

表 2 各种污染的危害和治理对策

污染形式	危害性	治理对策
过度养殖	密度高、水体缺氧	控制总量、调整布局
过剩饵料腐烂	水体发臭、病害蔓延	摸索摄食习性、研制悬浮饵料
水生动物排泄物	水体混浊、透明度低	转场调换水域、人工清淤
生活垃圾直排	水质富营养化、藻类繁衍	禁止直排、集中清运
外界污水、油污	水产品品质下降、有异味	禁止直排、使用电动船

协作,积极预防。例如,禁止使用含磷洗衣粉;禁止小作坊废水直排;在养殖水域附近航行的小船可采取非机动或电动船等等措施。

网箱养殖水污染治理的对策各地的做法都不尽相同,概括起来列于表 2。

#### 4 结语

网箱养殖水污染治理是个系统工程,牵涉到环境保护、养殖人员

生活管理、饵料研制开发、藻类抑制、水质净化等诸多方面。其目的都是一个,即尽可能减少污染源的产生。但有一点是无论如何也不可避免要产生的污染,即水生动物的排泄物。且在污染源总量中占比例在 50%以上,也是导致藻类衍生、水体混浊的主要原因。要清除这些淤积的排泄物,光靠自然作用,如浪潮洪水冲刷是解决不了问题的。在国外也是靠频繁转场,调换

水体进行人工清淤,这无疑对发展网箱养殖业是个很大的制约因素。近来,我国有的地方正在开发研制大型深水网箱,其目的是想避开浅海区域,这当然也是个好的办法,但仍不能解决近海水域和河道、湖泊等淡水水域的养殖问题。治理网箱水污染的关键还是如何能在沉降物未到达水底前就可主动被消除。近来,“清淤网箱”的问世,给水产部门和养殖户带来了福音,它或许就是迄今为止主动清淤、治理养殖水污染的最有效的设计方案,已引起有关部门的高度重视。

(本文编辑:张培新)

## 红树林污染生态学研究进展

### STUDIES ON MANGROVE POLLUTION ECOLOGY— A REVIEW

陆志强<sup>1</sup> 郑文教<sup>1</sup> 彭荔红<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 厦门大学生命科学学院 361005)

(<sup>2</sup> 厦门大学环境科学研究中心 361005)

红树林生长在热带、亚热带陆海交汇的海湾河口区。随着工农业、沿岸城市开发及港口驳岸海运的发展,大量的环境污染物汇集于河口海湾区,冲击了红树林生态系统。红树林作为河口海区生态系统初级生产者支撑着广博的陆域和海域生命系统,为海区和陆缘生物提供食物来源,也为鸟类、昆虫、鱼虾贝类、藻菌等提供栖息繁衍场

所,并构成复杂的食物链和食物网关系。因此有关红树林污染生态学问题已成为目前红树林研究中新的重要领域之一<sup>[1]</sup>。国内外学者对红树林生态系中多种环境污染物对环境行为和生态效应展开了研究,其中重金属、石油、人工合成有机物如有机氯农药等污染物已经引起了广泛的关注<sup>[16]</sup>。本文结合作者的相关工作,综合当前国内外本

领域的研究进展资料,对红树林污染生态学的研究现状作一介绍。

#### 1 红树林生态系统重金属污染的研究

第一作者:陆志强,出生于 1976 年,硕士研究生。E-mail: luluah@263.net

收稿日期: 2001-03-14

修回日期: 2001-11-26

有关红树林生态系统重金属污染的研究主要包括:红树植物对重金属的耐性和吸收,红树林沉积物中重金属的富集与释放,红树有机碎屑对重金属的吸附动态以及红树植物对重金属污染的净化作用等<sup>[1]</sup>。

Waslsh 等 1979 年对大红树 (*Rhizophora mangle*) 幼苗的土培研究认为大红树幼苗对重金属并不特别敏感,土壤中重金属 Pb、Cd 和 Hg 的浓度分别高达 250, 500 和 100  $\mu\text{g/g}$  时,未见明显受害症状,仅当 Hg 浓度达到 500  $\mu\text{g/g}$  时,才对大红树幼苗生存产生影响。Thomas 等 1984 年砂培红茄冬 (*R. marmorata*) 和白海榄雌 (*Avicennia alba*) 幼苗,在 Pb 和 Zn 浓度达 500  $\mu\text{g/g}$  的实验条件下,对幼苗的生长影响不大。陈荣华等 1988 年和 1989 年对白骨壤 (*A. marina*)、秋茄 (*Kandelia candel*) 和桐花树 (*Aegiceras comiculatum*) 幼苗砂培研究表明,水中 Hg 浓度达  $1 \times 10^6$  时未见受害症状,但此 3 种红树幼苗根对培养液中 Hg 有较高的吸收富集能力,其中秋茄和桐花树根对 Hg 的累积分别是原培养液 Hg 浓度的 16~174 倍和 16~100 倍。郑逢中等 1992 年和 1994 年砂培秋茄幼苗,在  $25 \times 10^6$  的 Cd 液中培养 4 周,幼苗生长未明显受影响。该研究也表明秋茄幼苗对 Cd 有较强的富集能力,尤其是根,根中的 Cd 含量比培养液高几十倍至上百倍。由此可见,红树植物对重金属污染物有较高的耐性,同时,在实验室条件下红树幼苗对重金属有较高的吸收和富集能力。上述研究成果都是基于对 Hg、Cd、Pb、Zn 等少数元素的单因子栽培实验,且大多仅以形态指标评价重金属的毒性<sup>[1]</sup>。Das 等 1999 年<sup>[10]</sup>

研究印度 Orissa 的 Bhitarkanika 红树林的重金属污染,发现重金属毒性引起一部分红树植物减数分裂和有丝分裂染色体结构变化和异常,如延迟、早分裂、染色体缺失、断裂等。进一步研究表明,该地区的桐花树、秋茄、白骨壤、海漆 (*Excoecaria agallocha*) 等 9 种红树植物的根部和幼苗分生组织的细胞中 DNA 含量明显减少。此外,有丝分裂指数从 5.3% 下降到 2.6%。染色体组长度、数量以及 4 C 核内 DNA 含量总体上都有减少,表明 DNA 复制过程中,重金属引起了基因突变。

红树林沉积物为重金属提供了一个“贮存库”。红树植物对潮水的缓冲作用使小粒径的有机质沉积,又由于硫酸盐分解细菌的作用,使其富含  $\text{S}^{2-}$ 。因此,直接吸附、与有机质络合或形成难溶的硫化物都可固定重金属<sup>[9]</sup>。红树林沉积物释放重金属的主要途径是有机络合及金属-有机复合体的移出,金属的甲基化以及植物的吸收<sup>[4]</sup>。

Clark 等 1998 年<sup>[9]</sup>研究了白骨壤红树林沉积物中氧化还原反应分层现象 (redox stratification) 对重金属富集和化学物种形成的影响。在  $\text{pH} > 7$ ,  $\text{Eh} < -150 \text{ mV}$  的还原作用层面,金属呈硫化物的结合态;在  $\text{pH} < 7$ ,  $\text{Eh} > +100 \text{ mV}$  的氧化作用层面,金属呈可交换态或氧化物结合态。多数情况下,两种氧化还原作用的层面都可以辨认出,层面的深度随着地下水面 (water table) 位置的季节变化而变化。这为描述红树林沉积物中重金属的环境行为提供了一个地球化学模型。

红树林沉积物通过各种方式贮存大量重金属污染物,在实验室条件下砂培也表明红树幼苗对重

金属有较强的吸收富集能力。但在自然生境下,郑文教和林鹏等<sup>[5,13,21]</sup>研究发现红树林对土壤沉积物中的重金属污染物吸收能力是低的,植物体对土壤重金属的累积系数除 Cd 较大外,大都在 0.1 以下。同时,红树植物所吸收的重金属主要累积分布在动物不易直接啃食和利用的根、质地较为坚硬的树干和多年生枝,而这些部位累积总量占群落植物体总量的 80%~85%。Tam 等 1993 年对深圳福田红树林沉积物的研究表明,其中可提取的重金属还不到总量的 1%。这表明,在自然生境条件下,红树林可为异养生物提供大量洁净的食物,并且避免了通过食物链的不断富集而引起对人类健康的危害。但红树林地的有机残留碎屑对重金属有较强的吸附作用<sup>[6,20]</sup>,这对以红树残留物碎屑为食的林区生物是很不利的。

## 2 红树林生态系统石油污染的研究

红树林生态系统石油污染主要来自海底石油、天然气的勘探和开发生产,往来穿梭的船舶排放的含油污水尤其是大型油船的溢油事故。由于事故发生难以预料,带有偶然性和突发性且泄漏量很大,因此对位于潮间带的红树林损害比较严重,并且不易恢复<sup>[3]</sup>。这方面的研究主要集中在国外。早在 80 年代初期,Getter 等调查油污对红树林群落的影响,主要包括叶子脱落、变形,阻碍生长,种子畸变和死亡等<sup>[3]</sup>。他们还提出评价溢油对红树林群落影响的生物学指标是:死亡率、气孔数量、根和种子的死亡率、叶畸变、附着植物丰度等。位于巴拿马加勒比海岸的 Bahla Las Mimas



红树林在过去的 30 a 中先后两次遭受严重的油溢伤害。Duke 等 1997 年<sup>[11]</sup>首次运用航空摄影技术评估了两次污染给该地区红树林带来的致死和亚致死损伤, 研究表明: 共有占 18% 的受污红树植物死亡而被砍伐, 存活下来的红树植物中近 30% 林冠异常稀疏。油溢对红树林的影响因石油和红树植物种类的不同有较大差异。Proffitt 等 1998 年<sup>[17]</sup>先后用两种不同类型的石油处理大红树的种苗和幼苗, 证明两次石油污染对红树植物没有累积效应或协作效应。Suprayogi 等 1999 年<sup>[19]</sup>在野外条件下, 分别用两种类型石油的 5 个浓度级处理红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、角果木 (*Ceriops tagal*)、红茄冬和白骨壤 4 种红树植物, 研究结果表明: 石油处理增加了红海榄和红茄冬对大部分营养元素的富集, 对白骨壤作用相反, 而对角果木则两种作用都有。随着石油处理浓度的增加, 红树植物叶片中烃的富集也增加, 而白骨壤叶片中累积的烃类是其它 3 种红树植物的 2~6 倍。

石油在红树林沉积物中富集, 引起沉积物 pH 值、溶解氧含量、氧化还原电位以及间隙水盐度下降, 形成一个缺氧的强还原性环境。这对重金属的固定与沉积是否有影响, 会不会引起复合污染, 还未见有报道。Munoz 等通过分析石油生物标志物 (biomarker) 研究了红树林沉积物中石油的长期演化。生物标志物广泛用于生物地球化学领域, 是指沉积物中的有机质以及原油、油页岩、煤中那些源于活生物体, 并具有明显分子结构特征的有机化合物。它们在演化过程中表现出一定的化学稳定性, 基本保存了原始生物化学组分的碳骨架, 以此判

别有机成矿沉积物的物质来源和分析其沉积环境<sup>[2]</sup>。如今应用于环境科学领域, 可认为是环境标志物, 用来监测石油在红树林沉积物中的风化和降解。

一般认为, 对于受石油污染的红树林湿地, 可采用生物修复技术。Ramsay 等 2000 年<sup>[18]</sup>的研究表明, 油污的红树林沉积物中烃分解细菌数目明显增加。Burns 等的实验表明, 在红树植物受石油污染后的 1 a 中, 石油分散剂 (dispersant) 的使用比生物修复更有效降低了红树植物的死亡率<sup>[7,8]</sup>, 它能把漂浮水面的石油分散成雾滴微粒从而散布在海水中。1 a 以后, 继续观察存活下来的红树植物的生长, 发现生物修复作用又比石油分散剂的使用效果更好一些<sup>[12]</sup>。澳大利亚官方已经把 Burns 等的研究成果作为制定石油污染管理政策的依据。

### 3 红树植物对有机氯农药的累积和吸收研究

有机氯农药 (OCP) 主要指六六六、DDT 等含氯的有机化合物。OCP 各国已禁止使用, 但土壤中残留量仍相当大, 还将在长时间内发生作用, 在红树林有关 OCP 的报道尚少。

林鹏等报道了九龙江口浮宫镇红树林区水体 OCP 浓度的季节性变化, 3 次高峰期分别为 2~5 月份、7 月和 11 月份。OCP 中  $\alpha$ -六六六 +  $\gamma$ -六六六浓度与 7 年前九龙江河口测定数据仍处同一水平<sup>[1]</sup>。从红树植物吸收累积 OCP 的分布看, 秋茄幼苗根、原胚轴累积的 OCP 含量是幼苗叶及小树的近 30 倍, 说明秋茄吸收 OCP 大量累积于根及原胚轴部分, 而向茎叶输送不

多。这与红树植物对重金属的净化作用有异曲同工之妙——为海湾河口生态系统的各级消费者提供大量洁净的食物。黄建斌等用不同浓度 DDT 溶液砂培秋茄幼苗, 表明: 10  $\mu\text{g/L}$  的 DDT 培养液对秋茄胚轴萌发和展叶有一定促进作用; 100  $\mu\text{g/L}$  以上的 DDT 培养液则有抑制现象, 电解质外渗率随 DDT 浓度提高而加大, 对秋茄胚的脱氢酶活力在一定浓度 (1 000  $\mu\text{g/L}$ ) 以内有刺激作用, 对叶蒸腾速率的抑制随浓度增高而下降, 达 1 000  $\mu\text{g/L}$  时与对照基本相近或略高<sup>[1]</sup>。有关有机农药污染物对红树植物的影响及其机理也尚需进一步研究。

### 4 红树林污染生态学研究展望

红树林污染生态经过多年的发展已经积累了大量有价值的基础资料和研究经验, 为更好地保护和利用珍贵的红树林资源提供了重要的科学依据。但还有很多方面的研究亟待深入。红树林沉积物是一个非常复杂的有机复合体, 其表面的理化性质由于受周期性潮水的影响具有多变性<sup>[4]</sup>。目前有关红树林沉积物中环境污染物行为的认识大多间接来源于近岸带沉积物的研究成果。弄清环境污染物在沉积物表面沉积动力学问题, 对我们更好地了解红树林沉积物很有帮助。红树植物对污染物耐性的研究除了通过短期的人工培养和形态观察以外, 更重要的是污染物自然生境条件下对红树林的长期环境行为和生物效应。同时, 进一步研究污染物对红树植物生理生态、生物化学、遗传特性的影响, 例如: 对光合作用、呼吸作用、色素含量及组成的影响, 对酶活力的影响,



对染色体结构和 DNA 复制的影响等。我们还可以展开环境污染物在红树林湿地的环境、动物、植物以及微生物间的多层次系统研究,探索污染物在红树林湿地生境水体、沉积物、有机碎屑和动物之间的分布、迁移转化规律及其生物、生态和环境效应等。此外,我们还缺乏有关污染指示物种和群落生物标志物的信息<sup>[16]</sup>,可借助生物地球化学的研究方法更准确地了解某一段时间内环境污染物的动态,为红树林生态系统环境污染的监测和防治提供更可靠的依据。这应该是今后重要的研究方向。

目前国内外红树林污染生态学的研究多集中于重金属污染物,而有机污染物如多环芳烃 (PAH),鉴于一些技术条件上的限制,至今很少有报道,只是法国人 Munoz 等研究红树林沉积物中石油长期演化时,把 PAH 作为环境标志物监测石油降解的程度<sup>[14,15]</sup>。PAH 也是一类很重要的环境污染物,具有明显的毒性、致癌性和致畸诱变作用。石油中含有 PAH,但它的主要人为源是矿物燃料的不完全燃烧和废弃物的不妥当处理。PAH 在红树林生态系统的迁移、转化和生态效应是一个全新尚待深入研究的课题。国内已经有学者正在从事这方面的研究工作。

#### 参考文献

- 1 林 鹏. 中国红树林生态系. 北京: 科学出版社, 1997. 297~316
- 2 王将克主编. 生物地球化学. 广州: 广东科技出版社, 1999. 95~97
- 3 李永祺、丁美丽. 海洋污染生物

学.

- 北京: 海洋出版社, 1991. 269~299
- 4 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
- 5 郑文教、郑逢中、连玉武. 福建九龙江口秋茄林铜铅锌锰元素的累积及动态. 植物学报, 1996, 38(3): 227~233
- 6 郑逢中、洪丽玉、郑文教. 红树植物落叶碎屑对水中重金属吸附的初步研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1998, 37(1): 137~141
- 7 Burns K. A. *et al.*. Weathering of hydrocarbons in mangrove sediments: testing the effects of using dispersants to treat oil spills. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(10): 273~286
- 8 Burns K. A. *et al.*. Gladstone Australia field studies: Weathering and degradation of hydrocarbons in oiled mangrove and salt marsh sediments with and without the application of an experimental bioremediation protocol. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 41(7-2): 92~420
- 9 Clark M. W. *et al.*. Redox stratification and heavy metal partitioning in *Avicennia*-dominated mangrove sediments: a geochemical model. *Chemical Geology*, 1998, 149(3-4): 147~171
- 10 Das A. B. *et al.*. Genetic erosion of wetland biodiversity in Bhitarkanika forest of Orissa, India. *Biodiversity*, 1999, 54(4): 415~422
- 11 Duke N. C. *et al.*. Large-scale damage to mangrove forests following two large oil spills in Panama. *Biotropica*, 1997, 29(1): 2~14
- 12 Duke N. C. *et al.*. Dispersant use and

a bioremediation strategy as alternate means of reducing impacts of large oil spills on mangroves: The Gladstone field trials. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 41(7-12): 403~412

- 13 Lin P. *et al.*. Distribution and accumulation of heavy metal in *Avicennia marina* community in Shenzhen, China. *Journal of Environmental Science*, 1997, 9(4): 472~479
- 14 Munoz D. *et al.*. Long term evolution on petroleum biomarkers in mangrove soil (Guadeloupe). *Marine Pollution Bulletin*, 1997, 34(11): 868~875
- 15 Munoz D. *et al.*. New approach to study of spilled crude oils using high resolution GC-MS(SIM) and metabolite reaction monitoring GC-MS-MS. *Talanta*, 1997, 45(1): 1~12
- 16 Peters E. C. *et al.*. Ecotoxicology of tropical marine ecosystems. *Environment Toxicology & Chemistry*, 1997, 16(1): 12~40
- 17 Proffitt C. E., Devlin D. J. . Are there cumulative effects in red mangrove from oil spills during seedling and sapling stages? . *Ecological Applications*, 1998, 8(1): 121~127
- 18 Ramsay M. A. *et al.*. Effect of bioremediation on the microbial community in oiled mangrove sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 41(7-12): 413~419
- 19 Suprayogi B., Mumay F. . A field experiment of the physical and chemical effects of two oils on mangroves. *Environment Toxicology & Chemistry*, 1999, 42(2): 211~229
- 20 Zheng W. J. *et al.*. Accumulation and biological cycling of heavy elements in *Rhizophora stylosa* mangroves in Yingluo Bay, China. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 159: 293~301

(本文编辑:张培新)