

• 序 言 •

李银心 研究员，博士生导师。先后就读于北京大学生物系植物生理生化专业、北京林业大学园林植物遗传育种专业和中国科学院植物研究所植物学专业，获学士、硕士和博士学位。1985至1987年任南京农业大学园艺系助教；1990年至今历任中科院植物所研究实习员、助理研究员、副研究员和研究员。1999至2000年加拿大多伦多大学植物系访问学者。2007至2010年任天津大学兼职教授。现任中国农业生物技术学会常务理事、中国农业生物技术学会作物生物技术分会理事，《生物工程学报》编委。在 *Molecular Plant*、*Plant Biotechnol J*、*Plant Cell Environ* 等国内外学术期刊上发表论文 70 余篇，申请专利 46 项，其中已授权专利 36 项。主要从事以抗盐为主线的植物抗逆机理及抗逆植物应用研究，包括：植物耐高盐的分子机理；盐生植物的筛选驯化；抗盐耐海水蔬菜新品种选育和滩涂海水栽培集成应用；盐碱及重金属污染土壤的植物修复。



2020 污染土壤的生物修复专刊序言

李银心

中国科学院植物研究所 植物分子生理学重点实验室，北京 100093

李银心. 2020 污染土壤的生物修复专刊序言. 生物工程学报, 2020, 36(3): 391–396.

Li YX. Preface for special issue on bioremediation of contaminated soil (2020). Chin J Biotech, 2020, 36(3): 391–396.

摘要: 生物修复技术，作为可持续发展的重要方向，因其环境友好、高效且无二次污染并能从根本上解决土壤污染问题而受到关注，已经在土壤污染治理中得到了广泛的应用。为了梳理和凝练生物修复技术的发展状况，本专刊收录了该研究领域的 16 篇论文，分别从植物修复、微生物修复、联合修复、重金属吸收积累的相关分子机制、资源化再利用等方面，详细阐述生物修复技术的发展动态，展望未来的发展趋势，为促进生物修复技术的发展提供参考。

关键词: 污染土壤，重金属，生物修复，植物修复，微生物修复，联合修复

Preface for special issue on bioremediation of contaminated soil (2020)

Yinxin Li

Key Laboratory of Plant Molecular Physiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: As an important strategy for sustainable development, bioremediation technology has been widely used in soil contamination remediation due to the advantages of environmental friendliness, excellent metal removal efficiency and free of

Received: March 16, 2020

Corresponding author: Yinxin Li. Tel: +86-10-62836258; E-mail: yxli@ibcas.ac.cn

secondary pollution. This special issue with a collection of 16 papers covers the research aspects from phytoremediation, microbial repair, combined remediation, molecular mechanisms of heavy metals absorption and accumulation, to beneficial reuse of feedstock resources, presents the recent advances as well as the future prospects involved in bioremediation for soil contamination. We aim to provide useful insights to help future development of bioremediation technology.

Keywords: contaminated soil, heavy metals, bioremediation, phytoremediation, microbial repair, combined bioremediation

土壤是生态系统的基本要素,也是人类赖以生存的物质基础。近几十年来,随着工农业的持续发展,导致不同类型的有机化合物如除草剂、杀虫剂、芳烃等和重金属进入土壤并积累,造成土壤污染^[1]。这些污染使土壤降低或丧失生产力,危及农产品、地下水和人居环境安全,甚至通过生物链的传递和迁移,威胁动物和人类自身的健康。目前,土壤污染已遍布五大洲,成为全球性的严峻问题。为降低污染物对土壤环境的危害,应从污染源头加以控制、减少有机化合物和重金属等污染物进入土壤,与此同时,开发经济有效的针对污染土壤的修复技术。

重金属污染是目前土壤污染中最突出的问题之一。国家环境保护部和国土资源部 2005–2013 年对全国土壤污染状况的联合调查显示,占调查点位总数 16.1% 的点位土壤受到不同程度的污染,而其中 82.8% 是以镉 (Cd)、汞 (Hg)、砷 (As)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、锌 (Zn)、镍 (Ni) 8 种重金属污染为代表的无机污染类型^[2]。重金属污染土壤的修复包括物理化学修复和生物修复。生物修复技术是利用生物 (包括动物、植物和微生物) 的代谢功能,对污染物进行吸收、降解、转化或者清除,实现环境净化,生态恢复^[3]。与传统的物理化学修复方法相比,生物修复技术具有无二次污染、成本低、操作维护相对简单等优点,是一种环境友好的修复技术^[4]。因此,在污染土壤修复中得到广泛的应用。目前污染土壤生物修复的生物主要是植物,其次是微生物。现代生物技术尤其是基因工程和细胞工程的飞速发展和应用,使生物处理具有更高的效率、更低的成本和更好的专一性,为生物修复技术在环境保护中的应用展示了更为广阔的前景^[5]。在此背

景下,《生物工程学报》推出“污染土壤的生物修复技术”专刊,以集中体现本领域的发展动态和研究进展。本专刊共收录 16 篇文章,以重金属污染土壤生物修复为主线,分别从植物修复、微生物修复、联合修复、重金属吸收积累的相关分子机制、资源化再利用等方面,展示土壤污染生物修复技术的研究进展和发展趋势。

植物修复是利用绿色植物根系或茎叶来固定、吸收、转移、转化和降解污染土壤、水体和大气中污染物的环境技术总称^[6-7]。自 1983 年,Scott 等^[8]提出运用植物去除土壤中的重金属污染,以达到修复土壤的目的。人们一直在探寻高效修复土壤的植物,即重金属超富集和富集植物。超富集植物具有很强的重金属耐性和超富集能力,能够在重金属污染土壤中正常生长。利用这些植物来吸收或者吸附积累重金属,可以达到从土壤中清除重金属的目的。目前,全世界范围内已发现对重金属超富集作用的植物有 500 余种,如 As 的超富集植物蜈蚣草 *Pteris vittata* L.、Cd 的超富集植物宝山堇菜 *Viola baoshaensis*、Cr 的超富集植物李氏禾 *Leersia hexandra* Swartz、Mn 的超富集植物商陆 *Phytolacca acinosa* Roxb、Zn 的超富集植物东南景天 *Sedum alfredii* Hance、Pb 的超富集植物圆叶遏蓝菜 *Thlaspi rotundifolium*^[9-12]等。其中,蜈蚣草 *Pteris vittata* L. 是世界上第一种被发现的神超富集植物,具有极强的砷吸收能力、高效的砷转运富集能力以及植物细胞对砷的高度抗性,因此是一种极为理想的修复土壤砷污染的植物^[13-14]。在本专刊中,中国科学院植物研究所何振艳研究组综述了蜈蚣草超富集砷的组学研究进展,以及目前鉴定到的砷富集过程中的重要分子元件,深入阐释了蜈蚣

草超富集砷的分子机制,并对未来的研究方向和趋势进行了展望。

近年来,盐分和重金属污染物的双重影响,严重威胁着盐碱地的开发利用与生产安全。绝大多数已发现的重金属超富集植物为甜土植物,其在盐土环境中难以正常生长,无法用于修复盐土重金属污染^[15]。利用耐盐碱的盐土植物修复盐土重金属污染的研究逐渐引起人们的关注。中国科学院植物研究所李银心研究组和西安文理学院高天鹏团队展示了盐土植物修复重金属污染的相关研究成果。盐角草 *Salicornia europaea* L. 是世界上最耐盐的真盐生植物,能够耐受 1 200 mmol/L NaCl 的高盐度,李银心研究组以盐角草为材料,考察了不同浓度 Cd、Pb、Li 处理下其耐受及积累特性,证明盐角草对于盐渍环境中 Cd、Pb、Li 三种金属均具有较强的耐受性与吸收积累能力,在修复高盐碱土壤的 Cd、Pb、Li 污染中具有应用潜力。碱蓬 *Suaeda salsa* (L.) Pall. 是另一种常见的耐盐碱的盐生植物,具有重金属耐受性,高天鹏团队分析了不同 Cu、Ni 单一和复合胁迫碱蓬种子萌发、芽期生理生化指标变化情况及其在野外条件下重金属富集和转移特征。结果表明,碱蓬可以作为矿区生态恢复和重金属污染修复的备选植物。

许多重金属污染物是通过水网系统从污染源(矿区、工厂等)向土壤系统扩散的,因此,治理水源污染是解决土壤污染问题的重要环节。沉水植物作为水生态系统重要的初级生产者,其根茎叶都能积累重金属,在含 As 污水净化治理中具有应用潜力^[16]。湖南科技大学陈国梁团队进一步研究证明常见的沉水植物(苦草、狐尾藻、金鱼藻、黑藻)对水体中的 As 有着较强的富集能力,他们详细分析了影响沉水植物富集 As 的因素,提出增强对 As 耐受性和富集能力的化学和生物方法,并讨论了现存问题以及今后的发展方向。

中国受重金属污染的农田中 Cd 污染最为普遍^[17]。面对 Cd 污染日趋严重的现状,利用 Cd 高

积累植物结合配套技术对土壤进行修复,是我国农业安全、高效和可持续发展的迫切需要^[18]。轮作和间作皆是我国传统的种植模式,具有提高土地利用率和生产效率,可以通过改变土壤性质,包括植物根系分泌物、土壤酶活性、土壤微生物和土壤 pH 值的变化,改变重金属在土壤中的生物有效性和迁移性,从而影响植物对重金属的吸收、提高土壤重金属污染的修复效率^[19-21]。中国计量大学朱诚团队利用盆栽试验和大田试验将 Cd 高积累植物扫帚菜 *Kochia scoparia* 与 4 个白菜品种进行轮作,探究其对土壤重金属 Cd 的富集效率。结果表明,该轮作系统不仅增加了白菜产量,而且有效降低了白菜可食部位 Cd 含量,实现边生产边治理的绿色农业理念。该团队还以 Cd 相对高积累番茄(中蔬 4 号)和低积累玉米(金珠蜜甜玉米)为材料,通过单作、限制性间作、间作 3 种植方式,探究间作对作物吸收重金属 Cd 的影响,旨在为利用间作模式修复土壤重金属污染和保障食品安全提供参考。此外,我国酸性土壤重金属包括 Cd 和 Zn 污染严重,危害农产品安全生产和人体健康^[22-24]。Al 毒常与土壤酸化相伴而生,限制作物的生长。土壤改良剂的施用可通过改变土壤性质,进而提高植物对土壤中重金属的修复效率。贵州大学刘鸿雁团队和中国科学院南京土壤研究所骆永明、吴龙华团队通过分别添加不同改良剂(钙镁磷肥(CMP)、 $MgCO_3$ 、 KH_2PO_4)和不同浓度 CMP 进行温室盆栽试验,探究不同改良剂对酸性土壤 Al 胁迫条件下 Cd 和 Zn 超积累植物伴矿景天 *Sedum plumbizincicola* 生长以及镉和锌吸取修复效率的影响。结果表明,酸性土壤上施用适量的 CMP 和 $MgCO_3$ 能够缓解伴矿景天的铝毒作用,维持较高的重金属吸收效率。

大多数重金属超积累植物生物量较小,使得吸收积累重金属的总量受到限制,选择一些生长周期短,具有较大生物量和较强重金属耐受能力,能够富集重金属的经济植物,成为近年来受到关

注的方向。高生物量经济植物用于重金属污染土壤修复的同时,可兼顾生态和经济效益,因此具有较好的应用前景。贾伟涛在总结植物修复研究进展的基础上,综述了近年来高生物量经济植物在重金属污染土壤修复中的研究进展,探讨了改善高生物量经济植物修复重金属污染土壤效率的方法,为提高植物修复经济效益,促进植物修复广泛应用提供参考。

随着越来越多的植物被发掘并用于修复重金属污染土壤,进一步了解这些植物富集重金属的分子机制,对于植物修复污染土壤和提高植物修复效率具有十分重要的意义。中国科学院植物生理生态研究所龚继明团队和晁代印团队为本专刊提供了相关的进展报告。晁代印团队以土壤修复方式为起点,综述了重金属对生态环境的危害、重金属污染土壤的修复类型,以及从植物重金属转运蛋白、植物新型砷酸盐还原酶的克隆与功能和植物新型螯合肽及转运蛋白 3 个方面详细阐述了植物吸收积累重金属以及解毒的相关分子机制研究进展,探讨了植物修复的发展现状以及趋势。龚继明团队通过构建酵母表达 cDNA 文库筛选得到富集和耐受 Cd 的关键基因 *SpMT2*, 进一步通过酵母异源表达系统,并结合其在植物中的亚细胞定位和表达模式,解析了其介导 Cd 耐受性的机制。推测 *SpMT2* 可能在超积累植物伴矿景天 *Sedum plumbizincicola* 细胞质中螯合 Cd, 在降低 Cd 毒害的同时可能还保持 Cd 在细胞质中的流动性从而在 Cd 长途转运过程中也发挥重要作用。

在植物修复技术应用中,一个受到关注的问题是富集重金属的植物材料的后续处置和利用问题,这些植物材料如果处置不当可导致二次污染。植物采矿主要利用超积累植物高量吸收土壤中的重金属,并从中提取、冶炼金属产品,在修复污染土壤的同时实现金属的资源化。其中具有代表性的是 Ni 的回收利用,在自然界广泛分布着自然风化的富 Ni 土壤。中山大学仇荣亮团队综述了近 30 年

来,国内外 Ni 污染土壤植物采矿技术的发展过程和研究进展,指出植物采矿技术关键过程主要包括超积累植物镍高选择性根际环境响应、植物镍高效吸收转运以及生物质中镍高附加值资源化等过程,提出了系统开展超积累植物品种筛选、化学与微生物强化技术的研发、农艺管理调控技术的优化,以及生物质镍的有效分离提取等研究的建议和展望,为接下来植物采矿的科学研究和技术在全世界推广提供理论基础和技术指导。

微生物修复技术是利用土壤中微生物多种多样的代谢功能,通过创造适宜的环境条件,促进微生物的代谢功能,从而降解土壤中污染物的生物修复技术。微生物包括土著微生物和人工培养的功能微生物群。湖北师范大学汪劲松团队综述了产嗜铁素抗砷微生物在砷污染环境中的作用及其在砷污染修复中的应用潜力。为开发砷污染修复的微生物修复技术和农业用地土壤改良剂或重金属隔离剂提供一些思路。

许多研究表明植物、微生物和动物在土壤修复中存在着相互促进的作用。在植物-微生物组合修复过程中,微生物一方面活化重金属,降解有机物,提高植物对污染物质的吸收和转运,另一方面,通过代谢分泌植物激素等物质促进植物生长;而植物可以通过根系分泌糖类、氨基酸等有机物质促进微生物的生长代谢。动物对植物和微生物修复则是起到“催化剂”作用。生物修复技术间的组合修复在污染土壤修复中已经取得了许多有价值的成果,被证明是非常有效的方法。在本专刊中,中国科学院城市环境研究所朱永官研究组综述了我国土壤污染现状及生物修复技术研究进展,在此基础上,详细阐明了土壤中微生物-植物-动物之间的相互作用,及其对土壤重金属迁移转化和生物修复效果的影响,深入剖析了微生物和(或)动物强化的植物修复方法的巨大研究价值。指出未来可在已有关于重金属污染土壤生物多样性及其功能研究基础上,在食物网水平上深入研究土壤生物间的相互作用机

制及其对重金属迁移转化的影响机制,提出土壤食物网的定向调控原理与技术,建立多元生物联合强化的污染土壤修复新技术,形成基于食物网的土壤污染生态风险评估体系。天津师范大学张海燕团队针对铜污染问题,对生物修复的主要技术如植物修复、微生物修复、植物-微生物联合修复、动物修复等在治理 Cu 污染土壤方面的研究进展进行了综述。蚯蚓作为潜在强化修复生物,对植物生长的促进作用已有较多研究,中国科学院南京土壤研究所吴龙华和贵州大学刘鸿雁团队通过在不同性质污染土壤上种植伴矿景天 *Sedum plumbizincicola*、引入赤子爱胜蚓 *Eisenia foetida*,研究了蚯蚓对超积累植物伴矿景天生长和重金属 (Cd/Zn) 吸取效率的影响,结果表明添加蚯蚓可强化酸性的常湿淋溶土重金属污染的超积累植物修复,外加秸秆可作为中性水耕人为重金属污染的蚯蚓强化伴矿景天修复的配套技术。

除草剂残留造成的土壤污染亦是土壤污染的一个重要问题。微生物修复不仅可以用于治理重金属等无机物污染的土壤,也可以治理农药、除草剂、石油、多环芳烃等有机污染物。黑龙江大学付海燕团队通过富集培养、逐级驯化等方法,从氯嘧磺隆污染土壤中分离到 1 株高效氯嘧磺隆降解菌 T9DB-01,分析其形态特征、生理生化及 16S rDNA 序列,进一步探索了该菌株降解氯嘧磺隆的影响因素,旨在解决氯嘧磺隆残留对土壤、水体污染,及后茬敏感作物药害问题,为污染土壤微生物修复提供降解菌种资源。结果表明,该降解菌株对氯嘧磺隆污染土壤原位生物修复具有一定的应用潜力。

生物修复技术是一门新兴学科,包含着多方面的内容,在我国正处于发展阶段。谨希望本专刊的出版能够为土壤污染生物修复技术的发展提供新的思路,吸引更多力量来共同推动生物修复技术领域的发展,进而稳定有效地改善土壤环境。此外,本专刊内容上如有不足之处,希望各位同行和广大读者进一步批评指正。

REFERENCES

- [1] Zhang C, Tao Y, Li SX, et al. Bioremediation of cadmium-trichlorfon co-contaminated soil by Indian mustard (*Brassica juncea*) associated with the trichlorfon-degrading microbe *Aspergillus sydowii*: related physiological responses and soil enzyme activities. *Ecotoxicol Environ Safe*, 2020, 188: 109756.
- [2] Ministry of environmental protection, Ministry of land and resources. National soil pollution survey bulletin [EB/OL]. [2020-03-16]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.html. (in Chinese)
环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. [2020-03-16]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.html.
- [3] Liu ZP, Liu SJ. Development of bioremediation in China—a review. *Chin J Biotech*, 2015, 31(6): 901–916 (in Chinese).
刘志培, 刘双江. 我国污染土壤生物修复技术的发展及现状. *生物工程学报*, 2015, 31(6): 901–916.
- [4] Liu HY, Guo SS, Jiao K, et al. Bioremediation of soils co-contaminated with heavy metals and 2,4,5-trichlorophenol by fruiting body of *Clitocybe maxima*. *Journal of hazardous materials*, 2015, 294: 121–127.
- [5] Tang HZ. Preface for special issue on environmental biotechnology (2019). *Chin J Biotech*, 2019, 35(11): 2031–2034 (in Chinese).
唐鸿志. 2019 环境生物技术专刊序言. *生物工程学报*, 2019, 35(11): 2031–2034.
- [6] Scragg A. *Environmental Biotechnology*. Beijing: World Books Press, 2000.
- [7] Schwitzguébel JP, Comino E, Plata N, et al. Is phytoremediation a sustainable and reliable approach to clean-up contaminated water and soil in Alpine areas? *Environ Sci Pollut Res*, 2011, 18(6): 842–856.
- [8] Scott D, David W. Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiol*, 1996, 110(3): 715–719.
- [9] Zheng JJ, Liu J, Zhang XH, et al. Research progress of phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals. *Guangdong Agric Sci*, 2013, 40(18): 159–164 (in Chinese)

- 郑君健, 刘杰, 张学洪, 等. 重金属污染土壤植物修复及强化措施研究进展. 广东农业科学, 2013, 40(18): 159-164.
- [10] Xue SG, Ye S, Zhou F, et al. Identity of *Phytolacca americana* L. (*Phytolaccaceae*), Pokeweed: a manganese hyperaccumulator plant. Acta Ecologica Sin, 2008, 28(12): 6344-6347 (in Chinese).
薛生国, 叶晟, 周菲, 等. 锰超富集植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 的认定. 生态学报, 2008, 28(12): 6344-6347.
- [11] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. New Phytol, 2009, 181(4): 759-776.
- [12] Guo XH, Zhu GL, Wei XZ. Characteristics of uptake, bioaccumulation and translocation of soil lead (Pb) in five species of herbaceous plants. Res Soil Water Conservat, 2016, 23(1): 183-186 (in Chinese).
郭晓宏, 朱广龙, 魏学智. 5 种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运. 水土保持研究, 2016, 23(1): 183-186.
- [13] Ma LQ, Komar KM, Tu C, et al. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature, 2001, 409(6820): 579.
- [14] Chen TB, Wei CY, Huang ZC, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* and its characteristics in arsenic accumulation. Chin Sci Bull, 2002, 47(3): 207-210 (in Chinese).
陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- [15] Ben Rejeb K, Ghnaya T, Zaier H, et al. Evaluation of the Cd²⁺ phytoextraction potential in the xerohalophyte *Salsola kali* L. and the impact of EDTA on this process. Ecol Eng, 2013, 60: 309-315.
- [16] Rezanian S, Taib SM, Md Din MF, et al. Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. J Hazard Mater, 2016, 318: 587-599.
- [17] Song W, Chen BM, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China. Res Soil Water Conser, 2013, 20(2): 293-298 (in Chinese).
宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [18] Xiao WD, Ye XZ, Zhang Q, et al. Evaluation of cadmium transfer from soil to leafy vegetables: Influencing factors, transfer models, and indication of soil threshold contents. Ecotox Environ Safe, 2018, 164: 355-362.
- [19] Shentu JL, He ZL, Yang XE, et al. Accumulation properties of cadmium in a selected vegetable-rotation system of southeastern China. J Agric Food Chem, 2008, 56(15): 6382-6388.
- [20] Xue B, Yin ZY, Xiao Q, et al. Effects of long-term straw returning on soil fertility under rice rape rotation system. Chin Agric Sci Bull, 2017, 33(7): 134-141 (in Chinese).
薛斌, 殷志遥, 肖琼, 等. 稻-油轮作条件下长期秸秆还田对土壤肥力的影响. 中国农学通报, 2017, 33(7): 134-141.
- [21] Dai CC, Hui X, Wang XX, et al. Intercropping peanut with traditional Chinese medicinal plants improves soil microcosm environment and peanut production in subtropical China. Afr J Biotechnol, 2009, 8(16): 3739-3746.
- [22] Zhou H, Zeng M, Liu J, et al. Investigation and evaluation of Pb, Cd, Zn contamination in soybean planting soils of 4 typical mine zones in Hunan province, China. J Agro-Environ Sci, 2011, 30(3): 476-481 (in Chinese).
周航, 曾敏, 刘俊, 等. 湖南 4 个典型工矿区大豆种植土壤 Pb、Cd、Zn 污染调查与评价. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 476-481.
- [23] Li ZY, Ma ZW, Jan Van Der Kuijp T, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. Sci Total Environ, 2014, 468-469: 843-853.
- [24] Wang FP, Xiao NC, Zhou L, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in farmland of geochemical anomaly area in southwest Guangxi. Environ Sci, 2020, 41(2): 876-885 (in Chinese).
王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价. 环境科学, 2020, 41(2): 876-885.

(本文责编 陈宏宇)