

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

何彦铮¹, 李天阳¹, 李永灏¹, 何丙辉¹, 曾波², 张高宁¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: [目的] 为研究植物篱-草沟系统协同机制下泥沙颗粒分选规律及氮、磷迁移转化过程的影响。[方法] 设置5种植物篱茎秆直径0(对照, CK)、0.1、0.2、0.4、0.8 cm与有、无草沟(0、0.5 cm)组合模式, 室内构建植物篱-草沟系统, 在90 mm/h雨强下开展模拟降雨试验, 分析侵蚀泥沙50~1 000、2~50、<2 μm 团粒体积百分比及其总氮(TN)、总磷(TP)迁移特征。[结果] 1) 在植物篱-草沟系统中, 侵蚀泥沙团粒主要以粉粒(2~50 μm)为主。2) 在有、无草沟条件下, 0 cm茎秆直径坡面迁移泥沙的砂粒含量均显著最高($p < 0.05$)。在有草沟条件下, 0.8 cm茎秆直径的坡面迁移泥沙中黏粒、粉粒、砂粒的TP含量均最低($p < 0.05$)。3) 在有草沟条件下, 0 cm茎秆直径下坡面迁移泥沙中3个不同粒径的TN含量均最低, 其中0.1、0.2 cm茎秆直径处理的效果显著($p < 0.05$)。4) 当有草沟时, 茎秆直径和砂粒TP含量呈显著负相关($p < 0.05$)。无草沟条件下, 茎秆直径和黏粒含量、粉粒TP含量、砂粒TP含量呈显著负相关($p < 0.05$)。[结论] 研究结果为防控紫色土区水土流失与面源污染提供理论基础。

关键词: 模拟降雨; 紫色土; 三峡库区; 植物篱-草沟系统; 泥沙分选

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0223-09

Influence of Stem Diameter of Hedgerow-Grass Ditch System on Sediment Particle Size and Nitrogen and Phosphorus Transport in Purple Soil Areas under Simulated Rainfall

HE Yanzheng¹, LI Tianyang¹, LI Yonghao¹, HE Binghui¹, ZENG Bo², ZHANG Gaoning¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment in the Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of the synergistic mechanism of the hedgerow-grass ditch system on the sediment particle sorting patterns and the migration and transformation processes of nitrogen and phosphorus. [Methods] Five combinations of hedgerows with stem diameters of 0 (control, CK), 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 cm, and with or without grass ditches (0, 0.5 cm) were set up. A hedgerow-grass ditch system was constructed in the laboratory, and a simulated rainfall experiment was conducted under a rainfall intensity of 90 mm/h. The volume percentages of eroded sediment aggregates of 50—1 000 μm , 2—50 μm , and less than 2 μm , as well as the transport characteristics of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), were analyzed. [Results] 1) In the hedgerow-grass ditch system, the eroded sediment aggregates were mainly composed of silt particles (2—50 μm). 2) Under the conditions with and without grass ditches, the content of sand particles in the

收稿日期: 2025-09-09

修回日期: 2025-10-05

录用日期: 2025-10-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305204); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2023022); 国家自然科学基金项目(42107347); 重庆市硕士研究生科研创新项目(CYS240153)

第一作者: 何彦铮(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与面源污染研究。E-mail: 13640559909@163.com

通信作者: 李天阳(1988—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事水土保持与面源污染研究。E-mail: tyli53@swu.edu.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

transported sediment on the slope with a stem diameter of 0 cm was significantly the highest ($p < 0.05$). Under the condition with grass ditches, the TP contents of clay, silt, and sand particles in the transported sediment on the slope with a stem diameter of 0.8 cm were the lowest ($p < 0.05$). 3) Under the condition with grass ditches, the TN contents of three different particle sizes in the transported sediment on the slope with a stem diameter of 0 cm were the lowest. Among them, the treatment effects with stem diameters of 0.1 cm and 0.2 cm were significant ($p < 0.05$). 4) Under the condition with grass ditches, stem diameter was significantly negatively correlated with the TP content of the sand particles ($p < 0.05$). Under the condition without grass ditches, stem diameter was significantly negatively correlated with the clay content, the TP content of silt particles, and TP content of sand particles ($p < 0.05$). [Conclusion] The research findings provide a theoretical basis for the prevention and control of soil erosion and non-point source pollution in purple soil areas.

Keywords: simulated rainfall; purple soil; Three Gorges Reservoir area; hedgerow-grass ditch system; sediment sorting

Received: 2025-09-09

Revised: 2025-10-05

Accepted: 2025-10-13

Online(www.cnki.net): 2025-12-08

紫色土是三峡库区农业用地的主要土壤类型,坡耕地是三峡库区水土流失的发源地^[1],土壤侵蚀不仅导致表土的养分流失和库区河沙淤积,而且会造成水质恶化并危害生态健康^[2]。三峡库区土壤侵蚀剥离富含氮、磷、有机质的表层土壤,导致坡耕地耕层厚度年均减少 3~5 mm^[3]。三峡水库蓄水后,回水变动区每年淤积泥沙约 1.2 亿 t,减少有效库容,降低防洪与发电效益^[4]。三峡库区也是长江上游面源污染的高负荷区,降雨径流监测表明,一次 30 mm 的暴雨可造成坡耕地氮、磷流失负荷分别达到 4.5~7.8 kg/hm² 和 0.6~1.2 kg/hm²^[5-6];库区 19 条一级支流的入江口在汛期 TN、TP 浓度普遍超过国家地表水Ⅲ类标准 1~2 倍^[7]。土壤侵蚀过程中土壤氮、磷等发生迁移与富集,成为农业面源污染问题的重要源头,对三峡库区水环境生态安全构成严重威胁^[8]。氮、磷经库湾缓流区富集后,促进蓝藻、硅藻异常增殖,形成 100~300 km² 的水华带,威胁重庆、宜昌等沿江城市 1 000 余万人的饮用水源安全。三峡库区悬沙以 ≤ 0.062 mm 粉砂为主,其磷通量占 82%,是颗粒磷的主要载体;非汛期细颗粒含磷更高,库区对黏粒磷滞留率 $>60\%$ ^[9]。更严峻的是,侵蚀泥沙携带的颗粒态氮、磷可在库区干支流中再次悬浮,释放溶解态营养盐,使水体总氮、总磷浓度在汛期升高 1.5~3.0 倍,诱发水华,降低溶解氧,破坏鱼类产卵场和浮游生物群落结构,形成“侵蚀-淤积-富营养化”的级联生态风险^[10]。因此,在氮、磷进入受纳水体前,通过适当的技术手段阻断氮、磷等营养物质是控制农业原料污染的主要策略之一^[11]。

植物篱是将植物沿等高线行列种植形成的植物篱笆墙或植物条带,枝叶缓冲雨滴,茎秆阻滞径流,深根固土,使表土不被剥蚀,促雨水入渗,减少泥沙

与氮磷流失^[12],因此,植物篱技术是目前水土保持领域治理农业面源污染较为有效且可持续性的植物措施。植物篱可通过减少坡耕地养分物质输出量,从而达到控制非点源污染的效果。有研究^[13]发现,等高植物篱通过控制 $<2\ \mu\text{m}$ 团聚体流失,有效减少氮、磷养分迁移,因其为 N、P 富集主要载体,是防控面源污染的关键。生态草沟是一种沿坡面或汇水区开挖并密植耐湿草本或灌木的浅沟系统^[14]。其根系能够固持水土,截留泥沙,吸附养分,净化水质。相比于传统水泥排水沟渠,草沟沟渠减少径流速度及产流量,同步实现排洪、减蚀、控污与景观提升,是一种低维护、可持续的坡面生态措施^[15-16]。生态草沟同样对于坡面径流中的各形态 N 素有较好的拦截作用,有研究^[17]在绿狐尾藻草沟的试验中发现,草沟对总氮的去除率可达 48.7%。农业沟渠种植水芹等水生植物,不仅能通过植物自身吸收富集土壤团粒中的氮、磷,还可有效拦截携带大量氮、磷的泥沙,从而增强养分滞留效果^[18]。

目前,针对植物篱-草沟系统在坡面径流过程中对泥沙颗粒的分选机制及氮、磷等养分拦截效应的研究仍较为薄弱,尤其缺乏对其协同作用过程的系统解析。深入探究该系统对泥沙团聚体粒径分布的调控规律及养分迁移路径,不仅有助于揭示其水土保持内在机理,也为优化生态治理模式、提升坡地资源可持续利用水平提供科学依据,具有重要的理论价值与实践意义。因此,本研究在室内构建不同茎秆直径的植物篱-草沟系统,设计 5 种植物篱茎秆直径与 2 种草沟直径的组合条件,开展室内人工模拟降雨试验,探究不同茎秆直径植物篱-草沟系统坡面产流产沙及氮磷迁移特征,研究结果为防治三峡库区坡地水土流失提供有效理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验用土取于重庆市西南大学水土保持试验基地的紫色土坡耕地(29°48′42″N,106°24′20″E)。该地属于亚热带季风气候,海拔 266.3 m,年平均降水量为 1 173.6 mm^[19],无霜期 359 d,年平均气温为 18.6℃,年日照时间达 1 006.2 h。供试土壤采自长江三峡库区典型坡耕地,其母质为中生代侏罗纪沙溪庙组紫色砂泥页岩,属典型弱酸性紫色土,是该区域分布最广、耕作最为普遍的农业土壤类型,约占库区耕地总面积的 78%。样品采集于表层 0~20 cm 耕作层。野外取样后,土壤经自然风干处理,以避免高温烘干对土壤结构和理化性质造成破坏,随后手工拣除石块、根系等杂物,并通过 10 mm 孔径筛进行均质化处理,确保颗粒分布相对均匀,满足模拟降雨试验对土壤样本的标准化要求。试验土壤体积质量为(1.25±0.05)g/cm³,TN 质量分数为(0.60±0.33)g/kg,TP 质量分数为(0.78±0.12)g/kg,砂粒质量分数为(50.87±1.29)%,粉粒质量分数为(38.05±1.41)%,黏粒质量分数为(11.08±0.12)%。

1.2 试验设计

按照野外实地测量不同生长阶段植物篱带茎秆直径,成比例构建植物篱-草沟系统,利用柔韧仿真软胶模拟草改变单株草径围来模拟植物篱带的 5 种茎秆直径,单株草茎秆直径为 0(对照,CK)、0.1、0.2、0.4、0.8 cm,草沟设置有草沟(0.5 cm)和无草沟(0 cm)2 种处理方式。植物篱-草沟系统茎秆直径布设见图 1。

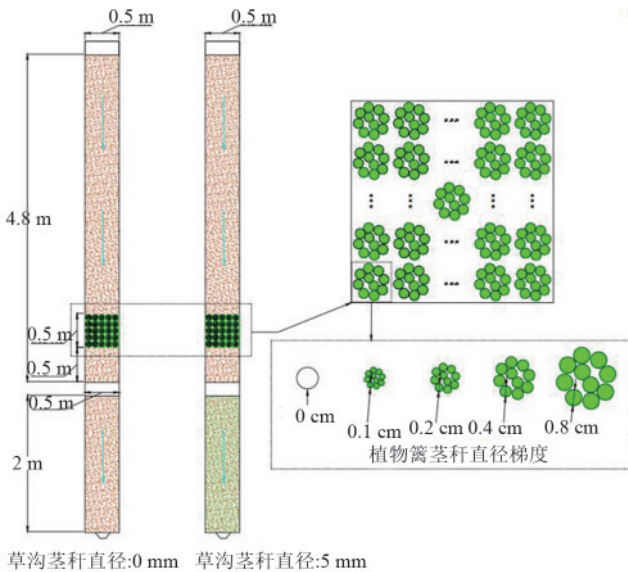


图 1 植物篱-草沟系统茎秆直径布设示意

Fig. 1 Layout of stem diameters in hedgerow-grass ditch system

软胶模拟草可重复使用,且比自然植被更容易控制茎秆直径,能够在外力(如水流冲击)作用下产生类似真实植被的弯曲与摆动行为,从而更真实地模拟植物在降雨-径流条件下的动态阻水固土过程。每株草单独插入土壤中,插入深度为 5 cm,植物篱带布置在上方土槽距离末端 0.5 m 处,面积为 0.25 m²(0.5 m×0.5 m)。

在西南大学水土保持试验基地内进行室内人工模拟降雨试验。采用长 4.8 m、宽 1 m 的钢制变坡土槽模拟布设植物篱模式的坡面,采用长 2 m、宽 0.5 m 的钢制变坡土槽模拟布设生态草沟的排水沟道(图 2)。根据三峡库区降雨资料设置雨强为 90 mm/h,通过实地调查紫色土区农业坡耕地和草沟坡度,设置植物篱坡面 15°,生态草沟坡面 16°,按照完全组合的方法进行模拟降雨试验,各组合条件重复 2 次,共 20 场降雨。

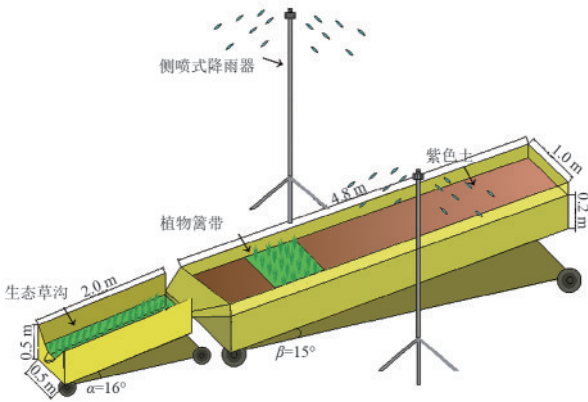


图 2 植物篱-草沟系统装置示意

Fig. 2 Experimental setup of hedgerow-grass ditch system

1.3 样品采集与测定

将试验土壤按体积质量分层装填到钢制土槽内,填土深度为 20 cm。植物篱坡面和生态草沟填土体积质量分别为 1.25、1.35 g/cm³。装填结束后以 30 mm/h 小雨强湿润土壤直至水分饱和,待沉降 24 h 后用土壤湿度计测量土壤含水量,试验开始前保持土壤含水量为标准田间持水量。降雨试验采用侧喷式人工模拟降雨装置,该装置由中国科学院水利部水土保持研究所研发制造,专用于坡面水土流失过程的模拟研究。试验中,土槽置于降雨器中央,两侧喷嘴水平间距为 1.5 m,喷嘴与土壤表面之间的垂直距离约为 4.0 m,可形成 8 m×3 m 的有效降雨面积,确保降雨覆盖整个试验小区并减少边缘效应。该侧喷式模拟降雨器通过调节供水压力和更换不同直径的喷嘴,实现 30~230 mm/h 内连续可调的降雨强度,能够覆盖三峡库区典型暴雨事件的强度范围。每次试验前测定雨强为 90 mm/h,降雨均匀度可达到 80% 以上。准备工作结束后,开始正

式降雨试验,生态草沟集流槽产流后开始用秒表计时,并用 20 L 刻度桶收集径流,降雨时长设置为 60 min,前 10 min 内每 2 min 用刻度桶采集 1 次径流泥沙样,后 50 min 每 5 min 采集 1 次径流泥沙样,单场降雨共收集 15 次径流泥沙样品,待每场降雨结束后,每桶径流泥沙混匀后用 590 mL 塑料水瓶采集 1 瓶用于泥沙团粒粒径分布测定,每场共收集 15 瓶径流泥沙样。桶内泥沙沉降完全后倒掉上清液,将每桶底部的泥沙分别采集带回实验室,放入烘箱进行低温 40 ℃ 烘干后,研磨过 1 mm 筛进行泥沙 N、P 质量分数测定。每场降雨试验结束后更换表层 10 cm 深土壤,并进行之前相同操作。

模拟降雨试验中所收集到的径流泥沙样品带回实验室后用 Rise 系列激光粒度仪分析泥沙团粒的粒径分布,将泥沙团粒共分为黏粒 $< 2 \mu\text{m}$ 、粉粒 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 、砂粒 $50 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 3 个粒径^[20],然后采用湿筛法配合吸管法进行不同粒径泥沙团粒的分离,首先将采集的土壤样品经自然风干后,挑除根系和碎石等杂质,随后将其轻轻研磨至通过 2 mm 筛,获取用于分析的细土。在测定前,取适量过筛样品置于套筛中,在水中缓慢振荡进行湿筛,以避免机械破坏团聚体结构。湿筛完成后,将各筛级中的团聚体收集并烘干称重,计算各级团聚体的含量。将收集的径流泥沙样按照 3 个粒径进行烘干、称重,测定产沙量、TN 和 TP 质量分数。样品测定时,先摇匀水样,采用碱性过硫酸钾消解-紫

外分光光度法测定 TN 质量分数;将摇匀水样静置 60 min 取上清液,采用碱性过硫酸钾-钼酸铵分光光度法测量 TP 质量分数。

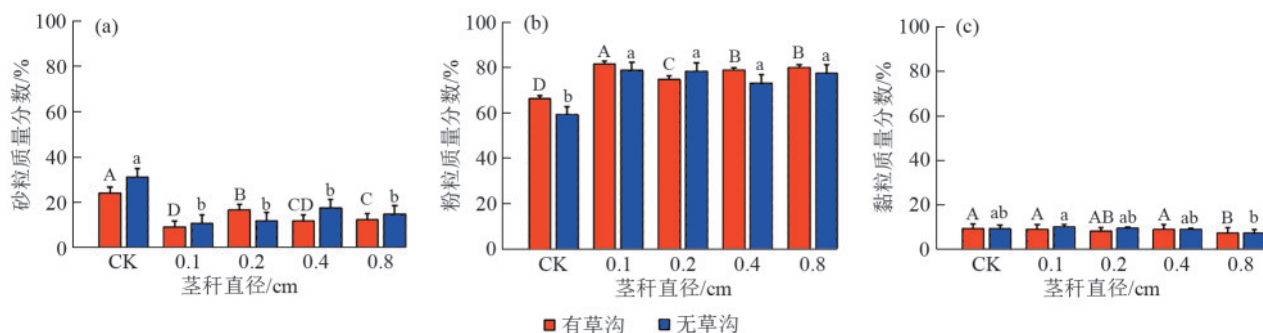
1.4 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据整理、计算和统计分析。采用单因素方差(ANOVA)分析不同茎秆直径变化对坡面侵蚀泥沙粒径分布、TN、TP 的影响;采用 Pearson 相关分析揭示不同茎秆直径下粒级泥沙团粒与 TN、TP 的关系,使用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 23.0 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 迁移泥沙粒径平均值分布

在有、无草沟条件下,CK 处理坡面迁移泥沙的砂粒质量分数均为最高,分别为 24.21% 和 31.33%,比 0.1、0.2、0.4、0.8 cm 茎秆直径坡面迁移泥沙的砂粒质量分数分别显著提高 162.65%、44.55%、101.89%、93.13% 和 188.95%、160.94%、78.08%、108.76%(图 3a)。在有、无草沟条件下,CK 处理坡面迁移泥沙的粉粒质量分数均为最低,分别为 66.67% 和 59.62%,比 0.1、0.2、0.4、0.8 cm 茎秆直径的粉粒质量分数分别显著降低 22.81%、12.87%、18.88%、20.45% 和 32.80%、32.10%、23.51%、24.80%(图 3b)。在有、无草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径坡面迁移泥沙的黏粒质量分数均显著最低,分别为 7.16% 和 7.11%,比 CK、0.1、0.4 cm 茎秆直径的黏粒质量分数分别显著降低 27.35%、24.36%、22.23% 和 27.32%、40.35%、23.39%(图 3c)。



注:图柱上方不同大、小写字母分别表示有、无草沟条件下同一粒级团粒在不同茎秆直径下差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同茎秆直径下迁移泥沙粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of transported sediment under different stem diameters

2.2 迁移泥沙中 TN、TP 分布

2.2.1 迁移泥沙中 TN 质量分数平均值分布 在有草沟条件下,0.2 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中砂粒的 TN 质量分数最高,为 1.02 g/kg,比 CK 和 0.1 cm 茎秆直径下的 TN 质量分数分别显著提高 107.73%、144.59%(图 4a);在无草沟条件下,CK、0.1、0.2、0.4、0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中砂粒的 TN 质量分数无显著性差异(图 4a)。

在有草沟条件下,0.2 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中粉粒的 TN 质量分数最高,为 1.26 g/kg,比 CK、0.1、0.4、0.8 cm 茎秆直径下的粉粒的 TN 质量分数本部显著提高 71.18%、23.42%、12.74%、51.53%(图 4b);在无草沟条件下,CK 处理坡面迁移泥沙中粉粒的 TN 质量分数最低,为 0.58 g/kg,比 0.1、0.2、0.4 cm 茎秆直径的粉粒的 TN 质量分数分别显著降低 71.69%、70.43%、43.77%(图 4b)。

在有草沟条件下,0.2 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中黏粒的 TN 质量分数最高,为 1.25 g/kg,比 CK、0.4、0.8 cm 茎秆直径黏粒的 TN 质量分数分别显著提高 68.03%、12.41%、35.55%(图 4c);在无草

沟条件下,0.1 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中黏粒的 TN 质量分数最高,为 0.68 g/kg,比 CK 和 0.8 cm 茎秆直径下的 TN 质量分数分别显著提高 58.78%、37.24%(图 4c)。

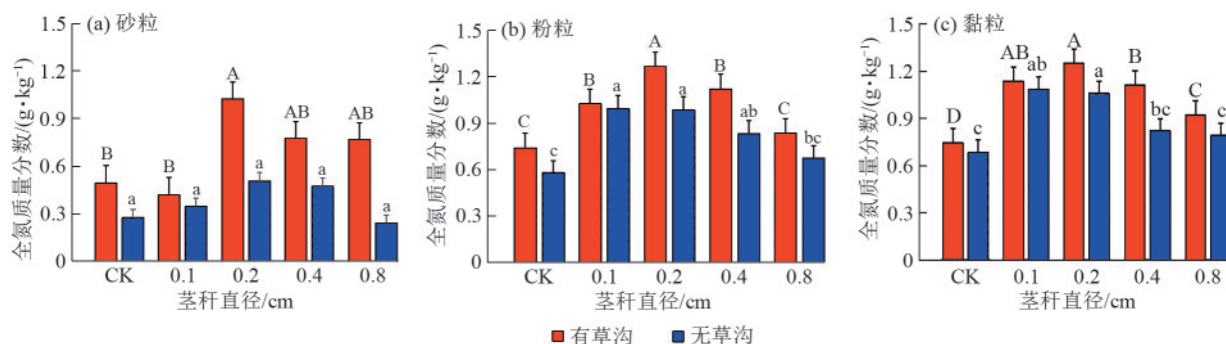


图4 不同茎秆直径下迁移泥沙中TN质量分数

Fig. 4 TN content in transported sediment under different stem diameters

2.2.2 迁移泥沙中TP质量分数平均值分布 在有草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中砂粒的 TP 质量分数最低,为 0.33 g/kg,比 CK、0.1、0.2、0.4 cm 茎秆直径砂粒的 TP 质量分数分别显著降低 58.82%、87.55%、55.47%、43.06%(图 5a);在无草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中砂粒的 TP 质量分数同样最低,为 0.43 g/kg,各茎秆直径下坡面迁移泥沙中砂粒的 TP 质量分数无显著性差异(图 5a)。

在有草沟和无草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中粉粒的 TP 质量分数均为最低,其中有草沟条件下粉粒的 TP 质量分数为 0.33 g/kg,比 CK、0.1、0.2、0.4 cm 茎秆直径分别显著降低 50.14%、

56.21%、50.43%、54.93%(图 5b);在无草沟条件下粉粒的 TP 质量分数为 0.49 g/kg,比 CK、0.1、0.2、0.4 cm 茎秆直径分别显著降低 31.47%、32.65%、31.50%、30.48%(图 5b)。

在有草沟和无草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中黏粒的 TP 质量分数均最低,为 0.44 g/kg,比 0.1、0.2、0.4 cm 茎秆直径黏粒 TP 质量分数分别显著降低 71.89%、63.30%、62.01%(图 5c);在无草沟条件下,0.8 cm 茎秆直径下坡面迁移泥沙中黏粒 TP 质量分数最低,为 0.54 g/kg,比 CK、0.1、0.4 cm 茎秆直径黏粒的 TP 质量分数分别显著降低 22.06%、28.37%、19.20%(图 5c)。

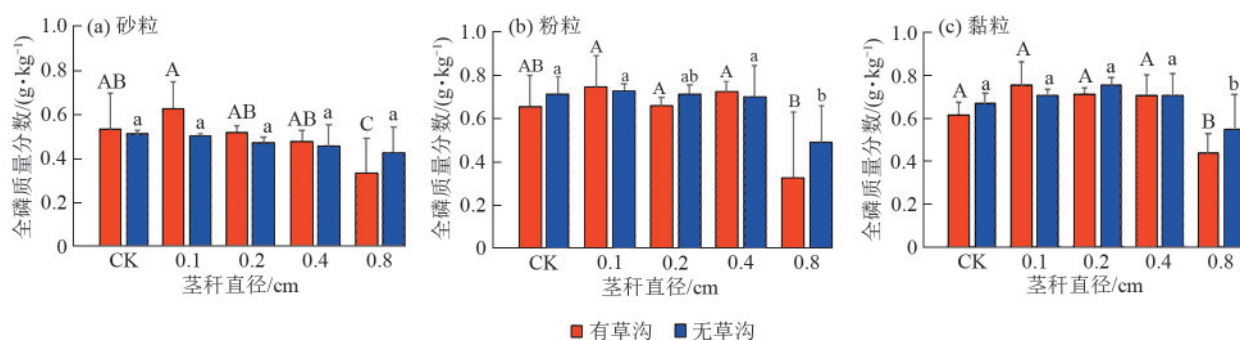


图5 不同茎秆直径下的迁移泥沙中TP质量分数分布

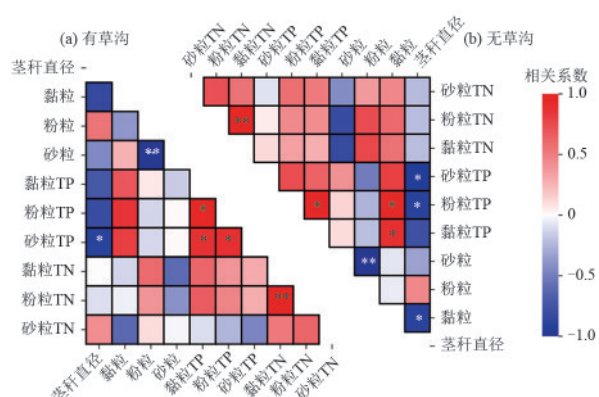
Fig. 5 Distribution of TP content in transported sediment under different stem diameters

2.3 茎秆直径与泥沙粒径、TN、TP的关系

在有、无草沟时,茎秆直径与泥沙粒径、TN、TP的关系见图6。有草沟条件下,黏粒 TN 质量分数与粉粒 TN 质量分数呈极显著正相关($p < 0.01$),砂粒 TP 质量分数和黏粒 TP 质量分数、粉粒 TP 质量分数呈显著正相关($p < 0.05$),粉粒 TP 质量分数和黏粒 TP 质量分数呈显著正相关($p < 0.05$);砂粒质量分数和粉粒质量分数呈极显著负相关($p < 0.01$),茎秆直径和砂粒 TP 质量分数呈显

著负相关($p < 0.05$)。

无草沟条件下,黏粒 TN 质量分数和粉粒 TN 质量分数呈极显著正相关($p < 0.01$),黏粒 TP 质量分数和粉粒 TP 质量分数呈显著正相关($p < 0.05$),黏粒质量分数和粉粒 TP 质量分数、黏粒 TP 质量分数呈显著正相关($p < 0.05$);茎秆直径和黏粒质量分数、粉粒 TP 质量分数、砂粒 TP 质量分数呈显著负相关($p < 0.05$),粉粒质量分数和砂粒质量分数呈极显著负相关($p < 0.01$)。



注: *表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著; **表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著。

图 6 有、无草沟条件下各指标的相关关系
Fig. 6 Correlation among different indicators under conditions with and without grass ditches

3 讨论

本试验雨强为 90 mm/h,属于暴雨,此时雨滴的溅蚀效应能显著使较大团聚体发生崩裂,产生较多细团粒,且交替的植被格局也会引起团聚体的崩裂,这种双重作用使得沟床内不易发生细沟侵蚀。从迁移泥沙粒径平均值分布来看,植物篱-草沟系统下侵蚀泥沙主要以粒径 2~50 μm 的团粒为主,平均占比为 75.25%。在有草沟条件下,篱带茎秆直径在增大的过程中,相较 0 cm 茎秆直径条件下,其他茎秆直径下的侵蚀泥沙中 50~1 000 μm 团粒质量分数均显著减少(44.55%~162.65%),而 2~50 μm 团粒质量分数为 12.87%~22.81% 和 <2 μm 团粒质量分数为 2.40%~27.35%,均呈增加趋势,表明植物篱-草沟系统具有泥沙分选的作用。其原因为植物篱带通过增加地表糙度显著降低径流剪切力,使 50~1 000 μm 大团聚体因重力沉降优先在篱前沉积;而草沟内缓流环境配合根系-微生物,促进 2~50 μm 微团聚体与 <2 μm 黏粒通过絮凝作用形成稳定悬浮流,随水流向下游迁移,从而表现出明显的粒径分选效应^[21]。当迁移泥沙通过坡面篱带的分选后汇入生态草沟,草沟沟床内更高密度的植被格局继续对迁移泥沙进行分选^[22],且对径流动能产生二次削弱,使得沟床内很难形成细沟侵蚀,故被搬运的泥沙团粒主要以 2~50 μm 团粒为主。

在有草沟条件下 CK 处理径流坡面迁移泥沙的砂粒质量分数最高为 24.21%,说明相较于无草沟条件下,植物篱带能有效地拦截更多径流中粒径较大的团粒,与肖海等^[20]的研究结果相似,其在 90 mm/h 雨强和 15°坡面条件下发现,植物篱能显著增强坡面的泥沙分选作用,且相较于裸坡地,侵蚀泥沙中 50~1 000 μm 团粒质量分数减少 30.75%~47.28%。除

0.2 cm 茎秆直径下的植物篱,CK、0.1、0.4、0.8 cm 茎秆直径的侵蚀泥沙中砂粒质量分数均表现为无草沟显著高于有草沟条件(17.61%~46.69%),说明草沟对径流中砂粒的拦挡作用,减小土壤表面砂粒的迁移速度,促进颗粒物的沉积,与 LEES 等^[23]的结果类似。与传统水泥沟渠相比,草沟由草沟壁和沟内植物组成,能有效降低径流中泥沙等颗粒物质的沉积,并且土壤孔隙被草沟堵塞,降低土壤的入渗能力。有研究^[24-25]表明,在侵蚀运行过程中,径流能量和草沟土壤基质的抗冲刷力共同决定着土体大团粒的运动,当径流能量小于草沟土壤基质的抗冲刷力时,草沟使得土壤大团粒发生沉积,草沟的沟床也发生演变,最终使泥沙悬浮与沉积达到动态平衡;吴凤至等^[26]研究降雨动能对泥沙分选的试验结果中指出,侵蚀泥沙中黏粒含量随降雨历时的增大而减小,可能因为其试验雨强超过 90 mm/h,且坡面不设置水土保持措施,降雨动能的显著增大使径流搬运的泥沙团粒以大团聚体为主,导致侵蚀泥沙中细团粒质量分数降低,并且泥沙在搬运的过程中会发生絮凝效应,即细团粒重新组合成较大团粒。彭怡等^[27]研究得出,随着降雨的进行,砂粒质量分数逐渐增加,粉粒质量分数基本保持不变,黏粒质量分数在逐渐减小,与本研究结果存在差异,可能是因为植物篱和生态草沟的泥沙分选作用改变不同粒级泥沙团粒搬运-沉积的过程,也说明土壤侵蚀中泥沙团粒的迁移过程存在复杂性^[28]。

从迁移泥沙中 TN 质量分数结果来看,在有草沟条件下,CK 处理下坡面迁移泥沙中 3 个不同粒径的 TN 质量分数均最低,随着茎秆直径增大,粒径的 TN 质量分数均呈现先上升后下降趋势,且 0.2 cm 茎秆直径下的 3 个粒径 TN 质量分数均达到最高,表明不同茎秆直径下的植物篱-草沟系统能增加土壤 TN、有机质等养分,与蒲玉琳等^[29]研究结果相似。从迁移泥沙中 TP 质量分数结果来看,在有、无草沟的条件下,3 个粒径下的 TP 均呈现 0.1 cm 茎秆直径下的侵蚀泥沙 TP 质量分数最高,0.8 cm 茎秆直径下的 TP 质量分数最低。本研究发现,随着茎秆直径增大,植物篱-草沟系统显著提高径流 TP 的拦截效果,其原因是篱-沟复合系统的协同效应显著提升土壤有机质积累,改善土壤团粒结构,使得 >250 μm 团聚体质量分数提高 15.00%,增强土壤对磷的吸附固定能力,从而促进土壤的熟化进程。当生态草沟茎秆直径为 0.5 cm 时,虽然各粒级泥沙团粒平均质量分数相较土质沟时没有显著变化,但随降雨历时的各粒级泥沙质量分数的变化相较土质沟时更稳定,波动性显

著减小,说明生态草沟在生长前后对于土壤侵蚀的控制能力存在差异,在实际农业生产过程中,可针对性地对草沟生长初期采取额外水土保持措施^[30-32]。土壤团粒可表征土壤的粒径分布,反映坡面侵蚀过程对土壤质地的影响^[33]。植物篱-草沟系统中,侵蚀泥沙随篱带茎秆直径增大呈增大趋势。茎秆直径和黏粒、粉粒TP、砂粒TP质量分数呈显著负相关,与50~1 000 μm 团粒质量分数呈显著负相关,与兰龙焱等^[34]在赣南草地发现的随植被盖度增大,土壤粗颗粒减少、细颗粒增加现象一致,表明根系-茎秆对水动力的削弱作用可降低大团聚体的搬运距离。本试验基于人工土槽开展,试验设计在尽可能还原自然坡面水文与侵蚀过程的基础上,设置可控的降雨强度、坡度和植被覆盖条件,以探究紫色土坡耕地在不同情景下的水土流失机制。研究结果同时表明谢贤健^[35]在泥石流频发区的分形维数与砂粒质量分数呈负相关,而与黏粒态磷(TP)呈正相关,进一步证明植物篱-草沟系统通过“截砂-保磷”作用,促进侵蚀泥沙向细颗粒富磷组分的方向分选,具有显著的养分拦截与水土保持协同效应。然而,受限于实验室空间与土槽尺寸,本研究尺度较小,难以完全再现自然流域中复杂的地形异质性、深层土壤结构及长期水文响应过程。同时,土槽的刚性边界可能引发边缘效应,干扰水分侧向运移与产流产沙的空间分布,影响观测结果的自然性;人工模拟降雨在雨滴谱、冲击动能等方面亦与天然降雨存在差异,可能导致侵蚀动力过程的模拟偏差。因此,尽管本试验为揭示植物篱-草沟系统的泥沙与养分调控机理提供一定的数据支撑,其结论在推广至更大空间尺度或不同生态区域时仍需谨慎。未来研究应结合野外大尺度径流小区观测与长期定位监测,开展多尺度对比验证,进一步检验分形特征与颗粒组成、养分分布之间的关系,优化系统参数,为三峡库区乃至南方丘陵山区的水土保持与生态修复提供更为科学、坚实的实践依据。

4 结论

1)在植物篱-草沟系统中,侵蚀泥沙以黏粒2~50 μm 团粒为主。相较裸坡,茎秆直径0.8 cm时显著增加黏粒、粉粒质量分数,显著减小砂粒质量分数。

2)在有、无草沟条件下,CK处理坡面迁移泥沙的砂粒质量分数均显著最高($p<0.05$);有草沟时,0.8 cm处理下的各粒径泥沙的TP质量分数均最低($p<0.05$),对TP的拦截效果最好。

3)有草沟时,CK处理坡面迁移泥沙中各粒径的TN质量分数均最低,表明植物篱-草沟系统的设置可降低氮流失,其中0.1、0.2 cm的削减效果显著($p<0.05$)。

4)有草沟时,茎秆直径和砂粒TP质量分数呈显著负相关($p<0.05$)。无草沟时,茎秆直径和黏粒及粉粒、砂粒TP质量分数呈显著负相关($p<0.05$)。

本试验可为三峡库区建设合理且科学的植物篱-草沟系统种植模式提供理论支撑,对于促进三峡库区水土流失和面源污染生态治理有重要现实意义。

参考文献:

- [1] 程辉,吴胜军,王小晓,等.三峡库区生态环境效应研究进展[J].中国生态农业学报,2015,23(2):127-140.
CHENG H, WU S J, WANG X X, et al. Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 127-140.
- [2] 徐文秀,韦杰,李进林,等.三峡库区紫色土坡耕地表土的可蚀性研究[J].水土保持通报,2019,39(3):7-11.
XU W X, WEI J, LI J L, et al. Topsoil erodibility on purple soil sloping farmlands in Three Gorges Reservoir area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 7-11.
- [3] 王荣,叶殿秀,肖潺,等.近62 a三峡地区区域性暴雨过程气候特征及长期变化规律[J].水利水电技术(中英文),2024,55(2):16-26.
WANG R, YE D X, XIAO C, et al. Climatic characteristics and long-term variation of regional rainstorm process in the Three Gorges area in recent 62 years[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 16-26.
- [4] 蒋光毅,黄嵩,郭宏忠.三峡库区水土流失综合治理现状与展望[J].中国水土保持,2021(8):27-29.
JIANG G Y, HUANG S, GUO H Z. Present situation and prospect of integrated control of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(8): 27-29.
- [5] 龙训建,李天阳,罗宏森,等.重庆市不同生态功能区的降雨侵蚀时空分异研究[J].西南大学学报(自然科学版),2025,47(6):162-174.
LONG X J, LI T Y, LUO H S, et al. Spatiotemporal differentiation of rainfall erosion in different ecological functional zones of Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2025, 47(6): 162-174.
- [6] 孙天成,刘婷婷,褚琳,等.三峡库区典型流域“源”“汇”景观格局时空变化对侵蚀产沙的影响[J].生态学报,2019,39(20):7476-7492.
SUN T C, LIU T T, CHU L, et al. Effects of temporal and spatial variations in source-sink landscape patterns on soil erosion and sediment yield from typical watershed in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Acta Eco-

- logica Sinica, 2019, 39(20):7476-7492.
- [7] 符素华, 张志兰, 蒋光毅, 等. 三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):79-83.
- FU S H, ZHANG Z L, JIANG G Y, et al. Priority watershed determination methods for comprehensive control of soil and water conservation in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):79-83.
- [8] 席颖, 陈婧怡, 纪道斌, 等. 三峡库区消落带生态环境影响研究进展[J]. 武汉大学学报(理学版), 2024, 70(1):1-6.
- XI Y, CHEN J Y, JI D B, et al. Research progress on eco-environmental impact of the water level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2024, 70(1):1-6.
- [9] 管孝艳, 陶园, 陈皓锐, 等. 三峡库区农业面源污染风险评估及治理清单[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20):200-210.
- GUAN X Y, TAO Y, CHEN H R, et al. Assessing risk and governing of agricultural non-point source pollution in Three Gorges Reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(20):200-210.
- [10] 李永灏, 龚俐婕, 王卓, 等. 汇/分流截-排水方式对降低三峡库区坡地磷流失量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22):94-103.
- LI Y H, GONG L J, WANG Z, et al. Confluence/diversion catch-drainage layout measures decreasing phosphorus loss from sloping lands in Three Gorges Reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22):94-103.
- [11] DONG Y F, XIONG D H, SU Z A, et al. Effects of vegetation buffer strips on concentrated flow hydraulics and gully bed erosion based on *in situ* scouring experiments[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(6):1672-1682.
- [12] 陈晴空, 陈治君, 王殿常, 等. 三峡库区悬沙颗粒磷的粒径变化和滞留特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1):181-192.
- CHEN Q K, CHEN Z J, WANG D C, et al. Particle size variation and retention characteristics of phosphorus in suspended sediments in Three Gorges Reservoir Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1):181-192.
- [13] 何丙辉, 梁艳玲, 黄欢. 坡面不同截-排水沟布置方式下土壤微团聚体流失特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13):151-158.
- HE B H, LIANG Y L, HUANG H. Characteristic of soil micro-aggregates loss on slopes with different surface water drainage patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13):151-158.
- [14] 唐政洪, 蔡强国, 许峰, 等. 半干旱区植物篱侵蚀及养分控制过程的试验研究[J]. 地理研究, 2001, 20(5):593-600.
- TANG Z H, CAI Q G, XU F, et al. A simulation study on the hedgerow's control process of erosion and nutrient in semiarid region[J]. Geographical Research, 2001, 20(5):593-600.
- [15] 黄小芳, 丁树文, 柯慧燕, 等. 三峡库区植物篱模式对土壤理化性质和可蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):9-15.
- HUANG X F, DING S W, KE H Y, et al. Effects of hedgerow patterns on soil physical and chemical properties and erodibility in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):9-15.
- [16] 王萌, 耿润哲. 农业面源氮污染控制措施滞后效应形成机理与评估方法研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(8):3132-3141.
- WANG M, GENG R Z. A review on the mechanisms and assessing methods for time lags in the responses of nitrogen loss to best management practices[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8):3132-3141.
- [17] ZEPEDA MONDRAGON H, GARCIA ARAGON J A, SALINAS TAPIA H, et al. Estimation of fractal dimension of suspended sediments from two Mexican Rivers[J]. Water, 2022, 14(18):e2774.
- [18] 蒋倩, 郑子成, 王永东, 等. 紫色土坡面细沟侵蚀过程中泥沙颗粒特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1):114-121.
- JIANG Q, ZHENG Z C, WANG Y D, et al. Characteristics of sediment particles during rill erosion on purple soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1):114-121.
- [19] 朱高立, 文博, 李静, 等. 不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6):1371-1379.
- ZHU G L, WEN B, LI J, et al. Particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of collapsing hill as affected by rainfall intensity and coverage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6):1371-1379.
- [20] 肖海, 王地, 夏振尧, 等. 植物篱对紫色土坡面侵蚀泥沙粒径分布特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19):58-66.
- XIAO H, WANG D, XIA Z Y, et al. Influence of hedgerows on the particle size distribution of eroded sediment on purple soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19):58-66.
- [21] MARTIN E R, GODWIN I A, COOPER R I, et al.

- Assessing the impact of vegetative cover within northeast Arkansas agricultural ditches on sediment and nutrient loads [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 320: e107613.
- [22] SONG L, LI T Y, HE B H, et al. Runoff nitrogen losses under confluence and diverging drainage systems in the sloped plot scale: A comparative study [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: e119855.
- [23] LEES C, BAETS S, RICKSON J, et al. Selecting plant traits for soil erosion control in grassed waterways under a changing climate: A growth room study [J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(6): 2381-2397.
- [24] 杨帅, 李永红, 高照良, 等. 黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 270-278.
- YANG S, LI Y H, GAO Z L, et al. Runoff and sediment reduction benefit of hedgerows and fractal characteristics of sediment particles on Loess Plateau slope of engineering accumulation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 270-278.
- [25] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 23-27.
- WANG S, WANG Q J, DONG W C, et al. Runoff and sediment generations and nutrient losses under different vegetation coverage in loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 23-27.
- [26] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙团粒特性研究 [J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1235-1240.
- WU F Z, SHI Z H, YUE B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1235-1240.
- [27] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 142-144.
- PENG Y, WANG Y K, FU B, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 142-144.
- [28] 刘茜, 宋兰, 胡文婷, 等. 模拟降雨下茎秆直径对紫色土坡面植物篱-草沟系统氮磷流失的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(8): 1023-1033.
- LIU X, SONG L, HU W T, et al. Effects of stem diameter on nitrogen and phosphorus losses in simulated hedgerow-grass ditch system on purple soil sloping lands [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(8): 1023-1033.
- [29] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 138-147.
- PU Y L, XIE D T, LIN C W, et al. Effect of hedgerow patterns controlling nitrogen loss of slope farmland in purple soil area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 138-147.
- [30] 刘森, 吴媛媛, 杨明义, 等. 次降雨过程中侵蚀泥沙分形维数的变化特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 37-43.
- LIU M, WU Y Y, YANG M Y, et al. Variation characteristics of fractal dimension of eroded sediment under different rainfall conditions [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 37-43.
- [31] 刘永辉, 崔德杰. 长期定位施肥对潮土分形维数的影响 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 324-327.
- LIU Y H, CUI D J. Effects of long-term fertilization on fractal dimension [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 324-327.
- [32] 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 三峡库区皇竹草植物篱对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 79-82.
- MA Y, HE B H, HE J L, et al. Effects of herba andrographitis hedgerow on soil fractal characteristics and erodibility on sloping cropland in Three Gorges Reservoir region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 79-82.
- [33] 胡宏宇, 张靖, 刘莹, 等. 三峡水库消落带优势植物不同配置对土壤结构稳定性的影响 [J]. *生态学报*, 2025, 45(6): 2710-2722.
- HU H Y, ZHANG J, LIU Y, et al. Soil structure stability impacted by the different configurations of dominant plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6): 2710-2722.
- [34] 兰龙焱, 马丽丽, 郭晓敏, 等. 赣南不同草地类型区土壤粒径分布及分形特征 [J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(1): 222-232.
- LAN L Y, MA L L, GUO X M, et al. Soil particle distribution and fractal characteristics of different grassland types in southern Jiangxi [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(1): 222-232.
- [35] 谢贤健. 泥石流频发区不同土地利用类型下土壤分形维数与理化性质的关联度 [J]. *草业科学*, 2024, 41(1): 49-58.
- XIE X J. Correlation degree analysis of soil fractal dimension and physical and chemical properties under different land use types in debris flow prone areas [J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 49-58.