

重金属污染对红树植物影响的研究综述与展望

厦门大学环境科学研究中心 李裕红
泉州师范学院生物系 章幼玉

【摘要】红树林是热带、亚热带潮间带的优势植物群落,对环境重金属污染具有较高的耐受能力。该文从重金属的分布特点及红树植物生长与形态结构以及生理代谢等方面简要综述重金属污染对红树植物的影响研究,并在分子研究水平对该方向的研究提出展望。

【关键词】重金属污染 红树植物 研究综述

红树植物是热带、亚热带海湾河口优势植物种,是该生态系统的重要初级生产者,对维护海湾河口地区的生态平衡起着十分重要的作用。全世界热带、亚热带海岸 70%分布有红树林,全世界约有红树植物 20 科 27 属 70 种,中国有 12 科 25 属 37 种(含半红树植物)^[1],主要分布在南方沿海省份。随着现代江河流域工农业的迅猛发展,沿海城市人口与经济的快速增长,人为干扰使河口海湾区的环境污染日趋严重,严重影响着区域生态系统的健康生存与发展。红树林作为一种海岸潮间带森林生态系统,对海湾河口区域的污染具有较高承载力和耐受性,许多学者从不同的生物学层面对污染胁迫下的红树植物进行研究,本文主要综述和展望有关重金属污染对红树植物的影响研究。

1 重金属在红树植物体内的分布特征研究

重金属元素在红树植物体内的分布因重金属种类、植物种类以及器官组织的不同而异,植物各器官的重金属含量通常与基质环境重金属含量呈正相关关系,并与植物生长阶段和季节有关。

郑逢中等(1994)^[2]用土培和砂培相结合的方法研究秋茄(*Kandelia candel*)幼苗对 Cd 的耐受性时发现,无论是土培或砂培,植物体各器官镉积累量均随处理浓度的增加而增加,各器官对镉的积累能力表现为:根>胚轴>茎>叶,并发现经处理的秋茄根镉含量均比基质浓度高,表现出显著富集效应。郑文教等(1996)^[3]对福建九龙江口潮间带桐花树(*Aegiceras coniculatum*)对重金属的吸收和累积进行研究,植物对土壤元素的富集系数大小依次表现为 Cd>Zn>Mn>Cu>Pb。王文卿等(1997)^[4]研究福建九龙江口潮间带 5 种红树植物叶片的重金属分布特征时发现,红树植物叶片对重金属元素的累积含量大小均表现为: Mn>Zn>Cu>Pb>Cd,不同树种的元素含量大都有明显差异,叶片对 Pb 的富集能力最低,随叶片从幼叶-成熟叶-黄叶的生长发育, Mn、Pb、Cd 含量上升,而 Cu、Zn 则下降,叶片重金属含量随季节的变化而变化,变化规律随物种及元素种类而已。并总结认为红树植物叶片对林地土壤重金属元素的富集能力是低的,有利于对红树林生态系统的各级消费者提供洁净的食物。章金鸿等

(2000)^[5]对深圳福田红树林研究结果表明,不同部位的 Cd 含量,秋茄为根>枝>茎>叶,桐花树和白骨壤(*Avicennia marina*)均为根>茎>叶>枝;Cu 在秋茄、桐花树体内各部位含量大小大致为茎>根>胚轴(或花)>叶>枝,而在白骨壤则为根>茎>叶>枝;Zn 在秋茄、桐花树中各部位含量大小为根>茎>枝>叶>胚轴(或花);在白骨壤中为根>茎>叶>枝;Pb 在 3 种植物各部位含量均为根>茎>枝>叶,重金属从根运输到枝、叶,再到花、胚轴的速率,在秋茄体内的移动速率为 Cu>Cd>Zn>Pb;桐花树为 Cu>Zn>Cd>Pb;白骨壤为 Cu>Zn>Cd>Pb。MacFarlane 和 Burchett (2000) 研究发现,Cu、Zn 和 Pb 在白骨壤的根、叶器官内各组织中的分布存在差异,Zn、Pb 主要富集在根部细胞壁,从而阻止其向根部表皮运输,少量分布在叶表面的各种腺体组织中,也是重金属在细胞壁中的浓度高于细胞质中^[6]。

2 重金属对红树植物生长和形态结构的影响研究

红树植物对重金属污染具有较高的耐受性,但高浓度的重金属胁迫对红树植物的生长和形态结构会造成损伤性影响。Walsh 和 Rigby(1979)^[7]对大红树(*Rhizophora mangle*)幼苗进行重金属胁迫研究发现,大红树对重金属具有高耐受性,当土壤中 Pb、Cd 和 Hg 的浓度分别高达 250 μg/g、500 μg/g 和 100 μg/g 时,大红树幼苗未见明显受害症状。陈荣华等(1988)^[8]以 Hg 胁迫秋茄、桐花树和白骨壤幼苗研究表明,当 Hg 浓度达到 10-5 mol/L 时,秋茄和桐花树种苗的萌芽受抑制;而白骨壤在此浓度下仍能正常萌芽和展叶,另外,在 Hg 浓度为 10mol/L 时,秋茄幼苗根变短,呈黑褐色;桐花树幼苗的胚轴萎缩,植株茎叶扭曲,根系少且根表黄褐色,整个植株不断枯萎;白骨壤幼苗表现出植株矮小、叶片小、子叶萎缩,只有侧根而无根毛,根尖呈黑色。MacFarlane 和 Burchett (2002) 用不同浓度的 Zn、Pb 对白骨壤进行抗性研究发现,Zn、Pb 浓度分别为 500 μg/g 和 400 μg/g 时,植株的死亡率增加,植株高度受到明显的抑制,最大叶面积变小,生物量降低,表现出显著的植物毒害;当这两种重金属浓度稍低时,植株仍能正常的生长,其影响不明显^[9]。林志芬等(2003)用砂培实验研究秋茄对 Cd 的吸收积累和净化作用,结果显示:当 Cd 处理浓度

基金项目:福建省青年科技人才创新项目(2004J053)和泉州市科技局项目(2003Z11)

为 0~100mg/L 时,秋茄种苗的萌发率都与对照组相一致,之后随着处理浓度的增加,萌发百分数下降^[10]。杨盛昌和吴琦(2003)^[11]研究认为,当 Cd 浓度低于 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,桐花树种苗生长略受促进;当浓度超过 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,桐花树植株生长即受抑制。陈荣华和林鹏(1988)、郑逢中等(1992)在培养过程中也发现低浓度重金属能促进红树植物幼苗生长。陈荣华和林鹏(1989)认为,红树植物根中发达的凯氏带对减少根系吸收重金属离子有一定作用。

3 重金属对红树植物生理生化代谢的影响研究

3.1 重金属对红树植物抗氧化系统的影响

在重金属对红树植物抗氧化系统影响方面的研究主要集中于对其膜脂过氧化及抗氧化酶系统的研究上。

杨盛昌和吴琦(2003)^[11]通过砂培实验研究 Cd 对桐花树幼苗叶片的影响时发现,当培养液中 Cd 浓度低于 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,随 Cd 浓度的增加,桐花树幼苗叶片过氧化物酶(POD)和超氧化物酶(SOD)活性均有所提高,而当高于 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,过氧化物酶(POD)和超氧化物酶(SOD)活性均出现不同程度的下降;不同 Cd 浓度下,桐花树叶片的细胞膜透性变化不大,但膜脂过氧化作用随着 Cd 浓度的增加而不断增强。笔者在研究 Cd²⁺胁迫对水培桐花树幼苗根系的影响时发现以 0.25~10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}^{2+}$ 处理桐花树幼苗,其根系活力随胁迫浓度升高而下降,而 MDA、含量及 POD、CAT 活性均表现为诱导升高,并随 Cd²⁺浓度的加大而逐渐上升^[12]。张凤琴等(2006)^[13]研究认为木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)幼苗遭受 Zn²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺和 Hg²⁺复合重金属污染时,根系与叶片中 SOD、POD 活性均呈先升后降的趋势,但叶片中的 POD 和 SOD 变化幅度比根系中的变化幅度明显要低;叶片中 CAT 的活性与污染程度几乎没有关系,保持相对平稳,只在高度(15 倍污水)污染时 CAT 的活性才有下降的趋势,而根部 CAT 的活性随着污染程度的增加而增加,但在 15 倍污水下, CAT 活性明显下降但仍高于对照组水平;另外,木榄幼苗叶片中 MDA 的含量与遭受的复合重金属污染程度呈正相关,且随着 SOD、POD 和 CAT 活性的下降,而膜脂过氧化作用加剧。陈怀宇等(2006)^[14]通过土培实验研究铅胁迫对桐花树幼苗膜脂过氧化及抗氧化保护酶的影响,结果表明:桐花树幼苗受铅胁迫源于时间和浓度的双重影响。Pb²⁺胁迫浓度越高,使桐花树幼苗膜脂过氧化而引起的膜伤害越大;在 Pb²⁺浓度不超过 2 g/kg 鲜土时,POD、CAT 活性随铅浓度的升高而上升,但 3 g/kg 鲜土的高浓度 Pb²⁺胁迫使桐花树幼苗 POD、CAT 酶的防御保护能力发生障碍,POD、CAT 活性下降低于对照。

在一定浓度的重金属胁迫范围,红树植物抗氧化保护酶的活性上升、抗氧化保护能力加强是植物细胞通过自身的防御机制对重金属污染作出的一种应激反应通过自身的防御机制,对毒物作出的保护性反应。研究普遍认为抗氧化保护酶可作为环境毒物的敏感指示者,能从生理水平提示逆境给红树植物带来的伤害。

3.2 重金属对红树植物光合作用与营养代谢的影响

在环境胁迫条件下,红树植物能在减少水分的同时进行最大的光合 CO₂ 固定,以抵抗胁迫的影响^[15]。缪绅裕和陈桂珠(1997)等用正常、5 倍、10 倍浓度富含 Mn、Zn、Cu、Ni、Pb、Cr、Cd 及有机氮等污染物的人工污水对温室中模拟的秋茄湿地系统持续灌污 1 年,在排污 1 周、3 个月、11 个月和结束后 2 个月对

污水处理组及对照组植株秋茄幼苗的光合速率和温室中光通量密度、CO₂ 浓度、叶片温度进行同步测定,植株光合速率的实测值和计算值均显示,排污初期正常浓度组变化小,而 5 倍、10 倍浓度组稍下降;排污后期正常浓度组显著上升,较高浓度组恢复正常;停止排污 2 个月,各组间无显著差异。由光合速率研究结果提示秋茄苗对人工污水的耐受力 and 抗性较强,对高浓度污水有逐渐适应的过程^[16]。缪绅裕和陈桂珠(2001)等利用模拟秋茄湿地系统研究表明,秋茄幼苗可通过扩大其叶面积来弥补可能因污水污染所致叶绿素含量降低而给光合作用带来的损失^[17]。杨盛昌等(2003)^[11]在研究 Cd 对桐花树幼苗影响的结果显示:不同 Cd 浓度对桐花树幼苗叶片叶绿素含量的影响不同,在 Cd 浓度低于 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,桐花树幼苗叶片的叶绿素含量随 Cd 浓度的增加呈上升趋势,低浓度 Cd 胁迫对桐花树幼苗叶片的叶绿素合成有促进作用。当培养液中 Cd 浓度超过 0.5 $\mu\text{g/L}$ 时,叶片叶绿素含量开始下降,且叶绿素 a/b 值随培养液中 Cd 浓度的增加而降低,说明较高浓度的 Cd 胁迫对桐花树幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 均有一定的破坏作用,且对叶绿素 a 的破坏作用更为明显。

氮素由于其对动植物体的重要性,被称为“生命元素”,蛋白质的代谢在很大程度上是氮素的代谢。逆境对植物氮素代谢的影响是植物逆境生理研究的重要内容之一。谷氨酰胺合成酶(GS)和简称谷氨酸合酶(GOGAT)耦联形成的循环反应是高等植物体内氮同化的主要途径。笔者在研究 Pb²⁺对桐花树幼苗谷氨酰胺合成酶和谷氨酰胺合成酶活性的影响时发现外源 Pb²⁺处理使桐花树幼苗根、茎、叶谷氨酰胺合成酶和谷氨酰胺合成酶活性降低,且根 NADH-GOGAT 活性受 Pb²⁺胁迫抑制的程度明显大于茎、叶。

3.3 重金属对红树植物有机溶质累积的影响

覃光球等(2006)^[18]土培研究红树植物秋茄幼苗在 Cd 胁迫下叶片可溶性糖和脯氨酸的含量变化,研究表明:浓度小于 20mg/kg 的 Cd 胁迫使秋茄叶片可溶性糖含量增加,在土壤 Cd 浓度为 20mg/kg 时,达到最高值,Cd 浓度高于 20mg/kg 时,可溶性糖含量迅速下降,但仍高于对照;脯氨酸的含量在土壤 Cd 浓度达到 40mg/kg 时,达到最大值,土壤 Cd 浓度达到 50mg/kg 时,降至 813mg/g,但仍高于对照。吴桂容等(2006)^[19]采用土培方法研究浓度为 0.5~50 mg/kg 的 Cd 对桐花树幼苗的生长及渗透调节的影响。结果表明:当 Cd 浓度为 0.5 mg/kg 时,可刺激幼苗叶及根中淀粉合成,含量高于对照,叶中淀粉含量变化趋势总体随 Cd 浓度增加而下降;可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸的质量分数均随着 Cd 浓度的增加出现不同程度的先升后降的趋势。Ravikumar 等(2007)^[20]在研究 Hg 和 Zn 对 Manakudi 红树林生态系统的影响时发现较高浓度的 Hg 和 Zn 胁迫使红树植物体内的蛋白质和糖类含量呈下降趋势,而在较高浓度 Hg 和 Zn 胁迫下,红树植物体内蛋白质和糖类的含量上升。红树植物可通过渗透调节以增加体内有机溶质的累积来抵抗重金属污染的不利影响。

4 重金属对红树植物次生代谢的影响

植物次生代谢物是指植物中一大类并非植物生长发育所必需的小分子有机化合物。植物单宁(vegetable tannin),又称植物多酚(plant polyphenol)是一类广泛存在于植物体内的多元酚化合物,在维管植物中的含量仅次于纤维素、半纤维素和木质素,

主要存在于植物的皮、根、叶、果中,含量可达 20%,单宁对红树植物所处的特殊生态环境有着重要的生态适应意义。红树植物体内的单宁等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^[2]。林益明等(2005)认为:单宁对红树植物繁殖体的发育过程有着重要意义,同时单宁还有抑制微生物活动、杀灭病原菌的效能,增强了红树植物的抗病能力和抗海水腐蚀的能力^[21]。覃光球等(2006)^[18]以 0-50 mg/kg 土壤 Cd 胁迫秋茄幼苗时发现,在 Cd 浓度为 30mg/kg 时,秋茄幼苗单宁含量达到最高值,而在 50mg/kg 土壤 Cd 浓度下,单宁含量虽然下降但仍高于对照。

4 分子水平研究展望

随着现代分子生物学的发展及其向各个学科的渗透,人们对红树林这一独特珍贵资源的重要性的认识,越来越多的分子水平技术被应用于红树植物的研究,如采用等位酶、限制性内切酶片断长度多态性(RFL P)、扩增片断长度的多态性(A FL P)和随机扩增多态 DNA (RA PD)等手段进行研究红树植物种群的遗传变异和生态分化问题^[22],为可持续利用红树林资源提供了更多的依据。但到目前为止,在红树植物对重金属污染响应方面的研究主要集中于红树植物对重金属的富集以及生长、形态和生理学方面,对红树植物抗污染胁迫的分子机理方面的研究还极少有报道。

植物耐受重金属元素胁迫的机制包括阻止和控制重金属的吸收、体内螯合解毒、体内区室化分隔以及代谢平衡等。菌根、根系分泌物以及细胞膜是控制重金属进入植物根系细胞的主要生理单元(谭万能等,2001)^[23]。外生菌根能显著提高寄主植物的重金属耐性。根系分泌物通过改变根际 pH,改变金属物质的氧化还原状态和形成络合物等机理减少植物对重金属的吸收。细胞膜上相关金属离子转运蛋白与重金属的体内运输和平衡有关。金属硫蛋白(MTs)、植物螯合素(PCs)、有机酸及氨基酸等是植物体内主要的螯合物质,它们通过螯合作用固定金属离子,降低其生物毒性或改变其移动性。在重金属污染逆境条件下,植物体内的基因表达发生改变,一些正常基因关闭,而一些与适应性有关的基因启动表达,表现出正常蛋白合成受阻,逆境蛋白被诱导合成。一些并不结合重金属的胁迫蛋白的合成,对植物提高抗重金属胁迫能力有重要作用。如植物热激蛋白能诱导植物对重金属抗性的增加(Neumarm 等,1994)^[24]。对重金属污染耐受性强的红树植物在耐受重金属元素胁迫的各环节势必产生相关响应基因或功能蛋白质。分子生物学和生态学原理的结合,为污染生态学的研究开辟了一个广阔的研究领域。在分子水平探讨红树植物对重金属具较高耐受性的分子生态机理,发现可能在红树植物中普遍存在的高效的重金属结合物质及其控制基因,其展示的前景无疑是值得期待的。

参考文献

① 林鹏. 中国红树林生态学[M].北京:科学出版社,1995
 ② 郑逢中,林鹏,郑文教.红树植物秋茄幼苗对镉耐性的研究[J].生态学报.1994 14(4):408-414
 ③ 郑文教,王文卿,林鹏.九龙江口桐花树红树林对重金属的吸收与累积[J].应用与环境生物学报.1996,2(3):20-213

④ 王文卿,郑文教,林鹏.九龙江口红树植物叶片重金属元素含量及动态[J].台湾海峡.1997,16(2):233-238
 ⑤ 章金鸿,李玫,潘南明.深圳福田红树林对重金属 Cu, Pb, Z, Cd 的吸收,累积与循环[J].云南环境科学,2000,19(增刊):54-55
 ⑥ MacFarlane G. R., Burchett M. D. Cellular distribution of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk) Vierh [J]. Aquatic Botany. 2000: 68.45-59
 ⑦ Walsh G.E., Rigby R. Resistance of the mangrove (*Rhizophora mangle* (L.)) seedlings to Pb, cadmium and mercury [J].Biotropica. 1979,11 (1): 22-27
 ⑧ 陈荣华,林鹏.汞和盐度对三种红树种苗生长影响初探[J].厦门大学学报.1988,27(1):110-115
 ⑨ MacFarlane G.R., Burchett M.D.Toxicity growth and accumulation relationships of copper lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh[J]. Marine Environ. Res. 2002, 54: 65-84
 ⑩ 林志芬,钟萍,殷克东,杜建伟.秋茄对镉-甲胺磷混合物的吸收积累及其致毒作用[J].生态科学.2003,22(4):346-348
 ⑪ 杨盛昌,吴琦.Cd 对桐花树幼苗生长某些生理特性的影响[J].海洋环境科学.2003,22(1):38-42
 ⑫ 李裕红,王荣富,应朝阳.桐花树幼苗根系对镉胁迫的抗氧化生理响应[J].福建农业学报.2007,22
 ⑬ 张凤琴,王友绍,董俊德,孙翠慈,殷建平.重金属污染对木榄幼苗几种保护酶及膜脂质过氧化作用的影响[J].热带海洋学报.2006,25(2):68-69
 ⑭ 陈怀宇,李裕红,韦炜,陈思.Pb²⁺对桐花树幼苗抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响[J].泉州师范学院学报(自然科学).2006,24(2):94-99
 ⑮ 杨盛昌,林鹏,中须贺常雄.红树林的光合作用 [J].植物学通报.1996,13(增刊):35-37
 ⑯ 缪绅裕,陈桂珠.人工污水对温室中秋茄苗光合速率的影响 [J].环境科学研究.1997.10(3):41-45
 ⑰ 缪绅裕,陈桂珠.人工污水对秋茄幼苗形态及解剖构造的影响[J].植物研究,2001.21(1):57-63
 ⑱ 覃光球,严重玲,韦莉莉.秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量 Cd 胁迫的响应[J].生态学报.2006,26(10):3366-3371
 ⑲ 吴桂容,严重玲.镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响[J].生态环境.2006,15(5):1003-1008
 ⑳ Ravikumar S, Williams G. P., Shanthy S, 等. Effect of heavy metals (Hg and Zn) on the growth and phosphate solubilising activity in halophilic phosphobacteria isolated from Manakudi mangrove [J]. Journal of Environmental Biology, 2007, 28(1): 109-114
 ㉑ 林益明,向平,林鹏.红树林单宁的研究进展[J].海洋科学,2005,29(3):59-61
 ㉒ 周涵韬,林鹏,孙晟.福建九龙江口红树植物分子分类的研究[J].海洋科学.2005,25(8):42-46
 ㉓ 谭万能,李志安,邹碧.植物对重金属耐性的分子生态机理 [J].植物生态学报.2001,30(4):703-712
 ㉔ Neumarm D, Lichtenberger O, Gunther D,et al. Heat-shock proteins induce heavy-metal tolerance in higher plants [J]. Planta. 1994, 194: 360-367