

# 重金属污染生态学研究现状与展望

王宏镛<sup>1,2</sup>, 束文圣<sup>1</sup>, 蓝崇钰<sup>1\*</sup>

(1. 中山大学生命科学院, 广州 510275; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 重金属污染生态学的研究迄今已有近 50a 的历史, 在土壤重金属元素背景值和环境标准的制定、重金属在环境中的迁移转化、重金属污染治理、元素分析测定方法和规范、对生物体的毒性及生物体的响应等方面取得了许多研究成果, 出版了很多专著。在对重金属污染生态学研究进行简要回顾的基础上, 以重金属在生物体内的行为特征(吸收、迁移、富集、毒害、解毒和抗性)为主线, 从微观和宏观水平, 系统综述了目前该领域的研究现状, 分析了尚存在的一些问题, 最后从生物对重金属污染适应的分子机理、治理方法和技术的创新性、复合污染下环境标准制定的科学化以及重金属污染条件下全球生物进化的趋势预测等方面作了研究展望。

**关键词:** 重金属; 污染生态学; 根际; 复合污染; 适应

## Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects

WANG Hong-Bin<sup>1,2</sup>, SHU Wen-Sheng<sup>1</sup>, LAN Chong-Yu<sup>1</sup> (1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Environmental Sciences and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 596~605

**Abstract** Studies of the ecology for heavy metal pollution have significantly advanced since the 1950s. Heavy metals, as one of important pollutants in the environment, are widely researched in the field of pollution ecology or ecology for environmental protection, which is more popularly used abroad. Many achievements have provided improved knowledge of metal mobility in ecological systems and in the context of environmental protection. We now have improved understanding of background soil concentrations, protocols, guidelines, monitoring and toxicity that have led to research and demonstration projects concerned with remediation of heavy metal contaminated sites. At the same time, many works related to this research field have also been widely published. In China, there is a focus for this research effort at many universities and research institutes, including the Department of Biology at Yunnan University (Kunming), the Institute of Environmental Science at Beijing Normal University (Beijing), the Institute of Applied Ecology at the Chinese Academy of Sciences (Shenyang), the Institute of Soil Science at the Chinese Academy of Sciences (Nanjing), the Research Center for Eco-Environmental Sciences at the Chinese Academy of Sciences (Beijing) and so on.

This paper briefly reviews progress and current research on modeling of heavy metal mobility in soils and biota, from the molecular level to the ecosystem scale. Emphasis is given to recent advances that have improved knowledge of absorption,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(30170178, 30100024); 国家“863”资助项目(2001AA 645010-3); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020558044)

**收稿日期:** 2003-10-11; **修订日期:** 2004-05-20

**作者简介:** 王宏镛(1974~), 男, 云南大理人, 博士生, 讲师, 从事污染生态学、生态工程学和恢复生态学研究。E-mail: wanghb74@163.com

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ls04@zsu.edu.cn

**致谢:** 本文承蒙云南大学生命科学学院生态学与环境科学系王焕校、段昌群教授以及中山大学环境科学与工程学院陈桂珠教授的悉心指教, 英国利物浦约翰莫尔斯大学(Liverpool John Moores University)生物与地球科学学院的Nicholas M. Dickinson教授协助撰写英文摘要, 在此一并表示衷心的感谢。

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 30170178, 30100024), the “863” Grant (No. 2001AA 645010-3) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20020558044)

**Received date:** 2003-10-11; **Accepted date:** 2004-05-20

**Biography:** WANG Hong-Bin, Ph. D. candidate, Lecturer, mainly engaged in pollution ecology, ecological engineering and restoration ecology. E-mail: wanghb74@163.com

migration, accumulation, toxicity, detoxification and biological resistance. The future research effort is likely to focus on rhizosphere ecology, molecular ecology and evolutionary genetics under heavy metal pollution.

Although many accomplishments have been achieved, many issues still remain unanswered such as the adaptive mechanisms at the molecular level, heavy metal speciation and bioavailability, the complication of combined pollutants and the remediation technologies. Therefore, the authors also detect these issues existed and forecast the trend of ecology for heavy metal pollution in terms of the molecular mechanisms of biological adaptation to heavy metal pollution, the newly-found technology in remediating this pollution, the scientific determination of environmental standard under combined heavy metal pollution and the evolutionary trend of organisms in this situation.

**Key words:** heavy metal; pollution ecology; rhizosphere; combined pollution; adaptation

文章编号: 1000-0933(2005)03-0596-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

20 世纪 50 年代后, 由于环境问题的出现而诞生和发展了环境科学这门新兴学科, 特别是 1962 年美国海洋生物学家 Rachel Carson 出版了划时代的科普名著——《寂静的春天》, 向人们昭示了使用杀虫剂造成的环境危害, 这本书的问世标志着“环境生态学”的诞生。近 50a 来, 环境中污染物与生物有机体之间的相互作用规律与机理研究引起了国内外学者的广泛关注, 无论是国内的污染生态学 (Pollution Ecology) 还是国外的环境保护生态学 (Ecology for Environment Protection), 都把重金属作为环境中的一类优先污染物进行研究, 本文在综述重金属污染生态学研究现状和尚存在问题的基础上, 对该领域未来的发展方向作了展望。

## 1 重金属污染生态学研究的简要回顾

追溯到 20 世纪 50 年代, 随着日本 1953~ 1956 年水俣病 (Hg 污染)、1955~ 1972 年骨痛病 (Cd 污染) 以及 1961 年四日市哮喘 (SO<sub>2</sub> 和重金属粉尘复合污染) 等事件的发生, 重金属污染问题研究被提上了议事日程。重金属在空气、土壤和水体中的存在对生物有机体产生严重影响, 并且其在食物链中的生物富集极具危险性<sup>[1]</sup>, 因此, 重金属污染生态学的研究成为污染生态学的一项热点研究内容。

重金属是指原子密度大于 5g/cm<sup>3</sup> 的一类金属元素, 大约有 40 种, 主要包括 Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn、Ag、Sn 等。但是, 从毒性角度一般把 As、Se 和 Al 等也包括在内。重金属离子 (如 Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup> 和 Co<sup>2+</sup> 等) 是植物代谢必需的微量元素, 可是如果它们过量则具有相当毒性。应当注意的是, 重金属污染并不只是近代才发生的现象, 对距今 7000 年前格陵兰冰中铜浓度的检测表明, 大约从 2500 年前开始 Cu 含量已超过自然水平, 这种北半球早期大范围的大气污染是由于古罗马和中世纪原始的高污染炼铜技术所致, 特别在欧洲和中国<sup>[2]</sup>。

王焕校先生讲授“污染生态学”、王德铭先生讲授“环境生物学”、余叔文先生讲授“环境生理学”、樊德方先生讲授“农药污染”<sup>[3]</sup>, 从而打开了我国进行污染生态学教学和科研的新局面。就重金属污染生态学而言, 王焕校、段昌群等在重金属对植物细胞遗传毒理学作用<sup>[4]</sup>、对作物生态型<sup>[5]</sup>、基因表达<sup>[6]</sup>和根系分泌物<sup>[7]</sup>的影响以及生物对长期重金属污染的生态效应与适应进化<sup>[8]</sup>等方面做了大量工作; 杨居荣、许嘉琳等系统研究了植物对重金属的耐性机理<sup>[9]</sup>以及植物体和食品中重金属的分布、存在形态与毒性评价<sup>[10]</sup>; 孙铁珩、周启星等在张士灌区重金属污染农田生态工程治理<sup>[11]</sup>、土壤-植物系统污染生态过程<sup>[12]</sup>、复合污染生态化学与污染生态效应<sup>[13]</sup>、陈怀满和郑春荣等在土壤中重金属的化学行为<sup>[14]</sup>、植物根际重金属的生态效应<sup>[15]</sup>、土壤-植物系统中重金属与养分元素的交互作用<sup>[16]</sup>以及汤鸿霄、江桂斌、王子健等在重金属形态、生物毒性和生物有效性<sup>[17]</sup>、重金属形态分析方法<sup>[18]</sup>、水环境中重金属的生物毒性模型预测<sup>[19]</sup>等方面均进行了有价值的探索和研究。

总起来看, 近 50a 来, 在重金属污染生态学研究方面, 国内外主要取得了以下成果: (1) 确立了世界和区域范围内的土壤主要重金属元素背景值以及相应的环境质量标准、食品卫生标准和排放标准; (2) 对重金属在底泥-水体-生物系统、土壤-植物-大气系统以及沿生产者-消费者-分解者食物链的迁移、转化和循环规律进行了深入系统的研究; (3) 对重金属在生物体内的吸收、迁移、富集、毒害以及生物体的解毒和抗性机理研究方面从宏观至微观水平开展了具有一定广度和深度的研究工作; (4) 对重金属污染的治理相继发展了物理、化学和生物方法, 植物修复技术和微生物修复技术引起了广泛关注; (5) 建立了较完善的各种主要重金属元素分析测定方法及规范; (6) 重金属对生物体的毒性效应以及生物对其响应机制进行了较为系统的研究; (7) 发现了一批可用于重金属污染生物监测的敏感植物、适于重金属污染区种植的抗性植物以及可望用于重金属污染土壤植物修复的超量积累重金属植物 (hyperaccumulators)。

一些有关的专著和期刊已出版或发行。比较有影响的专著有“Effect of Heavy Metal Pollution on Plants”<sup>[20, 21]</sup>, “Trace Elements in the Terrestrial Environment”<sup>[22]</sup>, “Metal Ecotoxicology: Concepts and Applications”<sup>[23]</sup>和“Toxic Metals in Soil-Plant Systems”<sup>[24]</sup>等以及国内的《土壤-植物系统污染生态研究》<sup>[25]</sup>、《污染生态学基础》<sup>[26]</sup>、《陆地生态系统中的重金属》<sup>[27]</sup>、《复

合污染生态学》<sup>[28]</sup>、《土壤-植物系统中的重金属污染》<sup>[29]</sup>、《污染生态学》<sup>[3,30]</sup>、《土壤中化学物质的行为与环境质量》<sup>[31]</sup>、《环境污染与生态恢复》<sup>[32]</sup>等。“Environmental Science & Technology”, “Environmental Pollution”, “Journal of Environmental Quality”, “Science of the Total Environment”, “Ecotoxicology”等以及国内的《生态学报》《应用生态学报》《环境科学学报》《生态学杂志》和《应用与环境生物学报》等杂志每期都有重金属研究方面的最新文章。

## 2 重金属污染生态学研究现状及存在的主要问题

### 2.1 研究现状

**2.1.1 重金属在生物体内的行为特征仍然是当前研究的主流** 重金属在生物体内的行为特征主要包括吸收、迁移、富集、毒害、解毒和抗性等,因此对这几个环节的研究一直是重金属污染生态学的热点研究内容。

在生物体对重金属的吸收和迁移上,细胞壁和胞外糖对重金属离子的钝化作用(immobilization)以及细胞对重金属离子的排除作用(exclusion)等方面研究较多。Rivetta等<sup>[33]</sup>研究发现在萝卜(*Raphanus sativus*)种子萌发早期,Cd可能通过质膜上的Ca通道进入细胞内;另有研究表明,Cd胁迫使某些植物根细胞外渗液天冬酰胺和Cd含量增加,但这种反应可能是高Cd浓度下质膜功能紊乱所致,并非特异性诱导氨基酸来与Cd离子螯合<sup>[34]</sup>;Williams等<sup>[35]</sup>研究表明,3种质膜转运蛋白与重金属在生物有机体中的转运有关,它们分别是重金属离子转运腺苷三磷酸酶(CPx-type ATPase,C代表半胱氨酸,P代表脯氨酸,x代表另一种氨基酸)、与天然抵抗力有关的巨噬细胞蛋白家族(Natural resistance-associated macrophage protein, Nramp)以及离子促进扩散子家族(Cation diffusion facilitator, CdF)。另外,吴启堂<sup>[36]</sup>根据土壤重金属向植物体转移的机理,提出了一个土壤-植物系统中元素解吸、迁移、吸收的联合数学模型。

在生物体对重金属的富集上,从目前所掌握的资料看,主要有两方面的研究内容,一是传统的重金属沿食物链各营养级特别是高位可食性生物的富集,二是超量积累重金属植物的筛选、应用以及超富集机理的探讨。对于前一方面的研究,一般认为重金属会沿食物链积累和放大,但也有一些例外的实验结果,如Devkota等<sup>[37]</sup>研究了Hg、Cd和Pb在生产者(食用植物)和消费者(4种蝗虫)体内的富集,发现蝗虫体内Cd含量明显比在食用植物中高,且雌性蝗虫比雄性蝗虫富集Cd的能力强,但Pb在蝗虫体内的含量均比在食用植物中低,几种元素在蝗虫体内的富集系数呈Cd>Hg>Pb;Wong等<sup>[38]</sup>在多个实验中发现动物体通过食物关系积累由植物富集的重金属的能力不强,以及Pb、Cu、Zn和Mn等重金属元素沿食物链由低营养级到高营养级放大的趋势不明显,他们推测这可能与处在高位营养级的生物体存在更复杂更多的机制将体内积聚过多的重金属排出体外有关。对于超量积累重金属植物的研究,目前全世界共发现400余种该类植物,其中Ni超过320种,Co有30种,Cu有34种,Se有20种,Pb有14种,具体见文献<sup>[39,40]</sup>。2002年,我国学者陈同斌<sup>[41]</sup>、杨肖娥<sup>[42]</sup>分别在湖南石门和浙江衢州发现As超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata*)和Zn超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*),它们在野外自然生长状况下地上部分As、Zn的含量可分别达1540 mg/kg(羽片)和4515 mg/kg,随后,另一种As超富集植物大叶井口边草(*Pteris nervosa*)<sup>[43]</sup>、Mn超富集植物商陆(*Phytolacca acinosa*)<sup>[44]</sup>以及Cd超富集植物宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)<sup>[45]</sup>也相继发现。骆永明、吴龙华等<sup>[46,47]</sup>在重金属污染土壤的植物修复特别是利用螯合诱导技术进行强化修复及环境风险等方面开展了很多工作。需要指出的是,除重金属富集型植物(accumulators)外,还有一种与之相对的重金属排斥型植物(excluders)。在重金属含量很高的土壤和水体中,该类植物对重金属的转运受限,其地上部分能保持较低并相对恒定的重金属浓度。Baker<sup>[48]</sup>认为,排斥(exclusion)和富集(accumulation)是高等植物耐受环境中高浓度重金属的两种基本策略。

在毒害方面,研究者从形态、生理生化、细胞和分子水平做了大量的研究工作,主要是剂量-效应关系的研究以及相应模型的建立,并且有从以前的高剂量、短期的急性毒性试验向低剂量、长期的慢性毒性试验转变的趋势,对于致癌、致畸和致突变的研究一直是该领域的重要研究内容。张义贤<sup>[49]</sup>研究了6种重金属(Hg<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>)对大麦(*Hordeum vulgare*)幼苗生长及根尖细胞遗传学毒害作用,结果表明随着重金属浓度的增加和处理时间的延长,大麦种子的萌发率、根生长速率和有丝分裂指数下降;郁建桢<sup>[50]</sup>从生物活性位点的角度系统阐述了重金属对生物毒性效应的分子机理;重金属污染抑制了植物的光合作用过程,如Ralph等<sup>[51]</sup>对一种海草(*Halophila ovalis*)的研究表明,Cu和Zn对光合过程的影响比Pb和Cd大,叶绿素a荧光在监测胁迫开始及发展方面是有效的,量子产额(Quantum yield)是最敏感的指标。Efremova等<sup>[52]</sup>研究发现Pb、Zn和Cu污染均增加了一种海绵动物(*Baikalospongia intemedica*)的DNA单链断裂频率(Frequency of DNA single-strand breaks)。此外,Das等和Thomas等对重金属的毒性效应作过系统综述<sup>[53,54]</sup>。

在解毒和抗性方面,主要是细胞活性氧防御酶系(POD、SOD、CAT等)、植物螯合素(Phytochelatins, PCs)、植物细胞液泡的区室隔离(Compartmentalization)、金属硫蛋白(Metallothioneins, MT)、逆境蛋白(Stress proteins)、逆境乙烯(Stress ethylene)以及有机酸等的调控作用研究。王宏镇等<sup>[55]</sup>研究了Cd处理下5个小麦品种的解毒机制,并运用灰色关联度分析和聚类分析方法对其解毒功能进行了划分。20世纪90年代后,对于PCs和MT的研究较多,Keltjens等<sup>[56]</sup>报道了可以用PCs作为表征Cd毒害的生物标记物(biomarkers);Zenk<sup>[57]</sup>研究表明,在植物体内重金属与通式为( $\gamma$ -Glu-Cys)<sub>n</sub>-Gly(n=2~11)的PCs

和类 PCs(iso-PCs) 结合, 在后者中, C-末端的 Gly 被其他氨基酸如  $\beta$ Ala 或 Glu 等所取代; Cd 胁迫起初促进了逆境乙烯的生成, 随后生成量缓慢下降至对照水平, 研究者猜想这可能与 Cd 被隔离以减少胁迫有关。在一种杂草 (*Amaranthus lividus*) 幼苗中, 随 Cd 浓度增加, Cd 诱导生成的乙烯量减少<sup>[58]</sup>; Pb、Zn 污染使上述海绵动物 *B. intemedia* 热激蛋白 HSP70 诱导增加, 而 Cu 则不能<sup>[52]</sup>。重金属污染下生物体抗性机理的研究一直是重金属污染生态学的重要内容之一。段昌群<sup>[59]</sup>根据抗性来源的背景不同, 将植物对重金属污染的抗性分为 3 种层次: 前适应(Preadaptation)、回避(Avoidance)和耐性(Tolerance)。Ye 等<sup>[60, 61]</sup>研究发现宽叶香蒲(*Typha latifolia*)和芦苇(*Phragmites australis*)对 Zn、Pb 和 Cd 具有先天(constitutional)重金属耐性。

**2.1.2 向宏观和微观两极分化** 当前重金属污染生态学的研究明显呈现出向宏观和微观两极发展的趋势。从基因-细胞-个体-种群-群落-生态系统-景观-区域-生物圈等生命组织层次上, 都有它们与重金属相互关系的研究。比如在宏观层次, 有大尺度下生态系统退化机理的研究、景观结构、功能与动态变化特别是重金属污染下景观的破碎化和全球污染物的生物地球化学循环研究等; 在中观层次, 主要是重金属污染导致的种群遗传组成上微小差异导致的微观进化研究; 在微观层次, 有在细胞水平上研究重金属污染下染色体的变异与在分子水平上研究基因和基因组(genome)的变化以及相应的蛋白质和蛋白质组(proteome)的变化。

重金属对生态系统的影响, 与重金属的类型、作用的强度、持续时间以及系统中最敏感成分的弹性或反应有关。每一生态系统类型对不同重金属所产生的反应不同, 单种重金属元素也可能导致生态系统产生不同的反应<sup>[62]</sup>。重金属在生态系统各组成成分中的分布、归宿以及它们对生态系统结构和功能的影响一直是国内外关注的热点, 因为重金属在生态系统中的动态特征与系统的稳定性和安全性密切相关。国内外学者对森林、草地、海洋、红树林以及矿业废弃地生态系统中重金属的行为特征均做了大量研究。比如 Yel'patyevsky 等<sup>[63]</sup>对橡树林污染生态系统中 Pb、Zn、Cu 和 Cd 地球化学的研究, 发现它们富集的基本库(basic pool)是一层薄的细腐殖质, 并且植物体中有很高的重金属负荷; Nikonov 等<sup>[64]</sup>对松林生态系统中 Ni 和 Cu 的迁移和积累表明, 在污染区, 松林作为重金属生物地化循环的障碍以减弱 Ni 和 Cu 向土壤下层分布; Kupeyman 等<sup>[65]</sup>研究了一个受重金属污染的草地生态系统中土壤微生物生物量和土壤酶活性, 发现污染土壤中多数微生物生物量指标(如数目、直径、长度等)均降低, 并且随土壤重金属浓度增加, 土壤酶活性显著降低了 10~50 倍; He 等<sup>[66]</sup>通过对水生生态系统中重金属行为及生态效应的研究, 提出了预测重金属对水生生态系统影响的生态模型框架; Tam 等<sup>[67]</sup>模拟红树林植物秋茄(*Kandelia candel*)污水系统研究了重金属在其中的积累和分布规律, 发现污水中的大多数重金属被滞留在土壤中, 并且重金属在秋茄根中的含量比在气生部分中高, 表明根成为重金属在该系统中转运的障碍以保护植物敏感部分不受重金属毒害; 陈桂珠等<sup>[68, 69]</sup>对重金属在红树林生态系统中的分布、迁移及其净化作过大量研究; 在矿业废弃地生态系统方面, 束文圣等<sup>[70]</sup>的研究表明, 尾矿中重金属的毒性和营养元素的极端贫瘠是矿业废弃地植被重建过程中影响植物定居的主要因子, 铅锌尾矿酸化与重金属移动性的关系以及植被重建过程中耐性物种的选择、基质改良等生态学问题也作了系统研究<sup>[71~74]</sup>。

微观方面, 国内外都零星开展了一些研究工作。吕朝晖等<sup>[75]</sup>研究了 Cd、Pb 对萌发期小麦醇脱氢酶(ADH)基因表达的影响, 发现 ADH 基因表达在 RNA 和酶活性两个层次均有变化, 并呈现相似的变化趋势, 说明重金属对其的影响来源于基因转录水平; 常学秀等<sup>[76]</sup>对不同浓度 Cd<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 影响蚕豆 DNA 合成及修复的研究表明, 在低浓度下重金属胁迫使 DNA 合成加快并不同程度诱导了非按期 DNA 合成(Unscheduled DNA synthesis, UDS), 但高浓度下则受抑制。随着分子生物学和基因工程技术的发展, 目前越来越多的研究倾向于抗重金属污染基因的定位与克隆研究。Zhang 等<sup>[77]</sup>报道了大豆(*Phaseolus vulgaris*)中编码一种新重金属胁迫相关蛋白的基因——PvSR2, 该基因编码蛋白质的分子量为 18.5kD, 等电点为 10.3, 其核苷酸和蛋白质序列与已知蛋白质无高度同源性。在重金属(如 Hg、Cd、As 和 Cu)的作用下, 该基因表达强烈地增加, 但对于其它环境胁迫(如紫外辐射、高温和病毒感染)则无响应; Margeay 等<sup>[78]</sup>综述了对一种特异性适应重金属污染细菌(*Ralstonia metallidurans*)的研究成果, 发现 CH34 菌株带有两个大质粒(PMOL28 和 PMOL30), 其上载有一些与重金属抗性相关的基因。目前已得到该菌基因组序列草图, 这样就可以将该图谱与早先公布的植物病原体 *R. solanacearum* 基因组数据进行比较研究, 该病原体含有的一个巨大质粒带有与 *R. metallidurans* CH34 相似的一些重金属抗性基因; Pence 等<sup>[79]</sup>从 Zn/Cd 超富集植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)中克隆到与 Zn 转运有关的 ZNT1 基因。随后, Assuncao 等<sup>[80]</sup>从同种植物体内也克隆到该基因, 同时还发现 ZTP1 和 ZNT2。抗重金属污染基因的定位和克隆研究将为种质资源的改良以及生物体对重金属污染的适应性研究提供重要的技术手段。今后, 污染生态学和分子生物学等学科的交叉可望形成一门污染生态学的分支学科——污染分子生态学。

**2.1.3 复合污染以及根际微环境污染生态研究受到前所未有的关注** 环境中的重金属以单元素存在的情况是很少的, 大多数情况下是元素之间以及重金属与其它污染物联合作用构成的复合污染, 由于复合污染下污染物对生物有机体的效应与单一污染物作用存在差异, 因此, 复合污染研究更能客观体现出环境中污染物与生物有机体之间的相互作用规律和机理。Witzel<sup>[81]</sup>研究表明, 如果是 Cd、Zn 单元素污染, 这两种元素均很难从土鳖(*Porcellio scaber*)体内排出而永久储存; Kim<sup>[82]</sup>研究了重金属复合污染对蟹壳去除重金属元素的影响, 表明单元素污染下 Cr<sup>3+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 的去除比 Cd<sup>2+</sup> 高; 对于双元素复合污染, Cd<sup>2+</sup> 不影响

$Pb^{2+}$  的去除而  $Cr^{3+}$  对  $Pb^{2+}$  的去除产生严重抑制,  $Pb^{2+}$  的存在对  $Cd^{2+}$  的去除仅有轻微影响, 但  $Cr^{3+}$  的存在则影响严重,  $Cd^{2+}$  对  $Cr^{3+}$  的抑制效应比  $Pb^{2+}$  对  $Cr^{3+}$  的低。在国内, 对重金属元素之间、有机物之间以及重金属与有机物之间的复合污染研究做了大量工作, 其中两元素复合污染研究较多, 如李元等<sup>[83]</sup>对 Cd-Fe、许桂莲等<sup>[84]</sup>对 Zn-Cd 以及王新等<sup>[85]</sup>对 Cd-Pb 的研究等, 也有少数多元素复合污染研究的报道, 如吴燕玉等<sup>[86]</sup>对 Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染的研究。

根际所形成的特殊微生态环境对重金属元素的化学行为产生重要影响, 根系分泌的有机酸、糖类、氨基酸和土壤微生物等对重金属进入根细胞具有重要的促进或抑制作用, 因而近几年来在土壤重金属研究方面, 有些研究利用根际箱或根际袋, 将传统的土壤分层研究转为仅针对根表面 0.1~4mm 区域的根际微生态环境研究。Lin 等<sup>[87]</sup>研究了 Cd 在水稻根际的化学行为, 表明在 0~1mm 区域极大地受质体流、活化和固定的联合作用, 醋酸铵提取态 Cd 含量最低。Cd 在根际与总土壤中分布的差异表明, 在根际 Cd 由于水稻根系分泌物、微生物活动以及铁锰氧化物的活化使醋酸铵提取态 Cd 向有机结合态和铁锰氧化态转变。Kunito 等<sup>[88]</sup>对高浓度 Cu 污染土壤细菌群落的研究表明, 总 Cu 浓度在根际与非根际土中分别为 720 $\mu$ g/g 和 5680 $\mu$ g/g, 细菌(特别是非抗 Cu 细菌)在根际的繁殖比在非根际快, 并且根际细菌群落的特征(如对 Cu 的吸收能力和生长速率等)与非根际明显不同, 抗 Cu 细菌和非抗 Cu 细菌在根际介质的生长都比在非根际快得多。可以预测, 根际微环境污染生态学将成为污染生态学的热点分支之一。

**2.1.4 与食品安全、生物安全和生态安全的联系更加紧密** 重金属污染问题引起人们的广泛关注最先是从其对人体健康的影响开始的, 因此长期以来对重金属的研究与人体健康就存在着千丝万缕的联系。特别是我国加入 WTO 后, 农产品中重金属超标问题将成为国际贸易中的一道绿色壁垒, 阻碍我国产品打入国际市场, 我们与国外农产品的竞争在某种程度上是“绿色食品”、“食品安全”意义上的竞争。当前, 农产品中重金属和农药的残留问题、重金属沿食物链向生物体可食部位的迁移积累问题以及重金属污染与疾病发生相关性等方面的研究相当活跃。Demirbas<sup>[89]</sup>研究了土耳其 6 种食用蘑菇中 Hg、Pb、Cd 和 Cu 的含量, 发现最高的重金属含量分别为(干重): *Hydnum repandum* (6.79mg/kg Hg)、*Russula delica* (6.87mg/kg Pb)、*Agaricus silvicolla* (16.8mg/kg Cd)、*Tricholoma terreum* (66.4mg/kg Cu); Abou-Arab<sup>[90]</sup>对农村和工业区动物器官中重金属含量分析表明, Pb、Cd、Zn、Cu、Mn 和 Fe 在动物肌肉、肝、肾、心和脾中的含量工业区均高于农村, 在清洗方法上, 仅用自来水冲洗的效果比用其他清洁剂的效果差, 并且用酸性清洁剂在降低 Pb、Cd、Zn 含量方面比用中性或碱性清洁剂有效; Bahemuka 等<sup>[91]</sup>对几种可食性蔬菜中的重金属研究表明, 一些蔬菜中重金属含量已超过 FAO 和 WHO 允许的标准值, 以所测蔬菜中重金属的平均值(按 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的顺序)为 0.20、7.95、3.95 和 33.75mg/kg 以及每人每天消费 108g 蔬菜, 每人每天摄入 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的量分别达 21.6 $\mu$ g、859 $\mu$ g、427 $\mu$ g 和 3.65mg。在对人体健康的影响方面, 重金属致癌、致畸和致突变效应均有报道, 如 Mandal<sup>[92]</sup>系统综述了 As 污染对人体肺、心血管、胃肠、血液、肝、肾、皮肤、神经和免疫诸方面的负面影响。

**2.1.5 重金属污染条件下生物体的适应与进化成为污染进化生态学的重要研究内容** 破坏性的人类活动对生物系统产生不同强度的干扰和损害, 面对重金属等污染物构成的环境系统所施加的影响, 生物系统要么适应要么灭绝, 因此, 研究污染物对生物体的作用过程、生物体的适应过程以及由此产生的微观乃至宏观进化具有重要的理论与现实意义。Gasso<sup>[93]</sup>研究了化工、冶炼厂附近以及采煤区爬行动物种群变化规律并与相对清洁区进行了对比, 发现在污染区动物的一些形态、生理和生化指标(如体长、体重、重金属含量、蛋白质和脂类、细胞色素 b5 和 P450 等)发生了改变, 在个体和种群水平上对环境胁迫具有不同的适应特征, 形成了不同的内稳态机制, 这些特征包括种群结构、繁殖策略、器官功能的强化、解毒过程的加强以及新陈代谢的改变等。在污染进化生态学方面, 国内段昌群<sup>[94]</sup>、文传浩<sup>[95]</sup>等利用 RAPD 和等位酶技术对不同空间地段上同一种质但受重金属污染经历不同的曼陀罗 (*Datura stramonium*) 和玉米 (*Zea mays*) 种群的遗传分化进行了系统研究, 发现短期污染下其遗传多样性水平降低, 但随时间推移以及人工选择作用的加强, 遗传多样性有所回升和提高。这种重金属污染条件下生物体的适应与进化研究将从不同的时间尺度上考察物种可遗传变异的形成、重金属选择压力的影响以及不同隔离方式的产生, 生物对重金属污染环境趋异适应的结果可导致种内生态型的分化乃至新物种的形成。另外, 熊治廷<sup>[96]</sup>对植物抗污染进化及其遗传生态学代价作了系统的综述。

## 2.2 存在的主要问题

**2.2.1 生物对重金属污染的某些适应机理尚处于推测阶段** 目前, 不同的研究者从不同的生命组织层次, 从基因、细胞、个体和群体水平上探讨了很多生物体与受重金属污染环境之间的相互作用规律和机理, 但是, 由于生物体本身的差异以及重金属元素毒性效应的不同, 使得生物体对重金属污染的适应过程和机理的研究极为复杂, 很多机理和规律尚未发现, 其中的一些尚处于推测阶段。比如对于超量积累植物的研究, 植物体内复杂的转运和整合机制控制了重金属吸收和储存的速率, 但是金属的转运和储存形态在很大程度上尚未为人们所知, 许多转运系统的机理、定位、结构和功能等仍待深入研究<sup>[97]</sup>。如果对超富集植物适应环境的机制研究还仅停留在一般植物耐受过程的方方面面, 那么该领域的研究就很难取得突破性的进展, 必须另辟蹊径从一般性中探索出一些特殊的具有规律性的超富集机理。在重金属污染影响下分子和生物化学研究方面, 目前一般都通过蛋白质

表达的差异来推测基因序列的差异,但对于抗性的基因控制,目前仍很不清楚,停留在理论假说方面。

**2.2.2 复合污染研究是热点但同时也是难点** 复合污染研究对于客观揭示环境中污染物的行为具有重要意义,但是由于环境因素的复杂性、重金属种类的多样性以及生物体对重金属耐受的差异广泛性,使得复合污染研究多为室内严格控制条件下的盆栽试验,这就使得研究结论与野外大田条件相比存在很多差别。另外,仅重金属元素之间的复合污染规律都很难阐释清楚,如果再加上其他有机污染物(如农药和表面活性剂等)的联合作用,复合污染的规律就更为复杂。因此,如何进行重金属元素之间、有机污染物之间特别是重金属元素与有机污染物之间在多因素组合情况下的复合污染研究,在理论和方法上还需要进行更多的探索和创新。

**2.2.3 重金属污染的治理方法研究仍然是一个世界性难题** 重金属污染的治理特别是重金属污染土壤的治理是一个世界性难题,虽然很多方法如物理法、化学法和生物法相继问世,但每种方法都有各自的优缺点。如现在普遍推崇的植物修复<sup>[98-101]</sup>方法,因其费用低廉、不会破坏甚至会改善土壤理化性质以及具有较高的美学价值等优点而倍受青睐,但由于超量积累重金属植物往往生物量低、生长缓慢、修复时间较长等缺陷以及重金属复合污染的制约,也就决定了该类植物实际应用的局限性。今后,寻找或驯化分布范围广、地上部生物量高、生命周期短以及繁殖速率快的超量积累重金属植物是植物修复技术应用与推广中必须加以解决的一个重要问题。

**2.2.4 重金属分析测定方法和技术有待实现新的突破** 目前,由于原子吸收光谱仪、电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)以及各种色谱-质谱联用仪等的使用,重金属的分析测定方法越显方便和快捷。但是,将重金属从总量分析转变到分形态、价态特别是生物有效态分析的研究是重金属分析方法发展的必然趋势,但对于分形态、价态的测定方法和技术往往需要多种仪器联用、仪器精度要求高、操作复杂并且很多涉及微量分析等,重金属分析测定方法和技术有待改进并实现新的突破<sup>[102-104]</sup>。

### 3 研究展望

#### 3.1 生物对重金属污染适应的分子机理研究

随着分子生物学和基因工程的迅猛发展,为重金属污染条件下生物适应的分子机理研究成为可能,一些抗虫、抗病基因的发现以及通过载体在宿主细胞中的成功表达为抗重金属污染基因的研究提供了一些可供借鉴的方法和经验。今后,对重金属抗性基因和超富集重金属基因的克隆和表达研究将为植物品系的改良以及植物修复技术的成功运用提供重要的技术支持和保障。另外,在重金属胁迫下根际微生态环境的变化,如根系分泌物的分离、鉴定、纯化、与植物耐受性的生物生态学意义以及可能的基因或细胞调控等方面的研究将成为污染生态化学的重要研究内容。

#### 3.2 重金属污染治理方法与技术的创新性研究

在重金属污染治理方法与技术的研究上,一方面要对传统的物理、化学和生物方法进行加工、复合或改造,注重去除的效率,使重金属能够回收和再利用,严防产生“二次污染”,因此必须设计并建立分层多级利用物质的污染生态工程,增加技术的创新性;另一方面要考虑到技术的经济可行性。只有这样,所开发的污染治理技术不但可以提高国内的污染治理水平,而且可以将其作为环保产业的一部分打入国际市场,抓住环保产业这一“朝阳产业”所带来的历史际遇。今后,重金属污染生态学的研究不但要在理论上实现创新,以不断丰富和发展自身的理论体系,而且与生产实践和人民生活的联系将更加紧密。

#### 3.3 重金属复合污染条件下环境标准制定的科学化研究

对于目前国内外所制定发布的各种环境标准,因其没有考虑到污染物之间的联合作用而受到学术界的普遍质疑,但是没有任何一个机构或个人制定出一个复合污染情况下的环境标准。随着复合污染生态学理论、方法和技术的发展,如何制定出复合污染下的环境质量标准、污染物排放标准特别是与人体健康密切相关的食品卫生标准,并且使其具有科学性和可操作性,是一个亟待解决的重要问题。

#### 3.4 重金属污染下全球生物的进化趋势预测研究

环境污染所构成的非同“自然”的环境极大地改变了生物多样性,也改变了生物的进化速率和演化方向,环境污染条件下生物的未来命运是污染生态学和保护生物学研究的焦点,不但学术界而且很多国际环保组织对此都非常重视。那么,包括重金属在内的环境污染对生物体的作用强度、生物体的耐受范围以及生物未来发展的趋向等方面的研究就显得尤为重要。随着计算机技术和生物信息学的发展,环境预测模型已在评估全球变化方面有了很多应用,今后可以在建立重金属污染下全球生物进化趋势预测模型方面作一些探索。在未来很长一段时间,全球变化对人类的影响将日益明显,在全球变化背景下重金属污染生态学的研究可能会超越“重金属”、“污染”的范畴而与其他逆境相复合进行研究,形成更多的分支学科和研究方向。

### References

- [1] Sanit àdi Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105~160
- [2] Hong S, Candelone J P, Patterson C C, et al. History of ancient copper smelting pollution during Roman and Medieval times recorded in

- Greenland ice *Science*, 1996, **272**: 246~ 248
- [ 3 ] Wang H X. *Pollution ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000
- [ 4 ] Duan C Q, Wang H X. Cytogenetical toxic effects of heavy metals on *Vicia faba* and inquires into the vicium micronucleus *Acta Botanica Sinica*, 1995, **37**(1): 14~ 24
- [ 5 ] Ma J M, Wang H X, He Y Q. Effects of heavy metal contamination on ecotype differentiation of wheat *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(4): 438~ 441.
- [ 6 ] Meng L, Wang H X, Tan D Y. The alteration of gene expression of wheat seed proteins by mineral pollution of lead and zinc in Huize, Yunnan Province *Acta Agronomica Sinica*, 1998, **24**(3): 375~ 379.
- [ 7 ] Zhang L, Wang H X. Changes of root exudates to cadmium stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(4): 496~ 502
- [ 8 ] Zhang T P, Duan C Q, Hu B, *et al*. Ecological differentiation and variety degeneration of maize under heavy metal contamination. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(6): 743~ 747.
- [ 9 ] Yang J R, Huang Y. Mechanism of metal tolerance of plants *Chinese Journal of Ecology*, 1994, **13**(6): 20~ 26
- [ 10 ] Yang J R, Zha Y, Liu H. The distribution and chemical forms of Cd, Cu and Pb in polluted seeds *China Environmental Science*, 1999, **19**(6): 500~ 504
- [ 11 ] Zhou Q X, Gao Z M. Compartmental model of cadmium cycle and pollution-control countermeasures in the Zhangshi sewage-irrigation area of Shenyang *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, **15**(3): 273~ 280
- [ 12 ] Zhou Q X, Wu Y Y, Xiong X Z. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, **5**(4): 438~ 441.
- [ 13 ] Zhou Q X, Sun T H. Current situation of pollution ecochemistry and its prospects *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(5): 795~ 798
- [ 14 ] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, *et al*. Effect of organic acids on soil chemical behavior of lead and cadmium and their toxicity to plants *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(4): 619~ 622
- [ 15 ] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, *et al*. The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(4): 634~ 638
- [ 16 ] Tu C, Zhen C R, Chen H M. Advances on interaction of heavy metals and nutrient elements in soil-plant system. *China Environmental Science*, 1997, **17**(6): 526~ 529.
- [ 17 ] Liu Q, Wang Z J, Tang H X. Research progress in heavy metal speciation and toxicity and bioavailability of heavy metals *Chinese Journal of Environmental Science*, 1996, **17**(1): 89~ 92
- [ 18 ] Jiang G B. Speciation analysis of organometallic compounds *Advances in Environmental Science*, 1999, **7**(2): 7~ 12
- [ 19 ] Huang S B, Wang Z J. Prediction models of toxicity of heavy metal to aquatic organisms *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, **21**(2): 20~ 23
- [ 20 ] Lepp N W. *Effect of heavy metal pollution on plants* Vol 1. *effects of trace metals on plant function*. London and New Jersey: Applied Science Publishers, 1981.
- [ 21 ] Lepp N W. *Effect of heavy metal pollution on plants* Vol 2. *metals in the environment* London and New Jersey: Applied Science Publishers, 1981.
- [ 22 ] Adriano D C. *Trace elements in the terrestrial environment* New York: Springer-Verlag, 1986
- [ 23 ] Newman M C, McIntosh A W. *Metal ecotoxicology: concepts and applications* Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1991.
- [ 24 ] Ross S M. *Toxic metals in soil-plant systems* Chichester, New York, Brisbane, Toronto and Singapore: John Wiley & Sons, 1994
- [ 25 ] Gao Z M. *Pollution-ecological research of soil-plant systems* Beijing: China Scientific and Technological Press, 1986
- [ 26 ] Wang H X. *Introduction to pollution ecology*. Kunming: Yunnan University Press, 1990
- [ 27 ] Xu J L, Yang J R. *Heavy metals in terrestrial ecosystem*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [ 28 ] Zhou Q X. *Combined-pollution ecology*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [ 29 ] Chen H M. *Heavy metal pollution in soil-plant system*. Beijing: Science Press, 1996
- [ 30 ] Sun T H, Zhou Q X, Li P J. *Pollution ecology*. Beijing: Science Press, 2000
- [ 31 ] Chen H M, Zhen C R, Zhou D M, *et al*. *Chemical behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality*. Beijing: Science Press, 2002
- [ 32 ] Huang M H, Shu W S, Zhou H Y, *et al*. *Environmental pollution and ecological restoration*. Beijing: Science Press, 2003
- [ 33 ] Rivetta A, Negrini N, Cocucci M. Involvement of Ca<sup>2+</sup>-calmodulin in Cd<sup>2+</sup> toxicity during the early phases of raddish (*Raphanus sativus* L.) seed germination *Plant Cell and Environment*, 1997, **20**: 600~ 608
- [ 34 ] Costa G, Michaut J C, Guckert A. Amino acids exuded from axenic roots of lettuce and white lupin seedlings exposed to different cadmium concentrations *Journal of Plant Nutrition*, 1997, **20**: 883~ 900
- [ 35 ] Williams L E, Pitman J K, Hall J L. Emerging mechanisms of heavy metal transport in plants *Biochimica et Biophysica Acta*, 2000, **1465**: 104~ 126
- [ 36 ] Wu Q T. A mechanistic mathematical model for predicting the uptake of heavy metals by plants *Acta Pedologica Sinica*, 1994, **31**(1): 68~ 76
- [ 37 ] Devkota B, Schmidt G H. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **78**: 85~ 91.

- [38] Wong M H, Hung K M, Chiu S T. Sludge-grown algae for culturing aquatic organisms part II Sludge-grown algae as feeds for aquatic organisms *Environmental Monitoring*, 1996, **20**(3): 375~ 384
- [39] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Bioresource*, 1989, **1**: 81~ 126
- [40] Reeves R D. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant and Soil*, 2003, **249**: 57~ 65
- [41] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. *Pteris vittata* L.: an arsenic hyperaccumulator and its character in accumulating arsenic. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(3): 207~ 210
- [42] Yang X E, Long X X, Ni W Z, et al. *Sedum alfredii* H.: a new zinc hyperaccumulator. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(13): 1003~ 1006
- [43] Wei C Y, Chen T B, Huang Z C, et al. Cretan Brake (*Pteris nervosa* L.): an arsenic-accumulating plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5): 777~ 778
- [44] Xue S G, Chen Y X, Lin Q, et al. *Phytolacca acinosa* Roxb (Phytolaccaceae): a new manganese hyperaccumulator plant from southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 935~ 937
- [45] Liu W, Shu W S, Lan C Y. *Viola baoshanensis*, a plant that hyperaccumulates cadmium. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(19): 2046~ 2049
- [46] Luo Y M. Phytoremediation of metal-contaminated soils. *Soil*, 1999, (5): 261~ 265, 280
- [47] Wu L H, Luo Y M. Chelate-enhanced phytoremediation of copper polluted soil III. Effects of EDTA and low molecule weight organic acids. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(5): 679~ 685
- [48] Baker A J M. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, **3**: 643~ 654
- [49] Zhang Y X. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(2): 199~ 205
- [50] Yu J S. Molecular mechanisms in the effect of heavy metal toxicity to organisms. *Environmental Pollution and Control*, 1996, **18**(4): 28~ 31
- [51] Ralph P J, Burchett M D. Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress. *Environmental Pollution*, 1998, **103**: 91~ 101
- [52] Efremova S M, Margulis B A, Guzhova I, et al. Heat shock protein Hsp70 expression and DNA damage in Baikalian sponges exposed to model pollutants and wastewater from Baikalsk Pulp and Paper Plant. *Aquatic Toxicology*, 2002, **57**: 267~ 280
- [53] Das P, Samantary S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review. *Environmental Pollution*, 1997, **98**(1): 29~ 36
- [54] Thomas D J, Styblo M, Lin S. The cellular metabolism and systemic toxicity of arsenic. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2001, **176**: 127~ 144
- [55] Wang H B, Wang H X, Wen C H, et al. Some detoxication mechanisms of different wheat varieties under cadmium treatment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(4): 523~ 528
- [56] Keltjens W G, Van Beusichem M L. Phytochelatins as biomarkers for heavy metal toxicity in maize: single metal effects of copper and cadmium. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, **21**: 635~ 648
- [57] Zenk M H. Heavy metal detoxification in higher plants—a review. *Gene*, 1996, **179**: 21~ 30
- [58] Bhattacharjee S. Membrane lipid peroxidation, free radical scavengers and ethylene evolution in *Amaranthus* as affected by lead and cadmium. *Biology of Plant*, 1997, **40**: 131~ 135
- [59] Duan C Q. Plant adaptation to environmental pollution and its micro-evolution. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, **14**(5): 43~ 50
- [60] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, et al. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation in populations of *Typha latifolia* L. *New Phytologist*, 1997, **136**: 469~ 480
- [61] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, et al. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Annals of Botany*, 1997, **80**: 363~ 370
- [62] Martin M H, Coughtrey P J. Impact of metals on ecosystem function and productivity. In: Lepp N W ed. *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants Vol 2: Metals in the Environment*. London and New Jersey: Applied Science Publishers, 1981. 119~ 158
- [63] Yel'patyevsky P V, Arghanova V S, Lutsenko T N. Heavy metals in polluted ecosystem of an oak forest. *The Science of the Total Environment*, 1995, **162**: 13~ 18
- [64] Nikonov V, Goryainova V, Lukina N. Ni and Cu migration and accumulation in forest ecosystem on the Kola peninsula. *Chemosphere*, 2001, **42**: 93~ 100
- [65] Kupeman R G, Carreiro M M. Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, **29**(2): 179~ 190
- [66] He M C, Wang Z J, Tang H X. Modeling the ecological impact of heavy metals on aquatic ecosystems: a framework for the development of an ecological model. *The Science of the Total Environment*, 2001, **266**: 291~ 298
- [67] Tam N F Y, Wong Y S. Accumulation and distribution of heavy metals in a simulated mangrove system treated with sewage. *Hydrobiologia*, 1997, **352**: 67~ 75
- [68] Chen G Z, Miao S Y, Huang Y S, et al. Distribution, migration and purification effects of heavy metals in artificial wastewater in simulated *Kandelia candel* wetland ecosystems. In: Lang H Q, et al. eds. *Conservation and research of wetlands in China*. Shanghai: East China Normal University Press, 1998. 279~ 285
- [69] Chen G Z, Miao S Y. *Research of mangrove plant (Kandelia candel) and its wetland system*. Guangzhou: Zhongshan University Press,



- 2000
- [70] Shu W S, Lan C Y, Zhang Z Q. Analysis of major constraints on plant colonization at Fankou Pb/Zn mine tailings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(3): 314~ 318
- [71] Shu W S, Ye Z H, Lan C Y, *et al*. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, 2001, **26**: 389~ 394
- [72] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al*. Lead, zinc and copper accumulation and tolerance in populations of *Paspalum distichum* and *Cynodon dactylon*. *Environmental Pollution*, 2002, **120**(2): 445~ 453
- [73] Shu W S, Xia H P, Zhang Z Q, *et al*. Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: Field experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, **4**(1): 47~ 57.
- [74] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al*. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1629~ 1639.
- [75] Lv Z H, Wang H X. Effects of cadmium and lead on ADH Gene expression. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(5): 500~ 503.
- [76] Chang X X, Wang H X. Effects of Cd<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> on the DNA synthesis and DNA repair in *Vicia faba*. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(6): 855~ 859.
- [77] Zhang Y X, Chai T Y, Dong J, *et al*. Cloning and expression analysis of the heavy metal responsive gene PvSR2 from bean. *Plant Science*, 2001, **161**: 783~ 790
- [78] Mergeay M, Monchy S, Vallaeys T, *et al*. *Ralstonia metallidurans*, a bacterium specifically adapted to toxic metals: towards a catalogue of metal-responsive genes. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, **27**: 385~ 410
- [79] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, *et al*. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**(9): 4956~ 4960
- [80] Assuncao A G L, Martins P D, De Folter S, *et al*. Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Cell and Environment*, 2001, **24**(2): 217~ 226
- [81] Witzel B. The Influence of Zinc on the Uptake and Loss of Cadmium and Lead in the Woodlouse, *Porcellio scaber* (Isopoda, Oniscidea). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, **47**: 43~ 53
- [82] Kim D S. The removal by crab shell of mixed heavy metal ions in aqueous solution. *Bioresource Technology*, 2003, **87**: 355~ 357.
- [83] Li Y, Zu Y Q, Wang H X. Effects of cadmium and iron on amino acid content in tobacco leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(6): 640~ 647.
- [84] Xu G L, Wang H X, Wu Y S, *et al*. Effect of Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and their combined on Ca, Fe and Mn uptake by wheat seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(2): 275~ 278
- [85] Wang X, Liang R L, Zhou Q X. Ecological effect of Cd-Pb combined pollution on soil-rice system. *Rural Eco-Environment*, 2001, **17**(2): 41~ 44
- [86] Wu Y Y, Wang X, Liang R L, *et al*. Dynamic migration of Cd, Pb, Cu, Zn and As in agricultural ecosystem. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(4): 407~ 414
- [87] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, *et al*. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere. *Chemosphere*, 2003, **50**: 755~ 761.
- [88] Kunito T, Saeki K, Nagaoka K, *et al*. Characterization of copper-resistant bacterial community in rhizosphere of highly copper-contaminated soil. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**: 95~ 102
- [89] Demirbas A. Accumulation of heavy metals in some edible mushrooms from Turkey. *Food Chemistry*, 2000, **68**: 415~ 419.
- [90] Abou-Arab A A K. Heavy metal contents in Egyptian meat and the role of detergent washing on their levels. *Food and Chemical Toxicology*, 2001, **39**: 593~ 599.
- [91] Bahemuka T E, Mubofu E B. Heavy metals in edible green vegetables grown along the sites of the Sinza and Msimbazi rivers in Dar es Salaam, Tanzania. *Food Chemistry*, 1999, **66**: 63~ 66
- [92] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 2002, **58**: 201~ 235.
- [93] Gasso V Y. Different levels of reptile homeostasis under conditions of environmental stress. *Toxicology Letters*, 1998, **95**: 238
- [94] Duan C Q, Guo T, Xu X Y, *et al*. Ecological genetical response of plants to environmental pollution and relevant molecular ecological mechanism. In: Zhu Y G, *et al* eds. *Molecular mechanisms of ecological adaptation and ecological evolution*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 171~ 192
- [95] Wen C H, Duan C Q, Chang X X, *et al*. Differentiation in *Datura stramonium* L. populations exposed to heavy-metal pollution at different durations: RAPD analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(8): 1239~ 1245.
- [96] Xiong Z T. Pollution-resistant evolution in plants and its genecological costs. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(1): 53~ 57.
- [97] Clemens S, Palmgren M G, Kramer U. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 2002, **7**(7): 309~ 315.
- [98] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. *Environment International*, 2003, **29**: 529~ 540
- [99] Visoottiviseth P, Francesconi K, Sridokchan W. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. *Environmental Pollution*, 2002, **118**: 453~ 461.
- [100] Garbisu C, Alkorta I. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 2001, **77**: 229~ 236
- [101] Chaney R L, Malik M, Li Y M, *et al*. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, **8**(3): 279~ 284

- [102] Santoyo E, Santoyo-Gutiérrez S, Vema S P. Trace analysis of heavy metals in groundwater samples by ion chromatography with post-column reaction and ultraviolet-visible detection. *Journal of Chromatography A*, 2000, **884**: 229~ 241.
- [103] Sarzanini C. Liquid chromatography: a tool for the analysis of metal species. *Journal of Chromatography A*, 1999, **850**: 213~ 228.
- [104] Gong ZL, Lu X F, Ma M S, et al. Arsenic speciation analysis. *Talanta*, 2002, **58**: 77~ 96.

### 参考文献:

- [3] 王焕校. 污染生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 段昌群, 王焕校. 重金属对蚕豆的细胞遗传学毒理作用和对蚕豆根尖微核技术的探讨. *植物学报*, 1995, **37**(1): 14~ 24.
- [5] 马建民, 王焕校, 何玉芹. 铅污染对小麦生态型的影响. *环境科学学报*, 1998, **18**(4): 438~ 441.
- [6] 孟玲, 王焕校, 谭德勇. 云南会泽铅锌矿污染导致小麦种子蛋白基因表达的变化. *作物学报*, 1998, **24**(3): 375~ 379.
- [7] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化. *生态学报*, 2002, **22**(4): 496~ 502.
- [8] 张太平, 段昌群, 胡斌, 等. 玉米在重金属污染条件下的生态分化与品种退化. *应用生态学报*, 1999, **10**(6): 743~ 747.
- [9] 杨居荣, 黄翌. 植物对重金属的耐性机理. *生态学杂志*, 1994, **13**(6): 20~ 26.
- [10] 杨居荣, 查燕, 刘虹. 污染区麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其存在形态初探. *中国环境科学*, 1999, **19**(6): 500~ 504.
- [11] 周启星, 高拯民. 沈阳张士灌区镉循环的分室模型与污染防治对策研究. *环境科学学报*, 1995, **15**(3): 273~ 280.
- [12] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属Cd-Zn对水稻的复合污染和生态效应. *应用生态学报*, 1994, **5**(4): 438~ 441.
- [13] 周启星, 孙铁珩. 污染生态化学: 现状与展望. *应用生态学报*, 2000, **11**(5): 795~ 798.
- [14] 林崎, 陈英旭, 陈怀满, 等. 有机酸对Pb、Cd的土壤化学行为和植株效应的影响. *应用生态学报*, 2001, **12**(4): 619~ 622.
- [15] 林崎, 陈英旭, 陈怀满, 等. 小麦根际铅、镉的生态效应. *生态学报*, 2000, **20**(4): 634~ 638.
- [16] 涂从, 郑春荣, 陈怀满. 土壤-植物系统中重金属与养分元素交互作用. *中国环境科学*, 1997, **17**(6): 526~ 529.
- [17] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展. *环境科学*, 1996, **17**(1): 89~ 92.
- [18] 江桂斌. 有机金属化合物形态分析. *环境科学进展*, 1999, **7**(2): 7~ 12.
- [19] 黄圣彪, 王子健. 水环境中重金属的生物毒性预测模型. *上海环境科学*, 2002, **21**(2): 20~ 23.
- [25] 高拯民. 土壤—植物系统污染生态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1986.
- [26] 王焕校. 污染生态学基础. 昆明: 云南大学出版社, 1990.
- [27] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [28] 周启星. 复合污染生态学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [29] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996.
- [30] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002.
- [32] 黄铭洪, 束文圣, 周海云, 等. 环境污染与生态恢复. 北京: 科学出版社, 2003.
- [36] 吴启堂. 一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型. *土壤学报*, 1994, **31**(1): 68~ 76.
- [41] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, 2002, **47**(3): 207~ 210.
- [42] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H.)——一种新的锌超积累植物. *科学通报*, 2002, **47**(13): 1003~ 1006.
- [43] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 等. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物. *生态学报*, 2002, **22**(5): 777~ 778.
- [44] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物——商陆. *生态学报*, 2003, **23**(5): 935~ 937.
- [45] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山董菜 (*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物. *科学通报*, 2003, **48**(19): 2046~ 2049.
- [46] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复. *土壤*, 1999, (5): 261~ 265, 280.
- [47] 吴龙华, 骆永明. 铜污染土壤修复的有机调控研究. III. EDTA 和低分子量有机酸的效应. *土壤学报*, 2002, **39**(5): 679~ 685.
- [49] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究. *环境科学学报*, 1997, **17**(2): 199~ 205.
- [50] 郁建栓. 浅谈重金属对生物毒性效应的分子机理. *环境污染与防治*, 1996, **18**(4): 28~ 31.
- [55] 王宏钺, 王焕校, 文传浩, 等. 镉处理下不同小麦品种几种解毒机制探讨. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 523~ 528.
- [59] 段昌群. 植物对环境污染的适应和植物的微进化. *生态学杂志*, 1995, **14**(5): 43~ 50.
- [68] 陈桂珠, 缪绅裕, 黄山山, 等. 重金属在模拟秋茄湿地生态系统的分布迁移及其净化效应. 见: 朗惠卿等主编. 中国湿地研究和保护. 上海: 华东师范大学出版社, 1998. 279~ 285.
- [69] 陈桂珠, 缪绅裕. 红树林植物秋茄及其湿地系统研究. 广州: 中山大学出版社, 2000.
- [70] 束文圣, 蓝崇钰, 张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析. *应用生态学报*, 1997, **8**(3): 314~ 318.
- [74] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践. *生态学报*, 2003, **23**(8): 1629~ 1639.
- [75] 吕朝晖, 王焕校. 镉铅对小麦醇脱氢酶(ADH)基因表达影响的初步研究. *环境科学学报*, 1998, **18**(5): 500~ 503.
- [76] 常学秀, 王焕校. Cd<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>对蚕豆(*Vicia faba*)DNA合成及修复的影响. *生态学报*, 1999, **19**(6): 855~ 859.
- [83] 李元, 祖艳群, 王焕校. 镉、铁及其复合污染对烟草叶片氨基酸含量的影响. *生态学报*, 1998, **18**(6): 640~ 647.
- [84] 许桂莲, 王焕校, 吴玉树, 等. Zn、Cd及其复合对小麦幼苗吸收Ca、Fe、Mn的影响. *应用生态学报*, 2001, **12**(2): 275~ 278.
- [85] 王新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究. *农村生态环境*, 2001, **17**(2): 41~ 44.
- [86] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. Cd、Pb、Cu、Zn、As复合污染在农田生态系统的迁移动态研究. *环境科学学报*, 1998, **18**(4): 407~ 414.
- [94] 段昌群, 郭涛, 徐小勇, 等. 植物对环境污染的生态遗传学响应及分子生态机制. 见: 祖元刚等主编. 生态适应与生态进化的分子机理. 北京: 高等教育出版社, 2000. 171~ 192.
- [95] 文传浩, 段昌群, 常学秀, 等. 重金属污染下曼陀罗种群分化的RAPD分析. *生态学报*, 2001, **21**(8): 1239~ 1245.
- [96] 熊治廷. 植物抗污染进化及其遗传生态学代价. *生态学杂志*, 1997, **16**(1): 53~ 57.