

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.029

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.029

赵佳驹,李鹏,周世璇,等.黄土高原植被恢复年限对坡面缓流减沙效益的水动力机制[J].水土保持学报,2026,40(3):180-189.

ZHAO Jiaju, LI Peng, ZHOU Shixuan, et al. Hydrodynamic mechanism of effects of vegetation restoration duration on slope flow retardation and sediment reduction on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):180-189.

黄土高原植被恢复年限对坡面缓流减沙效益的水动力机制

赵佳驹,李鹏,周世璇,杨旭,黄友奇

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,西安 710048)

摘要: [目的] 降雨径流是黄土高原侵蚀产沙的主要动力,植被通过削减降水产流和增强土壤抗蚀性来提高暴雨侵蚀的抵抗能力,不同恢复年限植被的水土保持作用一直是科学研究和生产实践关注的热点问题。[方法] 以黄土丘陵沟壑典型小流域为对象,选取 4 个植被恢复年限梯度(1、11、15、25 a),通过开展野外放水冲刷试验,系统分析植被恢复年限对坡面径流动力特征及减沙效应的调控规律。[结果] 随恢复年限延长,坡面径流量和产沙量显著下降,径流-泥沙过程趋于平稳;其中恢复 11 a 植被群落的减流效益(36.7%)较好,恢复 25 a 植被群落的减沙效益(95.2%)较好,试验条件下植被的减沙效应(84.1%)均大于减流效应(22.4%)。随恢复年限的增加,径流流速、弗劳德数随恢复年限降低,流速最大降幅达 61%;同时径流的阻力系数和剪切力随恢复年限增加(25 a 较 1 a 增 12.5%~45.1%)。相关分析表明,产沙量与水动力参数的关系随植被恢复年限减弱,但随冲刷强度增强;累积径流能耗与累积剥蚀量呈显著幂函数关系($R^2 > 0.96$),但随着植被恢复年限增加,其相关性减弱。[结论] 研究结果为黄土高原坡面植被恢复和水土流失治理提供科学依据。

关键词: 植被恢复年限; 减流减沙效应; 水动力参数; 径流能耗; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0180-10

Hydrodynamic Mechanism of Effects of Vegetation Restoration Duration on Slope Flow Retardation and Sediment Reduction on Loess Plateau

ZHAO Jiaju, LI Peng, ZHOU Shixuan, YANG Xu, HUANG Youqi

(State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] Rainfall-runoff is the primary driving force of erosion and sediment yield on the Loess Plateau. Vegetation enhances resistance to storm erosion by reducing rainfall-induced runoff generation and improving soil anti-erosion capability. The soil and water conservation effects of vegetation at different restoration stages have been a focus of both scientific research and practical applications. [Methods] This study was conducted in a typical small watershed of the loess hilly-gully region. Four vegetation restoration duration gradients (1, 11, 15, and 25 years) were selected. Field overland flow scouring experiments were carried out to systematically analyze the regulatory patterns of vegetation restoration duration on slope runoff hydrodynamic characteristics and sediment reduction effects. [Results] With increasing restoration duration, both slope runoff volume and sediment yield decreased significantly, and the runoff-sediment process became more stable. The vegetation community restored for 11 years showed a relatively good runoff reduction benefit (36.7%), while the vegetation community restored for 25 years exhibited an excellent sediment reduction benefit (95.2%). Under experimental conditions, the sediment reduction effect (84.1%) was greater than the runoff reduction effect (22.4%). As restoration duration increased, runoff velocity and Froude number decreased, with the maximum velocity reduction reaching

收稿日期: 2025-12-08

修回日期: 2026-01-20

录用日期: 2026-01-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2443228); 陕西省技术创新引导计划(基金)项目(2024QY-SZX-27); 西安理工大学博士创新基金项目(104-252072401)

第一作者: 赵佳驹(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: 13991350039@163.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。E-mail: lipeng74@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

61%。Meanwhile, the resistance coefficient and shear stress of runoff increased with restoration duration (increasing by 12.5% to 45.1% at 25 years compared with 1 year). Correlation analysis indicated that the relationship between sediment yield and hydrodynamic parameters weakened with longer restoration duration but strengthened with increasing scouring intensity. A significant power function relationship ($R^2 > 0.96$) was found between cumulative runoff energy consumption and cumulative sediment detachment; however, this correlation weakened with increasing vegetation restoration duration. [Conclusion] The findings of this study provide a scientific basis for vegetation restoration and soil erosion control on slopes in the Loess Plateau.

Keywords: vegetation restoration duration; runoff and sediment reduction effects; hydrodynamic parameters; runoff energy consumption; Loess Plateau

Received: 2025-12-08

Revised: 2026-01-20

Accepted: 2026-01-31

Online(www.cnki.net): 2026-03-13

黄土高原是世界上水土流失严重的地区之一,也是我国水土保持治理的重点区域^[1]。长期以来,强烈的侵蚀作用不仅破坏地表,还导致土地退化、土壤肥力损失,制约着区域经济社会可持续发展^[2]。为遏制严重的水土流失,自20世纪70年代以来,黄土高原地区开始实施一系列水土保持与生态修复工程,尤其是1999年开始实施的“退耕还林(草)工程”^[3],使得区域植被覆盖度大幅增加,坡面产流、产沙量明显下降,水土流失得到有效控制^[4]。植被恢复通过增加入渗、提高土壤稳定性、削弱坡面径流动能等途径起到减流减沙的作用^[5-6]。随着全球气候变化加剧,黄土高原极端暴雨事件频发,极端强降雨往往造成严重水土流失和泥沙输移^[7],在这种极端降雨条件下,植被,尤其是不同恢复阶段的植被,对坡面径流动力过程的调控表现出高度的复杂性。深入认识植被恢复条件下坡面水动力特征的演变规律,是揭示退耕还林(草)工程“缓流减沙”物理机制的关键,对于优化植被配置、科学评估生态恢复效果及提升水土保持效益具有重要意义。

近年来,研究人员从不同角度探讨植被特征对产流产沙过程的影响。YANG等^[8]通过模拟降雨试验探究30组灌草覆盖度与枯落物量组合条件下的径流侵蚀特征,植被覆盖可显著减轻侵蚀性降雨引发的坡面水力侵蚀。石晨雨等^[9]以吕二沟流域为研究对象,在控制植被覆盖率(40%)的条件下设置多种典型植被配置情景,结合SWAT模型和改进泥沙连通性指数(ICZQ)分析不同植被格局的减沙效应,优化植被空间配置可调控泥沙连通性,从而增强减沙效益;SUN等^[10]通过模拟降雨试验,核心探究降雨强度、坡度、植被类型及枯落物对坡面径流和土壤产沙率的影响,枯落物通过直接覆盖土壤表面,在拦截降雨、减缓径流速度、降低径流侵蚀能力方面发挥显著作用。

在坡面水动力学研究方面,国内外学者主要以植被结构特征与水流阻力之间的关系为切入点,分析不同植被属性对水流能量和紊动特征的影响^[11]。已有研究^[12-13]表明,植被覆盖度及形态特征能够显著增加土壤表面粗糙度,增大水流阻力,进而减缓坡面径流速度;张宽地等^[14]采用坡面定床阻力试验,系统研究6种不同粗糙度和5种坡度下坡面薄层水流动力特征,结果表明,水流弗劳德数与单宽流量和坡度均呈幂函数关系,阻力系数与单宽流量呈幂函数关系,而与雷诺数呈反比关系。张祎帆等^[15]通过研究不同坡度(5°、10°、15°、20°)和植被盖度(0、15%、30%)条件下坡面薄层水流的水动力变化特征,结果表明,径流剪切力随植被盖度的增加而增大,径流功率反之。植被通过改变坡面粗糙度、调节流体阻力与能量分布,对径流速度、剪切应力和侵蚀能力均产生重要影响。但目前的研究多关注不同植被覆盖及坡度条件下的水动力响应特征以及植被恢复对水沙效益的宏观评价,对植被恢复不同阶段水动力过程的演变规律及其驱动“缓流减沙”效应的内在机理,仍需开展更多的野外观测和模拟试验以进行系统揭示,特别是基于能量视角的定量关系尚不明确。因此,本研究以黄土高原实施退耕还林(草)工程的典型小流域为研究对象,采用野外放水冲刷试验,深入探究不同恢复阶段下植被的减沙机制。本研究旨在:1)揭示不同植被恢复阶段坡面径流与产沙过程及水动力特征的演变规律;2)从能量视角解析径流能耗与泥沙输移之间的内在联系,揭示不同冲刷强度下植被恢复阶段对“水-能-沙”耦合过程的调控作用。本研究的结论可为深入揭示退耕还林(草)工程的减沙机理提供新的理论支撑,并为黄土高原地区植被恢复与生态治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验区位于黄河流域的辛店沟流域与王茂沟流域,位于黄土高原丘 I 区,属于典型的黄土丘陵沟壑地貌(图 1)。其中辛店沟流域面积约为 1.44 km²,位于无定河中游左岸(37°27′~37°32′N,110°15′~110°20′E),海拔 810~1 120 m。该区属半干旱大陆性气候,年平均气温 9.7℃,多年平均降水量 486 mm,其中 72.5% 集中于 6—9 月。流域土壤以耕层较薄的黄绵土和黑垆土为主。流域开展封禁治理 60 多年,流域内常见的人工植被有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、胡桃(*Juglans regia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;天然植被有茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica* auct.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等。

王茂沟小流域作为试验性治理小流域(37°34′~37°36′N,110°20′~110°22′E),海拔 936~1 188 m,流域面积为 5.97 km²,沟壑密度 10.2 km/km²。自 90 年代开始响应中国退耕还林(草)政策,当地主要植被类型调查结果:乔木林主要有油松(*P. tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、旱柳(*Salix matsudana*);经济林主要有苹果树(*Malus pumila*)、杏树(*Prunus armeniaca*)、酸枣树;灌木林主要以小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、沙棘、柠条、胡枝子为主;撂荒地主要植被群落有:茵陈蒿群落、铁杆蒿群落、白羊草群落、早熟禾(*Poa annua*)群落等。

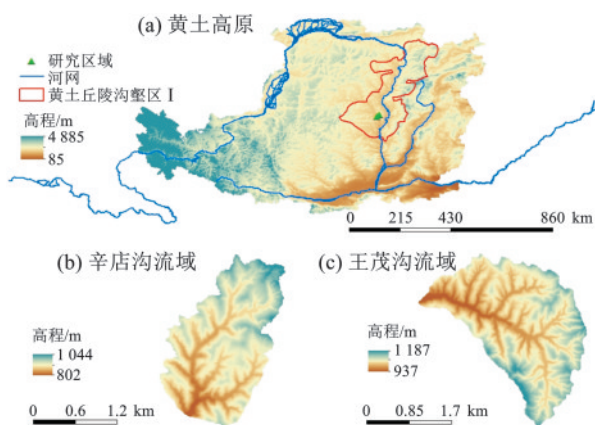


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

1.2 试验设计

基于绥德雨量站 1960 年至今的完整观测资料,依据《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL 44—

2006)^[16]对研究区开展暴雨频率研究,计算得到本区百年一遇条件下短历时(10、20、60 min)的暴雨量分别为 40.2、58.4、77.3 mm,对应的平均瞬时降雨强度为 1.3、2.9、4.0 mm/min。基于上述计算结果,分别采用 4、8、16 L/min 的冲刷流量作为野外模拟径流试验的冲刷强度,确保试验处理能够真实反映区域内典型降雨条件下的坡面来水过程。

本研究基于“空间序列代替时间序列”的原理,通过分析同一区域不同空间位置现存群落的分布特征,推断群落随时间恢复的动态过程。选择不同恢复阶段的坡面搭建径流小区,每个径流小区面积均为 4 m×0.5 m,经过对样地的实地调查,得到坡度值大约为(8°±0.3°)~(9°±0.3°),且考虑到对试验过程的控制和泥沙的采集问题,因而设置径流小区的坡度范围约为 8°~9°。为防止试验过程中坡面水流发生侧渗,四周用 2 mm 厚钢板隔离,并在小区入口安装稳流装置,在小区出口处设置水槽收集坡面径流,在集流槽下方挖出圆坑,用以放置收集泥沙样品的集流桶(图 2)。

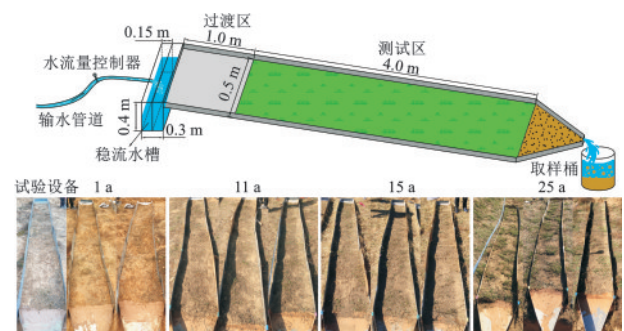


图 2 径流小区装置示意

Fig.2 Diagram of runoff plot setup

分别于小区 1、2、3、4 m 处设置观测断面,以便分段对径流进行观测,每场冲刷试验持续 30 min。分别以 4、8、16 L/min 水量进行冲刷。试验过程中每 1 min 收集 1 次径流泥沙样,每 2 min 测量 4 个断面径流数据。将收集到的泥沙样品静置,再采用烘干法求产沙量。为便于在试验过程中测量,将每个小区地上部分剪掉,保留根系和 5 cm 左右高度的植物茎秆。坡面径流流速观测采用高锰酸钾染色剂示踪法。径流深和径流宽均采用人工直尺测量法。径流深测量值只用于参考,水动力计算中采用的是公式推导值。

1.3 样地植被调查

在试验小区旁边,每种植被群落设置 3 个重复的 2 m×2 m 的植被调查小区,共 125 个,统计调查不同恢复阶段坡面的优势物种、覆盖度及伴生物种,调查结果见表 1。

表1 不同恢复阶段植被组成
Table 1 Vegetation composition in different restoration stages

年限/a	优势种	坡度/(°)	覆盖度/%	伴生物种
1	茵陈蒿	8±0.3	15±2.7	沟羊茅、猪毛蒿、平车前
11	铁杆蒿	9±0.1	73±5.6	沟羊茅、猪毛蒿、碱菀、酸枣、地角儿苗
15	白羊草	8±0.2	86±8.2	铁杆蒿、兴安胡枝子、猪毛蒿、蒲公英
25	兴安胡枝子	8±0.2	57±6.3	铁杆蒿、兴安胡枝子、白羊草、狗尾草、碱菀、沟羊茅、猪毛蒿、蒲公英

1.4 参数计算

植被减流效益(RRB)、减沙效益(SRB)是用来衡量水土保持措施在控制水土流失方面的表现。

$$RRB = \frac{R_{1yr} - R_{iyr}}{R_{1yr}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_{1yr} 、 R_{iyr} 为恢复年限1 a和*i* a的坡面径流量(*i*=11、15、25)。

$$SRB = \frac{S_{1yr} - S_{iyr}}{S_{1yr}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_{1yr} 、 S_{iyr} 为恢复年限1 a和*i* a的坡面产沙量(*i*=11、15、25)。

径流雷诺数(*Re*)。本研究为放水冲刷试验,径流中含沙量较大,考虑到其对水体运动黏滞性的影响,因此需要根据泥沙颗粒特征推导校正系数用于雷诺数计算,计算公式为:

$$Re = \frac{VR}{\gamma} \quad (3)$$

$$R = \frac{Q_1 - Q_2}{VbT} \quad (4)$$

式中: V 为径流(水流)表面平均流速,m/s; R 为过水断面的水力半径,m; γ 为径流运动黏滞系数[$\gamma = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$]; t 为水温,°C; $Q_1 - Q_2$ 为*T*时间内经过测量断面的水流量,m³; b 为测量断面的水流宽度,m; T 为测量时间间隔,s。

径流弗劳德数(*Fr*)计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度,取值为9.8 m²/s; h 过水断面平均水深,m。

Darcy-Weisbach阻力系数。Darcy-Weisbach系数可以表征坡面流流动时沿程所受阻力大小,计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (6)$$

式中: J 为水力坡度,m/m,这里用坡度的正弦值sin*θ*近似计算。

径流剪切力。径流剪切力是径流沿着坡面运动时,在其运动方向上产生的作用力,计算公式为:

$$\tau = \rho gRJ \quad (7)$$

式中: τ 为径流剪切力,Pa; ρ 为泥沙浑水密度,kg/m³; R 近似为平均水深*h*,m。

径流功率。径流功率表示一定高度的水体顺坡流动时具有的势能,可以描述地表径流侵蚀能力。计算公式为:

$$\omega = \tau V \quad (8)$$

1.5 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据分析、SPSS 27软件进行单因素方差分析,产沙量与水动力参数的交互式Mantel test相关性热图使用R语言进行绘制,其余均采用Origin 2021软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限坡面径流、产沙过程及其减流减沙效益

图3为不同恢复年限坡面在不同冲刷流量下的径流与产沙过程。整体而言,径流量和产沙量均受冲刷流量和恢复年限的双重影响。在相同恢复阶段中,随着冲刷流量的增加,径流和产沙峰值及累积量显著升高。在植被恢复1 a时,4、8、16 L/min冲刷流量下径流量分别为109.593、202.780、459.570 L,产沙量分别为2 016.76、2 704.70、10 825.17 g。随着恢复年限的延长,径流总量和产沙量显著下降,峰值降低同时径流、泥沙过程趋于平缓。这种变化可直接由植被减流、减沙效益指标来进行具体描述(图4),植被恢复过程中减沙效益(平均SRB为84.1%)普遍大于减流效益(平均RRB为22.4%)。在16 L/min流量条件下,产沙峰值从植被恢复1 a的1 022.66 g下降至末期(25 a)的40.97 g,减幅为95.99%,对应的减沙效益指标SRB高达97.2%,明显高于11、15 a阶段(87.3%和90.9%),表明长期恢复植被在较强冲刷流量下依然具有突出的拦沙能力,径流过程由初期的迅速上升逐渐转变为稳定输出。相比之下,减流效益(RRB)对径流的削减能力相对有限。不同恢复阶段间差异明显,其中11 a径流总量最小、植被减流效益较好(36.7%),而25 a产沙量最低、植被减沙效益较好(95.2%)。

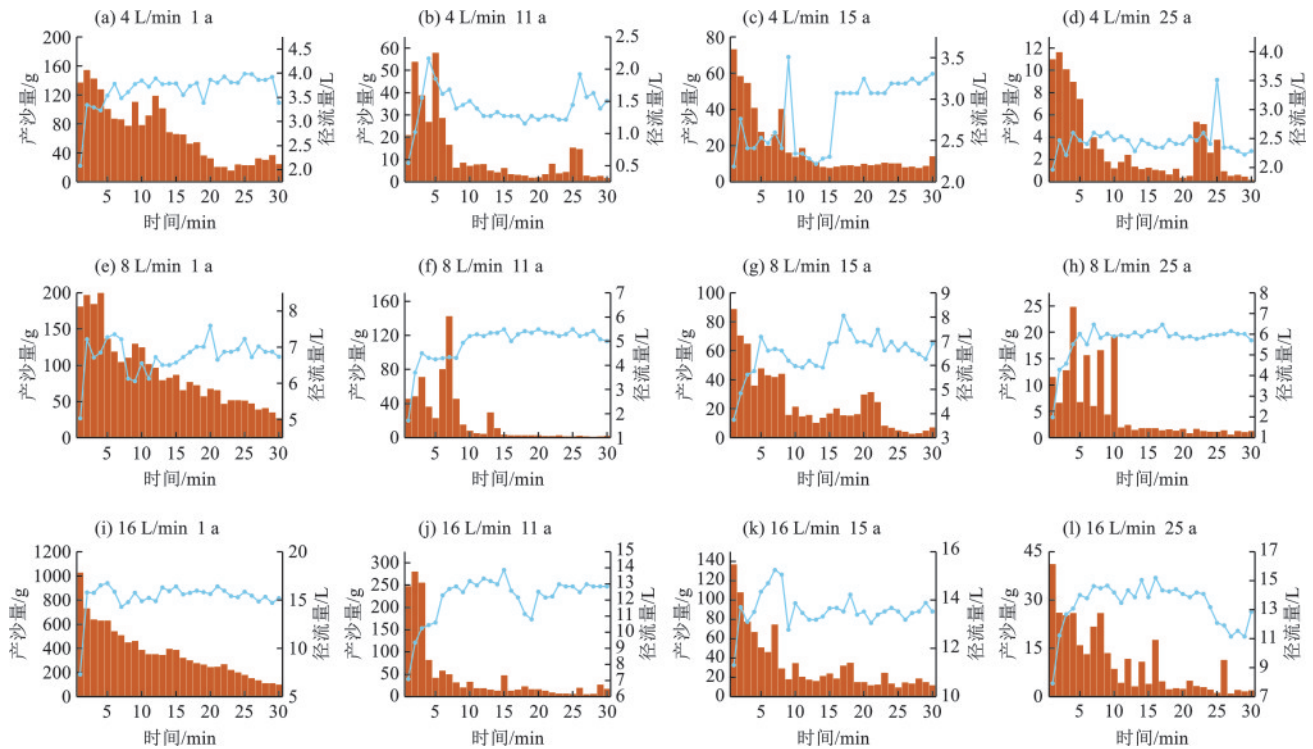


图 3 不同恢复阶段在不同冲刷流量下产流、产沙过程

Fig.3 Runoff and sediment processes in different restoration stages under different scouring discharges

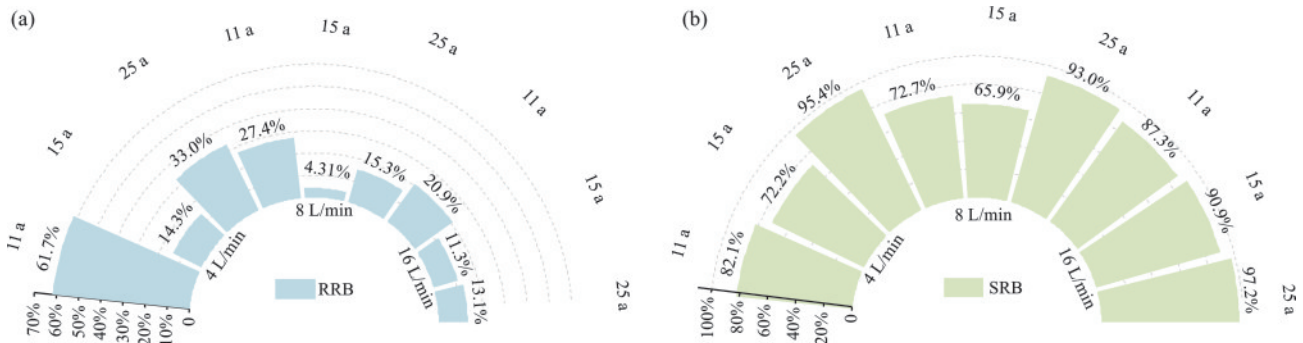


图 4 不同冲刷流量和恢复年限下 RRB 和 SRB

Fig.4 RRB and SRB under different scouring discharges and restoration durations

2.2 不同恢复年限下坡面水动力变化特征

表 2 为植被恢复的不同阶段在不同冲刷流量下的动力参数的变化情况。平均径流速度随恢复年限增加总体下降,在高流量(16 L/min)条件下呈现 25 a < 15 a < 11 a < 1 a 的规律,恢复不同阶段流速具有显著性差异($p < 0.05$)。径流弗劳德数随恢复年限显著减小,而雷诺数主要受冲刷流量影响。在不同冲刷流量条件下,同一恢复年限的径流功率表现出显著增大的特征($p < 0.05$)。在冲刷流量为 8、16 L/min 的条件下,径流阻力系数(f)随恢复年限增加总体呈上升趋势,到植被恢复后期 f 值显著大于植被恢复前期($p < 0.05$),并且冲刷流量越大时径流阻力系数越大。当冲刷流量为 16 L/min 时,恢复 25 a 的径流剪切力显著高于前中期,且随冲刷流量增大而增加。

2.3 不同冲刷流量下植被恢复阶段对水动力-产沙相关性的影响

图 5 为不同冲刷流量下,各恢复阶段坡面水动力参数之间的相关关系,并基于 Mantel 检验分析产沙量与主要水力参数的相关性特征。总体而言,产沙量与水动力参数之间的相关关系受冲刷流量与植被恢复阶段的双重影响,随着冲刷流量增大,产沙量与各水动力参数的相关性普遍增强。在冲刷流量为 4 L/min 时,各恢复阶段产沙量与径流量 R 均表现出显著的正相关($p < 0.05$),且相关系数表现出 11 a > 15 a > 1 a > 25 a,表明恢复 11 a 阶段的径流对产沙的驱动作用最为显著。当冲刷流量增至 8 L/min 时,产沙量与水动力参数的相关性明显增强,且恢复 11 a 阶段表现最为突出。其

中,产沙量与 Re 呈极显著正相关 ($r=0.48, p<0.001$),表明在植被恢复的 11 a 阶段,径流紊动程度成为影响产沙过程的关键因子。在高冲刷强度条件(16 L/min)下,恢复 1 a 阶段产沙量与水动力参数的相关性最强其中与弗劳德数 Fr 的相关性系数 r 为 0.74,表明在高速流条件下,水流流态及惯

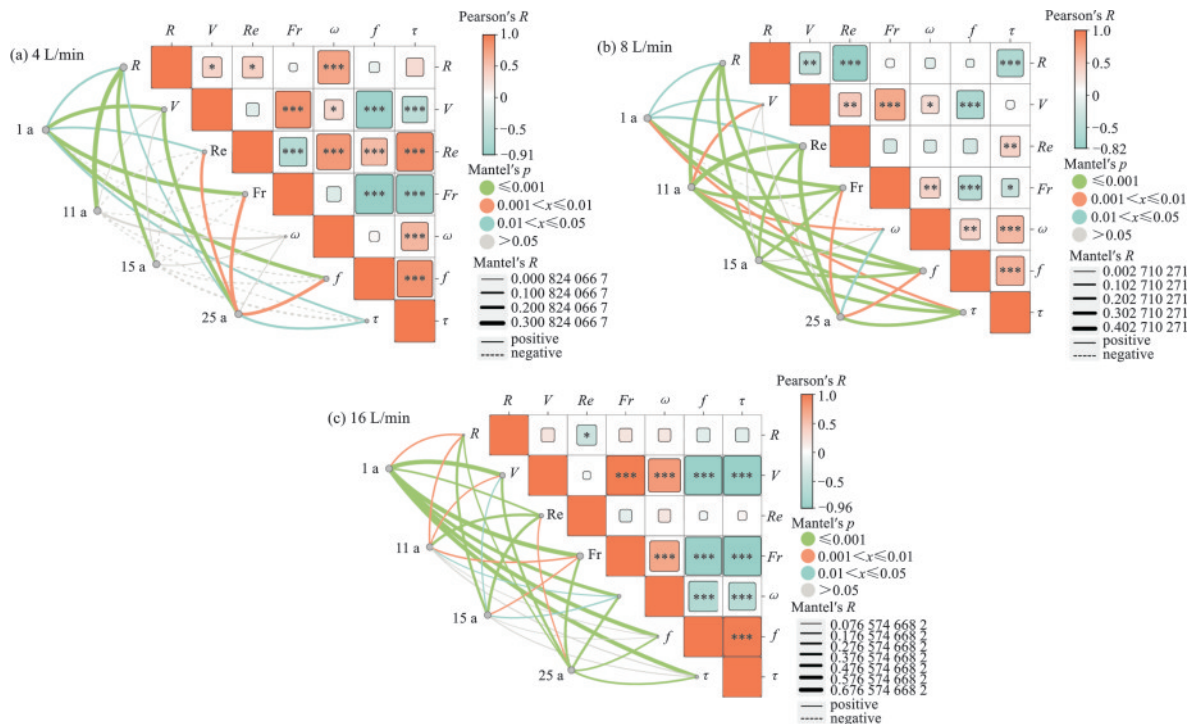
性力主导坡面侵蚀过程。与此同时,产沙量与雷诺数 (Re)、弗劳德数 (Fr)、径流功率 (ω)、阻力系数 (f)、剪切力 (τ) 的相关性均显著增强,其中径流功率 (ω) 与产沙量在 16 L/min 的冲刷流量下呈中等程度的相关性 ($r=0.54$),而其在低流量(4、8 L/min)下的相关性极低 ($r\approx 0$)。

表 2 植被恢复不同阶段在不同冲刷流量下的水动力参数

Table 2 Hydrodynamic parameters under different vegetation restoration stages and scouring discharges

冲刷流量/ (L·min ⁻¹)	恢复年 限/a	平均流速/ (m·s ⁻¹)	雷诺数	弗劳德数	径流功率/ (N·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	阻力系数	剪切力/Pa
4	1	0.24±0.07Bb	409.46±46.87Bb	1.57±0.14Ba	0.79±0.09Ab	0.46±0.07Bb	3.32±0.42Bb
	11	0.21±0.12Cb	290.72±16.31Cc	1.84±0.12Aa	0.44±0.25Cc	0.37±0.05Bb	2.10±0.07Cc
	15	0.26±0.13Aa	432.67±90.76ABb	1.95±0.27Aa	0.72±0.15Ab	0.35±0.13Bc	2.86±0.74Bc
	25	0.15±0.12Db	464.34±27.80Ab	0.85±0.13Cb	0.63±0.04Bc	1.65±0.50Ab	4.34±0.60Ab
8	1	0.22±0.11Bc	301.64±9.08Dc	1.59±0.13Aa	0.58±0.17Dc	0.45±0.07Cb	2.67±0.17Dc
	11	0.26±0.17Aa	588.89±32.98Ab	1.66±0.24Ab	1.02±0.57Ab	0.47±0.08Cb	3.96±0.39Bb
	15	0.20±0.07Ca	416.90±22.60Cb	1.35±0.67Bb	0.65±0.35Cc	1.37±0.14Ba	3.22±0.17Cb
	25	0.18±0.14Aa	465.66±3.15Bb	1.05±0.12Ca	0.76±0.01Bb	2.36±0.68Ab	4.24±0.38Ab
16	1	0.28±0.18Aa	689.69±63.11Ba	1.58±0.19Aa	1.33±0.12Aa	0.76±0.13Ba	4.69±0.59Ba
	11	0.27±0.21Ba	676.45±55.03Ba	1.55±0.18Ab	1.26±0.36Ba	0.84±0.18Ba	4.74±0.47Ba
	15	0.24±0.01Cb	751.11±22.80Aa	1.28±0.09Bb	1.18±0.36Ca	1.08±0.15Bb	4.95±0.30Ba
	25	0.11±0.09Dc	670.75±48.11Ba	0.43±0.05Cc	1.04±0.74Da	9.81±2.54Aa	9.46±0.86Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示参数在不同恢复年限间存在显著差异($p<0.05$);不同小写字母表示参数在不同冲刷强度间存在显著差异($p<0.05$)。



注:*表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

图 5 不同冲刷流量下产沙量与水动力参数的交互式 Mantel test 相关性热图

Fig.5 Correlation heatmap of interactive Mantel test between sediment yield and hydrodynamic parameters under different scouring discharges

2.4 基于径流能耗的坡面水-能-沙关系分析

图 6 对不同恢复阶段和不同冲刷流量条件下的累积径流能耗和累积剥蚀量进行函数拟合发现,二者呈良好的幂函数关系,拟合方程为 $y=ax^b$ (式中: y 为累积剥蚀量; x 为累积径流能耗),且拟合方程的判定系数(R^2)均在 0.90 以上。从图 6 可以看出,在恢复年限为 1 a 的坡面上累积剥蚀量与累积径流能耗在不同冲刷流量下呈现幂函数规律变化,且拟合决定系数(R^2)均为 0.99,在所有恢复阶段中拟合效果最佳。随着恢复年限的增加,植被的数量和种类也随之增加,径流累积能耗与土壤累积剥蚀量间的关

系逐渐减弱。土壤累积剥蚀量随恢复年限的增大呈减小的趋势,1 a 时各流量下累积土壤剥蚀量明显最高。在恢复阶段为 1、11 a 时,拟合方程中系数 a 随着冲刷流量增大而增大,反映相同累积径流能耗条件下坡面土壤的剥蚀强度水平。恢复年限为 25 a 时, a 的平均值为 2.46,较 1 a ($a=20.11$)、11 a ($a=35.88$)、15 a ($a=22.97$),分别降低 87.77%、93.14% 和 89.29%。系数 b 表征累积剥蚀量随累积径流能耗增加的增长速率,本研究中系数 b 为 0.24~0.73, b 值越大说明每增加相同的累积径流能耗,累积剥蚀量的增量越大。

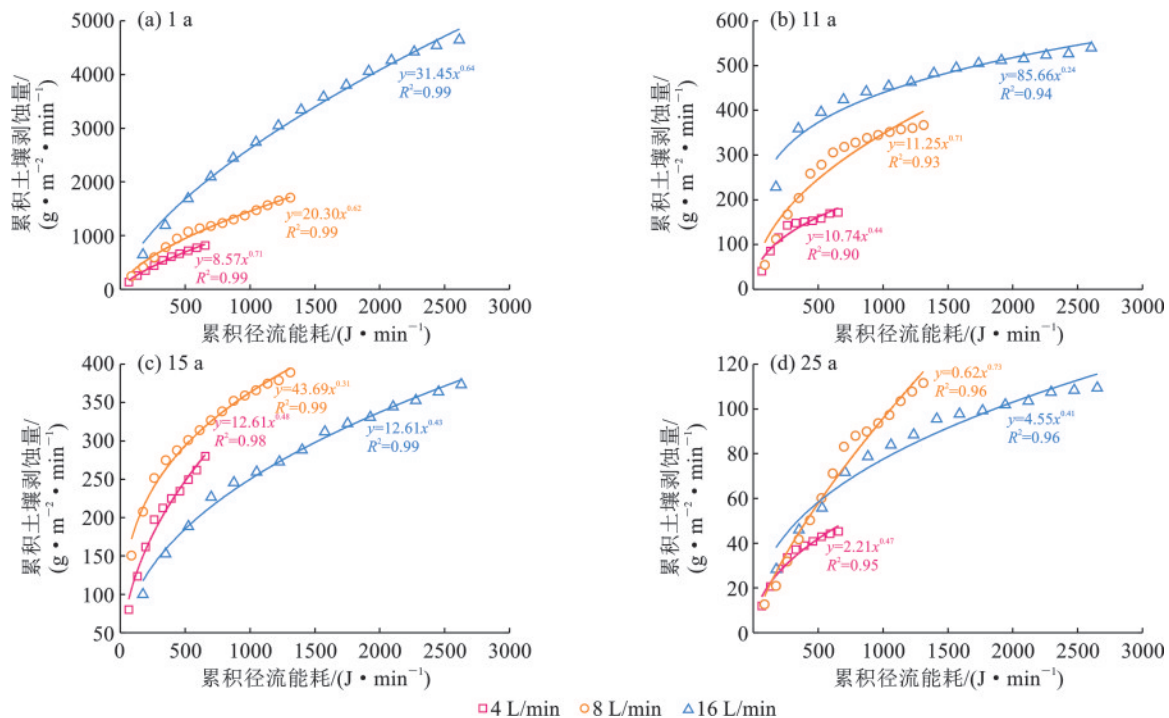


图 6 累积径流能耗与累积剥蚀量关系拟合

Fig.6 Fitted relationship between cumulative runoff energy consumption and cumulative erosion amount

3 讨论

3.1 植被恢复阶段对坡面径流-产沙过程的调控影响

本研究表明,随着植被恢复年限从 1~25 a 过程中,坡面径流总量逐渐减小、产沙量显著下降,且径流、泥沙过程由波动型向平稳型转变(图 3),此结果与 ZHANG 等^[17]的研究结果一致。然而,在不同冲刷流量条件下,植被各恢复阶段的减流、减沙效应表现出差异:恢复 11 a 的坡面径流洪峰和平均流量最小,减流效应最显著;而恢复 25 a 的坡面产沙峰值和平均产沙量最小,减沙效应最强(图 3、图 4)。同一区域的研究^[18]表明,11 a 阶段直根系植物(如铁杆蒿)具有较大的根径和较高的根系表面积密度(RSD),尤其在 20~60 cm 土层,显著增强土壤抗剪强度与稳定性,而 15 a 阶段以须根系植物(如白羊草)为主,虽具有更高的根尖数(Tips)和根长密度

(RLD),有利于水分吸收,但在削弱坡面径流侵蚀方面的效果相对较弱。在植被恢复过程中,植被覆盖度与物种丰富度增加(表 1)显著提高地表糙率^[19],土壤结构改善、团聚体稳定性增强,从而有效提高土壤抗蚀性^[20]。植被恢复显著增强土壤入渗性能^[21],洪艳艳^[22]对黄土高原 10 个不同小流域中植被恢复对土壤特性的影响研究表明,植被恢复提高各层土壤的饱和导水率,从而显著增加坡面土壤入渗能力,使径流量随植被恢复而减小。NIU 等^[23]、BAI 等^[24]的研究结果表明,植被恢复对减沙的促进作用普遍强于减流效应,与本研究结果相符。植被恢复过程中,覆盖度增加及腐殖质层与根系的增强改善土壤稳定性,显著降低泥沙输移^[25]。

3.2 植被恢复对径流能耗与泥沙输移耦合关系的影响

坡面径流和土壤侵蚀是土地退化的主要驱动

力^[26],而土壤侵蚀本质上是水流克服土体阻力所进行的能量消耗过程^[27]。通过拟合累积径流能耗与累积剥蚀量($y=ax^b$)来量化不同恢复阶段及冲刷流量条件下的侵蚀能量与泥沙产量关系,其中参数 a 和 b 分别反映坡面剥蚀的强度和速率。其中, a 值在1、11 a恢复阶段随冲刷流量增大而增大,而恢复25 a阶段显著减小。恢复1 a时 b 值在不同流量下均较大,表明早期坡面产沙对径流能耗变化高度敏感,而后期二者相关性减弱。随着植被恢复推进,覆盖度逐渐增加,地表植被和根系不仅保护土壤免受雨滴冲击,还改善坡面结构,增强土壤稳定性,从而抑制泥沙流失^[28-29]。白秀梅等^[30]通过对关帝山4种植被恢复类型和撂荒地(对照)土层土壤抗蚀性进行研究,结果表明,植被恢复使土壤团聚体的分散率降低,团聚度增加,土壤结构大大改善,土壤抗蚀性显著增强。植被恢复对坡面产、输沙过程的调控本质上源于对径流水动力特征的改变,坡面流速是反映水动力强度的关键指标,也是控制土壤侵蚀速率的重要因子^[31]。顾朝军^[32]研究指出,植被恢复显著降低坡面流速、弗劳德数,与本研究的结果一致。随着植被恢复年限增加,土壤体积质量降低、孔隙度增加,增强土壤入渗与水分滞留能力^[33],进一步减弱坡面径流的动能,高流量(16 L/min)条件下,径流功率随恢复推进而减小,而径流阻力系数逐渐增大,反映地表糙率在植被恢复后期显著上升。Mantel检验结果表明,水动力参数与产沙量的相关性受冲刷流量和植被恢复共同影响,高流量条件下径流功率成为主导产沙参数,与陈凯等^[34]和苏远逸等^[35]研究结果一致。李鹏等^[36]的系统试验进一步显示,不同坡度条件下,单宽径流能耗与单宽输沙率呈线性关系。根据能量守恒定律,植被恢复的发展可调控能量转移至土壤剥蚀,进而影响产沙。地表植被覆盖度的增大可明显控制水土流失^[37-38],植被冠层可有效降低雨滴下落动能保护土壤减少侵蚀^[39]。植被恢复调控水-能-沙耦合关系,通过水动力调控阻断能量向泥沙的高效传递,实现持续稳定的减沙效应。

3.3 研究不足与展望

本研究虽明确不同植被恢复年限的缓流减沙效应及水动力特征,但受试验设计和观测条件限制,仍存在不足:未系统测定各恢复年限样地的土壤基本理化性质(如体积质量、孔隙度、团聚体稳定性等),无法结合土壤自身性质解释径流-产沙过程的差异,削弱植被与土壤协同调控机制的分析深度;植被调查仅聚焦地上部分的优势种、覆盖度等特征,未测定根系关键参数(如根长密度、根径分

布、根系表面积密度等),而根系是增强土壤抗蚀性、调控坡面糙率的核心因子,不能较好地揭示“地上-地下植被结构”协同缓流减沙的共同作用。针对上述不足,未来研究将重点开展的工作:一是优化试验设计,增设裸地对照小区;二是考虑土壤理化性质与植被根系,完善相关数据,深化缓流减沙内在机制解析。

4 结论

1)植被恢复显著影响坡面径流与产沙过程,随着恢复年限延长,径流总量和产沙量逐渐下降,径流、泥沙变化由波动趋于平稳。其中,恢复11 a坡面减流效应最明显,恢复25 a减沙效应最大。

2)植被恢复降低流速和弗劳德数,增加地表糙率与阻力系数,从而增强径流剪切力并影响产沙过程。在高流量条件下,水动力参数与产沙量的相关性增强,植被恢复11 a阶段径流紊动(Re)对产沙影响最大,植被恢复1 a阶段高能流条件下弗劳德数(Fr)和径流功率(ω)成为主导因素。

3)从能量视角看,累积土壤剥蚀量和累积径流能耗关系可用幂函数 $y=ax^b$ 较好地拟合,且在1 a恢复阶段拟合效果最佳。随着植被恢复年限增加,二者相关性减弱,土壤抗蚀能力增强,植被恢复阻断径流能量向泥沙输移的高效传递。

参考文献:

- [1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017(1):11-19.
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017(1):11-19.
- [2] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(20):7398-7409.
- [3] 李金梦,祝宏辉,胡芳榕,等.“退耕还林还草”工程对干旱区生态系统服务的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):298-307.
LI J M, ZHU H H, HU F R, et al. Effects of Grain for Green Program on ecosystem services in arid regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 298-307.
- [4] 朱青,周自翔,刘婷,等.黄土高原植被恢复与生态系统水土保持服务价值增益研究:以延河流域为例[J].生态学报,2021,41(7):2557-2570.
ZHU Q, ZHOU Z X, LIU T, et al. Vegetation restora-

- tion and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe watershed, Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2557-2570.
- [5] 赵梦杰, 姚文艺, 王金花, 等. 植被覆盖度对黄土高原地区土壤入渗及产流影响的试验研究[J]. *中国水土保持*, 2015(6): 41-43.
ZHAO M J, YAO W Y, WANG J H, et al. Experimental study on influence of vegetation coverage to soil infiltration and runoff-producing of the Loess Plateau region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015 (6) : 41-43.
- [6] 李姜瑶, 缪晓星, 王延秀, 等. 西宁盆地黄土区不同草本植物和坡形条件下坡面产流产沙特征[J]. *盐湖研究*, 2022, 30(1): 33-45.
LI J Y, MIAO X X, WANG Y X, et al. The characteristics of runoff and sediment yield on slope surface under different herbs and slope shapes in loess regions of Xining basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, 30(1): 33-45.
- [7] 张昕晗, 赵文婷, 焦菊英, 等. 1960—2023年黄土高原极端降水事件时空演变特征[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(7): 1153-1166.
ZHANG X H, ZHAO W T, JIAO J Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of extreme precipitation events on the Loess Plateau from 1960 to 2023[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(7): 1153-1166.
- [8] YANG C X, SUN X M, CEN Y D, et al. Soil erosion rate of grass-shrub vegetation and litter under simulated rainfall conditions: An interpretable modeling method for nonlinear prediction[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(7) : e073624.
- [9] 石晨雨, 秦伟, 谢瑾如, 等. 基于SWAT和连通性指数的小流域植被格局减沙效应研究[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(4): 33-44.
SHI C Y, QIN W, XIE J R, et al. Study on sediment reduction effect of vegetation pattern in small watershed based on SWAT and connectivity index [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(4): 33-44.
- [10] SUN J M, YU X X, LI H Z, et al. Simulated erosion using soils from vegetated slopes in the Jiufeng Mountains, China[J]. *Catena*, 2016, 136: 128-134.
- [11] 刘西乐, 张宽地, 杨婕, 等. 斑块状植被覆盖下坡面流水动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6): 122-131.
LIU X L, ZHANG K D, YANG J, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow under patchy vegetation cover[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(6): 122-131.
- [12] 杨洁, 金继明, 邵进, 等. 黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 258-266.
YANG J, JIN J M, SHAO J, et al. Vegetation restoration and its impact on runoff in typical areas of middle Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 258-266.
- [13] FELDMANN D, LAUX P, HECKL A, et al. Near surface roughness estimation: A parameterization derived from artificial rainfall experiments and two-dimensional hydrodynamic modelling for multiple vegetation covers[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: e128786.
- [14] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 182-189.
ZHANG K D, WANG G Q, SUN X M, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 182-189.
- [15] 张伟帆, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被覆盖度对粉砂质河岸带坡面流侵蚀水动力特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2488-2498.
ZHANG Y F, ZHAO Q H, DING S Y, et al. Effects of slope gradient and vegetation coverage on hydrodynamic characteristics of overland flow on silty riparian slope [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (8) : 2488-2498.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL 44—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects SL 44—2006[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2006.
- [17] ZHANG G, AN C G, WANG C F, et al. Numerical modeling of effects of vegetation restoration on runoff and sediment yield on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2024, 247: e108501.
- [18] ZHOU S X, LI P, ZHANG X M, et al. Runoff and erosion reduction benefits of vegetation during natural succession on fallow grassland slopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: e176211.
- [19] 张升堂, 梁博, 张楷. 植被分布对地表糙率影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 45-48.
ZHANG S T, LIANG B, ZHANG K. Effects of vegetation distribution on earth surface roughness[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 45-48.
- [20] MA R T, HU F N, XU C Y, et al. Vegetation restoration enhances soil erosion resistance through decreasing the net repulsive force between soil particles[J]. *Catena*, 2023, 226: e107085.
- [21] 穆兴民, 刘卓昕, 王双银, 等. 植被恢复对黄土丘陵沟壑区产流模式的影响研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(9): 24-30.
MU X M, LIU Z X, WANG S Y, et al. Study on the effect of vegetation restoration on runoff pattern in gullied rolling area[J]. *Yellow River*, 2023, 45(9): 24-30.
- [22] 洪艳艳. 黄土高原植被恢复对地表产流机制的影响研究

- [D].杭州:浙江大学,2020.
- HONG Y Y. Study on the influence of vegetation restoration on surface runoff mechanism in Loess Plateau [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [23] NIU L L, HU J F, LI P F, et al. The effect of vegetation restoration on erosion processes and runoff on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Water*, 2025, 17(16): e2411.
- [24] BAI R H, WANG X Z, LI J W, et al. The impact of vegetation reconstruction on soil erosion in the Loess plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 363: e121382.
- [25] HU J F, GAO P, MU X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J]. *Catena*, 2019, 173: 234-245.
- [26] TUO M Y, QIAO H L, XU G C, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff and soil erosion on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2025, 260: e109487.
- [27] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 71-76.
- WEI X, LI X G, LI Z B. Experimental study on variable characteristics of runoff energy in convex composite slopes of loessial soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 71-76.
- [28] VANNOPPEN W, VANMAERCKE M, DE BAETS S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [29] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J]. *水利学报*, 2019, 50(9): 1078-1085.
- YANG C X, YAO W Y, XIAO P Q, et al. Effects of vegetation cover structure on runoff and sediment yield and its regulation mechanism [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [30] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 79-84.
- BAI X M, HAN Y Z, GUO H Q. Study on soil anti-erodibility of different vegetation restoration types in Guandi Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 79-84.
- [31] 陈浩,王豆豆,崔钦凯,等.草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(15): 6841-6853.
- CHEN H, WANG D D, CUI Q K, et al. Effects of canopy and root of grassland vegetation on erosion processes of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6841-6853.
- [32] 顾朝军.黄土区土壤水文物理特性及流域产汇流机制变化对植被恢复的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- GU C J. Response of soil hydrological and physical characteristics and watershed runoff generation and concentration mechanism changes to vegetation restoration in loess area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [33] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 713-722.
- TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 713-722.
- [34] 陈凯,张祎,王兴,等.宁南山区坡面与覆被特征对侵蚀水动力及产沙过程的耦合影响[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(11): 2044-2057.
- CHEN K, ZHANG Y, WANG X, et al. Coupled effects of slope and vegetation cover characteristics on hydrodynamic erosion forces and sediment yield processes in the southern Ningxia mountainous area [J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(11): 2044-2057.
- [35] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 32-39.
- SU Y Y, LI P, LI Z B, et al. Effects of slope vegetation patterns on energy regulation and water-sediment response relations in slope-gully system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 32-39.
- [36] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 444-449.
- LI P, LI Z B, ZHENG L Y. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 444-449.
- [37] ZHAO W J, ZHANG K D, CEN Y D, et al. Response law and prediction model of soil erosion considering vegetation and litter cover under different rainfall intensities in the Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 251: e106559.
- [38] YANG Z Q, ZENG L J, GUO J Y, et al. Spatial-temporal variation and correlation between vegetation coverage and soil conservation of Ten Kongdui watershed in the Yellow River basin[J]. *Environmental Research Communications*, 2024, 6(5): e055003.
- [39] ALIVIO M B, BEZAK N, MIKOŠ M. The size distribution metrics and kinetic energy of raindrops above and below an isolated tree canopy in urban environment [J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2023, 85: e127971.