

不同铜水平下海洲香薷的生理特性和铜积累研究

李 华 骆永明 宋静

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 本文研究了 Cu 对耐性植物海洲香薷 (*Elsholtzia splendens*) 的生长、Cu 积累、叶绿素含量和根系活力的影响,探讨了后 2 项生理指标与海洲香薷 Cu 积累之间的关系。研究结果表明:1) 低浓度 Cu 可促进海洲香薷生长 ($0.31 \sim 50 \mu\text{mol/L}$),但随着其浓度的增加出现抑制现象 ($75 \sim 100 \mu\text{mol/L}$)。2) 叶绿素 a 及叶绿素 b 受 Cu 的影响规律一致。 $100 \mu\text{mol/L}$ 的高 Cu 处理可显著降低这两者含量,其余 Cu 处理水平没有产生显著影响。3) 随着 Cu 浓度的增加根系活力呈现不断下降的趋势。与其余处理相比,Cu 浓度高于 $75 \mu\text{mol/L}$ 时影响达显著水平。4) 地上部和根系 Cu 浓度、积累量均随着 Cu 处理浓度的增加而增加,但地上部分 Cu 积累水平未达到超积累植物的要求。

关键词 植物修复; 海洲香薷; 生理指标; Cu

重金属的耐性植物及超积累植物体内具有优越于普通植物的积累及抗性机制,使其可以在严重污染环境中生长并起修复作用^[1,2]。但是,迄今发现的许多超积累植物生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小,极大地限制植物修复的实际应用^[3]。海洲香薷(俗称铜草, *Elsholtzia splendens*)是一种可以在 Cu 矿区或 Cu 污染土壤上正常生长的植物。其生物量大,并可吸收和积累相当高浓度的 Cu,被认为是一种可应用于重金属污染土壤修复的植物^[4-5]。虽然对海洲香薷在修复 Cu 污染土壤中的作用已有所认识,但对海洲香薷的生理特性及其与植株与 Cu 吸收积累的关系还鲜见报导。本研究以海洲香薷为供试植物,研究不同 Cu 处理条件对海洲香薷生长、植株 Cu 蓄积及其生理变化影响,以探讨海洲香薷的耐性机制及其修复潜力。

1 材料和方法

将海洲香薷 (*Elsholtzia splendens*) 种子播种于珍珠岩和蛭石混合物(重量比 1:3)的育苗盘中,长至 4 叶苗龄时,挑选生长一致植株,移栽于盛有 1/2 浓度完全营养液的塑料容器中培养。营养液组成(单位均为 $\mu\text{mol/L}$): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 1000; MgSO_4 , 500; K_2HPO_4 , 50; KCl , 100; H_3BO_3 , 10; MnSO_4 , 1.8; Na_2MoO_4 , 0.2; CuSO_4 , 0.31; NiSO_4 , 0.5; ZnSO_4 , 5; $\text{Fe}(\text{---})\text{-EDTA}$, 50。植物培养于 $25^\circ\text{C}/12\text{h}$ 光照、 $20^\circ\text{C}/12\text{h}$ 黑暗,相对湿度 60%~70%、光照强度不小于 10000Lux 的人工培养室中。试验采用容积为 1L 的塑料容器培育植株,每个容器定植 1 株。幼苗在 1/2 营养液预培养 1 周后采用含有不同的 Cu 处理营养液进行培养。营养液每 3 天

更换 1 次。Cu 处理设 0.31(植物正常生长所需 Cu 水平, CK)、25、50、75、100 $\mu\text{mol/L}$ 共 5 个水平, 以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的形式提供。各处理均设 4 次重复, 随机排列。植株培育 60 天收获。收获前采用乙醇丙酮浸泡提取法测定功能叶叶绿素含量; TTC 法测定根系活力^[6]。收获时分地上部和根两部分取样, 洗涤后杀青, 80°C 烘干, 分别测定植物干重后, 粉碎。样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解, 用原子吸收分光光度计测定地上部和根系中的 Cu 含量。

文中数据为 4 次重复的平均值, 结果应用 DPS 统计软件进行统计。

2 结果与分析

2.1 株高及干重

由表 1 数据可知, 75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ Cu 处理的海洲香薷的株高显著低于 Cu 浓度较低 (25 $\mu\text{mol/L}$, 50 $\mu\text{mol/L}$) 的处理 ($P < 0.05$); 但与 CK 处理 (0.31 $\mu\text{mol/L}$) 相比, 高 Cu 处理 (100 $\mu\text{mol/L}$) 对海洲香薷的生长抑制作用没有达到显著水平。这一现象可能与海洲香薷喜 Cu 特性有关。

随着外源 Cu 处理浓度的增加, 地上部生物量呈减少趋势, 表现为 75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ Cu 处理的海洲香薷地上部生物

表 1 不同 Cu 处理对海洲香薷生长及干重的影响

处理浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	株高 (cm)	地上部干重 (g)	根系干重 (g)	总干重 (g)
0.31	33.50Aabc	2.72aA	0.41bBC	3.13ABab
25	35.00Aab	2.67aA	0.67aAB	3.34ABabc
50	35.75Aa	2.64aAB	0.82aA	3.46Aa
75	26.75Abc	1.51bBC	0.29bC	1.8Bbc
100	25.50Ac	0.93bC	0.29bC	1.22Bc

量显著低于 Cu 浓度较低 (0.31 $\mu\text{mol/L}$, 25 $\mu\text{mol/L}$, 50 $\mu\text{mol/L}$) 的处理 ($P < 0.05$)。而外源 Cu 处理对海州香薷根系生物量影响呈抛物线型, 即当 Cu 处理 $< 50 \mu\text{mol/L}$, 海洲香薷生物量表现出增加趋势; Cu 处理浓度达到 50 $\mu\text{mol/L}$ 以后, 生物量呈现降低的趋势。高 Cu 处理浓度植株生物量均显著低于 CK 处理 (0.31 $\mu\text{mol/L}$) 植株生物量 ($P < 0.01$)。不同 Cu 处理对总生物量的影响规律与地上部生物量一致。

2.2 叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 含量变化

从图 1 可以看出, 外源 Cu 处理浓度对海洲香薷叶片中叶绿素 a、b 含量有影响。多重比较结果表明, 与其余 Cu 处理水平相比, 100 $\mu\text{mol/L}$ Cu 处理可明显降低叶片叶绿素 a、b 含量, 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

叶绿素 a、b 含量受 Cu 处理浓度影响的趋势没有显著差异, 叶绿素 a 含量约为叶绿素 b 含量的 2 倍, 所有处理的叶片叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值均约等于 2。

2.3 根系活力

根系活力受不同 Cu 浓度影响的趋势如图 2 所示。从图中可见, 海州香薷根系

活力随外源 Cu 浓度的增加而呈下降趋势; 多重比较结果表明, 与其余 Cu 处理水平相比, 75 $\mu\text{mol/L}$ Cu 处理可明显降低海州香薷根系组织还原 TTC 的能力, 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

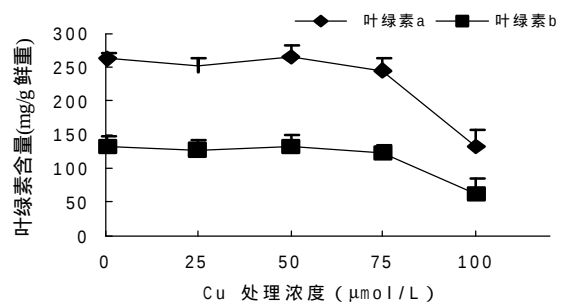


图 1 不同铜处理对叶绿素含量变化的影响

2.4 植株 Cu 含量及积累量

如表 2 所示，地上部和根系 Cu 浓度均随着 Cu 处理浓度的增加而不断增加。经统计分析，当外源 Cu 浓度达到 75 μ mol/L 时，地上部 Cu 浓度含量与 CK 处理（0.31 μ mol/L）植株相比差异达到了极显著水平（ $P<0.01$ ）；外源 Cu 浓度继续增加至 100 μ mol/L 时，植株

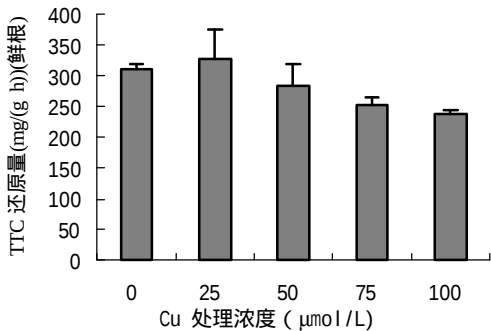


表 2 不同 Cu 处理浓度对地上、根系 Cu 浓度的影响

Xu处理浓度 (μ mol/L)	地上部 Cu 含量 (μ g/g)	根系 Cu 含量 (μ g/g)	根系/ 地上部
0.31	16.3dC	707.9dC	44
25	30.5 cdC	1306.2 cdC	43
50	44.8 cBC	2043.1 cC	46
75	74.0 bB	4598.1 bB	62
100	132.5aA	6730.9 aA	51

图 2 不同 Cu 处理对海州香薷根系活力影响

地上部 Cu 浓度含量表现为显著高于其它 Cu 处理含量。与地上部相比，根系中 Cu 浓度含量随外源 Cu 浓度增加而增加的幅度要明显大于地上部，Cu 处理浓度达到 75 μ mol/L 时，根系中 Cu 浓度含量极显著高于其余低 Cu 处理时的含量。比较地上部和根系的 Cu 浓度含量，不难发现，根系中的 Cu 含量显著高于地上部 Cu 含量，最高达到 62 倍，出现在高 Cu 处理（75 μ mol/L）。

地上部生物量与地上部金属浓度的乘积（即金属积累量）是决定植物修复或植物采矿成功与否的决定因素^[7]。如表 3 显示，本试验中植物地上部的 Cu 积累量随着 Cu 处理浓度的增加而显著增加；尽管根系生物量显著地小于地上部，但根系 Cu 积累量（表 3）却显

表 3 不同 Cu 处理浓度对植株 Cu 积累量的影响

Xu处理浓度 (μ mol/L)	地上部 Cu 积累量 (μ g)	根系 Cu 积累量 (μ g)	总积累量 (μ g)	地上部相对积累 (%)	根系相对积累 (%)
0.31	44.4bB	270.42 bB	314.83 Bc	14.11	85.89
25	116.15 aA	1095.45 abAB	1211.6 ABbc	9.59	90.41
50	140.94 aA	1401.47aAB	1542.41 ABbc	9.14	90.86
75	139.76 aA	2096.07aA	2235.83 ABab	6.25	93.75
100	122.97 aA	1998.67aA	2121.64 Aa	5.80	94.20

注：地上部/根系相对积累量=地上部 Cu 积累量（或根系 Cu 积累量）/总积累量 $\times$ 100%

著地高于地上部，根系中 Cu 的总量是地上部 Cu 总量的 6~16 倍。观察地上部和根系的相对吸收比例，发现低浓度 Cu 处理时地上部 Cu 积累量占总积累量的比例（14%）要高于高浓度处理所占比例（6%）；而根系中相对积累规律则相反，即高 Cu 处理的根系相对积累高于低 Cu 处理。

3 讨 论

Cu 是植物生长所必需的微量元素，它参与植物体内很多的新陈代谢过程。然而，过量的 Cu 却有着很高的植物毒性^[8]。本研究结果表明，海洲香薷可在 Cu 严重污染（有效 Cu 含量高于普通植物毒性的阈值）的环境下生长。然而，根据 Brooks 对超富集植物的定

义^[9] (植物的地上部分能富集 1000 mg/kg 的 Cu, 可称之为超富集植物植物), 海州香薷达不到这一要求; 但由于其生物量大, 根系能超积累 Cu, 植株 Cu 总积累较高, 因此仍可考虑将其用于 Cu 污染土壤的植物修复。

叶绿素是植物进行光合作用的色素, 叶绿素含量高低在一定程度上反映了光合作用的水平。由于 Cu 直接参与植物叶绿体中质蓝素及多种叶绿体酶的合成, 因此 Cu 含量多少也就直接关系到光合作用能否保持正常状态。本研究结果显示, 高浓度的 Cu 可显著降低海州香薷叶片中叶绿素含量, 这种影响可能是由于抑制叶绿素的合成或直接引起叶绿素破坏而造成的。

根系活力与根系生命活动的强弱有直接的关系, 它指示着根的生长和代谢的旺盛程度, 尤其是细胞吸收和逆浓度梯度保持营养离子的能力。我们的试验证明, 当外界环境 Cu 浓度达到一阈值时, 海州香薷的根系受到破坏, 植株吸收积累 Cu 的能力下降, 修复效果下降。

4 结 论

本文通过营养液试验, 研究了海州香薷生长、叶绿素含量、根系活力、植物 Cu 积累与生长介质 Cu 浓度之间的关系。从试验结果可以得到如下一些结论:

1. 海州香薷对 Cu 表现出很强的适应能力或耐性, 但高浓度 Cu 对海州香薷生长有抑制。
2. 高浓度 Cu 可降低海州香薷叶绿素含量、抑制其根系活力, 但毒害的临界浓度较普通植物高。
3. 海州香薷是一种有潜力的可用于 Cu 污染土壤修复的耐性植物;

参 考 文 献

- 1 Baker A.J.M., S. P. McGrath, C.M.D. Sidoli and R. D. Reeves, The possibility of metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling*. 1994, 11: 41 ~ 49.
- 2 骆永明. 强化植物修复的螯和诱导技术及其环境风险. *土壤*, 2000, 32: 57 ~ 61
- 3 骆永明. 金属污染土壤的植物修复. *土壤*, 1999, 31: 261 ~ 265
- 4 束文圣, 杨开颜, 张志权, 杨兵, 蓝崇钰. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究. *应用与环境生物学报*, 2001, 7: 7 ~ 12
- 5 唐世荣. 重金属在海州香薷和鸭跖草叶片提取物中的分配. *植物生理学通讯*, 2000, 36: 128 ~ 130
- 6 蒋德安, 朱诚. *植物生理学实验指导*. 成都: 成都科技大学出版社. 1999
- 7 Brooks R. R., General Introduction. In: Brooks R. R (ed.). *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals*. CAB International, Wallingford, U.K., 1998, 1 ~ 15
- 8 王狄, 李锋民, 熊治廷, 郑振华. 铜的植物毒性与植物蓄积的关系. *土壤与环境*, 2000, 9: 146 ~ 148
- 9 Brooks R. R.. Chapter three: Geobotany and Hyperaccumulators. In: Brooks R. R (ed.), *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals*. CAB International, Wallingford, U.K., 1998, 77 ~ 78