

# 铜锌铅复合污染土壤上香薷植物的生长和重金属吸收动态<sup>①</sup>

翁高艺<sup>1,2</sup>, 孙小峰<sup>1,2</sup>, 吴龙华<sup>1,2</sup>, 骆永明<sup>1,2\*</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘 要:** 盆栽试验研究了海州香薷和紫花香薷在 Cu、Zn、Pb 复合污染泥沙土上的重金属耐性与吸收动态。结果发现, 在 Cu、Zn、Pb 全量分别为 223、1068、232 mg/kg 的土壤上, 两种香薷植物地上部生物量随生长时间的延长其增长趋势明显, 其中叶片积累的生物量略高于茎秆积累的生物量; 在整个生长期中重金属含量呈现动态变化, 重金属吸收量有增加趋势。

**关键词:** 海州香薷; 紫花香薷; 复合污染; 重金属; 吸收

**中图分类号:** X 820.6

海州香薷 (*Elsholtzia splendens*) 是古老铜矿地区的优势植物之一<sup>[1-2]</sup>。目前关于海州香薷在植物修复中的研究大多集中于生理生化特性<sup>[3-4]</sup>、Cu 富集特征<sup>[5]</sup>以及植物有效性评价等<sup>[6]</sup>。重金属胁迫下不同时期植物体内重金属的吸收和分布研究较少<sup>[7]</sup>, 且多集中于乔木<sup>[8-10]</sup>。在 Cu、Pb、Zn 等重金属复合污染土壤上, 海州香薷与紫花香薷体内 Cu、Pb、Zn 含量的动态变化尚未见报道。研究重金属在土壤—植物体系向植物的迁移、传输和分布及其时间变化的动态过程, 将提供植物在重金属胁迫条件下对重金属吸收代谢的信息, 对认识重金属在植物体内的迁移转化规律和植物修复的实际应用有重要意义。

本试验采集田间重金属长期复合污染土壤, 研究 Cu、Zn、Pb 在香薷植物地上部的分布及重金属含量随时间的动态变化, 为重金属在植物—土壤系统中的迁移、生物有效性和植物修复提供信息。

## 1 材料与方法

试验在中国科学院南京土壤研究所温室进行。试验用土取自浙江省杭州市郊区的泥沙土表层 0 ~ 15 cm, 当地有小型金属冶炼厂, 由于长期大气沉降导致周围农田土壤中重金属含量超标。土壤的基本理化性质如下: pH 7.82, 有机 C 25.8 g/kg, Cu、Zn、

Pb 全量分别为 223、1068、232 mg/kg。供试海州香薷种子分别采自安徽铜陵 (TL)、浙江建德 (JD) 和诸暨 (ZJ), 紫花香薷种子采自浙江三门 (SM)。

试验采用塑料盆, 其上缘直径 15 cm, 底面直径 11 cm, 高 14 cm, 每盆装土 1.5 kg (烘干重)。将紫花香薷和 3 个海州香薷种群种子分别用去离子水浸种, 并在铺有滤纸的培养皿中催芽 2 天后播种于塑料盆中, 每盆 6 颗。植物生长期间, 每天用去离子水浇灌, 保持最大田间含水量的 70%。1 个月 after 间苗, 每盆保留大小一致、长势良好的幼苗 3 株。

海州香薷和紫花香薷生长 75 天后第 1 次取样, 以后每隔 30 天取样 1 次, 直至植物叶片开始凋谢, 共取样 5 次。样品洗净、烘干、磨碎后用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (85:15 v/v) 消煮, 原子吸收分光光度计 (Varian SpectrAA 220FS) 测定 Cu、Zn、Pb 含量。试验设 3 次重复, 数据分析采用 DPS (Version 3.11) 数据处理系统进行方差分析和多重比较<sup>[11]</sup>, 本文所列结果均为 3 次重复的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物地上部生物量的动态变化

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)、中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-429, CXTD-Z2005-4)、国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2004AA649050) 共同资助。

\* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 翁高艺 (1979—), 男, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染植物修复研究。E-mail: gyweng@yahoo.com.cn

海州香薷和紫花香薷地上部生物量随生长期的延长而增加, 植物叶片生物量在生长 195 天后达到最大值 (图 1)。JD、TL 和 ZJ 种群海州香薷叶片生物量分别为 5.50、7.60、6.70 g/株, SM 紫花香薷叶片生物量显著大于海州香薷 ( $p < 0.05$ ), 高达 20.6 g/株。植物茎秆生物量也在 195 天时达到最大值, 其中紫花香薷茎秆生物量大于 3 个海州香薷群体的茎

秆生物量。随生长周期的延长, 植物地上部生物量逐渐增大, 在 195 天时达到最大值, 地上部生物量依次为: SM 紫花香薷 > TL 海州香薷 > ZJ 海州香薷 > JD 海州香薷 (图 1)。

## 2.2 植物体内 Cu、Zn、Pb 含量与积累量的动态变化

3 种海州香薷群体叶片 Cu 含量均随生长期的延长而上升, 但差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 生长 195

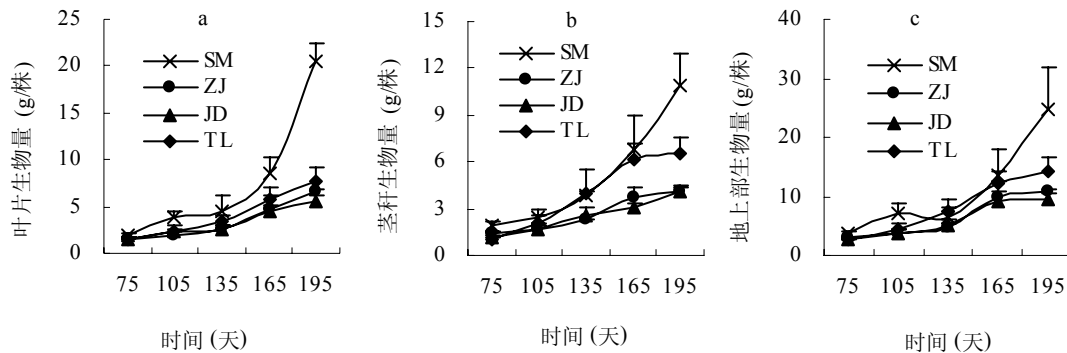


图 1 两种香薷属植物 (a) 叶片、(b) 茎秆、(c) 地上部生物量

Fig. 1 Plant biomass dynamics of (a) leaf, (b) stem, and (c) shoot of two *Elsholtzia* plants

天后 JD、TL 和 ZJ 海州香薷叶片 Cu 含量分别仅为 8.30、9.3、13.8 mg/kg (图 2)。这可能是由于过高的 pH 值和有机质含量降低了土壤 Cu 的植物有效性, 影响了植物对 Cu 的超常吸收。此外, 姜理英等<sup>[12]</sup>认为 Zn 可以抑制 Cu 向这两种香薷属植物地上部分的运输, 从而限制植物地上部 Cu 含量的提高。生长 75 天的 SM 紫花香薷叶片 Cu 含量显著低于另外 4 个时期样品中的 Cu 含量, 生长 165 天时叶片 Cu 含量最高, 为 13.5 mg/kg, 说明紫花香薷生长后期对 Cu 具有更高的吸收和转运能力。两种香薷属

植物茎秆 Cu 含量低于叶片 Cu 含量。3 种海州香薷茎秆 Cu 含量在 75 天时最高, 而生长 105 天后含量最低; 紫花香薷茎秆最高 Cu 含量出现在生长 135 天后, 同样 105 天时 Cu 含量最低, 但差异不显著 ( $p > 0.05$ ) (图 2)。

紫花香薷和 3 种海州香薷群体叶片 Cu 吸收量均随生长期延长而增加, 195 天时 SM 紫花香薷和 JD、TL、ZJ 海州香薷叶片 Cu 积累量分别达到 203、48.8、76.5 和 92.4  $\mu\text{g}/\text{株}$ 。紫花香薷茎秆 Cu 积累量大于 3 种海州香薷茎秆 Cu 积累量 (图 3)。

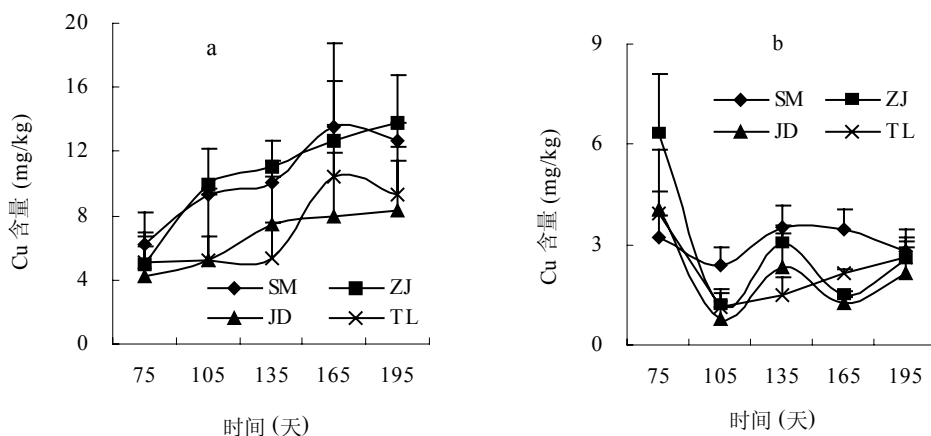


图 2 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Cu 含量

Fig. 2 Plant Cu concentration dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

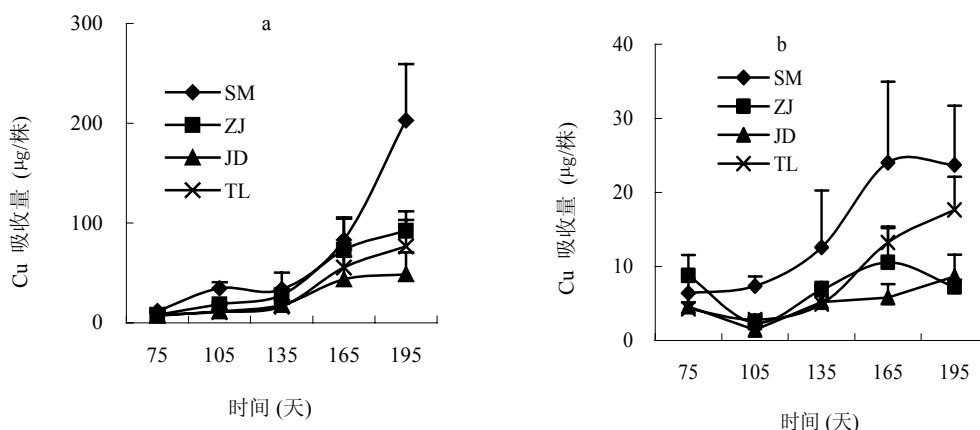


图 3 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Cu 吸收量

Fig. 3 Plant Cu uptake dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

生长 105 天时 4 种香薷植物叶片 Zn 含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其他 4 个采样期的 Zn 含量。此时 SM 紫花香薷和 JD、TL、ZJ 海州香薷叶片 Zn 含量分别为 248.5、228.2、252.7 和 202.6 mg/kg。叶片 Zn 含量最低值出现在 135 天或 165 天 (图 4)，这可能是因为植物生长前期对 Zn 的吸收能力和需求量较大。

生长 195 天时植物茎、叶 Zn 吸收量分别达到最大值 (图 5)。此时 SM 紫花香薷和 JD、TL、ZJ 海州香薷叶片 Zn 吸收量分别为：2766、1001、1331 和 782 μg/株。并且此时紫花香薷叶片、茎秆 Zn 积累量大于 3 种海州香薷群体叶片、茎秆 Zn 积累量 (图 5)，这说明紫花香薷对 Zn 具有较好的适应能力和吸收富集性。

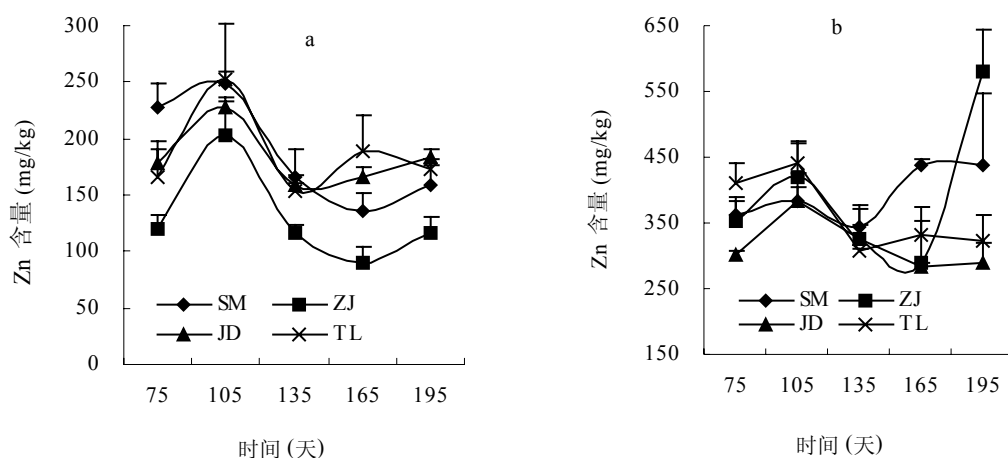


图 4 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Zn 含量

Fig. 4 Plant Zn concentration dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

在植物生长中期 (105 天或 135 天)，紫花香薷和 3 种海州香薷叶片中 Pb 含量低于植物生长的前、后期，11 月份 (195 天) SM 紫花香薷和 JD、TL、ZJ 海州香薷叶片样品中 Pb 含量分别为 21.4、23.3、23.6、26.4 mg/kg (图 6)。茎秆中 Pb 含量变化趋势

与叶片中相反，在植物生长中期含量高于植物生长前、后期。

叶片和茎秆中 Pb 的吸收量变化趋势相近，都随着香薷植物生长期延长吸收量逐渐增加，最后两次采集的紫花香薷和 3 种海州香薷叶片中 Pb 吸收量

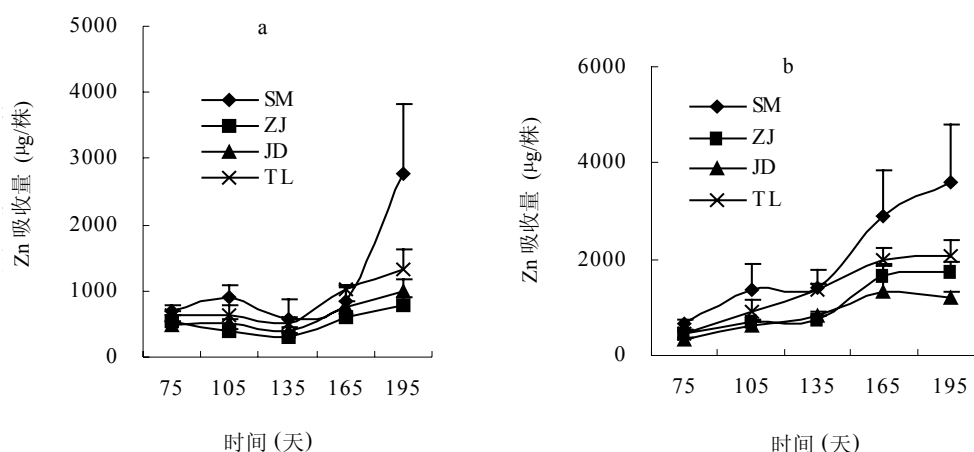


图 5 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Zn 吸收量

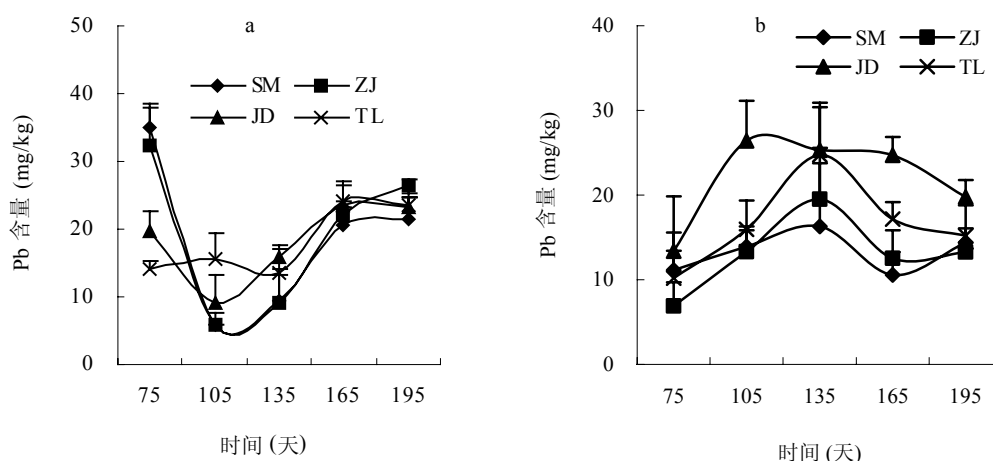
Fig. 5 Plant Zn uptake dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

图 6 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Pb 含量

Fig. 6 Plant Pb concentration dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其他 3 次采集的样品; 195 天时 4 种香薷植物茎秆中 Pb 积累量显著 ( $p < 0.05$ ) 大于 75 天时茎秆中 Pb 积累量。并且 195 天时紫花香薷叶片和茎秆中 Pb 积累量均分别大于 3 种海州香薷群体中的 Pb 积累量 (图 7)。

### 2.3 植物对 Cu、Zn、Pb 富集系数

吸收富集系数即重金属元素在植物地上部分含量与土壤对应元素含量之比, 可用来表征土壤—植物体中重金属元素迁移的难易程度。文献报道土壤

受重金属复合污染时, Cu、Zn、Pb 共存能够提高植物对几种重金属元素的吸收系数, 促进这些重金属元素在植物体内的迁移<sup>[7]</sup>。为明确 Cu、Zn、Pb 在海州香薷和紫花香薷体内的迁移特性, 分别计算了不同时期重金属在这两种香薷属植物茎、叶中的吸收富集系数。从表 1 可以看出, Cu 更易积累于香薷植物叶片中, 且香薷植物叶片 Cu 吸收富集系数随生长时间延长有增加趋势; Zn 则更易积累于香薷植物茎秆中。

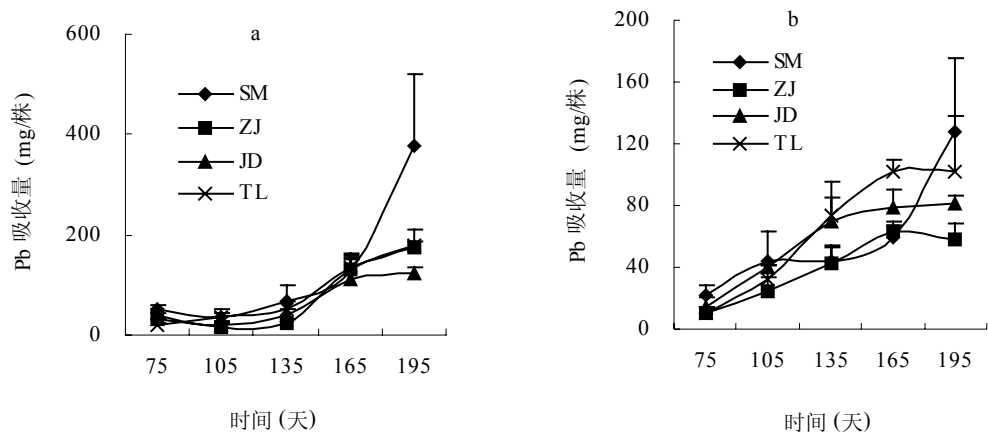


图 7 两种香薷属植物 (a) 叶片和 (b) 茎秆 Pb 吸收量  
Fig. 7 Plant Pb uptake dynamics of (a) leaf, and (b) stem of two *Elsholtzia* plants

表 1 两种香薷属植物不同时期茎叶对 Cu、Zn、Pb 的富集吸收能力  
Table 1 Bioconcentration factor of Cu, Zn and Pb of two *Elsholtzia* plants

| 金属元素 | 器官 | 香薷植物 | 重金属富集系数 |       |       |       |       |
|------|----|------|---------|-------|-------|-------|-------|
|      |    |      | 75 天    | 105 天 | 135 天 | 165 天 | 195 天 |
| Cu   | 叶片 | SM   | 0.028   | 0.042 | 0.045 | 0.060 | 0.057 |
|      |    | JD   | 0.019   | 0.024 | 0.034 | 0.036 | 0.037 |
|      |    | TL   | 0.023   | 0.023 | 0.024 | 0.047 | 0.042 |
|      |    | ZJ   | 0.022   | 0.044 | 0.049 | 0.057 | 0.062 |
|      | 茎秆 | SM   | 0.014   | 0.011 | 0.016 | 0.015 | 0.013 |
|      |    | JD   | 0.018   | 0.004 | 0.010 | 0.006 | 0.010 |
|      |    | TL   | 0.018   | 0.005 | 0.007 | 0.010 | 0.012 |
|      |    | ZJ   | 0.028   | 0.005 | 0.014 | 0.007 | 0.011 |
| Pb   | 叶片 | SM   | 0.150   | 0.025 | 0.041 | 0.089 | 0.092 |
|      |    | JD   | 0.085   | 0.039 | 0.068 | 0.101 | 0.101 |
|      |    | TL   | 0.060   | 0.067 | 0.058 | 0.104 | 0.102 |
|      |    | ZJ   | 0.140   | 0.025 | 0.039 | 0.095 | 0.114 |
|      | 茎秆 | SM   | 0.048   | 0.060 | 0.070 | 0.046 | 0.062 |
|      |    | JD   | 0.058   | 0.114 | 0.109 | 0.107 | 0.085 |
|      |    | TL   | 0.044   | 0.069 | 0.107 | 0.074 | 0.065 |
|      |    | ZJ   | 0.030   | 0.057 | 0.084 | 0.054 | 0.057 |
| Zn   | 叶片 | SM   | 0.213   | 0.233 | 0.156 | 0.128 | 0.149 |
|      |    | JD   | 0.166   | 0.214 | 0.148 | 0.155 | 0.171 |
|      |    | TL   | 0.156   | 0.237 | 0.143 | 0.177 | 0.163 |
|      |    | ZJ   | 0.113   | 0.190 | 0.109 | 0.084 | 0.109 |
|      | 茎秆 | SM   | 0.338   | 0.359 | 0.323 | 0.410 | 0.411 |
|      |    | JD   | 0.282   | 0.359 | 0.305 | 0.266 | 0.270 |
|      |    | TL   | 0.385   | 0.413 | 0.288 | 0.311 | 0.301 |
|      |    | ZJ   | 0.329   | 0.394 | 0.306 | 0.271 | 0.543 |

注：重金属富集系数 = 植物地上部重金属含量/土壤对应元素含量。

### 3 讨论

以上试验结果表明, 采自矿区的紫花香薷和 3 个地区的海州香薷群体对 Cu、Zn、Pb 复合污染土壤具有较强的耐性, 能够完成包括营养生长和生殖生长在内的整个生命史。魏树和等<sup>[13]</sup>对 18 种杂草对重金属的超积累特性研究后发现, 植物地上部生物量的高低与其地上部重金属的含量相关, 即地上部生物量较高的植物, 其地上部也可以对重金属的富集而达到较高含量。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, 极大地限制了植物修复的实际应用<sup>[4]</sup>。本试验采用的紫花香薷和海州香薷具有生物量大、生长快速的特点。据姜理英等<sup>[12]</sup>报道, 即使在全 Cu 含量高于 1200 mg/kg 的土壤上, 海州香薷的生物量也能达到 9 t/hm<sup>2</sup>, 远高于其他植物; 特别是紫花香薷, 该植物地上部生物量大于海州香薷地上部生物量。黄铭洪和骆永明<sup>[14]</sup>肯定了耐性植物在植物稳定修复中的作用, 在重金属污染土壤上种植金属耐受性植物可降低金属的移动性, 并减少进入食物链的金属的生物有效性, 有毒金属将会被固定在生态系统中, 减轻了通过风蚀和表土的风力传播所引起的迁移, 同时, 也可减少有毒金属因淋溶而进入地下水所引起的污染。

生长 195 天的紫花香薷和 3 种海州香薷群体地上部生物量分别显著大于其他 4 个采收时期的生物量。植物修复的效果取决于植物地上部重金属含量与生物量, 适当延长植物生长时间可使植物积累更多生物量, 从而提高修复效率。对紫花香薷和海州香薷而言, 其叶片开始脱落前收获为佳, 此时植物积累的生物量最大。Cu、Zn、Pb 全量分别为 223、1068 和 232 mg/kg 的土壤并没有使两种香薷属植物在生长过程中出现重金属毒害症状, 可能的原因有两点: ①紫花香薷和海州香薷对重金属的耐性; ②土壤较高的 pH 值降低了重金属的植物有效性。

蒋高明<sup>[8]</sup>在研究了油松针叶重金属含量动态变化后认为重金属在植物体内的变化是很复杂的, 油松针叶的 Cu、Zn 含量在整个生长季节均呈现下降趋势, 而 Pb 的含量在夏季时最高。王文卿等<sup>[10]</sup>在研究 5 种红树植物叶片重金属元素及动态变化时, 发现 5 种植物叶片元素含量顺序为 Zn>Cu>Pb, 随着叶片的生长发育, Pb 含量上升, Cu、Zn 含量下降。重金属元素从土壤进入根系木质部导管之后, 未被输导系统吸附固定的部分随蒸腾液流到叶片。

由于较老的叶片蒸腾强度大, 蒸腾周期长, 所以随着叶片从幼叶至成熟叶的发育过程, 到生长后期植物叶片 Cu、Zn 和 Pb 等元素含量有不同程度的升高。紫花香薷和海州香薷叶片 Cu 含量上升趋势明显, 而茎秆 Cu 含量则随生长期延长而呈现降低趋势, 这可能是由于茎秆生物量增大而产生了“稀释”效应。香薷植物生长前期, 茎秆 Cu 含量大于叶片 Cu 含量; 植物生长后期, 叶片是积累 Cu 的主要部位。茎秆对 Zn 的需求量高于叶片对 Zn 的需求量; Pb 在茎、叶中的含量相近。两种香薷属植物都可在重金属复合污染土壤上生存并完成整个生命史, 说明它们对重金属的耐性较强, 可作为先锋植物用于植被恢复和植物固定, 防止重金属污染物的进一步扩散。经过 195 天的生长, 紫花香薷地上部对 Cu、Zn、Pb 的吸收量均高于海州香薷, 其对 Cu、Zn、Pb 重金属复合污染土壤的修复效果可能会优于海州香薷。

### 4 小结

采自铜矿区的紫花香薷和 3 种海州香薷群体对 Cu、Zn、Pb 复合污染土壤具有耐性, 可在 Cu、Zn、Pb 全量分别为 223、1068 和 232 mg/kg 的土壤上完成整个生命周期, 并能积累较高的生物量。本试验条件下两种香薷属植物地上部 Cu、Zn、Pb 含量不高, 重金属在植物体内的含量变化很复杂, 但两种植物地上部重金属吸收量却在不断增加, 适当延长植物生长时间并选择合适的收获期有助于提高植物累积金属效果, 195 天收获的紫花香薷地上部对 Cu、Zn、Pb 的累积量均高于 3 种海州香薷群体。

### 参考文献:

- [1] 柯文山, 席红安, 杨毅, 王万贤, 陈世俭. 大冶铜绿山矿区海州香薷 (*Elsholtzia haichowensis*) 植物地球化学特征分析. 生态学报, 2001, 21 (6): 907-912
- [2] 姜理英, 杨肖娥, 叶海波, 石伟勇, 蒋玉根. 炼铜厂对周边土壤和作物体内重金属含量及其空间分布的影响. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2002, 28(6): 689-693
- [3] Lou LQ, Shen ZG, Li XD. The copper tolerance mechanisms of *Elsholtzia haichowensis*, a plant from copper-enriched soils. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51: 111-120

- [4] 李华, 骆永明, 宋静. 不同铜水平下海州香薷的生理特性和铜积累研究. 土壤, 2002, 34 (4): 225-228
- [5] Yang MJ, Yang XE, Römheld V. Growth and nutrient composition of *Elsholtzia splendens* Nakai under copper toxicity. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25: 1359-1375
- [6] Song J, Zhao FJ, Lou YM, McGrath SP, Zhang H. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. Environmental Pollution, 2004, 128: 307-315
- [7] 莫争, 王春霞, 陈琴, 王海, 薛传金, 王子健. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布. 环境化学, 2002, 21 (2): 110-116
- [8] 蒋高明. 承德市油松针叶硫及重金属含量动态及其与大气 SO<sub>2</sub> 之间的关系. 生态学报, 1995, 15 (4): 407-412
- [9] 郑文教, 郑逢中, 连玉武. 九龙河. 秋茄红树林镉铬镍元素的积累及动态. 环境科学学报, 1996, 16 (2): 232-237
- [10] 王文卿, 郑文教, 林鹏. 九龙江. 红树植物叶片重金属元素含量及动态. 台湾海峡, 1997, 16 (2): 233-238
- [11] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 2002
- [12] 姜理英, 杨肖娥, 叶正钱, 石伟勇. 海州香薷和紫花香薷对 Cu、Zn 的吸收和积累. 农业环境科学学报, 2003, 22 (5): 524-528
- [13] 魏树和, 周启星, 王新. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11 (2): 152-160
- [14] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003, 40(2): 161-169

## Growth and Metal Uptake Dynamics of Two *Elsholtzia* Plants on Cu, Pb and Zn Mixed-Contaminated Soils

WENG Gao-yi<sup>1,2</sup>, SUN Xiao-feng<sup>1,2</sup>, WU Long-hua<sup>1,2</sup>, LUO Yong-ming<sup>1,2</sup>

( 1 Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China )

**Abstract:** Pot experiment was conducted to determine the characters of heavy metal tolerance and uptake dynamics of two *Elsholtzia* plants on a long term Cu, Pb and Zn mixed-contaminated soil. The results showed that on this Cu, Pb, Zn mixed-contaminated soils, the plant heavy metal concentrations were changed and heavy metal uptakes were increased in two *Elsholtzia* plants along with plant growth period.

**Key words:** *Elsholtzia splendens*, *Elsholtzia argyi*, Mixed-contamination, Heavy metals, Uptake