

重金属胁迫下6种植物展叶过程对环境积温的响应

周华¹, 姜霞¹, 杨永艳¹, 党毅², 刘娜¹, 杨光能¹

(1. 贵州省林业科学研究院 贵州黎平石漠生态系统定位观测研究站, 贵阳 550000; 2. 贵州省林业科学研究院 贵州雷公山森林生态系统定位观测研究站, 贵阳 550000)

摘要: 为研究复合重金属胁迫下乡土植物生长发育与环境积温之间的关系, 采用土壤盆栽试验, 设置3个质量浓度梯度分析7种混合重金属胁迫下6种植物展叶过程对环境有效积温和日温差积温的响应, 建立以积温为自变量的逻辑斯蒂(Logistic)生长模型。结果表明, 不同质量浓度胁迫下6种植物的叶面积常数与对照组具有显著差异; 对照组6种植物叶面积生长量与不同质量浓度重金属胁迫处理下的植物叶面积生长量存在显著差异; 6种植物展叶期内相对叶面积与有效积温、日温差积温符合Logistic生长曲线, 但胁迫组植物生长模型总体拟合度(R^2)较差、预测精度较低, 特别是低质量浓度处理的地果相对叶面积-有效积温拟合模型参数的 R^2 仅为0.265 4, 表明重金属胁迫显著干扰了植物的正常生长过程。叶面积-积温Logistic生长模型能较好地反映植物展叶期内叶面积在环境胁迫下的生长差异, 研究结果可为矿区生态修复苗木筛选及培育提供科学参考。

关键词: 重金属; 相对叶面积; 有效积温; 日温差; 生长曲线

中图分类号: S 771.8

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.015

Response of Leaf Expansion Process of Six Plants to Environmental Accumulated Temperature under Heavy Metal Stress

ZHOU Hua¹, JIANG Xia¹, YANG Yongyan¹, DANG Yi², LIU Na¹, YANG Guangneng¹

(1. Guizhou Liping Rocky Desertification Ecosystem Observation and Research Station, Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550000, China; 2. Guizhou Leigongshan Forest Ecosystem Observation and Research Station, Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to study the relationship between the growth and development of native plants and the accumulated temperature of the environment under the compound heavy metals stress, a pot experiment was conducted to analyze the response of the leaf expansion process of six plants to the active accumulated temperature (A_{AT}) and daily temperature difference accumulated temperature (D_{AT}) under the stress of seven mixed heavy metals by setting three concentration gradients. A Logistic growth curve with accumulated temperature as the independent variable was established. The results showed that the leaf area constants of six plants under different concentrations of heavy metals stress were significantly different from those of the control group. There were significant differences between the leaf area growth of the six plants in the control group and the leaf area growth of the plants under different concentrations of heavy metal stress. The relative leaf area of the six plants in the control group, A_{AT} and D_{AT} were in accordance with the Logistic growth curve, but the overall fitting degree (R^2) of these model in the heavy metals stress groups was poor and the prediction accuracy was low. In particular, the R^2 of the relative leaf area- A_{AT} fitting model of the low concentration treatment was only 0.265 4 for *Ficus tikoua*, indicating that the heavy metal stress significantly interfered with the normal growth process of the plant. The leaf area-accumulated temperature Logistic growth model can better reflect the growth difference of leaf area under environmental stress during the leaf expansion period of plants. The research results can provide scientific reference for the screening and cultivation of ecological restoration seedlings in mining areas.

收稿日期: 2025-02-09

基金项目: 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般457); 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2023]009)。

第一作者简介: 周华, 博士, 副研究员。研究方向为森林经理与生态修复, E-mail: 13879793123@163.com

引文格式: 周华, 姜霞, 杨永艳, 等. 重金属胁迫下6种植物展叶过程对环境积温的响应[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1251-1267.

ZHOU H, JIANG X, YANG Y Y, et al. Response of leaf expansion process of six plants to environmental accumulated temperature under heavy metal stress[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1251-1267.

Keywords: Heavy metal; relative leaf area; active accumulated temperature; daily temperature difference; growth curve

0 引言

重金属污染对生态系统和人类健康构成严重威胁,一直是备受关注的环境问题^[1]。重金属通过土壤、水体和大气等途径进入植物体内,影响其生长发育过程,尤其是展叶这一关键阶段。展叶过程是植物光合作用和能量积累的基础,其速率和效率直接决定了植物的生长潜力和生态适应性,是估算大尺度叶面积指数动态变化的重要参考^[2]。环境因子对植物的叶厚、叶面积、养分含量以及比叶面积等功能性状都具有重要影响^[3],其中环境温度是调控植物展叶的重要因子,特别是有效积温和日温差积温^[4-6]。过高或过低的温度都会对植物种子萌发^[7]、叶片光合作用^[8]等生长过程产生不同程度的干扰,只有适宜的温度才适合植物生长,但极端温度却是打破植物种子休眠、树液流动、展叶和开花等物候发育节律的关键^[9-12]。对多数植物而言,生长季温度逐渐升高有利于种子和叶片萌发;低温则会延迟叶片萌发的时间,甚至冻死幼苗、幼树而影响种群的更新,昼夜温差是影响叶片生理性状和光合作用的重要因素^[13-15]。然而,一些植物的生长过程对温度没有明显的要求^[16]。因此,不同植物生长对温度的敏感性并不完全一致,尤其是在重金属等环境胁迫下,不同植物展叶过程如何响应环境温度的变化,值得深入研究。

轻微重金属胁迫可能对植物展叶过程产生轻微影响,导致展叶速率减缓或叶片形态异常等生理响应^[17],进而影响到叶片的性状和光合效率^[18]。但严重的重金属胁迫则可能显著抑制植物的展叶过程及生长,引起叶片表型特征不同程度变异^[19],进而影响叶片光合效率和生物量积累^[20-21],甚至对植物生长造成不可逆的损害。近年来,重金属胁迫对植物生长发育的影响研究取得了许多重要的进展^[22-24]。高质量浓度重金属胁迫会严重影响作物的生长发育和产量^[25],温度能够明显影响重金属对植物的毒性作用^[26],其中细胞分裂素和菌根参与了植物叶片蒸腾、光合、抗性和解毒等一系列生理生长过程^[27-28]。因此,本研究以不同质量浓度重金属胁迫下的6种乡土植物为研究对象,通过测定叶面积的动态变化,建立植物展叶过程对环境有效积温和日温差积温的响应曲线,揭示不同质量浓度重金属胁迫下植物展叶过程对温度变化的适应性并对模型进行评价,不仅可以深化对重金属胁迫下植物生长发育机制的理解,还可为污染环境下的植被

生态修复和农林生产管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本研究选择西南山地常见的、矿山生态修复中常用的乡土植物构树(*Broussonetia papyrifera*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、木荷(*Schima superba*)、地果(*Ficus tikoua*)、乌桕(*Triadica sebifera*)和楠木(*Phoebe zhennan*)2~3年生幼树为试验材料。其中,构树、乌桕具有较强的耐酸性,甚至在污染较严重的环境下(比如酸雾、重金属超标等)也能生存,同时也是很多退化生境恢复中最容易出现的先锋物种;地果是藤本植物,自我繁殖力强,具有良好的保水保土作用;木荷、麻栎为优势群落中的建群种,耗水量大,对生长环境的要求较高;楠木为西南地区珍贵用材树种。这些植物于2023年盆栽后放置于贵州省云关山国有林场试验地内(地理坐标为106°44′1.53″—106°45′27.74″E,26°28′22.42″—26°32′56.18″N),2024年早春选择长势良好、株高50 cm以上、生长性状相对一致的植物进行胁迫处理试验,每盆1株,每种植物不少于12株。

依据木本植物修复有关文献以及黔中地区土壤重金属背景值含量^[29],试验采用锰(Mn)、锌(Zn)、镉(Cd)、镍(Ni)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)7种复合元素的混合标定液,设置复合重金属质量浓度梯度处理组为:1)无重金属胁迫对照组(control group);2)100 μg/mL低质量浓度组(low-concentration group);3)500 μg/mL中质量浓度组(medium-concentration group);4)1 000 μg/mL高质量浓度组(high-concentration group)。试验选取的重金属元素以硝酸、盐酸和一级超纯水为原料,在室温下(20 °C±4 °C)配制后均匀喷施添加至植物根部土壤周围并松土拌匀,植物开始生长之前的添加量每盆约60 mL,展叶期每周添加一次,总量约60 mL。土壤基质为当地无污染森林土壤,试验期间进行不定期浇水以保持必要的土壤湿度,中途施复合肥1次,大量杂草萌发后未做处理。所有盆栽植物未采用大棚覆盖等遮阴措施,均在自然环境下生长。

1.2 环境温度

温度数据来源于本地气象观测站统计数据,主要使用观测当年的日最低温度、日最高温度和日平均温度。根据文献资料,本研究中的有效积温为连续5日大于10 °C的日平均气温之和,计算公式为

$$A_{AT} = \sum_{i=1}^n T_i, T_i \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}。 \quad (1)$$

式中: A_{AT} 为一年内某时间段的有效积温(active accumulated temperature, AAT), $^\circ\text{C}$;本研究统计时间从当年1月1日起开始计算,直至观测结束之日止; T_i 为每年第*i*天的日平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

日温差为每日最高温度与最低温度之差,日温差积温计算公式为

$$D_{AT} = \sum_{i=1}^n (T_{\max} - T_{\min})。 \quad (2)$$

式中: D_{AT} 为一年内某时间段的日温差积温(daily temperature difference accumulated temperature, DAT), $^\circ\text{C}$,统计时间与有效积温相同; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为每年第*i*天的最高温度和最低温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.3 叶长和叶宽观测

每种植物选择3~5株,每株选择2~3个枝条挂牌标记后,待叶片萌发裸露3~5 mm时开始观测,每种植物选择4~6片叶子,每2~3 d用电子游标卡尺在固定位置定期测定叶长和叶宽(0.1 mm),直至叶片生长完全停止为止。由于观测工作量较大,叶片数量较多,为避免混乱,在整个观测期均由专人负责测量和记录,测量时不能用手和游标卡尺大面积接触叶片以防损坏,观测时如遇大风或下雨则延迟一天观测;被观测叶片中途遭受虫害或凋零等导致无法继续观测时,则停止记录。

1.4 叶面积估算

植物叶片在生长过程中,其长、宽变化与叶面积之间存在一定的函数关系,根据有关文献资料^[4],叶片的叶面积采用的估算方法为

$$A = kLW。 \quad (3)$$

式中: A 为植物单片叶片单面的面积, mm^2 ; k 为叶面积常数; L 、 W 分别为单片叶片的叶长和叶宽, mm 。叶长指与叶片主脉平行的方向,即从叶柄靠近叶片基部到叶尖的长度;叶宽则是与叶长垂直方向最宽处的长度值。单片叶片在观测时间*t*与*t*-1时的叶面积之差即为该时间段叶片的叶面积生长量, mm^2 。

本研究采用图像法估算叶面积常数,即在叶片成熟后,选取观测过或未观测过的正常叶片若干,摘下后用游标卡尺测定每片叶片的长度和宽度,然后用扫描仪将叶片扫描成电子图像,再用ImageJ1.51软件测定每片叶片的面积,最后将测定的叶片面积除以叶片长与宽的乘积即可得到单片叶片的叶面积常数,每种植物不同处理叶片测定数量至少均匀铺满3张A4纸。

关于单片叶片的叶面积估算,采用以下2种模型来进行模拟^[30],2种模型分别为

$$\ln A = a_1 + b_1 \ln L。 \quad (4)$$

$$\ln A = a_2 + b_2 \ln W。 \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别为单片叶片的叶面积与长度和宽度的模型拟合函数, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为常数。

为了避免观测时间和叶片大小差异的影响以及选择生长模型参数的限制,研究采用被观测叶片的相对叶面积来代表叶片的展叶生长过程^[30]。相对叶面积的计算公式为

$$y_i = I_i / I_{\max}。 \quad (6)$$

式中: y_i 为观测时所观测叶片的相对叶面积,即观测时的叶面积占展叶完成时叶片总面积的百分比,介于0~1,无量纲; t 为一年中所对应的天数, d ; I_i 为叶片在观测时的叶面积, mm^2 ; I_{\max} 为叶片展叶完成(或观测结束)后的总叶面积, mm^2 ,即最大叶面积。

1.5 生长模型与统计分析

植物生长曲线是描述植物在生命周期中生物量、高度和叶面积等指标随时间变化的数学模型。通过分析植物生长曲线,可以深入了解植物的生长规律、环境适应性以及资源利用效率,从而为生产管理和生态研究提供科学依据。由于叶片的生长具有时间限制,且生长结束后叶面积将保持不变,因此可以采用逻辑斯谛(Logistic)生长模型来模拟其相对叶面积与环境积温之间的关系^[31],模型表达式为

$$y = \frac{a}{1 + e^{-k(x-c)}}。 \quad (7)$$

式中: y 为相对叶面积(无量纲); x 代表环境积温, $^\circ\text{C}$; a 为常数; c 代表达到最大生长量一半时(即展叶中期)的累积温度, $^\circ\text{C}$; k 代表生长速率;叶片生长曲线的拐点坐标为(c , $a/2$)。

模型拟合度采用简化卡方(reduced chi-sqr, 式中记为 R_{CS})进行评价验证,其公式为

$$R_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}。 \quad (8)$$

式中: R_{CS} 代表简化卡方, R_{CS} 越小,代表模型预测效果越好; y_i 为观测值; \hat{y}_i 代表模型预测值; n 为观测样本量。

所有观测数据在Excel中进行对数变换等预处理后,再在SPSS 26.0软件中采用单因素方差分析对不同质量浓度重金属处理的生长指标、模型参数等进行差异性检验,采用最小显著差异(LSD)对分析结果进行多重比较。制图在Origin 2022软件中完成。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫下叶面积常数估算

叶面积常数可通过植物叶片的长度和宽度以及叶

面积测量数据估算而得^[32]。不同植物在不同的生长阶段以及不同的环境胁迫下,叶片的生长发育可能因微环境差异而完全不同^[33],因此叶面积常数一定程度上可以反映微环境的变化差异。由表1可知,在不同质量浓度重金属胁迫下,6种植物展叶结束后的叶面积常数*k*并不完全相等。低质量浓度组、中质量浓度组、高质量浓度组和对照组的平均叶面积常数分别为0.654 2、0.694 4、0.682 9和0.782 1。差异性检验

结果表明,对照组与低质量浓度组、中质量浓度组、高质量浓度组之间存在显著差异,但3个质量浓度处理之间没有显著差异。这可能表明重金属胁迫对植物叶面积常数的影响不是显著的线性关系。就不同植物而言,在3种质量浓度重金属胁迫下,构树、乌桕、木荷、地果的平均叶面积常数变化较大,而麻栎、楠木的平均叶面积常数变化较小。

表1 不同质量浓度重金属胁迫下6种植物的平均叶面积常数

Tab. 1 Average leaf area constants of six plants under different concentrations of heavy metal stress

处理 Group	物种 Species	样本量/片 Sample size	叶面积常数(<i>k</i>) Leaf area coefficient	处理 Group	物种 Species	样本量 Sample size	叶面积常数(<i>k</i>) Leaf area coefficient
低质量浓度组 Low-concentration group	楠木	18	0.673 3	高质量浓度组 High-concentration group	楠木	21	0.672 1
	乌桕	18	0.596 6		乌桕	18	0.586 4
	地果	18	0.621 3		地果	18	0.741 6
	麻栎	15	0.760 6		麻栎	18	0.813 0
	构树	9	0.593 2		构树	9	0.676 5
	木荷	18	0.680 2		木荷	18	0.607 6
中质量浓度组 Medium-concentration group	楠木	18	0.652 8	对照组 Control group	楠木	18	0.732 5
	乌桕	18	0.738 5		乌桕	15	0.833 9
	地果	12	0.594 3		地果	18	0.825 2
	麻栎	15	0.787 0		麻栎	15	0.823 0
	构树	12	0.689 0		构树	6	0.701 9
	木荷	12	0.704 9		木荷	18	0.776 3

2.2 重金属胁迫下的叶面积变化差异

建立准确的叶片异速生长预测模型对于深入了解和掌握叶面积的发育动态至关重要。不同质量浓度重金属胁迫下6种植物叶长和叶宽与叶面积生长量之间的关系模型见表2。由表2可知,这些异速生长模型都具有较高的拟合精度,可以较好地反映叶面积的生长变化过程。单因素方差分析和LSD多重比较表明,不同处理组之间存在极其显著差异($P \leq 0.001$),对照组的植物叶面积生长量与低、中、高3种质量浓度重金属胁迫下的植物叶面积生长量存在极其显著差异($P \leq 0.001$)。经自然对数变换后作图,图1表明了不同质量浓度重金属胁迫下植物叶面积生长随时间的变化。由图1可知,构树、麻栎具有较高的叶面积,乌桕、楠木具有较长的展叶时间,而构树、麻栎、木荷早期展叶相对比较迅速。

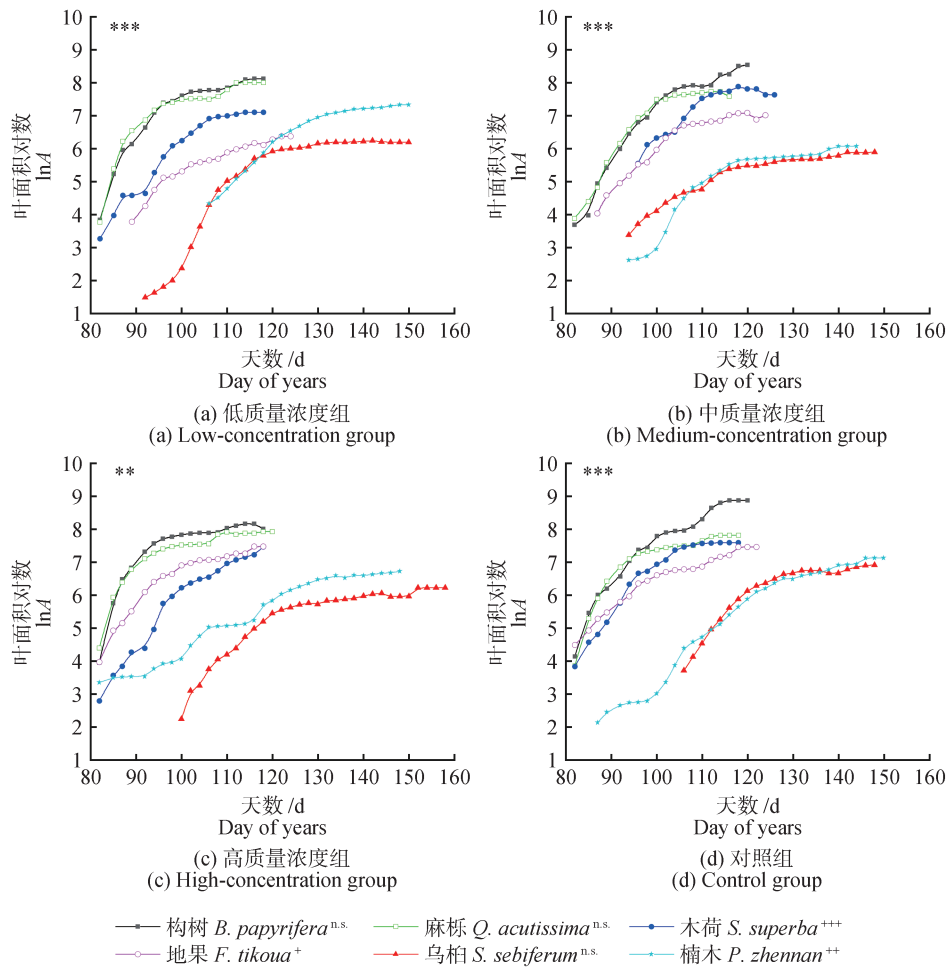
在低质量浓度处理组中,楠木、地果、麻栎、构树、木荷的叶面积生长量均存在极其显著差异($P \leq 0.001$);构树、麻栎、木荷、地果、乌桕和楠木的叶面积平均生长量分别为92.113 1、80.997 9、53.232 4、19.889 0、20.941 3、49.923 5 mm²/d,平均生长天数分别为27、26、27、27、27、26 d(图1(a))。在中质量浓度处理组中,地果、麻栎、构树、木荷的叶面积生长量均存在极其显著差异($P \leq 0.001$);构树、麻栎、木荷、地果、乌桕和楠木的叶面积平均生长量分别为87.748 1、71.384 8、73.747 2、64.150 4、8.320 3、16.448 0 mm²/d,平均生长天数分别为27、26、26、29、42、35 d(图1(b))。在高质量浓度处理组中,地果、麻栎、构树的叶面积生长量存在极显著差异($P \leq 0.01$);构树、麻栎、木荷、地果、乌桕和楠木的叶面积平均生长量分别为104.384 5、75.728 2、37.418 6、48.489 8、10.425 8、27.036 7 mm²/d,平均生长天数分别为28、27、26、27、39、34 d(图1(c))。

表 2 不同质量浓度重金属胁迫下 6 种植物的叶面积模型
Tab. 2 Leaf area models of six plants under different concentrations of heavy metal stress

处理 Groups	物种 Species	样本数/片 Sample size	叶宽-叶面积 Leaf width-leaf area		叶长-叶面积 Leaf length-leaf area	
			模型 Model	R^2	模型 Model	R^2
低质量浓度组 Low-concentration group	楠木	22	$\ln A = 1.9304 \ln W + 1.0235$	0.9750	$\ln A = 1.9678 \ln L - 1.4917$	0.9739
	乌桕	30	$\ln A = 1.5334 \ln W + 0.7383$	0.9978	$\ln A = 2.8415 \ln L - 2.7783$	0.9925
	地果	19	$\ln A = 1.5421 \ln W + 1.3427$	0.9972	$\ln A = 2.8034 \ln L - 3.6938$	0.9906
	麻栎	16	$\ln A = 1.8093 \ln W + 1.3282$	0.9987	$\ln A = 2.2276 \ln L - 2.22$	0.9980
	构树	17	$\ln A = 1.8726 \ln W + 0.3741$	0.9974	$\ln A = 2.1324 \ln L - 1.4946$	0.9966
	木荷	18	$\ln A = 1.9178 \ln W + 0.9301$	0.9893	$\ln A = 2.0402 \ln L - 1.6288$	0.9878
中质量浓度组 Medium-concentration group	楠木	36	$\ln A = 2.3460 \ln W - 0.1108$	0.9545	$\ln A = 1.6489 \ln L - 0.3657$	0.9781
	乌桕	28	$\ln A = 1.6221 \ln W + 0.7788$	0.9986	$\ln A = 2.5918 \ln L - 1.9992$	0.9963
	地果	19	$\ln A = 1.7394 \ln W + 0.7886$	0.9993	$\ln A = 2.3469 \ln L - 2.2707$	0.9986
	麻栎	17	$\ln A = 1.8808 \ln W + 1.0115$	0.9989	$\ln A = 2.1295 \ln L - 1.6370$	0.9986
	构树	19	$\ln A = 1.8141 \ln W + 0.7787$	0.9979	$\ln A = 2.2159 \ln L - 1.7378$	0.9969
	木荷	16	$\ln A = 1.7039 \ln W + 1.7385$	0.9685	$\ln A = 2.1932 \ln L - 2.2911$	0.9466
高质量浓度组 High-concentration group	楠木	33	$\ln A = 2.2664 \ln W + 0.0616$	0.9350	$\ln A = 1.6459 \ln L - 0.2773$	0.9669
	乌桕	24	$\ln A = 1.7794 \ln W + 0.1025$	0.9984	$\ln A = 2.4024 \ln L - 1.6822$	0.9590
	地果	18	$\ln A = 1.7313 \ln W + 1.0495$	0.9982	$\ln A = 2.3534 \ln L - 2.0917$	0.9966
	麻栎	19	$\ln A = 3.7629 \ln W - 5.4549$	0.9553	$\ln A = 2.2386 \ln L - 2.1259$	0.9977
	构树	18	$\ln A = 1.8070 \ln W + 0.8278$	0.9936	$\ln A = 2.2004 \ln L - 1.7398$	0.9905
	木荷	16	$\ln A = 2.8522 \ln W - 2.1201$	0.8486	$\ln A = 2.1724 \ln L - 2.2734$	0.9982
对照组 Control group	楠木	28	$\ln A = 2.3001 \ln W + 0.1011$	0.9717	$\ln A = 1.7048 \ln L - 0.4081$	0.9846
	乌桕	20	$\ln A = 1.7739 \ln W + 0.4565$	0.9989	$\ln A = 2.2848 \ln L - 0.9830$	0.9982
	地果	20	$\ln A = 1.8710 \ln W + 0.7239$	0.9978	$\ln A = 2.1363 \ln L - 1.2015$	0.9971
	麻栎	17	$\ln A = 1.8992 \ln W + 1.0681$	0.9989	$\ln A = 2.1067 \ln L - 1.5774$	0.9987
	构树	20	$\ln A = 1.824 \ln W + 0.7425$	0.9901	$\ln A = 2.2099 \ln L - 1.6695$	0.9900
	木荷	15	$\ln A = 1.8088 \ln W + 1.4748$	0.9979	$\ln A = 2.2237 \ln L - 2.3379$	0.9969

在对照组中,乌桕、地果、麻栎、构树、木荷的叶面积生长量存在极其显著差异($P \leq 0.001$);构树、麻栎、木荷、地果、乌桕和楠木的叶面积平均生长量分别为 107.803 4、68.140 5、61.245 0、35.061 6、32.599 7、19.629 6 mm^2/d ,平均生长天数分别为 29、27、25、28、33、39 d(图 1(d))。在不同质量浓度处理之间,就相同植物而言,楠木叶面积生长量在低质量浓度、中质量浓

度、高质量浓度重金属胁迫下均存在极显著差异($P \leq 0.01$);乌桕、麻栎、构树在不同质量浓度重金属胁迫下的叶面积生长量没有达到显著差异,但与对照组叶面积生长量存在极其显著差异($P \leq 0.001$);地果在低质量浓度和高质量浓度重金属胁迫下的叶面积生长量存在显著差异($P \leq 0.05$);木荷的叶面积生长量在低质量浓度、中质量浓度重金属胁迫下存在极其显著差异($P \leq 0.001$)。



“**” “***”代表组内在0.01和0.001下的显著水平。

“**” “***” represent the significance levels of 0.01 and 0.001, respectively, within group.

图1 不同质量浓度重金属胁迫下植物叶面积生长与时间的变化图

Fig. 1 Leaf area growth with time changing graph under different concentrations of heavy metals stress

2.3 重金属胁迫下相对叶面积与环境积温的关系

生长曲线可以揭示植物在不同环境条件下的生理响应,从而有助于选育抗逆性强的品种和更好地预测其生长过程,从而提高在不同生态系统应用中的恢复潜力。6种植物相对叶面积在低、中、高3种质量浓度以及无重金属胁迫下,对有效积温和日温差积温的响应曲线及预测模型分别如图2—图7所示。

由图2和图3可知,不同质量浓度处理下,构树、麻栎展叶初期需要的有效积温相对较低,在350℃左右,而日温差积温在580℃左右。到展叶中期时,需要达到的有效积温和日温差积温高质量浓度组最低、中质量浓度组最高,但差异不是很大,有效积温在491.84~

631.61℃,日温差积温在687.15~751.57℃。这2种树木的平均展叶速率为0.0138~0.0188,构树对照组最慢、麻栎对照组最快。

由图4和图5表明,在低、高质量浓度处理下,木荷、地果开始展叶的有效积温在450℃左右,日温差积温在650℃左右,但在中等质量浓度重金属胁迫下,木荷展叶的有效积温增加至770℃。到展叶中期,木荷、地果需要达到的有效积温和日温差积温对照组最低、中质量浓度组最高。在不同处理下,木荷达到展叶中期需要的有效积温在599.59~771.73℃、日温差积温在736.27~823.59℃;地果则受重金属胁迫的影响较大,对照组达到展叶中期需要的有效积温和日温差积温明显低于其他胁迫处理组,分别为527.49℃和697.06℃。

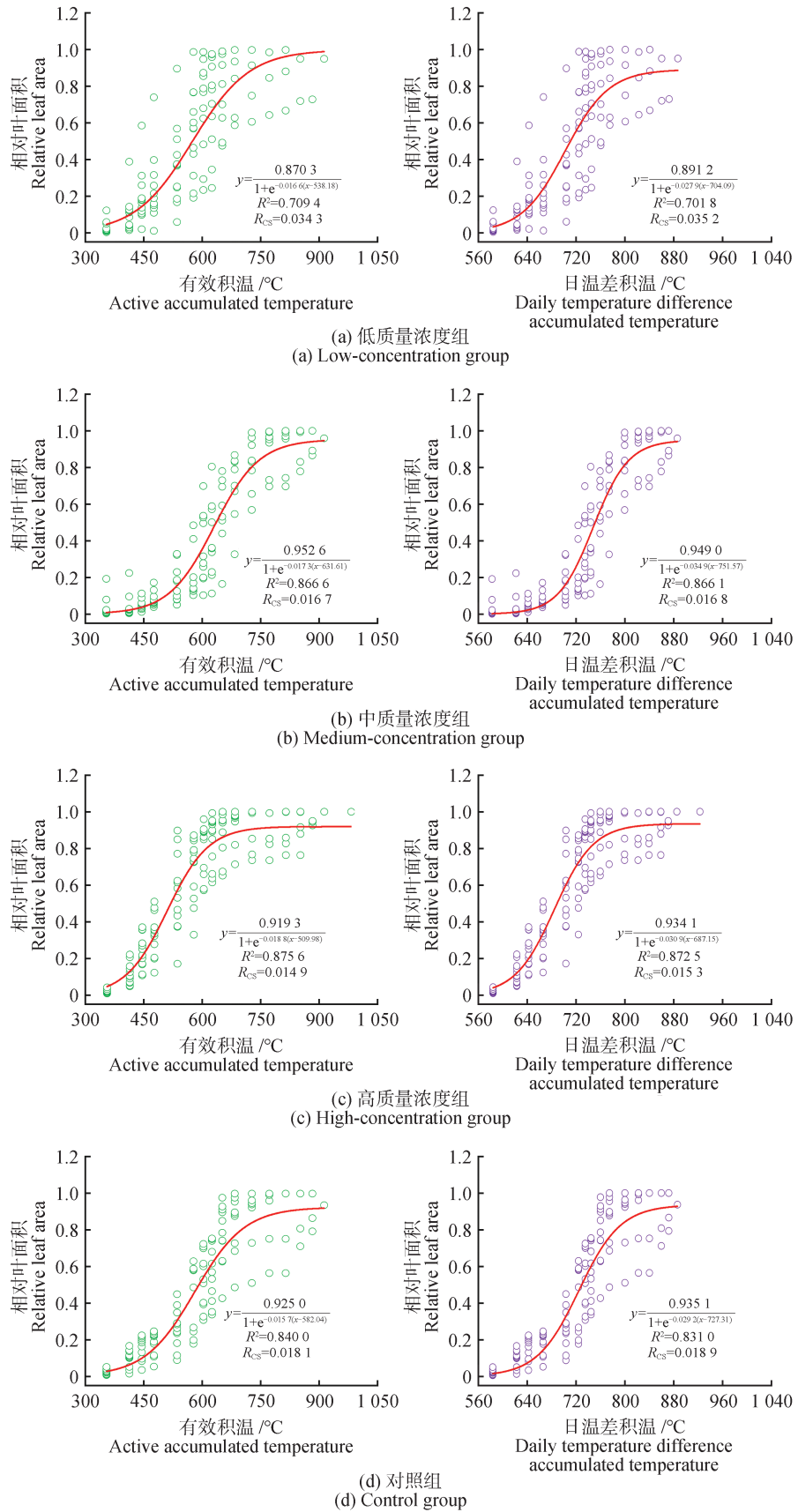


图 2 重金属胁迫下构树相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of relative leaf area of *B. papyrifera* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress

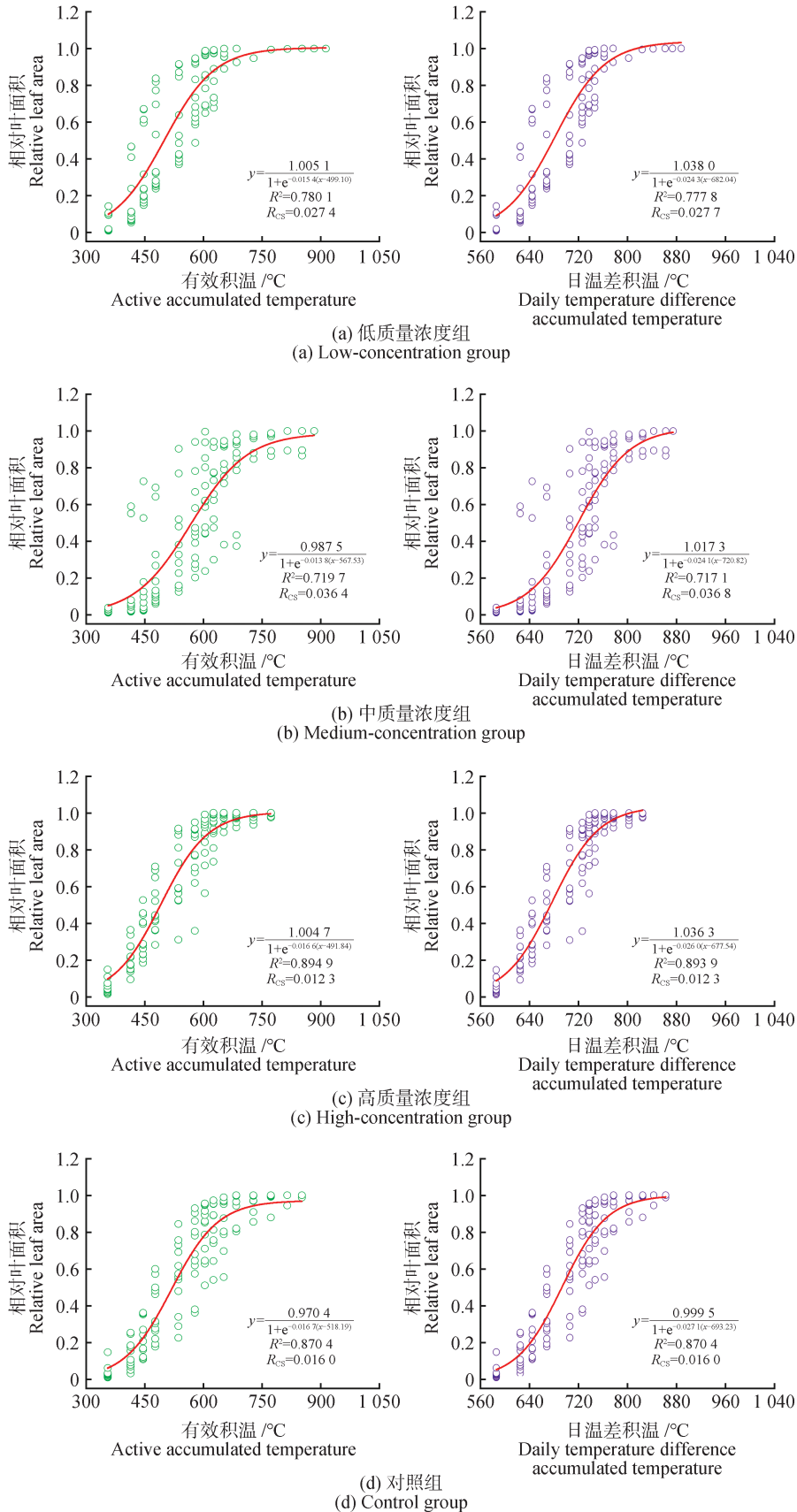


图3 重金属胁迫下麻栎相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of relative leaf area of *Q. acutissima* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress

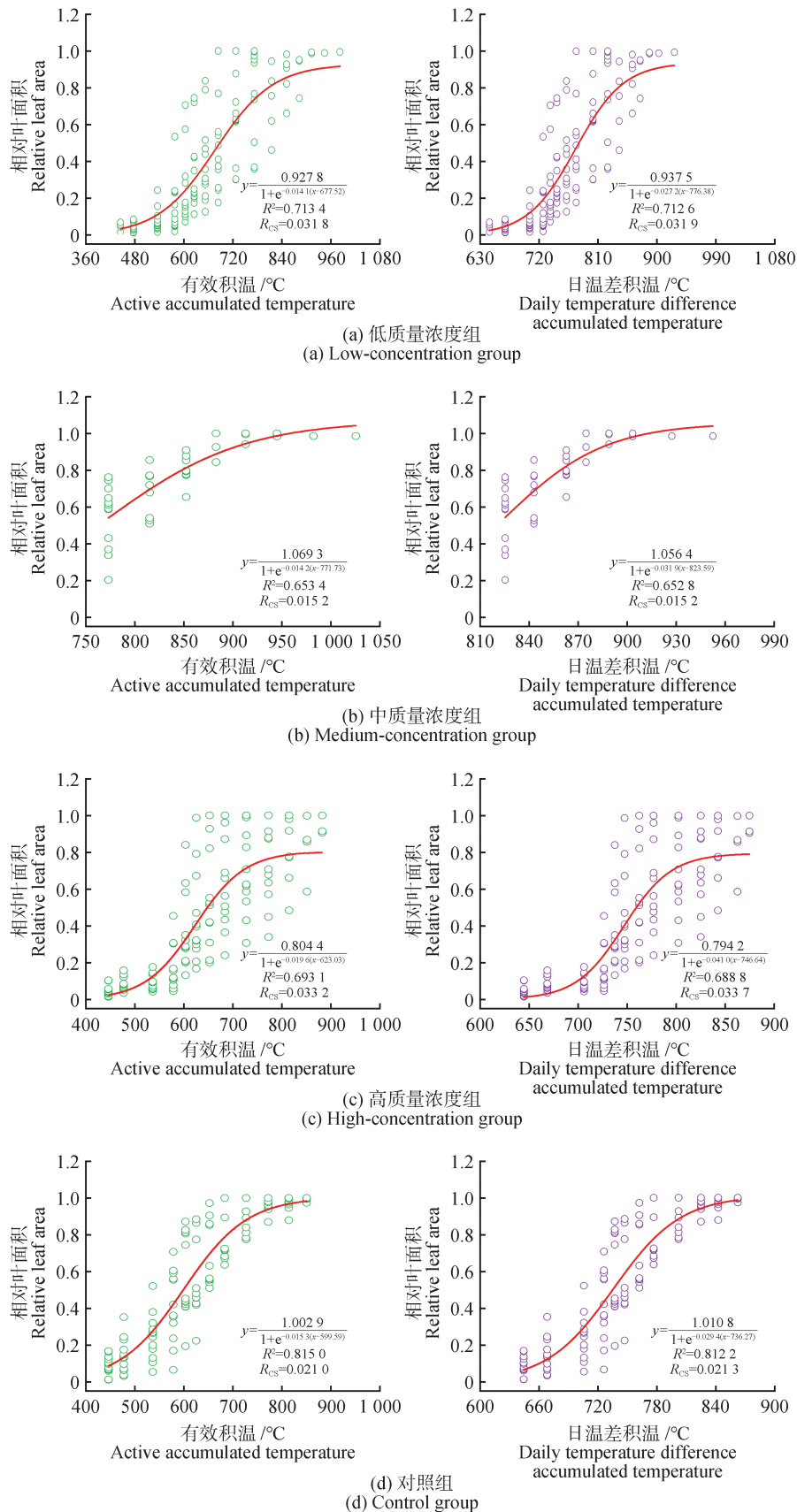
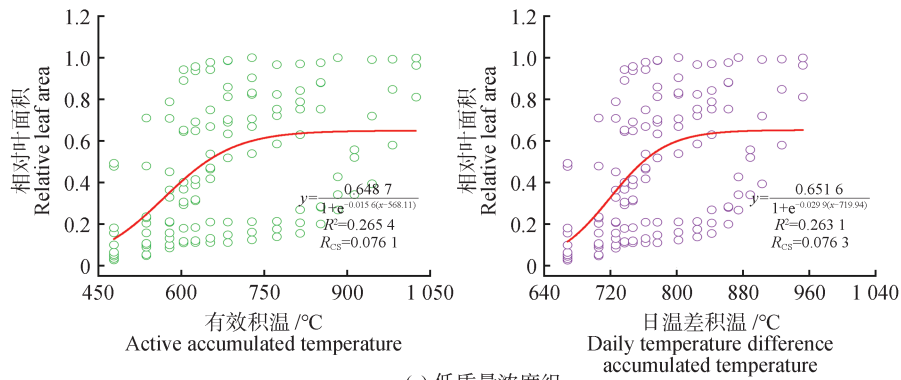
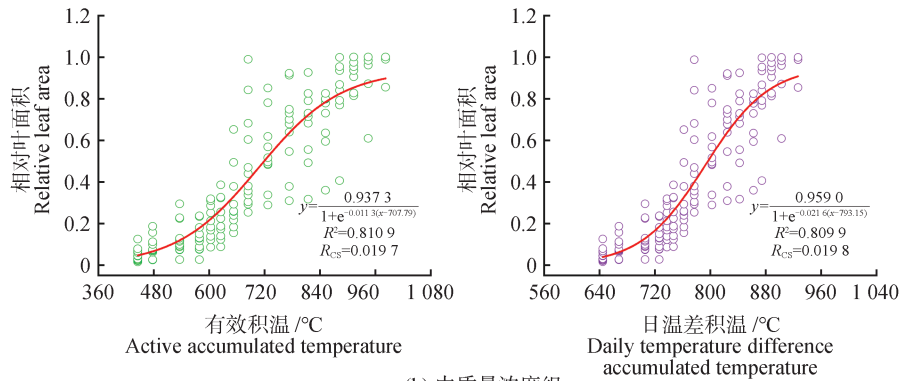


图 4 重金属胁迫下木荷相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

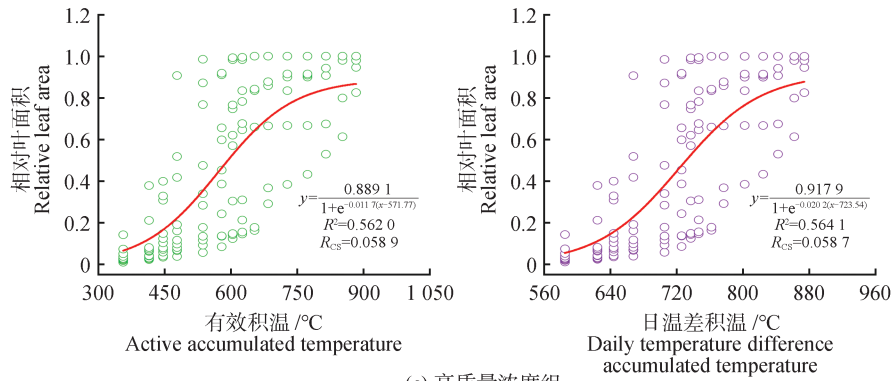
Fig. 4 Fitting curves of relative leaf area of *S. superba* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress



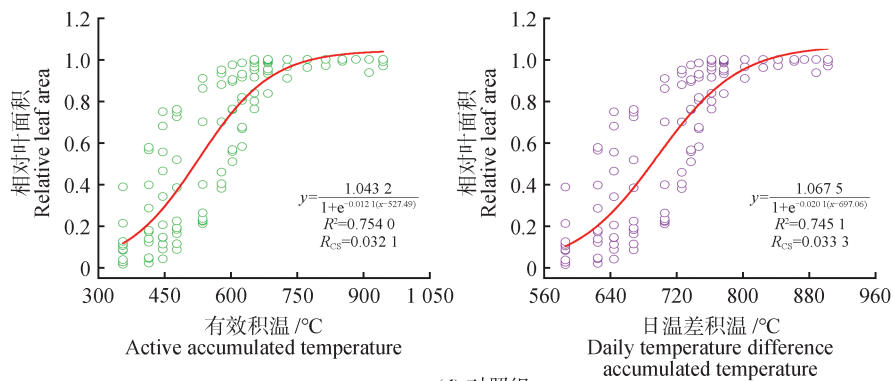
(a) 低质量浓度组
(a) Low-concentration group



(b) 中质量浓度组
(b) Medium-concentration group



(c) 高质量浓度组
(c) High-concentration group



(d) 对照组
(d) Control group

图5 重金属胁迫下地果相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of relative leaf area of *F. tikoua* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress

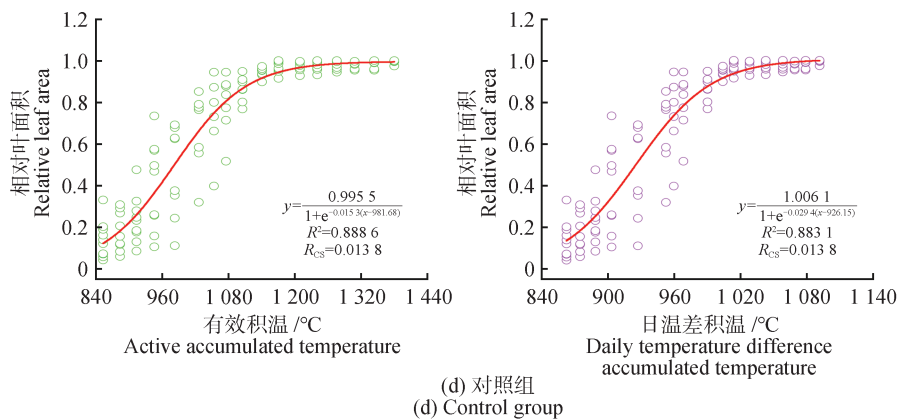
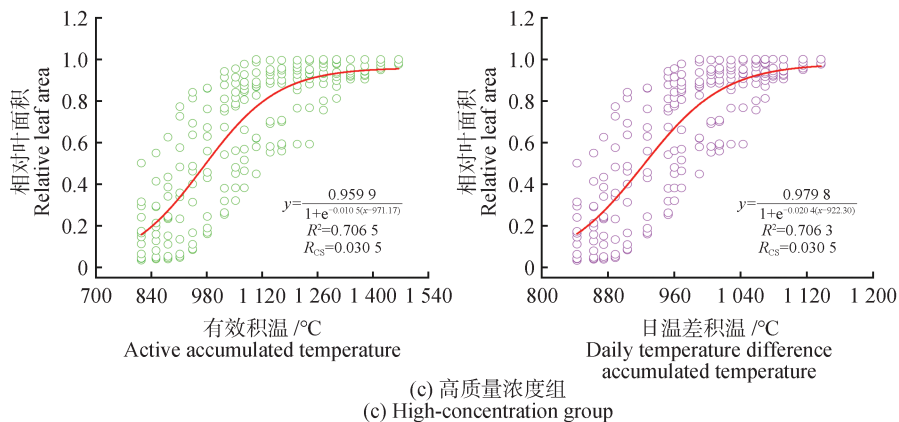
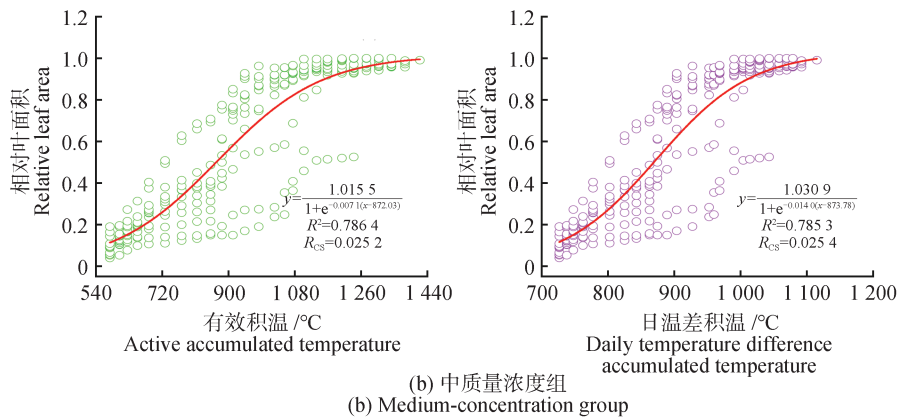
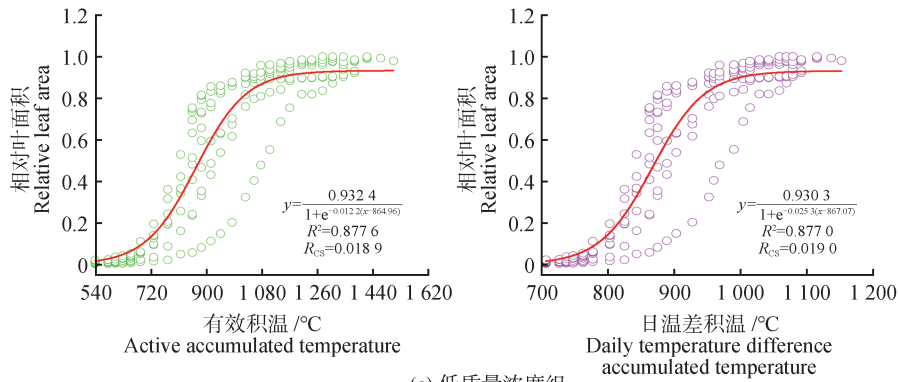


图 6 重金属胁迫下乌桕相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of relative leaf area of *S. sebiferum* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress

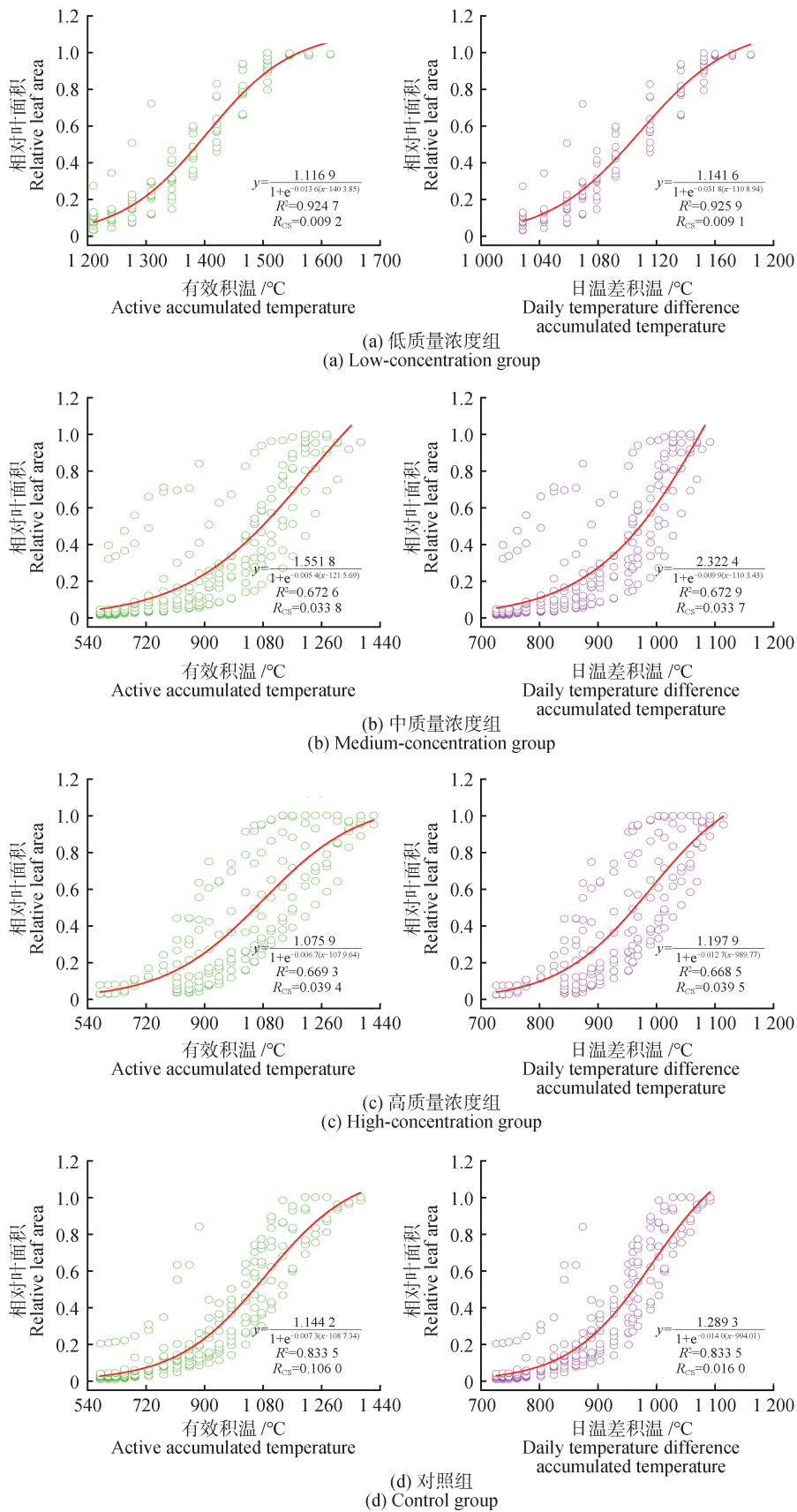


图7 重金属胁迫下楠木相对叶面积与有效积温、日温差积温拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of relative leaf area of *P. zhennan* with A_{AT} and D_{AT} under heavy metal stress

由图6和图7可看出,乌桕、楠木开始展叶的有效积温和日温差积温波动较大。在低、中质量浓度处理下,乌桕开始展叶需要的有效积温在510~540℃左右,日温差积温在700℃左右,而在高质量浓度处理下,开始展叶的有效积温和日温差积温基本持平,均在840℃左右。楠木则表现相反,中、高质量浓度处理下开始展叶的有效积温和日温差积温显著低于低质量浓度处理组,低质量浓度组展叶需要的有效积温和日温差积温均超过了1000℃,其他质量浓度处理则在600~700℃。到展叶中期时,乌桕、楠木需要的有效积温差异较大,分别为864.96~981.68℃和1087.34~1403.85℃;而需要的日温差积温则表现出与有效积温相似的规律性,分别为867.07~926.15℃和989.77~1108.94℃。不同处理而言,乌桕到展叶中期时需要的有效积温和日温差积温是低中质量浓度组低、高质量浓度组高,而楠木则恰好相反。

从不同质量浓度处理来看,植物在低质量浓度重金属胁迫下,构树、麻栎、地果和楠木叶片达到生长拐点(即展叶中期)时需要的有效积温和日温差积温有较大差异,分别为499.10~1403.85℃和682.04~1108.94℃,而乌桕叶片需要的有效积温和日温差积温差异不大,均在865℃左右。随着时间的推移,2种预测模型的预测效果相差不大。与日温差积温预测模型相比,有效积温预测模型的 R^2 要稍微高一些,为0.2654~0.9247; R_{CS} 要稍微低一些,为0.0092~0.0761。叶片生长速率为0.0122~0.0166。受重金属胁迫的影响,模型对地果展叶的拟合效果较差,对乌桕和楠木的拟合效果较好。在中质量浓度重金属胁迫下,构树、麻栎到展叶中期时需要的有效积温分别为631.61℃和567.53℃,而需要的日温差积温在680℃左右;木荷、地果、乌桕需要有效积温分别为771.73、707.79、872.03℃,需要的日温差积温分别为823.59、793.15、873.78℃;楠木需要的有效积温和日温差积温最高,分别达到了1215.69℃和1103.43℃。由于受重金属胁迫的影响,6种植物的拟合模型精度与低质量浓度组处理类似,有效积温模型的平均生长速率为0.0054~0.0173,平均 R^2 为0.7516,平均 R_{CS} 为0.0245;日温差积温模型的平均生长速率为0.0227,平均 R^2 为0.7507;平均 R_{CS} 为0.0246。在高质量浓度重金属胁迫下,构树、麻栎达到展叶中期时需要的有效积温相对较低,分别为509.98℃和491.84℃,需要的日温差积温则基本相同;木荷、地果达到展叶中期要求的环境积温则相对较高,需要的有效积温分别为623.03℃和571.77℃、日温差积温分别为746.64℃和723.54℃。有效积温模型的平均生长速率为0.0140,平均 R^2 为

0.7336,平均 R_{CS} 为0.0315;日温差积温模型的平均生长速率为0.0252,平均 R^2 为0.7323,平均 R_{CS} 为0.0317,2种模型的拟合效果基本相同。由于对照组植物未受重金属胁迫影响,除乌桕和楠木外,其余植物叶面积达到展叶中期时对有效积温的要求都在500~600℃,对日温差积温的需求在700℃左右。而乌桕和楠木达到生长拐点时的有效积温分别为981.68℃和1087.34℃,日温差积温分别为926.15℃和994.01℃。与3种不同质量浓度重金属胁迫处理相比,对照组所有植物叶面积-积温模型具有较高的 R^2 和 R_{CS} ,表明在整个展叶期的生长过程相对比较稳定。

3 结论与讨论

3.1 结论

研究的6种植物叶面积常数(k)受重金属胁迫与不受重金属胁迫时存在显著差异;低、中、高3种质量浓度处理组之间的叶面积常数差异不显著,表明重金属胁迫对植物叶面积的抑制作用可能是非线性。构树、乌桕、木荷和地果的叶面积常数受重金属胁迫影响较大,而麻栎和楠木则表现出较强的耐受性。

不同质量浓度重金属胁迫下6种植物叶长、叶宽与叶面积具有明显的异速生长关系,重金属胁迫对植物相对叶面积变化影响显著,多数异速生长模型具有较高的拟合精度,能够有效预测叶面积的动态变化。对照组与低质量浓度、中质量浓度、高质量浓度重金属胁迫植物叶片的叶面积生长量存在极其显著差异,重金属胁迫显著抑制了叶面积生长。不同植物叶面积生长量对重金属胁迫的响应存在显著差异,其中楠木对重金属胁迫的敏感性较高,而乌桕、麻栎和构树的叶面积生长量在不同质量浓度胁迫下未达到显著差异。

日温差积温作为有效积温的重要补充,同样可以较好地预测植物展叶期的动态变化,2种模型的拟合效果基本一致,但各自代表了不同的生态学意义。在低质量浓度、中质量浓度、高质量浓度重金属胁迫下,植物叶面积生长对有效积温和日温差积温的需求存在显著差异,其中乌桕、楠木对有效积温的需求较高,而构树、麻栎对有效积温和日温差积温的需求相对较低。受重金属胁迫的影响,地果的模型拟合效果较差,而乌桕和楠木的拟合效果最好。对照组植物叶面积生长过程较为稳定,多数模型的拟合精度显著高于胁迫组,这可能表明重金属胁迫对植物展叶期的正常生长具有明显干扰或抑制作用。

3.2 讨论

叶面积常数作为反映植物叶片生长状态的重要参数,能够在一定程度上指示环境胁迫对植物生长的影

响。已有研究表明,重金属胁迫对叶片形态结构以及光合作用都有一定的影响^[20,34-35],并会引发植物产生相应的生理生化响应^[36-37]。本研究发现,重金属胁迫显著降低了植物的叶面积常数,这与已有的研究结果基本一致^[38],即环境胁迫会显著影响植物的叶面积生长和形态结构的变化。从检验结果来看,低质量浓度、中质量浓度、高质量浓度处理组的叶面积常数差异不显著,说明重金属对叶面积常数的影响并非简单的剂量依赖关系,这可能是因为在低质量浓度胁迫下已经启动了防御机制,而在高质量浓度胁迫下,这种机制的效率并未显著提高。此外,构树、乌桕、木荷和地果对重金属胁迫更为敏感,而麻栎和楠木表现出较强的耐受性,这可能与不同植物对不同重金属的解毒能力或更高效的抗氧化特性差异有关^[24,26]。

异速生长模型为预测重金属胁迫下植物叶面积的动态变化提供了可靠的工具和手段。已有研究表明^[30],使用单个变量(叶长或叶宽)来估测叶面积动态的效果要显著优于同时使用叶长与叶宽等多个变量时的效果,这与本研究的结果基本相同。叶面积变化规律对植物的生长和生命活动具有深远影响,进而关系到生长速率、生物量分配等关键过程^[39]。在本研究中,低质量浓度、中质量浓度、高质量浓度重金属胁迫下不同植物的叶面积生长表现出不同的响应模式,意味着重金属胁迫确实能影响植物叶面积生长和发育,这与其他类似的研究结果也基本相似^[11,19]。例如,在低质量浓度处理中,多数植物的叶面积生长量存在显著差异,且平均叶面积生长量较大;而在高质量浓度处理中,部分植物的叶面积生长量受到显著抑制,平均生长量降低,这可能说明重金属胁迫对该植物叶面积生长的影响具有质量浓度依赖性,因此在研究重金属胁迫对植物叶面积生长的影响时,还需要考虑植物的种类和对重金属响应的生理特性差异^[35-36]。对于相同植物而言,不同质量浓度重金属胁迫下的叶面积生长量存在显著差异。如楠木在低质量浓度、中质量浓度、高质量浓度重金属胁迫下的叶面积生长均存在显著差异;而乌桕、麻栎、构树在不同质量浓度重金属胁迫下的叶面积生长量未达到显著差异,但与对照组相比具有显著差异。这些现象说明不同植物对不同质量浓度重金属胁迫的敏感性不同,即使同种植物在不同质量浓度胁迫下的生长响应也可能完全不同^[17,27]。地果和木荷的叶面积生长量在不同质量浓度重金属胁迫下表现出特定的响应模式;地果在低质量浓度和高质量浓度胁迫下的叶面积生长量存在显著差异,而木荷在中质量浓度、低质量浓度胁迫下的叶面积生长量存在极其显著差异,这可能与2种植物对重金属胁迫的抗

性以及耐受机制的权衡策略有关^[40-41],胁迫过高则可能激发植物自身其他保护系统使得毒害减轻而使影响的伤害程度减小^[37]。

有效积温理论揭示了植物生长发育过程中对积温需求的差异性及其植物对环境胁迫的响应^[42-43],但有效积温没有考虑极端温度等生物学极限温度对植物生长发育的延缓作用^[4]。因此本研究引入了日温差积温,一定程度上弥补了单纯采用有效积温来进行研究的缺陷,尤其是展叶过程达到生长拐点时的温度差异。有效积温和日温差积温作为重要的生态学参数,能够反映植物生长对热量资源的利用效率。研究发现,楠木和乌桕在展叶中期对积温的需求高于其他植物,这可能与其生长策略、生理特性以及植物光合特性差异密切相关^[18,25,40-44];楠木和乌桕可能更依赖于较高的热量积累以完成其生长过程,而构树和麻栎则表现出较强的适应性,能够在较低积温条件下实现较高的生长速率。重金属胁迫显著降低了模型的拟合精度,尤其是对地果的拟合效果最差,表明地果对重金属胁迫的敏感性较高。相比之下,乌桕和楠木的模型拟合效果较好,说明这2种植物对重金属胁迫具有一定的耐受性,这一现象与前人研究结果一致^[41,45]。在各种胁迫处理中,对照组植物的相对叶面积变化较为稳定,表明在无胁迫条件下,植物能够更高效地利用热量资源完成生长;而在胁迫条件下,植物的生长受到干扰或抑制,导致模型拟合精度下降,这间接证实了重金属胁迫对植物生长的负面影响可能确实存在。总体来看,采用有效积温的预测模型 R^2 稍高, R_{CS} 稍低,但差异不大,这可能是因为有效积温更直接地反映了植物生长的热量条件,而日温差积温则反映了温度变化的幅度对植物生长的影响。值得注意的是,植物在不同质量浓度处理下达到展叶中期时所需的有效积温和日温差积温同样存在显著差异,这说明植物对极端温度条件的适应性和敏感性可能完全不同^[10,12],以及重金属胁迫对植物生长温度需求的影响^[26]。比如,构树、麻栎、地果和楠木在低质量浓度组处理下,叶片达到展叶中期时所需的有效积温和日温差积温差异较大,而乌桕的差异不大,在中质量浓度、高质量浓度处理下,各植物所需的有效积温和日温差积温也呈现出一定的规律性,但受重金属胁迫的影响,这种规律性可能又不那么明显。研究结果为理解植物生长与环境胁迫因子的关系提供了理论参考,丰富了植物生长积温研究内容。未来研究可以进一步探讨不同植物对积温需求的生理机制,并结合其他环境因子(如水分、光照等)以及器官发育、干物质积累与分配差异等进行综合分析,以更全面地揭示环境胁迫下植物生长的调控机制。

参 考 文 献

- [1] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学,2020,41(6):2822-2833.
CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, 41(6):2822-2833.
- [2] 常颖,范文义,温一博. 帽儿山地区森林叶面积指数生长季动态研究[J]. 森林工程,2016,32(4):1-6.
CHANG Y, FAN W Y, WEN Y B. Study on seasonal dynamics of leaf area index in Maoer Mountain[J]. Forest Engineering, 2016, 32(4):1-6.
- [3] ZHANG S H, ZHANG Y, XIONG K N, et al. Changes of leaf functional traits in karst rocky desertification ecological environment and the driving factors[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24:e1381.
- [4] 张京伟,孙纪霞,郭文姣,等. 蝴蝶兰叶片生长曲线与环境积温的关系研究[J]. 中国农学通报,2016,32(1):113-117.
ZHANG J W, SUN J X, GUO W J, et al. Study on the relationship between leaf growth curve and accumulated temperature of *Phalaenopsis* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(1):113-117.
- [5] 杨继鸿,李亚楠,卜海燕,等. 青藏高原东缘常见阔叶木本植物叶片性状对环境因子的响应[J]. 植物生态学报,2019,43(10):863-876.
YANG J H, LI Y N, BU H Y, et al. Response of leaf traits of common broad-leaved woody plants to environmental factors on the eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(10):863-876.
- [6] 王全九,蔺树栋,苏李君. 马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析[J]. 农业机械学报,2020,51(3):306-316.
WANG Q J, LIN S D, SU L J. Quantitative analysis of response of potato main growth index to growing degree days [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):306-316.
- [7] 闫兴富,仇智虎,杜茜,等. 种皮和环境温度对辽东栎种子萌发的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):119-124.
YAN X F, QIU Z H, DU Q, et al. Influences of seed coat and temperature on the germination of *Quercus wutaishanica* seeds[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3):119-124.
- [8] 孙永江,王琪,邵琪雯,等. 高温胁迫对植物光合作用的影响研究进展[J]. 植物学报,2023,58(3):486-498.
SUN Y J, WANG Q, SHAO Q W, et al. Research advances on the effect of high temperature stress on plant photosynthesis [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2023, 58(3):486-498.
- [9] 高荣,岳桦. 哈尔滨春季70种观赏植物的展叶特征及选择对策[J]. 广东农业科学,2015,42(6):40-44.
GAO R, YUE H. Leaf expansion characteristic and selection countermeasure of 70 kinds of ornamental plants in the spring of Harbin [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(6):40-44.
- [10] 王利琳,庞基良,胡江琴,等. 温度对植物成花的影响[J]. 植物学通报,2002,19(2):176-183.
WANG L L, PANG J L, HU J Q, et al. Effect of temperature on flowering[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(2):176-183.
- [11] 李莉,李佳,高青,等. 昼夜温差对番茄生长发育、产量及果实品质的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2700-2706.
LI L, LI J, GAO Q, et al. Effects of day and night temperature difference on growth, development, yield and fruit quality of tomatoes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9):2700-2706.
- [12] 黄印冉,刘易超,张均营. 昼夜温差对中华金叶榆叶色的影响研究初报[J]. 中国农学通报,2013,29(7):31-34.
HUANG Y R, LIU Y C, ZHANG J Y. Effect of day-night temperature difference on leaf color of *Ulmus pumila* 'Zhonghua Jinye' [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(7):31-34.
- [13] 高芮,韩玮,杨太明,等. 高温背景下昼夜温差对葡萄叶片光系统II及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(3):171-177.
GAO R, HAN W, YANG T M, et al. Effects of temperature difference between day and night on photosystem II and antioxidant enzyme activities in grape leaves under high temperature [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(3):171-177.
- [14] 刘志民,杨甲定,刘新民. 青藏高原几个主要环境因子对植物的生理效应[J]. 中国沙漠,2000,20(3):309-313.
LIU Z M, YANG J D, LIU X M. Effects of several environmental factors on plant physiology in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(3):309-313.
- [15] 吴彦,刘庆,何海,等. 光照与温度对云杉和红桦种子萌发的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2229-2232.
WU Y, LIU Q, HE H, et al. Effects of light and temperature on seed germination of *Picea asperata* and *Betula albo sinensis* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12):2229-2232.

- [16] 许建伟. 东北东部林区花楸树天然更新的特征及影响因素研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010.
XU J W. Patterns and influencing factors for natural regeneration of *Sorbus pohuashanensis* in eastern forest region of Northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [17] 谢勇,王友绍. 重金属胁迫下四种红树植物幼苗生理响应特征[J]. 热带海洋学报,2022,41(6):28-34.
XIE Y, WANG Y S. Physiological response characteristics of four mangrove plants seedlings to heavy metal stress [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(6):28-34.
- [18] 孔佑莎,许洪扬,黄鑫浩,等. Pb胁迫下大叶女贞叶片性状与光合效率的关系[J]. 生态学杂志,2022,41(10):1881-1886.
KONG Y S, XU H Y, HUANG X H, et al. Relationship between leaf traits and photosynthetic efficiency of *Ligustrum lucidum* under Pb stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(10):1881-1886.
- [19] 曹晶潇,陆素芬,韦岩松,等. 铅镉污染矿区优势植物叶表型变异分析及综合评价[J]. 生物学杂志,2021,38(3):88-93.
CAO J X, LU S F, WEI Y S, et al. Variation in three dominant plant species leaf traits and comprehensive evaluation under heavy metal pollution in mining areas [J]. Journal of Biology, 2021, 38(3):88-93.
- [20] 段晓清,赵广,张扬建,等. 云南干热河谷辣木(*Moringa oleifera*)对Cd-Pb-Cu-Zn四种复合重金属胁迫的响应及富集特征[J]. 生态学杂志,2023,42(12):2817-2827.
DUAN X Q, ZHAO G, ZHANG Y J, et al. The responses of *Moringa oleifera* to combined Cd-Pb-Cu-Zn stresses and their enrichment characteristics in the dry-hot valley of Yunnan [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(12):2817-2827.
- [21] YANG Y, WANG S, ZHAO C, et al. Responses of non-structural carbohydrates and biomass in plant to heavy metal treatment [J]. Science of the Total Environment, 2024, 909:168559.
- [22] 时萌,王芙蓉,王棚涛. 植物响应重金属镉胁迫的耐性机理研究进展[J]. 生命科学,2016,28(4):504-512.
SHI M, WANG F R, WANG P T. Research advances in the tolerance mechanism of plant response to heavy metal cadmium stress [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2016, 28(4):504-512.
- [23] 钟旻依,张新全,杨昕颖,等. 植物对重金属铬胁迫响应机制的研究进展[J]. 草业科学,2019,36(8):1962-1975.
ZHONG M Y, ZHANG X Q, YANG X Y, et al. Recent advances in plant response to chromium stress [J]. Pratacul-tural Science, 2019, 36(8):1962-1975.
- [24] 姜敬,王月月,严善春. 锌胁迫对银中杨生长发育和化学防御的影响[J]. 北京林业大学学报,2018,40(11):42-48.
JIANG D, WANG Y Y, YAN S C. Effects of Zn stress on growth development and chemical defense of *Populus alba* 'berolinensis' seedlings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(11):42-48.
- [25] 周秋峰,于沐,赵建国,等. 重金属胁迫对小麦生长发育及相关生理指标的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(33):1-8.
ZHOU Q F, YU M, ZHAO J G, et al. Heavy metal stress on growth and development and physiological indexes of wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(33):1-8.
- [26] 翁南燕,周东美,武敬,等. 铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J]. 生态毒理学报,2011,6(6):607-616.
WENG N Y, ZHOU D M, WU J, et al. Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(6):607-616.
- [27] 方治国,杨青,谢俊婷,等. 重金属污染土壤植物修复中细胞分裂素的作用与机制[J]. 生态学报,2022,42(8):3056-3065.
FANG Z G, YANG Q, XIE J T, et al. The role and mechanism of cytokinin in phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8):3056-3065.
- [28] 方静,武帅,孟昭军,等. 两种丛枝菌根真菌复合接种对青山杨生长生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报,2024,52(4):17-22.
FANG J, WU S, MENG Z J, et al. Effects of complex inoculation with two species arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological indicators of *Populus pseudo-cathayana*×*P. deltoides* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(4):17-22.
- [29] 石振情,毕陈权,谭伟,等. 开阳磷矿10种木本植物叶片重金属富集特征[J]. 环境化学,2022,41(1):183-192.
SHI Z Q, BI C Q, TAN W, et al. Enrichment characteristics of heavy metals in leaves and soil of 10 woody plants in Kaiyang phosphate mine [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1):183-192.
- [30] XU Z, LIU Q, DU W, et al. Modelling leaf phenology of some trees with accumulated temperature in a temperate

- forest in northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 489: 119085.
- [31] 葛会硕, 宋跃朋, 苏雪辉, 等. 基于 Logistic 和 Gompertz 模型的小叶杨幼苗生长组合优化模型 [J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(5): 59-70.
GE H S, SONG Y P, SU X H, et al. Optimal growth model of *Populus simonii* seedling combination based on Logistic and Gompertz models [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(5): 59-70.
- [32] 郭孝玉, 孙玉军, 王轶夫, 等. 基于改进人工神经网络的植物叶面积测定 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 200-204.
GUO X Y, SUN Y J, WANG Y F, et al. Improved artificial neural network for determination of plant leaf area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 200-204.
- [33] 赵文君, 崔迎春, 周汀, 等. 茂兰喀斯特区 68 种不同功能(类)群植物比叶面积研究 [J]. *贵州林业科技*, 2022, 50(4): 1-7.
ZHAO W J, CUI Y C, ZHOU T, et al. Specific leaf area for 68 species of plant functional groups in Maolan National Nature Reserve [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2022, 50(4): 1-7.
- [34] 孙龙, 纪楠楠, 穆立蕾, 等. 重金属胁迫对小叶丁香叶片解剖结构的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(4): 1-4.
SUN L, JI N N, MU L Q, et al. Effect of heavy metal stress on leaf anatomical structure of *Syringa microphylla* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(4): 1-4.
- [35] 朱凡, 雷佳奇, 黄鑫浩, 等. 木本植物光反应对重金属胁迫响应机制的研究进展 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(10): 9-21.
ZHU F, LEI J Q, HUANG X H, et al. Advances in response mechanism of the light reaction of woody plants to heavy metal stress [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(10): 9-21.
- [36] 张超兰, 陈文慧, 韦必帽, 等. 几种湿地植物对重金属镉胁迫的生理生化响应 [J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1458-1461.
ZHANG C L, CHEN W H, WEI B M, et al. Response of physiology and biochemistry of plants in wetland to heavy metal cadmium stress [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1458-1461.
- [37] 范拴喜, 张楠, 孙旻涵, 等. Pb、Zn 和 Cd 复合重金属潜在超富集植物的筛选与胁迫响应特征 [J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4870-4882.
FAN S X, ZHANG N, SUN M H, et al. Screening and stress responsive characteristics of potential hyperaccumulator of Pb, Zn, and Cd compound heavy metals [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4870-4882.
- [38] 张敏, 李燕, 宁朋, 等. 镉胁迫对八角金盘生长及生理特性的影响 [J]. *分子植物育种*, 2023, 21(3): 978-987.
ZHANG M, LI Y, NING P, et al. Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of *Fatsia japonica* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(3): 978-987.
- [39] 李鑫, 贾炜玮. 红松人工林叶面积分布规律及回归模型研究 [J]. *森林工程*, 2023, 39(6): 1-11.
LI X, JIA W W. Study on the distribution law and regression model of leaf area in Korean pine plantation [J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(6): 1-11.
- [40] 曾婉珍, 艾灵, 吴秋霞, 等. 亚热带森林 72 个常绿和落叶树种凋落叶重金属的富集效率 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2024(3): 1-12.
ZENG W Z, AI L, WU Q X, et al. Enrichment efficiencies of heavy metals in foliar litter of 72 evergreen and deciduous tree species in subtropical forests [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2024(3): 1-12.
- [41] 蔡宇. 三种灌木对重金属胁迫的抗性及其吸收富集能力分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
CAI Y. Analysis of absorption and accumulation ability and heavy metal stress resistance of three shrubs [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [42] IBARRA L, FLORES J, DÍAZ-PÉREZ J C. Growth and yield of muskmelon in response to plastic mulch and row covers [J]. *Scientia Horticulturae*, 2001, 87(1): 139-145.
- [43] ZUNAIDI A A, LIM L H, METALI F. Heavy metal tolerance and accumulation in the Brassica species (*Brassica chinensis* var. *parachinensis* and *Brassica rapa* L.): A pot experiment [J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): e29528.
- [44] 姜霞, 丁访军, 刘延惠, 等. 黔中地区 3 种主要树种对土壤重金属的富集特征 [J]. *贵州林业科技*, 2022, 50(3): 40-44.
JIANG X, DING F J, LIU Y H, et al. Accumulation of heavy metals in soil under three main tree species in central Guizhou [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2022, 50(3): 40-44.
- [45] 葛坤, 王培军, 邵海林, 等. 城市典型绿化树种叶片重金属积累及抗性生理特征 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(4): 96-104.
GE K, WANG P J, SHAO H L, et al. Physiological characteristics of heavy metal accumulation and resistance in leaves of typical urban greening tree species [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(4): 96-104.