冬小麦的整个生育过程中，降水比较少，往往达不到造成硝态氮淋溶的程度，因而硝态氮损失少，肥料利用率高。所以冬小麦需要补充的氮肥量要明显的大于夏玉米。

在试验处理设定的施肥量变化范围内，总生物量绝对差异(图 3-10)在 N100

左右时最高，到 N200 和 N300 则逐渐减小。在超过一定施肥量后，随着氮肥施用量的增加，水分的增产作用有逐渐减小的趋势。总生物量之间相对差异（图 3-10）的变化趋势更是如此，从不施肥开始就没有增加，只是在 N0 到 N100 有一个相对的稳定范围，之后就急速减小。这也基本符合边际效应递减规律：随着投入成本的增加，单位成本所带来的收益逐渐减小，单位投入的增产效率逐渐减小。

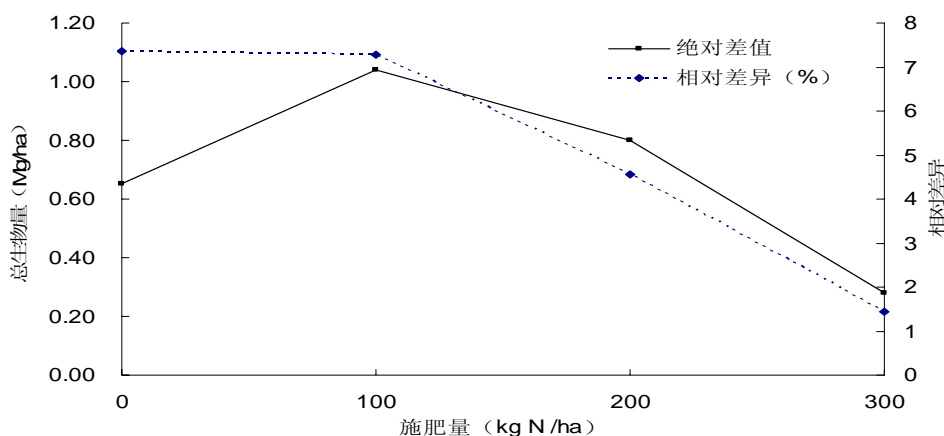


图 3-10 水分处理间总生物量的差异与施肥量的关系

Fig.3-10 Relationship between the difference of total biomass and fertilizer

2.水氮措施与经济产量的关系

同样是由于土壤本底值的差异，2000 经济产量数据的统计分析表明，所有因子的作用都不显著。2001、2002 年经济产量数据从统计学角度来看，则可以反映试验条件下的整体情况（表 3-11）。（1）总体上，2001 年至 2002 年，氮肥的影响始终显著；水、氮交互作用始终不显著；表 3-11 和表 3-10 不同的是，水分的影响由不显著变得显著。进一步分析表 3-11，可见水分间产量差异是高水处理回归最高产量低于低水处理，而 2002 年玉米季降水量低于平均水平，理应是高水处理产量高，低水处理产量低。由这一矛盾可以推测，水分的上述表现显著差异不合乎常理，差异大概是由于其他因素影响所致，不能简单地认为水分起到了显著作用。（2）就氮素处理间的产量差异来看，2001 年只有 N0 与其他处理间的差异显著。2002 年，N100 与 N200、N300 间产量的差异也变得显著，但是 N200 与 N300 之间的差异依然不显著。这一方面反映了随着时间推移，不同氮肥处理间土壤肥力开始出现明显差异；另一方面说明在较高施肥水平下，增加施肥量对产量的影响下降。

根据作物 2001、2002 年产量数据作二次回归分析（表 3-12），回归方程都达到了显著水平，所求得的经济产量最大时的施肥量存在年际变化，但是基本接近通常试验所得数值 220 kg N/ha。2001 年到 2002 年的年际变化有以下几点：（1）不论高水低水，2002 年最高产量所对应的施肥量都比 2001 年的有所增加，（2）

2002 年，在最高产量时的肥效都降低，其原因与上述生物量变化原因类似。在不同水分处理间，最高产量、最高产量的增幅、对应施肥量的增幅并没有表现出与总生物量类似的规律。

表 3-11 产量双因素方差分析

Tab. 3-11 Tests of Between-Subjects Effects for yield

年份	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.298	N100	0.353		
	氮肥	0.353	N200	0.798	0.496	
	水、氮交互作用	0.033	N300	0.386	0.083	0.267
2001 年	水分	0.430	N100	0.001		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.097	
	水、氮交互作用	0.374	N300	0.000	0.267	0.547
2002 年	水分	0.002	N100	0.000		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.007	
	水、氮交互作用	0.609	N300	0.000	0.006	0.985

表 3-12 产量二次回归分析

Tab. 3-12 Quadratic curve fit analysis of yield

年份	水分	显著性	B0	b1	b2	Xmax	增幅	Ymax	增幅	肥效
2000	高水	0.044	8.910	0.0144	-6.00E-05	120.00	4.00	9.77	16.45	81.45
	低水	0.705	8.567	-0.0030	1.30E-05	115.38		8.39		72.74
2001	高水	0.000	5.747	0.0373	-9.00E-05	207.22	6.27	9.61	4.80	46.38
	低水	0.000	5.368	0.0390	-1.00E-04	195.00		9.17		47.03
2002	高水	0.000	4.360	0.0417	-9.00E-05	231.67	-10.61	9.19	19.54	39.67
	低水	0.000	3.658	0.0311	-6.00E-05	259.17		7.69		29.67

Ymax:最大总生物量(Mg/ha), Xmax:对应的施肥量(kg N/ha), 增幅=100*(Xa_max- Xb_max)/Xb_max, 肥效=Ymax/Xmax (kg/kg N)。

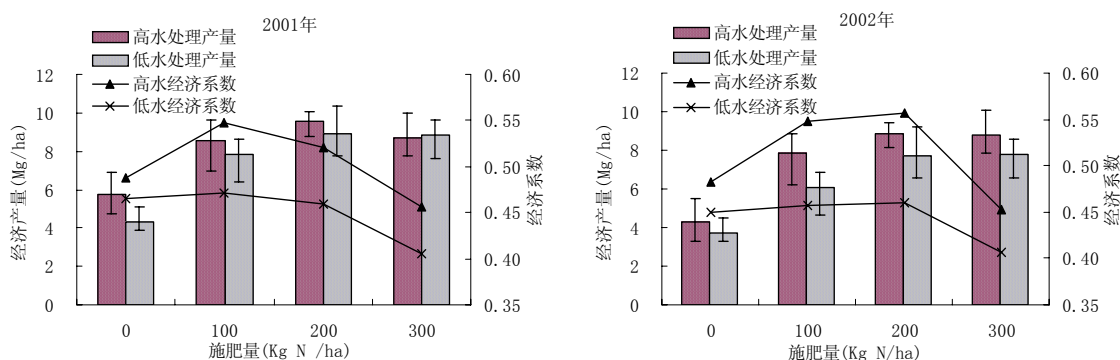


图 3-11 施肥量与玉米产量和经济系数的关系

Fig.3-11 The relationship between fertilization and yield of maize

经济系数的变化(图 3-12)表明，随着产量增加经济系数增加，然而在经济产量达到最大值之前，经济系数就达到最高值，然后开始下降。高水处理的经济系

数高于低水处理,这从生态学的角度来看,还是作物生殖策略的一种适应性改变。在水肥缺乏的时候,植物首先要维持个体的生存,主要是物种与自然界的适应关系。在水肥充足的时候,植物个体开始倾向于采用以增加种子数量来保持自身遗传物质得以更有效遗传扩散的生殖策略,这反映了同一物种不同个体间的竞争关系。

三、夏玉米生长动态

1.夏玉米株高变化

夏玉米播种季节正值当地光、温、水等条件最适宜的时期,生长发育速度极快。玉米生育期一般在 100 天左右,通常 6 月中旬播种,到 8 月中旬即可达到最大高度 250cm 左右,期间平均每天要升高 4~5cm,在施肥、灌水或者降雨之后,生长速度有时会达到每天 8cm。观测表明,相同水分处理区内玉米达到最大高度的时间基本一致,低水处理区达到最大高度的时间会比高水区的时间晚 5 天左右。

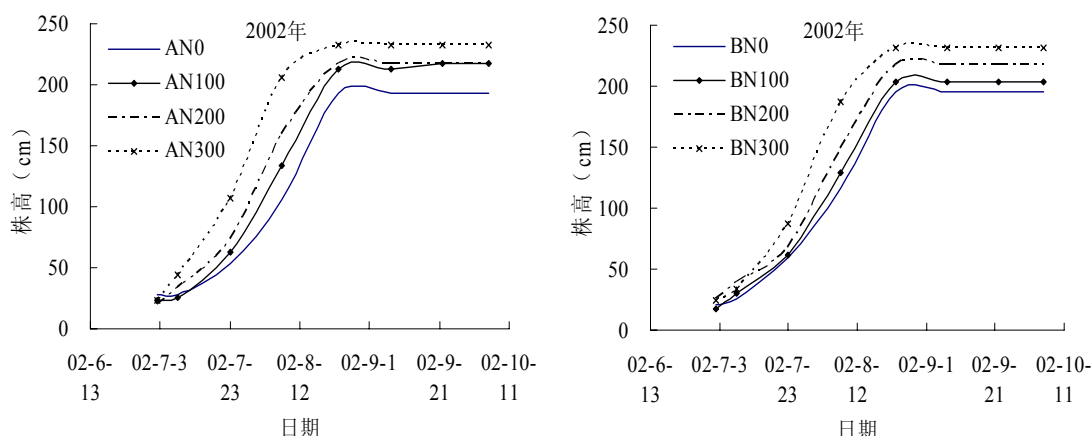


图 3-12 玉米株高变化

Fig.3-12 Changes of summer maize height

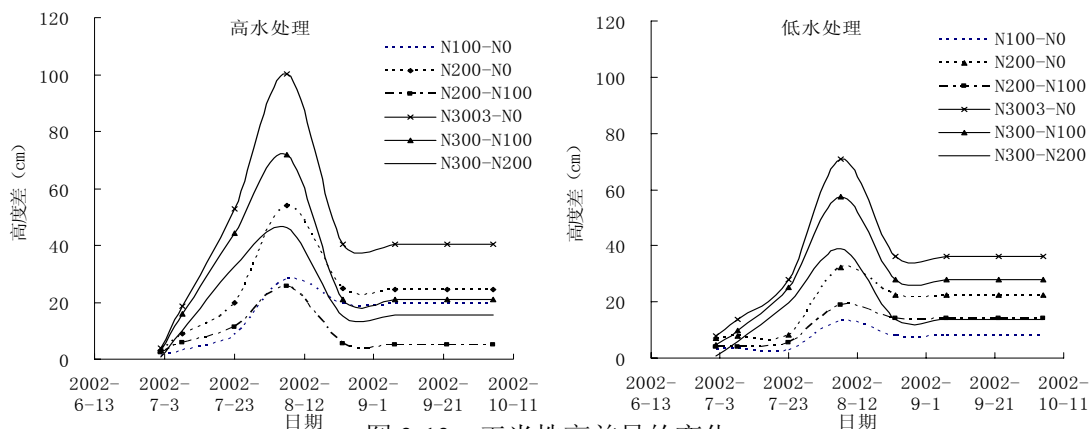


图 3-13 玉米株高差异的变化

Fig.3-13 Change of summer maize height difference

以典型的第三年为进行分析 (图 3-12), 高水区 N0 施肥处理与其他处理间

表现出显著差异，N100 与 N200 间差异不显著，N300 与其他处理差异显著；低水处理区内，不同施肥处理间都表现出了显著差异，且随施肥量玉米株高依次增加。玉米高度出现差异的时间很早，播种后 20 天左右，不同处理之间就开始表现出株高差异，在 8 月初达到差异最大值，随后高度差异又逐渐减小，直到达到最大高度为止（图 3-13）。高水处理区，不同施肥处理间的高度差异要大于低水处理区对应的高度差异，这大概因为高水区玉米生长比较快，从而最大差异要比生长比较慢的低水区大。

2. 夏玉米叶面积指数变化

玉米是高光效的 C_4 植物，单叶光饱和点为 10 万 lx，补偿点为 1000lx，在自然光下，大田玉米群体达不到光饱和点。可见，在其他条件满足的条件下，玉米产量的高低，决定于总辐射的大小。而在光照条件相同的条件下，玉米的产量决定于玉米叶面积的大小。第三年玉米叶面积指数的变化显示（图 3-14），在播种 20 天左右，玉米的叶面积指数差异开始显现出来，在整个玉米生长期，叶面积指数的顺序都是 $N300 > N200 > N100 > N0$ 。然而叶面积指数只是一个瞬时值，反映某一时刻的状态，在不同的生长阶段变化巨大，为了更加合理的反映作物对辐射能的吸收，我们可以取叶面积指数曲线的时间积分，得到累积叶面积指数。以累积叶面积指数作为植物一生吸收能量的指标，与产量进行对比分析。

图 3-15 显示，随着玉米叶面积累积指数的增加玉米产量增加，但是达到一定数值以后，玉米产量就稳定下来不再增加。玉米叶面积累积指数达到该值时刚好就在 N200 左右，可见在试验条件下，施肥 200 kg N/ha 时玉米产量就已经达到最高值，再增加施肥会对增加叶面积有帮助，但是已经不能增加产量。这是由于增加的叶面积部分所吸收的能量，已经被植物呼吸和植物营养器官增长消耗掉了，生殖生长已经不能从中受益。

3. 水、氮耦合措施与玉米生态指标间的关系

根据试验设计，在玉米收获时考察株高、茎粗、结穗高度、果穗长度、穗粗、穗行数、穗粒数、千粒重等 8 项指标。下面就水、氮措施对各项指标的影响进行双因素统计分析，以考察各项指标对水、氮处理的敏感性。结果显示（表 3-14），在第一年（2000）所有的 8 项指标都没有表现出对水分处理的响应，也没有表现出对施肥处理的响应。随着试验的进行，由于试验小区本底值差异开始加大，不同处理之间的各项指标的差异也开始显现出来。到第三年试验观测数据都很好的反映了灌水、施肥处理的差异：（1）水分只对株高和结穗高度有极显著影响，对其他 6 项指标都没有显著影响；施肥对所有指标都具有极显著影响；水、氮交互作用对所有指标都没有显著影响。（2）除了千粒重以外，剩余 7 项指标都显示出

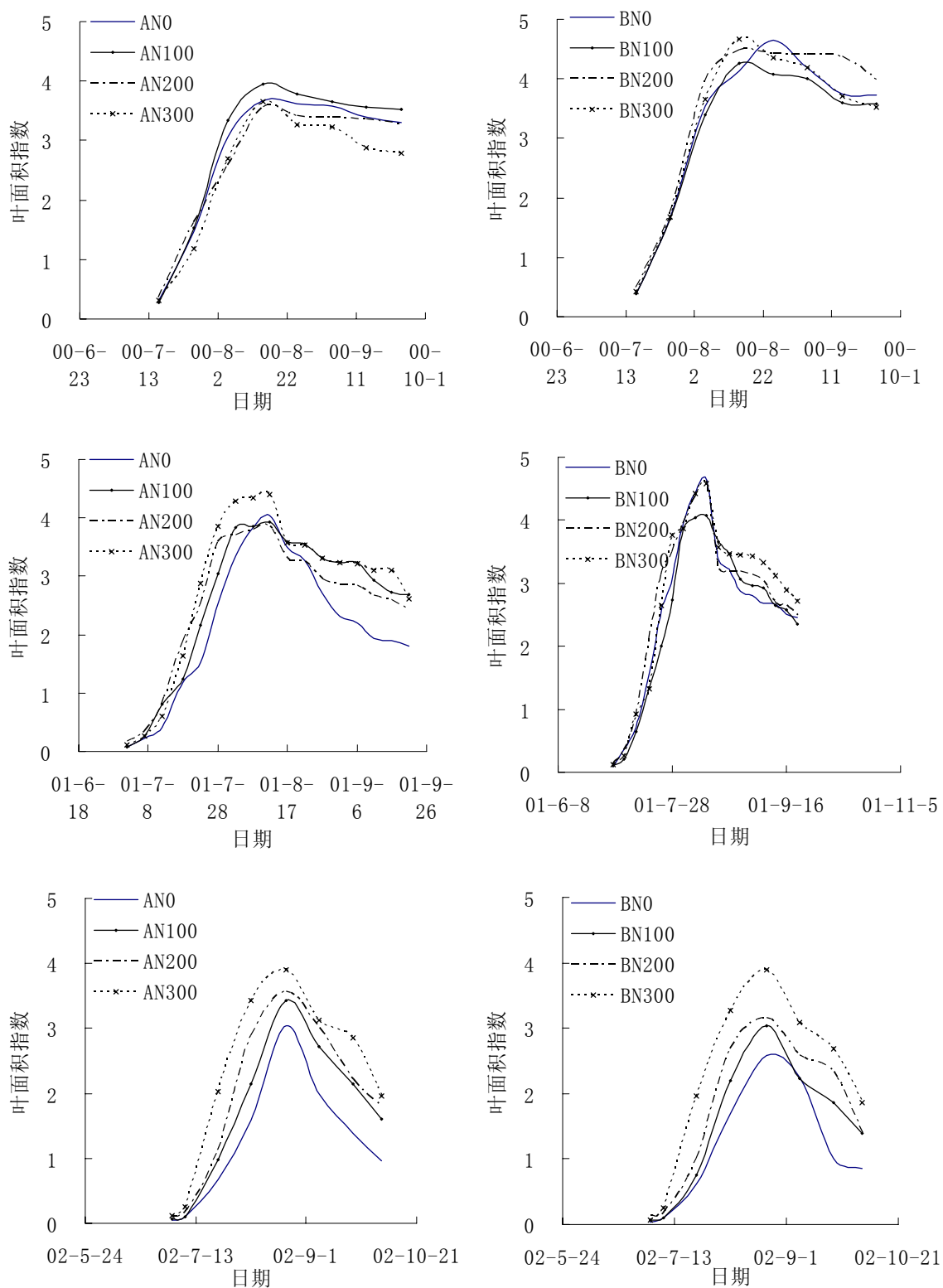


图 3-14 玉米叶面积系数变化

Fig.3-14 Changes of maize leaf area coefficient

N0 与施肥处理具有极显著差异。对于千粒重, N0 与 N100 之间没有显著差异, 与 N200、N300 具有极显著差异。(3) 结穗高度, N100 与 N300 之间有显著差异。(4) 果穗长度, N100 与 N300 之间有显著差异。(5) 穗粗, N100 与 N300 之间有显著差异。(6) 穗粒数, N100 与 N300 之间有显著差异。(7) 千粒重, N100 与 N300 之间有极显著差异。(8) 对所有指标, N200 与 N300 之间都没有显著差异, 这充分说明 N300 与 N200 相比较没有对玉米的最终生态指标产生质的影响, 因在试验条件下施用 200 kg N/ha 已经足够, 没有必要采用 300 kg N/ha 的施肥方案。

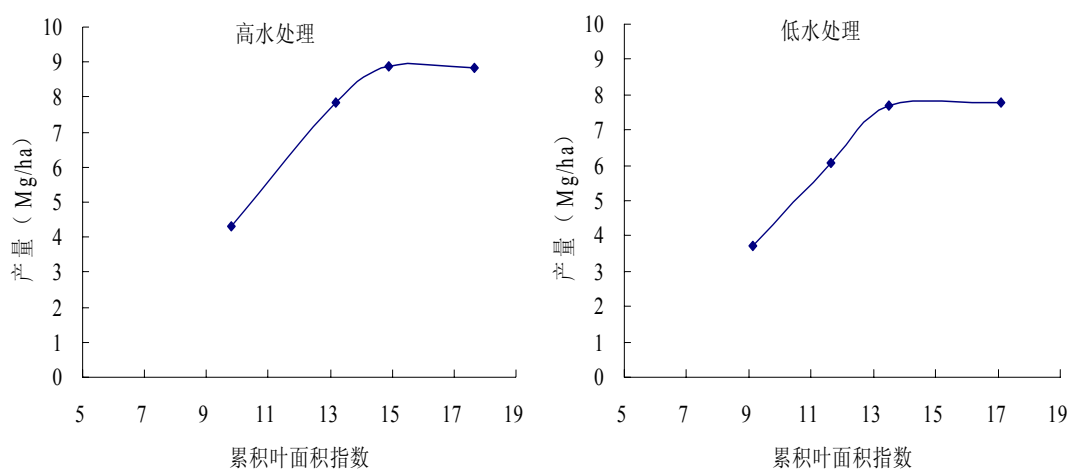


图 3-15 叶面积累积值与产量的关系

Fig.3-15 The relationship of yield and cumulation of leaf area

表 3-13(a, b, c, d, e, f, g, h) 玉米生态指标的系统分析

Tab. 3-13(a, b, c, d, e, f, g, h,) Tests of Between-Subjects Effect for maize yield components

表 3-13 (a)

双因素统计分析			株高			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.379	N100	0.815		
	氮肥	0.334	N200	0.179	0.120	
	水氮交互作用	0.875	N300	0.343	0.242	0.676
2001 年	水分	0.946	N100	0.009		
	氮肥	0.010	N200	0.014	0.844	
	水氮交互作用	0.112	N300	0.002	0.458	0.351
2002 年	水分	0.006	N100	0.001		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.433	
	水氮交互作用	0.677	N300	0.000	0.357	0.888

表 3-13 (b)

双因素统计分析			茎粗(cm)			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.774	N100	0.772		
	氮肥	0.240	N200	0.065	0.111	
	水氮交互作用	0.420	N300	0.350	0.514	0.322
2001 年	水分	0.367	N100	0.020		
	氮肥	0.102	N200	0.240	0.195	
	水氮交互作用	0.765	N300	0.070	0.538	0.480
2002 年	水分	0.208	N100	0.001		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.761	
	水氮交互作用	0.379	N300	0.000	0.089	0.152

表 3-13 (c)

双因素统计分析			结穗高度(cm)			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.435	N100	0.727		
	氮肥	0.355	N200	0.746	0.980	
	水氮交互作用	0.098	N300	0.105	0.192	0.184
2001 年	水分	0.583	N100	0.001		
	氮肥	0.003	N200	0.008	0.410	
	水氮交互作用	0.080	N300	0.001	0.948	0.376
2002 年	水分	0.003	N100	0.004		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.154	
	水氮交互作用	0.974	N300	0.000	0.037	0.449

表 3-13 (d)

双因素统计分析			果穗长度(cm)			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.074	N100	0.209		
	氮肥	0.471	N200	0.936	0.237	
	水氮交互作用	0.548	N300	0.914	0.175	0.851
2001 年	水分	0.852	N100	0.013		
	氮肥	0.005	N200	0.001	0.268	
	水氮交互作用	0.195	N300	0.002	0.434	0.735
2002 年	水分	0.842	N100	0.000		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.357	
	水氮交互作用	0.222	N300	0.000	0.043	0.228

表 3-13 (e)

双因素统计分析			穗粗(cm)			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.499	N100	0.609		
	氮肥	0.808	N200	0.885	0.514	
	水氮交互作用	0.129	N300	0.666	0.351	0.773
2001 年	水分	0.876	N100	0.007		
	氮肥	0.008	N200	0.006	0.918	
	水氮交互作用	0.923	N300	0.002	0.557	0.627
2002 年	水分	0.205	N100	0.007		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.098	
	水氮交互作用	0.821	N300	0.000	0.034	0.581

表 3-13 (f)

双因素统计分析			穗行数			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.807	N100	0.548		
	氮肥	0.837	N200	0.417	0.829	
	水氮交互作用	0.123	N300	0.829	0.698	0.548
2001 年	水分	0.334	N100	0.033		
	氮肥	0.023	N200	0.103	0.554	
	水氮交互作用	0.675	N300	0.003	0.276	0.103
2002 年	水分	0.762	N100	0.002		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.397	
	水氮交互作用	0.728	N300	0.000	0.130	0.479

表 3-13(g)

双因素统计分析			穗粒数			
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.026	N100	0.387		
	氮肥	0.649	N200	0.805	0.532	
	水氮交互作用	0.250	N300	0.719	0.227	0.546
2001 年	水分	0.770	N100	0.013		
	氮肥	0.009	N200	0.009	0.846	
	水氮交互作用	0.304	N300	0.002	0.329	0.431
2002 年	水分	0.253	N100	0.000		
	氮肥	0.000	N200	0.000	0.289	
	水氮交互作用	0.935	N300	0.000	0.045	0.295

表 3-13 (h)

双因素统计分析		千粒重(g)				
	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2000 年	水分	0.160	N100	0.389		
	氮肥	0.628	N200	0.698	0.218	
	水氮交互作用	0.691	N300	0.973	0.371	0.723
2001 年	水分	0.412	N100	0.018		
	氮肥	0.002	N200	0.000	0.098	
	水氮交互作用	0.832	N300	0.002	0.273	0.541
2002 年	水分	0.420	N100	0.081		
	氮肥	0.000	N200	0.002	0.086	
	水氮交互作用	0.322	N300	0.000	0.001	0.089

4.生态指标间的相互关系

利用三种二元定距变量的相关分析方法,对 2001 和 2002 年的玉米数据,进行产量及考种指标间的相关分析,表 3-14。Pearson 简单相关分析显示,产量与株高、茎粗、结穗高度、果穗长度、穗粗、穗行数、穗粒数、千粒重等 8 项指标

表 3-14 考种指标的 Pearson 简单相关分析
Tab. 3-14 Pearson simple analysis of maize parameters

		产量	株高	茎粗	结穗高度	果穗长度	穗粗	穗行数	穗粒数	千粒重
产量	相关系数	1.000	0.853	0.838	0.905	0.840	0.837	0.792	0.883	0.723
	显著性	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
株高	相关系数	0.853	1.000	0.701	0.899	0.673	0.732	0.669	0.760	0.618
	显著性	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
茎粗	相关系数	0.838	0.701	1.000	0.717	0.892	0.904	0.842	0.914	0.638
	显著性	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
结穗高度	相关系数	0.905	0.899	0.717	1.000	0.676	0.726	0.646	0.748	0.720
	显著性	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
果穗长度	相关系数	0.840	0.673	0.892	0.676	1.000	0.795	0.839	0.888	0.694
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000
穗粗	相关系数	0.837	0.732	0.904	0.726	0.795	1.000	0.840	0.887	0.618
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.001
穗行数	相关系数	0.792	0.669	0.842	0.646	0.839	0.840	1.000	0.942	0.547
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	.	0.000	0.006
穗粒数	相关系数	0.883	0.760	0.914	0.748	0.888	0.887	0.942	1.000	0.634
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.	0.001
千粒重	相关系数	0.723	0.618	0.638	0.720	0.694	0.618	0.547	0.634	1.000
	显著性	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.006	0.001	.

都成极显著相关,而且这 8 项指标相互之间也都成极显著相关关系。已知玉米产量构成因子只有株数、穗粒数、千粒重,在试验条件下不同处理小区的玉米株数是相同的,而且每一株只结一穗,所以只有穗粒数和千粒重会造成处理间的产量差异。其他因子之所以会与产量有极显著相关关系,是因为这些因子分别与

穗粒数和千粒重有极显著相关关系，从而通过间接作用影响到了产量，与产量形成了极显著相关关系。

Kendall 等级相关系数、Spearman 等级相关系数分析结果的与 Pearson 简单相关分析结果基本一致。

第三节 小结

本章首先分析了冬小麦、夏玉米的总生物量、经济产量对水分、氮素、水肥交互作用的响应。结果显示，两种水分处理对于总生物量和经济产量的影响不显著，在试验条件下，低水处理已经足够，没有必要采用高水处理方案。氮素施用量对于总生物量和经济产量的影响显著，N0和N100处理下都达不到较高的总生物量和经济产量，N200与N300处理的总生物量和经济产量十分接近，差异不显著，N200已经能够使作物达到比较好的生长状况，N300处理不能显著改善作物的生长，只会造成不必要的肥料浪费和环境污染。水、氮交互作用对于总生物量和经济产量都没有显著影响。其次，通过产量构成因子模拟出的产量与实测产量间的相关性分析，发现虽然在任何情况下产量的构成因子都是穗数、穗粒数和千粒重，但是具体的作用关系却是不同的，受到气候等因子的影响，具有比较明显的年际变化。

第四章 水、氮措施对土壤硝态氮动态的影响

硝态氮淋失是指硝态氮运移通过某一土壤断面后，无法再被植物吸收利用。土壤硝态氮淋失是一个极其复杂的过程，受到诸多因素的影响。作物的生长状况，作物种类和品种，土壤理化性状，降水规律和降水量，地下水位活动规律，管理措施，耕作习惯，当地气候特征等等都会直接或间接地对硝态氮淋失产生影响。硝态氮淋失与土壤硝态氮含量和硝态氮在不同层次的分布有直接的关系。硝态氮在土壤不同深度的分布决定了氮素淋失的可能性，而土层中硝态氮在不同时间的变化，以及当地地下水活动规律则决定了可能发生硝态氮淋失的时期和可能的淋失量。

第一节 淋失下界面的选择

淋失界面是指土壤硝态氮运移通过以后就无法被作物吸收利用的土壤断面。硝态氮淋失下界面的确定是一件比较困难的事情，这个界面不是固定不变的，决定于作物种类、生长特点、降水和地下水位活动等具体因素。界面不但有季节变化，而且有明显的年际变化。不同地区甚至地点都会具有不同的淋失界面，因此不可能找到一个永久性的深度作为淋失界面。

有的研究根据试验所使用的养分渗漏池的深度决定淋失界面，有的以作物根系分布作为划分淋失界面的依据，有的认为即使根系一下的硝态氮，也会在一定条件下随深层水分的毛细上升运动重新回到作物根系范围内，被植物吸收利用。在多种观点中，人们比较认同一作物根系作为硝态氮淋失的下界面。

根据马元喜等（1987）的研究，豫西的冬小麦根系在收获时平均在 190 cm 左右，期生长特点是越冬前下扎到达 100 cm，越冬期间生长不停，越冬后达到 120 cm，孕穗期达到 180 cm，孕穗后生长减缓。李玉山等在陕西关中地区所做得土柱试验表明，越冬前根系不超过 60 cm 经过一个冬季，整层湿润的土柱，在越冬 90 天内，每天以 2.3~2.6 cm 的速度向深层生长，至返青以后达到 250~280 cm。根据张喜英在栾城实验站的试验，冬小麦平均最大根深可以达到 200 cm，90%以上集中在土壤 0~120 cm 土层。

鲁西北平原与上述地区气候特点相似，土层深厚，降水较少，为作物根系下扎创造了条件。与上述地区的不同是鲁西北平原地下水位比较高，冬小麦季 300~400 cm，而且受降水的影响升降频繁。可以推断鲁西北地区冬小麦根系下扎地深度会比上述地区浅，而处在作物根系分布区外一定范围内的水分和养分，会随着毛细上升运动重新进入根系的吸收范围，因此将冬小麦的淋失界限定在 200 cm。

在鲁西北平原地区夏玉米与冬小麦相比,生育期较短,因品种不同和年际气候变化,大约在 90~110 天左右。生长季节正好处于当地的雨季,降水量比较大也比较集中,平均最大根深比冬小麦略浅,平均深度为 120 cm 左右,80%以上根系集中在 0~40 cm 土层。此时地下水位比较高大约在 250 cm 左右,同样考虑到毛细运动,也将夏玉米的淋失界限定在 200 cm。

第二节 夏玉米生长季水、氮措施对硝态氮淋失的影响

如前所述,鲁西北平原降水集中在 6~9 月份,此时地下水位是一年中最高的时候,通常可以达到 250 cm 左右,在个别年份,或者个别强降雨之后甚至会高达 100 cm,在这样的气候条件下硝态氮的淋失往往是突发性的,几次甚至一次强烈的淋失,就可以将相当大的一部分分布比较深的硝态氮淋失到地下水。虽然此时夏玉米正值生长旺季,但是其根系深度比较浅,对深层土壤硝态氮吸收能力不足,因此夏玉米季的硝态氮淋失问题尤其值得关注和研究。

一、水分对土壤溶液硝态氮的作用

水分作为作物光合的原料,是作物生长的物质基础,决定作物蒸腾强度,进而决定了作物的生长状态,影响了对养分,尤其是硝态氮的吸收。作为硝态氮运移的载体,水分的动态决定了土壤硝态氮的运移动态。

1. 水分对土壤溶液硝态氮分布的影响

土壤剖面硝态氮的动态分布说明了硝态氮的淋移特性。水分运动是硝态氮运移的主要驱动因素。2000 年试验区夏玉米生长期间的主要降水发生在 7 月初至 9 月中旬(图 4-1)。其中两次比较大的降水分别发生 8 月 9 日和 8 月 13 日,累计达到 170.2 mm。此后土壤硝态氮的剖面分布相对稳定,因此取 8 月 15 日数据做典型分析。2001 年降水偏少,没有大的降雨,取玉米乳熟期 9 月 8 号数据进行分析。图 4-1 表明,高水处理所有小区在 0~100 cm 土壤剖面上,土壤溶液硝态氮浓度都随深度增加而递增,自 100 cm 以下先后达到最大值。从 100~200 cm 土壤溶液硝态氮都维持在一个比较高的水平,此后直到 250 cm 呈现明显递减趋势。在低水处理的所有小区,0~60 cm 剖面上,土壤溶液硝态氮浓度都是随深度增加而递增的,60 cm 以下先后达到最大值,在达到最大值之后,直到 250 cm,呈现明显递减趋势。对比二者可见,高水处理的土壤溶液硝态氮浓度最高值出现深度,要比低水处理深大约 40 cm 左右,达到了 100 cm,这无疑大大增加了硝态氮淋失的危险。2000 年 8 月 15 日地下水位为 130 cm,可见高水处理区内几乎所有的硝态氮峰值都已经在地下水位以下,而且峰值达到 75~220 mg NO₃⁻-N/L,已经对地下水造成了污染。

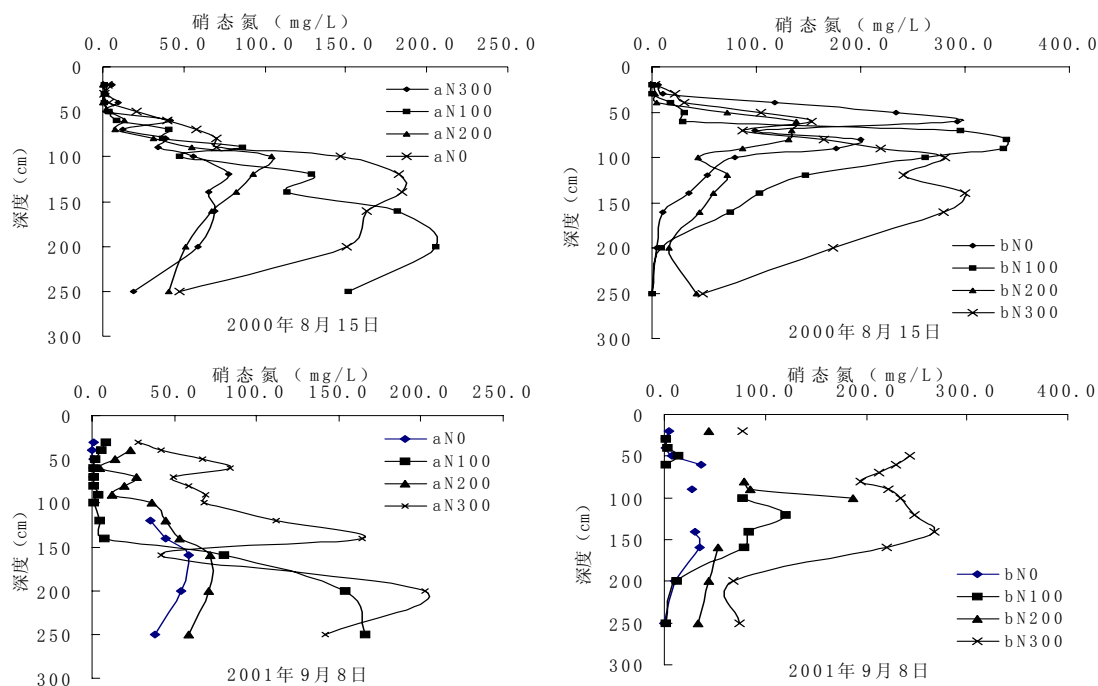


图 4-1 不同水分处理 (a, b) 区的土壤硝态氮浓度剖面分布

Fig.4-1 NO₃-N profile distribution of soil solution with varied water treatments

造成上述现象的主要原因可能是土壤大孔隙的存在。虽然土壤大孔隙占土壤孔隙的比例很小,约 0.31% (v/v),但可传导 90%的土壤水流通量^[16]。高水处理灌水时都要求达到田间持水量 (0.32(v/v)),此时上层大约 0~50 cm 土壤中的大孔隙充满水分,开始以优势流的形式向深层入渗,从而将土壤溶液中的硝态氮向深层运移,硝态氮大量累计在土壤剖面的深层,不利于作物的吸收利用。低水处理灌水不会达到田间持水量,土壤上层 (0~50 cm) 大孔隙充水有限,不易形成优势流,因此硝态氮向下运移深度比高水处理要小的多。

综合对比分析整个生育期的 9 次取样后发现,硝态氮在土壤剖面的分布状况与图 4-5 非常类似。并且不论高水处理还是低水处理 2000 年 8 月 15 日土壤溶液硝态氮峰值出现深度都要比玉米生长早期要深。可能是由于玉米根系生长到 8 月中旬才接近最大值,此时养分吸收能力最强,吸收深度最大,能够有效地抑制硝态氮的淋失。此后直到玉米收获,由于降雨减少硝态氮在土壤剖面的分布状况一直比较稳定。这是因为此后的根系生长已经处在 Logistic 曲线的后期,其分布也比较稳定。

2.相同水分条件下不同氮素处理对硝态氮分布的影响

高水处理不同氮素水平下土壤溶液硝态氮在土壤剖面的分布呈现如下规律 (图 4-1): 0~50 cm 土层,所有处理土壤溶液硝态氮浓度都很低,处理间差异很小,很可能是因为在该层次土壤水分条件良好,水分淋溶强度大、稀释作用强,同时作物根系生长普遍比较旺盛,吸收能力强,从而硝态氮浓度都很低。50~100 cm 土层, N100、N200、N300 开始升高,说明了表层氮素向深层的运移累积,

只是处理间差异依然不明显。100~150 cm 土层，N200、N300 处理由于上层根系对水分和养分的吸收明显减弱了淋失作用，从而向下淋失量减少。而 N100 处理此时吸收能力则开始明显下降，所以淋失与 N200、N300 依次相当。150~250 cm 土层，所有处理都开始下降，这主要由于水分对硝态氮的淋洗开始减弱。

3.集中降水对土壤溶液硝态氮迁移的推动作用

在半干旱地区，硝态氮的垂向运移主要受大的降雨或灌溉带来的活塞流所推动。2000 年玉米季 2 次较大降雨出现在 8 月 9 日和 8 月 13 日。取两个典型剖面（图 4-2）可以看出，降雨后所有处理的分布曲线都出现明显的整体下移，呈现上淋下淀的规律。活塞流的推动作用在土体表层表现比较明显。高水处理下峰值移动幅度与低水处理差异不大。降雨前后各种处理峰高变化也不明显。可见，集中大量的降雨或过量的灌溉对硝态氮垂直运移具有明显的推动作用。从降水在土体内的下渗过程来看，淋失应该是集中在降雨中间或之后的较短时间内，峰值会出现由于稀释造成的降低，但图 4-2 中观测不到这一现象，大概是因为取样日期比较晚，硝态氮已经通过土壤矿化作用得到补充。

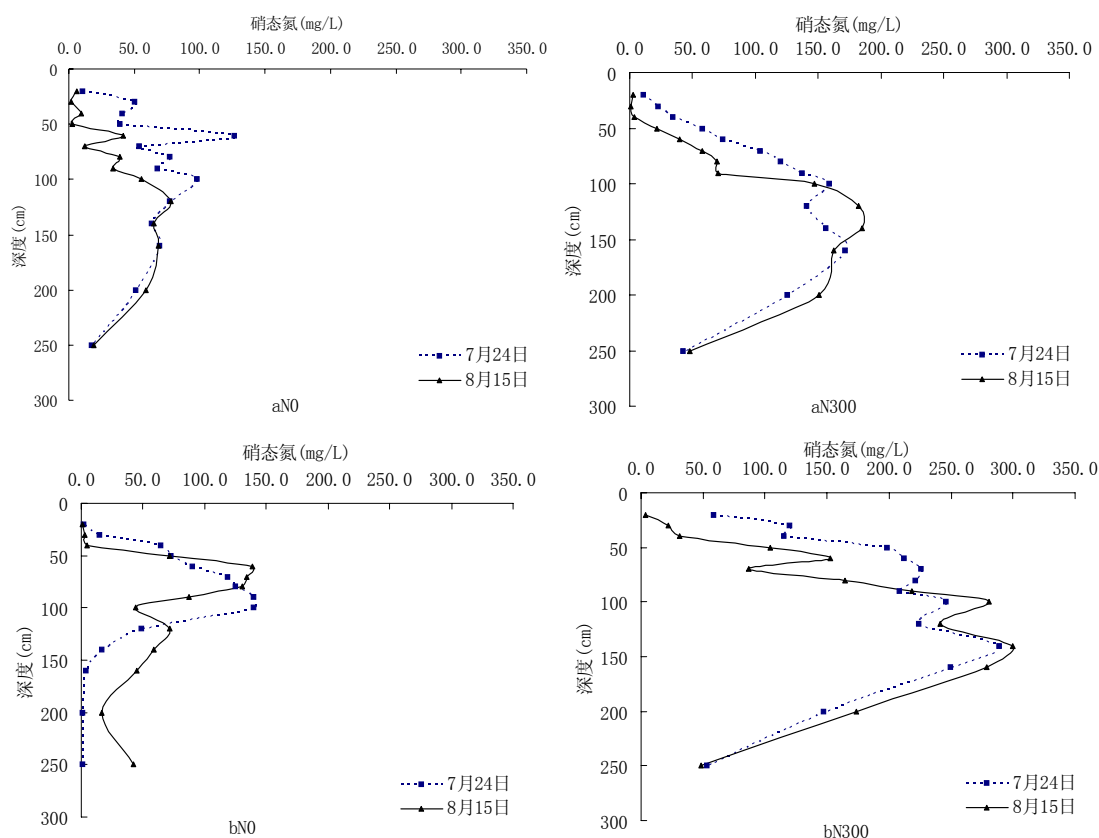


图 4-2 降水对硝态氮淋失的影响

Fig.4-2 Impact of rainfalls on NO_3^- -N leaching

与高水处理不同，低水处理有如下特征：N0、N100、N200 处理硝态氮的峰值部位明显偏上。这是因为在低水处理下，水分缺乏造成硝态氮向深层迁移动力

不足，淋失强度和深度都受到限制。同时作物根系生长受到限制，有效吸收深度减小，所以峰值上移。N300 处理条件下，由于水分限制作物不能充分吸收大量的硝态氮，过量的硝态氮向土壤深层扩散，峰值出现在 150 cm，出现深度与高水处理相似。

二、土体硝态氮储量的变化

试验观测了 2000 年 6 月玉米播种至 2002 年 10 月玉米收割期间，100 cm 土体硝态氮储量的变化（图 4-3）。由于土壤本底值的影响，2000 年夏玉米季，相同水分措施下不同氮肥处理间差异不明显。从 2001 年初小麦生长旺盛开始，差异开始显现。2001 年玉米至 2002 年玉米期间，不同氮肥处理间的差异变得非常明显。2001 年 6 月 15 日至 2001 年 10 月 7 日土体硝态氮数据的统计分析表明，观测可以反映整体试验情况（表 4-2）：（1）水分对 100 cm 土体硝态氮素有显著作用，（2）氮肥对硝态氮累积有显著作用，（3）水、氮交互作用明显，（4）除了 N0 与 N100 外，其他所有氮肥处理之间都有显著差异。图 4-3 显示 N100 和 N0 处理变化趋势基本相同，这是因为在 N100 处理氮肥不足，作物通过吸收土壤原有氮素来补充，从而导致土壤硝态氮储量不断减少；N200 处理的土壤硝态氮储量基本保持在与试验开始时相差不大的水平上，说明氮肥用量刚好等于作物吸收量、淋失和挥发量之和，保证该厚度土体硝态氮储量的动态平衡；N300 处理则呈现明显的累积，出现了氮肥使用过量的现象。

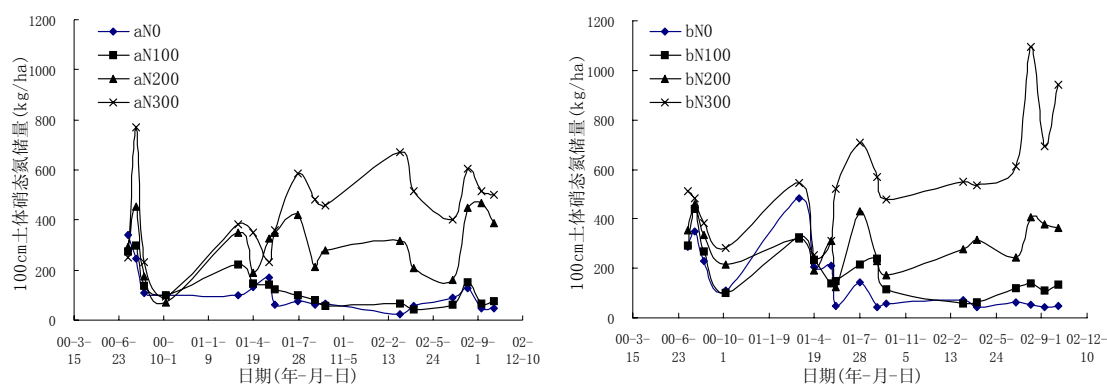


图 4-3 100 cm 土体硝态氮储量变化

Fig.4-3 Variation of total soil NO_3^- -N reserves in the 100 cm profile

表 4-2 100 cm 土体硝态氮储量双因素方差分析（2001.7—2002.10）

Tab. 4-2 Tests of Between-Subjects Effects for NO_3^- -N in 100 cm soil profile

因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
水分	0.030	N100	0.209		
氮肥	0.000	N200	0.000	0.000	
水、氮交互作用	0.039	N300	0.000	0.000	0.000

分析两个二次回归方程(图 4-4)可见:(1)二次项系数都为正值,意味着随施肥量的增加,土体硝态氮累积会一直急剧增加。(2)高水处理二次项小于低水处理,所以水分措施间土壤硝态氮储量的差异也随着施肥量增加而增加,这主要是在低水处理条件下,作物吸收能力有限,同时淋溶少。

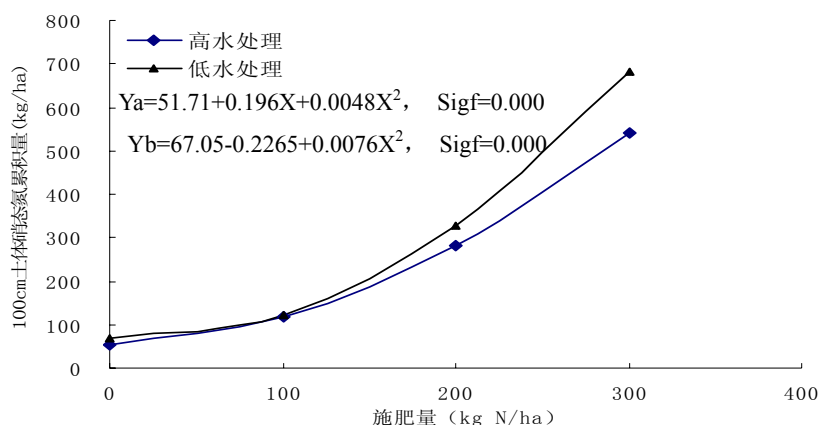


图 4-4 100 cm 土体硝态氮储量二次回归分析

Fig.4-4 Quadratic curve fit analysis of $\text{NO}_3^{-1}\text{-N}$ in 100 cm soil profile

三、淋失界面上硝态氮浓度变化

根据实验站地下水位的年均变动范围,设淋失下限为 200 cm。通过整个夏玉米生育期的分析,发现只有在低水处理下 200 cm 处的硝态氮浓度才比较低(图 4-5)。在低水处理,200 cm 处的硝态氮从 N0 到 N300 处理逐渐增加。与 2.3 的原因相同,在低水处理条件下,土壤优势流下渗能力有限,硝态氮的运移主要依靠溶质扩散和土壤平稳入渗流。N100 处理土壤表层的硝态氮被有效吸收,所以

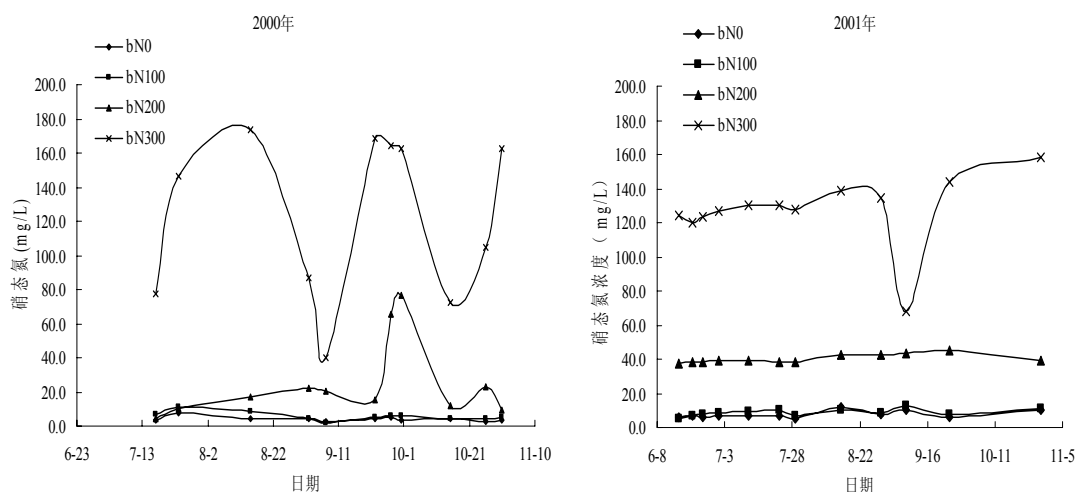


图 4-5 200 cm 深度处硝态氮浓度的动态

Fig.4-5 Variation of soil $\text{NO}_3^{-1}\text{-N}$ concentration at soil depth of 200 cm

在 200 cm 处的浓度与 N0 非常相近,没有明显差异。N200 小区浓度稍高于 N0

小区，在 2001 年生长季浓度超过国家饮用水质标准。在 N300 处理区，土壤中氮素含量高，超过了作物的有效吸收能力，扩散量大，因而在 200 cm 处形成了极高浓度。N300 曲线的两个极小值很可能是因为此前一段时间降水稀释作用所致。

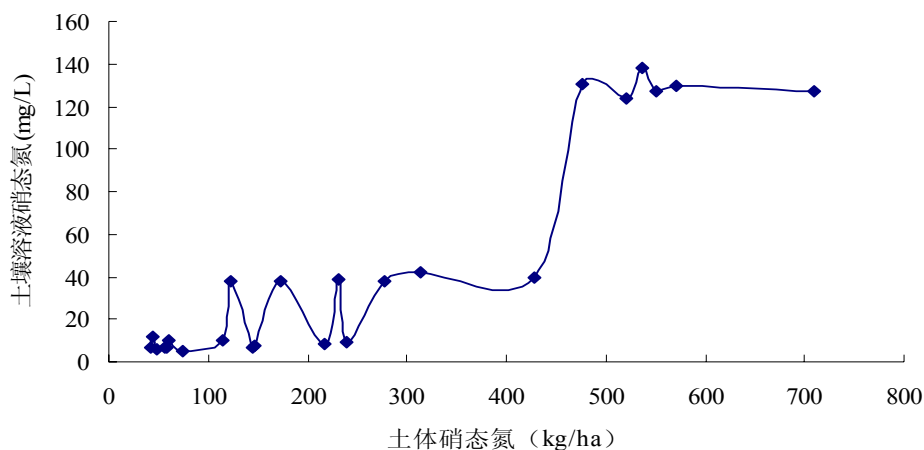


图 4-6 100 cm 土体硝态氮储量与 200 cm 土壤溶液硝态氮的关系

Fig.4-6 the relation between NO_3^- -N in 100 cm soil profile and soil NO_3^- -N concentration at soil depth of 200 cm

2001 年 6 月 15 日至 2001 年 10 月 7 日的土体硝态氮和土壤溶液硝态氮浓度做统计分析表明，二者具有极显著相关性 $\text{Sigf}=0.000$ 。图 4-6 显示在土体硝态氮储量达到 450 kg N /ha 以后，溶液硝态氮浓度出现急剧升高。再对照图 4-4 查出此时的氮肥施用量大约为 230 kg N /ha，恰好约等于最高产量时的施肥量，也与图 4-9 所反映出的浓度趋势基本吻合。由此可见施肥量、土体硝态氮储量、土壤溶液硝态氮浓度三者之间具有非常密切的连锁关系。

四、土壤溶液 pH 值的变化

鲁西北平原潮土呈中性至碱性反应，pH 有较大变化范围，非石灰性河潮土 pH6.5~7.2，碱化潮土 pH 在 8.5 以上，其他类型潮土呈中性至微碱性，pH7.5-8.5。禹城试验站历史上盐碱危害相当严重，pH 值曾经达到 9.0 以上，经过 70~80 年代的治理，盐碱状况已经明显好转，目前稳定在 8.0 左右。潮土中除了河潮土碳酸盐含量较低外，一般含量 3%~15%。在黄河冲积平原，碳酸盐含量一般随着土壤颗粒组成中粘粒含量的增加而增加。

实验站的土壤粒径分析显示，表层为轻壤土，粘粒 (<0.002mm) 含量在 22% 左右，从表层往下土壤粘粒含量具有逐渐减少的趋势，在试验取土过程中还发现在 2~3 米深度往往出现厚度在 20~40 cm 之间的砂土层，因此推测出碳酸盐含量也应该是自上而下逐渐减少。碳酸属于典型的弱酸，碳酸根离子很容易发生水解反应，使溶液呈碱性，水解强度越大碱性越强：

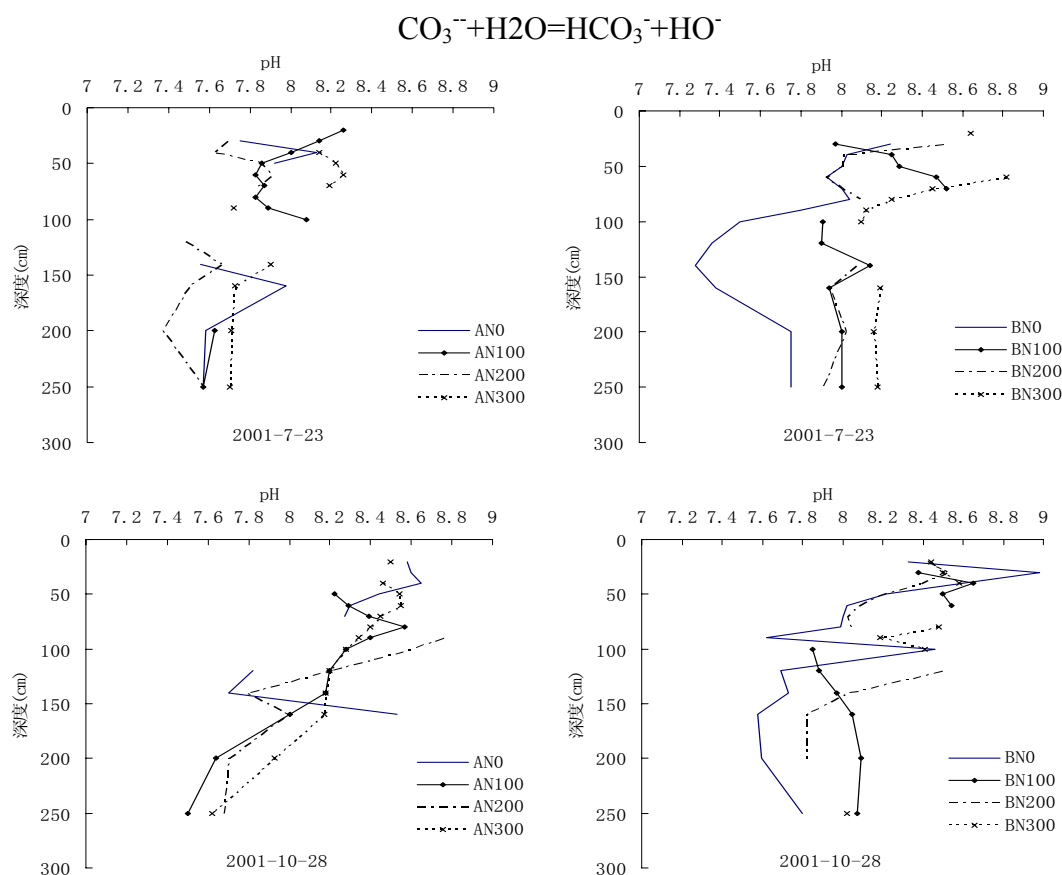


Fig.4-7 Changes of soil solution pH in soil profile during ummer maize

2001 年玉米季，分别在玉米拔节（2001-7-23）和收获后（2001-10-28），做了两次土壤溶液 pH 值观测，以研究其在 0~250 cm 土体剖面的分布情况(图 4-7)。总体上，试验地土壤介于非石灰性河潮土和碱化潮土之间，pH 变化范围在 7.4~8.6，表层土壤溶液 pH 值比较高，随着深度增加 pH 值逐渐降低。高水处理与低水处理之间未呈现出明显的 pH 值差异，因为 pH 值主要是由土壤中的碳酸盐所决定，在试验条件下水解反应完全可以使溶液 pH 维持在一个相当稳定的水平，二者含量水分的差异不会对溶液中氢氧根离子的含量产生太大影响。N300 处理的 pH 值从整个剖面来看要比其他处理的 pH 值略高，其他施肥处理之间也没有明显的变化规律。在玉米拔节期和玉米收获后土壤 pH 值没有多少变化。由此可见，至少在短期内试验设计的施肥和灌水措施不会对土壤溶液的 pH 值产生质的影响。

第三节 水、氮耦合措施对冬小麦季硝态氮淋失的影响

一、冬小麦土壤溶液硝态氮的剖面分布

2001 年 4 月 29 日（抽穗期）冬小麦第二次氮素施肥（随灌水追肥），施肥量与冬小麦播种前基肥的施用量相同，为总施肥量的 50%。А.Ф.Калинкевич(1961)

曾经在不同的温度条件下研究尿素在土壤中的转化，结果发现，当温度为 30℃ 时，尿素在土壤中一夜间就可以完全分解。而温度在 10-20℃ 时，尿素要 16-18 天才能分解完毕。尿素在土壤中的这一分解特性及当地的气候条件决定，施肥 2 周后土壤中尿素分解基本完成，硝态氮分布也就趋于稳定；同时考虑到拔节至抽穗期是冬小麦营养吸收最旺盛的时期，所以 2001 年 5 月 16 日进行了一次 0~250 cm 的土壤溶液全剖面取样分析。

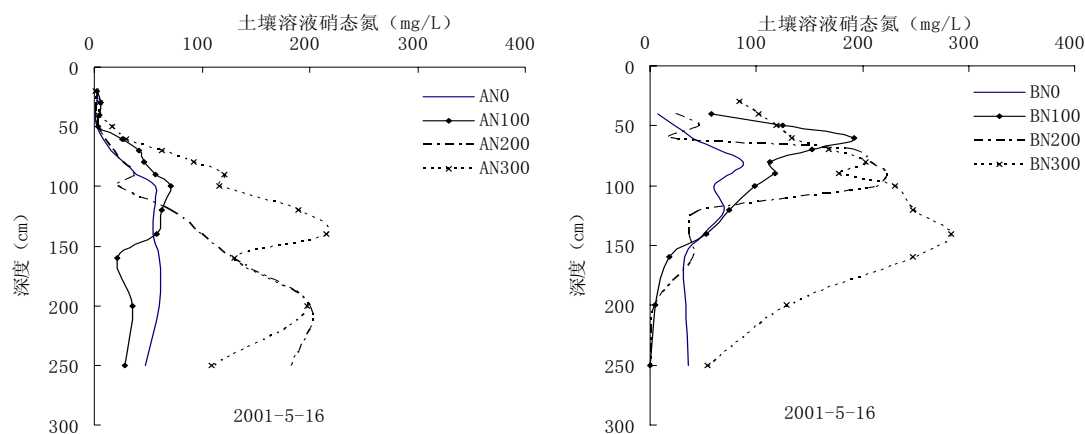


图 4-8 不同水分处理 (a,b) 区的土壤硝态氮浓度剖面分布

Fig.4-8 $\text{NO}_3\text{-N}$ profile distribution of soil solution with varied water treatments

图 4-8 表明，冬小麦季土壤溶液硝态氮的分布趋势与夏玉米基本相同：（1）高水处理所有小区在 0~100 cm 土壤剖面上，土壤溶液硝态氮浓度都较低，并且浓度随深度增加而递增，越过 100 cm 后，在不同深度达到最大值。从 100~200 cm，除了 N200 处理继续保持迅速升高外，其他处理的土壤溶液硝态氮都维持在一个比较高的水平。此后直到 250 cm，所有处理呈现明显递减趋势。（2）在低水处理的所有小区，0~60 cm 剖面上，土壤溶液硝态氮浓度都普遍比高水处理大，而且也是随深度增加而递增的，60 cm 以下先后达到最大值。N0、N100、N200 处理在浓度峰出现在 60~110 cm，此后迅速降低，在 110~250 cm 范围内三者之间差异不大。N300 处理的分布高峰出现在 70~150 cm，一度保持在 200mg/L 以上，此后直到 250 cm，呈现明显递减趋势，在 250 cm 处溶液硝态氮浓度已经降低到与前三者相近的水平。对比二者可见，高水处理的土壤溶液硝态氮浓度最高值出现深度，要比低水处理深大约 40 cm 左右，达到了 100~150 cm，这无疑大大增加了硝态氮淋失的危险。多年观测数据显示，该地区春季不太容易出现比较大的降雨，通常地下水位也处在一年之中最低的位置，大约 3~4 米，因此这一时期一般不会出现硝态氮的淋失。但是在 100 cm 以下冬小麦的根系吸收能力已经明显减弱，分布在这一深度氮素不容易被作物吸收，因此这部分氮素的当季利用率很低，会保留在土壤深层。然而接下来就是该地区降雨最多、最集中的季节，随着雨季的来临，地下水位会明显上升，有时会达到 200 cm 甚至更高，降水对

硝态氮的淋洗作用也在达到高峰，通过活塞流不断的将硝态氮向土壤深层运移，使之接近地下水，非常容易引起硝态氮的淋失。玉米根系的分布深度通常要比冬小麦浅，主要集中在 0~50 cm，冬小麦遗留的硝态氮分布深度超过了玉米的有效吸收范围，因而硝态氮更加难以利用。这一时期土壤水分的总体运动趋势是地面降水和灌溉补给土壤，是一年中土壤墒增的过程，深层水分依靠毛细上升运动到达作物根层的可能性不大，因此深层硝态氮不太可能重新回到根层。综上所述冬小麦遗留在土壤深层的硝态氮淋失危险更大。

二、100 cm 土体硝态氮储量的动态变化

100 cm 土体硝态氮储量的双因素统计分析结果显示了水肥处理对土壤硝态氮储量变化的影响。(1) 三年内，水分处理对硝态氮储量的影响不显著，这与土壤溶液硝态氮浓度的分析结果不同，说明在土壤中硝态氮除了以离子形式存在于水溶液之中外，还有另外的存在形式，这些形式氮素是需要通过特殊的方式才能够提取出来。具体是哪些存在形态还有待研究。(2) 氮肥施用对硝态氮储量具有极显著影响，虽然土壤氮素对于作物的氮素营养具有 40~50%左右的贡献率，但是最终还是要依靠外部氮素输入才能够使土壤硝态氮维持在一定的水平。(3) 水肥交互作用不显著，说明试验条件下，对于土壤硝态氮的累积，水分因素与施肥互相之间没有明显的影响。这与通常的想法有所不同，一般认为水分会影响到作物养分吸收，也会影响到土壤中养分的累积。对硝态氮却没有观测到这样的规律，说明硝态氮在土壤中的各种具体存在形态共同决定了硝态氮的供应，仅仅通过土壤溶液硝态氮的含量来考察土壤氮素供应情况是比较片面的。

施肥处理间土壤硝态氮的累积具有以下特点：(1) 三年内 N100 与 N0 之间始终没有显著差异，说明在 N100 处理下，土壤也处于氮素缺乏的状态，从而与 N0 一样，随着时间的推移土壤硝态氮储量逐渐减少。N0 与 N200、N300 之间的差异都达到极显著水平。在第三年，N300 与其他处理之间的差异十分巨大，统计分析的相伴概率降到了 0.05 以下，认为各个组的总体方差不相同，因此不能够在一起做方差检验。不考虑 N300 处理，只计算其他三个处理之间的差异性，统计分析的相伴概率达到了 0.361，可以认为各个组的总体方差相同，符合方差分析的前提条件。结果表明 N0 与 N100 仍然没有差异，N0 与 N200 之间具有极显著差异。(2) N100 与 N200 之间在第一年没有显著差异，随后两年中二者具有显著差异。N100 与 N300 之间都具有极显著差异。(3) N200 处理与 N300 之间第一年没有显著差异，在随后的两年内具有极显著差异。以上三点很好地反映了土壤氮素供应能力的变化趋势：随着管理措施的延续，N300 处理与其他处理间差异越来越大，N200 始终介于 N300 与 N100 之间，N100 与 N0 的土壤硝态氮储量都呈下降趋势，二者之间的差异不明显。

第一年和第三年的观测表明，从冬小麦返青开始，土壤硝态氮储量都呈比较明显的下降趋势，这反映作物对硝态氮的吸收在返青后一直持续不断地进行，而其他氮素形式向硝态氮的转化则相对缓慢，不足以弥补由于作物吸收造成的硝态氮浓度减少。可见在冬小麦返青前土壤硝态氮的充足贮备对于作物随后的旺盛生具有十分重要的意义，如果储备很少，则由于其他形式氮素向硝态氮的转化速度比较低，不能够满足作物的吸收，会出现营养供应不足的情况。

表 4-3 冬小麦 100 cm 土体硝态氮储量统计分析

Tab. 4-3 Tests of Between-Subjects Effects for $\text{NO}_3^{-1}\text{-N}$ in 100 cm soil profile during winter wheat

	因素	显著性	施肥差异显著性	N0	N100	N200
2001 年	水分	0.3839	N100	0.2433		
	氮肥	0.0010	N200	0.0083	0.1056	
	水氮交互作用	0.6936	N300	0.0002	0.0033	0.1274
2002 年	水分	0.1620	N100	0.9920		
	氮肥	0.0000	N200	0.0000	0.0000	
	水氮交互作用	0.5924	N300	0.0000	0.0000	0.0000
2003 年	水分	0.5248	N100	0.1144		
	氮肥	0.0000	N200	0.0000	0.0000	
	水氮交互作用	0.9136	N300			

显著水平 0.05

三、三年内 100 cm 土体硝态氮储量的动态变化

综合三年的 100 cm 土体硝态氮储量的变化，可以分析土壤硝态氮的累积发生的时期和消耗发生的时期（图）。

就冬小麦生长季而言，硝态氮累积峰分别出现在 2001 年 3 月 15 日、2002 年 3 月 12 日、2003 年 3 月 21 日，也就是说冬小麦土壤硝态氮累积在 3 月中旬达到高峰。此时刚好是冬小麦返青后 10~15 天左右，也就是说，一旦冬小麦进入春季的旺盛生长期，其对硝态氮的吸收速度就大于土壤中各氮素形式向硝态氮的转化速度，出现硝态氮的入不敷出，硝态氮储量减少，并且一直持续到冬小麦腊熟期。在冬小麦播种时，土壤硝态氮储量处在一个最低值，这显然是由于前一季夏玉米的吸收所致。播种后一直到冬小麦返青，土壤硝态氮储量呈现总体的增加趋势，可见在冬小麦越冬过程中，土壤中以其他形式存在的氮素在不断地向硝态氮转化，虽然受到温度等条件的限制，转化速度可能会非常缓慢，但由于冬小麦对硝态氮的吸收基本停止，所以总体上是供过于求，出现了硝态氮的累积，一直累积到冬小麦返青后，当吸收速度大于转化速度时累积过程才停止。

对于夏玉米，硝态氮累积峰分别出现在 2000 年 7 月 30 日、2001 年 7 月 30 日、2002 年 8 月 9 日，此时正值夏玉米孕穗期。夏玉米从一般 7 叶期或拔节期

开始就进入养分吸收旺盛期,孕穗期的土壤硝态氮一定是供不应求,已经处在硝态氮储量减少阶段,因此可以推断硝态氮累积峰至少是出现在孕穗期以前。夏玉米播种至孕穗一般一个半月左右,累积时间远远少于冬小麦,但冬小麦和夏玉米硝态氮储量的增加幅度却基本接近,所以在夏玉米生长初期,硝态氮的转化速度一定非常高,这一方面是由于此时的温度和水分条件非常适合,土壤中各种氮素迅速向硝态氮转化,另一方面拔节期施肥保证了氮素供应。孕穗期以后玉米保持很强的吸收能力,硝态氮的转化速度受到了抑制而降低,低于玉米的需求速度,出现硝态氮减少。硝态氮转化速度降低的原因很可能是此时降水导致的水分增加,而硝化作用一般是由好气自养细菌完成,在通气不足的情况下反应受到抑制,产生亚硝态氮的累积或还原为氮气,挥发损失。

无论是高水处理区还是低水处理区以上规律都比较明显,尤其 N200、N300 最为典型。N0、N100 施肥处理虽然起伏波动的幅度要明显偏小,但是依然可以观察到上述累积规律。

在三年的试验实施过程中,不同施肥处理呈现出不同的总体变化趋势。(1) 高水 N300 处理,100 cm 土体硝态氮储量呈现出不断累积,在试验结束时已经高出试验开始 250 kg/ha。低水 N300 处理,在试验结束时已经高出试验开始 550 kg/ha,平均每季增加 90 kg/ha。可见低水处理下,硝态氮在土壤表层累积的数量远远大于高水处理。高水与低水的总生物量差异甚微,不足以解释如此高的储量差异。很显然,高水处理区更多的土壤硝态氮随水分运移到了 100 cm 以下,无论从淋失的可能性和淋失量都要高于低水处理。(2) 高水 N200 处理,在试验结束时比试验开始少 21 kg/ha。低水 N200 处理,在试验结束时比试验开始少 60 kg/ha。考虑土壤硝态氮的动态转化,及取样观测时间问题,可以认为 N200 处理硝态氮储量变化不大。水分处理间的差异不明显。(3) 高水处理 N100,在试验结束时比试验开始少 211 kg N /ha; 高水处理 N0,在试验结束时比试验开始少 251 kg N /ha,二者差异不大。高水 N0 处理,在试验结束时比试验开始少 302 kg N /ha; 低水 N0 处理,在试验结束时比试验开始少 254 kg N /ha。可见不论高水低水,N0、N100 处理都出现的相同幅度的硝态氮储量减少。

第四节 小结

本章通过分析土壤溶液硝态氮剖面动态和 100 cm 土壤硝态氮储量对水氮措施响应指出:

1. 水分处理对土壤硝态氮淋失有显著影响。高水条件下,土壤水分下渗能力强,硝态氮运移深度大,所有施肥处理在 200 cm 处的硝态氮浓度都要高于国家标准 20 mg /L。低水条件下水分下渗能力弱,运移深度较小,但是 200、300 kg

N /ha 处理在 200 cm 处得硝态氮浓度依然高于国家标准 20 mg /L。强降雨或一次大量灌溉会对硝态氮向下运移产生明显的推动作用。

2. 土体硝态氮累积同时受到水分和氮肥的显著影响。

3. 在 N0、N100 处理下土壤硝态氮呈现逐年减少趋势，N200 处理下土壤硝态氮则相对稳定，N300 呈现出明显的累积。

4. 在冬小麦季和夏玉米季都分别存在土壤硝态氮的累积期和消耗期。冬小麦的累积期是播种至来年的返青后 10~15 天，此后直到收获是硝态氮消耗期。夏玉米的累积期是播种至 8 月初，此后至收获是消耗期。

5. 从经济产量和地下水水质两方面考虑，施肥应该控制在 200 kg N /ha 左右，灌溉制度应该采用低水处理。

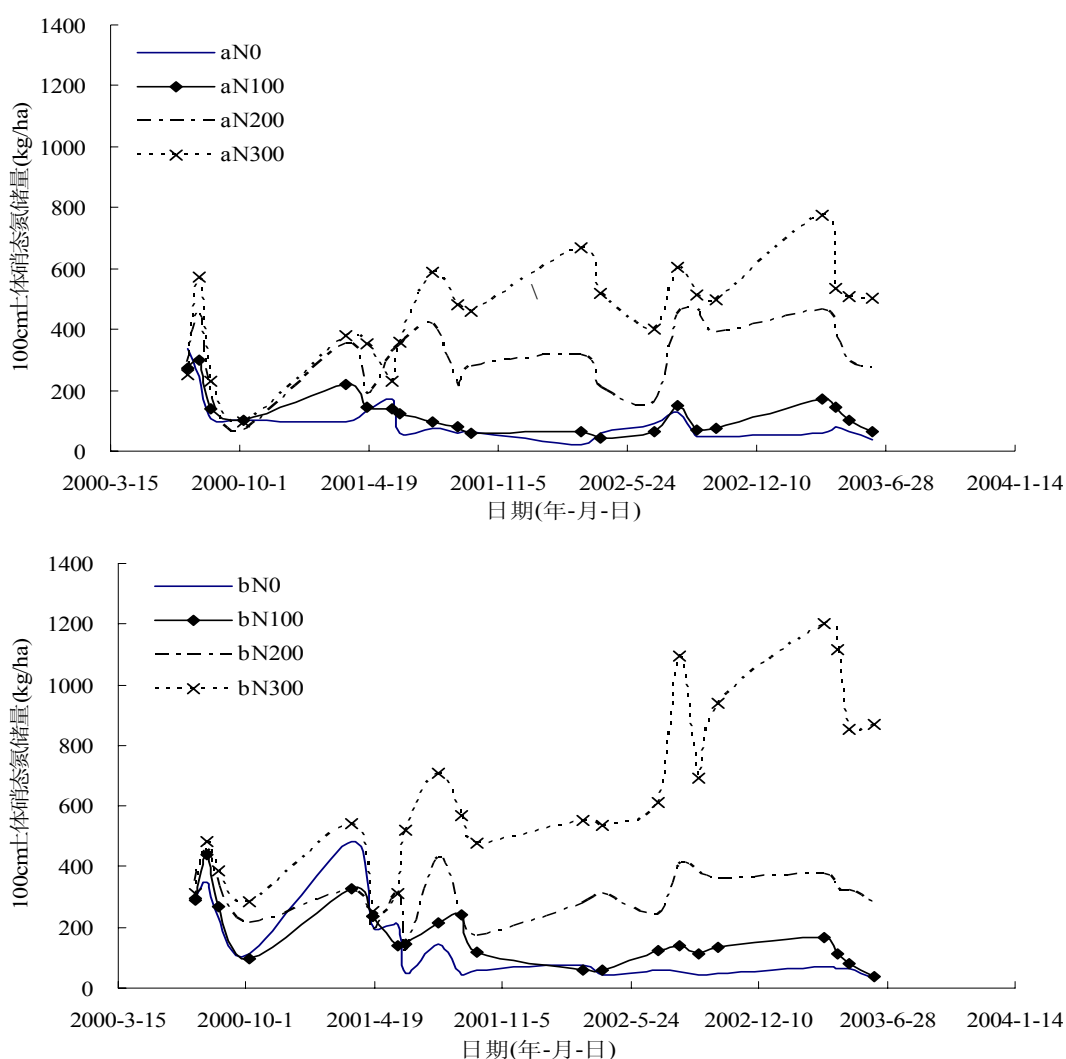


图 4-9 100 cm 土体硝态氮含量的周期性变化

Fig.4-9 Periodical variation of total soil NO_3^- -N reserves in the 100 cm profile

附录

图表编码系统:

本试验在三年内所获取数据量很大, 数据种类很多, 必须对数据进行系统的组织归类, 以便于按部就班地整理分析。而每一类数据又可以根据不同的分析思路进行各种方式的比较, 得出不同的图表。经过粗略估算, 所有这些图表总共大概有上千幅。因此必须对图表进行系统编号, 绘图工作才能不重复, 不遗漏。否则绘图分析进行到最后会因为图表越来越多, 搞不清到底已经绘制了那些图表, 还剩余那些需要绘制。更重要的是, 在写文章时候必须能够很快的找到所需的图表。为此我编制了一个简单的图表编码系统。

下面以土壤溶液硝态氮数据为例, 讲一下该系统。原始数据的结构如下图。首先任何一幅图都包含 5 个方面的信息: 取样时间 T, 水分处理 W, 氮处理 N, 土壤层次 L, 硝态氮浓度 C。其中 T, W, N, L 都可以是自变量, 但是在同一幅图中, 这四者中只能有一个是自变量, 余下的三个中又有一个是作为被考察因素, 以不同处理曲线出现, 另外两个是定值。C 在任何一幅图中都是因变量, 因此做编号时可以省略 C, 只考虑 T, W, N, L。通过四个因素的排列组合可以求出所有可能的图幅类型。现在将概念一般化, 假定有 A、B、C、D 四因素, 编码--ABCD 说明如下:

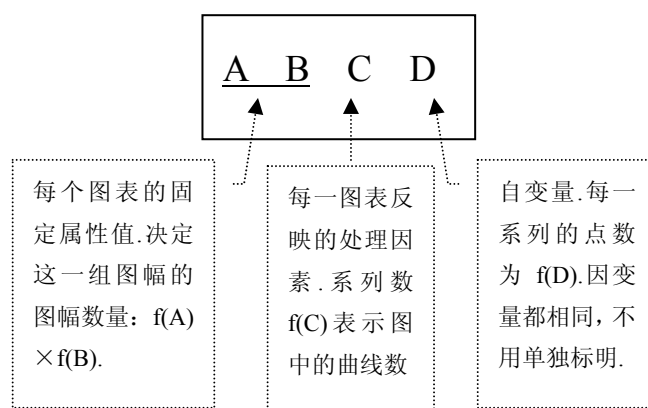


图 5-1 图表编码结构

Fig.5-1 Coding structure of Figure

14 个土层 (cm)		10	20	30	...	120	160	200	250
Date - 1	Wa	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.
	Wb	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.
Date - 2	Wa	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.
	Wb	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.
Date - k	Wa	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.
	Wb	N 0	.	.	.	.	.	.	.
		N 100	.	.	.	.	.	.	.
		N 200	.	.	.	.	.	.	.
		N 300	.	.	.	.	.	.	.

图 5-2 硝态氮溶液数据结构

Fig.5-2 Data structure of soil solution NO₃⁻-N

以最直观的 TWNL 组合为实例，可得 TWaNL、TWbNL：

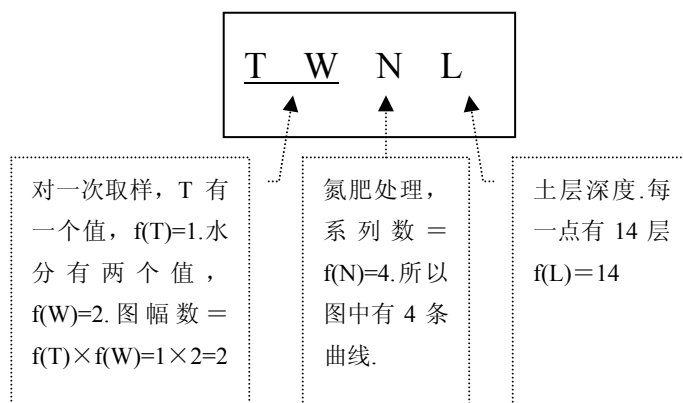


图 5-3(a)编码实例

Fig.5-3 (a) Example of figure code

下面先考虑对一次取样数据所作的作图分析。在这些图里 T 都为固定因素，而且不同图之间的 T 值相同，所以只会出现在 A、B 位置，由 T 的这一位置变化所产生的两组图是完全一样。可出现在 C、D 位置的只有 W，N，L。经过排列组合可以得到 $2 \times P_3^3 = 2 \times 3! = 12$ 组图表。这 12 组图表是（注意这里 T 只有一个值）：

1. $TWNL=WTNL$: $TWaNL$, $TWbNL$ 。反映在相同的水分处理不同的氮素处理下, 硝态氮随深度 d 变化。可以得到的图幅数量等于 T 的自由度乘以 W 的自由度, 结果为 2。

2. $TNWL=NTWL$: TN_0WL , $TN_{100}WL$, $TN_{200}WL$, $TN_{300}WL$ 。反映在相同的水分处理不同的氮素处理下, 硝态氮随深度的变化。可以得到的图幅数量等于 T 的自由度乘以 N 的自由度, 结果为 4。

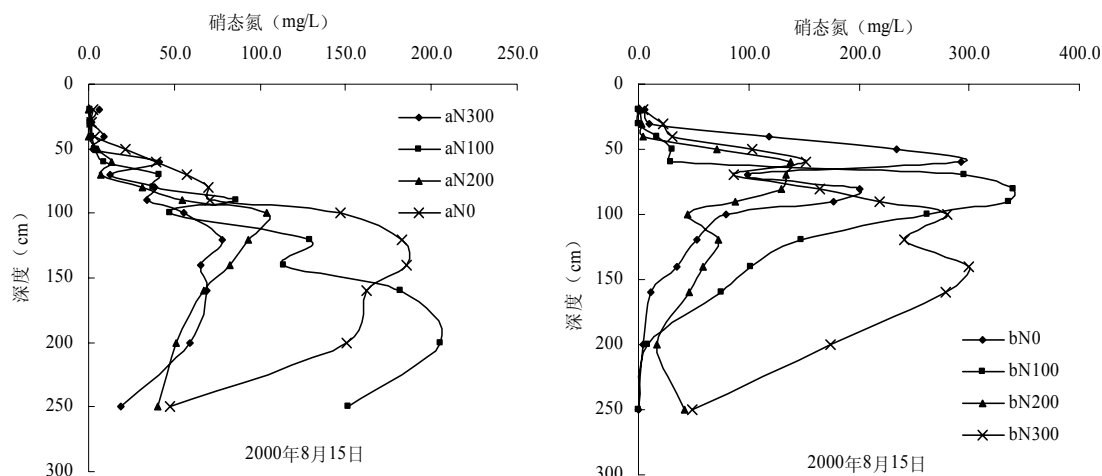


图 5-3(b) 编码实例

Fig.5-3(b) Example of figure code

3. $TWLN=WTLN$: $TWaLN$, $TWbLN$ 。反映在相同的水分处理不同土层, 硝态氮随氮素处理的变化。可以得到的图幅数量等于 T 的自由度乘以 W 的自由度, 结果为 2。与 $TWNL$ 相比可以看出, 实际上这两者的关系, 在 excel 作图里面实际上是系列产生在行或列的问题。

4. $TNLW=NTLW$: TN_0LW , $TN_{100}LW$, $TN_{200}LW$, $TN_{300}LW$ 。反映在相同的氮素处理不层次, 硝态氮随水分处理的变化。可以得到的图幅数量等于 T 的自由度乘以 N 的自由度, 结果为 4。类似的, 与 $TNLW$ 相比可以看出, 实际上这两者的关系, 在 excel 作图里面实际上也是系列产生在行或列的问题。

5. $TLWN=LTWN$: TL_1WN , TL_2WN , TL_3WN , ..., $TL_{14}WN$ 。反映相同层次不同水分处理, 硝态氮随氮素处理的变化。图幅数量等于 T 的自由度乘以 L 的自由度, 结果为 14。

6. $TLNW=LTNW$: TL_1NW , TL_2NW , TL_3NW , ..., $TL_{14}NW$ 。反映相同层次不同氮素处理, 硝态氮随水分处理的变化。图幅数量等于 T 的自由度乘以 L 的自由度, 结果为 14。与 $TLWN$ 相比可以看出, 实际上这两者的关系, 在 excel 作图里面实际上也是系列产生在行或列的问题。

总结一下, 可见一次取样数据所作的图有:

$TWNL=WTNL$ 2 幅

TNWL = NTWL 2 幅

TWLN = WTLN 4 幅

TNLW = NTLW 4 幅

TLWN = LTWN 14 幅

TLNW = LTNW 14 幅

共计 40 幅。三年取样大概 50 次，所以总共可以得到 $40 \times 50 = 2000$ 幅图。

汇总所有这 50 次取样数据，可做纵向分析。此时 T 不再作为定值，因而只能出现在编码的最后两个位置，可得图表的组数 $2 \times P_3^3 = 2 \times 3! = 12$ 。后两位编码相同，前两位颠倒顺序，所产生的两组图完全相同，所以只算做一组。

WNLT = NWLT $2 \times 4 = 8$ 幅

WNTL = NWTL $2 \times 4 = 8$ 幅

WLNT = LWNT $2 \times 14 = 28$ 幅

WLTN = LWTN $2 \times 14 = 28$ 幅

NLWT = LNWT $4 \times 14 = 56$ 幅

NLTW = LNTW $4 \times 14 = 56$ 幅

共计 184 幅图。依据此方法，其他数据也可以做出类似的编码，这里不再详述。

参考文献

- [1] Sharpley, A and M. Meyer. Minimizing agricultural nonpoint-source impacts: a symposium overview. *J. Environ. Qual.* 1994, 23:1-3.
- [2] 黄艾禾. 化肥是把双刃剑. *科技日报*, 1999年2月6日8版.
- [3] 马立珊, 钱敏仁. 太湖流域水环境硝态氮和亚硝态氮污染的研究. *环境科学*, 1987, 8(2): 60-65.
- [4] 朱济成. 关于氮肥地下流失率的初步研究. *环境科学*, 1983, 4(5): 35-40.
- [5] Comly, H. R. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *JAMA*, 1945, 129:112-116.
- [6] Ward, M. H., and et al. *Epidemiology* 1996, 7, 465-471.
- [7] Lord, E. Modeling of nitrate leaching sensitive area. In *Nitrate and Farming Systems* (eds J.R. Archer et al). *Aspects of Applied Biology*, 1992, 30:19-28
- [8] Nolan, Bernard. T. et al, A national look at nitrate contamination of groundwater, USGS, *Water conditioning and Purification*, 1998, 39(12):76-79.
- [9] Kengni, L. Vachaud, G. Thony, J.L. Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *J. Hydrol.(Amsterdam)*, 1994, 162:23-46
- [10] Bauder, J. W. and R. P. Schneider. Nitrate-nitrogen leaching following urea fertilization and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1979, 43:348-352.
- [11] Logan, T.J. Agricultural best management practices and groundwater protection. *J. Soil Water Conserv.*, 1990, 45:201-206
- [12] Diez, J.A., Roman, R., Cartagena, M.C. Controlling nitrate pollution of aquifers by using different nitrogenous CRF's in maize crop. *Agric. Ecosyst. Environ*, 1994, 48:49-56
- [13] Pier, J.W., Doerge, T.A. Concurrent evaluation of agronomic, economic, and environmental aspects of trickle-irrigated watermelon production. *J. Environ. Qual.*, 1995, 2:75-84
- [14] Lord, E.I., Shepherd, M.A. Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. *Journal of Soil Science*, 1993, 44:435-449.
- [15] Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J. Cheng, Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25:982-992
- [16] Jones C A, Kiniry J R. ed. *CERES-Maize. TX.*: Texas A&M Univ. Press, College Station, 1986.
- [17] Godwin, D.C., Jones, C.A. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In: Kanks, R.J., and Ritchie, J.T. ed. *Modeling plant and soil systems. Agron. Monogr. 31.* ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. 1991. 287-321
- [18] Wagenet R J, Hutson J L. *Leaching Estimation and CHEMISTRY Model. Continuum. Vol. 2, (Version 2).* Center for Environ. Res., Cornell Univ., Ithaca, NY, 1989
- [19] Tanji K K, Nour El Din M. Nitrogen Solute Transport. In: Kanks, R.J., Ritchie, J.T. ed. *Modeling plant and soil systems.*
- [20] 张福珠等. 应用¹⁵N研究土壤-植物系统中氮素淋失动态. *环境科学*, 1984, 5(1): 21-24.
- [21] 徐志红等. 尿素颗粒在石灰性砂壤土上对夏玉米效应及氮素去向的研究. *土壤学报*, 1987, 24:51-58
- [22] 李韵珠等, 主编. *土壤水和养分的有效利用*. 北京: 北京农业大学出版社, 1994. pp. 99-109.
- [23] 王家玉等. 稻田土壤中氮素淋失的研究. *土壤学报*, 1996, 33(1): 8-35.
- [24] 赵竟英等. 潮土硝态氮移动规律及对环境的影响. *农业环境保护*, 1996, 15(4): 166-169.

- [25] 谢经荣 等. 北京顺义县不同地貌类型粮田土壤剖面无机态氮的周年变化规律. 土壤通报, 1997, 28(2): 76-78.
- [26] 宋玉芳 等. 作物施肥条件下农田养分淋溶规律研究. 地理科学进展, 1998, 17(增刊): 148-153.
- [27] 黄元仿 等. 田间条件下土壤氮素迁移的模拟模型 II 田间检验与应用. 水利学报, 1996, (6): 15-23.
- [28] 王红旗 等. 土壤-作物系统中氮循环转化联合模型与模拟. 水利学报, 1997(增刊).
- [29] 王超. 氮类污染在土壤中迁移转化规律试验研究. 水科学进展, 1997, 8(2): 176-182.
- [30] 张国梁, 章申 等. 北京农田氮磷淋失研究. 挖掘生物高效利用养分潜力保持土壤环境良性循环论文集, 1999年4月, 239-243.
- [31] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展. 土壤, 1998(6): 291-297.
- [32] 赵微平(编). 《土壤和作物养分的测定及施肥》. 化学工业出版社, 1983年2月第一版.
- [33] 陆景陵(编著). 《作物营养与施肥》. 农业出版社, 1982年5月第一版.
- [34] Д.А.柯连科夫(苏) 著. 《氮肥的农业化学》. 农业出版社, 1983年7月第一版.
- [35] 徐克学. 生物数学. 科学出版社, 1999年10月第一版.
- [36] 黄满湘, 张申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗滤计测定冬小麦-夏玉米轮作期硝态氮淋失. 环境科学学报, 2003(1): 11-16.
- [37] 黄满湘, 张申, 张国梁. 北京地区冬小麦/夏玉米连作条件下 NO_3^- -N 淋失. 地理研究, 2002(4): 425-433.
- [38] 王小彬, 蔡典雅, 张镜清, 高绪科. 旱地玉米 N 吸收及其 N 肥利用效率研究. 中国农业科学, 34 卷: 179-186.
- [39] Food and Agricultural Organization of the United Nations[R]. FAO fertilizer Yearbook 1998, VOL.48, pp: 201. Roma.1999.
- [40] Ye Qiao lun, Rozell. Fertilizer demand in China's reforming economy[J]. Can. J. Agriculture Economics, 1994.42:191-207.
- [41] R.A.Skeffington. 不断增加的氮输入: 一个新问题还是新观点. 土壤学报, 1983(4): 22-25.
- [42] U.C.Sharma. 确定土壤和植物养分临界制的简单数学模型. 土壤学报, 1994(2): 33-36.
- [43] T.A1-Kanani, A.F.Mackenzie, and N.N.Barthakur. 表施氮肥后土壤水分与氮挥发关系. 土壤学进展, 1991(2): 38-42.
- [44] Morris Schnitzer. 土壤有机质--今后 75 年的展望. 土壤通报, 1982(1): 19-27.
- [45] M.J.Shaffer. Nitrogen modeling for soil management. JOURNAL OF SOIL AND WATER CONSERVATION, 2002:417-424.
- [46] M. Hoffmann, H. Johnsson, A. Gustafson, A. Grimvall. Leaching of nitrogen in Swedish agriculture—a historical perspective. Agriculture, Ecosystems and Environment, 80(2000) 277-290.
- [47] S.E. Allaire-Leunga, *, L. Wub, J.P. Mitchell, B.L. Sanden. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field. Agriculture Water Management, 48(2001) 37-50
- [48] M.J.D. Hack-ten Broeke. Irrigation management for optimizing crop production and nitrate leaching on grassland. Agriculture Water Management, 49(2001)97-114.
- [49] José María Peralta, Claudio O. Stockle. Dynamics of nitrate leaching under irrigated potato rotation in Washington State: a long-term simulation study. Agriculture, Ecosystems and Environment, 88(2001)23-34.
- [50] SH.Zand-Parsa, A.R.Sepaskhah. Optimal applied water and nitrogen for corn. Agriculture Water Management, 52(2001)73-85.

- [51] P. Loiseau , P. Carrère , M. Lafarge , R. Delpy, J. Dublanchet .Effect of soil-N and urine-N on nitrate leaching under pure grass , pure clover and mixed grass/clover swards. *European Journal of Agronomy* , 14(2001)113-121.
- [52] M. Pansu , Z. Sallih , and P. Bottner. Modeling of soil nitrogen forms after organic amendments under controlled conditions .*soil boil.Biochem.*, vol.30, no.1, pp.19-29 1998.
- [53] 彭琳, 彭详林, 卢宗藩. 黄土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的配肥增产作用 .*土壤学报*, 1981 (3): 209-222.
- [54] 党廷辉, 蔡贵信, 郭胜利 等. 黄土旱塬黑垆土---冬小麦系统中尿素氮的去向及增产效果 .*土壤学报*, 2002.3 39(2): 199-205.
- [55] 刘万代, 王化岑, 杨青华, 赵秀琴. 施氮对土壤水费亏损条件下冬小麦生产力的影.*土壤通报*, 31 (6): 262-264.
- [56] 李世清 , 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失.*应用生态学报*, 2000 (2): 240-242.
- [57] 杨熙仁. 肥料的增产效应与经济合理施肥. *土壤通报*, 1983 (4) .
- [58] 张道勇. 氮肥的利用率及其损失问题. *土壤通报*, 1981 (3-5) .
- [59] 曹志洪. 科学施肥与我国粮食安全保障. *土壤*, 1998 (2): 57-63, 69.
- [60] 李忠佩, 程励励, 文启孝. 黄淮海平原土壤中的固定态铵. *土壤通报*, 1992 (5): 200-202.
- [61] 陈力之, 平培良, 王林兴. 水稻生长期土壤溶液中氮素浓度的动态变化. *土壤* , 1997 (4): 215-217.
- [62] 吴建繁, 贾小红, 朱莉 等. 冬小麦氮素调控追肥技术的研究应用. *土壤通报*, 1998 (4): 168-170.
- [63] 增江海, 王智平, 农田土壤 N₂O 生成与排放研究. *土壤通报*, 1995 (3) : 132-134.
- [64] 许学前, 吴敬民, 小麦氮肥的有效利用和对水体环境污染的影响. *土壤通报*, 1999 (6) : 268-270.
- [65] B.H.Byrnes, *Fertilizer Research* 1999(26):209-215 施用氮肥的环境后果—综述.
- [66] 孙克刚, 张桂兰, 王英, 乔文学. 砂浆黑土长期施肥对作物产量及土壤剖面 NO₃⁻-N 累积的影响. *土壤通报*, 1999 (6) : 262-264.
- [67] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 郑纪慈, 李超英 计小江. 稻田土壤中氮素淋失的研究. *土壤学报*, 1996 (1) : 28-35.
- [68] 傅明高. 黑麦有机氮在土壤中矿化的研究. *土壤肥料*, 1995 (3) : 4-8.
- [69] 郭建华. 氮肥用量和水分淋溶对土壤和小麦氮素平衡的影响. *土壤通报*, 2000 (6) : 259-261.
- [70] 龚子同. 土壤学研究的新趋势. *土壤*, 1996 (6): 332-334.
- [71] 袁锋明, 陈子明, 等. 北京地区潮土表层中 NO₃⁻-N 的转化积累及其淋洗损失. *土壤学报*, 1995 (4) : 388-399.
- [72] 陈明昌, 张强, 等. 应用气候资料确定旱地冬小麦氮肥用量的初步研究. *土壤学报* 1994 (2) : 224-228
- [73] 宇振荣, 翟志席. 土壤水分对作物生长满足程度模拟模型. *土壤学报*, 1995 (4) : 458-463.
- [74] 黄明斌, 邵明安. 土壤植物系统中非稳态流研究进展. *土壤学进展*, 1994 (3) : 20-26.
- [75] 姚如河, 关士杰. 尿素基肥深施的增产效果及其在土壤中的移动状况. *土壤通报*, 1983 (5) : 31-33.
- [76] 卓名贵, 郝中源. 冬小麦吸肥规律的研究. *土壤通报*, 1983 (3) : 18-20.
- [77] 李仁岗, 淑敏, 等. 冬小麦对土壤氮和肥料的吸收及氮素平衡的研究. *土壤通报*, 1983 (4) : 21-22.
- [78] 张庆吉, 耿平. 应用 15N 对夏玉米吸氮规律的研究. *土壤通报*, 1983 (4) : 19-20.
- [79] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展. *土壤*, 1985 (1) : 2-9.
- [80] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对冬小麦产量效应的研究. *土壤学报*, 1980 (1) : 43-54.
- [81] 陈明昌, 白大鹏, 等. 冬小麦生长、水分及氮素效应的简化模型研究和初步验证. *土壤通报*, 1994

- (1): 22-24.
- [82] 魏庆丰. 粘土和土壤中的反应动力学. 土壤通报, 1992(2): 92-96.
- [83] 蔡祖聪. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化, N₂O 和 CO₂ 排放的影响. 土壤, 1999(6): 289-294.
- [84] 张道勇, 吕源澄. 农田土壤库氮素平衡研究. 土壤通报, 1992(2): 49-51.
- [85] 申义珍, 张秀美, 刘宝喜, 等. 高产小麦氮素调控指标研究. 土壤通报, 1999(3): 115-117.
- [86] 王小彬. 保持耕作土壤体系中肥料氮的行为及氮的有效管理的探讨. 土壤学进展, 1995(2): 1-9.
- [87] 吕耀. 苏南太湖地区水稻土中硝态氮淋溶的定位研究. 土壤通报, 1999(3): 113-114.
- [88] 艾应伟, 毛达如, 王兴仁, 等. 冬小麦-夏玉米轮作周期中氮、磷、钾、锌化肥合理施用的研究. 土壤通报, 1998(2): 73-75.
- [89] 沈振国, 史瑞和. 水田土壤矿化势的研究. 土壤通报, 1982(3): 250-252.
- [90] 陈科信. 关于土壤水分运动的研究. 土壤通报, 1981(5): 8-11.
- [91] 张鸿程, 黄甫湘荣, 宝德俊, 等. 冬小麦地上部器官氮磷钾的积累分配和运转的研究. 土壤通报, 2000(4): 177-179.
- [92] 孙波, 林心雄. 土壤有机质的生物学稳定性及其转化模型. 土壤学进展, 1994(1): 18-23.
- [93] 陈新平, 周金池, 宝德俊, 贾晓红, 等. 小麦玉米轮作制中氮肥效应模型的选择——经济和环境效益分析. 土壤通报, 2000(3): 346-353.
- [94] 李振高, 俞慎. 土壤硝化—反硝化作用研究进展. 土壤, 1997(6): 281-286.
- [95] 张树兰, 杨学云, 等. 几种土壤剖面的硝化作用及其动力学投资特征. 土壤学报, 2000(3): 372-379.
- [96] 汪德水, 杨晋臣, 邢睿智, 等. 半干旱地区麦田水肥效应研究. 土壤肥料, 1994(2): 1-4.
- [97] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏 II. 夏玉米. 生态学报, 2002(1): 48-53.
- [98] 马文奇, 毛达如, 张福锁. 山东省粮食作物施肥状况的评价. 土壤通报, 1999(5): 217-220.
- [99] 吴凯, 谢贤群, 刘恩民, 禹城市水资源高效利用与管理. 自然资源学报, 2000.6(增刊) 55-62.
- [100] 范丙全, 胡春芬, 平建立. 灌溉施肥度壤质潮土硝态氮淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 1998(1): 16-21.
- [101] 吕军. 浙江红壤区水分条件度冬小麦生长的动态耦合模拟. 水利学报, 1998(7): 68-72.
- [102] 童依平, 李继云, 刘全友, 孙建华. 收获后不同小麦品种土壤硝态氮残留量的差异研究. 环境科学学报, 2000(2) 251-253.
- [103] 赵允格, 邵明安. 不同施肥条件下硝态氮迁移的实验研究. 农业工程学报, 2000(4): 37-40.
- [104] 沈荣开, 王康, 张瑜芳, 等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的实验研究. 农业工程学报, 2001(5): 35-38.
- [105] 候红雨, 庞鸿宾, 齐学斌. 温室滴灌条件下氮素转化运移规律研究进展. 灌溉排水, 2002(1): 64-66.
- [106] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 高绪科. 旱地玉米 N 吸收及其 N 肥利用率研究, 2001(2): 179-186.
- [107] 姚金保, 王书文, 姚国才, 杨学明. 小麦产量构成因素的遗传分析. 上海农业学报, 2004, 20(1): 45-48.
- [108] 徐为根, 吴洪颜, 张仁祖. 用多元积分回归方法分析降水对小麦产量的影响. 江苏农业科学, 2004 年第 1 期: 24-27.
- [109] 詹其厚, 张效朴, 王泽新, 房运. 氮肥对小麦产量和品质的影响及其肥效研究. 安徽农业科学, 2003, 31(4): 544-545.
- [110] 周凌云, 李卫民. 水肥(氮) 条件对小麦产量综合效应研究. 土壤通报, 第 34 卷第 4 期: 291-294.

- [111] 于晓秋, 葛家麒, 宋伟 不同密度和施肥对小麦产量的影响分析 东北农业大学学报 34 (2): 192- 195.
- [112] 刘万代, 樊树平, 晁海燕, 王化岑, 罗毅 氮肥基追比对不同穗型优质小麦产量及品质的影响 华北农学报 2003, 18(2):56-59.
- [113] 滕树川, 罗贤君, 张且华 不同施氮量对小麦产量的影响 江西农业科技 2003 年第 5 期:25-26.
- [114] 赵炳祥 徐富安 周刘宗 徐梦熊 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率 土壤 2003 年第 2 期 :122-125.
- [115] 匡霞, 李德萍, 毕超 用 Logistic 方法制作青岛地区小麦产量预报 山东气象 2003 年第 1 期 :20-21.
- [116] 于晓秋, 葛家麒, 宋伟 综合农艺措施的小麦产量模型与效益分析 现代化农业 2003 年第 2 期(总第 283 期):16-17.
- [117] 李万昌, 刘曙东, 李桂双 强优势杂交小麦产量结构模式的研究西北植物学报 2003, 23 (1): 75-81.
- [118] 罗龙学, 吴定志, 刘尚培, 陈发雄, 雷民贵 不同施肥比例与玉米产量的关系 种子 Vol.23.No.1:56-57.
- [119] 郑若良, 宋志荣 施肥对玉米产量及品质的影响研究 杂粮作物 2003, 23 (4) :239-241.
- [120] 牟志勇 不同移栽密度对玉米产量的影响 玉米科学 2003, 11(增刊):81-82.
- [121] 张全发, 殷海善 渗水地膜对土壤水分、温度及玉米产量的影响 中国农业气象 第 23 卷第 3 期:46-48.
- [122] 王位泰 干旱与冬小麦和玉米产量关系的分析 中国农业气象 第 23 卷第 3 期:27-30.
- [123] 郑常祥, 杨文鹏, 舒世德, 傅良中 干旱条件下玉米产量的主要相关性状研究 玉米科学 2002, 10(增刊):59-61.
- [124] 王启柏, 李杰文, 王守义, 郭风法 玉米产量及其构成因素的通径分析 杂粮作物 2002, 22 (3):129-131.
- [125] 李言照, 刘光亮, 张海燕 光温因子与玉米产量的关系 西北农业学报 2001, 10 (2): 67- 70.
- [126] 向道权, 黄烈健, 曹永国, 戴景瑞 玉米产量性状主基因- 多基因遗传效应的初步研究 华北农学报 2001, 16 (3):1-5.
- [127] 张玉华, 武志杰, 刘子江, 兰井春 等 玉米长效专用复合肥不同施肥量 对玉米产量和经济效益的影响 玉米科学 2000, 8(2):80~83.
- [128] 陈国平, 陆卫平, 王忠孝 土壤和空间因子对玉米产量的影响 玉米科学 2000, 8(2):38-40.
- [129] 郑洪建, 董树亭 生态因素与玉米产量关系的研究 山东农业大学学报(自然科学版), 2000, 31 (3): 315-319.
- [130] 孙聪姝, 玉先, 周东兴, 金明 长期培肥定位试验耗竭阶段各培肥物质 对玉米产量的持续效应的研究 东北农业大学学报 30 (1): 10- 17.
- [131] 李学杰, 侯廷荣, 曹修才, 张桂阁 等 鲁西北地区玉米产量提高的限制因子与对策 国外农学—杂粮作物 1998, 18 (5):26-28.
- [132] 山东省土壤肥料工作站 《山东土壤》 中国农业出版社 1994 年 11 月 第一版 177-181.
- [133] 谢贤群, 王立军 《水环境要素观测与分析》 中国标准出版社 1998 年 10 月 第一版 279.

致谢

值此论文完成之际，首先对尊敬的导师于强致以诚挚的感谢！

在中国科学院地理资源所近三年的学习、工作和生活过程中，得到了导师无微不至的关怀和照顾，给予了充分自由的发展空间，使我可以在一个舒适、温馨的环境中集中精力学习和工作。导师渊博的专业知识，严谨求实的科研精神，平易近人的处事风格，艰苦朴素的生活作风，值得终生学习和效仿，是我不断进步的楷模。论文从选题、设计、实施、撰写、审阅到最后的定稿、评审，每个环节都倾注了导师辛勤的汗水和心血，使我少走了许多弯路，比较顺利地地完成了一项开始以为极其艰巨工作，同时在学业上取得了长足的发展，积累了比较丰富的科研经验，为以后的进一步提高奠定了比较坚实的基础。更重要的是，从导师那里学习的治学之道将使我今后受用无穷。再次表示我深深的谢意！

张国梁博士是值得我以最诚恳的态度致谢的人！如果不是张老师艰苦、细致、全面的前期努力，这篇论文也将无从谈起。在论文的每一个试验数据里都凝聚着他辛勤的汗水和智慧。论文的每个章节都经过了他耐心细致的审阅，并针对许许多多极其具体的问题提出了宝贵的建议和指导。所有这些是我能够顺利完成此文不可或缺的依靠和保障。

在禹城实验站的三年中，欧阳竹、罗毅两位老师给予了无私的帮助和巨大的支持。本试验的实施、论文的开题和文章的写作都得益于他们言简意赅的指导和建议。李运生老师在为我批改文章过程中付出了辛勤劳动，在我工作过程中给予了慷慨的指导与帮助。朱农、蔡小光老师在生活上兄弟式的照顾与关爱让我感激不尽。李俊老师耐心地和我交流思想、分析问题，使我在困惑中得到启示。谢贤群老师的帮助使我获得了巨大的精神鼓励，能够面对困境继续前进。信息室黄满湘博士给予了热心的论文指导。特别感谢舒晓明、陈力、王舒强老师在工作的大力支持与关怀。

这三年中在山东禹城试验站做试验的日子给我留下了美好的回忆。那里有活泼可爱的小杨子，老实勤恳的马姐，克尽职守的两个宋师傅，结实幽默的海勇，忠实厚道的小孟，调皮的王芹，知书达理的赵桂英，腼腆的蔡姗姗，还有于远春、王昭军、郭荣梅、郭昭光、秦春梅、腾伟、以及实验室的孟冬梅，刘翠婷，刘玉莲等等亲爱的兄弟姐妹们。你们对我的宽容与关爱，使我在那里感受到了家的温暖与舒适，对你们的感激怎一个谢字了得！

禹城站的刘恩民老师、王吉顺老师、田振荣老师、刘振民老师，在试验中帮助解决各种具体疑难问题，使我能够顺利、愉快地完成试验的布置与实施。你们丰富的经验、扎实的技术功底、认真负责的态度永远值得我学习。对你们的厚爱我表示最真诚的谢意！

同时非常感谢陈钻、吴杰、余卓渊、史登封、曹国锋、孙志刚、戎凯、王为民、王靖、肖薇等同学，以及其他关心和帮助过我的老师、同学、同事和领导。最后，感谢我的母亲！您是我永远的依靠！

鲁西北平原冬小麦—夏玉米轮作下的产量 和硝态氮动态研究

摘 要

硝态氮淋失是农田氮素淋失的主要途径之一，也是造成地下水污染的主要原因。伴随着农业集约化程度的提高、化肥用量的增加，在作物获得高产的同时，农田土壤环境与地下水质量受到的危害日益加剧。开展农田水肥措施对作物产量及对土壤硝态氮分布、运移规律与淋失影响的研究，将为定量评估水肥措施对地下水的潜在污染，提出既保证较高产量又减少硝态氮淋失损失的措施，和制定清洁科学的施肥制度提供科学依据。

试验安排在中科院禹城综合试验站进行，选择鲁西北平原具有区域代表性的冬小麦—夏玉米一年两熟农田作为研究对象，重点开展不同水肥措施下作物产量响应关系和硝态氮运移动态研究。一方面进行作物生长状态的跟踪观测，收获后测产，获得作物对水肥的响应关系。另一方面利用土壤溶液提取器 0~250 cm 的分层原位土壤溶液采集与中子仪进行 0~140cm 土壤水分含量测定，研究硝态氮在土壤中分布和运移规律。再者，利用土钻法测定土壤水分、硝态氮、铵态氮、有机质含量，确定不同管理措施对土壤肥力的影响。

通过三年的田间试验，得到以下主要结论：

1. 两种水分处理对于总生物量和经济产量的影响不显著，在试验条件下，低水处理已经足够，没有必要采用高水处理方案。氮素施用量对于总生物量和经济产量的影响显著，N0和N100处理下都达不到较高的总生物量和经济产量，N200与N300处理的总生物量和经济产量十分接近，差异不显著，N200已经能够使作物达到比较好的生长状况，N300处理不仅没能显著改善作物的生长，而且会造成不必要的肥料浪费和环境污染。水、氮交互作用对于总生物量和经济产量都未见显著影响，水、氮两个因素之间独立性比较强。
2. 通过分析产量构成因子模拟出的产量与实测产量间的相关性，发现穗数、穗粒数和千粒重与产量的作用关系具有比较明显的年际变化，受到气候等因子的影响。
3. 水分处理对土壤硝态氮淋失有显著影响。高水条件下，土壤水分下渗能力强，

硝态氮运移深度大，所有施肥处理在 200 cm 处的硝态氮浓度都要高于饮用水卫生标准 20 mg N/L。低水条件下水分下渗能力弱，运移深度较小，但是 200、300 kg N/ha 处理在 200 cm 处的硝态氮浓度依然高于 20 mg N/L。强降雨或一次大量灌溉会对硝态氮向下运移产生明显的促进作用。

4. 土体硝态氮累积同时受到水分和氮肥的显著影响。在 N0、N100 处理下土壤硝态氮呈现逐年减少趋势，N200 处理下土壤硝态氮则相对稳定，N300 呈现出明显的累积。
5. 在冬小麦季和夏玉米季都存在土壤硝态氮的累积期和消耗期。冬小麦的累积期是播种至来年的返青后 10~15 天，此后直到收获是硝态氮消耗期。夏玉米的累积期是播种至 8 月初，此后至收获是消耗期。
6. 从经济产量和地下水水质两方面综合考虑，施肥应该控制在 200 kg N/ha 左右，灌溉制度应该采用低水处理。

关键词：鲁西北平原，冬小麦，夏玉米，产量，硝态氮

Yield and Nitrate Movement with Winter Wheat-Summer Maize Rotation Cropping System in Northwest Plain of Shandong Province

Abstract

As a major way for nitrogen loss, nitrate leaching from the tillage layer results in NO_3^- -N accumulation in the deeper soil layers, and under this situation the groundwater was contaminated. With the development of agricultural intensivism and increase of fertilizer application rates, the yield has reached a relatively higher level recently. But at the same time the agricultural environment in soil and groundwater quality are facing more and more serious situation. To study the responses of yield to the irrigation and fertilization we setup experimental plots with treatments of N0, N100, N200, N300 under two different water levels at Yucheng Comprehensive Experimental Station CAS., which was located in Yu Cheng City of Shandong Province, where the typical agriculture practice is winter wheat and summer maize rotation. The objective of the research was to develop data basis for quantitatively evaluating the latent pollution caused by treatments above, and provide rational water and fertilizer methods that can keep high yield level and decrease the nitrate leaching at the same time.

First we observed the growth status of crops and yields in order to quantify the crop responses to irrigation and fertilization. Secondly we analyzed temporal dynamics of nitrate concentration at 0~250 cm soil profile with different nitrogen fertilizer rates, which was sampled by suction cups buried in the undisturbed soil, and simultaneously soil water content was measured with neutron probe to study the

movement and distribution of nitrate in the soil solution. Then the soil water, nitrate, ammonium and organic matter were detected to study the effect of water and fertilizer treatments on soil fertility.

The following conclusions were drawn from the three years experiments:

1. There is not evident effect of water treatment on total biomass or yield, so there is no need to apply high water treatment, since the low water application is enough for water requirements of crops growth. Effect of nitrogen fertilizer measurements to either total biomass or yield both is evident. Under N0 or N100 nitrogen fertilizer treatments the total biomass and yield cannot meet a satisfied high level, and there is no evident difference of total biomass or yield between N200 and N300 nitrogen fertilizer strategies. Water and nitrogen fertilizer are mutually independent, so the interaction of water and fertilizer has no evident effect on total biomass or yield.
2. Through the analysis of relationship between the observed yield and simulated yield we found that although the yield was always contributed by spikes on unit area farmland, number of grains per spike and the mass of every 1000 grains, but the relationship between yield and its components is different according the annual change of climate.
3. Different water treatments had evident impacts to nitrate leaching. Higher water application can accelerate the leaching of nitrate evidently. Under high water level, the peaks values of soil nitrate concentration appeared at deeper layers than that of low water level, meanwhile the nitrate concentrations of soil water at the depth of 200 cm were higher than the national drinking water limit (20 mg N /L). Comparatively, under low water treatment the nitrate leaching depths were less than those under high water treatment. However NO_3^- -N concentrations of soil solution under level of 200、300 kg N ha^{-1} at the depth of 200 cm still exceeded the national drinking water limit (10 mg N /L).
4. Water and fertilizer treatments had evident effects on the accumulation of soil nitrate. Under N0 or N100 fertilizer treatment the total amounts of soil nitrate will decrease annually, meanwhile it maintained the stable level under N200, and it accumulated under N300.
5. In both winter wheat and summer maize, there existed soil nitrate accumulation stage and nitrate decrease stage. For winter wheat the nitrate accumulation stage was from sowing to 10 to 15 days after return-green next year, and the decrease stage was from then to the end of this wheat gross season. For summer maize the nitrate accumulation stage was from sowing to the beginning of August, and the decrease stage was from then until harvest.
6. Considering the yield and groundwater quality, we should apply the fertilizer rates at about 200 kg N /ha and the water treatment at low water.

Keywords: Northwest Plain of Shandong Province, Winter Wheat, Summer Maize, Yield, Nitrate