

DOI: 10.5846/stxb202103260800

侯芳, 程金花, 王通簿. 基于探地雷达的滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征. 生态学报, 2022, 42(5): 1766-1776.

Hou F, Cheng J H, Wang T B. Characteristics of preferential flow of liana and secondary arbor forests along riverside based on Ground Penetrating Radar. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1766-1776.

基于探地雷达的滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征

侯 芳, 程金花*, 王通簿

北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 滨河带是河流生态系统和森林生态系统的过渡带, 该区域林分的土壤优先流特征对流域的地表水文过程会产生重要影响。探究土壤异质性与优先流的关系, 为当地地下水安全和河流上下游水生生态安全提供参考。本研究以永定河滨河带的藤本和次生乔木林两种植被为研究对象, 结合传统亮蓝 (Brilliant Blue FCF) 染色示踪法, 利用探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 技术进行测线扫描。提取探地雷达图像的单道波形图, 对反射波各参数与染色面积比进行拟合, 并结合优先流染色特征进行分析。染色形态特征表明, 藤本样地土壤染色形态呈现断离式零散分布, 优先流发育带为土壤表层以下 5—30 cm 的土层深度, 而次生乔木林土壤呈现大面积斑块状分布, 优先流发育较为迟缓, 其发育带为土壤表层以下 10—25 cm 的土层深度, 且平均染色面积比藤本小 1.68%。探地雷达测线表明, 土层深度为 0—15 cm 时, 最大振幅和总振幅面积均随土层的深度增加而下降, 土层深度为 15—35 cm 时, 两参数开始波动变化, 且藤本样地的最大振幅和总振幅面积大于次生乔木林样地。经拟合发现, 染色面积比与最大振幅呈 $y = 25.104\ln x + 25.137$ ($R^2 = 0.8697$) 的对数关系, 染色面积比与总振幅面积呈 $y = 23.874\ln x - 26.862$ ($R^2 = 0.6173$) 的对数关系。以上分析可知, 次生乔木林地土壤比藤本覆盖下的土壤紧实度更好, 其电磁波在经历物理过程中损失的电磁信号较少, 而藤本样地的电磁信号波动较大, 可见藤本覆盖下土壤层次间结构差异变化比次生乔木林更明显, 从而导致藤本覆盖下的土壤优先流程度更高。为保护地下水安全, 对于滨河床地带和丘前的低洼地这类排水不良的区域, 可对藤本植被茂盛的地带采取适当适量的伐藤措施来抑制藤本覆盖下的优先流过度发育, 同时也可通过避免强降雨前施肥降低藤本植被覆盖下的地下水污染。

关键词: 探地雷达; 滨河带; 藤本; 振幅; 优先流

Characteristics of preferential flow of liana and secondary arbor forests along riverside based on Ground Penetrating Radar

HOU Fang, CHENG Jinhua*, WANG Tongbo

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

Abstract: The riparian zone is a transition zone between river ecosystem and forest ecosystem. The characteristics of preferential flow in forest belt along riverside have an important influence on the surface hydrological process of the watershed. Therefore, study of the relationship between soil heterogeneity and preferential flow is of great significance to local groundwater security and water ecological security of upstream and downstream rivers. In this paper, using the technique of Ground Penetrating Radar (GPR) combined with the traditional staining tracing method, the liana and secondary arbor forest sample plots along Yongding Riverside (the junction of Beijing and Hebei) were detected. The single channel oscillogram of the GPR image was extracted, and then the parameters of reflected wave and dye area ratio were

基金项目: 国家自然科学基金 (32071839)

收稿日期: 2021-03-26; 网络出版日期: 2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Jinhua_cheng@126.com

fitted. Finally, the key step was to analyze the preferential flow staining features. The staining morphological characteristics showed that the preferential flow segment of liana sample plot was 5—30 cm below the soil surface, while the secondary arbor forest sample plot was 10—25 cm below the soil surface. The average dye area of the secondary arbor was 1.68% smaller than that of liana. The GPR lines results showed that the maximum amplitude and the total amplitude area decreased with the increase of soil depth at 0—15 cm. At 15—35 cm below the soil surface, the two parameters began to fluctuate. The maximum amplitude and total amplitude area of liana plot both were larger than that of secondary arbor plot. It was found that the dye area ratio was logarithmic with the maximum amplitude and the total amplitude area. The logarithm relationship between the dye area ratio and the maximum amplitude was $y = 25.104\ln x + 25.137$ ($R^2 = 0.8697$), and the logarithm relationship between the dye area ratio and the total amplitude area was $y = 23.874\ln x - 26.862$ ($R^2 = 0.6173$). The soil compactness of secondary arbor forest was better than that of liana. Therefore, there was less electromagnetic signal lost in the secondary arbor forest during the physical process. The electromagnetic signal of liana plot fluctuated greatly and lost more signals. It could be seen that the difference of soil structure between different layers of liana vegetation was more distinct than that of the secondary arbor, which led to preferential flow more frequently under liana coverage. In order to protect the safety of groundwater, it is necessary to cut down lianas appropriately and moderately in areas with poor drainage such as riverside bed zone and low-lying depression in front of hills. It could inhibit the over-development of preferential flow in soil under lianas coverage.

Key Words: Ground Penetrating Radar; riverside; liana; amplitude; preferential flow

滨河带作为湿地生态系统的“保护伞”,在调节上下游径流、涵养水源、缓冲和护岸、维持周围城镇生态环境安全等方面,发挥着重要作用。滨河带是水陆生态系统之间物质和能量交换的缓冲带,其净化水质、削减面源污染、水土保持等作用主要是通过滨河带植被与土壤间的相互关系实现的。地表水下渗是地下水来源的重要方式,控制这一特殊区域的水土流失、土壤污染以及地表污染物转移有利于滨河防护林带的生态构建^[1-4]。优先流是土壤中水分绕过土壤基质沿土壤孔隙向下迁移的一种不均匀流,其发生和发展可能会加剧地下水污染,造成水肥漏失的双重后果^[5-8]。探究滨河带不同植被类型覆盖下土壤优先流特征,得出该区域土壤结构对于优先流的影响,对于减少滨河带的面源污染,降低河岸缓冲区的土壤侵蚀,保护河道水及地下水安全具有重要意义。

优先流研究方法的改进和高精度仪器设备对于优先流研究具有重要意义,根据研究目的和研究对象选择合适的观测方法对试验结果会产生不同的影响。骆紫藤^[9]利用工业 CT 扫描技术对原状土柱进行扫描,从三维的角度探究土壤大孔隙结构对优先路径形成的影响;Wiekenkamp^[10]利用无线传感器在时空尺度上监测优先流的发生受小尺度土壤、生物特征和局部过程的控制;Yao 等^[11]将亮蓝染色示踪试验和时域反射技术(Time domain reflectometry, TDR)相结合发现土壤含水量低的地块优先流程度比含水量高的地块更明显。而探地雷达(Ground penetrating radar, GPR)作为一种非破坏性的地球物理探测方法,可以用于确定地下土壤结构、地下空洞和水位等地质信息。彭韬等^[12]利用探地雷达探测得到喀斯特岩溶带发育厚度集中在 2—8 m 的土层深度;夏银行等^[13]拟合了三种土壤质地地下电磁波波速和含水量的关系式,认为利用探地雷达技术探测土壤深度和含水量分布是切实可行的;罗古拜^[14]认为连续性较好的低频信号在 GPR 图像中的深度可表征矿区复垦地有效土层厚度;周广行^[15]利用 GPR 技术得出反射波参数中总时间间隔、第一周期波正振幅和最大振幅三个参数建立的多元线性模型估算根系径级效果最好。利用探地雷达探究土壤结构及其对优先路径形成的影响研究较少。有学者发现,探地雷达反射波参数与地下埋设的物体呈现正相关关系,且最大振幅的相关程度最高^[16-17]。电磁波在土壤中传播遇到介电常数差异较大的土壤界面时,会激发更多的反射波,从而形成的波形振幅也就越大。故本文采用得到的反射波参数反映土壤结构,对滨河带优先流规律进行探究。

研究区的地理位置属于黄土高原和华北平原的结合部,行政位置则是河北省与北京市的接壤地段,永定

河作为该区域重要河流,其沿岸的林带不仅起到调节降水和地表径流的作用,同时也为下游的固坡护滩、北京段城市水源涵养、净化空气等发挥积极作用。本文采用野外亮蓝(Brilliant Blue FCF)染色示踪法探究滨河带藤本(Liana)和次生乔木林(Secondary arbor)覆盖下的土壤优先流特征,结合探地雷达测线扫描法,通过分析电磁波波形图,建立反射波参数与优先流指标的关系,得出该区域土壤结构对优先路径形成的影响。本研究的开展不仅仅是优先流领域研究方法的扩展与创新,同时对于滨河带有效的管理和保护水资源提供一定的理论支撑,为认识滨河带水分入渗规律及浅层土壤结构对优先流的影响提供参考,同时也为下游首都水生态安全和环境污染研究提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省固安县与北京大兴区交接处的永定河中下游段,地理坐标为 116°14'46"E—116°12'42"E, 39°30'5"N—39°30'2"N,海拔高度 17—24 m,地势东北高西南低,年均气温 11.5℃,年均降水量 548.6 mm,属于典型的暖温带大陆性气候。永定河中游段河流平均宽度约 650 m,单侧河岸宽约为 50 m,河岸植被主要以乔灌木为主,植被覆盖率约为 60%。面源污染主要是由于降雨对地表的冲刷将城市污染物纳入河道引起,河床沙质化严重,土壤侵蚀模数约为 200 t km⁻² a⁻¹,土壤类型主要为壤质潮土。河道自 2019 年开始,春秋两季上游水库开闸补水,冬季河道干涸。研究区选择永定河河岸沿线滨河带的藤本和次生乔木林样地。探地雷达测线按照典型格子状布设^[18],根据测线,在两种林型的样地内各布设 3 个垂直样方和 3 个水平样方,即 6 个优先流染色小区。其中,1、2 和 3 为垂直剖面开挖样方,4、5 和 6 为水平剖面开挖样方(藤本植被样地用 L 表示,次生乔木林样地用 A 表示,下同)。试验时间为 2020 年 9 月 20 日,样方基本情况如表 1 所示。

表 1 样方基本情况

Table 1 Basic characteristics of the three sampling plots

样地 Plot	平均海拔 Altitude /m	坡度 Slope/(°)	优势植物种 Dominant species
L1	17	4	鹅绒藤(<i>Cynanchum chinense</i>)、葎草(<i>Humulus scandens</i>)、
L2	19	5	茜草(<i>Rubia cordifolia</i>)
L3	17	5	
L4	17	4	
L5	19	5	
L6	17	5	
A1	21	6	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、白杜(<i>Euonymus maackii</i>)、
A2	18	5	白腊树(<i>Fraxinus chinensis</i>)
A3	20	7	
A4	21	6	
A5	18	5	
A6	20	7	

L1、L2、L3 表示藤本植被覆盖下的垂直剖面样方,L4、L5、L6 表示藤本植被覆盖下的水平剖面样方;A1、A2、A3 表示次生乔木林的垂直剖面样方,A4、A5、A6 表示次生乔木林的水平剖面样方

2 研究方法

2.1 样地布设

试验前在永定河沿岸进行实地踏查,在永定河滨河带上选择地势较为平坦空旷的藤本植被覆盖和次生乔木林覆盖的样地,根据当地地形条件和地势起伏情况,两林型均布设 14 m×12 m 的矩形样地。在样地内顺坡方向选取 3 条测线放置卷尺作为标记,分别为测线 1、测线 2 和测线 3,垂直于等高线方向标注 2 条测线,即测线 4 和测线 5,相邻测线间距为 3—5 m 不等。测线 1 上布设样方 1 和 4(样方大小为 60 cm×60 cm),测线 2 上

布设样方 2 和 5,测线 3 上布设样方 3 和 6。测线 4 与测线 1 的交点为样方 1,测线 5 与测线 2 的交点为样方 5、与测线 3 的交点为样方 3。其中 L1、L2、L3 为藤本植被的垂直剖面样方,A1、A2、A3 为次生乔木林的垂直剖面样方;L4、L5、L6 为藤本植被的水平剖面样方,A4、A5、A6 为次生乔木林的水平剖面样方。为避免植物根系对试验造成影响,所有样方选取时均保证距离乔木 ≥ 0.5 m。样地布置如图 1。为避免染色溶液相互干扰,垂直样方和水平样方间距为 15 cm。

试验采用中心频率为 500MHz 的探地雷达(CAS-S500,IECAS,China),测量方式为测量轮连续点测。设置探地雷达的参数:本实验采用自动增益,频率为 56Hz,探测深度约为 0.8m。

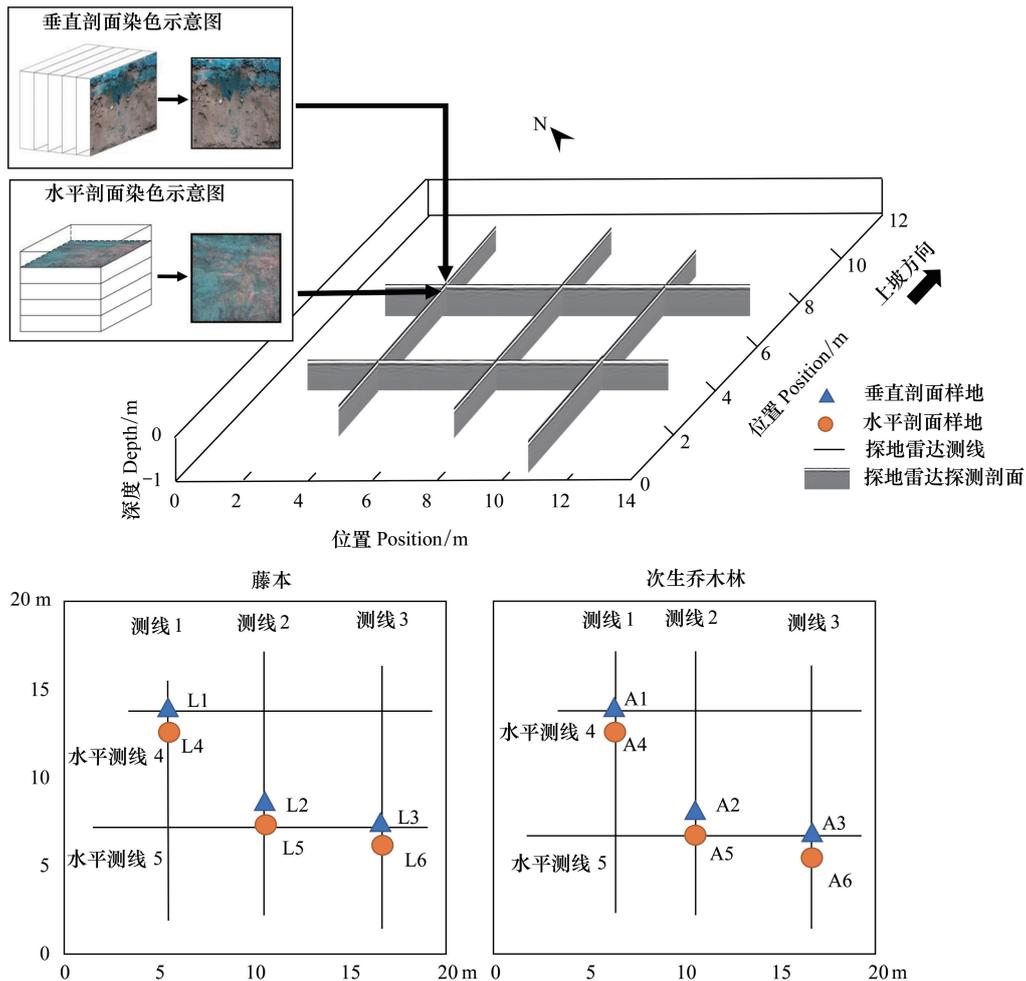


图 1 样地布置图

Fig.1 Diagram of sampling plots

利用环刀在每个样方内采用五点取样法分层 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 和 30—40 cm 取土样,称鲜重后带回实验室进行粒径分析和其余物理性质的测定。样地内土壤物理性质见表 2。

2.2 染色示踪

土壤中的优先流用肉眼难以直接观测,染色示踪就是利用染色剂标记水流经过的区域,强化优先流的可视性。其中,亮蓝配制的溶液无毒无害且性质稳定,被选作常用染色剂,将亮蓝溶液均匀地喷洒至土壤表面,入渗完成后通过挖掘土壤剖面得到剖面的染色形态、染色面积等情况,从而获取优先流特征。在保证染色试验前 1d 无降雨的情况下,清理各染色样方表层枯落物,将 60 cm×60 cm×50 cm 的铁框垂直砸入样方 20 cm,以防止染色溶液侧漏,并在样方表面覆盖塑料薄膜。静置 24 h 后开始染色,将提前配好的 4 g/L 亮蓝溶液用

喷壶均匀喷洒在土壤表面,共消耗 25 L 溶液。染色后再次用塑料薄膜覆盖样方,以免溶液蒸发对试验结果造成影响。24 h 后揭开塑料薄膜,对 L1、L2、L3 和 A1、A2、A3 样方进行垂直剖面开挖,每隔 10 cm 开挖一层,每个样方挖掘 5 个垂直剖面,共 15 个垂直剖面。对 L4、L5、L6 和 A4、A5、A6 样方进行水平剖面的开挖,按照 5 cm、10 cm、15 cm、25 cm、35 cm 共挖掘 5 层,共 15 个水平剖面^[19]。每个挖掘好的剖面平整后,将标尺放在剖面旁边作为参考,用数码相机(Canon EOS 60D, Canon, Japan)拍摄,每个剖面拍摄 3—5 张照片。

表 2 滨河带土壤基本物理性质

Table 2 Basic physical soil properties along riverside

样地 Plot	土层厚度 Soil depth/cm	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity/%	砂粒质量分数 Sand content/%	粉粒质量分数 Silt content/%	粘粒质量分数 Clay content/%
藤本植被 Liana	0—10	1.21±0.02a	40.88±1.36a	61.34±2.34a	20.11±1.56a	18.55±0.98a
	10—20	1.25±0.13a	42.72±1.35a	59.62±1.65b	19.63±0.09a	20.75±1.15a
	20—30	1.35±0.08b	42.43±2.03a	48.63±1.56c	21.65±2.05a	29.72±1.19b
	30—40	1.35±0.15b	43.77±0.65b	42.19±1.78c	35.47±1.07b	22.34±1.23b
乔木次生林 Secondary arbor	0—10	1.27±0.30a	46.91±0.09a	59.36±1.56a	20.09±0.95a	20.55±2.31a
	10—20	1.48±0.28b	39.22±0.21b	58.62±1.23a	18.56±1.24b	22.82±2.07a
	20—30	1.47±0.33a	37.58±2.13b	55.26±0.97b	17.46±1.26b	27.28±1.56b
	30—40	1.44±0.52a	41.47±2.45c	58.45±2.36a	19.85±0.86b	21.70±1.24a

±表示平均值±标准误;不同字母表示不同土层深度差异性显著($P<0.05$)

2.3 图像处理

原始染色图像利用 Adobe Photoshop 2020 进行几何校正和光照校正。染色图片在拍摄过程中,由于环境限制、镜头固有的畸变现象等因素致使获取的图像出现一定的变形和失真,因此对图像进行几何校正。此外,图片的质量可能受到拍摄过程中的光照不均匀的影响,造成图片参数提取障碍,所以需要调整图片的色相、饱和度和阈值等来进行光照校正。为了方便后续提取图像数据里的像素点,使用灰度处理和容差(小于 10)处理,使彩色图片变为黑白图片,染色区替换为黑色(0),未染色区替换为白色(255)。经过颜色替换处理的图像会出现少量的噪点,这些噪点往往是独立存在的像素,不符合实际的染色结果。利用 ImageProPlus 6.0 软件通过形态学的处理方法对颜色替换后的图像进行降噪处理,输出后续分析所需的 Bit 格式的二值矩阵,方便做染色形态特征分析。

探地雷达图像利用 RadarViewV18.08 进行背景杂波去除、地形校正等处理,以去除外界干扰,并选择自动增益平衡振幅,补偿深部雷达信号的快速下降。预处理之后进行图片提取(B-scan 图)和单道波形图的提取(A-scan 图)用于后续分析。在 RadarView 的雷达波形图上截取 5 个样点的 A-Scan 图^[15]对波形参数进行提取和分析,以便通过次生乔木林和藤本样地的 A-Scan 图量化反映林地土壤的结构,从而建立与优先流的关系,进而研究土壤结构对于优先路径形成的影响。A-Scan 图参数提取方式见图 2。分层提取 0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm、15—20 cm、20—25 cm 和 25—35 cm 的最大振幅、最大振幅面积、总振幅面积和最大时间间隔。35 cm 以下土层因反射波形图起伏变化小,此处不统计。L1、L2、L3 和 A1、A2、A3 每个样方提取 5 个剖面反射波波形图,共计 30 张。

2.4 数据处理

染色图片采用 Adobe Photoshop 2020 和 ImageProPlus 6.0 软件进行校正、颜色替换和二值化处理,数据统计、分析和作图采用 Excel 2013 和 Origin 2018,采用 SPSS 20.0 进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 滨河带林地土壤优先流特征

通过对永定河滨河带藤本植被和次生乔木林样地的土壤进行染色示踪试验,获得 12 个样方共计 30 张土

壤垂直剖面染色图像和 30 张水平剖面染色图像用以分析优先流染色形态特征,选取两样地具有代表性的染色图进行分析,并对 5 cm、10 cm、15 cm、25 cm 和 35 cm 土层深度时染色面积比的平均值进行分析(图 4)。

由染色特征图可以发现(图 3),藤本样地的优先路径条数更多,5 cm 以下染色形态呈枝条状的断离式零散分布,优先流主要集中在土壤表层以下 5—30 cm;而次生乔木林样地在 10 cm 以下土层染色斑块较为集中,优先路径的数量明显减少,优先流发育较藤本样地滞后,且发育带范围较窄,主要集中在 10—25 cm 土层。基质流区域(UniFr)是指水分在土壤浅层均匀向下入渗的区域,单位土层染色面积比在 80% 以上表示基质流区域^[20]。由图 4 可以得出,藤本样地的平均基质流深度为 3.85 cm,次生乔木林样地的平均基质流深度为 11.36 cm,可见次生乔木林样地的优先流发育较为迟缓。

由于水平剖面在开挖时,35 cm 以下土层的平均染色面积比不足 5%,故这里不分析 35 cm 以下土壤剖面染色面积比。由平均染色面积比图可以发现,随着土层深度增加,染色面积比呈现下降的趋势,但部分区域交叉波动,深层土壤的染色面积比反而大于浅层土壤,这种现象就是由于优先流的存在造成的。由于一定深度范围内地质、土壤结构等的差异,使得土层之间存在更多的有利于水分向下入渗的通道,优先流则在此区域内明显发育。藤本样地在 5—30 cm 内染色面积比急速下降,下降速率为 292.11%,优先流发育带(5—30 cm)的平均染色面积比为 63.34%;次生乔木林样地在 10—25 cm 内急速下降,下降速率为 325.28%,优先流发育带(10—25 cm)的平均染色面积比为 61.66%。

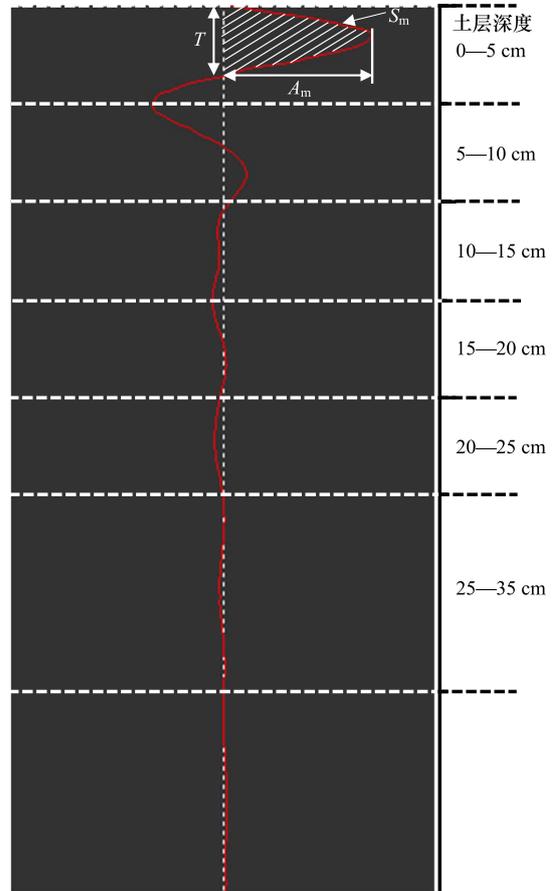


图 2 探地雷达参数提取示意图
Fig.2 Diagram of GPR parameters extraction

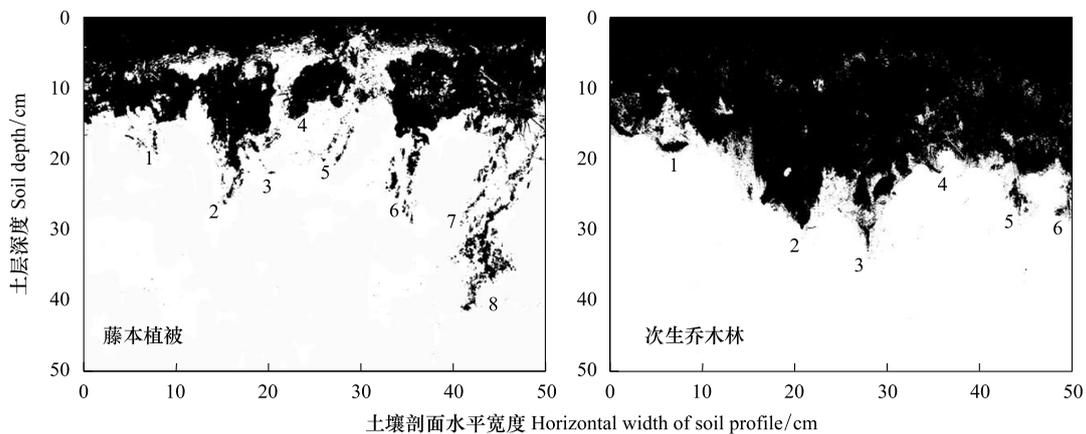


图 3 滨河带两种样地的土壤剖面染色形态特征
Fig.3 Images of dyed soil profiles in two types of plots along riverside
“1、2、3...”数字表示染色剖面的优先路径数

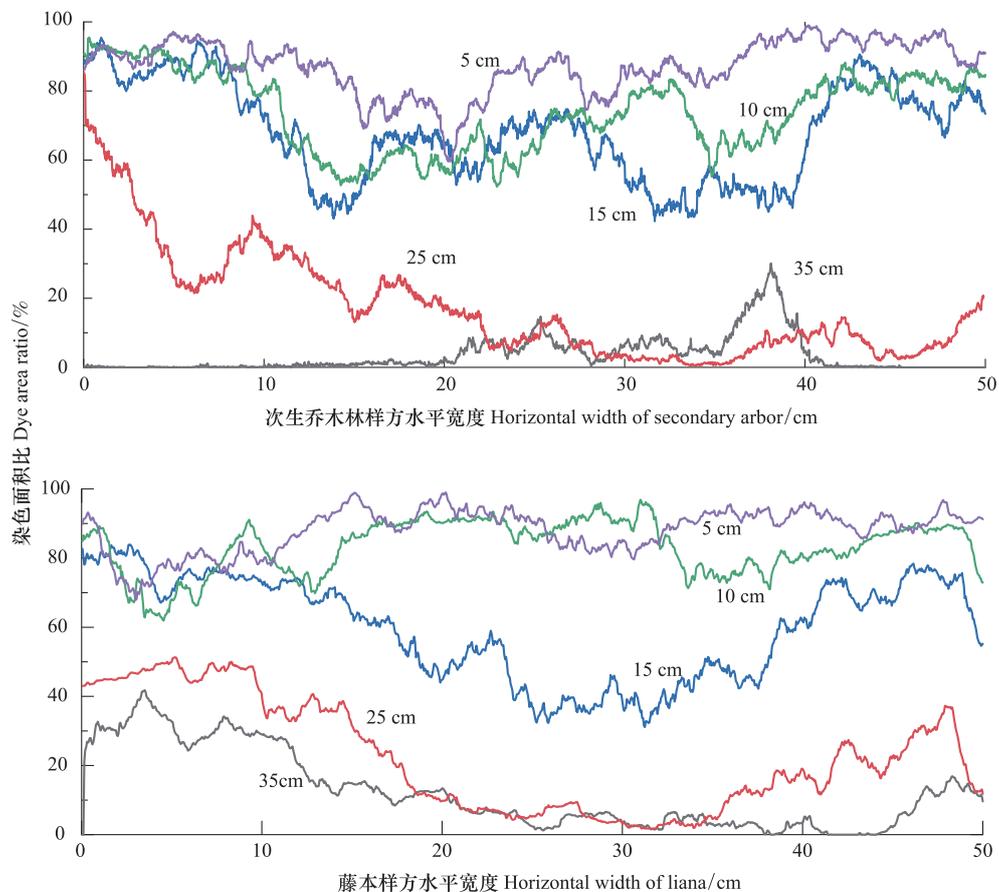


图4 两种样地不同土层深度染色面积比

Fig.4 Dye area ratio of different soil depths in two types of plots

3.2 土壤结构与优先流的关系

探地雷达反射波形成的电压堆积图是垂直方向上土壤层次间差异变化的反映,反射波波动变化小的表示土壤层次间差异变化小,土壤紧实度好。对这 30 张反射波波形图提取参数:最大振幅、最大振幅面积、总振幅面积和最大时间间隔。与直接反映优先流发育程度的指标染色面积比进行相关性分析,结果见表 3。藤本和次生乔木林样地均显示最大振幅与染色面积比呈显著正相关($P < 0.01$),总振幅面积与染色面积比呈显著正相关($P < 0.01$)。这表明探地雷达探测到的土壤结构对优先路径的形成具有一定影响,而最大振幅面积和最大时间间隔这两个参数与染色面积比之间没有明显相关性。故本研究选择最大振幅和总振幅面积反映土壤结构,用染色面积比反映优先流发育程度,将土壤结构与优先流量化,从而建立二者的联系。

表3 滨河带土壤的染色面积比与反射波形图各参数相关分析

Table 3 Correlation analysis between dye area ratio and single channel oscillogram parameters

参数 Parameters	样地 Plot	最大振幅 Maximum amplitude/ v	最大振幅面积 Maximum amplitude area/($ns \times v$)	总振幅面积 Total amplitude area/($ns \times v$)	最大时间间隔 Maximum time interval/ ns
染色面积比 Ratio of dye area/%	藤本	0.714 **	0.582	0.658 **	0.390
	次生乔木林	0.706 **	0.616	0.692 **	0.423

**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

对藤本样地和次生乔木林样地拟合染色面积比与最大振幅、总振幅面积的关系可以发现,染色面积比与二者呈现对数关系(图 5)。染色面积比随着最大振幅和总振幅面积的增加呈现对数增长趋势,其关系式见公

式(1)和公式(2)。

$$y = 25.104\ln x + 25.137, R^2 = 0.8697 \tag{1}$$

式中, y 为染色面积比(%), x 为最大振幅(v)。

$$y = 23.874\ln x - 26.862, R^2 = 0.6173 \tag{2}$$

式中, y 为染色面积比(%), x 为总振幅面积($ns \times v$)。

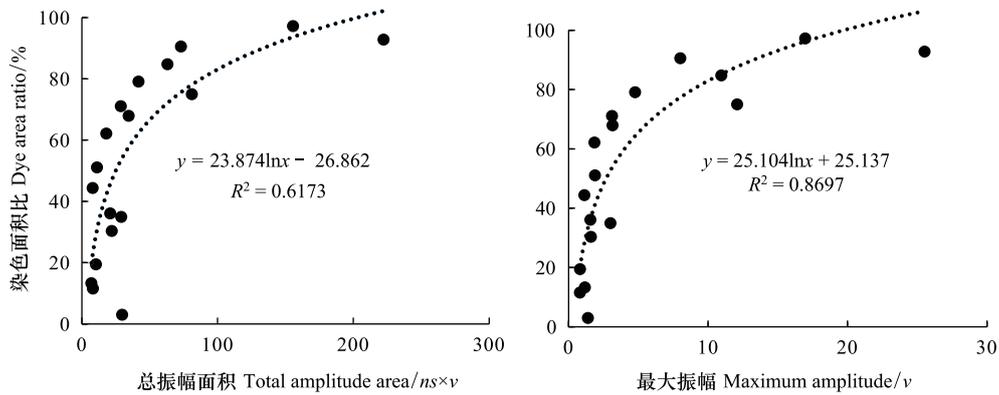


图 5 滨河带土壤的染色面积比与其最大振幅、总振幅面积的拟合关系

Fig.5 The fitting relationship of soil along riverside between dye area ratio and maximum amplitude, total amplitude area

3.3 土壤结构对优先路径形成的影响

对藤本植被和次生乔木林样地单道波形图的平均最大振幅、总振幅面积随土层深度变化进行分析,可以发现两参数随土层深度变化趋势基本一致(图 6)。整体来看,在 5—10 cm 两参数均随土层深度增加而下降的幅度是最大的,基质流区和优先流区土壤结构的差异变化使得各样地在这个深度范围时开始陆续产生优先流。藤本植被覆盖下的最大振幅和总振幅面积大于次生乔木林,这表明藤本样地的优先流现象更明显。10—20 cm 时两参数随土壤深度的增加而下降,20—25 cm 时出现小范围增加,从优先流染色形态可以看出,该范围存在一些漏斗状的优先流,可能是局部范围的土壤结块或小石砾导致。

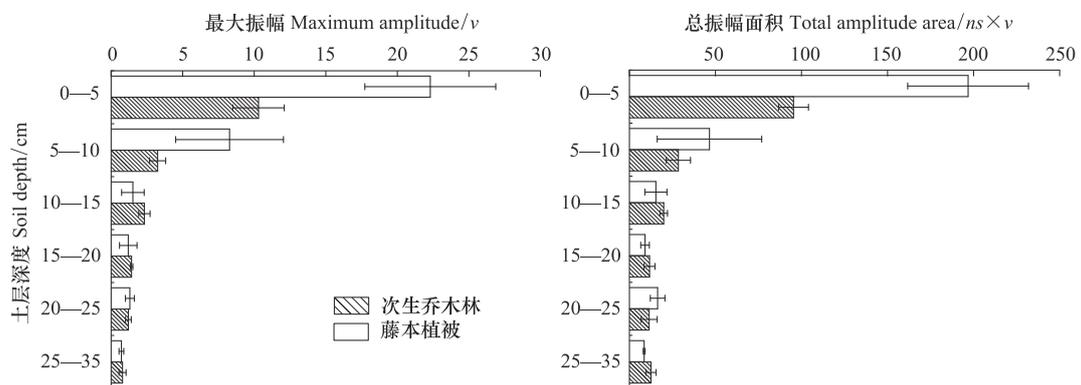


图 6 藤本和次生乔木林的最大振幅和总振幅面积随土层深度的变化

Fig.6 Variation of maximum amplitude and total amplitude area at different soil depths in liana and secondary arbor

藤本和次生乔木林样地的探地雷达单道波形图经过背景杂波处理后,去除了雷达天线和地面相互作用产生的回波部分(图 7)。0—20 cm 以内波动变化幅度明显可见,20 cm 土层以下波动幅度越来越小,这是由于电磁波在地下介质中的衰减特性导致^[21]。藤本样地的最大振幅和总振幅面积大于次生乔木林,两种林分的最大振幅主要分布在土壤表层以下 0—5 cm 范围内。0—5 cm 为基质流发生区域,水分近乎均匀向下入渗,

该深度范围内土壤间异质性较小。就藤本样地而言,L1、L3 的最大振幅和总振幅面积比 L2 大,L2 的基质流深度为 11.47 cm,L2 的回波(b 处)较 L1(a 处)和 L3(c 处)滞后,其优先流出现较 L1 和 L3 晚。而次生乔木林样地的单道波形图相比藤本植被无明显回波,波形图波动幅度较小,最大振幅和总振幅面积明显小于藤本植被,可见其土壤块体间差异性较小,优先流发育较为迟缓。

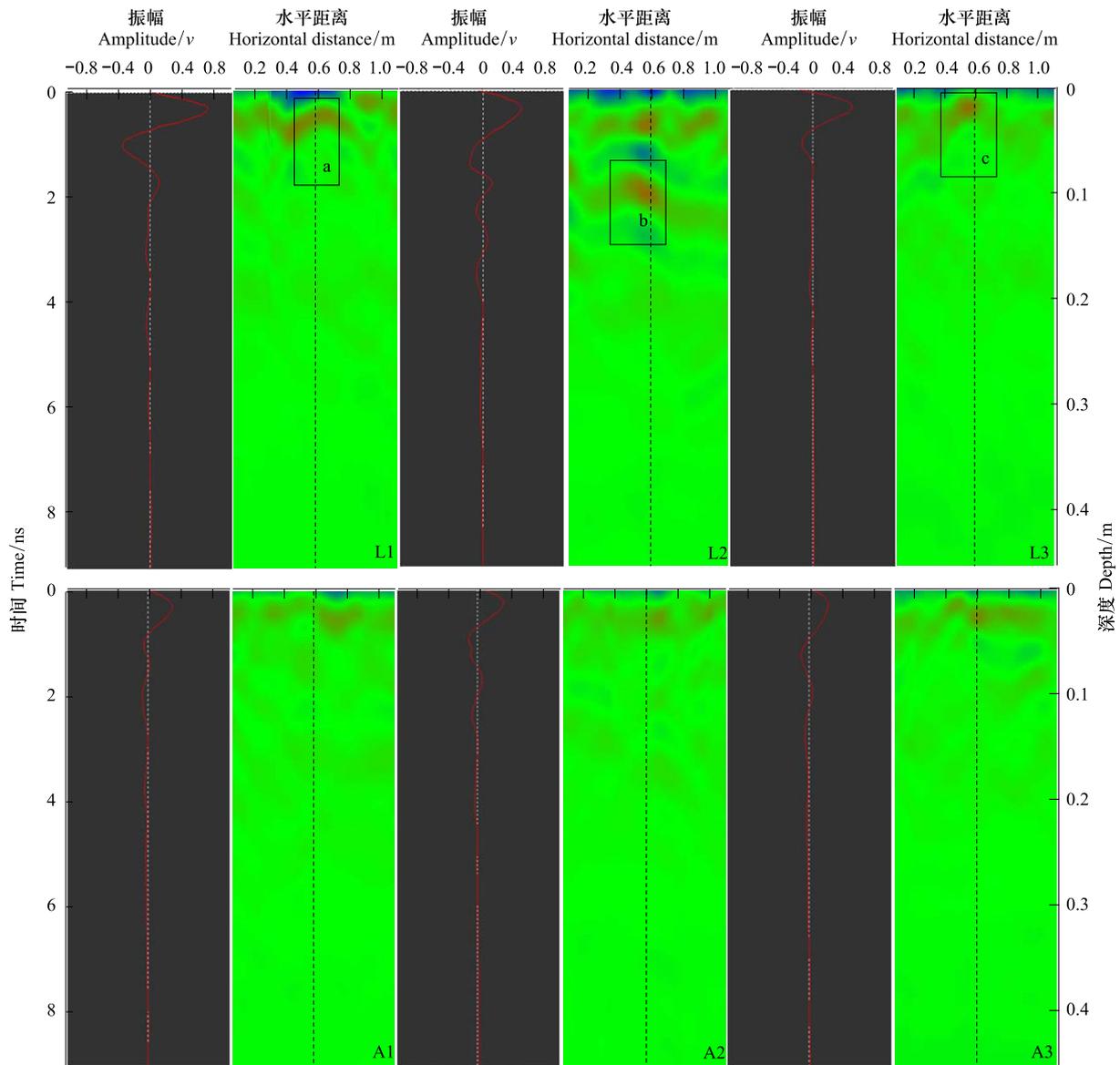


图7 藤本和次生乔木林土壤垂直剖面的单道波形图

Fig.7 Diagram of single channel oscillogram of vertical soil section in liana and secondary arbor

L 表示藤本植被样地,A 表示次生乔木林样地,a、b、c 分别为 L1、L2 和 L3 的回波处

4 讨论

4.1 滨河带优先流特征

滨河带属于生态脆弱地带,作为连接河流生态系统和森林生态系统的过渡区域,对于上下游涵养水源和林地水土保持发挥着重要的功能。滨河带藤本样地的平均染色面积比略高于同一研究区的次生乔木林样地(高 1.67%)。在挖掘染色剖面时,观察到藤本样地内肉眼可见的细根分布比次生乔木林样地更多,这可能是

导致藤本样地优先流发达的原因之一。广西岩溶区稻田土的土壤优先流平均染色面积比仅为 25.40%^[22],远低于滨河带藤本样地(63.33%)和次生乔木林(61.66%),但染色深度却是滨河带的 1.40 倍。可能是由于稻田土常年翻耕,深层土壤结构更优越,且滨河带土壤的初始含水量更高(平均为岩溶区稻田土的 1.15 倍),土壤含水量较高时更容易达到近饱和状态并产生径流^[20]。同样作为生态脆弱地区,荒漠绿洲的优先流现象不如滨河带明显,黑河中游湿地保护区怪柳(*Tamarix chinensis*)灌丛的染色面积仅为本研究次生乔木林的 0.60 倍,是藤本的 0.48 倍^[23],但染色深度却远高于滨河带(约 1.95 倍),这是由于荒漠绿洲的植物为了获取水源,土壤深层细根发达,导致 50—70 cm 出现了局部范围的漏斗状优先流^[24]。

从染色图像的形态特征来看,喀斯特洼地的染色剖面呈现细密的斑点状分布^[25—26],而滨河带藤本和次生乔木林的土壤染色呈现或大或小的斑块状分布,这是由于喀斯特地区细小土壤颗粒的运移阻塞了直径较小的孔隙从而限制了孔隙的发育,而滨河带样地的土壤优先流程度更高。本研究藤本样地土壤优先流染色面积比(0—35 cm)是喀斯特洼地的 1.23 倍^[25],是同一研究区次生乔木林土壤的 1.02 倍,由此可见该区域藤本植被土壤的优先流程度较高。

4.2 土壤异质性与优先流的关系

影响优先流的因素有很多,耕作和灌溉、季节干湿变化、冻融交替等间接影响土壤微环境,从本质来看其实是改变了地下土壤分布的结构构造,从而改变优先路径的形成。陈晓冰等^[22]发现,粉垄耕作降低了岩溶区甘蔗地优先流的发生频率,实质上是由于翻耕改变了土壤颗粒周围的微环境;Zhang 等^[27]研究表明干湿交替容易导致土壤裂缝的产生,从而促进优先路径的形成。这些研究均表明土壤本身结构的异质性才是影响优先路径形成的最直接、最根本的因素。

探地雷达是一种无损式电磁波地下结构探测仪器,在 20 世纪初被应用于地下金属物体的探测。最早是由 Kung 和 Donohue^[28]将探地雷达引入砂质土壤优先路径的探索。滨河带藤本植被和次生乔木林的土壤水分运移情况有一定差异。利用传统的染色示踪法,通过对滨河带藤本植被和次生乔木林土壤的染色图像进行解译,结合探地雷达对地下土壤结构进行无损探测,分析两种植被覆盖下优先流染色的形态特征。探测发现,藤本样地的电磁信号波动较大,表明藤本植被土壤层次间结构差异变化比次生乔木林样地更大,从而导致藤本覆盖下的土壤优先流程度更高,印证了土壤染色面积比得出的结果。

优先流的研究方法的改进与高精密仪器的应用对优先流的研究具有重要意义。Li 等^[29]利用探地雷达对宾夕法尼亚州 Shaver's Creek 流域不同坡向和坡型的水流入渗图像进行差分,发现坡面水文垂直方向的优先流占据重要地位。罗古拜^[14]利用探地雷达探究矿区土壤剖面发现,GPR 图像中的孤立碎石信号可能是由于潜在孤立碎石或土壤中存在的电性差异的孤立异质体导致的,而本研究所选的藤本植被样地和次生乔木样地均为纯土壤剖面,可见藤本样地土壤的存在部分电性差异极大的孤立异质体,才导致其 GPR 图像出现较多回波。周广行^[15]发现探地雷达波形中振幅大小、最大振幅面积和时间间隔均与地下植物根径大小呈正相关,且最大振幅与根径的相关性最强,这与本研究结果具有一定的相似性。染色面积比一定程度上反映了地下土壤结构,本研究发现染色面积比与最大振幅和总振幅面积呈显著正相关($P < 0.01$)。王萍^[30]曾用探地雷达探测非饱和土壤的紧实性,由于电磁波在土壤要经历反射、折射、散射、衰减等物理过程,所以分析返回地表的电磁信号一定程度可以反映土壤紧实度等土壤结构。本研究发现次生乔木林的土壤比藤本紧实度更好,电磁波在经历物理过程中损失的电磁信号较少,这也就解释了次生乔木林样地土壤的单道波形图波动幅度普遍小于藤本样地。

5 结论

本文对滨河带藤本和次生乔木林覆盖下的土壤优先流特征进行了分析,探究土壤结构与优先路径形成的关系。整体来看,滨河带藤本覆盖下的土壤入渗范围更广,优先流更发达。次生乔木林样地的优先流发育较迟缓,平均基质流深度比藤本样地大 7.54 cm。藤本样地的优先流发育带为土壤表层以下 5—30 cm 土层,平

均染色面积比为 63.34%;次生乔木林样地优先流发育带为土壤表层以下 10—25 cm 土层,平均染色面积比为 61.66%。用最大振幅和总振幅面积反映土壤结构,染色面积比反映优先流发育程度。经拟合发现,最大振幅、总振幅面积均与染色面积比呈现对数关系,藤本植被的最大振幅和总振幅面积大于次生乔木林样地。这表明土壤结构对优先路径的形成具有一定影响,藤本植被覆盖下的土壤层次间差异较大。因此,未来滨河带森林管护中应结合实际情况加强对藤本植被的管理,适量采伐以抑制藤本植被覆盖下土壤优先流的过度发育,避免对地下水环境造成的危害。

参考文献 (References):

- [1] 邵波, 方文, 王海洋. 国内外河岸带研究现状与城市河岸林带生态重建. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2007, 5(6): 43-46.
- [2] 徐宗恒, 徐则民, 官琦, 张露月. 不同植被发育斜坡土体优先流特征. 山地学报, 2012, 30(5): 521-527.
- [3] Liu H, Yu Y, Zhao W Z, Guo L, Liu G T, Yang Q Y. Inferring subsurface preferential flow features from a wavelet analysis of hydrological signals in the shale hills catchment. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2019WR026668.
- [4] 武亚楠, 张英虎, 张振明, 张明祥. 黄河三角洲湿地植物根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2021, 57(1): 69-75.
- [5] 彭旭东. 喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土流失过程及特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [6] Hopp L, Glaser B, Klaus J, Schramm T. The relevance of preferential flow in catchment scale simulations: calibrating a 3D dual-permeability model using DREAM. *Hydrological Processes*, 2020, 34(5): 1237-1254.
- [7] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势. 生态学报, 2006, 26(1): 231-243.
- [8] Liu Y, Zhang Y H, Xie L M, Zhao S Q, Dai L Y, Zhang Z M. Effect of soil characteristics on preferential flow of *Phragmites australis* community in Yellow River delta. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107486.
- [9] 骆紫藤. 华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [10] Wiekenkamp I, Huisman J A, Bogaen H R, Lin H S, Vereecken H. Spatial and temporal occurrence of preferential flow in a forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 139-149.
- [11] Yao J J, Cheng J H, Sun L, Zhang X, Zhang H J. Effect of antecedent soil water on preferential flow in four soybean plots in southwestern China. *Soil Science*, 2017, 182(3): 83-93.
- [12] 彭韬, 周长生, 宁茂岐, 付磊, 戴德求, 王世杰. 基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究. 第四纪研究, 2017, 37(6): 1262-1270.
- [13] 夏银行, 黎蕾, 邓少虹, 陈香碧, 何寻阳, 吴金水, 苏以荣. 基于探地雷达的喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布探测. 水土保持通报, 2016, 36(1): 129-135.
- [14] 罗古拜. 基于探地雷达的矿区重构土壤典型物理性质探测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [15] 周广行. 基于 GPR 技术的陕北黄土区河北杨粗根分布特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [16] 梁小龙. 应用电阻率层析成像和探地雷达技术探测树木根系分布[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2016.
- [17] 童亮. 基于探地雷达的毛竹竹鞭直径估算及生物量研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [18] Bo I D, Klotzsche A, Schaller M, Ehlers T A, Kaufmann M S, Espoz J P F, Vereecken H, van der Kruk J. Geophysical imaging of regolith in landscapes along a climate and vegetation gradient in the Chilean coastal cordillera. *CATENA*, 2019, 180: 146-159.
- [19] 李胜龙, 易军, 刘目兴, 张君, 杨燕, 张海林. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究. 土壤学报, 2018, 55(5): 1131-1142.
- [20] 盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究. 土壤, 2012, 44(1): 144-148.
- [21] 崔喜红, 陈晋, 沈金松, 曹鑫, 陈学泓, 朱孝林. 基于探地雷达的树木根径估算模型及根生物量估算新方法. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(2): 243-252.
- [22] 陈晓冰, 吴晗, 姜波, 韦灵, 郭义选. 广西岩溶区稻田土壤优先流的空间分布. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4099-4108.
- [23] 朱钊岑, 刘冰, 刘婵, 司瑞. 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征. 生态学报, 2020, 40(12): 3979-3990.
- [24] 陈姣. 基于土箱模拟的花岗岩红壤优先流研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [25] 王发, 付智勇, 陈洪松, 王克林. 喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征. 水土保持学报, 2016, 30(1): 111-116.
- [26] 邵一敏, 赵洋毅, 段旭, 王克勤, 陈婷婷, 万艳萍. 金沙江干热河谷典型林草地植物根系对土壤优先流的影响. 应用生态学报, 2020, 31(3): 725-734.
- [27] Zhang Z B, Zhou H, Zhao Q G, Lin H, Peng X. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. *Geoderma*, 2014, 228-229: 114-121.
- [28] Kung K J S, Donohue S V. Improved solute-sampling protocol in a sandy vadose zone using ground-penetrating radar. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1543-1545.
- [29] Li G, Lin H, Fan B H, Nyquist J, Toran L, Mount G J. Preferential flow through shallow fractured bedrock and a 3D fill-and-spill model of hillslope subsurface hydrology. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 430-442.
- [30] 王萍. 探地雷达检测土壤紧实性的实验研究和信号反演[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.