

# 演替梯度下土壤优先流特征及影响因素

曹丹妮<sup>1,3</sup>, 邸涵悦<sup>3</sup>, 郭忠录<sup>3</sup>, 马美景<sup>2,3</sup>

(1.湖北方源东力电力科学研究所有限公司, 武汉 430062;

2.武汉市水务科学研究院, 武汉 430014; 3.华中农业大学 水土保持研究中心, 武汉 430070)

**摘要:**为揭示植被恢复过程中土壤优先流特征及变化规律,以胡家山小流域内植被恢复过程中 5 个典型阶段(荒地、草地、灌木、针叶林、乔—灌混合林)为研究对象,采用空间代替时间的方法,通过室内分析和染色示踪试验,分析了演替梯度下土壤优先流特征参数的变化规律,探讨了土壤基本理化性质和根长密度对土壤优先流和土壤水分运移的影响。结果表明:(1) 随演替的进行,土壤中优先流数量和运移路径均呈增大趋势;5 种演替梯度下针叶林土壤染色面积比最大,其次是乔—灌混合林、灌木、草地,荒地的土壤染色面积比最小;(2) 土壤容重、毛管孔隙度、土壤有机质含量与土壤染色面积比之间的相关性较强,砂粒含量、黏粒含量对土壤中优先流染色面积影响不显著;(3) 不同径级根系对土壤优先流路径影响不同,5 种演替梯度下, $D \leq 0.5$  mm 的根长密度与土壤染色面积比之间相关性最显著,其次是  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $2 < D \leq 3$  mm,  $3 < D \leq 5$  mm;  $D > 5$  mm 的根长密度与土壤染色面积比之间相关性最不显著。说明土壤容重、毛管孔隙度、土壤有机质含量、 $D \leq 2$  mm 的根系主要影响土壤优先流的产生与发展。

**关键词:**演替梯度; 优先流; 土壤基本理化性质; 根长密度

中图分类号:S152; S153; S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0099-09

## Characteristics and Influencing Factors of Soil Preferential Flow in Different Succession Gradients

CAO Danni<sup>1,3</sup>, DI Hanyue<sup>3</sup>, GUO Zhonglu<sup>3</sup>, MA Meijing<sup>2,3</sup>

(1.Hubei Fangyuan Dongli Electric Power Science & Research Co., Ltd.,

Wuhan 430062, China; 2.Wuhan Institute of Water Science, Wuhan 430014, China;

3.Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to reveal the characteristics and changes of soil preferential flow in the process of vegetation restoration, five typical stages (wasteland, grasslands, shrubs, *Platycladus orientalis* forest, and mixed forest of arbor and shrubs) of vegetation restoration in Hujiashan Small Watershed were selected. By using the method with space instead of time, indoor analysis and field vegetation survey and dyeing tracer tests were conducted to analyze the variation patterns of soil preferential flow characteristics under different succession degrees, and the effects of soil properties and root diameters on preferential flow and water transport were discussed. The results showed that: (1) with the succession progresses, the number of soil preferential flow and the migration path increased; the soil preferential flow zones were different in the five succession gradients; the soil staining area ratio of *Platycladus orientalis* forest was the largest, followed by the mixed forest of arbor and shrubs, shrubs, grasslands, and the wasteland was the smallest; (2) soil bulk density, capillary porosity, soil organic matter content, and soil staining area ratio had the significant correlation, while sand content and clay content had no significant effect on preferential flow staining area in soil; (3) different diameter roots had different effects on soil preferential flow paths; the correlation between the root length density of root diameter ( $D$ )  $D \leq 0.5$  mm and the soil staining area ratio was the most significant, followed by  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $2 < D \leq 3$  mm,  $3 < D \leq 5$  mm, the root length density of  $D > 5$  mm and soil staining area ratio was the least significant, indicating that soil bulk density, capillary porosity, soil

收稿日期:2020-03-25

修回日期:2020-06-04

资助项目:国家自然科学基金“侵蚀环境下植物群落根系对坡面水蚀过程的影响及机制”(41671273)

第一作者:曹丹妮(1995—),女,山西运城人,硕士,研究方向为水土保持与植被恢复。E-mail:18235445268@163.com

通信作者:马美景(1989—),男,山西晋城人,工程师,硕士,研究方向为水土保持。E-mail:873834449@qq.com

organic matter content, and the root length density of root diameter ( $D$ )  $D \leq 2$  mm mainly affected the generation and development of soil preferential flow.

**Keywords:** succession gradient; preferential flow; fundamentally physicochemical properties of soil; root length density

土壤优先流是指土壤水分快速穿过大孔隙系统,并绕过土壤基质沿着优先途径在土体剖面内运动的现象<sup>[1-2]</sup>。优先流是土壤中普遍存在的一种水分运动,它与地表地下水水质、土壤养分吸收息息相关<sup>[3]</sup>,土壤中优先流的发生既可以增加入渗、减少地表径流,但也会引起土壤养分流失、地下水污染等<sup>[4-5]</sup>,因此开展土壤优先流特征研究对揭示土壤入渗机制及水土保持工作具有重要意义<sup>[6]</sup>。

目前,国内外学者采用不同方法(染色示踪法、树脂填充法、张力渗透仪法、离子示踪法等)分析了土地利用方式、土壤初始含水量、根系特性、植被覆盖、耕作方式、降雨强度等因素对土壤孔隙特征及土壤优先流形态发育特征的影响<sup>[7-9]</sup>。但是这些研究主要集中在农地和林地内且研究对象较为单一,针对不同演替下紫色土区土壤性质和根系性质等如何影响土壤优先流形态发育特征研究较少。土壤质地、土壤中孔隙的连通性和曲折性、土壤有机质含量等因素对土壤中优先流的运动和发展有重要的影响。Clark 等<sup>[10]</sup>通过对美国东部露天煤矿近地表区土壤优先流特征研究发现,重新造林的区域的土壤剖面染色面积和入渗速率明显高于草地;Jiang 等<sup>[11]</sup>通过对不同耕作方式下土壤优先流特征研究发现,耕作区与未耕作区的土壤优先流特征间有明显差异,且不同耕作方式下土壤中优先流特征也不同;陈晓冰等<sup>[12]</sup>对重庆市四面山针阔混交林、竹林和草地进行染色示踪试验发现,3 种植被条件下土壤中砂粒含量增加、粉粒和黏粒含量的减少在一定程度上均有助于土壤中优先流的发生;吕文星<sup>[13]</sup>通过对三峡库区坡面荒地、玉米地、柑橘地进行亮蓝染色示踪试验发现,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和土壤有机质含量越高,越有助于土壤中水分的快速运移。根系是土壤层的重要组成部分,草本植物、灌木、乔木等具有不同的根系系统,而这些植被的根系系统组合会构成较为复杂的空间网络结构,从而形成复杂的根系通道,加快优先流过程<sup>[3,7]</sup>。以胡家山小流域内荒地、草地、灌木、针叶林、乔—灌混合林为研究样地,运用原位染色示踪技术,对不同演替阶段的土壤优先流形态发育特征及其影响因素进行对比分析,为该区域不同演替阶段土壤入渗机制提供一定的理论基础和实践参考。

## 1 研究区概况

试验地位于湖北省丹江口市胡家山小流域,地理坐标为  $111^{\circ}12'22.0''$ — $111^{\circ}15'20.5''$ E,  $32^{\circ}44'17.8''$ — $32^{\circ}49'15.6''$ N,多年平均气温  $16.1^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降雨量  $797.6$  mm,属于北亚热带半湿润季风气候。流域内土壤类型主要为紫色土、石灰土和黄棕壤。

## 2 材料与方方法

### 2.1 样地选取与调查

选取研究区内荒地、草地、灌木、针叶林、乔—灌混合林为研究样地,进行染色示踪试验。研究点土壤类型均为紫色土。草地植被覆盖度约为 96%;灌木群落植被覆盖度约为 60%;针叶林和乔—灌混合林的郁闭度约为 88%,92%,地表枯枝落叶层厚度为 3~4 cm。样地详细情况见表 1。

表 1 样地参数

演替阶段	海拔/m	优势种
荒地	327	0
	329	0
	334	0
	336	0
	328	白茅( <i>Imperata cylindrical</i> )
草地	331	小蓬草( <i>Conyza Canadensis</i> )
	334	牛筋草( <i>Eleusine indica</i> )
	339	苅草( <i>Arthraxon hispidus</i> )
	327	酸枣( <i>Ziziphus jujube</i> )、乌柏( <i>Sapium sebiferum</i> )
灌木	333	白刺花( <i>Sophora davidii</i> )、小薹草
	335	牡荆( <i>Vitex negundo</i> )、小薹草
	336	白刺花、鸡眼草( <i>Kummerowia striata</i> )
	337	侧柏( <i>Platycladus orientalis</i> )、小薹草
针叶林	340	侧柏
	341	侧柏、小薹草
	340	侧柏
	339	侧柏、牡荆、白刺花
乔—灌混合林	347	侧柏、牡荆、白刺花、小薹草
	359	侧柏、牡荆、白刺花、小薹草
	335	侧柏、牡荆、白刺花、小薹草

### 2.2 样地优先路径染色示踪

选取相对平坦的荒地、草地、灌木、针叶林、乔—灌混合林为试验样地。试验前,先去除试验样地内的枯枝落叶、树枝和砾石等,并平整土壤表面。利用喷壶将 10 L 浓度为 4 g/L 亮蓝溶液均匀喷洒在边长为 50 cm 的正方形样地中,整个试验过程中无地表径流产生,喷

洒完后再用薄膜和绿色植被覆盖在样方表面上,防止蒸发和静置过程中降雨等外部因素的影响。染色 24 h 后,开挖 3 个垂直剖面(第一个剖面距离边框 15 cm、第 2 个剖面距离边框 25 cm、第 3 个剖面距离边框 35 cm),总计 60 个剖面,并用数码相机沿坡面垂直方向拍摄图像。首先将拍摄的剖面染色照片经 Photoshop 2017 软件处理,之后将其导入 Matlab 编写的程序中计算并提取土壤染色剖面各特征参数(未染色区域颜色为白色,染色区域调为黑色)<sup>[6]</sup>。

### 2.3 土壤理化性质分析

分 4 层、每层 10 cm 采集土样,测定土壤机械组成、质地、有机质等基本理化性质。其中,容重、孔隙度采用环刀法测定,土壤机械组成采用沉降法测定<sup>[14]</sup>,土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。

### 2.4 根长密度

分 4 层、每层 10 cm 采用体积为 500 cm<sup>3</sup>的环刀采集根系样品(3 个重复),测定土层中根系含量。将样品置于 0.25 mm 土样筛上,用流水冲去根系上的土样,利用 LA-S 系列植物图像分析系统获取根长密度,方法为:将根系无重叠的放入根盘(根系呈分散状态),倒入干净自来水至根系完全呈淹没状态,点击 EPSON Scan 图标,开始扫描根系并获取根长密度。

## 3 结果与分析

### 3.1 演替梯度下土壤优先流分布规律

5 种演替梯度下,土壤优先流垂直分布形态特征见图 1,5 种演替梯度下的土壤中均产生较为明显的优先流,随演替的进行和土层深度的增加,土壤中基质流发育程度越不明显,但优先流的数量和运移路径均呈增大趋势。

荒地和草地群落中,0—5 cm 的表层土壤均被亮蓝溶液大面积染色,且水平方向上染色分布均匀,说明该深度范围内优先流发育不明显,土壤水分以基质流形式运移为主。荒地内,土壤剖面中 20 cm 以下染色区域较小,开挖土壤剖面发现,20 cm 左右存在粘滞层,土壤的渗透性较低,土壤中优先路径的连通性与延伸性较弱<sup>[6]</sup>。草地内,剖面染色区域位于 0—30 cm 的土壤中,且呈聚集分布,优先路径的连通性较强,一方面可能与土壤斥水性有关,因为土壤斥水性会阻滞或延迟水分入渗,从而迫使水流借助大孔隙、裂隙、根孔等优先通道运动<sup>[15]</sup>;另一方面与草本植物的根系特性有关,与群落 4 相比,群落 1、群落 2 和群落 3 的染色深度较大,原因是群落 1、群落 2 和群落 3 的优势种分别是白茅、小蓬草和牛筋草,群落 4 的优势种是荩草,与荩草相比,白茅根系和牛筋草根系较粗,小蓬草为直根系草本植物,平均根系直径也较大,形成较为明显的根系通道,加速水分运

移速率。灌木中,群落 1 内土壤基质流发生层次较深且水平方向上染色分布均匀,主要分布在 0—10 cm 深度范围内,优先流运移较浅,主要分布在 10—25 cm 深度范围内,且土壤剖面中仅有 1 条明显的优先流路径;其余 3 个群落的土壤剖面中均存在 2 条染色路径较深的优先流路径,其中,群落 4 的 2 条染色路径最深,其锋部可达 36 cm。针叶林内,0—3 cm 的表层土壤表层染色较为均匀,剖面中亮蓝溶液绕过基质区后呈网状扩散式蔓延下渗,形成明显的优先路径。乔—灌混合林内基质流发生层次也比较浅,土壤剖面 3 cm 以下土壤水分分化较严重,土壤剖面染色区域呈不规则状,优先流路径大部分由短小的分支组成。林地土壤染色最大深度可达 50 cm,远大于其余 3 种演替梯度下土壤染色最大深度,一是因为与其余演替阶段相比,林地土壤中根系直径较大且分布较深,导致土壤垂直连通性较好,优先流现象更明显;二是因为林地群落地表具有 3~4 cm 的枯枝落叶层,枯枝落叶层内部与根系之间形成适合厌氧动物与微生物生存的环境,同时也会加速土壤中死根系的腐烂,根系腐烂后产生孔隙的几率较高,进一步影响土壤水分入渗<sup>[16-17]</sup>。

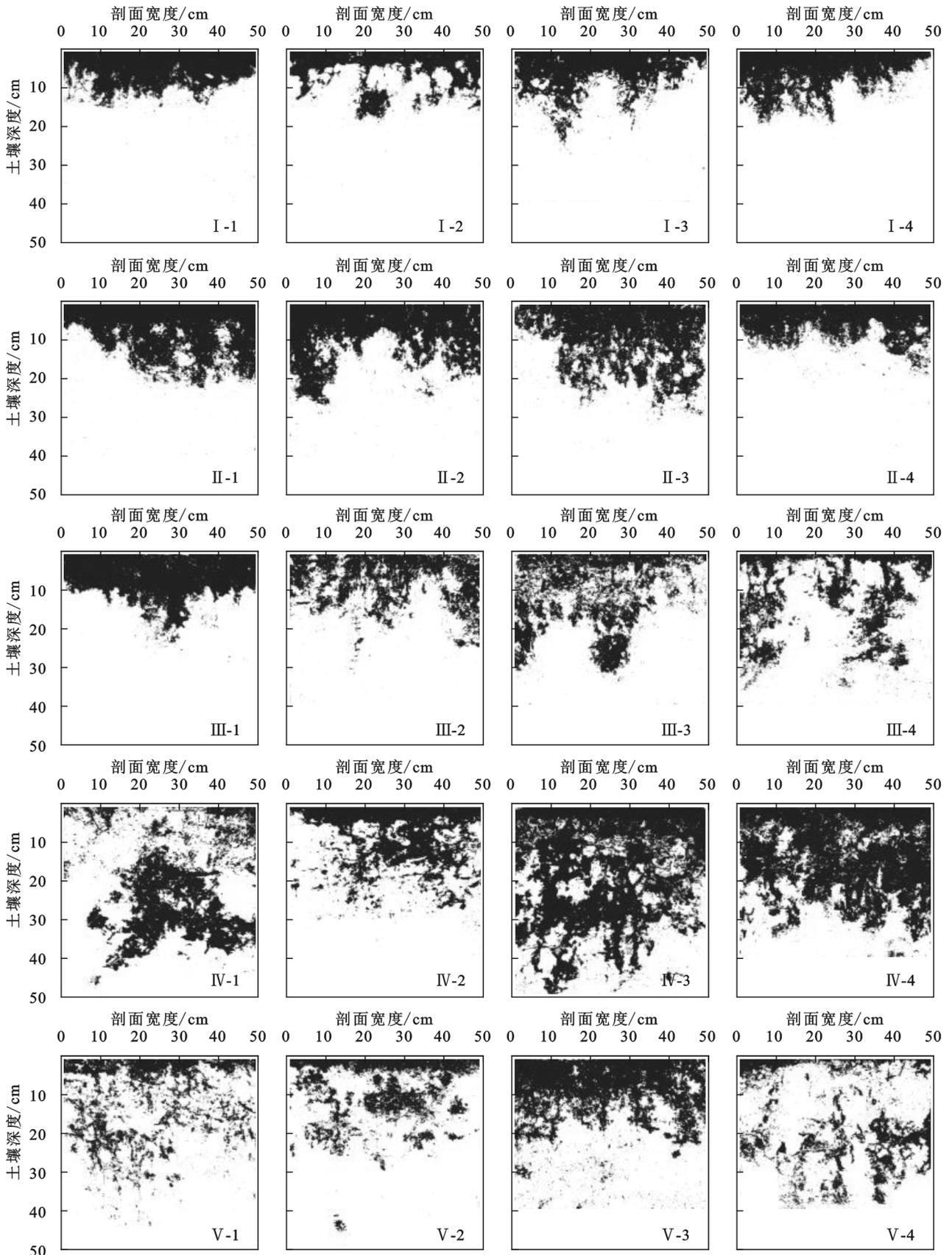
### 3.2 演替梯度下土壤染色面积比分布特征

5 种演替梯度下,土壤剖面染色面积比见图 2,土壤染色面积比在同一演替阶段不同深度处以及同一深度处不同演替阶段间均表现出明显的异质性。5 种演替梯度下针叶林土壤染色面积比最大、其次是乔—灌混合林、灌木、草地,荒地的土壤染色面积比最小。

荒地和草地群落中,0—5 cm 的表层土壤均被染色,土壤染色面积比可达 80% 以上,随土层深度增加,染色面积比均减小,但减小趋势较均匀。草地内,10 cm 以下,群落 1 的土壤染色面积比较大,群落 4 的土壤染色面积比较小,原因是群落 1 的优势种是白茅和小蓬草,群落 4 的优势种是荩草和小薹草,可能是因为荩草和小薹草均为须根草本植物、其平均根系直径较小,而白茅根系较粗且延伸深度较大,小蓬草为直根系草本植物、其平均根系直径较大,根系直径增大一定程度上会导致根系与土壤接触面之间的缝隙增大,进而提高土壤中水分运移的速率。灌木、乔—灌混合林内,随土层深度增加,染色面积比也呈减小趋势,但并非单调递减,其中,灌木中群 3 和群落 4 在 16,12 cm 左右、乔—灌混合林中群落 2 和群落 4 在 15,25 cm 左右均出现局部反弹现象,说明在此处优先流均发生侧渗现象。灌木中群落 2 的染色面积比随土层深度增加很少出现较大反弹上升的情况,说明以白刺花和小薹草为优势种的群落的土壤中发生侧向流的几率较小。针叶林内,由于存在水分的侧向入渗,随土层深度增加,土壤染色面积比整体上呈“S”型趋势减小,先在 0—10 cm 土层中迅速减小,在 10—20 cm 土层中略有增大趋势,20

cm 以下又逐渐减小,土壤染色最大深度可达 50 cm;  
群落 3 在 10—30 cm 染色较为均匀,染色面积比为

36%~42%,说明在此深度范围内,土壤中水分沿着  
稳定的渗流通道向深层土壤运移。



注: I 为荒地, II 为草地, III 为灌木, IV 为针叶林, V 为乔-灌混合林, 下图同。

图 1 优先流垂直分布图像

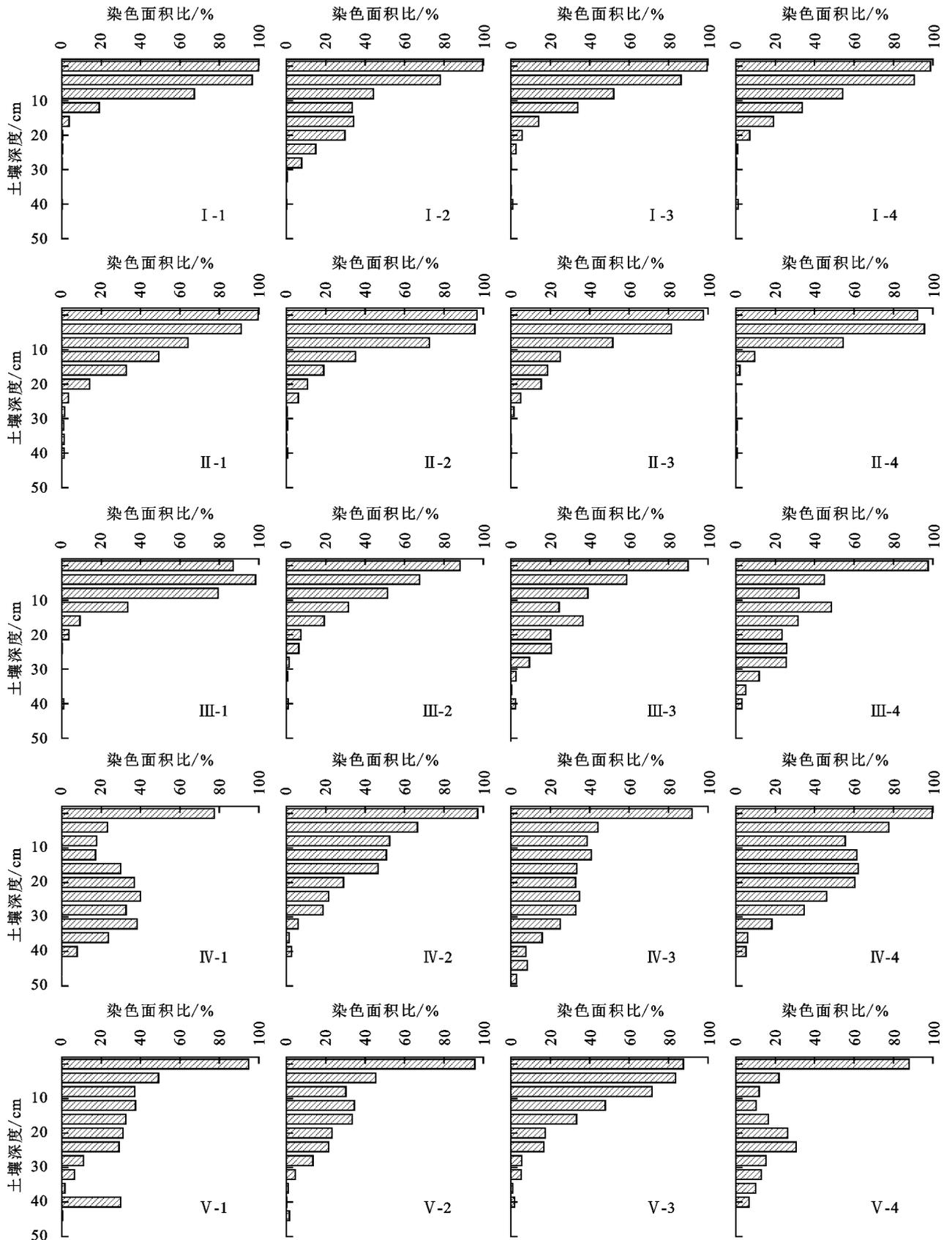


图 2 土壤剖面染色面积比变化

### 3.3 演替梯度下土壤染色路径分布特征

土壤染色路径数量的空间变化可以反映出优先路径的垂直连通状况和分支性<sup>[6,9]</sup>。染色路径宽度

(Stained Path Width, SPW)是指在某一指定深度处,被染色的优先流区域所占的宽度。演替梯度下土壤染色路径数分布特征见图 3,各个群落内,土壤剖面

的染色路径总数和  $SPW < 20$  mm 的数量随土层深度的增加其变化规律较一致,均随土层深度增加表现出多峰状态,但峰值随土层深度增加呈减小趋势; $SPW > 200$  mm 的数量随土层深度增加呈减小趋势。5 种演替梯度下,每个剖面土壤染色路径总数出现峰值的位置均不同,但都集中在 0—20 cm 的表层土壤中,说明水分运动在土壤表层分化较严重。土壤水分运移以优先流为主时, $SPW < 20$  mm 的数量越多,土壤水分运移以基质流为主时, $SPW > 200$  mm 的数量越多<sup>[18]</sup>,由图 3 可知,随演替的进行,染色路径总数、 $SPW < 20$  mm 的数量和  $SPW > 200$  mm 的数量波动趋势逐渐增大。土壤中染色路径总数和  $SPW < 20$  mm 的数量随演替的进行呈增大趋势,而  $SPW > 200$  mm 的数量随演替的进行呈减小趋势,一定程度上说明随演替的进行,土体优先流现象越明显。

荒地内,土壤中染色路径总数为 0~33 个,在 2 cm 左右,染色路径总数值最小,说明此深度处,水分运动以基质流为主,无明显优先流;与其余演替梯度相比,该演替梯度下  $SPW < 20$  mm 的数量较少,但在 10 cm 左右, $SPW < 20$  mm 的数量最大,说明该位置水分分化较严重。草地内,土壤染色路径数量最大值出现在 7—15 cm 的土层中,群落 1 的染色路径总数和  $SPW < 20$  mm 的最大值出现在 15 cm 左右,其深度略大于其余 3 个群落,与该群落内优势种白茅的根系特性有关;在 10 cm 左右土层中,群落 4 中染色路径总数值最大,可达 54 个,10 cm 以下,染色路径总数迅速减小,说明此处土壤优先流分化最严重。灌木中,群落 4 内染色路径数随土层深度增加变动幅度相对较小,说明该群落的土壤优先路径在垂直方向上的连通性较好。林地内,土壤染色路径数量随土层深度增加变化波动较频繁,说明林地内土壤优先流路径随土层深度变化极不稳定。针叶林内,在 20 cm 左右,群落 2,群落 3 和群落 4 内染色路径总数和  $SPW < 20$  mm 的数量均增大,说明此处优先流分化较严重。乔—灌混合林中,土层深度在 25 cm 左右时,群落 4 的染色路径数量值较大,开挖土壤剖面发现,此深度处,剖面内存在一个直径约 4 cm 的蛇洞,可能是因为蛇洞的存在会使本来紧实的土壤变的松动,促进了土壤水分和溶质的运移。

## 4 讨论

### 4.1 土壤理化性质对土壤优先流影响

土壤理化性质与土壤染色面积比之间相关性见表 2,土壤容重、毛管孔隙度、土壤有机质含量与土壤染色面积比之间的相关性较强。荒地和草地中,土

壤容重与土壤染色面积比之间存在极显著负相关性( $p < 0.01$ ),相关值分别 -0.67, -0.71,是因为土壤容重越大,土层越紧实,土壤中大孔隙数量越少,土壤中水分入渗的优先流路径减少<sup>[6]</sup>。荒地、草地和灌木群落中,土壤有机质含量与土壤染色面积比之间存在极显著正相关性( $p < 0.01$ ),相关值分别 0.68, 0.64, 0.63;乔—灌混合林中,土壤有机质含量与土壤染色面积比之间也存在显著正相关性( $p < 0.05$ ),相关值为 0.57,是因为有机质的存在会促进土壤团粒结构的形成,团粒和团粒之间的非毛管孔隙越多,越有利于水分入渗<sup>[19]</sup>。

土壤质地对土壤中优先路径的形成与发展有一定的影响。郑欣等<sup>[20]</sup>通过对北京地区 2 种类型土壤(淋溶褐土和潮土)研究发现,2 种类型土壤的砂粒含量与土壤染色面积比之间存在极显著正相关关系,粉粒含量和黏粒含量与土壤染色面积比之间存在极显著负相关关系( $p < 0.01$ )。孙龙等<sup>[21]</sup>对不同林龄柑橘林地土壤特性与优先路径分布特征进行相关性分析发现,砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量并没有对优先路径构成显著影响。研究发现,灌木和针叶林中,粉粒含量与土壤染色面积比之间存在显著负相关关系( $p < 0.05$ );5 种演替梯度下,砂粒含量、黏粒含量与土壤染色面积比之间无显著相关关系( $p > 0.05$ ),说明 5 种演替梯度下,砂粒含量和黏粒含量对土壤中优先流染色面积影响不显著,这可能与各演替梯度下土壤基质差异不大有关。

### 4.2 根长密度对土壤优先流影响

根长密度是指单位土壤体积所含根系的总长度,一定程度上影响着土壤中水分的运移和传输。将 5 个演替梯度下土壤剖面中的植物根系按照直径  $D \leq 0.5$  mm,  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $2 < D \leq 3$  mm,  $3 < D \leq 5$  mm 和  $D > 5$  mm 划分为 5 个径级,计算并得到每个径级根系的根长密度(图 4)。由图 4 可知,植物根系主要分布在 0—20 cm 表层土壤,各径级根系的根长密度随土层深度增加均减小。 $D \leq 0.5$  mm 根长密度最大,其次是  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $D \leq 2$  mm 的根长密度占总根长密度的 90% 以上。

根长密度与土壤染色面积比之间相关性见表 3,根长密度与土壤染色面积比之间总体上呈正相关关系。土壤染色面积比与荒地、草地、灌木和乔—灌混合林的根长密度间具有极显著相关性( $p < 0.01$ ),相关值分别为 0.80, 0.66, 0.6, 0.77,而与针叶林相关性系数为 0.43,说明植物根系极大地影响着荒地、草地、灌木和乔—灌混合林草地优先流的发生发展,对针叶林的影响较草地小。

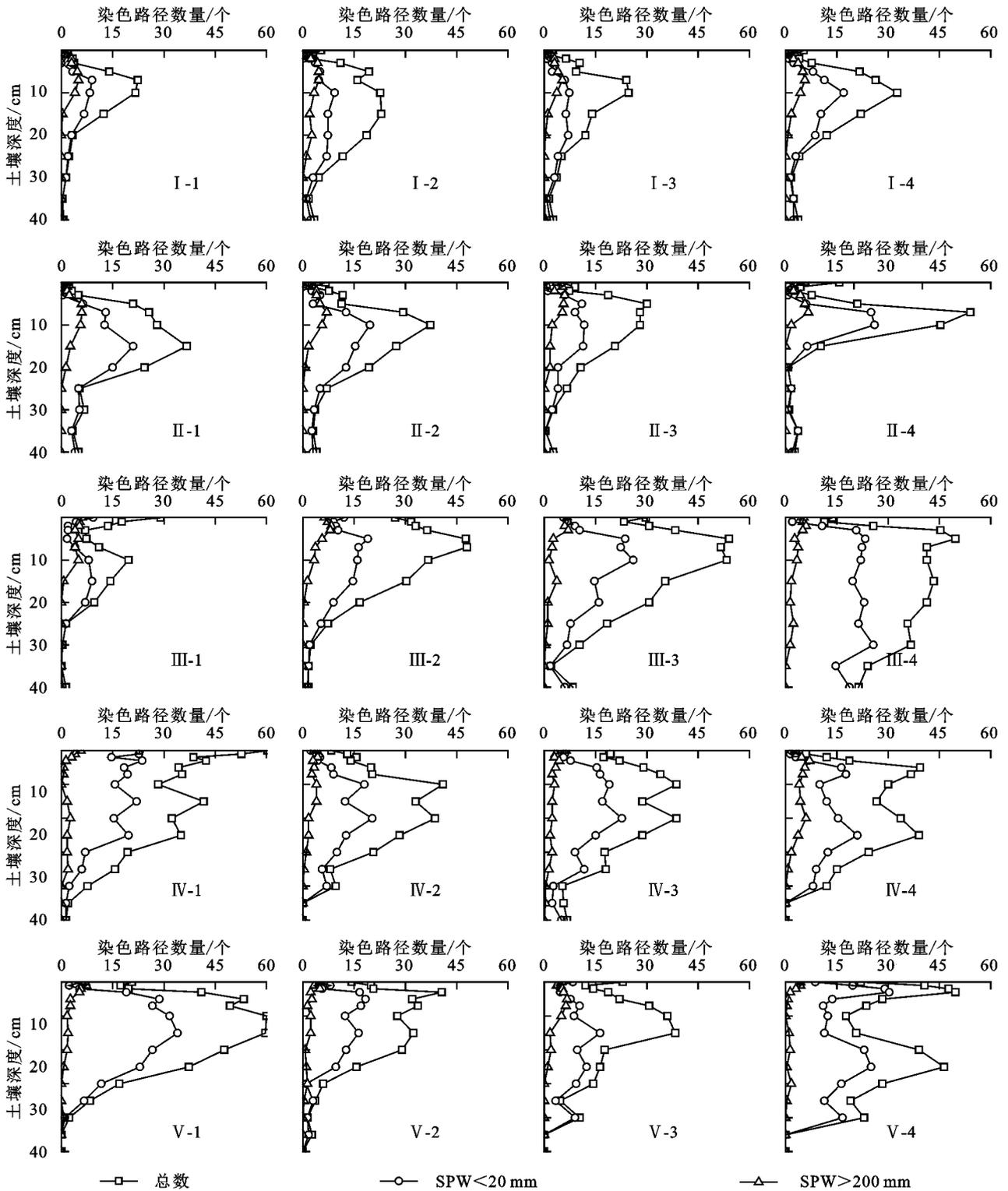


图3 土壤剖面染色路径数分布特征

不同根系径级的根长密度对土壤优先流有着不同的影响。草地和灌木内,土壤染色面积比与根系直径为  $D \leq 0.5$  mm 和  $0.5 < D \leq 2$  mm 的根长密度间均具有显著相关性 ( $p < 0.05$ ), 相关值分别为 0.66, 0.55, 0.60, 0.51, 说明  $D \leq 2$  mm 的细根对草地和灌木内土壤优先路径的影响较大, 而  $D > 2$  mm 粗根对草地和灌木内土壤优先路径的影响较小, 主要是因为  $D > 2$  mm 的粗根在土体

中所占比例分布较低。针叶林内, 土壤染色面积比与各径级根系的根长密度间均无明显相关性 ( $p > 0.05$ ); 乔—灌混合林内, 土壤染色面积比与根系直径为  $D \leq 0.5$  mm,  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $2 < D \leq 3$  mm 和  $3 < D \leq 5$  mm 的根长密度间均具有极显著相关性 ( $p < 0.01$ ), 相关值分别为 0.76, 0.77, 0.64, 0.70, 说明  $0.5 < D \leq 2$  mm 的根系主要影响乔—灌混合林内土壤优先流的产生与发展。

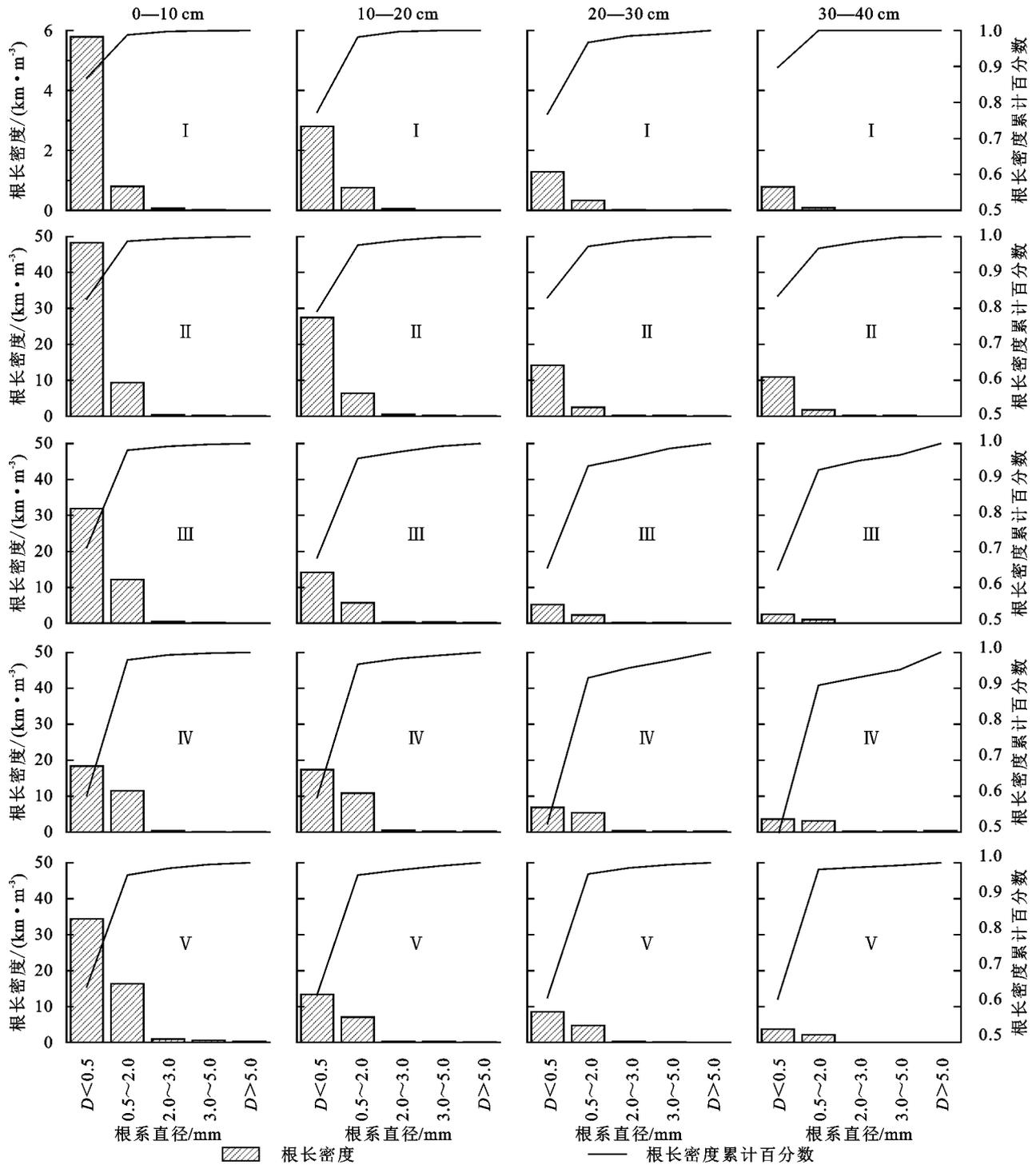


图 4 演替梯度下根长密度分布特征

表 2 土壤理化性质与土壤染色面积比之间相关性

指标	土壤染色面积比				
	荒地	草地	灌木	针叶林	乔-灌混合林
容重	-0.67**	-0.71**	-0.53*	-0.42	-0.57*
毛管孔隙度	0.35	0.85**	0.62*	0.41	0.54*
砂粒含量	0.01	-0.04	0.18	0.35	-0.15
粉粒含量	-0.37	-0.04	-0.67**	-0.50*	0.07
黏粒含量	0.42	0.12	0.47	-0.21	0.14
土壤有机质含量	0.68**	0.64**	0.63**	0.32	0.57*

注: \* 代表  $p < 0.05$ , \*\* 代表  $p < 0.01$ , 下表同。

王赵男等<sup>[22]</sup>通过对长白山系榛子灌木林根系进行染色示踪试验发现,  $D < 1$  mm 的根系对土体优先流的贡献度最大。研究发现, 演替初期,  $D \leq 2$  mm 的细根与土壤染色面积比之间的相关性较大; 演替种后期,  $2 < D \leq 5$  mm 粗根对土壤染色面积比之间的相关性逐渐增大, 但相关系数值仍小于  $D \leq 2$  mm 细根与土壤染色面积比之间的相关系数值, 是因为与粗根相比, 细根在土体中分布较多、寿命较短且非木质化程度高, 大量生长及腐烂后会形成根孔隙通道, 加

快水分运移速率<sup>[6]</sup>。并非所有径级的根系都有利于土壤中优先路径的形成,荒地和针叶林中, $D > 5$  mm 粗根系会阻碍土壤优先流路径的形成,是因为  $D > 5$  mm 粗根系有破坏土壤稳定性团粒结构的作用,会打破大孔隙在垂直方向上的连通性,进而会降低土壤中优先流的发生概率<sup>[13]</sup>。

表 3 根长密度与土壤染色面积比之间相关性

指标	土壤染色面积比				
	荒地	草地	灌木	针叶林	乔—灌混合林
RLD	0.80**	0.66**	0.67**	0.43	0.77**
$D \leq 0.5$ mm	0.81**	0.66**	0.55*	0.37	0.76**
$0.5 < D \leq 2$ mm	0.46	0.60*	0.51*	0.34	0.77**
$2 < D \leq 3$ mm	0.34	0.20	0.36	0.37	0.64**
$3 < D \leq 5$ mm	0.10	0.13	0.20	0.10	0.70**
$D > 5$ mm	-0.05	0.38	0.07	-0.48	0.31

## 5 结论

(1) 随演替的进行,土壤中优先流数量增多且运移路径增大;5 种演替梯度下针叶林土壤染色面积比最大,其次是乔—灌混合林、灌木、草地,荒地的土壤染色面积比最小;随演替的进行,SPW < 20 mm 染色路径数量呈增大趋势,SPW > 200 mm 染色路径数量呈减小趋势。

(2) 土壤容重、毛管孔隙度、土壤有机质含量与土壤染色面积比之间的相关性较强。其中,荒地和草地中,土壤容重与土壤染色面积比之间存在极显著负相关性( $p < 0.01$ );荒地、草地和灌木群落中,土壤有机质含量与土壤染色面积比之间存在极显著正相关性( $p < 0.01$ );乔—灌混合林中,土壤有机质含量与土壤染色面积比之间也存在显著正相关性( $p < 0.05$ )。砂粒含量、黏粒含量与土壤染色面积比之间无显著相关关系。

(3) 植物根系主要分布在 0—20 cm 表层土壤,各径级根系的根长密度随土层深度增加均减小。不同径级根系对土壤优先流路径影响不同,5 种演替梯度下, $D \leq 0.5$  mm 的根长密度与土壤染色面积比之间相关性最显著,其次是  $0.5 < D \leq 2$  mm,  $2 < D \leq 3$  mm,  $3 < D \leq 5$  mm,  $D > 5$  mm 的根长密度与土壤染色面积比之间相关性最不显著。

### 参考文献:

[1] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. Journal of Hydrology, 2011,398(3):191-201.

[2] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报,2015,52(3):477-488.

[3] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):147-156.

[4] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and

solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality [J]. European Journal of Soil Science, 2007,58(3):523-546.

[5] Sukhija B S, Reddy D V, Nagabhusanam P, et al. Recharge processes:piston flow vs preferential flow in semi-arid aquifers of India[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11 (3):387-395.

[6] 曹丹妮.演替梯度下植物群落特征及对土壤抗侵蚀性能影响[D].武汉:华中农业大学,2019.

[7] 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):11-17.

[8] Jost G, Schume H, Hager H, et al. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2012,420:112-124.

[9] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2011,32(3):871-878.

[10] Clark E V, Zipper C E. Vegetation influences near-surface hydrological characteristics on a surface coal mine in eastern USA[J]. Catena, 2016,139:241-249.

[11] Jiang X J, Liu S, Zhang H. Effects of different management practices on vertical soil water flow patterns in the Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2017,166:33-42.

[12] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.田香姣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.

[13] 吕文星.三峡库区 3 种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D].北京:北京林业大学,2013.

[14] 赵其国.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.

[15] 王秋玲,施凡欣,刘志鹏,等.土壤斥水性影响土壤水分运动研究进展[J].农业工程学报,2017,327(24):104-111.

[16] Zhang X Q. Fine-root biomass, production and turnover of trees in relations to environmental conditions [J]. Forest Research, 2001,14(5):566-573.

[17] 魏虎伟,程金花,杜士才,等.利用染色示踪法研究四面山两种林地优先流路径分布特征[J].水土保持通报,2015,35(2):193-197.

[18] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108.

[19] 席海洋,冯起,程玉菲,等.额济纳绿洲土壤入渗特征与土壤状况的关系研究[J].冰川冻土,2008,30(6):976-982.

[20] 郑欣,程金花,张洪江,等.北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J].水土保持学报,2018,32(3):113-119.

[21] 孙龙,张洪江,程金花,等.柑橘林地优先流路径分布及其影响因素[J].东北林业大学学报,2013,41(2):65-69.

[22] 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.