

# 片麻岩新成土中硝态氮垂直运移规律模拟研究

赵斌<sup>1</sup>, 王红<sup>2</sup>, 张瑞芳<sup>2</sup>, 周大迈<sup>2</sup>, 张爱军<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学 理学院, 河北 保定 071001; 2. 河北农业大学  
山区研究所/国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071001)

**摘要:**采用室内土柱模拟的方法,研究河北省太行山片麻岩新成土中不同肥料、不同施氮量对硝态氮垂直运移的影响。结果表明,尿素、有机无机混合肥、氮磷复合肥中硝态氮淋失总量比值为 1 : 0.87 : 0.94。中等施氮量下,有机无机复混肥可以降低氮素淋失。尿素硝态氮淋失率平均为 29%,氮磷复合肥平均为 27.8%,有机无机混合肥平均为 23.7%。60 cm 和 90 cm 处硝态氮淋失量比值为 1 : 1.03,差异不显著。淋溶结束后,有机无机混合肥在不同土层各处理中硝态氮含量最高,尿素硝态氮含量最低。

**关键词:**片麻岩; 硝态氮; 淋溶迁移

中图分类号: S153.6<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-0122-05

## Simulation Study on Nitrate Transport and Leaching in the Gneiss Entisols

ZHAO Bin<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>, ZHANG Rui-fang<sup>2</sup>, ZHOU Da-mai<sup>2</sup>, ZHANG Ai-jun<sup>2</sup>

(1. College of Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China;

2. Research Institute of Mountainous Areas, Agricultural Engineering Technology Research Center of Mountain District in the North of China, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

**Abstract:** By simulating soil column in laboratory, the effects of the nitrate vertical transport characteristics in the gneiss of Taihang mountainous region of Hebei Province under different N fertilizer were studied. The results showed that the ratio of leaching loss amounts of nitrate-nitrogen was 1 : 0.87 : 0.94 among urea, organic-inorganic mixed fertilizer and N-P compound fertilizer. The amount of nitrate leaching increased with the increasing amount of nitrogen fertilizer, but there was no significant difference among the three fertilizers. Organic-inorganic mixed fertilizer could reduce nitrate leaching with the medium nitrogen fertilizer application. For urea, the rate of nitrate leaching loss averaged 29%, 27.8% for N-P compound fertilizer, 23.7% for organic-inorganic mixed fertilizer. With the increase of soil depth, there was no significant difference between 60 cm and 90 cm in which the ratio of nitrate-nitrogen leaching loss was 1 : 1.03. At the end of the leaching, the nitrate content of organic-inorganic mixed fertilizer was the highest and the urea nitrate content was the lowest in different treatments.

**Key words:** gneiss; nitrate; transport and leaching

河北省高原、山地面积占全省总面积的 60%,其中片麻岩面积达 11 817 万  $\text{hm}^2$ , 主要分布在石家庄、保定、邢台、邯郸等太行山区,占全国片麻岩总面积的 3.7%。随着开发片麻岩山区的扩大,到 2004 年通过爆破整地,开渠修田,面积已达到 36 万  $\text{hm}^2$ 。新形成的片麻岩土为粗骨土<sup>[1]</sup>,又叫薄层砾质土,细土物质较少,漏水漏肥,结构性差,植物根系极少。表土层以下即为风化或半风化的母质层,厚度变幅较大,介于

20~50 cm,夹有大量岩屑体,生产性能不良。

山坡地遇到强降雨易发生水土流失,从而导致肥料流失,致使地下水污染加剧和湖泊富营养化加重。土壤中的硝态氮不易被胶体吸附,主要以溶质的形式存在,其运移规律主要受土壤理化性质和水分流动状态的影响,是氮素淋失的主要形态<sup>[2]</sup>。

聂斌等<sup>[3]</sup>研究了小水勤浇和滴灌对土壤中硝态氮的影响,发现两种灌溉方式显著改变了硝态氮在土

壤剖面的分布,将更多的硝态氮保留在作物所能再利用的土层中,减少了硝态氮的淋失。刘瑞等<sup>[4]</sup>的研究表明,土壤表观氮素平衡和盈亏决定了土壤剖面硝酸盐的累积状况。宋庆丰等<sup>[5]</sup>对河北省片麻岩地区不同肥料对土壤的影响研究表明,施用新型肥料能不同程度地增加表层和深层土壤的微生物数量,增加土壤中有机质的含量,改善土壤条件。周国娜等<sup>[6]</sup>的研究表明,生物有机肥、微生物菌肥和有机复混肥等肥料可以加速岩石风化,加快成土过程。陈效民<sup>[7]</sup>、杜春先<sup>[8]</sup>、李丹<sup>[2]</sup>等都采用室内模拟土柱方法对硝态氮垂直运移规律进行了研究。

国内外关于硝态氮淋溶迁移规律已有大量研究,但对片麻岩新成土中施肥量、肥料种类对硝态氮淋溶转化影响的研究较少。本文通过室内土柱模拟试验,初步探寻硝态氮在片麻岩新成土中的垂直运移规律,为片麻岩地区配方施肥提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤:粗骨土(保定易县),土壤基本养分含量:有机质 13.25 g/kg、全氮 0.97 g/kg、硝态氮 12.89 mg/kg、铵态氮 8.18 mg/kg、速效磷 2.66 mg/kg、速效钾 18.32 mg/kg、pH 值 8.50(水土比=2.5:1)。

供试肥料:尿素(氮 46%,沧州大化股份有限公司生产)、氮磷无机复合肥(N—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>—K:30—5—0,山东联盟化工集团生产)、有机—无机混合肥(康帝牌有机肥以鸡粪为主:尿素为 1:1)。

试验装置:模拟土柱为高 110 cm,内径为 10 cm 的 PVC 管。土柱顶部装 1 cm 厚的石英砂,以避免浇水对土壤的干扰。称取供试片麻岩新成土(粗骨土) 11 kg 装入土柱(90 cm)中,土柱边缘土壤压紧实,以防止侧渗,供试肥料与表层 20 cm 土壤充分混匀后加入土柱中,土柱底部用双层 200 目的尼龙网筛封口,并在底部装约 1 cm 厚的石英砂承托供试土壤。

### 1.2 试验设计

试验设 10 个处理:(1) CK 不施肥;(2) 尿素 N<sub>1</sub> 施肥量 120 kg/hm<sup>2</sup>;(3) 尿素 N<sub>2</sub> 施肥量 225 kg/hm<sup>2</sup>;(4) 尿素 N<sub>3</sub> 施肥量 300 kg/hm<sup>2</sup>;(5) 氮磷复合肥 F<sub>1</sub> 施肥量 120 kg/hm<sup>2</sup>;(6) 氮磷复合肥 F<sub>2</sub> 施肥量 225 kg/hm<sup>2</sup>;(7) 氮磷复合肥 F<sub>3</sub> 施肥量 300 kg/hm<sup>2</sup>;(8) 有机无机混合肥 Y<sub>1</sub> 施肥量 120 kg/hm<sup>2</sup>;(9) 有机无机混合肥 Y<sub>2</sub> 施肥量 225 kg/hm<sup>2</sup>;(10) 有机无机混合肥 Y<sub>3</sub> 施肥量 300 kg/hm<sup>2</sup>,每个处理重复 3 次。

尿素在 60 cm 处,施氮量分别为 120,225,300 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤淋溶液表示为 N60-1,N60-2,N60-3;尿素在 90 cm 处,3 个施氮水平下土壤淋溶液分别为 N90-1,N90-2,N90-3。氮磷复合肥在 60 cm 处,施氮量分别为 120,225,300 kg/hm<sup>2</sup> 下土壤淋溶液表示为 F60-1,F60-2,F60-3;氮磷复合肥 90 cm 处,3 个施氮水平下土壤淋溶液表示为 F90-1,F90-2,F90-3。有机无机混合肥 60 cm 处,3 个施氮水平下表示为 Y60-1,Y60-2,Y60-3;90 cm 处土壤淋溶液表示为 Y90-1,Y90-2,Y90-3。

第 1,4,7,···,61 天,每隔 3 天浇 300 ml 蒸馏水,并收集 60 cm,90 cm 处土壤淋溶液,直至前后两次淋溶液浓度差异不显著为止。测定淋溶液中硝态氮浓度。试验共培养 61 d。培养结束后,分三层(0—30,30—60,60—90 cm)采集土样,测定每层土壤硝态氮含量。

### 1.3 测定及分析方法

土壤淋溶液和土壤样品中硝态氮浓度采用 AA3-HR 流动注射分析仪测定。

数据采用 Excel 2003 和 SPSS 软件进行处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 尿素在不同施氮量下对土壤淋溶液硝态氮的影响

由图 1 可知,培养前 6 d,60 cm(30~66 mg/L)处淋溶液硝态氮的浓度显著低于 90 cm(100~276 mg/L)。第 7~13 天两处硝态氮浓度接近 30 mg/L 左右。培养第 13 天到 58 天,60 cm(10~50 mg/L)处硝态氮浓度显著高于 90 cm(1~10 mg/L)处,最后 3 d 两处浓度再次接近 17 mg/L 左右。张丽娟等<sup>[9]</sup>的研究表明,随着土壤剖面深度加深,土壤累积硝态氮的生物有效性随之降低,不同土层残留硝态氮的迁移深度有所差异。说明培养前期,土壤硝态氮可淋溶至 90 cm 以下或更深,进入地下水。该变化趋势与在相同施氮量下不同肥料土壤淋溶液中硝态氮含量的趋势相同,这是否是由于土层深度对硝态氮的影响大于肥料品种和施氮量,还是由粗骨土的特性决定,还有待进一步研究。60 cm 处,CK60 土壤淋溶液硝态氮溶度逐渐降低,第 13 天至淋溶结束变化不明显,维持在 1~3 mg/L,土壤中硝态氮基本淋溶至 60 cm 以下。随着淋溶次数的增加,淋溶液中硝态氮浓度逐渐降低,当降低到平衡时,其他形态氮逐渐转化为硝态氮,因此硝态氮含量有一个升高的过程。继续淋溶硝态氮浓度又逐渐降低,直至再次平衡。有研究表明<sup>[10]</sup>,尿素施入 8 h 时,土壤中基本没有硝态氮生

成;直到 96 h 时土壤中硝态氮才明显累积。培养第 40 天时 N60-1、N60-2、N60-3 和 CK60 硝态氮淋失量分别占总量的 67%、74%、72% 和 93%，表明土壤源硝态氮淋失主要集中在 40 天以前，而肥料中硝态氮淋失则是一个相对复杂缓慢的过程。

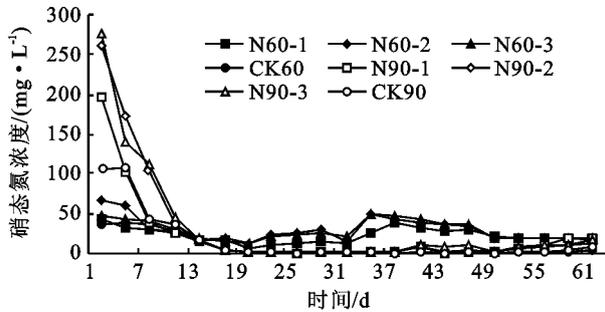


图 1 尿素各施氮量不同土层淋溶液中硝态氮浓度

90 cm 处，土壤淋溶液中硝态氮浓度前 7 d 急剧降低，淋溶强烈，土壤淋溶液硝态氮含量随着施氮量的增加而增加。第 7 天后硝态氮的浓度由 276 mg/L 降到 15 mg/L。第 13 天 N90-1、N90-2、N90-3 和 CK90 硝态氮淋失量分别占总量的 83%、89%、85% 和 90%，说明土壤硝态氮的淋溶主要集中在培养前期，这与片麻岩新成土特性有关，田间施肥时不应一次施入过多肥料，避免肥料大量淋失。认为 90 cm 以下淋溶液进入地下水，第 40 天以后硝态氮浓度有所增加但无明显变化规律，这可能是由于试验时间为夏季，室内温度较高，促进了硝化反应的发生而导致的。淋溶结束时，硝态氮浓度低于我国地下水硝酸盐标准 20 mg/L。

## 2.2 有机无机混合肥在不同施氮量下对土壤淋溶液硝态氮的影响

由图 2 可知，在整个培养期内，60 cm 处淋溶液硝态氮浓度变化曲线平缓，只在培养中期出现短暂升高—降低的过程，其余时间段，硝态氮含量差异不显著。习金根等<sup>[11]</sup>的研究表明，有机无机混合肥料淋溶前期硝化反应显著，硝态氮累积量较低。90 cm 处，在培养前期淋溶液硝态氮浓度急剧降低，后维持在较低水平，培养后期浓度显著增加直至维持在 18 mg/L 左右，达到我国地下水硝酸盐标准。

60 cm 处，3 个施氮水平在第 28~34 天有先升高后降低的过程，这可能是由于有机无机混合肥中，有机态氮或其他形态氮转化为硝态氮。培养中期，Y60-1 和 N60-1 硝态氮淋失率相同，说明在低施氮量下，尿素和有机无机混合肥对硝态氮淋溶率无肥料性能差异，在中高施氮量下有机无机混合肥淋失率低于尿素。3 个施氮水平下相同时间内，硝态氮浓度差异不显著。随淋洗次数增加，淋洗液中硝态氮的含量逐

渐减少，有研究表明<sup>[2]</sup>，经多次淋洗后，硝态氮输出率可高达 99.57%。

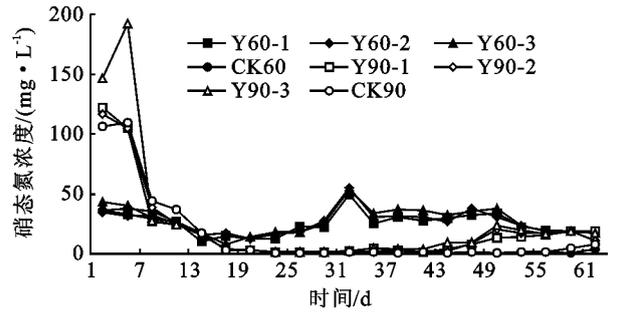


图 2 有机无机混合肥各施氮量不同土层淋溶液中硝态氮浓度 90 cm 处，土壤淋溶液中硝态氮浓度前 7 d 急剧降低，由 192 mg/L 降低到 27 mg/L。Y90-1 和 Y90-2 硝态氮浓度差异不显著但显著低于 Y90-3。与尿素相比，培养前期有机无机混合肥硝态氮淋失率明显降低。这是由于有机无机混合肥可以增加土壤团聚体的含量，提高阳离子代换量，从而增强对硝态氮的吸附。有研究表明<sup>[12]</sup>，增施有机肥，控制氮肥用量，在一定程度上可减少硝酸盐在土壤深层的累积。此外有机肥在分解中产生有机酸可以降低其周围土壤中脲酶和微生物的活性，在一定程度上抑制硝态氮的生成，从而降低了硝态氮的淋溶<sup>[13]</sup>。第 46 天至淋溶结束，硝态氮浓度逐渐增加后稳定于 18 mg/L，3 个施氮水平间差异不显著，达到我国地下水硝酸盐标准。

## 2.3 氮磷复合肥在不同施氮量下对土壤淋溶液硝态氮的影响

由图 3 可知，氮磷复合肥在 60 cm 和 90 cm 处土壤淋溶液中，硝态氮浓度变化趋势与尿素和有机无机混合肥相同。呈现出：培养前期，60 cm (31~67 mg/L) 处硝态氮的浓度显著低于 90 cm (65~213 mg/L)，后两处硝态氮浓度降低至 16 mg/L 左右；培养中期，60 cm (10~48 mg/L) 处硝态氮浓度显著高于 90 cm (1~5 mg/L)；培养末期，两处浓度再次接近 17 mg/L 左右。

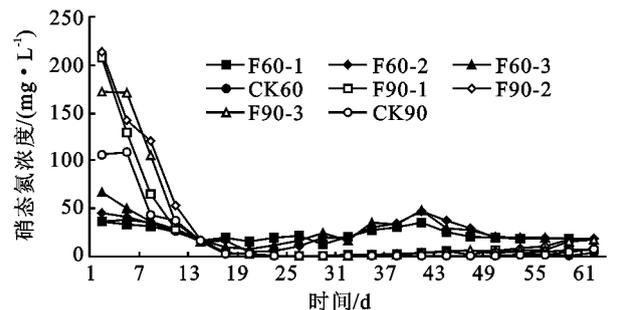


图 3 氮磷复合肥各施氮量不同土层淋溶液中硝态氮浓度

## 2.4 不同处理土壤硝态氮累计淋出量和淋失率比较

由表 1 可知,三种肥料尿素 N:有机无机复合肥 Y:氮磷复合肥 F 硝态氮淋失总量为 671:582:628。在低施氮量下,三种肥料之间硝态氮的淋出量差异不显著。在中等施氮量下,与尿素相比,有机无机复合肥可以显著减少氮素的淋失,这与杜伟等<sup>[14]</sup>的结论相同,有机无机复合肥具有优化化学肥料养分利用和提高化肥利用率的效果。张迪等<sup>[15]</sup>的研究表明,土壤硝态氮的垂直分布与土壤的施肥年限和有机肥施用水平密切相关,硝态氮的净累积量都随施肥量的增加而增加,随土层深度的增加呈现出递减趋势。由于肥料间的交互作用<sup>[16]</sup>,有机无机复混肥中某一肥料养分在土壤中的分解释放、固定、吸附解吸、氧化还原等往往会受到其他肥料的直接或间接影响。高施氮量下,尿素硝态氮淋出量显著高于其它两种肥料,复合肥和混合肥的优越性得以体现,但两者之间无明显差异。有机无机肥配合施用有利于改善土壤理化性质,加速有机肥的矿化,从而促进作物对氮素的吸收。

60 cm 处,硝态氮淋失量主要为 91~119 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 的淋失量显著高于 N<sub>1</sub>。90 cm 处,硝态氮淋失量介于 79~133 kg/hm<sup>2</sup>,尿素变化趋势与 60 cm 处相同,其余肥料无明显规律。60 cm,90 cm 处硝态氮淋失总量比值为 1:1.03。可能由于 90 cm 处长期处于水分饱和状态,在厌氧条件下发生反硝化,因而硝态氮含量变化不明显,也可能是由于有机无机复合肥、氮磷复合肥中某些养分形态占据土壤胶体上电位点,以及不同元素交互作用影响了硝态氮的淋溶。在本试验条件下,尿素硝态氮淋失率为 17.26%~47.12%,平均为 29%,略低于王慧等<sup>[17]</sup>研究的 32.6%,这可能是由于供试土壤的理化性质影响了尿素水解释放、固定、转化等。氮磷复合肥硝态氮淋失率平均为 27.8%,有机无机混合肥为 23.7%。

表 1 不同土层淋溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累计淋出量和淋失率

处理	0—60 cm		60—90 cm	
	淋出量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	淋失率/ %	淋出量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	淋失率/ %
N <sub>1</sub>	90.99b	47.12	87.15bc	17.26
N <sub>2</sub>	118.72a	37.46	126.10a	26.52
N <sub>3</sub>	115.55a	27.03	132.87a	22.14
Y <sub>1</sub>	101.69b	56.04	78.77c	10.28
Y <sub>2</sub>	105.68b	31.66	79.43c	5.78
Y <sub>3</sub>	112.47ab	26.01	104.64b	12.74
F <sub>1</sub>	92.88b	48.70	96.97bc	25.45
F <sub>2</sub>	98.61b	28.52	123.21a	25.23
F <sub>3</sub>	106.77b	24.11	110.50b	14.69
CK	34.44c	0.00	66.43d	0.00

注:小写字母表示 0.05 显著性差异水平。下同。

## 2.5 培养结束不同土层各处理硝态氮含量比较

由表 2 可知,施用尿素处理中,60—90 cm 处 N<sub>1</sub> 比 N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 分别显著增加了 2.34,2.21 mg/kg,其他处理均无显著差异性。有机无机复合肥中,0—30 cm 土层 Y<sub>2</sub> 显著大于 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>3</sub>,分别增加了 5.8,4.17 mg/kg。30—60 cm 处,Y<sub>2</sub> 与 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>3</sub> 相比,分别显著增加了 4.49,3.13 mg/kg。氮磷复合肥中,60—90 cm 处 F<sub>2</sub> 和 F<sub>3</sub> 土壤硝态氮的含量显著大于 F<sub>1</sub>,但两者之间差异不显著。

本试验条件下,由于灌水量较大,折合田间降雨量可达到 1 083 mm,淋溶量较大;同时由于片麻岩土壤颗粒较粗,没有团粒结构,土壤的保水保肥能力差,淋溶结束后,除了 Y<sub>2</sub> 和 Y<sub>3</sub> 处理外,其他各施肥处理并未显著增加土壤中硝态氮含量,绝大部分的氮肥都被淋失出土体。淋出土体的硝态氮进入复杂的岩石层,进而进入地表、地下水中,对生态环境产生影响。

表 2 淋溶结束不同土层深度各处理硝态氮含量 mg/kg

处理	0—30 cm	30—60 cm	60—90cm
N <sub>1</sub>	5.82c	6.44c	6.34b
N <sub>2</sub>	5.90c	6.09c	4.00c
N <sub>3</sub>	5.61c	6.28c	4.13c
Y <sub>1</sub>	5.86c	6.65c	8.85a
Y <sub>2</sub>	11.69a	11.59a	4.57c
Y <sub>3</sub>	7.52bc	9.46b	7.29ab
F <sub>1</sub>	7.21bc	9.99b	4.20c
F <sub>2</sub>	8.02b	14.76a	7.85ab
F <sub>3</sub>	8.82b	11.53a	6.18b
CK	8.10b	9.21b	4.62c

农作物根系主要分布在 0—30 cm,在低施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 下,60—90 cm 有机无机混合肥土壤硝态氮的含量显著大于尿素,尿素显著大于氮磷复合肥,其他土层三种肥料之间无显著差异性。在中等施氮量 225 kg/hm<sup>2</sup> 下,有机无机混合肥土壤硝态氮含量最高,尿素最低。高施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup> 下,30—90 cm 土层有机无机混合肥和氮磷复合肥硝态氮浓度显著大于尿素。该结果与高伟等<sup>[18]</sup>对芹菜施用有机无机混合肥的结果相似,在低施氮量下采用有机无机肥料配合施肥模式,硝态氮在 0—100 cm 土体内并未发生累积现象,同时可以显著降低灌溉水的渗漏和硝态氮的淋溶。

有机肥能增加土壤氮素的固持,使土壤中的一部分有效态氮转化为固定态氮,与单施无机肥相比,有机无机肥配施处理明显降低了土壤硝态氮径流损失量。本研究结果显示,有机无机肥的施用可以显著降低片麻岩土壤硝态氮径流损失量。在培肥地力、促进

养分循环和再利用以及可持续农业发展中,有机无机肥配合施用的效果和作用已得到普遍的证实和肯定。因此,在片麻岩新成土地区进行田间施肥时,要根据种植农作物的需肥量确定肥料品种和施肥量,宜选用有机无机混合肥,少量多次施用。

### 3 结论

(1) 在片麻岩新成土土柱模拟试验中,尿素、有机无机复混肥、氮磷复合肥中硝态氮淋失总量比值为 1 : 0.87 : 0.94,中等施氮量 225 kg/hm<sup>2</sup> 下有机无机复混肥可以减少氮素淋失,增加土壤氮含量,提高肥料利用率。低施氮量和高施氮量下,随着施氮量的增加,三种肥料硝态氮淋溶浓度增大,但肥料品种间无明显差异。三种肥料中氮素主要以硝态氮形式淋失,硝态氮淋失量占无机氮总量的 83%~91%。

(2) 在本试验条件下,尿素硝态氮淋失率平均为 29%,氮磷复合肥平均为 27.8%,有机无机混合肥平均为 23.7%。

(3) 60 cm 处和 90 cm 处硝态氮累计淋出量比为 1 : 1.03,且差异不显著。

(4) 淋溶结束后,有机无机混合肥在不同土层各处理中硝态氮含量最高,尿素硝态氮含量最低。

#### 参考文献:

- [1] 曹建生,张万军,刘昌明,等. 岩土二元介质坡地非饱和渗流特征试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):9-15.
- [2] 李丹,孙志梅,王艳群,等. 有机组分对 N 素在砂壤土中淋溶运移的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(3):23-26.
- [3] 聂斌,李文刚,江丽华,等. 不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响[J]. 水土保持研究,2012,6(3):102-107.
- [4] 刘瑞,戴相林,周建斌,等. 不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表现盈亏的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(6):1335-1341.
- [5] 宋庆丰,杨新兵,王晓燕,等. 不同肥料对花岗岩片麻岩山地土壤微生物与有机质的影响[J]. 水土保持研究,

2010,8(4):243-246.

- [6] 周国娜,宋庆丰,杨新兵. 华北花岗岩片麻岩山地土壤促成技术研究:室内模拟肥料对岩石金属元素释放作用 I [J]. 水土保持研究,2011,18(3):255-260.
- [7] 陈效民,邓建才,柯用春,等. 硝态氮垂直运移过程中的影响研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):12-15.
- [8] 杜春先,聂俊华,王祥峰. 室内模拟有机肥中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 的淋失规律及其对土壤环境的影响[J]. 山东农业科学,2004(6):48-50.
- [9] 张丽娟,巨晓棠,文宏达,等. 土壤剖面不同土层硝态氮植物利用及运移规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):82-91.
- [10] Nkrumah M, Griffith S M, Ahmad N. Lysimeter and field studies on <sup>15</sup>N in a tropical soil. II: Transformation of (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO-<sup>15</sup>N in a tropical loam in lysimeter and field plots [J]. Plant Soil,1989,114(1):13-18.
- [11] 习金根,周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(3):271-275.
- [12] Tong Y A, Emteryd O, Lü D Q, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eum-orthic anthrosols profile [J]. Nutr. Cycl. Agroeco.,1997,48(3):225-229.
- [13] 黄东风,王果,李卫华,等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(3):631-638.
- [14] 杜伟,赵秉强,林治安,等. 有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究. I:有机物料与尿素复混对玉米产量及肥料养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):579-586.
- [15] 张迪,赵牧秋,牛明芬,等. 有机肥对设施土壤硝态氮垂直分布的影响[J]. 土壤通报,2011,14(5):1149-1152.
- [16] 曾曙才,吴启堂,陈水莲,等. 肥料混施对赤红壤氮磷淋失特征的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(3):82-86.
- [17] 王慧,张民,尹秀华,等. 控释肥在黑麦草草坪中氮素淋失的研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):64-68.
- [18] 高伟,朱静华,李明悦,等. 有机无机肥料配合施用对设施条件下芹菜产量、品质及硝酸盐淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(3):657-664.
- [18] 温洋,金继运,黄绍文,等. 不同磷水平对紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 土壤肥料,2005(2):21-24.
- [19] 陈萍,咎林森,陈林. 不同灌溉量对紫花苜蓿生长和品质的影响[J]. 家畜生态学报,2011,32(5):43-47.
- [20] 温洋,金继运. 施磷对紫花苜蓿光合特性以及生长的影响[J]. 中国土壤与肥料,2007(6):36-38.
- [21] 杨恒山,曾敏建,李春龙,等. 苜蓿施用磷钾肥效应的研究[J]. 草业科学,2003,20(11):19-22.

(上接第 121 页)

- [15] 孟林,毛培春,张国芳. 京郊平原区苜蓿生产能力与耗水规律的研究[J]. 草业科学,2007,24(4):36-40.
- [16] 孙洪仁,马令法,何淑玲,等. 灌溉量对紫花苜蓿水分利用效率和耗水系数的影响[J]. 草地学报,2008,16(6):636-639.
- [17] 戴建军,石发庆,张海军,等. 黑龙江省西部草地土壤磷素状况及调控[J]. 中国草地,2001,23(3):45-48.