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

间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响

王亚飞 丁晓菲 续可心 曲冠博 陈仲 贾黎明

Short-term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations

Wang Yafei, Ding Xiaofei, Xu Kexin, Qu Guanbo, Chen Zhong, Jia Liming

引用本文:
王亚飞, 丁晓菲, 续可心, 曲冠博, 陈仲, 贾黎明. 间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):26–39. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250329
Wang Yafei, Ding Xiaofei, Xu Kexin, Qu Guanbo, Chen Zhong, Jia Liming. Short–term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):26–39. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250329

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250329

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响

Long–term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China

北京林业大学学报, 2025, 47(10): 11–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250208

间伐强度对马尾松人工林冠下套种树种生长的影响

Effects of thinning intensity on the growth of interplanting broadleaved trees under *Pinus massoniana* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 58–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200086

梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应

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

北京林业大学学报, 2026, 48(1): 144–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250229

不同土壤水势对毛白杨苗木生长节律和苗木质量的影响

Effects of different soil water potentials on seedling growth rhythm and seedling quality of *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2022, 44(4): 12–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200380

不同间伐强度下竞争对东北阔叶红松林主要树种生长气候关系的影响

Influence of competition on the relationship between tree growth and climate of main tree species in the broadleaved Korean pine forest under different thinning intensities in northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 30–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210515

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250329

间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响

王亚飞　丁晓菲　续可心　曲冠博　陈　仲　贾黎明
（北京林业大学林学院，省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】探究不同间伐强度与水分梯度调控下毛白杨人工林土壤水分时空响应特征及其调节机制，阐明经营干预对人工林水分利用与保持能力的影响，以期为华北平原地区人工林水分精准调控、抚育措施优化及森林质量持续提升提供科学依据。**【方法】**以 8 年生三倍体毛白杨 S86 人工林为研究对象，设置两种间伐强度（隔行间伐，间伐 50%，T50；隔行隔株间伐，间伐 75%，T75），在 T75 试验区设置充分灌溉（T75W20）和不灌溉（T75）2 个试验处理，在 T50 试验区设置充分灌溉（T50W20）、亏缺灌溉（T50W45）和不灌溉（T50）3 个试验处理。通过生长季定位监测土壤体积含水率（SVWC）和生长季末烘干法测定计算土壤 600 cm 剖面内的储水量，从而探究不同处理下土壤水分时空特征及土壤干层现象。**【结果】**（1）毛白杨人工林土壤水分呈现明显的垂直分布和时间动态特征：表层（0 ~ 30 cm 深）SVWC 随月份波动变化，7 月最低，而 8 月最高；同时随土层深度增加呈阶梯式上升趋势；中层（30 ~ 100 cm 深）土壤水分波动显著；深层（100 ~ 600 cm 深）则保持相对稳定。（2）间伐强度能够显著调控根区（距树 25 cm）水分分布格局，其中间伐 75% 可改变根区土壤水分的二维空间分布；而间伐 50% 主要增加中层（30 ~ 100 cm）土壤水分，在部分季节根区含水率相对偏低。（3）灌溉处理能够显著提升表层（0 ~ 30 cm 深）土壤水分状况，其中根区 T50W20 处理较 T50 平均提高 28.78%，而 T50W45 处理下 10 ~ 70 cm 根区土壤体积含水率相对较低；在不灌溉 T50 下，深层土壤（100 ~ 600 cm 深）呈现非根区（距树 100 cm）含水率偏高的分布特征。（4）2022—2023 年，各土层储水量普遍下降，但间伐强度增加可显著提升土壤储水量，其中 100 ~ 200 cm 土层的增幅最大，T75 处理的土壤储水量相比 T50 处理增幅达 53.00%。T75W20 处理能有效改善多个土层的水分状况，特别是对 500 ~ 600 cm 土层的储水恢复效果明显。（5）土壤干层主要分布于 0 ~ 300 cm，间伐 50% 下干层厚度可达 300 cm，而间伐 75% 将其减至 200 cm；间伐在缓解干层方面作用明显，但灌溉未能消除 0 ~ 200 cm 干层现象。**【结论】**毛白杨人工林土壤水分动态具有显著的时空异质性特征，间伐和灌溉措施能够有效调控不同土层的垂直水分分布格局，其中适当提高间伐强度可有效改善土壤干层的发育。研究结果为基于水分约束的人工林精准抚育提供了定量依据，对构建因地制宜的间伐−水分协同调控模式、提升人工林生态稳定性与经营可持续性具有重要参考价值。

关键词：间伐强度；水分管理；毛白杨；土壤水分动态；土壤干层；森林培育；森林质量精准提升
中图分类号：S792.11　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)03−0026−14
引文格式：王亚飞，丁晓菲，续可心，等. 间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(3)：26−39. Wang Yafei, Ding Xiaofei, Xu Kexin, et al. Short-term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 26−39.

Short-term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations

Wang Yafei　Ding Xiaofei　Xu Kexin　Qu Guanbo　Chen Zhong　Jia Liming
(College of Forestry, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

收稿日期：2025−08−29　**修回日期：**2025−09−29
基金项目：国家重点研发计划（2024YFD2201004、2021YFD2201203）。
第一作者：王亚飞，博士生。主要研究方向：用材林培育理论与技术。Email：mrw1996@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者：贾黎明，博士生导师，教授。主要研究方向：森林培育理论与技术。Email：jlm@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］This study investigates the spatiotemporal response characteristics and regulatory mechanisms of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations under different thinning intensities and water gradient controls. It aims to elucidate the impact of management interventions on the water utilization and retention capacity of plantations, with the goal of providing scientific basis for precise water regulation, optimization of silvicultural measures, and continuous improvement of forest quality in artificial forests across the North China Plain.［**Method**］The research was conducted in an 8-year-old triploid *P. tomentosa* S86 plantation. Two thinning intensities were established: alternate row thinning with 50% thinning (T50), and alternate row and alternate tree thinning with 75% thinning (T75). In the T75 experimental area, two treatments were set up: full irrigation (T75W20) and no irrigation (T75). In the T50 experimental area, three treatments were arranged: full irrigation (T50W20), deficit irrigation (T50W45), and no irrigation (T50). The soil volumetric water content (SVWC) was continuously monitored during the growing season, and soil water storage in the 0 – 600 cm profile was determined using the oven-drying method at the end of the season to assess the temporal and spatial variations in soil moisture and the formation of dry soil layers.［**Result**］(1) Soil moisture in the *P. tomentosa* plantation showed distinct vertical and temporal variation patterns. The surface layer (0 – 30 cm) exhibited monthly fluctuations, with minimum SVWC in July and maximum in August. Soil moisture increased stepwise with depth, with pronounced variation in the 30 – 100 cm layer and relative stability below 100 cm. (2) Thinning intensity significantly influenced moisture distribution in the root zone (25 cm from trees). A 75% thinning rate altered the two-dimensional spatial distribution of soil moisture in the root zone, while a 50% thinning rate primarily enhanced soil moisture in the middle layer (30 – 100 cm). In some seasons, the root zone exhibited relatively lower water content. (3) Irrigation significantly improved surface soil moisture. The T50W20 treatment in the root zone increased the average soil moisture by 28.78% compared to T50, while the soil volumetric water content in the 10 – 70 cm root zone under the T50W45 treatment remained relatively low. Under the T50W20 treatment, SVWC in the root zone increased by 28.78% compared with the control, while the T50W45 treatment enhanced water depletion within the 10 – 70 cm layer. Without irrigation, the deep soil (100 – 600 cm) showed higher moisture in the non-root zone (100 cm from trees). (4) From 2022 to 2023, soil water storage decreased overall, but increased thinning intensity markedly enhanced water storage, especially in the 100 – 200 cm layer. The T75 treatment increased total soil water storage by 53.00% compared with T50. The T75W20 combination further improved multi-layer moisture conditions and promoted recovery in the 500 – 600 cm layer. (5) Dry soil layers were mainly distributed within 0 – 300 cm. Under 50% thinning, the dry layer reached 300 cm, whereas under 75% thinning it was reduced to 200 cm. Thinning significantly alleviated the dry soil layer, while irrigation alone failed to eliminate dryness within 0 – 200 cm.［**Conclusion**］Soil moisture dynamics in *P. tomentosa* plantations exhibit significant spatiotemporal heterogeneity. Both thinning and irrigation effectively regulate vertical soil moisture distribution, and an appropriately increased thinning intensity can mitigate the development of deep dry soil layers in the North China Plain. The research results provide a quantitative basis for precision tending of plantations based on water constraints, offering important reference value for constructing site-specific thinning-water synergistic regulation models and enhancing the ecological stability and management sustainability of plantations.

Key words: thinning intensity; water management; *Populus tomentosa*; soil moisture dynamics; dry soil layer; forest cultivation; precision improvement of forest quality

森林土壤水分是调控林木生长、生态系统稳定性和碳–水循环的关键因子，被视为森林生态系统的“血液”[1]。然而，在全球气候变化背景下，降水格局的改变和蒸散需求的增加导致许多地区土壤水分持续亏缺，甚至形成深层土壤干层，严重制约森林生产力[2–4]。土壤水分通常受到自然和人为因素的影响，如：环境变化[5]、植被类型[6]、植物根系[7]和森林抚育策略[8]等。土壤水分的时空异质性对森林生态系统具有深远影响。从时间维度来看，土壤水分表现出明显的季节和年际变化规律，这种动态变化与降水

格局、蒸散需求以及植被物候密切相关[9]。在湿润地区，土壤水分通常呈现稳定的周期性变化，能够满足林木生长的需求[10]；而在干旱半干旱地区，土壤水分往往长期处于亏缺状态，而极端干旱事件频发进一步改变了林分土壤水分的时空分布格局，给人工林生态系统的稳定性维持带来了严峻挑战[2−3]。从空间维度来看，森林土壤水分通常呈现明显的分层特征。表层土壤(< 30 cm)水分受气象因子、枯落物层和植物吸收的共同影响，表现出较高的时空变异性；深层土壤(> 100 cm)水分虽然相对稳定，但可能因植被过度利用而形成难以恢复的土壤干层[7−8]，因此，如何通过森林管理措施缓解土壤干燥化、维持森林可持续性，对于水分亏缺地区的人工林生长发育至关重要。

速生人工林因生长迅速，蒸腾耗水量普遍偏高，常大量消耗深层土壤水分并诱发水分亏缺，这一问题在干旱半干旱区或季节性干旱期尤为突出[4,11]。为缓解土壤水分压力，间伐和灌溉常被应用于人工林水分管理。间伐通过降低林分密度，直接减少蒸腾耗水，同时改善林内小气候与土壤物理性质，从而促进降水入渗[12−13]；灌溉则是关键的水分调控措施，可快速补充土壤水分，并缓解干旱胁迫[14]。然而，在气候变化和水资源短缺日益严峻的背景下，尤其在华北平原地区，人工林灌溉管理面临双重挑战：既要保障林木基本水分需求，又需避免过度消耗有限水资源[15−16]。因此，科学确定合理的间伐强度与适宜的灌溉量，对实现人工林水分高效利用、提升其生态与经济效益具有重要意义。尽管已有研究[15−16]关注人工林深层土壤水分动态，但关于间伐与灌溉在整个生长季内对土壤水分时空变化的调控机制，目前仍缺乏系统认识。同时，间伐强度与水分管理如何影响华北平原土壤干层的形成与演变，迄今也缺乏明确证据。

毛白杨(*Populus tomentosa*)是我国北方广泛栽培的速生树种，在生态修复、木材生产和碳汇功能等方面具有重要价值[17−18]。然而，其生长迅速与水分利用效率高的特性也导致其对土壤水分变化极为敏感，水分亏缺已成为制约毛白杨人工林生产力提升和碳汇功能维持的关键限制因子[14, 18]。值得注意的是，已有研究[4]在华北平原毛白杨林中发现明显的土壤干层现象，这进一步凸显了探究人工林水分调控机制的紧迫性。其次，毛白杨人工林属于典型的速生林，造林初期通常采用较高密度以保证成活率和促进林分郁闭。然而，随着林龄增长，过高的林分密度易导致树木间竞争加剧，林内光照不足，进而影响根系分布与土壤水分利用效率，最终造成林分结构不合理和生产力下降[19−20]。因此，适时实施间伐是优化林分结构、缓解竞争压力、改善土壤水分和养分条件的重要措施。基于此，本研究以华北平原三倍体毛白杨 S86 无性系((*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × (*P. alba* × *P. glandulosa*))为研究对象，通过对不同间伐强度和水分管理下对毛白杨林分土壤含水率进行时间−空间的多维监测，分析不同处理下林分土壤水分分布及利用状况，探究间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤剖面内水分时空分布特征的影响机制；明确间伐强度和灌溉对土壤储水量及土壤干层的短期影响，检验“强度间伐结合充分灌溉能否缓解土壤干层”这一核心科学问题。研究结果将为华北平原人工林土壤水分动态监测与可持续管理提供理论依据，并为干旱与半干旱地区以毛白杨为代表的人工林水分高效调控与生态系统稳定性的协同提升，提供可参考的科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省高唐县国有旧城林场(36°48′47″N，116°05′25″E)，地势平坦，海拔 30 m。该区地处黄河下游，气候温和，光照充足，年均气温 13.2 ℃，全年降雨集中在 7—8 月，年均降水量 544.7 mm，年日照时数 2 651.9 h，无霜期 204 d。该试验林地在 0 ~ 1.4 m 深度土层，土壤质地为砂质壤土，而在 1.4 ~ 6.0 m 深度土层，粉砂壤土层和粉砂层交替出现[4]。地下水位 6 ~ 9 m 深，造林前 0 ~ 80 cm 土壤有机质平均含量为 3.34 g/kg，全氮含量为 0.23 g/kg，速效磷含量为 4.92 mg/kg。

1.2 试验材料和试验设计

本文研究对象为三倍体毛白杨 S86 无性系，2016 年春季采用 2 年生苗进行造林，以 2 m × 3 m 株行距(南北株距 2 m，东西行距 3 m)均匀栽植。2022 年年初以两种采伐强度对试验林进行间伐，分别为隔行隔株间伐(间伐 75%，株行距变为 4 m × 6 m，T75)、隔行间伐(间伐 50%，株行距变为 2 m × 6 m，T50)。在 T50 和 T75 试验区设置不同梯度的灌溉(滴灌)试验处理。T50 试验区以探究灌溉量对林分的影响为目标，设置了充分灌溉(T50W20)、亏缺灌溉(T50W45)和不灌溉(T50)3 个处理，以系统分析不同灌溉梯度下的土壤水分响应。T75 试验区则聚焦于高强度间伐与充分灌溉的协同效应，为与 T50 试验区形成对比并验证“高强度间伐结合充分灌溉能否从根本上缓解土壤干层”这一关键科学问题，仅设置充分灌溉(T75W20)和不灌溉(T75)两个极限处理。具体试验组合见表 1。滴灌带采用一行两带式，

位于树体两侧距树干 30 cm 处，滴头间距 50 cm。充分灌溉和亏缺灌溉是当滴头正下方 20 cm 土壤水势分别达到−20 kPa（W20，田间持水量的 79%）、−45 kPa（W45，田间持水量的 60%）时启动灌溉，土壤水分达到田间持水量时，则停止灌溉[19]。2022 年开始在每年林木展叶萌动时（4 月初）开始灌溉，雨季来临前（6 月末）停止，生长季内定期除草除虫。为避免光照及土壤异质性，以 T50 和 T75 试验区南北纵向为一个区组，设置 3 个区组，每个区组分别包含 2 个和 3 个处理小区，即共有 3 次重复，15 个小区。每小区 4 列 × 4 株林木，中间 2 列为试验树，东西 2 列为保护行。各试验样地林分信息相似（表 2）。

1.3　研究方法

围绕“不同间伐强度与水分梯度调控下，毛白杨人工林土壤水分在时间推进与空间结构上的响应特征”这一核心科学问题，本研究从时间动态、垂直剖面及根际空间差异 3 个层面构建土壤水分观测与采样体系。

鉴于毛白杨为深根性树种，通常将 100 cm 以下根系视为深层根系[7]，结合前人关于毛白杨细根主要分布于 0 ~ 30 cm 土层[8]的研究结果，本研究在垂直方向上将土壤划分为表土层（0 ~ 30 cm）、中土层（30 ~ 100 cm）和深土层（100 ~ 260 cm），以区分不同功能土层的水分响应特征。在水平方向上，考虑到毛白杨细根主要集中分布于距树干 0 ~ 25 cm 范围内[21]，将距树干 25 cm 处界定为根区，距树干 100 cm 处界定为非根区，以比较根系活动对土壤水分分布的影响。

在时间尺度上，根据区域气候特征将生长季划分为春季（4—5 月）、夏季（6—8 月）和秋季（9—11 月），用于分析土壤水分随生长季推进的动态变化过程。

1.3.1　土壤体积含水率的原位连续监测

为定量评估不同间伐强度（间伐 50%，间伐 75%）和不同水分管理（充分灌溉，亏缺灌溉，不灌溉）林分在生长季尺度上的土壤水分时空特征，2022 年于 T50 试验区不同水分梯度（T50W20、T50W45）处理及不灌溉处理样地（T50）和 T75 试验区不灌溉处理样地（T75）内各选 3 株平均标准木，在分别距树 25 cm（根区）、100 cm（非根区）处布设含水率测管，共计 24 根测管。在 2023 年生长季（4 月 1 日—10 月 31 日），采用管式 TDR 系统（TRIME-IPH）对土壤体积含水率（SVWC）进行连续监测，观测频率为每 10 d 一次，整个生长季共获取 21 期数据。监测深度设置为距地表 10、30、50、70、100、120、140、180、220 和 260 cm，用于探究不同管理措施下土壤水分在垂直剖面上的动态变化特征。

表 1　间伐和灌溉试验处理组合

Tab. 1　Combination of thinning and irrigation experimental treatments

处理	间伐75%（T75）	间伐50%（T50）
不灌溉	T75	T50
充分灌溉（W20）	T75W20	T50W20
亏缺灌溉（W45）		T50W45

1.3.2　土壤样品采集、处理和储水量计算

为定量评估不同处理林分在生长季尺度上的土壤水分盈亏特征，于 2022 年与 2023 年生长季末（11 月），分别在 T75 试验区的灌溉（T75W20）与不灌溉（T75）处理、以及 T50 试验区的不灌溉（T50）处理中，使用内径为 5 cm 的土钻进行土壤采样。在每个处理中，随机选取胸径接近该处理平均值的 3 株样树作为采样对象。在距树干 25 cm 处进行取土，取土深度为 600 cm，其中 0 ~ 100 cm 深度每 20 cm 一层，100 ~ 600 cm 深度每 100 cm 一层，将土样混合均匀放入样品袋带回实验室称量其湿质量。利用烘干法测定土壤干质量，进而换算该土层土壤含水量。根据目标土层干质量和土柱体积计算该土层土壤密度。土壤储水量（S_{WS}，mm）利用不同土层（i）的土壤含水量（S_{WCi}，%）、土壤密度（B_{Di}，g/cm^3）与对应土层深度（H_i，cm）计算得到[4, 8]。以 2023 年和 2022 年生长季末期不同土层的土壤储水量的差值

表 2　不同处理下下毛白杨林木生长情况

Tab. 2　Growth of *P. tomentosa* under different treatments

处理	2022年11月		2023年11月	
	胸径/cm	树高/m	胸径/cm	树高/m
T50	14.56 ± 1.12	15.21 ± 0.39	15.83 ± 1.07	17.36 ± 0.68
T50W20	14.23 ± 1.09	15.24 ± 0.86	15.64 ± 0.18	16.69 ± 0.87
T50W45	14.04 ± 0.53	15.27 ± 0.68	15.31 ± 0.52	16.79 ± 1.02
T75	13.63 ± 0.81	14.49 ± 0.25	15.17 ± 0.85	16.94 ± 0.26
T75W20	13.04 ± 0.29	14.62 ± 0.39	14.59 ± 0.64	16.73 ± 0.40

($S_{WS2023} - S_{WS2022}$)计算得到不同处理林分在生长季内的土壤储水量变化量(ΔS_{WS})，用于表征不同经营措施下土壤水分的消耗或补给特征。

$$S_{WS} = \sum_{n=1}^{i} (10 \times B_{Di} \times S_{WCi} \times H_i)$$

1.3.3 土壤干层的界定

土壤干层(dry soil layer, D_{SL})是指土壤含水量介于稳定田间持水量与植物萎蔫点之间的特定土层[22]。Shao 等[22]研究提出将由田间持水量的 60% 计算得到的土壤储水量作为土壤干层形成的土壤储水量阈值，低于这一阈值认为该土层出现土壤干层，这一结果得到了广泛验证和应用。本研究沿用这一方法，具体阈值数据参考文献[4]。本研究试验地与前人研究样地仅相隔 5 m，且两地土壤质地和土壤密度基本一致，因而这种简化处理方法科学可靠。

1.4 数据处理与分析

在时间尺度上，基于原位监测数据，计算各处理在不同季节的土壤体积含水率均值，用于分析间伐强度和水分管理随生长季推进的动态效应。在空间尺度上，分别统计表土层(0 ~ 30 cm)、中土层(30 ~ 100 cm)和深土层(100 ~ 260 cm)的平均土壤体积含水率，并按每 100 cm 土层厚度累加计算土壤储水量，以揭示不同管理措施下土壤水分的垂直分布特征。

使用 Levene 检验和 Kolmogorov-Smirnov 检验分别验证数据的方差齐性和正态性。采用双因素方差分析检验关键因子对土壤水分动态的交互影响。为精确回答本研究的具体科学问题，统计分析聚焦于以下两个维度：时间动态维度，分别检验“间伐强度(T) × 月份(M)”与“灌溉处理(W) × 月份(M)”在关键土层的交互作用，以揭示不同管理措施随生长季推进的动态效应；空间分布维度，分析土壤水分在“水平位置(H) × 土壤深度(D)”上的交互效应，以阐明其空间分布格局。双因素分析时，仅保留与该问题直接相关的两个主要因子进行分析，而将其余因子固定或通过分组的方式加以控制，例如，在分析“$M \times T$”交互效应时，仅选取根区土壤，并分别在不同土层内进行独立检验。与此同时，采用单因素方差分析分别评估了相同水平位置和处理条件下不同月份间土壤体积含水率的差异、相同土层深度不同处理间土壤储水量的差异。所有统计分析均在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下进行，多重比较采用 Duncan 检验法。所有数据整理和统计分析在 Excel 2016 和 SPSS 25 软件中进行，所有图形绘制使用 Origin 2022 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度下林分土壤水分的时空特征

为明确间伐强度对土壤水分时空动态的独立影响，本章节分析均基于不灌溉处理数据，以排除灌溉变量的干扰。本研究发现：在 2 种间伐强度的不灌溉处理下，毛白杨林地土壤体积含水率在生长季内受月份显著影响($P < 0.001$，表 3)，且不同土层响应存在差异(图 1)。表层土壤(0 ~ 30 cm)呈现明显的季节性波动特征，根区与非根区体积含水率均在 7 月降至最低值(0.053 0 ~ 0.070 6 cm^3/cm^3)，8 月达到最高值(0.138 2 ~ 0.150 2 cm^3/cm^3)，两月份差异显著($P < 0.05$，图 1)。中层土壤(30 ~ 100 cm)表现为单峰型变化，7 月出现谷值，9 月达峰值，且秋季(9—11 月)含水率大多显著高于夏季(6—8 月)(图 1，$P < 0.05$)。深层土壤(100 ~ 260 cm)水分动态相对稳定。这表明土壤水分的时间动态具有明显的垂直分异性，表层与中层水分对季节变化高度敏感，而深层土壤水分变化滞后且稳定，是林地水分的重要缓冲层。

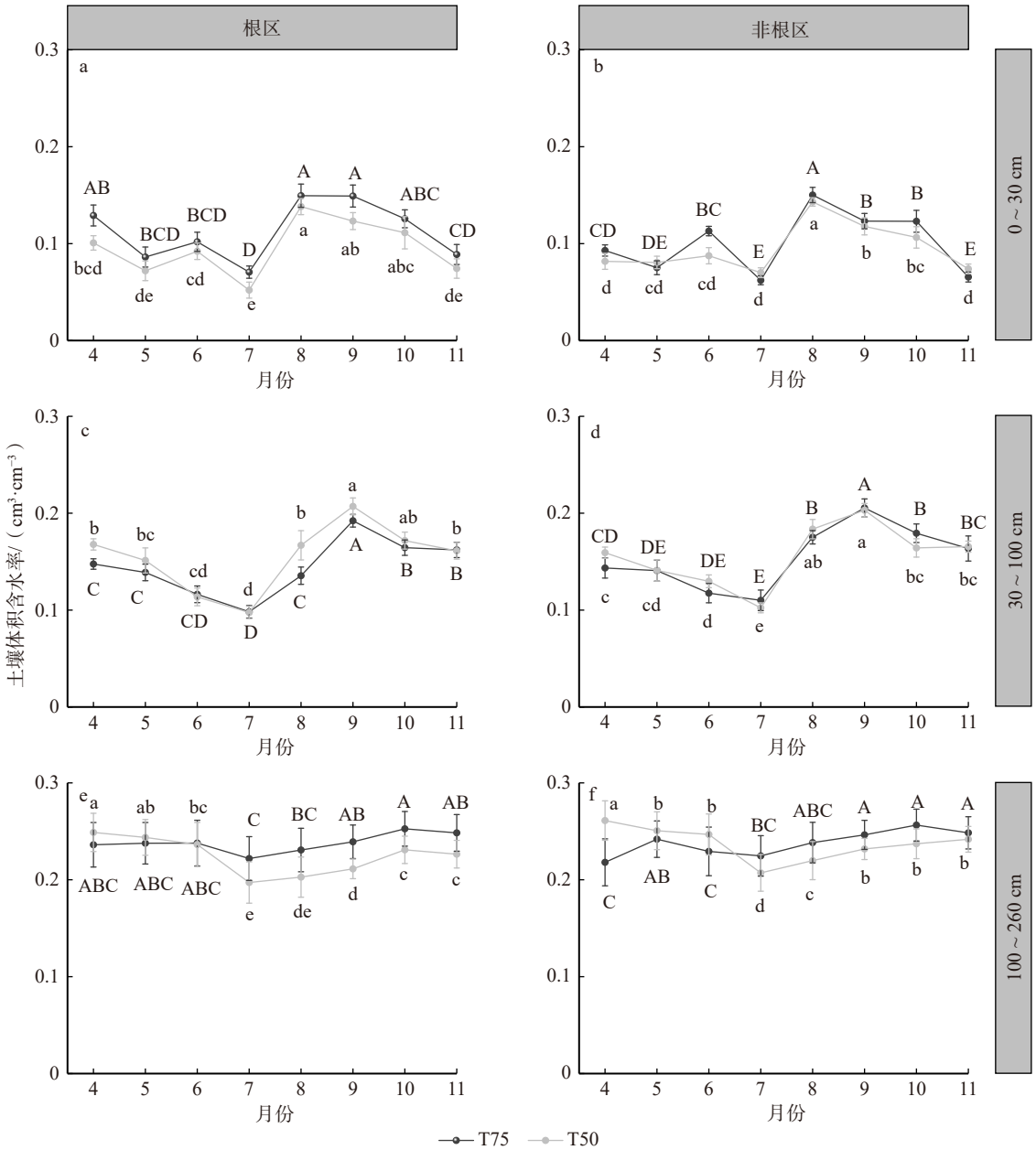
在此基础上，进一步分析间伐强度对土壤水分时间动态的调控作用。双因素方差分析结果表明，间伐强度对土壤体积含水率的影响具有明显的空间选择性，仅在根区表现为显著效应($P < 0.05$)，对非根区影响不显著(表 3)。具体而言，间伐 75% 显著提高了表层(0 ~ 30 cm)及生长季中后期(7—11 月)深层(100 ~ 260 cm)土壤体积含水率，而间伐 50% 主要提高的是中层土壤(30 ~ 100 cm)体积含水率(图 1)。值得注意的是，在深层土壤(100 ~ 260 cm)中，月份

表 3 月份、间伐强度及交互作用对土壤体积含水率影响的双因素方差分析

Tab. 3 Two-factor ANOVA for the effects of month, thinning intensity, and their interaction on soil volumetric water content

变异来源	根区			非根区		
	0 ~ 30 cm	30 ~ 100 cm	100 ~ 260 cm	0 ~ 30 cm	30 ~ 100 cm	100 ~ 260 cm
月份(M)	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
间伐强度(T)	**0.005**	**0.026**	**< 0.001**	0.145	0.366	0.999
$M \times T$	0.980	0.335	**< 0.001**	0.209	0.395	**< 0.001**

注：加粗表示存在显著影响($P<0.05$)。下同。



不同大写字母表示 T75 下不同月份土壤体积含水率存在显著差异；不同小写字母表示 T50 下不同月份土壤体积含水率存在显著差异。

图 1　不同间伐处理下根区与非根区土壤体积含水率随月份变化动态

Fig. 1　Monthly dynamics of soil volumetric water content in root zone and non-root zone under different thinning treatments

与间伐强度存在显著交互作用（$P < 0.001$，表 3），这表明深层水分对间伐措施的响应具有明显的时间依赖性，不同间伐强度通过影响生长季内水分补给与消耗过程，改变了深层土壤水分的季节演变轨迹。

从空间分布角度看，在 2 种间伐强度的不灌溉处理下，毛白杨人工林土壤水分呈显著空间异质性，土壤深度对土壤体积含水率影响极显著（$P < 0.001$，表 4）。整体呈阶梯式升高趋势（图 2），可划分为 3 个特征层：30 ~ 70 cm 层土壤体积含水率快速增加，70 ~ 140 cm 层相对稳定，140 ~ 260 cm 层再次升高。在水平分布上，仅在秋季间伐 50% 处理下，根区与非根区差异显著（$P < 0.05$）（表 4），且根区平均土壤体积含水率低于非根区（图 2f）；其他处理差异不显著（$P > 0.05$，表 4）。间伐 75% 处理下，水平位置与土层深度交互作用显著（$P < 0.05$，表 4），表明高强度间伐改变了土壤水分的二维分布格局。

以上结果共同表明，在不灌溉条件下，毛白杨人工林土壤水分的时空分异格局主要受土层结构和生长季进程调控，而间伐强度通过差异化调节不同土层及空间位置的水分分配方式，对土壤水分的时间动态和空间结构产生选择性影响。其中，高强度间伐对表层和深层水分调控作用更为明显，而中等强度间伐主要影响中层土壤水分。

2.2　不同梯度水分管理下林分土壤水分的时空特征

为系统揭示灌溉梯度对中度间伐林分（T50）土壤水分时空动态的调控作用，本章节分析均基于

表 4 不同间伐强度下水平位置、土壤深度及交互作用对土壤体积含水率影响的双因素方差分析

Tab. 4 Two-factor ANOVA for the effects of horizontal position, soil depth, and their interaction on soil volumetric water content under different thinning intensities

变异来源	春季		夏季		秋季	
	T50	T75	T50	T75	T50	T75
水平位置（*H*）	0.855	0.222	0.007	0.347	**0.031**	0.733
土壤深度（*D*）	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
H × *D*	0.647	**< 0.001**	0.696	**< 0.001**	0.056	**0.003**

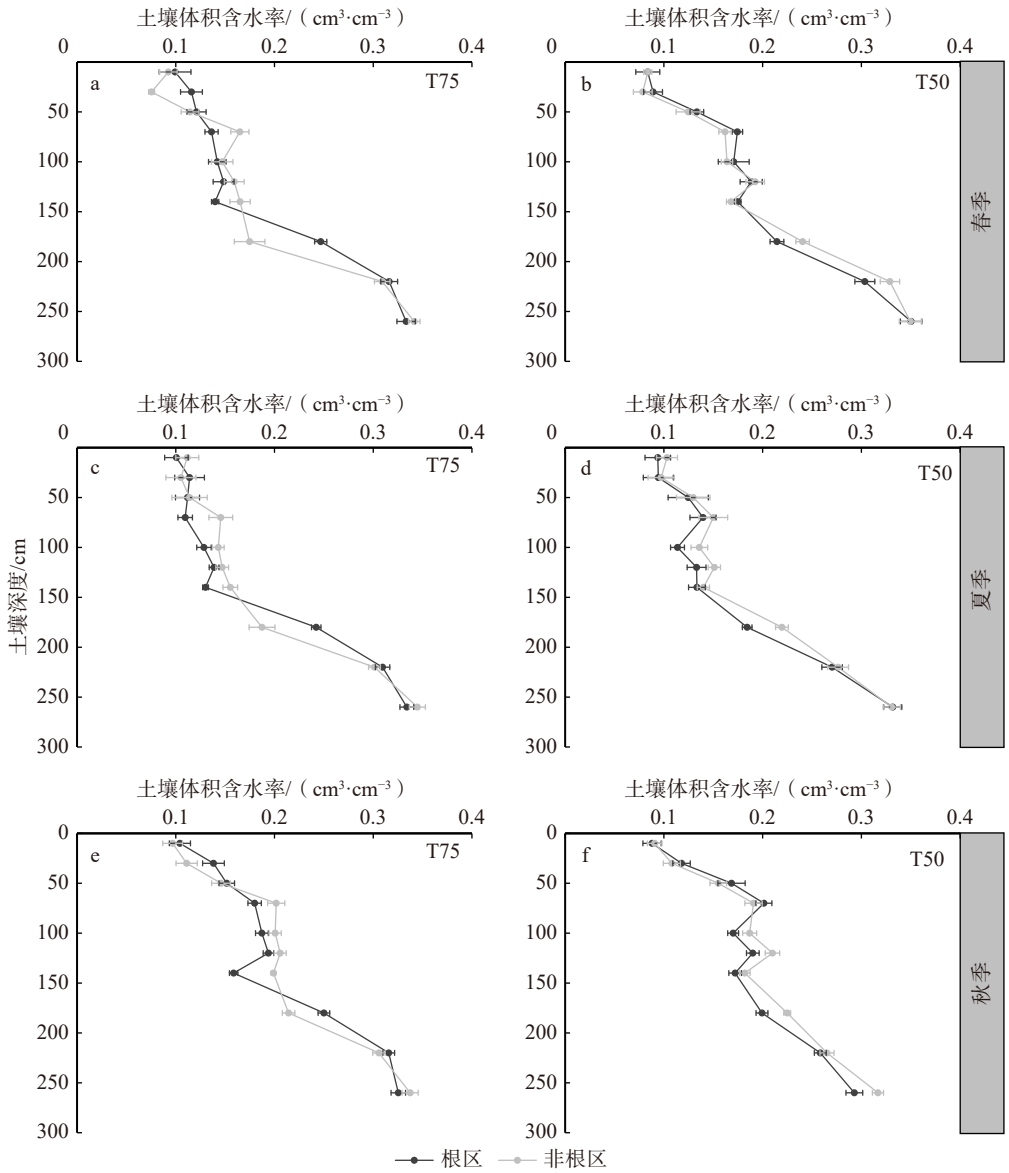


图 2 不同间伐处理下根区与非根区土壤体积含水率随土壤深度变化动态

Fig. 2 Dynamics of soil volumetric water content in root zone and non-root zone with soil depth under different thinning treatments

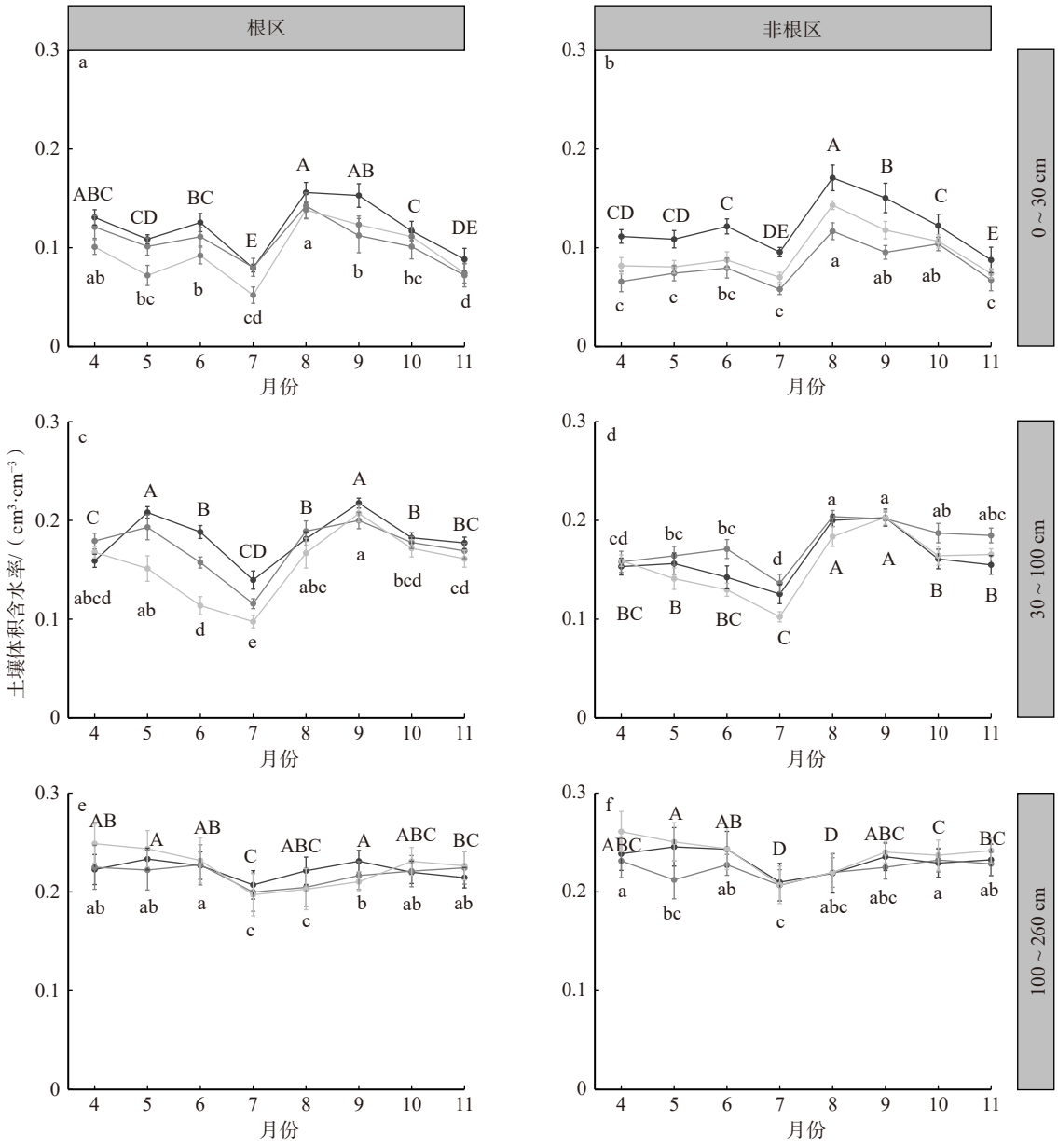
T50 试验区数据展开。结果显示，毛白杨人工林土壤体积含水率显著受月份和灌溉梯度影响，且二者在特定土层存在显著交互作用（表 5）。表层（0 ~ 30 cm）土壤体积含水率在各处理下均表现为 7 月最低（0.058 0 ~ 0.095 5 cm^3/cm^3），8 月最高（0.116 7 ~ 0.170 8 cm^3/cm^3）。灌溉显著提高了表层水分，其中充分灌溉处理（T50W20）下根区平均土壤体积含水率较不灌溉处理（T50）提高 28.78%（图 3），表明在中度间伐条件下，适度灌溉能够有效增强根区表层土壤水分供给。

中层土壤（30 ~ 100 cm）中，灌溉梯度对土壤水分的影响表现出明显的空间差异。在根区 T50W20 处理下平均土壤体积含水率最高，在非根区则以 T50W45 处理为最高，且灌溉与月份的交互作用仅

表 5　月份、灌溉梯度及交互作用对土壤体积含水率影响的双因素方差分析

Tab. 5　Two-factor ANOVA for the effects of month, irrigation gradient, and their interaction on soil volumetric water content

变异来源	根区			非根区		
	0 ~ 30 cm	30 ~ 100 cm	100 ~ 260 cm	0 ~ 30 cm	30 ~ 100 cm	100 ~ 260 cm
月份（*M*）	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
灌溉梯度（*W*）	**< 0.001**	**< 0.001**	**0.006**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
M × *W*	0.686	**< 0.001**	**< 0.001**	0.436	0.252	**0.003**



不同大写字母表示 T50W20 下，不同月份土壤体积含水率存在显著差异；不同小写字母表示 T50W45 下，不同月份土壤体积含水率存在显著差异；T50 已在图 1 中分析，本图不再表示。

图 3　不同灌溉处理下根区与非根区土壤体积含水率随月份变化动态

Fig. 3　Monthly dynamics of soil volumetric water content in root zone and non-root zone under different irrigation treatments

在根区达到显著水平（$P < 0.05$）（表 5）。这一结果表明，中层土壤水分对灌溉调控的响应具有明显的根际依赖性，不同灌溉水平通过影响根区水分补给过程，改变了中层土壤水分的季节变化特征。

相比之下，深层土壤（100 ~ 260 cm）体积含水率整体变化幅度较小，但月份与灌溉梯度的交互作用对根区和非根区的深层土壤均达到显著水平（$P < 0.05$）（表 5），表明深层土壤水分对灌溉措施的响应具有显著的时间依赖性。

从空间分布特征看，在 T50 处理下，土壤深度对

土壤体积含水率的影响极显著($P < 0.001$，表 6)，整体呈现随土层加深而逐渐升高的分布趋势(图 4)。水平位置的差异因灌溉量而异，在 W20 处理下，根区与非根区土壤体积含水率差异较小(图 4)；在 W45 处理下，春季根区与非根区差异显著($P < 0.05$，表 6)，这种差异主要表现在 10 ~ 70 cm 土层。同时，在春、夏、秋三季，W45 处理均表现出增加根区 220 cm 以下深层土壤水分的潜在趋势(图 4)。在不灌溉处理下，表层土壤(0 ~ 30 cm)根区与非根区差异不明显，但深层土壤的非根区土壤体积含水率普遍高于根区(图 4)。此外，在 W20 和 W45 处理下，水平位置与土壤深度的交互作用在春夏秋三季均达到显著水平($P < 0.05$，表 6)，表明灌溉管理显著改变了土壤水分的空间二维分布格局(图 4)。

表 6　不同灌溉梯度下水平位置、土壤深度及交互作用对土壤体积含水率影响的双因素方差分析

Tab. 6　Two-factor ANOVA for the effects of horizontal position, soil depth, and their interaction on soil volumetric water content under different irrigation gradients

变异来源	春季			夏季			秋季		
	T50W20	T50W45	T50	T50W20	T50W45	T50	T50W20	T50W45	T50
水平位置(H)	0.387	**< 0.001**	0.855	0.902	0.288	**0.007**	0.929	0.168	**0.031**
土壤深度(D)	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**
$H \times D$	**< 0.001**	**< 0.001**	0.647	**0.012**	**< 0.001**	0.696	**0.023**	**< 0.001**	0.056

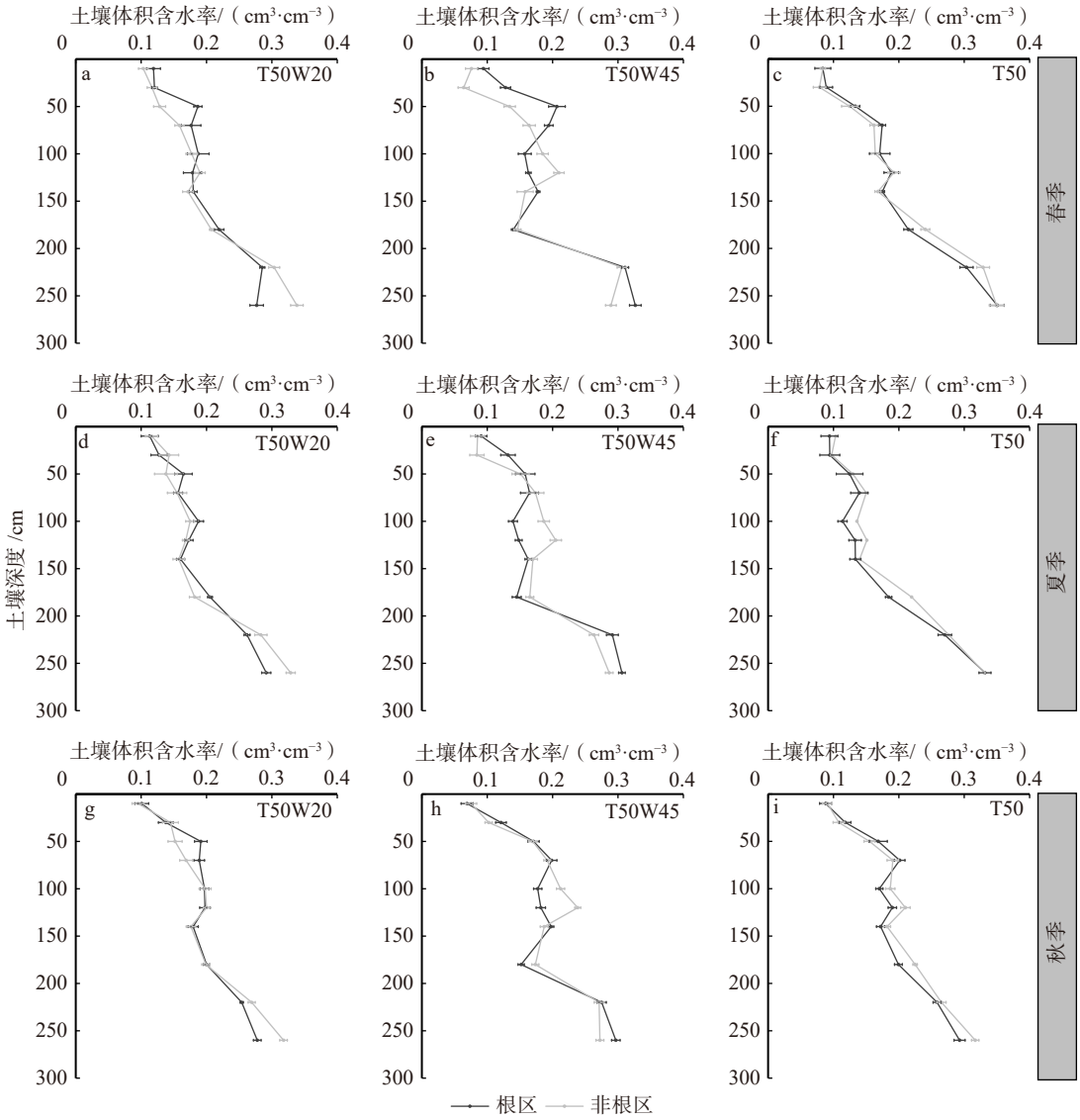


图 4　不同灌溉梯度下根区与非根区土壤体积含水率随土壤深度变化动态

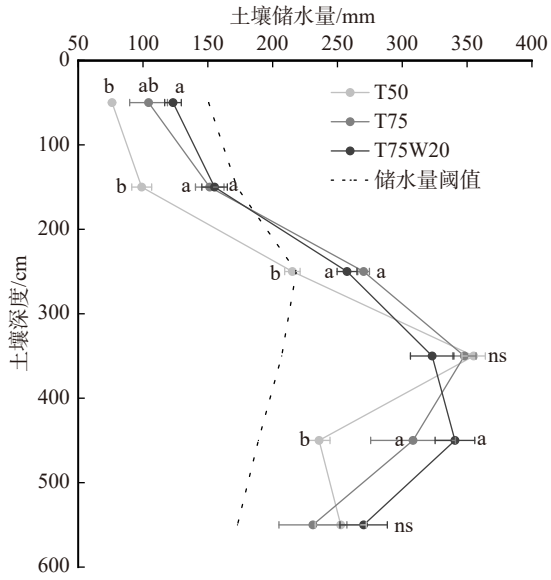
Fig. 4　Dynamics of soil volumetric water content in the root zone and the non-root zone with soil depth under different irrigation gradients

以上结果共同表明，在中度间伐条件下，灌溉梯度通过与生长季月份的交互作用，系统调控了土壤水分的时间动态与空间结构。适度灌溉主要增强根区表层和中层土壤水分，而较高灌溉量在特定季节促进水分向深层和根区传导，从而改变了林分土壤水分的时空分异特征。

2.3　间伐与水分管理对林分土壤储水量及干层的影响

通过选取 T75 试验区的充分灌溉（T75W20）、不灌溉处理（T75）以及 T50 试验区的不灌溉处理（T50）组，分离出高强度间伐的独立效应（T75 vs. T50）以及在高强度间伐基础上充分灌溉的叠加效应（T75W20 vs. T75），进而验证“高强度间伐结合充分灌溉能否缓解土壤干层”的核心科学问题。研究结果显示，间伐强度的增加显著提高 0 ~ 300 cm 和 400 ~ 500 cm 土层的土壤水储量，其中 T75 相比 T50 在 100 ~ 200 cm 土层的土壤水储量增幅最大（53.00%）（图 5）。这表明高强度间伐能够有效提高中浅层土壤的水分储存能力。

在灌溉效应方面，T75W20 处理较 T75 处理能提高多个土层的土壤储水量，其中 0 ~ 100 cm、400 ~ 500 cm 和 500 ~ 600 cm 土层的增幅较为明显（图 5）。值得注意的是，2022—2023 年间 T75W20 处理使 500 ~ 600 cm 土层储水量增加了 9.37 mm，有效缓解了该土层因林分发育导致的储水量下降趋势（图 6）。然而，从每土层的统计结果看，灌溉对土壤水储量的主效应并未达到显著水平（$P > 0.05$，图 5），表明在高强度间伐条件下，灌溉对土壤水分的提升具有明显的层次选择性。从年际变化角度看，2022—2023 年期间，0 ~ 600 cm 土层整体呈现储水量下降趋势，其中 500 cm 土层的降幅最大。除 300 ~ 400 cm 土层外，提高间伐强度能减小各土层储水量的年际变化幅度，T75 处理相较于 T50 处理，0 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm、200 ~ 300 cm、400 ~ 500 cm、500 ~ 600 cm 各土层储水量 2 年间变化量分别减小了 30.11%、17.36%、72.21%、11.75%、68.39%。这一结果表明，高强度间伐能够增强土壤水分储存的稳定性，减缓不同土层水分的年际消耗速率。



图中 T50、T75、T75W20 土壤储水量低于储水量阈值则被定义为出现土壤干层现象。不同小写字母表示相同土层不同处理间土壤储水量存在显著差异（P<0.05），ns 表示 3 个处理间差异均不显著。

图 5　不同处理下不同土层深度土壤储水量及干层现象

Fig. 5　Soil water storage and dry soil layer phenomenon at different soil depths under different treatments

在土壤干层发育特征方面，T50 处理下 0 ~ 300 cm 土层出现明显土壤干层，而在 T75 处理中，土壤干层主要集中于 0 ~ 200 cm 范围，表明提高间伐强度可在生长季末期显著降低土壤干层厚度（图 5）。尽管在高强度间伐基础上实施灌溉能够增加 0 ~ 150 cm

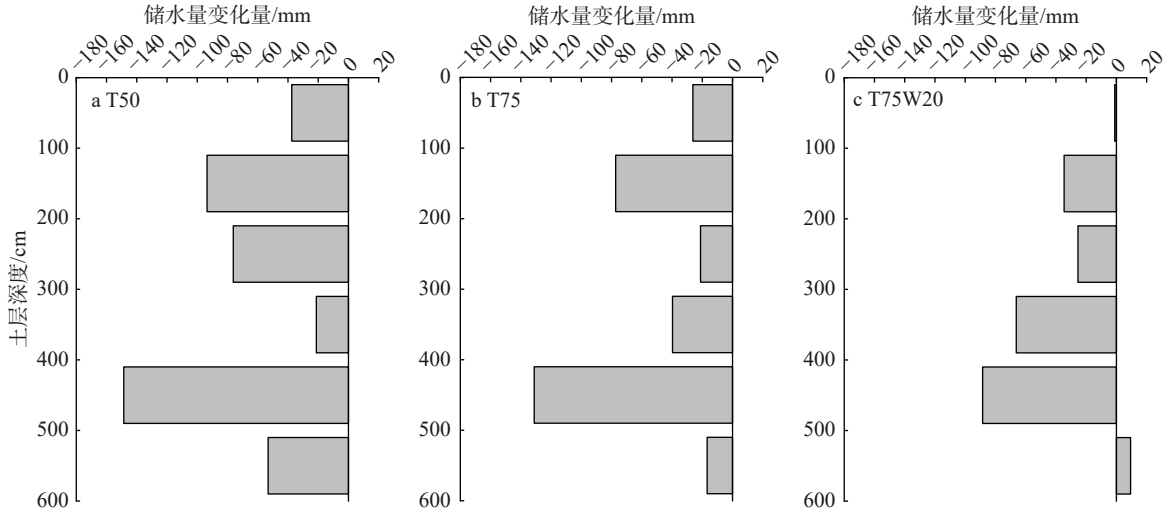


图 6　2022—2023 年不同处理下土壤储水量变化

Fig. 6　Variations in soil water storage under different treatments from 2022 to 2023

土层的土壤水储量，但并未从根本上消除土壤干层现象（图 5），说明灌溉对土壤干层的缓解作用有限，且难以替代间伐强度在调控干层发育中的主导作用。以上结果共同表明，高强度间伐通过提高中浅层土壤储水量、增强土壤水分稳定性，能够有效缓解毛白杨人工林土壤干层的发育，而在此基础上叠加充分灌溉虽可改善部分土层的水分状况，但不足以进一步消除土壤干层。该结果直接回答了“高强度间伐与灌溉协同作用是否能够缓解土壤干层”的科学问题，凸显了间伐强度在干层调控中的主导作用。

3 讨　论

毛白杨是华北平原典型的速生用材和生态防护树种，在防风固沙、木材供给和区域生态安全中具有不可替代的作用。然而，该区域水资源匮乏、降水季节分配极不均衡，叠加气候变化背景下干旱事件频发，使人工林水分供需矛盾日益突出。大量研究[4,8]表明，随着林分密度增加和林龄增长，毛白杨人工林易出现土壤水分持续亏缺，甚至形成深厚的土壤干层，从而制约林分的长期稳定经营。因此，在毛白杨人工林中，厘清间伐与水分管理对土壤水分时空格局及干层发育的综合影响，对于优化人工林水分调控策略、提升其生态可持续性具有重要的理论价值和实践意义。

3.1 间伐对土壤体积含水率时空特征的影响

生长季内，不同间伐强度下的毛白杨林分土壤体积含水率受到月份的显著影响，表现出相似的季节性波动特征，而这一特征与季节降水、土壤蒸发、林地蒸腾密切相关[23−24]。生长季前期（5—7 月），各土层土壤体积含水率整体呈下降趋势，主要原因在于该时期毛白杨处于旺盛生长期，茎干生长量和蒸腾量均维持较高水平[25]，而试验区尚未进入集中降雨阶段，水分消耗大于输入量。间伐通过移除部分林木，降低了林分整体蒸腾耗水，从而在一定程度上缓解了土壤水分消耗[26]，并表现为间伐强度越大，表层土壤体积含水率越高[27]。8 月份进入雨季后，不同间伐处理下土壤体积含水率均达到生长季峰值，这与降水持续累积及林木生长趋缓、蒸腾减弱密切相关。在此阶段，高强度间伐通过显著降低林冠郁闭度，减少降水截留，使更多降水直接补给土壤，从而进一步放大了间伐对土壤水分的正向调节效应。而在 8—10 月，表土层和中土层土壤体积含水率逐渐下降，而深土层逐渐上升（图 1）。此时，毛白杨进入生长缓慢期[28]，林分需水量降低[25]，但随着降雨的减少，林地表层、中层土壤水分逐渐下降，而深层土壤水分得以补充（图 1）。

间伐效应在空间尺度上表现出明显异质性。水平方向上，间伐强度仅显著影响根区土壤体积含水率，而对非根区影响不显著（表 4），这主要与根系对水分的主动吸收及其空间分布有关[29]。根区土壤水分变化直接响应林木需水强度，而非根区更多受降水和蒸发等非生物因子控制[30]。此外，间伐后保留木根系可能通过水力提升等机制调节根区水分利用，从而进一步强化了根区对间伐的响应[31]。在垂直方向上，总体呈现随土层加深含水率呈阶梯式上升趋势，这主要是由根系吸水，土壤蒸发等因素共同决定[32−33]。但随着间伐强度的增加，土壤体积含水率呈现不同的变化规律。这与前人研究中发现土壤水分随着间伐强度的提高而增加有所不同[31]。本研究结果显示：高强度间伐（T75）在表层（0 ~ 30 cm）和深层（100 ~ 260 cm，7—11 月）提高了土壤体积含水率，而在中层（30 ~ 100 cm）则低于中度间伐（T50）。这一结果表明，高强度间伐（T75）减少了冠层截留和蒸腾耗水，雨季更多降水到达地表并增加降水入渗深度，尤其在深层土壤中积累；同时保留木根系在浅层（< 30 cm）的水分竞争减少，导致雨季开始表层土壤体积含水率升高[34−35]。但高强度间伐后保留木可能通过深层根系（> 30 cm）的补偿性生长增加水分吸收，导致中土层（30—100 cm）水分消耗加剧[31, 36]。

3.2 水分管理对土壤含水率时空特征的影响

在间伐已调节林分结构的基础上，水分管理进一步影响了毛白杨人工林土壤水分的时空分布特征。本研究表明，4—11 月期间，不同灌溉梯度下土壤体积含水率均显著受月份和灌溉水平的共同影响，其季节性变化规律与不同间伐强度下的结果高度一致，说明水分输入与林木生长节律仍是控制土壤水分动态的主导因素。本研究表明，旱季（4—6 月）实施灌溉能有效缓解表土层根区土壤水分的过度消耗，且土壤体积含水率随灌溉量的增加呈上升趋势。但在 6 月底停止灌溉后，无论是否灌溉，各处理土壤体积含水率均在 7 月降至最低值，这一现象与前人[8]关于毛白杨人工林灌溉效应的研究结果一致。这表明灌溉对土壤水分的调节作用具有明显的时间依赖性，其效应在持续水分补给中才能稳定体现。从土壤垂直二维空间分布来看，灌溉水首先入渗表层土壤，导致表层含水量变化最为显著，但随着土层深度的增加，灌溉对土壤水分的影响逐渐减弱（图 3）。在不同灌溉梯度下，土壤体积含水率均随土层深度的增加而呈现总体上升的趋势（图 3）。这一现象与郭彪等[37]在西北地区对小叶杨（*Populus simonii*）的研究结果一致，其主要驱动因素在于杨树根系的垂直分布特征和吸水模式[21,29]。具体而言，由于杨树根系在表层

土壤分布密集，吸水活动强烈，导致表层土壤水分消耗较大；而随着土层加深，根系密度降低，水分利用减少，使得深层土壤能保持相对较高的含水率。

水平方向上的土壤水分分布格局受灌溉量的显著影响，表现出明显的根区与非根区差异。在充分灌溉（W20）条件下，充足的水分供应使根区与非根区含水率差异较小，土壤水分分布呈现均质化特征。这种均匀分布格局的形成主要依赖于频繁的灌溉补给，不仅充分满足植物需求，同时促进了水分向非根区的扩散[38]。相比之下，低灌溉量（W45）处理在春季表现出显著的空间异质性，根区（特别是 10 ~ 70 cm 土层）含水率明显高于非根区，这反映了植物在水分胁迫条件下通过根系水力再分配机制主动调控水分分布的策略[39−40]。而在不灌溉处理中，夏秋季观测到的根区含水率低于非根区的现象，这与自然降水在空间上的不均匀分布及其与根系吸水模式的交互作用有关。

3.3　间伐和水分管理对毛白杨林分储水量及土壤干层形成的影响

土壤水储量是综合反映人工林水分平衡状态的重要指标。本研究发现，随着林分发育，0 ~ 600 cm 土层土壤水储量整体呈下降趋势（图 6），这一结果与不同地区人工林的研究结论[41−42]一致。其主要原因在于：随着林分发育，冠层郁闭度增加导致降水截留率升高，蒸腾耗水量随生物量累积而上升[25]；同时长期根系生长和有机质积累可能改变土壤孔隙分布，尽管表层土壤持水性可能因有机质增加而改善，但深层土壤因根系穿透和微生物活动形成大孔隙，加速水分下渗至地下水或侧向流失[43]。基于土壤水分平衡方程[44]，随林龄增长，蒸散和深层渗漏占比增大，而这势必会导致林地土壤储水量随着林分发育而降低，而这已在前人研究中[4]得到证实。而在年际间的土壤储水量变化量中发现，400 ~ 500 cm 土层中储水量的减少最多，可能主要归因于深层土壤的降雨补给量低于浅层土壤[45−46]。浅层土壤中相对较低的土壤贮水量（图 5），以及随着林分发育逐渐增加的水分消耗（图 6），将会促进促深根系的发育，从更深土层中提取更多的水分。然而在未来更频繁和更严重的干旱情况下，随着林分发育，浅层土壤的快速干燥将减少雨水向深层土壤的移动，从而减缓人工林水循环的速度，并可能会加强对深层土壤水分的利用和消耗[4]。

间伐强度的增加显著提高了 100 ~ 300 cm 和 400 ~ 500 cm 土层的土壤水储量，并减缓了随林龄增长导致的储水量下降趋势（图 5，图 6）。这一结果表明，间伐通过降低林分密度、减少耗水强度并改善土壤入渗条件，在一定程度上重塑了土壤水分再分配过程[47−48]。相比之下，灌溉虽能提高多个土层的土壤水储量，尤其是在浅层和深层表现较为明显，但其整体效应相对有限，且未能从根本上逆转随林分发育而下降的储水趋势。与前人关于华北平原毛白杨人工林土壤干层形成的研究结果[4]一致，本研究发现生长季末 T50 林分在 0 ~ 300 cm 内出现明显土壤干层，而 T75 处理下干层厚度缩减至 0 ~ 200 cm，表明提高间伐强度能够有效减轻土壤干层的发育程度。尽管高强度间伐后实施灌溉在短期内增加了 0 ~ 150 cm 土层的土壤水储量，但并未显著消除干层现象，说明通过结构调控降低长期耗水压力，较简单增加水分输入更有利于缓解人工林深层水分亏缺问题。

4　结　　论

本研究针对华北平原毛白杨人工林水分供需矛盾突出及土壤干层发育加剧的问题，在明确间伐与灌溉协同调控潜力的基础上，通过连续生长季原位监测土壤体积含水率与深层土壤水储量，系统分析了不同间伐强度与灌溉梯度下土壤水分的时空动态特征及其对土壤干层形成的影响。研究得到以下结论。

（1）生长季内，毛白杨人工林土壤含水率显著受季节进程与土层深度的共同调控；表层土壤含水率随月份波动最为剧烈，而整体上土壤含水率随土层加深呈阶梯式升高。

（2）间伐对土壤水分分布具有显著且具有空间选择性的调控作用，主要体现在根区土壤水分响应上。高强度间伐（75%）显著提高了深层土壤水分状况，其中 100 ~ 200 cm 土层土壤水储量较中度间伐提高 53.00%，并有效降低了 0 ~ 600 cm 土层土壤水储量的年际波动。

（3）灌溉主要增强表层及局部深层土壤水分，但其调控效应具有明显的层次差异。在中度间伐林分中，充分灌溉（T50W20）使根区表层土壤体积含水率较对照提高 28.78%；在高强度间伐条件下，灌溉可在 500 ~ 600 cm 土层两年累计增加土壤储水量 9.37 mm，对缓解深层水分亏缺具有一定作用，但整体上难以逆转林分发育背景下的土壤储水量下降趋势。

（4）土壤干层主要分布于 0 ~ 300 cm 土层，其厚度受间伐强度显著调控。间伐 50% 条件下干层厚度可达 300 cm，而间伐 75% 将其缩减至 200 cm，表明通过降低林分密度可有效缓解土壤干层发育；相比之下，灌溉虽能增加浅层土壤储水量，但未能消除 0 ~ 200 cm 土层的干层现象。

本研究为毛白杨人工林水分优化管理提供了科学依据，未来可进一步结合长期定位观测与模型模

拟，优化间伐–灌溉协同策略，以实现人工林生产力提升与土壤水资源可持续利用的双重目标。

参 考 文 献

[1] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate [J]. Nature Geoscience, 2010, 3: 100−104.

[2] Jia X X, Shao M A, Zhang C C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 152−160.

[3] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437−448.

[4] Liu J Q, Li D D, Fernandez J E, et al. Variations in water-balance components and carbon stocks in poplar plantations with differing water inputs over a whole rotation: implications for sustainable forest management under climate change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 320: 108958.

[5] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 85−96.

[6] Gao Z, Hu X, Li X Y. Changes in soil water retention and content during shrub encroachment process in Inner Mongolia, northern China [J]. Catena, 2021, 206: 105528.

[7] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 37−49.
Xi B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 37−49.

[8] 周欧, 古丽米热·依力哈木, 祝维, 等. 不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 55−67.
Zhou O, Yilihamu G, Zhu W, et al. Soil water characteristics of *Populus tomentosa* stand sunder different densities and water treatments [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 55−67.

[9] Jia Y H, Shao M A, Jia X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 495: 150−161.

[10] Hiiragi K, Matsuo N, Sakai S, et al. Water uptake patterns of tropical canopy trees in Borneo: species-specific and temporal variation and relationships with aboveground traits [J]. Tree Physiology, 2022, 42(10): 1928−1942.

[11] Liu Y, Li Y, Gao G Y, et al. Effects of thinning on soil water content and water use characteristics of artificial forest in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2025, 254: 108997.

[12] Hipps N A, Davies M, Dumn J M, et al. Effects of two contrasting canopy manipulations on growth and water use of London plane (*Platanus* × *acerifolia*) trees [J]. Plant and Soil, 2014, 382(1): 61−74.

[13] Dung B X, Gomi T, Miyata S, et al. Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444−445: 51−62.

[14] Xi B Y, Clothier B, Coleman M, et al. Irrigation management in poplar (*Populus* spp.) plantations: a review [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 494: 119330.

[15] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The Impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467: 43−51.

[16] Xi B Y, Bloomberg, Watt M S, et al. Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 243−254.

[17] Li D D, Liu J Q, Verhoef A, et al. Understanding the relationship between biomass production and water use of *Populus tomentosa* trees throughout an entire short-rotation [J]. Agricultural Water Management, 2021, 246: 106710.

[18] He Y L, Xi B Y, Li G D, et al. Influence of drip irrigation, nitrogen fertigation, and precipitation on soil water and nitrogen distribution, tree seasonal growth and nitrogen uptake in young triploid poplar (*Populus tomentosa*) plantations [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106460.

[19] 王亚飞, 刘洋, 王凯, 等. 水氮耦合处理对毛白杨纸浆林生长及土壤水养特征影响 [J]. 林业科学, 2025, 61(5): 85−97.
Wang Y F, Liu Y, Wang K, et al. Effects of water-nitrogen coupling treatment on growth of *Populus tomentosa* pulp forest and the soil moisture-nutrient characteristics [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(5): 85−97.

[20] Wang Y F, Liu J T, He Y L, et al. Growth and biomass distribution responses of *Populus tomentosa* to long-term water-nitrogen coupling in the North China Plain [J]. Plants, 2025, 14(12): 1833.

[21] 孙一鸣, 贾黎明, 祝维, 等. 毛白杨幼龄林细根对树种组成和林分密度的响应初探 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2025, 49(2): 45−56.
Sun Y M, Jia L M, Zhu W, et al. Preliminary study on the response of fine roots in young *Populus tomentosa* forests to variations in species composition and stand density [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(2): 45−56.

[22] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review[J]. Vadose Zone Journal 2018, 17: 170077. DOI: 10.2136/vzj2017.04.0077.

[23] 朱喜, 何志斌, 杜军, 等. 间伐对祁连山青海云杉人工林土壤水分的影响 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 55−60.
Zhu X, He Z B, De J, et al. Effects of thinning on the soil moisture of the *Picea crassifolia* plantation in Qilian Mountains [J]. Forest Research, 2015, 28(1): 55−60.

[24] 郭保江, 甘淼, 李同川, 等. 黄土高原北部沟坡系统土壤水分时

空分布特征 [J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 102−110,121.
Guo B J, Gan M, Li T C, et al. Characteristics of spatiotemporal distribution of soil moisture in gully-slope system of northern Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 102−110,121.

[25] 李玲雅, 邸楠, 刘金强, 等. 短轮伐毛白杨人工林耗水规律及作物系数曲线构建 [J]. 林业科学, 2023, 59(10): 76−88.
Li L Y, Di N, Liu J Q, et al. Water consumption pattern and crop coefficient curve construction of short-rotation *Populus tomentosa* plantations [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(10): 76−88.

[26] Molina A J, Gonzalez S M, Biel C, et al. Ecohydrological turnover in overstocked Aleppo pine plantations: does the effect of thinning, in relation to water, persist at the mid-term? [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 483: 118781.

[27] Pisarello K L, Sun G E, Evans L M, et al. Potential long term water yield impacts from pine plantation management strategies in the southeastern United States [J]. Forest Ecology and Management, 2022, 522: 120454.

[28] 王烨, 李广德, 刘国彬, 等. 毛白杨人工林物候特征和生长对施肥的可塑性响应 [J]. 林业科学, 2023, 59(5): 32−40.
Wang Y, Li G D, Liu G B, et al. Plasticity responses of phenological characteristics and tree growth of *Populus tomentosa* plantation to fertilization [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(5): 32−40.

[29] Zhu W, Zhou O, Sun Y M, et al. Effects of stand age and structure on root distribution and root water uptake in fast-growing poplar plantations [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 1288331.

[30] Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, et al. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests [J]. Tree Physiology, 2002, 22(15−16): 1107−1117.

[31] Schume H, Jost G, Katzensteiner K. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)-European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand [J]. Geoderma, 2003, 112(3−4): 273−287.

[32] Zou S Y, Li D D, Di N, et al. Stand development modifies effects of soil water availability on poplar fine-root traits: evidence from a six-year experiment [J]. Plant and Soil, 2022, 480(1): 165−184.

[33] 席本野, 邸楠, 曹治国, 等. 树木吸收利用深层土壤水的特征与机制: 对人工林培育的启示 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(9): 885−905.
Xi B Y, Di N, Cao Z G, et al. Characteristics and underlying mechanisms of plant deep soil water uptake and utilization: implication for the cultivation of plantation trees [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(9): 885−905.

[34] Damato A W, Bradford J B, Fraver S, et al. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems [J]. Ecological Applications, 2013, 23(8): 1735−1742.

[35] Rascon R A E, Martinez S M, Sosa P G, et al. Soil moisture dynamics in response to precipitation and thinning in a semi-dry forest in Northern Mexico [J]. Water, 2021, 13: 105−122.

[36] Breda N, Huc R, Granier A, et al. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses [J]. Annals of Forest Science, 2006, 63(6): 625−644.

[37] 郭彪, 王尚义, 牛俊杰, 等. 晋西北不同植被类型土壤水分时空变化特征 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 267−273.
Guo B, Wang S Y, Niu J J, et al. Characteristics of soil moisture variation under different vegetation types in northwestern Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 267−273.

[38] Liao R K, Wu W Y, Hu Y Q, et al. Quantifying moisture availability in soil profiles of cherry orchards under different irrigation regimes [J]. Agricultural Water Management, 2019, 225: 105780.

[39] Burgess S S, Adams M A, Turner N C, et al. The redistribution of soil water by tree root systems [J]. Oecologia, 1998, 115: 306−311.

[40] Nadezhdina N, David T S, David I S, et al. Trees never rest: the multiple facets of hydraulic redistribution [J]. Ecohydrology, 2010, 3(4): 431−444.

[41] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113−122.

[42] Christina M, Nouvellon Y, Laclau J P, et al. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest [J]. Functional Ecology, 2017, 31: 509−519.

[43] Xiao T, Li P, Fei W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: a perspective review [J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167524.

[44] Zhang L, Dawes W R, Walker G R, et al. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701−708.

[45] Mendham D S, White D A, Battaglia M, et al. Soil water depletion and replenishment during first- and early second-rotation *Eucalyptus globulus* plantations with deep soil profiles [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1568−1579.

[46] Li H J, Si B C, Wu P, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(2): 320−327.

[47] Ma S Y, Comcilio A, Oakley B, et al. Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning treatments [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(5): 904−915.

[48] Sun X C, Onda Y C, OtsukiI K, et al. The effect of strip thinning on tree transpiration in a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) plantation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 197: 123−135.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　马履一）