



典型干旱区城市基调树种白榆年内径向生长及其对气象因子的响应

闫梦瑶 孙桂丽 秦莉 刘卫平 杨巧玲 阿尔曼·阿布拉 谢帆 张瑞波

Intra-annual radial growth of *Ulmus pumila*, a fundamental urban tree species in typical arid regions, and its response to meteorological factors

Yan Mengyao, Sun Guili, Qin Li, Liu Weiping, Yang Qiaoling, A'erman Abula, Xie Fan, Zhang Rui bo

引用本文:

闫梦瑶, 孙桂丽, 秦莉, 刘卫平, 杨巧玲, 阿尔曼·阿布拉, 谢帆, 张瑞波. 典型干旱区城市基调树种白榆年内径向生长及其对气象因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):143–155. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260185

Yan Mengyao, Sun Guili, Qin Li, Liu Weiping, Yang Qiaoling, A'erman Abula, Xie Fan, Zhang Rui bo. Intra-annual radial growth of *Ulmus pumila*, a fundamental urban tree species in typical arid regions, and its response to meteorological factors[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):143–155. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260185

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260185>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应

Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 18–27. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220373>

毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系

Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(6): 10–18. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240398>

寒温带典型森林类型生长季土壤活性有机碳动态特征及影响因素

Seasonal dynamics characteristics and influencing factors of soil labile organic carbon in typical boreal forest types during the growing season

北京林业大学学报, 2026, 48(2): 93–102. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250159>

气候变化对北京近远郊区油松径向生长影响的比较研究

Comparative study on the effects of climate change on radial growth of *Pinus tabulaeformis* in near and outer suburbs of Beijing

北京林业大学学报, 2022, 44(1): 19–28. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200329>

长白山云冷杉针阔混交林3种常见树种径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of three common tree species to climate change in a spruce–fir mixed stand in Changbai Mountain of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 1–10. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210479>

晋西黄土区油松人工林径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of *Pinus tabulaeformis* plantations to climate change in loess area of western Shanxi Province of northern China

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260185

典型干旱区城市基调树种白榆年内径向生长 及其对气象因子的响应

闫梦瑶^{1,2} 孙桂丽¹ 秦 莉² 刘卫平³ 杨巧玲^{1,2}
阿尔曼·阿布拉² 谢 帆^{1,2} 张瑞波²

(1. 新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆树木年轮生态重点实验室/
中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆气象信息中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:【目的】乌鲁木齐市地处典型干旱区, 城市树木生长易受水分亏缺、高温、大气干旱等因素影响。为明确干旱区城市基调树种年内径向生长动态特征及其与气象因子的关系, 以乌鲁木齐市白榆为对象, 分析其日尺度、季节尺度径向生长规律及主要气象驱动因子, 为干旱区城市绿化管理与生态规划提供科学依据。【方法】利用高精度树木径向生长测量仪对乌鲁木齐市区内 4 株白榆样木开展为期 3 年(2019—2021 年)的径向生长监测, 分析其径向生长日周期的昼夜变化和季节动态规律。结合气象站同步观测的气温、降水量、饱和水汽压差及不同土层地温等气象因子数据, 采用最大值法、温度阈值法、Gompertz 生长模型、Pearson 相关分析和滑动相关分析, 确定白榆生长季起止日和生长速率峰值日, 计算生长启动的平均生长速率, 并识别影响其径向生长的主要气象因子。【结果】(1)确定乌鲁木齐市白榆的生长季为 4 月上旬至 11 月上旬(DOY103—309 左右), 白榆生长速率峰值日集中于 5 月中旬(DOY 约 135), 平均生长启动速率约为 10 $\mu\text{m}/\text{d}$; (2)白榆径向生长主要发生在夜间 21:00 至 03:00, 并在 02:00 左右达到生长峰值, 具有明显的昼夜节律性与季节周期性; (3)相关性分析表明, 白榆径向生长与降水量和相对湿度呈显著正相关, 与饱和水汽压差和日照时数呈显著负相关, 水分条件是限制其径向生长的主要因素。滑动相关分析显示, 生长季前期径向生长主要受气温和地温驱动, 盛夏至秋季逐渐转为受降水和相对湿度主导。【结论】乌鲁木齐市白榆径向生长“昼缩夜胀”, 具有稳定的季节周期性; 其生长响应表现出由前期“热量驱动”向中后期“水分驱动”的季节性转换。研究发现, 20 cm 地温稳定通过 12.5 $^{\circ}\text{C}$ 的阈值对生长季启动预测有一定的指示意义。研究结果可为干旱区城市白榆物候预测、精准灌溉、绿地养护管理及城市森林生态功能维持提供科学依据。

关键词: 干旱区; 生长季; 径向生长; 动态变化; 气象因子

中图分类号: S718.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0143-13

引文格式: 闫梦瑶, 孙桂丽, 秦莉, 等. 典型干旱区城市基调树种白榆年内径向生长及其对气象因子的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 143-155. Yan Mengyao, Sun Guili, Qin Li, et al. Intra-annual radial growth of *Ulmus pumila*, a fundamental urban tree species in typical arid regions, and its response to meteorological factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 143-155.

Intra-annual radial growth of *Ulmus pumila*, a fundamental urban tree species in typical arid regions, and its response to meteorological factors

Yan Mengyao^{1,2} Sun Guili¹ Qin Li² Liu Weiping³ Yang Qiaoling^{1,2}
A'erman Abula² Xie Fan^{1,2} Zhang Ruibo²

收稿日期: 2026-04-20 修回日期: 2026-09-03

基金项目: 新疆维吾尔自治区天山创新团队(2025D14004), 新疆维吾尔自治区天山英才培养计划(2024TSYCCX0041), 新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金, 国家自然科学基金(42375054、42675059), 中国气象科学研究院创新发展专项(2021KJ034)。

第一作者: 闫梦瑶。主要研究方向: 森林培育学。Email: 15621800750@163.com 地址: 830052 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市沙依巴克区农大东路新疆农业大学老满城校区。

责任作者: 孙桂丽, 教授。主要研究方向: 荒漠化防治与生态恢复。Email: sxfgl@126.com 地址: 同上。秦莉, 研究员。主要研究方向: 树木年轮生态学。Email: Qinli@idm.cn 地址: 830002 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市天山区东大梁西街 261 号中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室。

本刊网址: <https://j.bjfu.edu.cn>; <https://journal.bjfu.edu.cn>

- (1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Tree-ring Ecology/Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research(CMA), Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
3. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: [Objective] Urumqi is located in a typical arid region, where urban tree growth is highly susceptible to water deficit, high temperature, atmospheric drought, and related environmental stresses. To clarify the intra-annual radial growth dynamics of dominant urban tree species in arid regions, and its relationship with meteorological factors, this study investigated the radial growth patterns of *Ulmus pumila* at daily and seasonal scales and identified the major meteorological drivers. The results are expected to provide a scientific basis for urban greening management and ecological planning in arid regions. [Method] High-precision radius dendrometers were used to monitor the radial growth of four *U. pumila* in urban Urumqi over three consecutive years from 2019 to 2021. Diurnal variation and seasonal dynamics of radial growth were analyzed. We used key meteorological data from a nearby weather station. The data included air temperature, precipitation, vapor pressure deficit, and soil temperature at different soil depths. We applied five analytical methods: the maximum value method, temperature threshold method, Gompertz growth model, Pearson correlation analysis, and sliding correlation analysis. These methods were used to determine the start and end dates of the *Ulmus pumila* growing season, as well as the date of peak growth rate. We also calculated the average growth rate at growth onset, and identified the main meteorological factors affecting radial growth. [Result] (1) The growing season of *U. pumila* in Urumqi lasted from early April to early November (approximately DOY 103–309). The peak growth rate occurred in mid-May (approximately DOY 135). The average growth rate at growth onset was approximately 10 $\mu\text{m}/\text{d}$. (2) Radial growth mainly occurred at night, approximately from 21:00 to 03:00, and reached its daily peak at around 02:00, indicating distinct diurnal rhythmicity and seasonal periodicity. (3) Correlation analysis showed that the radial growth of *U. pumila* was significantly and positively correlated with precipitation and relative humidity, whereas it was significantly and negatively correlated with vapor pressure deficit and sunshine duration, indicating that water availability was the primary factor limiting its radial growth. Moving correlation analysis further revealed that radial growth during the early growing season was mainly driven by air temperature and soil temperature, and gradually shifted to be dominated by precipitation and relative humidity from mid-summer through autumn. [Conclusion] The radial growth of *U. pumila* in Urumqi showed a pronounced daily rhythm of daytime contraction and nighttime expansion, as well as stable seasonal periodicity. Its growth response exhibited a seasonal transition from thermal regulation in the early growing season to water limitation in the middle and late growing season. The date on which soil temperature at a depth of 20 cm remained above 12.5 $^{\circ}\text{C}$ provided a reliable indicator of growing-season onset. These findings offer quantitative support for phenological forecasting, precision irrigation, urban green-space management, and the maintenance of urban forest ecosystem functions in arid regions.

Key words: drought; growing season; radial growth; dynamic change; meteorological factor

在气候持续变暖、降水格局改变以及极端气候事件频繁发生的背景下,人工林的生态稳定性受到了显著威胁。干旱和半干旱地区的人工林对这种变化尤为敏感,普遍出现了不同程度的生长衰退,甚至个体死亡现象^[1]。目前,对于干旱区天然林树木径向生长的研究已有一定积累^[2],但城市树木径向生长与气候响应的相关研究多集中于湿润、半湿润地区,对干旱区特殊水热条件下的城市树种关注相对不足。

干旱区的城市树种面临水资源短缺、极端高温等多种胁迫,树木生长的限制因子与气候响应机制不同于湿润地区;此外,城市环境下的热岛效应、土壤压实等人为干扰也会进一步改变树木的生长过程及其对气候因子的响应。由此可见,城市微环境可能是影响干旱区城市树木健康与可持续发展的重要因素^[3-4]。

基调树种是构建城市森林骨架的关键物种,其

健康状况和生长稳定性直接关系到城市生态系统的服务功能^[5]。随着全球变暖对森林生态系统影响的不断加剧,树木生长呈现出多样化的响应特征,其径向生长对气候因子的响应规律也成为学界关注的重点^[3-4]。虽然城市树木径向生长与气候关系的研究已取得较多成果,但多数基于树轮宽度、胸径年增量或较长时间尺度的观测。此类研究能够识别长期气候信号和树种差异性,但在时间分辨率方面存在一定局限性^[6],难以反映生长季内树干径向生长的精细动态,对于“干旱区城市绿化树种的生长季何时开始”“生长速率高峰何时出现”“某一阶段究竟受温度还是水分主导”等生长过程性问题缺乏针对性证据^[7]。

对此,近年来综述和方法学研究开始强调高频监测的重要性。Höermann 等^[8]在关于城市树木干旱胁迫监测的综述中指出,城市树木健康评估长期依赖目测诊断,但这种方式往往发现过晚,难以及时识别早期水分胁迫,因此需要更高时间分辨率、更具过程性的监测方法;Ziegler 等^[9]关于树干变化监测的研究指出,自动树干径向监测不仅能够连续记录树干径向变化,还可用于识别树干收缩、树体水分亏缺及干旱胁迫动态,具有构建大尺度早期预警指标的潜力。但是目前树木生长对气象因子的响应研究中,分析“日均径向变化”还不够,进一步区分可逆水分胀缩与真实不可逆径向生长,才能更接近树木形成层活动和真实生长过程。目前许多研究借助树干径向监测技术,在不损伤树木的前提下连续观测树干径向变化,并探讨不同树种的年内径向变化特征及其对气象因子的响应^[10-11]。

在干旱区城市中,城市绿化树种的生态价值不仅体现在栽植规模和覆盖水平,更体现在其能否在高温、水分短缺、土壤压实和地表硬化等环境下维持相对稳定的径向生长,从而持续发挥生态服务功能^[5]。白榆(*Ulmus pumila*)是乌鲁木齐市广泛栽植的基调树种,在当地城市绿化体系中具有重要地位,其

径向生长变化能在一定程度上反映干旱区城市树木对气候因子的响应^[12]。研究期间,试验样本均无灌溉、养护等人为管理。在此基础上,利用高分辨率径向监测数据,区分树体的可逆径向胀缩和不可逆径向生长,以揭示干旱区城市绿化树种径向生长的年内动态及其对气象因子的响应规律。研究结果将为城市绿化树种的适生性评价、干旱区城市灌溉管理与树种配置,以及城市生态系统服务功能的稳定维持提供科学依据^[13]。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

1.1.1 地理位置及研究对象

新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市地处欧亚大陆腹地,远离海洋,具有显著的温带大陆性气候特征,生态环境相对脆弱,是研究干旱区城市树木生长及其气候响应的典型区域。试验区位于乌鲁木齐市天山区中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室(43°53'N, 87°33'E),海拔为 935 m,邻近乌鲁木齐市气象站。土壤类型以风沙土、棕钙土和灰漠土为主^[14]。在 1960—2023 年统计期内,研究区年平均气温为 8.05 °C,平均降水量为 234.52 mm,降水量季节分配不均,多集中在 4—8 月。

白榆作为乌鲁木齐市本土适生树种,具备突出的抗旱性、耐寒性与广泛适应性。据 2022 年乌鲁木齐市园林树木调查,白榆占调查树木总量的 22.62%,被广泛应用于城市道路绿化、公园建设及防护林工程,在提升人居环境质量与调节区域微气候方面具有关键作用^[14]。

1.1.2 研究区监测期间气候变化

根据 2019—2021 年气温和降水观测数据(图 1),研究区气温具有明显的季节性波动,3 年气温曲线的年内变化趋势基本一致,气温自春季开始逐渐升高,夏季达到全年较高水平,随后自秋季逐步下降,

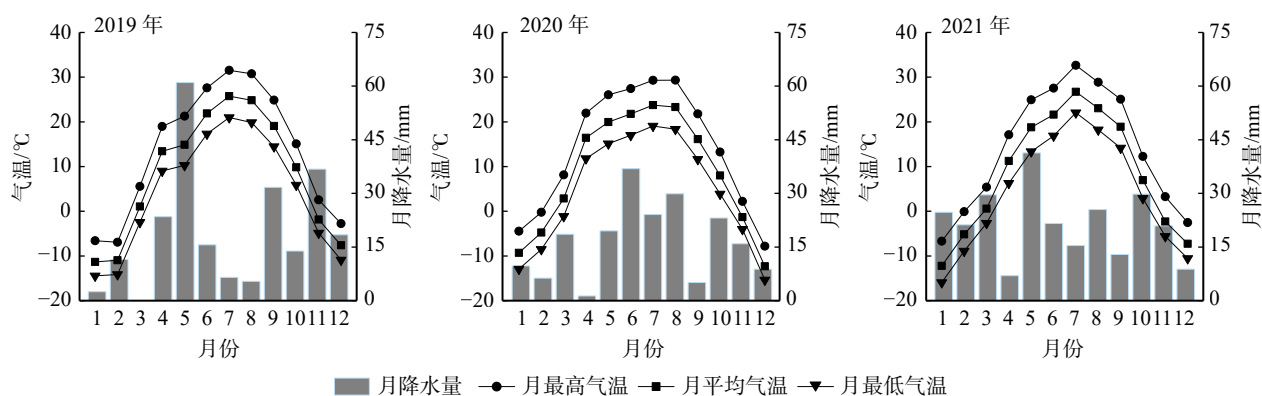


图1 研究区 2019、2020、2021 年气候特征

Fig. 1 Climate characteristics of the study area in 2019, 2020 and 2021

低温月份主要集中在12月至次年2月。其中,2019年1—2月均温相近,变化幅度最小,而3—4月升温最快,回温幅度最大,表明该年春季回温较快。观测期内,月最高气温最大值达32.6℃,月最低气温最小值为-15.9℃,出现时间分别为2021年7月和1月。

研究区月降水量表现出较明显的月际波动与年际差异(图1),2019年降水主要集中在5月(61 mm)和9月(31.7 mm),冬季及早春降水相对较少,其中1月降水量仅2.5 mm,3月基本无有效降水;2020年降水集中于6月(36.9 mm)与8月(29.9 mm),4月降水量仅为1.3 mm,春季至夏初的5—6月维持较高水平;2021年冬季至春季过渡期降水明显偏多,1—3月均降水量在20 mm以上,5月达41.3 mm,成为当年降水集中时段。总体来看,各年份降水集中月份并不完全一致,且同一月份年际差异明显,说明该地区具有降水阶段性集中和时间分配不稳定的特点。

1.2 白榆径向生长数据及气象资料收集

选取乌鲁木齐市4株树干通直、健康无虫、立地条件相近且均未受其他植被及人为干扰的白榆作为研究对象。采用树木径向生长测量仪连续监测白榆树干径向变化。监测时间为2019年4月1日至2021年11月7日,采样间隔为30 min,每株样木每日记录48个观测值,仪器测量精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。测径仪安装于距地面1.3 m的胸高处,安装前需从安装传感器的区域去除表层干枯松动的树皮,确保不损伤下方的活组织。

气象资料来源于距采样点最近的乌鲁木齐市气象站(43°53'45"N、87°33'00"E),包括平均气温(T_{mean})、日最高气温(T_{max})、日最低气温(T_{min})、平均相对湿度(RH)、日降水量(Prec)、饱和水汽压差(VPD)、日照时数(S_{sun})以及0、5、10、15和20 cm土层的日平均地温(T_g)等。VPD根据日平均气温和日平均相对湿度计算^[15]。

1.3 数据处理方法

1.3.1 日径向生长数据的提取及拟合

目前,树干径向生长量的常用提取方法包括周期法、日值平均法和最大值法^[16],这3种方法在分析结果上具有较高的一致性^[17]。根据径向生长测量仪监测的数据,发现落叶阔叶林和常绿针叶林径向生长变化均有明显的昼夜周期性,一个完整的昼夜变化周期可划分为3阶段^[18]:收缩期是指树干半径由前一周期的峰值下降至当前周期的谷值;恢复期是指树干半径由当前谷值逐步回升至前一阶段的峰值水平;增长期是指半径进一步突破前一阶段的峰值,形成新的最大值。上述3个阶段依次循环,共同构

成树干径向变化的昼夜周期。

在增长阶段,树木的径向变化包括细胞吸水引起的物理膨胀和新细胞形成的真实生物性生长。其中,由组织失水和复水引起的弹性缩胀属于可逆变化,而形成层细胞的生长、分裂所产生的径向增量视为不可逆生长。为区分水分变化引起的可逆径向变化与不可逆径向生长,Zweifel等^[19]提出了“零增长模型”,将超过既有茎干径向最大值的增量定义为生长,而低于该动态阈值的径向变化则归因于植株体内水分状况的波动。这与本研究中选择使用较为广泛的极大值法本质上是一致的。即用当前阶段径向变化的极大值减去上一阶段径向变化的极大值,得到径向变化值,若差值为正,则判定该阶段发生径向生长,记录其具体增长量;若差值为负或零,则认为该阶段未发生径向生长,径向变化量记为零。因此引入日径向变化模型进行曲线拟合。

$$y = Ax^4 + Bx^3 - Cx^2 + Dx - E$$

式中: y 为树干日径向变化量; x 为时间(日序); A 、 B 、 C 、 D 、 E 分别为四次项、三次项、二次项、一次项系数及常数项。

1.3.2 Gompertz 累积生长拟合

Gompertz 函数与其他“S”函数相比更适合于模拟生长季的径向生长,因此被广泛使用^[18]。本研究使用R 4.5.2,对高分辨率树干测量仪数据进行处理和分析。基于极大值法^[16]和周期法^[18],提取生长期内每日累积生长变化曲线,对白榆年内累积生长过程进行Gompertz函数拟合,以刻画白榆径向生长的动态变化特征,并计算样木的生长季起始日和终止日。

$$y = ae^{-e^{-k(x-x_c)}}$$

式中: y 为径向变化累积生长量; x 为自变量时间(日序); x_c 为拐点位置参数; a 为生长上限; k 为生长速率系数; e 为自然常数。

本研究基于累积径向生长曲线,采用复合阈值法区分可逆缩胀及不可逆生长,依据径向生长累积量与持续稳定状态界定白榆生长季起止日及周期长度^[19-20]。其中起始日定义为不可逆生长首次达到全年总累积生长的10%且持续21 d径向增量大于0的日期;终止日为生长峰值后,累积生长量首次达到全年总量的95%且持续21 d无正增长的日期^[20]。生长周期长度则为起始日与终止日之间的差值。为确保计算得出的白榆生长季起止时间更接近于生理意义上的真实生长,首先依据Gompertz累积生长曲线确定实测起止日。Ghelardini等^[12]研究发现,榆属植物的物候发生日期对气温具有很好的指示性,再

以徐琳等^[21]建立的中国温带气温-物候空间模型作为独立验证依据,对 Gompertz 识别结果进行交叉校验。当二者绝对偏差超过 ± 5 d 时,则进一步结合实测日变化数据排查降水/热膨胀致树干水分胀缩造成的“伪生长”现象。由于 Gompertz 曲线能够较好描述年内累积生长的非对称“S”形过程,同时对采样点的 4 株样木的累积生长量进行平均处理,利用 Python 对其函数一阶求导,可以得到生长季内每株样木随时间连续变化的生长速率,进而可识别最大生长速率及其出现时间。最终可以在已知生长季起始日的前提下,反推出白榆在生长启动时已达到的生长速率水平。

需明确的是,本研究将基于气温-物候模型判定的“理论潜在生长窗口”与基于实测径向动态判定的“生理有效生长期”进行了区分^[19]。前者反映气候意义上的生长上限,而后者聚焦于形成层活动的实质性不可逆生长阶段。为确保相关性分析的生理指示性,本研究选取涵盖全年 95% 以上累积径向增量的 4—10 月作为核心分析时段,旨在剔除生长季末期因水分主导的树干胀缩信号对气象响应分析的干扰^[22]。

1.3.3 热量指标的计算与优选

本研究采用“温度稳定通过阈值法”判定生长季起始日,并以活动积温的年际稳定性作为辅助筛选依据。将连续 5 d 日平均温度均不低于设定阈值时的首日定义为温度稳定通过日^[23]。选取大气日均温以及 0、5、10、15、20 cm 5 个深度的地温作为候选温度指标,分别设置 5、7.5、10、12.5 和 15 °C 共 5 个温度阈值进行比较,结果表明 12.5 °C 阈值下稳定通过日与实测起始日最为接近,故选取该阈值作进一步分析。自各温度指标稳定通过相应阈值之日起至实测生长季起始日,逐日计算并累加活动积温。

$$\text{GDD} = \sum_{i=1}^n \max(T_i - T_b, 0)$$

式中:GDD 为稳定通过日至实测生长季起始日期间的累积活动积温($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$); T_i 为第 i 日对应温度指标的日平均温度($^{\circ}\text{C}$); T_b 为设定的温度阈值($^{\circ}\text{C}$); n 为稳定通过日至实测生长季起始日的累计天数。

分别计算 2019—2021 年各“温度指标-阈值”组合对应的活动积温,并计算其 3 年标准差。若某一温度指标及阈值能够较好地表征白榆生长启动的热量需求,则其生长启动前所需累积热量在不同年份间应具有较高的稳定性。因此,以活动积温的年际标准差作为评价指标,标准差越小,表明该组合的年际稳定性越高,对生长季启动的指示能力越强^[24]。本研究共设置 6 个温度指标和 5 个温度阈值,形成 30 种“温度指标-阈值”组合,并综合比较各组合的

温度稳定通过日期与实测生长季起始日的偏差以及活动积温的年际稳定性,筛选适用于判定白榆生长季启动的温度指标及其阈值。

1.3.4 相关分析

为探究 2019—2021 年白榆径向生长对微环境变化的响应,首先采用 Pearson 相关分析,筛选白榆径向生长累积变化的显著相关因子,统计分析在 IBM SPSS Statistics 26 中完成。为进一步识别不同生长阶段径向生长对气象因子的动态响应,本研究采用滑动相关分析,以逐日径向净增长量为因变量,以同期逐日气象因子为自变量,窗口长度设为 21 d,滑动步长为 1 d;每个窗口内样本量为 21,分别计算 Pearson 相关系数。选择 21 d 窗口主要考虑一方面可满足相关显著性检验的基本样本量要求,另一方面可削弱单日降水或短时高温造成的高频波动,更适合揭示形成层活动对气象因子的阶段性响应。其中,显著性判断采用 $p < 0.05$ 水平,对应相关系数阈值 $|r| = 0.433$ 。

2 结果与分析

2.1 生长季识别及启动热量指标提取与优选

根据白榆径向生长累积变化数据进行 Gompertz 曲线拟合,通过复合阈值法确定乌鲁木齐市白榆实测的生长季起止时间(表 1)。2019—2021 年的生长季起始日分别为 DOY103、100、107,终止日分别为 DOY326、321、311,3 年平均生长季长度为 216 d。基于徐琳等^[21]提出的气温-物候空间模型,结合研究区 2019—2021 年 2—4 月和 9—11 月平均气温,界定榆树理论生长季(表 2)起始日分别为 DOY103、105、112,终止日分别为 DOY311、307、308(以上日序均四舍五入取整),3 年平均生长季长度为 202 d。

结果(表 3)显示,2 种方法在起始日上偏差(3.33 d)较小,且无系统性,表明复合阈值法对白榆生长启动的识别具有较高可信度,因此采用具有更高时间分辨率(逐日实测)的结果。终止日两方法的偏差(10.67 d)较大,且复合阈值法均偏晚,其生理原因在于:秋季白榆茎干在低温波动下仍会发生间歇性热膨胀,偶发性的正增量事件干扰了“连续 21 d $\leq$

表 1 基于 Gompertz 累积生长模型的白榆生长季起止时间

年份	起始日(DOY)	终止日(DOY)	生长季长度/d
2019	4月13日(103)	11月22日(326)	223
2020	4月9日(100)	11月16日(321)	221
2021	4月17日(107)	11月7日(311)	204

表 2 基于气温-物候空间模型的白榆生长季起止时间

Tab. 2 Start and end time of the growth season of *Ulmus pumila* based on the temperature-phenology spatial model

年份	2—4月均温/℃	起始日(DOY)	9—11月均温/℃	终止日(DOY)	生长季长度/d
2019	5.39	4月13日(103)	9.02	11月7日(311)	208
2020	4.84	4月14日(105)	7.61	11月2日(307)	202
2021	2.23	4月22日(112)	7.86	11月4日(308)	196

0”判据的触发,导致阈值法识别的终止日持续偏晚;同时,秋季实测终止日还易受水分回补等环境因子影响而产生明显波动,难以反映生理意义上的真实生长终止时点。而气温-物候模型基于 46 个温带站点的长期物候观测数据建立,经多年份、多站点验证及空间外推检验,均表现出较高的预测一致性和稳定性,模型解释率高达 90%,其具备较强的区域适用性和统计可靠性,更能反映乌鲁木齐市白榆生理意义上的生长季终止时间,故终止日采用气温-物候模型的结果。最终确定乌鲁木齐市白榆 2019—2021 年的生长季起始时间分别为 103、100、107,终止时间分别为 311、307、308,生长季为 4 月上旬(DOY103 左右)至 11 月上旬(DOY309 左右)。

为避免传统“后验依赖”导致的因果倒置,本研究采用“先独立计算热量指标达标日期,再与实测物候期进行偏差验证”的正向拟合逻辑。具体而言,分别计算大气均温及 5 层地温(0、5、10、15、20 cm)在 12.5 ℃ 阈值下“连续 5 d 均温稳定通过该阈值”的日序(DOY),并与 3 年实测白榆生长季起始日进行对比,通过平均绝对误差和年际稳定性进行优选。由表 4 可见,在 12.5 ℃ 阈值下,不同温度指标的预测精度呈现显著分异:大气均温表现最差,其 3 年均值 DOY 仅为 96,比实测起始日提前 7.3 d。表层地温(0 cm)误差更大(绝对误差 8.3 d),甚至劣于大气均温,表明近地表温度受短期天气波动影响显著。随着土壤深度增加,预测精度显著提升:5 cm 地温绝对误差为 3.0 d(良好);10 cm 地温绝对误差为 2.3 d(优秀);15 cm 地温绝对误差为 1.6 d(次优);20 cm 地温 3 年均值 DOY 为 104.7,与实测均值绝对误差

表 3 白榆生长季起止日实测值与气温-物候空间模型计算值偏差

Tab. 3 Deviations between measured values of the start and end dates of the growth season of *Ulmus pumila* and calculated values from a temperature-phenology spatial model

年份	起始日偏差/d	终止日偏差/d
2019	0	+15
2020	-5	+14
2021	-5	+3
平均绝对偏差(MAD)	3.33	10.67

为 1.4 d,为所有组合中最低。活动积温稳定性分析(表 5)进一步证实,20 cm 地温的年际标准差最低(2.1 ℃·d),表明白榆生长启动所需的热量积累在年际间高度一致。2 种分析结果相互印证,共同说明 20 cm 地温是最优监测指标,可作为生长启动的关键热量指标。20 cm 深度处于白榆根系主要分布层(10~30 cm),受大气短期冷暖扰动小,能够更真实地反映土壤季节性热量的有效蓄积,从而成为驱动白榆萌芽与径向生长启动的核心热量信号^[25-26]。

2.2 白榆径向变化特征

2.2.1 径向变化日循环模式

基于白榆月平均径向日变化结果(图 2),各月日径向变化振幅存在明显的季节分异:自 5 月起,日变化幅度明显增大,夏季维持在较高水平,9 月后逐渐收窄,10 月基本降至年内径向变化的最小阶段。尽管不同季节的日振幅差异明显,但日循环周期结构较为一致:树干径向日变化的最低值多集中于 12:00—16:00,而最高值出现时间相对分散,主要集

表 4 最优阈值指标筛选

Tab. 4 Selection of optimal threshold indicators

温度指标	2019年起始日DOY	2020年起始日DOY	2021年起始日DOY	3年平均起始日DOY	3年平均实测起始日DOY	平均偏差/d	绝对误差/d	稳定性评价
大气均温	91	94	103	96	103.3	-7.3	7.3	较差
地面(0 cm)	89	93	103	95	103.3	-8.3	8.3	差
地温(5 cm)	101	96	104	100.3	103.3	-3.0	3.0	良好
地温(10 cm)	102	97	104	101	103.3	-2.3	2.3	优秀
地温(15 cm)	102	97	106	101.7	103.3	-1.6	1.6	次优
地温(20 cm)	104	103	107	104.7	103.3	+1.4	1.4	最优

注:最优阈值根据各温度指标稳定通过12.5 ℃的时间一致性确定。

中在 02:00 左右。为深入探究白榆径向的日周期变化特征, 本研究选取了振幅最大的月份(2019 年 5 月), 并从中提取了连续 18 d(5 月 14 日前后均持续晴朗, 5 月 14 日为降水天气)的日径向增长量的时间序列(图 3)。分析白榆在持续晴朗天气下的径向变化(图 3a), 可以明显观察到降水对白榆径向生长的影响。具体而言, 降水事件导致白榆的径向生长动态出现无规律的变化, 这种变化在降水前后尤为明显。然而, 随着时间的推移, 白榆的径向生长逐

渐恢复到降水前的规律性变化模式。进一步分析(图 3b)表明白榆径向变化具有稳定的日循环规律, 在持续晴朗天气下, 白榆呈现有规律的昼夜交替周期性径向生长波动, 日周期变化符合典型的“收缩-恢复-增长”模式, 这种模式反映出白榆对环境变化有一定的适应性。

2.2.2 径向生长的季节动态变化

2019—2021 年, 白榆累积径向变化表现出较一致的季节变化(图 4)。冬季至早春累积径向变化增

表 5 活动积温年际稳定性
Tab. 5 Interannual stability in active temperature accumulation

温度指标	2019年/(℃·d)	2020年/(℃·d)	2021年/(℃·d)	3年均值/(℃·d)	标准差SD/(℃·d)	年际稳定性评价
大气均温	44.8	38.7	32.5	38.7	6.2	中等
地面(0 cm)	56.1	54.3	38.0	49.5	10.0	最差
地温(5 cm)	31.5	31.3	17.8	26.9	7.9	较差
地温(10 cm)	23.9	24.3	15.0	21.1	5.3	良好
地温(15 cm)	17.0	17.9	10.6	15.2	4.0	优秀
地温(20 cm)	10.3	12.3	8.1	10.2	2.1	最优

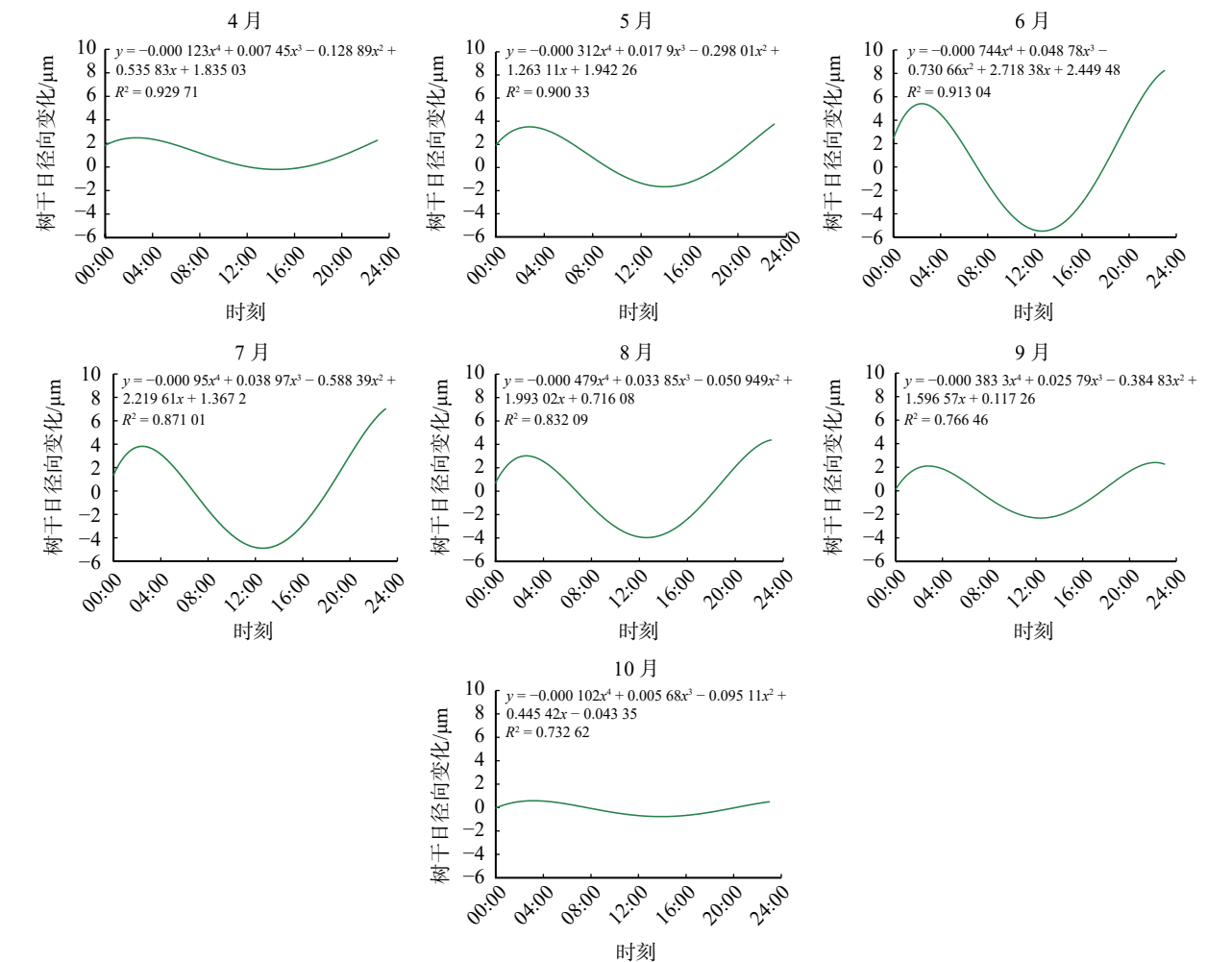


图 2 树干月平均日径向变化
Fig. 2 Monthly mean daily radial variation

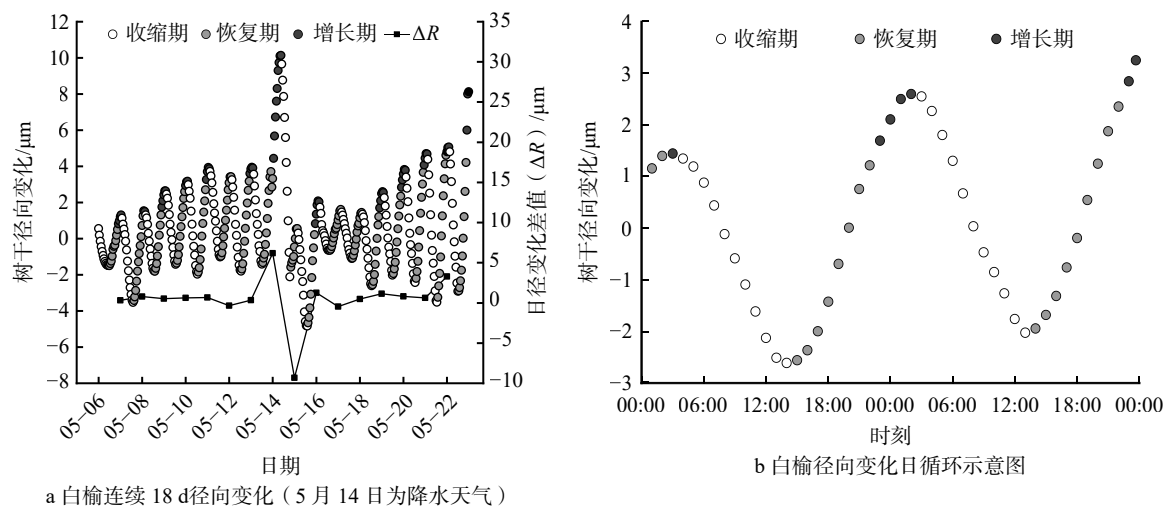


图3 白榆日周期循环变化动态

Fig. 3 Dynamic changes in the diurnal cycle of *Ulmus pumila*

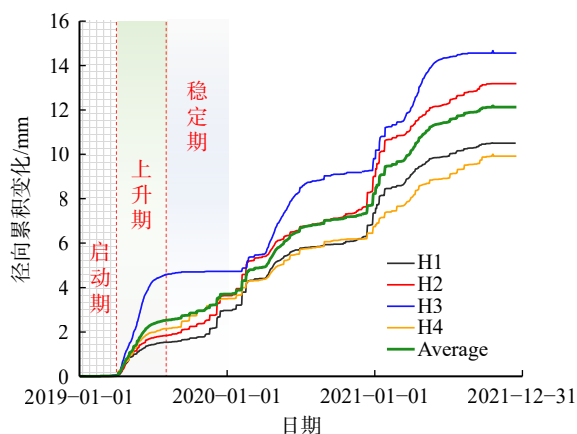
幅较小, 曲线总体较为平稳; 进入春季生长季后, 累积径向变化明显增加, 至 10 月后增幅逐渐减小, 生长季后期趋于稳定, 次年春季再次进入新的增长阶段。尽管不同样木的径向变化量存在差异, 但其年内变化趋势总体一致, 大致表现为“低谷-上升-稳定”3 个阶段, 说明样木在生长季内对外界环境变化具有较一致的响应模式。树木在低谷期生长活动较弱, 上升期标志着径向生长启动且生长速率显著加速, 稳定期则代表该年生长季结束。上述季节变化特征与不同月份的树干日径向变化模式基本一致(图 2)。

降水事件发生后, 白榆径向变化出现快速响应, 在时间上表现出一定的对应关系(图 5)。在 3 年生长季中, 多数明显降水事件发生后, 树干径向变化幅度随之增大, 部分时段表现为径向快速回升或日振幅增大。这种现象在降水较集中的阶段尤为明显, 表明白榆径向变化与降水具有较强的同步性和响应性。

2.3 白榆径向生长拟合

2019—2021 年, 白榆累积径向变化随生长季推进整体呈现“先快速增长、后逐渐趋缓”的变化特征(图 6)。进入生长季后, 径向累积量迅速增加, 生长季前中期增幅较大, 此后增长速率逐渐降低, 至生长季后期累积曲线趋于平缓。不同样株的最终累积径向变化量存在明显差异, 但年内变化趋势总体一致。Gompertz 模型对白榆累积径向变化过程的拟合效果良好($R^2 \geq 0.95$), 表明该模型能够较好地描述白榆年内累积径向变化过程。

将已确定的生长季起始日代入 Gompertz 一阶导数方程, 可计算得到白榆生长启动时的理论生长速率(图 6)。2019—2021 年, 白榆生长起始日对应



H1~H4 为选取的 4 株样树, Average 为 4 株样树的平均值。下同。

图4 连续3年径向累积变化

Fig. 4 Radial cumulative changes for three consecutive years

的平均生长速率约为 $10 \mu\text{m}/\text{d}$ 。3 年的生长速率分别在 5 月 14 日(DOY134)、5 月 13 日(DOY134)和 5 月 18 日(DOY138)达到最大。最终确定, 白榆的生长速率在 4 月(生长季前期)快速升高, 在 5 月中旬(DOY 约 135)达到峰值, 5 月上旬至 7 月下旬(DOY130—210)总体保持较高水平, 此后逐渐下降并趋近于零。

2.4 径向生长与气象因子的关系

基于 2019—2021 年白榆生长期(4—10 月)的径向生长与气象因子的 Pearson 相关性分析(图 7)可知, 水分条件是主导该地区白榆径向生长的核心因素。其中, 水分因子的正效应显著: 白榆径向生长与 Pre 表现出极显著正相关关系($p < 0.01$), 2020 和 2021 年的相关系数达 0.8 左右; 与 RH 表现出极显著正相关($p < 0.01$)。与水分消耗密切相关的 S_{sun} 和 VPD 在 3 年间均呈极显著负相关($p < 0.01$)。在整个生长季时间尺度上, T_{mean} 、 T_{max} 、 T_{min} 以及 20 cm

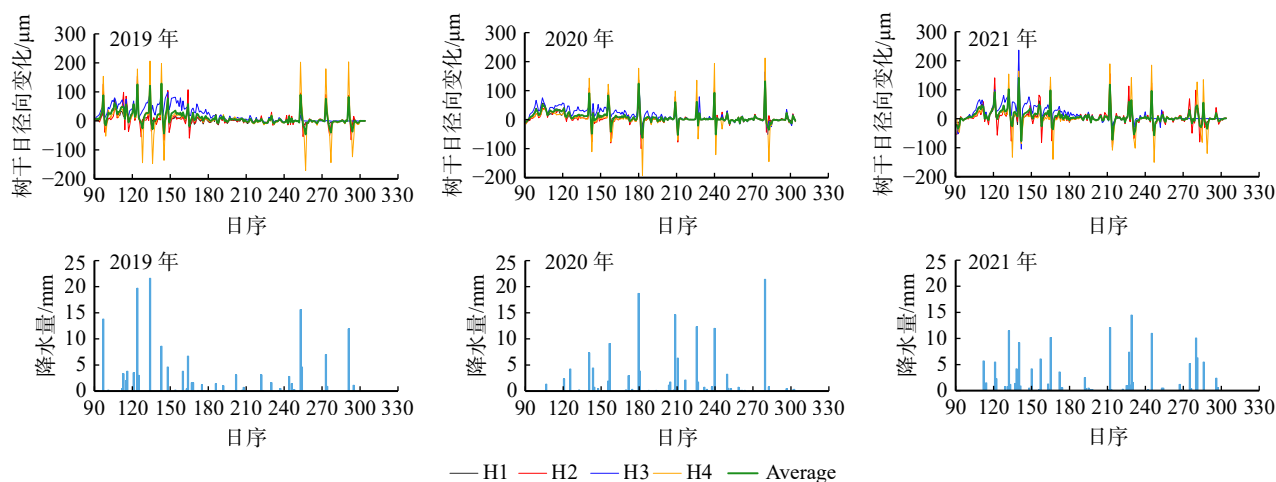


图5 生长季内树干径向变化及同期降水动态

Fig. 5 Stem radial variation and concurrent precipitation dynamics during the growing seasons

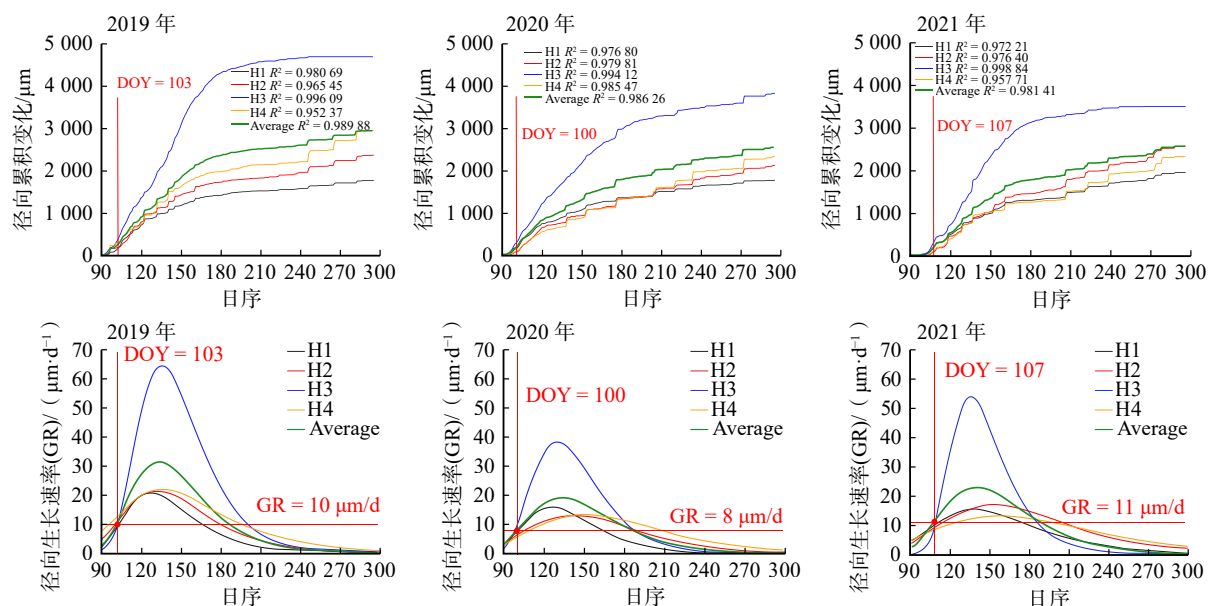


图6 2019—2021年白榆径向生长累积拟合及生长速率

Fig. 6 Cumulative fitting and radial growth rate of *Ulmus pumila* from 2019 to 2021

的 T_g 与径向生长的相关性均较低,且大多未达到显著水平。

21 d 滑动窗口动态分析(图8)进一步表明,气象因子对白榆生长的影响具有明显的“季节性转换”特征,表现为生长季前期(春季至初夏,DOY90—150左右)主要受热量条件驱动: T_{mean} 和20 cm的 T_g 与径向生长呈现明显的正相关波动,并多次突破显著性阈值,这一阶段水分因子的促进作用尚不明显,甚至在个别年份表现为短暂的负相关。生长季中后期(盛夏至秋季,DOY180—300左右)是水分因子主导阶段;在180 d后,温度的正向促进作用消退,水分因子的重要性迅速凸显,Pre和RH在此阶段与白榆生长呈现持续且显著的正相关($p < 0.05$),生长限制逐渐转向水分条件。在DOY150—300期间,径向生长与 S_{sun} 呈现持续的显著负相关($p < 0.05$),表

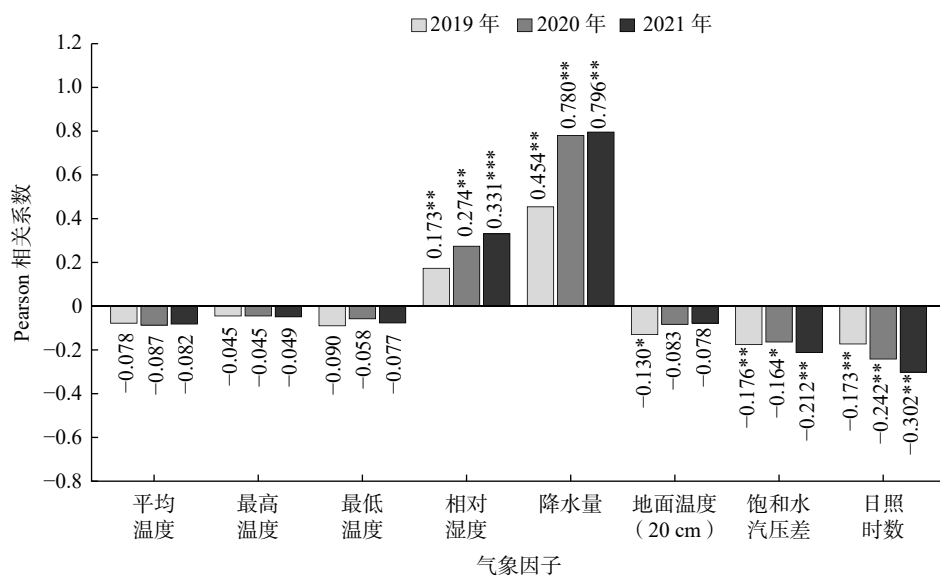
明夏季和秋季水分需求增加的同时,强烈的日照会抑制白榆径向生长。

3 讨 论

3.1 白榆不同时间尺度上径向生长动态变化

3.1.1 日尺度树干径向变化

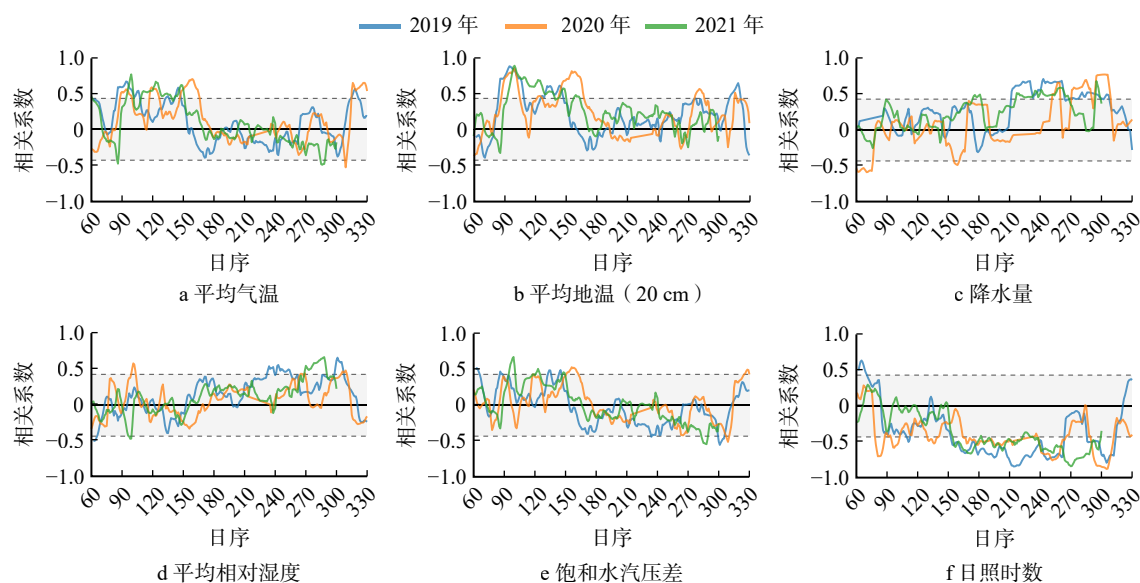
在日尺度上,白榆树干径向变化呈现明显的昼夜周期性,即白天收缩与夜间扩张,其中夜间径向扩张峰值集中于02:00左右,而12:00—16:00收缩较为明显,该昼缩夜胀特征与已有树干日周期径向变化的研究结果^[19,27]相符。需要指出的是,高频监测获得的树干径向变化既包括组织生长产生的不可逆增量,也包括树体水分变化引起的可逆胀缩,因此夜间径向扩张不完全等同于生长^[19]。已有研究^[28-30]表明,这种昼缩夜胀变化主要与树木水分平衡及细胞



*表示在 0.05 水平下显著相关 ($P < 0.05$) ; **表示在 0.01 水平下显著相关 ($P < 0.01$) 。

图 7 白榆生长季日径变化与气象因子的相关性

Fig. 7 Pearson correlation between daily radial growth variation and meteorological factors during the growth period of *Ulmus pumila*



虚线: $p = 0.05$ 阈值 ($|r| = 0.433$, $n = 21$) ; 阴影区: 非显著区域。

图 8 白榆径向生长与气象因子的动态相关性(21 d 窗口期)

Fig. 8 Dynamic correlation between radial growth and meteorological factors (21-day window)

膨压变化密切相关: 日间较高的 VPD 和太阳辐射增强蒸腾, 导致树体水分亏缺和茎干收缩; 夜间蒸腾减弱后, 树体水分状态逐渐恢复, 细胞膨压回升, 有利于径向生长。该机制的核心在于, 树木生长依赖形成层细胞的分裂与扩张过程, 而这一过程需要细胞膨压达到相应阈值才能实现^[30]。

树木的昼夜水分平衡并非恒定不变, 降水事件可在短期内打破白榆原有的日周期径向变化节律(图 3a, 图 5), 而随着天气转晴, 径向变化节律逐渐恢复。王晶苑等^[31]在浑善达克沙地榆研究中发现, 降水会影响树干液流, 树体水分运输过程会对降水

事件产生响应。结合本研究结果, 降水补给引起的树体水分状态变化可能进一步影响白榆的日尺度径向变化节律。除降水外, 温度、光照和空气湿度等环境因子也可能共同参与这一过程, 其具体生理作用机制仍需进一步研究。基于上述结果, 白榆日尺度径向变化能够随昼夜水分条件及降水事件发生调整, 并在短期扰动后恢复原有节律, 反映出其具有一定的水分调节和自我适应能力, 这可能有利于白榆适应干旱区水分受限及波动的环境。

3.1.2 季节尺度径向生长

在季节尺度上, 白榆径向生长主要集中于

4—10月,生长速率于5月中旬(DOY约135)达到峰值,并在5—7月总体维持较高水平,10月后径向生长逐渐趋于停滞。这与研究区主要降水期及适宜温度条件在时间上基本重合,表明白榆季节径向生长进程与生长季内水热条件变化密切相关。白榆累积径向生长过程呈明显的“S”形变化,经Gompertz模型拟合后 $R^2 \geq 0.95$,表明该模型能够较好描述其季节累积生长动态。与李港墩等^[32]采用Gompertz模型对长白山春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)和红松(*Pinus koraiensis*)累积径向生长过程的拟合效果一致。这表明,Gompertz模型能够较好表征白榆季节径向生长由缓慢启动、快速增长到逐渐稳定的累积过程。总体而言,白榆径向生长具有明显的季节性,较高的生长速率主要集中于生长季中前期,随后逐渐降低并趋于稳定。

3.2 白榆径向生长对气象因子的响应

相关性分析结果(图7)表明,白榆径向生长与降水量和相对湿度呈极显著正相关($p < 0.01$),与饱和水汽压差和日照时数呈显著负相关($p < 0.05$),而与温度因子未表现出显著正相关关系,5—9月部分温度指标甚至呈负相关趋势。该结果与长白山春榆径向生长对温度呈显著正响应的现象^[32]存在差异,表明不同水热环境条件下,榆属树种对气候因子的响应特征可能存在明显分异。相比之下,本研究中温度对白榆径向生长的直接促进作用并不明显,高温的不利影响可能更多与干旱环境下较强的大气蒸散需求有关。这一结果与浑善达克沙地榆径向生长对水分条件表现出较强响应的研究结果^[33]相似。干旱区树木研究^[34]表明,径向生长对干旱变化的响应较为稳定,而对温度的响应相对较弱。关于天山山脉雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)的研究^[35]也表明,降水是径向生长的重要驱动因素,而温度在水分受限条件下可通过加剧干旱胁迫对径向生长产生抑制作用。综合本研究中降水量和相对湿度的正相关以及VPD的负相关关系,说明白榆径向生长与水分条件的联系可能较温度单独作用更为密切,高温的影响可能更多地通过改变大气蒸散需求和树体水分状态体现。类似的VPD负响应在其他树种的高时间分辨率径向生长研究中也报道^[36]。

除总体相关关系外,白榆径向生长与气象因子的关系在生长季内还表现出明显的阶段性变化。连续日径向变化(图5)显示,白榆树干径向变化与短期天气变化具有较强联系,尤其在降水事件发生后,树干径向常出现短时较为明显的波动或恢复性扩张,但并未随降水增加而保持线性增长。21 d窗口滑动相关分析(图8)进一步表明,不同气象因子与径向

变化之间的相关程度并非在整个生长季内保持稳定,而是随生长进程发生变化,说明白榆对气象条件的敏感性具有一定的生长阶段差异。Chan等^[37]研究同样发现,树木径向生长对环境因子的响应可随生长季阶段发生变化,早夏生长与温度的关系较强,而夏末对水分的依赖程度增加。除这种阶段性差异外,高分辨率径向监测研究还发现,树木径向生长对环境因子可能存在滞后响应,且不同植被类型具有不同的滞后时间分布^[38-39]。

除气象条件外,城市生境也可能对白榆径向生长及其气候响应产生一定影响。城市化程度、热岛效应及干旱事件均可影响城市树木的生长,且不同树种之间的响应存在差异^[40]。本研究样木在研究期间未受人工灌溉干扰,能较为准确地反映自然气象条件与白榆径向生长之间的关系。但本研究样木数量和监测范围相对有限,未来研究可扩大样本和空间范围,并结合土壤水分、树液流及微树芯监测,以进一步区分树体水分变化与真实生长过程,更准确地揭示干旱区城市白榆径向生长的环境驱动机制。

4 结 论

本研究基于2019—2021年高时间分辨率树干径向变化监测数据及同期气象资料,分析了乌鲁木齐市白榆年内径向生长动态及其对气象因子的响应特征。结果表明,白榆树干径向变化具有明显的日周期和季节变化特征。日尺度上,白榆树干径向变化表现为典型的“昼缩夜胀”,径向扩张主要发生在夜间,日间12:00—16:00多出现收缩并达到最低值,凌晨02:00左右达到日内峰值。季节尺度上,2019—2021年白榆生长季平均始于4月上旬(DOY103左右)、结束于11月上旬(DOY309左右),生长速率峰值均出现在5月中旬(DOY约135),生长季起始日对应的平均生长速率约为10 $\mu\text{m}/\text{d}$ 。

整体相关性分析结果显示,相较于温度的单独效应,白榆径向生长与水分相关气象条件的关联更为紧密。进一步分析证实,白榆径向生长对气象因子的响应呈现出明显的阶段性变化特征:生长季前期气温和地温与径向生长的联系相对较强,随着生长季推进,降水量、相对湿度及饱和水汽压差等水分相关因子的作用逐渐突出,实现由“热量主导”向“水分主导”的季节性转换。因此,在干旱、半干旱的城市生境中,尽管温度是树木打破休眠的必要条件,但水分是贯穿整个生长期的核心限制因子。这种动态响应体现了白榆对于干旱区城市微气候的适应性策略。

20 cm地温稳定通过12.5 $^{\circ}\text{C}$ 的日序与白榆生长

季启动时间具有较好的对应关系,预测误差较小且年际表现相对稳定,可作为判断研究区白榆春季生长启动时间的潜在热量指标。本研究从日内和季节尺度揭示了干旱区城市白榆径向生长特征及其气象响应规律,可为干旱区城市树木生长监测与绿地养护管理提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 袁超峰,王文志,苏勇,等. 树木年轮在人工林研究中的应用[J]. *应用与环境生物学报*, 2025, 31(11): 1810–1820.
Yuan C F, Wang W Z, Su Y, et al. Progress in the application of tree-ring analysis to plantation forest research [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2025, 31(11): 1810–1820.
- [2] 李颖辉. 秦岭南、北坡油松径向生长对气候变化的响应差异[D]. 西安: 西北大学, 2023.
Li Y H. Different responses of radial growth *Pinus tubuliformis* to climate change at the southern and northern slopes of Qinling Mountains[D]. Xi'an: Northwest University, 2023.
- [3] 国颖. 气候变化背景下银杏分布预测及表型性状的环境响应机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
Guo Y. Prediction of ginkgo distribution and research on environmental response mechanism of phenotypic traits under climate change[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [4] 樊翔. 露天矿区重建植被动态变化对气候因子的响应研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
Fan X. Re-established vegetation response to climate factors on surface mined land[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [5] Pattnaik N, Honold M, Franceschi E, et al. Growth and cooling potential of urban trees across different levels of imperviousness [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 361: 121242.
- [6] 徐贺年, 王江林, 彭小梅, 等. 青藏高原东北部祁连圆柏径向生长对不同干旱类型的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2097–2104.
Xu H N, Wang J L, Peng X M, et al. Responses of radial growth of *Juniperus przewalskii* to different droughts over the northeastern Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8): 2097–2104.
- [7] Gillner S, Bräuning A, Roloff A. Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species [J]. *Trees*, 2014, 28(4): 1079–1093.
- [8] Hörmann V J, Özgen-Xian I, Beyer M, et al. Urban tree drought stress: a practitioner-focused review of detection and monitoring methods [J]. *Hydrological Processes*, 2025, 39(10): e70298.
- [9] Ziegler Y, Grote R, Alongi F, et al. Capturing drought stress signals: the potential of dendrometers for monitoring tree water status [J]. *Tree Physiology*, 2024, 44(12): tpae140.
- [10] 孙雅楠, 刘亚静, 孙钊, 等. 将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(2): 18–27.
Sun Y N, Liu Y J, Sun Z, et al. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(2): 18–27.
- [11] 孟盛旺, 刘利平, 刘文军, 等. 毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2025, 47(6): 10–18.
Meng S W, Liu L P, Liu W J, et al. Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47(6): 10–18.
- [12] Ghelardini L, Santini A. Avoidance by early flushing: a new perspective on Dutch elm disease research [J]. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 2009, 2(4): 143–153.
- [13] Dervishi V, Poschenrieder W, Rötzer T, et al. Effects of climate and drought on stem diameter growth of urban tree species [J]. *Forests*, 2022, 13(5): 641.
- [14] 谢璐迪, 玉米提·哈力克, 史磊, 等. 干旱区绿洲城市树木健康评估及影响因素: 以乌鲁木齐市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9284–9296.
Xie L D, Ümüt Halik, Shi L, et al. Health assessment of urban trees in arid land oasis cities and its influencing factors: a case study of Urumqi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9284–9296.
- [15] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains [J]. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36–42.
- [16] Dawes M A, Zweifel R, Dawes N, et al. CO₂ enrichment alters diurnal stem radius fluctuations of 36-yr-old *Larix decidua* growing at the alpine tree line [J]. *New Phytologist*, 2014, 202(4): 1237–1248.
- [17] 牛豪阁. 祁连山东部三种针叶树径向生长动态对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
Niu G H. Intraannual stem radial growth dynamics of three coniferous species in response to climate in the eastern Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [18] 张月莹, 周志勇. 树木径向生长测量仪的应用研究[J]. *林业资源管理*, 2019(1): 129–135.
Zhang Y Y, Zhou Z Y. Progress in the application of dendrometer [J]. *Forest Resources Management*, 2019(1): 129–135.
- [19] Zweifel R, Haeni M, Buchmann N, et al. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? [J]. *New Phytologist*, 2016, 211(3): 839–849.
- [20] Dufour B, Morin H. Focusing modelling on the tracheid development period-an alternative method for treatment of xylogenesis intra-annual data [J]. *Dendrochronologia*, 2007, 25(2): 125–133.
- [21] 徐琳, 陈效逖. 中国温带榆树生长季节的空间模拟[J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(4): 545–554.
Xu L, Chen X Q. Spatial modeling of the *Ulmus pumila* growing season in China's temperate zone [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42(4): 545–554.
- [22] Deslauriers A, Rossi S, Anfodillo T. Dendrometer and intra-

- annual tree growth: what kind of information can be inferred? [J]. *Dendrochronologia*, 2007, 25(2): 113–124.
- [23] Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, et al. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes [J]. *Oecologia*, 2007, 152(1): 1–12.
- [24] 叶彩华, 周孝煌, 姜会飞, 等. 下限温度对北京樱花盛花始期模拟效果的影响 [J]. *中国农业气象*, 2018, 39(1): 1–8.
- Ye C H, Zhou X H, Jiang H F, et al. Impacts of different base temperature on simulation effect of beginning flowering date of *Prunus discoidea* in Beijing [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(1): 1–8.
- [25] Montagnoli A, Lasserre B, Terzaghi M, et al. Fertilization reduces root architecture plasticity in *Ulmus pumila* used for afforesting Mongolian semi-arid steppe [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 878299.
- [26] Belokopytova L V, Karmanovskaya N V, Zhirnova D F, et al. Onset and seasonal kinetics of xylogenesis in *Pinus sylvestris* L. on the southern fringes of its distribution depend on early spring air and soil temperature [J]. *Plants*, 2026, 15(13): 1933.
- [27] Steppe K, Sterck F, Deslauriers A. Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology [J]. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(6): 335–343.
- [28] Steppe K, De Pauw D J W, Lemeur R, et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(3): 257–273.
- [29] Cabon A, Peters R L, Fonti P, et al. Temperature and water potential co-limit stem cambial activity along a steep elevational gradient [J]. *New Phytologist*, 2020, 226(5): 1325–1340.
- [30] Lockhart J A. An analysis of irreversible plant cell elongation [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1965, 8(2): 264–275.
- [31] 王晶苑, 蒋高明, 刘美珍. 浑善达克沙地榆树干液流动态研究 [J]. *科技导报*, 2011, 29(25): 54–58.
- Wang J Y, Jiang G M, Liu M Z. Sap Flow Dynamics of *Ulmus pumila* var. *sabulosa* in Hunshandake Sandland [J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(25): 54–58.
- [32] 李港墩, 钱尼澎, 王林旭, 等. 长白山红松和春榆径向生长季节动态对环境因子的响应 [J]. *植物生态学报*, 2025, 49(7): 1110–1118.
- Li G D, Qian N P, Wang L X, et al. Seasonal dynamics of radial growth of *Pinus koraiensis* and *Ulmus davidiana* var. *japonica* are related to environmental factors in Changbai Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(7): 1110–1118.
- [33] 陈晶晶. 浑善达克沙地榆树径向生长及其对气候因子的响应分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- Chen J J. Analyze the response of radial growth of elm to climate factors in Otindag Sand Land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [34] Zhang Y R, Gou X H, Wang T, et al. Response of tree growth to drought variability in arid areas: local hydroclimate and large-scale precipitation [J]. *Environmental Research*, 2024, 249: 118417.
- [35] Zhang Q, Liu Y, Song H M, et al. Spatial patterns and temporal evolution of tree radial growth responses to climate in the Tianshan Mountains [J]. *Dendrochronologia*, 2025, 92: 126349.
- [36] 张依雪, 范泽鑫, 付培立, 等. 滇西北高山针叶林优势树种径向生长及其对水分的响应 [J]. *应用生态学报*, 2025, 36(4): 1043–1052.
- Zhang Y X, Fan Z X, Fu P L, et al. Stem radial growth of dominant subalpine coniferous species and their responses to moisture variability in Northwest Yunnan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(4): 1043–1052.
- [37] Chan T, Hölttä T, Berninger F, et al. Separating water-potential induced swelling and shrinking from measured radial stem variations reveals a cambial growth and osmotic concentration signal [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, 39(2): 233–244.
- [38] Ge C H, Sun P, Yao R, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to ecological drought in China: lag and cumulative effects [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 304: 107405.
- [39] 杨保国, 刘士玲, 庞圣江, 等. 大青山米老排树干径向生长变化及其对环境因子的响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(2): 29–35, 53.
- Yang B G, Liu S L, Pang S J, et al. The stem radial growth of *Mytilaria laosensis* and its response to environmental factors in Daqing mountain [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(2): 29–35, 53.
- [40] Franceschi E, Moser-Reischl A, Honold M, et al. Urban environment, drought events and climate change strongly affect the growth of common urban tree species in a temperate city [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 88: 128083.
- (责任编辑 孟瑶
责任编辑 孟平)