

北方土石山区典型坡面优先流特征研究

赵思远¹, 苏辉东^{1,2}, 贾仰文¹, 龚家国¹, 牛存稳¹, 甘永德¹, 赵翠平¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,

北京 100038; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 以太行山区崇陵流域的典型坡面为研究对象, 通过亮蓝(Blue-FCF)与KI染色示踪试验, 利用图像处理软件技术, 计算优先流形态特征参数, 分析5个不同坡位的优先流形态特征变化规律。结果表明: (1) 随着坡位升高, 坡面土壤厚度、容重逐渐减小, 而总孔隙度、渗透系数、饱和含水量逐渐增大, 凋萎系数与田间持水量则呈现波动变化趋势; (2) 随着坡位的升高, 染色剂运移深度不断增加, 基质流区域占比减小而优先流区域占比增大; 各坡位染色面积比随深度缓慢下降, 在40 cm以下深度范围高坡位点的土壤水分与周围土体交互作用较低坡位点较弱; 染色剂入渗体积随坡位升高而逐渐增大; (3) 随着坡位的升高, 优先流对实际水分运移的贡献增大, 高坡位坡面水分以优先流为主要方式向下入渗; (4) 土壤质地与容重是影响土石山区坡面不同坡位优先流差异的主要因素。

关键词: 土石山区; 染色示踪; 优先流; 坡面; 染色形态特征

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0009-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.002

Characteristics of Preferential Flow on Typical Slope in Northern Rocky Mountain Area

ZHAO Siyuan¹, SU Huidong^{1,2}, JIA Yangwen¹, GONG Jiaguo¹,

NIU Cunwen¹, GAN Yongde¹, ZHAO Cuiping¹

(1. *The State Key Laboratory of Simulations and Regulations of Water Cycles in*

River Basins, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR),

Beijing 100038; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Taking the typical slope of the Chongling Basin in the Taihang Mountain area as the research object, the dye tracer experiments with Blue-FCF and KI were performed. The image processing software was used to explore the changes of preferential flow morphological characteristics at the five different slope positions. The results showed that: (1) With the increase of altitude, the soil thickness and bulk density of each slope position gradually decreased, and the total porosity, permeability coefficient and saturated moisture content gradually increased, while the wilting coefficient and field water holding capacity tended to fluctuate. (2) With the rise of slope position, the depth of dye migration increased, the matrix area decreased and the preferential flow area gradually increased; the stained area rate of dye infiltrate decreased with the increase of the depth. The interaction between soil moisture and surrounding soil in the depth below 40cm was weaker than that in the lower slope; the volume of dye infiltration increased gradually as the rise of slope position; (3) As the slope position increased, the contribution of the preferential flow to the actual water transport increased and the water flow infiltrated with preferential flow as the main method on higher slope; (4) Soil texture and bulk density were the driving forces for the difference of preferential flow at different slope positions in earth-rock mountainous area.

Keywords: rocky mountain area; dye tracer; preferential flow; slope; stained morphology characteristics

收稿日期: 2018-07-11

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701); 国家自然科学基金项目(51379215, 51779272); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题项目(2016ZY03)

第一作者: 赵思远(1992—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要从事水文模型研究。E-mail: zsyshaosiyuan@126.com

通信作者: 贾仰文(1965—), 男, 山东成武人, 博士生导师, 教授级高工, 主要从事流域水循环模拟和水资源规划管理研究。E-mail: jiayw@iwhr.com

优先流是一种沿特定路径绕过大部分基质与孔隙快速入渗的非平衡水流现象,广泛存在于非均质各向异性渗透介质中^[1-3],其表现形式主要有大孔隙流、非稳定指流、管流、裂隙流等^[4-5]。土壤优先流的相关研究最早可被追溯至 1882 年,但直到上世纪 80 年代才逐渐引起学术界的重视^[6]。Beven 等^[2]对土壤孔隙与优先流的关系的综述为后来的优先流研究热潮开启序幕,众多学者对优先流的发育基础理论、形态特征描述、影响因素及模型模拟等方面进行了大量研究^[7-11]。国内对于优先流的研究主要开始于 20 世纪 90 年代中后期,目前已成为水文学研究的热点问题之一^[12]。盛丰等^[13]根据优先流发展过程中所表现出来的阶段性特征和分形特征,建立了描述非均匀土壤水流运动和溶质运移过程的两区—两阶段模型;王红兰等^[14]开展室内土柱穿透试验对大孔隙优先流进行了定量评价,发现耕作层原状土柱中大孔隙流的导水贡献率为 66.2%~68.5%,而非耕作层土壤大孔隙流导水贡献率仅为 0.2%~1.7%;严家平等^[15]探究了矿区土壤裂隙优先流对土壤结构的影响,发现土壤裂隙优先流是煤矿开采沉陷区水土流失的重要驱动因素。

染色示踪法是用观测原位土壤优先流路径的常用方法。Sander 等^[16]曾借助染色示踪试验探究了定期耕作的稻田土壤中的优先途径;Öhrström 等^[17]曾利用染色示踪液进行人工降雨试验发现不同的流域地貌类型对染料的渗透响应存在显著差异;Mei 等^[18]使用亮蓝染色剂对黄土地区不同坡位、不同植被下优先流入渗模式及空间变异情况进行了探究。在国内,李胜龙等^[19]采用亮蓝染色示踪方法,对江汉

平原典型稻田—田埂过渡区进行研究,以揭示田埂对稻田—田埂过渡区土壤水分渗漏的影响;姚晶晶等^[20]采用亮蓝染色方法探究了 3 种不同入渗水量对山地土壤优先流的影响并进行了定量评价。

太行山区是我国华北平原的重要水源地之一,山坡表层广泛分布土石二元介质,极大的改变了土石山区土壤的水分特征参数与下渗、产汇流过程,为优先流的形成与存在创造了必要的有利条件^[21]。目前有关山区优先流的研究主要针对不同植被种类覆盖下单一坡位的优先流发育情况进行探究^[22-27],针对典型坡面不同坡位的优先流规律尚未有报道。本文以太行山区崇陵流域的典型坡面为研究对象,选择 5 个坡位进行染色示踪试验,对其垂直剖面优先流形态进行观测与量化分析,为华北土石山区优先流模型参数测定及分布式水文模型的修正提供理论依据,具有十分重要的指导意义

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于太行山典型土石山区流域—河北省易县崇陵流域。该流域位于太行山脉北端,属北易水支流旺龙河的支流,地理坐标为 39°22′—39°25′N, 115°21′—115°23′E,海拔 85~300 m,流域面积 6 km²。研究区域位置见图 1。在海拔较高区域以荆条和酸枣为主,在中低区域分布油松与侧柏,在低沟区分布杨柳。崇陵流域属温带大陆性季风气候,冬季干冷,夏季湿热。多年平均降水量为 650 mm,降雨大部分集中在汛期,7—9 月的降水量占全年的 75%。

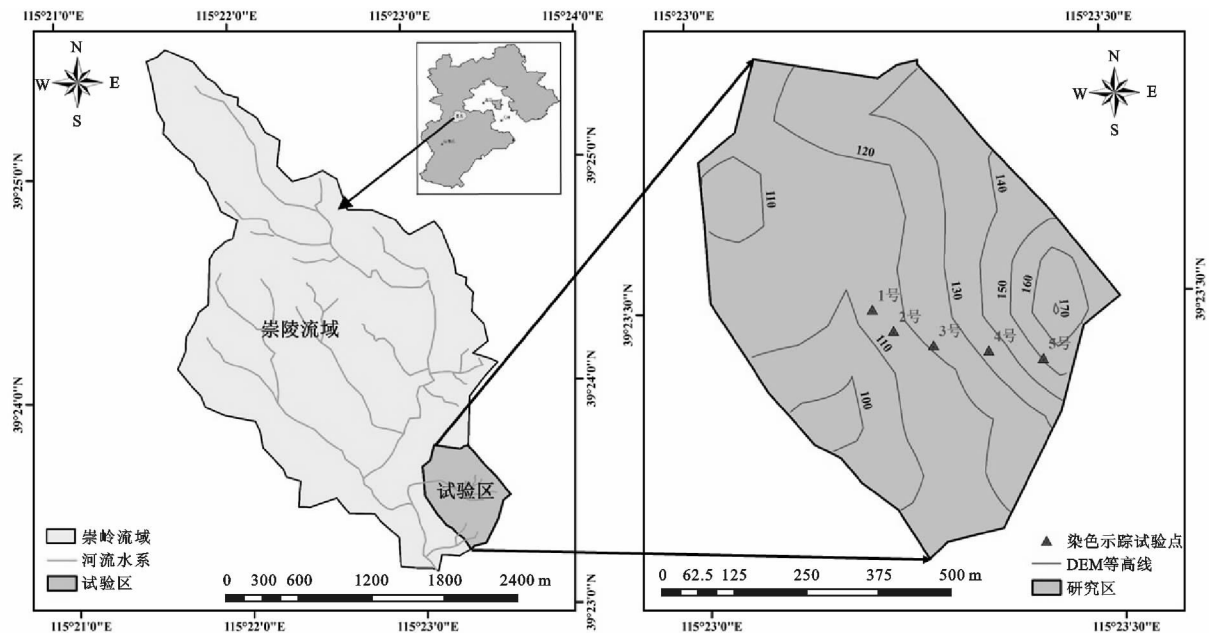


图 1 研究区地理位置

1.2 研究方法

于 2018 年 5 月在典型坡面从坡底至坡脚分别选择

5 个试验点进行染色示踪试验与土壤样品的采集,典型坡面地理位置及试验点信息见图 1 和表 1。试验点地表

覆盖植被以侧柏为主,试验点尽量选择距离植被 2 m 以上的区域以减少植被根系对优先流的影响。

表 1 试验点概况

编号	海拔/ m	平均土层 厚度/cm	坡位	植被 类型	叶面积 指数
1 号	101	95	坡下	侧柏	0.63
2 号	126	43	坡中下	侧柏	0.81
3 号	163	38	坡中	侧柏	0.99
4 号	184	25	坡中上	侧柏	1.06
5 号	203	16.5	坡上	侧柏	0.76

1.2.1 染色示踪试验 对试验点地表进行平整化处理,以避免地表不平导致的局部入渗,地表植被用剪刀小心剪除,避免破坏土壤结构。用 4 块规格为 0.80 m×0.3 m×0.03 m(长×宽×厚)的 PVC 板围成边长为 0.8 m 的正方形试验区,将 PVC 板敲入土中 0.1 m,PVC 板两侧土壤用木槌夯实,避免染色剂随 PVC 板内壁流下。示踪液中同时溶解了 4 g/L 的 Blue-FCF 食品级亮蓝染色剂与 10 g/L 的 KI,显色液中溶解 50 g/L 水溶性淀粉与 25 g/L 硝酸铁。为消除坡度对地表水头分布不均匀的影响,模拟降雨的上边界条件,采用控压式喷雾器将 30 L 染色示踪剂均匀喷洒在试验区内,以地表不产生积水与汇流为标准控制喷洒流量。染色剂喷洒结束后,用防水和隔热材料将试验区上层覆盖,防止水分蒸发。24 h 后,每隔 20 cm 对土壤剖面进行垂直开挖至 80 cm 深度,每个试验点共挖取 4 个垂直剖面以做重复对照。每个剖面形成后,在剖面四周放置 1 个铝合金硬质不变形刻度框和蜘蛛立方白平衡校准器,用于后期图像处理的几何畸变校正和标准化处理。先用数码相机对 Blue-FCF 染色剖面进行拍照记录,采用遮光板对试验区域进行遮光处理。然后,用喷壶将显色液均匀喷洒在垂直剖面,示踪液流经的剖面区域完全显色(15 min)后,用数码相机对 KI 示踪剂的分布剖面进行拍照记录。

1.2.2 坡面土壤理化性质与水动力学参数的测定 为探究土石二元介质结构与性质对优先流发育的影响,在染色示踪试验结束后,用 100 mL 的环刀分层采集土样,密封固定后带回试验室分别测定容重、孔隙度、粒径组成等理化性质和渗透系数、凋萎系数、田间持水量、饱和持水量等水动力学参数。对染色剖面的土壤厚度分布进行测定并记录,然后清理一个 0.5 m×0.5 m 的区域,在 0.3 m×0.3 m 的区域上设定特征点,钻取岩石风化层岩芯,整理岩石风化层剖面,拍照并记录照片名称和岩石风化层厚度。因采样难度较大,各剖面分层采集土样的深度不一致,为便于分析,各试验点土壤理化性质与水动力学参数均取该处各层数据的平均值(如土壤厚度、容重、饱和含水量等)或加权平均值(如渗透系数等)。

1.2.3 染色图像处理 染色图像的处理分为几何尺寸校正、白平衡校正、色彩校正和降噪处理 4 个步骤。首先使用 Python 程序(薄层水流数据采集软件)对拍摄的原始染色照片进行几何校正;采用 Adobe Photoshop CS 软件对拍摄的染色照片进行图像调整,通过调整大小、色阶、亮度、曝光度及颜色替换,将未染色区域颜色调整为黑色,染色区域调为白色或灰色,调整阈值色阶的大小后将处理后的灰阶模式图像以扩散仿色的方法转化为位图模式的 TIFF 格式图像,然后用 Image-Pro Plus 6.0 软件对图像进行降噪处理,降噪后图像中染色区域为白色,未染色区域为黑色。利用 MATLAB 对二值图像进行分析以获取入渗深度($Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.5}$ 、 $Z_{0.25}$ 、 $Z_{\max}$)、总入渗体积(V_{sum})和染色面积比(stained area ratio, SAR)等特征参数。SAR 指剖面内染色面积占剖面面积的百分比,反映水流在整个土壤剖面的变化规律。 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.5}$ 、 $Z_{0.25}$ 分别表示染色面积为 75%、50%、25% 的土层深度, $Z_{\max}$ 表示染色剂入渗的最大深度。总入渗体积计算公式为:

$$V_{\text{sum}} = \sum S_j \times \Delta x \tag{1}$$

其中: V_{sum} 为示踪剂在示踪单元体的染色/显色的体积(cm^3); S_j 为二位垂直剖面上 j 深度示踪剂染色/显色面积(cm^2); Δx 为两平行垂直剖面的水平间隔(cm)。

1.2.4 数据处理 采用 SPSS 19.0 软件对数据进行 Pearson 相关性分析($\alpha=0.05$),利用 Excel 2013 软件进行数据整理,用 OriginPro 9.4 软件作图。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤理化性质及水动力学参数变化规律

优先流是山区坡面下渗及壤中流的主要机制,而渗流介质的地质构造与理化性质直接影响大孔隙优先流的发育情况。各试验点的土壤理化性质(颗粒机械组成、土壤与风化层厚度、容重、孔隙度等)和水动力学参数(渗透系数、凋萎系数、田间持水量、饱和含水量等)见表 2 和图 2。本试验中,1 号至 5 号试验点分布于坡底至坡顶 5 个坡位,海拔从 109 m 向 202 m 逐渐递增,平均土壤厚度从 95 cm 向 16.5 cm 递减,土壤类型从黏土向砂壤土演变,黏粒占比(<0.002 mm)减小,砂粒占比(>0.02 mm)增大。随着坡位上升,各试验点土壤容重减小而总孔隙度增大,说明坡上土样较坡下更为疏松。各试验点水动力学参数随海拔变化明显,渗透系数($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)与饱和含水量大小排序均为 5 号 $>$ 4 号 $>$ 3 号 $>$ 2 号 $>$ 1 号,其中 5 号点的渗透系数与饱和含水量分别为 1.24 mm/min 和 30.39%,而 1 号点的渗透系数与饱和含水量仅为 0.07 mm/min 和 25.08%,凋萎系数与田间持水量则呈现波动的变化趋势。这说明随着坡位的上升,坡面表层土样的风化

程度加大,致密度降低,导水能力增大。另外,高坡位试验点各理化性质指标与水动力学参数的均方差均

显著大于低坡位试验点,说明高坡位的空间变异性要大于低坡位处。

表 2 各试验点表层土壤颗粒组成分析

单位: %

试验点编号	土壤类型	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.2 mm	0.2~2 mm
1 号	粉砂质黏壤土	22.38	47.87	29.58	0.17
2 号	壤质黏土	29.73	44.61	23.10	2.56
3 号	壤土	13.85	32.53	46.83	6.80
4 号	砂质壤土	10.76	27.56	46.66	15.03
5 号	砂质壤土	14.43	29.96	45.51	10.10

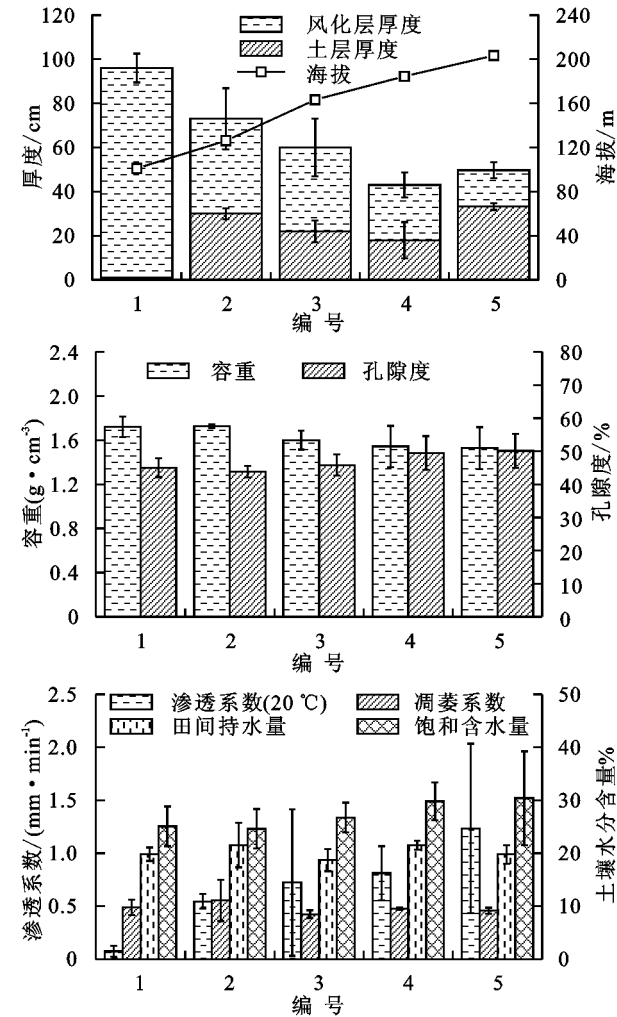


图 2 不同坡位试验点剖面土石介质理化性质与水动力学参数

2.2 不同坡位的优先流形态

选择每个试验点中最接近平均下渗深度及平均染色面积分布比的剖面二值图像作为该试验点染色试验的代表见图 3。其中白色部分代表染色区域,而黑色部分代表未被染色土壤区域,可以发现 5 个试验点均存在明显的优先流。随着坡位的不断升高,土壤水分下渗锋面的“触手”数量增多,染色示踪剂在垂直剖面的分布面积逐渐增加,非均匀性也逐渐增大。位于坡下的 1,2 号试验点下渗锋面接近水平,说明该区域入渗过程以基质活塞流为主;而坡中上的 3~5 号试验点出现与地表相连的优先流通道,这大大限制了表层水分与周围土体的交互关系,抑制了基质活塞流的发育,致使更多的水分通过大孔隙优先流通道快速

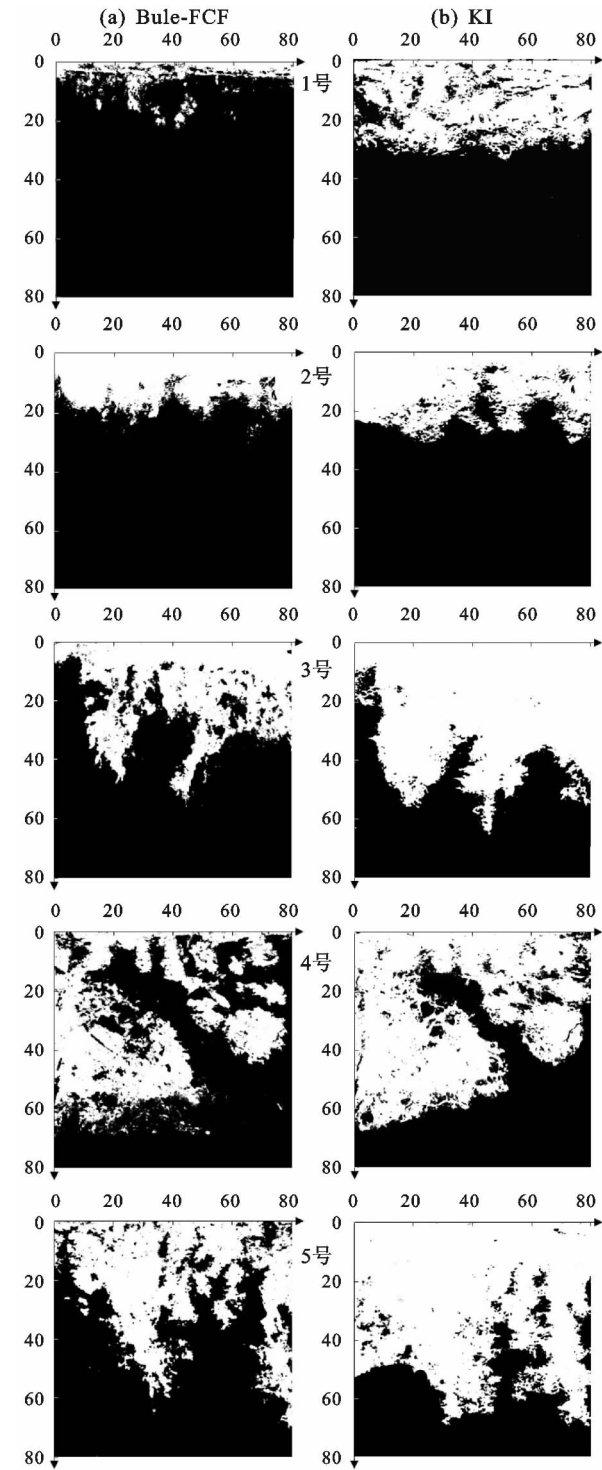
渗入土体。Blue-FCF 染色剂分子的颗粒直径较大,且易被土壤吸附或被致密土壤堵塞,它只能通过较大直径的入渗通道,借助 Blue-FCF 染色图像能够直观地了解该剖面大孔隙优先流的流动模式;而溶解于示踪液中的负一价碘离子颗粒较小,且不易被土壤吸附,在染色剖面喷洒显色液(硝酸铁与可溶性淀粉的混合溶液)后,土壤中的碘离子被氧化并显紫色,用来表征水分入渗的实际流动模式。与 Blue-FCF 染色模式相比,每处试验点 KI 染色剂的分布形态与前者基本一致,但后者覆盖了前者剖面中未被染色的部分区域,而且入渗深度也有不同程度的下移,即土壤水分主要借助大孔隙优先流通道进行入渗并逐渐向周围土体扩散。

2.3 不同坡位染色剂的入渗深度与体积

表 3 为各坡位染色示踪剂的最大入渗深度($Z_{\max}$)以及垂直剖面染色面积达到 75%,50%,25%时的土层深度(分别以 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.5}$ 、 $Z_{0.25}$ 表示)。Blue-FCF 染色剂的入渗深度排序为 4 号>5 号>3 号>2 号>1 号,说明优先流的运移深度随着坡位的上升增大,其中,4 号垂直剖面在 30—60 cm 深度存在节理发育明显的碎石带,该区域砾石直径超过 5 cm,大孔隙流与裂隙流大大增大了该剖面的导水能力。KI 染色剂的入渗深度排序具有较为一致的规律,5 号试验剖面水分下渗最深。值得注意的是,随着坡位的升高,各试验剖面 $Z_{\max}(\text{KI})/Z_{\max}(\text{Blue-FCF})$ 依次为 1.71, 1.44, 1.13, 1.03, 1.07, 可以发现 2 种染色模式的深度比逐渐减小,即大孔隙优先流通道的控制深度越来越靠近土壤水分的实际下渗深度,这说明在高坡位区域山坡入渗方式为优先流,而且随着坡位的升高,优先流对水分入渗的贡献越大。另外,各数据的误差范围变化规律也说明,坡位越高,土石二元介质水分入渗的空间变异性越大。

垂直剖面染色面积比超过 75%说明该区域(即 $Z_{0\sim0.75}$)水分入渗过程以基质流占主导,而垂直剖面染色面积低于 25%说明该区域(即 $Z_{0.25\sim\max}$)的水分入渗过程以优先流占主导^[28]。对于 Blue-FCF 染色模式而言,随着试验点海拔的升高, $Z_{0\sim0.75}/Z_{\max}$ 依次为 54%, 40%, 13%, 13% 和 20%, 而 $Z_{0.25\sim\max}/Z_{\max}$

依次为 80%, 68%, 38%, 54% 和 45%, 由此可以看出, 较低海拔坡位的水分入渗方式以基质流为主, 而较高海拔坡位的水分入渗方式以优先流为主。对于 KI 染色模式而言, 随着试验点海拔的升高, $Z_{0\sim 0.75}/Z_{\max}$ 依次为 46%, 57%, 33%, 34% 和 31%, $Z_{0.25\sim \max}/Z_{\max}$ 依次为 17%, 24%, 33%, 28% 和 29%, 与 Blue-FCF 染色模式下的结果具有基本一致的规律, 但各试验点之间的差距变小。



注: 图中下渗深度及宽度的单位为 cm。

图 3 施加染色剂 24 h 后不同坡位垂直剖面染色代表对各坡面土石二元介质理化性质及水动力学参

数与 $Z_{\max}$ 进行 Pearson 相关性分析, 发现土壤质地是影响 $Z_{\max}$ 的首要因素, 容重与饱和含水量也与 $Z_{\max}$ 呈现显著相关关系。

2.4 不同坡位染色剂染色面积比与下渗总体积

各坡位试验点染色剂染色面积比 SAR 随土层深度变化情况见图 4, 下渗体积密度分布统计结果见图 5。对于 Blue-FCF 染色剂而言, 1, 2 号试验点 SAR 变化趋势较为一致, 随土层深度的增大快速下降, 并在 30 cm 处降为 0, 说明该土层深度范围 1, 2 号坡位的人渗以基质活塞流为主, 且 2 号坡位的人渗能力较大。与之相反, 其余 3 点的 SAR 变化趋势相对平缓, 在 0—80 cm 土层深度内无明显临界点存在。在 0—40 cm 范围内, 坡中上 3 点以 5 号 > 4 号 > 3 号的关系波动缓慢下降, 40 cm 以下土层深度 3~5 点 SAR 均在 50% 以下缓慢变化, 这说明该范围内的水分与周围土体交互作用较弱, 沿较窄通道稳定快速入渗。其中, 4 号 SAR 变化呈现明显的“S”形, 在 5 个试验点中, 5 cm 处 4 号 SAR 最小, 而 40 cm 以下范围 4 号 SAR 最大, 这与该坡位 30—60 cm 深度出现的大块砾石层密切相关, 即孔隙连通性的骤变能够极好地改善土壤导水情况, 大大促进水分优先流的运移, 表层水分的活塞基质流尚未发育完全, 水分便通过大孔隙通道快速向土层深处下渗。盒状图的分布情况同样验证了以上结果, 且坡位越高处的变异情况越大。

相较 Blue-FCF 染色模式, 各试验点在 30 cm 以上范围的 KI 染色 SAR 曲线更加紧凑, 变化主要出现在 30—60 cm 土层深度范围内, 这说明水分通过大孔隙优先流垂直入渗的过程中发生了侧向扩散, 水分实际入渗模式的差异体现在 30 cm 以下的土层深度范围内。1, 2 号 KI 染色模式下的 SAR 曲线在 0—80 cm 土层深度范围内同样存在明显的临界位置 (45 cm), 在 0—45 cm 土层深度范围内较快地降至 0; 3~5 号试验点 SAR 曲线依然呈现较为平缓的下降趋势, 三者 在 0—40 cm 土层深度范围变化较小, 曲线斜率最大出现在 50—60 cm 土层范围, 说明在该土层深度水分入渗模式变化较大。

对各试验区域染色剂入渗总体积进行统计, 结果见表 4。随着坡位的升高, 2 种染色剂入渗总体积呈现增长趋势, 由大到小依次为: 4 号 > 5 号 > 3 号 > 2 号 > 1 号; $V_{\text{sum}}(\text{KI})/V_{\text{sum}}(\text{Blue-FCF})$ 随着坡位的升高而降低, 进一步说明在土石二元介质水分入渗过程中大孔隙优先流所占比重越来越大。

对各坡面土石二元介质理化性质及水动力学参数与 V_{sum} 进行 Pearson 相关性分析 (表 5), 结果表明土壤质地、容重、总孔隙度与饱和含水量显著影响各坡面的 V_{sum} 。

表 3 各试验点染色剂入渗深度统计

单位:cm

编号	$Z_{0.75}$		$Z_{0.5}$		$Z_{0.25}$		Z_{max}	
	Blue—FCF	KI	Blue—FCF	KI	Blue—FCF	KI	Blue—FCF	KI
1 号	12.0±1.1	17.3±5.3	14.5±1.6	27.3±2.2	17.7±2.1	31.3±2.4	22.1±0.9	37.9±2.8
2 号	10.6±2.8	21.5±7.1	14.8±2.6	25.5±6.5	17.8±2.3	28.9±5.7	26.3±2.4	37.9±2.8
3 号	6.9±4.1	20.1±8.1	9.9±7.1	36.4±8.3	20.5±10.2	51.6±4.6	54.6±4.2	61.8±4.4
4 号	7.7±12.4	21.2±8.8	13.1±16.5	42.8±12.4	32.5±15.6	54.7±5.7	60.3±7.0	62.3±6.3
5 号	12.0±6.0	19.4±9.4	11.5±3.2	34.7±14.8	26.35±3.7	54.9±7.1	58.7±8.6	63.2±9.3

注:表中数据为平均值±标准差; $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.5}$ 、 $Z_{0.25}$ 分别为染色面积为75%,50%,25%的土层深度(cm); Z_{max} 为染色剂入渗的最大深度(cm)。

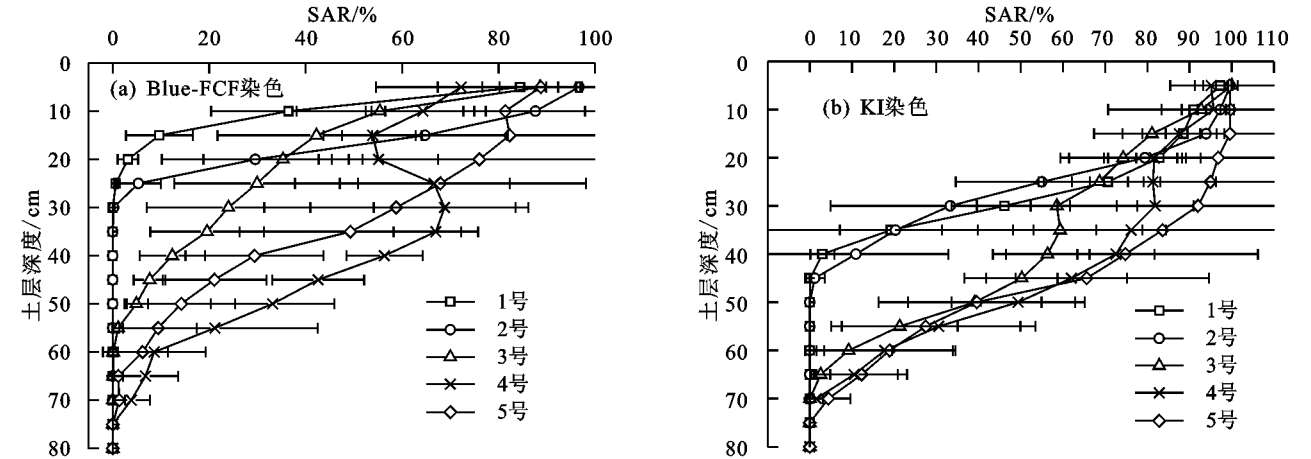


图 4 各试验点垂直剖面下染色剂染色面积比随土层深度变化

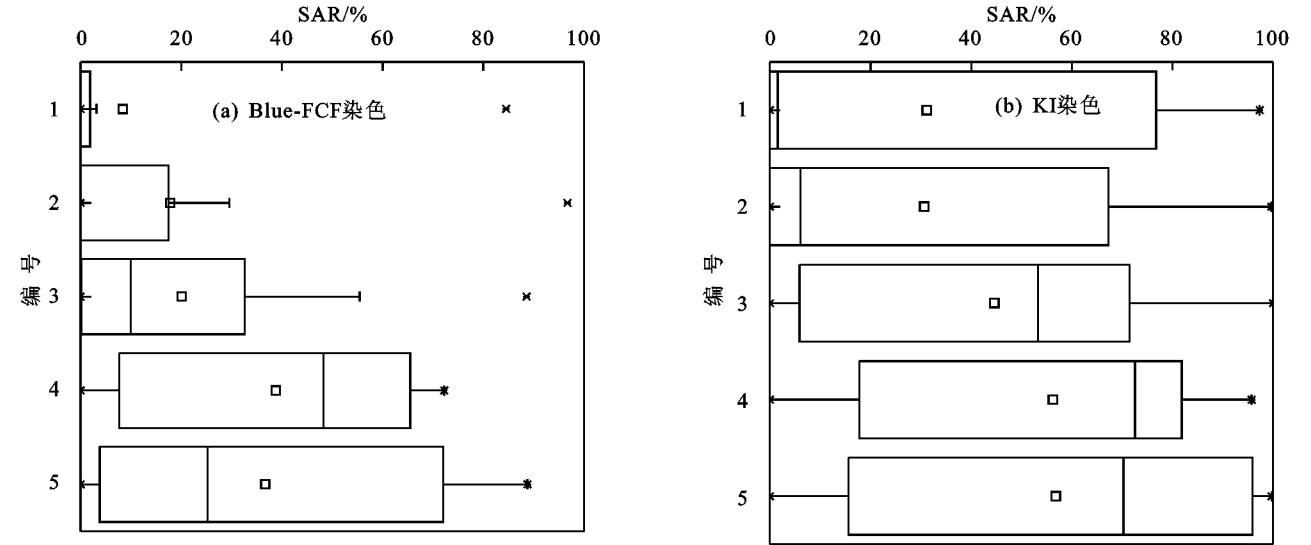


图 5 各试验点染色剂染色面积比盒状统计

表 4 各试验点染色剂入渗总体积统计

单位:cm³

染色模式	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
V_{sum} (Blue—FCF)	43020.6	80144.5	132793.5	178575.2	159056.3
V_{sum} (KI)	159595.0	173144.5	228363.7	259989.9	232280.0
V_{sum} (KI)/ V_{sum} (Blue—FCF)	3.7	2.2	1.7	1.5	1.5

表 5 土石二元介质理化性质及水动力学参数与优先流形态特征的相关性分析

染色模式	黏粒含量	砂砾含量	土壤厚度	风化层厚度	容重	孔隙度	渗透系数	萎蔫系数	田间持水量	饱和含水量
Z_{max} (Blue—FCF)	-0.901*	0.981**	-0.822	0.446	-0.977**	0.833	0.841	-0.690	-0.190	0.890*
Z_{max} (KI)	-0.922*	0.979**	-0.768	0.399	-0.969**	0.812	0.813	-0.772	-0.309	0.866
V_{sum} (Blue—FCF)	-0.746	0.874	-0.874	0.516	-0.922*	0.896*	0.854	-0.342	0.224	0.935*
V_{sum} (KI)	-0.891*	0.973**	-0.807	0.380	-0.945*	0.819	-0.770	-0.590	-0.022	0.872

注: * 表示相关系数达显著水平($P<0.05$); ** 表示相关系数达极显著水平($P<0.01$)。

3 结论

(1)随着海拔的升高,各坡位土壤厚度减小,容重减小,总孔隙度增大,土质由黏土向砂壤土演变;渗透系数与饱和含水量均随海拔的升高而增大,凋萎系数与田间持水量则呈现波动变化趋势;

(2)随着坡位的不断升高,优先流发育程度不断增大,主要体现在染色剂运移深度不断增加, $Z_{0\sim 0.75}/Z_{\max}$ 逐渐减小,而 $Z_{0.25\sim \max}/Z_{\max}$ 逐渐增大;染色剂下渗体积密度随土层深度缓慢下渗,在40 cm以下深度范围高坡位点的土壤水分与周围土体交互作用较低坡位点较弱;染色剂入渗体积逐渐增大;

(3)随着坡位的升高,大孔隙优先流对实际水分运移的贡献增大,高坡位坡面的土壤水分下渗过程以优先流为主;

(4)影响土石山区坡面大孔隙优先流运移深度的主要因素由大到小依次为容重、饱和含水量、渗透系数和总孔隙度;而影响染色示踪剂下渗总体积的主要因素由大到小依次为饱和含水量、容重、总孔隙度和土壤厚度。

参考文献:

- [1] Šimůnek J, Jarvis N J, van Genuchten M T et al. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1): 14-35.
- [2] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [3] 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.
- [4] 牛健植,余新晓,张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 231-243.
- [5] Bouma J, Belmans C F M, Dekker L W. Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 917-921.
- [6] 盛丰,张利勇,吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 1-10.
- [7] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137-153.
- [8] Hagedorn F, Bundt M. The age of preferential flow paths[J]. *Geoderma*, 2002, 108(1): 119-132.
- [9] Gerke H H. Preferential flow descriptions for structured soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 169(3): 382-400.
- [10] Ritsema C J, Dekker L, Hendrickx J M H, et al. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil[J]. *Water*

Resources Research, 1993, 29(7): 2183-2194.

- [11] Jarvis N, Koestela J, Larsbo M. Understanding preferential flow in the vadose zone: Recent advances and future prospects[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(12): 1-11.
- [12] 芮孝芳. 水文学前沿科学问题之我见[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 95-102.
- [13] 盛丰,王康,张仁铎,等. 土壤非均匀水流运动与溶质运移的两区—两阶段模型[J]. *水利学报*, 2015, 46(4): 433-442.
- [14] 王红兰,蒋舜媛,崔俊芳,等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 167-174.
- [15] 严家平,陈孝杨,程方奎,等. 矿区土壤裂隙优先流对土壤铵态氮迁移及土壤结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 120-126.
- [16] Sander T, Gerke H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(1): 105-115.
- [17] Öhrström P, Persson M, Albergel J, et al. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 257(1): 164-173.
- [18] Mei X, Zhu Q, 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.
- [19] 李胜龙,易军,刘目兴,等. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1131-1142.
- [20] 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.
- [21] 曹建生,刘昌明,张万军,等. 太行山区坡地水文地质特性与渗流集蓄技术研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(2): 216-221.
- [22] 骆紫藤,牛健植,孟晨,等. 华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 305-308.
- [23] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(3): 51-57.
- [24] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等. 森林生态系统林木根系对优先流的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1788-1797.
- [25] 魏虎伟,程金花,张洪江,等. 四面山2种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 25(4): 263-268.
- [26] 张英虎,牛健植,杜晓晴,等. 鹫峰国家森林公园土壤优先流现象分析[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 41-45.
- [27] 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.
- [28] 盛丰,方妍. 土壤水非均匀流动的碘—淀粉染色示踪研究[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 144-148.