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

不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征

周欧 古丽米热·依力哈木 祝维 王亚飞 曲冠博 李少然 贾黎明 席本野

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

Zhou Ou, Yilihamu Gulimire, Zhu Wei, Wang Yafei, Qu Guanbo, Li Shaoran, Jia Liming, Xi Benye

引用本文:
周欧, 古丽米热·依力哈木, 祝维, 王亚飞, 曲冠博, 李少然, 贾黎明, 席本野. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230092
Zhou Ou, Yilihamu Gulimire, Zhu Wei, Wang Yafei, Qu Guanbo, Li Shaoran, Jia Liming, Xi Benye. Soil water characteristics of *Populus tomentosa* stands under different densities and water treatments[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1):55–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230092

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230092

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤水分和养分条件下筇竹竹秆解剖特征及其适应可塑性

Anatomical characteristics and adaptability plasticity of *Qiongzhuea tumidinoda* stalk under different soil water and nutrient conditions

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190290

陕北黄土区不同微地形土壤水分变化趋势分析

Dynamic changing trend of soil moisture in different micro–topography in loess region of northern Shaanxi Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2018, 40(3): 84–92. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170337

生物土壤结皮对毛乌素沙地油蒿群落土壤水分的影响

Influence of biological soil crusts on soil moisture in *Artemisia ordosica* community in Mu Us Desert, northwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(3): 48–56. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160383

水肥耦合对毛白杨林分土壤氮、细根分布及生物量的影响

Effects of water and fertilizer coupling on soil nitrogen, fine root distribution and biomass of *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 75–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190222

极端干旱区绿洲植物叶功能性状及其对土壤水盐因子的响应

Leaf functional traits of oasis plants in extremely arid areas and its response to soil water and salt factors

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 20–29. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190128

基于植物分割理论的毛白杨干旱落叶研究

Leaf shedding of *Populus tomentosa* under drought stress based on the theory of plant segmentation hypothesis

北京林业大学学报, 2020, 42(9): 19–27. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190411

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230092

不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征

周　欧[1,2]　古丽米热·依力哈木[1,2]　祝　维[1,2]　王亚飞[1,2]　曲冠博[1,2]
李少然[3]　贾黎明[1,2]　席本野[1,2]
（1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；2. 干旱半干旱地区森林培育和生态系统研究国家林业和草原局重点实验室，北京 100083；3. 中国林业集团有限公司，北京 100036）

摘要:【目的】土壤水分是影响我国北方水分亏缺地区植被生长的重要因素，探究不同造林密度和水分管理下毛白杨林分的土壤水分状况，能为华北黄泛平原地区人工林土壤水分维持提供参考。**【方法】**以不同造林密度（Ⅲ3 m × 3 m、Ⅱ 3 m × 6 m、Ⅰ 6 m × 6 m）和水分管理（滴灌 FI、雨养 NI）下的 5 种（FI_{III}、FI_{I}、NI_{III}、NI_{II}、NI_{I}）毛白杨林分为研究对象，在 2021 年生长季内（5、6、8 和 10 月），采用烘干称重法测定各处理 6 m 剖面内的土壤含水量（SWC），研究不同处理土壤水分状况及土壤干层现象。**【结果】**（1）各处理毛白杨林分浅土层（0 ~ 30 cm 和 30 ~ 100 cm）的 SWC（5.62% ~ 15.53%）显著低于深土层（100 ~ 200 cm、200 ~ 400 cm 和 400 ~ 600 cm）（16.50% ~ 27.00%）；林分 SWC 在 0 ~ 240 cm 垂直剖面内随深度增加而增加，并在 240 ~ 260 cm（26.37% ~ 30.56%）和 360 ~ 400 cm（22.79% ~ 33.00%）出现两个峰值，而 400 ~ 600 cm 变化平缓；（2）5 种林分土壤均在 10 月最为湿润，平均 SWC 为 20.16% ~ 23.16%；雨养条件下，不同密度毛白杨林分在 6 月最干燥，平均 SWC 为 13.11% ~ 14.96%，滴灌减轻了 30 cm 以下土层 SWC 的季节变异程度；（3）不同水分管理下，高密度林分中深土层土壤水分状况最好（FI_{III}和 NI_{III}深土层平均 SWC 分别为 23.18% 和 21.13%），但雨季末（10 月），NI_{II}土壤水分补偿量最高，达 403.12 mm。在高密度和低密度林分中滴灌显著提高了林分 0 ~ 30 cm 土层的 SWC，且增加了深土层土壤水分补偿量（FI_{III}较 NI_{III}和 FI_{I} 较 NI_{I} 的储水量变化量分别提高了 84.40% 和 173.99%），滴灌仅显著提高了高密度林分土壤储水量（$P < 0.05$）；（4）滴灌和降雨均能缓解或消除不同密度林分在 2 m 深度内出现的可恢复性土壤干层现象。**【结论】**根据本研究结果，建议在华北黄泛平原毛白杨大径材林培育过程中，以 3 m × 3 m 密度造林且于旱季（4—6 月）辅以多频率滴灌充分灌溉，促进杨树人工林在快速生长期（2 ~ 4 年）的林木生长并改善其深层土壤水分状况。待林分出现密度效应及深层土壤水消耗后，可通过间伐等措施在实现土壤水分维持的同时提高杨树人工林林地生产力。

关键词：造林密度；水分管理；毛白杨；土壤水分；土壤干层
中图分类号：S725.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)01−0055−13
引文格式：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 Ou, Yilihamu Gulimire, Zhu Wei, et al. Soil water characteristics of *Populus tomentosa* stands under different densities and water treatments［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 55−67.

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

Zhou Ou[1,2]　Yilihamu Gulimire[1,2]　Zhu Wei[1,2]　Wang Yafei[1,2]　Qu Guanbo[1,2]
Li Shaoran[3]　Jia Liming[1,2]　Xi Benye[1,2]
(1. Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Key laboratory for Silviculture and Forest Ecosystem in Arid- and Semi-Arid Region of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China;
3. China Forestry Group Corporation, Beijing 100036, China)

Abstract:［**Objective**］In water-deficit area of northern China, soil water content is a crucial factor affecting

收稿日期: 2023−04−24　**修回日期:** 2023−06−19
基金项目: “十四五”国家重点研发计划（2021YFD2201203）。
第一作者: 周欧。主要研究方向：森林培育。Email: 1823935793@qq.com　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，教授。主要研究方向：森林培育。Email: jlm@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

plant growth. Studying the soil water status of *Populus tomentosa* stands under different planting densities and water treatments can provide a reference basis for soil water maintenance of plantations in the North China Plain. [**Method**] *Populus tomentosa* plantations under five different planting densities (Ⅲ 3 m × 3 m, Ⅱ 3 m × 6 m and Ⅰ 6 m × 6 m) and water (drip irrigation, FI and rainfed, NI) treatments (FI_{III}, FI_{I}, NI_{III}, NI_{II} and NI_{I}) were selected in this study. During the growing season (May, June, August and October) in 2021, soil water content (SWC) within the 6 m-depth soil profile was measured using the drying-weighing method, soil water content conditions and the occurrence of dry soil layer (DSL) were investigated and compared among different treatments. [**Result**] (1) Shallow soil layers (0−30 cm and 30−100 cm, ranging from 5.62% to 15.53%) showed significantly lower SWC than the deep soil layers (100−200 cm, 200−400 cm, and 400−600 cm, ranging from 16.50% to 27.00%) in each treatment. The SWC in all stands increased with depth within the vertical profile of 0−240 cm, showing two peaks at 240−260 cm (26.37%−30.56%) and 360−400 cm (22.79%−33.00%), while the change of SWC at 400−600 cm was relatively gradual. (2) All five stands exhibited the highest soil water availability in October, with an average SWC from 20.16% to 23.16%. In rainfed treatment, soil was driest in June independent of planting density, the average SWC ranged from 13.11% to 14.96%. Drip irrigation treatment reduced the seasonal variation in SWC in the soil layer below 30 cm. (3) Under different water treatments, high density stands exhibited the highest soil water availabilities in the deep soil layers (average SWC of 23.18% for FI_{III} and 21.13% for NI_{III}). However, NI_{II} exhibited the highest soil water compensation at the end of the rainy season (October) of 403.12 mm. In both high and low density stands, SWC in the 0−30 cm soil layer was significantly increased by drip irrigation treatment, the compensation of soil water in the deep layers was also enhanced (the change in water storage was 84.40% in FI_{III} than in NI_{III}, and 173.99% higher in FI_{I} than in NI_{I}). Drip irrigation treatment only significantly improved soil water storage in high density stands ($P < 0.05$). (4) Both drip irrigation and precipitation effectively alleviated or eliminated the occurrence of recoverable DSL within 2 m-depth under different planting densities. [**Conclusion**] According to the results of this study, a 3 m × 3 m planting density with frequent full irrigation treatment during dry season (April to June) is recommended for the cultivation of large-diameter poplar plantation in the North China Yellow River Plain in order to achieve fast tree growth in the early growing stage (2−4 years) and improve water condition of the deep soil layers. After the occurrence of evident density effect and deep soil water content depletion, management practices like thinning can be implemented to maintain soil water production and enhance the productivity of poplar plantations.

Key words: planting density; water treatments; *Populus tomentosa*; soil water; dry soil layer

土壤水分作为影响森林植被生长的关键性因子，控制着生态系统中物质与能量的分配和传递，在森林生产力形成、林地地力维持和森林演替中发挥着重要作用[1]。土壤水分动态变化是水分输入、土壤蒸发、林分蒸腾和林冠截留等过程综合作用、动态平衡的结果，受降水、土地利用类型、人为干预及土壤属性等共同影响[2−3]。据报道，在过去 20 年里，持续的土壤水分亏缺使东亚内陆出现了前所未有的热浪和干旱耦合，这种现象是不可逆转的[4]。且未来随着人为温室气体排放的增加，夏季土壤水分条件将表现为干旱区更加干燥而湿润区更加湿润的极端变化趋势[5]。在此背景下，浅层土壤水分不断被消耗，为了在旱季维持林木生长的水分需求，深根系树种需要不断加强对深层土壤水分的获取，以抵抗面临的干旱胁迫[6−7]，因此研究更深层土壤水分动态变化对于水分亏缺地区的植被生长和更新至关重要。

在具体的林分尺度中，考虑到土壤类型和地形的同质性，土壤水分的动态变化主要受气候环境、植被类型和林地管理模式的影响[8−9]。长期以来，国内外对超过 4 m 深度林分土壤水分已开展大量研究，主要探讨了土地利用方式[10]、地形[11]、植被类型[12]、林分密度[13]和林龄[14]等对土壤水分分布及消耗的影响。同时，现有研究表明，森林经营管理措施能对植被的耗水强度产生重大影响，并在维持人工林的存活和生长方面发挥着重要作用，其中密度调控和灌溉等营林措施能够从水分输出（主要包括林地蒸发和林分蒸散）和输入特征上影响人工林土壤水分条件，继而影响水土保持及林地生产力。例如，Andrews 等[15]研究发现低密度林分能在干旱条件下维持较高的林木生长并提高自身的抗旱能力，而 Liu 等[16]发

现灌溉能够降低深层土壤的干燥速率。因此，尽管不少学者对灌溉和造林密度林分的深层土壤水分进行了相关研究，但是密度和灌溉如何协同调控速生人工林的土壤水分，目前还了解甚少。

杨树(*Populus* spp.)不仅在我国北方防护林和城市道路绿化建设中广泛应用，还是全球中纬度平原地区栽培面积最大，且木材产量最高的速生用材树种之一。据全国第九次森林资源清查显示，我国杨树人工林面积达 757 万 hm^2[17]。然而随着林龄的增大，我国许多地区的杨树人工林出现大面积感病、老化和死亡等退化现象。一些研究表明我国杨树人工林存在着不同程度的干旱胁迫以及土壤干层现象[18−19]。土壤干层一般分为可恢复性和永久性的两种，前者可以通过降水或者灌溉解除胁迫，而永久性土壤干层的形成意味着地表水分输入和地下水之间无法通过土壤进行有效水分交换，成为土壤水分可持续利用的严重障碍[20−21]。还有研究发现干旱是我国北方地区(主要为“三北”防护林工程区)杨树人工林出现退化和死亡的主要原因，且中国北方许多杨树林中存在潜伏的溃烂病细菌，从而增加其对干旱胁迫的敏感性[22−24]。此外，有学者发现华北平原 37 年生欧美杨(*P. euramericana* ‘Sacrau 79’)人工林的 0～6 m 土层存在严重的土壤干燥化，而三倍体毛白杨无性系 B301((*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × *P. tomentosa*)幼龄林内已出现不同程度的土壤干层现象[16]。因此，为缓解华北平原杨树人工林的土壤干燥化提供一定的理论基础，研究不同密度和水分管理调控下的杨树人工林土壤水分变化十分必要。

综上，本研究以我国华北地区杨树速生丰产林建设的主要树种毛白杨为研究对象，通过对不同密度和水分管理下毛白杨林分 0～6 m 土层的土壤连续取样，确定不同林分的土壤水分分布及利用状况。探究灌溉和林分密度如何交互影响毛白杨人工林 6 m 土壤剖面内的水分分布特征；探讨造林密度和水分管理对土壤储水量的影响；明确毛白杨幼龄林中是否出现土壤干层现象。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究地和试验林概况

研究区位于山东省聊城市高唐县清平镇国有旧城林场(36°47′N，116°03′E)，海拔约 35 m。研究地属于华北黄泛冲积平原，地势平坦，暖温带半湿润大陆性季风气候，雨季和旱季分明，该区域年平均降水量为 500～900 mm，年均蒸发量为 1 880 mm，年均温 13.9℃(1981—2020 年)。

在 2017 年，采用“两根一干”的‘北林 1 号’毛白杨((*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × (*P. alba* × *P. glandulosa*))苗木进行造林。以 3 种林分密度(Ⅲ 3 m × 3 m、Ⅱ 3 m × 6 m 和Ⅰ 6 m × 6 m，以下简称“高密度”、“中密度”和“低密度”)建设了 3 个试验林。在低密度和高密度林分中随机设置雨养(rainfed，NI)和滴灌(drip irrigation，FI)两种水分处理，其中在高密度林分设定了 5 个重复，在低密度林分设定了 3 个重复。此外，为了进一步探究不同水平栽植密度对林分土壤水的影响，在中密度林分中额外设置了 3 个雨养处理重复。具体处理包括 FI_{III}、FI_{I}、NI_{III}、NI_{II}和 NI_{I}。每个试验小区含 16～25 棵树，小区外围设有保护行。各处理林分基本概况见表 1，根据美国农部制分类法确定林地土壤物理性质，见表 2。滴灌管布设同文献 [25]，2017—2020 年对滴灌处理进行常规旱季滴灌。2021 年 4 月 25 日—7 月 05 日用张力计测定 FI_{III}和 FI_{I} 林分内滴头正下方 20 cm 的土壤水势，当林分平均土壤水势达到−20 kPa 时(田间持水量的 79%)开始滴灌，单次滴灌约 7 h，2021 年 FI_{III}和 FI_{I} 林分的灌溉量分别为 354.30 和 143.61 mm，2021 年试验地毛白杨生长季(4—10 月)总降水量为 784.1 mm。

1.2　根样采集及细根根长密度测定

2021 年 9 月上旬，在 5 个处理中分别选择 3 个小区，每个小区中选择一株平均标准木。利用土钻

表 1　2021 年不同密度和水分处理林分基本情况

Tab. 1　Basic information of stands under different densities and water treatments in 2021

处理 Treatment	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	林分蓄积量/($m^3 \cdot hm^{-2}$) Stand volume /($m^3 \cdot ha^{-1}$)	林地生产力/($m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) Forest land productivity /($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$)
FI_{III}	14.57 ± 0.55ab	15.65 ± 0.44a	119.1 ± 11.12a	36.61 ± 3.60a
FI_{I}	15.49 ± 0.50a	12.55 ± 0.15b	15.28 ± 1.15b	6.94 ± 0.30c
NI_{III}	12.92 ± 0.87b	15.33 ± 0.40a	92.32 ± 13.25b	25.58 ± 4.64b
NI_{II}	14.79 ± 0.81ab	14.78 ± 0.79a	58.74 ± 8.10c	21.20 ± 4.12b
NI_{I}	14.48 ± 0.74ab	12.47 ± 1.04b	13.38 ± 2.21c	5.76 ± 1.30c

注：NI.雨养；FI.滴灌。不同小写字母表示同列不同处理间差异显著($P < 0.05$)。Notes: NI, rainfed; FI, drip irrigation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

表 2 试验地的土壤物理性质

Tab. 2 Soil physical characteristic of the experimental site

土层 Soil layer/cm	颗粒组成 Soil particle size distribution/%			质地 Soil texture	土壤密度 Bulk density/(g·cm^{-3})
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay		
0 ~ 40	51.96	42.18	5.85	砂壤土 Sand loam	1.37
40 ~ 460	24.27	67.90	7.83	粉壤土 Silt loam	1.49
460 ~ 600	56.82	37.75	5.43	砂壤土 Sand loam	1.63

(内径 8 cm)在距树干 50 cm(位于 FI 处理中的湿润区)以及林分树行中央处(距树 150 cm 或 300 cm，位于 FI 处理中的干燥区)进行取样[25]，取样深度为 600 cm。使用长分别为 1、2、3、4、5 和 6 m 的长柄钢管土钻依次进行取土，土钻钻头部分为改良后的洛阳铲，在钢管柄上用白色涂改液每隔 10 cm 进行标记，用大锤将长柄砸入相应取土深度后，再将土钻拉出以获取相应土层的根样。其中 0 ~ 100 cm 深度每 10 cm 一层，100 ~ 600 cm 深度每 20 cm 一层，共 15 株样树，1 080 份根样。根据祝维等[26]方法，获得细根的根系长度(cm)数据。细根根长密度(m/m^3)为细根长度与相应土样体积的比值。

1.3 土壤含水量的测定及土壤储水量的计算

1.3.1 土壤含水量、颗粒组成和密度的测定

用土钻(内径 5 cm)分别在 2021 年的旱季(5 月初和 6 月)及雨季(8 月和 10 月)对 5 个林分进行取土，每次取样时，在各处理中均随机选取 4 棵试验树，在距树干 50 cm 以及林分树行中央处进行取土，取土深度为 600 cm，其中 0 ~ 100 cm 深度每 10 cm 一层，100 ~ 600 cm 深度每 20 cm 一层，利用烘干法测定土壤含水量(soil water content，SWC)。在 3 个不同密度林分的雨养处理中分别各选 3 个样点，利用土钻采样至 600 cm，土样每隔 20 cm 土层采样一次并混合均匀，土样风干后采用吸管法测定土壤颗粒组成。烘干法测定雨养条件下不同密度试验林的土壤密度(0 ~ 600 cm，每 20 cm 为一层)。

1.3.2 土壤储水量的计算

土壤储水量(W，mm)利用不同土层的土壤含水量、密度与对应土层深度运算得到，见公式(1)。

$$W = \sum_{i} 10 \times w_i \times \rho_i \times H_i \quad (1)$$

式中：w_i 为第 i 层的土壤含水量(%)；ρ_i 为第 i 层的土壤密度(g/cm³)，H_i 为第 i 层的土壤厚度(cm)。

此外，利用公式(2)计算不同处理林分在生长季内的土壤储水量变化量(ΔW，mm)。

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (2)$$

式中：W_2 和 W_1 分别为 2021 年生长季末期(10 月)和初期(5 月初)不同土层的土壤储水量。

1.4 土壤干层的界定

基于田间持水量所对应的土壤水势(−10 kPa)[27]，利用不同土层的颗粒组成及土壤密度在 HYDRUS 软件(Hydrus-1D，https://www.pc-progress.com)内进行计算得出试验林对应土层的田间持水量。将田间持水量的 60% 计算得到的土壤储水量作为形成土壤干层的土壤储水量阈值[21]。将 3 个密度林分平均储水量阈值作为试验林形成土壤干层的土壤储水量阈值。将 2021 年软件模拟的各土层田间持水量数据与 2019 年底试验林内的实测数据进行比较(图 1)发现，受植被和环境因素的影响，0 ~ 100 cm 土层内田间持水量模拟值整体低于实测值，但在 100 ~ 300 cm 土层内决定系数 R^2 为 0.85($P < 0.001$)，HYDRUS 软件模拟效果较为准确。

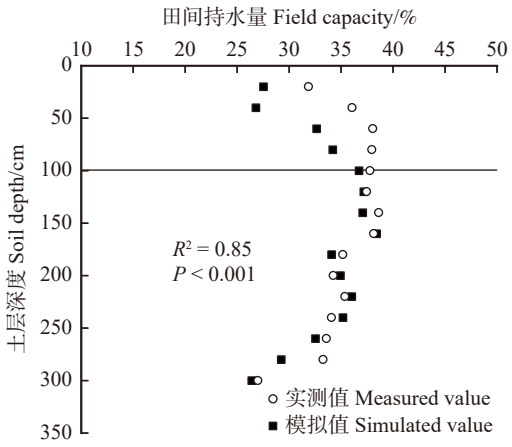


图 1 试验林不同深度土壤田间持水量实测值与模拟值比较

Fig. 1 Comparison of measured and simulated field capacity in experimental forest under different depths

1.5 数据分析

毛白杨为深根系树种，依据 Pierret 等[28]和 Maeght 等[29]的研究，100 cm 以下土层中的根系为深层根系，因此将杨树林分中 0 ~ 100 cm 定义为浅土层，而 100 ~ 600 cm 土层为深土层[30]。此外，研究表明，杨树细根主要分布于 0 ~ 30 cm 土层[31]，且该土层易受太阳辐射和降水等因素的影响，因此将浅土层划分为 0 ~ 30 cm(表土层)和 30 ~ 100 cm(中土层)。为了研究不同处理对毛白杨林分深层土壤水分的影响，采用变异系数法将 100 ~ 600 cm 土层从上到下依

次划分为 3 层: 100 ~ 200 cm(活跃层)、200 ~ 400 cm(次活跃层)和 400 ~ 600 cm(相对稳定层)[32]。

各处理林分土壤含水量(各处理土壤水分的水平分布特征除外)和土壤储水量均由不同距树距离处的数值平均得到。文中未涉及到时间动态的土壤含水量数据均为各时期(5、6、8 和 10 月)的平均值。采用 Shapiro-Wilk 检验数据是否服从正态分布,采用对数转化法转化不满足要求的数据,转化后仍不满足要求则进行非参数检验。使用独立样本 *T* 检验分析同一土层内不同距树距离和不同时期的土壤含水量差异。使用一般线性模型单变量分析对不同处理和土层的细根根长密度、土壤含水量和储水量进行方差分析,在 $\alpha = 0.05$ 时使用 Tukey's HSD 检验进行多重比较,并额外对不同土层内 FI_{III}、FI_{I}、NI_{III}和 NI_{I} 处理进行密度和水分管理交互作用的双因素方差分析。所有数据整理和统计分析在 Excel 2016 和 SPSS 27 软件中进行。所有绘图在软件 Origin2022b 中进行。

2　结果与分析

2.1　毛白杨细根分布格局

中密度(NI_{II})和低密度林分(FI_{I} 和 NI_{I})在浅土层中(0 ~ 100 cm)距树 50 cm 处细根根长密度高于树行中央处; 高密度林分(FI_{III}和 NI_{III})在不同土层中细根根长密度分布差异小于其他密度(图 2)。深土层(100 ~ 600 cm)中各处理细根分布受距树距离的影响不明显(图 2)。5 种细根根长密度峰值出现在 0 ~ 30 cm 中(表 3),在土壤剖面内随土层深度增加而减少,且 FI_{III}、FI_{I} 和 NI_{II}细根根长密度在 0 ~ 30 cm 土层显著高于 200 ~ 400 cm 和 400 ~ 600 cm 土层。雨养条件下,NI_{III}细根根长密度在 100 ~ 200 cm 土层为 1 223.86 m/m^3,显著高于 NI_{I}($P < 0.05$)。

2.2　毛白杨林分土壤水分的二维空间分布特征

所有林分中,距树不同距离的土壤含水量垂直分布特征相似(图 3)。SWC 在 0 ~ 260 cm 土层中随深度增加而增大,但在 260 cm 以下土层中呈波动变化,并在 240 ~ 260 cm(SWC 值为 26.37% ~ 30.56%)和 360 ~ 400 cm(SWC 值为 22.79% ~ 33.00%)深度出现峰值。密度和水分管理均能对土壤水分的水平分布特征产生影响(图 3)。雨养条件下,NI_{III}中不同距树距离的 SWC 在各土层中相近; NI_{II} 和 NI_{I} 距树 50 cm 处 SWC 低于树行中央处,但仅在 NI_{II}中 0 ~ 30 cm、30 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm 土层具有显著差异($P < 0.05$)。滴灌条件下,0~100 cm 范围内,距树越近土壤 SWC 越高($P < 0.05$),但该现象在更深土层中未出现($P > 0.05$)。

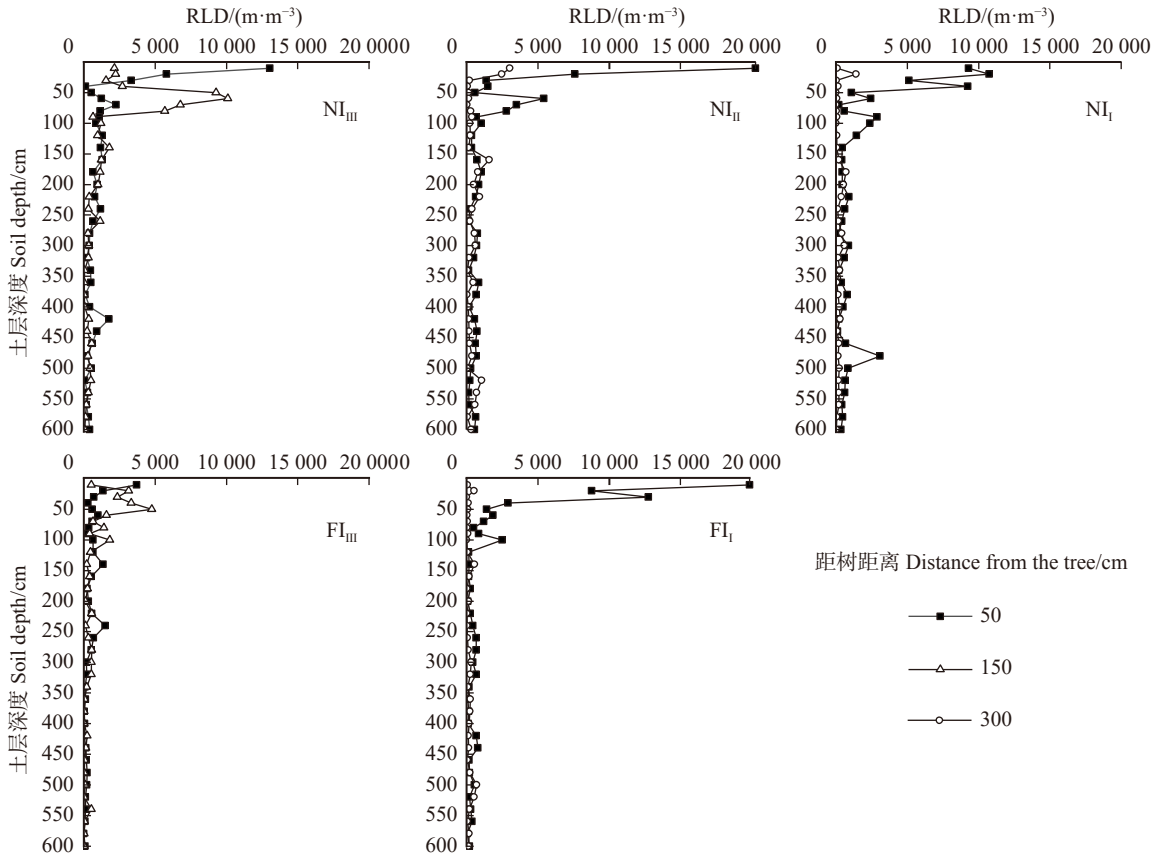


图 2　不同密度和水分管理下细根根长密度的二维空间分布

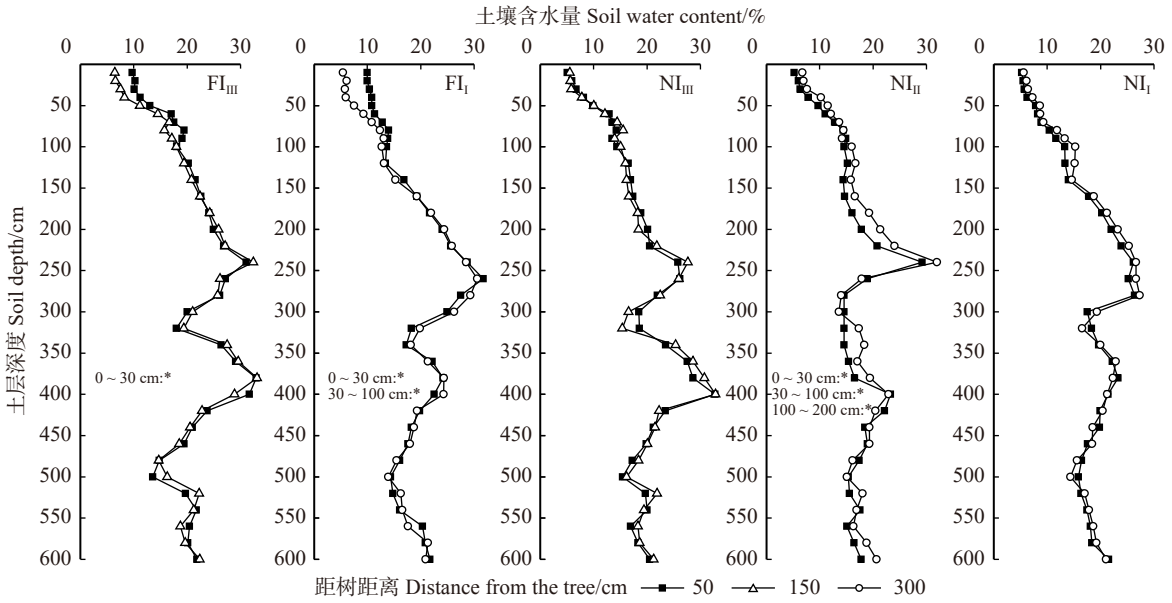
Fig. 2　Two-dimensional spatial distribution of root length density (RLD) under different densities and water treatments

表 3 不同密度和水分管理下各土层的平均细根根长密度

Tab. 3 Average RLD in each soil layer under different densities and water treatments m/m^3

处理 Treatment	土层 Soil layer/cm				
	0 ~ 30	30 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 600
FI_{III}	1 971.67 ± 456.97Aa	1 264.15 ± 447.82Aab	451.71 ± 176.84Bb	346.52 ± 118.01Ab	121.12 ± 16.11Ab
FI_{I}	6 997.50 ± 866.28Aa	836.25 ± 165.36Ab	171.17 ± 46.57Bb	270.52 ± 26.22Ab	298.40 ± 70.30Ab
NI_{III}	4 686.82 ± 331.50Aa	3 119.27 ± 2 065.69Aa	1 223.86 ± 94.34Aa	404.95 ± 47.77Aa	415.24 ± 45.14Aa
NI_{II}	5 828.61 ± 723.29Aa	1 199.00 ± 199.47Ab	673.68 ± 51.98ABb	422.52 ± 75.87Ab	410.43 ± 93.22Ab
NI_{I}	4 452.10 ± 3 850.95Aa	1 365.34 ± 580.03Aa	473.06 ± 191.01Ba	398.97 ± 124.32Aa	188.02 ± 17.11Aa

注：不同大写字母表示同列不同处理间差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同行不同土层间差异显著（$P < 0.05$）。Notes: different uppercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$), and different lowercase letters in the same row indicate significant differences among varied soil layers ($P < 0.05$).



代表该土层深度不同水平距树距离处土壤含水量差异显著（$P < 0.05$）。 indicates significant differences ($P < 0.05$) in soil water content at different horizontal distances from tree base in the same soil layer.

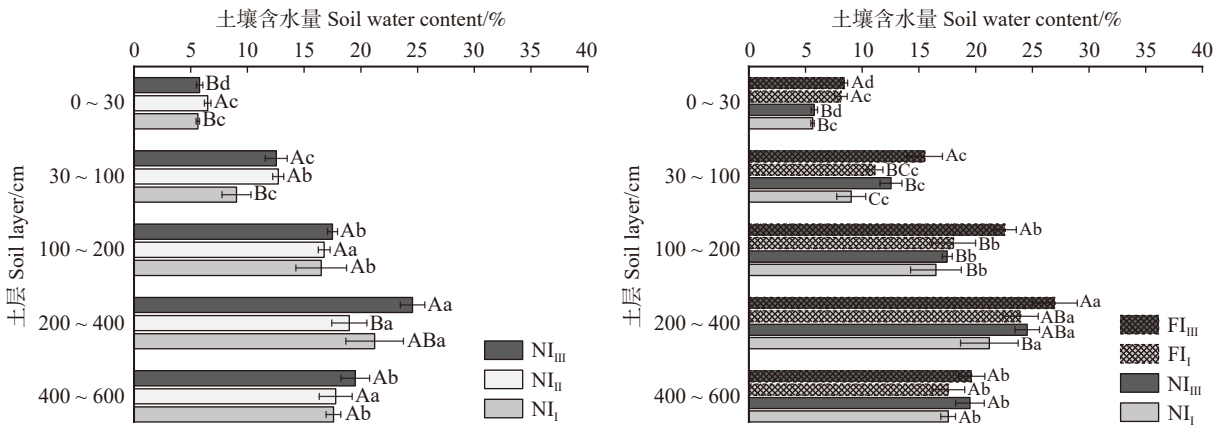
图 3 不同密度和水分管理下土壤含水量的二维空间分布

Fig. 3 Two dimensional spatial distribution of soil water content under different densities and water treatments

各处理土壤含水量均随土层深度增加而先增后减，在 200 ~ 400 cm 土层达到峰值；浅土层（0 ~ 100 cm）土壤含水量（5.62% ~ 15.53%）显著低于深土层（100 ~ 600 cm）土壤含水量（16.50% ~ 27.00%）（$P < 0.05$）（图 4）。雨养条件下，浅土层中，NI_{II} 的 SWC 在各密度林分间最高，分别显著高于 NI_{III} 和 NI_{I} 处理 15.28% 和 40.71%；而在深土层中，NI_{III} 的 SWC 最高，且在 200 ~ 400 cm 土层显著高于 NI_{II}。此外，密度（高密度和低密度）和水分管理（雨养和滴灌）交互作用对各土层 SWC 影响均不显著。高密度林分中，滴灌能显著提高 0 ~ 30 cm、30 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm 土层的含水量；然而，低密度林分中，滴灌对土壤水分提升作用仅出现在 0 ~ 30 cm 土层。

2.3 毛白杨林分土壤水分时间分布特征

相同水分管理下各处理的土壤含水量随时间动态变化相似，但变化幅度不同（图 5）。雨养条件下，0 ~ 30 cm 土层中各处理 SWC 在 5、6 和 8 月接近（4.29% ~ 5.10%）；在 30 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 和 200 ~ 400 cm 土层中，5 至 6 月各处理 SWC 均逐渐下降，随着雨季来临（8 月），各处理 SWC 整体提高，并在 10 月达到最高（图 5a）。滴灌处理在 30 cm 以下土层中的 SWC 最大值也出现在 10 月。与雨养处理相比，滴灌处理在 0 ~ 30 cm 土层中 SWC 随时间变化的幅度更大；但在 30 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 和 200 ~ 400 cm 土层中，滴灌处理 SWC 随时间变化



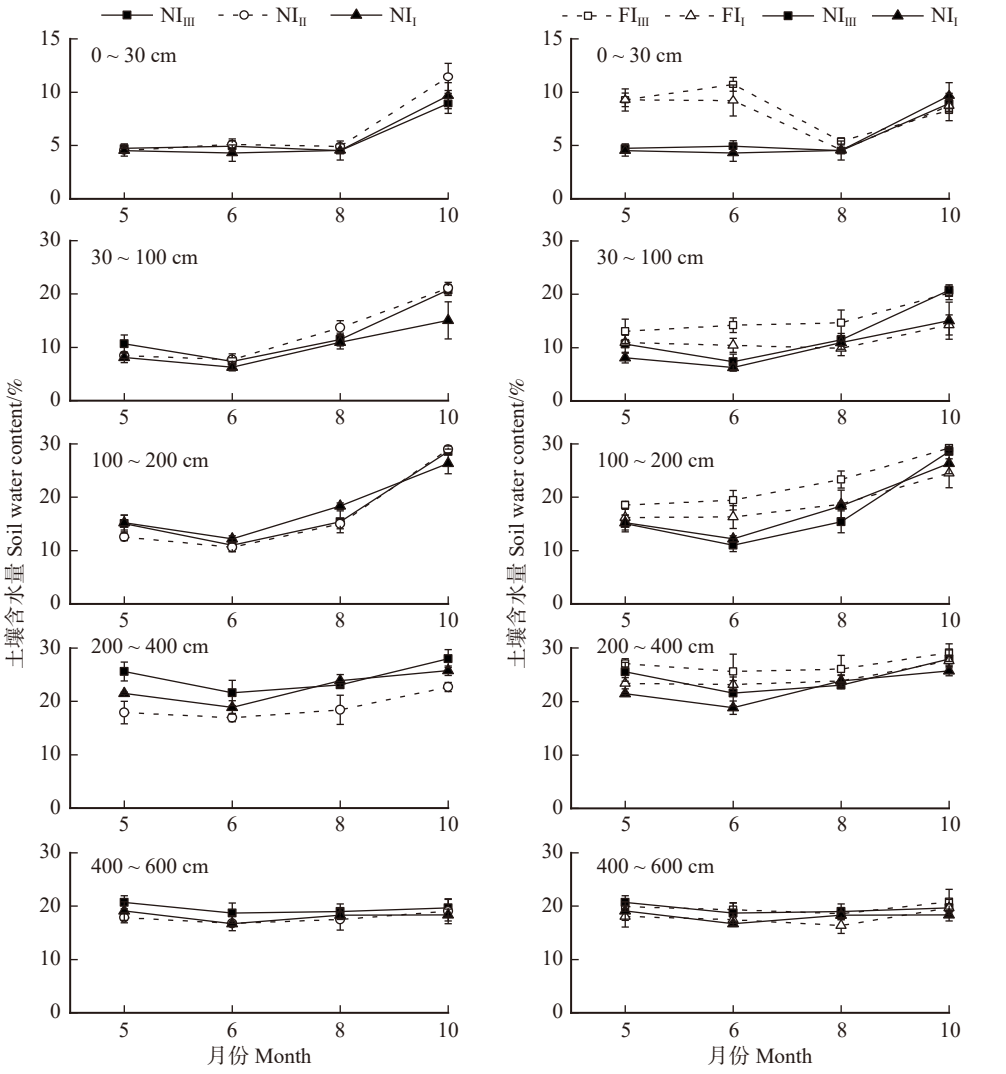
a 雨养条件下不同密度林分
Stand of different densities under rainfed treatment

b 滴灌和密度交互作用
Drip irrigation and density interaction stand

不同小写字母代表不同土层 SWC 差异显著($P < 0.05$)，不同大写字母代表不同处理 SWC 差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in SWC among soil layers($P < 0.05$), and uppercase letters indicate significant differences in SWC among treatments ($P < 0.05$).

图 4　不同密度和水分管理中各土层的平均土壤含水量

Fig. 4　Average soil water content in each soil layer under different densities and water treatments



a 雨养条件下不同密度林分
Different density stands under rainfed condition

b 水分管理和密度交互作用林分
Water treatments and different densities interaction stand

图 5　2021 年 5—10 月不同密度和水分管理各土层土壤含水量时间动态变化

Fig. 5　Temporal dynamics of soil water content in each soil layer under different densities and water treatments from May to October in 2021

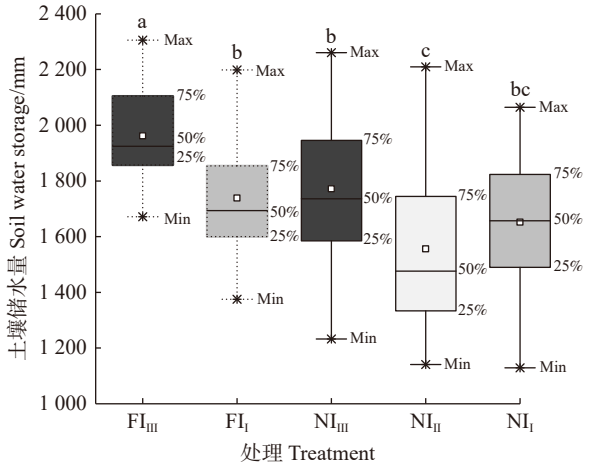
更为平缓(图 5b)。

2.4 毛白杨林分土壤储水量及其变化

在不同水分管理下，密度均显著影响 0 ~ 600 cm 土层内的储水量(W)($P < 0.05$)，受植被覆盖等因素的影响，高密度林分内的储水量最大(FI_{III}和 NI_{III}分别为 1 957.99 和 1 772.53 mm)，NI_{II}处理 W 最低，为 1 547.25 mm(图 6)。滴灌仅能显著提高高密度林分土壤储水量($P < 0.05$)。

雨养条件下，NI_{III}和 NI_{I}均在 460 ~ 580 cm 或 500 ~ 600 cm 出现连续土壤水净消耗(ΔW 为负)，而 NI_{II}处理仅在 500 cm 处出现 6.56 mm 的土壤水净消耗。与雨养处理相比，滴灌处理土壤储水量在深土层中出现负增长的土层深度更深，且土壤水净消耗更少(图 7)。

对比不同土层的 ΔW 可以看出，所有林分中的土壤水补偿量均在 100 ~ 200 cm 土层中达到最大。不同林分间土壤水分补偿量在浅土层(0 ~ 100 cm)和深土层(100 ~ 600 cm)中截然不同(图 7)。浅土层内，高密度林分中的土壤水分补偿量在滴灌和雨养条件下分别高于低密度林分 23.93% 和 52.93%，但在雨养条件下低于中密度林分 23.49%。深土层内，雨养条件下中密度林分的土壤水分补偿量仍最大(403.12 mm)，但高密度林分(215.87 mm)低于低密度林分(248.78 mm)，且该现象在滴灌条件下也存在。此外，在不同造林密度下，滴灌降低了浅土层中的水分补偿，但增加了深土层中的水分补偿。



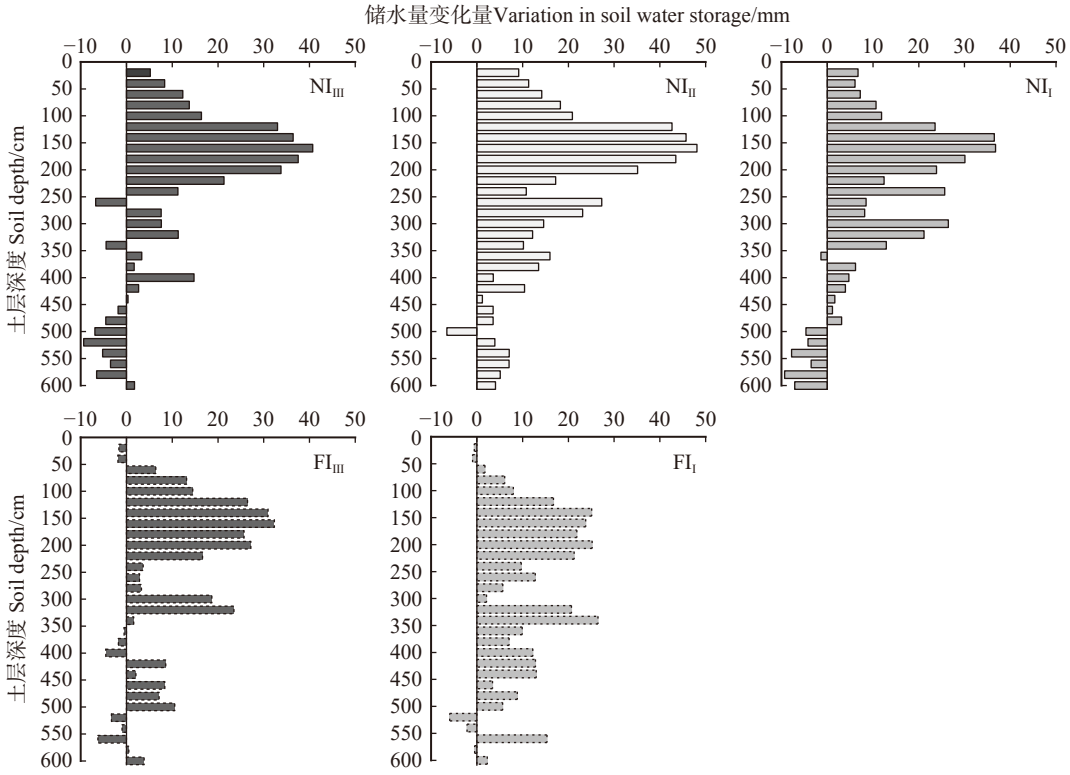
不同小写字母代表不同处理土壤储水量差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in soil water storage among treatments ($P < 0.05$).

图 6 不同密度和水分管理土壤储水量

Fig. 6 Soil water storage under different densities and water treatments

2.5 各处理土壤干层现象

雨养条件下不同林分仅在 0 ~ 220 cm 土层内均出现短暂性的土壤干层现象，但滴灌和降雨能缓解或消除该现象，其中 FI_{III}、FI_{I}、NI_{III}、NI_{II}和 NI_{I}处理 6 月份出现土壤干层现象的土层深度最深，分别为 120、160、220、220 和 180 cm(图 8)。



土层深度 0 ~ 6 m 每 20 cm 采集一组数据。Data were collected every 20 cm at soil 0 to 6 m depth.

图 7 2021 年 5—10 月不同密度和水分管理下土壤储水量变化量

Fig. 7 Variations of soil water storage variation under different densities and water treatments from May to October in 2021

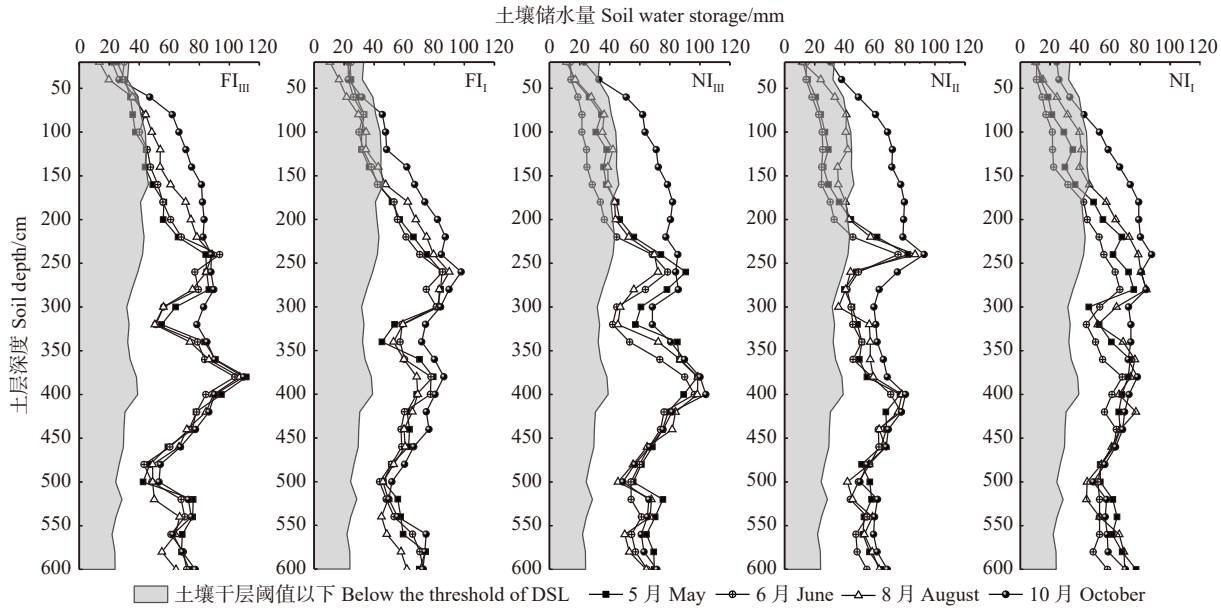


图 8　不同密度和水分管理下不同土层深度内土壤干层现象

Fig. 8　Phenomenon of dry soil layer (DSL) in different soil depths under different densities and water treatments

3　讨　　论

3.1　密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分分布特征

一般来说，林分根系和冠层在高密度林分水平空间上的分布更为均匀(图 2)[31,33]，因此距树 50 cm 与树行中央处的土壤含水量在 NI_{III}处理中无明显差异；而 NI_{II}和 NI_{I}林分在 0 ~ 100 cm 剖面内各土层均出现距离树干越远，细根根长密度越低(图 2)，土壤含水量越高的现象(图 3)。FI 能够通过增加水分输入的形式使距树 50 cm 处 0 ~ 160 cm 土层 SWC 高于行中央位置(图 3)，但不同林分出现的 SWC 水平空间差异均会在雨季到来即停灌之后逐渐消失。试验林 10 月为雨季结束时期，大量降水持续积累，同时 10 月也是毛白杨林分生长季末期，林分需水量降低，故此时各处理林分的土壤含水量最高(图 5)；毛白杨的生长及蒸腾耗水量高峰出现在每年的 5—8 月份[31]，这一时期试验地尚未进入雨季后期，因此雨养条件下不同密度林分在雨季前(6 月)最干燥，而在旱季(4—7 月)进行滴灌充分灌溉能明显缓解浅土层根区土壤水分的大量消耗[25]，使得滴灌处理在 0 ~ 30 cm 土层中土壤含水量的最低值出现在 8 月(图 5)。土层越靠近表层，其水分动态变化受根系分布、降水和太阳辐射的影响越大，因此其随时间变化幅度越大；反之，越靠近深层 SWC 主要受水分输入的补给及根系吸水的影响，随时间变化幅度越小。本研究在 30 cm 以下土层中，随土层深度的增加，5 种处理土壤含水量随时间变化越平缓。此外，灌溉期间相同密度林分中滴灌处理在 30~ 400 cm 内各土层 SWC 随时间变化幅度更平缓(图 5)，即滴灌充分灌溉也能够减少毛白杨林分土壤含水量的时间变异性。

3.2　密度和水分管理下毛白杨林分储水量及土壤干层现象

受低林分郁闭度和高林下植被生物量的影响，浅土层的土壤含水量在低密度林分下最低(图 4)，灌溉能给林分根系聚集区提供大量有效水，但是浅层土壤水分得到补偿后的林分蒸散也会随之增加。尽管低密度林分提高了灌溉次数，滴灌对低密度林分土壤储水量及 30 cm 以下土层的土壤含水量的提高均未达显著水平；而滴灌显著提高了高密度林分 0 ~ 30 cm、30 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm 土层土壤含水量及林分总土壤储水量，换而言之滴灌仅显著改善了高密度林分的土壤水分条件(图 4, 图 6)。本研究中相同水分管理下高密度林分具有更好的深层土壤水分状况(图 4)，这与不少研究者的结论相反，可能是因为其研究区域大多为降水量与地下水位较低的干旱/半干旱地区，试验林林分密度更大且林龄高，因而对深层土壤水分过度利用现象更为严重[34–35]，而本试验地生长季降水量高达 784.1 mm，年均地下水位深 7.52 m，5 年生林分属于毛白杨大径材培育周期中的幼林期，仅高密度林分达到完全郁闭，因此密度没有引起土壤水分的规律性变化。相反，高密度林分植被在人工林培育前期可能通过减少林地蒸发，抑制林下植被生长和改善土壤理化性质等提升土层的蓄水能力，从而有着更好的土壤水分条件[36–37]。同时，NI_{II}处理具有较高的林地生产力(高林分蒸腾量)和较低的林分郁闭度(高土壤蒸发量)，使浅层土壤水分有效性持续降低，为了满足

生长需求，林木会将更多的细根生长转移到更深（200 ~ 400 cm 和 400 ~ 600 cm）的土壤深度（表 3），加强对深层土壤水分的利用和消耗[38]，因此，NI_{II}在 5 种林分中土壤储水量最低。

本研究发现，雨养条件下，NI_{II}的浅土层 100~600 cm 储水量增量最大，而 NI_{III}最低（图 7），这可能是因为 NI_{III}处理林地生产力最高，在生长季内的林木耗水需求也最高；同时，不同密度林分中受林分穿透雨和树干径流等对降水再分配过程的影响各不相同，NI_{II}和 NI_{I}对整个雨季的降水更为敏感，使得 NI_{III}土壤水分净消耗层出现的更早。滴灌能够提高不同密度林分内土壤储水量，尽管较高的初始水分条件使得浅土层的土壤储水量变化量低于雨养处理，但是研究表明滴灌可以通过增加浅层土壤水分的有效性改善整个剖面的水文连通性，从而提高林分的水分补偿深度[16,39]，因此滴灌处理深土层的土壤储水量变化量高于雨养处理（图 7）。此外，该研究 0~200 cm 土壤含水量 NI_{III}低于 FI_{III}（图 4），NI_{III}处理土壤水分减少，刺激了林分细根生长以提高水资源吸收（表 3），进而加深了 NI_{III}处理深层土壤储水量的消耗（图 7）。

与 Liu 等[16]发现 5 年生毛白杨林分 0 ~ 2 m 土层发生季节性干旱类似，本试验雨养条件下不同密度林分均在 0 ~ 200 cm 土层内出现了短时期的土壤干层现象，且该现象能通过降雨或灌溉得到消除或缓解（图 6）。不同的是，Liu 等[16]的研究结果中深层土壤（2 ~ 4 m 和 5 ~ 6 m）土壤储水量在春末和夏季会临近甚至低于土壤干层阈值，而本研究中没有出现过度消耗深层土壤水而造成深层土壤干层现象的趋势，这可能有以下几点原因：（1）林分环境主要受密度的影响，高密度的林分具有高林分蒸腾和林冠蒸发，而本试验林分密度较低，林地水分的蒸散量远低于降水量，土壤水分的供求关系平衡；（2）土壤干层现象的形成与地下水位有着直接的关系，Liu 等的研究林分中地下水位达 9 m 深，深水位会减少地下水对深层土壤水的补偿深度，使林分根系进一步下扎“觅食”，从而导致了深层土壤水的过度消耗[30]；（3）土壤物理特性决定了土壤的持水能力，本研究中砂壤土出现在 0 ~ 40 cm 且 40 ~ 460 cm 为粉壤土（表 2），而 Liu 等[16]的研究中 0 ~ 140 cm 均为砂壤土，相比砂壤土，粉壤土具有更好的保水性能，因此土壤水分受环境因素影响的变异程度也更低。

3.3 毛白杨人工用材林培育技术优化

一般来说，林分随着林龄和密度的增加，林木主要耗水土层也将不断下移[40]。研究发现杨树造林后 2 ~ 4 年是其快速生长期，且随林分密度的增加杨树人工林的快速生长期也随之提前，高密度林分对林木生长的促进作用会消失，甚至有抑制作用[41]。尽管该研究发现高密度林分具有最高的深层土壤储水量，这可能是因为造林前期高密度林分密集的树木覆盖降低了日最高土壤温度和土壤蒸发量[42]，林分内聚集的根系使得茎干液流和穿透雨更顺利地对土壤深层水进行补偿[43]；但造林密度越大，林分叶面积指数显著提高，林冠截留量水分蒸发越多，林分蒸腾耗水量也越大[44]。本研究虽未发现不同造林密度中毛白杨幼龄林分（5 年生）出现不可逆的土壤水分亏缺现象，但 NI_{III}处理的可恢复性土壤干层已经深至 220 cm（图 8），且试验年 NI_{III}处理在 260 cm、340 cm 和 460 ~ 580 cm 土层已经出现了土壤储水净消耗（负增长）（图 7）。此外，低密度林分旱季灌溉对林地生产力和林分土壤储水量均无显著影响（表 1，图 6），林地土壤水分大量被蒸发，林地资源在可持续发展角度下不能最大限度的被利用。

结合不同造林密度中毛白杨幼林林分累积生长量现状，本文建议‘北林 1 号’毛白杨以 3 m × 3 m 的初植密度进行造林以求在杨树人工林快速生长期提高林分的蓄积量和林木干形条件，并改善其深层土壤储水量。研究表明旱季对林分进行充分灌溉可以显著提高高密度林分林地生产力和土壤储水量，降低林地可恢复性土壤干层深度，并提高降雨对林分的深层补水，因此必要时可在旱季期间（4—6 月）辅以多频率充分灌溉措施来缓解毛白杨人工林林分生长高峰期的需水矛盾。本毛白杨人工林试验林分培育目标为大径阶工业原料林，培育周期超过 5 年，因此待林分出现密度效应和深层土壤水分净消耗后，可通过间伐措施来减少深层土壤水分的消耗，在保证良好土壤水分维持的同时提高人工林林地的生产力。

4 结 论

（1）各处理土壤含水量在 0 ~ 240 cm 剖面中随土壤深度增加而增大，并在 240 ~ 260 cm 和 360 ~ 400 cm 出现两个峰值，而 400 ~ 600 cm 变化平缓。雨养条件下，受林分根冠分布的影响，浅土层（0 ~ 100 cm）中，NI_{III}处理 SWC 水平分布较为均匀，NI_{II}和 NI_{I}中距树 50 cm 处 SWC 低于树行中央处，而受人为水分输入的影响，FI_{III}和 FI_{I}在浅土层出现距树 50 cm 处 SWC 高于树行中央处的现象。

（2）不同密度条件下，NI_{III}处理土壤水分条件最好，NI_{II}最差，但 NI_{II}在雨季末期储水量变化量最高。不同水分管理条件下，NI 处理（尤其是 NI_{III}）通过增加各土层细根生长加深对土壤水分的吸收进而

引起了 NI_{III}处理开始出现深层土壤水分消耗的现象; 而 FI 不仅能够提高不同密度林分 0 ~ 30 cm 土层 SWC 以及高密度林分土壤储水量($P < 0.05$), 缓解了毛白杨人工林 5 和 6 月生长旺盛期的水分需求压力, 此外, FI 还能够增加不同密度林分深土层的储水量增量。

(3)不同造林密度条件下的毛白杨幼龄林仅在 0 ~ 220 cm 土层内出现可恢复性土壤干层现象, 且滴灌和降雨均能缓解或消除不同密度林分出现的可恢复性土壤干层现象。

(4)建议在华北黄泛平原大径阶毛白杨工业原料林培育过程中, 以 3 m × 3 m 密度造林且于旱季(4—6 月)辅以多频率滴灌充分灌溉, 在杨树快速生长期(2 ~ 4 年)促进林分生长, 并改善深层土壤水分条件。在林分出现密度效应及深层土壤水消耗后, 可通过间伐至密度为 3 m × 6 m 等措施, 实现在维持良好土壤水分状况的同时提高杨树人工林林地生产力的培育目标。

参　考　文　献

[1] Wilske B, Lu N, Wei L, et al. Poplar plantation has the potential to alter the water balance in semiarid Inner Mongolia[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2762−2770.

[2] Wang Y, Yang J, Chen Y, et al. The spatiotemporal response of soil moisture to precipitation and temperature changes in an arid region, China[J/OL]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 468[2023−12−08]. https://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/468.

[3] Zhang C, Wang Y, Jia X, et al. Variations in capacity and storage of plant-available water in deep profiles along a revegetation and precipitation gradient[J/OL]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124401[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419311369.

[4] Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point[J]. Science, 2020, 370: 1095−1099.

[5] Qiao L, Zuo Z, Xiao D, et al. Detection, attribution, and future response of global soil moisture in summer[J/OL]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 745185[2023−12−08]. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.745185/full.

[6] Anderegg L D L, Anderegg W R L, Abatzoglou J, et al. Drought characteristics role in widespread aspen forest mortality across Colorado, USA[J]. Global Change Biology, 2013, 19(5): 1526−1537.

[7] Yang F, Feng Z, Wang H, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 234−235: 106−114.

[8] Jian S, Zhao C, Fang S, 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.

[9] Di N, Xi B, Clothier B, et al. Diurnal and nocturnal transpiration behaviors and their responses to groundwater-table fluctuations and meteorological factors of *Populus tomentosa* in the North China Plain[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 445−456.

[10] Yu B, Liu G, Liu Q, et al. Seasonal variation of deep soil moisture under different land uses on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1179−1189.

[11] 邱德勋, 赵佰礼, 尹殿胜, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2021, 19(3): 72−80.
Qiu D X, Zhao B L, Yin D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 72−80.

[12] Gao Z, Hu X, Li X. Changes in soil water retention and content during shrub encroachment process in Inner Mongolia, northern China[J/OL]. Catena, 2021, 206: 105528[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221003866.

[13] 孔凌霄, 毕华兴, 周巧稚, 等. 晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 163−169.
Kong L X, Bi H X, Zhou Q Z, et al. Dynamics of soil moisture in different stand sites of *Robinia pseudoacacia* forestland in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 163−169.

[14] Liang H, Xue Y, Shi J, et al. Soil moisture dynamics under *Caragana korshinskii* shrubs of different ages in Wuzhai County on the Loess Plateau, China[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2018, 109(3−4): 387−396.

[15] Andrews C M, D'Amato A W, Fraver S, et al. Low stand density moderates growth declines during hot droughts in semi-arid forests[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(6): 1089−1102.

[16] Liu J, Li D, Fernández J, 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/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 320: 108958[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192322001484.

[17] 张建龙. 中国森林资源报告 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.

Zhang J L. National forestry and grassland administration[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.

[18] 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.

[19] 朱炜歆, 牛俊杰, 刘庚, 等. 植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 152−156.
Zhu W X, Niu J J, Liu G, et al. The influence of vegetation types on the soil moistures during growing seasons in loess area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 152−156.

[20] Wang Y, 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.

[21] Shao M, Wang Y, Xia Y, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review[J/OL]. Vadose Zone Journal, 2018, 17: 170077[2022−02−12]. https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0077.

[22] Ji Y, Zhou G, Li Z, et al. Triggers of widespread dieback and mortality of poplar (*Populus* spp.) plantations across northern China[J/OL]. Journal of Arid Environments, 2020, 174: 104076 [2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196319301466.

[23] Liu Z, Jia G, Yu X, et al. Morphological trait as a determining factor for *Populus simonii* Carr. to survive from drought in semi-arid region[J/OL]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106943[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377421002080.

[24] Jia G, Chen L, Yu X, et al. Soil water stress overrides the benefit of water-use efficiency from rising CO_2 and temperature in a cold semi-arid poplar plantation[J]. Plant, Cell & Environment, 2022, 45(4): 1172−1186.

[25] 邹松言, 李豆豆, 汪金松, 等. 毛白杨幼林细根对梯度土壤水分的响应 [J]. 林业科学, 2019, 55(10): 124−137.
Zou S Y, Li D D, Wang J S, et al. Response of fine roots to soil moisture of different gradients in young *Populus tomentosa* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 124−137.

[26] 祝维, 周欧, 孙一鸣, 等. 混交林内毛白杨和刺槐根系吸水的动态生态位划分 [J]. 植物生态学报, 2023, 47(3): 389−403.
Zhu W, Zhou O, Sun Y M, et al. Dynamic niche partitioning in root water uptake of *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* in mixed forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 389−403.

[27] Hillel D. Introduction to environmental soil physic [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.

[28] Pierret A, Maeght J, Clément C, et al. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research.[J]. Annals of Botany, 2016, 118(4): 621−635.

[29] Maeght J, Rewald B, Pierret A. How to study deep roots-and why it matters[J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 299[2023−12−08]. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00299/full.

[30] 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.

[31] 贺曰林. 毛白杨 S86 人工林根区滴灌施肥及水氮调控机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
He Y L. Research on the drip irrigation-nitrogen fertigation and mechanism of water-nitrogen regulation in root zone for *Populus tomentosa* S86 plantation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[32] 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.
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.

[33] Postma J A, Hecht V L, Hikosaka K, et al. Dividing the pie: a quantitative review on plant density responses[J]. Plant, Cell & Environment, 2020, 44(4): 1072−1094.

[34] Wang D, Wang L. Soil water dynamics in apple orchards of different ages on the Loess Plateau of China[J/OL]. Vadose Zone Journal, 2018, 17:180049[2022−02−12]. https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0049.

[35] Nan W, Ta F, Meng X, et al. Effects of age and density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on soil moisture in the semiarid Mu Us Dunefield, northern China[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2020, 473: 118313[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720310823.

[36] Nan W, Liu S, Yang S, et al. Changes of Sabina vulgaris growth and of soil moisture in natural stands and plantations in semi-arid northern China[J/OL]. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e859[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989419304299.

[37] 杜满义, 封焕英, 裴顺祥, 等. 晋南不同密度油松人工林土壤水分的物理特性 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 72−76.
Du M Y, Feng H Y, Pei S X, et al. Soil hydro-physical properties in *Pinus tabuliformis* plantations with different stand densities in

southern Shanxi[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 72−76.

[38] Zou S, Li 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(1−2): 165−184.

[39] Good S P, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes[J]. Science, 2015, 349: 175−177.

[40] Huang Z, Liu Y, Qiu K, et al. Soil-water deficit in deep soil layers results from the planted forest in a semi-arid sandy land: implications for sustainable agroforestry water management[J/OL]. Agricultural Water Management. 2021, 254: 106985[2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837742100250X.

[41] 王利宝, 张志毅, 康向阳, 等. 造林密度对白杨杂种无性系初期生长性状的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(5): 25−30.
Wang L B, Zhang Z Y, Kang X Y, et al. Effects of planting density on the early growth traits of white poplar hybrid clones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(5): 25−30.

[42] von Arx G, Pannatier E G, Thimonier A, et al. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate[J]. The Journal of Ecology, 2013, 101(5): 1201−1213.

[43] Bayala J, Prieto I. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems[J]. Plant and Soil, 2020, 453(1−2): 17−28.

[44] Hakamada R E, Hubbard R M, Moreira G G, et al. Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2020, 466: 118125 [2023−12−08]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112720301109.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）