

重金属铬 (Ⅳ) 对红树植物白骨壤幼苗生长的影响*

方煜 郑文教** 万永吉 陈昌徐 盛华夏

(厦门大学生命科学学院, 福建厦门 361005)

摘要 采用砂基栽培, 研究重金属铬 (III) 不同胁迫强度 (0 100 200 300 400 500 600 800 mg·L⁻¹) 和胁迫时间 (25 45 和 150 d) 条件下, 对红树植物白骨壤 (*Avicennia marina*) 成熟胚轴萌发及幼苗生长的影响。结果表明: Cr(III) 胁迫 (0~800 mg·L⁻¹) 对白骨壤成熟胚轴的初期萌发无明显的影响。胁迫栽培 45 d 时, 随着 Cr(III) 浓度的提高, 白骨壤幼苗苗高生长、根系生长及各组分生物量和总生物量均表现出逐渐下降的趋势, 但下降幅度不大。当胁迫时间延长至 150 d 时, Cr(III) 浓度在 100 mg·L⁻¹ 时对幼苗的生长影响不明显, 而浓度在 100 mg·L⁻¹ 以上, 达到 200 mg·L⁻¹ 以上水平, 则对幼苗根系生长、苗高、叶片大小及生物量生长均具有明显抑制的作用, 并将随胁迫时间的增加而加剧。

关键词 红树植物; 白骨壤; 铬 (Ⅳ); 幼苗生长

中图分类号 Q945.78 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2008)03-0429-05

Effects of chromium (Ⅳ) on the seedling growth of mangrove species *Avicennia marina*.

FANG Yu, ZHENG Wen-jiao, WAN Yong-ji, CHEN Chang-xu, SHENG Hua-xia (School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(3): 429-433

Abstract By the method of sand culture, this paper studied the effects of different concentration chromium (Ⅳ) (0 100 200 300 400 500 600 800 mg·L⁻¹) on the matured hypocotyl germination and seedling growth of *Avicennia marina* on 25 45 and 150 days of treatment. The results showed that the germination of matured hypocotyl was not obviously affected by Cr(Ⅳ) during the early germination period. When the stress reached 45 days, the growth of stem height, root and component and total biomass was decreased with increasing Cr(Ⅳ) concentration, but the decrement was not remarkable. With the stress prolonging to 150 days, low Cr(Ⅳ) concentration (100 mg·L⁻¹) didn't have obvious negative effects on the seedling growth, but > 100 mg·L⁻¹, especially > 200 mg·L⁻¹ of Cr(Ⅳ) inhibited the growth of root, stem length, leaf size and biomass distinctly, and the effects would be more severe with extending stress time.

Key words mangrove, *Avicennia marina*, chromium (Ⅳ); seedling growth

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落, 是一项备受国内外广泛关注和重点保护的珍贵生物资源, 对维护海湾河口地区的生态平衡和生态环境保护具有十分重要的作用 (林鹏, 1984)。红树林湿地生境特殊, 地处陆海交汇的港湾河口区, 生境受到来自于陆地和海域的环境污染物的双重冲击。其中, 重金属作为一类重要的环境污染物质, 已引起国内外有关学者的重视并进行了广泛研究 (Walsh *et al.*, 1979; Zheng *et al.*, 1997; 王文

卿和林鹏, 1999; 陆志强等, 2002; MacFarlane & Burchett, 2002; Kehrig *et al.*, 2003)。Cr 作为环境中的一种主要重金属污染物, 会抑制作物种子萌发、阻碍幼苗发育、降低产量, 甚至导致作物的死亡 (Chen *et al.*, 1994; 张义贤, 1997; 马宏瑞等, 2006)。有关 Cr 对其它作物生长发育的影响已有不少研究, 但 Cr 对地处陆海交汇区的红树植物的影响尚未见报道。白骨壤 (*Avicennia marina*) 是我国红树植物的主要代表树种之一, 广泛分布于东南沿海, 尤以外海盐度较高地段为多, 是红树群落演替最前阶段的类型 (林鹏, 1984)。本文主要探讨了红树植物白骨壤幼苗的生长对重金属 Cr 污染胁迫的响应, 为科学预测与评价

* 福建省自然科学基金计划资助项目 (D0710025)。

** 通讯作者 E-mail: Zhengwenjiao2008@sina.com

收稿日期: 2007-06-06 接受日期: 2007-10-29

重金属污染物对红树植物的生物效应以及红树林湿地的生态环境保护, 提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

成熟的白骨壤胚轴 2006 年 10 月采自于福建省东南部漳江口红树林自然保护区的云霄竹塔村的海滩红树林。选择生活力强、无病虫害且大小相近的成熟胚轴 360 个, 用于栽培实验。

1.2 栽培实验

将白骨壤成熟胚轴栽培于盛沙塑料网框的砂基上, 并套入大小相近的塑料盆中, 每盆砂基高 10 cm、直径 28 cm, 每盆插植 15 个。培养液用 15‰海水和 CaCl_2 配置, 设置培养液含 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度梯度组分别为 0 (CK)、10Q 20Q 30Q 40Q 50Q 60Q 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 每盆加入培养液 1700 ml 每组均设 3 个重复, 共 24 个盆栽。实验盆栽置于玻璃温室, 在自然透光下栽培培养, 每 7 d 更换培养液 1 次, 每天用自来水补足散失的水量。在胁迫处理 25 d 时统计成熟胚轴的初期萌发率, 并在处理期全过程观测幼苗的生长状况, 并在栽培处理达 45 d 和 150 d 时分别分析测定幼苗的各项生长量、生物量等指标参数。

1.3 分析方法

1.3.1 成熟胚轴初期萌发率统计 萌发株数直接计数。萌发率 = 萌发株数 / 胚轴总数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 生长量分析 幼苗的根系长度、幼苗生长高度、叶片大小直接测量; 根系数量则直接计数。

1.3.3 生物量分析测定 根、茎、叶各组分分开, 测定各组份鲜质量, 后置于烘箱中 105°C 杀青 15 min, 于 80°C 烘至恒量。另取部分测定各组份含水量, 以求测生物量。

1.3.4 数据处理 实验结果进行数理统计, 结果用平均值 \pm 标准误 (Mean \pm SE) 表示, 用 t 检验法对组间数据进行差异性显著分析。

2 结果与分析

2.1 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫对白骨壤成熟胚轴初期萌发的影响

从表 1 可以看出, 不同浓度 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫处理白骨壤胚轴 25 d 时, 各处理组白骨壤胚轴的萌发百分数在 56% ~ 69%, 与对照组 (60%) 相比无明显差异。这结果表明, $\text{Cr}(\text{VI})$ 污染 (0 ~ 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对红树植物白骨壤胚轴的初期萌发无明显的负面影响。

表 1 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫对白骨壤胚轴萌发的影响

Tab 1 Effects of $\text{Cr}(\text{VI})$ on the shoot of *A. marina* seedlings hypocotyls

$\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	胚轴总数	萌发株数	萌发率 (%)
CK	45	27	60.0
100	45	26	57.8
200	45	31	68.9
300	45	28	62.2
400	45	27	60.0
500	45	25	55.6
600	45	28	62.2
800	45	29	64.4

2.2 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫对白骨壤幼苗苗高的影响

由图 1 可知, 胁迫栽培 45 d 时, 随着生长基 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度的提高, 白骨壤幼苗苗高生长量逐步降低, 如 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度为 300 和 600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 幼苗苗高生长量分别比对照低 21.4% 和 24.6%。当胁迫时间延长至 150 d 时, $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时苗高生长与对照相当, 达 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及以上水平时白骨壤幼苗苗高生长随 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度的提高迅速下降, 且下降幅度明显大于胁迫 45 d 如 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度为 300 和 600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时幼苗苗高生长分别比对照低 46.2% 和 67.8%。

这表明, 生长基 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度为 $\leq 100 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白骨壤幼苗苗高生长未受明显影响; $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度 $\geq 200 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对白骨壤幼苗苗高生长具有明显的抑制作用, 且抑制程度随胁迫时间的延长而加剧。

2.3 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫对白骨壤幼苗叶片的影响

不同浓度 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫栽培 150 d 对白骨壤幼苗叶片 (相对成熟稳定的叶片) 生长的影响见表 2。从表 2 可以看出, 生长基 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白骨壤幼苗叶片大小 (叶长与叶宽) 比对照略为减小, 但差异不明显 ($P > 0.05$); 而 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度 $\geq 200 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白骨壤幼苗叶长与叶宽均随着

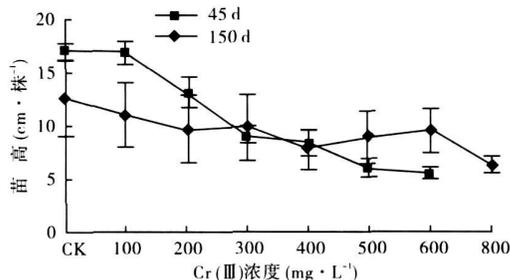


图 1 $\text{Cr}(\text{VI})$ 胁迫对白骨壤幼苗苗高的影响

Fig 1 Effects of $\text{Cr}(\text{VI})$ on the height of *A. marina* seedlings

表 2 Cr(Ⅵ)胁迫对白骨壤幼苗叶片大小的影响
 Tab 2 Effects of Cr(Ⅵ) on the size of leaves of *A. marina* seedlings

Cr(Ⅵ)浓度 (mg·L ⁻¹)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	叶长/叶宽
CK	5.7 ± 0.7	2.6 ± 0.3	2.1 ± 0.1
100	5.0 ± 0.4	2.4 ± 0.2	2.1 ± 0.1
200	3.8 ± 0.3 *	1.9 ± 0.1 *	2.0 ± 0.1
300	3.6 ± 0.8 *	1.6 ± 0.3 *	2.2 ± 0.2
400	2.8 ± 0.4 *	1.4 ± 0.2 *	2.0 ± 0.2
500	1.8 ± 0.3 *	1.0 ± 0.1 *	2.0 ± 0.2
600	1.4 ± 0.3 *	0.8 ± 0.2 *	1.7 ± 0.2 *

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ $n = 15$

Cr(Ⅵ)浓度的提高迅速下降, 与对照组相比差异显著或极显著。如 Cr(Ⅵ)浓度为 300 和 600 mg·L⁻¹ 的叶长分别比对照下降了 36.8% 和 75.4%, 叶宽分别比对照降低 38.5% 和 108.0%。

这表明, 生长基 Cr(Ⅵ)浓度 ≤ 100 mg·L⁻¹, 对红树植物白骨壤幼苗叶片大小的影响不明显; 而 ≥ 200 mg·L⁻¹, 则随着 Cr(Ⅵ)浓度的提高, 白骨壤幼苗叶片迅速变小, 且逐渐趋向于圆形化, 表现出 Cr(Ⅵ)胁迫对幼苗叶片生长具有明显的抑制影响。

2.4 Cr(Ⅵ)胁迫对白骨壤幼苗根系的影响

不同浓度 Cr(Ⅵ)胁迫栽培 45 d 和 150 d 对白骨壤幼苗根系生长的影响见图 2 和图 3。从图 2 可以看出, 无论是胁迫栽培 45 d 或 150 d 随着生长基 Cr(Ⅵ)胁迫浓度的提高, 白骨壤幼苗根数表现出一定的波动, 但各组间没有明显差异 ($P > 0.05$)。

从图 3 可以看出, Cr(Ⅵ)胁迫栽培 45 d 白骨壤幼苗根系长度表现为随生长基 Cr(Ⅵ)胁迫浓度的提高而变短, 如 Cr(Ⅵ)浓度为 300 和 600 mg·L⁻¹ 组, 幼苗根系长度分别比对照降低了 21.7% 和 56.5%。当胁迫时间延长到 150 d 时, 不同浓度 Cr(Ⅵ)胁迫下白骨壤幼苗根长生长的变化趋势与胁迫 45 d 时相似, 表现随 Cr(Ⅵ)浓度的提高幼苗

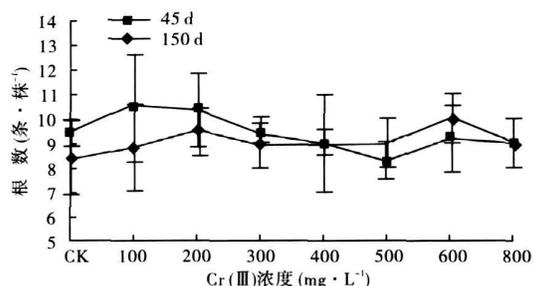


图 2 Cr(Ⅵ)对白骨壤幼苗根数的影响
 Fig 2 Effects of Cr(Ⅵ) on the of root number of *A. marina* seedlings

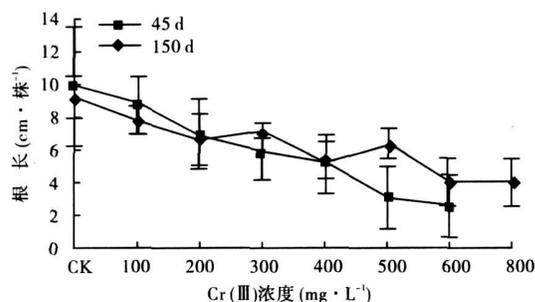


图 3 Cr(Ⅵ)对白骨壤幼苗根系长度的影响
 Fig 3 Effects of Cr(Ⅵ) on the length of roots of *A. marina* seedlings

根系长度生长量迅速降低, 且降低程度大于胁迫 45 d 如 300 和 600 mg·L⁻¹ 组, 白骨壤幼苗根系长度分别比对照下降了 39.9% 和 73.3%。

以上结果表明, Cr(Ⅵ)污染胁迫对红树植物白骨壤幼苗根数影响不明显, 但对根系长度生长有明显的抑制作用, 且影响程度随胁迫时间的延长而增加。

2.5 Cr(Ⅵ)胁迫对白骨壤幼苗生物量的影响

2.5.1 对根生物量影响 从图 4 可以看出, Cr(Ⅵ)胁迫栽培 45 d 时, 随胁迫浓度的提高根生物量虽然表现出一定的波动, 但变化不明显 ($P > 0.05$)。当胁迫时间延长达 150 d 时, 幼苗根生物量则明显表现随 Cr(Ⅵ)胁迫浓度的提高而迅速降低, 除 100 mg·L⁻¹ 组与对照组差异不显著外 ($P > 0.05$), 其余胁迫组级与对照均差异显著 ($P < 0.01$), 如 200 和 500 mg·L⁻¹ 组分别比对照低 51.8% 和 77.3%。

2.5.2 对茎生物量影响 胁迫栽培 45 d 时, 苗茎生物量的组间变化不明显 ($P > 0.05$), 但均略低于对照。当胁迫时间达 150 d 时, 100 mg·L⁻¹ 组与对照组间变化不明显; 但 ≥ 200 mg·L⁻¹ 时, 幼苗茎生物量显著降低 ($P < 0.01$), 如 200 和 500 mg·L⁻¹ 组分别比对照低 29.5% 和 66.6%。

2.5.3 对叶生物量影响 从图 4 可以看出, 胁迫处理 45 d 时, 幼苗叶生物量随 Cr(Ⅵ)浓度的提高平缓下降, 如 300 和 600 mg·L⁻¹ 组分别比对照低 30.5% 和 41.3%。当胁迫时间达 150 d 低浓度 Cr(Ⅵ) (100 mg·L⁻¹) 对叶生物量有一定的促进作用, 如 Cr(Ⅵ)为 100 mg·L⁻¹ 时, 白骨壤幼苗叶生物量较对照提高 28.4%; ≥ 200 mg·L⁻¹ 时, 叶生物量则迅速减少, 且均低于对照, 如 300 和 600 mg·L⁻¹ 组分别比对照低 45.9% 和 66.8%。

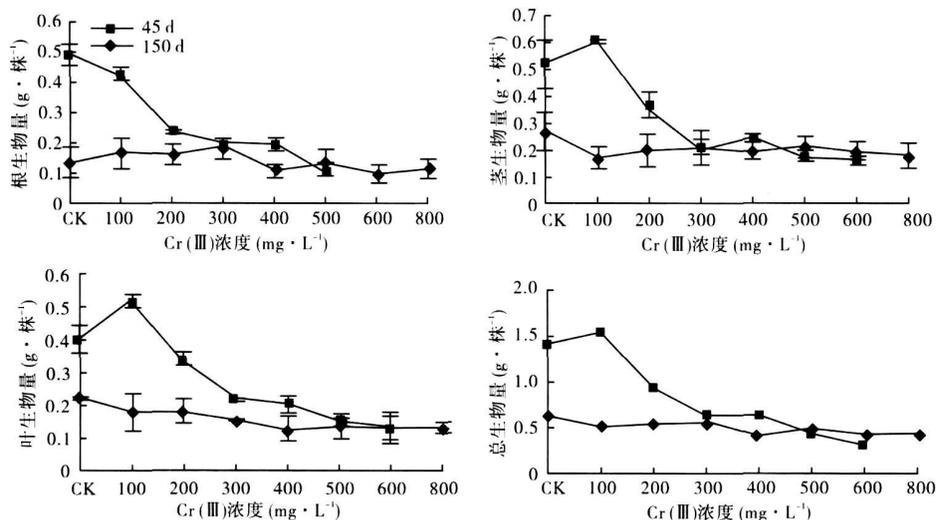


图 4 Cr(Ⅲ)对白骨壤幼苗生物量的影响
Fig 4 Effects of Cr(Ⅲ) on the biomass of *A. marina* seedlings

2.5.4 对总生物量影响 总生物量变化趋势与上述各组分生物量变化趋势相似,胁迫栽培 45 d 时各组总生物量随生长基 Cr(Ⅲ)浓度的提高而平缓下降,但变化不明显。当胁迫时间延长达 150 d 低 Cr(Ⅲ)浓度组 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 总生物量与对照组相当, $\geq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时幼苗总生物量则迅速减少,如 300 和 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组幼苗总生物量分别比对照低 55.6% 和 78.6%。

这表明, Cr(Ⅲ)胁迫栽培 45 d 白骨壤幼苗各组分生物量及总生物量随 Cr(Ⅲ)胁迫浓度的提高而降低,表现 Cr(Ⅲ)的抑制作用,但幅度较小;当胁迫栽培期延长到 150 d 时,较低浓度 Cr(Ⅲ) ($\leq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对幼苗各组分生物量及总生物量的影响不明显,而 $\geq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 则表现出明显的抑制作用。

3 讨论

陈荣华和林鹏 (1988) 用含不同浓度 Hg ($0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 砂培秋茄 (*Kandelia candel*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 和白骨壤 3 种红树植物种苗表明,盐度为 17.5% 含 Hg $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度对秋茄种苗萌芽有延缓作用、桐花树种苗萌芽受抑制,而白骨壤种苗萌芽和展叶均不受影响。郑逢中等 (1994) 用 10% 盐度海水含不同 Cd 浓度砂培秋茄种苗的研究表明, Cd 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对秋茄种苗的萌芽无影响,而 $\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 对秋茄种苗的萌芽和展叶具有明显的抑制作用。周希琴和李裕红 (2004)

的研究结果表明, Cr(Ⅲ) 浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 木麻黄种子浸种 7 d 时发芽率仅为 30%, 当 Cr(Ⅲ) 浓度 $\geq 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 7 d 内全部种子均未萌发。

从本研究表明,培养初期 (25 d) Cr(Ⅲ) 的污染胁迫 ($0 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对白骨壤种苗的萌发的影响不明显,对 Cr(Ⅲ) 具有较高的抗性,这与白骨壤种苗在萌苗阶段主要依赖于胚轴繁殖体储存的养分供应与缓冲可能有密切相关。

Cr 对其他作物生长影响的研究表明,玉米幼苗根长在 Cr(Ⅲ) 浓度为 $0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降幅明显, 300 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度 Cr(Ⅲ) 处理的玉米幼苗随培养时间的延长而最终致死 (10~15 d), 随着 Cr(Ⅲ) 浓度的提高, 幼苗株高、鲜物质质量和干物质质量均逐渐降低 (周希琴和吉前华, 2005); 琼脂培养基中 Cr(Ⅲ) 浓度达 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时风滚草 (*Salsola kali*) 根长和芽的生长均受到显著抑制 (Gardea-Torresdey *et al.*, 2005)。本研究表明, Cr(Ⅲ) 胁迫处理延长达 150 d 时白骨壤幼苗在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 仍可以很好的生长, 由此, 可见红树植物白骨壤较其他作物对重金属 Cr(Ⅲ) 有较强的耐受性。

据报道, 不同重金属对不同红树植物生长的影响的阈值不同: 生长基 Hg 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 (砂培) 可导致白骨壤种苗植株矮小、叶片小、子叶萎缩、只有侧根而无根毛等影响 (陈荣华和林鹏, 1988); 生长基 Cd 浓度 (砂培) 为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时秋茄幼苗的高生长和生物量生长不受影响, 而 $\geq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 种苗高和生物量受抑制 (郑逢中等, 1994); 生长基 Cd (砂培) 为 $0.05 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内

桐花树幼苗能存活, 其中 Cd 浓度 $< 0.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时略为促进植株的生长, 而浓度 $> 0.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时则抑制幼苗的生长 (杨盛昌和吴琦, 2003); 用土培白骨壤幼苗研究 Cu Zn 等对其生长和毒性等作用, 发现白骨壤苗高、叶片数量和面积在 Cu 浓度 $> 100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时明显减少, 总生物量和根生长在 $400 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时受到明显抑制, Zn 处理浓度为 $500 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时幼苗苗高、叶片生长、生物量和根生长被抑制 (MacFarlane & Burchett 2002)。

以上研究表明, 不同重金属对植物生长影响的阈值不同。从本研究表明, 重金属 Cr(Ⅵ)对白骨壤幼苗生长的影响表现为: 胁迫 45 d 时, 对白骨壤幼苗生长 (苗高、根系、生物量等指标参数) 均有一定的负效应, 但影响程度相对较小; 当胁迫时间延长达 150 d 时, Cr(Ⅵ)浓度在 $100 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对幼苗的生长影响不明显, 而浓度 $> 100 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 特别是 $> 200 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 则对幼苗根系生长、苗高、叶片大小及生物量生长均具有明显的抑制作用。可以认为: Cr(Ⅵ)浓度 $\leq 100 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对红树植物白骨壤幼苗的正常生长, 一般不会造成明显的不利影响; 而 $\geq 200 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 则对幼苗的生长具有明显的抑制作用, 并随胁迫时间的增加而加剧。

参考文献

- 陈荣华, 林 鹏. 1988 汞和盐度对三种红树种苗生长影响初探. 厦门大学学报(自然科学版), 27(1): 110-115
- 林 鹏. 1984 红树林. 北京: 海洋出版社.
- 陆志强, 郑文教, 彭荔红. 2002 红树林污染生态学研究进展. 海洋科学, 26(7): 26-29.
- 马宏瑞, 蔡 勇, 王晓蓉. 2006 制革污泥污染土壤中铬对小麦的富集及生化效应研究. 农业环境科学学报, 25(4): 846-851.
- 王文卿, 林 鹏. 1999 红树林生态系统重金属污染的研究.

- 海洋科学, 21(3): 45-48
- 杨盛昌, 吴 琦. 2003 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, 22(1): 38-42
- 郑逢中, 林 鹏, 郑文教. 1994 红树植物秋茄幼苗对镉耐性的研究. 生态学报, 14(4): 408-414
- 张义贤. 1997 三价铬和六价铬对大麦毒害效应的比较. 中国环境科学, 17(6): 565-568
- 周希琴, 李裕红. 2004 木麻黄种子萌发对铬胁迫的生理生态响应研究. 中国生态农业学报, 12(1): 53-55
- 周希琴, 吉前华. 2005 铬胁迫下不同品种玉米种子和幼苗的反应及其与铬积累的关系. 生态学杂志, 24(9): 1048-1052
- Chen YX, Zhu ZX, He ZY. 1994 Mechanisms of chromium transformations in soils and its effects on rice growth. 浙江农业大学学报, 20(1): 1-7.
- Garlea-Torresdey JL, de la Rosa G, Penalta-Vilea JR, et al. 2005 Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 48: 225-232
- Kehrig HA, Pinto FN, Moreira I et al. 2003 Heavy metals and methylmercury in a tropical coastal estuary and a mangrove in Brazil. Organic Geochemistry, 34: 661-669.
- MacFarlane GR, Burchett MD. 2002 Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Verh Marine Environmental Research, 54: 65-84.
- Walsh GE, Ainsworth KA, Rigby R. 1979 Resistance of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) seedlings to lead, cadmium and mercury. Biotropica, 11: 22-27.
- Zheng W J, Chen XY, Lin P. 1997 Accumulation and biological cycling of heavy metal elements in *Rhizophora stylosa* mangroves in Yinghuo Bay, China. Marine Ecology-Progress Series, 159: 293-301.

作者简介 方 焯, 女, 1982年生, 硕士研究生。主要从事红树植物生理生态研究。E-mail fangyu_lior@126.com
责任编辑 魏中青