

模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究

陈 玲¹, 宋林旭¹, 崔玉洁¹, 张 彪¹, 朱晓明¹, 刘德富^{1,2*}

(1.三峡大学水利与环境学院, 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.湖北工业大学资源与环境学院, 武汉 430072)

摘 要:为揭示暴雨条件下磷素的流失规律,在湖北省香溪河流域选择具有代表性的黄棕壤坡耕地进行原位人工模拟降雨试验,研究磷素随地表径流和壤中流的流失特征。结果显示:次暴雨过程中产生两种径流形式(地表径流和壤中流),地表径流约占总径流的68.4%,壤中流约占31.6%;地表径流和壤中流磷素输出过程差异明显,地表径流中总磷(TP)和颗粒态磷(PP)变化过程较为一致,呈波浪式起伏无明显降低趋势,溶解态总磷(DP)和溶解态无机磷(DIP)在降雨初期浓度较高,之后随降雨持续迅速减小并逐步趋于稳定。壤中流中TP和PP在初期出现浓度峰值($6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),之后迅速减小并趋于稳定,DP和DIP则在降雨过程中均无明显变化,各形态磷素的平均浓度均超出水体富营养化的阈值;TP随径流的流失量为 $0.262 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同形态的磷素流失均以地表径流为主,贡献率均达72.7%以上,可见土壤对磷素具有较强的滤减作用。地表径流TP流失形态以PP为主,占总量的92.8%,壤中流中PP和DP所占的比例相当,无论在地表径流还是壤中流中,DIP的输出负荷均占DP的78.3%以上。降雨后总磷和速效磷沿剖面的养分含量均明显低于降雨前,表层养分含量的损失量最大,速效磷养分的损失比例比全量损失比例大。

关键词:三峡水库;香溪河;磷素;壤中流;流失规律

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0049-07 doi:10.11654/jaes.2013.01.008

Characteristics of Phosphorus Loss in Sloping Arable Land of Yellow-brown Soil Under Artificial Rainfall Test

CHEN Ling¹, SONG Lin-xu¹, CUI Yu-jie¹, ZHANG Biao¹, ZHU Xiao-ming¹, LIU De-fu^{1,2*}

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.College of Resources and Environment Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to reveal the loss characteristics of non-point phosphorus under storm conditions, a field experiment was conducted on the sloping arable land of typical yellow-brown soils in Xiangxi River watershed, Hubei Province. Artificial rainfall was used to evaluate the phosphorus transfer characters through surface flow and interflow. The results showed two runoff patterns: surface flow and interflow during rainfall process. The surface runoff and interflow accounted for 68.4% and 31.6% respectively in total runoff. The output feature between surface flow and interflow was significantly different. Total phosphorus(TP) and particulate phosphorus(PP) fluctuated and kept consistent in surface flow without obvious downtrend, while Dissolved phosphorus(DP) and dissolved inorganic phosphorus(DIP) were both high at the early stage, then rapidly decreased with time and kept steady finally. TP and PP in interflow were high at the very beginning ($6.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $5.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively) but decreased rapidly and then tended to be stable when artificial rainfall continued. DP and DIP kept relatively stable in the whole runoff process, the average concentration of all forms of phosphorus exceeded the threshold of eutrophication of freshwater. Loss amount of phosphorus carried by runoff was $0.262 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and surface flow was the main way for all forms of phosphorus loss—all output loadings exceed 72.7%, i.e., so soil had significant effects on reducing phosphorus output. PP was the primary form of phosphorus loss in surface flow which accounted for 92.8%, PP and DP shared the same level in interflow. No matter in surface flow or interflow, the output of DIP was mainly in the form of DP, which accounted for over 78.3%. After the rainfall, TP and rapidly available phosphorus (RAP) level were both lowered significantly, especially in surface, and the proportion of RAP loss was heavier than that of total loss.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; phosphorus; interflow; loss characteristics

收稿日期:2012-07-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51179095,51179205);国家自然科学基金杰出青年基金(50925932);国家自然科学基金青年基金(51009080,51009081,51209123);三峡大学研究生科研创新基金(2011CX009)

作者简介:陈 玲(1987—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事非点源污染输出机理研究。E-mail:wwwchenling@126.com

* 通信作者:刘德富 E-mail:dfliu@ctgu.edu.cn

水体富营养化的原因及其过程十分复杂,国内外的大量研究表明,农业生产中大量的氮磷输入是关键因素之一^[1-2],而磷素是造成水体富营养化的主要限制性影响因子^[3]。它通过地表径流携带,或者以渗漏、淋失等形式通过土壤剖面下渗到地下水进而运移到受纳水体中,成为水体中磷的重要补给源。由于土壤的吸持和固定磷素的容量很大,磷素在土壤中很难移动,而且施肥主要集中于耕层,所以多数研究认为土壤磷垂直淋溶到底层的可能性不大,广泛认为地表径流和土壤侵蚀是磷流失的主要途径^[4-5]。对磷素在土壤剖面中的淋溶以及随壤中流流失的研究相对较少,已有的研究主要集中在田间管理及土壤理化性质等对壤中流中磷素流失的影响^[6-8],方法也多采用室内模拟研究,野外原位定量研究相对薄弱,对磷素在不同水文传输形势下的流失机理有待进一步认识。本研究区域位于三峡水库香溪河流域,该区雨量丰富,土壤水分饱和度高,壤中流在整个径流成分中占有较大比重,磷素通过壤中流传输不容忽视。有研究表明夏季暴雨是磷素流失的高发期^[9],再加之频繁的耕作与不合理的施肥管理使得污染程度日益严重,对周边的水体环境质量构成严重威胁。因此,查明暴雨径流过程中不同径流形式下磷素流失特征,对合理控制农业非点源具有重要的意义。

本文拟通过人工模拟降雨试验,在原位径流小区内观察地表径流和壤中流的产流过程,分析不同水文形式下各形态磷素输出过程以及磷负荷的流失特征、降雨前后沿土壤剖面磷素再分配特征,研究水文传输过程对坡耕地磷素流失的影响,以期进一步认识坡耕地磷素流失机理,为源头控制非点源污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验点布设

香溪河流域为三峡水库湖北省境内的最大支流。地形地貌呈现岩多坡陡,为丘陵低山区,流域内坡度小于 15°占 18.3%,大于 25°占 51.2%,农业用地主要

集中在坡度为 15°~25°的坡耕地。多年平均降水量 1067 mm,多集中在夏季,约占全年总降雨量的 41%。主要的耕地利用类型为黄棕壤,占总面积的 34.1%,经济作物主要为玉米和小麦,其土地利用模式及小流域农业结构在三峡库区极具代表性。

试验地位于香溪河流域兴山县峡口镇建阳坪村(110°817'E,31°122'N),试验小区顺坡种植玉米,植被覆盖度 35%,土壤类型为黄棕壤,坡度为 15°,试验点土壤理化性质采用常规分析法确定^[10],其基本情况见表 1。在原始坡面上顺坡修建小区,小区面积为 2 m×5 m,小区边界(除出水侧)修建隔水墙,深度约为 1.5 m,隔水墙顶部高出地面 0.2 m,用砖砌墙,用水泥抹平以防渗漏和相邻小区影响。出水一侧紧挨剖面堆积 30 cm 宽的碎石墙,分别在地表和距地表 130 cm(该部位具有明显的土壤结构分层)的地方修建集水沟,用水泥砂浆抹平,使两边高中间低,以利于地表径流和壤中流的出流,紧挨碎石墙外侧修建砖砌墙,以稳定小区剖面和封闭降雨径流小区,分别在地表和距地表 130 cm 的地方修建地表径流和壤中流导流沟槽,其中安置导流管,便于收集壤中流和地表径流。试验装置见图 1。

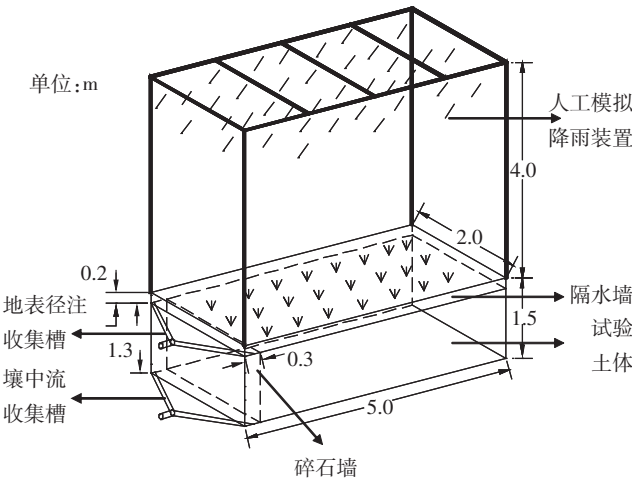


图 1 试验小区示意图

Figure 1 Map of the experimental plot

表 1 试验地土壤样品物理化学性质

Table 1 Physical-chemical properties of experimental soil

层次/cm	容重/ g·cm ⁻³	前期含水量/ %	孔隙度/ %	土壤颗粒(mm)组成/%			阳离子代换量/ cmol·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹
				砂砾(>0.05)	粉粒(0.05~0.002)	黏粒(<0.002)			
表层(0~20)	1.24	23.50	51.7	24.08	55.91	20.01	22.74	1.53	60.82
底层(100~120)	1.41	15.40	41.1	15.42	56.02	28.56	20.21	0.38	8.29

1.2 实验设计与样品采集

2011 年 10 月中旬在小区内进行人工模拟降雨试验,降雨器为 TSJY-081 侧喷式人工模拟降雨器,降雨高度为 4 m,降雨均匀系数 90%,以保证模拟降雨与自然降雨相似。率定实验雨强为 $2.22 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,降雨总量为 60 mm,人工降雨历时 27 min。在降雨前半个月,按照当地的施肥量 ($75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 在小区土壤表面均匀喷洒重过磷酸钙,并小心翻耕 5 cm 厚的表土,使肥料与表土混合均匀。模拟降雨开始后,记录降雨开始时间、地表径流和壤中流出流时间,每间隔 1~2 min 采集地表径流和壤中流各一次,每次采集径流样 2 瓶,共计 560 mL,并记录采样历时,计算得出不同时刻的径流量。记录降雨停止时间、径流停止时间,采样直至降雨径流结束。最后测量地表径流和壤中流集流桶中径流总量。并采集人工模拟降雨实验用水作为空白样,径流分析结果扣除该空白。在模拟降雨前后沿坡上、坡中、坡下采集土壤剖面样,样品分层为 0~10、10~20、20~30、30~40 cm,混合不同坡面的土样进行养分含量的测定。

1.3 样品分析

水样采集后现场加酸保存,并于 24 h 内进行室内分析。室内样品分析在香溪河水生态与环境野外监测站进行。采集的两瓶径流水相样品充分摇匀后,一瓶直接用于径流水样总磷测定,另一瓶经 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后测定溶解态总磷(dissolved phosphorus, DP)和溶解态无机磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)。TP 和 DP 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法;DIP 采用氯化亚锡还原光度法测定;颗粒态磷(particulate phosphorus, PP)采用差减法求出,计算方法为: $\text{PP} = \text{TP} - \text{DP}$ 。土样经自然风干后,采用 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法和 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法分别测定土壤中的总磷和速效磷含量。

2 结果与讨论

2.1 产流过程特征

在人工模拟降雨条件下,供试土壤产生两种径流形式:地表径流和壤中流。地表径流在降雨 4 min 后地表开始产流,壤中流在降雨 18 min 后开始产流;分别对其产流过程分析表明,径流曲线均表现为单峰曲线,地表径流和壤中流产流过程差异明显(图 2)。由于土壤前期含水量较高,地表产流较早,产流量呈逐渐增大并趋于稳定的趋势,并在降雨结束后迅速减小。在降雨初期,由于土壤尚未达到饱和,降雨首先需

满足土壤蓄水,主要以入渗的方式进入土壤中,因此地表径流量较小。随着土壤蓄水逐渐达到饱和,开始产生壤中流,水分下渗速度也逐渐趋于饱和土壤下渗速率,地表径流量达到最大并开始趋于稳定,降雨结束后,地表径流很快消失;随着地表径流的消退壤中流的流量逐渐增大,达到最大流量后由于没有雨水的补给逐渐消退,与地表径流相比,有较长时间的消退过程直至无明显产流。

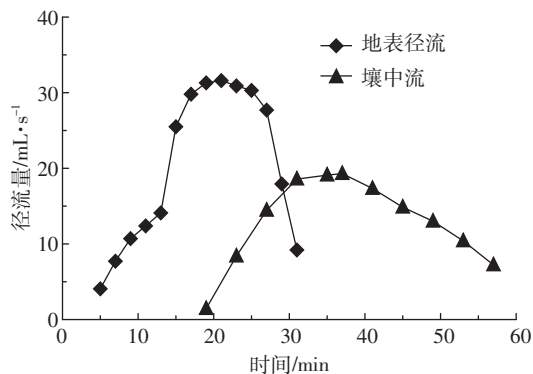


图 2 降雨条件下地表径流和壤中流产流过程

Figure 2 Generation processes of surface flow and interflow

降雨结束后地表径流的径流总量、径流系数(径流量与降雨总量的比值)和平均流量均明显高于壤中流(表 2);分别对地表径流和壤中流的累积径流量进行统计,地表径流量约占总径流的 68.4%,壤中流为 31.6%。由于模拟降雨前期有持续的降雨事件发生,表层以下的土层含水率也较高,土壤孔隙中水分连通性较好,因而雨水在孔隙中流动性强,流量也较大^[11];同时在降雨前径流小区经过翻耕,容重较小,土壤孔隙度增加,径流更容易形成壤中流流出,因此壤中流的径流系数较高^[12]。许多相关研究均指出壤中流在总径流中占有一定的比例,是坡耕地径流输出的重要方式之一^[13-14]。

表 2 地表径流和壤中流的特征

Table 2 Characteristics of surface flow and interflow

径流形式	初始产流 时间/min	产流历时/ min	径流总量/ L	径流系数/ %	平均流量/ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$
地表径流	4	23	50.4	8.4	2192
壤中流	18	42	23.3	3.9	554

2.2 不同径流形式下各形态磷素的输出过程

农田磷素的流失主要以水流迁移为驱动力,水是土壤磷素迁移的载体和溶剂,主要通过地表径流和壤

中流两种传输方式实现。根据本次模拟降雨试验的结果,分析不同径流形式下 TP、PP、DP、DIP 的输出过程。试验结果显示:地表径流中 TP 和 PP 变化过程较为一致,呈波浪式起伏无明显降低的趋势,DP 和 DIP 在降雨初期浓度较高,之后随降雨持续迅速减小并逐步趋于稳定;壤中流中 TP 和 PP 在初期出现浓度峰值,之后迅速减小并趋于稳定,DP 和 DIP 则在降雨过程中均无明显变化(图 3)。

在整个降雨过程中,PP 浓度占 TP 浓度的 88.2%~95.6%,其浓度变化趋势与 TP 基本一致,呈波浪式起伏,无明显的下降趋势,与杨丽霞等对太湖流域蔬菜地的人工模拟降雨试验研究结论一致^[9]。主要原因可能是在产流初期,径流量较少,携带养分的能力有限,径流中的磷素浓度稍有下降。由于本次试验雨强较大,雨滴对地表的冲刷剧烈,较大的土壤颗粒易被击碎,雨水携带养分富集较高的细颗粒随径流流失,径流从土壤中获得更多的磷素,与降雨径流的稀释作用相互抵消,从而使地表径流中 TP 和 PP 的浓度呈波浪式起伏,但无明显下降趋势。DP 和 DIP 是生物可直接利用的磷,易从土壤中溶出,主要以可溶态流失。土壤表层受长期施肥的影响有大量的可溶性磷素养

分富集,在降雨作用下,大量可溶性的磷素从土壤中交换溶出,因此在初期出现浓度峰值,即存在初期冲刷效应^[15]。随着土壤中养分含量逐渐降低,地表径流与土壤磷素的交换作用趋于平衡,加上雨水的稀释和壤中流的淋溶流失,地表径流中磷素浓度逐渐减小,并趋于稳定。

壤中流在土壤内的运动受内部结构和组分分布的影响,在壤中流形成的初期,土壤内部少量的细颗粒沿孔隙随优势水流迁移,造成在初期 TP 和 PP 浓度较高,但随着降雨过程的持续,土壤内部的细颗粒运移减少再加之降雨量的增加,浓度逐渐下降并趋于稳定。由于土壤内部束缚磷素的溶解释放相对均一,壤中流中溶解态磷素在整个降雨过程中浓度随时间延长无明显变化。

利用流量加权平均法,估算整个降雨过程中地表径流和壤中流中各形态磷素的平均浓度,结果见表 3。地表径流中 TP 和 PP 浓度远高于壤中流,DP 和 DIP 在不同的径流形式下平均浓度无明显差异。研究结论与高扬等对不同坡度和降雨条件下紫色土的磷素浓度输出规律一致^[16]。由于地表径流和壤中流的水动力条件差异较大,地表径流流量大,流速快,具有较

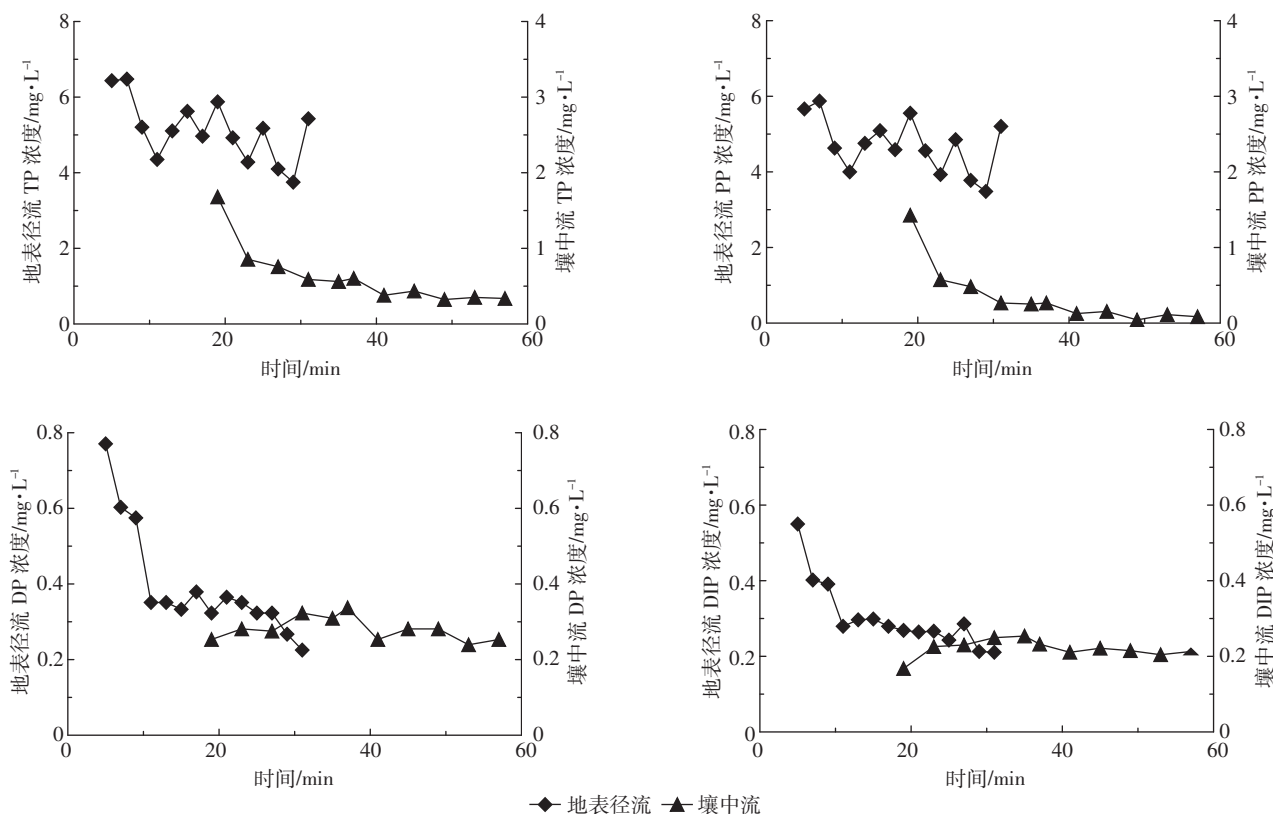


图 3 地表径流和壤中流中各形态磷素的浓度变化过程

Figure 3 Dynamics of concentration of different phosphorus forms in surface flow and interflow

大的动能,能够携带大量的颗粒态的磷,而壤中流是在内部水分充分饱和后通过重力作用流出,流速缓慢,受土壤物理结构的影响,极大地消减了颗粒态磷素的输出浓度。因此,地表径流中 PP 的输出浓度远高于壤中流,由于 PP 对 TP 的贡献率较大,造成地表径流中 TP 的输出浓度也远高于壤中流。DP 和 DIP 在不同的径流形势下浓度变化并不显著,主要是因为土壤颗粒对磷有很强的吸附性,晏维金等认为土壤解析的磷在 2 h 时增加至最大,在降雨形成径流后,雨水对 PP 并没有足够浸提解析的时间,PP 未得到释放就随径流流出,同时一定的水土混合比例的土壤所解吸的磷的浓度相当,因此地表径流和壤中流 DP 和 DIP 差异不明显^[17]。不同径流形式下各形态磷素的平均浓度均远超出水体富营养化的阈值($0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),可见其对水体富营养化的威胁不容忽视。

表 3 地表径流和壤中流中各形态磷素的平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 3 Mean concentration of different phosphorus forms in surface flow and interflow($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

径流方式	TP	PP	DP	DIP
地表径流	4.96	4.60	0.36	0.28
壤中流	0.54	0.25	0.29	0.23

2.3 磷素负荷流失特征

不同形态的磷素在地表和壤中流中的迁移特征不同,对比不同径流形式下的迁移差异,有利于发现农田磷素的流失规律。对本次降雨各形态磷素流失特征分析发现:随径流流失的 TP、PP、DP、DIP 的流失量分别为 0.262 、 0.237 、 0.025 、 $0.019\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中地表径流的流失贡献率分别为 95.3% 、 97.6% 、 72.8% 、 72.7% (表 4)。不同形态的磷素流失均以地表径流流失为主,壤中流的贡献率较低,可见土壤对磷具有较强的滤减作用,尤其对颗粒态总磷的削减效果明显,因此磷肥适当深施有利于磷素养分流失量的减少。本研究中 TP 的流失负荷为 $0.262\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 略高于其他研究者所得出的结论^[18]。主要是因为本次试验在施肥处理后半个月进行,大量未被植物吸收利用的磷素随径流流失,导致养分输出浓度较高,同时模拟降雨的径流产生量较大,造成流失负荷较高;其次,本次试验设计的雨强属于暴雨范畴,研究发现磷素的大量流失主要集中在暴雨条件下;最后,已有的研究主要集中在地表径流而忽略了普遍存在的壤中流对负荷流失的贡献,相关研究证实壤中流输入的磷素是导致湖泊和河流富营养化的重要营养物质来源之一^[19-20]。

表 4 径流中磷素养分的流失量
Table 4 Load of phosphorus loss carried by runoff

磷素形态	径流养分流失量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			地表径流/总负荷(%)
	地表径流	壤中流	总负荷	
TP	0.250	0.012	0.262	95.3
PP	0.232	0.005	0.237	97.6
DP	0.018	0.007	0.025	72.8
DIP	0.014	0.005	0.019	72.7

对不同径流形式下磷素流失的形态组成分析表明,地表径流 TP 流失以 PP 为主,占总量的 92.8% ,壤中流中 PP 和 DP 所占的比例相当(图 4);对 DP 的流失负荷的组成分析发现,DIP 的贡献率均达 78.3% 以上。庾刚等对太湖流域暴雨过程中磷素的迁移特征分析也得出磷素迁移以 PP 为主,DP 的输出以 DIP 为主^[21]。PP 虽然被土壤颗粒所吸附,但在适宜条件下会向水体释放为生物可利用磷,同样引起水体富营养化。尽管暴雨径流过程中磷素迁移以地表径流为主,但壤中流在径流中所占份额不容忽视,特别是壤中流中溶解态磷流失所占的比例较大,更易于被水生生物所利用,导致藻类过度生长等生态环境问题,对区域水环境造成较大的威胁。

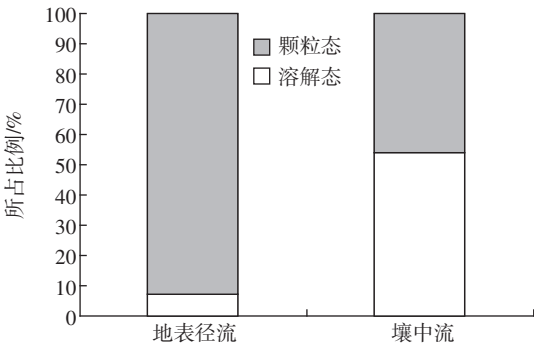


图 4 地表径流和壤中流中磷素养分组成特征分析
Figure 4 Composition characteristics of phosphorus load in surface flow and interflow

2.4 降雨前后土壤剖面磷素变化

壤中流的普遍存在不仅造成磷素的径流流失,同时会对土壤剖面磷素的分布产生影响,造成土壤剖面磷素的再分配。采集人工模拟降雨前后沿剖面的土壤样品分析发现:降雨后总磷和速效磷沿剖面的养分含量均有不同程度的降低,其变化率沿深度基本呈逐渐降低的趋势,表层的变化率最大,速效磷养分的损失比例比全量损失比例大(图 5)。受表层施肥的影响,降雨前养分含量较高,而磷在土壤中具有较强的吸附

固持能力,迁移率较小,因此随深度的增加,养分含量呈逐渐降低的趋势。由于降雨径流的冲刷,土壤表层养分富集率较高的细颗粒随径流横向流失,再加上壤中流携带的纵向流失导致表层养分含量的变化率最高,而表层以下只随壤中流纵向流失,其变化率较小。速效磷含量在降雨后损失量较大,表层含量由降雨前的 $86.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少至 $13.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明速效磷在土壤中很活跃,是本次降雨过程中随径流流失的重要部分。张燕等的研究也证明土壤尤其是表层土壤的速效磷水平与进入径流或渗漏水中的各种形态的磷呈显著正相关关系^[5]。本试验径流中各形态的磷素浓度较高,与表层土壤中磷素养分特别是速效养分的释放密切相关。

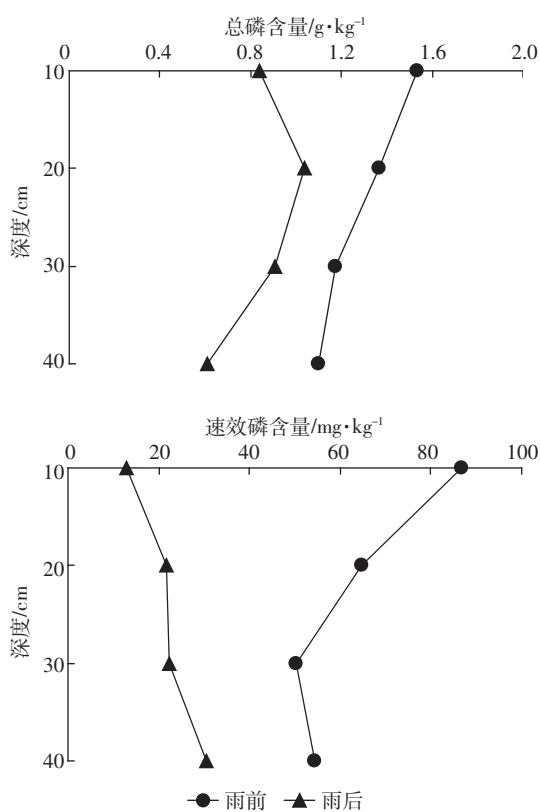


图5 降雨前后土壤剖面磷素的变化

Figure 5 Soil profile of the phosphorus concentration before and after rainfall

3 结论

(1)次暴雨径流过程中产生两种径流模式:地表径流和壤中流,其径流特征存在明显差异,地表径流约占总径流的 68.4%,壤中流为 31.6%。

(2)暴雨过程中,地表径流和壤中流磷素输出过

程差异显著,地表径流中 TP 和 PP 变化过程较为一致,呈波浪式起伏无明显降低趋势,DP 和 DIP 在降雨初期浓度较高,之后随降雨持续迅速减小并逐步趋于稳定;壤中流中 TP 和 PP 在初期出现浓度峰值,之后迅速减小并趋于稳定,DP 和 DIP 则在降雨过程中均无明显变化,各形态磷素的平均浓度均超出水体富营养化的阈值。

(3)TP 随径流的流失量为 $0.262 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷素输出负荷组成分析表明,不同形态的磷素流失均以地表径流为主,贡献率均达 72.7%以上,可见土壤对磷素具有较强的滤减作用,对磷肥的施用应适当深施;地表径流 TP 流失形态以 PP 为主,占总量的 92.8%,壤中流中 PP 和 DP 所占的比例相当,无论在地表径流还是壤中流中,DIP 的输出负荷均占 DP 的 78.3%以上。

(4)降雨后总磷和速效磷沿剖面的养分含量均明显低于降雨前,表层养分含量的损失量最大,速效磷养分的损失比例比全量损失比例大。

参考文献:

- [1] Novotny V, Olem H. Water quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution[M]. New York: 1993.
- [2] Yin C, Shan B. Multipond systems: A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, 30(6): 369-375.
- [3] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [4] 徐 畅, 谢德体, 高 明, 等. 三峡库区小流域旱坡地氮磷流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 1-5.
XU Chang, XIE De-ti, GAO Ming, et al. Study on the nitrogen and phosphorus loss characteristics from sloping uplands in small watershed of Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 1-5.
- [5] 张 燕, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域农田径流磷素流失的土壤影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 41-45.
ZHANG Yan, LI Yong-mei, ZHANG Huai-zhi, et al. The soil factors influencing phosphorus loss by field surface runoff in Dianchi watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 41-45.
- [6] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 13-17.
CAO Xue-yan, LI Yong-mei, ZHANG Huai-zhi, et al. Differences of phosphorus loss on different soil texture insitu under simulated rainfall conditions of Dianchi Lake watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 13-17.
- [7] 钱晓雍, 沈根祥, 黄丽华, 等. 崇明东滩旱作农田土壤磷素流失及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 334-338.

- QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, HUANG Li-hua, et al. Loss of soil phosphorus from rain-fed cropland and its affecting factors in Dongtan of Chongming[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):334-338.
- [8] 王 静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与氮肥后移对巢湖流域麦田磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6):1152-1159. WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of conservation tillage and postponing N application on phosphorous loss from wheat field in Chaohu lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1152-1159.
- [9] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. 环境科学, 2007, 28(8):1763-1769. YANG Li-xia, YANG Gui-shan, YUAN Shao-feng, et al. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu basin[J]. *Environment Science*, 2007, 28(8):1763-1769.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999:147-160. LU Ru-kun. Agrochemistry analysis[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999:147-160.
- [11] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R, et al. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(1):30-35.
- [12] Moret D, Arrúe J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1-2):103-113.
- [13] 丁文峰, 张平仓, 王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3):14-17. DING Wen-feng, ZHANG Ping-cang, WANG Yi-feng. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on purple soil slope [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(3):14-17.
- [14] 周明华, 朱 波, 汪 涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(11):1374-1381. ZHOU Ming-hua, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(11):1374-1381.
- [15] 李振伟, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012(4):1152-1158. LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, et al. Output characteristics of non-point phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountainous Area under the special rainfall[J]. *Environment Science*, 2012(4):1152-1158.
- [16] 高 扬, 朱 波, 汪 涛, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6):542-547. GAO Yang, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Purple soil sloping land bio-available phosphorus transported out under the condition of artificial simulated rainfall[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6):542-547.
- [17] 晏维金, 亢 宇, 章 申, 等. 磷在土壤中的解吸动力学 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(2):97-101. YAN Wei-jin, KANG Yu, ZHANG Shen, et al. The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(2):97-101.
- [18] 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.
- [19] Brookes P C, Poulton P R, Heckrath G, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5):904-910.
- [20] Sharpley A N, McDowell R W. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):508-520.
- [21] 庾 刚, 李恒鹏, 金 洋, 等. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(1):45-52. TUO Gang, LI Heng-peng, JIN Yang, et al. Characteristics of phosphorus transfer in farmland under artificial rainfall conditions[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1):45-52.