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

坝上地区退化小叶杨树干液流特征及对环境因子的响应

杨东烨 余新晓 李旭红 蒋涛 贾国栋

Characteristics of sap flow of degraded *Populus simonii* in Bashang Area, Hebei Province of northern China and its response to environmental factors

Yang Dongye, Yu Xinxiao, Li Xuhong, Jiang Tao, Jia Guodong

引用本文:
杨东烨, 余新晓, 李旭红, 蒋涛, 贾国栋. 坝上地区退化小叶杨树干液流特征及对环境因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):36–43. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230332
Yang Dongye, Yu Xinxiao, Li Xuhong, Jiang Tao, Jia Guodong. Characteristics of sap flow of degraded *Populus simonii* in Bashang Area, Hebei Province of northern China and its response to environmental factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):36–43. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230332

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230332

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响

Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 127–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230209

自然群体小叶杨叶绿素荧光表型变异分析

Chlorophyll fluorescence phenotypic variation in natural populations of *Populus simonii*

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 52–62. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230030

基于Logistic和Gompertz模型的小叶杨幼苗生长组合优化模型

Optimal growth model of *Populus simonii* seedling combination based on Logistic and Gompertz models

北京林业大学学报, 2020, 42(5): 59–70. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190296

六盘山华北落叶松林分蒸腾日内变化及其对环境因子的响应

Diurnal variations of stand transpiration of *Larix principis–rupprechtii* forest and its response to environmental factors in Liupan Mountains of northwestern China

北京林业大学学报, 2020, 42(5): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190468

兴安落叶松和白桦细根形态对环境变化的响应

Response of fine root morphology of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* to environmental changes

北京林业大学学报, 2019, 41(6): 15–23. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180396

考虑环境因素的杨树生长率模型研究

Research on the growth rate model of *Populus* spp. considering environmental factors

北京林业大学学报, 2022, 44(11): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210201

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230332

坝上地区退化小叶杨树干液流特征及对环境因子的响应

杨东烨[1] 余新晓[1] 李旭红[2] 蒋 涛[1] 贾国栋[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 311100）

摘要:【目的】探究华北坝上地区退化和未退化小叶杨蒸腾耗水规律，合理配置生态用水，为小叶杨退化林的修复与重建提供理论参考。**【方法】**选取未退化、退化小叶杨为研究对象，利用热扩散探针（TDP）测定树干液流量，同时监测气象因子，研究两种小叶杨在不同天气下树干液流特征及其对环境因子的响应机制，分析生长旺季（7、8、9 月）两种小叶杨树干液流与蒸腾量。**【结果】**（1）在不同天气条件下，退化和未退化小叶杨晴天树干液流速率大于雨天与阴天，晴天时两者差距最大，且未退化小叶杨树干液流的启动时间总是早于退化小叶杨；（2）生长季内两种小叶杨树干液流速率差异显著，未退化小叶杨蒸腾耗水量是退化小叶杨的 3 倍；（3）大气温度和光合有效辐射是影响小叶杨树干液流最主要的环境因子，未退化小叶杨对环境因子响应更敏感。**【结论】**退化小叶杨较低的蒸腾量难以维持正常生理所需，导致生理衰退，对环境因子变化的敏感性增加，进一步削弱了其应对未来干旱事件的能力。建议对已经发生退化的杨树林分进行更新改造。

关键词：小叶杨；树干液流；退化；环境因子
中图分类号：S774；S157 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)07−0036−08
引文格式：杨东烨，余新晓，李旭红，等. 坝上地区退化小叶杨树干液流特征及对环境因子的响应［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：36−43. Yang Dongye, Yu Xinxiao, Li Xuhong, et al. Characteristics of sap flow of degraded *Populus simonii* in Bashang Area, Hebei Province of northern China and its response to environmental factors［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 36−43.

Characteristics of sap flow of degraded *Populus simonii* in Bashang Area, Hebei Province of northern China and its response to environmental factors

Yang Dongye[1] Yu Xinxiao[1] Li Xuhong[2] Jiang Tao[1] Jia Guodong[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, Zhejiang, China)

Abstract:［**Objective**］This paper explores the transpiration water consumption patterns of degraded and undegraded *Populus simonii* in the Bashang Area, Hebei Province of northern China, optimizes the allocation of ecological water use, so as to provide theoretical references for the restoration and reconstruction of degraded *Populus simonii* forests.［**Method**］In this study, we selected undegraded and degraded *Populus simonii* as the research objects and used the thermal dissipation probe (TDP) method to determine the sap flow, and also monitored the meteorological factors to study sap flow characteristics of the two types of *Populus simonii* and their response mechanisms to environmental factors, as well as their sap flow and transpiration rates during the growing season (July, August and September).［**Result**］(1) The relationship between daily changes of sap flow of degraded and undegraded *Populus simonii* was greater in sunny weather compared with rainy and cloudy days, with the largest difference observed on sunny days, and the initiation of sap flow of undegraded *Populus simonii* was always earlier than that of degraded *Populus simonii*. (2) The transpiration water consumption of undegraded *Populus simonii* was the highest

收稿日期: 2023−11−16 **修回日期:** 2024−05−10
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1302502-03），国家自然科学基金项目（42230714、U2243202）。
第一作者: 杨东烨。主要研究方向：生态水文。Email：2363383030@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 余新晓，博士，教授。主要研究方向：流域水文。Email：yuxinxiao111@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

during the growing season, and there was a significant difference in sap flow rates between the two species, with a 3 times difference in transpiration. (3) Temperature and photosynthetically active radiation (PAR) were the most important environmental factors affecting sap flow in *Populus simonii*, and undegraded *Populus simonii* was more sensitive to environmental factors. [**Conclusion**] The low transpiration of degraded *Populus simonii* makes it difficult to obtain the water required to maintain normal physiology, resulting in physiological decline, and its sensitivity to changes in environmental factors is increased, which further weakens its ability to cope with future drought events. Therefore, it is recommended to renovate the degraded poplar stand.

Key words: *Populus simonii*; sap flow; degradation; environmental factors

2021 年 3 月 14 日至 15 日晨，中国遭遇近 10 年强度最大、范围最广的一次沙尘天气。3 月 15 日，根据北京市生态环境监测中心监测数据，北京大部分地区 PM10 浓度超过 2 000 μg/m^3，海淀区四季青站达 3 572 μg/m^3，三北防护林的重要性再次进入大众的视野。三北防护林建设以来，对沙尘暴，尤其是近地面沙尘和沙源本地传输起到了减弱甚至阻断的作用[1]。小叶杨（*Populus simonii*）是三北地区优质的速生树种，在防护林的营造中做出了很大贡献，然而大面积防护林建设造成了普遍的林水矛盾[2−3]。小叶杨在树龄 30 年时进入成熟期，部分小叶杨出现了不同程度的退化[4−5]。坝上地区杨树防护林退化面积为 8.1 万 hm^2，占当地杨树防护林总面积的 79.5%[3]，其中小叶杨是主要衰退树种之一。小叶杨人工林退化已对林分的正常生长造成了严重影响和危害，阻碍了林业和区域的可持续发展。治理退化小叶杨人工林以及如何合理经营人工林使其健康持续稳定发展已成为坝上地区三北防护林体系建设的重要问题。

在干旱半干旱地区，水分是制约植被生长的主要环境因子。在土壤–植被–大气连续体的水分运移中，蒸腾耗水是影响植物生长发育的重要环节[6−7]，占到了森林水分散失 40% 以上[8]，树木吸收的水分 90% 以上以蒸腾的方式散失，蒸腾耗水主要来自于树干液流，约占总蒸腾量的 99% 以上[9−10]。热技术是利用外部电源向树木提供恒定热量，通过测定热传递的速率或热损失量来确定树木的液流量，通过测定树干液流来反映树木的蒸腾耗水。Granier 热扩散探针法[11−12]（thermal dissipation probe，TDP）可以在不破坏样树正常生长的情况下，将传感器插入边材木质部中，进行长期连续观测，并根据温差进行树干液流速率的计算[13−14]。目前，有关小叶杨树干液流的研究主要是针对不同林龄、与其他树种的水分利用差异特征以及蒸腾耗水对地下水位影响展开的[15−18]，对于退化与未退化小叶杨树干液流的差异和对环境因子响应的研究较少。

本研究旨在通过 2019 年树木生长季对树干液流和可能相关的气象因子进行连续测量，探求小叶杨蒸腾作用对环境因子的响应，系统研究退化与未退化杨树干液流特征，以期解决生态建设中林水矛盾的难题，为防护林的经营管理提供数据支撑和理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　试验地概况

试验地点位于中国河北省张家口市三北防护林小二台林场（41°03′ ~ 41°27′N，114°20′ ~ 114°58′E），平均海拔 1 300 m。该地区位于中国北方坝上高原，属温带大陆性季风气候区，四季分明，雨热同期，年日照 2 890 h，年平均气温 3.7 ℃，昼夜温差较大。年最低和最高气温分别为−34.8 ℃ 和 33.4 ℃。多年平均降水量为 392.7 mm，全年的降雨量集中在 6—8 月份。风能资源丰富，年平均风速 4.6 m/s，春秋冬常见六级以上大风天气，大风为常见的自然灾害。土壤母质主要为玄武岩、花岗岩、片麻岩和风积沙土，地带性土壤为栗钙土，少量棕壤、草甸土和盐碱土，pH 值在 3.37 ~ 5.52 之间。在生长季初期进行林分调查。林场内主要分布了小叶杨、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongholica*）、华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）、柠条（*Caragana korshinskii*）、沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、苜蓿（*Medicago sativa*）、狗尾巴草（*Setaria viridis*）、草木犀（*Melilotus officinalis*）等。

据 2016 和 2017 年在张北地区样地普查结果发现，张北地区人工林中小叶杨、樟子松等乔木分布面积最广[19]，共有小叶杨防护林 1.02 × 10^5 hm^2。本研究小叶杨林所处林分面积 1 500 m^2，平均土壤厚度 83 cm，平均种植密度 1 438 株/hm^2，均为同一年种植，林龄 33 年。选择位置相临，胸径相近、树干圆满、生长状况良好且无病虫害的未退化和退化的小叶杨共 5 棵为测定对象，退化与未退化的判定标准参照《LY/T 3179—2020 退化防护林修复技术规程》。对样地内选定的小叶杨各项指标进行调查，样木基本

特征如表 1 所示。

1.2 环境因子测定

设置林外小型自动气象站(HOBO U30, Onset inc., USA)观测记录研究区气象数据; 同时在样地内设置林内小型自动气象站, 同步观测记录降雨量、光合有效辐射、大气压强、空气温度、空气相对湿度、太阳辐射、风速和风向等气象数据, 采集频率 1 min 1 次, 15 min 输出一个数据。饱和水汽压亏缺使用空气温度和空气相对湿度计算[20]得到。

1.3 边材面积测定

边材面积的测定是研究树干液流关键步骤。由于试验为破坏性取样, 为避免样树被破坏影响树干液流的测定, 在固定样地中另选 8 棵胸径相近的小叶杨, 量取胸径, 同时在树木胸高 1.3 m 处使用生长锥钻取木芯的方法测定边材宽度。根据树芯年轮估算树木年龄, 测量树芯边材长度与心材长度并记录统计, 拟合边材宽度与树木胸径的统计关系方程: $y = 0.605\ 5\ x - 4.737\ 4$, $R^2 = 0.971\ 1$。利用关系方程计算林木的边材宽度, 推求每株样树的边材面积。

1.4 树干液流的测定

采用 Granier 热扩散探针对样树的正向树干液流速率进行连续观测, 观测时间为 2019 年 1 月到 2019 年 12 月。选择树干胸高 1.3 m 处的位置, 首先用小刀去除树皮, 到达形成层, 然后进行钻孔, 钻孔时用次氯酸钠清洗钻头, 使用过氧化氢清洗钻孔。安装探针时把加热探针插入上边的孔中, 把参比探针插入下边的孔中, 每次推进 10 mm, 交替推动探针直到钻孔最深处。TDP 探针插入树干时接触位置用硅胶密封, 探针周围安放 1/4 泡沫球, 使用反射性泡沫包裹设置热绝缘装置, 再包上锡纸和塑料纸, 防止太阳辐射和雨水渗入影响数据结果。热探针外接 12 V 电压持续加热, 参比探针不加热。使用 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, Logan, USA)采集树干液流数据, 每 10 s 采集 1 次数据, 每 15 min 计算平均值并记录。

根据热量守恒定理, 将温差转换为液流密度。

$$J_s = 0.011\ 9K^{1.231} \tag{1}$$

$$K = (\Delta T_m - \Delta T)/\Delta T \tag{2}$$

式中: J_s 为单株样木液流密度(g/(cm^2·s)); K 为无量纲常数; ΔT_m 为液流密度为 0 时两个探针之间的温差(℃); ΔT 为两个探针之间的瞬时温差(℃)。

$$F = 3\ 600 J_s A_s \tag{3}$$

式中: F 为整树每小时蒸腾量(g/h), A_s 为边材面积(cm^2), 3 600 为将瞬时液流密度扩展到每小时液流量的时间换算系数。

由于林分中树木胸径存在差异, 以胸径为尺度扩展因子推算林分尺度的日蒸腾量。

$$E_c = \sum_{i=1}^{n} (J_{s,i} \times A_{s,i}) \tag{4}$$

式中: E_c 为日蒸腾量(mm), $J_{s,i}$ 表示 i 径阶所有样木的液流密度均值, $A_{s,i}$ 为 i 径阶的总边材面积, n 为径级数。

1.5 数据分析

由于研究区特殊的气候条件, 小叶杨一般在 5 月份长叶, 10 月中下旬落叶, 因而将生长季定为 5—10 月。

利用 Microsoft Excel 2019 软件进行气象数据处理和分析, 树干液流数据利用 Dynamax 公司提供的液流数据分析软件及 SPSS 26.0 统计软件分析和处理。利用 Pearson 相关分析、多元线性回归分析对小叶杨树干液流与环境因子的关系进行分析, 多重比较在 0.05 水平上利用最小显著差异(least significant difference, LSD)法检验。利用 Origin 2021 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同天气退化与未退化小叶杨树干液流日变化

在生长季内选取雨天(6 月 25 日)、晴天(7 月 3 日)、阴天(8 月 9 日), 绘制不同天气条件下小叶杨

表 1 样木基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of sample wood

退化程度 Degradation degree	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	枯梢高 Withered shoot height/m	枝下高 Clear bole height/m	冠幅 Crown width/m		边材宽度 Sapwood width/cm	边材面积 Sapwood area/cm^2
					东西 East-west	南北 North-south		
未退化 Undegraded	13.7	41.0		2.1	6.7	5.3	19.58	1 317.59
	13.4	24.2		2.5	4.1	2.1	9.62	440.64
退化 Degraded	10.6	18.5	3.1	1.2	2.8	3.1	6.24	240.36
	12.9	23.7	5.6	1.4	2.2	3.5	9.32	421.10
	12.6	21.8	5.9	2.1	2.8	3.5	8.20	350.31

树干液流速率变化曲线。

图 1a 显示：雨天退化和未退化小叶杨的树干液流速率均随时间呈现“多峰型”变化。6 月 25 日，未退化小叶杨液流启动于早晨 08:00，而退化杨树稍晚于 08:30。两者液流速率均迅速上升，但退化杨树整体速率较小。至 12:30，两者液流速率达到峰值，分别为 0.002 20 cm/s 和 0.001 49 cm/s。当日下午 14:00—15:30 降雨期间，树干液流速率迅速下降。降雨结束后，退化杨树液流逐渐上升并波动，而未退化杨树液流持续下降至 16:30 后才开始回升。18:30 时，未退化和退化小叶杨的液流速率达到第二次峰值，分别为 0.001 64 cm/s 和 0.001 28 cm/s，前者是后者的 1.28 倍

晴天时，未退化和退化小叶杨的树干液流均呈现“宽峰型”（图 1b），启动时间分别为 07:30 和 08:15，之后均迅速上升。未退化小叶杨在 11:30 达到峰值，而退化小叶杨的“宽峰”平台时间相对较短，为 09:30—16:00，可能与其对环境响应较慢有关。正午时，由于高温低湿导致植物午休，气孔关闭，两者液流均短暂下降。平台期后，液流缓慢下降，至 19:00 急剧减小，21:00 后变化趋于平稳。退化杨树的下降速率转变较晚。7 月 3 日，未退化和退化小叶杨的液流峰值分别为 0.004 02 cm/s 和 0.002 60 cm/s，前者是后者的 1.57 倍。晴天时树木蒸腾和光合作用最强，生长条件最佳。

图 1c 显示：阴天条件下，未退化小叶杨树干液流呈“双峰型”曲线，而退化小叶杨则为“单峰型”。8 月 9 日凌晨起，夜间树干液流维持较高水平，归因于 8 月 8 日高光合有效总辐射（160 303.1 J），杨树通过主动吸水补偿前一天蒸腾耗水。未退化小叶杨液流于 08:00 启动，初期增长缓慢，至 10:00 速率骤增，首个峰值达 0.000 80 cm/s，随后正午时降至波谷。退化小叶杨因夜间液流速率高，早晨启动后速率较低且启动时间晚，正午时受太阳辐射影响进一步降低，上午与夜间液流差异小，导致曲线由“双峰”变为“单峰”。下午，两者液流均上升，14:30 时达到峰值，分别为 0.002 04 cm/s 和 0.000 87 cm/s，未退化小叶杨是退化小叶杨的 2.35 倍。

2.2　生长季内退化与未退化小叶杨树干液流差异

为方便观察树干液流连续多日变化，排除阴天、雨天的干扰，在小叶杨生长旺季（7、8、9 月）每个月选取连续 5 天天气为晴天的数据进行分析（图 2）。

整体来看，未退化小叶杨和退化小叶杨树干液流的变化曲线趋势相同，波峰、波谷形状相近。7 月份树干液流与 8、9 月份相比，整体较高，且未退化小叶杨树干液流速率大于退化小叶杨树干液流速率。其中，退化小叶杨树干液流流量占未退化小叶杨树干液流比例为 7 月份（60% ~ 76%）> 8 月份（32% ~ 43%）> 9 月份（5% ~ 26%）。对环境因子进行分析，造成这一结果的原因可能是 7 月份降雨较多，退化杨树对雨天的响应程度较高。

图 3 显示：在生长季内，5 月两者蒸腾量相近（退化 15 mm，未退化 16 mm）。进入 6 月，差异逐渐增大，未退化小叶杨蒸腾量增至 68.3 mm，是退化小叶杨（27.92 mm）的 2.45 倍。7 月，未退化小叶杨蒸腾量达到最大值，为 97.26 mm，而退化小叶杨为 27.71 mm，前者是后者的 3.51 倍。自 8 月起蒸腾量显著下降，9 月继续减少，未退化与退化小叶杨的蒸

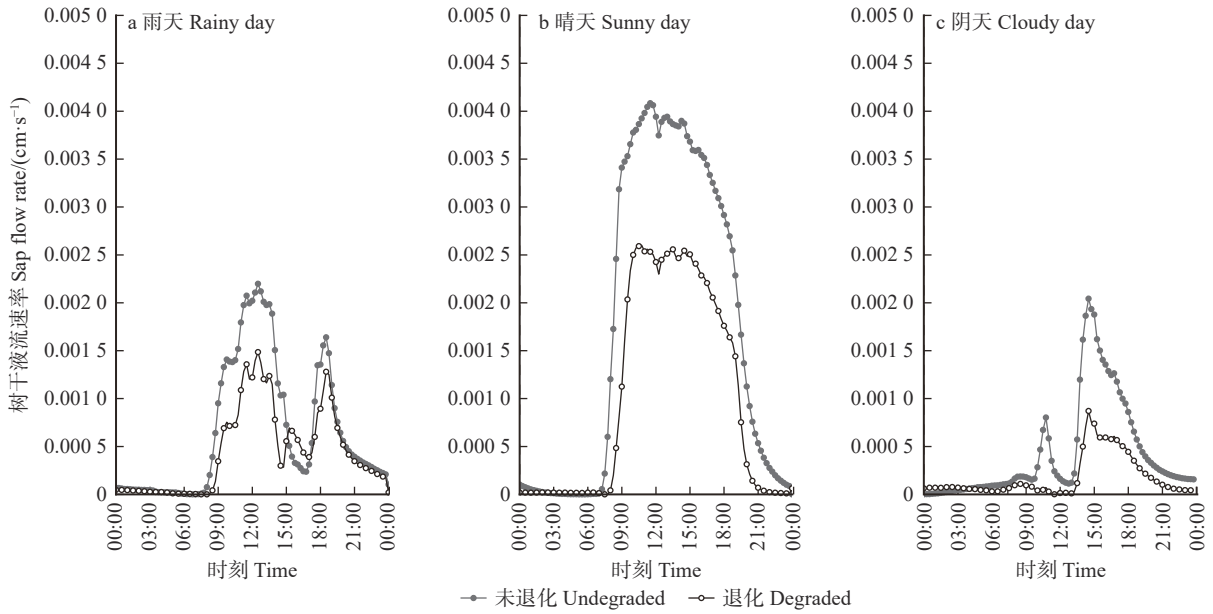
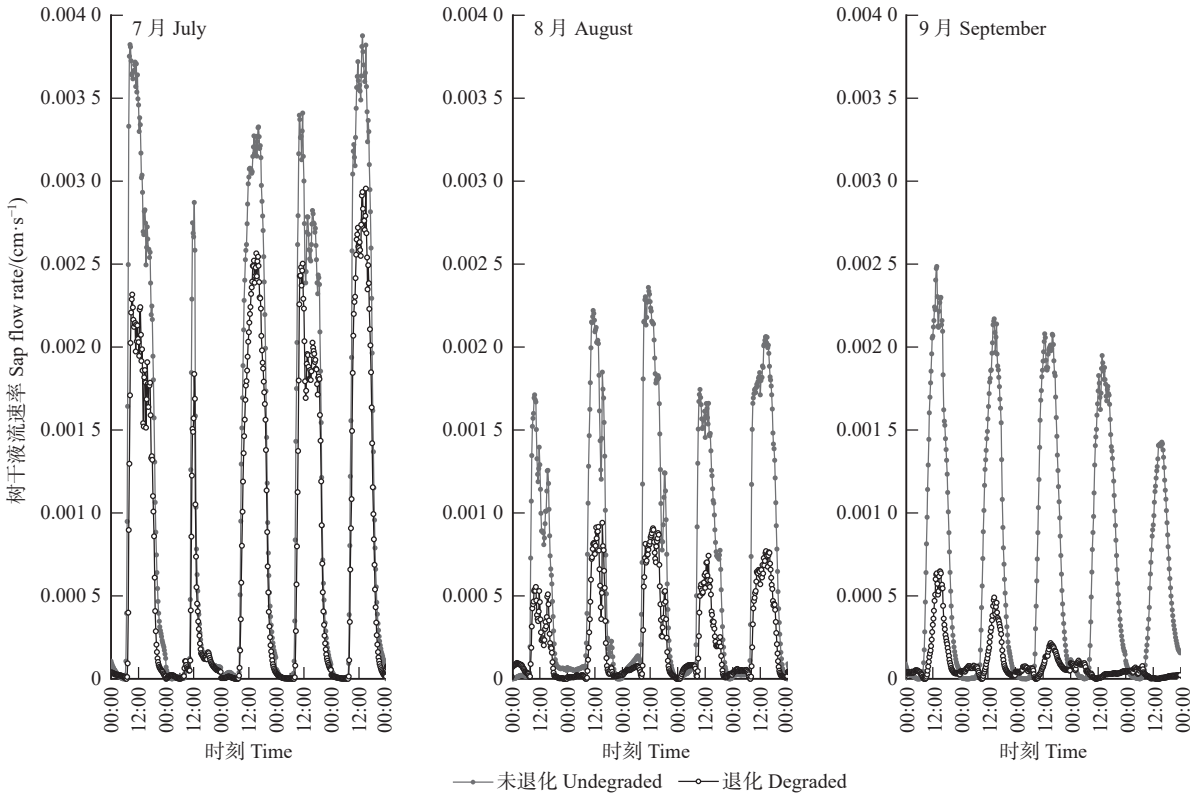


图 1　不同天气下小叶杨树干液流变化

Fig. 1　Changes in sap flow of *Populus simonii* under different weather conditions



7—9 月观测日期分别为 7 月 4—8 日，8 月 5—9 日，9 月 4—8 日。 The observated dates for July, August, and September are July 4th to 8th, August 5th to 9th, and September 4th to 8th, respectively.

图 2 生长旺季小叶杨树干液流变化

Fig. 2 Changes in sap flow of *Populus simonii* during the growing season

腾量分别为 64.12 mm 和 14.63 mm，较 8 月分别降低 42.17% 和 36.02%。至 10 月，蒸腾量进入非生长季水平，未退化小叶杨蒸腾量最大为 19.67 mm。整体来看，未退化小叶杨的蒸腾量显著高于退化树木，且两者均在 7 月后迅速下降。这表明树木退化后蒸腾作用显著降低，生长季内未退化小叶杨的蒸腾耗水量是退化小叶杨的 3 倍。

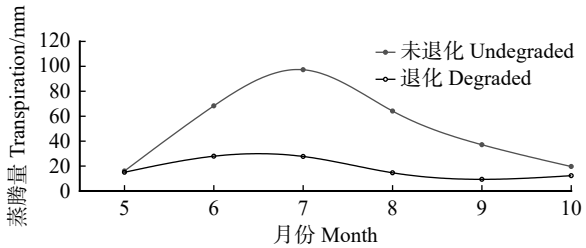


图 3 生长季小叶杨蒸腾量

Fig. 3 Transpiration of *Populus simonii* during the growing season

2.3 退化与未退化小叶杨液流速率对气象因子变化的响应

针对未退化与退化小叶杨的树干液流与环境因子关系的研究(表 2、表 3)表明，两者树干液流均与 5 个气象因子显著相关($P < 0.001$)。拟合结果显示，两者树干液流与光合有效辐射和大气温度呈三次曲线关系，与相对湿度和饱和水汽压差呈二次曲线关系。风速与退化小叶杨为线性关系，而与未退化小叶杨为二次曲线关系。表 2 显示：退化杨树液流主要受大气温度(28.5%)、光合有效辐射(21.5%)和饱和水汽压差(12.0%)影响。对于未退化小叶杨，大气温度的影响最大(60.3%)，是退化小叶杨的 2.1 倍，其次是光合有效辐射(27.3%)和饱和水汽压差(22.0%)，风速的影响最小(3.3%)。综上，未退化小叶杨对气象因子的响应敏感，其中大气温度对树干液流具有最大直接影响，其次是光合有效辐射，风速对小叶杨树干液流的影响最小。

本研究对退化与未退化小叶杨的树干液流进行了多元线性逐步回归分析，以大气温度、光合有效辐射、相对湿度、风速和饱和水汽压差为自变量。结果显示，对于未退化小叶杨，大气温度单独解释了树干液流变化的 31.6%，而 5 个环境因子综合解释了 45.4% 的变化。然而，对于退化小叶杨，大气温度并非显著预测变量，而其余 4 个因子综合解释了 27.1% 的液流变化。这表明未退化小叶杨的树干液流更易受环境因子影响。

3 讨 论

3.1 退化与未退化小叶杨树干液流的日变化

在日尺度上，小叶杨树干液流速率随天气条件

表 2　不同环境因子与小叶杨树干液流的拟合方程

Tab. 2　Fitting equations between different environmental factors and sap flow of *Populus simonii*

退化程度 Degradation degree	气象因子 Meteorological factor	拟合方程 Fitting equation	R^2	P
退化 Degraded	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (x_1)	$y = -174.222 + 4.89x_1 - 0.06\,x_1^2 + 2.524e - 6\,x_1^3$	0.215	< 0.001
	风速 Wind speed (x_2)	$y = 610.465 + 557.01\,x_2$	0.068	< 0.001
	大气温度 Air temperature (x_3)	$y = -17.1 + 26.646\,x_3 - 2.627\,x_3^2 + 0.045\,x_3^3$	0.285	< 0.001
	相对湿度 Relative humidity (x_4)	$y = -1\,192.5 + 11.385\,x_4 - 0.253\,x_4^2$	0.051	< 0.001
	饱和水汽压差 Saturated vapor pressure (x_5)	$y = -306.041 - 34.063\,x_5 - 0.141\,x_5^2$	0.120	< 0.001
未退化 Undegraded	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (x_1)	$y = 281.786 + 7.923\,x_1$ -0.09 $x_1^2 + 3.605E - 6\,x_1^3$	0.273	< 0.001
	风速 Wind speed (x_2)	$y = 1\,179.974 + 786.543$-83.242 x_2^2	0.033	< 0.001
	大气温度 Air temperature (x_3)	$y = -309.610 + 7.625\,x_3 + 5.541\,x_3^2 + 0.176\,x_3^3$	0.603	< 0.001
	相对湿度 Relative humidity (x_4)	$y = 1\,824.017 + 26.977\,x_4 - 0.495\,x_4^2$	0.072	< 0.001
	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit (x_5)	$y = -574.040 - 49.729\,x_5 - 0.163\,x_5^2$	0.220	< 0.001

注：y为树干液流速率。下同。Notes: y is sap flow rate. Same as below.

表 3　树干液流与环境因子逐步回归分析

Tab. 3　Stepwise regression analysis of sap flow and environmental factors

退化程度 Degradation degree	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2	P
未退化 Undegraded	$y = 0.562\,x_3$	0.316	< 0.001
	$y = 0.426\,x_3 + 0.306\,x_1$	0.391	< 0.001
	$y = 0.198\,x_3 + 0.381\,x_1 - 0.263\,x_5$	0.418	< 0.001
	$y = -0.227\,x_3 + 0.286\,x_1 - 0.744\,x_5 - 0.428\,x_4$	0.454	< 0.001
	$y = -0.225\,x_3 + 0.312\,x_1 - 0.742\,x_5 - 0.435\,x_4 - 0.063\,x_2$	0.457	< 0.001
退化 Degraded	$y = 0.433\,x_1$	0.188	< 0.001
	$y = 0.408\,x_1 - 0.257\,x_5$	0.253	< 0.001
	$y = 0.310\,x_1 - 0.327\,x_5 - 0.164\,x_4$	0.266	< 0.001
	$y = 0.277\,x_1 - 0.328\,x_5 - 0.153\,x_4 + 0.081\,x_2$	0.271	< 0.001

变化显著，表现为晴天最高，雨天次之，阴天最低。晴天的高光合有效辐射、高温和低相对湿度促使植物液流速率和蒸腾耗水量增大[21]，然而，本研究中雨天树干液流速率较大，与曹文强等[22]的研究结果相悖，这可能是由于本研究中相对湿度与小叶杨环境因子的相关性较弱，且降雨事件（14:00—15:30，18 mm）短暂且前期无连续降雨，导致相对湿度对树干液流的影响不明显。在不同天气条件下，未退化和退化小叶杨的日变化规律相似，但前者树干液流量始终高于后者，特别是在白天差异显著，这与徐利岗等[23]的研究结果一致。晴天时两者差异最大，其次是阴天和雨天，这归因于未退化和退化小叶杨对天气条件响应的差异[24–25]。未退化小叶杨对光合有效辐射和温度的响应更为敏感，在阴天和雨天，气象因子对两者的影响减弱，导致差异较小。关于启动时间，无论天气条件如何，未退化小叶杨总是早于退化小叶杨，时间差为 0.5 ~ 1 h，这与前人的研究[17]相符。

3.2　退化与未退化小叶杨生长季树干液流变化规律

退化小叶杨和未退化小叶杨的生长旺季树干液流活动较强，其原因可能是生长旺季光合有效辐射最强，叶面积指数远远大于其他时期，蒸腾作用最强烈，树干液流量也普遍较高，非生长季植株主要靠根压主动吸水产生树干液流[26]。整体来看，7 月份的杨树树干液流最大。比较两种杨树的树干液流发现，生长季未退化小叶杨与退化小叶杨树干液流速率与蒸腾量差距较大，未退化小叶杨蒸腾量是退化小叶杨的 3 倍，与前人研究结果相似[27–29]。

3.3　环境因子对小叶杨树干液流的影响

分析退化和未退化小叶杨树干液流对气象因子的响应，我们发现大气温度、光合有效辐射、湿度、饱和水汽压差和风速 5 种气象因子与树干液流均呈极显著相关性，这与以往的研究结果一致[28,30]。其中，大气温度和光合有效辐射是影响小叶杨树干液流的主要环境因子，而风速对树干液流的影响最小。较高的温度和辐射有利于树干液流的增加。退

化与未退化小叶杨与气象因子的相关性存在显著差异。未退化小叶杨对气温的响应更为敏感。此外，虽然退化和未退化小叶杨对水分的响应较高，但相对湿度与树干液流的相关系数较小。这可能是由于土壤水分对退化小叶杨树干液流量的影响更为显著。这与程静等[31]的研究结果相吻合，即树干液流不仅受气象因子的影响，还与土壤温度、水分等因子密切相关。

4 结　　论

本文基于热扩散技术分析了坝上地区退化和未退化小叶杨防护林的水分运移特征。结果表明，环境因子对两种小叶杨的蒸腾作用具有显著影响。不同天气条件下，小叶杨树干液流速率表现为晴天 > 雨天 > 阴天，未退化小叶杨树干液流的启动时间早于退化小叶杨，尤其在晴天，两者差异显著。在生长季，7 月份光合有效辐射较强，温度较高，小叶杨蒸腾耗水量达到最大。在整个生长季，两种小叶杨树干液流速率存在显著差异。未退化小叶杨蒸腾量是退化小叶杨的 3 倍。两种小叶杨的树干液流均与气温、光合有效辐射、湿度、饱和水汽压差和风速呈显著相关，但未退化小叶杨对气象因子的响应更为敏感。其中，大气温度和光合有效辐射是影响小叶杨树干液流最关键的气象因子。

与未退化小叶杨相比，较低的蒸腾量导致退化小叶杨难以获取维持正常生理所需水分，加剧了其退化过程。在全球气候变化加剧、干旱事件频发的背景下，小叶杨退化可能进一步加重直至死亡，在区域和局部地区造成林分的初级生产力显著下降。同时杨树作为高耗水树种，未退化的小叶杨对降水量较少的坝上地区的“绿水”造成了巨大的负担，这可能会加剧该地区地下水的消耗。大量的蒸腾用水使得该地区杨树防护林的退化情况日益加剧，建议对该地区的杨树人工林重新进行合理规划改造，改种耗水较低的树种，对于已经发生退化的杨树林分进行更新，改善该地区林种、林龄、林分结构单一的问题。

参 考 文 献

[1] 赵子夜. 中国“三北”防护林工程建设现状及思考 [J]. 南京林业大学学报 (人文社会科学版), 2018, 18(3): 67−76.
Zhao Z Y. The current situation of “Three Norths” protection forest project construction in China and reflections[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Humanities and Social Sciences Edition), 2018, 18(3): 67−76.

[2] Wang L, Liu Z B, Guo J B, et al. Estimate canopy transpiration in larch plantations via the interactions among reference evapotranspiration, leaf area index, and soil moisture[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2021, 481(1): 118749[2023−02−21]. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118749.

[3] Luo Y, Fu S, Sun L, et al. Combining sap flow measurements and modelling to assess water needs in an oasis farmland shelterbelt of *Populus simonii* Carr. in Northwest China[J/OL]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 172−178. http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.015.

[4] 苗博. 张北地区衰败与未衰败小叶杨水分利用差异特征 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
Miao B. Characteristics of water use difference between die-backand non-dieback *Populus simonii* Carr. in Zhangbei area[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.

[5] 段世宇, 薛斌龙. 晋北风沙区小叶杨林地退化修复对土壤理化性状的影响 [J]. 陕西林业科技, 2022, 50(1): 7−15.
Duan S Y, Xue B L. Physical and chemical properties of soil in rehabilitation of *Populus simonii* degraded forestland located in windy and sandy area of northern Shanxi Province[J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2022, 50(1): 7−15.

[6] Wullschleger S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in tree[J]. Tree Physiology, 1988, 18(9): 499−512.

[7] Momii K, Hiyama H, Takeuchi S. Field sugarcane transpiration based on sap flow measurements and root water uptake simulations: case study on Tanegashima Island, Japan[J/OL]. Agricultural Water Management, 2021, 250(2): 106836[2023−12−21]. https://www.x-mol.com/paper/1371979894577643520.

[8] Hong L, Guo J, Liu Z, et al. Time-lag effect between sap flow and environmental factors of *Larix principis-rupprechtii* Mayr[J]. Forests, 2019, 10(11): 971−987.

[9] 张延文, 王子瑄, 孙志虎, 等. 基于随机森林的长白落叶松树干液流影响因素研究 [J]. 温带林业研究, 2022, 5(3): 21−28.
Zhang Y W, Wang Z X, Sun Z H, et al. Recognition of dominant factors behind sap flow of *Larix olgensis* based on random forest method[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2022, 5(3): 21−28.

[10] 李少然, 王冕之, 宋硕, 等. 银川市 5 种典型城市树木蒸腾耗水特性及其受主要气象驱动力的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(9): 35−39.
Li S R, Wang M Z, Song S, et al. Transpiration and water consumption characteristics of five typical urban trees and their response to main meteorological drivers in Yinchuan[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(9): 35−39.

[11] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. Annals of Forest Science, 1985, 42: 193−200.

[12] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1988, 3(4): 309−320.

[13] 贾国栋, 余新晓, 朱建刚, 等. 北京山区刺槐、栓皮栎生长旺季液流特性及影响因子 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 50−56.
Jia G D, Yu X X, Zhu J G, et al. Sap flow characteristics and influencing factors of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus variabilis* in rapid growth season in mountain area of Beijing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(5):

50−56.

[14] 刘自强. 华北地区典型林木水分运移过程与利用机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Liu Z Q. Water migration process and utilization mechanism of typical trees in North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[15] 徐丹丹. 旱区植被耗水及其对地下水位下降的响应 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
Xu D D. Plant water consumption and its response to groundwatertable drop in arid area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

[16] 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 等. 黄土高原主要树种树干液流研究进展 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 369−373.
Liu X X, Li G Q, Yan M J, et al. Research progress on sap flow of main tree species on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 369−373.

[17] 左力翔, 陈佳村, 李秧秧. 陕北沙地不同树龄小叶杨的水分利用策略 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 59−67.
Zuo L X, Chen J C, Li Y Y. Water use strategies of different ages of *Populus simonii* on sandy land of northern Shaanxi[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(6): 59−67.

[18] 周海光, 刘广全, 焦醒, 等. 黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性 [J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4568−4574.
Zhou H G, Liu G Q, Jiao X, et al. Water consumption by transpiration of several trees species in the Loess Plateau with mixed water and wind erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4568−4574.

[19] 孜尔蝶·巴合提. 坝上地区不同退化程度小叶杨水分来源与利用研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Zierdie Baheti. Study on water source and utilization of *Populus simonii* with different degradation degree in Bashang Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[20] Idso S B. An introduction to environmental biophysics[J]. Journal of Environmental Quality, 1977, 6(4): 474.

[21] 刘春鹏. 河北省平山县石质山区主要造林树种耗水特征研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
Liu C P. Study on water consumption characteristics of main tree species in stony mountain area of Pingshan County, Hebei Province[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.

[22] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究 [J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174−177.
Cao W Q, Han H R, Ma Q Y, et al. Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leafforest of Taiyue Mountain in Shanxi Province[J]. Scientia Silvae Science, 2004, 40(2): 174−177.

[23] 徐利岗, 苗正伟, 杜历, 等. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5519−5527.
Xu L G, Miao Z W, Du L, et al. Analysis of variation in and factors influencing sap flow in stems of *Lycium barbarum* in an arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5519−5527.

[24] 刘淑明, 王得祥, 孙长忠. 干旱胁迫下雪松土壤水分及生理特性的研究 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2057−2060.
Liu S M, Wang D X, Sun C Z. Study of soil water and physiological characteristics of *Cedrus deodara* under water stress[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(11): 2057−2060.

[25] 陈宝强, 张建军, 张艳婷, 等. 晋西黄土区辽东栎和山杨树干液流对环境因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 746−754.
Chen B Q, Zhang J J, Zhang Y T, et al. Whole-tree sap flow of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* inresponse to environmental factors in the Loess Plateau area of western Shanxi Province, northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 746−754.

[26] 丁访军, 王兵, 赵广东. 毛竹树干液流变化及其与气象因子的关系 [J]. 林业科学, 2011, 47(7): 73−81.
Ding F J, Wang B, Zhao G D. Sap flow changes of *Phyllostachys edulis* and their relationships with meteorological factors[J]. Scientia Silvae Science, 2011, 47(7): 73−81.

[27] 唐子舒, 王根绪, 胡兆永. 贡嘎山不同径级峨眉冷杉树干液流特征及其影响因素 [J]. 山地学报, 2022, 40(2): 220−234.
Tang Z S, Wang G X, Hu Z Y. Characteristics of stem sap flow and influencing factors of *Abies fabri* in varied diameters on Mount Gong-ga, China[J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 220−234.

[28] Wen J, Chen Y M, Tang Y K, et al. Characteristics and affecting factors of sap flow density of *Pinus tabuliformis* and *Hippophae rhamnoides* in growing season in the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. The Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 763−771.

[29] 孛永明, 王丽洁, 荐圣淇. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘树干液流的变化特征 [J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1553−1562.
Bo Y M, Wang L J, Jian S Q. Variations of sap flow of *Caragano korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1553−1562.

[30] 刘华, 佘春燕, 白志强, 等. 不同径级的西伯利亚红松树干液流及蒸腾耗水特征的差异 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(2): 390−397.
Liu H, She C Y, Bai Z Q, et al. Sap flow and transpiring water-consumption of *Pinus sibirica* in differernt diameter classes[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(2): 390−397.

[31] 程静, 欧阳旭, 黄德卫, 等. 鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4097−4104.
Cheng J, Ouyang X, Huang D W, et al. Sap flow characteristics of four dominant tree species in a mixed coniferbroad leaf forest in Dinghushan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4097−4104.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　杨晓晖）