

华北土石山区典型坡面土壤水分入渗特征及其影响因素

田帅霖^{1,2}, 卢山^{1,2}, 桑玉强^{1,2}, 张劲松^{2,3}, 张志华^{1,2}

(1. 河南农业大学林学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 济源 454650; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 【目的】探究华北土石山区典型坡面土壤水分入渗特征及其主要影响因素, 为该地区水土流失的缓解和土壤保水蓄水能力的提高提供科学依据。【方法】以华北土石山区典型坡面(自然坡地与鱼鳞坑坡)作为研究对象, 利用 SATURO 双水头渗透计测定土壤水分入渗过程, 系统分析不同坡面及坡位土壤水分入渗特征, 使用 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型拟合实测入渗过程以评估其适用性, 并采用冗余分析法确定影响土壤水分入渗特征的主要驱动因子。【结果】1) 自然坡地初始入渗速率和稳定入渗速率均表现为坡中>坡下>坡上, 鱼鳞坑坡初始入渗速率和稳定入渗速率均表现为坡下>坡上>坡中。2) 坡上和坡下的初始及稳定入渗速率整体上表现为鱼鳞坑坡>自然坡地, 仅在坡中表现为自然坡地>鱼鳞坑坡。3) 在本研究中, Philip 模型能够最准确地描述土壤水分入渗过程。4) 自然坡地土壤水分入渗主要影响因子为砾石质量分数、粉粒质量分数和土壤密度; 而对于鱼鳞坑坡, 砾石质量分数和植被覆盖度为主要影响因素。【结论】在华北土石山区, 砾石质量分数是影响自然坡地与鱼鳞坑坡土壤水分入渗的主要因素。鱼鳞坑整地可以有效减弱粉粒质量分数和土壤密度在土壤水分入渗中的影响, 改善土壤水分入渗性能, 增强土壤保水能力。

关键词: 华北土石山区; 土壤水分入渗; 鱼鳞坑坡; 自然坡地; 入渗模型

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Soil moisture infiltration characteristics and influencing factors on typical slopes in rocky mountainous areas of North China

TIAN Shuailin^{1,2}, LU Shan^{1,2}, SANG Yuqiang^{1,2}, ZHANG Jinsong^{2,3}, ZHANG Zhihua^{1,2}

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Xiaolangdi Forest Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Jiuyuan 454650, China; 3. Key Laboratory of Forest Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the soil moisture infiltration characteristics and their main influencing factors in the rocky mountainous areas of North China, providing a scientific basis for mitigating soil erosion and improving soil water retention capacity in this region. 【Method】This study investigated representative hillslopes (natural slopes and fish-scale pit slopes) in the rocky mountainous areas of North China. Soil infiltration processes were measured using a SATURO dual-head infiltrometer, followed by systematic analysis of infiltration characteristics across different slope aspects and positions. Three infiltration models (Kostiakov, Philip, and Horton) were employed to evaluate their applicability by fitting the measured infiltration processes. Additionally, redundancy analysis was conducted to identify the primary driving factors influencing soil infiltration characteristics. 【Result】1) On natural slopes, both the initial infiltration rate and stable infiltration rate followed the order: middle slope > lower slope > upper slope, whereas on fish-scale pit slopes, the order was lower slope > upper slope > middle slope. 2) The initial and stable infiltration rates were generally higher on fish-scale pit slopes

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807174); 河南省高等学校重点科研项目(24A220004); 河南省科技攻关项目(232103810014)

作者简介: 田帅霖(2000—), 男, 河南方城人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文学方面的研究, E-mail: tianshuailin@outlook.com。

通信作者: 张志华(1984—), 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, E-mail: zhizhua1221@163.com。

than on natural slopes for both upper and lower slope positions, except for the middle slope, where natural slopes exhibited higher infiltration rates. 3) In this study, the Philip model was able to most accurately describe the soil moisture infiltration process. 4) The main influencing factors for soil moisture infiltration on natural slopes are gravel mass fraction, silt mass fraction, and soil density; whereas for fish-scale pit slopes, gravel mass fraction and vegetation coverage become the dominant factors. 【Conclusion】 In the rocky mountainous areas of North China, significant differences in soil infiltration characteristics were observed between natural slopes and fish-scale pit slopes across various slope positions and aspects. Gravel mass fraction was identified as the dominant factor controlling soil infiltration processes. The fish-scale pit terracing technique not only effectively mitigated the influence of silt content and bulk density, but also significantly improved soil moisture infiltration capacity and enhanced water retention performance.

Keywords: rocky mountainous areas of North China; soil moisture infiltration; fish-scale pit slope; natural slope; infiltration model

土壤水分入渗是陆地水循环的关键环节, 直接影响地表径流生成、地下水资源补给及植被水分利用效率^[1]。因此, 深入理解土壤水分入渗特征及其主控因子, 对于优化水土资源管理、缓解水土流失和提升生态系统水源涵养能力至关重要^[2-3]。土壤水分入渗是复杂的物理过程, 主要影响因素包括土壤自身理化性质和外部环境因素^[4]。土壤的理化性质是影响入渗能力的内在决定因素, 包括土壤质地、结构、土壤密度和有机质等^[5-6]。一般情况下, 土壤中沙粒质量分数越多, 黏粒质量分数越低, 其结构越疏松, 越有利于水分的渗透^[7]。土壤密度作为衡量土壤水分入渗能力的重要指标, 其本质上是通过改变土壤内部孔隙结构来影响土壤水分的传导过程, 土壤密度越高, 土壤越紧实, 土壤水分入渗能力通常越低^[8]。此外, 土壤有机质质量分数的增加也能显著提高入渗能力。有机质有助于形成结构良好的团聚体, 进而促进水分渗透^[9]。ALI 等^[10]研究表明, 在中国黄土高原丘陵区, 随着林下表土植物残体和亚表层土根系分解残留物的积累, 土壤总孔隙度及有机质质量分数随之增加, 从而显著提升了入渗速率。外部因素方面, 土壤初始含水量、植被覆盖、地形地貌等都对入渗过程有着重要影响^[11]。土壤初始含水量控制着入渗前期的水势条件, 是调控水分入渗特性的关键因子。土壤初始含水量越高, 其初始入渗率越低^[12]。植被覆盖对入渗的影响主要体现在其对土壤物理结构的改造作用上。ASFAWESEN 等^[13]在埃塞俄比亚农田的研究中发现, 植被覆盖度的增加促进了土壤孔隙的形成, 显著提高了土壤水分入渗率。地形的变化特别是坡度的改变, 也会影响入渗速率, 坡度越陡, 入渗速率通常越低^[14]。

华北土石山区位于黄河中游, 对黄河流域的生态与水资源安全具有重要的保护作用。近年来, 人类不合理的开发利用导致该地区水土流失严重, 供水和耗水之间的平衡遭到破坏^[15-16]。为了保护和改善生态环境, 中国先后实施了“退耕还林工程”和“天然林保护工程”等生态修复措施, 大规模开展了鱼鳞坑造林整地工程。然而, 华北土石山区石多土少, 微地貌复杂多变, 导致土壤水分具有高度的空间异质性, 目前在这种复杂环境下关于土壤水分入渗的研究鲜有报道。本研究选取自然坡地与鱼鳞坑坡 2 种华北土石山区典型坡面为研究对象, 依托野外定位监测, 系统分析不同坡面及坡位的土壤水分入渗特征并深入探究其主要影响因子, 以期缓解华北土石山区水土流失、提高土壤保水蓄水能力进而促进植被恢复和生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于河南省济源市太行山南麓, 隶属于黄河小浪底森林生态系统国家定位观测研究站。作为中国水源涵养与土壤保持的核心功能区, 该区域在生态安全体系中占据重要地位^[17]。气候类型属于暖温带大陆性季风气候, 水热条件呈现“蒸发强、降水集中”的特征: 年均降水量 613 mm, 主要集中在 6-9 月, 年均蒸发量达 1 611 mm (约为降水量的 2.6 倍); 年平均气温 13.1 °C, 整体气候有利于温带落叶植被生长。

土壤类型以棕壤为主，质地组成具有显著砂质特征，土壤孔隙结构松散。植被组成以刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、栓皮栎（*Quercus variabilis*）等乔木为优势种，伴生酸枣（*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge)）、荆条（*Vitex negundo* var. *heterophylla*）及扁担杆（*Grewia biloba*）等灌木群落^[18]。

1.2 试验设计

1.2.1 样地布设及样品采集 基于野外调查,在研究区选取 2 个具有代表性的坡面(自然坡地与鱼鳞坑坡)作为研究对象，二者植被生态相似。样地基本情况如表 1 所示。山坡 1（S1）为人为扰动较少的自然坡地，坡长 80 m，宽 30 m；山坡 2（S2）为人工林地，坡长 100 m，宽 30 m，坡面上实施鱼鳞坑造林整地工程。两坡面植被沿坡位梯度（坡上至坡下）均呈现草本-灌木-乔木连续分布格局。基于植被类型，将 S1 和 S2 坡分别划分为坡上、坡中和坡下 3 个坡位。在每个样地水平间距为 5 m，纵向间距为 10 m 布设网格，在网格点采集土壤样品（部分网格点分布在基岩上，无法采集土壤样品，故以 1 m 为半径在样点周围取样）。依据坡面大小，鱼鳞坑坡共布设 42 个样点，自然坡地共布设 32 个样点。利用全站仪和 GPS 相结合的方法测定并记录每个样点的坐标，Arcgis 提取基本地形因子（坡度、坡向、坡长、海拔等）。使用样方法测定植被覆盖度。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic overview of sample plots

坡面 Hillslope	坡位 Slope position	土层深度/cm Soil depth	坡位长度/m Slope length	坡度/(°) Slope angle	植被覆盖度/% Vegetation Coverage	植被分布 Vegetation distribution
S1	坡上 Upper slope	20	40	18.96	25.77	酸枣、侧柏、栓皮栎、扁担杆、鼠李、柘、荆条、
	坡中 Middle slope	35	20	18.95	43.70	构树
	坡下 Lower slope	45	20	20.44	37.69	
S2	坡上 Upper slope	20	40	21.31	46.13	酸枣、侧柏、栓皮栎、扁担杆、鼠李、柘、荆条、
	坡中 Middle slope	30	30	17.90	63.08	楝、臭椿、蔷薇、刺槐
	坡下 Lower slope	40	30	21.70	24.14	

1.2.2 土壤水分入渗的测定 土壤水分入渗速率采用 SATURO 双水头渗透计（美国 METER Group 公司）进行测定。该渗透计将水导流到土壤表层，利用气压产生 2 个不同的压力头，自动保持特定的水位，通过 2 个完整的压力周期更快更精准测量渗透速率^[19-20]。于 2020 年 10 月和 11 月进行野外测量，清理自然坡地和鱼鳞坑坡网格样点处表面，将测量环垂直插入土壤表面约 5 cm 深，放置渗透计的测量头在测量环上，并进行相应设置（表 2）。本研究选取前 3 min 的平均入渗率为初始入渗速率（initial infiltration rate, IIR）。稳定入渗速率包括高水头稳定入渗速率（high head stable infiltration rate, IRS-H）和低水头稳定入渗速率（low head stable infiltration rate, IRS-L），分别为 2 个水头单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率。通过分析土壤水分入渗速率在不同时间阶段的变化，探究土壤水分入渗过程的动态特征。

表 2 双水头渗透计参数及设置
Table 2 Parameters and settings of the dualhead infiltrometer

参数 Parameters	浸泡时间/min Soaktime	低水头设定/cm Low pressure head	高水头设定/cm High pressure head	保持时间/min Hold time at each pressure head	压力循环 Pressure cycles	总运行时间/min Total run time
设置 Setting	15	5	15	35	1	85

1.2.3 土壤水分入渗模型的选取 基于参数可识别性和试验条件匹配性，本研究采用 Kostiakov、Horton 和 Philip 3 种经典模型模拟土壤水分入渗过程。这些模型应用广泛、参数明确、拟合方法成熟，能从不同角度描述土壤水分入渗特征。高水头阶段为土壤水分入渗提供了充足的驱动力，土壤能够快速达到稳定入渗状态，此时系统的水力响应主要由土壤固有的渗透特性决定，受初始条件影响较小。因此，本试验将模型边界设为高水头，仅拟合高水头时段的入渗行为。采用 Origin 2024 软件拟合土壤水分入渗速率与时间的关系曲线，将实测数据代入各模型方程，得到模型参数及决定系数 R^2 。以 R^2 为主要指标评估各模型的拟合精度和适用性，该指标能够直观地反映模型解释实测数据变异性的能力。

Kostiakov 模型如式（1）所示：

$$f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中： $f(t)$ 为土壤水分入渗速率； t 为入渗时间； a 、 b 为拟合参数。

Horton 模型如式（2）所示：

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

式中： $f(t)$ 为土壤水分入渗速率； f_0 和 f_c 分别表示初始入渗速率和稳定入渗速率； t 为入渗时间； k 为衰减指数。

Philip 模型如式（3）所示：

$$f(t) = 0.5St^{-\frac{1}{2}} + A \quad (3)$$

式中： $f(t)$ 为土壤水分入渗速率； t 为入渗时间； S 为模型参数； A 为稳定入渗速率。

1.2.4 土壤理化性质的测定 在每个样点处取表层（0~20 cm）混合土样，每个点取 3 个重复样。用相对密度计测土壤机械组成，并按国际制分为黏粒（<0.002 mm）、粉粒（0.002~0.02 mm）、沙粒（0.02~2 mm）；环刀法取原状土测土壤密度；利用全自动元素分析仪 Euro Vector EA3000（意大利 EuroVector 公司）测定土壤中全碳、全氮质量分数。

砾石体积质量分数的测定：在 S1 和 S2 的每个采样点，利用小样方框向下依次挖出长 0.3 m、宽 0.3 m、深 0.1 m 的坑，利用排沙法测其总体积，从坑中挖出的所有土壤样品都铺在帆布上，通过筛网，分别称其质量求得细粒土和砾石的质量分数，排水法得到砾石体积。继续向下挖取长 0.3 m、宽 0.3 m、深 0.1 m 的土坑，并重复以上程序，直至取至基岩层为止。

1.3 数据分析

数据以“平均值±标准差”表示。用 Excel 2019 进行数据的整理；运用 SPSS 26.0 对数据进行独立性 t 检验和差异性分析， $p<0.05$ 表示在统计学意义上差异显著；使用 Origin 2024 进行图表绘制及土壤水分入渗过程拟合；运用 Canoco 5 进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 华北土石山区典型坡面土壤水分入渗特征分析

2.1.1 土壤水分入渗特征参数分析 如图 1 所示，自然坡地（S1）的初始入渗速率和稳定入渗速率均呈现坡中>坡下>坡上的规律，其中坡中的高水头稳定入渗速率（IRS-H）较坡上显著增加 76.46%。鱼鳞坑坡（S2）则表现为坡下>坡上>坡中的趋势，坡上和坡下的初始入渗速率分别比坡中显著提高 153.30%和 164.05%（ $p<0.05$ ），高水头稳定入渗速率分别提高 150.23%和 173.60%（ $p<0.05$ ），坡下的低水头稳定入渗速率（IRS-L）比坡中显著增加了 200.60%（ $p<0.05$ ）。

同一坡位不同坡面土壤水分入渗特征也存在显著差异。坡上与坡下的土壤初始入渗速率和稳定入渗速率均表现为 S2>S1，其中坡上 S2 比 S1 的高水头稳定速率显著提高了 101.82%（ $p<0.05$ ）。而在坡中，S1 的初始入渗速率和稳定入渗速率均显著高于 S2（ $p<0.05$ ）。

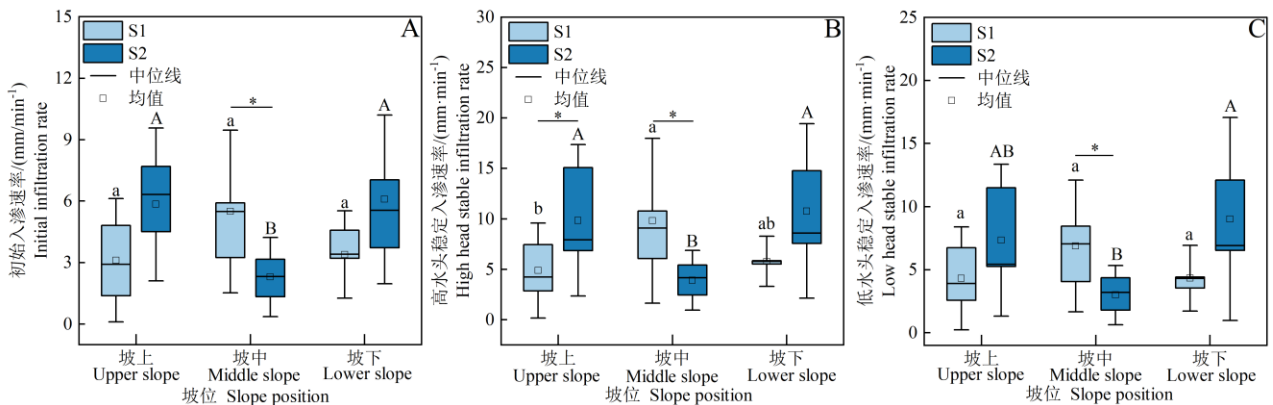


图 1 不同坡面及坡位土壤水分入渗特征

Fig.1 Soil moisture infiltration on different hillslopes and slope positions

2.1.2 土壤水分入渗过程分析 如图 2 所示, 自然坡地 (S1) 土壤水分从初渗直至稳渗均表现为坡中高于坡下和坡上。各坡位入渗速率均在前 2 min 内急剧上升, 坡上和坡中在 3 min 达到稳定, 而坡下延迟至 7 min 达到稳定; 浸泡阶段结束后, 土壤水分入渗速率在 15~18 min 再次急剧增加, 坡上和坡下于 19 min 达到高水头稳定入渗, 坡中在第 24 min 达到稳定状态; 在 50~52 min 内, 土壤水分入渗速率急剧下降, 坡上土壤水分入渗速率在第 52 min 达到稳定状态, 坡中与坡下均在 55 min 达到稳定状态。鱼鳞坑坡 (S2) 土壤水分从初渗直至稳渗均表现为坡下高于坡上和坡中。坡上、坡中和坡下分别在第 10 min、第 3 min 和第 5 min 达到稳定状态; 浸泡结束后, 土壤水分入渗速率在 15~18 min 急剧增加, 坡上和坡下均在第 23 min 达到稳定状态, 而坡中仅在第 19 min 就达到了稳定入渗; 在 50~55 min, 土壤水分入渗速率急剧下降后又缓慢上升, 坡上和坡下均在第 56 min 达到稳定, 坡中在第 55 min 到达稳定。

总体而言, 自然坡地和鱼鳞坑坡土壤渗透速率分别表现为坡中>坡下>坡上、坡下>坡上>坡中。自然坡地土壤水分入渗速率到达稳定入渗的耗时表现为坡中大于坡上与坡下, 鱼鳞坑坡到达稳定入渗的耗时表现为坡下高于坡上与坡中。对于不同坡面土壤水分入渗过程, 鱼鳞坑坡在坡上和坡下的入渗速率均高于自然坡地, 达到稳定的时间也更长; 而在坡中则相反, 自然坡地的入渗速率更高, 达到稳定耗时更长。

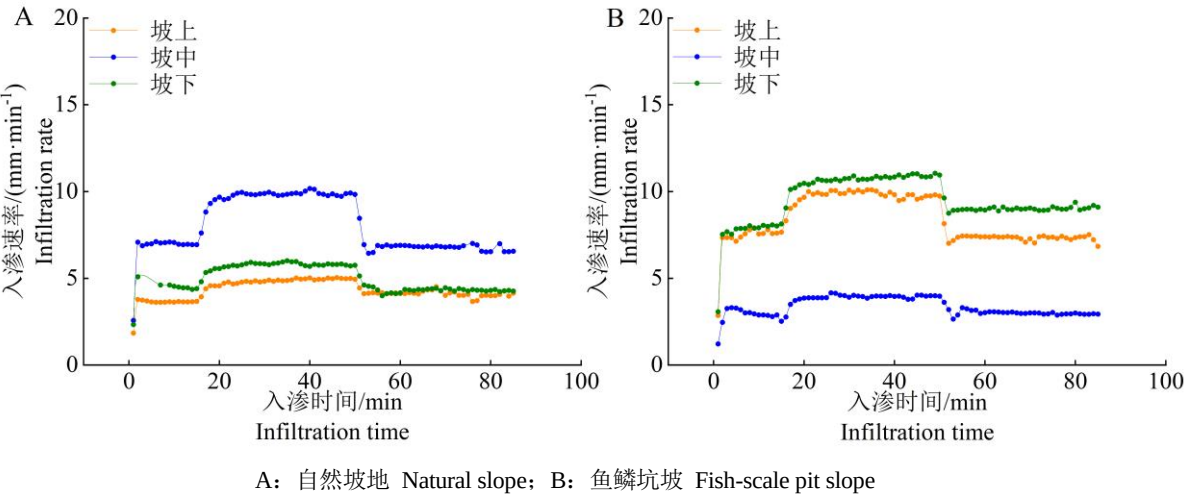


图 2 不同坡面及坡位土壤水分入渗过程

Fig.2 Soil moisture infiltration processes on different hillslopes and slope positions

2.1.3 土壤水分入渗过程拟合 土壤水分入渗作为一个复杂的物理现象, 对水土保持效益评估具有重要意义, 选用适宜的模型对于分析土壤保水性能至关重要。本研究采用 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型, 分析华北土石山区典型坡面土壤水分入渗过程的动态变化规律, 相关结果如表 3 所示。

表 3 不同坡面及坡位土壤水分入渗模型拟合结果

Table 3 Fitting results of soil moisture infiltration models for different hillslopes and slope positions											
坡面 Hillslope	坡位 Slope position	Kostiakov 方程参数 Parameters of Kostiakov			Horton 方程参数 Parameters of Horton				Philip 方程参数 Parameters of Philip		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>f</i> ₀	<i>f</i> _c	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> ²
自然坡地 Natural slope	坡上 Upper slope	2.642	0.171	0.833	3.118	4.885	0.069	0.765	6.151	4.885	0.924
	坡中 Middle slope	4.882	0.194	0.779	5.502	9.815	0.076	0.751	13.251	9.815	0.824
	坡下 Lower slope	3.355	0.152	0.704	3.395	5.794	0.086	0.692	6.195	5.794	0.805
鱼鳞坑坡 Fish-scale pit slope	坡上 Upper slope	5.515	0.162	0.769	5.841	9.859	0.086	0.762	12.458	9.859	0.837
	坡中 Middle slope	2.178	0.165	0.718	2.306	3.940	0.074	0.685	4.995	3.940	0.851

坡下	5.509	0.188	0.843	6.089	10.781	0.081	0.805	14.120	10.781	0.863
Lower slope										

由表 3 可知, 3 种模型中, Philip 模型的 R^2 均值最大, 表明该模型对实测入渗数据具有较强的解释能力, 能够准确描述不同坡面及坡位的土壤水分入渗过程, Kostiaikov 模型模拟效果中等, Horton 模型与实测值偏差较大, 不适合用于描述本研究区域土壤水分入渗过程。

在 Philip 模型中, 参数 S 是衡量土壤水分入渗快慢程度的重要指标。从表 3 可知, 自然坡地和鱼鳞坑坡对应的 S 值分别表现为坡中>坡下>坡上、坡下>坡上>坡中; 在相同坡位, 不同坡面的参数 S 在坡上和坡下均表现为鱼鳞坑坡>自然坡地, 仅在坡中表现为鱼鳞坑坡<自然坡地, 说明鱼鳞坑坡显著改善了地表下层土壤结构, 提高了土壤表层入渗能力, 这与前文描述的土壤水分入渗特征相符, 进一步证实了 Philip 模型在本研究区的良好适用性。

2.2 华北土石山区典型坡面土壤理化性质特征分析

如表 4 所示, 在自然坡地 (S1), 从坡上到坡下, 土壤含水量、全碳和全氮质量分数逐渐升高, 其中, 坡下分别比坡上提高了 37.34%、159.53%和 84.34% ($p<0.05$)。同时, 砾石质量分数和砾石覆盖度整体呈现下降趋势。在鱼鳞坑坡 (S2), 土壤含水量、全碳和全氮质量分数随着坡位的下降而逐渐升高, 然而, 不同坡位之间未达到显著水平。与 S1 坡相似, S2 坡的砾石质量分数和砾石覆盖度也呈现逐渐下降的趋势。

通过对不同坡面土壤理化性质分析发现, 在坡上, S2 的电导率比 S1 增加 189% ($p<0.05$), 表明 S2 土壤中存在较高的溶解盐分。在坡中, 沙粒质量分数和电导率均表现为 S2 显著高于 S1, 分别提高 3.67%和 56.91%; S1 全碳和全氮质量分数较 S2 分别增加 147%和 168% ($p<0.05$)。在坡下, 土壤含水量、黏粒质量分数、全碳和全氮质量分数均表现为 S1 显著高于 S2, 而电导率表现为 S2>S1 ($p<0.05$)。综合来看, 自然坡地土壤理化性质随坡位变化呈现明显的空间分异特征, 而鱼鳞坑坡因工程措施的均质化作用使坡位间差异趋于平缓。

表 4 不同坡面及坡位土壤理化性质统计结果

Table 4 Statistical results of soil physicochemical properties across different hillslopes and slope positions

指标 Indicator	S1			S2		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
	Upper slope	Middle slope	Lower slope	Upper slope	Middle slope	Lower slope
砾石质量分数/%	20.03±9.70	23.06±9.74	17.29±4.27	32.05±21.68	12.73±6.95	19.30±10.73
Gravel mass fraction	ab	ab	ab	a	b	ab
砾石覆盖度/%	12.44±4.52	6.68±5.45	1.67±0.50	13.45±2.16	5.43±2.09	2.59±1.95
Gravel coverage	a	b	d	a	bc	cd
土壤含水量/%	13.9±2.15	14.43±2.06	19.09±3.60	14.63±1.38	15.15±1.00	15.39±1.29
Soil water content	b	b	a	b	b	b
土壤密度/(g cm ⁻³)	1.57±0.08	1.50±0.10	1.40±0.13	1.48±0.10	1.49±0.11	1.49±0.17
Bulk density	a	ab	b	ab	ab	ab
沙粒质量分数/%	91.17±2.05	86.88±3.19	88.68±1.11	90.65±1.32	90.07±0.96	89.61±1.17
Sand mass fraction	a	c	bc	ab	ab	ab
黏粒质量分数/%	2.91±0.90	4.15±2.02	4.68±1.16	3.03±0.77	2.96±0.46	2.71±0.67
Clay mass fraction	bc	ab	a	bc	bc	c
粉粒质量分数/%	5.93±2.25	7.57±1.09	6.64±1.09	6.33±1.03	6.97±1.29	7.68±1.35
Powder mass fraction	a	a	a	a	a	a
电导率/(μS cm ⁻¹)	47.14±9.04	45.33±12.90	68.58±24.26	89.05±21.86	71.13±20.85	95.38±12.72
Electric conductivity	c	c	b	ab	b	a
全碳质量分数/(g kg ⁻¹)	14.01±5.02	24.52±7.28	36.36±5.67	15.31±3.08	16.69±6.03	19.59±7.09
Total carbon mass fraction	c	b	a	c	c	bc
全氮质量分数/(g kg ⁻¹)	1.66±0.53	2.64±0.74	3.06±0.52	1.40±0.27	1.57±0.22	1.77±0.55
Total nitrogen mass fraction	b	a	a	b	b	b

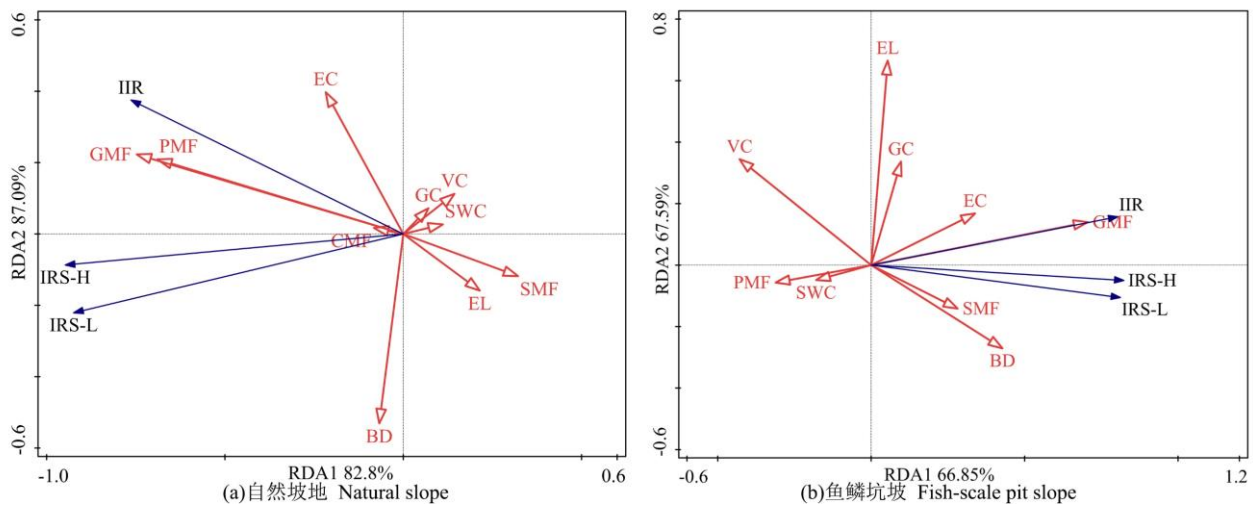
注: 同一行不同小写字母表示指标数据在统计学意义上差异显著 ($p<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same row indicate statistically significant differences among the measured parameters($p<0.05$).

2.3 华北土石山区典型坡面土壤水分入渗特征影响因素分析

RDA 排序图可以直观地反映出不同因子与入渗特征的关系。影响因子的箭头长度反映了其对入渗的解释量，两个射线之间的夹角代表影响因子与入渗特征因子之间的相关性，相关系数在数值上等于夹角的余弦值。自然坡地和鱼鳞坑坡第一轴和所有轴的蒙特卡罗置换检验结果 p 值均小于 0.05，表明冗余分析结果可信。

如图 3 所示，自然坡地（S1）初始入渗速率 IIR 主要与砾石质量分数、粉粒质量分数、黏粒质量分数和电导率呈正相关关系，与土壤密度、土壤含水量、植被覆盖度、砾石覆盖度、沙砾质量分数及海拔呈负相关关系；IRS-H 和 IRS-L 与砾石质量分数、粉粒质量分数、黏粒质量分数、土壤密度呈正相关关系，与土壤水分、植被覆盖度、砾石覆盖度、沙砾质量分数及海拔呈负相关关系。鱼鳞坑坡（S2）初始入渗速率和稳定入渗速率与砾石质量分数、砾石覆盖度、电导率、沙粒质量分数、土壤密度呈正相关关系，与粉粒质量分数、植被覆盖度及土壤水分呈负相关关系。将单个影响因子对土壤水分入渗特征的贡献度进行量化（表 5），结果显示，自然坡地各影响因子的贡献度依次为砾石质量分数（48.2%）>粉粒质量分数（17.8%）>土壤密度（12.1%）>土壤含水量（7.8%）>海拔（4.1%）>电导率（3.4%）>植被覆盖度（3.1%）>沙粒质量分数（2.4%）>黏粒质量分数（0.6%）>砾石覆盖度（0.5%），总解释量为 87.5%。自然坡地土壤水分入渗特征主要受到砾石质量分数（ $p<0.05$ ）、粉粒质量分数（ $p<0.05$ ）和土壤密度（ $p<0.05$ ）的影响，砾石质量分数与粉粒质量分数越高，IIR、IRS-H 和 IRS-L 越大；土壤密度越高，IIR 越低，IRS-H 和 IRS-L 越大。鱼鳞坑坡各影响因子的贡献度依次为砾石质量分数（40.6%）>植被覆盖度（19.3%）>沙粒质量分数（8.3%）>电导率（7.8%）>海拔（6.8%）>土壤密度（6.4%）>粉粒质量分数（5.5%）>土壤含水量（3.6%）>砾石覆盖度（1.6%），总解释量为 67.7%。鱼鳞坑坡土壤水分入渗速率主要受到砾石质量分数（ $p<0.05$ ）和植被覆盖度（ $p<0.05$ ）的影响，砾石质量分数越高，IIR、IRS-H 和 IRS-L 越大；而植被覆盖度升高，入渗速率随之降低。由上可知，自然坡地的土壤水分入渗主要受砾石质量分数、粉粒质量分数和土壤密度的影响，体现出土壤物理性状对水分渗透的主导作用。鱼鳞坑坡土壤水分入渗则在砾石质量分数的影响下，植被覆盖度起到了调节作用，导致入渗速率呈现一定的下降趋势。



GMF: 砾石质量分数; PMF: 粉粒质量分数; SMF: 沙粒质量分数; CMF: 黏粒质量分数; BD: 土壤密度; SWC: 土壤含水量; EC: 电导率; VC: 植被覆盖度; GC: 砾石覆盖度; EL: 海拔; IIR: 初始入渗速率; IRS-H: 高水头稳定入渗速率; IRS-L: 低水头稳定入渗速率。

GMF: Gravel mass fraction; PMF: Powder mass fraction; SMF: Sand mass fraction; CMF: Clay mass fraction; BD: Bulk density; SWC: Soil water content; EC: Electric conductivity; VC: Vegetation coverage; GC: Gravel coverage; EL: Elevation; IIR: Initial infiltration rate; IRS-H: High head stable infiltration rate; IRS-L: Low head stable infiltration rate.

图 3 不同坡面影响因子与土壤水分入渗特征冗余分析结果

Fig.3 Redundancy analysis results of influencing factors and soil moisture infiltration characteristics across different hillslopes

表 5 不同坡面影响因子的正向选择结果

Table 5 Positive selection results of influencing factors across different hillslopes

影响因子 Influencing factors	自然坡地 Natural slope		鱼鳞坑坡 Fish-scale pit slope	
	贡献度/% Contribution	p 值 p value	贡献度/% Contribution	p 值 p value
砾石质量分数 Gravel mass fraction	48.2	0.006	40.6	0.006
粉粒质量分数 Powder mass fraction	17.8	0.026	5.5	0.222
土壤密度 Bulk density	12.1	0.034	6.4	0.218
土壤含水量 Soil water content	7.8	0.062	3.6	0.376
海拔 Elevation	4.1	0.526	6.8	0.174
电导率 Electric conductivity	3.4	0.208	7.8	0.148
植被覆盖度 Vegetation coverage	3.1	0.572	19.3	0.046
沙粒质量分数 Sand mass fraction	2.4	0.322	8.3	0.294
黏粒质量分数 Clay mass fraction	0.6	0.698	0.1	0.754
砾石覆盖度 Gravel coverage	0.5	0.792	1.6	0.568

3 结论与讨论

研究表明，鱼鳞坑坡初始入渗速率及稳定入渗速率均显著高于自然坡地，尤其是在坡上位置，鱼鳞坑坡的高水头稳定入渗速率比自然坡地高 101.82%，低水头稳定入渗速率也高 78.76%。这一结果可能与鱼鳞坑坡特殊的整地措施密切相关，鱼鳞坑整地打破了土壤表面原有的紧实结构，形成不同深度和形状的洼地，增加了土壤的孔隙空间，从而提高了土壤的孔隙度，促进了水分的快速渗透^[21]。此外，王青宁等^[22]研究发现，鱼鳞坑整地会改变土壤表面微地形，当水进入鱼鳞坑后，水分不再沿着表面流失，而是在鱼鳞坑坡内聚集并向入下入渗。相比之下，自然坡地的土壤表面较为平坦，水分容易沿表面流失，导致入渗速率相对较低，这一结果在 LI 等^[23]的研究中也得到了验证。但在坡中，鱼鳞坑坡初始入渗速率和稳定入渗速率均低于自然坡地。LIU 等^[24]研究表明砾石的存在增加了土壤基质中的裂缝，促进了土体中连通的大孔隙结构的逐步形成，从而使水分能够迅速向下移动，增强了水分的渗透性。鱼鳞坑坡的砾石质量分数显著低于自然坡地，因此入渗速率低于自然坡地。这与马雪燕等^[25]的研究结果一致，表明砾石质量分数差异是两坡面入渗性分化的重要原因。

自然坡地土壤水分入渗特征表现出明显的空间异质性，土壤水分入渗速率表现出坡中>坡下>坡上的趋势。这与周一诺等^[26]的研究结果相似，主要是源于坡度、水动力过程与植被根系分布等因子的协同作用。苏辉东等^[27]在土石山区的研究表明，土石山区坡面优先流和入渗受地形坡度的影响。在本研究中自然坡地从坡上到坡下坡度逐渐增大，但坡中相对平缓，减弱了径流冲刷力，使得砾石和细颗粒和有机质在此沉积，有机质能够在沉积物中形成生物矿化物或吸附在矿物表面，进而促进微生物的活动，有助于在土壤中形成微孔或其他有助于水流通过的孔隙结构，从而建立起一个高效的导水网络^[28]。此外，坡中的砾石质量分数最高，砾石形成相互支撑的骨架结构使土壤整体保持稳定，产生通透的孔隙网络，这种网络可以促进水分的渗透^[29]。相较之下，坡上与坡下的坡度较陡，土壤表面径流的能力增强，从而导致水分在表层流失，未能充分渗透入土壤中。水流的迅速冲刷可能会造成土壤表层的侵蚀，进一步影响水分的入渗。通常情况下，密度较高的土壤结构紧密，孔隙较少，水分渗透受阻^[30]。坡中的土壤密度较低且孔隙度较大，水分能够较快地渗透到土壤中，因此坡中的入渗速率最高。鱼鳞坑坡的土壤水分入渗特征表现出坡下>坡上>坡中的趋势。本研究发现，土壤大孔隙平均孔径在不同坡位上存在显著差异性，坡下大孔隙平均孔径（2.07 mm）显著高于坡上（1.88 mm）和坡中（1.82 mm）。苏智冉^[31]在华北土石山区的研究表明，土壤大孔隙通过改

变土壤水分运移规律,为优先流的发生创造通道,减缓地表径流,促进入渗。坡上和坡下的砾石质量分数显著高于坡中,这种空间分布格局与大孔隙孔径的分布存在一定的关联性。较高的砾石质量分数也有助于改善土壤的孔隙结构,特别是有利于形成大孔隙,这对于水分渗透具有积极作用,较大的孔隙空间不仅能够促使水分快速入渗,还能有效减少地表径流^[32]。同时,坡下与坡上坡度较大,鱼鳞坑结构本身能够有效汇集和滞留水分,显著降低坡面水流速度,水流在坑内滞留时间长,从而促进更多水分入渗。此外,坡中的植被覆盖度相对于坡上与坡下分别高出 39.28%和 161.28%,在密集的植被覆盖下,植物根系可能会对土壤孔隙进行挤压,导致土壤表面更加紧实或不均匀,减少了水分渗透的空间,进而降低土壤的入渗速率^[33]。

土壤水分入渗特征与多种影响因子之间存在显著关系。对于自然坡地,砾石质量分数、粉粒质量分数和土壤密度是主要的影响因子,鱼鳞坑坡的主要影响因子是砾石质量分数和植被覆盖度。这与顾金普等^[34]的研究结果不一致,主要是因为鱼鳞坑整地打破了原有土壤的紧实结构,使得土壤中的细颗粒与粗颗粒能够重新分布,改善了细颗粒和粗颗粒之间的比例,促使土壤颗粒更均匀地分布,从而减弱了粉粒质量分数和土壤密度的影响,降低了细粉粒质量分数以及土壤的压实程度,有效增加了土壤水分入渗速率^[35]。然而,砾石质量分数和植被覆盖度仍是影响华北土石山区水分渗透的主要因素。砾石相较于其他土壤成分(如黏土、粉粒等)具有较大的粒径,能够形成较为疏松的土壤结构。这种结构增加了土壤的总孔隙度,从而促进水分的入渗。更高的砾石质量分数有助于减少土壤的压实度,使得水分能够更容易通过重力渗透进入地下水储层^[36]。这对于提高土壤的水分保持能力和地下水的补给具有重要作用。而植被覆盖度增加通常会导致表层土壤的有机质增加,从而改善土壤的孔隙结构和水分保持能力。但植被过密可能导致根系对土壤的压实,反而降低了水分的入渗速率^[37]。因此,在实际实施过程中,除了优化微地形设计和改良土壤结构外,还应注重合理调整砾石的分布和植被覆盖,尤其是在坡中位置,确保砾石分布更加均匀,同时减少植被覆盖度,以进一步提升生态系统的水土保持能力和恢复效果。

综上所述,自然坡地初始和稳定入渗速率均表现为坡中>坡下>坡上,主要影响因子是砾石质量分数、粉粒质量分数和土壤密度。鱼鳞坑坡则表现为坡下>坡上>坡中,主要影响因子是砾石质量分数和植被覆盖度。2个坡面渗透性能整体上表现为鱼鳞坑>自然坡地。Philip 模型更适合描述华北土石山区土壤水分入渗过程。整体而言,鱼鳞坑坡在改善土壤水分入渗性和保水能力方面具有显著优势,有助于缓解水土流失问题。针对华北土石山区水土保持工程,建议通过管理砾石质量分数以优化土壤结构、提高渗透性,并适当控制植被覆盖度,避免过密植被抑制入渗。该研究为优化华北土石山区水土保持与造林整地策略、促进生态恢复及水资源保护提供了科学依据。

参考文献 References:

- [1] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of Northeast China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(2): 379-387.
- [2] 程竞萱, 程金花, 郑欣, 等. 不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(6): 973-982.
- CHENG J X, CHENG J H, ZHENG X, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow under different vegetation cover. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(6): 973-982.
- [3] ZHANG S Y, ZHAO G J, FAN J J, et al. Variations of soil infiltration in response to vegetation restoration and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 372: 123356.
- [4] HUANG L, ZHANG P, HU Y G, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4: 255-263.
- [5] NERIS J, JIMÉNEZ C, FUENTES J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of

Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Catena*, 2012, 98: 55-62.

[6] BASSET C, ABOU NAJM M, GHEZZEHEI T, et al. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 226: 105577.

[7] SETIAWAN O, SARTOHADI J, HADI M P, et al. Infiltration characterization using principal component analysis and K-means cluster analysis on quaternary volcanic landscape at the southern flank of Rinjani Volcano, Lombok Island, Indonesia[J]. *Physical Geography*, 2020, 41(3): 217-237.

[8] HOLTEN R, BØE F N, ALMVIK M, et al. The effect of freezing and thawing on water flow and MCPA leaching in partially frozen soil[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 219: 72-85.

[9] 曾红, 董天富, 杨静, 等. 喀斯特区出露基岩对土壤水分入渗过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 144-154.

ZENG H, DONG T F, YANG J, et al. Effect of exposed bedrock on soil water infiltration in karst region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 144-154.

[10] ALI K S, DING K, ZHANG B Y, et al. Soil infiltration rate of forestland and grassland over different vegetation restoration periods at Loess Plateau in northern hilly areas of China[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15(1): 91-99.

[11] 马仁明, 付娟, 贾燕锋, 等. 不同机械压实条件下黑土性质及入渗特征变化研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2024, 55(1): 54-65.

MA R M, FU J, JIA Y F, et al. Characterization of black soil infiltration under different mechanical compaction conditions[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2024, 55(1): 54-65.

[12] 曲芷程, 黄绍普, 刘司博, 等. 1963—2020 年蒙古锡林河流域极端气候及其对水文干旱的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(11): 5386-5397.

QU Z C, HUANG S P, LIU S B, et al. Extreme climate and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin of Inner Mongolia over the past 60 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(11): 5386-5397.

[13] ASFAWESEN M G, DESTA G, DANANTO M. Soil management and crop practice effect on soil water infiltration and soil water storage in the humid Lowlands of beles sub-basin, Ethiopia[J]. *Hydrology*, 2022, 10(1): 1.

[14] 贺鑫浩, 常桐桐, 乔晓英, 等. 土地利用变化对榆溪河流域地下水文过程影响[J/OL]. *水文地质工程地质*, 2025: 1-11(2025-06-10). <https://link.cnki.net/doi/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202405036>.

HE X H, CHANG T T, QIAO X Y, et al. Effect of land use change on groundwater hydrological process in Yuxi River Basin[J/OL]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2025: 1-11(2025-06-10). <https://link.cnki.net/doi/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202405036>.

[15] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 等. 太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 511-517.

FENG X J, ZHANG Z H, YANG X T, et al. Distribution characteristics of surface soil organic carbon and total nitrogen in forest plantation of hilly area of Taihang Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 511-517.

[16] 蒋丽娅, 陈静, 桑玉强, 等. 不同 ET_0 计算方法在华北土石山区的适用性评价[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(5): 830-838.

JIANG L Y, CHEN J, SANG Y Q, et al. Applicability evaluation of different ET_0 calculation methods in rocky mountainous areas of North China[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(5): 830-838.

[17] 杨子, 范世献, 周芮宸, 等. 太行山南麓优势树种不同坡向下的叶功能及土壤养分差异[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 408-414.

YANG Z, FAN S X, ZHOU R C, et al. Leaf function and soil nutrient differences of dominant tree species on different slope aspects at the south foothills of Taihang Mountains[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(3): 408-414.

[18] 刘雅辰, 赵琛迪, 杨子, 等. 太行山南麓不同龄级荆条光合特性及光响应研究[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(2): 203-208, 230.

LIU Y C, ZHAO C D, YANG Z, et al. Study on photosynthetic characteristics and light response of *Vitex negundo* of different age classes at the southern foot of Taihang Mountain[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(2): 203-208, 230.

[19] REYNOLDS W D, ELRICK D E. Ponded infiltration from a single ring: I. analysis of steady flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(5): 1233-1241.

[20] ZHANG S Y, HOPKINS I, GUO L, et al. Dynamics of infiltration rate and field-saturated soil hydraulic conductivity in a wastewater-irrigated cropland[J]. Water, 2019, 11(8): 1632.

[21] QI Y L, WEI W, LI J R, et al. Effects of terracing on root distribution of *Pinus tabulaeformis* Carr. forest and soil properties in the Loess Plateau of China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 721: 137506.

[22] 王青宁, 衣学慧, 王晗生, 等. 黄土坡面植被重建鱼鳞坑整地的土壤水分特征[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 866-872.

WANG Q N, YI X H, WANG H S, et al. Soil moisture regime of fish-scale pits for land preparation engineering in loess slope revegetation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 866-872.

[23] LI H C, ZHAO X N, GAO X D, et al. Effects of water collection and mulching combinations on water infiltration and consumption in a semiarid rainfed orchard[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 432-441.

[24] LIU K, YE W J, SUN X Y, et al. Revealing the mechanisms of water permeability enhancement of urban loess subg

rades due to vibration application[J]. *Transportation Geotechnics*, 2024, 48: 101346.

[25] 马雪燕, 穆兴民, 王双银, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 89-96, 104.

MA X Y, MU X M, WANG S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the Gully Regions on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 89-96, 104.

[26] 周一诺, 马新, 刘文利, 等. 施用不同有机物料对坡耕地水分入渗特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(6): 802-813.

ZHOU Y N, MA X, LIU W L, et al. Effects of different organic materials on water infiltration characteristics of sloping farmland[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(6): 802-813.

[27] 苏辉东, 赵思远, 贾仰文, 等. 崇陵流域土石山区坡面优先流发育路径研究[J]. *水文*, 2019, 39(6): 1-6.

SU H D, ZHAO S Y, JIA Y W, et al. Development path of preferential flow on soil-rock hillslope in Chongling watershed[J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(6): 1-6.

[28] 盛贺伟, 蔡强国, 孙莉英. 黄土质地对坡面侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 31-35.

SHENG H W, CAI Q G, SUN L Y. Impacts of loessial texture on slope erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 31-35.

[29] 胡香港, 周美, 邓显瑜. 砾石土特征分析及数字岩心重构[J]. *地球科学前沿*, 2023, 13(11): 1239-1251.

HU X G, ZHOU M, DENG X Y. Analysis of gravelly soil characteristics and digital core reconstruction[J]. *Advances in Geosciences*, 2023, 13(11): 1239-1251.

[30] GARG A, HUANG H, CAI W L, et al. Influence of soil density on gas permeability and water retention in soils amended with in-house produced biochar[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(3): 593-602.

[31] 苏智冉. 砾石对华北石质山区人工林土壤大孔隙及优先流特征影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.

SU Z R. Effects of gravel on soil macropores and preferential flow characteristics in artificial forests of rocky mountainous areas in Northern China[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.

[32] DONG H, HUANG R Q, GAO Q F. Rainfall infiltration performance and its relation to mesoscopic structural properties of a gravelly soil slope[J]. *Engineering Geology*, 2017, 230: 1-10.

[33] JIA Y Y, HUAN H, ZHANG W J, et al. Soil infiltration mechanisms under plant root disturbance in arid and semi-arid grasslands and the response of solute transport in rhizosphere soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 957: 177633.

[34] 顾金普, 王双银, 龚家国, 等. 华北土石山区典型小流域土壤水文特征与模拟研究[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(4): 22-25.

GU J P, WANG S Y, GONG J G, et al. Study on soil characteristics and simulation of typical basin in rocky mountain area of North China[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(4): 22-25.

[35] HE Y B, WU Z L, ZHAO T M, et al. Different plant species exhibit contrasting root traits and penetration to variation in soil bulk density of clayey red soil[J]. Agronomy Journal, 2022, 114(1): 867-877.

[36] 陈仕媛, 马岚, 杨浩宇, 等. 冻融循环对不同砾石含量土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(14): 6719-6729.

CHEN S Y, MA L, YANG H Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate stability and erodibility of soils with different gravel contents [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(14): 6719-6729.

[37] 赵建文, 李金麟, 王圣杰. 祁连山土壤水分时空变化特征及主要驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2025, 48(08): 1480-1491.

ZHAO J W, LI J L, WANG S J. Characteristics of spatial and temporal variation of soil moisture and analysis of main driving factors in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(08): 1480-1491.