



梁泽锐,梁芳,刘冰,等.镉胁迫对红花玉蕊矿质元素含量的影响及相关性分析[J].黑龙江农业科学,2020(5):51-56.

镉胁迫对红花玉蕊矿质元素含量的影响及相关性分析

梁泽锐¹,梁芳¹,刘冰¹,檀小辉²,黄兰清¹,招敏萍¹,李佳¹,屈子钰¹

(1. 玉林师范学院,广西玉林 537000;2. 广西壮族自治区亚热带作物研究所,广西南宁 530001)

摘要:为筛选适宜镉污染土壤的园林湿生植物树种,以二年生红花玉蕊为试验材料,模拟全日潮、设置不同 Cd^{2+} 浓度对红花玉蕊进行处理,胁迫 60 d 后测定植株叶片中的矿质元素含量且进行相关性分析。结果表明:0~100 $mg \cdot kg^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫下的红花玉蕊植株生长发育正常,叶片中 N、P、K、Fe、Cu 元素含量随着 Cd^{2+} 浓度的增加均呈先升高后下降的趋势,各元素出现吸收高峰值在 Cd^{2+} 浓度 25~75 $mg \cdot kg^{-1}$,其中,N、K、Fe、Cu 含量的低峰值在 100 $mg \cdot kg^{-1}$,较对照组均呈显著差异($P < 0.05$),P 含量较对照组无显著差异。此外,不同 Cd^{2+} 浓度与 N、K、Fe、Cu 呈负相关,与 P 呈正相关,但均不显著。可见 Cd^{2+} 胁迫下红花玉蕊对矿质元素 N、P、K、Fe、Cu 的吸收有一定程度的影响,整体呈低浓度促进,高浓度抑制的现象,但并不影响植株正常生长发育,表明红花玉蕊对 0~75 $mg \cdot kg^{-1}$ 的 Cd^{2+} 胁迫有较好的耐受性,在城市内河或湖泊受镉金属污染地段的景观绿化、生态修复、植物群落多样性等有一定的园林应用前景。

关键词:红花玉蕊;镉胁迫;矿质元素;相关性分析

随着人类社会经济的发展,河流和农田等重金属污染日益严重,造成大量农作物的生境减少以及生长状态减弱。就我国而言,已有 11 个省市的 25 个地区受 Cd 污染^[1]。以广西玉林市的母亲河南流江为例,南流江是广西流程最长、流域面积最大的独流入海河流,但随着人类活动愈加频繁地进入该河岸环境,南流江日益遭受居民生活用水、工业废水和牲畜养殖的污染^[2],全流域河岸带土壤整体上处于重度污染水平,其中镉污染最为严重^[3], Cd^{2+} 能在动植物体内富集,通过食物链被人体吸收和积累,对人类的健康造成威胁^[4],因此,解决南流江的 Cd^{2+} 污染迫在眉睫。

关于湿生植物对于改善重金属污染的研究,我国学者已取得一定的研究成果,如王红镔等^[5]发现圆果雀稗(*Paspalum orbiculare*)对重金属 Cd、Zn 有转移和富集能力,查建军^[6]发现黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、美人蕉(*Canna indica*)对酸性矿山废水重金属污染具有修复意义,张彧等^[7]发现香蒲和菖蒲可以通过富集 As、Hg 来修复污

染水体,施雪黎^[8]发现湿生植物对沿河沿江等湿生地区重金属土壤的修复作用。综上所述表明湿生植物对于河岸带重金属污染的改善有重要作用,对合理规划城市景观和生物修复技术手段、保护环境等有着非常重要的意义。

园林树木不但能美化环境,还能吸收和净化城市生态系统的重金属^[9]。红花玉蕊(*Bar-ringtonia acutangula*)为玉蕊科玉蕊属植物,乔木,常生长于潮湿的地方,具有一定的抗涝能力^[10],是观赏性极佳的园林树木,可营造湿地景观^[11]。随着我国的技术和经济的发展,园林植物观赏需求多元化,国内广东、福建、海南、广西等省份的城市滨水景观、湿地公园绿地等景观类型加大对红花玉蕊的应用,国内梁芳等^[12-13]学者对红花玉蕊淹水、盐度胁迫的生理生化应答机制做了相关研究,但红花玉蕊对重金属镉胁迫的矿质元素变化规律及生长发育情况相关报道较少。本试验初步研究了镉(Cd^{2+})胁迫下红花玉蕊叶片矿质元素含量硝态氮(N)、有效磷(P)、速效钾(K)、铁(Fe)、铜(Cu)的变化规律与植物耐镉能力相关性,为筛选适宜镉污染土壤的园林湿生植物树种选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

红花玉蕊种子于 2017 年 9 月采自广西壮族自治区崇左市龙州县,种子饱满无病虫害,随采随

收稿日期:2020-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(31660226);广西高校中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB361);大学生创新创业训练计划项目(自治区级)(201910606170)。

第一作者:梁泽锐(1998-),女,在读学士,专业为植物营养调控。E-mail:lzrbjy@foxmail.com。

通信作者:梁芳(1984-),女,硕士,副教授,从事园林植物抗逆生理及繁殖管护研究。E-mail:liangfang360@163.com。

播于荫棚沙床上,待苗高约 10 cm 时起苗移入 13 cm×20 cm 营养袋中,每袋 2 株,种植土为果园土与椰糠(体积比 1:1),装好置于玉林师范学院温室大棚中正常管护后备用。本试验选取株高约 40 cm,生长健壮无病虫害的 2 年生红花玉蕊实生苗为试验苗,试验在玉林师范学院温室大棚中进行,起止时间为 2019 年 6 月 1 日至 7 月 31 日,试验期间大棚的温度为 30.1℃,平均湿度为 86.9%。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验采用储水槽、植物培养槽、定时器、水泵、过滤系统、补光系统及遮阴系统等组成模拟潮汐自动控制装置,将红花玉蕊幼苗放于处理槽中,不同浓度的 Cd^{2+} 溶液倒入储水槽中,每个处理槽和储水槽中都配置一个定时器和水泵,采用定时器来自动控制各处理槽和储水槽里水泵的抽取溶液时间,模拟全日潮,植株淹浸水位为地径高,每天淹 6 h,进行不同浓度 0(CK), 25, 50, 75, 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 胁迫。试验每处理 18 株,3 个重复。每 14 d 施加一次 Cd^{2+} 溶液(施加的量和初始浓度一样),施加两次 Cd^{2+} 溶液后不再添加。处理 60 d 后采样并测定各元素含量。

1.2.2 测定项目及方法 试验结束后,取红花玉蕊幼苗新鲜叶片剪成 1~2 mm 碎片并放入研钵中研磨均匀直至出汁,使用针筒抽取出汁液,即取得植物原汁液;用胶头滴管取原汁液两滴置于量筒中,加蒸馏水定容至 100 mL[测硝态氮(N)、有效磷(P)、有效钾(K)时]或 50 mL(测 Fe、Cu 时)得到稀释 100 倍或 50 倍的待测液,再根据元素种类加入相对应的药品到待测液中与待测液反应,反应结束后使用 JN-G02 型高智能多参数土壤肥料养分检测仪(由郑州锦农科技有限公司生产)测定。

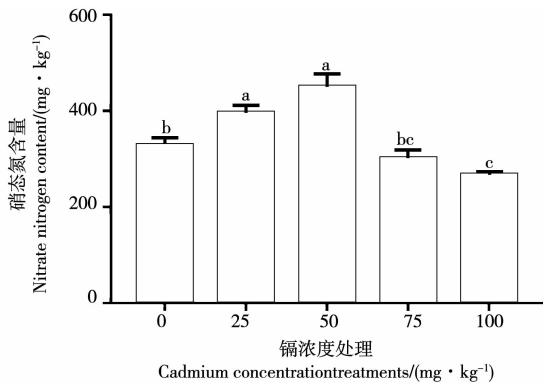
1.2.3 数据分析 采用 Excel 2010 进行初始数据的整理,采用 SPSS 19.0 进行数据分析,采用 GraphPad Prism 7.0 软件分析作图,平均值间的比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用邓肯多重范围检验(Duncan's multiple range test),显著性检验水平均设置为 0.05。

2 结果与分析

2.1 硝态氮含量

如图 1 所示,红花玉蕊叶片硝态氮含量随着

Cd^{2+} 浓度的增大呈先升高后下降的趋势,其中, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组较 CK 呈显著差异($P<0.05$),为 CK 的 120.6%,50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的氮含量达到了试验的最大值,较 CK 呈显著差异($P<0.05$),为 CK 的 137.5%,75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的花玉蕊硝态氮含量较 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组显著下降,在 Cd^{2+} 浓度达到最大值(100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,硝态氮含量为最低值。说明 Cd^{2+} 浓度胁迫对硝态氮含量可能呈低浓度促进高浓度抑制的现象。



不同小写字母表示差异显著性($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference($P<0.05$)

图 1 镉胁迫对红花玉蕊幼苗叶片氮含量的影响

Fig. 1 Effects of cadmium stress on nitrogen content in leaves of *Barringtonia acutangula* seedlings

2.2 有效磷含量

如图 2 所示,红花玉蕊的有效磷元素含量随着 Cd^{2+} 浓度的增大整体上呈先升高后下降的趋势,其中,25 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的含量与 CK 相差不大,而 50 和 75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的有效磷含量较其他三组显著增加($P<0.05$),且 75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理的有效磷含量达到了本试验的峰值,为 CK 的 190.98%,因此 50 和 75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 胁迫对红花玉蕊有效磷的影响最大。

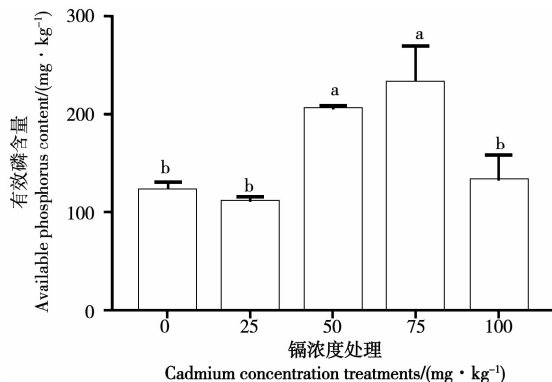


图 2 镉胁迫对红花玉蕊幼苗叶片磷含量的影响

Fig. 2 Effects of cadmium stress on phosphorus content in leaves of *Barringtonia acutangula* seedlings

2.3 速效钾含量

如图 3 所示, Cd^{2+} 处理下的红花玉蕊速效钾含量随着 Cd^{2+} 浓度的增大呈先升高后下降的趋势, 其 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的速效钾含量是本试验的最大值, 大于该浓度的处理组的速效钾含量随着 Cd^{2+} 浓度的增大而下降, 在 Cd^{2+} 浓度达到最大值(100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时, 速效钾含量为最低值。与 CK 相比, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的速效钾含量虽有所上升, 但不显著, 而 50, 75 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的速效钾呈持续下降的趋势, 均低于 CK 且与 CK 呈显著差异 ($P<0.05$), 50, 75 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的速效钾含量分别为对照组的 86.8%、76.8% 和 54.5%。因此, 高浓度 Cd^{2+} 处理对红花玉蕊对速效钾的吸收有较大的抑制作用, 且这种抑制作用随浓度的增大而愈加明显。

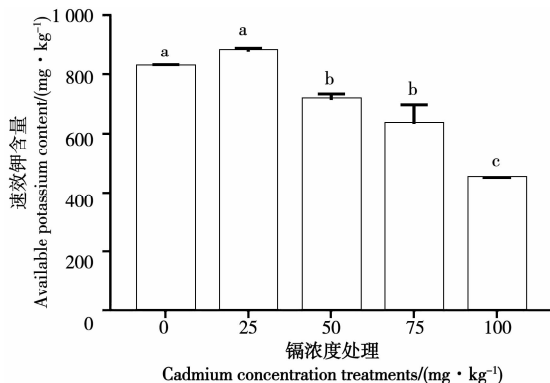


图 3 镉胁迫对红花玉蕊幼苗叶片钾含量的影响

Fig. 3 Effects of cadmium stress on potassium content in leaves of *Barringtonia acutangula* seedlings

2.4 Fe 含量

如图 4 所示, 红花玉蕊 Fe 含量随着 Cd^{2+} 浓度增大呈先升高后下降的趋势, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的 Fe 含量为最大值, 大于该浓度的处理 Fe 含量随 Cd^{2+} 浓度的增大而减少, 镉浓度 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理的 Fe 含量是本试验的最小值。其中, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理组的 Fe 元素含量较 CK 明显升高且呈显著差异 ($P<0.05$), 是 CK 的 119.4%, 而 Cd^{2+} 浓度达到 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后, 红花玉蕊 Fe 元素的吸收开始受到抑制, 50~100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的 Fe 含量持续下降, 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Fe 含量为最低值, 与 CK 呈显著差异 ($P<0.05$), 为 CK 的 80.8%。整体的变化趋势幅度没有 N、P、K 元素的高, Cd^{2+} 对 Fe 的影响比较小。

2.5 Cu 含量

如图 5 所示, 不同浓度 Cd^{2+} 处理下的红花玉

蕊 Cu 含量呈先增后降的趋势, 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的 Cu 含量为本试验的最大值, 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的 Cu 含量为本试验的最低值。其中, 与 CK 相比, 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组和 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组的 Cu 含量均上升了, 但不显著, 以 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为临界点, 大于该浓度的处理组的 Cu 含量均随 Cd^{2+} 浓度的增大而减少, 且 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理组与 CK 呈显著差异 ($P<0.05$), 为 CK 的 85.1%。因此, 低浓度的 Cd^{2+} 胁迫对红花玉蕊 Cu 含量的影响并不大, 高浓度的 Cd^{2+} 胁迫则会抑制红花玉蕊对 Cu 元素的吸收, 整体上的影响没有 N、P、K 明显。

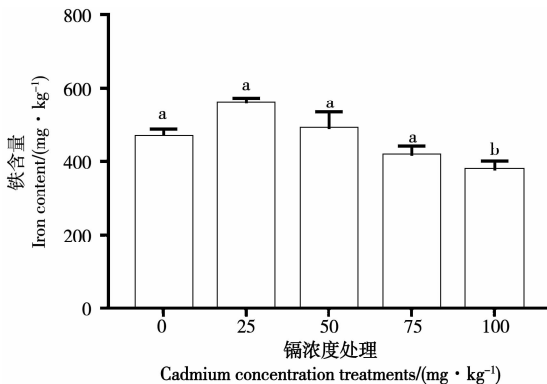


图 4 镉胁迫对红花玉蕊幼苗叶片铁含量的影响

Fig. 4 Effects of cadmium stress on iron content in leaves of *Barringtonia acutangula* seedlings

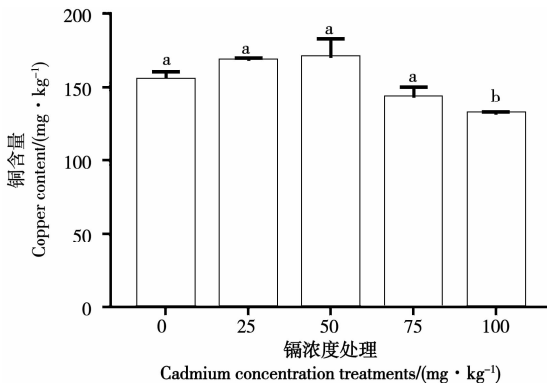


图 5 镉胁迫对红花玉蕊幼苗叶片铜含量的影响

Fig. 5 Effects of cadmium stress on copper content in leaves of *Barringtonia acutangula* seedlings

2.6 不同元素之间的相关性

由表 1 可以看出, 不同浓度的 Cd^{2+} 处理与红花玉蕊的 N、K、Fe、Cu 含量呈负相关, 与 P 呈正相关, 但均不显著。此外, 控制 Cd^{2+} 浓度变量进行偏相关性分析可以看出, 同一 Cd^{2+} 浓度处理的红花玉蕊的各个矿质元素含量之间均呈不显著正相关, 说明这些浓度的 Cd^{2+} 胁迫对红花玉蕊的影响并不显著, 红花玉蕊对外来 Cd^{2+} 胁迫有一定的抗性。

表 1 不同浓度 Cd²⁺ 处理下红花玉蕊矿质元素的相关性分析

Table 1 Correlation analysis on mineral elements of *Barringtonia acutangula* under different concentration of Cd²⁺

控制变量 Control variable			N 含量 N content	P 含量 P content	K 含量 K content	Fe 含量 Fe content	Cu 含量 Cu content	Cd ²⁺ 浓度 Concentration of Cd ²⁺
-无 ^a	N 含量	相关性	1.000	0.029	0.540	0.647	0.540	-0.430
		显著性(双侧)	0.000	0.917	0.038	0.009	0.038	0.109
		df	0	13	13	13	13	13
	P 含量	相关性	0.029	1.000	-0.150	-0.182	-0.150	0.360
		显著性(双侧)	0.917	0.000	0.594	0.517	0.594	0.188
		df	13	0	13	13	13	13
	K 含量	相关性	0.540	-0.150	1.000	0.818	10.000	-0.894
		显著性(双侧)	0.038	0.594	0.000	0.000	0.000	0.000
		df	13	13	0	13	13	13
	Fe 含量	相关性	0.647	-0.182	0.818	1.000	0.818	-0.614
		显著性(双侧)	0.009	0.517	0.000	0.000	0.000	0.015
		df	13	13	13	0	13	13
	Cu 含量	相关性	0.540	-0.150	10.000	0.818	1.000	-0.894
		显著性(双侧)	0.038	0.594	0.000	0.000	0.000	0.000
		df	13	13	13	13	0	13
	Cd ²⁺ 浓度	相关性	-0.430	0.360	-0.894	-0.614	-0.894	1.000
		显著性(双侧)	0.109	0.188	0.000	0.015	0.000	0.000
		df	13	13	13	13	13	0
Cd ²⁺ 浓度 ^b Concentration of Cd ²⁺	N 含量	相关性	1.000	0.219	0.385	0.538	0.385	
		显著性(双侧)	0.000	0.453	0.174	0.047	0.174	
		df	0	12	12	12	12	
	P 含量	相关性	0.219	1.000	0.411	0.053	0.411	
		显著性(双侧)	0.453	0.000	0.144	0.857	0.144	
		df	12	0	12	12	12	
	K 含量	相关性	0.385	0.411	1.000	0.760	10.000	
		显著性(双侧)	0.174	0.144	0.000	0.002	0.000	
		df	12	12	0	12	12	
	Fe 含量	相关性	0.538	0.053	0.760	1.000	0.760	
		显著性(双侧)	0.047	0.857	0.002	0.000	0.002	
		df	12	12	12	0	12	
	Cu 含量	相关性	0.385	0.411	10.000	0.760	1.000	
		显著性(双侧)	0.174	0.144	0.000	0.002	0.000	
		df	12	12	12	12	0	

注:a. 单元格包含零阶(Pearson)相关。b. Cd²⁺ 浓度单元格为偏相关性。

Note:a. The cell contains Pearson correlation. b. The cell of Cd²⁺ concentration is partial correlation.

3 结论与讨论

3.1 结论

综上试验结果得知,Cd²⁺ 胁迫下红花玉蕊对矿质元素 N、P、K、Fe、Cu 的吸收有一定程度的影

响,整体呈低浓度促进,高浓度抑制的现象,但并不影响其正常生长发育,表明红花玉蕊对 0~75 mg·kg⁻¹浓度范围内的 Cd²⁺ 胁迫有较好的耐受性,在城市内河或湖泊受镉金属污染地段的景

观绿化、生态修复、植物群落多样性等有一定的园林应用前景。

3.2 讨论

在被污染的自然环境中,植物不仅吸收土壤中的Fe、Cu等必需金属元素,还会吸收非必需重金属元素如Cd^[14],Cd毒害植物后,不仅会影响植物的光合速率^[15-16],还会抑制根部吸收积累的矿质元素向上运输物质的通道^[17],影响植物对矿质元素的吸收、转运和分配能力^[18-20],而矿质元素又能反过来缓解Cd对植物的毒害作用^[21-22]。

本试验发现,低浓度的Cd²⁺处理会促进红花玉蕊对N的吸收,而高浓度Cd²⁺会抑制吸收,有研究表明重金属会影响植物对氮素的吸收和利用的能力,相反植物体内的氮素又能反过来拮抗Cd²⁺对自身的毒害作用^[23]。而高浓度的Cd²⁺降低了红花玉蕊的N含量,可能与NRT1和NRT2运输载体以及NO的形成有关^[24]。

在矿质元素P的吸收方面,表现为高浓度促进,低浓度抑制的趋势,有研究表明,P可以降低植物对Cd²⁺的吸收,抑制Cd²⁺对植物的毒害^[25-26],因此低浓度的Cd²⁺胁迫下,红花玉蕊通过提高对P的吸收来拮抗Cd²⁺对自身的毒害。

Cd²⁺胁迫下红花玉蕊对K的吸收在浓度0~25 mg·kg⁻¹有促进作用,相对高浓度则起抑制作用,这与胡倩^[27]和谢亚兵等^[28]的研究一致,李隼等^[29]研究表明,Cd²⁺浓度的提升会抑制植物对K的吸收并诱导钾离子外排,导致K含量下降。

对于矿质元素Fe、Cu而言,本试验发现相对低浓度的Cd²⁺会促进红花玉蕊幼苗对Fe、Cu的吸收,相对高浓度则抑制,与胡铁柱等^[30]的研究一致,且Cd²⁺浓度最大处理组含量最低,低浓度Cd²⁺胁迫下的红花玉蕊幼苗Fe、Cu含量提高可能是由于Cd²⁺与Fe、Cu的电子价位相同,它们存在交互作用,Fe、Cu对于低浓度的Cd²⁺胁迫具有一定的缓解作用^[31],相对高浓度抑制了Fe的吸收可能是由于根系细胞膜系统透性增加,细胞内的小分子物质向外流,抑制了细胞对矿质元素的主动吸收^[32]。

通过分析Cd²⁺胁迫处理下红花玉蕊叶片矿质元素的相关性,发现不同浓度的Cd²⁺处理与红花玉蕊的N、K、Fe、Cu呈负相关,与P呈正相关,但相关性均不显著,表明Cd²⁺在一定程度上抑制红花玉蕊对矿质元素N、K、Fe、Cu的吸收,促进P的吸收。此外,控制Cd²⁺浓度变量进行偏相关

性分析可以看出,在Cd²⁺胁迫下的红花玉蕊的各个矿质元素含量均呈不显著正偏相关,说明红花玉蕊有一定的耐Cd²⁺特性,能够通过调节自身的矿质元素来应对外界胁迫。

镉胁迫对植物矿质元素含量的影响程度依植物自身及Cd²⁺浓度大小而异,本试验发现低浓度Cd²⁺处理下的红花玉蕊N、P、K、Fe、Cu含量均有提高,可能是因为植物通过调控这些元素来减少对Cd²⁺的吸收,从而避免Cd²⁺对植株的毒害^[33],但植物自身调控能力是有限的,因此随着胁迫程度的增大,达到一定浓度,各元素的吸收开始受到抑制,含量逐渐下降。植物吸收、转运和积累Cd²⁺的机理十分复杂,受多因素、多基因共同调控^[34]。关于红花玉蕊是否具有更多调控元素来缓解Cd²⁺胁迫的能力、调控能力范围、以及镉胁迫下植株的生理生化响应机制、分子调控机制等均有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 龚伟群,潘根兴.中国水稻生产中Cd吸收及其健康风险的有关问题[J].科技导报,2006,24(5):43-48.
- [2] 王峰.南流江流域水污染排放特征分析——基于KEC与Lorenz曲线[J].人民珠江,2018(8):33-36.
- [3] 陈刚,赵银军,胡宝清,等.河岸带重金属时空变化与土壤环境质量分析[J].环境污染与防治,2017(9):981-986.
- [4] 林晓敏,朱健,汤思敏,等.一株耐Cd罗尔斯通氏菌的分离、鉴定及其对Cd²⁺的吸附特性研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(6):10-16.
- [5] 潘义宏,王宏锭,谷兆萍,等.大型水生植物对重金属的富集与转移[J].生态学报,2010(23):6430-6441.
- [6] 查建军.酸性矿山废水污染对农田土壤理化性质的影响及五种湿生植物的耐受性研究[D].合肥:安徽大学,2019.
- [7] 张彧,林海,董颖博,等.几种水生植物对砷、汞复合污染水体的富集特征研究[J].金属世界,2018(4):15-19.
- [8] 施雪黎.水湿生植物中Cd和Pb的积累研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [9] 兰欣宇,解莹然,程佳雪,等.北京园林绿地29种树木3种重金属含量的比较[J].中南林业科技大学学报,2019(9):115-121.
- [10] 宋莉英,黎昌汉.珍奇的庭园树木——4种外来玉蕊科植物[J].广东园林,2009(3):51-53.
- [11] 梁芳,黄寿谔,于艳萍,等.红花玉蕊对淡水全淹胁迫的生长及生理响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2019(3):18-25.
- [12] 梁芳,卜小英,黄秋伟,等.水淹对红花玉蕊幼苗生长及生理特性的影响[J].西北林学院学报,2019(2):48-55.
- [13] 梁芳,黄秋伟,檀小辉,等.潮汐系统下不同盐度水体对红花玉蕊幼苗生理特性的影响[J].南方农业学报,2018(11):2250-2255.
- [14] 刘春梅,罗盛国,王孟雪,等.硒对镉胁迫下寒地水稻Cd、

- Zn、Fe、Cu、Mn 含量的影响[J]. 水土保持学报, 2014(6): 136-142.
- [15] 贺国强, 刘茜, 郭振楠, 等. 镉胁迫对烤烟叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 华北农学报, 2016(S1): 388-393.
- [16] 唐星林, 金洪平, 周晨, 等. 镉胁迫对龙葵叶绿素荧光和光合生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019(9): 102-108.
- [17] 杨春刚, 朱智伟, 章秀福, 等. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系[J]. 中国农学通报, 2005(11): 176-178.
- [18] 马月花, 郭晓瑞, 杨楠, 等. 黄苡幼苗对镉胁迫的生理响应机制[J]. 植物研究, 2019(4): 497-504.
- [19] 陈京都, 何理, 许轲, 等. 镉胁迫对不同基因型水稻生长及矿质营养元素吸收的影响[J]. 生态学杂志, 2013(12): 3219-3225.
- [20] 代邹, 王春雨, 李娜, 等. 硒、硅配施对镉胁迫下杂交稻中镉及矿质元素的影响[J]. 中国农业科技导报, 2017(1): 108-117.
- [21] 姚慧, 蔡庆生. 缓解植物重金属胁迫伤害的途径及其机理[J]. 浙江农业科学, 2011(1): 144-147.
- [22] 余玮, 崔国贤, 赵丹博, 等. 锌、铁缺失对苧麻吸收及转运重金属镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014(2): 283-287.
- [23] 安志装, 王校常, 施卫明, 等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J]. 土壤与环境, 2002(4): 392-396.
- [24] Miller A J, Shen Q, Xu G. Freeways in the plant: transporters for N, P and S and their regulation[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12: 284-290.
- [25] 董善辉, 李军, 赵梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010(9): 39-43.
- [26] 李桃, 李军, 韩颖, 等. 磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017(9): 1712-1718.
- [27] 胡倩. 海南风吹楠苗木对镉和铅胁迫的响应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [28] 谢亚兵, 林铃, 叶兴状, 等. Cd、Pb 单一胁迫对芳樟矿物质元素及叶绿素含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2017(24): 14-17.
- [29] 李隼, 黄胜东, 赵福庚. 重金属镉对水稻根毛细胞钾离子吸收过程的影响[J]. 植物生理学报, 2011(5): 481-487.
- [30] 胡铁柱, 冯素伟, 丁位华, 等. 镉对不同镉积累类型小麦幼苗的影响[J]. 江苏农业科学, 2018(19): 46-49.
- [31] 陈美静, 刘倩雯, 李雪妹, 等. 重金属胁迫与植物矿质元素交互作用的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2016(9): 2181-2184.
- [32] Gussarsson M, ASP H, Adalsteinsson S, et al. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulfoximine (BSO)[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(2): 211-215.
- [33] 赵巍, 张联合, 郁飞燕, 等. 镉对水稻幼苗累积微量元素的影响[J]. 山东农业科学, 2011(11): 63-66.
- [34] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J]. 生命科学研究, 2015(2): 176-184.

Effects of Cadmium Stress on the Content of Mineral Elements in the Leaf of *Barringtonia acutangula* and Its Correlation Analysis

LIANG Ze-rui¹, LIANG Fang¹, LIU Bing¹, TAN Xiao-hui², HUANG Lan-qing¹, ZHAO Min-ping¹, LI Jia¹, QU Zi-yu¹

(1. Yulin Normal University, Yulin 530700, China; 2. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China)

Abstract: In order to screen the garden plants suitable for cadmium polluted soil, the relationship between the changes of nitrate nitrogen (N), available phosphorus (P), available potassium (K), iron (Fe), copper (Cu) and cadmium tolerance of plants under Cd^{2+} stress was studied. Two year old *Barringtonia acutangula* was used as the experimental material to simulate the diurnal tide and set different concentration of Cd^{2+} to *Barringtonia acutangula*. The content of mineral elements in leaves of plants was measured and correlation analysis was carried out after 60 days of stress. The results showed that the plant growth and development were normal under the stress of 0-100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} , the contents of N, P, K, Fe and Cu in leaves increased first and then decreased with the increase of Cd^{2+} , the highest absorption peak of each element was 25-75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} , and the low peak of N, K, Fe and Cu was 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was significantly different from the control group. There was no significant difference in P content between the two groups. In addition, different concentrations of Cd^{2+} were negatively correlated with N, K, Fe, Cu and positively correlated with P, but not significantly. It could be seen that *Barringtonia acutangula* had a certain degree of influence on the absorption of mineral elements N, P, K, Fe, Cu under Cd^{2+} stress, which was generally promoted by low concentration and inhibited by high concentration, but does not affect the normal growth and development of plants, indicating that *Barringtonia acutangula* had a good tolerance to Cd^{2+} stress within the concentration range of less than 75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and landscape greening in urban rivers or lakes polluted by cadmium metal, ecological restoration, plant community diversity and so on have certain landscape application prospects.

Keywords: *Barringtonia acutangula*; cadmium stress; mineral elements; correlation analysis