

闫亚茹, 冯天骄, 刘亚博, 吴天宇, 王平. 黄土残塬沟壑区典型植被恢复类型的长期土壤水分动态及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2026.

YAN Yaru, FENG Tianjiao, LIU Yabo, WU Tianyu, WANG Ping. Long-term Soil Volumetric Water Dynamics and Driving Factors of Typical Vegetation Restoration Types in the Loess Hilly-Gully Region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026.

黄土残塬沟壑区典型植被恢复类型的长期土壤水分动态及其驱动因素*

闫亚茹^{1,2}, 冯天骄^{1,2†}, 刘亚博^{1,2}, 吴天宇^{1,2}, 王平^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京, 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西吉县, 042200)

摘要: 为遏制土壤退化趋势和提升生态环境质量, 黄土高原地区开展了大规模、长期的植被恢复工程, 而典型植被恢复类型的长期土壤水分动态变化差异, 特别是土壤水分变异性 and 差异性仍需深入探讨。为此, 本研究选取黄土残塬沟壑区典型人工林(油松林、侧柏林、刺槐林)与天然林(辽东栎次生林), 基于长时间序列(2006年—2025年)0~200 cm 土壤水分动态变化, 结合多期土壤理化性质、植被生长属性数据, 采用单因素方差分析、主成分分析、Mantel test 分析等统计方法, 探讨林下土壤理化性质及植被生长参数在长期植被恢复中对林下土壤水文动态的影响。结果表明: (1)不同植被恢复类型存在显著的土壤水分差异性: 与人工林相比, 天然次生林的土壤水分含量整体较高, 平均土壤含水量为 16.8%, 月均峰值可达 30.4%, 且具有较高的水分稳定性, 变异系数平均值为 12.89%; (2)不同植被恢复类型在土壤理化性质和植被属性方面存在显著差异, 天然次生林的土壤氮(236.428 mg·kg⁻¹)、磷(488.575 mg·kg⁻¹)和有机碳含量(14.903 g·kg⁻¹)高于其他三种人工林; 乔木层和灌木层的生物量、高度等植被属性低于人工林; (3)主成分分析和 Mantel test 分析表明: 土壤水分差异性主要由乔木属性和林下植被属性共同影响, 而土壤水分变异性则主要受林下植被属性主导影响。该研究可为该区域天然次生林保护、人工林林下植被配置优化、强化林下植被培育提升水源涵养能力及水土保持管理提供理论依据。

关键词: 黄土高原; 植被恢复; 生态水文过程; 土壤水分; 水源涵养功能

中图分类号: S714.7

文献标志码: A

Long-term Soil Volumetric Water Dynamics and Driving Factors of Typical Vegetation Restoration Types in the Loess Hilly-Gully Region

YAN Yaru^{1,2}, FENG Tianjiao^{1,2†}, LIU Yabo^{1,2}, WU Tianyu^{1,2}, WANG Ping^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian Forest Ecosystem National Field Observation and Research Station, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: [Objective] To curb the trend of soil degradation and improve ecological environment quality, large-scale and long-term vegetation restoration projects have been carried out in the Loess Plateau region. However, the long-term variations in soil volumetric water under typical vegetation restoration types, especially the variability and differences in soil moisture, have not been given in-depth attention. [Method] Therefore, this study selected typical artificial forests (*Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, *Robinia pseudoacacia*) and natural forests (*Quercus mongolica secondary forest*) in the Loess Plateau remnant gully area as the subject focus. Based on a long-term sequence (2006—2025) of

* 国家自然科学基金项目(42371114)和中央高校基本业务项目(QNTD202508)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42371114) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. QNTD202508)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fengtianjiao1991@bjfu.edu.cn

作者简介: 闫亚茹, 硕士研究生, 主要从事生态水文学研究。E-mail: fengtianjiao1991@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2025-10-09; 收到修改稿日期: 2026-01-29; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-12

*

0~200 cm soil volumetric water dynamics, combined with multi-phase soil physicochemical properties and vegetation growth attribute data, this study used one-way analysis of variance, principal component analysis, and Mantel test to explore the effects of soil physicochemical properties and vegetation growth parameters on the soil hydrological dynamics in long-term vegetation restoration. **[Result]**The results show that: (1) Significant soil moisture differences exist between vegetation restoration types: compared to artificial forests, the natural forest has a higher overall soil volumetric water content, with an average of 16.8% and a peak of 30.4%, and greater moisture stability, with an average coefficient of variation of 12.89%; (2) Significant differences exist in soil physicochemical properties and vegetation attributes among different vegetation restoration types. The natural forest has higher nitrogen (236.428 mg·kg⁻¹), phosphorus (488.575 mg·kg⁻¹), and organic carbon content (14.903 g·kg⁻¹) than the three artificial forests. The biomass and height of the tree and shrub layers are lower in the natural forest than in the artificial forests; (3) Principal component analysis and Mantel test analysis show that soil moisture differences are mainly influenced by both tree and understory vegetation attributes, while soil moisture variability is predominantly influenced by understory vegetation attributes. **[Conclusion]**This study can provide a theoretical basis for the conservation of natural forests in the region, the optimization of understory vegetation in plantations, the enhancement of water conservation capacity through the cultivation of understory vegetation, and the management of soil and water conservation.

Key words: Loess Plateau; Vegetation restoration; Eco-hydrological processes; Soil moisture; Water source conservation function

黄土高原地区是我国重要的生态屏障和水土保持关键地区^[1],但黄土高原地区自然资源有限、植被覆盖度低、生态环境脆弱^[2],加之该地区属于半干旱地区,降水主要集中在夏季且降水量较少,土壤疏松易受风蚀和水蚀,导致土壤保水能力变差^[3],均使得黄土高原地区水资源极度缺乏^[4],并成为突出的生态脆弱区^[5]。土壤水分作为黄土高原生态系统的核心限制因子,其动态变化直接影响植被生长与生态系统稳定^[6]。土壤水分动态变化过程聚焦于土壤水分差异性与土壤水分变异性两个关键指标,前者用以说明不同植被恢复类型之间的土壤水分静态差异,可直接判断不同植被类型对土壤水分的消耗强度与适应能力,为植被恢复过程中的树种筛选提供科学依据。土壤水分变异性描述同一植被恢复类型下土壤水分含量变化的波动幅度,反映系统对外界环境干扰的响应模式与内部调节能力。因此,进一步研究植被恢复树种选择及其对土壤水文过程的影响,精准量化土壤水分差异性与变异性并揭示其驱动机制,对于评估黄土高原植被恢复的可持续性、预警土壤干层风险及优化水土资源管理策略具有不可替代的科学意义。

目前,关于典型植被恢复的水文效应研究已形成较为系统的脉络。在土壤水分差异性层面,现有研究已明确植被通过冠层-林下层-土壤三层结构调控水文过程,且这种调控作用在不同植被类型间存在显著差异。天然次生林因多层群落结构,乔木冠层和林下层截留量高于人工纯林^[7];枯落物厚度增加,最大持水量呈正向上上升趋势^[8],天然林林下枯落物厚度高于人工林^[9],加速水分下渗;在土壤入渗环节,多数研究聚焦土壤理化性质的中介作用^[10],发现天然次生林对土壤结构的改良效果优于人工纯林,并支撑入渗与持水性能^[11]。此外,学界已逐步从静态过程转向水文动态研究。不同植被类型下土壤水分循环存在显著的季节动态,雨季加速循环过程^[12],而这一过程在人工林与天然次生林中的表现存在差异。人工林因林下植被覆盖度低、地表裸露度高,雨季入渗后水分易通过地表径流流失,旱季则因乔木蒸腾耗水集中导致水分快速下降^[13];植被恢复初期水分保持能力呈快速上升趋势^[14],人工林因群落结构单一,恢复初期的水分循环过程(如入渗速率)提升后易因耗水加剧进入平台期^[15],而天然次生林凭借乔灌草协同发育,水分保持能力的上升趋势更持久,表现出不同植被类型在长期恢复后的水分差异性^[16]。在土壤水分变异性层面,当前研究发现土壤水分具有高度的时空变异性。在空间尺度上,不同深度土层土壤水分变异性有所差异,表层土壤水分变异性大于0~250 cm各土层水分^[17]。在时间尺度上,土壤水分变异性随季节呈现规律性改变^[18],雨季与旱季的水分波动幅度、动态趋势存在明显区

别。此外，学界对于影响土壤水分变异性的驱动因子也做了深入研究。黄土地区植被盖度是主要驱动因子^[19]，浅层土壤水分变异性受降水、植被发育、根系分布、土壤特性和人为干扰等影响，而 30 cm 以下的土壤水分受自相关因素和随机因素共同控制^[20]。

当前，学界已围绕黄土高原植被恢复的水文效应开展了系统研究，为区域生态修复提供了重要参考。然而，当前多数研究仅聚焦于短周期监测数据的分析对比，缺乏多年长期观测数据支持，无法从宏观时间尺度揭示长期恢复过程中土壤水分的调控机制和变异特征。本研究基于 19 年连续定位监测数据，不仅刻画了土壤水分在年际、季节及垂直分层上的变异规律，而且分析了不同植被类型在水分保持、水源涵养功能上的长效差异，为评估区域植被恢复的可持续性提供了不可或缺的长期数据支撑。

基于此，本研究在山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站开展，以油松人工林、侧柏人工林、刺槐人工林、天然次生林为研究对象，通过长期监测水分数据、土壤理化性质以及植被属性等指标，分析了不同植被恢复树种对土壤水分含量、土壤水分变异性 and 土壤水分差异性水文指标的影响规律；植被恢复过程中土壤理化性质的变化及其与水文过程的相互关系；植被属性对土壤水文过程的驱动机制；以期评估不同植被恢复树种的水文生态效益，为黄土高原科学造林提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域，地理坐标为 36°14'27"—36°18'23"N，110°39'45"—110°47'45"E(图 1)。该区域地处黄土高原东南部典型的残塬沟壑区和梁峁丘陵沟壑区，地势整体呈现东高西低的倾斜趋势，海拔介于 440 m 至 1 820 m 之间。

吉县站所处区域为温带大陆性季风气候，年均降水量为 569 mm，降水主要集中在 6 月至 9 月，年蒸发量为 1 719 mm；多年平均气温为 9.9°C，夏季最高气温可达 38.1°C，冬季最低气温为 -20.4°C。土壤以褐土为主，母质为黄土，pH 约为 7.9。该区域植被资源丰富，天然次生植被主要包括辽东栎(*Quercus mongolica*)、旱柳(*Salix matsudana Koidz*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina Lindl*)等。人工林植被则以油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等纯林及混交林为主，这些树种在植被恢复中发挥了重要作用。

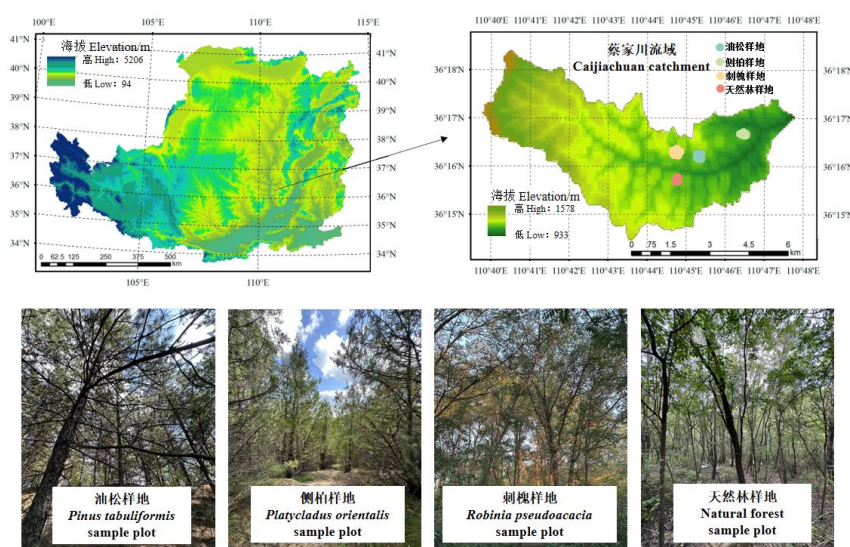


图 1 研究区概况 (以彩图发表)

Fig. 1 Overview of the research area

1.2 样地设计

为解决水土流失严重、植被覆盖率低等问题,该区域自 1991 年开始进行植被恢复建设。选取的植被类型涵盖油松、侧柏、刺槐人工林及天然次生林,这类植被在黄土高原植被恢复实践中具有典型代表性。其凭借生长速率快、耐旱性强的生物学特性以及水土保持等显著生态功能,已被当地林业部门广泛推广应用。造林采取 2 m×2 m 的栽植间距,天然次生林以封山育林为主,与人工林同步开展林内基础管护,且所有样地均采取禁止干扰土壤原生环境的措施。

在充分进行野外调查的基础上结合典型性、整体性和均匀性的原则,在 2006 年至 2024 年 7—8 月生长旺盛的时期,于刺槐人工林、油松人工林、侧柏人工林、天然次生林四种植被恢复类型内均选择 19~25°阳坡、人工林林龄相同的 3 块 50m×50m 的样地,不同样地相距 100 m 以上且树种分布均衡,群落结构完整无缺损,层次分化清晰,林分整体发育阶段趋于一致。在各样地内按“品”字形设置 3 个坡度、坡向一致、海拔相差不超过 50 m 的 10 m×10 m 样方,每个样方间隔 20 m 以上。选取树木生长状况优良、群落特征显著且空间分布格局规整的区域,剔除生长过密的植株及枯立木,确保调查取样的完整性。各个样地的基本信息如表 1。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of research sample sites

基本信息 Basic information	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔高度 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope direction	土壤类型 Soil type	植被盖度 Vegetation cover/%	优势植物种 Dominant plant species
油松 ^① 1	36°16'14"	110°45'29"	1148	24°	阳坡	粉壤土	34	油松
油松 ^① 2	36°16'11"	110°45'44"	1099	19°	阳坡	粉壤土	31	油松
油松 ^① 3	36°16'15"	110°45'31"	1134	21°	阳坡	粉壤土	32	油松
侧柏 ^② 1	36°16'16"	110°46'42"	1170	25°	阳坡	粉壤土	25	侧柏
侧柏 ^② 2	36°16'18"	110°46'39"	1151	24°	阳坡	粉壤土	22	侧柏
侧柏 ^② 3	36°16'15"	110°46'45"	1192	19°	阳坡	粉壤土	26	侧柏
刺槐 ^③ 1	36°16'20"	110°44'31"	1135	24°	阳坡	粉壤土	38	刺槐
刺槐 ^③ 2	36°16'21"	110°44'27"	1087	22°	阳坡	粉壤土	40	刺槐
刺槐 ^③ 3	36°16'19"	110°44'28"	1109	25°	阳坡	粉壤土	39	刺槐
天然次生林 ^④ 1	36°15'41"	110°44'30"	1081	23°	阳坡	粉壤土	41	辽东栎
天然次生林 ^④ 2	36°15'34"	110°44'19"	1052	21°	阳坡	粉壤土	40	辽东栎
天然次生林 ^④ 3	36°15'37"	110°44'27"	1073	25°	阳坡	粉壤土	38	辽东栎

①*Pinus tabulaeformis*, ②*Platycladus orientalis*, ③*Robinia pseudoacacia*, ④Natural forest

1.3 土壤水分监测

本研究土壤水分监测结合不同时期技术选用分段监测设备,在 2006—2015 年采用土钻烘干法^[21],利用土钻采集土壤样本,将样本放入 105° 烘箱中烘干 6~8 h,直到样本恒重后计算土壤体积含水量。2015—2020 年在 0~200 cm 土层中埋设 EnviroSMART 土壤定位监测系统(SENTEK PTY LTD, AU),2020—2025 年更换为 ZL6 型土壤水分传感器设备(METER GROUP, USA),测定不同林分、不同年份、不同月份各个土层的土壤含水量。数据采集频率设定为 15 min 一次,每个监测点在每次测定时重复记录 3 组数据,取平均值作为该监测点的土壤水分含量数据。通过数据采集器实时储存并传输原始数据,细致捕捉土壤水分在全年的动态变化。为保证数据的准确性和可比性,所有监测数据均以烘干法进行校准。在四种植被恢复类型中,测定位于 0~200 cm 剖面中 10 个不同土层(间隔 20 cm)的土壤体积含水量。样地选择植被生长旺盛、无明显差异,且坡度、坡向、海拔、植被恢复年限和林分密度等属性基本相同的林地。土壤水分变异性利用变异系数(CV)来衡量,以此表示不同植被恢复类型林下土壤水分的波动性。

1.4 土壤理化性质测定

在四种植被恢复类型中，在表土以下 0~200 cm 进行采样，分别从 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180、180~200 cm 土层处取样。在 2006、2012、2017、2020、2023 年生长旺盛的 7—8 月，于不同样方内和不同土层间采用品字形分别选取 3 个不同的采集点，每个采集点取 5 个样品，以此保证采样的准确性和对比性。将采集到的土样用塑封袋密封后带回实验室进行测定。

将野外取回的土样自然风干，研磨过筛后进行测定，以获得更加精确的土壤理化性质。土壤全氮采用凯氏定氮法测定；土壤全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定；土壤全钾采用 ICP 法测定；有机碳采用重铬酸钾外加热法测定；土壤机械组成采用比重计法测定；土壤容重采用环刀法测定。

1.5 植被调查

分别在 2006、2012、2017、2020、2023 年植被生长旺盛的 7—8 月，于蔡家川流域展开植被调查，获取植被属性数据以分析其对土壤水分变异性与差异性的驱动作用。首先将油松人工林、刺槐人工林、侧柏人工林以及天然次生林 4 个植被恢复类型范围内按照对角线形选定 5 个乔木样方，每个样方相隔 50 m 以上，大小为 10 m×10 m。每个样方内林木生长状况良好、分层明显，坡度、海拔、坡向、面积、植被恢复年限基本相同，以排除这些变量对林下植被的影响。在调查样方内展开每木调查，分别测定每株树的树高、胸径和冠幅。其次，在乔木样方内选择五个 5×5 m 的灌木样方，每个样方相隔 20 m 以上，用卷尺测定灌木层内植被的株高、胸径和冠幅。在灌木样方中选择五个 1 m×1 m 的草本样方，调查草本植物的类型、生长状况，测量株高、丛径和盖度等数据。最后在乔木样方内沿着对角线设置五个 0.5 m×0.5 m 的枯落物样方，调查枯落物的厚度，取样方内的所有枯落物放在密封袋中称重后，将其带回实验室内分标，置于 75° 烘干箱内烘干称量，计算枯落物的生物总量。

1.6 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2019 软件对实验数据进行整理，所有样品数据均使用“平均值±标准差”的方式展示。在 Surfer 15 中对各植被样地不同月份各土层土壤水分含量数据进行可视化处理，直观对比土壤水分含量的动态变化及土壤水分变异性与差异性的时空特征。利用 SPSS26.0 软件单因素方差分析计算不同植被恢复类型下土壤水分含量和理化性质、植被属性的显著性差异，土壤理化性质包括土壤氮、磷、钾、有机碳、砂粒、粉粒、黏粒含量和土壤容重，植被属性包括乔木、灌木植物的高度、胸径、冠幅和草本植物的株高、丛径、盖度以及枯落物的厚度和总生物量。在 R4.5.1 中对各样品数据进行制图，并通过主成分分析筛选影响土壤水分变异性与差异性的关键驱动因子；采用 Mantel test 分析并量化土壤水分变异性、差异性与土壤理化性质、植被属性之间的相关性强度，明确各因子对土壤水分异质性的贡献程度。

2 结果

2.1 不同植被恢复类型下土壤水分动态特征

为明确典型植被恢复类型对土壤水分储量的调控效应，基于 2006—2025 年 0~200 cm 土层长期监测数据分析土壤水分含量的时空分异特征，结合年际、季节与垂直分层多维度分析，结果表明：天然次生林在土壤水分保持能力上具有显著优势，是驱动植被间土壤水分差异性的关键类型。从整体来看（图 2），不同植被恢复类型土壤含水量的年际波动特征明显：2008—2011 年、2014—2016 年、2019—2021 年、2022—2024 年呈现下降趋势，2011—2014 年、2016—2019 年、2021—2022 年呈上升趋势，在 2022 年整体达到峰值，主要波动范围为 10.0%~25.0%。但天然次生林始终维持更高的水分含量，平均土壤含水量达 16.8%±0.6%，显著高于油松人工林、刺槐人工林与侧柏人工林（ $P<0.05$ ），且在 2022 年达到 30.4% 的峰值，较人工林土壤水分含量

最高值 26.8% 高 13.4%。

在一年内不同月份对土壤水分动态也有影响：每年的 3—6 月各样地的土壤体积含水量呈现上升态势，6—9 月生长旺盛的季节土壤水分含量波动，9—12 月缓慢下降，12 月—次年 3 月保持较为平稳的状态。天然次生林生长季的土壤含水量较高，主要集中在 15.0%~18.0%。侧柏、油松、刺槐人工林土壤体积含水量与天然次生林相比较少且分散，主要分布在 12.0%~17.0%。

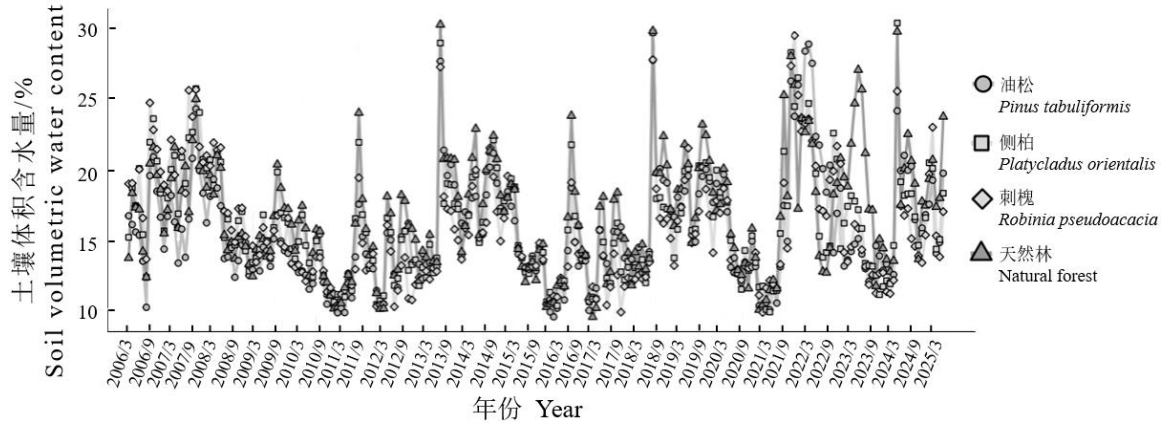
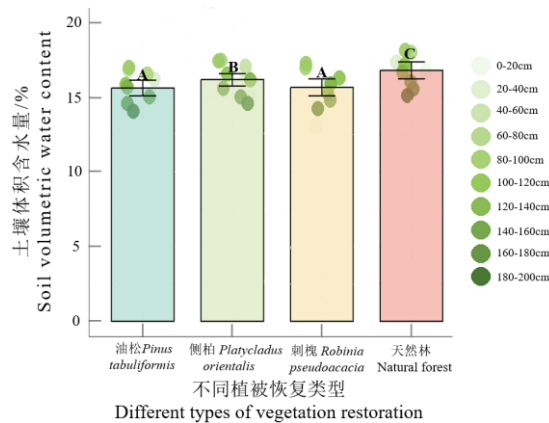


图 2 2006—2025 年不同植被恢复类型下土壤体积含水量

Fig. 2 Soil volumetric water content under different vegetation restoration types from 2006 to 2025

图 3 呈现 2006—2025 年油松、侧柏、刺槐及天然次生林四种植被恢复类型下，平均各土层深度的土壤含水量数据分布。天然次生林土壤体积含水量显著大于其他植被恢复类型 ($P < 0.05$)，总体平均土壤含水量呈现“天然次生林 > 侧柏人工林 > 刺槐人工林 > 油松人工林”的梯度特征，分别为 $16.8\% \pm 0.6\%$ 、 $16.1\% \pm 0.4\%$ 、 $15.6\% \pm 0.6\%$ 、 $15.6\% \pm 0.5\%$ 。天然次生林复杂的群落结构可通过多维度调控减少水分流失，而人工林单一的群落结构因蒸腾耗水集中，导致水分储量偏低。在土层深度与土壤体积含水量的关系维度，浅层土壤对应的数据点多分布于柱状图主体轮廓之外，而深层土壤的数据点则与柱状图重合度较高，说明植被恢复类型对土壤水分动态的调控存在垂直分层效应，在水分交换活跃的浅层土壤，植被通过改变冠层截留、林下覆盖度等过程，放大了不同植被恢复类型间的水分差异；而在水分交换缓慢的深层土壤，植被调控作用减弱，土壤自身物理特性成为主导因素。



注：大写字母表示不同树种土壤体积分含水量的显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Uppercase letters indicate significant differences in soil volumetric water content among different tree species ($P < 0.05$).

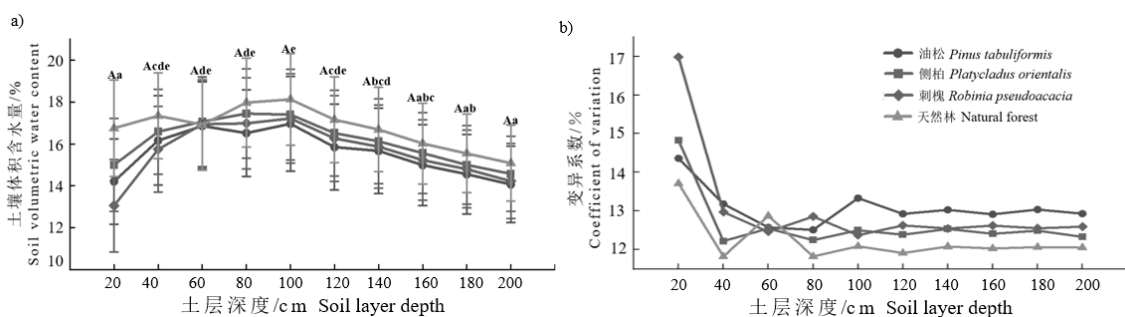
图 3 不同植被恢复类型下不同土层深度的平均土壤含水量（以彩图发表）

Fig. 3 Average soil volumetric water content at different soil layer depths under different vegetation recovery types

土壤含水量随土层深度和树种的不同而发生相应的变化。由图 4a 可知，土壤水分含量整体

呈现先增加后减少的趋势。0~100 cm 浅层土壤整体随着土层深度的增加含水量逐渐上升，多数样地于 80~100 cm 处达到峰值，100~200 cm 土壤含水量随着土层深度的增加而逐渐减少。不同深度土层的含水量具有显著差异，土壤水分在垂直剖面的分布受土层深度影响较大，存在明显的分层特征。0~20 cm 和 180~200 cm 土层无显著性差异($P>0.05$)，20~40 cm、100~120 cm 土层无显著性差异($P>0.05$)，40~60 cm、60~80 cm 土层无显著性差异($P>0.05$)，其他各土层均有显著性差异。各植被恢复类型土壤水分含量在浅层土壤中差异较大，在深层土壤中趋于一致。不同植被恢复类型也影响土壤体积含水量，整体来看天然林高于侧柏人工林，浅层土壤中油松人工林高于刺槐人工林，深层土壤中刺槐人工林高于油松人工林。天然林各土层含水量介于 15.1%~18.1%，数据分布更集中，表明天然林下表层土壤不仅含水量更高，且因垂直分层差异小，水分稳定性更优。

图 4b 为不同植被恢复类型下不同土层深度土壤体积分水量的变异系数。从整体趋势看，变异系数随土层深度增加，土壤水分变异性大致遵循“先降低-再上升-后稳定”的演变规律。浅土层阶段，变异系数普遍处于相对高位；深土层时，变异系数降低且不同植被恢复类型样地的曲线趋于重合。不同样地的变异系数曲线体现各样地的土壤水分变异规律不同。2006—2025 年，油松、侧柏、刺槐、天然林 0~200 cm 土层土壤体积分水量的平均变异系数最大值与最小值的差值分别为 1.43%、2.60%、4.60%、1.89%。刺槐人工林样地浅层土壤变异系数可达 17.0%，土壤水分变异性明显高于其他样地，说明其表层土壤持水性能差、水分易流失。天然林浅层土壤与深层土壤的变异性变化不大，说明天然林的土壤水分含量相对稳定。



注：大写字母表示相同土层不同树种的差异显著 ($P<0.05$)，小写字母表示相同树种不同土层的差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Capital letters indicate significant differences among different tree species at the same soil depth ($P<0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among different soil depths for the same tree species ($P<0.05$).

图 4 不同植被恢复类型下不同土层深度土壤水分含量及其变异系数

Fig. 4 Soil volumetric water content and its coefficient of variation at different soil layer depths under different vegetation restoration types

图 5 分别为油松林、侧柏林、刺槐林和次生天然林不同月份不同土层的土壤水分含量。不同植被恢复类型下土壤水分含量随月份和土层深度呈现明显变化。0~60 cm 浅层土壤含水量受季节降水和植被耗水共同影响，波动更为频繁：3—6 月降水增加且植被耗水较低，含水量呈上升趋势；6—9 月植被生长旺盛，蒸腾耗水加剧，含水量波动下降；9—12 月降水减少但植被蒸腾量降低，含水量缓慢回升。其中天然次生林各季节浅层含水量均无显著低值，在 8 月出现土壤体积分水最低值 15.8%，而油松、刺槐人工林 8 月浅层含水量可降至 13.2%~13.8%，进一步说明天然次生林对浅层土壤水分的稳定调控作用。

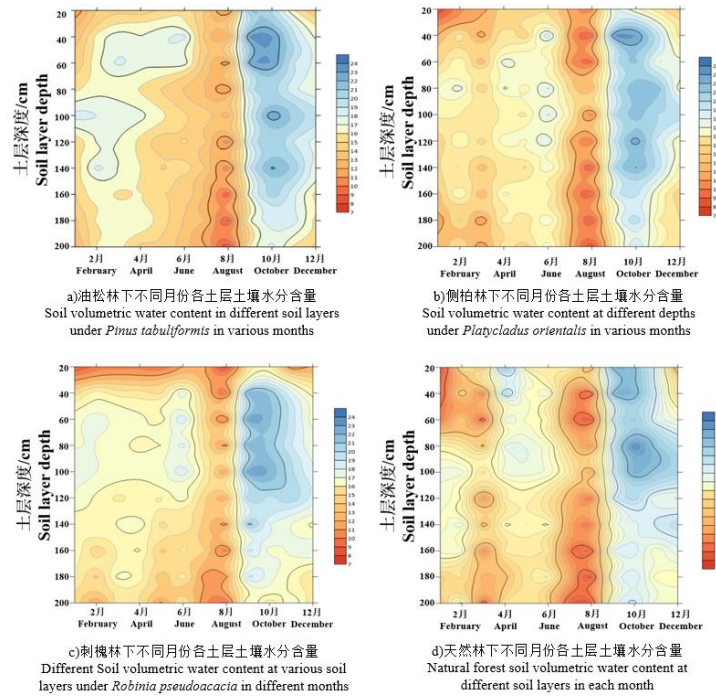


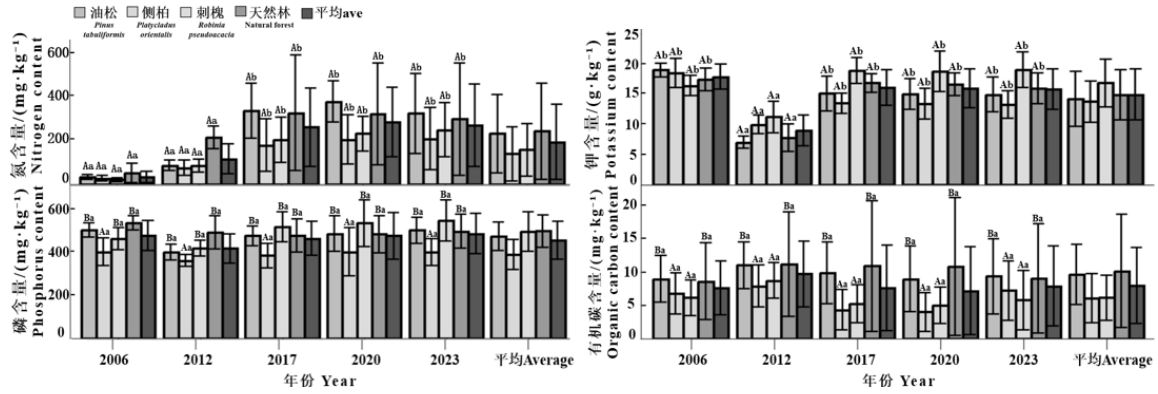
图 5 4 种植被恢复类型下不同月份各土层水分含量(以彩图发表)

Fig. 5 Soil volumetric water content at different soil layers across months under four types of vegetation restoration

2.2 土壤理化性质对比

图 6 为植被恢复类型土壤化学性质对比图，横坐标中的“平均”分别为 4 种植被恢复类型下土壤中的养分含量均值。各样地土壤化学养分含量随年份变化呈现波动性特征。四种植被恢复类型下土壤氮含量整体呈现前期偏低、中期快速上升、后期趋于稳定的长期演变趋势。2006 年、2012 年与其他年份间氮含量具有显著差异($P < 0.05$)，2006 年和 2012 年氮含量普遍偏低，2012—2023 年多样地氮含量上升，在 2017 年、2020 年等部分年份达到峰值。整体氮含量呈现为天然次生林>油松人工林>刺槐人工林>侧柏人工林。其中，2020 年油松林下土壤氮含量最高，达到 $369.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，2006 年刺槐林下土壤氮含量最低，为 $19.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2017—2023 年各植被恢复类型下土壤氮含量均高于平均水平。长期来看，天然次生林氮含量始终高于人工林且稳定性更强，体现了其对氮素截留、归还与储存的优化效应。不同植被恢复类型下土壤磷含量存在差异，侧柏人工林下土壤磷含量显著低于油松林、刺槐林和天然林，均值上天然次生林>刺槐人工林>油松人工林>侧柏人工林。磷含量年际波动相对较小，整体维持在一定水平，不同年份间各植被恢复类型下土壤磷含量无显著差异。2012 年土壤钾含量显著低于其他年份($P < 0.05$)，该年各植被恢复类型土壤钾含量平均为 $8\ 968 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤有机碳含量同土壤磷含量相似，侧柏、刺槐人工林下有机碳含量显著低于油松林和天然次生林($P < 0.05$)，天然次生林有机碳含量始终处于高位且波动较小，不同年份间四种植被恢复类型下有机碳含量均无显著差异。有机碳含量与氮含量相似，不同植被恢复类型的化学养分含量的标准差整体大于磷含量和钾含量的标准差。其中，天然次生林有机碳含量标准差明显大于其他植被恢复类型，说明其生态系统结构复杂、功能冗余充足、动态调节能力强。



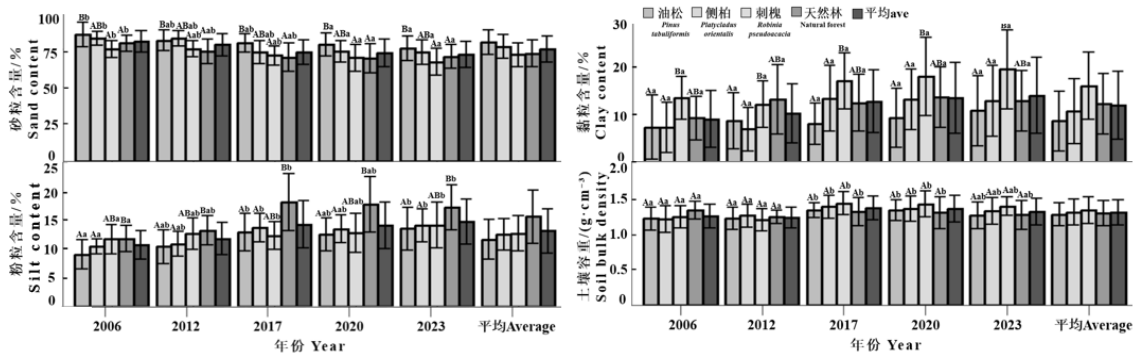
注：大写字母表示相同年份不同树种的显著差异($P<0.05$)，小写字母表示相同树种不同年份间的显著差异($P<0.05$)

Note: Uppercase letters indicate significant differences among different tree species in the same year ($P<0.05$), while lowercase letters indicate significant differences for the same tree species across different years ($P<0.05$)

图 6 不同植被恢复类型下土壤氮、磷、钾及有机碳含量

Fig. 6 Soil nitrogen, phosphorus, potassium, and organic carbon content under different vegetation recovery types

由图 7 可知，油松、侧柏、刺槐人工林和天然次生林林下土壤机械组成以砂粒为主，砂粒含量均值约为 75%。粉粒和黏粒所占比重相差不大，黏粒含量最少，均值为 12% 上下。天然林林下土壤中粉粒含量高于其他树种，所占比例可达 15.43%。不同年份间粉粒含量也具有显著差异($P<0.05$)，整体土壤粉粒含量呈现逐渐上升后稳定的趋势。以粉粒为主的质地可平衡土壤通透性和持水性，天然林 0~60 cm 土层体积含水量较油松林高，为植被生长提供了良好的土壤物理基础。在土壤容重方面，2006—2012 年、2017—2020 年和 2023 年不同年份间土壤容重均有显著差异($P<0.05$)，各年份林下土壤容重呈现波动性特征。2017 年侧柏林、刺槐林和天然林林下土壤容重达到峰值，分别为 $1.37\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $0.42\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.30\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，油松林的土壤容重于 2020 年达到峰值 $1.32\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。4 种植被恢复类型下土壤容重无显著差异($P>0.05$)，刺槐人工林略高于侧柏人工林、天然次生林，油松人工林下土壤容重最低，说明土壤容重对水分动态的影响弱于养分和机械组成。



注：大写字母表示相同年份不同树种间显著差异($P<0.05$)，小写字母表示相同树种不同年份间的显著差异($P<0.05$)。

Note: Uppercase letters indicate significant differences among different tree species in the same year ($P<0.05$), while lowercase letters indicate significant differences for the same tree species across different years ($P<0.05$).

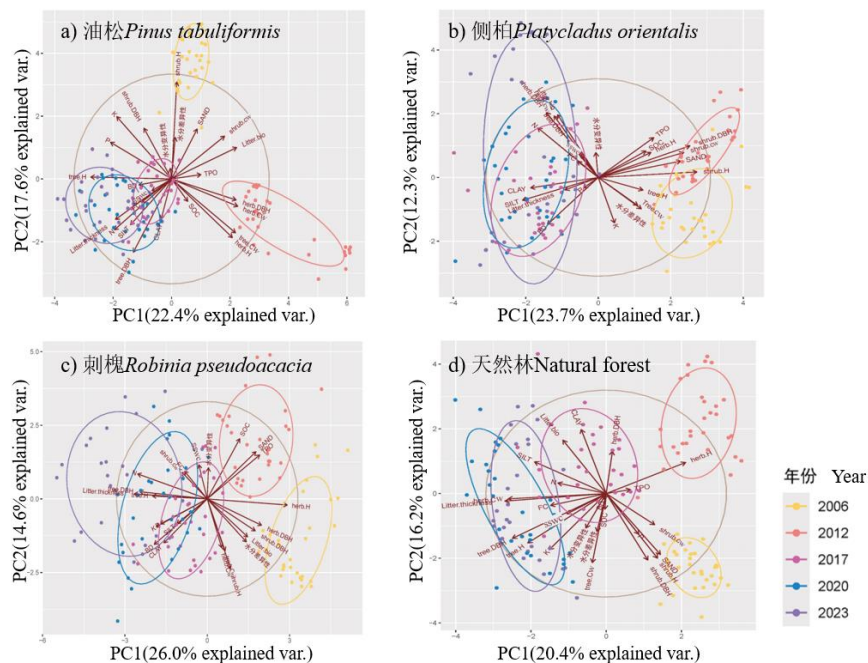
图 7 不同植被恢复类型下土壤机械组成及其容重

Fig. 7 Soil mechanical composition and bulk density under different vegetation restoration types

2.3 生态因子对土壤水分动态的影响机制

图 8 为 4 种样地不同年份的主成分分析图，油松林、侧柏林、刺槐林和天然林的 PC1 和 PC2 的贡献值分别为 22.4% 和 17.6%、23.7% 和 12.3%、26.0% 和 14.6%、20.4% 和 16.2%。除侧柏林外，其他三种植被恢复类型 2017—2023 年与 2006 年、2012 年均存在显著性差异，天然林 2017

年与 2020 年也存在显著差异，侧柏林 2006—2012 年与 2017—2023 年存在显著差异，2006 年与 2012 年无显著差异。油松林中，PC2 的差异主要来自水分差异性和灌木高度，二者呈正相关关系。说明油松林土壤水分差异与灌木生长状况密切相关，灌木越高，对降水的截留能力越强，土壤水分含量越高。侧柏林中土壤总孔隙度、有机碳、草本高度、砂粒、灌木高度、灌木冠幅、灌木胸径与土壤黏粒、土壤粉粒、枯落物总厚度、土壤容重呈负相关关系，黏粒含量高则孔隙度低，水分入渗受阻。刺槐林中，PC1 的差异主要由草本高度、乔木胸径和枯落物总厚度贡献，草本高度与乔木胸径和枯落物厚度呈负相关，说明乔木胸径越大，蒸腾耗水越强，草本生长受抑制，枯落物积累减少，进而降低土壤水分含量。在天然林中，PC1 的差异主要来自草本高度和乔木胸径。PC2 的差异受到多种生态因子的共同作用，土壤砂粒、灌木高度、灌木冠幅与土壤黏粒、枯落物生物量呈负相关，草本树高与乔木胸径为负相关关系。土壤饱和含水量与乔木胸径、乔木树高呈正相关关系，说明天然林乔木生长健壮可提升土壤饱和含水量，进而增强水分保持能力。四种植被恢复类型的 PCA 结果显示，第一主成分与第二主成分累计贡献率达 32.8%~40.0%，可解释土壤水分动态的主要变异，且 PC1 正值方向均为植被属性指标，说明植被因子是驱动土壤水分动态的核心维度。



TPO: 总孔隙度 Total Porosity; N: 氮 Nitrogen; P: 磷 Phosphorus; K: 钾 Potassium; BD: 容重 Bulk Density; SAND: 砂粒; SILT: 粉粒; CLAY: 黏粒; SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon; SSWC: 饱和含水量 Saturated soil water content; FC: 田间持水量 Field capacity; tree.DBH: 乔木胸径 Diameter at breast height; tree.H: 乔木树高 height; tree.CW: 乔木冠幅 crown width; shrub.H: 灌木株高 height; shrub.DBH: 灌木胸径 Diameter at breast height; shrub.CW: 灌木冠幅 crown width; herb.H: 草本株高; herb.DBH: 草本丛径; herb.CW: 草本盖度 crown width; litter.bio: 枯落物生物量 litter biomass; litter.thickness: 枯落物总厚度 The total thickness of the litter.

图 8 不同年份不同植被恢复类型的主成分分析(以彩图发表)

Fig. 8 Principal component analysis of different vegetation restoration types in different years

如图 9 所示，基于 Mantel test 分析的结果表明，土壤水分差异性和土壤水分变异性与土壤性质及植被属性存在显著的相关性。土壤水分差异性主要受到乔木属性和林下植被属性的共同影响，灌木植物株高、草本植物冠幅和枯落物生物量与土壤水分差异性呈极显著的正相关关系，而土壤粉粒含量和乔木胸径对其具有显著影响。这说明乔灌层与草本层的协同发育可扩大植被间的水分差异，而粉粒含量高可提升土壤持水性，进一步增强这种差异。土壤水分变异性则受到林下植被属性的主导影响，尤其是灌木植物株高与水分变异性之间存在极显著的相关性，草

本植物基径也对土壤水分变异性产生了显著影响。这是因为林下灌木层和草本层直接作用于浅层土壤，其高度与基径决定了对降水截留与蒸发抑制的强度，进而调控水分波动；而乔木主要影响深层水分，对变异性贡献较小。此外，在土壤理化性质方面，土壤砂粒与粉粒、黏粒之间呈现显著负相关关系，土壤容重与总孔隙度也呈现显著负相关，但这些关联对土壤水分动态的影响弱于植被属性，进一步说明在黄土残塬沟壑区植被恢复对土壤水分的调控作用主要通过优化植被结构实现，而非单纯依赖土壤理化性质改良。

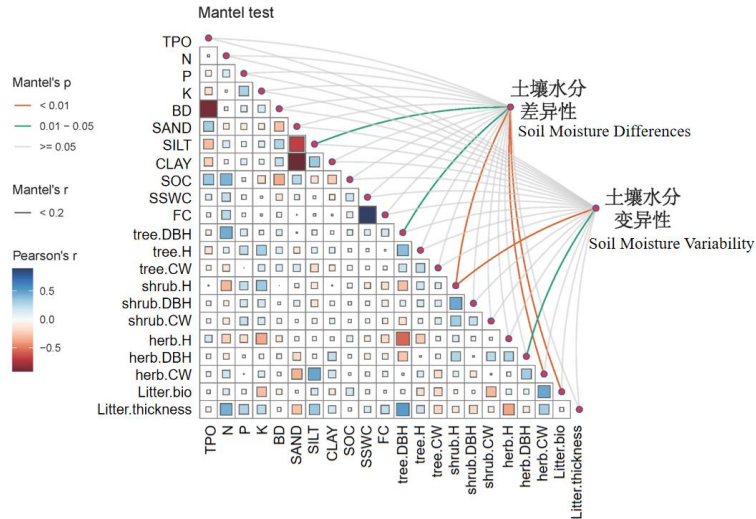


图 9 不同土壤性质和植被属性对土壤水分动态的影响（以彩图发表）

Fig. 9 Effects of different soil properties and vegetation attributes on soil volumetric water dynamics

3 讨论

3.1 植被恢复类型对水文过程、土壤性质和植被属性的影响差异与相互关系

植被恢复类型(树种)对土壤属性具有显著影响。本研究表明，天然次生林在各个土层的土壤含水量较高，且变化较为稳定(图 4)，而人工林(如油松、侧柏、刺槐林)则呈现较低的土壤含水量，特别是在深层土壤，这与穆兴民等^[22]对黄土高原人工林土壤水分和马骥和张维江^[23]对六盘山地区土壤水分的研究结果吻合。本研究进一步揭示了这种差异的核心驱动机制，即天然次生林乔灌草多层配置形成的差异化水分利用生态位，与人工林纯林树种生态位重叠导致的集中耗水形成鲜明对比，补充了既有研究仅关注水分含量差异而缺乏生态位分化机制分析的不足。乔木、灌木、草本植物根系分别吸收利用不同层次土壤水分^[24]，避免了单一层次的水分过度消耗。而人工林多为纯林，树种生态位重叠度高，蒸腾耗水集中在浅层土壤，易导致深层土壤干旱。同时，天然次生林的枯落物层厚度达 3.5 cm，一方面通过物理截留减少地表径流^[25]，另一方面枯落物分解形成的腐殖质改善了土壤结构，促进降水入渗并减少蒸发，使得天然林在干旱季节土壤水分波动仍较小，表现出更强的水分缓冲能力。这表明天然次生林通过其独特的植被结构，能够更有效地调节土壤水分，保持土壤的水源涵养能力^[26]。

不同植被恢复类型的土壤氮含量、磷含量及有机碳含量均有所差异。天然次生林的土壤化学性质最为丰富且波动较小(图 6)，这与张增悦等^[27]对毛乌素沙地人工林早衰的研究结果相一致，表明其生态系统具有更强的动态调节能力。但其仅指出天然林土壤养分高于人工林而未阐明养分与水分的关联路径，本研究进一步补充了这一点。天然次生林较高的有机碳含量能够促进土壤团粒结构形成^[28]，既增强了土壤对降水的截留蓄存，又减少了水分渗漏损失；同时，天然林土壤容重较低，孔隙度更高，为水分入渗和根系伸展提供了良好条件。相比之下，人工林土壤有机碳含量较低，土壤结构性差，导致土壤储水能力不足。这些土壤特征与植被残体归还量密切相关：天然林枯落物生物量达 2.0 t·hm⁻²，持续为土壤结构改良提供物质基础，从而有效

增强土壤的水分保持和水源涵养功能。这些土壤特征共同作用，提升了天然林对水源的保护能力，尤其是在干旱和半干旱地区，天然林能更好地维持土壤水分和减少水分流失^[29]。

在植被属性方面，乔木胸径和灌木高度等植被因子与土壤水分动态的关系紧密，天然次生林的植被结构使其在水分保持方面具有优势。乔木和灌木的生物量较大，有助于增加地表的水分截留并减少蒸发损失^[30]。此外，天然林下的草本植物和枯落物层^[31]也为土壤提供了额外的保护。草本层通过叶片蒸腾调节近地表微气候，降低蒸发速率，枯落物层则通过物理阻隔减少了土壤水分的直接蒸发和流失，从而增强了整体的水源涵养能力。与此相对，人工林的植被结构较为简单，林下草本盖度低、枯落物层薄、地表裸露度高，土壤蒸发损失显著增加，导致其在水源保护方面的能力逊色于天然林。主成分分析和曼特尔检验分析结果显示，土壤水分差异主要受到乔木和林下植被属性的共同影响，而水分变异性则主要受林下植被属性主导。乔木属性通过改变冠层截留量和深层耗水量，决定了不同植被类型间土壤水分的整体水平差异。乔木胸径越大，冠层截留量越高，但深层耗水量也随之增加，二者的平衡关系决定了土壤水分的最终储量。林下植被和枯落物通过调节浅层土壤水分的入渗与蒸发，主导了同一植被类型内土壤水分的时空波动。林下植被盖度越高、枯落物越厚，对降水脉冲和蒸发胁迫的缓冲能力越强，土壤水分变异性越小。本研究结果强调了树种选择对于水分的重要影响，同时林下植被属性对于水分稳定性具有重要作用。综合来看，植被因素对土壤水分差异性的影响大于土壤性质因子，强调了植被结构和生物量在水源涵养中的关键作用。

通过对土壤水分、土壤化学性质和植被属性的分析可以看出，天然次生林的综合生态特性使其在土壤水分保持和水源涵养方面具有显著优势^[32]。其较高的土壤有机碳含量、较低的土壤容重以及较稳定的土壤水分动态，共同促成了天然林在水源保护中的重要作用。因此，选择天然林作为恢复模型或在植被恢复中优先考虑天然林的构建，将有助于提升区域生态系统的水源涵养功能^[33]，为生态恢复提供更加稳固的水文保障。

3.2 黄土高原不同植被类型的水源涵养功能差异对区域科学造林的启示

在黄土高原地区，植被恢复的树种选择对水源涵养功能具有至关重要的影响^[34]。天然次生林在土壤水分的保持方面具有显著优势，不仅其土壤水分含量较高，而且其水分波动较小，能够更好地调节区域的水文循环。天然林通过其丰富的植物根系和较为复杂的植被结构，在降水时能够有效地吸收和储存水分，避免水分的过度蒸发和流失。此外，天然林下层的草本植物和凋落物层为土壤提供了额外的保护，减少了水分的直接蒸发，使得天然次生林在干旱季节仍能维持较好的水源涵养功能。

相比之下，人工林在水源涵养功能方面表现出较大的差异，尤其是在深层土壤中的水分保持能力较弱。人工林的土壤水分波动较大，特别是在夏季和干旱季节，土壤水分的迅速流失可能导致水资源的浪费和水土流失。因此，在选择树种进行植被恢复时，不仅要考虑树种的生长适应性和生态恢复能力，还必须充分考虑其对水源涵养的长效影响。尤其在干旱和半干旱地区，选择适合本地水文条件的树种进行恢复，不仅能提高土壤水分的有效利用率，还能减少水分流失，提升区域的生态服务功能。

本研究结果为黄土高原地区的科学造林提供了多方面的启示。首先，应优先考虑天然次生林或其他具有较强水源涵养功能的树种进行植被恢复^[35]。天然林由于其丰富的生物多样性和较强的水分调节能力，是提升区域水源涵养功能和土壤稳定性的理想选择。通过实施封山育林、近自然造林等措施^[36]，为天然次生林营造不受人为干扰的生长环境，维系其原有的生态结构和功能完整性，使其成为区域水源涵养、水土保持与生物多样性保护的核心，为整个黄土高原生态系统的稳定提供坚实支撑。其次，人工林的选择和配置应更加科学化^[37]，应根据当地的水文条件、土壤特性以及植被类型的水文功能进行综合评估，避免单一树种的种植^[38]，力求通过多样化的植被结构提高水源涵养能力。例如，可以通过结合不同树种的水分吸收特性，建立多层次、多样化的植被恢复模式，最大限度地提高生态系统的水分保持能力。最后，黄土高原地区

的植被恢复应注重长期监测不同植被类型对水源涵养功能和土壤水分动态变化的影响^[39], 构建覆盖不同植被类型、不同地貌单元、不同气候分区的土壤、植被、环境一体化监测网络, 持续跟踪监测土壤水分动态、植被生长状况、土壤理化性质及气象条件等关键指标, 深入分析各因子间的相互作用机制, 揭示植被恢复过程中生态系统的演变规律与潜在风险, 这将为优化当地的植被恢复策略和水土保持措施提供数据支持和理论依据。

总之, 黄土高原的植被恢复不仅是恢复生态环境的需要, 也是提升水源涵养功能、增强区域生态系统稳定性的关键^[40]。科学的树种选择和合理的植被恢复策略将对区域水资源的可持续利用、生态恢复及水土保持工作起到重要作用。

4 结论

天然次生林 0~200 cm 土层平均土壤含水量达 16.8%, 变异系数为 12.89%, 在土壤水分含量与稳定性上均优于三种人工林。垂直方向上, 浅层土壤的植被类型间水分差异更为明显, 深层土壤水分含量受植被调控作用减弱而趋于一致; 时间维度上, 天然次生林全年无显著水分低值, 人工林生长旺盛期浅层土壤含水量降低且波动更剧烈。天然次生林的土壤氮、磷、有机碳含量均高于人工林, 土壤砂粒与黏粒比例适宜, 植被结构上虽乔木、灌木生物量与高度低于人工林, 但草本植物的树高、冠幅及枯落物生物量 ($2.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 更高, 形成完整的乔灌草-枯落物复合结构。土壤水分差异性由乔木属性与林下植被属性共同驱动, 土壤水分变异性主要受林下植被属性主导, 灌木和草本植物的高度、冠幅及枯落物生物量直接影响土壤水分动态, 土壤理化性质对水分动态的影响弱于植被因素。因此, 发展天然次生林不仅有助于提升土壤水分保持能力, 还能有效地促进水土保持和生态恢复, 建议在黄土高原地区的植被恢复过程中优先考虑天然林的修复和保护。

致 谢 感谢山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站的数据支持。

参考文献 (References)

- [1] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in Loess Plateau[J]. *Science in China: 地球科学*, 2007, 37 (11): 1504-1514. [信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37 (11): 1504-1514.]
- [2] Liu G B, Shanguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 11-19. [刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.]
- [3] Fu B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(32): 3769-3779, 3768. [傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J]. *科学通报*, 2022, 67(32): 3769-3779, 3768.]
- [4] Li S S, Duan S Y, Hu J L, et al. Identifying the spatio-temporal pattern of vegetation change and influencing factors on the Loess Plateau between 2000 and 2022[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7): 1768-1786. [李双双, 段生勇, 胡佳岚, 等. 黄土高原植被变化主导空间模态及其影响因素[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1768-1786.]
- [5] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [6] Liang Y, Gao G Y, Liu J B, et al. Runoff and soil loss responses of restoration vegetation under natural rainfall patterns in the Loess Plateau of China: The role of rainfall intensity fluctuation[J]. *Catena*, 2023, 225: 107013.
- [7] Gong S H, Zha T G, Zhang X X, et al. Responses of litter-soil nutrients to rainfall redistribution in typical stand on loess area of western Shanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7748-7759. [龚世

- 豪, 查同刚, 张晓霞, 等. 晋西黄土区典型林分凋落物-土壤养分对降雨再分配变化的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7748-7759.]
- [8] Sun Y B, Ou X B, Chen K L, et al. Evaluation of water conservation function of litters of *Pinus tabulaeformis* forest in Ziwuling forest region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 8-15. [孙于卜, 欧晓彬, 陈轲林, 等. 黄土高原子午岭油松林枯落物的水源涵养功能评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 8-15.]
- [9] Zhang Y, Ma L, He J, et al. Water holding characteristics of litters of typical forest in loess area of Western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3177-3183. [张月, 马岚, 何娇, 等. 晋西黄土区典型林分枯落物持水特性[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3177-3183.]
- [10] Yang Y, Zhu Y J, An S S. Review on ecohydrological processes in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 4052-4063. [杨阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 4052-4063.]
- [11] Li P, Wang D M, Ding C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1610-1620. [李平, 王冬梅, 丁聪, 等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1610-1620.]
- [12] Yu Y C, Zhang G H. Temporal variation of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated land in hilly region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 8-11, 17. [郁耀闯, 张光辉. 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 8-11, 17.]
- [13] Zheng F, Zhang J J. Hydrological response to changes in vegetation covers at a watershed scale in western Shanxi, Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5475-5484. [郑芳, 张建军. 晋西黄土区不同植被覆盖流域的水文响应[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5475-5484.]
- [14] Wang S, Ma L, Zhang D, et al. Plant diversity and soil moisture of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(3): 253-258. [王舒, 马岚, 张栋, 等. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(3): 253-258.]
- [15] Amantai Nigenare, Meng Y Y, Tang Z Y. Impacts of plantation and its growth on carbon sequestration and hydrological regulation functions on the Loess Plateau based on remote sensing time series analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7322-7333. [尼格娜热·阿曼太, 孟媛媛, 唐志尧. 人工林种植和生长对黄土高原生态系统固碳和水文调节功能的影响——基于遥感时序分析证据[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7322-7333.]
- [16] Qi K B, Huang J S, Yang T H, et al. Effects of natural and artificial restoration approaches on soil water-holding capacity in subalpine coniferous forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 8118-8128. [祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 等. 亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8118-8128.]
- [17] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 310-316. [王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.]
- [18] Chen H S, Shao M A, Wang K L. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1853-1857. [陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1853-1857.]
- [19] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100-107. [邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.]

- [20] Li Y S, Wang G X, Ding Y J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 61-67. [李元寿, 王根绪, 丁永建, 等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 61-67.]
- [21] Zhu J Z, Wang R S. Chinese Ecosystem Observation and Research Dataset: Forest Ecosystem Volume: Shanxi Jixian Station: 2005-2015 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021. [朱金兆, 王若水. 中国生态系统定位观测与研究数据集·森林生态系统卷·山西吉县站: 2005-2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.]
- [22] Mu X M, Xu X X, Wang W L, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 210-217. [穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 210-217.]
- [23] Ma J, Zhang W J. The dynamic change characteristics of soil water content in different forestland in Lipu Mountain area[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2016, 15(2): 167-170. [马骥, 张维江. 六盘山地区不同林地土壤水分动态变化特征初探[J]. *宁夏工程技术*, 2016, 15(2): 167-170.]
- [24] Lü T, Zhao X N, Gao X D, et al. Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in Loess Hilly Region[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(2): 175-185. [吕婷, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(2): 175-185.]
- [25] Wang Z X, He K N. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7662-7672. [王作泉, 贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2024, 44(17): 7662-7672.]
- [26] Feng T J, Zheng H Y, Wei W, et al. Natural forests accelerate soil hydrological processes and enhance water-holding capacities compared to planted forests after long-term restoration[J]. *Water Resources Research*, 2025, 61(9): e2025WR040857.
- [27] Zhang Z Y, Jiang Z, Li T J, et al. Causes and features of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* plantation premature aging in Mu Us sandland[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(6): 1-6. [张增悦, 姜准, 李甜江, 等. 毛乌素沙地中国沙棘人工林早衰原因与特点[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 1-6.]
- [28] Cai L Q, Qi P, Zhang R Z. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two sequence rotation system with spring wheat and field pea[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 141-145. [蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 141-145.]
- [29] Wang H S, Liu G B. Analysis of vegetation structure and its role in preventing soil erosion [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(2): 62-68. [王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(2): 62-68.]
- [30] Wei H B, Li R, Yang Q K. Research advances of vegetation effect on soil and water conservation in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 489-496. [韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 489-496.]
- [31] Dou P F, Zuo S D, Ren Y, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2398-2409. [窦攀峰, 左舒翟, 任引, 等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2398-2409.]
- [32] Miao G P. Study on the evaluation and analysis of China's natural forest protection program policy[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005. [缪光平. 中国天然林资源保护政策评价与分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.]

- [33] Gong S H, Xiao Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462. [龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.]
- [34] Qiu D X, Xu R R, Gao P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2024, 241: 108079.
- [35] Teng H Y, Geng Y L, Zhang H S, et al. Assessment of soil quality under different land use types in the rocky mountain area of northern Hebei Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11): 3046-3054. [滕慧颖, 耿艳楼, 张恒硕, 等. 冀北土石山区不同土地利用类型土壤质量评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 3046-3054.]
- [36] Xie Y C, Zhang S X, Lin B, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 217-229. [谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217-229.]
- [37] Ru H. Analysis of hydrological characteristics and functions of typical forest stands in the Loess Plateau area of western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. [茹豪. 晋西黄土区典型林地水文特征及功能分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.]
- [38] Ding K, Zhang Y T, Zhang J H, et al. Effects of Chinese fir plantations with different densities on understory vegetation and soil microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(1): 62-73. [丁凯, 张毓婷, 张俊红, 等. 不同密度杉木林对林下植被和土壤微生物群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(1): 62-73.]
- [39] Wang Y Q, Hu W, Sun H, et al. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(15): e2322127121.
- [40] Zhang B Q, Tian L, Yang Y T, et al. Revegetation does not decrease water yield in the Loess Plateau of China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL098025.

(责任编辑: 檀满枝)