

铬超富集植物李氏禾对铜的富集特征研究

张学洪¹, 陈俊^{1,2}, 李海翔¹, 胡澄¹, 梁延鹏¹, 黄海涛¹, 刘杰¹

(1. 桂林工学院资源与环境工程系, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究中心, 北京 100101)

摘要:李氏禾是中国境内发现的第一种铬超富集植物。本文通过野外调查和水培试验,研究了李氏禾对铜的富集特征。野外调查结果表明,李氏禾能够将淤泥和水体中的铜转运到地上部,叶中铜平均含量为 $1\,717.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根和茎中铜平均含量为 $533.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶中铜含量与水和淤泥中铜含量之比分别为 291.88 和 14.01。营养液培养条件下,李氏禾对铜也有较强的富集能力。当培养液中铜浓度为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶中铜含量最高达到 $2\,357.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这些结果表明,无论是在野外生长条件下还是在营养液培养条件下,李氏禾均对铜表现出很强的富集能力。李氏禾生长迅速,地理分布广,且能对铜、铬等多种重金属产生富集,因此,是一种优良的修复铜、铬等重金属污染土壤和水体的物种。

关键词: 李氏禾;铜;植物修复;富集特征

中图分类号: X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0521-04

Characteristics of Copper Uptake by Cr-hyperaccumulator *Leersia Hexandra Swartz*

ZHANG Xue-hong¹, CHEN Jun^{1,2}, LI Hai-xiang¹, HU Cheng¹, LIANG Yan-peng¹, HUANG Hai-tao¹, LIU Jie¹

(1. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: *Leersia Hexandra Swartz* is a hygrophite Cr-hyperaccumulator plant first discovered in South China (Guangxi Zhuang Autonomous Region). Field survey and hydroponics cultivation experiments were conducted to investigate the characteristics of copper uptake by the plant. The results showed that this species had a marvelous capacity to accumulate Cu under the field condition and nutrient solution cultivation. In the field samples, the average copper concentration in leaves and stems were $1\,717.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $533.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, the mean ratios of copper concentration in leaves to that in water and soil were 291.88 and 14.01, respectively. Under hydroponics cultivation conditions, *Leersia Hexandra Swartz* showed a remarkable uptake capacity for copper also. At the Cu^{2+} concentration of $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the nutrient solution, the copper concentration in the leaves reached the maximum (up to $2\,357.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). *Leersia Hexandra Swartz* is a species which grows rapidly, distributes widely and could accumulate Cr, so it can be used as a new plant resource for phytoremediation of copper and chromium contaminated soils and waters.

Keywords: *Leersia Hexandra Swartz*; copper; phytoremediation; accumulating characteristics

铜是最早被发现的对植物耐性基因发生作用的污染物^[1]。随着铜矿的开采和冶炼,及含铜杀虫剂的长期使用和污水灌溉的增多,土壤铜污染程度日益加剧^[2],导致农产品中铜超标,对人体健康造成很大的威胁^[3]。植物修复技术(Phytoremediation)是利用植物对重金

属的富集作用来降低土壤和水体中重金属浓度或毒性的环境友好型方法^[4]。该方法效率高、成本低、易于操作,而且与生态环境相协调,是一种具有广阔发展前景的环境治理技术^[5,6]。

植物修复技术的关键问题是要找到能大量富集重金属的植物。目前虽然已经发现了重金属超富集植物近 500 种,但得到广泛认同的铜超富集植物只有 37 种^[7,8],分布于莎草科、唇形科、禾木科、玄参科等 15 个科。我国学者对铜的富集植物也进行了大量的探索,研究了海州香薷(*Elsholtzia splendens*)^[9-12]、

收稿日期:2007-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(40663002);教育部科学技术研究重点项目(206116);广西研究生教育创新计划项目(2006105960830M12);广西科学基金项目(桂科青 0640072)

作者简介:张学洪(1963—),男,湖北荆州人,博士,教授,主要从事重金属污染的治理研究。E-mail: zhangxuehong@x263.net

紫花香薷 (*Elsholtzia argyi*)^[11,12]、鸭跖草 (*Commelina communis*)^[9,10,13,14]、酸模 (*Rumex acetosa*)^[15,16]等植物对铜的富集特征及机理。

李氏禾 (*Leersia Hexandra Swartz*) 是中国境内首次发现的湿生铬超富集植物^[17,18], 本文通过野外调查和室内水培试验研究了李氏禾对铜的富集特征。

1 材料与方法

1.1 野外采样

该调查区位于广西北部某电镀工业区 (E110.3°, N24.51°), 距桂林市约 110 km, 该工业区产生的污水含铜、铬、镍等重金属, 废水经化学分类法处理后排入附近一水塘中, 然后再流入附近一条小河^[19]。长期以来在水塘中沉积了大量的铜、铬、镍等重金属, 对水塘及小河周围环境造成了一定的影响。水塘周围的植物主要有李氏禾 (*Leersia Hexandra Swartz*)、凤尾竹 (*Bambusa multiplex cv. Fernleaf*)、马唐 (*Digitaria sanguinalis*)、蒲公英 (*Taraxacum officinale W.*) 等, 其中李氏禾是当地的优势种群。2006 年 1 月在水塘周围布设 6 个采样点, 分别采集李氏禾、淤泥和水样, 每个采样点采集李氏禾 30 株左右, 淤泥 1 kg 左右, 水样 500 mL。

1.2 室内营养液培养

室内培养的李氏禾采自未受重金属污染的桂林市桃花江边。将取回的样本洗净, 选取具有 4~6 片叶子的禾苗培养, 采用 1/2 强度的 Hoagland 溶液, 控制植物生长环境 (14 h 光照, 25 °C 白天 / 20 °C 晚上, 相对湿度 70%~80%)。15 d 后, 选取生长一致的禾苗移植到容积约为 2.0 L 的塑料桶中, 每桶约 30 株李氏禾。Cu 以 CuSO₄ 的形态加入, 共设置 8 个浓度: 0 (CK)、5、10、15、20、25、30、40 mg·L⁻¹, 每个处理设置

3 个重复。每 4 d 更换一次营养液, 并保持营养液中铜浓度恒定, 50 d 收获植物。

1.3 土壤与植物分析

淤泥样品自然风干、研磨, 过 100 目筛后供分析使用。

收获的植物样品先用自来水冲洗干净, 用 0.1 mol·L⁻¹ 的 Ca(NO₃)₂ 溶液浸泡 30 min, 然后用去离子水冲洗 3 次, 再用吸水纸把表面水吸干, 将样品分为根、茎、叶 3 部分。将新鲜样品放在烘箱内 105 °C 杀青 30 min, 然后 80 °C 烘干至恒重, 磨碎, 待测。

土壤样品用 HCl+HNO₃+HClO₄ 消解 (2:2:1, 体积比)^[20], 植物样品用 HNO₃+HClO₄ 消解 (3:1, 体积比)^[9], 野外取回的水样当天测定重金属含量。重金属含量的测定均采用火焰原子吸收分光光度法 (PEAA-700)。

数据采用 SPSS 10.0 软件进行显著性检验及均值多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 电镀废水污染条件下李氏禾对铜的富集

电镀废水污染条件下生长的李氏禾对铜的富集结果见表 1。

由表 1 可看出, 李氏禾对铜具有很强的富集能力。叶中铜含量最高达到 2 129.30 mg·kg⁻¹, 平均含量为 1 717.85 mg·kg⁻¹, 6 个采样点的李氏禾叶中铜含量均超过 Baker 和 Brooks 提出的铜超富集植物临界值 1 000 mg·kg⁻¹^[7]; 根和茎中铜的平均含量为 533.42 mg·kg⁻¹, 最高可达到 1 171.20 mg·kg⁻¹。李氏禾叶中铜含量显著高于水和淤泥中的铜含量, 叶中铜含量与水和淤泥中的铜含量之比最高分别达到 376.87 和 27.00, 说明李氏禾能够有效地从环境中吸收铜, 并能

表 1 野外生长条件下李氏禾对铜的富集

Table 1 Copper uptake by *Leersia Hexandra Swartz* in the polluted pond

样品 编号	Cr 含量 /mg · kg ⁻¹ , mg · L ⁻¹				L/S	L/W	S/S	S/W
	底泥	水	叶	茎+根				
S1	146.20	5.75	1 325.50	192.00	9.07	230.52	1.31	33.39
S2	97.40	6.70	1 984.60	268.90	20.38	296.21	2.76	40.13
S3	138.40	5.65	2 129.30	1 171.20	15.39	376.87	8.46	207.29
S4	70.20	5.85	1 895.60	241.40	27.00	324.03	3.44	41.26
S5	273.70	5.75	1 892.90	576.90	6.92	329.20	2.11	100.33
S6	203.50	5.55	1 079.20	750.10	5.30	194.45	3.69	135.15
Mean	154.90	5.88	1 717.85	533.42	14.01	291.88	3.63	92.93

注: 根的生物量不足以单独测定重金属含量, 故与茎合并测定; L/S 为叶中铜含量与淤泥中铜含量之比; L/W 为叶中铜含量与水中铜含量之比; S/S 为茎中铜含量与淤泥中铜含量之比; S/W 为茎中铜含量与水中铜含量之比。

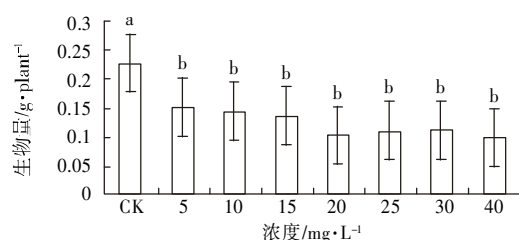
将其转运到地上部分。

由表 1 还可看出, 由于电镀废水的长期排入, 池塘受到了比较严重的 Cu 污染。《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水质标准规定地表水中 $\text{Cu} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。若以此标准衡量, 各采样点 Cu 含量均超标。池塘淤泥对水中的重金属离子产生吸附、螯合等作用, 使得淤泥中 Cu 含量也较高。

2.2 不同浓度的 Cu 处理对李氏禾生物量的影响

营养液培养结果表明, 李氏禾能在含铜浓度为 $0 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液中存活, 说明李氏禾对铜具有较强的耐性。不同浓度铜处理条件下李氏禾单株生物量见图 1。

由图 1 可看出, 过量的铜对李氏禾的生长有明显的抑制作用。1/2 强度的 Hoagland 营养液 (对照) 中培养的李氏禾收获时生物量为 $0.23 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, 而含铜浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液中生长的李氏禾收获时生物量为 $0.153 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, 在铜处理浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液中生长的李氏禾生物量最少, 为 $0.10 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。



不同字母表示数值间存在显著差异 (LSD, $P < 0.05$)

图 1 不同浓度铜处理对李氏禾生物量的影响
(平均值±标准偏差)

Figure 1 Effects of Cu treatment on the biomass of *Leersia Hexandra* Swartz (Means $\pm$ SD)

在含铜浓度为 $5 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 李氏禾的生物量与对照相比均有显著减少 ($P < 0.05$), 而在含铜浓度为 $5 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内, 李氏禾生物量无显著差异。

2.3 营养液培养条件下李氏禾对铜的富集

营养液培养试验结果见表 2。

由表 2 可看出在营养液培养下李氏禾根、茎、叶中铜含量均较高。叶中铜含量为 $298.96 \sim 2357.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 叶对铜的生物富集系数为 $29.54 \sim 91.96$ 。当培养液中铜浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶中铜含量达到最大 ($2357.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 且显著高于其他浓度条件下铜含量 ($P < 0.05$); 当培养液中铜浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶对铜的生物富集系数达到最大 (91.96), 且显著高于其他浓度条件下叶的生物富集系数 ($P < 0.05$)。李氏禾根和茎也对铜表现出明显的富集作用, 根中铜含量为 $2414.93 \sim 7312.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 茎中铜含量为 $583.68 \sim 2681.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根、茎中铜的最高生物富集系数分别达到 482.99 和 116.74 。

3 讨论与结论

Baker 和 Brooks 提出铜超富集植物的参考值, 即植物叶片或地上部 (干重) 铜含量超过 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Reeves 和 Baker 进一步深化其内涵, 即同时满足 $S/R > 1$ 的条件 (S 和 R 分别指植物地上部和根部重金属的含量)^[8]。目前, 虽然在国内还没有关于铜超富集植物的报道, 但是对铜的富集植物关注较多。施积炎等^[9]通过营养液水培实验, 得出在 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu 处理下, 海州香薷植物根中 Cu 含量都超过 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在培养液 Cu 浓度为 $50 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 地上部 Cu 积累量为 $262 \sim 543 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。田生科等^[12]研究了铜

表 2 营养液培养条件下李氏禾对铜的富集作用

Table 2 Cu concentrations in the tissues of *Leersia Hexandra* Swartz grown in nutrient solution

处理/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW			生物富集系数		
	根	茎	叶	根	茎	叶
0	13.87 $\pm$ 1.91	15.77 $\pm$ 3.85	29.35 $\pm$ 12.33	—	—	—
5	2414.93 $\pm$ 224.34d	583.68 $\pm$ 192.54c	298.96 $\pm$ 108.24c	482.99 $\pm$ 44.87a	116.74 $\pm$ 38.51a	59.79 $\pm$ 21.65b
10	3030.85 $\pm$ 848.39cd	762.98 $\pm$ 330.71c	919.58 $\pm$ 292.32b	303.08 $\pm$ 84.84b	76.30 $\pm$ 33.07b	91.96 $\pm$ 29.23a
15	4115.34 $\pm$ 492.38c	671.91 $\pm$ 112.60c	961.11 $\pm$ 137.22b	274.36 $\pm$ 32.83c	44.79 $\pm$ 7.51c	64.07 $\pm$ 9.15b
20	5442.09 $\pm$ 124.24b	1483.28 $\pm$ 205.15b	1047.04 $\pm$ 152.20b	272.10 $\pm$ 57.84b	74.16 $\pm$ 10.26b	52.35 $\pm$ 7.61bc
25	5151.02 $\pm$ 86.29c	1615.28 $\pm$ 556.76b	1000.86 $\pm$ 209.46b	206.04 $\pm$ 3.45bc	64.63 $\pm$ 22.27bc	40.03 $\pm$ 8.38c
30	4841.81 $\pm$ 14.39bc	902.95 $\pm$ 28.78c	886.27 $\pm$ 111.79b	161.39 $\pm$ 57.50c	30.10 $\pm$ 0.96c	29.54 $\pm$ 3.73c
40	7312.09 $\pm$ 810.46a	2681.54 $\pm$ 1019.36a	2357.26 $\pm$ 494.23a	182.80 $\pm$ 49.77b	71.54 $\pm$ 25.48b	58.93 $\pm$ 12.36b

注: 结果为平均值±标准偏差 ($n=3$); 生物富集系数=植物组织中铜含量与营养液中铜含量之比; 不同字母表示数值之间存在显著差异 (LSD, $P < 0.05$)。

胁迫对紫花香薹富集铜的影响,得出在 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 处理下,紫花香薹叶中 Cu 含量为最大 ($160 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。廖斌等^[13]对不同种群鸭跖草的研究结果表明,矿山型鸭跖草对 Cu 的富集能力明显大于非矿山型鸭跖草,在高浓度 Cu 处理下,矿山鸭跖草的地上部分 Cu 含量可超过 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,并认为生长在高铜介质中的矿山鸭跖草可以被看作是 Cu 的超富集植物^[13]。

在本研究中,电镀废水污染池塘中 6 个采样点的李氏禾叶片中的铜含量均高于 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的临界值,平均为 $1717.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且叶中铜含量均高于根茎中铜含量。当培养液含铜浓度为 $10\sim40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片中铜含量均接近或超过 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;当培养液铜含量为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,李氏禾叶片中的铜含量达到 $2357.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这些结果表明李氏禾对铜具有很强的富集能力,富集量超过了国内以前报道的任何一种铜富集植物。

本研究野外调查区域与文献^[17]相同,该区域生长的李氏禾具有同源性。文献^[17]的研究结果表明,6 个采用点的李氏禾样品叶中铬含量均高于 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $1786.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明该区域的李氏禾种群对铬和铜具有相似的富集特征。

前期研究发现,污染区和未污染区李氏禾对铬的富集能力和耐受能力无种群差异^[18],未污染区的李氏禾在含铬浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液中生长仍未出现任何中毒症状。而本研究中发现,采用营养液培养时,铜的加入对李氏禾的生长产生明显的抑制,出现叶片发黄,根部萎缩,病虫害机率增加,含铜浓度为 $5\sim40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液中生长的李氏禾生物量均明显低于对照,含铜浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 营养液中生长的李氏禾生物量比对照减少了 33%。野外调查的水塘受到铜、铬、镍等多种重金属的污染,水体铜含量超过 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在这种环境中李氏禾生长非常繁茂,说明野外生长的李氏禾对这几种重金属的耐性均较强。造成这种现象的原因,可能是不同种群的李氏禾对铜的耐性和富集能力存在差异,在后续的研究中应开展不同种群李氏禾对铜的富集差异性研究。

李氏禾是中国境内首次发现的湿生铬超富集植物^[17,18],多年生禾本科植物,繁殖能力强,生长非常迅速,特别适合于潮湿生环境中生长。本研究发现李氏禾对铜也有较强的富集能力,因此李氏禾在铜、铬污

染水体、湿地和土壤的修复中具有重要的价值,是一种具有广阔前景的修复铜、铬等多种重金属污染的优良物种。

参考文献:

- [1] Prat S. Die Erbllichkeit der Resistenz gegen kupfer[J]. *Der Dt Bot Ges*, 1934, 102: 65–67.
- [2] 王校常,曹志洪.太湖地区水稻土的健康质量问题及调控对策[J].应用生态学报,2002,13(2): 199–203.
- [3] 郑洁敏,楼丽萍,王世恒,等.一种新发现的铜积累植物——密毛蕨[J].应用生态学报,2006,17(3): 507–511.
- [4] 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[J].生态学报,2001,21(7): 1196–1203.
- [5] Chaney R L, Malikz M, Yin M Li, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8: 279–284.
- [6] 唐世荣.污染环境植物修复的原理与方法[M].北京:科学出版社,2006. 1–291.
- [7] 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: 81–126.
- [8] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants. In: Raskin I, Ensley B D eds. *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. 193–229.
- [9] 施积炎,陈英旭,田光明,等.海州香薹和鸭跖草铜吸收机理[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6): 642–646.
- [10] 唐世荣.重金属在海州香薹和鸭跖草叶片提取物中的分配[J].植物生理学通讯,2000,36(2): 128–129.
- [11] 姜理英,杨肖娥,叶正钱,等.海州香薹和紫花香薹对 Cu、Zn 的吸收和积累[J].农业环境科学学报,2003,33(5): 524–528.
- [12] 田生科,李廷轩,彭红云,等.铜胁迫对海州香薹和紫花香薹根系形态及铜富集的影响[J].水土保持学报,2005,19(3): 97–100.
- [13] 廖斌,邓冬梅,杨兵,等.鸭跖草 (*Commelina communis*) 对铜的耐性和积累研究[J].环境科学学报,2003,23(6): 797–801.
- [14] 刘小红,周东美,司友斌,等.铜矿区先锋植物鸭跖草对铜的耐性研究[J].农业环境科学学报,2006,25(5): 1171–1175.
- [15] 刘杰,熊治廷,李天煜.两个不同来源的齿果酸模种群对铜吸收与抗性差异[J].农业环境科学学报,2003,22(3): 271–273.
- [16] 刘杰,张学洪,朱义年,等.两个酸模种群对 Cu^{2+} 积累和抗性的差异[J].生态环境,2006,15(2): 299–302.
- [17] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等.一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)[J].生态学报,2006,26(3): 950–953.
- [18] Zhang X H, Liu J, Huang H T, et al. Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz[J]. *Chemosphere*, 2007, 27: 1138–1143.
- [19] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等.某电镀厂土壤重金属污染及植物富集特征[J].桂林工学院学报,2005,25(3): 289–292.
- [20] 黄海涛,张学洪,陈俊,等.相同酸体系加酸顺序对土壤重金属测定的影响[J].环境技术,2006,24(2): 10–13.