

沈 羽, 张开梅, 方炎明. 蕨类植物修复土壤与净化水体的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 11–14.

蕨类植物修复土壤与净化水体的研究进展

沈 羽, 张开梅, 方炎明

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏南京 210037)

摘要:解决重金属污染是全球化环境污染处理难题之一, 利用植物进行重金属污染的土壤修复和水体净化正引起人们的日益关注。在介绍植物修复理论的基础上, 重点从蕨类植物角度出发, 系统综述了陆生蕨类植物和水生蕨类植物在土壤修复和水体净化中的技术方法和综合应用情况, 并对植物修复的发展趋势进行了展望, 希望有助于促进该领域的深入研究。

关键词:植物修复; 重金属; 蕨类植物; 水体净化; 土壤修复

中图分类号: X52; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2014)01–0011–04

20 世纪 50 年代以来, 全球化环境问题开始引起人类的关注。20 世纪 50—60 年代, 日本相继出现水俣病(Hg 污染)、骨痛病(Cd 污染)、哮喘病(SO₂ 和重金属粉尘复合污染); 70 年代, 美国南加利福尼亚海岸发生重金属事件, 重金属污染引起的环境问题越发严重。据报道, 2009—2010 年, 我国重金属中毒事件高达 31 起。针对这一问题, 2011 年初, 国务院正式批复了《重金属污染综合防治“十二五”规划》。

重金属主要是指原子密度大于 5 g/cm³ 的金属元素, 包含 Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn、Ag 和 Sn 等 40 余种金属, 此外, 毒性相近的 As、Se 等类金属元素也包括在内。重金属是具有潜在危害性的重要污染物^[1], 其在环境中所产生的污染效应具有隐蔽性、长期性以及不可逆性^[2], 在土壤–植物大系统中迁移, 伴随着转移的介质具有积累和放大作用, 对环境生物产生更大的影响。近年来, 植物专家采用藻类、苔藓、蕨类以及种子植物^[3–6], 分别对不同重金属的单一或复合污染处理效果进行研究, 筛选出了相应的重金属富集和超富集植物^[7]。

蕨类植物是植物界中的一个特殊类群, 种类繁多, 分布广泛, 生活周期具有明显的世代交替, 对各种极端恶劣环境适应能力强, 能蓄积的污染物种类繁多, 因此, 在土壤修复和水体净化中具有较高的实用价值。由于蕨类植物孢子体和配子体各自独立生活, 并且都能蓄积重金属污染物, 其修复能力的独特性日益为人们所关注。笔者从蕨类植物角度出发, 综述了近几年世界范围内植物对重金属污染修复的研究进展。

1 植物修复技术的产生与发展

1583 年, 意大利植物学家 Cesalpino 在意大利托斯卡纳发现“黑色的岩石”上生长的特殊植物, 首次对植物修复进行了报道, 1814 年, Desvaux 将这种特殊的植物命名为贝托庭芥

(*Alyssum bertolonii*)。1848 年, Inguzzi 和 Erignano 首次测定了贝托庭芥叶片中 Ni 的含量, 高达 7 900 μg/g^[8]。植物的区域分布与土壤中某些重金属的含量呈明显的相关性^[9–10]。矿物的埋藏有特定的地理环境和地质条件, 会有特定的适生植物, 通过这些植物可认定地下的矿藏, 在中国古代矿藏定位中就有应用, 例如: 海州香薷–铜矿、紫云英–钼矿、问荆草–金矿、车前草–锌矿等^[11]。

在重金属污染的土壤上, 大量植物物种的发现促进了耐重金属植物的研究, 也使某些富集重金属的植物相继被发现。1977 年, Brooks 等提出了超富集植物的概念^[12]; 1983 年 Chaney 提出了利用超富集植物清除土壤重金属污染的观点^[13]。随后, 有关耐重金属植物与超富集植物的研究逐渐增多, 使植物修复的理论得到了进一步的充实, 分别产生植物萃取(phytoextraction)^[14–15]、植物稳定(phytostabilization)^[16–17]、植物挥发(phytovolatilization)^[18–19]、根系过滤(rhizofiltration)^[20–21]、植物辅助生物修复(plant–assisted bioremediation)^[22–23]等植物修复类型。植物修复作为一种有效的重金属污染治理技术, 在工程性试验研究和实地应用中显示了巨大的潜力。

2 蕨类植物修复技术

蕨类植物进入植物修复领域是从蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)对 As 污染的治理探索开始的^[24], 并在随后的生理和抗性试验中证实了蜈蚣草对 As 的超富集特性^[25–26]。近年来, 随着科学技术的发展与研究的深入, 蕨类植物在植物修复中的应用得到了更大的发展。

2.1 陆生蕨类植物对土壤修复研究

蜈蚣草作为首先发现的超富集蕨类植物^[27], 在现有的植物修复研究领域仍然发挥着重要的作用。在筛选耐重金属植物和超富集植物的研究中, Koller 等发现在不同的土壤条件下, 蜈蚣草和 *Pteris umbrosa* 都具有吸附 As 和其他重金属的能力^[28]。陈健等通过解剖学等一系列手段, 研究了蜈蚣草和波斯顿蕨(*Nephrolepis exaltata*)对 Hg 的抗性, 发现波斯顿蕨对 Hg 的抗性较蜈蚣草强^[29]。Roccotiello 等选用 *Polypodium cambricum* 和蜈蚣草进行耐 Zn 蕨类植物的筛选, 通过对转移系数等多个指标的比较分析, 发现 *P. cambricum* 具有更强的

收稿日期: 2013–05–23

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 31200233); 中国科学院南京土壤研究所科研项目。

作者简介: 沈 羽(1988—), 男, 江苏苏州人, 硕士, 研究方向为环境生物学。Email: sheyitmax@gmail.com。

通信作者: 方炎明, 博士, 教授, 研究方向为环境生物学。E-mail: jwu4@njfu.edu.cn。

耐 Zn 和吸附 Zn 的能力^[30]。

由于蜈蚣草具有较强的富集重金属的能力^[31],有学者将其作为环境指示的一个重要标准。Chang 等在 Myoungbong 废弃矿点(韩国),通过选取 8 个样点的蜈蚣草、毛轴假蹄盖蕨(*Deparia petersenii*)、*Deparia lobatocrenata* 和 *Deparia conilii*,检测其根和土壤中 As、Cu、Cd、Pb、Zn 含量,并使用 PCR 分析各样点蕨类的亲缘关系,从分子水平上佐证了蕨类植物特别是蜈蚣草对重金属的吸附作用^[32]。Kumari 等在印度穆扎法尔布尔的 Kanti 热力发电站附近,发现蜈蚣草的地上部分对 Fe、Cu、Zn、Ni、Al、Cr、Pb、Si 和 As 的累积量比地下部分高,各元素的变异系数分别为 As 29.73%、Cu 12.66%、Cd 12.38%、Fe 2.95%、Ni 3.65%、Al 6.85%^[33]。由此可见,蜈蚣草对于废弃尾矿的发现和利用,不管是从直接的重金属污染治理,还是从间接的土壤监测方面都具有重要的理论意义和实用价值^[34-35]。

由于蜈蚣草对砷的超富集作用,国内外学者也对其进行了抗性机理等方面的研究。郑永强等将蜈蚣草的配子体和愈伤组织分别置于 2 mmol/L Na₃AsO₄ 和 3 mmol/L CuSO₄ 中,发现蜈蚣草的配子体和愈伤组织中的 As 富集浓度分别高达 763.3 mg/kg 和 315.4 mg/kg,配子体对 Cu 的吸附量可达 7 940 mg/kg^[35]。Srivastava 等研究了 As 和 Se 复合污染对蜈蚣草的作用效果,发现 Se 可以作为 1 种抗氧化剂,抑制蜈蚣草体内的脂质过氧化反应,抑制率达 26%~42%,巯基和谷胱甘肽的含量增加,Se 可以激活蜈蚣草体内的保护机制,从而减轻 As 对蜈蚣草的毒害^[36]。Sundaram 等发现 *PvGRX5* 基因的表达能促进蜈蚣草对 As 的超富集,随后将 *PvGRX5* 片段导入拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)中,发现拟南芥叶片中也有 As 的聚集;因此,通过定向改变基因表达,可以培育出更好的超富集植物^[37]。Mathews 等发现蜈蚣草在含高浓度 As 后,可以对草食性昆虫产生杀伤作用,进而达到自我保护的目的^[38]。张开梅等通过比较井栏边草(*P. multifida* Poir.)与蜈蚣草酶的抗氧化系统和非抗氧化系统、重金属 As-Pb 转移系数和富集系数,以及重金属区隔化分析,结果发现,随着 As-Pb 浓度的升高,SOD 和 POD 活性升高、可溶性蛋白含量下降,GSH 和 AsA 含量增加;As 主要集中分布在井栏边草和蜈蚣草的羽叶里,而 Pb 属于根部囤积型富集;细胞壁对重金属 As-Pb 具有一定的沉积作用,对细胞正常的代谢起到了保护作用^[39-42]。

蹄盖蕨属(*Athyrium*)植物也是一类重金属超富集蕨类植物,如禾秆蹄盖蕨(*A. yokoscense*)已被日本学者鉴定为对 Cu、Zn 等重金属具有富集能力的植物^[43]。有学者根据这一特性,将匍匐南芥(*Arabis flagellosa*)与禾秆蹄盖蕨进行间作,并分别进行重金属胁迫试验,发现杂交群落比单一群落的植株对重金属具有更大的吸附性能^[44]。在波兰西南部山区,有学者运用当地的 *A. filix-femina* 根系、叶片在不同土质中对同种元素吸收的差异来衡量岩石土壤的物理化学性质^[45]。华东蹄盖蕨(*A. niponicum*)对 Pb 的富集能力较强^[46],通过 Pb、As 单一污染和复合污染,证实华东蹄盖蕨具有超富集 Pb 和 As 的能力^[47]。

通过对我国广东云浮市的重金属污染土壤修复发现,乌毛蕨(*Blechnum orientale*)和莧菜(*Amaranthus mangostanus*)具

有耐重金属胁迫特性,可以作为污染区植被重建的先鋒物种^[48]。在西班牙马德里西北的废弃矿区,研究人员通过选取 25 种植物[包括 3 种蕨类植物:*Equisetum ramosissimum*(节节草)、*Pteridium aquilinum*(欧洲蕨)、*Athyrium filix-femina*],对重金属污染的土壤进行处理分析,筛选出 5 种耐重金属的优势种,其中欧洲蕨就是其中之一^[49]。在波兰 Tatra 国家公园,研究人员使用 Market Basket Analysis(MBA)技术,用 *A. distentifolium* 成功分析了土壤中的 Ca、Cd、Cr 等元素,不但验证了 MBA 技术在生态环境监测方面的巨大潜力,也说明了蕨类植物在植物修复中的重要作用^[50]。

2.2 水生蕨类植物对水体净化研究

近年来,水污染问题同样是一个世界性难题,一些科学家开始使用水生植物进行水体净化研究^[51-53]。在水生蕨类植物修复方面,主要有槐叶苹属(*Salvinia*)和满江红属(*Azolla*)植物。

槐叶苹(*Salvinia natans*)为多年生根退化型浮水性蕨类植物。2008 年,Rahman 等通过试验发现,槐叶苹吸附重金属和有机物是采用不同的运输通道^[54]。Dhir 等通过 Freundlich 方程拟合吸附和浓度曲线,以及傅里叶变换红外光谱(FTIR)检测槐叶苹生物量的变化,发现槐叶苹可富集 Ni、Cr、Fe 和 Cd^[55-56]。有学者通过分离萃取的手段,证实了 Pb 进入槐叶苹后,可与草酸形成有机盐,从而固定环境中的 Pb,减少 Pb 进一步造成环境污染的可能性^[57]。通过检测槐叶苹呼吸作用生成的有机碳与 Cr 含量的关系,发现槐叶苹可通过降低可溶性酸性转化酶的活性和蔗糖浓度,减轻 Cr 对自身所造成的伤害^[58]。Estrella-Gómez 等通过分析谷胱甘肽合成酶基因(GS)与 GS 编码基因(*SmGS*),对 Pb 胁迫下槐叶苹的根和叶进行比对,发现谷胱甘肽协调 Pb 在槐叶苹叶片和根系之间的平衡,抵消槐叶苹中自由基的产生,削弱 Pb 对槐叶苹叶片造成的不利影响有重要作用^[59]。

满江红(*Azolla imbricata*)为水田或池塘 1 年生小型浮水草植物,对水体重金属有很强的富集能力。满江红、小叶满江红(*A. microphylla*)和蕨状满江红(*A. filiculoides*)具有很强的吸收 Cr 的能力,生物富集系数分别为 528、4 617 和 2 997,组织中重金属含量分别达到 9 125、14 931、12 383 μg/g^[60]。在印度 Singrauli 工业区,研究人员在当地存在重金属污染的池塘和河流中发现 *A. pinnata* R. Br(印度特有种),对该物种进行 Hg、Cr 胁迫试验发现,处理 13 d 后,培养液中 Hg 含量下降了 70%~94%,在 3 mg/L 含重金属的培养液中,满江红中 Cr 含量可达 310~740 mg/kg,因此,满江红可以作为水体净化的理想植物材料^[61]。

3 展望

植物修复无污染、零破坏,不仅是一种绿色环保的净化途径,而且还具有持续时间长、价格低廉的特点。对植物修复在未来的发展应用中,笔者有以下几点思考:

第一,关于蕨类植物修复技术的优点和缺点。蕨类植物作为最原始的维管植物,种类繁多,分布广泛,繁衍方式多,对各种极端恶劣环境的适应生存能力强,所蓄积的污染物种类繁多,选择性差,因此,重视蕨类植物蓄积重金属污染物的研究具有重要的理论意义和实用价值。但是,由于对蕨类植物

的筛选、繁殖、培养、移栽等一系列研究尚处于起步阶段,在一定程度上限制了蕨类植物作为修复材料的应用。预期未来的发展方向是蕨类植物与木本植物复合应用于修复实践。

第二,关于超富集蕨类植物筛选。超富集植物的研究已经有近 50 年的时间,发现了 450 多种超富集植物,但真正能运用到生产实践中的超富集植物寥寥无几。不是植物选择重金属的能力较单一,就是植物的生物量太少,繁殖周期低于生产实践周期,再加上现在的环境破坏对当地的植被往往是毁灭性的,一些可以用来修复污染的植物还没有被发现就灭绝,这更增大了筛选超富集植物的难度。进一步筛选超富集蕨类植物,是植物修复实践的迫切需要。

第三,关于耐受重金属机制研究。蕨类植物作为修复材料研究还处于试验阶段,蕨类植物对重金属富集机理和耐受重金属的机制研究还不完善,近年来,以蜈蚣草为主的蕨类植物超富集研究,往往只是单一环境生态范畴的宏观研究,进一步深入分子水平的研究鲜见报道。预期该领域是不久将来的研究热点。

第四,关于修复技术开发。重金属富集到植物体内后,现有的很多做法是将植物直接掩埋、焚烧或是用水泥等固定物将植物固定后储存起来,后续工作往往是忽略的问题。简单的处理并不能从根本上把重金属污染问题解决,如果开发既能将富集重金属的植株转化为生物能源、又能安全回收重金属的新技术,将是蕨类植物资源利用很有前景的发展方向。

参考文献:

- [1] 周启星. 镉的生物地球化学循环和污染生态学研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 1992.
- [2] Zhang N M. The present situation and prospect of research on heavy metal pollution in soil plant systems[J]. Advances in Environment Science, 1999, 7(4): 30–33.
- [3] Gao Y, Yan X. Response of chara globularis and hydrodictyon reticulatum to lead pollution; their survival, bioaccumulation and defense[J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(2): 245–251.
- [4] Lang I, Wernitznig S. Sequestration at the cell wall and plasma membrane facilitates zinc tolerance in the moss *Pohlia drummondii* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74: 186–193.
- [5] Rozentsvet O A, Guschina I A, Bogdanova E S. The effect of copper and lead ions on growth and lipid composition of the fern *Matteuccia struthiopteris* [J]. Bioremediation Journal, 2012, 16(1): 38–47.
- [6] Hu R, Sun K, Su X, et al. Physiological responses and tolerance mechanisms to Pb in two xerophylls: *Salsola passerina* Bunge and *Chenopodium album* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 205/206: 131–138.
- [7] 唐世荣. 超积累植物在时空、科属内的分布特点及寻找方法[J]. 农村生态环境, 2001, 17(4): 56–60.
- [8] Brooks R R, Naidu S M, Malaisse F, et al. The elemental content of metallophytes from the copper/cobalt deposits of central Africa [J]. Royal Botanical Society of Belgium, 1986, 119(2): 179–191.
- [9] Ingrouille M J, Smirnoff N J. *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. (*T. alpestre* L.) in Britain [J]. New Phytologist, 1986, 102(1): 219–233.
- [10] Baker A J M, Walker P L. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants [M]//Shaw A J. Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc, 1990: 155–177.
- [11] 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖祥. 超积累植物与找矿[J]. 物探与化探, 1997, 21(4): 263–268.
- [12] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 49–57.
- [13] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents [C]//Parr J F. Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corporation, New Jersey: Park Ridge, 1983: 50–76.
- [14] Baker A M, McGrath S P, Sidoli C D, et al. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants [J]. Resources Conservation and Recycling, 1994, 11(1/2/3/4): 41–49.
- [15] Brett R, Jose – Enrique F, Paula M, et al. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability [J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 117–125.
- [16] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. Nature Biotechnology, 1995, 13(5): 468–474.
- [17] Abreu M M, Santos E S, Ferreira M, et al. *Cistus salvifolius* a promising species for mine wastes remediation [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 113: 86–93.
- [18] Bañuelos G S, Ajwa h A, Terry N, et al. Phytoremediation of selenium laden soils: A new technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 52(6): 426–430.
- [19] Seeger E M, Reiche N, Kuschik P, et al. Performance evaluation using a three compartment mass balance for the removal of volatile organic compounds in pilot scale constructed wetlands [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(19): 8467–8474.
- [20] Zhu Y L, Zayed A M, Qian J H, et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II. Water hyacinth [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 28(1): 339–344.
- [21] Gleba D, Borisjuk N V, Borisjuk L G, et al. Use of plant roots for phytoremediation and molecular farming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(11): 5973–5977.
- [22] Kulli B, Balmer M, Krebs R, et al. The influence of nitrilotriacetate on heavy metal uptake of lettuce and ryegrass [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(6): 1699–1705.
- [23] Meers E, Ruttens A, Hopgood M J, et al. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals [J]. Chemosphere, 2005, 58(8): 1011–1022.
- [24] 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 [J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207–210.
- [25] 亢希然, 范稚莲, 乔西, 等. 无菌条件下砷对蜈蚣草配子体生长发育的影响 [J]. 广西植物, 2007, 27(6): 882–885.
- [26] 谢景千, 雷梅, 陈同斌, 等. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 165–171.
- [27] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic [J]. Nature, 2001, 6820: 409, 579.
- [28] Koller C E, Patrick J W, Rose R J, et al. Arsenic and heavy metal accumulation by *Pteris vittata* L. and *P. umbrosa* R. Br [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 80(2): 128–133.
- [29] Chen J, Shiyab S, Han F X, et al. Bioaccumulation and physiological effects of mercury in *Pteris vittata* and *Nephrolepis exaltata* [J]. Eco-

- toxicology, 2009, 18(1): 110–121.
- [30] Roccotiello E, Manfredi A, Drava G, et al. Zinc tolerance and accumulation in the ferns *Polypodium cambricum* L. and *Pteris vittata* L. [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(6): 1264–1271.
 - [31] 李文学, 陈同斌. 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 627–631.
 - [32] Chang J S, Yoon I H, Kim K W. Heavy metal and arsenic accumulating fern species as potential ecological indicators in As – contaminated abandoned mines[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1275–1279.
 - [33] Kumari A, Lal B, Pakade Y B, et al. Assessment of bioaccumulation of heavy metal by *Pteris vittata* L. growing in the vicinity of fly ash [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(8): 779–787.
 - [34] 刘足根, 杨国华, 杨帆, 等. 赣南钨矿区土壤重金属含量与植物富集特征[J]. 生态学报, 2008, 27(8): 1345–1350.
 - [35] Zheng Y Q, Xu W Z, Ma M, et al. Plant regeneration of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. from spores and identification of its tolerance and accumulation of arsenic and copper[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(2): 249–255.
 - [36] Srivastava M, Ma L Q, Rathinasabapathi B, et al. Effects of selenium on arsenic uptake in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1115–1121.
 - [37] Sundaram S, Wu S, Ma L Q, et al. Expression of a *Pteris vittata* glutaredoxin PvGRX5 in transgenic *Arabidopsis thaliana* increases plant arsenic tolerance and decreases arsenic accumulation in the leaves [J]. Plant, Cell & Environment, 2009, 32(7): 851–858.
 - [38] Mathews S, Ma L Q, Bala R, et al. Arsenic reduced scale – insect infestation on arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2/3): 282–286.
 - [39] Zhang K M, Deng T, Fang Y M. Arsenic and lead induced changes in the frond physiology and ultrastructure of *Pteris multifida* Poir. [C]. The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2011: 128–135.
 - [40] Zhang K M, Deng T, Fang Y M, et al. Influence of co – contamination of As and Pb on the frond physiology and ultrastructure of *Pteris vittata* L. [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 21(8a): 2215–2223.
 - [41] Zhang K M, Deng T, Fang Y M, et al. Compartmentalization of heavy metal in fern under As and Pb co – exposure: a case study[C]. The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2012: 344–352.
 - [42] 邓滔. 井栏边草和蜈蚣草对 As – Pb 胁迫的富集作用[D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 1–50.
 - [43] Nishizono H. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. Plant and Soil, 1987, 101(1): 15–20.
 - [44] Chen Z H, Masayuki S, Kang Y M, et al. Zinc and cadmium uptake from a metalliferous soil by a mixed culture of *Athyrium yokoscense* and *Arabis flagellosa* [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(2): 315–324.
 - [45] Aleksandra S C, Krzysztof K, Stankiewicz A, et al. Rhizomes and fronds of *Athyrium filix – femina* as possible bioindicators of chemical elements from soils over different parent materials in southwest Poland [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1105–1111.
 - [46] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2003, 14(3): 277–282.
 - [47] 贾恒. 华东蹄盖蕨对砷和铅胁迫的生理响应和抗逆性[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
 - [48] 刘晓双, 亦如瀚, 吴锦标, 等. 硫酸厂废水污染区土壤和植物中重金属分布特征的研究——以云浮市某硫酸厂为例[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29): 14319–14320.
 - [49] Moreno – Jiménez E, Peñalosa J M, Manzano R, et al. Heavy metals distribution in soils surrounding an abandoned mine in NW Madrid (Spain) and their transference to wild flora [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2/3): 854–859.
 - [50] Samecka – Cymerman A, Stankiewicz A, Kolon K, et al. Market basket analysis: a new tool in ecology to describe chemical relations in the environment—a case study of the fern *Athyrium distentifolium* in the Tatra National Park in Poland [J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(9): 1029–1034.
 - [51] Soltan M E, Rashed M N. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations [J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(2): 321–334.
 - [52] 袁蓉, 刘建武, 成旦红, 等. 凤眼莲对多环芳烃(萘)有机废水的净化[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2004, 10(3): 272–276.
 - [53] 楚建周, 王圣瑞, 金相灿, 等. 基质营养状况对黑藻生长及光合作用的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 702–707.
 - [54] Rahman M A, Hasegawa H, Ueda K, et al. Influence of phosphate and iron ions in selective uptake of arsenic species by water fern (*Salvinia natans* L.) [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 145(2): 179–184.
 - [55] Dhir B, Sharmila P, Pardha Saradhi P, et al. Physiological and antioxidant responses of *Salvinia natans* exposed to chromium – rich wastewater [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(6): 1790–1797.
 - [56] Dhir B, Nasim S A, Sharmila P, et al. Heavy metal removal potential of dried *Salvinia* biomass [J]. International Journal of Phytoremediation, 2010, 12(2): 133–141.
 - [57] Núñez – López R A, Meas Y, Gama S C, et al. Leaching of lead by ammonium salts and EDTA from *Salvinia minima* biomass produced during aquatic phytoremediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/2/3): 623–632.
 - [58] Prado C, Rodríguez – Montelongo L, González J A, et al. Uptake of chromium by *Salvinia minima*: effect on plant growth, leaf respiration and carbohydrate metabolism [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1/2/3): 546–553.
 - [59] Estrella – Gómez N E, Sauri D E, Enrique Z P, et al. Glutathione plays a role in protecting leaves of *Salvinia minima* from Pb²⁺ damage associated with changes in the expression of *SmGS* genes and increased activity of GS [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 75: 188–194.
 - [60] Arora A, Saxena S, Sharma D K. Tolerance and phytoaccumulation of chromium by three *Azolla* species [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, 22(2): 97–100.
 - [61] Rai P K. Phytoremediation of Hg and Cd from industrial effluents using an aquatic free floating macrophyte *Azolla pinnata* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2008, 10(5): 430–439.