

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.025; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.025.

马关媛, 蒋小金, 刘佳庆, 等. 不同林型橡胶林土壤水分入渗特征及影响因子[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 57-65, 72.

Ma Guanyuan, Jiang Xiaojin, Liu Jiaqing, et al. Soil water infiltration characteristics and influencing factors in different types of rubber forests[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 57-65, 72.

# 不同林型橡胶林土壤水分入渗特征及影响因子

马关媛<sup>1</sup>, 蒋小金<sup>2</sup>, 刘佳庆<sup>1</sup>, 刘文杰<sup>2</sup>, 陈春峰<sup>2</sup>, 张瑞<sup>3</sup>

(1.新疆大学 生态与环境学院, 乌鲁木齐 830000; 2.中国科学院 西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303; 3.中国科学院 西双版纳热带植物园公共技术中心, 云南 勐腊 666303)

**摘要:** [目的] 探究不同林型橡胶林土壤入渗特征及其影响因子, 为高效、可持续橡胶林的构建提供数据支撑。 [方法] 以单一橡胶林(SR)、人工雨林橡胶林(AF)、橡胶—益智复合林(AR)、橡胶—可可复合林(RC)、橡胶—茶树复合林(RT)对入渗过程进行拟合和评价。 [结果] 纵观 0—100 cm 土壤剖面, SR 容重最大, 孔隙度、田间持水量和饱和持水量最小; SR 初始入渗速率(0.03 cm/min)、平均入渗速率(0.009 cm/min)、稳定入渗速率(0.005 cm/min)均显著低于橡胶复合林; 通过拟合发现 Horton 模型对胶农复合林入渗过程拟合较好且拟合参数具有物理意义; 除非毛管孔隙度外, 土壤物理性质与初始入渗速率有极显著相关关系( $p < 0.01$ ), 与总累积入渗量、稳定入渗速率有显著相关关系( $p < 0.05$ ), 但与平均入渗速率无显著相关性( $p > 0.05$ ), 而稳渗前累积入渗量受土壤持水性能的影响显著( $p < 0.01$ )。 [结论] 结合田间入渗过程, 采用初始入渗速率、稳定入渗速率和稳渗前累积入渗量来评估不同林型橡胶林土壤水分入渗和储存性能; SR 土壤持水能力、渗透性均低于橡胶复合林, 其中 RC 土壤持水能力最好, RT 土壤入渗性能最好, 因此间作茶树和可可对改善土壤结构及水文特性有重要作用。

**关键词:** 土壤水分入渗; 物理性质; 入渗速率; 拟合模型

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0057-09

## Soil water infiltration characteristics and influencing factors in different types of rubber forests

Ma Guanyuan<sup>1</sup>, Jiang Xiaojin<sup>2</sup>, Liu Jiaqing<sup>1</sup>, Liu Wenjie<sup>2</sup>, Chen Chunfeng<sup>2</sup>, Zhang Rui<sup>3</sup>

(1.College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830000, China;

2.Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden,

Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China; 3.Public Technology Center,

Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the soil water infiltration characteristics and influencing factors of different forest types rubber forest, and to provide data support for building of efficient and sustainable rubber forests. [Methods] A single rubber forest (SR), rubber artificial rain forest composite system (AF), rubber-puzzle composite system (AR), rubber-cocoa composite system (RC), rubber-tea tree composite system (RT) were selected as the research objects. Soil physical properties and soil moisture infiltration performance were determined and analyzed. Kostiakov, Philip, Horton model were used to fit and evaluate the infiltration process. [Results] Examination of the 0—100 cm soil profile revealed that SR bulk density was the highest, while porosity, field water holding capacity and saturated water holding capacity

收稿日期: 2024-04-11

修回日期: 2024-04-30

资助项目: 国家自然科学基金(32271648, 32360367); 云南省基础研究计划(2019FI011, 202201AT070216, 202201AT070212); 云南省“兴滇英才支持计划”(XDYC-QNRC-2018-143); 中国科学院西部之光项目

第一作者: 马关媛(1999—), 女(回族), 云南昭通人, 硕士研究生, 研究方向生态水文。E-mail: mgy\_ecology@163.com

通信作者: 蒋小金(1983—), 男, 甘肃定西人, 博士, 研究员, 主要从事橡胶林水文研究。E-mail: jiangxiaojin@xtbg.ac.cn

刘佳庆(1987—), 女(满族), 辽宁抚顺人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文研究。E-mail: liujiaqing@xju.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

were the lowest. The initial infiltration rate (0.03 cm/min), average infiltration rate (0.009 cm/min), and steady infiltration rate (0.005 cm/min) of SR were significantly lower than those of rubber composite forests. The Horton model effectively fitted the infiltration process of rubber composite forests, with the model's parameters holding physical significance. With the exception of capillary porosity, soil physical properties showed significant correlation with the initial infiltration rate ( $p < 0.01$ ), and with the total cumulative infiltration amount and soil saturated water conductivity ( $p < 0.05$ ), but not with the average infiltration rate ( $p > 0.05$ ). The cumulative infiltration before stable infiltration was significantly affected by soil water retention ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Combined with the field infiltration process, the initial infiltration rate, steady infiltration rate and accumulated infiltration before steady infiltration were used to evaluate the soil water infiltration and storage performance of different forest types of rubber plantations. The soil water-holding capacity and permeability of SR were inferior to those of rubber composite forests, with RC demonstrating the highest soil water-holding capacity and permeability. Additionally, RT composite forests exhibit the best soil infiltration performance, highlighting the importance of intercropping tea and cocoa in improving soil structure and hydrological properties.

**Keywords:** soil water infiltration; physical properties; infiltration rate; fitting model

天然橡胶是国家重要战略资源,因此在水热条件优越、无台风侵袭的西双版纳地区发展了大量生态校园。经过几十年发展,西双版纳已经成为国内第二大橡胶生产基地<sup>[1]</sup>,在为国家提供天然乳胶的同时也为当地居民带来极大的经济效益。近年来极端气候愈演愈烈,使地处热带雨林北部边缘的西双版纳面临如何种植和保育橡胶林的考验<sup>[2]</sup>。加之地理、地质与气候条件的相互制约,导致水资源分配极不平衡,部分区域因极端干旱使橡胶林等植被生长受限<sup>[3]</sup>。此外,橡胶林的大面积扩张破坏了原始雨林、加剧了区域水土流失、降低了生物多样性<sup>[4]</sup>,而且由于橡胶树强大的蒸腾耗水能力<sup>[5]</sup>,季节性干旱加剧,使该地区农业生产和发展受到限制。

为解决橡胶树单作带来的生态环境问题 and 提高养分、水分、光照等资源的利用效率,相关部门基于不同物种间的生态互补功能构建了多种胶农复合林。大量研究表明胶农复合林可减缓水土流失、提高水分利用效率、增强土壤储水能力,如吴俊恩等<sup>[6]</sup>发现胶农复合林可提高对水分的利用效率,庞家平等<sup>[7]</sup>发现橡胶—大叶千斤拔复合林提高了植物对土壤养分的利用,王浩飞等<sup>[8]</sup>发现橡胶林中间作益智提高了土壤水分入渗能力,Jiang 等<sup>[9]</sup>发现胶农复合林的构建增强了橡胶林土壤水源涵养能力。上述研究表明胶农复合林在模式、密度等结构特征和功能特征之间的关系。然而,尚未明确表明不同林型之间土壤水分入渗性能的差异<sup>[10-11]</sup>,因此亟需在不同胶农复合林之间研究土壤水分入渗性能及其与土壤物理性质之间的关系。

土壤水分入渗是一个复杂的动态过程,其性能与土壤水分再分配、地表和地下径流、养分运移、土壤侵

蚀等关系密切,是反映土壤水源涵养和抗侵蚀能力的重要指标<sup>[12]</sup>。该过程是水循环的重要环节,是地表水转化为土壤水的唯一途径,受多种因素的影响,如土壤物理性质、有机质含量、土壤亲水和疏水能力等<sup>[13]</sup>。土壤水分储存是应对干旱与强降雨的关键,对极端事件(极端干旱、强降雨、极端温度)具有缓冲作用<sup>[14]</sup>。因此,研究土壤水分入渗及储存对调节地表径流、减少土壤侵蚀、改善区域水源涵养能力具有重要意义<sup>[15]</sup>。此外,目前用于评估土壤水分入渗性能的主要指标是饱和导水率<sup>[16]</sup>,但在实际情况中,达到饱和入渗之前进入到土壤的水分可能更多,且野外入渗大多以非饱和入渗为主,因此,初始入渗速率和稳渗前累积入渗量可能更能直接反映土壤水分入渗性能。

本研究以单一橡胶林(SR)为对照,对比分析人工雨林橡胶林(AF)、橡胶—益智复合林(AR)、橡胶—茶树复合林(RT)、橡胶—可可复合林(RC)对土壤水分入渗过程和物理性质的影响。采用初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率、稳渗前累积入渗量来评估不同橡胶林之间土壤水分入渗和储存性能,同时采用 Kostakov 模型、Philip 模型、Horton 模型对土壤水分入渗过程进行拟合,并对 3 种模型拟合精度进行评价,揭示胶农复合林土壤水分入渗规律,为环境友好型校园构建、开发和利用提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区及样地概况

试验样地位于云南省西双版纳傣族自治州勐腊县(21°08'—22°25'N, 101°06'—101°50'E)。该地区属于热带季风气候,平均海拔 640 m,土壤类型主要

为红壤、棕红壤<sup>[17]</sup>。年降水量为 1 486.5 mm,其中雨季降雨量占全年降雨量的 80%以上。年平均最高气温 29.9 ℃,年平均最低气温 18.1 ℃,平均相对湿度为 84%。全年可分为雨季(5—10 月)和旱季(11 月—次年 4 月),旱季由雾凉季(11 月—次年 2 月)和干热季(3—4 月)组成<sup>[18]</sup>。

本研究选取了单一橡胶林(SR)、人工雨林橡胶林(AF)、橡胶—益智复合林(AR)、橡胶—茶树复合林(RT)、橡胶—可可复合林(RC)5 块坡度相近、海拔介于 534~560 m 的样地。5 个样地中橡胶树(*Hevea brasiliensis*)在 1960—1980 年内陆续定植完成。橡胶树种植模式为宽(14 m)窄(4.5 m)行交替模式,橡胶树间距 2 m,橡胶树胸径均值为 38 cm,平均高度为 25 m 左右。通过在橡胶林宽行间作其他物种以构建复合林,SR 宽行中无作物。于 1992 年前在宽行中随机定植了露兜树(*Pandanus tectorius*)、木奶果(*Baccaurea ramiflora*)、青藤公(*Ficus langkokensis*)等多种热带雨林常见树种形成 AF。复合林中益智(*Alpinia oxyphylla*)、茶树(*Camellia sinensis*)、可可(*Theobroma cacao*)种植规格分别为 0.6 m×1.5 m, 2.5 m×2.5 m, 1.4 m×1.3 m。茶树、可可、益智平均高度分别为 5.7 m, 5.9 m, 1.6 m。SR, AF, AR, RT, RC 平均叶面积指数分别为 3.22, 4.95, 3.49, 5.17, 6.25。土壤质颗粒组成采用吸管法测定<sup>[19]</sup>,测定结果如图 1 所示。

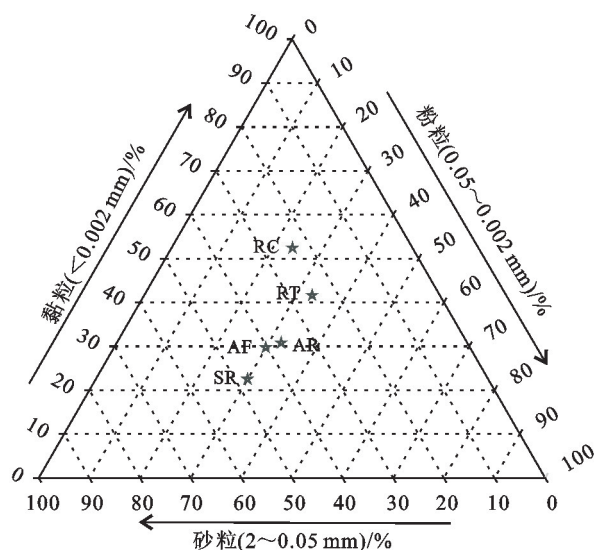


图 1 不同林型橡胶林土壤颗粒组成三角图

Fig. 1 Triangulation map of soil particle composition in rubber forest of different forest types

## 1.2 试验设计及数据测定

土壤水分入渗试验于 2023 年 9 月 20 日利用单环入渗法进行测定。清理掉土壤表层枯落物后,每个样地随机布设 3 个单环入渗仪(3 个重复),将高 30 cm、

内径为 20 cm 的入渗仪嵌入地下 10 cm,并将入渗仪外围土壤压实,防止侧漏。安装好设备后在其内壁粘附量尺用于读取水位变化,环内地表铺设网眼大小 3 mm 的纱网后极速注水至 15 cm 处开始计时。前 30 min 内每 2 min 记录一次液面下降高度,30 min 后每 5 min 记录一次下降高度。每次记录后及时补充水分,使入渗仪内水头高度始终维持在 15 cm。连续五次液面下降高度不变时达到稳渗阶段<sup>[8]</sup>。通过下式将土壤水分入渗速率(初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率)统一为 10 ℃ 下入渗指标。

$$I_{10} = \frac{I_t}{0.7 + 0.03T} \quad (1)$$

式中: $I_{10}$ 和 $I_t$ 分别为土壤水分在 10 ℃ 和实际温度下的入渗速率(cm/min); $T$ 为测定时水的温度。

土壤样品于 2023 年 9 月 25 日采集。5 块样地土壤分 6 层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm, 40—60 cm, 60—100 cm)用环刀(直径 7.0 cm, 高度 5.2 cm, 容积为 200 cm<sup>3</sup>)取样用于土壤物理性质的测定<sup>[8]</sup>,每层设置 3 个重复,共 90 个环刀。取土完毕立即带回实验室内,用环刀称重法测定、计算土壤田间持水量、饱和持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤含水量<sup>[20]</sup>,即采集土壤后,将环刀外擦净,将盛有鲜土的环刀称重( $W_{\text{鲜土}}$ ),之后将环刀放在蒸馏水中浸泡 24 h 后称重( $W_{24h}$ ),浸泡期间确保水位不漫过环刀顶盖。后将饱和后的环刀放置于干砂上,2 h 后称重( $W_{2h}$ ),5 d 后再次称重( $W_{5d}$ )。之后置于烘箱中(105 ℃)烘至恒重后再次称重( $W_{\text{干土}}$ )。计算公式如下:

$$\text{土壤质量含水量} = \frac{W_{\text{鲜土}} - W_{\text{干土}}}{W_{\text{干土}} - W_{\text{空}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{饱和持水量} = \frac{W_{24h} - W_{\text{干土}}}{W_{\text{干土}} - W_{\text{空}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{田间持水量} = \frac{W_{5d} - W_{\text{干土}}}{W_{\text{干土}} - W_{\text{空}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{容重} = \frac{W_{\text{干土}} - W_{\text{空}}}{200} \quad (5)$$

$$\text{毛管持水量} = \frac{W_{2h} - W_{\text{干土}}}{W_{\text{干土}} - W_{\text{空}}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{总孔隙度} = 1 - \frac{\text{容重}}{\text{土密度}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{毛管孔隙度} = \frac{\text{毛管持水量} \times \text{容重}}{\text{水密度}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{非毛管孔隙度} = \text{总孔隙度} - \text{毛管孔隙度} \quad (9)$$

## 1.3 模型拟合

Philip, Kostikov, Horton 模型的表达式分别为<sup>[21]</sup>:

$$I_{(t)} = A + 0.5St^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$



式中: $I_{(t)}$ 为土壤水分入渗速率(cm/min); $A$ 为稳定入渗速率(cm/min); $S$ 为土壤吸渗率(cm/min),表征土壤入渗能力。

$$I_{(t)} = Kt^{-\alpha} \tag{11}$$

式中: $I_{(t)}$ 为土壤水分入渗速率(cm/min); $K, \alpha$ 为经验常数。

$$I_{(t)} = I_c + (I_o - I_c)e^{-\beta t} \tag{12}$$

式中: $I_{(t)}$ 为土壤入渗速率(cm/min); $I_c$ 为稳定入渗速率(cm/min); $I_o$ 为初始入渗速率(cm/min); $\beta$ 为模型参数。

### 1.4 数据分析和制图

通过 IBM SPSS 23.0(Inc., Chicago)软件对土壤物理性质进行单因素方差分析,对入渗指标进行非参数检验(Kruskal-Wallis 检验),对拟合参数与实测值进行配对样本 T 检验。使用 R4.2.2 软件对土壤物理性质与土壤入渗指标做 Pearson 相关性分析;Origin 2021 软件进行土壤水分入渗过程模型模拟。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林型橡胶林土壤物理性质

土壤物理性质受到不同林型、不同土层的影响(图 2)。土壤饱和持水量、田间持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度在不同复合林之间差异显著( $p < 0.05$ ),土

壤饱和持水量、田间持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度在不同深度之间差异显著( $p < 0.05$ ),土壤物理性质也受到不同林型和土层的交互影响( $p < 0.05$ );非毛管孔隙度在不同深度及不同区域之间无显著差异( $p > 0.05$ )。0—10 cm 土壤容重趋势为单一橡胶林(SR) > 人工雨林橡胶林(AF) > 橡胶—益智复合林(AR) > 橡胶—茶树复合林(RT) > 橡胶—可可复合林(RC),总孔隙度趋势为橡胶—可可复合林(RC) > 橡胶—茶树复合林(RT) > 橡胶—益智复合林(AR) > 人工雨林橡胶林(AF) > 单一橡胶林(SR);10—20 cm 的毛管孔隙度、饱和持水量和田间持水量在单一橡胶林(SR)、橡胶—益智复合林(AR)、人工雨林橡胶林(AF)3 个样地之间无差异( $p > 0.05$ ),但 10—20 cm 的毛管孔隙度、饱和持水量和田间持水量在橡胶—可可复合林(RC)和橡胶—茶树复合林(RT)之间差异显著( $p < 0.05$ )。饱和持水量和田间持水量是衡量区域持水能力的关键,5 个样地持水能力呈随土层加深而减弱的趋势。其中单一橡胶林饱和持水量和田间持水量的均值分别为 26% 和 24.43%,持水能力最弱,其次是人工雨林橡胶林,橡胶—可可复合林持水性能最强,饱和持水量和田间持水量的均值分别为 43.66% 和 40.70%,分别是单一橡胶林的 1.68 倍和 1.67 倍。

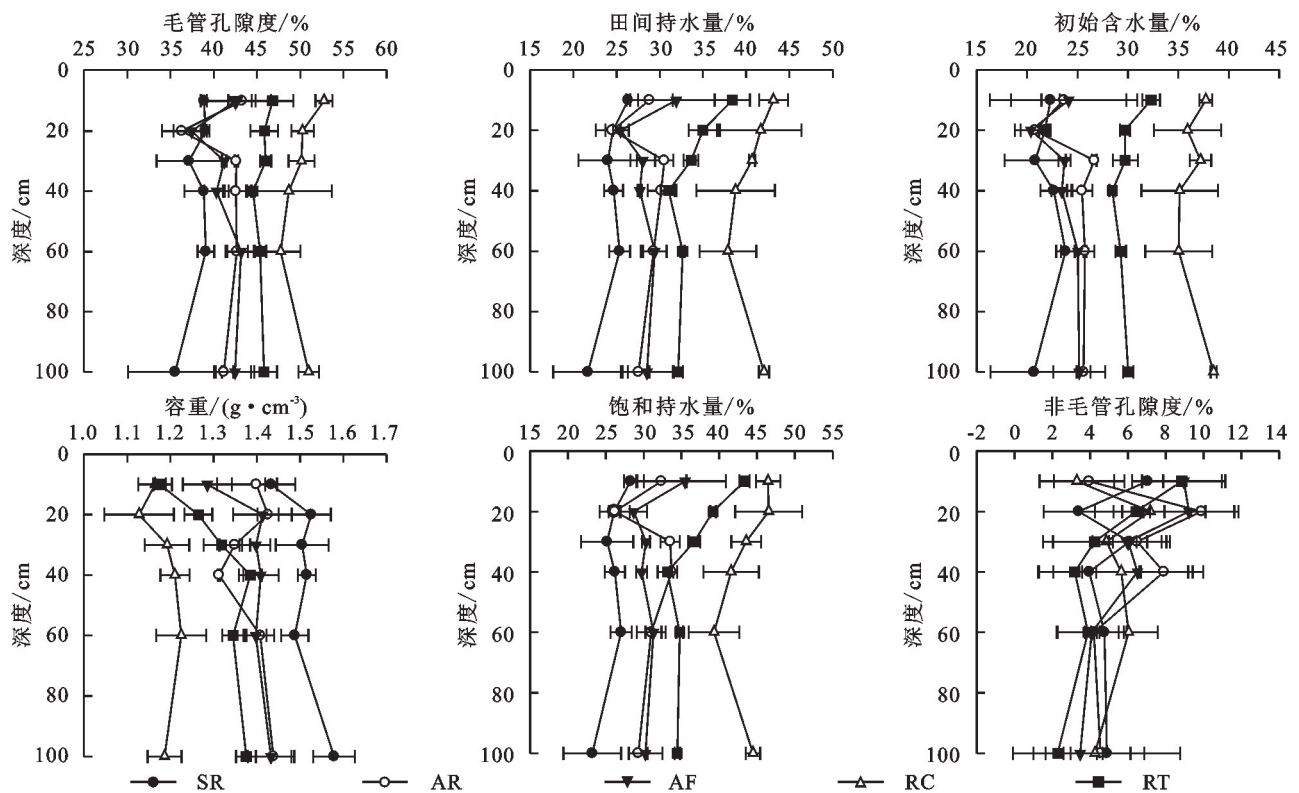


图 2 不同林型橡胶林土壤物理性质

Fig. 2 Soil physical properties of rubber forests of different forest types

从整体来看(表 1),0—100 cm 土层土壤物理性质 均值在不同林型橡胶林间存在差异,其中,5 种林型间土

壤含水量均存在显著差异( $p < 0.05$ ),单一橡胶林(SR)、橡胶-可可复合林(RC)、橡胶-茶树复合林(RT)3个样地间土壤物理性质差异显著( $p < 0.05$ ),除土壤含水量外,AR 和 AF 土壤物理性质无显著相关关系( $p > 0.05$ );土壤容重随深度增加呈现出先增加后减小的趋势,而饱和持水量、田间持水量、总孔隙度与毛管孔隙度呈现出

随深度增加而降低的趋势。综上,单一橡胶林容重最大,孔隙度最小,田间持水量和饱和持水量最小,这说明在这 5 种橡胶林中单一橡胶林土壤渗透性最差,持水性能最弱,在单一橡胶林中间作其他树种有利于改善土壤渗透性及持水能力。其中在橡胶林中间作可可更有利于土壤结构的改善,其次是间作茶树。

表 1 不同林型橡胶林 0—100 cm 土层土壤物理性质

Table 1 Average soil physical properties of 0—100 cm soil layer in rubber forests of different forest types

样地	初始 含水量/%	饱和 持水量/%	田间 持水量/%	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
SR	(22.05±0.01)d	(26.00±0.01)d	(24.43±0.01)d	(1.51±0.01)a	(38.09±0.01)d	(5.04±0.01)d
AR	(24.59±0.01)c	(31.01±0.01)c	(28.47±0.01)c	(1.39±0.01)b	(41.44±0.01)c	(6.43±0.01)c
AF	(23.66±0.01)cd	(30.96±0.01)c	(28.50±0.01)c	(1.39±0.02)b	(41.18±0.01)c	(6.86±0.01)c
RC	(36.58±0.01)a	(43.66±0.01)a	(40.70±0.01)a	(1.18±0.01)d	(50.10±0.01)a	(5.37±0.01)a
RT	(29.96±0.00)b	(36.93±0.01)b	(33.80±0.01)b	(1.31±0.02)c	(45.73±0.01)b	(5.24±0.00)b

注:表中数据为平均值(标准误差), $n=3$ ,同列不同小写字母表示不同林型橡胶区之间差异显著, $p < 0.05$ ,下同。

## 2.2 不同林型橡胶林土壤入渗特征

评价土壤水分入渗能力的指标还有初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率。在 5 种橡胶林中单一橡胶林初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率分别为 0.06 cm/min,0.01 cm/min,0.005 cm/min(图 3),均显著小于 4 种复合林中的相应指标( $p < 0.05$ )。这说明,橡胶复合林对单一橡胶林的入渗性能具有显著的改善作用。

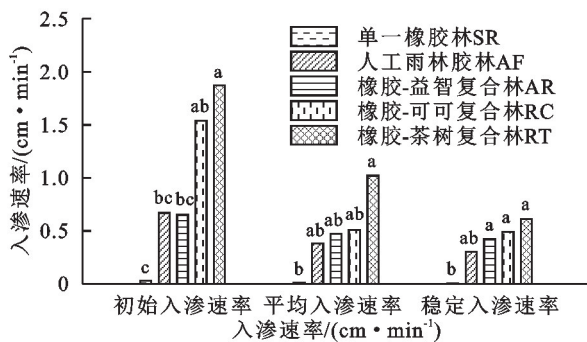


图 3 不同林型橡胶林土壤入渗指标

Fig. 3 Infiltration indicators of rubber forests of different forest types

土壤水分入渗能力也可以采用土壤水分入渗过程和累积入渗量来反映(图 4)。从土壤入渗速率随时间的变化曲线来看,4 种复合林和单一橡胶林入渗过程中入渗速率变化趋势相同,均表现为前 10 min 速率最大,后缓慢降低,最后趋于稳定,但不同林型土壤水分入渗达到稳渗时间有所不同:SR 稳渗时间为 30 min,AF 稳渗时间为 50 min,AR 稳渗时间为 55 min,RC 稳渗时间为 70 min,RT 稳渗时间为 75 min。累积入渗曲线为累计入渗量与入渗时间的关系曲线。在稳渗前土壤水分累积入渗量为 RT(99.40 cm)>RC(67.50 cm)>AR(32.12 cm)>AF(30.57 cm)>

SR(0.58 cm),分别占总累积入渗量(90 min 入渗量)的 80.14%,76.07%,53.14%,62.26%,59.79%。综上,单一橡胶林稳渗前累积入渗量显著低于 4 种复合林( $p < 0.01$ ),橡胶-茶树复合林最高,橡胶-可可复合林次之,人工雨林橡胶林和橡胶-益智复合林之间差异不显著。可见地表水入渗到土壤中的水量主要受稳渗前的累积入渗量影响。

## 2.3 土壤水分入渗性能与土壤物理性质的相关分析

Pearson 相关性分析发现,土壤物理性质与土壤平均入渗速率无显著相关关系( $p > 0.05$ )(表 2)。容重与初始入渗速率、累积入渗量、稳定入渗速率、稳渗前累积入渗量呈显著负相关关系( $p < 0.05$ ),毛管孔隙度、田间持水量、初始含水量、饱和持水量与初始入渗速率、总累积入渗量、稳定入渗速率、稳渗前累积入渗量均呈显著正相关关系( $p < 0.05$ ),初始入渗速率和稳渗前累积入渗量与土壤物理性质均呈显著相关关系,其中与容重和非毛管孔隙度呈显著负相关关系( $p < 0.05$ ),田间持水量和饱和持水量表征土壤持水性能的关键,稳渗前累积入渗量与田间持水量和饱和持水量存在极显著相关关系( $p < 0.01$ ),因此稳渗前累积入渗量受土壤持水量的影响。

## 2.4 土壤水分入渗曲线模型拟合

利用 Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型分别对单一橡胶林和橡胶复合林的入渗过程进行拟合,不同模型模拟参数见表 3,不同的植被覆盖类型模型拟合精度不同。3 个模型在单一橡胶林的拟合精度都较低, $R^2$  均低于 0.80。其中 Horton 模型  $R^2$  最高为 0.74。在 4 种橡胶复合林中 Horton 模型的拟合精度较稳定,在 0.92~0.96 之间,而 Kostiakov 模型和 Philip 模型的拟合精度范围分别为 0.89~0.99,0.88~0.99。

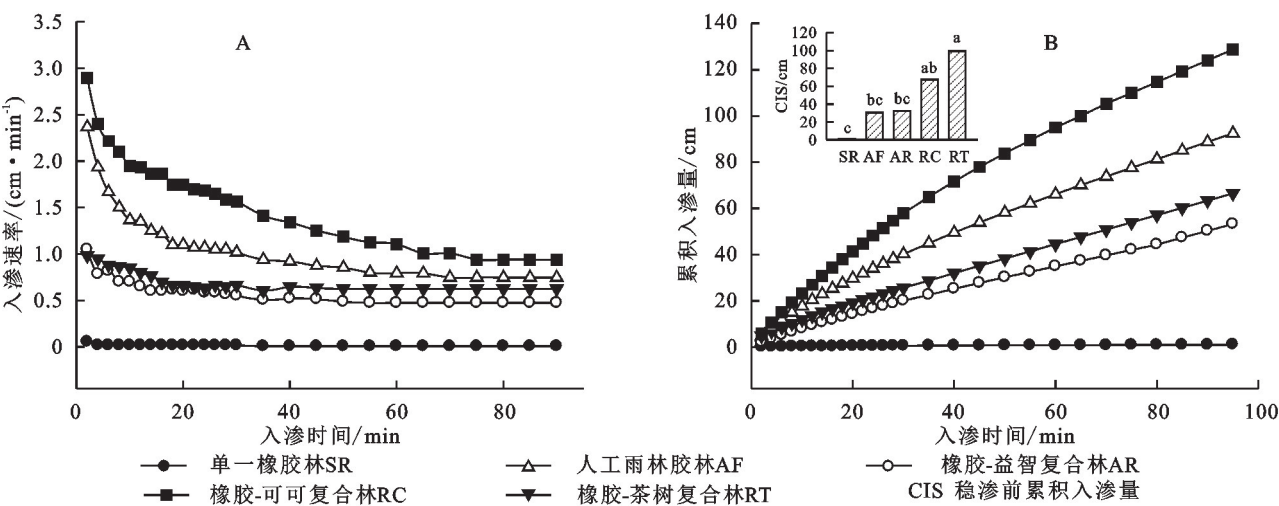


图 4 不同林型橡胶林入渗过程及累积入渗量

Fig. 4 Infiltration process and cumulative infiltration of rubber forests of different forest types

表 2 土壤入渗指标与土壤物理性质 Pearson 相关性分析

物理性质	初始入渗速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	稳定入渗速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	平均入渗速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	总累积入渗量/ cm	稳渗前累积 入渗量/cm
毛管孔隙度	0.739**	0.603*	0.454	0.638*	0.690**
容重	-0.596*	-0.601*	-0.473	-0.586*	-0.581*
田间持水量	0.724**	0.585*	0.443	0.614*	0.643**
总孔隙度	0.721**	0.623*	0.484	0.630*	0.619*
饱和持水量	0.760**	0.621*	0.491	0.655**	0.655**
非毛管孔隙	-0.541*	-0.370	-0.497	-0.472	-0.526*
初始含水量	0.694**	0.524*	0.410	0.574*	0.637*

注：\* 表示  $p < 0.05$ ，\*\* 表示  $p < 0.01$ 。

表 3 不同林型橡胶林土壤入渗曲线模型模拟参数

模型	参数	SR	AF	AR	RC	RT
Kostiakov 模型	$k$	$0.06 \pm 0.01$	$1.15 \pm 0.03$	$1.20 \pm 0.03$	$2.96 \pm 0.03$	$3.65 \pm 0.13$
	$\alpha$	$0.53 \pm 0.05$	$0.22 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.01$	$0.32 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.01$
	$R^2$	0.73	0.96	0.89	0.99	0.94
Philip 模型	$A$	$0.01 \pm 0.00$	$0.37 \pm 0.01$	$0.53 \pm 0.01$	$0.46 \pm 0.01$	$0.82 \pm 0.06$
	$S$	$0.12 \pm 0.01$	$1.92 \pm 0.07$	$1.53 \pm 0.11$	$5.70 \pm 0.11$	$6.72 \pm 0.49$
	$R^2$	0.73	0.96	0.88	0.99	0.88
Horton 模型	$I_c$	$0.01 \pm 0.00$	$0.49 \pm 0.01$	$0.62 \pm 0.01$	$0.83 \pm 0.02$	$0.90 \pm 0.06$
	$I_o$	$0.33 \pm 0.29$	$1.04 \pm 0.04$	$1.09 \pm 0.02$	$2.50 \pm 0.08$	$2.69 \pm 0.07$
	$\beta$	$1.00 \pm 0.45$	$0.09 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.00$
	$R^2$	0.74	0.92	0.96	0.96	0.96

注：\* 表示  $p < 0.05$ ，\*\* 表示  $p < 0.01$ 。

Kostiakov 模型为经验模型,参数无明确的物理意义。Horton 模型为半经验模型, $I_c$ 、 $I_o$ 分别代表为稳定入渗速率和初始入渗速率。 $I_c$ 与实际测定值差距最小,差值小于 0.1。 $I_o$ 与实测初始入渗速率相差较大,尤其是在单一橡胶林区域。Philip 模型基于物理意义的模型, $A$  表征稳定入渗速率,与实际值对比分析发现有显著差异  $p < 0.05$ , $I_o$ 、 $I_c$ 与实测值均无

显著差异  $p > 0.05$ 。因此 Horton 模型的拟合参数有物理意义且更贴合实际值(表 4)。

### 3 讨论

#### 3.1 橡胶复合林对橡胶林土壤水分入渗和储存性能的改善

不同林型土壤水分入渗特征的差异主要来源于土壤物理性质的差异。在本研究中,单一橡胶林初始入



渗速率为 0.03 cm/min,总累积入渗量仅为 0.97 cm,即纯橡胶林土壤水分入渗和储存性能差的原因之一可能与土壤斥水性有关,如朱凯等<sup>[22]</sup>研究单一橡胶林的土壤斥水指数是橡胶—可可复合林的 5.18 倍。复杂林分可改善土壤水分入渗性能,因为不同植物根系对土壤切割作用较强,以及较厚的枯落物加速土壤表层团粒的形成,使土壤疏松,孔隙度增加,利于雨水下渗<sup>[23]</sup>。另外,相对于单一橡胶林,胶农复合林具有更为复杂的群落结构,地表凋落物丰富对强降雨有很好的缓冲作用,减少了击溅对地表孔隙度的破坏<sup>[24]</sup>。在本研究中,橡胶复合林的初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率均显著高于单一橡胶林,这说明土壤水分入渗性能在单一橡胶林中最差的特征可通过构建橡胶复合林来改善,其中间作茶树改善效果最好。进一步通过土壤水分入渗指标与土壤理化性质的相关性分析,发现初始入渗速率、总累积入渗量分别与土壤物理性质(除非毛管孔隙度)呈极显著相关关系( $p < 0.01$ )和显著相关关系( $p < 0.05$ )。本研究还发现土壤水分入渗指标与初始含水量存在显著正相关( $p < 0.05$ ),这与梁磊等<sup>[25]</sup>研究相符,但与刘小林<sup>[10]</sup>、郁耀闯<sup>[26]</sup>等的研究结果相反,而刘卓昕等<sup>[27]</sup>则发现二者无显著相关关系,这可能与试验开展方式(原位试验或模拟试验)和研究区土壤质地有关。

表 4  $I_c, I_o, A$  值与实际值得对比分析

Table 4 Comparison and analysis of  $I_c, I_o$  and  $A$  values with actual values

样地	稳定入渗速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	初始入渗速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$I_o$	$A$	$I_c$
SR	0.01	0.05	0.33	0.01	0.01
AF	0.47	1.05	1.04	0.37	0.49
AR	0.63	0.98	1.09	0.53	0.62
RC	0.75	2.37	2.50	0.46	0.83
RT	0.94	2.90	2.69	0.82	0.90

土壤水分储存性能也与土壤物理性能密切相关,土壤容重的大小反映土壤疏松程度和通透性,孔隙度表明土壤中水分和空气容量的大小,田间持水量与饱和持水量表征土壤持水性能的强弱<sup>[28]</sup>。在 5 种橡胶林中,单一橡胶林容重显著大于 4 种复合林,孔隙度最低、持水性能弱,可见橡胶复合林的构建改善了橡胶林土壤物理性质,进而提升了土壤水分的储存性能,其中橡胶—茶树复合林和橡胶—可可复合林改善效果最佳,橡胶—益智复合林和人工雨林橡胶林改善效果较差。土壤水分储存性能也和林分结构有关<sup>[29]</sup>,单一橡胶林地上无丰富的冠层结构缓冲强降雨,地下无复杂的根系网络改善土壤团粒结构,这可能是导致单一橡胶林土壤水分容易流失、难以入渗的主要原

因<sup>[9]</sup>;而橡胶复合林土壤储水性能均强于单一橡胶林,且复合林之间土壤储水能力差异的主要原因来自根系活动和分布特征。因此土壤储水能力的改善还有赖于橡胶林种植密度和群落结构。

另外,大量研究表明土壤入渗性能随降雨强度的增加而降低,这主要是因为降雨强度的增加使地表结皮状况更加严重,土壤入渗性能降低<sup>[30]</sup>。这会影响到稳定入渗率在不同林型橡胶林间的差异性,如在本研究中土壤稳定入渗率在 5 个林型橡胶林之间无差异,这种情况下可考虑采用初始入渗速率来评价不同林型橡胶林之间的入渗特性。在本研究中,初始入渗速率的大小关系为橡胶—茶树复合林(1.89 cm/min) > 橡胶—可可复合林(1.54 cm/min) > 人工雨林橡胶林(0.68 cm/min) > 橡胶—益智复合林(0.64 cm/min) > 单一橡胶林(0.03 cm/min),且初始入渗速率在 5 种林型之间差异显著。这表明在同一降雨环境下,纯橡胶林在地表水转化为土壤水的能力最差,但这一能力通过构建不同胶农复合林得到不同程度的改善,其中改善效果最好的是橡胶—茶树复合林,其次橡胶—可可复合林。进一步分析发现稳渗前累积入渗量与土壤孔隙度有显著相关关系( $p < 0.05$ ),与土壤饱和持水量有极显著相关关系( $p < 0.01$ ),5 种林型稳渗前累积入渗量为橡胶—茶树复合林(99.4 cm) > 橡胶—可可复合林(67.5 cm) > 橡胶—益智复合林(32.1 cm) > 人工雨林橡胶林(30.57 cm/min) > 单一橡胶林(0.58 cm),且 5 种林型稳定入渗前累积入渗量均占总入渗量的 53.14%~80.14%,因此,采用稳渗前累积入渗量才能更真实的反映土壤水分储存能力。综上,考虑到稳定入渗速率在不同林型橡胶林之间差异不显著,但初始入渗速率在不同林型橡胶林之间差异显著,且二者趋势大体一致,因此,可采用初始入渗速率和稳定入渗来评价不同林型橡胶林之间的入渗特性,稳渗前累积入渗量来反映土壤水分储存能力。

### 3.2 土壤水分入渗模型评价及研究展望

比较 3 个入渗模型拟合的  $R^2$  可得出, Horton 模型、Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合对单一橡胶林的拟合精度都较差,这可能因为单一橡胶林内土壤入渗性能较差引起的。通过对比拟合精度  $R^2$  发现, Horton 模型拟合精度在橡胶复合林中拟合精度较稳定且与实测值的差异不显著,因此 Horton 模型更适用于拟合橡胶复合林土壤水分入渗过程。

橡胶复合林的构建改善了单一橡胶林的土壤结构,从而增强橡胶林土壤入渗能力。但土壤入渗特性影响因子众多,要明确橡胶复合林对单一橡胶林水文特性的改善机制,还需考虑多方面因素,如林分组成、

冠层结构、林地凋落物生物量、土壤化学性质等,以构建更加高效、可持续的胶农复合林。

## 4 结论

(1) 在5种橡胶林中单一橡胶林植被单一,容重最大、孔隙度最小,这可能是导致其土壤水分入渗性能较差的原因。橡胶复合林改善了土壤结构,使地表水能相对高效地转化为土壤水。4种橡胶复合林中土壤水分入渗和储存性能存在差异这和不同复合林林分组成关系密切。因此,合理调控橡胶复合林中树种配置、规格,是改善橡胶林土壤水分入渗和储存性能的主要因子。

(2) 降雨强度增加导致土壤孔隙堵塞,可能导致稳定入渗速率在不同林型橡胶林之间差异不显著。这种情况下,可结合土壤水分初始入渗速率来评价土壤水分入渗性能。另外,稳渗前累积入渗占总累计入渗量均超50%,且与土壤物理性质存在显著相关性,因此可采用稳渗前累积入渗量评估土壤水分的储存性能。

(3) Horton模型中 $I_0$ 和 $I_e$ 能更接近橡胶林土壤水分入渗的实际过程且拟合精度在橡胶复合林中较稳定因此对橡胶复合林入渗过程的模拟更接近渗透实际过程,在本研究中有良好的实用性。

致谢特此感谢刘明忠先生在野外取样时给予的帮助,感谢中国科学院西双版纳热带植物园公共技术中心对本试验开展提供的支持与帮助。

### 参考文献(References):

- [1] 叶德林,李开云,董寿东,等.勐腊农场环境友好型生态胶园建设初报[J].热带农业科技,2016,39(2):7-9,32.  
Ye D L, Li K Y, Dong S D, et al. Preliminary report on the construction of environment friendly rubber plantations in Mengla farm[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2016,39(2):7-9,32.
- [2] 刘少军,周广胜,房世波.中国橡胶种植北界[J].生态学报,2016,36(5):1272-1280.  
Liu S J, Zhou G S, Fang S B. A preliminary study of the northern planting boundary of rubber tree cultivation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(5):1272-1280.
- [3] 朱钟麟,赵燮京,王昌桃,等.西南地区干旱规律与节水农业发展问题[J].生态环境,2006,15(4):876-880.  
Zhu Z L, Zhao X J, Wang C T, et al. The Rules of drought and the development of water-saving agriculture in southwest China [J]. Ecology and Environment Sciences, 2006,15(4):876-880.
- [4] Singh A K, Liu W J, Zakari S, et al. A global review of rubber plantations: Impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. Science of the Total Environment, 2021,796:148948.
- [5] 姚平,寇卫利,王秋华,等.近60年来西双版纳气候变化及其与橡胶种植关系研究[J].林业调查规划,2020,45(3):17-23.  
Yao P, Kou W L, Wang Q H, et al. Relationship between climate change and rubber planting in Xishuangbanna in recent 60 years [J]. Forest Inventory and Planning, 2020,45(3):17-23.
- [6] 吴骏恩,刘文杰.西双版纳地区不同胶农(林)复合系统的植物水分利用效率比较[J].广西植物,2016,36(7):859-867.  
WU J E, Liu W J. Comparing the water use efficiency of plants in different types of rubber-based agroforestry ecosystem in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Guihaia, 2016,36(7):859-867.
- [7] 庞家平,陈明勇,唐建维,等.橡胶-大叶千斤拔复合生态系统中的植物生长与土壤水分养分动态[J].山地学报,2009,27(4):433-441.  
Pang J P, Chen M Y, Tang J W, et al. The dynamics of plant growth and soil moisture and nutrient in the rubber plantation and rubber-*Flemingia macrophylla* agroforestry system in Xishuangbanna, southwest China[J]. Mountain Research, 2009,27(4):433-441.
- [8] 王浩飞,王黎,朱习爱,等.橡胶-益智复合林土壤饱和导水率空间分布格局及其影响因子[J].生态学杂志,2023,42(9):2113-2120.  
Wang H F, Wang L, Zhu X A, et al. Spatial distribution pattern and impact factors of soil saturated hydraulic conductivity in *Hevea brasiliensis*-*Alpinia oxyphylla* agroforestry [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(9):2113-2120.
- [9] Jiang X J, Liu W J, Wu J N, 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.
- [10] 刘小林,李惠萍,郑子龙,等.小陇山林区主要林地类型土壤入渗特征[J].甘肃农业大学学报,2016,51(6):89-94.  
Liu X L, Li H P, Zheng Z L, et al. Soil infiltration characteristics of main forest lands in Xiaolongshan Region [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2016,51(6):89-94.
- [11] 张金武,王立.白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗和持水特征[J].西北林学院学报,2021,36(4):41-47.  
Zhang J W, Wang L. Characteristics of forest soil infiltration and water holding capacity in different succession stages in the upper reaches of the bailong river[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4):41-47.



- [12] 杨源峰, 韦慧, 王建羽, 等. 喀斯特区两种岩性发育土壤入渗特征及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(6): 1103-1116.  
Yang Y F, Wei H, Wang J Y, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of two types of lithological soils in Karst regions [J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(6): 1103-1116.
- [13] Hervé-Fernández P, Muñoz-Arriagada R, Glucevic-Almonacid C, et al. Influence of rangeland land cover on infiltration rates, field-saturated hydraulic conductivity, and soil water repellency in southern *Patagonia* [J]. Rangeland Ecology & Management, 2023, 90: 92-100.
- [14] Zhang W X, Furtado K, Wu P L, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Science Advances, 2021, 7(31): eabf8021.
- [15] 李雨晨, 平原, 澹腾辉, 等. 红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 71-77.  
Li Y C, Ping Y, Tan T H, et al. Effects of biocrust with different coverage on water infiltration in red soil hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 71-77.
- [16] 康文蓉, 张勇勇, 赵文智, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤饱和导水率的空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 137-143.  
Kang W R, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. Spatial variation characteristics of soil saturated hydraulic conductivity in a desert-oasis ecotone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 137-143.
- [17] 卢洪健, 刘文杰, 罗亲普. 西双版纳山地橡胶林凋落物的生态水文效应[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2129-2136.  
Lu H J, Liu W J, Luo Q P. Eco-hydrological effects of litter layer in a mountainous rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2129-2136.
- [18] 曾欢欢, 刘文杰, 吴骏恩, 等. 西双版纳地区丛林式橡胶林内植物的水分利用策略[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 394-403.  
Zeng H H, Liu W J, WU J E, et al. Plant water use strategies in jungle rubber in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 394-403.
- [19] 马作豪, 唐昊治, 李文红, 等. 吸管法和比重计法测定土壤机械组成的比对研究[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(6): 645-651.  
Ma Z H, Tang H Y, Li W H, et al. Comparative study on the determination method of soil mechanical composition between pipette method and hydrometer method [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(6): 645-651.
- [20] 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.
- [21] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1373-1380.  
Zhao J C, Pan D L, Wei W, et al. Simulation experiment on the influence of vegetation pattern on soil infiltration and water and sediment process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [22] 朱凯, 刘文杰, 刘佳庆. 西双版纳地区胶农复合系统的土壤斥水特性[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(1): 137-146.  
Zhu K, Liu W J, Liu J Q. Water repellency of soil in different types of rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2017, 39(1): 137-146.
- [23] 李民义, 张建军, 郭宝妮, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1083-1090.  
Li M Y, Zhang J J, Guo B N, et al. Understory plant species diversity and hydrological effect of *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand densities in Loess Plateau of Western Shanxi, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1083-1090.
- [24] Felix R W, Dias A T C, Bevilacqua M S, et al. Litter addition as a tool for restoring hydrological processes and controlling erosion in riparian forests disturbed by fine sediment deposition [J]. Restoration Ecology, 2023, 31(5): 13895.
- [25] 梁磊, 孙浩田, 徐高明, 等. 田间原位试验分析长期机械作业下稻麦轮作地块土壤入渗性能[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 110-118.  
Liang L, Sun H T, Xu G M, et al. Soil infiltration of rice-wheat rotation field under long-term mechanical treatment based on field *in situ* experiments [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 110-118.
- [26] 郁耀闯, 杨树瑶, 王长燕, 等. 宝鸡地区  $L_1-S_5$  黄土和古土壤水分入渗及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 78-85.  
Yu Y C, Yang S Y, Wang C Y, et al. Water infiltration and influencing factors of  $L_1-S_5$  loess-paleosol in Baoji Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 78-85.

- [16] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J].水土保持学报,2009,23(5):228-231,236.  
Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):228-231,236.
- [17] 耿韧,张光辉,洪大林,等.黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J].农业工程学报,2019,35(3):141-148.  
Geng R, Zhang G H, Hong D L, et al. Variation characteristics of aggregate stability of cropland, grassland and woodland along precipitation gradient in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(3):141-148.
- [18] 王长庭,龙瑞军,王根绪,等.高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究[J].草业学报,2010,19(6):25-34.  
Wang C T, Long R J, Wang G X, et al. Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(6):25-34.
- [19] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕.黄土高原沟壑区土壤养分空间变异及其与地形因子的相关性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(12):166-172,180.  
Song F J, Chang Q R, Zhong D Y. Spatial variability of soil nutrients and its relations to topographical factors in hilly and gully area of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011,39(12):166-172,180.
- [20] Zhang G., Tang K., Ren Z., et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013;927-934.
- [21] 娄义宝,康宏亮,王文龙,等.黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J].中国农业科学,2023,56(1):90-103.  
Lou Y B, Kang H L, Wang W L, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(1):90-103.
- [22] Wang B, Li P P, Huang C H, et al. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021,754(14):2304.
- [23] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007,32(9):1323-1345.
- [24] 程颖,刘鸿雁,王红亚,等.中全新世以来中国中部高山植被生产力和土壤侵蚀演变的古生态学证据[J].中国科学:地球科学,2021,51(12):2140-2149.  
Cheng Y, Liu H Y, Wang H Y, et al. Indication of paleo-ecological evidence on the evolution of alpine vegetation productivity and soil erosion in central China since the mid-Holocene [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021,51(12):2140-2149.
- [25] Hudek C, Stanchi S, D'Amico M, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017,5(1):36-42.

~~~~~  
(上接第 65 页)

- [27] 刘卓昕,高鹏,穆兴民,等.黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):206-213.  
Liu Z X, Gao P, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):206-213.
- [28] 赵恩辉,吴磊,赵生华.黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,2023,30(6):255-263.  
Zhao E H, Wu L, Zhao S H. Comprehensive evaluation of soil water conservation function of different vegetation types in the Yellow River Delta [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):255-263.
- [29] 简永旗,吴家森,盛卫星,等.间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(2):320-328.  
Jian Y Q, Wu J S, Sheng W X, et al. Effects of thinning and stand types on litter stock and soil water-holding capacity[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2021,38(2):320-328.
- [30] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.  
Liu H, Lei T W, Zhao J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on Loess infiltration capacity [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(2): 1-6.