

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.03.021 CSTR:32310.14.stbcb.2025.03.021

黄羨,余新晓,贾国栋,等.坝上地区不同退化程度小叶杨蒸腾特征及其对气象因子的响应[J].水土保持学报,2025,39(3):247-255.

HUANG Xian, YU Xinxiao, JIA Guodong, et al. Transpiration responses of *Populus simonii* with different degradation degrees to meteorological factors in the Bashang area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):247-255.

坝上地区不同退化程度小叶杨蒸腾 特征及其对气象因子的响应

黄羨¹, 余新晓¹, 贾国栋¹, 孙立博²

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.山西大学黄土高原研究所,太原 030006)

摘要: [目的] 探讨坝上地区不同退化程度小叶杨蒸腾特征及其对气象因子的响应。[方法] 以坝上地区不同退化程度小叶杨(*Populus simonii*)为研究对象,利用热扩散式边材液流探针技术对不同退化程度小叶杨的树干液流进行监测,并同步监测光合有效辐射(PAR)、降雨量(P)、气温(T)、风速(W)、饱和水汽压差(VPD)和相对湿度(RH)等气象因子,研究不同退化程度小叶杨蒸腾耗水规律及其与气象因子的关系。[结果] 1)不同退化程度小叶杨生长季蒸腾速率呈昼高夜低的单峰型变化趋势,且未退化和轻度退化小叶杨启动时间早于中度退化和重度退化小叶杨,未退化小叶杨生长季蒸腾速率峰值显著高于其他3种退化小叶杨。2)不同退化程度小叶杨生长季日耗水量表现出先增大后减小的季节变化趋势,日耗水量大小总体表现为未退化>轻度退化>中度退化>重度退化。未退化小叶杨日耗水量峰值为(197.19±38.99) L,分别是轻度退化(82.43±5.30) L、中度退化(60.06±6.79) L、重度退化小叶杨(51.02±7.00) L的2.4、3.3、3.9倍。退化使得小叶杨生长季缩短,中度退化和重度退化小叶杨生长季为5—9月。3)不同退化程度小叶杨生长季蒸腾速率和日耗水量与光合有效辐射、风速、气温、饱和水汽压差和相对湿度呈极显著相关($p<0.01$),未退化和轻度退化小叶杨生长季日耗水量与降雨量显著负相关。不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率与日耗水量对气象因子的响应存在差异,多气象因子共同控制小叶杨蒸腾速率与日耗水量。[结论] 研究成果可为水分平衡下坝上地区小叶杨人工林生态需水估算和林分合理密度选择提供理论依据。

关键词: 小叶杨; 退化程度; 蒸腾耗水; 气象因子

中图分类号: S715.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)03-0247-09

Transpiration Responses of *Populus simonii* with Different Degradation Degrees to Meteorological Factors in the Bashang Area

HUANG Xian¹, YU Xinxiao¹, JIA Guodong¹, SUN Libo²

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to investigate the transpiration responses of *Populus simonii* with different degradation degrees to meteorological factors in the Bashang area. [Methods] *Populus simonii* with different degradation degrees in Zhangbei County, Bashang area were taken as the research object. The sap flow of *P. simonii* with different degradation degrees (no degradation, light degradation, moderate degradation, and severe degradation) was monitored by the thermal dissipation sap flow probe. Meteorological factors such as photosynthetically active radiation, precipitation, wind speed, air temperature, vapor pressure deficit and relative humidity were simultaneously monitored. The transpiration characteristics of *P. simonii* with different degradation degrees and their relationship with meteorological factors were studied. [Results] 1) The transpiration rate of

收稿日期:2024-11-18 修回日期:2024-12-29 录用日期:2025-01-09 网络首发日期(www.cnki.net):2025-04-02

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFF1305302,2022YFF1302502-03)

第一作者:黄羨(1996—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与森林生态水文研究。E-mail:1208141476@qq.com

通信作者:余新晓(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail:yuxinxiao111@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

P. simonii with different degradation degrees during the growing season showed a unimodal trend, peaking during the day and decreasing at night. The initiation time of transpiration of undegraded and lightly degraded *P. simonii* was earlier than that of moderately and severely degraded *P. simonii*, and the peak transpiration rate of undegraded *P. simonii* was significantly higher than that of the other three degrees of degraded *P. simonii*. 2) The daily water consumption of *P. simonii* with different degradation degrees during the growing season showed a seasonal trend of first increasing and then decreasing, and the daily water consumption generally followed the order of undegraded > lightly degraded > moderately degraded > severely degraded. The peak daily water consumption of undegraded *P. simonii* (197.19 ± 38.99) L was 2.4, 3.3, and 3.9 times that of lightly degraded (82.43 ± 5.30) L, moderately degraded (62.06 ± 6.79) L, and severely degraded *P. simonii* (51.02 ± 7.00) L, respectively. Degradation shortened the growing season of *P. simonii*, with the growing season of moderately and severely degraded *P. simonii* lasting from May to September. 3) The transpiration rate and daily water consumption of *P. simonii* with different degradation degrees during the growing season was extremely significantly correlated with photosynthetically active radiation, wind speed, air temperature, vapor pressure deficit and relative humidity. The daily water consumption of undegraded and lightly degraded *P. simonii* during the growing season showed a significant negative correlation with precipitation. There were differences in the responses of transpiration rate and daily water consumption to meteorological factors among *P. simonii* with different degradation degrees, and multiple meteorological factors jointly controlled the transpiration rate and daily water consumption of *P. simonii*. [Conclusion] The results can provide a theoretical basis for estimating the ecological water demand and selecting appropriate stand density of *P. simonii* plantations in the Bashang area under balanced water conditions.

Keywords: *Populus simonii*; degradation degree; transpiration water consumption; meteorological factors

Received: 2024-11-18

Revised: 2024-12-29

Accepted: 2025-01-09

Online(www.cnki.net): 2025-04-02

植物通过蒸腾作用利用水分来维持生长发育,而植物蒸腾所需水分的 99% 以上都来自树干液流^[1],因此可以利用植物树干液流变化来反映树木蒸腾耗水规律^[2-3]。树木蒸腾耗水特征除与树木生理学结构、土壤供水情况相关外,还与气象因子密切相关^[4]。树木蒸腾受光合有效辐射、降雨量、气温、风速、相对湿度及饱和水汽压差等气象因子的影响,且众多气象因子共同影响树木蒸腾。如陈孟涤等^[5]研究发现,气温、太阳辐射、大气湿度和降水是影响华北落叶松冠层蒸腾的主要气象因子。气象因子主要通过影响叶片气孔开闭程度从而影响树木蒸腾^[6]。小叶杨(*Populus simonii*)作为坝上地区张北县分布面积最为广泛的人工防护林树种^[7],在保持水土、防风固沙、水源涵养、改善小气候等方面起着关键作用,然而近年来由于初植密度过大、林分结构不合理等原因,小叶杨防护林逐渐出现不同程度的衰退现象,导致防护林生态服务功能逐渐降低^[8-10]。针对坝上地区防护林退化问题,许多研究者^[8,11-16]从年轮分析、水分利用效率、根系分布、树木生理、气候变化、形态学等方面开展树木退化的相关研究,但对于不同退化程度的树木蒸腾耗水特征及其与气象因子的关系研究相对较少。因此,本文选择坝上地区张北县不同退化程度小叶杨为

研究对象,对其树干液流及气象因子进行监测,并建立蒸腾速率与气象因子间的关系,探讨不同退化程度小叶杨生长季蒸腾耗水特征及其对气象因子的响应,以期为水分平衡下坝上地区小叶杨人工林生态需水估算和林分合理密度选择提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究地点位于河北省张家口市张北县二台镇林场($41^{\circ}20'N, 114^{\circ}51'E$),属于坝上高寒区,平均海拔为 1 300 m。该地区为温带大陆性季风气候,年平均降水量为 400 mm,雨季 6—9 月的降水量占全年的 60% 以上。该地区年平均气温为 3~4 °C。土壤呈中性或弱酸性,母质多为玄武岩和花岗岩。

1.2 样木选择

研究区小叶杨林地平均密度为 1 210 株/hm²,平均林龄为 33 a,平均树高为 11.15 m,平均胸径为 21.11 cm。研究区小叶杨人工林按照枯梢率和林分生长状况特征^[7]分为 4 种退化程度,分别为未退化、轻度退化、中度退化和重度退化。在研究区选取林龄、密度相近的 4 种退化程度小叶杨人工林样地,确保 4 个样地距离相近,在各样地中选取 3 棵样树进行树干液流监测,监测样木特征见表 1。

表1 小叶杨监测样木特征

Table 1 Characteristics of monitored sample trees of *Populus simonii*

样木编号	退化程度	枯梢率/%	树高/m	胸径/cm	边材宽度/cm	边材面积/cm ²	枝下高/m	冠幅/m	
								东西	南北
1	未退化	0	14.30	32.00	12.83	772.70	1.70	6.50	5.20
2	未退化	0	13.40	24.20	10.47	451.59	2.50	4.10	2.10
3	未退化	0	14.20	24.00	10.41	444.42	2.10	4.00	3.00
4	轻度退化	<20	13.70	26.00	11.01	518.53	1.70	4.20	3.80
5	轻度退化	<20	14.20	23.50	10.26	426.72	1.40	3.50	3.30
6	轻度退化	<20	13.40	23.80	10.35	437.30	1.60	3.50	2.20
7	中度退化	20~60	12.60	21.80	9.74	369.03	2.10	3.20	3.10
8	中度退化	20~60	10.60	18.50	8.74	267.99	1.20	2.80	3.10
9	中度退化	20~60	12.90	22.70	10.01	399.10	1.60	2.20	3.50
10	重度退化	>60	10.40	18.10	8.62	256.72	1.30	2.70	2.90
11	重度退化	>60	12.90	23.70	10.32	433.76	1.60	3.60	3.50
12	重度退化	>60	11.20	20.10	9.23	315.17	1.60	2.80	3.00

1.3 树干液流观测

利用热扩散原理(插针式)茎流计对小叶杨进行树干液流的连续测定(表1),监测时间为2019年5月1日至10月31日。选择比边材宽度短的探针,使探针不接触心材,并完全处于边材内。在树干胸径(距地面1.3 m)位置朝西南方向处钻孔后,安装型号为TDP-30(Dynamax, Houston, 美国)的探针,安装完毕后,为防止雨水和热辐射对探针造成影响,用硅酮胶密封探针与树干接触部分,并用铝箔包裹住树干的探针部位。使用CR 1000数据采集器(Campbell Scientific, Logan, 美国)监测采集树干液流数据,并外接12 V电源,保证持续稳定供电,探针连接在数据采集器上,数据采集频率为15 min/次。被测树木的蒸腾速率和日耗水量计算公式为:

$$F_V = 3.6 \times 0.0119 \times [(D_M - D)/D]^{1.231} \times A_s \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{24} F_V \quad (2)$$

式中: F_V 为蒸腾速率,L/h; D_M 为液流为0时的温差; D 为瞬时温差; A_s 为边材面积,cm²; Q 为日耗水量,L; i 为实际测量小时数。本研究的蒸腾速率和耗水量取各退化程度的3株样木的平均值。

1.4 气象因子

利用小型自动气象站(HOBO U30, Onset Inc., USA)连续监测光合有效辐射[PAR, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、降雨量(P , mm)、气温(T , $^{\circ}\text{C}$)、风速(W , m/s)及相对湿度(RH, %)等气象因子,每15 min采集1次数据。饱和水汽压差(VPD, kPa)计算公式为:

$$\text{VPD} = 0.61078 \times (1 - \text{RH}) \times e^{[17.277/(T + 237.3)]} \quad (3)$$

式中:VPD为饱和水汽压差,kPa;RH为相对湿度,

%; T 为气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 数据处理

采用Excel 2021软件对小叶杨液流数据及气象数据进行处理。利用SPSS 27.0软件的Pearson相关分析法分别量化小叶杨晴天蒸腾速率、日耗水量与气象因子的相关性,并用多元线性逐步回归分析法分别构建不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率、日耗水量与气象因子的多元回归模型。文中插图均利用Origin 2021软件完成。

2 结果与分析

2.1 小叶杨晴天蒸腾速率变化特征

对不同退化程度小叶杨生长季初期(5—6月)、中期(7—8月)、后期(9—10月)的典型晴天蒸腾速率进行比较,其中生长季初期选择6月6-8日,生长季中期选择7月30和31日、8月1日,生长季后期选择9月21-23日。对比不同退化程度小叶杨典型晴天的蒸腾速率变化特征(图1)发现,在晴天时,无论何种退化程度和生长季时期,小叶杨蒸腾速率有明显的昼夜变化,表现为白天蒸腾速率高于晚上。生长季初期时,4种不同退化程度小叶杨在6:00—7:00开始启动。生长季中期时,小叶杨在7:00—8:00开始启动。生长季后期时,未退化和轻度退化小叶杨在8:00左右开始启动,而中度退化和重度退化小叶杨在10:00左右开始启动。在整个生长季期间,未退化和轻度退化小叶杨启动时间早于中度退化和重度退化小叶杨。虽然不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率日变化趋势较为一致,均表现为单峰曲线,但在生长季期间未退化小叶杨的蒸腾速率峰值显著高于其他3种退化小叶杨(表2)。

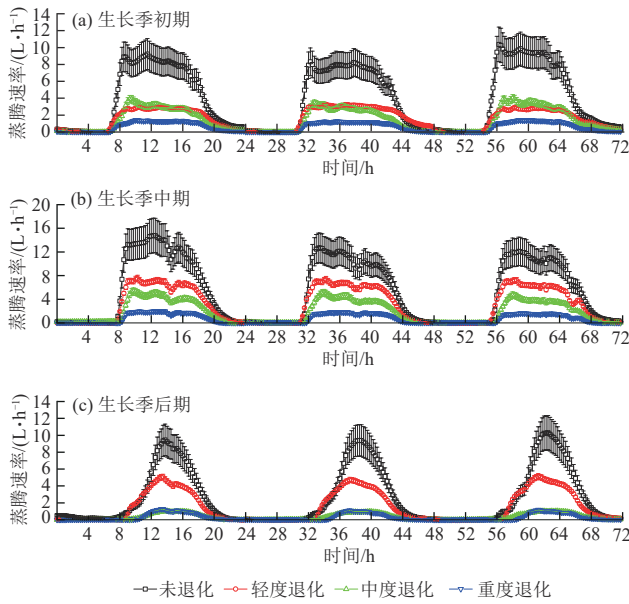


图 1 小叶杨晴天蒸腾速率变化趋势

Fig. 1 Diurnal variation trend of transpiration rate of *Populus simonii* on sunny days

表 2 小叶杨生长季晴天蒸腾速率峰值

Table 2 Peak transpiration rate of *Populus simonii* on sunny days during the growing season L/h

退化程度	生长季初期	生长季中期	生长季后期
未退化	9.23±1.83a	14.80±2.93a	9.46±1.87a
轻度退化	2.93±0.19b	7.56±0.49b	5.06±0.33b
中度退化	3.89±0.44b	5.32±0.60bc	1.02±0.12c
重度退化	1.39±0.19b	1.95±0.27c	1.24±0.17c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同退化程度间差异显著($p < 0.05$)。

2.2 小叶杨日耗水量变化特征

由图 2a 可知,5—10 月,不同退化程度小叶杨日耗水量表现出先增大后减小的季节变化趋势,相较于其他 3 种退化小叶杨,未退化小叶杨日耗水量波动幅度较大,小叶杨日耗水量总体表现为未退化>轻度退化>中度退化>重度退化。未退化小叶杨日耗水量峰值为(197.19±38.99) L,分别是轻度退化(82.43±5.30) L、中度退化(60.06±6.79) L、重度退化小叶杨(51.02±7.00) L 的 2.4、3.3、3.9 倍。9 月未退化小叶杨日耗水量为(7.15±1.41)~(96.06±18.99) L,轻度退化小叶杨日耗水量为(3.44±0.22)~(57.12±3.67) L,中度退化小叶杨日耗水量为(5.87±1.79)~(29.34±1.06) L,重度退化小叶杨日耗水量为(1.31±0.18)~(9.94±1.36) L。10 月未退化小叶杨日耗水量为(5.89±1.17)~(51.17±10.12) L,轻度退化小叶杨日耗水量为(0.93±0.06)~(39.92±2.56) L,中度退化小叶杨日耗水量为(3.70±0.42)~(22.02±2.49) L,重度退化小叶杨日耗水量为(0.58±

0.08)~(8.54±1.17) L。未退化和轻度退化小叶杨日耗水量在 10 月时维持在一个较低水平,但仍有较小波动,重度退化和中度退化小叶杨日耗水量在 9 月初维持在一个较低水平,在 10 月初降低至 0 附近。

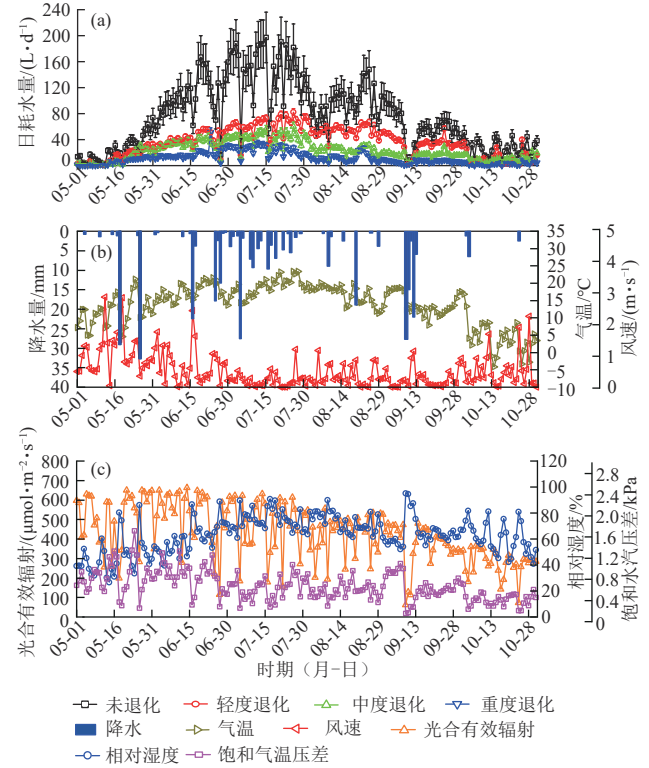


图 2 小叶杨日耗水量与气象因子时间动态变化

Fig. 2 Temporal dynamics of daily water consumption of *Populus simonii* and meteorological factors

2.3 小叶杨晴天蒸腾速率对气象因子的响应

将不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率与 PAR、W、T、RH 和 VPD 进行相关分析(表 3)表明,不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率与 PAR、W、T、VPD 呈极显著正相关,与 RH 呈极显著负相关。不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率对 VPD、RH、T 和 PAR 的响应较高,对 W 的响应最小。

利用多元线性逐步回归分析法建立不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率与 PAR、W、T 和 RH 的多元回归模型(表 4)发现,不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率与气象因子间的回归方程解释度均 > 0.74。从关系模型可以看出,生长季初期,不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率被 PAR、W、RH 和 T 共同影响。生长季中期,不同退化程度小叶杨晴天蒸腾速率被 RH、PAR 和 T 共同影响。生长季后期,未退化小叶杨晴天蒸腾速率被 RH、PAR、W 和 T 共同影响,轻度退化小叶杨晴天蒸腾速率被 RH 和 W 共同影响,中度退化和重度退化小叶杨晴天蒸腾速率被 RH、PAR 和 W 共同影响。

表 3 小叶杨晴天蒸腾速率与气象因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between transpiration rate of *Populus simonii* and meteorological factors on sunny days

生长期	退化程度	皮尔逊相关系数				
		PAR	W	T	RH	VPD
生长季初期	未退化	0.879**	0.766**	0.844**	-0.858**	0.911**
	轻度退化	0.810**	0.705**	0.878**	-0.927**	0.949**
	中度退化	0.877**	0.760**	0.829**	-0.833**	0.889**
	重度退化	0.847**	0.767**	0.876**	-0.878**	0.935**
生长季中期	未退化	0.834**	0.380**	0.889**	-0.914**	0.910**
	轻度退化	0.826**	0.382**	0.908**	-0.931**	0.926**
	中度退化	0.817**	0.388**	0.876**	-0.902**	0.907**
	重度退化	0.796**	0.391**	0.874**	-0.907**	0.920**
生长季后期	未退化	0.546**	0.392**	0.850**	-0.872**	0.919**
	轻度退化	0.699**	0.390**	0.909**	-0.930**	0.966**
	中度退化	0.569**	0.366**	0.879**	-0.914**	0.941**
	重度退化	0.520**	0.426**	0.806**	-0.830**	0.877**

注:**表示在 0.01 级别(双尾)上极显著相关;*表示在 0.05 级别(双尾)上显著相关。下同。

表 4 小叶杨晴天蒸腾速率与气象因子的多元回归模型

Table 4 Multiple regression models of transpiration rate of *Populus simonii* and meteorological factors on sunny days

生长期	退化程度	回归方程	R ²	Sig.	F
生长季初期	未退化	$Y=4.038+0.002PAR-0.038RH+0.477W+0.081T$	0.887	0	554.044
	轻度退化	$Y=2.356-0.031RH+0.115W+0.037T+0.195\times 10^{-3}PAR$	0.915	0	758.911
	中度退化	$Y=1.192+0.001PAR+0.158W-0.018RH+0.032T$	0.862	0	442.355
	重度退化	$Y=0.615-0.009RH+0.084W+0.019T+0.163\times 10^{-3}PAR$	0.897	0	616.291
生长季中期	未退化	$Y=24.003-0.213RH+0.003PAR-0.351T$	0.911	0	964.384
	轻度退化	$Y=12.481-0.114RH+0.002PAR-0.153T$	0.925	0	1 173.868
	中度退化	$Y=8.546-0.075RH+0.001PAR-0.127T$	0.883	0	717.894
	重度退化	$Y=3.766-0.033RH+0.415\times 10^{-3}PAR-0.058T$	0.880	0	696.830
生长季后期	未退化	$Y=6.576-0.077RH-0.002PAR+2.709W+0.157T$	0.809	0	300.367
	轻度退化	$Y=5.166-0.056RH+1.145W$	0.878	0	1 023.561
	中度退化	$Y=1.288-0.014RH+0.164\times 10^{-3}PAR+0.225W$	0.871	0	637.754
	重度退化	$Y=1.229-0.013RH+0.436W+0.164\times 10^{-3}PAR$	0.746	0	278.046

注:PAR 为光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; W 为风速, m/s ; T 为气温, $^{\circ}\text{C}$; RH 为相对湿度, %。下同。

2.4 小叶杨日耗水量对气象因子的响应

由表 5 可知,生长季初期,不同退化程度小叶杨日耗水量与 T 和 RH 呈极显著正相关,与 W 呈极显著负相关,未退化小叶杨日耗水量与 PAR 呈极显著正相关,而轻度退化和中度退化小叶杨日耗水量与 PAR 呈显著正相关。生长季中期和生长季后期,不同退化程度小叶杨日耗水量与 PAR、VPD 和 T 呈极显著正相关。生长季中期,未退化和轻度退化小叶杨日耗水量与 P 和 RH 呈极显著负相关,与 W 呈显著负相关;中度退化小叶杨日耗水量与 W、P 和 RH 呈显著负相关;重度退化小叶杨日耗水量与 W 呈极显著负相关。生长季后期,未退化、轻度退化和中度退化小叶杨日耗水量与 W 呈极显著负相关,重度退化小叶杨日耗水量与 W 呈显著负相关,未退化小叶

杨日耗水量与 RH 呈极显著负相关,与 P 呈显著负相关。在整个生长季期间,不同退化程度小叶杨日耗水量与 T、PAR、RH 和 VPD 呈极显著正相关,与 W 呈极显著负相关。未退化和轻度退化小叶杨生长季日耗水量还与 P 呈显著负相关。

生长季初期,不同退化程度小叶杨对 T 的响应较高,其次是 RH 和 W,响应较小的是 PAR,重度退化小叶杨对气象因子的响应均较小。生长季中期,不同退化程度小叶杨对 PAR 的响应较高,与其他 3 种退化程度小叶杨相比,重度退化小叶杨对除 W 之外的气象因子响应均较小。生长季后期,不同退化程度小叶杨对 PAR、VPD 和 T 的响应较高,但中度退化和重度退化小叶杨对气象因子响应较未退化和轻度退化小叶杨小。在整个生长季期间,不同退化程度

小叶杨对 T 、 PAR 、 W 的响应较高,其次是 RH 和 VPD 对 P 的响应最小。

表 5 小叶杨日蒸腾耗水量与气象因子的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between transpiration water consumption of *Populus simonii* and meteorological factors

生长期	退化程度	皮尔逊相关系数					
		P	PAR	W	T	RH	VPD
生长季初期	未退化	-0.165	0.339**	-0.453**	0.658**	0.392**	0.122
	轻度退化	-0.114	0.315*	-0.391**	0.699**	0.441**	0.125
	中度退化	-0.028	0.308*	-0.417**	0.672**	0.447**	0.121
	重度退化	-0.056	0.183	-0.334**	0.612**	0.433**	0.076
生长季中期	未退化	-0.344**	0.784**	-0.319*	0.390**	-0.445**	0.596**
	轻度退化	-0.602**	0.822**	-0.312*	0.480**	-0.564**	0.740**
	中度退化	-0.268*	0.686**	-0.319*	0.558**	-0.271*	0.550**
	重度退化	-0.160	0.619**	-0.390**	0.347**	-0.161	0.328**
生长季后期	未退化	-0.293*	0.789**	-0.353**	0.585**	-0.342**	0.795**
	轻度退化	-0.248	0.720**	-0.352**	0.601**	-0.174	0.695**
	中度退化	-0.206	0.657**	-0.360**	0.433**	-0.243	0.545**
	重度退化	-0.035	0.531**	-0.258*	0.380**	-0.094	0.370**
研究期间	未退化	-0.154*	0.530**	-0.380**	0.659**	0.292**	0.245**
	轻度退化	-0.159*	0.451**	-0.410**	0.701**	0.380**	0.197**
	中度退化	-0.074	0.518**	-0.329**	0.650**	0.298**	0.249**
	重度退化	-0.036	0.481**	-0.250**	0.592**	0.285**	0.202**

利用多元线性逐步回归分析法,对不同退化程度小叶杨生长季日耗水量与 P 、 PAR 、 W 、 T 和 RH 进行分析(表 6)。结果表明,在生长季初期,未退化和轻度退化小叶杨日耗水量受 T 、 PAR 、

RH 、 P 和 W 共同影响,轻度退化小叶杨日耗水量受 T 、 PAR 、 RH 和 P 共同影响,中度退化和重度退化小叶杨日耗水量受 T 、 PAR 和 RH 共同影响。

表 6 小叶杨日蒸腾耗水量与气象因子的多元回归模型

Table 6 Multiple regression models of transpiration water consumption of *Populus simonii* and meteorological factors

生长期	退化程度	回归方程	R^2	Sig.	F
生长季初期	未退化	$Y = -164.069 + 5.358T + 0.126PAR + 1.953RH - 2.093P - 14.847W$	0.797	0	43.262
	轻度退化	$Y = -74.964 + 2.273T + 0.059PAR + 0.735RH - 0.571P$	0.828	0	67.316
	中度退化	$Y = -62.337 + 1.851T + 0.057PAR + 0.521RH$	0.772	0	64.227
	重度退化	$Y = -30.675 + 1.031T + 0.280RH + 0.025PAR$	0.582	0	26.495
生长季中期	未退化	$Y = -37.226 + 0.238PAR + 3.303T - 26.827W$	0.695	0	43.997
	轻度退化	$Y = 30.447 + 0.050PAR + 1.534T - 0.578P - 6.706W - 0.267RH$	0.857	0	66.873
	中度退化	$Y = -23.276 + 0.057PAR + 1.872T - 8.829W$	0.681	0	41.226
	重度退化	$Y = -34.154 + 0.056PAR + 0.393RH - 7.975W$	0.535	0	22.283
生长季后期	未退化	$Y = -19.809 + 0.159PAR + 1.122T$	0.693	0	64.435
	轻度退化	$Y = -14.851 + 0.088PAR + 0.867T$	0.619	0	47.016
	中度退化	$Y = 1.007 + 0.037PAR$	0.431	0	44.734
	重度退化	$Y = 0.541 + 0.013PAR$	0.282	0	23.218
研究期间	未退化	$Y = -130.875 + 2.904T + 0.183PAR + 1.587RH - 18.673W - 1.516P$	0.712	0	88.071
	轻度退化	$Y = -54.172 + 1.518T - 8.259W + 0.060PAR + 0.766RH - 0.967P$	0.770	0	118.928
	中度退化	$Y = -34.203 + 0.747T + 0.055PAR + 0.397RH - 4.446W$	0.660	0	86.798
	重度退化	$Y = -26.484 + 0.412T + 0.035PAR + 0.272RH$	0.546	0	72.241

在生长季中期,未退化和中度退化小叶杨日耗水量受 PAR 、 T 和 W 共同影响,轻度退化小叶杨日耗水量受 PAR 、 T 、 P 、 W 和 RH 共同影响,重度退化小叶杨日耗水量受 PAR 、 RH 、 W 共同影响。在生长季后

期,未退化和轻度退化小叶杨日耗水量受 PAR 、 T 共同影响,中度退化和重度退化小叶杨日耗水量受 PAR 单独影响。在整个生长季期间,未退化和轻度退化小叶杨生长季日耗水量受 T 、 PAR 、 RH 、 W 和 P

共同影响,中度退化小叶杨生长季日耗水量受 T 、 PAR 、 RH 和 W 共同影响,重度退化小叶杨生长季日耗水量受 T 、 PAR 、 RH 共同影响。

3 讨论

3.1 小叶杨晴天蒸腾速率变化特征

受气象因子的影响,树木晴天蒸腾速率表现出明显的昼夜变化规律^[17-18]。本研究中,4种不同退化程度的小叶杨晴天蒸腾速率均呈现出昼高夜低趋势,表现为单峰曲线,与蒋涛^[4]、武鹏飞等^[19]的研究结果一致。小叶杨蒸腾速率与气象因子密切相关,日间光和有效辐射较强,温度和饱和水汽压差较高,促进叶片气孔开放,因此日间蒸腾速率高于夜间蒸腾速率。4种不同退化程度的小叶杨在生长季的蒸腾速率日变化趋势较为一致,未退化小叶杨蒸腾速率峰值显著高于其他3种退化小叶杨,未退化和轻度退化小叶杨启动时间早于中度退化和重度退化小叶杨。马长明等^[20]对张北县北京杨(*Populus beijingensi*)的研究发现,不同健康等级的北京杨液流速率峰值变型为健康北京杨>亚健康北京杨>不健康北京杨,与前本研究结果相同。在所处环境相同的情况下,不同退化程度小叶杨蒸腾速率特性有所差异,原因可能是退化使小叶杨生理特性发生变化,使得未退化和轻度退化小叶杨对气象因子的响应高于中度退化和重度退化小叶杨。

3.2 小叶杨日耗水量特征

整个生长季过程中,4种不同退化程度小叶杨日耗水量均表现为先增大后减小的变化趋势,与洪光宇等^[2]的研究结果相同,可能是由于5月初小叶杨叶片开始萌芽展叶,叶片较小, PAR 、 T 及 RH 较低,蒸腾耗水量受气象因子的共同影响整体处于偏低水平,5—6月 PAR 、 T 及 RH 呈上升趋势,蒸腾耗水量也随之逐渐增大;小叶杨在生长季中期叶片成熟旺盛, PAR 、 T 较高, W 较低,蒸腾耗水量受气象因子的共同影响处于较高水平,但在降雨发生的当天,蒸腾耗水量快速下降,而降雨发生之后,土壤水分得到补充,耗水量又快速上升;小叶杨在生长季后期开始落叶, PAR 、 T 逐渐降低,蒸腾作用减弱,因此耗水量逐渐降低。4种不同退化程度的小叶杨日耗水量变化趋势一致,但随着退化程度的加剧,小叶杨日耗水量总体表现出未退化>轻度退化>中度退化>重度退化,说明不同退化程度小叶杨蒸腾耗水量的差异是因为退化改变小叶杨本身生理因素,退化程度较严重的小叶杨对气象因子的响应较低。小叶杨属于高耗水树种,由于受到长期的水分胁迫,小叶杨为减少蒸腾耗水,采取树冠落叶、枝条枯梢及根系退化的策

略^[21],随着树冠落叶、枝条枯梢及根系退化的加重,小叶杨逐渐出现退化甚至死亡的现象^[22-23]。随着退化程度的加剧,小叶杨生理活动变弱,生长周期缩短,与路伟伟等^[24]的研究结果相似。

3.3 气象因子对小叶杨蒸腾耗水的影响

日尺度下,不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率与 PAR 、 W 、 T 、 VPD 呈极显著正相关,与 RH 呈极显著负相关,与钟红云等^[25]的研究结果相同。众多研究^[26-27]表明,树木蒸腾速率对各气象因子的响应程度不一样,本研究有相似的结果,小叶杨对 VPD 、 PAR 、 RH 和 T 的响应较高,对 W 的响应较低。回归分析表明,众多气象因子共同影响不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率,与尚友贤等^[28]的研究结果相似。

月尺度下,在生长季初期,各退化程度小叶杨叶片较少且稚嫩,同时 T 逐渐回暖,4种退化程度小叶杨受 T 的影响最大,因此小叶杨蒸腾作用较弱但呈上升趋势^[28]。在生长季中期,小叶杨蒸腾作用最为旺盛,此时小叶杨叶片最为茂密成熟,其间降雨较多,土壤水分较充足, PAR 为小叶杨蒸腾耗水量的最大影响因子,在生长季中期 PAR 和 T 较高,促进小叶杨的蒸腾作用,耗水量较大^[29]。在生长季后期,小叶杨开始落叶,对小叶杨影响较大的 PAR 呈下降趋势, T 逐渐降低,蒸腾作用逐渐下降,耗水量逐渐减少^[30]。在生长季期间,与未退化和轻度退化小叶杨相比,影响中度退化和重度退化小叶杨耗水量的气象因子减少,同时回归方程的 R^2 较小,说明气象因子对未退化和轻度退化小叶杨蒸腾耗水的影响大于中度退化和重度退化小叶杨。10月时,相较于未退化和轻度退化小叶杨,中度退化和重度退化小叶杨蒸腾耗水更先接近于0,说明重度退化和中度退化小叶杨在10月初提前结束生长季,进入非生长季,退化使得小叶杨生长周期缩短,生理代谢逐渐变缓,中度退化和重度退化小叶杨生长季为5—9月。

4 结论

1)不同退化程度小叶杨生长季蒸腾速率呈昼高夜低的单峰型变化趋势,且未退化和轻度退化小叶杨启动时间早于中度退化和重度退化小叶杨,未退化小叶杨生长季蒸腾速率峰值显著高于其他3种退化小叶杨。

2)不同退化程度小叶杨生长季日耗水量表现出先增大后减小的季节变化趋势,日耗水量大小总体表现为未退化>轻度退化>中度退化>重度退化。退化使小叶杨生长季缩短,中度退化和重度退化小叶杨生长季为5—9月。

3)不同退化程度小叶杨生长季晴天蒸腾速率与日耗水量对气象因子的响应存在差异,多气象因子共同控制小叶杨蒸腾速率与日耗水量,中度退化和重度退化小叶杨对气象因子的响应低于未退化和轻度退化小叶杨。小叶杨属于高耗水树种,而坝上地区干旱少雨,因此在营造小叶杨人工林时应从水分平衡的角度下考虑林分适宜密度,而对于已退化小叶杨人工林要采取合理的措施进行恢复和改造。

参考文献:

- [1] GRANIER A, BOBAY V, GASH J H C, et al. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 51(3/4):309-319.
- [2] 洪光宇, 王晓江, 高孝威, 等. 毛乌素沙地杨柴液流变化对气象因子的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(4):1635-1645.
HONG G Y, WANG X J, GAO X W, et al. Responses of sap flow of *Hedysarum leave* to climatic factors in Mu Us Sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4):1635-1645.
- [3] 李健男, 史海滨, 苗庆丰, 等. 环境因子对不同种类人工乔木林分蒸腾耗水的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8):1312-1321.
LI J N, SHI H B, MIAO Q F, et al. Effect of environmental factors on the transpiration water consumption of various artificial arbor stands[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8):1312-1321.
- [4] 蒋涛. 华北地区典型人工林树干液流动态变化及对环境因子响应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2022.
JIANG T. Sap flow dynamics and environmental responses of typicalplantation forest in north China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [5] 陈孟涂, 覃鑫浩, 毛炎新, 等. 半干旱区华北落叶松林冠层蒸腾特征及其影响因子[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4):10-17.
CHEN M D, QIN X H, MAO Y X, et al. Transpiration characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in the semi-arid area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4):10-17.
- [6] 郑家银, 李绣宏, 李少宁, 等. 典型天气下经济林液流特征及其对环境因子的响应[J]. 西部林业科学, 2022, 51(6):62-70.
ZHENG J Y, LI X H, LI S N, et al. Characteristics of sap flow in non-wood forest under typical weather and its response to environmental factors[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(6):62-70.
- [7] 孜尔蝶·巴合提, 贾国栋, 余新晓, 等. 基于稳定同位素分析不同退化程度小叶杨水分来源[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6):1807-1816.
BAHETI Z E D, JIA G D, YU X X, et al. Assessing water sources for *Populus simonii* with different degrees of degradation based on stable isotopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6):1807-1816.
- [8] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 近40年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2020, 40(24):9108-9119.
LIU Y L, XIN Z B, LI Z S, et al. Climate effect on the radial growth of *Populus simonii* in northwest of Hebei for last four decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24):9108-9119.
- [9] 孙守家, 李春友, 何春霞, 等. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7):2119-2127.
SUN S J, LI C Y, HE C X, et al. Retrospective analysis of the poplar plantation degradation based on stable carbon isotope of tree rings in Zhangbei County, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7):2119-2127.
- [10] SUN S J, HE C X, QIU L F, et al. Stable isotope analysis reveals prolonged drought stress in poplar plantation mortality of the three-north shelter forest in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252:39-48.
- [11] JIA G D, CHEN L X, YU X X, et al. Soil water stress overrides the benefit of water-use efficiency from rising CO₂ and temperature in a cold semi-arid poplar plantation[J]. Plant, Cell and Environment, 2022, 45(4):1172-1186.
- [12] 武娟娟, 邱云霄, 王渝淞, 等. 坝上地区不同退化程度小叶杨细根分布特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5):242-248.
WU J J, QIU Y X, WANG Y S, et al. Fine roots distribution characteristics of *Populus simonii* with different degradation degrees in Bashang area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5):242-248.
- [13] 韦景树, 李宗善, 冯晓珂, 等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7):2433-2444.
WEI J S, LI Z S, FENG X Y, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7):2433-2444.
- [14] JI Y H, ZHOU G S, LI Z S, et al. Triggers of widespread dieback and mortality of poplar (*Populus* spp.) plantations across northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 174:e104076.
- [15] SUN L B, CHANG X M, YU X X, et al. Precipitation and soil water thresholds associated with drought-induced mortality of farmland shelter forests in a semi-arid area

- [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 284:e106595.
- [16] LIU Z H, JIA G D, YU X X, et al. Morphological trait as a determining factor for *Populus simonii* Carr. to survive from drought in semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2021, 253:e106943.
- [17] 张潇, 武娟娟, 贾国栋, 等. 降水控制对侧柏液流变化特征及其水分来源的影响[J]. 植物生态学报, 2023, 47(11):1585-1599.
ZHANG X, WU J J, JIA G D, et al. Effects of precipitation variations on characteristics of sap flow and water source of *Platycladus orientalis* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(11):1585-1599.
- [18] 吕同汝, 蒋勇军, 吴泽, 等. 亚热带岩溶区典型常绿和落叶树种的蒸腾特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(3):1047-1058.
LV T R, JIANG Y J, WU Z, et al. Transpiration characteristics of typical evergreen and deciduous tree species in subtropical karst areas and their responses to environmental factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3):1047-1058.
- [19] 武鹏飞, 刘云强, 李冬梅, 等. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5):402-411.
WU P F, LIU Y Q, LI D M, et al. Driving influence of environmental factors on the sap flow of the artificial poplar forest on sandy land [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(5):402-411.
- [20] 马长明, 马玉洁, 程月明. 冀西北坝上干旱区北京杨树树干液流特征及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):338-344.
MA C M, MA Y J, CHENG Y M. Characteristics and the driving forces of sapflow in stems of *Populus beijingensis* in Bashang area of north-west Hebei [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):338-344.
- [21] 张小雨, 贾国栋, 余新晓, 等. 不同退化程度小叶杨人工林冠层气孔导度特征及其环境响应[J]. 植物生态学报, 2024, 48(9):1143-1156.
ZHANG X Y, JIA G D, YU X X, et al. Characteristics of canopy stomatal conductance of *Populus simonii* stands with different degradation degrees and its responses to environmental factors [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(9):1143-1156.
- [22] MANZONI S, VICO G, KATUL G, et al. Optimal plant water-use strategies under stochastic rainfall [J]. Water Resources Research, 2014, 50(7):5379-5394.
- [23] BARBETA A, MEJÍA-CHANG M, OGAYA R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest [J]. Global Change Biology, 2015, 21(3):1213-1225.
- [24] 路伟伟, 吴波, 白建华, 等. 樟子松人工林退化原因及研究展望[J]. 科学通报, 2023, 68(11):1286-1297.
LU W W, WU B, BAI J H, et al. Causes and research prospects of the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(11):1286-1297.
- [25] 钟红云, 潘瑞华, 邸楠, 等. 库布齐沙漠小叶杨和新疆杨树树干液流速率对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(21):9896-9909.
ZHONG H Y, PA R H, DI N. Response of the sap flow velocity of *Populus simonii* and *Populus alba* var. *Pyramidalis* to environmental factors in the Kubuqi Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21):9896-9909.
- [26] 贾天宇, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10):3255-3264.
JIA T Y, LIU T X, DUAN L M, et al. Transpiration and water consumption of poplar trees in semi-arid dune meadow transition zone [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10):3255-3264.
- [27] LI S, XIAO H L, CHENG Y B, et al. Water use measurement by non-irrigated *Tamarix ramosissima* in arid regions of northwest China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7:146-156.
- [28] 尚友贤, 满秀玲, 徐志鹏. 多年冻土区白桦次生林蒸腾特征及其对影响因子的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):310-319.
SHANG Y X, MAN X L, XU Z P. Transpiration characteristics and its response to influence factors of *Betula platyphylla* secondary forest in permafrost area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):310-319.
- [29] 宋金堆, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 荒漠绿洲区新疆杨蒸腾耗水特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(7):162-171.
SONG J D, XIAO H J, XIN Z M, et al. Transpiration and water consumption characteristics of *Populus alba* in desert oasis area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(7):162-171.
- [30] 赵文芹, 席本野, 刘金强, 等. 不同灌溉条件下杨树人工林蒸腾过程及环境响应[J]. 植物生态学报, 2021, 45(4):370-382.
ZHAO W Q, XI B Y, LIU J Q, et al. Transpiration process and environmental response of poplar plantation under different irrigation conditions [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(4):370-382.