

一种新发现的铜积累植物——密毛蕨*

郑洁敏^{1,2} 楼丽萍¹ 王世恒² 唐世荣^{1,3**}

(¹ 浙江大学农业与生物技术学院原子核农业科学研究所和环境与资源学院环境工程系, 杭州 310029; ² 杭州市农业科学研究院, 杭州 310024; ³ 广州大学环境科学与工程学院, 广州 510405)

【摘要】 对铜尾矿上生长的密毛蕨(*Petridium revolutum*)进行了野外调查分析和温室营养液砂培实验。结果表明,密毛蕨所生长的废铜矿土壤中 Cu 含量平均为 2 432 mg·kg⁻¹DW, 最高达 7 554 mg·kg⁻¹DW; 地上部生物量平均为 18.33 g·plant⁻¹DW, 最高达 40.05 g·plant⁻¹DW; 地上部 Cu 含量平均为 201 mg·kg⁻¹DW, 最高达 567 mg·kg⁻¹DW; 地下部 Cu 含量平均为 346 mg·kg⁻¹DW, 最高达 1 723 mg·kg⁻¹DW; 密毛蕨对 Cu 的转移系数平均为 0.81, 最高达 3.88。在营养液砂培的条件下, Cu 7 mg·L⁻¹ 处理没有抑制密毛蕨地上部的生长; 密毛蕨体内的 Cu 含量随着介质中 Cu 浓度的增加而显著增加, 但是大部分的 Cu 积累在地下部。密毛蕨对 Cu 具有较强的忍耐和较高的积累能力, 可作为修复 Cu 污染土壤的新材料。

关键词 密毛蕨 积累植物 Cu 植物修复

文章编号 1001-9332(2006)03-0507-05 **中图分类号** X591 **文献标识码** A

Petridium revolutum, a promising plant for phytoremediation of Cu-polluted soil. ZHENG Jiemin^{1,2}, LOU Liping¹, WANG Shiheng², TANG Shirong^{1,3} (¹Institute of Nuclear Agricultural Sciences, College of Agronomy and Life Science and Department of Environment Engineering, College of Environment and Natural Resource, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; ²Hangzhou Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310024, China; ³College of Environment Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(3): 507~511.

A field survey on the *Petridium revolutum* growing on the Cu mining spoils in Yunnan Province and related greenhouse hydroponic sand culture experiment showed that when growing on the soil with an average Cu concentration of 2 432 mg·kg⁻¹DW and the maximum Cu concentration of 7 554 mg·kg⁻¹DW, *P. revolutum* had a large amount of aboveground biomass, with the maximum dry weight of 40.05 g·plant⁻¹DW and the average dry weight of 18.33 g·plant⁻¹DW. The average and maximum Cu contents were 201 and 567 mg·kg⁻¹DW in aboveground biomass, and 346 and 1 723 mg·kg⁻¹DW in underground biomass, respectively. The transfer factor of Cu reached a maximum of 3.88, with an average of 0.81. Under quartz sand culture condition, *P. revolutum* could grow well when the Cu concentration in nutrient solution was 7 mg·L⁻¹. The accumulation of Cu by *P. revolutum* plant increased significantly with increasing Cu concentration, with the most of absorbed Cu concentrated in underground biomass. It was suggested that *P. revolutum* had a remarkable tolerance to Cu and a potential capacity of Cu accumulation, and could be used in the phytoremediation of Cu-polluted soils.

Key words *Petridium revolutum*, Phytoaccumulator, Cu, Phytoremediation.

1 引言

随着铜矿的开采和冶炼、含 Cu 杀虫剂的长期使用和污水污泥灌溉的增多, 土壤 Cu 污染程度日益加剧^[22,23], 导致农产品中 Cu 超标, 对人体健康造成很大的威胁。植物修复技术(phytoremediation)利用植物忍耐、吸收、转移和转化重金属的能力, 通过植物的生长来清除环境中超标的重金属, 是一种新兴的污染土壤的治理方法^[9,16]。

超积累植物是植物修复技术得以实施的前提条件。目前虽已发现 400 余种超积累植物, 但公认的 Cu 超积累植物却只有 24 种, 而且这些 Cu 超积累植物只分布在非洲扎伊尔和赞比亚的铜矿带^[1], 由于

该国战乱, 一直无法加以研究和应用^[18]。因此, 发现和筛选新的 Cu 超积累植物, 是 Cu 污染土壤植物修复研究中亟待解决的问题之一。我国幅员辽阔、植物资源丰富, 已有许多研究者陆续报道了海州香薷、酸模、戟叶酸模、小头蓼、鸭跖草等^[6,18~20]植物对 Cu 具有不同程度的忍耐和积累能力。

对云南铜尾矿上生长的一种优势物种——密毛蕨(*Petridium revolutum*)进行了野外调查工作, 并结合温室营养液砂培实验, 研究密毛蕨在富 Cu 环境中的生长能力和对 Cu 的积累和转移特点, 以证实其对 Cu 污染土壤植物修复的能力, 从而丰富 Cu

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011800)。

** 通讯联系人。

2004-12-22 收稿, 2005-11-21 接受。

超积累植物的植物资源库,旨在引起植物修复研究者对这种植物的关注。

2 材料与方法

2.1 野外采样

采样地点位于云南省中部的绿丰县大美厂铜矿外围采矿选矿区,平均海拔高度1 790 m。气候属于中亚典型的平原气候类型;4月中旬到9月上旬为雨季,其余时间为干季;年平均降水量为915 mm,年平均温度为16℃,无霜期260 d。当地密毛蕨分布较广,长势茂盛,株高可达1 m以上,与已有报道的“铜草”小头蓼^[19]生长在一起,是当地的优势物种之一(图1)。在铜矿密毛蕨生长区域采集密毛蕨及其根区土壤(0~20 cm),共33个样品。

2.2 营养液培养

将密毛蕨栽培于已消毒的石英砂基质中,用10% Hoagland 营养液浇灌。2~3个星期后,在营养液中加入Cu(NO₃)₂,分别配成浓度为0、1、3和7 mg Cu·L⁻¹,调pH值为5.5。用不同Cu浓度的营养液培养密毛蕨,每个处理设4个重复。20 d后,将植株小心从石英砂中取出,用水洗净,分成地上部(羽片)和地下部(根和地下茎),测其Cu含量。

2.3 样品分析与数据处理

植物样品在烘箱中110℃杀青30 min,在80℃烘至恒重,称烘干重后磨碎,取0.3~0.5 g,加入HClO₄和HNO₃的混合酸(1:2)8 ml,隔夜消化^[5],消化液定容为50 ml,过滤后用原子吸收法(Varian AAS 220)测定Cu含量。

植物根区土壤风干后供测全Cu、有效Cu和有机质含量。土壤过100目筛,取0.3~0.5 g,加入HClO₄和HNO₃的混合酸(1:2)8 ml,隔夜消化^[5],消化液定容为50 ml,过滤后用原子吸收法(Varian AAS 220)测定Cu含量。

土壤(pH 5.61)有效态Cu用0.1 mol·L⁻¹ HCl浸提^[8]。土壤过20目筛,称取0.5 g置于玻璃三角瓶中,加入0.1 mol·L⁻¹ HCl 150 ml,在25℃下振荡(200 r·min⁻¹)1.5 h,过滤后的清液用原子吸收仪测定。

土壤中有机质含量用改进的Mebius测定^[10]。土壤过100目筛,称取0.3 g置于玻璃三角瓶中,精确加入0.25 mol

·L⁻¹ K₂Cr₂O₇ 10 ml和浓H₂SO₄ 15 ml,用三角漏斗覆口,在电热板上加热样品,沸腾30 min,冷却后加蒸馏水至60 ml,加0.2 ml邻苯氨基苯甲酸指示剂,用0.2 mol·L⁻¹ Fe(NH₄)₂SO₄溶液滴定,同时设1个空白和2个不加热空白。

根据根际土壤全Cu含量,将密毛蕨分成5组,土壤Cu浓度范围分别是200~500、500~1000、1 000~2 300、2 300~4 000和>4 000 mg·kg⁻¹,每组有5~8个植株,用SPSS 10.0软件进行显著性和相关分析。

3 结果与讨论

3.1 废铜矿渣上的密毛蕨生长情况

一般土壤中Cu含量范围是2~100 mg·kg⁻¹ DW^[13],而密毛蕨根际土壤全Cu含量平均为2 432 mg·kg⁻¹ DW,最高达7 554 mg·kg⁻¹ DW,是正常土壤Cu含量上限的75倍。密毛蕨所生长的土壤中的高Cu含量,说明密毛蕨对Cu具有很强的忍耐性,可以在富Cu土壤中生长。密毛蕨所生长的土壤有机质含量平均为9.2 g·kg⁻¹,属低肥力土壤^[2]。

密毛蕨地上部生物量干重相当可观,平均为18.33 g·plant⁻¹,最高可达40.05 g·plant⁻¹;地下部生物量干重平均为9.34 g·plant⁻¹,最高可达42.31 g·plant⁻¹。从密毛蕨生物量与土壤全Cu含量的关系来看,密毛蕨地上部的生物量并未随着土壤Cu含量的增加而呈下降趋势(图2),Cu含量<500 mg kg⁻¹土壤中生长的密毛蕨的地上部干重平均为14.1 g·plant⁻¹,Cu含量大于4 000 mg·kg⁻¹的土壤中生长的密毛蕨的地上部干重平均可达20.4 g·plant⁻¹。这表明在所调查的Cu浓度范围内,密毛蕨的生长并未受到土壤中高Cu含量的抑制,可见密毛蕨不仅对Cu具有很强的忍耐性,而且即使生长在高Cu浓度的土壤中,密毛蕨都有可能以较大的生物量生存。



图1 云南大美厂铜尾矿上生长的密毛蕨

Fig.1 *Petridium revolutum* growing on soil of Dameichang Cu mining spoils.

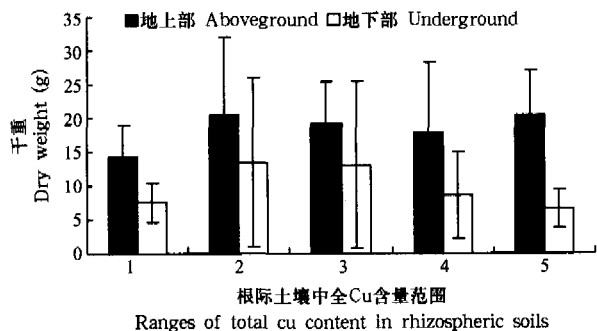


图2 废铜矿上生长的密毛蕨生物量干重与根际土壤全Cu含量的关系

Fig.2 Relationship between biomass of *Petridium revolutum* growing on Cu mining spoils and total Cu concentration in rhizospheric soils. 土壤全Cu含量 Soil total Cu concentration: 1) 200 ~ 500 mg·kg⁻¹; 2) 500 ~ 1 000 mg·kg⁻¹; 3) 1 000 ~ 2 300 mg·kg⁻¹; 4) 2 300 ~ 4 000 mg·kg⁻¹; 5) > 4 000 mg·kg⁻¹. 下同 The same below.

3.2 密毛蕨对Cu的吸收和转运

废铜矿渣上生长的密毛蕨地下部Cu含量的平均为346 mg·kg⁻¹ DW,最高可达1 723 mg·kg⁻¹ DW;地上部Cu含量的平均值为201 mg·kg⁻¹ DW,最高可达567 mg·kg⁻¹ DW.从植物体内Cu含量与根际土壤全Cu含量范围的关系来看,密毛蕨地上部Cu含量与地下部Cu含量均随土壤Cu含量的增加而呈增加的趋势(图3);在Cu含量为1 000 ~ 2 300 mg·kg⁻¹和> 4 000 mg·kg⁻¹时,土壤中生长的密毛蕨地上部Cu含量均显著高于在Cu含量小于500 mg·kg⁻¹土壤中生长的密毛蕨(P<0.05),前者平均值分别是后者的6.24和5.78倍,说明密毛蕨不仅可以健康生长在Cu浓度较高的土壤中,而且在所调查的Cu浓度范围内,密毛蕨地上部Cu含量随着土壤Cu含量的增加而增加.值得注意的是,土壤Cu含量为500~1 000 mg·kg⁻¹时,密毛蕨地上部Cu含量高于地下部(图3),说明在一定的Cu浓度条件下,密毛蕨地上部可能比地下部积累更多的Cu.

在33个样品中,密毛蕨对Cu的转移系数(TF)

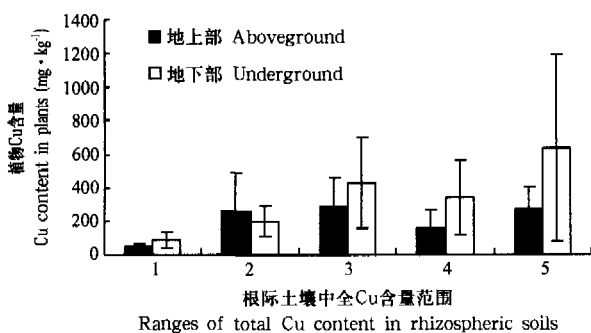


图3 废铜矿上生长的密毛蕨Cu含量与根际土壤全Cu含量的关系 Fig.3 Relationship between Cu concentration of *Petridium revolutum* growing in Cu mining spoils and total Cu concentrations in rhizospheric soils.

(植物地上部Cu含量与地下部Cu含量的比值)变化范围为0.09~3.88,平均值为0.81.密毛蕨对Cu的TF与土壤Cu含量无显著相关性.但是,当土壤全Cu含量高达4795 mg·kg⁻¹时,TF可达1.17,说明密毛蕨由地下部向地上部运输的能力受土壤Cu含量的限制不大.

密毛蕨地下部的生物富集系数(BF)(地下部Cu含量与土壤中有效Cu含量的比值)的平均为0.68,最高可达3.67,地上部的生物富集系数(地上部Cu含量与土壤中有效Cu含量的比值)的平均为0.47,最高可达2.96.当土壤全Cu含量小于500 mg·kg⁻¹时,密毛蕨对土壤Cu具有较高的转移能力,密毛蕨地上部的Cu生物富集系数为1.21,地下部为2.06.密毛蕨的Cu生物富集系数与根际土壤的pH值呈极显著负相关(植物地下部BF和地上部BF分别为r=-0.646,r=-0.528,P<0.01,n=33)(图4),说明根际土壤中较低的pH值有利于植物对Cu的吸收.

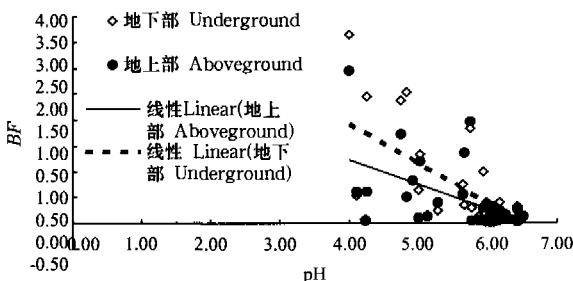


图4 废铜矿土壤中生长的密毛蕨BF与根际土壤中pH的关系 Fig.4 Relationship of BF of *Petridium revolutum* growing in Cu mining spoils and pH values in rhizospheric soils.

在矿山或者其他一些重金属含量超标的环境中,某些植物经过长期自身的演化和自然界的筛选,在形态、生理生化甚至遗传方面发生变化,建立起一系列防御机制,从而在重金属胁迫条件下也能正常地生长.一般植物体中正常的Cu含量为5~20 mg·kg⁻¹,有些作物在叶部Cu含量超过10 mg·kg⁻¹时就会出现Cu中毒症状,而许多植物对Cu的最大忍耐含量为60 mg·kg⁻¹[14].矿山上生长的密毛蕨地下部积累了大量的Cu,却无明显毒害症状,说明密毛蕨对富Cu环境具有适应机制.植株根部Cu主要积累在细胞壁上,无法进入细胞质影响生理代谢,被认为是生长于铜矿的蕨类植物禾秆蹄盖蕨耐Cu的一种机制[11].而密毛蕨叶部Cu含量平均为201 mg·kg⁻¹ DW,即根部积累的Cu一部分可进入细胞质中,并被运输至地上部,说明植物细胞还可能存在其他的解毒机制.Nishizono等[12]发现,在禾秆蹄盖蕨

的根部细胞质中存在的一种富含半胱氨酸的物质对植物耐 Cu 起到了重要的作用,这种物质可能是植物螯合蛋白 PCs(phytochelatin).超量的重金属会诱导产生 PCs 与重金属结合,从而保护了酶和结构蛋白的金属敏感部位(如巯基等),保证了细胞的正常新陈代谢^[15].因此,在一定程度的金属胁迫下,PCs 有利于增强植物对重金属的耐性^[25].但是,PCs 在超积累植物中所起的作用还存在着争议^[7,17].

目前通常把植物地上部 Cu 含量超过1 000 mg·kg⁻¹DW,同时满足 S/R>1 的条件(S 和 R 分别表示植物地上部和地下部重金属含量)的植物称为 Cu 超积累植物^[4].但是,许多研究者认为,对 Cu 超积累植物的定义过于苛刻.最早超积累植物的定义是针对 Ni 超积累植物提出的,标准是植物地上部 Ni 含量超出一般植物 Ni 含量的 20 倍,即超出 1 000 mg·kg⁻¹,而一般植物体内的 Cu 含量为 5~20 mg·kg⁻¹^[11],所以 Brooks 等^[4]认为,植物体内 Cu 含量达 500 mg·kg⁻¹即可称作 Cu 的超积累植物.从生长在铜矿上的植物来看,其大部分 Cu 主要积累在根部(表 1),很难满足 S/R>1 的条件,如目前公认的 24 种 Cu 超积累植物之一的 *Aeollanthus biformifolius* 体内 Cu 含量高达 13 700 mg·kg⁻¹,但大部分的 Cu 主要积累在地下部的球茎中^[1].密毛蕨的叶部 Cu 含量平均为 201 mg·kg⁻¹,地下部 Cu 含量的平均为 346 mg·kg⁻¹,与以往的矿山调查结果一致.密毛蕨主要将 Cu 积累在地下部.但是密毛

表 1 一部分铜矿上发现的植物对 Cu 的积累能力

Table 1 Cu concentration in tissues of some plants found growing on Cu rich soils

植物种类 Species	Cu 含量 Cu concentration (mg·kg ⁻¹)			参考文献 References
	土壤 Soil	叶部 Leaves	根部 Roots	
鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	7789	1034	1224	[18]
头花蓼 <i>Polygonum capitatum</i>	7789	222	403	[18]
海州香薷 <i>Elsholtziahaic haichowensis</i>	7789	116	385	[18]
蝇子草 <i>Silene fortunei</i>	14170	29 ~ 391	43 ~ 2288	[20]
小头蓼 <i>Polygonum microcephalum</i>	1494	133	491	[19]
酸模 <i>Rumex acetosa</i>	11138	340 ~ 1102	45 ~ 220	[20]
鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	13077	429 ~ 587	2707 ~ 6159	[20]
问荆 <i>Equisetum arvense</i>	5970	116	782	[24]
禾秆蒨盖蕨 <i>Athyrium yokoscense</i>	3303	169	5989	[13]
麦瓶草 <i>Silene dioica</i>	6500	90	-	[3]

蕨对 Cu 的 TF 变化范围大,33 个样品中 9 个样品

的 TF 超过 1,最大可达 3.88,说明在一定的条件下,密毛蕨对 Cu 可能具有较高的转移能力.

3.3 营养液砂培条件下密毛蕨对 Cu 耐受性和吸收

密毛蕨在 0、1、3 和 7 mg Cu·L⁻¹处理的营养液中生长 20 d 后,均没有出现羽片产生黄斑、根尖发黑等 Cu 中毒现象.各处理与对照间密毛蕨地上部和地下部的生物量均无显著差异(图 5),说明所选用的浓度(7 mg Cu·L⁻¹)没有抑制密毛蕨的生长.植物体内的 Cu 含量随着营养液中 Cu 浓度的增加而显著增加(P<0.05),但大部分的 Cu 蓄积在地下部.

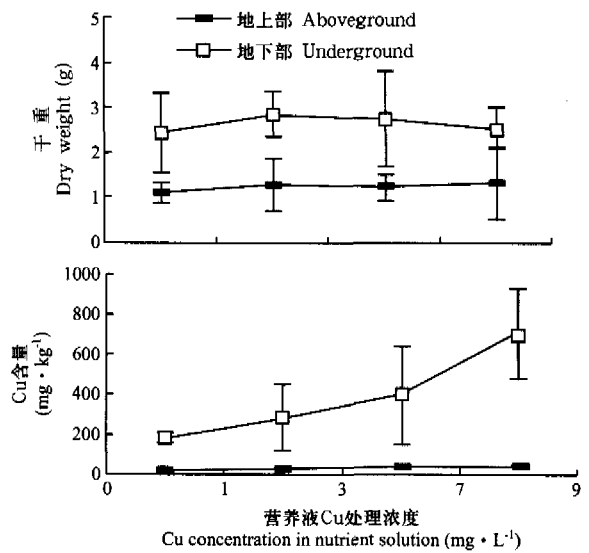


图 5 含 Cu 营养液处理 20 d 后密毛蕨的生物量及其铜含量
Fig.5 Dry weight and Cu concentration of *Petridium revolutum* cultivated with nutrient solutions of different Cu concentrations for 20 days.

营养液培养证实了密毛蕨对 Cu 的强忍耐性,但与矿山土壤中生长的密毛蕨相比,砂培的密毛蕨对 Cu 的转移能力大大降低.其原因可能与土壤中生长的密毛蕨根部对 Cu 的活化作用有关.pH 对土壤阳离子的植物有效性起到关键的作用^[21].pH 较低时,密毛蕨对 Cu 具有较强的富集能力.矿山土壤中生长的密毛蕨根部可能分泌某些酸性分泌物,协助植物吸收和转运 Cu,而在营养液培养的条件下,密毛蕨这种分泌物的产生受到抑制,从而导致地上部 Cu 吸收量下降.另外,随着营养液中 Cu 浓度的增加和生长时间的延长,密毛蕨对 Cu 的吸收和转运情况也会发生变化.

4 结 语

密毛蕨是一种容易繁殖的多年生草本植物,可大量生长在干燥、贫瘠的铜矿山土壤中,具有直立的机械收割的地上部,且生物量大.在矿山上所采到

的植物样品中,密毛蕨地上部 Cu 累积量最高可达 $16.62 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。按照这种吸收能力,密毛蕨运用在植物修复技术中,如果每年收 2 茬,则密毛蕨每年可从 Cu 污染土壤中去 Cu 达 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此外,密毛蕨还是一种极具观赏价值的植物^[26],因此对荒废的 Cu 矿尾矿、炼铜厂及其周边地区的植被重建以及 Cu 污染农田土壤的修复具有潜在的应用价值。但是,在野外铜矿土壤上生长和含 Cu 营养液中培养后的密毛蕨对 Cu 的积累和转移能力存在差异,因此密毛蕨对 Cu 的积累特性有待于进一步的研究,尤其是应进行大田实验,为其在 Cu 污染土壤植物修复技术中发挥作用提供参考。

研究植物忍耐重金属的机理,有利于植物修复技术的应用和发展,是耐性植物和超积累植物研究的重点之一。密毛蕨的发现为植物忍耐和积累 Cu 的机理研究提供了一种新的材料。

参考文献

- Baker AJM. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1: 81~126
- Bao S-D(鲍士旦). 2000. Soil Agrichemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Press. 25(in Chinese)
- Brooks RR, Crooks HM. 1980. Studies on uptake of heavy metals by the Scandinavian *Kisplanten* *lychnis alpina* and *Silene dioica*. *Plant Soil*, 54: 491~496
- Brooks RR, Morrison RS, Reeves RD. 1978. Copper and cobalt in African species of *Aeolanthus* Mart. (Plectranthinae, Labiatae). *Plant Soil*, 50: 503~507
- Czuba M, Hutchinson TC. 1980. Copper and lead levels in crops and soils of the Holland Mars area-Ontario. *J Environ Qual*, 9(4): 566~574
- Jiang L-Y(姜理英), Shi W-Y(石伟勇), Yang X-E(杨肖娥). 2002. Cu-hyperaccumulators in mining area. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 13(7): 906~908(in Chinese)
- Leopold DG, Schmidt J, Neumann D. 1999. Phytochelatins and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 50: 1323~1328
- Li Y-K(李酉开). 1989. Normal Analysis Methods of Soils and Agrichemistry. Beijing: Science Press. 141~142(in Chinese)
- Long X-X(龙新宪), Yang X-E(杨肖娥), Ni W-Z(倪吾仲). 2002. Current situation and prospect on the remediation of soil contaminated by heavy metals. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 13(6): 757~762(in Chinese)
- Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matters. In: Page AL, ed. *Methods of Soils Aalysis II. Chemical and Microbiological Properties*. Madison: American Society of Agronomy Inc. 539~580
- Nishizono H, Ichikawa H, Ishii F. 1987. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*. *Plant Soil*, 101: 15~20
- Nishizono H, Minemura H, Suzuki S. 1988. An inducible copper-thiolate in the fern, *Athyrium yokoscense*: Involvement in copper tolerance of the fern. *Plant Cell Physiol*, 29(8): 1345~1351
- Nishizono H, Suzuki S, Ishii F. 1987. Accumulation of heavy metals in the metal tolerant fern, *Athyrium yokoscense*, growing on environments. *Plant Soil*, 102: 65
- Reeves RD, Baker AJM, Brooks RR. 1995. Abnormal accumulation of trace metals by plants. *Mining Environ Manage*, 9: 4~8
- Regina VL, George JW. 1990. Subcellular localization of cadmium and cadmium-binding peptides in tobacco leaves, implication of a transport function for cadmium-binding peptides. *Plant Physiol*, 92: 1086~1093
- Salt DE, Blaylock M, Kumar NPA. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 13: 468~474
- Schat H, Kalf MMA. 1992. Are phytochelatins involved in differential metal tolerance or do they merely reflect metal-imposed strain? *Plant Physiol*, 99: 1475~148
- Shu W-S(束文圣), Yang K-Y(杨开颜). 2001. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on tonglushan in Hubei Province, China. *Chin J Appl Environ Biol(应用与环境生物学报)*, 7(1): 7~12(in Chinese)
- Tang SR, Fang YH. 2001. Copper accumulation by *Polygonum microcephalum* D. Don and *Rumex hastatus* D. Don from copper mining spoils in Yunnan Province, P. R. China. *Environ Geol*, 40: 902~907
- Tang SR, Wilke BM, Huang CY. 1999. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People's Republic of China. *Plant Soil*, 209: 225~232
- Tyler G, Olsen T. 2001. Concentration of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity. *Eur J Soil Sci*, 52: 151~165
- Vinit-Dunand F, Epron D, Alaoui-Sosse B. 2002. Effect of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Sci*, 163: 53~58
- Wang X-C(王校常), Cao Z-H(曹志洪). 2002. Health quality problems of paddy soil in the Taihu region. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 13(2): 199~203(in Chinese)
- Wenzel WW, Jockwer F. 1999. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps. *Environ Poll*, 104: 145~155
- Wu F-B(邬飞波), Zhang G-P(张国平). 2003. Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(4): 632~636(in Chinese)
- Zhang C-F(张朝芳), Zhang S-R(章绍尧). 1986. Flora of Zhejiang. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press. 75 (in Chinese)

作者简介 郑洁敏,女,1977年生,博士生.主要从事环境污染物生物修复研究. E-mail: jmzh04@163.com.

责任编辑 梁仁禄