

# 土壤不同形态氮素在剖面中移动特征的模拟研究\*

王百群, 戴鸣钧

(中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)

**摘要:** 应用室内土柱模拟试验方法, 在可控水量条件下, 研究不同水量淋溶情况下, 土壤不同形态氮素在剖面中的分布和移动特征。研究表明, 土壤有机氮组分中, 氨基酸氮和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是易于移动的形态, 非酸解性氮则相对稳定; 无机氮组分中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是易于移动的形态,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 运移性差, 非交换态 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为相对稳定形态; 水、肥条件是决定 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失的重要因素。研究结果为认识和掌握土壤氮素在剖面中的运移规律, 为农田水分和氮素养分管理提供了科学依据; 同时为深入揭示土壤中各种形态氮运移动态机制, 展示了模拟实验技术的前景。

**关键词:** 土柱模拟实验; 氮素形态; 淋溶运移

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2000)04-0117-06

## Simulated Study on Movement Features of Soil Nitrogen in Different Forms in Soil Profile

WANG Bai-qun, DA Ming-Jun

(Institute of Soil and Water Conservation, CAS/MWR National Key Lab of  
Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling Shaanxi 712100, PRC)

**Abstract:** Applying simulated experiment of artificial soil column under the condition of controllable water amount, the distribution and movement features of soil nitrogen in different forms in soil profile are studied with different water amount leaching. The result shows that nitrogen in amino acid and  $\text{NH}_3\text{-N}$  are the forms easily to move, but non-acid-hydrolyzable nitrogen is relatively stable in constituent of soil organic nitrogen,  $\text{NO}_3\text{-N}$ . It provides us with scientific basis for field moisture and nitrogen management to understand and master moving principle of soil nitrogen in soil profile, this study shows the perspective of simulated experiment technique for further revealing of nitrogen movement in different forms and its kinetic mechanism.

**Key words:** simulated experiment of soil column; nitrogen form; leaching

土壤中氮素的淋溶流失不但是重要的农业问题, 而且是导致生态环境中氮素污染的主要来源。氮素是土壤肥力的重要因素之一。土壤中的氮主要以有机形态而赋存, 按照 Bremner 的方法可将土壤有机态氮以形态上进一步细分, 首先根据有机态氮的酸解特性, 把有机态氮分为酸水解性氮和非酸解性氮, 酸水解性氮又可分为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、氨基酸态氮、己

糖态氮和酸解性未知态氮等四种形态。无机氮是作物吸收利用的主要形态, 无机态氮包括硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、铵态氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )和固定态铵(fixed- $\text{NH}_4$ )三种形态。以上各形态氮具有不同的化学组成和化学性质, 从而决定了各形态氮的转化特征、生物有效性及在土壤中移动性等方面的差异性。

\* 收稿日期: 2000-10-08

本试验研究获中科院重点项目(批准号 Z102), 基金的资助。

农田生态系统中,影响土壤氮素状况及其有效性和去向的因素较多,其中降雨和土壤水分条件为重要的因子。在水土流失区,暴雨期间,土壤表层中的有机氮, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  随泥沙及地表径流而流失,使土壤氮素遭到损失<sup>[2]</sup>。同时携带氮素养分的径流汇入河流,引起地表水的氮污染。被氮污染的地表水渗入地下有可能又导致地下水的氮污染,这种现象在一些施用氮素化肥多的地区更为明显。土壤中水分的运动与土壤养分移动有着密切关系,在干旱半干旱地区,由于自然降水或灌溉水的入渗,土壤中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  或其它形态的氮随水分在剖面中下渗而向下层迁移。已有的研究表明, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的迁移深度与降水量有密切的关系,从而影响到作物根系对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的吸收<sup>[1]</sup>。调查表明,由于城郊农田大量施用化肥或进行污水灌溉,导致我国部分城市的地下水中发生氮污染,直接影响人们的身体健康。一些环境科学研究者,对地下水氮污染的成因和机理,采用田间试验或室内模拟试验的方法进行

研究,主要研究了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在土壤中的垂直迁移特征<sup>[3,4]</sup>。但是在淋溶条件下,通过土壤中氮素在剖面中分布和移动状况来反映氮的淋溶损失报道尚不多。

本文通过采用室内土柱模拟试验,在可控条件下,研究不同水量淋溶条件下,各形态氮素在土壤剖面中的分布、移动特征及  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的淋溶量。为农田水分和氮素养分管理、认识和控制氮素的淋溶损失及防治氮素污染提供理论依据。

供试土样为采自陕北安塞县茶坊乡顶农地的黄绵土,其基本理化性质如表 1。试验用氮素为市售尿素,含氮量为 46%;有机氮采用猪粪,取自西北农业大学畜牧场,其含氮量为 2.17%。

## 1 研究材料和方法

### 1.1 供试土样与肥料

表 1 供试土壤的基本性质

有机质/%	有机氮/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )					
	$\text{NH}_3 - \text{N}$	氨基酸氮	己糖氮	HUN	非酸解氮	合计
0.55	144.2	161.5	36.6	153.8	199.1	695.2
有效氮/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		无机氮/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			颗粒组成/%	
		$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	合计	0.05~0.01	0.01~0.005 0.005~0.0010
47.6	3.0	20.7	14.3	35.0	58.0	8.0 8.5

注: HUN 指酸解性未知态氮。

### 1.2 试验过程

试验在水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的土壤养分模拟试验厅进行。(试验装置及实验方法见文献[2],将采集的黄绵土过筛后装入直径为 10 cm,高 200 cm 的塑料管中,每管装土 16.5 kg,装土高度为 150 cm,成为一均质土柱。然后加水,使全土柱中土壤含水量至田间持水量,平衡一周后,进行施肥。试验设置 4 种施肥处理和 2 种淋洗水量(表 2)。施肥方法为,从预先加过水的土柱中取出表层 0~10 cm 土壤,将肥料均匀撒入土柱后,再将取出的土壤填回原土柱中去。

施肥结束后,立即给每个土柱加水,然后分别在第 12 d、44 d、86 d 和 132 d 加水,每次加水量相等,

共分 5 次加完所设计的水量。在上述加水过程中,低水量淋洗每次加水 400 ml,高水量淋洗每次加水 600 ml,分别相当于 51 mm 和 76 mm 降水。每次加水后,由土柱下端侧孔插入塑料管收集淋溶液,作为待测样品,测定其中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量。5 次淋洗结束后,在每个土柱中分别在距施肥点 20 cm、70 cm 和 120 cm 处由土柱侧孔取土样,风干处理后,测定有机、无机氮各组合含量。放置土柱的房间室温为 10~18℃。

应用 Bremner 法进行土壤中有机态氮的分组测定和土壤非交换态铵的测定<sup>[5]</sup>。土壤和淋溶液中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  用电极法测定。

表 2 土柱模拟试验设计

灌水量/ml	对照	尿素/( $\text{g} \cdot \text{柱}^{-1}$ )	猪粪+尿素/( $\text{g} \cdot \text{柱}^{-1}$ )	猪粪/( $\text{g} \cdot \text{柱}^{-1}$ )	备注
2000	0	2.0	50.0+1.0	100.0	255 mm 水量
3000	0	2.0	50.0+1.0	100.0	382 mm 水量

2 结果与分析

土壤水分运动是引起土壤养分淋溶迁移的动力条件。土壤养分的化学形态和性质是决定其迁移特性的内因。以下就不同水量淋洗下土壤各形态氮的剖面分布和移动状况加以分析。

2 1 低水量(255mm)淋洗后各形态氮剖面分布特点

淋洗结束后,测定了剖面中距施肥点不同距离处土壤有机氮和无机氮各组分的含量。由表 3 知,就有机态氮的NH<sub>3</sub>-N 组分而论,未施肥土壤剖面中NH<sub>3</sub>-N 的含量在 120 cm 处较高,而各施肥处理NH<sub>3</sub>-N 含量随深度的增加而减少。比较各处理相同深度处NH<sub>3</sub>-N 的含量可以看出,在距施肥点 20 cm 和 70 cm 处,施肥处理的NH<sub>3</sub>-N 含量均高于对

照,而在距施肥点 120 cm 处,施肥与对照的相差甚微。由此可知,因施肥而增加的NH<sub>3</sub>-N 随水分的运动而往下迁移,但迁移的深度一般只到 70 cm 左右。对氨基酸态组分而言,水分淋洗作用使土壤中的氨基酸氮在剖面中发生再分布。未施肥处理土壤氨基酸氮的含量在 120 cm 处最高。施肥处理土壤氨基酸态氮含量随剖面深度的增加而递减,与NH<sub>3</sub>-N 具有相似的剖面分布模式。在距离施肥点 20 cm 和 70 cm 处,施肥处理中氨基酸态氮的含量均高于未施肥处理的,表明了在水分淋洗下,上层因施肥而增加的氨基酸态氮也随水分的下移而淋移,但主要迁移至 70 cm 处,而不再下移。

在所有处理中,己糖氮和HUN 含量的剖面分布无一定的规律性可循(表 3)。

表 3 低水量(255mm)淋洗后土壤各形态有机氮的垂直分布 mg/kg

取样深度/cm	NH <sub>3</sub> -N				氨基酸氮				己糖氮			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	124.8	151.2	158.3	153.9	111.4	145.4	122.1	130.5	34.6	22.9	38.2	15.4
70	115.5	147.9	127.8	134.6	103.8	130.6	111.5	115.4	21.1	40.4	34.3	34.6
120	130.6	128.8	130.1	132.4	142.3	111.5	99.5	111.6	38.4	19.2	40.2	33.6
平均值	123.6	142.6	138.7	140.3	119.1	129.2	111.0	119.2	31.4	27.5	37.6	27.9

取样深度/cm	HUN				非酸解氮			
	1	2	3	4	1	2	3	4
20	163.2	139.8	143.0	203.8	191.1	186.7	198.4	205.9
70	105.6	69.2	116.4	138.4	191.1	193.1	197.3	190.2
120	88.9	163.4	132.0	138.2	202.7	200.0	192.0	199.4
平均值	119.2	124.1	130.5	160.1	195.0	193.2	195.9	198.5

非酸解氮是不能被 6mol/L HCl 酸解的有机氮形态,用凯氏法对其含量进行测定。非酸解氮的来源比较复杂,它在土壤中以杂环存在,或与芳香环键合存在。由表 3 看出,在所有处理中,非酸解氮含量的增减随剖面深度的变化无一致的规律性,且各处理不同层次的含量相差不大。这表明水分淋洗对非酸解性氮的分布无影响。由于非酸解氮在高温下难以酸解,水分使其溶解的可能性极小,所以水分下移过程中,非酸解氮不可能发生再分布。

无机氮虽然占土壤全氮的比例很小,但是作物主要吸收的是无机态氮。淋洗结束后,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和非交换态NH<sub>4</sub><sup>+</sup>3 种无机氮含量的剖面分布模式如表 4。对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 而言,对照中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量随剖面深度的增加而增加,施肥处理中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量则随剖面深度的增加而递减。比较未施肥处理和施肥处理中各层次NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量,在

距施肥点 20 cm 和 70 cm 处,施肥处理中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均高于未施肥处理的,表明了上层土壤中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随水分的下渗而向下迁移。在NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 组分中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在剖面中分布基本均匀,且各处理不同层次间的含量相差较小。由于土壤胶体对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 具有吸附作用,导致NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 随水分移动的能力差。在非交换态铵组分中,除施用猪粪的处理,其余各处理中土壤非交换态铵的含量随剖面深度变化不大。非交换态NH<sub>4</sub><sup>+</sup>存在于 2:1 型黏土矿物的层间,被层间电荷牢固吸附,易被中性盐交换出来,虽然土壤中的 2:1 型黏土矿物在湿润条件下膨胀,层间间距增大,土壤溶液中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>有可能进入层间,但是由表 4 知,施肥后显著提高土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量,而对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量影响不大,在这种情况下,施肥对非交换态NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的含量影响小。土壤中原有的非交换态NH<sub>4</sub><sup>+</sup>要维持层间电荷平衡,不易由矿

物层间进入土壤溶液中, 因此水分移动对非交换态  $\text{NH}_4^+$  的剖面分布无明显影响。

表 4 低水量(255mm)淋洗后土壤各形态无机氮的垂直分布 mg/kg

取样深度/cm	$\text{NO}_3^- - \text{N}$				$\text{NH}_4^+ - \text{N}$				非交换态 $\text{NH}_4^+$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	4.2	68.8	74.1	91.7	11.3	9.6	7.5	8.8	195.0	188.9	192.9	
70	9.5	43.4	33.1	10.5	9.2	9.4	8.0	9.7	193.4	196.2	194.8	174.4
120	13.0	13.0	15.9	13.2	9.6	11.0	8.6	13.3	201.1	186.6	201.6	171.9
平均值	8.9	41.7	41.0	38.5	10.0	10.0	8.0	10.6	196.5	190.6	196.4	179.6

2.2 高水量(382 mm)淋洗后各形态氮剖面分布特点

表 5 和表 6 分别为高水量淋洗后, 有机、无机各形态氮的剖面含量分布。由表 5 知, 未施肥土壤剖面中  $\text{NH}_3^- - \text{N}$  含量在 120 cm 处略高, 在施肥处理中, 剖面中  $\text{NH}_3^- - \text{N}$  的含量随剖面深度的增加而减少, 表现出与低水量淋洗下相似的分布模式。对相应层次中  $\text{NH}_3^- - \text{N}$  含量进行比较可知, 在距施肥点 120 cm 处, 施肥处理的  $\text{NH}_3^- - \text{N}$  含量高于未施肥中的含量。与低水量淋洗相比, 可以看出, 由于淋洗水量增加使  $\text{NH}_3^- - \text{N}$  迁移深度增加。对氨基酸态氮组分来说, 各处理土壤剖面中不同层次其含量相差不大, 但是在施肥处理的剖面中, 距施肥点 120 cm 处氨基酸态氮的含量高于未施肥的, 表明在淋洗水量多的

情况下, 因施肥而增加的氨基酸态氮可以淋移至距施肥点 120 cm 处。

己糖氮和 HUN 在剖面中的分布缺乏一定的规律性(表 5), 与低水量淋洗下的结果类似。己糖氮主要由葡萄糖胺和乳糖胺组成。绝大部分己糖是不均质的多分散系大分子化合物, 在土壤中以复合状态存在; 另一部分己糖紧密地与无机胶体结合。关于 HUN 的化学组成和性质尚不清楚, 但它的成分肯定是复杂的, 这些特性可能是导致己糖氮和 HUN 在剖面中无规律分布的原因。

无论是不同处理间还是同一处理的不同层次中, 非酸解性氮的含量差异很小(表 5), 表明水分淋洗对非酸解性氮的剖面分布影响甚微, 水分在剖面的下移不会引起非酸解性氮的移动。

表 5 高水量(382 mm)淋洗后土壤各形态有机氮的垂直分布 mg/kg

取样深度/cm	$\text{NH}_3^- - \text{N}$				氨基酸氮				己糖氮			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	120.2	146.1	149.0	151.9	95.4	103.0	110.8	114.6	38.1	17.3	34.5	17.3
70	118.7	133.7	139.2	132.3	111.1	110.8	92.1	111.2	30.7	45.9	16.2	28.8
120	116.7	130.0	130.0	130.0	96.0	115.0	111.4	99.7	42.2	28.8	48.1	36.4
平均值	121.9	136.6	139.6	138.2	100.8	109.9	104.8	108.5	37.0	30.6	32.9	27.5

取样深度/cm	HUN				非酸解氮			
	1	2	3	4	1	2	3	4
20	97.3	113.5	126.1	123.1	191.3	188.4	199.0	192.8
70	134.1	110.7	139.9	76.6	191.0	199.4	198.0	203.4
120	148.3	193.5	94.2	205.1	199.3	189.1	181.9	189.2
平均值	126.6	139.2	120.1	134.9	193.8	192.3	193.0	195.1

表 6 高水量(382 mm)淋洗后土壤各形态无机氮的垂直分布 mg/kg

取样深度/cm	$\text{NO}_3^- - \text{N}$				$\text{NH}_4^+ - \text{N}$				非交换态 $\text{NH}_4^+$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	3.0	41.7	38.6	52.0	9.2	10.1	8.5	10.8	191.3	188.4	199.0	192.8
70	7.3	58.3	46.5	11.3	7.7	10.3	10.6	12.0	191.0	199.4	198.0	203.4
120	6.0	12.6	14.7	7.5	11.2	12.3	11.4	13.1	199.3	189.1	181.9	189.2
平均值	5.4	37.5	33.3	23.6	9.4	10.9	10.2	12.0	193.8	192.3	193.0	195.1

高水量淋洗后, 土壤中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在剖面中的分布模式与低水量的淋洗略有不同。在未施肥, 施用尿素及尿素与猪粪配施 3 个处理中,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的含量均随剖面深度的增加而增加, 但至 70 cm 以下,

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  的含量又减少。与低水量淋洗结果相比, 上述 3 个处理的土壤剖面中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量的峰值明显下移, 表明淋洗水量的增加, 促使较多的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  向土壤下层迁移。但在施用猪粪的处理中,

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 主要分布在距施肥点 20 cm 以内的土层中,高水量与低水量下淋洗的分布特点相似。猪粪腐解后形成的腐殖质对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 有一定的吸持作用,使 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 保持在距施肥点较近的范围内。

在 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 和非交换态 NH<sub>4</sub> 两组分中,无论是不同处理间还是同一处理的不同层次,它们的含量差别很小。可见,淋洗水量增加,对这两种氮的剖面分布几乎无影响。

2 3 淋洗水量对各形态氮迁移累积量的影响

水分淋洗是引起土壤养分移动的必要条件,某些形态氮的移动必然与水分淋洗有关。根据不同水量淋洗土柱前后,土壤剖面中不同层次几种形态氮的变化量可以看出(表 7),未施肥土壤剖面不同层次各形态氮的含量比原始土壤减少,减少量的顺序为,氨基酸态氮> HUN> NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N> NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N> 己糖氮。在淋洗试验中引起有机氮各组分含量减少的原因可能有二,其一是矿化分解,另一种可能是淋溶所致。通过比较对照中 NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、氨基酸态氮和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 在不同水量淋洗下全剖面的平均减少量,证明水分淋洗确实引起了上述 3 种形态氮的淋失。施肥情况下,NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 在距施肥点 20 cm 内有所累积,低水量淋洗后的累积量大于高水量淋洗后的累积量。距施肥点 20 cm 以下,NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的含量比淋洗前的减少,但是施肥处理的淋失量比未施

肥的淋失量少,表明水分淋洗使因施肥而增加的 NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 向下层迁移,但还不足以弥补 NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋失。所以淋洗水量多时足以引起 NH<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋失,由表 7 知,氨基酸态氮的淋失量最多,且高水量下的平均淋失量大于低水量下的淋失量,表明淋洗水量的增加,导致较多的氨基酸氮淋失。因此氨基酸氮的淋失是土壤有机氮淋失的重要方面。在 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 组分中,施用猪粪的处理以两种水量淋洗后,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 均累积在距施肥点 20 cm 以内,而且低水量淋洗后的累积量大于高水量淋洗后的累积量。在其余两组施肥处理中,低水量淋洗后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 最大累积量在距施肥点 20 cm 以内,而高水量淋洗后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 最大累积量却在距施肥点 20~ 70 cm 的土层中。施肥与淋洗水量对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的迁移与累积有着明显的影响,在施肥处理中,低水量淋洗后,全 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的平均净累积量大于高水量淋洗后的平均累积量。未施肥处理中,高水量淋洗后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的平均迁移淋失量大于低水量淋洗后的迁移淋失量。以上结果表明,施肥可以弥补 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋失,而且在一定水量淋洗下还可以在剖面中累积。对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N,无论施肥与否,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 淋失量少且各种处理差别不大。各处理中,己糖氮的减少量相对较小;HUN 的减少量虽然较大,但是无法确定引起 HUN 减少的原因是淋失还是矿化分解的结果。

表 7 两种水量淋洗前后土壤剖面中几种形态氮的变化量\* mg/kg

取样深度/cm	NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N				氨基酸氮				己糖氮			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	- 24 0	+ 1. 9	+ 4 8	+ 7. 7	- 66 5	- 57. 7	- 50 7	- 46 9	+ 1. 5	- 19. 3	- 2. 1	- 19. 3
	- 19. 4	+ 7. 0	+ 14. 1	+ 9. 7	- 50. 1	- 16. 1	- 39. 4	- 49. 9	- 2. 0	- 13. 7	+ 1. 6	21. 2
70	- 25. 5	- 10. 5	- 5. 0	- 11. 9	- 50. 4	- 50. 7	- 69. 4	- 50. 3	- 5. 9	+ 9. 3	- 20. 4	- 7. 8
	- 28. 7	+ 3. 7	- 16. 4	- 9. 6	- 57. 7	- 30. 9	- 70. 0	- 46. 1	- 15. 5	+ 3. 8	- 2. 3	- 2. 0
120	- 17. 5	- 13. 9	- 13. 6	- 13. 8	- 65. 5	- 46. 5	- 50. 1	- 61. 8	+ 5. 6	- 7. 8	+ 11. 5	- 0. 2
	- 13. 6	- 16. 2	- 14. 1	- 11. 8	- 19. 4	- 50. 1	- 62. 0	- 31. 0	+ 1. 8	- 17. 4	+ 3. 6	- 4. 0
平均值	- 22. 3	- 7. 5	- 4. 6	- 6. 0	- 60. 7	- 51. 6	- 56. 7	- 53. 0	+ 0. 4	- 5. 9	- 3. 7	- 9. 1
	- 20. 6	- 1. 6	- 5. 6	- 3. 9	- 42. 4	- 32. 3	- 57. 1	- 42. 3	- 5. 2	- 9. 1	+ 1. 0	- 9. 1

取样深度/cm	HUN				NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N				NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	- 56. 5	- 40. 3	- 27. 7	- 30. 4	- 17. 7	+ 26. 0	+ 17. 9	+ 31. 3	- 5. 1	- 4. 2	- 5. 8	- 3. 5
	+ 9. 4	- 14. 0	- 10. 8	+ 50. 0	- 16. 5	+ 48. 1	+ 53. 4	+ 71. 0	- 3. 0	- 4. 7	- 6. 8	- 5. 5
70	- 19. 7	- 43. 1	- 13. 9	- 77. 2	- 13. 4	+ 37. 6	+ 25. 8	- 9. 4	- 6. 6	- 2. 3	- 3. 7	- 2. 3
	- 48. 2	+ 84. 6	- 37. 5	- 15. 4	- 11. 2	+ 22. 7	+ 12. 4	- 10. 2	- 5. 1	- 4. 9	- 6. 3	- 4. 6
120	- 5. 1	+ 39. 7	- 59. 6	+ 51. 3	- 14. 7	- 8. 1	- 6. 0	- 13. 2	- 3. 1	- 4. 0	- 2. 9	- 1. 2
	- 64. 9	+ 9. 6	- 21. 8	- 15. 6	- 7. 7	- 7. 4	- 4. 8	- 7. 5	- 4. 7	- 3. 3	- 5. 7	- 1. 0
平均值	- 27. 2	- 14. 6	- 33. 7	- 18. 9	- 15. 3	+ 16. 8	+ 12. 6	+ 2. 9	- 4. 9	- 3. 5	- 4. 1	- 2. 4
	- 34. 6	- 29. 7	- 23. 3	+ 6. 3	- 11. 8	+ 21. 0	+ 20. 3	+ 17. 8	- 4. 3	- 4. 3	- 6. 3	- 3. 7

\*: 变化量指淋洗后的含量减去淋洗前基础土样的含量。+: 增加;- : 减少。  
每行上边数据是高水量(382mm)淋洗后的增减量,下边数据代表低水量(255mm)淋洗后的增减量。

将两种水量淋洗后,各处理剖面不同层次的非酸解氮和非交换态铵(表 3、4、5、6)分别与淋洗前土壤中的含量进行 Y 检验,非酸解氮的 Y 值为 0. 44,非交换态铵的 Y 值为 0. 029 8,二者 Y 检验结果均远

远达不到 5% 的显著水平, 表明这两种形态的氮是土壤氮中稳定的组分, 在淋洗下不会发生淋溶损失。

2.4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 淋溶量与水肥的关系

如上所述, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 是易淋溶的氮形态。土壤胶体对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的吸附能力弱, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 溶于土壤溶液中, 沿着土壤孔隙随水分的下移而发生淋溶。为了揭示淋洗水量及施肥对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 淋溶总量的影

响, 对表 8 的结果进行方差分析。施肥处理间及两种水量间 *F* 值分别为 31.87 和 104.5, 均达到极显著水准, 说明水肥是决定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 淋溶量的主要因子。由表 8 知, 高水量下淋溶的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 量大于低水量淋溶的量, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量随淋洗水量的增加而增加, 施肥处理中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量高于未施肥的, 可见, 施肥增加了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量。

表 8 两种水量淋洗下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量

水量/mm	382				225			
处理号	1	2	3	4	1	2	3	4
淋溶量/mg	163.4	265.0	294.2	189.0	74.6	150.2	182.6	114.2
比对照增加/%	—	62.3	80.1	15.7	—	101.3	144.7	53.1

3 结 论

根据上述不同施肥处理和不同淋洗水量条件下, 土壤中不同形态氮淋移深度与迁移累积量的分析, 明确了土壤各形态氮的迁移特点, 在土壤有机氮组分中, 氨基酸氮和 NH<sub>3</sub><sup>+</sup> - N 是易于移动的形态; 非酸解性氮则相对稳定, 不易移动; 无机氮组分中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 是易于移动的形态, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 运移性差, 非交换态 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 是相对稳定的形态, 难以移动。水肥是决定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 淋失的重要因素, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量随淋洗水量的增加而增加, 施用氮肥增加了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的淋溶量, 因为大量施用氮肥而导致地下水的

硝态氮污染提供了有力的证据。

本试验研究采用土柱模拟试验, 仅仅就不同形态氮在淋溶条件下的移动与分布作了静态的研究, 得出了初步的结论。众所周知, 氮素在土壤的转化与随水分移动是一种复杂的过程, 包括物理、化学及生物化学过程, 因此, 应用模拟试验, 除作静态研究外, 还应该全面考虑各形态氮的物理化学性质及其转化规律, 应用溶质运移的基本理论, 建立数学模型, 对土壤中各形态氮的运移规律作动态描述, 揭示出其在土壤中转化运移的动态过程, 有关这方面的研究还有必要进一步深入。

参考文献

1 J. W. Shuford, D. D. Fritton and E. Barer. Nitrate-nitrogen and chloride movement through undisturbed field Soil[J]. J. Environ. ual, 1977. 6(3)

2 王继增, 等. 侵蚀条件下黄绵土氮素流失规律的研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1980(12)

3 董发开. 西安市地下水氮污染的环境水文地质探讨[J]. 环境科学, 1984, 5(2)

4 董克虞, 等. 北京西郊地下水氮污染与农田施肥和污水灌溉关系的探讨[J]. 环境科学, 1984. 5(5)

5 曹亚澄译. 土壤氮素分析法[M]. 北京: 农业出版社, 1981

6 余存祖, 张建丰. 土壤剖面营养元素运移的模拟研究及其装置[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4)

致谢: 试验研究中得到余存祖研究员、彭琳研究员的指导和刘宏高工的帮助, 谨此致谢。