# 鲁中南花岗岩丘陵区坡耕地不同厚度土壤中优先流的发育特征

刘 超[1,2], 姚光兴[1], 安 娟[1], 吴元芝[1]

〔1.临沂大学 资源环境学院 山东省水土保持与环境保育重点实验室,
山东 临沂 276005; 2.中国地质大学(北京) 地球科学与资源环境学院, 北京 10083〕

**摘 要**:[目的] 研究不同土壤厚度条件下坡耕地优先流发育特征,为土层浅薄条件下坡耕地灌溉效率提高及面源污染防治提供依据。[方法] 以地处北方土石山区的山东省蒙阴县花岗岩丘陵区坡耕地为例,选取土层深度为 30 cm 和 50 cm 的样地,运用野外染色示踪试验法和室内图像处理技术,分析土层厚度对优先流发育特征的影响。[结果] 土壤厚度为 30 cm 和 50 cm 条件下平均基质入渗深度分别为 11.8 cm 和 11.9 cm,两者没有显著差异,平均优先流比分别为 28.2%和 29.5%,两者也没有明显差异;土壤厚度为 30 cm 时,9.9 cm 以上以基质入渗为主导,优先流发育深度范围为 9.9—27.0 cm;土壤厚度为 50 cm 时,6.1 cm 以上土层以基质入渗为主导,优先流发育深度范围为 6.1—39.5 cm;土壤厚度为 50 cm 条件下优先流平均最大入渗深度为 34.6 cm,平均长度指数为 192%,平均变异系数为 87.7%,均显著高于土壤厚度为 30 cm 时的数值;但两者平均最大入渗深度非均匀系数没有明显差异。[结论] 土壤层厚度差异不影响基质入渗,但会阻碍优先流向土壤深层的发育。

**关键词**: 不同土壤厚度; 优先流; 染色示踪法; 土石山区

**文献标识码**: A **文章编号**: 1000-288X(2021)04-0025-08 **中图分类号**: S157.1

**文献参数**: 刘超, 姚光兴, 安娟, 等.鲁中南花岗岩丘陵区坡耕地不同厚度土壤中优先流的发育特征[J].水土保持通报,2021,41(4):25-32.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.004; Liu Chao, Yao Guangxing, An Juan, et al. Characteristics of preferential flow development in slope cropland with different soil thickness in granite hilly region of Central and Southern Shandong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):25-32.

# Characteristics of Preferential Flow Development in Slope Cropland with Different Soil Thickness in Granite Hilly Region of Central and Southern Shandong Province

Liu Chao[1,2], Yao Guangxing[1], An Juan[1], Wu Yuanzhi[1]

〔1.*Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong* 276005, *China*;
2.*School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*〕

**Abstract**: [Objective] The development characteristics of preferential flow in slope farmland with different soil thicknesses were studied, in order to provide a basis for improving the irrigation efficiency and preventing and controlling the non-point source pollution. [Methods] The granite hilly slope cropland in Mengyin County, Shandong Province, which is located in the mountainous region of Northern China, was taken as an example. The samples with soil depth of 30 cm and 50 cm were selected, and the field staining tracer test method and indoor image processing technology were used to analyze the influence of soil thickness on the development characteristics of preferential flow. [Results] When the soil thickness was 30 cm and 50 cm, the average depth of substrate infiltration was 11.8 cm and 11.9 cm, respectively, and the average preferential

**收稿日期**:2021-03-09 **修回日期**:2021-04-12

**资助项目**:山东省自然科学基金项目"鲁中南花岗岩发育土壤剖面结构对典型人工林根系吸水来源的影响"(ZR2020MD102); 山东省大学生创新创业训练计划项目"鲁中南花岗岩弱发育土壤剖面结构对林地优先流发育的影响"(S201910452034)

**第一作者**:刘超(1993—),女(汉族),山东省聊城市人,硕士研究生,研究方向为第四纪地质学。Email:chaowa1995@163.com。

**通讯作者**:吴元芝(1982—),女(汉族),山东省济南市人,博士,副教授,主要从事土壤物理与生态水文方面的研究。Email:wuyuanzhi05@163.com。

flow ratio was 28.2% and 29.5%, respectively, there was no significant difference between the two depths. When the soil thickness was 30 cm, substrate flow was dominant in the soil layer above 9.9 cm, and the development depth of preferential flow ranged from 9.9 to 27.0 cm. When the soil thickness was 50 cm, matrix flow was dominant in the soil layer above 6.1 cm, and the development depth of preferential flow ranged from 6.1 cm to 39.5 cm. Under the condition of 50 cm soil thickness, the average maximum infiltration depth of preferential flow was 34.6 cm, the average length index was 192%, and the average coefficient of variation was 87.7%, which were significantly higher than those under the condition of 30 cm soil thickness. However, there was no significant difference in the non-uniformity coefficient of maximum infiltration depth between the two conditions. [Conclusion] The difference of soil layer thickness did not affect the substrate infiltration, but hindered the development of preferential flow to deep soil layer.

**Keywords: different soil thickness; preferential flow; staining tracer method; earth-rock mountainous area**

优先流是水分沿土壤中大孔隙、根孔、虫洞、裂隙等路径向下快速入渗到达深层土壤甚至地下水的非平衡水分运动现象[1-2]，是较为常见的土壤水分运动形式之一，优先流的发生常使灌溉和降水中的部分水分快速流到根系分布层以下，使灌溉和降水对根区土壤水分的补充不能达到预期效果，使上层土壤干旱持续[3]；而在水分快速运输的过程中，溶质也随水分运移，进而导致土壤养分流失和面源污染等方面的问题[4-5]。因此，优先流与人类的生产生活和生态安全息息相关，因而土壤优先流研究越来越被人们重视，成为目前土壤水文学关注的热点问题之一。学者们多采用染色示踪[6-7]、张力渗透仪[8]、CT 扫描等[9]方法研究土壤优先流，其中染色示踪法因可以直观、清晰地反映优先流流经区域而受到广泛的应用。已有研究利用染色示踪法对不同土地利用类型[10-11]、植被类型[12-13]及土壤条件包括土壤结构[14]、质地[15]、水分条件下[16-17]优先流发育特征及产流机制进行了广泛的探讨。也有学者们关注耕作方式对优先流发育的影响，如陈晓冰等[18]研究西南岩溶区甘蔗地不同耕作方式下优先流发育特征发现，粉垄耕作方式与免耕方式相比，可降低岩溶区甘蔗地土壤优先流的发生与发展，并在一定程度上提高土壤的保肥蓄水能力；而王发等[19]研究发现耕作犁底层有阻碍水分入渗和优先流产生的作用。土石山区土层浅薄，下伏基岩风化层与犁底层类似，具有与上层土壤差异较大的质地与结构，但下伏基岩风化层对优先流发育的作用尚不明确，不同土壤厚度条件下土壤优先流发育特征研究较少。鲁中南花岗岩丘陵地处北方土石山区，土层浅薄，土壤发育程度较弱，含有大量砾石，坡耕地水土流失及氮磷流失严重[20,21]，其优先流发育程度研究较少。因此，本文以地处鲁中南山地丘陵区的山东省蒙阴县双河峪小流域坡耕地不同厚度土壤为研究对象，以亮蓝染色图像变化数据为基础，利用统计学中的变异性分析方法，结合图像分析技术中的形态学理论，分析薄层土壤坡耕地不同土壤厚度条件下优先流发育特征的差异，探讨北方土石山区薄层土壤对优先流发育的影响机制，旨在为土层浅薄条件下坡耕地灌溉效率提高及面源污染防治提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选择试验样地位于地处鲁中南山地丘陵区的蒙阴县双河峪小流域。该小流域位于临沂市饮用水水源地—云蒙湖库区(117°45′—118°23′E，35°27′—36°20′N)，地势南北高，中间低，由西向东逐渐倾斜。山地丘陵占总面积的 94 %，海拔高度 170～500 m，坡度 10°～15°，年平均气温 13.7 ℃，降水主要集中在 7 月下旬至 9 月中旬，多年平均降水量 733.4 mm，属暖温带大陆性季风气候。该小流域母岩为典型花岗岩，土壤以粗骨性棕壤为主，土层厚度常不足 50 cm，地下水埋深 6～22 m。该小流域是典型农业小流域，坡耕地以种植花生为主，每年都用小型机械翻耕，翻耕深度 20～30 cm。人为活动剧烈，水土流失严重。为保证土壤的厚度，当地农民每隔几年就用挖掘机深翻至 50 cm，将浅层风化母质挖起以增加土壤层厚度。因而该区域花生坡耕地没有明显的犁底层，松散土壤层下即是坚硬基岩风化层。本研究在坡耕地选取土壤厚度不同的位置建立试验小区，进行染色示踪试验。

### 1.2 染色示踪试验

依据研究区土壤厚度的不同，于 2018 年 4 月在翻耕未起垄前的花生坡耕地上调查土壤厚度，然后选择土壤厚度不同的(30 cm，50 cm)2 个代表性位置，建立宽 60 cm 的正方形试验小区各 1 个，四周埋入有机玻璃板，插入深度至土壤和基岩风化层交界处，玻璃板露出地表高度为 20 cm，边缘压实，防止水分侧渗。用玻璃胶粘贴 PVC 板的缝隙，防止染色剂从缝隙中直接入渗，从而影响试验结果。

取亮蓝染色粉末 40 g,加 10.8 L 水(相当于当地大雨降雨量)配制成 4 g/L 为标准的亮蓝染色剂当作示踪染料溶液。在试验样地的土壤表面,用电动喷雾器均匀喷洒 35 min 左右(约 300 ml/min)。染色剂喷洒后,用薄膜塑料布覆盖 2 个样方,避免外界影响。待染色 24 h 后,取中间未受干扰的 50 cm×50 cm,以 10 cm 为间隔挖一系列垂直剖面,开挖得到 5 个土壤染色剖面,所有剖面挖掘深度均到达基岩风化层,深度为 40—60 cm,用小刀和小土铲将剖面修整平齐,用像素为 1 300 万的佳能数码相机进行剖面的垂直拍摄,并在拍照的同时用卷尺或者直尺作为参照,标定染色区域的面积。

### 1.3　土壤物理性质测定

试验前用标准环刀分别取 0—10,10—20 cm 和 20—30 cm 土壤,用于测定土壤的容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度,同时取 10 cm×10 cm×10 cm 土块,分散后装入用塑封袋用于测定>2 mm 砾石质量含量,并用 250 ml 环刀取原状土结合 Hyprop 导水率测定系统测定饱和导水率。采用环刀烘干法测定土壤容重,采用环刀浸泡法测定毛管孔隙度、总毛管孔隙度,并计算非毛管孔隙度。将塑封袋内土样烘干,然后用筛分法测定>2 mm 石砾含量,结果详见表 1。

**表 1　试验耕地的土壤物理性质**

| 土层深度/cm | 砾石含量/% | 容重/(g·cm$^{-3}$) | 总孔隙度/% | 毛管孔隙度/% | 非毛管孔隙度/% | 饱和导水率/(cm·d$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0—10 | 29.8 | 1.55 | 36.7 | 29.5 | 7.1 | 237.4 |
| 10—20 | 46.8 | 1.60 | 35.4 | 27.9 | 7.5 | 39.8 |
| 20—30 | 61.0 | 1.64 | 33.0 | 27.5 | 5.5 | 9.8 |

### 1.4　数据处理

在进行染色剖面的拍摄时,由于人为操作以及当时拍摄的环境等因素的影响,致使所拍摄出来的图片存在一定程度空间几何误差,需要对误差图片进行几何校正及剪切。利用 Photoshop CS3 将拍摄的垂直染色剖面彩色图像进行几何校正、剪切、自动对比度、光照校正、灰度、色阶、亮度以及降噪等步骤的处理,将其转为黑白阈值图像,这样就使得染色区变为黑色(像素值为 0)、非染色区变为白色(像素值为 255),利于观测结果以及后期的比对。调整阈值使处理结果与实际染色结果相同,将其另存储为位图格式(*.TIF)。然后利用专业图像软件 Imge-Pro Plus 6.0 把所得的几何校正后的水平染色图像进行滤镜处理,并输出由 0,255 组成二值矩阵,然后以此为依据利用 Excel 2016进行优先流特征分析及优先流变异性分析,并利用 SPSS 20 软件进行统计分析,采用 OringinPro 2019 和 Excel 2016 进行绘图。本研究利用箱图比较不同土壤厚度条件下优先流特征指数的分布差异,并用方差分析比较两种土壤厚度条件下各项指数差异的显著性,箱图的箱体采用的是 20%～80%的百分位数,即 60%的变量落在箱体内。

### 1.5　优先流特征指数及变异性

#### 1.5.1　优先流特征指数

(1) 染色面积比。染色面积比指一定深度土层中染色像素占图像宽度的比例[6],计算公式为:

$$DC_i = \frac{a_i}{A} \tag{1}$$

式中:$DC_i$ 为土层深度 $i$ 处染色面积比(%);$a_i$ 为深度 $i$ 处土壤染色面积(mm$^2$);$A$ 为深度 $i$ 处图像宽度总面积,土壤剖面宽度为 500 mm,即 $A$ 为 500 mm$^2$。

(2) 基质入渗深度。是土壤入渗由基质入渗发展成为优先流入渗时的最大垂直深度,也是土壤优先流发生深度[22],一般用土壤剖面中染色面积比≥80%时的土层深度表示。

(3) 最大染色深度。是染色图像中像素为 0 的最大土层深度,可以指征土壤水分入渗的最大深度,数值越大,说明土壤水分入渗越深,在一定程度上可以反映优先流的分布深度。

(4) 优先流比。是土壤整个剖面中优先流对应的染色面积占整个土壤剖面总染色面积的比例[22]。基于垂直剖面计算得来的土壤优先流比可以剔除基质入渗区域的影响,从而更真实的反映优先流区在整个染色区域的分布情况,其计算公式为:

$$PF = \left(1 - \frac{UF \cdot W}{DT}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中:PF 为土壤剖面优先流比(%);UF 为土壤剖面基质入渗深度(mm);$W$ 为土壤剖面水平宽度(mm);DT 为土壤剖面染色区总面积(mm$^2$)。

(5) 优先流长度指数。在竖直剖面上每一层与上一层染色面积比之差的绝对值之和,与染色剂渗透模式的异质性程度有关,该参数较大的土壤优先流更发育[23]。

$$L_i = \sum_{i=1}^{n} \left| DC_{(i+1)} - DC_i \right| \tag{3}$$

式中:$L_i$ 为优先流长度指数(%);$DC_{(i+1)}$,$DC_i$ 为土壤剖面第 $i+1$ 层、第 $i$ 层对应的染色面积比(%);$n$ 为土壤剖面垂直土层数,本研究选取垂直剖面进行该指标的计算,沿垂直面向下 1 个像素为 1 层,$n$ 值大小根据最大染色深度包含的像素数确定[12]。

#### 1.5.2　优先流变异性

(1) 土壤染色形态变异性。土壤染色形态变异性是指不同土层深度范围内的土壤染色图像的变化

程度，即变异系数，它可以反映土壤空间中优先流的发育程度[6-7]，表达式为：

$$C_v=\frac{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(DC_i-DC_m)^2}}{DC_m}\times 100\% \quad (4)$$

式中：$C_v$ 为土壤优先流染色面积比变异系数(%)；$N$ 为土壤剖面优先流垂直土层数量；$DC_i$ 为土壤剖面第 $i$ 层对应的染色面积比(%)；$DC_m$ 为优先流染色面积比均值。

(2) 最大入渗深度非均匀系数。因为实际入渗深度很难确定，一些已有学者将最大入渗深度非均匀系数用于分析优先流入渗的非均匀性，同时这也是优先流发育变异性的一种表示方法[24-25]。

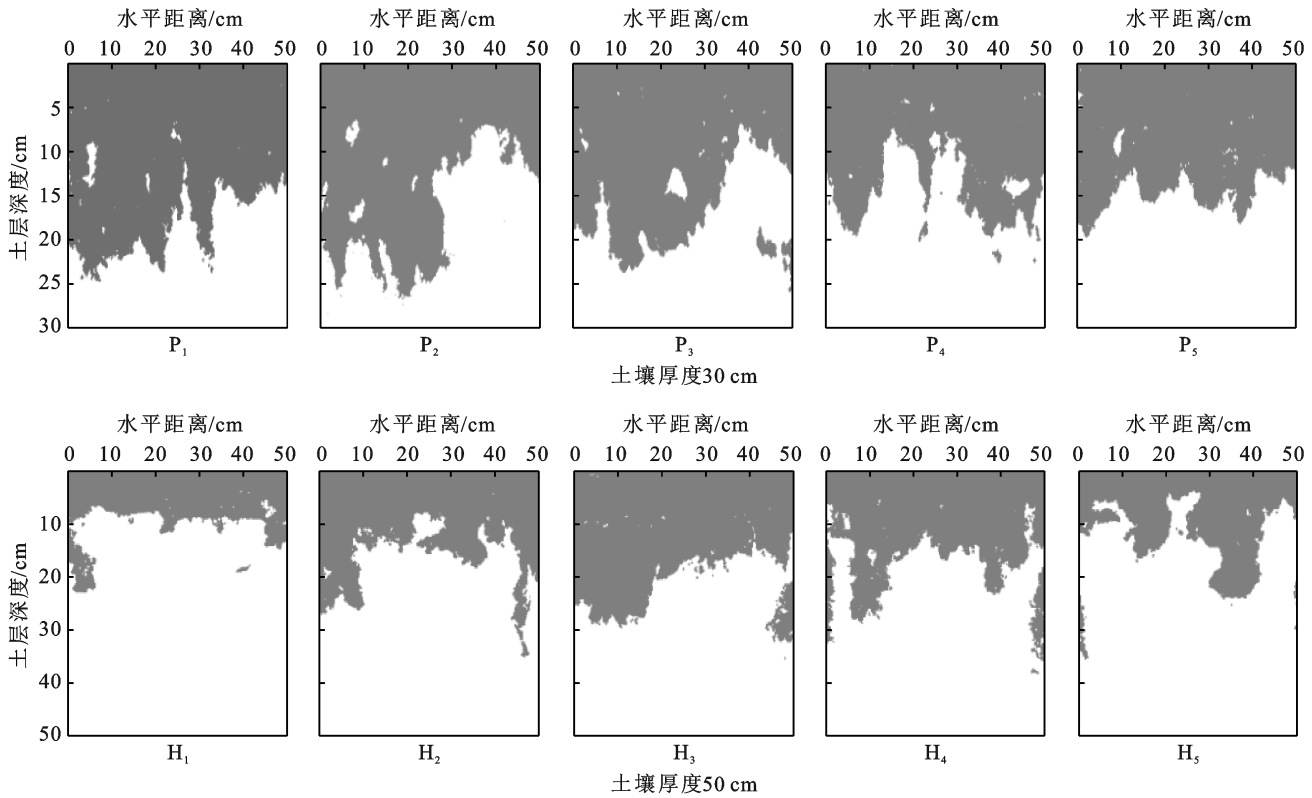
$$C_u=\frac{\sum_{i=1}^{m}|h_{max}(x_i,y_i)-h_{mean}|}{m\cdot h_{mean}} \quad (5)$$

式中：$C_u$ 为最大入渗深度的非均匀系数；$h_{max}(x_i,y_i)$ 为垂直剖面 $(x_i, y_i)$ 位置处染色最大深度；$h_{meam}$ 为水平方向不同位置染色最大深度的平均值；$m$ 为垂直剖面水平方向总像素点数，本研究取值 500。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤厚度条件下优先流染色剖面空间分布

土壤厚度为 30 cm 和 50 cm 条件下垂直染色剖面分布图像如图 1 所示，各剖面染色面积比变化及平均染色面积比的垂直分布如图 2—3 所示。




注：$P_1$，$P_2$，$P_3$，$P_4$，$P_5$ 分别为土壤厚度为 30 cm 条件下的 5 个染色剖面；$H_1$，$H_2$，$H_3$，$H_4$，$H_5$ 分别为土壤厚度为 50 cm 条件下的 5 各染色剖面。下同。

**图 1 不同土壤厚度条件下的垂直染色剖面分布**

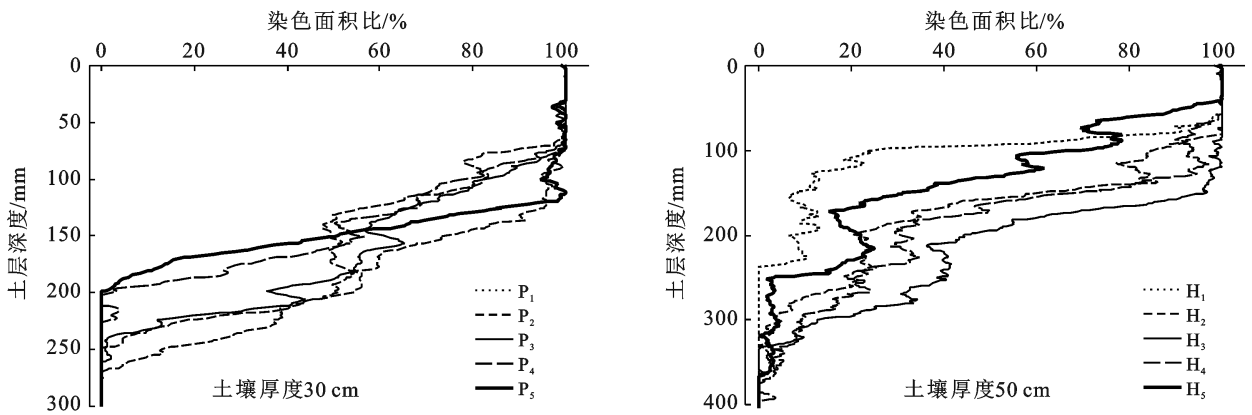



**图 2 不同土壤厚度条件下各垂直剖面染色面积比**

从 5 幅染色图像(图 1)可以看出,随着横向距离的变化,优先流染色面积会受到土壤结构的影响发生变异,但总体上表现出较为一致的垂直剖面分布规律,即表层土壤(10 cm)以上染色较为均匀,随着土层深度的增加,染色面积比呈波动减小趋势,且各剖面之间存在一定差异(图 2)。

从图 2—3 可以看出,染色面积比并不是随着入渗深度的增加而单调递减,而在局部区域会出现染色面积随入渗深度增加而增大,这主要是土壤水侧向入渗等因素形成的。土层厚30 cm条件下染色面积比在10—15 cm 处开始迅速降低,最大染色深度仅到 27.5 cm 处,而土层厚 50 cm 条件下染色面积比在 15—20 cm 处有明显降低,之后依然逐渐降低,最大染色深度接近 40 cm,说明两种条件下土壤优先流发育垂直变化有明显差异,土壤厚度较大条件下优先流发育的空间不均匀性增大。

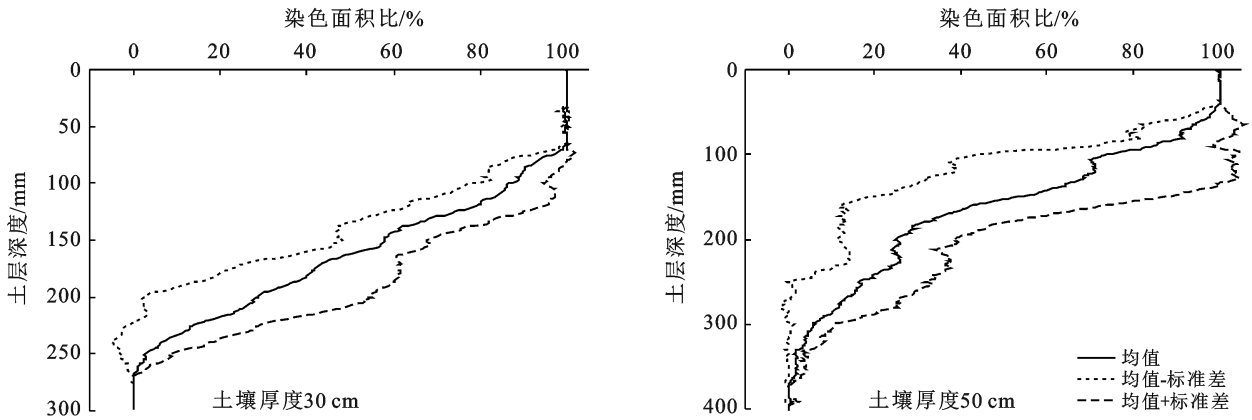



**图 3　不同土壤厚度条件下垂直剖面平均染色面积比分布**

### 2.2　不同土壤条件下优先流形态特征差异分析

由不同土壤厚度条件下优先流发育特征指数分布图(图 4)可以看出,土壤厚度为 30 cm 条件下,各剖面染色面积比大于 80%的基质入渗深度在 9.9—14.5 cm 范围内,平均为 11.8 cm,即 9.9 cm 以上土层土壤水分运动以基质入渗为主导,9.9 cm 以下基质入渗逐步转变为优先流入渗;优先流最大入渗深度在 19.8—27.5 cm 范围内,平均为 24.2 cm 和 27.5 cm 以下优先流消失,即土壤厚度为 30 cm 时优先流发育深度范围为 9.9—27.5 cm;而土壤厚度为 50 cm 条件下,基质入渗深度在 6.1—16.6 cm 平均为 11.9 cm,优先流最大入渗深度在 23.7—39.5 cm 范围内,平均为 34.6 cm和 39.5 cm 深度以下优先流消失,此时优先流发育范围为 6.1—39.5 cm。方差分析结果显示两种土壤厚度条件下基质入渗深度没有明显差异($p=0.95>0.05$),最大入渗深度差异显著($p=0.01<0.05$),因而两种土壤厚度条件下,基质入渗深度差异不明显,但是土壤厚度为 50 cm 条件下优先流发育范围较大。

优先流比是反映土壤优先流染色区域占整个土壤剖面染色区域比例的优先流特征参数,其数值越大,说明优先流现象越明显[22]。土壤厚度为 30 cm 样地优先流比为 13.2%～38.0%,而土壤厚度为50 cm样地优先流比为 19.6%～55.5%,即土壤厚度为 30 cm 条件下,优先流比波动范围比较小,优先流现象比较稳定;而两者优先流比均值分别为 28.2%和 29.5%,方差分析结果显示,两种土壤厚度条件下优先流比没有显著差异($p=0.875>0.05$),因此两种土壤厚度条件下优先流发育有一定差异,但差异不显著。优先流长度指数可以体现优先流和基质入渗的差异性,其数值越大表示优先流程度越高[6],土层厚 30 cm 条件下长度指数为 133%～156%范围内,均值 145%±11%,50 cm 厚度条件下长度指数较高,为 163%～239%,均值为 191%±32%,两者具有明显差异($p=0.018<0.05$)。因此,不同土壤厚度条件下优先流开始发育深度和优先流比没有明显差异,而优先流发育深度范围和长度指数有明显差异,即土壤厚度增加了优先流发育的垂直空间,进而有利于水分垂直的入渗。

### 2.3　不同土壤厚度条件下优先流变异性特征

图 5 为土壤厚度 30 cm 和 50 cm 条件下染色面积比的变异系数 $C_v$ 的分布。从图 5 可以看出,土壤厚度 30 cm 和 50 cm 条件下优先流染色面积变异系数范围分布为 16.5%～76.4%,70.4%～99.9%,均值分别为 60.9%,87.7%,且两者差异显著($p=0.006<0.01$),说明土壤厚度增大导致优先流变异性增大。研究表明,优先流染色面积变异系数 $C_v$ 越大优先流发育程度越高[6,26],而且本研究土壤厚度 50 cm 条件下优先流长度指数和优先流最大入渗深度明显较高。因此土壤厚度为 50 cm 条件下土壤优先流发育程度较高。再者,土壤厚度为 30 cm 和 50 cm 条件下优先流最大入渗深度非均匀系数的范围 $C_u$ 分别为

0.12～0.35，0.23～0.39，平均值为 0.22，0.30（图 5），50 cm 条件下优先流最大入渗深度的非均匀性有增加趋势，但两者差异不显著（$p=0.106>0.05$）（图 5）。虽然两者优先流最大入渗深度有明显差异，但两者最大入渗深度的变异性并没有显著差异，即土壤厚度并未对最大入渗深度的非均匀性特征构成明显影响。

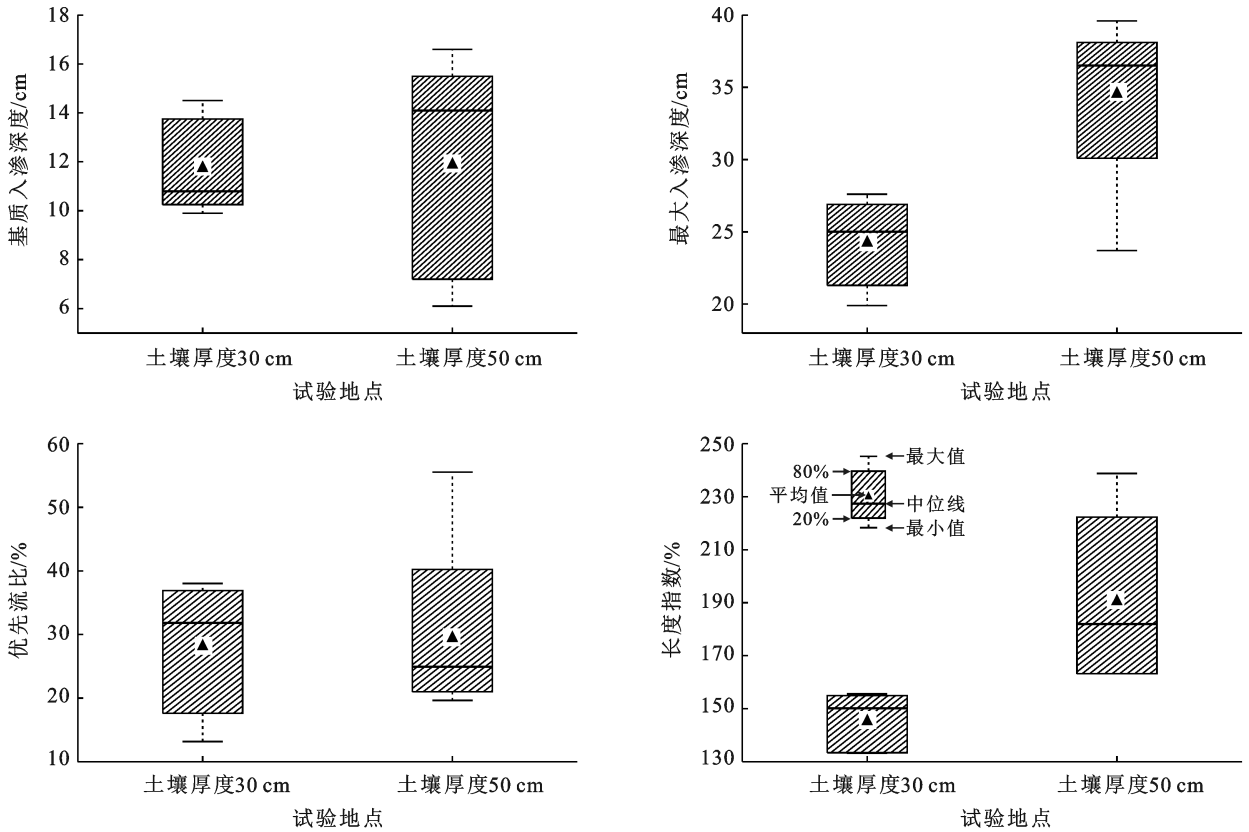



**图 4 不同土壤厚度条件下优先流发育特征值指数的分布**

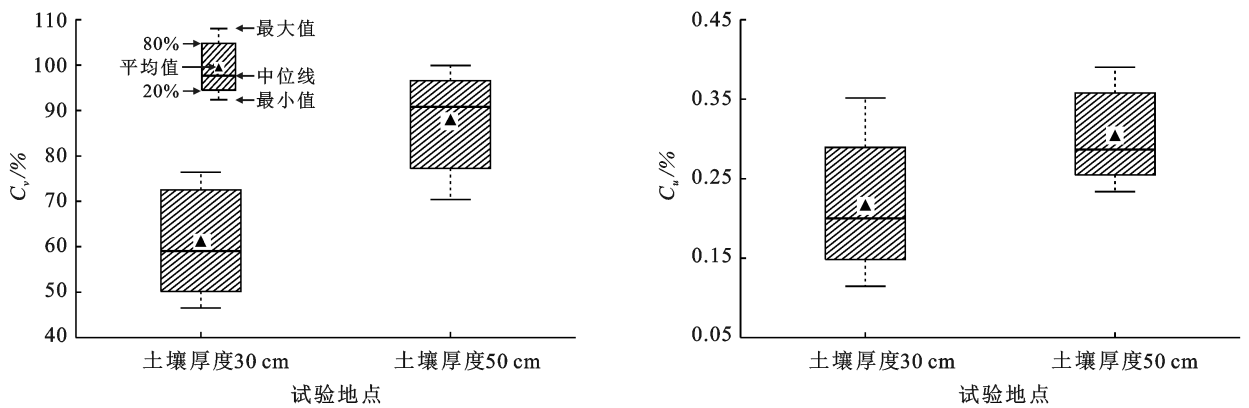



**图 5 不同土壤厚度条件下优先流发育变异性指数分布**

## 3 讨 论

本研究采用染色示踪法对不同土壤厚度条件下坡耕地优先流染色图像进行解析，分析北方土石山区薄层土壤中基岩风化层存在位置对优先流发育特征的影响，为深入探究土石山区土壤水分运移规律和坡耕地养分流失机理提供了一定的研究基础。

土壤性质、根系生长、土壤动物活动等都是影响优先流发育的因素[2]。本研究土壤是早春翻耕后的土壤，土壤中几乎见不到根系、虫洞，试验前土壤没有明显干湿过程，也不存在干湿变化形成的裂隙，因而以上因素不是该区坡耕地土壤优先流发育形成的主要原因。研究表明，土壤中存在的砾石有利于促进优先流发育[27]，本研究区域坡耕地频繁的机械耕作，致使土壤中混合大量的＞2 mm 石砾，土壤结构松散，非毛管孔隙度高（表 1），因而大量砾石存在形成的大孔隙是该地区坡耕地土壤优先流形成的主要原因。已有研究表明砾石含量增加可能会会使土壤大孔隙

体积、孔隙半径和孔隙密度增加[28],本研究中随土层深度增加坡耕地土壤的容重和石砾含量增加,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度有一定程度的降低趋势(表 1),石砾含量增加并没有伴随土壤大孔隙的增加,这可能是受取样环刀尺寸影响,环刀内碎石尺寸较大时,因碎石的孔隙度较小而使土壤孔隙度的测定结果偏小。另有研究表明砾石含量对水分运移的影响非常复杂,一方面因其促进大孔隙形成而有利于水分入渗,另一方面因其增加入渗路径的复杂程度而延迟水分入渗[29]。本研究中随土层深度增加砾石含量增加,饱和导水率降低(表 1),这可能是因为随砾石含量增加入渗路径的复杂程度增大的效应超过了大孔隙增加对入渗的促进作用,从而延迟水分入渗[30-31]。因此本研究利用基质入渗深度、最大染色深度、优先流比、染色面积比剖面分布等研究土壤中优先流发育特征,分析发现两种土壤厚度条件下基质入渗深度没有显著差异,均值在 11.8 cm 左右,这与 0—10 cm 土层饱和导水率明显高于下层土壤有关(表 1)。研究中还发现两种土壤厚度条件下优先流比没有显著差异,但土壤厚为 50 cm 条件下最大染色深度和长度指数明显较大。由于花岗岩风化基岩层的孔隙度、导水率明显低于土壤层[32],土壤层和风化基岩层的交界面与层状土壤的分层界面一样存在毛管障碍[33],从而对水分入渗起抑制作用。土层较薄条件下,水分到达土壤与风化基岩层交界面附近较早,受土壤层与风化基岩层交界面的毛管障碍影响,土壤中的空气随着水分入渗压缩到一定程度不能再压缩后阻碍水分的入渗,进而阻碍了优先流的发育,因而风化基岩层对优先流发育的抑制作用发生较早;而土层较厚条件下,水分垂直入渗空间较大,相同入渗水量条件下水分可以优先流形式入渗到接近 40 cm 深度附近,且空间分异较大,具有较大的长度指数。已有研究表明基质入渗深度越大,优先流区染色面积相对较小,优先流比便小,优先流发育程度便低[34]。虽然本研究中两种土壤厚度条件下基质入渗深度没有显著差异,但土壤厚度较小时优先流入渗深度和长度指数明显较小,因而土壤厚度较薄时不利于优先流发育,也即土石山区下伏基岩风化层所处位置变浅一定程度上阻碍水分的垂直入渗。

已有研究[6,25]表明长度指数、变异系数均是与染色图像异质性相关的指标,本研究不同土壤厚度条件下长度指数和变异系数有明显差异,而且土壤厚度为 50 cm 时优先流长度指数和变异系数都明显高于土壤厚度为 30 cm 时,说明土石山区薄层土壤的厚度增加使优先流空间分异增加,即土石山区薄层土壤下伏基岩风化层所处深度对优先流空间分异有明显影响。因此,水土流失导致土层变薄可能限制优先流发育及其扩散。这一结果与王发等[19]的研究发现类似,他们在喀斯特地区退耕洼地和耕地的研究发现耕作层存在会限制水分的入渗,阻碍优先流产生,但加强水分的横向扩散。鉴于此,土石山区坡耕地土壤厚度变薄,基岩风化层所处位置变浅会阻碍深层水分入渗,可能增加沿坡面向下的壤中流。但本研究仅是在 60 cm×60 cm小区基于 30 mm 入渗水量得出的初步结果,没有考虑沿坡面向下的水流,也没有考虑入渗水量变化会带来怎样的结果。而有研究表明入渗水量的增加可以促进水分向更深层运动,且随入渗水量增加,总染色面积比和优先流长度指数增加、最大入渗深度的非均匀性减小[24-25]。另外,付智勇[35]基于 60 mm 降雨量的径流小区试验研究表明土层较薄小区比土层较厚小区具有较高的壤中流和深层入渗量。因而入渗水量增加如果使优先流入渗到基岩风化层,基岩风化层所处位置对优先流发育的影响可能发生变化。因此,不同入渗水量条件下基岩风化层所处位置对优先流发育特征的影响可能更加复杂,需要进行进一步研究以全面探究土石山区基岩风化层所处位置或者土壤层厚度对地表水文过程的影响。另外,水土流失不仅导致土壤厚度变化,还会引起土壤颗粒组成变化,水土流失导致土壤中细颗粒减少,粗颗粒所占比例相应增加可能引起土壤大孔隙增多,进而会促进优先流发育[36],因而水土流失条件下土壤厚度减小、细颗粒减少对优先流发育的影响也将更加复杂,这也是今后值得深入研究的重要问题。

## 4　结 论

本文利用 30 mm 入渗水量对土石山区不同土壤厚度坡耕地进行染色示踪试验,并对垂直染色剖面的分布进行了图像学和统计学分析。土壤厚度为 30 cm 和 50 cm 时基质入渗深度相近,优先流比没有显著差异;但两者优先流发育范围,空间变异差异显著,最大入渗深度分别为 24.2,34.6 cm($p=0.01<0.05$),平均长度指数分别为 145%,192%($p=0.018<0.05$),染色面积比变异系数分别为 60.9%,87.7%($p=0.006<0.01$);后者最大入渗深度的非均匀系数有增大趋势,但不明显。因此,土石山区下伏基岩风化层所处位置变浅会一定程度上阻碍优先流垂直入渗。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Nimmo J R. Preferential flow occurs in unsaturated conditions [J]. Hydrological Processes, 2012,26(5):786-789.

[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.

[3] 马田田,柯浩成,李占斌,等.次降雨事件下雨养区典型小流域土壤水分运移规律[J].水土保持学报,2018,32(2):80-86.

[4] 胡博,王冬梅.农地非点源磷污染的优先流路径研究[J].亚热带水土保持,2007,19(2):16-19.

[5] 吕文星.三峡库区 3 种土地利用方式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.

[6] 陈晓冰,张洪江,程金花,等.基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J].农业机械学报,2015,46(5):93-100.

[7] 吴庆华,张家发,蔺文静,等.土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J].农业工程学报,2014,30(7):82-90.

[8] Lee J, Horton R, Noborio K, et al. Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001,51(3/4):131-144.

[9] 王红兰.紫色土耕地的大孔隙结构特征及优先流研究[D].北京:中国科学院大学,2016.

[10] 田香姣,程金花,杜士才,等.2 种土地利用方式下的优先流特征[J].水土保持学报,2014,28(3):37-41.

[11] 陈晓冰.重庆四面山 4 种土地利用类型土壤优先流特征研究[D].北京:北京林业大学,2016.

[12] 阮芯竹,程金花,张洪江,等.重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(3):68-74,80.

[13] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.

[14] Bachmair S, Weiler M, Gunnar N. Controls of land use and soil structure on water movement: Lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone[J]. Journal of Hydrology, 2009,369(3/4):241-252.

[15] 盛丰,方妍,张仁铎.运用染色示踪方法研究土壤质地对土壤水非均匀流运动特征的影响[J].土壤通报,2012,43(1):25-30.

[16] 张欣,张洪江,张福明,等.西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):1-7.

[17] 高朝侠,徐学选,赵传普,等.土壤初始含水率对优先流的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(1):46-54.

[18] 陈晓冰,严磊,陈廷速,等.西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J].水土保持学报,2018,32(4):58-66.

[19] 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.

[20] 李建华,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同植被模式下坡耕花生地垄间水土流失与磷素输出[J].应用生态学报,2012,23(12):3347-3354.

[21] 马骞,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J].环境科学学报,2011,31(7):1526-1536.

[22] van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. Catena, 2009,78(1):36-47.

[23] 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, 2014,30(7):3342-3354.

[24] 潘网生,许玉凤,卢玉东,等.基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J].农业工程学报,2017,33(3):140-147.

[25] 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):45-51,76.

[26] 张东旭,张洪江,程金花,等.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.

[27] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108.

[28] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响[J].生态学报,2008,28(10):4929-4939.

[29] 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.

[30] 王慧芳,邵明安.田间含碎石土壤水分入渗及再分布试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):84-89.

[31] 张英虎,牛健植,韩旖旎,等.鹫峰地区林木根系和石砾对土壤水分运移速率的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):121-126.

[32] Graham R C, Anderson M A, Sternberg P D, et al. Morphology, porosity, and hydraulic conductivity of weathered granitic bedrock and overlying soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(2):516-522.

[33] 王文焰,张建丰,汪志荣,等.砂层在黄土中的减渗作用及其计算[J].水利学报,2005,36(6):650-655.

[34] 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.

[35] 付智勇.三峡库区不同厚度紫色土坡面水文过程及侵蚀响应[D].湖北 武汉:华中农业大学,2012.

[36] 程金花,张洪江,史玉虎.三峡库区花岗岩林地土壤特性与"优先路径"的关系[J].中国水土保持科学,2005,3(1):97-101.