

不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响

商放泽¹, 杨培岭^{1*}, 李云开¹, 任树梅¹, 刘培斌², 贺国平²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 为研究深层包气带土壤中氮素的迁移规律, 采用田间小区试验, 研究了不同施氮水平(142.5、285 和 427.5 kg/hm²) 对夏玉米种植期间 0~500 cm 包气带土壤中氮素淋溶累积的影响。结果表明, 不同施氮水平对 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总氮有显著影响, 施氮越多, NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总氮在土壤中的淋溶累积也就越多, 夏玉米生育期间土壤中氮素的淋溶累积含量随着夏玉米生长逐渐减少。在 0~200 cm 土层中, 收获后不同施肥水平土壤中 NO₃⁻-N 和总氮累积量随施氮量增加而增多, 285 kg/hm² 施氮水平 NH₄⁺-N 累积量最多, 427.5 kg/hm² 施氮水平 NH₄⁺-N 累积量最少, 但相差不超过 0.1 kg/hm², 收获后土壤中氮素累积量有损失。夏玉米生育期间不同施氮水平对土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总氮的影响深度主要为 0~145 cm。粉砂壤土中氮素更易累积, 砂质壤土中氮素较易随水分淋溶至下层。142.5 kg/hm² 施氮水平可有效减少 NO₃⁻-N 在土壤中的淋溶损失, 降低土壤中 NH₄⁺-N 和总氮的含量, 对地下水构成的潜在污染风险最小。北京地区地下水埋深较深, NO₃⁻-N 不易淋溶至地下水, 但长期大量施用氮肥、田间土壤大孔隙的存在等会加速 NO₃⁻-N 向深层土壤迁移, 对地下水水质构成威胁。

关键词: 淋溶, 氮, 土壤, 累积, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.018

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0103-08

商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 103-110.

Shang Fangze, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Effects of different inorganic nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 103-110. (in Chinese with English abstract)

0 引言

1963 年中国首次施用氮肥, 至今已有近 50 a 的历史。氮肥对促进中国粮食产量大幅提高起到了十分重要的作用^[1-2], 然而氮肥利用率只有 25%~35%^[3], 过量施肥导致 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总氮“三氮”在土壤剖面中淋溶累积, 对地下水构成潜在污染, NO₃⁻-N 进入人体后能还原为亚硝酸盐, 进而形成亚硝基化合物, 亚硝基化合物具有明显的致癌、致突变、致畸形的性质, 会严重威胁到人体健康。因此, 有关氮素在土壤中的淋溶累积成为研究热点, 国内外学者在实验室和田间对氮素的淋溶累积开展了大量的研究^[4-9]。土壤氮素的累积是氮素淋溶的首要条件, 水分在土壤剖面中的垂直运移是氮素向下淋溶的必要条件, 土壤剖面中 NO₃⁻-N 的分布特征在一定程度上能表征地下水 NO₃⁻-N 污染的潜力^[10], 而且水量和溶质运移深度之间关系密切, Sharma 甚至发现 NO₃⁻-N 下移与水分移动相当一致^[11]。NH₄⁺-N 带正电, 土壤胶体带负

电, 易被土壤胶体吸附, NH₄⁺-N 能通过硝化作用转化为 NO₃⁻-N。总氮包括有机态氮和无机态氮, 有机态氮通过微生物的矿化作用也能转化为 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 等无机态氮。

国内外文献大量研究了 0~200 cm 土层中氮素的淋溶累积规律^[12-16], 对 NO₃⁻-N 研究较多, 对 NH₄⁺-N 和总氮研究较少, 对深层 0~500 cm 包气带土壤结构“三氮”的淋溶累积几乎未见报道^[17-20]。本研究旨在了解夏玉米种植期间不同施氮水平对 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总氮“三氮”在 0~500 cm 包气带土壤中淋溶累积的影响和对 0~200 cm 土层中“三氮”累积量的影响, 为揭示氮素的淋溶累积规律、指导区域合理施肥和减少 NO₃⁻-N 对地下水的潜在污染提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区在北京市海淀区上庄镇中国农业大学上庄实验站, 试验田地理位置: N 40°08'39"~40°08'42", E116°11'19"~116°11'22"。北京市海淀区属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区, 冬季寒冷干燥, 盛行西北风, 夏季高温多雨, 盛行东南风。多年平均气温 12.5℃, 年日照数 2 662 h, 无霜期 211 d, 多年平均降水量 628.9 mm, 降水集中于夏季 6~8 月, 占全年降水的 70%。上庄镇位于海淀区西北部, 辖区面积 38.5 km², 人口约 2 万人。田间观测土壤剖面与实验室粒径分析结合, 把 0~500 cm 土

收稿日期: 2011-08-11 修订日期: 2011-11-24

基金项目: 北京市科技计划课题: 北京市地下水资源安全评价及污染防治技术与示范 (D07050601510703-3)

作者简介: 商放泽 (1988-), 男, 云南大理人, 主要从事水土资源与环境研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: shangfangze@126.com

*通信作者: 杨培岭 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、灌溉理论与技术等研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: yangpeiling@126.com

层共分为 11 层。包气带土壤物理特性和氮素背景值分别 见表 1 和表 2，试验小区包气带土壤结构示意图见图 1。

表 1 0~500 cm 包气带土壤物理特性
Table 1 Physical properties of 0-500 cm deep vadose zone soils

土层深度/ cm	不同粒径颗粒所占百分数/%			pH 值	体积质量/ (g cm ⁻³)	孔隙率/ %	田间持水率/ (g·g ⁻¹)	饱和含水率/ (g·g ⁻¹)	饱和导水率/ (cm·s ⁻¹)
	0.05~2 mm	≥0.002~0.05 mm	<0.002 mm						
0~20	42.6	50.2	7.2	8.2	1.41	45.2	15.66	32.26	0.004396
>20~60	39.0	53.3	7.7	8.5	1.63	39.1	13.26	23.76	0.001771
>60~100	39.5	55.0	5.5	8.7	1.44	43.3	15.47	29.58	0.001051
>100~145	38.4	55.2	6.4	8.7	1.59	40.1	17.65	25.27	0.000256
>145~170	45.9	49.5	4.6	8.9	1.57	43.0	13.51	27.48	0.001008
>170~210	31.4	62.0	6.6	8.9	1.59	42.2	20.51	26.34	0.000203
>210~300	34.4	58.2	7.4	8.8					
>300~330	49.4	45.2	5.4	8.7					
>330~400	26.9	66.3	6.8	8.5					
>400~440	14.0	75.0	11.0	8.6					
>440~500	66.9	29.4	3.7	8.7					

表 2 0~500 cm 包气带土壤氮素质量分数背景值
Table 2 Background values of nitrogen content in 0-500 cm depth vadose zone soils

土层深度/cm	0~20	>20~60	>60~100	>100~145	>145~170	>170~210	>210~300	>300~330	>330~400	>400~440	>440~5000
NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	8.43	2.82	1.88	0.88	1.10	0.60	0.52	0.10	0.25	0.35	0.30
NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	2.54	2.22	0.12	2.51	0.04	0.81	0.85	1.67	1.92	3.64	2.85
总氮/(mg·kg ⁻¹)	1012	841	530	421	398	632	485	446	450	970	870

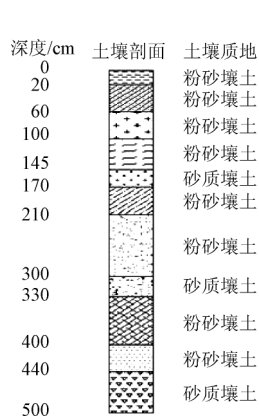


图 1 试验区包气带土壤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of vadose zone soils in study area

1.2 试验设计

试验供试夏玉米为“纪元一号”，2010 年 6 月 21 日播种，10 月 3 日收获，行距 55 cm，株距 25 cm，生育期 102 d。试验设置 3 个氮肥水平，即 N_{0.5}、N₁ 和 N_{1.5}（见表 3），分别表示施纯氮总量 142.5、285 和 427.5 kg/hm²，N₁ 为当地常规水平，2010 年 6 月 21 日施底肥，2010 年 7 月 9 日追肥，不同施氮水平见表 3。小区面积 10 m×10 m，小区之间设置 2 m 隔离带，小区用 50 cm 高土埂围住，重复 3 次，共 9 个小区，随机区组排列。试验小区灌水方式采用普通漫灌，7 月 9 日和 8 月 29 日分别灌水 80 mm。6 月 21 日至 10 月 3 日试验期间自然降雨和人工灌水情况见图 2。

表 3 不同施氮水平

处理	日期	无机肥/(kg·hm ⁻²)		纯氮合计
		尿素	复合肥	
N _{0.5}	2010-06-21	187.5	375.0	142.5
	2010-07-09			
N ₁	2010-06-21	187.5	375.0	285
	2010-07-09	309.8		
N _{1.5}	2010-06-21	187.5	375.0	427.5
	2010-07-09	619.6		

注：N_{0.5}、N₁ 和 N_{1.5} 分别表示施纯氮总量 142.5、285 和 427.5 kg/hm²，下同。

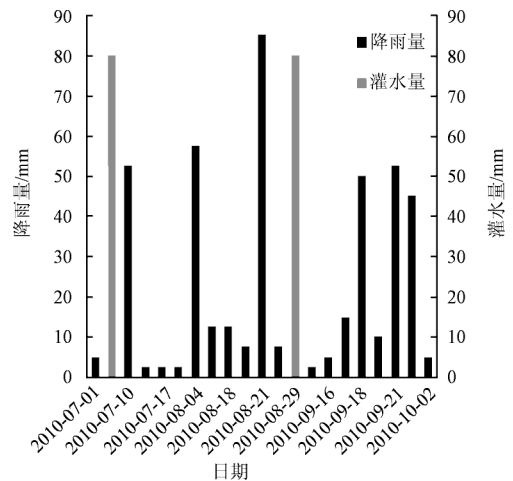


图 2 试验期间降雨量和灌水量

Fig.2 Rainfall and irrigation quantity distribution during test

1.3 样品取样方式和测定方法

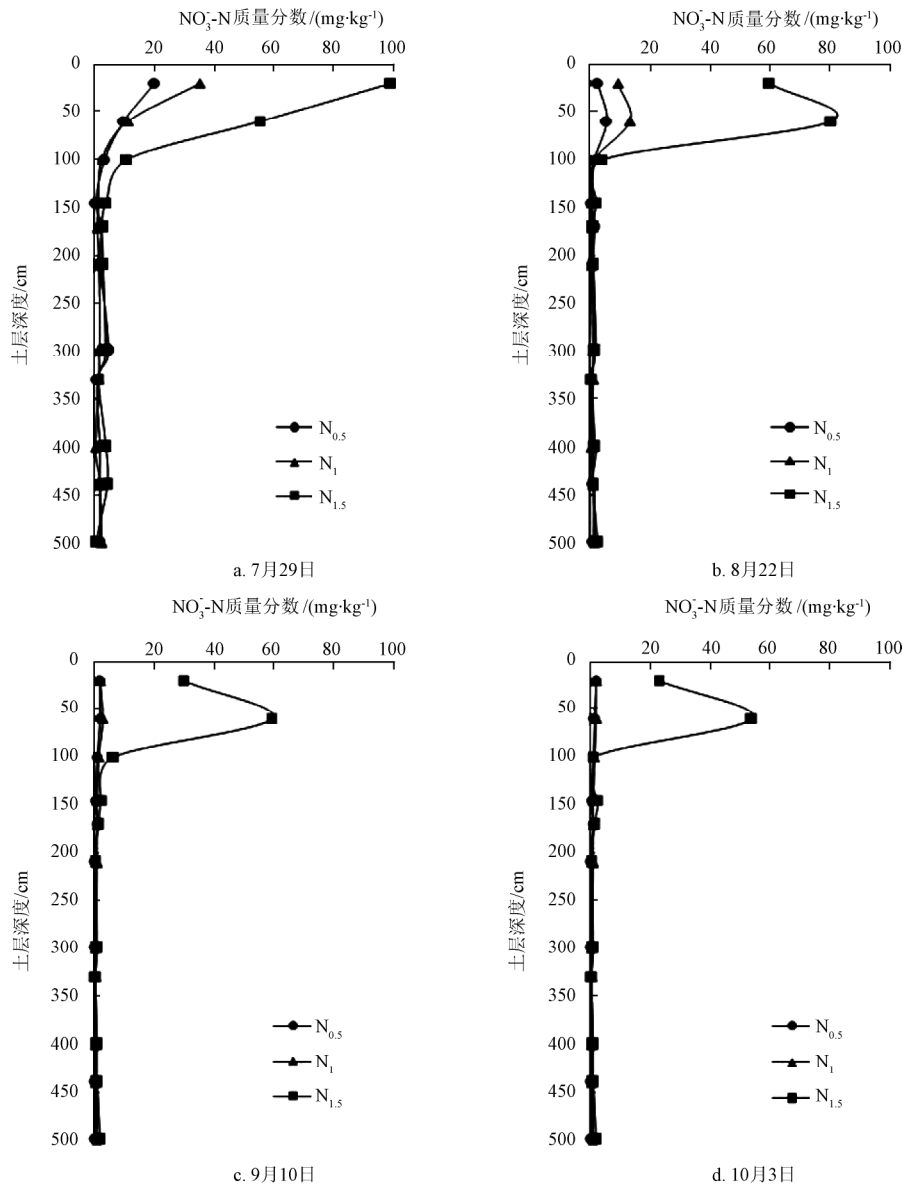
分别于 2010 年 7 月 29 日（拔节期）、8 月 22 日（抽雄期）、9 月 10 日（灌浆期）和 10 月 3 日（收获后）4 个具有代表性的时间点分层采集 0~500 cm 土层土样，分为 0~20、>20~60、>60~100、>100~145、>145~170、>170~210、>210~300、>300~330、>330~400、>400~440、>440~500 cm 共 11 层，采样器为荷兰 Eijkelkamp 公司生产的衬片式土样采集器。NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 根据《土壤农化分析》（鲍士旦，第三版）的方法，用紫外分光光度计测定；TN 根据中华人民共和国林业行业标准森林 TN 的测定（LY/T1228-1999）方法，用半微量凯式法测定。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对包气带土壤 NO₃⁻-N 的影响

不同施氮水平对土壤 NO₃⁻-N 质量分数的影响见图 3。

图 3 中 a、b、c、d 分别为 7 月 29 日、8 月 22 日、9 月 10 日和 10 月 3 日不同施氮水平土壤 NO₃⁻-N 质量分数。7 月 8 日施肥后灌水 80 mm，第 2 天自然降雨 52.5 mm，如此大的水量足以引起氮肥的溶解和 NO₃⁻-N 的淋溶，至 7 月 29 日，土壤中 NO₃⁻-N 大量累积在 0~100 cm 土层中，N_{1.5} 处理小区取样点存在大孔隙使 NO₃⁻-N 淋溶到 440 cm，NO₃⁻-N 在 210~300 cm 和 400~440 cm 粉砂壤土（粉粒分别占 58.0% 和 75.0%）土层中有少量累积，因为粉砂壤土粉粒多，水分和 NO₃⁻-N 不易向下运移。8 月 4 日降雨 57.4 mm，8 月 21 日又降雨 85 mm，水分对 NO₃⁻-N 产生淋溶使 8 月 22 日 NO₃⁻-N 在 20~60 cm 土层上累积明显。8 月 29 日灌水 80 mm 导致 9 月 10 日 N_{1.5} 处理在 >20~60 cm 土层上有累积。9 月 10 日后 NO₃⁻-N 质量分数变化较少，夏玉米根系对土壤中 NO₃⁻-N 的不断吸收使 NO₃⁻-N 减少，由水分下移引起的 NO₃⁻-N 淋溶量变少，即使 9 月 18 日、9 月 21 日和 10 月 1 日分别降雨 50、52.5 和 30 mm，



注：N_{0.5}、N₁、N_{1.5}见表 3

图 3 不同施氮水平对土壤 NO₃⁻-N 质量分数的影响

Fig.3 Effect of N-fertilizer level on NO₃⁻-N content in soil profile

NO_3^- -N 质量分数变化不大, 10月3日土壤中 NO_3^- -N 的淋溶累积质量分数及分布与9月10日相似。 NO_3^- -N 与土壤离子同带负电荷, 难以被土壤胶体吸附, 随水分迁移明显, 施氮量越多, NO_3^- -N 在土壤中的淋溶累积量就越多, 夏玉米根系不断吸收 NO_3^- -N, 而且 NO_3^- -N 在深层缺氧的土壤中易发生反硝化作用, 部分 NO_3^- -N 以气体形式损失, 土壤中 NO_3^- -N 含量随时间减少。

夏玉米生育期间 NO_3^- -N 的影响深度主要为 0~145 cm, 大孔隙存在的地方 NO_3^- -N 能淋溶至 440 cm。施氮量为 1/2 倍常规施氮量的 $\text{N}_{0.5}$ 处理和常规施氮处理 N_1 中 NO_3^- -N 的变化规律相似, 8月22日之前, N_1 处理淋溶损失比 $\text{N}_{0.5}$ 大, 9月10日之后, 2种处理土壤中 NO_3^- -N 淋溶累积量十分接近。不同施氮水平下夏玉米产量无显著差异。

2.2 不同施氮水平对包气带土壤 NH_4^+ -N 的影响

不同施氮水平对土壤 NH_4^+ -N 质量分数的影响见图4。图4中 a、b、c、d 分别为7月29日、8月22日、9月10日和10月3日不同施氮水平土壤 NH_4^+ -N 质量分数。7月

29日之前的施肥、灌水和降雨使 NH_4^+ -N 发生淋溶累积, $\text{N}_{1.5}$ 处理施氮最多, 在 0~145 cm 土层中淋溶累积量比 $\text{N}_{0.5}$ 和 N_1 处理大。8月4日和8月21日降雨的淋溶作用使 NH_4^+ -N 产生波动, 8月22日 0~145 cm 土层中 $\text{N}_{1.5}$ 处理 NH_4^+ -N 质量分数呈线性减少, $\text{N}_{0.5}$ 和 N_1 处理在 60~100 cm 土层累积。8月22日之后, 降雨和灌水的淋溶作用导致 NH_4^+ -N 有小幅波动, 根系对 NH_4^+ -N 的吸收利用导致后期能在水分作用下淋溶的 NH_4^+ -N 减少, 9月10日和10月3日期间质量分数变化较小。 NH_4^+ -N 在 210~300 和 400~440 cm 粉砂壤土(粉粒分别占 58.2%和 75.0%) 土层中累积较多, 在 300~330 和 440~500 cm 砂质壤土(砂粒分别占 49.0%和 66.9%) 土层中质量分数较少, 因为砂质壤土砂粒含量多, 孔隙大, 水分和 NH_4^+ -N 容易下移, NH_4^+ -N 背景值在 330~500 cm 土层上呈 S 形分布。夏玉米生育期间, 施氮量越大, NH_4^+ -N 在土壤中的质量分数也越多, 夏玉米根系对 NH_4^+ -N 的吸收及 NH_4^+ -N 发生氨挥发等作用, NH_4^+ -N 质量分数亦随夏玉米生育期推进而减少。

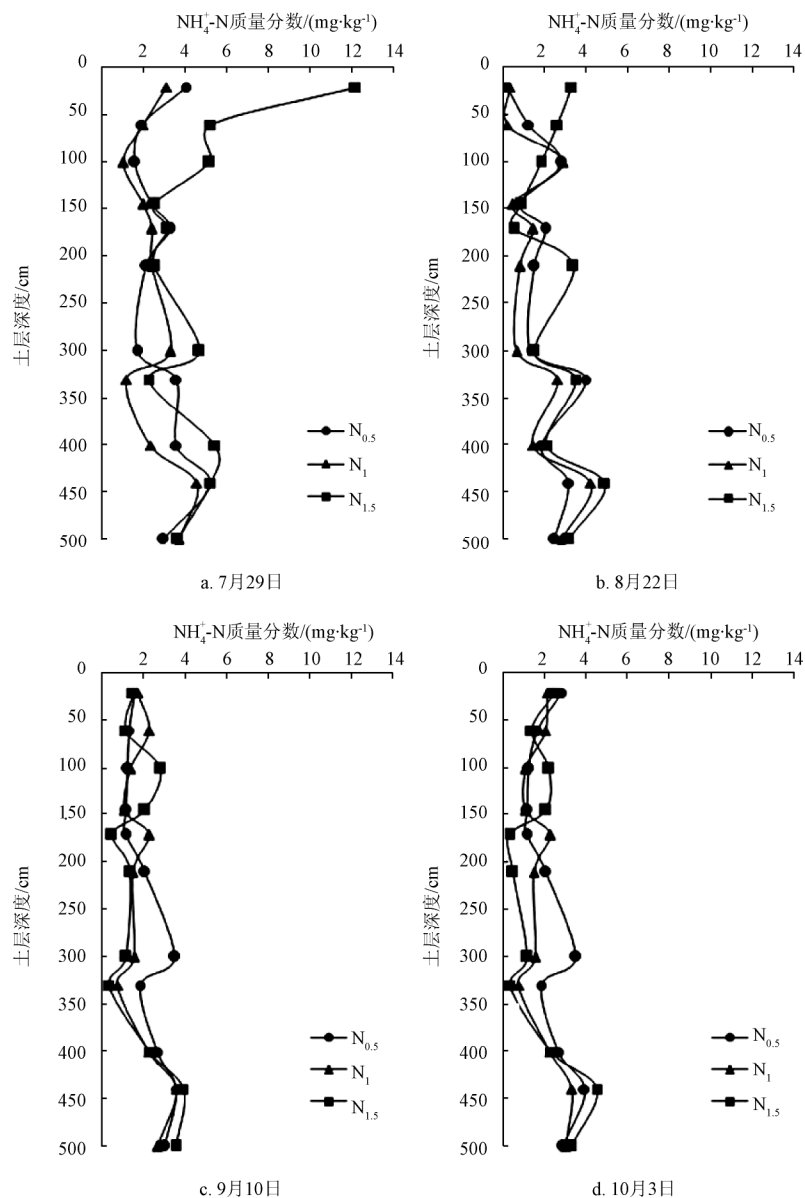


图4 不同施氮水平对土壤 NH_4^+ -N 质量分数的影响

Fig.4 Effect of N-fertilizer level on NH_4^+ -N content in soil profile

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响深度主要为 0~145 cm, 在 145~330 cm 有波动, 330 cm 以下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数变化主要受背景值 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响。 $\text{N}_{0.5}$ 处理和 N_1 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化规律相似, 8 月 22 日之前 N_1 处理淋溶损失比 $\text{N}_{0.5}$ 大, 之后 2 种处理土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量分数接近。

2.3 不同施氮水平对包气带土壤总氮的影响

不同施氮水平对土壤总氮质量分数的影响见图 5。图 5 中 a、b、c、d 分别为 7 月 29 日、8 月 22 日、9 月 10 日和 10 月 3 日不同施氮水平土壤总氮质量分数。7 月 9 日施肥后灌水和降雨使 7 月 29 日土壤中 TN 在 >60~100 cm 中累积。8 月 22 日 $\text{N}_{1.5}$ 处理在 400~440 cm 粉砂壤土(粉粒占 75.0%) 土层中有明显累积, 在 500 cm 深处质量分数有增加, 说明 8 月 4 日和 8 月 21 日的降雨使总氮淋溶至 500 cm, 9 月 10 日之后, TN 质量分数变幅减小。夏玉米生育期间, 总氮在 145 cm 处形成一个拐点, 总氮淋溶累积主要发生在 0~145 cm 土层中, 且土壤中总氮

的质量分数随深度增加而逐渐减少; 145 cm 以下, 土壤中总氮质量分数变化幅度较小, 在 400~440 cm 粉砂壤土土层中累积明显, 在 440~500 cm 砂质壤土(砂粒占 66.9%) 中淋溶减少。夏玉米根系对氮素的吸收, 有机态氮在微生物作用下发生铵离子的矿物固定、氨化、硝化、反硝化等作用, 无机态氮发生的硝化、反硝化等作用, 以及微生物的固持作用等, 造成总氮在土壤中变化的无序性, 但总体来说, 施氮量越大, 土壤中发生淋溶累积的总氮也越多, 土壤中总氮因根系的吸收和氮素的各种转化反应随夏玉米生长不断减少。

总氮的影响深度主要为 0~145 cm, 145 cm 深度以下总氮质量分数变化较小, 但已经被淋溶到 500 cm 深。总氮包含多种氮素形式, 能发生多种物理化学反应, 总氮在包气带土壤中的淋溶累积比较复杂, 有一定的规律性, 也有相当的随机性。

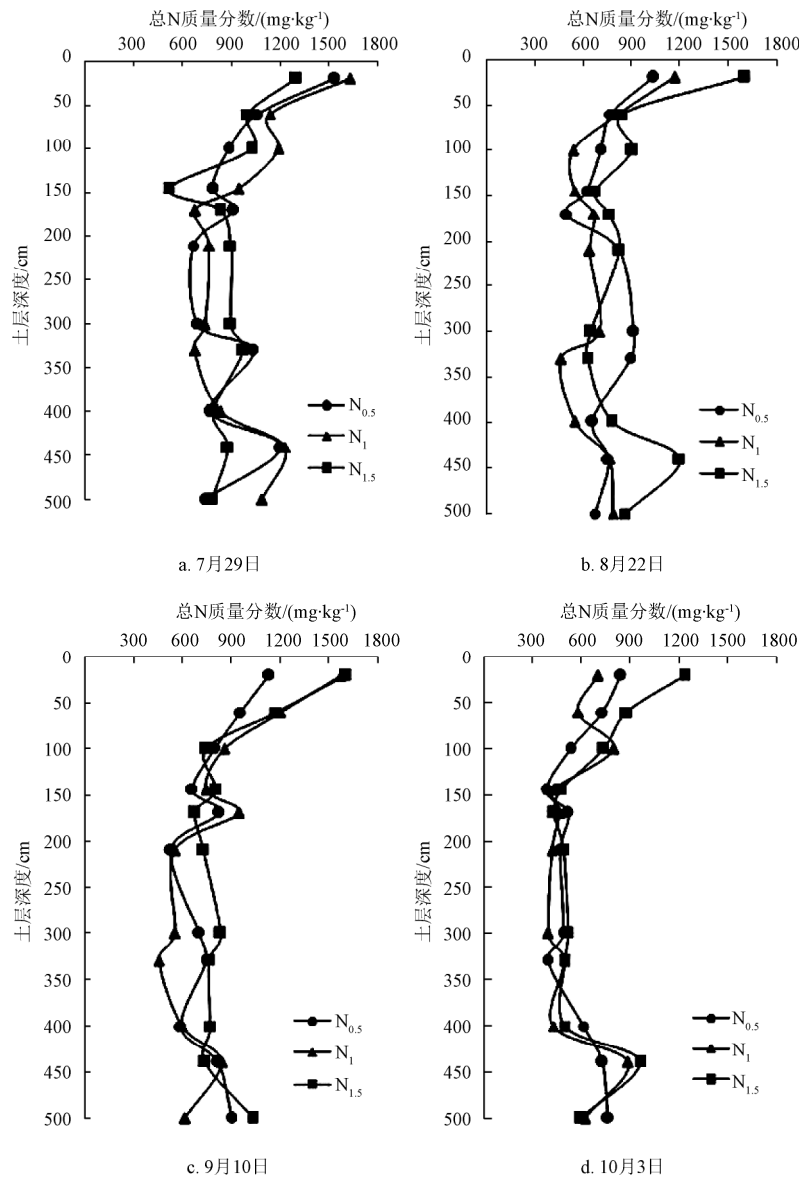


图 5 不同施氮水平对土壤总 N 质量分数的影响

Fig.5 Effect of N-fertilizer level on TN content in soil profile

3 不同施氮水平对0~200 cm 土层中氮素累积量的影响

不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 NO_3^- -N 累积量的影响如表4所示,夏玉米收获后,累积量: $\text{N}_{1.5} > \text{N}_1 > \text{N}_{0.5}$, 施氮量越多,累积量越大, $\text{N}_{1.5}$ 处理达 21.84 kg/hm^2 , 而其他两个处理不足 2 kg/hm^2 。7月29至10月3日,3种处理 NO_3^- -N 在土壤中的累积量随时间减少,与7月29日相比,收获后损失量: $\text{N}_{1.5} > \text{N}_1 > \text{N}_{0.5}$, 施氮越多, NO_3^- -N 损失越大。根系的吸收、水分的淋溶和反硝化作用是 NO_3^- -N 损失的主要原因。

表4 不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 NO_3^- -N 累积量的影响
Table 4 Effect of N-fertilizer level on soil NO_3^- -N accumulation in 0-200 cm depth

处理	日期				累积量 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	2010-07-29	2010-08-22	2010-09-10	2010-10-03	
$\text{N}_{0.5}$	8.95	3.09	1.26	1.07	-7.88
N_1	11.89	6.37	2.28	1.93	-9.96
$\text{N}_{1.5}$	42.05	37.67	27.27	21.84	-20.21

不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 NH_4^+ -N 累积量的影响如表5所示,夏玉米收获后,累积量: $\text{N}_1 > \text{N}_{0.5} > \text{N}_{1.5}$, 但相差不超过 0.1 kg/hm^2 。夏玉米生育期间不同施氮水平 NH_4^+ -N 在土壤中累积量有升有降,与7月29日相比,收获后损失量: $\text{N}_{1.5} > \text{N}_{0.5} > \text{N}_1$, 高施氮量的 $\text{N}_{1.5}$ 处理损失最多,达 5.4 kg/hm^2 , 其他2个处理损失量小于 1.5 kg/hm^2 , 土壤对 N_1 施氮水平下 NH_4^+ -N 吸附较强,损失量最少。根系的吸收、水分的淋溶和氨挥发是 NH_4^+ -N 损失的主要原因。

表5 不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 NH_4^+ -N 累积量的影响
Table 5 Effect of N-fertilizer level on soil NH_4^+ -N accumulation in 0-200 cm depth

处理	日期				累积量 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	2010-07-29	2010-08-22	2010-09-10	2010-10-03	
$\text{N}_{0.5}$	3.97	2.40	2.18	2.48	-1.49
N_1	3.41	1.74	2.63	2.54	-0.87
$\text{N}_{1.5}$	7.84	3.20	2.69	2.44	-5.40

不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 TN 累积量的影响如表6所示,夏玉米收获后,累积量: $\text{N}_{1.5} > \text{N}_1 > \text{N}_{0.5}$, 施氮量越多, TN 累积量越大。试验期间不同施氮水平 TN 在土壤中累积量有升有降,与7月29日相比,收获后损失量: $\text{N}_1 > \text{N}_{0.5} > \text{N}_{1.5}$, 施氮量最多的 $\text{N}_{1.5}$ 损失量最小,当地施氮水平 N_1 损失最大,可能是 TN 有多种氮素形式组

表6 不同施氮水平对0~200 cm 土壤中 TN 累积量的影响
Table 6 Effect of N-fertilizer level on soil TN accumulation in 0-200 cm depth

处理	日期				累积量 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	2010-07-29	2010-08-22	2010-09-10	2010-10-03	
$\text{N}_{0.5}$	1 568.15	1 153.06	1 260.97	875.29	-692.86
N_1	1 761.22	1 119.61	1 507.29	902.00	-859.23
$\text{N}_{1.5}$	1 492.26	1 433.05	1 489.34	1 077.50	-414.76

成,淋溶累积变化较复杂。根系的吸收、水分的淋溶和氮素发生的物理化学反应是 TN 损失的主要原因。

4 结论

1) 不同施氮水平对深层包气带土壤“三氮”淋溶累积的影响不同,总体来说,施氮越多,“三氮”在土壤中的淋溶累积越多,根系对氮素的吸收、水分淋溶和氮素发生的物理化学反应使包气带土壤中“三氮”质量分数随夏玉米生长而减少,9月10日和10月3日期间“三氮”淋溶累积变化较小。夏玉米收获后,在0~200 cm 土层中, NO_3^- -N 和总氮累积量: $\text{N}_{1.5} > \text{N}_1 > \text{N}_{0.5}$, 施氮量越多,累积量越大, NH_4^+ -N 累积量: $\text{N}_1 > \text{N}_{0.5} > \text{N}_{1.5}$, 但最多相差 0.1 kg/hm^2 , 收获后不同施氮水平下“三氮”有损失。

2) 不同施氮水平对 NO_3^- -N 的影响深度主要为0~145 cm, 大孔隙存在的地方 NO_3^- -N 能淋溶至440 cm; 对 NH_4^+ -N 的影响深度主要为0~145 cm, >145~330 cm 有波动,330 cm 以下 NH_4^+ -N 质量分数变化主要受背景值 NH_4^+ -N 的影响; 对总氮的影响深度主要为0~145 cm, 145 cm 深度以下总氮质量分数变化较小,但已经被淋溶到500 cm 深。

3) 土壤质地对不同施氮水平“三氮”的淋溶累积有影响,在粉粒含量多、孔隙小、水分难下渗的粉砂壤土土层中“三氮”易累积; 砂粒含量多、孔隙大、水分容易下移的砂质壤土土层中“三氮”较易随水分淋溶至下层。

4) $\text{N}_{0.5}$ 施氮量是 N_1 的1/2倍,不同施氮水平对夏玉米产量无明显影响,夏玉米生育后期包气带土壤中 NO_3^- -N 质量分数也十分接近, $\text{N}_{0.5}$ 施氮处理可有效减少 NO_3^- -N 在土壤中的淋溶损失,降低土壤中 NH_4^+ -N 和总氮的质量分数,使氮素对地下水构成的潜在污染风险最小, $\text{N}_{0.5}$ 施氮处理比上庄镇当地常规施氮水平 N_1 更环保,也更经济。北京地区较深的地下水埋深使 NO_3^- -N 不易淋溶至地下水,但长期大量施用氮肥、田间土壤大孔隙的存在等会加速 NO_3^- -N 向深层包气带土壤淋溶迁移,对地下水构成威胁。

[参考文献]

- [1] 巨晓棠,张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Nitrate accumulation and its implication to environment in North China[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐钰,江丽华,林海涛,等. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1196-1199.
Xu Yu, Jiang Lihua, Lin Haitao, et al. Effects of different nitrogen regulation on maize yield, economic benefit and the content of soil nitrate-N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1196-1199. (in Chinese with English abstract)
- [3] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 92-94.

- Ju Xiaotang, Liu Xuejun, Zhang Fusuo. Dynamics of different soil nitrogen pools after applying different types of nitrogen fertilizers[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 92—94. (in Chinese with English abstract)
- [4] Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. The effect of autumn applied 15 N-labelled fertilizer on nitrate leaching in a cultivated soil during winter[J]. *Nutrition Cycling Agroecosystems*, 2000, 56(2): 99—107.
- [5] Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden[J]. *Nutrition Cycling Agroecosystems*, 2000, 56(2): 139—152.
- [6] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1964—1972.
- Zhang Lijun, Ju Xiaotang, Zhang Fusuo, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964—1972. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭建华, 赵春江, 孟志军, 等. 北方旱作条件下玉米施用氮肥对氮吸收和淋洗的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 562—565.
- Guo Jianhua, Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, et al. The effect of nitrogen on nitrate leaching and absorption under spring corn in dry areas of North China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 562—565. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(1): 96—101.
- Song Haixing, Li Shengxiu. Effects of root uptake function and soil water on NO_3^- -N and NH_4^+ -N distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1): 96—101. (in Chinese with English abstract)
- [9] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 630—634.
- Ma Xinghua, Yu Zhenwen, Liang Xiaofang, et al. Effects of nitrogen application rate and its basal/top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 630—634. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jabro J D, Lotse E G, Simmons K E. A field study of macropore flow under saturated conditions using a bromide tracer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(5): 376—380.
- [11] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amount of water on desalinization and permeability: behavior of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 31(3): 225—235.
- [12] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋洗及氮素利用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 200—205.
- Chuan Limin, Zhao Tongke, An Zhizhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 200—205. (in Chinese with English abstract)
- [13] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1493—1499.
- Ju Xiaotang, Liu Xuejun, Zou Guoyuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493—1499. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ottaman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1883—1892.
- [15] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 197—204.
- Wang Xina, Wang Zhaohui, Li Shengxiu. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water-nitrogen dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 197—204. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘微, 赵同科, 王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. *华北农学报*, 2006, 21(3): 27—30.
- Liu Wei, Zhao Tongke, Wang Liying. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on NO_3^- -N content and distribution in soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21(3): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [17] 冯绍元, 张自军, 丁跃元, 等. 降雨与施肥对夏玉米土壤硝态氮分布影响的田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 11—14.
- Feng Shaoyuan, Zhang Zijun, Ding Yueyuan, et al. Impact of different rainfall and fertilization conditions on the distribution of soil nitrate in maize field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(5): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [18] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 33—39.
- Ye Youliang, Li Long. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(1): 33—39. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙占祥, 邹晓锦, 张鑫, 等. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. *玉米科学*, 2011, 19(5): 119—123.
- Sun Zhanxiang, Zou Xiaojin, Zhang Xin, et al. Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [20] Allaire-Leung S E, Wu L, Mitchell J P, et al. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48(1): 37—50.

Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone

Shang Fangze¹, Yang Peiling^{1*}, Li Yunkai¹, Ren Shumei¹, Liu Peibin², He Guoping²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of China, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to study the soil nitrogen migration under different application rates of chemical nitrogenous fertilizer in deep vadose zone, during the course of summer maize growing, 3 chemical N fertilizer levels (142.5, 285 and 427.5 kg/hm²) were set up, the NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and total nitrogen migration and accumulation in the first 500 cm depth of soil for each treatment were studied. The results showed that impacts of chemical N application rates on NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and total nitrogen were dramatic, the leaching and accumulation of soil NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and total nitrogen increased with increasing chemical N application rate, but decreased with the growth of summer maize. Soil NO₃⁻-N and total nitrogen accumulation increased with the increase of chemical N application rate in 0-200 cm soil, while the soil NH₄⁺-N accumulation were found to be in the following descending order: the 285 kg/hm² N application rate > the 142.5 kg/hm² N application rate > the 427.5 kg/hm² N application rate, but the difference was no more than 0.1 kg/hm². After harvest the soil nitrogen accumulation decreased. The influences of different N application rates on soil NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and total nitrogen changes were mainly in 0-145 cm depth. The soil nitrogen was inclined to accumulate in powder sandy loam and leach into water in sandy loam. The 142.5 kg/hm² N application rate can effectively reduce the NO₃⁻-N leaching, and reduce NH₄⁺-N and total nitrogen content in soil, thus make the risk of groundwater pollution minimum. The groundwater in Beijing is deep, which is not polluted easily by NO₃⁻-N leaching. However, large quantity of chemical N application in long-term and the presence of soil macropores can accelerate the leaching and migration of NO₃⁻-N in the soils, thus posing a threat to groundwater quality in the Beijing area.

Key words: soils, leaching, nitrogen, accumulation, NO₃-N, NH₄⁺-N