北方干旱区岩质高陡边坡植生孔修复高效集水技术改进试验

李远航[1], 赵 天[2], 温泽华[3], 陈雨琦[3], 卢佳驹[3], 陈亚恒[1], 闫 丰[1]
(1.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071001; 2.河北科技大学 环境科学与工程学院, 河北 石家庄 050000; 3.河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘 要: [目的]通过人工模拟短时弱降雨试验,分析不同引流槽水平角和内切角下的集水效能、孔间集水量均匀性及其对雨强变化的响应,旨在为北方干旱区岩质高陡边坡植生孔修复的集水优化提供试验依据和工程参考。[方法]以河北省馒头山矿区高陡岩质边坡为试验对象,构建"集水装置-引流槽-植生孔"协同集水体系以提升植生孔集水量,并采用人工模拟降雨试验评价其集水效果。在统一开槽规格(3 mm×40 mm)条件下,设置不同水平角(H)和内切角(I)的引流槽处理,以3,4,5 mm/h共3种降雨强度进行对比试验,采用降水利用率、孔间变异系数和线性混合效应模型分析技术的集水效果。[结果]H45_I30组合综合性能最优,平均利用率49.54%;在5 mm/h雨强下利用率峰值达51.84%,为对照组的3.1倍。模型分析显示,H45_I30对降雨响应最敏感,交互项系数+85.50,有效平衡了槽体有效通流比与开槽时岩体破碎对槽体结构的破坏。植生孔集水量的孔间变异系数由对照组的57.01%降至42.37%,显著提升了水分补给均匀性。[结论]构建的集水装置-引流槽-植生孔协同集水系统实现了降水利用模式由被动接收向主动捕获转变,具有一定的应用潜力。

关键词: 植生孔覆绿技术; 岩质边坡生态修复; 植生孔协同集水系统; 线性混合效应模型(LMM)
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0157-12 **中图分类号:** X171.4, TD88

文献参数: 李远航, 赵天, 温泽华, 等.北方干旱区岩质高陡边坡植生孔修复高效集水技术改进试验[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 157-168. Li Yuanhang, Zhao Tian, Wen Zehua, et al. Experimental study on improvement of efficient rainwater harvesting technology for vegetation-hole restoration of steep rocky slopes in arid regions of northern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 157-168.
DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.025 **CSTR:** 32312.14.stbctb.2026.05.025

Experimental study on improvement of efficient rainwater harvesting technology for vegetation-hole restoration of steep rocky slopes in arid regions of northern China

Li Yuanhang[1], Zhao Tian[2], Wen Zehua[3], Chen Yuqi[3], Lu Jiaju[3], Chen Yaheng[1], Yan Feng[1]
(1.*College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071001, *China*; 2.*College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei* 050000, *China*; 3.*College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071001, *China*)

Abstract: [Objective] The water collection efficiency, inter-hole water collection uniformity, and their responses to rainfall intensity variation under different horizontal angles and internal cutting angles of diversion grooves were analyzed through artificially simulated short-duration, low-intensity rainfall experiments in order to provide an experimental basis and engineering reference for optimizing water collection for vegetation-hole restoration on steep rocky slopes in arid regions of northern China. [Methods] Taking the high-steep rocky slope in the Mantoushan mining area, Hebei Province, as the research object, this study constructed a synergistic water

收稿日期: 2026-02-12 **修回日期:** 2026-04-27 **采用日期:** 2026-04-30
资助项目: 河北省自然资源厅项目"燕山地区典型矿山生态修复示范"(454-0601-YBN-ZO4B)
第一作者: 李远航(2001—),男(汉族),河北省邢台市人,硕士研究生,研究方向为矿山生态修复技术。Email:184799669@qq.com。
通信作者: 陈亚恒(1973—),男(汉族),河北省保定市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事土地整治及生态修复等方面的研究。Email:chenyaheng@126.com。
闫丰(1987—),男(汉族),河北省保定市人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事矿山生态修复等方面的研究。Email:yanfeng@hebau.edu.cn。

collection system integrating "water collector-diversion groove-vegetation hole" to increase the amount of water collected by vegetation holes, and evaluated its water collection performance through artificially simulated rainfall experiments. Under uniform groove dimensions (3 mm×40 mm), diversion groove treatments with different horizontal angles (H) and internal cutting angles (I) were established, and comparative experiments were conducted under three rainfall intensities of 3, 4 and 5 mm/h. Precipitation use efficiency, the inter-hole coefficient of variation and a linear mixed-effects model were used to analyze the water collection performance of the proposed technology. [Results] The H45_I30 combination exhibited the optimal comprehensive performance, with an average precipitation use efficiency of 49.54%. Under a rainfall intensity of 5 mm/h, the peak efficiency reached 51.84%, which was 3.1 times that of the control group. Model analysis showed that H45_I30 had the highest sensitivity to rainfall, with an interaction term coefficient of +85.50, and effectively achieved a balance between the effective flow-area ratio of the groove and structural damage caused by rock fragmentation during slotting. The inter-hole coefficient of variation in the amount of water collected by the vegetation holes decreased from 57.01% in the control group to 42.37%, significantly improving the uniformity of water replenishment. [Conclusion] The constructed synergistic water collection system integrating the water collector, diversion groove and vegetation hole enables a shift in precipitation utilization from passive reception to active capture, and has practical application potential.

Keywords: vegetation-hole greening technology; ecological restoration of rocky slopes; vegetation-hole synergistic water collection system; linear mixed-effects model (LMM)

中国矿产资源的开发推动了经济社会的快速发展,但长期的矿山开采活动,特别是露天开采,严重破坏了原有的地形地貌与地面植被,引发了生态系统退化、水土流失及生物多样性丧失等诸多环境问题[1-3]。近年来,在生态文明思想的指引下,中国坚持"绿水青山就是金山银山"的新发展理念,大力推进矿山地质环境治理与生态修复行动,通过一系列工程与生物措施,使大量废弃矿山的生态环境质量得到了显著改善[4-6]。

中国北方地区矿产资源丰富,受历史上高强度露天开采影响,遗留了大量坡度在70°以上甚至直立的高陡岩质边坡[7-8]。针对此类边坡的生态修复,北方地区主要应用挂网喷播、客土喷播及植被混凝土等技术进行修复。这些技术通过在坡面挂网并喷射含有种子、肥料和保水剂的土壤基质混合物,在短时间内实现边坡表面的全面覆盖和快速绿化,这在缓坡或岩体破碎度较高的区域应用中表现出较好的修复效果[9-12]。然而,在面对高陡岩质边坡时,喷播类技术表现出明显的局限性。喷播的基质层难以与光滑岩面稳固结合,受到重力影响在降雨冲刷或冻融循环下容易发生大面积剥落和崩塌,导致修复效果欠佳,甚至土层完全脱落[13-15]。在此背景下,植生孔技术应运而生,以人工方式在高陡岩质边坡上开掘孔洞,并在孔内进行植物种植,是一种使植物与岩体有机结合,实现植物自主生长、边坡复绿的方法。此技术因能为植物根系提供相对稳定的生长环境和一定的水分养分保障,逐渐成为高陡岩质边坡修复的重要选择[16-19]。

在北方干旱区,降水偏少、蒸发较强,严重制约了植生孔技术在高陡岩质边坡生态修复中的效果,其中水分亏缺往往是限制植被重建的关键因素。北方地区常年降雨量普遍偏低,多数地区平均年降雨量不足400 mm[20]。春季干旱少雨,降水季节分布不均,多集中在夏季。春季是植被打破休眠,萌芽返青的关键时期,降水量却较为稀少[21-25],并且植生孔对坡面自然降雨形成的径流利用不足,土壤的水分补给严重依赖人工补灌。在脱离矿山修复工程的管护期后,植生孔仅靠孔口被动接收降雨。高陡边坡受雨面积小,且坡面径流流速较快,坡面的降雨多为流失,难以被植生孔高效利用。这种低效的降水利用导致即便在降雨季节,孔内植物也常因集水难、存水少而生长受限。因此在北方干旱区的植生孔生态修复项目中,脱离修复管护期后的植生孔常出现因水分供给不足造成的植被生长受限,甚至植被退化的问题[26-27]。植生孔中植物难以有效覆盖裸露坡面,不符合可持续发展的要求[28],这已成为该技术在北方干旱地区推广的瓶颈因素。现有植生孔技术主要侧重于植生孔结构调整,孔内基质保水性能改良与更耐旱植物筛选[16-17,20],鲜有学者关注如何摆脱人工定期浇灌种植,实现天然降水就能满足植生孔对水源的需求。基于上述问题,本文以河北省保定市满城区馒头山矿区岩质高陡边坡为试验对象,将其作为北方干旱区高陡边坡的典型案例,构建集水装置-引流槽-植生孔协同集水系统,通过人工模拟短时弱降雨试验,分析不同引流槽水平角和内切角下的集水

效能、孔间集水量均匀性及其对雨强变化的响应,旨在为北方干旱区岩质高陡边坡植生孔修复的集水优化提供试验依据和工程参考。

1　试验材料与方法

1.1　协同集水系统技术路线

在北方干旱区高陡岩质边坡生态修复中,针对植生孔技术面临天然降水不足与利用率低的问题,本文试验通过“集水装置-引流槽-植生孔”协同集水的技术思路,以提升未明显风化破碎,坡面较为平整的高陡岩质边坡上的植生孔对天然降水的捕获与利用能力。该技术思路主要增加了两项工程措施。①通过在植生孔区域布设集水装置,对孔域结构进行延伸,扩大植生孔的有效受雨面积并提高临时储水能力;②在植生孔上方岩质坡面开设引流槽,将坡面降雨形成的面源径流定向汇集至植生孔区域,实现面源径流向孔域集中供水。试验选取预实施植生孔修复的岩质高陡边坡为试验场地,设置传统植生孔与改进后植生孔两类处理。采用人工降雨方式开展对比试验,获取不同处理条件下的植生孔集水数据,以评估集水装置与引流槽协同作用的集水效果,选出集水效果相对较好的引流槽布局方式(图 1)。

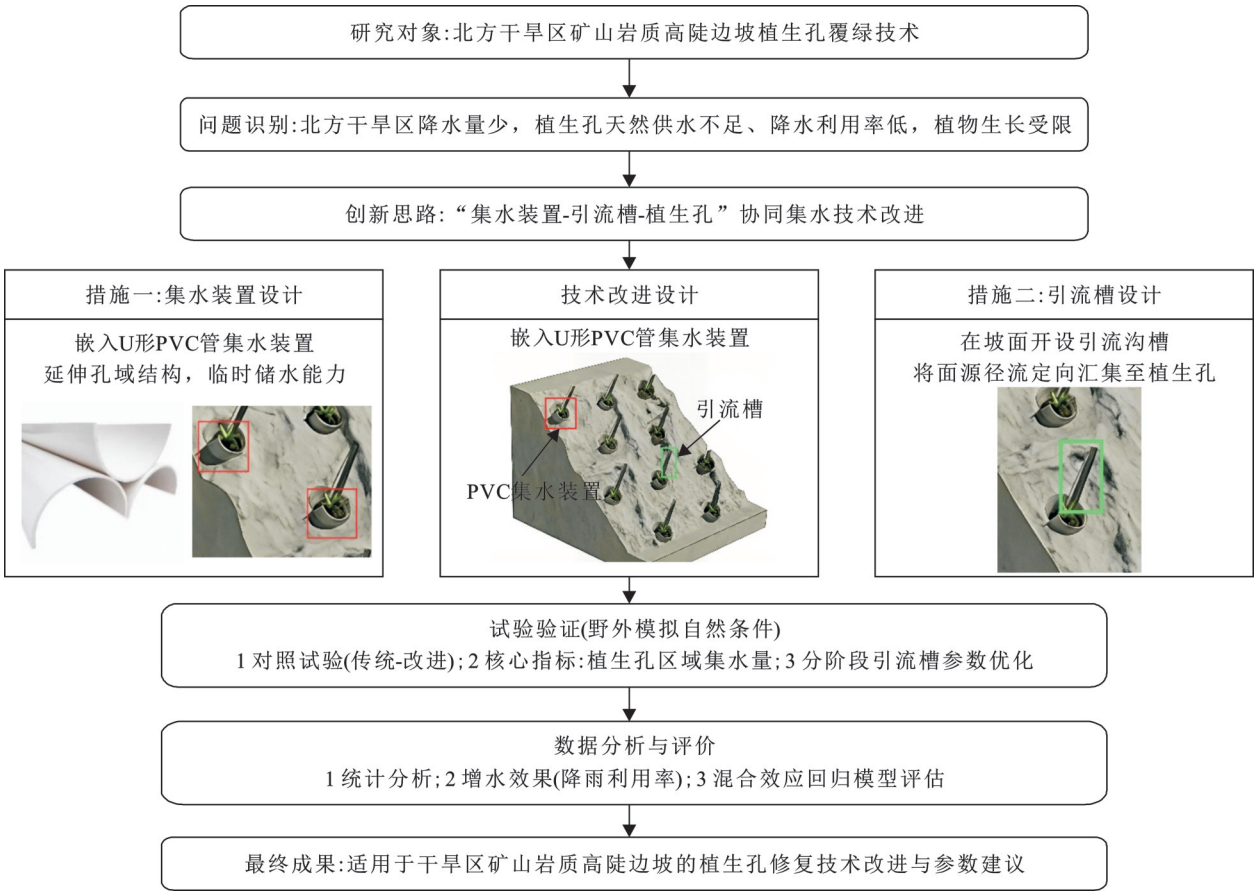


图 1　协同集水技术路线图

Fig.1　Technical roadmap for synergistic water collection

1.2　试验地质环境与边坡选取

试验场地位于河北省保定市满城区馒头山矿区,出露地层以古生界寒武系、石炭系的灰岩、白云质灰岩及页岩为主,矿体顶底板岩石坚硬且风化程度低。岩石抗压强度高,边坡整体稳定性较好。试验边坡的选取要充分考虑试验安全,试验开展条件、试验效果等因素。综合考虑,选取位于吴家庄村西南角处的矿区中部底谷区域的典型岩质高陡边坡作为试验区域(如图 2 所示)。该段边坡系露天采矿活动爆破开挖形成的掌子面,总体呈南北向展布,剖面形态总体呈“直线形”,坡度陡峭。坡顶为矿山开采后的台阶,坡脚为已有工程治理后平台。坡宽约 160 m,坡高一般 13～20 m。坡体坡度一般 75°～85°,局部直立。斜坡体坡面裸露且临空,因开挖扰动呈现出略微凹凸不平的微地貌。出露地层主要由青灰色中厚层状灰岩及白云质灰岩组成,岩质坚硬,风化程度低;受区域单斜构造控制,坡体水平层理极为发育,呈清晰的层状叠合结构,岩体整体较完整,满足生态修复试验对立地条件的代表性要求。

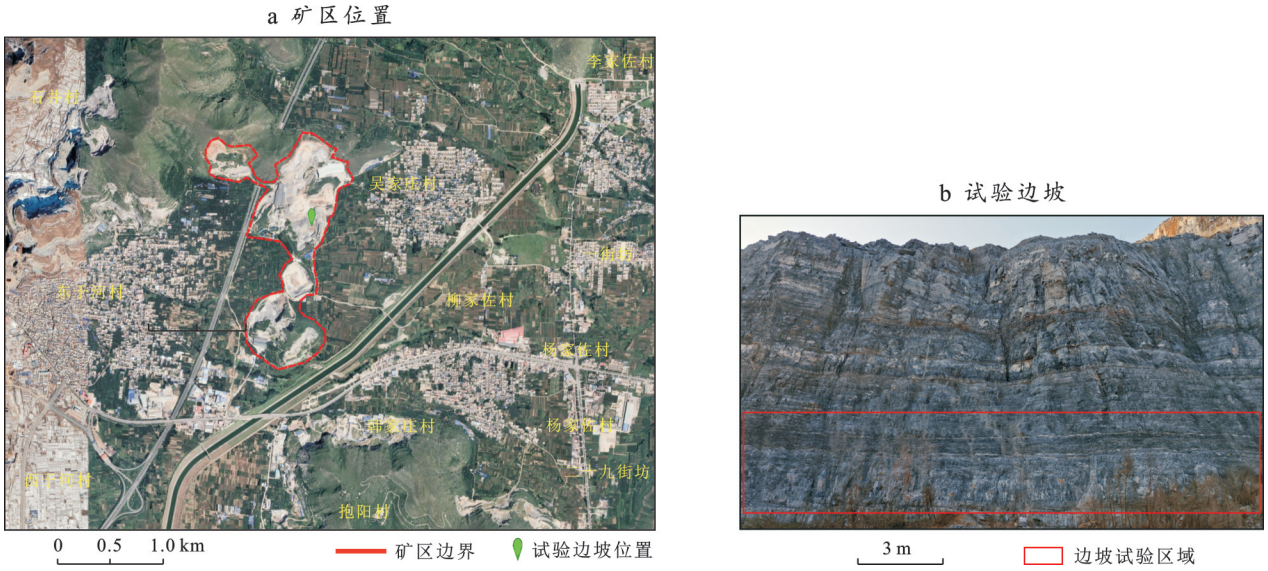


图 2 试验边坡区位图

Fig.2 Location map of experimental slope

1.3 主要试验内容

1.3.1 PVC 集水装置设计

集水装置为一种内嵌式 PVC 管(图 3—4),该装置用半圆形 PVC 管制作,管径和植生孔相同,并沿轴向安装在植生孔下侧。半圆形 PVC 管一端插入孔内,利用回填基质与孔壁的共同固定,施工简便无需额外锚固构件。另一端向外延伸出坡面,形成外露的集水部分,用于承接并暂存孔域周边来水。河北唐县植生孔生态修复示范工程中,选用国标 PVC 管材,直径 180 mm,壁厚 3 mm,在伸出长度为 35 cm 的极限工况下,经受了 5 a 的野外自然营力作用,包括风荷载与环境老化,装置整体结构完整,未见明显形变或断裂(图 3)。试验参考 PVC 管的抗折强度和高陡边坡的极端环境安全情况[29-31],将外露集水段的设计长度控制在 20 cm 左右。



图 3 保定市唐县某边坡覆绿项目植生孔集水器现状

Fig.3 Current status of vegetation-hole water collectors in a slope greening project in Tangxian County, Baoding City

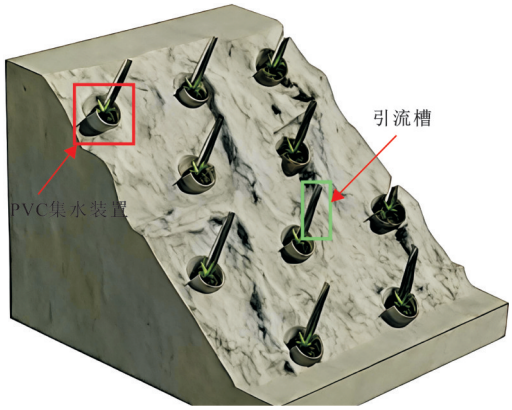


图 4 植生孔协同集水技术渲染图

Fig.4 Rendering of synergistic water collection technology for vegetation holes

1.3.2 试验边坡引流槽布局设计与开槽

“集水装置-引流槽-植生孔”集水系统的布局设计与优化分两阶段实施工程模拟试验。植生孔区域直径恒定为 18 cm,引流槽共有 3 个工程参数,水平角(H)、内切角(I)和引流槽长度。引流槽在水平面上的投影长度为水平间植生孔间距,随水平角 H 变大,引流槽长度随之增长(如图 5 所示)。第 1 阶段固定引流槽内切角 I 为 45°,设置水平角 H 为 15°,30°,45°,60°共 4 个处理,依次进行对比测试寻找最优水平角。第 2 阶段则以筛选出的集水量最高的水平角 45°为定值,设置内切角 I 为 15°,30°,45°,60°共 4 个处理,依次进行对比测试寻找最优内切角。为消除随机误差和确保试验数据的代表性与可靠性,每个处理工况均设置独立观测单元。每个处理样本量为 3 排、每排 10 个(共 30 个)植生孔区域。第 1 排植生孔位于距试验边

坡坡底 50 cm 处,每个植生孔区域呈菱形排列,间隔为 100 cm。

根据引流槽布局方案,假设坡面岩石不下渗雨水,汇流系数取 1.0,并且引流槽光滑无异物。引流槽截面大小选择以下列公式[32]为依据。

$$A = Q/V \tag{1}$$

式中:A 为引流槽的水流截面面积;Q 为坡面瞬时降水体积;V 为引流槽中水流平均流速。

当降水强度为人工降水强度最高 5 mm/h 时(降水强度选择见下节),假设开槽处理为 H=15 时的水流流速为 0.01 m/s 时(非常缓慢),水流截面面积应为 24.12 mm^2。考虑引流槽堵塞及工程试验的可实施性、坡面的稳定性,试验确定开槽规格为 3 mm 宽×40 mm 深,依照引流槽布局设计于 2025 年 10 月 3—18 日分阶段使用手持开槽机进行开槽作业,并加装 PVC 集水装置。

1.3.3　人工模拟降雨

北方春季降雨强度小且持续时间短。单次降雨时长一般不足两小时,降雨强度在 5 mm/h 以下的小强度降水事件发生频率最高,短时弱降雨是北方干旱地区春季植被生存的主要水分补给来源[21-23]。本试验未考虑中到大雨情况,选取 3,4 和 5 mm/h 的降水强度为试验降雨强度,降雨时长为 1 h。未设置引流槽的对照组 CK 和采取不同布局引流槽的试验组 H15_I45,H30_I45,H45_I45,H60_I45,H45_I15,H45_I30,H45_I60,共 8 组对照处理(详见表 1)。各个组别每个降雨强度进行 3 次重复处理,每孔区域汇雨量取 3 次算术平均值。

人工降雨系统由供水单元、流量精控单元和雾化喷淋单元串联构成,试验选用纯铜电机水泵将水源由储水箱泵入主输水管路,作为初级供水动力源。管路中段接入蠕动泵,调节泵转速后水流实现二级恒流控制。管路末端垂直安装雾化降雨装置。试验前使用量雨桶校准流速参数,分别实现 3,4 和 5 mm/h 的 3 种梯度降雨强度。试验中采用多组雾化降雨装置,第一组装置贴近岩壁,位于第 3 排植生孔坡面上方 1 m 处,余组雾化装置按相同间隔平行排列,确保每排植生孔区域受雨面积一致。

人工模拟降雨试验分两次进行,第 1 次人工降雨试验在第 1 阶段引流槽的开槽作业完成后,于 2025 年 10 月 8—11 日开展。第 2 次人工降雨试验在第 2 阶段引流槽的开槽作业后,于 2025 年 10 月 19—22 日完成试验。降雨试验均在无风、阴天或岩壁阴面条件下进行。植生孔区域配套设置集水装置,用于收集、测定降雨后的实际集水量。

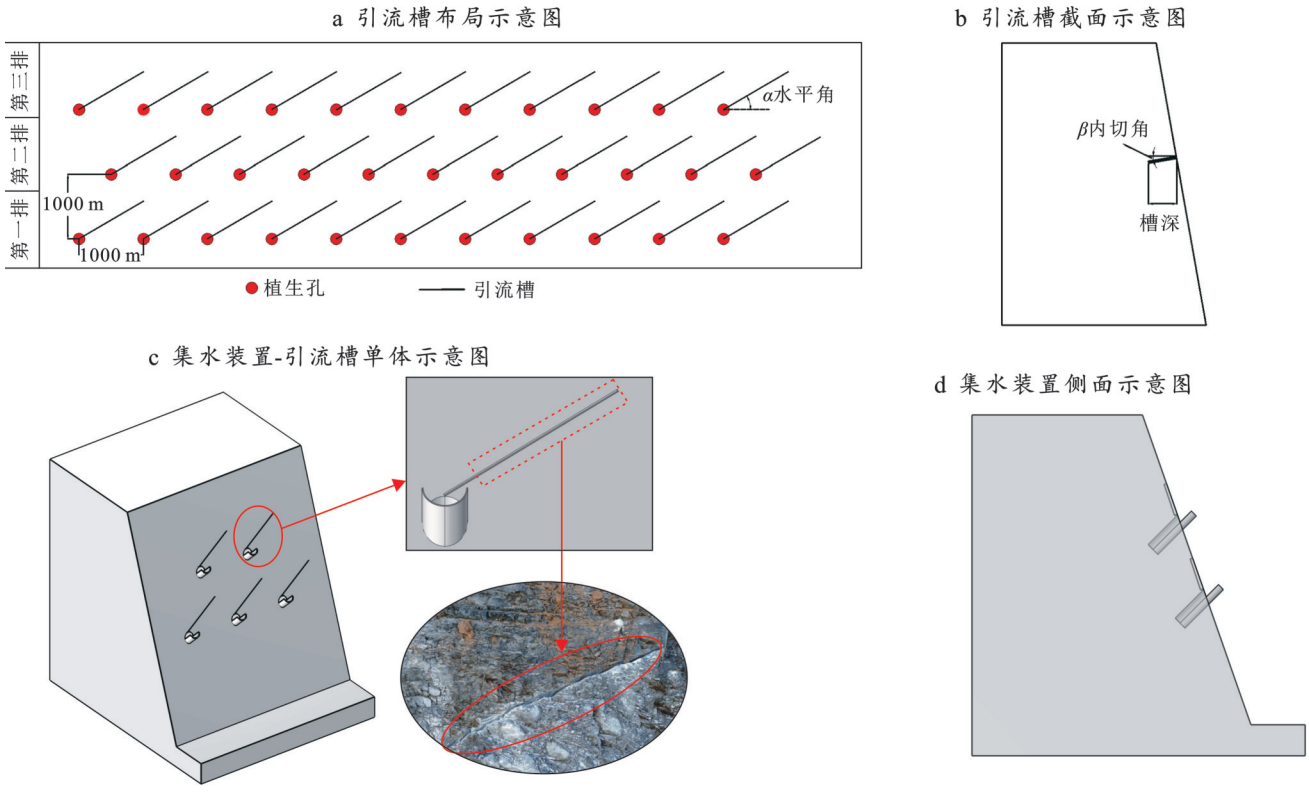


图 5　集水装置及引流槽布设示意图

Fig.5　Schematic layout of water collection device and diversion grooves

表1 人工降雨试验组别设置

Table 1 Treatment design for simulated rainfall experiments

处理组别	引流槽水平角/(°)	引流槽内切角/(°)	逐时降雨强度/(mm·h^{-1})	说明
CK	—	—	3,4,5	第1阶段降雨试验（CK组未设引流槽）
H15_I45	15	45	3,4,5	
H30_I45	30	45	3,4,5	
H45_I45	45	45	3,4,5	
H60_I45	60	45	3,4,5	
H45_I15	45	15	3,4,5	第2阶段降雨试验
H45_I30	45	30	3,4,5	
H45_I60	45	60	3,4,5	

1.4 数据分析方法

1.4.1 植生孔降水利用率计算

本研究需要量化导水槽对坡面径流的捕获效率，并消除降雨强度与受水面积差异的影响，因此引入降水利用率作为核心评价指标。该指标定义为单位时间内植生孔实际集水量与该孔所在区域降水量的比值。计算公式为

$$\eta=\frac{V}{P\cdot S\cdot t}\times 100\% \tag{2}$$

式中：η为降水利用率(%)；V为单次降雨事件中植生孔的实测集水量(ml)；P为人工模拟降雨强度(mm/h)；S为植生孔及其附属导水结构的水平投影面积(cm^2)，依据图5的植生孔区域布局，每个孔所在坡面面积为1 m×1 m；t为降雨持续时间(h)。

1.4.2 混合效应模型(LMM)

为量化分析开槽处理对植生孔区域集水量的作用大小，考虑到试验数据的层级结构及组内观测值的相关性，混合效应模型(LMM)能够正确识别“嵌套”和“重复测量”关系[33]，采用此模型分析引流槽处理、降雨强度及坡位对植生孔集水量的影响。将“开槽处理”“降雨强度”和“坡位”设定为固定效应(Fixed Effects)，将“排(Row)”设定为随机效应，将交互作用项(处理×降雨)纳入模型来评估不同设计对降雨变化的响应差异，可以控制空间嵌套结构带来的伪重复问题及空间异质性对结果的干扰[34](详见表2)。LMM的计算公式为

$$V_{ijk}=\mu+T_i+R_j+(T\cdot R)_{ij}+\mathrm{Row}_k+\epsilon_{ijk} \tag{3}$$

式中：T_i为引流槽处理效应；R_j为降雨强度效应；$(T\cdot R)_{ij}$为交互效应，用来判断某种开槽是否只在某降水强度下有效；Row_k为随机效应，消除不同高度背景降雨不均的影响。

表2 线性混合效应模型(LMM)分析变量定义及说明

Table 2 Definitions and descriptions of variables used in linear mixed-effects model (LMM) analysis

变量	含义	示例值	说明
Treatment	开槽处理	CK	对照组，未开引流槽
		H45_Ⅰ45	H=水平角，I=内切角
Slope_Pos	坡位	Pos_Low	第1排植生孔(下)
		Pos_Mid	第2排植生孔(中)
		Pos_Up	第3排植生孔(上)
Rain_Int	降雨强度	3	单位：mm/h，时长1 h
		4	
		5	
Volume	植生孔区域集水量	—	单位：ml

1.4.3 变异系数(C_v)

本研究采用变异系数来量化不同处理类别的孔间集水量异质性，并判断开槽处理是否能改善边坡微地貌差异带来的植生孔集水量差异较大的问题。C_v为标准差与平均值的比值，作为一种无量纲统计量，它能够消除由于测量尺度或数据量级不同带来的影响，从而客观反映数据的相对离散程度。C_v的计算公式为

$$C_v=\frac{\mathrm{SD}}{\mathrm{mean}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：C_v为变异系数；SD为样本标准差；mean为样本平均值。C_v值越小，表明孔间数据的波动越小，一致性越高；反之，C_v值越大，表明孔间异质性越强，数据分布越离散。

1.4.4 数据的归一化处理

为了消除不同降雨强度量级差异对数据分布特征的掩盖，直观比较不同处理组在空间上的孔间异质性，本研究对集水量数据进行均值归一化处理，以

评估不同导水槽结构对坡面径流分配均匀度的调控作用。具体方法是将每个植生孔的实测集水量除以该处理组在同等降雨条件下的平均集水量:

2　结果与分析

2.1　不同处理下植生孔行间集水量分析

试验结果显示,引流槽的不同布局参数对植生孔行间集水量的影响呈现一定的非线性特征(图 6)。所有开槽处理组在各降雨强度下的集水量都优于对照组CK,集水量随降雨强度增加呈正相关趋势。在第 1 阶段引流槽布局的水平角优化试验中(图 6a),固定内切角为 45°,随着引流槽水平角从 15°增加至 60°,植生孔区域集水量呈现出显著攀升后略有回落的变化。H45_I45 处理组在各降雨强度下均记录到该阶段的集水峰值,H60 处理组较 H45 出现小幅衰减,但仍高于低角度处理组。在第 2 阶段内切角优化试验中(图 6b),基于最优水平角 H=45°,集水量随引流槽内切角的变化表现为单峰分布规律。当内切角为 30°时,各雨强下的集水效果均表现良好,并且集水量达到试验全过程的最高值,较小内切角 I15 和较大内切角 I60 的集水表现相对较弱。

不同引流槽布局带来的集水效能差异主要是受到开槽的布局参数和岩土施工质量的综合影响。在引流槽布局的水平角设置上,引流槽小角度的水平角造成槽底纵坡不足,槽内水流流速滞后于坡面汇流速度,试验中出现槽内泥石淤积,容易出现滞留溢流。大角度的水平角布局设置虽提升重力势能和槽内水流速度,但施工开槽中受限于不平缓的岩质坡面,形成施工死角,使局部开槽深度未达设计标准。同时施工扰动也造成部分岩表破碎,破坏槽体完整性,在雨强为 5 mm/h 时,引流槽中水流容易冲越槽口,一定程度上限制集水效率的提升。在引流槽布局的内切角设置方面,过小的切角会导致有效过水面积系数显著降低。I15 处理的有效过水面积系数仅为 0.259,水流携带的细碎石易沉积于槽底,从而引发溢流,引流槽导流效果不佳。受碳酸盐岩的硬脆岩性制约,过大的内切角在施工中极易造成岩石坡面与槽壁脆性碎裂与剥落。这种工程损伤会破坏引流槽结构的完整性,造成径流在输送过程中大量流失。

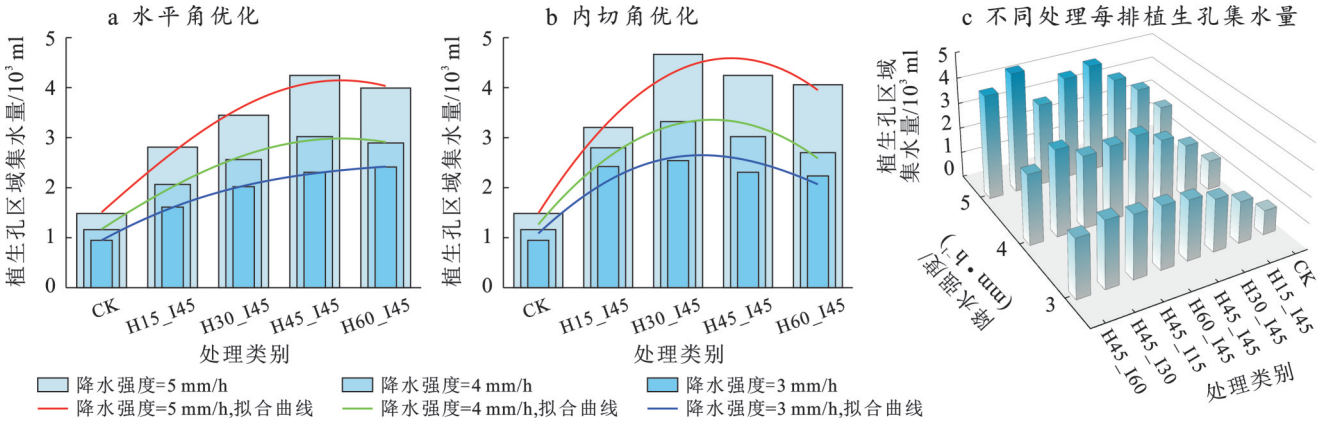


图 6　不同引流槽布设试验结果

Fig.6　Experimental results of different diversion-groove layouts

2.2　不同处理下植生孔行间降雨利用率分析

研究通过计算植生孔区域每行集水量与其投影面积内理论降水量的比值,并求其算术平均数得到行间降雨利用率(图 7)。在不同降雨强度试验下,不同开槽处理对降水利用率的提升存在明显差异,但综合各雨强下的试验数据,所有开槽处理均显著优于对照组 CK,平均利用率仅为 17.14%。H45_I30 组合的综合表现最优,其平均降水利用率高达 49.54%,约为 CK 组的 2.9 倍,是唯一平均利用率接近 50% 的处理组。H45_I45 组合与 H60_I45 次之,也均保持在 44% 以上的较高利用率。H45_I60 组合和 H45_I15 组合的平均利用率分别为 42.32%,40.82%。H45_I15 组合平均利用率为 40.82%,但随雨强增加利用率从 45.72% 下降到 35.61%。H30_I45 组合与 H15_I45 组合的利用率均未能达到 40%,集水能力的提升幅度相对欠佳。

降水利用率的级差化分布说明导水结构改变坡面径流的捕获模式,植生孔对边坡降雨实现从“被动接收”转变为“主动掠获”。植生孔的孔口面积有限,仅能截获直接落入孔内的降水与流经孔域的坡面径流,行间降雨利用率始终徘徊在 16.49%~17.80% 的低位。在经过引流槽处理后,其利用率有

不同程度增加，其中引流槽H45_I30组合表现出显著的汇流集水能力。岩质坡面吸水量和降雨蒸发量相对固定，试验中H45_I30组未出现明显引流槽溢流现象，降水利用率随降雨强度增加而持续提高，并在5.0 mm/h强降雨下达到峰值51.84%，约为同等条件下传统植生孔技术的3.1倍。通过协同集水系统的辅助作用，引流槽的几何结构实质上扩大了植生孔的有效水力控制域，将岩质坡面降雨时形成的无效径流强制转化为孔内补给水，实现对降雨水资源的高效利用。

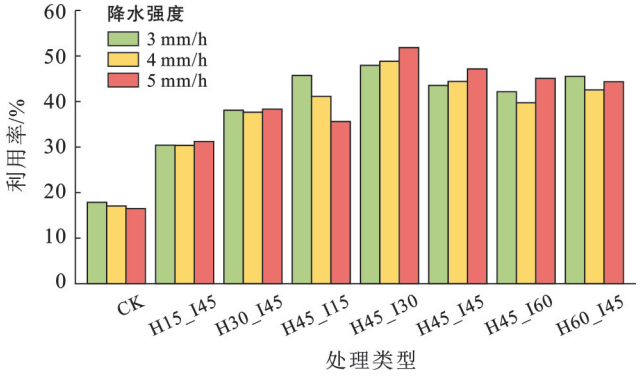


图7 不同处理类型的降水利用率

Fig.7 Precipitation use efficiency under different treatment types

2.3 降水强度与开槽类别的交互作用分析

线性混合模型的交互作用检验结果（表3）表明，不同引流槽设计对降雨强度的响应敏感度存在显著差异。H45_I30组合降雨敏感性最高，其交互项系数为+85.50（$p<0.001$），随着降雨强度的增加，该组合集水量的增长速率最快。H45_I45组合的交互系数为+72.55，也表现出较好的集水能力。H15_I45与H45_I15的交互项系数仅为+30.10和+11.90，且统计上不显著（$p>0.05$），表明这两组存在设计缺陷，在强降雨条件下也难以有效提升集水效能，对坡面径流的捕获能力趋于饱和。各处理组之间呈现明显的分异趋势（图8），在3 mm/h阶段，处理组的边际均值点及其95%置信区间高度重叠，各组集水量差异较小。但随着雨强增至5 mm/h，各组数据表现出明显的发散式分异，H45_I30的拟合线斜率最陡，与其他处理组快速拉开差距。H45_I30组合的优异表现，归因于实现了导流效率与引流槽施工质量的较好平衡。虽然各组截流水平长度一致，但H15类设计因槽底纵坡不足，排水速度滞后于坡面来水，出现径流溢出槽体。H60类设计虽排水快，但因考虑边坡稳定性在开槽深度设计上较为保守，开槽深度仅为40 mm，加之施工中的不可避免的岩壁破坏和过长的输水路径，增加了水流冲越槽体、引流槽失效的风险。试验中H45_I30在保证径流迅速汇入植生孔区域的同时，也尽量避免了水流溢出引流槽，从而实现了较高的径流捕获率。

表3 线性混合效应模型（LMM）交互作用显著性检验结果及表现评价

Table 3 Results of significance tests for interaction effects in linear mixed-effects model (LMM) and performance evaluation

处理组合	交互项系数	p值（显著性）	表现评价
H45_I30	+85.50	<0.001	极高（对降雨极其敏感）
H45_I45	+72.55	<0.001	非常高（稳健的优选）
H45_I60	+69.35	<0.001	高
H60_I45	+54.25	0.006	中等（显著优于CK）
H30_I45	+40.50	0.042	较低（勉强显著）
H15_I45	+30.10	0.131（不显著）	差
H45_I15	+11.90	0.550（不显著）	极差
Pos_mind	—	0.794	无交互作用
Pos_Up	—	0.802	无交互作用

注：随机效应方差为4 564.676。

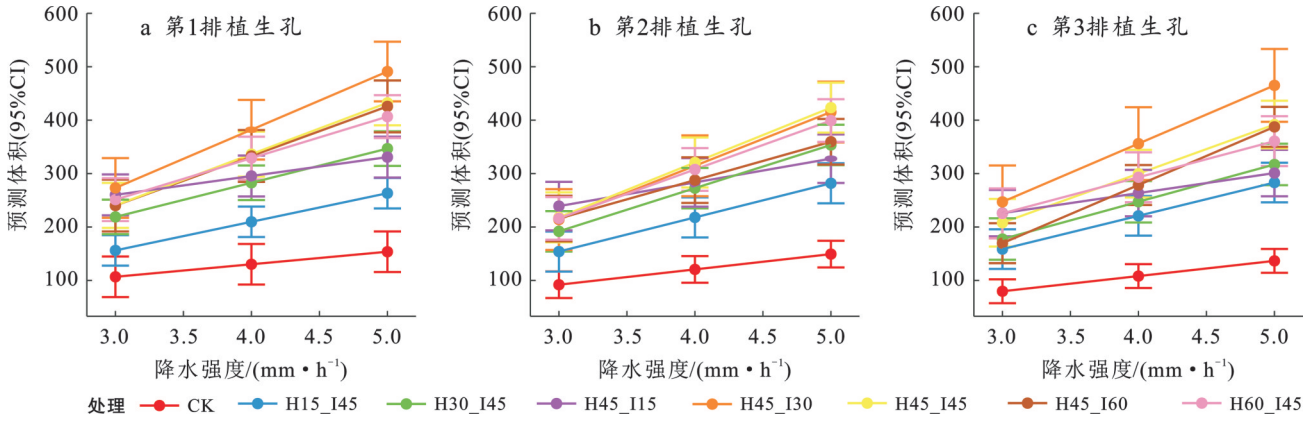


图8 不同坡位下各处理集水量随降雨强度的变化趋势

Fig.8 Trends in volume of water collected with rainfall intensity for different treatments at various slope positions

在交互结果中,坡位效应及其交互项均不显著($p>0.05$),不同坡位集水量估计边际均值的95%置信区间高度重叠(图9),集水量差异较小。表明植生孔无论是在坡面的上部、中部还是下部,流槽设计的集水效率相对稳定,集水效能不受坡面纵向位置的干扰,可以在不同高程的边坡上标准化推广。除降雨强度与开槽处理的主效应外,集水量呈现出明显的坡位累积效应,多数处理组中的下坡位Pos_Low集水量>中坡位Pos_Mid>上坡位Pos_Up。这一现象印证了坡面径流的汇流叠加现象,位于坡脚的植生孔不仅收集本区域的降水,还截获来自中上坡位未被利用的坡面径流。这种空间分异随降雨强度的增加而显著放大,在H45_I30组合中,下坡位的集水优势在强降雨(5 mm/h)下达到顶峰。这表明该优化结构具备较高的水力吞吐能力,能够有效应对并充分利用坡底汇聚的高通量,高流速径流,并未出现明显溢流,进一步证实引流槽H45_I30组合具有可靠性与高效性。

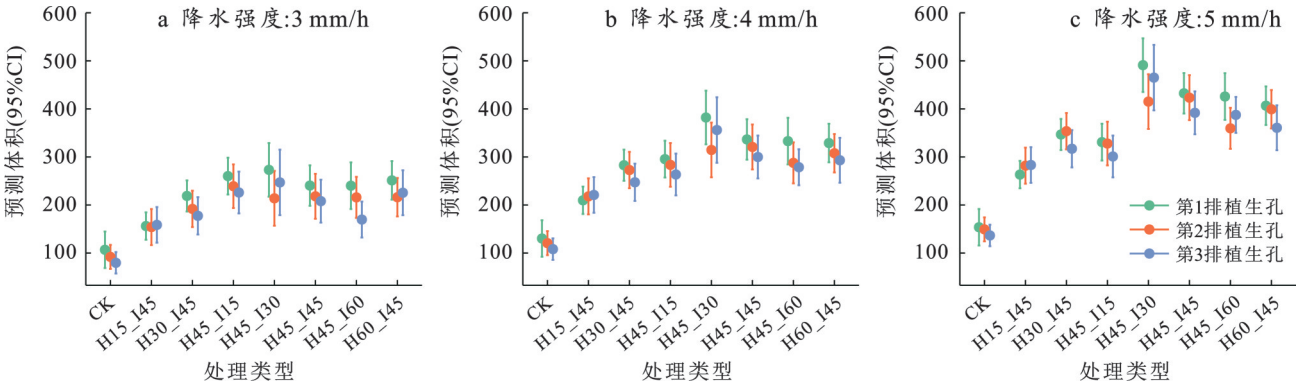


图9　不同降雨强度下的集水量估计边际均值点图

Fig.9　Dot plot of estimated marginal means of volume of water collected under different rainfall intensities

本文试验仅考虑3~5 mm/h的短时弱降雨范围,H45_I30组在该范围内集水量和降水利用率随雨强增加而提高,但这并不意味着雨强持续增大时技术效果将线性提升。随着降雨量进一步增加,会出现与试验中H15_I45组和H45_I15组相似的情况,当坡面水流通量超过引流槽的导流能力,出现引流槽水流溢出、水流冲越槽口现象。这时就需要重新评估岩质边坡的稳定性,尝试进行更深更宽的引流槽。

2.4　不同处理下孔间异质性分析

混合效应模型(LMM)(表3)的随机效应方差数值高达4 564.676,该结果表明在同一处理组内,受岩面微地貌影响,植生孔间的集水量存在巨大的个体差异。

孔间变异系数表(表4)与归一化异质性分布图(图10)显示,对照组CK受坡面随机因素干扰,C_v值始终处于51.32%~57.01%的高位,数据离散度大且伴有明显的极端值。各试验组的孔间差异有不同程度收缩,优势组合H45_I30在5.0 mm/h降雨强度下的C_v值降至38.73%,且其箱线图的箱体最为扁平紧凑,数据分布相对集中。这种孔间异质性的显著降低,说明科学的引流槽布局设计在克服坡面微地貌导致植生孔受雨不均方面具有关键作用。矿山开采后的裸岩边坡,在没有进行人工修饰时其表面凹凸不平并伴有微裂隙,导致径流路径具有高度的不确定性,各植生孔面临严重的受雨不均风险。导水槽的设计使这种风险得以降低。它在无序的坡面上建立标准化的集水模式,通过构建高效的定向导流路径,有效规避局部微地貌对径流的非利用性引导,将不可控的坡面漫流转变为受控的有序径流,实现坡面径流向植生孔区域的相对均等分配。

表4　不同降雨强度下各处理组孔间变异系数(C_v)

Table 4　Inter-hole coefficient of variation (C_v) in water collection for each treatment group under different rainfall intensities

降雨强度/(mm·h^{-1})	不同处理组孔间变异系数(C_v)							
	CK	H15_I45	H30_I45	H45_I15	H45_I30	H45_I45	H45_I60	H60_I45
3.0	57.01	46.61	46.41	48.37	42.37	43.90	43.26	44.93
4.0	51.32	42.78	42.43	42.91	41.30	41.50	41.29	41.66
5.0	53.24	43.91	42.63	45.07	38.73	40.17	40.29	41.49

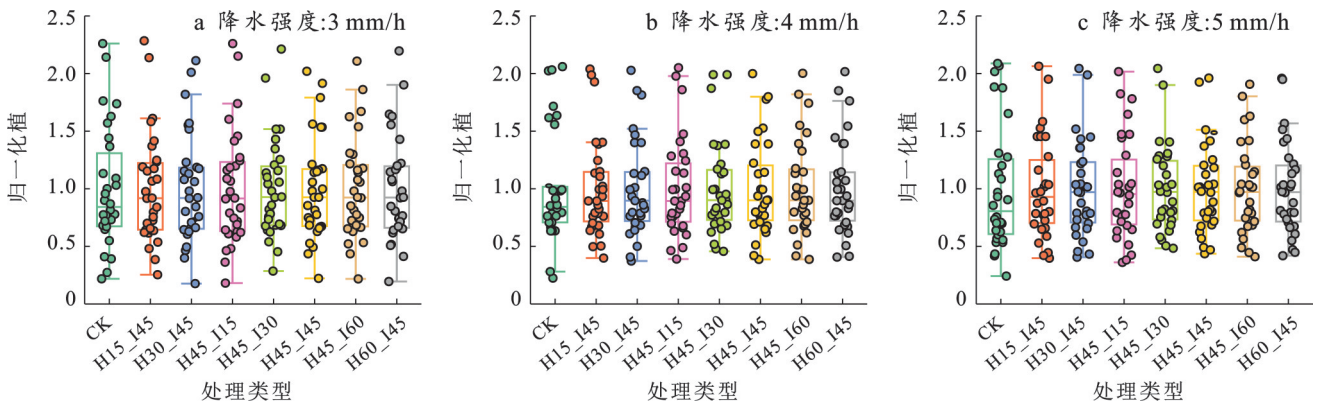


图 10 不同开槽处理类别植生孔集水量归一化异质性分布

Fig.10 Normalized heterogeneity distribution of volume of water collected among vegetation holes under different grooving treatments

3 结 论

(1) 不同开槽处理对降水利用率的提升效果差异显著。综合3种弱降雨强度的数据统计,在3 mm宽×40 mm深的工程参数下,所有开槽处理的集水效果均显著优于对照组(CK组平均利用率仅为17.14%)。各处理组的平均降水利用率排序为:H45_I30(49.54%)>H45_I45(45.03%)>H60_Ⅰ45(44.14%)>H45_I60(42.32%)>H45_I15(40.82%)>H30_I45(38.02%)>H15_I45(30.67%)。

(2) 确定H45_I30为最优开槽参数组合。在3~5 mm/h的短时弱降雨范围,试验中H45_I30组合展现出最佳的汇雨集水能力。在3和4 mm/h的低雨强下,各组差异相对较小。在5 mm/h的强度下,部分处理组出现引流槽溢流现象,H45_I30组与其他组的差距显著放大,其降水利用率高达51.84%,是同等条件下CK组的3.1倍。岩石吸水量和降雨蒸发量相对固定,试验中H45_I30组集水量随降水强度增强而提高。当降雨强度超过5 mm/h时,需要重新评估岩质边坡稳定性并设置更深更宽的引流槽,以维持其高效降水利用率。线性混合效应模型(LMM)分析表明,H45_I30对降雨强度的响应敏感性最高,其交互项系数达到全场最高的+85.50($p<0.001$)。该参数组合避免水平小角度的溢流和内切大角度致使岩体脆性破坏,引流槽失效的问题,实现降水利用模式由被动接收向主动捕获转变。

(3) 协同增水技术显著降低孔间集水量差异。受坡面微地貌影响,试验中CK组的孔间集水量变异系数为51.32%~57.01%,呈现极强的离散性。设置引流槽后,各处理组的集水量C_v值均有不同程度下降。其中,H45_I30组合在平抑孔间差异方面效果最优,其C_v值降至全场最低的38.73%~42.37%。最优的开槽设计不仅极大提升集水总量,还通过标准化的导流路径弱化坡面随机微地貌的干扰,提升植生孔水分补给的均匀性,为坡面植被群落的均质化生长提供措施保障。

(4) 该技术具有一定的应用潜力。坡面径流呈现明显的自上而下汇流累积效应,下坡位植生孔集水量显著高于中上坡位,但协同集水系统在各坡位均表现出的稳定集水作用。为确保引流槽的开槽完整和施工作业便利,该技术适合在未明显风化破碎且坡面较为平整的岩质高陡边坡进行标准化推广。

参考文献(References)

[1] 关军洪,郝培尧,董丽,等.矿山废弃地生态修复研究进展[J].生态科学,2017,36(2):193-200.
Guan Junhong, Hao Peiyao, Dong Li, et al. Review on ecological restoration of mine wasteland [J]. Ecological Science,2017,36(2):193-200.

[2] 冯亮勇.关于高陡岩质边坡矿山地质环境治理工程的分析[J].世界有色金属,2021(20):171-172.
Feng Liangyong. Analysis on mine geological environment treatment project of high and steep rock slope [J]. World Nonferrous Metals, 2021(20):171-172.

[3] 张家明,陈积普,杨继清,等.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,2019,33(5):1-7.
Zhang Jiaming, Chen Jipu, Yang Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):1-7.

[4] 李永庚,蒋高明.矿山废弃地生态重建研究进展[J].生态学报,2004,24(1):95-100.
Li Yonggeng, Jiang Gaoming. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: An over review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(1):95-100.

[5] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
Zhang Jinde, Xi Furui. Study on ecological restoration of

abandoned mines in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(21):7921-7930.

[6] 胡振琪.我国土地复垦与生态修复30年:回顾、反思与展望[J].煤炭科学技术,2019(1):25-35.
Hu Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: Review, rethinking and prospect [J]. Coal Science and Technology, 2019(1):25-35.

[7] 邢宇,王静雅,杨金中,等.全国废弃露天矿山采矿用地分布状况与存在问题[J].自然资源遥感,2024,36(2):21-26.
Xing Yu, Wang Jingya, Yang Jinzhong, et al. Distributions and existing problems of mining land of abandoned open-pit mines in China [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(2):21-26.

[8] 叶丽娟,段霄龙,李婷,等.河北省采矿损毁土地分布及治理状况分析[J].自然资源遥感,2024,36(4):75-81.
Ye Lijuan, Duan Xiaolong, Li Ting, et al. Distribution and rehabilitation status of lands destroyed by mining: A case study of Hebei Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(4):75-81.

[9] 陈晓东,聂小军,张永慧,等.中国高陡岩质边坡植被重建技术现状与展望[J].环境科学与技术,2024,47(S1):70-78.
Chen Xiaodong, Nie Xiaojun, Zhang Yonghui, et al. Study status and prospect of revegetation technology for high and steep rocky slopes in China [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(S1):70-78.

[10] 王娜,田磊,文可戈,等.基于遥感技术的矿山生态修复调查研究:以冀东铁矿为例[J].金属矿山,2021(10):192-198.
Wang Na, Tian Lei, Wen Kege, et al. Mine environment investigation and research based on remote sensing technology: A case study of the Jidong iron mine [J]. Metal Mine,2021(10):192-198.

[11] 孙文洁,焦建,白小梅,等.河北省煤炭矿山环境地质问题及其治理技术[J].煤炭工程,2016,48(增刊1):47-50.
Sun Wenjie, Jiao Jian, Bai Xiaomei, at el. Environmental geology problems and the treatment technologyfor coal mines of Hebei Province [J]. Coal Engineering, 2016,48(S1):47-50.

[12] 李予红,赵金召,张万河,等.露天矿山高陡岩质边坡生态修复技术研究现状与发展趋势[J].河北地质大学学报,2021,44(3):82-86.
Li Yuhong, Zhao Jinzhao, Zhang Wanhe, et al. Research status and development trend of ecological restoration technology for high and steep rock slope in open-pit mine [J]. Journal of Hebei GEO University, 2021,44(3):82-86.

[13] 高云峰,徐友宁,陈华清.露天矿硬岩边坡复绿技术现状及存在问题[J].中国矿业,2019,28(2):60-65.
Gao Yunfeng, Xu Youning, Chen Huaqing. Situation and existing problems of vegetation restoration technology of hard rock slope in open-pit mining area [J]. China Mining Magazine, 2019,28(2):60-65.

[14] 王耀建,王永喜,夏兵,等.基于喷混植生的高陡岩质边坡生态修复新思路:以梧桐山道立交边坡为例[J].中国水土保持,2019(1):29-31.
Wang Yaojian, Wang Yongxi, Xia Bing, et al. New ideas on ecological rehabilitation of high and steep rock slope based on concrete spray-planting-turf [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1):29-31.

[15] 高轩,邵鹏远,康春景,等.露天矿山高陡岩质边坡生态修复技术的应用现状与发展趋势[J].能源与环保,2022,44(8):27-31.
Gao Xuan, Shao Pengyuan, Kang Chunjing, et al. Application status and development trend of ecological restoration technology for high and steep rock slope in open pit mine [J]. China Energy and Environmental Protection, 2022,44(8):27-31.

[16] 宋豪,吴圣林,米尔阿地力·阿布都艾尼,等.基于COMSOL Multiphysics的高陡岩质边坡复绿植生孔最优角度研究[J].中国矿山工程,2023,52(5):1-10.
Song Hao, Wu Shenglin, Miradil Abduayini, et al. Study on the optimal angle of planting holes for regreening on high steep rocky slopes based on COMSOL Multiphysics [J]. China Mine Engineering, 2023, 52(5): 1-10.

[17] 刘娜,任国俊,王磊.兴隆山矿山岩质边坡生态修复技术研究[J].金属矿山,2022(10):218-225.
Liu Na, Ren Guojun, Wang Lei. Research on ecological restoration technology of mine rocky slopes in Xinglong Mountain [J]. Metal Mine,2022(10):218-225.

[18] 赵国红,宁立波,宋阳.植生孔地境再造技术在皖北和沿江高陡岩质边坡复绿中的对比研究[J].安徽地质,2022,32(4):350-354.
Zhao Guohong, Ning Libo, Song Yang. Comparative study on greening of high and steep rock slopes in northern Anhui and along the Yangtze River by reconstructing the plant habitat in the form of plant-growing holes [J]. Geology of Anhui, 2022,32(4):350-354.

[19] 赵金召,李予红,席正,等.露天高陡岩质边坡生态修复技术的探讨[J].绿色科技,2020,22(22):223-225.
Zhao Jinzhao, Li Yuhong, Xi Zheng, et al. Discussion on ecological restoration technology of open-pit high and steep rock slope [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020,22(22):223-225.

[20] 白冰珂,赵国红,尹峰,等.高陡岩质边坡覆绿植物成活的生态因子分析:以安庆市大龙山集贤关为例[J].安全与环境工程,2019,26(5):33-39.
Bai Bingke, Zhao Guohong, Yin Feng, et al. Ecologi-

cal factor analysis of vegetation restoration on the high and steep rock slope: Taking Jixianguan, Dalongshan, Anqing City as an example [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019,26(5):33-39.

[21] 郭志起,王秀茹.河北省地区50年来降水变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):67-72.
Guo Zhiqi, Wang Xiuru. Variations of precipitation in recent 50 years in Hebei Province [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012,10(3):67-72.

[22] 王晓东,潘学标,龙步菊,等.近50年来河北省降水和温度极端事件分析[J].中国农业气象,2010,31(2):170-175.
Wang Xiaodong, Pan Xuebiao, Long Buju, et al. Analysis of extreme precipitation and temperature events in Hebei Province over last 50 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010,31(2):170-175.

[23] 王新宁,张俊霞,段雯瑜,等.张家口近40年降水量变化特征分析[J].农业灾害研究,2021,11(1):90-91,94.
Wang Xinning, Zhang Junxia, Duan Wenyu, et al. Analysis on the characteristics of precipitation changes in Zhangjiakou in the past 40 years[J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2021,11(1):90-91,94.

[24] 李瑞苏.河北南部农作物生长季降水满足度与干旱风险度研究[J].中国农学通报,2023,39(12):75-80.
Li Ruisu. Study on precipitation satisfaction degree and drought risk degree of crop growing season in southern Hebei Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023,39(12):75-80.

[25] 李瑞苏,杨丽娜,杨翠丽,等.河北沙河地区农作物生长季降水变化与旱涝分析[J].宁夏农林科技,2023,64(6):59-62.
Li Ruisu, Yang Lina, Yang Cuili, et al. Analysis of precipitation changes and drought-flood conditionsduring crop growing season in Shahe County, Hebei Province [J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023,64(6):59-62.

[26] 吴帆,陈洪凯.高陡岩质边坡植被绿化技术研究[J].公路,2017,62(4):280-283.
Wu Fan, Chen Hongkai. Study on vegetation greening technology of high and steep rock slope [J]. Highway, 2017,62(4):280-283.

[27] 秦鑫,陈洪凯.公路高陡岩质边坡的快速生态恢复技术研究[J].公路,2017,62(6):311-314.
Qin Xin, Chen Hongkai. Study on rapid ecological restoration technology of high and steep rock slope of highway [J]. Highway, 2017,62(6):311-314.

[28] 杨阳,赵金召,张兆长,等.矿山高陡岩质边坡复绿中节水灌溉技术现状与发展趋势[J].资源环境与工程,2022,36(2):239-243.
Yang Yang, Zhao Jinzhao, Zhang Zhaochang, et al. Present situation and development trend of water-saving irrigation technologyin regreening of high-steep rock slope in mines [J]. Resources Environment & Engineering, 2022,36(2):239-243.

[29] Bainbridge D A, Fidelibus M W, Macaller R. Techniques for plant establishment in arid ecosystems [R]. Albany, C A:U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 1995.

[30] GB/T 19472.2—2017 埋地用聚乙烯(PE)结构壁管道系统 第2部分:聚乙烯缠绕结构壁管材[S].北京:中国标准出版社,2017.
GB/T 19472.2—2017 Polyethylene structure-wall piping systems for underground usage. Part 2: Polyethylene spirally enwound structure-wall pipes [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[31] CJ/T 326—2010 市政排水用塑料检查井[S].北京:中国标准出版社,2010.
CJ/T 326—2010 Plastics inspection chambers for sewerage in municipal engineering [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[32] Manning R. On the flow of water in open channels and pipes [J]. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 1889,20:166-195.

[33] Laird N M, Ware J H. Random-effects models for longitudinal data [J]. Biometrics, 1982,38(4):963.

[34] Eisenhart C. The assumptions underlying the analysis of variance [J]. Biometrics, 1947,3(1):1-21.