

重金属污染土壤的 香薷植物修复研究

骆永明 等著



科学出版社

重金属污染土壤的香薷植物修复研究

骆永明 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结重金属污染土壤的香薷植物修复研究成果,是国内外第一部关于香薷植物应用于污染土壤修复的专著。全书共12章,全面介绍香薷植物的种类与分布、生长习性与特性、对重金属的耐性与吸收、富集重金属的生理机制、植物修复技术与调控、修复后植物处置与综合利用技术等研究进展,突出植物修复这种绿色环境技术的理念与实践,对污染土壤的植物修复理论与技术的研究和发展具有重要的学术价值和指导意义。

本书可作为土壤学、环境科学、生态学、农学、植物生理学等领域科研工作者、技术人员的参考书,也可作为高等院校、研究所相关专业研究生课程的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

重金属污染土壤的香薷植物修复研究/骆永明等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033589-0

I. ①重… II. ①骆… III. ①香薷-作用-重金属污染:土壤污染-污染防治 IV. ①X173②X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 025646 号

责任编辑:韩 鹏 李 锋 卜 新/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年3月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:313 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

土壤污染是世界各国关注的重要环境问题之一。随着社会经济的高速发展和高强度的人类活动,排放的多种毒害污染物在土壤中不断积累,超过自然净化能力,使土壤环境容量大幅缩小,环境质量持续恶化。目前,我国土壤污染类型与日俱增,污染范围不断扩大,土壤生态与环境功能日益损害。农业土壤污染已从局部向区域蔓延,农产品安全更加令人担忧。与此同时,工业化和城市化迅猛发展,加之东部沿海发达地区新一轮“产业转移”政策实施,大量原在城市的工厂、企业被搬迁或遗弃,污染场地不断增多,土地安全利用和人居环境健康问题备受关注,已经引起党和国家的高度重视。

据估计,按现行的国家土壤环境质量标准评价,我国受重金属等污染的耕地面积在千万公顷以上。土壤污染,通常是无色无味的积累性污染,不像大气和水体污染那样易为人们察觉,具有隐蔽性和潜伏性。土壤一旦遭到污染,因土壤持留作用,污染物难被清除,质量难被修复,功能难被恢复,土壤污染往往具有持久性和不可逆性。土壤中污染物可以通过水气迁移转化和生物吸收积累,降低作物产量与品质,或者危害生态系统和人类健康,造成严重的后果。鉴于土壤重金属污染的普遍性和严重性,一些欧美发达国家早在 20 世纪八九十年代就纷纷制定相应的污染土壤修复计划,包括植物修复及联合修复技术。

土壤重金属污染的植物修复(phytoremediation)始于 20 世纪 80 年代初,其主要原理是利用具有超积累功能的植物对高浓度金属的忍耐性和高度富集性(通常比一般植物高 100 倍以上)来净化或控制土壤中镍、镉、砷^①、锌、铅、铜等重金属污染。与传统的物理、化学和工程措施相比,植物修复具有如下优点:①低成本,有时还有经济效益;②绿色生态,能维持土壤原状,并起绿色美化作用;③环境友好,修复植物能被集中安全处理,不易造成二次污染;④公众易接受,植物修复是一个自然净化过程。但是,植物修复有其局限性,主要是修复速度慢,植物生长受多因素影响,推广难。

重金属污染土壤的植物提取(phytoextraction)修复是植物修复原理之一,其修复效率取决于植物的生物量和重金属浓度。因此,超积累植物资源的发现与鉴定是植物修复的重要研究内容。全世界报道的重金属超积累植物有 500 余种。其中,铜的超积累植物有几十种,但是不少植物后来被证明只是高积累的耐性植物。主要原因在于铜与其他重金属不同,它是植物必需元素,同时对植物毒性较大,能致植物铜毒害的临界浓度较低。

海州香薷是我国早期发现的铜矿区指示植物,曾被报道为铜的超积累植物。后来我们的工作证明,它对铜的积累量波动性大,是一种高产、耐毒、富铜、美景的绿色植

① 砷为非金属元素,但其对环境的污染习惯上归类于重金属污染。——作者注

物,适用于矿区、冶炼场地及周边重金属复合污染土壤的植物修复。海州香薷和其他香薷属植物是在我国作为修复植物得到长期研究并被应用于污染土壤修复的植物,曾是我国第一个植物修复基地(浙江富阳基地)的主要修复植物。近十年来,中国科学院南京土壤研究所、浙江大学等单位研究小组在中国科学院“百人计划”、国家自然科学基金、973计划、863计划环境技术领域等课题的资助下,通过调查、实验与示范,开展香薷植物的种类与分布、生长习性与特性、对重金属的耐性与吸收、富集重金属的生理机制、植物修复技术与调控、修复后植物处置与综合利用技术等系统性研究。本书是我们多年研究工作的系统总结与集体结晶。值得指出的是,本书更多的是体现我们对植物修复这种绿色环境技术的理念与实践。香薷植物具有对重金属污染土壤的修复潜力,关键是提高其地上部分的积累量,这有待于土壤-根际-植物系统机理与长期田间试验研究。

本书是国内外第一部关于香薷植物应用于重金属(特别是铜)污染土壤修复的专著。本书从香薷植物的生长特性、对重金属的耐性与吸收机理、污染土壤修复应用、修复后植物综合利用与处置等四方面分12章介绍最新研究进展,以期为我国土壤污染的植物修复理论与技术研究及发展提供借鉴。本书内容框架由骆永明研究员拟定和完成。全书由骆永明统稿、定稿。参加撰写的主要人员有:浙江大学的石伟勇(第一、九、十章)、陈英旭(第二章)、林琦(第二章)、中国科学院南京土壤研究所吴龙华(第二、三、四、六、八、十一章)、宋静(第三、四章)、唐明灯(第四、五章)、林先贵(第五章)、王发园(第五章)、蒋明星(第七章)、彭红云(第九章)、王国庆(第十二章)等。在此,对参加本书相关研究工作的科研人员和研究生表示诚挚的谢意!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位同人批评、指正。

骆永明

2010年7月于南京

目 录

前言

第一章 香薷植物的分布及生境	1
第一节 香薷植物的分布与生物学特性	1
第二节 香薷植物的元素组成和功能	4
第三节 香薷植物的生境	8
参考文献	10
第二章 香薷植物修复重金属污染的生理生化基础	11
第一节 香薷植物对重金属的耐性	11
第二节 香薷植物对重金属及养分的吸收和积累	17
参考文献	36
第三章 香薷植物修复的施肥调控	39
第一节 氮素形态对海州香薷生长和铜吸收的影响	39
第二节 氮肥和磷肥联合施用对海州香薷铜富集的调控作用	44
参考文献	48
第四章 香薷植物修复的增溶剂调控	50
第一节 有机制剂在重金属污染土壤修复中的应用	50
第二节 EDTA 和蒸腾抑制剂对海州香薷生长和铜吸收的影响	57
第三节 硫粉和 EDDS 对海州香薷修复土壤铜和锌污染的影响	62
第四节 化学调控强化海州香薷植物修复的机制	75
参考文献	81
第五章 香薷植物修复的微生物学调控	88
第一节 产酸菌对海州香薷富集重金属的影响	89
第二节 丛枝菌根真菌在香薷植物修复中的作用	94
第三节 丛枝菌根真菌与其他微生物在香薷植物修复中的复合作用	99
第四节 微生物与化学螯合剂在香薷植物修复中的联合作用	106
参考文献	115
第六章 香薷植物修复的技术集成、示范应用与修复效率计算	123
第一节 重金属污染土壤的诱导强化海州香薷修复技术	123
第二节 重金属污染土壤的诱导强化海州香薷修复技术——肥料类型与田间种植密度对香薷生长的影响	126
第三节 香薷植物修复集成技术的示范应用与修复效率	127
参考文献	128

第七章 香薷植物修复污染土壤对节肢动物群落的影响	129
第一节 香薷植物影响节肢动物群落的生态学基础.....	129
第二节 海州香薷田主要节肢动物及其发生动态.....	133
参考文献.....	137
第八章 修复植物处置技术现状与进展	139
第一节 修复植物作为废弃物的产后处置技术.....	139
第二节 修复植物的资源化综合利用.....	142
第三节 修复植物处置的可行性及效益分析.....	144
第四节 修复植物处置技术展望.....	144
参考文献.....	145
第九章 香薷植物精油及其提取应用	147
第一节 香薷植物挥发油的生态环境特征.....	148
第二节 香薷植物精油的提取及其分析鉴定方法.....	154
第三节 香薷植物精油的应用前景.....	162
参考文献.....	163
第十章 香薷属植物的抗菌功能及其开发应用	165
第一节 香薷属植物的药用价值.....	165
第二节 香薷属植物用做植物源农药.....	172
第三节 香薷属植物抗菌应用.....	174
参考文献.....	176
第十一章 香薷植物型生物肥料的研制与应用	177
第一节 不同环境因子对海州香薷堆肥品质与物质转化的影响研究.....	177
第二节 修复植物香薷堆肥对缺铜土壤中冬小麦生长和铜吸收的影响研究.....	184
参考文献.....	192
第十二章 香薷植物修复污染土壤的技术规范	195
第一节 技术规范制定的主要依据——国内有关的法律、法规与标准依据.....	195
第二节 典型重金属污染场地的修复技术规范.....	196
第三节 浙江杭州典型重金属污染场地案例调研和分析.....	206
参考文献.....	210

第一章 香薷植物的分布及生境

第一节 香薷植物的分布与生物学特性

香薷植物是唇形科 (Labiatae) 香薷属 (*Elsholtzia* Willd.) 的一类植物。据研究, 世界上香薷属植物约 40 种, 主要分布于亚洲东部。其中, 1 种延伸至欧洲及北美洲, 3 种分布在非洲 (含埃塞俄比亚)。我国目前发现 33 种 (中国科学院中国植物志编辑委员会, 1977), 全国各地均有分布, 但多数在南部或西南部, 每一种地域分布有较大差别。

一、香薷植物的种类与分布

香薷属植物有草本、半灌木或灌木。在我国的香薷属植物中多数是草本植物, 这些草本香薷有一年生或多年生, 植株高矮不等, 生物量大小不一。据研究, 多数草本类香薷属植物具有药理作用, 是民间传统的中药材。

(一) 草本类香薷植物的种类与分布

1. 香薷

香薷 (*Elsholtzia ciliata* (Thunb.) Hyland.), 别名水芳花, 山苏子 (黑龙江、吉林、河北、山西), 青龙刀香薷 (黑龙江), 荆芥、小荆芥、拉拉香、小叶苏子 (辽宁), 蜜蜂草、水荆芥、臭香麻、真荆芥 (河北), 臭荆芥 (辽宁、甘肃华池、河北), 荆芥 (甘肃成县), 边枝花 (浙江), 酒饼叶 (广西阳朔), 排香草 (广西), 山苏子、香草、蜜蜂草 (福建福州), 野紫苏 (四川都江堰), 鱼香草 (四川南川), 香茹草、德昌香薷 (四川), 蚂蝗痧 (云南文山), 野芝麻 (云南镇雄), 野芭子 (云南保山)。

香薷一般生于路旁、山坡、荒地、林内、河岸, 海拔可达 3400m。在我国, 除新疆、青海外, 其他各地都有分布。蒙古、朝鲜、日本、印度、中南半岛及西伯利亚也有分布, 欧洲及北美洲有引种。

香薷含有芳香油, 全草可入药, 嫩叶可作猪饲料。香薷籽含油率为 42.38%。在香薷籽油脂脂肪酸组成中, α -亚麻酸为 58.1%, 亚油酸为 20.7%, 油酸为 11.7%, 棕榈酸为 6.93%, 硬脂酸为 2.60%。香薷籽油不饱和脂肪酸含量高达 90.46%, 是不饱和脂肪酸含量极高的植物油之一 (梅文泉, 2004)。

2. 紫花香薷

紫花香薷 (*Elsholtzia argyi* Lévl.), 别名野薄荷 (浙江昌化), 牙刷花 (江西广昌), 臭草 (广东乐昌), 荆芥草、假紫苏、土荆芥 (广东宝安), 金鸡草 (广东怀集)。

紫花香薷主要生长在山坡灌木丛中、林下、溪旁及河边草地, 海拔一般为 200~1200m。主要分布在中国浙江、江苏、安徽、福建、江西、广东、广西、湖南、湖北、贵州; 国外, 日本有分布, 越南有栽培。

3. 海州香薷

海州香薷 (*Elsholtzia splendens* Nakai ex F. Mackawa), 主要生长于山坡林缘和山顶草地上, 常成片生长。据研究, 铜矿露头或铜矿尾砂堆会有成片生长, 是一种铜矿的指示植物 (谢学锦, 1953)。垂直分布海拔可达 1500m。主要分布在中国辽宁、河北、山东、河南、江苏、江西、浙江、广东; 国外, 朝鲜也有。全草含有芳香油, 是中国药典记载的中药材。

除上述香薷种外, 还有川滇香薷、高原香薷、岩生香薷、水香薷、湖南香薷、淡黄香薷、东紫苏、异叶香薷、球穗香薷、密花香薷、毛穗香薷、野草香、吉龙草、穗状香薷、四方蒿、长毛香薷等 16 种香薷, 分布于中国各地及泰国、缅甸、印度、尼泊尔、阿富汗、巴基斯坦、老挝、越南、印度尼西亚、日本、朝鲜、俄罗斯等 (张继, 2004)。

(二) 灌木类香薷植物的种类与分布

灌木类香薷植物与草本类香薷植物不同主要在于茎的木质化, 灌木类香薷植物以灌木或半灌木形态为主, 在我国的香薷植物中占三分之一左右。主要分布在我国西南部。主要有野拔子 (*Elsholtzia rugulosa* Hemsl)、鼠尾香薷 (*Elsholtzia myosurus* Dunn)、鸡骨柴 (*Elsholtzia fruticosa* (D. Don) Rehd.)、毛萼香薷 (*Elsholtzia erio-calyx* C. Y. Wu et S. C. Huang)、黄白香薷 (*Elsholtzia ochroleuca* Dunn)、木香薷 (*Elsholtzia stauntoni* Benth.)、白香薷 (*Elsholtzia winitiana* Craib)、野苏子 (云南潞西) (*Elsholtzia flava* (Benth.) Benth.)、大黄药 (*Elsholtzia penduliflora* Smith) 和光香薷 (*Elsholtzia glabra* C. Y. Wu et S. C. Huang) 等 (中国科学院中国植物志编辑委员会, 1977)。

二、香薷植物的生物学特性

香薷的种类数十种, 本节主要介绍与本研究相关的几种香薷的生物学特性。

(一) 香 薷

直立草本，植株高 0.3~0.5m，具密集的须根。茎通常自中部以上分枝，钝四棱形，具槽，无毛或被疏柔毛，常呈麦秆黄色，老时变紫褐色。叶卵形或椭圆状披针形，长 3~9cm，宽 1~4cm，先端渐尖，基部楔状下延成狭翅，边缘具锯齿，上面绿色，疏被小硬毛，下面淡绿色，主沿脉上疏被小硬毛，余部散布松脂状腺点，侧脉 6~7 对，与中肋两面稍明显；叶柄长 0.5~3.5cm，背平腹凸，边缘具狭翅，疏被小硬毛。穗状花序长 2~7cm，宽达 1.3cm，偏向一侧、由多花的轮伞花序组成；苞片宽卵圆形或扁圆形，长宽约 4mm，先端具芒状突尖，尖头长达 2mm，多半退色，外面近无毛，疏布松脂状腺点，内面无毛，边缘具缘毛；花梗纤细，长 1.2mm，近无毛，序轴密被白色短柔毛。花萼钟形，长约 1.5mm，外面被疏柔毛，疏生腺点，内面无毛，萼齿 5，三角形，前 2 齿较长，先端具针状尖头，边缘具缘毛。花冠淡紫色，约为花萼长之 3 倍，外面被柔毛，上部夹生有稀疏腺点，喉部被疏柔毛，冠筒自基部向上渐宽，至喉部宽约 1.2mm，冠檐二唇形，上唇直立，先端微缺，下唇开展，3 裂，中裂片半圆形，侧裂片弧形，较中裂片短。雄蕊 4，前对较长，外伸，花丝无毛，花药紫黑色。花柱内藏，先端 2 浅裂。小坚果长圆形，长约 1mm，棕黄色，光滑。花期 7~10 月，果期 10 月至翌年 1 月。

(二) 紫 花 香 薷

草本，植株高 0.5~1m。茎四棱形，具槽，紫色，槽内被疏生或密集的白色短柔毛。叶卵形至阔卵形，长 2~6cm，宽 1~3cm，先端短渐尖，基部圆形至宽楔形，边缘在基部以上具圆齿或圆齿状锯齿，近基部全缘，上面绿色，被疏柔毛，下面淡绿色，沿叶脉被白色短柔毛，满布凹陷的腺点，侧脉 5~6 对，与中脉在两面微显著；叶柄长 0.8~2.5cm，具狭翅，腹凹背凸，被白色短柔毛。穗状花序长 2~7cm，生于茎、枝顶端，偏向一侧，由具 8 花的轮伞花序组成；苞片圆形，长宽约 5mm，先端骤然短尖，尖头刺芒状，长达 2mm，外面被白色柔毛及黄色透明腺点，常带紫色，内面无毛，边缘具缘毛；花梗长约 1mm，与序轴被白色柔毛。花萼管状，长约 2.5mm，外面被白色柔毛，萼齿 5，钻形，近相等，先端具芒刺，边缘具长缘毛。花冠玫瑰红紫色，长约 6mm，外面被白色柔毛，在上部具腺点，冠筒向上渐宽，至喉部宽达 2mm，冠檐二唇形，上唇直立，先端微缺，边缘被长柔毛，下唇稍开展，中裂片长圆形，先端通常具突尖，侧裂片弧形。雄蕊 4，前对较长，伸出，花丝无毛，花药黑紫色。花柱纤细，伸出，先端相等 2 浅裂。小坚果长圆形，长约 1mm，深棕色，外面具细微疣状凸起。花、果期 9~11 月。

(三) 海 州 香 薷

直立草本，植株高 30~50cm。茎直立，污黄紫色，被近 2 列疏柔毛，基部以上多

分枝，分枝劲直开展，先端具花序，节间伸长，长2~12cm。叶卵状三角形，卵伏长圆形至长圆状披针形或披针形，长3~6cm，宽0.8~2.5cm，先端渐尖，基部或阔或狭楔形，下延至叶柄，边缘疏生锯齿，锯齿整齐，锐或稍钝，上面绿色，疏被小纤毛、脉上较密，下面较淡，沿脉上被小纤毛，密布凹陷腺点；叶柄在茎中部叶上较长，向上变短，长0.5~1.5cm，腹凹背凸，腹面被短柔毛。穗状花序顶生，偏向一侧，长3.5~4.5cm，由多数轮伞花序所组成；苞片近圆形或宽卵圆形，长约5mm，宽6~7mm，先端具尾状骤尖，尖头长1~1.5mm，除边缘被小缘毛外余部无毛，极疏生腺点，染紫色；花梗长不及1mm，近无毛，序轴被短柔毛。花萼钟形，长2~2.5mm，外面被白色短硬毛，具腺点，萼齿5，三角形，近相等，先端刺芒尖头，边缘具缘毛。花冠玫瑰红紫色，长6~7mm，微内弯，近漏斗形，外面密被柔毛，内面有毛环，冠筒基部宽约0.5mm，向上渐宽，至喉部宽不及2mm，冠檐二唇形，上唇直立，先端微缺，下唇开展，3裂，中裂片圆形，全缘，侧裂片截形或近圆形。雄蕊4，前对较长，均伸出，花丝无毛。花柱超出雄蕊，先端近相等2浅裂，裂片钻形。小坚果长圆形，长1.5mm，黑棕色，具小疣。花、果期9~11月。

(四) 穗状香薷

柔弱草本，植株高0.3~1m。茎直立，钝四棱形，具槽，黄褐色或常带紫红色，幼时略被卷曲白色短柔毛，其后毛多少脱落，多分枝，分枝具花序。叶菱状卵圆形，长2.5~6cm，宽1.5~3.5cm，先端骤渐尖，基部楔形或阔楔形，下延至叶柄成狭翅，边缘在基部以上具整齐或近整齐缺刻状锯齿，薄纸质，上面绿色，散布白色短柔毛，下面淡绿色，仅沿脉上被短柔毛，余部散布淡黄色凹陷腺点，侧脉约4对，与中脉在上面微显著下面明显隆起；叶柄长0.5~4cm，通常长度几与叶片相等，腹面具槽，槽上密被余部疏被白色微柔毛。穗状花序顶生及腋生，位于茎、枝顶上者较长，长4~8.5cm，腋生枝上者最短，长仅1.5cm，开花时粗可达6(8)mm，通常粗5mm，由疏花多少不连续的轮伞花序所组成；苞片钻状线形，具肋，常超出花冠；花梗短，长0.5mm，与序轴被白色短柔毛。花萼钟形，长约1.5mm，外面密被白色柔毛，内面齿上略被微柔毛，萼齿5，披针形，近相等，果时花萼略增大，管状钟形，长约2mm。花冠白色，有时为紫红色，长约为花萼长的2倍，外面被短柔毛，内无毛，冠筒向上渐宽大，冠檐二唇形，上唇直立，先端微缺，下唇开展，3裂，中裂片椭圆形，侧裂片先端圆形。雄蕊4，前对不发育，后对内藏或微露出。花柱微露出，先端近相等2裂。小坚果椭圆形，淡黄色。花、果期9~12月。

第二节 香薷植物的元素组成和功能

一、海州香薷植物的元素含量特点

分析海州香薷植物不同部位元素含量可知，Cu、Mn、Zn、Cd、Pb几种金属元素

在海州香薷植物中的含量表现为: Cu ($337 \pm 87 \mu\text{g/g}$) $>$ Mn ($116 \pm 53 \mu\text{g/g}$) $>$ Zn ($42.5 \pm 6.4 \mu\text{g/g}$) $>$ Pb ($5.62 \pm 1.27 \mu\text{g/g}$) $>$ Cd ($1.12 \pm 0.50 \mu\text{g/g}$), 根、茎、叶元素含量均表现为 $\text{Cu} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd}$, 根中 Cu 含量最高, 分别是 Mn 的 3 倍, Zn 的 8 倍。不同金属元素在植物不同部位含量不同。 Cu 、 Mn 、 Pb 表现为根 $>$ 叶 $>$ 茎, Zn 、 Cd 表现为叶 $>$ 根 $>$ 茎。

由海州香薷植物和群落中其他几种主要植物元素含量的比较可知, 天蓝苜蓿 (*Medicago lupulina*)、茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*)、苳草 (*Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino) 中铜的累积均为地下部分显著高于地上部分 ($p < 0.01$), 地下部分 ($402 \pm 89 \mu\text{g/g}$ 、 $424 \pm 105 \mu\text{g/g}$ 、 $350 \pm 75 \mu\text{g/g}$) 分别是地上部分 ($45.4 \pm 5.8 \mu\text{g/g}$ 、 $118 \pm 66 \mu\text{g/g}$ 、 $76.2 \pm 36.4 \mu\text{g/g}$) 的约 9 倍、4 倍、5 倍。野胡萝卜 (*Daucus carota*) 则是地上 $>$ 地下。对照组中, 天蓝苜蓿、茵陈蒿、苳草、野胡萝卜均为地下部分大于地上部分, 但地上和地下 Cu 含量差异不大。海州香薷与这些植物相比, 其 Cu 含量均高于这几种植物, 是野胡萝卜的 10 倍, 是天蓝苜蓿、茵陈蒿、苳草的 1~3 倍。

海州香薷地下部分 Mn 含量 ($164 \pm 41 \mu\text{g/g}$) 略高于苳草 ($156 \pm 64 \mu\text{g/g}$)、茵陈蒿 ($152 \pm 61 \mu\text{g/g}$), 明显高于天蓝苜蓿 ($95.2 \pm 44.4 \mu\text{g/g}$, $p < 0.05$), 野胡萝卜 ($24.7 \pm 3.5 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$); 地上部分则是海州香薷略低于茵陈蒿 ($94.8 \pm 23.2 \mu\text{g/g}$), 显著高于天蓝苜蓿 ($48.4 \pm 7.3 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$), 苳草 ($62.1 \pm 8.5 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$), 野胡萝卜 ($64.0 \pm 11.8 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$)。

海州香薷、茵陈蒿、野胡萝卜中 Zn 的含量表现为地上 $>$ 地下。和这几种植物相比, 海州香薷地下部分 ($42.0 \pm 5.6 \mu\text{g/g}$) 显著低于天蓝苜蓿 ($63.8 \pm 6.4 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$)、野胡萝卜 ($51.1 \pm 4.9 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$); 地上部分除明显高于天蓝苜蓿 ($28.4 \pm 3.9 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$)、野胡萝卜 ($31.4 \pm 40.5 \mu\text{g/g}$, $p < 0.01$) 外, 与其他两种相当。而矿区生长的天蓝苜蓿、茵陈蒿、苳草、野胡萝卜与对照相比, 并不是每一种植物地上和地下都明显比对照高, 有些地上 (或地下) 部分与对照无明显差异。天蓝苜蓿、苳草、野胡萝卜中 Cd 的含量表现为地下 $>$ 地上, 而茵陈蒿则为地上 $>$ 地下。海州香薷和这几种植物相比, 除茵陈蒿地上部分差异不显著外, 其他不论地上或地下, 海州香薷均不显著高于其他植物 ($p < 0.01$)。天蓝苜蓿、茵陈蒿和对照相比无明显差异。 Pb 含量中, 海州香薷、天蓝苜蓿、苳草、野胡萝卜表现为地下高于地上, 茵陈蒿则是地上高于地下。

海州香薷及群落中几种主要植物与土壤元素相关分析见表 1.1。海州香薷各部位 (根、茎、叶) 中的 Cu 与土壤 Cu 元素相关显著 ($p < 0.05$), 其中根、茎相关极显著 ($p < 0.01$); 根中的 Mn 、 Cd 与土壤相关显著, Pb 相关极显著; 叶中的 Zn 与土壤中的 Zn 元素相关显著。说明海州香薷各部位 Cu 的相关性比 Mn 、 Zn 、 Cd 、 Pb 元素相关性好, 随土壤 Cu 含量的增加, 植物对 Cu 的吸收、累积增强。海州香薷植物各部分金属浓度相关性比其他几种植物好。除苳草地上和地下部分的 Mn 、 Cd 相关性均显著外, 其他几种植物元素的相关性并不一致。有的植物地下部分元素的相关性较好, 有的是地上部分相关性较好, 有的都无显著相关, 说明不同植物和同一植物对不同元素吸收迁移、累积不同。这一方面反映植物本身的特性, 另一方面反映土壤元素对植物的影响及在植物体内的迁移能力。

表 1.1 大冶铜矿区植物与土壤元素相关系数

物 种	植物部位	Cu	Mn	Zn	Cd	Pb
海州香薷	根	0.690**	0.438*	0.151	0.416*	0.470**
	茎	0.580**	0.283	0.303	0.024	0.352
	叶	0.445*	0.110	0.512*	0.146	0.301
茵陈蒿	地上部	0.416	0.381	0.505*	0.464*	0.417
	地下部	0.480*	0.451	0.428	0.384	0.351
荩草	地上部	0.411	0.449*	0.382	0.489*	0.221
	地下部	0.576**	0.491**	0.387	0.455	-0.089
野胡萝卜	地上部	0.621*	0.615*	0.414	0.248	0.324
	地下部	0.577	0.486	0.382	0.314	-0.287
天蓝苜蓿	地上部	0.405	0.384	0.014	0.325	0.443
	地下部	0.624**	0.507*	0.336	0.229	0.158

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$

二、紫花香薷植物的元素含量特点

分析紫花香薷植物体内元素含量（表 1.2）可知，介质中 Cu 含量对两种生态型紫花香薷根茎叶中 P、K、Ca、Mg 等大量元素都有影响（姜理英，2003）。

表 1.2 铜处理水平对两种生态型紫花香薷根茎叶中大量元素含量的影响

铜水平 /($\mu\text{mol/L}$)	植物 部位	P/(g/kg)		K/(g/kg)		Ca/(g/kg)		Mg/(g/kg)	
		九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门
0.25	根	1.49d	5.19d	22.8b	29.1a	2.76a	2.44b	2.76a	2.33a
2.5		1.59d	6.47c	27.2a	27.6ab	2.48ab	2.34b	2.48ab	2.23ab
5		1.49d	6.43c	26.7a	29.2a	2.06c	2.78a	2.06c	2.60a
10		2.06cd	6.49c	26.2a	27.5ab	2.15bc	2.42b	2.15bc	2.23ab
25		2.51c	6.30c	19.5c	26.0b	1.40d	2.10c	1.40d	2.26ab
50		3.68b	6.86b	11.7d	22.0c	1.41d	2.34b	1.41d	1.89b
100		5.95a	9.61a	8.26e	5.92d	1.36d	2.84a	1.36d	1.11c
0.25	茎	1.25a	2.33d	31.5a	23.4d	2.67a	4.34ab	2.67a	2.28ab
2.5		1.42a	2.85b	31.2a	25.0c	2.61a	4.45a	2.61a	2.46a
5		1.52a	3.21a	32.5a	28.5a	2.67a	4.35ab	2.67a	2.49a
10		1.43a	2.82b	33.3a	26.7b	2.40a	4.11bc	2.40a	1.92bc
25		1.63a	2.86b	30.3a	24.5cd	2.43a	3.95c	2.43a	2.03abc
50		1.23a	2.54c	19.4b	26.8b	1.66b	3.93c	1.66b	2.19ab
100		0.74b	1.47e	17.6b	19.1e	1.69b	3.92c	1.69b	1.60c

续表

铜水平 ($\mu\text{mol/L}$)	植物 部位	P/(g/kg)		K/(g/kg)		Ca/(g/kg)		Mg/(g/kg)	
		九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门
0.25	叶	1.99a	3.35a	23.3b	27.5bc	2.47bc	3.95a	2.47bc	2.28bc
2.5		2.31a	3.32a	23.0b	27.3bc	2.53abc	3.67a	2.53abc	2.21c
5		2.41a	3.27a	25.8a	27.0c	2.60abc	3.52a	2.60abc	2.42bc
10		2.37a	3.64a	27.4a	27.4bc	2.67abc	3.67a	2.67abc	2.38bc
25		2.35a	3.74a	27.3a	28.8b	2.77a	3.66a	2.77a	2.68a
50		1.24b	3.43a	15.7c	30.6a	2.50abc	3.93a	2.50abc	2.46ab
100		1.10b	2.51b	13.7c	24.6d	2.35c	3.74a	2.35c	1.88d

注：“九溪”代表九溪生态型，“三门”代表三门生态型

随着 Cu 浓度的增加，两种生态型根系中的 P 含量呈增加的趋势，但高 Cu（尤其是 $100\mu\text{mol/L}$ ）时茎和叶中的 P 含量明显减少，但是三门生态型紫花香薷 P 的减少量明显比九溪生态型的少。

钾的泄漏是 Cu 毒害的主要表现之一，随着溶液中 Cu 浓度的提高两种生态型根系和茎中的 K 含量明显减少。非矿山生态型在 Cu 浓度为 $50\mu\text{mol/L}$ 时组织中的 K 含量明显减少，而矿山生态型在 $100\mu\text{mol/L}$ 时才有减少的趋势，这主要与高铜对两种生态型植物细胞膜的破坏程度不同有关。但在叶片中却表现出不同于根茎的趋势，九溪生态型叶片中的钾含量在铜 $\leq 25\mu\text{mol/L}$ 时随铜供应水平的增加而增加，而三门生态型在 $\leq 50\mu\text{mol/L}$ 铜时都随着增加，这可能是由于当供应过量的铜时，植物体内能产生有机酸来整合植物体内的铜，而叶片吸收过量的钾来维持体内的离子平衡。

两种生态型根茎叶中的 Mg 含量在高铜处理时显著减少，而且两者在含量上差异并不显著。根系中的 K 和叶片中的 Ca 含量也表现出同样的趋势，但在高 Cu 时三门生态型根系的 Ca 含量增加。这些结果说明在高铜条件时三门生态型的紫花香薷对铜的耐性与植物吸收 K、Ca 有关。

表 1.3 铜处理水平对两种生态型紫花香薷根茎叶中微量元素含量的影响

铜水平 ($\mu\text{mol/L}$)	植物 部位	Fe/(mg/kg)		Mn/(mg/kg)		Zn/(mg/kg)	
		九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门
0.25	根	1954d	3871d	112a	207d	66.1b	89.1d
2.5		2275cd	4493c	128a	168e	73.1b	97.6d
5		2104d	3709d	110a	220c	67.2b	112c
10		2609bcd	4606c	101a	270a	103ab	161a
25		3296abc	5718b	113a	265a	72.6b	138b
50		4261a	5462b	56.3b	232b	92.93b	140b
100		3622ab	7086a	40.0b	102f	138a	89.4d

续表

铜水平 /($\mu\text{mol/L}$)	植物 部位	Fe / (mg/kg)		Mn / (mg/kg)		Zn/ (mg/kg)	
		九溪	三门	九溪	三门	九溪	三门
0.25	茎	347.95cd	122a	24.8ab	8.03c	44.2d	5.89c
2.5		450.67bc	173a	24.9ab	10.1b	45.4cd	6.64c
5		320.52cd	118a	25.5ab	10.5b	55.9bc	9.02c
10		507.05b	196a	27.7a	9.55bc	68.0b	6.06c
25		508.48b	130a	31.4a	8.41c	58.2bc	23.3a
50		753.44a	193a	22.3ab	17.4a	92.8a	14.7bc
100		257.26d	197a	13.6b	8.17c	13.6d	14.5bc
0.25	叶	420.43a	513ab	45.5ab	19.1d	41.6b	69.0d
2.5		537.03a	543a	45.1ab	23.6bc	45.8b	70.3d
5		515.61a	516ab	65.0a	23.0bc	44.4b	131c
10		443.59a	433b	67.2a	23.1bc	51.8ab	213ab
25		509.92a	486ab	59.8a	26.5b	57.3ab	244a
50		431.94a	435b	31.1b	30.6a	48.8ab	192bc
100		470.21a	466ab	25.2b	22.2cd	62.3a	207ab

注：“九溪”代表九溪生态型，“三门”代表三门生态型

不同浓度铜对两种生态型紫花香薷组织中其他微量元素含量有不同的影响（表 1.3），根系和茎中的 Fe 含量相对于对照都有所增加，而在高 Cu（100 $\mu\text{mol/L}$ ）时非矿山生态型茎中的 Fe 含量明显减少。三门生态型根系中 Mn 含量是九溪生态型的 2.5 倍，而 Cu 处理对两种生态型茎和叶片的 Mn 含量影响不同，在高 Cu（50 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ ）时非矿山生态型地上部分的 Mn 含量相对于对照明显减少，差异达显著性水平（ $p < 0.05$ ），而矿山生态型比对照都有所增加。两种生态型各组织中的 Zn 含量随着 Cu 处理浓度的增加都比对照有所增加。

第三节 香薷植物的生境

在我国生长的 33 种香薷属植物，其地理分布主要集中在西南地区，尤其是云南、贵州、四川占了多数种类。据目前研究已确定认为有重金属耐性香薷种仍较少，海州香薷和紫花香薷是近年来研究最多的香薷属植物。海州香薷在浙江、安徽、湖北等地的铜矿中有群落分布，各地的生境条件也有较大差异。

一、浙江海州香薷的生境特点

调查的老铜矿区位于浙江省诸暨市西南 30km 左右（姜理英，2003），119°3′~120°32′E，29°21′~29°59′N；属亚热带季风区，总的特点是温和、湿润、多雨、四季分明、水资源丰富。诸暨铜矿矿床主要分布在海拔 630m 左右，在这附近土壤中的 Cu 含量明显比其他点高，达 2 000~3 500mg/kg。铜矿区附近土壤 Cu 含量也达 1 000~2 000mg/kg，而远离 Cu 矿分布区土壤 Cu 的含量大约为 10~500mg/kg。野外调查发现，在铜矿矿床分布区或矿渣堆放处海州香薷是主要的优势植物。尤其是在铜含量最高区，海州香

薷的覆盖度达 80% 以上,基本上没有其他植物生长。植物在重金属毒性较高的废弃地上能成功定居,主要有三种生态对策:耐性对策、根茎对策和微生境(逃避)对策。对于优势度很低的偶见种来说,一般是定居于先锋植物的枯枝落叶、动物粪便或是人为干扰形成的营养状况较好、重金属毒性较低的微生境中,这些植物本身不具有重金属耐性,在铜矿山自然定居的大部分偶见种都属这种情况。其他优势度较高的植物,则是通过耐性对策在铜矿山定居,一般而言都具有较强重金属耐性。

在矿山调查中还发现,在未开采的矿区和土壤 Cu 含量低的地方很少有海州香薷的分布,只有在土壤中 Cu 含量高的地区才有海州香薷的生长,且分布度较高。这说明海州香薷对高 Cu 环境具有较强的耐性,而且它的分布对 Cu 具有某种依赖性。这种海州香薷与 Cu 矿分布的紧密联系,早在 1953 年中国地质学家就有报道(谢学锦,1953),因此海州香薷被认为是铜矿的指示植物。在铜矿矿床和尾砂堆放处,土壤一般比较砂性贫瘠,但海州香薷是这些地区的优势植物,这表明海州香薷对养分缺乏和干旱具有较好的抵抗力。

海州香薷根系和地上部分的 Cu 含量分别为 224~613mg/kg 和 23.5~90.6mg/kg,平均值分别为 404mg/kg 和 64.4mg/kg,其相应土壤中全 Cu 和有效态 Cu 含量分别为 1399~6049mg/kg 和 17.3~664mg/kg(表 1.4)。以根系和地上部分的 Cu 含量/土壤中 Cu 的全量作为计算富集系数的依据,发现海州香薷对 Cu 的富集能力相当低,并且根系的富集系数(0.11~0.22)远远高于地上部分(0.016~0.044),这说明 Cu 向地上部分的转移能力相当低,主要富集在根系,这可能是其对 Cu 的一种耐性机制之一。

表 1.4 铜矿区海州香薷植物体内及其相应土壤中 Cu 含量(单位:mg/kg)

样点	植 物		土壤全量 Cu		土壤 NH ₄ OAc 提取态 Cu		富集系数	
	根系	地上部	非根际土壤	根际土壤	非根际土壤	根际土壤	根系	地上部
1	224	23.5	1399	1042	17.3	15.5	0.215	0.023
2	315	90.6	4046	2046	376	279	0.154	0.044
3	465	57.9	3454	3046	251	171	0.153	0.019
4	613	85.7	6049	5508	664	572	0.111	0.016

区分根际土和非根际土,发现海州香薷根际土壤全 Cu 和有效 Cu 含量都低于非根际土壤,从这可以得出海州香薷根系具有较强的吸收能力并且可能分泌某种物质溶解土壤中 Cu,从而促进植物根系对 Cu 的吸收。

二、湖北海州香薷的生境特点

湖北海州香薷的研究主要在大冶铜绿山铜矿(柯文山等,2001),它位于大冶铜绿山铜矿,东经 114°53',北纬 30°05',隶属湖北省大冶市铜绿山镇^①,矿区面积为 7.8km²,是全国六大铜基地之一,更因其 3000 年前的古铜矿遗址而闻名。其地形为低

① 现为铜录山街道

山、丘陵、残丘和湖盆，海拔高度为 14~660m。地质为正石闪玢岩，矿区出露地层以白云大理岩为主，夹带夕卡岩、凝灰岩、凝灰角砾熔岩等，气候属于大陆性东亚季风型湿润性气候，太阳年辐射总量为 392.92~472.34kJ/cm²，年均日照数为 1810.9h。年均温 17℃，最冷月（1 月）均温为 3.9℃，最热月（7 月）均温 29.2℃。年均降水 1406.6mm，降雨连续而集中时期为 6~7 月。

土壤表层（0~30cm）各金属含 Cu 1645~8950μg/g（平均 5843μg/g），Mn 1260~3580μg/g（平均 2326μg/g），Zn 217~1055μg/g（平均 722μg/g），Cd 0.252~0.365μg/g（平均 0.271μg/g），Pb 2.38~17.6μg/g（平均 12.4μg/g）。其中，Cu 比湖北省红土壤背景值（26.2μg/g）高 200 多倍，Zn 高约 10 倍（66.7μg/g），Cd 高 3 倍。

采样地植被主要为草丛，以海州香薷群落为主，占 80%~90%，盖度为 60%~80%。其中，主要有海州香薷纯群落、海州香薷和另外一些植物共同占优势的混合群落。在纯群落中，海州香薷占绝对优势，占 95%以上，生长茂盛，呈现群集生长，另有少量狗尾草等；在混合群落中，其优势种除海州香薷（占 40%~50%）外，还有茵陈蒿、苅草、野胡萝卜等。

三、紫花香薷的生境特点

紫花香薷生境调查在浙江省三门县进行（姜理英，2003）。调查矿区位于 120°17'~121°56'E，28°01'~29°21'N，属亚热带季风区。通过铅锌矿调查发现，紫花香薷的分布具有明显的优势，沿着矿口流出的废水茂盛生成。取紫花香薷各分布点的土壤样品分析发现，土壤中 Cu 含量处于正常水平，NH₄OAc-Zn 和 NH₄OAc-Pb 含量都高于 100mg/kg，而紫花香薷能在此处正常生长，其体内的 Zn 和 Pb 含量最高分别为 488mg/kg 和 74.4mg/kg。虽然紫花香薷体内 Zn 和 Pb 的含量是车前草的 1/5~1/4，但前者的生物量是后者的 25~50 倍。紫花香薷地上部分吸收污染元素的总量较高，因此紫花香薷在重金属污染土壤的植物修复方面具有较好的应用潜力。

从目前研究的海州香薷生境特点看，海州香薷主要生长在铜矿的露头、铜矿的尾砂及富铜土壤中，以群落集中分布，表现出良好的抗贫瘠和耐旱性。

参考文献

- 姜理英. 2003. 典型香薷属植物对铜的耐性和吸收特性及污染土壤植物修复机理研究. 杭州: 浙江大学博士学位论文
- 柯文山, 席红安, 杨毅等. 2001. 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, 21 (6): 907~912
- 梅文泉. 2004. 香薷籽油脂肪酸组成的分析. 中国油脂, 29 (6): 68, 69
- 谢学锦. 1953. 铜矿指示植物海州香薷. 地质学报, 32 (4): 360~368
- 张继. 2004. 高原香薷挥发性成分的分析研究. 兰州大学学报, 40 (5): 69~72
- 张继. 2005. 密花香薷挥发油成分的分析研究. 草业学报, 14 (1): 112~116
- 郑尚珍. 2001. 超临界流体 CO₂ 萃取法研究木香薷精油化学成分. 西北师范大学学报, 37 (3): 37~40
- 中国科学院中国植物志编辑委员会. 1977. 中国植物志 (第六十六卷). 北京: 科学出版社