

不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证

高海鹰¹, 黄丽江^{1,2}, 张 奇², 徐力刚²

(1. 东南大学市政工程系, 江苏 南京 210096; 2. 湖泊与环境国家重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要: 云南抚仙湖北岸农田平原区地下水埋深较浅, 约 0.6 m, 农田土壤氮素的淋失易对地下水和湖泊造成污染。采自抚仙湖北岸典型农田-蔬菜地土壤, 应用 3 组不同降雨强度作用下室内土柱实验方法, 通过测定土壤中铵态氮、硝态氮的含量以及渗漏液流量及其氮素浓度来探讨氮在土壤中的淋失规律。选用土壤营养物淋失模型(LEACHM 模型), 模拟了实验条件下水分运移和铵态氮、硝态氮浓度变化过程, 并对实验数据作了拟合分析。结果表明, 在不出现地表径流的情况下, 降雨强度越大, 水分下渗速率、铵态氮和硝态氮淋失速率也越快, 总氮的淋失量也越大。实验中渗漏液铵态氮、硝态氮含量分别达 10 和 120 mg·L⁻¹, 说明地下径流是营养盐损失的途径之一, 硝态氮是氮素淋失的主要形态。营养盐淋失是地下水氮素污染的原因之一。模拟结果与实验数据较为吻合, 表明该模型适用于研究区农田氮素淋失的模拟, 为评估氮素淋失提供有效工具, 同时也为现场模拟工作提供研究基础。

关键词: 室内实验; 数值模拟; 氮素; 降雨强度; LEACHM; 抚仙湖

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1346-07

Nitrogen Leaching Under Different Rainfall Intensities for Agricultural Soils—Laboratory Experiments and Numerical Modeling Using LEACHM

GAO Hai-ying¹, HUANG Li-jiang^{1,2}, ZHANG Qi², XU Li-gang²

(1 Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The depth of groundwater in the north agricultural region of Fuxianhu Lake watershed, Yunnan Province is as shallow as 0.6 m. Nitrogen leaching in farmland can easily pollute the groundwater and consequently the lake. One-dimensional soil column laboratory experiments were performed for soils from the agricultural land of Fuxianhu Lake watershed under three different rainfall intensities. Concentrations of ammonia-N and nitrate-N were measured for the tested soils as well as the leaching water at different experimental times. The numerical model of LEACHM was used to simulate the processes of water leaching and the temporal changes of concentrations of ammonia-N, nitrate-N in the leaching water for the experimental conditions. Results indicated that an increase in the rainfall intensity applied would result in an increase in the leaching rate of ammonia-N and nitrate-N, which ultimately resulted in an increase in the leaching loss of total-N. The concentrations of ammonia-N and nitrate-N in leaching water were 10 mg·L⁻¹ and 120 mg·L⁻¹, respectively. It is concluded that that groundwater is the one of the runoffs that transports nutrients for the study area, and nitrate-N is the main form of N leaching to groundwater. Nutrient leaching is becoming the major cause of groundwater pollution. Modeling results from LEACHM were found to be agreeable with the experimental data, which implies that the model is suitable to simulate nitrogen leaching for the study area. This study forms the basis for further field simulation work for the study area.

Keywords: laboratory experiment; numerical modeling; nitrogen; rainfall intensity; LEACHM, Fuxianhu lake

收稿日期: 2007-11-14

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金(40471018); 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金(CXNIGLAS-2004-1, CXNIGLAS-2005-20); 江苏省自然科学基金(BK2006179)

作者简介: 高海鹰(1966—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为土壤中营养盐迁移数值模拟。E-mail: gaohaiyingseu@163.com

通讯作者: 张 奇 E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

地下水氮污染已成为国内外普遍关注的问题^[1,2]。土壤淋失被认为是氮素损失的重要途径之一,也是造成地下水氮污染的重要原因^[3]。降雨是土壤氮素淋失的主要驱动因子之一,较大降雨形成的土壤下渗水流为氮素的迁移提供了载体,因而,通常情况下,氮素淋失主要发生在降雨集中季节^[4]。此外,土壤类型和土地利用方式等也是影响土壤氮素淋失的重要因素^[5,6]。饮用水中硝态氮含量过高的最大危害是水高铁血红蛋白综合症。

目前研究氮素淋失的方法主要有田间实测法、平衡估算法、数学模型法以及模拟土柱法^[7]。田间实测法是对研究区域进行实地观测,探讨气候、水肥管理、耕作制度等一系列因素对氮素淋失的影响,该方法能较为系统地研究土壤氮素淋失动态,但影响因素复杂多变,难以控制,同时需要投入的人力物力也较大^[8,9]。平衡估算法是通过测定或估计氮素输入和输出,然后以差减法求得氮素的淋失量,但难以对氮素淋失动态过程进行较为精确地研究与模拟^[10]。目前对营养物质运移规律的研究大多采用室内模拟土柱法,这也被认为是快速了解降雨-入渗-径流-渗流规律以及营养盐动态迁移过程及规律行之有效的方法^[11]。本研究采用土柱室内模拟结合数学模型的方法,分析铵态氮、硝态氮的淋失过程和规律。

本研究区域位于云南抚仙湖流域北部农田区。已有研究表明,抚仙湖的污染主要来自于农田面源污染,而抚仙湖的北岸平原区是农田和村镇的所在地,污染强度大。北岸的农田区,地下水埋深较浅,雨季小于 1 m。受降雨入渗的影响,该区地下水极易受到农田土壤农药化肥的污染。本研究目的包括:①探讨氮素在土壤中的淋失规律及降雨强度对淋失过程的影响;②采用数学模型对实验数据做拟合分析,检验模型的有效性,为模型应用于现场提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 土柱模拟实验

1.1.1 供试土壤

土柱实验于 2006 年 4 月在中国科学院南京地理与湖泊研究所云南抚仙湖工作站开展。土壤选自抚仙湖北岸梁王河流域典型农田-蔬菜地土壤,土壤属冲积土类,石砾土种,质地为砂壤。土样分层采集,每层 10 cm,共采集 0~40 cm 4 个层次土壤样品,经风干、磨碎、过 30 目筛后,按容重填充的方法获得近似原状土^[12,13]。

表 1 为试区土壤的主要物理特性。其中土壤含水

量用铝盒烘干法测定,土壤容重用环刀法测定,土粒密度采用比重瓶法测定,土壤孔隙度通过计算获得,土壤铵态氮采用氧化镁-代氏合金(MgO-Devarda)蒸馏法测定,硝态氮采用的是酚二磺酸法测定,土壤有机质通过重铬酸钾容量法测定,总氮采用开氏消煮法测定,机械组成通过筛分法测定,渗漏液铵态氮采用纳氏试剂比色法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定^[14,15]。实验共 3 组,风干土壤的初始铵态氮含量分别为:12.0、8.0、2.3 mg·kg⁻¹,硝态氮的含量分别为 94.0、121.1、131.1 mg·kg⁻¹。

1.1.2 实验设计及实验过程

由于作物根系圈的深度少于 40 cm,因此当氮素淋失到土壤 40 cm 深度时可认为氮素淋失,所以在设计土柱时土壤深度为 40 cm。模拟实验土柱由有机玻璃管柱设计而成,高度 50 cm,直径 18 cm。土柱顶部安装针状滴管模拟降雨,降雨强度通过带刻度和溢流口的 PVC 圆柱体管来实现对降雨强度的控制,水通过橡皮管注入 PVC 圆柱体后,一部分通过 PVC 管体底部所安装的 32 个均匀分布的针孔渗出而作用于土壤表层,而多余的水则通过侧向溢流口排出。这样就可以使圆柱体的水压始终处于恒定状态,降雨强度也就处于恒定状态,通过调节不同的水压来获得不同降雨强度的恒定降雨量,降雨强度可以通过计算单位时间内的水量下渗来获得。在土壤表层铺装一层软质砂布和滤纸,让水流缓缓渗入土层,以防止股状流和优先流的产生。在土柱底部加一层石英砂过滤层以防止堵塞入渗口,渗漏液通过渗漏瓶进行定时收集。在土柱侧面有一个侧向孔,当入径流量大于土壤入渗能力时,地表径流从侧向孔中流出,整个土柱模拟装置的示意图如图 1 所示。

根据当地典型的降雨强度特征,确定 3 组实验降雨强度分别为 0.75、0.85、1.21 mm·min⁻¹,然后按设计的降雨强度调节好装置并进行实验,喷洒过程中降雨强度保持不变,记录开始喷洒的时间以及渗漏液产流的时间。3 组土柱实验总时间分别为:1 485、1 440、1 356 min,模拟降雨时间分别为:1 305、1 440、1 236 min。渗漏液出现后开始采集,两次采样时间间隔依次为 10、20、30、50、70、90、110、130、150、180 min,每次样品测定包括渗漏液量及其铵态氮和硝态氮含量。2006 年 4 月 2 日作为第 1 组实验,2006 年 4 月 5 日作为第 2 组实验,2006 年 4 月 13 日作为第 3 组实验。

1.2 数值模拟

为了更好地分析实验数据,利用数值模型模拟土柱

表 1 试区土壤主要物理特性
Table 1 Physical properties of tested soil

土层深度/ cm	含水量/ %	干容重/ g·cm ⁻³	土粒密度/ g·cm ⁻³	孔隙率	总氮/ g·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	土壤机械组成/%			饱和导水率/ mm·d ⁻¹
							2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
0~10	15.62	1.39	1.98	0.39	1.101	14.129	81.34	10.38	8.28	3 001.1
10~20	15.91	1.59	2.06	0.39	0.911	10.129	72.25	12.54	15.21	2 901.2
20~30	18.09	1.64	2.21	0.39	0.722	7.005	70.24	15.72	14.04	2 645.5
30~40	16.83	1.62	2.19	0.39	0.522	1.217	73.25	17.54	9.21	2 754.1

针状滴管(上接 PVC 圆柱体提供不同的降雨强度)

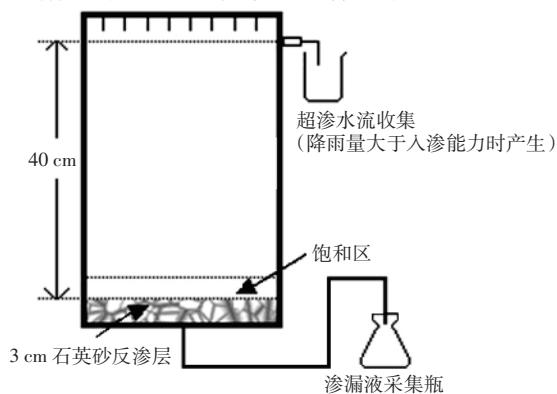


图 1 模拟实验土柱示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental setup

实验,探讨数值模型适用性以及将模型应用于研究区的可行性。目前研究农田氮磷面源污染的模型较多,代表性的有 ANSWERS、GREAMS、GLEAMS、SWRRB、SWAT、AGNPS、李怀恩模型、LASCAM 模型和 LEACHM 模型等^[16,17]。这些模型大多数是针对流域尺度设计的,并不适用于本次小尺度土柱实验。其中,LEACHM 模型模拟的空间尺度可以是农田小区或土柱,时间尺度可以是单次也可以是长期连续降雨^[18]。因此,此次土柱实验氮淋失的模拟选用 LEACHM 模型。

1.2.1 LEACHM 模型的介绍

LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model) 模型是美国康乃尔大学研究开发的既能模拟室内土柱实验也能模拟自然条件下水和化学物质在土壤剖面中的迁移规律。它包括 LEACHP (Pesticide Version)、LEACHC (Salinity Version) 和 LEACHN (Nutrient Version) 3 个子模型^[18],数值模拟使用的是描述营养盐在土壤中迁移规律的氮模型(LEACHN)。

LEACHN 模型中描述土壤的方程为 Campbell 水分特征方程:

$$h = a(\theta/\theta_s)^{-b} \quad (1)$$

式中: θ_s 为饱和状态下的体积含水率; θ 为体积含水

率; a 、 b 均为常数; h 为压力水头, kPa。

水运动方程是 Richards 方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U(z, t) \quad (2)$$

式中: H 为水力势, mm; $k(\theta)$ 为非饱和土壤的水力传导率, mm·d⁻¹; t 为时间, d; U 为源汇。

土壤水中的氮素的运移采用对流扩散方程:

$$\frac{\partial c_L}{\partial t} (\theta + \rho Kd) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D(\theta, q) \frac{\partial c_L}{\partial z} - qc_L \right] \pm \Phi \quad (3)$$

式中: c_L 为土壤水中溶质浓度, mg·L⁻¹; ρ 为土壤密度, 10³ kg·m⁻³; θ 为土壤体积含水量; Kd 为分配系数, 10⁻³ m³·kg⁻¹; D 为弥散系数, mm²·d⁻¹; Φ 为源汇。以上微分方程的解法是有限差分法。

1.2.2 模型的建立

LEACHM 模型的上边界条件为恒定渗透流, 当降雨停止时, 上边界条件为零流量, 下边界条件是自由排水边界, 土柱离散单元数目为 12, 每单元纵向尺寸为 0.033 m。模型率定参数的方法是作图比较模拟值与实验值以找出合适的参数。Campbell 水分特征方程中常量 a 和 b 是比较渗漏液的模拟流量和实验流量获得, 其中 $a = -2.02$ kPa, $b = 4.76$, 氮素的运移对流扩散方程中分配系数 Kd 是比较渗漏液铵态氮浓度的模拟值与实验值获取, 铵态氮分配系数为 $Kd = 0.6 \times 10^{-3}$ m³·kg⁻¹, 而硝酸根离子带负电荷受到土壤矿质胶体和腐殖质所带大量负电荷的排斥、不易被土壤吸附(侯晶等, 2006), 因此不考虑土壤对其吸附, $Kd = 0$ 。模型要求土体每个单元的初始氮素的含量均需测定, 但由于取土过程和实验装置加土时土壤的混合使每层土壤氮素的含量难以测取, 因此土壤氮素的含量只取了平均值。模型中还涉及到氮素的硝化、反硝化等, 但实验过程很短, 只有 1 d 左右, 因此把氮素形态的转变忽略不计。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度下氮素淋失实验结果及分析

不同降雨强度下, 3 组实验的开始产流时间不

同。实验 1、2、3 的产流时间分别为 210、146、132 min。随着降雨强度的增大,产流速度加快。3 组实验的降雨入渗量及土柱残余量计算结果见表 2。从表中可以看出,3 组实验均未产生径流,随着降雨强度的增加,入渗量也随之增加。实验土柱水分残留量几乎相同,因此降雨强度与渗漏液量无明显的关系。实验中采用分层按容重近似取样的方法,所以土壤剖面结构特征基本一至,实验土柱高度均为 40 cm,因此土柱的残余水量一致。

3 组土柱实验不同时刻氮素淋失量及其占土柱总量的比值见表 3。从表 3 中可以看出 3 组实验铵态氮淋失量占土柱总量的 35.3%、74.6%、78.3%,铵态氮的淋失比很高可能因为是砂质土壤,且由于有机质含量少,对铵态氮的吸附作用不强^[9]。硝态氮淋失量占土柱总量的 48.7%、94.5%、97.5%,说明降雨强度越大,淋失比也越大。3 组实验铵态氮的淋失量分别为 41.9、59.4、21.3 mg,硝态氮淋失量分别为 449.6、1 045.8、1 299.0 mg,总氮淋失量分别为 1 234.1、1 696.8、1 878.7 mg,比较铵态氮、硝态氮与总氮淋失量的大小,可以看出农田土壤氮素的淋失主要形态是硝态氮。从表 3 中也可以看出,降雨强度越大,总氮淋失量也越大。

2.2 数值模拟结果及分析

3 组土柱实验渗漏液流量的实验值与模拟值的比较见图 2。

渗漏液铵态氮浓度的实验值与模拟值之间的比较见图 3。

渗漏液硝态氮浓度的实验值与模拟值之间的比较见图 4。

从图 2 中可以看出,除实验起始段和实验结束

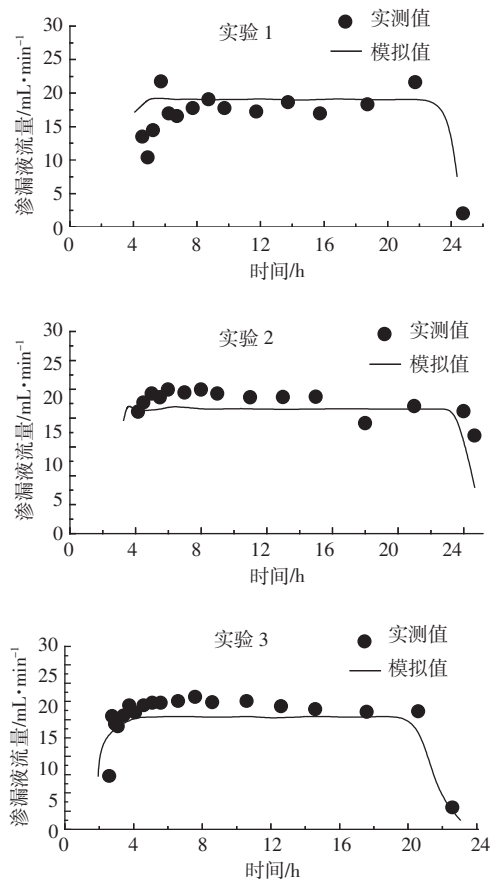


图 2 3 组土柱实验渗漏液流量的实验值与模拟值的比较

Figure 2 Comparison of flow rates from experiments and modeling results

段之外,渗漏液出流量基本恒定不变。起始段,渗漏液出流量急剧增加,在实验结束时,渗漏液出流量又缓慢减小,直至为 0。这是因为实验开始时土壤是风干土,土壤的水分含量很低,包括土壤结合水含量也

表 2 降雨入渗量及土柱残余量

Table 2 The rainfall seepage and calculated soil column surplus

实验编号	实验时间/min	降雨强度/mm·min ⁻¹	总降水量/mm	总入渗量/mm	总渗漏液量/mm	土柱残留量/mm
实验 1	1 480	0.85	1 222	1 222	983.3	283.7
实验 2	1 356	1.21	1 494	1 494	1 212.6	281.4
实验 3	1 124	1.50	1 506	871	587.9	283.1
平均	1 361	1.08	1 320	1 161	888.8	283.2

表 3 不同降雨强度下氮素的淋失比

Table 3 Mass of N leached rate for different rainfall intensities

实验编号	土柱铵态氮量/ mg	铵态氮淋失量/ mg	铵态氮淋失比/ %	土柱硝态氮量/ mg	硝态氮淋失量/ mg	硝态氮淋失比/ %	土柱总氮量/ mg	总氮淋失量/ mg	总氮淋失比/ %
实验 1	118.7	41.9	35.3	922.9	449.6	48.7		1 234.1	16.8
实验 2	79.6	59.4	74.6	1 123.6	1 045.8	94.5	7 326	1 696.8	23.2
实验 3	27.2	21.3	78.3	1 332.9	1 299.0	97.5		1 878.7	25.6

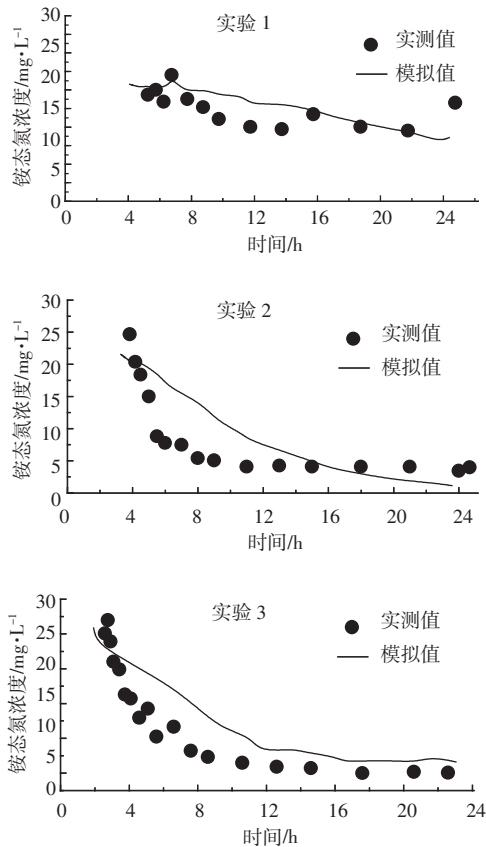


图3 渗漏水铵态氮浓度的实验值与模拟值之间的比较

Figure 3 Comparison of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations from experiments and modeling results

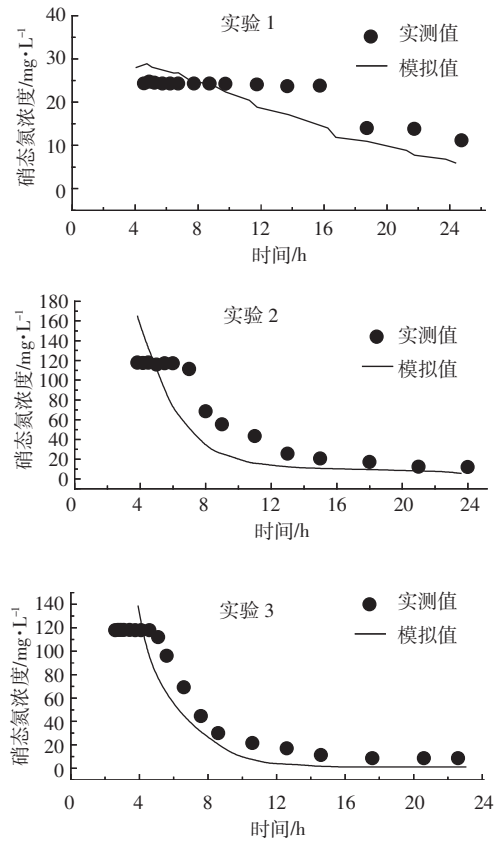


图4 渗漏水硝态氮浓度的实验值与模拟值之间的比较

Figure 4 Comparison of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations from experiments and modeling results

很低,降雨开始时,水分通过土粒的缝隙渗漏,所以会出现急剧升高的情形。随着降雨的继续进行,土壤颗粒在水分的作用下膨胀,土粒之间的孔隙减小,水分运移速率减慢。又由于土壤黏粒含量少,土壤颗粒膨胀较小,所以水分运移速率变化很小,最后趋近于恒定值。停止降雨后,土壤中的含水量大于土壤的田间持水量,土壤中水分在重力的作用下继续渗漏,渗漏水出流量慢慢减小,当土壤的含水量等于持水量时,渗漏水出流量即为0。所以在图2中会出现渗漏水流量先急剧增加,然后略减小,接着几乎不变,最后减小至0。

从图3中可以看出,渗漏水中铵态氮浓度随降雨过程逐渐减小,实验1渗漏水铵态氮浓度变化最慢,实验3渗漏水铵态氮浓度变化最快。因为降雨冲刷使土壤中铵态氮更易溶解于水中,随降雨强度增大,渗漏水产流速率增大,铵态氮浓度变化也越快。一般来说土壤颗粒带负电,铵态氮带正电,所以土壤颗粒对铵态氮有一定的吸附能力。翟丽华等认为铵态氮吸附被认为是线性吸附^[19]。而蒋桂华等认为氨氮在土壤中

的吸附符合 Langmuir 等温吸附模式^[20],但并无一致认同的观点。LEACHM 模型考虑铵态氮吸附也是线性吸附,因此从理论上说,当土壤中氨氮的含量变化不大时,模型模拟能达到比较好的效果。如果土壤中铵态氮含量变化较大时,模型的模拟效果就相对较差。而在土柱实验中,由于降雨量很大,相当于当地年降雨量,土壤中的氨氮含量在长时间大量降雨的作用下变化较大,所以模拟效果并未达到最佳。

硝态氮浓度变化随降雨强度的增加而增大。因为土壤中硝态氮易溶于水中,产流速率越大渗漏水硝态氮浓度变化越快,见图4。LEACHM 模型模拟硝态氮淋溶时不考虑土壤对硝态氮吸附,因此实验值与模拟值也较接近。

从图2、3、4中可以看出,渗漏水中的铵态氮、硝态氮的模拟值与实验值的变化趋势相同,且营养盐浓度较接近,只是实验的起始段模拟效果欠佳,主要是因为各个时间段的渗漏水在石英砂的孔隙中混合造成的。从以上结果看出,LEACHM 模型模拟实验结果比较理想,说明模型模拟实验区土壤的土柱实验是可行

的,进而为模型推广到实地模拟研究提供依据,也为以后现场模拟提供研究基础。

3 结论

云南抚仙湖梁王河流域农田集中,该流域降雨强度大,由于农田地下水埋深较浅,地下水易受农田土壤营养物的淋失污染,地下水已成为营养物向湖泊输移的主要路径之一。本项研究通过长时间连续匀强度降雨对营养盐垂向迁移过程进行淋失实验,得出如下结论:

(1)降雨强度是影响营养盐淋失的关键因素之一,降雨强度越大,铵态氮、硝态氮淋失速率也越大。若出现在径流时,水分下渗速率随降雨增加而增大。

(2)实验中渗漏液铵态氮、硝态氮含量很高,分别达10和120 mg·L⁻¹,说明地下径流是营养盐损失的途径之一,硝态氮是氮素淋失的主要形态。营养盐淋失是地下水氮素污染的原因之一。

(3)LEACHM模型能有效地模拟土柱实验渗漏液出流,铵态氮、硝态氮淋失的浓度变化,可以作为研究农田土壤中铵态氮、硝态氮的垂向淋失的方法和预测氮素淋失的评估工具,对探讨合理的种植灌溉模式以减少浅层地下水污染和抚仙湖面源污染有重要的现实意义和环保意义。

参考文献:

- [1] Jorge A Delgado, Ronald F Follett, Marvin J Shaffer. Simulation of Nitrate-nitrogen dynamics for cropping systems with different rooting depths[J]. *Soil Sci Soc AM J*, 2000, 64: 1050-1054.
- [2] 陈克亮, 朱晓东, 朱波, 等. 川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 1060-1064.
CHEN Ke-liang, ZHU Xiao-dong, Zhu Bo, et al. Temporal and spatial variation of NO₃⁻-N pollution in groundwater in small water shed of Central Sichuan Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 1060-1064.
- [3] 李俊良, 朱建华, 张晓晨, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(2): 126-129.
LI Jun-liang, ZHU Jian-hua, ZHANG Xiao-sheng, et al. Nitrate leaching loss form soil utilization by tomato in protected field[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2001, 7(2): 126-129.
- [4] ÜNLÜ K, ÖZENİRLER G, YURTERİ C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey[J]. *European Journal of Science*, 1999, 50: 609-620.
- [5] Ng H Y F, Drury C F, Serem V K, et al. Modeling and testing of the effect of tillage, cropping and water management practices on nitrate leaching in clay loam soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 43: 111-131.
- [6] Alva A K, Paramasivam S, Fares A, et al. Nitrogen best management practice for citrus trees II. Nitrogen fate, transport, and components of N budget[J]. *Science Horticulturae*, 2006, 109(3): 223-233.
- [7] 彭星辉, 谢晓阳, 纪雄辉. 淹水稻田氮素淋溶损失及其控制[J]. *湖南农业科学*, 2006, 5: 58-61.
PENG Xing-hui, XIE Xiao-yang, JI Xiong-hui. Nitrogen leaching in paddy rice field and its countermeasure[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2006, 5: 58-61.
- [8] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 676-681.
WANG Zhao-hui, LI Sheng-xiu, WANG Xi-na, et al. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors [J]. *Soils*, 2006, 38(6): 676-681.
- [9] 田玉华, 尹斌, 朱兆良. 稻田氮素淋洗损失研究[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(12): 2792-2794.
TIAN Yu-hua, YIN Bin, ZHU Zhao-liang. Study on nitrogen losses via leaching in paddy soil [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2006, 34(12): 2792-2794.
- [10] 邱卫国, 唐浩, 王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(4): 740-744.
QIU Wei-guo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and control technology [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 740-744.
- [11] 冯绍员, 黄冠华, 王凤新, 等. 用人工降雨和数值模拟方法研究降雨入渗规律[J]. *水利学报*, 1998, 11: 17-20.
FENG Shao-yuan, HUANG Guan-hua, WANG Feng-xin, et al. Study on soil infiltration law with artificial rainfall and numerical simulation [J]. *Shui Li Xue Bao*, 1998, 11: 17-20.
- [12] 宋波, 高定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1707-1715.
SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tong-bin, et al. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1707-1715.
- [13] 邵爱军, 刘广明, 杨劲松. 土壤水动力弥散系数的室内测定[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 184-189.
SHAO Ai-jun, LIU Guang-ming, YANG Jin-song. In lab determination of hydrodynamic dispersion coefficient[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 184-189.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 146-288.
Agrochemical Chemical Professional Board of Soil Science Society of China. General Analytical Method of Soil Agricultural Chemical[M]. Beijing: Science Press, 1983. 146-288.
- [15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编辑委员会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 200-284.
State Environmental Protection Administration Editorial Board of Monitor and Analytical Method of Water and Waste Water. Monitor and Analytical Method of Water and Waste Water (Version 4)[M]. Beijing: Environmental Science Press, 1989. 200-284.
- [16] 徐力刚, 杨劲松, 张奇. 冬小麦种植条件下土壤水盐运移特征的

- 数值模拟与预报[J]. 土壤学报, 2005, 42(6):923-929.
- XU Li-gang, YANG Jin-song, ZHANG Qi. Numerical simulation and forecasting of soil water and salt regime under winter wheat crop plan-tation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6):923-929.
- [17] 徐力刚, 张 奇. 流域非点源污染物输移模型研究现状及展望[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):316-322
- XU Li-gang, ZHANG Qi. Status and prospects of models for non-point source pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (Supplement):316-322.
- [18] John L Hutson. LEACHM model description and user's guide[M]. Australia; School of Chemistry, Physics and Earth Sciences the Flinders University of South Australia. 2003. 1-4.
- [19] 翟丽华, 刘鸿亮, 徐红灯, 等. 浙江某农场土壤和沟渠沉积物对氨氮的吸附研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8):1770-1773.
- ZHAI Li-hua, LIU Hong-liang, XU Hong-deng, et al. Property of ammonium adsorption on sediments in ditches and adjacent soil[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8):1770-1773.
- [20] 姜桂华, 王文科, 杨胜科. “三氮”在黄土非饱和带迁移转化原位试验及数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4):571-575.
- JIANG Gui-hua, WANG Wen-ke, YANG Sheng-ke. In situ experiment and numerical simulation on transportation and transformation of “Three Nitrogen” in loess unsaturated zone[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2004, 34(4):571-575.