

金沙江干热河谷活跃和稳定冲沟集水区土壤优先流特征

李志成¹, 赵洋毅^{1,2}, 王克勤^{1,2}, 段旭^{1,2}, 徐贵迁¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224;
2.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站,昆明 650224)

摘要:为揭示金沙江干热河谷冲沟集水区土壤优先流特征,以金沙江元谋干热河谷地区不同发育程度冲沟(活跃期、稳定期)集水区为研究对象,采用野外染色示踪和统计分析相结合的方法,通过图像处理技术,从野外染色图像中整合出相关 5 个优先流特征指标,并结合根系特征,对比分析土壤优先流差异规律。结果表明:(1)稳定期冲沟集水区在 0—15 cm 土层深度范围出现大面积的团块状染色,随后呈小枝状分布,染色区分布相对更加集中,活跃期染色呈整体状—团块状—枝状分布,表明活跃期冲沟集水区染色形态特征更加分化。(2)活跃期冲沟集水区的平均基质流深度、平均染色面积比、平均土壤染色斑块形状系数和优先流平均长度指数(20.53 cm,54.25%,24.94,592.46%)分别是稳定期冲沟集水区的 1.79,1.62,2.20,1.16 倍,表现为活跃期冲沟系统集水区优先流发生时间相对滞后,优先流发育程度更大,优先流空间异质性相对较强。(3)随土层深度增加,根重密度和根长密度均呈减小趋势,且二者与染色面积比均呈显著正相关关系($p<0.05$)。活跃期冲沟集水区各土层根重密度和根长密度均大于稳定期冲沟集水区。研究结果为揭示金沙江干热河谷冲沟集水区土壤优先流特征提供理论依据,同时为该地区生态恢复与水土保持工作提供参考和借鉴。

关键词:土壤优先流特征;染色示踪法;活跃和稳定冲沟集水区;金沙江干热河谷

中图分类号:S152.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)06-0119-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.016

Soil Preferential Flow Characteristics in Active and Stable Gully Catchment Areas of the Dry-hot Valleys of the Jinsha River

LI Zhicheng¹, ZHAO Yangyi^{1,2}, WANG Keqin^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, XU Guiqian¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224;

2.Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224)

Abstract: In order to reveal the characteristics of soil preferential flow in the catchment areas of gully systems in Yuanmou Dry-hot Valley, the catchment areas of gully systems with different development degrees (active and stable phases) were selected as the research objects in Yuanmou Dry-hot Valley of the Jinsha River, using a combination of field staining tracing and statistical analysis, five preferential flow indicators were integrated from the field staining images by image processing techniques, and combined with the root characteristics, the differences of soil preferential flow were analyzed. The results showed that: (1) In the gully catchment areas at stable stage, massive clump-like staining appeared in the depth range of 0—15 cm soil layer, and then it was distributed twig-like, and the distribution of staining areas were relatively more concentrated. In the active phases, the staining showed a monolithic-clumpy-branched distribution, indicating that the staining morphological characteristics in the active phases were more differentiated. (2) The mean matrix flow depth, the average staining area ratio, the average shape coefficient of staining patch and the mean length index of preferential flow (20.53 cm, 54.25%, 24.94 and 592.46%) in the active phases gully catchment areas was 1.79, 1.62, 2.20 and 1.16 times that in the stable phases, respectively. It

收稿日期:2022-04-10

资助项目:国家自然科学基金项目(42067005,31860235);云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-075);云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-215,YNWR-QNBJ-2019-226);国家林草局林业科技创新平台运行项目“云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地项目”(2020132550);云南省自然生态监测网络项目(2021-YN-13)

第一作者:李志成(1994—),在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:2300287011@qq.com

通信作者:赵洋毅(1980—),吉林农安人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与小流域环境综合治理研究。E-mail:yyz301@foxmail.com

showed that the occurrence time of preferential flow in the catchment areas of active gully was relatively late, the development degree of preferential flow was greater and the spatial heterogeneity of priority flow was relatively strong. (3) Both root weight density and root length density decreased with the increasing of soil depth, and both of them showed a significant positive correlation with staining area ratio ($p < 0.05$). The root weight density and root length density of each soil layer in the active gully catchment areas were greater than those in the stable phases. The results of the study provided theoretical basis for revealing the soil preferential flow characteristics of catchment areas of Yuanmou Dry-hot Valley of the Jinsha River, and also provided references and lessons for ecological restoration and soil and water conservation in this area.

Keywords: characteristics of soil preferential flow; dye tracing method; active and stable gully catchment; the Dry-hot Valley of the Jinsha River

金沙江元谋干热河谷气候干热,沟蚀发育强烈,土壤多为燥红土和变性土,降雨少而蒸发量大,其特殊的自然环境特点导致该地区水土流失严重,是植被恢复和生态治理极为困难的区域^[1]。有研究^[2]表明,土壤水分是限制干旱河谷地区植被恢复与重建的主要因子,明确其土壤水分入渗特征对提高植被恢复成效、缓解地力退化及保持生态系统的稳定具有重要的意义。因此,着重研究该区域土壤水分及溶质运移特征则显得尤为重要。

土壤优先流是指土壤水分沿着特定路径向下发生非稳定性渗流的现象,具有非稳定性、非平衡性、空间异质性等特点,其复杂的成因加上土壤本身的较强异质性,加深了通过土壤优先流来揭示土壤水文过程的难度^[3]。土壤优先流的发生可以减少地表径流,对地下水补给至关重要,同时也可以造成土壤中的养分流失、降雨型滑坡、地下水水质受污染、泥石流等自然灾害,因此研究优先流特征及影响因素对土壤侵蚀、植被恢复和地下水污染的治理有着重要意义。现阶段对土壤优先流发生和形成机理、形态和数量特征及影响因子等研究已受到广泛学者的关注。土壤理化性质的差异是导致优先流发育变化的重要原因,对干热河谷环境下优先流的形成及运动特征等研究^[4]表明,土壤大孔隙分布密集区更易发生优先流;也有研究^[5]表明,在其他条件相同的情况下,初始含水量高的土壤比初始含水量低的土壤更易产生大孔隙流;对不同降雨强度下优先流出流速率的数值模拟^[6]表明,优先流速率与降雨强度之比随着降雨强度的增加而减小;有研究^[7]表明,不同土地利用类型对土壤团聚体的稳定性、容重、孔隙度、含水量和饱和导水率均有不同程度的影响,进而对优先流产生影响;动物因素主要指土体中如蚂蚁、蝉蛻等土壤动物活动形成的孔道,成为快速导水的优先流通道,植物根系穿插挤压土壤、或者根系死亡腐烂而形成的大孔隙,为水分输移提供通道,植物细根对优先发育有显著促进作用^[8];石砾通过影响土壤层大孔隙数量和有效孔隙的密度、体积

来影响优先流^[9]。目前,土壤优先流的观测技术逐渐完善,研究方法主要有染色示踪技术、非侵入式影像获得技术、地下雷达探测、微张力测量技术等。邵一敏等^[10]基于染色示踪法研究干热河谷不同地类土壤优先流形态和数量特征;董均贵等^[11]借助核磁共振技术,对不同干湿条件下土壤水分入渗和孔隙结构的关系进行研究;侯芳等^[12]将雷达技术与染色示踪技术相结合,将染色面积比与反射波参数进行拟合分析;Flammer等^[13]利用声波探测技术建立数学模型,将波信号与土壤水分含量进行定量表征。其中本试验采用的染色示踪技术投入价格低,操作原理简易,结果较为准确,尤其是将染色图片与图像处理相结合,可以进一步明确优先流路径的定义和划分,是研究优先流最为常用的试验方法^[3]。

冲沟发育过程复杂,受降雨、水文、土壤、土地利用等众多因素影响^[14]。当前对冲沟侵蚀机理的研究不够系统和深入,尤其以土壤优先流与冲沟侵蚀机理关系的研究还较为薄弱,优先流作为土壤水分运动的重要组成部分,水分在优先路径中的快速运动过程侵蚀土壤颗粒,使土体的稳定性降低,提高土壤可蚀性;且就冲沟系统集水区而言,其土壤水分的入渗能力与整个冲沟的发育及抗蚀能力关系密切^[15]。现有优先流研究多集中在林地、草地、人工林、农田等生态系统,涉及到干热河谷冲沟系统的研究甚少,更没有涉及冲沟系统集水区优先流方面的研究,尚缺乏对干热河谷冲沟系统土壤优先流方面的理解。对于干旱河谷冲沟集水区优先流特征及运动机理的研究,可为揭示干热河谷区土壤水分溶质运移规律和水土流失治理提供参考,进而为解决生态脆弱、水土资源管理等方面的问题提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于元谋金雷国家级水土保持科技示范园(25°23'—26°06'N, 101°35'—102°06'E)。该地区属南亚热带季风气候,具有炎热干燥、降水集中、干湿季分明的特征。地区土壤主要以燥红土和变性土为主,易侵

蚀,土壤 pH 6.34~8.35。植被类型为稀树灌草型,草本主要有扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)、橘草(*Cymbopogon goeringii*)和拟金茅(*Eulaliopsis binata*)等,灌木以车桑子(*Dodonaea viscosa*)为主,乔木以引进种银合欢(*Leucaena leucocephala*)和橄榄树(*Canarium album*)为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在冲沟坡面集水区与沟床交接

表 1 研究区样地基本概况

样地类型	冲沟类型	沟头 落差/m	坡向	冲沟 坡度/(°)	海拔/m	集水区 坡度/(°)	植被 覆盖度/%
稀树荒草地	稳定冲沟 1	0.50	东南	8~28	1109.53	6	43
	稳定冲沟 2	0.60		5~23	1096.19	8	46
	稳定冲沟 3	0.62		6~25	1092.43	5	45
	活跃冲沟 1	1.50		7~17	1097.43	8	52
	活跃冲沟 2	1.80		6~20	1094.57	7	54
	活跃冲沟 3	1.65		7~19	1096.76	8	54

1.2.2 染色示踪试验 试验于 2021 年 7 月 15 日至 9 月 5 日在元谋金雷国家级水土保持科技示范园展开。在每个样地选择尽量平缓的地方,对土壤表面进行整修,将长、宽、高均为 60 cm 的金属框垂直插入清理后的深 50 cm 的土体,并将铁框内壁 4 cm 的土夯实;将浓度为 4 g/L 染色溶液 25 L(参考当地日最大累计降雨量 60 mm)用喷壶均匀地喷洒在铁框内的土壤表面,用防雨布将铁框覆盖,以避免蒸发,静置 24 h。在不破坏染色土体的情况下取出铁框,考虑铁框周围小范围内土壤水分侧流情况,选择在中心 50 cm×50 cm 的土体进行逐层挖掘,同时用高清相机拍摄染色土体剖面以获取染色图像。本试验在每个样地进行 5 次染色试验,3 次为水平剖面的挖掘

处,因跌水冲刷形成具有一定高差的跌坎,跌坎高差可作为判断沟头活跃程度的重要指标之一^[16]。活跃沟头有明显跌坎,且跌坎高差均大于 1 m;而稳定沟头则大多无明显跌坎,最小的跌坎高差仅为 0.3 m^[17]。据此,综合考虑跌坎高差、地形、植被等影响,在研究区内选取 3 条活跃冲沟和 3 条稳定冲沟,在每条冲沟的集水区各布设 1 块 10 m×15 m 的样地,共 6 个样地作为试验区(表 1)。

(水平染色图像的采集,土样的采集),2 次为垂直剖面的挖掘(垂直染色图像的采集),每次垂直染色试验进行 10~15 次垂直剖面图像的采集,在展示染色剖面时仅选取典型染色剖面。分区之间采样点的距离设置不小于 15 m。

在水平剖面的挖掘过程中进行逐层土样的采集,以 10 cm 为 1 层,先对相应土层进行水平染色图像的采集,用 100 cm³标准环刀和 8 号实验袋采集该土层染色区和未染色区土样,各取 3 次作为重复,并收集该土层植物根系。接着对该土层土壤进行挖掘清理,准备下一个 10 cm 土层的处理。参照国标用常规方法测定土壤基本理化性质并根据实际试验进行调整,土壤基本性质见表 2。

表 2 土壤基本性质

样地类型	土壤	土层	自然	容重/	有机质/	土壤机械组成/%		
		深度/cm	含水量/%	(g·cm ⁻³)	(g·kg ⁻¹)	黏粒	粉粒	砂粒
稳定期冲沟集水区	燥红壤	0—10	1.78±0.03c	1.40±0.02c	20.72±0.92a	12.7	54.7	32.6
		10—20	2.08±0.10b	1.53±0.03b	16.14±1.43b	11.1	56.4	32.5
		20—30	2.35±0.07a	1.59±0.03a	15.55±1.28b	12.5	51.2	36.4
		30—40	2.43±0.05a	1.60±0.02a	12.44±2.30c	10.3	56.5	34.3
		40—50	1.90±0.04b	1.61±0.01a	13.92±1.95c	10.8	53.9	35.3
活跃期冲沟集水区	燥红壤	0—10	3.44±0.14c	1.49±0.01b	23.62±4.83a	10.1	53.1	38.9
		10—20	4.88±0.11a	1.60±0.03a	22.12±3.21a	9.5	56.3	34.1
		20—30	4.58±0.09a	1.63±0.04a	19.17±1.77b	10.7	48.0	41.4
		30—40	3.98±0.09b	1.65±0.02a	18.07±2.53b	9.5	45.8	44.8
		40—50	3.43±0.10c	1.70±0.05a	15.50±1.31c	9.2	51.6	39.2

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示不同土层间差异显著($p<0.05$)。

1.2.3 优先流特征指标测定

(1)染色面积比。经过处理的染色图像中着色像素格的个数与图像宽度的比值即为染色面积比。计算公式为^[18]:

$$DC = \left(\frac{D}{M}\right) \cdot 100\%$$

(1)

式中:DC 表示染色面积比(%);D 表示图像中着色像素格的个数;M 表示图像的宽度。

(2) 基质流深度。经过公式(1)计算染色面积比,将 $DC \geq 80\%$ 的区段作为该样地基质流深度。该值可以表征土壤优先流发生的早晚。

(3) 优先流比。经过处理的染色图像中基质流区域外的着色斑块与总着色斑块的面积比即为优先流比。计算公式为^[19]:

$$PF - fr = (1 - \frac{UniFr \cdot W}{TotStAr}) \cdot 100\% \quad (2)$$

式中: $PF - fr$ 为优先流比; $UniFr \cdot W$ 为垂直剖面图像中基质流区域着色斑块面积(cm^3); $TotStAr$ 为垂直剖面图像中总着色斑块面积(cm^3)。

(4) 土壤染色斑块形状系数。该系数可用经过处理的染色图像中着色区域的总边长与等面积圆的周长比来表示。计算公式为^[20]:

$$SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3)$$

式中: P 为图像中着色区域总边长(cm); A 为等圆的面积(cm^2)。

(5) 长度指数。试验中将垂直剖面图像分为 50 层,每 1 cm 作为 1 层。将每相邻的 2 层 DC 值之差的绝对值进行求和,作为长度指数。计算公式为^[19]:

$$L_i = \sum_{i=1}^{50} |DC_{i+1} - DC_i| \quad (4)$$

式中: L_i 为长度指数; DC_{i+1} 、 DC_i 为图像中相邻两层染色面积比(%)。

1.3 数据处理

通过 Photoshop—CS6 对初始染色照片进行预处理;通过软件 Imagepro—plus—6.0 对图像黑白像素数量进行量化(0 表示染色,255 表示未染色),将得到的数值矩阵导入 Excel,对优先流特征指标进行计算。

通过 SPSS 和 Excel 进行数据处理和统计分析,用 PPT 和 Origin—2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同发育期冲沟系统集水区土壤优先流形态特征

对研究区内不同发育期冲沟系统集水区土壤垂直剖面的染色图像进行分析(图 1),对于不同发育期的冲沟集水区,土壤优先流的最大染色深度不同,形态特征有明显变化。稳定期冲沟集水区的各剖面染色深度较浅,可达 28 cm,活跃期冲沟集水区的各剖面染色深度较深,可达 37 cm。表层土壤覆盖有较多的植物根系,且土质往往与下层土有所不同,有大面积均匀染色区出现,该均匀染色区主要为基质流区,优先流现象不明显,可以看出稳定期冲沟条件下的基质流发生区为 0—15 cm,活跃期冲沟条件下的基质流发生区为 0—20 cm。

在活跃期冲沟集水区土壤条件下,以图 3 中的剖

面 B_2 为例,在 20 cm 以内的土层中染色形态基本呈片状,表明该区域土壤大孔隙有较好的连通性,基本没有优先流分化现象;20—40 cm 土层中既有片状染色也有枝状染色,表明水分侧向运动减弱,在 40—50 cm 土壤没有观察到有染色液的下渗,几乎没有优先流的存在。优先流导致水分沿着特殊通道快速下渗,垂直上导致最大染色深度加深,水平上枝状分布明显,稳定期冲沟集水区土壤染色区分布相对更加集中,优先流现象较活跃期的土壤更不明显。

对土壤剖面中染色斑块的周长与等面积的圆周长之比进行计算,通过公式(3)计算求得活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区的土壤染色斑块形状系数。稳定期冲沟系统集水区的 SI 为 12.35,活跃期冲沟系统集水区的 SI 为 24.94,后者是前者的 2.20 倍,二者之间差异显著($p < 0.05$)。说明活跃期冲沟系统集水区与稳定冲沟集水区相比,染色形态更加多元化,表征其优先流发育相对充分。

2.2 不同发育期冲沟系统集水区土壤优先流参数特征

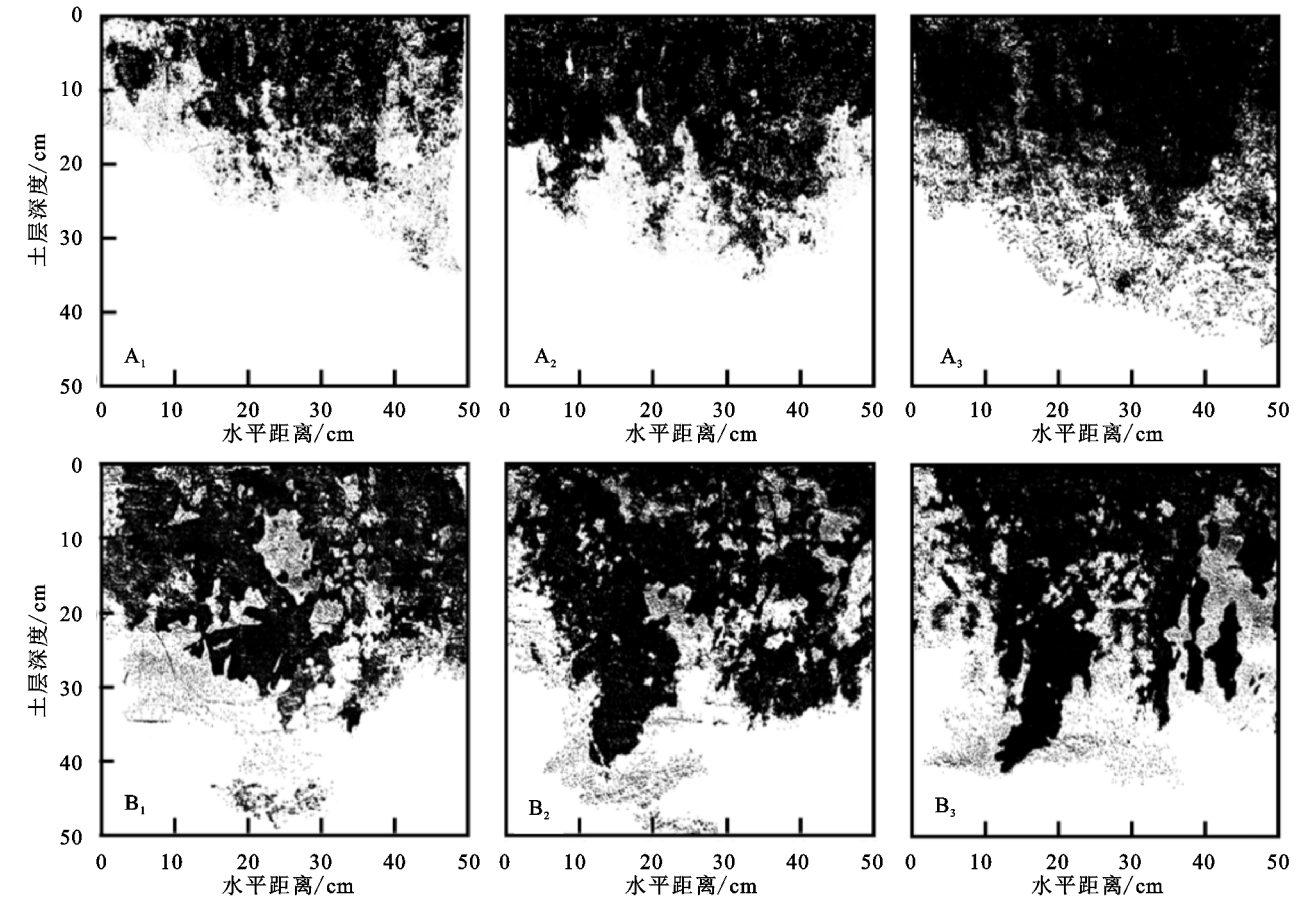
2.2.1 土壤垂直剖面染色面积比 总体来说,在相同的外部供水条件下,染色面积比值越大,说明土壤水的入渗量越大。对图像整体染色面积进行统计,活跃期冲沟系统集水区的土壤平均染色面积比为 54.25%,是稳定期冲沟系统集水区(33.49%)的 1.62 倍,结合土壤垂直剖面染色形态特征分析,说明活跃期冲沟系统集水区的土壤水分入渗性能更好。

由图 2 可知,在 0—40 cm 土层中,不同发育期下的冲沟系统集水区各个剖面染色面积比均随土层深度增加而减少,各发育期冲沟系统集水区存在一定差异。稳定期冲沟系统集水区的染色面积比随土层的加深呈稳定减少趋势,稳定期冲沟集水区的染色面积比曲线较活跃期冲沟集水区的波动更小,在 0—20 cm 土层中染色面积比呈线性减少,表明该土层范围内水分入渗由基质流主导;在 20 cm 土层附近,随着土层加深,染色面积比进入转折点,优先流分布明显;30 cm 以下土壤染色面积比趋于 0,结合图 2 可知,基本没有染色液向下运输,推测在该土层土壤容重增大,土体趋于紧实,孔隙数量少,而且在挖掘过程中发现在 40—50 cm 土层并没有植物根系网络延伸,开始有石块出现,染色溶液下渗慢,优先流现象停止。

在活跃期冲沟系统集水区的 0—18 cm 土层中,各垂直剖面中染色面积比曲线波动程度较稳定期冲沟系统集水区明显增大,且持续出现小幅度反弹,曲线呈现多个波峰,使得上半截曲线整体呈现连续“S”形,染色面积比维持在较大范围(63.5%~93.2%),原因可能是表层土壤疏松,体现了基质流区的空间异质性;在 18—35 cm 土层,个别剖面的染色面积比在

该土层中出现间歇性递增,在挖掘过程中发现个别中间土层中有较大横向树根的生长,也有虫洞的出现,推测原因可能是较大植物根系的延伸或虫洞的出现导致染色液侧向运动,使得染色面积比突然增

大;在 30—40 cm 土层,染色面积比逐渐变小,集水区优先流持续时间、优先流深度和染色面积比均大于稳定期。优先流现象在活跃期冲沟集水区各方面表现更为突出。



注: A₁、A₂、A₃ 分别为稳定冲沟集水区不同染色剖面; B₁、B₂、B₃ 分别为活跃冲沟集水区不同染色剖面。

图 1 垂直剖面染色图

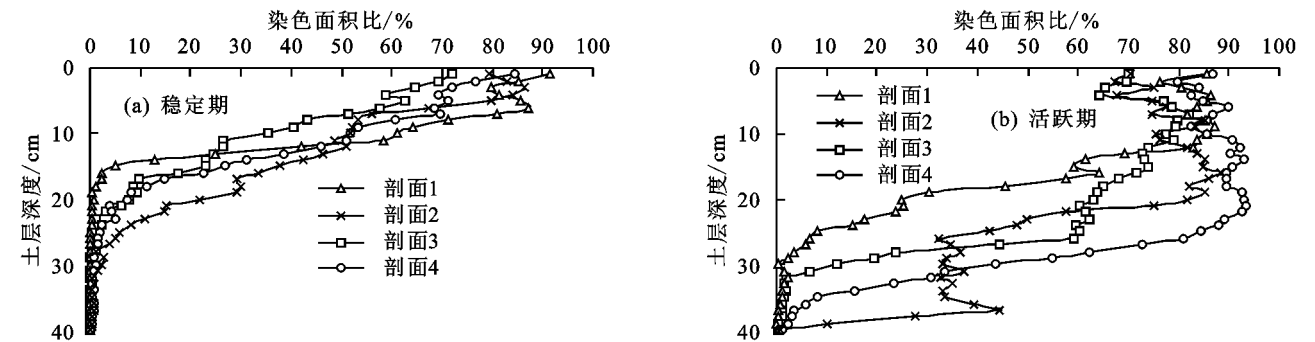


图 2 垂直土壤剖面染色面积比

2.2.2 土壤优先流特征参数 稳定期冲沟集水区的平均基质流深度为 11.49 cm,活跃期冲沟集水区的基质流深度为 20.53 cm,二者差异显著($p<0.05$),活跃期是稳定期的 1.79 倍(表 3)。进一步观测表明,在同一供水条件下,活跃期冲沟系统集水区的土壤优先流发生相对较慢,即稳定期土壤优先流发生时间较早。因此与活跃期冲沟集水区相比,稳定期冲沟集水区土壤中的水分停留时间较低,水分流失较快,影响植物生长(由表 1 可知活跃冲沟植被覆盖度均大于稳定冲沟)。

优先流比一定程度上可以说明土壤优先流发育程度。稳定期冲沟集水区土壤平均优先流比为 27.27%,大于活跃期冲沟集水区平均优先流比(25.63%),两者之间差异不显著($p>0.05$)。主要原因是虽然稳定期冲沟集水区与活跃期相比,优先流发生时间早、持续时间短、深度浅,但其基质流染色面积范围也相对较小,导致二者优先流面积占比相近,差异不显著。

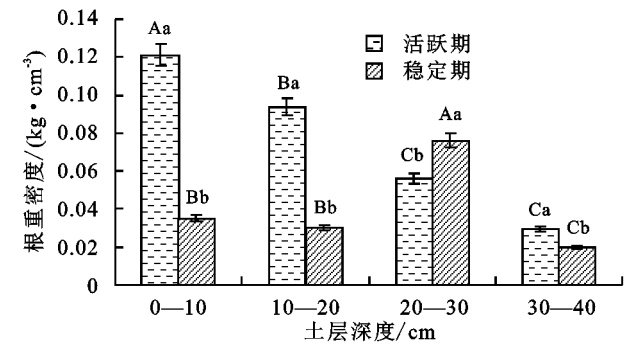
优先流长度指数越大,反映出水流运动的非均匀性越强,空间变异性越大,优先流越明显。活跃期冲

沟集水区的平均长度指数为 592.46%，显著大于稳定期冲沟集水区(512.14%)，是其 1.16 倍，二者之间差异显著($p<0.05$)，说明活跃期冲沟集水区优先流程度更高，空间异质性更强。活跃期冲沟集水区的优先流长度指数更大，但是与平均优先流比的结果相反，二者基于不同的角度揭示优先流现象，研究结果并不矛盾。因为优先流比是从优先流发生区域面积的角度进行描述的，而优先流长度指数表征的是优先流的空间异质性。综合土壤优先流特征参数，表明活跃期冲沟集水区土壤优先流发生较晚，水分在基质流区停留时间较长，活跃期冲沟集水区优先流空间异质性更强。

表 3 不同样地类型土壤优先流特征参数

样地类型	基质流深度/cm	优先流比/%	长度指数/%
稳定期冲沟集水区	11.49±1.59A	27.27±1.75A	512.14±6.96A
活跃期冲沟集水区	20.53±3.63B	25.62±0.68A	592.46±9.47B

注：同列不同大写字母表示同一特征参数不同样地间差异显著($p<0.05$)。



注：不同大写字母表示同一发育期冲沟集水区不同土层间根系指标差异显著($p<0.05$)；不同小写字母表示同一土层间不同发育期冲沟集水区根系指标差异显著($p<0.05$)。

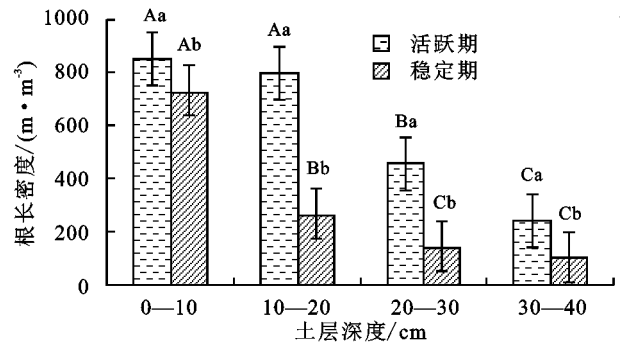
整体而言，根重、根长密度在活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区均随着土层深度的增加呈减少趋势，这与染色面积比变化情况一致。表层土往往土质疏松，有机质丰富，有利于植物根系生长，所以表层土根重密度和根长密度最大。活跃期冲沟集水区根重密度和根长密度均比稳定期冲沟集水区高，表明不同粗细长短的根系穿插在土壤中使得水分渗透性较好，优先流发育明显。

2.3.2 根系特征对染色面积分布的影响 为了进一步探讨根系特征与染色面积比的关系，将两者进行线性回归拟合，探究活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区植物根系对优先流的影响。由图 4 可以看出，各根系指标与染色面积比的拟合效果较好，活跃期冲沟集水区根长密度 $R^2=0.93$ ，根重密度 $R^2=0.95$ ，稳定期冲沟集水区根长密度 $R^2=0.97$ ，根重密度 $R^2=0.85$ 。活跃期冲沟系统集水区根长密度与染色面积比的相关系数和稳定期冲沟集水区相近，但其根重密度与染色面积比的相关系数却明显高于稳定期(活跃期 $R^2=0.946\ 6$ 大于稳定期 $R^2=0.849\ 6$)，且稳定期

2.3 不同发育期冲沟系统集水区土壤根系特征

通过不同优先流特征指标可以对土壤剖面优先流形态特征和数量特征进行定量表征，考虑到 2 块研究样地植被覆盖度有明显差异(表 1)，且植物根系是土壤层的重要组成，可在土体中构建较大的网络结构，促进优先流发育^[21]，因此引入根系特征，进一步探究根系与土壤优先流的关系。

2.3.1 根重密度和根长密度随土层深度的变化 从图 3 可以看出，活跃期冲沟集水区的表层土壤根重密度最大，最大值为 0.121 kg/cm³，是稳定期冲沟集水区的 3.46 倍，>40 cm 土层基本没有土壤根系分布。在稳定期冲沟集水区 20—30 cm 土层，根重密度异常增大，是因为有粗的乔木根系横穿该土层。根长密度指标变化规律基本一致，其最大值在 0—10 cm 土层处出现，分别为 850.88, 724.56 m/m³，且活跃期冲沟集水区的根长密度在每个土层均高于稳定期。



注：不同大写字母表示同一发育期冲沟集水区不同土层间根系指标差异显著($p<0.05$)；不同小写字母表示同一土层间不同发育期冲沟集水区根系指标差异显著($p<0.05$)。

图 3 不同土层深度下根重密度和根长密度

的拟合度较高，主要是因为活跃期冲沟集水区灌草较稳定期冲沟集水区多，根系结构复杂，与染色面积比有更高的相关性。

2.4 土壤环境因子对优先流的影响

土壤水分下渗受由多种土壤因子的共同影响^[22]。总体上，染色面积比与土壤容重、土壤 pH 均呈负相关关系，与土壤孔隙度、有机质、全氮、全磷均呈正相关关系，与粉粒含量的相关性均不显著。由于冲沟类型的差异，染色面积比与黏粒、砂粒含量、全钾含量的相关性在 2 种类型的样地表现出较大差异。

元谋干热河谷土壤砂粒含量较多，有利于土壤水分入渗，土壤砂粒含量比重的增大可以提高土壤孔隙度，促进优先流发育^[23]。由表 4 可知，稳定冲沟集水区染色面积比与土壤黏粒关系呈极显著相关，活跃期冲沟集水区染色面积比与土壤砂粒含量呈显著相关。稳定冲沟集水区染色面积比与孔隙度呈极显著相关，活跃期冲沟集水区染色面积比与孔隙度呈显著相关，这是因为总孔隙度及其在土壤中的连通性对优先流

的发育及形成有直接影响^[24]。土壤含水率、有机质含量随土层加深而降低,2 类样地土壤染色面积比均与有机质含量呈显著正相关,这是因为有机质通过改

善土壤的黏结力,促进土壤颗粒形成水稳定性团聚体并减少土壤孔隙黏土颗粒的覆盖,同时促进植物根系发育,改善优先流发育通道^[22]。

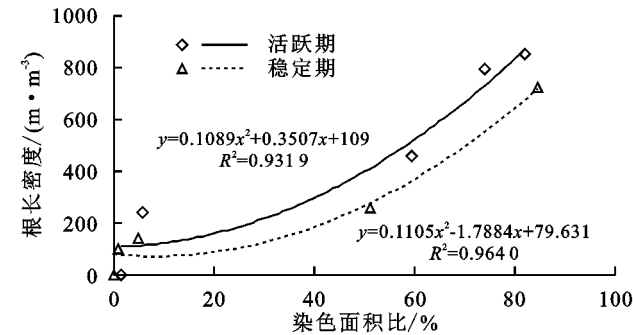


图 4 染色面积比与根重密度和根长密度的关系

表 4 土壤环境因子与染色面积比的相关系数

样地类型	指标	容重	孔隙度	有机质	土壤机械组成			全氮	全磷	全钾	pH
					黏粒	粉粒	砂粒				
稳定期	染色面积比	-0.934 *	0.965 **	0.934 *	0.973 **	0.086	-0.854	0.979 **	0.998 **	0.601	-0.976 **
	容重	1	-0.969 **	-0.996 **	-0.977 **	-0.135	0.949 *	-0.899 *	-0.936 *	-0.502	0.973 **
	孔隙度		1	0.953 *	0.959 **	0.045	-0.856	0.903 *	0.955 *	0.534	-0.999 **
	有机质			1	0.979 **	0.141	-0.970 **	0.912 *	0.941 *	0.530	-0.960 **
	黏粒				1	0.234	-0.922 *	0.967 **	0.975 **	0.486	-0.971 **
	粉粒					1	-0.113	0.208	0.081	-0.651	-0.063
	砂粒						1	-0.858	-0.877	-0.573	0.870
	全氮							1	0.985 **	0.560	-0.923 *
	全磷								1	0.627	-0.968 **
	全钾									1	-0.545
活跃期	染色面积比	-0.958 *	0.942 *	0.930 *	-0.142	0.155	0.945 *	0.904 *	0.946 *	0.940 *	-0.962 **
	容重	1	-0.950 *	-0.983 **	0.165	-0.275	0.032	-0.956 *	-0.999 **	-0.824	0.956 *
	孔隙度		1	0.965 **	-0.389	0.131	0.171	0.986 **	0.936 *	0.822	-0.943 *
	有机质			1	-0.189	0.360	-0.071	0.984 **	0.977 **	0.810	-0.972 **
	黏粒				1	0.638	-0.891 *	-0.358	-0.148	0.058	0.064
	粉粒					1	-0.914 *	0.244	0.285	0.218	-0.383
	砂粒						1	0.082	-0.049	-0.097	0.140
	全氮							1	0.946 *	0.760	-0.938 *
	全磷								1	0.803	-0.943 *
	全钾									1	-0.917 *

注: ** 表示 $p<0.01$; * 表示 $p<0.05$ 。

3 讨论

活跃期冲沟集水区基质流深度是稳定期的 1.79 倍,说明活跃期冲沟集水区优先流的发生相对滞后。然而对于优先流发育程度与基质流深度是否有定性或定量关系,卢华兴等^[25]对滇中磨盘山 4 种典型林分的优先流结果显示,各林分基质流深度为云南松林>华山松林>高山栎林>滇油杉林,而优先流发育程度表现为华山松林>云南松林>滇油杉林>高山栎林,表明优先流发育程度与基质流深度并无相关关系,因此本试验需结合土壤优先流其他特征指标进行对比分析。研究结果显示,活跃期冲沟集水区平均染色面积是稳定期的 1.62 倍,二者差异显著($p<0.05$);熊东红等^[26]对不同活跃冲沟下的水分入渗研

究结果表明,活跃和半活跃冲沟集水区染色面积均大于稳定冲沟集水区,说明活跃期冲沟集水区水分入渗良好,优先流发育程度更高。从图 2 可以看出,活跃期冲沟集水区染色面积比持续出现小幅度反弹,其原因可能是植物根系、虫洞等因素导致不同土层大孔隙不均匀分布,使土壤染色液横向运移,这与贾昂元等^[27]研究结果相近。染色面积比表征水分在土壤中的运动分布状况,在一定程度上可以说明优先流的发育程度^[28],染色面积比越大,优先流现象更明显,因此相比稳定期冲沟集水区,活跃期优先流发育更好。另外,朱梦雪等^[29]对元谋干热河谷红壤优先流的研究显示,其平均总染色面积比大于本研究结果(活跃期 54.25%,稳定期 33.49%),这与元谋干热河谷不同

地区气候特征和土壤条件有关。

优先流比能直观体现土壤染色区中优先流区的占比^[30]。李振东等^[31]以 3 种典型农地为研究对象,发现同样地类型优先流比与染色面积比差异显著,这与本文研究的结果不同。本次试验发现,活跃冲沟集水区优先流比(25.63%)和稳定期(26.27%)相近,且差异不显著($p>0.05$),主要原因是优先流比是由基质流深度和优先流面积共同决定,从优先流比中不能看出优先流区面积的大小,体现了该指标的局限性。因此为了进一步揭示冲沟集水区土壤优先流特征,笔者从土壤染色斑块形状系数、垂直染色剖面图、优先流长度指数方面分析活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区土壤优先流特征。活跃期冲沟集水区的平均土壤染色斑块形状系数(24.94)是稳定期(12.35)的 2.20 倍,且二者之间差异显著($p<0.05$),定量表征活跃期冲沟集水区土壤染色分化现象更显著^[32]。同时,这一点从垂直染色剖面图像中也有直观的体现,稳定期染色呈整体分布向小枝状分布,活跃期染色呈整体状—团块状—枝状分布;王佩佩等^[33]研究表明,优先流长度指数越大,优先流发育程度越高,活跃期冲沟集水区的平均长度指数(592.46%)是稳定期冲沟集水区(512.14%)的 1.16 倍,二者之间差异显著($p<0.05$),说明活跃期冲沟集水区优先流程度更高,空间异质性更强。综合考虑平均染色面积,染色面积比、染色斑块形状系数、垂直剖面图像、长度指数,表明活跃期冲沟集水区土壤优先流发育更充分。

Lv 等^[20]研究认为,土壤表层植物根系分布最为密集,本研究结果也表明,表层土壤根重密度、根长密度最大,且活跃期冲沟集水区的根重、根长密度均高于稳定期,这是由不同的土壤条件和植被条件导致的,总体植被覆盖度为稳定冲沟集水区低于活跃冲沟集水区,但稳定冲沟集水区草本、小灌木较多,活跃冲沟则林木较多,草本相对较少,因此稳定冲沟集水区土壤以小根细根为主,且主要集中在表层土,活跃冲沟集水区土壤粗根深根较多,提高了土壤中孔隙连通性,为优先流提供优先通道^[34]。王赵男等^[35]研究认为,根长密度与染色面积比有较强的正相关性,将活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区根系指标与染色面积比进行回归拟合,结果表明 R^2 为 0.85~0.96,且活跃期冲沟集水区优先流发育更突出。根重密度和根长密度在影响优先流发育中起重要的作用,基于本研究得出的结论,对于土壤侵蚀的治理,应着重考虑植物的影响,尤其是草本和小灌木的种植,可以极大促进冲沟向着稳定期过渡。

土壤机械组成在活跃冲沟集水区和稳定冲沟集水区表现出显著差异,表明土壤条件的差异导致不同发育

期冲沟集水区基质流深度和平均染色面积的差异。何周窈等^[14]研究表明,土壤砂粒含量随着冲沟稳定性增加逐渐降低趋势,这与本研究结果一致。本研究结果表明,黏粒含量、粉粒含量总体为活跃冲沟集水区<稳定冲沟集水区,细砂粒含量、粗砂粒含量则是活跃冲沟集水区>稳定冲沟集水区,且砂粒含量与染色面积比呈极显著正相关关系($p<0.01$)。含砂量越高,越有利于水分下渗,形成优先通道,这与染色图像所反映出的结果相符,且张素等^[36]研究表明,集水区抗蚀性以活跃冲沟大于稳定冲沟,这是由于稳定冲沟土壤紧实,进一步印证活跃冲沟集水区优先流发育强于稳定期冲沟集水区的结论,侧面反映活跃、稳定冲沟集水区土壤条件的显著差异性。此外,优先流的形成过程中受土壤化学性质影响较大,随着土层深度的增加,活跃期冲沟集水区和稳定期冲沟集水区的全氮、全磷、全钾、有机质含量变化总体上均呈减少趋势。

4 结论

(1)活跃期冲沟集水区平均基质流深度、平均染色面积比是稳定期的 1.79,1.62 倍,二者差异均显著($p<0.05$),表明活跃期冲沟系统集水区优先流发生时间滞后,优先流发育程度好。

(2)活跃期冲沟系统集水区的平均土壤染色斑块形状系数和优先流平均长度指数均高于稳定期,且二者之间差异均显著($p<0.05$)。结合垂直染色剖面图像表明,活跃期冲沟系统集水区优先流形态特征分化明显,空间异质性相对较强。

(3)根重密度、根长密度均与染色面积比呈正相关关系($p<0.05$),表明植物根系是影响优先流发育的重要因子。植被条件和土壤条件的差异性,是活跃期冲沟集水区根重、根长密度均大于稳定期的主要原因。

(4)土壤环境因子与染色面积比具有相关性。2 类样地染色面积比与土壤容重、pH 均呈负相关关系,黏粒、砂粒含量、全钾含量的相关性在 2 种类型的样地表现出较大差异。

参考文献:

- [1] 文孝丽,董一帆,杨己,等.元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):282-288.
- [2] 杨淦舟,何光熊,王艳丹,等.干热河谷燥红土坡面水分时空分布特征及其对覆被类型的响应[J].中国水土保持科学,2021,19(5):90-98.
- [3] 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.
- [4] 邵一敏,赵洋毅,段旭,等.基于分形分析的干热河谷区典型地类土壤优先路径分布特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):102-112.

- [5] 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.
- [6] 解璐萌,张英虎,张明祥,等.黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征[J].生态学报,2021,41(19):7713-7724.
- [7] 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.
- [8] Miao Y, Martine P, Esperanza H L, et al. Leaching of microplastics by preferential flow in earthworm (*Lumbricus terrestris*) burrows[J].Environmental Chemistry, 2019,16(1):31-40.
- [9] Kan X Q, Cheng J H, Hou F. Response of preferential soil flow to different infiltration rates and vegetation types in the Karst region of southwest China[J].Water, 2020,12(6):57-78.
- [10] 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.
- [11] 董均贵,吕海波,陈国强.基于核磁共振技术的孔隙水形态及土壤渗透性分析[J].农业工程学报,2020,36(6):74-80.
- [12] 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[J].生态学报,2022,42(5):1766-1776.
- [13] Flammer I, Blum A, Leiser A, et al. Acoustic assessment of flow patterns in unsaturated soil[J].Journal of Applied Geophysics,2001,46(2):115-128.
- [14] 何周竊,苏正安,王勇,等.干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):8-13,27.
- [15] Samani A N, Ahmadi H, Jafari M, et al. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed)[J].Journal of Asian Earth Sciences,2009,35(2):180-189.
- [16] Tsegaye Y, Mulatie M, Assefa D. Gully erosion and its impacts on soil loss and crop yield in three decades, northwest Ethiopia[J].Modeling Earth Systems and Environment,2020,7(4):1-10.
- [17] 李佳佳,熊东红,卢晓宁,等.基于 RTK-GPS 技术的干热河谷冲沟沟头形态特征[J].山地学报,2014,32(6):706-716.
- [18] 张海林,杨秀锋,易军,等.亚热带红壤区不同土地利用方式下的土壤剖面水流特征[J].水土保持学报,2019,33(6):233-241.
- [19] 阮晓晗,白一茹,王幼奇,等.基于多指标分析和分形维数的不同种植年限压砂地基质流与优先流特征研究[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):86-94.
- [20] 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:e266.
- [21] Lipiec J, Medvedev V V, Birkas M, et al. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe[J].International Agrophysics, 2003,17(2):61-69.
- [22] 刘剑荣,杨磊,卫伟,等.半干旱黄土区柠条灌丛不同植被管理方式下的土壤水分[J].草业科学,2021,38(8):1439-1450.
- [23] Li M F, Yao J J, Cheng J H. Study on the preferential flow characteristics under different precipitation amounts in simian mountain grassland of China[J].Water,2020,12(12):e3489.
- [24] Shein E V. Soil hydrology: Stages of development current state and nearest prospects[J].Eurasian Soil Science, 2010,43(2):158-167.
- [25] 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.
- [26] 熊东红,翟娟,杨丹,等.元谋干热河谷冲沟集水区土壤入渗性能及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(6):170-175.
- [27] 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.
- [28] Luo Z T, Niu J Z, Xie B Y, et al. Influence of root distribution on preferential flow in deciduous and coniferous forest soils[J].Forests,2019,10(11):986-1000.
- [29] 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.
- [30] 吴晗,陈晓冰,姜波,等.秸秆还田对甘蔗地土壤优先流运动特征的影响[J].应用生态学报,2022,33(1):141-148.
- [31] 李振东,朱彦光,陈晓冰,等.桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征[J].水土保持研究,2019,26(5):68-74,80.
- [32] Bettinger P, Bradshaw G A, Weaver G W. Effects of geographic information system vector-raster-vector data conversion on landscape indices[J].Canadian Journal of Forest Research,1996,26(8):1416-1425.
- [33] 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.
- [34] 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):1634-1647.
- [35] 王赵男,辛颖,赵雨森.长白山系榛子灌木林根系对优先流的影响[J].林业科学研究,2017,30(6):887-894.
- [36] 张素,熊东红,校亮,等.冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J].土壤,2016,48(6):1270-1276.