

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.025.

史德威, 程金花, 李明峰. 永定河平原南部典型植被土壤优先流特征及其归因[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 232-240.

Shi Dewei, Cheng Jinhua, Li Mingfeng. Characteristics and Attribution of Soil Preferential Flow of Typical Vegetation in the South of Yongding River Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 232-240.

永定河平原南部典型植被土壤优先流特征及其归因

史德威, 程金花, 李明峰

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 研究永定河平原地区的优先流现象, 解析其形态特征和发育程度, 明确影响优先流的主要因素, 为该区域淡水资源保护以及生态环境恢复提供理论依据。 [方法] 以 3 种典型植被柳树、荆条和狗尾草为对象, 在 25 mm 入渗水量下(大雨)通过野外亮蓝染色示踪试验获取原始土样和染色剖面图像, 使用图像处理技术解析水分和溶质在土壤下渗的形态规律, 结合相关性分析和主成分分析法研究不同土壤因子对优先流产生和发育的响应。 [结果] (1) 柳树、荆条和狗尾草土壤优先流分别集中在 10—40 cm 处、10—40 cm 处和 10—30 cm 处, 最大染色深度分别为 40.0 cm, 44.8 cm, 31.5 cm。不同植被类型垂直剖面上显示出染色面积比随土层深度的增加而下降。(2) 优先流发育程度为柳树样地 > 荆条样地 > 狗尾草样地。柳树样地和狗尾草样地的染色面积比和长度指数差异显著 ($p < 0.05$), 荆条样地与其他 2 种植被差异均不显著 ($p > 0.05$)。 (3) 黏粒、砂粒、粉粒含量对方差变异性的贡献率为 24.824%, 根重密度和有机质含量对方差变异性的贡献率为 46.312%。 [结论] 永定河平原南部 3 种典型植被中柳树样地最早发生土壤优先流现象, 形成优先流染色形态分化程度最高, 优先流现象最明显, 而狗尾草样地最不明显。随着入渗水量的增加, 土壤水分运动表现出整体下移, 加深了土壤水流形态分化界面深度, 即 0—20 cm 土层染色形态表现为相对稳定。土壤机械组成与径级小于 5 mm 根系是影响优先流产生发育的重要因素, 由于各样地中植被的生长发育状态不同, 因此对土壤优先流的影响程度也不尽相同, 存在一定的差异性。

关键词: 永定河; 优先流; 亮蓝染色示踪法; 主成分分析

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0232-09

Characteristics and Attribution of Soil Preferential Flow of Typical Vegetation in the South of Yongding River Plain

Shi Dewei, Cheng Jinhua, Li Mingfeng

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the preferential flow phenomenon in the Yongding River Plain, to analyze its morphological characteristics and development degree, to identify the main factors affecting preferential flow, and provide a theoretical basis for the protection of freshwater resources and the restoration of ecological environment in the region. [Methods] Willow, wattle and *Setaria viridis* of three typical vegetation were taken as objects. The original soil samples and dyed profile images were obtained by field brilliant blue dye tracing test under 25 mm infiltration water (heavy rain). Image processing technology was used to analyze the morphological rule of water and solute infiltration in soil, and combined correlation analysis and principal component analysis were used to study the response of different soil factors to the generation and development of preferential flow. [Results] (1) The preferential flow of the willow, Jing, and dogtail soil concentrated at 10—40 cm, 10—40 cm, and 10—30 cm, respectively. The maximum

收稿日期: 2022-10-23

修回日期: 2022-12-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特地区土石二元结构下优先流对坡面水文过程的影响”(32071839)

第一作者: 史德威(1998—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: shidewei258@163.com

通信作者: 程金花(1979—), 女, 山东东阿人, 博士, 教授, 主要从事森林水文与土壤研究。E-mail: jinhua_cheng@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

chromosome depth was 40.0 cm, 44.8 cm, and 31.5 cm. Different vegetation types of vertical section showed that the chromosomal area decreased compared with the depth of the soil layer. (2) The degree of preferential development was a willow-like land > ine-like > dogtail-like land. The differential ratio and length index of the chromosomal area of the willow-like land were significantly different ($p < 0.05$), and the differences between the two planting of the neither of the two planting of the tattoo ($p > 0.05$). (3) The contribution rate of the content of the other party's variant was 24.824%, and the contribution rate of root weight density and organic content was 46.312%. [Conclusion] Among the three typical vegetation in the south of the Yongding River Plain, the first willow-sample of soil preferential flow occurred, forming the highest degree of preferential chromatization. The phenomenon of preferential flow was the most obvious, while the dogtail-like land was the least obvious. With the increase of the amount of water seepage, the soil moisture movement showed the overall downward movement, deepening the depth of the differential interface of the soil water flow, i. e., the dyeing of the 0—20 cm soil layer was relatively stable. Soil machinery composition and less than 5 mm root system are important factor affecting the development of preferential flow. Because the growth and development of vegetation in various places is different, the impact on soil preferential flow is not the same. There are certain differences in differentiation.

Keywords: Yongding River; preferential flow; bright blue dye tracing method; principal component analysis

由于自然土壤生物运动产生的大孔隙和气候变化产生的裂缝等优先流路径的存在,水分沿着这些路径绕过土壤基质优先向下运动的现象称为优先流^[1]。这一现象缩短了水分和养分在土壤中的滞留时间,使其能够快速运移至土壤深层,既减少了土壤对水分和养分的吸收利用^[2],还会造成地下水资源的污染和富营养化^[3]。

优先流运动轨迹及其形成因素复杂,且具有快速运移、侧向入渗、不稳定性等特点。众多学者在不同的研究区域结合染色示踪与处理土壤染色剖面图像对不同类型土壤优先流形态特征及其影响因素进行了大量的研究。艾力夏提·库尔班等^[4]采用野外染色示踪分析了土壤优先流形态特征,并结合相关根系指标得出根径小于 5 mm 的根重密度在优先流形成中起到重要作用。尤金等^[5]采用染色示踪法,通过对入渗深度、染色面积等调查分析,得出坡面土壤裂隙在降雨重新分配中起到重要作用。其他一些学者也对农耕地,人工林地做出了相关研究^[6-8]。而国外学者近年来更注重大尺度的特殊地理位置研究。Maier 等^[9]采取时空方法对瑞士阿尔卑斯山研究得出侧向流可能会随着山坡年龄而增加,Tang 等^[10]对阿巴拉契亚山脉中部不同岩性土壤研究得出,页岩丘陵的优先流频率更高。

随着工业化的发展和研究的深入,优先流研究的重点已转向一些生态脆弱、不同地质地貌或间接影响生产生活的特殊区域,如喀斯特地区、滨河带等^[11]。永定河流域是京津冀地区水源涵养区、生态保护区和

水土保持重要功能区之一,水资源保护十分关键。在降雨过后,滨河带附近污染物通过地表流入河流,除此之外还会通过土壤入渗危害地下水体。永定河平原南部水资源短缺,优先流对水资源具有一定的影响,研究该区域优先流的特征和形成机理对水资源保护和合理利用有着重要的现实意义。

1 研究区概况

研究区位于河北省廊坊市固安县东北村的永定河平原南部即卢沟桥—梁各庄河段(112°—117°45'E, 39°—41°20'N)。永定河为地上河,泥沙会在河道大量淤积,土壤主要为砾岩石,土质多为沙质土^[12-13]。永定河流域属温带大陆性季风气候,为半干旱、半湿润型气候过渡区。多年平均气温 6.9℃,年均降水量 360~650 mm。永定河平原段地处滨河带,乔木多为人工栽植,包括柳树(*Salix*)、加杨(*Populus canadensis*)和圆柏(*Sabina chinensis*)等;灌木植物有荆条(*Vitex negundo*)、铁扫帚(*Indigofera bungeana*)、铺地柏(*Sabina procumbens*)等;常见草本植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、马齿苋(*Portulaca oleracea*)、芦苇(*Phragmites australis*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、假稻(*Leersia japonica*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等。

2 材料与方法

2.1 样地布设

通过数次野外调查与查阅文献,选取荆条、柳树、狗尾草这 3 种永定河平原南部典型的植物为研究对

象布设优先流染色小区(表 1)。3 块样地大小分别为柳树 20 m×20 m,荆条 5 m×5 m,狗尾草 1 m×1 m。完成植被调查后在柳树与荆条样地选择相邻 3~4 株乔木或灌木中心地势变化较小的地方布设染

色小区,使小区与各立木的距离相等,降低立木主根对染色结果的影响。狗尾草则选择相对平坦的区域。每个优先流观测样地布设 3 个染色小区来观测优先流形态特征。

表 1 样地基本情况特征

Table 1 Basic information and characteristics of the sample plot

类型	样地	海拔/m	坡度/(°)	株数/株	平均高度/m	盖度/%	郁闭度	纬度(N)	经度(E)
柳树样地	W ₁	20	7	15	6.23	—	0.70	39°30′6″	116°14′50″
	W ₂	21	7	13	5.98	—	0.65	39°30′5″	116°14′45″
	W ₃	19.5	7	18	6.41	—	0.75	39°30′9″	116°14′52″
荆条样地	T ₁	20.5	10	22	2.3	75	—	39°30′55″	116°14′11″
	T ₂	20	10	20	2.01	60	—	39°30′54″	116°14′16″
	T ₃	22	9	15	1.9	55	—	39°30′53″	116°14′01″
狗尾草样地	S ₁	18	6	15	1.5	93	—	39°30′33″	116°14′42″
	S ₂	17	7	9	1.6	95	—	39°30′35″	116°14′44″
	S ₃	17.5	6	13	1.4	96	—	39°30′40″	116°14′44″

2.2 染色示踪试验及样品采集

染色前为了不扰动土壤腐殖质层,将地表枯枝落叶碎石简单清理,然后将大小分别为 120 cm×70 cm×50 cm 和 140 cm×90 cm×50 cm 的 PVC 板框竖直砸入样地(地上 20 cm,地下 30 cm),并使用小锤夯实 PVC 板壁 5 cm 内松动土壤,防止亮蓝染色溶液沿 PVC 隔板内壁下漏影响观测结果。采用亮蓝染色剂 4 g/L 以 21 L(模拟 24 h 大雨累计降雨量 25 mm)溶液量对研究区内 3 种典型植被类型 9 块样地进行染色试验。在染色结束后使用塑料薄膜覆盖染色土壤表面,以避免静置过程受到降雨等其他水分影响。24 h 后,揭开并移去塑料薄膜和埋下的 PVC 板框,进行垂直土壤染色剖面的挖掘。由于板框周围水分运移较不稳定,在样地中板框中心 50 cm×50 cm 的地方进行挖掘,自上而下挖出 5 个垂直剖面,每层间隔 10 cm。使用尼康相机(1 200 万像素)拍摄每个剖面染色图像 3~5 张。根据水平剖面的染色情况进行原状土壤采集(环刀规格(100 cm³),将每个区域分为土壤染色区和土壤未染色区并重复取样 3 次;同时取足够量散状土,用于室内测定有机质等指标(表 2)。

2.3 植物根系的测定

在进行野外亮蓝染色示踪试验时,对不同区域的植物根系进行分开收集用于后续的内业试验处理。利用实验室的根系扫描分析系统(WinRHI2.0 Pro2005)计算得出每层土体内相应的根长密度,并将烘箱调到 75℃进行烘干室内试验,求出对应根长密度的根重密度值(表 2)^[14]。

2.4 染色图像处理

一般拍摄的原始图片会受到人为因素和环境条件的影响,图像会产生颜色损失或畸变,本次研究使

用 Adobe PhotoshopCS5 对图像几何校正和光照校正。首先调整图像的色相、饱和度和阈值,使得颜色对比度更加明显,然后使用颜色替换功能,将所有染色区域替换为黑色(0),未染色区域替换为白色(255),调整容差、阈值、灰度等参数,使染色图像与实际结果一致减少误差,染色图像解析是获得土壤优先流特征的重要过程,主要是对室外原位土体染色示踪试验过程中拍摄的染色图像进行处理和分析,获取土壤优先流特征参数。首先利用 PhotoshopCS5 软件将染色图像进行样式编辑和几何校正(裁剪大小为 50 cm:50 cm),通过调整灰度和对比度、颜色替换、降噪处理及图像反相处理,使染色区域变为黑色、未染色区域变为白色,调整固像阈值使染色图像与实际情况一致,得到土壤优先流的形态特征。然后将处理后的染色图像导入 Image Pro Plus 6.0 软件中进行图像数值化,得到由 0(染色区)和 255(未染色区)组成的数据矩阵,并统计黑白像素数量,根据统计结果计算平均染色区域总面积和某一指定土层深度染色区域(优先流区)面积所占的比例,即染色面积比。本研究以 1 cm 土层深度为间隔计算染色面积比。

3 结果与分析

3.1 垂直方向染色形态特征

图 1—3 为各个典型植被土壤垂直染色图像及其染色剖面。染色面积比能反映所使用的亮蓝染料在土壤剖面的占比情况,其占的比例越多表明水分下渗得越多。优先流是水分和溶质快速向下运移的现象,表现为明显的湿润锋快速运移^[15],即条形染色部分为优先流集中发生区^[16]。由图 1 可知荆条样地 T₁ 和 T₃ 土壤垂直剖面染色面积比在 0—10 cm 范围内随土层深度的增

加迅速减小,在 10—20 cm 范围内保持着相对稳定的速度减小。样地 T₁ 和 T₃ 的最大深度分别为 23.5 cm 和 19.2 cm,亮蓝示踪剂入渗较浅,可能是由于土壤浅层优先路径较少,示踪剂以基质流的形式向土壤深层下渗。样地 T₂ 的染色程度较好,最大入渗深度为 44.9 cm,

从染色图像上也可以看出具有多条优先路径,很可能是由于其发达的主根产生的通道。即便是同一植被类型土壤剖面染色面积比也会有较大的差异,因其不同的环境条件、不同发育程度、不同位置等,这正反映了优先流路径空间的高度变异性和复杂性^[17]。

表 2 土壤基本性质
Table 2 Basic properties of soil

植被 类型	土层 深度/cm	土壤有机质/ (g·kg ⁻¹)	根重密度/ (kg·m ⁻³)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	根长密度/(m·m ⁻³)		
							≤1.0 mm	1.0~2.5 mm	2.5~5.0 mm
柳树样地	0—10	6.50±0.78	1.70±1.02	1.76±0.28	8.70±1.12	89.54±1.39	1981.72	143.22	24.6
	10—20	5.30±0.78	1.59±0.88	2.29±0.32	10.43±1.29	87.28±1.61	1274.23	96.7	21.35
	20—30	3.95±0.78	1.03±0.71	4.58±0.28	18.59±1.12	76.83±1.39	324.39	85.8	16.1
	30—40	3.00±1.10	0.48±0.42	0.68±0.39	4.17±1.58	95.15±1.97	48.6	62	2.1
	40—50	3.17±1.10	0.21±0.13	1.45±0.55	8.59±2.24	89.96±2.79	86.8	10	1.1
荆条样地	0—10	7.23±0.26	2.11±0.89	0.13±0.55	4.31±2.24	95.56±2.79	11299.33	146.8	16.4
	10—20	3.96±0.26	1.02±0.45	1.68±0.16	9.57±0.44	88.75±0.53	2438.4	34.7	6.2
	20—30	2.15±0.26	0.36±0.11	2.56±0.16	9.38±0.44	88.06±0.53	242.6	2	2
	30—40	2.06±0.52	0.43±0.20	0.93±0.16	5.95±0.44	93.11±0.53	112	13.2	8
	40—50	2.21±0.52	—	2.66±0.32	10.16±0.87	87.19±1.05	—	—	—
狗尾草样地	0—10	6.46±0.32	1.66±0.77	4.96±0.46	15.76±1.11	79.29±1.56	19101.9	75.9	12.4
	10—20	6.02±0.32	0.84±0.39	3.05±0.46	11.69±1.11	85.26±1.56	1025.65	12.9	12.38
	20—30	4.34±0.37	0.86±0.50	1.62±0.53	8.15±1.28	90.23±1.81	428.44	4	5.33
	30—40	3.39±0.65	0.85±0.71	3.21±0.91	15.07±2.23	81.72±3.13	76.8	38	7.2
	40—50	2.87±0.65	0.42±0.00	0	7.76±2.23	92.24±3.13	25.2	36	0

注:表中土壤有机质、根重密度、黏粒、粉粒、砂粒含量为平均值±标准差。

由图 2 可知柳树样地最大染色深度处于 25—40 cm,染色区域较为均匀,染色面积随土层深度增加而减少的量较为稳定。样地 W₃ 在图层深度为 10—20 cm 时染色面积几乎不变,说明此样地下存在一个土壤孔隙相对稳定的区域,但随后在 5 cm 内染色面积迅速下降至 0,其最大染色深度为 39.9 cm 但在 25—40 cm 处染色面积低于 10%。这可能是由于染色区域大孔隙率下降,土壤容重增加所致。

图 3 表明狗尾草样地染色面积随着土层深度的增加变化较为稳定,其最大染色深度为 25—30 cm,明显小于柳树样地与荆条样地。可能是由于狗尾草的根系分布在浅层土,水分运移较浅。

3.2 染色形态特征

本研究计算了亮蓝染色示踪试验后土壤中水分运动形成的垂直剖面染色图像相关形态特征参数,并分析了优先流染色形态特征。图 4 为 3 种植被类型土壤在 25 mm 入渗水量下相应的垂直剖面染色形态特征参数关系。

土壤剖面染色面积比能直观地反映出优先流的发育程度,如表 3 所示,染色面积比越大,优先流发育程度越好。在荆条样地中,T₂ 平均染色面积比显著

大于 T₁ 和 T₃,且 T₁ 和 T₃ 较为接近。而柳树样地 W₁ 和 W₂ 的平均染色面积比显著大于 W₃,且 W₁ 和 W₂ 非常接近。可能出现的原因是 T₁,T₃,W₃ 土壤孔隙通道连通性较差,优先路径较少,导致染料溶液产生部分侧向流,这也体现出了优先流的空间异质性和不稳定性^[18]。狗尾草样地的染色面积比也呈现类似的变化趋势。

优先流比是土壤剖面上优先流区的面积与总染色面积的比值,是除去了基质流影响的结果。柳树、荆条和狗尾草样地的平均优先流比分别为 33.59%,29.60%和 21.71%,基质流深度分别为 13.46 cm,12.72 cm,12.49 cm,表现结果均为柳树样地>荆条样地>狗尾草样地,且优先流比和机制流比均为差异不显著($p>0.05$)。造成这种现象的原因是该处土壤为沙质土,土壤初始含水量低,示踪剂多以整体均匀向下入渗,优先流染色形态分化现象不明显。

优先流比是在剖面角度上以染色区域为参照描述优先流现象的,而优先流长度指数着重刻画不同剖面之间的差异,优先流长度指数是指以一定深度(本研究为 1 cm)将土壤剖面等分为若干层,其相邻土层差值的绝对值之和。柳树样地的优先流长度指数 Li

为 188.67~309.07,荆条和狗尾草分别是 145.60~244.20,142.93~175.87。柳树覆盖下土体的优先流长度指数分别是荆条的 1.22 倍和狗尾草的 1.58 倍。虽然荆条样地 T_1 和 T_3 所展现出来的最大染色深度只有 24.4 cm 和 19.1 cm,但这也证实了在同样的降

水强度下荆条植被比狗尾草土壤中水分入渗的速度更快且优先流发育程度更高。柳树样地与狗尾草样地之间差异显著($p<0.05$),荆条样地与柳树和狗尾草样地差异均不显著($p>0.05$),这与染色面积比表明的结果一致。

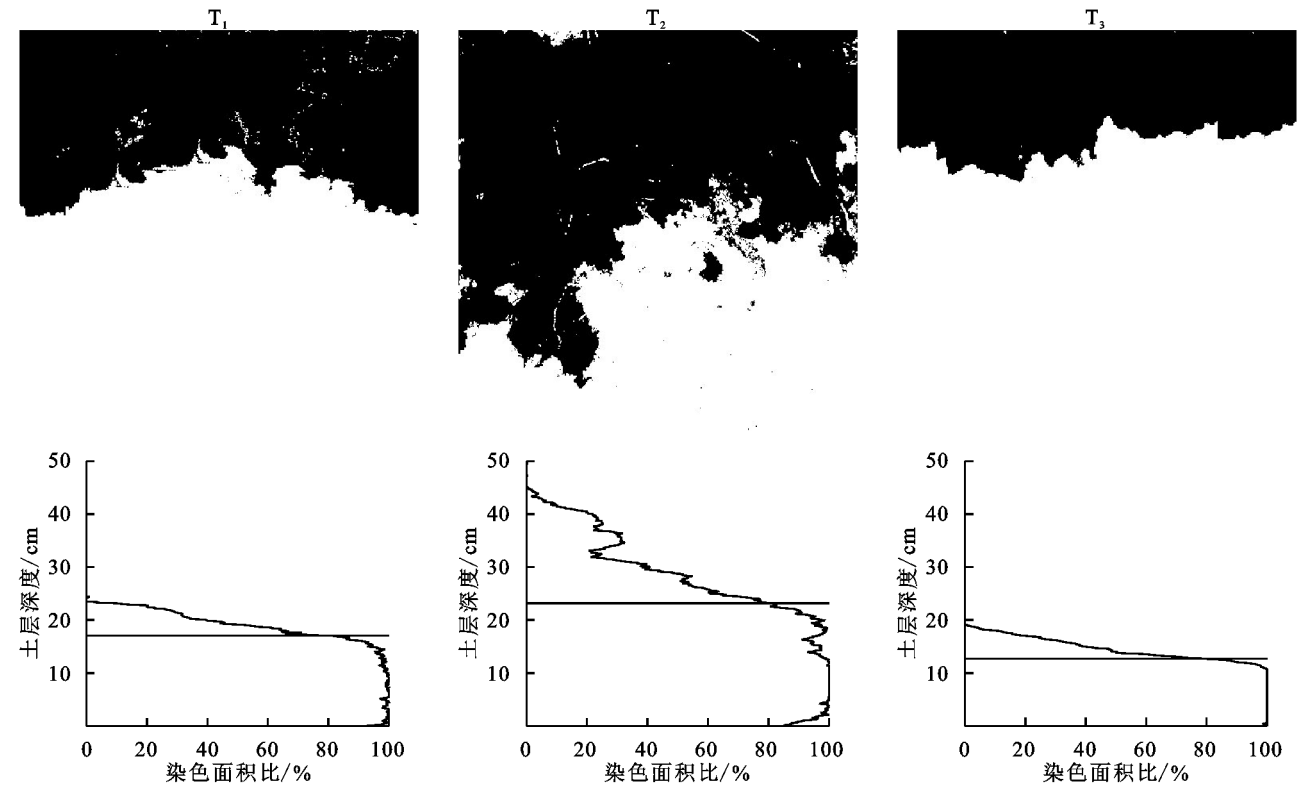


图 1 荆条样地土壤垂直染色图像

Fig. 1 Images of soil dyed vertical pattern in vitex plots

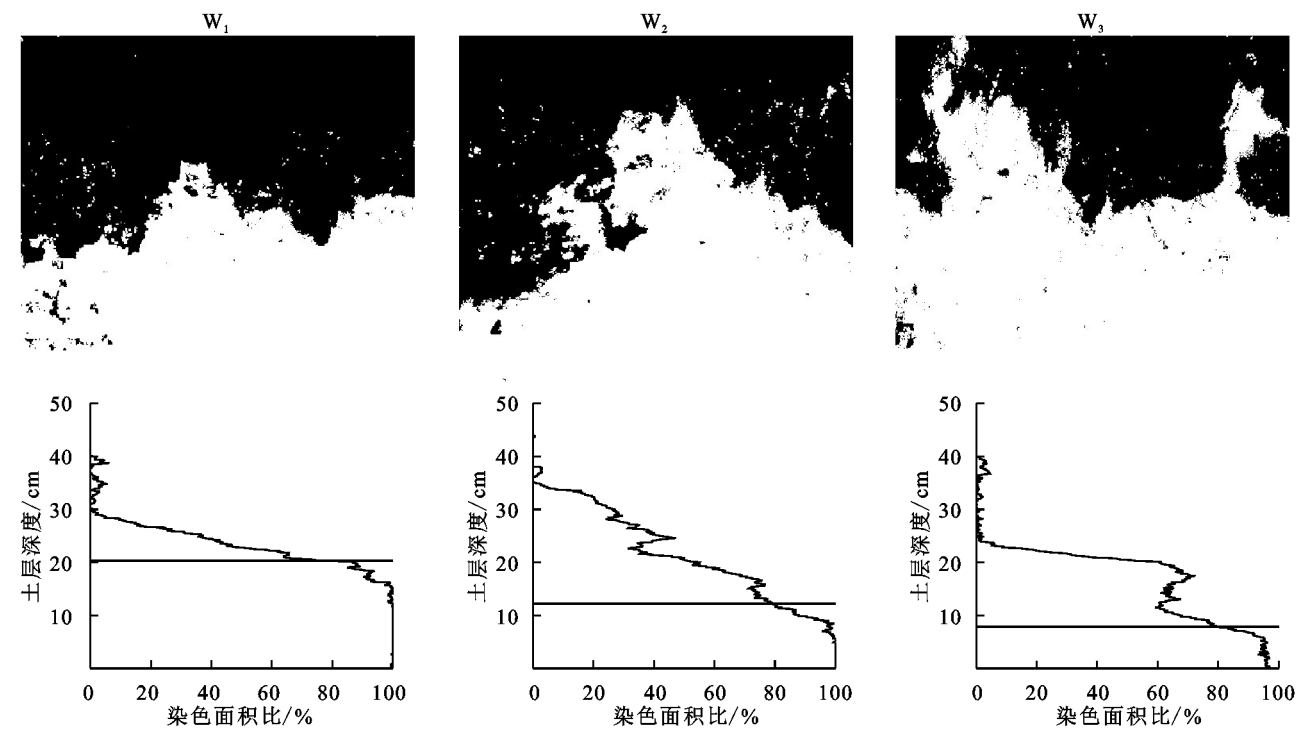


图 2 柳树样地土壤垂直染色图像

Fig. 2 Images of soil dyed vertical pattern in willow plots

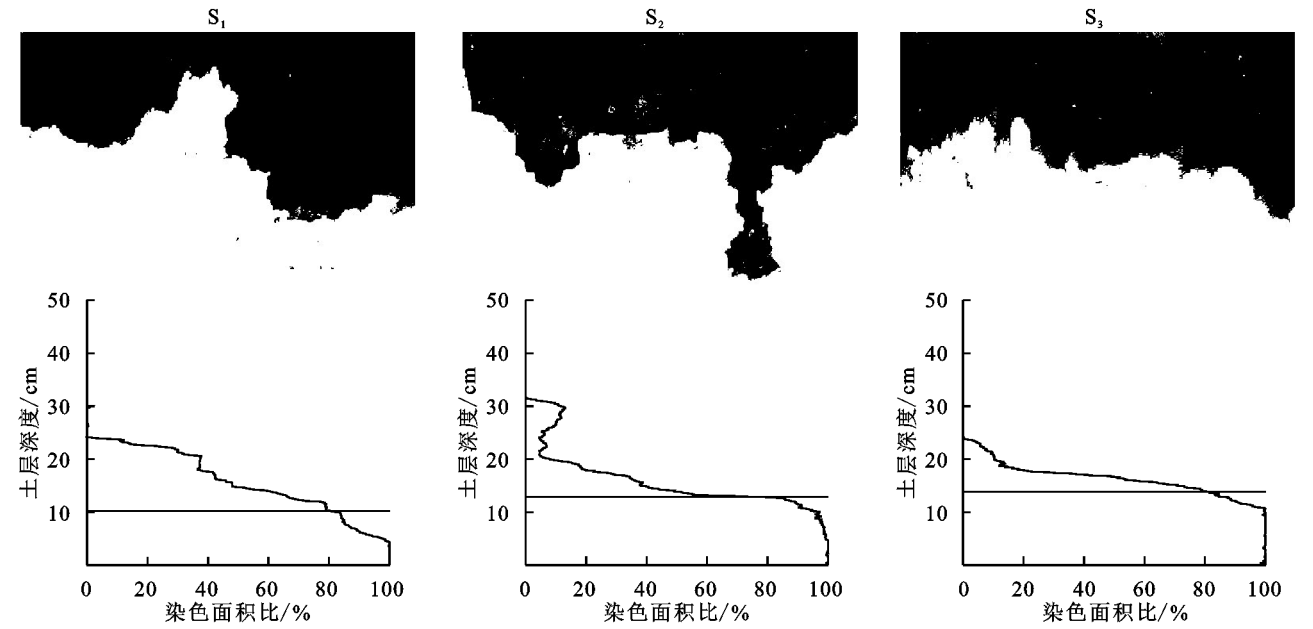


图 3 狗尾草样地土壤垂直染色图像

Fig. 3 Images of soil dyed vertical pattern in setaria plots

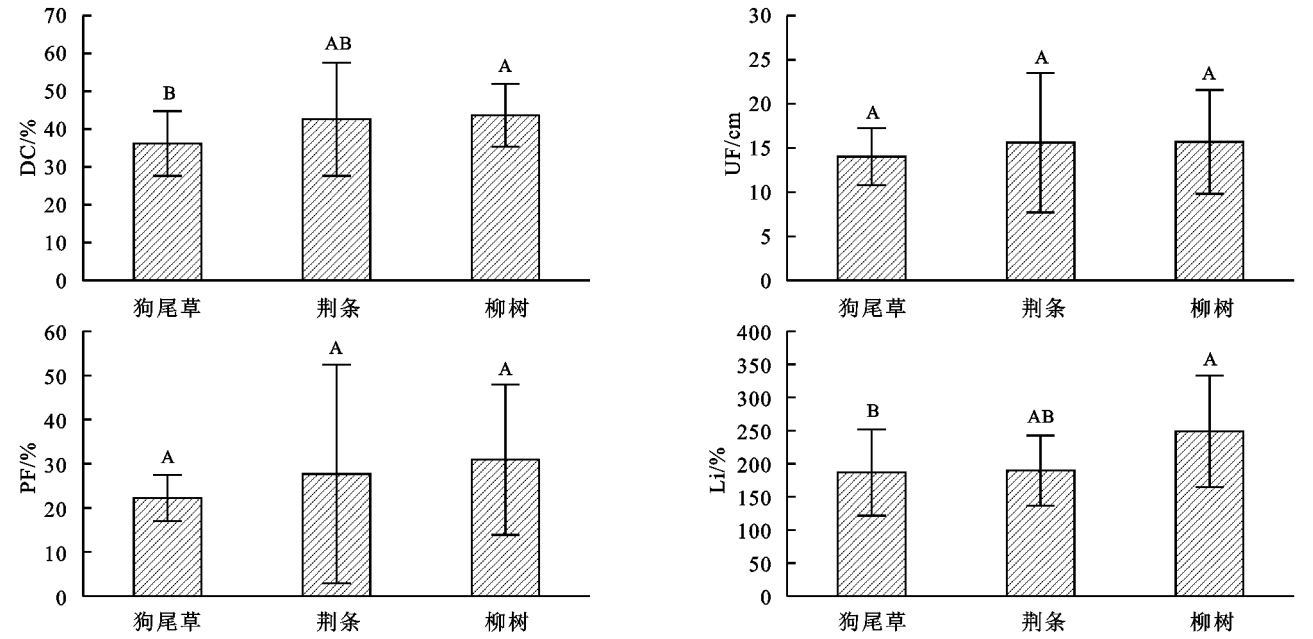


图 4 不同植被类型土壤 25 mm 入渗水量下优先流染色形态特征关系

Fig. 4 Relationship between preferential flow staining morphological characteristics of different vegetation types under low infiltration

表 3 3 种植被样地土壤染色形态特征参数

Table 3 Characteristic parameters of soil dyeing morphology in three vegetation sample plots

样地	基质流深度/cm	染色面积比/%	优先流比/%	长度指数/%	最大染色深度/cm
T ₁	12.37±4.01	31.90±5.62	23.71±10.70	210.47±23.67	24.4
T ₂	14.27±12.49	46.64±10.94	43.76±49.00	244.20±44.26	44.8
T ₃	11.53±1.85	29.40±0.58	21.35±13.93	145.60±53.62	19.1
W ₁	18.03±2.53	42.83±3.86	16.05±4.47	188.67±13.91	40.0
W ₂	13.40±4.62	42.45±1.84	37.34±19.37	309.07±130.81	38.0
W ₃	8.97±1.51	34.01±0.91	47.39±7.50	239.13±34.70	39.9
S ₁	12.60±3.17	33.46±6.15	24.99±8.99	146.00±42.06	24.2
S ₂	12.50±0.26	31.62±0.65	20.91±2.89	175.87±47.95	31.5
S ₃	12.37±1.34	30.60±2.23	19.24±4.57	142.93±16.02	24.1

注:表中基质流深度、染色面积比、优先流比、长度指数为平均值±标准差。

3.3 优先流与土壤因子的响应分析

优先流的整个运动过程非常复杂,为进一步了解其特征,采用 Spearman 相关性分析法,将影响优先流的土壤内部因素黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、有机质、根重密度和染色面积比作为指标进行研究,根据卢华兴等^[19]的研究发现滇南地区普洱茶土壤中,径级大于 5 mm 根长密度与土壤染色面积比的相关性程度较低,故本研究中没有将其选为主成分因子。分析结果如表 4 所示,其特征值为一种 84.017,两种 98.517,即其中一种主成分就能解释全部原始变量变异信息的 84%左右,相关性较强。分析得出影响不同植被类型的优先路径因素有 2 个主成分,土壤中黏粒砂粒粉粒含量可以解释 24.824%的方差变异性,第 2 个主成分中的根重密度和有机质含量可以解释46.312%的方差变异情况。说明植物根系的生长发育情况对永定河区不同植被优先路径的影响起主要作用。植物根系生长发育使土壤中形成裂隙产生大孔隙,成为优先流运移的主要通道,而根系死亡后也会形成腐殖质对土壤增加有机质含量,还可以促进大孔隙的形成,增加优先流路径。且径级≤1.0 mm 的根系比其他径级在土壤中占比更多,这主要是由于植物不同特性决定的,植物生长状况好,侧根发达,根须较多,对优先路径的贡献度更高。程金花等^[20]研究得出粗根系虽然也能够产生孔隙,但会使团聚体破碎,堵塞土壤孔隙而不利于优先路径的形成。而砂砾黏粒粉粒的含量则与土壤的紧密程度有显著关系,对土壤大孔隙结构有着重要作用。随着土层深度的进一步增加,黏粒、粉粒的含量增加,优先流发育会部分受阻。

表 4 主成分分析情况

Table 4 Analysis of principal components

环境因子	主成分得分	
	1	2
染色面积比	0.373	0.454
黏粒	0.456	−0.499
粉粒	0.506	−0.346
砂粒	0.049	0.557
有机质	0.425	0.272
根重密度	0.461	0.195
≤1.0 mm 根长密度	0.604	−0.825
1.0~2.5 mm 根长密度	0.561	−0.426
2.5~5.0 mm 根长密度	0.238	0.488

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究中不同植被样地优先流比、优先流长度指

数等特征与王伟^[21]和侯芳^[22]等所研究的阔叶林土壤优先流和针叶林土壤优先流特征与此类似,针阔林染色面积在 0—10 cm 迅速下降,草地则在 0—10 cm 存在明显基质流区域。狗尾草样地染色深度变化与王佩佩研究的白羊草群落结果相一致^[23]在 0—5 cm 逐渐升高,最高可达 25—30 cm,且达到峰值前基本保持稳定。草本植物细根占比高,形成致密的结构网络可以促进优先流的发生,但其促进作用随着根长密度的增加而减小。荆条样地与柳树样地中土壤剖面染色面积比研究结果与侯芳等在重庆四面山所研究的阔叶林、针叶林、草地与此结果近似^[22]。优先流与土壤因子的关系研究与陈晓冰等^[6,18,24-26]研究结果相近似,土壤有机质等营养元素可以改善土壤孔隙度,增加染色面积。而对于影响优先流形成的相关因子,研究区内土壤优先流的形成主要受植物生长发育的影响,植物根系的生长发育以及不同结构影响了土壤的理化性质,从而改变了土壤的结构状况,对优先流的形成和发展起到了促进作用。然而各样地中植被生长发育状态不同,因此对土壤优先流的影响程度也不尽相同,存在一定差异性。本研究的结果与卢华兴等人^[6]的研究结果类似,土壤机械组成与径级小于 5 mm 根系是影响优先流产生的重要因素。今后的试验要在提高精度的同时,量化各因素之间的共同作用,进一步明确优先路径的形成机理。而土壤水分运动是土壤优先流研究中的热点和难点,牛健植等^[27]提出优先流是由动态因素和静态因素相互作用产生的,静态因素包括土壤基本性质、土壤含水率等,动态因素包括降雨强度、坡度、水文连通性等。本次试验只从静态因素对优先流染色特征进行分析和描述其形态特征,试验结果可能会受到动态因素的影响。今后需要进一步加强更多环境因子的相互作用以及动态因素与优先流发育程度的关系研究,为永定河水资源保护、合理利用等管理以及生态修复提供一定的技术支持。

4.2 结论

不同植被类型垂直剖面上显示出染色面积比随土层深度的增加而下降。柳树样地优先流主要集中于 10—40 cm 处,最大染色深度为 40.0 cm;狗尾草样地优先流集中在 10—30 cm 处,最大染色深度为 31.5 cm;荆条样地优先流集中在 10—40 cm 处,最大染色深度为 44.8 cm。

永定河 3 种不同植被类型存在明显优先流现象,且土壤优先流与基质流共同发生,狗尾草样地土壤优先流

多发于土壤浅层且有明显的基质流。发育程度为柳树样地>荆条样地>狗尾草样地。柳树样地和狗尾草样地的染色面积比和长度指数差异显著($p<0.05$),荆条样地与其他 2 种植被差异均不显著($p>0.05$)。

土壤理化性质是影响优先流形成发育的重要因素,主要指标为土壤黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、有机质含量和根重密度等,其中黏粒砂粒粉粒含量对方差变异性的贡献率为 24.824%,根重密度和有机质含量对方差变异性的贡献率为 46.312%。

参考文献:

- [1] 李洪宇,高阳,刘铁刚.土壤优先流路径研究进展[J].灌溉排水学报,2015,34(S1):254-258.
Li H Y, Gao Y, Liu T G. Progress in research on soil priority flow pathways [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,34(S1):254-258.
- [2] Johnson A C, Haria A H, Bhardwaj C L, et al. Water movement and isoproturon behaviour in a drained heavy clay soil: 2. Persistence and transport [J]. Journal of Hydrology, 1994,163:217-231.
- [3] 曹顺爱.稻田土壤优先流及其对氮肥运移的影响研究[D].杭州:浙江大学,2003.
Cao S A. Study on preferential flow of paddy soil and its impact on nitrogen fertilizer transport [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [4] 艾力夏提·库尔班,伊怀虎,韦自强,等.黑龙江省张广才岭樟子松人工林根系与优先路径的关系[J].西部林业科学,2022,51(4):134-140.
Ailixiati · Ku-Erban, Yi H H, Wei Z Q, et al. Relationship between root system and Priority Path of *Pinus sylvestris* var. *Mongolic* plantation in Zhangguangcailing, Heilongjiang province [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022,51(4):134-140.
- [5] 尤今,王树谦.土壤裂隙对农田土壤优先流的影响及其控制因子[J].节水灌溉,2022,325(9):71-75,80.
You J, Wang S Q. Impacts of soil fracture on cropland soil preferential flow and its controlling factors [J]. Water Saving Irrigation, 2022,325(9):71-75,80.
- [6] 卢华兴,段旭,赵洋毅,等.滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2022,50(7):48-62.
Lu B X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Characteristics and attribution analysis of soil preferential flow in typical stand of Mopan Mountain in central Yunnan [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022,50(7):48-62.
- [7] 姜波.耕作方式影响下的甘蔗地土壤优先流定量研究[D].广西桂林:桂林理工大学,2022.
- Jiang B. Quantitative study on soil preferential flow in sugarcane fields under the influence of farming [D]. Guangxi Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
- [8] 秦梓城,陈晓冰,刘思佳,等.基于计算流体力学分析的蔗田土壤优先流运动过程研究[J].中国土壤与肥料,2023,310(2):33-42.
Qin Z C, Chen X B, Liu S J, et al. Research on soil preferential flow movement process of sugarcane field based on computational fluid mechanics analysis [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023,310(2):33-42.
- [9] Maier F, Meerveld I V, Greinwald K, et al. Effects of soil and vegetation development on surface hydrological properties of moraines in the Swiss Alps [J]. Catena, 2019,187:104353-104370.
- [10] Tang Q, Duncan J M, Guo L, et al. On the controls of preferential flow in soils of different hillslope position and lithological Origin [J]. Hydrological Processes, 2020,8(13):13883-13926.
- [11] 孟红旗,赵同谦,徐华山,等.河岸带耕地降雨径流产流特征分析[J].农业环境科学学报,2009,28(4):749-754.
Meng H Q, Zhao T Q, Xu H S, et al. Research on the Characteristics of the Rainfall Runoff in Riparian Farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009,28(4):749-754.
- [12] 吕金波.简述北京永定河沿岸的地质背景[J].城市地质,2012,7(1):4-7.
Lv J B. Geological Background along the Banks of the Yongding River [J]. City Geology, 2012,7(1):4-7.
- [13] 程天赦,杨文静,代鹏,等.永定河冲洪积平原南部 QHJ01 孔第四纪地层划分及其环境意义[J].华北地质,2021,44(4):47-54.
Cheng T S, Yang W J, Dai P, et al. Quaternary stratigraphic division and its environmental significance of Borehole QHJ01 in southern alluvial plain of the Yongding River [J]. North China Geology, 2021,44(4):47-54.
- [14] 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.
Chen X B. Study on the preferential flow characteristics of four land use types in Simian Mountain of Chongqing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [15] Aeby P, Forrer J, Flühler H, et al. Image Analysis for Determination of Dye Tracer Concentrations in Sand Columns [J]. Soil Science Society of America, 1997,61(1):33-35.
- [16] Markus Flury, Hannes Flühler, William A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field

- study[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945-1954.
- [17] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 888-894.
- Li W L, Jin C J, Wang A Z, et al. Research progress in soil macropore flow[J]. *the Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 888-894.
- [18] 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, 28(4): 263-268.
- Wei H W, Cheng J H, Zhang H J, et al. Relationships between soil macropores properties and preferential flow about two kind of woodlands in Simian Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 263-268.
- [19] 卢华兴, 段旭, 赵洋毅, 等. 滇南地区普洱茶树根系对土壤优先路径形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 80-87.
- Lu B X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Effect of root of Pu'er Tea on the formation of soil priority path in southern Yunnan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 80-87.
- [20] 程金花, 张洪江, 张晓晖, 等. 重庆四面山根系及土壤特性对优先路径分布的影响[J]. *世界科技研究与发展*, 2011, 33(4): 519-523.
- Cheng J H, Zhang H J, Zhang X H, et al. Effect of roots and soil properties on preferential flow paths distribution in Simian Mountains, Chongqing[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2011, 33(4): 519-523.
- [21] 王伟, 张洪江, 程金花, 等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- Wang W, Zhang H J, Cheng J H, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains[J]. *the Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [22] 侯芳, 程金花, 祁生林, 等. 重庆四面山不同林地类型优先流特征及染色形态定量评价[J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2021, 41(2): 107-117.
- Hou F, Cheng J H, Qi S L, et al. Characteristics of preferential flow and quantitative evaluation of dyeing morphology in different forest types on Simianshan mountain in Chongqing[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2021, 41(2): 107-117.
- [23] 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.
- [24] 程竞萱, 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.
- Cheng J X, Cheng J H, Zheng X, et al. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors under different vegetation cover [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(6): 973-982.
- [25] 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.
- Liu M X, Song X M, Lu S G, et al. Research on the characteristics of preferential flow movement along varied hillslopes covered with different vegetation in the Three Gorges reservoir area [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1321-1335.
- [26] 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.
- Chen X B, Zhang H J, Li S Y, et al. Characteristics and influencing factors of preferential flow in different vegetation types of purple sandstone regions [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(6): 42-49.
- [27] 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.
- Niu J Z, Yu X X, Zhang Z Q. The present and future research on preferential flow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 231-243.