

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220447

# 镉胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响

刘金秀<sup>1</sup>, 张松彦<sup>1</sup>, 周 建<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南科技学院园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省园艺植物资源利用与种质创新工程研究中心, 河南 新乡 453003)

**摘要:** [目的] 探究镉胁迫对刺槐生长与光合生理特性的影响。[方法] 以刺槐幼苗为研究对象, 测定不同浓度镉处理下刺槐生长、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、呼吸速率和气孔特性等。[结果] 在镉胁迫下, 刺槐幼苗地径、株高受到明显抑制; 高浓度处理植株的鲜质量、干质量下降, 低浓度处理植株则略微上升, 但与对照差异不显著。随着镉浓度增加, 刺槐叶绿素 a、叶绿素总量呈下降趋势, 而叶绿素 b、类胡萝卜素变化无规则, 但与对照差异不显著; 初始荧光 ( $F_0$ ) 与最大荧光产量 ( $F_m$ ) 先升后降, 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 逐步下降, 非光化学淬灭系数 ( $q_N$ ) 逐步上升, 实际光化学量子效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 均低于对照值, 但差异不显著; 胁迫植株气孔宽度、气孔面积降低, 气孔逐步闭合, 呼吸效率受到显著抑制; 通过相关分析显示, 多数指标之间显著性相关; 经随机森林回归分析, 初始荧光 ( $F_0$ )、根系镉含量、气孔宽度和叶绿素 a 的重要性分别在叶绿素荧光参数、植株富集镉含量、气孔特性、光合色素中最强, 成为影响刺槐光合功能的最关键因子。[结论] 刺槐幼苗生长与光合生理受到一定影响, 但仍表现出较强的镉胁迫耐受性, 可为镉污染地区的园林应用提供参考。

**关键词:** 镉胁迫; 刺槐; 叶绿素; 叶绿素荧光; 气孔

**中图分类号:** S718.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)03-0168-11

土壤重金属污染是我国当前最突出的环境污染问题, 2014 年原环境保护部和原国土资源部联合发表的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 镉的点位超标率为 7%<sup>[1]</sup>。镉 (Cd) 是毒性最强的重金属之一, 具有分解周期长、毒性大、难降解的特点, 容易在植物中富集<sup>[2]</sup>, 可通过食物链进入人体, 进而危害人类健康<sup>[3]</sup>。针对土壤重金属污染, 植物修复技术具有成本低、对环境友好等优势, 修复土壤的同时净化空气与水体, 改善环境, 成为了当下研究热点<sup>[4]</sup>。目前, 对于重金属富集植物研究多限于草本植物, 如鱼腥草 (*Houttuynia cordata* Thunb.)<sup>[5]</sup> 等, 而草本植物因根系浅、生物量小对重金属富集有一定的局限性。木本植物因其生物量大、生长周期长、根系发达等特征<sup>[6]</sup>, 日趋成为土

壤重金属污染修复的新方向。研究发现, 在镉胁迫中植物光合作用非常敏感, 是鉴定植物对镉耐受性的一种良好途径<sup>[7]</sup>。在镉胁迫下, 桑树 (*Morus alba* L.) 幼苗净光合速率下降, 抑制了光合作用过程中产物的输送, 最终导致桑树幼苗植株矮小<sup>[8]</sup>。

刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 属于豆科落叶乔木, 因其耐旱、耐贫瘠、耐铅镉污染<sup>[9-10]</sup>, 同时具备生物量大、生长速度快、观赏价值高等特点, 是一种理想的环境污染修复树种。本研究以刺槐为对象, 研究不同浓度镉处理对刺槐的幼苗生长、叶绿素含量、叶绿素荧光特性、呼吸速率及气孔变化特性的影响, 了解刺槐对镉胁迫的耐受能力, 并通过随机森林回归分析镉胁迫对刺槐叶片光合生理的损伤途径及刺槐幼苗对镉胁迫的适应机

收稿日期: 2022-09-12 修回日期: 2022-12-17

基金项目: 河南省科技攻关项目“刺槐修复铅镉污染土壤的双向调控关键技术研究及应用”(202102110053)

作者简介: 刘金秀, 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 大地景观规划与生态修复。E-mail: ljx04190620@163.com

\* 通讯作者: 周建, 副教授, 硕士生导师, 主要从事园林植物逆境生态修复研究。E-mail: zj200102@163.com

制,为进一步探索刺槐抗镉机理提供依据,同时也为强化刺槐在镉污染土壤修复中应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

取腐叶土、蛭石、珍珠岩、普通园土按照 1:1:1:3 配制栽培土,其土壤理化性质为: pH 值 6.3, 总有机碳  $15.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷为  $15.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。河南省土壤镉含量背景值为  $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [11], 本试验从刺槐种子萌芽阶段进行胁迫, 植株个体较小, 故设置 0、5、10、20  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  等镉浓度处理, 每个处理设置 3 次重复, 每次重复 4 钵。随后在土壤中加入  $\text{CdCl}_2$ , 充分混合混匀。将混匀的供试土壤装入栽培钵(口径 13 cm, 高度 12 cm), 每钵 0.7 kg 土壤。选取饱满刺槐种子, 浸泡 24 h, 待 1/3 种子露白后, 播种于栽培钵, 覆土 0.5~1 cm, 每钵 5 粒种子。其中, 0、5、10、20  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  等处理的发芽率分别为 85.00%、76.67%、68.33%、85.00%。出苗后, 每 2 周用 1/4 浓度的 Hoagland 营养液浇灌 1 次; 将幼苗放置于温室, 室温设置为白天 28 °C, 晚间 25 °C。等幼苗发育 5 个月时取样, 测定相关指标。

### 1.2 测定指标及方法

**1.2.1 生长指标测定** 从各处理中选取 3 盆中的 3 棵具有代表性的幼苗, 用直尺测量幼苗株高, 利用游标卡尺测量茎粗, 重复 5 次。用水冲洗植株并吸干水分, 将幼苗放至烘箱内, 105 °C 杀青 5 min, 80 °C 恒温处理 10 h, 烘至质量不变后称其干质量, 重复 3 次。

**1.2.2 镉含量测定** 称取 0.1 g 干样, 放入聚四氟乙烯烧杯中, 为了更好地消解植物依次加入 10:5:3 比例的硝酸-氢氟酸-高氯酸, 并搅拌混合均匀; 然后置于 180 °C 的电热板上进行消解 3 h, 消解成黄豆粒大小时加入 0.2% 稀硝酸定容至刻度。采用 Optima 2100 DV 离子发光谱仪测定, 3 次重复。

**1.2.3 叶绿素含量测定** 采用丙酮-无水乙醇提取法测定叶绿素、类胡萝卜素含量。称取新鲜叶片 0.3 g 左右, 剪碎; 将组织加入离心管的丙酮与乙醇混合溶液 (V:V=2:1) 中; 用报纸包裹离心管, 置于黑暗条件下 14 h, 直至组织变白。取上清液在可见分光光度计 440、644、662 nm 处比色, 每组重复 3 次。

计算公式如下:

$$\text{叶绿素 a 含量 } C_a = 9.78 \times A_{662} - 0.99 \times A_{644}$$

$$\text{叶绿素 b 含量 } C_b = 21.43 \times A_{644} - 4.65 \times A_{662}$$

$$\text{总叶绿素含量 } C_{a+b} = 5.13 \times A_{662} + 20.44 \times A_{644}$$

$$\text{类胡萝卜素} = 4.7 \times A_{440} - 0.27 \times C_{a+b}$$

**1.2.4 叶绿素荧光参数测定** 采用便携式 Yaxin-1161G 叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光指标。选取样本植株中上部的全展叶, 用叶片夹夹住叶片, 暗处理 20 min; 随后  $4\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  光强饱和脉冲处理 1 s,  $1\ 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  光化光处理 9 s, 测得  $F_0$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_m$ 、 $qN$ 、 $\Phi PSII$ , 每组重复 3 次。

**1.2.5 叶面气孔观测** 现场剪取样本中上部叶片, 用打孔器取下样品叶片, 将叶片黏在含导电胶的样品台上, 粘贴叶片时注意仅用镊子小心按压叶片四周, 不要全叶按压, 以免破坏叶片的结构。在 QUANTA 250 扫描电子显微镜下观察叶面气孔的形态, 每组重复 3 次。用 ImageJ1.8.0 定量软件测定叶片气孔长、宽度及面积, 每张图片重复测量 3 次。

**1.2.6 呼吸速率测定** 采用 Yaxin-1151 雅欣生物氧仪测定叶片呼吸速率。从不同处理样株上部取  $1 \text{ cm}^2$  叶片样品, 置入恒温反应室, 反应体系为 8 mL 去离子水与 2 mL 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; 将搅拌子放入反应室, 以  $1\ 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  转速搅拌 3 min, 随后插入电极。遮蔽反应室, 暗处理 2 min, 即可进行呼吸速率测定, 每组重复 3 次。

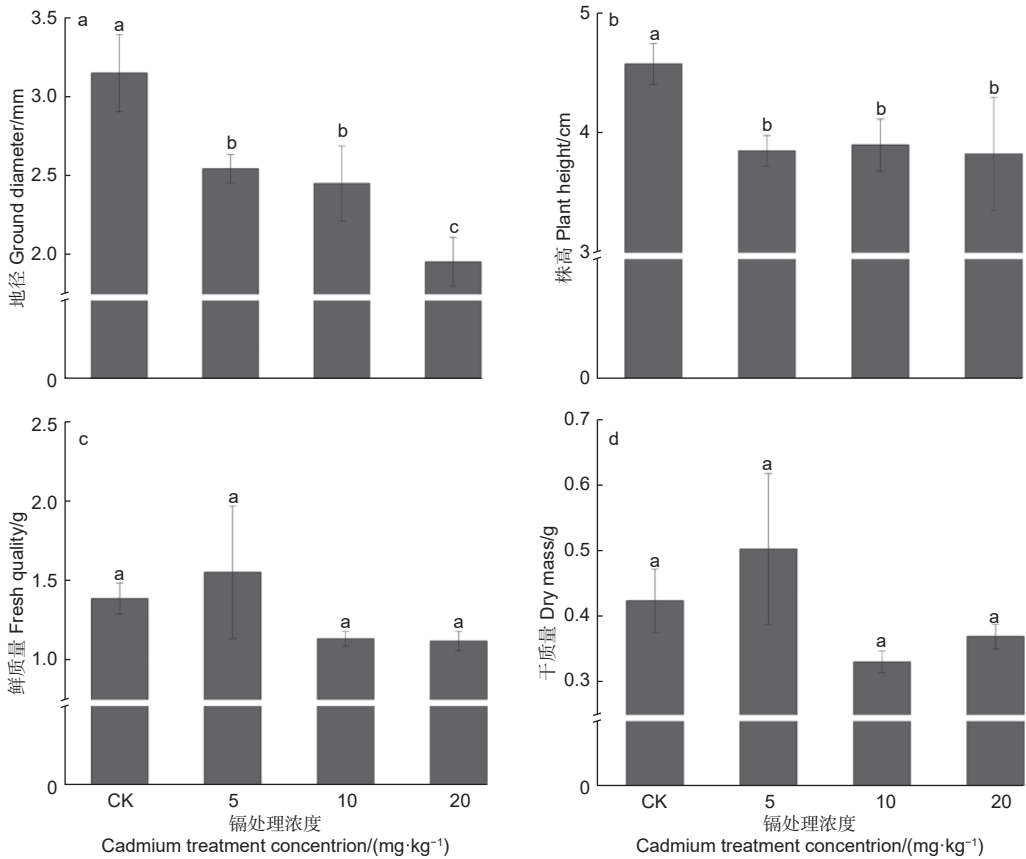
### 1.3 数据处理

采用 Origin2018 软件制图; 用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析 ( $P < 0.05$ ); 用 Metabo Analyst5.0 软件包进行主成分分析、相关性分析及森林回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同镉含量对刺槐幼苗生长及生物量的影响

本试验中, 镉胁迫植株的地径与株高表现相似, 随着镉浓度增加而逐步降低, 并显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 在 20  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理中, 其地径与株高最低, 分别低于对照 37.89% 和 16.39% (图 1a、b)。此外, 刺槐鲜质量与干质量表现相似 (见图 1c、d), 中高浓度处理植株的生物量低于对照植株, 而 5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  镉处理植株的生物量最高, 其鲜质量与干质量分别高于对照 11.94%、18.57%, 但差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。



注：图中误差线代表标准偏差，不同小写字母代表各处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )，下同

Notes: the error bars in the figure represent the standard deviation, and different lowercase letters represent significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ), the same as follow

图1 镉胁迫下刺槐幼苗生长指标

Fig. 1 The growth indices of *Robinia pseudoacacia* seedlings under Cd stress

## 2.2 刺槐幼苗重金属镉含量

图2表明：各处理刺槐幼苗的根系镉含量均高于地上部，其镉含量大小为根>叶>茎。随着镉处理浓度增加，刺槐幼苗根、叶、茎的镉含量均逐步上升，其中，在  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理时达到最大值，相对于对照植株分别增加 4.8、1.83、1.45 倍且差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 不同镉含量对刺槐幼苗叶片色素含量的影响

由图3a、c可知：胁迫刺槐的叶绿素 a、总叶绿素含量表现相似，其含量随镉浓度增加而逐步降低，但与对照差异不显著 ( $P > 0.05$ )，其中， $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  镉处理植株的叶绿素 a 和总叶绿素分别降低 25.94% 和 20.21%。叶绿素 b 与类胡萝卜素变化相似，随镉浓度增加，其含量先降后升，呈“V”型变化 (图3b、d)，但与对照差异均不显著 ( $P > 0.05$ )，其中， $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  镉处理植株含量最低，分别低于对照 9.84%、17.18%。此外，叶绿

素 a/b 值随着镉浓度的升高呈下降趋势，在  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  镉处理中，其值显著低于对照 29.57% ( $P < 0.05$ ) (图3e)。

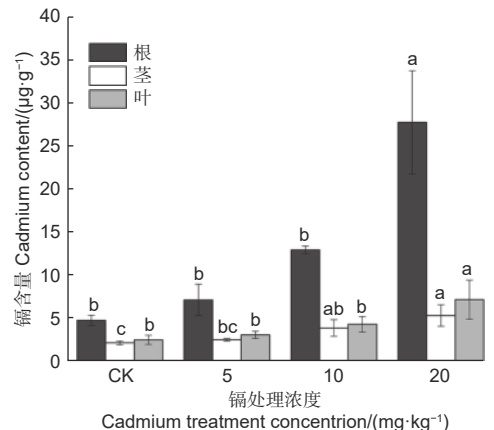


图2 不同镉浓度下刺槐幼苗各器官镉含量

Fig. 2 Contents of cadmium in different organs of *Robinia pseudoacacia* seedlings under different cadmium concentrations.

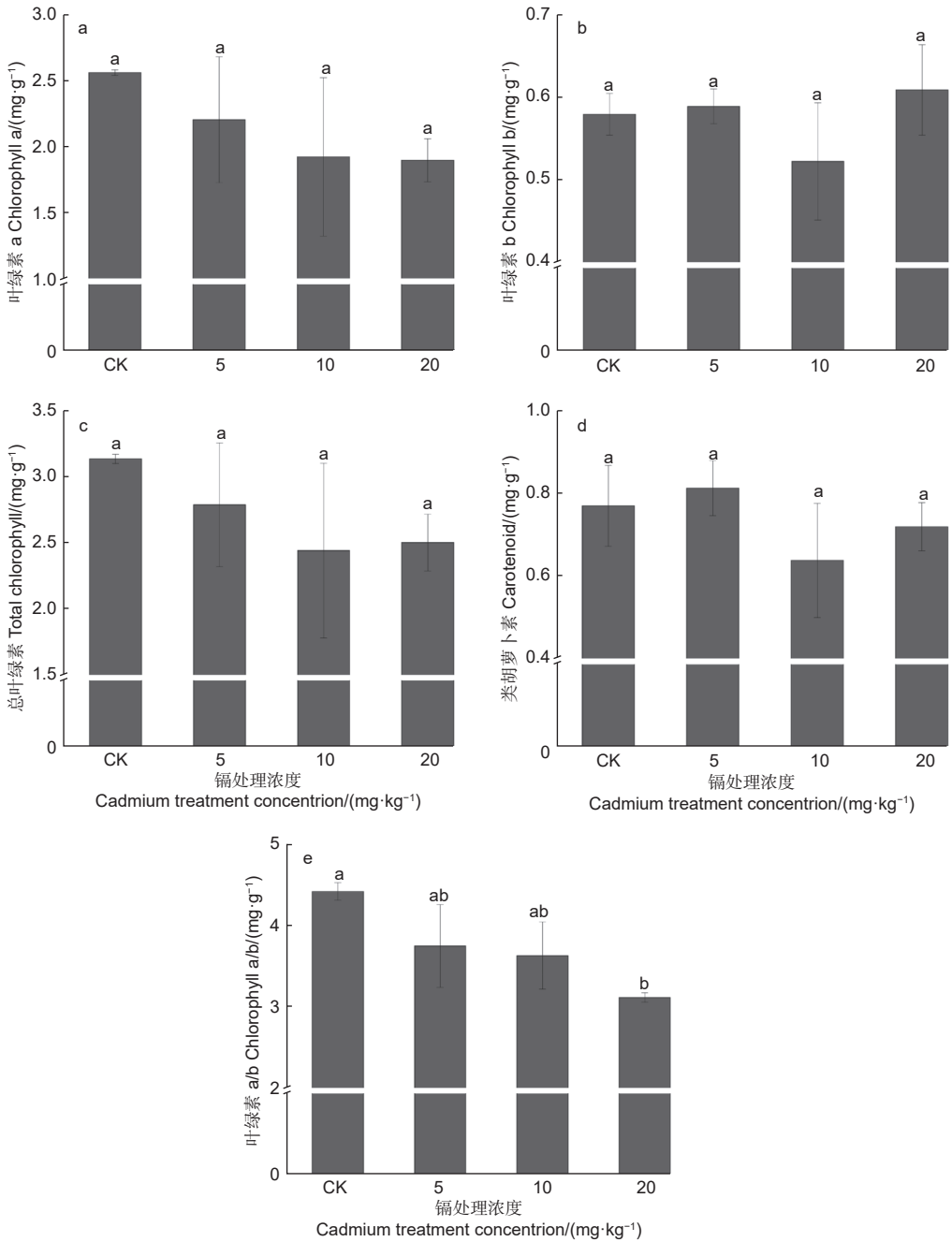


图3 镉胁迫对刺槐叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素、类胡萝卜素及叶绿素a/b含量的影响

Fig. 3 Effects of cadmium stress on the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid and chlorophyll a/b in *Robinia pseudoacacia*.

#### 2.4 不同镉含量对刺槐幼苗叶绿素荧光的影响

由图4a、c、d可知:随着镉浓度的增加,刺槐叶片 $F_0$ 、 $F_m$ 整体呈现先上升后下降的趋势,但 $F_0$ 变化趋势明显大于其他参数。在镉浓度为10 mg·kg<sup>-1</sup>时,刺槐叶片的 $F_0$ 较CK增加了5.49% ( $P < 0.05$ );在镉浓度为20 mg·kg<sup>-1</sup>时,叶片的 $F_m$ 较CK减少了29.88% ( $P < 0.05$ );不同处理下刺槐叶片 $qN$ 无显著变化 ( $P > 0.05$ )。  $F_v/F_m$ 与 $\Phi PSII$ 变

化相似,随着镉浓度的增加,其值呈现下降趋势(图4b、e), $\Phi PSII$ 与对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ),在镉浓度5 mg·kg<sup>-1</sup>时植株含量最低,低于对照12.53%;而 $F_v/F_m$ 在镉浓度20 mg·kg<sup>-1</sup>时,其值显著低于对照11.18% ( $P < 0.05$ )。

#### 2.5 不同镉含量对刺槐幼苗气孔变化的影响

由表1、图5可知:从镉处理后刺槐的气孔特征看,表面存在较多气孔、凹凸不平等。随着镉浓

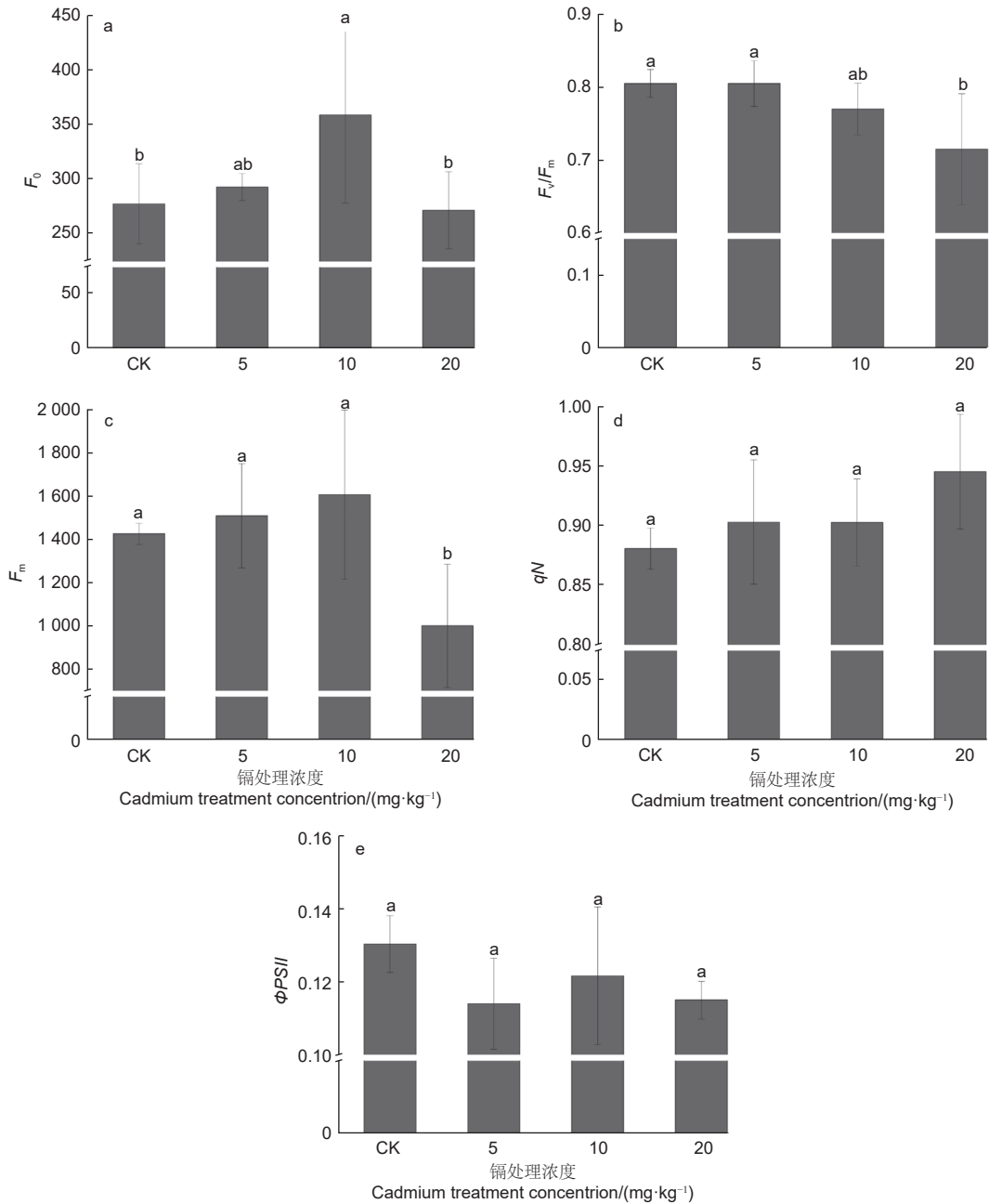


图 4 不同镉浓度胁迫下刺槐初始荧光、最大光化学效率、最大荧光产量、非光化学淬灭系数、实际光化学量子效率的变化

Fig. 4 Changes of initial fluorescence, maximum photochemical efficiency, maximum fluorescence yield, non-photochemical quenching coefficient and actual photochemical quantum efficiency of *Robinia pseudoacacia* under different cadmium concentrations.

度的增加,刺槐叶面气孔长度与面积表现相似,均呈先升高后降低趋势,叶面气孔长度和气孔面积在镉浓度 5 mg·kg<sup>-1</sup>时最大,与其他处理差异显著 ( $P<0.05$ ),其中,在镉浓度 10 mg·kg<sup>-1</sup>和 20 mg·kg<sup>-1</sup>时,叶面气孔长度和气孔面积分别较 CK 降低了 2.93%、55.18%、21.84% 和 61.10%。叶面气孔宽度随着镉浓度的增加呈现下降趋势,在镉浓度 10 mg·kg<sup>-1</sup>和 20 mg·kg<sup>-1</sup>时,均比 CK 显

著降低了 54.58% ( $P<0.05$ )。

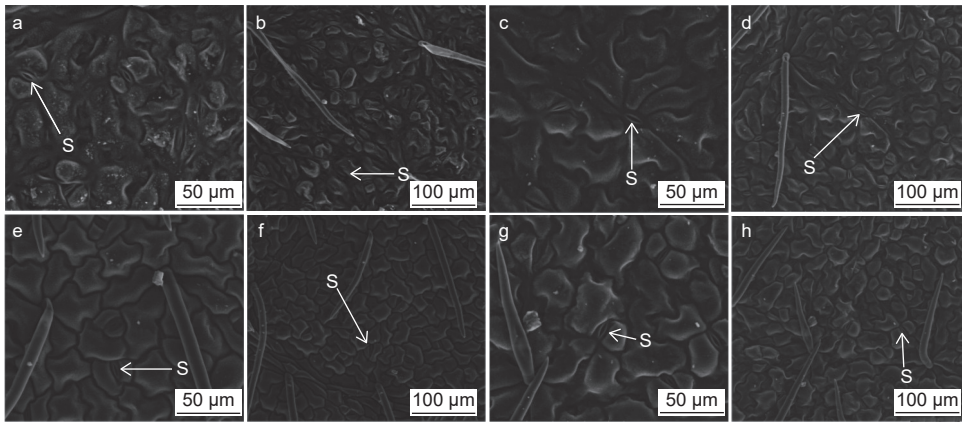
## 2.6 不同镉含量对刺槐幼苗呼吸速率的影响

由图 6 可知:与 CK 相比,随着镉浓度的变化都不同程度地降低了刺槐幼苗叶片的呼吸速率,呼吸速率与镉浓度呈负相关;其各处理与对照均差异显著 ( $P<0.05$ ),在镉浓度 10 mg·kg<sup>-1</sup>时对呼吸速率的影响最大,与对照相比降低了 40.00%,但镉浓度处理之间呼吸速率无明显差异 ( $P>$

表 1 不同镉浓度处理下对刺槐叶片气孔的影响

Table 1 Effects of different cadmium concentrations on stomata of *Robinia pseudoacacia* leaves

处理浓度 Treatment concentration/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	长度 Length/ $\mu\text{m}$	宽度 Width/ $\mu\text{m}$	面积 Area/ $\mu\text{m}^2$
CK	$9.89 \pm 0.35$ ab	$2.84 \pm 0.18$ a	$21.44 \pm 1.88$ a
5	$11.07 \pm 0.82$ a	$2.52 \pm 0.08$ a	$21.83 \pm 1.59$ a
10	$9.60 \pm 0.33$ b	$1.29 \pm 0.31$ b	$9.61 \pm 1.82$ b
20	$7.73 \pm 0.90$ c	$1.29 \pm 0.19$ b	$8.34 \pm 0.50$ b



注: a、b 为对照, c、d 为  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , e、f 为  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , g、h 为  $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  镉处理, S 为叶面气孔

Notes: a and b are the control, c and d are  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , e and f are  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , g and h are  $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  cadmium treatment, S is the leaf stomata

图 5 刺槐叶面气孔形态特征

Fig. 5 Morphological characteristics of leaf stomata of *Robinia pseudoacacia*

由随机森林回归结果可知: 对于刺槐幼苗叶绿素含量来说, Ch1a 的平均精度值最高; 对于刺槐幼苗叶绿素荧光来说, 初始荧光 ( $F_0$ ) 的平均精度

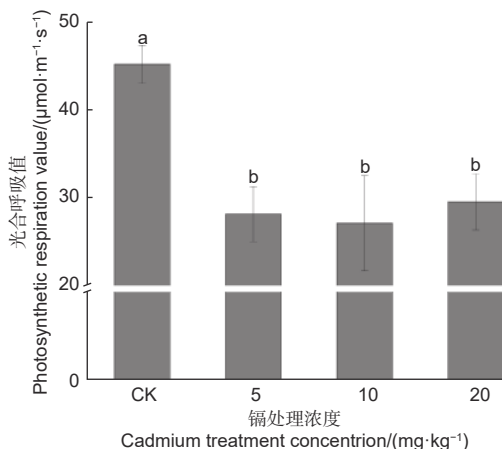


图 6 不同浓度镉处理下对刺槐呼吸变化的影响  
Fig. 6 Effects of different concentrations of cadmium on respiratory changes of *Robinia pseudoacacia*.

0.05)。

## 2.7 刺槐幼苗各指标之间的相关性分析、主成分分析及随机森林回归分析

利用主成分分析进一步探究了 Cd 胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响。由表 2 可知: PC1 占据了总方差的 29.9%, PC2 占据了总方差的 26.8%。4 个处理 (CK、Cd5、Cd10、Cd20) 被 PC2 显著分离, 其中, CK、Cd20 处理与其他处理显著分离 (图 7a)。

值最高; 对于叶面气孔来说, 气孔宽度的平均精度值最高; 对于植株镉含量来说, 其根系镉含量的平均精度值最高 (图 7b)。

根据相关性分析结果 (图 8a、b) 可知: 其干质量和 Ch1b、Tchl、Ch1a/Ch1b 以及气孔长度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与气孔面积、气孔宽度、类胡萝卜素呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 与刺槐幼苗的株高、地径、鲜质量、呼吸速率呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同质量浓度的镉处理对刺槐幼苗生长的影响

作为毒性最强的重金属元素之一, 镉浓度较低时就可以引起植物中毒, 常见症状为生长速率降低<sup>[12]</sup>。本试验中, 随着 Cd 胁迫增强, 刺槐幼苗株高及地径都受到明显的抑制作用, 表明在较高含量镉胁迫下刺槐幼苗受到一定程度的毒害作用。可能是随着  $\text{Cd}^{2+}$  进入植物细胞, 破坏细胞结构, 阻碍

表 2 不同镉浓度处理下对刺槐主成分分析

Table 2 Analysis of principal components of *Robinia pseudoacacia* under different cadmium concentrations

指标 Index	第1主成分 Prin1	第2主成分 Prin2	第3主成分 Prin3	第4主成分 Prin4	第5主成分 Prin5
方差贡献率 Variance contribution rate/%	29.9	26.8	17.8	11.6	6.4
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	29.9	56.7	74.5	86.1	92.5

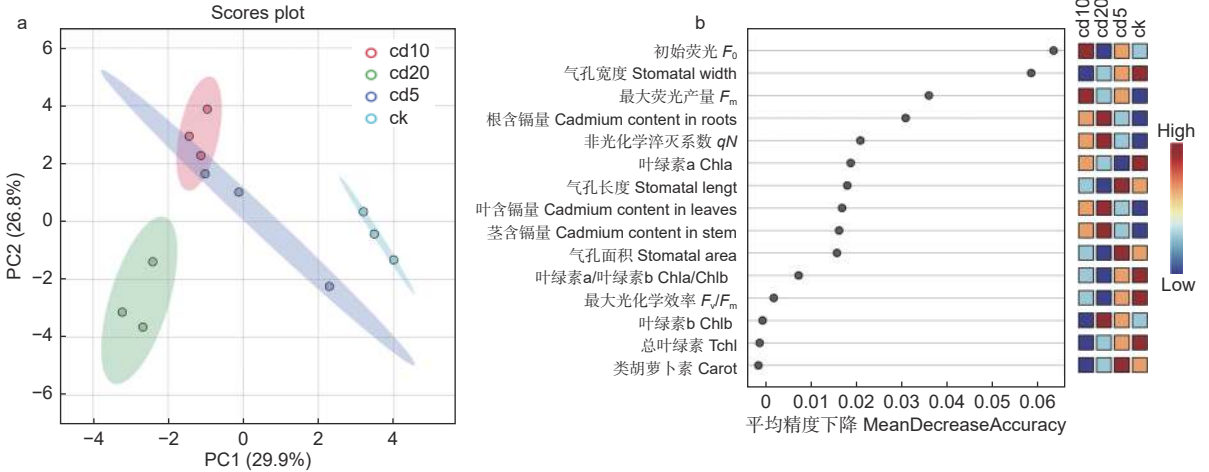
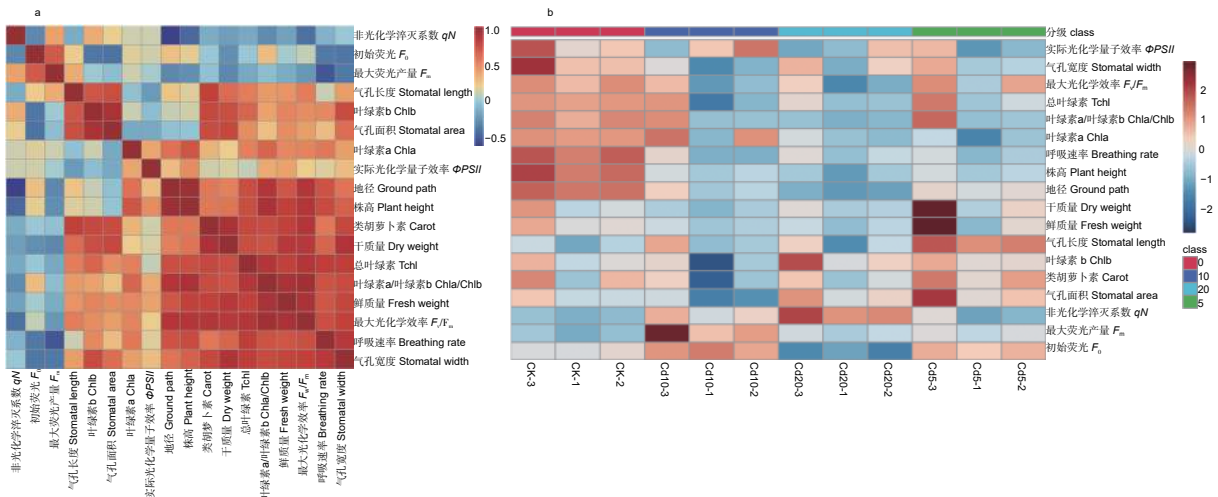


图 7 不同浓度镉胁迫下刺槐幼苗指标变化的得分图 (a)、随机森林回归分析 (b)

Fig. 7 Principal Component Analysis II (b) and random forest regression analysis (b) of *Robinia pseudoacacia* seedling index changes under different concentrations of cadmium stress.



注: a 中颜色的深浅代表系数的大小, 0 以下代表负相关, 颜色越深, 相关性越大。

Notes: in figure a, the different color represents the value of coefficient, the value above zero represents positively correlated, and the value below zero represents negatively correlated. The darker the color, the larger the correlation.

图 8 不同浓度镉胁迫处理刺槐幼苗各指标的相关性分析 (a)、热图 (b)

Fig. 8 Correlation analysis (a) and heat map (b) of various indexes of *Robinia pseudoacacia* seedlings under different concentrations of cadmium stress.

植株细胞分裂和伸长, 抑制了植物细胞分裂<sup>[13]</sup> 及 Cd<sup>2+</sup> 与植物生长中的关键酶、含氮和硫基团及蛋白中心巯基结合, 导致硫代巴比妥酸反应物过量堆积以及生物大分子损伤而抑制生长发育<sup>[14]</sup>。这与

镉胁迫下紫花地丁 (*Viola philippica* Cav.)<sup>[15]</sup>、巨桉 (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden)<sup>[16]</sup> 等幼苗变化规律相似。然而, 本试验中, 低浓度 Cd 胁迫植株的干质量和鲜质量略微上升, 而中高

浓度镉胁迫植株则低于对照,但差异不显著,表明刺槐胁迫植株的光合功能与有机物积累没有受到明显影响,也体现出刺槐植株对镉胁迫具有较强的耐受性,这与巨桉结果一致<sup>[17]</sup>。在本试验中,20 mg·kg<sup>-1</sup>镉处理下刺槐根、叶的镉浓度分别为26.80、7.21 μg·g<sup>-1</sup>;而常用修复植物——火炬树(*Rhus typhina* L.)在25 mg·kg<sup>-1</sup>镉处理下,其根、叶镉浓度为15.05、0.33 μg·g<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>,表明刺槐具有较强的镉富集能力。根据随机森林回归分析,刺槐根部镉含量的平均精度值最高,表明根中镉的重要性最强,对植株生长的影响程度大于叶与茎中的镉。应该是刺槐幼苗在逆境环境中,根系吸收的镉通过共质体和原生质体途径到达木质部,运输到地上部分,对地上部分造成镉毒害,影响地上部分生物量的积累<sup>[13]</sup>;在较低浓度镉胁迫下,地下部可能由于Cd<sup>2+</sup>刺激根细胞壁中交换位点而排斥Cd<sup>2+</sup>,从而促进地下部的生长,这与胁迫环境中植物改变其生物量的分配方式,将其资源分配到不同器官以达到适应逆境环境<sup>[19-20]</sup>。

### 3.2 不同镉处理质量浓度对刺槐幼苗光合指标的影响

光合色素是光合作用所必需的物质,其含量高影响着植物的有机合成,叶片光合色素含量也直接反映了植物的生长状态<sup>[21]</sup>。相关试验证明,重金属胁迫影响叶片光合色素含量和捕光色素分子数,从而抑制植物光合作用<sup>[22]</sup>。在本试验中,镉胁迫刺槐幼苗的叶绿素a与叶绿素总量随着镉浓度升高均呈下降趋势,这与巨桉<sup>[17]</sup>等植物研究结果相似。叶绿素下降可能是镉离子进入植株体内后,抑制了植物细胞的正常分裂<sup>[23]</sup>;同时增加了叶绿素降解酶活性,降低参与叶绿素生物合成的δ-氨基乙酰丙酸生物合成和原叶绿素还原酶复合物<sup>[24]</sup>,导致叶绿素合成降低。相关研究表明,光合强度与叶绿素a/b值密切相关<sup>[25]</sup>。本试验中,镉处理下叶绿素a下降趋势明显强于叶绿素b,其叶绿素a/b值随着镉浓度增加呈降低趋势。根据随机森林回归发现,其刺槐叶绿素a的精度值最高,表明叶绿素a是影响光合作用的关键因子。说明刺槐叶绿素总量降低主要是叶绿素a合成受到抑制,进而影响刺槐光能利用能力。然而,各处理组植株的叶绿素含量与对照植株差异不显著,表明对刺槐光能利用能力的影响不明显,进而反应出刺槐对镉胁迫的强耐受能力。

叶绿素荧光参数可反应植物光合系统II特性及其对光能的利用能力<sup>[26]</sup>,进而可体现外界逆境对PSII产生的危害<sup>[27]</sup>。随机森林回归结果显示,叶绿素荧光中F<sub>0</sub>精度值最大,表明胁迫过程中初始荧光F<sub>0</sub>重要性在叶绿素荧光指标中最强,表明PSII反应中心的损害程度是影响刺槐光合功能的最关键因子。初始荧光F<sub>0</sub>表示的是光系统II(PSII)反应中心处于完全开放时的荧光产量<sup>[28]</sup>。本试验中,镉胁迫刺槐F<sub>0</sub>增加,表明刺槐叶片PSII天线色素吸收的能量流向光化学的部分减少,以荧光形式等散失的能量增加,随着浓度的增加,破坏程度越高。因而,镉胁迫导致刺槐PSII反应中心受损,影响到光量子捕捉与光反应链中电子传递,从而降低胁迫植株的PSII光能转化与光合能力,使得刺槐叶片的光合效率变低,这与F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>值逐步下降一致。F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>下降反应出PSII反应中心受损,大部分激化能以热能形式耗散<sup>[29-30]</sup>或光合电子传递受阻<sup>[31]</sup>。过剩激化能压力是损伤PSII的关键因素<sup>[32]</sup>;而qN反映出激化能以热形式耗散的情况,与叶黄素循环途径密切相关<sup>[33]</sup>。热耗散可以避免过剩激化能对PSII的损伤<sup>[34]</sup>。在本试验中,镉胁迫刺槐qN逐步增加,表明激化能通过热耗散途径消耗的比例上升,进而缓解了激化能对PSII的压力。总之,镉胁迫降低了刺槐光系统对光能捕获效率,抑制其光化学效率,这与镉胁迫下龙葵(*Solanum nigrum* L.)、桢楠(*Phoebe zhennan* S. Lee et F.N. Wei)<sup>[35-36]</sup>等表现相似。

### 3.3 不同镉处理质量浓度对刺槐幼苗气孔特性的影响

气孔是植物与环境进行水分与气体交换的重要门户<sup>[37]</sup>,其孔径大小直接影响植物光合作用,也与其他生理过程密切相关<sup>[38]</sup>,如蒸腾、呼吸作用等生理过程<sup>[39]</sup>,而气孔特征也常作为一种指标来阐明植物在逆境中的适应性对策<sup>[40]</sup>。随机森林分析结果显示,气孔宽度的重要性在气孔特征中最强,表明气孔闭合程度是影响刺槐叶片水分与气体交换的关键因子。在本试验中,镉胁迫使得叶片气孔逐步闭合,水气交换能力与气孔导度逐步减弱,进而叶面通气性变差抑制刺槐光合作用,从而影响植株有机物积累,这与刺槐鲜质量、干质量及最大光化学效率的结果一致。然而,在低浓度镉处理中,刺槐气孔面积大于对照,这可能是由于镉对植物胁迫程度较弱,引起细胞膨胀,气孔阻力减小,蒸腾速率增



大<sup>[23]</sup>, 将会增强水气交换能力与光合效率, 促进刺槐有机物合成与生物量积累, 这应该是刺槐对 Cd 胁迫的适应机制。当胁迫浓度超过一定范围后, 植物耐性减弱, 其细胞气孔阻力增大甚至关闭, 从而限制外界 CO<sub>2</sub> 进入叶肉细胞, 导致细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低, 即气孔对光合产生限制<sup>[41-42]</sup>。

## 4 结 论

镉胁迫抑制刺槐幼苗株高、地径生长, 但对生物量积累影响不大; 影响叶绿素合成, 导致光化学反应减弱, 热耗散增强, 但程度不明显; 降低刺槐呼吸强度, 逐步闭合叶片气孔, 表明刺槐幼苗生长与光合生理受到一定影响, 但刺槐仍表现出较强的镉胁迫耐受性, 虽然与其他超积累植物存在差距, 但其根表现出较强的镉积累能力, 在镉污染土壤植物修复中具有较好的应用潜力。

## 参 考 文 献:

- [1] 余 涛, 蒋天宇, 刘 旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. 中国地质, 2021, 48 (2): 460-476.
- [2] 罗 昱. 螯合剂及有机酸强化凤尾鸡冠花修复Pb、Cd污染土壤研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [3] ZHANG Y, ZHOU J, GAO F J, *et al.* Comprehensive ecological risk assessment for heavy metal pollutions in three phases in rivers - ScienceDirect[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3436-3441.
- [4] SHI Y K, MU X M, LI K R, *et al.* Soil characterization and differential patterns of heavy metal accumulation in woody plants grown in coal gangue wastelands in Shaanxi, China[J]. ENVIRON SCI POLLUT R, 2016, 23(13): 13489-13497.
- [5] 吴正卓, 刘桂华, 范成五, 等. 镉胁迫下不同生态型鱼腥草生长及生理特性的响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35 (2): 359-365.
- [6] PENG Z, GUO Z, XIAO X, *et al.* Phytoextraction potential of *Pteris vittata* L. co-planted with woody species for As, Cd, Pb and Zn in contaminated soil[J]. Science of The Total Environment, 2018, 650(Pt 1): 594-603.
- [7] SILVEIRA F S, AZZOLINI M, DIVAN A M. Scanning cadmium photosynthetic responses of *Elephantopus mollis* for potential phytoremediation practices[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(11): 1-12.
- [8] 毛晓瑜, 楼艳笑, 戴 超, 等. 镉和酸雨对不同性别桑树幼苗光合生理的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (1): 117-124.
- [9] 杨 斌. 刺槐幼苗对水分胁迫的响应: 基于生长、生理及非结构性碳的分配与动态[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [10] ZHOU J, ZHANG Z P, ZHANG Y C, *et al.* Effects of lead stress on the growth, physiology, and cellular structure of privet seedlings[J]. PloS ONE, 2018, 13(3): e01911139.
- [11] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. 河南农业, 1998 (10): 28.
- [12] 马月花, 郭晓瑞, 杨 楠, 等. 黄芩幼苗对镉胁迫的生理响应机制[J]. 植物研究, 2019, 39 (4): 497-504.
- [13] 魏 畅, 焦秋娟, 柳海涛, 等. 镉暴露条件下玉米生长及根系构型分级特征研究[J]. 草业学报, 2022, 31 (3): 101-113.
- [14] 李 婷, 钟连香, 卢扬章, 等. 镉胁迫对格木幼苗生长及养分元素的影响[J]. 西部林业科学, 2020, 49 (4): 136-141.
- [15] 杨明洁, 张晓曼, 赵 蔓. 镉胁迫下根际促生菌对紫花地丁生长和镉含量的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35 (4): 831-839.
- [16] 刘喜建, 陈 刚, 胡红玲, 等. 镉胁迫下巨桉幼树的生长、养分含量变化及镉富集特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49 (3): 67-74,85.
- [17] 文 静, 胡红玲, 陈 洪, 等. 巨桉幼树对镉胁迫的光合生理响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50 (3): 30-39.
- [18] 杨滕希, 国伟强, 和文懿, 等. 火炬树幼苗对镉胁迫的生理响应及积累特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49 (3): 334-340.
- [19] FILEK M, GZYL-MALCHER B, ZEMBALA M, *et al.* Effect of selenium on characteristics of rape chloroplasts modified by cadmium[J]. Journal of plant physiology, 2010, 167(1): 28-33.
- [20] 王岑涅, 刘柿良, 李 勋, 等. 3种土壤类型下镉胁迫对红椿生物量分配及其镉富集特性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26 (9): 1591-1598.
- [21] 关广晟, 屠乃美, 肖汉乾, 等. 镁对烟草生长及叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (1): 151-155.
- [22] 唐星林, 刘 斌, 刘光正, 等. 氮肥对镉胁迫下龙葵叶绿素含量和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41 (6): 39-46.
- [23] 王 菲, 肖 雨, 程小毛, 等. 镉胁迫对吊兰及银边吊兰生长及镉富集特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (5): 1835-1844.
- [24] WU M, LUO Q, ZHAO Y, *et al.* Physiological and biochemical mechanisms preventing Cd toxicity in the new hyperaccumulator *Abelmoschus manihot*[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2018, 37(3): 709-718.
- [25] 金梦娇, 刘 博, 王抗抗, 等. 薇甘菊光能利用及叶绿素合成在不同光照强度下的响应[J]. 中国农业科学, 2022, 55 (12): 2347-2359.
- [26] 张栋栋, 李 萌, 甘 龙, 等. 重金属Cd-Cu复合污染对苍耳生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2019, 65 (1): 66-76.
- [27] LIU L Y, ZHANG Y J, JIAO Q J, *et al.* Assessing photosynthetic light-use efficiency using a solar-induced chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(11-12): 4264-4280.
- [28] 张春平, 周 慧, 何 平, 等. 外源5-氨基乙酰丙酮酸对盐胁迫下黄连幼苗光合参数及其叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报,

- 2014, 34 ( 12 ): 2515-2524.
- [29] ADAMS W W, DEMMIG-ADAMS B, ROSENSTIEL T N, *et al.* Dependence of photosynthesis and energy dissipation activity upon growth form and light environment during the winter[J]. *Photosynthesis Research*, 2001, 67(1): 51-62.
- [30] DĄBROWSKI P, PAWLUŚKIEWICZ B, BACZEWSKA A H, *et al.* Kalaji HMChlorophyll a fluorescence of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L. ) varieties under long term exposure to shade[J]. *Zemdirbyste*, 2015, 102: 305-312.
- [31] TUBA Z, SAXENA D K, SRIVASTAVA K, *et al.* Chlorophyll a fluorescence measurements for validating the tolerant bryophytes for heavy metal (Pb) biomapping[J]. *Curr Sci India*, 2010, 98(11): 1505-1508.
- [32] LI X, JI Y, SHENG Y, *et al.* Priming with the green leaf volatile (Z)-3-hexeny-1-yl acetate enhances drought resistance in wheat seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2022, 98(3): 477-490.
- [33] SANTOS R W, SCHMIDT É C, VIEIRA I C, *et al.* The effect of different concentrations of copper and lead on the morphology and physiology of *Hypnea musciformis* cultivated in vitro: a comparative analysis[J]. *Protoplasma*, 2015, 252(5): 1203-1215.
- [34] ÖQUIST G, HUNER N. Cold-hardening-induced resistance to photoinhibition of photosynthesis in winter rye is dependent upon an increased capacity for photosynthesis[J]. *Planta*, 1993, 189(1): 150-156.
- [35] 周 蛟, 潘远智, 赵 胤, 等. 黄果龙葵幼苗对镉胁迫的生理生长响应[J]. *广西植物*, 2022, 42 ( 4 ): 628-638.
- [36] 铁得祥, 胡红玲, 喻秀艳, 等. 桉楠幼树光合特性对镉胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40 ( 11 ): 3738-3746.
- [37] HETHERINGTON A M, WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. *Nature*, 2003, 424(6951): 901-908.
- [38] 李耀琪, 王志恒. 植物叶片形态的生态功能、地理分布与成因[J]. *植物生态学报*, 2021, 45 ( 10 ): 1154-1172.
- [39] 李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等. 遮荫对香果树叶片生理特性及叶肉细胞超微结构的影响[J]. *植物研究*, 2020, 40 ( 1 ): 29-40.
- [40] 龚明贵, 刘凯洋, 魏亚楠, 等. 镉胁迫下接种丛枝菌根真菌对棉花光合特性和叶肉细胞超微结构的影响[J]. *棉花学报*, 2022, 34 ( 3 ): 256-266.
- [41] BELLASIO C, QUIRK J, BEERLING D J. Stomatal and non-stomatal limitations in savanna trees and C4 grasses grown at low, ambient and high atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Plant Science*, 2018, 274: 181-192.
- [42] ZHOU S, DUURSMA R A, MEDLYN B E, *et al.* How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182: 204-214.

# Effects of Cadmium Stress on Growth and Photosynthetic Physiological Characteristics of *Robinia pseudoacacia* Seedlings

LIU Jin-xiu<sup>1</sup>, ZHANG Song-yan<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>

(1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China; 2. Henan Province Engineering Center of Horticultural Plant Resource Utilization and Germplasm Enhancement, Xinxiang 453003, Henan, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of cadmium (Cd) stress on the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia*. [Method] The characteristics on the growth, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, respiration rate and stomatal indices of Cd-stressed *R. pseudoacacia* seedlings were studied in this experiment. [Result] Under Cd stress, the stem diameter and plant height of these seedlings were obviously inhibited. The fresh weight and dry weight of treated plants with high concentration decreased, while those with low concentration increased slightly, but all the differences were insignificant between them and the control treatment. With an increase of cadmium concentration, the contents of chlorophyll a and total chlorophyll decreased, chlorophyll b and carotenoids changed irregularly, but there were insignificant differences between them and the control for *R. pseudoacacia* seedlings. However, the initial fluorescence ( $F_0$ ) and the maximum fluorescence yield ( $F_m$ ) increased first and then decreased. The maximum photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) gradually decreased, the non-photochemical quenching coefficient ( $qN$ ) gradually increased, and the actual photochemical quantum efficiencies ( $\Phi_{PSII}$ ) were all lower than the control with insignificant-difference for those stressed plants during this experiment. Simultaneously, the stomatal width and stomatal area decreased, the stomata gradually closed in the treated-seedlings, and their respiratory efficiency was significantly inhibited. It was shown that the most of indicators were significantly correlated each other by correlation analysis. Through random forest regression analysis, the importance of initial fluorescence ( $F_0$ ), root cadmium content, stomatal width and chlorophyll a were the strongest among chlorophyll fluorescence parameters, plant cadmium enrichment content, stomatal characteristics and photosynthetic pigments, respectively, and became the most critical factors affecting the photosynthetic function of *R. pseudoacacia* seedlings. [Conclusion] Although the growth and photosynthetic physiology of *R. pseudoacacia* seedlings are affected by cadmium concentration to some extent, the seedlings still show strong tolerance to cadmium stress. It provides a reference for garden application in cadmium polluted areas.

**Keywords:** cadmium stress; *Robinia pseudoacacia*; chlorophyll; chlorophyll fluorescence; stomata

(责任编辑: 张 研)