

文章编号: 1000-0585(2002)04-0425-09

# 北京地区冬小麦/夏玉米连作 条件下 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失

黄满湘<sup>1,2</sup>, 章 申<sup>1</sup>, 张国梁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院遥感应应用研究所, 北京 100101)

**摘要:** 分析评价了北京草甸褐土冬小麦/夏玉米连作条件下  $\text{NO}_3\text{-N}$  累积、淋失以及同氮肥水平的关系。设置4个氮肥处理: 0、120、240、360 kgN/ha。在每一处理区20、40、60、80、100、140、200 cm 埋设土壤溶液提取器, 在试验地同期设置两个直径0.48 m、深2 m的原状土柱, 氮肥水平为0和240 kg/ha。土壤剖面取样分析发现: 不施肥种植降低土体  $\text{NO}_3\text{-N}$  储量, 施肥种植增加0~100 cm 土体  $\text{NO}_3\text{-N}$  储量, 但只有360 kg/ha才能维持100~200 cm 土体  $\text{NO}_3\text{-N}$  储量, 种植和施肥改变了土壤中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的含量和空间分布。利用土壤溶液提取器取得剖面2 m处土壤溶液  $\text{NO}_3\text{-N}$  年均浓度和土柱底部同期排水量估算得到大田不同氮肥水平  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失年均通量分别为: 1.8、2.41、5.52、17.12 kg/ha; 施肥处理表观氮淋失百分率为: 0.33%、1.03%、3.19%。试验结果有益于指导合理施肥和更好地认识农业氮肥应用与地下水  $\text{NO}_3\text{-N}$  污染的关系。

**关键词:**  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失; 土壤溶液提取器; 原状土柱排水渗漏计

**中图分类号:** S153.6 **文献标识码:** A

## 1 引言

农田氮素的垂向迁移和淋失引起了地下水中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的不断上升, 导致水质退化, 危及人类健康<sup>[1~8]</sup>; 随着人类对粮食需求的增长, 化学氮肥用量将进一步增加, 硝酸盐引起的地下水、饮用水污染也将较目前更为严峻。因此, 农业硝态氮的水体污染研究在很长一段时期内将是政府有关部门和农业、生态环境等学科关注的焦点。

目前国内外对农田氮的淋失都进行了一定的研究, 初步揭示了氮素的淋失规律及其与影响因素的关系<sup>[9,16,17]</sup>。国外发达国家农田硝态氮水体污染问题的出现和研究都比我国要早。我国在农田氮(磷)营养元素对主要河、湖水体的富营养化影响方面已积累了一些数据<sup>[10,11]</sup>, 但对农田氮素向地下水迁移的机制和特征的研究却很少, 对硝态氮在农田土壤中迁移途径的了解也很不全面。特别是由于气候条件和耕作制度不同于西方国家, 我国农田氮向地下水迁移的特征和机制也有别于欧美国家, 北方地区更是如此。因此, 从实际出发, 研究和阐明我国农田氮在土壤中的迁移过程及其影响因素的关系, 为制定有效的阻控对策提供依据, 具有重要的理论和现实意义。

收稿日期: 2002-01-16; 修订日期: 2002-05-29

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(39790100)

作者简介: 黄满湘(1967-), 男, 湖南湘乡人, 博士。主要从事环境生物地球化学循环研究。E-mail: huangmx@igsnr.ac.cn

冬小麦/夏玉米连作在北京及华北地区是一种普遍的种植方式，两种作物对氮有很高的需求，但其损失也很高，其中一个途径是在早春和夏季作物生长季节硝态氮随灌溉水和降雨下渗而淋失。已有的研究多以小规模模拟试验为主，在较浅的深度（1m 左右）上看待氮素淋失，没能充分反映冬小麦/夏玉米连作制中氮素的行为<sup>[12~15]</sup>。因此，本研究通过冬小麦/夏玉米连作的氮肥水平田间管理试验（1）利用土壤取样测定土体剖面 NO<sub>3</sub>-N 累积；（2）利用原状土柱测定冬小麦/夏玉米连作条件下根层（2m）渗滤液体积；利用土壤溶液提取器测定根层 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度，并估算大田条件下冬小麦/夏玉米两季根层 NO<sub>3</sub>-N 淋失通量，以阐明氮在土壤中的迁移淋失过程以及氮肥水平的影响，加深对这种由季节性灌溉与降雨引起的农田硝态氮淋失的特征和机制的了解。

2 材料与方法

2.1 试验地点及基本情况

试验地位于中国农业大学西校区科学园内，地处东经 116.3 度，北纬 39.95 度。为暖温带半湿润大陆季风气候区，年平均气温 11.5℃，年降水量为 640mm，70~80%集中在夏季。地貌属华北平原山前冲积平原区，地下水深约 14m。土壤类型为壤质夹粘草甸褐土。粘土层出现在 65~140cm。试验地属于高肥力土壤，其基本理化性状如表 1、表 2。

表 1 试验地土壤物理性状

Tab. 1 Physics properties of experiment soil

深度 (cm)	土壤质地 *	粘粒 (%)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	田间持水量 (v/v)	饱和含水量 (v/v)	饱和导水率 (cm/d)
0~20	壤土	17.25	1.32	0.324	0.338	9.97
20~30	壤土	13.91	1.46	0.314	0.390	25.47
30~65	壤土	22.95	1.50	0.261	0.401	18.16
65~95	粘壤土	30.96	1.46	0.315	0.405	43.46
95~110	粘壤土	34.34	1.46	0.334	0.425	0.22
110~140	粘土	45.53	1.48	0.341	0.497	9.25
140~180	壤土	22.04	1.48	0.379	0.497	9.25
180~230	壤土	14.41	1.45	0.432	0.446	13.51

\*美国制。

表 2 试验地土壤的化学性质

Tab. 2 Chemical properties of experiment soil

深度 (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 (%)	全氮 (%)	碱解氮 N (mg/kg)	有效磷 P (mg/kg)	有效钾 K (mg/kg)
0~20	8.25	2.67	0.143	93.0	41.9	95.5
20~40	8.17	1.58	0.079	46.5	27.2	90.3
40~60	8.10	0.96	0.039	39.9	10.9	88.8
60~80	8.22	0.75	0.042			
80~100	8.06	0.80	0.041			
100~120	8.00	0.68	0.044			
120~140	8.04	0.66	0.038			
140~160	8.02	0.48	0.031			
160~180	8.14	0.55	0.029			
180~200	8.11	0.37	0.026			

2.2 田间小区试验

2.2.1 施肥处理和田间管理 田间试验设 4 个氮肥水平处理 N0、N120、N240、N360，每季施氮量分别为 0、120、240、360kg/ha。240kg/ha 的施氮量相当于北京地区常规施氮

量;  $120\text{kg/ha}$  是对常规施氮量减半的施氮水平;  $360\text{kg/ha}$  的施氮量属过量施氮水平。

试验小区规格为  $21 \times 6 \text{ (m}^2\text{)}$ , 每处理重复三次, 采用随机区组排列, 共计 12 个小区。冬小麦种植密度为 160 万基本苗/ha, 苗穗数为 350 万/ha 左右。冬小麦季氮肥的  $1/2$  作基肥,  $1/2$  作拔节肥。每个小区施基肥  $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ 。田间管理为: 1998 年 9 月下旬收割上茬玉米后, 喷灌, 待地稍干后深耕 20cm, 耙平, 划小区。10 月下旬按小区施肥, 将肥料混入 0~10cm 的土壤中, 然后播种农大 518。因墒情好未进行冬前灌溉。开春后于 4 月 7 日追拔节肥, 先将肥料撒于小区, 然后灌水 75mm。6 月中旬收割。

冬小麦收割后, 于 6 月下旬免耕播种夏玉米农大 80, 种植密度为 65000 株/ha。夏玉米肥只在三叶期 (7 月 5 日) 追施了  $1/2$ , 十叶期末追施, 先将肥料均匀撒入小区, 然后混入 0~10cm 土层。磷 ( $60\text{kgP}_2\text{O}_5/\text{ha}$ )、钾肥 ( $60 \text{ kg K}_2\text{O/ha}$ ) 作基肥于播前施入。6 月 29 日和 7 月 29 日各灌水 40mm 和 60mm。9 月下旬收获。其它管理同大田。

**2.2.2 土壤溶液的田间采集** 1999 年 4 月在各田间小区的 20、40、60、80、100、140、200cm 处理设溶液提取器 (共计 28 个), 观测土壤水分和  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋溶运移。在降雨或灌溉之后几小时内, 抽负压到大约 0.8atm, 12 小时后收取滤液  $30 \sim 50\text{cm}^3$ 。分析前的溶液样品冷藏保存。

**2.2.3 1999 年冬小麦/夏玉米季土壤采样** 于 1998 年 10 月 4 日 (冬小麦播前)、1999 年 6 月 13 日 (冬小麦收获后、夏玉米播种前)、1999 年 9 月 24 日采集各处理小区土样 (每 20cm 深为一个样)。所采样品全部测定  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量。

### 2.3 大型原状土柱试验

**2.3.1 设置与施肥处理** 在大田试验地同期进行土柱渗漏试验。两个大型有机玻璃筒, 内径 0.48m, 有效高度 2m, 埋置在 2.5m 多深的地下坑内, 上端与田面齐平。筒内为取自大田试验区的原状圆型土芯, 直径 0.48m, 高约 2m, 土芯与圆筒内壁紧密接触。下端有滤液出口, 连接收集滤液的塑料桶。

对土柱编号, 土柱 1 为施氮处理, 氮肥水平相当于大田  $240\text{kgN/ha}$  的施肥处理; 土柱 2 不施氮肥, 作为对照。两柱的水分灌溉、作物种植和管理等与大田试验小区一致。

**2.3.2 土柱底部出流液取样** 定期收集土柱底部出流液, 一般以一周为期, 也根据降雨、灌水和底部出流情况而调整。每次都测定出流液体积, 水样带回试验室处理保存。

### 2.4 室内测定方法

土柱出流液和土壤溶液样  $\text{NO}_3\text{-N}$  (包括  $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 的测定, 采用 DN - 1900 有机氮分析仪测定; 土样  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量的测定用连续流动分析法 (TRACCS-2000 Continuous Flow Analytical, CFA)。并用于一定面积土层深度  $\text{NO}_3\text{-N}$  量的计算; 单位体积土体  $\text{NO}_3\text{-N}$  量为土壤  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量与单位体积土体重量 (kg) 的乘积。

## 3 结果与讨论

### 3.1 1999 年冬小麦/夏玉米季降雨

图 1 表示 1999 年 4~9 月降雨分布。该年度 4~9 月降雨偏少, 只有 332mm, 但比较均匀地分散在冬小麦、夏玉米生长期; 从 4~9 月, 各月降雨分别为 52.6、48.2、32.1、62.5、94.2、42.4mm。下面的分析表明, 降雨的均匀分布对作物生长期间土壤水分和养分的迁移, 尤其对有土柱底部出流和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的淋失有一定的影响。

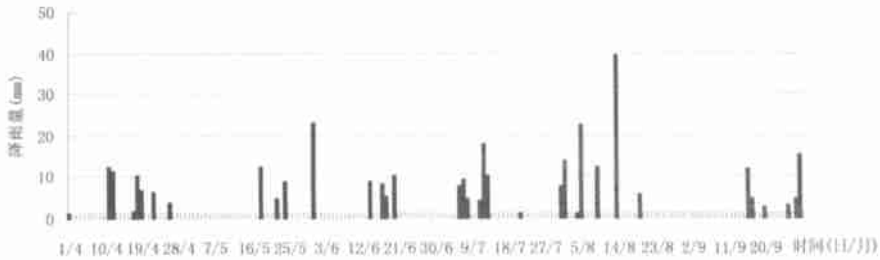


图 1 1999 年冬小麦/夏玉米季连作期间降雨分布

Fig. 1 Precipitation distribution during winter wheat/ summer maize rotation at the study site in 1999

### 3.2 土体 NO<sub>3</sub>-N 累积

**3.2.1 土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量变化** 冬小麦、夏玉米播前和收获后，土壤剖面 NO<sub>3</sub>-N 含量分布如图 2、图 3，种植和施肥改变了土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量。播前土壤剖面中的 NO<sub>3</sub>-N 比较均匀，其各层的 NO<sub>3</sub>-N 含量均低于 10mg/kg。其中以 0~20cm 土层的含量最高（9.4mg/kg），其它层次均较低（<6mg/kg）。与播前相比，冬小麦收获以后，对照处理（N0）区各层次的土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量有所降低；120kg/ha 处理区 0~60cm 土层 NO<sub>3</sub>-N 含量增加，而 60cm 以下土层 NO<sub>3</sub>-N 含量减少；240kg/ha 和 360kg/ha 处理的整个土壤剖面 NO<sub>3</sub>-N 含量都明显高于播前（图 2）。

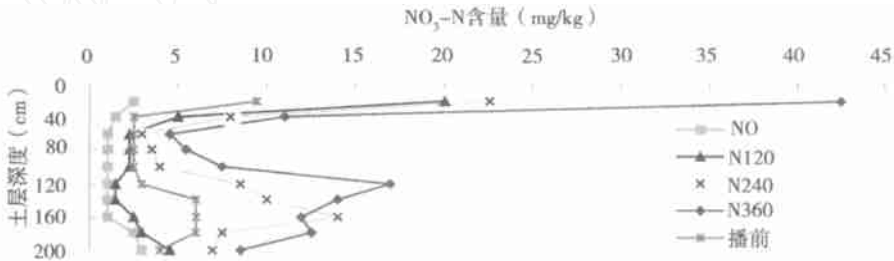


图 2 1999 年冬小麦种植前后土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量

Fig. 2 The distribution of NO<sub>3</sub>-N in soil profile before and after winter wheat grow

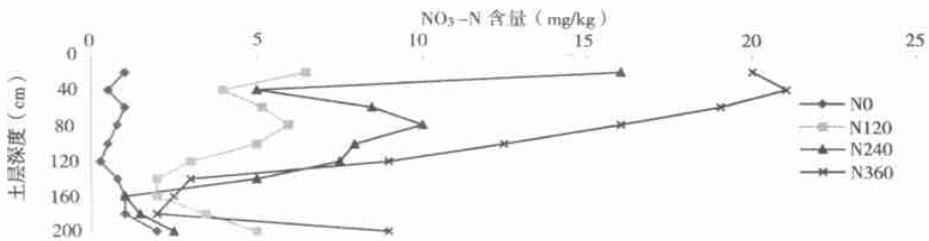


图 3 1999 年夏玉米收割后不同施氮处理土壤剖面 NO<sub>3</sub>-N 含量分布

Fig. 3 The distribution of NO<sub>3</sub>-N content of soil profile after harvest of summer maize

与冬小麦收割后夏玉米播前比较，夏玉米收获后，对照处理区土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量降低；

施肥处理区表层（0 ~ 20cm）土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量也都有所降低，但是，20 ~ 100cm 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量都有所增加；100 ~ 200cm 土体，除 120kg/ ha 处理外，两个高氮处理区土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量也都下降了（图 2、图 3）。这说明在当年降雨条件下，夏玉米季氮肥施用后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 迁移不强烈，主要累积在 1m 以上土体内；但是，1m 至 2m 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的变化也是很明显的，如 N240 和 N360 处理区消耗了大量在冬小麦期间累积的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N；N120 处理区，经冬小麦后其 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量已相当低，所以在夏玉米季的净变化反而不如两个高氮水平处理显著了。下面的分析中将进一步说明这一点。

3. 2. 2 土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积

表 3 1999 年冬小麦/夏玉米不同时期 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在土壤剖面中的累积（kg/ ha）

Tab. 3 The cumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in soil profile during winter wheat/ summer maize grown

时期	深度 (cm)	N0	N120	N240	N360
冬小麦季	0 ~ 100	- 34. 7	33. 2	59. 2	141. 3
	100 ~ 200	- 48. 5	- 35. 2	64. 6	114. 4
夏玉米季	0 ~ 100	- 8. 9	- 11. 1	21. 3	58. 5
	100 ~ 200	- 10	7. 3	- 86. 9	- 113. 3
冬小麦/ 夏玉米季	0 ~ 100	- 43. 6	22. 1	80. 5	199. 8
	100 ~ 200	- 58. 5	- 28	- 22. 3	1. 1
	0 ~ 200	- 102. 1	- 5. 9	58. 2	200. 9

注：负值表示土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量减少，正值表示土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量增加。

表 3 反映了不同水平氮肥处理土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量的变化。无论是冬小麦季还是夏玉米季，对照处理 0 ~ 200cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量都是降低的。冬小麦季，对照处理 0 ~ 100cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量降低了 34. 7kg/ ha，100 ~ 200cm 土体降低了 48. 5kg/ ha。120kg/ ha 处理 0 ~ 100cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量比播前增加了 33. 2kg/ ha，100 ~ 200cm 比播前减少了 35. 2kg/ ha。240 kg/ ha 和 360kg/ ha 处理，0 ~ 100cm、100 ~ 200cm 土体比播种前增加了，充分说明在高量施用氮肥的条件下，种植一季冬小麦后，即有相当数量的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 移动到 100 ~ 200cm 土层，并完全可能向下淋失。假定 100 ~ 200cm 土体累积的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 来自肥料，在施氮量为 240kg/ ha 时，100 ~ 200cm 土体累积的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占施肥量的 26. 9 %；在施氮量为 360kg/ ha 时，100 ~ 200cm 土体累积的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占施肥量的 31. 7 %。由该试验可以得出初步的结论：在冬小麦生长季，高氮处理条件下的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 可移动到 100cm 以下，在 100 ~ 200cm 土层中累积。如果地下水位达 1m，则在高量施氮条件下，冬小麦季淋失到 1m 以下的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 是相当可观的。因此，如果只考虑表土或者 1m 以内土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的变化，将会完全忽略高氮施用对地下水或深层土体污染的影响。

与夏玉米播前比较，夏玉米收割后，120kg/ ha 处理，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量在 0 ~ 100cm 土体降低，在 100 ~ 200cm 土体有所增加；两个高氮处理，在 0 ~ 100cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量增加，在 100 ~ 200cm 土体减少。夏玉米季高氮处理下 100 ~ 200cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量减少可能是作物吸收、淋溶、反硝化和随水分向上运移共同作用的结果，有待进一步研究。

与冬小麦播前比较，冬小麦/夏玉米连种后，对照处理土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量从上至下都降低，而施氮处理 0 ~ 100cm 土体都有不同程度的累积，累积量随氮肥水平的增加而增加；100 ~ 200cm 土体，360kg/ hm<sup>2</sup>处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量变化不大，而另两个施肥处理都有不同程

度的降低。这说明高水平施氮足以补充 100 ~ 200cm 土体 NO<sub>3</sub>-N 的损耗（作物吸收、反硝化、淋溶等）。综上所述，种植和施肥改变了土壤中 NO<sub>3</sub>-N 的含量和土体 NO<sub>3</sub>-N 储量的空间分布。

3.3 氮肥水平对土壤剖面土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度的影响

表 4 不同氮肥水平处理土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度 (mg/l) 的垂直变化

Tab. 4 The distribution of NO<sub>3</sub>-N concentration in soil profile of differential applied N rates

深度 (cm)	N0	N120	N240	N360
20	12.0 (17.0)	15.0 (12.6)	15.6 (9.8)	51.0 (43.7)
40	5.7 (6.5)	-	39.7 (46.6)	137.0 (2.1)
60	8.8 (8.2)	19.1 (2.7)	33.0 (8.0)	51.0 (16.0)
80	4.7 (3.1)	13.0 (6.4)	30.5 (7.6)	57.2 (30.8)
100	5.2 (4.1)	14.3 (4.3)	21.8 (11.3)	54.6 (17.3)
140	4.1 (1.2)	4.7 (2.9)	10.1 (6.0)	115.9 (14.0)
200	8.9 (0.4)	14.4 (8.2)	33.0 (15.5)	102.4 (16.0)

注：不同氮肥水平处理各层土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度根据 15 次测定值求得，括号内数字为标准差。

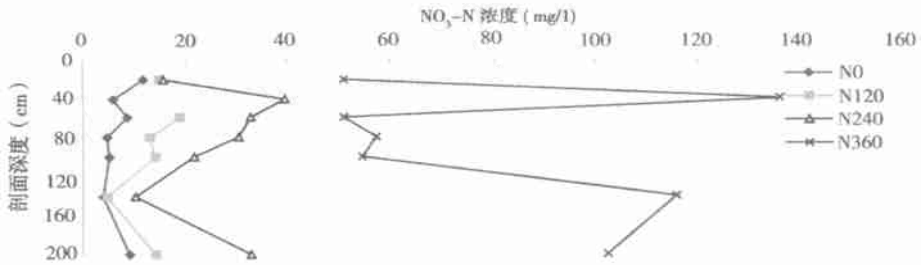


图 4 冬小麦/夏玉米不同氮肥水平处理土壤提取液 NO<sub>3</sub>-N 浓度垂直变化

Fig. 4 The distribution of NO<sub>3</sub>-N concentration in soil profile

表 4 表示不同氮肥水平试验区土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度的垂直变化，可称为 NO<sub>3</sub>-N 浓度特征剖面。这一特征剖面受施氮水平的影响明显。对照处理土壤剖面 NO<sub>3</sub>-N 浓度低，基本上小于 10mg/l；施肥处理土壤剖面 NO<sub>3</sub>-N 浓度高于对照处理，并随氮肥用量增加而呈递增趋势（图 4）。氮肥水平为 120kg/ha 时，土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度几乎都在 10mg/l 以上；氮肥水平为 240kg/ha，土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度都大于 N120 处理对应层次；氮肥水平为 360kg/ha 时，NO<sub>3</sub>-N 浓度在 50mg/l 以上。

同时，NO<sub>3</sub>-N 浓度在剖面不同深度也表现出不同的特征。N0 处理，土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度低，但自上至下变化不大；施肥处理剖面，40 ~ 100cmNO<sub>3</sub>-N 浓度较高；两个高氮处理剖面 20 ~ 40cmNO<sub>3</sub>-N 浓度最高，说明施肥后 NO<sub>3</sub>-N 在表层以下 1m 土体内迁移强烈。此外，氮肥量越高，1m 以下溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度越高，NO<sub>3</sub>-N 向下迁移淋失的潜力越显著，如 240kg/ha 处理 200cm 处达 30mg/l 以上，360kg/ha 处理 1m 以下土体 NO<sub>3</sub>-N 浓度超过 100mg/l。

观察比较图 4 与图 2、图 3，还可看出，不同氮肥处理区，其剖面土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度同土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量随深度和时间的变化有相近的规律；虽然，某一点土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N

浓度受含水量的明显影响，但土壤 NO<sub>3</sub>-N 含量高低还是起决定性的作用。

3.4 根层 NO<sub>3</sub>-N 淋失

利用田间试验小区土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度和原状土柱底部渗滤液量等数据可以获取大田条件下 NO<sub>3</sub>-N 淋失的有关信息。

3.4.1 土柱渗滤量及其 NO<sub>3</sub>-N 浓度特征 土柱底部 (2m) 渗漏出流年累积量为 16.6mm (取两个土柱底部排水量平均值)，但年内土柱底部渗漏出流时间跨度长 (图 5)。其中，冬小麦季渗漏现象比夏玉米季强烈，冬小麦季渗漏出水占全部渗漏出水的 74%，这与冬小麦播后至拔节灌水期间土壤水分渗漏分不开，至 4 月 8 日土柱底部渗漏液体积达 7.2mm，这不全是 4 月 7 日浇水造成的。98 年降雨较多 (3~9 月降雨 589.3mm) 有利于深层土壤储存水分，加之 99 年冬小麦播前灌水，越冬期降水 (1998 年 10 月 25 日降雨和 11 月 21 日降雪) 都有利于冬小麦越冬期间的渗漏，对全年的渗漏也有决定性的作用。

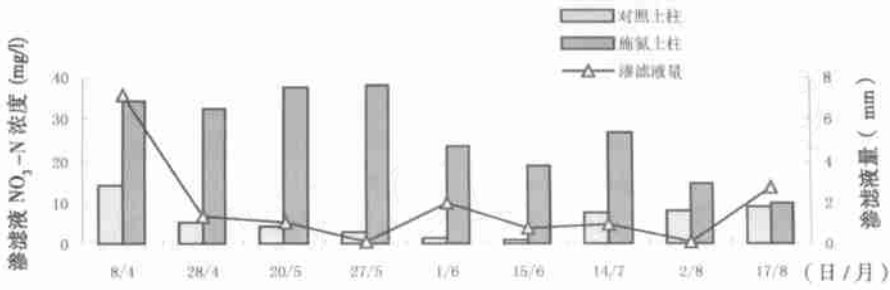


图 5 土柱渗滤分布及其 NO<sub>3</sub>-N 浓度

Fig. 5 The distribution of leaching and NO<sub>3</sub>-N concentrations in leachate of soil cores

对照土柱渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度低。1999 年 4 月 8 日收集测定的整个越冬阶段渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度达 13.9mg/l，以后，由于冬小麦的高强度吸收，渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度下降到 6mg/l 以下。至 7 月夏玉米季，渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度又回升到 7mg/l 以上，该年度最后一次渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度达 9mg/l。年均 NO<sub>3</sub>-N 浓度为 9.0mg/l。

1999 年度，冬小麦施用基肥和拔节追肥，但冬小麦越冬期的持续渗滤淋失，所以该年度 6 月前的施肥处理土柱渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度分布较为均匀，在 32mg/l~38mg/l 之间。冬小麦生长后期，渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度下降至 20mg/l 左右。夏玉米季三叶期追肥后，渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度上升到 20mg/l 以上，最高达 27mg/l。随后，十叶期没有追肥，渗滤液 NO<sub>3</sub>-N 浓度呈现显著的下降，接近 10mg/l。年均 NO<sub>3</sub>-N 浓度为 27.9mg/l。

3.4.2 根层 (2m) NO<sub>3</sub>-N 年均淋失通量 两个土柱渗滤液的 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度和淋失量如表 5。大田小区 200cm 处 NO<sub>3</sub>-N 淋失年均通量由土柱底部渗滤液累积量和大田 200cm 处土壤溶液年均 NO<sub>3</sub>-N 浓度 (表 4) 的乘积得出，结果见表 5。计算时，未考虑大田 200cm 处土壤溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度的波动。因为 2m 处土壤含水量较高，且平稳；相对于其它层次，土壤溶液中 NO<sub>3</sub>-N 在 2m 深度处变化较小，而且，施肥水平越高，溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度高，波动较小，利用平均值计算的年均淋失通量误差越小。

表 5 表明，肥料水平相同的施肥土柱 (NF) 与田间小区处理 N240 两者在 200cm 处的溶液 NO<sub>3</sub>-N 浓度年均值和年均淋失通量都非常接近，因此，利用土柱底部出流液体积数据和 大田小区根层 NO<sub>3</sub>-N 年均浓度，估算大田 NO<sub>3</sub>-N 淋失年均累积通量这种方法是可行的。

表 5 土柱、大田小区 200cm 处 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失通年量  
Tab. 5 Flow weighted mean NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentrations and annual averaged  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N flux below the root zone (200 cm)

处理	土柱		大田			
	对照	施肥	N0	N120	N240	N360
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 平均浓度, mg/l	9.0	27.9	8.9	14.4	33.0	102.4
年均淋失通量, kg/ha	1.5	4.60	1.8	2.41	5.52	17.12

注：表中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均浓度和年淋失通量的时间单位指冬小麦播后至夏玉米收割。

土柱和大田试验都表明，施氮对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的淋失影响明显，施肥处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度和淋失量都大于对照；肥料水平越高，渗漏液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均浓度越高，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 损失量越大（表 5）。

如果把淋失到根层（2m）以下的净 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N（各处理淋失量减去对照淋失量）当作当年化肥的表观淋失量，施肥土柱（N240）、大田处理 N120、N240、N360 淋失 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占施肥量的 0.86 %、0.33 %、1.03 %、3.19 %。可以说，肥料的损失百分数是很低的。这与 1999 年降雨量少于正常年份，以及选择地表以下 2m 作为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的淋失界面有关。

4 结论

本文通过土柱渗滤试验、大田小区肥料试验研究了北京地区冬小麦/夏玉米连作条件下土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的累积和淋失。

高氮处理（N240、N360）大大超过冬小麦对氮的需求量；冬小麦收割后，0 ~ 200cm 土体累积的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占氮肥的 51.6 %和 71 %以上；夏玉季的高氮处理区，0 ~ 100cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的累积分别占施氮量的 89 % 和 71.7 %，但 100 ~ 200cm 土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 储量分别下降了 86.9kg/ha 和 113.3kg/ha，远大于冬小麦/夏玉米连作期间淋失到根层（2m）以下的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的绝对量（5.52kg/ha 和 17.12kg/ha）。土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的变化是施肥、作物吸收、反硝化、淋溶以及由底层向上运移的共同作用的结果，因此，可以利用这一结果进一步研究有关的氮平衡问题。

大田施肥试验条件下，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 表观淋失百分数分别为 0.33 %、1.01 %和 3.19 %；从氮肥损失角度看，淋失的绝对量和占施肥量的百分比都不是很大；但是，0 ~ 200cm 土体溶液 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随施氮水平的增加而明显增大，120kg/ha 施氮土体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度即超过饮用水卫生标准，常量和高氮施肥条件下则远大于此值，对地下水的影响不容忽视。

参考文献：

[1] 马立珊,钱敏英.太湖流域水环境和亚硝态氮污染的研究.环境科学,1987 8(2):60~65.  
[2] 朱济成,田应录.化学氮肥与地下水污染.水文地质—工程地质,1986,(5):38~41.  
[3] 朱建国.硝态氮污染危害与研究展望.土壤学报,1995,32(增刊):62~69.  
[4] 张维理,田哲旭,张宁.我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查.植物营养与肥料学报,1995 1(2):80~87.  
[5] 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.  
[6] 王家玉,王胜任,陈义,等.稻田土壤中氮素淋失的研究.土壤学报,1996,33(1):28~36.



- [7] 戴同顺,赵忠生. 海河流域灌溉平原氮磷形态转化和淋失的定位研究. 环境科学学报,1992,12(4):497~501.
- [8] 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染环境影响的研究. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):8~15.
- [9] 张国梁,章申. 农田氮素淋失研究进展. 土壤,1998,(6):291~297.
- [10] 章申,张国梁,唐以剑,等. 中国淡水生态监测网络建设规划研究报告. 世界银行中国环境技术援助项目(B-9-1),1996.
- [11] 金相灿,刘鸿亮,等. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [12] 陈子明. 北京潮土  $\text{NO}_3\text{-N}$  在土体中的移动特点及其淋失动态. 植物营养与肥料学报,1995,1(2):71~79.
- [13] 袁锋明. 北京地区潮土表层中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的转化积累及其淋洗损失. 土壤学报,1995,32(4):388~398.
- [14] 黄元仿,李韵珠. 土壤-作物系统中氮素行为的模拟研究—现状与展望. 见:李韵珠. 土壤水和养分的有效利用. 北京:北京农业大学出版社,1994.
- [15] 衣纯真,李韵珠,黄元仿. 麦田无机氮含量与变化特征. 见:李韵珠. 土壤水和养分的有效利用. 北京:北京农业大学出版社,1994.
- [16] John D Toth, Richard H Fox. Nitrate losses from a corn-alfalfa rotation: lysimeter measurement of nitrate leaching. J. Environ. Qual., 1998, 27: 1027 ~ 1033.
- [17] Power J F, Wiese R, Flowerday. Managing nitrogen for water quality lessons from management systems evaluation area. Journal of Environmental Quality., 2000, 29:355 ~ 366.

## Nitrate leaching from a winter wheat / summer maize rotation in Beijing Area

HUANG Man-xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Shen<sup>1</sup>, ZHANG Guo-liang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract :** This study was conducted to compare  $\text{NO}_3\text{-N}$  cumulation and leaching from a winter wheat/ summer maize rotation under four applied N fertilizer rates of 0, 120, 240, and 360 kgN/ ha. An array of 7 zero-tension lysimeters installed at 20, 40, 60, 80, 100, 140, and 200cm below the soil surface in each plot was used to examine  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching; two disturbed soil cores were stalled, one for contrast, the other fertilized with applied N fertilizer rate of 240 kg/ ha, to study leachate and  $\text{NO}_3\text{-N}$  leachate flux. Soil sampling performed before and after cultivation revealed that content of soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  in unfertilized plots decreased; and N fertilizer applied plots resulted in  $\text{NO}_3\text{-N}$  cumulation in soil of 0 ~ 100 cm; but only the fertilized rate of 360 kg/ ha could maintain a constant amount of  $\text{NO}_3\text{-N}$  in soil of 100 ~ 200 cm. Average cumulative  $\text{NO}_3\text{-N}$  fluxes through the interface of 200cm below the soil surface at four N fertilizer applied rates were 0.18, 2.41, 5.52 and 17.12 kg/ ha; surface percentages of N leaching were 1.24%, 1.48% and 3.14% for each fertilized treatment. The findings are beneficial to the determination of economical optimum N rate and the understanding of the potential role of N fertilizer that affects water quality.

**Key words :** nitrate leaching ; porous cup sampler ; undisturbed soil core (lysimeter)