

# 滇南地区普洱茶树根系对土壤优先路径形成的影响

卢华兴<sup>1</sup>, 段旭<sup>1,2</sup>, 赵洋毅<sup>2,3</sup>, 王克勤<sup>2,3</sup>, 杨坤<sup>2</sup>, 朱梦雪<sup>2</sup>

(1.西南林业大学林学院,昆明 650224;2.西南林业大学生态与环境学院,  
昆明 650224;3.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:**为明确滇南地区普洱茶种植下土壤优先路径特征以及根系对其形成的影响,以典型普洱茶产地为研究对象,灌草地为对照,基于染色示踪法与图像处理技术,定量分析普洱茶树根系特征与土壤优先路径的关系,解释根系对优先路径形成的影响。结果表明:(1)茶地和灌草地染色路径宽度随土层深度增加呈不同幅度的下降趋势,茶地优先路径的连通性比灌草地差,优先路径的发育程度小于灌草地;(2)根系主要集中分布在土壤表层,随土层深度增加,根重密度、不同径级根长密度均呈减小趋势,径级 $\leq 1$  mm 的根长密度贡献度最大,达到 84.08%;(3)染色路径宽度与根重密度、径级 $\leq 1, 1\sim 3$  mm 的根长密度呈显著相关( $P < 0.05$ ),其中灌草地染色路径宽度与径级 $\leq 1$  mm 的根长密度呈极显著相关性( $P < 0.01$ ),相关系数为 0.986;(4)染色路径宽度与径级 $\leq 1$  mm 的根长密度拟合效果较好, $R^2$  高达 0.970 6,径级 $\leq 1$  mm 的细根系对优先路径形成的影响程度更大。根系是影响土壤优先路径的重要因素之一,开展滇南地区普洱茶树根系对土壤优先路径影响的研究,可为当地水土流失治理以及水资源管理提供一定的科学依据。

**关键词:** 优先路径; 根系特征; 根重密度; 根长密度; 滇南地区

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0080-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.04.012

## Effect of Root of Pu'er Tea on the Formation of Soil Priority Path in Southern Yunnan

LU Huaxing<sup>1</sup>, DUAN Xu<sup>1,2</sup>, ZHAO Yangyi<sup>2,3</sup>, WANG Keqin<sup>2,3</sup>, YANG Kun<sup>2</sup>, ZHU Mengxue<sup>2</sup>

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

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

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

**Abstract:** In order to clarify the characteristics of soil priority path and the influence of root on the formation of soil priority path under the cultivation of Pu'er tea in southern Yunnan, we took the typical Pu'er tea producing areas as the research object and shrub grassland as the control, and the relationship between root characteristics of Pu'er tea tree and soil priority path was quantitatively analyzed based on the staining tracer method and image processing technology, and the influence of root on the formation of soil priority path was explained. The results showed that: (1) With the increasing of soil depth, the width of dyeing path in tea field and shrub grassland decreased in different extent. The connectivity of priority path in tea field was worse than that in shrub grassland, and the development degree of priority path in tea field was less than that in shrub grassland. (2) The root mainly distributed in the surface of soil, with the increasing of soil depth, root weight density and root length density of different diameter classes all decreased, and the root length density of diameter class  $\leq 1$  mm contributed the most, reaching 84.08%. (3) The width of staining path was significantly correlated with root weight density, root length density of diameter class  $\leq 1$  mm and  $1\sim 3$  mm ( $P < 0.05$ ). The width of staining path of shrub grassland was significantly correlated with root length density of diameter class  $\leq 1$  mm ( $P < 0.01$ ), and the correlation coefficient was 0.986. (4) The staining path width had a better fitting effect with the root length density of diameter class  $\leq 1$  mm, and the  $R^2$  was as high as 0.970 6.

收稿日期: 2021-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42067005, 31860235); 云南省教育厅科学研究基金项目(2021Y243); 云南省基础研究计划项目(2018BB018); 云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-226, YNWR-QNBJ-2019-215); 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定位观测研究站”(2020132078); 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(2020-YN-13)

第一作者: 卢华兴(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林土壤学研究。E-mail: 405169351@qq.com

通信作者: 段旭(1983—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事森林培育和生态水文研究。E-mail: feixue20012360@163.com

The fine roots with diameter class  $\leq 1$  mm had a greater influence on the formation of priority path. Root is one of the important factors that affect soil priority path. The research on the influence of Pu'er tea tree root on soil priority path in southern Yunnan can provide some scientific basis for soil erosion control and water resources management.

**Keywords:** priority path; root characteristics; root weight density; root length density; southern Yunnan area

土壤水分和溶质运移是土壤学研究的难点和热点<sup>[1]</sup>,而优先流作为常见的土壤水分运动形式<sup>[2]</sup>,为土壤中水分和溶质快速迁移提供优先通道<sup>[3]</sup>,即形成优先路径。有研究<sup>[4]</sup>表明,优先流的发生对土壤水文过程具有深远影响,减少地表径流和水土流失,对地下水补给至关重要。云南省内南部地区是世界茶叶的发源地,茶树种质资源丰富,人工种植规模较大<sup>[5]</sup>,茶农缺乏水土保持意识,茶地多处于地势起伏较大的荒山荒坡,雨旱两季分明且雨季较为集中,受地形和气候的影响,旱季水资源利用效率不高,且雨季容易带来水土流失的风险<sup>[6]</sup>。因此,提高水资源利用效率和减少水土流失是该区域发展茶业待以解决的问题。开展滇南地区茶种植下土壤优先路径研究,对解决该区域水土流失、农业资源的高效利用和水资源管理都具有十分重要的意义。

影响土壤优先路径形成的因素较多,国内外已经有大量相关的研究报道。张洪江<sup>[7]</sup>研究认为,优先路径是由植物根系、动物活动、土壤膨胀收缩以及湿润锋不稳定性所形成的渗透通道;Anderson等<sup>[8]</sup>提出优先路径的形成因素分为物理和化学2种;阮芯竹<sup>[9]</sup>研究发现,除土壤基本理化因子外,根重密度和根孔数也是影响优先路径的因素;植物根系是土壤层的重要组成部分,在土壤内可形成巨大的空间网络结构,根系通道加快优先流的发生<sup>[10]</sup>;张建丰等<sup>[11]</sup>研究发现,植物根系对优先流的形成有重要影响;程竞萱等<sup>[12]</sup>、魏虎伟<sup>[13]</sup>研究认为,植物生长过程中根系穿插挤压土壤形成裂隙,或者根系死亡腐烂而形成大孔隙,由于根系的向性生长还能形成垂直根孔<sup>[14]</sup>,根系对优先流的产生起先导作用。综合国内外众多学者的研究成果,植物根系<sup>[9-12,14]</sup>是影响优先路径分布不可忽视的因素,根长密度、根重密度、根孔数作为植物根系结构的特征指标,影响着优先路径的形成<sup>[9-10,12]</sup>;邵一敏等<sup>[15]</sup>研究发现,细根系对优先流的

形成具有重要影响。由于滇南地区荒地被广泛开垦用于种植普洱茶树,种植过程中土地翻耕频繁且大量喷洒农药极易造成水土流失和地下水体污染。课题组前期研究<sup>[16]</sup>表明,普洱茶种植对土壤大孔隙会产生显著影响,但目前关于茶种植下对土壤优先流及路径等方面的研究还鲜有报道。因此,本研究以滇南地区普洱茶产地(灌草地作对照)作为研究对象,定量分析土壤优先路径与普洱茶树根系的关系,探讨根系对优先路径形成的影响,为区域水土流失治理以及水资源管理提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省普洱市思茅区踏青河源头小流域(22°29'—22°43' N, 101°10'—101°26' E),海拔800~1 964 m。该区属南亚热带高原性季风气候,四季温暖,垂直气候分布明显,具有多雨、湿润、静风的特点;雨量充沛,年均降水量1 524.4 mm,雨旱两季界线分明,雨季集中在6—10月,占全年降水量的92.4%以上;年平均气温18.2℃,最冷月1月平均气温10.5℃,最热月6月平均气温21.7℃;光热资源丰富,年平均日照时间2 125.1 h,日照率为48%;流域土壤类型为山地红壤,质地多为粉砂质壤土,pH多呈微酸性至酸性,森林覆盖率达70.28%。植被均以云南松(*Pinus yunnanensis*)、思茅松(*Pinus kesiya* Royle ex Gordon var. *Langbianensis* (A. Chev) Gaussen)、大叶藤黄(*Garcinia xanthochymus* Hook.f. ex T. Anders)等为主<sup>[16]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 为了尽可能降低外界因素对试验的影响,本试验选择地势平缓、立地条件基本一致的地段,分别布设3个15 m×15 m茶地样地和3个10 m×10 m灌草地样地,总计6个样地。样地基本情况见表1。

表1 研究区样地基本概况

样地类型	海拔/m	坡度/(°)	含水率/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	饱和导水率/(mm·min <sup>-1</sup> )	土壤质地/%			有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )
								砂粒	粉粒	黏粒	
茶地	1228	15~26	23.53	1.31	55.91	54.48	1.64	15.10	50.15	34.75	19.35
灌草地	1253	18~30	23.72	1.27	53.38	43.47	2.70	72.32	27.22	0.45	12.99

1.2.2 染色示踪试验 试验于2020年7月1日至8月30日在踏青河源头小流域茶地和灌草地样地进行。首先清理样地中较大的石块和树枝,除去样点土

壤表层的植物以及较厚的地被物,然后将长70 cm、宽70 cm、高50 cm的不锈钢框以宽垂直于水平面的方向插入土体内30 cm,在不锈钢框内施加浓度4 g/

L 的亮蓝溶液 12 L(模拟当地 24 h 大雨累计降雨量 25 mm)进行染色示踪试验,在不锈钢框上覆盖塑料薄膜防止其他水分输入对试验结果造成干扰。静置 24 h 后开挖染色剖面,根据染色结果将亮蓝染色区域定义为优先流路径分布区域,并使用 1 300 万像素的数码相机进行拍摄,保持相机镜头与土壤剖面相互垂直,以获取染色图像。

**1.2.3 优先路径提取与计算** 使用 Photoshop CS 5 软件对染色图像进行预处理,通过图像反相处理使染色区域变为黑色、未染色区域变为白色,调整图像阈值使染色图像与实际情况一致。将处理后的染色图像导入 Image Pro Plus 6.0 软件中进行黑白像素统计,根据其结果计算染色路径影响半径、优先路径重心坐标、染色路径宽度,并以此用 Surfer 15 软件处理得到优先路径的位置分布。

**1.2.4 根系特征测定** 分层采集土样的同时进行根系收集,用双层纱布包裹后洗净根系上附着的泥土并晾干,在温度为 85 ℃ 条件下烘干至恒重后记录其质量。以根系直径为标准,将根系分为 5 个径级:≤1, 1~3, 3~5, 5~10, >10 mm,测量不同径级根系的长度,分别统计不同土层深度各个径级根系的总根长,计算根重密度、根长密度以及贡献度。

(1)根重密度 根重密度也叫做根系生物量,是指单位体积土壤中植物根系的干重,可以反映植物根系的生长状况<sup>[10]</sup>。根重密度越大,说明植物根系越发达,植物根系与土壤的接触范围、形成的间隙就越大,容易形成大孔隙的优先路径<sup>[17]</sup>,其计算公式为:

$$q_m = \sum \frac{M_i}{V_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中: $q_m$ 为根重密度(kg/m<sup>3</sup>); $M_i$ 为某一土层深度根系重量(kg); $V_{\text{soil}}$ 为土壤体积(m<sup>3</sup>)。

(2)根长密度 根长密度是指单位体积土壤中分布的不同径级根系的总长度状况,是反映植物根系生长状况的重要参数<sup>[10]</sup>,其计算公式为:

$$q_l = \sum \frac{L_r}{V_{\text{soil}}} \quad (2)$$

式中: $q_l$ 为根长密度(m/m<sup>3</sup>); $L_r$ 为某一径级根系长度(m); $V_{\text{soil}}$ 为土壤体积(m<sup>3</sup>)。

(3)贡献度 贡献度是指整个土壤剖面优先流区内不同径级根系的根长密度与整个剖面总根长密度的比值<sup>[10]</sup>,可以反映不同径级根长密度对优先流和优先路径的作用程度。首先测定整个剖面 5 个径级根系的根长密度,然后计算整个剖面所有径级根系总根长密度,最后将整个剖面≤1 mm 根长密度与总根长密度之比得到≤1 mm 根系对优先流的贡献度,其他径级根系贡献度计算方法相同。

## 1.3 数据处理

用 Excel 2016、Origin 2019 软件绘图作表,用 Photoshop CS 5、Image Pro Plus 6.0、Surfer 15 软件处理染色照片,用 SPSS 20.0 统计软件进行显著性检验和 Pearson 相关分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶地和灌草地的优先路径特征

**2.1.1 位置分布特征** 基于图像处理和分析技术,利用所获取的染色剖面图像,对优先路径的位置分布进行分析。通过 Image Pro Plus 6.0 软件提取染色路径影响半径重心坐标,利用 Surfer 15 软件绘制不同径级土壤优先路径的位置分布图(图 1)。图 1 中灰度深浅可以反映某一径级优先路径在不同土层深度的分布情况;当某一径级的优先路径大量聚集在一个区域时,说明该径级范围的优先路径在土壤中连通性较好<sup>[18]</sup>。从图 1 可以看出,茶地染色半径为≤1, 1~2.5, 2.5~5 mm 的优先路径呈不同灰度点状分布,优先路径在土壤中的连通性较差,而染色半径为 5~10, >10 mm 的优先路径在土壤中连通性较好。灌草地连通性最好的染色半径为≤1 mm,其次是 >10, 5~10 mm, 1~2.5 mm 的连通性最差。

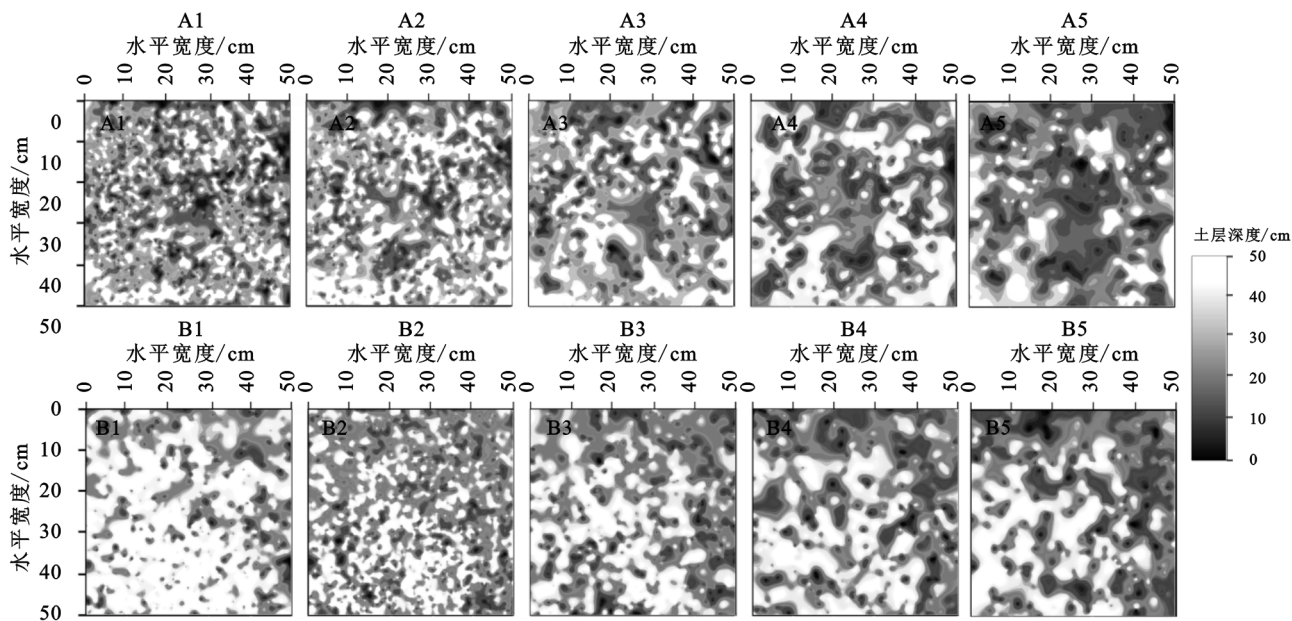
比较茶地和灌草地不同径级土壤优先路径的连通性,茶地 5 个径级优先路径的连通性比灌草地差。随着土层深度的增加,茶地优先路径的连通性愈来愈好,这是茶地土壤存在耕作层导致的,由于人工耕作方式使得原有的土壤结构遭到破坏,打破茶地优先路径的上下连通性,影响土壤水分的垂直运移,增大水分横向侧流的几率。灌草地优先路径的连通性较好,但也存在连通性较差的情况(图 1B2),这主要是因为土壤中存在大量的植物根系,植物根系及其形成的根孔对土壤优先路径的形成和发育起着重要作用。

**2.1.2 染色路径宽度特征** 从图 2 可以看出,茶地各个剖面的染色路径宽度变化趋势呈现单调下降,且染色路径宽度均在表层达到最大值,占对应宽度(500 mm)95%以上。在 0—10 cm 土层深度范围内,茶地染色路径宽度下降幅度平稳,平均染色路径宽度在 360 mm 以上,10 cm 土层深度以下各个剖面的染色路径宽度下降趋势较急,说明随着土层深度增加,优先流快速下渗,优先路径发育良好,表现出优先路径的连贯性和优势性。灌草地各个剖面的染色路径宽度下降幅度波动较大,变化趋势不呈单调下降,变化趋势总体呈“S”形。

整体来讲,茶地和灌草地各个剖面的染色路径宽度均随着土层深度的增加而逐渐下降。由于茶地受人为耕作方式的影响,表层土壤植物根系和动物活动所形成的大孔隙被破坏,打破优先路径的上下连通

性,也导致表层土壤疏松,增大亮蓝溶液的水平运动空间,不断延伸水平范围内的染色路径宽度,使得表

层土壤茶地染色路径宽度明显大于灌草地,体现了茶地和灌草地优先流的空间异质性。



注:A为茶地;B为灌草地;其后数字1~5分别表示土壤优先路径的染色半径为 $\leq 1, 1\sim 2.5, 2.5\sim 5, 5\sim 10, >10$  mm。

图 1 茶地和灌草地不同径级优先路径的位置分布

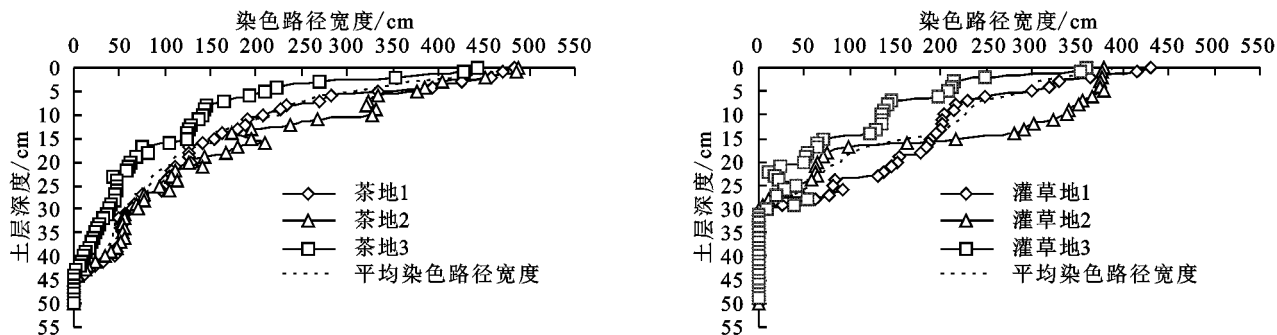


图 2 茶地和灌草地染色路径宽度变化规律

## 2.2 茶地和灌草地的根系特征

2.2.1 根重密度 从图 3 可以看出,茶地和灌草地表层土壤 0—10 cm 根重密度最大,最大值分别为 1.48, 2.45  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,说明植物根系主要分布在 0—10 cm 表层土壤中,40—50 cm 深层土壤根系分布较少,根重密度较小,其中茶地根重密度仅为 0.11  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。根长密度变化规律与根重密度基本一致,根长密度最大值出现在 0—10 cm 土层中,分别为 124.3, 380.05  $\text{m}/\text{m}^3$ ,且灌草地根长密度最大值是茶地的 3 倍。茶地和灌

草地的表层土壤覆盖地被植物及其枯枝落叶,使得有机质来源丰富,土质疏松,有利于植物根系的分布和生长,故表层土壤根长密度、根长密度最大。由于茶树根系稀疏,灌草地中草本植物生长旺盛,具有庞大的根系数量,使得同一土层灌草地根重密度、根长密度都远远大于茶地。

总体来看,随着土层深度的增加,茶地和灌草地根重密度、根长密度都呈现减少的趋势,这与染色路径宽度变化情况一致。

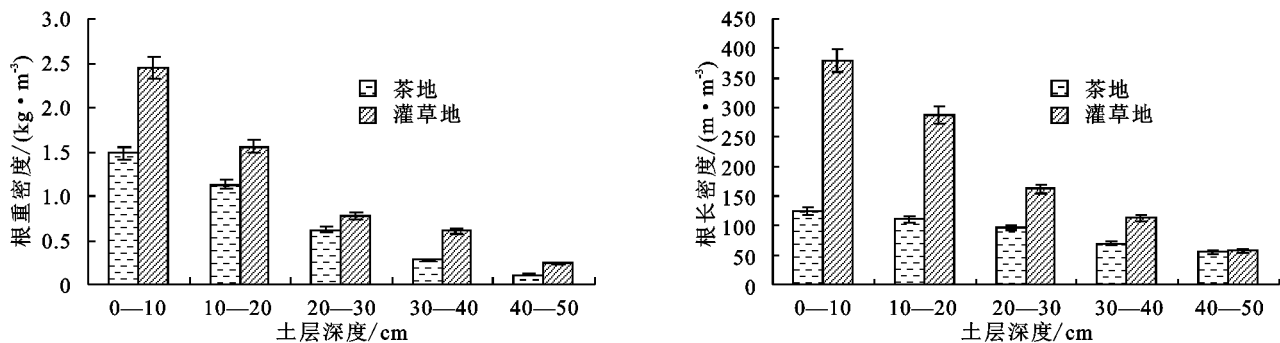


图 3 茶地和灌草地根重密度、根长密度的差异变化

2.2.2 根长密度 尽管茶地和灌草地根长密度随土层深度的增加逐渐减小,但不同径级的根长密度变化差别较大。由图 4 可以看出,茶地根系直径分为 3 个径级: $\leq 1$ , 1~3, 3~5 mm,不同径级根长密度随土层深度的增加呈减小的趋势,径级在 1~3, 3~5 mm 范围内根长密度随土层深度增加基本成单调递减变化, $\leq 1$  mm 范围的根长密度在 20—30 cm 土

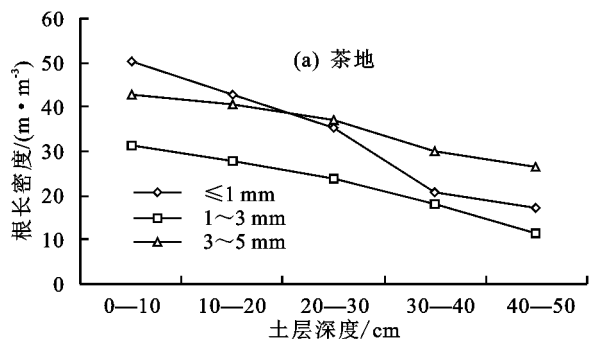
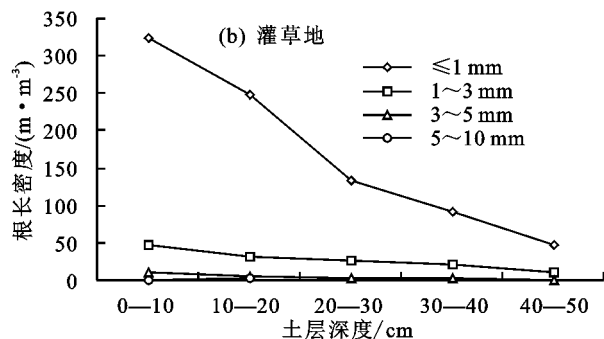


图 4 茶地和灌草地不同径级根长密度的变化

层出现较大波动,根长密度急剧减少。灌草地根系直径分为 4 个径级: $\leq 1$ , 1~3, 3~5, 5~10 mm,径级在 1~3, 3~5, 5~10 mm 范围内根长密度较小,随土层深度增加变化幅度不大, $\leq 1$  mm 范围的根长密度随土层深度增加而减少的幅度较为明显。根长密度变化幅度的差异性除了植物本身,与土壤的异质性有很大关系。



2.2.3 根系贡献度 由表 2 可以看出,茶地细根系(径级 $\leq 1$  mm)对优先路径的贡献度最大,为 38.84%,其次是粗根系(径级 3~5 mm)对优先路径的贡献度为 36.42%。灌草地细根系(径级 $\leq 1$  mm)对优先路径的贡献度最大,达到 84.08%,其它径级根长密度对优先路径的作用程度不突出,贡献度不超过 15%。茶地不同径级根长密度贡献度从大到小顺序为 $\leq 1$ , 3~5, 1~3 mm,而灌草地顺序为 $\leq 1$ , 1~3, 3~5, 5~10 mm。由此可以看出,茶地和灌草地根系径级为 $\leq 1$  mm 的细根系对优先路径的贡献度最大,这主要是因为细根系在植物根系中占比较大,在土壤中分布范围较广,在一定程度上说明细根系更能影响土壤优先路径的形成。

表 2 不同径级根长密度的贡献度 单位:%

样地类型	$\leq 1$ mm	1~3 mm	3~5 mm	5~10 mm
茶地	38.84	24.74	36.42	—
灌草地	84.08	13.56	1.88	0.48

### 2.3 土壤理化因子与优先路径的关系

土壤优先路径的形成是一个复杂的过程,是众多因素共同作用的结果。土壤作为土壤水分和溶质运移的主体,土壤理化性质影响着优先路径的形成。将土壤容重、含水率、总孔隙度、饱和导水率、有机质含量、土壤质地与染色路径宽度进行相关分析(表 3)可知,茶地和灌草地染色路径宽度均与饱和导水率表现为极显著正相关( $P < 0.01$ ),与有机质含量、砂粒含量、黏粒含量的相关性不显著。茶地染色路径宽度与土壤容重呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与含水率、总孔隙度呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),但与粉粒含量呈显著负相关。灌草地除粉粒含量外,染色路径宽度与土壤容重、含水率、总孔隙度的相关性与茶地基本一

致,但只表现为显著相关( $P < 0.05$ )。茶地和灌草地土壤的异质性导致染色路径宽度与土壤理化因子的相关性存在差异。总体来看,土壤容重越小,透水性较好,土壤孔隙度和含水率越高,越有利于土壤优先路径的形成。

### 2.4 根系对优先路径的影响

茶地和灌草地根重密度、根长密度均随土层深度的增加呈现减小趋势,与染色路径宽度变化趋势相同,而不同径级根长密度对优先流的贡献度也存在差异,这表明植物根系与优先路径的形成关系密切。为了进一步证实茶地和灌草地植物根系对优先路径的影响,将根重密度、不同径级根长密度与对应土层深度的染色路径宽度进行 Pearson 相关分析。由表 4 可以看出,茶地和灌草地的根重密度均与染色路径宽度呈显著正相关( $P < 0.05$ ),相关系数 $> 0.95$ 。不同径级根长密度与染色路径宽度相关性存在差异,茶地径级 $\leq 1$ , 1~3 mm 范围根长密度与染色路径宽度呈显著正相关( $P < 0.05$ );灌草地染色路径宽度与 $\leq 1$  mm 范围根长密度呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数为 0.986。茶地和灌草地染色路径宽度均与径级 $\leq 1$  mm 范围根长密度的相关系数最大,而与径级 $> 3$  mm 范围根长密度的相关性不显著。说明根系径级 $> 3$  mm 的粗根系并不能显著影响优先路径的分布,而根系径级 $\leq 1$  mm 的细根对优先路径的分布起关键作用,这与上文径级为 $\leq 1$  mm 的根长密度对优先路径的贡献度结果基本一致。

为了进一步探讨根重密度、径级 $\leq 1$  mm 范围根长密度与染色路径宽度的关系,将根重密度、径级 $\leq 1$  mm 根长密度与染色路径宽度进行回归拟合。由图 5 和图 6 可以看出,根重密度、径级 $\leq 1$  mm 范围根长

密度越大,染色路径宽度越大。根重密度、径级 $\leq 1$  mm 范围根长密度与染色路径宽度的拟合效果较好,根重密度  $R^2 > 0.90$ ,根长密度  $R^2 > 0.88$ 。植物根系主要分布在土壤表层,表层土壤植物根重密度、根长密度最大,而表层土壤染色路径宽度也较深层土壤大,随着土层深度增加而逐渐减小,植物根系对优先路径的分布具有一定的影响;灌草地根重密度、根长

密度均大于茶地,径级 $\leq 1$  mm 范围根长密度与染色路径宽度的  $R^2$  也高于茶地,灌草地拟合效果最好,  $R^2$  为 0.970 6,这主要是因为灌草地草本植物较多,生长旺盛,根系数量庞大,且一年生草本植物死亡后根系腐烂形成大量细小的土壤孔隙,有利于水分入渗,使得灌草地根重密度、根长密度更大,与染色路径宽度的相关性更好。

表3 染色路径宽度与土壤理化因子的相关性

样地类型	指标	染色路径宽度	土壤容重	含水率	总孔隙度	饱和导水率	有机质含量	土壤质地		
								砂粒	粉粒	黏粒
茶地	染色路径宽度	1	-0.998**	0.976**	0.992**	0.983**	0.818	0.212	-0.879*	0.487
	土壤容重		1	-0.967**	-0.984**	-0.982**	-0.789	-0.272	0.888*	-0.432
	含水率			1	0.970**	0.978**	0.916*	0.106	-0.888*	0.603
	总孔隙度				1	0.958*	0.836	0.103	-0.817	0.550
	饱和导水率					1	0.842	0.251	-0.947*	0.500
	有机质含量						1	-0.234	-0.747	0.843
	砂粒							1	-0.434	-0.690
	粉粒								1	-0.353
	黏粒									1
	染色路径宽度	1	-0.915*	0.888*	0.945*	0.974**	0.878	0.847	-0.845	-0.053
土壤容重		1	-0.995**	-0.969**	-0.872	-0.879*	-0.866	0.853	0.387	
含水率			1	0.973**	0.824	0.829	0.876	-0.864	-0.382	
总孔隙度				1	0.865	0.792	0.901*	-0.896*	-0.161	
灌草地	饱和导水率					1	0.931*	0.747	-0.741	-0.129
	有机质含量						1	0.747	-0.731	-0.419
	砂粒							1	-0.999**	-0.077
	粉粒								1	0.044
	黏粒									1

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

表4 染色路径宽度与根重密度、根长密度的相关性

样地类型	指标	染色路径宽度	根重密度	不同径级根长密度					
				$\leq 1$ mm	1~3 mm	3~5 mm	5~10 mm		
茶地	染色路径宽度	1	0.954*	0.917*	0.891*	0.869	—		
	根重密度		1	0.984**	0.961**	0.960**	—		
	不同径级	$\leq 1$ mm			1	0.976**	0.990**	—	
	根长密度	1~3 mm				1	0.989**	—	
		3~5 mm					1	—	
		5~10 mm						—	
	染色路径宽度	1	0.952*	0.986**	0.978*	0.942	0.631		
	根重密度		1	0.968**	0.967**	0.971**	0.565		
	灌草地	不同径级	$\leq 1$ mm			1	0.956*	0.995**	0.684
	根长密度	1~3 mm				1	0.936*	0.454	
	3~5 mm					1	0.709		
	5~10 mm						1		

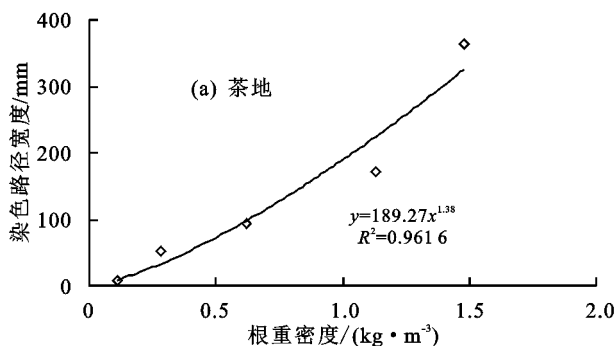
### 3 讨论

本研究发现,茶地优先路径的连通性比灌草地差,主要是因为茶地存在耕作活动,破坏土壤大孔隙

的垂直连通性,增加水分横向运动的几率。邵一敏等<sup>[18]</sup>研究表明,人为耕作在一定程度上破坏土壤的孔隙结构,进而影响优先路径的形成。染色路径宽度

更能反映亮蓝染色情况的差异,随着土层深度增加,染色路径宽度逐渐减少,但减少幅度有所差异,程竟萱等<sup>[12]</sup>研究表明,优先流具有空间异质性,优先流在同一土层深度可能会发生侧渗现象。

整体来讲,茶地优先路径连通性差,不利于优先



路径的形成,优先路径发育程度也较灌草地差。邵一敏等<sup>[18]</sup>利用分形维数结合染色示踪法分析干热河谷优先路径分布特征研究表明,其优先路径发育程度为林地>农地>荒草地>园地,与本研究结果基本一致。

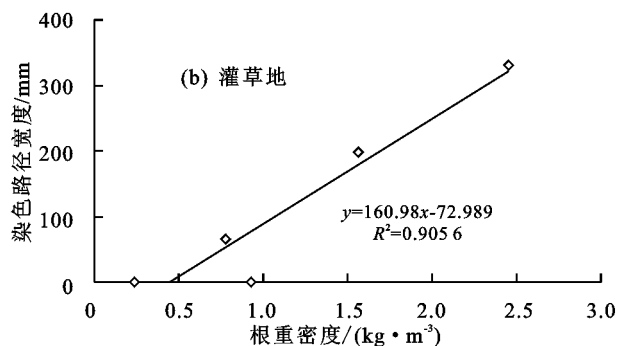


图 5 染色路径宽度与根重密度的关系

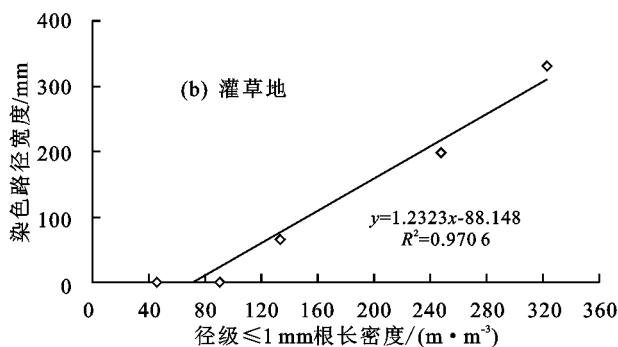
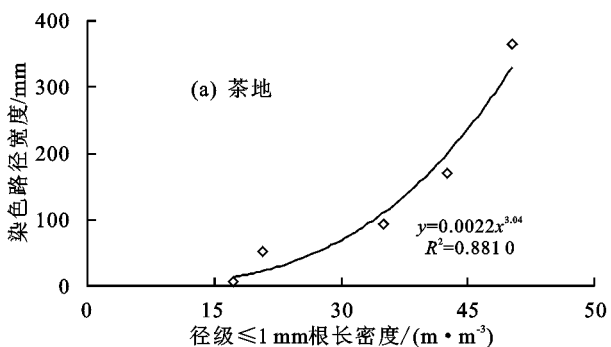


图 6 染色路径宽度与径级≤1 mm 根长密度的关系

茶地和灌草地根系特征有一定差异,但随着土层深度的增加,根重密度、根长密度均呈减小趋势,这与张英虎等<sup>[10]</sup>、邵一敏等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。表层土壤根重密度、根长密度最大,而且同一土层深度灌草地根重密度、根长密度始终大于茶地,首先是因为根系主要集中在土壤表层,且含量较高<sup>[10,14]</sup>,而深层土壤质地紧实,容重较大,不利于根系生长,故根系含量低。此外,由于根系结构在土体内的异质性,同一土层深度不同植物根系结构也会出现较大差异。根系生长是一个动态的过程<sup>[19]</sup>,不同的土壤质地和立地条件,根系分布格局也多种多样<sup>[10]</sup>。将不同径级根长密度和贡献度进行对比发现,茶地和灌草地径级≤1 mm的根长密度最大,根系贡献度也是如此,其中灌草地径级≤1 mm 范围根系对优先路径的贡献度达到 84.08%,这主要是由植物本身的特性决定的,植物长势好,侧根发达,须根较多,使得径级≤1 mm 的细根系比其他径级根系在土壤中的占比大,对优先路径贡献度高,这与陈婷婷等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。

根系是影响优先路径形成的重要因素,径级≤1 mm 细根系对优先路径的影响程度更大,与众多学者<sup>[21-23]</sup>研究结果相符。不论是活根系还是死根系,都会产生优先流通道,改善土壤理化性质<sup>[21]</sup>,根系和

土壤接触面之间的缝隙以及死根系形成的根孔,提高土壤孔隙度,促进土壤水分和溶质的运移,也利于优先路径的形成<sup>[10]</sup>。根重密度和根长密度与染色路径宽度变化趋势一致,将其与染色路径宽度进行相关分析,根重密度、径级≤1,1~3 mm 范围根长密度与染色路径宽度呈显著正相关( $P < 0.05$ ),其中灌草地径级≤1 mm 范围根长密度与染色路径宽度呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数为 0.986,而径级 3~5,5~10 mm 范围根长密度与染色路径宽度的相关性很小。程金花等<sup>[22]</sup>研究发现,除了径级≤1,1~3 mm 范围根长密度外,优先路径也与径级 3~5 mm 范围根长密度显著相关,与本研究结果不尽相同,其原因除植物本身的差异外,主要是受研究区环境条件的影响。将根重密度、径级≤1 mm 范围根长密度与染色路径宽度进行拟合,拟合效果较好, $R^2$ 为 0.88~0.97,说明根重密度、径级≤1 mm 范围根长密度与优先路径密切相关。灌草地径级≤1 mm 范围根长密度的  $R^2$  为 0.9706,进一步说明细根系对优先路径的影响程度较大。程金花等<sup>[22]</sup>研究认为,粗根系能够产生孔隙,但也使土壤团聚体破碎,堵塞土壤孔隙而不利于优先路径的形成;董宾芳<sup>[23]</sup>研究表明,与粗根系相比,细根系寿命短而且木质化程度低,细根系大量增生或死亡都

会形成更多的根孔隙通道,促进优先路径的形成。

本研究定量分析根系与优先路径的量化关系,深入探讨根系对优先路径形成的影响,但由于优先流的空间异质性和优先路径影响因素较多,试验结果一定程度上受其他因素的干扰,如何量化其他因素和优先路径的关系以及众多因素之间的共同作用是有待解决的问题,需要花大量时间进一步探索。

随着科技的发展,GIS、CT扫描等现代技术相继投入优先流的研究,能够获取精确的数据来提高试验精度,今后的研究在提高试验精度的同时,着重量化其他因素和优先路径的关系以及各因素之间的共同作用,形成系统的优先路径判断标准,建立、优化优先路径与众多影响因素的数学模型,进一步明确优先路径的形成机理,以期对滇南地区水土流失治理以及水资源管理提供理论基础和科学依据。

## 4 结论

(1)茶地优先路径的连通性比灌草地差,优先路径发育程度也不如灌草地。茶地和灌草地染色路径宽度随着土层深度的增加均呈逐渐下降趋势,但下降程度存在一定波动。由于茶地存在耕作层,频繁翻耕破坏茶地土壤的孔隙结构,导致茶地优先路径的连通性比灌草地差,水分横向测流使得茶地表层土壤染色路径宽度明显大于灌草地。

(2)茶地和灌草地根重密度、不同径级根长密度随土层深度的增加逐渐减小, $\leq 1$  mm的细根系在土壤中占比较大,对优先路径的贡献度最大。

(3)植物根系特征与染色路径宽度的关系密切。染色路径宽度与根重密度、径级 $\leq 1, 1\sim 3$  mm根长密度具有显著相关性( $P < 0.05$ ),与灌草地径级 $\leq 1$  mm根长密度具有极显著相关性( $P < 0.01$ )。

(4)植物根系是影响优先路径形成的重要因素。根系径级为 $\leq 1$  mm的细根系对优先路径的形成起着关键作用,细根系大量增生或死亡所形成的根孔隙通道有利于优先路径的形成,而径级 $> 3$  mm的粗根系对优先路径的形成影响不大。

### 参考文献:

[1] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, et al. Preferential flow paths: Biological 'hot spots' in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 729-738.

[2] Loius W D, Coen J, Ritsema O, et al. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1): 4-22.

[3] 盛丰, 张利勇, 吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 1-10.

[4] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. *山地学报*, 2005, 23(5): 23-29.

[5] 许咏梅. 云南普洱茶农户调查[J]. *茶叶*, 2013, 39(1): 24-27.

[6] 陈小英, 查轩, 陈世发. 山地茶园水土流失及生态调控措施研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 51-54, 58.

[7] 张洪江. 长江三峡花岗岩地区优先流运动及其模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[8] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 1990, 46: 13-29.

[9] 阮芯竹. 重庆四面山不同土地利用类型优先路径特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[10] 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): 1788-1797.

[11] 张建丰, 林性粹, 王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 168-171.

[12] 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.

[13] 魏虎伟. 重庆四面山两种林地土壤优先流路径特征及其影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

[14] Gish T J, Gimenez D, Rawls W J. Impact of roots on ground water quality[J]. *Plant and Soil*, 1998, 200(1): 47-54.

[15] 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.

[16] 杨坤, 赵洋毅, 王克勤, 等. 普洱茶种植对滇南红壤大孔隙的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 586-593.

[17] 常丹东. 三峡地区阔叶林地植物根系分布特征与优先路径关系分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 41-46.

[18] 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.

[19] Dastidar M G, Jouannet V, Maizel A. Root branching: Mechanisms, robustness, and plasticity[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 2012, 1(3): 329-343.

[20] 陈婷婷, 段旭, 赵洋毅, 等. 红河干旱河谷区典型地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 107-115.

[21] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33-36.

[22] 程金花, 张洪江, 张晓晖, 等. 重庆四面山根系及土壤特性对优先路径分布的影响[J]. *世界科技研究与发展*, 2011, 33(4): 519-523.

[23] 董宾芳. 黄土丘陵区林地植物根系与土壤优势流关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.