试验研究

花岗岩残积土浅层滑坡区优先流的特征与水力响应

樊秀峰[1,2,3], 王采诗[1], 郑国明[4], 简文彬[1,2,3], 吴振祥[1,2,3]

(1.福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108;
2.福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 3.自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002; 4.福建省地质科学研究院, 福建 福州 350013)

摘 要: [目的]分析花岗岩残积土浅层滑坡区不同结构土体中优先流的发育特征及其水力响应差异,明确植被根系和岩土结构对降雨入渗过程的控制作用,为坡地降雨入渗过程认知及滑坡水动力模型参数化提供试验依据。[方法]以福建省武平县典型花岗岩残积土浅层滑坡区为研究对象,选取木荷覆盖残积土(MH)、裸露残积土(BR)和全风化花岗岩(QW)3类代表性土体,通过开展野外染色示踪试验,并结合图像处理方法定量提取染色面积比、基质流深度、平均最大入渗深度、优先流比、长度指数和染色面积变异系数等参数,进一步构建优先流综合评价指数(PFI),系统分析不同结构土体中优先流的空间分布特征及其差异。[结果]①3类土体均发生优先流,但其空间分布形态和入渗深度存在明显差异。MH以根系孔隙主导的指状流为主,优先流通道发育充分,最大入渗深度可超过40 cm;QW的优先流主要受结构面与裂隙控制,染色多集中分布于20—40 cm深度范围;BR结构致密、孔隙度低,染色主要局限于0—10 cm浅层。②不同土体优先流的空间非均质性差异显著,其中BR染色面积变异系数最大,表现出最强的空间离散性,而MH染色分布相对均匀。③优先流综合评价指数PFI在不同土体间呈现明显差异,其均值大小规律为MH(0.596 9)>QW(0.472 9)>BR(0.325 4),表明植被根系扰动和结构面条件显著增强了优先流通道的连通性及垂向入渗能力。[结论]花岗岩残积土浅层滑坡区不同结构土体中优先流发育程度存在显著差异,其中植被根系和结构面条件是控制优先流通道形成及水分垂向快速入渗的重要因素。

关键词: 花岗岩残积土; 优先流; 染色示踪试验; 图像处理; 评价指数

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0001-09 **中图分类号:** TU447

文献参数: 樊秀峰, 王采诗, 郑国明, 等.花岗岩残积土浅层滑坡区优先流的特征与水力响应[J].水土保持通报,2026,46(4):1-9. Fan Xiufeng, Wang Caishi, Zheng Guoming, et al. Preferential flow characteristics and hydraulic response in shallow landslide zones of granite residual soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):1-9.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.021 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.021**

Preferential flow characteristics and hydraulic response in shallow landslide zones of granite residual soil

Fan Xiufeng[1,2,3], Wang Caishi[1], Zheng Guoming[4], Jian Wenbin[1,2,3], Wu Zhenxiang[1,2,3]

(1.*Zijin School of Geology and Mining*, *Fuzhou University*, *Fuzhou*, *Fujian* 350108, *China*; 2.*Key Laboratory of Geohazard*, *Fuzhou*, *Fujian* 350002, *China*; 3.*Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains*, *Ministry of Natural Resources of China*, *Fuzhou*, *Fujian* 350002, *China*; 4.*Fujian Institute of Geological Sciences*, *Fuzhou*, *Fujian* 350013, *China*)

Abstract: [Objective] The development characteristics of preferential flow and the differences in hydraulic response among different structural soils in shallow landslide zones of granite residual soils were investigated in order to clarify the controlling effects of vegetation roots and soil-rock structures on the rainfall infiltration process and to provide experimental support for understanding slope infiltration processes and parameterizing landslide

收稿日期:2025-10-15 **修回日期:**2026-02-03 **采用日期:**2026-02-05

资助项目:国家自然科学基金促进海峡两岸科技合作联合基金"闽台高植被覆盖区台风暴雨型滑坡孕灾环境、成灾机制与动态预警"(U2005205); 福州大学科技开发项目(202410); 福建省地质灾害与防治重点实验室开放基金(FJKLGP2024K002)

第一作者:樊秀峰(1975—),女(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,副教授,主要从事地质灾害及其防治等方面的研究。Email:53437793@qq.com。

通信作者:王采诗(2001—),女(汉族),福建省福州市人,硕士研究生,研究方向为地质灾害及其防治。Email:2405343455@qq.com。

hydrodynamic models. [Methods] A typical shallow landslide area of granite residual soils in Wuping County, Fujian Province, was selected as the study area. Three representative soil types, residual soils covered by *Schima superba* (MH), bare residual soil (BR), and completely weathered granite (QW), were investigated. Field dye tracer experiments were conducted, and image processing was used to quantify the dyed area ratio, matrix flow depth, mean maximum infiltration depth, preferential flow ratio, length index, and coefficient of variation of dyed area. A comprehensive preferential flow index (PFI) was then constructed to systematically analyze the spatial distribution characteristics of preferential flow in different structural soils and the differences among them. [Results] ① Preferential flow occurred in all three soil types, but the spatial distribution patterns and infiltration depths differed significantly. In MH, preferential flow was dominated by finger flow associated with root pores, the preferential flow pathways were well developed, and the maximum infiltration depth exceeded 40 cm. In QW, preferential flow was mainly controlled by structural planes and fractures, and dye staining was concentrated mostly at depths of 20—40 cm. In BR, the structure was compact and porosity was low, so dye staining was mainly confined to the 0—10 cm shallow layer. ② Significant differences in the spatial heterogeneity of preferential flow were observed among the soil types. BR had the largest coefficient of variation of dyed area, indicating the strongest spatial dispersion, whereas MH showed relatively uniform dye distribution. ③ The comprehensive PFI differed clearly among soil types, with mean values ranked as MH (0.596 9) > QW (0.472 9) > BR (0.325 4), indicating that vegetation root disturbance and structural discontinuities significantly enhanced preferential flow connectivity and vertical infiltration capacity. [Conclusion] The degree of preferential flow development differs significantly among different structural soils in shallow landslide zones of granite residual soils, and vegetation roots and structural discontinuities are key factors controlling preferential flow pathway formation and rapid vertical water infiltration.

Keywords: granite residual soil; preferential flow; dye tracer experiment; image processing; evaluation index

在极端降雨事件日益频发的背景下,坡地土体内部水分的快速入渗与非均质运移过程已成为控制滑坡等地质灾害发生的重要水动力机制之一。大量研究表明,降雨入渗并非完全遵循均质基质流假设,而是常通过裂隙、根道及大孔隙等结构性通道绕过基质区,形成明显的非平衡水分运移过程,即土壤优先流(preferential flow)[1-2]。该过程能够在短时间内将大量水分传导至坡体深部,显著提高局部孔隙水压力,从而加速土体软化与失稳,是降雨诱发滑坡形成的重要触发机制之一[3-5]。

近年来,关于优先流的形成机制与类型特征已有大量研究。根据入渗路径及孔隙结构差异,优先流可表现为大孔隙流、指状流、裂隙流、漏斗流及管流等多种形式[6-7]。已有研究表明,优先流的发生与发展受到多种因素的共同控制,包括植被根系分布、土体结构特征、母质岩性、降雨强度及历时等[8-10]。不同地质背景下的实地示踪试验进一步指出,母岩类型及其风化结构在优先流通道的形成与空间分布中起着关键约束作用。例如喀斯特区裂隙网络对优先流路径具有强控制性,而非碳酸盐岩区则呈现更显著的结构差异性。

在南方湿润山区,花岗岩残积土广泛分布,是典型的强风化、结构非均质土体。其形成过程经历了长期的物理-化学风化作用,内部结构呈现出"残积土-全风化岩"渐变特征,裂隙、结构面及弱胶结界面发育明显。在强降雨条件下,这类结构特征极易形成垂向或斜向的优先流通道,使降雨水分快速传导至坡体内部,从而诱发浅层滑坡或顺层滑移[11-12]。因此,花岗岩残积土不仅是南方山区滑坡灾害的主要物质基础,也是研究地质结构控制下优先流过程的理想对象。

尽管优先流在坡地水文过程与滑坡触发中的重要性已得到普遍认识,但现有研究仍存在以下不足。①优先流定量表征方法尚不统一。多数研究依赖单一指标或定性描述,缺乏能够综合表征通道连通性与垂向入渗能力的评价体系。②针对结构性土体中优先流与滑坡水力响应耦合关系的实证研究仍较有限,尤其是植被根系、裂隙结构与入渗路径协同作用机制尚不清晰。③区域尺度研究不足。目前相关研究多集中于黄土区或碳酸盐岩区,对南方高降雨区花岗岩残积土中优先流发育特征及其致灾效应关注较少。

基于此,本文以福建省武平县典型花岗岩残积土浅层滑坡区为研究对象,选取木荷覆盖残积土(MH)、裸露残积土(BR)和全风化花岗岩(QW)3类

代表性土体,通过野外染色示踪试验与图像处理方法,定量提取多项优先流特征参数,并构建优先流综合评价指数(I_{PF}),系统刻画不同结构条件下优先流的空间分布特征及其差异。本研究旨在揭示花岗岩残积土中优先流的结构控制机制,为坡地降雨入渗过程认知及滑坡水动力模型参数化提供试验依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究在福建省武平县下坝村(24°52′38.161″N,116°2′32.248″E)设立野外观测试验区。野外调查时间为2024年10月19日至2024年10月29日。下坝村位于武平县南部,是一个低丘沟谷地貌区,地势西北高、东南低,平均海拔约180 m,且为武平县海拔最低的区域。该区域地形起伏明显,坡顶海拔220～240 m,坡脚海拔185～195 m,坡面自然坡度上部为20°～27°,下部为32°～36°,相对高差30～50 m,具备南方丘陵地貌特征。研究区属南亚热带湿润季风气候,年平均气温为19.5 ℃,年降雨量1 643.8 mm,主要集中于4—9月,降雨强度大,频率高,易诱发坡面径流和浅层土体水动力过程。土体母质为花岗岩,表层为木荷覆盖残积土(0—30 cm),中层为裸露残积土(30—60 cm),下部为全风化花岗岩(60—90 cm),整体结构疏松,透水性强,易发生不均匀入渗与优先流现象。

1.2　样地选取与样点布设

通过野外实地调查,在下坝村某浅层滑坡后缘平台选择地势较为平坦、土体表层具备一定植被根系分布的区域,设置3 m×3 m的试验样地。为便于分析不同土体类型和植被覆盖条件对优先流发育的影响,在整平后的样地内布设3个试验小区。

(1) MH(木荷覆盖残积土)。该区土体结构较疏松,表层植被为自然生长的木荷(*Schima superba*)及其根系,地面被小灌木、枯落物和草本植物覆盖,植被覆盖度大于80%。

(2) BR(裸露残积土)。该区人工清除地表植被,呈裸露状态,土壤为风化花岗岩残积层,无明显植物根系,便于研究无植被干扰条件下的入渗路径。

(3) QW(全风化花岗岩)。该小区位于平台边缘,土体母质为全风化花岗岩,颗粒粗大,结构疏松,地表无明显植被覆盖,部分区域有稀疏草本植物。

在各小区中选取具有代表性的区域开展染色示踪试验,使用4 g/L的高亮蓝染色液均匀施加于土体表面,通过模拟降雨入渗过程,观察染色水在不同土体与植被覆盖条件下的入渗特征与优先流路径。染色完成后,于入渗充分的剖面沿垂直方向切取,进行图像记录与染色情况分析。

需要说明的是,MH, BR和QW这3种土体类型在成因上对应同一花岗岩风化剖面的不同层位(表层残积土-中部残积土-下部全风化花岗岩),但染色示踪试验并非在同一垂直剖面上分层进行,而是分别选取具有代表性的不同地表位置作为独立试验小区。

由于研究区地形起伏明显,各试验小区存在一定的地表高程差异,每个小区均以其自身地表为0 cm深度基准,向下开展染色入渗试验。因此,表1中"0—30,30—60,60—90 cm"仅用于表征不同土体类型在区域风化剖面中的典型赋存深度范围,而非试验中的统一垂向分层。

1.3　染色示踪试验

为研究不同土体类型中水分运移及优先流特征,试验前对染色示踪区域进行准备。首先,剥离试验区周围土体,保留核心区域,使用削土刀将其整形为60 cm×60 cm×50 cm的规则立方体,确保剖面规整、观测清晰。整形时,清理表面5 cm内土层并平整,避免喷洒过程中积水或溶液流失。同时,在距染色试验点0.2 m处采集环刀样,用于土体理化性质分析。

喷洒前,先进行预喷试验以确定喷洒强度和持续时间。最终采用压力式喷壶,以125 ml/min的流速将高亮蓝染色剂(浓度4 g/L)均匀喷洒于试样表面,喷洒持续2 h,并严格控制水量,避免积水,模拟自然降雨入渗过程。压力式喷壶因其结构简单、出水均匀,在野外染色示踪试验中被广泛用于模拟自然降雨条件下的非饱和入渗过程,相关方法已在多项优先流研究中得到应用[6,13]。该方法可有效避免集中注水造成的强迫入渗,更有利于识别真实的优先流通道。

在喷洒过程中,喷壶内部压力随水量减少可能存在一定衰减。为降低压力变化对喷洒均匀性的影响,本研究采取以下措施。①喷洒前对喷壶进行充分加压,并在喷洒过程中定期补充压力;②通过预试验监测单位时间出水量,确认流速变化幅度较小;③采用较长喷洒时间和较低流量,以减弱瞬时压力波动对整体入渗格局的影响。

需要指出的是,喷洒压力的微小变化可能在局部尺度上引入一定不确定性,但该不确定性对本研究关注的优先流空间分布特征及不同土体类型的对比影响有限。由于各处理条件下均采用相同喷洒装置与操作方式,系统误差在不同土体间具有一致性,不会改变优先流发育差异的相对大小规律。

喷洒后,立即用防水、隔热材料覆盖试验区,防

止水分蒸发或外界干扰，静置24 h以便染色剂充分渗透并显现入渗路径。该染液浓度在前期预试验中已验证具备良好的可视化效果，能够在剖面中清晰观察到优先流通道及入渗特征。

静置完成后，按15 cm间距开挖，依次剖切5个垂直剖面，每剖一层用小铲修整边缘，确保剖面平整，并用钢尺标识长宽（方便图像校正和染色面积计算）。随后使用高精度摄像设备对每个剖面进行图像采集，获取高分辨率染色图像，用于后续优先流路径分析和染色面积统计。

1.4 土体样品理化性质测定

为掌握不同深度土层的基本物理性质，在染色示踪试验点附近0.2 m处采集土体样品（环刀样和散土样），带回实验室进行相关指标测试。采用环刀法测定土体容重、干密度和含水率，饱和含水率则依据最大持水状态下的含水量进行换算。黏聚力（c）与内摩擦角（Φ）是表征土体抗剪强度的重要参数，通过室内直剪试验测定。试验结果如表1所示。

表1 土体基本性质

Table 1 Basic properties of soils

参 数	木荷覆盖残积土（0—30 cm）	裸露残积土（30—60 cm）	全风化花岗岩（60—90 cm）
c/(kPa)	24	23	21
Φ/(°)	13	9	12
密度/(g·cm^{-3})	1.54	1.71	1.92
干密度/(g·cm^{-3})	1.27	1.4	1.53
含水率/%	21.3	22.1	25.5
饱和含水率/%	44.6	43.1	37.7

注：①表中0—30，30—60，60—90 cm表示3类土体在区域典型花岗岩风化剖面中的赋存深度范围，用于区分土体类型；②实际染色试验在不同地表位置的独立试验小区开展，各剖面深度均以各自地表为0 cm起算。

1.5 数据处理

1.5.1 图像解析

为便于后续对土体染色面积的计算与分析，需对获取的剖面图像进行预处理。首先，使用Adobe Photoshop软件对图像拍摄过程中产生的偏斜、杂色和边缘变形等问题进行校正，并通过调整阈值对图像进行二值化处理，将染色路径区域转换为黑色（0），未染色区域转换为白色（1），从而获得清晰的黑白图像。随后，将处理后的图像导入MATLAB软件中，利用imbinarize函数将图像转化为二维矩阵数据，矩阵中仅包含0（表示染色区）和1（表示非染色区）。在此基础上，统计黑白像素的数量，并将结果导出为Excel格式文件，为后续的定量分析提供基础数据。

1.5.2 优先流特征参数计算

计算木荷覆盖残积土、裸露残积土和全风化花岗岩3种土体类型的染色垂直剖面的染色面积比、平均最大入渗深度、基质流深、优先流比、长度指数和染色面积比变异系数等6个优先流形态特征参数，系统分析不同土体类型在相同降雨条件下的优先流发生特征与分布规律。

（1）染色面积比（D_c，%）。表示剖面中染色区域所占的相对面积比例，表征染液在垂直剖面中的迁移范围。计算公式为：

$$D_c=\frac{D}{S}\times 100\% \tag{1}$$

式中：D为染色区域面积（cm^2）；S为剖面图像总面积（cm^2）。

（2）基质流深度L（cm）指剖面中染色面积比大于80%的区域所对应的最大深度，可表征溶液主要通过基质流入渗的范围。

（3）平均最大入渗深度U_{max}（cm）为剖面中各个染色区域的最大入渗深度的平均值，代表染液迁移的平均最大深度。

（4）优先流比P_F（%）衡量染液是否集中分布在有限区域，进而表明优先流现象的显著程度。计算公式为

$$P_F=\left(1-\frac{L\times W}{S_{Toc}}\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中：W为剖面宽度（本研究设定为60 cm），S_{Toc}为剖面的总染色面积（cm^2）。

（5）长度指数（L_i，%）。将剖面垂直划分为若干等厚层（1 mm），计算相邻各层染色面积比的绝对差值之和，表示染液在不同深度的分布变化程度，其主要表征染色面积比沿深度方向的层间起伏与梯度变化强度，对局部突变和分段式通道（如指状流、裂隙导流）更敏感。计算公式为：

$$L_i=\sum_{i=1}^{n-1}|D_{i+1}-D_i| \tag{3}$$

式中：n为分层总数；D_i表示第i层的染色面积比（%）。

（6）染色面积比变异系数（C_v）。表征剖面各深度层染色面积比相对均值的整体离散程度，表明总体非均质强弱，但不强调层间变化的方向与突变位置。计算公式为：

$$C_v=\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{DC}_i-\overline{\mathrm{DC}})^2}}{\overline{\mathrm{DC}}} \tag{4}$$

式中:$\overline{DC}$为各层染色面积比的平均值。

1.5.3　优先流评价指标构建

为统一不同参数的量纲并综合评估优先流强度,本研究采用了标准化与权重加权的方法构建综合优先流评价指数(I_{PF})。该方法参考《荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤优先流特征》一文中的研究方法[14]。

(1)指标正负向与极差标准化处理。本研究6个指标中,D_c, U_{max}, P_F, L_i, C_v均为正向指标(数值越大表征优先流越显著);基质流深度L描述基质流主导入渗的深度范围,L越大说明入渗越偏向均质基质流、优先流相对越弱,因此L为负向指标。为保证综合指数与物理意义一致,标准化时对正向与负向指标分别采用如下极差标准化:

正向指标:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{i,\min}}{x_{i,\max}-x_{i,\min}} \tag{5}$$

负向指标:

$$x'_{ij}=\frac{x_{i,\max}-x_{ij}}{x_{i,\max}-x_{i,\min}} \tag{6}$$

式中:x_{ij}为第j个样本在第i个指标下的原始值;$x_{i,\max}$,$x_{i,\min}$分别为该指标的最大值与最小值。经上述处理后,所有指标均满足"值越大→优先流越强"的统一方向性,便于综合加权计算。

(2)权重计算(基于方差法)。各参数权重$W(G_i)$由其标准差$\sigma(G_i)$决定,标准差计算如下。

标准差$\sigma(G_i)$表示第i个指标在样本间的波动程度,其计算公式为:

$$\sigma(G_i)=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(Z_{ij}-\overline{Z_i})^2} \tag{7}$$

$$W(G_i)=\frac{\sigma(G_i)}{\sum_{i=1}^{m}\sigma(G_i)} \tag{8}$$

式中:m为样本总数;$\overline{Z_i}$为第i个指标的标准化平均值。

(3)综合优先流指数计算(I)。将标准化参数与权重相乘,得到最终综合评价值:

$$I=\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}\cdot W_j \tag{9}$$

该指标数值越大,表示剖面中优先流过程越明显,越易发生集中迁移。

2　结果与分析

2.1　染色剖面土体优先流分布特征

为揭示不同土体类型中水分迁移机制的差异,基于剖面染色图像(图1)与染色面积比随深度分布特征(图2),对3种典型土体(MH, BR, QW)的入渗行为进行分析。

MH剖面呈现连续、分支发达的垂向染色通道,最大延伸深度超过40 cm,染色面积比在0—50 cm范围内保持40%～50%,分布均匀。这表明该剖面具有由根系孔隙主导的指状流与基质流协同入渗的特征。

BR染色主要集中于0—10 cm表层,呈团块状分散分布,10 cm以下迅速衰减,染色面积比下降至10%以下,表明入渗严重受限,主要为浅层基质渗流。

QW染色通道集中于20—40 cm深度,沿结构面延伸,呈现波动式多峰分布,表明裂隙控制下的结构性优先流与显著非均质入渗特征。3类土体表现出显著差异:MH入渗路径通畅且均一,BR入渗浅显、扩展性差,QW则表现为中深层结构诱导的非均一优先流。

2.2　染色剖面土体优先流特征参数

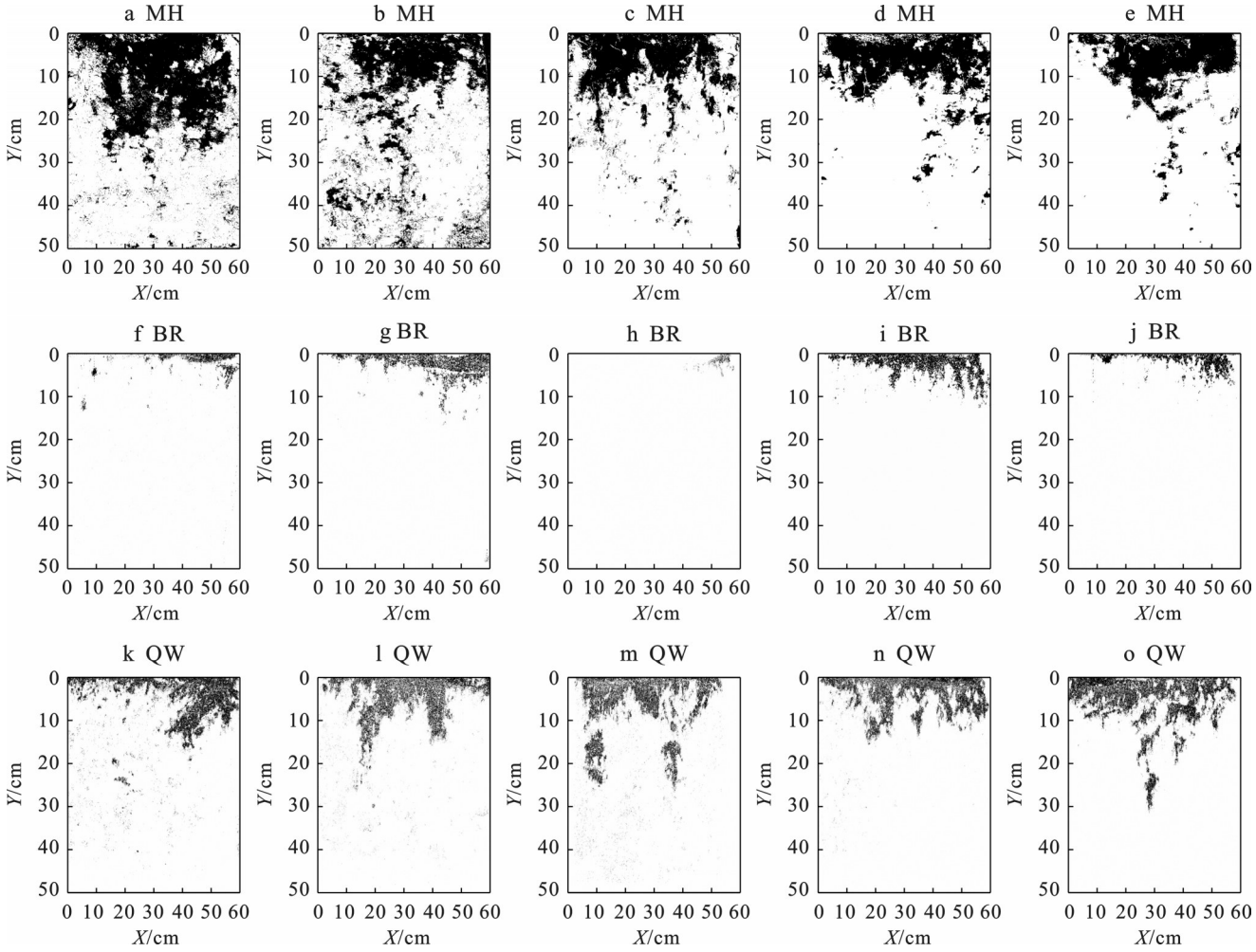
基于各剖面染色图像的像素提取结果(表2),对3类土体(MH, BR, QW)的6项优先流表征参数(D_c, L, U_{max}, P_F, L_i, C_v)进行对比分析。总体而言,MH在染色渗透程度与垂向扩展能力方面表现最强,QW次之,BR最弱;而在空间离散性方面,BR的不均一性最突出,MH相对稳定。这一总体格局与染色剖面直观特征相一致,即MH更易形成连续的根孔——大孔隙导水通道,QW受结构面与裂隙控制呈中深层集中入渗,而BR由于缺乏宏观孔隙与生物扰动,染色多局限于浅层并呈零散分布。

从染色面积比D_c看,MH的平均值显著高于QW与BR,表明在相同施加水量条件下,MH剖面整体染色范围更大,入渗更充分;QW虽存在优势通道,但总体染色面积仍受裂隙连通性与结构非均一性限制;BR的D_c最低,说明水分在表层基质中以缓慢弥散入渗为主,难以形成贯通的优势渗流通道。

在垂向入渗能力方面,平均最大入渗深度U_{max}的差异更为直观:MH最大,QW居中,BR最小,显示植被根系改造与孔隙连通性显著增强水分向深部的传输能力。基质流深度L在MH中为非零而在BR,QW中接近0,表明MH中仍存在一定厚度的相对均质入渗层,而BR与QW的优先通道多在近地表即快速启动并占主导。P_F指标在3类土体中整体偏高,提示各剖面均存在一定程度的优势入渗,但MH的P_F波动更大,表明其基质流-优先流协同特征更明显。

L_i与C_v共同刻画染色沿深度分布的非均匀性。MH与QW的L_i较高,说明染色面积比随深度变化起伏更明显,符合通道结构型优先流导致的分段式入

渗特征;而BR的C_v最大,表明其染色分布高度离散,局部性强,可能与表层结皮、微地形径流汇聚或局部孔隙突变有关。综合来看,MH的优势在于整体渗透强,通道连通性好,QW的特征为结构控制的中深层优势通道,BR则表现为浅层受限与分布离散的入渗模式。



注:①土体类型代码MH,BR,QW分别代表木荷覆盖残积土、裸露残积土和全风化花岗岩。②每个土体类型(MH,BR,QW)均包含5个独立垂直剖面(a—e,f—j,k—o),分别对应5次重复染色试验结果,用于表征同一土体条件下优先流空间分布的变异性。下同。

图1 不同土体类型垂直剖面染色特征

Fig.1 Vertical profile staining characteristics of different soil types

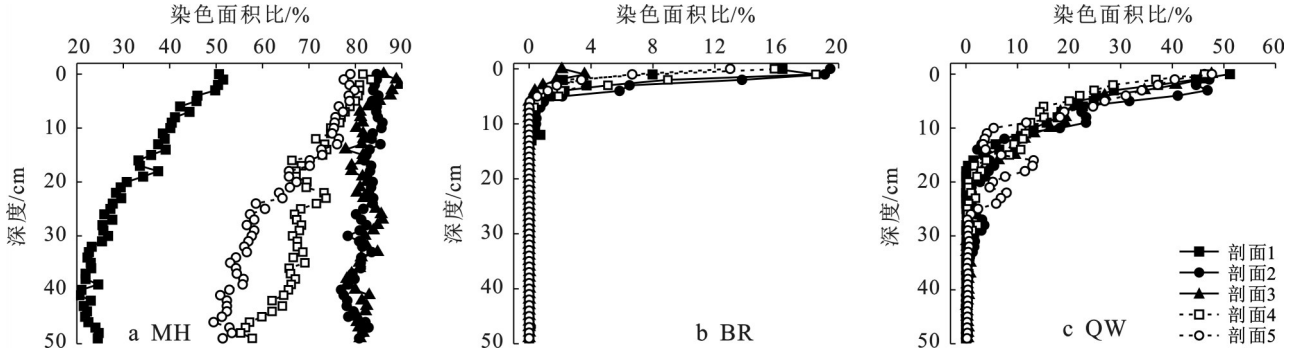


图2 不同土体类型染色面积比

Fig.2 Dyed area ratios of different soil types

2.3 不同土体类型下的优先流特征指标差异

为进一步量化不同土体类型间优先流特征差异的显著性,采用箱线图(图3)展示各指标的组内离散与组间差异,并基于多重比较结果对差异进行判定

($p<0.05$)。总体上,D_c与U_{max}对土体类型差异最敏感:MH显著高于BR,且整体高于QW,说明植被覆盖及根孔结构显著提高入渗规模与垂向延伸能力;BR在多数指标上处于最低水平,表明其渗透受限的基质流主导特征。

对于L指标,MH显著大于BR与QW,表明MH表层仍存在一定相对均质入渗层,随后才进入明显的通道控制阶段;而BR与QW的L接近0,说明优势通道在浅层迅速主导入渗。P_F指标虽在3类土体中均接近100%,但MH的组内波动更大,指示其不同剖面间的通道连通性差异更明显,符合根系分布与团聚结构空间异质性导致的变化。

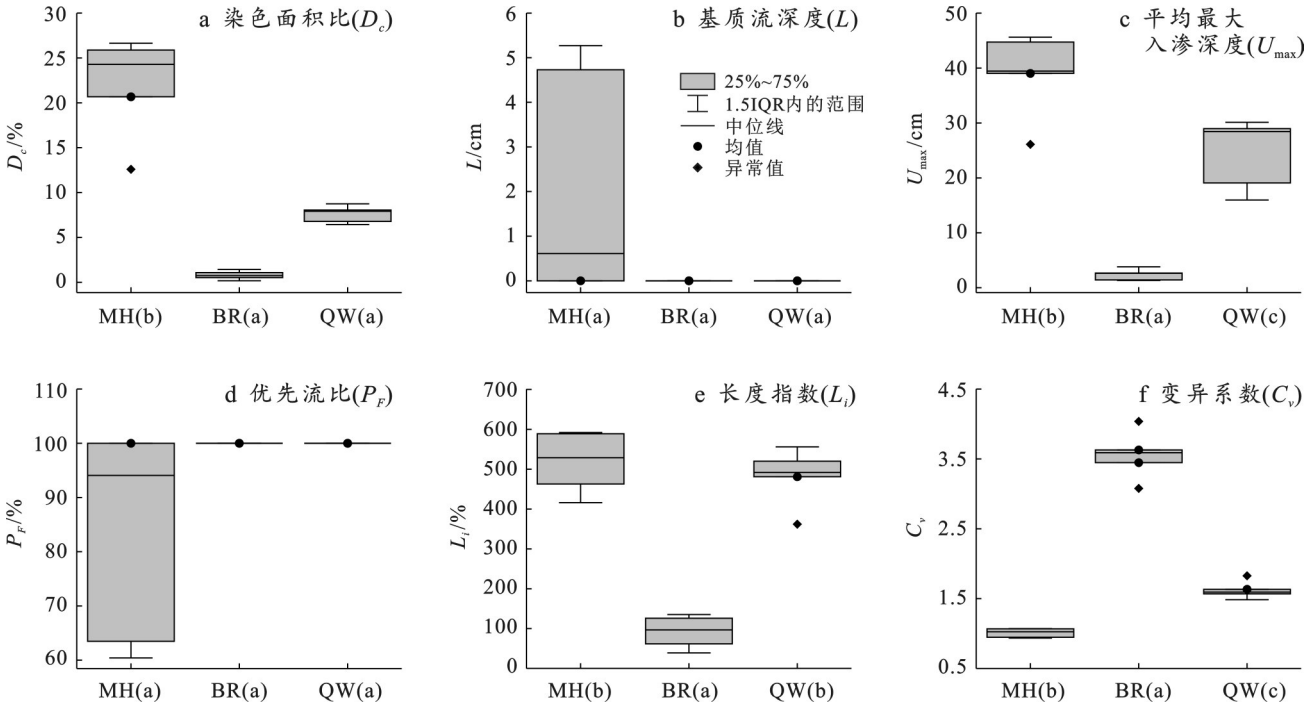
在刻画非均匀性方面,L_i显示MH与QW显著高于BR,说明前两者沿深度方向存在更强的染色起伏与通道分段性;C_v则显示BR明显高于MH与QW,表明BR染色更离散化和斑块化。上述统计结果进一步支持前文的过程解释:MH以根孔驱动的连续通道增强深部入渗,QW以裂隙结构面控制形成中深层优势路径,BR则因缺乏宏观孔隙而表现为浅层受限与高离散性。

表 2　不同土体类型下的优先流特征参数

Table 2　Preferential flow characteristic parameters of different soil types

土体类型	剖面层次	D_c/%	L/cm	U_{max}/cm	P_F/%	L_i/%	C_v
MH	剖面 1	12.59	0	45.62	100	591.94	0.946 5
	剖面 2	26.64	5.27	44.72	60.42	588.85	1.025 9
	剖面 3	25.88	4.73	39.45	63.48	528.74	1.070 0
	剖面 4	20.67	0.61	39.02	94.08	462.79	1.067 3
	剖面 5	24.28	0	26.11	100	416.07	0.935 7
BR	剖面 1	0.75	0	2.68	100	96.75	3.628 4
	剖面 2	1.43	0	3.82	100	135.31	3.078 2
	剖面 3	0.18	0	1.34	100	39.20	3.588 8
	剖面 4	1.08	0	2.64	100	126.04	3.446 6
	剖面 5	0.53	0	1.43	100	61.74	4.037 2
QW	剖面 1	6.78	0	15.97	100	361.99	1.826 8
	剖面 2	8.74	0	19.08	100	481.07	1.633 7
	剖面 3	7.92	0	28.44	100	491.87	1.567 5
	剖面 4	6.43	0	28.97	100	556.08	1.593 6
	剖面 5	8.06	0	30.13	100	520.14	1.484 1

注:D_c,L,U_{max},P_F,L_i,C_v分别表示染色面积比、基质流深度、平均最大入渗深度、优先流比、长度指数、变异系数。下同。



注:每个图中标注 Tukey 显著性差异字母(如 a,b):相同字母表示无显著差异;不同字母表示组间差异显著($p<0.05$)。

图 3　不同土体类型 6 种优先流指标箱型图

Fig.3　Boxplots of six preferential flow indicators for different soil types

2.4　优先流综合指数分析结果

基于6项指标构建的优先流综合评价指数I,有效量化优先流强度。表3表明标准差法确定的权重中,长度指数L_i(0.175 4)与最大入渗深度U_{max}(0.173 1)权重最高,显示其对优先流过程最敏感。图4表明各土体I平均值依次为MH(0.596 9)> QW(0.472 9)> BR(0.325 4),表示MH优先流通道发育最显著,渗透能力与根系扰动协同作用突出;QW以

结构面为主导形成中深层通道；BR缺乏宏观孔隙，优先流活动最弱。结果进一步印证土体结构、风化程度与植被状况对优先流形成与发展具有决定性影响，I可作为坡体水动力响应分析的关键指标，具有良好的综合判别能力。

表3 各评价指标的均方差和权重系数

Table 3 Mean square deviations and weight coefficients of each evaluation indicator

指 标	均方差	权重系数
D_c/%	0.365 7	0.169 8
L/cm	0.332 6	0.154 4
U_{max}/cm	0.372 8	0.173 1
P_F/%	0.336 7	0.156 4
L_i	0.377 8	0.175 4
C_v	0.367 9	0.170 9

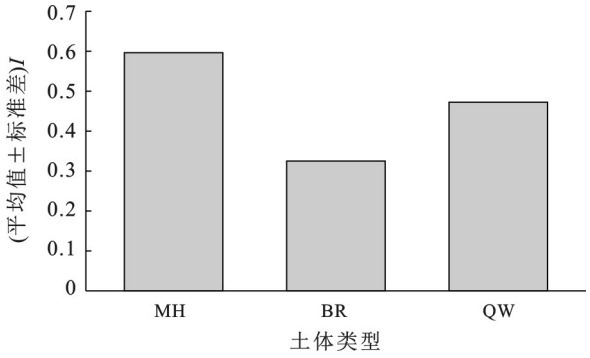


图4 不同土体类型优先流综合评价指数(I)

Fig.4 Comprehensive preferential flow index (I) for different soil types

3 讨 论

本研究基于野外染色示踪试验，重点揭示不同花岗岩残积土类型中水分入渗过程中优先流的空间分布特征及其水力响应差异。结果表明，即便在相同降雨入渗条件下，不同土体因结构条件与生物扰动差异，其优先流发育程度和主控机制存在显著不同，这一现象在近年的非饱和带水文研究中亦被广泛关注[1,15]。

3.1 不同土体结构对优先流发育的控制作用

木荷覆盖残积土(MH)中观测到连续性强，延伸深度大的垂向染色通道，表明根系活动显著增强土体中宏观孔隙的连通性，使水分更易沿特定路径快速入渗。类似的根系诱导型优先流现象已在多种森林土壤和坡地环境中得到验证，研究认为根孔不仅提供低阻力通道，还可能通过改变局部含水状态强化指状流发育[16-17]。本研究中MH土体优先流综合指数最高，表明其水分运移更具集中性和深层传导特征，但需要指出的是，该结果仅表征入渗过程中的水力行为差异，并不直接对应坡体稳定性变化。

全风化花岗岩(QW)土体的优先流主要受结构面和风化裂隙控制，染色通道多集中于中下部，呈现明显的非均质分布特征。这种结构控制型优先流在硬岩风化带中具有普遍性，尤其在花岗岩、片麻岩等母质中，裂隙几何特征对水分迁移路径起主导作用[18-20]。与植被主导型优先流相比，此类通道的空间连续性较弱，但在局部尺度上可能形成较强的垂向渗透能力。

裸露残积土(BR)中优先流发育最弱，染色主要集中于表层，说明在缺乏植被和生物扰动条件下，土体孔隙结构相对致密，水分入渗以基质流为主。类似结果在人工清除植被或长期裸露坡面中已有报道[21-22]，表明表层结构退化会显著抑制优先流通道的形成。

3.2 优先流评价指数的水文指示意义

本研究构建的优先流综合评价指数，整合染色面积比、入渗深度、长度指数和变异系数等多项形态参数，能够在不同土体类型有效区分优先流发育程度。近年来，基于多指标融合的优先流量化方法逐渐成为研究趋势，被认为有助于减少单一指标带来的尺度偏差[23-24]。从结果来看，长度指数和最大入渗深度对综合指数贡献较大，说明优先流的垂向延伸能力是表征快速入渗过程的重要特征。

需要强调的是，该指数主要表征土体在特定入渗条件下的水力响应特征，其适用范围仍受降雨强度、初始含水状态及三维结构差异等因素制约。当前结果基于二维剖面染色分析，尚不能完全刻画优先流在坡体尺度上的空间连通性，这也是近年优先流研究中普遍存在的技术局限[25]。

3.3 对浅层坡地水文过程的启示与研究局限

从水文过程角度看，不同土体类型中优先流的存在表明，降雨入渗并非均匀推进，而是受控于少数高渗透通道。这种非均质入渗机制可能导致坡体内部含水状态在时间和空间上的强烈差异，从而影响后续的水力响应过程[26]。然而，本研究仅基于入渗示踪试验，未涉及力学参数随含水变化的动态响应，也未开展稳定性或风险评估分析，因此相关推论应限定在水分迁移机制层面。

未来研究可在本工作基础上，结合原位水分监测、孔隙水压力观测及数值渗流模拟，进一步探讨优先流与坡体水文-力学过程的耦合关系，以增强试验结果在工程与灾害研究中的解释力[27]。

4 结 论

(1) 3类土体均表现出不同程度的优先流特征，但入渗模式存在显著差异。MH以根系孔隙主导的指状

流为主,优先通道连续且入渗更深,I最高(0.596 9);QW受结构面裂隙控制形成中深层优势路径,I居中(0.472 9);BR孔隙度低,结构致密,优先流发育弱,PFI最低(0.325 4)。

(2)优先流面积比随深度递减且剖面水平分布具有明显非均质性,表明土体结构对水分运移路径的强控制作用。其中MH的整体染色范围与入渗深度显著高于BR,QW则表现为结构诱导的非均一入渗。

(3)结果表明,不同土体类型显著影响优先流的发生强度、路径结构与垂向扩展能力,从而可能改变坡体入渗水分的时空分布格局并影响水力响应过程;但其对孔隙水压力演化与稳定性变化的具体作用仍需结合原位监测与耦合分析进一步验证。

(4)I作为整合染色面积比、入渗深度、优先流比等多参量的综合指标,可用于定量表征花岗岩残积土剖面入渗过程的非均匀性与优势通道发育程度,为相关水文过程模拟与参数化表达提供参考;其在滑坡稳定性分析与风险评估中的应用需在后续工作中通过孔压与含水率监测及渗流-稳定性耦合计算加以检验。

参考文献(References)

[1] Caputo M C, De Carlo L, Masciale R, et al. Detection and quantification of preferential flow using artificial rainfall with multiple experimental approaches [J]. Hydrogeology Journal, 2024,32(2):467-485.

[2] 彭海英,李小雁,崔步礼,等.土壤优势流研究方法综述[J].干旱气象,2011,29(2):137-143.
Peng Haiying, Li Xiaoyan, Cui Buli, et al. Review on the study of preferential flow in soil [J]. Arid Meteorology, 2011,29(2):137-143.

[3] Kukemilks K, Wagner J F, Saks T, et al. Conceptualization of preferential flow for hillslope stability assessment [J]. Hydrogeology Journal, 2018,26(2):439-450.

[4] Tsai T L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide [J]. Environmental Geology, 2008, 53(7): 1563-1569.

[5] Shao Wei, Bogaard T, Bakker M, et al. The influence of preferential flow on pressure propagation and landslide triggering of the Rocca Pitigliana landslide [J]. Journal of Hydrology, 2016,543:360-372.

[6] 史文娟,汪志荣,沈冰,等.非饱和土壤中指流的研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(7):128-132.
Shi Wenjuan, Wang Zhirong, Shen Bing, et al. Review on the study of finger flow in unsaturated soil [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2004,32(7):128-132.

[7] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.
Gao Zhaoxia, Xu Xuexuan, Zhao Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(11):2801-2811.

[8] Leuther F, Schlüter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties [J]. Soil,2021, 7(1):179-191.

[9] Wei Hui, Yang Yuanfeng, Wang Jianyu, et al. A comparison of preferential flow characteristics and influencing factors between two soils developed in the Karst region of Southwest China [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 241:106132.

[10] Zwartendijk B W, Bruijnzeel L A, Ghimire C P, et al. Effects of (assisted) natural regeneration on infiltrability and preferential flow pathways in the Khasi hills (Meghalaya, NE India) [J]. Land Degradation & Development, 2025,36(5):1564-1578.

[11] Coutinho R Q, Silva M M, dos Santos A N, et al. Geotechnical characterization and failure mechanism of landslide in granite residual soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(8): 05019004.

[12] Salih A G. Review on granitic residual soils' geotechnical properties [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012,17(3):2645-2658.

[13] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study [J]. Water Resources Research, 1994,30(7):1945-1954.

[14] 杨鹏华,胡广录,李昊辰,等.荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤优先流特征[J].干旱区研究,2025,42(1):127-140.
Yang Penghua, Hu Guanglu, Li Haochen, et al. Characteristics of the soil priority flow in the root zone of typical sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone [J]. Arid Zone Research, 2025,42(1):127-140.

[15] Zhou Tiantian, Levintal E, Brunetti G, et al. Estimating the impact of vadose zone heterogeneity on agricultural managed aquifer recharge: A combined experimental and modeling study [J]. Water Research, 2023,247: 120781.

[16] Luo Ziteng, Niu Jianzhi, He Shuqin, et al. Linking roots, preferential flow, and soil moisture redistribution in deciduous and coniferous forest soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2023,23(3):1524-1538.

[17] Mair A, Dupuy L X, Ptashnyk M. Model for water infiltration in vegetated soil with preferential flow oriented by plant roots [J]. Plant and Soil, 2022,478(1): 709-729.

(下转第 115 页)