

芦苇和香蒲对重金属钼的吸收特性研究

练建军, 许士国*, 韩成伟

(大连理工大学建设工程学部, 大连 116024)

摘要: 研究了水生植物芦苇和香蒲对重金属钼的吸收特性. 通过短期室内水培实验, 对比考察了 2 种植物对重金属钼的耐毒性、动态去除率、吸收过程及富集情况, 并对在不同浓度营养液中植物对重金属钼吸收的影响进行了分析. 结果表明, 2 种植物钼中毒导致其茎叶发黄、蒸腾能力下降, 在钼浓度为 $2 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 香蒲对重金属钼的耐毒性较芦苇强. 香蒲对重金属钼的去除率高于芦苇, 在钼浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 香蒲和芦苇去除率分别为 87% 和 62%. 2 种植物对重金属钼的吸收是一个动态平衡过程, 且以被动吸收为主. 香蒲对钼的富集量较芦苇高, 且植物地上部重金属积累量大于根部, 符合超积累植物特征之一. 营养液浓度的增加不会提高植物对重金属钼的吸收量, 反而会因离子竞争等因素使去除率有所下降. 芦苇和香蒲对溶液中钼的吸收均具有显著效果, 香蒲吸收效果较芦苇好.

关键词: 植物修复; 芦苇; 香蒲; 重金属钼; 吸收性能

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3335-06

Absorption Characteristics of Molybdenum by Reed and Cattail

LIAN Jian-jun, XU Shi-guo, HAN Cheng-wei

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The adsorption characteristics of reed and cattail to molybdenum were studied. The toxicity, removal rate, adsorption process and accumulation of Mo were investigated in the short-term indoor-culture experiment. The effects of Mo adsorbed by two plants in nutrition solution with different concentrations were also studied. Due to the Mo toxicity, the color of stems and leaves of two plants had become scorch and the transpiration was declined. The cattail illustrated higher tolerance to Mo than reed when Mo concentration was in the range of $2 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The removal rate of Mo by cattail was 87%, which was higher than reed (62%) with Mo concentration of $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The absorption process of Mo by two plants was homeostasis, and the passivity absorption was the main absorption mechanism. Mo enrichment amount in cattail was higher than that in reed, and Mo concentration in shoot were higher than that in roots. The results displayed that cattail was Mo hyper accumulator. The absorption of Mo was not enhanced with the increase of nutrition solution concentration, due to the competition of other ions. The study suggested that the absorption capacity of Mo was significant by the two plants, and cattail was better for Mo removal than reed.

Key words: phytoremediation; reed; cattail; molybdenum; absorption characteristics

重金属钼不仅是动植物生长必需的营养元素之一, 同时也是非常重要的战略资源^[1]. 然而钼矿开采技术相对落后, 尾矿管理力度不够, 导致部分地区已经产生了相对严重的钼污染事件, 如加拿大不列颠哥伦比亚省^[2]及辽宁省乌金塘水库^[3]等. 目前对重金属钼的研究工作主要集中在缺钼对动植物带来的影响及危害, 对钼污染导致的环境问题及解决方法研究较少, 因此对重金属钼污染的治理研究是很有必要的.

重金属治理方法较多, 然而从生态学及环境学角度出发, 人工湿地技术无疑是一个理想的选择. 虽然人工湿地技术发展历程不超过 50 a, 但目前已被广泛应用于农业面源污染、矿山、食品加工、造纸、奶制品加工等领域的废水处理中. 湿地去除污染物的三要素为: 基质、植物及微生物, 相关研究表明, 植物对重金属和有害物质具有吸附、吸收^[4]、

挥发^[5]及固定^[6]功能, 因此植物修复技术通常被认为是缓解低浓度污染物经济有效的方法^[7,8]. 目前研究的植物修复技术主要是针对 Zn、Mn、Pb、Cu、Ni、Co、As 和 Cd 等几种重金属开展的, 如魏树和等^[9]对钼的超积累植物龙葵进行了研究; Deng 等^[10]使用 12 种湿地植物对铅、锌、铜及钼的吸收进行了研究, 而对重金属钼的研究却很少. 芦苇 (*Phragmites australis*) 和香蒲 (*Typha latifolia*) 是国际上公认的湿地水生植物优势品种^[11,12], 由于具有适应性广、抗逆性强等优点, 被广泛应用于湿地环境中, 然而利用芦苇和香蒲修复重金属钼污染的

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50979012); 格平绿色助学行动辽宁环境科研工程项目

作者简介: 练建军 (1985 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为重金属钼污染人工湿地治理, E-mail: jilian@mail.dlut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sgxu@dlut.edu.cn

研究几乎没有,并且不同营养液浓度对水生植物修复重金属的研究也甚少. Ingole 等^[13]认为水生植物对重金属的吸收量通常会随着营养液浓度的提高而增大,而 Jayaweera 等^[14]的研究结果却不相一致. 本研究以芦苇和香蒲为实验材料,对重金属钼的植物累积特征进行了系统分析,以期对重金属钼污染的植物修复技术提供理论参考.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 试剂

实验所用钼溶液是用钼酸钠和去离子水配制而成,并使用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节溶液 pH 为中性. 营养液为 Hoagland 配方^[15-17],如表 1 所示. 由于实验测试对象为重金属钼,所以去除了配方中的 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. 实验所用药品、试剂均为分析纯.

表 1 Hoagland 营养液配方

Table 1 Nutrient composition of the Hoagland solution

名称	浓度 $/\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	名称	浓度 $/\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5×10^3	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.09
KH_2PO_4	0.25×10^3	EDTA	51
KNO_3	1.25×10^3	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.19
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.11×10^3	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	17.9
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.3	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0
H_3BO_3	11.5		

1.1.2 材料

实验选用植物为芦苇和香蒲,植物样本采自当地某水库周边湿地. 为使实验具有可参比性,实验开始前,预先选择生长健壮、株高、长势一致的植株,放入 1 L 未含钼的 Hoagland 营养液中培养. 培养 1 周后,选择根部成熟,叶片数目为 5~7 片,植株高度为 50~60 cm 的植物,并用自来水冲洗干净作为实验材料. 实验所用容器为 2.5 L 塑料瓶,瓶壁用铝箔纸包裹,瓶口用保鲜膜密封. 植物培养均在室内近窗的自然光下进行,保持植物根以上部位能够获得充足的光照和通风.

1.2 植物耐毒性及钼分布特征实验

植物耐毒性实验是通过测试短期内植物的相对蒸腾速率变化来实现的^[18],首先供试植物在营养液中分别培养 1 d,然后将营养液替换为含有不同钼浓度的去离子水,每天测试溶液质量的变化以表示植物的蒸腾速率. 每个培养瓶各放 3 株植物,溶液共设 5 个处理水平,浓度分别为 0、2、5、10、20

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相当于乌金塘水库钼污染浓度的 0、1、2.5、5、10 倍^[19],各处理水平重复 3 次. 相对蒸腾速率由式(1)得出:

$$\text{RT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_i(c,t)}{T_i(c,0)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $c(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 是溶液钼离子浓度, $t(\text{h})$ 是接触时间, $T(\text{g} \cdot \text{h}^{-1})$ 是绝对蒸腾量, i 是重复次数 1,2, ..., n .

每天观察植物的生长状况,实验结束后,收集植物并分解为根、茎、叶三部分,考察重金属钼在植物体内的富集能力及转移情况. 重金属钼的富集能力通过植物的生物富集因子(BCF)计算得出^[15,20],计算公式见式(2). 转移能力(TA)是指重金属从植物根部转移到地上部分的能力^[21],计算公式如式(3)所示. 较高的生物富集因子及较强的转移能力表明移除植物的地上部分就可以去除大量目标污染物^[17,22].

$$\text{BCF} = P/E \quad (2)$$

式中, $P(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 指植物体内重金属含量; $E(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 是重金属在溶液中的浓度.

$$\text{TA} = A_r/A_s \quad (3)$$

式中, $A_r(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 指植物根部重金属的含量, $A_s(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 指植物茎叶重金属含量,植物各部分重金属钼含量的测定均在干重条件下进行.

1.3 动态去除及吸收过程实验

动态去除实验考察了 2 种植物在一定时间内对 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 钼溶液的动态去除效果,每隔 2 d 补充营养液并测水样钼含量. 吸收过程实验是对 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼溶液在 24 h 内不同时刻的取样检测来完成的,每个培养瓶放 3 株植物,各设 3 次重复.

1.4 不同营养液浓度对植物去钼效果影响实验

在培养瓶分别放入含钼浓度均为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的不同营养液中,即标准营养液(如表 1),2 倍于标准液的培养液以及不含营养液的去离子水,每种营养液培养实验各重复 3 次. 每隔 2 d 测试溶液中钼浓度,并用对应溶液补充耗散的水分.

1.5 分析测试方法

采集的植物先按以下方法进行处理:将采集的植物先用去离子水冲洗干净,再用 Na-EDTA 溶液浸泡根部约 15 min,以除去表面吸附的钼离子,最后用去离子水冲洗干净. 之后将样本分为根、茎、叶三部分,在 105°C 烘箱内杀青 30 min,然后在 70°C 的烘箱中烘至恒重,用不锈钢粉碎机粉碎备用. 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法进行消解^[23],消解溶液及营养液

中的钼离子均采用原子吸收分光光度法来测定^[24, 25].

所获数据采用相关软件进行统计分析, 并进行多组样本间差异显著性分析 ($P < 0.05$).

2 结果与讨论

2.1 植物耐毒性分析

从植物生长的表现现象可以得出, 高浓度的重金属钼溶液对芦苇和香蒲生长发育的影响十分明显. 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼溶液中培养的 2 种植物基本没有发生变化. 在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼浓度中, 芦苇和香蒲

在第 5 d 开始发黄. 而 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼浓度, 2 种植物叶片在第 3 d 开始发黄. 整个实验结束后, 除 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 钼溶液的植物外, 其余植物的茎和叶均已枯黄, 收获时根部颜色明显加深, 这可能是由于植物钼中毒对 Fe 代谢的影响而导致植物颜色发黄^[26]. 由图 1 可知, 溶液中重金属钼在一定程度上抑制了植物的蒸腾作用, 而且浓度越高, 植物蒸腾量越小, 这与 Ebel 等^[16]的研究成果基本符合. 从图 1 得出, 芦苇蒸腾量下降更快, 表明芦苇对重金属钼反应更为强烈, 并且芦苇蒸腾量均低于香蒲, 因此香蒲对重金属钼的耐毒性较芦苇好.

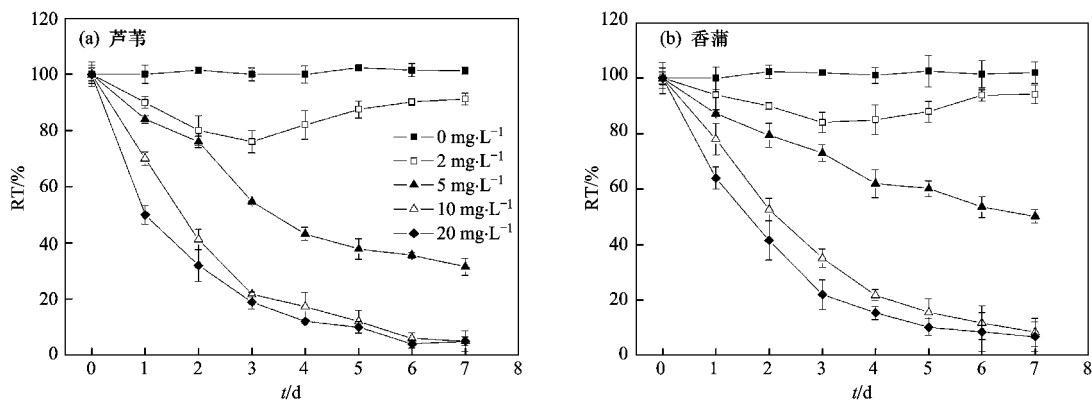


图 1 不同钼供应水平下芦苇和香蒲的相对蒸腾量随时间的变化

Fig. 1 Relative transpiration of reed and cattail under different Mo treatments

2.2 动态去除率

钼供应水平为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着培养时间的延长, 2 种植物对钼的去除率均呈上升趋势, 这与植物吸收其他有毒有害物质的吸收机理相符, 即植物对有毒有害物质的吸收以被动吸收为主, 增加植物和废水的接触时间, 可提高植物对其的去除率^[27, 28]. 由图 2 可知, 前 6 d 芦苇对钼的去除效果较好, 但随着时间的延长, 香蒲去钼效率逐渐上升, 而芦苇却趋于稳定, 表明香蒲对钼的吸收具有较强的持久性, 在培养的第 20 d, 芦苇和香蒲对钼的去除率已分别达到 62% 和 87%. 芦苇吸收速率较香蒲快, 可能与芦苇较为发达的根系有关.

2.3 吸收过程研究

由图 3 可知, 2 种植物对钼的去除过程均经历 4 个阶段, 分别为: 快速吸收、缓慢吸收、释放与慢速吸收, 研究结果与戴全裕^[29]的研究成果基本吻合. 图中①②段为芦苇的释放阶段, ②③段为香蒲的释放阶段, 由于芦苇对钼的吸收速率较香蒲快, 因而释放速率也较快, 这与 2 种植物的动态去除率变化趋势相符. 重金属钼的释放过程是由根表皮细

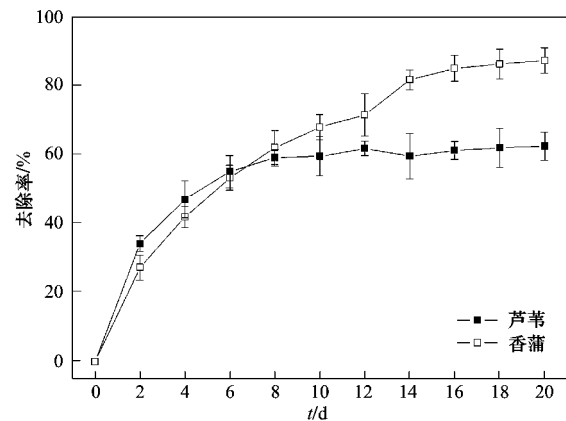


图 2 时间对重金属钼去除率的影响

Fig. 2 Effects of contact time on the removal rate of Mo

胞壁解吸所致, 而对其过量吸收可能是由植物表皮细胞吸收及植物蒸腾所导致的^[30].

2.4 植物富集研究

对照组植物钼含量在检测限值以下, 所以在表 2 没有列出. 由表 2 可知, 随着钼供应水平的提高, 芦苇和香蒲各部分含钼量均呈上升趋势. 目前对超

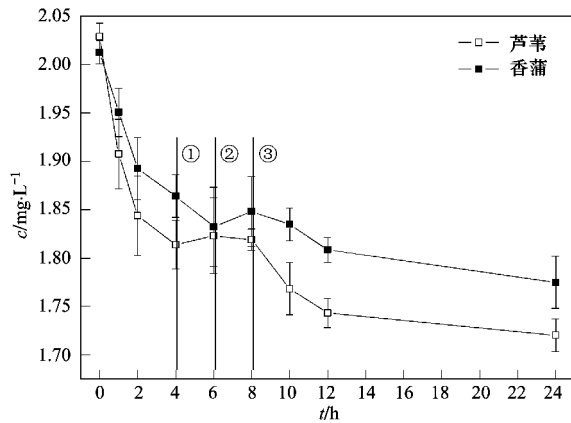


图 3 2 种植物对重金属钼的吸收和释放

Fig. 3 Absorption and release of Mo by reed and cattail

积累植物衡量标准的认识在转移系数方面已达成共识,即植物地上部重金属含量应大于根部积累的含

量;而对植物体内重金属的定量评价中却存在差异,如 Baker 等^[31]提出对 Cd 有超积累作用的植物,其地上部分 Cd 含量应达到 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,对于 Zn 植物体内含量应达到 $10\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[32].文献[33]则认为,对 Cd 的超积累标准应降低为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 比较合理,而其他学者认为 Zn 的超积累植物体内含量应降低为 $3\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[34].因此,超积累植物的定量评价与重金属种类及当地环境有密切的关系. Zhu 等认为^[35],优良的富集植物 BCF 值应超过 1 000,而本研究中 2 种植物对重金属钼的富集系数并未达到该要求,这可能与植物对不同微量元素的需求差异有关.芦苇转移系数均大于 1,说明主要以根部吸收为主,而香蒲的转移系数 < 1 ,符合超积累植物的特点之一.随钼浓度的提高,2 种植物的富集系数却呈下降趋势,与 Carvalho 等^[36]的研究成果相吻合.

表 2 2 种植物对重金属钼的富集情况

Table 2 Accumulation of Mo by reed and cattail

钼浓度 /mg·L ⁻¹	芦苇 ¹⁾					BCF	TA	香蒲 ¹⁾					BCF	TA
	根 /mg·kg ⁻¹	茎 /mg·kg ⁻¹	叶 /mg·kg ⁻¹	总计 /mg·kg ⁻¹	总计 /mg·kg ⁻¹			根 /mg·kg ⁻¹	茎 /mg·kg ⁻¹	叶 /mg·kg ⁻¹	总计 /mg·kg ⁻¹			
2	74.51a ²⁾	25.92a	45.09a	145.51	72.76	1.05	60.71a	39.23a	80.66a	180.60	90.30	0.51		
5	183.55b	61.54 b	117.07b	362.16	72.43	1.03	145.38b	60.18a	218.08b	423.63	84.73	0.52		
10	408.36c	86.87bc	165.76b	660.99	66.10	1.62	233.79c	170.74b	399.26c	803.79	80.38	0.41		
20	458.05d	111.66c	234.62c	804.33	40.22	1.32	527.13d	392.72c	589.54d	1509.40	75.47	0.54		

1) n = 3; 2) 同一列不同字母表示彼此之间的差异显著 (P < 0.05)

2.5 营养液浓度影响

随着营养液浓度的提高,2 种植物对重金属钼的去除并没有提高,这与 Jayaweera 等^[14]的研究结果相符.从图 4 可知,实验初期,去离子水中植物去钼速率较快,而在后期随着溶液中微量元素的减少去除能力逐渐降低;标准营养液中植物对钼的吸收

能力较持久,可能是由于标准营养液使植物生长状态良好,对植物去钼起到了促进作用;2 倍标准营养液培养的的植物去钼效率并未提高,可能与溶液中过多的负离子对植物吸收重金属钼产生了竞争作用有关,也可能由于 2 倍标准营养液并不是植物最佳生长条件.相关研究表明^[37],外界硫化物的存在降

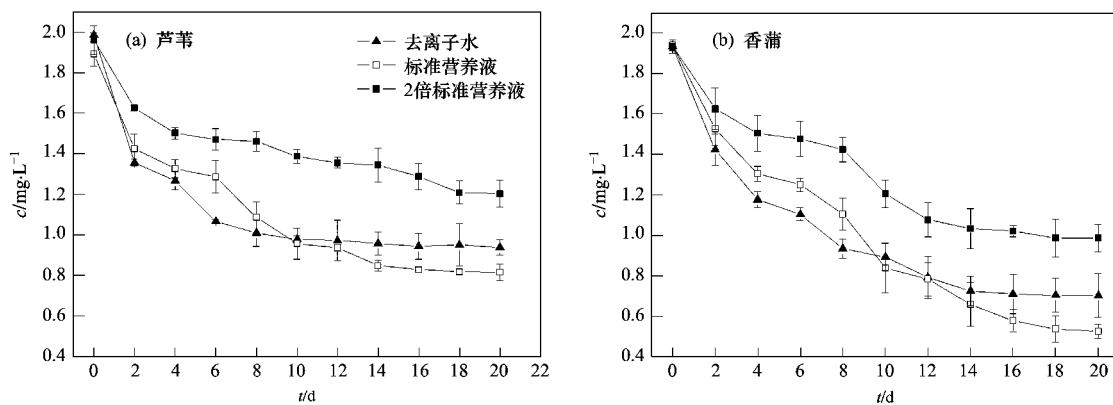


图 4 营养液浓度对芦苇和香蒲吸收重金属钼的影响

Fig. 4 Effects of different nutrient solutions on Mo absorption by reed and cattail

低了钼酸根从植物根部向茎部的输移, 而 Kannan 等^[38]通过水稻实验得出, 硫酸盐的存在减少了植物根部对钼酸盐的吸收。

3 结论

(1) 香蒲对重金属钼的耐毒性较芦苇强。芦苇和香蒲对重金属钼的去除是一个吸收释放的动态平衡过程, 表明 2 种植物对重金属钼的吸收以被动吸收为主。在质量浓度 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼溶液中, 芦苇和香蒲去除率分别达 62% 和 87%。

(2) 香蒲对钼的富集量较芦苇高, 且植物地上部重金属积累量大于根部, 符合超积累植物特征之一, 因此香蒲更适宜于对重金属钼的吸收。

(3) 营养液浓度的提高不会增强植物对钼的吸收, 是否对其他重金属具有相同的效果仍需进一步考察。

参考文献:

- [1] Namasivayam C, Sureshkumar M V. Removal and recovery of molybdenum from aqueous solutions by adsorption onto surfactantmodified coir pith, a lignocellulosic polymer [J]. Clean-Soil Air Water, 2009, **37**(1): 60-66.
- [2] Aube B C, Strozio J. Molybdate treatment at Brenda mines [A]. In: Proceedings of the 5th international conference of acid rock drainage. ICARD (I, II) [C]. Denver: Soc Mining Metallurgy And Exploration Inc, 2000. 1113-1119.
- [3] 于常武, 许士国, 陈国伟, 等. 水体中钼污染物的迁移转化研究进展[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(9): 70-74.
- [4] 郭静, 阮宜纶, 林荣忱. 水生植物对地热废水净化作用的研究[J]. 环境科学学报, 1995, **15**(2): 251-255.
- [5] Tassi E, Pouget J, Petruzzelli G, et al. The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals[J]. Chemosphere, 2008, **71**(1): 66-73.
- [6] Gohle V, Paszkowski U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation [J]. Planta, 2006, **223**(6): 1115-1122.
- [7] Fritioff A, Greger M. Aquatic and terrestrial plant species with potential to remove heavy metals from stormwater [J]. International Journal of Phytoremediation, 2003, **5**(3): 211-224.
- [8] Weis J S, Weis P. Metal uptake, transport and release by wetland plants: Implications for phytoremediation and restoration [J]. Environment International, 2004, **30**(5): 685-700.
- [9] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, **49**(24): 2568-2573.
- [10] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(1): 29-40.
- [11] Gopal B, Goel U. Competition and allelopathy in aquatic plant communities [J]. Botanical Review, 1993, **59**(3): 155-210.
- [12] Grace J B, Wetzel R G. Long-term dynamics of Typha populations [J]. Aquatic Botany, 1998, **61**(2): 137-146.
- [13] Ingole N W, Bhole A G. Removal of heavy metals from aqueous solution by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Journal of Water Supply Research and Technology-aqua, 2003, **52**(2): 119-128.
- [14] Jayaweera M W, Kasturirachchi C K, Kularatne R K A, et al. Contribution of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) grown under different nutrient conditions to Fe-removal mechanisms in constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2008, **87**(3): 450-460.
- [15] Zayed A, Gowthaman S, Terry N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(3): 715-721.
- [16] Ebel M, Evangelou M W H, Schaeffer A. Cyanide phytoremediation by water hyacinths (*Eichhornia crassipes*) [J]. Chemosphere, 2007, **66**(5): 816-823.
- [17] Qian J H, Zayed A, Zhu Y L, et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: III. uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, **28**(5): 1448-1445.
- [18] Trapp S, Zambrano K C, Kusk K O, et al. A phytotoxicity test using transpiration of willows [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(2): 154-160.
- [19] 郭志军, 王艳秋. 乌金塘水库水体中钼污染现状及其防治对策[J]. 环境科学导论, 2007, **26**(4): 59-60.
- [20] Weiss J, Hondzo M, Biesboer D, et al. Laboratory study of heavy metal phytoremediation by three wetland macrophytes [J]. International Journal of Phytoremediation, 2006, **8**(3): 245-259.
- [21] Wu F Y, Sun E J. Effects of copper, zinc, nickel, chromium and lead on the growth of water convolvulus in water culture [J]. Process Safety and Environmental Protection, 1998, **21**(1): 63-72.
- [22] Falbo M B, Weeks T E. A comparison of *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) and *Sphagnum quinquefarium* (Sphagnaceae) in treatment of acid mine water [J]. Economic Botany, 1990, **44**: 40-49.
- [23] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 167-171.
- [24] Wei S H, Zhou Q X. Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals [J]. Progress in Natural Science, 2004, **14**(6): 495-503.
- [25] 魏树和, 杨传杰, 周启星. 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征 [J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2912-2918.
- [26] Warrington K. The influences of high concentrations of ammonium and sodium molybdates on flax, soybean and pea grown in nutrient solutions containing deficient or excess [J]. Annals of Applied Biology, 1955, **43**: 709-719.

- [27] 戴全裕. 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价[J]. 环境科学学报, 1983, **3**(3): 213-223.
- [28] 吴玉树. 水生维管束植物对水体 Pb 污染的反应抗性和净化作用[J]. 生态学报, 1983, **3**(3): 185-195.
- [29] 戴全裕. 水生高等植物对废水 Ag 的净化与富集特性研究[J]. 生态学报, 1990, **10**(4): 343-348.
- [30] Hale K L, McGrath S P, Enzo L, et al. Molybdenum sequestration in *Brassica* species. A role for anthocyanins? [J]. *Plant Physiology*, 2001, **126**(4): 1391-1402.
- [31] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, **1**(2): 81-126.
- [32] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants [A]. In: Raskin H, Ensley B D, eds. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to clean up the Environment* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. 193-230.
- [33] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Study on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus *Silene* L(Caryophy llaceae) from Zaire [J]. *Plant and Soil*, 1983, **73**(3): 377-385.
- [34] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralized soils of the Austrian Alps [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **104**: 145-155.
- [35] Zhu Y L, Zayed A M, Qian J H, et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants, Water Hyacinth [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, **28**(1): 339-344.
- [36] Carvalho K M, Martin D F. Removal of aqueous selenium by four aquatic plants [J]. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2001, **39**: 33-36.
- [37] Stout P R, Meagher W R, Pearson G A, et al. Molybdenum nutrition of crop plants: I. The influence of phosphate and sulfate on the absorption of molybdenum from soils and solution cultures [J]. *Plant and Soil*, 1951, **3**(1): 51-87.
- [38] Kannan S, Ramani S. Studies on molybdenum absorption and transport in bean and rice 1. The influence of phosphate and sulfate on the absorption of molybdenum from soils and solution cultures [J]. *Plant Physiology*, 1978, **62**: 179-181.