

模拟降雨条件下重构阻水层对坡面 风化煤矸石产流产沙的影响

张颂扬, 张巍, 杨鹏辉, 杨思远, 杨海龙

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 为缓解水分因子对高寒矿区扰动土体无法形成冻土带来的不利影响, 研究提出扰动土体下方添加高阻水性材料亲水性聚氨酯(W-OH)重构底部阻水层(近似无缝隙的不透水层)的设计方案, 分析重构阻水层后高寒矿区风化煤矸石坡面入渗、产流和产沙的变化特征, 为高寒矿区扰动坡面冻土重现以及重构阻水层的坡面水土流失防治提供理论支撑。[方法] 通过人工模拟降雨试验, 研究在60和90 mm/h降雨雨强条件下, 重构阻水层(添加W-OH浓度0%, 1.5%, 2.5%, 3.5%, 4.5%)后不同坡度条件的(3种坡度5°, 15°, 25°)的风化煤矸石坡面入渗特性和水土流失变化规律。[结果] ①重构阻水层后的煤矸石坡面稳定入渗率较自然坡面明显降低, 且与W-OH添加浓度呈负相关关系; ②煤矸石坡面产流率随时间变化呈现先快速上升后逐渐平稳的变化趋势, 平均产流率与W-OH添加浓度呈现正相关关系, 添加浓度为1.5%, 2.5%, 3.5%, 4.5% W-OH的煤矸石坡面平均产流率较自然状态增加26.75%, 38.02%, 46.90%, 63.23%; ③坡面平均流速与降雨雨强、W-OH添加浓度和坡度均呈正相关关系, 影响程度表现为: 降雨雨强>坡度>W-OH添加浓度。④坡面产沙率随时间变化曲线多为“单峰”曲线, 呈现先迅速上升随后缓慢下降最终趋于稳定的变化趋势, 添加浓度为1.5%, 2.5%, 3.5%, 4.5% W-OH的煤矸石坡面平均产沙率较自然状态增加26.98%, 49.48%, 71.64%, 94.01%。[结论] 重构阻水层对坡面风化煤矸石渗透性能降低明显, 能有效帮助高寒矿区扰动坡面的冻土恢复和形成, 但入渗率的降低使坡面更容易产生径流, 增加了地表的产流产沙, 可配置一定的水土保持措施。

关键词: 入渗率; 产流率; 产沙率; 风化煤矸石

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0101-09

中图分类号: S157.1, P333.5

文献参数: 张颂扬, 张巍, 杨鹏辉, 等. 模拟降雨条件下重构阻水层对坡面风化煤矸石产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 101-109. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.011; Zhang Songyang, Zhang Wei, Yang Penghui, et al. Effect of reconstructed water-blocking layers on sediment production from weathered coal gangue on slopes under simulated rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 101-109.

Effect of Reconstructed Water-blocking Layers on Sediment Production from Weathered Coal Gangue on Slopes Under Simulated Rainfall Conditions

Zhang Songyang, Zhang Wei, Yang Penghui, Yang Siyuan, Yang Hailong

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] A design scheme was proposed involving the addition of hydrophilic polyurethane (W-OH, a highly water-resistant material) under disturbed soil conditions to reconstruct a bottom water-resistant layer (approximately seamless impervious layer) in order to alleviate the adverse effects of water factors on the failure of disturbed soil to form frozen soil in a high cold mining area. Changes in slope infiltration, flow production, and sediment production of weathered coal gangue after the reconstruction of a water-blocking layer in an alpine mining area were studied to provide theoretical support for the recurrence of frozen soil on a disturbed slope and the prevention and control of soil erosion on a slope after the

收稿日期: 2023-09-19

修回日期: 2023-10-27

资助项目: 国家重点研发计划项目“高寒矿区水源涵养功能恢复新型材料和冻土剖面近自然重构技术研发与试验示范”(2022YFF1302604)

第一作者: 张颂扬(1998—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: songy_zhang@163.com。

通信作者: 杨海龙(1966—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水土保持研究。Email: yang_hlong@163.com。

reconstruction of a water-blocking layer. [Methods] Simulated artificial rainfall was applied at rates of 60 mm/h and 90 mm/h to reconstructed water-blocking layers having W-OH concentrations of 0%, 1.5%, 2.5%, 3.5%, and 4.5%. Infiltration characteristics and soil and water loss changes of the weathered coal gangue slope under three different slope conditions (5°, 15°, 25°) were obtained. [Results] ① The stable infiltration rate of the coal gangue slope after application of a reconstructed water-blocking layer was significantly lower than that of natural slope, and was negatively correlated with W-OH concentration. ② The flow yield of the coal gangue slope showed a trend of rapid increase at first and then gradually becoming stable over time, and the average flow yield showed a positive correlation with the W-OH addition concentration. The average runoff yield of coal gangue slopes with 1.5%, 2.5%, 3.5%, and 4.5% W-OH increased by 26.75%, 38.02%, 46.90%, and 63.23%, respectively, compared with the natural state. ③ The average slope velocity was positively correlated with rainfall intensity, W-OH addition concentration, and slope, and the influence degree followed the order of rainfall intensity>slope addition concentration>W-OH addition concentration. ④ The variation curve of slope sediment yield over time was mostly a “unimodal” curve, which showed a rapid rise at first, then a slow decline and finally tends to be stable. The average sediment yield of coal gangue slopes with 1.5%, 2.5%, 3.5%, and 4.5% W-OH increased by 26.98%, 49.48%, 71.64%, and 94.01% compared with the natural state. [Conclusion] The reconstructed water-blocking layer significantly reduced the permeability of weathered coal gangue on the slope, thereby effectively helping the recovery and formation of frozen soil on disturbed slopes in high, cold, mining areas. However, the decrease in infiltration rate could make the slope more prone to runoff and increases sediment production on the surface, and therefore, certain soil and water conservation measures should be applied.

Keywords: infiltration rate; flow production rate; sediment yield; weathered coal gangue

随着近些年全球气候变暖以及人类采矿活动的影响,祁连山地区的气候条件发生了显著变化,冻土资源多年下限逐渐抬升,多年冻土低温朝着退化方向发展。资料显示,近 10 a 来,聚乎更矿区多年冻土上限在 3.0~7.0 m,冻土上限下降率 0~20 cm/a^[1]。为保护聚乎更矿区冻土上限,本研究提出重构高寒矿区阻水层,利用 W-OH 的高防水性,缓解水分因子对低温季节无法形成冻土的扰动土体剖面带来的不利影响,为扰动地区冻土重现提供理论支撑。

煤矸石是矿区常见的固体废弃物,在开采煤炭过程中产生,约占煤炭产出量的 10%^[2],具有含碳量低、质地硬、热值低等特点^[3]。中国煤矸石堆存 7.00×10^8 t,且每年增量达 1.50×10^8 t^[4],这些煤矸石形成数以千计的煤矸石山,成为废弃矿区的重要组成部分^[5]。此外,煤矸石内含有 Pb, Cd, F, Hg, Cr 等有害元素^[6],因此,坡面煤矸石受到雨水不断侵蚀,将会带来严重的环境问题,对矿区生态环境造成不可磨灭的损害,甚至影响当地居民的生存和发展。此前,已有诸多对煤矸石侵蚀的试验研究以及 W-OH 对不同类型土壤产流产沙的试验研究。例如,王黎军^[7]通过慢冻法对不同浓度 W-OH 喷涂后形成的固结层进行了 47 次冻融循环试验,认为 W-OH 形成的固结层本身具有很好的抗冻胀,材料不会因冻胀破坏,能够适

应高寒环境;李樊敏^[8]通过人工降雨试验,研究了聚丙烯酰胺和石膏粉对黄土坡地产流产沙的影响,认为聚丙烯酰胺和石膏粉均可延缓坡面初始产流时间,并且聚丙烯酰胺可增强坡面抗蚀性,减少产沙量而石膏粉减弱坡面抗蚀性,产沙量增加;王欣等^[9]通过人工降雨试验研究了新型 W-OH 材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响,认为喷洒 W-OH 对入渗率有明显的降低效果,对产流率有明显的提升效果;冯慧敏等^[10]通过室内模拟径流冲刷试验对坡面煤矸石水土流失规律研究后认为,设计径流量对坡面产流率影响显著,坡面产沙率跟设计径流量和坡度满足幂函数关系,且设计径流量对产沙率的影响大于坡度。目前已有的研究多为 W-OH 对土壤产流产沙的特性研究,未涉及 W-OH 与煤矸石的结合研究。为此,本研究利用 W-OH 的阻水性和对高寒地区的适应性,提出重构煤矸石坡面阻水层的设计方案,利用人工降雨模拟试验,研究其不同降雨雨强和坡度组合条件下产流、产沙变化规律,为矿区内重构阻水层坡面水土流失的预测和水土保持措施的布设提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于木里矿区矿坑之一的聚乎更矿区,地处青海省海西州天峻县与海北州刚察县交界,平均海

拔4 000 m,多为高原冰缘地貌类型。根据气候资料显示,矿区 11 月至翌年 5 月多降雪,6—10 月以降雨为主,年平均降雨量为 400~500 mm,年平均蒸发量为 1 544.88 mm;年平均气温-0.39℃左右,最低气温-34℃,最高气温 19.8℃,属于典型的高原大陆性气候。区域内植被多低矮,结构简单,以高寒沼泽类植物为主,常与高寒草甸类植被交错生长,主要优势植物为圆囊苔草与藏蒿草,伴生植物有羊茅、沙生蒿、异叶青兰、水麦冬等;土壤类型以高山草甸土、沼泽草甸土为主,有机质含量 21.99%,pH 值 7.5,碳氮比 12.4,此外,区域内冻土广泛发育,厚度约为 50~90 m,季节性冻土每年 4 月份左右开始融化,9 月回冻,根据井温观测资料显示,聚乎更矿区内冻土厚度在 40~120 m,多年冻土上限为 5 m。

1.2 试验装置与材料

试验于 2023 年 4—6 月在北京林业大学涿鹿试验基地进行,人工降雨装置采用由西安森森电子科技有限公司自研生产的野外便携式人工模拟降雨器[MSR-S20-W1100(1500)],由降雨管路、水泵、降雨控制器、喷头、泄压阀、支架和储水箱组成,支架高度可调节,最高 6.8 m,降雨雨强变化范围 20~240 mm/h,降雨有效面积 12 m²,降雨均匀度>80%,满足人工降雨精度要求^[11]。所用水槽为自行设计制作,规格(长×宽×高)为 1.2 m×0.5 m×0.15 m 可调节坡度水槽,水槽设有三角形集流口,方便收集径流和泥沙。试验所用亲水性聚氨酯(W-OH)为改性复合材料,具有阻水性,密度 1.18 g/cm³,黏度为 650~700 Pa/s,固含量为 85%,凝固时间为 30~1 800 s。风化煤矸石取自青海省木里煤田聚乎更矿区,风化煤矸石容重为 1.62 g/cm³,天然含水率 13.7%,机械组成为: $d<0.1$ mm 比例为 5.73%, $0.1<d<0.5$ 比例为 12.33%, $0.5<d<1$ 比例为 12.56%, $1<d<2$ 比例为 6.61%, $2<d<10$ 比例为 38.55%, $d>10$ 比例为 24.23%。

1.3 试验设计

基于青海省木里煤田近 5 a 降雨监测数据分析,试验降雨雨强设置为 60 和 90 mm/h 两个梯度;由于木里矿区煤矸石山堆砌坡度较缓,最大坡度为 25°左右,因此坡度设计为 5°,15°,25°3 个梯度;参照王欣在南方红壤产流产沙试验中 W-OH 的设计浓度以及梁止水对砷砂岩侵蚀率试验中 W-OH 的设计浓度,结合风化煤矸石跟南方红壤与砷砂岩的性质差异,通过 W-OH 对风化煤矸石的作用效果预试验结果综合分析,将 W-OH 的浓度设计为 0%(空白对照组),1.5%,2.5%,3.5%,4.5%5 个梯度,为使 W-OH 与煤

矸石充分作用,控制添加标准为 1 000 ml(W-OH+水)/m²。

1.4 试验步骤

(1) 试验槽装填。为了防止风化煤矸石与水槽接触面发生滑动影响试验结果,先在水槽底部和四周布设透水纱布再进行装填,填埋高度为 12 cm,先装填 6 cm 压实,保证容重为 1.62 g/cm³,与自然状态下一致,装填完毕后,喷洒 W-OH,等待 1 h 让 W-OH 与煤矸石充分作用后,煤矸石回填至 12 cm 与三角形径流口齐平,并做刮毛处理。

(2) 降雨雨强率定。将水槽用油布盖住,在水槽四角放置 4 个雨量计进行降雨强度率定,保证每次降雨误差不超过 5%,且均匀度达到 85%以上。

(3) 泥沙量、径流量、渗出量、流速采集。降雨开始后,利用高精度秒表记录初始产流时间,稳定产流后记录 60 min 泥沙量、径流量和流速数据。坡面开始产流前 10 min,每 1 min 进行一次泥沙径流量取样,同时利用高锰酸钾示踪法测定流速,产流 10 min 后,每 5 min 采集一次数据。流速在坡面不同位置差别较大,为减小滴定流速带来的误差,设计测流区在坡中区域,长度 50 cm,测定流速时,在测流区左侧、中间、右侧分别滴定并取平均值。

(4) 泥沙径流量处理。坡面径流量利用量筒读出,产沙量待静置 24 h 后,倒入铝盒中,利用烘箱在 105℃下烘干 24 h,并使用 0.01 g 精度天平称重测得。

1.5 数据分析

数据的汇总、计算利用 Excel 2021 进行,数据的统计分析通过 SPSS 25.0 进行处理,图件利用 Origin 2017 进行绘制。

(1) 初始产流时间(T_0)指从降雨开始至集流槽内有明显的股流流出的时间(s)。

(2) 流速(V , cm/s),使用高锰酸钾示踪法测得的流速是坡面的表层流速,须乘以修正系数 k ,得到平均流速 v 。

$$v=kV \tag{1}$$

式中: v 为平均流速(m/s); k 为修正系数(层流取 0.67,过渡流取 0.75 紊流取 0.80,本研究中 $k=0.67$)。

(3) 径流量(q)为恒定产流在一段时间所汇集的产流量(ml)。

$$q=V_{\text{浑水}}-\frac{M}{\rho_{\text{煤矸石}}} \tag{2}$$

式中: $V_{\text{浑水}}$ 为含煤矸石浑水总体积(ml); M 为烘干后煤矸石质量(g); $\rho_{\text{煤矸石}}$ 为煤矸石密度(g/cm³)。

(4) 产流率(R)为单位时间单位面积上坡面径流量(mm/min),表征产流强度。

$$R=\frac{q}{AT}$$

(3)

式中: A 为坡面面积(cm^2); T 为取样时间(min)。

(5) 产沙率(S)为单位时间单位面积上坡面产沙量($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$),表征侵蚀强度。

$$S=\frac{M}{AT}$$

(4)

(6) 入渗率(i)为单位面积土壤表面在单位时间内入渗的水量(mm/min)。

$$i=\frac{PT\cos\theta-\frac{10q}{A}}{T}$$

(5)

式中: P 为降雨雨强(mm/min); θ 为坡面坡度($^\circ$)。

2 结果与分析

2.1 坡面入渗率特性

坡面入渗率可以反映单位时间内单位面积坡面煤矸石的入渗水量。本研究发现,坡面入渗率随时间

呈现减小的趋势,且坡面初始产流前 20 min 内,入渗率随时间迅速降低,20 min 后降低速度变缓并逐渐趋于稳定(图 1)。在 60 mm/h 降雨强度条件下,坡面稳定入渗率随 W-OH 添加浓度增加逐渐降低,添加 1.5%,2.5%,3.5%,4.5% 浓度下稳定入渗率分别为 0.421,0.280,0.239 和 0.108 mm/min,较自然煤矸石的 0.657 mm/min 降低 35.92%,57.41%,63.58%,83.50%。90 mm/h 降雨强度的入渗率较 60 mm/h 更快地降低至稳定,但稳定入渗率与 W-OH 浓度无明显的相关性。同一降雨强度条件下,各坡面稳定入渗率随坡度增加逐渐减小,25°坡面稳定入渗率较 5°在 60 mm/h 时降低 35.91%,90 mm/h 时降低 63.47%。对比同一坡面条件在不同降雨强度下稳定入渗率变化情况可知,稳定入渗率随降雨雨强的增加明显减小,5°,15°,25°坡度条件下,稳定入渗率随降雨雨强的增加分别减小了 59.80%,65.56%,76.94%。

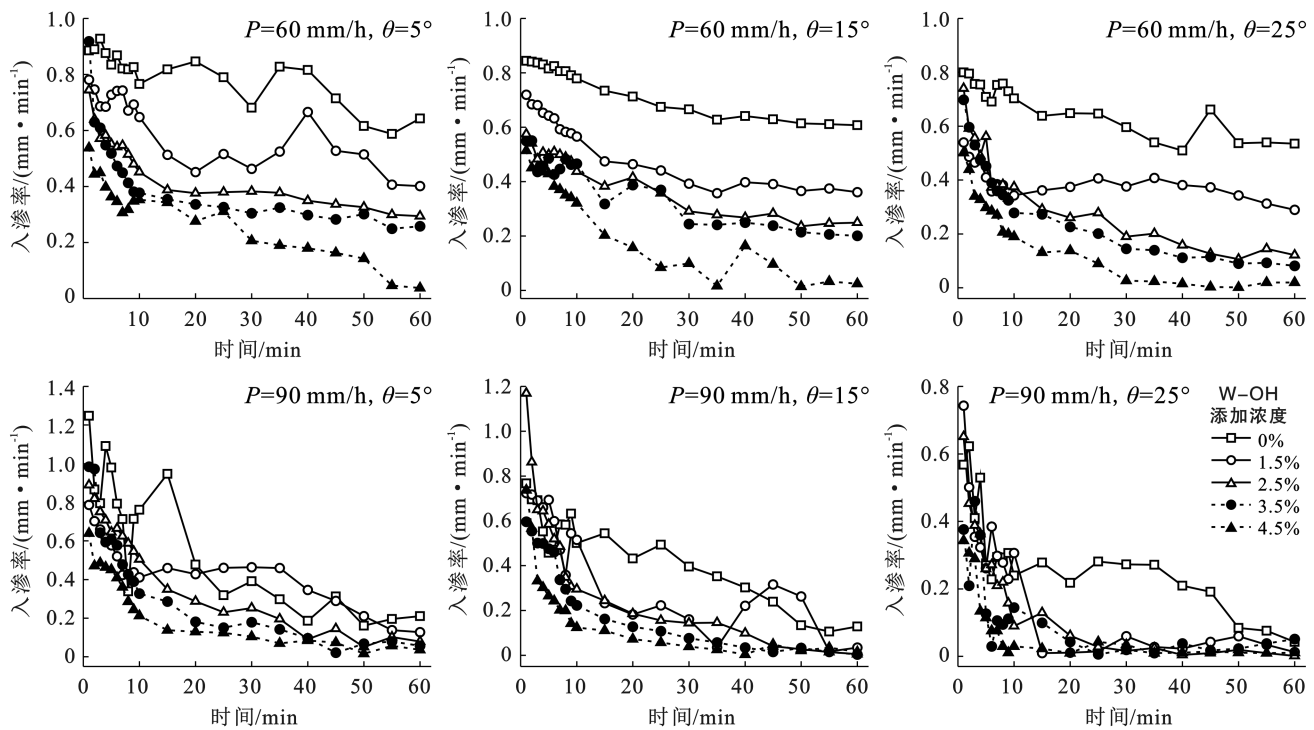


图 1 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤入渗率变化

Fig.1 Changes of soil infiltration rate under different rainfall intensity (P) and slope (θ) conditions

2.2 初始产流时间特征

初始产流时间主要受降雨雨强、坡度、入渗率、初始含水率等因素的影响。在 90 mm/h 降雨雨强下,初始产流时间随 W-OH 浓度变化无明显趋势;在 60 mm/h 降雨雨强下,初始产流时间随 W-OH 浓度增加明显减小,添加 1.5%,2.5%,3.5%,4.5% 浓度 W-OH 初始产流时间较自然状态下分别减小了 41.11%,

60.18%,64.21%,73.66%(表 1)。在降雨雨强相同的条件下,初始产流时间随坡度增大呈现减小的趋势,15°和 25°坡面平均初始产流时间分别为 211 和 151 s,相较于 5°坡面的 306 s 减少 30.93%和 50.64%。坡度相同时,初始产流时间随降雨雨强的增加呈现明显减小趋势,在 90 mm/h 降雨雨强下,平均初始产流时间为 134 s,相较于 60 mm/h 条件下的 311 s 减少了 56.91%。

表1 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤初始产流时间变化

Table 1 Changes of initial runoff production time of slope soil under different rainfall (P) and slope (θ) conditions s

W-OH 添加浓度/%	土壤产流时间					
	60 mm/h 雨强			90 mm/h 雨强		
	5°	15°	25°	5°	15°	25°
0%	964	526	298	298	173	82
1.5%	492	369	192	124	130	116
2.5%	279	266	167	222	116	76
3.5%	222	211	207	168	80	141
4.5%	169	154	148	117	85	81

2.3 坡面产流率特性

产流率反映单位时间内单位面积坡面煤矸石产生的径流量。本研究发现,产流率随时间呈现增长趋势,其增长趋势可以分为两个阶段:①初始产流开始20 min 内产流率迅速增长;②20 min 后产流率缓慢增长至稳定(图2)。在60 mm/h 降雨雨强条件下,添加 W-OH 的煤矸石坡面平均产流率均明显大于自然

状态下的坡面,添加浓度为 1.5%,2.5%,3.5%,4.5% W-OH 坡面平均产流率为 0.452,0.559,0.594 和 0.719 mm/min,且随着 W-OH 浓度的增加,平均产流率逐渐增加,分别较自然状态下的 0.225 mm/min 增加 100.33%,148.16%,163.70%,219.03%;在 90 mm/h降雨雨强条件下,产流率增加速度更快,且更快地趋于稳定,但平均产流率随浓度增加变化较小,自然状态下和添加 W-OH 坡面平均产流率范围 0.992 mm/min~1.268 mm/min。同一降雨雨强条件下,平均产流率均随坡度增加逐渐增大,5°,15°,25°在 60 mm/h 时分别为 0.484 mm/min,0.512 mm/min,0.534 mm/min,90 mm/h 时分别为 1.080,1.129 和 1.190 mm/min,随坡度增加 5°,产流率最大增量出现在 90 mm/h坡度 15°增至 25°,平均产流率增加 0.061 mm/min。对比同一坡面条件在不同降雨雨强下平均产流率变化情况可知,平均产流率随降雨雨强的增加明显增大,5°,15°,25°坡度条件下,平均产流率随降雨雨强增加分别增大 123.15%,120.68%,122.75%。

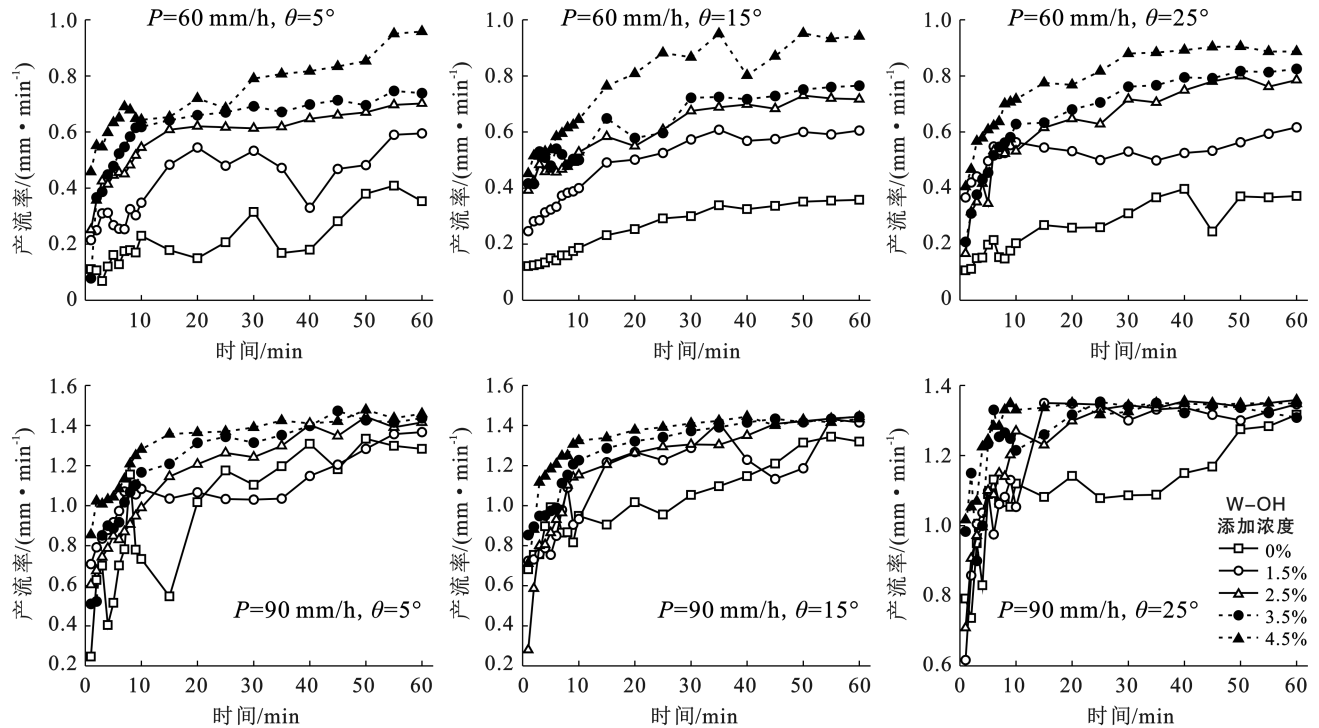


图2 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤产流率变化

2.4 平均流速特征

平均流速由高锰酸钾示踪法测的流速乘以修正系数得出,主要与降雨雨强、坡度、坡面阻力系数等因素有关。在相同降雨雨强和坡度条件下,最大平均流速均出现在 4.5% W-OH 浓度坡面上,最大增量为 60 mm/h,25°坡面条件下,4.5%浓度较自然状态增加 0.770 cm/s(图3)。同一降雨雨强条件下,平均

流速随坡度的增加明显增大,且 5°至 15°坡面平均流速的增量 0.791 cm/s 明显大于 15°至 25°增量 0.21 cm/s。同一坡面条件下,降雨雨强对平均流速的影响显著,5°,15°,25°坡面在 90 mm/h 降雨雨强时平均流速为 3.134,4.100 和 4.413 cm/s,较 60 mm/h 的 2.442,3.058 和 3.167 cm/s 分别增加了 28.42%,34.08%,39.37%。

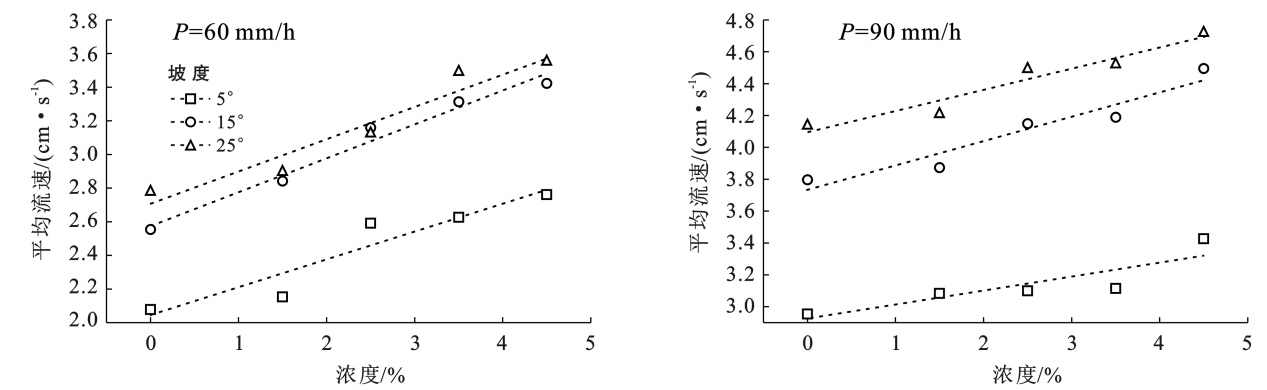


图 3 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤平均流速变化

Fig.3 Changes of average velocity of slope soil under different rainfall intensity (P) and slope (θ) conditions

2.5 坡面产沙率特性

2.5.1 产沙率变化特征 产沙率可以反映单位时间内单位面积坡面煤矸石产沙量。本研究发现,初始产流开始前 10 min 内,产沙率变化明显,呈现先增加后减小的趋势,多为“单峰”曲线,峰值均出现在前 5 min 内,10 min 后产沙率呈现缓慢降低至稳定的趋势(图 4)。其中,4.5% 浓度在产流 40 min 时有一个突变,是径流不断冲刷坡面导致一块大粒径煤矸石被冲刷引起的。

2.5.2 平均产沙率特征 平均产沙率可以反映不同试验条件下各坡面产沙的强度。由图 5 可以看出,在

相同降雨雨强和坡度条件下,最大平均产沙率均出现在 4.5% W-OH 浓度坡面上,其中最大增量出现在 90 mm/h,5°坡面条件下,4.5% 浓度较自然状态增加 2.269 g/(m²·min)。同一降雨雨强条件下,平均产沙率随坡度的增加明显增大,其中 90 mm/h 下坡度 15°增至 25°时平均产沙率增加最多,为 1.609 g/(m²·min)。同一坡面条件下,降雨雨强对坡面平均产沙率影响显著,5°,15°,25°坡面在 90 mm/h 降雨雨强时平均产沙率为 2.027,2.513 和 4.122 g/(m²·min)较 60 mm/h 的 1.437,2.044 和 2.474 g/(m²·min)分别增加了 40.99%,22.94%,66.59%。

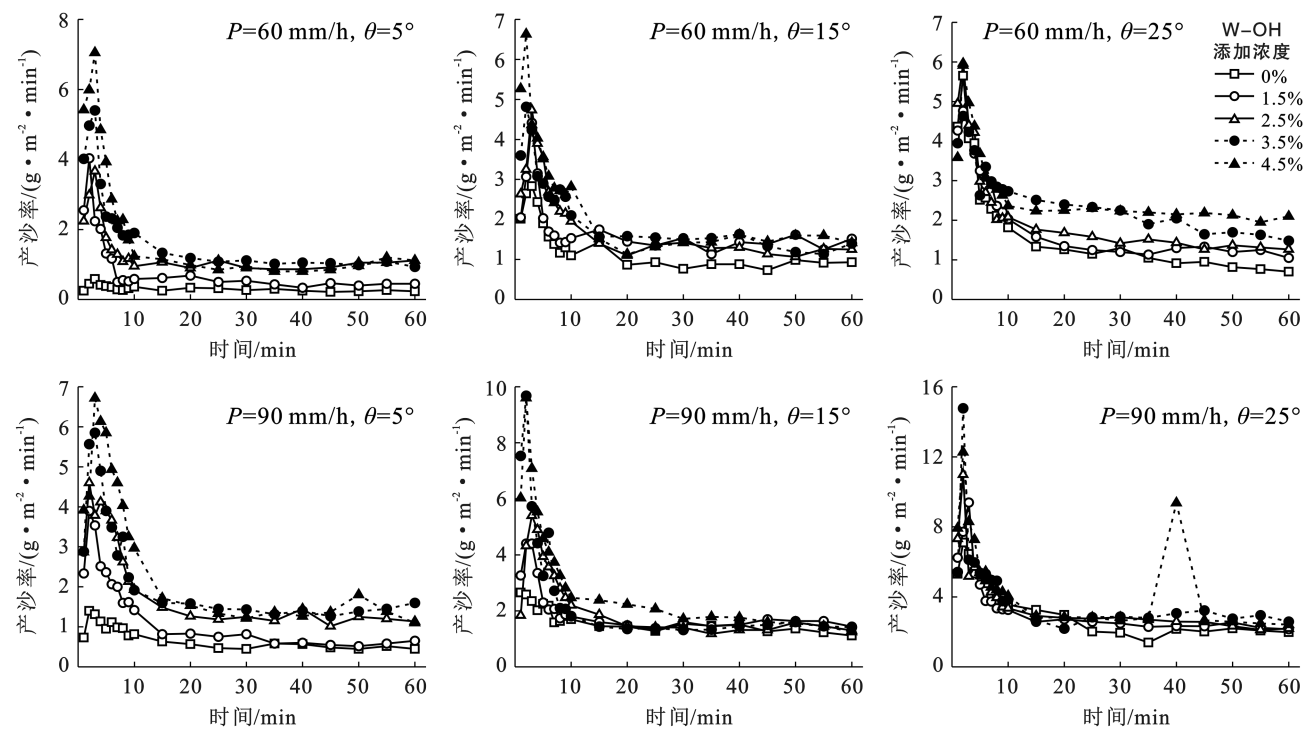


图 4 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤产沙率变化

Fig.4 Changes of soil sediment yield rate under different rainfall intensity (P) and slope (θ) conditions

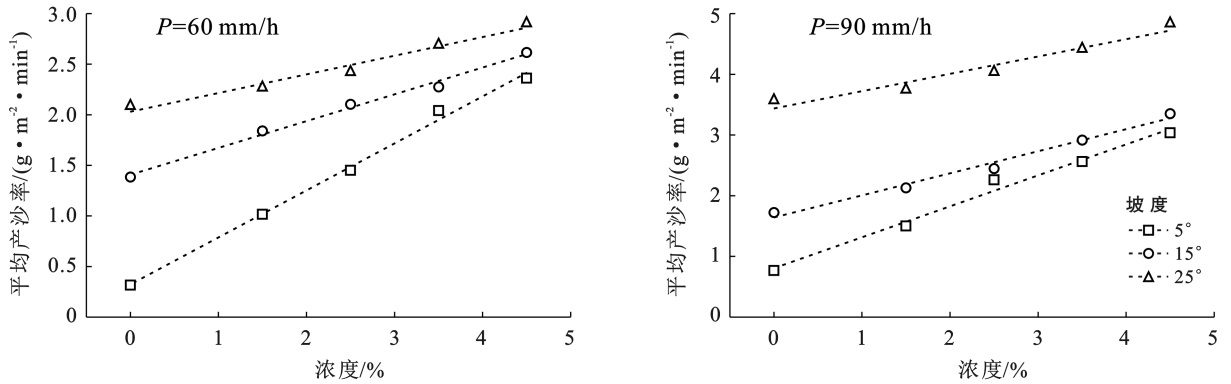


图5 不同降雨强度(P)和坡度(θ)条件下坡面土壤平均产沙率变化

Fig.5 Changes of average sediment yield rate of slope soil under different rainfall intensity (P) and slope (θ) conditions

3 讨论

在坡面降雨入渗过程中,坡面的入渗率是影响产流产沙过程的重要因素。刘目兴^[12]、曾辰^[13]研究表明初始含水率对入渗率影响显著,为避免初始含水率影响本研究的试验结果,所用煤矸石均在同一时间取自同一地点,并在试验前测量含水率并进行平衡,保证初始含水量基本一致,因此可以忽略初始含水率对入渗率产生的影响。在本研究中,添加 W-OH 的煤矸石坡面稳定入渗率明显低于自然状态下的坡面,且随着浓度的升高不断降低,这是因为 W-OH 具有良好的保水性和高防水性,W-OH 浓度越高,对坡面的渗透性能降低越明显^[14]。而入渗率在单次降雨过程中呈现出先急速下降后逐渐稳定的变化趋势,这是因为降雨初期雨水快速入渗并慢慢达到了饱和状态^[15]。

初始产流时间表征坡面达到稳定产流时间长短,本研究表明,煤矸石坡面初始产流时间跟降雨雨强和坡度呈负相关,这与前人^[16-19]在不同土壤类型条件下研究结果一致。在单次降雨产流过程中,产流率随着降雨历时的增加而增大,并逐渐趋于稳定状态,其原因是坡面煤矸石在降雨初期未达到饱和,入渗率较高,随着降雨历时的增大,坡面煤矸石逐渐达到饱和状态,入渗率逐渐降低并趋于稳定,产流率波动随之减小。而不同坡面条件下,稳定产流率随 W-OH 浓度增加而增大,这是因为添加 W-OH 使坡面煤矸石的渗透性能降低,W-OH 浓度越高,对坡面渗透性能降低越明显,导致同一降雨雨强条件下坡面稳定入渗率降低,根据水量平衡,入渗量减小,降雨量大部分转化为坡面径流,产流率增大,这与洪斌^[20]研究的结果一致。由于稳定状态下坡面入渗率较小,坡面属于蓄满产流,两种降雨雨强条件下的产流量主要由坡面承雨量决定,所以随着降雨雨强的提升,稳定产流率也有明显的提升。而坡度对产流率的影响较复杂,根据

已有研究表明,在降雨强度一定的条件下,产流率主要由坡面入渗率和承雨量决定,在本研究中,大坡度坡面入渗率低于小坡度坡面,但大坡度坡面承雨量小于小坡度坡面,所以产流率随坡度并没有明显的变化趋势。90 mm/h 降雨雨强较 60 mm/h 平均流速明显增大,这是因为较大的降雨雨强使坡面径流深增加,摩擦阻力变小导致的,这与众多学者^[21-24]对降雨雨强与流速的研究结果一致。

产沙率随时间呈现先迅速上升后缓慢下降最终趋于稳定的变化趋势,这是因为降雨初期,雨滴击溅造成的侵蚀和坡面原有的松散煤矸石被形成的径流带走,导致降雨初期产沙率迅速上升,但随着坡面松散的煤矸石被侵蚀殆尽,产沙率缓慢降低,坡面侵蚀方式转变为径流对煤矸石坡面的剥蚀,此时的产沙率较低且趋于稳定,这与李瑞栋^[25]、赵蕊^[26]和孙若修等^[27]对产沙率的研究得出了一致的结论。在不同煤矸石坡面条件下的平均产沙率随降雨雨强的增大而增大,这是因为降雨雨强大,雨滴冲击煤矸石坡面的能量大,且降雨雨强增大使坡面径流增强,导致坡面径流对煤矸石颗粒的运移能力增强,更容易造成煤矸石侵蚀,这与何舟窈^[28]通过模拟降雨试验对坡耕地土壤平均产沙率研究结果相同;平均产沙率随坡度的增大而增大是因为坡度增大后入渗率降低,坡面径流量增大更容易造成侵蚀,且坡度增大导致坡面径流动能增大,侵蚀能力增强,从而增加坡面平均产沙率,这与 Lei^[29]的研究结论一致。

4 结论

(1) 单次降雨过程中,入渗率呈现迅速降低后逐渐稳定的趋势,W-OH 对坡面煤矸石稳定入渗率有明显的降低,添加 4.5% 浓度 W-OH 的煤矸石坡面稳定入渗率较自然状态降低 83.50%,能够有效缓解水分因子对扰动土体冻土重现的不利影响。

(2) 自然状态煤矸石坡面初始产流时间在 82~964 s, 添加 W-OH 煤矸石坡面初始产流时间在 76~492 s, 添加 W-OH 坡面初始产流时间明显减少, 且浓度越大初始产流时间越短。

(3) 煤矸石坡面产流过程为先迅速增长后保持稳定, 添加 W-OH 的煤矸石坡面平均产流率均高于自然状态, 且浓度与平均产流率呈正相关关系。

(4) 产沙率在单次降雨过程中呈现先迅速上升后缓慢下降最终趋于稳定的变化趋势, 多为“单峰”曲线, 峰值均出现在径流产生初期。在不同坡面条件下, 平均产沙率受降雨雨强影响最显著, 90 mm/h 降雨雨强条件下, 平均产沙率较 60 mm/h 提升 45.43%。

参考文献 (References)

- [1] 王伟超, 梁振新, 张文龙, 等. 青海省祁连山聚乎更矿区冻土特征及其生态地质功能作用研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(7): 56-60, 66.
Wang Weichao, Liang Zhenxin, Zhang Wenlong, et al. Research on permafrost characteristics and eco-geological function of Juhugen Mining area, Qilian Mountains, Qinghai Province [J]. Coal Geology of China, 2022, 34(7): 56-60, 66.
- [2] Song Liang, Yu Ying, Yan Zelin, et al. Rapid analysis of composition of coal gangue based on deep learning and thermal infrared spectroscopy [J]. Sustainability, 2022, 14(23): 16210.
- [3] 贾敏. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 46-52.
Jia Min. The current situation research on comprehensive utilization of coal gangue [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 46-52.
- [4] Feng Yan, Shi Liang, Ma Deng, et al. Road performance evaluation of unburned coal gangue in cold regions [J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13915.
- [5] Shi Fang, Li Xiaodan, Cao Ying, et al. The feasibility analysis of “ecological photovoltaics” from coal gangue mountains [J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8761.
- [6] 段锋, 马爱琼, 肖国庆, 等. 煤矸石在高温材料中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(9): 1811-1816.
Duan Feng, Ma Aiqiong, Xiao Guoqing, et al. Study progress on application of coal gangue in high temperature materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(9): 1811-1816.
- [7] 王黎军. W-OH 新型防渗材料在高寒干旱区渠道中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2011(4): 28-30, 34.
Wang Lijun. Application of W-OH new anti-seeping material in canal of cold and arid area [J]. Water Saving Irrigation, 2011(4): 28-30.
- [8] 李樊敏. 聚丙烯酰胺和石膏粉对黄土坡地产流产沙的影响[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 116-119, 139.
Li Fanmin. Effects of polyacrylamide and gypsum on runoff and sediment yields in the loess slope land [J]. Yellow River, 2023, 45(7): 116-119, 139.
- [9] 王欣, 朱绪超, 梁音, 等. 新型 W-OH 材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2020, 18(6): 123-131.
Wang Xin, Zhu Xuchao, Liang Xin, et al. Effects of new polyurethane material (W-OH) on infiltration and runoff and sediment yield of two typical erodible soils in South China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 123-131.
- [10] 冯慧敏, 王电龙, 胡振华. 风化煤矸石坡面水土流失规律模拟[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 39-44.
Feng Huimin, Wang Dianlong, Hu Zhenhua. Soil erosion and water loss laws of mine waste slope [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 39-44.
- [11] 罗璟, 裴向军, 黎俊豪, 等. 模拟降雨条件下角砾和圆砾对陡峭路堑边坡产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 1-10.
Luo Jing, Pei Xiangjun, Li Junhao. Effects of breccias and round gravels on steep cut slope runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 1-10.
- [12] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.
Liu Muxing, Nie Yan, Yu Jing. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 871-878.
- [13] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.
Zeng Chen, Wang Quanjie, Fan Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 24-30.
- [14] 张璐. 一种亲水反应型聚氨酯在藏北退化草原的应用研究[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2020.
Zhang Lu. Application of a hydrophilic reactive polyurethane in degraded steppe of Northern Tibet [D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2020.
- [15] 吕凯, 段颖丹, 吴伯志. 降雨强度和秸秆覆盖对坡耕地烤烟降雨入渗特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 91-97.
Lü Kai, Duan Yingdan, Wu Bozhi, et al. Effect of rainfall intensity and straw mulching on infiltration of rainfall into slope planted with flue-cured tobacco [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 91-97.

- [16] 曾凤铃,刘淑婧,运剑苇,等.模拟降雨条件下三峡库区紫色土坡地产流入渗特征[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(1):107-113.
Zeng Fengling, Liu Shujing, Yun Jianwei, et al. Run-off and infiltration characteristics of purple soil slope in the Three Gorges reservoir region under simulated rainfall [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(1):107-113.
- [17] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2010.
Jia Lianlian. Experiment study on soil erosion process and regulation on loess slope under simulating rainfall [D]. Shaanxi Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010
- [18] 陈泽勋,刘廷玺,王怡璇,等.模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J].生态学杂志,2022,41(7):1316-1323.
Chen Zexun, Liu Tingxi, Wang Yixuan, et al. Quantitative analysis of the contribution of different rainfall conditions to runoff and sediment yield on typical grassland slope [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7):1316-1323.
- [19] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.
Yao Chong, Zha Rui bo, Huang Shaoyan, et al. Study on processes of erosion on hillslopes of quaternary red clay under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):10-15.
- [20] 洪斌,张祖莲,黄英,等.人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性[J].水土保持通报,2016,36(4):118-123.
Hong Bin, Zhang Zulian, Huang Ying, et al. Erosion characteristics of Yunnan laterite under artificial rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4):118-123.
- [21] 李瀚之,余新晓,樊登星,等.模拟降雨条件下黑麦草覆盖度对褐土坡面径流流速的影响[J].北京林业大学学报,2014,36(5):94-98.
Li Hanzhi, Yu Xinxiao, Fan Dengxing, et al. Effects of ryegrass coverage on runoff velocity of cinnamon soil slope under simulated rainfall [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5):94-98.
- [22] 梁志权,卓慕宁,郭太龙,等.不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J].生态环境学报,2015,24(4):638-642.
Liang Zhiquan, Zhuo Muning, Guo Tailong, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on hydrodynamic characteristics of overland flow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4):638-642.
- [23] 张琪琳,王占礼,张庆玮,等.雨强及坡度对黄土区草地坡面水流流速的影响[J].人民黄河,2018,40(4):96-99.
Zhang Qilin, Wang Zhanli, Zhang Qingwei, et al. Experiment on influence of rainfall intensity and slope on flow velocity in loess area grassland [J]. Yellow River, 2018, 40(4):96-99.
- [24] Tian Haojun, Kong Zhigang. Influence of rainfall intensity and slope on the slope erosion of Longling completely weathered granite [J]. Applied Sciences, 2023, 13(9):5295.
- [25] 李瑞栋,王文龙,娄义宝,等.模拟降雨条件下砾石含量对黄土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2022,33(11):3027-3036.
Li Ruidong, Wang Wenlong, Lou Yibao, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11):3027-3036.
- [26] 赵纯,高照良,李永红,等.连续径流冲刷条件下工程堆积体土壤侵蚀特征[J].水土保持通报,2022,42(6):61-67.
Zhao Chun, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion characteristics of engineering deposits under continuous runoff scouring [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):61-67.
- [27] 孙若修,申明爽,胡亚伟,等.模拟降雨下坡面草带分布对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022, 36(4):22-29.
Sun Ruoxiu, Shen Mingshuang, Hu Yawei, et al. Effect of grass belt distribution on runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):22-29.
- [28] 何周窃,何淑勤,逯传琦,等.大渡河流域干旱河谷区坡面侵蚀产沙与水动力学特征研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(4):832-841.
He Zhouyao, He Shuqin, Lu Chuanqi, et al. Study on characteristics of slope erosion sediment production and hydrodynamics in arid valley area of Dadu River basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(4):832-841.
- [29] Wang Lei, Li Yan, Wu Jiajun, et al. Effects of the rainfall intensity and slope gradient on soil erosion and nitrogen loss on the sloping fields of Miyun Reservoir [J]. Plants, 2023, 12(3):423.