

节节草 (*Hippochaete ramosissimum*) 对 Cu 的吸收和积累

李 影, 褚 磊

(安徽省高校“生物环境与生态安全”省级重点实验室, 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000)

摘要:通过野外样品分析和室内栽培实验,研究了 Cu 在节节草(*Hippochaete ramosissimum*)体内和根细胞内的积累、分布及赋存形态。结果表明,铜尾矿区和室内盆栽的节节草对铜均以根系积累为主,根系中 Cu 含量最高分别可达 1309, 1339.75 mg·kg⁻¹;滞留率平均分别为 84.98%, 97.30%。节节草根细胞各组分中,仅细胞壁(F₁)和含核糖核蛋白体的细胞溶质(F₄)中的铜含量与 Cu 处理浓度呈极显著正相关($r_{F_1}=0.98, r_{F_4}=0.98, p<0.01$);且细胞壁中的铜占大多数,为总量的 45%~70%。此外节节草根、茎中 Cu 赋存形态存在差异,在其根部主要以醋酸提取态和盐酸提取态形式存在,占总量的 60%~80%,且两形态的 Cu 含量均与土壤 Cu 浓度呈极显著的正相关($r_{HAC}=0.99, r_{HCl}=0.98, p<0.01$);而茎部铜均以 NaCl 提取态为主;水溶态铜含量在其根部和茎部所占比例均相对较低。节节草可能通过根部截留和细胞壁沉积的方式,以及使体内的 Cu²⁺形成难溶性、活性低的化合物来降低过量的 Cu 对其的毒害。节节草对 Cu 具有较强的耐性和较高的积累能力,在 Cu 污染土壤修复上有着广阔的应用前景。

关键词:节节草(*Hippochaete ramosissimum*);铜;积累;吸收;化学形态

文章编号:1000-0933(2008)04-1565-08 中图分类号:Q149 文献标识码:A

The uptake and accumulation of Cu in *Hippochaete ramosissimum*

LI Ying, CHU Lei

Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui Province; College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1565 ~ 1572.

Abstract: The accumulation of Cu in different parts of *H. ramosissimum*, distribution of Cu in root subcellulars and chemical forma of Cu in its body were studied by means of analysis of field samples and greenhouse cultivation. The results showed that most of the Cu of *H. ramosissimum* growing on the Cu mining spoils and greenhouse cultivation were deposited in the root with the largest content of 1309 mg·kg⁻¹ and 1339.75 mg·kg⁻¹. The average retention rate was 84.98% and 97.3%, respectively. Moreover, more Cu deposited in the cell wall than that of the other fractions which accounted for 45%—70% in the root subcellular of *H. ramosissimum*. The Cu content distributed in the cell wall (F₁) and plasma part with ribosome (F₄) has a marked correlation with Cu concentration of the soil, respectively ($r_{F_1}=0.98, r_{F_4}=0.98, p<$

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30470270);安徽省教育厅青年教师资助基金资助项目(2005Jq1054);安徽师范大学青年基金资助项目(2006xqn77);中国科学院开放实验室安徽省重点实验室专项基金资助项目

收稿日期:2007-01-13; **修订日期:**2007-08-23

作者简介:李影(1979~),女,博士,主要从事环境污染与恢复生态研究. E-mail:liyings791212@Yahoo.com.cn

致谢:真挚感谢导师刘登义教授对本文的全面指导和支持.

Foundation item: This work was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30470270), Youth Teacher Foundation of Education Department in Anhui Province (No. 2005Jq1054), Youth Foundation in Anhui Normal University (No. 2006xqn77), Open Laboratory of Academy of Science in China and the Foundation of Provincial Key Laboratory of Conservation and Utilization for Important Biological Resource in Anhui

Received date:2007-01-13; **Accepted date:**2007-08-23

Biography: LI Ying, Ph. D., mainly engaged in environment pollution and rehabilitation ecology. E-mail:liyings791212@Yahoo.com.cn

0.01). Under Cu stress of different levels, the chemical forma of Cu in the plant was different. The content of Cu forma extracted by HAC and HCl in the root was the greatest with the rate of 60%—80%, which was significantly and positively related to Cu concentration of the soil, respectively ($r_{\text{HAC}} = 0.997, r_{\text{HCl}} = 0.98, p < 0.01$). Meanwhile, NaCl in the shoot was dominant, while that extracted by water was the lowest in both the root and the shoot. The accumulation character and detoxification mechanism in which the mass of Cu were intercepted at the root accumulated in cytodermis and formed certain low dissolvable Cu-compounds, possibly contributing to the reduction of the Cu toxic effect on *H. ramosissimum*. It was suggested that *H. ramosissimum* had a remarkable tolerance to Cu and a potential capacity of Cu accumulation could be used widely in phytoremediation of Cu-polluted soils.

Key Words: *Hippochaete ramosissimum*; Cu; accumulation; uptake; chemical forma

植物修复是当前治理、修复污染土壤的经济、有效、环保的新途径^[1~3]。但已发现的超富集植物和耐性物种普遍存在局域性分布、生物量小和生长缓慢等特点^[4~6]。因此筛选合适的修复物种显得尤为重要,而了解重金属污染土壤上自然定居的植物对重金属的吸收、转移和积累规律,对于新型修复物种的发现和筛选,以及对重金属污染土壤的植被重建和生态恢复有着十分重要的理论和实际指导意义。

铜尾矿库是一种露天堆积的金属尾矿废弃地,其上自然定居的植物必定对重金属有一定的耐性,对尾矿土壤环境也具有一定的修复和治理作用^[7, 8]。狮子山铜尾矿库位于安徽省铜陵市东南部,其海拔较高,三面环山,一面筑坝,由尾矿排放堆积而成,坝高约 100 m,面积达 20 hm²,停止排放时间约为 10 a,无人影响,风蚀、水蚀严重,尾矿基质贫乏,植被稀疏^[9~11]。野外调查发现,节节草(*Hippochaete ramosissimum*) 在狮子山铜尾矿库上具有较强的生长优势,并且有着进一步演替的趋势^[10, 12]。

节节草隶属于木贼科木贼属多年生草本植物,叶片退化^[13];其分布广泛,路边、砂地、荒原等地均可生长,生长迅速,适应性强^[10, 11]。李影等的研究已表明节节草对高浓度铜毒害具有较强的耐受能力,在铜污染土壤的治理和修复中有着良好的发展潜力^[14, 15],但有关节节草对 Cu 的吸收、运转和积累能力的研究目前却未见报道。本文通过野外样品的分析和室内栽培实验,研究了 Cu 在节节草体内各器官和根部细胞各组分中的积累和分布,及其在植物体内赋存的化学形态,以期探讨节节草对 Cu 的吸收和积累特性及其解毒机理,为进一步研究植物对铜的耐性机制和重金属污染土壤的植物修复提供参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于安徽铜陵狮子山铜尾矿库随机采集植物和土壤样品。样品采集时选取不同铜污染程度的采集点,包括尾矿区(基质类型主要为砂土和湿地砂土)和矿边缘区(基质类型为土壤);取节节草的不同部位(根、茎)以及相应的根际土壤样品。同时采取活体节节草,供室内栽培实验。

1.2 盆栽实验

将采集的植物幼苗根部土壤清洗干净,于正常土壤中预培养两周,取大小相当的幼株进行盆栽实验。盆栽土壤取自安徽师范大学后山园田土,其土壤基本理化性质为, pH7.31, 有机质 13.6 g·kg⁻¹, Cu 本底值 25.46 mg·kg⁻¹。每盆装土 2 kg, 一次性添加 CuSO₄·5H₂O 溶液,使土壤中 Cu 含量(以纯 Cu 计算)分别为 500、1000、2000、3000 mg·kg⁻¹,以未加 Cu 的土壤作为对照,每处理设 3 个重复,稳定 2 周后,每盆栽种幼苗 5 株,于安徽师范大学花房中培养,60d 后取样分析。

1.3 测试指标和测试方法

1.3.1 节节草体内各器官中 Cu 含量测定

将节节草分成根部和茎部,先后用自来水和蒸馏水反复冲洗,再用去离子水仔细清洗干净,吸干表面水分,烘箱中先于 108℃ 杀青 30 min,再彻底烘干、磨碎。分别称取各样 1 g,加入混酸 5 ml(浓 HNO₃:HClO₄:浓

H₂SO₄ = 8:1:1)消化,原子吸收分光光度计测定 Cu 含量^[16]。

1.3.2 土壤中 Cu 含量的测定

土壤经风干、烘干、粉碎,过 100 目筛后,取样采用 HClO₄-浓 H₂SO₄消化,原子吸收分光光度计测定金属含量^[16]。

1.3.3 节节草根细胞不同组分中 Cu 含量测定

取植物根 1g,先后用自来水、蒸馏水反复冲洗,再用 10 mmol·L⁻¹ EDTA·Na₂ 仔细清洗,最后用去离子水冲洗干净,吸干表面水分,置于 -20℃ 冰箱中迅速冰冻备用。细胞各组分的区分采用陈朝明^[17]和杨居荣^[18]的方法,其中组分 F₁ 为细胞壁及极少量未破碎残渣,组分 F₂ 主要是细胞核、叶绿体,组分 F₃ 为线粒体,组分 F₄ 为含核糖核蛋白体的细胞溶质。各组分用 HNO₃-HClO₄ 消化,原子吸收分光光度计测定 Cu 含量。

1.3.4 根、茎中 Cu 的化学形态分析

采用逐步提取法研究节节草根部和茎部内 Cu 的化学形态^[19~21]。提取剂和提取顺序为 80% 乙醇,去离子水,1 mol·L⁻¹ NaCl 溶液,2% (体积分数) 醋酸,0.6 mol·L⁻¹ 盐酸。具体操作为:分别称取 0.5 g 新鲜材料,剪成 1~2 mm² 的碎片,置于烧杯中,加入 35 ml 提取剂于电动振荡器上振荡 2 h 后,于 30℃ 恒温箱中放置过夜 (17~18 h),次日回收提取液,再加入同样体积该提取剂,振荡浸提 2 h 后再回收提取液,重复 2 次,即在 24 h 内提取 4 次。将回收的提取液放入 150 ml 的烧杯中,电热板上蒸发至近干,加入一定比例的 HNO₃-HClO₄ 于砂浴中消煮至澄清,用 10% HNO₃ 定容,原子吸收分光光度计测定 Cu 含量。

2 结果与分析

2.1 野外条件下节节草对 Cu 的吸收和积累

由表 1 可知,节节草在铜尾矿废弃地上可自然定居,在 Cu 含量为 318~2093 mg·kg⁻¹ 的土壤、砂地和湿地砂土等环境中均能正常生长,显示出较强适应能力和 Cu 耐性;且铜在节节草体内的分布主要以根部蓄积为主,其含量可高达 1309 mg·kg⁻¹,而茎部 Cu 含量相对较低,最高只有 137 mg·kg⁻¹。相关分析表明,根部 Cu 含量与土壤 Cu 含量呈极显著正相关($r=0.86, p<0.01$),而茎部铜含量与土壤 Cu 含量无明显相关性。由生物富集系数和滞留率数值可以看出,野外条件下节节草对 Cu 的富集能力低,富集系数均小于 1,而滞留率平均为 81.76%,表明节节草将 Cu 向地上部的运输能力较差,主要以根部积累为主,不符合“超富集植物”的定义^[22];但由根系富集因子可知(表 1),其值均大于 1,表明节节草对土壤中的 Cu 是具有吸收和积累作用的。

表 1 野外条件下节节草体内各器官和根际土壤中 Cu 的含量

Table 1 Content of Cu in every organ of plant and root soil of *H. ramosissimum*

样点 Plot	节节草根际土壤环境 Root soil of <i>H. ramosissimum</i>			植物体 Cu 含量 (mg·kg ⁻¹) Concentration of Cu in plant			富集系数 Accumulation coefficient	根系富集因子 ^② Accumulation factor of roots
	类型 Type	pH	Cu 含量 (mg·kg ⁻¹) Content of Cu	茎部 Shoot	根 Root	滞留率 (%) ^① Retention rate		
SZ01	土壤 S	7.35	318 (30.41)	22.2	53.80	58.70	0.07	1.77
SZ02	土壤 S	7.04	509 (53.67)	89	469.60	81	0.17	8.75
SZ04	砂土 SS	6.84	834 (72.61)	106	552.70	80.80	0.13	7.61
SZ07	砂土 SS	6.59	839 (50.34)	111	429.90	74.20	0.13	8.54
SZ03	砂土 SS	6.79	894 (56.20)	93	509.80	81.80	0.10	9.07
SZ08	砂土 SS	6.71	914 (55.60)	137	848	83.80	0.15	15.25
SZ05	砂土 SS	6.63	940 (51.91)	101	859	88.80	0.11	16.55
SZ06	砂土 SS	6.31	1080 (126.83)	98	837	89.20	0.09	6.60
SZ09	湿地砂土 WSS	5.71	2076 (311.51)	118	989.30	88.10	0.06	3.18
SZ10	湿地砂土 WSS	5.68	2093 (367.13)	115	1309	91.20	0.05	3.57

① (根系中铜含量与茎叶中铜含量的差值)/根系中铜含量 × 100% (Cu content of root - Cu content of leaf) / Cu content of root × 100%;

② 根系中铜含量 / 基质中铜有效态含量 Cu content of root / available content of Cu in soil; 下同 the same below; S: soil; SS: sandy soil; WSS: wetland sandy soil; 括号内数值为有效铜量 Numbers of brackets means available content of copper

2.2 室内盆栽条件下节节草对 Cu 吸收和积累

由表 2 分析可得,在室内盆栽条件下,处理组节节草根部和茎部的 Cu 含量均明显高于其对照组,平均是其对照的 20.50 倍和 1.75 倍,但两者的增长情况不同。回归分析表明,节节草根部 Cu 含量随 Cu 污染浓度的增加而显著升高,呈极显著的正相关($r_R=0.95, p<0.01$),而茎部 Cu 含量随 Cu 浓度增加其增长水平不明显,两者间无明显相关性($r_S=0.73, p>0.05$)。此外,铜胁迫下节节草不同器官对 Cu 的吸收与积累能力具有显著差异,其中 Cu 在根部的积累量明显高于茎部(t -test, $p<0.05$),平均是茎部铜含量的 43.50 倍,其滞留率平均可达 97.30%,根系富集因子均大于 1,显示出植物根部对土壤中铜的吸收和积累能力。这与上述野外条件下节节草对 Cu 的吸收积累特征表现出一致的结果。

表 2 节节草不同器官 Cu 的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (平均值 $\pm$ 标准误)
Table 2 Content of Cu in different organs of *H. ramosissimum* (Mean $\pm$ SE)

器官 Organ	Cu 处理浓度 Concentration of Cu ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)					r 值	P 值	回归方程 Regression equation
	0	500 (51.72)	1000 (107.43)	2000 (208.66)	3000 (314.94)			
根 Root	42.50 $\pm$ 1.94 ^a	392.85 $\pm$ 5.64 ^b	848 $\pm$ 11.03 ^c	898.88 $\pm$ 11.40 ^c	1339.75 $\pm$ 40.88 ^d	0.95	0.01	$Y=2.29X-312.41$
茎部 Shoot	11.50 $\pm$ 1.46 ^a	18.85 $\pm$ 0.76 ^b	17.28 $\pm$ 1.04 ^b	23.68 $\pm$ 2.01 ^b	20.30 $\pm$ 1.72 ^b	0.73	0.16	—
滞留率 (%) Retention rate	68.05	95.20	97.96	97.37	98.48	0.66	0.28	—
根系富集因子 Accumulation factor of roots	—	7.60	7.89	4.31	4.25	—	—	—

同一行中数据用 SNK- q 检验,不同字母的数值表示它们之间有显著差异 ($p<0.05$) Same letters within each line indicate no significant difference at $p=0.05$ level, according to SNK- q test

2.3 Cu 在节节草根细胞各组分中的分布和积累

由图 1 可知,随着 Cu 处理浓度的增加,节节草根细胞组分 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 的铜含量表现出不同程度的变化。其中组分 F_1 和 F_4 的铜含量随着 Cu 处理浓度的增加而显著升高(图 1-a),两者均呈极显著正相关($r_{F_1}=0.98, p<0.01$; $r_{F_4}=0.98, p<0.01$),而组分 F_2 和 F_3 的铜含量随 Cu 处理浓度无明显变化(图 1-b),两者间无显著的相关性。

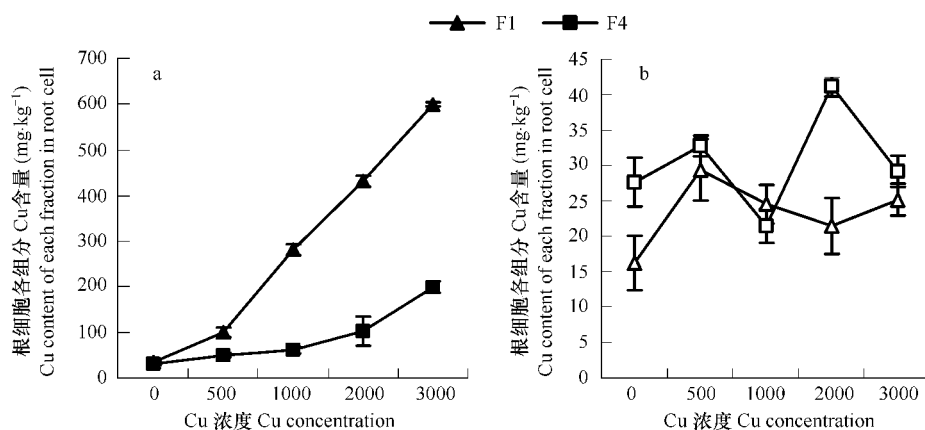


图 1 节节草根细胞各组分 Cu 含量

Fig. 1 Cu content of each fraction in the root cell of *H. ramosissimum*

图 2 显示了节节草根细胞各组分中 Cu 含量占总量的百分比。在各浓度组均以组分 F_1 中 Cu 含量最高,占总组分的 45% ~ 70%; F_4 组分次之,占总组分的 15% ~ 28%,两者之和约占总组分的 70% ~ 90%,且随着土壤 Cu 浓度的增加,二者所占百分比之和有增加的趋势;而 F_2 和 F_3 组分铜含量所占比例较小,随着土壤 Cu 浓

度的增加,二者所占百分比之和有减小的趋势。

2.4 Cu 在节节草体内存在的化学形态

从表 3 可知,在各浓度 Cu 处理下,根部和茎部中的水溶态的铜含量均处于较低水平。在节节草根部分,均以 HAC 提取态为主,分别占其总量的 42.12%、39.43%、41.28% 和 48.93%;HCl 提取态次之,两者之和约占其总量的 60%~80%;相关分析表明,节节草根部分醋酸提取态和盐酸提取态的 Cu 含量均与土壤铜浓度间呈极显著的正相关性($r_{\text{HAC}}=0.99, p<0.01$; $r_{\text{HCl}}=0.98, p<0.01$)。而在茎部, Cu 均以 NaCl 提取态占优势,分别占其总量的 34.55%、28.44%、24.32% 和 31.06%,其次是 HCl 提取态;但茎部 5 种形态的铜含量与 Cu 处理浓度间均无明显相关性。

3 讨论

重金属在植物体内的分布有两种情况,一是大部分积累在根部;另一种是把根系吸收的重金属大部分运输到地上部;重金属在植株内的运输影响着植物对重金属的吸收与耐性,以及重金属在植物体内的分布和金属离子与植物体内物质的结合形态等^[18,19,23]。本研究表明,无论是野外污染条件,或室内人工盆栽条件下,节节草对铜均具有较强的积累作用,超出了一般植物体内的铜含量水平($5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[24,25],其中根系滞留是节节草积累铜的主要方式,其含量为 $42.5 \sim 1339.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,滞留率平均高达 84.98%;而地上部铜积累量较低,其含量为 $11.5 \sim 137 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。夏汉平等^[24]研究发现,植物根系对重金属的滞留效应,可能是植物的一种自我保护措施,以避免过量的重金属进入茎叶,降低金属的毒害作用。节节草以根系积累铜的特性说明了节节草可能是通过降低 Cu 向地上部位的迁移能力,以减轻过量 Cu 对其他各器官的毒害作用,从而提高植物的耐 Cu 能力。

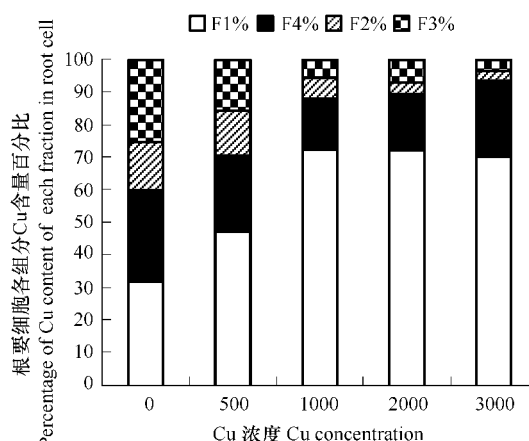


图 2 节节草根细胞各组分 Cu 含量的百分比

Fig. 2 Percentage of Cu content of each fraction in the root cell of *H. ramosissimum*

F1%: 组分 F1 铜含量所占总组分铜含量的百分比 Percentage of Cu content of F1 fraction; F2%: 组分 F2 铜含量所占总组分铜含量的百分比 Percentage of Cu content of F2 fraction; F3%: 组分 F3 铜含量所占总组分铜含量的百分比 Percentage of Cu content of F3 fraction; F4%: 组分 F4 铜含量所占总组分铜含量的百分比 Percentage of Cu content of F4 fraction

表 3 节节草体内不同化学形态的 Cu 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Cu contents of different chemical forms in *H. ramosissimum*

Cu 浓度 Content of Cu ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	器官 Organ	不同 Cu 化学形态的含量 Contents of different Cu chemical forms ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
		F_E	F_w	F_{NaCl}	F_{HAC}	F_{HCl}
0	根 Root	4.14 (12.80)	3.08 (9.52)	13.02 (40.26)	4.76 (14.72)	7.34 (22.70)
	茎部 Shoot	4.84 (14.39)	3.60 (10.70)	12.66 (37.63)	4.58 (13.61)	7.96 (23.66)
500	根 Root	23.50 (19.29)	9.46 (7.76)	11.32 (9.29)	51.32 (42.12)	26.24 (21.54)
	茎部 Shoot	6.26 (14.46)	5.47 (12.61)	14.96 (34.55)	5.20 (12.01)	11.42 (26.37)
1000	根 Root	44.20 (20.41)	15.68 (7.24)	12.92 (5.97)	85.38 (39.43)	58.36 (26.95)
	茎部 Shoot	6.80 (15.60)	5.92 (13.58)	12.40 (28.44)	6.98 (16.01)	11.50 (26.37)
2000	根 Root	95.20 (18.50)	24.92 (4.84)	15.94 (3.10)	212.46 (41.28)	166.14 (32.28)
	茎部 Shoot	7.60 (16.99)	8.76 (19.58)	10.88 (24.32)	7.78 (17.39)	9.72 (21.73)
3000	根 Root	103.80 (16.70)	9.17 (1.48)	13.18 (2.12)	304.20 (48.93)	191.30 (30.77)
	茎部 Shoot	7.92 (19.19)	5.33 (12.91)	12.82 (31.06)	6.47 (15.68)	8.73 (21.15)

* F_E : 80% 乙醇提取态; F_w : 去离子水提取态; F_{NaCl} : 1 mol 氯化钠提取态; F_{HAC} : 2% 醋酸提取态; F_{HCl} : 0.6 mol 盐酸提取态 F_E : Extracting form of alcohol; F_w : Extracting form of water; F_{NaCl} : Extracting form of NaCl; F_{HAC} : Extracting form of HAC; F_{HCl} : Extracting form of HCl

** 括号内数值为分配比率(%) Numbers of brackets means distribution ratio

根据“超富集植物”定义^[22],节节草茎部铜富集水平未达到超富集植物的要求,生物富集系数均小于1。然而植物主要通过根系从基质中吸收金属元素,且根系吸收的是元素的有效态,而非其他形态^[24, 26],故有学者认为“根系富集因子”更能真正反映植物对金属的吸收能力^[24]。本研究以此观点为依据,发现节节草对铜的根系富集因子均大于1,这就说明了节节草对土壤中的Cu具有吸收和富集作用,可考虑将其作为铜污染土壤的植物修复物种。

此外,杨居荣^[18]、王宏镔^[27]和Wagner^[28]等的研究表明,植物细胞壁对重金属离子具有一定的阻隔作用,是植物抵御重金属毒害的一种措施;而细胞内某些特殊的蛋白与金属离子的结合也一定程度上可以降低重金属对植物的毒害作用。因此,在本研究中,从Cu离子在节节草根细胞各组分中的分布情况来看,绝大部分的Cu沉淀在质外体的细胞壁中(F₁组分),占总量的45%~70%,其次是与含核糖核蛋白的细胞溶质(F₄组分)相结合,而对于细胞最重要的光合作用和呼吸作用场所——叶绿体和线粒体,结合的铜量较少,平均不足10%。这就说明在Cu胁迫下,节节草根细胞壁可能是肩负着一定的阻隔作用,可通过与铜离子的络合和螯合作用,将大量Cu贮存在根细胞的质外体中,阻止过多的铜离子进入原生质体中,而进入原生质体中的少量Cu可能与其中的某些蛋白质相结合,形成无毒害作用的重金属结合蛋白,以此降低Cu离子的毒性;而线粒体和叶绿体中少量的铜,一方面满足了植物细胞对铜微量元素的营养所需,保证其正常发挥重要的生理机能,另一方面防止过量的Cu将叶绿体和线粒体中的重要离子(如Mg²⁺)置换而影响光合作用和呼吸作用的效率。

节节草对Cu向地上部的运输能力较低,可能与铜离子在植物体内存在的化学形态有一定的关系。金属元素在植物体内主要是以离子形式运输的^[26],而络合态的金属元素其毒性和转移能力均很低^[2, 29],且有研究发现^[19, 21],重金属胁迫下,植物体内的某些蛋白质可与金属离子结合,以降低其有效性和毒性。本文研究结果表明,Cu胁迫下,节节草根部的Cu以活性较低难溶性的醋酸提取态和盐酸提取态为主要存在形态,地上部的Cu主要以NaCl提取态为主,而水溶态的铜在根部和茎部中的存在比例均相对较低。由此可见,大量铜离子可能与节节草根系中的某些物质结合形成了难溶性的沉淀或活性低的络合态Cu,这种吸持、钝化或沉淀作用,可能是造成植物根系所吸收的Cu向地上部运输困难的主要因素之一,大大降低了铜离子的毒性和迁移能力,使得大部分的Cu以低毒形式积累于植物根部;而运输到地上部的Cu又多附集在蛋白质周围,与蛋白质相结合形成结合形态,以减少体内游离Cu的含量,降低其有效性及毒性,一定程度上也起着保护植物免受Cu毒害的作用。另外,金属离子进入根细胞后,是随着蒸腾流向地上部迁移的^[26, 30],而由于节节草的叶片退化,地上部的蒸腾拉力相对较小,这也可能是造成铜离子向地上部运输能力较低的一方面原因,有关此方面还需作进一步研究。

节节草分布广泛,生长迅速,适应力强,在pH5.68~7.35的土壤、荒坡、砂地及受污染的湿地中均能正常生长。虽不是定义上的超富集植物,但植物根系对土壤中铜具有较强的吸收和积累能力。这些都表明节节草在植物修复方面的应用潜力不容忽视。

References:

- [1] Wang Q R, Chun Y S, Dong Y T. Phytoremediation — an effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21: 326—331.
- [2] Liu X M, Nie J H, Wang Q R. Research on lead uptake and tolerance in six plants. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (5): 533—537.
- [3] Wei C Y, Chen T B. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (7): 1196—1203.
- [4] Tang S R. Hyperaccumulator. *Agro-Environment and Development*, 1996, 49 (3): 14—18.
- [5] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J & C. Presl (*Brassicaceae*). *New Phytol*, 1994, 127: 61—68.
- [6] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements — a review of their distribution. *Ecology and Phytocchemistry Biorecovery*, 1989, (1): 81—126.

- [7] Chaney R L, Li Y M, Angle J S. Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems: approaches and progress. In: Terry, N. & G. S. Bacuelos eds. *Phytoremediation of trace elements*. Miami: Ann Arbor Press, 1999. 112 — 128.
- [8] Zhang Y X, Chai T Y, Burkard G. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants. *Acta Bot Sin*, 1999, 41(5): 453 — 457.
- [9] Sun Q Y, Liu F C. Study on the effect of physical and chemical property change of copper mine tailing on vegetation rehabilitation in Tongling copper mine. *Rural Eco-Environ*, 1998, 14(1): 21 — 23.
- [10] Li Y, Wang Y B, Liu D Y. Investigation on the vegetation of copper tailing wasteland in Shizishan, Tongling, Anhui Province. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(11): 1981 — 1984.
- [11] Wang R B, Zhang L, Liu D Y. Analysis of vegetation state in the copper tailing yard in Tongling. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 135 — 139.
- [12] Wang Y B, Liu D Y, Zhang L, *et al.* Patterns of Vegetation Succession in the Process of Ecological Restoration on the Deserted Land of Shizishan Copper Tailing in Tongling City. *Acta Bot Sin*, 2004, 46(7): 780 — 787.
- [13] Cooperation of Anhui botanical. *Anhui Botanical (Volume I)*. Hefei: Science and Technology Press in Anhui, 1986. 36.
- [14] Liu D Y, Li Y, Chu L, *et al.* Study of the tolerance of *Hippochaete ramosissimum* to Cu stress. *Science in China*, 2005, 5(48) Supp. I: 150 — 155.
- [15] Li Y, Liu D Y. Studies on Physiological Metabolism and Protective Enzyme Activities of *Hippochaete ramosissimum* under Cu Stress. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(3): 498 — 501.
- [16] Soil Research Institute of Nanjing of Science Academy in China. *Analysis of Physical and Chemical of Soil*. Shanghai: Science and Technology Press of Shanghai, 1978. 360.
- [17] Chen C M, Gong H Q, Wang K R. Effect of Cd on quality, physiological and biochemical characteristics of mulberry leaves and its mechanism. *Chin J Appl Ecol*, 1996, 7(4): 417 — 423.
- [18] Yang J R, Bao Z P, Zhang S Q. The distribution and binding of Cd and Pb in plant cell. *China Environmental Science*, 1993, 13(4): 263 — 268.
- [19] Jang X F, Wang C H, Zhao K F. Study on the mechanism of cadmium resistance in *Phragmites australis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 856 — 862.
- [20] Ouariti O, Gouta H, Ghorbal M H. Response of bean and tomato plants to cadmium Growth, mineral nutrition and nitrate reduction. *Plant Physiol. Biochem*, 1997, 35: 347 — 354.
- [21] Yang H Y, Wang H X. A preliminary study on cadmium — binding proteins of two green algae and their cadmium tolerance. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1985, 11(4): 357 — 36.
- [22] Tang S R, Wilke B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People's Republic of China. *Plant and Soil*, 1999, 209: 225 — 232.
- [23] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al.* Arsenic hyperaccumulators *Pteris vittata* L. and its accumulation characteristics. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3): 207 — 210.
- [24] Xia H P, Shu W S. Resistance and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1121 — 1129.
- [25] Reeves R D, Baker A J M, Brooks R R. Abnormal accumulation of trace metals by plants. *Mining Environ Manage*, 1995, 9: 4 — 8.
- [26] Pan R Z. *Plant Physiology (Edition V)*. Beijing: Higher Education Press, 2004. 6: 28 — 44.
- [27] 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.
- [28] Wagner G J. Inducible cadmium binding complexes of cabbage and tobacco. *Plant Physiology*, 1982, 69: 801 — 809.
- [29] Bringezi K, O. Lichtenberger & I. Leopold. Heavy metal tolerance of *Silene vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154: 536 — 546.
- [30] Zhang J, Shu W S. Mechanisms of heavy metal cadmium tolerance in plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1): 1 — 8.

参考文献:

- [1] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径. 生态学报, 2001, 21: 326 ~ 331.
- [2] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究. 植物生态学报, 2002, 26 (5): 533 ~ 537.
- [3] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报, 2001, 21 (7): 1196 ~ 1203.
- [4] 唐世荣. 超积累植物. 农业环境与发展, 1996, 49 (3): 14 ~ 18.
- [8] 张玉秀, 柴团耀, Burkard G. 植物耐重金属机理研究进展. 植物学报, 1999, 41 (5): 453 ~ 457.
- [9] 孙庆业, 刘付程. 铜陵铜尾矿理化性质的变化对植被重建的影响. 农村生态环境, 1998, 14 (1): 21 ~ 23.
- [10] 李影, 王友保, 刘登义. 安徽铜陵狮子山铜尾矿库植被调查. 应用生态学报, 2003, 14 (11): 1981 ~ 1984.
- [11] 王友保, 陈莉, 刘登义. 铜陵铜尾矿植被状况分析. 生态学杂志, 2004, 23 (1): 135 ~ 139.
- [13] 安徽植物志协作组. 安徽植物志 (第一卷). 合肥: 安徽科学技术出版社, 1986. 36.
- [15] 李影, 刘登义. Cu 对节节草生理代谢及抗氧化酶活性的影响研究. 应用生态学报, 2006, 17 (3): 498 ~ 501.
- [16] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 360.
- [17] 陈朝明, 龚惠群, 王凯荣. Cd 对桑叶品质、生理生化特性的影响及其机理研究. 应用生态学报, 1996, 7 (4): 417 ~ 423.
- [18] 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态. 中国环境科学, 1993, 13 (4): 263 ~ 268.
- [19] 江行玉, 王长海, 赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究. 生态学报, 2003, 23 (5): 856 ~ 862.
- [21] 杨红玉, 王焕校. 绿藻的镉结合蛋白及耐镉性初探. 植物生理学报, 1985, 11 (4): 357 ~ 365.
- [23] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 神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.
- [24] 夏汉平, 束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究. 生态学报, 2001, 21 (7): 1121 ~ 1129.
- [26] 潘瑞炽. 植物生理学 (第 5 版). 北京: 高等教育出版社, 2004. 6: 28 ~ 44.
- [27] 王宏镔, 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.
- [30] 张军, 束文圣. 植物对重金属镉的耐受机制. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32 (1): 1 ~ 8.