

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.026

宋艺琳, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征. 土壤, 2024, 56(2): 448–456.

晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征^①

宋艺琳¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5,6*}, 赵丹阳¹, 巩大鹏¹, 王 宁¹, 刘泽晖¹, 黄靖涵¹

(1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 3 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西吉县 042200; 4 水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083; 5 北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学), 北京 100083; 6 林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学), 北京 100083)

摘 要: 为探究晋西黄土区刺槐林地是否存在土壤优先流及不同入渗水量条件下对优先流发育程度的影响, 以山西吉县蔡家川小流域刺槐人工林为研究对象, 结合野外染色示踪试验与室内图像处理的技术方法, 获取垂直剖面染色形态特征图像并进行特征值的提取, 选取基质流深度、染色面积比、优先流比、长度指数、平均最大染色深度和染色面积比变异系数 6 个特征指标, 基于均方差决策法定量分析不同入渗水量条件下的优先流发育情况。结果表明: ①刺槐人工林土壤水分入渗过程中存在优先流现象, 随入渗水量的增加, 优先路径逐步向侧向发展, 优先流斜侧入渗现象明显; ②染色面积比随土层深度的增加呈非线性减小趋势, 水分呈现非均匀下渗现象; 入渗水量为 75 mm 时的优先流比达到 47.11%, 优先流发育程度最高; ③ 3 种入渗水量条件下的平均最大染色深度分别为 25.33、32.20、38.87 cm, 与入渗水量的大小呈正相关关系, 表明入渗水量的增加可以促进水分向深层运动, 有利于优先路径的开启; ④入渗水量与优先流评价指数之间呈正相关关系, 优先流评价指数 75 mm(0.81)>50 mm(0.39)>25 mm(0.36), 入渗水量增加促使优先流发育程度更高。

关键词: 优先流; 刺槐人工林; 染色示踪; 晋西黄土区; 入渗水量

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Characteristic of Preferential Flow in *Robinia pseudoacacia* Forests in Loess Plateau in Western Shanxi Province Under Different Infiltration Conditions

SONG Yilin¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5,6*}, ZHAO Danyang¹, GONG Dapeng¹, WANG Ning¹, LIU Zehui¹, HUANG Jinghan¹

(1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China; 3 Jixian County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Jixian, Shanxi 042200, China; 4 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083, China; 5 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083, China; 6 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the existence of preferential soil flow in the Loess Plateau in western Shanxi Province and the effects of different infiltration water conditions on the degree of preferential flow development, *Robinia pseudoacacia* plantation in Caijiachuan small-watershed were taken as the study object, and a combination of field dyeing experiment and indoor image processing technology was used to obtain the morphological images of soil vertical profile dyeing and to extract the characteristic indicators. Six characteristic indicators, including the matrix flow depth, the dyeing area ratio, the preferential flow ratio, the length index, the average maximum dyeing depth and the coefficient of variation of staining morphology, were chosen to measure the development of preferential flow across various infiltration water scenarios based on the root mean square difference decision method. The results showed that: 1) The phenomenon of preferential flow existed in the process of soil water movement of *Robinia pseudoacacia* forests, with the increase of infiltration water, the preferential path began to develop laterally, and the phenomenon of preferential flow side infiltration was obvious. 2) The dyeing area ratio showed a non-linear decreasing trend with the increase of soil depth, and there was non-uniformity in the process of water infiltration. At an infiltration rate of 75 mm, the

①基金项目: 国家重点研发课题(2022YFF1300401)和国家自然科学基金项目(31971725, U2243202)资助。

* 通讯作者(bhx@bjfu.edu.cn)

作者简介: 宋艺琳(1999—), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: sxjy915@126.com

preferential flow ratio reached 47.11% with the highest level of preferential flow development. 3) The average maximum dyeing depths under the three infiltration water conditions were 25.33, 32.20 and 38.87 cm, respectively, which were positively correlated with the magnitude of infiltration water, indicating that an increase of infiltration water can directly promote the movement of soil water to deeper layers and facilitate the opening of preferential path. 4) There was a positive correlation between infiltration water and the preferential flow evaluation index, with the preferential flow evaluation index of 75 mm (0.81) > 50 mm (0.39) > 25 mm (0.36), and the increase in infiltration water led to a higher degree of preferential flow development.

Key words: Preferential flow; *Robinia pseudoacacia* plantation; Dye tracer; Loess Plateau in western Shanxi Province; Infiltration amount

优先流是指沿土壤中的某些优先路径通道, 绕过大部分的土壤基质, 流向深层地下水的非均匀流^[1-2], 具有非平衡性和空间异质性的特点^[3]。优先流广泛存在于林地土壤中, 占总入渗水量的 11%~54%^[4], 影响土壤水分的入渗过程^[5-6], 对地下水的补给有着重要意义。因此对林地土壤优先流进行研究, 有利于植被恢复和森林涵养水源功能的提升。

近年来优先流的相关研究引起了国内外学者的广泛关注。目前针对优先流的研究方法包括土壤水分穿透曲线^[7]、CT 扫描^[8]、时域反射仪(TDR)^[9]和染色示踪^[10]等。相比于前几种方法, 染色示踪法具有操作简便、成本较低和反映直观等优点, 是最简便、应用最广泛的方法^[11]。优先流的空间和时间变化主要受地形特征、土壤性质、植被类型和动物活动等复杂相互作用的影响^[11-12]。Wang 等^[13]研究表明高异质性的土壤结构会产生更多大孔隙和裂缝, 促进了优先流的形成; 张建丰等^[14]研究得出植物根系通道促进了水分和溶质在土壤中快速迁移; 此外, 通过室外生物洞穴观察和室内模拟洞穴试验, 发现生物洞穴增加了土壤孔隙和通道的数量, 使示踪剂优先快速地渗透进入洞穴, 促进了优先流的发育^[15]。随着优先流形成机理研究的深入, 有学者开始定量研究优先流的发育程度。王发等^[16]研究发现土壤水分入渗量一定程度上会有利于优先流的激发, 但多为定性描述, 缺乏变异性特征分析及定量评价。肖自幸等^[17]对优先流发育状况进行了定量分析, 但仅选择了染色面积比和染色深度两个指标, 缺少长度指数和变异系数等异质性指标分析, 不能充分反映土壤优先流程度大小。

晋西黄土区近年来开展了大量关于黄土区植被恢复建设的研究与探讨^[18]。解析黄土区林-水关系问题对深入探索黄土高原地区生态系统修复具有重要意义, 其中降雨入渗是晋西黄土区土壤水分的唯一来源, 其入渗机制对维持人工林生态系统的稳定性和水量平衡起着至关重要的作用。目前我国关于优先流的研究多集中于土石山区和西南喀斯特地区, 黄土区研

究较少, 其优先流定量分析评价的研究更少, 且黄土区优先流渗流过程复杂, 机理尚不明确, 未形成一定理论体系。因此, 本研究对晋西黄土区刺槐人工林进行 3 种不同入渗水量条件下的染色示踪试验, 辅以图像处理手段与统计分析方法, 采用均方差决策法综合 6 个优先流特征指标, 分析不同入渗水量条件下的优先流形态特征并综合评价其发育情况, 以期为黄土区林-水关系问题的解决及人工林植被可持续和高质量发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(36°14'27"N ~ 36°18'23"N, 110°39'45"E ~ 110°47'45"E)。该站点属于黄土梁状丘陵沟壑区, 海拔高度为 900~1 513 m。气候特点冬季寒冷干燥而夏季温度较高, 年均气温约 11℃, 多年平均降水量 576 mm, 降水季节分布不均, 多集中在 7—9 月, 年蒸发量 1 500~2 000 mm。土壤类型为褐土, 黄土母质, 土壤质地为粉质壤土。流域上游主要由天然植被组成, 包括华北落叶松、辽东栎、杜梨; 中游主要由人工林组成, 包括刺槐、侧柏、油松; 下游主要为荒草地及农田, 以小麦、玉米等农田作物为主。

1.2 样地选取与布设

选取研究区人工林主要造林树种——刺槐林为试验样地, 样地大小为 20 m×20 m。研究时间 7—9 月处于该地区雨季时期, 雨季降水量占蔡家川流域全年降水的 70% 左右, 降雨集中且多为大雨。因此, 结合研究区实际情况, 以大雨和暴雨降水量为标准, 选择 24 h 林内降水量 25 mm(大雨)、50 mm(大雨)和 75 mm(暴雨)进行 3 种不同入渗水量的试验。样地布设见图 1, 试验设计见表 1, 样地基本情况见表 2。

1.3 染色示踪试验

选取样地中较为平坦区域, 去除表面枯枝落叶, 保留一些未受干扰的腐殖质层。将尺寸为 60 cm×60 cm×

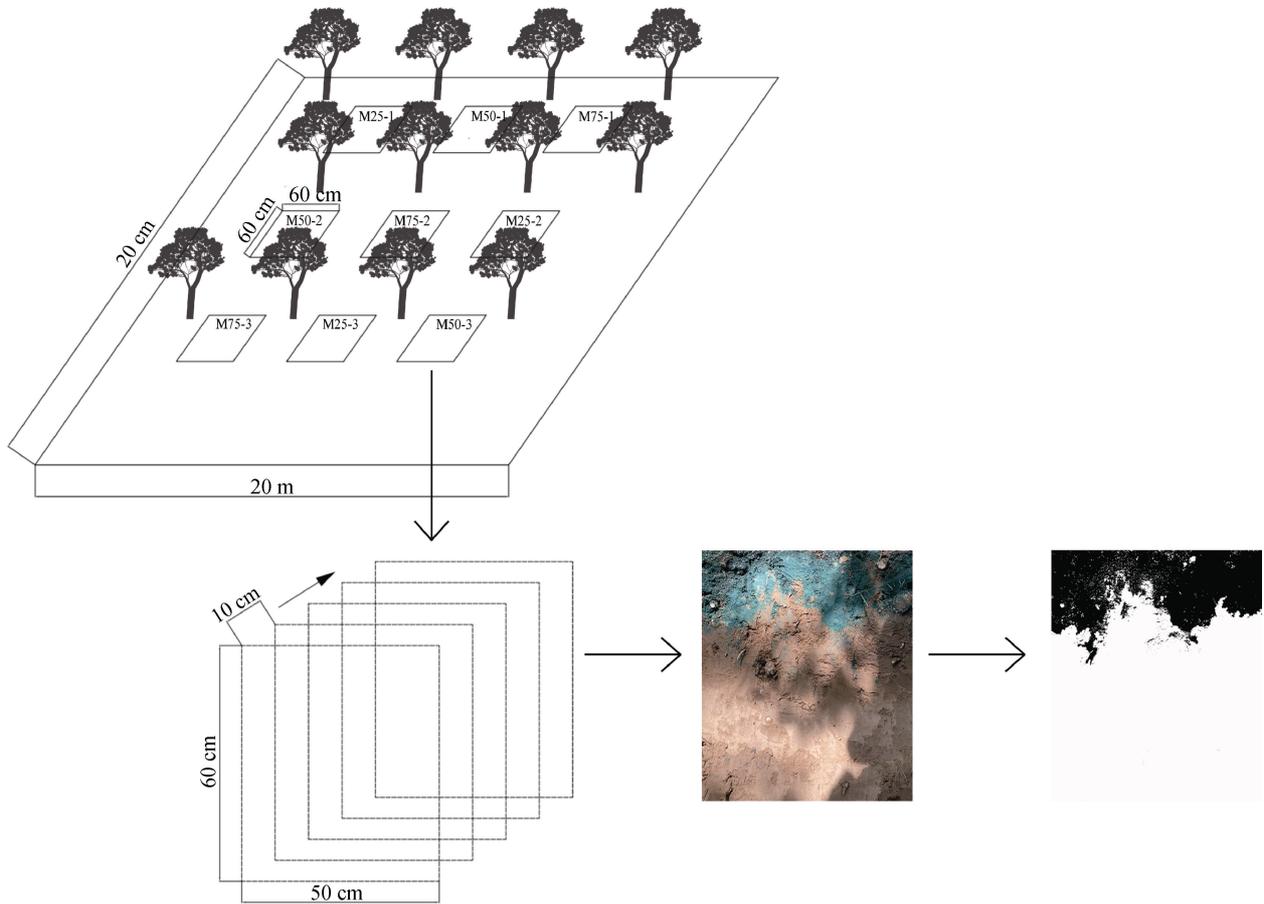


图 1 样地布局及土壤垂直剖面挖掘示意图

表 1 试验设计

样点	试验编号	小区尺寸 (cm×cm)	入渗水量 (mm)
M25	1	60×60	25
	2	60×60	25
	3	60×60	25
M50	1	60×60	50
	2	60×60	50
	3	60×60	50
M75	1	60×60	75
	2	60×60	75
	3	60×60	75

30 cm 的铁框缓慢砸入土壤中，深度约为 5 cm，并对靠近铁框边缘的土壤进行压实避免侧渗。确保试验前后 1 d 及当天无降雨的情况下，使用 4 g/L 的亮蓝溶液作为染色示踪剂进行试验，根据样方大小和实际损耗(0.5% 损耗)计算确定每个试验点分别需要亮蓝溶液 9.45、18.9、28.35 L。使用自制的简易恒流喷洒器，以 150 mL/min 的速率将亮蓝溶液均匀喷洒于框内，喷洒完后用塑料膜覆盖金属框。

表 2 样地基本性质

地理位置	海拔(m)	林龄(a)	植被密度(株/hm ²)	土层深度(cm)	容重(g/cm ³)	含水率(%)	总孔隙度(%)	毛管孔隙度(%)
36°16'24"N, 110°45'45"E	1 100	16	1 550	0~10	1.00 ± 0.09	14.87 ± 1.15	52.73 ± 1.11	47.34 ± 0.90
				10~20	1.26 ± 0.01	10.02 ± 0.43	49.28 ± 2.70	44.92 ± 2.82
				20~30	1.27 ± 0.01	9.71 ± 0.10	50.29 ± 0.91	46.82 ± 1.06
				30~40	1.26 ± 0.01	9.23 ± 0.30	50.12 ± 1.97	46.67 ± 1.99
				40~50	1.29 ± 0.03	9.23 ± 0.32	49.95 ± 0.18	46.04 ± 0.93
				50~60	1.27 ± 0.02	9.16 ± 0.06	49.89 ± 0.05	47.45 ± 2.23

注：表中数据为平均值 ± 标准差；下同。

24 h 后，揭开塑料膜缓慢取出铁框，进行染色剖面挖掘。挖掘前剔除四周各 5 cm，故实际开挖的平面尺寸为 50 cm × 50 cm。垂直剖面的每个切片之间

的距离为 10 cm，根据试验实际染色情况，本研究最大挖掘深度为 60 cm，每个样方挖 5 个剖面，共计 45 个。每个剖面挖掘完成后用刷子进行适当修整，用相

机垂直于剖面拍摄每个剖面的染色情况, 拍摄时水平和竖直方向各放置一把标尺便于后续计算。剖面挖掘过程见图 1。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 优先流特征参数计算 染色面积比(DC, %): 指剖面内染色面积占整个剖面面积的百分比。计算公式为:

$$DC = \frac{N_i}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: DC 为染色面积比, %; N 为每行像元数, 个; N_i 为第 i 行统计值为 255 的染色像元数, 个。

平均最大染色深度(U_{\max} , cm): 指垂直剖面中染色部分最大深度的平均值。

基质流深度(UniFr, cm): 指染色图像中土壤染色面积比 $\geq 80\%$ 时所对应的深度。

优先流比(PF-fr, %): 指垂直染色剖面中优先流区染色面积占总染色面积的比值。计算公式为:

$$PF-fr = \left(1 - \frac{UniFr \times W}{TSA}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: PF-fr 为优先流比, %; UniFr 为基质流深度, cm; W 为剖面水平染色宽度, 本文为 50 cm; TSA 为垂直剖面染色总面积, cm^2 。

长度指数(Li, %): 指土壤垂直染色剖面下一层与上一层染色面积比差值的绝对值求和。计算公式为:

$$Li = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (3)$$

式中: Li 为土壤长度指数; DC_{i+1} 和 DC_i 为土壤垂直剖面第 $i+1$ 层和第 i 层对应的染色面积比, %; n 为垂直土层数。

染色面积比变异系数(CV): 可以用来表示不同深度土壤染色的变化程度和评价优先流发育的相对程度。计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DC_i - \overline{DC})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC_i} \quad (4)$$

式中: n 为垂直土层数; DC_i 为第 i 层土壤对应的染色面积比, %; \overline{DC} 为染色面积比的平均值, %。

1.4.2 基于均方差决策法的优先流综合评价 使用极差法对基质流深度、染色面积比、优先流比、长度指数、平均最大染色深度和染色面积比变异系数 6 个特征参数进行无量纲标准化处理^[19], 计算公式为:

$$Z_{ij}(\text{正}) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

$$Z_{ij}(\text{负}) = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: Z_{ij} 为优先流参数标准化后的值; X_i 为第 i 项参数的实测值; X_{\max} 为该参数的实测最大值; X_{\min} 为该参数的实测最小值。

计算随机变量的均值 $E(G_j)$:

$$E(G_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{ij} \quad (7)$$

计算 G 的均方差 $\sigma(G_j)$:

$$\sigma(G_j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{ij} - E(G_j))^2} \quad (8)$$

计算 G_j 的权重系数 $W(G_j)$:

$$W(G_j) = \frac{(G_j)}{\sum_{i=1}^m (G_j)} \quad (9)$$

进行多指标决策与排序:

$$D_i(W) = \sum_{j=1}^m Z_{ij} W(G_j) \quad (10)$$

1.4.3 数据分析与制图 本研究运用 Excel 2016 对数据进行分类处理, 使用 SPSS 25.0 对数据进行方差分析和 Person 相关性分析, 采用 Photoshop CS6 和 Image Pro Plus 对图像进行形态学解析, 通过 Origin Pro 2022 软件制图。

2 结果与分析

2.1 优先流分布特征

土壤剖面的染色图像能直观揭示水分在土壤中的运移情况。由于采集的剖面数量较多, 故每种水量仅展示 4 张具有代表性的典型剖面染色图像(图 2)。由图 2 可知, 刺槐林地土壤水分入渗过程中存在优先流现象, 且随入渗水量的增加优先流现象愈加明显。总体上, 3 种入渗水量下土壤表层均以基质流形式呈现均匀染色形态, 随着水分向土壤深层入渗, 出现不同程度的优先流分化特征。当入渗水量为 25 mm 时, 0~10 cm 土层染色均匀, 10 cm 以下土层水分绕过土壤基质沿大孔隙呈漏斗状向下运移, 以优先流形式运动, 分布范围在 10~25 cm。当入渗水量为 50 mm 时, 土壤表层染色区域扩大, 基质流深度达到 20 cm, 20 cm 以下土层水分开始以优先流形式运动, 入渗深度在 25~40 cm; 染色图像出现环形区域呈破碎化分布, 优先流路径不明显。当入渗水量为 75 mm 时, 0~10 cm 土层水分以基质流形式运动, 10 cm 以下土层优先流形态出现明显侧向偏移, 入渗深度在 35~

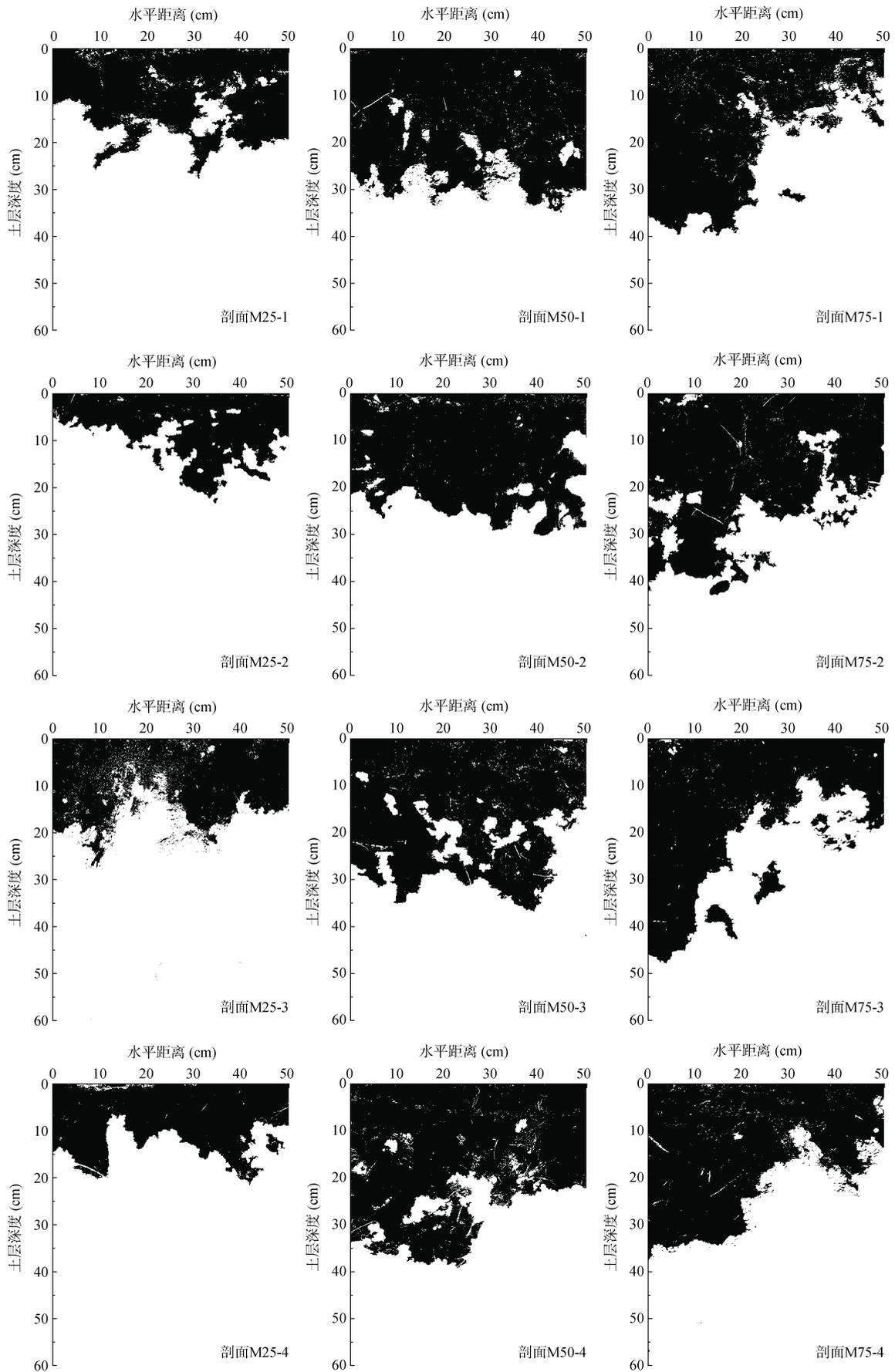


图 2 不同入渗水量下土壤垂直剖面染色特征

50 cm, 说明土壤中的优先路径并非完全呈现垂直发育; 相比 25 mm 和 50 mm 入渗水量, 75 mm 入渗水量的染色剖面在 20 ~ 50 cm 土层出现零星分布的染色斑块, 发生管流现象, 说明土壤内部存在裂隙, 为水分运动提供优先路径, 使土壤深层出现染色特征。

2.2 优先流特征参数

通过对染色图像进行数值化解译计算, 得到基质流深度、染色面积比、优先流比、长度指数、平均最大染色深度和染色面积比变异系数 6 个优先流特征参数, 用以描述优先流的分布特征和发育状况。从图 3 可以看出, 入渗水量对垂直剖面的染色面积比影响较大。整体上, 染色面积比随土层深度的增加呈现非线性减小趋势, 在局部位置达到峰值, 水分下渗过程中存在非均匀性。不同入渗水量下的染色面积比变化存在一定差异。当入渗水量为 25 mm 时, 染色面积比随土层深度增加基本呈单调递减, 10 cm 以下土层变化剧烈。当入渗水量为 50 mm 时, 染色面积比随着土层深度的增加出现一定波动, 但总体呈下降趋势, 总染色面积比较 25 mm 入渗水量增加 49.82%, 变化程度相对变缓。当入渗水量为 75 mm 时, 染色面积比随着土层深度增加变化波动较大, 15 cm 以下土层出现多个波峰, 曲线整体呈多个“S”型变化。

由表 3 可知, 3 种入渗水量条件下不同特征指标均存在显著差异($P < 0.05$)。入渗水量 25、50 和 75 mm 条件下的基质流深度分别为 10.63、17.99 和 12.31 cm,

其中入渗水量 50 mm 时为入渗水量 25 mm 时的 1.69 倍, 说明入渗水量的增加可以促进土壤水分向深层运移。而入渗水量 75 mm 时的基质流深度小于入渗水量为 50 mm 时, 说明高入渗水量促进了优先路径的开启, 提高了优先路径的连通性, 通过优先路径水分可迅速运移至土壤深处。3 种入渗水量条件下的平均最大染色深度分别为 25.33、32.20、38.87 cm, 与入渗水量的大小呈正相关关系, 说明增加入渗强度有利于优先通道的开启。

优先流比越大, 优先流发育程度越高。当入渗水量为 75 mm 时, 其优先流比显著高于 25 mm 和 50 mm 入渗水量($P < 0.05$), 达到 47.11%, 优先流发育程度最高。长度指数与染色面积比变异系数均是描述优先流空间变异性的指标, 长度指数越大, 优先流发育程度越好; 染色面积比变异系数越大, 优先流发育程度越差^[5]。50 mm 入渗水量条件下的长度指数最大, 25 mm 入渗水量条件下的长度指数最小。随入渗水量的增加染色面积比变异系数减小, 表现为 25 mm(0.78) > 50 mm (0.62) > 75 mm(0.56), 50 mm 和 75mm 入渗水量的差异不显著($P < 0.05$), 说明优先流区域染色面积比变化趋势相似, 优先流现象均较活跃。二者虽然都是衡量优先流变异程度的指标, 但长度指数针对于不同土层之间的差异, 因此, 虽然 50 mm 入渗水量条件下的染色面积比变异系数较大, 但其不同土层之间空间变异性明显, 因而长度指数较大。

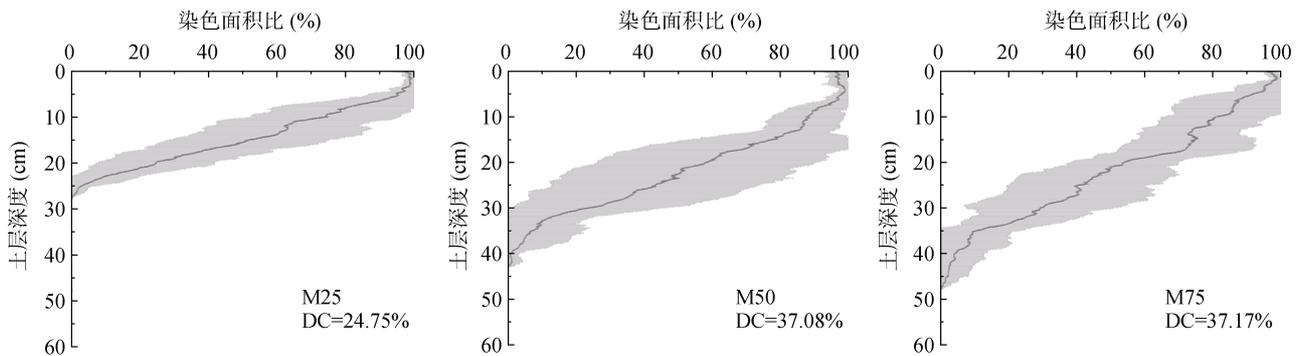


图 3 不同入渗水量下土壤垂直剖面染色面积比变化

表 3 不同入渗水量条件下优先流特征指标

样点编号	基质流深度(cm)	平均最大染色深度(cm)	优先流比(%)	长度指数(%)	染色面积比变异系数
M25	10.63 ± 3.65 b	25.33 ± 2.02 c	31.92 ± 11.71 b	197.51 ± 37.34 b	0.78 ± 0.10 a
M50	17.99 ± 6.12 a	32.20 ± 7.25 b	24.07 ± 13.95 b	253.86 ± 59.12 a	0.62 ± 0.11 b
M75	12.31 ± 6.65 ab	38.87 ± 5.11 a	47.11 ± 23.99 a	246.66 ± 38.44 a	0.56 ± 0.13 b

注: 同列不同小写字母表示优先流特征指标在不同入渗水量下差异显著($P < 0.05$); 下同。

2.3 入渗水量与优先流特征参数的相关性

对入渗水量和优先流特征参数进行相关性分析

(表 4)。结果表明, 入渗水量与平均最大染色深度和染色面积比呈极显著正相关, 与染色面积比变异系数

呈极显著负相关, 且与平均最大染色深度相关性更高。基质流深度与染色面积比呈极显著正相关, 与优先流比呈极显著负相关。平均最大染色深度与染色面积比和长度指数呈极显著正相关性, 与染色面积比变异系数呈显著负相关, 染色面积比与长度指数呈极显

著正相关, 与染色面积比变异系数呈极显著负相关, 而长度指数和染色面积比变异系数呈极显著负相关, 可以看出染色深度的增加提高了土壤总染色面积的比例, 同时加大了优先流各指标特征之间的差异性, 促进了优先流的发育。

表 4 入渗水量与优先流特征参数的相关性

	入渗水量	基质流深度	平均最大染色深度	染色面积比	优先流比	长度指数	染色面积比变异系数
入渗水量	1.000						
基质流深度	0.175	1.000					
平均最大染色深度	0.744**	0.238	1.000				
染色面积比	0.567**	0.818**	0.704**	1.000			
优先流比	0.231	-0.845**	0.268	-0.408	1.000		
长度指数	0.397	0.346	0.759**	0.679**	0.071	1.000	
染色面积比变异系数	-0.594**	-0.272	-0.644*	-0.618**	-0.137	-0.656**	1.000

注: *, **分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平显著、极显著相关。

2.4 优先流特征参数综合评价

为对不同入渗水量条件下的优先流发育程度进行客观评价, 选择基质流深度、染色面积比、优先流比、长度指数、平均最大染色深度和染色面积比变异系数 6 个特征参数为评价指标, 采用均方差决策法对其进行评价。各指标标准化处理后的均值、均方差及权重如表 5 所示。由表 5 可知, 各项评价指标中, 权重系数最高的为长度指数, 其次为基质流深度, 最低为平均最大染色深度。由于优先流分布特征存在较大差异, 6 项指标的权重系数分布相对均匀。

根据表 5 计算出不同入渗水量条件下的土壤优先流评价指数 (图 4)。由图 4 可以看出, 当入渗水量增加时, 优先流评价指数变大, 两者之间呈正相关关系, 说明优先流现象愈加明显。因此, 外界水分充足的条件下能促使水分快速运移至土壤深层, 有利于提高刺槐人工林对降水资源的利用效率, 能够为林地涵养水源功能的提升提供一定的理论基础。

表 5 各评价指标的均值、均方差和权重系数

评价指标	均值	均方差	权重系数
基质流深度	0.59	0.43	0.168
平均最大染色深度	0.50	0.41	0.161
染色面积比	0.41	0.43	0.167
优先流比	0.45	0.42	0.163
长度指数	0.62	0.44	0.175
染色面积比变异系数	0.58	0.42	0.166

3 讨论

优先流的发育情况可以通过土壤优先流的染色

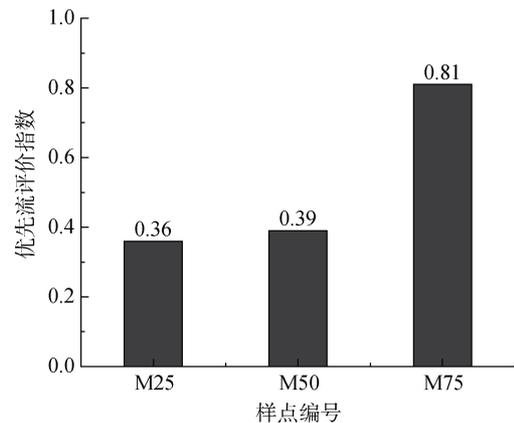


图 4 不同入渗水量条件下优先流评价指数

形态特征揭示。本研究基于不同的入渗水量条件, 对晋西黄土区刺槐人工林地的土壤垂直染色剖面图像进行解译分析, 结果表明, 该地区的刺槐人工林地土壤存在明显的优先流现象, 这是由于黄土存在大量裂隙和根孔, 因此水分在入渗时会产生优先渗流通道, 以加速通过土壤基质^[20]。染色面积比总体随土层深度的增加呈非线性递减趋势, 与 Wu 等^[21]的研究结果一致, 这是由于位于表层的土壤有机质较为丰富, 存在丰富的孔隙且根系分布密集, 有利于水分下渗; 而位于深层区域的土壤质地严密, 透水性较差, 水分下移受到限制^[22]。表层土壤呈现大范围均匀染色现象, 说明表层土壤水分运动多表现为基质流, 优先流则多发生在基质流区域以下的深层土壤, 与邵一敏等^[23]研究结论相同。当入渗水量较小时, 染色面积比随土层深度增加的变化波动程度较小, 基本呈线性减小趋势, 而当入渗水量增加时, 染色面积比曲线波动程度较大, 多次出现波峰, 整体呈“S”型变化, 这主要

是由于土壤的非均质性^[24], 随入渗水量增加, 优先流也表现出一定的空间异质性。此外, 低入渗水量条件下土壤优先流染色形态主要呈漏斗状分布, 当入渗水量提高时, 优先流染色形态出现环状分布区域; 当入渗水量增加至 75 mm 时优先流染色形态发生明显侧向偏移, 且在深层土壤出现零星染色斑块, 出现管流现象。这说明当外界水量较少时, 水分主要以竖直向下方向沿优先路径运动; 而当外界水量充足时, 优先路径中的水分到达饱和, 由于土壤中大量植物根系形成复杂空间结构促使土壤出现倾斜的连通路径, 水分运动出现明显的斜侧入渗, 从而抑制了垂直入渗过程^[25-26]。

为了尽量控制变量, 本研究在一个研究样地同时进行 25、50 和 75 mm 三种入渗水量的染色示踪试验, 尽可能避免土壤结构变化对水分运移的影响。前人研究表明, 优先流与土壤大孔隙密切相关^[27-28]。本试验地所处黄土区的非毛管孔隙度小于西南喀斯特及南方红壤区^[27,29], 大孔隙含量较少, 优先流发育程度较低; 而与北方半干旱草原相比^[21], 其非毛管孔隙度较大, 大孔隙含量高, 优先流发育程度及变异性均较高。本研究中, 随着入渗水量的增加, 平均最大染色深度增加, 且呈显著正相关, 长度指数先增大后减小, 与以往研究结果相同^[30-31]; 而优先流比呈现先减小后增大趋势, 与以往研究相悖^[32], 分析其原因可能是由于本研究地点位于晋西黄土区, 样地土壤性质和树种根系分布等因素与西南喀斯特地区差异较大, 形成的优先流形态特征也不尽相同。染色面积比变异系数可以表征优先流区与基质流区染色程度的差异大小, 随入渗水量的增加, 优先流发育程度提高, 与吴庆华等^[5]利用染色特征图像变异性分析优先流程度得到的结果一致。

以往对土壤优先流的研究大多是基于特征分布的描述, 且在黄土区开展的优先流研究较少, 同时对优先流的定量评价也只针对染色面积比和染色深度两个指标进行研究, 对优先流发育程度的判别缺乏客观性, 较难全面反映土壤的优先流特征, 存在一定的局限性^[33]。本研究结合剖面实际染色图像, 选取 6 个优先流特征参数, 通过计算得出优先流评价指数, 定量分析了不同入渗水量条件下优先流发育程度。研究发现, 入渗水量的增加导致土壤优先流评价指数增大, 优先流现象发育更为明显, 与程浩等^[29]研究结果相一致, 与张旭等^[34]研究结论相反, 原因可能是优先流的形成是一个复杂的水分运动过程, 当水分在基质流区快速向土层下部运动时, 由于土壤大孔隙及

根系分布具有随机性, 导致优先流发生的起点和路径不尽相同, 影响试验结果。因此, 基于多指标定量分析的优先流评价指数可以消除各特征参数之间的差异, 更好地反映优先流发育程度, 具有一定的实际意义。

随着现代科学技术的进步, 优先流的研究已日益完善。本研究对晋西黄土区刺槐人工林的优先流特征进行了定量分析和综合评价, 结果表明入渗水量的增加可以促进优先流现象的发生, 提高了刺槐人工林对降水资源的利用程度, 有利于干化土壤的治理修复。然而, 水分在土壤中的运动机制尚不明确, 优先流的形成过程十分复杂, 且本研究仅对刺槐林地进行了研究, 研究对象和区域较为单一, 未来可扩大研究范围, 更为综合地揭示黄土区的水分入渗机制; 同时结合环境因子, 进一步明确优先流的形成机理, 为植被恢复、林业生态工程构建及林-水关系的深度解析提供理论依据。

4 结论

1) 研究区刺槐林地土壤水分入渗过程中存在优先流现象, 随入渗水量的增加, 优先路径倾斜发育, 斜侧入渗现象明显。

2) 3 种入渗水量条件下表层土壤基质流现象明显, 随土层深度的增加染色面积比呈现非线性减小趋势, 水分下渗过程中存在着非均匀性; 入渗水量为 75 mm 时的优先流比达到 47.11%, 优先流发育程度最高。

3) 入渗水量与平均最大染色深度和染色面积比呈极显著正相关, 与染色面积比变异系数呈极显著负相关, 且与平均最大染色深度相关性更高, 说明增加入渗水量可以直接促进水分向土壤深层运动。

4) 优先流评价指数随入渗水量的增加而增大, 两者之间呈正相关, 入渗水量越大优先流现象愈加明显, 优先流发育更为活跃。

参考文献:

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3071-3092.
- [2] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. *Eurasian Soil Science*, 2016, 49(6): 661-672.
- [3] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势[J]. *土壤*, 2012, 44(6): 905-916.
- [4] van der Heijden G, Legout A, Pollier B, et al. Tracing and modeling preferential flow in a forest soil—Potential

- impact on nutrient leaching[J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 12–22.
- [5] 吴庆华, 朱国胜, 崔皓东, 等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 118–127.
- [6] Zhang Y Y, Zhao W Z, Li X B, et al. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desertoasis ecoregion[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(4): 1751–1760.
- [7] 王彬俨. 北京昌平区农地土壤优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [8] 侯汝凡. 基于 CT 扫描对植被发育斜坡土体大孔隙和渗透性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [9] Merdun H. Using TDR and modeling tools to investigate effects of interactive factors on preferential flow and transport in field sandy clay soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(4): 1821–1838.
- [10] Sheng F, Wang K, Zhang R D, et al. Modeling preferential water flow and solute transport in unsaturated soil using the active region model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(7): 1491–1501.
- [11] Yi J, Qiu W W, Hu W, et al. Effects of cultivation history in paddy rice on vertical water flows and related soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104613.
- [12] Maier F, van Meerveld I, Greinwald K, et al. Effects of soil and vegetation development on surface hydrological properties of moraines in the Swiss Alps[J]. *CATENA*, 2020, 187: 104353.
- [13] Wang F, Chen H S, Lian J J, et al. Preferential flow in different soil architectures of a small Karst Catchment[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1–10.
- [14] 张建丰, 林性粹, 王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 168–171.
- [15] Shipitalo M J, Dick W A, Edwards W M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(3/4): 167–183.
- [16] 王发, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 111–116.
- [17] 肖自幸, 朱蔚利, 牛健植, 等. 鹞峰国家森林公园不同林分下土壤优先流现象研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(17): 118–121.
- [18] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14–22.
- [19] 张东旭, 张洪江, 程金花. 基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 214–220, 277.
- [20] Chen G, Meng X M, Qiao L, et al. Response of a loess landslide to rainfall: Observations from a field artificial rainfall experiment in Bailong River Basin, China[J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 895–911.
- [21] Wu X L, Dang X H, Meng Z J, et al. Mechanisms of grazing management impact on preferential water flow and infiltration patterns in a semi-arid grassland in Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152082.
- [22] 刘目兴, 宋兴敏, 卢世国, 等. 三峡库区不同植被覆盖坡地的土壤优先流运动特征研究[J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1321–1335.
- [23] 邵一敏, 赵洋毅, 段旭, 等. 基于分形分析的干热河谷区典型地类土壤优先流分布特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(7): 102–112.
- [24] 程竞莹, 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.
- [25] Chelli A, Zanini A, Petrella E, et al. A multidisciplinary procedure to evaluate and optimize the efficacy of hydraulic barriers in contaminated sites: A case study in Northern Italy[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6): 246.
- [26] 陈晓冰, 严磊, 李振东, 等. 耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(4): 786–794.
- [27] 管凝, 程金花, 侯芳, 等. 西南喀斯特地区 2 种森林的土壤优先流特征[J]. *林业科学*, 2023, 59(12): 61–70.
- [28] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 871–880.
- [29] 程浩, 初磊, 燕超, 等. 人工银杏林土壤优先流多指标定量分析与评价——以镇江下蜀林场为例[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(12): 60–66.
- [30] 姚晶晶, 程金花, 张洪江, 等. 入渗水量对重庆四面山草地优先流影响的定量评价[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 45–51, 73.
- [31] 连经纬, 胡海波, 王灿, 等. 枫香麻栎混交林土壤优先流特征及其对碳运移的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 122–131.
- [32] 管凝, 程金花, 侯芳, 等. 不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J]. *土壤通报*, 2023, 54(3): 587–595.
- [33] 梁建宏, 吴艳宏, 周俊, 等. 土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 220–227.
- [34] 张旭, 卢玉东, 王博, 等. 黄土高原南部黄土渗流特征的染色示踪研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 110–118.