

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.035

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.035

李阳, 阳邦戈, 王杰, 等. 模拟降雨条件下不同质地土壤侵蚀泥沙颗粒组成及磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3): 76-85.

LI Yang, YANG Bangge, WANG Jie, et al. Eroded sediment particle composition and phosphorus loss characteristics of soils with different textures under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 76-85.

模拟降雨条件下不同质地土壤侵蚀泥沙 颗粒组成及磷流失特征

李阳¹, 阳邦戈², 王杰^{1,3}, 袁超¹, 蔡崇法³

(1. 广东石油化工学院环境科学与工程学院, 广东 茂名 525024; 2. 中交和美环境生态建设有限公司, 武汉 430090; 3. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 泥沙团聚体是坡面侵蚀磷流失的重要载体, 其粒径分布特征是影响泥沙磷富集率的重要因素, 探究不同质地土壤侵蚀产流产沙及侵蚀泥沙粒径分布与磷流失间的关系对于农业非点源污染的治理与模型研究具有重要意义。[方法] 以丹江口库区5个质地差异的旱耕地表土为研究对象, 通过模拟降雨试验, 采用湿筛法分离不同粒径泥沙颗粒, 探究不同质地土壤产流产沙过程中磷流失与侵蚀泥沙颗粒组成之间的关系。[结果] 模拟降雨条件下, 不同质地土壤溶解态磷流失主要集中在产流初期(0~10 min), 占总溶解态磷流失的72.1%~86.5%; 泥沙吸附态磷含量也呈现降雨初期显著高于降雨中后期。次降雨过程中, 磷的固液分配系数表现出随着降雨历时增加指数增加的趋势, 而富集率呈现出随降雨历时增加而减少的趋势。不同土壤质地间磷的固液分配系数和侵蚀泥沙磷富集率均呈显著差异($F>3.4, p<0.05$)。泥沙吸附态磷均在 <0.05 mm 粒径团聚体上富集率最高, 土壤磷主要随 <0.05 mm 粒径泥沙团聚体流失, 该粒径泥沙团聚体磷总量占泥沙磷流失总量的22%~24%。[结论] 不同质地土壤侵蚀与磷流失存在显著差异, 且侵蚀泥沙颗粒组成与磷流失富集率存在显著的相关性, 泥沙吸附态磷主要富集在 <0.05 mm 粒径团聚体。可以在模型中修改侵蚀泥沙不同粒径设置下的磷富集率参数, 来提高模型精度, 提升对磷流失的预防能力。

关键词: 土壤质地; 土壤侵蚀; 泥沙颗粒组成; 磷流失

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0076-10

Eroded Sediment Particle Composition and Phosphorus Loss Characteristics of Soils with Different Textures under Simulated Rainfall Conditions

LI Yang¹, YANG Bangge², WANG Jie^{1,3}, YUAN Chao¹, CAI Chongfa³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525024, China; 2. CCCC Hemei Eco-Environmental Construction Co., Ltd., Wuhan 430090, China; 3. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] Sediment aggregates are an important carrier of phosphorus loss from slope erosion, and their particle size distribution is an important factor affecting the phosphorus enrichment rate in sediments. It is of great significance to explore the relationship between runoff and sediment yield from soils with different textures, the particle size distribution of eroded sediments, and phosphorus loss for the control of agricultural non-point source pollution and related model development. [Methods] This study took the surface soils of five dry farmlands with different textures in the Danjiangkou Reservoir area as the research object. Through simulated rainfall experiments, sediment particles of different sizes were separated using the wet sieving method to investigate the relationship between phosphorus loss and eroded sediment particle composition in the process of runoff and sediment yield of soils with different textures. [Results] Under simulated rainfall conditions, the loss of dissolved

收稿日期: 2026-01-05 修回日期: 2026-02-14 录用日期: 2026-02-23 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077067); 广东石油化工学院人才引进项目(XJ2005000301)

第一作者: 李阳(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程及水土保持技术应用研究。E-mail: liyang@gdupt.edu.cn

通信作者: 王杰(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与农业面源污染研究。E-mail: wj6377@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

phosphorus in different soil textures was mainly concentrated in the early stage of runoff (0-10 minutes), accounting for 72.1% to 86.5% of the total dissolved phosphorus loss. The content of adsorbed phosphorus in sediment was also significantly higher in the early stage of rainfall than in the middle and late stages of rainfall. During the rainfall process, the solid-liquid distribution coefficient of phosphorus showed an exponential increase with the increase of rainfall duration, while the enrichment rate showed a decreasing trend with the increase of rainfall duration. There were significant differences in the solid-liquid partition coefficient of phosphorus and the phosphorus enrichment rate of eroded sediments among different soil textures ($F > 3.4$, $p < 0.05$). The enrichment rate of adsorbed phosphorus in sediments was highest in aggregates with particle size < 0.05 mm, and the soil phosphorus was mainly lost with aggregates with particle size < 0.05 mm. The total amount of phosphorus in aggregates of this particle size accounted for 22% to 24% of the total sediment phosphorus loss. [Conclusion] There are significant differences in soil erosion and phosphorus loss among soils with different textures, and there is a significant correlation between the particle composition of eroded sediments and the enrichment rate of phosphorus loss. The adsorbed phosphorus in sediments is mainly enriched in aggregates with particle size < 0.05 mm. The phosphorus enrichment rate parameters under different particle size settings of eroded sediments can be modified in the model to improve model accuracy and enhance the ability to prevent phosphorus loss.

Keywords: soil texture; soil erosion; sediment composition; phosphorus loss

Received: 2026-01-05

Revised: 2026-02-14

Accepted: 2026-02-23

Online(www.cnki.net): 2026-03-20

磷是三大养分元素之一,是生态系统中不可或缺的部分^[1]。但同时磷也是污染元素,由于作物对磷肥的利用率较低,通常当季吸收率仅为5%~25%,导致超过75%施肥总量的磷在土壤中逐渐累积,使得土壤的磷含量逐渐增多^[2]。随着磷在农田土壤中的累积,磷的流失风险大大增加,也加重农业非点源污染的程度。我国农业非点源污染比重逐年升高,2020年全国第二次污染源普查结果显示,我国农业非点源污染产生的全氮(total nitrogen, TN)和全磷(total phosphorus, TP)占总体的45.52%和67.22%^[3-4],磷素流失已成为非点源污染的重要组成部分。

土壤磷流失的主要途径是降雨径流,全球范围内,由水力侵蚀导致的土壤磷流失占总体磷流失50%以上^[5]。从土壤侵蚀的角度来看,表层土壤受到雨滴的击溅和径流的冲刷,使得土壤中的磷与降雨径流相互作用,分别以溶解态和泥沙吸附态随径流和泥沙发生迁移进入水体^[6-7]。大量研究^[8-11]表明,泥沙吸附态磷是土壤磷流失的主体。而在降雨径流条件下产生的侵蚀泥沙通常比原土壤有更高的磷含量,表明侵蚀泥沙对磷有富集作用,一般把这种富集作用以富集率(enrichment ratio, ER)表示^[12]。磷在泥沙中的富集效应对环境最大的影响在于使得水体富营养化程度加剧,因为磷是制约大多数藻类生长的因素之一^[13]。随着水环境中磷的增多,水体的污染风险增大,造成水体水质降低,生态环境遭到破坏。同时,富集率也是预测磷流失的重要参数,目前应用较多的几个非点

源污染预测模型中,常采用富集率来估算泥沙吸附态磷的流失量,如CREAMS、AGNPS、EPIC、SWAT等^[14]。然而,这些模型通常采用化学分散后的单粒(黏粒、粉粒、砂粒)来进行估算与预测。大量研究^[15-16]表明,侵蚀泥沙与原始土壤在土壤质地上没有明显差异,但侵蚀泥沙搬运过程中存在分选机制,并且和降雨强度、降雨时间、坡面侵蚀过程中3个阶段^[17]、原始土壤中黏粒和粉粒含量有显著关系,导致泥沙的团聚体组成与原始土壤存在显著差异^[18-19]。侵蚀泥沙颗粒组成一直是坡面侵蚀的重点研究对象,降雨强度、径流冲刷强度、坡度、不同土壤质地对于侵蚀泥沙粒径分布有着重要的影响。葛楠楠等^[20]在研究土壤颗粒组成与不同质地之间的相互关系中表明,土壤中大团聚体的占比随着土壤黏粒含量的增加而增加,微团聚体的占比则随着黏粒含量的增加而减少;刘壮壮等^[21]在研究黄土坡面侵蚀过程中指出,在降雨强度为60 mm/h时,5°和7.5°存在临界坡度,在90 mm/h时,小粒径泥沙颗粒更容易富集,降雨强度是影响磷富集率的主要因素。由于忽视侵蚀引起的团聚体组成变化规律,基于土壤颗粒的磷富集率模型可能会导致估算及预测的不准确性^[22]。

丹江口水库位于汉江中上游,横跨鄂、豫两省,是南水北调中线工程水源地,保障着北方多省的用水问题,因此对水质要求非常严格。但由于库区流域内居住人口多,耕地面积大,加上缺乏良好的田间管理,使得库区流域内农业非点源磷污染较为普

遍^[22]。丹江口库区旱地不同质地之间黏粒含量差异显著, 先前结论主要针对于不同质地黏粒、粉粒、砂粒含量的研究, 没有细化到不同质地土壤团聚体粒径分布对磷流失影响的研究。本研究选取丹江口库区流域为研究区, 选取研究区内不同质地旱地土壤开展模拟降雨试验, 探究不同质地土壤降雨侵蚀泥沙分选过程及其与磷富集的关系, 为提高坡面径流养分流失预测提供一定理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

丹江口库区横跨鄂豫两省, 属于亚热带-温带过渡带湿地生态系统, 全流域年平均降水量 800~1 000 mm, 雨热同期。本次研究选取丹江口库区内的 5 种质地土壤为研究对象, 分别在湖北省丹江口市习家店镇、湖北省十堰市郧阳区、河南省南阳市淅川县进行采样(图 1)。采用土壤手搓法时, 先取待采集土壤样品, 剔除石块、根系等杂质, 加入蒸馏水调至湿润不粘手的状态, 再将其搓捻为直径约 2 mm、长度 5~10 cm 的土条, 依据搓捻手感与土条形态特征, 快速大致判断土壤质地; 在此基础上, 结合查阅各省土壤志的相关内容, 进一步获取该类土壤的当地利用类型、理化性质等系统性数据, 初步选择 0~20 cm 表面土壤带回实验室进行理化性质测定。主要测定指标包括土壤 pH、土壤游离氧化铁铝、土壤游离氧化铁铝、土壤全磷、有效磷、无机磷。土壤质地划分依据美国农业部的划分方法

(USDA 制), 然后根据土壤中黏粒、粉粒、砂粒比例, 分为砂质壤土、壤土、黏壤土、黏土、粉质黏土。

1.2 模拟降雨试验

1.2.1 仪器设备 模拟降雨试验在华中农业大学资源与环境学院水土保持研究中心开展, 采用下喷式降雨模拟系统, 可模拟 15~220 mm/h 雨强, 降雨均匀度可达 90%^[18]。试验采用长 3.0 m、宽 0.8 m、深 0.45 m 的土槽, 在室内控制条件下进行降雨与地表径流模拟。土槽顶部设有进水稳压箱, 用于模拟坡面上方来水。通过调节连接稳压箱与供水水箱之间的阀门(图 2), 可控制上方来水流量。

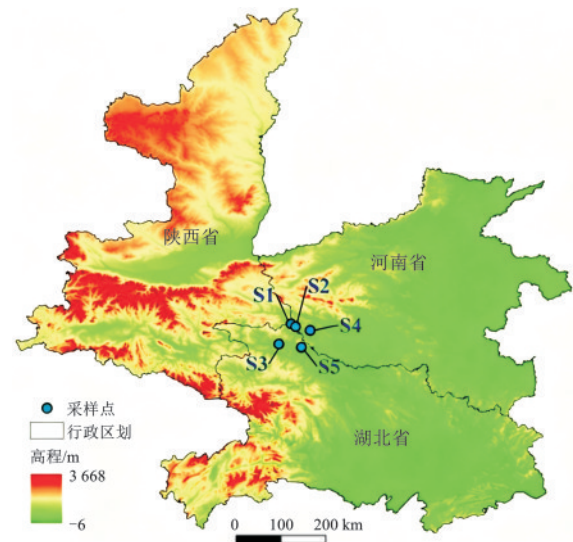


图 1 采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites

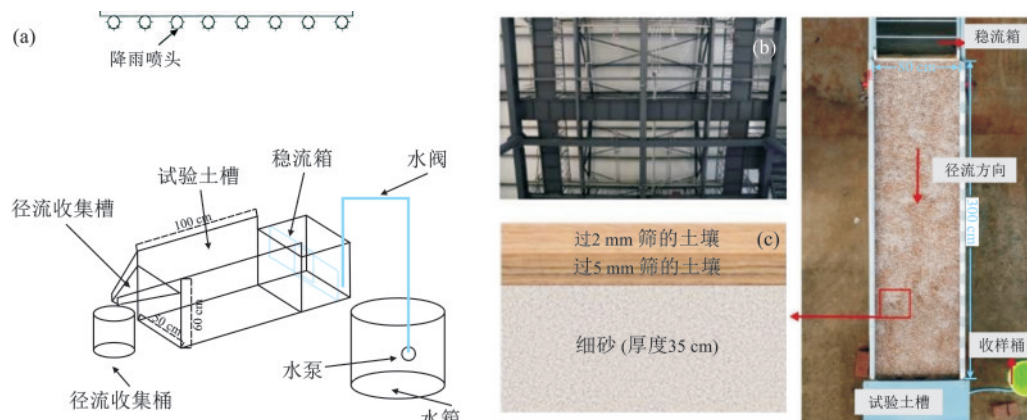


图 2 试验装置

Fig.2 Experimental setup

1.2.2 试验设置 试验过程中, 由于丹江口库区的耕地坡度通常在 5° ^[21], 因此本试验控制坡度为 5° ; 填土时, 选取接近田间自然状况的体积质量, 设置土壤体积质量为 1.35 g/cm^3 , 采用分层填土法。为避免土壤初始含水率对试验结果的影响, 试验开始前, 采用 30 mm/h 的小雨强对试验土壤预湿润, 并静置 24 h 排除重力水以控制各质地土壤的初始含

水率基本一致。试验设置雨强为 60 mm/h ^[9], 未设置上方来水流量。

1.3 样品分析与测定

1.3.1 供试土壤基本理化性质

供试土壤基本理化性质采用常规方法^[17]测定, 所有试验均设置 3 次重复试验。测试方法见表 1, 供试土壤理化性质见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质测定方法
Table 1 Determination methods for basic physicochemical properties of test soils

指标	测定方法
土壤颗粒组成	习惯法
土壤 pH	电极法
有机质	外加热法
土壤游离氧化铁铝	质量法
土壤全磷	HClO ₄ -H ₂ SO ₄ 消煮法、钼锑抗比色法
有效磷	NaHCO ₃ 浸提法、NaOH 熔融-钼锑抗比色法
无机磷	石灰性土壤无机磷形态分级测定方法

表 2 土壤基本理化性质
Table 2 Basic physicochemical properties of tested soils

土样编号	纬度(N)	经度(E)	作物类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	土壤质地
S1	33°14'19.51"	111°00'45.44"		13.99±0.39	16.72±2.91	69.29±0.89	砂质壤土
S2	33°10'50.68"	111°06'13.46"		25.59±1.34	47.31±0.58	37.63±0.96	壤土
S3	32°49'47.21"	110°45'58.50"	玉米	36.32±0.74	45.96±0.23	27.10±0.57	黏壤土
S4	33°06'13.18"	111°23'48.53"		46.64±0.92	45.76±1.07	7.60±0.71	粉质黏土
S5	32°45'44.18"	111°13'20.74"		52.67±2.16	41.39±0.44	5.94±1.83	黏土

土样编号	pH	碳酸钙/%	游离氧化铁/(g·kg ⁻¹)	游离氧化铝/(g·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)
S1	8.59±0.42	3.64±0.09	4.73±0.09	0.05±0	8.16±0.32	0.91±0.03	33.70±1.89
S2	7.75±0.33	8.91±0.04	11.43±0.13	0.11±0.02	21.64±1.27	0.72±0	29.47±1.13
S3	7.68±0.28	3.20±0.04	8.55±0.16	0.08±0.01	23.59±0.84	0.78±0	32.34±1.16
S4	8.06±0.12	3.02±0.02	12.99±0.20	0.14±0.03	12.99±1.17	0.56±0	17.40±0.58
S5	8.33±0.17	5.56±0.07	17.24±0.24	0.19±0.03	17.4±1.91	0.82±0	19.95±0.82

注:表中数据为平均值±标准差;分类和质地等级的划分依据美国农业部制(USDA);黏粒、粉粒和砂粒分别为<0.002、0.002~0.05、2~0.05 mm 的土壤单粒含量;Olsen-P,0.5 mol/L 碳酸氢钠提取的有效磷。

泥沙团聚体含量测定 本文中泥沙团聚体采用湿筛法分离各粒径泥沙团聚体后烘干测定各粒级泥沙团聚体质量。每个土样设置 3 个重复。

1.3.3 磷流失过程测定

径流溶解态磷(dissolved phosphorus, DP) 模拟降雨试验时对所用降雨水源取样,过滤后测定水样总磷含量,即为本底值。径流泥沙样过滤后分离出的径流样,离心后测定其总磷含量,减去本底值后即为径流溶解态磷含量(C_{DP})径流磷含量采用钼酸铵分光光度法^[24]测定。

泥沙吸附态磷(particle adsorbed phosphorus, PP) 径流泥沙样过滤后分离出的泥沙样烘干后取部分测定泥沙总磷含量(C_{PP}),其余泥沙分级后测定各粒级泥沙总磷含量。泥沙中的磷采用钼锑抗比色法^[25]测定。

1.3.2 土壤侵蚀产流产沙测定

径流量和产沙量的测定 试验过程中,取样间隔时间长短根据产流产沙特点确定。从产流发生开始,前 10 min 每隔 2 min 收集 1 次样品^[23],10 min 后每隔 3 min 收集 1 次样品,收集径流泥沙样品时间根据产流产沙量确定。每次接样中径流量(mL)为水沙混合样质量减去泥沙质量(水的密度为 1.0 g/mL)。产流强度(runoff velocity, V_r)为单位时间径流深(mm/min);径流系数(runoff coefficient, R_c)为产流强度除以降雨强度(rainfall intensity, I_r);入渗率(infiltration rate, f)为降雨强度与产流强度之差;土壤产沙率(sediment yield rate, S_y)为单位时间土壤流失量(g/min)。

1.3.4 磷流失特征计算

磷固液分配系数 磷固液分配系数(K_d,kg/L)为泥沙颗粒吸附态磷总量与径流溶解磷总量之比,即:

$$K_d = C_{PP} / C_{DP} \quad (1)$$

式中:C_{DP}为径流溶解态磷,mg/L

磷富集率(或泥沙富集比) 磷富集率(或泥沙富集比)(ER)计算方法为:

$$ER = \frac{C_{PP}}{P_0} \quad (2)$$

式中:C_{PP}为泥沙全磷或各粒径泥沙全磷含量(侵蚀泥沙各粒径团聚体质量百分比),mg/kg;P₀为土壤全磷含量(原土壤各粒径团聚体质量百分比),mg/kg。

1.4 数据处理

本试验采用 Excel 2024 软件处理数据,SPSS 27 软件进行统计分析,Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤磷流失特征

由图3a可知,次降雨过程中,径流中溶解态磷含量(DP)随着降雨历时的增加变化趋势均呈现出迅速下降趋势,0~10 min流失的磷占到总溶解态磷流失量的76%~83%。不同质地土壤间,随着土壤黏粒含量的增加,径流溶解态磷浓度未表现出明显差异($F=0.226, p=0.924$),分别为68.43~284.67、91.67~421.40、42.23~325.57、86.27~362.03、55.27~316.01 mg/L。

由图3b可知,泥沙吸附态磷含量(PP)基本呈降雨初期快速下降阶段,占总体泥沙吸附态磷的28%~52%。降雨中期(10~30 min)处于缓慢下降阶段,其间泥沙吸附态磷含量占总体泥沙吸附态磷的30%~39%。降雨后期(30~60 min)处于比较稳定阶段。不同质地土壤间,泥沙吸附态磷含量表现出显著差异($F=4.9, p<0.01$),随着土壤黏粒含量的

增加,依次为0.47~0.74、1.18~1.56、1.45~1.58、1.43~1.66、1.79~2.27 g/kg。由表3可知,次降雨过程中,DP与PP随降雨历时的增加均呈幂函数下降关系($R^2>0.85$)。

回归分析表明,固液分配系数(K_d)随降雨历时的增加呈指数增加趋势(图3c)(Adj $R^2>0.87$)。不同质地土壤间, K_d 随黏粒含量的降低而显著降低。

不同质地磷富集率(图3d)整体呈随降雨历时逐渐下降趋势。一方面是因为,降雨前期(<30 min)的磷流失率为54%~78%;另一方面,受泥沙分选机制影响,泥沙中<0.05 mm粒径泥沙含量逐渐降低(图4),也是导致泥沙磷富集在随降雨历时显著降低的重要原因。其中在0~10 min阶段快速下降,10~50 min阶段缓慢下降,30~60 min阶段逐渐稳定。总体而言,不同质地磷富集率跟随土壤黏粒的增加而增加。

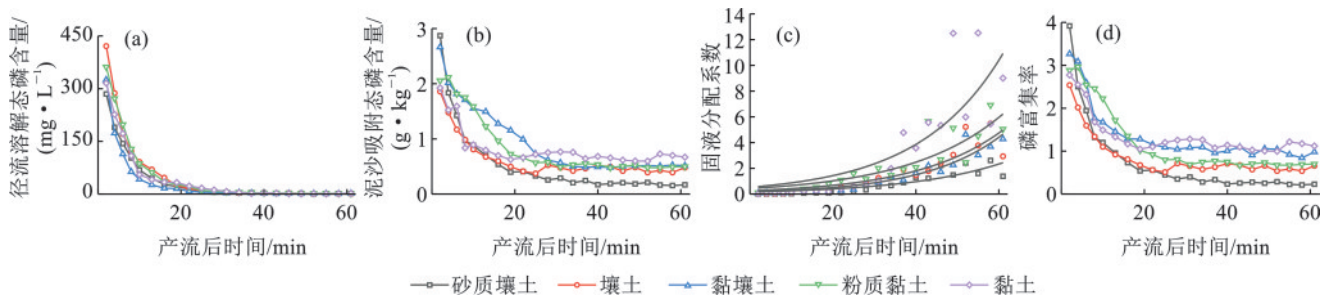


图3 不同质地土壤模拟降雨条件下不同形态磷含量和固液分配系数变化过程

Fig.3 Changes in different forms of phosphorus content and solid-liquid partition coefficients of soils with different textures under simulated rainfall conditions

表3 不同土壤质地溶解态磷及泥沙吸附态磷含量随降雨历时变化曲线拟合

Table 3 Curve fitting of dissolved phosphorus and sediment-adsorbed phosphorus contents in soils with different textures over rainfall duration

磷形态	土壤质地	拟合方程	R^2
径流溶解态磷	砂质壤土	$y=7\ 012.409x^{-2.118}$	0.937**
	壤土	$y=2\ 458.429x^{-1.884}$	0.964**
	黏壤土	$y=5\ 198.945x^{-2.035}$	0.893**
	粉质黏土	$y=5\ 034.054x^{-1.961}$	0.945**
	黏土	$y=3\ 211.904x^{-1.881}$	0.956**
泥沙吸附态磷	砂质壤土	$y=6\ 412.673x^{-2.235}$	0.955**
	壤土	$y=4\ 295.265x^{-1.989}$	0.931**
	黏壤土	$y=6\ 605.184x^{-2.077}$	0.885**
	粉质黏土	$y=7\ 136.993x^{-2.014}$	0.910**
	黏土	$y=3\ 203.351x^{-1.875}$	0.950**

注:y为径流中的磷质量分数,mg/g;x为产流时间,min。

2.2 产流产沙对磷流失的影响

由图4可知,次降雨过程中,5种质地土壤随着降雨历时的增加,产流速率(V_r)在不同质地间表现出

显著差异($F=24.072, p<0.001$)表现为随着土壤黏重程度增加而增加,整体表现为降雨初期(0~10 min)处于快速增长阶段,降雨中后期(10~60 min)缓慢增长,最终趋于稳定。在该降雨设置下黏土的产流速率是砂质壤土、壤土、黏壤土、粉质黏土的1.3、1.1、1.1、1.1倍。在该降雨设置下,不同质地径流系数(R_c)呈显著差异($F=26.364, p<0.001$),基本表现为随着黏粒含量的增高而增高,其中黏土是砂质壤土的1.3倍,是其他土壤的1.1倍。可能是随着黏粒含量增加,土壤孔隙减小,宜产生径流。

泥沙浓度(C_s)在不同质地之间表现出显著差异($F=71.184, p<0.001$),整体表现为除黏土外,均表现为随着黏粒含量的增加而降低。具体表现为在降雨初期(0~10 min)处于快速下降阶段,降雨中后期(10~60 min)逐渐趋于稳定。其中砂质壤土变化趋势最为明显,在该降雨设置下是壤土、黏壤土、粉质黏土、黏土的2.4、3.1、4.0、1.8倍。可能是因为砂粒含量越高,土壤质地越疏松,土壤颗粒宜被径流裹挟搬运。

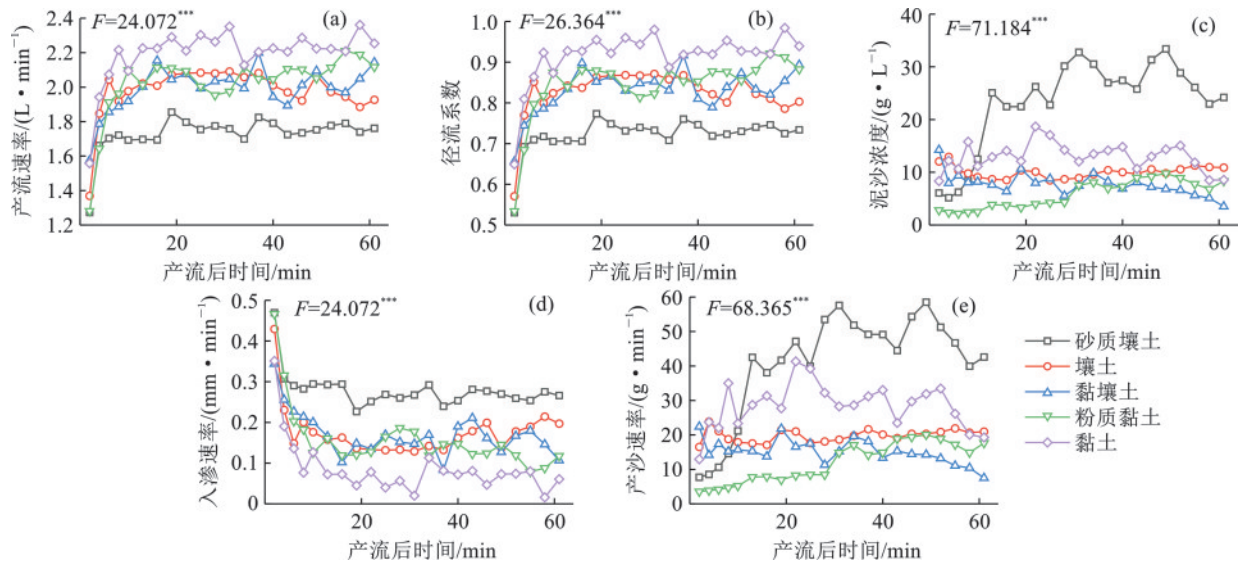


图 4 不同质地土壤侵蚀产流特征

Fig.4 Characteristics of erosion-induced runoff for soils with different textures

入渗速率(f)表现出显著差异($F=68.365, p < 0.001$),整体表现为随着土壤黏粒含量增加而减少;基本表现为降雨初期(0~10 min)处于快速降低阶段,降雨中后期(10~60 min)缓慢变化,最终趋于稳定。在该降雨设置下砂质壤土的入渗速率是壤土、黏壤土、粉质黏土、黏土的1.6、1.7、1.8、3.4倍。是因为黏粒含量越少,土壤孔隙越大,表面水分更易下渗。表明入渗速率与土壤中黏粒含量有着密切的关系。

产沙速率(S_y)变化趋势呈较大波动,整体随着黏粒含量增大而减小。基本表现为降雨初期(0~10 min)处于快速增长阶段,10~50 min处于稳定增长阶段,50 min之后缓慢下降。其中砂质壤土变化趋势最为明显,在该降雨设置下是壤土、黏壤土、粉质黏土、黏土的2.1、2.8、3.4、1.5倍。可能是因为砂质壤土团

聚体稳定性较差,在降雨溅蚀作用下导致团聚体破碎。

2.3 侵蚀泥沙颗粒组成及其磷富集率

由图5和表4可知,次降雨过程中,5种不同质地团聚体中<0.25 mm 粒径团聚体占到总体侵蚀泥沙的63.6%~87.3%。其中0.05~0.25 mm 粒径泥沙含量为26.5%~60.8%,随着黏粒含量的增加,其平均值分别为55.0%、52.2%、52.8%、42.1%、35.6%;<0.05 mm 粒径泥沙含量为14.6%~55.5%,随着黏粒含量的增加,其平均值分别为20.6%、26.7%、31.9%、32.9%、43.1%。随降雨历时的增加,5种不同质地土壤产生的侵蚀泥沙中,<0.25 mm 粒径泥沙颗粒随着产流时间而逐渐增加,0.25~1 mm 粒径泥沙颗粒随着产流时间逐渐减少。

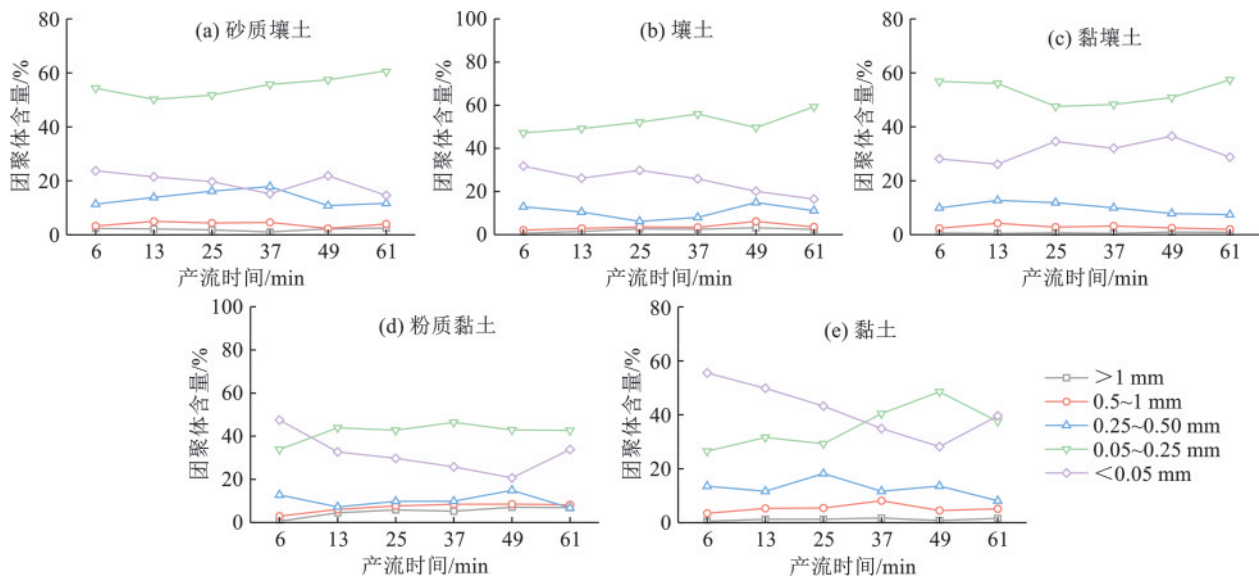


图 5 不同质地土壤侵蚀泥沙粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of eroded sediments from soils with different textures

表 4 原土壤和侵蚀泥沙颗粒组成

Table 4 Particle composition of original soils and eroded sediments		%				
土壤类别	质地	<0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	>1 mm
原始土壤	砂质壤土	24.4	17.3	15.6	16.5	26.2
	壤土	24.5	11.5	15.0	19.9	29.2
	黏壤土	23.6	11.7	12.6	15.8	36.3
	粉质黏土	10.1	4.6	7.7	12.3	65.3
	黏土	5.3	6.0	5.1	6.8	76.8
侵蚀泥沙	砂质壤土	20.0	59.0	14.7	4.2	2.1
	壤土	25.9	56.4	11.1	4.1	2.5
	黏壤土	32.6	53.8	10.0	2.9	0.7
	粉质黏土	31.3	44.5	10.7	7.8	5.7
	黏土	41.4	38.3	13.3	5.7	1.3

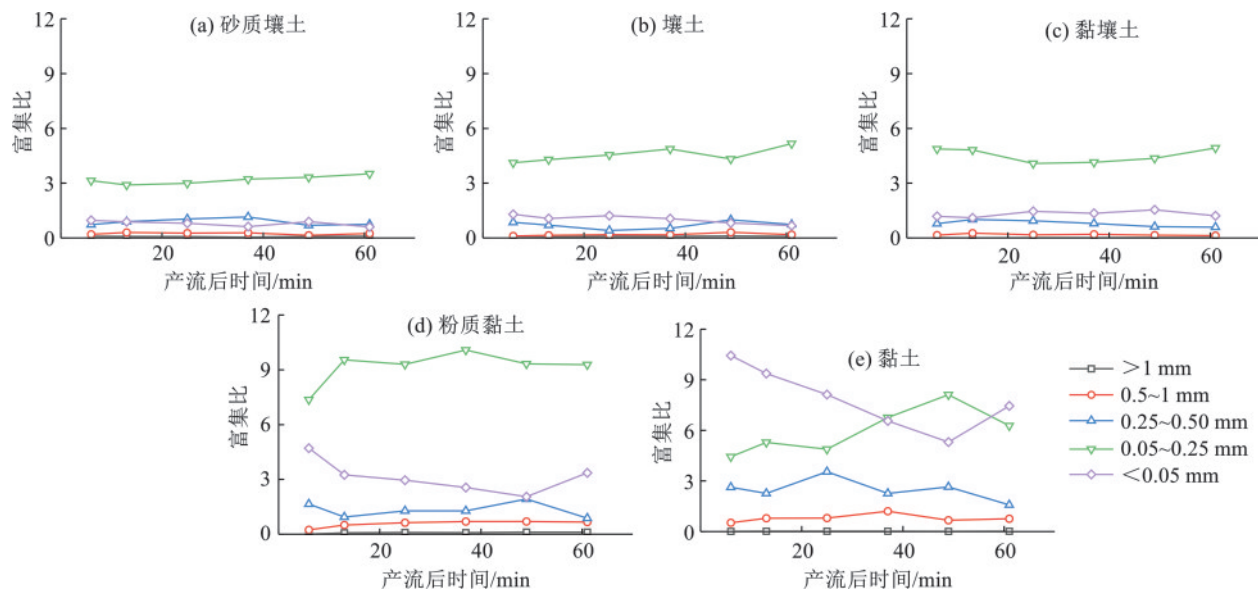


图 6 不同质地土壤富集比

Fig.6 Enrichment ratios of soils with different textures

对不同粒径泥沙磷富集率计算(图 7)表明,泥沙磷富集率(ER)随着团聚体粒径减小而增大,具体表现为<0.05 mm 团聚体磷富集率最高,其次为>1 mm 团聚体,而 0.05~0.25 mm 富集率最低。其中砂质壤土各粒径富集率均<1,说明砂质壤土对磷不存在富集作用。而土壤黏粒含量增高,其磷富集率也越高,说明土壤黏粒含量越高,对磷的富集作用越显著。整体而言,富集率随着土壤黏粒含量的增加而增加。

为揭示产流产沙、泥沙粒径分布与磷流失的耦合关系,采用曼特尔检验(Mantel test)。由图 8 可知, f 、 R_c 、 V_r 与 DP 呈极显著相关性($p<0.01$),ER5 与 DP 呈显著相关性($p<0.05$),表明 DP 与产流过程密切相关;ER5 与 PP 呈极显著相关性($p<0.01$),表明 PP 流失过程来自<0.05 mm 粒径泥沙颗粒; K_d 与 ER4 呈极显著

由图 6 可知,不同质地土壤侵蚀泥沙的富集作用显著(>1)的范围在<0.25 mm 粒径,随着土壤黏粒含量增高,其富集作用越显著,例如,砂质壤土的侵蚀泥沙中<0.05 mm 粒径的富集比为 0.6~1,0.05~0.25 mm 粒径的富集比为 2.9~3.5,其他粒径的富集比均<1,说明砂质壤土侵蚀泥沙中以<0.25 mm 粒径富集作用显著,其他粒径的富集作用较弱或不富集。随着土壤黏粒含量的增加,0.05~0.25 mm 粒径富集比依次为 4.1~5.2、4.1~5.0、7.4~10.1、4.4~8。随着土壤黏粒含量的增加,<0.05 mm 粒径的富集比依次为 0.7~1.3、1.1~1.5、2.1~4.8、5.3~10.4。各粒径侵蚀泥沙的富集比受粒径影响而表现出显著差异,其中在 0.05~0.25 mm 粒径,黏土是砂质壤土的 1.9 倍,表明该降雨设置下不同质地泥沙颗粒对于<0.25 mm 粒径的富集作用更明显。

相关性($p<0.01$),与 R_c 、 V_r 、ER5 呈显著相关性($p<0.05$); f 和 ER5 对 ER 呈显著相关性($p<0.05$)。因此,可以认为产流产沙、侵蚀泥沙粒径分布与磷流失之间存在显著相关性。

3 讨论

3.1 侵蚀产流产沙对磷流失的影响

次降雨过程中,DP 的释放主要受到 f 、 R_c 、 V_r 的影响,是因为 DP 主要来自土壤表面易溶性磷的释放。降雨初期表层土壤疏松,产流速率较低,径流挟沙能力弱,大量可溶性磷富集在土壤表面^[26]。当产流速率大于入渗速率产生径流时,被小粒径团聚体吸附的可溶性磷便会被径流裹挟流失。随着降雨历时增加,土壤表面易溶性磷和<0.05 mm 粒径团聚体含量降低,导致 DP 含量降低。

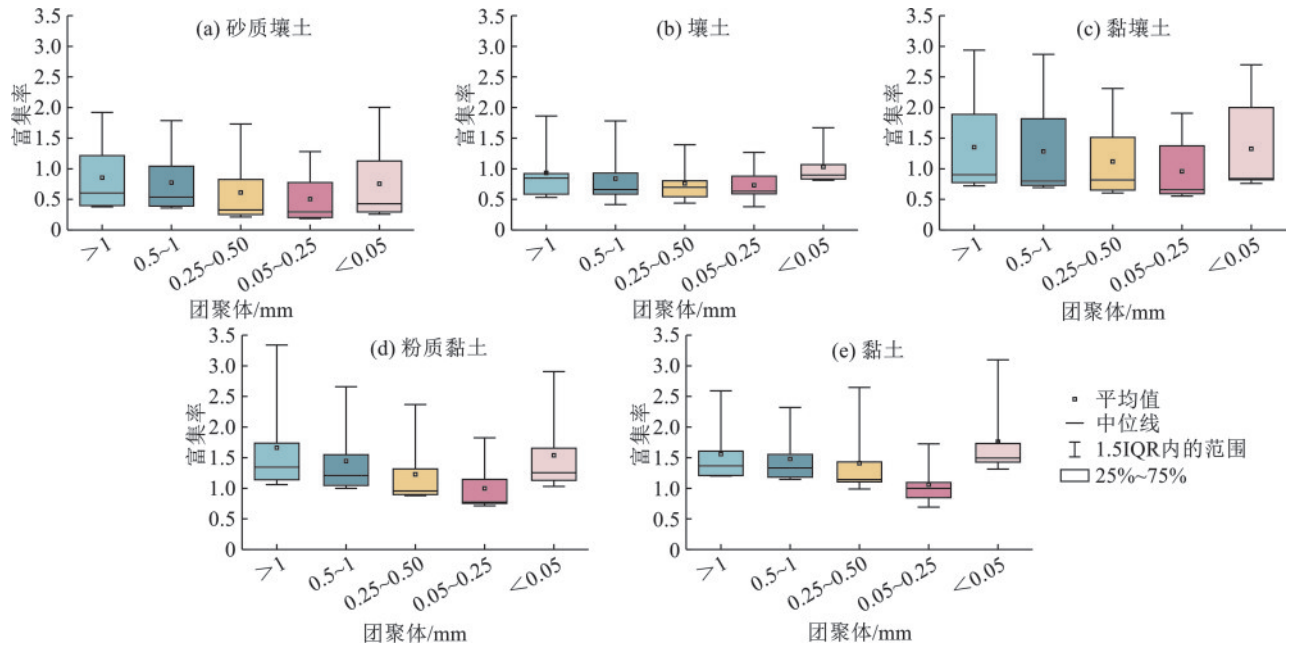
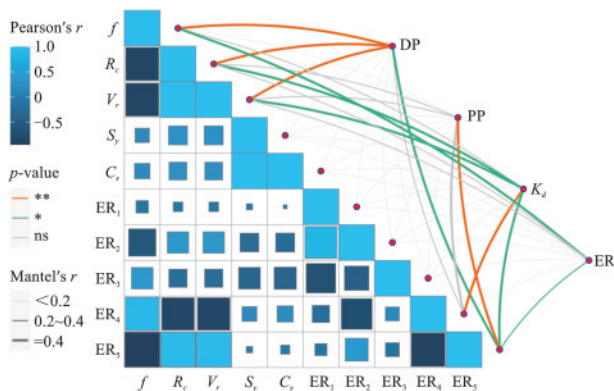


图 7 不同粒径泥沙磷富集特征

Fig.7 Phosphorus enrichment characteristics of sediments with different particle sizes



注: DP, PP, K_d , ER 分别为径流溶解态磷含量、泥沙吸附态磷含量、磷的固液相分配系数和侵蚀泥沙磷富集率; f 为入渗速率; R_f 为径流系数; V_f 为产流速率; S_f 为产沙率; C_f 为径流含沙量; $ER_1 \sim ER_5$ 分别为 $>1, 0.5 \sim 1, 0.25 \sim 0.5, 0.05 \sim 0.25, < 0.05$ mm 粒径泥沙的磷富集率。

图 8 曼特尔检验 (Mantel test) 分析产流产沙特征、粒径分布与磷流失关系

Fig.8 Mantel test analysis of relationship between runoff and sediment yield characteristics, particle size distribution, and phosphorus loss

PP 与 ER_5 呈显著相关性,是因为一方面,土壤表面易溶性磷一部分被径流冲刷流失,另一部分随着水分向下渗入到土壤内部。在降雨溅蚀作用和泥沙分选作用下, <0.05 mm 粒径由于其比表面积更大,自重更轻,优先被径流裹挟搬运。随着降雨历时增加, <0.05 mm 泥沙颗粒减少, $0.05 \sim 0.25$ mm 团聚体在降雨溅蚀作用下破碎成 <0.05 mm 粒径团聚体继续被径流裹挟搬运。另一方面,团聚体比表面积和表面电场强度影响团聚体稳定性。在降雨侵蚀过程中,土壤团聚体中有机质和黏粒等胶结物质减少,导致团聚体颗粒之间表面点位和表面电场强度^[16]变

弱,颗粒间排斥力增大,吸力减小,团聚体稳定性减弱,破碎成小粒径团聚体。

K_d 与 ER_4 表现出极显著相关性,是因为在降雨前期,大量土壤表面易溶性磷随着径流流失,短时间内提高 DP 含量。降雨中后期,主要是以 PP 为主导作用流失。其中, PP 主要富集在 <0.05 mm 粒径泥沙颗粒,降雨中后期 <0.05 mm 泥沙颗粒主要来自 $0.05 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体在降雨溅蚀作用下形成。因此, K_d 表现出随着降雨历时的增加而增加。

对于 DP 与 PP 的转换机制,当水流剪切力超过土壤固相磷平衡^[22],以及在降雨溅蚀作用下时,团聚体稳定性逐渐减弱,土壤团聚体表面电场负荷降低,吸附磷的能力减弱,便由 DP 为主转向以 PP 为主。

ER_5 显著影响 ER,是因为 <0.05 mm 粒径泥沙颗粒在整体侵蚀泥沙中占比较高,且该粒径泥沙颗粒磷富集率最高。

3.2 侵蚀泥沙颗粒组成对磷流失影响

次降雨后,和原土壤水稳性团聚体组成相比,侵蚀泥沙颗粒组成有显著差异,其中小粒径团聚体含量显著增加,表明在径流分选作用下,小粒径泥沙颗粒优先被径流裹挟搬运^[27]。侵蚀泥沙中以 <0.25 mm 粒径团聚体为主,是因为土壤快速湿润,团聚体内部空气被替换成水分,在降雨溅蚀作用下产生更多小粒径土壤颗粒^[16]。粒径较小的泥沙颗粒上富集有更多可溶解的磷^[2],细颗粒的先迁移导致泥沙中养分的富集^[28]。在该降雨设置下,雨滴溅蚀作用有限,径流输沙能力有限,导致对大团聚体的分选作用不大,只能优先搬运黏粒和粉砂粒^[21]。如果增大降雨

强度,则会增强溅蚀作用,导致对于黏粒含量低的土壤泥沙分选作用不明显^[16];如果坡度增大,则降雨对坡面冲蚀作用更明显,导致整个降雨过程中DP和PP含量都比原坡度高。但不及降雨强度增大对坡面冲蚀作用剧烈。

次降雨过程中, $>1\text{ mm}$ 粒径团聚体和 $<0.05\text{ mm}$ 粒径团聚体磷富集率更高,是因为 $>1\text{ mm}$ 粒径团聚体,能够保留内部吸附的磷,减少与外界接触,并且大团聚体可以增强对新输入的磷吸附^[14,22]。而 $<0.05\text{ mm}$ 粒径团聚体则因其比表面积更大,吸附点位更多,并且能与有机质形成有机-无机复合体,增强对土壤中磷的吸附。因此,可以通过更改磷流失模型中相对应侵蚀泥沙不同粒径下的磷富集率参数,来提高模型精度,提升丹江口库区磷流失预测能力。

4 结论

次降雨过程中,土壤溶解态磷和泥沙吸附态磷随降雨历时的增加均呈良好的幂函数下降关系。磷固液分配系数在降水过程中处于持续增长的指数函数关系,并且受到土壤质地的显著影响。由于土壤质地对土壤侵蚀及磷流失的显著影响及相关性,可以通过土壤质地指标来估算磷流失,以提升磷流失预测模型的精度。侵蚀泥沙粒径组成是影响泥沙磷富集的重要原因之一,由于侵蚀过程中泥沙选择性搬运,磷主要富集在 $<0.05\text{ mm}$ 粒径泥沙颗粒上,侵蚀泥沙磷富集率随降雨历时的增加和土壤黏粒含量的降低而下降。根据本次试验,丹江口库区水土保持措施应加强对黏粒含量较高土壤的保护。次降雨过程中,在降雨强度上采用 60 mm/h ,可能造成径流对于大粒径团聚体的分选作用不明显,影响试验精度。在未来的研究中,可以增加不同降雨强度下对团聚体分选作用更深层次的研究;另外,可以在该雨强设置下将降雨时间延长,研究降雨时长对于大粒径团聚体的影响作用。

参考文献:

- [1] DALY K, STYLES D, LALOR S. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties[J]. *Journal of Soil Science*, 2015, 66(4): 792-801.
- [2] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268.
- [3] TIM U S, JOLLY R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 25-35.
- [4] KRONVANG B, BRUHN A J. Choice of sampling strategy and estimation method for calculating nitrogen and phosphorus transport in small lowland streams[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(11): 1483-1501.
- [5] ALEWELL C, RINGEVAL B, BALLABIO C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: e4546.
- [6] 皮宛鑫, 杨俊茜, 李丹莉, 等. 降雨对磷矿区土壤磷形态特征和流失风险的影响: 以黄柏河流域磷矿区为例[J]. *地质灾害与环境保护*, 2025, 36(3): 64-77.
PI W X, YANG J X, LI D L, et al. Effects of rainfall on soil phosphorus forms and loss risk in phosphate mining areas: A case study of the Huangbai River watershed[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2025, 36(3): 64-77.
- [7] 刘思彤, 屈传新, 安娟, 等. 沂蒙山区棕壤横坡垄作坡面土壤磷的空间分异研究: 以双河峪小流域为例[J]. *中国水土保持*, 2025(7): 65-70.
LIU S T, QU C X, AN J, et al. Spatial variation of soil phosphorus for brown soil in transverse ridge planting slopes of the Yimeng Mountain areas: A case study of the Huangbai river watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(7): 65-70.
- [8] 刘晓荣, 杜新忠, 刘新茹, 等. 典型降雨事件下流域磷流失特征与影响因素[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(5): 81-87.
LIU X R, DU X Z, LIU X R, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus loss in watersheds during typical rainfall events[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(5): 81-87.
- [9] 肖坚. 水土保持措施对坡面产流产沙及氮磷流失的调控机制[J]. *水利技术监督*, 2026(3): 237-240.
XIAO J. Regulation mechanism of soil and water conservation measures on slope runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2026(3): 237-240.
- [10] 李雪婷, 刘目兴, 卢世国, 等. 三峡库区茶园坡面土壤水分空间分布特征及对降雨补给的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 137-144.
LI X T, LIU M X, LU S G, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture on tea garden slope and its response to rainfall replenishment in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 137-144.
- [11] 张艺, 田昌园, 汪文, 等. 皖西大别山典型土地利用类型坡面产流产沙与氮磷流失特征[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(4): 62-70.
ZHANG Y, TIAN C Y, WANG W, et al. Characteristics of runoff and sediment yield, and nitrogen and phosphorus loss on slopes undergoing typical land-use in Dabie

- Mountain of western Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 62-70.
- [12] 叶芝茜, 刘宝元, 符素华, 等. 土壤侵蚀过程中的养分富集率研究综述[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 124-130. YE Z H, LIU B Y, FU S H, et al. Review of research on enrichment ratio of nutrient in soil erosion process[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1): 124-130.
- [13] 罗晓春, 杭鑫, 曹云, 等. 太湖富营养化条件下影响蓝藻水华的主导气象因子[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1248-1258. LUO X C, HANG X, CAO Y, et al. Dominant meteorological factors affecting cyanobacterial blooms under eutrophication in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1248-1258.
- [14] WANG J, WEI Y J, YANG B G, et al. Soil texture as a regulatory pathway for the enrichment of aggregate-associated phosphorus[J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(5): 1644-1655.
- [15] WAN Y, EL-SWAIFY S A. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol[J]. Geoderma, 1997, 75(3/4): 251-265.
- [16] BEUSELINCK L, STEEGEN A, GOVERS G, et al. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt[J]. Geomorphology, 2000, 32(1/2): 69-82.
- [17] 张应平, 牛向东, 刘关锋, 等. 普朗铜矿地表冰碛物径流分选试验研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 167-170. ZHANG Y P, NIU X D, LIU G F, et al. Experimental study on surface moraine runoff separation in Pulang copper mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(4): 167-170.
- [18] HAO H X, WANG J G, GUO Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. Catena, 2019, 173: 494-504.
- [19] HAN Z, LI J W, LI Y H, et al. Assessment of the size selectivity of eroded sediment in a partially saturated sandy loam soil using scouring experiments[J]. Catena, 2021, 201: e105234.
- [20] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626-1632. GE N N, SHI Y, YANG X L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [21] 刘壮壮, 和继军, 段光耀, 等. 不同降雨-坡度黄土坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J]. 生态学报, 2025, 45(13): 6427-6436. LIU Z Z, HE J J, DUAN G Y, et al. Study on the particle characteristic of slope erosion sediment on loess under varied rainfall-slope conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 6427-6436.
- [22] 辛小康, 王超, 柳根, 等. 南水北调中线水源区农田面源污染防治现状分析与对策建议[J]. 中国水利, 2024(20): 81-88. XIN X K, WANG C, LIU G, et al. Current situation and countermeasures of prevention and control of non-point source pollution from farmlands in water source areas of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. China Water Resources, 2024(20): 81-88.
- [23] 何彦铮, 李天阳, 李永灏, 等. 模拟降雨下植物篱-草沟系统茎秆直径对紫色土区泥沙粒径与氮磷迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 223-231. HE Y Z, LI T Y, LI Y H, et al. Influence of stem diameter in hedgerow-grass ditch system on sediment particle size and nitrogen and phosphorus transport in purple soil area under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 223-231.
- [24] 国家环境保护总局. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Water quality-determination of total phosphorus-ammonium molybdate spectrophotometric method: GB 11893—1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [25] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. ZHANG G L, GONG Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [26] 赵晓峰, 王艳辉, 张健乐, 等. 风水复合侵蚀下土壤表面电化学性质及团聚体稳定性的变化特征[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 107-114. ZHAO X F, WANG Y H, ZHANG J L, et al. Soil surface electrochemical properties and aggregate stability under wind-water compound erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(11): 107-114.
- [27] 张逸飞, 汪零, 徐玲, 等. 降雨驱动下红壤团聚体的溅蚀特征及周转过程[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 27-33. ZHANG Y F, WANG L, XU L, et al. Splash erosion characteristics and turnover process of red soil aggregates driven by rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 27-33.
- [28] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130. TANG S S, GAO H D, LI Z B, et al. Characteristics of particle separation of erosion sediment in slop surface covered with sand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 125-130.