

紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究

高 扬^{1,2}, 朱 波¹, 周 培², 汪 涛¹, 缪驰远³

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要:氮素和磷素是引起水体富营养化的重要限制因子, 本文通过人工模拟降雨的方法, 对紫色土坡地在降雨后产生的氮磷迁移过程进行动态研究。结果表明, 两种坡度(5°和 10°)和不同降雨强度的模拟降雨过程中, 供试的土壤产生两种径流模式: 地表径流和壤中流。多场人工模拟降雨中, 单场降雨造成坡地总氮(TN)最大迁移量达 2.13 kg·hm⁻², 总磷(TP)最大迁移量达 0.17 kg·hm⁻², 地表径流的总氮和总磷(NP)输出与壤中流 NP 输出相差 3~5 倍, 地表径流是 TP 输出的主要途径, 而地表径流 TN 输出与壤中流 TN 输出差异不显著, 壤中流也是 TN 迁移的另一重要途径; 在相同坡度和降雨强度条件下, 农田作物的覆盖作用能减缓地表径流量和 N、P 的迁移量具有明显作用, 但产流时间的差异不大; 在相同作物覆盖和降雨强度条件下, 坡度越大其地表径流量和 TN 的迁移量也越大, 土壤的 NP 迁移主要以 TN 为主。通过模拟降雨发现紫色土坡地土壤 NP 流失浓度与径流流量之间的关系可以表示为: $C_n = aQ^2 + bQ + c$, 降雨量是影响参数 b 的主要因子。

关键词:降雨模拟; 表面径流; 壤中流; 非点源

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1371-06

Non-point Source Export of Nitrogen and Phosphorus from Slope Crop of Purple Soil with Simulated Rainfall Method

GAO Yang^{1,2}, ZHU Bo¹, ZHOU Pei², WANG Tao¹, MIAO Chi-yuan³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Nitrogen and phosphorus released through runoff to surface waters and drinking water systems represent a risk to human and environmental health. This study focuses on nitrogen and phosphorus loss from sloping land of purple soil with different slope gradients and rainfall intensities. Variable intensity field rainfall simulations were performed on 4.5 m long 1.5 m wide 1 m depth plot, and overland runoff and subsurface flow were collected. Results showed that, with two slope (5° and 10°) and different rainfall intensities, there were two runoff forms: overland runoff and subsurface flow. The TN loss maximum reached 2.13 kg·hm⁻² and the TP maximum loss reached 0.17 kg·hm⁻², and there were 3~5 times discrepancy in runoff rate between overland runoff and subsurface flow. With the same slope and rainfall intensity, the crop coverage increased the subsurface flow rate and reduced the NP loss and overland runoff rate, but there was not significant difference in the runoff-occurring time. With the same coverage and the same rainfall intensity, the TN loss and overland runoff went up as the slope increasing. The relationship between NP loss concentration (C_n) and runoff flux (Q) could be expressed by $C_n = aQ^2 + bQ + c$ and rainfall was major factor on influencing parameter b . So it is necessary to evaluate the eutrophication of the local surface water and ground water environment, and thereby to analyze the overall effects of different kinds of rainfalls.

Keywords: simulated rainfall; overland runoff; subsurface flow; non-point source

坡地 N、P 流失的过程十分复杂, 它受降雨(降雨类型、强度及持续时间)和下垫面因素(地形、地貌、土壤的化学和物理状况、植被或作物特征, 以及农业时

间措施等)的综合影响^[1,2]。紫色土具有风化成土作用快、矿物组成复杂、矿质养分丰富、耕性和生产性好、自然肥力高等特点, 是一种宝贵的农业土壤资源^[3]。但由于母质物理风化快、多分布在山地丘陵区、下渗及抗蚀性差、人类活动强度大等原因, 使紫色丘陵区成为我国严重水土流失区之一^[4]。

目前, 非点源试验的主要研究内容包括: 流域非点源污染物流失时空变化规律^[5]; 土地利用类型、地形

收稿日期: 2008-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571093); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02)

作者简介: 高 扬(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非点源污染与环境毒理学。E-mail: gaoyang0898@sjtu.edu.cn

通讯作者: 朱 波

等因素对产污特征的影响^[9],紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征^[7]。营养物质的流失逐渐成为研究的热点,已开展的试验包括云南水田化肥流失试验^[8],浙江德清红壤坡地磷流失试验^[9],广州赤红壤旱地营养物流失试验^[10]。通过人工模拟试验对非点源污染进行量化研究是当前该领域研究的一个重要方向^[11-13]。研究非点源污染中 N、P 的输出比重,对控制非点源污染和污染治理的方向都具有重要意义。目前关于紫色土地表径流和壤中流中 N、P 比重的非点源输出动态研究未见报道。本文采用人工降雨的方法,模拟紫色土坡地的 N、P 非点源输出的动态过程,建立 N、P 迁移的预测模型,为控制紫色土丘陵区内和三峡库区内非点源污染物输出与控制提供科学依据,同时也为进一步建立监测模型奠定基础。

1 研究方法

1.1 区域特征

试验地位于四川盆地中部紫色土丘陵的中国科学院紫色土盐亭农业生态试验站(105°27'E,31°16'N),该站处于嘉陵江一级支流涪江的支流——猕江、湍江分水岭上,具有四川盆地亚热带湿润季风气候特征。地形为中深丘,海拔 400~600 m,由于水平砂泥岩互层形成多级梯地,山顶为园丘、长岗状。多年平均降雨量 825 mm 左右,年内水量分配不均,春季占 5.9%,夏季占 65.5%,秋季占 19.7%,冬季占 8.9%。该区农耕发达,农业种植一年两熟制。供试土壤为钙质紫色土,质地为中壤^[3],黏粒小于 20%,粉粒 33.1%~43.8%,土壤理化性质见表 1。

1.2 人工模拟降雨方法

降雨装置采用美国 Norton 摇摆式野外人工降雨模拟装置。降雨高度为 2.7 m,降雨历时为 60~90 min 左右(如有壤中流形成或产流量不稳定可延长),采用降雨强度为中雨(0.33 mm·min⁻¹)、大雨(0.9 mm·min⁻¹)、暴雨(1.86 mm·min⁻¹)3 种降雨强度。降雨强度率定的具体方法为:均匀布置取样点,用杯子收集人工降雨的雨水并计算体积,所得体积除以降雨时间即降雨强度。模拟试验于 2005 年 7—8 月进行,试验用帆布挡风,人工降雨供试水为自来水,降雨前取降雨供试水

样分析总磷、总氮等指标,同时分析土壤水分含量,见表 2。小区面积 4.5 m×1.5 m(投影面积),土层深度为 60 cm,四周用水泥板围埂,底部是岩层,小区 10 cm 处和 60 cm 处设计建造能同时测定地表径流和壤中流装置。在地表径流和壤中流测定池中安装 ISCO-6712 水沙自动采集仪,测定地表径流与壤中流产流过程中的水位变化。小区试验的坡度为 5°、10°(本区的坡度范围一般为 3°~10°),地表条件为裸地与大于 80%覆盖(种植花生,在种植 25~30 d 时进行降雨)。施肥量与当地相近,氯化铵(以 N 计)0.015 kg·m⁻²、过磷酸钙(以 P₂O₅ 计)0.009 kg·m⁻²,施肥方式采用穴施。

表 2 降雨前期供试土壤的水分含量
Table 2 Water content of tested soil in rainfall prophase

坡地类型	中雨	大雨	暴雨
5°裸地	15.80%	16.60%	17.10%
5°覆盖	16.20%	16.60%	16.78%
10°裸地	15.90%	15.80%	16.04%
10°覆盖	14.82%	15.20%	16.40%

1.3 分析与采样

在降雨开始后,计测径流和壤中流出现时间,始流后每 1~3 min 取一次样,随着产流的稳定可逐渐拉长采样时间,最后取径流和壤中流的总样。水样置于冰箱低温保存,分析总磷(TP)、总氮(TN),所得浓度减去池水本底值,即为地表径流和壤中流氮磷浓度。水中的全磷(TP)用过硫酸钾氧化法测定;总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光法^[14]。

2 结果与讨论

2.1 地表径流氮磷浓度变化

试验模拟了 3 种降雨强度和两类下垫面(作物覆盖度 80%、0 和两种坡度)的径流过程。在降雨过程中,主要表现为地表径流和壤中流。在中雨、大雨、暴雨强度下,5°小区为裸地时,地表径流产流时间分别为 43、19 和 6 min,总氮和总磷(NP)输出平均浓度分别为 6.21、6.14 和 6.29 mg·L⁻¹,其中 TN 占 98%、97%和 98%(图 1);5°小区有作物覆盖时,中雨、大雨、暴雨强度下,地表径流产流时间分别为 47、24 和 9 min,

表 1 供试土壤的主要理化性质
Table 1 Physical and chemical parameters of tested soil

土壤	容重/g·cm ⁻³	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	pH	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	CaCO ₃ /g·kg ⁻¹	含水量/%
紫色土	1.3±0.03	38.53±1.10	11.11±2.00	8.1±0.2	0.81±0.3	44.72±5.91	102.64±4.44	7.8±0.7	131.6±4.8	16.60±1.0

NP 输出平均浓度分别为 5.81、5.53 和 5.56 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 TN 占 96%、96% 和 96% (图 1); 5° 小区 NP 输出表现为逐渐减小趋于稳定中间伴有波动, NP 变化主要受 TN 影响, TP 输出稳定无明显变化。在中雨、大雨、暴雨强度下, 10° 小区为裸地时, 地表径流产流时间分别为 46、22 和 6 min, NP 输出平均浓度分别为 6.10、6.24 和 6.19 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 TN 占 98%、99% 和 99% (图 2); 10° 小区有作物覆盖时, 中雨、大雨、暴雨强度下地表径流产流时间分别为 47、23 和 9 min, NP 输出平均浓度分别为 5.78、5.87 和 5.59 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 TN 占 97%、96% 和 96% (图 2); 10° 小区 NP 输出过程与 5° 小区特征相同。在相同降雨强度和坡度条件下, 无作物覆盖的坡地在单位时间内, 地表径流输出量大于有作物覆盖的坡地; 相同坡度和作物覆盖条件下, 降雨强度越大, 单位时间内径流输出量也越大; 同时因为坡度不同引起的单位时间内径流输出量差异不是很明显。

从图 1 和图 2 可以看出, 小区有作物覆盖可以减缓地表产流的时间, 降雨强度越大, 产流时间越早, 这种现象同作物改变土壤表面产汇流机制有关, 作物作为隔离层避免了雨滴对土壤层的直接撞击溅蚀作用, 降雨强度较大时, 裸露地表易形成土膜, 抑制水分下渗, 使得土壤未达到饱和情况下就产流输出, 另外作

物层在降低雨滴冲击强度的同时, 其根系也易于土壤内部的导流, 利于水分下渗。在相同降雨强度和作物覆盖下, 不同坡度对产流时间的影响表现的不明显, 主要是因为不同坡度坡地的降雨前期土壤水分含量不同, 由于土壤含水量高有利于扩散作用的进行, 在含水率高时, 土壤中充水毛管数量增加、孔隙加大, 故扩散加快, 扩散系数变大^[15,16], 黄丽等^[17]发现土壤初始含水量高会导致地表径流较早达到饱和状态, 而加大对地表的冲刷能力。在相同降雨强度和坡度下, 裸地 NP 输出浓度比坡面有作物覆盖的都要高 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, TN 比重要高 1%~2%, 这主要因为随降水径流和渗漏排出农田的氮素中有 20%~25% 是当季施用的氮素化肥, 大部分被土壤吸附^[18], 因此坡地土壤氮素流失过程实际上是表层土壤氮素与降雨、径流相互作用的过程, 作物的根系则可以固结土壤颗粒, 阻碍坡面径流, 减少养分流失; TP 输出差异不明显这是因为磷在土壤中易被固定, 扩散移动性能极弱^[19]; NP 输出浓度逐渐减小, 这是因为降雨前期雨水击打, NP 输出以颗粒态 NP 和溶解态 NP 为主, 随着径流稳定输出, 降雨后期以溶解态 NP 为主, 所以 TN 的比重下降, 由于 TP 比重小, 浓度变化也小, 所以无明显差异。

2.2 壤中流氮磷浓度变化

在大雨和暴雨两种降雨强度下, 5° 小区有作物覆

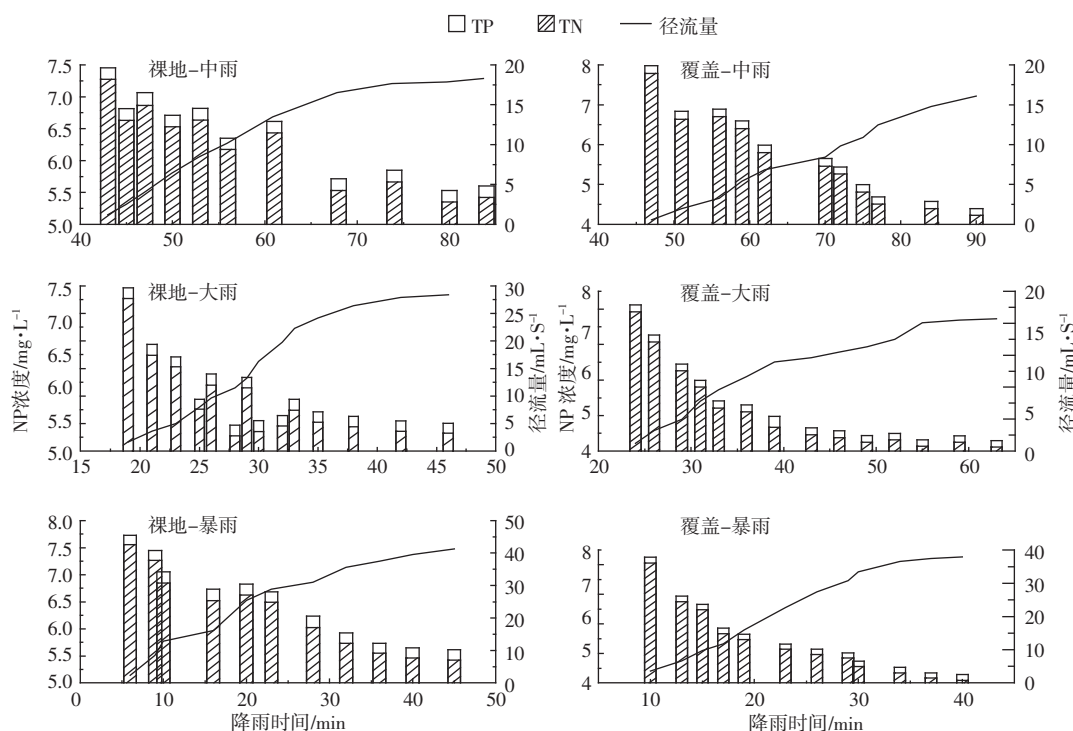


图 1 5° 坡地地表径流的氮磷输出动态过程

Figure 1 Change of NP export of 5° sloping cropland through overland runoff

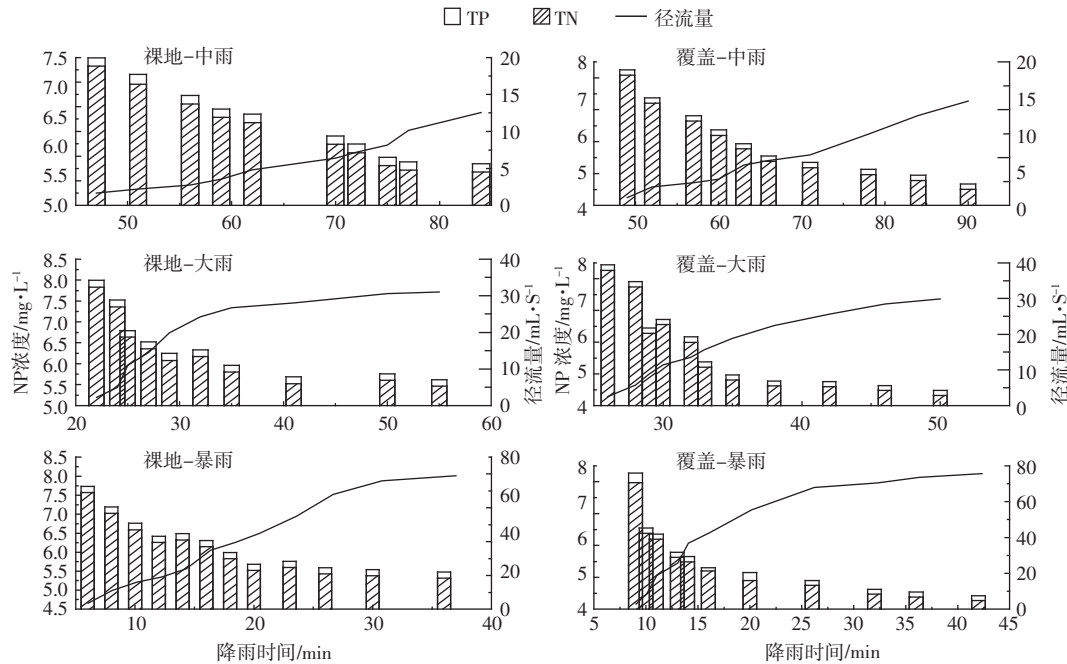


图 2 10°坡地地表径流的氮磷输出动态过程

Figure 2 Change of NP export of 10° sloping cropland through overland runoff

盖时产生壤中流,小区裸地没有产生壤中流;10°小区在降雨过程中并未产生壤中流。这种现象的原因是由于土壤的物理状况及降雨入渗特征的影响,土壤空隙在充分饱和时,土壤水分才会在重力作用下产生流动,当坡面有作物覆盖时,减弱了降雨对土壤的直接打击,地表径流减缓,缓慢下渗。此结果表明,降雨时,农田土壤有无作物覆盖对壤中水流动状态的效应或结果同表面流相反,作物效应对壤中流更加显著,但不能得出坡度小更易产生壤中流结论,因为它是多种效应综合作用的过程。已有研究表明,土壤的物理结构(容重和孔隙度等)决定土壤内部水分和溶质迁移^[5]。通过模拟实验,我们认为在相同坡度和低降雨强度时,单位雨面上水通量少且相对均匀,土壤容重和孔隙结构是导流的重要限制因子,但大雨强时,尤其在土壤饱和后,土壤壤中流更多的是受植物根系分布的影响,根系分布明显促进壤中水分和溶质的导量。

壤中流 NP 输出浓度先增大后逐渐减小,但浓度变化受降雨强度影响较小,在大雨和暴雨两种强度下,壤中流产流时间分别为 34 和 22 min,降雨强度越大,单位时间壤中流累积渗流量也越大,NP 输出的平均浓度分别为 2.99 和 3.16 mg·L⁻¹,TN 的输出比重下降为 93%和 92%(图 3)。因为作物使水分平衡输入,壤中流在土壤空隙饱和后,才开始径流流动,土壤内部束缚氮磷的溶解释放相对均一,并且以溶解态为

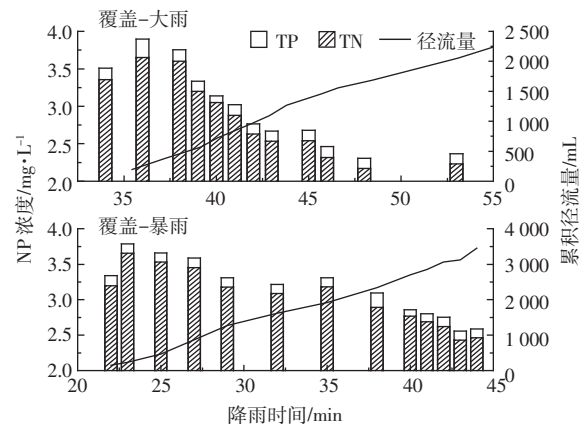


图 3 10°坡地壤中流的氮磷输出动态过程

Figure 3 Change of NP export of 10° sloping cropland through subsurface flow

主,TN 的输出浓度下降的要比 TP 快,但壤中流 TN 输出与地表径流 TN 输出差异不显著,而壤中流 TP 输出与地表径流 TP 输出相差 3~5 倍。

2.3 坡地 NP 迁移比较

如表 3 所示,5°坡地壤中流的产生可以一定程度减缓地表径流量和 NP 迁移量,TN 和 TP 浓度输出都低于地表径流;在多场工人模拟降雨中,当 5°坡地裸地和下暴雨时,TN 迁移量最大,达到 2.13 kg·hm⁻²,TP 迁移量也达到最大值 0.17 kg·hm⁻²。在相同降雨强度和坡度条件下,小区有作物覆盖可以减少 TN 和 TP 的浓度输出和迁移量;在相同作物覆盖和降

雨强度条件下,坡度越大其地表径流累积流量也越大,TN 的迁移量大小顺序为:10°> 5°,TP 和 TN 的浓度输出差异不大。在整个模拟试验中土壤 NP 迁移主要以 TN 为主,不同降雨场次土壤 TN 的迁移量变化幅度较大,这表明土壤径流是一种多因素综合作用过程,TN 的迁移研究值得关注。

2.4 降雨径流量与浓度输出的关系

目前关于紫色土坡地的 NP 浓度输出与径流量的关系还未见报道,因此我们根据多场人工降雨模拟试验,建立径流量与 NP 浓度输出的模型,见表 4。

如表 4 所示,除了 5°坡地的三场降雨的相关系数在 0.9 以下,其他降雨场次都取得 0.9 以上的相关系数,这表明不同坡度、降雨强度和作物覆盖,以及土壤的理化性状对紫色土坡地 NP 流失的主要因子影响可能不同。根据表 4,得知在不同降雨侵蚀条件下紫色土坡地土壤 NP 流失浓度与径流量之间的关系可以表示为:

$$C_n = aQ^2 + bQ + c \quad (1)$$

式中: C_n 为降雨中土壤 NP 输出浓度; Q 为径流量; a 、 b 和 c 分别表示为与坡地特征、降雨径流特征和土壤特征密切相关的参数。应用多元分析方法,对参数 a 、 b 和 c 与降雨量、径流量的关系做进一步相关性分析,同时对 a 、 b 和 c 相互间做相关性分析。我们发现参数 b 与降雨量,以及参数 a 、 b 之间存在显著相关性(图 4),降雨量是影响参数 b 的主要因子。

3 结论

(1)降雨过程中,供试的土壤产生两种径流模式:地表径流和壤中流,地表径流的 TP 输出与壤中流 TP 输出相差 3~5 倍,地表径流是 TP 输出的主要途径,地表径流 TN 输出与壤中流 TN 输出差异不显著,壤中流也是 TN 迁移的另一重要途径。

(2)在多场降雨侵蚀过程中,紫色土坡地的 NP 流失的预测模型可表达为: $C_n = aQ^2 + bQ + c$;降雨量是

表 3 不同降雨场次氮磷输出迁移比较

Table 3 NP export in overland runoff and subsurface flow from plots during the different rain events

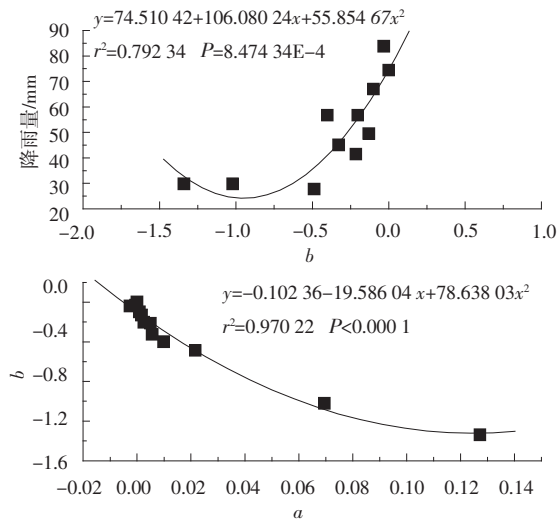
坡地类型	降雨类型	降雨量/mm	径流量/L	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	TN/TP	TN 迁移量/kg·hm ⁻²	TP 迁移量/kg·hm ⁻²
5°坡地裸地	中雨	27.72	3.18	6.21	0.075	98%	0.45	0.035
	大雨	41.4	6.23	6.14	0.081	97%	0.77	0.075
	暴雨	83.7	13.58	6.29	0.084	98%	2.13	0.170
5°坡地覆盖	中雨	29.7	2.26	5.81	0.083	96%	0.39	0.028
	大雨	地表	56.7	4.79	5.53	0.072	96%	1.05
			壤中	2.24	2.99	0.034	93%	0.23
	暴雨	地表	74.4	10.95	5.56	0.078	96%	1.83
			壤中	3.45	3.16	0.036	92%	0.33
						92%	0.33	0.018
10°坡地裸地	中雨	27.72	3.46	6.10	0.072	98%	0.48	0.037
	大雨	49.5	7.56	6.24	0.070	99%	0.84	0.078
	暴雨	66.96	15.48	6.19	0.064	99%	1.92	0.146
10°坡地覆盖	中雨	29.7	2.98	5.78	0.066	97%	0.48	0.028
	大雨	45	6.85	5.87	0.063	96%	0.81	0.064
	暴雨	78.12	14.38	5.59	0.059	96%	2.08	0.126

表 4 径流量(C_n)与 NP(Q)输出浓度关系

Table 4 Relationship between runoff discharge (C_n) and NP(Q) exporting concentration.

降雨场次	方程	r^2	降雨场次	方程	r^2
5°plot-B-M	$y = -0.002 6x^2 - 0.040 5x + 7.228 1$	0.889 8	10°plot-B-M	$y = 0.021 6x^2 - 0.487 6x + 7.982 3$	0.977 5
5°plot-B-D	$y = 0.005x^2 - 0.214x + 7.209 1$	0.794 4	10°plot-B-D	$y = 0.001 7x^2 - 0.129 8x + 8.060 1$	0.964 2
5°plot-B-R	$y = -0.000 5x^2 - 0.031 4x + 7.590 5$	0.914 5	10°plot-B-R	$y = 0.000 9x^2 - 0.099 3x + 8.01$	0.987 1
5°plot-C-M	$y = 0.127 2x^2 - 1.399 3x + 8.358 5$	0.973 6	10°plot-C-M	$y = 0.069 5x^2 - 1.020 5x + 8.499 3$	0.950 1
5°plot-C-D	$y = 0.009 9x^2 - 0.400 8x + 8.452$	0.989 1	10°plot-C-D	$y = 0.005 6x^2 - 0.326 9x + 9.339 2$	0.970 4
5°plot-C-R	$y = 0.002 6x^2 - 0.202 6x + 8.410 3$	0.935 6	10°plot-C-R	$y = 0.002 5x^2 - 0.203 3x + 8.560 3$	0.973 9
5°plot-R'-D	$y = 2E-07x^2 - 0.001 3x + 4.091 9$	0.880 2	5°plot-R'-R	$y = -7E-08x^2 - 7E-05x + 3.615 2$	0.909 5

注:B 表示裸地,C 表示作物覆盖,M 表示中雨,D 表示大雨,R 表示暴雨,R' 表示壤中流。

图 4 参数 a 与 b 以及参数 b 与降雨量间的相关关系Figure 4 Relationship between a and b , b and rainfall in formula

影响模型参数 b 主要因子, 参数 a 与 b 呈显著相关。

(3) 当 5° 坡地裸地和下暴雨时, TN 迁移量最大, 达到 $2.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TP 迁移量也达到最大值 $0.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 由此可以进一步推测出, 整个川中紫色土丘陵地区大降雨过程中土壤表面流和壤中流的 NP 迁移量非常惊人。

参考文献:

- [1] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 251-257.
- [2] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receive waters: a review[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 261-266.
- [3] 何毓蓉. 中国紫色土(下)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] 何毓蓉. 中国紫色土(上)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] HE Yu-rong. Chinese purple soil(a)[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] 李俊然, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征[J]. *地理科学学报*, 2002, 22: 238-242.
- [7] LI Jun-ran, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. Temporal and spatial characteristics of non-point source N in surface water of Yuqiao reservoir watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22: 238-242.
- [8] 孟 伟, 于 涛, 郑丙辉, 等. 黄河流域氮磷营养盐动态特征及主要影响因素[J]. *环境科学学报*, 2007, 12: 2046-2051.
- [9] MENG Wei, YU Tao, ZHENG Bing-hui, et al. Variation and influence factors of nitrogen and phosphorus transportation by the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 12: 2046-2051.
- [10] 杨金玲, 张甘霖, 张 华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(1): 16-23.
- [11] YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin, ZHANG Hua, et al. The impact of land uses on watershed runoff nitrogen discharge in hilly regions[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(1): 16-23.
- [12] 刘忠翰, 彭江燕. 化肥氮素在水稻田中迁移与淋失的模拟研究[J]. *农村生态环境*, 2000, 16(2): 312-316.
- [13] LIU Zhong-han, PENG Jiang-yan. Simulation of transfer and leaching of fertilizer nitrogen in paddy field[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(2): 312-316.
- [14] 陈 欣, 王兆骞, 杨武德. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响[J]. *生态学报*, 2000, 20(3): 374-377.
- [15] CHEN Xin, WANG Zhao-qian, YANG Wu-de, et al. Effects of sloping land use patterns on phosphorus loss in a micro-watershed of red soil area, Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 374-377.
- [16] 吴雪彪, 陈士银. 旱耕赤红壤中氮、磷流失污染研究[J]. *湛江海洋大学学报*, 1999, 19(2): 58-62.
- [17] WU Xue-biao, CHEN Shi-yin. Study on the nitrogen and phosphorus losses pollution from nonirrigated lateritic red earth[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1999, 19(2): 58-62.
- [18] Howarth R W, Bilien G, Swaney D, et al. Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 75-139.
- [19] Nemes A M G, Schaap, Wosten L H M. Functional evaluation of pedo-transfer function derived from different scales of data collection[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67: 1093-1102.
- [20] Crescimanno, Iovino G M, Provenzano G. Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59: 1701-1708.
- [21] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998. 275-278.
- [22] XIE Xian-qun, WANG Li-Jun. Monitoring and analysis of water environmental factors[M]. Beijing: China Criterion Press, 1998. 275-278.
- [23] Shapley A N, Smith S J, Jones O R. The transportation of bioavailable phosphorus in agriculture runoff[J]. *J Environ Qual*, 1992, 21: 30-35.
- [24] Booltink, Bouma H W G J, Gimenes D. A suction crust infiltrometer for measuring hydraulic conductivity of unsaturated soil near saturation[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 566-588.
- [25] 黄 丽. 侵蚀紫色土壤颗粒流失研究[J]. *水土保持学报*, 1999, 5(1): 35-39.
- [26] HUANG Li. Study on soil particle losses of eroded purple field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 5(1): 35-39.
- [27] Jerome M, Patrickd. Mechanisms of nitrate transfer from soil to stream in an agricultural watershed of French Brittany[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 133: 161-183.
- [28] Brookes P C, Heckrath G. Losses of phosphorus in drainage water: phosphorus loss from soil to water [M]. New York: CAB International, 1997. 353-371.

致谢: 西南大学张进忠教授对文章英文摘要和全文修改提出宝贵的意见。