

## 普洱茶种植对滇南红壤大孔隙的影响<sup>①</sup>

杨坤<sup>1</sup>, 赵洋毅<sup>1,2\*</sup>, 王克勤<sup>1,2</sup>, 段旭<sup>1,2</sup>, 韩姣姣<sup>1</sup>, 李耀龙<sup>1</sup>

(1 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2 国家林业与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:**为探讨滇南典型红壤下普洱茶种植对土壤大孔隙的影响,以灌草地和茶地为研究对象,采用染色示踪法观察土壤剖面,运用 Photoshop CS 5、Image pro Plus 6.0 软件进行图像处理,利用土壤水分穿透曲线和 Poiseuille 方程研究了该地区的大孔隙特征。结果表明:茶地在耕作层大面积染色中,染色深度可达土层 40 cm 深度,灌草地于土层 2.8 cm 深度开始出现大孔隙流,灌草地比茶地更易发生大孔隙流;样地大孔隙主要集中在当量孔径 0.4~2.5 mm,其中茶地和灌草地当量孔径 0.4~1.0 mm 大孔隙密度分别占 95.2% 和 95.5%,当量孔径>1 mm 的大孔隙密度较低,且灌草地大于茶地;大孔隙密度分布为 10~20 cm 土层最高,随着土层深度增加依次递减,整体上土壤大孔隙密度关系为灌草地>茶地;土壤大孔隙不同当量孔径密度和染色面积比与土壤饱和导水率呈现显著性相关关系,当量孔径>1 mm 的大孔隙仅占 4.61%,但控制了饱和导水率 90.8% 的变异。茶地相较于灌草地土壤结构遭到破坏,水分向下运移速率慢,渗透量减小,致使水土流失加重。

**关键词:**土壤大孔隙;染色示踪法;茶种植;饱和导水率;滇南

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A

土壤中存在的大孔隙仅占土壤体积的极小部分,其数量的多少及分布特征对土壤水分及溶质的运移产生重要的影响<sup>[1-2]</sup>。大孔隙的存在能够使地表径流较快地进入土壤中形成壤中流,土壤水分及溶质绕过土壤基质,快速到达土壤深层,形成大孔隙流<sup>[3]</sup>,从而促进水资源的交换及补给,在一定程度上降低水土流失的风险<sup>[4]</sup>。此外,土壤大孔隙的形成受人为因素显著<sup>[5]</sup>,农地和果园地等人为干扰强烈的土地中,在降雨、灌溉和施肥等条件下,大孔隙变化将影响氮、磷溶质及土壤中养分物质进入到地下的速度,易造成水资源的污染及土壤侵蚀的加剧,进而影响区域用水安全<sup>[6-8]</sup>。土壤大孔隙作为土壤的重要参数,具有重要的生态水文效应<sup>[9]</sup>。

国内外土壤大孔隙研究多集中于森林土壤大孔隙形成机理<sup>[9-11]</sup>、大孔隙对土壤水分及溶质的运移规律<sup>[6,8,12]</sup>、大孔隙研究方法<sup>[13-15]</sup>等方面,并已取得丰硕的研究成果。Thomas 和 Phillips<sup>[16]</sup>及 Beven 和 Germann<sup>[17]</sup>主要对土壤大孔隙成因进行了研究,并将半径为 0.03~3 mm 的孔隙被定义为大孔隙。对于森

林土壤大孔隙而言,土壤经过植物根系生长、死亡腐烂、土壤中动物的活动等过程后形成的大孔隙是普遍存在的现象<sup>[18]</sup>。国内学者陆斌<sup>[19]</sup>研究不同林分下的土壤大孔隙特征,指出根系腐烂有助于团聚体的形成,对新根生长延伸提供有效的通道。虽然土壤中大孔隙数量很少,但对传导水流有着重要作用,可明显地增加入渗,减少地表径流<sup>[9,20-21]</sup>。刘目兴等<sup>[12]</sup>研究发现森林土壤大孔隙仅占土壤体积 0.15%~4.72%,当量孔径>1 mm 的大孔隙仅占大孔隙总数的 1.26%~8.55%,但决定了饱和导水率 84.7% 的变异。可见,土壤大孔隙是山地土壤水分及溶质运移的主要路径。Reichenberger 等<sup>[6]</sup>研究表明,由于目前土壤大孔隙的存在导致农业灌水用量和施肥量的增加,缩短了污染物在土壤中停留降解的时间,进而增大地下水受污染的风险。当前,研究土壤大孔隙方法主要有染色法、切片法、穿透曲线法、X 射线 CT 扫描摄像法、张力入渗仪法和地透雷达探测法等<sup>[13]</sup>。CT 扫描法不利于快速反映原始特征,应用尺度小,难以应用于野外原位测试且费用昂贵。染色法能将大孔隙的路径清晰地呈现在原

基金项目:云南省重点研发计划项目(2018BB018)、国家自然科学基金项目(31860235, 31760149, 31560233)、国家级大学生创新训练计划项目(201810677016)、国家林业与草原局林业科技创新平台运行补助项目(2018-LYPT-DW-162)和云南省自然生态监测网络监测项目(2018-YN-12)资助。

\* 通讯作者(yyz301@foxmail.com)

作者简介:杨坤(1992—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 583391307@qq.com

状土壤剖面上,非常适用于野外试验,因此染色法是研究大孔隙较为普遍的方法之一<sup>[15,22-25]</sup>。

云南南部是茶树原产地中心,茶园是该地区比较典型的种植方式。近年来随着茶叶价格的增长,农民大面积开垦荒山荒坡,广泛种植茶树,虽给当地带来了可观的收入,但茶农缺乏水土保持观念,保护水土资源意识薄弱,且茶园处于多山地区,雨季历时长且相对集中,茶园顺坡耕种、清耕作业、大量施肥等活动造成了当地水土流失加剧和水资源污染<sup>[26-27]</sup>。另外,新建茶园缺乏完善的管理维护措施,大部分处于裸露状态,土壤结构破坏严重,水土流失风险更大<sup>[3]</sup>。大孔隙结构是影响水土流失的重要因素,大孔隙占总孔隙数量少,但对水的下渗能力影响大,孔径越大、数量越多对径流的形成影响就越大,相应地对土壤侵蚀影响也越大<sup>[23,25,28]</sup>。目前,还未有对普洱茶种植影响土壤大孔隙研究的相关报道。因此,本研究选取滇南地区典型茶园为研究对象,以原状的灌草地为对照,探讨在灌草地开垦种植茶树后对土壤大孔隙特征及水分渗透性的影响,以期对土壤改良以及水土流失防治提供一定的理论基础和科学依据。

## 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,小流域经纬跨度为 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,全年温暖,垂直气候分布明显,年降水充沛,但年中分配不均,雨季、旱季界线分明;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 2 125.1 h,日照率为 48%;年均降雨量 1 524.4 mm,雨季集中在 6—10 月,占全年降雨量的 92.4% 以上。流域土壤类型为山地红壤,主要生长乔灌木,乔木占大部分。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*)、大芒萁(*Dicranopteris ampla Ching et Chiu*)、藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L)、齿果酸模(*Rumex dentatus* L)等为主。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地选择及染色试验** 在研究区内的茶园地布设固定试验样地 3 块,样地大小为 15 m × 15 m,同时在附近灌草地选取地形、土壤条件等相同的地段,布设 3 块 10 m × 10 m 的固定样地为对照,样地基本概况见表 1。

2017 年 9—10 月,在选定的样地上除去地表的植物层和枯枝落叶层,平整土壤表面,在确保试验前 1 d 无降雨的情况下,以亮蓝粉末作为示踪剂,进行染色试验。首先,将长、宽、高依次为 70、70、50 cm,厚 0.5 cm 的铁框埋入土中 30 cm,并捣实距铁框内壁 5 cm 的土层,以防染料沿铁框内壁下渗,然后用浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液 12 L,均匀喷洒于框内的土壤表面,盖上塑料薄膜。24 h 之后,以 10 cm 厚为一层相应地挖掘 5 个垂直剖面,然后用 1 200 万像素的相机进行拍摄。在每层土壤剖面内,用环刀(高 5.2 cm、直径 7 cm)采集原状土壤,并收集扰动土,经风干处理过筛后测定物理指标(表 1)。

表 1 研究区样地概况及土壤理化性质  
Table 1 Information of sampling plots and soil physio-chemical properties in study area

| 样地  | 海拔<br>(m) | 坡度<br>(°) | 植被密度(株/m <sup>2</sup> )<br>或盖度(%) | 土层<br>(cm) | 容重<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 砂粒<br>0.02~2 mm | 粉粒<br>0.002~0.02 mm | 黏粒<br><0.002 mm | 有机质<br>(g/kg) |
|-----|-----------|-----------|-----------------------------------|------------|----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------|
| 茶地  | 1 228     | 15~26     | 4                                 | 0~10       | 1.31±0.05                  | 28.33±2.12      | 51.50±5.66          | 20.50±3.54      | 16.69±0.16    |
|     |           |           |                                   | 10~20      | 1.37±0.01                  | 25.34±5.66      | 48.43±14.85         | 24.78±9.19      | 16.10±0.59    |
|     |           |           |                                   | 20~30      | 1.36±0.03                  | 16.25±3.89      | 63.5±4.24           | 20.25±0.35      | 16.81±0.84    |
|     |           |           |                                   | 30~40      | 1.34±0.01                  | 39.75±3.89      | 47.25±3.89          | 13.23±0.71      | 16.53±0.34    |
|     |           |           |                                   | 40~50      | 1.36±0.02                  | 13.50±0.71      | 47.75±3.18          | 13.25±0.35      | 15.62±0.32    |
| 灌草地 | 1 253     | 18~30     | 47.3                              | 0~10       | 1.16±0.01                  | 78.44±3.74      | 21.15±1.55          | 0.41±0.68       | 15.94±0.85    |
|     |           |           |                                   | 10~20      | 1.33±0.02                  | 71.26±5.13      | 28.21±1.94          | 0.53±0.89       | 13.89±1.01    |
|     |           |           |                                   | 20~30      | 1.29±0.02                  | 72.59±5.03      | 27.037±1.78         | 0.38±0.79       | 11.49±0.43    |
|     |           |           |                                   | 30~40      | 1.27±0.05                  | 68.26±4.62      | 31.39±2.19          | 0.35±0.73       | 9.62±0.47     |
|     |           |           |                                   | 40~50      | 1.28±0.03                  | 71.05±4.62      | 28.29±2.07          | 0.59±0.95       | 13.98±1.34    |

**1.2.2 土壤性质及水分穿透曲线测定** 土壤容重测定采用环刀法;土壤含水量测定采用烘干法;土壤机械组成测定采用马尔文 3000 激光粒度仪法;土壤

有机质含量测定采用硫酸-重铬酸钾外加热法;土壤饱和导水率测定采用定水头环刀法<sup>[29]</sup>。

将原状土样带回实验室测定水分穿透曲线。首

先,将采集的原状土壤样品置于水中浸泡 12 h 以充分饱和,然后放置于粗砂上放置 12 h,使其达到田间持水量,并在环刀上边缘与土壤样品接触的部分涂上凡士林,以保证水分不能通过土壤与环刀壁之间的孔隙直接流出。其次,在土柱上部放置一张滤纸,以防止水分冲刷破坏表层土壤结构。土柱下部过滤板的出流孔密度为 5 个/cm<sup>2</sup>。用马氏瓶控制水头 5 cm,从加水开始计时,当土柱下部有水流出时,每隔 5 s 收集出流量,测定其体积,直到水流量达到稳定为止。

**1.2.3 数据处理** 1) 染色图像处理。利用 Photoshop CS5 软件将拍摄的照片进行样式编辑及大小调整,通过调整灰度、对比度、颜色替换及降噪处理,将染色区域调整为黑色或灰色、未染色区域调整为白色,调整阈值后获得水平和垂直剖面的染色图像,然后用 Imagepro plus 6 软件将染色图像数值化,准确计算垂直剖面每 1 cm 染色区域的面积比例。

2) 土壤大孔隙数量计算。由于土壤水分运动的速率较慢,处于层流的范围,因而假设土壤孔隙为圆形,利用 Poiseuille 方程建立流量和孔径之间的关系<sup>[30]</sup>,再结合公式(1)~(4)计算大孔隙的数量( $n$ )。

$$Q = \pi r^4 \Delta p \cdot (8\eta \tau L)^{-1} \quad (1)$$

$$Q = \pi r^2 \tau \cdot L \cdot t^{-1} \quad (2)$$

$$r = \tau L [8\eta / (t \Delta p)]^{0.5} \quad (3)$$

$$Q_e = AV = nr^2 V \quad (4)$$

式中: $Q$  为单位流量(cm<sup>3</sup>/s); $A$  为孔隙面积(cm<sup>2</sup>); $V$  为流速(cm/s); $r$  为当量孔径(cm); $\tau$  为水流实际路径的弯曲系数,本研究取 1.2; $L$  为土柱长度(cm); $\eta$  为水的黏滞系数(g/(cm·s)); $\Delta p$  为压力水头(cm); $t$  为首次加水开始记时的时间(s)。对任意时间水分出流量进行观测,利用式(1)~(3)计算出相应的孔隙半径(即当量孔径)。将两孔隙孔径之间按照一定间隔划分出一个孔隙范围,以其平均值作为计算值,当间隔排水量为  $Q_e$  时,计算相应大孔隙数量( $n$ ),如公式(4)。另外,根据水流稳定后的流量计算饱和导水率( $K_s$ ),并统一换算为 10℃ 的饱和导水率( $K_{10}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 普洱茶种植对土壤染色发生区域及其分布的影响

通过野外染色示踪试验得到灌草地和茶地各土壤垂直剖面染色照片(图像中黑色区域为土壤水分运移经过的地方),结合软件 Photoshop CS 5 和 Image pro Plus 6.0 软件处理得到大孔隙流的垂直分布图像,

本文选取典型剖面图展示(以图 1A 为例分析,图 1B 和 1C 为重复)。通过茶地垂直剖面染色图像可以看出,茶地的耕作层(15 cm)以上被亮蓝溶液大面积染色,耕作层以下(水平距离 15 ~ 40 cm)出现较为狭长的染色区域。在耕作层,人为耕作措施打破了大孔隙的垂直连通性,增加了水平空间水分运移。耕作层的大面积染色表明是基质流主导。处于耕作层以下的大孔隙未被破坏,水分运移时加速了亮蓝的垂直运动,但由于该层大孔隙分布的不均匀性,导致染色区域也呈不规则性分布。

相对于茶地,灌草地没有明显的耕作区,大孔隙流分布从表层土壤延伸到底层。土壤表层 0 ~ 2.8 cm 染色均匀,表明是基质流主导;2.8 cm 深度以下,亮蓝溶液沿着大孔隙快速流动,由于土体的低渗透性,亮蓝溶液从大孔隙流进入基质流的侧向流动速率较缓慢,因此土壤染色剖面上出现了狭长的染色区域。

通过垂直剖面的染色图像可以看出(图 1A),茶地染料溶液在还没有到达土壤基质时就优先通过这些大孔隙向土壤深处运移,因此有大孔隙的存在水流入渗比较快,在相同时间内抵达土层更深处。在大孔隙流路径中,最深的一条达到 40 cm 土层深度,而相同时间内,亮蓝溶液在没有大孔隙的土壤基质中仅运移至土层 3.4 ~ 8.4 cm 深度;而灌草地的大孔隙流运动深度可达 33 cm,此时基质流仅运移至 3 cm 深度。由此可以看出,大孔隙流的存在将水分在土壤中的运移速度至少增加了 2 倍 ~ 3 倍。灌草地的大孔隙流和基质流发生明显,在 2.8 cm 深度开始出现分支,在 6 cm 深度有很多分支出现,而茶地的大孔隙流发生区则相对集中,基质流均匀分布于 0 ~ 10 cm 土层,在 10 cm 土层以下开始出现大孔隙流,说明灌草地相对于茶地更易于大孔隙流的发生,茶地的表层土壤不利于大孔隙的形成,阻碍了大孔隙流的下渗深度。茶地和灌草地染色深度集中于 0 ~ 20 cm 土层,染色宽度相差不多,是因为灌草地上部分土壤是经过人为堆积而形成的。在土壤层 6 cm 深度以下灌草地剖面大孔隙路径非常明显,而茶地在土壤层 15 cm 深度以下的大孔隙路径较明显,说明茶地的耕作措施在一定程度上破坏了大孔隙的垂直连续性,增加了水分的横向运移通量,增大了水分水平方向上的运动范围。

### 2.2 普洱茶种植对土壤大孔隙的影响

**2.2.1 不同当量孔径的大孔隙密度** 利用水分穿透曲线计算样地土壤大孔隙状况(表 2),结果显示,研究区灌草地和茶地土壤大孔隙的当量孔径范围为 0.4 ~ 2.5 mm,其中最小当量孔径 0.4 mm 大于水分自

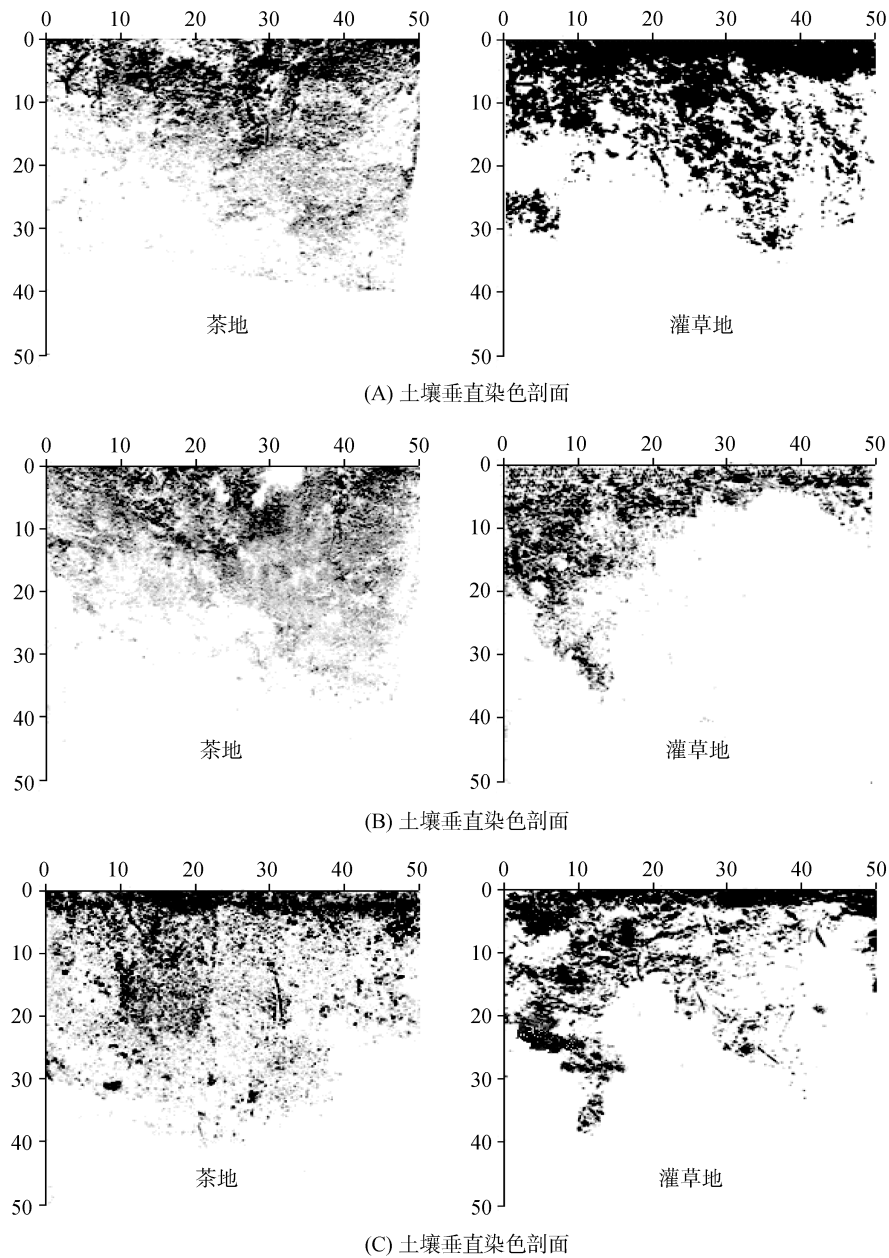


图 1 土壤垂直染色剖面

Fig. 1 Dyeing images of soil vertical profiles

由通过孔隙直径的最小值下限( $d > 0.3$  mm),此时大孔隙内主要以重力水为主,是降雨或灌溉后水流迅速抵达土壤深层的主要路径<sup>[31]</sup>。

大孔隙密度是土壤单位断面积上的平均大孔隙数量。研究区 0~50 cm 土层土壤大孔隙密度在 1 609~30 250 个/ $m^2$ ,平均 14 026.8 个/ $m^2$ ,其中茶地 40~50 cm 土层最小,灌草地 10~20 cm 土层最大。茶地和灌草地同一土层大孔隙密度为灌草地>茶地。两样地内土壤当量孔径 0.4~1.0 mm 的大孔隙密度最大,占大孔隙总数量的 95.2% 和 95.5%,而当量孔径>1.0 mm 的孔隙数量仅占大孔隙总数量的 4.8%

和 4.48%。

两样地土壤大孔隙数量在 10~20 cm 土层最多,随着土壤深度的增加大孔隙数量逐步减小。其中,灌草地 30~40 cm 土层当量孔径>2.0 mm 的大孔隙密度随着土壤深度的增加呈现负相关,这可能是因该层剖面有大量蚂蚁活动导致,蚂蚁活动有利于较高范围孔隙半径的大孔隙形成。样地表层(0~30 cm)土壤中,当量孔径为 2.0~2.5 mm 的平均大孔隙密度为 36 个/ $m^2$ ,而底层为 18 个/ $m^2$ 。该级别孔径土壤大孔隙的形成可能与植物根系和土壤蚂蚁活动有关。灌草地平均大孔隙密度为 17 225.4 个/ $m^2$ ,是茶地的 1.5 倍。人为的耕

作打断了洞穴、根孔,破坏了土壤表层结构,减少了大孔隙密度。各样地土壤层总体表现为较大孔径孔隙密度较小,反之密度越大(表 2)。采用 Duncan 多重比较对不同样地不同土层深度中各当量孔径的大孔隙

密度及一定深度不同样地大孔隙数量进行统计分析,结果表明,土壤大孔隙数量随土壤深度变化的差异整体上不显著,仅在土壤深度为 10~20 cm 时当量孔径变化量大( $P<0.05$ )(表 3)。

表 2 不同当量孔径的大孔隙密度  
Table 2 Number and density of macropores in each equivalent diameter

| 植被类型 | 土壤深度(cm) | 不同当量孔径(mm)孔隙密度(个/m <sup>2</sup> ) |         |         |           |             | 总大孔隙数(个/m <sup>2</sup> ) | 饱和导水率(mm/min) | 染色面积比 |
|------|----------|-----------------------------------|---------|---------|-----------|-------------|--------------------------|---------------|-------|
|      |          | 2.0~2.5                           | 1.2~2.0 | 1.0~1.2 | 0.6~1.0   | 0.4~0.6     |                          |               |       |
| 茶地   | 0~10     | 18±16                             | 132±103 | 156±130 | 1599±1104 | 4150±3066   | 6055                     | 0.88±0.55     | 0.43  |
|      | 10~20    | 57±30                             | 429±219 | 538±346 | 5387±2861 | 14419±6652  | 20830                    | 3.02±1.36     | 0.33  |
|      | 20~30    | 26±10                             | 201±095 | 242±105 | 2679±1306 | 7314±3333   | 13122                    | 1.60±0.65     | 0.23  |
|      | 30~40    | 17±11                             | 236±113 | 327±171 | 3437±2123 | 8513±4143   | 12525                    | 1.83±0.86     | 0.11  |
|      | 40~50    | 4±5                               | 30±25   | 39±32   | 396±221   | 1140±570    | 1609                     | 0.85±0.58     | 0.01  |
| 灌草地  | 0~10     | 22±12                             | 198±132 | 261±194 | 2619±1899 | 7243±4910   | 10343                    | 1.58±1.18     | 0.57  |
|      | 10~20    | 64±31                             | 603±368 | 745±466 | 7724±4794 | 21114±12786 | 30250                    | 4.60±3.04     | 0.32  |
|      | 20~30    | 22±14                             | 503±307 | 498±312 | 5930±3680 | 17121±8560  | 24074                    | 3.88±4.01     | 0.11  |
|      | 30~40    | 31±15                             | 288±176 | 374±234 | 4043±2509 | 11237±6805  | 15973                    | 2.41±2.59     | 0.01  |
|      | 40~50    | 12±3                              | 109±45  | 134±44  | 1369±468  | 3869±1238   | 5487                     | 1.58±1.54     | 0.00  |

表 3 大孔隙数量随土壤深度变化的差异显著性  
Table 3 Significance of difference in macropore number in each soil depth

| 土壤深度(cm) | 大孔隙当量孔径(mm) |         |         |         |         |
|----------|-------------|---------|---------|---------|---------|
|          | 2.0~2.5     | 1.2~2.0 | 1.0~1.2 | 0.6~1.0 | 0.4~0.6 |
| 0~10     | b           | b       | b       | a       | a       |
| 10~20    | a           | a       | a       | a       | a       |
| 20~30    | b           | b       | b       | a       | a       |
| 30~40    | b           | b       | b       | a       | a       |
| 40~50    | b           | b       | ab      | a       | a       |

注:同列不同小写字母表示不同土层间差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

**2.2.2 染色面积比** 灌草地土体 5 个垂直剖面染色面积比率随深度变化规律如图 2 所示,随着土层深度的增加,土体染色面积整体呈现减小趋势,表层 0~2 cm 内,剖面 2-1~2-4 都能达到 65% 以上,只有剖面 2-5 为 36% 左右,但是剖面 2-5 较剖面 2-1~2-4 染色面积比率下降较慢,变化幅度较小,剖面中染色最深可达 39 cm,于 36~39 cm 深度染色变化趋近于 0-5 个染色剖面平均染色面积每 1 cm 占 20.3%,在 1 cm 处各层染色面积差异最大,标准差为 0.24,变异系数为 0.61。各剖面染色面积垂直变化过程中峰值不同,剖面 2-1 和 2-2 染色面积下降变化较大,剖面 2-3~2-5 变化较小,剖面 2-1 在 9 cm 处和 19 cm 处出现双峰,剖面 2-2 在 4 cm 和 20 cm 处出现反弹,前者反弹幅度较大后者很小,剖面 2-3 在 15 cm 和 26 cm 处出现细微反弹,剖面 4 出现较多的反弹点;剖面 2-5 于 37 cm 处出现单峰,这是由于染色剂在下渗过程中土壤大孔隙和渗透性的土壤基质之间具有

较高的交互作用<sup>[15]</sup>,因此,每个大孔隙附近都有一部分土壤基质被染色,导致土壤剖面染色面积不因土壤深度而呈现单调递减。

由图 2 可以看出,茶地垂直剖面染色面积于土层 10~25 cm 波动较频繁,尤其是剖面 1-3~1-5,剖面 1-1 变化较频繁,但是幅度较小,剖面 1-2 整体趋于单调递减,说明该土层范围内由于水分下渗过程中发生横向侧流,从而导致染色面积会突然增大。剖面 1-1~1-3 表层土 0~3 cm 范围内,染色面积均值可达 68%,染色深度最深可达 40 cm,但剖面 1-4 和剖面 1-5 平均染色面积低至 12%,染色深度最深可达 40 cm。观测表明,土壤中植物根系分布特征是影响土壤染色比例出现上述波动变化的主要原因,也说明剖面 1-3 和剖面 1-4 在垂直空间上的孔隙连通性较好。由图 2 可以看出,茶地染色面积波动变化程度较灌草地严重,各剖面染色面积变化波动较大,表现出异质性,整体上茶地染色面积较灌草地大。

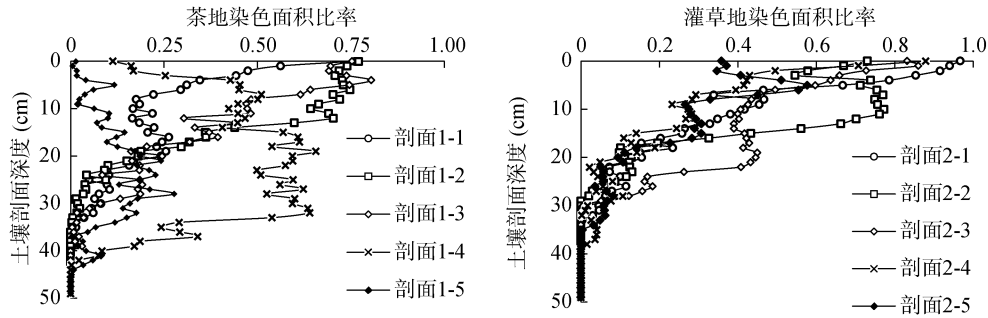


图 2 土壤垂直剖面染色面积变化  
Fig.2 Changes of dyeing areas of soil vertical profiles

2.3 普洱茶种植对土壤饱和导水率的影响

土壤入渗性能、持水能力、溶质迁移等特征受诸多因素影响，饱和导水率是其中一个重要物理指标，是研究水分运移规律的重要参数，而土壤大孔隙是影响饱和导水率的重要指标<sup>[9]</sup>。对各土层不同当量孔径的大孔隙密度和土壤饱和导水率与染色面积进行相关分析(表 4)，发现当量孔径为 0.4 ~ 2.0 mm 的大孔隙密度与饱和导水率的相关关系极显著( $P < 0.01$ )，由于土层 10 ~ 20 cm 大孔隙密度变化较大，对该土层土壤饱和导水率的影响较高。当量孔径为 2.0 ~ 2.5 mm 的大孔隙数量较少，不同土层其数量变化相对其他当

量孔径较小，但其与土壤饱和导水率呈极显著相关( $P < 0.01$ )，说明当量孔径为 2.0 ~ 2.5 mm 的大孔隙对水分运移有较大影响。在研究区内土壤染色面积与土壤饱和导水率显著相关( $P < 0.01$ )，说明大孔隙孔径和密度分布共同影响土壤水分下渗。当量孔径在 0.4 ~ 2.0 mm 范围内，随着孔径降低，大孔隙密度和饱和导水率相关性也逐渐降低，表明土壤水分运移特性与大孔隙孔径特征密切相关。灌草地 10 ~ 30 cm 土层丰富的根系和蚂蚁活动形成的土壤大孔隙使其具有较强的渗透性；茶地 10 ~ 20 cm 土层较多的根系是其具有较好渗透性的重要原因。

表 4 饱和导水率与大孔隙密度的相关系数  
Table 4 Correlation coefficients among saturated water conductivity, macropore density and in each equivalent diameter

|       | 不同当量孔径的大孔隙密度 |              |              |              |              | 染色面积比   |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
|       | 2.0 ~ 2.5 mm | 1.2 ~ 2.0 mm | 1.0 ~ 1.2 mm | 0.6 ~ 1.0 mm | 0.4 ~ 0.6 mm |         |
| 饱和导水率 | 0.805**      | 0.908**      | 0.892**      | 0.899**      | 0.835**      | 0.936** |

注：\*\*表示在  $P < 0.01$  水平显著相关。

对当量孔径  $> 1$  mm 的大孔隙密度与饱和导水率作回归分析，发现该孔径范围的大孔隙密度和饱和导水率呈线性关系，且相关性高(图 3)。当量孔径  $> 1$  mm 的大孔隙密度仅占总大孔隙密度的 4.61%，但控制了饱和导水率 90.8% 的变异。这与刘目兴等<sup>[12]</sup>的三峡库区森林土壤大孔隙特征对饱和导水率影响的回归分析结果相似。土壤饱和导水率越大，土壤的入渗能力越强，地表产流就会越少，降低土壤流失量。灌草地土壤孔隙密度大于茶地，土壤饱和导水率大于茶地，说明种植茶树在一定程度上影响了土壤结构，进而使水土流失加剧。

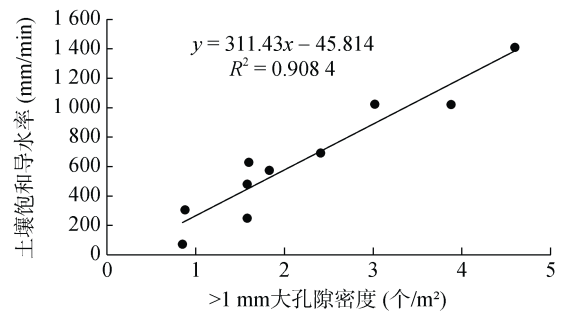


图 3 土壤饱和导水率与  $> 1$  mm 大孔隙密度的相关关系  
Fig. 3 Correlation between saturated water conductivity and  $> 1$  mm micropore density

3 讨论

通过对普洱茶地和灌草地土壤结构中的大孔隙染色形态特征进行对比分析，进而得出普洱茶种植对红壤大孔隙的影响，有研究表明植被状况的不同在一

定程度上造成了土壤大孔隙染色形态间的差异<sup>[3]</sup>，同时人为干扰活动对大孔隙染色形态变化也产生了重要影响。本研究得到的灌草地土壤剖面染色形态变化特征反映出其土壤孔隙发育较茶地好，这一结果与陈晓冰<sup>[32]</sup>对四面山 4 种土地利用类型的大孔隙流

现象研究结果相一致。由于翻耕、除草等干扰活动导致农耕地表层(耕层)土壤大孔隙结构受到破坏,土壤结构松软且相对较均匀,该区域的染色水流入渗形式表现为基质流入渗,而耕作层下土壤孔隙结构保持原有状态,因而染色分化程度较高。灌草地土壤剖面大孔隙密度均大于茶地。因此,茶地相对于灌草地不易发生大孔隙流,尤其在暴雨天气下溅蚀能力强,且茶地不能快速地将雨水渗透到土壤深层,导致水土流失加重。

本研究区两种植被下土壤大孔隙半径范围比田香姣等<sup>[33]</sup>的研究结果范围大 0.4 mm,比刘目兴等<sup>[12]</sup>结果小 0.4 mm,比陆斌等<sup>[9]</sup>结果小 1.2 mm,主要集中在 0.4~2.5 mm,这可能是由于林地乔木居多,根系粗大且数量多,枯枝落叶层厚。>0.1 mm 的各当量孔径大孔隙密度与饱和导水率显著相关,这与刘目兴等<sup>[12]</sup>及王伟等<sup>[23]</sup>研究结果基本一致。整体表现为大孔隙密度随当量孔径的增大而减小,当量孔径 0.4~0.6 mm 的孔隙密度最大,当量孔径>1.0 mm 的孔隙数量仅占大孔隙总数量的 4.61%,但控制了饱和导水率 90.8% 的变异。土壤饱和导水率与不同孔径的大孔隙密度、大孔隙染色面积比均存在显著正相关关系,与刘目兴等<sup>[12]</sup>、陆斌等<sup>[9]</sup>、王伟等<sup>[3]</sup>的研究结果基本一致。研究区土壤大孔隙染色面积比在 1%~57%,平均为 21.2%,与时忠杰等<sup>[34]</sup>六盘山地区大孔隙染色面积比对比,发现研究区变异系数与平均值较大,可能是茶地土壤表层大孔径密度少,以基质流为主,水分下渗慢。土壤染色面积比关系为茶地>灌草地,可能是因为茶地基质流深度较大使染色面积宽度范围大;土壤大孔隙密度表现为灌草地>茶地,说明原状土壤较之耕作土壤孔隙状况更好,从土壤肥力角度看,灌草地能更好地调节土壤中的水分,减少水土流失。

#### 4 结论

1)从土壤垂直剖面染色图片得出,灌草地相对于茶地更容易发生大孔隙流,茶地的耕作层(0~15 cm)受到农耕措施的影响,导致大孔隙被破坏,造成基质流层深度增加,增大了水平方向上的运动范围;耕作层下大孔隙特征保持完整,水分垂直流通性好,深度可达 40 cm。灌草地在土层 2.8 cm 深度开始出现大孔隙流,最深可达 33 cm。

2)研究区大孔隙当量孔径集中于 0.4~2.5 mm,两种样地内当量孔径 0.4~1.0 mm 的大孔隙密度最大,占大孔隙总数量的 95.2%(普洱茶地)和 95.5%(灌

草地),当量孔径>1 mm 的大孔隙密度较少,但该孔隙孔径是水分运移的主要通道。大孔隙密度分布主要表现为表层多于下层,且各土层均为灌草地>茶地。

3)当量孔径>1 mm 的大孔隙密度和土壤染色面积比与饱和导水率呈现显著正相关关系,该孔径范围内大孔隙密度仅占总大孔隙密度的 4.61%,但控制了饱和导水率 90.8% 的变异,较大孔隙孔径控制土壤水分垂直运移。茶地土壤孔隙密度小,相对地饱和导水率也小,导致地表径流、水土流失量增大。

#### 参考文献:

- [1] Buczko U, Bens O, Hüttl R F. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(6): 1998-2007
- [2] Bodhinayake W, Si B C, Noborio K. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 964-970
- [3] 王伟. 三峡库区紫色砂岩林地土壤大孔隙流特征及其形成机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2011
- [4] 吴丹. 三峡库区森林土壤大孔隙成因及其水分黄土塬区土地利用传导功能研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2016
- [5] 高朝侠, 徐学选, 宇宙子, 等. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1578-1584
- [6] Reichenberger S, Amelung W, Laabs V, et al. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol[J]. Geoderma, 2002, 110(1/2): 63-86
- [7] 王晓星. 土壤大孔隙特征以及对土壤中溶质迁移影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
- [8] 王彬伊. 北京昌平区农地土壤优先路径特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
- [9] 陆斌, 张胜利, 李侃, 等. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1512-1519
- [10] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 578-582
- [11] Hayashi Y, Ken'Ichirou K, Mizuyama T. Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(1/2): 85-102
- [12] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3189-3196
- [13] Moran C J, Mcbratney A B, Koppi A J. A rapid method for analysis of soil macropore structure. I. Specimen preparation and digital binary image production[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(3): 921-928
- [14] 刘勇, 胡霞, 李宗超, 等. 基于 CT 的青海湖流域芨芨草草地土壤大孔隙特征分析[J]. 土壤, 2017, 49(1): 184-188

- [15] 陈晓冰, 程金花, 陈引珍, 等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 174-186
- [16] Thomas G W, Phillips R E. Consequences of water movement in macropores[J]. Journal of Environmental Quality, 1979, 8(2): 149-152
- [17] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325
- [18] 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): 533-539
- [19] 陆斌. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及其水文效应[D]. 西北农林科技大学, 2013.
- [20] Goulding K W T, Poulton P R, Webster C P, et al. Nitrate leaching from the Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather[J]. Soil Use & Management, 2010, 16(4): 244-250
- [21] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 871-880
- [22] Baveye P C, Laba M, Otten W, et al. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data[J]. Geoderma, 2010, 157(1): 51-63
- [23] 王伟, 张洪江, 程金花, 等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1217-1223
- [24] 阮芯竹, 程金花, 张洪江, 等. 重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2015(3): 68-74
- [25] 杜文正. 长江三峡森林土壤大孔隙特征及其优先流效应研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014
- [26] 封槐松. 2014 年全国茶园面积、产量、产值统计[J]. 茶叶科学, 2015(5): 396-396
- [27] 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
- [28] 张丽萍, 陈儒章, 邬燕虹, 等. 风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 620-632
- [29] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [30] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2675-2680
- [31] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [32] 陈晓冰. 重庆四面山四种土地利用类型土壤大孔隙流特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016
- [33] 田香姣, 程金花, 杜士才, 等. 重庆四面山草地土壤大孔隙的数量和形态特征研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 292-296
- [34] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2675-2680

## Effects of Planting Pu'er Tea on Macropores in Typical Red Soil in South of Yunnan

YANG Kun<sup>1</sup>, ZHAO Yangyi<sup>1,2\*</sup>, WANG Keqin<sup>1,2</sup>, DUAN Xu<sup>1,2</sup>, HAN Jiaojiao<sup>1</sup>, LI Yaolong<sup>1</sup>

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

2 Yuxi Forest Ecosystem Research Station, State Forestry and Grassland Administration of China, Kunming 650224, China)

**Abstract:** In order to study the effect of planting Pu'er tea on macropores in the typical red soil in South of Yunnan, an experiment was conducted in shrub-grassland and tea land, staining tracer was used to observe soil profiles, Photoshop CS5 and Image Pro Plus were used to edit images of dyed soil profiles, then penetration curves of soil moisture and Poiseuille equation were used to study the characteristics of soil macropores. The results showed that the tea land was dyed in large area in plough layer, the dyeing depth was up to 40 cm. Macropore flow appeared since 2.8 cm depth in shrub-grassland. Macropore flow happened more easily and frequently in shrub-grassland than in tea land. Macropores were mainly concentrated in width of 0.4 – 2.5 mm, and 0.4 – 1.0 mm macropores of tea and shrub-grass lands accounted for 95.2% and 95.5%, respectively. >1 mm macropores were less, and more easily found in shrub-grassland. Macropores mainly appeared in depth of 10 – 20 cm, and decreased with the increase of soil depth. Macropore density was higher in shrub-grassland than in tea land. Soil hydraulic conductivity significantly correlated with equivalent diameter densities of soil macropores and dyeing area. >1 mm micropores only accounted for 4.61% in area but controlled 90.8% variation of hydraulic conductivity. Compared with shrub-grassland, soil structure was damaged in tea land, where water moved down slowly and infiltration capacity was decreased, thus, aggravated soil erosion.

**Key words:** Soil macropore; Staining tracer method; Tea planting; Saturated hydraulic conductivity; South of Yunnan