

不同退化程度刺槐人工林树干液流对环境因子的响应

马军¹, 韩磊^{2,3,4}, 柳利利^{2,3,4}, 王娜娜^{2,3,4}, 马云蕾^{2,3,4}, 马世杰¹, 王苑^{2,3,4}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 3. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 4. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021)

摘要: [目的] 研究不同退化程度人工林树干液流特征及其对环境因子响应的差异性, 有助于揭示林木退化机制, 从而为区域人工林结构调整与经营管理提供科学依据。[方法] 以宁夏河东地区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林为研究对象, 于2023年5—10月利用TDP热扩散茎流计测定不同退化程度刺槐的树干液流速率, 同时监测环境变量, 研究未退化刺槐人工林(NDPP)、中度退化刺槐人工林(MDPP)、重度退化刺槐人工林(HDPP)的树干液流速率与环境变量的响应关系。[结果] 1) NDPP日均液流速率为2.32 cm/h, MDPP为0.84 cm/h, HDPP为0.45 cm/h。2) 随着退化程度加剧, 刺槐液流速率对大气温度和饱和水汽压亏缺的响应阈值提高, 对太阳辐射的响应阈值减小。不同退化程度刺槐液流速率对大气温度变化响应的临界阈值分别为29.6、30.3、32.7℃, 对饱和水汽压差响应的临界阈值分别为1.14、1.93、2.39 kPa, 对太阳辐射响应的临界阈值分别为428、314、222 W/m²。3) 刺槐液流速率随着土壤水分体积分数的下降而显著下降, 随着退化程度加剧, 液流速率对土壤水分体积分数变化的敏感性降低。4) 环境变量对不同退化程度刺槐液流速率的贡献不同, 随着林地刺槐退化程度加剧, 太阳辐射、饱和水汽压亏缺和土壤水分对液流速率影响的总效应减小。[结论] 对于出现退化的刺槐林地, 通过适当疏伐来降低林分蒸腾, 改善根际土壤水分环境, 提高林木对干旱环境响应的敏感性。

关键词: 液流速率; 环境因子; 响应阈值; 退化; 刺槐

中图分类号: S792.27

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0269-10

Responses of Sap Flow to Environmental Factors in *Robinia pseudoacacia* Plantations with Different Degrees of Degradation

MA Jun¹, HAN Lei^{2,3,4}, LIU Lili^{2,3,4}, WANG Nana^{2,3,4}, MA Yunlei^{2,3,4}, MA Shijie¹, WANG Yuan^{2,3,4}

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Region of Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] Research on the characteristics of sap flow velocity and its responses to environmental factors in plantations with different degrees of degradation is helpful to reveal the mechanisms of forest degradation, and can provide a scientific basis for structure adjustment and management of regional plantations. [Methods] Taking *Robinia pseudoacacia* plantations in the east area of Yellow River in Ningxia as the research objects, the stem sap flow velocities of *R. pseudoacacia* with different degrees of degradation were measured by TDP thermal diffusion sap flow meter from May to October, 2023, and the environmental variables were monitored at the same time. The response relationships between environmental variables and the stem sap flow velocities of non-degraded *R. pseudoacacia* plantation (NDPP), moderately degraded *R. pseudoacacia* plantation (MDPP) and heavily degraded *R. pseudoacacia*

收稿日期: 2024-10-17

修回日期: 2024-11-11

录用日期: 2024-11-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-02-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(32460426, 31760236); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03056)

第一作者: 马军(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: majun0079@163.com

通信作者: 韩磊(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事干旱半干旱地区生态水文过程研究。E-mail: layhan@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

plantation (HDPP) were studied. [Results] 1) The daily average sap flow velocity of NDPP, MDPP and HDPP were 2.32, 0.84 and 0.45 cm/h respectively. 2) With the aggravation of degradation, the response threshold of *R. pseudoacacia* sap flow velocity to atmospheric temperature (T_a) and saturated water pressure deficit (VPD) increased, while the response threshold to solar radiation (S_r) decreased. The critical response thresholds of sap flow velocity of *R. pseudoacacia* with different degradation degrees to environment variables were 29.6, 30.3 and 32.7 °C respectively in T_a , 1.14, 1.93 and 2.39 kPa respectively in VPD and 428, 314 and 222 W/m² respectively in S_r . 3) The sap flow velocity of *R. pseudoacacia* decreased significantly with the decrease of soil water content, and the sensitivity of sap flow velocity to the change of soil water content decreased with the aggravation of degradation. 4) The contribution of environmental variables to sap flow velocity in stands with different degrees of degradation was different. With the aggravation of the degradation degree, the total effect of S_r , VPD and soil moisture on sap flow velocity decreased. [Conclusion] For degraded *R. pseudoacacia* forests, appropriate thinning could be used to reduce stand transpiration, improve rhizosphere soil moisture environment and increase the response sensitivity of trees to drought environment.

Keywords: sap flow velocity; environmental factors; response threshold; degradation; *Robinia pseudoacacia*

Received: 2024-10-17

Revised: 2024-11-11

Accepted: 2024-11-18

Online(www.cnki.net): 2025-02-19

地处干旱半干旱地区的黄土高原,生态环境脆弱,水土流失严重,长期以来大面积营建人工植被是该地区防风固沙、调节小气候和涵养水源的重要措施^[1]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)因其耐贫瘠、生长迅速、适应能力强等特点,被引进国内并作为黄土高原植被建设的优势树种^[2]。随着林木逐年生长,加之全球气候变暖,降水格局发生改变,水资源供需矛盾日益加剧,部分刺槐人工林出现枯梢、生长异常缓慢和“小老树”等退化现象,森林生态水文功能随之降低,也进一步加剧区域生态风险^[3-5]。研究^[6]表明,林木退化现象为一个复杂而渐进的过程,受各种作用因素的限制影响,如全球气温持续上升变暖、水资源短缺、升高的饱和水汽压差、土壤水分以及极端天气等,都导致林木生长环境的关键因子处于临界和敏感状态,可能发生树木退化现象。其中干旱半干旱地区人工林退化的主要原因是不合理的配置导致林分蒸腾耗水需求和水分供给之间的矛盾加剧^[7-8]。林木蒸腾耗水在土壤-植被-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum)的水分平衡要素中所占比例最大,其中树干液流约占林木蒸腾量99%,连续监测林木树干液流变化规律,可以准确反映其耗水特征^[7]。热扩散探针法(TDP)是研究树干液流通量的重要方法之一,基于该方法众多学者^[8-11]发现,树干液流速率通过响应大气温度、相对湿度、饱和水汽压差、太阳辐射等气象因子,以及土壤水分环境的变化,调节气孔开启或关闭以维持树木的生存。因此,通过量化分析环境因子对于林木树干液流的影响,能够深入了解气候变化背景下人工植被对于干旱环境的适应性。

目前,关于黄土高原地区不同退化程度的人工林树种树干液流速率的研究较少,通过分析不同退化程度人工林树种树干液流对环境因子响应的差异性,对充分认识气候变化下人工植被的适应性,揭示干旱半干旱地区人工林的退化机制具有重要意义。本研究于2023年5—10月选取刺槐人工林为研究对象,通过划分不同退化程度刺槐人工林样地,分析不同退化程度刺槐人工林树干液流差异,明确环境因子对不同退化程度刺槐树干液流影响的敏感性、影响路径,探讨不同退化程度的刺槐人工林树干液流与环境驱动因子的耦合关系及响应机理,以期揭示黄土高原地区人工林退化机制提供参考,并为干旱半干旱地区植被建设和人工林林分结构调整提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区灵武市白芨滩(38°03'N, 106°22'E),海拔1 105~1 655 m,地处毛乌素沙地西南缘,属于鄂尔多斯高原与黄土高原过渡带(图1)。气候类型为温带大陆性气候,年平均降水量212.4 mm,降水量分布不均,主要集中在7—9月,年平均气温8.5 °C。土壤以灰钙土和风沙土为主,自然植被以沙生植物为主,包括沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等,人工植被主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、新疆杨(*Populus bolleana*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等^[12]。

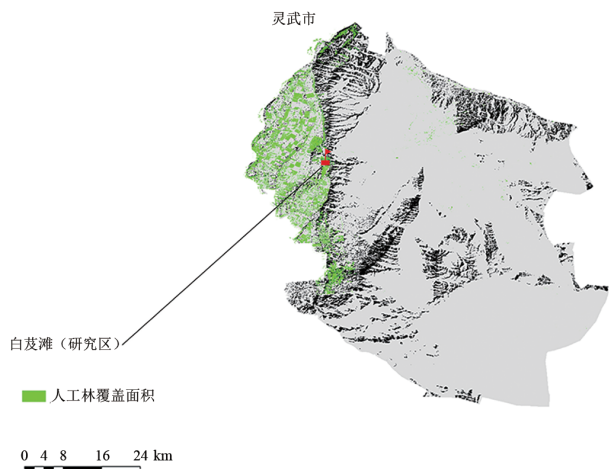


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 样地选取与调查

在研究区核心区域(面积约 40 hm²),随机设

置 5 个 20 m×20 m 刺槐人工林地标准样地,分别调查树高、胸径、冠幅、郁闭度、单株枯梢率等指标,将刺槐人工林划分为未退化(NDPP)、中度退化(MDPP)和重度退化(HDPP)3 种样地类型(表 1),划分依据见文献[13]。研究区刺槐为同一时期栽种,林龄为 20 a,株行距为 3 m×3 m,即 1 111 株/hm²。

1.3 气象数据监测

采用美国 Vantage Pro 2 自动气象站(Davis Inc, USA)实时监测气象要素,气象站安装在观测点空旷地内,主要包括降水量(*P*, mm)、空气温度(*T*_a, °C)、相对湿度(*RH*, %)、风速(*W*_v, m/s)、太阳辐射(*S*_r, W/m²)、大气压(*B*_p, kPa)等,每隔 15 min 记录 1 次。饱和水汽压差(*VPD*, kPa)具体公式为^[12]:

$$VPD = 0.611 \exp\left(\frac{17.502 T_a}{T_a + 240.97}\right) \times (1 - RH) \quad (1)$$

表 1 林分特征及退化程度划分

Table 1 Characteristics and degradation degrees of the sampled stands

样地 类型	林木基本特征					退化指标		
	胸径/cm	冠幅/m ²	树高/m	叶面积指数	郁闭度	枯死木比例/%	防护功能	单株枯梢/%
NDPP	6.4±2.1	8.31±2.26	3.17±0.26	1.24±0.35	≥0.5	≤5	良好	≤10
MDPP	6.2±1.3	7.78±2.01	2.97±0.35	0.84±0.29	0.3~0.5	10~40	较好	10~40
HDPP	6.5±0.8	6.7±1.52	3.01±0.13	0.59±0.22	≤0.3	>40	较差	≥40

注:表中数据为平均值±标准差。

1.4 土壤指标、根系生物量的测定

植物生长季末期(10月下旬)在各标准样地内分层采集土壤样品用于测定土壤有机碳(TOC),土壤采样深度为 0~200 cm,间隔 10 cm,重复 3 次。土壤有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(SSM-5000A, TOC-L Inc., JPN)测定。于 10 月中旬沿着样树干的北、南及东 3 个方向,分别在水平方向 0.5、1 m 范围内按照不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~120、120~200 cm)进行根系样品采集,利用 0.2、0.1 目的土壤筛,筛选各土层粗细根,放入 75 °C 的烘箱中烘干至恒重,用精度为 0.001 g 的天平称重,获得细根生物量。根系生物量(*Br*, g/m³)具体公式为^[14]:

$$Br = \frac{M_d}{V_{soil}} \quad (2)$$

式中:*Br*为根系生物量, g/m³; *M_d*为某径级根系干质量, g; *V_{soil}*为根钻土壤体积, m³。

土壤体积含水率(*SWC*)采用时域反射仪(TDR)测定,间隔 10 cm 土层、每隔 7 d 测定 1 次,并通过烘干法校准。土壤储水量、土壤水分亏缺和土壤水消耗率具体公式为^[15]:

$$S = \frac{\theta \rho_b H}{\rho_w} \quad (3)$$

$$S_{deplete} = S_{initial} - S_{present} \quad (4)$$

$$V_{deplete} = \frac{S_{deplete}}{T_{age}} \quad (5)$$

式中:*S*为土壤储水量, mm; *θρ_b*为土壤体积含水率, %; *H*为土层深度, mm; *ρ_w*为水密度, g/cm³; *S_{deplete}*为土壤水分亏缺, mm; *S_{initial}*为草地土壤储水量, mm; *S_{present}*为当前土壤储水量, mm; *V_{deplete}*为土壤水消耗率, mm/a; *T_{age}*为树龄, a。

1.5 叶面积指数测定、液流监测

在 NDPP、MDPP 和 HDPP 刺槐林样地内,分别选取 3 株长势一致的样木实时监测树干液流(表 2)。叶面积指数(LAI)采用冠层分析仪(LAI-2200, LICOR Inc., USA)测定,每隔 15 d 测定 1 次;树干液流采用 TDP 热扩散茎流计(SF-G, German)测定,热扩散探针安装在距地 1.3 m 处,传感器由 2 根直径 1.5 mm、长 35 mm 的探针组成,将配套铝管插入木质部边材钻孔中并注入导热硅脂,以改善探针的导热性能。树干液流速率(*J_s*, cm/h)根据 Granier 的校正公式计算,具体公式^[14]为:

$$J_s=0.011\,9\times\left(\frac{dT_{\max}-dT}{dT}\right)^{1.231}\times3\,600\quad(6)$$

式中： $dT_{\max}$ 为树干木质部液流为0时2个探针间的温度差，℃； dT 为2个探针间的瞬时温差，℃。

表2 监测样木特征

Table 2 Characteristics of the sampled trees				
样树编号	树高/m	胸径/cm	冠幅/m ²	边材面积/cm ²
N1	3.20	6.70	8.36	32.44
N2	2.95	6.64	8.31	30.49
N3	2.86	6.55	7.86	31.38
M1	3.12	6.42	8.03	29.03
M2	3.02	6.36	7.76	28.24
M3	2.89	6.53	7.83	30.87
H1	3.25	6.80	7.13	31.06
H2	3.15	6.35	6.88	28.82
H3	2.91	6.25	6.25	28.13

1.6 数据处理

为了便于分析,本文根据文献[12]将土层深度

划分为浅层(0~40 cm)、中层(40~120 cm)和深层(120~200 cm)。采用SPSS Statistics 27统计描述分析和SPSS Amos 25软件搭建结构方程进行通径分析;采用边界线分析法(boundary line analysis),分析15 min尺度下液流速率对环境因子响应的边界,并利用Origin 2021和Visio 2019软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度刺槐生长环境因子的变化

观测期间累计发生降雨事件32次,主要集中在5—10月,降雨量为94.4 mm。日平均大气温度为21.70℃,日平均相对湿度为51.02%。太阳辐射及饱和水汽压差的整体变化趋势相似,日平均太阳辐射为231.78 W/m²,日平均VPD为1.39 kPa。不同退化程度刺槐树干液流速率日平均值分别为2.32(NDPP)、0.84(MDPP)、0.45 cm/h(HDPP),最大值和最小值分别出现在6月和9月,表现出明显的季节差异(图2)。

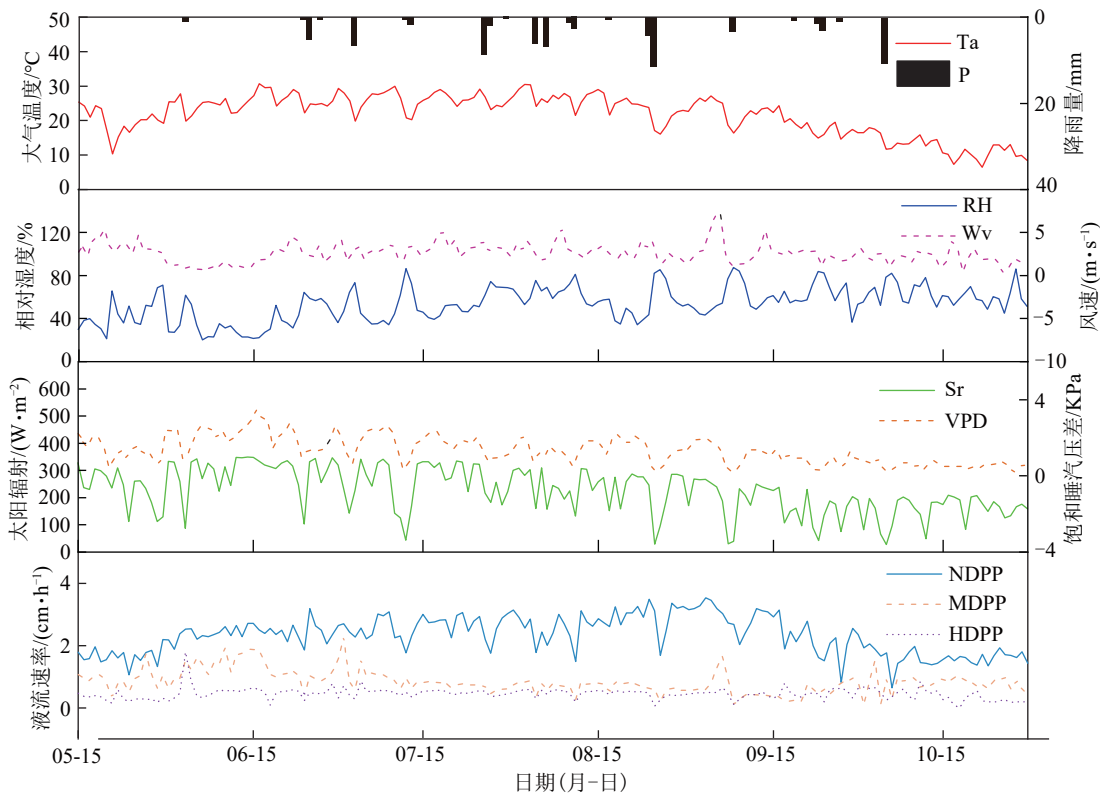


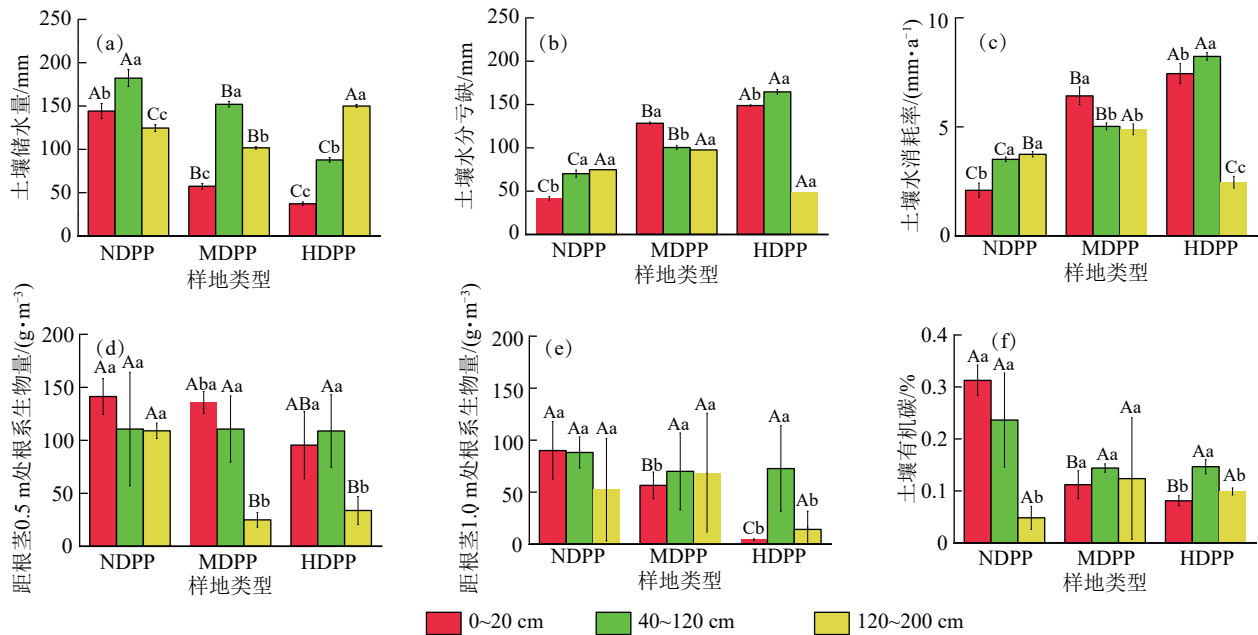
图2 观测期间环境因子及液流速率的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of environmental factors and sap flow velocity during the observation period

由图3可知,整个观测期内NDPP林地土壤储水量保持相对较高水平,而MDPP和HDPP林地较低。0~40 cm土层,不同退化程度刺槐林地土壤储水量由大到小依次为NDPP>MDPP>HDPP林地,HDPP土壤水分亏缺和土壤水消耗率最高,MDPP次之,NDPP最低;40~120 cm土层,NDPP

土壤储水量高于MDPP和HDPP林地,且HDPP林地土壤水分亏缺和土壤水消耗率最高,NDPP林地土壤水分亏缺和土壤水消耗率最低;120~200 cm土层,HDPP林地土壤储水量最高,土壤水分亏缺和土壤水消耗率最低。NDPP林地浅层土根系生物量占比为39.15%~39.75%;MDPP林地浅层土占

比为 28.97%~49.96%;而 HDPP 样地主要分布在中层土占比为 45.67%~79.91%。NDPP 样地土壤有机碳质量分数浅层土(0.31%)高于中层土(0.24%)和深层土(0.05%);MDPP 样地中层土(0.15%)高于深层土(0.13%)和浅层土(0.11%),HDPP 样地中层土(0.15%)高于深层土(0.10%)和浅层土(0.08%),NDPP 林地土壤有机碳质量分数保持相对较高水平,MDPP 和 HDPP 林地土壤有机碳质量分数较低,出现退化现象林木周围各土层有机碳质量分数下降。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层内不同退化林地间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一退化林地不同土层间差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同退化程度刺槐林地土壤水分、根系生物量、土壤有机碳变化特征

Fig. 3 The variation characteristics of soil moisture, root biomass and soil organic carbon in *Robinia pseudoacacia* plantations with different degrees of degradation

2.2 不同退化程度刺槐液流速率和主导气象因子变化规律分析

选取典型晴天(7月15—18日),分析不同退化刺槐液流速率和太阳辐射、饱和水汽压差的时滞关系(图4)。不同退化程度刺槐树干液流启动时间和到达峰值的时间明显不同,NDPP 林地刺槐液流启动时间为 5:30 前后,在 9:30 液流速率达到峰值(4.76 cm/h),随后液流速率

缓慢下降;MDPP 林地液流启动时刻大致为 7:00 前后,在 12:00 液流速率达到峰值(2.51 cm/h);HDPP 林地液流启动时刻大致为 7:30 前后,在 14:00 液流速率达到峰值(1.24 cm/h)。太阳辐射和饱和水汽压差呈单峰变化趋势。NDPP 和 MDPP 树干液流速率峰值出现时间明显提前于太阳辐射和饱和水汽压差,而 HDPP 液流速率峰值略滞后于太阳辐射,提前于饱和水汽压差。

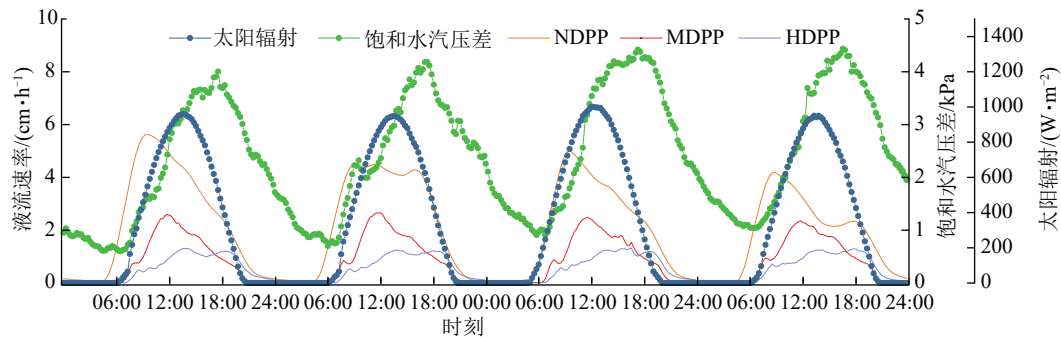


图 4 晴天条件下液流速率和太阳辐射、饱和水汽压差的时滞关系

Fig. 4 The time-lag relationships between sap flow velocity and solar radiation, saturated water vapor pressure deficit under sunny conditions

2.3 不同退化程度刺槐液流速率与叶面积指数、土壤水分体积分数的关系

观测期间各林地刺槐液流速率随叶面积指数

的增加而增加,随着退化程度的增加,液流速率对叶面积指数变化响应的敏感性降低(图 5a、图 5b、图 5c)。刺槐液流速率随着土壤水分体积分数的

降低先缓慢下降后迅速降低,不同退化程度刺槐液流速率对土壤体积含水率变化响应的阈值不同,分别为 18% (NDPP)、11% (MDPP)、9%

(HDPP)(图 5d、图 5e、图 5f),表明随着退化程度的加剧,刺槐液流速率对土壤水分变化响应的敏感性下降。

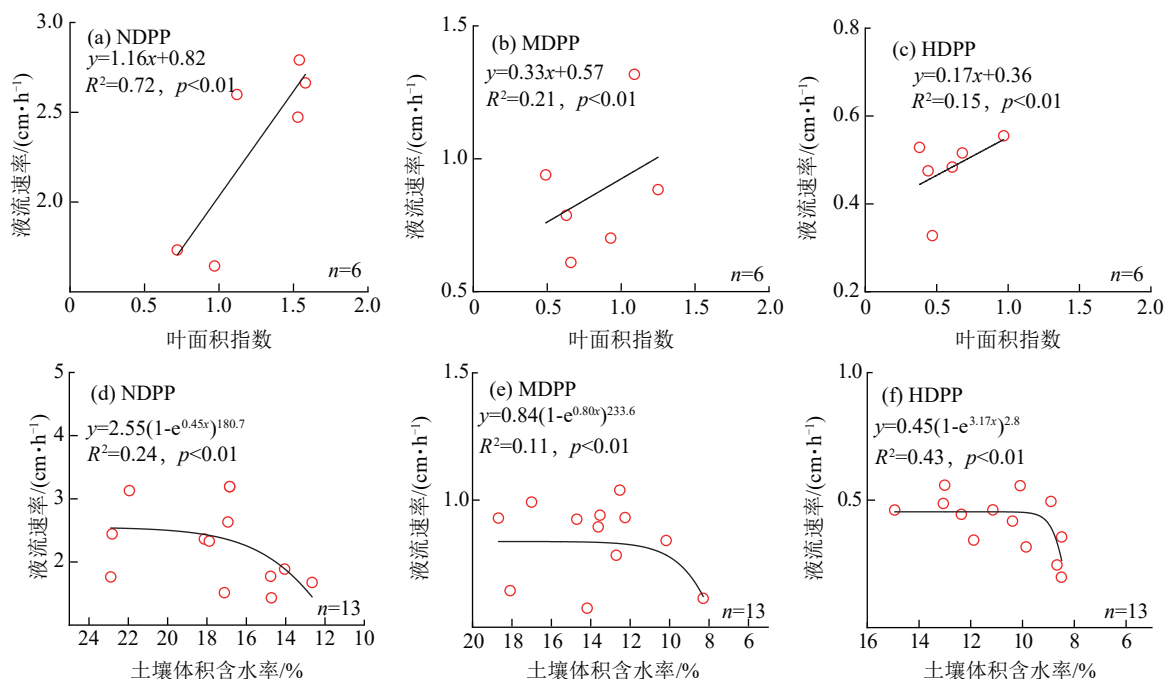


图 5 不同退化程度液流速率与叶面积指数(LAI)、土壤体积含水率(SWC)的关系

Fig. 5 Relationships between sap flow velocity and leaf area index (LAI) and soil volume moisture content (SWC) in *Robinia pseudoacacia* plantations with different degrees of degradation

2.4 不同退化程度刺槐液流速率对大气环境因子响应的边界线

采用边界线分析液流速率对大气环境因子的响应过程,由图 6 可知,当大气温度分别高于 19.2、20.2、21.5℃时,NDPP、MDPP、HDPP 林地林木树干液流速率随着大气温度升高迅速增加,当大气温度分别高于 23.7、28.1、30.3℃时,各林分林木树干液流速率对大气温度变化的敏感性降低,当大气温度高于 29.6、30.3、32.7℃时,各林分林木树干液流速率反而随着大气温度的升高而降低(图 6a、图 6d、图 6g)。液流速率随着饱和水汽压差增加而增大,当饱和水汽压差大于 1.14 kPa (NDPP)、1.93 kPa (MDPP) 和 2.39 kPa (HDPP) 时,不同退化程度刺槐液流速率对饱和水汽压差的响应敏感性降低(图 6b、图 6e、图 6h)。液流速率随着太阳辐射增强而增加,引起气孔调节的太阳辐射阈值分别为 428 W/m²(NDPP)、314 W/m²(MDPP) 和 222 W/m²(HDPP),当大于该阈值时,树干液流速率对太阳辐射的响应敏感性降低(图 6c、图 6f、图 6i)。

2.5 不同退化程度刺槐液流速率对其影响因素路径分析

研究对影响树干液流速率的气象因子(大气温度、太阳辐射、饱和水汽压差)、土壤根系特征及根系土壤环境(根系生物量、土壤体积含水率、土壤有机碳质量

分数)和林木特征(叶面积指数)构建结构方程模型。由图 7 可知,环境因素对不同退化程度刺槐树干液流速率的影响路径和影响程度不同,NDPP 林地影响因素依次为 Sr、SWC、VPD 和 Br,太阳辐射、饱和水汽压差和叶面积指数存在显著的正效应,大气温度、土壤水分和根系生物量存在显著的负效应(图 7a);MDPP 林地影响因素依次为 LAI、Br、VPD 和 SWC,太阳辐射、饱和水汽压差、叶面积指数和根系生物量存在显著的正效应,大气温度和土壤水分存在显著的负效应(图 7b);HDPP 林地影响因素依次为 LAI、Sr、SWC 和 Ta,饱和水汽压差、叶面积指数、根系生物量和土壤水分存在显著的正效应,太阳辐射和大气温度存在显著的负效应(图 7c)。整体上,气象因子对于出现退化刺槐的树干液流速率影响逐渐减弱,土壤体积含水率一方面直接影响刺槐根系对土壤水的利用率,同时通过土壤养分和根系生物量间接对树干液流速率产生影响。

在路径分析的基础上,通过多元曲线回归分析(表 3)可知,太阳辐射、饱和水汽压差、土壤水分和根系生物量是影响未退化刺槐树干液流速率变化的主要因素,可以解释 87% 的变量;而影响轻度退化刺槐树干液流速率的主要因素依次为温度、饱和水汽压差、叶面积指数和根系生物量,可以解释 79% 的变量,影响重度退化刺槐树干液流速率变化最主要的因素为叶面积

指数、土壤水分和饱和水汽压差,对液流速率的解释程 流速率的影响程度降低,根际土壤环境及林木叶片特
度为 72%。随着退化程度的加剧,气象因子对刺槐液 征的变化对树干液流速率的影响增大。

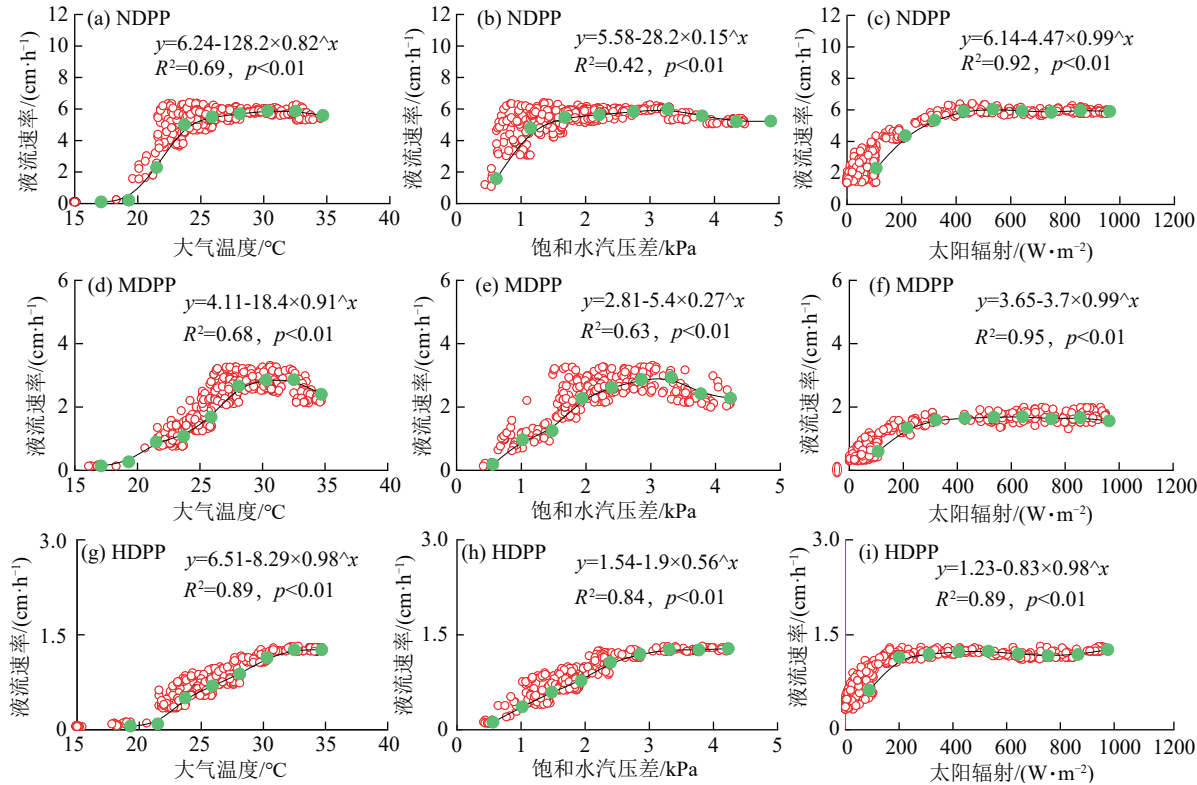
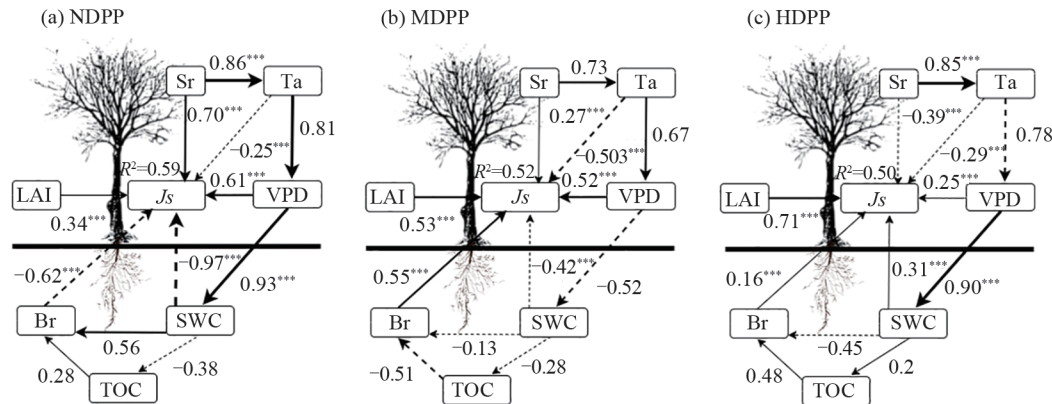


图 6 不同退化程度刺槐树干液流速率对主要气象因子响应过程的边界线分析

Fig. 6 Boundary line analysis of the response process of sap flow velocity to main meteorological factors in *Robinia pseudoacacia* plantations with different degrees of degradation



注:实线和虚线分别代表正路径系数和负路径系数,线粗细代表路径系数相对大小,数字代表总作用效应, R^2 表示变量方差被解释比例;*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$;***表示 $p<0.001$; J_s 为液流速率; T_a 为大气温度; S_r 为太阳辐射; RH 为相对湿度; VPD 为饱和水汽压差; LAI 为叶面积指数; Br 为根系生物量; SWC 为土壤体积含水率; TOC 为土壤有机碳。

图 7 不同退化程度刺槐树干液流速率影响因素路径分析

Fig. 7 Path analysis of the influencing factors of sap flow velocity in *Robinia pseudoacacia* plantations with different degrees of degradation

表 3 不同退化程度刺槐树干液流速率与环境因子关系的回归方程

Table 3 Regression equations of sap flow velocity and environmental factors in *Robinia pseudoacacia* plantations with different degrees of degradation

样地	多元曲线回归方程	R^2
NDPP	$J_s = 2.42 + 300e^{-Sr} - 621.82e^{-7.32VPD} + 15.99e^{-3.57SWC} + 41.09e^{-27.58Br}$	0.87
MDPP	$J_s = 0.05 + 25.26e^{-0.44Sr} - 2.69e^{-1.12VPD} + 0.66e^{-0.08LAI} + 2.62e^{-11.06Br}$	0.79
HDPP	$J_s = 0.5 - 521.85e^{-16.18LAI} + e^{-1.62SWC} + 6.24e^{-34.87VPD}$	0.72

3 讨论

3.1 不同退化程度刺槐树干液流变化差异

在典型晴天条件下,不同退化程度刺槐人工林液流速率表现为未退化>中度退化>重度退化林地,且均呈先升高后缓慢降低的变化规律,但不同退化程度刺槐树干液流启动时间和到达峰值的时间存在差异。在黄土高原地区,正常生长的刺槐树干液流启动时间为5:00~7:00,到达峰值的时间约为10:00~12:00^[9]。本研究发现,随着退化程度加剧,刺槐液流启动时间和峰值时间不断延迟,延迟时间约为30~150 min,表明未退化刺槐冠层蒸腾作用对环境因子的响应及其气孔调节反应迅速,随着退化程度加剧,刺槐冠层气孔调节出现障碍。杨丽琳等^[16]研究发现,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)液流速率提前于饱和水汽压差而滞后于太阳辐射,而杨洁等^[17]则发现,刺槐树干液流速率提前于太阳辐射而滞后于饱和水汽压差。本研究发现,不同退化程度刺槐树干液流速率与太阳辐射和饱和水汽压差之间存在时滞关系,未退化刺槐树干液流速率对太阳辐射和饱和水汽压差升高的响应更加敏感,树干液流速率峰值出现时间明显提前于太阳辐射和饱和水汽压差,而重度退化刺槐树干液流速率峰值略滞后于太阳辐射,提前于饱和水汽压差,其原因可能是夏季较高的饱和水汽压差和较为干燥的土壤水分环境引起的树木叶片气孔调节失衡^[18-19],树干液流峰值可能提早出现引发较大的时滞效应。

3.2 不同退化程度刺槐树干液流速率对环境变量响应的敏感性

环境变量对树干液流速率的影响是动态变化的,其主要受到气象因子、土壤条件和林木特征的综合影响^[19-21]。例如,张荣等^[9]研究发现,影响刺槐液流速率的主导气象因子在不同月份存在差异,主要为太阳辐射、饱和水汽压差和气温;魏鸾葳等^[11]研究发现,刺槐为降水敏感型树种,土壤水分对液流速率的影响更为显著;王彪等^[22]对刺槐人工林进行降雨拦截试验发现,刺槐液流速率的影响因素依次为太阳辐射、土壤水分和树木水分生理特征,且干旱胁迫显著降低刺槐液流速率。

作为影响液流速率的主要气象环境因子,太阳辐射和饱和水汽压差分别承担气孔开度和水分运移的驱动力来影响树干液流^[16]。植物树干液流对太阳辐射和饱和水汽压差变化响应的敏感性下降,植物则可能面临更高的衰退和枯死风险^[23]。本研究也发现,中度和重度退化的刺槐人工林液流速率对气象因子变化的敏感性显著低于未退化林地,液流速率随着太阳

辐射和饱和水汽压差的增加线性增加,达到阈值后缓慢下降,表明太阳辐射和饱和水汽压差超过一定阈值范围,则成为气孔调节和光合作用的限制因子^[24-25],与韩磊等^[24]研究白榆(*Ulmus pumila*)和LIU等^[25]研究落叶松(*Larix gmelinii*)发现的结果较为一致。随着退化程度的加剧,刺槐树干液流对气温变化的响应敏感性降低,将进一步造成叶片失水,叶片光合作用能力也有所下降^[26]。土壤水分体积分数下降限制植物气孔导度和水力导度的调节能力^[27]。刺槐树干液流速率随着土壤水分的下降,先缓慢下降,达到一定阈值后迅速降低。不同退化程度刺槐液流速率对土壤水分变化响应的阈值分别为未退化>中度退化>重度退化,表明随着退化程度的加剧,刺槐液流速率对土壤水分变化响应的敏感性下降,进而加速林木退化。根系生物量的变化直接影响树木根系的吸水能力^[28]。本研究发现,中、重度退化刺槐根系生物量呈明显下降趋势,难以利用深层水分,从而限制树木的水分传输。土壤含水率一方面直接影响刺槐根系对土壤水的利用率,同时通过土壤养分和根系生物量间接对树干液流速率产生影响,植物受到水分胁迫后,叶片通常选择在较低的饱和水汽压差下选择关闭气孔,从而通过降低蒸腾作用来防止水分过度流失^[29]。当气孔调节的敏感性下降时,则影响叶片对CO₂的吸收和非结构性碳水化合物合成^[30],造成林木生长因能量缺失而引起退化^[31]。随着土壤水分体积分数的降低,树木木质部水势降低,空气容易在木质部形成空穴,进而影响树干的水分输导^[32],进一步加剧退化。不同林地刺槐液流速率随叶面积指数的增加而增加。LIU等^[6]研究发现,当树木叶面积指数达到阈值时,因缺少土壤水分支持蒸腾,树干液流速率并不再增加,这也是树木应对干旱环境的一种适应机制。因此,受地区气候、土壤环境和林分结构差异,树干液流速率的影响因素存在较大的差异,随着林地林木出现不同程度退化,树干液流速率与环境变量之间的响应关系则更为复杂。

4 结论

1)随着退化程度的加剧,液流速率受气象因子和土壤水分条件的响应解耦,退化刺槐人工林的液流速率对环境因子变化响应的敏感性降低。

2)结构方程模型分析揭示气象因子、土壤根系条件和林木特征对刺槐液流速率的综合影响,随着林地刺槐退化程度加剧,环境变量对不同退化程度刺槐液流速率的贡献不相同,太阳辐射、饱和水汽压差和土壤水分对液流速率影响的总效应减小。

3)随着退化程度的加剧,气象因子对刺槐液流

速率的影响程度降低,根际土壤环境及林木叶片特征的变化对林木液流速率的影响增大。可以通过适当疏伐来减少林木的蒸腾耗水量,进而提高树木对季节性干旱的适应性,研究结果可为黄土高原地区刺槐人工林管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] SONG L N, ZHU J J, ZHENG X, et al. Transpiration and canopy conductance dynamics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in its natural range and in an introduced region in the sandy plains of northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: e107830.
- [2] 朱燕,翟博超,孙美美,等.黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 160-167.
ZHU Y, ZHAI B C, SUN M M, et al. Soil physicochemical properties and stoichiometry characteristics in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantations across different densities in the loess hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 160-167.
- [3] 于博威,刘高焕,崔保山.晋西黄土丘陵区人工刺槐林土壤干燥化效应[J]. *环境生态学*, 2020, 2(增刊1): 51-58.
YU B W, LIU G H, CUI B S. Soil desiccation effects under *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess hilly region of western Shanxi Province [J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(S1): 51-58.
- [4] 刘彦,余新晓,岳永杰,等.北京密云水库集水区刺槐人工林空间结构分析[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 25-28.
LIU Y, YU X X, YUE Y J, et al. Spatial structure of *Robinia pseudoacacia* plantation in Miyun Reservoir Watershed of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(5): 25-28.
- [5] WANG L X, MA X Y, CHE Y M, et al. Extracellular ATP mediates H₂S-regulated stomatal movements and guard cell K⁺ current in a H₂O₂-dependent manner in *Arabidopsis*[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(4): 419-427.
- [6] LIU H Y, PARK WILLIAMS A, ALLEN C D, et al. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [7] SONG L N, LI M C, ZHU J J, et al. Comparisons of radial growth and tree-ring cellulose $\delta^{13}\text{C}$ for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in natural and plantation forests on sandy lands [J]. *Journal of Forest Research*, 2017, 22(3): 160-168.
- [8] 王宁,毕华兴,郭孟霞,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 213-219.
WANG N, BI H X, GUO M X, et al. Study on soil water vegetation carrying capacity of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully area of western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 213-219.
- [9] 张荣,毕华兴,焦振寰,等.生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(6): 1238-1246.
ZHANG R, BI H X, JIAO Z H, et al. Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(6): 1238-1246.
- [10] 朱昊阳,李洪宇,王晓蕾,等.黄土高原油松冠层气孔导度和蒸腾变化特征与模拟[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9130-9142.
ZHU H Y, LI H Y, WANG X L, et al. Characteristics and modeling of canopy stomatal conductance and transpiration of *Pinus tabulaeformis* on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9130-9142.
- [11] 魏鸾葳,陈左司南,陈胜楠,等.降雨对河岸生态系统杨树树干液流及其环境控制的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 284-293.
WEI L W, CHEN Z, CHEN S N, et al. Effects of rainfall on sap flow and its environmental controls in a riparian *Poplar* plantation ecosystem [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 284-293.
- [12] 柳利利,韩磊,高阳,等.宁夏河东沙区刺槐和丝棉木水分利用策略[J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 812-825.
LIU L L, HAN L, GAO Y, et al. Water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 812-825.
- [13] 国家林业和草原局.退化防护林修复技术规程: LY/T 3179—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
National Forestry and Grassland Administration. Technical regulation for the restoration of degraded protective forest: LY/T 3179—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [14] 周鹏,韩磊,彭冬,等.基于神经网络优化模型的丝棉木瞬态液流模拟[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(8): 2123-2132.
ZHOU P, HAN L, PENG L, et al. Instantaneous sap flow velocity simulation of *Euonymus bungeanus* based on neural network optimization model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(8): 2123-2132.
- [15] 李艳春,赵光平,胡文东.宁夏河东沙地气候变化对全球变暖的响应[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(2): 36-42.
LI Y C, ZHAO G P, HU W D. Response of climate change in Hedong sandy area of Ningxia to global warming[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(2): 36-42.
- [16] 杨丽琳,邢万秋,王卫光,等.新安江源区杉木树干液流

- 速率变化及其对环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(4): 571-583.
- YANG L L, XING W Q, WANG W G, et al. Variation of sap flow rate of *Cunninghamia lanceolata* and its response to environmental factors in the source area of Xin'anjiang River[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(4): 571-583.
- [17] 杨洁, 吕金林, 何秋月, 等. 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2607-2613.
- YANG J, LYU J L, HE Q Y, et al. Time lag of stem sap flow and its relationships with transpiration characteristics in *Quercus liaotungensis* and *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2607-2613.
- [18] ZHANG Y F, FENG T J, WANG L Q, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil physicochemical properties mainly achieved by the coupling contributions of biological synusia to the Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2023, 152: e110353.
- [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] 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]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: e118749.
- [21] 张荣, 毕华兴, 王宁, 等. 不同时间尺度下刺槐蒸腾耗水与环境因子关系[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 204-211.
- ZHANG R, BI H X, WANG N, et al. Relationship between transpiration of *Robinia Pseudoacacia* and environmental factors at different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 204-211.
- [22] 王彪, 陈立欣, 吴应明, 等. 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[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(4): 127-140.
- WANG B, CHEN L X, WU Y M, et al. 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[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 127-140.
- [23] SONG X W, LYU S D, WEN X F. Limitation of soil moisture on the response of transpiration to vapor pressure deficit in a subtropical coniferous plantation subjected to seasonal drought[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: e125301.
- [24] 韩磊, 黄晓宇, 韩永贵, 等. 白榆冠层蒸腾及其对环境因子响应的边界线[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(12): 22-27.
- HAN L, HUANG X Y, HAN Y G, et al. Characteristics and boundary line analysis of canopy transpiration of *Ulmus pumila* to environmental driving factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(12): 22-27.
- [25] LIU Z B, YU S P, XU L H, et al. Differentiated responses of daytime and nighttime sap flow to soil water deficit in a larch plantation in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: e108540.
- [26] DOUGHTY C E, KEANY J M, WIEBE B C, et al. Tropical forests are approaching critical temperature thresholds[J]. Nature, 2023, 621(7977): 105-111.
- [27] SONG L N, ZHU J J, ZHENG X, et al. Comparison of canopy transpiration between *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabulaeformis* plantations in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 314: e108784.
- [28] 秦颖萍, 刘泽彬, 郭建斌, 等. 环境和冠层结构对华北落叶松林树干液流的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1681-1689.
- QIN H P, LIU Z B, GUO J B, et al. Effects of environment and canopy structure on stem sap flow in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1681-1689.
- [29] BARNARD H R, RYAN M G. A test of the hydraulic limitation hypothesis in fast-growing *Eucalyptus saligna*[J]. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(8): 1235-1245.
- [30] 张婷, 曹扬, 陈云明, 等. 生长季末期干旱胁迫对刺槐幼苗非结构性碳水化合物的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 297-304.
- ZHANG T, CAO Y, CHEN Y M, et al. Effects of drought stress on non-structural carbohydrates of *Robinia pseudoacacia* saplings at the end of the growing season[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 297-304.
- [31] DENG J F, YAO J Q, ZHENG X, et al. Transpiration and canopy stomatal conductance dynamics of Mongolian pine plantations in semiarid deserts, Northern China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: e106806.
- [32] 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.