半干旱区城市环境中4种针叶树的水分利用效率
——以呼和浩特市为例

马继媛，韩玉国，文延延，杨雨航，宋子豪，肖森培
（北京林业大学 水土保持学院，北京 100083）

摘　要：［目的］揭示半干旱地区城市环境中针叶树种水分利用效率的种间差异特征及其动态变化规律，阐明环境因子对水分利用效率的调控机制，为节水型城市绿化树种选择提供科学依据。［方法］以内蒙古自治区呼和浩特市为研究区，选择侧柏、杜松、油松和白杆4种城市绿化常用针叶树为试验材料，采用盆栽控制试验和完全随机设计，利用LI-6400XT便携式光合测定仪，于2024年6—9月生长季系统测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO_2浓度等光合参数，计算瞬时水分利用效率，同步监测光合有效辐射、温度、相对湿度等环境因子，采用重复测量方差分析和Pearson相关分析进行统计分析。［结果］采用Tukey HSD法对4个树种进行两两多重比较，结果显示所有树种间均存在极显著差异（$p<0.001$）。各树种的水分利用效率生长季均值表现为：杜松＞侧柏＞油松＞白杆的等级序列，杜松水分利用效率最高（6.16±0.80 μmol/mmol），采用低光合-低蒸腾的保守型水分利用策略；侧柏水分利用效率为中等水平（3.64±0.96 μmol/mmol）；油松和白杆水分利用效率较低，分别为1.62±0.73 μmol/mmol和0.99±0.67 μmol/mmol。相关性分析显示水分利用效率与净光合速率和叶面饱和水汽压亏缺呈极显著正相关，与气孔导度和蒸腾速率呈极显著负相关。［结论］杜松凭借“低光合-低蒸腾”保守型水分利用策略表现出最优的水分利用效率，在盆栽控制条件下展现高效稳定特性，在具备人工养护或类似水分管理的半干旱区城市绿化中可作为优先树种；侧柏具有良好的平衡型水分利用特性，适应性较强；而油松和白杆的高耗水消耗型特征及较低稳定性使其不适宜在水分受限环境中推广。

关键词：植物生理学；水分利用效率；盆栽控制试验；针叶树；半干旱地区；呼和浩特市
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）03-0064-09　　**中图分类号：**S152.7^{+}5，S732

文献参数：马继媛，韩玉国，文延延，等.半干旱区城市环境中4种针叶树的水分利用效率[J].水土保持通报，2026，46（3）：64-72. Ma Jiyuan，Han Yuguo，Wen Yanyan，et al. Water use efficiency of four coniferous tree species in urban environments of semi-arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（3）：64-72.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.037　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.037**

Water use efficiency of four coniferous tree species in urban environments of semi-arid regions
—A case study of Hohhot City

Ma Jiyuan，Han Yuguo，Wen Yanyan，Yang Yuhang，Song Zihao，Xiao Senpei
（*School of Soil and Water Conservation*，*Beijing Forestry University*，*Beijing* 100083，*China*）

Abstract：［Objective］The interspecific differences and dynamic variations of water use efficiency（WUE）of coniferous tree species in urban environments of semi-arid regions were examined，and the regulatory mechanisms of environmental factors on WUE were clarified，in order to provide a scientific basis for selecting water-saving urban greening tree species.［Methods］Taking Hohhot as the study area，four common coniferous tree species for urban greening，namely *Platycladus orientalis*，*Juniperus rigida*，*Pinus tabuliformis*，and *Picea meyeri* were selected as experimental materials. Pot control experiments and a completely randomized design were employed.

收稿日期：2025-08-25　　**修回日期：**2025-11-18　　**采用日期：**2025-11-27
资助项目：国家自然科学基金项目“基于稳定同位素的典型森林生态系统水、碳过程及其耦合机制研究”（41430747）
第一作者：马继媛（1999—），女（汉族），内蒙古自治区巴彦淖尔市人，硕士研究生，研究方向为水土保持与城市绿化。Email：3347500294@qq.com。
通信作者：韩玉国（1979—），男（汉族），内蒙古自治区通辽市人，博士，教授，主要从事土壤侵蚀与养分流失方面的研究。Email：yghan@bjfu.edu.cn。

Using a LI-6400XT portable photosynthesis system, photosynthetic parameters including net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and intercellular CO_2 concentration were systematically measured during the growing season from June to September 2024. Instantaneous WUE was calculated, while environmental factors such as photosynthetically active radiation, temperature, and relative humidity were monitored simultaneously. Statistical analyses were performed using repeated measures analysis of variance (ANOVA) and Pearson correlation analysis. [Results] Pairwise multiple comparisons of the four tree species using the Tukey's honestly significant difference (HSD) tests showed extremely significant differences among the four species ($p<0.001$). The mean WUE during the growing season followed the order: *J. rigida* > *P. orientalis* > *P. tabuliformis* > *P. meyeri*. *J. rigida* had the highest WUE (6.16±0.80 μmol/mmol), employing a conservative water use strategy characterized by low photosynthesis and low transpiration. *P. orientalis* exhibited a moderate WUE (3.64±0.96 μmol/mmol). *P. tabuliformis* and *P. meyeri* showed lower WUE values of 1.62±0.73 and 0.99±0.67 μmol/mmol, respectively. Correlation analysis indicated that WUE was highly significantly positively correlated with net photosynthetic rate and leaf-to-air vapor pressure deficit, and highly significantly negatively correlated with stomatal conductance and transpiration rate. [Conclusion] *J. rigida*, with its conservative water use strategy characterized by low photosynthesis and low transpiration, demonstrates the highest WUE and shows efficient and stable performance under the pot control experiment conditions. It can be prioritized for urban greening in semi-arid regions with artificial maintenance or similar water management practices. *P. orientalis* shows a well-balanced water use strategy and strong adaptability. In contrast, the high water consumption and low stability of *P. tabuliformis* and *P. meyeri* make them unsuitable for application in water-limited environments.

Keywords: plant physiology; water use efficiency; pot control experiment; coniferous trees; semi-arid regions; Hohhot City

随着全球气候变化和快速城市化进程的推进,水资源短缺已成为制约半干旱地区城市可持续发展的重要因素。植物水分利用效率(water use efficiency, WUE)作为表征植物光合碳同化与蒸腾失水之间权衡关系的核心生理生态指标[1],在评价城市园林植物节水抗旱能力和指导城市绿化树种选择方面具有重要意义[2]。然而,城市环境的复杂性使得城市园林植物WUE研究面临诸多挑战和不足,亟需深入探讨。

城市环境具有明显区别于自然环境的独特生态特征。城市热岛效应、空气污染、土壤改良、人工灌溉、局部小气候变化等复合环境因子显著影响植物生理生态过程[3]。城市热岛效应导致的高温低湿环境增加了植物蒸腾负荷,空气污染可能影响气孔行为和光合效率,城市土壤的物理化学性质改变和根系生长空间限制等因素都可能对植物WUE产生显著影响[4]。在半干旱地区的城市环境中,树木蒸腾和相关的蒸发冷却在水循环和缓解城市"热岛"效应中发挥着关键作用,但不同树种在蒸腾量、季节性变化和生物物理调节方面的差异在干旱城市地区尚未得到充分解释[1]。目前针对城市园林植物WUE的研究存在显著不足:①现有WUE研究主要集中在自然森林生态系统,对城市环境中园林植物WUE特征及其环境调控机制缺乏系统认识[4]。②城市环境复合胁迫因子对植物WUE的交互影响机制尚未明确,缺乏针对城市环境特点的WUE评价体系[5]。③基于WUE特征的城市绿化树种筛选标准不完善,难以为抗旱节水型城市绿化建设提供科学指导[6]。④城市环境下不同树种WUE的种间差异规律及其生理生态机制研究薄弱,限制了对城市植物水分适应策略的深入理解[7]。这些不足直接影响了半干旱地区城市绿化中树种选择的科学性和节水灌溉管理的有效性。

呼和浩特市作为中国北方典型的半干旱地区城市,面临着水分胁迫与城市环境胁迫的双重挑战。随着1990年以来快速城市化进程,人口和城市化率显著增长,地下水位持续下降,水环境质量面临严峻挑战,使得城市绿化树木长期处于水分胁迫状态[8]。这种极端的水分环境为研究城市园林植物水分利用策略提供了理想的研究平台。针叶树作为半干旱地区城市绿化的重要树种,具有较强的抗旱性和对城市环境的良好适应性。本研究选择的4种针叶树:侧柏(*Platycladus orientalis*)、杜松(*Juniperus rigida*)、油松(*Pinus tabuliformis*)和白杆(*Picea meyeri*),均为中国北方半干旱地区广泛应用的乡土树种或适生树种,在呼和浩特市城市绿化中占重要地位。然而,这些树种在城市环境下的WUE特征、种间差异规律及其生理生态机制尚缺乏系统研究,制约了基于WUE的城市绿化树种优化配置。基于此,本研究拟解决

以下关键科学问题：①半干旱区城市环境中4种针叶树WUE_i的种间差异特征及其动态变化规律是什么？②城市环境因子如何调控针叶树种的WUE_i？为回答上述科学问题，本研究采用盆栽控制试验，结合LI-6400XT光合测定仪，系统测定叶片水平上不同针叶树种的水分利用效率及其主要影响因子。研究结果将为呼和浩特市及类似半干旱地区城市绿化建设中的抗旱节水型树种选择以及城市森林生态系统可持续管理提供重要的理论依据，对于构建适应气候变化的城市森林生态系统具有重要的理论意义和实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

呼和浩特市地处中国北方典型半干旱地区，位于内蒙古自治区中部（110°46′—112°10′E，40°51′—41°8′N）。该地区属温带大陆性季风气候，气温呈典型单峰型年内分布；降水集中于6—8月，具有显著的季风性特征。年平均气温6.7 ℃，年平均降水量400.3 mm，年蒸发量1 753.9 mm，蒸降比达4.38，水分亏缺严重[9]。近年来气象要素呈现明显的年际波动，2020—2024年观测数据显示夏季降水和冬季气温均存在波动趋势。研究区土壤类型主要为栗钙土，pH值7.8～8.2，呈弱碱性[10]。土层厚度30—80 cm，质地以砂壤土为主，有机质含量1.2%～1.8%，全氮0.08%～0.12%，速效磷8～15 mg/kg，速效钾120～180 mg/kg，土壤肥力中等偏下[11]。本研究在呼和浩特市树木园内开展，树木园建于1956年，占地面积22 hm^2，是集科研、教学和游览为一体的综合性植物园。园内收集保存各类植物500余种，其中木本植物300余种。园区地势平坦，海拔1 050～1 080 m，具有典型的半干旱区城市绿地环境特征[8]。园内基础设施完善，具备完整的灌溉系统和气象观测设备，为开展植物生理生态学研究提供了良好的条件。

1.2 试验材料

本研究选择4种在呼和浩特市城市绿化中广泛应用的针叶树种作为试验材料：侧柏、杜松、油松和白杆。试验苗木均为3 a生容器苗，具有相似的生长状况和形态特征。侧柏苗木平均株高35.2±3.8 cm，地径0.7±0.1 cm；杜松苗木平均株高32.6±4.2 cm，地径0.6±0.1 cm；油松苗木平均株高28.9±3.5 cm，地径0.8±0.1 cm；白杆苗木平均株高31.3±3.9 cm，地径0.6±0.1 cm。试验采用盆栽控制试验方法，每个树种选择生长一致、无病虫害的健壮苗木30株，随机分为3组，每组10株作为重复。试验用盆为直径30 cm、高35 cm的塑料花盆，盆底设排水孔。盆栽基质采用园土：腐叶土：河沙按体积比3∶2∶1混合配制，基质理化性质：pH值为7.6，有机质含量18.3 g/kg，全氮1.24 g/kg，全磷0.68 g/kg，全钾12.8 g/kg，容重1.32 g/cm^3，总孔隙度49.2%，田间持水量23.4%。移栽前对基质进行过筛、消毒处理，每盆装土6 kg，确保基质均匀性。苗木于2024年4月下旬移栽上盆，缓苗期1个月。缓苗期间统一管理，及时浇水保证成活，不施肥。缓苗结束后开始正式试验。试验期间采用统一的水肥管理制度。根据土壤含水量和天气情况进行补充灌溉，保持土壤含水量在田间持水量的60%～70%，每月施复合肥1次，定期进行病虫害防治和杂草清除。

1.3 研究方法

试验采用完全随机设计，设置4个树种处理（侧柏、杜松、油松、白杆），每个处理3个重复，每个重复10株苗木，共计120株试验苗木。所有盆栽苗木在呼和浩特市树木园温室外自然环境条件下培养，摆放采用完全随机排列，定期轮换位置以减少环境异质性的影响。

1.3.1 光合参数测定

采用LI-6400XT便携式光合测定仪（LI-COR，美国）测定叶片光合参数。测定时间为2024年6—9月生长季，每月中旬选择晴好天气进行日变化观测。从每个树种的每个重复单元中随机选取1株长势良好的植株作为固定测定对象，每次测定于当日8：00—18：00期间，每2 h测定1次，共6个时间点。每株选取树冠中部向阳面生长良好、无病虫害的当年生健康叶片进行测定。测定参数包括：净光合速率〔P_n，μmol/(m^2·s)〕、蒸腾速率〔T_r，mmol/(m^2·s)〕、胞间CO_2浓度（C_i，μmol/mol）、气孔导度〔G_s，mol/(m^2·s)〕、实测叶面温度〔$t(l)$，℃〕和叶面饱和水汽压亏缺（VPD，kPa）。气体交换参数的日变化测量旨在捕获叶片对自然环境的响应，测定在自然光温条件下进行，叶室未设定恒定参数，以真实记录叶片的生理变化。

瞬时水分利用效率（WUE_i）计算公式：

$$WUE_i = P_n / T_r$$

式中：P_n为叶片净光合速率〔μmol/(m^2·s)〕；T_r为蒸腾速率〔mmol/(m^2·s)〕。

1.3.2 环境因子监测

在试验期间同步监测环境因子，使用Davis Vantage Pro2自动气象站（Davis公司，美国）监测大气温度〔$t(a)$，℃〕、相对湿度（RH，%）、光合有效辐射〔PAR，μmol/(m^2·s)〕、风速（WS，m/s）等，数据每

10 min记录1次;使用TDR-300土壤水分测定仪(Spectrum公司,美国)测定土壤含水量(SWC, %);使用pH计测定土壤pH值,每周测定1次。

1.4 数据处理

本研究采用重复测量方差分析(repeated measures ANOVA)对瞬时水分利用效率进行统计分析。试验设计中,被试单元(subject)为每个树种的每次重复(n=12,即4个树种×3次重复),被试间因子(between-subject factor)为树种(4个水平),被试内因子(within-subject factors)为月份(4个水平)和时间(6个水平)。在进行方差分析前,需验证以下前提假设(显著性水平α=0.05):①对模型残差进行Shapiro-Wilk正态性检验;②对被试间因子的各水平进行Levene方差齐性检验;③对被试内因子进行Mauchly's球形假设检验,若违背球形假设(p<0.05),则采用Greenhouse-Geisser校正自由度。方差分析采用Type Ⅲ平方和计算F统计量。对于显著的主效应,采用Tukey HSD(honestly significant difference)法进行事后多重比较,控制家族错误率在α=0.05水平。对于显著的交互效应,进行简单效应分析(simple effects analysis),并采用Bonferroni法校正多重比较的显著性水平。所有统计检验的显著性水平设定为α=0.05,根据p值大小标注显著性,*p<0.05,**p<0.01,***p<0.001。文中数据均以平均值±标准差表示。所有数据分析使用R软件(版本4.3.1,R Core Team,2023)完成,图形绘制使用Origin软件(版本2021)完成。

2 结果与分析

2.1 光合、蒸腾及相关环境因子日动态变化

在一天中,随着外界条件的规律性变化,G_s, VPD, C_i, P_n, $T4_r$发生改变,水分利用效率同样也具有节律性变化。强烈的太阳辐射是引起t, T_r等日变化发生的重要因素[2]。如图1所示,PAR, VPD, T_r, $t(a)$, $t(l)$表现为单峰曲线,峰值出现在10:00或14:00,随后依时序呈现出递减趋势。P_n, G_s为双峰曲线,峰值出现在10:00,16:00,10:00达到最高值后开始下降,到16:00稍有回升后仍呈现出减弱趋势。C_i则呈深V曲线,从8:00开始逐渐下降,14:00下降到谷值后上升。

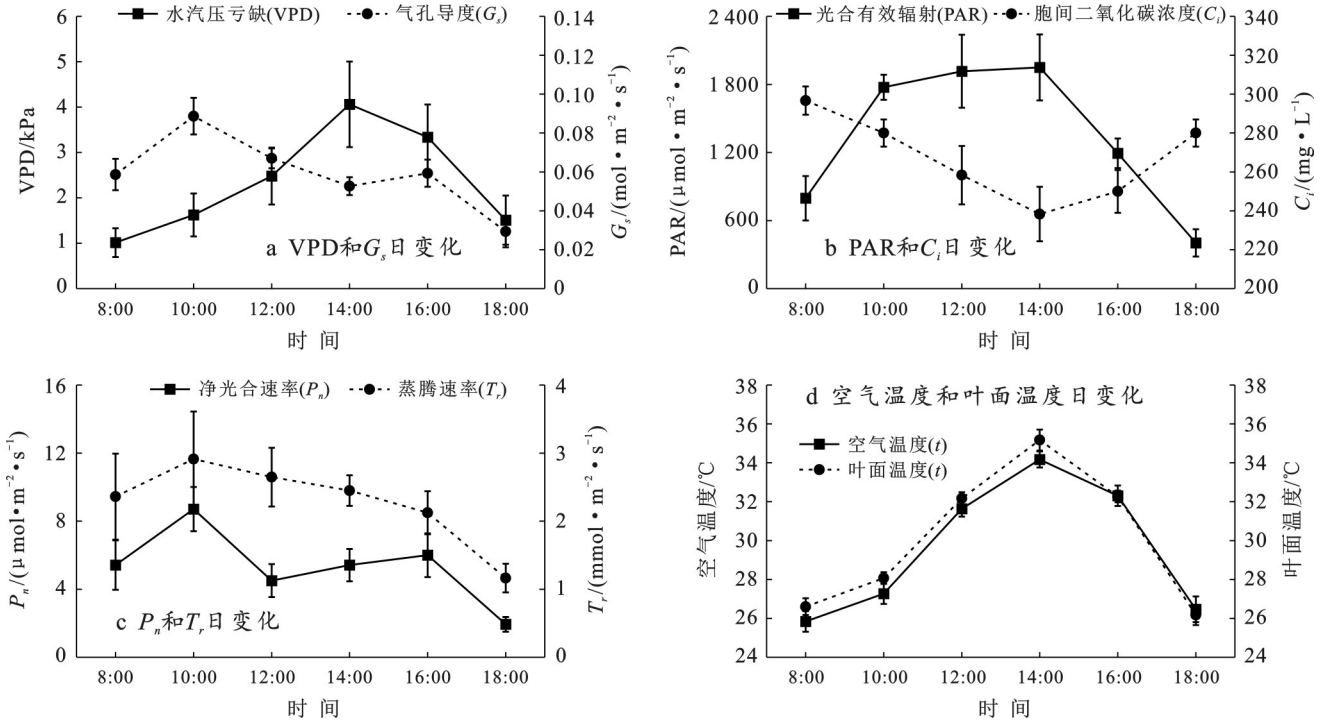

图1 主要试验环境因子的日变化

Fig.1 Daily variations of primary environmental factors under experiment

2.2 水分利用效率在日尺度和月尺度的变化规律

2.2.1 日尺度水分利用效率变化特征

如图2所示,不同树种植物水分利用效率呈现出差异化的日变化响应模式。①侧柏表现出最显著的日变化波动特征,在14:00WUE$_i$值达到峰值4.60 μmol/mmol,较8:00的2.79 μmol/mmol显著增加64.9%。随后在16:00进一步上升至全天最高点4.88 μmol/mmol,而在18:00骤降至2.77 μmol/mmol。整个日变化过程中侧柏的WUE$_i$变化幅度达2.11 μmol/mmol,显示出对日间环境变化的高度敏

感性和典型的“双峰型”日变化特征。②杜松则呈现出相对平稳的日变化模式,表现为全天高位运行且波动较小的特征。从8:00的6.24 μmol/mmol小幅上升,在10:00和12:00均保持在6.44～6.45 μmol/mmol的高位水平,随后在14:00略降至5.88 μmol/mmol,16:00和18:00维持在5.97～6.02 μmol/mmol的相对稳定水平。全天WUE_i变化幅度仅为0.57 μmol/mmol,表明杜松具有优异的水分利用效率稳定性和对日间环境波动的强适应能力。③油松呈现出“双峰型”日变化模式,但其峰谷特征与侧柏存在明显差异。8:00WUE_i值为1.94 μmol/mmol,10:00达到上午峰值2.80 μmol/mmol,增幅44.3%,随后在12:00和18:00急剧下降至谷值0.89和0.87 μmol/mmol,14:00和16:00出现回升,分别达到1.37,1.88 μmol/mmol。油松全天WUE_i变化幅度达1.93 μmol/mmol,仅次于侧柏,且在12:00和18:00的显著下降表明其对正午和傍晚的高温和强光胁迫极为敏感,但在下午时段展现出一定的生理调节和恢复能力。④白杆8:00 WUE_i值为1.70 μmol/mmol,10:00达到全天峰值2.00 μmol/mmol,随后持续下降,12:00降至0.88 μmol/mmol,14:00,16:00和18:00继续递减,分别为0.63,0.54,0.19 μmol/mmol。白杆全天WUE_i变化幅度高达1.81 μmol/mmol,且下午至傍晚呈现单向持续下降的独特模式。

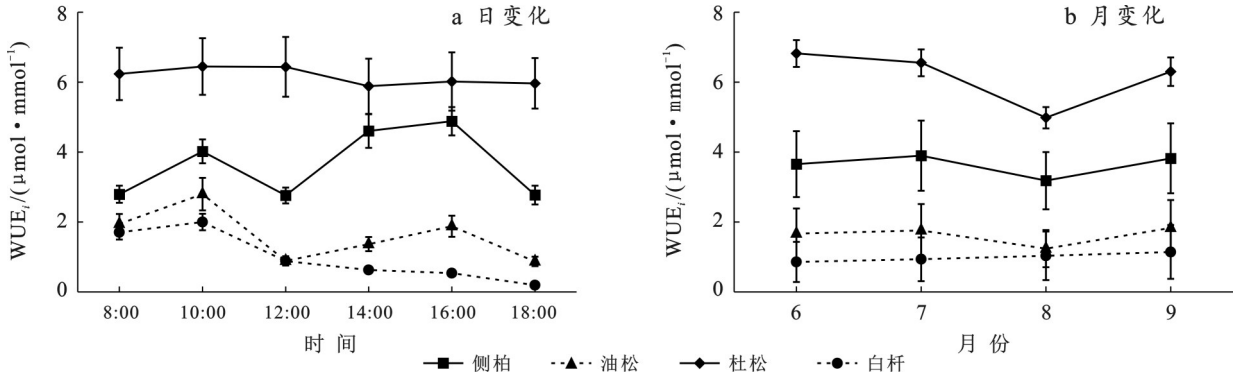

图2 各树种水分利用效率(WUE_i)的时刻与月份响应模式

Fig.2 Response patterns of tree species water use efficiency (WUE_i) to time and month

2.2.2 月尺度水分利用效率变化特征

不同树种呈现出差异化的月变化响应模式,侧柏呈现出“先升后降再升”的非线性季节变化模式。WUE_i值在7月达到峰值3.90 μmol/mmol,随后在8月下降至3.18 μmol/mmol,降幅达18.5%,而在9月再次回升至3.82 μmol/mmol。这种波动模式表明侧柏对季节中期8月的干旱高温胁迫较为敏感,但具有较强的生理调节能力,能够在胁迫解除后迅速恢复;杜松表现出最显著的季节波动特征,在8月WUE_i值降至最低点4.98 μmol/mmol,较6月6.82 μmol/mmol显著降低27.0%。随后在9月,WUE_i值出现明显回升至6.30 μmol/mmol,整个生长季杜松的WUE_i变化幅度达1.84 μmol/mmol,显示出对季节性环境变化的高度敏感性;油松同样表现出“先升后降再升”的变化趋势,但其变化模式与侧柏存在明显差异。6—7月WUE_i值从1.67 μmol/mmol微增至1.76 μmol/mmol,8月显著下降至1.24 μmol/mmol,9月大幅回升至1.83 μmol/mmol,且超过生长季初期水平。油松在8月的显著下降幅度仅次于杜松,表明其对生长季中期环境胁迫同样敏感,但9月的强劲恢复能力显示出其良好的生理调节潜力和对秋季有利条件的高效利用能力;白杆则呈现出完全相反的季节动态,表现为持续递增趋势。从6月的0.86 μmol/mmol逐月稳步上升,至9月达到1.14 μmol/mmol,累计增长32.6%。

2.3 光合参数的种间差异及其与WUE_i的关系

净光合速率在不同树种间存在显著差异。各树种的净光合速率统计显示,侧柏〔7.64±2.63 μmol/(m²·s)〕>油松〔5.99±3.63 μmol/(m²·s)〕>杜松〔3.78±1.08 μmol/(m²·s)〕>白杆〔3.46±2.98 μmol/(m²·s)〕。侧柏净光合速率最高,油松次之,杜松和白杆净光合速率相对较低。各树种的蒸腾速率统计显示,油松〔3.57±1.55 mmol/(m²·s)〕>白杆〔3.05±1.03 mmol/(m²·s)〕>侧柏〔2.09±0.36 mmol/(m²·s)〕>杜松〔0.63±0.19 mmol/(m²·s)〕。油松和白杆蒸腾速率较高,杜松蒸腾速率显著低于其他树种,表现出明显的水分保守策略。从光合-蒸腾耦合关系来看,侧柏表现出高效平衡型策略,其净光合速率最高,蒸腾速率中等,水分利用效率较高,体现了碳获取与水分损耗的优化平衡;杜松则采取极端节水模式,虽净光合速率较低,但通过超低蒸腾实现最高水分利用效率,凸显强干旱适应能力;油松依赖高

蒸腾支撑光合,水分利用效率较低,属高耗水敏感型;白杆因光合严重抑制伴随高蒸腾,水分利用效率最低,揭示其对干旱胁迫的弱适应性。

2.4　环境因子对 WUE_i 的影响

树木的生长高度依赖水分供应,其水分利用效率受生物因子与非生物因子的协同调控[12]。WUE_i 是 P_n 与 T_r 的比值,所有直接或间接影响 P_n 或 T_r 的生理及环境参数均会显著改变 WUE_i。表1的相关性分析表明,P_n 与PAR呈极显著正相关($p<0.01$),与 $t(a)$ 呈显著正相关($p<0.05$);T_r 则 $t(a)$,$t(l)$,VPD呈显著正相关($p<0.01$);WUE_i 与 P_n,VPD呈极显著正相关($p<0.01$),与PAR呈极显著正相关($p<0.01$),而与 G_s,T_r 呈极显著负相关($p<0.01$),与 $t(l)$,C_i 呈极显著负相关($p<0.01$),与 $t(a)$ 呈显著负相关($p<0.05$)。

表1　4种针叶树不同时间段水分利用效率与影响因子相关性

Table 1　Correlation between water use efficiency and influencing factors of four coniferous tree species at different periods

因 子	光合有效辐射PAR	空气温度 $t(a)$	叶面温度 $t(l)$	饱和水汽压亏缺VPD	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r
水分利用效率 WUE_i	0.382**	−0.153*	−0.213**	0.752**	−0.657**	−0.441**	0.863**	−0.773**
蒸腾速率 T_r	−0.053	0.423**	0.423**	0.321**	0.751**	0.325**	0.524**	
净光合速率 P_n	0.736**	0.211*	0.154	−0.114	0.774**	−0.752**		
胞间 CO_2 浓度 C_i	−0.635**	−0.531**	−0.567	−0.538**	0.635**			
气孔导度 G_s	−0.546**	−0.653**	−0.637**	−0.745**				
水汽压亏缺VPD	0.681**	0.867**	0.781**					
叶面温度 $t(l)$	0.754**	0.824**						
空气温度 $t(a)$	0.742**							

注:**在0.01水平上显著相关,*在0.05水平上显著相关。

3　讨 论

3.1　WUE_i 种间差异的主导机制

植物的生长发育是受多种环境因子综合调控的复杂过程,其中水分作为植物生命活动的基础要素,在植物的整个生命周期中发挥着关键作用。WUE作为评价植物生长适应性和抗逆性的核心指标,能够综合反映植物在水分胁迫条件下的生理响应能力[13]。前人研究[14]表明,在干旱胁迫环境中,具有较高WUE的树种能够通过优化水分分配和利用策略,以相对较少的水分消耗实现更高的净光合产物积累和生物量增长,从而表现出更强的干旱适应能力和生存竞争优势。本研究中各树种的 WUE_i 生长季均值结果显示:杜松的 WUE_i 最高(6.16±0.80 μmol/mmol),其次为侧柏(3.64±0.96 μmol/mmol)和油松(1.62±0.73 μmol/mmol),白杆的 WUE_i 最低(0.99±0.67 μmol/mmol)。

杜松生长季平均 WUE_i 显著高于其他树种,作为“最抗旱的植物群体”[15],杜松具有独特的结构适应性,包括抗气穴化的木质部组织和鳞片状叶片,这些特征使其能够在极端干旱条件下维持水分传导[16]。侧柏的稳定性最强,其成功在于同步调节 P_n 与 T_r。这种协同变化归因于灵敏的气孔调节机制[17],使其在干旱胁迫下能通过显著降低 G_s 和 T_r 来减少水分损失,同时维持相对较高的 P_n,从而适应一定程度的干旱。油松虽光合能力较强,但其高蒸腾需求导致 WUE_i 生长季均值仅1.62±0.73 μmol/mmol,暴露其对干旱的敏感性。这与油松开放式冠层结构及较弱的气孔关闭响应有关[18],在持续干旱下易引发水分失衡。

研究表明,油松森林具有开放式冠层特征,覆盖度通常小于20%[19],且其水分利用策略相对不保守,对环境变化的响应敏感性较高。然而,也有研究[20]表明油松在应对土壤干旱加剧时,其 G_s 和 T_r 下降的幅度高于 P_n 下降的幅度,从而提高瞬时水分利用效率。这种看似矛盾的结论反映了油松气孔调节响应在不同干旱强度下的策略差异。在本研究观测的持续干旱胁迫下,油松表现出气孔调节滞后和水分失衡,其整体 WUE_i 表现较低。白杆 WUE_i 均值最低,Han等[21]在芦芽山的研究表明白杆WUE显著低于常绿针叶林平均水平;Chen等[22]通过对比研究发现在干旱胁迫下白杆保持相对稳定的蒸腾水平,而油松和樟子松的林分蒸腾量显著下降,体现了其作为喜湿树种的生理特征。这与本研究的结果相近,白杆在6—9月蒸腾速率平均变化幅度仅为9.4%,WUE_i 显著低于其他树种,尽管9月 WUE_i 有所提升,但生长季碳积累效率仍居低位。Feng等[23]通过6 a监测发现落叶松的水分亏缺诱导的茎收缩较低且径向增长速率较白杆更高,揭示了白杆在混交林中的竞争劣势。Chen等[22]进一步指出,白杆的气孔调节能力弱于油松和樟子松,在生长季节初期消耗土壤水分较少,但整体碳积累效率受限。

3.2 环境因子对WUE_i的影响

本研究发现WUE_i与VPD呈极显著正相关。这种正相关关系可能反映了植物在干旱胁迫下的重要适应机制，面对高VPD诱导的强烈蒸腾驱动力，针叶树可能倾向于降低G_s以优先限制水分损失（T_r显著下降）[20]。尽管气孔关闭也会限制CO_2供应（C_i显著下降）并可能抑制P_n，观测数据显示生理响应的非对称性，T_r的降幅大于P_n的降幅，这与WUE_i的提升相一致。这一气孔优化调控过程是针叶树在水分受限环境中维持碳获取并提高水分利用效率的核心策略[24]。这与本研究观测到的树种在干旱期通过气孔调节维持WUE_i的策略一致，也证实了气孔限制在维持碳同化与水分利用平衡中的关键作用。然而，相关分析仅能揭示变量间的统计关联，其背后的确切调控机制仍需通过气孔阻力动态监测、叶水势测定或ABA等植物激素水平分析等进一步的机制性试验来验证。此外，WUE_i与$t(l)$和$t(a)$呈显著负相关，提示在本研究区域和观测期内，温度升高可能通过促进蒸腾作用和抑制光合潜力，超过了其可能的间接气孔调节效应，从而与WUE_i下降相关联。这一结果与王耀龙[25]关于敦煌常见优势植物环境因子影响的研究和姜寒冰[4]关于作物水分利用效率的研究结论一致。然而，关于温度对WUE的影响存在复杂性，不同研究结果存在差异。例如，有研究[26]发现侧柏WUE_i与温度呈极显著正相关，认为较高温度下的干旱胁迫导致气孔开度降低、蒸腾减少、CO_2利用率提高，从而增大WUE_i；而张远东等[15]在西南高山地区则研究发现WUE_i与温度负相关；冯朝阳[27]在中国北方地区的9个定位观测台站发现WUE随$t(a)$升高而增大；林子琦等[28]研究发现黄河流域植被WUE与温度的偏相关关系存在空间分异，正相关区域主要分布在黄土高原东北部，负相关区域则分布在黄河流域西部；方青青等[29]通过对半干旱流域的研究指出，草原区较森林区升温快但植被对温度的响应存在差异性。这些差异与研究尺度、植被类型、水分状况、地域气候背景等多种因素有关。因此，温度对WUE的影响是多种生理生态过程综合作用的结果，其方向与强度具有高度的环境依赖性。准确阐明温度与水分利用效率关系的内在机制，还需结合气孔导度的连续监测、叶片生理生化指标测定以及控制试验等多种手段进行深入研究。

4 结 论

通过对半干旱区城市环境中4种针叶树种水分利用效率的系统研究，发现各树种间存在极显著差异，水分利用效率生长季均值表现为：杜松＞侧柏＞油松＞白杆的等级序列。杜松采用"低光合-低蒸腾"的保守型水分利用策略，通过严格的气孔调节实现高效水分利用；侧柏采用平衡型策略，水分利用效率居中；而油松和白杆则表现为高耗水的消耗型策略，水分利用效率较低且稳定性差。各树种水分利用效率在时间尺度上呈现明显的变化规律，杜松在日内保持高位稳定运行，但对季节性干旱胁迫敏感；侧柏和油松均表现出“双峰型”日变化模式和“先升后降再升”的季节波动特征，油松在正午和傍晚时段受胁迫最显著；白杆则呈现下午持续递减的独特日变化模式和逆势上升的季节动态，反映出其对干旱环境的弱适应性和不同的生理响应机制。环境因子分析表明，水分利用效率与净光合速率和饱和水汽压亏缺呈极显著正相关，与气孔导度和蒸腾速率呈极显著负相关，揭示了光合能力提升和适度水分胁迫对提高水分利用效率的重要作用。在本研究设定的盆栽控制条件下，包括缓苗期管理、人工灌溉与施肥，杜松展现出高效且稳定的水分利用特性，因此在类似水分管理条件或具备人工养护的半干旱区城市绿化中，杜松可作为优先考虑的树种，以促进节水高效的可持续生态建设。

参考文献（References）

[1] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982,9(2):121-137.

[2] 赵娜，李少宁，徐晓天，等.北京地区典型绿化树种水分利用效率及其影响因素[J].北京林业大学学报，2021，43(3):44-54.
Zhao Na, Li Shaoning, Xu Xiaotian, et al. Water use efficiency and its influencing factors of typical greening tree species in Beijing region [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021,43(3):44-54.

[3] Piracha A, Chaudhary M T. Urban air pollution, urban heat island and human health: A review of the literature [J]. Sustainability, 2022,14(15):9234.

[4] 姜寒冰，张玉翠，任晓东，等.作物水分利用效率研究方法及尺度传递研究进展[J].中国生态农业学报(中英文)，2019，27(1):50-59.
Jiang Hanbing, Zhang Yucui, Ren Xiaodong, et al. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(1):50-59.

[5] Calfapietra C, Peñuelas J, Niinemets Ü. Urban plant physiology: Adaptation-mitigation strategies under per-

manent stress [J]. Trends in Plant Science, 2015,20(2):72-75.

[6] 林雍,陈智,杨萌,等.中国干旱半干旱区生态系统光合参数的时空变异及其影响因素[J].植物生态学报,2022,46(12):1461-1472.
Lin Yong, Chen Zhi, Yang Meng, et al. Temporal and spatial variations of ecosystem photosynthetic parameters in arid and semi-arid areas of China and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(12):1461-1472.

[7] 王楠,王晶晶,王传宽,等.兴安落叶松水分利用效率对模拟气候变暖的响应[J].植物研究,2025,45(5):686-694.
Wang Nan, Wang Jingjing, Wang Chuankuan, et al. Responses of water use efficiency in *Larix gmelinii* to simulated climate warming [J]. Bulletin of Botanical Research, 2025,45(5):686-694.

[8] 石玮琦.呼和浩特市树木园典型植物群落生态环境效应调查研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Shi Weiqi. Investigation on ecological and environmental effects of typical plant communities in the Hohhot arboretum [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[9] 任彤.呼和浩特樟子松人工林蒸腾、光合特征与气候适宜性分析[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Ren Tong. Analysis of Transpiration、photosynthetic characteristics and climate suitability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Hohhot [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[10] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.
Wang Tian, Xu Shan, Zhao Mengying, et al. Allocation of mass and stability of soil aggregate in different types of Nei Mongol grasslands [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(11):1168-1176.

[11] 孙文惠.呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古大学,2012.
Sun Wenhui. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2012.

[12] 王放.干旱对祁连山不同针叶树种碳水过程的影响[D].甘肃 兰州:兰州大学,2024.
Wang Fang. The impact of aridity on carbon and water processes of different conifer species on the Qilian Mountains [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2024.

[13] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].生态学报,2018,38(23):8296-8305.
Du Xiaozheng, Zhao Xiang, Wang Haoyu, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(23):8296-8305.

[14] 何天友,于增金,沈少炎,等.花吊丝竹对干旱胁迫的光合和生理响应[J].森林与环境学报,2020,40(1):68-75.
He Tianyou, Yu Zengjin, Shen Shaoyan, et al. Photosynthetic and physiological responses of *Dendrocalamus minor* var. *amoenus* to drought stress [J]. Journal of Forest and Environment, 2020,40(1):68-75.

[15] 张远东,庞瑞,顾峰雪,等.西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J].生态学报,2016,36(6):1515-1525.
Zhang Yuandong, Pang Rui, Gu Fengxue, et al. Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in alpine area of southwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(6):1515-1525.

[16] Candido-Ribeiro R, Aitken S N. Weak local adaptation to drought in seedlings of a widespread conifer [J]. New Phytologist, 2024,241(6):2395-2409.

[17] Zhao Na, Lu Shaowei, Li Shaoning, et al. Enhancing the water use efficiency model predictions for *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis*: Integrating the dynamics of carbon dioxide concentration and soil water availability [J]. Science of the Total Environment, 2025,959:178179.

[18] Dang Hongzhong, Zhang Xueli, Han Hui, et al. Water use by Chinese pine is less conservative but more closely regulated than in Mongolian Scots pine in a plantation forest, on sandy soil, in a semi-arid climate [J]. Frontiers in Plant Science, 2021,12:635022.

[19] Man Zihong, Zhang Junzhou, Liu Junjun, et al. Process-based modeling of phenology and radial growth in *Pinus tabuliformis* in response to climate factors over a cold and semi-arid region [J]. Plants, 2024,13(7):980.

[20] 金思雨,彭祚登.刺槐和油松干旱胁迫响应研究进展[J].西北林学院学报,2022,37(4):79-91.
Jin Siyu, Peng Zuodeng. Research progress on drought stress on *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022,37(4):79-91.

[21] Han Yijie, Li Shuheng, Wang Jiachuan, et al. Responses of *Picea meyeri* to climatic factors revealed by tree ring isotopes and water use efficiency on Luya Mountain of north-central China [J]. Atmosphere, 2023,14(4):615.

[22] Chen Shengnan, Chen Z, Feng Zeyu, et al. Species difference of transpiration in three urban coniferous forests in a semiarid region of China [J]. Journal of Hydrology, 2023,617:129098.

[23] Xue Feng, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. Different

drought responses of stem water relations and radial increments in *Larix principis*-rupprechtii and *Picea meyeri* in a montane mixed forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022,315:108817.

[24] 刘燕,张凌楠,刘晓宏,等.干旱胁迫植物个体生理响应及其生态模型预测研究进展[J].生态学报,2023,43(24):10042-10053.
Liu Yan, Zhang Lingnan, Liu Xiaohong, et al. Research progress from individual plant physiological response to ecological model prediction under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(24):10042-10053.

[25] 王耀龙,宋梦奇,倪铭遥,等.敦煌常见优势植物气体交换日变化比较[J].温带林业研究,2025,8(3):26-32.
Wang Yaolong, Song Mengqi, Ni Mingyao, et al. Comparison of diurnal variations in gas exchange of common dominant plants in Dunhuang [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2025,8(3):26-32.

[26] 周佳,孟平,张劲松,等.河南民权与陕西白水刺槐径向生长与水分利用效率对气候响应的差异[J].林业科学研究,2021,34(6):1-8.
Zhou Jia, Meng Ping, Zhang Jinsong, et al. Differences in the response of radial growth and intrinsic water use efficiency of *Robinia pseudoacacia* to climatic factors in Minquan of He'nan Province and Baishui of Shaanxi Province [J]. Forest Research, 2021,34(6):1-8.

[27] 冯朝阳,王鹤松,孙建新.中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子[J].植物生态学报,2018,42(4):453-465.
Feng Chaoyang, Wang Hesong, Sun Jianxin. Temporal changes of vegetation water use efficiency and its influencing factors in northern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018,42(4):453-465.

[28] 林子琦,温仲明,刘洋洋,等.基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因分析[J].生态学报,2024,44(1):377-391.
Lin Ziqi, Wen Zhongming, Liu Yangyang, et al. Spatiotemporal variation and attribution of carbon and water use efficiency in the Yellow River basin based on remote sensing data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):377-391.

[29] 方青青,张思远,王国强,等.半干旱流域水热变化规律及植被响应[J].生态学报,2024,44(16):7198-7212.
Fang Qingqing, Zhang Siyuan, Wang Guoqiang, et al. Water and thermal conditions variation and the vegetation response at semi-arid basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(16):7198-7212.

(上接第31页)

[24] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[25] 聂晶晶,杨翠,陈文昶,等.凯氏定氮仪测定土壤全氮方法优化[J].环境保护前沿,2024(1):24-31.
Nie Jingjing, Yang Cui, Chen Wenchang, et al. Optimization of Kjeldahl method for determination of total nitrogen in soil [J]. Advances in Environmental Protection, 2024(1):24-31.

[26] 中华人民共和国农业部.NY/T 1121.7—2014 土壤检测:土壤有效磷的测定[S].北京:中国农业出版社,2015.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1121.7—2014 Soil Testing: Method for Determination of Available phosphorus in soil [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.

[27] 杨小秋,汪健,王林,等.火焰原子吸收光谱法测定植烟土壤中的速效钾[J].烟草科技,2012,45(10):65-67.
Yang Xiaoqiu, Wang Jian, Wang Lin, et al. Determination of available potassium in tobacco planting soil by flame atomic absorption spectrometry [J]. Tobacco Science & Technology, 2012,45(10):65-67.

[28] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[29] Franke A C, van den Brand G J, Vanlauwe B, et al. Sustainable intensification through rotations with grain legumes in Sub-Saharan Africa: A review [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018,261:172-185.

[30] 任凤玲,张旭博,孙楠,等.施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J].中国农业科学,2018,51(1):119-128.
Ren Fengling, Zhang Xubo, Sun Nan, et al. A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(1):119-128.

[31] Peddle S D, Hodgson R J, Borrett R J, et al. Practical applications of soil microbiota to improve ecosystem restoration: Current knowledge and future directions [J]. Biological Reviews, 2025,100(1):1-18.

[32] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.