

# 不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程和淋失量的影响\*

徐力刚<sup>1,2</sup> 张 奇<sup>1†</sup> 徐 进<sup>3</sup> 蒋鸿昆<sup>3</sup> 黄丽江<sup>3</sup>

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(3 东南大学土木工程系, 南京 210096)

**摘 要** 云南抚仙湖流域农田面源污染日益严重, 土壤污染物主要随地表径流进入湖泊, 使湖泊受到污染。但目前的现场观测表明, 农田区浅层地下水也已受到污染, 地下水已成为污染物输移的路径之一。通过四组不同降雨强度作用下的室内土柱试验模拟土壤污染物向地下水的淋失迁移量, 对降雨入渗过程中总氮、总磷、铵态氮和硝态氮的垂向迁移过程进行了分析, 通过分时段处理来对各组实验中营养盐累积淋失量进行了计算。结果表明, 硝态氮的垂向迁移能力和出流浓度均大于铵态氮, 总氮和总磷的累积淋失量与累积降雨量呈自然对数关系; 降雨强度对总氮的淋失作用明显, 对总磷淋失量的影响则相对较弱。实验结果有助于揭示抚仙湖流域降雨作用下农田土壤中污染物的垂向迁移过程及其对农田浅层地下水的污染机制, 并为污染物垂向迁移的数学模拟提供数据基础。

**关键词** 降雨强度; 土柱; 营养盐; 迁移; 淋失量

**中图分类号** X53 **文献标识码** A

云南抚仙湖北岸集水区集中了大量农田, 由于农田中化肥的施用对水体造成的氮、磷污染已越来越引起关注, 农业非点源污染目前已上升为抚仙湖水污染的重要因素。抚仙湖北岸地下水埋深较浅, 约为 60 cm, 受降雨入渗影响, 该区的地下水可能已受到农田土壤农药化肥的污染, 并且北岸平原区以平均坡度 6.4% 由北(平原区)向南(湖泊)倾斜, 地下水总的流向由北向南, 入渗湖泊, 因此浅层地下水已成为向湖泊输送营养物质的主要载体之一。笔者在云南抚仙湖开展的部分农田地下水水质监测中发现总氮和总磷的浓度已高达  $5 \text{ mg L}^{-1}$  和  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , 与前期背景值比较, 农田浅层地下水受污染的趋势正在加重, 必须尽快对此开展相关研究工作。许多研究已表明营养物质的淋失特性对地下水可造成污染, 并且还有可能导致土壤酸化和降低土壤肥力<sup>[1]</sup>。营养盐在土壤中的垂直运移过程是指营养盐在土壤中的垂直淋失过程, 实质上是营养物质

以土壤水为载体在土壤中的垂直迁移过程。由于目前监测手段的落后, 加之降雨过程的随机性, 使得观测自然降雨条件下营养盐在土体中的垂向迁移过程和规律在很大程度上存在周期长、工作量大、数据不够准确等困难和缺憾。欲对降雨-入渗-径流-渗流规律以及营养盐动态迁移过程进行准确、快速、全面的了解, 采用人工模拟降雨的方法, 进行室内土柱模拟试验是一种行之有效的方法<sup>[2]</sup>。目前对营养盐在土壤及地下水中迁移规律的研究, 一是通过室内土柱试验和野外大田试验进行实测模拟分析<sup>[3]</sup>; 二是通过建立数学模型来进行数值模拟分析, 通过模型来预测污染物浓度的时空变化规律, 以便采取控制措施, 使土壤和地下水环境受影响的程度降为最低<sup>[4~7]</sup>。冯绍元<sup>[8]</sup>对排水条件下氮素转化运移和流失进行了研究; 李保国<sup>[9]</sup>对区域土壤氮素行为的定量研究进行了初步探索; 张思聪等<sup>[10]</sup>应用 LEACHIM 模型对唐山农业地区在灌溉施肥条件下氮素在土壤

\* 国家自然科学基金项目(40471018, 40701176)、中国科学院“百人计划”项目、江苏省自然科学基金项目(BK2006579)及河海大学水文与水资源与水利科学工程国家重点实验室开放基金课题(2006412511)联合资助

† 通讯作者, E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

作者简介: 徐力刚(1976~), 博士, 助理研究员, 主要从事数值模拟及污染水文学研究。E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

收稿日期: 2006-12-24; 收到修改稿日期: 2007-03-28

中的迁移转化进行了分析。目前对营养物质运移规律的研究大多采用扰动土样,在较浅深度的渗漏池及室内条件下进行,初步揭示了营养盐的淋失规律及其与影响因素的关系,但对于农田营养物质向地下水体迁移的动态变化及通量研究却较少,在这方面,模型研究被证明是一种有用且高效的工具。HYDRUS 模型可模拟饱和-非饱和土壤中一维水流与溶质输移及热量的迁移,然而模型中没有考虑作物的生长<sup>[11]</sup>; ENVIRO-GRO 模型表征了植物-土壤-水-盐-氮系统中复杂的相互作用和反馈机制,模型中考虑了水、盐胁迫条件下对作物产量的影响,但忽略了土壤氮素的反硝化作用<sup>[12]</sup>。为了深入探讨抚仙湖农田土壤中污染物在土壤中的垂向迁移过程和规律、营养盐淋失比例以及对农田浅层地下水的污染机制,本文结合实验地抚仙湖集水区的气候特点和降雨规律,选取抚仙湖北岸梁王河流域典型蔬菜地土壤为实验对象,侧重以土柱淋失实验来模拟氮、磷在非饱和土壤中的垂向迁移过程和规律,通过分时段处理对营养盐累积淋失量进行了计算。在抚仙湖流域开展不同降雨强度下营养盐垂向过程的淋失实验对于弄清上述科学问题具有重要的实际意义,研究工作与以往研究工作相比,侧重于探讨不同降雨强度下营养盐的垂向迁移规律、特征以及营养盐的累积淋失量。研究结果有助于揭示云南抚仙湖集水区降雨作用下农田土壤中污染物的迁移过程和规律、营养盐淋失比例以及对农田浅层地下水的污染机制,也可以为合理施用化肥及环境中氮、磷循环提供基础数据和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

土柱试验于 2005 年 8 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。供试土壤选取具有代表性的抚仙湖集水区梁王河流域一蔬菜地进行土壤样品的采集。采用分层采样,按容重进行填充的方法获得供试土柱,采样区地下水水位埋深约 0.6 m。实验共进行四组,设计了两种不同的初始营养盐含量,其中实验一、实验二中土壤的初始营养盐含量相同,取自同一时间和同一地点的供试土壤;实验三、实验四中土壤的初始营养盐含量相同,为同一批次土壤。每组实验的降雨强度均不同,试区土壤的主要物理特性如表 1 所示。

表 1 试区土壤初始营养盐含量及主要物理特性

Table 1 Nutrient contents and physical properties of soil samples tested

项目 Item	土层深度 Soil layer depth			
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm
初始含水量 Initial soil moisture (%)	15.62	15.91	18.09	16.83
容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	1.59	1.59	1.58	1.58
土粒密度 Particle density (g cm <sup>-3</sup> )	2.64	2.61	2.60	2.57
孔隙度 Porosity	0.37	0.37	0.39	0.41
总氮(实验一、实验二) Total nitrogen (Test 1, Test 2) (mg kg <sup>-1</sup> )	16.36	14.12	8.92	5.97
总氮(实验三、实验四) Total nitrogen (Test 3, Test 4) (mg kg <sup>-1</sup> )	14.33	13.01	11.97	6.66
总磷(实验一、实验二) Total phosphorus (Test 1, Test 2) (mg kg <sup>-1</sup> )	4.08	3.50	2.20	1.48
总磷(实验三、实验四) Total phosphorus (Test 3, Test 4) (mg kg <sup>-1</sup> )	3.67	3.22	2.96	1.65

### 1.2 测定方法

为了探讨不同降雨强度下营养盐(本文侧重于研究氮素在垂向剖面中的迁移规律与淋溶量,实验过程中对总磷也一并做了测定和研究)在土体中的迁移规律和计算营养盐淋失量的百分比,需要对土壤基本物理性质、初始营养盐含量以及渗漏液的营养盐浓度进行分析,其中土壤含水量用铝盒烘干法进行测定;土壤容重用环刀法进行测定;土粒密度采用比重瓶法测定;土壤孔隙度通过计算方法获得;土壤全氮采用开氏消煮法;土壤全磷采用碳酸钠熔融—钼锑抗比色法,以上项目的测定均按照《土壤农业化学分析方法》进行<sup>[13]</sup>;水样中总氮、总磷、硝态氮、铵态氮的测定按照国家环境保护总局《水和废水水质监测方法》<sup>[14]</sup>进行分析。

### 1.3 降雨装置与土柱设计

实验根据对抚仙湖区域多年来的短时降雨强度进行概率频度分布分析,以此为依据,确定了四种不

同的降雨强度,这四种强度代表了当地常见的短时降雨过程的强度,实验一到实验四的降雨强度分别为  $0.59, 0.47, 0.38, 0.24 \text{ mm min}^{-1}$ 。实验过程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。渗漏水经石英砂过滤层后采用量杯进行人工收集,以供分析测定之用。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,在土柱底部加一层石英砂过滤层以防止堵塞入渗口,渗漏水通过渗水瓶进行定时收集。在土柱侧面有一个直径为 4 cm 侧向孔,当入径流量大于土壤入渗能力时,能满足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。

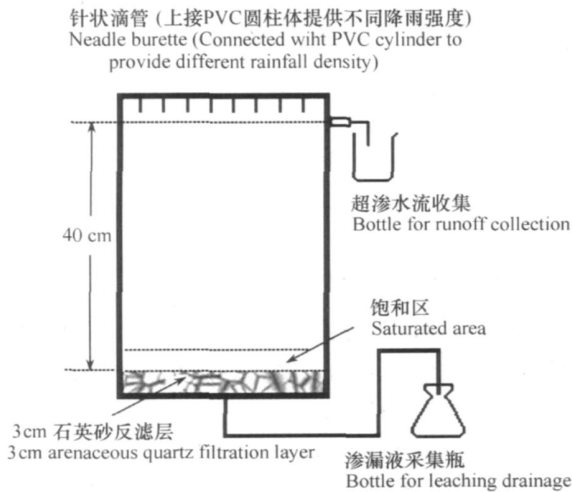


图 1 模拟实验土柱示意图

Fig. 1 Sketch of the apparatus used in the simulated soil column experiment

#### 1.4 试验过程

根据确定的实验降雨强度调节好装置并进行试验,喷洒过程中降雨强度保持不变,记录开始喷洒的时间和地表径流产流以及渗漏水产流的时间。每组实验均在渗漏水产流后均持续 180 min,然后结束实

验,出现产流后采样时间间隔分别为出现渗漏水的时间 10、20、30、50、70、90、110、130、150、180 min,在每次样品的采集过程中均测定此采样间隔内的产流量,采集渗漏水分别测定总氮、总磷、铵态氮和硝态氮含量。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 土壤入渗过程及产流、渗漏分析

四组实验开始产流(出现渗漏水,下同)的时间不一(实验一、实验二均为 30 min,实验三、实验四分别为 50 min、60 min,再加上实验设计为实验开始产流后 180 min 停止实验,所以降雨持续时间分别为产流时间加上 180 min),四组实验的降雨入渗量及渗漏水入渗百分比的计算结果见表 2(为了方便比较,降水量和渗漏水均为降雨体积除以土柱的横截面积换算成毫米来表示)。从表中可以看出,四组实验的渗漏水占入渗总量的百分比的计算结果变化于  $0.40 \sim 0.47$ ,平均值为 0.44。不同降雨条件下的渗漏水入渗量百分比无明显的规律性。这主要是因为土壤的入渗系数主要取决于土壤剖面的结构特征,尤其是表层土壤的质地特性。抚仙湖北岸属平原地带,农业耕作方式大体一致,并且实验中采用分层按容重近似取样的方法进行,所以土壤剖面结构特征基本一致,即使有降雨强度的差别,但整体来看,土壤入渗过程并没有发生规律性的变化,其受降雨强度的影响较小。

### 2.2 降雨淋失过程中营养盐的迁移过程及规律分析

土壤水分运动是引起土壤养分淋失迁移的动力条件<sup>[15]</sup>,所以营养盐的迁移规律和特征与水分入渗量密切相关。土壤养分的化学形态和性质是决定其迁移特性的内因,降雨条件下,土壤养分随径流的迁移有两层含义:一是指土壤内部的可溶性物质随入渗水分垂向迁移;另一方面指土壤入渗能力小于雨强时产生地表径流,可溶性养分随地表径流迁移<sup>[16]</sup>。本试验主要以养分垂向入渗迁移为主要研究对象,以下分别就不同降雨强度作用下总氮、总磷及其他两种形态氮在土体中的垂向迁移过程及规律加以分析。

#### 2.2.1 降雨淋失过程中总氮和总磷的变化规律分析

土壤中各组实验之间虽然存在降雨强度的不同,但从图中仍可看出,四组实验中的渗漏水出流液中总氮的变化趋势仍然具有规律性,总氮在出现渗漏

表 2 降雨入渗量及入渗百分比

Table 2 Rainfall seepage and calculated seepage percentage

实验编号 Number of test	试验时间 Duration of the experiment (min)	降雨强度 Rainfall intensity (mm min <sup>-1</sup> )	总降水量 Rainfall amount (mm)	总渗漏液量 Total amount of leachate (mm)	渗漏液占入渗总量的百分比 Percentage of the rainfall (%)
实验一 Test 1	210	0.59	123.9	50.93	41
实验二 Test 2	210	0.47	98.70	46.60	47
实验三 Test 3	230	0.38	88.13	35.52	40
实验四 Test 4	240	0.24	57.53	27.04	47
平均 Average	222	0.42	92.07	40.02	44

液的前 20 min 会出现一个比较明显的降低趋势,然后随着时间的进行渐渐趋缓,逐渐达到一个比较稳定的状态。对总氮来说,同一初始营养盐含量的土柱实验(图 2a,图 2b)结果来看,随着降雨强度的增加,渗漏液的出流浓度也会略有增加。在初始营养盐含量

相同的情况下,渗漏液浓度随着降雨强度的增加有增大的趋势,降雨强度对出流液总氮浓度影响的显著性分析结果( $p < 0.01$ )表明,降雨强度与单位持续时间内总氮的出流浓度呈显著相关,由此可以看出降雨强度是影响总氮渗漏液出流浓度的一个重要因素。

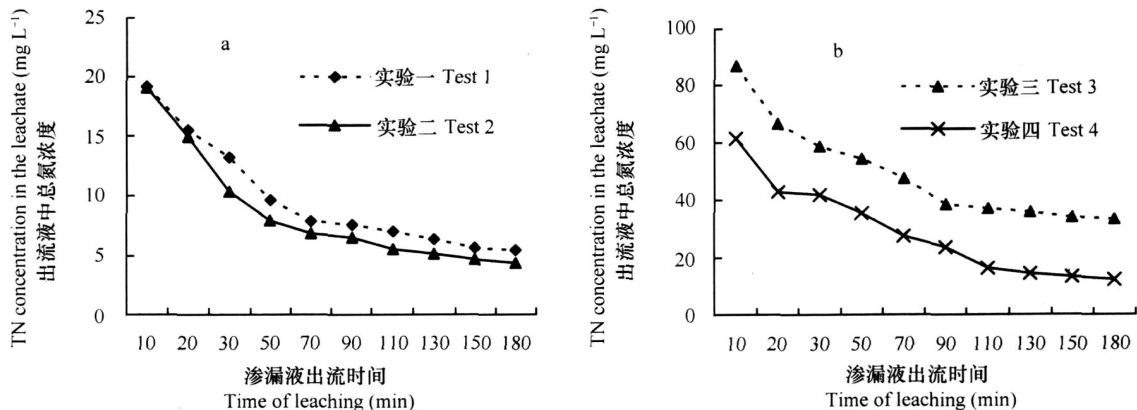


图 2 各组实验渗漏液总氮含量变化

Fig. 2 Dynamic curves of total nitrogen in leachate in different groups of tests

对总磷而言,各组实验之间均呈现出渗漏液初始值稍低,然后逐渐上升,最后呈现一个比较稳定的平衡,总磷的淋失量趋于稳定,实验过程中当渗漏液的浓度趋于平衡时就停止实验的进行。抚仙湖流域具有降雨强度大、持续时间短的实际条件,为了更好地模拟不同降雨强度下营养盐在土体中的垂向迁移过程和规律,四组实验降雨持续时间均不是太长。对于总磷长时间序列的迁移规律和出流特征尚需更多实验来验证;对于不同降雨强度的实验而言,在降雨淋失过程中呈现的规律性特征就不太明显(图 3),这主要是因为磷在土体中的迁移速度相对于氮缓慢得多,总磷受水分运动的影响较小,在实验持续期间的降雨过程中就不足以表现出明显的规律性特征,由于本次实验主要侧重于探讨氮在土壤垂向剖

面中的迁移规律与淋溶量研究,所以没有对可溶性磷酸盐进行测定,如果以磷作为研究重点,则应当观测可溶性磷酸盐的含量。

2.2.2 土壤中无机氮的变化规律分析 无机氮是作物吸收利用的主要形态,无机态氮包括硝态氮、铵态氮和固定态铵三种形态。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<sup>[17]</sup>。本实验中主要探讨了硝态氮和铵态氮在渗漏液中的变化过程。

实验结果表明,同一初始营养盐含量的土柱淋失实验(图 4a,图 4b)结果来看,随着降雨强度的增加,渗漏液中铵态氮的出流浓度呈现降低的趋势;而随着降雨强度的增加,渗漏液中硝态氮的出

流浓度则与之相反,出流浓度随着降雨强度的增加而相应增大(图 5a,图 5b)。这主要是因为硝态氮随水分移动明显,而铵态氮随水分迁移较慢。当实验开始时,水分进入土体开始下渗,硝态氮不易被土壤胶体吸附,随着水分一起向下迁移,但土

壤颗粒对铵态氮的吸附强烈,随着土壤中含水量的增加,对于铵态氮的吸附能力也增强,导致铵态氮随着降雨强度的增加出流浓度却相应减少了,而硝态氮随水分移动明显,就表现出了与铵态氮相反的迁移规律和特征。

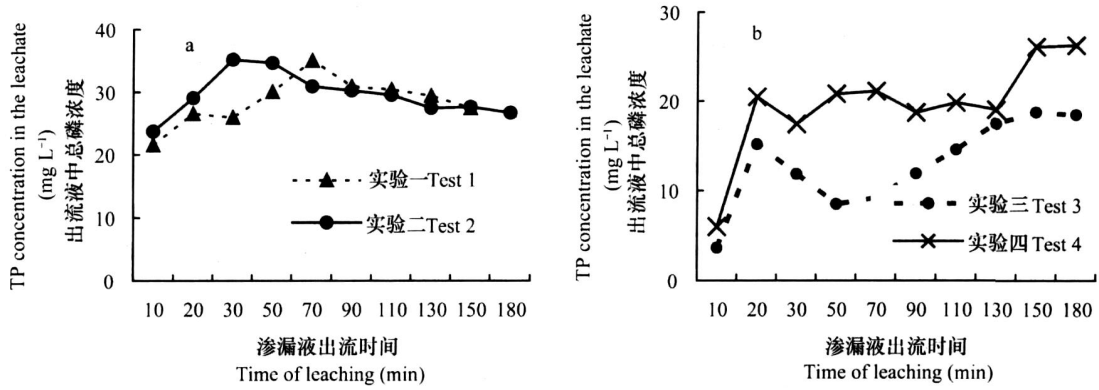


图 3 各组实验渗漏液总磷含量变化

Fig. 3 Dynamic curves of total phosphorus in leachate in different groups of tests

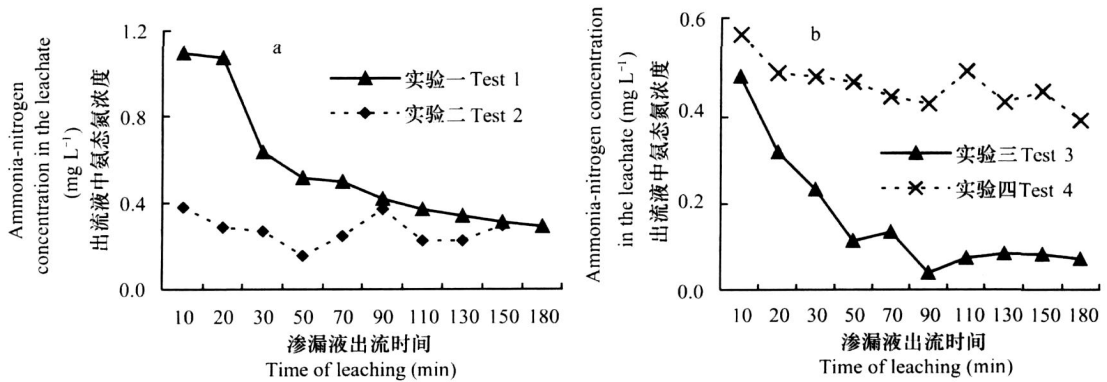


图 4 各组实验渗漏液铵态氮含量变化

Fig. 4 Dynamic curves of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in leachate in different groups of tests

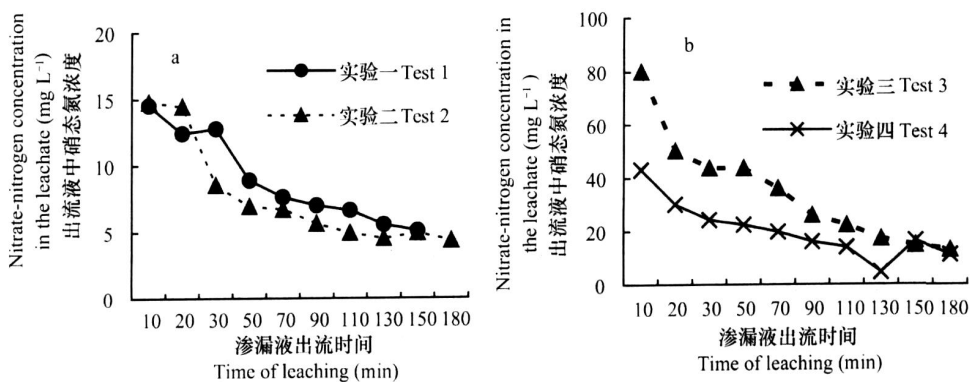


图 5 各组实验渗漏液硝态氮含量变化

Fig. 5 Dynamic curves of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in leachate in different groups of tests

从产生渗漏液的开始 10 min 内的初始渗漏液浓度来看,实验一的出流浓度远大于实验二同等条件下的出流浓度(图 4a),而这两组降雨强度对初始渗漏液中硝态氮的影响则不明显(图 5a);实验三和实验四则呈现相反的规律,在产生渗漏的开始 10 min 内,降雨强度对铵态氮的影响不明显,对硝态氮的影响明显。这说明了降雨强度的大小对铵态氮在初始渗漏液中的出流浓度作用明显,铵态氮和硝态氮表现出了不一致的初始出流规律,而这与实验中所设定的降雨强度的大小是密切相关的。

### 2.3 营养盐累积淋失量的估算

单位时间内的降雨量可以从降雨强度获得,再对单位时间内的渗漏液进行采集,结合营养物质在

此时间内的浓度变化过程就可以获得此时段内营养盐(总氮、总磷)的淋失量,有了这些数据和实验的持续时间,进行分段计算和处理,就可以获得每个时间段内的营养盐的淋失量和整个实验期间的营养盐累积淋失量。土柱中初始营养盐含量已知,由此计算出营养盐的累积淋失百分比。从实验分析和计算结果来看,四组实验从开始渗漏到整个实验结束过程中累积营养盐淋失量与累积降雨量呈较好的对数关系(如表 3 所示)。所建立的对数关系式中,只有当累积降雨量( $x$  值)达到初始累积降雨量( $x_0$ )时,即  $x > x_0$  时,土柱才开始有渗漏液流出。初始降雨量累积值  $x_0$  与降雨强度有关,降雨强度越低, $x_0$  值越低。本次实验的初始降雨量累积值如表 3 所示。

表 3 各组实验中累积淋失量百分比及累积营养盐淋失量与累积降雨量的相关表

Table 3 Cumulative leaching percentage and cumulative nutrient leaching loss in relation to cumulative rainfall in different groups of tests

营养盐 Total nutrient content	实验编号 No. of test	降雨强度 Rainfall intensity (mm min <sup>-1</sup> )	累积营养盐淋失量 $y$ 与累积降雨量 $x$ 的回归关系 Regression between cumulative leaching losses of total nitrogen $y$ (mg) and cumulative rainfall $x$ (mm)	累积营养盐淋失百分比 Percentage of nutrient leaching loss (%)	初始累积降雨量 $x_0$ Initial cumulative rainfall amount (mm)	相关系数 Correlation coefficient
总氮 Total nitrogen	实验一 Test 1	0.59	$y = 27.45\ln(x) - 79.34$	28.53	18	0.79
	实验二 Test 2	0.47	$y = 26.41\ln(x) - 71.61$	25.58	15	0.88
	实验三 Test 3	0.38	$y = 12.43\ln(x) - 30.02$	21.58	12	0.89
	实验四 Test 4	0.24	$y = 3.65\ln(x) - 7.34$	22.41	8	0.77
总磷 Total phosphorus	实验一 Test 1	0.59	$y = 18.42\ln(x) - 53.70$	7.82	18	0.86
	实验二 Test 2	0.47	$y = 13.62\ln(x) - 40.09$	6.54	15	0.77
	实验三 Test 3	0.38	$y = 11.45\ln(x) - 28.76$	2.42	12	0.85
	实验四 Test 4	0.24	$y = 8.76\ln(x) - 18.75$	4.78	8	0.87

从表中营养盐的累积淋失百分比可以看出,降雨强度对营养盐中总氮的淋失作用规律明显,总氮的累积淋失量与累积降雨量显著相关,呈自然对数关系,下一步流域工作中将营养盐淋失量与累积降雨量的关系进行验证。在四组实验持续时间内,总氮被淋失的相对值较多,总氮的淋失效果明显,这是因为占总氮总量主体的硝态氮在淋失过程中所表现

出的良好入渗能力和弱吸附能力作用的结果;而在淋失实验进行过程中,总磷虽然也表现出累积降雨量与累积营养盐淋失量也呈自然对数关系,但从淋失量的百分比可以看出,总磷的淋失效果不明显,这可能是由于土壤颗粒对磷的吸附作用限制了磷的迁移能力。

### 3 结 语

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。本研究通过不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程的淋失实验,得出如下结论:

1) 各组实验中渗漏液中总氮和总磷的迁移呈现出一致性的变化规律。对同一初始营养盐含量的土柱实验来看,渗漏液中总氮随降雨强度的增加呈现增大的趋势,但降雨强度的变化对渗漏液中总磷的影响不呈现出明显的规律性;随着降雨强度的增加,渗漏液中铵态氮的出流浓度呈现降低的趋势,渗漏液中硝态氮的出流浓度则与之相反,出流浓度随着降雨强度的增加而相应增大;硝态氮的入渗能力和迁移速度明显强于铵态氮,降雨强度对硝态氮的影响大于铵态氮。

2) 降雨强度是影响营养盐流失的关键因素之一。各组实验中累积营养盐淋失量与累积降雨量均呈自然对数关系;降雨强度对营养盐中总氮的淋失作用明显,对总磷的淋失量的影响则相对较弱,下一步将在流域工作中对营养盐淋失量与累积降雨量的关系进行验证。

3) 实验结果揭示抚仙湖集水区梁王河流域地下径流是营养盐输移的途径之一,营养盐的垂向迁移过程是导致地下水受农田土壤染污物影响的主要原因。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 汪志荣,张兴昌,李军. 农田生态系统中的物质迁移研究进展. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 156~171. Wang Z R, Zhang X C, Li J. Advance in research on matter transfer in ecosystem of farmland (In Chinese). Agriculture Research in the Arid Areas, 2004, 22(1): 156~171
- [ 2 ] 段永惠,张乃明,张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究. 土壤, 2005, 37(1): 48~51. Duan Y H, Zhang N M, Zhang Y J. Effect of fertilize application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff (In Chinese). Soils, 2005, 37(1): 48~51
- [ 3 ] 李韵珠,李保国. 土壤溶质运移. 北京: 科学出版社, 1998. Li Y Z, Li B G. The Solute Transport in Soil (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [ 4 ] 胡春胜,程一松,李晓欣. 太行山前平原农田生态系统中硝态氮的淋失研究. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 262~269. Hu C S, Cheng Y S, Li X X. Leaching loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in farmland ecosystem of piedmont plain of Mt Taihang (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (Suppl.): 262~269
- [ 5 ] White R E. Prediction of nitrate leaching from a structured clay soil using transfer functions derived from externally applied or indigenous solute fluxes. Journal of Hydrology, 1989, 10(7): 31~42
- [ 6 ] Vassilis Z A. Simulation of water and nitrogen dynamics in soils during waste water applications by using a finite-element model. Water Resources Management, 1993, 7: 237~251
- [ 7 ] 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. 土壤学报, 2005, 42(6): 923~929. Xu L G, Yang J S, Zhang Q. Numerical simulation and forecast of soil water and salt regime under winter wheat crop planting (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 923~929
- [ 8 ] 冯绍元,郑耀泉. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响. 农业环境保护, 1996, 15(6): 277~279. Feng S Y, Zheng Y Q. The effect of change and loss of N for water environment in field (In Chinese). Agro-environmental Protection, 1996, 15(6): 277~279
- [ 9 ] 李保国,龚元石,左强. 农田土壤水的动态模拟及应用. 北京: 科学出版社, 2000. Li B G, Gong Y S, Zuo Q. The Dynamic Model and Application of Soil and Water in Field (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [ 10 ] 张思聪,吕贤粥,黄永刚. 灌溉施肥条件下氮素在土壤中迁移转化的研究. 水利水电技术, 1999, 30(5): 6~8. Zhang S C, Lu X B, Huang Y G. Study on the transport and transform of nitrogen in soil under the condition of fertilizer irrigation in Tangshan (In Chinese). Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(5): 6~8
- [ 11 ] Simunek J, Suarez D L. Two-dimensional transport model for variably saturated porous media with major ion chemistry. Water Resources, 1994, 30(4): 1115~1133
- [ 12 ] Pang X P, Letey J. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, An integrated water, salinity, and nitrogen model. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 1418~1427
- [ 13 ] 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. 北京: 科学出版社, 1983. Agro-chemistry Specialty Committee, Soil Science Society of China. General Analytical Methods of Soil and Agro-chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983
- [ 14 ] 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). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. Editorial Board of Monitor and Analytical Methods of Water and Waste Water, State Environmental Protection Administration of China. Monitor and Analytical Methods of Water and Waste Water (In Chinese). 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1989
- [ 15 ] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Nitrate leaching in an irrigated wheat-maize rotation field in the North China Plain. Pedosphere, 2005, 15(2): 196~203
- [ 16 ] 曹巧红,龚元石. 降水影响冬小麦灌溉农田水分渗漏和氮淋失模拟分析. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 37~42. Cao Q H, Gong Y S. A simulation analysis of influence of precipitation on water

## MIGRATION AND LEACHING LOSSES OF NUTRIENTS IN RELATION TO RAINFALL INTENSITY

Xu Ligang<sup>1,2</sup> Zhang Qi<sup>1†</sup> Xu Jin<sup>3</sup> Jiang Hongkun<sup>3</sup> Huang Lijiang<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(3 Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Non-point source pollution in the Fuxianfu Lake catchment, Yunnan has been the main cause of eutrophication of the Fuxianfu Lake. Leaching loss of nutrients from the soil is not only one of the most important agricultural problems, but also the main factor causing nitrogen and phosphorus pollution of the water environment. Four soil columns sampled in the region were used in the laboratory experiment, which was designed to have four different rainfall intensities, to investigate migration and leaching loss of nutrients. Based on the obtained experimental data, characteristics of migration of total nitrogen, total phosphorus, nitrate-N and ammonia-N were analyzed, and cumulative leaching losses were calculated. Results show that nitrate-N moves relatively easily with water movement in the soil profile while ammonia-N can hardly do. A natural logarithm relationship was found existing between cumulative rainfall amount and cumulative leaching losses of nutrients in all the experimental conditions. Leaching loss of total nitrogen was mainly affected by rainfall intensity, while leaching loss of total phosphorus was not significantly related to rainfall intensity. The findings of this paper may help explore distribution and migration of nutrients in agricultural lands, and mechanism of agricultural activities polluting groundwater.

**Key words** Rainfall intensity; Soil column; Nutrients; Migration; Leaching losses