

秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸 含量对 Cd 胁迫的响应

覃光球, 严重玲*, 韦莉莉

(厦门大学生命科学学院 污染生态学研究实验室, 福建 厦门 361005)

摘要:在温室条件下,采用土壤盆栽技术研究了红树植物秋茄的幼苗在不同浓度的 Cd($0\sim 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)胁迫下叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸的含量变化。研究表明:秋茄幼苗叶片中的单宁、可溶性糖和脯氨酸含量均随着 Cd 胁迫浓度的增加出现不同程度先升后降的趋势,这表明秋茄幼苗对低浓度的 Cd 有一定的抵抗能力,但在高浓度的 Cd 胁迫下则受到伤害;单宁、可溶性糖和脯氨酸的含量分别在土壤 Cd 处理浓度为 $30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $40\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最高,相应地,单宁、可溶性糖和脯氨酸浓度最高分别达到 $66.2\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $105.0\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $12.22\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; Cd 胁迫对脯氨酸含量的影响极显著,因此可以作为秋茄对 Cd 污染的检测指标。

关键词: Cd; 秋茄; 单宁; 脯氨酸; 可溶性糖

文章编号:1000-0933(2006)10-3366-06 中图分类号:Q143, Q948, X503.23 文献标识码:A

Effect of cadmium stress on the contents of tannin, soluble sugar and proline in *Kandelia candel* (L.) Druce seedlings

QIN Guang-Qiu, YAN Chong-Ling*, WEI Li-Li (Laboratory of Pollution Ecology, School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3366~3371.

Abstract: Soil-culture medium was used to investigate the physiological and ecological response of the *Kandelia candel* (L.) Druce to cadmium pollution stress, including the contents of tannin, soluble sugar and proline. The seedlings were cultured in greenhouse conditions under a series of cadmium pollution stress ($0\sim 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) from the beginning of May in 2004 to the end of December in 2004. After harvesting, the contents of tannin, soluble sugar and proline of leaves in *Kandelia candel* (L.) Druce were measured. The results showed that contents of tannin, soluble sugar and proline all increased firstly in lower cadmium stress, which might be regarded as a self-protecting function of plants. After they reached the highest values, $66.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $105.0\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $12.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, when the treated concentration of CdCl_2 was $30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $40\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, the contents of these solutes decreased. This indicates that the plants would have been harmed at the greater amount of cadmium. The increasing concentration of tannin might result in the over accumulation of cadmium in *Kandelia candel* (L.) Druce. As tannin can combine with cadmium, however, it could reduce the toxicity of this pollutant. The increasing concentration of soluble sugar and proline functioned as osmotic adjustors, so the heavy metal cadmium could be less harmful to the plant. As the content of proline was significantly influenced by the cadmium stress, it could provide a valuable monitoring index of heavy metal cadmium pollution.

Key words: *Kandelia candel* (L.) Druce; cadmium; tannin; soluble sugar; proline

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30530150;30470301)

收稿日期:2005-07-02; **修订日期:**2006-02-04

作者简介:覃光球(1982~),男,广西南宁人,硕士生,主要从事污染生态学研究. E-mail: qinguangqiu@sina.com

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

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30530150; 30470301)

Received date: 2005-07-02; **Accepted date:** 2006-02-04

Biography: QIN Guang-Qiu, Master candidate, mainly engaged in pollution ecology. E-mail: qinguangqiu@sina.com

红树林是热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,对维持生态平衡和保护环境起着重要的作用。秋茄 [*Kandelia candel* (L.) Druce]是红树植物群里中最为常见的红树植物之一^[1]。

由于生长在海陆交汇的河口海湾地带,红树林面临着来自江河流域和海岸城市经济发展所带来的各种污染物的冲击,其中重金属污染尤为严重持久。重金属对红树林的作用以及红树林对重金属的累积及动态研究已经受到重视^[2~5]。研究表明红树植物对重金属 Cd 污染具有一定的耐受性和抗性^[6~8]。

红树植物是单宁含量最高的植物种类之一^[9]。红树植物体内丰富的单宁含量在其抵御各种不良环境中发挥着积极的作用^[10]。可溶性糖和脯氨酸是植物细胞渗透调节的重要物质。在逆境条件下,植物通过合成积累可溶性糖和脯氨酸等有机物质来调节细胞内的渗透压,稳定细胞中酶分子的活性构象,保护酶免受的直接伤害,增强适应环境的能力^[11]。

本文以红树植物秋茄为材料,研究其幼苗叶片中单宁、可溶性糖和脯氨酸的含量对重金属镉(Cd)胁迫的响应,旨在了解秋茄对重金属 Cd 的耐受性生理基础,包括:(1) Cd 胁迫与秋茄幼苗叶片单宁含量之间的关系,探讨红树植物体内含量丰富的单宁在其抵御重金属 Cd 毒害的过程中发挥的作用;(2) 确定 Cd 胁迫对秋茄幼苗叶片可溶性糖含量的影响;(3) 确定 Cd 胁迫与秋茄幼苗叶片脯氨酸含量之间的关系。为红树林生态系统的保护和管理,以及植物修复湿地污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试验的土壤沉积物样品于 2004 年 2 月采自福建九龙江口龙海市浮宫镇红树林区,取亚表层土(5~20cm)。土壤 pH6.52,阳离子交换量(CEC)为 16.23me/100g,有机碳含量为 24.4g·kg⁻¹,水分含量为 43.68%,土壤颗粒的直径 90%以上小于 50μm。采集回来的土壤沉积物分装在 9 个塑料桶里(每桶 45kg),分别加入一定量的 CdCl₂,使各桶沉积物中的 CdCl₂ 含量分别为 0mg·kg⁻¹、0.5mg·kg⁻¹、1mg·kg⁻¹、5mg·kg⁻¹、10mg·kg⁻¹、20mg·kg⁻¹、30mg·kg⁻¹、40mg·kg⁻¹、50mg·kg⁻¹湿重。每星期加水并混匀 1 次,持续 8 个星期,以尽量保持沉积物的初始状态并使 CdCl₂ 在土壤中均匀分布。

盆栽前分别取各处理土样,用 HF、HNO₃ 和 HClO₄ 消化后,采用原子吸收光谱法测定 CdCl₂ 处理后土壤(干重)的实际 Cd 含量,结果如表 1。

供试验的秋茄胚轴于 2004 年 4 月采自福建九龙江口龙海市浮宫镇红树林区,选取刚从母树上掉落的成熟、大小相对一致、生活力强的胚轴进行培养。

1.2 栽培试验

栽培试验用玻璃容器,尺寸为 400mm×200mm×250mm。每箱含上述用 Cd 处理好的土壤沉积物约 13kg,种植秋茄胚轴 15 根。每个处理设置 3 个重复,置于温室中进行培养,培养期 8 个月。培养期间每天用自来水补足蒸发损失的水量。

1.3 测定方法

单宁含量的测定参考 Terrill 等^[12]的方法。可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[13]。脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法^[13]。

1.4 数据处理

试验原始数据的处理采用 Excel 软件完成,差异显著性分析采用 SPSS11.5 软件完成。

2 实验结果

2.1 Cd 胁迫下秋茄幼苗叶片单宁含量的变化

表 1 不同处理土壤中镉的浓度

Table 1 The contents of Cd in soil

CdCl ₂ 处理浓度 CdCl ₂ treatment (mg·kg ⁻¹ ,WW)	盆栽前总镉浓度 Contents of Cd before culture (mg·kg ⁻¹ ,DW)
0	1.16 ±0.08
0.5	2.28 ±0.07
1	3.43 ±0.19
5	11.72 ±0.43
10	24.68 ±0.79
20	44.29 ±0.14
30	70.41 ±0.92
40	90.18 ±2.78
50	112.86 ±3.03

Cd 胁迫下,秋茄幼苗叶片的单宁含量变化呈单峰曲线(图 1),其变化范围为 $5.1 \sim 66.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Cd 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,单宁含量达到最高值,为对照含量的 12.96 倍。在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤 Cd 浓度下,单宁含量降至 $20.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,但仍高于对照,为对照的 402.1%。方差分析结果表明,Cd 处理浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,单宁含量与对照相比差异极显著 ($p = 0.008$)。

2.2 Cd 胁迫下秋茄幼苗叶片可溶性糖含量的变化

实验结果(图 2)表明:低浓度的 Cd 胁迫使秋茄叶片可溶性糖含量增加,高浓度的 Cd 胁迫使可溶性糖含量迅速下降。可溶性糖含量的变化范围为 $51.3 \sim 105.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤 Cd 浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,可溶性糖含量达到最高值,为对照的 188.7%。在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤 Cd 浓度下,可溶性糖含量降至 $57.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,但仍高于对照,为对照的 103.2%。方差分析结果表明,Cd 处理浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,可溶性糖含量与对照相比差异极显著 ($p = 0.006$)。

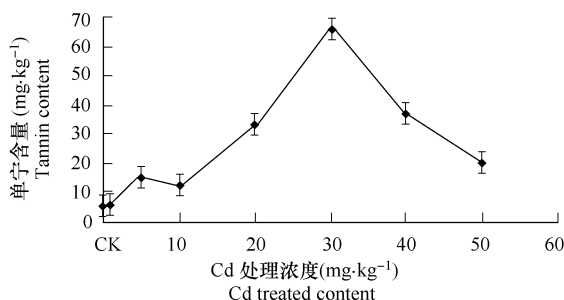


图 1 Cd 胁迫对秋茄叶片单宁含量的影响

Fig.1 Changes of tannin content of leaves in *Kandelia candel* (L.) Druce under Cd stress

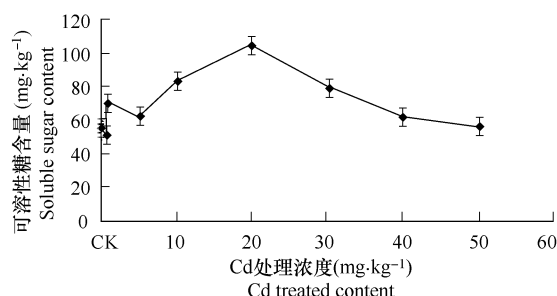


图 2 Cd 胁迫对秋茄叶片可溶性糖含量的影响

Fig.2 Changes of soluble sugars contents of leaves in *Kandelia candel* (L.) Druce under Cd stress

2.3 Cd 胁迫下秋茄幼苗叶片脯氨酸含量的变化

从图 3 可以看出,Cd 胁迫下秋茄叶片中的脯氨酸含量变化趋势也呈单峰曲线。脯氨酸含量的变化范围为 $2.4 \sim 12.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在土壤 Cd 浓度达到 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量达到最大值 $12.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,为对照的 510.1%。土壤 Cd 浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量降至 $8.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,但仍高于对照,为对照的 346.6%。用统计分析软件 SPSS 分析显示,各处理浓度间脯氨酸含量差异极显著 ($p = 0.00$)。方差分析结果表明,与对照相比,Cd 处理浓度大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量均达到极显著差异 ($p < 0.01$)。

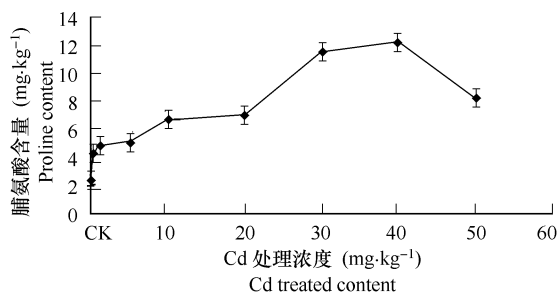


图 3 Cd 胁迫对秋茄叶片脯氨酸含量的影响

Fig.3 Changes of proline contents of leaves in *Kandelia candel* (L.) Druce under Cd stress

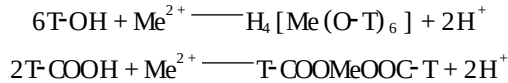
3 讨论

3.1 Cd 胁迫对秋茄幼苗叶片单宁含量的影响

单宁是植物进化过程中所产生的一类起自身保护作用的次生化学成分。有研究表明,红树植物树皮单宁含量可达到树叶重量的 20%^[14]。单宁的存在对于植物的生存和进化有着重要的意义。由于单宁的涩味,减轻了昆虫和动物对植物的直接啃食。另外,单宁在红树植物的抗盐适应中发挥着重要的作用^[10]。单宁能与植物体内的蛋白质和纤维素结合,形成稳定的化合物^[15]。单宁亦可以与重金属离子结合,单宁作为污水处理中的重金属离子吸附剂的研究已有不少^[16~18]。已有研究表明,红树植物体内的单宁能与重金属离子结合形成难溶的化合物或络合物,降低重金属离子的毒性^[7,8]。

本实验中,秋茄在低浓度的 Cd 胁迫下,其叶片中的单宁含量有上升的趋势,在 Cd 浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以

前,单宁含量上升的趋势比较平缓,这说明秋茄幼苗对 Cd 有一定的耐受性。Cd 胁迫浓度为 $10\sim 30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,单宁含量大幅度增加,最高达到空白对照的 12.96 倍。已有研究表明,单宁分子具有多个活性基团(酚羟基、羧基等)且易溶于水,在适宜的条件下,重金属离子可与单宁中的酚羟基、羧基等的氢原子发生离子交换,形成络合物而被吸附^[19]。单宁与重金属离子相接触时,可发生如下反应(以 Me^{2+} 代表二价金属离子)^[20]:



因此,推测红树植物的高单宁含量可能有利于对重金属的固定,秋茄通过增加叶片中的单宁含量来减弱 Cd 的毒害。方差分析结果显示,在 Cd 处理浓度为 $30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的单宁含量与空白对照的差异极显著($p = 0.008$)。在一定浓度范围内的 Cd 胁迫下,单宁含量的增加在一定程度上体现了单宁在秋茄抵抗 Cd 毒害过程中发挥的作用,其机理有待深入研究。

3.2 Cd 胁迫对秋茄幼苗叶片可溶性糖含量的影响

可溶性糖是植物体内一种重要的渗透调节物质,水分胁迫、盐胁迫、冷胁迫等不良环境都会使植物体内的可溶性糖含量发生显著变化^[21~23]。虽然大部分研究认为 Cd 对植物体内糖代谢有影响,但是其影响程度尚无一致结论。对蚕豆种子和烟草的研究表明,低浓度 Cd 胁迫使植物体内可溶性糖含量增加,高浓度 Cd 胁迫使植物体内可溶性糖含量降低^[24]。对高等水生植物的研究表明,耐性较强的凤眼莲和较敏感的紫背萍叶片可溶性糖含量均随水中 Cd 浓度的升高而增加^[24]。但也有不同的研究结果:白蒿^[25]等人研究了水体 Cd 污染对水稻种苗初期生长的影响,发现可溶性糖含量随着 Cd 胁迫浓度的增大而呈下降趋势。杨居荣^[24]等的研究表明玉米、大豆和黄瓜的可溶性糖含量因 Cd 污染而下降。

本研究表明,秋茄幼苗叶片中的可溶性糖含量随着 Cd 胁迫浓度的增加出现先升后降的趋势。方差分析结果显示,在 Cd 处理浓度为 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,可溶性糖含量与空白对照的差异极显著($p = 0.006$)。表明 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理浓度对秋茄幼苗叶片的可溶性糖含量产生了显著影响。当 Cd 浓度高于 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,可溶性糖的含量随 Cd 浓度的减小而迅速下降,这可以解释为 Cd 胁迫破坏了植物的光合作用系统,使植物对 CO_2 的固定减少造成的^[26]。有研究认为, Cd^{2+} 可使光合色素含量降低,进而使光合产物减少^[25]。当植物叶片局部积累过多的 Cd 时, Cd 可与蛋白质上的 -SH 等结合和取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 等,破坏叶绿体的结构和功能^[25],直接导致了在高浓度的 Cd 胁迫下,植物体内可溶性糖含量的迅速下降。但在本实验中,直到 Cd 浓度为 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,可溶性糖的含量还处在空白对照之上。这说明在 Cd 胁迫诱导了秋茄幼苗叶片中可溶性糖含量的增加,以减小 Cd 胁迫对其产生的不良影响,具有一定的耐 Cd 特性。

3.3 Cd 胁迫对秋茄幼苗叶片脯氨酸含量的影响

植物游离脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应,是植物在逆境下的适应表现。脯氨酸具有多种生理功能,如作为细胞质渗透调节物质、稳定生物大分子结构、降低细胞酸度以及作为能量库调节细胞氧化还原势等^[27]。许多植物在受到环境胁迫,例如在干旱、盐渍、低温等胁迫条件下时,体内的脯氨酸含量会发生很大的变化^[29~31]。因此,通常把脯氨酸含量变化作为植物体内氨基酸代谢是否发生障碍的指标。已有研究表明, Cd 胁迫下,植物体内的脯氨酸含量会发生显著变化,可高达到对照的 3~4 倍^[32]。

本实验的结果表明,秋茄幼苗叶片中的脯氨酸含量随着 Cd 胁迫浓度的增加出现先升后降的趋势。在土壤 Cd 浓度达到 $40\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量达到最大值 $12.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,为对照的 510.1%。胁迫条件下植物体内脯氨酸含量的剧烈变化已经在很多研究中得到证实^[33~35]。有研究表明, Cd 胁迫下植物体内脯氨酸等蛋白质含量的增加是由于 Cd 刺激植物体内 mRNA 的合成造成的^[32]。Cd 浓度大于 $40\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之后,脯氨酸的含量随着 Cd 浓度的增大而迅速下降,但在本实验的一系列浓度的 Cd 胁迫下,秋茄叶片的脯氨酸含量始终保持在空白对照之上。说明脯氨酸含量可以很好的指示 Cd 的存在。方差分析显示,各处理浓度间脯氨酸含量差异极显著($p = 0.00$);与对照相比, Cd 处理浓度大于 $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,脯氨酸含量均达到极显著差异($p < 0.01$)。证明 Cd 对秋茄叶片脯氨酸含量有显著影响,两者之间具有一定的相关性,因此脯氨酸可以作为秋茄对土壤 Cd 污

染的检测指标。在 Cd 胁迫下,秋茄幼苗可通过增加叶片中的脯氨酸含量,来抵御 Cd 的伤害,具有一定的抗 Cd 污染特性。

4 结论

秋茄幼苗叶片中的单宁、可溶性糖和脯氨酸含量均受土壤 Cd 胁迫的影响,表明 Cd 已被植物吸收运输到叶片中,并对植物叶片的生理代谢产生影响。

单宁、可溶性糖和脯氨酸的含量分别在土壤 CdCl₂ 处理浓度为 30mg·kg⁻¹、20mg·kg⁻¹和 40mg·kg⁻¹时达到最高值。相应地,单宁、可溶性糖和脯氨酸含量最高分别达到 66.2mg·g⁻¹、105.0mg·g⁻¹和 12.2mg·g⁻¹。三者的含量均随着 Cd 胁迫浓度的增加出现不同程度的先升后降的趋势。这表明秋茄幼苗对低浓度的 Cd 有一定的抵抗能力,但在高浓度的 Cd 胁迫下则受到伤害。

Cd 对脯氨酸含量的影响极显著 ($p = 0.00$),因此可以作为秋茄对 Cd 污染的检测指标。

References:

- [1] Lin P. Mangrove Research Papers (III). Xiamen: Xiamen University Press, 1990. 30~40.
- [2] Zheng W J, Zheng F Z, Lian Y W, et al. Accumulation and dynamics of Cu, Pb, Zn and Mn elements in *Kandelia candel* (L) Druce mangrove community of Jiulong River estuary of Fujian. Journal of Integrative Plant Biology, 1996, 38(3): 227~233.
- [3] Zan Q J, Wang Y J, Wang B S. Accumulation and cycle of heavy metal in *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* mangrove community at Futian of Shenzhen, China. Environmental Science, 2002, 23(4): 81~88.
- [4] Zheng W J, Lin P. Accumulation and distribution of Cr, Ni and Mn in an *Avicennia marina* mangrove community at Futian of Shenzhen. Oceanographic Literature Review, 1996, 43(12): 1280.
- [5] Tam N F Y, Wong Y S. Spatial and temporal variations of heavy metal contamination in sediments of a mangrove swamp in Hong Kong. Oceanographic Literature Review, 1996, 43(6): 619.
- [6] Yang S C, Wu Q. Effect of Cd on growth and physiological characteristics of *Aegiceras corniculatum* seedling. Marine Environmental Science, 2003, 22(1): 38~42.
- [7] Wang W Q, Lin P. Studies on the heavy metal pollution in mangrove ecosystems —— a review. Marine Sciences, 1999, (3): 45~48.
- [8] Zheng F Z, Lin P, Zheng W J. Study on the tolerance of *Kandelia candel* mangrove seedlings to cadmium. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(4): 408~414.
- [9] Zheng D Z, Zheng S F, Liao B W, et al. The utilization, protection and afforestation on mangrove wetland. Forest Research, 1995, 8(3): 322~328.
- [10] Lin Y M, Xiang P, Lin P. Studies on tannins of mangroves —— a review. Marine Sciences, 2005, 29(3): 60~63.
- [11] Xu X M, Ye H C, Li G F. Progress in research of plant tolerance to saline stress. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2000, 6(4): 379~387.
- [12] Terrill T H, Rowan A M, Douglas G B, et al. Determination of extractable and bound condensed tannin concentrations in forage plant, protein concentrate meals cereal grains. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, 58: 321~329.
- [13] Li H S. The principles and techniques of plant physiological biochemical experimental. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [14] Hernes P J, Benner R, Cowie G L, et al. Tannin diagenesis in mangrove leaves from a tropical estuary: A novel molecular approach. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(18): 3109~3122.
- [15] Guo Y J, Zhang D G, Long R J, et al. The seasonal dynamics of the condensed tannins in forages and shrubs in alpine meadow. Journal of Sichuan Grassland, 2004, 6: 3~5.
- [16] Liao X P, Ma H W, Wang R, et al. Adsorption of UO_2^{2+} on tannins immobilized collagen fiber membrane. Journal of Membrane Science, 2004, 243: 235~241.
- [17] Ogata T, Nakano Y. Mechanisms of gold recovery from aqueous solutions using a novel tannin gel adsorbent synthesized from natural condensed tannin. Water Research, 2005, 39: 4281~4286.
- [18] Palma G, Freer J, Baeza J. Removal of metal ions by modified *Pinus radiata* bark and tannins from water solutions. Water Research, 2003, 37: 4974~4980.
- [19] Lei G Y. Advances of heavy metal ion sorbent. Metallic Ore Dressing Abroad, 2000, (10): 2~6.
- [20] Zhao X, Wu T B, Ye Y C. The heavy metal pollution and the eliminated techniques of the drinking water in our country. Water & Wastewater Engineering, 1998, 24(10): 22~25.
- [21] Ni Y, Guo Y J, Li J, et al. Physiological-biological changes of legumes under drought stress. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 25(3): 275~278.
- [22] Liu F R, Chen H Y, Liu Y, et al. Changes in solute content of different tomato genotypes under salt stress. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2004, 30(1): 99~104.
- [23] Yang S C, Li Y B, Lin P. Change of leaf caloric value from *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* mangrove plants under cold stress. Journal of

- Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(1): 46~52.
- [24] Yang J R, He J Q, Jiang W R. Effect of Cd pollution on the physiology and biochemistry of plant. Agro-environmental Protection, 1995, 14(5): 193~197.
- [25] Bai H, Li Q Z, Bai Y, et al. Effect of water cadmium pollution on primary growth of rice seedling. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(2): 128~130.
- [26] Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of *in vitro* cultured *Lupinus albus*. Plant Science, 1997, 128: 131~140.
- [27] Zhou Q X, Kong F X, Zhu L. Ecotoxicology: Principles and Methods. Beijing: Science Press, 2004. 336.
- [28] Ren A Z, Gao Y B, Liu S. Effects of Cr, Cd and Pb on free proline content etc in leaves of *Brassica chinensis* L.. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2000, 6(2): 112~116.
- [29] Liu E E, Zong H, Guo Z F, et al. Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2000, 8(3): 235~238.
- [30] Chen Y H, Yan C L, Li Y H, et al. Study on the characteristic of proline accumulation and active oxygen metabolism in *Rhizophora stylosa* under salt stress. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2004, 43(3): 402~405.
- [31] Niu M G, Wang X, Chen L, et al. The effect of the stress of drought, water logging and low-temperature on wheat physiological and biochemical characteristics. Seed, 2003, (4): 19~21.
- [32] Chakravarty B, Srivastava S. Effects of genotype and explant during *in vitro* response to cadmium Stress and variation in protein and proline contents in linseed. Annals of Botany, 1997, 79: 487~491.
- [33] Liu K B, Li S X. Effects of NaCl on elements balance, peroxidase isozyme and protein banding patterns of *Lycopersicon* leaf cultures and regenerated shoots. Scientia Horticulturae, 1991, 46: 97~107.
- [34] Chakravarty B, Srivastava S. Response to cadmium toxicity during *in vitro* growth in *Arachis hypogaea*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1994, 52: 749~755.
- [35] Sharma S S, Schat H, Vooijs R. *In vitro* alleviation of heavy metal-induced enzyme inhibition by proline. Phytochemistry, 1998, 49(6): 1531~1535.

参考文献:

- [1] 林鹏. 红树林研究论文集(1980~1989年). 厦门: 厦门大学出版社, 1990. 30~40.
- [2] 郑文教, 郑逢中, 连玉武, 等. 福建九龙江口秋茄红树林铜铅锌锰元素的积累及动态. 植物学报, 1996, 38(3): 227~233.
- [3] 曾启杰, 王勇军, 王伯荪. 深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落的重金属累积和循环. 环境科学, 2002, 23(4): 81~88.
- [6] 杨盛昌, 吴琦. Cd 对桐花树幼苗生长及某些生理特性的影响. 海洋环境科学, 2003, 22(1): 38~42.
- [7] 王文卿, 林鹏. 红树林生态系统重金属污染的研究. 海洋科学, 1999, (3): 45~48.
- [8] 郑逢中, 林鹏, 郑文教. 红树植物秋茄幼苗对镉耐性的研究. 生态学报, 1994, 14(4): 408~414.
- [9] 郑德璋, 郑松发, 廖宝文, 等. 红树林湿地的利用及其保护和造林. 林业科学研究, 1995, 8(3): 322~328.
- [10] 林益明, 向平, 林鹏. 红树林单宁的研究进展. 海洋科学, 2005, 29(3): 60~63.
- [11] 许祥明, 叶和春, 李国凤. 植物抗盐机理的研究进展. 应用与环境生物学报, 2000(6): 379~387.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2003. 195~197.
- [15] 郭彦军, 张德罡, 龙瑞军, 等. 高山灌木和牧草缩合丹宁含量季节变化动态研究. 四川草原, 2004, 6: 3~5.
- [19] 雷国元. 重金属离子吸附剂的研究进展. 国外金属矿选矿, 2000, (10): 2~6.
- [20] 赵璇, 吴天宝, 叶裕才. 我国饮用水源的重金属污染及治理技术深化问题. 给水排水, 1998, 24(10): 22~25.
- [21] 倪郁, 郭彦军, 吕俊, 等. 水分胁迫下豆科牧草的生理生化变化. 土壤通报, 2004, 25(3): 275~278.
- [22] 刘凤荣, 陈火英, 刘杨, 等. 盐胁迫下不同基因型番茄可溶性物质含量的变化. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(1): 99~104.
- [23] 杨盛昌, 李云波, 林鹏. 冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶片热值的变化. 台湾海峡, 2003, 22(1): 46~52.
- [24] 杨居荣, 贺建群, 蒋婉茹. Cd 污染对植物生理生化的影响. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193~197.
- [25] 白蒿, 李青芝, 白岩, 等. 水体镉污染对水稻种苗初期生长的影响. 吉林农业大学学报, 2003, 25(2): 128~130.
- [27] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学. 北京: 科学出版社, 2004. 336~337.
- [28] 任安芝, 高玉葆, 刘爽. 铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 112~116.
- [29] 刘娥娥, 宗会, 郭振飞, 等. 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 235~238.
- [30] 陈英华, 严重玲, 李裕红, 等. 盐胁迫下红海榄脯氨酸与活性氧代谢特征研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(3): 402~405.
- [31] 牛明功, 王贤, 陈龙, 等. 干旱、渍涝和低温胁迫对小麦生理生化特征的影响. 种子, 2003, (4): 19~21.