

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.032 CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.032

温永福,李梦真,丁建川,等.黄土丘陵沟壑区植物根系对土壤优先流的影响机理[J].水土保持学报,2026,40(2):195-204.

WEN Yongfu, LI Mengzhen, DING Jianchuan, et al. Influencing Mechanisms of plant roots on soil preferential flow in loess hilly-gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 195-204.

## 黄土丘陵沟壑区植物根系对土壤优先流的影响机理

温永福<sup>1,2,3</sup>, 李梦真<sup>4</sup>, 丁建川<sup>4</sup>, 周雨晨<sup>1</sup>, 高鹏<sup>3</sup>, 穆兴民<sup>3</sup>

(1.河北水利电力学院水利工程系,河北沧州061001; 2.河北省滨海湿地水资源调配及生态保护技术创新中心,河北沧州061001; 3.中国科学院水土保持与生态环境研究中心,陕西杨凌712100; 4.河北水利电力学院计算机系,河北沧州061001)

**摘要:** [目的] 为探究黄土丘陵沟壑区植物根系对土壤优先流的影响机理。 [方法] 采用原位双环染色示踪试验结合根系扫描技术系统分析黄土丘陵沟壑区不同植被恢复类型和恢复时间土壤的优先流变化,阐明植物根系对优先流的影响机理。 [结果] 植被恢复增强优先流发育程度,且随着植被恢复时间的增加而增强。相较于农地,植被恢复地(林地40a、林地20a、草地40a、灌木地40a、草地20a及灌木地20a)的最大染色深度增加1.3~3.4倍。植被恢复显著增加根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度( $p < 0.01$ ),且随植被恢复年限的增加而增大,随土层深度的增加而显著减小( $p < 0.01$ )。根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度单独解释优先流方差的73.7%、76.6%、68.9%和80.6%,共同解释度为58.2%。 $d > 2$  mm根系对优先流影响最大,其次为 $d \leq 1$  mm根系,最后为 $1 \text{ mm} < d \leq 2$  mm的根系。 [结论] 林地、灌木地和草地通过发达的根系形态促进优先流发育,增强土壤入渗能力,有效减缓水土流失,为新时期黄土高原植物根系影响陆地水文过程的研究提供理论支撑。

**关键词:** 优先流; 根系特征; 植被恢复; 土壤入渗; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S812.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)02-0195-10

## Influencing Mechanisms of Plant Roots on Soil Preferential Flow in Loess Hilly-Gully Region

WEN Yongfu<sup>1,2,3</sup>, LI Mengzhen<sup>4</sup>, DING Jianchuan<sup>4</sup>, ZHOU Yuchen<sup>1</sup>, GAO Peng<sup>3</sup>, MU Xingmin<sup>3</sup>

(1. Department of Hydraulic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China; 2. Hebei Technology Innovation Center for Coastal Wetland Water Resources Allocation and Ecological Protection, Cangzhou, Hebei 061001, China; 3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Department of Computer Science, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the influencing mechanisms of plant root systems on soil preferential flow in the loess hilly-gully region. [Methods] In-situ double-ring dye tracer experiments combined with root scanning techniques were used to systematically analyze the variations in soil preferential flow under different vegetation restoration types and restoration ages in the loess hilly-gully region, and to elucidate the mechanisms by which plant roots influence preferential flow. [Results] Vegetation restoration enhanced the development of preferential flow, and this enhancement increased with vegetation restoration age. Compared to cropland, the maximum dye-stained depth increased by 1.3 – 3.4 times in the vegetation restoration lands (forestland 40 a, forestland 20 a, grassland 40 a, shrubland 40 a, grassland 20 a, and shrubland 20 a). Vegetation restoration significantly increased root length density, root surface area density, root volume density, and root

收稿日期: 2025-09-22 修回日期: 2025-11-01 录用日期: 2025-11-10 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(42277354, U2243211); 河北省教育厅科学研究项目(QN2025293)

第一作者: 温永福(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事生态水文与流域水文研究。E-mail: wenyongfu@hbwe.edu.cn

通信作者: 高鹏(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与流域水文研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

weight density ( $p < 0.01$ ). These root characteristics increased with vegetation restoration age and significantly decreased with increasing soil depth ( $p < 0.01$ ). Root length density, root surface area density, root volume density, and root weight density explained 73.7%, 76.6%, 68.9%, and 80.6% of the variance in preferential flow, respectively, with a combined explanatory power of 58.2%. Roots with a diameter of  $d > 2$  mm had the greatest effect on preferential flow, followed by roots with  $d \leq 1$  mm, and finally roots with  $1 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ . [Conclusion] Forestland, shrubland, and grassland promote the development of preferential flow through their developed root morphology, thereby enhancing soil infiltration capacity and effectively mitigating soil erosion. This study provides theoretical support for research on how plant roots influence terrestrial hydrological processes in the Loess Plateau in the new era.

**Keywords:** preferential flow; root characteristics; vegetation restoration; soil infiltration; loess hilly-gully region

Received: 2025-09-22

Revised: 2025-11-01

Accepted: 2025-11-10

Online(www.cnki.net): 2025-12-26

植被恢复是黄土高原乃至整个干旱和半干旱地区防治土壤侵蚀、保持水土和恢复生态环境的关键措施之一<sup>[1]</sup>。由于该地区水资源稀缺,植被总体呈空间异质分布。不同植被恢复方式及恢复年限下,根系形态特征对土壤入渗和优先流的影响及其潜在机制尚不清楚,制约了流域水文过程的准确评估与区域生态发展<sup>[2-3]</sup>。

土壤优先流是指水分或溶质绕过土壤基质并以非达西定律的形式迅速渗入土壤深层的现象<sup>[4-5]</sup>。尽管优先流路径在土壤总体积中所占比例有限,但优先流可能占总入渗量的11%~94%<sup>[6]</sup>。染色示踪技术是研究优先流最常用的方法,可直接观察、评估和分析优先流的路径数量和分布。作为染料示踪剂,亮蓝溶液可以直观地显示土壤中不均匀流动的分布,即优先流,并且可以较容易识别出染色土壤剖面照片上的染色区域和未染色区域,表征优先流分布<sup>[7]</sup>。在黄土高原开展优先流染色示踪试验的研究较为广泛,但多集中于单一土地利用类型,缺乏不同植被恢复类型及恢复年限下优先流变化过程的系统对比研究,尤其缺乏从多植被类型、多恢复年限综合评价优先流发生与发展规律的探讨,这些不足限制了对该区域生态恢复进程中水文过程和演变过程的深刻认识。

植物根系作为“植物-土壤-水文”系统中的关键因子,对土壤优先流及其他水文过程具有重要影响<sup>[8-9]</sup>。根系对优先流的影响与根系粗细密切相关。BODNER等<sup>[10]</sup>系统研究细根与粗根对土壤水分运动机制表明,粗根与细根均能够不同程度增加土壤水分运动,但作用机制不同;WU等<sup>[11]</sup>研究发现,根系直径大小对土壤入渗速率产生明显影响,特别在初始入渗阶段及前15 min内,粗根与细根之间的差异在提高水流入渗速率方面发挥重要作用。然而,尽管有较多研究表明植物根系对优先流的发展具

有重要作用,但在水土流失核心区之一的黄土丘陵沟壑区,开展此项研究具有特殊的紧迫性和典型性。该区域强烈的侵蚀动力、独特的黄土土壤特性及大规模的植被恢复实践,使得阐明不同植被恢复类型与恢复年限下植物根系对优先流的具体影响机制,成为准确评估生态水文效应、优化植被恢复策略的关键。

鉴于此,本研究通过染色示踪试验结合根系扫描技术系统研究黄土丘陵沟壑区不同植被恢复类型与恢复年限下优先流变化及植物根系对土壤优先流的影响机制。具体目的为:1)对比分析不同植被恢复类型及不同植被恢复年限下土壤优先流特征变化;2)明确不同植被恢复类型及不同植被恢复年限下植物根系特征差异;3)阐明植物根系对优先流的影响机理。研究结果可为黄土丘陵沟壑区乃至整个黄土高原植被恢复树种的选择提供理论支持,并为水土保持工作提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

纸坊沟流域位于陕西省安塞区(36°42′42″~36°46′28″N, 109°13′46″~109°16′03″E),总面积8.27 km<sup>2</sup>,主沟道长8.1 km,海拔1 010~1 431 m,呈南北狭长型,地处黄土高原丘陵区,属于该区域的第二副区。该研究区为暖温带半干旱气候,年平均气温8.8℃,年平均最高气温16.9℃,年平均最低气温3.2℃,无霜期约160 d,多年平均降水量458.30 mm(1990—2023年),年内降雨分布不均,以暴雨为主,多集中在6—9月,约占全年降水量的72.8%。年平均径流量14.95 mm,输沙量3.18×10<sup>4</sup> t(1993—2019年)。自开展小流域综合治理后,流域年均径流量和输沙量均显著降低。目前,流域内主要植物类型为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、旱柳(*Salix matsudana*)、小

叶杨 (*Populus simonii*)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草 (*Stipa bungeana*) 和铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 等<sup>[12]</sup>。

1.2 染色示踪试验设计与处理

采用空间代替时间的方法选择试验样地<sup>[13]</sup>。在研究区内选取包含主要植被恢复类型的 6 个样地

(20 m×15 m,彼此间距在 5 km 以内),分别为林龄为 20、40 a 的林地(刺槐),灌龄为 20、40 a 的灌木地(柠条)及草龄为 20、40 a 的草地(以铁杆蒿、芨蒿、长芒草、白羊草为主),1 个农地(玉米)作为对照。确保所选的植被恢复样地退耕前均为农地,且所有试验样地均具有相近的坡度、坡向、坡位等立地条件<sup>[14]</sup>。试验样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sampling plots

样地类型	植被类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	坡向	坡度/(°)	坡位	植被盖度/%	年限/a
林地	刺槐	16.00±1.63	59.26±0.49	24.74±2.11	阴坡	21.67±1.56	坡中	50.00±4.67	20
林地	刺槐	13.21±0.88	61.25±1.66	25.54±2.50	阴坡	23.67±4.22	坡中	61.33±4.22	40
灌木地	柠条	17.59±0.61	59.80±1.10	22.61±1.64	阴坡	19.33±2.89	坡中	52.67±2.89	20
灌木地	柠条	16.51±0.55	61.82±1.97	21.67±1.80	阴坡	23.33±1.56	坡中	60.67±8.22	40
草地	白羊草、长芒草、铁杆蒿等	13.44±2.03	59.89±0.38	26.67±1.80	阴坡	17.33±4.22	坡中	44.67±4.22	20
草地	白羊草、长芒草、铁杆蒿等	16.80±0.48	65.03±1.71	18.17±1.70	阴坡	24.33±1.56	坡中	60.33±2.89	40
农地	玉米	10.05±0.93	63.25±1.17	26.25±1.18	阴坡	5.33±1.56	坡中	16.67±1.56	—

注:表中数据为平均值±标准差。

在每块样地采用对角线法布设 3 个样点,各样点之间的距离设置在 5 m 以上(图 1)。染色示踪试验之前,去除土层表面 0~5 cm 枯枝落叶,整平土壤。在各样点分别将内径为 30 cm、外径为 45 cm 的双环入渗仪插入土壤 10 cm,可切断表层优先路径对优先流的影响。入渗仪由 2 个量程为 10 L 的马氏瓶供水,采用定水头法测定入渗参数。内外环各放置直径为 5 cm 的滤纸,缓冲水流,防止对表层土壤结构的破坏。染色示踪试验开始后,同时打开内环与外环

供水阀(内环为 4.0 g/L 的 Brilliant Blue FCF 溶液,外环为清水),当内外环均达到预设水位(5 cm 定水头)后开始计时,记录一定时间点马氏瓶中溶液体积,直至均达到稳定入渗速率后停止试验(连续 3 次入渗量变化率<5%)<sup>[15]</sup>。

入渗结束 24 h 后,沿内环 1/2 处开挖深度为 1 m 的垂直剖面。每个垂直剖面开挖后,利用标尺标注剖面的宽度与深度,使用高清数码相机(Nikon D7500, Japan)采集剖面图像。

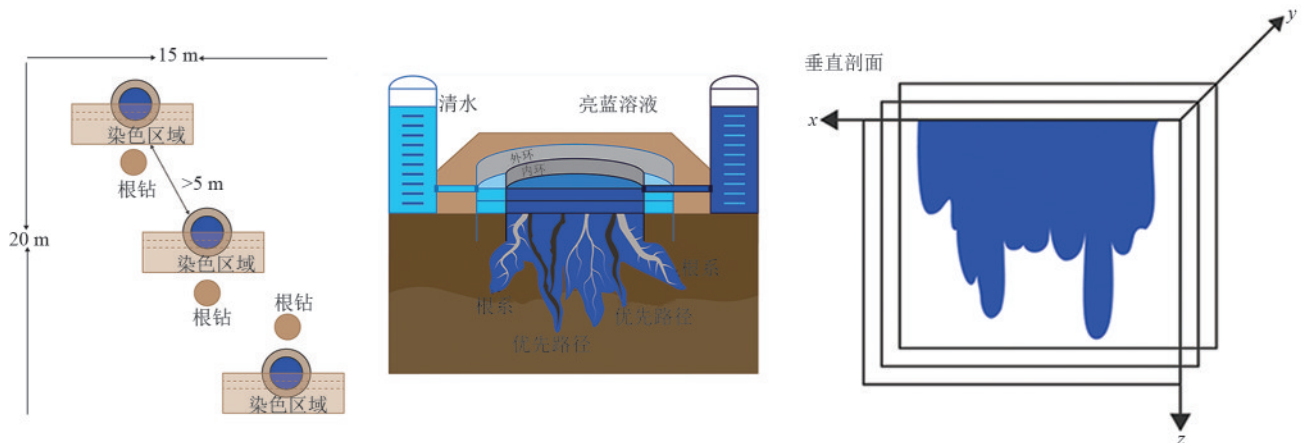


图 1 染色示踪试验布设及图像采集

Fig. 1 Layout of dye tracer test and collection of dyeing images

1.3 根系样品采集和测定

利用 100 cm<sup>3</sup> 环刀以 10 cm 深度间隔在垂直剖面采集根系样品,共采集 105 个根系样本(7 个样地类型×5 个土层×3 个重复),并将样品用保鲜膜包裹后保存于冰箱中。环刀中的根系样品进行处理:首先,将环刀内根系轻轻抖落掉多余的土壤和

杂质,通过目视方法将优先流区内染色和非染色根系区分开,最终形成 3 类根系样品,分别为优先流区染色根系、优先流区非染色根系和基质流区根系。分别对 3 类根系样品用清水冲洗的同时过 0.25 mm 的土筛,筛选出所需要的根系样品,将根系冲洗干净后,用无纺布吸干根系水分,按照分类

放入信封中。平铺至扫描版上,使得每一根根系无遮挡,无重叠,使用根系扫描仪(最高分辨率为 6400 DPI)将根系扫描为 300 DPI 的图像(Epson V900 Photo Scanner, 日本),利用 WinRhizo 根系分析系统(2009 a, Regent Instruments, Quebec, QC, 加拿大)编制程序将根系按照直径分别划分为  $d \leq 1 \text{ mm}$ ,  $1 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$  和  $> 2 \text{ mm}$ , 分别得到不同径级范围内的总根长、根表面积和根体积,计算根长密度[RLD,  $\text{cm}/(100 \text{ cm}^3)$ ]、根表面积密度[RSD,  $\text{cm}^2/(100 \text{ cm}^3)$ ]、根体积密度[RVD,  $\text{cm}^3/(100 \text{ cm}^3)$ ]。最后将不同类别根系样品放入  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温烘箱内,使其干燥 72 h 后称重,得到根重密度[RWD,  $\text{g}/(100 \text{ cm}^3)$ ]。公式为:

$$\text{RLD} = \frac{\text{RL}}{V} \quad (1)$$

$$\text{RSD} = \frac{\text{RS}}{V} \quad (2)$$

$$\text{RVD} = \frac{\text{RV}}{V} \quad (3)$$

$$\text{RWD} = \frac{\text{RW}}{V} \quad (4)$$

式中:RL 为根系总长度,cm;RS 为根系总表面积,  $\text{cm}^2$ ;RV 为根系总体积,  $\text{cm}^3$ ;RW 为根系干量,g;V 为每层提取根系的土壤体积,  $100 \text{ cm}^3$ 。

#### 1.4 染色图像分析和优先流参数计算

分别利用 Adobe Photoshop 2020、Image Pro Plus v6.0 和 Python3.1.2 软件对染色图片进行处理得到优先流参数指标。具体步骤为:首先利用 Adobe Photoshop 2020“镜头校正”功能对染色图片进行空间校正,使染色图片与镜头平行无变形。将校正后的染色图片进行校准和移动使其与顶部和侧向参照标尺重合。随后利用“色彩功能”对染色图片进行色彩增强、去噪点等操作。利用“灰度阈值”将染色图片转化为灰度图(TIFF)格式。随后将灰度图导入 Image Pro Plus v6.0 软件包,利用 Bitmap Analysis 功能将灰度图输出为仅有“0”和“255”排列组合的 excel 数据表格,最后利用 Python 3.1.2 编程获取优先流参数。

1)最大染色深度(MDD)指在土壤剖面中染色最大深度,cm。

2)染色面积比(DC)指在土壤剖面中染色区域总面积占剖面总面积的比例,计算公式为:

$$\text{DC} = \left( \frac{D}{D + \text{ND}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中:D 为染色剂所在区域面积,  $\text{cm}^2$ ;ND 为最大染色深度对应的矩形范围内未染色区域面积,  $\text{cm}^2$ 。本研究

土壤剖面总宽度为 300 mm(设置像素为 300 pixels)。

3)基质流深度(UniF)指染色剂沿土壤基质均匀入渗的深度(cm),本研究参考相关研究<sup>[16]</sup>,定义为染色面积比达到 80% 所对应的深度,cm。

4)优先流比(PFF)指土壤染色剖面上优先流区占总染色面积的比例,计算公式为:

$$\text{PFF} = \left( 1 - \frac{\text{UniF} \times W}{\text{ToA}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中:W 为染色剖面宽度,本研究为 300 mm;ToA 为垂直剖面染色总面积,  $\text{cm}^2$ 。优先流比越大,说明优先流发育强烈。

5)长度指数(LI)指沿垂直剖面连续上下两层之间染色面积比差值的绝对值之和<sup>[17]</sup>,计算公式为:

$$\text{LI} = \sum_{i=1}^n | \text{DC}_{i+1} - \text{DC}_i | \quad (7)$$

式中:i 为垂直剖面土壤层;DC<sub>i</sub>和 DC<sub>i+1</sub> 为第 i 层和第 i+1 层土壤染色面积比,%;n 为剖面土壤层总层数。为提高精度,本研究以 1 mm 为 1 层。

#### 1.5 统计分析

采用双因素方差分析法(Two-ANOVA)研究植被恢复类型和土层深度对根系特征的影响。为综合评价优先流发育强度,根据 YU 等<sup>[18]</sup>的方法建立优先流综合指数。对优先流参数(最大染色深度、基质流深、优先流比、染色面积比和长度指数)进行 KMO 和 Bartlett 检验,KMO 检验统计值为 0.799 ( $> 0.7$ ),表明变量之间存在很强的相关性,且具有高度显著性 ( $p < 0.01$ ),表明该数据适合主成分分析(principal component analysis, PCA)。优先流综合指数是由最大染色深度、基质流深、优先流比、染色面积比和长度指数的主成分分析的第 1 个轴导出的合成变量。皮尔逊相关性分析用于明确不同径级的根系参数与优先流参数的相关性。同时采用多元线性回归分析辨析不同径级根系参数对优先流的贡献度。进行方差分解分析(variation partitioning analysis, VPA),以量化根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度对优先流综合指数的相对贡献。双因素方差分析通过 SPSS Statistics. ver. 26.0 软件实现,主成分分析、相关性和方差解释分析均由 R version 4.0.3 软件实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被恢复方式下土壤优先流特征

不同植被类型下的优先流最大染色深度均表现出较强的空间异质性(图 2 和图 3)。林地、灌木地和草地的最大染色深度普遍高于农地,且这些土地利用类型的优先流非均匀性较强,波峰与波谷交替的

结构明显,并且随着植被恢复年限的增加,优先流的最大染色深度也随之增加,优先流的非均匀性和波动性也越强;相反,农地的最大染色深度较小,水流的非均匀性较弱,且波峰与波谷交替的分布不明显。

最大染色深度表现为林地 40 a(64.52 cm) > 林地 20 a(48.54 cm) > 草地 40 a(38.63 cm) > 灌木地 40 a(31.75 cm) > 草地 20 a(26.12 cm) > 灌木地 20 a(23.68 cm) > 农地(18.94 cm)。

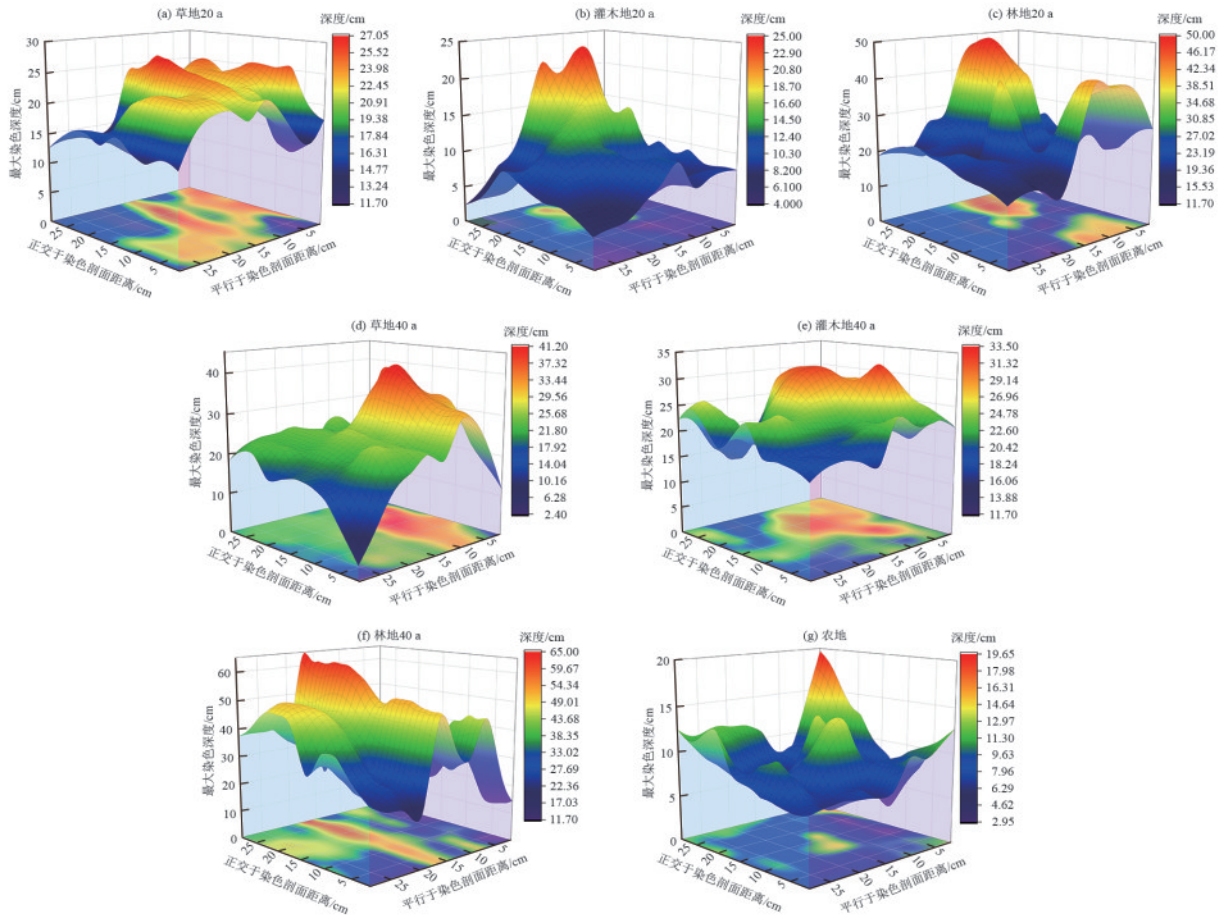


图 2 不同植被恢复方式下土壤优先流空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of soil preferential flow under different vegetation restoration types

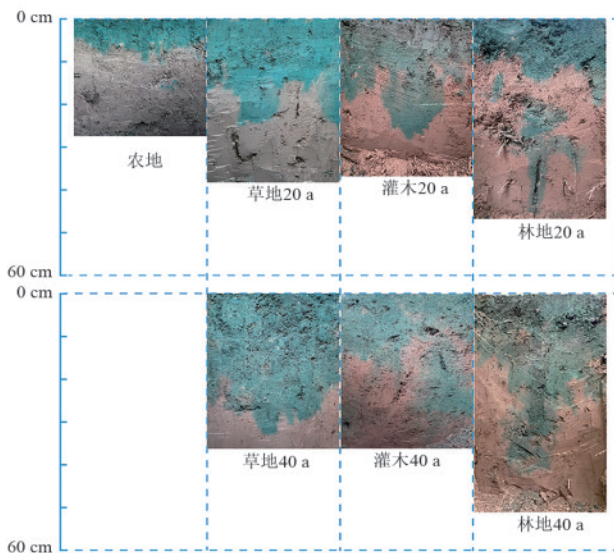


图 3 不同植被恢复方式下典型垂直剖面染色形态特征

Fig. 3 Dyeing morphological characteristics of typical vertical profiles under different vegetation restoration types

由表 2 可知,植被恢复样地最大染色深度显著高于农地( $p < 0.01$ ),且相同恢复年限下林地显著高于灌木地和草地( $p < 0.01$ ),相同土地利用类型下植被恢复 40 a 显著高于 20 a。农地染色面积比明显高于植被恢复地( $p < 0.05$ ),植被恢复地中林地优先流发育最强,其次为草地,最后是灌木地,且植被恢复年限越长优先流发育越强。农地优先流比仅为 29.43%,而在草地 20、40 a、灌木地 20、40 a、林地 20、40 a 样地中,该值分别为 36.11% 和 42.07%、33.45% 和 41.50%、40.36% 和 43.88%。农地的长度指数平均值(187.78)低于林地 20、40 a(329.67、386.00),灌木地 20、40 a(242.77、337.67),草地 20、40 a(224.41、320.12)。综上所述,农地转换为林地、灌木地和草地后优先流发育程度增强,其中林地的优先流发育程度最高,灌木地和草地次之。各植被恢复样地均随植被恢复年限的增加,优先流发育程度也随之增强。

表 2 土壤垂直剖面优先流参数特征  
Table 2 Characteristics of preferential flow parameters in vertical soil profiles

样地类型	最大染色深度/cm	染色面积比/%	基质流深度/cm	优先流比/%	长度指数
林地 20 a	34.30±8.80b	58.68±14.72bcd	19.16±4.23bc	40.36±2.82ab	329.67±29.48b
林地 40 a	45.80±54.06a	45.75±8.62d	27.23±1.93a	43.88±3.64a	386.00±8.73a
灌木 40 a	29.10±45.89b	55.41±6.30bcd	16.59±0.74bc	41.50±8.32ab	337.67±30.61b
灌木 20 a	24.02±0.64bc	70.54±1.94ab	15.99±0.76c	33.45±2.33bc	242.77±6.38c
草地 20 a	25.81±2.57bc	68.57±2.86abc	16.23±2.60bc	36.11±3.19abc	224.41±9.35cd
草地 40 a	33.96±6.45b	52.87±2.73cd	22.38±5.29ab	42.07±0.12ab	320.12±10.51b
农地	18.04±1.23c	75.39±3.06a	8.00±2.26d	29.43±1.98c	187.78±26.65d
显著性水平( $p$ 值)	<0.01	0.011	<0.01	0.025	<0.01

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示在不同样地类型差异显著( $p<0.05$ )。

主成分分析结果表明,第1轴解释优先流参数变异的78.6%,表明优先流综合指数适合作为评价优先流的综合指标(图4a)。

图4b进一步分析表明,优先流综合指数贡献率依次为优先流比(23.07%)>最大染色深度(21.48%)>基质流深度(20.01%)>染色面积比(18.14%)>长度指数(16.58%)。由图4c可知,植被

恢复类型对优先流综合指数具有显著作用( $p<0.05$ )。优先流综合指数由大到小依次为林地40 a(3.10)>林地20 a(2.23)>草地40 a(1.15)>灌木地40 a(-0.61)>灌木地20 a(-1.33)>草地20 a(-1.36)>农地(-3.00)。综合比较4种土地利用类型可知,优先流在林地中发育最强,其次为灌木地和草地,最后为农地。

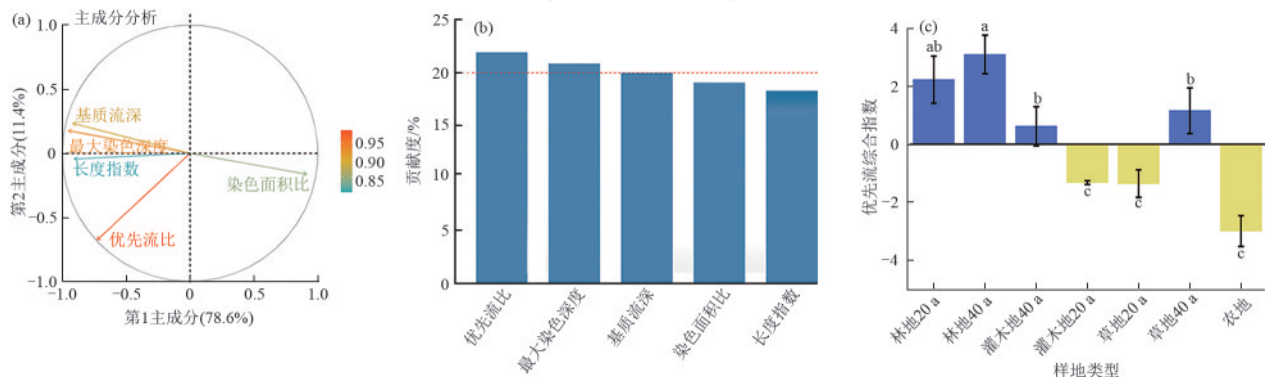


图 4 各优先流参数与优先流综合指数关系

Fig. 4 Relationships between preferential flow parameters and composite preferential flow index

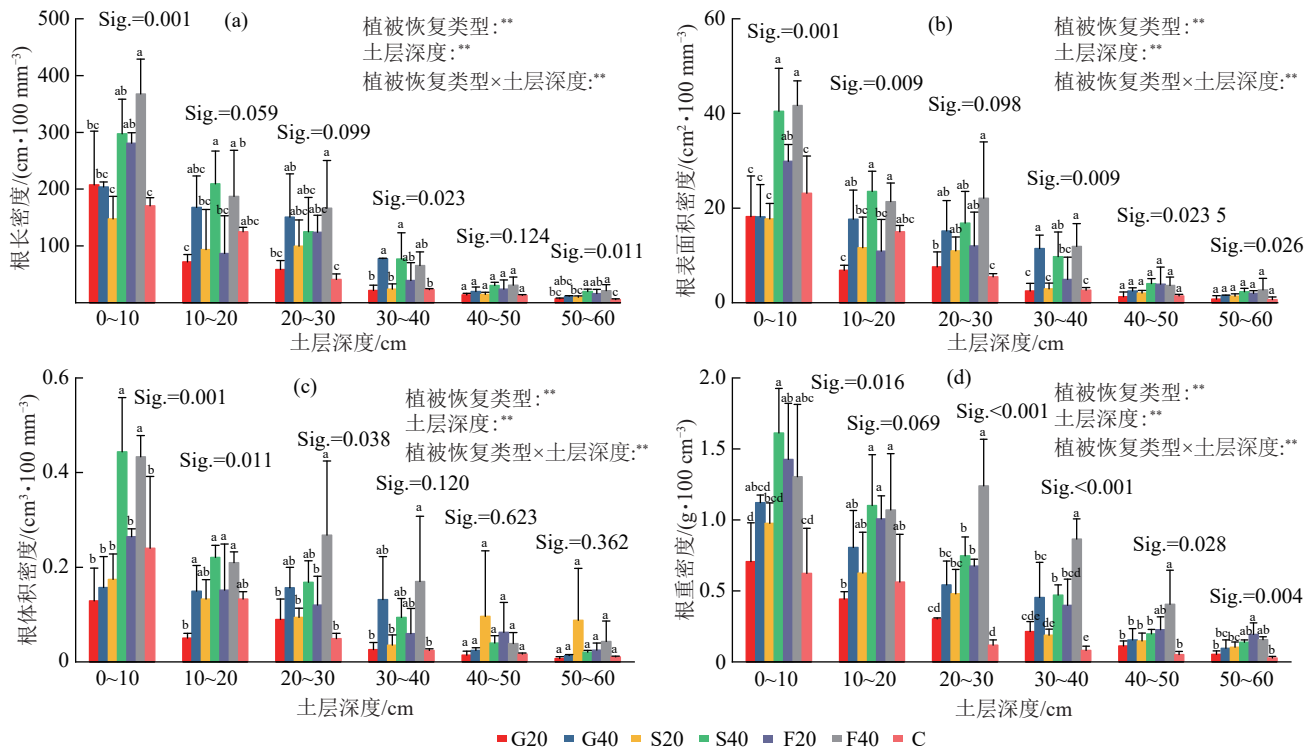
## 2.2 不同植被恢复下植物根系特征

植被恢复类型、土层深度及二者交互作用对根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度均具有极显著影响( $p<0.01$ )(图5)。总体表现为植被恢复样地的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密显著大于农地,并且植被恢复时间越长,根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密越大。所有样地的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密均随土层的增加而降低。在0~20 cm土层中,除草地20 a、草地40 a和灌木地20 a样地外,其他退耕地的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密均显著高于农地( $p<0.05$ ),分别增加16.98%~182.64%、0.92%~65.78%、12.15%~75.59%和99.76%~127.12%。在20~40 cm土层中,所有退耕地的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密均显著高于农地( $p<$

0.05),分别增加18.55%~250.65%、14.73%~322.86%、43.97%~521.00%和158.25%~951.33%。在40~60 cm土层中,所有退耕地的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密均显著高于农地( $p<0.05$ ),分别增加13.71%~212.92%、24.08%~225.20%、35.44%~219.03%和1107.16%~574.82%。根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密在4种土地利用类型中从大到小依次表现为林地>灌木地>草地>农地。

## 2.3 优先流与根系特征的关系

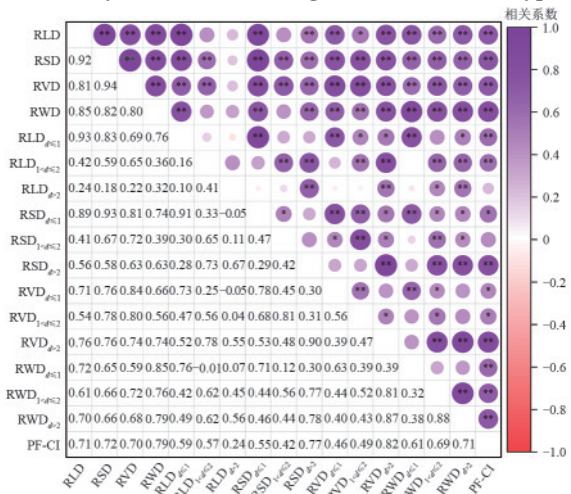
优先流综合指数与总根长密度、总根表面积密度、总根体积密度、总根重密度、 $RLD_{d\leq 1}$ 、 $RLD_{1<d\leq 2}$ 、 $RSD_{d\geq 2}$ 和 $RVD_{d\geq 2}$ 呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与 $RSD_{1<d\leq 2}$ 、 $RVD_{d\leq 1}$ 和 $RVD_{1<d\leq 2}$ 呈显著正相关( $p<0.05$ )。总体来看,相较于 $d\leq 1$  mm和 $1\text{ mm}<d\leq 2$  mm根系参数,总根系参数和 $d>2$  mm根系参数对优先流影响更加显著(图6)。



注: C 表示农地; G20 表示草地 20 a; G40 表示草地 40 a; S20 表示灌木地 20 a; S40 表示灌木地 40 a; F20 表示林地 20 a; F40 表示林地 40 a; 图柱上方不同小写字母表示相同土层不同植被恢复方式间差异显著 ( $p < 0.05$ ); \*\* 表示相同土层不同植被恢复方式间差异极显著 ( $p < 0.01$ )。

图 5 不同植被恢复方式和土层下根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of root length density, root surface area density, root volume density and root weight density under different vegetation restoration types and soil layers



注: RLD 表示根长密度; RSD 表示根表面积密度; RVD 表示根体积密度; RWD 表示根重密度; PF-CI 表示优先流综合指数; \* 表示  $p \leq 0.05$ ; \*\* 表示  $p \leq 0.01$ 。

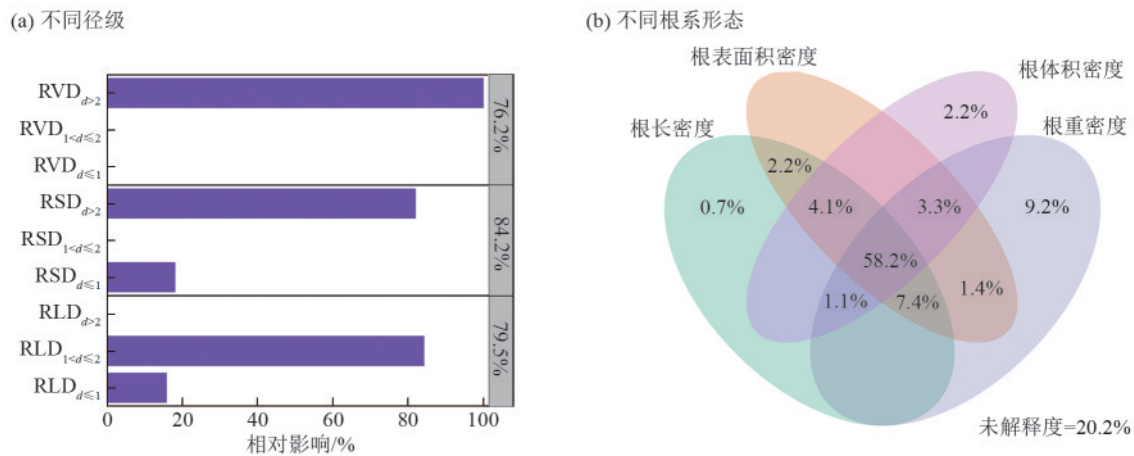
图 6 优先流指标与根系特征参数相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between preferential flow index and root characteristic parameters

多元线性回归分析用于量化  $d \leq 1$  mm、 $1 \text{ mm} < d \leq 2$  mm 和  $d > 2$  mm 根系对优先流综合指数的相对影响(图 7a)。结果表明,各径级的根长密度、根表面积密度和根体积密度对优先流综合指数贡献率分别为 79.5%、84.2% 和 76.2%,仍然表现为根表面积对优先流影响最大,其次为根长,最后为根体积。在不同

径级的根长密度参数中,  $d \leq 1$  mm 根长密度相对影响为 15.77%,  $1 \text{ mm} < d \leq 2$  mm 相对影响为 84.23%,  $d > 2$  mm 根长密度无影响。在不同径级根表面积密度中,  $d \leq 1$  mm 根表面积密度相对影响为 18.03%,  $d > 2$  mm 根表面积密度相对影响为 81.97%,  $1 \text{ mm} < d \leq 2$  mm 根表面积密度无影响。在不同径级的根体积密度中,  $d > 2$  mm 的根体积密度相对影响为 100%,而其他径级的根体积密度则没有影响。综合来看,  $d > 2$  mm 根系对优先流影响最大,其次为  $d \leq 1$  mm 根系,最后为  $1 \text{ mm} < d \leq 2$  mm 的根系。

方差分解分析用于量化每一类解释变量(总根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度)对优先流方差变异的解释贡献度。从图 7b 可以看出,总根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度分别解释优先流方差的 73.7%、76.6%、68.9% 和 80.6%,只有 20.2% 的变异无法解释 ( $p < 0.01$ ),总根重密度对优先流方差解释度最高。共同解释度为 58.2%,说明根长、表面积、体积和重量共同影响着优先流的发育。若不考虑共同解释的部分,仅根重密度单独解释 9.2% 的总变异,说明根系生物量是影响优先流的主导因素。比较根系几何形态特征参数(根长、根表面积和根体积)可知,根表面积对优先流贡献率最大,其次是根长,最后是根体积。



注:RLD表示根长密度;RSD表示根表面积密度;RVD表示根体积密度;RWD表示根重密度;PF-CI表示优先流综合指数。

图7 根系特征对优先流的影响

Fig. 7 Effects of root characteristics on preferential flow

### 3 讨论

#### 3.1 植被恢复对根系特征的影响

植被恢复显著增加根系长度密度、表面积密度、体积密度和根重密度,且植被恢复年限越长,根系长度密度、表面积密度、体积密度和根重密度越大(图5),与WANG等<sup>[19]</sup>和QIU等<sup>[20]</sup>研究结果一致。主要原因是相较于农地,草地、灌木地和林地中根系密度更大,入土深度更深;ARCHER等<sup>[21]</sup>也研究发现,深根系的灌木和乔木比须根系的草本植被根系更加粗大,且生长深度更深,使得灌木和乔木植物能够将土壤水分运移至更深层土壤,促进优先流垂向发育。根系长度密度、表面积密度、体积密度和根重密度均表现出随土层增加而降低的趋势(图5),与FERCHAUD等<sup>[22]</sup>和LUO等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。原因是随着土层的加深,植物自身生长所需的水分和养分含量下降,加之黄土层深厚且土壤体积质量大,严重限制深层土壤根系的生长速度。

#### 3.2 植被恢复对优先流的影响

植被恢复不仅提高土壤的入渗特性,而且改变优先流发展规律<sup>[20]</sup>。黄土丘陵沟壑区长期植被恢复后,植被覆盖显著增加物种多样性,在植物根系、土壤动物等的多重作用下,土壤中形成越来越复杂的孔隙结构,构成土壤中的优先通道,有利于优先流的形成和发育<sup>[3]</sup>。本研究表明,植被恢复显著提高优先流发育程度,并且植被恢复年限越长优先流发育程度越高(图2~图4),与CAI等<sup>[24]</sup>和GUAN等<sup>[25]</sup>研究结果一致。本研究还发现,在4种土地利用类型中,林地的优先流最大入渗深度最大,其次为灌木地和草地,最后为农地。原因是林地相较于其他土地利用具有丰富且发达的根系系统,根系通过物理、化学和生物作用引导优先流向着土壤深层快速移动<sup>[26]</sup>,与MEI等<sup>[27]</sup>和GUAN等<sup>[25]</sup>研究结果相似,而QIU

等<sup>[20]</sup>在相同研究区发现,灌木地的最大染色深度高于林地和草地。可能是他们选择的植被恢复年限较小(仅为20 a),植物根系对优先流作用还相对较小,而土壤理化性质可能主导者优先流的快速移动。本研究进一步发现,植被恢复年限越长,优先流发育越强。CAI等<sup>[24]</sup>研究发现,在黄土高原随着林龄增加,林地优先流发育程度越强,与本试验结果一致。

#### 3.3 植物根系对优先流的影响

植物根系对土壤结构和优先路径有重要影响,进而影响优先流的发育<sup>[28]</sup>。本研究表明,最大染色深度、优先流比、长度指数与总根系长度密度、表面积密度、体积密度和根重密度呈显著正相关( $p < 0.05$ ),染色面积比与总根系长度密度、表面积密度、体积密度和根重密度呈显著负相关( $p < 0.05$ )(图6),与田昕等<sup>[29]</sup>研究结果一致,证实根系对优先流动通道形成的重要作用。各样地土壤剖面的染色模式不同(图2和3),表明根系在入渗过程中起着不同的作用<sup>[26]</sup>。土壤的染色面积随土层深度的增加呈降低趋势(图3)。原因是随着表层植物的生长,土壤中细根的发育更加均匀。较大的根系密度和数量,以及分布在土壤中的复杂根系结构产生大量大孔隙,孔隙连通性增强<sup>[30]</sup>。另一种解释可能是,生物活性随着土层深度的增加而降低,但微生物和植物根系的渗出物可以在土壤中产生有机物,而较大的有机物含量有助于优先流垂向移动<sup>[4]</sup>。根系退化还产生巨大的孔洞,这些孔洞是优先流动的通道<sup>[24]</sup>。

根系形态和尺寸影响着优先流发育程度<sup>[21]</sup>。本研究表明,相较于根长密度、根表面积密度及根体积密度,根重密度是影响优先流的主要因素(图7c),与WU等<sup>[28]</sup>研究结果一致。根系直径范围也是影响土壤水分的入渗和再分配的重要因素之一<sup>[21]</sup>。本研究还发现,粗根( $d > 2$  mm)对优先流发育的影响最显

著,其次是细根( $d \leq 1 \text{ mm}$ ),而 $1 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 根系对优先流影响最小(图7b),与DEVITT等<sup>[31]</sup>和LUO等<sup>[23]</sup>研究结论部分一致。DEVITT等<sup>[31]</sup>通过主成分分析表明,优先流发育与根系密切相关,粗根对优先发育的影响大于细根。而LUO等<sup>[23]</sup>证明粗根比细根对优先流的贡献更小,因为细根在土壤剖面的总根系中所占比例要大得多。细根( $d \leq 1 \text{ mm}$ )和粗根( $d > 2 \text{ mm}$ )对优先流过程影响机制不同。细根与优先流指标之间存在显著的相关性(图6)。BODNER等<sup>[10]</sup>研究表明,细根导致孔隙空间不均匀,微孔体积增大。它们很容易扭曲形成一个复杂的根系网络,增加土壤的水文连通性。有研究<sup>[22]</sup>表明,细根比粗根具有更高的根长密度和分解能力,增强团聚体的稳定性,同时改善土壤孔隙度,减少松散黏土颗粒在水道中的堵塞。同时,在自然条件和土壤特性共同影响下,细根较短,数量较多,比表面积较大对优先流贡献比例增大<sup>[32]</sup>。王佩佩等<sup>[26]</sup>研究发现,细根( $d \leq 1 \text{ mm}$ )是影响半干旱区土壤入渗潜力的主要因素,与本研究结果部分一致。粗根具有刚度高、穿透力强、周转率慢的特点,易于开辟新的生长路径,向更深的土壤深度生长<sup>[10]</sup>。因此,粗根可以诱导土壤颗粒强烈的运动和重新排序,增加团聚体间孔隙空间,促进水分向更深的土层渗透,从而促进优先流的发生<sup>[33]</sup>。WU等<sup>[28]</sup>研究指出, $2 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$ 的根系对优先流有显著的正向影响,而 $5 \text{ mm} < d < 15 \text{ mm}$ 的根可能对优先流有潜在的抑制作用。WANG等<sup>[34]</sup>研究指出,粗根( $d \geq 2 \text{ mm}$ )通过具有高穿透性的粗根( $d \geq 2 \text{ mm}$ )发展孔径和连通性来增加优先流路径,从而促进土壤水向深层运移。

不同植被恢复方式下植物根系特征存在显著差异,进而影响优先流特征,最终影响陆地水文过程,对水资源极度短缺的黄土丘陵沟壑区至关重要。因此,在黄土丘陵沟壑区植被恢复规划中,需综合考虑植被类型与恢复年限,适当延长林草恢复周期,保证根系系统充分发育,以最大化其水文调控效益。

## 4 结论

1) 植被恢复显著增加植物根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度,且植被恢复年限越长,根系根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度越大。

2) 植被恢复促进土壤优先流的发育,且随着植被恢复年限的增加而增强。相较于农地,植被恢复地(林地40 a、林地20 a、草地40 a、灌木地40 a、草地20 a及灌木地20 a)的最大染色深度增加1.3~3.4倍。

3) 根系根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度对优先流均具有显著影响( $p < 0.05$ ),对优

先流的影响从大到小依次表现为根重密度>根表面积密度>根长密度>根体积密度。

4) 不同径级的根系对优先流的影响差异显著,其中 $d > 2 \text{ mm}$ 根系对优先流影响最大,其次是 $d \leq 1 \text{ mm}$ 根系, $1 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 根系对优先流影响最小。

总之,植被恢复总体上促进土壤优先流的发育。但本研究仅选取黄土丘陵沟壑区的农地及退耕年限为20、40 a的林地、草地和灌木地,未来可增加更多不同退耕年限、植被类型及多种植被类型组合的研究,为该区域植被恢复过程中的植被的选择和配置提供科学指导。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 牛健植,余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 110-116.  
NIU J Z, YU X X. Preferential flow and its scientific significance [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 110-116.
- [3] WEN Y F, LIM Z, GAO P, et al. Soil physicochemical properties and roots promoted preferential flow development after vegetation restoration [J]. Journal of Hydrology, 2025, 659: e133349.
- [4] ALLAIRE S E, ROULIER S, CESSNA A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques [J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1/2): 179-204.
- [5] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality [J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279-302.
- [6] ALAOU I A. Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow [J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 536-546.
- [7] ZHANG J, LEI T W, YIN Z, et al. Effects of time step length and positioning location on ring-measured infiltration rate [J]. Catena, 2017, 157: 344-356.
- [8] PORPORATO A, D'ODORICO P, LAIO F, et al. Ecohydrology of water-controlled ecosystems [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(8/9/10/11/12): 1335-1348.
- [9] RODRÍGUEZ F, MAYOR Á G, RIETKERK M, et al. A null model for assessing the cover-independent role of bare soil connectivity as indicator of dryland functioning and dynamics [J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 512-519.
- [10] BODNER G, LEITNER D, KAUL H P. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently [J]. Plant and Soil, 2014, 380(1): 133-151.
- [11] WU G L, LIU Y, FANG N F, et al. Soil physical proper-

- ties response to grassland conversion from cropland on the semi-arid area[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(8): 1471-1479.
- [12] WEN Y F, LI M Z, XU R R, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of shallow and deep soil moisture under ecological restoration in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2024, 38(3): e15109.
- [13] WALKER L R, WARDLE D A, BARDGETT R D, et al. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 725-736.
- [14] 邱德勋, 赵佰礼, 尹殿胜, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(3): 72-80.
- QIU D X, ZHAO B L, YIN D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(3): 72-80.
- [15] FLURY M, FLÜHLER H. Tracer characteristics of brilliant blue FCF[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(1): 22-27.
- [16] VAN SCHAIK N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78(1): 36-47.
- [17] BARGUÉS T A, REESE H, ALMAW A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3342-3354.
- [18] YU J M, WANG X T, YANG S X, et al. Divergent response of blue carbon components to wetland types and hydrological effects in typical estuarine wetlands of Jiaozhou Bay, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: e119233.
- [19] WANG R, DONG Z B, ZHOU Z C, et al. Temporal variation in preferential water flow during natural vegetation restoration on abandoned farmland in the Loess Plateau of China[J]. *Land*, 2019, 8(12): e186.
- [20] QIU D X, XU R R, WU C X, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltrability and preferential flow in hilly gully areas of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2023, 221: e106770.
- [21] ARCHER N A L, QUINTON J N, HESS T M. Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in south-east Spain[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52(4): 535-553.
- [22] FERCHAUD F, VITTE G, BORNET F, et al. Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops[J]. *Plant and Soil*, 2015, 388(1): 307-322.
- [23] LUO Z T, NIU J Z, XIE B Y, et al. Influence of root distribution on preferential flow in deciduous and coniferous forest soils[J]. *Forests*, 2019, 10(11): e986.
- [24] CAI L, WANG F, LIN Y Y, et al. Changes in preferential flow caused by root effects in black locust plantations of different stand ages in the semi-arid region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: e131086.
- [25] GUAN N, BI H X, SONG Y L, et al. Vegetation restoration is affecting the characteristics and patterns of infiltration in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2024, 243: e108190.
- [26] 王佩佩, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 16-23.
- WANG P P, SU X M, ZHOU Z C, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow on slope of typical vegetation communities in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 16-23.
- [27] MEI X M, ZHU Q K, MA L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a loess hillslope[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [28] WU G L, CUI Z, HUANG Z. Contribution of root decay process on soil infiltration capacity and soil water replenishment of planted forestland in semi-arid regions[J]. *Geoderma*, 2021, 404: e115289.
- [29] 田昕, 赵勇钢, 刘啟霞, 等. 黄土丘陵区长期种植柠条坡地土壤饱和导水率及其影响因素[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(4): 20-27.
- TIAN X, ZHAO Y G, LIU Q X, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors on the slope with long-term plantation of *Caragana korshinskii* in the loess hilly region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4): 20-27.
- [30] JIANG X J, CHEN C F, ZHU X A, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS-3D to interpret preferential flow in soil in a rubber-based agroforestry systems in Xishuangbanna, China[J]. *Catena*, 2019, 178: 120-131.
- [31] DEVITT D A, SMITH S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1): 99-108.
- [32] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J]. *BioScience*, 2011, 61(11): 869-879.
- [33] LUCAS M, VETTERLEIN D, VOGEL H J, et al. Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2): 546-560.
- [34] WANG P P, LIU Q, ZHOU Z C, et al. Distinct variations of soil infiltrability of contrasting root types in a temperate mosaic-pattern grassland in northern China[J]. *Catena*, 2024, 243: e108174.