

亚热带森林类型转换对土壤水文物理参数的影响

郑力轩¹, 吴福忠^{1,2}, 杨巧¹, 彭艳^{1,2}, 安南南^{1,2},

江华玲¹, 郑俞辰¹, 岳楷^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350117; 2. 福建三明森林生态系统
国家野外科学观测研究站, 福建 三明 365002)

摘要: [目的] 旨在探讨森林类型转换对森林土壤水文物理参数的影响。[方法] 以亚热带天然常绿阔叶林及由此转换来的天然次生林、米槠(*Castanopsis carlesii*)人工林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林为研究对象, 对比分析森林类型转换后对土壤孔隙度、渗透性和土水势等水文物理参数的影响。[结果] 1) 林型转换后, 土壤总孔隙度在次生林土壤下层 20~40 cm 显著提高, 相比天然林增加 5.43%, 土水势在旱季杉木人工林中显著提高, 与天然林相比增加 5.01 kPa, 但土壤渗透性无显著变化。2) 4 种林型 0~40 cm 土层的土壤颗粒均以砂粒为主, 但仅黏粒和粉粒与土壤总孔隙度之间呈显著性相关, 土壤颗粒组成并非林型转换下土壤持水指标的受控因子。3) 土壤持水指标的主要受控因子是土壤体积质量和土壤湿度, 土壤体积质量与各持水指标显著相关, 森林转换导致土壤体积质量与土壤湿度发生变化, 进而引起土壤持水性能的改变。[结论] 林型转换对亚热带地区土壤水文物理参数有显著影响, 表现为天然林转换为次生林有利于水源涵养或水土保持, 但转换为杉木人工林可能降低水源涵养能力。研究结果为亚热带森林的可持续经营和水源涵养提供一定的理论依据和数据支持。

关键词: 林型转换; 土壤孔隙度; 土壤渗透性; 土壤基质势; 水文物理参数

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0125-10

Impacts of Subtropical Forest Type Conversion on Soil Hydrophysical Characteristics

ZHENG Lixuan¹, WU Fuzhong^{1,2}, YANG Qiao¹, PENG Yan^{1,2}, AN Nannan^{1,2},

JIANG Hualing¹, ZHENG Yuchen¹, YUE Kai^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. Fujian Sanming
Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming, Fujian 365002, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the effects of forest type conversion on the hydrophysical characteristics of forest soils. [Methods] The effects of forest type conversion on soil porosity, permeability, and matric potential, using subtropical natural evergreen broad-leaved forests and the secondary forests were compared, *Castanopsis carlesii* artificial forests, and *Cunninghamia lanceolata* artificial forests derived from them as research subjects. [Results] 1) After forest type conversion, total soil porosity in the lower soil layer of secondary forests significantly increased by 5.43% compared to natural forests. Soil matric potential also significantly increased in *C. lanceolata* artificial forests during the dry season by 5.01 kPa compared to natural forests. However, the variation of soil permeability in different forest types was not significant. 2) In the 0~40 cm soil layer of the four forest types, soil particles were mainly dominated by sand particles, but only clay particles and silt particles showed a significant correlation with total soil porosity, and soil particle composition was not the controlling factor for soil water-holding indicators under forest type conversion. 3) The main

收稿日期: 2024-10-22

修回日期: 2024-11-19

录用日期: 2024-11-27

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(32271633, 32201342); 福建省 2023 年中央引导地方科技发展资金项目(2023L3005); 福建省自然科学基金项目(2022J01642)

第一作者: 郑力轩(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: zhenglixuan1209@163.com

通信作者: 岳楷(1987—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生态与全球变化相关研究。E-mail: kyleyuechina@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

controlling factors for soil water-holding indicators were soil bulk density and soil moisture, with significant correlations between soil bulk density and each water-holding indicator, while forest conversion led to changes in soil bulk density and soil moisture, thereby causing changes in soil water-holding performance. [Conclusion] Forest type conversion has a significant impact on the hydrophysical parameters of subtropical region soils, with the conversion from natural forests to secondary forests being beneficial for water conservation or soil retention, and conversion to *C. lanceolata* artificial forests requiring soil amelioration measures to optimize their water retention and permeability. The results can provide a theoretical basis and data support for sustainable management of subtropical forests and water conservation.

Keywords: forest type conversion; soil porosity; soil permeability; soil matric potential; hydrophysical parameters

Received: 2024-10-22

Revised: 2024-11-19

Accepted: 2024-11-27

Online(www.cnki.net): 2025-01-27

森林土壤在森林生态系统中具有重要的水分储存功能^[1],其持水能力通常占到总水源涵养量的85%以上,对于水分循环的调节具有显著影响^[2]。评价森林水土保持和水源涵养功能时,关键在于土壤的水文物理特性,这些参数包括土壤体积质量、孔隙度、渗透性及土壤基质势。土壤体积质量是土壤质地、结构和孔隙状况的综合反映,而孔隙度则揭示土壤的通透性,其中毛管孔隙和非毛管孔隙分别赋予土壤储水和透水的功能^[3]。土壤的渗透特性即土壤对地表水的渗透能力,土壤水分的来源、运动、保持和贮存等都取决于土壤入渗,作物根系吸收利用的水分也来源于渗入土壤的水分,且土壤的渗透特性与植物根系呈显著的线性关系^[4]。土壤水势影响水分在土壤中的运动和分布,土壤基质势是土壤水势中最重要的组成部分之一,与附着在土壤表面的水分密切相关。综合这些特性来看,森林土壤层作为大气降水的“蓄水池”和“调节器”,其水文物理参数对森林持水在水土保持、水源涵养等生态系统的稳定性方面具有深远的影响^[5]。目前大部分土壤水文研究大多关注单一的土壤水文属性与水文过程影响机理、土壤结构变化等^[6-8]。因此,土壤水文研究仍需进一步探究,其中研究森林类型转换对土壤持水性能的影响具有重要意义。

森林覆盖全球31%的陆地,对维持生态环境和推动可持续发展起着至关重要的作用^[9]。森林影响水文过程,降低洪峰,防止水土流失,参与水分再分配^[10]。然而,在政策因素、人口转型、贸易与经济全球化、自然环境条件等原因影响下,森林类型在一定条件下发生转换^[11]。以米槠为建群种的常绿阔叶林广泛分布于我国中亚热带的山地丘陵地带^[12]。该地区水热条件优越,生产力高,既满足人类生产生活所需的木材等林产品需求,也对调节区域小气候,保育生物多样性,维护区域生态安全起到不可忽视的作用。随着人口的快速增长和对木材、薪材等林产品的需求不断扩大,大面积的天然常绿阔叶林已转换为次生林和人工林,森林类

型发生转换。这种转换不仅改变森林的结构和功能,而且可能对土壤的水文物理参数产生深远影响,如不同的森林类型,在冠层、林下植被和凋落物方面存在差异,从而可能导致土壤孔隙度、渗透性及土壤基质势等水文物理参数发生变化,进一步影响水土保持和蓄水能力。但森林类型转换后,土壤理化性质是否有变化存在不确定性。因此,开展亚热带森林类型转换过程中土壤水文物理参数研究,有助于评估和预测该区域天然林、次生林的土壤物理化学性质及生态系统恢复效果,同时在人工林的选择问题上思路也更加清晰。

本研究基于长期观测的环境因子数据,以亚热带地带性植被常绿阔叶天然林为对照,通过天然林砍伐后经人为保留目的树种以促进天然林更新形成次生林,以及天然林砍伐后经炼山人工造林转换为米槠人工林和杉木人工林为研究对象,研究天然林转换为次生林和人工林前后土壤的土壤体积质量、孔隙度、渗透性、土壤基质势等土壤水文物理参数的变化特征,深入认识森林转换对土壤水文物理参数的影响。通常认为天然林的持水能力大于人工林,因此作出科学假设:天然林转换为次生林后,由于保留部分原始植被,次生林土壤孔隙度可能升高,土壤持水能力得到改善,转换为人工林后可能因为其单一的树种和较快的生长速度,土壤持水能力低于天然林和次生林。通过对比不同林型的土壤持水参数变化,可以为亚热带森林的可持续经营和水源涵养功能的提升提供理论依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国福建省三明市森林生态系统国家野外科学观测研究站的陈大观测点(26°19'N, 117°36'E)。该区域属于中亚热带季风气候,具有冬暖夏热、雨热同期的特点。年平均气温19.1~19.3℃,年平均降水量1610~1749mm,主要集中在3—8月(雨季),占年降水总量的80%。相对湿度约为81%,年平均蒸发量为1585mm。地形以低山丘陵为主,海拔250~500m,坡

度 25°~45°。土壤主要为花岗岩发育的红壤和黄壤,多呈酸性,土壤厚度超过 1 m,土壤体积质量为 1.3 g/cm³,表层 C 和 N 浓度分别为 22.7,1.4 mg/g。植被方面,该区域以米槠为优势种的亚热带常绿阔叶林为主。

本研究以天然林为对照,选取次生林、米槠人工林、杉木人工林 3 种不同的森林类型为研究样地。1958 年以前,该采育场内主要分布着以米槠为主的天然常绿阔叶林。自 1958 年以来,由于木材需求,该区域的天然常绿阔叶林逐渐被砍伐。其余 3 种森林类型的形成过程为:次生林为 2011 年由米槠天然林皆伐后保留剩余采伐物,在幼苗生长过程中有目的地保留米槠、格氏栲等树种,米槠人工林与杉木人工林为 2012 年 4 月经过炼山后人工挖穴种植的纯林,遵循人工林的传统经营方式。至 2018 年,人工林面积占福建省森林总面积的 47.5%。研究区内设有多个样地(图 1),用于研究天然林与人工林的转换对生态系统的影响。4 种林分类型的样地概况见表 1。

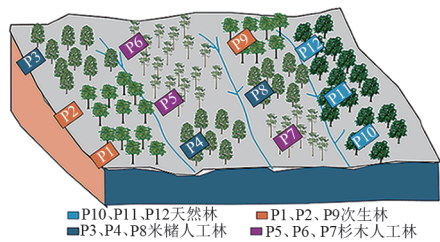


图 1 研究区不同森林类型示意

Fig. 1 Diagram of sampled plots of different forest types in the study area

表 1 4 种林型的基本信息

Table 1 Basic information of four forest types

林分特征	坡度/ (°)	林龄/ a	密度/ (株·hm ⁻²)	树高/m	胸径/ cm	郁闭度/ %
天然林	31.7	46	3 788	15.80	21.99	80
次生林	31.7	11	13 300	7.87	5.07	70
米槠人工林	32.0	11	2 400	8.77	9.93	60
杉木人工林	33.0	11	2 860	11.30	14.80	60

1.2 样品采集与测定

采样时选取林下地势较平坦的区域,同时在地形背景条件下,考虑到根系结构、凋落物及树冠的影响,选择距树基约为 0.5 m 处挖 1 个深度为 40 cm 的土壤剖面,然后打入 100 cm³ 环刀,自上而下取下 0~20、20~40 cm 土层的原状土(注意避开石块和粗根,尽量避免破坏土壤结构),每个林型做 3 个重复,带回实验室分析,测得土壤总氮、土壤有机碳、颗粒态有机质。将长度为 20、40 cm 规格的张力计插在剖面附近,待读数稳定后记录土壤基质势。本研究观测期近 1 a,在观

测期使用土壤温度传感器、土壤干湿表记录土壤温度和湿度,温度传感器放置在百叶箱内记录大气温度,使用雨量器收集降水数据。雨季(2022 年 4—8 月)每月采集土壤,采 5 次、旱季(2022 年 9 月至翌年 2 月)每隔 3 个月采集土壤样品,采样 2 次,共计 7 次采样。

将样品烘干至恒重,从而计算出土壤含水率和土壤体积质量,用环刀浸泡法^[13]测定土壤总孔隙度和毛管孔隙度,并计算土壤非毛管孔隙度。具体步骤为:将环刀放在大塑料盘里,在盘子内加水直到水面平齐于环刀上部。在水中浸泡环刀 12 h,使土壤中所有孔隙吸满水;取出环刀并擦干外部水分,然后称重;将环刀放在干砂中静置 2 h,非毛管孔隙中的水从土壤中流出,剩下毛管孔隙中的水分;再次将环刀从干砂中取出并称重,将环刀放置在干砂中 48 h,此时环刀中的土壤仅含有毛管孔隙中的水分,再次取出环刀并称重;最后,将环刀放入 105 °C 的烘箱中,将土壤彻底烘干并再次称重,从而可以计算土壤孔隙度特征。

土壤颗粒组成采用 MasterSize2000, MasterSize(英国)测定,并根据美国制土壤质地分类划分采用 7 个等级,即黏粒(0~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm)。

1.3 数据计算

土壤体积质量计算公式为:

$$\rho_b = m_{\text{dry}} / V_{\text{ring}} \tag{1}$$

式中:ρ_b为土壤体积质量,g/m³;m_{dry}为烘干土样质量,g;V_{ring}为环刀容积,cm³。

土壤总孔隙度计算公式为:

$$P_t = (m_1 - m) / m \times \rho_b \times 100\% \tag{2}$$

式中:P_t为土壤总孔隙度,%;m₁为浸泡 12 h 后环内湿土重量,g;m 为环刀内烘干土重量,g;ρ_b为土壤体积质量。

土壤毛管孔隙度计算公式为:

$$P_c = (m_2 - m) / m \times \rho_b \times 100\% \tag{3}$$

式中:P_c为毛管孔隙度,%;m₂为在干砂盘中静置 2 h 后环刀内湿土重量,g;m 为环刀内烘干土重量,g;ρ_b为土壤体积质量,g/m³。

土壤非毛管孔隙度计算公式为:

$$P_n = P_t - P_c \tag{4}$$

式中:P_t为土壤总孔隙度,%;P_c为毛管孔隙度,%;P_n为非毛管孔隙度,%。

1.4 数据分析

采用 Excel 2021 对土壤孔隙特征、渗透特性及水势特征等指标进行数据整合;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验 4 种森林类型孔隙度、渗透量和土水势等变量的差异,采用最小显著性差异法(LSD)进行

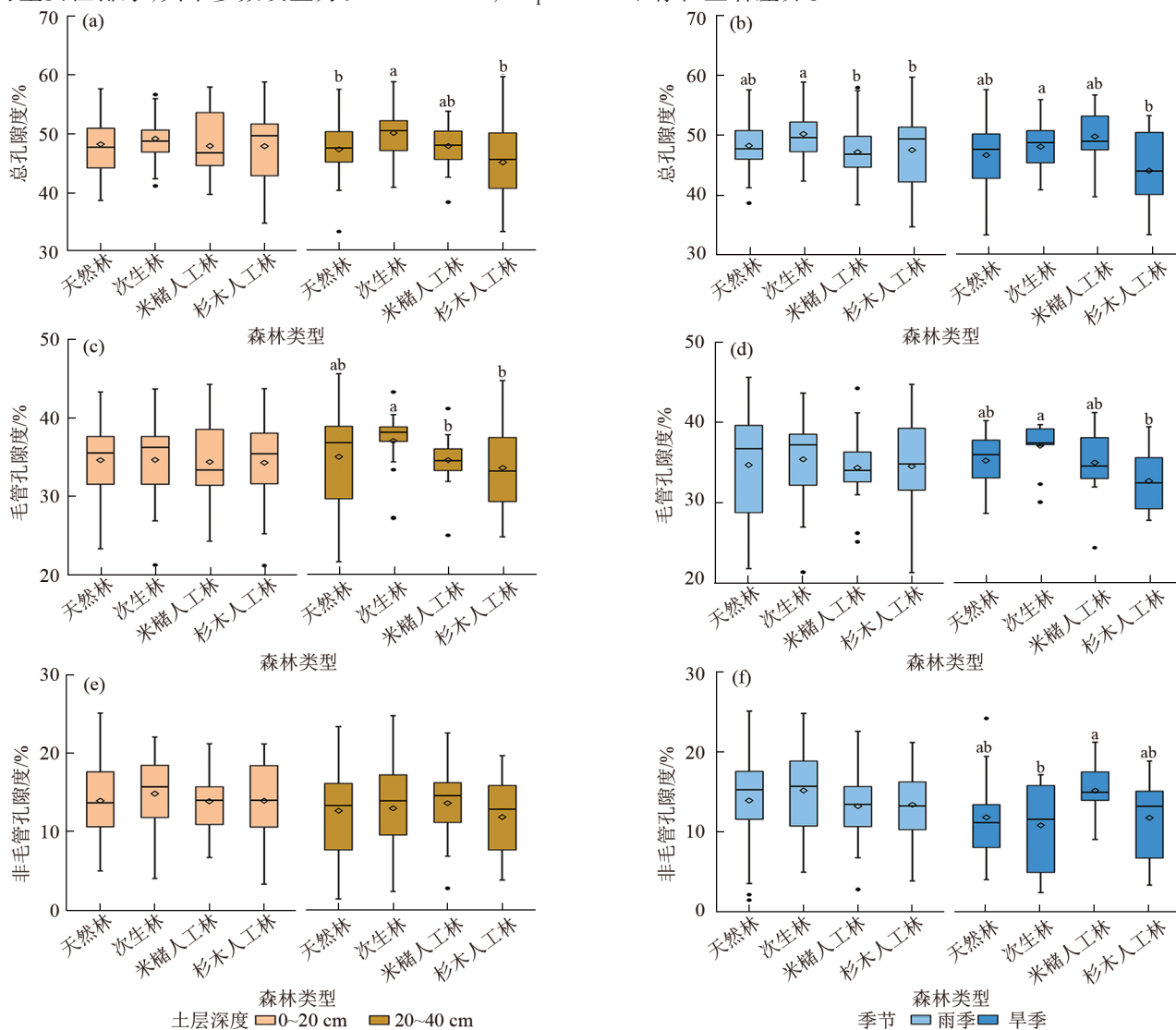
多重比较;采用一般线性回归分别对土壤体积质量和总孔隙度、稳渗率、土壤基质势、各土壤颗粒类型和总孔隙度、土壤基质势进行拟合,探究土壤体积质量变化和土壤颗粒组成对土壤水文物理参数的影响。通过删除方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)>5的自变量降低变量间的共线性后,用随机森林(random forest)通过比较模型中某个变量被随机扰动前后的均方误差变化来进行各环境因子对土壤水文物理参数影响的相对重要性排序,其中参数设置为:ntree=1 000,nrep=

299,各环境因子数据均来自本研究中所有的统计分析,与绘图均在R软件中完成(R Foundation for Statistical Computing,Vienna,Austria,R version 4.4.1)。

2 结果与分析

2.1 森林类型转换后土壤水文物理参数的变化特征

土壤各孔隙特征在土层间均无显著差异(图2)。从土层深度来看,林型间土壤下层的总孔隙度和毛管孔隙度均存在显著差异($p<0.05$),非毛管孔隙度不存在显著差异。



注:箱式图中不同小写字母代表林型之间的统计学差异($p<0.05$)。箱体表示各孔隙度数据的四分位数范围;中位线表示各孔隙度数据的中位数;箱体中的点表示数据的均值;从箱体延伸出的线为须,表示数据的变异范围,超出此范围的数据点为离群点,为数据中的异常值。下同。

图2 4种森林类型在不同土层和干湿季的土壤孔隙度特征

Fig. 2 Soil porosity characteristics of different soil layers in four forest types in dry and wet seasons

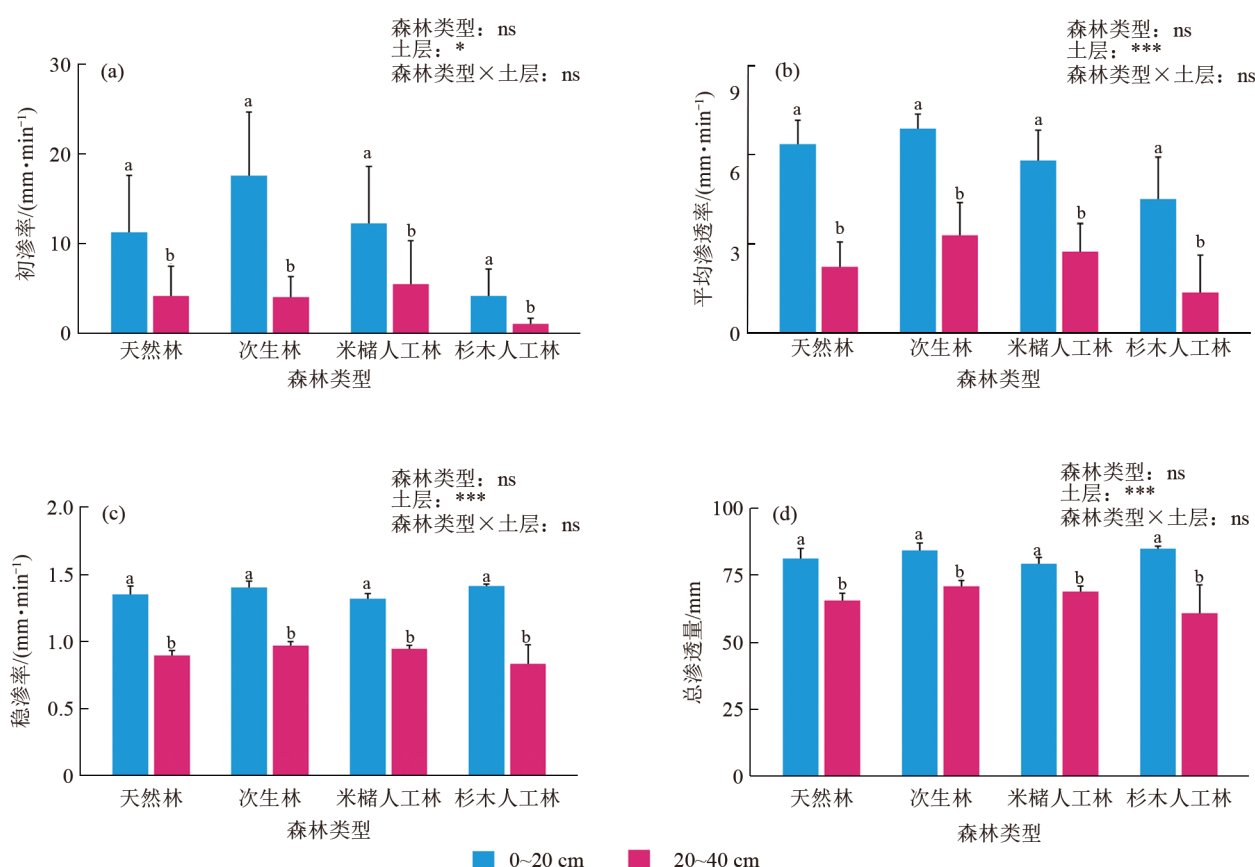
土壤下层天然林、次生林、米槠人工林和杉木人工林的总孔隙度平均值分别为47.87%、52.17%、48.41%和45.68%,天然林和次生林存在显著性差异($p<0.05$)(图2a);毛管孔隙度中,次生林平均值为39.10%,显著高于人工林,但天然林与其他林型均不显著(图2c);4种林型的土壤下层非毛管孔隙

度平均值分别为12.75%、13.07%、13.72%和11.97%,林型对毛管孔隙度和非毛管孔隙度均无显著影响(图2e)。从季节来看,4种林型的土壤孔隙特征不存在季节性差异,但在同一时期不同林型的孔隙特征有显著差异($p<0.05$),旱季次生林的土壤总孔隙度和毛管孔隙度最高,杉木人工林最低,土壤

非毛管孔隙度中米楮人工林显著高于次生林;雨季次生林的土壤总孔隙度显著高于人工林,其余林型均不显著。

不同森林类型的渗透特性在上下土层间存在显著性差异($p < 0.05$),且表现为初始入渗率 $>$ 平均渗透率 $>$ 稳定入渗率(图3)。林型转换后,初渗率平均值表现为次生林(14.67 mm/min) $>$ 米楮人工林(12.72 mm/min) $>$ 天然林(11.56 mm/min) $>$ 杉木人工林(5.47 mm/min),土壤下层较上层分别下降

63.20%、42.09%、47.05%和52.75%(图3a);平均渗透率平均值为次生林(6.37 mm/min) $>$ 天然林(5.58 mm/min) $>$ 米楮人工林(5.57 mm/min) $>$ 杉木人工林(3.92 mm/min)(图3b);稳渗率、渗透总量均表现为次生林 $>$ 米楮人工林 $>$ 天然林 $>$ 杉木人工林,其中,稳渗率在土壤下层较上层分别下降32.21%、28.03%、33.82%和40.85%(图3c),渗透总量下降幅度较小,分别下降15.81%、13.02%、19.25%和28.24%(图3d)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$);*表示 $p < 0.05$;*** $p < 0.001$ 。

图3 4种森林类型土壤渗透特性

Fig. 3 Soil permeability characteristics of four forest types

土壤基质势在土层间无显著差异,林型间土壤下层有显著性差异。从土层深度来看,土壤下层各林型土壤土水势平均值分别为-14.87、-19.17、-11.85、-13.85 kPa(图4a);从季节来看,季节性变化对4个林型的土壤基质势并无显著影响(图4b),但不同时期林型之间存在显著性差异,雨季表现为米楮人工林最高,次生林最低,旱季表现为杉木人工林最高,天然林最低,其他林型土壤基质势并无显著差异。

2.2 不同因子与土壤水文物理参数之间的关系

土壤总孔隙度和体积质量显著性较强,总孔隙度随着体积质量的升高而降低(图5a)。土壤渗透性

能稳渗率和体积质量具有较强的显著性,其决定系数 >0.4 ,一般线性回归呈较好的拟合关系,稳渗率随体积质量的升高而降低(图5b)。土壤基质势和体积质量具有显著性,二者呈正相关,土壤基质势随体积质量的升高而升高(图5c)。

黏粒与土壤总孔隙度呈显著性相关($p < 0.05$),粉粒与土壤孔隙度具有显著性,但相关性不如黏粒显著($p = 0.040$);黏粒与土壤基质势的显著性差($p = 0.270$);其他土壤颗粒,如极细砂、细砂、中砂、粗砂和极粗砂与土壤孔隙度和土壤基质势的相关性不显著(表2)。

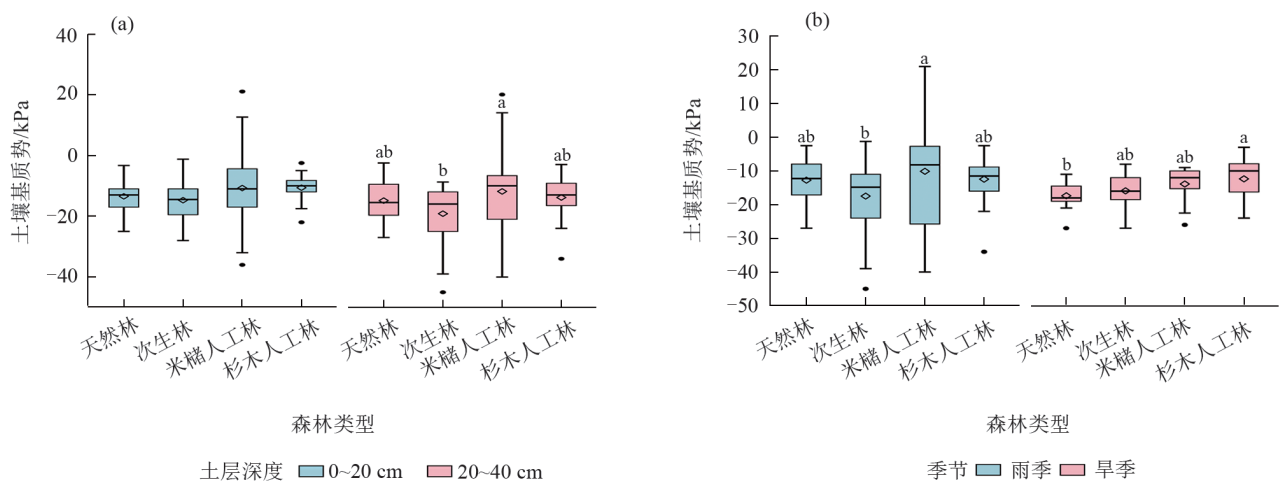


图 4 4种森林类型在不同土层和干湿季的土壤基质势特征

Fig. 4 Soil matrix potential characteristics of different soil layers in four forest types in dry and wet seasons

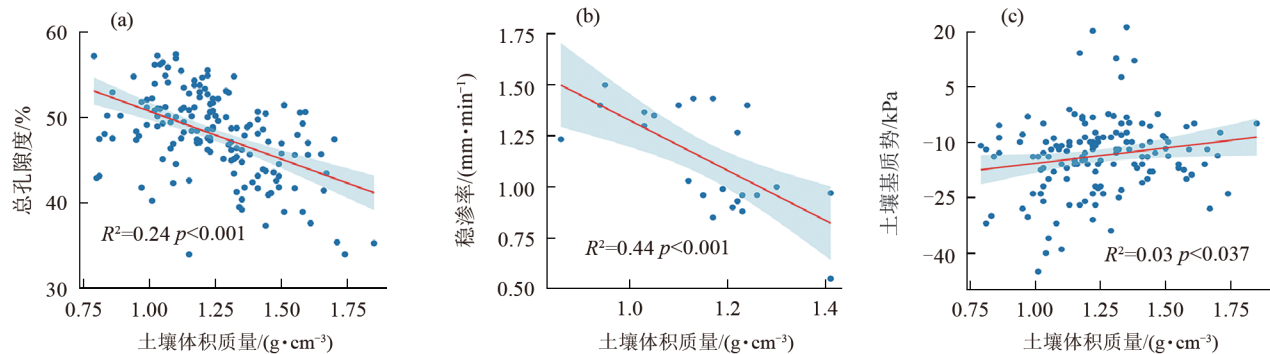


图 5 土壤体积质量变化与土壤水文物理参数之间的关系

Fig. 5 Relationship between soil bulk density changes and soil hydrophysical parameters

表 2 土壤颗粒组成与土壤水文物理参数(土壤总孔隙度、土壤基质势)的一般线性回归分析结果

Table 2 General linear regression analysis results of soil particle composition and soil hydrophysical parameters (soil total porosity, soil matrix potential)

土壤颗粒	总孔隙度/ %	土壤基质势/ -kPa
黏粒(0~2 μm)	0.017*	0.270
粉粒(2~50 μm)	0.040*	0.879
极细砂(50~100 μm)	0.172	0.998
细砂(100~250 μm)	0.967	0.769
中砂(250~500 μm)	0.234	0.538
粗砂(500~1 000 μm)	0.471	0.981
极粗砂(1 000~2 000 μm)	0.082	0.915

注: *表示 $p < 0.05$ 。

2.3 其他环境因子对土壤水文物理参数的影响

土壤湿度是土壤总孔隙度、稳渗率和土水势最重要的环境因子。土壤总孔隙度主要受到土壤湿度和大气降雨量的影响,林分特征和其他土壤因子对土壤总孔隙度影响较小;土壤基质势特征中,土壤湿度、大气降雨量和土壤温度相

对重要性较高,林分特征的相对重要性最低(图 6)。

由表 3 可知,林型转换使土壤体积质量与土壤湿度发生显著变化。天然林转换为次生林、米槠人工林后,土壤体积质量存在显著性差异,转换为次生林、米槠人工林和杉木人工林后,土壤湿度也存在显著性差异,而土壤体积质量与土壤湿度的变化又进一步引起土壤持水性能的改变。

3 讨论

本研究旨在探究森林类型转换对土壤水文物理参数的影响。林型不同,地表凋落物成分、储量、分解速率和树木根系生长等均存在一定差异,从而导致不同林分土壤水文物理参数的不同^[14]。而土壤孔隙度、渗透性、土壤基质势对森林土壤的持水能力和蓄水能力有直接影响^[15]。本研究发现,次生林和米槠人工林在提高土壤孔隙度和渗透性方面表现更佳,而杉木人工林则需要改进管理策略以增强土壤的保水和渗透能力,表明森林类型转换对亚热带地区土壤水文物理参数有影响,且不同林型对土壤特性的改善效果存在差异。

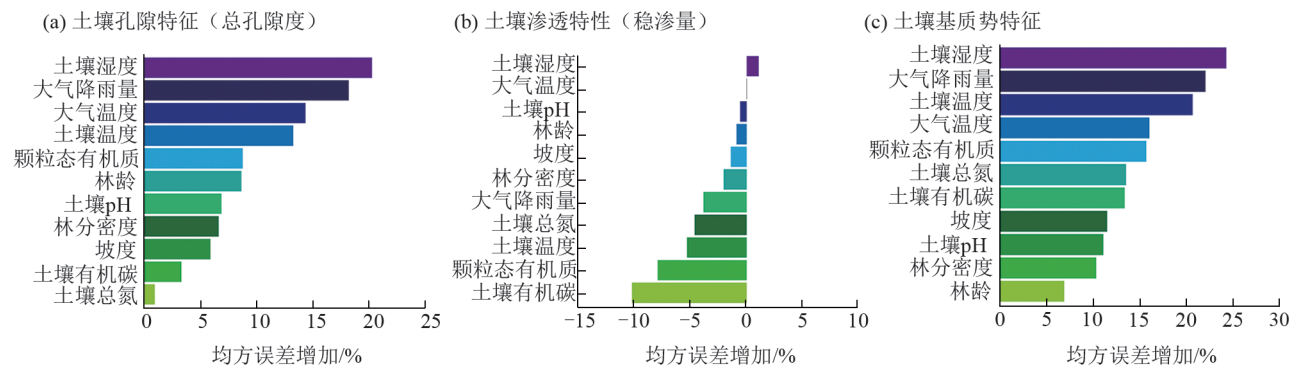


图 6 其他环境因子在各土壤水文物理参数中的相对重要性排序

表 3 森林类型对土壤体积质量和土壤湿度影响的单因素方差分析

Table 3 One-way ANOVA of the impact of forest types on soil bulk density and soil moisture content		
森林类型	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	土壤湿度/ %
天然林	1.297a	17.090b
次生林	1.132b	13.242c
米楮人工林	1.203b	22.017a
杉木人工林	1.316a	21.889a

注: 同列不同小写字母表示不同森林类型之间差异显著 ($p<0.05$)。

土壤孔隙度能较好地反映土壤结构状况、通气性能及持水能力。土壤体积质量较轻的土壤具有更高的孔隙度,因而土壤结构更疏松,表现出更强的持水能力(图 4a)。由表 3 可知,三明陈大观测点采育场通过近 66 a 的林型转换演替,土壤水文物理参数较为良好,4 种森林类型土壤体积质量为 1.13~1.32 g/cm³[16],符合我国陆地生态系统的土壤体积质量平均值(0.93~1.41 g/cm³),也处在土壤松紧程度比较适宜的 1.1~1.4 g/cm³[17],陈大观测点采育场天然林被替代后,林型转换使土壤体积质量呈杉木人工林>天然林>米楮人工林>次生林的规律,土壤总孔隙度和非毛管孔隙度排序则与之相反,表明天然林转换为次生林与米楮人工林后对土壤的改良作用好,但转换为杉木人工林后土壤通透性较差。该变化可能归因于:天然林经过多年发育而形成地带性森林群落,物种多样性丰富,凋落物分解较快,因此在降低土壤体积质量、增大孔隙度等方面优于人工林[18],次生林在自然恢复过程中植被多样性增加,根系数量增加,有助于改善土壤结构、增加土壤孔隙空间,从而有利于土壤持水性能的提升[19-20]。而杉木人工林由于是炼山后形成,且在后续过程中的人为活动如砍伐、刀耕和杂草控制等,可能使土壤暴露在太阳辐射下,导致温度升高和蒸发,从而增加土壤体积质量,高体积

质量的土壤通常反映土壤的退化趋势。且人工林单一的树种组成和较低的植被覆盖度,可能导致土壤结构紧实,进一步使孔隙度降低[21]。通常认为,土壤中同时存在不同大小的孔隙。大多数森林土壤的总孔隙度为 40%~60%。当总孔隙度接近 50%,其中非毛管孔隙占 20%~40% 时,土壤的透水性、通气性和持水能力相对均衡,最适合树木生长[22]。由图 1 可知,4 种森林类型总孔隙度均为 50%,但总体非毛管孔隙度约占 13.50%,可能是造成土壤孔隙度在旱雨季期间没有显著性差异的原因之一。土壤渗透性是反映森林土壤水源涵养、理水调洪功能的重要指标[14]。三明陈大观测点采育场 4 种林型的土壤渗透性的变化趋势与孔隙度的变化一致,相比天然林,次生林和米楮人工林的土壤渗透性有所提高,而杉木人工林的土壤渗透性降低。可能与不同树种的根系结构和凋落物输入有关,根系结构影响土壤孔隙的连通性,进一步影响土壤的渗透性能[23]。而凋落物的分解则提供有机质,有助于土壤团聚体的形成,进而影响土壤的渗透性[24]。以米楮为主的建群种有机质丰富,根系发达,土壤通透性良好渗透能力极强;而杉木人工林地裸露,雨水的冲刷导致土壤变得紧实,通透性下降,渗透能力弱[10]。4 种林型表现出初渗率>平均渗透率>稳渗率的特征,且土壤上层的土壤渗透性高于下层。在土壤入渗初期,由于土壤基质势较低且各基质水吸力较大,土壤渗透速率急剧下降[25]。随着时间的推移,受毛细管力和重力作用,水分逐渐填充土壤孔隙,使土壤水分体积分数不断增加,导致土壤渗透率逐渐下降,土壤水分达到饱和状态时,土壤渗透率趋于稳定[26]。因此,在降雨发生时,土壤入渗初期能有效储存林内降雨,减缓高强度降雨所引起地表径流。土壤基质势的变化与土壤孔隙度和渗透性紧密相关,土壤基质势越大,土壤颗粒对水分的吸引力越强,水分在土壤中的保持和下降速度相对较慢,在土壤中更易于保持,土壤越湿

润,越有利于植物吸收利用土壤水分;反之,土壤基质势越低越不利于植物吸收利用土壤水分^[27]。在水势梯度下,根系可以从土壤孔隙中吸收水分。一般而言,可供植物吸收的水分时的水势通常为 $-10\sim-30\text{ kPa}$ ^[22]。研究区的天然林林转换为其余林型后土水势为 $-10.61\sim-19.17\text{ kPa}$,表明该区域土壤的持水能力较好,有利于森林植物的正常生长和发育。具体来看,天然林转换为次生林后,土壤基质势有所下降,可能与次生林土壤结构的改善和根系对水分的竞争有关^[28]。而杉木人工林土壤基质势相对较高,可能与其较低的植被密度和根系结构有关^[29]。

有研究^[30-31]发现,土壤颗粒组成能够影响土壤的结构和性质,随着黏粒的增加,土壤中孔隙体积减少,对水势也有影响。研究区4种林型土壤颗粒主要以砂粒为主,粉粒次之,黏粒最少。仅黏粒和粉粒与土壤总孔隙度之间呈显著性相关,土壤颗粒组成并非林型转换下土壤持水指标的受控因子。黏粒主要在土壤下层较高,可能是因为在亚热带地区淋溶作用强烈而导致土壤剖面下部黏粒较高^[32]。提示在土壤管理中需要平衡不同颗粒大小的分布,采取一些优化措施以改善土壤的水文物理特性,对于理解和预测土壤水分状况及其在不同土地利用和管理措施下的行为具有重要意义。

随机森林分析结果表明,三明陈大观测点采育场4种林型中,土壤湿度是影响土壤水文物理参数的关键环境因子。有研究^[33]发现,在不同的土壤湿度条件下,小麦能够通过调节其水力和气孔导度来应对水分胁迫。这种调节有助于深入理解土壤湿度如何影响土壤的水文物理特性。大气降雨量是土壤水分补给的主要来源,其变化直接影响土壤湿度和土壤水文物理参数。通过地表径流、降雨入渗和植被蒸腾等生态水文过程,对土壤水分产生重要作用^[34]。大气温度对土壤水文物理参数的影响表现在全球变暖导致大气中温室气体的增加,不仅引起全球温度的上升,而且改变降水模式和全球环流过程,土壤作为气候系统的一部分,通过碳、氮和水文循环与大气相连。因此,由于温度的升高和降水的变化,许多生物地球化学和水文循环发生变化,进而改变成土作用。土壤温度对土壤水文物理参数的影响表现在土壤温度的升高影响土壤中水分的相变,间接改变土壤湿度,从而影响降水,通过改变地表反照率、土壤容量影响植被的生长情况,进一步影响地气之间的辐射平衡^[35]。表明在亚热带地区,气候条件对林型转换下土壤特性的影响不容忽视。森林转换导致土壤湿度发生变化,进而引起土壤水文物理参数的改变。

4 结 论

1)森林类型转换显著影响亚热带地区土壤的水文物理参数。天然林转换为次生林后土壤结构得到改善,具有较强的土壤持水能力,有利于土壤的水源涵养和水土保持功能。米楮人工林的变化情况因持水指标的不同而表现出差异。杉木人工林的土壤渗透性较差,不利于降水入渗和贮存,需要通过改进管理措施来优化土壤结构,从而提高其保水和渗透能力。

2)土壤体积质量和土壤湿度作为林型转换中各水文物理参数的主要受控因子,对土壤水文物理参数的影响应在森林经营和土壤管理中予以重视,本研究为亚热带森林的水土保持和可持续经营提供科学依据,建议在林业实践中优先发展次生林和米楮人工林,并对杉木人工林采取适当的土壤改良措施。在未来研究中,可以通过物理、化学、生物手段改善林型转换地区人工林的土壤体积质量,特别是通过保护性土壤管理和添加外源有机物来实现这一目标。

参考文献:

- [1] 王光玉.杉木混交林水源涵养和土壤性质研究[J].林业科学,2003,39(增刊1):15-20.
WANG G Y. Study on water conservation and soil properties of Chinese fir mixed stands[J].Scientia Silvae Sinicae,2003,39(S1):15-20.
- [2] 杜姣姣,周运超,白云星,等.阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究[J].水土保持研究,2021,28(4):105-112.
DU J J, ZHOU Y C, BAI Y X, et al. Research of soil hydrophysical properties of *Pinus massoniana* plantation after the introduction of broad-leaved tree species [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 105-112.
- [3] 田大伦,陈书军.樟树人工林土壤水文-物理性质特征分析[J].中南林学院学报,2005,25(2):1-6.
TIAN D L, CHEN S J. Analysis of soil hydrology-physic properties in the artificial forest of *Cinnamomum Camphora* (L.) Presl [J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(2): 1-6.
- [4] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
LI J X, HE B H, CHEN Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [5] 何文强.贺兰山东坡不同植被类型凋落物和土壤层水源涵养功能及其影响因素研究[D].银川:宁夏大学,2023.

- HE W Q. Study on water conservation function of litter and soil layer of different vegetation types on the eastern slope of Helan Mountain and its influencing factors [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [6] 贺缠生, 田杰, 张宝庆, 等. 土壤水文属性及其对水文过程影响研究的进展、挑战与机遇[J]. 地球科学进展, 2021, 36(2): 113-124.
- HE C S, TIAN J, ZHANG B Q, et al. A review of advances in impacts of soil hydraulic properties on hydrological processes, challenges and opportunities [J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(2): 113-124.
- [7] VEREECKEN H, AMELUNG W, BAUKE S L, et al. Soil hydrology in the earth system [J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, 3: 573-587.
- [8] VEREECKEN H, HUISMAN J A, HENDRICKS F H J, et al. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2616-2633.
- [9] MA J, LI J W, WU W B, et al. Global forest fragmentation change from 2000 to 2020 [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): e3752.
- [10] 谭思懿. 中亚热带森林林型转换对降水再分配过程的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
- TAN S Y. Effect of forest type conversion in mid-subtropical forest on precipitation redistribution process [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023.
- [11] 卢龙辉, 许月卿, 黄安, 等. “森林转型”研究进展与展望[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 373-384.
- LU L H, XU Y Q, HUANG A, et al. Reviews and prospects for forest transition [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(2): 373-384.
- [12] 吴捷录, 张雪, 王宏宇, 等. 中亚热带森林转换对地表凋落物现存量及其组分的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 116-124.
- WU J L, ZHANG X, WANG H Y, et al. Effects of forest conversion on the standing storage of litter and its components in mid-subtropical region [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 40(2): 116-124.
- [13] 杨静, 张耀艺, 谭思懿, 等. 亚热带不同树种土壤水源涵养功能[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4594-4604.
- YANG J, ZHANG Y Y, TAN S Y, et al. Soil water conservation functions of different plantations in subtropical forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4594-4604.
- [14] WEI Q, LING L, CHAI C S, et al. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [15] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 205-212.
- ZHU W Z, SHENG Z L, SHU S M. Soil physical properties and water holding capacity of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 205-212.
- [16] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- CHAI H, HE N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [17] 丁访军, 王兵, 钟洪明, 等. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 179-183.
- DING F J, WANG B, ZHONG H M, et al. Physical characteristics of soil and function of soil and water conservation for three main forest land types in the lower reaches of Chuishuihe river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 179-183.
- [18] 林佳慧. 不同林分类型土壤水分及物理性质对比研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- LIN J H. Comparative study on soil moisture and physical properties of different stand types [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [19] 李雪惠. 抚育间伐对杉木林植被和生物量及土壤理化性质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- LI X H. Effects of tending and thinning on vegetation and biomass and soil physical and chemical properties of Chinese fir forest [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
- [20] 徐松鹤, 陈宇浩. 休牧对锡林郭勒典型草原土壤养分和植物群落特征的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 15-21.
- XU S H, CHEN Y H. Effect of stop grazing on characteristics of plant community and soil nutrients of typical grassland in Xilinguole [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 15-21.
- [21] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
- KANG B, LIU S R, CAI D X, et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [22] 江华玲. 亚热带森林类型转换对土壤持水能力的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2024.
- JIANG H L. Effects of subtropical forest type conversion on soil water holding capacity [D]. Fuzhou: Fujian

- Normal University, 2024.
- [23] 宋一凡. 荒漠草原降水驱动下的水分-土壤-植被耦合与响应机制[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- SONG Y F. Water-soil-vegetation coupling and response mechanism driven by precipitation in desert grassland [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [24] 杨静, 张耀艺, 谭思懿, 等. 中亚热带不同树种对土壤团聚体组成及其碳、氮含量的影响[J]. 林业科学, 2022, 58(4): 51-61.
- YANG J, ZHANG Y Y, TAN S Y, et al. Effects of different tree species on the compositions of soil aggregates and their carbon and nitrogen concentrations in mid-subtropical forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(4): 51-61.
- [25] 程欢, 程一伦, 宫渊波, 等. 川西北高山/亚高山区 6 种典型土壤类型水文效应[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 225-231.
- CHENG H, CHENG Y L, GONG Y B, et al. Hydrological effect of six soil types in northwestern Sichuan alpine and subalpine mountains [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(2): 225-231.
- [26] 刘翔, 周宏飞, 刘昊, 等. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5820-5826.
- LIU X, ZHOU H F, LIU H, et al. Characteristic and numerical simulation of sandy soil infiltration under the different types of biological soil crusts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5820-5826.
- [27] 韩玉静, 杜广明, 白于. 星毛委陵菜水势对环境变化的响应[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013(21): 94-96.
- HAN Y J, DU G M, BAI Y. Response of *Potentilla tenuiflora* water potential to environmental change [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2013(21): 94-96.
- [28] 李晓敏, 魏江生, 智宇. 大兴安岭南段落叶阔叶次生林土壤水势特征[J]. 现代农业, 2019(1): 95-97.
- LI X M, WEI J S, ZHI Y. Characteristics of soil water potential of broad-leaved secondary forest in the southern section of Daxing'anling Mountains [J]. Modern Agriculture, 2019(1): 95-97.
- [29] 姜俊, 刘宪钊, 贾宏炎, 等. 杉木人工林近自然化改造对林下植被多样性和土壤理化性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 170-177.
- JIANG J, LIU X Z, JIA H Y, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties after close-to-nature transformation management of Chinese fir plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 170-177.
- [30] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 53-56.
- GAO X S, DENG L J, ZHANG S R. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(2): 53-56.
- [31] JIAO W C, ZHOU D, WANG Y T. Effects of clay content on pore structure characteristics of marine soft soil [J]. Water, 2021, 13(9): e1160.
- [32] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 1-8.
- CHEN Q Q, SHEN C D, SUN Y M, et al. Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan biosphere reserve [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 1-8.
- [33] WANG L J, ZHANG Y Q, LUO D D, et al. Integrated effects of soil moisture on wheat hydraulic properties and stomatal regulation [J]. Plants, 2024, 13(16): e2263.
- [34] 党毅, 王维, 张永娥, 等. 坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106-118.
- DANG Y, WANG W, ZHANG Y E, et al. Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 106-118.
- [35] ZHANG H, WANG E L, ZHOU D W, et al. Rising soil temperature in China and its potential ecological impact [J]. Scientific Reports, 2016, 6: e35530.