

# 我国污染土壤生物修复技术研究现状及发展展望

石扬 陈沅江\*

(中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

**摘要:**以文献统计的方式对2006~2015年国内学者在中国知网和Web of science中发表的相关文献进行统计分析,综述了我国污染土壤生物修复技术的10年研究进展。结果显示:近10年我国土壤生物修复技术的研究热度不断上升,主要研究对象为重金属污染土壤和有机物污染土壤,总体分为机理研究和试验研究,且后者居多。在此基础上,本文简要介绍了当前主要研究的植物修复技术、微生物修复技术、动物修复技术、生物材料修复技术、生物组合修复技术及物理、化学、生物联合修复技术6种生物修复技术的原理、优缺点及研究现状等内容,并指出了未来生物修复技术在修复原理、针对性、经济性、风险、强化措施、应用范围等方面的发展方向。

**关键词:**污染土壤;生物修复技术;植物修复;微生物修复

**中图分类号:**Q89 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.002

## Research Status and Development Direction of Contaminated Soil Bioremediation Technology in China

SHI Yang CHEN Yuanjiang\*

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Related articles in CNKI and Web of science from 2006 to 2015 are researched and analyzed by using the statistics method, and the research progress of soil bioremediation technology of China in this decade are summarized. The result shows that the research enthusiasm of soil bioremediation technology is constantly rising; heavy metal polluted soil and organic pollutants soil are the main research objects; the overall studies can be divided into theoretical research and experimental research and the latter occupies the most. Based on this, the principle, advantages and disadvantages, and research status of bioremediation technology are briefly introduced at six current main research aspects, including phytoremediation, microbial remediation, fauna remediation, biological materials remediation, biological combined remediation, and the remediation combined by physical, chemical and biological technology. Development directions on repair principle, pertinence, economic, risk, strengthen measures, application area of bioremediation technology are put forward.

**Key words:** contaminated soil; bioremediation technology; phytoremediation; microbial remediation

## 1 引言

土壤污染是指人类活动产生的有害物质进入土壤,累积量超过土壤自净能力,引起土壤质量恶化,影响植物生长及危害人畜健康的现象。土壤污染存在危害人体健康、导致农作物减产和农产品品质降低、污染地下水和地表水、污染大气等诸多危害<sup>[1]</sup>。2014年我国环境保护部和国土资源部发布的全国污染土壤调查公报显示,全国土壤污染物质的总超标率高达16.1%,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧。污染土壤的治理成为我国亟待解决的重要问题。

污染土壤生物修复技术是指利用生物体、生物

的代谢反应过程或生物合成产物对污染土壤进行治理和修复<sup>[2]</sup>。与传统的物理、化学修复技术相比,生物修复技术具有处理彻底、二次污染小和成本低的巨大优势,因此在我国受到了广泛关注,在我国土壤污染日趋严重的状况下,研究污染土壤的生物修复技术具有重要意义。

为了解和掌握近年我国污染土壤生物修复技术研究现状,本文运用文献统计法对2006~2015年中国知网和Web of science收录的相关文献进行检索与统计,对污染土壤生物修复技术的原理、优缺点、研究现状等内容进行了分析介绍,并针对其发展趋势作出了展望。

## 2 我国污染土壤生物修复技术的研究现状

学术论文可以在一定程度上反映某一领域发展动态,目前我国关于污染土壤生物修复技术的学术

2016-06-14 收稿,2016-08-21 接受,2017-02-09 网络发表

\* 通讯作者, E-mail: 304421241@qq.com; Tel: 13787120657

论文已不少,但未见相关学术论文在数量上的统计。为更加直观地了解我国污染土壤生物修复技术的研究现状,本文从文献量、污染物种类、研究方面3个方面,对相关文献进行了统计分析。

1)以“生物修复”并含“土壤污染”为主题,对中国知网数据库2006~2015年收录的文献进行检索,以“bioremediation”并含“contaminated soil”为主题,地区精炼为“China”,对Web of science 2006~2015年收录的文献进行检索,将检索结果汇总,其中期刊论文2474篇,硕博论文1152篇,论文数量按收录年份的统计如图1所示。由图可知,2006~2015年污染土壤生物修复技术的相关期刊文献数量迅速增加,只在2011年略有下降,2015年的文献数量已超过2006年的2倍,2013年以后每年的文献量均已超过300篇,这说明污染土壤生物修复技术已受到国内学者的广泛关注,研究热度越来越高。硕博论文的数量在2006~2015年总体呈上升趋势,尽管在2011年稍有下降,但仍数量颇多,说明污染土壤生物修复技术也是各高校的学习与研究重点。



图1 近10年我国污染土壤生物修复技术论文数量的年份分布

2)按文献中涉及的污染物类别对近10年中国知网和Web of science收录的污染土壤生物修复技术相关文献进行统计分析的结果见表1。我国土壤污染形式主要有无机物污染(重金属、非金属有毒物质、放射性物质)、有机物污染、复合污染、固体废物污染、生物污染5种形式,由表1的统计数据可知,近年来我国学者对土壤污染生物修复技术的研究主要针对重金属污染土壤和有机物污染土壤,这与我国重金属污染土壤和有机物污染土壤分布范围广、污染程度严重的情况相符。可能由于污染土壤生物修复技术的研究起步较晚,尚不成熟,所以尽管重金属-有机物复合污染土壤的危害及修复难度更大,其相应的生物修复技术文献却相对较少,只占总文献数的10.73%。值得注意的是,硒、砷等非金属

有毒物质和放射性物质污染土壤对动植物和人类的危害极大,但由于这2类污染土壤的分布范围相对较小,所以当前我国学者对这2类污染土壤的生物修复重视程度不够,相关生物修复技术的文献比例只有4.05%和1.17%。土壤生物污染分布面积广,会引起农作物减产、动物人类疾病等诸多危害,但由于目前人们对土壤生物污染的认识程度不足,因此对生物污染土壤的生物治理研究很少,生物污染土壤的生物治理也是今后应重点研究的内容之一。

表1 生物修复技术涉及的土壤污染形式及相应的文献数量

污染形式	典型污染物举例	文献数量	所占比例/%
无机物污染	重金属污染物:汞、铬、镉、铜、锌、铅、镍等及几种重金属的复合污染	938	39.15
	非金属有毒物质:硒、砷等	97	4.05
	放射性物质:铀	28	1.17
有机物污染	农药、石油、除草剂、多氯联苯、三氯乙烯、多环芳烃、五氯酚等	1033	43.11
复合污染	主要为重金属-有机物的复合污染	257	10.73
生物污染	炭疽杆菌、霍乱弧菌、沙门氏菌等	25	1.04
固体废物污染	矿渣、煤矸渣、粉煤灰、白色垃圾等	18	0.75

3)对生物修复技术的研究主要分为机理研究和试验研究两个方面,忽略相同或相似文章发表在不同期刊重复统计对统计结果的准确性的影响,各研究方面的分布比例如图2所示。由图可以看出,目前我国对污染土壤生物修复技术的研究大多为试验研究,即通过试验的方式探究生物修复手段,而对修复机理的研究较少,文献数量所占比例只有18.85%,对修复机理认识不足,说明我国对土壤污染生物修复技术的研究尚处于起步阶段。

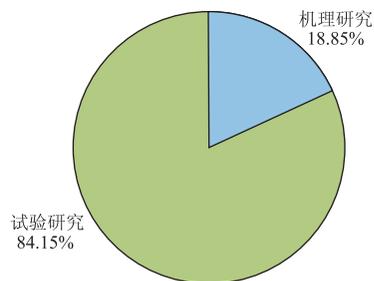


图2 污染土壤生物修复技术各研究方面分布比例

总体来讲,污染土壤生物修复技术近年在我国迅速发展,并逐步涉及到各种污染类型的土壤,但对某些污染类型的土壤的研究不足,且对生物修复的机理研究不够深入。

### 3 我国污染土壤生物修复技术的主要内容及研究进展

目前我国污染土壤生物修复技术主要包括植物修复技术、微生物修复技术、动物修复技术、生物材料修复技术及四者之间的组合技术,此外,还包括物理、化学、生物联合修复技术。

#### 3.1 植物修复技术

植物修复技术是指利用植物来转移、容纳或转化环境介质中有毒有害污染物,进而使污染土壤得到修复与治理。植物修复有植物固定、植物挥发、植物提取、植物降解、植物促进、根部过滤等方式,各修复方式主要针对的污染物、修复机理以及存在的不足见表2。

植物修复技术是一项相对较为成熟的技术,其对象主要为重金属污染土壤,对有机物污染土壤的研究相对少一些,近10年我国关于植物修复技术的研究内容及取得的进展表现为以下4个方面:

1) 修复植物物种库的丰富:国内学者不断研究发现可用于修复污染土壤的植物种类,如金丝草和柳叶箬为Pb的超富集植物<sup>[3]</sup>,忍冬、水葱、杂交狼尾草、串叶松香草、黑籽雀稗为Cd的超富集植物<sup>[4-6]</sup>,张福金等<sup>[7]</sup>通过温室盆栽实验证实玉米对土壤有机氯农药具有清除修复能力。除探索发现具有修复能力的植物外,近年国内学者开始研究转基因植物的构建以提高植物修复效果,如王奋飞<sup>[8]</sup>将低生物量的砷超富集植物蜈蚣草植物螯合肽合成酶基因PvPCSI转入高生物量的南芥中,构建了能修复砷污染土壤的工程植物;Chen Yunan等<sup>[9]</sup>利用基因

工程技术研究发现谷胱甘肽巯基转移酶(glutathione-S-transferase)基因可以调节植物氧化应激效应,提高植物对汞的富集能力。

2) 修复植物的处理和污染物的回收:传统的修复植物产后处置方法包括焚烧法、堆肥法、压缩填埋法、高温分解法、灰化法、液相萃取法等<sup>[10]</sup>,但这些处理方法存在二次污染环境、重金属回收率低、资源化利用率低等缺点,因此近年国内学者不断探索更加环保、高回收率、强经济性的处理方法,如杨建广等<sup>[11]</sup>提出了超富集植物的“焚烧→湿法提取与净化→电化学沉积/化学沉淀法→金属/化工产品”处理方法,并用此方法处理镍超富集植物 *Berkheya cod-dii*,最终得到了高纯镍板(99.999%);邓自祥<sup>[12]</sup>研究了超富集植物的“水热液化”处理方法,并用“水热液化”方法处理蜈蚣草、垂序商陆、东南景天茎叶收获物,证实该方法可将绝大部分(超过95%)有害重金属分离到水溶液中,并将超过80%的生物质转化为粗生物油,实现了修复植物的无公害处理和资源化利用。

3) 植物修复的附加效益的提高:在重视植物生态效益的同时,国内学者开始重视修复植物的附加效益。如贾伟涛等<sup>[13]</sup>通过湖南重金属污染田间试验证实了能源作物甜高粱修复重金属污染土壤的可行性,将重金属从粮食链转入能源链,在修复重金属污染土壤的同时生产清洁能源产品,兼顾了植物修复的生态和经济效益;潘雨齐等<sup>[14]</sup>介绍了苕麻、桑树、棉花、烟草等经济作物对不同重金属的富集能力、耐受能力,并指出经济作物修复技术在修复土壤的同时具有一定经济效益;周建利等<sup>[15]</sup>在Cd、Zn污

表2 植物修复的方式、机理与不足

修复方式	主要针对的污染物	修复机理	存在不足
植物固定	重金属	利用植物根际分泌的特殊物质将根系周围的重金属转化为相对无害物质使其稳定化的过程	暂时将土壤中的重金属元素固定,减少了污染物的生物有效量,但并未减少污染物总量,若土壤性质发生变化,重金属离子可能再度活化造成危害
植物挥发	汞、硒、有机物	利用植物的吸收和蒸腾作用,将污染物质从土壤中去挥发到大气中去	挥发到大气中的污染物的处理技术不完善,存在污染大气环境的风险
植物提取	重金属、铀、有机物	以植物的耐性为基础,植物吸收土壤中污染物并在地上部分或根部累积	超富集植物生长缓慢,往往植株矮小,修复速度缓慢;修复范围局限于根系所能伸展的范围;积累污染物的超富集植物处置不当会造成二次污染
植物降解(转化)	重金属、有机物	植物通过体内代谢活动降低重金属的毒性;将有机污染物代谢分解,经木质化作用使其成为植物的一部分,如木质素;或通过矿化作用将有机物彻底分解为CO <sub>2</sub> 和H <sub>2</sub> O;通过根系分泌物(包括一些酶类)加速土壤的生化反应,促进有机污染物的修复	只对结构简单、分子量低的有机污染物起作用,对结构复杂、分子量高的有机污染物无效
植物促进	有机物、重金属	植物根系分泌氨基酸、糖类、有机酸及可溶性有机质等供微生物代谢利用,为根际微生物提供营养物质,促进根际微生物对土壤的修复作用	不详
根部过滤	重金属	耐性植物根系对重金属进行吸收并将其保持在根部	目前发现的此类耐性植物多为水生和半水生植物,陆生耐性植物种类较少

染土壤中间套种东南景天和玉米,在利用东南景天修复污染土壤的同时生产出符合饲料卫生标准的玉米籽粒,为污染土壤的修复与利用提供了新的途径。此外,贾永霞等<sup>[16]</sup>研究证实观赏植物细叶百日草对镉有很强的耐性和富集能力,李翠兰等<sup>[17]</sup>通过水培试验证实花卉植物紫茉莉、紫花玉簪和鸭跖草对Pb具有较高的富集系数,利用观赏植物和花卉植物可以在治理污染的同时达到美化环境的目的。

4) 植物修复效率的提高:植物修复受污染物生物有效性、水溶性限制,且具有修复速度慢、修复时间长、作用范围局限于根部延展区域等不足,强化植物修复效果、提高植物修复效率的措施一直是生物修复的研究热点。目前我国运用的强化措施主要有微生物强化修复(功能菌株、根际微生物等)、动物强化修复(蚯蚓、线虫)、诱导修复技术(表面活性剂、螯合剂等)、农艺措施强化技术(施肥、套作等)、基因工程技术等。

### 3.2 微生物修复技术

微生物修复技术是指利用微生物在适宜的条件下将污染土壤中的污染物降解、转化、吸附、淋滤除去或利用其强化作用修复污染土壤。微生物修复技术是近年研究的热点,利用的微生物包括土著微生物、外来微生物和基因工程菌三大类。微生物修复污染土壤的方式、各修复方式针对的污染物类型、修复机理、存在的不足见表3。

微生物修复技术是近10年我国污染土壤生物修复的研究热点,对微生物修复技术的研究主要包括下述4个方面:

1) 修复菌株的筛选和基因工程菌的构建:修复菌株的筛选是微生物修复技术的第一步,目前修复污染土壤的微生物资源绝大部分尚未得到开发,国

内学者致力于修复菌株的筛选工作,并且取得了一定的成果。如胡婷等<sup>[18]</sup>从油田污染土壤中分离获得了一株苯酚高效降解菌——红球菌;Chai Liyuan<sup>[19]</sup>发现了一种土著菌可将 $Cr^{+6}$ 还原成低转移率的 $Cr^{+3}$ , $Cr^{+6}$ 去除率高达98%;Zhang Jun等<sup>[20]</sup>发现一种能够将 $As^{+3}$ 氧化为 $As^{+5}$ 的化能自养型微生物,并且该微生物可以利用其产生的能量同化二氧化碳,供自身生长利用;除筛选修复菌株,国内学者还从基因角度研究构建对多种污染物有效、效率高、适应性强的基因工程菌来强化微生物修复效果,如付瑞敏等<sup>[21]</sup>从油田污染土壤中分离得到石油高效降解菌短小芽孢杆菌,对其进行He-Ne激光诱变,得到了降解石油烃能力和产表面活性剂能力更强且遗传性状稳定的菌株;谢云<sup>[22]</sup>将芳香烃降解菌株的邻苯二酚2,3-双加氧酶基因C23O转入对芳香烃组分降解能力不强的石油烃降解菌,构建了对原油中的烷烃和芳香烃组分同时具有较好降解效果的基因工程菌。

2) 微生物淋滤技术修复污染土壤:重金属在土壤中的存在形态分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机态、残渣态等,其中前两种形态的重金属迁移能力较强,易从土壤中淋滤出去。传统的化学淋滤方法存在成本高、二次污染等弊端,因此国内学者开始研究微生物淋滤技术。如张军等<sup>[23]</sup>从某矿的酸性矿井水中分离出一株嗜酸氧化亚铁硫杆菌用于微生物淋滤,在一定条件下处理15d,使污泥中Zn、Pb、Ni、Cu、Cd及Cr去除率分别达到93.56%、46.54%、85.48%、97.68%、90.64%、45.15%;和苗苗等<sup>[24]</sup>发现氧化亚铁硫杆菌与氧化硫硫杆菌对重金属的去除率很高,但同时污泥中营养成分(TN、TP、TK、有机质)的损失亦很高,特别

表3 微生物修复的方式、机理与不足

修复方式	主要针对的污染物	修复机理	存在不足
降解	有机物	微生物通过胞外酶和胞内酶对有机污染物进行氧化、还原、基团转移、水解或其他反应(氨化、乙酰化、酯化、缩合、双键断裂及卤原子移动等),使污染物降解	污染物浓度过高时会抑制微生物活性;微生物代谢有机物的产物可能具有毒性,造成二次污染
转化	重金属	微生物通过氧化/还原、甲基化/脱甲基化等作用,将金属污染物转化为无毒或低毒形态	并未将重金属污染物从土壤中彻底移除,存在重金属活化再次造成污染的风险
吸附	重金属、有机物	微生物通过胞外吸附、细胞表面吸附、胞内积累的方式吸附固定污染物	操作难度大,存在二次污染风险,修复效率低
生物淋滤	重金属	利用产酸微生物的新陈代谢过程或间接利用产酸微生物新陈代谢的产物的氧化、还原、络合、吸附或溶解作用,使重金属污染物从土壤中溶出	溶出的重金属可能对微生物产生毒害效应,生物淋滤会造成土壤中营养元素的流失,修复周期长
强化修复	重金属、有机物	微生物通过产生络合基团、螯合基团、表面活性剂等物质增加污染物的生物有效性,强化生物修复效果;根际微生物可以促进植物根系生长,改善根际环境,促进植物对营养元素的吸收等强化植物修复作用	污染物溶解度增加可能会扩大污染面积,下渗污染地下水

是 TP 的损失量最高可达到 70%,说明微生物淋滤技术存在一定的风险;原武斌<sup>[25]</sup>发现 Cd、Pb 溶出存在不同机制,Cd 通过间接机制溶出,而 Pb 由直接机制和间接机制的共同作用溶出;谭险夷等<sup>[26]</sup>研究发现重金属—有机复合污染土壤中的有机物代谢产物低分子量有机酸对氧化亚铁硫杆菌存在毒害作用,添加丝状菌可有效降低毒害作用,进而增强淋滤效果。另外,还有学者研究了 PH、温度、土液比对淋滤效果的影响<sup>[27-30]</sup>,但微生物生物淋滤技术尚处于实验室探索阶段。

3)微生物强化修复技术。微生物强化修复技术主要是利用功能微生物或根际微生物强化生物修复效果。目前微生物强化修复技术主要有以下 2 种方式:①利用产表面活性剂或螯合剂等物质的微生物提高污染物的生物有效性:如吴涛等<sup>[31]</sup>从黄河三角洲石油污染盐渍化土壤中筛选出一株高效产生物表面活性剂的耐盐菌——沙氏雷菌,并发现直接接种该菌可促进盐渍化土壤石油烃的降解;杨卓等<sup>[32]</sup>实验发现施用巨大芽胞杆菌和胶质芽胞杆菌的混合微生物制剂可以促进印度芥菜的生长并且活化 Cd、Pb、Zn,提高土壤 Cd、Pb、Zn 有效态含量,使印度芥菜对 Cd、Pb、Zn 的提取量分别提高 52%、121% 和 23%;②利用微生物改善根际环境,促进植物根系的生长、提高根系表面积,促进根部吸收,提高植物对污染物的转运<sup>[33]</sup>等:如周笑白<sup>[34]</sup>利用两种丛枝菌根真菌(*Glomus intraradices* 和 *Glomus mosseae*)进行试验,发现两种丛枝菌根真菌均能促进 PAHs 污染土壤中植物的生长和对磷的提取,但不同的丛枝菌根真菌促进植物生长和 PAHs 降解的能力不同,*Glomus mosseae* 更能明显促进植物对高分子量的二苯并蒽的降解;利用根际微生物强化植物修复效果是近年的研究热点之一,并且由于菌根真菌可提高植物重金属耐性,国内学者认为菌根真菌与超富集植物的组合在重金属污染土壤的修复中有广泛的应用前景<sup>[35-37]</sup>。

### 3.3 动物修复技术

动物修复技术是指利用土壤中的某些低等动物(蚯蚓、线虫、甲螨等)的直接作用或间接作用修复污染土壤。直接作用是指动物通过被动扩散作用和摄食作用对污染物的富集,间接作用是指动物通过代谢、活动、取食降解菌等行为改善土壤物理、化学及生物学性质,提高污染物的生物有效性,促进植物和微生物对污染土壤的修复作用。目前我国对于动

物修复技术的研究不多,尚处于起步阶段,土壤动物更多是被用于生物指示及污染土壤的风险评价<sup>[38,39]</sup>。蚯蚓是动物修复中最常用的土壤动物,有学者对蚯蚓富集污染物的规律及污染物对蚯蚓的影响等内容进行相关研究<sup>[40,41]</sup>,但由于土壤动物不能像收割植物那样轻易从土壤中移除,因此目前国内仍鲜见利用动物的直接作用修复污染土壤的案例,而大多数是利用土壤动物的间接作用强化植物、微生物的修复效果,如白建峰等<sup>[42]</sup>通过温室盆栽实验发现接种蚯蚓可有效地提高南瓜苗从土壤中吸收 3~5 环 PAHs 化合物的效率;马淑敏等<sup>[43]</sup>利用蚯蚓—甜高粱复合系统修复镉污染土壤,发现蚯蚓可显著提高甜高粱的生物量及其对 Cd 的吸收量,并使土壤有效镉提高了 9.8%。

### 3.4 生物材料修复技术

目前我国应用生物材料修复污染土壤主要通过 2 种途径:1)使用生物表面活性剂、生物螯合剂诱导生物修复或进行土壤淋洗;2)施用生物土壤改良剂修复污染土壤。

#### 3.4.1 生物表面活性剂、生物螯合剂诱导生物修复或土壤淋洗

表面活性剂和螯合剂可增加污染物的溶解度,提高污染物的生物可利用性,因此在诱导污染物的生物修复和进行土壤淋洗中表现出巨大潜力,一直是土壤修复领域研究的热点课题。由于传统化学制剂存在二次污染及成本高等缺陷,一直制约表面活性剂和螯合剂的大范围推广使用,因此国内学者开始致力于可生物降解、环境友好的生物表面活性剂和生物螯合剂的研究。

目前我国研究的用于诱导生物修复和进行土壤淋洗的生物表面活性剂主要有鼠李糖脂、皂素、烷基多苷、槐糖脂、海藻寡糖等。如刘魏魏<sup>[44]</sup>通过室内盆栽实验研究发现,在污染土壤中辅助添加生物表面活性剂鼠李糖脂可将 PAHs 专性降解菌 90 d 的降解率由 21.3% 提高到 36.0%;石福贵等<sup>[45]</sup>研究发现鼠李糖脂可显著增加黑麦草地上部 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量,但高浓度的鼠李糖脂会显著地降低黑麦草地上部生物量,说明生物表面活性剂可能对修复植物有一定的毒害风险;朱清清等<sup>[46]</sup>研究了浓度和 PH 值对皂角苷溶液淋洗土壤重金属去除率的影响,发现增加溶液浓度和降低 PH 值均有利于重金属的去除,且皂角苷对土壤中不同形态重金属的去除能力存在差异,对离子交换态和碳酸盐结合态金属的

去除效果最好,并认为金属离子可能是通过直接与皂角苷形成可溶性络合物或者通过与其他金属的架桥作用而被转移到皂角苷溶液相中,从而从土壤中去除的。

生物螯合剂主要用于重金属污染土壤,目前我国研究用于诱导生物修复和进行土壤淋洗的生物螯合剂主要有EDDS(乙二胺二琥珀酸)、NTA(二乙基三乙酸)、GLDA(谷氨酸N,N-二乙酸)及NLMWOAs(天然低分子量有机酸)等。如卫泽斌等<sup>[47]</sup>研究发现施加 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的GLDA可以显著提高东南景天地上部的生物量和Cd、Zn浓度,进而提高东南景天对土壤Cd和Zn的提取效率;刘晓娜等<sup>[48]</sup>发现螯合剂和菌根真菌联合在某些情况下可协同强化植物修复效果;此外,有学者发现,泥炭、植物激素、无机盐、表面活性剂等均可在一定条件下与生物螯合剂协同作用强化生物修复效果<sup>[49-51]</sup>;刘霞等<sup>[52]</sup>采用批实验和柱实验方法证实柠檬酸溶液淋洗能有效去除污染土壤中交换态、吸附态、碳酸盐结合态和有机结合态的Cu、Pb,辅助添加浓度为100 CMC的二鼠李糖脂RL2对CIT淋洗Cu、Pb具有协同增溶作用,而辅助添加浓度为200 CMC的二鼠李糖脂RL2对CIT淋洗Cu、Pb则表现为拮抗作用,证实了生物表面活性剂和生物螯合剂联合淋洗污染土壤不一定表现为协同作用。

与传统化学试剂相比,生物表面活性剂和生物螯合剂在污染土壤修复中表现出巨大优势,但因其存在可能使污染物下渗污染地下水,对植物、微生物存在生物毒性,造成土壤养分流失等问题,且现阶段材料制备成本高、技术不成熟<sup>[53]</sup>,因此二者在污染土壤修复中的应用仍处于试验阶段,如何克服二者在诱导污染物修复和进行土壤淋洗中的弊端是亟待解决的重要问题。

#### 3.4.2 生物质土壤改良剂修复技术

土壤改良剂通过降低土壤中污染物的移动性及生物有效性,从而降低污染物的毒害作用。近年我国众多学者研究利用工农业废物改良污染土壤,生物质土壤改良剂是研究热点之一。如曹英兰等<sup>[54]</sup>在酸化和镉污染土壤中添加5%、150目的牡蛎壳粉,土壤pH值由5.56提高至7.74,镉钝化率达51.7%,证实了牡蛎壳粉具有矫正酸化土壤、钝化镉的作用;Hao Xiaowei等<sup>[55]</sup>试验发现骨炭可有效钝化污染土壤中的Pb和Zn;生物炭是近年被提出并被广泛研究的一种生物质土壤改良剂,是由动植物

残体在缺氧的情况下,经缓慢高温热解产生的一类难溶的、稳定的、高度芳香化的、富含碳素的固态物质<sup>[56]</sup>,近年我国学者<sup>[57-59]</sup>研究使用水稻秸秆、花生壳及中药渣、粪便等废弃的生物质制备生物炭并将其应用于污染土壤修复,证实生物炭有吸附土壤污染物、改善土壤肥力、改变土壤物理化学性质及微生物学特征等作用,同时利用废弃生物质制备生物炭可减少CO<sub>2</sub>的排放,具有巨大的环境效益。生物质土壤改良剂在土壤修复中具有广阔的发展前景。但生物质土壤改良剂大多是通过降低污染物的生物有效性而降低污染土壤的毒害作用,并不能真正将污染物从土壤中移除,污染土壤仍存在一定风险。

#### 3.5 组合修复技术

许多研究表明植物、微生物、土壤动物在污染土壤修复中存在着相互促进的作用,生物表面活性剂和生物螯合剂等生物材料亦可强化生物修复的效果。微生物对植物修复的促进作用主要表现为微生物分泌植物激素、铁载体等物质促进植物的生长,并通过代谢反应,产生表面活性剂、螯合物质等改变污染物的生物有效性,促进植物对污染物的吸收<sup>[60]</sup>,而植物对微生物的促进作用表现为根系分泌氨基酸、糖类、有机酸及可溶性有机质等物质供微生物生长代谢,有些植物根系可产生表面活性剂促进微生物对污染物的修复作用。动物对植物和微生物修复的促进作用则为前文中所述的动物对土壤的间接修复作用。

近年国内学者已探索出一些具有较高修复效率的组合修复技术,如Xu Yang等<sup>[61]</sup>试验发现考克氏菌与黑麦草组合修复PAHs重污染土壤的效果明显高于微生物修复或植物修复单独作用的效果,土壤微生物群落的多样性和结构也得到明显改善;周际海等<sup>[62]</sup>筛选分离出两株分别为苍白杆菌属和芽胞杆菌属的扑草净降解菌,并试验发现两菌株具有联合代谢降解扑草净的能力,而耐性线虫的存在可促进降解菌数量增殖,提高土壤基础呼吸强度及水解酶和过氧化氢酶的活性,使扑草净的微生物降解率提高8.36%~10.69%,从而得到了有效的降解扑草净的食微线虫-微生物的组合;卓胜等<sup>[63]</sup>通过水稻土盆栽试验发现菌根-蚯蚓-黑麦草的组合50d对多氯联苯的去除率可达61.05%,远高于单独添加蚯蚓或黑麦草、组合添加蚯蚓和黑麦草或菌根和黑麦草4种情况时的修复效率。

#### 3.6 物理、化学、生物联合修复技术

尽管生物修复技术显现出成本低、环境友好等

巨大优势,但也存在一些不足,如植物修复速度较慢、生物很难在高度污染土壤中生存、一些高分子量的有机物(如四环以上的 PAHs)很难被生物降解等问题。为克服生物修复技术的缺点,国内学者研究将物理、化学修复技术与生物修复技术联合,如牛秋雅等<sup>[64]</sup>利用臭氧预氧化法与堆肥法联合修复菲污染土壤,臭氧预氧化作用将菲污染土壤堆肥 31 d 的表层土壤和次表层土壤的菲残留率由 15.0% 和 14.5% 降低到了 1.1% 和 0.9%,证实了臭氧预氧化-堆肥法去除污染土壤中菲的可行性;赵庆节<sup>[65]</sup>研究发现土壤电动修复中,较低的电场强度可刺激土壤细菌生长繁殖,可采用电动力学强化原位生物修复技术的修复效率。目前我国对物理、化学、生物的联合修复的研究尚处于探索阶段,但已有的研究表明,物理、化学、生物联合修复技术具有广阔的应用前景。

#### 4 我国污染土壤生物修复技术发展展望

本文通过文献统计的方式统计分析了我 国污染土壤生物修复技术的研究现状,得到了如下 2 点结论:1)生物修复技术具有环保、经济等优势,近年在我国发展迅速,主要包括植物修复、微生物修复、动物修复、生物材料修复、组合修复及物理、化学、生物联合修复 6 种方法;2)目前我国学者已探索出一些具有较好效果的生物修复技术,但对生物修复技术的原理、针对性、经济性、风险、强化措施、应用范围等方面研究仍有不足。现将主要不足和发展方向总结如下:

1)目前我国对生物修复技术的研究大多是采用试验方法,即通过试验探究对某种污染物污染土壤具备修复作用的植物、微生物、动物或某些组合,对生物修复技术的原理研究较少,对协同组合的研究亦是单靠试验验证,无可循的原理,今后应加强从分子和基因水平上对生物修复原理的研究,深度揭示生物修复机理,推动生物修复技术的发展。

2)目前未见针对不同污染物适用的生物修复技术、不同污染程度应采用的生物修复技术程度(植物的密度、投放菌剂的剂量等),及相应的生物修复效果强化方法等内容进行系统性总结归纳的相关文献和著作,这必将制约土壤生物修复技术在我国的大范围推广。

3)当前一些生物修复技术成本较高,对污染土壤进行修复的同时几乎没有对其进行合理的经济利

用,且土壤生物修复技术存在诸多风险,如动物取食修复植物或动物,外来生物对原生态环境的影响等,目前我国对土壤生物修复的风险认识不足,更没有相应的风险应对措施。因此我国应对土壤生物修复技术的经济性评价和风险评价进行研究。

4)目前对于生物组合修复技术和物理、化学、生物联合修复技术研究较少,加强组合修复技术和联合修复技术的研究对提高土壤修复效率和降低土壤修复成本具有重要意义。

5)目前生物修复技术主要是针对重金属污染、有机物污染土壤的修复,对放射性物质污染、硒和砷等非金属有毒无机物污染、生物污染、固体废物污染、复合污染土壤的研究较少,今后应加强对这 5 种污染土壤的生物修复研究,扩大生物修复技术的应用范围。

#### 参考文献

- [1] WANG Xiaoyu. Characteristic and environmental risk assessment of heavy metals in farmland soil of based on speciation analysis[J]. Informatics and Management Science, 2013, 204: 213-220.
- [2] 刘志培, 刘双江. 我国污染土壤生物修复技术的发展及现状[J]. 生物工程学报, 2015, 31(6): 901-916.
- [3] 侯晓龙, 常青山, 刘国锋, 等. Pb 超富集植物金丝草 (*Pogonatherum crinitum*)、柳叶箬 (*Isache globosa*) [J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 989-994.
- [4] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬——一种新发现的镉超富集植物 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 666-670.
- [5] 李硕, 刘云国, 李永丽, 等. 水葱对镉的超富集作用及其用于植物修复的潜力(英文)[J]. 广西植物, 2007, 27(2): 180-185.
- [6] ZHANG Xingfeng, XIA Hanping, LI Zhian, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 2063-2066.
- [7] ZHANG Fujin, ZHANG Xinxin, HOU Dekun, et al. Potentialities of maize on the removal of organochlorine pesticides from contaminated soils[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(12): 2127-2134, 2191.
- [8] 王奋飞. 将蜈蚣草植物螯合肽合成酶基因(PvPCS1)转入拟南芥中的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [9] CHEN Yunan, CHI Wenchang, TRINH N N, et al. Transcriptome profiling and physiological studies reveal a major role for aromatic amino acids in mercury stress tolerance in rice seedlings[J]. PLoS One, 2014, 9(5): 1-11.
- [10] 肖维林. 砷超富集植物蜈蚣草产后处置及其资源化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [11] 杨建广, 杨建英, 彭长宏, 等. 从超富集植物 *Berkheya coddii* 中国收镍[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 754-759.
- [12] 邓自祥. 超富集植物收获物“水热液化”脱除重金属及生物油转化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.

- [13] 贾伟涛, 吕素莲, 冯娟娟, 等. 利用能源植物治理土壤重金属污染[J]. 中国生物工程杂志, 2015, 35(1): 88-95.
- [14] 潘雨齐, 黄仁志, 雷鸣, 等. 经济作物修复重金属污染土壤的研究现状与应用前景[J]. 中国麻业科学, 2015, 37(1): 35-39.
- [15] 周建利, 邵乐, 朱凤榕, 等. 间套种及化学强化修复重金属污染酸性土壤——长期田间试验[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1056-1065.
- [16] 贾永霞, 张春梅, 方继宇, 等. 细叶百日草对镉的生长响应及富集特征研究[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1577-1582.
- [17] 李翠兰, 邵泽强, 王玉军, 等. 几种花卉植物对铅富集特征的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 127-130, 134.
- [18] 胡婷, 谷洁, 甄丽莎, 等. 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1140-1148.
- [19] CHAI Liyuan, HUANG Shunhong, YANG Zhihui, et al. Cr(VI) remediation by indigenous bacteria in soils contaminated by chromium-containing slag[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1-3): 516-522.
- [20] ZHANG Jun, ZHOU Wuxian, LIU Bingbing, et al. Anaerobic arsenite oxidation by an autotrophic arsenite-oxidizing bacterium from an arsenic-contaminated paddy soil[J]. Environment Science Technology, 2015, 49(10): 5956-5964.
- [21] 付瑞敏, 康治华, 彭瑞强, 等. 高效石油烃降解菌 CQ6 的分离鉴定及 He-Ne 激光诱变[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 404-407.
- [22] 谢云. 高效石油烷烃降解菌及原油降解基因工程菌构建研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [23] 张军, 肖潇, 王敦球, 等. 一株嗜酸氧化亚铁硫杆菌的分离及过滤效果研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3): 1-7, 13.
- [24] 和苗苗, 俞一统, 华玉妹, 等. 生物淋滤法对污泥中 Zn Cu 的去除效果及污泥养分损失研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1359-1364.
- [25] 原武斌. 污泥生物淋滤过程中 Cd 及 Pb 形态变化研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(31): 110-111.
- [26] 谭险夷. 丝状菌对生物淋滤去除底泥中重金属的促进作用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [27] 李洁. 黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 的分离鉴定及其在重金属污染土壤异养生物淋滤处理中的作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [28] 方迪, 周立祥. 温度对制革污泥的生物淋滤除铬效果的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1455-1458.
- [29] 任婉侠, 李培军, 李晓军. 黑曲霉产酸淋滤去除污染土壤中的重金属[J]. 中国环境科学, 2008, 28(8): 736-741.
- [30] 崔雨琪, 方迪, 毕文龙, 等. 一株黑曲霉的分离鉴定及其对土壤重金属的生物浸出效果[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 420-425.
- [31] 吴涛, 依艳丽, 谢文军, 等. 产生物表面活性剂耐盐菌的筛选鉴定及其对石油污染盐渍化土壤的修复作用[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12): 3359-3367.
- [32] 杨卓, 李术娜, 李博文, 等. 接种微生物对土壤中 Cd、Pb、Zn 生物有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 670-675.
- [33] YI H, DAVID E C. Biostimulation of PAH degradation with plants containing high concentrations of linoleic acid[J]. Environment Science Technology, 2007, 41(12): 4382-4388.
- [34] 周笑白. 植物—丛枝菌根真菌修复多环芳烃污染土壤[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [35] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 793-801.
- [36] CHII Ching Tseng, JUI Yann Wang, LEI Yang. Accumulation of copper, lead, and zinc by in situ plants inoculated with AM fungi in multicontaminated soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(21-22): 3367-3386.
- [37] 祖艳群, 卢鑫, 湛方栋, 等. 丛枝菌根真菌在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1538-1548.
- [38] 向昌国, 杨世俊, 聂琴. 土壤动物对土壤环境的生物指示作用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 364-367.
- [39] 颜增光, 何巧力, 李发生. 蚯蚓生态毒理试验在土壤污染风险评估中的应用[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 134-142.
- [40] 李志强, 王彬彬, 聂俊华. 铜污染对蚯蚓体重的影响与其铜富集特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1408-1414.
- [41] WU Gang, KANG Huibiao, ZHANG Xiaoyang, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1-3): 1-8.
- [42] 白建峰, 秦华, 王景伟, 等. 蚯蚓和发酵牛粪促进南瓜苗修复 PAHs 污染农田土壤[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 208-213.
- [43] 马淑敏, 孙振钧, 王冲. 蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 133-138.
- [44] 刘魏魏, 尹睿, 林先贵, 等. 生物表面活性剂强化微生物修复多环芳烃污染土壤的初探[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1118-1125.
- [45] 石福贵, 郝秀珍, 周东美, 等. 鼠李糖脂与 EDDS 强化黑麦草修复重金属复合污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1818-1823.
- [46] 朱清清, 邵超英, 张琢, 等. 生物表面活性剂皂角苷增效去除土壤中重金属的研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2491-2498.
- [47] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1864-1869.
- [48] 刘晓娜, 赵中秋, 陈志霞, 等. 螯合剂、菌根联合植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12H): 127-133.
- [49] 沈莉萍, 宗良纲, 蒋培, 等. 螯合剂和泥炭对苧麻吸收土壤镉的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2767-2772.
- [50] 张婷. 植物激素协同螯合剂强化植物修复土壤重金属污染[D]. 厦门: 集美大学, 2012.
- [51] 韩梅, 籍国东, 倪晋仁. 无机盐强化烷基多苷清洗石油污染土壤的机理[J]. 物理化学学报, 2009, 25(10): 2026-2033.
- [52] 刘霞, 王建涛, 张萌, 等. 螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污

- 染壤土的淋洗修复[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1590-1597.
- [53] 唐浩, 王敏, 刘钊钊, 等. APCAs 在重金属污染土壤修复中的应用综述[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2013, 31(2): 44-52.
- [54] 曹英兰, 陈丽娜, 张金丽, 等. 牡蛎壳粉对酸性土壤的修复及其对镉的钝化作用研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 178-182.
- [55] HAO Xiaowei, HUANG Yizong, CUI Yanshan. Effect of bone char addition on the fractionation and bio-accessibility of Pb and Zn in combined contaminated soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 118-122.
- [56] 孙红文. 生物炭与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 1-3.
- [57] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [58] 刘旻慧, 王震宇, 陈蕾, 等. 花生壳及中药渣混合生物炭对铅污染土壤的修复研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 101-107.
- [59] 王章鸿, 郭海艳, 沈飞, 等. 蚯蚓粪便制备生物炭及其对罗丹明 B 吸附的研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3170-3177.
- [60] YANG Quan, TU Shuxin, WANG Guijing, et al. Effectiveness of applying arsenate reducing bacteria to enhance arsenic removal from polluted soils by *Pteris Vittata* L [J]. International Journal of Phytoremediation. 2012, 14(1): 89-99.
- [61] XU Yang, SUN Guangdong, JIN Jianghua, et al. Successful bioremediation of an aged and heavily contaminated soil using a microbial/plant combination strategy [J]. Journal of Hazardous Material, 2014, 264: 430-438.
- [62] 周际海, 袁颖红, 朱志保, 等. 土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 343-351.
- [63] 卓胜, 苏嘉欣, 黎华寿, 等. 黑麦草-菌根-蚯蚓对多氯联苯污染土壤的联合修复效应[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 150-157.
- [64] 牛秋雅, 曾光明, 牛一乐, 等. 臭氧预氧化-堆肥去除污染土壤中菲实验研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2352-2358.
- [65] 赵庆节. 土壤电动修复中匀强电场对土壤细菌群落的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11551-11554.

## TOP500 新闻组主编关注中国超算的崛起

2017年1月4日, TOP500 新闻组主编迈克尔·费德曼(Michael Feldman)以“正确看待中国超级计算机崛起”为题, 描述并分析了中国超级计算机的现状、挑战与未来预期等。

1) 近五年中国超级计算机发展势头迅猛: 中国在高性能计算领域取得的成就很大程度上是建立在过去五年大量制造的千万亿次超级计算机基础上。过去几年, 中国制造的太湖之光、天河2号、天河1号以及“星云”超级计算机一直位居 TOP500 排行榜的前两位。2016年11月, 中国在 TOP500 最新榜单中的超级计算机数目和整体性能表现已与美国持平。

2) 中国超级计算机的性能与部署仍有提升空间: 尽管中国和美国在 TOP500 榜单中所占数量不相上下, 但中国的大部分超级计算机排在榜单的后半部分, 排名中位数 316, 而美国的中位数是 227。此外, 榜单中大多数中国的超级计算机隶属于互联网数据中心, 并未用于开展高性能计算工作; 而美国的超级计算机大多数被部署于国家实验室、大学以及研究机构。

3) 软件专业人才缺乏 超算应用有待加强: 目前, 中国正致力于在其顶尖超级计算机上使用国内自主的处理器和互联产品, 系统软件缺乏的问题亟待解决, 这是中国超级计算团队的一个明显缺陷。

4) 未来超算标准平台待定 技术研发形势严峻: 中国和世界上其他国家共同面临着一个严峻的问题, 那就是超级计算机没有一个实际的标准平台作为下一步发展目标。同时, 美国 2015 年对中国采取的出口限制政策, 在一定程度上推动着中国技术的自主研发。中国最终是选择完全依赖国内自主设计还是从 ARM、AMD、OpenPOWER 或者其他公司获得技术支持, 仍有待观察。

5) 中国科研财政及全球研发支出将推动中国超算发展: 2009 年, 中国的科研财政支出超过日本, 并于 2013 年超过欧洲, 若以这种趋势延续, 中国的科研财政支出将于 2020 年超过美国。同时, 全球的研发支出也强力推动中国高性能计算公司的发展。

田倩飞(中国科学院成都文献情报中心), 马泽(西南大学) 编译自  
<https://www.top500.org/news/putting-the-rise-of-chinese-supercomputing-in-perspective/>  
原文标题: Putting the Rise of Chinese Supercomputing in Perspective