

尿素在砖红壤中的淋失特征 II —— NO_3^- -N 的淋失

林清火¹, 罗 微¹, 屈 明², 茶正早¹, 林钊沐¹

(1.中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南 儋州 571737; 2.西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘 要:通过室内大型土柱模拟试验研究了不同尿素施用量与砖红壤中 NO_3^- -N 的淋失关系。结果表明,各处理渗漏液中 20 cm 处 NO_3^- -N 浓度变化趋势相似;60 cm 处渗漏液中各处理 NO_3^- -N 最高浓度值均显著高于对应的 20 cm 处;120 cm 处渗漏液中各处理 NO_3^- -N 浓度在 39 d 前无显著变化,之后迅速上升并且随着施肥量的增加而增大,其最高浓度值与施肥量的关系可用方程 $y=0.5257x+138.2$ 来表示。从 120cm 处 NO_3^- -N 累计淋失量来看,其累计淋失量与施肥量的关系可以用下式来表示: $y=0.478x+204.26$;最后对各处理 NO_3^- -N 累计淋失量 $Y_i(\text{gN})$ 与时间 $t(\text{d})$ 的关系进行拟合。

关键词:砖红壤; 尿素; NO_3^- -N; 淋溶

中图分类号:S151.93 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)04-0638-05

Leaching Characters of NO_3^- -N in Latosol After Applying Urea II . Loss of NO_3^- -N by Leaching

LIN Qing-huo¹, LUO Wei¹, QU Ming², CHA Zheng-zao¹, LIN Zhao-mu¹

(1. Rubber Research Institute , CATAS , Danzhou , Hainan 571737,China; 2. Department of Resource and Environment, South-west Agriculture University, Beibei 400716, China)

Abstract: The relationship between different quantity of urea fertilizer applied and NO_3^- -N leaching in latosol was studied by large soil columns containing disturbed soils at laboratory. The results showed that: at the depth of 20 cm layer, the changing tendency of the concentration of NO_3^- -N in leaching water was similar with different quantity of urea applied. At the depth of 60cm layer, the highest concentration of NO_3^- -N in leaching water with different treatments was significantly higher than the corresponding ones at the depth of 20 cm layer. In the initial 39 days, the concentration of NO_3^- -N in leaching water at 120 cm depth layer was not significantly different, then ascended sharply. The more of urea quantity was applied, the higher it grows. The relationship between the highest concentration of NO_3^- -N and fertilizer quantity applied can be shown in the regression equation $y=0.5257x+138.2$; According to the leaching amount accumulated at the depth of 120 cm layer, the relationship between the leaching amount of NO_3^- -N accumulated and fertilizer quantity applied can be expressed as regression equation $y=0.478x+204.26$. Finally, using equation to model the relationship between the accumulation leaching amounts of NO_3^- -N and times.

Keywords: latosol; urea; NO_3^- -N; leaching

在我国热带地区大面积分布的砖红壤具有酸性强、CEC 低等特点,同时地处热带海洋性气候,降雨量大且分布不均。研究表明,在降雨量大、高渗透性、低阳离子交换量的土壤上,淋失作用是导致化肥利用率低的主要原因^[1~3]。目前国内研究土壤养分淋失主要

集中水稻土和北方旱地土壤的氮素淋失形态和过程,但对南方酸性旱地土壤中氮素的淋失过程缺乏系统研究^[4]。

在各种形态的 N 素中, NO_3^- -N 很难被土壤颗粒所吸附,是土壤转化、迁移过程中最活跃的 N 素形态。当降雨量和灌溉量超过田间饱和持水量时, NO_3^- -N 将随着水流向下淋失,不仅造成土体中 N 素的损失,降低肥料效益,还会恶化环境,影响人类健康。N 肥的过量施用一般被认为是地下水中 NO_3^- -N 含量增高的主要原因。土壤剖面中 NO_3^- -N 的存在和水分的

收稿日期:2004-10-21

基金项目:重大基础研究前期专项(2004CCA00400);中国热带农业科学院博士基金

作者简介:林清火(1978—),男,福建莆田人,硕士,助研,主要研究方向为土壤化学与植物营养。E-mail:qinghuo1@163.com

垂向运动是影响土壤溶液 NO_3^- -N 浓度分布的 2 个主要因子^[9],N 肥施用和降雨(灌溉)分别增加土壤剖面中 NO_3^- -N 和水分含量,它们共同影响土壤中 NO_3^- -N 向下迁移。为此,探讨 N 肥施用量对 NO_3^- -N 淋失的影响,在理论和实践上均有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为片麻岩发育的砖红壤,采自中国热带农业科学院试验场五队,共分为 0~20 cm、20~60 cm、60~120 cm 3 层采样,风干后过 5 mm 筛用于土柱模拟试验。各层土壤基本理化性质如表 1。

1.2 试验装置

模拟土柱为内径 30.0 cm、高 125 cm 的圆柱体 PVC 管。将土样按实际测得土层厚度和土壤容重称重后装入模拟土柱,同时分别在 20 和 60 cm 处安装内径为 10 cm 的圆形渗漏盘并用硬质细管引出 PVC 管外。用负压真空泵抽取此两处的土壤溶液,控制总量为 50 mL,抽满后即用软管夹夹住出水口,使土壤溶液不再外流,每次取样之前先弃去硬质连接管中残余渗漏液。在土柱正上方 30 cm 处架有用穿有孔洞的塑料薄膜覆盖的塑料篮,以模拟降雨过程。安装土柱时,特别注意将土柱壁边缘的土壤压实,以确保无贴壁水流入渗,尽量减少边缘效应的产生。

1.3 试验设计

试验以 N、P、K 肥为基本供试因子,试验处理和养分投入量见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土壤层次 /cm	有机质 /g · kg ⁻¹	全 N /g · kg ⁻¹	全 P /g · kg ⁻¹	全 K /g · kg ⁻¹	有效 P /mg · kg ⁻¹	有效 K /mg · kg ⁻¹	pH	容重 /g · cm ⁻³
0~20	15.4	0.65	0.75	17.0	22.0	70.0	4.76	1.40
20~60	11.0	0.49	0.69	18.4	6.95	57.3	4.79	1.43
60~120	6.0	0.26	0.57	27.1	1.23	33.3	5.15	1.45

表 2 试验处理和养分投入量

Table 2 Treatments and fertilization in the experiment

处理名称	施肥量/kg · hm ⁻²			N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	施加肥料用量/g		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0		0	0	0
T1	187.5	93.5	187.5	2 : 1 : 2	1.32	0.66	1.32
T2	375	187.5	375	2 : 1 : 2	2.64	1.32	2.64
T3	562.5	281.25	562.5	2 : 1 : 2	3.96	1.98	3.96
T4	750	375	750	2 : 1 : 2	5.28	2.64	5.28

其中,CK 设 4 个重复,其他处理设 5 个重复,随机排列。N 肥用尿素(全 N 46.3%),P 肥用过磷酸钙(P₂O₅ 14.0%),K 肥用氯化钾(K₂O 60%),肥料与表土混合后一次性施入土中。施肥后每隔 3 d 加 2 L 去离子水,控制在 0.5 h 内滴完,折合降雨量约为 30 mm,33 d 后每隔 6 d 加 1 次水,添水量为 4 L,降雨时间控制在 1 h 内,折合降雨量约为 60 mm。用 100 mL 三角瓶接收 20 cm 和 60 cm 处的渗漏液,4 L 塑料桶接收 120 cm 处渗漏液。试验于 2003 年 9 月 12 日至 2004 年 1 月 3 日止,折合成降雨量共为 1 110 mm,约为热带地区年均降雨量的 1/2。施肥处理前加数次离子水淋洗土柱,直到底层沥出液中各养分含量大致相等。

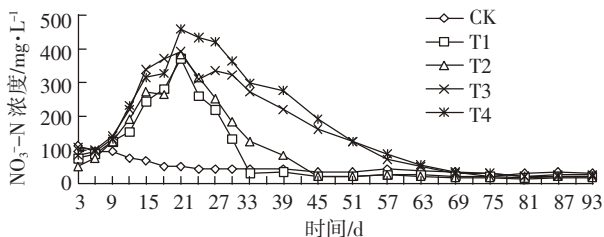
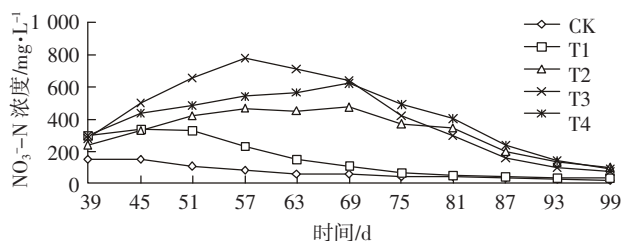
1.4 测定项目与方法

在每次收到渗漏水后,将其充分混匀,测量渗漏水体积并分析水样,用紫外分光光度法测定 NO_3^- -N^[6]。用渗水量与 NO_3^- -N 浓度计算每次淋失量,每次淋失量相加得累计淋失量。供试土样基本理化性质用常规法测定^[7]。文中数据均用 Excel2000 和 SAS6.12 版进行分析。

2 结果与讨论

2.1 土柱 20 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度变化

图 1 为在不同施肥量下 20 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 浓度随时间变化的曲线图。从图 1 可以看出,除了 CK 处理一直随时间的迁移而逐渐下降外,其他处理之间的变化曲线基本吻合。在前 9 d 内变化趋势比较

图1 20 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 浓度变化Figure 1 Concentration of NO_3^- -N in leaching water at 20 cm depth图2 60 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 浓度变化Figure 2 Concentration of NO_3^- -N in leaching water at 60 cm depth

平缓,9 d 后变化曲线变陡,到 21 d 时达到最高峰,其中 T4 处理的峰值达到 $458.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而后呈下降趋势,最后趋于稳定状态,维持在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。但不同处理到达稳定的时间不一样,T1 处理需要 33 d,T2 处理需要 45 d,T3 和 T4 处理则需要 69 d 左右。

从不同施肥处理间的浓度值来看,在渗漏液中 NO_3^- -N 浓度变化幅度较大期间即 12~33 d 之间,基本上是随着施肥量的增加,其渗漏液中 NO_3^- -N 浓度增大,但其最高峰的浓度差异不显著。这可能是由于土壤表层有机质含量高,吸附氨的潜力大^[8],而造成土壤液相中的 NH_4^+ -N 含量有限,最终导致各处理渗漏液中 NO_3^- -N 含量差异不显著。

2.2 土柱 60 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度变化

由于在处理的前阶段,上层土柱疏松,水分移动较快,60 cm 渗漏液在最初阶段收集不到,直到第 39 d 加双倍的灌溉量后才可较全面地收集到。图 2 为 60 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 浓度变化曲线图。从图 2 可以看出,不同施肥量间在 60 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 浓度随着时间的推移先呈上升趋势,从 39 d 起增加趋势比较明显,在 45~69 d 之间各处理达到最大值,而后呈下降状态,其中 T1 处理在 69 d 后就趋于稳定,而 T2、T3 和 T4 处理到 93 d 后渐渐趋于稳定,但 T3 处理的浓度明显高于 T4 处理。T4 处理施肥量大但其渗漏液中 NO_3^- -N 浓度基本比 T3 处理低,一种可能是由于土壤是非均一介质,T3 处理中存在着大孔隙而发生“优势流”,导致渗漏液中 NO_3^- -N 浓度偏高;另一种可能是 T4 处理施肥用量过大,在土壤微域形成强酸性环境,从而抑制土壤微生物活动,导致硝化能力减弱, NO_3^- -N 含量减少。具体原因有待继续探讨。

另外与 20 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度变化曲线图进行对照,各处理间的最高浓度值均显著高于 20 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N,且其最高浓度值出现的时

间明显滞后于 20 cm 处。这可能是由于土壤溶液中的 NO_3^- -N,一部分是来自于上层土壤溶液中的 NO_3^- -N 向下移动;另一部分是来自于上层土壤溶液中的尿素态氮或土壤颗粒所吸附的 NH_4^+ -N 被交换出来并在向下移动的过程中慢慢地转化,并最终主要以 NO_3^- -N 的形态向下迁移。

2.3 土柱 120 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度变化

图 3 为不同施肥量下 120 cm 处 NO_3^- -N 的浓度变化曲线图。由图 3 可以看出在前 39 d 内,各处理渗漏液中 NO_3^- -N 浓度与 CK 间没有明显差别,可见,肥料形成的 NO_3^- -N 移动速度较慢,39 d 无法到达 120 cm 土层,这可能是由于在本试验中灌溉量大,土壤湿度高,微生物活性低,土壤硝化能力较弱,上层土壤中重力水下渗进一步减少下层中的氧气数量而加剧反硝化作用,下移 NO_3^- -N 有可能在运移过程中多数被反硝化了。到 39 d 后,除了 CK 处理随着淋洗的继续进行而逐渐下降外,其他施肥处理皆随着时间的推移而迅速上升,并且在 80~100 d 左右达到最大值。且各渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度值随着施肥量的增加而增大,其最大浓度值与施肥量的关系可用下式来表示,差异达到极显著:

$$y = 0.5257x + 138.2 (r^2 = 0.9689, F^{**} = 93.3509)$$

其中 y 代表渗漏液中 NO_3^- -N 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; x 代表施肥量, $\text{Nkg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此说明旱地土壤中尿素以 NO_3^- -N 形态的淋失浓度取决于施肥量的高低,必须根据作物的需肥情况,适时适量地施肥。

另外,120 cm 处各处理渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度最高值到来的时间分别滞后于对应的 20 cm 处和 60 cm 处。可见,120 cm 渗漏液中 NO_3^- -N 主要来自于上层土壤产生的 NO_3^- -N 向下移动,但各处理渗漏液中 NO_3^- -N 的最高浓度值均低于 60 cm 处渗漏液中 NO_3^- -N 的浓度,这可能是由于 NO_3^- -N 在向下运移的过程中,

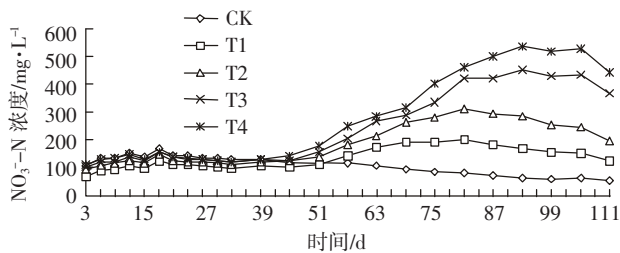


图3 120 cm处渗漏液中 NO_3^- -N浓度变化

Figure 3 Concentration of NO_3^- -N in leaching water at 120 cm depth

被土壤颗粒所吸附或经反硝化作用而成气态损失。

由于作物有效根系范围一般在1 m以内,因此,120 cm处渗漏出来的 NO_3^- -N难以被作物所吸收利用,而继续向下移动并最终进入到地下水。从渗漏液中 NO_3^- -N浓度值来看,即使是无施肥处理的对照土柱,淋溶出来的 NO_3^- -N也维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,而在淋水大约1110 mm后其渗漏液中 NO_3^- -N浓度仍有 $54.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之多。如果与WHO颁布的饮用水质量标准中 NO_3^- -N的最大容许浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,我国的相应标准是(GB5749-85) $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以此为准^[9],该浓度范围对地下水 NO_3^- -N含量均已严重超标。在本试验中T4处理渗漏液中 NO_3^- -N浓度甚至高达 $537.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此,在热带地区,高降雨量、高施肥量的情况下, NO_3^- -N淋出土层并污染到地下水将是一个非常严重的环境问题。

2.4 土柱120 cm处渗漏液中 NO_3^- -N的累计淋失量

图4为不同施肥量下120 cm处 NO_3^- -N累计淋失量曲线图(以纯N计)。从图4可以看出, NO_3^- -N的淋溶作用是一个累进过程,在最初阶段,曲线斜率比较平缓,而后慢慢变陡,从而也可以看出在后期淋失量增加较快,而且其淋失总量取决于施肥量的高低。

试验土柱中 NO_3^- -N的来源有二:土壤原来残留

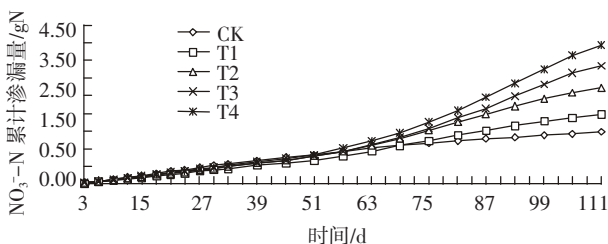


图4 120 cm处 NO_3^- -N累计淋失量

Figure 4 Accumulation of NO_3^- -N in leaching water at 120 cm depth

的氮素和施入的氮素。假定施肥土柱中来自土壤残留氮素的 NO_3^- -N淋失量等于对照处理的 NO_3^- -N淋失量,那么施肥处理中来自肥料的 NO_3^- -N淋失量可由其与对照处理的差值来估算。因此,在本试验中,由肥料引起的120 cm处 NO_3^- -N淋失量分别为72.44、176.14、267.05和350.85 $\text{Nkg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占施氮量的38.64%、46.97%、47.47%和46.78%。可见,在低施肥量下尿素以 NO_3^- -N形态的淋失率随施肥量的增加而增加,但当施肥量到一定程度后其淋失率就不再随施肥量的变化而变化,而维持在47%之间。因此,在热带地区砖红壤上,尿素以 NO_3^- -N的形态淋失是导致热带地区尿素肥效不高的主要原因。如何防止尿素以 NO_3^- -N的形态大量淋失是提高热带地区尿素利用率的根本途径。

在本试验中,120 cm处 NO_3^- -N累计淋失量与施肥量的关系可以用下式来表示:

$$y=0.478x+204.26(r^2=0.9976, F^{**}=1272.08)$$

其中 y 表示120 cm处 NO_3^- -N的累计淋失量($\text{Nkg} \cdot \text{hm}^{-2}$), x 表示尿素施肥量, $\text{Nkg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。方程达到极显著,因此可用本方程预测砖红壤中尿素以 NO_3^- -N形态淋失的总量。由方程可知,在本试验中截距表示土壤自身残留氮而产生的 NO_3^- -N累计淋失量,斜率表示尿素施于砖红壤后的淋失率。如果用此方程预测的话,则施入砖红壤中的尿素将有47.8%的肥料量因为淋洗而损失掉,这个结果在其他研究结果(氮素淋失量占施肥量的3.6%~52.3%)范围内^[10]。由于本试验是应用大型土柱模拟且有良好的重现性,我们的观测结果是较为可信的,但本试验是在不种作物,水分主要是从上到下运动的条件下进行,因此可以认为,在本试验条件下,这是尿素以 NO_3^- -N形态在砖红壤中的最大淋失潜力。

2.5 土柱120 cm处 NO_3^- -N淋失特征曲线拟合

将 NO_3^- -N淋失量 $Y_i(\text{gN})$ 与时间 $t(\text{d})$ 用7种方程进行拟合,结果,见表3。各方程复相关系数均达极显著水平,说明它们都能很好的描述砖红壤中尿素以 NO_3^- -N形态的淋失量随时间的动态变化。比较各方程的 r^2 值大小,其中CK处理以抛物线方程 $Y_i^{1/2}=a+bt$ 的拟合效果最好,T1处理以直线方程 $Y_i=a+bt$ 的拟合效果最优,而T2、T3和T4处理以幂函数方程 $\ln Y_i=a+blnt$ 的 r^2 值最高。在拟合方程 $\ln Y_i=a+blnt$ 中, a 表示第1 d各施肥处理 NO_3^- -N淋失量, b 表示 $\ln Y_i$ 随 $\ln t$ 的变化速率,从T2、T3和T4处理的 b 值大小来看,

表 3 不同处理 NO₃⁻-N 淋失量 $Y_t(\text{gN})$ 与时间 $t(\text{d})$ 的拟合方程

Table 3 The modeling equation between times and leaching amounts of NO₃⁻-N with different treatments

拟合方程	系数	CK	T1	T2	T3	T4
$Y_t=a+bt$	a	0.064 9	-0.143 6	-0.255 2	-0.369 4	-0.460 3
	b	0.013 9	0.018 7	0.025 1	0.029 4	0.034 0
	r^2	0.983 5 ^{***}	0.987 4 ^{**}	0.969 6 ^{**}	0.941 1 ^{**}	0.928 1 ^{**}
$Y_t=a+bt^{1/2}$	a	-0.432 1	-0.750 3	-1.049 3	-1.275 0	-1.495 7
	b	0.181 3	0.233 8	0.311 1	0.360 8	0.415 3
	r^2	0.992 2 ^{***}	0.922 3 [*]	0.886 5 ^{**}	0.842 2 ^{**}	0.823 6 ^{**}
$Y_t^{1/2}=a+bt$	a	0.369 4	0.235 1	0.229 0	0.195 6	0.185 4
	b	0.008 9	0.011 3	0.013 3	0.014 6	0.015 8
	r^2	0.908 8 ^{***}	0.982 2 ^{**}	0.992 1 ^{***}	0.992 4 ^{***}	0.990 9 ^{**}
$\ln Y_t=a+b\ln t$	a	-4.542 4	-5.509 9	-5.196 1	-5.308 3	-5.294 5
	b	1.096 4	1.329 3	1.300 9	1.344 1	1.365 7
	r^2	0.973 5 ^{***}	0.986 9 ^{**}	0.994 1 ^{**}	0.990 1 ^{**}	0.986 6 ^{**}
$\ln Y_t=a+bt$	a	-1.953 4	-2.444 8	-2.254 7	-2.292 6	-2.240 1
	b	0.026 6	0.033 7	0.034 2	0.035 8	0.036 6
	r^2	0.706 6 ^{***}	0.784 9 ^{**}	0.848 6 ^{**}	0.868 4 ^{**}	0.874 7 ^{**}
$Y_t=a+b\ln t$	a	-0.915 2	-1.279 4	-1.719 6	-2.015 9	-2.331 2
	b	0.468 4	0.577 8	0.759 2	0.870 2	0.996 8
	r^2	0.899 7 [*]	0.764 5 [*]	0.716 8 ^{***}	0.665 1 ^{***}	0.644 2 ^{**}
$1/Y_t=a+b/t$	a	-2.362 1	-5.996 9	-2.312 0	-2.341 2	-2.453 9
	b	137.86	267.609 3	141.719 5	141.872 6	139.227 5
	r^2	0.933 2 ^{***}	0.887 3 [*]	0.958 4 ^{***}	0.958 9 ^{***}	0.942 4 ^{**}

注:**表示 $P<0.01$ 。

随着施肥量的增加,b 值增大, 其中 T3 处理为 T2 的 1.03 倍,T4 处理为 T2 的 1.05 倍。可见,随着施肥量的增加,土壤中 NO₃⁻-N 的淋失速率加快,但增加幅度不大。

3 小结

综上所述,在本试验条件下,20 cm 处渗漏液中,NO₃⁻-N 到 21 d 后达到最高峰;60 cm 处渗漏液中 NO₃⁻-N 浓度随着施肥量的增加而递增,且大于 20 cm 处 NO₃⁻-N 浓度,但其高峰期在 45~63 d 之间,滞后于 20 cm 处;120 cm 渗漏液中,NO₃⁻-N 浓度随着施肥量的增加而增加,并且在 80~100 d 时达到高峰,分别滞后于 20 cm 处 60 d 左右,60 cm 处 30 d 左右,且其浓度低于 60 cm 处,而稍高于 20 m 处。在本试验条件下降雨量 为 1 110 mm 左右时,尿素以 NO₃⁻-N 形态淋失可达到施肥量的 47.8%,是尿素在砖红壤上损失的主要形态。

参考文献:

[1] Pleysier J L, Juo A S R. Leaching of fertilizer ions in a Ultisol from the

high rainfall tropics: leaching through undisturbed soil columns[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45: 754-760.

[2] Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Leaching and redistribution of nutrients in surface layer of red soils in Southwest China[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(2): 135-142.

[3] Shen R F, Zhao Q G. Leaching of nutrient elements in a red soil derived from Quaternary red clay[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(1): 15-20.

[4] 孙 波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 257-263.

[5] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240-242.

[6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 129-132.

[7] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988. 552-553.

[8] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 60-65.

[9] 任丽萍, 宋玉芳, 许华夏, 等. 旱地养分淋溶规律及对地下水影响的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 133-136.

[10] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 57-64.