北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应

杨千喜 宋亮 杨斌 吴骏恩 朱习爱

Regulatory effects of terracing and intercropping on soil moisture infiltration characteristics in rubber plantations

Yang Qianxi, Song Liang, Yang Bin, Wu Junen, Zhu Xiai

引用本文:
杨千喜, 宋亮, 杨斌, 吴骏恩, 朱习爱. 梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):144–154. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250229
Yang Qianxi, Song Liang, Yang Bin, Wu Junen, Zhu Xiai. Regulatory effects of terracing and intercropping on soil moisture infiltration characteristics in rubber plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):144–154. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250229

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250229

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析

Soil infiltration characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 77–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200122

热带橡胶林不同经营模式对土壤呼吸及其组分的影响

Effects of management patterns on soil respiration and its components in tropical rubber plantations

北京林业大学学报, 2025, 47(7): 82–91. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250097

金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性

Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101–113. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220135

不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征

Soil water characteristics of *Populus tomentosa* stands under different densities and water treatments

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 55–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230092

马尾松人工林混交改造下根系菌丝微生物互作对土壤磷转化的调控机制

Regulatory mechanism of root–mycelial–microorganism interactions on soil phosphorus transformation of *Pinus massoniana* plantation under mixed renovation

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 83–94. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240322

异戊二烯共聚改性木质素补强橡胶复合材料

Isoprene copolymer–modified lignin to reinforce rubber composites

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 162–170. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240401

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250229

梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应

杨千喜[1,2,3] 宋 亮[1,2] 杨 斌[1,2] 吴骏恩[4] 朱习爱[1,2]

（1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学实验室，云南 勐腊 666303；2. 云南省森林生态系统稳定性与全球变化响应重点实验室，云南 勐腊 666303；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 云南师范大学地理学部，云南 昆明 650050）

摘要:【目的】本研究旨在探讨梯田营造与茶树间作对橡胶林土壤水分入渗过程及优先流发育特征的影响，为热带山区橡胶种植的水分管理与可持续发展提供基础数据和科学依据。**【方法】**采用亮蓝 FCF 染色示踪法，针对 4 种典型橡胶种植模式（梯田橡胶−茶复合林、梯田单一橡胶林、平地橡胶−茶复合林和平地单一橡胶林），系统比较不同地形（梯田和平地）与林型（复合与单一）组合对土壤水分入渗的影响，量化分析最大染色深度（M_{DD}）、总染色面积（A_{TD}）、均匀入渗深度（U_{ID}）、长度指数（I_L）及染色面积比（D_C）等典型参数，并基于置换检验（$\alpha = 0.1$）、Bootstrap 95% 置信区间（95%CI）和 Cohen's d 效应量对调控作用进行综合分析。**【结果】**（1）地形对 M_{DD}、A_{TD} 和 I_L 均有显著影响（$p < 0.1$，95%CI 不包含 0，$|d| > 0.8$）。在相同林型下，梯田橡胶林比平地橡胶林的 M_{DD} 高 11.3% ~ 69.6%，U_{ID} 高 5.0% ~ 70.7%，A_{TD} 高 39.0% ~ 63.2%，而 I_L 均值低 12.6% ~ 19.3%，表明梯田增强了以基质流为主导的深层入渗。（2）林型对 M_{DD} 和 A_{TD} 均有显著影响（$p < 0.1$，95%CI 不包含 0，$|d| > 0.8$）。在相同地形下，橡胶−茶复合林比单一橡胶林的 M_{DD} 低 3.6% ~ 36.8%，U_{ID} 低 3.4% ~ 40.6%，A_{TD} 低 30.1% ~ 40.5%，I_L 高 7.7% ~ 16.6%，表明茶树的浅根系增强了浅层水分的截留与利用能力，但限制了整体入渗深度。**【结论】**地形改造通过改变坡面形态，为水分向深层迁移提供了物理通道，显著增强了基质流过程及垂直入渗能力；而林型特征通过调节根系分布、土壤孔隙结构及生物过程，主导了优先流的形成及浅层水分的截留与再分布。二者在结构基础与生态功能上互为补充，共同影响橡胶林土壤水分的入渗路径与运移动态。总体来看，地形作为较大尺度的物理因子主导水流路径和水分再分布，表现出显著且稳健的调控效应。本研究揭示了山地橡胶林土壤水分入渗过程以地形主导、林型调节为核心的调控格局。

关键词：梯田；橡胶−茶复合林；土壤入渗；优先流；染色示踪

中图分类号：S714；S157.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)01−0144−11

引文格式：杨千喜，宋亮，杨斌，等. 梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(1)：144−154. Yang Qianxi, Song Liang, Yang Bin, et al. Regulatory effects of terracing and intercropping on soil moisture infiltration characteristics in rubber plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 144−154.

Regulatory effects of terracing and intercropping on soil moisture infiltration characteristics in rubber plantations

Yang Qianxi[1,2,3] Song Liang[1,2] Yang Bin[1,2] Wu Junen[4] Zhu Xiai[1,2]

(1. Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China;
2. Yunnan Key Laboratory of Forest Ecosystem Stability and Global Change, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650050, Yunnan, China)

收稿日期: 2025−06−19 **修回日期:** 2025−07−06

基金项目: 国家自然科学基金项目（32171529、32171557），云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目（YNWR-QNBJ-2020-066），中国科学院西双版纳热带植物园“十四五”科技创新规划项目（E3ZKFF7B），云南省基础研究计划项目（202201AT070221、202301AT070354、202501AS070082、202403AC100028）。

第一作者: 杨千喜。主要研究方向：生态水文、生态恢复。Email：yangqianxi@xtbg.ac.cn 地址：666303 云南省西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑镇中国科学院西双版纳热带植物园。

责任作者: 宋亮，研究员，博士生导师。主要研究方向：生态恢复、生物多样性和全球变化。Email：songliang@xtbg.ac.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of terracing and tea intercropping on soil water infiltration processes and the development of preferential flow in rubber plantations. The objective is to provide empirical data and scientific evidence to support water management and sustainable land use in tropical rubber-growing regions. [**Method**] A brilliant blue FCF dye tracer technique was used to conduct a comparative analysis of four typical rubber planting patterns: rubber-tea agroforestry on terraces, rubber monoculture on terraces, rubber-tea agroforestry on flatland, and rubber monoculture on flatland. By comparing combinations of different topographies (terrace vs. flatland) and stand types (agroforestry vs. monoculture), key parameters were quantified, including maximum dye penetration depth (M_{DD}), total dyed area (A_{TD}), uniform infiltration depth (U_{ID}), length index (I_L), and dye coverage (D_C), to assess infiltration patterns and preferential flow characteristics. The regulatory effects were comprehensively analyzed using permutation tests (α = 0.1), Bootstrap 95% confidence intervals (95% CI), and Cohen's d effect sizes. [**Result**] (1) Topography significantly influenced M_{DD}, A_{TD}, and I_L ($p < 0.1$, 95% CI excluding zero, $|d| > 0.8$). Under the same stand type, terraced rubber plantations exhibited 11.3%–69.6% higher M_{DD}, 5.0%–70.7% higher U_{ID}, 39.0%–63.2% higher A_{TD}, and 12.6%–19.3% lower I_L than flatland plantations. These findings indicate that terracing promotes deeper infiltration dominated by matrix flow. (2) Stand type significantly affected M_{DD} and A_{TD} ($p < 0.1$, 95% CI excluding zero, $|d| > 0.8$). Under the same topography, rubber-tea agroforestry demonstrated 3.6%–36.8% lower M_{DD}, 3.4%–40.6% lower U_{ID}, 30.1%–40.5% lower A_{TD}, and 7.7%–16.6% higher I_L relative to rubber monoculture. These results suggest that tea intercropping facilitates localized infiltration through more developed preferential flow paths, while the shallow root system of tea intercepts water in the upper soil layers, thereby limiting overall infiltration depth. [**Conclusion**] Topographic modification alters slope morphology, providing physical pathways that enhance deeper soil water movement and significantly improve matrix flow processes and vertical infiltration capacity. Stand type influences root distribution, soil pore structure, and biological processes, thereby regulating the formation of preferential flow paths and the retention and redistribution of shallow soil moisture. These factors interact structurally and functionally, jointly influencing soil water infiltration routes and transport dynamics in rubber plantations. Overall, topography, as a large-scale physical factor, predominantly governs water flow paths and moisture redistribution, demonstrating a significant and robust regulatory effect. This study reveals a regulatory framework for soil water infiltration in rubber plantations that is primarily driven by topography and modulated by stand type.

Key words: terrace; rubber-tea agroforestry; soil infiltration; preferential flow; dye tracer

橡胶树(*Hevea brasiliensis*)作为热带地区重要的经济作物，其主产区分布于东南亚及中国热带北缘[1]。中国西双版纳作为典型的植胶区，地貌以山地丘陵为主，坡度大于 15°的区域占总面积的 71%。随着植胶面积的持续扩张，该地区橡胶园的平均坡度从 1988 年的 14.6°显著增加至 2010 年的 17.9°[2]。为应对山地地形引发的水土流失风险，胶农普遍采用等高梯田技术，通过减缓地表径流速率、提高入渗效率等措施提升土地资源利用效率。同时，构建橡胶−茶(*Camellia sinensis* var. *assamica*)等农林复合系统，实施多层次立体种植以提高水资源利用效率[3−6]。然而，大规模橡胶种植引发了土壤退化、区域水分亏缺等生态水文问题[1,7−8]。在山地特殊地形背景下，橡胶林的水分入渗、下渗与再分布过程对流域水资源动态具有重要影响，深入研究其水分运移规律对区域水资源科学管理具有重要意义。

土壤水分入渗是连接降水、土壤和植物的关键环节，可分为均匀流(uniform flow)与非均匀流(non-uniform flow)[9]。均匀流主要受基质吸力控制，表现为湿润锋平稳推进，以基质流(matrix flow)为主；非均匀流则在土壤结构复杂或入渗条件突变时发生，典型形式为优先流(preferential flow)。优先流通过根道、裂缝等大孔隙快速迁移水分，绕过周围基质孔隙，湿润锋呈现不规则分布，显著影响土壤深层渗漏和溶质运移[10]。目前，关于优先流的观测方法主要包括间接测量(微张力计法、电阻率层析成像技术和穿透曲线法)与直接观测(树脂填充法和染色示踪法)。其中，染色示踪法基于颜色对比原理，选用水

溶性显色物质，通过人工降水或积水入渗试验驱动示踪剂迁移。因其成本低、可视化强、对土壤无害，成为研究优先流动态和发育程度的主要手段[11−13]。

近年来，关于橡胶林土壤入渗与优先流特征的研究逐渐增多，从不同角度揭示了橡胶林水分运移机制的复杂性。一部分研究聚焦于单一种植模式内部，普遍采用染色、入渗试验揭示种植带之间的水力特征差异：在梯田橡胶−茶复合林中，茶树带较橡胶带表现出更高的优先流发生频率及更强的土壤入渗能力[14]；在平地橡胶−柑橘（*Citrus reticulate*）复合林中，植被带湿润锋推进更快，侧向流分布更广，可有效实现非植被带的水分补偿，形成更均衡的土壤水分分布[15]；在平地单一橡胶林中，根系区与非根系区同样存在水分的空间互补性，根系区主导优先流路径，并通过侧向流与相邻区域形成水分互补的再分配网络[11]。这些研究共同揭示了橡胶林土壤水分运移过程的高度空间异质性与复杂性。另有部分研究关注根系特征对水分运移的调控作用。Jiang 等[16]在平地单一橡胶林中发现，根系能够引导水分向深层渗透，且不同形态的根系对水分入渗路径具有差异化影响。Nespoulous 等[17]在梯田单一橡胶林中进一步指出，细根相较于粗根和土壤动物活动对壤中流的触发作用更为显著，强调了根系结构在优先流形成过程中的关键作用。此外，也有研究从不同林型角度对水分运移进行比较。Jiang 等[18]在平地地形条件下，采用染色示踪法对单一橡胶林、橡胶−肾茶（*Clerodendranthus spicatus*）复合林和橡胶−砂仁（*Amomum villosum*）复合林进行对比研究，结果表明，复合林通过优化土壤三相比例改善了土壤结构，显著增强了剖面内三维水力再分配能力；复合林中更为活跃的优先流、侧向流与水分交换过程协同作用，有效促进了水分在不同土层之间的输送、再分配与储存。然而，以往研究多为剖面染色图示和定性描述，尚缺乏对优先流关键指标（如均匀入渗指数、优先流长度指数等）的系统量化与比较。

为深入理解不同橡胶种植模式下的水文过程，本文选取西双版纳 4 类典型的橡胶种植模式（梯田橡胶−茶复合林、梯田单一橡胶林、平地橡胶−茶复合林和平地单一橡胶林），采用土壤染色示踪方法，比较分析不同地形、林型影响下的水分入渗与优先流特征。通过测定最大染色深度、总染色面积、均匀入渗深度、长度指数与染色面积比等指标，探讨地形与林型如何影响橡胶林的水分运移过程。研究结果可为热带山地人工林的水分管理策略提供科学依据，并为构建高效、可持续的橡胶种植园提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于云南省南部的中国科学院西双版纳热带植物园（21°55′39″N，101°15′55″E）。受西南季风影响，该地区属热带季风气候，年均降水量为 1 500 mm，其中 80% 以上集中在 5—10 月的雨季；11 月至次年 4 月为干季，降水稀少[5]。年均气温为 21.4 ℃，最热月（7 月）平均气温 25.7 ℃，最冷月（1 月）平均气温 15.9 ℃，年均相对湿度 85%，年日照时数 1 828 h，年均雾日数 173.7 d。土层厚度约 2 m，排水良好[19]。

1.2 试验样地

本研究选取了 4 类橡胶种植模式（图 1），涵盖两种地形（梯田和平地）与两种林型（橡胶−茶复合林和单一橡胶林），具体包括：梯田橡胶−茶复合林（TA）、梯田单一橡胶林（TM）、平地橡胶−茶复合林（FA）和平地单一橡胶林（FM）。橡胶树于 20 世纪 90 年代前后种植在梯田（海拔 540 m，坡度 29°～33°）和平地（海拔 520 m，坡度 0°）上，林龄约 30 年，均为老龄橡胶林。橡胶林均采用带状种植方式，每个带状单元内栽植两行橡胶树，行距 3 m，株距 2 m。相邻橡胶带之间保留 10～18 m 间隔，以便于管理和间作。2004 年，在相邻橡胶带之间间作 2～4 行茶树，行距 1 m，株距 1 m，林龄约 13 年。所有样地均处于相同管理水平，统一施行除草、割胶等人工措施。梯田样地包含台面与坡面两个功能单元。各样地间直线距离均小于 2 km。

1.3 土壤染色示踪试验

梯田橡胶林中土壤染色示踪试验于 2022 年 12 月开展，平地橡胶林中土壤染色示踪试验于 2017 年 12 月开展，试验前研究区域内已至少连续两周无降雨。在每类橡胶种植模式的样地（30 m × 30 m）中随机选择 3 个试验点，共设置 12 个试验点，其中梯田橡胶林中试验点均位于台面区域。试验开始前，清除土壤表层枯落物，然后将高度为 30 cm、内径为 20 cm 的中空不锈钢圆筒嵌入土壤中，嵌入深度为 5 cm，并确保其侧壁和边缘密闭防水。随后，逐步向圆筒内加入 25 L 质量浓度为 4.0 g/L 的亮蓝 FCF 染液[20]，并设置压力水头为 10 cm。试验过程中，使用塑料布覆盖圆筒周边区域，以防止染液蒸发。24 h 后，移除塑料布及圆筒，并以圆筒中心为基准，垂直挖掘一个深约 2～3 m 的土坑，获取完整的土壤染色剖面。采用佳能数码相机（Canon EOS M6，Japan）在黑伞营造的柔光条件下拍摄垂直剖面，拍摄距离固定为 50 cm，并在剖面边缘放置垂直校准标尺，以便

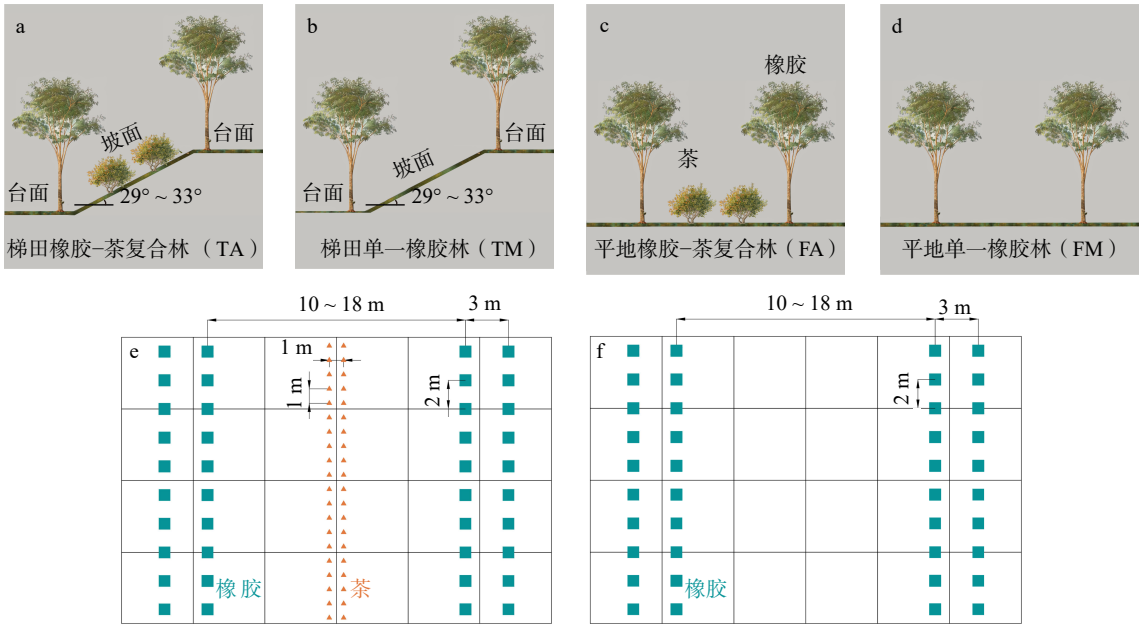


图 1　橡胶种植模式示意图

Fig. 1　Schematic diagram of rubber planting patterns

注：4 类橡胶种植模式侧视示意图（a ~ d）。俯视示意图：梯田/平地橡胶−茶复合林（e）、梯田/平地单一橡胶林（f）。

后续图像处理与参数提取。最终共获取 12 个垂直染色剖面用于分析。

1.4　染色图像处理

基于计算机形态学图像处理技术进行染色图像的处理，主要步骤如下。

（1）几何校正。受限于镜头畸变等因素，原始图像常存在一定程度的几何变形。为提高分析精度，采用 Erdas Imagine 9.2 软件对染色图像进行几何校正。根据拍摄时置于土壤剖面边缘的校准标尺，选取 3 个角点作为控制点，通过软件识别确定第 4 个控制点，完成图像配准与重采样处理[21]，从而获得几何精度更高的图像用于后续分析。

（2）颜色调整。由于图像采集过程中光照不均及土壤表面反射特性差异，导致图像色彩与实际存在一定偏差。利用 Adobe Photoshop 2020 软件对染色剖面图像的对比度、曝光度等参数进行调整，以增强染色区域与未染色区域的辨识度，提升图像的清晰度和识别效果。

（3）图像裁剪。为提高图像分析结果的可比性，本研究对所有染色剖面图像进行统一裁剪，裁剪尺寸为 20 cm × 230 cm。其中，宽度 20 cm 对应入渗试验中不锈钢圆筒的内径，深度 230 cm 则为 12 个染色剖面中观测到的最大染色深度。

（4）图像阈值化。为提取土壤染色图像的形态特征参数，需将彩色图像转化为黑白二值图像。使用颜色替换功能，对已调整颜色的图像设定适当的容差值，将染色区域替换为黑色（灰度值为 0），未染色区域替换为白色（灰度值为 255），从而生成二值图像。当自动选区存在误差时，可辅以人工选区方式，以提升转换结果的准确性。

1.5　染色特征参数计算

使用 Python 3.13 对阈值化处理后的图像进行进一步分析与参数计算。首先，利用 OpenCV 库将图像以灰度格式加载，并沿垂直方向将其划分为 230 层，每层高度 1 cm。在此基础上，逐层计算黑色区域面积与该层总面积的比值，获得逐层染色面积比；并进一步累积各层黑色区域面积，计算其占整个图像面积的比例，即染色面积比。此外，提取以下关键染色参数：最大染色深度、总染色面积、均匀入渗深度和长度指数，以综合反映土壤水分入渗与优先流特征。

（1）染色面积比（D_C）为从地表到某一目标深度范围内，染色区域面积与剖面总面积的百分比[22]。

$$D_C = (D/(D+D_N)) \times 100\% \quad (1)$$

式中：D 为染色区域面积，cm^2；D_N 为未染色区域面积，cm^2。

（2）最大染色深度（M_{DD}）指在染色剖面中自地表向下，染色迹象可被识别的最大土壤深度。

（3）总染色面积（A_{TD}）为 20 cm 宽 × 230 cm 深土壤剖面内的所有染色区域的总面积。

（4）均匀入渗深度（U_{ID}）指 D_C 值低于 80% 时的土壤深度，用于表示基质流占主导的深度。一般而言，U_{ID} 值较低的土壤具有较高的优先流比例[14,23−24]。

（5）长度指数（I_L）指剖面中随深度变化的连续染色面积比之间绝对差值的总和[25−26]，反映了优先流

的空间变异程度，I_L 值越大，表明优先流的空间分布越不均匀，变异性越强。

$$I_L = \sum_{i=1}^{230} \left| D_{C_{i+1}} - D_{C_i} \right| \quad (2)$$

式中：i 为土壤深度，0 ~ 230 cm。

1.6 数据处理与统计分析

本研究采用 Erdas Imagine 9.2、Adobe Photoshop 2020 和 Python 3.13 对染色图像进行处理与特征参数计算。使用 R 4.4.2 进行统计分析。首先对各项指标进行正态性检验（Shapiro-Wilk 检验）和方差齐性检验（Levene 检验），以评估数据是否满足参数检验的前提条件。鉴于本研究样本量较小（$n = 3$），传统参数方法在控制假设检验错误率方面不够稳健。因此，进一步采用了基于置换的非参数方法以增强分析的可靠性。该方法通过随机重排数据标签构建零假设分布，不依赖正态性或方差齐性假设，特别适用于小样本和非正态数据情境。每次分析均执行 10 000 次置换，以获得稳定的 p 值估计。在发现显著主效应后，通过置换检验对各系统进行两两比较，分析其具体差异。考虑到小样本数据的统计功效较低，为降低漏报风险，将显著性水平设定为 $\alpha = 0.1$，该标准适用于生态学的小样本研究 [27–28]。为进一步验证结果的稳健性，采用 Bootstrap 方法（重抽样 10 000 次）计算处理间均值差异及 95% 置信区间（95% CI）。此外，为量化不同处理间差异的实际大小，计算 Cohen's d 效应量，其标准如下：$|d| < 0.2$ 为极小效应，$0.2 \leqslant |d| < 0.5$ 为小效应，$0.5 \leqslant |d| < 0.8$ 为中等效应，$|d| \geqslant 0.8$ 为大效应。所有统计分析均通过以下 R 包实现：coin（置换检验）、boot（Bootstrap 分析）和 effectsize（效应量计算）。使用 R 4.4.2，SigmaPlot 15.0 和 AutoCAD 2021 完成图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同橡胶种植模式下染色面积比的差异

不同橡胶种植模式的逐层染色面积比存在差异，整体呈随土壤深度增加而降低的趋势，但部分土层中则出现局部反弹，可能指示该层存在更多的侧向运移通道（图 2、3）。黑白二值图像可更直观地揭示土壤水分入渗的空间分布特征。由于土壤空间异质性，即使在同一种植模式下，不同剖面的染色形态也存在差异。整体来看，土壤浅层（0 ~ 50 cm）呈较大染色面积，表明基质流主导浅层（0 ~ 50 cm）水分以较均匀的形式向下运移。而在深层土壤（> 50 cm）则呈现漏斗状或树枝状等复杂形态，表明优先流通过大孔隙（根系通道、裂隙和虫孔）快速运移。部分深层土壤出现的零星斑块状染色，表明水分在垂直入渗过程中可能伴随侧向扩散。图中规则椭圆形白色区域对应橡胶树主根遗留空隙，反映了根系分布对水分运移路径的影响。

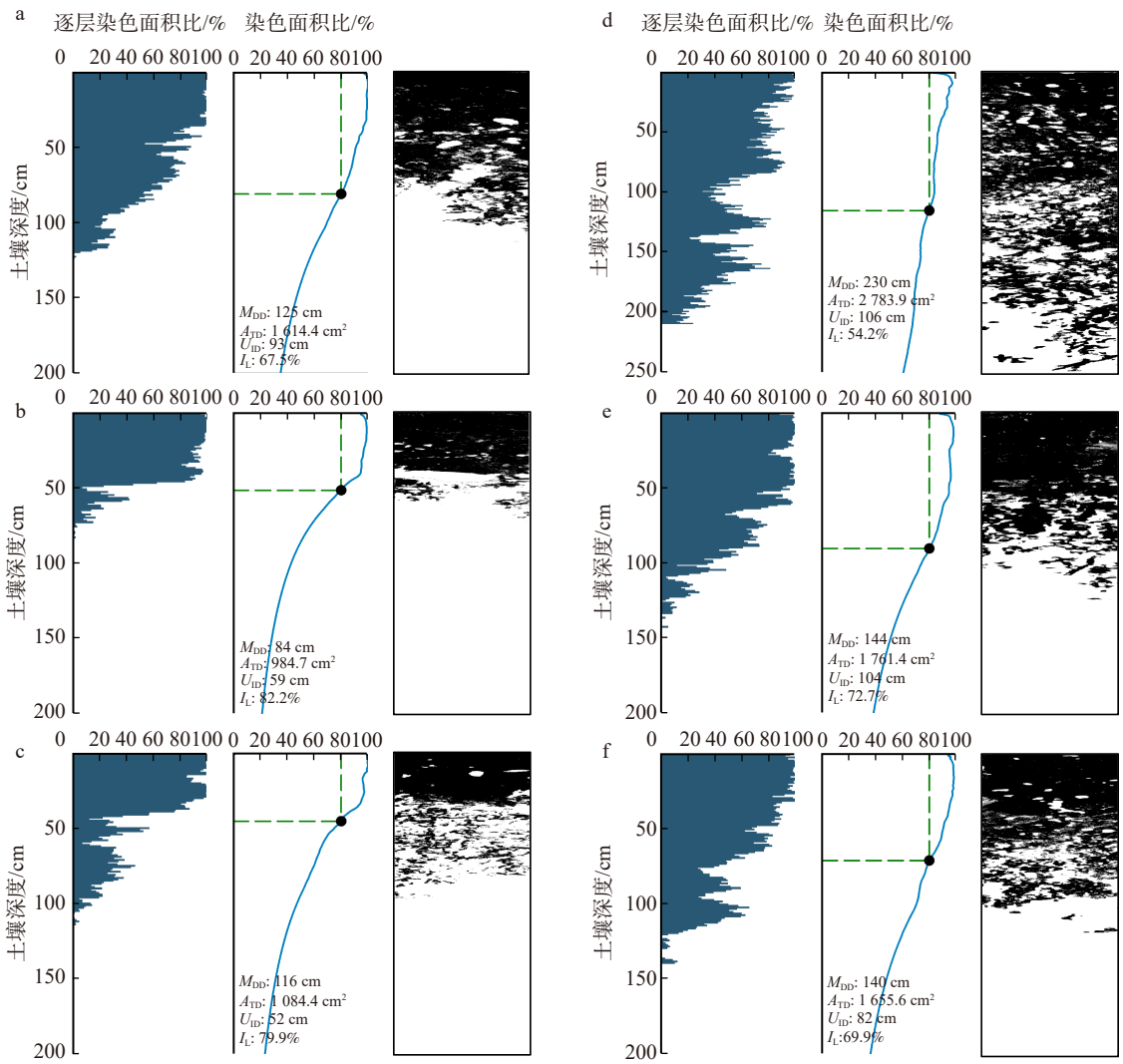
图 4 展示了 4 类橡胶种植模式染色面积比（D_C）在 0 ~ 230 cm 土层的垂直变化趋势。具体而言，在 0 ~ 50 cm 土层中，D_C 保持相对稳定，维持在 80% ~ 100% 之间，表明该土层以基质流主导的均匀入渗为主。其中，梯田橡胶–茶复合林（96.5% ± 2.9%）、梯田单一橡胶林（94.8% ± 2.0%）和平地单一橡胶林（94.8% ± 3.5%）的 D_C 均值显著高于平地橡胶–茶复合林（84.2% ± 5.1%）（$p < 0.1$）。而在 50 ~ 230 cm 土层中，梯田橡胶–茶复合林（48.3% ± 17.3%）、平地橡胶–茶复合林（46.0% ± 16.3%）和平地单一橡胶林（48.9% ± 19.0%）的 D_C 均值明显低于梯田单一橡胶林（66.7% ± 14.6%）（$p < 0.1$）。

2.2 不同橡胶种植模式下最大染色深度的差异

梯田橡胶–茶复合林中 3 个土壤剖面的最大染色深度（M_{DD}）分别为 125、84 和 116 cm，梯田单一橡胶林为 230、144 和 140 cm，平地橡胶–茶复合林为 95、73 和 124 cm，平地单一橡胶林为 108、98 和 97 cm（图 2、3）。图 5 显示，4 类橡胶种植模式的 M_{DD} 均值依次为梯田单一橡胶林（（171.3 ± 50.8）cm）、梯田橡胶–茶复合林（（108.3 ± 21.5）cm）、平地单一橡胶林（（101.0 ± 6.1）cm）和平地橡胶–茶复合林（（97.3 ± 25.6）cm）。置换检验结果表明，不同橡胶种植模式间的 M_{DD} 存在显著差异（$p = 0.018$）。此外，基于 Bootstrap 分析的 95% 置信区间显示，梯田单一橡胶林的置信区间不包含 0，且效应量达到大效应水平（$|d| > 0.8$），表明梯田单一橡胶林的 M_{DD} 显著高于其他 3 种橡胶种植模式（图 6a）。

2.3 不同橡胶种植模式下总染色面积的差异

梯田橡胶–茶复合林中 3 个土壤剖面的总染色面积（A_{TD}）分别为 1 614.4、984.7 和 1 084.4 cm^2，梯田单一橡胶林为 2 783.9、1 761.4 和 1 655.6 cm^2，平地橡胶–茶复合林为 1 190.0、997.7 和 1 321.8 cm^2，平地单一橡胶林为 857.0、1 348.6 和 1 426.6 cm^2（图 2、3）。图 5 表明，4 类橡胶种植模式的 A_{TD} 均值大小依次为梯田单一橡胶林（（2 067.0 ± 579.6）cm^2）、梯田橡胶–茶复合林（（1 227.7 ± 335.1）cm^2）、平地单一橡胶林（（1 210.7 ± 314.4）cm^2）和平地橡胶–茶复合林（（1 169.7 ± 165.9）cm^2），与最大染色深度结果类似。整体置换检验表明，4 类橡胶种植模式间的 A_{TD} 存在显著差异（$p = 0.018$）。梯田单一橡胶林与其他 3 种橡胶种植模式相比，基于 Bootstrap 分析的 95% 置信区间不包含 0，且效应量达到大效应水平



剖面宽度为20 cm，深度为230 cm。M_{DD}表示最大染色深度；U_{ID}表示均匀入渗深度；I_L表示长度指数；A_{TD}表示总染色面积，即染色图像经过阈值化处理后的结果，其中黑色区域代表染色部分，白色区域代表未染色部分。

图 2　梯田橡胶–茶复合林(a ~ c)和梯田单一橡胶林(e ~ f)染色垂直剖面图

Fig. 2　Dyed vertical profile views of rubber-tea agroforestry (a–c) and rubber monoculture on terraces (e–f)

($|d| > 0.8$)，表明梯田单一橡胶林的 A_{TD} 显著高于其他 3 种橡胶种植模式的 A_{TD}(图 6b)。

2.4　不同橡胶种植模式下均匀入渗深度的差异

梯田橡胶–茶复合林中 3 个土壤剖面的均匀入渗深度(U_{ID})分别为 93、59 和 52 cm，梯田单一橡胶林为 106、104 和 82 cm，平地橡胶–茶复合林为 40、56 和 29 cm，平地单一橡胶林为 39、83 和 88 cm(图 2、3)。图 5 显示，4 类橡胶种植模式的 U_{ID} 均值依次为梯田单一橡胶林(97.3 ± 13.3)cm、平地单一橡胶林(70.0 ± 27.0)cm、梯田橡胶–茶复合林(68.0 ± 21.9)cm 和平地橡胶–茶复合林(41.7 ± 13.5)cm。基于 Bootstrap 分析的 95% 置信区间表明，梯田单一橡胶林与其他 3 种橡胶种植模式相比，其置信区间不包含 0，且效应量达到大效应水平($|d| > 0.8$)，说明梯田单一橡胶林的 U_{ID} 显著高于其他 3 种橡胶种植模式的 U_{ID}(图 6c)。

2.5　不同橡胶种植模式下长度指数差异

梯田橡胶–茶复合林中 3 个土壤剖面的长度指数(I_L)分别为 67.5%、82.2% 和 79.9%，梯田单一橡胶林为 54.2%、72.7% 和 69.9%，平地橡胶–茶复合林为 77.8%、97.3% 和 87.6%，平地单一橡胶林为 93.5%、78.3% 和 72.2%(图 2、3)。图 5 表明，4 类橡胶种植模式的 I_L 均值分别为梯田橡胶–茶复合林(76.5 ± 7.5)%、梯田单一橡胶林(65.6 ± 10.0)%、平地橡胶–茶复合林(87.6 ± 9.9)% 和平地单一橡胶林(81.3 ± 11.1)%。基于 Bootstrap 分析的 95% 置信区间与效应量分析显示，部分橡胶种植模式间存在显著差异(例如，梯田单一橡胶林的 I_L 低于平地系统)(图 6d)。

2.6　地形与林型对各土壤染色特征指标的影响

地形与林型对土壤染色特征指标的影响存在差异(表 1)。具体而言，地形与林型对 M_{DD} 和 A_{TD} 均

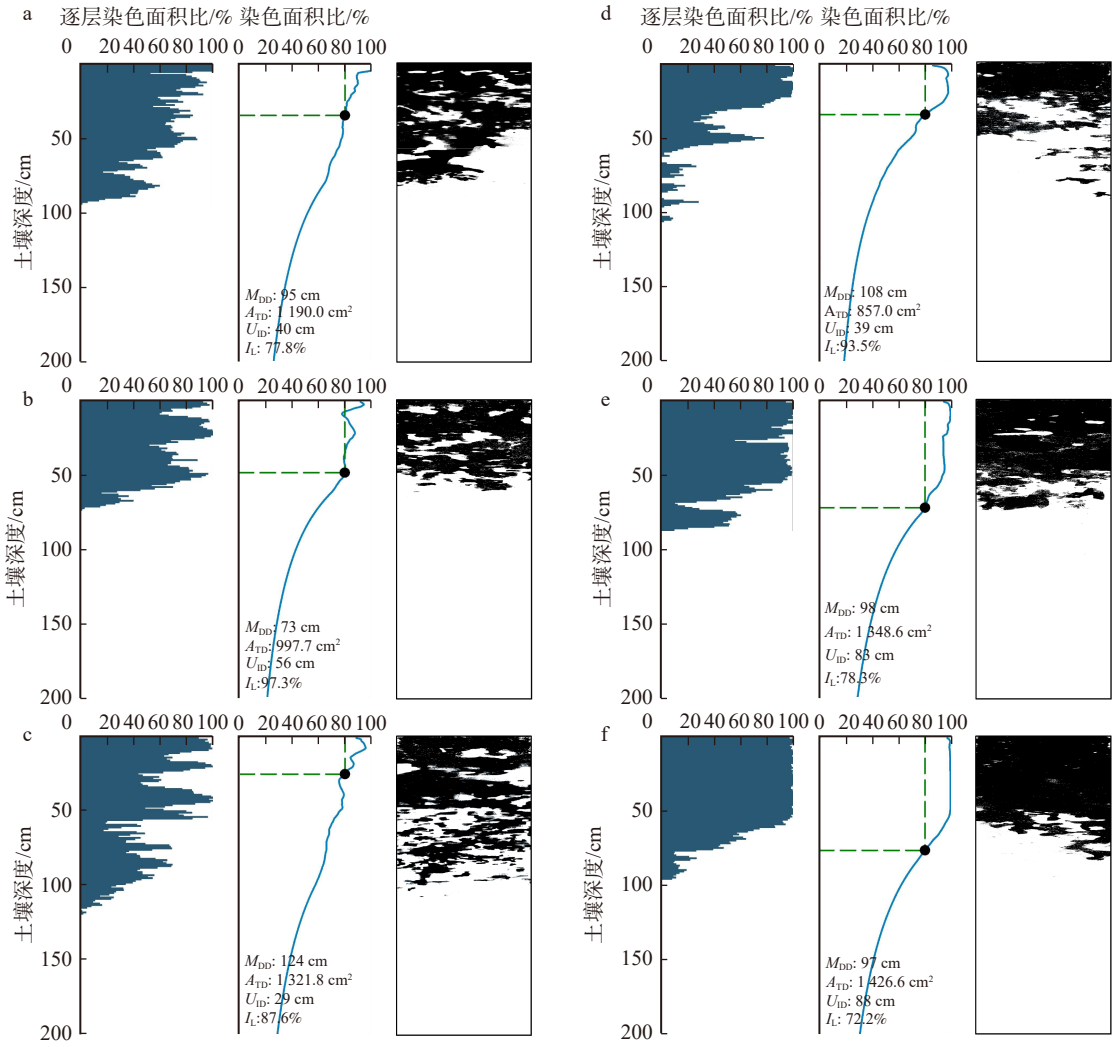


图 3 平地橡胶–茶复合林(a～c)与平地单一橡胶林(e～f)的染色垂直剖面图

Fig. 3 Dyed vertical profile views of rubber-tea agroforestry (a–c) and rubber monoculture on flatland (e–f)

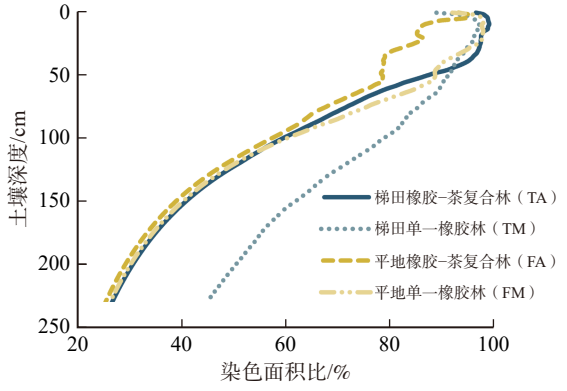


图 4 4 类橡胶种植模式下染色面积比均值随深度的变化

Fig. 4 Variation of mean dyeing area ratio with depth under four rubber planting patterns

具有显著影响($p < 0.1$，95% 置信区间不包含 0，$|d| > 0.8$)。I_L 仅受地形的显著影响($p < 0.1$，95% 置信区间不包含 0，$|d| > 0.8$)，而林型对 I_L 无显著影响($p > 0.1$，95% 置信区间包含 0，$|d| < 0.8$)。总体而言，本研究的观测数据表明，地形是影响土壤水分入渗特征的关键因素，林型也具有一定的作用。

3 讨 论

3.1 地形对橡胶林土壤水分入渗的影响

相较于平地，梯田通过优化地形条件，在提升水分垂直入渗方面表现出显著优势。地形对 M_{DD}、A_{TD} 和 I_L 均具有显著影响($p < 0.1$，95%CI 不包含 0，$|d| > 0.8$)。在相同林型条件下，梯田橡胶林的最大染色深度(M_{DD})均值比平地橡胶林高出 11.3%～69.6%，总染色面积(A_{TD})均值高出 5.0%～70.7%(图 5)，表明梯田土壤的水分入渗能力更强。这一作用机制主要源于梯田通过缩短坡长、降低坡度，有效减缓了地表径流速度，降低了径流对土壤表层的冲刷作用[29−30]。同时，梯田中的平台结构如同微型堤坝，能够截留并暂时储存来自上方坡面的地表水，延长水分在台面的滞留时间，为水分进一步深层渗透提供了充足的时间和空间[31−32]。

在相同林型条件下，梯田橡胶林的均匀入渗深度(U_{ID})均值比平地橡胶林高出 39.0%～63.2%，而长度指数(I_L)均值则低 12.6%～19.3%(图 5)。这表

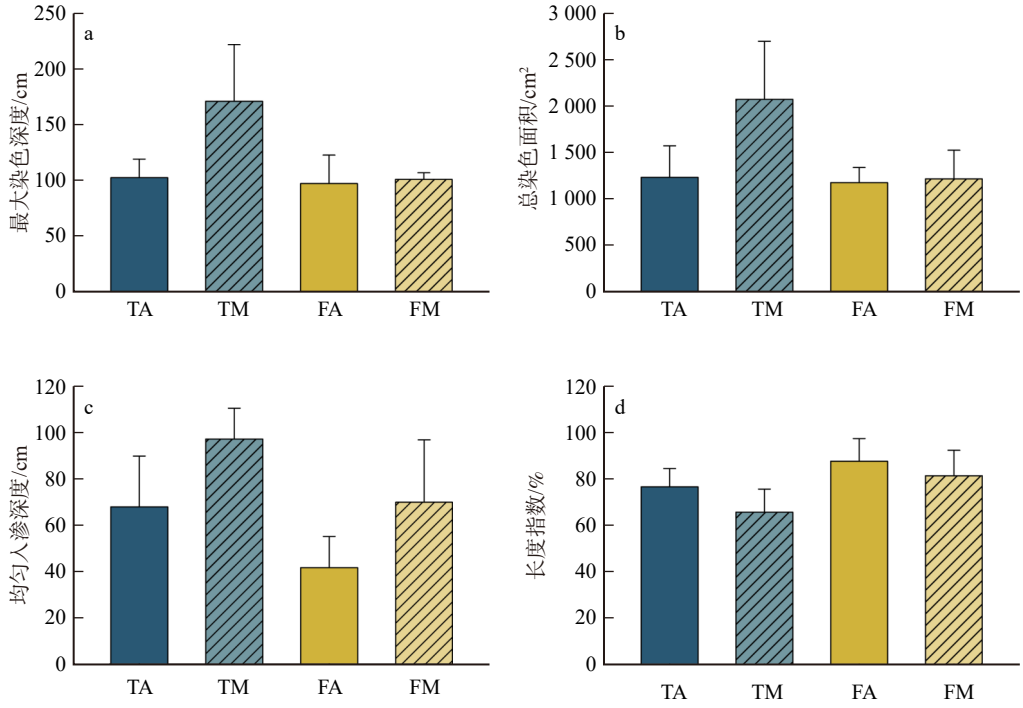


图 5　4 类橡胶种植模式的染色特征参数

Fig. 5　Dyeing characteristic parameters under four rubber planting patterns

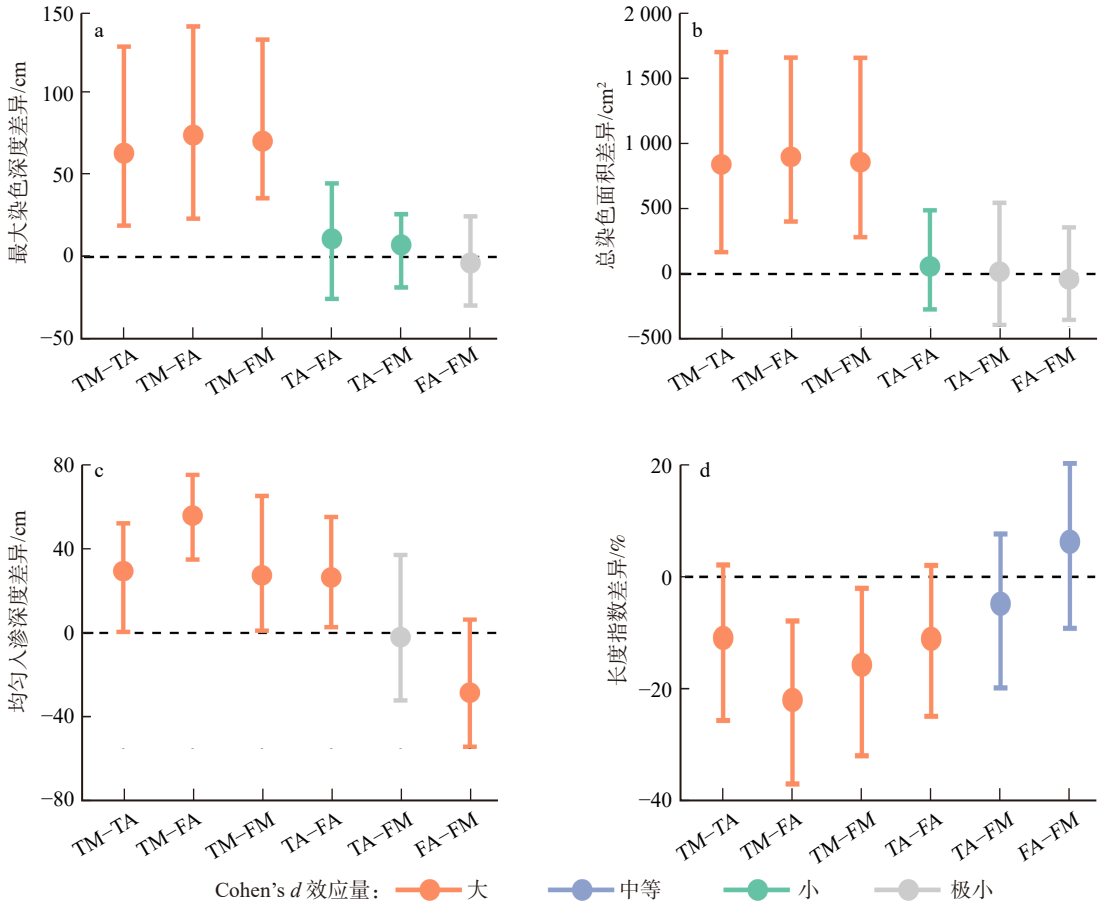


图 6　4 类橡胶种植模式染色特征参数间的均值差异与效应量

Fig. 6　Mean differences and effect sizes among dyeing characteristic parameters under four rubber planting patterns

注：各橡胶种植模式间两两比较，误差棒表示基于 Bootstrap 分析的 95% 置信区间。

明梯田橡胶林中基质流渗透更深且作用更显著，水分在土壤剖面中的分布更均匀，从而有助于减少沿特定优先流路径发生快速流失的风险。这一现象与梯田建设过程中常见的整地、翻土和割胶压实等林

表 1 地形和林型对各染色特征参数的影响

Tab. 1 Effects of topography and stand type on dyeing characteristic parameters

指标	效应来源	p值	均值差	95%置信区间	包含0	Cohen'd	效应强度
M_{DD}	地形	0.014	40.7	9.4 ~ 92.1	否	1.11	大效应
	林型	0.064	–33.3	–91.3 ~ –1.3	否	–0.86	大效应
A_{TD}	地形	0.050	457.1	29.3 ~ 1 097.7	否	0.95	大效应
	林型	0.055	–440.0	–1 103.3 ~ –10.2	否	–0.91	大效应
U_{ID}	地形	0.050	26.8	–1.5 ~ 51.2	是	1.13	大效应
	林型	0.039	–28.8	–49.2 ~ 2.8	是	–1.25	大效应
I_L	地形	0.043	–13.4	–24.9 ~ –3.2	否	–1.34	大效应
	林型	0.160	8.6	–3.9 ~ 21.3	是	0.75	中等效应

注：地形效应（梯田 vs 平地），林型效应（复合林 vs 单一林），p值基于置换检验（$\alpha = 0.1$），均值差指梯田与平地、复合与单一处理均值的差。95%置信区间基于bootstrap方法计算，效应量基于Cohen's d评估。均值差和95%置信区间M_{DD}、A_{TD}、U_{ID}、I_L对应的单位分别为cm、cm^2、cm、%。

地管理措施密切相关，这些操作能够有效填充大孔隙、降低裂隙连通性，促使土壤结构趋于均质化[33−34]，为基质流的发生与维持提供了有利条件。司琴等[35]在喀斯特地区研究发现，梯田土壤入渗稳态期基质流占主导，耕地翻耕可显著提升 M_{DD}（为自然林地的 1.6 ~ 2.0 倍），进一步验证了梯田平台结构延长水分滞留时间、促进基质流深层渗透的作用机制。

梯田中水分垂直渗透与横向运移并非相互矛盾，而是根据不同的土壤水分状态和位置协同发生。梯田中水分主要以基质流形式向深层渗透，而在水分局部饱和的条件下，部分水分可沿坡面发生横向迁移。例如，在坡度与重力的共同作用下，水分逐渐沿与台面连接的坡面扩散，其运移方向从垂直于台面转为平行于坡面[36]。Chen 等[12]对热带山地森林的研究也发现，相比于平地，坡面位置的染色垂直剖面中水分表现出沿着坡度扩散的趋势。这种横向流特征有助于扩大水分在土壤中的分布范围，提高表层土壤的水分再分布效率，从而提升整个系统对降水的吸收与储存能力。总体而言，梯田通过增强垂直基质流和横向再分布，构建了一个更具调蓄能力和结构复杂性的水分运移系统。相比之下，平地橡胶林优先流更显著且整体入渗更浅。

3.2 茶树间作对橡胶林土壤水分入渗的影响

除地形因素外，林型（单一橡胶林与橡胶−茶复合林）也可能对土壤水分的入渗行为产生影响。数据显示，林型显著影响 M_{DD} 和 A_{TD}（$p < 0.1$，95%CI 不包含 0，$|d| > 0.8$），提示其在调节水分垂向与侧向运移方面可能具有一定作用。在相同地形条件下，本研究发现：橡胶−茶复合林中 M_{DD} 均值较单一橡胶林低 3.6% ~ 36.8%，A_{TD} 均值低 3.4% ~ 40.6%（图 5），该趋势可能与茶树根系的空间分布特征有关。已有研究指出，茶树约 60% ~ 70% 的根系集中分布于 0 ~ 20 cm 浅层土壤[37]，且其主要水分吸收也来自浅层（约 70.3% 来自 0 ~ 30 cm 土层）[5]。这种浅根特性可能增强了表层土壤对水分的保持能力，从而限制了水分向更深土层的均匀渗透。

此外，本研究发现，相同地形下橡胶−茶复合林的 U_{ID} 均值较单一橡胶林低 30.1% ~ 40.5%，而 I_L 均值则高出 7.7% ~ 16.6%。这反映出复合林土壤中可能发育了更为丰富的优先流路径，使得水分沿不规则通道迁移的比例增加。此现象与 Zhu 等[14]关于橡胶−茶复合林中茶树种植区优先流更为活跃的报道一致。复合林内优先流路径的潜在发育，可从根系互作与土壤生态过程的角度进行解释：一方面，茶树浅根系与橡胶树深根系可能形成空间互补[5]，改变土壤孔隙结构；另一方面，茶树根际微生物活动可能促进团聚体形成[38]，同时蚯蚓等土壤动物活动也有助于形成更多大孔隙通道[14]，这些都可能为优先流的发生创造物理条件。

0 ~ 50 cm 浅层土壤中，所有橡胶种植模式的染色面积比（D_C）均维持在 80% ~ 100% 的较高水平，表明浅层入渗均匀且充分。> 50 cm，D_C 值整体下降，反映出深层渗透受到一定限制。但在梯田单一橡胶林中，D_C 下降幅度明显小于其他种植模式，深层土壤仍保持较高的染色覆盖，表明基质流在该模式中可持续渗透至更深层。所有种植模式中，梯田单一橡胶林表现出最高的 M_{DD} 均值、A_{TD} 均值和 U_{ID} 均值及最低的 I_L 均值，体现了地形与林型的协同效应与加和效应：梯田地形可减缓坡面径流并延长水分在表层的滞留时间，而相对单一的林型结构有利于维持连续的垂直土壤水分传输通道，二者的协同作用可能增强了水分向深层土壤的垂向渗透能力。

3.3 研究局限性

本研究部分结果整体检验显著但多重比较不显著，可能的原因包括：（1）样本量限制（$n = 3$）导致统计功效不足，事后功效分析显示当前设计仅有 40%

的功效能够检测到大效应；（2）野外试验组内变异较大（梯田 M_{DD} 的 CV = 29.7%）。尽管统计不稳健，多项证据支持处理间存在实质性差异：首先，效应量分析显示所有关键比较的 Cohen's d 值均超过 1.5，远超大效应标准；其次，Bootstrap 95% 置信区间不包含 0，表明差异的稳健性；且生物学机制亦支持观察到的差异模式。这提示我们在解读小样本研究结果时，不应单纯依赖 p 值，还应综合考虑效应量、置信区间以及生物学意义[39]。本研究通过多种分析手段揭示了处理间的差异，但水分入渗过程对土壤结构[11]、初始水分状态[15]、根系分布[16]、土壤生物[17]等因素高度敏感，其空间异质性特征可能尚未被充分捕捉。未来研究中，建议增加剖面数量，以揭示水分运移的空间变异性。

4　结　　论

本研究通过染色示踪法揭示了地形与林型对橡胶林土壤水分运移的调控机制，主要结论如下。地形显著影响 M_{DD}、A_{TD} 和 I_L，相对于平地，梯田能有效延长水分在台面的滞留时间，显著增强水分的深层入渗，地形改造是调控水分行为的重要方式；林型显著影响 M_{DD} 和 A_{TD}，相对于单一橡胶林，橡胶–茶复合林中茶树的浅根系形成致密根网，增强了复合林浅层水分的截留与横向扩散能力，其优先流路径更为发育，可实现局部快速下渗。本研究揭示了橡胶林水分运移过程以地形主导、林型调节为基本特征的多尺度调控格局，为橡胶林管理提供科学依据。

参　考　文　献

[1] Qiu J. Where the rubber meets the garden [J]. Nature, 2009, 457: 246−247.

[2] Chen H F, Yi Z F, Schmidt-Vogt D, et al. Pushing the limits: the pattern and dynamics of rubber monoculture expansion in Xishuangbanna, SW China [J]. PLoS ONE, 2016, 11(2): e0150062.

[3] Yang B, Meng X J, Zhu X A, et al. Coffee performs better than *Amomum* as a candidate in the rubber agroforestry system: insights from water relations [J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106593.

[4] Yang B, Meng X J, Singh A K, et al. Intercrops improve surface water availability in rubber-based agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 298: 106937.

[5] Wu J E, Liu W J, Chen C F. How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season?[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 236: 69−77.

[6] Qi D L, Wu Z X, Chen B Q, et al. Integrative cultivation pattern, distribution, yield and potential benefit of rubber based agroforestry system in China [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 220: 119228.

[7] Guardiola-Claramonte M, Troch P A, Ziegler A D, et al. Hydrologic effects of the expansion of rubber (*Hevea brasiliensis*) in a tropical catchment [J]. Ecohydrology, 2010, 3(3): 306−314.

[8] Chiarelli D D, Passera C, Rulli M C, et al. Hydrological consequences of natural rubber plantations in Southeast Asia [J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(15): 2060−2073.

[9] Hendrickx J M H, Flury M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone[C]// National Research Council. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Washington: The National Academies Press, 2001: 149−187.

[10] Skopp J, Gardner W R, Tyler E J. Solute movement in structured soils: two-region model with small interaction [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(5): 837−842.

[11] Jiang X J, Zakari S, Wu J E, et al. Can complementary preferential flow and non-preferential flow domains contribute to soil water supply for rubber plantation? [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117948.

[12] 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.

[13] 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): 186−186.

[14] Zhu X A, Chen C F, Wu J E, et al. Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system? [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 327−339.

[15] Jiang X J, Chen C F, Zhu X A, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS-3D to interpret preferential flow in soil in a rubber-based agroforestry systems in Xishuangbanna, China [J]. Catena, 2019, 178: 120−131.

[16] Jiang X J, Liu W J, Chen C F, et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China [J]. Geoderma, 2018, 320: 161−171.

[17] Nespoulous J, Merino-Martín L, Monnier Y, et al. Tropical forest structure and understorey determine subsurface flow through biopores formed by plant roots [J]. Catena, 2019, 181: 104061.

[18] Jiang X J, Liu W J, Wu J E, et al. Land degradation controlled and mitigated by rubber-based agroforestry systems through optimizing soil physical conditions and water supply mechanisms: a case study in Xishuangbanna, China [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(7): 2277−2289.

[19] Liu W J, Li J T, Lu H J, et al. Vertical patterns of soil water acquisition by non-native rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southwest China [J]. Ecohydrology, 2014, 7(4): 1234−1244.

[20] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. Geoderma, 2004, 120(1−2): 137−153.

[21] Cey E E, Rudolph D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(12): 1768−1779.

[22] Flury M, Flühler H. Tracer characteristics of brilliant blue FCF [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(1): 22−27.

[23] 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.

[24] Benegas L, Ilstedt U, Roupsard O, et al. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 183: 185−196.

[25] Bargués T A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso [J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3342−3354.

[26] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a loess hillslope [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(5): 1353−1365.

[27] García L V. Escaping the Bonferroni iron claw in ecological studies [J]. Oikos, 2004, 105(3): 657−663.

[28] Mudge J F, Baker L F, Edge C B, et al. Setting an optimal α that minimizes errors in null hypothesis significance tests [J]. PLoS ONE, 2012, 7(2): e32734.

[29] Shi Z H, Cai C F, Ding S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China [J]. Catena, 2004, 55(1): 33−48.

[30] Fashaho A, Ndegwa G M, Lelei J J, et al. Effect of land terracing on soil physical properties across slope positions and profile depths in medium and high altitude regions of Rwanda [J]. South African Journal of Plant and Soil, 2020, 37(2): 91−100.

[31] Posthumus H, Stroosnijder L. To terrace or not: the short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes [J]. Environment, Development and Sustainability, 2010, 12(2): 263−276.

[32] Molina A J, Latron J, Rubio C M, et al. Spatio-temporal variability of soil water content on the local scale in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, North Eastern Spain): how different spatio-temporal scales reflect mean soil water content [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 182−192.

[33] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 109−121.

[34] Mesfin S, Taye G, Desta Y, et al. Short-term effects of bench terraces on selected soil physical and chemical properties: landscape improvement for hillside farming in semi-arid areas of northern Ethiopia [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(11): 399.

[35] 司琴, 余佳峻, 高泽超, 等. 西南喀斯特区不同土地利用梯田优先流定量分析 [J]. 中国农村水利水电, 2023, 8(8): 191−197.
Si Q, Yu J J, Gao Z C, et al. A quantitative analysis of preferential flow in different land use terraces in the southwest karst region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023, 8(8): 191−197.

[36] Lü M X, Hao Z C, Liu Z, et al. Conditions for lateral downslope unsaturated flow and effects of slope angle on soil moisture movement [J]. Journal of Hydrology, 2013, 486: 321−333.

[37] 冯耀宗, 汪汇海, 张家和, 等. 巴西橡胶−云南大叶茶人工植物群落的实验生态学研究 [J]. 植物学报, 1982, 24(2): 164−171.
Feng Y Z, Wang H H, Zhang J H, et al. Experimental and ecological studies on the rubber-TEA* artificial community [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1982, 24(2): 164−171.

[38] Wang S Q, Li T X, Zeng Z C, et al. Soil aggregate-associated bacterial metabolic activity and community structure in different aged tea plantations [J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 1023−1032.

[39] Nakagawa S, Cuthill I C. Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists [J]. Biological Reviews, 2007, 82(4): 591−605.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）