

# 冬小麦/夏玉米轮作中 $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面的累积及移动\*

巨晓棠<sup>1,2</sup> 刘学军<sup>1,2</sup> 张福锁<sup>1,2</sup>

(1 中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

(2 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程开放实验室, 沈阳 110015)

**摘要** 通过田间试验研究了冬小麦/夏玉米轮作中  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面的累积及移动, 结果表明, 尿素施入旱地土壤后, 硝化作用一般在 7 d 之内完成,  $\text{NH}_4^+$ -N 只在施肥后的短期内保持较高浓度, 其它时期  $\text{NH}_4^+$ -N 含量基本在 1~3  $\text{mg kg}^{-1}$  范围内, 土壤剖面不同层次  $\text{NH}_4^+$ -N 一般也低于 4  $\text{mg kg}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 的含量不能反映土壤有效氮的水平。土壤剖面中的  $\text{NO}_3^-$ -N 随施氮量的增加而显著升高。在低施氮量条件下 ( $N < 120 \text{ kg hm}^{-2}$ ),  $\text{NO}_3^-$ -N 主要在 0~40 cm 土层内移动, 但当施氮量高于  $N 240 \text{ kg hm}^{-2}$  时, 冬小麦季即有相当数量的氮移出 0~100 cm 土体。  $\text{NO}_3^-$ -N 在土体中的移动存在着很大的年际变化, 在干旱年份, 即使夏玉米季,  $\text{NO}_3^-$ -N 向深层移动的可能性也很小。试验年份中, 除 1999 年夏玉米季发生了较严重的气体损失以外(该季节特别干旱), 其余季节损失的肥料氮主要以  $\text{NO}_3^-$ -N 的形式在深层土壤剖面中累积, 这两个试验点的结果相当一致。

**关键词** 冬小麦, 夏玉米, 氮肥,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N

**中图分类号** S154

氮肥在农业生产上具有不可替代的作用。随着农田氮肥用量的增加, 农田氮肥力提高。进入 80 年代以后, 我国农田生态系统中氮素由亏缺转为盈余, 而且盈余量越来越大<sup>[1]</sup>, 对环境的威胁也增大<sup>[2]</sup>。在北方旱作条件下, 这些盈余的氮素绝大部分以  $\text{NO}_3^-$ -N 的形式在土壤剖面中累积, 其在剖面中的分布与移动直接影响着氮素进入环境的数量。本文主要研究尿素施入土壤后, 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 的变化及  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中的累积与移动, 为理解氮肥在土壤中的过程, 制定氮肥管理措施提供理论依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验点概况

试验点位于中国农业大学科学园试验农场和海淀区东北旺农场(以下简称科学园和东北旺)。两个试验点属华北平原北部山前冲积平原区。全年降雨集中在夏季(6~8月), 多年平均降雨量为 618 mm, 且年际间变化大。在冬小麦季的多年平均降雨量为 134 mm, 在夏玉米季为 484 mm。科学园和东北旺两个试验点的供试土壤分别为壤质草甸褐土和粉砂壤质潮土, 均属于华北平原典型的农业土壤。科学园土壤的基本理化性质为: 容重 1.32  $\text{g cm}^{-3}$ , pH( $\text{H}_2\text{O}$ ) 为 8.2, 有机质 26.7  $\text{g kg}^{-1}$ , 全氮 1.43  $\text{g kg}^{-1}$ , 有效磷 P41.9  $\text{mg kg}^{-1}$ , 速效钾 K 95.5  $\text{mg kg}^{-1}$ 。东北旺为: 容重 1.34  $\text{g cm}^{-3}$ , pH( $\text{H}_2\text{O}$ ) 为 8.0, 有机质 22.4  $\text{g kg}^{-1}$ , 全氮 1.18  $\text{g kg}^{-1}$ , 有效磷 P 34.4  $\text{mg kg}^{-1}$ , 速效钾 K 145.0  $\text{mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验方案

**1.2.1 科学园试验方案** 施氮水平设每季 N 0, 120, 240, 360  $\text{kg hm}^{-2}$  4 个处理, 氮肥的 1/2 作基肥于播前整地时施入, 1/2 在拔节期撒施后灌水。磷肥作基肥于播前施入  $\text{P}_2\text{O}_5$  60  $\text{kg hm}^{-2}$ , 冬小麦品种为农

\* 国家自然科学基金项目(编号 39870479)、国家十五攻关重大专项(2002BA516A02)资助

收稿日期: 2001-08-14; 收到修改稿日期: 2002-05-09

大 518。小区面积为  $21 \times 6 = 126 \text{ m}^2$ , 每处理重复 3 次, 小区采用随机区组排列。冬小麦收获后, 免耕播种夏玉米。夏玉米季氮肥的 1/2 在三叶期开沟条施, 1/2 在十叶期雨前撒施, 磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$   $60 \text{ kg hm}^{-2}$ )、钾 ( $\text{K}_2\text{O}$   $60 \text{ kg hm}^{-2}$ ) 肥也在三叶期开沟条施, 夏玉米品种为农大 80。氮肥为尿素, 磷肥为重过磷酸钙, 钾肥为硫酸钾。试验期间的降雨量和灌溉量如表 1。

表 1 两个试验点试验期间的降雨量和灌溉量

Table 1 Precipitation and irrigation in crop growth season at two experimental sites

试验地点、年份和作物 Sites, year and crop	生育期降雨量 Precipitation (mm)	相当于常年降雨的 Percentage to average (%)	降水年型 Drought type of year	灌溉量 Irrigation (mm)	降雨量+灌溉量 Precipitation + irrigation (mm)
科学园					
1998/1999 冬小麦	135	101	湿润季	150	285
1999 夏玉米	194	41	极端干旱季	100	294
1999/2000 冬小麦	108	81	干旱季	280	388
2000 夏玉米	379	78	湿润季	70	467
东北旺					
1999 夏玉米	159	33	极端干旱季	未灌溉	159
1999/2000 冬小麦	限量灌溉	77	干旱季	185	262
	常规灌溉	77	干旱季	329	406
	优化灌溉	77	干旱季	318	395
2000 夏玉米	365	76	湿润季	81	446

**1.2.2 东北旺试验方案** 东北旺试验设 3 个灌溉水平, 2 种耕作方式, 3 个施氮水平, 采用完全方案共 18 个处理, 4 次重复共 72 个处理区, 小区面积为  $300 \text{ m}^2$ , 随机排列。试验因子和处理内容如下:

因子 I: 灌溉方式。(1) 限量灌溉: 喷灌, 在农民习惯的基础上减少灌溉量和灌溉次数, 作为对照水平; (2) 常规灌溉: 畦灌, 按照农民习惯进行灌溉; (3) 优化灌溉: 喷灌, 根据 TDR 土壤水分监测结果, 当主要根系活动层土壤含水量低于作物有效土壤含水量(田间持水量 萎蔫含水量)的 45% 时, 灌溉至土壤有效含水量的 80%。

因子 II: 耕作方式。(1) 秸秆还田: 冬小麦, 夏玉米秸秆全部还田; (2) 秸秆不还田: 冬小麦, 夏玉米秸秆全部不还田。

因子 III: 施氮方式。(1) 不施氮; (2) 常规施氮: 代表华北地区农户习惯的施肥方式和施肥量, 每季  $\text{N}$   $300 \text{ kg hm}^{-2}$ 。其中 1/2 用碳酸氢铵在播前结合耕作深施(冬小麦)或三叶期开沟条施(夏玉米), 1/2 用尿素在拔节期撒施后灌水(冬小麦)或十叶期雨前撒施(夏玉米)。(3) 分期动态优化施氮: 根据不同时期作物需氮量, 土壤  $\text{N}_{\text{min}}$  测试结果, 植株  $\text{NO}_3^-$  含量测试结果确定施氮量。1999 年夏玉米三叶期施尿素  $\text{N}$   $60 \text{ kg hm}^{-2}$ , 十叶期施尿素  $\text{N}$   $50 \text{ kg hm}^{-2}$ ; 1999/2000 年冬小麦不施基肥, 返青期和拔节期追施尿素  $\text{N}$   $78 \text{ kg hm}^{-2}$ ; 2000 年夏玉米三叶期施尿素  $\text{N}$   $37 \text{ kg hm}^{-2}$ , 十叶期不施氮肥。作物和不同时期的施肥方法同常规施氮。

磷肥和钾肥只在冬小麦季作基肥于耕地前施入。1999/2000 年冬小麦播前施  $\text{P}_2\text{O}_5$   $180 \text{ kg hm}^{-2}$ , 施  $\text{K}_2\text{O}$   $90 \text{ kg hm}^{-2}$ 。冬小麦品种为京冬 8, 夏玉米品种为京垦 114。冬小麦收获后, 免耕播种夏玉米。磷肥为重过磷酸钙, 钾肥为氯化钾。试验期间的降雨量和灌溉量如表 1。

### 1.3 测定方法

土壤  $\text{NO}_3^- \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{N}$  采用  $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$  浸提, TRACCS2000 型连续流动分析仪测定, 其它项目采用常规法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的动态

在北方条件下, 冬小麦基肥一般在 10 月上旬施用, 这时  $10 \text{ cm}$  土层月平均土温在  $17^\circ\text{C}$  左右, 尿素施入土壤后, 4~7 d 表层土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  即达到高峰, 随后土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  含量迅速下降, 最终  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  会下降到

与不施氮肥处理相当水平,说明由尿素水解生成的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经过硝化作用完全转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。施肥以后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤中的持续时间与尿素的施用量有关,基施氮肥 $\text{N } 60 \text{ kg hm}^{-2}$ 以下时,约14 d以前 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会全部转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ;基施氮肥 $\text{N } 60 \text{ kg hm}^{-2}$ 以上时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤中的持续时间会长一些。拔节期追肥一般在4月初结合灌水进行,这时土温回升,尿素水解和硝化的速度更快,一般在4 d前全部转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。夏玉米的两次施肥由于土壤水热条件更有利于硝化作用的进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一般在1~2 d之内达到高峰,5 d之内降低到对照水平,说明硝化作用一般在5 d之内完成。

冬小麦/夏玉米生长期0~20 cm土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 只在施肥后短期内保持较高浓度,其它时期基本保持在1~3  $\text{mg kg}^{-1}$ ,不同施氮水平之间也没有明显差别。土壤剖面中20~100 cm层次的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也保持在4  $\text{mg kg}^{-1}$ 以下,不随施氮量和生育时期而发生显著的变化。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的这种变化规律说明旱地土壤的硝化能力很强,在一般情况下,土壤中不会累积 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的水平不能反映土壤的有效氮肥力高低。

## 2.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的动态

0~20 cm土层的硝态氮含量随施肥量的增加而明显增加(图1)。不施氮处理和施氮 $\text{N } 120 \text{ kg hm}^{-2}$

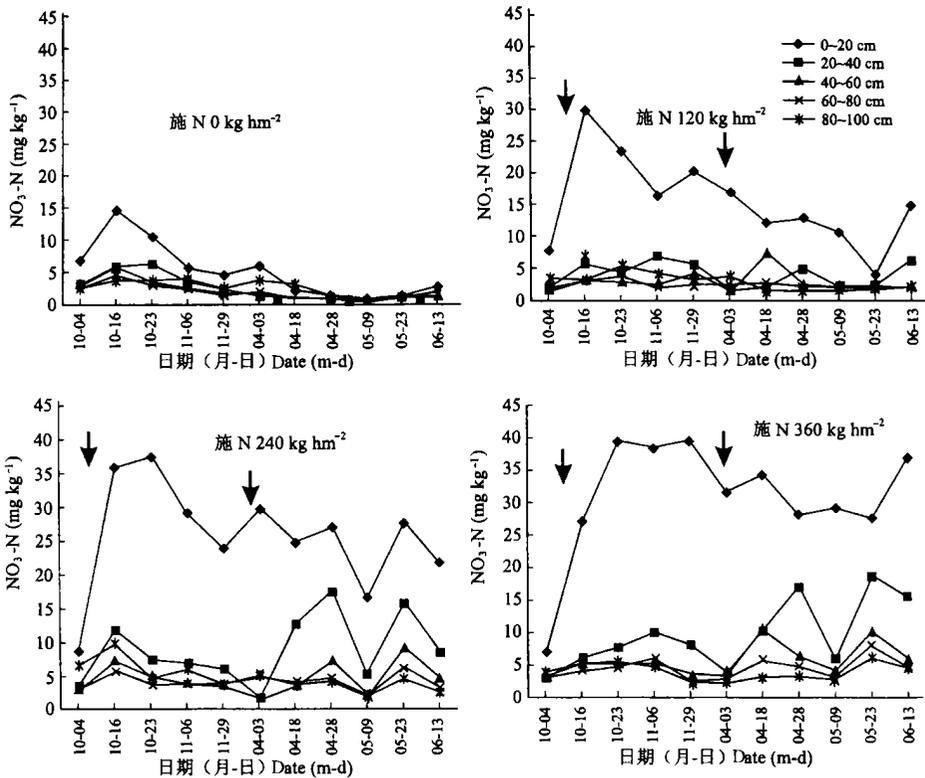


图1 不同土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在冬小麦生长季的动态

Fig 1 The dynamics of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in different soil layers during the winter wheat growth season

处理,20~40 cm以下土层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 没有明显的变化。 $\text{N } 240 \text{ kg hm}^{-2}$ 处理,春季以后20~40 cm土层中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 明显增加。 $\text{N } 360 \text{ kg hm}^{-2}$ 处理,冬前和春后20~40 cm土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均显著增加。后两个高量施氮处理收获后在0~60 cm土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有明显的累积,60~100 cm有轻微累积,100~200 cm有明显的累积(表2)。说明高量施氮条件下,冬小麦生长期即有相当数量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 移动到100~200 cm土层。1998/1999年冬小麦生长季属于偏旱年份,参照 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤不同层次的动态变化情况可知(图1), $\text{NO}_3^-\text{-N}$

淋洗出 100 cm 土体主要是由拔节期施肥后一次性强度较大的灌水造成的。假若 100~200 cm 累积的  $\text{NO}_3^-$ -N 来自于肥料, N 240  $\text{kg hm}^{-2}$  处理 100~200 cm 累积的  $\text{NO}_3^-$ -N 占施氮量的 26%; N 360  $\text{kg hm}^{-2}$  处理占施氮量的 31%。

表 2  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤不同层次的累积Table 2 The accumulation of  $\text{NO}_3^-$ -N in different soil layers ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

试验年份 及作物 Year and crop	处理 Treatment	0~100 cm 土层 0~100 cm soil layer			100~200 cm 土层 100~200 cm soil layer			200~300cm 土层 200~300cm soil layer 收获后 After harvest
		播前	收获后	收获后-播前	播前	收获后	收获后-播前	
		Before sowing	After harvest	Harvest sowing	Before sowing	After harvest	Harvest sowing	
科学园								
1997/1998	N0	177.5	18.7	-158.8	53.5	47.3	-6.2	
冬小麦	N75	177.5	101.9	-75.5	53.5	54.9	1.3	
	N112.5	177.5	183.3	5.8	53.5	35.2	-18.3	
	N150	177.5	162.1	-15.3	53.5	59.7	6.1	
1998/1999	N0	56.9	15.4	-41.5	71.9	17.5	-54.3	
冬小麦	N120	56.9	84.4	27.4	71.9	39.8	-32.0	
	N240	56.9	114.6	57.6	71.9	134.9	63.0	
	N360	56.9	196.0	139.0	71.9	183.5	111.6	
1999	N0	15.4	13.3	-2.1	17.6	14.5	-3.1	66.5
夏玉米	N120	84.4	82.3	-2.1	39.8	48.6	8.8	75.1
	N240	114.6	134.5	19.9	134.9	52.0	-82.9	79.4
	N360	196.0	256.4	60.4	183.6	75.2	-108.4	57.6
1999/2000	N0	13.3	5.6	-7.7	14.5	32.0	17.5	
冬小麦	N120	82.3	43.5	-38.8	48.6	82.0	33.4	
	N240	134.5	250.4	115.9	52.0	248.9	196.9	
	N360	256.4	329.7	73.3	75.2	245.1	169.9	
2000 夏玉米	N0	5.6	20.9	15.3	32.0	23.3	-8.7	41.3
	N120	43.5	180.6	137.1	82.0	95.1	13.1	88.7
	N240	250.4	408.6	158.2	248.9	314.5	65.6	196.8
	N360	329.7	569.1	239.4	245.1	298.4	53.3	275.8
东北旺 <sup>1)</sup>	N0	36.1	32.0	-4.1	46.1	32.7	-13.4	
1999 夏玉米	N110	36.1	57.1	21.0	46.1	37.5	-8.6	
	N360	36.1	107.9	71.8	46.1	54.3	-8.2	
1999/2000	N0	32.0	26.5	-5.5	32.7	41.2	8.5	
冬小麦	N78	57.1	86.1	29.0	37.5	58.9	21.4	
	N300	107.9	369.9	262.0	54.3	65.7	11.4	
2000	N0	26.5	82.0	55.5	41.2	102.2	61.0	
夏玉米	N37	86.1	99.1	13.0	58.9	122.7	63.8	
	N300	369.9	459.5	89.6	65.7	274.3	208.6	

1) 东北旺为 0~90cm 土层和 90~200cm 土层

$\text{NO}_3^-$ -N 在夏玉米季的变化是冬小麦季不同处理残留和夏玉米季施肥的累积结果。对照处理各层次的  $\text{NO}_3^-$ -N 均低于  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  (图2), 说明连续不施肥  $\text{NO}_3^-$ -N 很快被消耗。N  $120 \text{ kg hm}^{-2}$  处理的  $\text{NO}_3^-$ -N 主要在 0~20 cm 变化, 20~100 cm 含量均在  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  以下。N  $240 \text{ kg hm}^{-2}$  和 N  $360 \text{ kg hm}^{-2}$  处理生育期中土壤各层次  $\text{NO}_3^-$ -N 均保持较高水平。十叶期追肥后灌水,  $\text{NO}_3^-$ -N 出现明显向下移动的现象。1999 年夏玉米收获期与播前比较, 两个高量施氮处理 0~100 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 分别增加了 N  $20 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $60 \text{ kg hm}^{-2}$ , 100~200 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 分别减少 N  $83 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $108 \text{ kg hm}^{-2}$ 。0~100 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 的增加是由于当季施入的氮量超过了作物的吸氮量造成的。但高量施肥条件下 100~200 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 在夏玉米季减少的现象比较异常。这种减少可能由三方面的原因引起: 一是由于 100~200 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 被作物吸收, 但吸收的数量不会很大; 二是由于  $\text{NO}_3^-$ -N 向更深土层移动, 为此, 本试验采集了 200~300 cm 土层的样品, 从分析结果可以看出, 各处理之间 200~300 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 并没有显著差异(表2); 三是由于  $\text{NO}_3^-$ -N 在干旱季节随毛管水向上运动, 或者在某些土壤层次发生了反硝化作用。土壤水分向上运动已被剖面中水分动态的监测所证实<sup>(1)</sup>, 但  $\text{NO}_3^-$ -N 究竟在哪些层次发生了反硝化以及反硝化损失的数量有多大, 依然是一个值得研究的问题<sup>(2)</sup>。

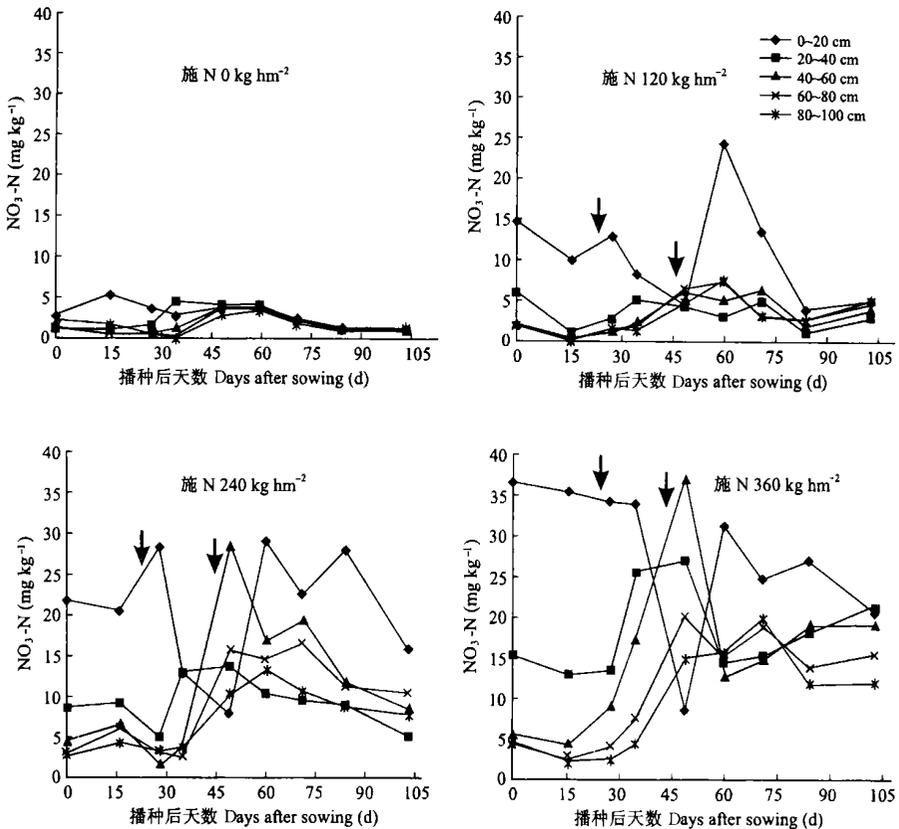


图2 不同土层  $\text{NO}_3^-$ -N 在夏玉米生长季的动态

Fig.2 The dynamics of  $\text{NO}_3^-$ -N in different soil layers during the summer maize growth season

(1) 袁福生. 应用传递函数模型随机模拟土壤中硝态氮的淋洗. 中国农业大学硕士学位论文, 2000

(2) 邹国元. 冬小麦/夏玉米轮作体系中肥料氮的硝化-反硝化作用研究. 中国农业大学博士学位论文, 2001

### 2.3 $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中的累积与移动

$\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中的累积和移动受残留  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, 施氮量和施氮方法, 降雨量和灌溉量的影响, 存在着非常大的年际变化。所以, 仅依据一季或两季的观测很难对  $\text{NO}_3^-$ -N 的移动和淋洗作出评价。土壤剖面采样方法虽不能给出  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗出某一土层的数量, 但可反映出  $\text{NO}_3^-$ -N 在不同土层的累积和移动趋势。为此, 在每季作物播种前和收获后采集了 0~ 200 cm 或 0~ 300 cm 土样分析  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。图 3 和图 4 是两个点  $\text{NO}_3^-$ -N 在 200 cm 土壤剖面中的分布情况。表 2 列出了不同种植季节中  $\text{NO}_3^-$ -N 在 0~ 200 cm 或 0~ 300 cm 土壤中的累积数量。从图和表中可以总结出  $\text{NO}_3^-$ -N 移动和淋洗情况(表 3)。

表 3 不同生长季中  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤中的累积和移动

Table 3 The accumulation and movement of  $\text{NO}_3^-$ -N in different growth season

试验年份 及作物 Year and crop	施氮量 Nitrogen rate	灌溉情况 Irrigation	$\text{NO}_3^-$ -N 累积及移动情况 Accumulation and movement of $\text{NO}_3^-$ -N
科学院			
1997/ 1998 冬小麦	基施氮肥 N 0, 75, 112.5, 150 $\text{kg hm}^{-2}$	冬前喷灌 75mm, 拔节期喷 灌 75mm	$\text{NO}_3^-$ -N 主要累积在 0~ 60cm 土层, 没有 移动到 100cm 以下
1998/ 1999 冬小麦	基施和拔节期追施氮肥 N 0, 120, 240, 360 $\text{kg hm}^{-2}$ 。	播前喷灌 75mm, 拔节期漫 灌 75mm	高量施氮 $\text{NO}_3^-$ -N 移动出 100cm 土层, 在 100~ 200cm 土层累积, 主要发生在 拔节期追肥后漫灌时期
1999 夏玉 米	在上季冬小麦基础上, 三叶 期和十叶期追施氮 N 0, 120, 240, 360 $\text{kg hm}^{-2}$	出苗期喷灌 40mm, 十叶期 喷灌 60mm	高量施氮播前 100~ 200 cm 累积的 $\text{NO}_3^-$ - N 大量消失, 200~ 300 cm 并没有增加, 可能是由于极端干旱, 100~ 200 cm 土体 中的 $\text{NO}_3^-$ -N 向上运动, 或在某些层次发 生了反硝化
1999/ 2000 冬小麦	在上季夏玉米基础上, 播前 和拔节期追施氮 N 0, 120, 240, 360 $\text{kg hm}^{-2}$	于苗期、冬前、拔节期、抽穗 期每次喷灌 70mm 水, 共灌 溉 280mm	高量施氮 $\text{NO}_3^-$ -N 少量在 0~ 100cm 土 体中累积, 大量在 100~ 200cm 土体中 累积, 其它形式损失的氮素很少
2000 夏玉 米	在上季冬小麦基础上, 三叶 期和十叶期追施氮 N 0, 120, 240, 360 $\text{kg hm}^{-2}$	苗期喷灌 70mm	高量施氮 $\text{NO}_3^-$ -N 在 0~ 100cm 土体和 100~ 200cm 土体中均有累积, 在 200~ 300cm 土体中累积的氮素可能是上季 冬小麦和该季夏玉米 $\text{NO}_3^-$ -N 移动的共同 结果, 以其它形式损失的氮素很少
东北旺			
1999 年夏 玉米	三叶期和十叶期追施氮 N 0, 110, 300 $\text{kg hm}^{-2}$	未灌溉	施入的氮肥主要以 $\text{NO}_3^-$ -N 的形式在 0~ 30cm 土壤中累积, 常规施氮 30~ 60cm 土壤的 $\text{NO}_3^-$ -N 也有稍微提高, 但 未移动出 60cm 土体
1999/ 2000 冬小麦	在上季夏玉米基础上, 施氮 N 0, 78, 300 $\text{kg hm}^{-2}$	生育期共喷灌 318mm	常规施氮处理 $\text{NO}_3^-$ -N 移动到 30~ 60cm, 少量移动到 60~ 90cm, 但没有移 动出 90cm 土体, $\text{NO}_3^-$ -N 向下移动主要 发生在春季灌水以后。其它形式损失 的氮素很少
2000 夏玉 米	在上季冬小麦的基础上, 施 氮 N 0, 37, 300 $\text{kg hm}^{-2}$	生育期共喷灌 81mm	由于生育期中出现过几次强度较大的 降雨, 常规施氮 $\text{NO}_3^-$ -N 移出 90cm 土 层, 在 90~ 200cm 土层中累积, 以其它 形式损失的氮素很少

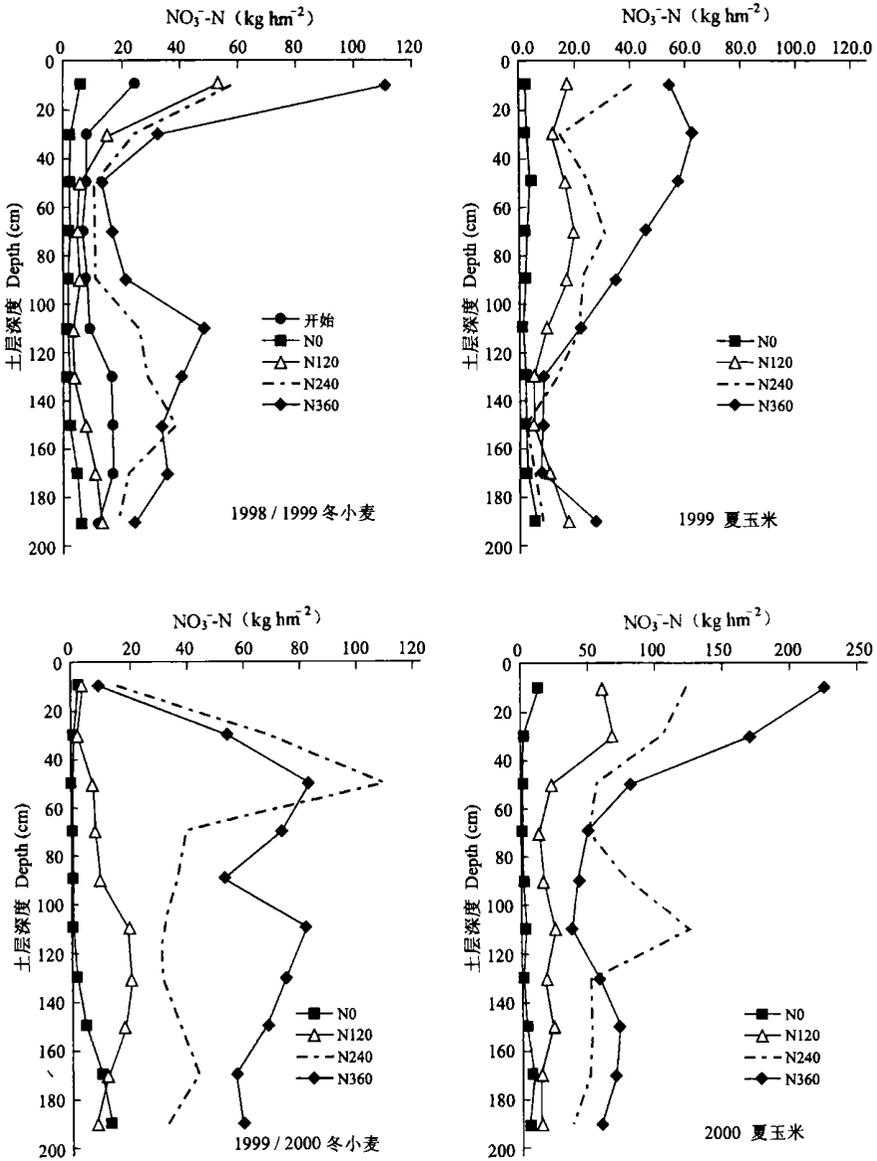


图3 科学园作物收获后  $\text{NO}_3^-$ -N 在 0~ 200 cm 土壤剖面中的分布

Fig. 3 The distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in 0~ 200 cm soil profile after crop harvest at Kexueyuan

科学园试验点 1998/1999 冬小麦/夏玉米轮作中硝态氮淋洗出 2 m 土体的数量很少,土壤硝态氮主要在 100~ 200 cm 土体中累积。进入第二个轮作周期,硝态氮在土壤剖面的累积继续增加,高量施氮处理区 200~ 300 cm 土体中也累积了较高的硝态氮,说明硝态氮有明显向下淋洗的趋势。通过氮平衡的计算(数据未列出),发现冬小麦/夏玉米轮作中氮素表观损失的数量与相应施氮处理试验前后 100~ 300 cm 土体中硝态氮的增量基本相当,因此,硝态氮向深层移动可能是冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥的主要损失途径。东北旺 90~ 200 cm 剖面中硝态氮的分布也有类似的趋势。

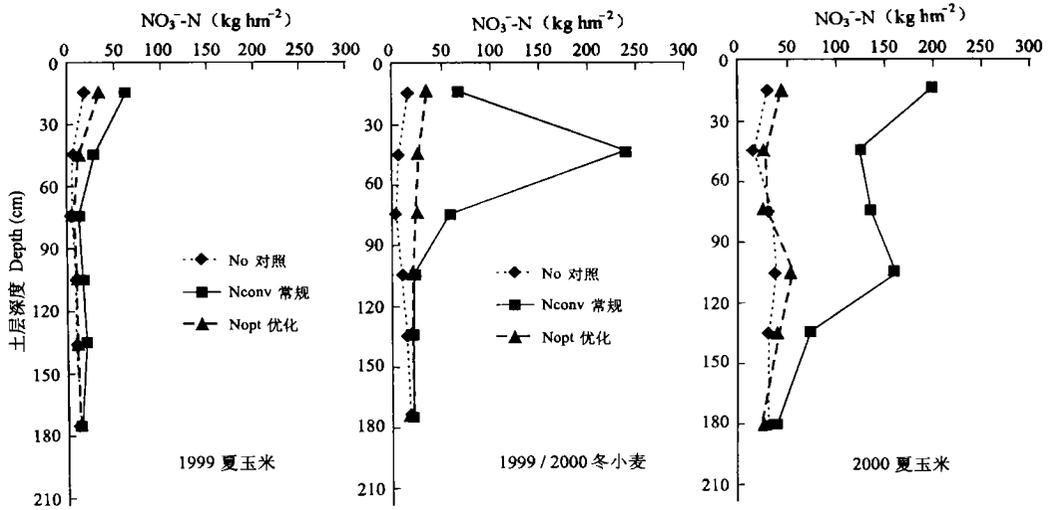


图 4 东北旺作物收获后  $\text{NO}_3^-$ -N 在 0~200 cm 土壤剖面中的分布

Fig 4 The distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in 0~200 cm soil profile after crop harvest at Dongbeiwang

### 3 讨论

在高量施氮和大量灌水的条件下,氮的淋洗是农田土壤氮素损失的主要途径,特别是对那些持水力低的土壤或浅根系作物。氮素的淋洗主要以硝酸根形式,尽管尿素可以在土壤中移动,但尿素施入土壤后会水解为  $\text{NH}_4^+$ ,在通气良好的旱作土壤上, $\text{NH}_4^+$  会很快地转化成  $\text{NO}_3^-$ -N,所以铵的硝化就成为导致氮淋洗损失链上的一个重要环节。由于研究条件的差异,各个作者所观察到的淋洗量和淋洗率有很大的差异<sup>[3,4]</sup>,因此,应该结合某一地区的气候、管理措施对氮肥的淋洗做出具体的评价。近五年来,本试验就华北地区冬小麦/夏玉米轮作中土壤-肥料氮的转化和去向作了一系列研究<sup>[3]</sup>,概括起来,当铵态氮肥或酰胺态氮肥施入通气性良好的旱作土壤后,硝化作用一般在很短时间内完成,这些氮肥很快转化为  $\text{NO}_3^-$ -N,在不合理的高施氮量条件下,整个生育期以  $\text{NO}_3^-$ -N 的形式在土壤剖面不同层次累积,若遇到强度较大的降雨或一次性大量的灌水,这些  $\text{NO}_3^-$ -N 逐渐向土壤深层移动,其中一部分最终可能移动到地下水。累积于土壤不同层次的  $\text{NO}_3^-$ -N,在有利于反硝化的环境条件下,还通过反硝化作用而发生损失<sup>[2]</sup>。铵态氮肥或酰胺态氮肥施,则绝大部分氮肥发生了氮挥发损失。值得注意的是,这些损失都发生在不合理的高施氮量条件下,如果按照作物需要动态调控氮肥用量,氮肥的损失量并不大。以往的研究大多数只考虑了冬小麦和夏玉米单季的氮肥运筹,而没有将整个轮作周期作为一个整体考虑。事实上,在冬小麦季施入的氮肥没有被利用的部分绝大多数在土壤中残留,而农户往往不考虑这些残留的氮肥在夏玉米季的后效,依然施用高量的氮肥,这是引起氮肥严重损失的重要原因。

### 参考文献

- 李家康,林葆. 化肥在我国农业生产中的作用与展望. 中国植物营养与肥料学会和加拿大钾磷研究所(PPI/PPIC)合编. 肥料与农业持续发展国际学术讨论会论文集. 北京:中国农业科技出版社,1999. 19~29
- 张维理,田哲旭,张宁等. 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
- 陈子明,袁锋明,姚造华等. 北京地区潮土表层中  $\text{NO}_3^-$ -N 的转化积累及其淋洗损失. 土壤学报,1995,32(4): 388~398
- 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究. 植物营养与肥料学报,1998,4(1): 8~15.

## ACCUMULATION AND MOVEMENT OF $\text{NO}_3^-$ -N IN SOIL PROFILE IN WINTER WHEAT-SUMMER MAIZE ROTATION SYSTEM

Ju Xiaotang<sup>1,2</sup> Liu Xuejun<sup>1,2</sup> Zhang Firsuo<sup>1,2</sup>

(1 Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

(2 Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)

### Summary

Accumulation and movement of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil profile in winter wheat/ summer maize rotation system was studied in field experiments. The results showed that nitrification completed in 7d after urea was applied into soil. High concentration of  $\text{NH}_4^+$ -N only appeared in short period after fertilization and  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in other times was 1~ 3  $\text{mg kg}^{-1}$ .  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in different soil layers was lower than 4  $\text{mg kg}^{-1}$  generally. So the content of  $\text{NH}_4^+$ -N could not reflect soil available nitrogen level.  $\text{NO}_3^-$ -N in soil profile was significantly increased with nitrogen fertilizer rate increasing.  $\text{NO}_3^-$ -N movement mainly occurred in 0~ 40 cm with low nitrogen rate ( $\text{N} < 120 \text{ kg hm}^{-2}$ ), but large amount of  $\text{NO}_3^-$ -N moved below 100 cm even in winter wheat growth season with high nitrogen rate. The movement of  $\text{NO}_3^-$ -N had a great different between years. In drought year, the possibility of  $\text{NO}_3^-$ -N moving to deeper layer was low even in summer maize growth season. Except large amount of gas loss occurred in 1999 summer maize season (extremely drought in this season), the loss nitrogen fertilizer mainly accumulated in deeper layer in other season, which was consistent in two sites.

**Key words** Winter wheat, Summer maize, Nitrogen fertilizer,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N