

坡面氮、磷流失特征分析及预测

王建中,刘 凌

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

摘要 利用室内人工降雨系统和大型可变坡土槽,模拟了裸土坡地在不同的初始土壤营养物质质量分数、径流量、坡度及植被覆盖率下的产污过程,分析了典型降雨过程中氮、磷质量浓度随时间的变化过程以及径流中营养物质的流失规律.结果表明:径流中氮、磷质量浓度受表层土壤营养物的质量分数影响很大,氮、磷质量浓度在产流初期迅速下降,随后下降速度趋于平稳;在多数情况下,径流中硝酸盐氮的质量浓度高于氨氮质量浓度,亚硝酸盐氮的质量浓度很低.在物理机理研究的基础上提出了氮、磷的污染负荷模型.

关键词 非点源污染;氮;磷;人工降雨;数学模型

中图分类号:X131.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)04-0359-05

氮、磷等营养元素对提高农作物的产量至关重要,但是当土壤中的营养物质超过了农作物的需求时,就会造成农业非点源污染,进而引起湖泊和水库等水体的富营养化.2005 年 12 月,太湖流域省界河流水质 18% 为Ⅳ类,18% 为Ⅴ类,36% 为劣于Ⅴ类.太湖富营养化指标总磷平均质量浓度为 0.090 mg/L,总氮平均质量浓度为 1.69 mg/L,氨氮平均质量浓度为 0.36 mg/L.富营养化评价结果显示,太湖 6.7% 的水域为中营养水平,其余 93.3% 的水域为富营养水平^[1].在造成太湖流域水体污染的各种污染源中,农业面源所占比重最大^[2].

农业非点源污染具有影响因素多、产生的随机性大、污染物排放数量不确定等特点,其研究比点源污染更为复杂和困难.为了研究氮、磷等营养物质随降雨径流及土壤侵蚀等途径迁移和转化机理,笔者利用人工降雨系统和大型可变坡土槽,模拟了裸土坡地在不同的径流量、坡度、植被覆盖率及初始土壤营养物质质量分数下的产污过程.

1 材料与方法

1.1 试验装置

人工降雨模拟系统由河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自行研制,主要包括人工降雨系统、土槽系统、土水势监测系统、雨量监测系统和控制系统.大型可变坡土槽长 12 m、宽 3 m、高 1.5 m,土槽纵向中间的挡板将土槽分成南北 2 个面积相等的部分,分别记作 1 号槽和 2 号槽.土槽从 2004 年 8 月初开始装土,每 5 cm 为 1 个填土层,按照干密度 1.40 g/cm³ 的标准进行填装,至 8 月底装土完毕,共计用土 90.7 t.土壤取自南京江心洲由长江冲积母质发育的河沙土,其理化性质见表 1.

表 1 试验土壤主要特性

Table 1 Main properties of experimental soil

土壤类别	孔隙率/ %	土壤密度/ (g·cm ⁻³)	粒径质量分数/%			
			d < 0.005 mm	d = 0.005 ~ 0.050 mm	d = 0.050 ~ 0.100 mm	d = 0.100 ~ 2.000 mm
砂土	48	1.40	7.1	16.4	62.4	14.1

注:d 为粒径.

1.2 采样及分析测定

室内人工降雨试验分 2 个阶段进行.第 1 阶段从 2004 年 9 月 24 日起到 2005 年 12 月 5 日为止,实施人工

降雨9场,第2阶段从2006年8月1日起到2006年11月15日为止,实施人工降雨13场.雨强和坡度均由计算机控制,产流后开始记录时间和收集水样,取水样的时间间隔为5 min或10 min,同时测定出口断面流量.降雨前后均测定表层土壤中营养物的质量分数.

水质测定方法:氨氮采用纳氏试剂比色法^[3],硝酸盐氮采用酚二磺酸分光光度法^[4];亚硝酸盐氮采用分光光度法^[5];总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[6];总磷采用钼酸铵分光光度法^[7].土壤测定方法:铵态氮采用蒸馏法^[8]^[54-55],硝态氮采用酚二磺酸比色法^[8]^[57-58],全氮采用开氏消煮法^[9]^[147-149],全磷采用酸溶—钼锑抗比色法^[9]^[167-169],土壤颗粒分析采用吸管法^[10].

2 结果与讨论

2.1 典型降雨过程中氮、磷质量浓度及径流量随时间的变化过程

非点源污染负荷取决于降雨条件、土地利用方式及下垫面特征等多种因素,任何一个相关条件的微小变化都会对流域出口处的污染负荷过程造成影响.为了分析氮、磷质量浓度在降雨过程中的变化规律以及流量对各种形态氮、磷质量浓度的影响,绘制了各场降雨事件径流中不同形态氮、磷的质量浓度及流量过程,第20060822与20061017场降雨的氮、磷质量浓度变化过程如图1所示.

a. 为了揭示不同的初始土壤营养物质质量分数对径流中相应污染物质量浓度的影响,在20060822场降雨前一天于土槽表面喷洒了氯化铵及磷酸二氢钾溶液,其中2号槽的喷洒量为1号槽的2倍.由土样分析可知,2号槽表层土壤中铵态氮、全氮及全磷的质量分数显著高于1号槽的质量分数.由图1可知,第20060822场降雨2号槽径流中氨氮、可溶性磷及总氮、总磷的质量浓度明显高于1号槽相应污染物的质量浓度.可见,表层土壤中营养物的质量分数对径流中相应污染物质量浓度的影响很大.

b. 从图1可以看出,在产流初期,各种形态氮、磷的质量浓度均有一个快速下降的过程,然后质量浓度变化过程趋于平缓.其原因在于产流初期表层土壤中氮、磷的质量分数较高,土-水界面氮、磷的质量浓度梯度很大,土壤水中的氮、磷向地表径流扩散的速度较快,随着扩散过程的持续,表土中氮、磷的质量分数迅速降低,土壤水中的氮、磷向上扩散的速度也很快降低.

c. 在第20061017场降雨的径流中硝酸盐氮质量浓度远高于氨氮质量浓度,但分析土样后发现雨前土壤中硝态氮质量分数略低于铵态氮质量分数.由于绝大多数土壤颗粒在中性条件下均带负电荷,它们与同样带负电荷的硝酸根离子相互排斥,故硝酸根离子更易于溶于水中,而铵根离子则带正电荷,很容易被吸附到土壤颗粒表面.由于上述原因,同等条件下硝酸根离子在土壤水中向上层扩散时经过的路径远小于铵根离子经过的路径,故硝酸根离子扩散速度更快.因此,在土壤硝态氮与铵态氮质量分数相同的情况下,径流中硝酸盐氮质量浓度高于氨氮质量浓度.

d. 在温暖、湿润以及氧气充足的条件下,硝化细菌可以很快将土壤中的亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮,土壤亚硝酸盐氮的质量分数很小,因此径流中亚硝酸盐氮的质量浓度也很低.

2.2 非点源污染负荷模型

2.2.1 模型建立及参数率定

营养物质从土壤表层向河流迁移的过程十分复杂,土壤中营养物的质量分数、径流量、降雨强度、地表坡度、坡长和植被、土壤的成分和结构以及耕作管理制度等诸多因素对营养物质迁移量均有较大影响.第2阶段的人工降雨试验考虑了土壤表层营养物的质量分数、径流量、土槽坡度及地表植被覆盖率在不同水平时对营养物质迁移通量的影响.

相关分析表明,营养物质迁移通量与上述4个因子有较好的相关关系.因此,采用多元回归方法求得了营养物质迁移通量与4个因子的回归方程.营养物质迁移通量的一般表达式为

$$\Phi_i = \lambda_i w(N_i)^{a_i} R_0^{b_i} S_L^{c_i} (1 - d_i C) \quad (1)$$

式中: Φ_i ——第*i*种营养物质的迁移通量, $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; $w(N_i)$ ——表层土壤中第*i*种营养物质的质量分数,%; R_0 ——径流量, mm/h ; S_L ——坡度因子; C ——地表植被覆盖率; λ_i ——影响第*i*种营养物质迁移的其他因子的综合系数; a_i, b_i, c_i, d_i ——常数.

坡度因子 S_L 可采用下式计算:

$$S_L = 65.41 \sin^2 \alpha + 4.56 \sin \alpha + 0.065 \quad (2)$$

式中 α 为土槽坡度.

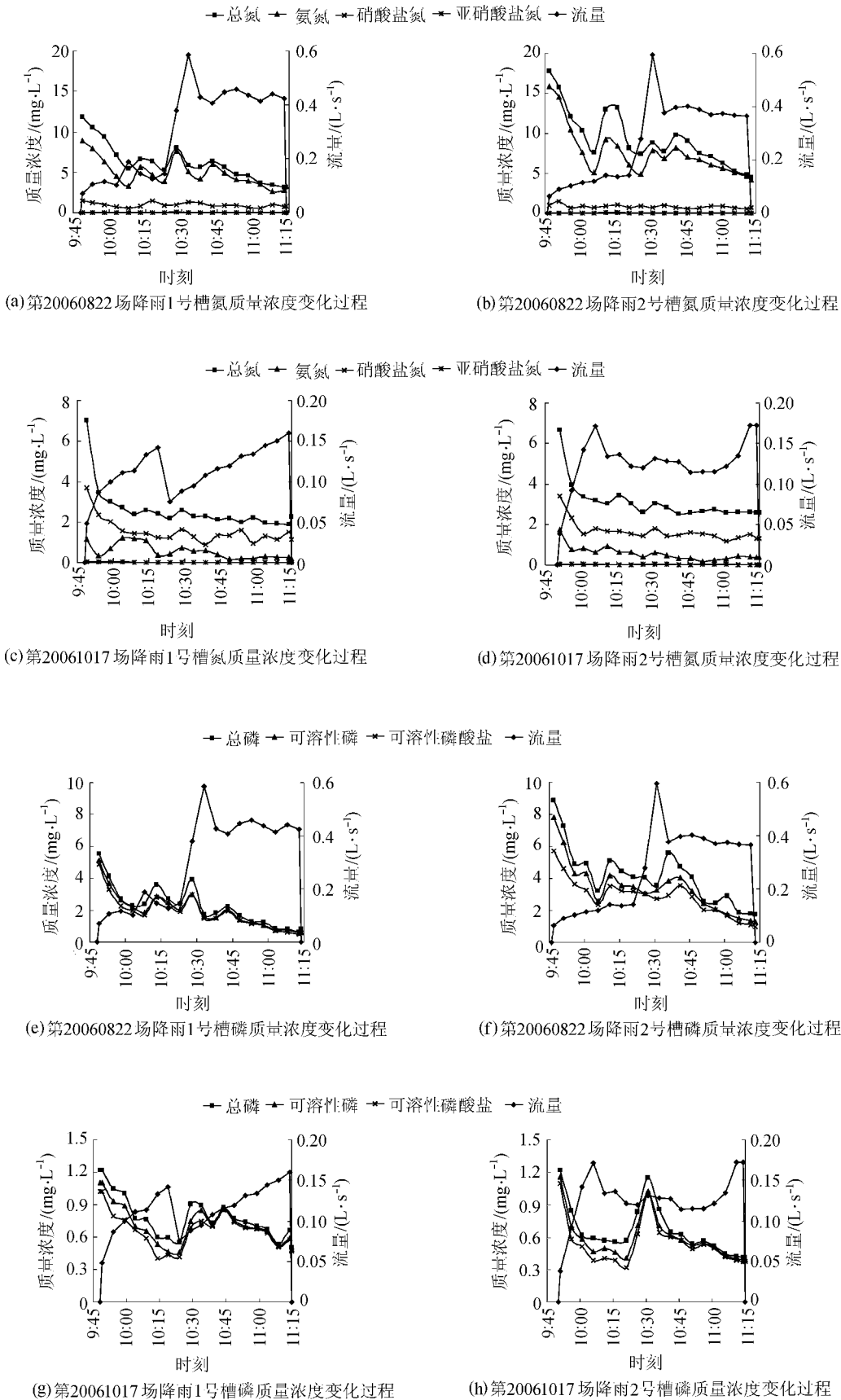


图 1 径流中氮、磷质量浓度随降雨径流变化的过程

Fig.1 Variation of nitrogen and phosphorus concentrations in runoff with precipitation process

对第2阶段共13场降雨的观测资料进行了多元回归统计,结果如下:

$$\Phi_{TN} = 1045(u(NH_4) + 0.5u(NO_3))^{0.62}R_0^{0.97}S_L^{0.10}(1 - 0.1C) \tag{3}$$

$$\Phi_{NH_4} = 4340u(NH_4)^{1.00}R_0^{0.98}S_L^{0.20}(1 - 0.3C) \tag{4}$$

$$\Phi_{TP} = 65u(TP)^{1.00}R_0^{0.95}S_L^{0.30}(1 - 0.2C) \tag{5}$$

式中: Φ_{TN} 、 Φ_{NH_4} 、 Φ_{TP} ——总氮、氨氮与总磷的迁移通量, $g/(hm^2 \cdot h)$; $u(NH_4)$ 、 $u(NO_3)$ 、 $u(TP)$ ——表土中铵态氮、硝态氮和全磷的质量分数, %.

由于硝酸盐氮迁移通量与径流通量之间的相关系数平方值已经达到了0.65,所以可直接用径流通量推算硝酸盐氮的迁移通量,即

$$\Phi_{NO_3} = 9.83R_0 + 54.25 \tag{6}$$

式中 Φ_{NO_3} 为硝酸盐氮的迁移通量, $g/(hm^2 \cdot h)$.

2.2.2 模型验证

为了验证模型结构与参数的合理性,采用式(3)~(6)计算了第1阶段9场降雨氮、磷的迁移通量,第20041206与20041227场降雨氮、磷迁移通量的实测值与模型计算结果如表2所示.

表2 氮、磷迁移通量模型计算结果与实测值的比较

Table 2 Comparison of calculated result of the model with observed flux of nitrogen and phosphorus transfer							
降雨场次	测定项目	1号槽			2号槽		
		测量值/ ($g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)	模拟值/ ($g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)	误差/%	测量值/ ($g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)	模拟值/ ($g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)	误差/%
20041206	总氮	2081	2332	12	1472	1130	-23
	硝酸盐氮	1121	996	-11	898	848	-6
	氨氮	579	743	28	187	219	17
	总磷	158	124	-22	62	61	-2
20041227	总氮	1556	1837	18	1243	1326	7
	硝酸盐氮	785	764	-3	639	674	5
	氨氮	729	588	-19	599	548	-9
	总磷	339	274	-19	53	66	25

从表2可以看出,由模型计算的氮、磷迁移通量与实测值相差不大,模型计算结果的平均误差为14%,最大相对误差为28%.部分场次模型计算值与实测值相差较大可能是由土壤中营养物质分布不均所致.可见该模型参数选取比较合理,具有较强的适应性.

3 结 论

- a. 径流中氮、磷的质量浓度受表层土壤中营养物的质量分数影响很大.
- b. 在产流初期,氮、磷的质量浓度均有一个快速下降的过程,随后质量浓度变化趋于平缓.
- c. 在土壤硝态氮与铵态氮质量分数相等的情况下,径流中硝酸盐氮的质量浓度明显高于氨氮质量浓度.径流中亚硝酸盐氮的质量浓度较低.
- d. 由表层土壤营养物质质量分数、径流通量、坡度及植被覆盖率求得的营养物迁移通量与实测值相差较小,表明模型符合实际情况,便于推广应用.

参考文献:

[1] 太湖流域水资源保护局.太湖流域及东南诸河省界水体水资源质量状况通报[第103期] EB/OL. (2005-12-01) [2006-07-20]. <http://www.tba.gov.cn/wqinform/20051201.pdf>.

[2] 陈荷生,华瑶青.太湖流域非点源污染控制和治理的思考[J].水资源保护,2004(1):33-36.

[3] 国家环境保护局规划标准处. GB/T 7479—1987 水质 铵的测定 纳氏试剂比色法[S].北京:中国标准出版社,2001.

[4] 国家环境保护局规划标准处. GB/T 7480—1987 水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2001.

[5] 国家环境保护局规划标准处. GB/T 7493—1987 水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法[S].北京 :中国标准出版社 , 2001 .

[6] 国家环境保护局规划标准处. GB/T 11894—1989 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].北京 :中国标准出版社 2001 .

[7] 国家环境保护局标准处. GB/T 11893—1989 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].北京 :中国标准出版社 2001 .

[8] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京 :农业出版社 ,1980 .

[9] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京 :中国农业科技出版社 2000 .

[10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海 :上海科学技术出版社 ,1978 469-491 .

Analysis and prediction of nitrogen and phosphorous losses
from slope surface

WANG Jian-zhong , LIU Ling

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

Abstract :By use of artificial precipitation equipment and a large soil tank with changeable slope , the process of non-point pollution in uncovered slopes was simulated under different initial soil nutrient contents , runoff , slopes and plant coverage ratios . The dynamic variation of nitrogen and phosphorus concentrations with time in typical precipitation process and the law of nutrient losses in runoff were analyzed . The result shows that the nitrogen and phosphorous concentrations in runoff are greatly affected by mass fraction of nutrients in surface soil , and that the nitrogen and phosphorus concentrations decrease sharply at the initial stage of runoff generation , and then the rate of decrease approaches to a stable state . Under most circumstances , the concentration of nitrate-nitrogen in runoff is higher than that of ammonia-nitrogen , and the concentration of nitrite-nitrogen is relatively low . Finally , a mathematic model for estimating the amounts of nitrogen and phosphorus transfer was developed based on the study of physical mechanism .

Key words :non-point pollution ; nitrogen ; phosphorus ; artificial precipitation ; mathematic model

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 ,CN32-1439/TV ,ISSN1006-7647 ,双月刊)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 ,主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文 ,设有研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目 ,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读 .

《水利水电科技进展》由邮局发行 ,邮发代号 28-244 ,2008 年每期定价 10 元 ,全年 6 期共计 60 元 .读者亦可直接向编辑部订阅 .欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单 .编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部 .联系电话 :025-83786335 ,E-mail :jz@hhu.edu.cn ,http ://kkb.hhu.edu.cn .

汇款时务请注明“订水利水电科技进展” .