

矿区 Cu 耐性植物研究初探

刘小红^{1,2}, 薛艳^{1,3}, 周东美¹, 吴龙华¹, 司友斌², 沈振国³, 骆永明¹,
陈怀满¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 安徽农业大学资源环境学院, 安徽 合肥 230036; 3. 南京农业大学生命科学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 对长江沿岸几个主要 Cu 矿区的植被及其 Cu 含量分布进行了调查分析, 并且通过多批次室内培养试验研究了
几种候选植物品种对 Cu 的富集效果。结果表明, 虽然在矿区被调查植物中仍没有发现具有严格意义上的 Cu 超富集植
物, 但是由于鸭跖草 (*Commelina communis* L.) 和杠板归 (*Polygonum perfoliatum*) 对 Cu 均有较多吸收, 其中杠板归在一定
条件下其地上部累积 Cu 的含量能够超过 1 000 mg · kg⁻¹, 较鸭跖草高, 表现出非常强的吸收 Cu 的能力, 所以具有很好的
应用前景。盆栽试验发现, 鸭跖草和杠板归对 Cu 均具有很好的耐性, 溶液 Cu 浓度达 400 μmol · L⁻¹ 时 2 种植物均仍
能正常生长。另外, EDTA 可以显著增加鸭跖草对土壤 Cu 的吸收, 但对其生长有明显抑制。

关键词: Cu; 耐性植物; 鸭跖草; 杠板归

中图分类号: X508 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2005)01 – 0050 – 05

Primary Study on Copper Tolerant Plants in Mine Areas

LIU Xiao-hong^{1,2}, XUE Yan^{1,3}, ZHOU Dong-mei¹, WU Long-hua¹, SI You-bin², SHEN Zhen-guo³, LUO Yong-ming¹,
CHEN Huai-man¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing
210008, China; 2. College of Resource and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. College of Life
Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Copper tolerant plants were surveyed in several copper mines of southern China along Yangtse river, and a series of pot
experiments of *Commelina communis* L. and *Polygonum perfoliatum* in glasshouse were performed to evaluate their possibilities in
repairing Cu contaminated soil. The survey results showed that no plant was yet found in these areas to strictly meet the definition of
Cu hyperaccumulator, and the Cu concentrations in the aboveground parts of *Elsholtzia splendens*, *Commelina communis* L. and
Polygonum perfoliatum were in the range of 34 ~ 414, 119 ~ 1589 and 88 ~ 1122 mg · kg⁻¹, with the average 121, 554 and 310
mg · kg⁻¹, respectively. *Commelina communis* L. and *Polygonum perfoliatum* were very tolerant to Cu toxicity in a culturing solution
with Cu concentration up to 400 μmol · L⁻¹. The uptake of Cu by *Commelina communis* L. and *Polygonum perfoliatum* from Cu
contaminated soil or the culturing solution was very high, in which the ability of Cu uptake of *Polygonum perfoliatum* was stronger than
Commelina communis L. In some cases, Cu concentration in *Polygonum perfoliatum* was above 1 000 mg · kg⁻¹, the threshold for a
Cu hyperaccumulator. The presence of EDTA enhanced Cu uptake of *Commelina communis* L., but was disadvantageous for its growth
to some degree.

Keywords: copper; tolerant plant; *Polygonum perfoliatum*; *Commelina communis* L.

Cu 既是植物生长发育所必需的微量元素, 又是
环境污染物^[1]。它对植物的正常生理代谢、生长发育

及提高作物产量、改善食物品质等都具有重要意义。
但是作物正常生长需要 Cu 的量不大, 所以它的过量
对作物生理代谢及产量和品质等均有不利影响^[2]。人
体摄入过量的 Cu 也会引起很多疾病, 因此开展 Cu
污染土壤的修复治理研究是非常重要的。而采取植物
修复则是一种比较经济、方便和可行的方法。

收稿日期: 2004 – 06 – 09

基金项目: 国家 863 项目(2001AA645010 – 2)

作者简介: 刘小红(1979—), 女, 硕士生, 主要从事土壤环境化学与
污染控制方面的研究。

联系人: 周东美, dmzhou@issas.ac.cn

植物修复已有非常成功的实例,而发现合适的修复植物是首要的。目前已广泛研究的超富集植物就是一类极好的修复植物。据报道,现已发现的超富集植物约 400 种,广泛分布于植物界的 45 个科,但绝大多数是镍超富集植物,约 318 种^[3]。植物修复的效益主要取决于植物地上部金属含量和生物量及植物生长速率。但是,目前已知的大多数超富集植物生长慢、生物量小。鉴于上述现状,国内外对调查、鉴定和发现生长速率相对较快、生物量较大的超富集植物尤为关注。我国科学家已开展了重金属富集植物筛选和植物修复领域的研究^[4~8]。本文通过对我国一些重要的 Cu 矿区主要耐性植物进行调查及室内培养试验,以期寻找和发现我国 Cu 富集植物资源。

1 材料与方法

1.1 矿区采样

在湖北大冶 Cu 矿进行了详尽调查。调查分 2 次进行,一次在 2003 年 7 月,另一次在 2003 年 10 月。第一次采集了矿区范围内的几乎所有种类的野生植物样品,并对植物的地上部和根部分别进行实验室分析,筛选出优势品种;第二次有针对性的在矿区选择了 18 个点,采集优势植物品种及对应的表层土,并带回实验室分析。

另外,在江苏九华铜矿和安徽铜陵多个铜矿进行了植物调查与土壤样品的采集。根据所调查的铜矿的

地形及植被分布特点,采集代表性植物样品及对应的表层土壤样品(深度为 0~15 cm)供植物鉴定和分析测定。植物样品主要包括海洲香薷 (*Elsholtzia haichowensis*)、鸭跖草、杠板归、艾蒿 (*Artemisia. argyi* Levl. Et Van.)、狗尾草 (*Glycine soja*)、茵陈蒿 (*Artemisia. capillaries* Thunb.)、茅叶荳草 (*Arthraxon prionodes* (steud.) Dandy) 和商陆 (*Phytolacca acinosa* Roxb.)等。

1.2 温室培养试验

水培试验: 采用 Hoagland 营养液进行培养。供试植物为大冶铜矿和九华铜矿区筛选出的鸭跖草及大冶铜矿的杠板归。将植株用自来水冲洗干净,选取大小一致的幼苗进行移栽,预培养 18 d(长出比较旺盛的根系)后进行 Cu 处理。营养液用 0.1 mol·L⁻¹NaOH 或 0.1 mol·L⁻¹HCl 调 pH 至 5.8,每 3 d 更换一次营养液,处理 20 d 后收获。样品反复用自来水冲洗干净,用去离子水冲洗干净,再用吸水纸把表面水吸干。将样品分地上部分和根系测定各部分鲜重,然后在 70℃下烘干至恒重,测定其干物质量,最后用粉碎机磨碎,供分析测定。

土培试验: 供试土壤为采自南京农业大学园艺学院菜园试验基地 0~20 cm 表层黄棕壤,重金属 Cu 的背景值为 35.29 mg·kg⁻¹。土壤理化性质如表 1 所示。

供试植物为采自江苏九华 Cu 矿的鸭跖草。盆钵

表 1 土壤理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties

pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	全 N /g·kg ⁻¹	全 K /g·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹	全 P /g·kg ⁻¹	速效 P /mg·kg ⁻¹
5.1	18.26	17.19	1.53	45.5	86.5	1.21	22.55

为高 15 cm 直径 12 cm,土样风干后过 2 mm 筛,每盆装土 1.5 kg,Cu 以 CuSO₄ 溶液的形式加入,施 Cu 水平为 100 mg·kg⁻¹,装盆前与土充分混匀。调节土壤含水量至最大持水量 60%,并将其置于温室内平衡 15 d。鸭跖草生长 35 d 后,用不同浓度的 EDTA 进行处理,EDTA 的处理浓度水平分别为 0、1、3 和 10 mmol·kg⁻¹。对照土壤(CK)不用 EDTA 处理,处理 10 d 后追施一次氮肥。25 d 后收获植株,将地上部和根系用去离子水清洗干净后,70℃下烘至恒重,测定其干物质重量及 Cu 含量。

1.3 分析方法

植物样品分析: 在植物样品的处理前,于 60℃下烘 2 h,称取 0.5~1.0 g 放入锥形瓶中,采用 HNO₃-

HClO₄ 法消化,原子吸收光度法测定。分析方法中包括植物标样和空白样。

土壤样品分析: 样品在 105℃下烘 2 h,称取 0.5 g 放入聚四氟乙烯坩埚中,采用 HF-HClO₄-HNO₃ 法消煮,原子吸收分光光度法测定。分析方法中包括土壤标样和空白样。

数据分析方法: 采用 SPSS 统计分析软件,用 Duncan's 法进行多重比较。对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异(*P*≤0.05)。

2 结果与分析

2.1 矿区植物体内 Cu 富集情况调查

对大冶铜矿(包括铜矿遗址)的多种植物 Cu 含量分布进行了调查,并研究了不同采样时间植物吸收 Cu 含量的变化情况,结果如表 2。海洲香薷、鸭跖草和杠板归地上部 Cu 含量范围分别为:34~414、119~

1 587 和 88~1 122 mg·kg⁻¹;根中铜含量范围分别为:137~4 982、269~7 820 和 230~3 159 mg·kg⁻¹。唐世荣等^[9,10]曾发现铜矿区小头蓼(*P. Microcephalum*)对 Cu 有较高的吸收,但在大冶铜矿区该植物分布并不多。

表 2 不同采样时期大冶矿区海洲香薷、鸭跖草和杠板归植株中 Cu 浓度变化
Table 2 Cu concentrations of three plants in Daye Cu mine at different sampling times

植物品种		7 月			10 月		
		Cu	样品数	平均值	Cu	样品数	平均值
		/mg·kg ⁻¹		/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹		/mg·kg ⁻¹
鸭跖草	地上部	313~987	8	530	119~1 587	13	579
	根	915~2 218	8	1 319	269~7 820	13	2 225
海洲香薷	地上部	64~414	18	158	34~151	16	85
	根	137~4 982	16	808	225~1 805	16	708
杠板归	地上部	122~587	11	331	88~1 122	14	289
	根	342~1 509	11	800	230~3 159	12	909

海洲香薷、鸭跖草和杠板归地上部的平均 Cu 含量分别为 121 mg·kg⁻¹(34 个)、554 mg·kg⁻¹(21 个)和 310 mg·kg⁻¹(25 个)。就其所包含 Cu 含量的平均值相比较而言,在 3 种植株中,地上部和地下部 Cu 含量高低顺序均为鸭跖草>杠板归>海洲香薷。由数据统计分析可知,10 月份和 7 月份之间植物样品中 Cu 的含量没有显著性差异。另外,已有研究发现^[11],Cu 在这些植物中主要以铜维生素化合物形式存在。

表 3 显示了大冶铜矿 3 种植物地上部与根的 Cu 含量的比值。海洲香薷、杠板归和鸭跖草地上部与根中 Cu 含量之比平均值分别为 0.162、0.298 和 0.359。说明虽然部分鸭跖草和杠板归地上部的 Cu 含量超过 Cu 超富集植物定义的标准 1 000 mg·kg⁻¹,但是它们地上部与根中 Cu 含量的比值要远小于 1,所以仍然不能认为它们是 Cu 超富集植物。比较不同铜矿区的调查结果发现,大冶铜矿植物地上部中 Cu 的平均含量(265 mg·kg⁻¹)要远高于铜陵凤矿、十五冶、铜官山和九华铜矿植株铜含量^[8],它们分别为 48.9、44.3、38.6 和 23.3 mg·kg⁻¹,这可能与矿区土壤性质、气候条件和采矿历史等有关。姜理英等^[13]调查了浙江铜矿区的超积累 Cu 植物,发现海洲香薷和酸模对 Cu 有较高吸收。

2.2 鸭跖草的水培和土培试验

表 3 大冶铜矿 3 种植物地上部与根的铜含量的比值

Table 3 Root/shoot ratios of three plants in Daye Cu Mine

采样时间	海洲香薷	杠板归	鸭跖草
7 月	0.196(<i>n</i> = 16)	0.414(<i>n</i> = 11)	0.402(<i>n</i> = 8)
10 月	0.120(<i>n</i> = 16)	0.318(<i>n</i> = 12)	0.260(<i>n</i> = 13)
平均	0.162(<i>n</i> = 32)	0.298(<i>n</i> = 23)	0.359(<i>n</i> = 21)

采用 2 个矿区的鸭跖草以相同的条件进行水培试验。由试验结果可知,九华铜矿鸭跖草和大冶铜矿鸭跖草对 Cu 都表现出较好的耐性,能够在 400 μmol·L⁻¹ 的 Cu 溶液中正常生长(表 3)。在 300 μmol·L⁻¹ 的 Cu 溶液中,九华和大冶铜矿鸭跖草的地上部生物量分别为对照的 109 % 和 90.2 %,而根的生物量分别为对照的 90.1 % 和 97.3 %。由其生物量结果可知,2 种生态型鸭跖草的地上部和地下部生物量差异也不显著。但总的趋势是在适量的 Cu 浓度范围内,其生物量会有一定的增加,但随着处理浓度的增大,其生物量是减小的,说明在一定的 Cu 浓度范围内,鸭跖草能不受 Cu 的毒害而较好地生长,见表 4。

图 1 显示了鸭跖草在水培试验条件下随添加 Cu 浓度变化其地上部吸收 Cu 的情况。无论是九华或大冶铜矿鸭跖草,其地上部 Cu 含量均随处理的 Cu 浓度的增加而增加,九华鸭跖草地上部 Cu 含量可高达 441 mg·kg⁻¹,而大冶鸭跖草地上部分 Cu 含量也可达 418 mg·kg⁻¹。由数据统计分析可知,九华和大冶两处的鸭

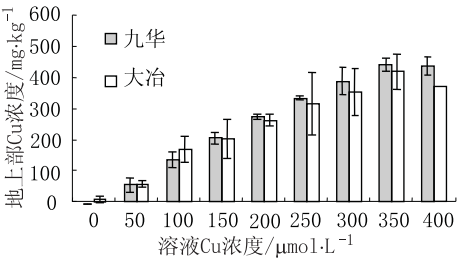


图 1 水培试验条件下外加 Cu 浓度对鸭跖草吸收 Cu 的影响
Figure 1 Adding copper on the concentration of Cu in Commelina communis L. under hydroponic incubation condition

表 4 鸭跖草水培试验条件下添加 Cu 浓度对其地上部和根生物量的影响

Table 4 Effect of Cu concentration on aboveground and root biomass of <i>Commelina communis</i> L. under water culture conditions				
Cu 浓度 / $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	地上部生物量/g		根生物量/g	
	九华铜矿区	大冶铜矿区	九华铜矿区	大冶铜矿区
0	0.56 ± 0.10 abcd	0.52 ± 0.07 abc	0.074 ± 0.016 fgh	0.037 ± 0.005 a
50	0.74 ± 0.06 d	0.43 ± 0.13 abc	0.084 ± 0.005 h	0.042 ± 0.012 ab
100	0.68 ± 0.22 cd	0.57 ± 0.21 abcd	0.080 ± 0.008 gh	0.045 ± 0.011 abc
150	0.77 ± 0.07 d	0.57 ± 0.06 abcd	0.082 ± 0.010 gh	0.046 ± 0.007 abc
200	0.53 ± 0.18 abcd	0.35 ± 0.12 a	0.061 ± 0.013 cdef	0.040 ± 0.007 a
250	0.67 ± 0.05 cd	0.37 ± 0.13 ab	0.065 ± 0.007 defg	0.031 ± 0.003 a
300	0.61 ± 0.20 bc	0.47 ± 0.10 abc	0.067 ± 0.015 efg	0.036 ± 0.002 a
350	0.46 ± 0.07 abcd	0.36 ± 0.07 a	0.049 ± 0.004 abcd	0.036 ± 0.006 a
400	0.55 ± 0.15 abcd		0.055 ± 0.011 bcde	

注:生物量以烘干重计。不同处理间字母相同表示无显著性差异,字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)。

跖草之间地上部和地下部 Cu 的含量并无显著性差异。

为了进一步考察鸭跖草在污染土壤上对 Cu 的吸收情况,开展了鸭跖草的土培试验研究。图 2 显示了在土培试验条件下不同浓度 EDTA 处理对鸭跖草在对照土壤(CK)和铜污染土壤(外加 Cu 浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)生长的影响。随着 EDTA 浓度的增加,植株的地上部和地下部的生物量都有一定的降低,说明加入较高浓度的 EDTA 对鸭跖草的生长不利。但是,由图 3 可知,鸭跖草的地上部和地下部吸收 Cu 的量均随着 EDTA 浓度的增加而增加。这说明 EDTA 是能适当增加植株吸收 Cu 的量,但对地上部生物量的影响较大。

Wu 等^[13]研究了添加 EDTA 对土壤溶液中重金属

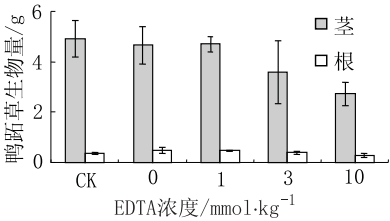


图 2 土培试验条件下不同浓度 EDTA 处理对鸭跖草在 Cu 污染土壤生长的影响

Figure 2 Effect of EDTA on the growth of *Commelina communis* L. in pot experiment with Cu addition soil

浓度的影响,发现 EDTA 将增加土壤中重金属的生物有效性。龙新宪等^[14]比较了外源有机酸对 2 种生态型东南景天(*sedum. alfredii Hance*)生长和 Zn 吸收与积累的影响,发现有机酸能够增强非超积累生态型东南景天的耐 Zn 能力,叶片、茎和根系中 Zn 含量明显增加。

2.3 水培条件下不同 Cu 浓度处理对杠板归吸收积累 Cu 量的影响

根据野外调查结果,发现杠板归对 Cu 具有很好的吸收能力,所以开展了杠板归在水培试验条件下对

Cu 的响应和吸收情况。由试验结果发现,杠板归对 Cu 有较强的耐受能力, Cu 耐受浓度水平可达 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,较鸭跖草要高。由图 4 可知,在 300 和 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cu 处理浓度时,其地上部 Cu 的浓度分别可达 1246 和 $2964 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现非常强的吸收 Cu 的能力,而且地上部和根中 Cu 含量的比值随 Cu 处理浓度的增加而增加,在 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cu 处理浓度时,其比值为 0.216。

与鸭跖草相比,杠板归具有更高的耐受 Cu 毒性的能力,同时无论是地上部分还是地下部分对 Cu 的吸收也较高,所以需要进一步对其从吸收机理方面进行研究。

3 结论

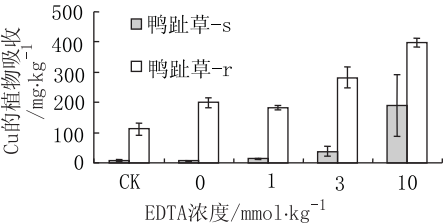


图 3 土培试验条件下不同浓度 EDTA 处理对鸭跖草吸收污染土壤 Cu 的影响

Figure 3 Effect of EDTA on Cu uptake of *Commelina communis* L. grown in the Cu polluted soil

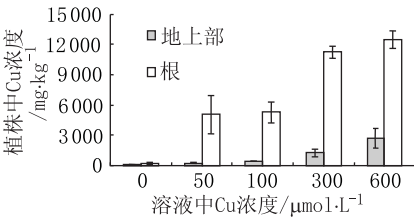


图 4 水培条件下杠板归对 Cu 的吸收

Figure 4 Cu concentration in *Polygonum perfoliatum* under water culture conditions

Cu 是一种有毒重金属元素, 其在正常植物中的含量仅有 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, Cu 超富集植物的筛选比较困难。因此, 在进一步加强对 Cu 超富集植物品种筛选的同时, 还应考虑将 Cu 的耐性植物, 如海洲香薷、杠板归和鸭跖草等, 应用于 Cu 污染土壤的修复, 发展其植物修复技术。本研究发现杠板归和鸭跖草均对 Cu 有很好的耐性, 其中杠板归在一定条件下其地上部累积 Cu 含量能超过 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有很好的应用前景, 有望进一步用于 Cu 污染土壤的植物修复。而且这 2 种植物生物量较大, 吸收重金属的总量较高, 进一步研究这些 Cu 耐性植物耐 Cu 的生理机制以及调控铜吸收的辅助技术具有广阔前景。

参考文献:

- [1] 陈怀满, 等. 土壤 - 植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 沈振国, 刘友良. 超量积累重金属植物研究进展[J]. 植物生理学通讯, 1998, 34(2): 133 - 139.
- [4] 李 华, 骆永明, 宋 静. 不同铜水平下海洲香薷的生理特性和铜积累研究[J]. 土壤, 2002, 34(4): 225 - 228.
- [5] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 黄启飞, 鲁全国, 范 莲. 铜超富集植物

是蜈蚣草及其对铜的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207 - 210.

- [6] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 傅承新. 东南景天(*Sedum alfredii* H) - 一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003 - 1006.
- [7] 唐世荣. 超积累植物在时空、科属内的分布特点及寻找方法[J]. 农村生态环境, 2001, 17(4): 56 - 60.
- [8] 周东美, 王玉军, 郝秀珍, 陈怀满. 铜矿区重金属污染分异规律初步研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3): 225 - 227.
- [9] Tan S R, Wilke B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze river[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209: 225 - 232.
- [10] 方益华, 唐世荣. 小头蓼(*P. Microcephalum*)对矿区铜的吸收积累研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2): 254 - 256.
- [11] 唐世荣. 重金属在海洲香薷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.
- [12] 李文学, 陈同斌. 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 627 - 631.
- [13] Wu L H, Luo Y M, Christie P, Wong M H. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50 (6): 819 - 822.
- [14] 姜理英, 石伟勇, 杨肖娥, 等. 铜矿区超积累 Cu 植物的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 906 - 908.