

# 镉锌复合胁迫对秋茄幼苗渗透调节物质的影响\*

郭晓音 严重玲\*\* 叶彬彬

(厦门大学生命科学学院 厦门 361005)

**摘要** 通过土壤盆栽研究了不同浓度镉(Cd, 0、2.5、50 mg kg<sup>-1</sup>)、锌(Zn, 0、100、500 mg kg<sup>-1</sup>)胁迫下红树植物秋茄的幼苗体内可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、有机酸含量的变化。结果表明, Cd、Zn单一处理下, 秋茄体内渗透调节物质含量随重金属浓度升高而增加; Cd、Zn复合处理对秋茄体内可溶性蛋白质含量的复合效应主要表现为协同作用: Cd的加入减弱Zn对秋茄体内可溶性糖含量的刺激作用, 低Cd浓度处理下Zn的加入导致可溶性糖含量增加, 而高Cd浓度处理下Zn的加入反而降低其含量。低浓度Zn(或Cd)的加入与土壤中Cd(或Zn)发生拮抗作用, 秋茄体内脯氨酸、有机酸含量下降; 高浓度Zn(或Cd)的加入与土壤中的Cd(或Zn)发生协同作用, 导致渗透调节物质脯氨酸、有机酸的积累量增加, 从而缓解高浓度重金属的胁迫。植物组织或部位不同, Cd与Zn浓度和比例不同, Cd、Zn之间的复合作用存在一定的差异。表5 参30

**关键词** 红树; 秋茄; Cd-Zn复合; 渗透调节物质

CLC Q945.78 : X173

## Effect of Cd-Zn Combined Stress on Contents of Osmotic Substances in *Kandelia candel* (L.) Druce Seedlings\*

GUO Xiaoyin, YAN Chongling\*\* & YE Binbin

(School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract** Potted culture experiment was used to investigate the effects of co-contamination of Cd (0, 2.5, 50 mg kg<sup>-1</sup>) and Zn (0, 100, 500 mg kg<sup>-1</sup>) on the contents of osmotic adjustment substances in *Kandelia candel* (L.) Druce seedlings. The interaction effect of Cd-Zn combined stress on the content of soluble protein was mainly mutual. The content of soluble sugar decreased with the addition of Cd when Zn concentration was 100 and 500 mg kg<sup>-1</sup>. Low Zn concentration increased the soluble sugar content, while high Zn concentration decreased it when Cd (2.5 and 50 mg kg<sup>-1</sup>) was added. The interaction effect of Cd-Zn combined stress with low concentration on the contents of proline and organic acid was as also mutual, and it showed antagonism at high level of the combined stress. It was suggested that the compound pollution of Cd and Zn was not simply an additive or antagonistic effect. It depended on the Cd and Zn concentrations and their combinations in soil, as well as on the different parts of the plant. Tab 5, Ref 30

**Keywords** mangrove; *Kandelia candel* (L.) Druce; Cd-Zn combined stress; osmotic adjustment substance

CLC Q945.78 : X173

红树林是热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落, 生长在海陆交汇的河口海湾地带, 是非常珍贵的生物资源<sup>[1]</sup>。作为河口海岸湿地生态系统中的初级生产者, 红树林具有较高的生产力, 在河口海岸生态系统中占有十分重要的地位<sup>[1]</sup>。近年来由于经济及工农业的快速发展, 大量的污染物直接或间接排放进入红树林湿地, 日益增加着红树林的环境压力, 其中重金属污染尤为严重持久。既往研究主要集中于锌(Zn)、铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铜(Cu)等重金属元素单因子处理对红树植物生理生态等方面的影响<sup>[2-5]</sup>, 有关重金属复合处理对红树植物影响的报道相对较少<sup>[6, 7]</sup>, 而在自然界中重金属

污染往往是两种或多种元素的复合污染, 具有普遍性、复杂性等特点<sup>[8]</sup>, 因此研究重金属复合污染对红树植物的影响具有重要的科学意义。

渗透调节(Osmotic adjustment, OA)是植物适应干旱、盐渍、低温、重金属等胁迫的重要机制之一<sup>[9]</sup>。植物通过积累一些小分子有机化合物, 如可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸、有机酸等, 保持体内细胞与组织的水平衡, 稳定生物大分子结构, 抵抗环境胁迫<sup>[10, 11]</sup>。

本文以最为常见的红树植物之一秋茄[*Kandelia candel* (L.) Druce]为研究材料, 探讨Cd-Zn复合污染对秋茄生长生理特性的影响, 旨在了解其体内渗透调节物质对Cd-Zn复合的响应与耐受机理, 探讨Cd-Zn之间的相互作用机制, 为红树林生态系统的保护和管理以及海湾河口重金属污染的治理提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤沉积物样品于2007年3月采自福建厦门集美滩

收稿日期: 2008-05-07 接受日期: 2008-07-07

\*国家自然科学基金项目(Nos. 40673064, 30710103908), 国家基础科学人才培养基金项目(No. J0630649)和福建省高校创新团队培育计划项目资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 30710103908, 40673064), the National Foundation for Fostering Talents of Basic Science (J0630649) and the Program for Innovative Research Team in Science and Technology in Universities of Fujian, China

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: ycl@xmu.edu.cn)

涂(24°35'N, 118°06'E), 取亚表层土(5~20 cm).

土壤pH为6.84±0.32, 水分含量为42.37%±0.45%, 有机碳含量为(8.19±0.47) g kg<sup>-1</sup>, 可溶性盐含量为2.50%±0.13%, 土壤表面积平均粒径为(5.159±0.37) μm, 体积平均粒径为(32.974±8.92) μm, 土壤颗粒直径92%以上小于50 μm. 土壤中Zn本底值为(113.38±2.01) mg kg<sup>-1</sup>, Cd本底值(0.71±0.10) mg kg<sup>-1</sup>. 将采回的土壤沉积物混匀后分装于直径25 cm、高30 cm的塑料桶中, 每盆土壤质量约5.5 kg.

分别将分析纯ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O与CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O配制成的溶液施入土壤, 搅拌均匀, 活化1 mo. 为探讨Cd、Zn轻度和重度污染产生的效应, 结合实际情况将Zn处理浓度(以Zn<sup>2+</sup>计)设置为0、100、500 mg kg<sup>-1</sup> 3个水平(分别以Zn0、Zn100、Zn500表示), Cd处理浓度(以Cd<sup>2+</sup>计)设置为0、2.5、50 mg kg<sup>-1</sup> 3个水平(分别以Cd0、Cd2.5、Cd50表示). 试验采用完全随机设计, 共9个处理, 每个处理重复3次. 盆栽前分别取各处理土样, 用HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>硝化, ICP-MS测定活化后土壤(干重)的实际Zn、Cd含量, 结果见表1.

表1 不同处理土壤中Zn和Cd的浓度  
Table 1 Contents of Zn and Cd in soil

Zn-Cd 处理 Zn-Cd treatment	盆栽前总Zn浓度 Content of Zn before potted culture (w/mg kg <sup>-1</sup> , DW)	盆栽前总Cd浓度 Content of Cd before potted culture (w/mg kg <sup>-1</sup> , DW)
Zn0-Cd0	118.36±9.74	0.67±0.07
Zn0-Cd2.5	108.00±4.59	8.46±0.76
Zn0-Cd50	117.53±7.88	118.18±2.63
Zn100-Cd0	217.48±5.68	0.84±0.07
Zn100-Cd2.5	218.66±3.09	10.28±1.17
Zn100-Cd50	235.50±7.55	129.58±2.43
Zn500-Cd0	1357.14±13.19	0.82±0.05
Zn500-Cd2.5	1283.80±14.34	9.85±1.73
Zn500-Cd50	1319.48±17.02	109.06±3.39

于2007年4月在福建九龙江口浮宫镇红树林区(24°24'N, 117°55'E)摘取母树成熟、大小相对一致的秋茄胚轴(平均长度为23.08 cm±2.35 cm, 平均鲜重为16.90 g±3.11 g), 每盆种植7棵. 置于自然透光的温室大棚中培养, 培养期为140 d, 白天平均最高气温为(29.96±3.57) °C, 夜间最低气温为(23.43±3.58) °C, 每天用自来水补足蒸发损失的水量.

## 1.2 测定方法

土壤背景值测定方法参考《土壤农业化学性质分析方法》<sup>[12]</sup>; 可溶性盐采用质量法测定; pH值采用电位法测定; 沉积物有机质含量测定采用灼烧法; 沉积物粒径组成采用粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern, Britain)测定; 土样经HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>硝化后, 通过ICP-MS (PE Elan DRC-e, Axial Field Technology)测定其Zn、Cd含量.

可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝G250法<sup>[13]</sup>; 可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法<sup>[14]</sup>; 脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法<sup>[15]</sup>; 总有机酸含量测定采用NaOH滴定法<sup>[15]</sup>.

## 1.3 数据处理

试验原始数据处理采用 Excel软件完成, SPSS10.0 软件进行差异显著性分析.

## 2 结果

### 2.1 Cd、Zn复合处理对秋茄根、叶中可溶性蛋白质含量的影响

由表2可以看出, 在相同Zn处理浓度下, 秋茄根中可溶

性蛋白质含量随着加入Cd浓度的升高大体呈上升趋势(除Zn100-Cd2.5处理外), 尤以Zn500水平下加入Cd导致的增加量最多, Zn500-Cd50与Zn500-Cd0处理的差异显著( $P < 0.05$ ); 同一Cd处理浓度下, 随着加入Zn浓度的提高, 根中可溶性蛋白质含量大体呈增加的趋势, 此趋势随着Cd浓度的升高更为明显.

表2 Cd-Zn复合作用对秋茄根、叶中可溶性蛋白质含量(w/mg g<sup>-1</sup>)的影响( $\bar{x} \pm s$ , N=3)

Table 2 Effect of Cd-Zn complex pollution on soluble protein (w/mg g<sup>-1</sup>) in leaves and roots of *K. candel* seedlings ( $\bar{x} \pm s$ , N=3)

植物部位 Part	土壤Zn浓度 Zn concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )	土壤Cd浓度 Cd concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		
		0	2.5	50
根 Roots	0	1.79±0.34 <sup>c</sup>	1.85±0.63 <sup>bc</sup>	1.94±0.41 <sup>ac</sup>
	100	2.00±0.05 <sup>ac</sup>	1.97±0.13 <sup>ac</sup>	2.13±0.10 <sup>ab</sup>
	500	1.82±0.08 <sup>bc</sup>	2.10±0.34 <sup>ab</sup>	2.17±0.59 <sup>a</sup>
叶片 Leaves	0	9.90±1.09 <sup>d</sup>	15.29±0.77 <sup>ab</sup>	11.01±1.54 <sup>cd</sup>
	100	14.19±1.52 <sup>bc</sup>	18.24±1.74 <sup>a</sup>	17.53±1.74 <sup>ab</sup>
	500	13.39±1.81 <sup>c</sup>	17.46±0.66 <sup>ab</sup>	15.63±1.83 <sup>ab</sup>

同一部位不同处理间字母相同表示无显著性差异, 不同字母表示有显著性差异( $P < 0.05$ ), 下同

The same letters among different treatments in the same plant part mean no significant differences, and the different letters mean significant differences. The same below

在相同Zn处理浓度下, 加入Cd导致秋茄叶片中可溶性蛋白质含量增加, 以Cd2.5下的增加量最为显著(Zn0时 $P < 0.01$ , Zn100、Zn500时 $P < 0.05$ ); 同一Cd处理浓度下, 加入Zn亦导致叶片中可溶性蛋白质含量增加, 以低浓度Zn (100 mg kg<sup>-1</sup>) 处理下的增加量更为显著(Cd0时 $P < 0.05$ , Cd50时 $P < 0.01$ ).

### 2.2 Cd、Zn复合处理对秋茄根、叶中可溶性糖含量的影响

由表3可以看出, 未添加外源Zn时, 随着Cd浓度的增加, 秋茄根中可溶性糖含量相应增加, 并在Cd50处理与Cd0处理下达到显著差异( $P < 0.05$ ); 添加低浓度和高浓度Zn处理下, 加入Cd导致根中可溶性糖含量有所降低; 未添加外源Cd和低浓度Cd处理下, 随着加入Zn浓度的增加, 根中可溶性糖含量呈上升趋势, 且差异达到显著水平( $P < 0.05$ ); 添加高浓度Cd处理下, 根中可溶性糖含量则随Zn浓度的增加略呈下降趋势, 但差异不显著( $P > 0.05$ ).

在相同Zn处理浓度下, 加入Cd导致秋茄叶片可溶性糖含量增加, Cd2.5处理的增加尤为明显, 在Zn100水平下, 此趋

表3 Cd-Zn复合作用对秋茄根、叶中可溶性糖含量(w/mg g<sup>-1</sup>)的影响

Table 3 Effect of Cd-Zn complex pollution on soluble sugar content (w/mg g<sup>-1</sup>) in leaves and roots of *K. candel* seedlings

植物部位 Part	土壤Zn浓度 Zn concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )	土壤Cd浓度 Cd concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		
		0	2.5	50
根 Roots	0	51.44±2.92 <sup>c</sup>	55.76±2.01 <sup>c</sup>	61.16±9.37 <sup>ab</sup>
	100	68.25±8.21 <sup>a</sup>	59.42±2.47 <sup>bc</sup>	60.68±2.76 <sup>ab</sup>
	500	67.64±4.94 <sup>a</sup>	65.56±6.01 <sup>ab</sup>	56.95±6.91 <sup>bc</sup>
叶片 Leaves	0	45.66±1.61 <sup>ac</sup>	49.11±1.64 <sup>a</sup>	46.27±3.46 <sup>ac</sup>
	100	43.06±3.39 <sup>c</sup>	48.98±1.89 <sup>a</sup>	45.93±0.14 <sup>ac</sup>
	500	47.58±1.07 <sup>ab</sup>	48.51±1.87 <sup>ab</sup>	47.24±1.46 <sup>ab</sup>

势最为显著;同一Cd处理浓度下,Zn的加入对叶片可溶性糖含量影响并不显著( $P>0.05$ ).

### 2.3 Cd、Zn复合处理对秋茄根、叶中脯氨酸含量的影响

由表4可以看出,未添加外源Zn时,随着Cd浓度的增加,秋茄根、叶中脯氨酸含量增加,但差异未达显著水平( $P>0.05$ );低浓度Zn处理下,Cd2.5的加入导致根、叶中脯氨酸含量减少,而Cd50则导致其含量增加;高浓度Zn处理下,随着加入Cd浓度的增加,根、叶中脯氨酸含量增加。

表4 Cd-Zn复合作用对秋茄根、叶中脯氨酸含量(w/mg g<sup>-1</sup>)的影响

Table 4 Effect of Cd-Zn complex pollution on proline content (w/mg g<sup>-1</sup>) in leaves and roots of *K. candell* seedlings

植物部位 Part	土壤Zn浓度 Zn concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		土壤Cd浓度 Cd concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		
	0	100	0	2.5	50
根 Roots	0	6.04±0.33 <sup>cd</sup>	6.23±0.66 <sup>bd</sup>	7.17±0.53 <sup>bd</sup>	
	100	6.05±0.70 <sup>cd</sup>	4.83±1.10 <sup>c</sup>	6.77±0.88 <sup>bd</sup>	
	500	6.79±1.08 <sup>bd</sup>	7.83±1.28 <sup>ab</sup>	8.71±1.97 <sup>a</sup>	
叶片 Leaves	0	8.57±1.22 <sup>bc</sup>	8.76±2.14 <sup>bc</sup>	10.00±2.82 <sup>bc</sup>	
	100	8.63±1.07 <sup>ac</sup>	8.00±1.04 <sup>c</sup>	11.02±1.78 <sup>ab</sup>	
	500	9.58±2.17 <sup>bc</sup>	10.07±2.32 <sup>ac</sup>	12.67±1.01 <sup>a</sup>	

未添加外源Cd时,外源Zn浓度的增加致使秋茄根、叶中脯氨酸含量增加,但未达到显著水平( $P>0.05$ );低浓度和高浓度Cd处理下,Zn100的加入导致脯氨酸含量减少,Zn500则导致其含量显著增加( $P<0.05$ ).

### 2.4 Cd、Zn复合处理对秋茄根、叶中有机酸含量的影响

由图5可以看出,未添加和添加低浓度Zn处理下,Cd2.5的加入导致秋茄根、叶中的有机酸含量略减,Cd50则导致其含量增加,其中Zn100-Cd50和Zn100-Cd2.5两种处理间差异显著( $P<0.05$ );高浓度Zn处理下,随着Cd浓度的增加,根、叶中有机酸含量增加。

表5 Cd-Zn复合作用对秋茄根、叶中有机酸含量(b/μmol g<sup>-1</sup>)的影响

Table 5 Effect of Cd-Zn complex pollution on organic acid content (b/μmol g<sup>-1</sup>) in leaves and roots of *K. candell* seedlings

植物部位 Part	土壤Zn浓度 Zn concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		土壤Cd浓度 Cd concentration in soil (w/mg kg <sup>-1</sup> )		
	0	100	0	2.5	50
根 Roots	0	5.65±0.99 <sup>ab</sup>	4.71±0.28 <sup>bc</sup>	5.82±0.59 <sup>ab</sup>	
	100	5.12±0.33 <sup>ac</sup>	4.32±0.19 <sup>c</sup>	5.57±0.40 <sup>ab</sup>	
	500	5.69±0.25 <sup>ab</sup>	5.99±0.51 <sup>a</sup>	6.51±0.99 <sup>a</sup>	
叶片 Leaves	0	9.85±0.69 <sup>ac</sup>	9.21±1.54 <sup>bc</sup>	10.03±0.86 <sup>bc</sup>	
	100	9.30±0.84 <sup>bc</sup>	9.07±1.24 <sup>c</sup>	11.78±1.86 <sup>ab</sup>	
	500	9.54±1.87 <sup>bc</sup>	9.76±1.77 <sup>bc</sup>	12.37±0.42 <sup>a</sup>	

在相同Cd浓度处理下,外源低浓度Zn的加入导致根有机酸含量下降,高浓度Zn则导致其含量增加,其中以Cd2.5时差异最显著(Zn500-Cd2.5与Zn0-Cd2.5、Zn100-Cd2.5差异达极显著, $P<0.01$ );而未添加外源Cd时,加入Zn后叶片中有机酸含量略减少;添加低浓度Cd处理下,Zn100的加入导致叶有机酸含量略为下降,Zn500则导致其含量略为增加;高浓度Cd处理下,叶片中有机酸含量随着Zn的加入而增加。

## 3 讨论

### 3.1 Cd-Zn复合胁迫对秋茄幼苗可溶性蛋白质含量的影响

不少研究指出,重金属胁迫诱导可溶性蛋白质含量增加,在体内合成一类能与重金属特异结合的蛋白质或多肽,减轻重金属毒害,这是植物适应重金属污染的主要途径之一.可溶性蛋白质含量的提高,可以增加细胞渗透势和功能蛋白的数量,有助于维持细胞正常代谢,提高植物的抗逆性<sup>[16-18]</sup>.本研究中,单独Cd、Zn的加入均导致秋茄根、叶中可溶性蛋白质含量增加,可看作是秋茄对重金属毒害的一种解毒机制之一.Cd-Zn复合处理下,秋茄幼苗可溶性蛋白质含量的增加较相应浓度的单独处理更高,可能Cd-Zn复合处理在可溶性蛋白质含量的增加方面呈协同作用。

### 3.2 Cd-Zn复合胁迫对秋茄幼苗可溶性糖含量的影响

重金属处理下植物可溶性糖含量增加的原因可能是叶片内不溶性糖降解及光合产物运输受阻的结果,或者是葡萄糖酶、蔗糖酶活性异常所致<sup>[18]</sup>,亦或是植物对重金属胁迫环境的一种生理反应.重金属处理下植物体内含水量下降,积累的可溶性糖可作为渗透调节物质保护细胞免受伤害,维持原有的生理过程,抵御水分胁迫<sup>[19]</sup>.本研究中,Cd、Zn单一处理导致秋茄幼苗根、叶中可溶性糖含量增加,作为渗透调节物质,可溶性糖含量增加在一定程度上减弱了重金属对植物体的毒害效应.Cd-Zn复合处理下,Zn的加入减弱了Cd对根中可溶性糖含量的刺激作用,显示Zn对Cd有一定的拮抗效应.而在低Cd浓度处理下,Zn的加入导致根中糖含量增加,高Cd浓度处理下,Zn的加入反而使其含量降低,说明Cd-Zn之间相互作用因不同的Cd、Zn浓度而异<sup>[20,21]</sup>.叶片中可溶性糖含量的变化与根中并不完全一致,推测可能由于重金属胁迫对植物叶片光合作用系统产生一定的影响,导致光合产物的形成、分解、运输受阻<sup>[22,23]</sup>,具体机理有待进一步研究。

### 3.3 Cd-Zn复合胁迫对秋茄幼苗脯氨酸含量的影响

脯氨酸作为渗透调节物质和细胞质渗透物质,可保持植物受环境胁迫时的膨压.作为水溶性最大的氨基酸(162.3 g L<sup>-1</sup>, 25 °C),脯氨酸具有易于水合的趋势或具较强的水合能力,有助于增加细胞持水力,对原生质起着保护与保水作用,同时参与植物体内活性氧自由基的清除,减少重金属对细胞膜和蛋白质造成的损伤,对稳定和保水大分子化合物也有重要作用<sup>[22-25]</sup>.本研究中,单独施加Cd、Zn处理的秋茄幼苗体内脯氨酸含量均随着重金属浓度的升高而增加,有利于保持细胞与组织水平衡,保护膜结构完整性,减轻重金属胁迫的毒害.添加低浓度外源Zn(或Cd)后,根、叶中脯氨酸含量减少,可认为是低浓度Zn(或Cd)的加入与Cd(或Zn)发生拮抗作用,在一定程度上缓解Cd(或Zn)的毒害作用;高浓度外源Zn(或Cd)的加入显著提高秋茄体内脯氨酸的含量,可能由于高浓度Zn(或Cd)的加入与土壤中的Cd(或Zn)发生协同作用,重金属毒害作用增加,导致渗透调节物质脯氨酸积累量增加。

### 3.4 Cd-Zn复合胁迫对秋茄幼苗有机酸含量的影响

有机酸是一类重要的金属螯合物,是一种带一个或多个羧基功能团的低分子量的碳氢化合物<sup>[26]</sup>.在重金属胁迫



下, 有机酸参与重金属离子在细胞内的区域化分布, 作为金属元素的配基与之形成稳定的复合体, 将离子态的金属转变为低毒或无毒的螯合态形式, 降低重金属的有效性和毒性, 同时还参与重金属吸收、运输、贮存、解毒等生理代谢过程<sup>[26, 27]</sup>。已有不少研究表明, 有机酸在植物耐铝、锌、镉等重金属胁迫时发挥重要作用; 如有机酸在铝积累型植物体中与铝形成稳定的化合物, 降低植物体内铝离子的生理活性, 减弱细胞内铝离子的毒害效应<sup>[27, 28]</sup>。Salt等利用X射线吸收光谱, 分析了遏蓝菜体内Zn的结合基团, 结果显示遏蓝菜地上部中Zn-柠檬酸结合态占38%, 草酸结合态占9%; 木质部中, 与柠檬酸结合的Zn占21%, 其余部分也以游离的水合阳离子形态存在<sup>[29]</sup>。Küpper等研究表明, 成熟及衰老的遏蓝菜叶片所积累的Cd大部分以Cd-有机酸复合物的形式贮存在表皮细胞的液泡中<sup>[30]</sup>。

本研究中, 单独Cd处理的秋茄幼苗根、叶中有机酸含量均随着Cd浓度的升高而增加; 在相同Cd浓度处理下, 低浓度Zn的加入基本上导致有机酸含量减少, 高浓度Zn则导致其含量增加。而Zn0和Zn100处理下, 低浓度Cd的加入导致秋茄根、叶中的有机酸含量略减, 高浓度Cd导致其含量增加; Zn500处理下, 随着加入Cd浓度的增加, 根、叶中有机酸含量增加。造成此现象的原因可能为: 低浓度Zn (或Cd)的加入与Cd (或Zn)发生拮抗作用, 在一定程度上缓解了Cd (或Zn)的毒害作用; 高浓度Zn (或Cd)的加入与土壤中的Cd (或Zn)发生协同作用, 从而刺激秋茄体内有机酸的分泌以缓解重金属的胁迫。

## 4 结论

Cd、Zn单一胁迫处理导致秋茄体内各种渗透调节物质(可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸、有机酸)含量增加, 这是植物对重金属胁迫的解毒机制之一。

Cd-Zn复合处理在秋茄体内可溶性蛋白质含量的增加方面呈协同作用。Cd的加入减弱了Zn对秋茄体内可溶性糖含量的增加作用; 低Cd浓度处理下, Zn的加入使可溶性糖含量增加, 高Cd浓度处理下, Zn的加入反而使其含量降低。低浓度Zn (或Cd)的加入与Cd (或Zn)发生拮抗作用, 秋茄体内脯氨酸和有机酸含量降低; 高浓度Zn (或Cd)的加入与土壤中的Cd (或Zn)发生协同作用, 从而导致渗透调节物质脯氨酸、有机酸的积累量增加, 以缓解高浓度重金属的胁迫。

Cd、Zn之间的复合作用十分复杂, 可能因植物组织或部位不同、Cd与Zn浓度和比例不同而存在一定的差异。

## References

- Lin P (林鹏). Mangrove Ecosystem in China. Beijing, China (北京): Science Press, 1997. 297~316
- Walsh GE. Resistance of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) seedlings to lead cadmium and mercury. *Biotropia*, 1979, **11** (1): 22~27
- Thomas C. Effect of heavy metals zinc and lead on *Rhizophora mucronata* Lam. and *Avicennia alba* BL seedlings. In: Soepadmo E, Rao AM, NacIntosh MD eds. Proceedings of Asian Symposium on Mangroves and Environment, Research and Management, 1984. 568~574
- Ye BB (叶彬彬), Yan CL (严重玲). Effects of Cd on dissolved organic matters in mangrove sediments. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2008, **14** (2): 198~201
- Miao SY (缪绅裕), Chen GZ (陈桂珠), Huang YS (黄玉山), Tan FY (谭凤仪). Allocation and capacity of zinc in artificial wastewater in simulated wetland system with *Kandelia candel*. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1999, **5** (1): 8~10
- MacFarlane GR, Burchett MD. Toxicity growth and accumulation relationships of copper lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Mar Environ Res*, 2002, **54**: 65~84
- Yim MW, TAM NFY. Effects of wastewater-borne heavy metal on mangrove plants and soil microbial activities. *Mar Pollu Bul*, 1999, **69** (1): 179~186
- Wang HB (王宏宾), Shu WS (束文圣), Lan CY (蓝崇钰). Ecology for heavy metal pollution: Recent advances and future prospects. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, **25** (3): 596~605
- Spickett CM, Smirnoff N, Ratcliffe RG. Metabolic responses of maize roots to hyperosmotic shock. *Plant Physiol*, 1992, **99**: 856~863
- Peng LX (彭立新), Li DQ (李德全), Shu HR (束怀瑞). Osmotic adjust action of plant under osmotic stress. *Tianjin Agric Sci* (天津农业科学), 2002, **8** (1): 40~43
- Wang J (王娟), Li JQ (李健全). The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress. *Chin Bull Bot* (植物学通报), 2001, **18** (4): 459~465
- Lu RK (鲁如坤). Analytical Method of Soil Agro-chemistry. Beijing, China (北京): Chinese Agriculture Science and Technology Press, 2000. 12~13, 87~89
- Li HS (李合生). The principles and techniques of plant physiological biochemical experimental. Beijing, China (北京): Higher Education Press, 2000. 184~185, 258~260
- Zhang ZL (张志良), Qu WJ (瞿伟菁). Guides to Plant Physiological Experiments. Beijing, China (北京): Higher Education Press, 2003, 80~83, 127~129
- Wang JY (王晶英), Ao H (敖红), Zhang J (张杰), Qu GQ (曲桂琴). The technology and theory of plant's physiological and biochemical experiment. Harbin, China (哈尔滨): Northeast Forestry University Press, 2003. 18~20
- Wu GR (吴桂容), Yan CL (严重玲). Effects of Cd on the growth and osmotic adjustment regulation contents of *Aegiceris conrniculatum* seedlings. *Ecol & Environ* (生态环境), 2006, **15** (5): 1003~1008
- Li ZJ (李兆君), Ma GR (马国瑞), Xu JM (徐建民), He Y (何艳). Physiological and biological mechanism of plant for adapting the stress by cadmium. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2004, **35** (2): 234~238
- Sun SC (孙赛初), Wang HX (王焕校), Li QR (李启任). Preliminary studies on physiological changes and injury mechanism in aquatic vascular plants treated with cadmium. *Acta Phytophy Sin* (植物生理学报), 1985, **11** (2): 113~121
- Ding HD (丁海东), Zhu WM (朱为民), Yang SJ (杨少军), Qi NM (齐乃敏), Wan YH (万延慧), Yang XF (杨晓峰). Effects of cadmium and zinc stress on growth and content of proline and glutathione (GSH) in tomato seedlings. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农业学报), 2005, **21** (3):

- 191~196
- 20 He JQ (贺建群), Yang JR (杨居荣), Xu JL (许嘉琳), Chen YF (陈燕丰). Influence of heavy metals and their interactions on heavy metal contents in wheat seedlings. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 1992, **11** (4): 5~10
- 21 Dudka S. Effect of elevated concentrations of Cd and Zn in soil on spring wheat yield and the metal contents of the plants. *Water Air & Soil Poll*, 1994, **76**: 333~341
- 22 Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of *in vitro* cultured *Lupinus albus*. *Plant Sci*, 1997, **128**: 131~140
- 23 Prasad MNV. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. *Environ & Exp Bot*, 1995, **35** (4): 525~545
- 24 Tang ZC. The accumulation of free proline and its roles in water-stressed sorghum seedlings. *Acta Phytophy Sin*, 1989, **15** (1): 105~110
- 25 Schat H, Sharma SS, Vooijs R. Heavy metal-induced accumulation of free proline in a metal-tolerant and a nontolerant ecotype of *Silene vulgaris*. *Physiol Planta*, 1997, **101**: 477~482
- 26 Sun RL (孙瑞莲), Zhou QX (周启星). Action and mechanisms of organic acids in higher plants resisting to metals. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2006, **25** (10): 1275~1279
- 27 Ma JF, Hiradate S, Matsumoto H. High aluminum resistance in buckwheat. II. Oxalic acid detoxification aluminum internally. *Plant Physiol*, 1998, **117**: 753~759
- 28 Sun Q (孙琴), Ni WZ (倪吾钟), Yang XE (杨肖娥). Role of organic acid in detoxification of aluminum in higher plants and its mechanisms. *Chin Bul Bot* (植物学通报), 2002, **19** (4): 496~503
- 29 Salt DE, Prince RC, Backer AJM, Raskin I, Pickering IJ. Zinc ligands in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* as determined using X-ray absorption spectroscopy. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**: 713~717
- 30 Küpper H, Mijovilovich A, Meyer-Klaucke W. Tissue- and age-dependent differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype) revealed by X-ray absorption spectroscopy. *Plant Physiol*, 2004, **134**: 748~757

## 湿地生物多样性保护主流化的理论与实践 (精装)

印红 主编 科学出版社 出版 (2009年5月)

978-7-03-024432-1 ¥168.00

### 内容简介

本书由国家林业局GEF 湿地项目办公室组织北京林业大学自然保护区学院有关专家对“湿地生物多样性保护主流化的实践与交流”国际研讨会的会议论文进行整理汇编而成。全书共分为13部分,前7部分为中文后6部分为英文。本书讲述了湿地生物多样性保护主流化的理论基础、主要方法和手段,并分别从国际层面、国家层面、区域层面、地方层面介绍了湿地生物多样性保护主流化的案例,阐述了关于湿地基础研究及保护的建议。本书旨在通过对不同尺度、不同类型湿地保护主流化的实践和案例的分析,分享湿地保护主流化的国内外经验,探讨湿地保护主流化所面临的挑战,为推动全球、国家、区域和地方层面的湿地保护主流化提供方向、思路和方法。

本书可供从事湿地保护工作的管理和科研工作者以及其他相关人员借鉴和参考。

邮购地址: 北京东黄城根北街16号 科学出版社科学出版中心生命科学分社 邮编: 100717

联系人: 周文字 联系电话: 010-64031535 网址: <http://www.lifescience.com.cn>

