

紫色土丘陵区非耕作季节不同种植模式下 N P 流失模型

罗 艺,吴福忠,杨万勤,王旭熙

(四川农业大学林学院,四川 雅安 625014)

摘 要:为了解长江上游紫色土丘陵区非耕作季节 N、P 的流失特征,以长江上游紫色土丘陵区 4 种典型种植模式为研究对象,采用野外调查、室内分析和模型模拟相结合的方法,于 2008 年 11 月 1 日至 12 月 31 日研究了耕作季节后不同种植模式在每次降雨后的 N、P 流失特征及不完全混合模型的综合应用效果。结果表明,非耕作季节,紫色农耕地均表现出较大的 N、P 流失量,最大分别达到 $(0.491\pm 0.079)\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $(12.604\pm 13.173)\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。N 的流失量均大于 P 的流失量,并且 N、P 主要通过地表径流流失。不同种植模式间 N、P 流失量有较大的差异,其中生姜种植模式的 N、P 流失量最大,大豆种植模式最小。不完全混合模型可很好应用于研究区域农耕地 N、P 流失。模型的有效系数均达到 0.6 以上,其中模拟 N 流失的有效系数高达 0.958。这表明,非耕作季节农耕地 N、P 流失是区域农业面源污染的重要来源,不完全混合模型可成为该区域 N、P 流失预报和面源污染控制的重要手段。

关键词: N、P 流失,紫色土,不完全混合模型,种植模式,非耕作季节

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)04-0717-08

The Model of N and P Losses from Different Cropping Modes in the Purple Hilly Region During the Non-cropping Season

LUO Yi, WU Fu-zhong, YANG Wan-qin, WANG Xu-xi

(Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract N and P losses aroused by agriculture activities are important origins in regional water pollution, and then limit sustainable development of society and environment. However, more attentions have been given to the losses of N and P in the cropping season, but little information has been focused on those in different cropping modes and in the non-cropping season. In order to characterize the N and P losses in the purple hilly region of the upper Yangtze River during the non-cropping period, therefore, the N and P loss characteristics of 4 representative cropping modes in purple hilly region, and the application of their modeling simulation were studied just after cropping season from November 1 to December 31, 2008. Losses of N and P were relative serious in non-cropping season in the studied cropland, whose maximum values were $(0.491\pm 0.079)\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $(12.604\pm 13.173\times 10^{-3})\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. N losses were significantly higher than P losses in these studied croplands. Compared to infiltration flow, runoff flow was the main pathway during N and P losses. Obvious differences of N and P losses were found in different cropping modes. Ginger cropping modes had the maximum N and P losses via both runoff and infiltration, whereas soybean cropping modes exhibited the minimum values. Additionally, the semi-mixture model could be efficiently applied in forecasting N and P losses of these cropping lands in this region. The simulated effected coefficients were higher than 0.6, which reached to 0.958 for simulating N losses. The results demonstrated that the losses of N and P in non-cropping season could also be the important resources in agricultural non-point pollution in the purple hilly region at the upper reaches of Yangtze River. The incompleteness mixture model could be the regional efficient model in forecasting N and P losses, which provided the potential effective way in controlling agricultural non-point pollution in this purple hilly region.

Keywords N and P losses; purple soil; semi-mixture model; cropping mode; non-cropping season

收稿日期 2009-09-14

基金项目 四川省重点公益性项目(2007NGY006);国家科技支撑计划课题(2008BADCB2B01, 2008BAD98B03-07);四川高等学校科技创新重大培育计划(2007ZZ024, 09ZZ023)

作者简介 罗 艺(1984—)男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为污染生态。E-mail: lino2341776@126.com

通讯作者 杨万勤 E-mail: scyangwq@163.com

农业生产活动造成的 N、P 流失已经成为区域水体富营养化、水质恶化、水源紧缺、生态环境破坏和制约经济健康持续发展的重要原因^[1-5]。耕作制度和耕作方式的差异引起的土壤结构、养分存留、地表特征等的变化可能改变 N、P 流失特征^[6-8]，但已有的研究更加关注单一种植模式下作物耕作季节 N、P 流失特征^[9-13]，而有关不同种植模式间的 N、P 流失特征研究相对较少。非耕作季节地表植被覆盖和保水保肥管理措施的缺乏也可能使其具有相对较大的流失量，但过去的研究很少关注到非耕作季节的流失特征。这极大地限制了对区域 N、P 流失特征的认识以及农业面源污染的控制和治理。

紫色土丘陵区是长江上游最为重要的耕地区域之一，区内农业人口密集、农业活动集中^[14]，耕作制度季节性明显。由于紫色土是一类成土时间较短、成土过程以物理风化为主的岩性土，具有矿质营养丰富但土壤母质疏松、土层浅薄和岩层松软等特点，因而在自然和人类活动的干扰及其叠加效应下，该区已成为长江上游水土流失最严重的地带，是三峡库区最主要面源污染来源^[15-16]。其中，通过农业土壤流失的 N、P 已成为区域水体污染负荷的重要来源，但迄今为止的研究很少关注非耕作季节不同种植模式下 N、P 流失特征，并极少关注模型的综合应用效果^[17-19]。由于不完全混合模型为面源污染模型 CREAMS^[20-21]和 AGNPS^[22]模型所用，可用性强，形式简单，参数较易得，可能能够较好地应用于该区降雨后的 N、P 流失模拟与预报，但一直缺乏相关研究^[23]。因此，以长江上游紫色土丘陵区 4 种典型种植模式为研究对象，采用野外调查、室内分析和模型模拟相结合的方法，研究长江上游紫色土丘陵区 N、P 流失特征以及模型模拟效果，揭示其特点和规律，以期为区域污染控制和合理耕作管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川盆地西部和岷江下游的五通桥区(东经 103°39'~103°56'；北纬 29°17'~29°31')，地处川西南四川盆地平原与丘陵结合部，幅员面积 465 km²，是典型的人口稠密区和紫色丘陵区域，也是重要的农业生产基地，2004 年成为国家可持续发展实验区。该区属于中亚热带湿润气候，气候温和，四季分明，年平均气温 17.4℃，最低气温 -2.2℃，最高温度 37.6℃，年降水量 1 404.7 mm，相对湿度 80%，无霜期

334.5 d，年日照时数 1 119.7 h，耕作具有显著的季节性。区内江河密布，河流面积达 2 000 hm² 以上。近年来，受不合理的农业耕作方式和管理制度的影响，农业面源污染日趋严重。

1.2 样地设置

基于本底调查，选取紫色丘陵区普遍种植、环境条件基本一致的水稻-紫云英(模式 1)、大豆(模式 2)、生姜(模式 3)、玉米-红薯(模式 4)等 4 种典型耕作模式(E 103°41'67"，N 29°26'43"，asl 379 m)，根据实际地块大小，在每一模式下设置固定监测样地，样地特征如表 1 所示。

表 1 样地特征

Table 1 Characteristics of sampling cropping lands

模式	面积/m ²	坡度	坡向	土壤类型	土壤容重/ g·cm ⁻³	pH	全 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹
模式 1	102	3.0°	NE15°	紫 色 土	1.34	6.7	0.90	0.90
模式 2	55	5.8°	NE60°		1.48	6.8	0.70	1.10
模式 3	56	6.3°	NE36°		1.26	7.3	1.00	0.90
模式 4	108	4.7°	NE98°		1.31	7.4	1.10	1.20

在 4 种不同种植模式的农田均分别设置 5 个集水面积为 0.194 m² 的大气降水和 0.1 m² 的渗透水收集装置，根据样地地形特征，设置长 2 m，集水面积分别为 20.35 m²(模式 1)、9.81 m²(模式 2)、10.36 m²(模式 3)和 23.25 m²(模式 4)的地表径流收集装置。

1.3 取样与实验分析

2008 年，待主要农作物收获后，于 11 月 1 日至 12 月 31 日，监测降雨事件，测定降雨量、地面径流量和渗透流量，不足 5 mL 产流量的降雨事件计入下一次降雨事件，并取样送回实验室。样品分为同样的两批，一批加入 5 滴浓硫酸防止 NH₄-N 的损失，固定样品以备 N 含量测定，另一批加入 3 滴氯仿稳定样品用于 P 含量测定，放入 4℃ 冰箱保存，48 h 内分析完全，TOC 测量仪测定总 N 含量，钼锑抗比色法测定总 P 含量。土样中速效 N、P 的测定方法：水解 N 采用碱液扩散法测定，有效 P 采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定^[24]。研究期间共监测到降雨事件 10 次，其中大于 5 mL 产流量的降雨事件 8 次，具体降雨及径流特征见表 2。

1.4 模型构建

本研究为非耕作季节 4 种不同种植模式下次降雨后农耕地 N、P 流失模型，研究期间没有施肥输入，因而选用不完全混合模型。通过 Fortran 语言编程取定参数，模拟次降雨后不同种植模式下 N、P 流失量，

表 2 2008 年 11 月 1 日至 12 月 31 日降雨、径流及下渗特征

Table 2 Rainfall, runoff and infiltration from November 1 to December 31, 2008

降雨日期	降雨量/ mm	降雨持续 时间/h	模式 1/L·hm ⁻²		模式 2/L·hm ⁻²		模式 3/L·hm ⁻²		模式 4/L·hm ⁻²	
			径流量	下渗量	径流量	下渗量	径流量	下渗量	径流量	下渗量
2008-11-01	3.21	6	34.40	27.03	14.74	37.84	38.49	53.24	25.33	43.55
2008-11-02	24.37	26	584.77	840.29	270.27	383.29	384.93	990.99	411.56	476.45
2008-11-16	4.17	5	42.75	39.21	25.38	44.23	44.72	69.88	34.71	48.16
2008-11-21	5.80	7	53.80	55.04	32.56	54.05	66.34	77.15	43.67	57.38
2008-11-24	4.37	6	49.63	41.28	27.02	48.16	49.96	72.89	36.54	56.44
2008-12-04	2.47	8	18.67	22.60	12.29	20.15	29.48	29.48	18.21	23.18
2008-12-16	4.78	7	50.61	52.29	29.48	48.55	52.42	73.71	38.76	51.29
2008-12-31	20.89	13	488.45	471.75	73.71	261.43	304.67	425.88	281.46	368.68

为农耕地 N、P 流失预测提供可靠依据。

1.4.1 模型变量和参数

非耕作季节降雨期间主要系统状态变量有：降雨中的 N、P 浓度 $C_i(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ ，混合层厚度 $d(\text{mm})$ ，混合前土壤 N、P 初始浓度 $C(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ ，下渗期间混合层 N、P 的平均浓度 $\bar{C}_1(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ ，产流期间混合层 N、P 的平均浓度 $\bar{C}_2(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ ，土壤容重 bd ，土壤孔隙度 por ，下渗量 $F(\text{mL})$ ，径流量 $Q(\text{mL})$ 。

模型需要的相关技术参数有：N、P 向下释放系数 EXK_1 和向径流释放系数 EXK_2 。

1.4.2 状态变量递进模型表达

由于状态变量递进模型是基于土壤颗粒对 N、P 具有一定的吸附能力，达到吸附平衡，在水作为迁移动力进行迁移的理论^[20-21]。该实验区域表现出土壤表层是 N、P 大量淋溶的层位，只有可溶性的 N、P 才能渗透到更深的土层。颗粒态 N、P 只能由地表径流迁移，溶解态 N、P 可以通过壤中流迁移，符合模型的特征。该模型的在各个时刻的表达式分述如下。

次降雨初始时刻，混合层内的溶质浓度变化与雨水输入的溶质浓度、下渗量关系为：

$$\frac{dc}{dt} = k_1 f(t)(C_r - C) \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{EXK_1}{d \times por} \quad (2)$$

$$por = 1 - \frac{bd}{2.65} \quad (3)$$

式中 C 为某时刻混合层内的溶质浓度 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $f(t)$ 为下渗函数。

下渗期间混合层溶质的平均浓度为：

$$\bar{C}_1 = [(C_0 - C_r)/k_1 F][1 - \exp(-k_1 F)] + C_r \quad (4)$$

产流期间混合层溶质的平均浓度为：

$$\bar{C}_2 = [(C_1 - C_r)/k_1 Q][1 - \exp(-k_2 Q)] + C_r \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{EXK_2}{d \times por} \quad (2)、(6)$$

式中 C_0 为混合前土壤溶质初始浓度 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

产流过程中迁移到径流中的溶质总量为：

$$RO = \bar{C}_2 \times EXK_2 \times Q \times 0.01 \quad (7)$$

综合以上模型，N 迁移到径流中的溶质总量具体的模型为：

$$RON = (solN - rainN)e^{-k_1 F} (1 - e^{-k_2 Q}) + 0.01 \times C_r \times Q \times EXKN_2 \quad (8)$$

P 迁移到径流中的溶质总量具体的模型为：

$$ROP = (solP - rainP)e^{-k_1 F} (1 - e^{-k_2 Q}) + 0.01 \times C_r \times Q \times EXKP_2 \quad (9)$$

模型中 $solN$ 、 $solP$ 分别为土壤表层的速效态 N、P 总量 $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ ， $rainN$ 、 $rainP$ 分别为雨水中 N、P 总量 $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ ^[20]。

EXK_1 和 EXK_2 为模型假设的参数，用来反映土壤溶质向下渗水流和地表径流释放的能力。通过 CREAMS 模型中假定两个值均小于 1.0，并且 $EXK_1 > EXK_2$ 。本次模型也采用这种假定，根据研究区域不同种植模式下的农耕地径流的养分数据，来确定 EXK_1 和 EXK_2 的数值，通过模型 2 和 6 确定 k_1 和 k_2 的值。通过 Fortran 语言编写程序将 k_1 和 k_2 的取值区间划分为若干等分，然后从中逐个取值代入模型 8、9 中运算，选取模型效果最佳值。

判断模型效果的指标为模型有效系数，该指标是由 Nash 等^[25]提出来评价实测值和模拟值的接近程度。计算公式为：

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_{obsi} - R_{cdi})^2}{\sum (R_{obsi} - \bar{R}_{obs})^2} \quad (10)$$

式中 R_{obsi} 和 R_{cdi} 分别为第 i 个实测养分流失量和模

拟养分流失量 $\overline{R_{obs}}$ 为实测养分流失量的平均值。

2 结果与分析

2.1 实际 N、P 流失量

研究期间,每次降雨 N 的平均输入量为 $(4.701 \pm 0.889) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,每次降雨导致的 N 平均流失量表现为:模式 3 $[(0.491 \pm 0.079) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 1 $[(0.285 \pm 0.042) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 4 $[(0.210 \pm 0.046) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 2 $[(0.041 \pm 0.011) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ (表 2)。其中以模式 3 下渗的 N 流失量 $[(0.194 \pm 0.075) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 最大,下渗 N 的最小流失量 $[(0.017 \pm 0.009) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 出现在模式 2。坡面径流 N 的流失量仍然是以模式 3 最大 $[(0.297 \pm 0.083) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$,模式 2 最小 $[(0.024 \pm 0.014) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 。

每次降雨中 P 的平均输入量为 0,每次降雨导致的 P 平均流失量表现为:模式 3 $[(12.604 \pm 13.173 \times 10^{-3})$

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 1 $[(8.706 \pm 11.129 \times 10^{-3}) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 4 $[(6.763 \pm 8.647 \times 10^{-3}) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 2 $[(0.285 \pm 0.087 \times 10^{-3}) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ (表 3)。与 N 流失量相似,以模式 3 坡面径流和下渗 P 的流失量最大,分别为 $[(7.556 \pm 9.237) \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 和 $[(5.048 \pm 4.977) \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$,模式 2 坡面径流和下渗 P 流失量均最小。

2.2 模拟 N、P 流失量

图 1 显示 4 种常见种植模式下次降雨后实测与模拟的 N 流失量的比较,数据能较均匀地分布在 1:1 线的周围。图 2 显示 4 种常见种植模式下次降雨后实测与模拟的 P 流失量的比较,数据与 1:1 线的距离较大。可以看出,模拟次降雨后的 N 总流失量表现为:模式 3 $[(0.465 \pm 0.111) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 1 $[(0.262 \pm 0.066) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 4 $[(0.206 \pm 0.075) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 2 $[(0.046 \pm 0.020) \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ 。模拟次降雨后的 P 总流失量

表 2 不同种植模式下次降雨导致的 N 实际流失量

Table 2 N losses of sampling cropping modes in each rainfall

统计项目		次降雨 N 输入量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	径流 N 流失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	下渗 N 流失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	N 总流失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
模式 1	平均值		0.141±0.039	0.144±0.049	0.285±0.087
	最大值	4.701	0.176	0.187	0.363
	最小值		0.095	0.07	0.165
模式 2	平均值		0.024±0.014	0.017±0.009	0.041±0.011
	最大值	4.701	0.047	0.031	0.078
	最小值		0.009	0.006	0.015
模式 3	平均值		0.297±0.083	0.194±0.075	0.491±0.079
	最大值	4.701	0.439	0.314	0.753
	最小值		0.235	0.109	0.344
模式 4	平均值		0.121±0.046	0.089±0.047	0.210±0.046
	最大值	4.701	0.171	0.139	0.310
	最小值		0.065	0.025	0.090

表 3 不同种植模式下次降雨导致的 P 实际流失量

Table 3 P losses of sampling cropping modes in each rainfall

统计项目		次降雨 P 输入量/ $10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	径流 P 流失量/ $10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	下渗 P 流失量/ $10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	P 总流失量/ $10^{-3} \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
模式 1	平均值		4.506±5.593	4.200±5.538	8.706±11.129
	最大值	0	15.207	14.764	29.971
	最小值		0.109	0.085	0.194
模式 2	平均值		1.981±2.076	1.431±2.394	3.430±3.412
	最大值	0	6.486	6.783	9.644
	最小值		0.133	0.079	0.298
模式 3	平均值		7.556±9.237	5.048±4.977	12.604±13.173
	最大值	0	22.203	10.715	32.458
	最小值		0.243	0.089	0.440
模式 4	平均值		4.145±5.514	2.618±3.203	6.763±8.647
	最大值	0	14.384	8.357	21.386
	最小值		0.274	0.225	0.500

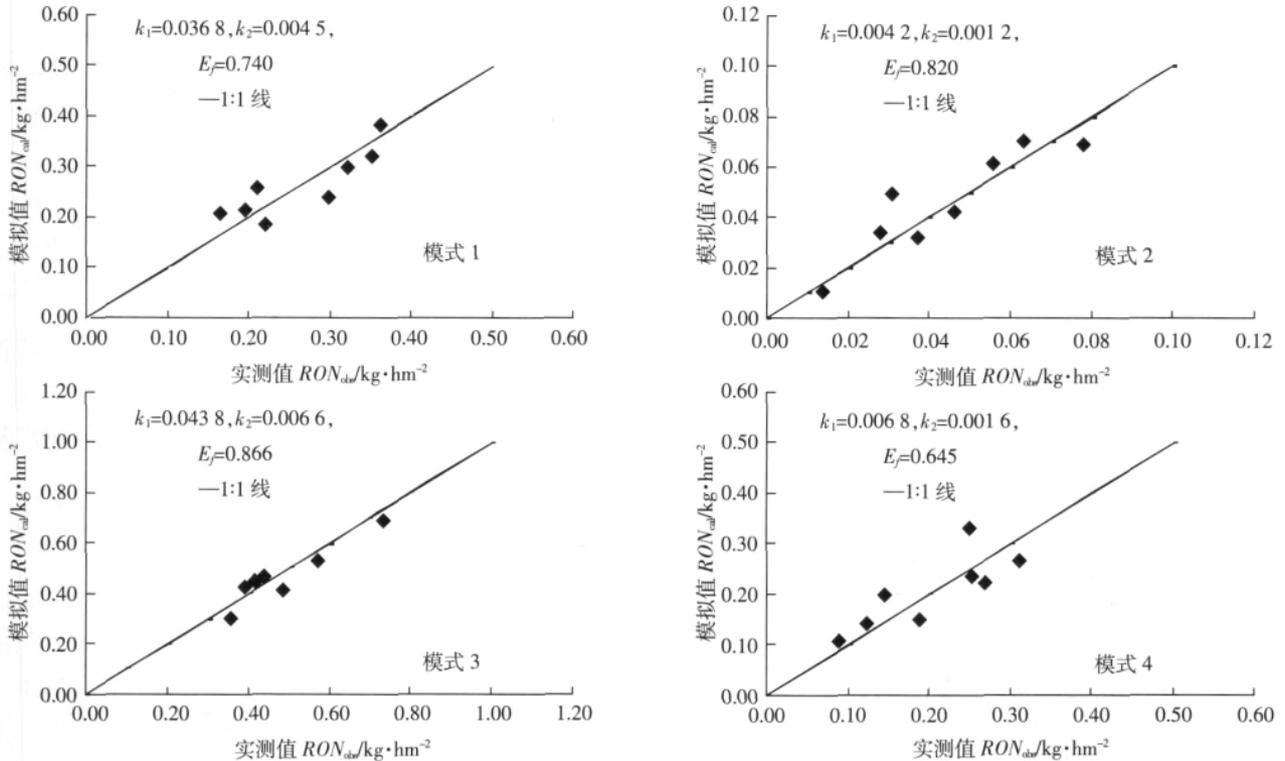


图 1 4 种不同种植模式下次降雨后实测与模拟的 N 流失量比较

Figure 1 The reality and simulation losses of N in 4 cropping modes in each rainfall (n=8)

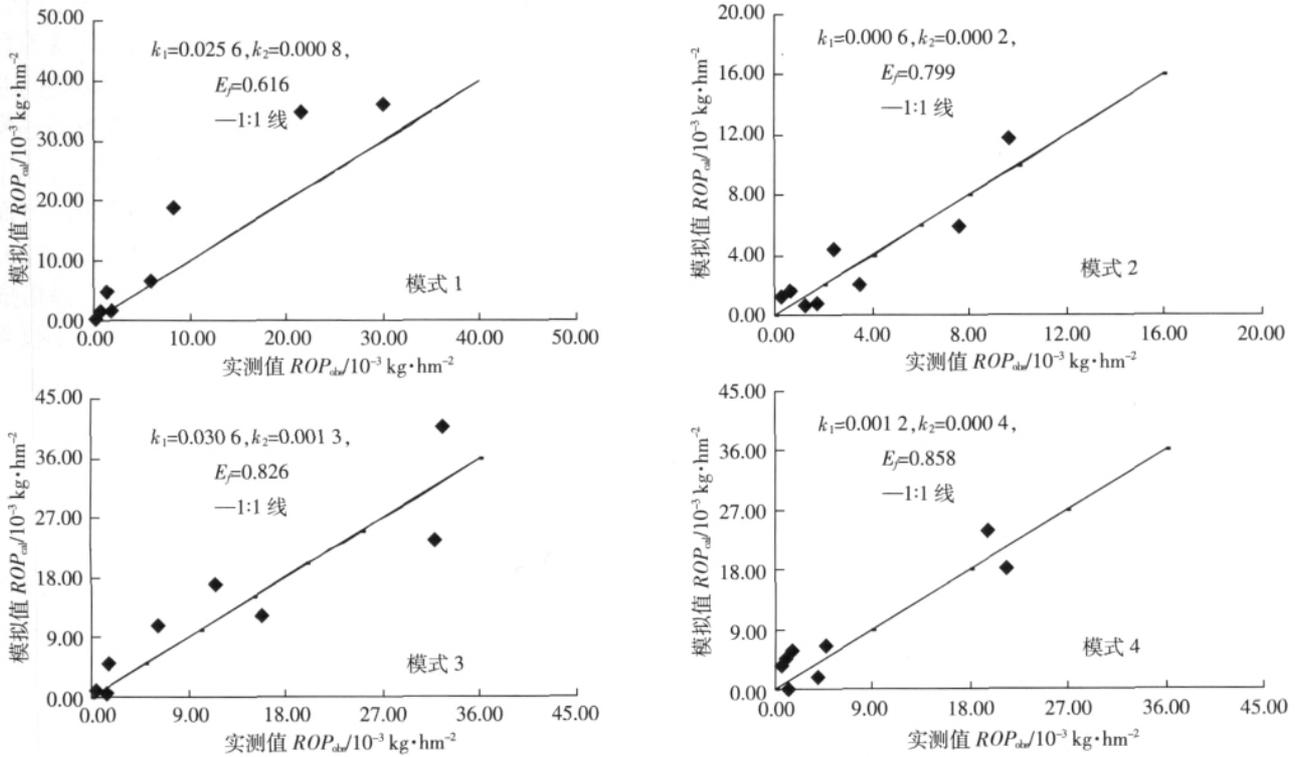


图 2 4 种不同种植模式下次降雨后实测与模拟的 P 流失量比较

Figure 2 The reality and simulation losses of P in 4 cropping modes in each rainfall (n=8)

表现为: 模式 3 $[(13.783 \pm 13.470) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 1 $[(12.966 \pm 15.000) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 4 $[(7.990 \pm 8.392) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}] >$ 模式 2 $[(3.457 \pm 3.876) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}]$ (表 4)。

表 4 不同种植模式下次降雨后 N、P 模拟流失结果

Table 4 The simulation N and P losses of 4 cropping modes in each rainfall

模式	N				P			
	总流失量平均值/kg·hm ⁻²	E_f	EXK_1	EXK_2	总流失量平均值×10 ⁻³ /kg·hm ⁻²	E_f	EXK_1	EXK_2
模式 1	0.262±0.066	0.740	0.182	0.022	12.966±15.000	0.616	0.126	0.004
模式 2	0.046±0.020	0.820	0.019	0.005	3.457±3.876	0.799	0.003	0.001
模式 3	0.465±0.111	0.870	0.230	0.035	13.783±13.470	0.826	0.161	0.007
模式 4	0.206±0.075	0.645	0.034	0.008 2	7.990±8.392	0.858	0.006	0.002

由 Fortran 程序计算出的最佳 k_1 、 k_2 取值下 4 种不同种植模式对 N、P 的模型有效系数均能达到 0.6 以上,说明不完全混合模型可以较好地定量计算 4 种不同种植模式下次降雨后 N、P 的流失量,并且在模式 3 下应用的效果更好, E_f 值达 0.866。无论是 N 还是 P,模式 3 的 EXK_1 和 EXK_2 最大,模式 2 的 EXK_1 和 EXK_2 最小 4 种模式下 EXK_1 和 EXK_2 的排序为:模式 3>模式 1>模式 4>模式 2,且对于向下渗水流和地表径流释放的能力, N 都要强于 P。

2.3 模型综合应用与参数修正

将不同种植模式下用相同的参数 k_1 和 k_2 来模拟农耕地养分流失量,对比结果如图 3 所示。

整个研究区域的次降雨后的 N 流失模型参数为 $k_1=0.019 6$ $k_2=0.002 8$,模拟结果良好,模型有效系数达 0.958,通过 k_1 和 k_2 计算得到研究区域 N 释放系数 EXK_1 和 EXK_2 平均为 0.096、0.014,与表 3 的数值比较接近。由图 3 可见 4 种不同种植模式下的数据均能较均匀而紧密的分布在 1:1 线的周围,说明该模型综合应用在研究区域对 N 的流失量预报效果很好。

对于研究区域的 P 流失而言,每次降雨后的流失模型使用参数 $k_1=0.020 2$ $k_2=0.000 7$,模型计算结果良好,模型有效系数为 0.679,在不同种植模式单独的

P 流失模型有效系数之间。并且通过 k_1 和 k_2 计算得到研究区域 P 释放系数平均为 0.099、0.003,与表 3 中的数值接近。说明该模型综合应用在研究区域次降雨后的 P 的流失量预报效果较好。

3 讨论

本项研究结果表明,不同耕作模式下耕作季节后均表现出较大的 N、P 流失量,但耕作模式间表现出较大差异。这一方面说明非耕作季节紫色农耕地 N、P 流失也是农业面源污染不可忽视的重要来源;另一方面也暗示着合理的耕作制度可以减小农耕地 N、P 流失量。另外,本研究从不完全混合模型的基本原理出发,分析了影响农耕地 N、P 流失水文条件和土地管理活动 2 个主导因素,并从非耕作季节无作物覆盖且无 N、P 肥的施放等方面考虑 N、P 流失过程的空间差异性,建立了研究区域次降雨后的 N、P 流失动态模型,通过验证,模拟结果与实际结果吻合度高,可以用来预测紫色丘陵农耕地 N、P 流失量。这为区域面源污染预报和控制提供了潜在可以实践的有效方法。

降雨事件侵蚀土壤导致水土及养分流失是形成区域面源污染的主要形式之一^[26]。养分流失量不仅受到降雨强度、持续时间和频度等因子决定,而且也与土壤结构特征、地表植被、土地管理和外源养分输入

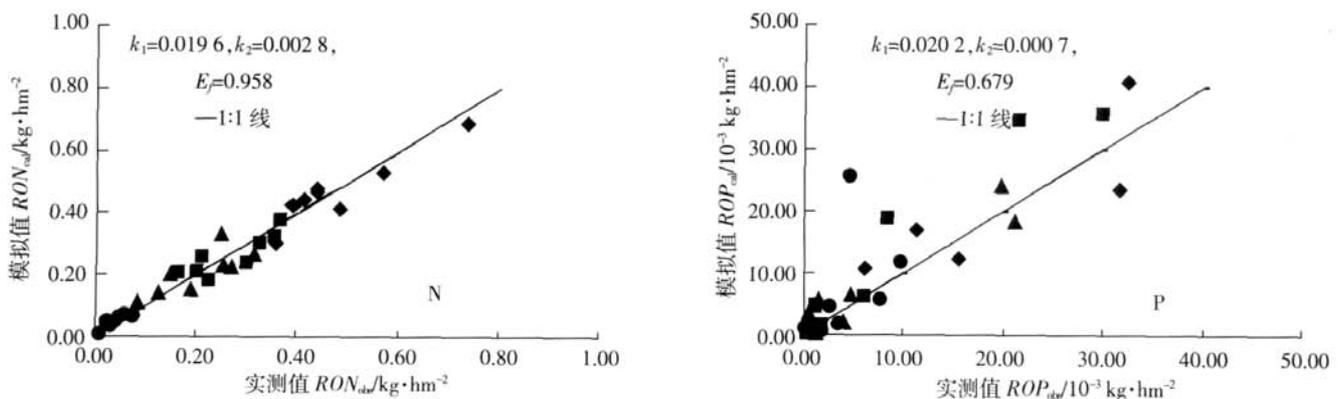


图 3 拟定的 N、P 流失量模型实测与计算值比较

Figure 3 The relationships between reality and simulation losses of N and P

等密切相关^[27-30]。非耕作季节地表植被相对较低、水肥管理措施相对缺乏且无人为养分输入, 这为研究自然降雨形成的养分流失提供了良好的平台, 并且意味着非耕作季节可能具有较大的养分流失量。本研究进行期间, 非耕作季节降雨导致了相对较大的 N、P 流失量充分证明了这一点。本研究中 N、P 流失主要以坡面径流为主, 这与非耕作季节土壤翻耕管理较少, 下渗力相对较小有关。另外, 由于耕作季节不同耕作模式下的地表状况差异导致径流与养分的作用强度不同, 土壤养分向径流的释放能力也随之不同^[16], 因而不同耕作模式下表现出不同的 N、P 流失量。根据我国农业行业标准 NY/T 5226—2004《无公害食品生姜生产技术规程》, 生姜种植需要多次深耕、翻晒、中耕等管理措施, 尽管非耕作季节缺少管理, 但其土壤松散度仍然相对较大, 因而导致在降雨的冲刷下, N、P 流失量最大。然而, 大豆常常是免耕种植, 土壤孔隙度较小, 因此受侵蚀性较小, N、P 流失量也相对较小。这些结果说明合理免耕种植可以在一定程度上减少 N、P 流失, 进而减小区域农业面源污染。同时, 养分元素性质的差异也会导致养分流失量的差异。本研究结果显示, 无论下渗径流还是地表径流 N 流失量均大于 P。这主要因为土壤的固 P 作用相对较强, 并且土壤中 P 多以颗粒态存在, 迁移率很小, 不易淋溶下移^[17]; 而土壤中的水溶性 N 多为硝态氮和铵态氮, 移动性强, 不易被土壤吸附^[13], 易流失。

从不完全模型的拟合效果也可以得出相同的结论。首先 $EXK_1 > EXK_2$, 说明 N、P 向地表径流释放能力强于向下渗透释放能力; 无论是 N 还是 P, 模式 3 的 bd 最小 por 最大 EXK_1 和 EXK_2 最大, 模式 2 的 bd 最大 por 最小 EXK_1 和 EXK_2 最小, 说明生姜种植地在每次降雨后的 N、P 流失相对较大, 而大豆种植地每次降雨后的 N、P 流失相对较小。这与实际观察结果基本一致。其次 $EXKN_1 > EXKP_1$, $EXKN_2 > EXKP_2$ 说明无论是向径流还是向下渗透的释放能力 N 都要比 P 大, 这与实际观测的次降雨后 N、P 流失情况也是一致的。更为有趣的是, 模型有效拟和系数均大于 0.6, 且对 N 流失的拟合系数达 0.958。可见, 不完全混合模型可以较好地定量计算研究区域的 N、P 流失量, 并在生姜模式种植地可以得到最好的应用效果。模拟 N、P 流失模型形式相近但参数不同, 使用方便。该模型在作物耕作季节还需考虑 N、P 肥施用等因素产生的影响, 因此在没有其他实验数据补充和验证的情况下, 不完全混合模型在研究区域对 N、P 流失量

的预报具有较强的可用性。

4 结论

长江上游紫色土丘陵区在非耕作季节 N、P 流失仍比较严重, 不完全混合模型可很好地拟合并预测该区域农耕地 N、P 流失量。同时, 耕作模式对 N、P 流失有较大影响, 其中生姜种植地表现出最为严重的 N、P 流失特征, 而免耕大豆种植地表现出相对较小的流失量。这些结果不仅为区域面源污染预报以及 N、P 流失机制提供了很好的借鉴, 而且为合理选择耕作模式、优化管理以控制并减少区域面源污染提供重要基础理论支撑。

参考文献:

- [1] Maciej J D. Activities in non-point pollution control in rural areas of Poland[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 14(4): 429-434.
- [2] Yulianti J S, Lence B J, Johnson G V, et al. Non-point source water quality management under input information uncertainty[J]. *Journal of Environmental Management*, 1999, 55: 199-217.
- [3] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. *环境科学*, 2000, 21(3): 98-100.
CHEN Li-ding, FU Bo-jie. Farm ecosystem management and control of nonpoint source pollution[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000, 21(3): 98-100.
- [4] 龙天渝, 李继承, 刘腊美. 嘉陵江流域吸附态非点源污染负荷研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(7): 1811-1817.
LONG Tian-yu, LI Ji-cheng, LIU La-mei. Adsorbed non-point source pollution load of Jialing river basin[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(7): 1811-1817.
- [5] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2696-2702.
ZHOU Hui-ping, GAO Chao. Identifying critical source areas for non-point phosphorus loss in Chaohu watershed[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(10): 2696-2702.
- [6] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1353-1358.
JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jia-liang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1353-1358.
- [7] 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆盖变化对区域生态环境的影响[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 66-75.
GUO Xu-dong, CHEN Li-ding, FU Bo-jie. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in regional ecological environment[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(6): 66-75.
- [8] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 525-533.
ZHU Bo, WANG Tao, KUANG Fu-hong, et al. Characteristics of nitrate

- leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3) :525-533.
- [9] 吕唤春, 薛生国, 方志发, 等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. *中国地质*, 2004, 31 :112-117.
- LV Huan-chun, XUE Sheng-guo, FANG Zhi-fa, et al. Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qian-daohu drainage area[J]. *Chinese Geology*, 2004, 31 :112-117.
- [10] Smith D R, Owens P R, Leytem A B, et al. Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1) :131-137.
- [11] Ranjith P U, Peter P M. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with claypan soils[J]. *Agricultural Ecosystems and Environment*, 2006, 117 :39-48.
- [12] Drewry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 :879-887.
- [13] Dossa E L, Kouma M, Diedhiou I, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of semiarid Sahelian soils amended with native shrub residues[J]. *Geothermal*, 2009, 148 :251-260.
- [14] 何毓蓉. 中国紫色土[M]. 北京 :科学出版社, 2003 :3-10.
- HE Yu-rong. Purple soils in China[M]. Beijing :Science Press, 2003 :3-10.
- [15] 杨万勤, 张 健. 土壤生态研究[M]. 成都 :四川科学技术出版社, 2008 :67-79.
- YANG Wan-qin, ZHANG Jian. Researches on soil ecology[M]. Chengdu :Sichuan Science & Technology Press, 2008 :67-79.
- [16] 沈珍瑶, 刘瑞民, 叶 闽, 等. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京 :科学出版社, 2008 :164-167.
- SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min, YE Min, et al. Characteristics and principle of agricultural non-point source pollution in the upper reaches of Yangtze River[M]. Beijing :Science Press, 2008 :164-167.
- [17] Vassilis Z A. Simulation of water and nitrogen dynamics in soils during waste water applications by using a finite-element model[J]. *Water Resources Management*, 1993, 7 :237-251.
- [18] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35 :735-743.
- [19] 高 扬, 朱 波, 周 培, 等. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4) :1371-1376.
- GAO Yang, ZHU Bo, ZHOU Pei, et al. Non-point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4) :1371-1376.
- [20] Knisel W G. CREAMS :A field scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural management systems[R]. Conservation Report USDA-SEA, 1980.
- [21] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. *环境科学*, 2002, 23(3) :124-128.
- HU Xue-tao, CHEN Ji-ning, ZHANG Tian-zhu. A study on non-point source pollution models[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3) :124-128.
- [22] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS :A non-point source pollution model for evaluating agriculture watersheds[J]. *Soil and Water, Conservation*, 1989, 44(2) :168-173.
- [23] 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 plantation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6) :923-929.
- [24] 国家环保局《水和废水分析方法》编委会. 水和废水分析方法[M]. 北京 :中国环境科学出版社, 1989 :252-286.
- Editorial Committee of State Environment Protection Administration for *Analysis Methods of Water and Waste-water*. Analysis methods of water and waste-water[M]. Beijing :Chinese Environmental Science Press, 1989 :252-286.
- [25] Nash J E, Sutcliffe V. River flow forecasting through conceptual models I :A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10 :282-290.
- [26] 徐泰平, 朱 波, 汪 涛, 等. 不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(6) :139-144.
- XU Tai-ping, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Nutrient loss from slope cropland of purple soil under different rainfall erosivities[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6) :139-144.
- [27] 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[J]. *土壤*, 2005, 37(1) :48-51.
- DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan. Effect of fertilizer application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff[J]. *Soils*, 2005, 37(1) :48-51.
- [28] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(6) :506-510.
- LI Jun-ran, CHEN Li-ding, GUO Xu-dong, et al. Effects of land use structure on non-point source pollution[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(6) :506-510.
- [29] 孟庆华, 杨林章. 三峡库区不同土地利用方式的养分流失研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(6) :1028-1033.
- MENG Qing-hua, YANG Lin-zhang. Nutrient losses in different land use types in the Three Gorge Reservoir Area(TGRA)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6) :1028-1033.
- [30] 刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(12) :2407-2414.
- LIU Rui-min, YANG Zhi-feng, DING Xiao-wen, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(12) :2407-2414.