

昆明迤者小流域坡面地表径流磷素流失研究

郭圣浩¹, 王克勤¹, 宋维峰¹, 陈志中², 康 龙²

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 昆明市水务局, 昆明 650224)

摘 要: 基于松华坝水源区 2008 年自然降雨监测数据, 采用径流小区法对坡面地表径流中磷素流失进行分析; 结果表明: 不同土地利用类型下, 坡面地表径流磷素流失量与径流量、产沙量基本一致; 人工次生林地(云南松纯林)在控制地表磷素流失上有显著效果; 当地传统农业模式下的烤烟、玉米栽植, 地表径流磷素流失显著, 施肥后的 1~3 次降雨是磷素流失的主要时期。转变当地农业结构, 扩大经济林地面积, 减少人为活动对地表的影响是解决坡面地表磷素流失的关键。

关键词: 地表径流; 坡面; 磷素流失; 迤者小流域; 水源区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0053-07

Study on Phosphorus Loss of Slope Runoff in Yizhe Watershed of Kunming

GUO Sheng-hao¹, WANG Ke-qin¹, SONG Wei-feng¹, CHEN Zhi-zhong², KANG Long²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China; 2. Kunming Water Conservancy Bureau, Kunming 650224, China)

Abstract: Based on the natural rainfall data of the headwaters, the phosphorus losses of slope runoff were analyzed. The results showed that the phosphorus loss of slope runoff was consistent with runoff and soil erosion and the plantation has significant effects on control of phosphorus loss. In local traditional agricultural mode of flue-cured tobacco and corn planting, the significant phosphorus loss happened the 1~3 times in the rainfall period after fertilization. Changes in local agricultural structure, expansion of economic forest area, reduction of the impact of human activities on the ground surface are the keys to solve the problem of phosphorus loss along with slope runoff.

Key words: surface runoff; slope; phosphorus loss; Yizhe Watershed; headwaters

磷是植物生长不可或缺的营养元素, 又是维持地球淡水生态系统生态平衡的重要因素; 在自然状态下, 河流、湖泊等淡水系统中的磷非常有限, 这些有限的磷可以为水体中的藻类提供营养元素, 同时又限制其过度生长, 起着稳定生态平衡的重要作用^[1]。如果河流、湖泊中存在过量的磷就有可能导致原有生态平衡发生破坏, 引起水体富营养化, 最终丧失原有生态功能。通过研究发现, 人类在生产实践活动中, 向水体中排入磷等营养元素是造成当今世界河流、湖泊水质恶化, 水体富营养化现象的根源所在^[2], 而磷是水体富营养化发生最为关键的限制因子^[3]。故研究和了解磷素流失进入水体的机理及其影响因子, 是治理河流、湖泊水体水质恶化的关键环节。

迤者小流域位于昆明市北郊的松华坝水源保护区内, 小流域属滇池流域内盘龙江上的源头支流。滇池每年水体交换量的 42% 来自松华坝水源区, 水源区每年还为昆明市提供一半以上的饮用水^[4]; 研究水源区内的水体污染对滇池综合治理及昆明市用水安全都有着非常重要的意义。目前, 水源区内大量的人类生产活动, 特别是农业生产活动导致的农业面源污染问题严峻^[5]。

如何在不影响当地居民经济发展的同时又很好地解决农业面源污染问题是当前我们急需解决的大事。在山区、半山区 95% 以上的松华坝保护区内研究坡面上主要土地利用类型下的磷素流失是非常必要的。

收稿日期: 2010-05-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(30660037); 云南省自然科学基金项目(2006D0041M); 云南省科技计划项目(2006SG20); 西南林学院水土保持重点学科

作者简介: 郭圣浩(1985-), 男, 山西晋中榆次人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: gshhsn@sina.com

通信作者: 宋维峰(1967-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 生态环境工程, 森林水文。E-mail: songwf85@126.com

1 研究区概况

松华坝水源保护区位于云南省中部,昆明市主城区的东北端,是昆明市第一个饮用水水源保护区;地处东经 $102^{\circ}45'01''-102^{\circ}59'15''$,北纬 $25^{\circ}08'48''-25^{\circ}28'01''$,总占地面积约 630 km^2 ,径流面积约 293 km^2 ,海拔 $1\ 890\sim 2\ 590\text{ m}$,年平均气温为 14.7°C ,年降雨量 $900\sim 1\ 200\text{ mm}$,气候属北亚热带和暖温带混合型气候,多年平均气温 13.8°C ;多年平均降雨量 925.6 mm ,最大年降雨量 $1\ 405.7\text{ mm}$ (1968 年),最小年降雨量 748.3 mm (1972 年)。年内降水分布极为不均,5-10 月为雨季,降雨量占全年的 87.5% ,11 月至次年 4 月为旱季,降雨量仅占全年的 12.5% 。具有夏秋多雨,冬春干旱的特点。10 年一遇 $3\sim 6\text{ h}$

降雨量 61.2 mm ,24 h 降雨量 91.5 mm 。水源保护区内人口约 9 万人,其中 96% 以上为农民;经济结构以烤烟、水稻、玉米、蔬菜等种植业为主,耕地面积近 65 km^2 ,一半以上为坡地。

迳者小流域位于松华坝水源区中部,昆明市嵩明县滇源镇西端的迳者村委会境内,地处东经 $102^{\circ}45'35''-102^{\circ}50'05''$,北纬 $25^{\circ}13'20''-25^{\circ}17'00''$,距昆明市嵩明县县城约 38 km ,土地总面积 21.56 km^2 。流域内的牧羊河,为松华坝水库上游主要支流,在流域内全长 2.6 km ,流域内地形以高原低山为主,属低山丘陵中轻度流失区;土壤以红壤为主,占流域土地面积的 89.3% ,其主要理化性质见表 1;流域内坡耕地 284.38 hm^2 ,占总耕地总面积 55.8% ,且大部分坡度为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$,主要以种植玉米、马铃薯、烤烟为主。

表 1 迳者小流域表土主要理化性质

土壤类型	平均土层厚度/cm	土壤容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有机质/%	全氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 值
红壤	65	1.53	1.07	175.8	30.2	320.1	8.4	6.8

2 研究方法

2.1 试验设计

设计选取位于迳者小流域中段的坡面,布设投影面积为 $5\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准径流小区共 8 个;8 个小区的坡度均在 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 之间,海拔在 $2\ 066\sim 2\ 068\text{ m}$ 之间;每个径流小区的出口处,均布设了 $2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的集流池各一个,用于小区内地表径流的收集;集流池均采用五分法收集径流(即 $1/5$ 的流入集流

池内,其余随排水沟排出),每个集流池均配有防雨盖,避免降雨直接降入;径流小区内布设自计雨量计,监测降雨量和降雨强度。根据当地主要种植习惯,径流小区选取了玉米和烤烟两种作物,并分别进行了 3 个小区的重复处理,另外选取邻近人工林地和荒地各一处,1#-3# 小区种植烤烟、4#-6# 小区种植玉米,所有的施肥量、施肥时间以及烤烟的移栽时间均按照当地习惯,一次性播撒底肥,无追肥;7#、8# 不做任何处理。8 个径流小区的预处理情况详见表 2。

表 2 径流小区试验预处理概况

径流小区	种植密度株/ hm^2	种植方式	播种方式	盖度/%	栽植及施肥时间	底肥施用/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			备注
						施氮	施磷	施钾	
1#(烤烟地)	12500	顺坡种植	移栽	55	2008-05-05	150	70	200	3 个重复施肥量一致,1 次性施肥,无追肥
2#(烤烟地)				57					
3#(烤烟地)				50					
4#(玉米地)	38500	顺坡种植	穴播	45	2008-08-01	150	70	200	3 个重复施肥量一致,1 次性施肥,无追肥
5#(玉米地)				40					
6#(玉米地)				40					
7#(人工林地)	—	—	—	50	—	—	—	—	云南松纯林,生长期在 12 年左右,树高 $1.5\sim 2\text{ m}$
8#(荒地)	—	—	—	—	—	—	—	—	为荒废 1 年以上的坡地,有极少杂草

注:植被盖度为植物生物量最大时期的盖度,各小区中坡向均为南向坡(S),土壤为红壤,坡位为坡上位。

根据试验区降雨监测显示,观测区内 2008 年降雨量共 937.5 mm ,为当地多年的平均水平;其中雨季 5-10 月降雨量为 748.9 mm ,占全年总降雨量的 79.9% ;故采用具有代表性的雨季 5-10 月的降雨监

测数据进行分析。

2008 年 5-10 月共监测到降雨 41 次,试验选取了 5-10 月其中的 12 次降雨径流过程进行分析,具体降雨统计见表 3。

表 3 12 次典型降雨统计表

时间 (日期)	降雨量/ mm	雨强/ (mm·h ⁻¹)	备注	日期 (日期)	降雨量/ mm	雨强/ (mm·h ⁻¹)	备注
05-02	13.8	3.4	未种植 任何作物	07-28	21.9	5.7	
05-10	20.4	3.2	种植玉米后 第一次降雨	08-04	19.8	7.6	种植烤烟后第一次降雨
05-18	16.2	6.4		08-14	18.2	5.3	
06-27	18.4	14.8		08-18	20.8	7.4	
06-30	83.6	11.2		09-05	15.3	4.2	
07-15	20.8	9.1		09-25	17.5	8.6	作物收获后第一次降雨

注: 表中雨强均为 30 min 内最大雨强, 用 I_{30} 表示。

2.2 取样与测定方法

在每次降雨产流结束后, 首先从径流小区内的自记雨量计中读取降雨量(R) 和降雨强度(RI); 将集流池中的水充分搅浑, 取 500 ml 的浑水置于试剂瓶中, 测定含沙量(S), 估算土壤流失量(M)。

取 1 000 ml 的浑水样置于试剂瓶中, 带回实验室测定水样中的总磷(TP)和可溶性总磷酸盐(DP)的浓度; 取样全部完成后, 仔细清理集流池中的径流水和泥沙, 完毕后盖好等待下次降雨径流的产生。

径流中的泥沙含量测定采用置换法测定^[8]; 径流量采用体积法测定(集流池面积×径流深×5)^[8]; 水样中的总磷浓度(TP)采用钼酸铵分光光度法, 选取中性条件下过硫酸钾高温消化的方法测定; 可溶性总磷酸盐浓度(DP)采用钼锑抗分光光度法, 水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后, 选取过硫酸钾高温消化的方法测定, 泥沙结合态磷浓度(PP)采用计算法 $PP = TP - DP$ ^[6-8]。

3 结果与分析

3.1 坡面地表径流量和产沙量

图 1、图 2 分别为 4 种土地利用类型下径流量、产沙量随时间变化的趋势。可以看出, 4 种类型(荒地、人工林地、玉米地、烤烟地)下的径流量和产沙量在整

个监测过程中均有较大的波动; 降雨量对径流量、产沙量均有显著的影响, 波动的趋势与降雨量呈正相关关系。4 种土地利用类型相比较, 人工林地产生的径流量、产沙量均为最小, 而荒地的径流量和产沙量最大。

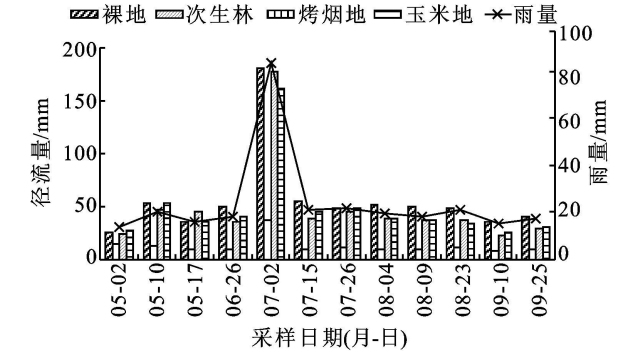


图 1 不同利用类型径流量随时间的变化

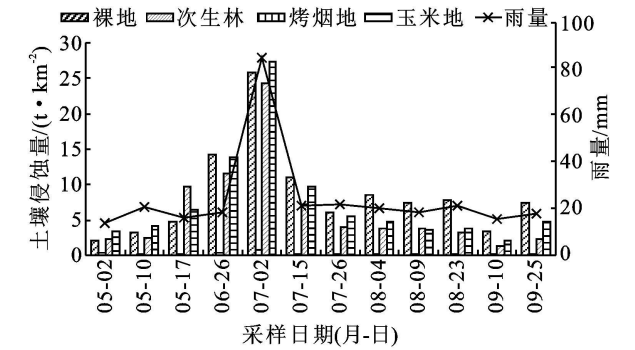


图 2 坡面不同利用类型产沙量随时间的变化

表 4 不同土地类型下径流量、产沙量基本统计

土地类型	径流量		不同土地类型中 径流量方差分析	产沙量		不同土地类型中 径流量方差分析
	均值/mm	标准差		均值/mm	标准差	
荒地	56.06	40.12	显著性概率值 Sig 为 0.016< 0.05	8.47	6.44	显著性概率值 Sig. 为 0.021< 0.05
人工林地	12.84	7.60		0.29	0.18	
玉米地	48.06	36.35		6.32	6.51	
烤烟地	48.13	41.48		7.45	7.06	

注: 样本数均为 12, 显著性概率 sig 值小于 0.05, 认为差异显著。

从表 4 可以看出, 4 种土地利用类型下的径流量和产沙量存在显著性差异, 方差分析中的 F 分布显著性概率分别为 0.016, 0.021。

人工林地在整个监测期间的径流量、产沙量均最小, 径流量的平均值为人工林地(12.84 mm)< 玉米地≈烤烟地< 荒地; 而产沙量的平均值为人工林地

(0.29 t/km²) < 玉米地(6.32 t/km²) < 烤烟地(7.45 t/km²) < 荒地(8.47 t/km²)。可以看出,人工林地在控制坡面磷素流失量上表现出较好的水土保持效益;而玉米地和烤烟地的径流量、产沙量却与荒地相差不大,这可能是由于农业生产活动施肥、除草等人为活动加剧了土壤扰动,同时作物的植被覆盖时间相对较短,不能有效减弱降雨对土壤侵蚀的作用^[9]。

表 5 不同土地类型下径流量、产沙量和降雨量的相关性分析表

项 目		含沙量	降雨量	径流量
含沙量	相关系数	1	0.666 [*]	0.909 [*]
	双尾显著性			
	覆概率 Sig	-	0.000	0.000
	样本	12	12	12
降雨量	相关系数	0.666 [*]	1	0.806 [*]
	双尾显著性			
	覆概率 Sig	0.000	-	0.000
	样本	12	12	12
径流量	相关系数	0.909 [*]	0.806 [*]	1
	双尾显著性			
	覆概率 Sig	0.000	0.000	-
	样本	12	12	12

注: * 表示 0.01 显著性水平。

从表 5 中可以看出,不同土地利用类型下,降雨量与径流量、含沙量存在显著的相关关系,显著性概率 Sig 分别为 0.806, 0.666;而径流量与含沙量同样存在极显著的相关关系。吴发启等对黄土高原缓坡耕地上降雨对径流产沙的研究也表明,降雨量与径流量、产沙量存在显著的线性相关关系。

3.2 坡面地表径流磷素流失量

图 3- 5 分别表示监测时段内,地表径流中总磷(TP)、可溶性总磷酸盐(DP)及泥沙结合态磷(PP)的流失量变化。

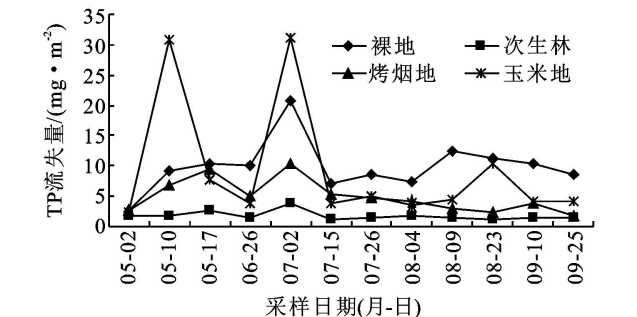


图 3 不同利用类型径流中总磷流失量变化

从图 3 可以看出,在整个监测时段内,玉米地和烤烟地的流失量变化波动较荒地和人工林地大。其中,玉米地在 7 月 2 日和 5 月 10 日的降雨监测中,地表径流 TP 流失量达到了全年的峰值,分别为 31.19 mg/m² 和 30.96 mg/m²,最小值为 5 月 2 日降雨的 2.41 mg/m²;烤烟地在 7 月 2 日的降雨监测中,地表

径流 TP 流失量达到了全年的峰值 10.5 mg/m²,最小值则为 9 月 25 日降雨的 1.92 mg/m²。

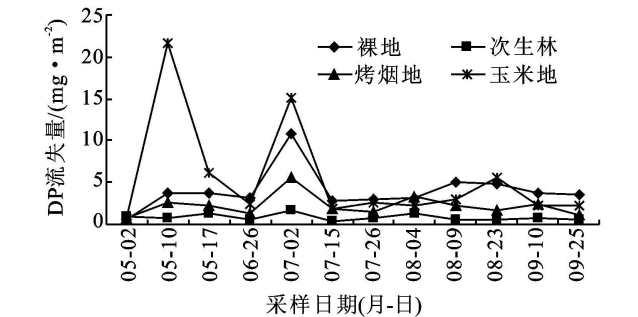


图 4 不同利用类型径流中可溶性总磷酸盐流失量随时间的变化

从图 4 可以看出,地表径流中可溶性总磷酸盐(DP)的流失量与总磷(TP)的流失量规律基本一致,烤烟地和玉米地地表径流 DP 的流失量在整个监测时段内变化波动较大;其中,玉米地的在 5 月 10 日的降雨监测中,地表径流 DP 流失量达到了全年的峰值为 21.6 mg/m²,最小值为 5 月 2 日降雨的 0.74 mg/m²;烤烟地在 7 月 2 日的降雨监测中,地表径流 DP 流失量达到了全年的峰值 5.56 mg/m²,最小值则为 5 月 2 日降雨的 0.71 mg/m²。

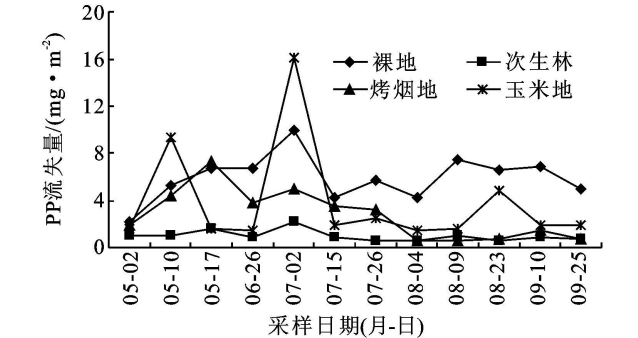


图 5 不同利用类型径流中泥沙结合态磷流失量随时间的变化

从图 5 可以看出,在整个监测时段内,玉米地的 PP 流失量变化波动较荒地、人工林地和烤烟地的变化显著;其中,玉米地的在 7 月 2 日的降雨监测中,地表径流 PP 流失量达到了全年的峰值为 16.07 mg/m²,最小值为 8 月 4 日降雨的 1.44 mg/m²。

运用 SPSS 统计分析软件,进一步对 4 种利用类型下 TP、DP、PP 流失量进行具体统计分析。可以看出:不同土地类型下,地表径流中 TP、DP、PP 的流失量均存在显著性差异,显著性概率值分别为 0.01, 0.028, 0.002。

人工林地在整个监测时段中,地表径流 TP、DP、PP 的流失量的变化波动最小,方差分别为 TP (0.649)、DP (0.143)、PP (0.226);而荒地、玉米地、烤烟地磷素的流失量变化波动显著;这可能是由于人工林地的植被郁闭度相对较大,人为扰动较小有关。

地表径流中 TP 流失量基本为荒地 ≈ 玉米地> 平均值分别为荒地 9.94 mg/m²、人工林地 1.85 mg/m²、玉米地 9.35 mg/m²、烤烟地 4.98 mg/m²。
烤烟地> 人工林地; 其中, 地表径流中 TP 流失量的

表 6 不同土地类型下磷素流失量基本统计表

植被类型	样本数	TP			DP			PP		
		平均值/ (mg·m ⁻²)	标准差	方差分析	平均值/ (mg·m ⁻²)	标准差	方差分析	平均值/ (mg·m ⁻²)	标准差	方差分析
荒地	12	9.94	4.25	显著性 概率 sig 为 0.01< 0.05	4.03	2.43	显著性 概率 sig 为 0.028< 0.05	5.91	1.95	显著性 概率 sig 为 0.002< 0.05
人工林地	12	1.85	0.81		0.85	0.378		0.99	0.48	
玉米地	12	9.35	10.37		5.48	6.35		3.87	4.47	
烤烟地	12	4.98	2.77		2.21	1.28		2.76	2.13	

地表径流中 DP 流失量平均值分别为荒地 4.03 mg/m²、人工林地 0.58 mg/m²、玉米地 5.48 mg/m²、烤烟地 2.21 mg/m², 地表径流中 DP 流失量基本为人工林地< 烤烟地< 荒地< 玉米地。

地表径流中泥沙结合态(PP)流失量基本为人工林地< 烤烟地< 玉米地< 荒地; 其中, 地表径流中 PP 流失浓度平均值分别为荒地 5.91 mg/m²、人工林地 0.99 mg/m²、玉米地 3.87 mg/m²、烤烟地 2.76 mg/m²。在烤烟地和玉米地中, TP、DP、PP 的流失量中, 烤烟地始终都小于玉米地, 其中玉米地在 DP 的流失

量高于荒地, 主要原因可能是因为烤烟地相对玉米地低矮的植被, 较大的郁闭度, 一定程度上削弱了降雨对土壤结构的破坏, 减少了土壤磷素的流失。焦金平等在淮北平原对不同作物种植下地表径流磷素流失研究中也表明, 植物覆盖度的增加可以有效的减少地表径流中磷素的流失。

从图 3- 5 可以看出, 玉米地和烤烟地的主要流失量发生在施肥后的 1~ 3 次降雨径流中, 且随着时间的推移 1~ 2 周后, 流失量迅速下降; 表 6 为玉米地和烤烟地施肥后 3 次降雨的流失量。

表 7 两种类型坡耕地磷流失量的比较

项目	玉米地				烤烟地			
	5月10日	5月17日	6月26日	下降幅度/%	下降幅度/%	8月4日	8月9日	8月23日
总磷(TP)/(mg·m ⁻²)	23.09	7.75	7.02	69.6	15.48	12.03	7.20	53.5
可溶性总磷酸盐(DP)/(mg·m ⁻²)	16.11	6.14	4.33	73.1	13.16	9.4	4.93	62.5

从表 7 中可以看出, 玉米地在施肥后的 3 次降雨 5 月 10 日、5 月 17 日、6 月 26 日中 TP 和 DP 的流失量有明显的波动; 其中 5 月 10 日玉米地施肥过后的第 1 次降雨中, 地表径流中 TP 和 DP 的流失量均达到了全年的最大峰值(TP 为 23.09 mg/m²、DP 为 16.11 mg/m²), 而在经过 1~ 2 周后的(5 月 17 日)第 3 次降雨中, TP 和 DP 的流失量呈显著的下降趋势; 其中 TP 为 7.02 mg/m² 与 5 月 10 日相比下降了 69.6%, DP 为 4.33 mg/m² 与 5 月 10 日相比下降了 73.1%; 与 TP 的流失量相比 DP 的下降幅度较明显。

烤烟地施肥过后的第一次降雨(8 月 4 日)中, 地表径流中 TP 和 DP 的流失量均达到了全年的最大峰值, 其中 TP 为 15.48 mg/m²、DP 为 13.16 mg/m²; 而在经过 1~ 2 周后的(8 月 23 日)第 3 次降雨中, 地表径流中 TP 和 DP 的流失浓度呈显著的下降趋势, 其中 TP 下降了 53.5%、DP 下降了 62.5%。这可能是由于磷肥在施入土壤后, 由玄武岩发育的红壤土对磷素的固定是比较显著的可溶性的磷大部分会被土壤所吸附、固定, 同时有效磷的含量也会迅速的下降^[10-13]; 鲁如坤等对磷在土壤中有有效性的衰减研究中

也表明, 磷素在施磷后的 3 h 内就会有一半以上的磷素被固定, 可溶性总磷酸盐(DP)的含量会在 0~ 3 h 内直线下降, 在随后的 60 d 内衰减速度渐减。

3.3 不同利用类型下, 坡面地表径流磷素流失形态特征

坡地地表径流中磷素的形态可分为可溶性总磷酸盐和泥沙结合态磷, 即径流中的总磷(TP)= 可溶性总磷酸盐(DP)+ 泥沙结合态磷(PP)。表 8 为 12 次降雨产流后, 不同利用类型(荒地、人工林地、玉米地、烤烟地)地表径流中可溶性总磷酸盐(DP)浓度、泥沙结合态磷(PP)浓度与总磷(TP)浓度所占的比例。

从表 8- 10 中分析可知, 在不同土地利用类型下各种形态地表径流磷浓度有着显著的差异, 其中 DP/TP、PP/TP 的显著性概率 Sig. 值均为 0.022, 小于 0.05。而 4 种类型中荒地与玉米地之间的差异最显著。

在监测的 12 次降雨地表径流磷素流失中, 荒地地表径流中泥沙结合态磷(PP/TP)的含量明显高于可溶性总磷酸盐(DP/TP)的含量, 而与荒地相比, 人工林地、玉米地和烤烟地均没有表现出明显的规律性。

表 8 不同土地利用类型下各种形态地表径流磷浓度构成

采样日期 (月-日)	不同植被 类型	不同形态磷径流浓度占 总磷浓度的比例/%		采样日期 (月-日)	不同植被 类型	不同形态磷径流浓度占 总磷浓度的比例/%	
		DP	PP			DP	PP
05-02	荒地	18.8	81.2	07-26	荒地	34.8	65.2
	人工林地	46.2	53.8		人工林地	53.3	46.7
	玉米地	30.7	69.3		玉米地	50.8	49.2
	烤烟地	27.5	72.5		烤烟地	30.0	70.0
05-10	荒地	41.8	58.2	08-04	荒地	42.0	58.0
	人工林地	44.7	55.3		人工林地	66.2	33.8
	玉米地	69.8	30.2		玉米地	60.1	39.9
	烤烟地	36.7	63.3		烤烟地	85.0	15.0
05-17	荒地	36.0	64.0	08-09	荒地	40.8	59.2
	人工林地	43.6	56.4		人工林地	38.9	61.1
	玉米地	79.3	20.7		玉米地	63.4	36.6
	烤烟地	23.5	76.5		烤烟地	78.1	21.9
06-26	荒地	32.5	67.5	08-23	荒地	42.4	57.6
	人工林地	35.7	64.3		人工林地	53.3	46.7
	玉米地	61.7	38.3		玉米地	55.6	44.4
	烤烟地	25.8	74.2		烤烟地	68.6	31.4
07-02	荒地	52.0	48.0	09-10	荒地	34.8	65.2
	人工林地	43.8	56.2		人工林地	55.6	44.4
	玉米地	48.5	51.5		玉米地	54.1	45.9
	烤烟地	52.9	47.1		烤烟地	62.5	37.5
07-15	荒地	40.5	59.5	09-25	荒地	42.5	57.5
	人工林地	34.1	65.9		人工林地	46.7	53.3
	玉米地	50.8	49.2		玉米地	54.1	45.9
	烤烟地	35.3	64.7		烤烟地	62.5	37.5

注: 采样年份为 2008 年。

表 9 不同土地利用类型下各种形态地表径流磷浓度方差分析

项目	分项均方	平方和	自由度	均方	F	Sig.
DP/TP	组间均方	2048.85	3	682.95	3.55	0.022
	组内均方	8460.63	44	192.29		
	合计	10509.48	47			
P/TP	组间均方	2048.85	3	682.95	3.55	0.022
	组内均方	8460.63	44	192.29		
	合计	10509.48	47			

表 10 不同土地利用类型下各种形态地表径流磷浓度多重比较分析

项目	不同植被		均值差	Sig.	项目	不同植被		均值差	Sig.
DP/TP	荒地	人工林地	- 8.600	0.136	PP/TP	荒地	人工林地	8.600	0.136
		玉米地	- 18.333*	0.002			玉米地	18.333*	0.002
		烤烟地	- 10.792	0.063			烤烟地	10.792	0.063
	人工林地	荒地	8.600	0.136		人工林地	荒地	- 8.600	0.136
		玉米地	- 9.733	0.093			玉米地	9.733	0.093
		烤烟地	- 2.192	0.701			烤烟地	2.192	0.701
	玉米地	荒地	18.333*	0.002		玉米地	荒地	- 18.333*	0.002
		人工林地	9.733	0.093			人工林地	- 9.733	0.093
		烤烟地	7.542	0.190			烤烟地	- 7.542	0.190
	烤烟地	荒地	10.792	0.063		烤烟地	荒地	- 10.792	0.063
		人工林地	2.192	0.701			人工林地	- 2.192	0.701
		玉米地	- 7.542	0.190			玉米地	7.542	0.190

注: * 表示 0.05 的显著性水平。

荒地在整个监测时段内, 地表径流中泥沙结合态磷(PP)的含量明显高于可溶性总磷酸盐(DP)的含量, 泥沙结合态磷占总磷的61.8%; 除7月2日一次降雨中, DP/TP值(52%)略高于PP/TP值(48%)外, 其他11次DP/TP值均远小于PP/TP值; 其中5月2日最为突出, PP/TP值达到81%; 而与荒地相比, 人工林地(云南松纯林)、玉米地和烤烟地均没有表现出PP明显高于DP的趋势。

人工林地地表径流中PP的流失浓度总体略高于DP的流失浓度; 而烤烟地在8月4日降雨后, DP的流失浓度逐渐高于了PP的流失浓度; 而玉米地与人工林地恰好相反, 整个监测过程中, DP的流失浓度略高于PP的流失浓度。在地表径流磷素流失中, 只有荒地表现出明显的PP流失浓度高于DP流失浓度的趋势, 而其他3种则没有明显的趋势; 而烤烟地在8月后表现出DP高于PP的趋势; 可能是由于玉米地和烤烟地在作物的生长后期, 植被覆盖度增加, 以及施磷共同影响磷素流失形态的原因。

4 结论

(1)在松华坝迳者小流域内, 降雨量对不同土地利用类型下的径流量和产沙量均具有显著正相关关系; 人工次生林地在产沙量和径流量上均显著小于其他3种利用类型, 表现出较好的水土保持效益。而栽植作物并不会有效的减少水土流失; 其中, 径流量依次为人工林地< 玉米地 \approx 烤烟地< 荒地; 产沙量为人工林地< 玉米地< 烤烟地< 荒地。

(2)在不同土地利用类型下, 坡面地表径流中的总磷(TP)的流失量与可溶性总磷酸盐(DP)的流失量变化规律基本一致: 人工次生林(云南松纯林)中的磷素流失量始终小于荒地、烤烟地和玉米地; 在整个监测时段内地表径流中TP流失量基本为人工林地< 烤烟地< 玉米地 \approx 荒地; DP流失量基本为人工林地< 烤烟地< 荒地< 玉米地; 泥沙结合态(PP)流失量基本为人工林地< 烤烟地< 玉米地< 荒地; 烤烟地和玉米地的磷素流失量几乎与荒地一致。

(3)烤烟地中的TP、DP、PP的流失量始终都小于玉米地, 而玉米地在DP的流失量高于荒地, 主要原因可能是因为烤烟地相对玉米地低矮的植被, 较大的郁闭度, 一定程度上消弱了降雨对土壤结构的破坏, 减少了土壤磷素的流失。

(4)在施肥处理的玉米地和烤烟地内, 磷素流失量主要发生在施肥后的1~3次降雨径流中, 且随着时间的推移1~2周后, 流失量会迅速的下降; 其中, 玉米地地表径流中TP和DP的流失量在施肥后的3

次降雨中, 分别下降了69.6%和73.1%; 烤烟地地表径流中TP和DP的流失量在施肥后的3次降雨后, 分别下降了53.5%和62.5%。

(5)在整个监测时段内, 荒地地表径流磷素流失中, PP流失浓度均高于DP流失浓度, 泥沙结合态磷流失占总磷流失的(PP/TP)61.8%; 而人工林地、烤烟地、玉米地均没有表现出径流磷素流失中, 泥沙结合态磷素为主要流失的趋势; 相反, 烤烟地在8月后表现出DP流失浓度高于PP的趋势; 可能是由于植被覆盖度的变化、施磷等影响因子共同作用的结果。

可见在松华坝迳者小流域, 传统种植方式下玉米和烤烟的栽植不可能控制磷素的流失, 而研究表明: 人工次生林地对地表径流中磷素的流失有显著的控制作用, 在今后的土地利用规划中, 可适当改变当地传统的栽植模式, 逐步扩大林地, 特别是经济林的面积, 将当地居民向林农转变, 适当搬迁水源区内居民, 减少人为活动是解决松华坝水源区水体污染的方法之一。

参考文献:

- [1] 李裕元. 坡地磷素迁移研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 1-3.
- [2] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄绵土坡耕地磷素迁移与土壤退化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 1-7.
- [3] 焦平金, 许迪, 王少丽. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 15-20.
- [4] 来路, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 65-67.
- [5] Sharpley A N, Gburek W J, Folmar G, et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania[J]. Agri. Water Manage., 1999, 41: 77-89.
- [6] Sharpley A N. The Enrichment of Soil Phosphorus in Runoff Sediments[J]. J. Environ. Qual., 1980, 9(3): 521-526.
- [7] 张志剑, 朱荫渭, 王珂, 等. 水稻田土水系统中磷肥投入及环境意义的研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 229-232.
- [8] 向治安. 水文测验[M]. 北京: 水利水电出版, 1985.
- [9] 徐泰平, 汪涛, 朱波, 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): 139-142.
- [10] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有有效性的衰减[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 323-329.
- [11] 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态转化及其有效性[J]. 土壤学进展, 1981(2): 1-11.
- [12] 顾益初, 钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性[J]. 土壤, 1997(1): 13-17.
- [13] 黄满湘, 周成虎, 章申, 等. 农田暴雨径流侵蚀泥沙流失及其对氮磷的富集[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 13-17.