张馨予,查同刚,张晓霞,等.乌拉特矿山废弃地植被恢复斑块格局对土壤侵蚀的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5627-5638.
Zhang X Y, Zha T G, Zhang X X, et al. The Impact of vegetation restoration patterns on soil erosion in the wasteland of Urat mining area [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5627-5638.

乌拉特矿山废弃地植被恢复斑块格局对土壤侵蚀的影响

张馨予[1],查同刚[1,2*],张晓霞[1,3],王 冬[4],张泽宇[1],裴益乐[1] (1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083；2.北京林业大学,北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083；3.中建一局集团,北京 100161；4.中建一局集团第三建筑有限公司,北京 100161)

摘要：以乌拉特前旗矿山废弃地为研究区域,基于人工冲刷试验,探究了植被恢复格局(空白对照、棋盘状、横条状与斜条状)与冲刷流量(3,4.5, 6L/min)对坡面土壤侵蚀特征及植被水土保持效益的影响.结果表明:径流量与泥沙量在植被恢复坡面降低,但随冲刷流量提高而增加.横条坡面径流量与泥沙量随冲刷流量提高增加幅度最小,总体坡面减流率(34.36%)与坡面减沙率(79.50%)最大,总体植被减沙量[35.09g/(min·m^2)]最高.随冲刷进行,坡面产流率整体上升,不同格局坡面产沙率具有差异.植被斑块产沙率均显著低于坡面平均产沙率,且多数情况下为负值.横条坡面产沙率较为稳定,植被斑块产沙率最低[−13.02g/(min·m^2)].除横条坡面外,坡面产沙率与产流率呈线性正相关.冲刷流量对径流量与产流率具有决定性作用,贡献率分别达 79.37%与 66.21%.植被斑块格局对侵蚀的影响高于径流.综上,横条格局是最适宜矿山废弃地水土保持的植被斑块格局,设计排水对该地土壤侵蚀防治极为重要.

关键词：矿山废弃地；生态修复；模拟冲刷；植被斑块格局；产流产沙
中图分类号：X171.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5627-12

Impact of vegetation restoration patterns on soil erosion in the wasteland of Urat mining area. ZHANG Xin-yu[1], ZHA Tong-gang[1,2*], ZHANG Xiao-xia[1,3], WANG Dong[4], ZHANG Ze-yu[1], PEI Yi-le[1] (1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China；2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China；3.China Construction First Group, Beijing 100161, China；4.The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5627~5638

Abstract：This study investigated the impacts of vegetation restoration patch patterns (blank control, checkerboard, horizontal strip, and diagonal strip) and scouring flow rates (3, 4.5, and 6L/min) on slope soil erosion characteristics and vegetation conservation benefits in a mining wasteland of Urat Front Banner. Key findings include: Runoff and sediment yield decreased on vegetation-restored slopes but increased with higher souring flow rates. The horizontal strip pattern slope exhibited the smallest increase in runoff and sediment yield with rising flow rate, achieving the highest overall runoff reduction rate (34.36%) and sediment reduction rate (79.50%), and sediment reduction capacity [35.09g/(min·m^2)]. Runoff rates generally increased during scouring, while sediment yield rates varied across patterns. Sediment yield rate within vegetation patches were significantly lower than the slope average and often negative. The horizontal strip slope exhibited stable sediment yield rate, with the lowest patch sediment yield rate [−13.02g/(min·m^2)]. Except for the horizontal strip slope, sediment yield rates correlated linearly with runoff rates. Scouring flow rates dominated runoff and runoff rates, contributing 79.37% and 66.21%, respectively. Moreover, vegetation patch patterns exerted stronger effects on erosion than runoff. In conclusion, the horizontal strip pattern is optimal for soil and water conservation in mining wastelands, and drainage design is crucial for erosion control in these areas.

Key words：mining wasteland；ecological restoration；scouring test；vegetation patch pattern；runoff and sediment yield

矿山开采毁坏了原有景观环境与土地系统,导致坡面植被稀少,土壤结构松散,形成的特殊地形极易汇集降雨形成径流,造成严重土壤侵蚀[1-2].这进一步导致了土地退化与生产力降低[3].植被恢复是坡面水土流失综合治理的关键组成部分,也是矿山废弃地生态修复的必要步骤[4-6].长期以来,人为增加植被覆盖度与面积,有效地减少了生态脆弱区域水土流失的风险,并改善了矿区生态系统的水资源与土壤质量[7].

《中国矿产资源报告(2024)》[8]显示,中国矿产资源开发投资连续增长.截至 2023 年底,全国登记采矿权 30514 个,登记面积达 33.2 万 km^2.“三北”工程

收稿日期：2025-03-01
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFF130300204);中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2020-Z-5)
* 责任作者, 教授, zhtg73@bjfu.edu.cn

区等重要区域项目被纳入示范工程,以引领推动历史遗留废弃矿山生态修复.西北干旱半干旱地区现存大量矿山废弃地,在多风少雨、降水集中且强度大的气候影响下,初步整治的坡面植被生长困难,植物覆盖稀少,水土流失风险依然严峻[9].恢复植被进一步构建水土流失防治体系,推进水土资源留存与植被恢复相互促进是提高矿山废弃地生态恢复效益与可持续发展能力的关键[10-12].然而,在当地紧缺水资源的胁迫下,盲目增加植被盖度与面积将对生态与社会经济造成新的不利影响[12-13].因此,如何精细化坡面植被措施建设,通过合理布局发挥单位面积植被最大水土保持效益,已成为该区域矿山废弃地生态修复与环境保护中的重难点.

植被斑块格局是指植被在景观中以不连续的斑块形式分布的空间结构,其特征包括大小、形状、密度与空间配置[14].植被斑块格局的优选应用能够提高植被水土保持功能,并提升当地水土资源的利用效率[15].植被通过提高地表糙度,分散坡面径流,增加土壤入渗量,消减侵蚀能量,降低径流挟沙力,具有保持水土的作用[16-19].植被与裸地斑块的空间分布直接改变了径流连续性与坡面泥沙侵蚀-沉积位置,进而改变泥沙输移路径连通程度,可以极大地影响坡面径流与产沙量[20-21].近年来,国内外学者就植被斑块形状、结构与分布对坡面侵蚀产沙的作用开展了大量试验,分别探究了均匀状、随机状与聚集状植被转化降雨与产生泥沙的差异[22-24],其中聚集状植被依照聚集方式可分为点状、棋盘状与条带状[25-26].而植被所处坡位、斑块密度、条带方向与总覆盖度被证实能够显著影响植被与土壤侵蚀之间的关系[27-28].植被与泥沙、水文连通性的关系是试验设计与研究讨论中的普遍要点[29].一般认为,相同数量下均匀分布植被以及高密度的棋盘状与横向条带植被对土壤流失有较好的控制效果[24,30-31],连通性差的植被路径相对表现出较强的水力传输阻力与较差的水力挟沙能力[32],靠近坡面末端的植被在蓄水保沙方面更为有效[33-34].

然而,当前鲜有探究植被恢复斑块格局在矿山废弃地的应用,且以往的研究主要针对坡面已有植被并以降雨为侵蚀驱动力.研究表明,裸露尾矿的土壤侵蚀量随降雨强度提高而显著增加,径流量与泥沙量对降雨强度的变化响应极为敏感[35].间歇模拟降雨试验条件下,尾矿重构坡面堆积覆土能够提高土壤渗透率,减少径流产生,并降低产流产沙峰值[36].这对汇流作用强、需重构植被的矿山废弃地结合不足.此外,目前对坡面土壤侵蚀与植被水土保持效益的表征尚不完整[21].一般采用产流(产沙)率与减流(减沙)率对整体坡面进行描述.这对植被与裸地斑块效益解释不够清晰,缺乏对水土保持效率与数量区别的解析.

乌拉特矿山废弃地位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗乌拉山北麓铁矿区,是“乌梁素海流域山水林田湖草生态保护修复工程”矿山地质环境综合整治的重点区域之一.该地水资源短缺,水土流失风险严重,迫切需要植被重构恢复.本研究采用人工冲刷试验,结合该地矿山废弃地特点,对比了不同植被恢复斑块格局与冲刷流量下坡面水土流失及水沙过程特征,并构建了植被水土保持效益指标进行分析.本研究目的在于:(1)探究径流与土壤侵蚀对植被恢复斑块格局的响应关系特征;(2)阐明植被斑块的坡面水土保持效益,量化坡面内部裸地与植被斑块间的堆积-沉积现象;(3)揭示植被斑块格局对径流与泥沙的影响贡献,筛选适宜矿山废弃地植被恢复斑块格局.研究结果为土壤侵蚀机理构建,干旱半干旱地区矿山废弃地坡面水土流失防治以及生态修复模式化管理提供建议.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗乌拉山北麓铁矿区矿山废弃地(40°45′20″~40°45′47″N,108°45′01″~108°46′08″E),乌拉山北麓铁矿区为“乌梁素海流域山水林田湖草生态保护修复工程”矿山地质环境综合整治的重点区域之一(图 1).属于乌梁素海流域,具有典型温带大陆性季风气候,年均温 8.4℃,年降水在 215mm 左右,且集中于 6~9 月,地带性土壤以灰褐土、栗钙土为主.初步整治的废弃采坑坡面采用原有表土进行客土覆盖,覆土厚度高于 30cm,土壤容重在 1.26g/cm^3 左右,土壤黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 4.22%、28.70%与 67.05%,土壤质地为砂壤质,有机质含量约 0.66%,全氮含量 0.7%,全磷含量 0.8%,呈弱碱性,土壤肥力较低.该区域自然植被以旱生类植物为主,植被类型为山地草

原植被,主要植物包括蒙古韭(*Allium mongolicum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)和狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)等.

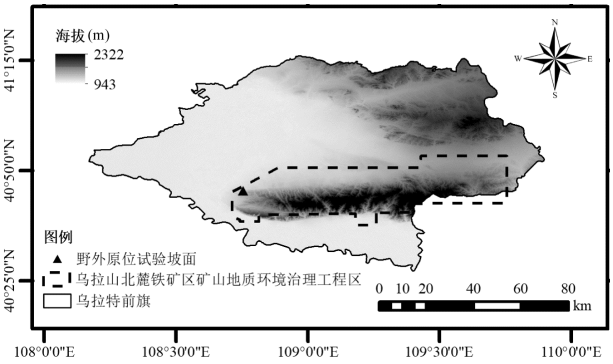


图 1　研究区及野外原位试验坡面位置

Fig.1　Location of the study area and field in test slopes

1.2　试验设计及步骤

试验于 2021 年 8~9 月在研究区野外原位坡面进行.2021 年 8 月,根据前期调查选取 12°坡面进行植被恢复试验,在坡面划分 24 个(4 组,6 个重复)1m×3m 简易径流小区,根据研究区代表植物以及当地常用牧草种选择蒙古韭(*Allium mongolicum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)与雀麦(*Bromus japonicus*)进行混合播种试验.根据文献资料,设计棋盘状、横条状与斜条状三种植被斑块格局[21],设计种植植被斑块面积为坡面总面积的 50%[7,12],同时设有空白小区作为对照组.具体径流小区及植被播种格局设计如图 2 所示.依照该区域矿山废弃地雨季前快速建植流程,人工撒种后至正式试验前,将各径流小区置于自然条件下恢复,适当进行人工浇水以保证植物成活率.

2021 年 9 月,在植被恢复后径流小区陆续进行冲刷试验.试验前进行植被调查,各径流小区植被恢复覆盖与播种格局大致吻合,各小区的覆盖密度偏差在 5%以内.冲刷开始前,依照设计对坡面形成植被斑块格局进行边缘修整并置于自然条件下稳定一周.由于植被未完全覆盖设计面积,仅调查植被斑块内植物密度及平均高度(表 1).本研究中分析植被盖度均为设计覆盖度.

依据乌拉特前旗多年气象资料,结合研究区所设置气象站监测的常年平均降雨,设计冲刷流量相当于 60mm/h 降雨量以及 1 倍、1.5 倍及 2 倍汇流面积,选取 3,4.5,6L/min,3 个流量进行冲刷试验,冲刷时间为 25min.同一植被斑块格局与冲刷流量设置相同径流小区进行 2 次的重复试验,数据分析取平均值.共进行冲刷试验 24 场(表 2).

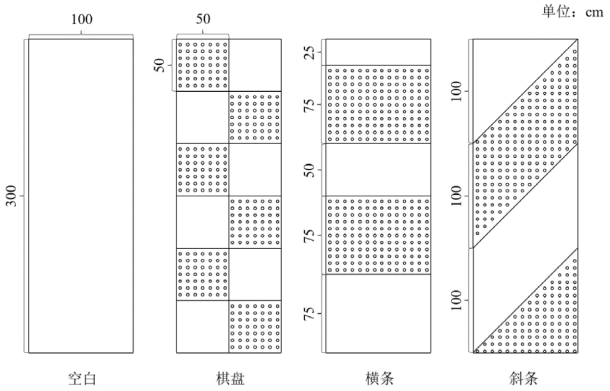


图 2　坡面径流小区及植被斑块格局设置

Fig.2　Runoff plot and vegetation pattern setting

表 1　恢复植被斑块基本属性

Table 1　Basic attributes of vegetation

植物种	平均株数(个/m^2)	平均高度(cm)
蒙古韭 *Allium mongolicum*	232	3.78
银灰旋花 *Convolvulus ammannii*	19	2.40
雀麦 *Bromus japonicus*	87	19.09

表 2　径流小区试验设置

Table 2　Experimental setup for runoff plot

植被恢复格局	小区个数/试验次数	冲刷流量(L/min)	小区个数/试验次数
空白对照	6	3	2
		4.5	2
		6	2
棋盘格局	6	3	2
		4.5	2
		6	2
横条格局	6	3	2
		4.5	2
		6	2
斜条格局	6	3	2
		4.5	2
		6	2

冲刷试验前,采用土壤饱和含水量换算水量并均匀浇水的方式使坡面润湿,达到即将产流状态,并控制土壤含水率一致.各径流小区采用溢流槽、集水

口与径流桶进行冲刷及取样,采用蓄水桶、水泵与流量计供水与控制流量.试验过程中控制流量误差在±5%以内.形成产流后,每 2.5min 进行一次泥沙样品采集,取样间隔 2min,取样时间 30s.采用天平称量与烘干法测定泥沙样品径流量与泥沙量.

1.3 数据计算与分析

$$Q_i = \frac{M_i - m_i}{\rho} \tag{1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot \frac{T_i}{t_i} \tag{2}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot \frac{T_i}{t_i} \tag{3}$$

式中:Q_i 为第 i 次取样中径流体积,mL;m_i 为第 i 次取样烘干后泥沙质量,g;M_i 为第 i 次取样泥沙样品总质量,g;ρ 为水密度,g/mL;S 为泥沙量,g;n 为取样次数,T_i 为第 i 次取样所代表时间,t_i 为第 i 次取样时间;Q 为径流量,mL.

$$\mathrm{RRR} = \frac{Q_c - Q_v}{Q_c} \times 100\% \tag{4}$$

$$\mathrm{SRR} = \frac{S_c - S_v}{S_c} \times 100\% \tag{5}$$

式中:RRR 为坡面减流率;Q_c 为空白对照径流小区径流量,mL;Q_v 为植被覆盖径流小区径流量,mL;SRR 为坡面减沙率;S_c 为空白对照径流小区泥沙量,g;S_v 为植被覆盖径流小区泥沙量,g.

$$\Delta Q_v = \frac{Q_c - Q_v}{A_v \cdot T} \times 100\% \tag{6}$$

$$\Delta S_v = \frac{S_c - S_v}{A_v \cdot T} \times 100\% \tag{7}$$

式中:ΔQ_v 为植被减流量,mL/(min·m^2);Q_c 为空白对照径流小区径流量,mL;Q_v 为植被覆盖径流小区径流量,mL;ΔS_v 为植被减沙量,g/(min·m^2);S_c 为空白对照径流小区泥沙量,g;S_v 为植被覆盖径流小区泥沙量,g;A_v 为植被面积,m^2.

$$\bar{Q} = \frac{Q}{A \cdot T} \tag{8}$$

$$\bar{S} = \frac{S}{A \cdot T} \tag{9}$$

式中: $\bar{Q}$ 为坡面平均产流率,mL/(min·m^2); $\bar{S}$ 为坡面平均产沙率,g/(min·m^2);A 为径流小区面积,m^2;T 为产流时间,min.

$$\bar{Q}_v = \frac{Q - (1-C) \cdot Q_c}{A_v \cdot T} \times 100\% \tag{10}$$

$$\bar{S}_v = \frac{S - (1-C) \cdot S_c}{A_v \cdot T} \times 100\% \tag{11}$$

式中: $\bar{Q}_v$ 为植被斑块产流率,mL/(min·m^2); $\bar{S}_v$ 为植被斑块产沙率,g/(min·m^2);C 为径流小区植被斑块覆盖度,%.

1.4 统计分析

采用 Office 16 进行径流量与泥沙量的数据记录与计算分析,采用 R 4.4.2 中“readxl”包与“vegan”包进行植被斑块格局与冲刷流量对径流(泥沙)量,以及植被斑块格局、冲刷流量与时间对产流(产沙)率的冗余分析,采用 Origin 2023 进行制图,并进行产流率与产沙率的拟合回归分析,计算 95%置信区间.

2 结果与分析

2.1 径流泥沙量及植被减流(减沙)效益

对照坡面在不同流量下累计产生径流 79.83L 与泥沙 4.97kg.总体而言,植被覆盖坡面径流量与泥沙量分别是对照坡面的 63.60%~77.88%与 20.50%~54.09%.其中棋盘坡面与横条坡面产流量均较低且相近.而泥沙量:斜条坡面>棋盘坡面>横条坡面(图3).

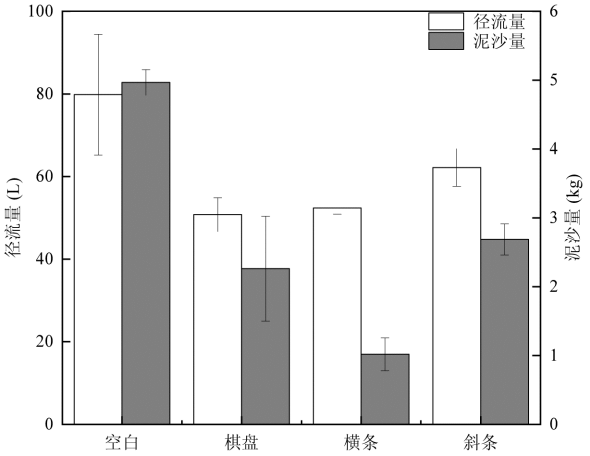


图 3 不同植被斑块格局坡面径流量与泥沙量

Fig.3 Runoff and sediment yield of slopes with different vegetation patch patterns

坡面水土流失受到植被斑块格局与冲刷流量的共同作用(图 4).植被覆盖坡面径流泥沙相较对照坡面降低,但在不同冲刷流量下呈现出显著差异.径流量与泥沙量随冲刷流量提高而增加,对照坡面整体提升幅度最大,横条坡面提升幅度最小.

4.5 与 6L/min 冲刷流量下,对照坡面径流量均高于植被覆盖坡面,但在 3L/min 冲刷流量下,对照坡面径流量低于横条坡面并与棋盘坡面相接近.对照坡面径流量随冲刷流量提高由 10.88L 增加至 43.75L,提高幅度最大,而横条坡面径流量随冲刷流量提高由 13.62L 增加至 21.02L,提高幅度最小.而棋盘与斜条坡面径流量随冲刷流量提高具有显著差异,表现为在 4.5~6L/min 径流量相对前一等级大幅增加.斜条坡面、棋盘坡面与横条坡面分别是 3,4.5L/min 与 6L/min 冲刷流量下径流量最低的坡面.

对照坡面泥沙量均高于植被覆盖坡面,在 3L/min 冲刷流量下二者差异较小,其后随着冲刷流量的提高差异增强.对照坡面泥沙量随冲刷流量提高由 0.57kg 增加至 2.54kg,提高幅度最大,而同等情况下,横条坡面泥沙量仅由 0.19kg 增加至 0.60kg.值得注意的是,相较 3~4.5L/min,植被覆盖坡面泥沙量在 4.5~6L/min 区间大幅提高,而对照坡面则相反.横条与棋盘坡面在 3 与 4.5L/min 冲刷流量下泥沙量均较低,为 0.14~0.29kg.而 6L/min 冲刷流量下,横条坡面泥沙量最低.

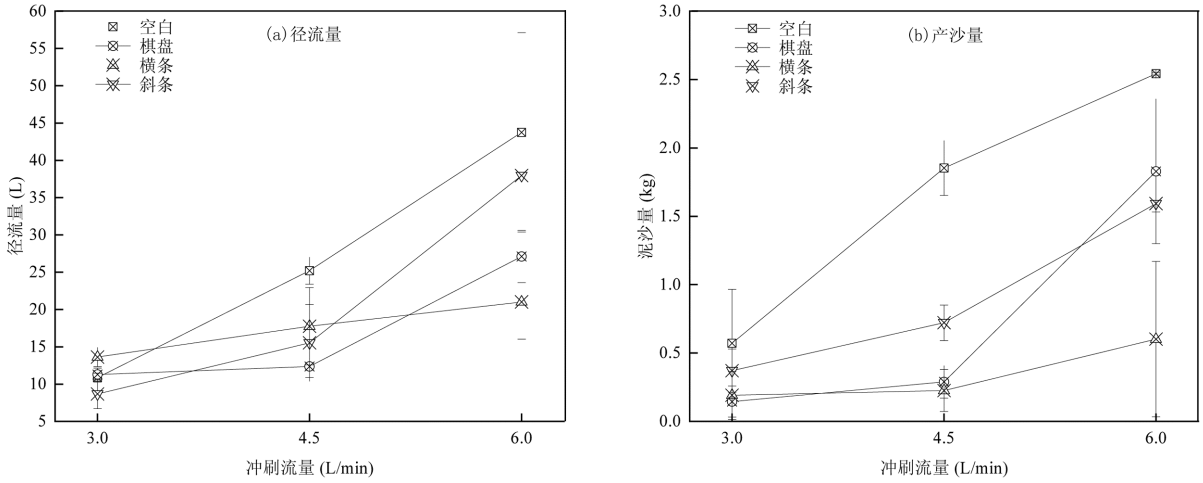


图 4　不同植被斑块格局坡面径流量与泥沙量

Fig.4　Runoff and sediment yield of different vegetation patch pattern slopes

坡面减沙率普遍高于减流率(表 3).相同冲刷流量下的坡面植被减流(减沙)量与减流(减沙)率之间具有对应关系,但随流量增加它们的趋势具有差异.

棋盘坡面减流率与减沙率随冲刷流量先增加后降低,最大值出现在 4.5L/min 处,分别为 50.93%与 84.41%.植被减流量随冲刷流量提高而上升.而植被减沙量随冲刷流量先增加后降低,但 6L/min 处均高于 3L/min 处,而产沙率相反.横条坡面的减流率、植被减流量与植被减沙量随冲刷流量增加而增加.但减沙率最大值出现在 4.5L/min 冲刷流量下.斜条格局各项效益最大值均出现在 4.5L/min 冲刷流量下.

斜条、棋盘与横条坡面分别是 3~6L/min 流量下减流率最高的坡面,其减流率为 20.30%~51.97%,植被减流量为 58.88~606.30mL/(min·m^2).在 3L/min 冲刷流量下,棋盘坡面减沙率最高,而在 4.5 与 6L/min 冲刷流量下,横条格局是减沙最高的坡面格局,坡面减沙率分别为 74.70%、87.83%与 76.34%,植被减沙量达到 11.38~51.75g/(min·m^2).

表 3　不同植被斑块格局坡面水土保持效益

Table 3　Soil and water conservation benefits of different vegetation patch pattern slopes

植被斑块格局	冲刷流量 (L/min)	坡面减流率(%)	坡面减沙率(%)	植被减流量 [mL/(min·m^2)]	植被减沙量 [g/(min·m^2)]
棋盘	3	−3.85	74.70	−11.15	11.38
	4.5	50.93	84.41	342.23	41.71
	6	38.03	28.08	443.70	19.04
	总体	36.40	54.46	258.26	24.04
横条	3	−25.26	66.52	−73.27	10.13
	4.5	29.51	87.83	198.31	43.40
	6	51.97	76.34	606.30	51.75
	总体	34.36	79.50	243.78	35.09
斜条	3	20.30	35.01	58.88	5.33
	4.5	38.40	61.04	258.06	30.16
	6	13.20	37.33	153.98	25.31
	总体	22.12	45.91	156.98	20.27

此外,棋盘坡面与横条坡面植被在 3L/min 冲刷

流量下对产流有促进作用.横条坡面在所有冲刷流量下的减沙率均大于 65%.

2.2 产流(产沙)过程及植被斑块产流(产沙)率

产流率随冲刷流量提高整体提高,各坡面产流率随冲刷进行总体呈现上升趋势,但产流阶段特征与整体水平差异与冲刷流量及植被斑块格局相关(图 5).

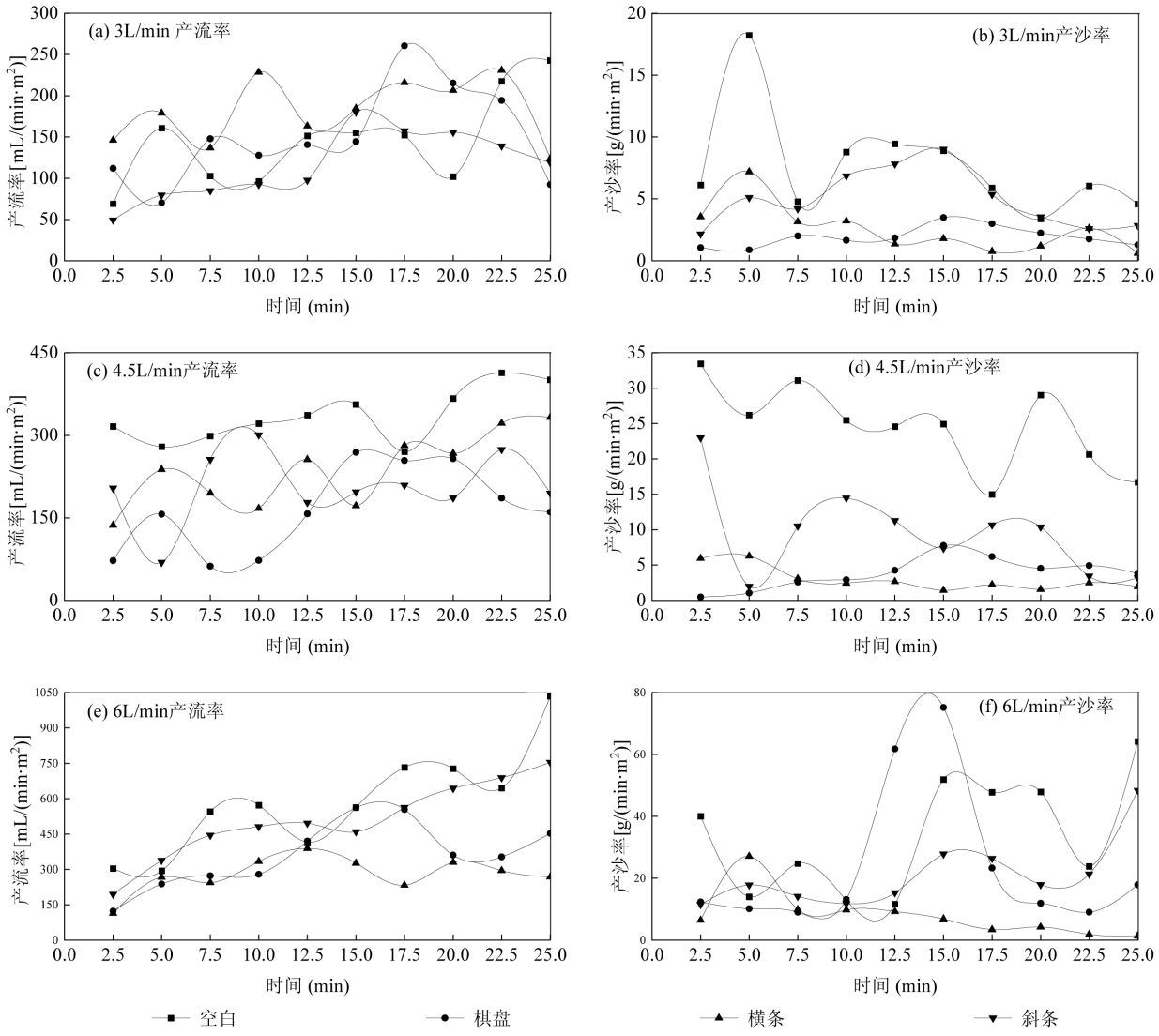


图 5 不同植被斑块格局径流小区产流产沙过程

Fig.5 Process of runoff and sediment yield of different vegetation patch pattern slopes

3L/min 冲刷流量下,对照坡面产流率在 69.03~242.81mL/(min·m^2)波动,整体呈上升趋势,最终产流率相较最初提高 2.52 倍.对应地,具有植被覆盖坡面产流率呈现前期上升,其后下降的趋势,棋盘坡面整体波动幅度相对较大.4.5L/min 冲刷流量下,对照坡面产流率高于其他坡面,与横条坡面产流率整体呈现上升趋势.相较最初产流率,最终产流率分别提高 26.85%与 143.12%.而棋盘与斜条坡面在产流前期产流率有较大波动,斜条坡面在 12.5min 后产流率较为稳定,棋盘坡面总体呈现 15min 前上升而后略微下降的趋势.6L/min 冲刷流量下,各坡面产流率均呈现整体上升趋势,上升幅度:对照坡面>斜条坡面>棋盘坡面>横条坡面,相较最初产流率,其最终产流率分别提高 730.82,559.28,329.14,154.31mL/(min·m^2),是对应最初产流率的 3.41 倍、3.88 倍、3.67 倍与 2.35 倍.

随冲刷进行,不同植被斑块格局坡面产沙率趋势具有差异.植被斑块格局通过影响产沙整体水平或者局部产沙率特征进而影响坡面泥沙量(图 5).

3L/min 冲刷流量下,对照坡面产沙率在产沙前期波动幅度较大,整体呈下降趋势,其数值居于

3.38~18.22g/(min·m^2)之间.而棋盘、横条与斜条坡面则分别呈现相对稳定、总体下降与先上升后下降的趋势.4.5L/min 冲刷流量下,对照坡面与斜条坡面产沙率呈现波动下降趋势.对照坡面产沙率均大于同一时间的其他坡面.而棋盘与横条坡面产沙率相对平稳,产沙率分别处于 0.48~7.75g/(min·m^2)与 1.45~6.27g/(min·m^2).6L/min 冲刷流量下,对照坡面产沙率在 12.5min 之前呈下降趋势,其后陡然升高,有所波动但维持在一个较高水平.棋盘坡面产流率在12.5min 与 15min 处急剧升高,产沙峰值高于对照坡面.斜条植被坡面产流 12.5min 前相对较为稳定,其后产流率呈现上升趋势.而横条坡面总体较为稳定,其产沙率随时间呈现缓慢下降的趋势.

表 4　不同植被斑块格局坡面产流产沙率

Table 4　Runoff rate and sediment yield rate of different vegetation patch pattern slopes

植被斑块格局	冲刷流量(L/min)	坡面平均产流率[mL/(min·m^2)]	坡面平均产沙率[g/(min·m^2)]	植被斑块产流率[mL/(min·m^2)]	植被斑块产沙率[g/(min·m^2)]
空白	3	145.02	7.62		
	4.5	335.99	24.71		
	6	583.35	33.90		
	总体	354.79	22.07		
棋盘	3	150.59	1.93	156.17	−3.76
	4.5	164.88	3.85	−6.24	−17.01
	6	361.50	24.38	139.66	14.86
	总体	225.66	10.05	96.53	−1.97
横条	3	181.65	2.55	218.28	−2.52
	4.5	236.84	3.01	137.69	−18.69
	6	280.20	8.02	−22.95	−17.85
	总体	232.90	4.53	111.01	−13.02
斜条	3	115.57	4.95	86.13	2.28
	4.5	206.96	9.62	77.93	−5.46
	6	506.36	21.24	429.37	8.59
	总体	276.30	11.94	197.81	1.80

植被斑块产流(产沙)率普遍低于坡面产流(产沙)率.4.5L/min 下的棋盘坡面与 6L/min 下的横条坡面植被斑块产流率为负值,而植被斑块产沙率均显著低于坡面产沙率,且多数情况下为负值(表 4).这意味着径流在植被斑块处下渗提高,而泥沙在植被斑块处产生沉积或由于植被斑块的存在减小了裸露坡面斑块的产沙量.

2.3　坡面水沙关系与影响因素贡献率

对照坡面、棋盘坡面与斜条坡面产沙率随产流率的增加呈显著线性正相关(P<0.01),而横条坡面产流率与产沙率线性关系并不显著(图 6).对照坡面、棋盘坡面与斜条坡面拟合线斜率分别为 0.06、0.09 与 0.04,这表明随产流率增加产沙率提高速度棋盘坡面>对照坡面>斜条坡面.

通过冗余分析,植被斑块格局对泥沙量与产沙率的贡献度高于径流量与产流率.冲刷流量对径流量与产流率具有决定性作用,贡献率分别达到79.37%与 66.21%.而时间对产流率有一定影响,但对产沙率贡献度几乎为 0(图 7).

3　讨论

3.1　植被恢复斑块格局对矿山废弃地径流泥沙的影响

随着我国水土保持工作的不断深入推进,如何在资源匮乏区最大化利用资源,发挥植被最优效益并量化其效益逐渐成为各方面广泛关注的课题.植被斑块格局可以极大地影响侵蚀过程及结果,近年来,通过优化植被斑块格局提高坡面植被蓄水保沙效益已成为当前研究热点.矿山废弃地生态环境脆弱恢复条件恶劣,坡面水土流失具有产流低、产沙高、含沙量高的特点[37],本研究中无植被坡面在最大冲刷流量下换算土壤流失量达到 848.66t/km^2,研究区处于黄土高原、北方土石山区以及风蚀区交接处,该土壤流失量远超北方土石山区土壤容许流失量(200t/(km^2·a)),并接近黄土高原土壤容许流失量(1000t/(km^2·a)).

本研究在矿山废弃地坡面设置了不同植被恢复斑块格局,结果表明横条格局是最佳减沙格局并具有较高的截水能力,这与Ludwig 等[25]、Zhang 等[30]和丁琳等[7]研究结果一致.而在王恒星[26]、孟铖铖等[38]研究中,棋盘相对横条坡面水土保持效益更高,并具有较好的水动力学条件.这种差异是由于在矿山废弃地中,汇流冲刷细沟状面蚀与沟蚀是主要侵蚀方式,与坡面均匀产流的溢流形式不同,横条格局可以保证任何上方来水受到最大限度的阻挡.

研究证据表明,裸露坡面水土流失随降雨与冲刷流量提高并呈指数型上升[39-41],裸露尾矿坡面径流与产沙量随降雨量提高而减少或增加幅度减小[9].这与本研究中坡面径流泥沙量随冲刷流量提高而递增,对照坡面随冲刷流量提高产流稳定增加,产沙提高量下降的现象一致.而在有植被坡面,产沙量随冲刷流量的提高而增加量提高,但产沙上升或下

降[42].这与本研究中来水流量的再次提高会大幅增加有植被坡面产沙量的现象相吻合.这表明矿山废弃地能够减小降雨及冲刷流量提高带来的增量.植被坡面集中径流导致的沟蚀效益随流量增大而增强,并不断逼近植被的拦蓄上限[43],进而呈现出土壤侵蚀随冲刷流量提高敏感性增加的特征.

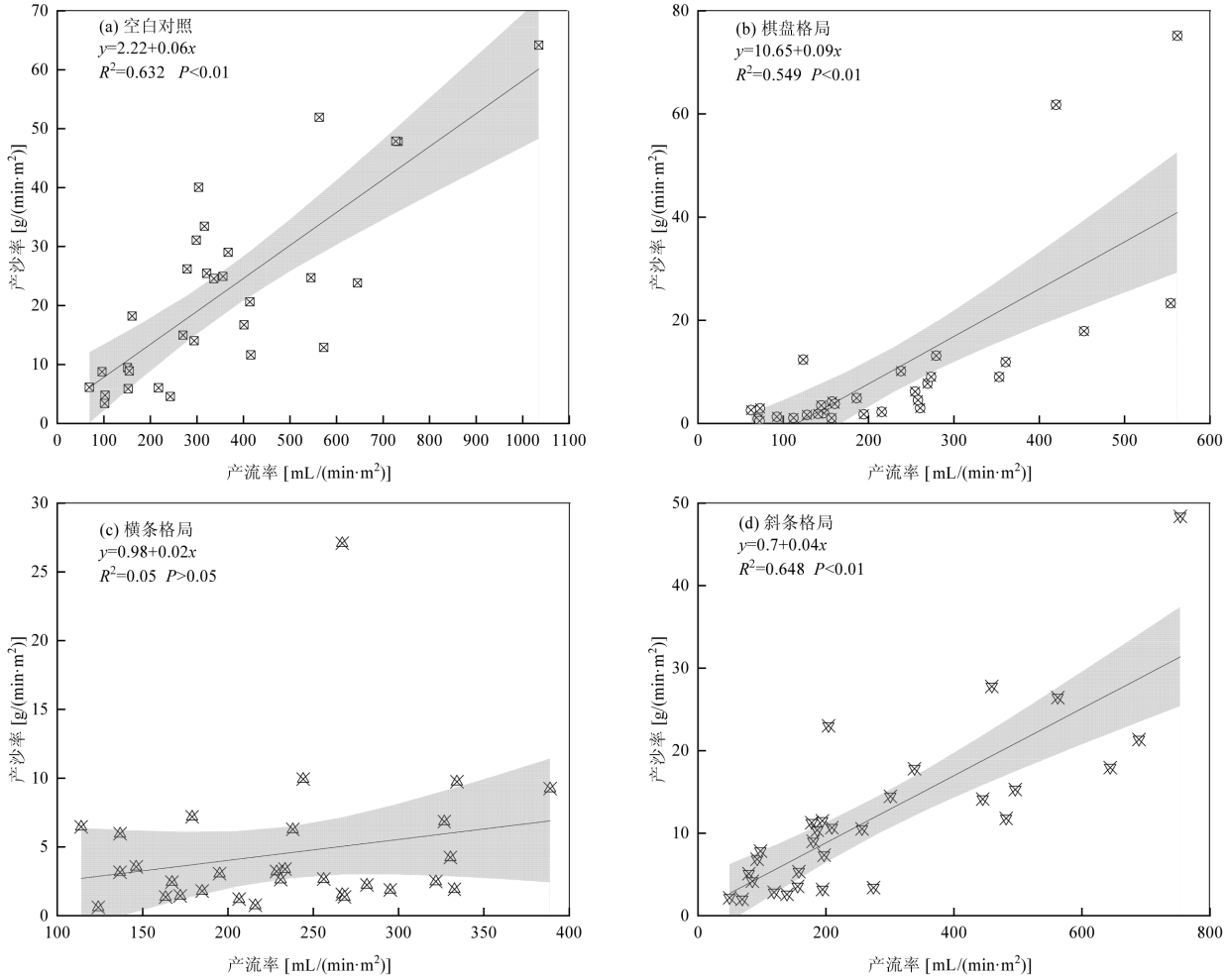


图 6 不同植被斑块格局坡面水沙关系

Fig.6 The relationship between runoff and sediment yield of different vegetation patch pattern slopes

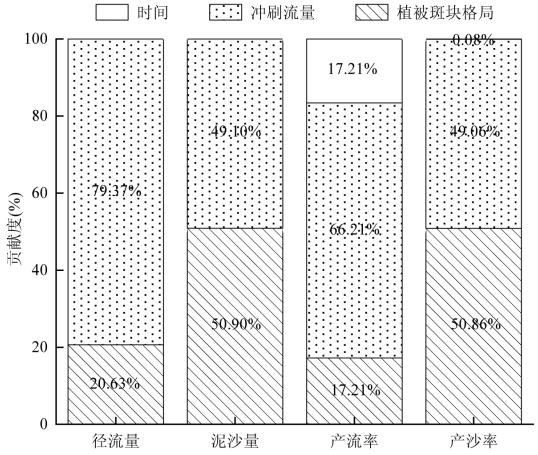


图 7 不同因素对产流与产沙的贡献率

Fig.7 The contribution rate of different factors to runoff and sediment yield

本研究中发现,在 3L/min 冲刷流量下,棋盘与横条坡面植被减少产沙同时增加产流,这可能是由于侵蚀量少侵蚀沟发育缓慢或侵蚀过程中形成了土壤结构性结皮,因此水分的深层下渗减小[44].而其他情况下有植被坡面径流泥沙均小于对照坡面,则进一步表明植被斑块格局能够改变矿山废弃地水土流失.

3.2 植被恢复斑块格局对植被水土保持效益的影响

植被斑块格局特征与侵蚀产沙过程的表征指数当前较为缺少,本研究中构建了植被减流(减沙)量表征植被水土保持效益,采用植被斑块产流(产沙)率对植被斑块的作用进行了描述,并与对照坡面相对

比.本研究结果发现,植被减流(减沙)量的提高并不意味着坡面减流(减沙)率提高.在当前以容许土壤流失量为土壤侵蚀标准的情况下[45],植被减流量与植被减沙量可以弥补减流率与减沙率所缺乏的对减少水土流失量的描述,并能够直接表征植被水土保持效益量绝对值.这为不同侵蚀条件下植被拦截径流泥沙的最大阈值确定提供了新思路.

本研究中发现,绝大多数植被坡面减流(产沙)率最大值出现在 4.5L/min,表明植被水土保持效益随冲刷流量提高的同时具有阈值,这一特征在植被减流(减沙)量变化规律中体现更加明显.横条坡面减沙率较高且稳定,结合坡面水沙关系,这可能是由于横条格局能够显著抑制坡面产沙率同产流率的线性增长关系.

根据测算,植被斑块产流(产沙)率均有出现为负值的情况,且在植被斑块产沙率中出现更为普遍.其原因在于植被斑块的分布影响改变了坡面径流泥沙的动力学参数,导致坡面径流泥沙在由植被处下渗或堆积[46],或者由于植被斑块影响了裸露斑块的特性,导致裸露地块与植被斑块产流产沙总体下降,但仅以对照坡面产流率与产沙率计算会出现植被斑块产沙率为负的现象,这也侧面印证了坡面尺度上泥沙在裸地与植被斑块间的源-汇理论[47-48].此外,植被斑块产流(产沙)率能够有效计算不同植被盖度下单位面积植被减流(减沙)效益.由于更高的植被恢复盖度往往需要更多的资源投入,这为以植被恢复效益优化为目标的植被盖度对水土流失防治的影响研究提供了有效方法.

3.3　结合植被恢复斑块格局对矿山废弃地土壤侵蚀防治的建议

矿山废弃地坡面普遍具有面积大,坡高,坡长的特点,坡面产生径流泥沙量依照坡长呈指数型增长,实际中,如何考虑上方来水来沙对下坡面水土流失的影响是值得探究的关键问题[49].合理划分地块进行模拟计算,量化不同坡面的水土流失是实现水土资源精细调控的第一步,也是坡面-流域尺度换算表征的基础[15,50].本研究表明,土壤流失量相比径流更易受到植被覆盖度和空间格局的调控[51-52],本研究中,横条坡面减沙率均大于 65%,但 3L/min 冲刷流量下,可能会促进产流.因此,设计排水措施辅助植被进行矿山废弃地坡面水土流失重点防治极为重要.对于汇流量较低的坡面则可以考虑棋盘与斜条格局的组合应用.对于植被减少产沙同时增加产流现象,由于整治矿山废弃地坡面恢复的主要矛盾在于土壤流失与植被生长的矛盾,因此在同等情况下应以固土为优先.这也间接证明,只在局部植被恢复来减少坡面出口的泥沙产量[55],而留下大面积局部土壤流失严重的裸露坡面并不合理.

植被盖度通过影响土壤入渗、径流泥沙量等进而对水土保持功效造成影响.一般认为,植被盖度与地表径流量呈负相关关系,50%~60%的植被盖度能稳定的减少泥沙[55].本研究以植被斑块覆盖度固定值进行了试验计算,实际中可以考虑不同密度下的植被建设与资源利用效益比率以及对水土保持效益的最大化[56].对植被种子可能随水流迁移[57]的现象也可以依照产流区域进行不同程度播种,并合理建设种子库.

矿山废弃地的水土保持措施设置与植被恢复,包括植被斑块格局的构建都需要考虑到操作便捷程度与应用可行性,以及是否利于机械化与统一管理.而本研究中横条恢复格局更适宜实际情况.矿山废弃地汇流效益较大风险点需重点关注,对于坡面存在的植被水土保持效益阈值现象,需要同工程措施相结合进行水土流失防治.此外,由于干旱半干旱区常受到土壤风蚀的影响.当前工程措施中,草方格的应用效果与形式对风蚀防治以及植被恢复斑块格局的实施具有天然优势.因此,结合草方格的植被斑块恢复可能是未来的实践与研究方向.

综上,横条格局最适宜矿山废弃地的植被恢复斑块格局,设计排水对该地土壤侵蚀防治极为重要,未来可深入探究水土资源利用效益比率,并与播种及工程措施(如:草方格等)相结合.

4　结论

4.1　植被坡面整体径流与侵蚀量分别为对照坡面的 63.60%~77.88%与 20.50%~54.09%.横条坡面径流与泥沙随冲刷流量提升幅度最小.随流量增加植被减流(减沙)量与减流(减沙)率的趋势具有差异.

4.2　随冲刷进行,各坡面产流率总体上升,不同格局坡面产沙率具有差异.径流在植被斑块处下渗提高,而泥沙在植被斑块处产生沉积或由于植被斑块的存在减小了裸露坡面斑块的产沙量.

4.3 横条格局能有效抑制产沙率与产流率线性正相关关系.植被斑块格局对侵蚀的影响高于径流.冲刷流量对径流量与产流率具有决定性作用,贡献率分别达到 79.37%与 66.21%.

4.4 横条格局是最适宜矿山废弃地水土保持的坡面植被斑块格局,设计排水措施辅助植被进行水土流失重点防治同样极为重要.未来可深入探究水土资源利用效益比率,并与播种及工程措施(如:草方格等)相结合.

参考文献:

[1] Worlanyo A, Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021,279:111623.

[2] Kincey M, Warburton J, Brewer P. Contaminated sediment flux from eroding abandoned historical metal mines: Spatial and temporal variability in geomorphological drivers [J]. Geomorphology, 2018,319:199-215.

[3] Feng Y, Wang J, Bai Z, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2019,191:12-25.

[4] Zhang L, Wang J, Bai Z, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. Catena, 2015,128:44-53.

[5] 黄元仿,张世文,张立平,等.露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展 [J]. 农业机械学报, 2015,46(8):72-82.
Huang Y, Zhang S, Zhang L, et al. Research progress on conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine [J] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(8):72-82.

[6] 陈思思,董 滨,徐祖信.矿山生态修复及市政污泥稳定化产物应用潜力 [J]. 中国环境科学, 2022,42(12):5734-5747.
Chen S, Dong B, Xu Z. Mine land ecological restoration and application potential of sewage sludge stabilization products [J]. China Environmental Science, 2022,42(12):5734-5747.

[7] 丁 琳,许海超,秦 伟,等.不同坡面草被格局下的侵蚀产沙量及其连通性指数表征 [J]. 农业工程学报, 2022,38(9):119-128.
Ding L, Xu H, Qin W, et al. Erosion and sediment yield under different grass cover patterns and its characterization of connectivity index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022,38(9):119-128.

[8] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告 2024 [M]. 2024, 北京:地质出版社.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China Mineral Resources 2024 [M]. 2024, Beijing: Geology Press.

[9] 李海东,沈渭寿,司万童,等.中国矿区土地退化因素调查:概念、类型与方法 [J]. 生态与农村环境学报, 2015,31(4):445-451.
Li H, Shen W, Si W, et al. Survey of land degradation factors in mining areas in China: Concepts, types, and methods [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015,31(4):445-451.

[10] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向 [J]. 煤炭学报, 2021,46(5):1355-1364.
Bi Y, Peng S, Du S. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(5):1355-1364.

[11] Martin M, Martin D, Nicolau I, et al. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: The experimental spoil heap at El Machorro Mine(Central Spain) [J]. Land Degra-dation & Development, 2016,27(2):145-159.

[12] 闫帅旗,朱冰冰,边 熇.不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征 [J]. 农业工程学报, 2021,37(3):116-123.
Yang S, Zhu B, Bian H. Variation characteristics of flow length of grass slope under different grass strip positions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021,37(3):116-123.

[13] 赵 阳,曹文洪,王向东,等.北京山区植被恢复建设对流域径流量影响研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(12):3771-3778.
Zhao Y, Cao W, Wang X, et al. Effect of vegetation rehabilitation and construction on runoff of watershed in Beijing Mountain Area [J]. China Environmental Science, 2015,35(12):3771-3778.

[14] Zhang W, Yi S, Chen J, et al. Characteristics and controlling factors of alpine grassland vegetation patch patterns on the central Qinghai-Tibetan plateau [J]. Ecological Indicators, 2021,125(107570).

[15] 张金茜,柳冬青,钱彩云,等.流域景观格局对土壤保持服务的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(3):1164-1172.
Zhang J, Liu D, Qian C, et al. Influence of watershed landscape pattern on soil conservation service [J]. China Environmental Science, 2019,39(3):1164-1172.

[16] Seitz S, Goebes P, Zumstein P, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in sub-tropical forests [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(11):1439-1447.

[17] Ghimire C, Bruijnzeel L, Lubczynski M et al. Rainfall interception by natural and planted forests in the Middle Mountains of Central Nepal [J]. Journal of Hydrology, 2012,475:270-280.

[18] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(3/4):356-363.

[19] Wang D, Yuan Z, Cai Y, et al. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285:112165.

[20] Liu J, Gao G, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(1):59-78.

[21] 秦 伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述 [J]. 生态学报, 2017,37(14):4905-4912.
Qin W, Cao W, Guo Q, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(14):4905-4912.

[22] 张 鹏,李 龙,李 艳,等.植被斑块格局对砒砂岩坡面土壤侵蚀强度的影响 [J]. 水土保持学报, 2022,36(5):58-65.

Zhang P, Li L, Li Y, et al. Effect of vegetation patch pattern on soil erosion intensity on arsenic sandstone slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):58−65.

[23] Wei W, Pan D, Feng J. Tradeoffs between soil conservation and soil−water retention: The role of vegetation pattern and density [J]. Land Degradation & Development, 2022,33(1):18−27.

[24] Sun R, Ma L, Zhang S, et al. Study on Landscape Patches Influencing Hillslope Erosion Processes and Flow Hydrodynamics in the Loess Plateau of Western Shanxi Province, China [J]. Water, 2020,12: 320111.

[25] Ludwig J A, Tongway D J, Marsden S G. Stripes, strands or stipples: modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi−arid woodlands, Australia [J]. Catena, 1999,37(1):257−273.

[26] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征 [J]. 北京林业大学学报, 2021,43(3):85−95.
Wang H, Zhang J, Sun R, et al. Effects of different vegetation slope patterns on infiltration and characteristics of runoff and sediment production in the loess area of western Shanxi Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021,43(3):85−95.

[27] Su Y, Zhang Y, Wang H, et al. Effects of vegetation spatial pattern on erosion and sediment particle sorting in the loess convex hillslope [J]. Scientific Reports, 2022,12:141871.

[28] Lou Y, Gao Z, Li Y, et al. Effects of distributions of grass strips on soil erosion in spoil tips [J]. Water, 2022,14(6):913.

[29] Callegaro C, Ursino N. Connectivity of niches of adaptation affects vegetation structure and density in self−organized (Dis−Connected) vegetation patterns [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(8): 2589−2594.

[30] Zhang G, Liu G, Zhang P, et al. Influence of vegetation parameters on runoff and sediment characteristics in patterned Artemisia capillaris plots [J]. Journal of Arid Land, 2014,6(3):352−360.

[31] 张　霞,李　鹏,李占斌,等.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究 [J]. 水土保持学报, 2018,32(6):16−21.
Zhang X, Li P, Li Z, et al. Study on temporal and spatial variation of runoff velocity and sediment in the convex hillslope under different vegetation patterns [J] Journal of Soil and Water Conservation., 2018, 32(6):16−21.

[32] 赵　明,杨晓楠,陈攀宇,等.灌木斑块格局对产流及产沙过程的影响 [J]. 应用生态学报, 2020,31(3):735−743.
Zhao M, Yang X, Chen P, et al. Effects of shrub patch pattern on runoff and sediment yield [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(3):735−743.

[33] 赵炯昌,潘岱立,卫　伟,等.植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究 [J]. 生态学报, 2021,41(4):1373−1380.
Zhao J, Pan D, Wei W, et al. Simulation experiment on the influence of vegetation pattern on soil infiltration and water and sediment process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1373−1380.

[34] Shi P, Li P, Li Z, et al. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2022,259:107231.

[35] 郭星星,吕春娟,陈　丹,等.降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2019,33(2):23−29.
Guo X, Lv C, Chen D, et al. Effects of rainfall intensities and slope gradients on runoff and sediment yield on bare iron tailings sand slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):23−29.

[36] 吕春娟,张　徐,毕如田,等.间歇降雨对铁尾砂重构坡面侵蚀水动力学特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2020,36(11):74−85.
Lyu C, Zhang X, Bi R, et al. Effects of intermittent rainfall on hydrodynamics characteristics of erosion on reconstructed slopes of iron tailings [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020,36(11):74−85.

[37] 张馨予,查同刚,张泽宇,等.乌拉山废弃矿区坡长对客土坡面产流产沙与沟蚀特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2022,36(6):8−15.
Zhang X, Zha Tg, Zhang Z, et al. Effects of slope length on the characteristics of runoff and sediment yield and gully erosion on alien soil slopes in the abandoned mining area of wula mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(6):8−15.

[38] 孟铖铖,张会兰,杨坪坪.模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2017,31(2):50−56.
Meng C, Zhang H, Yang P. Effects of simulated vegetation types and spatial patterns on hydrodynamics of overland flow [J] Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):50−56,78.

[39] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征 [J]. 农业工程学报, 2016,32(20):161−170.
Kang H, Wang W, Xue Z, et al. Erosion morphology and runoff generation and sediment yield on ephemeral gully in loess hilly region in field scouring experiment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016,32(20): 161−170.

[40] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征 [J]. 农业工程学报, 2018,34(17):143−150.
Deng L, Zhang L, Fan X, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018,34(17): 143−150.

[41] 彭梦玲,吴　磊,乔闪闪.不同雨强下黄土裸坡水−沙−氮磷流失耦合模拟 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):1109−1116.
Peng M, Wu L, Qiao S. Coupling simulation of runoff−sediment−nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities [J]. China Environmental Science, 2018,38(3):1109−1116.

[42] 陈　鹏,张铁钢,董　智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(9):116−121.
Chen P, Zhang T, Dong Z, et al. The influence of shrub grass pattern on the characteristics of runoff and sediment production in arsenic sandstone areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(9):116−121.

[43] Anderson R L, Rowntree K M, Le Roux J J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion [J]. Catena, 2021,206:105482.

[44] Issa O M, Valentin C, Rajot J L, et al. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi−arid sandy soils [J]. Geoderma, 2011,167−68:22−29.

[45] Liu B, Xie Y, Li Z, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. International Soil and Water Conservation Research,

2020,8(4):430−439.

[46] Lann T, Bao H, Lan H, et al. Hydro−mechanical effects of vegetation on slope stability: A review [J]. Science of The Total Environment, 2024,926:171691.

[47] Mayor A G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands [J]. Water Resources Research, 2008,44:W1042310.

[48] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等.基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数 [J]. 生态学报, 2003,(11):2406−2413.
Chen L, Fu B, Xu J, et al. Landscape pattern recognition method based on "source sink" ecological process−Landscape spatial load comparison index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,(11):2406−2413.

[49] 张乐涛,高照良,李永红,等.黄土丘陵区堆积体边坡对上方来水的侵蚀响应 [J]. 水科学进展, 2015,26(6):811−819.
Zhang L, Gao Z, Li Y, et al. The Erosion Response of Accumulated Slope in Loess Hilly Area to Upstream Water [J]. Advances in Water Science, 2015,26(6):811−819.

[50] Gomi T, Sidle R C, Miyata S, et al. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer [J]. Water Resources Research, 2008,44:W084118.

[51] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? [J]. Earth−Science Reviews, 2012,115(1/2):21−36.

[52] Borges N, Xavier R A, de Souza B I, et al. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2023,48(9):1712−1723.

[53] Tang C, Liu Y, Li Z, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107956.

[54] Bai L, Shi P, Li Z, et al. Effects of vegetation patterns on soil nitrogen and phosphorus losses on the slope−gully system of the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2022,324:116288.

[55] Liu Y, Liu Y, Shi Z, et al. Effectiveness of re−vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi−arid Loess Plateau [J]. Catena, 2020,195:104787.

[56] Fu B, Liu Y, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China [J]. National Science Review, 2023,10(7):033.

[57] Yu W, Jiao J, Chen Y, et al. Seed Removal due to Overland Flow on Abandoned Slopes in the Chinese Hilly Gullied Loess Plateau Region [J]. Land Degradation & Development, 2017,28(1):274−282.

作者简介：张馨予(1999−),四川绵阳人,北京林业大学博士研究生,主要从事流域治理与生态修复研究.发表论文 11 篇.Zhang_xinyu_9@bjfu.edu.cn.