

红树林重金属污染生态学研究进展

程 皓¹, 陈桂珠², 叶志鸿^{1,*}

(1. 有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 中山大学生命科学学院, 广州 510006; 2. 中山大学环境科学研究所, 广州 510275)

摘要: 红树林湿地, 由于其固有的一些特性, 能够大量接受来自潮汐、河水、地表径流所携带的重金属污染物。近 30a 来, 红树林湿地重金属污染问题已引起了国内外学者们的极大关注, 并对此进行了大量的研究。分别对重金属在红树林湿地中的分布与迁移、红树植物对重金属的生长响应及耐性机理等方面的研究进展和存在的问题进行了综述; 此外, 还对红树林湿地重金属净化效应的相关研究进行简要的概述。最后, 对今后的研究趋势提出了一些看法。

关键词: 红树林; 重金属; 耐性; 分布; 污水处理

文章编号: 1000-0933(2009)07-3893-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Research progress of heavy metal pollution in mangrove wetlands

CHENG Hao¹, CHEN Gui-Zhu², YE Zhi-Hong^{1,*}

1 State Key Laboratory for Bio-control, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University Guangzhou, 510006, China

2 Institute of Environmental Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3893 ~ 3900.

Abstract: Mangrove wetlands, due to their attributes, could receive a large amount of pollutants (e. g. heavy metals) from local drainages, rivers and tides. Heavy metal pollution in mangrove wetlands has aroused great concern and a great number of relevant researches have been conducted in last three decades. The paper here reviews the research progress and some issues relating to distribution and transfer of heavy metals in mangrove wetlands, response and tolerant mechanisms to heavy metals by mangrove plants. In addition, it also summarizes metal purifying effects by mangrove system. Finally, the paper discusses the trends of future researches on mangrove wetlands.

Key Words: mangrove; heavy metals; tolerance; distribution; sewage treatment

随着人口膨胀、城市化和工业化的急速发展, 加上船舶运输业、农业和渔业等人为活动的影响, 大量的点源、面源污染物被排放到江河湖海中, 给这些地区带来沉重的生态压力^[1~4]。其中重金属污染物, 因不能被生物降解、残留时间长和通过食物链富集等特性, 受到越来越多的关注^[5]。

如何处理受重金属污染的水体和土壤日益受到环境和生态学家们的重视。传统的重金属处理方法, 如物理、化学方法, 都存在价格昂贵、易造成二次污染等缺陷。近 20 年来, 湿地污水处理技术, 由于成本低、易操作、无副作用等特点, 得到迅猛发展^[6]。红树林湿地是分布于热带、亚热带海湾、河口潮间带重要的植被类型, 由于其固有的一些特性, 能够大量接受来自潮汐、河水、地表径流所携带的重金属污染物, 成为重金属污染物重要的源和汇^[7], 一些专家学者也由此提出利用红树林湿地处理重金属污水的建议和尝试^[8,9]。但在红树林湿地污水处理技术的应用和推广上还存在一定的距离。

为了达到这一目标, 非常重要的一步就是筛选出重金属净化效果好、重金属耐性高的红树植物种类, 及了解重金属在红树林湿地中的分布迁移特征和红树植物的重金属耐性机理。为此, 本文就国内外近年来红树林

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA091703); 国家自然科学基金资助项目 (30570345)

收稿日期: 2008-10-15; 修订日期: 2009-03-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lssyzhh@mail.sysu.edu.cn

湿地重金属污染的相关研究进行综述,并对以后的研究趋势提出了一些看法。

1 红树植物对重金属胁迫的生长响应

关于红树植物对重金属胁迫的生长响应的研究开展得较早,大量研究结果均表明红树植物能忍受一定程度的重金属胁迫^[10]。早在 1979 年 Walsh 等^[11]就利用土培实验,研究了大红树(*Rhizophora mangle*)幼苗对 Pb、Cd 和 Hg 胁迫的生长响应,并发现在实验浓度范围内 Pb 对大红树的生长基本无影响,而 Cd 和 Hg 则会抑制植物生长。Thomas 和 Eong^[12]在红茄冬(*Phizophora macronata*)和白海榄(*Avicennia alba*)幼苗的砂培实验中发现,两种植物幼苗在 250、500mg/kg 的 Zn 或 Pb 的培养土中的生长情况和对照相近。MacFarlane 和 Burchett^[13]在白骨壤(*Avicennia marina*)土培实验中发现,当 Cu、Zn 分别为 380、392 mg/kg 时,其生物量是对照组的一半;Cu、Zn 浓度分别高达 800、1000 mg/kg 时,白骨壤不能萌发;但 Pb 却对白骨壤幼苗的生长基本没影响。Chiu 等^[14]对秋茄(*Kandelia candel*)重金属耐性的研究结果表明,秋茄可在 Zn 和 Cu 均为 400 mg/kg 的土壤生长,但根、叶生长明显受到抑制。

陈荣华和林鹏^[15]用 10 mg/L 的 Hg 溶液浇灌秋茄、桐花(*Aegiceras coriculatum*)和白骨壤幼苗并发现,秋茄和桐花胚轴的萌芽均受抑制或延迟;白骨壤在此浓度下虽仍能正常萌芽,但整个植株的生长也受到明显的抑制,整个植物矮小,叶片小,根尖呈黑色。郑逢中等^[16]用类似方法研究了 Cd 对秋茄生长的影响,当 Cd 浓度为 25 mg/L 时,秋茄的生长受到明显抑制,50d 后叶片出现褪绿、萎焉,根系受害严重呈黑褐色,70d 后植株陆续死亡。Wong 等^[17]发现,桐花幼苗在 10 倍浓度人工污水灌溉下的一些生长形态指标,如基径、生物量、树高与对照组没有显著差异。Yim 和 Tam^[9]用不同浓度重金属的人工污水处理木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)幼苗时,发现高浓度污水时,植物明显受害,叶片提前变黄、生物量减少。但中、轻浓度的污水对木榄幼苗生长的影响不明显。

目前,关于红树植物对重金属胁迫的生长响应的相关研究均是对一种或少数几种红树植物单因子栽培实验,所涉及到的金属元素也仅限于 Pb、Zn、Cu、Hg、Cd。并且由于实验条件不一致,如栽培条件、重金属胁迫持续时间、植物生命周期等不同都可能导致实验结果差异较大。关于在同一培养条件下多种红树植物对重金属胁迫生长、生理响应的比较,以及造成红树植物重金属耐性差异的机制。

2 红树植物重金属耐性机理

关于红树植物重金属耐性机理,虽然国内外许多学者作了大量研究工作,但目前对红树植物的耐性机理还没有系统的认识,甚至在某些方面尚有争议^[10,11,18]。

2.1 根部重金属富集

大量研究证实,红树植物吸收的重金属主要积累于根部,只有少量的重金属被转运至叶片中,从而保护了地上敏感部分,提高植物的重金属耐性^[19~22]。MacFarlane 和 Burchett^[23]利用 X 射线能谱-扫描电镜对 Cu、Pb、Zn 在白骨壤根系中的微区分布进行了研究,并发现白骨壤根系的外皮层及凯氏带是阻止根部吸收、及向地上部分传输过多重金属的重要屏障。

2.2 根际微环境调节

关于根际微环境对红树植物重金属耐性的相关研究工作才刚起步,目前还尚无深入的机理性研究。红树植物根系的生命活动会直接影响根际土壤的微环境,如 pH、Eh 及微生物群落结构。Liu 等^[24]发现,秋茄根系的生命活动会降低根际区域的 pH、增加 Eh;同时也会改变根际区域 Cd 的存在形态,与非根际区域相比,根际区域重金属毒性较高的可交换态 Cd 及碳酸盐结合态 Cd 较少,而重金属毒性较低的铁、锰氧化物结合态 Cd 和有机质 Cd 较多,因此在一定程度上可以减轻 Cd 对植物的毒害。Krishnan 等^[25]发现红树林底泥中的一些细菌可减轻重金属 Fe、Mn 对植物的毒害。Lu 等^[26]研究表明,秋茄根际分泌的小分子有机酸可以改变 Cd 的存在形态,并由此猜测红树根系分泌的小分子有机酸对秋茄幼苗重金属耐性起重要作用。另外,高含量的 Fe、S 及有机质(均对 Eh 十分敏感)是红树林底泥的一个重要特征^[27],红树植物根系的存在会调控重金属与它们的螯合与吸附。如 Wilson 等^[28]发现白骨壤、白皮红树(*Laguncularia racemosa*)和大红树均可在根表形成

铁锰氧化膜,俗称铁膜^[29]。铁膜的形成则可以与重金属吸附或与之共沉淀,将重金属滞留在植株体外^[30~32],从而提高植物的重金属耐性。但 Clark 等^[33]研究却表明,红树林根系密集区由于其渗氧作用,显著抑制了生物毒性相对较低的重金属硫化物在根际的形成。

2.3 细胞调节和基因调控

高等植物可通过多种细胞调节机制来降低重金属毒性^[34],如细胞壁沉淀^[35,36]、细胞区域隔离^[37~39]、膜上运输调控^[40]、螯合作用^[41~44]等。目前,关于红树植物重金属胁迫细胞调节机制的研究很少。只有 MacFarlane 和 Burchett^[23,45]发现白骨壤的细胞壁中的 Pb、Zn、Cu 含量明显高于非细胞壁组分。对红树植物而言,关于重金属的细胞区域隔离、重金属结合蛋白、重金属在质膜上的行为特征等的研究都是空白。

随着研究的深入,对于植物重金属耐性机理的研究已渐渐深入到分子、基因水平。Macnair^[46]提出植物重金属耐性的机制是由多基因控制的,如重金属转运蛋白基因、重金属结合蛋白、植物螯合肽合酶、以及 PvSR2、Ubiquitin 等抗性相关基因。但关于红树植物重金属耐性基因调控方面的研究也几近空白,仅 Mendoza 等^[47]发现,在低浓度的 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 刺激下,黑皮红树(*Avicennia germinans*)叶片 *AvPCS* 的表达在 4h 内显著上升,但 *AvMt2* 在 16h 内只有少量上升。并指出基因 *AvPCS* 表达的激增可能对减轻 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 毒害起一定的作用。

2.4 通过盐腺将多余的重金属排出体外

Baker 等^[48]认为,排斥和富集是高等植物耐受环境中高浓度重金属的两种基本策略。一些红树植物,如白骨壤、桐花的叶片具有泌盐功能,它们能通过叶表面的盐生腺体将积累在叶片内多余的盐重新排出体外^[49]。MacFarlane 和 Burchett^[45]通过收集和分析白骨壤叶片分泌物,发现在 Zn 和 Cu 污染下,白骨壤分泌的盐晶中的 Zn 和 Cu 的含量显著高于对照,并通过 X 射线能谱-扫描电镜证实了白骨壤叶表面盐生腺体在分泌掉体内多余盐分的同时,也可以将 Zn 和 Cu 排出体外,从而减少重金属对植物的毒害。但目前对此方面的研究仅限于白骨壤,其它红树植物是否存在这一机制还不得而知。

2.5 生理调节机制

与其它形式的逆境胁迫相似,植物在受到一定程度的重金属胁迫时,也会产生大量活性氧自由基,引起膜脂伤害。但红树植物有一套完整的生理调节机制,保护植物免受重金属伤害,维持其正常生长。MacFarlane 和 Burchett^[50]发现,高浓度的 Zn 和 Cu 胁迫显著增加白骨壤叶片中过氧化物酶(POD)活性,并指出叶片中 POD 活性与土壤 Zn 和 Cu 含量正相关。Caregnato 等^[51]还发现,白骨壤叶片中谷胱甘肽还原酶(GR)活性与土壤 Zn 含量正相关。国内的学者们也做了一些关于红树植物对重金属生理响应的相关研究工作^[52,53]。如 Zhang 等^[54]分别用不同浓度的重金属污水灌溉桐花、木榄幼苗,随着重金属胁迫的加强,桐花、木榄幼苗的过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)的活性均随着重金属胁迫的加强,出现先增强,后减弱的趋势。陈桂奎等^[55]用 10 倍浓度的人工污水浇灌白骨壤,结果发现叶片中游离脯氨酸含量、叶片相对电导率及束缚水/自由水比例均显著增加。

3 重金属在红树林湿地的分布与迁移

红树林湿地,由于其固有的一些特性,如具有发达的根系、富含有机质、Fe、S 等,使得其较一般潮滩更易于富集重金属^[56~58]。就整个红树林湿地生态系统而言,红树林底泥是重金属主要的储存库,红树植物和凋落物所占的比例很少^[19,59]。此外,红树植物生命周期长,且每年通过落叶向环境输出重金属量很小,因此红树林湿地还是一个较为稳定的重金属库。Silva 等^[60]在研究重金属在巴西红树林中的分布与迁移规律中发现,红树林通过落叶向土壤释放 Fe、Al、Zn 和 Ni 的年平均速率仅分别为 0.56、1.11、0.02、0.07 mol/hm²; Cu、Pb、Cr 和 Cd 的年平均释放速率不到 0.02 mol/hm²。

一般说来,红树林底泥重金属含量大体上表现为:Fe > Mn > Zn > Cu、Pb > Ni > Cd^[61,62]。但由于红树林底泥土壤背景值、机械组成、理化特性的差异,不同红树林区底泥重金属含量变化范围较大,同一红树林湿地不同位置上重金属含量有时也可能存在较大差异^[63,64]。Harbison^[65]在研究澳大利亚南部 Baker 港红树林底泥重金属分布时发现,重金属含量与有机质含量、粘粒(<63 μm)含量呈正相关。阿联酋、澳大利亚昆士兰州东

南部的红树林区底泥中重金属分布也有类似规律^[61,66]。但也有一些相关研究得出了不同的结果,如 Tam 和 Yao^[67]在对香港红树林底泥重金属分布的研究中发现,只有 Cr、Ni、Mn 的含量与有机质含量呈显著正相关关系,其它几种重金属含量则与有机质含量没有显著相关关系。重金属在红树林底泥中的垂直分布也存在显著差异,重金属主要富集在红树林底泥的表层,只有在表层土壤饱和后,重金属才会向土壤下层迁移^[68]。此外,一些研究结果还表明,潮汐、季节、人为等因素也会影响重金属在红树林湿地中的分布^[69~72]。

4 红树林湿地重金属净化效应

由于红树林湿地的存在,涨潮时,海水涌入红树林湿地,就犹如给海水过滤一次。有研究发现涨潮时海水中的悬浮物颗粒及重金属含量远高于退潮时^[73,74]。另外,由于红树林湿地将大量的重金属污染物沉积于底泥中,从而对整个海湾河口生态系统起重金属净化作用。

近年来,人工红树林湿地重金属处理技术由于其高效、易操作、无副作用等优点,受到许多国内外学者们的青睐。陈桂珠等^[75]发现白骨壤人工模拟湿地对污水中重金属净化效果显著,重金属平均净化效率分别为: Pb 98%、Zn 90%、Cd 95%、Ni 94%。Tam 和 Wong^[59]发现秋茄人工模拟湿地对重金属的净化效果也十分显著,去除了污水中超过 90% 的 Pb、Ni、Cd。他们还发现随着污水中重金属含量的升高,秋茄人工模拟湿地重金属去除效率明显提高,如在正常浓度的重金属污水下,Zn 的净化效率不足 50%,而在 5 倍、10 倍浓度的重金属污水下,Zn 的净化效率均超过 90%。这一结果与缪绅裕和陈桂珠^[76]对秋茄人工模拟湿地重金属污染污水的净化效果的研究报道类似。缪绅裕等^[77]还根据物质平衡模型,得出在秋茄模拟湿地污水处理系统中的使用寿命至少为 20a。此外,Yim^[78]在实验中还发现,桐花和木榄混交林对重金属废水的净化效果比单一纯林好。但目前,大部分研究还只是停留在室内模拟和可行性分析上,离应用和推广还存在一定距离。筛选重金属净化效果好的红树植物及搭配方式,及探寻易推广的人工红树林湿地重金属污水处理模式已迫在眉睫。

5 展望

5.1 红树植物重金属耐性机理尚无系统性认识,仍需进一步研究

目前,对于红树植物重金属耐性机理并无系统性认识,在某些方面尚停留在推测阶段。今后以下几方面还有待进一步研究:①进一步探讨重金属在植物体内的运输、代谢途径;②根际微环境对红树植物重金属耐性的影响,如根部渗氧、铁膜、根际分泌物、土壤微生物对植物重金属耐性的关系;③探寻红树植物可能存在的抗重金属基因、蛋白、酶等以及关键代谢过程和抗性表达部位;④开展红树植物多重金属元素污染、重金属与有机污染物复合污染研究。⑤植物激素及细胞信号转导在红树植物忍耐重金属胁迫中的作用及机制。

5.2 红树林湿地污水处理技术的应用

大量的研究表明红树林湿地重金属污水处理技术有很好的应用前景,今后在该技术的应用和推广上,一方面要注重净化效率,筛选出重金属净化效果最好的红树植物及搭配方式,同时也要严防二次污染;另一方面要兼顾经济效益,与生产实践和人民生活联系起来。如人工湿地-物理化学污水复合处理模式、红树林种植-水产养殖复合立体经营模式、红树林种植-公园游憩旅游复合模式等都值得试验和推广。

References:

- [1] Defew L H, Mair J M, Guzman H M. An assessment of metal contamination in mangrove sediments and leaves from Punta Mala Bay. *Pacific Panama. Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 547—552.
- [2] Cuong D T, Bayen S, Wurl O, *et al.* Heavy metal contamination in mangrove habitats of Singapore. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 1732—1738.
- [3] Kehrig H A, Pinto F N, Moreira I, *et al.* Heavy metals and methylmercury in a tropical coastal estuary and a mangrove in Brazil. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 661—669.
- [4] Agoramoorthy G, Chen F A, Hsu M J. Threat of heavy metal pollution in halophytic and mangrove plants of Tamil Nadu, India. *Environmental Pollution*, 2008, 15: 320—326.
- [5] Wang H B, Shu W S, Lan C Y. Ecology for heavy pollution: recent advances and future prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 596

—605.

- [6] Breaux A, Farber S, Day J. Using natural wetlands systems for wastewater treatment: An economic benefit analysis. *Journal of Environmental Management*, 1995, 44, 285 — 291.
- [7] Ray A K, Tripathy S C, Patra S, *et al.* Assessment of Godavari estuarine mangrove ecosystem through trace metal studies. *Environment International*, 2006, 219 — 223.
- [8] Machado W, Moscatelli M, Rezende L G, *et al.* Mercury, zinc, and copper accumulation in mangrove sediments surrounding a large landfill in southeast Brazil. *Environmental Pollution*, 2002, 120: 455 — 461.
- [9] Yim M W, Tam N F Y. Effects of wastewater-borne heavy metal on mangrove plants and soil microbial activities. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 69(1): 179 — 186.
- [10] Wang W Q, Lin P. Studies on the heavy metal pollution in mangrove ecosystems — a review. *Marine Science*, 1999, 3: 45 — 47.
- [11] Walsh G E, Ainseorth K A, Rigby R. Resistance of red mangrove seedlings(*Phizophora mangle*) to lead cadmium and mercury. *Biotropica*, 1979, 11(1): 22 — 27.
- [12] Thomas C, Eong O J. Effects of the heavy metals Zn and Pb on *R. mucronata* and *A. alba* seedlings. In: Soepadmo E, Rao A M, MacIntosh M D, eds. *Proceedings of the Asian Symposium on Mangroves and Environment*. Malaysia: ISME, 1984. 568 — 574.
- [13] MacFarlane G R, Burchett M D. Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Environmental Research*, 2002, 54: 65 — 84.
- [14] Chiu C Y, Hsiu F S, Chen S S, *et al.* Reduced toxicity of Cu and Zn to mangrove seedlings in saline environments. *Botanica Bulletin Academia Sinica*, 1995, 36: 19 — 24.
- [15] Chen R H, Lin P. Influence of mercury and salinity on the growth of seedlings of three mangrove species. *Journal of Ximen University (Natural Science)*, 1989, 27(1): 110 — 115.
- [16] Zheng F Z, Lin P, Zheng W J. Study on the tolerance of *Kandelia candel* mangrove seedlings to cadmium. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(14): 408 — 414.
- [17] Wong Y S, Tam N F Y, Chen G Z, *et al.* Response of *Aegiceras corniculatum* to synthetic sewage under simulated tidal conditions. *Hydrobiologia*, 1997, 89 — 96.
- [18] Zhang F Q, Wang Y S, Yin J P, *et al.* Research advances on the resistance of mangrove plants to heavy metal pollution. *Acta Botanica Yunnanica*, 2005, 27(3): 225 — 231.
- [19] Zheng W J, Lin P. Accumulation and distribution of Cr, Ni and Mn in *Avicennia marina* mangrove community at Futian of Shenzhen. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(2): 139 — 144.
- [20] Alberts J J, Price M T, Kania M. Metal concentration in tissues of *Spartina alterniflora* and sediments of Georgia Salt Marshes. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1990, 30: 47 — 58.
- [21] MacFarlane G R, Koller C E, Blomberg S P. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69: 1454 — 1464.
- [22] Zheng F Z, Lin P, Zheng F Z, *et al.* Study on the adsorption and removal of *Kandelia candel* for pollutant cadmium. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(3): 220 — 226.
- [23] MacFarlane G R, Burchett M D. Cellular distribution of copper, lead and zinc in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Aquatic Botany*, 2000, 68: 45 — 59.
- [24] Liu J C, Yan C L, Zhang R F, *et al.* Speciation changes of cadmium in mangrove (*Kandelia candel* (L.)). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 80: 231 — 236.
- [25] Krishnan K P, Fernandes S O, Chandan G S, *et al.* Bacterial contribution to mitigation of iron and manganese in mangrove sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 1427 — 1423.
- [26] Lu H L, Yan C L, Liu J C. Low-molecular-weight organic acids exuded by Mangrove (*Kandelia candel* (L.) Druce) roots and their effect on cadmium species change in the rhizosphere. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61: 159 — 166.
- [27] Raman D J, Jonathan M P, Srinivasalu S, *et al.* Trace metal enrichments in core sediments in Muthupet mangroves, SE coast of India: application of acid leachable technique. *Environmental Pollution*, 145(1): 245 — 247.
- [28] Wilson M, Bruno B, Gueriro S D, *et al.* Trace metals in mangrove seedlings: role of iron plaque formation. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13: 199 — 206.

- [29] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al.* Copper and nickel uptake, accumulation and tolerance in *Typha latifolia* L. with and without iron plaque on the root surface. *New Phytologist*, 1997, 136: 481—488.
- [30] Taylor G J, Crowder A A. Uptake and Accumulation of heavy metals by *Typha latifolia* in wetlands of the Sudbury Ontario region. *Canadian Journal of Botany*, 1983, 61: 63—73.
- [31] Otte M L, Rozema J, Koster L, *et al.* Iron plaque on roots of *Aster tripolium* L: interaction with zinc uptake. *New Phytologist*, 1989, 111: 309—317.
- [32] Hu Z Y, Zhu Y G, Li M, *et al.* Sulfur (S)-induced enhancement of iron plaque formation in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Environmental Pollution*, 2006, 147 (2): 387—393.
- [33] Clark M W, McConchie D, Lewis D W, *et al.* Redox stratification and heavy metal partitioning in *Avicennia*-dominated mangrove sediments: a geochemical model. *Chemical Geology*, 1998, 149: 147—171.
- [34] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(366): 1—11.
- [35] Antonovics J, Bradshaw A D, Turner N G. Heavy metal tolerance in plants. *Advances in Ecological Researches*, 1971, 7: 1—85.
- [36] Molone C, Koeppel D E, Miller R J. Localization of lead accumulation by corn plants. *Plant Physiologist*, 1974, 3: 388—394.
- [37] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 2001, 212: 475—486.
- [38] Wang J. Computer-simulated evaluation of possible mechanisms for quenching heavy metal ion activity in plant vacuoles. *Plant Physiologist*, 1991, 97: 1154—1160.
- [39] Rauser W E, Ackerley C A. Localization of Cadmium in granules within differentiating and mature root cells. *Canadian Journal of Botany*, 1987, 65: 643—646.
- [40] Nies D H, Silver S. Plasmid-determined inducible efflux is responsible for resistance to Cadmium, Zinc and cobalt in *Alcatigenes eutrophus*. *Journal of Bacteriology*, 1989, 171: 896—900.
- [41] Ma J F, Hiradate S, Matsumoto H. High aluminum resistance in buck wheat II oxalic acid detoxifies aluminum internally. *Plant Physiologist*, 1998, 117: 753—759.
- [42] Grill E W, Innacker E L, Zenk M H. Phytochelatin: a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of America*, 1987, 84: 439—443.
- [43] Tan W N, Li Z A, Zou B. Molecular mechanisms of plant tolerance to heavy metals. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 703—712.
- [44] Zhou J, Goldsbrough P B. Functional homologs of fungal metallothionein genes from *Arabidopsis*. *Plant Cell*, 1994, 6: 875—884.
- [45] MacFarlane G R, Burchett M D. Zinc distribution and excretion in the leaves of the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Environmental Experimental Botany*, 1999, 41: 167—175.
- [46] Meharg A A. Integrated tolerance mechanisms: Constitutive and adaptive plant responses to elevate metal concentration in the environment. *Plant Cell and Environment*, 1994, 17: 989—993.
- [47] Mendoza G D, Moreno A Q, Perez Z O. Coordinated responses of phytochelatin synthase and metallothionein genes in black mangrove, *Avicennia Germinans*, exposed to cadmium and copper. *Aquatic Toxicology*, 2007, 83: 306—314.
- [48] Baker A J. Accumulators and excluders: Strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1-4): 643—654.
- [49] Ru Q M, Zheng H L, Xiao Q. Advances in salt-tolerance mechanism of mangrove. *Acta Botanica Yunnanica*, 2006, 28(1): 78—84.
- [50] MacFarlane G R, Burchett M D. Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy metals stress in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(3): 233—240.
- [51] Cargnato F F, Koller C E, MacFarlane G R, *et al.* The glutathione antioxidant system as a biomarker suite for assessment of heavy metal exposure and effect in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 1119—1127.
- [52] Yang S C, Wu Q. Effect of Cd on growth and physiological characteristics of *Ageiceras constrictatum* seedlings. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(1): 38—42.
- [53] Jing Y X, Ren Y L, Chen G Z. Studies of eco-physiological characteristics of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1612—1619.
- [54] Zhang F Q, Wang Y S, Lou Z P, *et al.* Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*). *Chemosphere*, 2007, 67: 44—50.
- [55] Chen G K, Chen G Z, Huang Y S, *et al.* Effect of artificial waste water on some eco-physiological characteristics of *Avicennia marina* seedlings.

- Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10 (1): 95—98.
- [56] Patharbison. Mangrove muds a sink and a source for trace metals. Marine Pollution bulletin, 1989, 17(6): 246—250.
- [57] Alongi D M, Tzner J P, Trott L A, *et al.* Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 63: 605—618.
- [58] Guo T Z, Delaune R D, Patrick W H. The influence of sediment redox chemistry on chemically active forms of arsenic, cadmium, chromium and zinc in estuarine sediment. Environmental International, 1997, 3: 305—316.
- [59] Tam N F Y, Wang Y S. Accumulation and distribution of heavy metals in a simulated mangrove system treated with sewage. Hydrobiologia, 1997, 352: 67—75.
- [60] Silva C A R E, Silva A P D, Oliveira S R D. Concentration, stock and transport rate of heavy metals in a tropical red mangrove, Natal, Brazil. Marine Chemistry, 2006, 99: 2—11.
- [61] Shriadah M M A. Heavy metals in mangrove sediments of the United Arab Emirates shoreline (Arabian Gulf). Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 116: 523—534.
- [62] Kruitwagen G, Pratap H B, Covaci A, *et al.* Status of pollution in mangrove ecosystems along coast of Tanzania. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(5): 1022—1031.
- [63] Tam N F Y, Wong Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. Environmental Pollution, 2000, 110: 195—205.
- [64] Marini M E J, Jiménez M F S, Osuna F P. Trace metals accumulation patterns in a mangrove lagoon ecosystem, Mazatlán Harbor, southeast gulf of California. Journal of Environmental Science and Health, 2008, 43(9): 995—1005.
- [65] Harbison P. Mangrove muds — a sink and a source for trace metals. Marine Pollution Bulletin, 1986, 17: 246—250.
- [66] Micaela P, Malcolm E C. Metal occurrence and distribution in sediments and mangroves, Pumicestone region, southeast Queensland, Australia. Environmental International, 2002, 28: 433—449.
- [67] Tam N F Y, Yao M W Y. Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments. The Science of the Total Environment, 1998, 216: 33—39.
- [68] Tam N F Y, Wang Y S. Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater. Environmental Pollution, 1996, 94: 283—291.
- [69] Praveena S M, Ahmed A, Radojevic M, *et al.* Heavy metals in mangrove surface sediment of Mengkabong lagoon, Sabah: multivariate and geo-accumulation index approaches. International Journal of Environmental Research, 2008, 2(2): 139—148.
- [70] Essien J P, Benson N U, Antai S P. Seasonal dynamics of physicochemical properties and heavy metal burdens in mangrove sediments and surface water of the brackish Qua Iboe estuary, Nigeria. Toxicological and Environmental Chemistry, 2008, 90(2): 259—273.
- [71] Mackey A P, Hodgkinson M C. Concentrations and spatial distribution of trace metals in mangrove sediments from Brisbane River, Australia. Environmental Pollution, 1995, 90(2): 181—186.
- [72] Yu R L, Yuan X, Zhao Y H, *et al.* Heavy metal pollution in intertidal sediment from Quanzhou Bay, China. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 664—669.
- [73] Lacerda L D, Pfeiffer W C, Fiszman M. Heavy metal distribution, availability and fate in Sepetiba Bay, S. E. Brazil. Science of the Total Environment, 1987, 65: 163—167.
- [74] Machado E C, Machado W, Bellido L F, *et al.* Removal of zinc from tidal water by sediments of a mangrove ecosystem: a radiotracer study. Water, Air and Soil Pollution, 2008, 192: 77—83.
- [75] Chen G Z, Chen G K, Tan F Y, *et al.* Purifying effects of *Avicennia marina* simulated wetland system on sewage. Marine Environmental Science, 2000, 19(4): 23—26.
- [76] Miao S Y, Chen G Z. Distribution, accumulation and migration of Ni and Cu in simulated *Kandelia candel* wetland system. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(5): 545—549.
- [77] Miao S Y, Chen G Z, Huang Y S. Allocation and capacity of zinc in artificial waste water in simulated wetland system with *Kandelia candel*. Chinese Journal of Applied Biology, 1999, 5(1): 8—10.
- [78] Yim M W. Remove of heavy metals from synthetic wastewater by mangrove microcosm and their impact. Master of Philosophy Thesis. City University of Hong Kong, 1999.

参考文献:

- [5] 王宏镭,束文圣,蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望. 生态学报, 2005, 25(3): 596 ~ 605.
- [10] 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 ~ 47.
- [15] 陈荣华,林鹏. 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), 1989, 27(1): 110 ~ 115.
- [16] 郑逢中,林鹏,郑文教. 红树植物秋茄对镉耐性的研究. 生态学报, 1994, 14(14): 408 ~ 414.
- [18] 张凤琴,王友绍,殷建平,等. 红树植物抗重金属污染研究进展. 云南植物研究, 2005, 27(3): 225 ~ 231.
- [19] 郑文教,林鹏. 深圳福田白骨壤群落 Cr、Ni、Mn 的累积及分布. 应用生态学报, 1996, 7(2): 139 ~ 144.
- [22] 郑逢中,林鹏,郑文教,等. 秋茄对镉的吸收、积累及净化作用的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(3): 220 ~ 226.
- [43] 谭万能,李志安,绉碧. 植物对重金属耐性的分子生态机理. 植物生态学报, 2006, 30(4): 703 ~ 712.
- [49] 茹巧美,郑海雷,肖强. 红树植物耐盐机理研究进展. 云南植物研究, 2006, 28(1): 78 ~ 84.
- [52] 杨盛昌,吴琦. Cd 对桐花树幼苗生长及其某些生理特性的影响. 海洋环境科学, 2003, 22(1): 38 ~ 42.
- [53] 靖元孝,任延丽,杨丹菁,等. 人工湿地污水处理系统三种红树植物抗性生理特性. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1544 ~ 1546.
- [55] 陈桂葵,陈桂珠,黄玉山,等. 人工污水对白骨壤幼苗生理生态特性的影响. 应用生态学报, 1999, 10(1): 95 ~ 98.
- [75] 陈桂珠,陈桂奎,谭凤仪,等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 23 ~ 26.
- [76] 缪绅裕,陈桂珠. 模拟秋茄湿地系统中镍、铜的分布积累与迁移. 环境科学学报, 1999, 19(5): 545 ~ 549.
- [77] 缪绅裕,陈桂珠,黄玉山,等. 模拟实验初探秋茄湿地系统中锌的分配与土壤容量. 应用与环境生物学报, 1999, 5(1): 8 ~ 10.