

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 等. 喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 756–765.

PENG Hong-jia, WU Qi-xin, REN Fei-peng, et al. Response of soil erosion and phosphorus losses to individual rainfall under different land uses at Karst slopes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 756–765.

## 喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳<sup>1</sup>, 吴起鑫<sup>1,3\*</sup>, 任斐鹏<sup>2\*</sup>, 安艳玲<sup>4</sup>, 付宇文<sup>5</sup>, 刘瑞禄<sup>5</sup>, 吕婕梅<sup>3</sup>

(1. 贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵阳 550025; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 4. 贵州理工学院, 贵阳 550003; 5. 贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

**摘要:**为探究喀斯特地区坡面不同土地利用方式下水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应,对喀斯特地区不同土地利用方式(水保林、耕地、自然草地、裸地、经果林)坡面场次降雨的水土流失和磷素输出进行了分析。结果表明:5种土地利用方式的径流系数由大到小整体表现为裸地>自然草地>耕地>水保林>经果林,而单位面积产沙量、单位面积磷流失量整体表现为耕地>裸地>经果林>水保林>自然草地。其中耕地和裸地在大雨量、高强度降雨事件的影响下径流系数、单位面积产沙量、单位面积磷流失量急剧增大。雨强是影响水土流失、磷素输出的重要因素,可以很好地拟合水土流失量。径流中磷素输出以颗粒态磷(PP)为主,占总磷(TP)的比例介于75.47%~97.91%之间。降雨引起的耕地径流 $[0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 2.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 、裸地径流 $[0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 和经果林径流 $[0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 磷输出对受纳水体磷的含量有增加的风险,而自然草地径流 $[0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 影响较小。坡面水土流失和磷素输出与降雨过程、土地利用方式关系密切,可以通过优化土地利用结构、减少人为扰动有效防治水土流失,减轻流域面源污染。

**关键词:**喀斯特;土地利用方式;次降雨;水土流失;磷

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)04-0756-10 doi:10.11654/jaes.2017-1486

### Response of soil erosion and phosphorus losses to individual rainfall under different land uses at Karst slopes

PENG Hong-jia<sup>1</sup>, WU Qi-xin<sup>1,3\*</sup>, REN Fei-peng<sup>2\*</sup>, AN Yan-ling<sup>4</sup>, FU Yu-wen<sup>5</sup>, LIU Rui-lu<sup>5</sup>, LÜ Jie-mei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 5. Guizhou Provincial Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In order to understand the response of soil erosion and phosphorus losses to individual rainfall under different land uses at Karst slopes, water and sediment samples were collected from different Karst slopes. These samples comprised conservation forest, farmland, natural meadow, bare land, and economic fruit forest land uses. The results indicated that the descending order of runoff coefficients for the five land-use types were as follows: bare land > natural meadow > farmland > conservation forest > economic fruit forest. The sediment yield and phosphorus losses per unit area were (in descending order) as follows: farmland > bare land > economic fruit forest > conservation forest > natural

收稿日期:2017-09-29 录用日期:2017-12-25

作者简介:彭宏佳(1992—),男,重庆开州人,硕士研究生,从事水土保持与面源污染研究。E-mail: penghongjia1992@163.com

\* 通信作者:吴起鑫 E-mail: wuqixin03@163.com;任斐鹏 E-mail: feipengren2006@mail.bnu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金委-贵州省喀斯特联合基金项目(U1612442);贵州省水利厅科技基金项目(KT201508);贵州省科技厅联合基金项目(黔科合LH字[2016]7457号);三峡工程生态与环境监测系统长江上游典型区小流域监测重点站项目(JJ[2016]-021)

**Project supported:** The Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and Guizhou Province, China(U1612442); Science and Technology Fund of Water Resources Department of Guizhou Province, China(KT201508); Joint Fund of Science and Technology Department of Guizhou Province, China(Qian, LH[2016]7457); Ecological and Environmental Monitoring System of the Three Gorges Project, Key Monitoring Stations of Small Watershed in Typical Areas Along the Upper Reaches of the Yangtze River(JJ[2016]-021)

meadow. Under large rainfall and high-intensity rainfall conditions, runoff coefficients, sediment yield per unit area, and phosphorus losses per unit area of farmland and bare land increased sharply. Rain intensity was a significant factor that affected soil erosion and phosphorus losses, which fitted well with the amount of soil erosion. Particulate phosphorus (PP) was the main loss of total phosphorus (TP), ranging from 75.47% to 97.91%. Farmland runoff [ $0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 2.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ], bare land runoff [ $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] and economic fruit forest runoff [ $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] could lead to phosphorus loadings increasing in receiving waters, while that of natural meadow runoff [ $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] had minor impacts on pollutant loadings in receiving waters. Soil erosion and phosphorus losses correlated strongly with precipitation processes and land uses, suggesting that land-use structure optimization and human disturbance reduction could be an effective method to mitigate soil erosion and non-point source pollution.

**Keywords:** Karst area; land uses; individual rainfall; soil erosion; phosphorus

贵州省是我国西南典型喀斯特地貌分布区,喀斯特地貌占全省面积的62%,是我国喀斯特地形分布最广的省区。该地区为亚热带季风性湿润区,降雨充沛,但年内分配不均,同时,由于岩体裂隙、落水洞等发育,使降雨迅速漏失,水资源利用困难;加上碳酸盐岩不溶物含量低,成土速率十分缓慢,土层浅薄、贫瘠且分布不连续;植被生长缓慢,生物量低,一旦破坏,恢复困难<sup>[1]</sup>。这种脆弱的生态环境在自然因素(地质、水文、气候等)和人为因素的综合影响下,水土流失现象十分严重。水土流失不仅造成水、土资源的流失,还伴随大量磷素的输出,而磷不但是植物生长不可或缺的营养元素之一,同时也是水体富营养化的限制因子<sup>[2]</sup>,因而水、土资源和磷素的流失最终会导致喀斯特地区土壤质量下降和水环境污染双重危害<sup>[3-4]</sup>。

当前,对于非喀斯特地区坡面侵蚀产流、产沙过程与机理,以及磷在坡面径流流失的研究较为成熟,不同土地利用磷素输出特征及规律等方面也取得了较为重要的成果<sup>[5-7]</sup>。然而对于喀斯特地区相关研究则偏少且不明确<sup>[8-9]</sup>,凡非得等<sup>[1]</sup>对西南喀斯特区域水土流失敏感性进行评价和划分时发现贵州全境都属于中度以上敏感区域,水土流失极易发生;李会等<sup>[10]</sup>研究喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应时认为直接套用黄土高原土壤抗蚀性的研究方法值得商榷;而对伴随水、土资源流失的磷素的研究则鲜有报道。总体而言,喀斯特地区水土流失和磷素输出的严重性、独特性以及研究不足是当前存在的主要问题。

降雨是引起水土流失的先决条件,不同的降雨量、降雨强度对径流的产生,泥沙、磷素的输出有重要影响<sup>[5,11-12]</sup>。除此之外,土地利用方式也会严重影响水土流失和磷素的输出<sup>[8,13]</sup>,不同的土地利用方式和强度使得地表植被和土壤理化性质发生变化,进而影响土壤的抗蚀性指标,导致土壤抗蚀性发生相应

变化<sup>[10,14]</sup>。研究不同降雨、土地利用方式对水土流失和磷素输出的影响,对于探索坡面径流过程、坡面水土流失机理、潜在风险源、坡面治理与土地生产力的保护具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。本文利用喀斯特地区小流域(羊鸡冲)5种不同土地利用方式的径流小区,探究不同降雨、土地利用方式对水土流失和磷素输出的影响,以期为解决岩溶地区坡面土壤物质大量流失造成的土地贫瘠和面源污染问题提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

羊鸡冲小流域位于贵州省黔南布依族苗族自治州龙里县东城郊,东经 $107^{\circ}00'53''$ ,北纬 $26^{\circ}26'58''$ ,属乌江水系三沅河支流的上游,位于国家水土流失重点治理区——珠江南北盘江治理区。该小流域属北亚热带湿润季风气候,降雨年内分布不均,主要集中在6—9月,多年平均降雨量为1100 mm,平均气温为 $14.8^{\circ}\text{C}$ ;主要植被类型为亚热带石灰岩常绿栎林及常绿落叶阔叶混交林;土壤类型主要为黄壤土。坡面土地利用方式分为耕地、林地、自然草地3种,其面积分别为1.77、4.48、3.50  $\text{km}^2$ 。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 野外实验布设

在流域内同一坡面布设有5种不同土地利用方式的径流小区。小区始建于2004年,根据坡长、坡宽、坡度、坡位、土地利用现状等的不同而布设,所有小区都不存在基岩裸露情况。其中水保林和自然草地小区不存在任何人为活动;经果林小区于2016年5月11日至12日进行锯镰除草和填土操作,9月16日进行锯镰除草操作;裸地小区定期进行锯镰除草和喷雾除草操作,对土壤的扰动很小,可以忽略;耕地小区除定期进行锯镰除草和喷雾除草外,于2016年4月14日进行玉米种植,8月19日进行玉米收获,5月12日、6

月10日、7月7日进行了3次玉米施肥,对土壤有较大幅度的扰动。径流小区布设情况见表1,土壤养分状况见表2。

### 1.2.2 监测内容与方法

土壤采集及养分测定:采用对角线混合法采集0~20 cm 表层土壤 1 kg;土壤有机质采用(NY/T 1121.6—2006)方法测定,土壤全磷采用(NY/T 88—1988)方法测定,土壤有效磷采用(NY/T 1121.7—2006)方法测定。

雨量观测:通过 HOBO 小型自动气象站、虹吸式自记雨量计记录观测雨量,人工雨量器进行校核。

径流和泥沙观测:待降雨结束后,采用水尺观测一级分水箱水位(集流池中无径流水);随后将分水箱里的泥水充分搅拌,使泥沙与水充分混合达到均匀,取两份 1000 mL 泥水,一份用作流失泥沙量的测定,一份用作磷素的测定。将用作流失泥沙量测定的水样静置 24 h,清水用量筒测量,剩余泥沙放入泥沙盒中,烘干,测定泥沙质量。取另一份充分摇匀水样的一部分,  $H_2SO_4-HNO_3$  消化、摇匀,原液采用钼锑抗分光光度法测定总磷(TP);取另一部分,过 0.45  $\mu m$  滤膜,采用孔雀绿磷钼杂多酸分光光度法测定水溶性总磷(TDP)。

### 1.2.3 实验数据处理与计算

应用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理、作图及统计分析,SPSS 20.0 进行相关分析和回归分析。

颗粒态磷(PP)=总磷(TP)-水溶性总磷(TDP)

单位面积磷流失量( $g \cdot km^{-2}$ )=磷浓度( $g \cdot m^{-3}$ ) $\times$ 单位面积径流量( $m^3 \cdot km^{-2}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨特征分析

选取羊鸡冲小流域 2016 年 5 月 29 日—10 月 20 日具有代表性的 6 场侵蚀性降雨,降雨量介于 11.4~33.6 mm 之间。分别统计出每场降雨的最大 10 min 雨强( $I_{10}$ ),最大 30 min 雨强( $I_{30}$ ),最大 60 min 雨强( $I_{60}$ )

表 2 径流小区土壤养分状况

Table 2 Soil nutrients condition in runoff plots

土地利用方式	有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	有效磷/ $mg \cdot kg^{-1}$	全磷/ $g \cdot kg^{-1}$
水保林	28.8	12.5	1.6
耕地	21.9	14.2	1.4
自然草地	23.7	4.3	1.4
裸地	25.7	8.7	1.5
经果林	33.6	9.8	1.7

和平均雨强( $I_{\bar{p}}$ )(表 3)。其中  $I_{\bar{p}}$  能反映场次降雨的总特征,时段雨强能够体现降雨过程集中程度的差异性<sup>[15]</sup>。由表 3、表 4 可见,降雨量与时段雨强没有必然的相关性,即降雨量大,时段雨强不一定大。而时段雨强之间的相关性则较为密切, $I_{10}$  和  $I_{30}$  的相关性达到极显著水平, $I_{10}$  与  $I_{60}$ 、 $I_{\bar{p}}$  的相关性也达到显著水平, $I_{30}$  与  $I_{60}$ 、 $I_{\bar{p}}$  的相关性都达到极显著水平,而  $I_{60}$  与  $I_{\bar{p}}$  的相关性不显著。闫胜军等<sup>[15]</sup>在黄土丘陵沟壑区的研究表明  $I_{10}$  较大的场次降雨  $I_{20}$  和  $I_{30}$  并不一定大,这与本研究结论不一致,可能的原因是羊鸡冲小流域雨型与黄土丘陵沟壑区相比更稳定一些。

### 2.2 不同土地利用方式产流、产沙特征

在坡度、坡长较为一致的情况下,降雨量、降雨强度、人为活动、植被等是影响产流和产沙的主要因素<sup>[17-21]</sup>。其中,降雨量是产流和产沙的先决条件,只有达到一定降雨量,产流和产沙才有可能发生;降雨强度越大,单位时间落到地面的雨水越多,越容易产流,且对土壤的侵蚀作用越强烈;人为活动扰动的越剧烈,土壤变得越疏松,空隙越大,越有利于雨水的下渗,同时径流中的泥沙含量越高;植被的冠层能够截留一部分雨水,降低雨水的落地速度以及对地表的直接冲刷作用,茎秆能够拦蓄和分散径流,降低径流对地表的冲刷作用,根系在相关微生物群落共同参与下能够改善土壤粒级结构、理化性质,进而增强土壤的抗侵蚀性,枯枝落叶层能够增加坡面糙率,降低径流流速,增加土壤入渗。

由表 5 可知,5 种土地利用方式的径流系数由大

表 1 径流小区布设情况

Table 1 Layout of runoff plots

土地利用方式	主要物种	植被盖度/%	苗木数量	投影坡长/m	坡宽/m	坡度/( $^{\circ}$ )	坡向	坡位	土壤类型
水保林	杨树	65	42	20	5	20	南偏西	中	黄壤
耕地	玉米	31	—	15	5	20	南偏西	中	黄壤
自然草地	杂草	87	—	20	5	20	南偏东	中	黄壤
裸地	—	—	—	20	5	20	西南	中	黄壤
经果林	杨梅	85	40	20	9	20	西	中	黄壤

表3 羊鸡冲小流域场次降雨特征( $n=6$ )Table 3 Rainfall characteristics of Yangjichong small watershed( $n=6$ )

降雨场次	降雨日期	降雨量/mm	降雨时长/h	$I_{10}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$I_{30}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$I_{60}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$I_{\bar{p}}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$
R1	2016-05-29	14.60	2.50	32.40	15.20	9.60	5.84
R2	2016-06-07	33.00	5.58	33.60	22.80	16.40	5.91
R3	2016-06-29	27.20	1.58	54.00	44.40	25.00	17.22
R4	2016-07-01	33.40	3.92	40.80	26.00	22.20	8.52
R5	2016-08-16	11.40	1.50	21.60	14.80	9.40	7.60
R6	2016-10-20	33.60	8.08	13.20	9.60	8.20	4.16

表4 羊鸡冲小流域场次降雨特征相关性分析

Table 4 Correlation analysis of rainfall characteristics in Yangjichong small watershed

相关性	降雨量	$I_{10}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$I_{\bar{p}}$
降雨量	1				
$I_{10}$	0.151	1			
$I_{30}$	0.242	0.939**	1		
$I_{60}$	0.461	0.908*	0.927**	1	
$I_{\bar{p}}$	0.009	0.835*	0.939**	0.789	1

注:\*\*在0.01(双侧)水平上显著相关,\*在0.05(双侧)水平上显著相关。下同。

Note:\*\* is significantly related at the level of 0.01 (bilateral), \* is at the level of 0.05 (bilateral). The same below.

到小整体表现为裸地>自然草地>耕地>水保林>经果林。其中,裸地没有植被的覆盖,且观测期内没有明显扰动土层的人为活动,土壤在一定程度上板结,因而径流系数整体最大且随不同场次降雨变化较大,表现为R3、R4两场高强度降雨事件的影响下迅速增大;耕地植被盖度随着玉米的生长,变化较大,人为除草、施肥等因素对土层扰动也较大,因而径流系数较大且随不同场次降雨变化明显,表现为R3、R4两场高强度降雨事件的影响下急剧增大,而在其他4场降雨事件中雨水下渗较多,其径流系数小于自然草地;其他3种土地利用方式没有人为活动的扰动,不同场次降

雨径流系数的大小相对比较稳定,它们之间的差异主要是受不同植被覆盖的影响。

5种土地利用方式单位面积产沙量由大到小整体表现为耕地>裸地>经果林>水保林>自然草地。其中不同场次降雨水保林、自然草地、经果林单位面积产沙量相对比较稳定,它们之间出现差异主要是因为植被盖度、垂直结构、地表枯枝落叶层覆盖等因素综合影响的结果;耕地由于除草、施肥等人为操作的扰动以及植被覆盖的变化,裸地由于没有植被覆盖,不同场次降雨两种土地利用方式单位面积产沙量变化较大,表现为R3、R4两场高强度降雨事件的影响下急剧增大。从时间尺度上看,随着耕地中玉米的生长,其对降雨的截流作用逐渐增大,能够减小雨滴对地表的直接冲刷作用,但减小径流对地表的冲刷作用不明显,尤其是前期降雨和农事操作的扰动,使得土壤变得疏松。裸地尽管没有植被的截流阻拦作用,但没有明显人为扰动,土壤在一定程度上板结、变硬,使得其单位面积产沙量小于耕地。

### 2.3 降雨强度与单位面积径流量和单位面积产沙量的关系

#### 2.3.1 降雨强度与单位面积径流量

雨强是影响产流的重要因素,雨强越大,单位时间内地面接收的降雨量越多,径流量也越大。由表6可见,不同土地利用方式单位面积径流量分别与 $I_{10}$ 、

表5 不同土地利用方式径流系数和单位面积产沙量

Table 5 Runoff coefficient and sediment yield per unit area of different land uses

降雨场次	降雨量/mm	$I_{\bar{p}}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	径流系数/%					次降雨单位面积产沙量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$				
			水保林	耕地	自然草地	裸地	经果林	水保林	耕地	自然草地	裸地	经果林
R1	14.60	5.84	3.17	2.45	4.65	9.20	2.87	0.02	0.62	0.02	2.42	0.05
R2	33.00	5.91	2.28	4.17	4.38	9.67	2.32	0.04	6.03	0.03	1.27	0.21
R3	27.20	17.22	5.59	45.88	8.12	38.20	3.98	0.16	280.46	0.08	25.16	0.29
R4	33.40	8.52	3.25	23.42	4.79	30.45	2.75	0.10	291.28	0.03	24.85	0.05
R5	11.40	7.60	2.92	3.14	5.34	7.89	1.58	0.02	0.61	0.01	0.52	0.00
R6	33.60	4.16	2.41	1.40	3.78	2.68	1.45	0.04	0.30	0.03	0.05	0.01

$I_{30}$  呈现较好的三次曲线函数关系, 与  $I_{60}$  呈现较好的二次曲线函数关系, 与  $I_{\bar{p}}$  的一次函数关系相对较好。这与闫胜军等<sup>[15]</sup>研究黄土丘陵沟壑区发现不同时段雨强与单位面积径流量呈现较好的指数函数关系有所差异, 可能的原因是黄土丘陵沟壑区降雨雨型多变, 而本研究区降雨雨型则相对比较稳定, 以及两个研究区土壤性质和植被覆盖的差异。其中水保林、自然草地、经果林单位面积径流量与  $I_{30}$  的决定系数最高, 可能的原因是这 3 种土地利用方式的植被盖度很高且没有人为活动的扰动, 土壤较紧实; 耕地、裸地单位面积径流量与  $I_{60}$  的决定系数最高, 可能是因为这两种土地利用方式植被盖度相对很低, 且耕地受人为扰动, 土壤孔隙度较大。因此用时段雨强预测单位面积径流量时, 应根据不同土地利用方式选择合适的时段雨强。

### 2.3.2 降雨强度与单位面积产沙量

影响侵蚀产沙量的因素有很多, 包括降雨量、降雨强度、人为活动、植被<sup>[15]</sup>等。由表 7 可见, 不同土地利用方式下单位面积产沙量分别与  $I_{10}$ 、 $I_{30}$  呈现较好的三次曲线函数关系, 与  $I_{60}$  呈现较好的二次曲线函数关系, 与  $I_{\bar{p}}$  的一次函数关系相对较好(自然草地与  $I_{\bar{p}}$  呈现较好的二次曲线函数关系)。这和不同时段雨强与不同土地利用方式下单位面积径流量的关系整体一致, 原因是泥沙是伴随径流输出的。其中, 自然草地、经果林单位面积产沙量与  $I_{30}$  的决定系数最高, 水保林、耕地、裸地与  $I_{60}$  的决定系数最高。水保林中单位面积径流量、单位面积产沙量与时段雨强的回归关系出现差异, 可能的原因是降雨过程中产沙迟于产流, 且水保林的植被盖度比自然草地和经果林低所致。

## 2.4 不同土地利用方式径流磷素流失特征

### 2.4.1 磷素浓度特征

降雨对地表的击溅和冲刷产生的水力侵蚀, 造成结合在土壤颗粒、土壤团聚体以及土壤水中的磷素伴随径流而流失<sup>[22]</sup>。影响径流中磷浓度的因素有很多, 包括土壤磷素状况、施肥情况、植被、土壤枯枝落叶层、径流量、产沙量等。由图 1 可见, 5 种土地利用方式  $\rho(\text{TP})$  整体表现为耕地 > 裸地 > 经果林 > 水保林 > 自然草地, 这与不同土地利用方式单位面积产沙量大小规律表现一致。径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.01~2.49  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 其中耕地径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.73~2.49  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 裸地径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.10~0.50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 经果林径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.13~0.46  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 水保林径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.01~0.17  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 自然草地径流  $\rho(\text{TP})$  范围介于 0.03~0.09  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间。磷是水体富营养化的限制性因素, 在以管理为目的的水体评价中, 通常用 TP 来评价水体富营养化的风险性, 当水体  $\rho(\text{TP})$  超过 0.10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 视为能够引起水体富营养化<sup>[23]</sup>。因此, 这 6 场侵蚀性降雨引起的耕地、裸地和经果林径流进入受纳水体后对水质影响较大, 水保林有 4 场径流对水质影响较大, 而自然草地径流对水质影响则较小。耕地由于多年人工施肥的因素, 土壤含磷量较高, 同时因为人为因素的扰动, 加上植被盖度较低、土壤侵蚀严重, 使得其径流  $\rho(\text{TP})$  远远大于其他 4 种土地利用方式; 裸地由于没有植被的覆盖, 土壤侵蚀严重, 导致径流  $\rho(\text{TP})$  相对较高; 经果林林下植被几乎没有, 缺乏植被垂直结构, 保肥效果较差, 同时枯枝落叶层较厚, 有机质分解产生的磷素随径流流失, 增大了径流  $\rho(\text{TP})$ ; 水保林除了本身杨树外, 林下长了比较多的杂草, 保肥效果较

表 6 不同时段雨强( $X$ )与不同土地利用方式单位面积径流量( $Y$ )的回归关系( $n=6$ )

Table 6 Regression relationship between rainfall intensity( $X$ ) and runoff per unit area( $Y$ ) under different land uses( $n=6$ )

土地利用方式		$I_{10}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$I_{\bar{p}}$
水保林	方程	$Y=3.763-0.350X+0.011X^2-9.527E-5X^3$	$Y=3.842-0.510X+0.023X^2+0.000X^3$	$Y=1.278-0.131X+0.006X^2$	$Y=0.243+0.071X$
	( $R^2$ , Sig.)	(0.973, 0.041)	(0.990, 0.015)	(0.874, 0.045)	(0.587, 0.076)
耕地	方程	$Y=16.268-1.856X+0.059X^2+0.000X^3$	$Y=16.087-2.703X+0.132X^2-0.002X^3$	$Y=9.371-1.633X+0.070X^2$	$Y=-4.382+0.998X$
	( $R^2$ , Sig.)	(0.940, 0.089)	(0.934, 0.097)	(0.999, 0.000)	(0.822, 0.013)
自然草地	方程	$Y=5.153-0.463X+0.014X^2+0.000X^3$	$Y=5.435-0.711X+0.032X^2+0.000X^3$	$Y=1.158-0.068X+0.004X^2$	$Y=0.550+0.092X$
	( $R^2$ , Sig.)	(0.872, 0.186)	(0.969, 0.046)	(0.796, 0.092)	(0.508, 0.112)
裸地	方程	$Y=23.612-2.787X+0.096X^2-0.001X^3$	$Y=18.677-3.182X+0.164X^2-0.002X^3$	$Y=0.819-0.213X+0.025X^2$	$Y=-1.704+0.754X$
	( $R^2$ , Sig.)	(0.886, 0.166)	(0.911, 0.131)	(0.958, 0.009)	(0.592, 0.074)
经果林	方程	$Y=2.743-0.280X+0.009X^2-8.963E-5X^3$	$Y=2.294-0.322X+0.016X^2+0.000X^3$	$Y=-0.030+0.045X-5.289E-5X^2$	$Y=0.254+0.047X$
	( $R^2$ , Sig.)	(0.921, 0.116)	(0.940, 0.088)	(0.870, 0.047)	(0.428, 0.159)

表7 不同时段雨强( $X$ )与不同土地利用方式下单位面积产沙量( $Y$ )的回归关系( $n=6$ )Table 7 Regression relationship between rainfall intensity( $X$ ) and sediment yield per unit area( $Y$ ) under different land uses( $n=6$ )

土地利用方式		$I_{10}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$I_{\bar{}}$
水保林	方程	$Y=0.263-0.026X+0.001X^2-6.427E-6X^3$	$Y=0.282-0.041X+0.002X^2-2.324E-5X^3$	$Y=-0.143-0.020X+0.001X^2$	$Y=-0.024+0.011X$
	( $R^2, Sig.$ )	(0.962, 0.056)	(0.970, 0.045)	(0.989, 0.001)	(0.795, 0.017)
耕地	方程	$Y=789.857-94.969X+3.188X^2-0.030X^3$	$Y=657.944-113.567X+5.613X^2-0.073X^3$	$Y=146.028-30.025X+1.486X^2$	$Y=-99.418+23.874X$
	( $R^2, Sig.$ )	(0.815, 0.265)	(0.804, 0.279)	(0.902, 0.031)	(0.577, 0.080)
自然草地	方程	$Y=-0.085-0.006X+0.000X^2-7.576E-7X^3$	$Y=0.107-0.013X+0.001X^2-5.844E-6X^3$	$Y=0.086-0.011X+0.000X^2$	$Y=0.060-0.010X+0.001X^2$
	( $R^2, Sig.$ )	(0.951, 0.073)	(0.966, 0.051)	(0.780, 0.104)	(0.914, 0.025)
裸地	方程	$Y=60.593-7.332X+0.249X^2-0.002X^3$	$Y=46.750-8.133X+0.410X^2-0.005X^3$	$Y=13.849-2.634X+0.129X^2$	$Y=-7.929+2.068X$
	( $R^2, Sig.$ )	(0.842, 0.228)	(0.800, 0.285)	(0.911, 0.026)	(0.607, 0.068)
经果林	方程	$Y=-0.237+0.027X-0.001X^2+9.416E-6X^3$	$Y=-0.212+0.029X-0.001X^2+1.216E-5X^3$	$Y=-0.139+0.021X+0.000X^2$	$Y=-0.048+0.018X$
	( $R^2, Sig.$ )	(0.664, 0.459)	(0.733, 0.372)	(0.533, 0.320)	(0.509, 0.112)

好;自然草地杂草茂密,植被盖度最高,保肥效果最好,因而径流 $\rho(\text{TP})$ 最低。从时间尺度上来看,从R1到R6,5种土地利用方式 $\rho(\text{TP})$ 变化趋势整体上一致,这与张瑞国等<sup>[24]</sup>的研究结论一致,并且 $\rho(\text{TP})$ 整体呈下降趋势,这主要是因为土壤中的磷素逐渐被冲刷出来,浓度降低。

由图1、图2计算可得, $\rho(\text{PP})$ 占 $\rho(\text{TP})$ 的比例介于75.47%~97.91%之间,且变化趋势与 $\rho(\text{TP})$ 基本一致,结合相关性分析可以发现,二者的相关性都达到极显著水平,说明径流中的磷以泥沙结合态为主,这与已有研究结论一致<sup>[25-26]</sup>。5种土地利用方式中 $\rho(\text{PP})/\rho(\text{TP})$ 的比例由高到低依次是耕地>裸地>经果林>水保林>自然草地,这与不同土地利用方式单位面积产沙量和 $\rho(\text{TP})$ 大小变化趋势一致,也从侧面进一步印证了径流输出的磷以侵蚀泥沙相为主。

TDP是伴随径流水输出的,其占总磷的比例很

小,5种土地利用方式 $\rho(\text{TDP})$ 占 $\rho(\text{TP})$ 的比例介于2.09%~24.53%之间。由图3可见, $\rho(\text{TDP})$ 由大到小整体表现为耕地>裸地>经果林>水保林>自然草地。这与不同土地利用方式 $\rho(\text{TP})$ 变化趋势一致,原因是土壤中TDP和PP处于一个相对稳定的动态平衡状态,径流中 $\rho(\text{TP})$ 高,则对应的 $\rho(\text{TDP})$ 也相应高。

#### 2.4.2 单位面积磷流失量特征

径流和泥沙是养分流失的载体,因而影响径流和泥沙的因素对磷素的流失也有很显著的影响<sup>[27]</sup>,其中植被通过拦蓄径流和减少侵蚀等方式对养分流失产生影响<sup>[9]</sup>。单位面积TP流失量不仅和径流中 $\rho(\text{TP})$ 相关,还与单位面积径流量密切相关<sup>[3]</sup>。由表8可见,单位面积TP流失量由大到小整体表现为耕地>裸地>经果林>水保林>自然草地,这与单位面积产沙量和 $\rho(\text{TP})$ 大小变化规律一致。其中,耕地由于人工施肥,使得土壤含磷量较高,同时人为活动的扰动以及缺乏

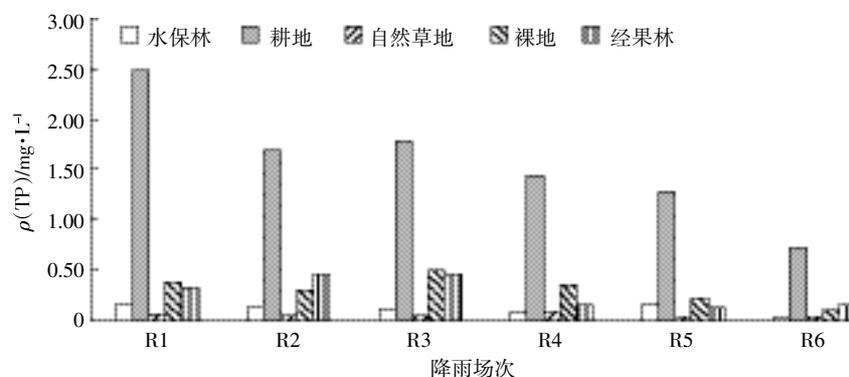


图1 不同土地利用方式径流TP浓度

Figure 1 Concentration of TP in runoff under different land uses

植被的覆盖,使得土壤侵蚀严重,因而单位面积 TP 流失量最大,尤其是在大雨量、强降雨的情况下,单位面积 TP 流失量迅速增加;裸地没有人工施肥,同时没有人为活动的扰动,土壤在一定程度上板结,但是没有植被覆盖的保护,雨水的直接击溅和冲刷使得土壤侵蚀严重,因而单位面积 TP 流失量很大;经果林、水保林、自然草地植被盖度高,没有人工施肥和对土壤的扰动,因而单位面积 TP 流失量较小。

单位面积 TDP 流失量由大到小整体表现为耕地>裸地>自然草地>经果林>水保林,与单位面积 TP

流失量出现不同。单位面积 TDP 流失量占 TP 流失量的比例介于 2.09%~24.53%之间,比例由大到小整体表现为自然草地>水保林>经果林>裸地>耕地,与单位面积土壤流失量刚好相反。结合表 5、图 3,可能的原因是自然草地虽然径流  $\rho(\text{TDP})$  最低,但是其径流量远大于经果林和水保林,同时单位面积产沙量又最小,因而自然草地单位面积 TDP 流失量大于经果林和水保林,且为 5 种土地利用方式输出的 TP 中 TDP 所占比例最高的。

耕地和裸地在 R3 和 R4 这两场降雨事件中单

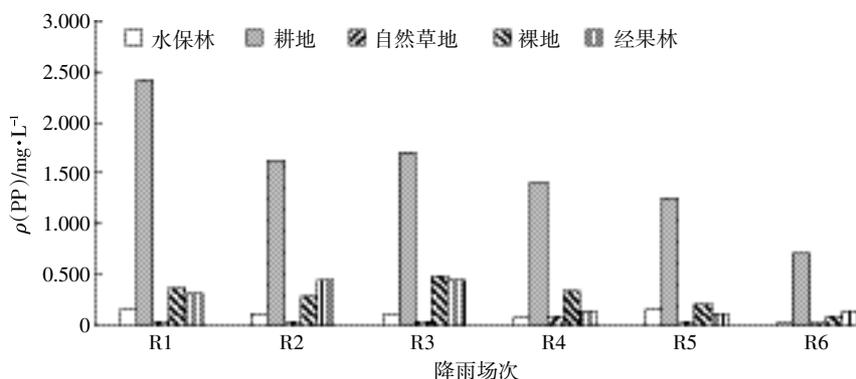


图 2 不同土地利用方式径流 PP 浓度

Figure 2 Concentration of PP in runoff under different land uses

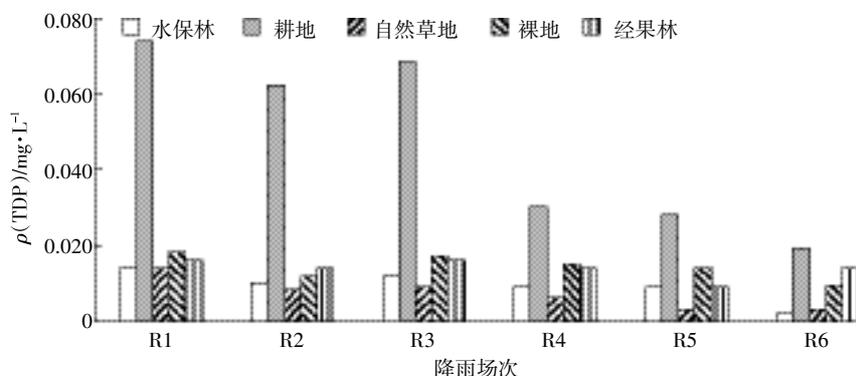


图 3 不同土地利用方式径流 TDP 浓度

Figure 3 Concentration of TDP in runoff under different land uses

表 8 场次降雨径流小区单位面积磷流失量

Table 8 Phosphorus losses per unit area in runoff plot during individual rainfall

降雨场次	TP 流失量/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-2}$					TDP 流失量/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-2}$					TDP 流失量/TP 流失量/%				
	水保林	耕地	自然草地	裸地	经果林	水保林	耕地	自然草地	裸地	经果林	水保林	耕地	自然草地	裸地	经果林
R1	80.06	895.29	38.75	514.31	138.61	6.44	26.63	9.51	24.12	6.72	8.04	2.97	24.53	4.69	4.85
R2	94.22	2 326.68	64.73	949.84	353.52	7.50	86.06	11.85	38.28	10.78	7.96	3.70	18.30	4.03	3.05
R3	174.61	22 176.01	111.23	5 217.32	501.66	18.21	855.90	19.80	176.63	17.28	10.43	3.86	17.80	3.39	3.44
R4	97.28	11 245.63	142.80	3 629.88	140.32	9.38	234.60	9.96	152.55	12.86	9.64	2.09	6.98	4.20	9.16
R5	55.66	459.61	24.92	195.36	23.42	2.84	10.08	1.97	12.58	1.55	5.10	2.19	7.89	6.44	6.61
R6	11.32	342.19	38.24	88.86	77.37	1.62	9.10	4.10	8.42	6.85	14.31	2.66	10.71	9.47	8.85

位面积 TP、TDP 流失量迅速增大,这与其单位面积径流量、单位面积产沙量表现一致。说明水土流失和磷素输出主要发生在受人为活动影响和缺乏植被覆盖的坡面,尤其是在大雨量、高强度降雨事件的影响下。

降雨量、降雨强度代表了降雨对土壤的冲刷溶解能力、冲刷强度,是降雨径流污染物形成的重要水文条件<sup>[28-29]</sup>。由表 9 可见,单位面积磷流失量与降雨量呈不显著正相关,这是因为降雨在产生径流的过程中,有一部分雨水要满足初损、入渗等损失<sup>[29-30]</sup>,同时磷流失量取决于降雨所引起的径流量和产沙量<sup>[9]</sup>。单位面积磷流失量与时段雨强、平均雨强、单位面积径流量、单位面积产沙量的相关性普遍较好。结合表 6、表 7,说明雨强是影响径流和产沙的重要因素,而磷素的输出是伴随径流和产沙发生的。

### 3 结论

(1)5 种土地利用方式中,经果林的保水效果最好,裸地最差,自然草地的固土保肥效果最好,耕地最差。水土流失和磷素输出主要发生在受人为活动影响和缺乏植被覆盖的坡面。

(2)雨强是影响水土流失、磷素输出的重要因素,可以很好地拟合水土流失量。大雨量、高强度降雨事件下水、土、磷素的流失量迅速增大,尤其在耕地和裸地表现明显。

(3)6 场降雨引起的耕地径流 $[0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP})$

$< 2.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 、裸地径流 $[0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 和经果林径流 $[0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 对受纳水体水质影响较大,而自然草地径流 $[0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \rho(\text{TP}) < 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 对水质影响则较小。

(4)坡面水土流失和磷素输出与土地利用方式和人为活动有密不可分的关系,因此可以通过优化土地利用结构(退耕还林还草、调整植被垂直结构、增加植被盖度),减少人为扰动来防治水土流失,减轻面源污染。

#### 参考文献:

- [1] 凡非得, 王克林, 熊 鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.  
FAN Fei-de, WANG Ke-lin, XIONG Ying, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in Karst regions, Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [2] 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 of the United States of America*, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [3] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.  
WANG Quan-jiu, ZHAO Guang-xu, LIU Yan-li, et al. Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 195-201.
- [4] Bouwman A F, Beusen A H W, Griffioen J, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by

表 9 单位面积磷流失量与降雨、径流、产沙特征相关性分析( $n=6$ )

Table 9 Correlation analysis between phosphorus losses per unit area with rainfall, runoff and sediment yield( $n=6$ )

土地利用方式	磷流失量	降雨量	$I_{10}$	$I_{30}$	$I_{60}$	$I_{\bar{p}}$	单位面积径流量	单位面积产沙量
水保林	TP	0.070	0.979**	0.962**	0.867*	0.887*	0.704	0.804
	TDP	0.211	0.968**	0.982**	0.900*	0.913*	0.836	0.902*
	PP	0.052	0.977**	0.956**	0.860*	0.881*	0.685	0.789
耕地	TP	0.291	0.881*	0.957**	0.913*	0.941**	0.993**	0.909*
	TDP	0.214	0.847*	0.957**	0.833*	0.969**	0.940**	0.787
	PP	0.294	0.881*	0.955**	0.915*	0.939**	0.994**	0.912*
自然草地	TP	0.561	0.771	0.734	0.923**	0.580	0.781	0.575
	TDP	0.320	0.921**	0.911*	0.830*	0.777	0.806	0.873*
	PP	0.564	0.705	0.666	0.884*	0.518	0.732	0.499
裸地	TP	0.341	0.904*	0.939**	0.955**	0.886*	0.974**	0.967**
	TDP	0.372	0.884*	0.895*	0.958**	0.826*	0.994**	0.989**
	PP	0.340	0.904*	0.941**	0.955**	0.888*	0.972**	0.966**
经果林	TP	0.365	0.797	0.866*	0.749	0.724	0.804	0.995**
	TDP	0.616	0.851*	0.873*	0.914*	0.704	0.990**	0.799
	PP	0.355	0.792	0.861*	0.740	0.721	0.794	0.996**

- livestock production over the 1900—2050 period[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(52):20882—20887.
- [5] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6):67—82.  
WANG Quan-jiu, YANG Ting, LIU Yan-li, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):67—82.
- [6] Barbosa F T, Bertol I, Luciano R V, et al. Phosphorus losses in water and sediments in runoff of the water erosion in oat and vetch crops seed in contour and downhill[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1):22—28.
- [7] Dorioz J M. Mechanisms and control of agricultural diffuse pollution: The case of phosphorus[J]. *Bmc Ophthalmology*, 2013, 15(1):1—8.
- [8] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16):121—126.  
CHEN Hong-song, YANG Jing, FU Wei, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on Karst hill-slope with different land-use types in Northwest Guangxi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16):121—126.
- [9] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):1—8.  
PENG Xu-dong, DAI Quan-hou, LI Chang-lan. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwest Karst of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):1—8.
- [10] 李会, 周运超, 刘娟, 等. 喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5):16—23.  
LI Hui, ZHOU Yun-chao, LIU Juan, et al. Responses of Karst soil anti-erodibility to different land use types[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):16—23.
- [11] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(5):1707—1716.  
CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1707—1716.
- [12] 马骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(7):1526—1536.  
MA Qian, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, et al. Effect of physicochemical properties of brown earth under different land cover in the Yimeng Mountainous area on the output of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7):1526—1536.
- [13] 丁志磊, 祖艳群, 陈建军, 等. 滇池流域2种坡耕地农林复合系统的地表径流、泥沙输出及径流N、P流失的特征[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11):5301—5307.  
DING Zhi-lei, ZU Yan-qun, CHEN Jian-jun, et al. Characteristics of surface runoff, sediment, N and P losses from two agro-forest plantation patterns in Dianchi Basin[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(11):5301—5307.
- [14] 刘旦旦, 张鹏辉, 王健, 等. 黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J]. *林业科学*, 2013, 49(9):102—106.  
LIU Dan-dan, ZHANG Peng-hui, WANG Jian, et al. A comparison on soil anti-erodibility over different land use types on loess slope[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9):102—106.
- [15] 闫胜军, 郭青霞, 闫瑞, 等. 不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):45—49.  
YAN Sheng-jun, GUO Qing-xia, YAN Rui, et al. Relationship of rainfall intensity and the characteristics of soil and water erosion under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):45—49.
- [16] Wang T, Zhu B, Xia L Z. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the Three Gorges area, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(1):105—114.
- [17] 王丽, 王力, 王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11):2171—2178.  
WANG Li, WANG Li, WANG Quan-jiu. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from slope cropland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2171—2178.
- [18] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2):169—175.  
YAN Qing-hong, YUAN Cui-ping, LEI Ting-wu, et al. Effect of rain-storm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2):169—175.
- [19] 胡雪琴, 蒋平, 彭旭东, 等. 紫色丘陵区不同土地利用类型径流泥沙及氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):35—39.  
HU Xue-qin, JIANG Ping, PENG Xu-dong, et al. Characteristics of runoff and sediment, nitrogen and phosphorus losses under different land-use types in purple hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):35—39.
- [20] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):85—90.  
LI Guang, HUANG Gao-bao. Effects of rainfall intensity and land use on soil and water loss in loess hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11):85—90.
- [21] 游珍, 李占斌. 坡面植被对径流的减流减沙作用机理及试验研究[J]. *泥沙研究*, 2011, 6(3):59—62.  
YOU Zhen, LI Zhan-bin. Mechanism and experiment of vegetation on slope to reduce runoff and sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 2011, 6(3):59—62.
- [22] 宋泽芬, 王克勤, 孙孝龙, 等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型地表径流氮、磷的流失特征[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(4):109—113.  
SONG Ze-fen, WANG Ke-qin, SUN Xiao-long, et al. Phosphorous and nitrogen loss characteristics with runoff on different lands use pattern in small watersheds in Jianshan River, Chengjiang[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4):109—113.
- [23] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1996, 51(2):160—166.
- [24] 张瑞国, 王克勤, 陈奇伯, 等. 昆明市水源区不同利用类型坡地径流氮和磷的输出特征[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(5):607—611.

- ZHANG Rui-guo, WANG Ke-qin, CHEN Qi-bo, et al. Nitrogen and phosphorus loss characteristics in runoff from slopes with different land uses in Songhua Dam Reservoir of Kunming[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(5):607-611.
- [25] 沈连峰, 苗 蕾, 韩 敏, 等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):77-80.
- SHEN Lian-feng, MIAO Lei, HAN Min, et al. Characteristics analysis of nitrogen and phosphorus loss about different land use types of Huaihe River basin in Henan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):77-80.
- [26] 李 博, 阎 凯, 付登高, 等. 滇中地区4种覆被类型地表径流的氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2):50-55.
- LI Bo, YAN Kai, FU Deng-gao, et al. Loss characteristics of nitrogen and phosphorus in surface runoff under 4 plant cover types in central Yunnan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):50-55.
- [27] Liu R M, Wang J W, Shi J H, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469:1069-1077.
- [28] 王爱娟, 丁文峰, 王万君. 人工降雨和放水冲刷条件下紫色土坡面产流产沙特征分析[J]. *长江科学院院报*, 2015, 10(3):31-34.
- WANG Ai-juan, DING Wen-feng, WANG Wan-jun. Characteristics of runoff and sediment yield of purple soil slope surface in the presence of artificial rainfall and scouring[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 10(3):31-34.
- [29] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(10):2287-2293.
- LI Li-qing, YIN Cheng-qing, KONG Ling-li, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10):2287-2293.
- [30] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 玉米种植下紫色坡耕地径流中磷素流失特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12):2441-2450.
- HE Xiao-ling, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Phosphorus loss via runoff from sloping cropland of purple soil under corn planting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2441-2450.