

海岸带不同林龄木麻黄对重金属的吸收与富集作用*

靳明华¹ 丁振华^{1**} 周海超¹ 叶功富²

(¹厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361102; ²福建省林业科学研究院, 福州 350012)

摘要 为研究不同林龄木麻黄对重金属的吸收与富集作用,用 ICP-MS 测定了福建东山县国有防护林场 10、16、20、30 年生木麻黄小枝、细根、凋落物及林地土壤中的 5 种重金属 (Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb) 含量。结果表明,木麻黄对不同重金属的吸收能力不同,从高到低为 Zn > Cr > Pb > Cu > Cd; 木麻黄细根中 Cr 和 Cu、Pb、Fe 和 Cu、Zn 和 Cd 具有明显的协同作用; 各林龄木麻黄对重金属均具有一定的耐性,对 Cu、Zn、Cd、Pb 有很好的富集作用; 20 年生木麻黄的重金属年积累量最高; 说明木麻黄对重金属的净化作用具有极大的潜力,20 年生木麻黄作用最为明显。

关键词 木麻黄; 重金属; 富集作用; 海岸带

中图分类号 S718.4 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)8-2183-05

Absorption and enrichment of heavy metals by *Casuarina equisetifolia* of different stand ages in a coastal zone. JIN Ming-hua¹, DING Zhen-hua^{1**}, ZHOU Hai-chao¹, YE Gong-fu² (¹College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; ²Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2183–2187.

Abstract: To assess the absorption and enrichment of heavy metals by *Casuarina equisetifolia*, the concentrations of heavy metals including Cr, Cu, Zn, Cd and Pb in branchlet, fine root, litter and soil of *C. equisetifolia* forests at four ages (10, 16, 20, 30) were determined. The results showed that the enrichment degree of the heavy metals in *C. equisetifolia* ranked as Zn > Cr > Pb > Cu > Cd. Correlation analysis showed that Cr and Cu, Pb, Fe and Cu, Zn and Cd had significant synergies in the fine roots of *C. equisetifolia*. *C. equisetifolia* had a higher capability of absorbing and accumulating heavy metals. Annual accumulation of heavy metals was highest in 20 years old *C. equisetifolia*. Our results indicate that *C. equisetifolia* has a great potential for reducing the pollution of heavy metals, especially for the 20 years old forest.

Key words: *Casuarina equisetifolia*; heavy metals; enrichment; coastal zone.

人类活动使重金属污染日益严重。有色金属矿床的开发、金属的冶炼、固体废弃物的堆置,以及农业生产中化肥和农药的使用,污水灌溉或污泥农业,都可能使重金属在生态系统中得到较多的积累(许嘉琳和杨居荣,1995)。主要包括 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn 等元素,一般为几种重金属的复合污染(谢正苗等,1997)。近年来随着海洋资源的开发、沿海城市生产的发展以及沿海港口频繁的贸易往来,海洋环境的污染日益严重,重金属是具有

潜在危险的重要污染物(乔磊等,2005)。近岸海域污染主要是由陆源污染物引起的,污染物进入水体后,将会在水沙之间发生迁移,或随入海泥沙进入近岸海域,从而对近岸海域造成污染(刘成等,2003)。海岸带是全球环境变化最为敏感的地区之一,重金属污染对海岸带生态环境造成了极大影响(许世远等,1997;毕春娟等,2002)。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)是我国东南沿海岸的主要造林树种,对沿海岸生态系统恢复、改善和保护起着重要的作用,在防风固沙、改良土壤、改善沿岸生态环境方面的作用更为突出(叶功富等,2000)。然而,目前木麻黄面临着林龄长、功能退化的局面,如何进行退化木麻黄林地更新改造是沿海

* 国家自然科学基金项目(41176090)和国家科技支撑项目(2009BADB2B0302)资助。

** 通讯作者 E-mail: dzh@xmu.edu.cn

收稿日期: 2013-12-02 接受日期: 2014-04-22

防护林带迫切需要解决的问题之一,新的防护林除了具有防护功能外,最好还能够修复沿海受重金属污染的土壤(高伟等 2010)。许多学者对木麻黄的环境胁迫的生理反应进行了研究(Sanchez-Rodriguez *et al.*, 1997; 杨涛等 2003; 周希琴等 2004),但缺乏对重金属的吸收、累积以及分布的研究。因此,本文研究了福建省东山县国有防护林场不同年龄木麻黄对重金属元素 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 吸收存储作用,以期认识木麻黄各部位对重金属的富集能力,探讨林龄对木麻黄吸富集能力的影响,为木麻黄对重金属的耐性及重金属污染土壤的植物修复提供科学依据和基础资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

福建省东山县国有防护林场位于福建省东山岛(117°18'E 23°40'N),亚热带海洋性季风气候,年均降雨量 1164 mm,年均蒸发量 2028 mm,全年干湿季节明显,每年 11 月至翌年 2 月为旱季,大部分降水集中于 5—9 月的台风季节,全年无积雪,霜冻天极少,年均气温 20.8 °C,年均台风 5.1 次。样地为均一性沙土地,沙土层厚(>100 cm),保持水肥能力差,全年海风大,立地干旱。林下无灌木,草本植物稀少。

1.2 样品采集

分别选择东山县国有防护林场 10、16、20、30 年生木麻黄林地作为采样点,每个采样点选取 3 株长

势相近的木麻黄,分别采集小枝、细根、凋落物。在采集木麻黄样品的同时,采集植物生长所在土层相应的土壤样品,刮去土壤表层的表土后,取每株植物相应细根区的土壤样品。

1.3 样品处理和分析

将植物样品分别用自来水充分冲洗,去除粘附于植物样品上的泥土和污物,再用去离子水冲洗,然后在 60 °C 下于烘箱中烘至恒重研磨备用。采集的土壤样品风干研磨过 100 目筛备用。植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 法消解,土壤样品采用王水-高氯酸法消解。

经消解后的土壤和植物样品用 ICP-MS(PE DRC-e 电感耦合等离子体质谱仪)对 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、Fe 和 Mn 含量进行测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 进行相关性分析和方差分析, SigmaPlot 10.0 和 Excel 进行作图,数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 小枝、凋落物、细根和土壤中的重金属含量

木麻黄小枝、凋落物、细根及土壤重金属含量见表 1,木麻黄重金属 Zn 的平均含量最高,为 142.34 μg · g⁻¹,其次为 Cr(29.94 μg · g⁻¹),而 Cd 的含量(0.29 μg · g⁻¹)则非常低,Pb 和 Cu 的含量分别为 11.37 和 17.60 μg · g⁻¹。

木麻黄各部位 Pb 和 Cd 含量均为根 > 凋落物 >

表 1 木麻黄小枝、凋落物、细根和土壤中的重金属含量(μg · g⁻¹)

Table 1 Content of heavy metals in branchlet, litter, fine root and soil of *Casuarina equisetifolia*

组分	林龄(a)	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Mn	Fe
小枝	10	20.23 ± 1.96	11.43 ± 2.12	181.81 ± 68.16	0.14 ± 0.08	9.95 ± 1.58	552.02 ± 78.46	644.48 ± 68.79
	16	21.63 ± 5.21	6.69 ± 0.95	125.10 ± 28.60	0.04 ± 0.03	3.25 ± 0.50	587.72 ± 89.20	353.26 ± 66.53
	20	31.09 ± 4.33	8.98 ± 1.72	111.66 ± 34.66	0.09 ± 0.07	2.78 ± 0.37	540.32 ± 178.26	208.49 ± 78.03
	30	30.70 ± 2.00	14.59 ± 5.99	148.37 ± 45.42	0.10 ± 0.09	4.38 ± 1.18	294.49 ± 170.72	524.19 ± 50.09
凋落物	10	29.97 ± 1.98	0.76 ± 0.46	117.13 ± 13.08	0.06 ± 0.03	5.10 ± 0.98	357.99 ± 186.12	489.56 ± 41.48
	16	33.99 ± 5.55	2.04 ± 1.27	164.01 ± 60.09	0.12 ± 0.07	3.38 ± 0.39	931.45 ± 70.71	715.55 ± 32.17
	20	31.59 ± 14.94	2.84 ± 1.70	166.61 ± 81.37	0.09 ± 0.03	4.20 ± 1.04	518.29 ± 114.95	595.45 ± 113.62
	30	48.58 ± 25.39	7.61 ± 0.97	307.99 ± 36.09	0.32 ± 0.07	13.13 ± 1.16	540.16 ± 193.78	1429.95 ± 147.43
根	10	35.11 ± 14.92	11.35 ± 4.74	61.38 ± 13.96	0.25 ± 0.05	23.34 ± 10.32	108.28 ± 24.59	916.75 ± 409.45
	16	26.60 ± 1.46	7.24 ± 1.71	54.24 ± 23.68	0.38 ± 0.09	29.22 ± 12.53	103.86 ± 34.16	631.45 ± 91.49
	20	27.85 ± 8.79	12.02 ± 1.99	150.15 ± 68.89	0.74 ± 0.36	20.20 ± 2.03	104.27 ± 21.82	1554.26 ± 654.96
	30	21.93 ± 8.39	9.556 ± 1.122	119.59 ± 20.65	1.12 ± 0.20	17.54 ± 3.28	178.83 ± 64.54	653.67 ± 190.78
土壤	10	9.04 ± 0.41	2.22 ± 0.44	11.81 ± 2.32	0.04 ± 0.01	10.42 ± 3.48	54.92 ± 23.68	1669.09 ± 593.45
	16	9.99 ± 1.14	2.43 ± 0.12	16.56 ± 3.10	0.04 ± 0.01	13.01 ± 2.29	81.50 ± 43.82	2500.02 ± 478.71
	20	9.73 ± 1.64	2.34 ± 0.56	16.40 ± 6.64	0.03 ± 0.01	9.38 ± 1.96	57.54 ± 48.19	1598.09 ± 81.57
	30	10.49 ± 2.86	1.93 ± 0.28	11.08 ± 2.16	0.09 ± 0.04	14.42 ± 5.37	68.44 ± 35.33	2034.61 ± 346.77

表 2 木麻黄林土壤与福建省、福建省海岸带土壤元素背景值比较 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Comparison of soil element background values among *Casuarina equisetifolia* forest, Fujian Province, and Fujian coastal zone

	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd
福建省	82.7	21.6	41.3	34.9	0.054
福建省海岸带	83.6	22.4	40.7	39.0	0.060
木麻黄林	14.0	2.2	9.8	11.8	0.050

小枝; Zn 和 Cr 在凋落物中的含量显著高于根和小枝 ($P < 0.05$); Cu 在木麻黄根中的含量最高, 小枝和凋落物 Cu 含量无显著差异; 说明木麻黄各部分对不同重金属的吸收能力不同。

根据表 1 对 4 个林龄木麻黄重金属的含量进行分析, 结果表明, 30 年生木麻黄 Zn、Cu、Cd、Fe 含量均显著高于 10、16、20 年生木麻黄 ($P < 0.05$), 说明当木麻黄到达一定的年龄, 其对 Zn、Cd 与 Cu 的累积作用非常明显。但是 Cr、Pb 含量在不同林龄间无显著差异。

土壤重金属含量均显著低于植物样品, 将其与福建省土壤环境背景平均值(陈振金等, 1995)和福建省海岸带土壤元素背景平均值(刘用清, 1995)比较(表 2) Zn、Cu、Cr、Pb 4 种重金属含量均明显小于福建省土壤环境背景值和福建省海岸带土壤元素背景值, Cd 元素与背景值接近。

2.2 根际重金属含量相关性

当植物体某部位各重金属含量呈现明显相关性时, 它们在被植物吸收时可能互为协同作用。对木麻黄细根各重金属含量相关性分析的结果(表 3)表明, 木麻黄细根中 Cr 和 Cu、Pb、Fe 和 Cu、Zn 和 Cd 呈明显相关性。说明这些重金属在被木麻黄根吸收时具有协同作用。

2.3 重金属在不同林龄木麻黄中的富集

植物富集重金属的能力可以用富集系数(植物

表 3 木麻黄细根重金属含量间的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix among heavy metals in the root of *Casuarina equisetifolia*

	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd
Mn	0.192					
Fe	0.426	-0.099				
Cu	0.645*	0.168	0.756**			
Zn	-0.017	0.252	0.321	0.311		
Cd	-0.412	0.573	-0.172	-0.020	0.578*	
Pb	0.601*	0.120	0.040	0.197	-0.288	-0.254

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

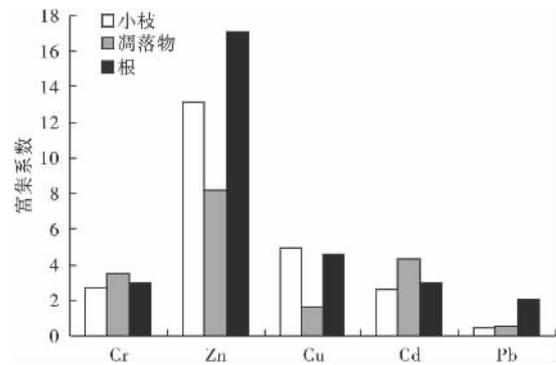


图 1 重金属在木麻黄小枝、根、凋落物中的富集系数
Fig. 1 Bio-concentration factors of heavy metals in branchlet, fine root and litter of *Casuarina equisetifolia*

体内重金属含量与根际沉积物中重金属含量之比)来表示。根据木麻黄对 5 种重金属元素的富集情况分析, 发现木麻黄对不同重金属的富集能力不同(图 1), 木麻黄对几种重金属的富集均明显, 其中对 Zn 的富集最为明显, 对 Zn 的富集系数达到 17.08。Pb 在木麻黄中的富集系数表现为根 > 凋落物 > 小枝; Cr 和 Cd 表现为凋落物 > 根 > 小枝。

2.4 不同林龄木麻黄中重金属元素的积累量

根据叶功富等(2003)对东山县木麻黄均一性风积沙土地木麻黄净生长量的测定, 小枝(叶)净生长量为 $28.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 根净生长量 $102.83 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 因此推算出树木重金属的总积累量至少是小枝总积累量和根总积累量之和, 采用年积累量 = 小枝重金属含量 × 小枝净生长量 + 根重金属含量 × 根净生长量。不同林龄木麻黄 Cr、Zn、Cu、Cd 和 Pb 的年积累量在 20 年生总体较高(图 2), 16 年生年积累量均较低。说明 20 年生的木麻黄对重金属污染的净化作用最为明显。

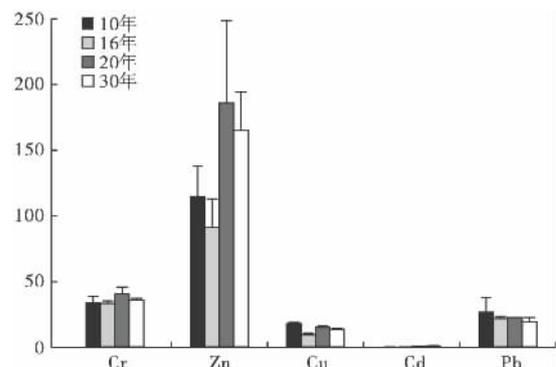


图 2 不同林龄木麻黄中 Cr、Zn、Cu、Cd、Pb 的积累量
Fig. 2 Annual accumulation of Cr, Zn, Cu, Cd and Pb in *Casuarina equisetifolia* of different ages

3 讨论

东山县国有防护林场靠近海边,木麻黄林地土质主要为沙土,本身很难积累重金属,因而其土壤重金属含量很低。各林龄的木麻黄小枝、凋落物和根的重金属含量均明显高于土壤重金属含量,说明木麻黄对重金属有一定的富集作用。有研究表明,红树植物对重金属的吸附功能不但可为植物生长提供必需的微量元素,而且可减少重金属对周围环境的污染(Cuong *et al.* 2005)。木麻黄对不同重金属的吸收能力不相同,对Zn的吸收最多,可能由于Zn是生物必需元素,而其他元素主要通过被动吸收进入植物体,因此含量相对较低。许多重金属都是植物必需的微量元素,对植物的生长发育起着十分重要的作用。但是,当环境中重金属数量超过某一临界值时,就会对植物产生一定的毒害作用(江行玉和赵可夫 2001)。普通植物地上部组织忍受Pb、Zn、Cu、Cd的平均浓度是5、100、10和1 mg·kg⁻¹(Zu *et al.* 2004)。而各林龄木麻黄重金属含量平均值均明显高于普通植物,说明重金属可以在其体内积累,其积累的重金属含量超过了普通植物的毒性标准,表明可能具有内部脱毒机制(Taylor & Crowder, 1983a, 1983b)。

许多研究表明,某些耐性植物根部可以积累大量重金属,从而限制向地上部分的运输,使地上部分免受伤害。木麻黄根对Pb、Cd、Cu的吸收显著高于小枝。Salt等(1995)研究表明,重金属胁迫条件下芥菜根部重金属含量明显高于地上部分。Zn、Pb和Cd胁迫的芦苇,根部重金属含量比地上部分高10倍多(Ye *et al.* 1997)。

对林龄、小枝、根、凋落物重金属含量进行相关性分析,结果显示,Cr、Fe、Zn、Cu 4种元素凋落物重金属含量均与林龄呈极显著正相关($P < 0.01$);小枝Mn含量与林龄呈显著负相关($P < 0.05$),而根Mn含量则与林龄呈显著正相关($P < 0.05$)。这是因为Mn直接参与光合作用,在水的光解和氧的释放中起重要的作用,并对叶绿素结构的保持有重要作用,随着林龄的增加,木麻黄光合作用加强而表现出小枝中Mn含量与林龄呈负相关。凋落物Cr含量与土壤Cr含量呈极显著正相关。研究表明,在群落中植物体以凋落物的形式向林地内归还养分和能量,对生态系统物质循环和稳定起着重要的作用(刘世荣和王文章,1992),但重金属在环境中一般

是不能被分解的,所以又从植物体以凋落物的形式回归到土壤,然后再次被植物体吸收或由于海水潮汐作用而被带入海洋。

胡志平(2007)在研究重金属元素在植物吸收的相互作用中发现,根部对有些重金属元素的累积呈现一定的正相关性,说明植物根系在吸收重金属时,各重金属元素是共同进入植物的根系被植物吸收。木麻黄细根中Cr和Cu、Pb、Fe和Cu、Zn和Cd含量呈明显相关性。说明这些重金属元素被木麻黄吸收时具有协同作用。张丽玲等(2013)对泉州湾红树植物重金属分布的研究发现,秋茄和桐花树根对重金属的吸收过程中,重金属间的协同作用不同,说明重金属间的不同协同作用可能与植物对重金属的吸收机理有关。

植物对重金属的富集能力因植物种类、重金属种类以及其他一系列环境因素不同而有所差异(Weis & Weis 2004)。重金属富集系数可以用来表征土壤-植物体系中重金属迁移的难易程度。木麻黄对不同重金属富集能力不同,木麻黄对Zn和Cu富集系数非常高,这可能也是由于这2种元素是植物生长的必需微量元素。通过净生产量推算出木麻黄对重金属的年积累量,20年生木麻黄对重金属的年积累量总体较高,分析原因可能是20年生木麻黄处于近熟期,其生长发育速度较快,需要从根部吸收大量的营养元素,可能是在吸收营养的同时也将部分重金属带入体内。各林龄木麻黄对重金属均有很好的富集作用,尤其是20年生时,这对减小环境中重金属的污染起着非常重要的作用。

4 结论

木麻黄对不同重金属的吸收能力不相同,对Zn的吸收能力最强;木麻黄细根中Cr和Cu、Pb、Fe和Cu、Zn和Cd具有明显的协同作用;木麻黄可以积累大量重金属,对Cu、Zn、Cd、Pb有很好的富集作用,20年生木麻黄对重金属的年积累量最高,日益扩种的木麻黄防护林对近海岸重金属净化作用具有极大的潜力,尤其是20年生木麻黄净化作用最为显著。

致谢 感谢东山县赤山国有防护林场的陈胜为本次研究的采样工作提供帮助!感谢王琛琛研究生在试验测定中的热心帮助!

参考文献

毕春娟,陈振楼,许世远. 2002. 上海白龙港排污口附近潮

- 滩沉积物中重金属总量及其化学形态分析. 海洋环境科学, **21**(4): 1-5.
- 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 1995. 福建省土壤背景值及其特征. 中国环境监测, **8**(3): 107-110.
- 高伟, 叶功富, 游水生, 等. 2010. 不同干扰强度对沙质海岸带植物物种 β 多样性的影响. 生态环境学报, **19**(11): 2581-2586.
- 胡志平. 2007. 长江口潮滩植被营养元素和重金属元素累积特征研究(硕士学位论文). 上海: 华东师范大学.
- 江行玉, 赵可夫. 2001. 植物重金属伤害及其抗性机理. 应用与环境生物学, **7**(1): 92-99.
- 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 2003. 环渤海湾诸河口底质现状的调查研究. 环境科学学报, **23**(1): 58-63.
- 刘世荣, 王文章. 1992. 落叶松人工林生态系统净初级生产力形成过程中的能量特征. 植物生态学与地植物学学报, **16**(3): 209-219.
- 刘用清. 1995. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用. 海洋环境科学, **14**(2): 68-73.
- 乔磊, 袁旭音, 李阿梅. 2005. 江苏海岸带的重金属特征及生态风险分析. 农业环境科学学报, **24**(增刊): 178-182.
- 谢正苗, 黄昌勇, 徐建民. 1997. 土壤污染化学. 北京: 中国环境科学出版社.
- 许嘉琳, 杨居荣. 1995. 陆地生态系统中的重金属. 北京: 中国环境科学出版社.
- 许世远, 陶静, 陈振楼, 等. 1997. 上海潮滩沉积物重金属的动力学累积特征. 海洋与湖沼, **28**(5): 509-515.
- 杨涛, 严重玲, 梁洁, 等. 2003. 盐胁迫下木麻黄幼树营养元素的分配规律. 亚热带植物科学, **32**(3): 1-4.
- 叶功富, 谭芳林, 徐俊森, 等. 2000. 木麻黄基干林带防风效应及其与林带结构关系的研究. 防护林科技, (专): 103-107.
- 叶功富, 吴锡麟, 张清海, 等. 2003. 海岸带不同立地木麻黄群落能量研究. 林业科学, **39**(S1): 1-8.
- 张丽玲, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 2013. 泉州湾红树植物中重金属元素的分布与储量. 环境科学与技术, **36**(6): 183-190.
- 周希琴. 2004. 木麻黄幼苗对酸雨胁迫的生理效应. 山地农业生物学报, **23**(3): 210-214.
- Cuong DT, Bayen S, Wurd O, et al. 2005. Heavy metal contamination in mangrove habitats of Singapore. *Marine Pollution Bulletin*, **50**: 1732-1738.
- Salt E, Prince R, Pickering IJ, et al. 1995. Mechanism of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology*, **109**: 1427-1433.
- Sanchez-Rodriguez J, Martinez-Carrasco R, Perez P. 1997. Photosynthetic electron transport and carbon-reduction-cycle enzyme activities under long-term drought stress in *Casuarina equisetifolia*. *Photosynthesis Research*, **52**: 255-262.
- Taylor GJ, Crowder AA. 1983a. Uptake and accumulation of heavy metals by *Typha latifolia* in wetlands of the Sudbury, Ontario region. *Canadian Journal of Botany*, **61**: 63-73.
- Taylor GJ, Crowder AA. 1983b. Uptake and accumulation of copper, nickel, and iron by *Typha latifolia* grown in solution culture. *Canadian Journal of Botany*, **61**: 1825-1830.
- Weis JS, Weis P. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: Implication for phytoremediation and restoration. *Environment International*, **30**: 685-700.
- Ye ZH, Baker AJM, Wong MH, et al. 1997. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Annals of Botany*, **80**: 363-370.
- Zu YQ, Li Y, Christian S, et al. 2004. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulate or choice in Lanping lead-zinc mine area, China. *Environment International*, **30**: 567-576.
-
- 作者简介 靳明华,女,1987年生,硕士研究生,主要从事污染生态学研究。E-mail: jinminghua1007@163.com
责任编辑 魏中青
-