

永定河(北京段)滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征

侯芳¹, 杨志², 程金花¹, 王通簿¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.宁夏回族自治区水土保持监测总站,银川 750000)

摘要:以永定河(北京段)滨河带的藤本植被和次生乔木林为研究对象,采用野外染色示踪法和根系分析法,利用形态学和统计分析学的解译手段,对得到的剖面染色图片进行优先流特征研究。结果表明:藤本植被覆盖的样地基质流深度比次生乔木林小 5.48 cm,优先路径的通道数量比次生乔木林多 67%。藤本植被的优先流现象更明显,平均染色面积比(34.17%)、优先流比(69.44%)和长度指数(457.79%)分别比乔木样地大 9.89%,18.66%,25.71%。2 种覆被状况下根长密度随土层深度增加逐渐减小,藤本植被覆盖下土壤表层 0—10 cm 根长密度是次生乔木林样地的 2.96 倍。2 种覆被状况下的染色面积比和根长密度关系曲线拟合较好,藤本样地相关指数 R^2 高达 0.97。在相同外界条件下,藤本植被覆盖下的土壤比次生乔木林土壤优先流程度更大。

关键词: 滨河带; 藤本植被; 根长密度; 优先流

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0143-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.020

Characteristics of Preferential Flow of Liana and Secondary Arbor Forest Along Yongding Riverside (Beijing Section)

HOU Fang¹, YANG Zhi², CHENG Jinhua¹, WANG Tongbo¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Ningxia Hui Autonomous Region Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750000)

Abstract: Taking liana vegetation and secondary arbor forest in Yongding (Beijing section) riverside as the research object, this paper studied preferential flow characteristics of the section dyed pictures and infiltration water volume by using the methods of field dyeing tracer, root system analysis, morphological and statistical analysis. The results showed that the depth of matrix flow in the sample plot covered by liana vegetation was 5.48 cm smaller than that in the secondary arbor forest, and the number of channels with preferential flow paths was 67% more than that in the secondary arbor forest. The phenomenon of preferential flow was more obvious in liana vegetation sample plot, and the average dyeing area ratio (34.17%), preferential flow ratio (69.44%) and length index (457.79%) were 9.89%, 18.66% and 25.71% larger than those of arbor forest plot, respectively. In the two kinds of plots, the root length density decreased with the increasing of soil depth. The root length density of 0—10 cm surface soil layer in liana plot was 2.96 times higher than that in secondary arbor forest. The relationship curve between dye area ratio and root length density was well fitted, and the correlation index R^2 of liana plot was 0.97. Under the same external conditions, the soil under liana vegetation had higher preferential flow degree than that under secondary arbor forest.

Keywords: riverside; liana; root length density; preferential flow

优先流是土壤中的水分快速向下运动产生的不均匀水流^[1]。优先流的发生会对地下水体安全^[2]、土壤水肥和养分流失^[3]、土壤侵蚀^[4]产生一定影响。目前,许多学者对不同地域不同地被覆盖的样地进行了优先流相关研究,国内学者集中对紫色砂岩区的大豆

农耕地^[4]、东北黑土地^[5]、喀斯特洼地退耕地^[6]、河套灌区农膜残留耕地^[7]进行了研究,并取得了一定的成果。近年国外学者对优先流的研究更倾向于特殊地理位置的大尺度研究。Tang 等^[8]基于不同坡位对阿巴拉契亚山脉中部不同岩性土壤优先流特征研究发

收稿日期:2020-11-09

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07101005)

第一作者:侯芳(1996—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail:CHNhoufang@163.com

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

现,页岩丘陵具有更高的优先流频率;Luisa 等^[9]在集水区尺度上代入优先流参数校准了 DREAM 水文模型发现,垂向优先流与集水区产流规模无关;Maier 等^[10]采用时空转换法研究阿尔卑斯山脉发现,形成年代更久远的斜坡容易产生过量的径流。

随着工业化的发展和对优先流研究的深入,优先流研究重点已经转向一些特殊的区域,包括生态脆弱的地区、不同地貌类型的地理结合部位或间接对城镇生产生活安全产生影响的区域等,如滨河带。滨河带作为湿地生态系统的重要组成部分,不仅可以调节径流量、固岸防冲、减流挂淤,同时还可以改善下游城镇的生态环境。该区域的土壤入渗能力较强,林地径流系数达 2%^[11]。在降雨过后,滨河带土壤污染物除了通过地表污染物流入河流外,还可能通过土壤入渗影响地下水体安全,因此明确滨河带林地土壤入渗机制对于城市水源涵养、水土保持以及面源污染削减方面发挥着重要作用。藤本植被具有发达的根系,对于维持森林生态系统的结构和功能占有重要地位^[12],藤本植被可以改善土壤物理结构^[13],同时也对土壤微环境产生一定的影响^[14]。关于藤本植被研究多集中于藤本植物与林木的关系^[15-16]、藤本植物在城市绿化中的应用^[17-18]或藤本植物本身^[19]的研究。然而关于藤本植被覆盖下土体的优先流特征研究较少,藤本植被的根系在土壤中盘旋缠绕对于土壤大孔隙和优先路径的形成具有正向作用。

研究区位于黄土高原和华北平原的地理结合部,滨河带不仅可以调节降水和地表径流,同时可以为下游固坡护滩、北京段城市水源涵养、净化空气等发挥积极作用。本研究选取永定河(北京段)滨河带藤本植被和次生乔木林为研究对象,采用染色法获取剖面染色特征,结合优先流参数并分析植被的根长密度特征,进而探讨优先流在 2 种覆被情况下的优先流在形态和空间上的发生发展规律及根系对其的影响。为认识滨河带土壤物理结构和水分入渗规律提供参考,

为滨河带水生态环境污染治理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省固安县西北部东北村与北京交界处(116°14′46″—116°12′42″E,39°30′05″—39°30′02″N),地处黄土高原和华北平原的地理结合部位,同时也是永定河沿岸防护林带的重要组成部分。林带长约 15 km,距离河道约 1.5 km,海拔 17~21 m。由于历史上永定河多次河道泛滥,河岸周边反复冲刷,形成了河漫滩、沙丘、低洼等多种地貌类型。因此,该区域的土壤以壤质河潮土为主,pH 为 7.1~7.8,呈现微碱性。土壤耕层厚 20—25 cm,呈灰棕色或暗黄色,轻壤土或中壤土,粒状结构。心土层厚 30 cm 左右,灰棕色或浅黄色。轻壤土,少数是重壤土或砂土,块状结构。底土层厚 50—70 cm,有较多锈斑锈纹。研究区位于典型的暖温带大陆性气候区,四季分明,雨热同期,多年平均气温 11.5℃,7 月最高气温可达 26℃,1 月最低气温可达 -5.2℃;年降水量 548.6 mm,无霜期 188 天。受季风气候的影响,夏秋季节盛行东北风和北风。

2 材料与方法

2.1 样地布设

2020 年 9 月在永定河沿岸进行实地踏查,选择藤本丛生的样地和次生乔木林为研究对象,按照典型性和代表性原则,每种林地内分别布设 3 个优先流染色小区进行染色试验和土样采集,藤本植被样地编号分别为 T1、T2 和 T3,次生乔木林样地编号分别为 Q1、Q2 和 Q3。对每个染色小区表层的植物、枯落物等进行清除,将长、宽、高分别为 60 cm×60 cm×30 cm 的金属框(每个样地剖面实际染色面积是 50 cm×50 cm)轻砸入样地 10 cm,防止染色渗漏,覆盖塑料薄膜后待 24 h 后进行染色试验。利用手持式 GPS 对 2 个样地的坡度、坡向、海拔等信息进行测量并记录,使用样线法调查样地内藤本和乔木的种类等信息,收集资料对采集物种进行鉴定。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

植被类型	植被	样地编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	其余优势草本
藤本植被(TB)	鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)、	T1	17	4	SW	苦苣菜(<i>Sonchus oleraceus</i>)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、鬼针草(<i>Bidens bipinnata</i>)
	葎草(<i>Humulus scandens</i>)、茜草	T2	19	5	SW	
	(<i>Rubia cordifolia</i>)	T3	17	5	NW	
次生乔木林(QM)	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、白	Q1	21	6	SW	
	杜(<i>Euonymus maackii</i>)、白腊树	Q2	18	5	NW	
	(<i>Fraxinus chinensis</i>)	Q3	20	7	NW	

注:表中 SW 表示西南方向;NW 表示西北方向。

2.2 染色试验及样品采集

染色试验于下午 14:00 展开(前 1 天无降雨),揭开塑料薄膜,将 4 g/L 的亮蓝溶液 25 L 均匀喷洒到

铁框中,用塑料薄膜覆盖。24 h 后揭开塑料薄膜,取出铁框进行垂直染色剖面的开挖,每隔 10 cm 挖掘 1 层剖面,每个样地挖 5 个剖面,共计 30 个垂直剖面,

挖掘深度视染色情况而定(图 1)。每个挖掘好的剖面平整后用相机(500 D,1 300 万像素)配合柯达产标准比色卡拍摄,每个剖面拍摄 3~5 张照片。

在样地四周距离 0.5 m 处插入 ECA—GX02 植物根系生长监测系统,在不破坏植物根系生长的前提下获取样地内植物根系的扫描图片。土壤孔隙度采用环刀浸透法测量,在染色的样地旁边挖掘阶梯状剖面进行环刀分层取样,按照 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70 cm 分层,每层取 3 个环刀,连同环刀称取鲜重后带回实验室,浸泡 12 h 后称重(m_1),在平底盘内铺入干砂渗透 12 h 后立即称重(m_2),将环刀放入 105 ℃烘箱内烘烤 24 h 后称重(m_3)。土壤基本性质见表 2。

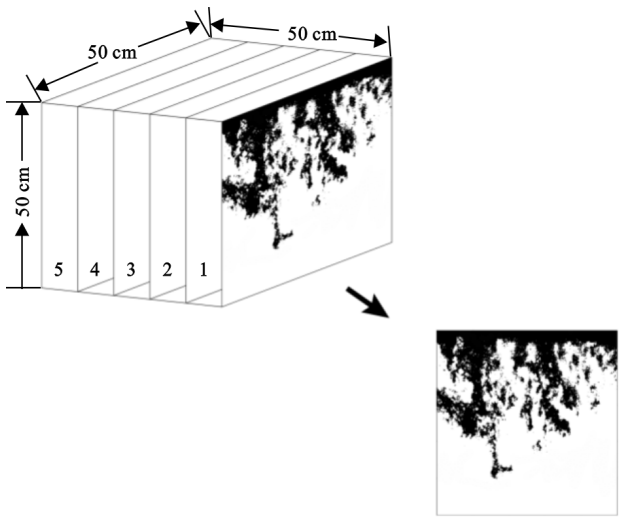


图 1 染色剖面取样示意

表 2 土壤基本性质

植被类型	土层深度/cm	土壤总孔隙度/%	大孔隙度/%	自然含水量/%	容重/(g·cm ⁻³)
藤本植被(TB)	0—10	40.88±2.38a	3.21±1.02a	5.76±1.23a	1.30±0.38a
	10—20	42.72±4.26a	4.05±0.60b	8.24±1.26b	1.25±0.34b
	20—30	42.43±1.25a	5.02±0.89c	5.29±0.68a	1.35±0.35c
	30—40	43.77±1.26a	3.85±0.55a	5.77±1.46a	1.35±0.38c
	40—50	46.01±3.78b	6.08±0.20d	5.59±1.76a	1.25±0.21b
	50—60	41.11±3.05b	3.23±1.06a	7.61±1.45b	1.43±0.31d
	60—70	42.67±4.02a	3.61±0.74b	9.06±2.06b	1.39±0.24a
次生林乔木(QM)	0—10	46.91±0.09a	7.60±1.47a	4.82±0.09a	1.27±0.30a
	10—20	39.22±0.21b	2.73±0.96b	5.55±1.23a	1.48±0.28b
	20—30	37.58±2.13b	2.52±1.44b	5.34±0.34a	1.47±0.33a
	30—40	41.47±2.45c	2.76±1.45b	9.64±1.35b	1.44±0.52a
	40—50	38.07±3.14d	2.18±0.04b	7.40±2.06a	1.43±0.41a
	50—60	38.36±2.62d	2.19±0.08c	7.64±2.01a	1.51±0.32b
	60—70	38.97±3.48d	2.33±0.12b	9.76±1.86b	1.53±0.21b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同种植被类型不同土层深度间差异性显著($P<0.05$)。

2.3 图像处理

原始拍摄图片在拍摄过程中由于环境条件的限制、镜头畸变等因素的限制使得图像有一定的失真和畸变,使用 Photoshop 2020 对图片进行几何校正,首先调整图片的色相、饱和度使得染色对比更加明显,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,减少明暗不均匀对结果造成的影响,以上操作均是为了使彩色图片变为黑白图片,方便计算染色面积所占比例。利用 IPWIN 32 软件的分离功能对图像执行降噪处理,然后输出 Bit 格式的二值矩阵用于图像的染色特征分析等。根系扫描图片采用 WinRHIZO 软件分析测定植物根系指标。

2.4 参数计算

(1)土壤总孔隙度

$$P=((m_1-m_3)/v)\times100\% \tag{1}$$

式中: P 为土壤总孔隙度(%); m_1 为饱和重(g); m_3 为烘干重(g); v 为环刀体积(cm^3)。

(2)土壤大孔隙度

$$P_1=P-((m_2-m_3)/v)\times100\% \tag{2}$$

式中: P_1 为土壤大孔隙度(%); P 为土壤总孔隙度(%); m_2 为干砂渗透后的重量(g); m_3 为烘干重(g); v 为环刀体积(cm^3)。

(3)染色面积比

染色面积比(D_c)是研究优先流的基础参数,反映染色区域占所挖掘剖面的比例。

$$D_c=\frac{D_s}{D_t}\times100\% \tag{3}$$

式中: D_c 为染色面积比(%); D_s 为剖面染色区域的面积(cm^2); D_t 为土壤剖面的面积(cm^2)。

(4)优先流比

土壤中的水分向下入渗要依次经过基质流区和优先流区,基质流深度(U_F)可以直观反映优先流的响应速度,而优先流比(P_F)剔除了基质流的影响,更真实地反映优先流在染色区域的分布情况:

$$P_F=(1-\frac{U_F\times W}{D_s})\times100\% \tag{4}$$

式中: P_F 为优先流比(%); U_F 为基质流深度(cm); W 为染色剖面的宽度(cm); D_S 为剖面染色区域的面积(cm^2)。

(5)优先流长度指数
优先流长度指数(L_i)可以反映相邻土壤剖面的异质程度,优先流区域的染色剂运动具有更高的异质性,该参数越大表明优先流程度越高^[4]。

$$L_i = \sum_{i=1}^n |D_{C(i+1)} - D_{C_i}| \quad (5)$$

式中: L_i 为优先流长度指数(%); n 为垂直剖面土层数量(个),这里用像素栅格个数表示, n 值的大小视剖面最大染色深度而定; $D_{C(i+1)}$ 为第*i*+1层对应的染色面积比(%), D_{C_i} 为第*i*层对应的染色面积比(%), $D_{C(i+1)}$ 和 D_{C_i} 为相邻的2个土层。

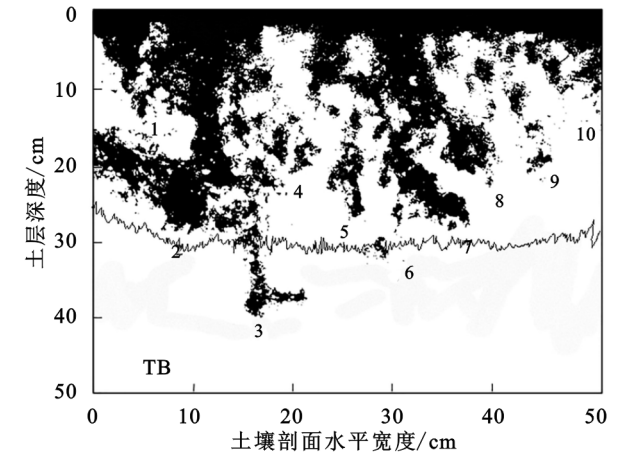
2.5 数据处理

染色图片采用 Photoshop 2020 和 IPWIN 32 软件进行校正、颜色替换和二值化处理,数据统计、分析和制图采用 Excel 2013 软件和 Origin 2018 软件,采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析和显著性检验。

3 结果与分析

3.1 2种植被类型的土壤染色特征

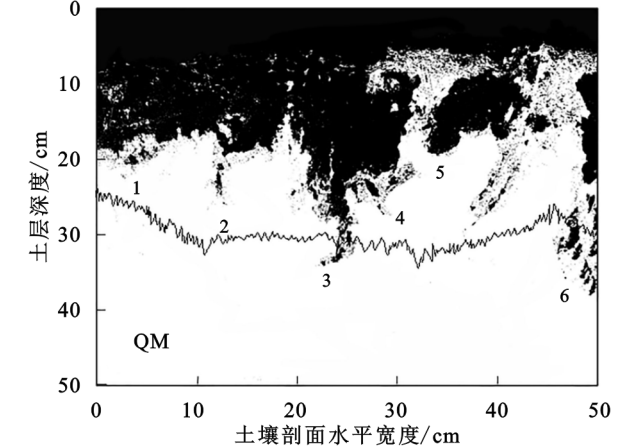
通过对藤本(TB)和次生乔木林(QM)2种样地类型进行染色示踪试验,采集6个样地共30张垂直剖面的染色图片,2种样地类型各选取1张具有代表性的图像进行分析(图2)。土壤染色形态一定程度上反映了水流的运动状态,次生乔木林土壤水流呈现均匀的整体向下入渗状态(0—10 cm),随土层深度增加,染色形态开始分化,土壤水流运动轨迹也随着孔隙结构的改变开始分化;而藤本样地土壤水流仅在



土壤表层0—4 cm呈现明显的均匀向下入渗状态,4 cm以下土壤水流运动轨迹开始分化。

藤本样地的土体基质流深度约为4 cm,90%以上均被染色;4 cm以下染色区域呈现小面积斑块状、树枝状分布,此区域内优先流发育明显,表明该深度范围(4—40 cm)土壤大孔隙分布路径相比于次生乔木林更为明显。藤本样地的土壤染色区域上部和下部染色呈现出断离式零散的分布状态;在15—25 cm深度时,染色图像部分区域出现明显的横向连通,表明该处侧向流比垂直方向上的优先流更发达。次生乔木林土体的基质流深度较藤本样地大(10 cm),染色面积在85%以上;10—20 cm染色区域呈大面积的斑块状分布,斑块数量和面积相比于藤本样地更少、更大;20—25 cm染色区域呈现树枝状分布,该深度范围是优先流发育最明显的区域。

观察染色图片优先流的形态特征,对明显的优先流通道进行标注,藤本植被覆盖下的土壤有10条明显的优先路径,这10条优先路径的平均染色深度为24.7 cm,染色深度在25 cm以上的优先路径有5条,最大染色深度可以达到41 cm;而次生乔木林只有6条明显的优先路径,平均染色深度为27 cm,深度为25 cm以上的优先路径占66.70%,最大染色深度达39 cm。藤本植被覆盖下湿润锋平均迹线较次生乔木林更为平缓,但锯齿波动较大,说明该植被覆盖下优先路径的条数较多;而次生乔木林的湿润锋平均迹线的锯齿较小,在0~15,35~50 cm宽度范围内斜率较大,进一步表明,土壤水流在此范围内以优先流形式运动。



注:图中波浪线为湿润锋运动轨迹。

图 2 2种植被类型土壤染色形态

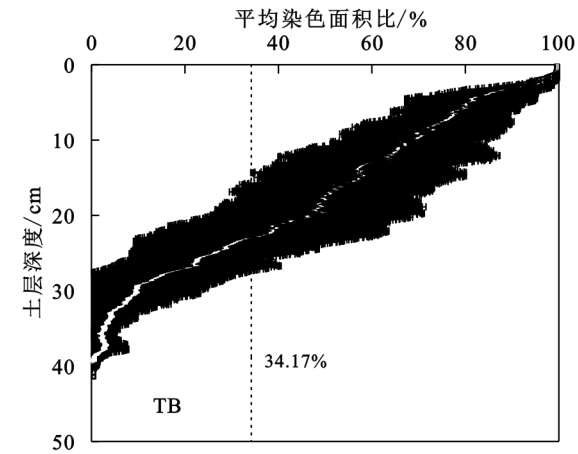
3.2 2种植被类型的的优先流变化特征

对研究区藤本和次生乔木林样地垂直剖面的染色面积比(D_c)、基质流深度(U_F)、优先流比(P_F)、优先流长度指数(L_i)4个优先流特征参数进行对比分析(图3和表3)。藤本植被覆盖下土壤的平均染色面积比随着

土层深度增加迅速下降,5—30 cm下降相对其他深度更迅速,说明该深度范围内优先流高度发育;30—40 cm下降速度明显减缓,到37 cm时出现局部的波谷,此后染色面积比略有回升最终降至0(41 cm),表明土壤优先流在入渗到30 cm时,垂向水流发育滞缓,

横向流成为此时水分运动的主要形式。

次生乔木林土壤的平均染色面积比与藤本样地土壤差异较大($P<0.05$)。平均染色面积比整体上随土层深度增加而下降,0—10 cm 下降斜率比藤本植被小,这个范围内基质流占主体,在 9 cm 时出现局部谷值(81%),此后染色面积比达到局部最大值 85%,此时横向水流伴随优先流同时发展;10—20 cm 为优先流的主要发生区域,20 cm 以下土壤孔隙



空间结构细密化,大孔隙减小导致了土壤染色面积比下降缓慢(20—40 cm)。

对比 2 种植被覆盖下的染色面积比图像可以发现,藤本植被覆盖下土壤在垂直空间上具有多条互相连通的大孔隙通道均匀分布,导致了该样地优先流比乔木样地更加发育;而次生乔木林样地土壤孔隙的横向连通性较好,土壤中的水分在经过基质流区域后,侧向流伴随优先流同步发育。

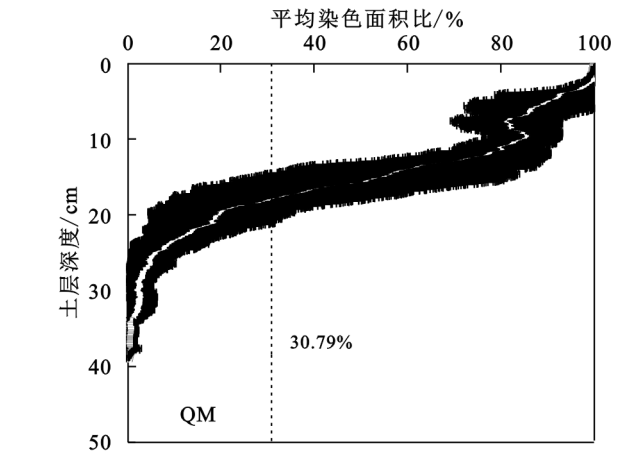


图 3 2 种植被覆盖下优先流平均染色面积比

染色面积比一定程度上可以反映土壤水分的运动形态,藤本植被覆盖下土壤的染色面积比是次生乔木林的 1.11 倍,但由于基质流的存在,染色面积并不能代表优先流发育程度,故比较 2 种植被覆盖下的水分入渗的基质流深度。基质流深度可以间接反映优先流发生的快慢程度,即优先流的响应速度^[3]。乔木样地平均基质流深度为 8.76 cm,是藤本样地(3.28 cm)的 2.67 倍,可见次生乔木林的土壤对于优先流的响应速度较慢,水分在土壤中向下入渗时优先流产生相对滞后。

优先流比是剔除了基质流区域的影响,反映了染色剖面优先流区占染色总面积的比值。从表 3 可以发现,藤本植被覆盖的样地优先流比是乔木样地的 1.21 倍。而优先流长度指数反映的是相邻垂直剖面染色面积比的差值,土壤从基质流转向优先流的强弱程度直接影响该值的大小,乔木样地优先流长度指数(340.08%)仅为藤本样地(457.79%)的 74.29%,说明藤本植被覆盖下的土壤垂直剖面的空间异质性更大,优先流更明显。总体上,藤本植被覆盖的样地与次生乔木林的染色面积比、基质流深度和优先流长度指数这 3 个指标差异显著($P<0.05$),而优先流比不显著。

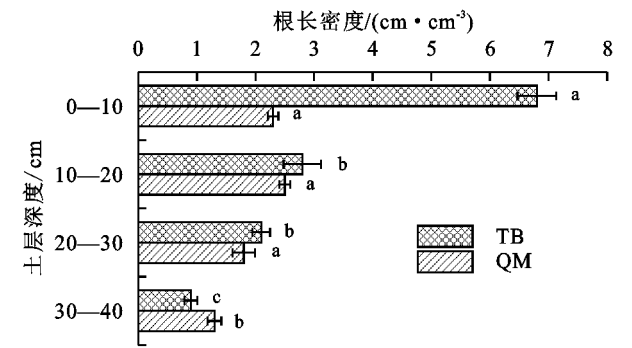
表 3 2 种植被类型土壤优先流特征参数

植被类型	染色面积比/%	基质流深度/cm	优先流比/%	优先流长度指数/%
TB	34.17±2.78a	3.28±0.14a	69.44±5.23a	457.79±72.23a
QM	30.79±3.02a	8.76±1.06b	56.48±4.42a	340.08±56.46b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同植被覆盖下差异显著($P<0.05$)。

3.3 2 种植被类型的根系特征

染色面积比、优先流比、优先流长度指数、变异系数等可以定量反映土壤剖面染色特征和变异特征,为了探究水分在土壤中滞留的原因,引入根系分布特征来进一步探究优先流入渗差异(图 4)。根长密度是单位土体内根系的总长度,整体来看,根长密度随着土层深度增加而减小。藤本样地在 0—10 cm 根长密度明显高于次生乔木林样地,是乔木样地的 2.96 倍;而 30—40 cm 次生乔木林样地的根长密度比藤本样地大 0.4 cm/cm³。藤本植被多为细小根系无规律分布在土壤表层(0—10 cm),根系穿插在土壤中使得土壤渗透性较好,优先流发育明显;而乔木有明显主根且分布比藤本植被更深,也印证了次生乔木林样地优先流出现时间较晚。



注:不同小写字母表示同种植被类型不同土层间差异显著($P<0.05$)。

图 4 2 种植被类型根长密度特征

染色面积比除了受到土壤大孔隙的影响,根系网络

结构也是影响优先流分布重要因素^[19]。将反映优先流特性的指标染色面积比与反映根系特性的指标根长密度建立联系,探究藤本和次生乔木林的根系对优先流的

影响。染色面积比随着土层深度的增加而降低,随着根长密度的降低而降低(图 5)。本研究中,染色面积比和根长密度拟合效果较好,且二者具有较强相关性。

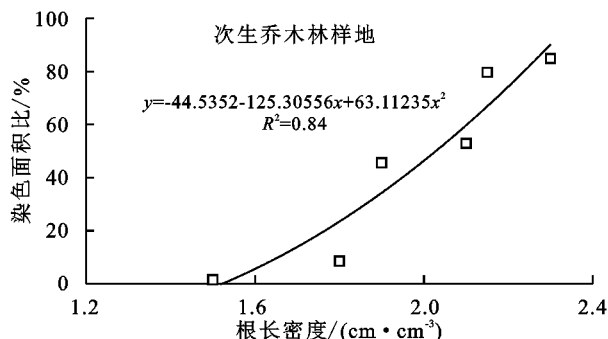
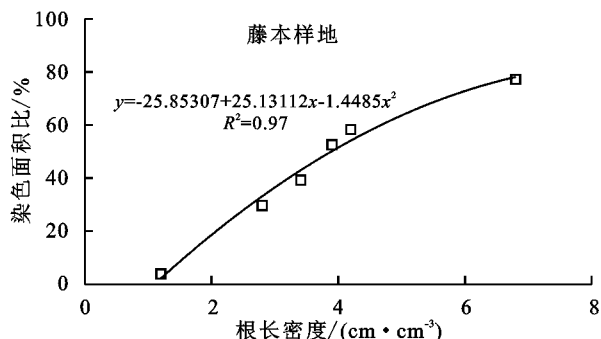


图 5 染色面积比随根长密度变化

4 讨论

潮土是在较长期的积水或较高潜水位情况下形成的土壤,研究潮土土壤的优先流特征对于永定河沿岸水体水质安全、水源涵养和黄土高原与华北平原结合部的河流生态安全具有理论意义。土壤中的水分在藤本样地和乔木样地中运动状况不同,通过对 2 类样地的染色图像进行解译,分析了 2 种植被覆盖下优先流染色形态特征、优先流变化特征及样地植被特征等。

程竞萱等^[20]对重庆四面山天然林地和农地土壤优先流特征研究发现,天然针阔混交林(63.44%)、天然阔叶林(61.87%)和玉米农地(43.51%)的优先流染色面积比均高于本研究藤本覆盖(34.17%)和次生乔木林(30.79%);侯芳等^[21]研究得出,重庆四面山草地覆盖情况下优先流染色面积比(36.09%)是本研究 2 类植被覆盖的 1.06,1.17 倍;蒋小金^[5]研究得出,东北黑土大豆耕地的优先流染色面积比为 13.13%(压力水头—1 cm);王发等^[6]研究发现,喀斯特洼地土壤优先流平均染色面积比为 30.00%。由此可见,优先流发育不仅受到植被类型的影响,不同地域的土壤类型对优先流影响极为显著。本研究发现,藤本植被比次生林样地染色面积大 9.90%,但次生林样地的基质流深度更大,这说明藤本植被覆盖的样地优先流程度更高,且土壤中的水分入渗时对于优先流的响应更为迅速。

陈晓冰等^[4]研究发现,紫色砂岩区竹林和草地优先流主要发生在土壤表层(0—20 cm),并且认为草地土体中水分只能通过几条传导能力较强的通道向下入渗,本研究藤本植被覆盖下优先流的发生区域更广(5—35 cm),虽然染色深度仅为紫色砂岩区竹林和草地的 68.30%,但藤本植被覆盖的土体优先流沿着多条大孔隙通道向下入渗,染色面积比分别是紫色砂岩区竹林和草地的 1.32,1.45 倍。Beven 等^[1]研究认为,土壤表层的大孔隙是优先流的主要通道,而藤本植被的土壤浅层根系发达,横向萌蘖能力强,致使

土壤孔隙通道异质性大,为优先流的发生提供了良好的外界条件。紫色砂岩区的针阔混交林样地优先流最大入渗深度可以达到 70 cm^[4],高于本研究 2 类植被覆盖下的最大入渗深度(41.9 cm),可能是由于四面山针阔混交林植被种类复杂繁多,主根发达且扎根较深,加之土壤中营养物质丰富,土壤动物活动频繁导致了优先流入渗较深。

徐宗恒等^[22]研究发现,斜坡土体(平均坡度 35°)的乔木样地云南松(*Pinus yunnanensis*)比草本样地狗牙根(*Cynodon dactylon*)染色路径的数量更多,这与本研究结果有一定差异。本研究通过剖面染色图像发现,藤本植被覆盖下主要优先路径的条数大于次生乔木林样地,且藤本植被覆盖的样地随土层深度增加优先路径数量增多,形态更加错综复杂。优先流比是在剖面的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间的差异。程浩等^[23]研究发现,镇江市下蜀林场人工银杏林土壤水分入渗(30 L)时优先流比和长度指数呈现相反的趋势,而本研究藤本植被覆盖下优先流比(69.44%)和长度指数(457.79%)均大于次生乔木林样地(56.48%和 340.08%),也大于下蜀林场人工银杏林(68.93%和 343.27%)。本研究发现,藤本植被土壤表层(0—10 cm)的根长密度分别是黄河河岸带水莎草(*Juncellus serotinus*)和艾蒿(*Artemisia argyi*)的 3.40,5.23 倍^[24],可见藤本植被的浅层根系较为发达。

已有研究^[25]表明,藤本植被对群落结构可造成一定影响,甚至会阻碍次生林的正向演替,藤本植被还可以改变土壤理化性质和土壤微环境^[14,25]。本研究从土壤水分入渗的角度证实了藤本植被比次生乔木林优先流更发达,土壤大孔隙结构更丰富。因此,为了保证地下水体安全,防止水肥和养分的流失,防止土壤侵蚀的潜在风险,降低土壤中优先流的发生与发展,可以尝试采取一些适当的伐藤措施,合理

配置乔木、灌木和草本结构,进一步为区域水土保持提供依据。

5 结论

(1)从优先流的染色形态来看,藤本样地的基质流深度比乔木样地小 5.48 cm,水分对优先流的响应更迅速,主要优先路径通道数量多且明显,湿润锋迹线较次生乔木林平缓。

(2)在染色条件均相同的情况下,藤本植被土壤的平均染色面积比(34.17%)、优先流比(69.44%)和长度指数(457.79%)均大于次生乔木林,分别比乔木样地大 9.89%,18.66%,25.71%。

(3)藤本和次生乔木林样地的根长密度随着土层深度增加而增加,染色面积比的变化与根长密度变化基本同步,二者拟合关系较好。藤本植被浅层根系发达,导致表层土壤入渗能力较强,在降雨后可能导致土壤侵蚀和水肥流失,可采取适当伐藤措施以减少水土流失,增加土壤中的水肥利用率。

参考文献:

[1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.

[2] Cote C M, Bristow K L, Ross P J. Increasing the efficiency of solute leaching: Impacts of flow interruption with drainage of the “preferential flow paths” [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 43(3/4): 191-209.

[3] Haria A H, Johnson A C, Bell J P, et al. Water movement and isoproturon behaviour in a drained heavy clay soil I preferential flow processes [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 163: 203-216.

[4] 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.

[5] 蒋小金. 典型黑土耕地土壤优先流特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[6] 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.

[7] 胡琦, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于染色示踪的农膜残留农田土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 142-149.

[8] 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.

[9] Luisa H, Barbara G, Julian K, et al. The relevance of preferential flow in catchment scale simulations: Calibrating a 3D dual-permeability model using DREAM [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(5): 1237-1254.

[10] 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.

[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.

[12] Schnitzer S A, Van der heijden G M F, Mascaroj, et al. Lianas in gaps reduce carbon accumulation in a tropical forest [J]. *Ecology*, 2014, 95(11): 3008-3017.

[13] 张玉虎, 张学顺, 冯万富, 等. 鸡公山落叶阔叶林和针阔混交林植物物种多样性研究[J]. *云南农业大学学报*, 2014, 29(6): 799-805.

[14] Liu Y C, Shang Q, Zhang B, et al. Effects of under-story liana (*Trachelospermum jasminoides*) on distributions of litterfall and soil organic carbon in an oak forest in Central China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 1019-1038.

[15] Stewart T, Scogings P F, Baijnath H. Dispersal of a forest liana into grasslands and post-establishment stand expansion [J]. *South African Journal of Botany*, 2020, 131: 51-55.

[16] Francis M M, Marijn B, Elizabeth K, et al. Liana communities exhibit different species composition, diversity and community structure across forest types in the Congo Basin [J]. *Biotropica*, 2020, 52(4): 12787-12800.

[17] Elisangela X R, Juliana S, Caian S, et al. Higher rates of liana regeneration after canopy fall drives species abundance patterns in central Amazonia [J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(4): 1311-1321.

[18] 王武. 藤本月季在城市垂直绿化中的应用研究[J]. *绿色科技*, 2020(15): 56-58.

[19] 孔德汀, 徐艳芳, 刘丽媛, 等. 山东建筑大学校园藤本植物种类及其应用分析[J]. *现代园艺*, 2020, 43(15): 185-187.

[20] 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.

[21] 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*, 2021, 41(1): 1-11.

[22] 徐宗恒, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被发育斜坡土体优先流特征[J]. *山地学报*, 2012, 30(5): 521-527.

[23] 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.

[24] 林承博, 陈国德, 张何信, 等. 伐藤对五指山市低海拔次生林群落特征的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(10): 127-136.

[25] 王忠伟, 张科萌, 邹娜, 等. 河南鸡公山落叶阔叶林藤本植物对林下物种多样性的影响[J]. *云南农业大学学报*, 2020, 35(3): 476-482.