

永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素^①

朱美菲^{1,2}, 程金花^{1,2*}

(1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2 国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为探究永定河岸坡缓冲带不同护岸植被覆盖下土壤水分入渗状况及植被根系对其影响, 为区域河岸带生态修复和水资源保护提供参考, 选取永定河流域典型护岸植被柳树林、荆条林、狗尾草地为研究对象, 通过亮蓝染色法结合 Photoshop、Image Pro6.0 等图像处理技术, 基于分形维数和多指标评价法定量评价了优先流发育程度, 并探讨了不同植被根系对优先流的影响。结果表明: ①研究区 3 种植被类型覆盖地土壤均存在水分优先入渗现象, 土壤染色面积比随土层深度增加而逐渐减小, 柳树林地平均染色面积比(38.32%)最大, 为荆条林地和狗尾草地的 1.11 倍和 1.37 倍。狗尾草地的长度指数、优先流分数均显著低于柳树林地($P < 0.05$), 3 种植被覆盖地基质流深度无显著差异。②以优先流评价指数和分形维数评价优先流发育程度的结果呈一致, 为柳树林地>荆条林地>狗尾草地, 柳树林地的湿润锋迹线破碎化程度最高, 优先流发育最显著。③有机质、非毛管孔隙度和根长密度对水分入渗均具有显著影响, 总根长密度、非毛管孔隙度与染色面积比呈显著正相关, ≥ 1 mm 根系根长密度、有机质含量与分形维数呈显著正相关。3 种植被覆盖地染色面积比和根长密度关系曲线拟合较好。总之, 在外界条件相同的情况下, 柳树林地水分优先入渗现象最明显; 植物根系的径级、密度对优先流的发育具有显著影响, ≥ 1 mm 根系越丰富优先流现象越明显, 而径级 < 1 mm 的根系主要促进表层土壤水分均匀入渗。

关键词: 优先流; 多指标综合评价法; 染色示踪; 分形维数; 根长密度

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Soil Water Infiltration and Influencing Factors of Typical Revetment Vegetation in Yongding River

ZHU Meifei^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2*}

(1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, State Forestry Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study soil water infiltration under different revetment vegetation to provide references for regional riparian ecological restoration and water resources protection, three typical vegetation in the slope vegetation buffer zone of the Yongding River basin, including *Willow*, *Vitex* and *Setaria* were selected, dye morphology were studied by combining bright blue staining method with the software of Photoshop, Image Pro6.0. The development degree of priority flow was quantitatively evaluated based on fractal dimension and multi-index evaluation method, and the influences of different vegetation roots on priority flow was discussed. The results showed that water preferential infiltration occurred in the soils under the three vegetation, the ratio of soil stained area (D_c) decreased gradually with the increase of soil depth, average D_c (38.32%) was the largest under *Willow*, which was 1.11 and 1.37 times of *Vitex* and *Setaria*, the length index and preferential flow fraction were significantly lower under *Setaria* than those of *Willow* ($P < 0.05$), no significant difference was found in the depth of substrate flow under the three vegetation. The results of the priority flow evaluation index (P_{FI}) and fractal dimension (F_D) were consistent in the order of *Willow* > *Vitex* > *Setaria*, the wet front line fragmentation of *Willow* was the highest, and the priority flow phenomenon was the most obvious. Organic matter, non-capillary porosity and root length density significantly influenced water infiltration, the total root length density and non-capillary porosity were significantly positively correlated with D_c , F_D was significantly positively correlated with roots ≥ 1 mm and organic matter, and D_c was well fitted with root length density. In conclusion, under the same

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32071839)资助。

* 通讯作者(jinhua_cheng@126.com)

作者简介: 朱美菲(1999—), 女, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail:meifei_zhu@163.com

external conditions, *Willow* priority flow degree was greater, the diameter class and density of plant roots significantly influenced the development of preferential flow, and the more abundant roots ≥ 1 mm, the more obvious the preferential flow phenomenon was, while the roots with diameter class < 1 mm mainly promoted the uniform infiltration of surface soil water.

Key words: Preferential flow; Multi-index evaluation method; Dyeing tracer; Fractal dimension; Root length density

优先流是一种特殊的土壤水分运动形式^[1],是指水流和溶质通过大孔隙、虫洞、根孔等优势通道在土壤中快速运移的现象^[2],对土壤水分入渗的促进、地表径流的减少、森林水文和区域水资源的控制具有重要影响。优先流的发育特征、发育程度及调控因素是生态水文学科共同的研究热点与难点。

有研究提出,用染色面积比的变异系数来评估优先流的发育程度,变异系数越低,优先流程度越高^[3]。郭会荣等^[4]进行室内土柱穿透试验时,采用穿透曲线延展量与水动力弥散作用及两区作用引起的延展量的比值 PFSP 作为指标,以指示优先流的发育程度。张东旭等^[5]在进行室外染色试验的基础上,采用多指标综合评价法计算优先流评价指数 P_{FI} 。优先流的发育受植被、地形、土壤性质等多种因素控制。研究表明,在黄土丘陵区不同恢复年限耕地的土壤优先流呈现出不同的发育程度^[6];在西南山区^[7],土壤的孔隙特性、质地和盐基离子的共同作用成为影响优先流发育的关键因素;在华北土石山区^[8],土层中根系的空间分布对于优先流的发育不可忽视。然而,关于植被根系径级和根长密度对优先流影响的研究并不充分,对于岸坡植被优先流的研究更是欠缺。

永定河流域作为京津冀重要的水源涵养区,发挥了生态屏障、生态廊道和水土保持等重要作用,区域的修复治理对于平原区特别是周围城区的生态具有重要意义。扦插柳枝护岸^[9]在永定河生态修复中具有悠久历史,是最常见的柔性护岸技术;荆条^[10]和狗尾草^[11]根系都具有较好的固土能力,能够发挥良好的水土保持效益,也是永定河植物护坝所选用的常用植物类型。因此,本研究选取柳树、荆条、狗尾草为主要植被类型,通过染色示踪试验获得典型植被覆盖地土壤水分入渗特征,采用多指标评价法和分形维数对样地土壤优先流发育程度进行评价,明确永定河岸坡植被发育土体的土壤水分运动特征,探究不同植被根系对优先流发育的影响,以为水资源的保护和合理利用、河岸带的生态修复提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于永定河平原南部,在永定河综合治理

与生态修复布局中属于平原城市段,主要进行生态补水和河岸带生态修复,地理坐标为 $39^{\circ}30'N \sim 41^{\circ}20'N$, $112^{\circ}14'E \sim 117^{\circ}45'E$,流域面积为 $47\ 016\ km^2$ 。该区域属于温带大陆性季风气候,降水量的年际变化差异较大。永定河河道部分主要以地上河为主,河岸以沙质土为主,河心土壤多为松沙土。永定河平原段河岸带湿地植物分布具有广域性,乔木多为人工栽植(30年以上),河岸带主要护岸植被包括柳树(*Willow*)、侧柏(*Sabina chinensis*)、荆条(*Vitex negundo*)、铁扫帚(*Indigofera bungeana*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等。

1.2 样地选取

通过实地考察,在研究区选取具有典型代表性的护岸护坡植被柳树、荆条和狗尾草覆盖地设置样地,每种植被类型样地设置 3 个样方,柳树林地样方为 $20\ m \times 20\ m$,荆条林地和狗尾草地样方为 $5\ m \times 5\ m$,在每个样方内选择 3 个试验点开展染色示踪试验。

1.3 染色示踪试验

试验时,首先对样地进行简单的地表清理和平整,防止地表植物、枯落物等对试验造成影响。且亮蓝染色示踪观测剖面一般选择在 3~4 株相邻木的中心且相对平坦的位置,防止植物粗大根系影响土壤染色结果。根据双环入渗原理,将长 \times 宽 \times 高为 $90\ cm \times 90\ cm \times 50\ cm$ 和 $70\ cm \times 70\ cm \times 50\ cm$ 的 PVC 板框埋入样地 30 cm,地上部分 20 cm,分别作为双环的外环和内环(图 1)。其次,使用 12.5 L 浓度为 4 g/L 的亮蓝作为染色示踪剂以 150 mL/min 的速度喷洒于土壤表面(模拟当地 24 h 大雨累计降雨量 25 mm)。喷洒结束后,待表层染色溶液完全入渗后覆盖塑料薄膜,覆盖时间不少于 24 h,以保证溶液充分入渗。最后,以横向 10 cm 距离挖掘土壤剖面(图 1),使用高像素数码相机拍摄垂直剖面染色图像,结合测量标尺和灰阶比色卡校正色彩,减少明暗不均带来的误差。

1.4 染色图像处理

根据现场卷尺及比例尺调整图片为 $1\ 800 \times 1\ 800$ 像素,再使用 Photoshop 对图片进行几何校正、光照校正和颜色替换(图 2),并采用 Image-Pro 6.0 进行数值转换,输出 Excel 格式文件用于后续分析。采用 Matlab 2021 中的 FractalFox 工具计算分形维数,采

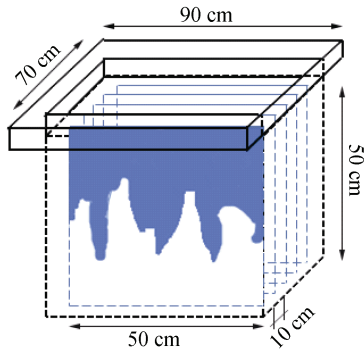


图 1 试验装置及土壤剖面取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus and soil profile sampling

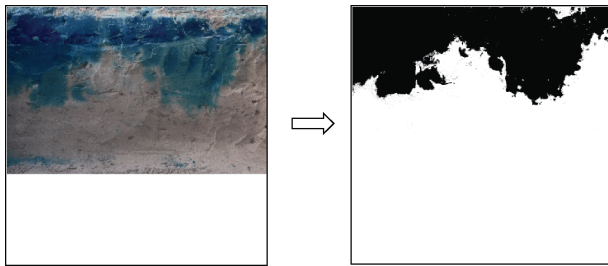


图 2 染色图像处理

Fig. 2 Image processing

用 Excel 2010、Origin pro 2021 进行数据分析和作图。

1.5 土壤根系采样及理化性质测定

染色完成后对土壤剖面进行挖掘的同时分层收集植物根系，将同一土层深度根系装袋，带回实验室进行分析，并划分根系径级。计算每层土体内不同径级根系的根长密度。

为避免土样采集影响染色试验，在染色样地旁挖掘阶梯状剖面进行分层取样，按照 10 cm 为一层，每层取 3 个环刀(规格 100 cm³)样用于测定土壤容重等物理性质，并分层采集散状土用于室内有机质等土壤化学指标的测定。土壤容重、土壤孔隙度采用环刀法测定，土壤质地采用激光粒度分析仪测定，土壤有机质含量采用重铬酸钾稀释热法测定^[6]。样地土壤理化性质见表 1。

1.6 优先流特征指标

1)土壤垂直剖面总染色面积比 D_c ^[12]:

$$D_c = \frac{D}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中： D_c 为土壤垂直剖面染色面积比(%)； D 为土壤垂直剖面总染色面积(cm²)； S 为土壤垂直剖面总面积(cm²)。

表 1 3 种植被类型土壤理化性质

Table 1 Soil physiochemical properties of three vegetation soils

样地	土层 (cm)	黏粒 (% , V/V)	粉粒 (% , V/V)	砂粒 (% , V/V)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙度 (%)	有机质 (g/kg)	容重 (g/cm ³)
狗尾草地	0~10	4.05 ± 1.80 a	13.27 ± 2.94 a	82.68 ± 4.09 a	38.81 ± 2.27 a	4.79 ± 1.67 a	1.84 ± 0.62 b	1.50 ± 0.06 a
	10~20	1.01 ± 1.40 a	6.81 ± 3.28 a	92.18 ± 4.67 a	39.92 ± 2.02 a	3.89 ± 1.83 a	1.54 ± 0.67 b	1.51 ± 0.06 a
	20~30	6.34 ± 2.27 a	18.97 ± 4.91 a	74.70 ± 7.18 a	40.63 ± 1.49 a	5.41 ± 1.09 a	2.21 ± 0.53 b	1.46 ± 0.03 a
	30~40	3.21 ± 0.91 a	15.07 ± 2.23 a	81.72 ± 3.13 a	31.05 ± 2.08 a	10.70 ± 2.14 a	1.39 ± 0.65 b	1.42 ± 0.07 a
	40~50	0 a	7.76 ± 2.18 a	92.24 ± 3.01 a	39.56 ± 1.99 a	5.74 ± 1.16 a	1.87 ± 0.65 b	1.48 ± 0.07 a
荆条林地	0~10	1.46 ± 1.04 a	9.79 ± 2.89 a	88.75 ± 3.48 a	33.58 ± 4.60 b	7.26 ± 1.51 a	2.39 ± 0.39 b	1.48 ± 0.08 a
	10~20	1.80 ± 1.30 a	8.96 ± 2.61 a	89.24 ± 3.29 a	32.39 ± 2.42 b	6.97 ± 1.49 a	2.24 ± 0.42 b	1.57 ± 0.07 a
	20~30	1.23 ± 0.60 a	5.75 ± 2.11 a	93.02 ± 2.71 a	32.36 ± 1.24 b	6.06 ± 1.28 a	1.58 ± 0.93 b	1.57 ± 0.07 a
	30~40	2.66 ± 0.32 a	10.16 ± 0.87 a	97.19 ± 1.05 a	33.90 ± 3.68 b	5.55 ± 1.24 a	1.06 ± 0.52 b	1.52 ± 0.03 a
	40~50	-	-	-	32.52 ± 3.63 b	9.53 ± 0.84 a	1.21 ± 0.52 b	1.53 ± 0.10 a
柳树林地	0~10	1.97 ± 0.33 a	9.54 ± 1.44 a	88.50 ± 1.73 a	42.17 ± 4.10 a	7.54 ± 2.71 a	6.79 ± 0.88 a	1.38 ± 0.07 b
	10~20	2.29 ± 1.03 a	10.43 ± 4.17 a	87.28 ± 5.19 a	41.31 ± 8.21 a	11.66 ± 5.25 a	5.76 ± 1.89 a	1.29 ± 0.24 b
	20~30	2.61 ± 1.22 a	11.15 ± 5.06 a	86.24 ± 6.28 a	38.09 ± 1.83 a	7.80 ± 2.48 a	3.86 ± 1.76 a	1.38 ± 0.10 b
	30~40	0.68 ± 0.39 a	4.17 ± 1.58 a	95.15 ± 1.97 a	37.31 ± 2.96 a	6.55 ± 0.37 a	3.87 ± 1.03 a	1.41 ± 0.01 b
	40~50	1.45 ± 0.55 a	8.59 ± 2.24 a	89.96 ± 2.79 a	35.02 ± 2.14 a	6.45 ± 2.48 a	3.17 ± 1.10 a	1.46 ± 0.07 b

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类型相同土层之间差异显著($P < 0.05$)。黏粒、粉粒、砂粒的粒径分别为 < 0.002 、 $[0.002, 0.050]$ 、 $(0.050, 2.000)$ mm。

2)基质流深度 U_{Fr} ^[12]：土壤基质流区域是指土壤上层染色面积比大于 80% 的区域，该区域入渗过程主要为基质流，其入渗深度称为基质流入渗深度。

3)优先流分数 P_{Fr} ^[13]：

$$P_{Fr} = \left(1 - \frac{\omega \times U_{Fr}}{S} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中： P_{Fr} 为优先流分数(%)； ω 为土壤剖面水平宽度 (cm)； U_{Fr} 为基质流深度(cm)； S 为土壤垂直剖面总面

积(cm^2)。

4) 长度指数 $Li^{[14]}$:

$$Li = \sum_{i=1}^n |D_{c(i+1)} - D_{ci}| \quad (3)$$

式中: D_{ci} , $D_{c(i+1)}$ 为土壤剖面第 i 层, $i+1$ 层对应的染色面积比(%); n 为层数。

1.7 优先流评价指数

优先流综合评价指数(P_{Fi})采用多指标综合评价法^[12], 选取土壤垂直剖面总染色面积比、基质流深度、优先流分数和长度指数 4 项优先流特征指标, 采用极差法^[15]对指标进行无量纲标准化处理, 以消除不同指标间的差异。

1.8 分形维数

分形模型在土壤水分扩散方面的运用已经十分广泛^[16], 湿润锋迹线不规则、破碎复杂无序的特征符合分形特征。本研究采用 Matlab 2021 中的 FractalFox 工具包基于盒子法(box-counting)计算, 选择边长为 ε 的正方形盒子, 覆盖湿润锋迹线, 记录覆盖到的盒子数为 $N(\varepsilon)$, 当缩小盒子尺寸使之无限接近于 0 时得到分形维数 F_D , 计算公式如下:

$$F_D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}} \quad (4)$$

若 $F_D=1$ 时湿润锋为直线, 此时入渗均匀, 不存在优先流现象; 理论上湿润锋迹线的分形维数在 1~2, 且在此范围内 F_D 越大, 优先流发育程度越高。

2 结果与分析

2.1 典型植被类型土壤优先流染色图像及特征指标

土壤剖面染色图可以直观地描述优先流的运动轨迹, 经过二值化处理后染色情况更加清晰。由于剖面较多, 本文每种植被类型覆盖的土壤各选取垂直剖面第二层作为典型剖面进行分析, 如图 3 所示。

土壤中的水流在开始时呈现整体均匀向下入渗的状态, 随着土层深度的增加, 柳树林地土壤染色形态从 8 cm 深度左右开始分化, 左右都形成了条带状染色路径, 在 10~25 cm 深度时, 染色图像部分区域出现了横向连通, 说明在该深度范围内侧向流较为发达。荆条林地土壤的基质流深度约为 12 cm, 12 cm 以下染色区域呈现出斑块状, 并存在一些断离式零散分布的细小染色斑块。狗尾草地在 0~12 cm 深度呈现整体均匀下渗, 12 cm 后开始分化出两条较为明显的指状优先流路径, 最大染色深度达 33 cm。

总体来看, 平均染色面积比随土壤深度的增加而下降。3 种植被类型土壤的平均染色面积比分别为: 柳树林地(38.32%)>荆条林地(34.26%)>狗尾草地

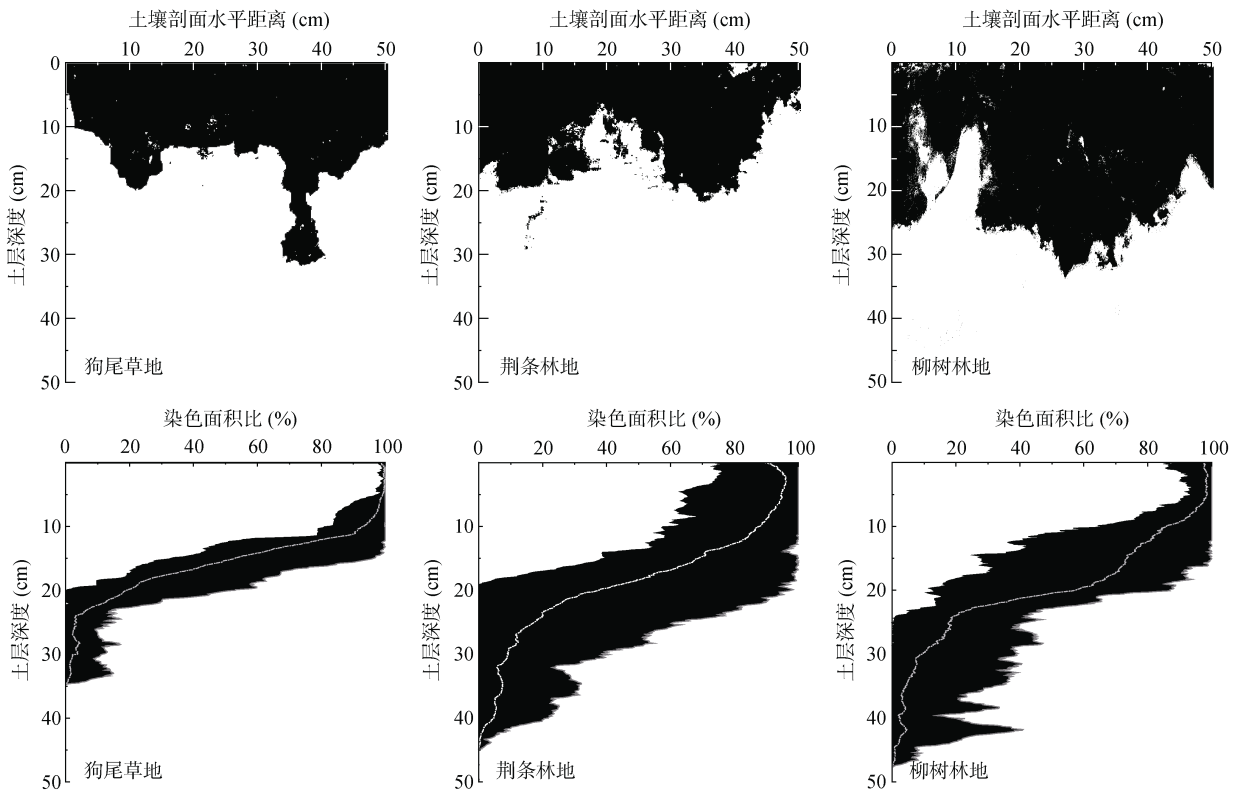


图 3 3 种植被类型土壤染色形态及染色面积比

Fig. 3 Staining morphology and staining area ratio of three vegetation soils

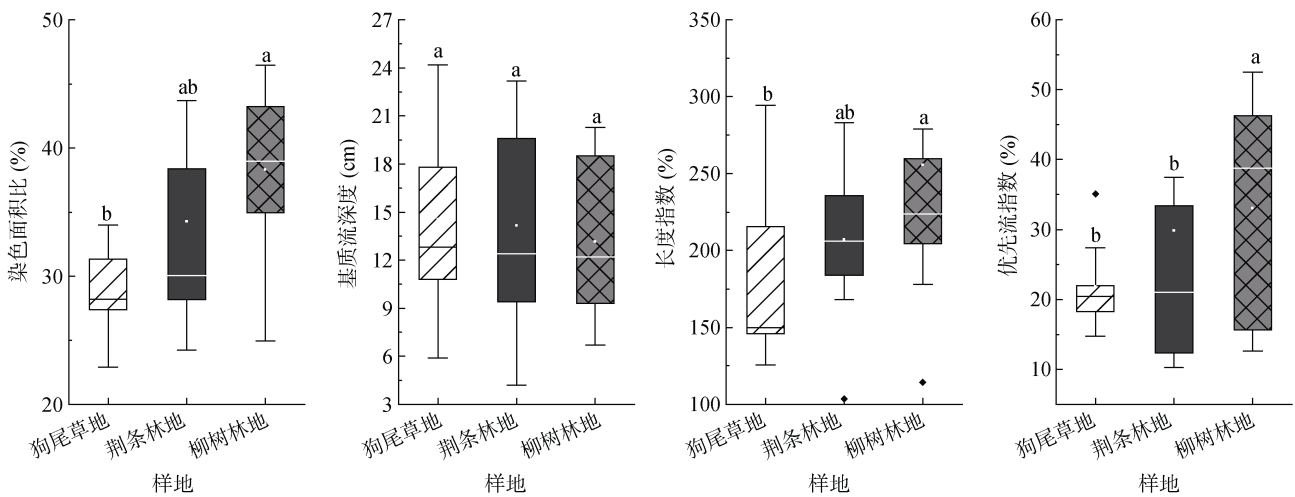
(27.95%)。狗尾草地土壤在 15~25 cm 深度范围内染色面积比下降较快,而从曲线斜率可以看出,柳树林地土壤下降速度大于狗尾草地,说明该深度范围内优先流发育明显。3 种植被类型土壤在 25 cm 深度后,染色面积比的下降速度均小于 25 cm 深度以内土层;超过一定深度后,植被覆盖类型对于染色面积大小的影响不显著,但对于染色深度的影响一直存在,染色深度柳树林地(46.3 cm)>荆条林地(44.3 cm)>狗尾草地(34.7 cm)。

由图 4 可知,4 项特征指标中,染色面积比(D_c)、长度指数(Li)、优先流指数(P_{Fr})呈现相同的排序,由大到小表现为柳树林地、荆条林地、狗尾草地。长度指数可以反映基质流与优先流的差异性,其数值越大,优先流发育程度越高^[14]。荆条林地和柳树林地的长度指数最高,分别是狗尾草地(142.93%)的 1.67 倍和 1.70 倍,可见柳树林地土壤的空间异质性较大,土壤连通性孔隙较多^[17]。优先流分数是优先流占总渗透量的比值,一定程度反映了优先流在土壤中的发

生程度,其值越大表明优先流程度越明显^[14]。柳树林地优先流分数显著大于荆条林地和狗尾草地($P<0.05$),平均优先流分数达 33.59%。基质流入渗深度是能够描述优先流在垂直剖面运动轨迹的易得参数,3 种植被类型土壤基质流深度差异不显著($P>0.05$)。由此可见,采用单项指标评价优先流发育程度时,评价的最终结果受指标选取的影响而不同。

2.2 典型植被类型土壤优先流评价指数及分形维数

采用多指标综合评价法对 3 种典型植被类型土壤优先流程度进行评价,各指标的均值、均方差和权重系数见表 2。4 项指标中除基质流深度与优先流发育负相关外,即基质流深度越大说明优先流发育越不明显,其他指标均为正相关。在计算优先流评价指数时,染色面积比和优先流分数的权重最高,但 4 个指标参数的权重分布较为均匀,说明优先流分布特征指标的差异化较大^[18]。对 3 种植被类型土壤优先流发育程度的评价结果显示(表 3),土壤优先流评价指数 P_{Fr} 柳树林地(0.5748)>荆条林地(0.4268)>狗尾草地(0.2292)。



(图中不同小写字母表示各样地差异显著($P<0.05$))

图 4 3 种植被类型土壤优先流特征指标箱线图

Fig. 4 Box-line diagrams of priority flow feature indexes of three vegetation soils

表 2 3 种植被类型土壤优先流特征指标均值、均方差、权重系数

Table 2 Mean values, mean square errors and weight coefficients of priority flow characteristic indexes of three vegetation soils

指标	均值	均方差	权重系数
垂直剖面总染色面积比 D_c	0.38	0.35	0.28
优先流分数 P_{Fr}	0.39	0.34	0.27
基质流深度 U_{Fr}	0.57	0.25	0.20
长度指数 Li	0.34	0.32	0.25

湿润锋迹线是水流在运动过程中,下层干土与湿润带末端的界面。由于水分在土壤各处流动的速度存在差异性,剖面上的湿润锋迹线出现不规则的弯曲起伏。而分形维数则可以反映图像的复杂程度,通过计

算湿润锋迹线的分形维数可以表征土壤水分入渗的不均匀程度,从而说明优先流的发育程度^[12]。一条分形曲线的分形维数一般介于 1~2,在这个范围内分形维数越大,曲线越不规则越复杂^[19]。3 种植被类

型样地的湿润锋迹线分形维数在 1.227 0 ~ 1.335 8, 符合理论范围。其中, 柳树林地的优先流湿润锋迹线

分形维数高于狗尾草地, 湿润锋迹线波动程度大, 更为复杂和破碎。

表 3 3 种植被类型土壤湿润锋分形维数及优先流评价指数

Table 3 Fractal dimension (F_D) and P_{FI} of three vegetation soils

样地	样地编号	分形维数 F_D	F_D 均值	优先流评价指数 P_{FI}	P_{FI} 均值
狗尾草地	1	1.232 5	1.234 3	0.283 4	0.574 8
	2	1.227 3		0.748 4	
	3	1.243 0		0.692 4	
荆条林地	1	1.284 5	1.253 8	0.334 1	0.426 8
	2	1.227 0		0.753 2	
	3	1.250 0		0.193 0	
柳树林地	1	1.248 3	1.303 1	0.266 7	0.229 2
	2	1.335 8		0.249 5	
	3	1.325 3		0.171 3	

2.3 典型植被类型的根长密度

由图 5 可知, 随土层深度增加, 3 种植被的根长密度均呈减小趋势, 80% 以上的根系集中分布在 0 ~ 20 cm 土壤中, 狗尾草和荆条根系分布在 0 ~ 30 cm, 柳树根系在 0 ~ 50 cm 土层内均有分布。如表 4 数据显示, 0 ~ 50 cm 土层内 3 种植被的总根长密度为 0.539 8 ~ 2.471 2 cm/cm³, 柳树总根长密度显著低于

狗尾草与荆条。为进一步对比不同植被的根系状况, 将根系分为 ≥1 mm 径级和 <1 mm 径级。总体来看, <1 mm 径级的根系在土壤中的分布更为丰富, 且随土层深度的增加根长密度降低。3 种植被根长密度的差异主要体现在 0 ~ 20 cm 土层中 <1 mm 的根系数目, 狗尾草根系根长密度达到 2.228 1 cm/cm³, 而在 20 ~ 50 cm 土壤中, 荆条根长密度(0.121 8 cm/cm³)

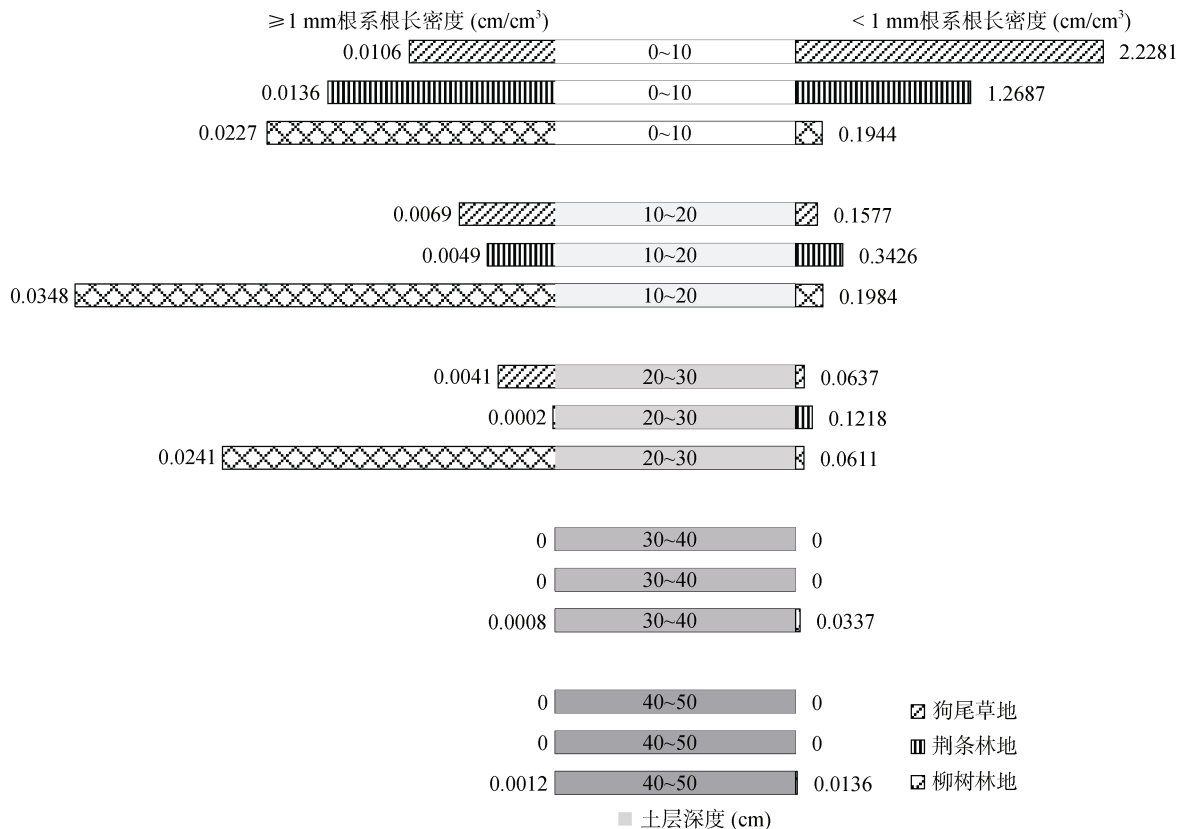


图 5 不同植被根长密度随土层深度的分布

Fig. 5 Distributions of root length density of different Vegetations with soil depth

表 4 不同土层植被根长密度
Table 4 Density of root length of three vegetations in different soil layers

样地	<1 mm 根长密度(cm/cm ³)		≥1 mm 根长密度(cm/cm ³)		总根长密度(cm/cm ³)
	0~20 cm	20~50 cm	0~20 cm	20~50 cm	
狗尾草地	2.228 1 ± 0.439 7 a	0.0637 ± 0.0782 a	0.010 6 ± 0.012 9 a	0.004 1 ± 0.007 2 a	2.471 2 ± 0.407 1 a
荆条林地	1.268 7 ± 0.332 5 b	0.1218 ± 0.1167 a	0.013 6 ± 0.009 1 a	0.000 2 ± 0.000 3 a	1.751 7 ± 0.080 9 a
柳树林地	0.194 4 ± 0.088 5 c	0.0769 ± 0.1176 a	0.022 7 ± 0.008 6 a	0.024 8 ± 0.017 5 a	0.539 8 ± 0.255 4 b

注: 表中数据为平均值 ± 标准差, 同列不同小写字母表示相同土层不同植被之间差异显著($P < 0.05$)。

最大。柳树 ≥ 1 mm 根系的根长密度在 3 种植被中最大, 且随土层深度增加先增加后降低, 在 10~20 cm 土层中最为丰富。

3 讨论

3.1 优先流特征指标

对 3 种不同植被类型土壤的染色图像分析发现, 染色面积比随土壤深度的增加总体逐渐减小, 在局部深度土壤染色面积比有所回升, 局部区域较高的孔隙度能够提高土壤通透性^[20], 使染色溶液能够侧向移动, 导致染色面积比短暂反弹。与陈晓冰等^[13]对农地土壤研究不同的是, 本研究中优先流出现的深度大于农地土壤。根据土壤质地分类三角坐标图, 柳树林地和狗尾草地土壤属于壤质砂土, 荆条林地土壤属于砂土。土壤砂粒含量在 85% 以上, 具有良好的通气透水性, 相比于壤土, 染色溶液能够较为快速均匀地下渗^[21], 因此基质流深度较大, 染色也更为均匀。虽然本研究中入渗量和土壤性质与张建中等^[22]的研究存在差异, 但均能发现乔木林土壤水流垂直运动的非均匀性大于灌木林和草地土壤。

3.2 分形维数和多指标综合评价法

对单项指标分析时发现, 仅通过一项指标评价优先流的发育状况时, 由于所选取的指标不同, 得出的结果会存在一定差异, 而采用多指标评价法有效避免了单一指标评价的弊端, 能够通过优先流评价指数直接对比不同样地优先流发育程度。同时, 由于野外试验中数码影像所记录的示踪剂染色的优先流湿润锋迹线具有明显、复杂、破碎和不规则的分形特征, 通过分形维数刻画染色形状的不规则程度也成为描述优先流的定量化指标^[23]。本研究结果显示, 在入渗水量相同的条件下, 柳树林地土壤湿润锋波动最明显, 不规则程度最高, 分形维数最大, 水分入渗在水平方向上各个位置所能达到的最大深度参差不齐^[12], 与采用多指标综合评价法计算的优先流评价指数呈现一致性。由此可见, 分形维数对于优先流发育程度的评价结果具有参考意义。同时, 在进行相关分

析时发现(表 5), 多指标评价法得出的优先流评价指数与土壤质地、根系等各因素的相关性, 与分形维数与各因素的相关性呈现高度一致性, 但均低于分形维数与各因素相关性。这一方面说明分形维数与多指标综合评价法对于评价优先流发育程度均适用, 另一方面也揭示了均方差决策法在进行数据标准化时, 使数据平滑, 削弱了各项指标之间的差异^[5]。

表 5 优先流特征指标的相关性
Table 5 Correlation coefficients of preferential flow parameters

	分形维 优先流评		染色面积比 D_c		
	数 F_D	价指 P_{Fr}	狗尾草地	荆条林地	柳树林地
≥1 mm 根长密度	0.68*	0.50	0.82*	0.77*	0.66
<1 mm 根长密度	-0.78*	-0.66			
有机质	0.71*	0.61		0.62	
非毛管孔隙度	0.48	0.56		0.83*	
容重	-0.62	-0.35		-0.35	
砂粒	-0.61	-0.12		0.23	

注: 表中计算根长密度和染色面积比的相关系数时, 没有区分 <1mm 和 ≥1mm 根系, 使用的是总根长密度; 计算土壤性质与染色面积比的相关系数时, 不区分植被类型, *表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关。

3.3 优先流影响因素

植物根系对优先流的形成具有重要影响^[24]。曹丹妮等^[25]的研究表明植物根系极大影响草地和乔灌混合林地优先流的发生发展, 而对针叶林地的影响较小。Lv 等^[26]发现根长密度和根重密度显著影响煤矿排土场优先流的形成和发展。侯芳等^[27]发现藤本植被的土壤浅层根系发达, 导致土壤孔隙通道异质性大, 为优先流的发生创造了良好的条件。通过相关性分析发现, 植物根长密度与染色面积比呈显著正相关, 密集根系对于水分入渗起到促进作用, 尤其是在狗尾草地和荆条林地中更为显著($P < 0.05$)。结合各样地的根系分布情况, 0~20 cm 土层内狗尾草地中根径 < 1 mm 的根系最为丰富。由于狗尾草根系在第一次分支后就不再有分支^[10], 导致浅层土壤根系密度大, 深层土壤中根系分布少,

为浅层土壤水分提供了运移路径,且丰富的根系使孔隙的连通性更好,促使水分能够均匀入渗,在土壤浅层形成基质流区域。

本研究发现, ≥ 1 mm 根系根长密度与分形维数显著正相关,柳树林地中较为发育的优先流是水分通过该类根系(≥ 1 mm)提供的快速通道移动而形成的;而 < 1 mm 的细小根系主要在浅层土壤中,对水分均匀下渗起促进作用。狗尾草和荆条根系大多分布浅,根径小(< 1 mm),虽然浅层土壤中(0 ~ 20 cm)根长密度高,但这并未对优先流的发展起明显促进作用,浅

层小径级根系(< 1 mm)主要促进水分的均匀入渗,进而推动基质流的形成。有研究发现, ≥ 1 mm 的根系才是优先流发生发展的重要推动因素,而根系过粗(> 10 mm)会破坏土壤稳定的团聚体结构^[28],进而影响优先路径发育。为探究不同植物根系对优先流的影响,本研究分别建立了狗尾草、荆条、柳树根长密度与染色面积比的拟合关系(图 6),狗尾草和荆条根长密度与染色面积比呈对数关系, R^2 均大于 0.8,柳树林地根长密度与染色面积比呈幂函数关系, R^2 为 0.453,拟合结果较为理想。

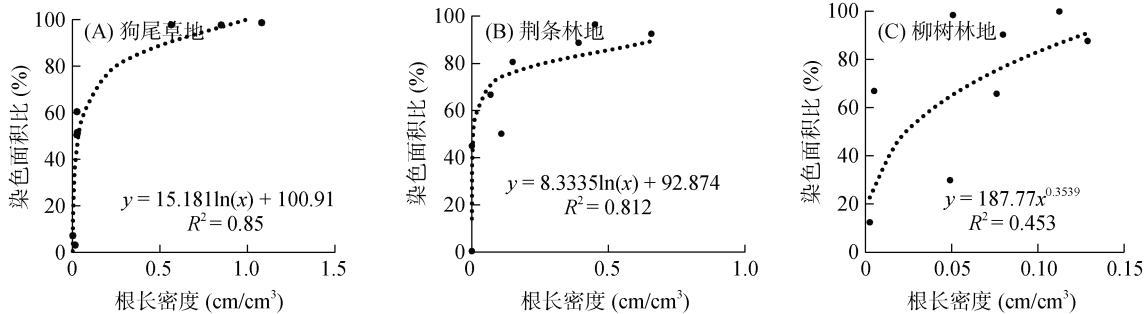


图 6 3 种植被覆盖土壤染色面积比随根长密度变化

Fig. 6 Soil stained area ratios under three vegetations varied with root length density

此外,有机质的积累促使水稳性团聚体的形成和土壤孔隙的稳定^[29],也起到丰富优先路径的作用。由于乔、灌、草根系在不同质地土壤剖面分布不同,导致土壤孔隙数量和孔隙连通性密度具有显著差异^[30]。土壤孔隙状况与土壤持水性能密切相关,总孔隙度小,土壤紧实,孔隙与基质的水分交换弱^[31]。非毛管孔隙在吸水后将水分快速运移下渗,而毛管孔隙水运动速度较慢,可以长时间保存^[32]。林地土壤入渗速度快,优先流发育显著,但持水性能差;草地土壤入渗速度慢而持水性能高^[33]。由此可见,狗尾草地土壤更易于储蓄水分,而柳树林地土壤更易于将水分传递至下层以补充地下水和调控河川径流,从而利于水源涵养^[32]。

4 结论

1) 3 种典型植被类型覆盖下土壤染色面积比随土层深度增加总体呈逐渐减小趋势,在局部深度有轻微波动,柳树林地土壤染色面积比分别是荆条林地和狗尾草地的 1.11 倍和 1.37 倍;长度指数和优先流指数均呈相同规律,同样地间基质流入渗深度无明显差异。

2) 多指标评价法和分形维数对于优先流发育程度评价的结果具有一致性。在入渗水量相同的条件下,3 种典型植被类型土壤的优先流评价指数大小为

柳树林地(0.574 8)>荆条林地(0.426 8)>狗尾草地(0.229 2),柳树林地的湿润锋迹线分形维数最大,湿润峰迹线最为破碎和复杂,优先流发育最显著。

3) 根长密度随土层深度增加而减小,根系对水分入渗的影响显著,丰富的根系有助于土壤水分入渗。 ≥ 1 mm 根系具有明显促进优先流发生和发育的效果, < 1 mm 根系主要在浅层土壤中起促进水分均匀入渗的作用,与基质流的形成有关。为防止水肥流失及土壤侵蚀,在岸坡生态修复及植被配置时,应从植被根系方面考虑合理搭配乔灌木。

参考文献:

- [1] Chen C F, Zou X, Singh A K, et al. Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113672.
- [2] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势[J]. 土壤, 2012, 44(6): 905-916.
- [3] 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.
- [4] 郭会荣, 靳孟贵, 王云. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 101-106.
- [5] 张东旭, 张洪江, 程金花. 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.

- [6] Wang R, Dong Z B, Zhou Z C, et al. Temporal variation in preferential water flow during natural vegetation restoration on abandoned farmland in the Loess Plateau of China[J]. *Land*, 2019, 8(12): 186.
- [7] 朱梦雪, 赵洋毅, 段旭, 等. 红河干热河谷林草地红壤中优先流的形态分布特征[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 9–16.
- [8] Luo Z T, Niu J Z, Zhang L, et al. Roots-enhanced preferential flows in deciduous and coniferous forest soils revealed by dual-tracer experiments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(1): 136–146.
- [9] 朱文星, 邓卓智. 简述永定河城市段的生态修复[J]. *水利科技与经济*, 2012, 18(2): 19–21, 37.
- [10] 段中奎, 杨元保, 王秋生. 野生荆条人工繁殖试验及效益研究[J]. *中国水土保持*, 1988(7): 29–31.
- [11] 李云鹏, 陈建业, 陈学平, 等. 五种护坡草本植物根系固土效果研究[J]. *中国水土保持*, 2021(1): 41–45, 5.
- [12] 孟凡旭, 王树森, 马迎梅, 等. 有机肥施用量对残塬沟壑区苹果园土壤优先流特征的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(6): 1272–1280.
- [13] 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.
- [14] Kan X Q, Cheng J H, Hu X J, et al. Effects of grass and forests and the infiltration amount on preferential flow in Karst regions of China[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1634.
- [15] van Schaik N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *CATENA*, 2009, 78(1): 36–47.
- [16] Pachepsky Y A, Giménez D, Crawford J W, et al. Conventional and fractal geometry in soil science[J]. *Developments in Soil Science*, 2000, 27: 7–18.
- [17] 姜波, 陈晓冰, 吴晗, 等. 基于色相分割的甘蔗地土壤优先流程度定量评价[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 50–57, 65.
- [18] 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.
- [19] He Z F, Zhang Y N, Guo Q C, et al. Comparative study of artificial neural networks and wavelet artificial neural networks for groundwater depth data forecasting with various curve fractal dimensions[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(15): 5297–5317.
- [20] Zhang D S, Dai Y, Wang L L, et al. Influence of living and dead roots of Gansu poplar on water infiltration and distribution in soil[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3593.
- [21] 贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 等. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 486–497.
- [22] 张建中, 姚晶晶, 张成梁, 等. 排矸场植被恢复初期不同植被类型土壤优先流特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(4): 165–172.
- [23] 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.
- [24] Germann P F, Lange B, Lüscher P. Preferential flow dynamics and plant rooting systems[M]//*Hydropedology*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 121–141.
- [25] 曹丹妮, 邸涵悦, 郭忠录, 等. 演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 99–107.
- [26] Lv G, Li J, Li Y X, et al. Preferential flow characteristics of reclaimed mine soils in a surface coal mine dump[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(6): 266.
- [27] 侯芳, 杨志, 程金花, 等. 永定河(北京段)滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 143–149.
- [28] 邵一敏, 赵洋毅, 段旭, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 725–734.
- [29] Xu L Y, Wang M Y, Shi X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1243–1250.
- [30] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1190–1201.
- [31] 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.
- [32] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 等. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 538–547.
- [33] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4844–4854.