

模拟降雨条件下工程边坡土壤磷素流失特征

杨兴^{1,2}, 庞鑫³, 曹卓冰¹, 彭培好^{1,3}, 谢成晟¹, 李伟²

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 成都理工大学 生态资源与景观研究所, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 探究西南高山—亚高山地区工程边坡土壤磷素流失机理, 为同类型工程边坡生态环境恢复研究提供理论依据。[方法] 采用室内人工模拟降雨试验及原状土搬迁等方法, 研究在 2 种坡度(30°, 50°)和 4 种雨强(25, 45, 65, 85 mm/h)条件下工程边坡全磷(TP), 泥沙全磷(STP), 溶解态磷(DP)迁移变化特征及其与土壤侵蚀状况的关系。[结果] ①工程边坡径流平均 DP 浓度整体较低且受雨强影响较小, STP 浓度在降雨初期较高, 随之降低或趋于稳定。②不同雨强下工程边坡 DP 流失率、STP 流失率变化曲线具有明显差异性, 当雨强为 25 mm/h 和 45 mm/h 时, 工程边坡 STP 流失率、DP 流失率较低且较为稳定; 当雨强为 65 mm/h 和 85 mm/h 时, 工程边坡 STP 流失率、DP 流失率迅速上升后趋于稳定; 当雨强由 45 mm/h 增至 65 mm/h 时, 工程边坡 STP 流失率、DP 流失率迅速增大。③土壤侵蚀率与 DP 流失率、DP 平均浓度、STP 流失率和浓度、TP 流失率有极显著正相关关系; 径流率与 DP 流失率、STP 流失率、TP 流失率、DP 平均浓度有极显著正相关关系, 与 STP 浓度无显著相关关系。工程边坡 TP 流失率随径流率、土壤侵蚀率皆以幂函数形式逐渐增加。[结论] 雨强和坡度对工程边坡磷素流失动态变化特征具有显著的影响且整体呈现出先增后减的趋势。

关键词: 降雨强度; 坡度; 磷流失; 工程边坡; 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)01-0024-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 杨兴, 庞鑫, 曹卓冰, 等. 模拟降雨条件下工程边坡土壤磷素流失特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 24-29. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 01. 004; Yang Xing, Pang Xin, Cao Zhuobing, et al. Characteristics of soil phosphorus loss from engineered slopes under simulated rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 24-29.

Characteristics of Soil Phosphorus Loss from Engineered Slopes Under Simulated Rainfall

Yang Xing^{1,2}, Pang Xin³, Cao Zhuobing¹, Peng Peihao^{1,3}, Xie Chengsheng¹, Li Wei²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059,

China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. Institute of Ecological Resources and Landscape, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The mechanism of soil phosphorus loss from engineered slopes in a southwest alpine-subalpine region was studied to provide a theoretical basis for the restoration of the ecological environment on the same type of slopes. [Methods] The characteristics of total phosphorus (TP), sediment total phosphorus (STP), dissolved phosphorus (DP) migration, and their relationships with soil erosion, were studied under two slope gradients (30°, 50°) and four rainfall intensities (25, 45, 65, and 85 mm/h) using indoor simulated rainfall experiments and undisturbed soil removal. [Results] ① The average DP concentration of runoff from the engineering slopes was generally low and was less affected by rainfall intensity. The STP concentration was higher at the beginning of the rainfall and then decreased, or tended to be stable. ② The curves of the

收稿日期: 2019-08-30

修回日期: 2019-09-26

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山亚高山区工程创面人工土壤重建技术”(2017YFC0504903); 中国科学院关键技术人才项目(CAS201665)。

第一作者: 杨兴(1995—), 男(汉族), 云南省保山市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤地球化学。Email: 1393165327@qq.com。

通讯作者: 李伟(1969—), 男(汉族), 四川省南充市人, 本科, 高级工程师, 主要从事山地生态与环境方面的研究工作。Email: liwei@imde.ac.cn。

DP loss rate and STP loss rate from the engineered slopes had obvious differences under different rain intensities. When the rain intensities were 25 and 45 mm/h, the STP loss rate and DP loss rate from the engineered slopes were lower and more stable. When the rainfall intensity was 65 and 85 mm/h, the loss rate of STP and DP of the engineering slopes increased rapidly in a parabolic trend and tended to be stable. When the rainfall intensity increased from 45 to 65 mm/h, the loss rate of STP and DP increased rapidly. ③ The soil erosion rate was positively correlated with the DP loss rate, mean DP concentration, STP loss rate and concentration, and TP loss rate. The runoff rate was positively correlated with the DP loss rate, STP loss rate, TP loss rate, and mean DP concentration, but not with the STP concentration. The rate of TP loss from the engineered slopes increased gradually with the runoff rate and soil erosion rate in the form of a power function. [Conclusion] Rainfall intensity and slope gradient have significant influence on change of the dynamics of phosphorus loss from engineered slopes, and the trend of phosphorus loss first increases, and then decreases.

Keywords: rainfall intensity; slopes; phosphorus loss; engineering slope; soil erosion

磷是植物生长重要的营养元素,参与植物体内的各种生理代谢,是细胞质和细胞核的重要组成成分,具有促根、抗逆等性能^[1]。在西南高山—亚高山地区公路建设的过程中出现了大量高陡、裸露工程边坡,在复杂的降雨条件下易造成严重的水土流失及磷素等土壤养分流失,导致土壤贫瘠、区域水体富营养化,严重制约工程边坡生态恢复。边坡土壤磷素流失的过程是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程^[2-5]。工程边坡土壤磷的流失主要有土壤侵蚀、地表径流两种途径,随径流流失的磷素按其形态可以划分为溶解态磷(dissolved phosphorus, DP)与泥沙结合态磷(sediment extractable phosphorus, SEP)两种类型,坡地土壤磷素流失形态主要以 SEP 为主,同时在水环境研究中 SEP 通常称为颗粒态磷(particulate phosphorus, PP)^[6]。

雨强和坡度能够通过影响坡面径流的径流率、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能等流水力学参数来改变土壤侵蚀与磷流失特征^[7-9]。徐国策等^[10]通过野外模拟降雨实验研究表明,坡面径流量和磷素流失总量均随着雨强的增大而增大,在小雨强下玉米小区和裸地小区的坡面径流和壤中流磷素浓度均值均高于大中雨强下的对应径流下的磷素浓度均值。陈曦等^[11]通过模拟降雨对秦岭北麓土壤磷素流失研究表明,降雨强度能够影响径流中溶解态磷(DP)的含量,但二者之间并非呈线性关系,泥沙全磷(STP)的流失速率与土壤流失速率之间存在着明显的线性关系($R^2=0.92$),总磷流失浓度与产沙率分别呈显著的线性正相关。王晓燕等^[12]通过从土壤—径流—泥沙过程研究中发现,磷浓度和磷流失量都随坡度增大呈上升趋势,在坡度为 $15^\circ\sim 20^\circ$ 范围,存在磷流失的坡度临界值。张梦等^[13]对黄土坡面土壤侵蚀研究发现,磷素流失途径以径流流失为主,随着坡度的增

加,磷素的流失途径以泥沙流失为主。前人对于土壤磷流失特征的研究极大推动了土壤养分流失机理研究的发展。然而,目前对于土壤磷素流失研究多集中于坡度较小、土壤夹石量低的坡耕地地区;对于降雨条件复杂、坡度较大($>30^\circ$)、砾石含量较多($>40\%$)的西南高山—亚高山区工程边坡磷素流失研究较少。高坡度条件下工程边坡土壤侵蚀特征与径流特征与低坡度农耕地具有巨大差异,土壤剪切力、径流流速、径流携带细沙能力均有显著不同,同时砾石不仅对土壤特性(包括土壤容重、含水率、孔隙度等)具有重要影响,而且在流水力学和土壤侵蚀中也有重要的作用^[14-15]。在不同的径流特征与侵蚀状况下,工程边坡磷素流失荷载载体和流失量及动态变化过程均可能与农耕地磷素流失有显著区别,因此本文研究高坡度、雨强、砾石等因素对工程边坡土壤流失磷素特征的影响,以期对西南高山—亚高山地区工程边坡生态环境恢复研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验目的是研究西南高山—亚高山地区工程边坡土壤磷素流失规律,人工模拟降雨试验于 2018 年 11—12 月,在中国科学院万州典型区生态环境监测重点站人工模拟降雨大厅进行,采用 4 m 高下喷式降雨装置,降雨强度通过压力表调节,雨强可调至 20 mm/h~150 mm/h,两台降雨机并排降雨,在降雨试验前对不同雨强进行滤定,确保降雨均匀度达到 85% 以上,满足试验要求。试验土槽为自主设计及制作的聚丙烯土槽,规格为长 100 cm,宽 40 cm,高 25 cm,底部均匀打孔(2 mm),坡度可根据试验需要调整。

试验所用土壤采自四川省泸定县二郎山西坡 G318 国道工程边坡,类型属于山地棕壤。为保证试验土壤与原位土壤的一致性,采用分层取土的方式,每隔 5 cm 分层取土,共采集 5 层。每层土壤进行过筛、分选、混合等处理,分别通过 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6 cm 共 6 种样品筛,制备 <0.2 cm 土壤和 0.2~0.5, 0.5~1, 1~2, 2~4, 4~6 cm 这 5 种粒径砾石并按照体积比 2.2:3:2.3:1.7:0.8 比例将砾石装袋混合。土壤其他属性:有机质含量 8~15 g/kg;pH 值 5.5~6.5;N 含量 0.9~0.16 g/kg;P 含量 0.5~1.5 g/kg;K 含量 10.2~20 g/kg。

1.2 试验设计

土壤采取分层填土的方式进行装填,为增大土层之间摩擦力,每层 5 cm 并使用工具对上层土打毛处理,填充后压实并通过称重法使土壤容重控制在 1.11~1.37 g/cm³ 范围内。用喷壶喷雾及 Delta-T (HH2) 便携式水分测试仪将土壤相对含水率控制在 7.5%~9.8% 范围内。为使土壤透水状况接近天然坡面,底层铺设粒径 5 mm 厚粗沙。试验前对降雨强度进行滤定,每天进行 2 场降雨,每次试验结束后将土壤取出并重新配比装填新的试验土壤。通过对研究区 85 个工程边坡实地坡度测量并结合其 30 a 气象资料,在 2 种坡度 (30°, 50°) 和 4 种雨强 (25, 45, 65, 85 mm/h) 条件下进行模拟降雨试验,为保证试验结果的准确性,每场模拟降雨试验重复一次。降雨时长设计为坡面产流后 60 min,地表径流在产流后收集浑水径流样品,其中 1~10 min 每 2 min 收集一次;10~50 min 每 5 min 收集一次共收集 15 个坡面径流的浑水样品,每次取样用秒表记录取样时间。

1.3 样品与数据分析

试验结束将样品带回实验室分析。径流水样的测定指标包括:径流量、坡面径流中总磷 (TP)、溶解态磷 (DP)、泥沙全磷 (STP) 浓度。侵蚀泥沙的测定

指标包括:产沙量、泥沙中的全磷含量 (STP)。指标测定方法具体如下。

(1) 坡面径流总磷 (TP) 浓度。过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度。

(2) 坡面径流中溶解态磷 (DP) 浓度。样品经 0.45 μm 滤膜过滤后过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法 (参照 GB11893-1989)。

(3) 土壤或泥沙全磷 (STP) 含量。HClO₄-H₂SO₄ 消煮法—钼锑抗比色法。

(4) 土壤侵蚀率 (D_r)。坡面径流在单位时间内所输移出的泥沙质量,计算公式为:

$$D_r = \frac{M_t}{t} \quad (1)$$

式中: D_r 为土壤侵蚀率 (g/s); M_t 为测量时段 t 内的所运移出的泥沙含量 (g); t 为接样时间 (min); 下同。

(5) 径流率 (Q): 坡面在降雨条件下单位时间内所产生地表径流的体积,计算公式为:

$$Q = \frac{D_t}{t} \quad (2)$$

式中: Q 为径流率 (ml/min); D_t 为接样时间 t 内的径流量 (ml)。

采用 Spass25.0, Excel2016, R3.5.1 进行试验数据分析,采用 Sigmaplot12.5, Photoshop CS4 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 工程边坡坡面径流携磷素浓度变化特征

2.1.1 坡面径流溶解态磷 (DP) 平均浓度变化特征
在不同的径流与土壤环境以及流失途径下溶解态磷 (DP) 是磷素流失的主要形态之一,可供植物吸收利用,是水体富营养化的关键性磷素形态^[16]。如图 1 所示,不同雨强和坡度下工程边坡溶解态磷 (DP) 平均浓度整体较低。

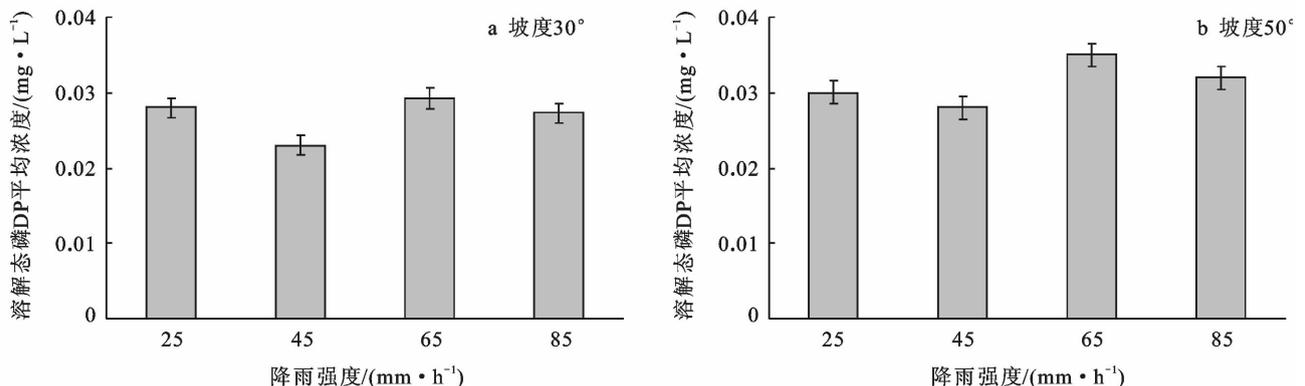


图 1 不同雨强和坡度下工程边坡径流平均溶解态磷 (DP) 浓度特征

这是由于溶解态磷(DP)为生物可直接利用的磷,易从土壤中溶出,主要以可溶态流失^[17];工程边坡土壤中嵌套砾石使得土壤颗粒在降雨作用下与径流具有充分的接触面,大量可溶性磷素从土壤中交换溶出,随着多年径流对土壤的浸提和冲洗,土壤中易溶性磷素含量偏低,而坡面径流中往往只能携带走较低含量的 DP。此外,可以看出在两种坡度下平均 DP 并不随雨强的增加而增加,当雨强为 25mm/h 和 65mm/h 时,平均 DP 偏高;当雨强为 45mm/h 和 85mm/h 时。这是由于坡面径流的径流功率、径流剪切力、过水断面单位能等随着雨强的增加而增加,坡面土壤遭受的浸提和冲洗作用越强,坡面易溶性磷流失越快;但随着坡面砾石的抗侵蚀作用的增加和坡面易溶性磷含量的减少,径流中平均 DP 含量大大降低。

2.1.2 坡面径流泥沙全磷(STP)浓度变化特征 西南高山—亚高山地区工程边坡常年受降雨侵蚀,坡面土壤中可溶性磷含量较少,随泥沙流失是磷素流失的主要途径。因此研究不同降雨条件与坡度下径流泥沙中磷(P)的动态变化规律具有重要的意义。由图 2

可以看出,在 30°和 50°坡度条件下泥沙全磷(STP)随降雨历时变化特征具有其相似性,STP 含量在降雨初期迅速增加至峰值随之降低或趋于稳定;当雨强为 65 mm/h 时 STP 浓度较高;随着雨强的增加,STP 浓度变化趋势由平稳变为迅速波动。这是由于降雨初期表层土壤中含有较多细小松散的颗粒,这些颗粒容易通过悬移的方式被径流带走,随着降雨的延续,泥沙中粒径较大的颗粒比例逐渐增多,而泥沙携带的养分含量多吸附于细小颗粒含量中^[18];降雨雨滴不断的冲击造成土壤团聚体逐步遭到破坏,细小颗粒随入渗水分向下迁移逐步堵塞土壤空隙,同时加之雨滴冲击对坡面的压实作用,土壤表层开始出现一层密度更大,透水性差且糙度较小的结皮层^[19];随着表层土壤被侵蚀,坡面砾石逐渐暴露于表层,砾石对阻止中深层土壤流失具有重要作用。此外,径流 STP 浓度变化过程中会出现远远高于其他降雨过程时段的极大值。这是由于高坡度下土壤剪切力较大导致坡体不稳定,坡体出现较多裂缝、滑坡等,失去了表层砾石及生物结皮的保护,大量中深层土壤易溶养分随径流流出。

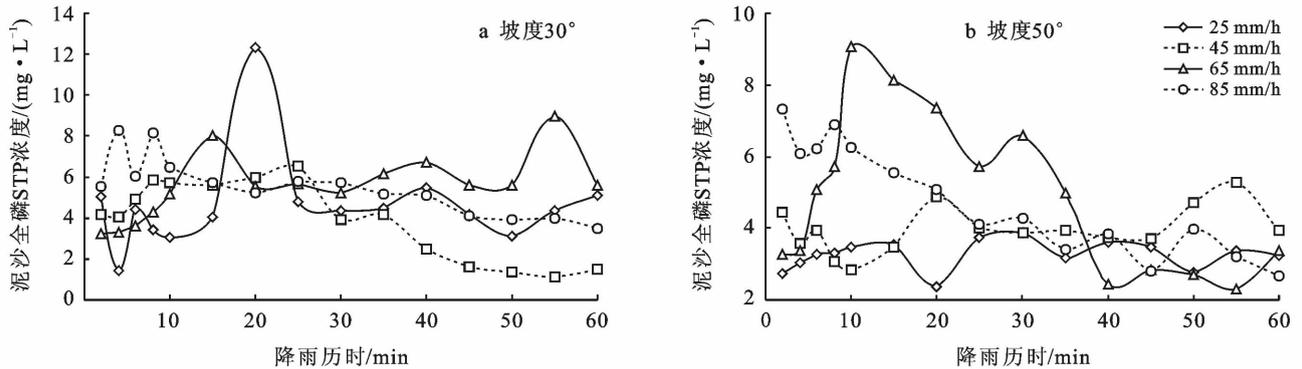


图 2 不同雨强和坡度下工程边坡径流泥沙全磷(STP)浓度随时间变化过程特征

2.2 工程边坡坡面径流磷素流失率变化特征

2.2.1 坡面径流溶解态磷(DP)流失率变化特征

研究降雨过程中径流磷素的流失量随降雨历时的变化特征对建立土壤养分流失预测模型具有重要的意义。图 3 为在 30°和 50°坡度下,溶解态磷(DP)流失率在不同降雨强度和坡度下随降雨历时的变化曲线。如图 3 所示,工程边坡 DP 流失率随雨强的增大不同程度的增加,当雨强由 45 mm/h 增至 65 mm/h 时 DP 流失率增速较大;当雨强为 25 mm/h 和 45 mm/h 时,工程边坡 DP 流失率较低且较为稳定,当雨强为 65 mm/h 和 85 mm/h 时,工程边坡 DP 流失率迅速上升后趋于稳定。这是由于工程边坡土壤中岩石碎片不仅为坡

体提供了良好的透水性而且增加了水力粗糙度和摩擦力,减缓了地表径流流量的排放,导致坡面流速和产沙率下降,阻止了地表封闭性的发展,从而增加了入渗率^[20]。当雨强较低时,水分大量入渗导致坡面径流量较少,DP 流失率较低;当雨强较大时,坡面产生大量径流导致 DP 流失率较大,随着降雨的进行,在坡面表层土壤中易溶性磷的减少和坡面砾石抗侵蚀作用两种因素作用下,DP 浓度逐渐降低。

2.2.2 坡面径流泥沙全磷(STP)流失率变化特征

如图 4 所示,在 30°和 50°两种坡度下工程边坡泥沙全磷(STP)流失率具有具有相似性,当雨强为 25 mm/h 和 45 mm/h 时,STP 流失率较低且整体呈现出缓慢

增加的趋势;当雨强为 65 mm/h 和 85 mm/h 时,STP 流失率较高且整体呈现出抛物线的趋势;当雨强由 45 mm/h 变为 65 mm/h 时,STP 流失率增速较快。坡面产流初期,由于土壤孔隙未饱和,径流量较少,对大颗粒土壤冲击、搬运能力较弱,搬运土壤多为粒径 $<200 \mu\text{m}$ 的颗粒。粒径 $<200 \mu\text{m}$ 的颗粒各养分流失贡献率均高达 70% 以上,表明水土流失导致土壤

中大量细小颗粒与养分流失,其中流失泥沙携带的养分含量与细小颗粒含量呈明显的正相关^[21-22]。工程边坡坡度较高,边坡中粒径较大土壤颗粒能通过径流搬运或溅蚀的形式迁移流失。工程坡面有限的细小土壤颗粒随着降雨的进行逐渐减少,泥沙中大粒径泥沙比例不断增加,这使得降雨后期侵蚀泥沙中含磷量也随之降低。

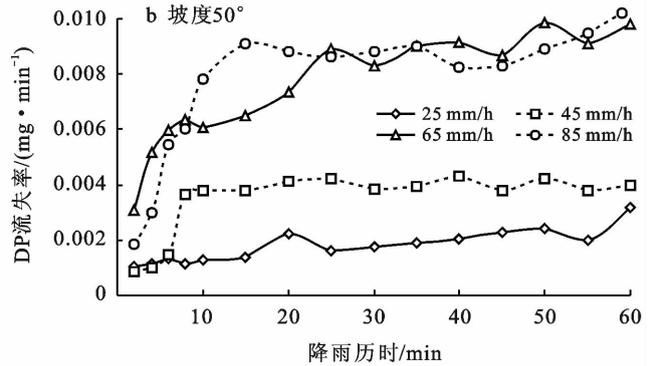
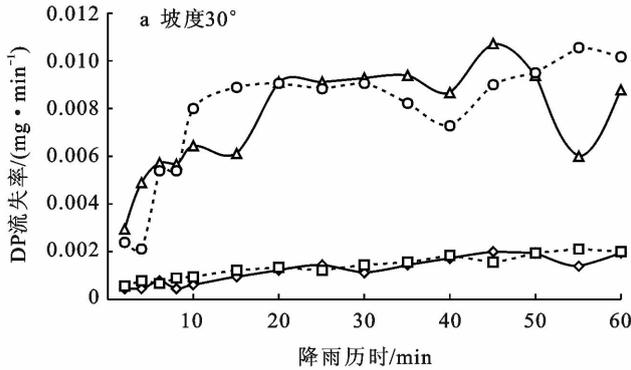


图 3 不同雨强和坡度下工程边坡溶解态磷(DP)流失率随时间变化的特征

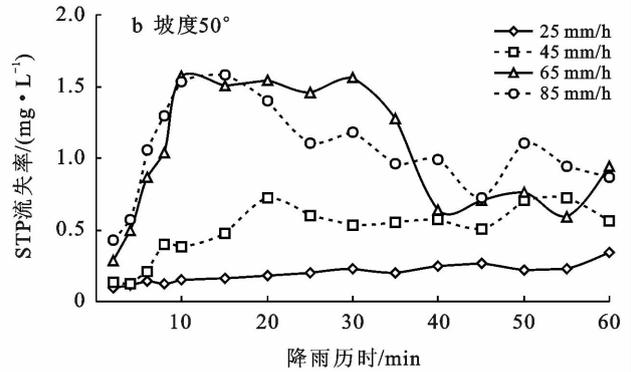
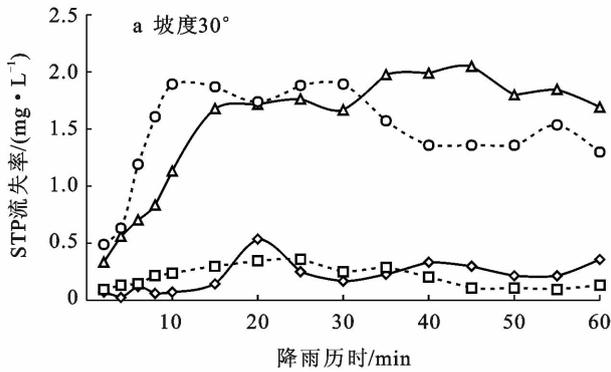


图 4 不同雨强和坡度下工程边坡泥沙全磷(STP)流失率随时间变化的特征

2.3 工程边坡磷素流失与土壤侵蚀特征的关系

工程边坡土壤侵蚀是磷素流失的重要途径,通过对边坡侵蚀率、径流率与溶解态磷(DP)平均浓度、DP 流失率、泥沙全磷(STP)流失率、STP 浓度、全磷(TP)流失率进行相关性分析可以对工程边坡磷素流

失规律有进一步认识。如表 1 所示,边坡土壤侵蚀率与 DP 流失率、DP 平均浓度、STP 流失率和浓度、TP 流失率有极显著正相关关系;径流率与 DP 流失率、STP 流失率、TP 流失率、平均 DP 浓度有极显著正相关关系,与 STP 浓度无显著相关关系。

表 1 工程边坡磷素流失状况与土壤侵蚀特征相关性分析

Pearson 相关性	DP 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DP 流失率/ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$)	STP 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	STP 流失率/ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$)	TP 流失率/ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$)
侵蚀率	0.262**	0.862**	0.517**	0.992**	0.992**
径流率	0.317**	0.986**	0.174	0.885**	0.886**

注:①DP 为溶解态磷;②STP 为泥沙全磷;③* 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关;④** 为在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

为了研究工程边坡磷素流失速率随径流率及土壤侵蚀率表现为何种规律,对全磷(TP)流失速率分

别与径流率和侵蚀率进行了拟合(见图 5)。从图 5 可以看出,工程边坡全磷 TP 流失率随径流率以幂函数

形式逐渐增加,可知全磷 TP 的流失强度随径流率增加而增加;工程边坡全磷 TP 的流失率随侵蚀率以幂函

数形式逐渐增加,可知全磷 TP 的流失强度随侵蚀率的增加而增大。

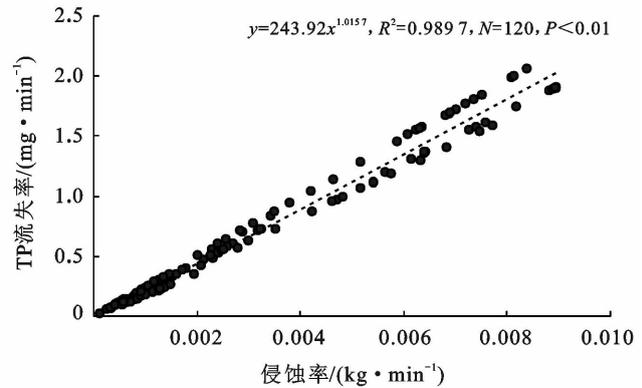
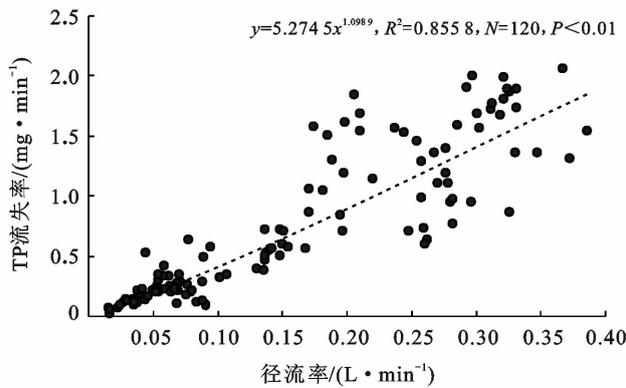


图 5 工程边坡全磷(TP)流失率与侵蚀特征的关系

3 结论

(1) 工程边坡中砾石在高坡度条件下使得土壤剪切力较大,坡体产生裂缝、崩塌等导致降雨过程中土壤磷素频繁出现波动。同时由于坡面可溶性磷含量低和砾石的抗侵蚀性使得泥沙全磷(STP)和溶解态磷(DP)的浓度随降雨历时先后出现不同形式的降低。

(2) 工程边坡磷素流失以泥沙全磷(STP)为主,溶解态磷(DP)和 STP 流失率随雨强的增大而不同程度的增加,但由于边坡土壤孔隙度较高,具有较高的下渗率,当雨强为 25 mm/h 和 45 mm/h 时,工程边坡 DP 流失率较低且较为稳定,当雨强为 65 mm/h 和 85 mm/h 时,工程边坡 DP 流失率呈迅速增加后保持稳定的趋势。

(3) 工程边坡径流率和土壤侵蚀率与泥沙全磷(STP)流失率,溶解态磷(DP)平均浓度,DP 流失率,全磷(TP)流失率,STP 流失率皆具有极显著相关性;径流率与 DP 平均浓度及流失率,STP 流失率,TP 流失率皆具有极显著相关性,但与 STP 浓度无显著相关性。工程边坡 TP 流失率与其径流率和土壤侵蚀率呈幂函数关系。

(4) 工程边坡与农耕地磷素流失特征具有明显的差异性,工程边坡磷素流失量偏小与无人工施肥和常年遭受侵蚀具有重要的关系。工程边坡往往具有坡长较大且具有较多种类坡面形状,室内模拟试验无法模拟野外坡长及所有坡形,对工程边坡土壤磷素流失有一定的影响。

[参 考 文 献]

[1] 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.

- [2] 邵明安,张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 世界科技研究与发展,2001,23(2):7-12.
- [3] 范晓娟. 不同侵蚀强度的风化花岗岩坡地土壤磷素流失模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [4] 史文海. 黄土高原坡面及流域尺度水—土—养分流失耦合模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2018.
- [5] 成玉婷. 冻融作用下坡面水沙与氮磷迁移过程及其响应机制研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [6] 李裕元. 坡地磷素迁移研究进展[J]. 水土保持研究,2006,13(5):1-4.
- [7] Lin Jinshi, Huang Yanhe, Zhao Gan, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully[J]. Catena, 2017,157:47-57.
- [8] 王蕙,胡秀君,山成菊. 雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(4):24-29.
- [9] 黄利玲,王子芳,高明,等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(1):30-33.
- [10] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江鹦鹉沟小流域土壤侵蚀和养分损失定量分析[J]. 农业工程学报,2013,29(10):160-167,296.
- [11] 陈曦,王雪松,贺京哲,等. 模拟降雨条件下秦岭北麓土壤磷素流失特征[J]. 水土保持学报,2016,30(2):80-87.
- [12] 王晓燕,王静怡,欧洋,等. 坡面小区土壤—径流—泥沙中磷素流失特征分析[J]. 水土保持学报,2008,22(2):1-5.
- [13] 张梦,李冬杰,周玥. 雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):85-90.

加后减少的趋势,当坡度 $<9^\circ$ 时沟谷占坡地面积比随坡度的增加而增加,在坡度为 $6^\circ\sim 9^\circ$ 范围内达到最大值,当坡度 $\geq 9^\circ$ 时沟谷占坡地面积比随坡度的增加而减小, $6^\circ\sim 9^\circ$ 是研究区侵蚀沟分布最为集中的区域。这与李飞等^[7]以九台为研究区得出的结论相近,但坡度区间不同。研究区以低山丘陵地貌为主,坡耕地主要分布于 9° 以下坡地,在坡耕地内由于缺乏植被的保护作用,坡度的增加加剧了侵蚀沟道的发展。

(3) 沟壑密度与汇水面积、坡度均无明显函数相关性,这与蒋岩初等^[11]和许晓鸿等^[12]得出的沟壑密度与坡度呈正相关的结论不同。本研究发现沟壑密度与汇水区平均宽度呈幂函数关系($y=706.38x^{-1.108}$, $R^2=0.68$),表现为沟壑密度随着汇水区域平均宽度的增加呈幂函数下降,并且侵蚀沟汇水区平均宽度越大,沟道横向平均宽度越大,二者呈线性正相关关系。

参 考 文 献

- [1] 刘晓冰,张兴义. 沟道侵蚀的多样性和发生过程及研究展望[J]. 土壤与作物, 2018, 7(2): 90-102.
- [2] 范昊明,顾广贺,王岩松,等. 东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J]. 中国水土保持, 2013(10): 75-78.
- [3] 张学俭. 东北黑土地水土流失修复[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 宋华,王铮,杨凯. 基于遥感和 GIS 技术的长春东部典型黑土区侵蚀沟动态监测研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(10): 194-197.
- [5] 张永光,伍永秋,刘洪鹄,等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 35-38, 49.
- [6] 胡天然,王树力. 东北黑土区乌裕尔河流域侵蚀沟变化过程及影响因素[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2018, 42(1): 113-119.
- [7] 李飞,张树文,李天奇. 东北典型黑土区南部侵蚀沟与地形要素之间的空间分布关系[J]. 土壤与作物, 2012, 1(3): 148-154.
- [8] 杜书立,李浩,陈强,等. 典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析:以黑龙江省引龙河农场为例[J]. 土壤与作物, 2013, 2(4): 177-182.
- [9] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 545-549.
- [10] 李天奇. 东北黑土区侵蚀沟成因与模型研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [11] 蒋岩初,张文太,盛建东. 天山北坡典型小流域侵蚀沟形态特征及其成因[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 304-307, 314.
- [12] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等. 东北丘陵区沟蚀发展现状及影响因素分析[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 699-708.
- [13] 王岩松,王念忠,钟云飞,等. 东北黑土区侵蚀沟省际分布特征[J]. 中国水土保持, 2013(10): 67-69.
- [14] 范昊明,王铁良,蔡强国,等. 东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 75-78.
- [15] 孟令钦,李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 7-11, 44.
- [16] 范昊明,蔡强国,崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 8-11.
- [17] 余新晓. 森林生态水文研究进展与发展趋势[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 391-402.
- [18] 常玉,余新晓,陈丽华,等. 模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 69-74.
- [14] Li Tianyang, He Binghui, Chen Zhanpeng, et al. Effects of gravel on infiltration, runoff, and sediment yield in landslide deposit slope in Wenchuan earthquake area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(12): 12075-12084.
- [15] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling [J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): 1-21.
- [16] 申东,唐家良,章熙峰,等. 紫色土丘陵区农业小流域暴雨事件磷素多尺度流失特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 56-63.
- [17] Shields S, Mondala A, Gaviglio K. Effect of extraction conditions on citrate-mediated phosphorus removal and recovery from intercepted particulate runoff[J]. Environmental Technology & Innovation, 2018, 10: 305-313.
- [18] 胡宏祥,洪天求,马友华,等. 土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 26-29.
- [19] 吴发启,范文波. 坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 33-36.
- [20] Li Tianyang, He Binghui, Chen Zhanpeng, et al. Effects of gravel on concentrated flow hydraulics and erosion in simulated landslide deposits [J]. Catena, 2017, 156: 197-204.
- [21] 白玉洁,张凤宝,杨明义,等. 急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化的水动力学机制研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 1-6.
- [22] 李波,李晔,韩惟怡,等. 人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 39-43.

(上接第 29 页)