

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0077

王甜,肖文发,黄志霖,等.三峡库区紫色土坡地典型暴雨径流氮磷流失特征[J].生态与农村环境学报,2022,38(3):367-374.

WANG Tian, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, et al. Characteristics of Typical Rainstorm-runoff Nitrogen and Phosphorus Loss on Purple Soil Slope in Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(3): 367-374.

三峡库区紫色土坡地典型暴雨径流氮磷流失特征

王甜¹, 肖文发^{1,2}*, 黄志霖^{1,2}, 曾立雄^{1,2} (1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所/国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 为研究暴雨径流过程中紫色土坡地土壤氮磷的迁移规律,利用坡地试验小区对三峡库区兰陵溪小流域2019年雨季降雨径流过程进行监测,选取6月22日(长历时均匀降雨)和8月3日(短历时强降雨)两场典型暴雨,分析暴雨特征对地表径流和壤中流以及随径流流失的氮磷的影响。结果表明:(1)两场暴雨事件中,受降雨特征影响,其径流量、径流历时、峰值流量和径流率都存在明显差异,且降雨过程中峰值雨强出现的时间对壤中流的产流时间有决定作用。(2)不同暴雨条件下地表径流和壤中流中氮磷浓度差异较大,主要受降雨量和峰值雨强影响,但与同时段降雨量呈负相关关系,与同时段径流量呈显著正相关关系。(3)土壤养分径流流失以TN流失为主,且氮磷流失量与径流流失量呈现显著正相关关系。6月22日和8月3日TN流失量分别为4.03和8.49 kg·hm⁻²,其中,壤中流贡献率分别为88.59%和85.51%;TP流失量分别为0.11和0.33 kg·hm⁻²,其中,以颗粒态形式流失占比分别为54.55%和60.61%。上述结果表明,短历时强降雨会造成更大的水土流失和养分流失,这为三峡库区农业面源污染的防控工作提供了参考依据。

关键词: 三峡库区; 紫色土; 暴雨类型; 地表径流; 壤中流; 氮; 磷

中图分类号: X52; S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)03-0367-08

Characteristics of Typical Rainstorm-runoff Nitrogen and Phosphorus Loss on Purple Soil Slope in Three Gorges Reservoir Area. WANG Tian¹, XIAO Wen-fa^{1,2}*, HUANG Zhi-lin^{1,2}, ZENG Li-xiong^{1,2} (1. Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry/ Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grass Land Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To study the movement of nitrogen (N) and phosphorus (P) on a purple soil slope during rainstorm runoff, the rainfall runoff process of Lanlingxi watershed in Three Gorges Reservoir Area was monitored in 2019 using a slope plot. Two rainstorms, typical of long-term uniform rainfall (June 22) and short-term heavy rainfall (August 3), were selected to analyze the impact of rainstorm characteristics on surface flow, interflow and N and P loss with runoff. The results show that: (1) there were significant differences in runoff, runoff duration, peak flow and runoff rate between the two rainstorm events. The time of peak rainfall intensity had a decisive effect on the interflow generation time. (2) Under different rainstorm conditions, the concentration of N and P in surface flow and interflow were significantly different. This was mainly affected by rainfall and peak rainfall intensity. The concentrations of N and P in runoff were negatively correlated with rainfall in the same period, and positively correlated with runoff in the same period. (3) Total N (TN) was the main form of soil nutrient runoff loss, and there was a significant positive correlation between N and P loss and runoff loss. On June 22 and August 3, TN loss was 4.03 and 8.49 kg·hm⁻², respectively, in which the contribution rate of interflow was 88.59% and 85.51%, respectively. The total P (TP) loss was 0.11 and 0.33 kg·hm⁻², respectively, of which the loss in granular form accounted for 54.55% and 60.61%, respectively. The results show that short-duration heavy rainfall caused greater soil erosion and nutrient loss. This provides a reference for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; purple soil; rainstorm type; surface flow; interflow; nitrogen; phosphorus

收稿日期: 2021-02-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505301-1); 国家自然科学基金(32171877)

① 通信作者 E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

三峡库区作为我国重要的水土保持生态功能区之一^[1],其水环境及生态安全问题一直处在国家重点关注之中。在三峡库区,78.7%的农耕地为紫色土坡耕地。紫色土土层浅薄,结构松散,保水保土能力差,再加上三峡库区山高坡陡,降雨集中且多有暴雨,极易出现水土流失,引发农业面源污染,导致库区出现水体富营养化问题^[2]。2017年长江三峡工程生态与环境监测公报显示,2016年三峡库区流失氮素0.75万t,磷素0.16万t,46.8%的支流水体在雨季呈现富营养化^[3]。因此,国内外大量学者针对三峡库区农业面源污染的发生机制及防控进行了大量研究,主要从土壤氮磷的流失特征和影响条件,如降雨特征^[4]、土地利用^[5]、耕作方式^[6]、施肥措施^[7]等方面入手。其中,降雨特征对氮磷流失影响的研究大多集中在降雨雨强^[8]和降雨量^[9]两个方面。但目前针对雨强的监测试验多采用固定雨强进行人工模拟降雨的试验方法^[10],而针对降雨量又多侧重于地表产流产沙^[11],对自然降雨条件下长时间的径流过程及氮磷迁移转化研究不够,尤其对暴雨条件下地表径流与壤中流耦合引起土壤氮磷流失过程及流失量分异的研究涉及较少。该研究利用紫色土坡地试验小区对2019年雨季自然降雨条件下三峡库区兰陵溪小流域降雨径流过程进行监测,分析研究不同暴雨类型下土壤氮磷流失过程及迁移特征,评估地表径流和壤中流对土壤氮磷流失的影响,以期为三峡库区农业面源污染治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 模拟试验小区设计

试验主要针对三峡库区紫色土坡面进行研究。

表 1 试验土壤样品物理化学性质

Table 1 Physicochemical properties of the experimental soil

土壤深度/ cm	w (有机质)/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	w (全氮)/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	w (全磷)/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	w (硝态氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	w (铵态氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	机械组成 $w/\%$		
							黏粒	粉粒	砂砾
0~20	17.65±4.43	1.38±0.39	1.50±0.20	14.65±1.52	4.63±0.17	1.24±0.05	7.62	64.80	27.58
>20~40	15.65±1.95	1.02±0.22	2.22±0.19	21.92±2.75	8.34±0.24	1.54±0.07	7.58	75.90	16.52

土壤类型为紫色土,海拔为290 m。

1.2 试验设计

对于降雨径流过程及土壤养分流失的监测依托长江三峡秭归森林生态系统国家定位观测站(简称秭归定位站)进行。秭归定位站位于三峡库区首县秭归县兰陵河流域,该流域地理位置为30°50' N, 110°56' E,地形地貌为西高东低的丘陵山区,属于亚热带大陆性季风气候区,年均气温为7.8~18℃,

模拟试验小区装置主体为3 m×1.5 m×0.5 m的可移动式钢框塑料土槽,兰陵溪小流域内紫色土坡耕地坡度主要分布在11.5°~33.2°之间,面积加权平均值为20.32°,因此,试验小区坡度定为20°。在试验小区底部5 cm高处放置带有孔洞的隔水板,将小区分为土体和排水层以保证良好的水分下渗情况,隔水板上方铺设两层孔径为0.15 mm的纱网,防止排水口被堵塞。小区上下分别设置地表径流和壤中流两个出水口。具体试验装置见图1。

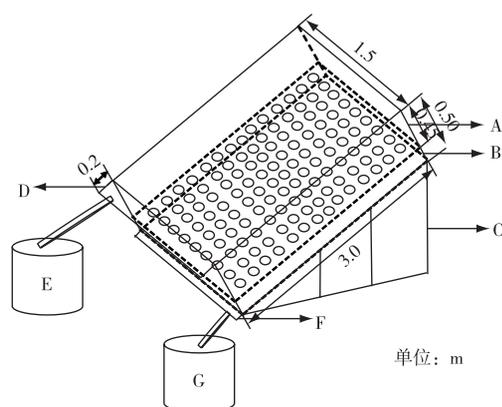


图 1 试验装置示意
A—试验土体; B—隔水板; C—可移动可调节钢支架; D—地表径流收集槽;
E—地表径流收集筒; F—壤中流收集管; G—壤中流收集筒。

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

采集兰陵溪小流域内0~20和>20~40 cm土层紫色土,搬运回定位站后,不进行过筛和研磨处理,按原来的土层顺序填充到土壤中,槽中土壤实际高度为40 cm(农作物根系主要分布范围)。土壤填充完毕后,将试验小区放置于露天试验场,经过一年的沉降后,当小区土壤情况基本贴近自然情况时,进行自然降雨监测。试验土壤理化性质见表1。

雨量充沛,年均降雨量为950~1 500 mm且时空分布不均,主要集中在5—9月的雨季,日照充足,无霜期约为307 d^[12]。在2019年雨季,共监测到28次降雨,其中,暴雨有3次,其降雨特征和降雨过程见表2和图2。综合分析可知,6月28日和8月3日两场暴雨属于短历时单峰值强降雨,峰值降雨量皆大于20 mm·h⁻¹^[13]。8月3日降雨特征更突出,且

雨强峰值出现在降雨前期,冲刷效应更加明显,而6月22日降雨属于长历时多峰值的均匀降雨,因此,选取6月22日和8月3日两场降雨进行研究。

表2 2019年3次典型降雨事件特征

Table 2 The characteristics of the three typical rainfall events

降雨日期	降雨雨量/ mm	降雨历时/ min	30 min 最大雨强/ (mm · h ⁻¹)	平均雨强/ (mm · h ⁻¹)
06-22	60.40	605	16.40	5.99
06-28	58.60	432	22.40	8.06
08-03	58.40	287	37.20	12.21

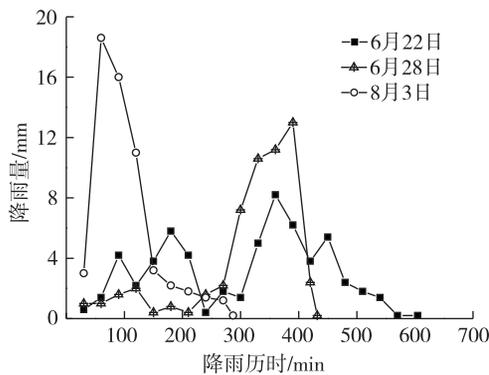


图2 3次典型降雨过程

Fig. 2 Processes of the three typical rainfall events

1.3 样品采集与分析

水样采集:降雨开始后,利用流量计记录降雨、地表径流和壤中流的发生过程,根据地表径流和壤中流径流流速合理调整取样间隔。经长期监测发现,降雨结束后,地表径流几乎同步停止,而壤中流产流滞后且降雨停止后仍会长时间产流,通常将3 h内壤中流不再产流视作壤中流产流结束。同时采集雨水作为空白样,径流分析结果扣除空白样。水样采集后置于4℃冰箱中保存。

泥沙样采集:在径流完全结束后,从地表径流截流槽获取泥水混合物,放入105℃烘箱中烘干。

径流水样分析指标有总氮(TN)和总磷(TP),两者的测定参照标准方法^[14],泥沙分析指标与水样指标相同。样品分析测试均在秭归定位站进行。

由于降雨径流过程历时较长,为更好地研究径流中氮磷浓度的变化过程,对获取的地表径流和壤中流水样中的养分浓度进行加权计算,得到每0.5 h地表径流、壤中流中氮磷平均流失浓度。

1.4 公式及数据处理

根据同步流量和浓度计算氮磷流失负荷:

$$y_i = \int_0^1 c_i(t) \times q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} C_i Q_i \Delta t_i \quad (1)$$

式(1)中, y_i 为第*i*种污染物排放负荷, g ; c_i 为*t*时刻第*i*种污染物浓度, $mg \cdot L^{-1}$; q_i 为*t*时刻流量, $mL \cdot s^{-1}$; Δt_i 为样本*i*和*i+1*的时间间隔, s ; C_i 为第*i*种污染物在样本*i*监测时的浓度, $g \cdot L^{-1}$; Q_i 为监测期间样本*i*的径流, $L \cdot s^{-1}$ 。

采用无量纲的累积污染物总量与累积流量变化曲线 $M(V)$ 对降雨进行分析,可以明确各降雨径流中污染物总量随流量变化的关系,理解降雨径流污染物的迁移过程^[15]。 $M(V)$ 曲线可以表示为

$$\frac{\sum_{i=1}^J C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^J C_i Q_i \Delta t_i} = f \left(\frac{\sum_{i=1}^J V_i}{\sum_{i=1}^J V_i} \right) \quad (2)$$

式(2)中, C_i 、 Q_i 和 Δt_i 含义同式(1); V 为样本*i*检测总次数; J 为样本*i*检测次数。

试验数据采用 Origin 19.0、SPSS 17.0 和 Excel 2016 进行分析和作图。

2 结果与讨论

2.1 降雨径流特征

对6月22日和8月3日两场暴雨径流的监测数据进行分析后,得到两场降雨的径流过程(图3)和径流特征(表3)。如图3所示,6月22日降雨径流事件中,地表径流量曲线变化趋势对降雨量变化趋势响应度极高,均为多峰值均匀型曲线。壤中流量曲线与降雨后期雨量变化趋势相近,但滞后效应较地表径流更加明显。而8月3日降雨径流事件为单峰值强降雨事件,地表径流量和壤中流量曲线对降雨量的响应趋势大致相同,响应时间也较为一致。由图3可知,即使降雨量相似,降雨类型不同情况下径流输出过程差异明显。

对2场降雨的过程和特征进行对比(图3、表3)发现,降雨特征对径流产流的影响明显。其中,8月3日降雨量最大峰值出现在降雨前期,因此,产流时间早于6月22日,且为壤中流先开始产流,这与目前很多研究结果^[15-16]相反。这可能是因为降雨前土壤含水量较低,暴雨初期雨强突然增大,紫色土发生超渗产流,雨水入渗能力远大于土壤蓄水能力^[17]。8月3日地表径流量和壤中流径流量最大峰值皆出现在降雨量峰值30 min后,分别为2.50和6.98 $mL \cdot s^{-1}$;流量峰值出现时,累积降雨量达到总雨量的64.38%,地表径流和壤中流累积流量分别占各自总流量的54.82%和36.17%。而6月22日地表径流初次峰值为0.38 $mL \cdot s^{-1}$,与降雨量初次峰值相比滞后1个时间段,地表径流最大峰值与

降雨量最大峰值同时段出现,为 $0.85 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$,此时地表径流累积流量占地表径流总量的 84.04%;壤

中流峰值出现在壤中流初始产流时,为 $5.00 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$,此时壤中流累积流量仅占总量的 3.50%。

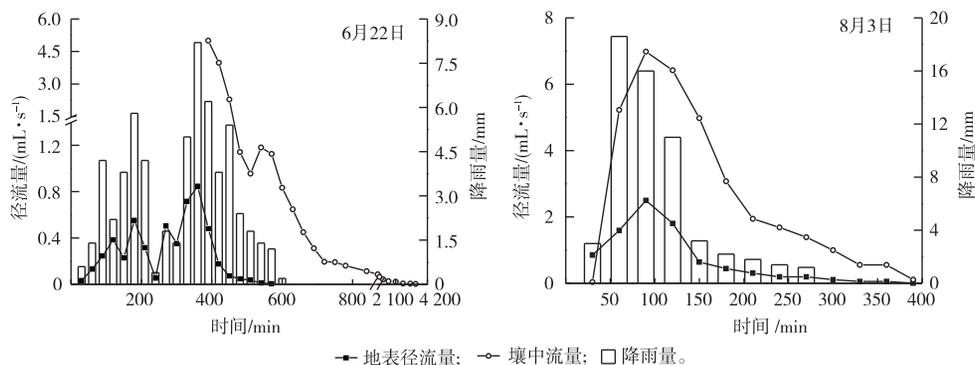


图 3 两场典型暴雨的降雨产流过程

Fig. 3 Rainfall and runoff processes of the two typical rainstorm events

表 3 两场典型暴雨事件的降雨径流特征

Table 3 Characteristics of the rainfall and runoff of the two typical rainstorm events

降雨时间	径流途径	径流量/ L	产流时间/ min	径流历时/ min	径流峰值/ ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$)
6月22日	地表径流	9.40	20	570	0.85
	壤中流	28.55	377	3 010	5.00
8月3日	地表径流	15.14	12	365	2.50
	壤中流	60.91	8	372	6.98

经计算,6月22日和8月3日两场降雨的径流系数分别为 14.1% 和 28.9%。

2.2 径流氮磷浓度流失特征

降雨是土壤养分流失的源动力,形成的径流是氮磷输出的载体和溶剂,主要经地表径流和壤中流两种径流途径损失^[18]。因此,降雨类型不同,径流中氮磷浓度具有明显差异。监测的两场降雨径流过程中氮磷浓度流失范围见图 4。其中,在 6 月 22

日降雨径流事件中,地表径流中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 $6.81 \sim 19.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $13.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,壤中流中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 $42.83 \sim 78.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $59.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在 8 月 3 日降雨径流事件中,地表径流中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 $7.25 \sim 28.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $16.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,壤中流中 $\rho(\text{TN})$ 范围为 $31.23 \sim 71.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $50.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。结合两场降雨事件中的数据发现,随壤中流流失的 TN 浓度远高于地表径流,这与陈玲等^[17]在三峡库区黄棕壤径流场所得到的结果相似,而王荣嘉等^[19]在辽宁浑河流域的棕壤径流场却发现地表径流中 TN 浓度高于壤中流。这主要是因为辽宁区域的棕壤主要为壤土,黏粒含量高,可以更好地固持养分,而三峡库区紫色土和黄棕壤多发育自砂页岩,土壤组成中黏粒含量较少,再加上土层薄、土壤颗粒孔隙大,致使固水固肥能力较差。

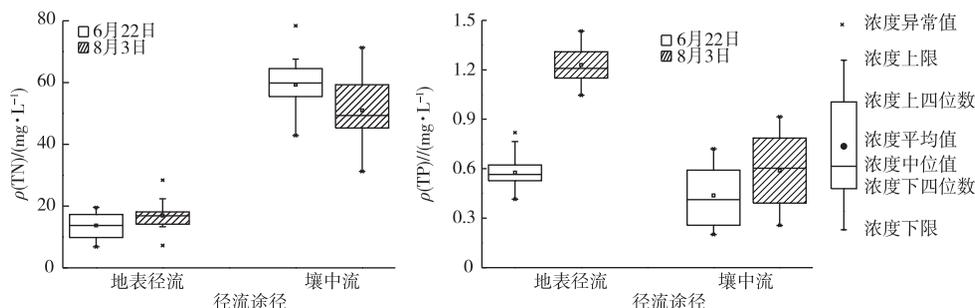


图 4 两场典型暴雨径流氮磷浓度特征

Fig. 4 Characteristics of TN/TP concentration in runoff under the two typical rainstorm events

对比两场降雨事件可知,8月3日地表径流中 TN 浓度范围和平均值均大于 6 月 22 日,而壤中流

中却恰好相反,这与陈维梁等^[20]对紫色土坡耕地所做的试验结果相同。出现这种现象的原因是 8 月 3

日降雨过程中前期强降雨对表层土壤冲击较大,土壤中氮素进入地表径流导致其浓度上升,而壤中流入渗速度过快,对土壤中氮素的溶解和浸提能力都受到抑制,并且壤中流量快速增加对氮素溶液有稀释作用^[21]。两场降雨条件下地表径流中 TN 浓度差异较小,壤中流中 TN 浓度差异较大,但不显著。

在地表径流中,6月22日 $\rho(\text{TP})$ 范围为 $0.42\sim 0.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;8月3日 $\rho(\text{TP})$ 范围为 $1.05\sim 1.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在壤中流中,6月22日 $\rho(\text{TP})$ 范围为 $0.21\sim 0.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;8月3日 $\rho(\text{TP})$ 范围为 $0.25\sim 0.91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由此可见,两场降雨径流中 TP 浓度

波动幅度较小亦无显著差异,且随壤中流流失的 TP 浓度低于地表径流。两场降雨径流事件中 TP 浓度差异较小。分别就地表径流和壤中流中 TP 浓度(平均值)而言,8月3日降雨事件较6月22日降雨事件分别增加112.06%和23.91%。结合刘娟等^[22]的研究,紫色土地表径流中 TP 流失浓度高于红壤、黑土,与潮土相似,主要是因为紫色土和潮土土壤颗粒对磷的固持性较差,较易流失。

对两场降雨径流过程中同时段降雨量对同时段随地表径流和壤中流流失的 TN、TP 浓度的影响程度进行 Pearson 相关分析(表4)后发现,其影响并不明显,这与左继超等^[23]的降雨试验结果相一致。

表4 典型暴雨径流过程中降雨量与径流中氮磷浓度及流失量的相关分析

Table 4 Correlation of rainfall, nitrogen and phosphorus concentration and loss in runoff during the typical rainstorm events

项目	相关系数									
	地表径流量	壤中流量	径流中 TN 浓度		径流中 TP 浓度		径流中 TN 流失量		径流中 TP 流失量	
			地表径流	壤中流	地表径流	壤中流	地表径流	壤中流	地表径流	壤中流
6月22日降雨量	-0.012	0.999**	-0.234	-0.361	-0.126	0.761**	0.364	0.675**	0.470	0.675**
8月3日降雨量	0.901**	0.782*	0.355	-0.672	-0.411	-0.098	0.822**	0.076	0.917**	0.386

*表示在 $\alpha=0.05$ 水平上显著,**表示在 $\alpha=0.01$ 水平上显著。

在两场降雨径流事件中,土壤中氮磷除以溶解态形式流失外,还以颗粒态形式随径流裹挟的泥沙流失。在产流初期,受降雨冲击力影响,径流浑浊,携带颗粒态氮磷较多,其后,随着时间增加而逐渐减少。并且,降雨初期雨强越大,随泥沙流失的颗粒态氮磷浓度就越高^[24]。随地表径流流失的泥沙中,6月22日颗粒态 TN 和 TP 质量含量平均值分别为 2.85 和 $0.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,8月3日颗粒态 TN 和 TP

质量含量平均值分别为 3.65 和 $0.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 径流氮磷流失量特征

对2场暴雨的氮磷流失过程进行分析后发现,随径流流失的氮磷流失量与相应途径的径流量呈显著正相关关系(表5),同步性极高,但受相应时间段降雨量的直接影响要小于径流量(表4~5),这与邹刚华等^[25]的监测结果相一致。

表5 典型暴雨径流量与径流中氮磷浓度及流失量的相关分析

Table 5 Correlation of flow, nitrogen and phosphorus concentration and loss in runoff during the typical rainstorm events

降雨时间	径流量	相关系数							
		径流中 TN 浓度		径流中 TN 流失量		径流中 TP 浓度		径流中 TP 流失量	
		地表径流	壤中流	地表径流	壤中流	地表径流	壤中流	地表径流	壤中流
6月22日	地表径流	0.519*		0.738**		0.524*		0.677**	
	壤中流		0.047		0.645**		0.995**		0.698**
8月3日	地表径流	0.686**		0.951**		0.220		0.891**	
	壤中流		0.445		0.715*		0.445		0.857**

*表示在 $\alpha=0.05$ 水平上显著,**表示在 $\alpha=0.01$ 水平上显著。

结合图5可知,6月22日地表径流中,TN 和 TP 流失量曲线变化趋势与地表径流变化趋势相似,皆为多峰值曲线且无明显滞后反应。而6月22日壤中流中 TP 流失量变化趋势较 TN 流失量对壤中流量的响应程度更高。6月22日壤中流中 TP 流失量

曲线为双峰值曲线,TN 流失量曲线为多峰值曲线。对比壤中流中 TN 和 TP 流失量曲线的变化趋势可知,TP 流失量对壤中流量的响应程度更高。在8月3日降雨径流过程中,地表径流和壤中流流量变化趋势相同(图5),因此,随径流流失的氮磷流失量变

化趋势也较为相似,皆为单峰值曲线。

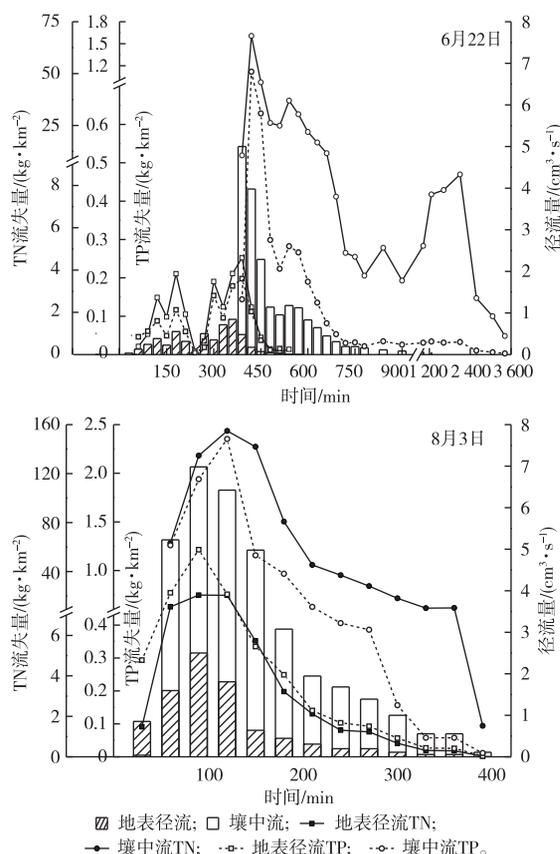


图 5 典型暴雨径流中氮磷流失量变化过程

Fig. 5 Process of nitrogen and phosphorus loss during the typical rainstorm events

对氮磷流失过程的监测数据进行统计分析后的结果(表 6)表明,6 月 22 日和 8 月 3 日 TN 流失量分别为 4.03 和 8.49 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TP 流失量分别为

0.11 和 0.33 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在 6 月 22 日和 8 月 3 日两场暴雨径流中,壤中流中溶解态 TN 流失量分别占总负荷的 88.59% 和 85.51%,地表径流中颗粒态 TP 流失负荷分别占总负荷的 54.55% 和 60.61%,这表明壤中流是 TN 的主要输出载体,而 TP 主要以颗粒态形态随地表径流中的冲刷泥沙流失。

2.4 氮磷流失量在径流过程中的分布特征

由图 6 可知 2 场降雨径流过程中氮磷累积负荷曲线和雨水初期冲刷效应的关系。 $M(V)$ 曲线与二分线垂向距离越远,说明冲刷效应越明显^[26],且曲线在二分线上方表明冲刷效应发生在前期,氮磷流失主要发生在径流过程前期,曲线在二分线下方则表明氮磷流失主要发生在径流后期。笔者研究结果表明 6 月 22 日地表径流中 TP 的初期冲刷作用较 8 月 3 日更为明显,其原因主要是虽然 8 月 3 日降雨前期雨强大,但大部分雨水经壤中流途径流失,且强降雨对土壤表层冲蚀力强,导致土壤表层中磷素以颗粒态磷形式流失,溶于径流中的磷素较少^[27]。而 6 月 22 日降雨径流历时极长,雨水与土壤可以充分反应,因此,地表径流和壤中流中溶解态磷含量较高,径流后期因壤中流分流和雨水减少,致使磷流失量逐渐减少。6 月 22 日壤中流中 TN 主要在径流后期流失,这是因为壤中流中 TN 浓度对 TN 流失量的影响显著,壤中流前期急速增加的径流量对径流中氮素产生了稀释作用,后期,随着径流量降低,TN 浓度逐渐回升,在 8 月 3 日的地表径流和壤中流中 TN 流失过程中都出现了同样的现象。

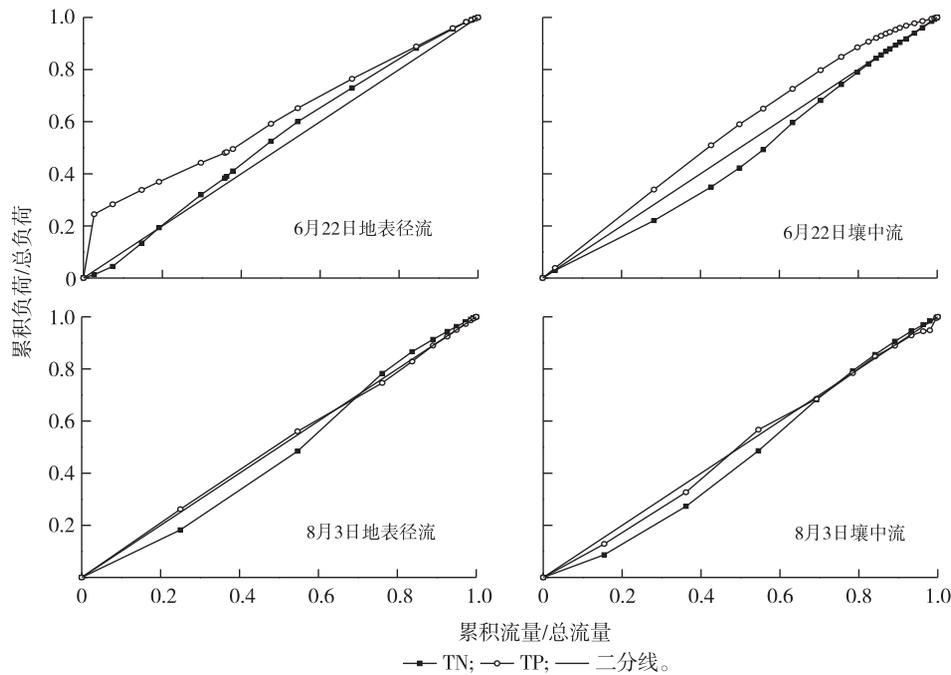
表 6 典型暴雨径流 TN 和 TP 流失负荷

Table 6 TN and TP loss load in runoff under the two typical rainstorm events

降雨时间	流失形态	流失载体	TN 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TN 流失量 占比/%	TP 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TP 流失量 占比/%
6 月 22 日	溶解态	地表径流	0.30	7.44	0.01	9.09
		壤中流	3.57	88.59	0.04	36.36
	颗粒态	地表径流冲刷泥沙	0.16	3.97	0.06	54.55
		总量	4.03		0.11	
8 月 3 日	溶解态	地表径流	0.69	8.13	0.03	9.09
		壤中流	7.26	85.51	0.10	30.30
	颗粒态	地表径流冲刷泥沙	0.54	6.36	0.20	60.61
		总量	8.49		0.33	

通过以上分析可以发现,暴雨的雨强、降雨历时及峰值雨强出现时段对产流时间、径流量和径流历时、氮磷流失量有着较大影响。对于短历时强降雨类型的暴雨,在防控养分流失时,可从增强土壤

的固水固沙能力方面入手,但关于其他类型暴雨条件下水土流失过程和氮磷迁移转化规律,仍需要进行大量监测和研究。

图6 两场降雨径流 $M(V)$ 曲线Fig. 6 The $M(V)$ curves of the runoff under the two typical rainstorm events

3 结论

(1) 不同的暴雨特征对地表径流和壤中流的产流过程有决定作用,在降雨量相似条件下,降雨历时和峰值雨强所处降雨过程时间段,对径流产流的延迟性和产流量有着显著影响。

(2) 在降雨径流过程中,地表径流与壤中流中氮磷养分浓度存在明显差异。短历时强降雨下径流中 TN 和 TP 浓度的波动范围大于长历时均匀降雨。坡地地表径流中氮素浓度低于壤中流,而磷素随地表径流流失的浓度高于壤中流,且雨强越高,磷素流失浓度就越高,且降雨量与径流中氮磷浓度无显著相关关系。

(3) 紫色土的机械组成中黏粒含量低,固水固肥能力较差,因此,溶解态 TN 和 TP 主要随壤中流流失,颗粒态 TP 主要随侵蚀泥沙流失。

参考文献:

- [1] 张林,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J].环境科学,2018(2):792-799. [ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, et al. Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2018(2):792-799.]
- [2] 史书.三峡库区典型农业小流域氮磷径流排放及淋溶流失[D].重庆:西南大学,2015. [SHI Shu. Nitrogen and Phosphorus Runoff Discharge and Leaching Loss in a Small Typical

Agricultural Watershed of the Three-Gorges Reservoir Region[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.]

- [3] 中国环境监测总站.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].北京:中华人民共和国环境保护部,2017. [China National Environmental Monitoring Centre. Bulletin of the Three Gorges Dam and the Environmental Monitoring [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, P. R. China, 2017.]
- [4] 罗专溪,朱波,王振华,等.川中丘陵区村镇降雨特征与径流污染物的相关关系[J].中国环境科学,2008,28(11):1032-1036. [LUO Zhuan-xi, ZHU Bo, WANG Zhen-hua, et al. Correlation Analysis among Stormwater Runoff Pollutants in a Rural Township in the Hilly Area of the Central Sichuan Basin, China[J]. China Environmental Science, 2008, 28(11):1032-1036.]
- [5] ZHU Q, SCHMIDT J P, BUDA A R, et al. Nitrogen Loss from a Mixed Land Use Watershed as Influenced by Hydrology and Seasons[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4):307-315.
- [6] GUO M J, ZHANG T G, LI J, et al. Reducing Nitrogen and Phosphorus Losses from Different Crop Types in the Water Source Area of the Danjiang River, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(18):3442.
- [7] SILVEIRA M L, O'CONNOR G A, LU Y Y, et al. Runoff and Leachate Phosphorus and Nitrogen Losses from Grass-vegetated Soil Boxes Amended with Biosolids and Fertilizer[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(5):1498-1506.
- [8] 井光花,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J].农业工程学报,2012,28(6):120-125. [JING Guang-hua, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, et al. Characteristics of Soil Nitrogen Loss under Different Intense Rainfalls in Yimeng Mountainous Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6):120-125.]

- [9] 李其林,魏朝富,曾祥燕,等.自然降雨对紫色土坡耕地氮磷流失的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(2):76-80.[LI Qi-lin, WEI Chao-fu, ZENG Xiang-yan, *et al.* Influence of Nature Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss in Slope Land of Purple Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 76-80.]
- [10] 钱婧,张丽萍,王小云,等.人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):6-10.[QIAN Jing, ZHANG Li-ping, WANG Xiao-yun, *et al.* Effects of Different Slope Length and Vegetation Coverage on Nitrogen Loss in Sloping Land under Artificial Simulated Rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 6-10.]
- [11] 范晓娟,张丽萍,邓龙洲,等.侵蚀程度差异诱发的坡面产流-产沙-总磷流失特征[J].环境科学学报,2019,39(2):459-468.[FAN Xiao-juan, ZHANG Li-ping, DENG Long-zhou, *et al.* The Characteristics of Runoff-sediment Yield and Total Phosphorus Loss Induced by the Soils of Different Erosion Degree[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(2): 459-468.]
- [12] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等.三峡库区不同退耕还林模式水土流失特征及其影响因子[J].长江流域资源与环境,2014,23(1):146-152.[ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, *et al.* Relationship between Environmental Factors and Soil Erosion with Different Patterns of Returning Farmland to Forest in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(1): 146-152.]
- [13] WANG T, ZHU B. Nitrate Loss via Overland Flow and Interflow from a Sloped Farmland in the Hilly Area of Purple Soil, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(3): 309-319.
- [14] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等.三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J].环境科学,2012,33(10):3390-3396.[ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2012, 33(10): 3390-3396.]
- [15] 王洪娇.滇池流域不同农田类型径流氮磷流失特征[D].昆明:云南大学,2013.[WANG Hong-jiao. Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Runoff Losses from Different Farmlands in Dianchi Watershed[D]. Kunming: Yunnan University, 2013.]
- [16] 陈志,王伟峰,孙丽.不同降雨条件下红壤坡地养分垂向流失规律[J].江苏农业科学,2017,45(8):241-244.
- [17] 陈玲,刘德富,宋林旭,等.香溪河流域坡耕地人工降雨条件下土壤氮素养分流失特征[J].生态与农村环境学报,2012,28(6):616-621.[CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, *et al.* Soil Nitrogen Loss from Sloping Farmland under Artificial Rainfall in Xiangxi River Valley[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(6): 616-621.]
- [18] DENG L Z, FEI K, SUN T Y, *et al.* Characteristics of Runoff Processes and Nitrogen Loss via Surface Flow and Interflow from Weathered Granite Slopes of Southeast China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(5): 1048-1064.
- [19] 王荣嘉,高鹏,李成,等.模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征[J].生态学报,2019,39(8):2732-2740.[WANG Rong-jia, GAO Peng, LI Cheng, *et al.* Characteristics of Surface Flow and Interflow and Nitrogen Loss in *Quercus acutissima* Forest Land under Simulated Rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2732-2740.]
- [20] 陈维梁,高扬,林勇明,等.紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J].环境科学,2014,35(6):2129-2138.[CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, *et al.* Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2129-2138.]
- [21] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J].中国农业科学,2011,44(9):1847-1854.[LIN Chao-wen, LUO Chun-yan, PANG Liang-yu, *et al.* Effect of Different Fertilization Methods and Rain Intensities on Soil Nutrient Loss from a Purple Soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1847-1854.]
- [22] 刘娟,张淑香,宁东卫,等.3种耕作土壤磷随地表径流流失的特征及影响因素[J].生态与农村环境学报,2019,35(10):1346-1352.[LIU Juan, ZHANG Shu-xiang, NING Dong-wei, *et al.* Characteristics of Phosphorus Runoff Losses and Influencing Factors in Three Cultivated Soils[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(10): 1346-1352.]
- [23] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.[ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, *et al.* Characteristics of Phosphorus Output through Runoff on a Red Soil Slope under Natural Rainfall Conditions[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4178-4186.]
- [24] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):24-27.[LUO Chun-yan, TU Shi-hua, PANG Liang-yu, *et al.* Effect of Rain Intensity on Nutrient Losses from Sloping Land of Purple Soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 24-27.]
- [25] 邹刚华,赵凤亮,单颖.典型红壤区不同土地利用方式下氮素垂直分布及其影响因素[J].生态与农村环境学报,2019,35(5):644-650.[ZOU Gang-hua, ZHAO Feng-liang, SHAN Ying. Vertical Distribution of Nitrogen and Its Influencing Factors under Different Land Use Patterns in a Typical Red Soil Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 644-650.]
- [26] 杨帆,蒋轶锋,王翠翠,等.西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征[J].环境科学,2016,37(1):141-147.[YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, *et al.* Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 141-147.]
- [27] 陈玲,宋林旭,崔玉洁,等.模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J].农业环境科学学报,2013,32(1):49-55.[CHEN Ling, SONG Lin-xu, CUI Yu-jie, *et al.* Characteristics of Phosphorus Loss in Sloping Arable Land of Yellow-brown Soil under Artificial Rainfall Test[J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(1): 49-55.]

作者简介:王甜(1987—),女,吉林辽源人,博士生,主要研究方向为土地利用及其生态环境效应。E-mail: 1494951212@qq.com

(责任编辑:李祥敏)