

香薷属植物在重金属修复中的应用进展^①

唐明灯^{1,2}, 胡 锋², 吴龙华¹, 骆永明^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要: 香薷属植物应用于重金属修复经历了矿区植物资源调查和比较、室内模拟研究、田间规模修复以及修复后处置研究, 已经初步形成一个植物修复技术的完整体系。在现有技术条件下, 把生态修复模式、品种驯化及诱导剂“配方”应用到香薷属植物修复土壤重金属污染对提高修复效率具有重要意义。

关键词: 香薷; 铜; 植物修复; 应用前景

中图分类号: Q142.3; X53

土壤重金属污染相当普遍, 人为源是主要因素^[1-3]。统计目前已有文献, 我国除西部地区的西藏、青海、宁夏 3 省区尚没有重金属污染报道外, 其他行政

区都有土壤重金属污染报道 (图 1)。重金属进入土壤中不是一成不变的, 而是迅速参与土壤中各形态的分配重组, 并且不同形态之间保持动态平衡 (图 2)。

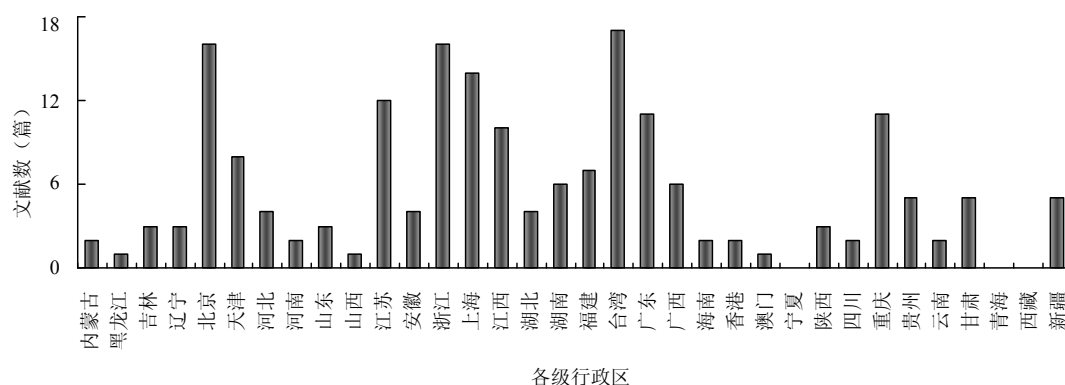


图 1 我国 35 个省级行政区土壤重金属污染文献报道数 (以维普与 Scencedirect 为数据库)

Fig. 1 Number of published papers on soils contaminated by heavy metals in provinces, China

土壤重金属污染有潜在的生态风险和健康风险。治理土壤重金属污染的方法论为驱动重金属各形态间的平衡向固定态移动及从土壤中去除重金属, 从而衍生出物理、化学、生物等多种土壤重金属污染修复方法^[4]。治理重金属污染土壤的指导方针是费效比低, 易于操作, 于是 20 世纪 80 年代欧洲和美国开始兴起了重金属污染土壤的植物修复技术, 其中最前景的是植物提取 (phytoextraction) 技术^[2]。

1 超富集植物及铜矿区植物资源调查

提高植物修复重金属污染土壤效率的关键在于寻找体内重金属浓度很高的植物: 超积累植物。嗣后全球掀起了寻找各种重金属 (超) 积累植物的高潮, 已经报道的超积累植物有 500 多种^[5], 多为草本植物, 研究较多的有重金属耐性植物印度芥菜 (*Brassica juncea*)^[6-7]、Zn 超积累植物遏兰菜 (*Thlaspi caerulescens*)^[8]、As 超积累植物蜈蚣草 (*Pteris vittata*)^[9-11]、Zn-Cd 超积累植物东南景天 (*Sedum alfredii* Hance)^[12-13]、Ni 超积累植物香雪球 (*Alyssum lesbiacum*)^[14]。

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)、国家自然科学基金重点项目 (40432005) 和中国科学院知识创新项目 (CXTD-Z2005-4) 资助。

* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 唐明灯 (1968—), 男, 湖南武冈人, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染植物修复研究。E-mail: njautmd@163.com

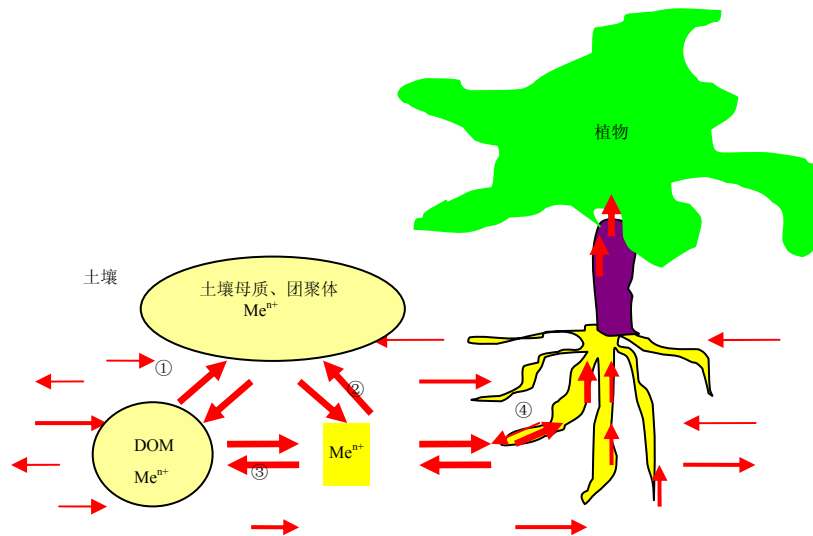


图2 根土界面金属形态的动态平衡

(土壤母质、团聚体- Me^{n+} 表示固定态金属离子；DOM- Me^{n+} 表示易于交换的金属离子； Me^{n+} 表示水合金属离子)

Fig. 2 Homeostasis of metals fractions in soil-root interface

植物体 Cu 的全量区间很窄，一般为 3 ~ 20 mg/kg，因为 Cu 的生物毒性是 Pb 的 8 倍^[15]，大多数植物 Cu 中毒的临界含量在 20 ~ 30 mg/kg 之间^[16]。Reeves 和 Baker^[17]统计出 Cu 的超积累植物已有 34 种(表 1)，但 Cu 的超积累植物主要分布在非洲铜矿区。早在 1953 年谢学锦和徐邦梁^[18]就报道过铜矿区海州香薷 (*Elsholtzia splendens* Nakai 或 *Elsholtzia Haichowensis* Sun) 植物体 Cu 含量很高；1998 年，Yang 等^[19]报道海州香薷为 Cu 的超积累植物。2000 年前后，经过对长江中下游铜矿区植物资源进行调查研究发现，海州香薷、鸭跖草 (*Commelina communis*) 和酸模 (*Rumex acetosa* Linn.) 是铜矿区的优势植物，其中海州香薷分布最普遍，鸭跖草是 Cu 超积累植物^[20](表 1)；从优势植物 Cu、Cd、Pb、Zn 等重金属含量来看，含量最高的是 Cu 元素^[21-22]。从矿区调查结果来看，海州香薷含 Cu 量超过 1000 mg/kg 的报道很少，仅在诸暨矿区有一个样点海州香薷 Cu 含量达 1000 mg/kg^[23]，其他报道都没有发现海州香薷 Cu 含量达到 1000 mg/kg^[20-22, 24]。矿区海州香薷不同器官 Cu 含量顺序为根 > 叶 > 茎^[22]，如果把花的含 Cu 量也包括在内，各器官 Cu 含量分配顺序为根 > 花 > 叶 > 茎^[21]。所以，从矿区调查来看，把海州香薷归入 Cu 超积累植物非常勉强，引起对海州香薷为 Cu 超积累植物的探讨，2004 年，Song 等^[25]通过土培实验验证海州香薷为 Cu 的耐性植物。

因海州香薷能在土壤裸露、生境贫瘠及铜矿区茂盛生长，生物量可达 9 t/hm²^[26]，植物体内 Cu 含量较高，从而为铜矿区生态重建和 Cu 污染土壤修复提供了物种

资源。虽然很多植物地上部 Cu 含量超过海州香薷，如：番薯属植物 (*Ipomea alpine*) 含 Cu 量达 12300 mg/kg^[27]，唇形科植物 *Aeollanthus subacaulis* var. *linearis* Cu 含量达 13700 mg/kg^[17](表 1)，但或因生物量低、或因超积累不稳定等多种原因，后续报道很少。由于植物富集重金属呈现亲缘(科属)特性^[28]，因而土壤重金属污染修复研究从海州香薷扩展到香薷属植物。从目前全球植物修复 Cu 污染土壤的文献来看，以香薷属这类具有一定 Cu 富集能力、生物量较大的耐 Cu 草本植物报道最多，达 50 多篇。

表 1 Cu 超积累植物及其最大 Cu 含量 (mg/kg)

Table 1 Potential copper hyperaccumulators and their max copper concentrations

科	种	产地	Cu 含量
苋科	<i>Pandaka metallorum</i>	刚果	6270
	<i>Celosia trigyna</i>	北美、非洲	2051
菊科	<i>Anisopappus chinesis</i>	中印泰、南非	1657
	<i>Anisopappus davyi</i>	刚果	3504
	<i>Gutenbergia pubescens</i>	中非	5095
	<i>Millotia myosotidifolia</i>	澳大利亚	2400
	<i>Vernonia petersii</i>	中非	1555
石竹科	<i>Minuartia verna hercynia</i>	中欧	1033
	<i>Silene cobalticola</i>	刚果	1660
鸭跖草科	<i>Commelina communis</i>	亚洲	1034
	<i>Commelina zigzag</i>	不详	1214

续表 1

旋花科	<i>Ipomoea alpina</i>	中非	12300
莎草科	<i>Ascolepis metallorum</i>	刚果	1211
	<i>Bulbostylis cupricola</i>	刚果	1523
	<i>Bulbostylis pseudoperennis</i>	刚果	7763
大戟科	<i>Monadenium cupricola</i>	刚果	1234
	<i>Phyllanthus williamoides</i>	刚果	1140
豆科	<i>Vigna dolomitica</i>	中非	3000
唇形科	<i>Aeollanthus subacaulis</i> var. <i>linearis</i>	中非	13700
	<i>Aeollanthus homblei</i>	不详	1113
	<i>Becium grandiflorum</i> var. <i>vanderystii</i>	东非	1135
	<i>Haumaniastrum katangense</i>	中非	9222
	<i>Haumaniastrum robertii</i>	刚果	2070
	<i>Haumaniastrum rosulatum</i>	刚果	1089
松科	<i>Abies balsamea</i>	北美	1120
禾本科	<i>Eragrostis racemosa</i>	非洲	2800
	<i>Rendilia altera</i>	南、中非	1560
	<i>Sporobolus congoensis</i>	南、中非	1671
凤尾蕨科	<i>Actiniopteris</i> sp.	中非	3535
玄参科	<i>Buchnera henriquesii</i>	中非	3520
	<i>Crepidiorhopalon perennis</i>	刚果	9322
	<i>Striga hermontheca</i>	东、西、北非	1105
椴树科	<i>Triumfetta dekindtiana</i>	中非	1283
	<i>Triumfetta digitata</i>	中非	1057

注：根据Reeves 和 Baker^[17]修改。

2 室内重金属污染修复模拟研究

2.1 Cu胁迫下香薷植物萌芽、形态和生物量的变化

香薷属植物虽然能耐受Cu等重金属^[25, 29]，但不论是水培试验^[30-41]还是土培试验^[25-26, 42-44]，香薷属植物都会受到抑制，同时其形态也发生变化；其形态变化首先表现在与土壤（溶液）直接接触的植物根系，其次是地上部分，因为影响其光合作用及蒸腾作用^[41]。

2.1.1 抑制萌芽 香薷种子对Cu耐性很强，低浓度Cu（不高于250 μmol/L）处理甚至对海州香薷种子萌发有刺激作用，即使Cu处理高达2000 μmol/L也没有完全抑制其发芽^[35]；Cu、Fe、Pb三者对海州香薷种子萌发抑制强弱顺序为Fe≈Pb>Cu^[30]。种子萌发后，低浓度Cu处理对海州香薷主根和胚轴的伸长有刺激效应，但主根对Cu浓度增加更敏感^[35]；高浓度Cu处理胚根伸出种皮1~2 cm立即变黑并停止生长^[30]。Cu处理下香薷幼苗生长的抑制效果随着Cu浓度升高而增强，并且效果显著，所以用幼苗生长能更好地反映海州香薷Cu胁迫下的毒害状况。另外，海州香薷幼苗生长最佳的

Cu处理是50~100 μmol/L^[31, 35]。

2.1.2 根系受抑 不同重金属处理下，香薷属植物根系行为表现不一。在Pb处理下，虽然海州香薷和紫花香薷（*Elsholtzia argyi*）90% 根的直径都小于0.6 mm，但海州香薷根长受到的抑制程度更大，且Pb处理显著影响海州香薷直径小于0.2 mm的根，从而根表面积显著减小，因此紫花香薷根系比海州香薷更能耐受Pb环境^[36]。Cu处理下香薷植株根系形态的响应与此不同，Cu处理在≤50 μmol/L时可促进海州香薷根的生长，而Cu处理对紫花香薷不同直径的根都有抑制作用，由此可知，海州香薷根系比紫花香薷更能耐受Cu毒害^[38]。

2.1.3 中毒症状 矿区生态种比非矿区生态种更能耐受Cu、Pb毒性，当非矿区生态种有中毒症状和生物量减小时，矿区种还能正常生长^[34, 39-40, 43]；非矿区生态种水培中毒Cu浓度为20 μmol/L左右^[34, 40]，土壤中中毒的Cu含量为300~600 mg/kg^[43]。海州香薷比紫花香薷更能耐受Cu毒性，紫花香薷出现中毒症状生物量减小时，海州香薷正常生长^[32-34, 37-38]，但来自铅锌矿区的紫花香薷比海州香薷耐Pb能力强^[36]；紫花香薷水培中毒Cu浓度为50~100 μmol/L^[37-38]。

香薷中毒症状有多种表现，将香薷预培养一段时间，然后Cu处理香薷一周左右出现失水萎蔫、生长受阻和根尖褐化、坏死等症状^[34, 38]。较严重的表现为：处理1天根变黑、叶萎蔫，处理3天植株死亡^[33]；长时间Cu处理，香薷出现叶色变紫或黄化、根变黑、长势弱和生物量小，甚至大量落叶等症状^[25, 37, 43]。

植株表现出中毒症状前，其细胞器结构已经出现明显变化。以海州香薷为例，透射电镜观测表明，在50 μmol/L Cu处理下，植株叶细胞中细胞器完整，但是根细胞器已出现损伤^[45]，这并非根对Cu更敏感，而是由于根与培养液直接接触，其含Cu量比叶片高得多；在100~250 μmol/L Cu处理下，根细胞器严重受损，而叶中的线粒体直到250 μmol/L Cu处理才严重受损，和核相比，过量Cu更容易破坏线粒体^[45]。所以，尽管在水培50 μmol/L Cu处理下海州香薷生长最佳^[31]，但香薷根已经开始出现了微观损伤。

2.2 香薷植物对Cu胁迫的生理响应

低浓度Cu处理对香薷叶绿素的含量有刺激作用^[42]，但如果设置的Cu处理浓度梯度太大，得到的结果为叶绿素含量随着Cu处理浓度的增加而降低^[31, 46]。与非矿区生态种相比，Cu处理对矿区生态种叶绿素含量

影响较小^[46-47]。在Cu处理对海州香薷根系活力影响方面,其效应是先抑制后升高^[42],抑制临界浓度为75 $\mu\text{mol/L}$ ^[31]。

在Cu²⁺氧化胁迫下,由于涉及到抗氧化酶的脱毒过程和平衡调节,导致低分子抗氧化物的耗竭^[48]。在低Cu处理下,海州香薷过氧化物酶(Peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性提高,高Cu处理受到抑制,0.5 mmol/kg Cu处理下活性最高^[42]。海州香薷非矿区生态种SOD和POD显著受到抑制时,其矿区生态种SOD和POD活性较高,故矿山生态种能及时清除Cu²⁺产生的氧自由基,保持细胞膜的完整性,从而不易出现外观症状^[46-47]。另一方面,矿区生态种抗坏血酸、还原型谷胱甘肽、总抗氧化能力都显著高于非矿区种,丙二醛含量显著低于非矿区种,所以矿区香薷耐Cu毒性能力强^[43]。

海州香薷地上部积累的Cu大部分是水溶性Cu,达总含量的42%~93%,植物体内Cu含量越高,谷胱甘肽(GSH)和蛋白巯基浓度降低越显著;GSH和蛋白巯基的浓度,尤其是蛋白巯基的浓度,在叶中的含量比根高得多,有利于解除Cu毒。进一步用Sephadex G-50凝胶色谱柱过滤洗提到3个含有大量Cu的蛋白紫外吸收峰^[35, 49]。同时,海州香薷叶中氨基酸也进行相应的生理响应以减轻Cu对植物的毒害作用, γ -氨基丁酸和His显著增加^[50]。

施积炎等^[51]用Sephadex G-50凝胶对海州香薷根匀浆液进行洗提得到2个含Cu量很高的蛋白质峰;用同步辐射X射线荧光(SRXRF)对两铜蛋白主要元素进行分析,两蛋白含S量很低,可见,根铜蛋白并不是含S量较高的金属硫蛋白(MTs)或植物络合肽(PCs)。

通过2,4-二硝基苯酚、钒酸钠^[52]、LaCl₃等对香薷吸收Cu的影响表明,海州香薷吸收Cu与ATP、P型-ATP酶、钙离子通道蛋白密切相关^[40, 53]。

2.3 香薷植物体内的金属分配

Baker和Walker^[27]认为对不同种植物内部Cu的分布规律进行比较,可以得出其内部耐性机制的差异。海州香薷在室内培养和野外矿区生长其金属的器官分布大体一致,根Cu含量最高^[25, 31, 34-35, 38, 44-45, 53],并且Cu结合在根细胞壁上^[25, 35];其次是茎;最后是叶^[34, 38, 45]。进一步分析,茎中Cu含量由高到低顺序为维管束>皮层>表皮;叶中Cu含量高低顺序为叶肉>叶表皮>香毛簇^[54]。唐世荣^[55]推测Cu以Cu-维生素化合物的形式存在于香薷叶内。

Peng等^[45]利用差速离心技术得出:在Cu胁迫

条件下,Cu在海州香薷根(叶)细胞器中的分配规律一致,即细胞壁>质体(叶绿体)>可溶性Cu>核糖体>线粒体>细胞核;但在正常Cu供应水平下,叶绿体Cu含量大于叶细胞壁;那么在液泡破损细胞中,Cu主要定位在细胞壁和叶绿体。在液泡完整细胞中,矿区香薷Cu主要分布在液泡、细胞壁、叶绿体膜等细胞器^[56],可见Cu胁迫下香薷将Cu贮存在液泡和细胞壁进行解毒。显微技术表明,过剩的Cu、Pb以微粒形式分布在细胞壁和细胞膜之间^[40, 43]。

由于海州香薷地上部分Cu含量不高,地下部Cu含量很高,根在耐Cu功能上起到重要作用,确认它为Cu的耐性植物,可以作为Cu污染场地植物修复的植物资源^[25, 37]。

2.4 香薷属植物修复的强化措施

海州香薷地上部Cu含量常不到1000 mg/kg,尽管Yang等^[57]在水培条件下获得海州香薷转移Cu的最高记录(3417 mg/kg DW)。应用多种措施提高其地上部Cu含量,所用措施是香薷属植物生理的模拟和强化,如海州香薷根系分泌草酸等以提高Cu的植物有效性^[58]。

2.4.1 化学强化剂 化学强化剂在植物修复中的应用始于20世纪90年代^[59],施加化学剂的目的是提高Cu的水溶性和迁移性^[60]。用乙二胺四乙酸(EDTA)提高海州香薷对Cu污染土壤的修复效果;另一方面EDTA使植物萎蔫,生物量减少^[61-62]。和铜矿区土壤相比,Yang等^[63]认为EDTA更有利于香薷修复因冶炼Cu而污染的水稻土。EDTA与EDDS(乙二胺二琥珀酸)相比,前者有利于土壤Pb、Cd的溶解及在植物中的累积,后者有利于土壤Cu、Zn的溶解并增加植物地上部的累积量^[64]。

Chen等^[65]通过变性梯度凝胶电泳(DGGE)、微生物群落结构指纹发现:施加葡萄糖和柠檬酸显著提高了海州香薷根际土壤有效态Cu含量,但对微生物结构没有影响。

2.4.2 生物强化剂 Yang等^[66]认为通过根系-微生物互作可以活化根际重金属。假单孢菌和白腐真菌对污染土壤Cu、Zn都有活化作用^[58];无色细菌属菌株B,能将培养液中沉淀态Cu显著活化^[67];王发园等^[68]添加菌根真菌对海州香薷生物量增加有极其显著影响;Wang等^[69]将多种菌根真菌接种到Cu、Zn、Pb、Cd等重金属复合污染土壤中,也显著提高海州香薷的生物量。另外,能耐受3 mmol/L Cu的假单孢菌对土壤Cu可能有一定的活化作用^[70]。

虽然根际微生物对植物萃取重金属的含量影响不大,但能提高植物生物量及抗重金属毒害能力,因此

进行植物修复时添加根际微生物也是一种有效途径^[71]。

2.4.3 生物-化学强化剂 耐Cu细菌MS3显著活化息生土壤中的Cu,细菌MS3与乙酰丙酮匹配活化效果更佳^[72]。翁高艺等^[73]用EDDS+苏格兰球囊霉处理海州香薷,叶片中Cu含量达847 mg/kg。Ni等^[74]把海州香薷和紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 接种根瘤菌共培养,并施加EDTA,香薷地上部Cu、Zn、Pb含量显著增加。

3 田间重金属修复应用研究

早在2000年海州香薷就在浙江富阳田间应用^[3],是世界少有的规模修复试验,得到2000年参加第一届国际土壤污染与修复学术大会与会代表的肯定,修复试验现在还在进行。由于外加Cu比长期污染的Cu更易吸收^[75]及田间的复杂性,与室内试验相比,田间的修复效率更低,即使施加各种诱导措施仍不乐观^[76-81]。在田间修复当中,不同生育期收获对修复效果也有影响,成熟期收获的修复效果是花蕾期收获的2倍^[76-77]。田间盆栽试验表明,EDDS虽然使可提取态重金属显著提高,但对地下水没造成污染,水质仍符合地下饮用水水质标准^[78-79]。

4 修复植物的处置方法

植物修复重金属污染后自身成了“有害物”,对其采取的措施有焚烧、压缩填埋、高温分解、灰化、液相萃取、堆腐等^[3, 82]。由于香薷属植物具芳香^[83]、含多种抗菌成分^[84],并且在中国药用植物志中多有收录,如:香薷(别名红紫苏, *Elsholtzia ciliate* (Thunb.) Hylander)^[85],及另一种广布于欧亚的香薷(别名山苏子, *Elsholtzia patrinii* Garcke)^[86];药效成分系其挥发油,香薷药用主要集中在中国和其他东亚国家^[84, 87-88]。彭红云和杨肖娥^[3]建议对修复植物香薷资源化利用,加工成防腐剂、植物源农药,或加工成香料产品^[88]。鉴于部分地区缺Cu,小麦穗而不实^[89],将修复植物海州香薷研制成堆肥,可显著改善冬小麦的生长状况,提高冬小麦籽实量^[90-91]。

5 问题与展望

香薷属植物修复Cu污染土壤已初具规模,并形成一个完整的体系。同时,研究手段从单一光谱技术走向多种大型仪器的联用(如电子显微镜、高效液相色谱、气相色谱、凝胶电泳、同步辐射X射线荧光光谱等),对香薷属植物吸收富集Cu的机制探讨得相当深入;但由于受制于整个世界微观技术和分子生物学技术发展现状,Cu跨越植物生理屏障的关键机制仍然不清楚,

Cu长距离运输的载体和动力未确定,香薷根部滞留Cu的原因尚未探明;另一方面,各种化学、生物强化剂对香薷植物转移重金属的影响因素多,采自矿区的种子生长状况及金属吸收性等差异大,甚至有时香薷体内Cu含量与普通植物无异^[81],这些都容易掩盖事实的真像。

彭红云等^[3]认为运用现代实时检测手段,将基因组学、蛋白质组学、生物代谢组学和金属组学有机地结合来解决以上问题,这无疑是未来研究的主要内容和远景方向,亟需长期艰苦的努力。

但要在近期解决香薷属植物修复重金属污染的难题,也许越“原始”就越可靠。首先要构建生态修复模式,运用多种生物物种进行“立体”修复,诸如土壤施加微生物后,香薷和Zn、Cd超积累景天植物进行套种,另外土壤动物对提高修复效率的作用也很明显^[92];其次是品种驯化,从矿区诱导筛选具有Cu富集基因并能耐受Cu毒害的香薷植株(种子);最后,化学诱导剂对金属的活化效果超过生物作用,经优化组合能得到效果最佳的化学-微生物-香薷重金属修复“配方”。

参考文献:

- [1] Nriagu JO. Global metal pollution: Poisoning the biosphere. *Environment*, 1990, 32(7): 7-33
- [2] 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
- [3] 彭红云, 杨肖娥. 香薷植物修复铜污染土壤的研究进展. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 195-199
- [4] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展. *环境科学*, 1997, 18(3): 72-76
- [5] 周乃元, 王仁武. 植物修复—治理土壤重金属污染的新途径. *中国生物工程杂志*, 2002, 22(5): 53-57
- [6] Ebbs SD, Kochian L. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environmental Science & Technology*, 1998, 32: 802-806
- [7] Wei ZG, Wong JWC, Hong FS, Zhao HY, Li HX, Hu F. Determination of inorganic and organic anions in xylem saps of two contrasting oilseed rape (*Brassica juncea* L.) varieties: Roles of anions in long-distance transport of cadmium. *Microchemical Journal*, 2007, 86(1): 53-59
- [8] Assunção AGL, Bookum WM, Nelissen HJM, Vooijs R, Schat H, Ernst WHO. Differential metal-specific tolerance and accumulation patterns among *Thlaspi caerulescens* populations originating from different soil types. *New Phytologist*, 2003, 159: 411-419
- [9] Ma LQ, Komar KMM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED. A

- fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409: 579
- [10] 陈同斌, 韦朝阳, 黄则春, 黄启飞, 鲁全国, 范稚莲. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特性. *科学通报*, 2002, 47(3): 207-210
- [11] Wang JR, Zhao FJ, Meharg AA, Raab A, Feldmann J, McGrath SP. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. *Plant Physiology*, 2002, 130: 1552-1561
- [12] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 傅承新. 东南景天 (*Sedum alfredii* Hance)——一种新的砷超积累植物. *科学通报*, 2002, 47(13): 1003-1006
- [13] Yang XE, Long XX, Ye HB, He ZL, Calvert DV, Stofella PJ. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant and Soil*, 2004, 259: 181-189
- [14] Broadhurst CL, Chaney R, Angle JS, Erbe EF, Mangel TK. Nickel localization and response to increasing Ni soil levels in leaves of the Ni hyperaccumulator *Alyssum murale*. *Plant and Soil*, 2004, 265: 225-242
- [15] Fargašová A. Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots. *Biologia Plantarum*, 2001, 44(3): 471-473
- [16] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press, 1995
- [17] Reeves RD, Baker AJM. Metal-accumulating plants // Raskin I, Enslen BD. Phytoremediation of Toxic Metals-Using Plants to Clean up the Environment. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2000
- [18] 谢学锦, 徐邦梁. 铜矿指示植物海州香薷. *地质学报*, 1953, 32(4): 360-368
- [19] Yang XE, Shi WY, Fu CX, Yang MJ. Copper-hyperaccumulators of Chinese native plants: Characteristics and possible use for phytoremediation // Bassam NEL. Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry. London, UK: James, James Publishers Ltd, 1998: 484-489
- [20] 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(1): 7-12
- [21] 柯文山, 王万贤, 杨毅. 海州香薷种群微量金属元素的累积分布特征. *环境科学与技术*, 2000, 90: 41-44
- [22] 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
- [23] 姜理英, 石伟勇, 杨肖娥, 傅承新, 陈伟光. 铜矿区超积累铜植物的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 906-908
- [24] Tang SR, Wilke BM, Huang CY. 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
- [25] Song J, Zhao FJ, Luo 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
- [26] Jiang LY, Yang XE, He ZL. Growth response and phytoextraction of copper at different levels in soils by *Elsholtzia splendens*. *Chemosphere*, 2004, 55: 1179-1187
- [27] Baker AJM, Walker PL. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants // Shaw AJ. Heavy Metal Tolerance in Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1990: 155-177
- [28] Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP. Arsenic hyperaccumulation by different fern species. *New Phytologist*, 2002, 156: 27-31
- [29] Tang SR, Wilke BM, Brooks R. Heavy-metal uptake by metal-tolerant *Elsholtzia haichowensis* and *Commelina communis* from China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(5/6): 895-905
- [30] 李锋民, 熊治廷, 王狄, 王新力. 铜铁铅单一及复合污染对铜草幼苗生长的影响. *农业环境保护*, 2001 (2): 71-73, 77
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Jiang LY, Yang XE, Ye ZQ, Shi WY. Uptake, distribution and accumulation of copper in two ecotypes of *Elsholtzia*. *Pedosphere*, 2003, 13(4): 359-366
- [34] Jiang LY, Yang XE, Shi WY, Ye ZQ, He ZL. Copper uptake and tolerance in two contrasting ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(12): 2067-2083
- [35] 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
- [36] Peng HY, Tian SK, Yang XE. Changes of root morphology and Pb uptake by two species of *Elsholtzia* under Pb toxicity. *Journal of Zhejiang University Science*, 2005, 6B(6): 546-552
- [37] Weng GY, Wu LH, Wang ZQ, Luo YM, Christie P. Copper uptake by four *Elsholtzia* ecotypes supplied with varying levels of copper in solution culture. *Environment International*, 2005, 31: 880-884
- [38] 田生科, 李廷轩, 彭红云, 杨肖娥, 李廷强, Ejaz. 铜胁迫对海州香薷和紫花香薷根系形态及铜富集的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 97-100, 183
- [39] Islam E, Yang XE, Li TQ, Liu D, Jin XF, Meng FH. Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(3): 806-816

- [40] 柯文山, 熊治廷, 柯世省, 金则新. 两个海州香薷种群根对 Cu 的吸收及 Cu 诱导的 ATP 酶活性差异. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1214-1221
- [41] 柯文山, 熊治廷, 柯世省, 金则新. 铜毒对海州香薷 (*Elsholtzia splendens*) 不同种群光合作用和蒸腾作用的影响. 生态学报, 2007, 27(4): 1368-1375
- [42] 李锋民, 熊治廷, 胡洪营. 海州香薷对铜的蓄积及铜的毒性效应. 环境科学, 2003, 24(3): 30-34
- [43] 谢明吉, 柯文山, 王万贤, 熊治廷, 吴明煜, 陈建军. 铜胁迫下两种海州香薷的膜脂过氧化水平及抗氧化能力比较. 生态学杂志, 2005, 24(8): 935-938
- [44] 柯文山, 熊治廷, 谢明洁, 熊双莲, 黄河, 李民敬. 不同来源的海州香薷和野胡萝卜的铜抗性及其铜积累差异. 环境工程学报, 2007, 1(5): 94-100
- [45] Peng HY, Yang XE, Tian SK. Accumulation and ultrastructural distribution of copper in *Elsholtzia splendens*. Zhejiang University Science, 2005, 6B(5): 311-318
- [46] 刘杰, 熊治廷, 黄河. Cu²⁺ 胁迫下海州香薷生理反应的种群差异. 武汉大学学报 (理学版), 2004, 50(6): 726-730
- [47] Liu J, Xiong ZT. Differences in accumulation and physiological response to copper stress in three populations of *Elsholtzia haichowensis* S. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 168(1-4): 5-16
- [48] Demirevska-Kepova K, Simova-Stoilova L, Stoyanova Z, Holzer R, Feller U. Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52(3): 253-266
- [49] Qian M, Li XD, Shen ZG. Adaptive copper tolerance in *Elsholtzia haichowensis* involves production of Cu-induced thiol peptides. Plant Growth Regulation, 2005, 47(1): 65-73
- [50] Yang XE, Peng HY, Tian SK. Gama-aminobutyric acid accumulation in *Elsholtzia splendens* in response to copper toxicity. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6B(2): 96-99
- [51] 施积炎, 陈英旭, 袁小凤, 武贝, 黄宇营, 何伟. 同步辐射 X 荧光分析海州香薷根中铜结合蛋白的微量元素. 核技术, 2004, 27(10): 736-739
- [52] Williams LE, Pittman JK, Hall JL. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. Acta Biochimica et Biophysica Sinica, 2000, 1465: 104-126
- [53] 施积炎, 陈英旭, 田光明, 林琦. 海州香薷和鸭跖草铜吸收机理. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 642-646
- [54] Shi JY, Chen YX, Huang YY, He W. SRXRF microprobe as a technique for studying elements distribution in *Elsholtzia splendens*. Micron, 2004, 35: 557-564
- [55] 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(2): 128-129
- [56] Ni CY, Chen YX, Lin Q, Tian GM. Subcellular localization of copper in tolerant and non-tolerant plant. Journal of Environmental Sciences (China), 2005, 17(3): 452-456
- [57] Yang MJ, Yang XE, Römhild V. Growth and nutrient composition of *Elsholtzia splendens* Nakai under copper toxicity. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25: 1359-1375
- [58] 施积炎, 陈英旭, 林琦, 王远鹏. 根分泌物与微生物对污染土壤重金属活性的影响. 中国环境科学, 2004, 24(3): 316-319
- [59] Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, Baker AJM. Phytoremediation of soil metals. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3): 279-284
- [60] 卢信, 赵炳梓, 张佳宝, 龚键东. 不同可溶性有机碳对铜在土壤迁移的影响. 土壤学报, 2007, 44(3): 418-424
- [61] 李锋民, 熊治廷, 胡洪营. 螯合剂对铜毒性影响. 环境科学, 2003, 24(6): 96-100
- [62] Jiang LY, Yang XE. Chelators effect on soil Cu extractability and uptake by *Elsholtzia splendens*. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(4): 450-456
- [63] Yang XE, Peng HY, Jiang LY. Phytoextraction of copper from contaminated soil by *Elsholtzia splendens* as affected by EDTA, citric acid, and compost. International Journal of Phytoremediation, 2005, 7(1): 69-83
- [64] 钱猛, 沈振国, 魏岚. 螯合剂 EDDS 和 EDTA 诱导海州香薷积累土壤重金属的比较研究. 农业环境科学, 2006, 25(1): 113-118
- [65] Chen YX, Wang YP, Wu WX, Lin Q, Xue SG. Impacts of chelate-assisted phytoremediation on microbial community composition in the rhizosphere of a copper accumulator and non-accumulator. Science of the Total Environment, 2006, 356: 247-255
- [66] Yang XE, Feng Y, He ZL, Stoffella PJ. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4): 339-353
- [67] 江春玉, 盛下放, 夏娟娟. 重金属铜抗性菌株的筛选及其生物学特性的研究. 生态学杂志, 2005, 24(1): 6-8
- [68] 王发园, 林先贵, 尹睿. 丛枝菌根真菌对海州香薷生长及其 Cu 吸收的影响. 环境科学, 2005, 26(5): 174-180
- [69] Wang FY, Lin XG, Yin R, Wu LH. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth of *Elsholtzia splendens* and *Zea mays* and the activities of phosphatase and urease in a multi-metal-contaminated soil under unsterilized conditions. Applied Soil Ecology, 2006, 31: 110-119
- [70] Chen XC, Shi JY, Chen YX, Xu XH, Xu SY, Wang YP. Tolerance and biosorption of copper and zinc by *Pseudomonas putida* CZ1 isolated from metal-polluted soil. Canadian Journal of Microbiology, 2006, 52(4): 308-316
- [71] Wu SC, Cheung KC, Luo YM, Wong MH. Effects of inoculation

- of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. Environmental Pollution, 2006, 140(1): 124–135
- [72] Chen YX, Wang YP, Lin Q, Luo YM. Effect of copper-tolerant rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*. Environment International, 2005, 31: 861–866
- [73] 翁高艺, 汪自强, 吴龙华, 骆永明, 宋静, 钱薇, 林琦, 王发园, 蒋玉根, 戴学龙, 裘希雅. 可降解络合剂及微生物调控对海州香薷修复污染土壤的效应. 土壤, 2005, 37(2): 152–157
- [74] Ni CY, Shi JY, Luo YM, Chen YX. “Co-culture engineering” for enhanced phytoremediation of metal contaminated soils. Pedosphere, 2004, 14(4): 475–482
- [75] 李宁, 吴龙华, 李法云, 骆永明. 不同铜污染土壤上海州香薷生长及铜吸收动态. 土壤, 2006, 38(5): 598–601
- [76] Peng HY, Yang XE, Jiang LY, He ZL. Copper phytoavailability and uptake by *Elsholtzia splendens* from contaminated soil as affected by soil amendments. Journal of Environmental Science and Health, Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2005, 40(4): 839–856
- [77] Peng HY, Yang XE. Distribution and accumulation of copper, lead, zinc, and cadmium contaminants in *Elsholtzia splendens* grown in the metal contaminated soil: A field trial study. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, 75(6): 1115–1122
- [78] 裘希雅, 孙小峰, 何旭华, 蒋玉根, 吴龙华, 胡宁静, 骆永明, 戴学龙. 施用 EDDS 对海州香薷铜锌吸收到强化作用及淋溶风险. 浙江农业学报, 2006, 18(2): 86–89
- [79] 孙小峰, 吴龙华, 骆永明. EDDS 对海州香薷修复重金属复合污染土壤的田间效应. 土壤, 2006, 38(5): 609–613
- [80] Wu LH, Sun XF, Luo YM, Xing XR, Christie P. Influence of [S, S]-EDDS on phytoremediation of copper and zinc by *Elsholtzia splendens* from metal-contaminated soil. International Journal of Phytoremediation, 2007, 9: 228–241
- [81] Wang FY, Lin XG, Yin R. Role of microbial inoculation and chitosan in phytoextraction of Cu, Zn, Pb and Cd by *Elsholtzia splendens*—A field case. Environmental Pollution, 2007, 147: 248–255
- [82] 李宁, 吴龙华, 孙小峰, 李法云, 骆永明. 修复植物产后处置技术现状与展望. 土壤, 2005, 37(6): 587–592
- [83] 于宝章, 王遂义. 河南植物志(第3册). 郑州: 河南科学技术出版社, 1997
- [84] Kim DW, Son KH, Chang HW, Bae K, Kang SS, Kim HP. Anti-inflammatory activity of *Elsholtzia splendens*. Archives of Pharmacal Research, 2003, 26(3): 232–236
- [85] 上海第一医学院药系生药学教研组编. 杭州药用植物志. 上海: 上海科学技术出版社, 1961
- [86] 刘慎谔主编. 东北药用植物志. 北京: 科学出版社, 1959
- [87] 罗光明, 杨光义, 刘红宇, 陈岩, 李霞, 杨雅琴. 江香薷挥发油提取工艺优化. 中药材, 2006, 3: 284–286
- [88] Peng HY, Yang XE. Volatile constituents in the flowers of *Elsholtzia argyi* and their variation: A possible utilization of plant resources after phytoremediation. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6B(2): 91–95
- [89] Qin SC, Luo YM, Huang CY, Wu Z, Zhu LC. Study on “Blind-Ear”-copper deficiency symptom in wheat on subtropic hill soils. Pedosphere, 1992, 2(1): 85–92
- [90] 吴龙华, 李宁, 李振高, 骆永明. 利用修复植物海州香薷制作含铜有机肥料的方法: 中国, CN200610037757.3. 2006
- [91] 唐明灯, 吴龙华, 李宁, 骆永明, 胡锋, 张良兴. 修复植物香薷堆肥对缺铜土壤上冬小麦生长和铜吸收的初步研究. 土壤, 2006, 38(5): 614–618
- [92] 林淑芬, 李辉信, 胡锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响. 土壤学报, 2006, 43(6): 911–918

Progresses on Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils Using *Elsholtzia* Plants

TANG Ming-deng^{1,2}, HU Feng², WU Long-hua¹, LUO Yong-ming¹

(¹ Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The application of *Elsholtzia* plants to the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals has experienced a series of processes, i.e. plants resource survey and comparison, pot simulation study, field remediation experiments and disposals of after phytoremediation, then formed a complete remediation system. Under current biotechnology, it is important for the higher phytoremediation efficiency by *Elsholtzia* plants: 1) to rehabilitate pollution sites by several life-forms as a three-dimensional ecosystem, 2) to screen *Elsholtzia* plants with stable genotype of high accumulation of more heavy metals, and 3) to optimize combination between chemicals and microorganisms for heavy metal accumulation in plant shoots.

Key words: *Elsholtzia* plant, Copper, Phytoremediation, Application