

# 鲁西北平原夏玉米产量与土壤硝态氮淋失

王兴武, 于 强\*, 张国梁, 李运生

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 供水量和氮肥施用量是影响农田硝态氮淋失的主要因素。本文通过田间小区试验, 研究了水分和氮肥用量对夏玉米产量和土壤硝态氮的影响。试验表明, 高水处理 (0~50 cm 平均含水量控制在 85% FC, FC 为田间持水量 0.32) 和低水处理 (0~50 cm 平均含水量控制在 70% FC) 间产量差异不显著, 施肥量 (0, 100, 200 和 300 kg N ha<sup>-1</sup>) 则具有显著影响, 并且在 200 kg N ha<sup>-1</sup> 左右时达到最高产量; 高水条件下土壤水分硝态氮下渗强, 运移深度大, 所有施肥处理在 200 cm 处的土壤水硝态氮浓度都要高于国家饮用地下水标准 10 mg N L<sup>-1</sup>; 低水条件下水分下渗弱, 运移深度小于高水处理, 但是在 200 cm 处, 200, 300 kg N ha<sup>-1</sup> 处理的土壤溶液硝态氮浓度依然高于 10 mg N L<sup>-1</sup>。

**关键词:** 水分; 氮肥; 硝态氮淋失; 夏玉米

**文章编号:** 1000-0585(2005)05-0140-11

农田氮素的垂向迁移和淋失会引起地下水中硝态氮的不断上升, 导致水质退化, 危及人类健康<sup>[1~5]</sup>。在所有影响淋失的可控因素中水、肥管理是最重要的两个<sup>[6~10]</sup>。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”; 美国地质调查局 (USGS) 也于近期完成了地下水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 污染全国风险图, 以指导农民合理施肥; 欧共体 (CEC) 在 1991~1994 年进行了国际性多学科实验, 确定了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”<sup>[11~16]</sup>。

近来我国对硝态氮的淋失问题开展了许多研究工作<sup>[17~25]</sup>。这些研究或者利用渗滤池及大型原状土柱渗漏计研究北京地区硝态氮的淋失与转化<sup>[7, 25]</sup>, 或者利用渗滤池研究水田硝态氮淋失, 或者安排在中国西北黄土高原半干旱地区和太行山前平原等地下水位非常低、水位波动对土壤硝态氮的淋失影响小的地区。在旱田、地下水位比较高、大田条件和较深层进行作物总量和土壤氮素动态研究的资料不多。

鲁西北地区位于华北平原东端、黄河下游的冲积平原上。该地区土质疏松, 夏季地下水位在 200 cm 左右, 且升降频繁, 极易造成硝态氮的淋失。为获玉米高产, 大水漫灌和过量氮肥施用相当普遍。夏玉米季 (6~9 月) 降水集中, 氮素易于淋失。本实验目的是在大田及更深的土壤层次 (0~250 cm) 条件下, 查明该地区夏玉米季不同水、氮处理对产量的响应, 确定土壤硝态氮浓度动态, 制定该地区的最佳农业水肥管理措施。

收稿日期: 2004-03-28 修订日期: 2004-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40001021)

作者简介: 王兴武 (1973-), 男, 山东济南人, 硕士。主要从事农田生态环境研究。E-mail: wangw@igsnrr.ac.cn

\* 通讯作者: 于 强 (1962-), 男, 安徽阜阳人。研究员, 博士生导师。E-mail: yuq@igsnrr.ac.cn

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院禹城综合试验站进行。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  $1/5\ 000\sim 1/7\ 000$ 。该地区属于典型的暖温带大陆性季风气候, 年平均气温  $13.1^{\circ}\text{C}$ , 极端高温  $42.2^{\circ}\text{C}$ , 极端低温  $-25.0^{\circ}\text{C}$ , 平均年降雨量 600 mm, 降水集中在 6~9 月份。本区是华北平原有代表性的农业中、高产区, 主要种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。本区 97% 的土壤属潮土, 土壤基本性质见表 1。

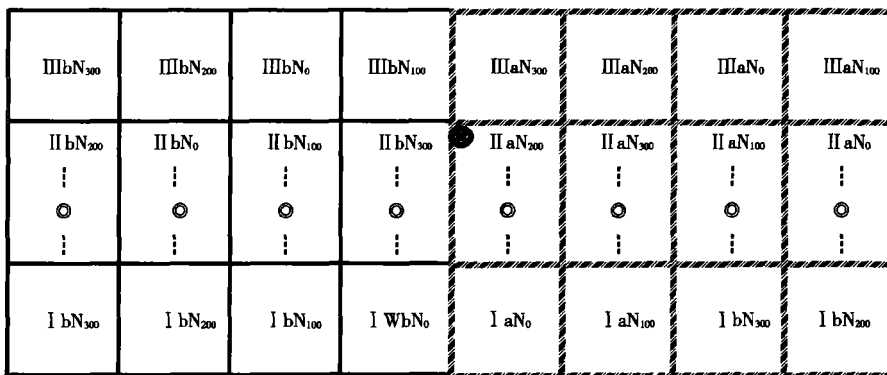
表 1 试验土壤理化性质

Tab 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 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	有效钾 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	容重 ( $\text{g cm}^{-3}$ )
		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

### 1.2 试验设计及处理

试验于 2000~2002 年进行, 为水、氮双因素裂区设计 (图 1), 共有 24 个小区 (2 水分  $\times$  4 氮素  $\times$  3 重复), 每个小区面积为  $50\text{ m}^2$  ( $12.5\text{ m} \times 4\text{ m}$ )。水分处理为实验的主处理, 分高水 (a) 和低水 (b) 两个水平。a 定义为在整个生长季 0~50 cm 土层平均含水量为土壤田间持水量 (FC) 的 85% FC, 补偿控制幅度为 70%~100% FC。b 则为平均 70% FC, 控制幅度为 55%~83% FC。土体水分控制方式为补偿式灌溉法: 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; 同理对于 b, 一旦发现土壤含水量下降为 55% FC, 便回灌使之恢复至 83% 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  $300\text{ kg N ha}^{-1}$ 。考虑到玉米营养特性及氮素淋失



注:  $\odot$  中子管  $\vdots$  土壤溶液提取器  $\bullet$  地下水位观测井 I aN<sub>100</sub> 表示高水  $100\text{ kg N ha}^{-1}$  第一重复, II bN<sub>100</sub> 表示低水  $100\text{ kg N ha}^{-1}$  第二重复, 其他代号类似。

图 1 裂区设计示意图

Fig 1 The layout of experimental sites

特点, 氮肥分两次等量追施, 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 ( $N \geq 46.2\%$ )。在上季冬小麦播种前施 P、K 肥为作为基肥, 用量分别为过磷酸钙 ( $P_2O_5 \geq 18\%$ )  $1500\text{ kg ha}^{-1}$ , 硫酸钾 ( $K_2O \geq 52\%$ )  $450\text{ kg ha}^{-1}$ 。

1.3 田间观测及采样、分析

土壤水分观测用中子仪法, 中子管埋在第二重复内各小区中央。土壤溶液用多孔杯抽取。多孔杯埋设在试验第二重复 8个小区的中部。深度分别为 2Q 3Q 4Q 5Q 6Q 7Q 8Q 9Q 10Q 12Q 14Q 16Q 200和 250 cm。距该点南北各 2m 处埋设两组重复, 深度分别为 2Q 5Q 100和 160 cm。每次较大降水或灌溉 ( $> 30\text{ mm}$ ) 后抽取土壤溶液, 取样负压为  $0.8\text{ MPa}$ 。在分析前土壤溶液装入 50ml 聚氯乙稀塑料瓶内冷冻保鲜, 硝态氮分析采用氯化钾提取紫外分光光度法。

夏玉米品种为农大 108 生育期长度约为 108天 (表 2), 播种密度  $58000\text{株 ha}^{-1}$ 。在播种前土壤墒情比较差, 需灌水, 为便于控制, 此次灌水使各个小区的水分分别达到设计上限 (高水  $100\% \text{ FC}$ , 低水  $85\% \text{ FC}$ )。降水与地下水位变化状况见图 2。

表 2 夏玉米生育期 (月-日)

Tab. 2 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

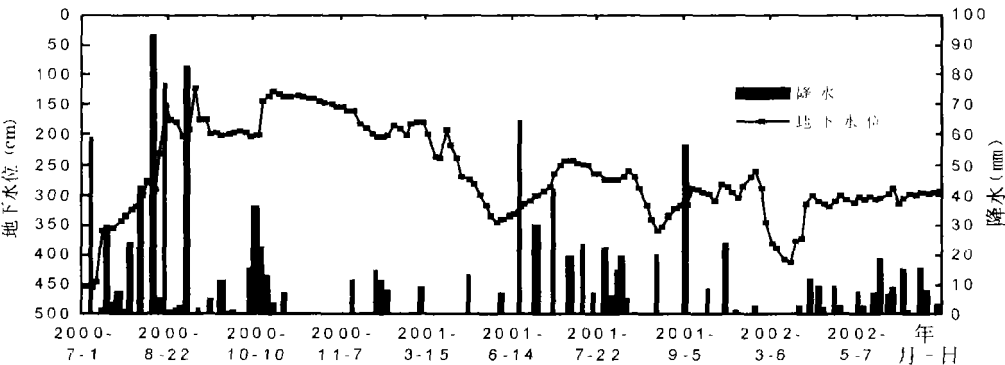


图 2 试验期降水和地下水位变化

Fig. 2 Precipitation and variation of groundwater table during the study period

2 结果和讨论

2.1 水氮措施的作物产量效应

2.1.1 水氮措施与总生物量的关系 由于土壤本底值的差异, 2000年不同处理间玉米生长状况差异不明显, 因此只取样计算了经济产量, 未计算总生物量。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)。由该表可见: (1) 在试验进行的两年中, 水分影响均不显著; 氮素影响显著; 水、氮交互作用不显著。因此就总生物量而言, 没有必要采用高水管理措施, 而氮素施用量对总生物量至关重要,

水分、氮肥两因素基本上互相独立。(2) 2001年, 只有  $N_0$  和其他处理之间的差异显著,  $N_{100}$ 、 $N_{200}$ 、 $N_{300}$ 相互间的差异都不显著, 而 2002年, 所有氮肥处理间的差异都达到了显著水平。这说明随着施肥管理措施的实施时间变长, 土壤本底肥力的差异开始变大, 从而施肥处理对产量的影响变大。

表 3 生物量双因素方差分析

Tab. 3 Tests of Between-Subjects Effect for biomass

年份	因素	显著性	施肥差异显著性	$N_0$	$N_{100}$	$N_{200}$
2001年	水分	0.379	$N_{100}$	0.002		
	氮肥	0.000	$N_{200}$	0.000	0.204	
	水、氮交互作用	0.768	$N_{300}$	0.000	0.142	0.828
	水分	0.902	$N_{100}$	0.000		
2002年	氮肥	0.000	$N_{200}$	0.000	0.025	
	水、氮交互作用	0.269	$N_{300}$	0.000	0.000	0.012
	水分					

显著性水平 0.05

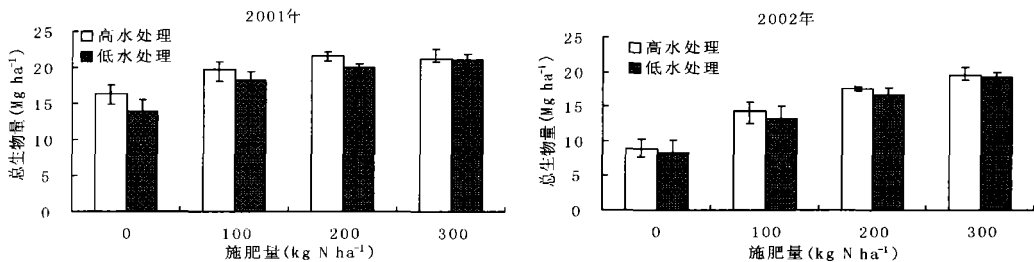


图 3 施肥量与总生物量的关系

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

总生物量与施肥量具有良好的规律性 (图 3), 做二次回归拟和达到显著水平 (表 4)。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-肥效则相反:  $77.153 < 90.788$ ,  $43.087 < 48.631$ , 即高水肥效小于低水肥效。这说明了边际效应递减规律, 即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%), 这也间接说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

表 4 总生物量二次回归分析

Tab. 4 Quadratic curve fit analysis of biomass

	水分	显著性	b0	b1	b2	$X_{max}$	增幅%	$Y_{max}$	增幅	肥效
2001	a	0.002	14.012	0.0585	-1.0E-04	292.50	24.47	22.57	5.77	77.153
	b	0.015	16.365	0.0423	-9.0E-05	235.00		21.34		90.788
2002	a	0.000	9.171	0.0478	-5.0E-05	478.00	19.71	20.60	6.06	43.087
	b	0.000	8.258	0.0559	-7.0E-05	399.29		19.42		48.631

$Y_{max}$  最大总生物量 ( $Mg\ ha^{-1}$ ),  $X_{max}$  对应的施肥量 ( $kg\ N\ ha^{-1}$ ),  
增幅 =  $100 \times (X_{amax} - X_{bmax}) / X_{bmax}$ , 肥效 =  $Y_{max} / X_{max}$  ( $kg\ kg^{-1}\ N$ )。

低。主要因为 2002年降水较少，水分供应相对不足使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，增加了氮素的挥发；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。

2. 1. 2 水氮措施与经济产量的关系 同样，由于土壤本底值的差异，2000年经济产量的统计分析表明，所有因子的作用都不显著。2001、2002年经济产量从统计学角度看，则可反映试验条件下的整体情况（表 5）。（1）2001至 2002年，氮肥的影响始终显著；水、氮交互作用始终不显著；与表 3不同的是水分的影响由不显著变得显著。进一步分析表 6 可见，水分间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，因此水分的这一表观显著差异不合乎常理，是受到了其他因素影响，不能简单地认为水分作用显著。（2）2001年只有  $N_0$  与其他处理间的差异显著。2002年， $N_{100}$ 与  $N_{200}$ 、 $N_{300}$ 间的差异也变得显著，但是  $N_{200}$ 与  $N_{300}$ 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。

表 5 产量双因素方差分析

Tab. 5 Tests of Between-Subjects Effects for yield						
年份	因素	显著性	施肥差异显著性	$N_0$	$N_{100}$	$N_{200}$
2000年	水分	0. 298	$N_{100}$	0. 353		
	氮肥	0. 353	$N_{200}$	0. 798	0. 496	
	水、氮交互作用	0. 033	$N_{300}$	0. 386	0. 083	0. 267
2001年	水分	0. 430	$N_{100}$	0. 001		
	氮肥	0. 000	$N_{200}$	0. 000	0. 097	
	水、氮交互作用	0. 374	$N_{300}$	0. 000	0. 267	0. 547
2002年	水分	0. 002	$N_{100}$	0. 000		
	氮肥	0. 000	$N_{200}$	0. 000	0. 007	
	水、氮交互作用	0. 609	$N_{300}$	0. 000	0. 006	0. 985

显著性水平 0. 05

表 6 产量二次回归分析

Tab. 6 Quadratic curve fit analysis of yield										
	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

根据两年产量作二次回归分析（表 6），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  $220\text{ kgN ha}^{-1}$ 。2001年到 2002年的年际变化有以下几点：（1）不论高水低水，最高产量所对应的施肥量都增加，（2）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。

经济系数的变化 (图 4) 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。高水处理的经系数高于低水处理, 这从生态学角度看, 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, 将营养物质输送到营养体, 然后才根据剩余营养物质的多少进行生殖生长, 这反映了物种与自然界的适应关系。水肥充足时, 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, 从而使得遗传器官中聚集的营养物质比例增加, 小麦的经济系数增加, 这反映了同一物种不同个体间的竞争关系。

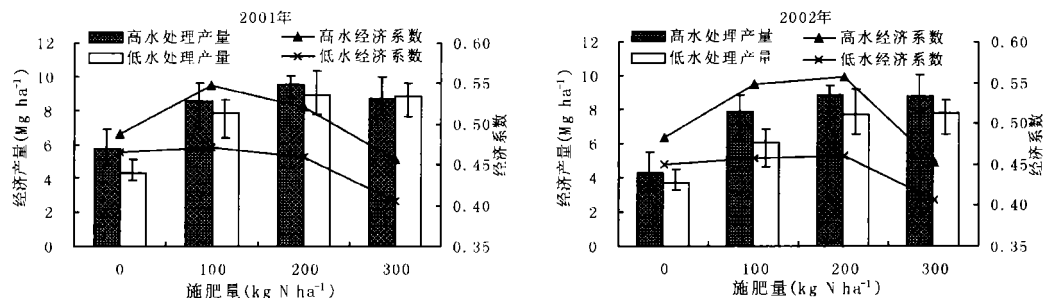


图 4 施肥量与玉米产量和经济系数的关系

Fig. 4 The relationship between fertilization and yield of maize and economic coefficients

## 2.2 水分对土壤溶液硝态氮作用

### 2.2.1 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。水分运动是硝态氮素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, 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日数据进行分析 (图5)。图5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的深度, 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 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N L<sup>-1</sup>, 已经对地下水造成了污染。

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%的土壤水流量<sup>[20, 21]</sup>。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, 大量累积在土壤深层, 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得多。

### 2.2.2 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

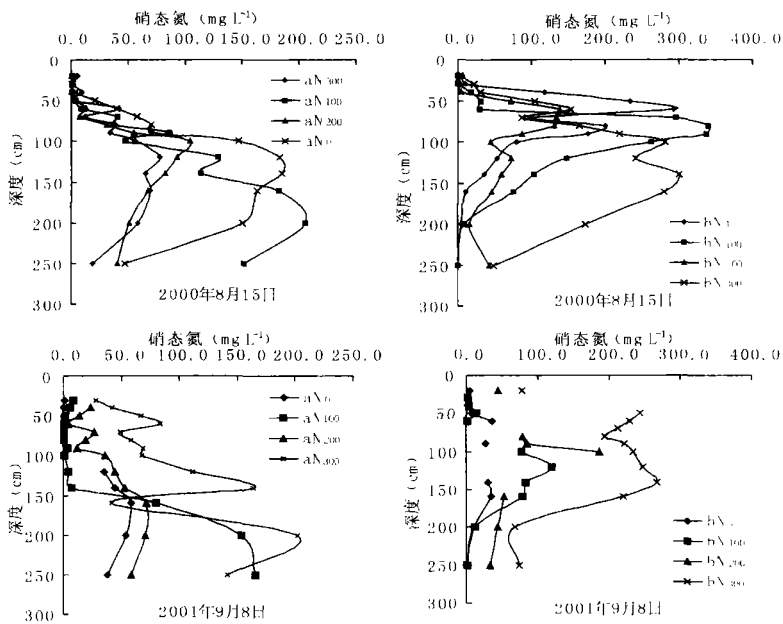


图 5 不同水分处理 (a高水, b低水) 区的土壤硝态氮浓度剖面分布  
Fig. 5  $\text{NO}_3^-$ -N profile distribution of soil solution with varied water treatments

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 6) 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 6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。

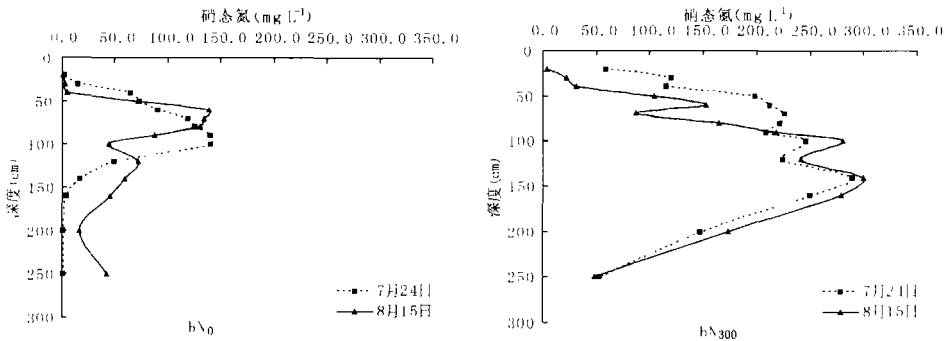


图 6 降水对硝态氮淋失的影响  
Fig. 6 Impact of rain falls on  $\text{NO}_3^-$ -N leaching

2.3 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, 100cm 土体硝态氮储量的变化 (图 7)。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

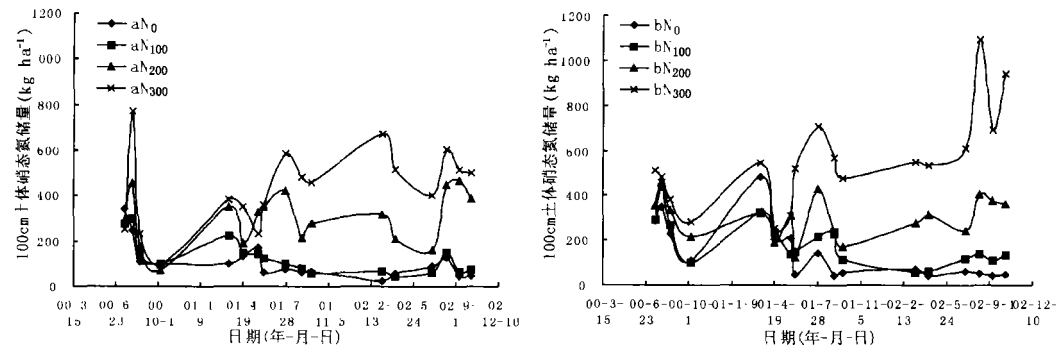


图 7 100cm 土体硝态氮储量变化

Fig. 7 Variation of total soilNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N reserves in the 100 cm profile

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 7): (1) 水分对 100cm 土体硝态氮累积有显著作用, (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 N<sub>0</sub> 与 N<sub>100</sub> 外, 其他所有氮肥处理之间都有显著差异。图 7 显示 N<sub>100</sub> 和 N<sub>0</sub> 处理变化趋势基本相同, 这是因为在 N<sub>100</sub> 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; N<sub>200</sub> 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; N<sub>300</sub> 处理则呈现明显的累积, 出现了氮肥使用过量的现象。

表 7 100 cm 土体硝态氮储量双因素方差分析 (2001 年 7 月 - 2002 年 10 月)

Tab. 7 Tests of Between-Subjects Effects for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in 100 cm soil profile

因素	显著性	施肥差异显著性	N <sub>0</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>200</sub>
水分	0.030	N <sub>100</sub>	0.209		
氮肥	0.000	N <sub>200</sub>	0.000	0.000	
水、氮交互作用	0.039	N <sub>300</sub>	0.000	0.000	0.000

显著性水平 0.05

分析两个二次回归方程 (图 8) 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, 这主要是受低水条件下, 作物吸收能力有限, 同时淋溶少。

2.4 生长季内淋失界面上硝态氮浓度变化

根据试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 9)。在低水处



理, 200 cm 处的硝态氮从  $N_0$  到  $N_{300}$  处理逐渐增加。与 2.3 的原因相同,  $N_{100}$  处理土壤表层的硝态氮被有效吸收, 所以在 200 cm 处的浓度与  $N_0$  非常相近, 没有明显差异。  $N_{200}$  小区浓度稍高于  $N_0$  小区, 在 2001 年生长季浓度超过国家饮用水质标准。在  $N_{300}$  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。  $N_{300}$  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。

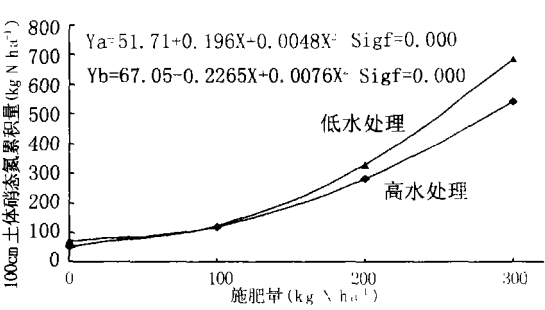


图 8 100 cm 土体硝态氮储量二次回归分析  
Fig. 8 Quadratic curve fit analysis of  $NO_3^-$ -N in 100 cm soil profile

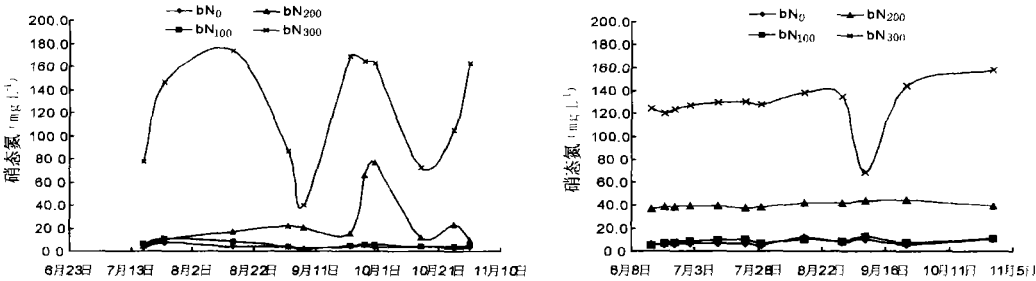


图 9 低水处理区 200 cm 深度处硝态氮浓度的动态  
Fig. 9 Variation of soil  $NO_3^-$ -N concentration at soil depth of 200 cm under low water

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统计分析表明, 二者具有极显著相关性  $Sig. = 0.000$ 。图 10 显示在土体硝态氮储量达到  $450 kg N ha^{-1}$  后, 溶液硝态氮浓度出现急剧升高。再对照图 8 查出此时的氮肥施用量大约为  $230 kg N ha^{-1}$ , 恰好约等于最高产量时的施肥量, 也与图 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。

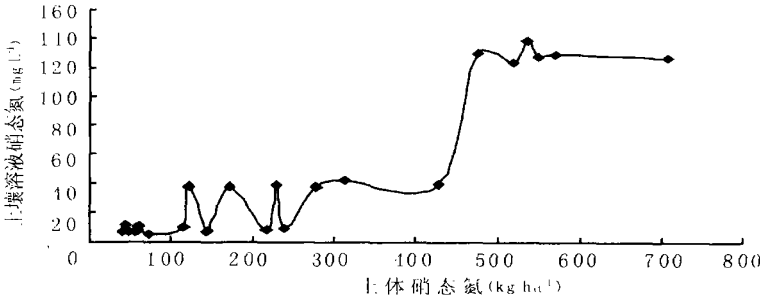


图 10 100cm 土体硝态氮储量与 200cm 土壤溶液硝态氮的关系  
Fig. 10 The relationship between  $NO_3^-$ -N in 100 cm soil profile and soil  $NO_3^-$ -N concentration at soil depth of 200 cm

### 3 结论

试验所设定的两个水分处理间总生物量、经济产量均未见显著差异。经济产量对氮肥有显著的响应, 在氮肥施用量  $200\text{ kg N ha}^{-1}$  左右达到最高值。

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  $200\text{ cm}$  处的硝态氮浓度都要高于国家标准  $10\text{ mg L}^{-1}$ 。低水条件下水分下渗能力弱, 运移深度较小, 但是  $200\text{--}300\text{ kg N ha}^{-1}$  处理在  $200\text{ cm}$  处得硝态氮浓度依然高于国家标准  $10\text{ mg L}^{-1}$ 。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。

土体硝态氮累积同时受到水分和氮肥的显著影响。从经济产量和地下水水质两方面考虑, 施肥应该控制在  $200\text{ kg N ha}^{-1}$  左右, 灌溉制度应该采用低水处理。

观测表明试验区地下水与表层土壤具有互补性, 硝态氮运移方向并不单一, 现有任何单一方法都很难准确估算淋失通量, 因此需要针对该地区的特点探索新观测手段或方法。仅仅通过两个水分处理还难以精确地分析水分对产量和硝态氮淋失的影响。今后的试验应当适当增加水分处理。

### 参考文献:

- [1] Shapley A, Meyer M. Minimizing agricultural nonpoint source impacts: a symposium overview. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23: 1~3.
- [2] 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
- [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] 黄满湘, 章申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗漏计测定冬小麦-夏玉米轮作期硝态氮淋失. *环境科学学报*, 2003 (1): 11~16
- [6] 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
- [7] 曹志洪. 科学施肥与我国粮食安全保障. *土壤*, 1998, 69(2): 57~63.
- [8] 俞海, 等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究. *地理研究*, 2003, 22(3): 380~389
- [9] 李庆朝, 等. 黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究. *地理研究*, 1999, 18(3): 297~305
- [10] 蒋业放, 等. 水资源可持续利用规划耦合模型与应用. *地理研究*, 2000, 19(1): 37~45
- [11] Lord E. Modeling of nitrate leaching sensitive area. In: Archer JR, *et al.* (eds), *Nitrate and Farming Systems: Aspects of Applied Biology*, 1992, 30: 19~28.
- [12] Nolan Bernard T, *et al.* A national look at nitrate contamination of groundwater. USGS. *Water conditioning and Purification*, 1998, 39(12): 76~79
- [13] Kengni L, Vachaud G, Thony JL. Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *J. Hydrol.*, (Amsterdam), 1994, 162: 23~46
- [14] Shaffer M J. Nitrogen modeling for soil management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002: 417~424
- [15] Allaire-Leunga S E, Wub L, Mitchell J P, *et al.* Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field. *Agricultural Water Management*, 2001, 48: 37~50
- [16] Hoffmann M, Johnson H, Gustafson A, *et al.* Leaching of nitrogen in Swedish agriculture: a historical perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 80: 277~290.
- [17] 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, 239~243
- [18] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展. *土壤*, 1998 (6): 291~297.
- [19] 黄满湘, 章申, 张国梁. 北京地区冬小麦/夏玉米连作条件下  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失. *地理研究*, 2002, 21(4): 425~433

- [20] 倪余文, 区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展. 土壤与环境, 2000, 9(1): 60~63
- [21] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对小麦产量效应的研究. 土壤学报, 1980, 17(1): 43~54.
- [22] 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, 11(2): 240~242
- [23] 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, 35(3): 199~205
- [24] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 16~21.
- [25] 袁锋明, 陈子明, 等. 北京地区潮土表层中硝态氮的转化积累及其淋洗损失. 土壤学报, 1995, 11: 388~399

## The yield and dynamics of soil nitrate for summer maize on the plain of northwest Shandong province

WANG Xing-wu, YU Qiang, ZHANG Guo-liang, LI Yun-sheng

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract** The water and nitrogen applications are the two main factors that affect the nitrate leaching on farmland. The field experiment was conducted to analyze the nitrate leaching and yield under different nitrogen and water application rates in summer maize field. The result indicated that there was no distinct yield difference between the higher water treatment (with soil moisture controlled between 70% FC and 100% FC in 0~50cm) and the lower one (between 55% FC and 85% FC), while the nitrogen rate had evident effect on yield with the yield reaching the maximum at about 200 kg N ha<sup>-1</sup>, and significant effect on nitrate leaching. Higher water application could accelerate the leaching of nitrate evidently. Under higher water level, the soil nitrate concentration peaks appeared at deep layers more easily than those under lower water level as an indication of nitrogen leaching, meanwhile the nitrate concentrations of soil water at depth of 200 cm were all higher than the national drinking water limit (10 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N L<sup>-1</sup>). Comparatively, under lower water treatment the nitrate leaching depths are all less than those under higher water treatment, but NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N L<sup>-1</sup> concentrations of soil solution under level of 200 and 300 kg N ha<sup>-1</sup> at the depth of 200 cm still exceeded the national drinking water limit (10 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N L<sup>-1</sup>). When NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in 100cm soil profile came to about 450 kg N ha<sup>-1</sup>, the soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration at soil depth of 200cm would rapidly rise to 130 mg L<sup>-1</sup> from 40 mg L<sup>-1</sup>, at the same time the nitrogen rate just reached 230 kg N ha<sup>-1</sup>, which means that the nitrogen rate should be under about 230 kg N ha<sup>-1</sup>.

**Key words** water, nitrogen, nitrate leaching, summer maize