

王 岚, 戴闽玥, 严重玲. 磷镉交互作用对白骨壤幼苗体内镉的亚细胞分布和生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 640–646.

WANG Lan, DAI Min-yue, YAN Chong-ling. Effects of phosphorus and cadmium interaction on cadmium subcellular distribution and physiological characteristics in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 640–646.

磷镉交互作用对白骨壤幼苗体内镉的亚细胞分布和生理特性的影响

王 岚¹, 戴闽玥², 严重玲^{2*}

(1. 铜仁学院农林工程与规划学院, 贵州 铜仁 554300; 2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘 要:为研究镉(Cd)和磷(P)交互作用对白骨壤幼苗体内 Cd 亚细胞分布和生理特性的影响,以一年生白骨壤幼苗为试验材料,采用差速离心法提取不同亚细胞组分, 氮蓝四唑法、愈创木酚法、分光光度法和考马斯亮蓝 G-250 法分别测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和叶绿素、蛋白质含量。结果表明:随着 Cd 浓度的增加,白骨壤幼苗体内各亚细胞组分的 Cd 含量逐渐增加,其中细胞壁和可溶性组分中 Cd 含量增加较多,就分布而言,大部分的 Cd(占整个植株的 65.23%~96.92%)分布于白骨壤幼苗的根部。Cd 集中分布于根中,表明细胞壁的固定及液泡区室化是白骨壤幼苗对 Cd 的解毒机制之一。研究也发现:外源 P 能促使 Cd 向液泡转移,同时提升了植株的抗氧化能力,表现为白骨壤植株 SOD、POD 活性增加、叶绿素和蛋白质含量升高。外源 P 能够缓解 Cd 对红树植物白骨壤的影响,增强白骨壤对 Cd 的耐受能力。

关键词:磷; 镉; 白骨壤; 亚细胞分布; 生理特性

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)04-0640-07 doi:10.11654/jaes.2017-1193

Effects of phosphorus and cadmium interaction on cadmium subcellular distribution and physiological characteristics in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh seedlings

WANG Lan¹, DAI Min-yue², YAN Chong-ling^{2*}

(1. School of Agriculture and Forestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren 554300, China; 2. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: A hydroponic experiment was carried out to study the effects of phosphorus and cadmium interaction on cadmium subcellular distribution and physiological characteristics in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh seedlings. *Avicennia marina* seedlings were used as the test materials. Four extraction methods; differential speed centrifugation, nitroblue tetrazolium, guaiacol, spectrophotometry and coomassie, were respectively adopted to determine the activity of SOD and POD, together with the chlorophyll and protein content. The results showed that increased Cd level in the medium caused a significant increase of Cd concentration in all fractions of leaves and roots, with most accumulation in the cell wall and soluble fraction. The content of Cd in roots was significantly higher than that in leaves, accounting for 65.23% ~ 96.92%. Cellular compartmentation was one of the Cd detoxification mechanisms. Phosphorous could promote Cd transfer to the vacuole. With increasing P level, SOD, POD activities, chlorophyll and protein content also increased to alleviate the toxicity of Cd in *A. marina* seedlings to a certain extent, and thus increased the Cd tolerance of *A. marina* seedlings.

Keywords: phosphorus; cadmium; *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh; subcellular distribution; physiological characteristics

收稿日期: 2017-09-01 录用日期: 2017-12-13

作者简介: 王 岚(1983—), 女, 贵州人, 副教授, 从事植物学、植物生理学的教学和科研工作。E-mail: wanglantru@163.com

* 通信作者: 严重玲 E-mail: ycl@xmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(31530008)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(31530008)

镉(Cd)是毒性很强、移动性大的重金属之一,广泛存在于土壤和水体中,容易在生物体内富集,对生物危害很大^[1-2]。红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,在维持生态平衡和环境保护方面起着重要作用^[3]。随着工业化的快速发展,大量污水排放,近海水域及红树林等面临着严重的重金属 Cd 污染问题^[4]。有研究人员报道过红树林湿地沉积物中 Cd 含量范围为 0.06~0.98 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[5],Wu 等^[6]研究表明漳江口红树林可利用磷为 $(28.41\pm 1.07)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可利用氮 $(97.85\pm 4.67)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。磷(P)是植物生长发育不可缺少的大量元素之一,参与植物体内多种化合物的形成以及代谢调控,施加 P 肥能降低 Cd 的有效性^[7],缓解 Cd 对植物的毒害作用^[8]。

大量研究表明,细胞壁的固定和液泡区室化在植物应对重金属的毒性方面起着相当重要的作用^[3,9]。Cd 在植物体中主要积累在细胞壁和细胞可溶部分,说明细胞壁是植物对 Cd 解毒的首要屏障,Cd²⁺进入细胞后主要富集在液泡中,使得其他细胞器免受毒害^[10-13]。植物在抗 Cd 的胁迫中,抗氧化酶的作用不容忽视。Cd 导致活性氧(ROS)生成而对植物产生伤害,植物通过抗氧化酶类(如 SOD、POD 等)逐步形成保护机制来减轻或消除 ROS 对植物的伤害^[14-15]。

白骨壤[*Avicennia marina*(Forsk.) Vierh]是主要的红树植物之一,也是红树林植物群落的主要树种之一,对重金属污染的耐受性较强。目前,有关重金属 Cd 对白骨壤的研究主要集中在 Cd 对白骨壤胁迫下幼苗的生理生态特性、钾钠镁吸收和分配、Si 对 Cd 胁迫下白骨壤幼苗低分子质量有机酸代谢和 Cd 胁迫对白骨壤幼苗生理影响等方面^[16-17],有关 P、Cd 交互作用下白骨壤幼苗不同细胞器对重金属区域化固定和生理特性的研究尚未见报道。因此,本文选取白骨壤为材料,采用溶液培养,进行 Cd 和 P 交互处理,研究不同浓度 P 对 Cd 胁迫下白骨壤幼苗体内 Cd 亚细胞分布、抗氧化酶、叶绿素和蛋白质含量的影响,以说明 P 存在情况下 Cd 在白骨壤幼苗体内的分布及部分生理变化,从而缓解 Cd 的毒性,为红树林湿地环境安全与削减重金属污染提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

白骨壤成熟胚轴采集于福建漳江口红树林国家级自然保护区(东经 117°24',北纬 23°53'),沙培 120 d,培养期间统一管理。待白骨壤幼苗子叶完全枯黄掉

落后,先后采用 1/4、1/2、全 Hoagland 营养液依次进行培养直至第 3 对叶子成熟,调节营养液盐浓度为 1%,pH 控制在 6.5 左右(采用 NaOH 或 HCl 溶液调节)。选取长势一致、规格相同的白骨壤幼苗移栽至口径 15 cm、底内径 10 cm、深 20 cm 的塑料小桶中,用 Hoagland 营养液进行适应性培养 7 d,然后进行不同浓度的 Cd、P 交互处理。试验设定 9 个处理,即 Cd(0、0.5、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),P(0、30、90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),每个处理重复 3 盆,每盆 3 株,浓度搭配如表 1。实验期间,每 3 d 更换含 Cd 和 P 的营养液,处理 30 d 后收苗。收苗时白骨壤幼苗根系用 Mini-Q 超纯水冲洗,用滤纸吸干植物体表面水分,根和叶分别用于不同亚细胞组分 Cd 含量、抗氧化酶活性和蛋白质含量以及对白骨壤叶片中叶绿素的测定。

表 1 Cd、P 交互处理

Table 1 The treatments of Cd and P

处理	Cd(0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd(0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd(5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
P(0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd0P0	Cd0.5P0	Cd5P0
P(30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd0P30	Cd0.5P30	Cd5P30
P(90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd0P90	Cd0.5P90	Cd5P90

1.2 试验方法

1.2.1 不同亚细胞组分的提取及测定

利用差速离心法提取不同亚细胞组分^[18]。分别称取 0.50 g 根和叶鲜样,加入 10 mL 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl 缓冲溶液(pH 7.4)、250 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖和 1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 二硫赤藓糖醇(DTE)的混合液,研磨成匀浆后转至离心管,500 $\times$ g 离心 10 min,沉淀为细胞壁组分,上清液继续在 10 000 $\times$ g 下离心 10 min,沉淀为含叶绿体和细胞核组分,上清液继续在 18 000 $\times$ g 下离心 10 min,沉淀为线粒体组分,上清液为可溶性组分。全部操作在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下进行。所有组分用 10 mL 混酸(硝酸:H₂O₂=2:1,V:V) 145 $^{\circ}\text{C}$ 消化 4 h,超纯水定容至 40 mL,用 0.22 μm 滤膜过滤,电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS(PerkinElmer,UK)测定各亚细胞 Cd 含量。

1.2.2 抗氧化酶活性的测定

参照李合生等^[19]的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)(氮蓝四唑法)和过氧化物酶(POD)活性(愈创木酚法)。

1.2.3 叶绿素含量的测定

参照张雯^[9]的方法测定叶绿素含量。去除白骨壤叶片主脉,称取 0.10 g 鲜样,将样品剪碎后置于带塞玻璃试管,加入 5 mL 丙酮和乙醇混合液(V:V=1:1),

避光放置 24 h 直至组织完全变白,3000 r·min⁻¹ 离心 10 min,分别在 663 nm 和 645 nm 处测定 OD 值,测定叶绿素 a、b 含量,并计算总叶绿素和叶绿素 a/b。

1.2.4 蛋白质含量的测定

蛋白质含量的测定参照李合生等^[19]的考马斯亮蓝 G-250 法。

1.3 数据分析

采用 Excel 2013 制作图表,SPSS 17.0 软件进行方差分析,对同一 Cd 处理水平下不同 P 处理组进行单因素方差分析和 LSD 显著性检验,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 P、Cd 交互处理对白骨壤幼苗体中 Cd 的亚细胞分布影响

刘芳等^[20]研究了 P 和 Cd 交互作用对烟草生长及吸收积累 P 和 Cd 的影响,研究表明随着 P 肥用量增加,高 Cd 环境下烟草积累 Cd 量呈上升趋势,高 Cd 高 P 水平时植物增加了对 Cd 总量的吸收。从表 2 中可知,Cd 浓度从 0.5 mg·L⁻¹ 增大到 5 mg·L⁻¹ 时,白骨壤幼苗体内亚细胞 Cd 的含量均不同程度地增加,其

中细胞壁和可溶性组分中 Cd 的含量增加较多,可能是由于细胞壁上的纤维素、半纤维素、蛋白质和多糖与 Cd 结合,从而限制了 Cd 的转移^[21],研究结果与张雯等^[9-10]一致。不同处理条件下,由于 Cd 是由根部直接进入白骨壤幼苗体内,所以根部 Cd 的含量明显多于叶的含量,与张雯、Qiu 等^[9,21]研究结果相同。本试验中,各处理中白骨壤幼苗根部 Cd 的含量明显多于叶的,可能是由于 P 的添加增加了 HPO₄²⁻和 H₂PO₄⁻等负离子,负离子与 Cd²⁺结合,从而减少 Cd²⁺从根迁移到地上部分,进一步减少 Cd 在叶中的含量^[21-22],从而缓解了 Cd 对白骨壤的毒害。在相同 Cd 水平处理下,随着 P 浓度的升高,白骨壤叶和根的细胞壁中 Cd 含量呈上升趋势,可能是添加的 P 促进了根系发育,增加了根吸收 Cd 的含量。当 Cd 浓度为 0.5 mg·L⁻¹ 时,白骨壤叶和根中可溶性组分的 Cd 含量先降后升,叶中可溶性组分 Cd 的含量多于在细胞壁中的,施加适量浓度的 P(30 mg·L⁻¹)能够促进 Cd 向液泡(可溶性组分)转移。在高浓度 Cd(5 mg·L⁻¹)处理下,Cd 在可溶性组分中的含量变化不一,具体原因有待进一步研究。总体来说,随着 P 浓度的增加,叶和根中可溶性组分 Cd

表 2 P 对不同 Cd 处理下白骨壤幼苗体内 Cd 亚细胞分布的影响

Table 2 Subcellular distribution of Cd in *A. marina* seedlings under different P and Cd concentration

处理 Treatments/mg·L ⁻¹		部位 Parts	Cd 浓度 Concentration/μg·kg ⁻¹ FW			
Cd	P		细胞壁 Cell wall	叶绿体和细胞核 Chloroplast and nucleus	线粒体 Mitochondrion	可溶性组分 Soluble fraction
0	0	叶 Leaf	20.92±2.75a	6.57±0.11b	6.04±0.24a	20.88±3.21b
			22.91±0.85a	7.21±0.13a	5.32±0.17b	14.82±0.93c
			26.27±4.42a	2.10±1.05c	5.94±0.07a	29.71±3.18a
	0	根 Root	26.94±0.70b	2.54±0.35a	0.64±0.37b	71.95±2.46b
			66.94±8.11a	0.67±0.35b	1.20±0.03a	90.63±5.92a
			70.74±1.90a	0.38±0.21b	0.52±0.17b	60.29±3.51c
0.5	0	叶 Leaf	30.60±7.24a	4.58±0.77a	6.99±0.04a	52.22±0.65a
			30.50±2.71a	2.34±0.36b	6.35±0.32b	32.16±6.79b
			27.24±1.14a	1.14±0.20b	6.53±0.16ab	39.98±3.44b
	0	根 Root	1 117.78±209.02a	44.69±4.18a	13.75±0.75a	1 017.87±100.46ab
			1 240.60±214.92a	30.90±1.83b	21.35±8.73a	805.62±101.59b
			1 190.98±218.62a	38.73±2.66ab	21.65±1.45a	1 102.44±65.07a
5	0	叶 Leaf	424.32±15.43b	12.62±3.82a	7.98±0.17b	81.69±10.17c
			448.68±29.20b	18.36±2.58a	9.22±0.44a	213.46±2.89a
			632.95±93.70a	15.46±2.04a	9.09±0.04a	185.56±0.88b
	0	根 Root	1 212.07±116.13c	80.53±12.37a	33.23±5.86b	1 823.57±209.37b
			2 734.97±67.41a	72.78±6.12a	28.15±1.69b	1 950.94±135.95b
			2 197.69±109.50b	81.61±0.85a	42.80±3.02a	2 559.25±5.63a

注:表中不同小写字母代表相同植物器官相同Cd水平不同P浓度处理下的显著性差异(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between same organ, same cadmium and different P concentration treatments (P<0.05). The same below.

的百分比升高,说明液泡也是植物细胞贮存重金属的重要场所^[9]。所以,细胞壁是白骨壤对 Cd 解毒的首要屏障,Cd²⁺进入细胞后主要富集在液泡中使得其他细胞器免受毒害^[3,10-13],减轻了 Cd 对白骨壤的毒害,进一步说明了细胞壁的固定及液泡区室化是白骨壤对 Cd 的解毒机制之一。

2.2 P、Cd 交互处理对白骨壤幼苗体中抗氧化酶活性的影响

Cd 胁迫能干扰许多植物的正常生长和代谢,产生 ROS,使植物细胞受到伤害^[23]。植物清除 ROS 有很多方式,其中抗氧化酶参与解毒过程是一个非常重要的方式^[24]。SOD 能将超氧阴离子歧化为 H₂O₂ 和 O₂,POD 利用 H₂O₂ 来催化过氧化物的氧化和分解,这是植物应对逆境胁迫的响应机制之一^[25]。

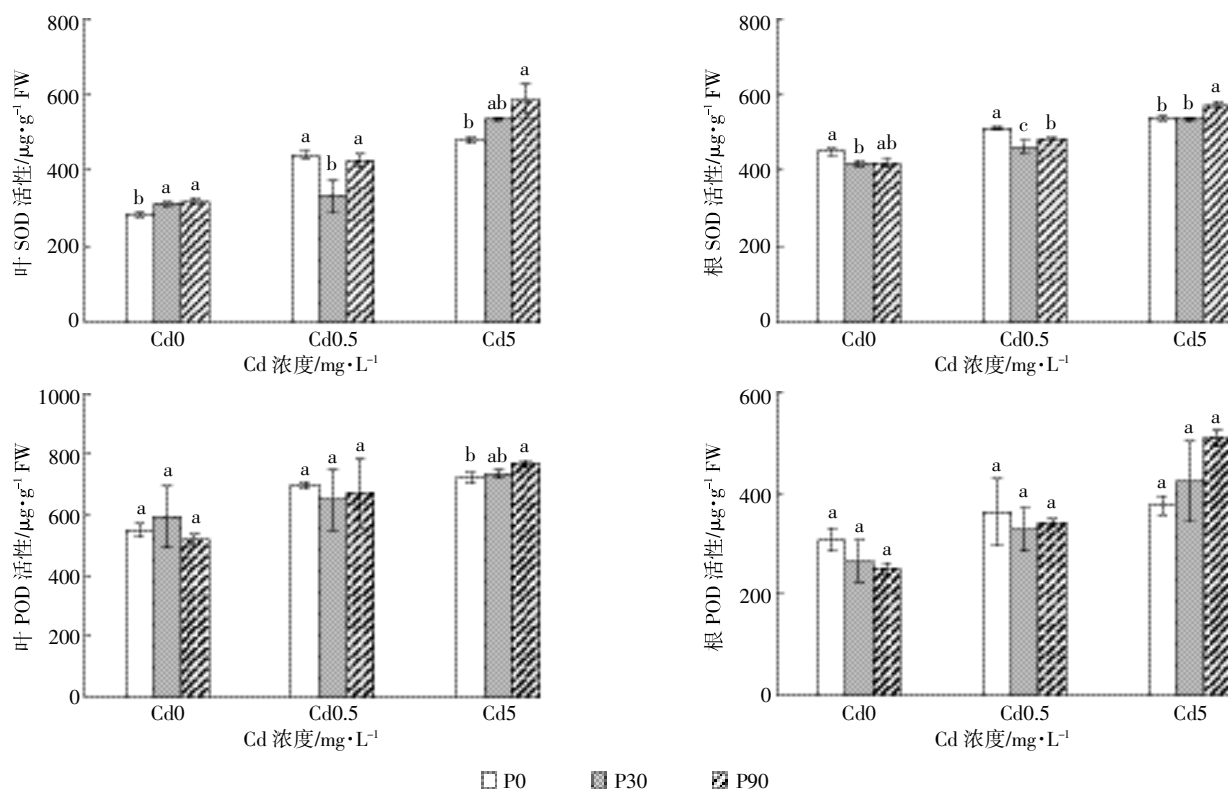
从图 1 可以看出,单 Cd 处理时,随着 Cd 浓度的增加,白骨壤叶片和根的 SOD 活性呈上升趋势,与 Kavita 等^[26]研究结果一致。随着施 Cd 及 P 浓度的增加,各处理叶片和根的 SOD 活性均有一定的升高。添加 90 mg·L⁻¹ 的 P 后,白骨壤幼苗叶中的 SOD 活性增

加,与对照相比差异显著,与 Qiu 等^[27]研究结果一致,具体原因可能是施 P 促进了白骨壤的生长,为了应对 Cd 对植株的毒害,叶和根的 SOD 活性升高,有效清除了由 Cd 引起的氧化胁迫产生的活性氧。

由图 1 还可见,单 Cd 处理时,随着 Cd 浓度的增加,白骨壤叶片和根的 POD 活性变化趋势与 SOD 活性一致。施加相同 P 水平处理下,随着施 Cd 浓度的增加,各组叶片和根的 POD 活性有一定的升高,与对照相比,各处理间差异不显著。在高 P(90 mg·L⁻¹)高 Cd(5 mg·L⁻¹)处理下,白骨壤叶和根的 POD 活性最高,可能原因是 Cd 胁迫下促进 POD 升高,P 的添加进一步增加了 POD 的含量,提高了抗氧化能力,有效清除毒害产生的活性氧。因此,施加一定浓度的 P 可缓解 Cd 对白骨壤幼苗的胁迫和伤害。

2.3 P、Cd 交互处理对白骨壤幼苗中叶绿素含量的影响

从表 3 中可以看出,随着 Cd 浓度的增加,叶绿素含量总体呈下降趋势,Chla/b 上下波动,变化不一。在无 Cd 处理下,白骨壤幼苗的总叶绿素含量随着 P 浓度的增大而增多,P 浓度为 90 mg·L⁻¹ 时,Chla、Chlb



不同小写字母代表相同植物器官相同Cd水平不同P浓度处理下的显著性差异($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences between same organ, same cadmium and different P concentration treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 P、Cd 交互处理下白骨壤幼苗抗氧化酶活性

Figure 1 Antioxidant enzyme activity of *A. marina* seedlings under P and Cd treatments

表 3 P、Cd 交互处理下白骨壤幼苗叶绿素含量及叶绿素 a/b 变化

Table 3 Chlorophyll contents and chlorophyll a/b in *A. marina* seedlings under P and Cd treatments

处理 Treatments/mg·L ⁻¹		叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b	总叶绿素
Cd	P	Chla/mg·g ⁻¹ FW	Chlb/mg·g ⁻¹ FW	Chl(a/b)/mg·g ⁻¹ FW	Chl/mg·g ⁻¹ FW
0	0	0.91±0.07a	0.23±0.02b	3.90±0.03a	1.15±0.10b
	30	0.97±0.02ab	0.27±0.01a	3.54±0.01b	1.24±0.02ab
	90	1.00±0.02a	0.28±0.01a	3.57±0.09b	1.29±0.02a
0.5	0	0.81±0.02a	0.22±0.01a	3.66±0.03a	1.03±0.02a
	30	0.94±0.03a	0.24±0.01a	3.88±0.23a	1.18±0.04a
	90	0.86±0.11a	0.25±0.03a	3.54±0.24a	1.09±0.08a
5	0	0.81±0.01a	0.20±0.01a	4.09±0.15a	1.00±0.10a
	30	0.80±0.01a	0.21±0.01a	3.81±0.10a	1.01±0.05a
	90	0.83±0.10a	0.22±0.02a	3.82±0.12a	1.05±0.12a

和总叶绿素最大。在施加 Cd 的处理下,Chla、Chlb 和总叶绿素的含量呈下降趋势,但各处理间差异不显著。实验结果说明 Cd 浓度增加,抑制或破坏了白骨壤幼苗叶绿素的合成,可能是由于 Cd 抑制叶绿素酸酯还原酶和影响氨基-γ-酮戊二酸的合成,直接破坏了叶绿体结构及功能^[28]。当 Cd 浓度为0.5 mg·L⁻¹ 和 5 mg·L⁻¹ 时,总叶绿素含量随着 P 浓度的增大而有所增多:一方面,P 的添加可能在一定程度上降低了 Cd 的有效性^[8],缓解了 Cd 对叶绿素的破坏,实验结果与刘芳等^[29]研究一致;另一方面可能由于添加的 P 浓度增加,有效 P 也随之增加,叶绿素生物合成过程中 δ-氨基-γ-酮戊酸(ALA)合成速率和卟胆原(PBG)酶活性升高,叶绿素生物合成增多^[30],这也说明了 P 能够缓解 Cd 对白骨壤幼苗光合系统的破坏。

2.4 P、Cd 交互处理对白骨壤幼苗蛋白质含量的影响

植物处于不良环境中,逆境蛋白增加,以增加渗透调节物质而增强植物细胞对逆境的抵抗力^[19]。从图

2 中可知,当 Cd 浓度为 0.5 mg·L⁻¹ 时,随着 P 浓度增大,白骨壤幼苗叶片中的蛋白质含量呈下降趋势,各处理间差异不显著。在根中蛋白质含量先降后升,但各处理间差异也不显著。当 Cd 浓度为 5 mg·L⁻¹ 时,随着添加的 P 浓度上升,白骨壤叶片中的蛋白质含量也呈上升趋势,根中的蛋白质含量先降后升,各处理间差异显著。当 P 浓度为 90 mg·L⁻¹ 时,叶片和根中的蛋白质含量显著增加,分析原因可能是 P 为植物生长发育所需的大量营养元素,P 的添加在一定程度上改善了植株的营养状况,从而促进了根系的发育和植株地上部的生长^[31],提高了植物体内蛋白质的含量,进而减轻 Cd 对植株的毒害,增强白骨壤幼苗对 Cd 的耐受性。

3 结论

(1)细胞壁的固定及液泡区室化是白骨壤幼苗 Cd 污染解毒的重要机制之一。

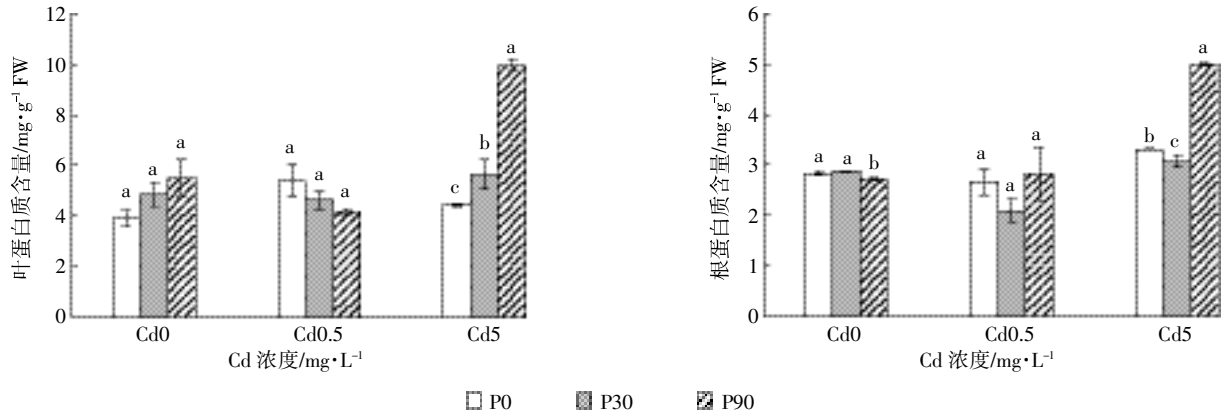


图 2 P、Cd 交互处理下白骨壤幼苗蛋白质含量

Figure 2 Protein contents of *A. marina* seedlings under P and Cd treatments

(2)外源 P 能促使 Cd 向液泡转移,同时提升白骨壤植株 SOD、POD 活性,增加了叶绿素和蛋白质含量。

(3)外源 P 能够缓解 Cd 对红树植物白骨壤的影响,增强白骨壤对 Cd 的耐受能力。

参考文献:

- [1] 王晓娟,王文斌,杨 龙,等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7921-7929.
WANG Xiao-juan, WANG Wen-bin, YANG Long, et al. Transport pathways of cadmium(Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7921-7929.
- [2] 程 皓,陈桂珠,叶志鸿. 红树林重金属污染生态学研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3893-3900.
CHENG Hao, CHEN Gui-zhu, YE Zhi-hong. Research progress of heavy metal pollution in mangrove wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3893-3900.
- [3] Weng B S, Xie X Y, Weiss D J, et al. *Kandelia obovata*(S., L.) Yong tolerance mechanisms to cadmium: Subcellular distribution, chemical forms and thiol pools[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2453-2460.
- [4] 黄志亮. Cd 低积累蔬菜品种筛选及其 Cd 积累与生理生化特性研究[D]. 湖北:华中农业大学, 2012.
HUANG Zhi-liang. Screening of low Cd-accumulation vegetable cultivars and research on its properties of Cd-accumulation and physiology [D]. Hubei: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [5] 李柳强. 中国红树林湿地重金属污染研究[D]. 厦门:厦门大学, 2008.
LI Liu-qiang. Heavy metals in the mangrove wetland of China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [6] Wu G R, Hong H L, Yan C L. Arsenic accumulation and translocation in mangrove(*Aegiceras corniculatum* L.) grown in arsenic contaminated soils[J]. *Public Health*, 2015, 12(7): 7244-7253.
- [7] 刘昭兵,纪雄辉,彭 华,等. 磷肥对土壤中 Cd 的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1585-1590.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [8] 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, 11(4): 392-396.
AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, SHI Wei-ming, et al. Plant physiological responses to the interactions between heavy metal and nutrients [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 392-396.
- [9] 张 雯. 硫硒交互对水稻幼苗 Cd 累积和毒害的影响机制研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
ZHANG Wen. Influence mechanism of sulfur and selenium interaction on cadmium accumulation and toxicity in rice seedling[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [10] 张 雯,林匡飞,周 健,等. 不同硫浓度下叶面施硒对水稻幼苗镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 844-852.
ZHANG Wen, LIN Kuang-fei, ZHOU Jian, et al. Effects of selenium foliar spray on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in rice seedlings in different sulfur concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 844-852.
- [11] 杜远鹏,李洪敬,尹克林,等. 霞多丽苗木中镉的积累、亚细胞分布及化学存在形态[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1607-1612.
DU Yuan-peng, LI Hong-jing, YIN Ke-lin, et al. Cadmium accumulation, subcellular distribution, and chemical forms in *Vitis vinifera* cv. Chardonnay grapevine[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1607-1612.
- [12] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckhamia nivea*(L.) Gaud[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 389-395.
- [13] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L.[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 103-107.
- [14] Blokhina O, Virolainen E, Fagerstedt K V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review[J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(2): 179-194.
- [15] Shi G R, Cai Q S, Liu C F, et al. Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes[J]. *Plant Growth Regul*, 2010, 61(1): 45-52.
- [16] 陈昌徐,陆志强,郑文教. 白骨壤幼苗对镉胁迫的生长及生理生态响应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 5(4): 485-492.
CHEN Chang-xu, LU Zhi-qiang, ZHENG Wen-jiao. The growth and ecophysiological responses of mangrove *Avicennia marina* seedlings to cadmium[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2015, 5(4): 485-492.
- [17] 陆志强,陈昌徐,马 丽,等. 镉胁迫对白骨壤幼苗钾钠镁吸收与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1313-1319.
LU Zhi-qiang, CHEN Chang-xu, MA Li, et al. Absorption and distribution of K, Na and Mg in *Avicennia marina* seedlings under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1313-1319.
- [18] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(10): 1437-1446.
- [19] 李合生,孙 群,赵世杰. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [20] 刘 芳,介晓磊,孙巍峰,等. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 116-120.
LIU Fang, JIE Xiao-lei, SUN Wei-feng, et al. Influence of P and Cd interaction on their accumulation in tobacco and tobacco growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 116-120.
- [21] Qiu Q, Wang Y T, Yang Z Y, et al. Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage(*Brassica parachinensis* L.) cultivars differ-

- ing in cadmium accumulation[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(9):2260–2267.
- [22] Bolan N S, Adriano D C, Naidu R. Role of phosphorus in (im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil–plant system[J]. *Environ Contam Toxicol*, 2003, 177(2):1–44.
- [23] 杨卫东, 陈益泰. 镉胁迫对旱柳细胞膜透性和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(11):2263–2269.
YANG Wei-dong, CHEN Yi-tai. Membrane leakage and antioxidant enzyme activities in roots and leaves of *Salix matsudana* with cadmium stress[J]. *Acta Bot Boreal –Occident Sin*, 2008, 28(11):2263–2269.
- [24] Pereira G J G, Molina S M G, Lea P J, et al. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*[J]. *Plant and Soil*, 2002, 239(1):123–132.
- [25] Azevedo R A, Alas R M, Smith R J, et al. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley[J]. *Physiol Plant*, 1998, 104(2):280–292.
- [26] Kavita S, Ritambhara G K, Shalini V, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6):1135–1144.
- [27] Qiu R L, Zhao X, Tang Y T, et al. Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyper accumulator, *Arabis paniculata* F.[J]. *Chemosphere*, 2008, 74(1):6–12.
- [28] 陶毅明, 陈燕珍, 梁士楚, 等. 镉胁迫下红树植物木榄幼苗的生理生化特性[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5):762–766.
TAO Yi-ming, CHEN Yan-zhen, LIANG Shi-chu, et al. Physiological and biochemical properties of *Bruguiera gymnorhiza* seedlings under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5):762–766.
- [29] 刘芳, 介晓磊, 刘世亮, 等. 褐土中磷镉交互作用对磷镉有效性影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5):1429–1432.
LIU Fang, JIE Xiao-lei, LIU Shi-liang, et al. Effect of P and Cd interaction on bioavailability of P and Cd in cinnamon soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5):1429–1432.
- [30] 吴楚, 王政权, 孙海龙, 等. 氮磷供给对长白落叶松叶绿素合成、叶绿素荧光和光合速率的影响[J]. 林业科学, 2005, 41(4):31–36.
WU Chu, WANG Zheng-quan, SUN Hai-long, et al. Effects of different concentrations of nitrogen and phosphorus on chlorophyll biosynthesis, chlorophyll a fluorescence, and photosynthetic rate in *Larix olgensis* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4):31–36.
- [31] 刘世亮, 刘忠珍, 介晓磊. 施磷肥对Cd污染土壤中油麦菜生长及吸收重金属的影响[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(1):30–34.
LIU Shi-liang, LIU Zhong-zhen, JIE Xiao-lei. Influence of phosphate fertilizer application on lettuce plant growth and absorbing of heavy metals in Cd polluted soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(1):30–34.