

# 重金属污染土壤的生物修复技术研究进展

罗辉, 朱易春\*, 冯秀娟 (江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西赣州 341000)

**摘要** 简述了土壤重金属污染的危害及我国当前土壤重金属污染的形势与现状。与传统、物理化学技术相比, 生物修复技术具有简单、高效的优点, 具有广阔的发展前景与研究价值。生物修复包括植物修复、微生物修复、动物修复以及联合修复, 目前该技术尚处于研究与发展阶段, 在实际大规模重金属修复应用中仍存在一定的缺陷和不足。从植物修复技术、微生物修复技术、动物修复技术及其联合修复技术 4 个方面简述了生物修复技术在重金属污染土壤治理中的研究进展与其各自的优点和缺点, 最后探讨了生物修复技术现存在的不足之处及未来的研究方向。

**关键词** 重金属污染; 植物修复; 动物修复; 微生物修复; 联合修复

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)05-224-04

## Research Progress of Bioremediation on Heavy-Metal Contaminated Soil

LUO Hui, ZHU Yi-Chun\*, FENG Xiu-juan (The School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000)

**Abstract** This paper provides a brief introduction to the hazards and situation of soils contamination by heavy metals in China. Compared with the traditional physical and chemical technologies, bioremediation technology has the advantages of simplicity and high efficiency with wide developing and research prospects. However, bioremediation technology is still at the stage of research and development at present with some shortcomings in the actual application of large-scale heavy metal remediation, including phytoremediation, micro-remediation, animal remediation and associated remediation. The progress in the research of bioremediation for heavy-metal contaminated soil is reviewed, including phytoremediation, micro-remediation, animal remediation and associated remediation, and their advantages and disadvantages. Finally, some disadvantages of bioremediation in soil pollution treatment are presented and the future of this research field is looked into.

**Key words** Heavy metal pollution; Phytoremediation; Animal remediation; Micro-remediation; Associated remediation

土壤重金属污染是指由于人类活动使得土壤中的重金属含量明显超过背景值, 造成生态环境恶化的现象。重金属污染物进入土壤后难以被降解, 其具有隐蔽性、不可逆性、累积性等特点, 对动植物的生存、人类健康及社会发展存在极大危害<sup>[1-2]</sup>。白义等发现土壤动物的数量及群落多样性均随重金属污染严重程度的增加而不断减少、下降<sup>[3]</sup>。高浓度重金属污染能显著降低小节肢类土壤动物的个体密度<sup>[4]</sup>。随着土壤铬污染程度的增加, 草本植物株高和叶片叶绿素含量会显著下降<sup>[5]</sup>。湘南某农田中种植的苋菜、空心菜等叶菜类蔬菜的 Pb 和 Cd 含量超过国家食品卫生标准限值<sup>[6]</sup>, 重金属通过食物链进入人体, 不同重金属元素对人体健康的危害不同<sup>[7]</sup>, 如镉易造成骨质疏松、萎缩、变形等症状; 甲基汞会造成神经系统受损; 铅能引起末梢神经炎及运动和感觉障碍等<sup>[8]</sup>。当前, 我国土壤重金属污染形势相当严峻。据统计, 我国耕地土壤的重金属污染面积为 16.67% 左右, 约占我国耕地总量的 1/6, 其中, 辽宁、河北等 14 个省、市和自治区是我国耕地重金属污染的多发区域<sup>[9]</sup>。辽宁各土壤污染区面积均超过 1 000 km<sup>2</sup>, 湖南土壤重金属污染面积已达 71.5 万 hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>, 以及其他多个城市地区均受到不同程度的污染<sup>[11-12]</sup>。土壤重金属污染的隐蔽性和滞后性等特点注定了治理土壤重金属污染的任务繁重、过程复杂、道路漫长。

随着土壤的重金属污染问题日趋严重, 近年来, 国内外对于如何降低、减小, 甚至消除大面积土壤重金属污染做了大量研究工作, 主要分为物理法、化学法和生物法 3 个方面。

物理修复是指通过各种物理过程将污染物从土壤中去或分离的技术, 主要包括土壤淋洗法、工程措施法、电热修复法等; 化学修复是通过向重金属污染土壤中添加改良剂、抑制剂, 以调节和改变土壤的理化性质, 使重金属发生沉淀、吸附、拮抗和氧化还原等化学反应, 降低其生物有效性<sup>[14]</sup>。物理化学技术修复重金属污染土壤不仅费用昂贵、治理效果一般, 难以应用于大面积污染土壤的改良, 化学治理后的土壤中重金属容易再度活化, 而且常常造成土壤结构的破坏, 导致土壤生物活性和肥力下降, 引起二次污染等。而生物修复技术是一种起步较晚但发展潜力巨大的新兴技术, 其与传统的物理、化学修复技术相比, 具有操作管理简单、处理费用低、对周边环境扰动小、不产生二次污染等特点, 是一种经济、有效且非破坏性的修复技术, 在处理土壤重金属污染方面具有广阔研究前景。

## 1 生物修复技术

生物修复是指生物通过生命代谢活动将环境中的有毒有害物质完全分解成二氧化碳和水或转化为无毒害作用的中间产物的过程。目前生物修复分为植物修复、微生物修复、动物修复、植物-微生物联合修复和植物-动物-微生物联合修复。

**1.1 植物修复技术** 植物修复技术是通过利用特定的植物吸收、降解、固定、富集重金属, 降低重金属在土壤中的浓度, 从而修复被重金属污染的土壤的技术。植物修复机理主要包括植物提取、植物固定和植物挥发 3 个方面。

植物提取是在受重金属污染的土壤中连续种植重金属超积累植物, 植物吸取土壤中一种或几种重金属, 富集并输送到植物根部的可收割部分或植物的地上枝条部位, 随后收割并集中处理, 使土壤中重金属浓度降低到可接受水平。超

**基金项目** 国家自然科学基金(51364015)资助。

**作者简介** 罗辉(1988-), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 研究方向: 污水处理。\* 通讯作者, 副教授, 硕士生导师, 从事污水处理等方向的研究与教学。

**收稿日期** 2014-12-26

积累植物是植物提取的关键之一,是指能够超量吸收和积累重金属的植物,如天蓝遏蓝菜能超富集 Cd 和 Zn<sup>[13]</sup>。目前,已发现超富集植物有 700 种以上,且广泛分布于约 50 科中,并主要集中在十字花科<sup>[14]</sup>。赵盈丽等经试验研究发现商陆能够将土壤中的锰转运到地上部位,一棵商陆可以富集平均 13 mg 的 Mn,表明商陆对锰有较强的富集能力,是一种优良的修复锰污染土壤的物种<sup>[15]</sup>。康薇指出,超积累植物蓖麻对 Cu 不仅有极强的耐性和较高的吸收、转运能力,并且对生长环境中酸碱度的适应能力很强,有利于在重金属污染土壤的生态修复中大规模应用<sup>[16]</sup>。

植物固定又称植物钝化,是通过吸收、分解、氧化还原和沉淀固定等过程,促进重金属转变为低毒性形态,降低重金属在土壤中的迁移性和毒性。Fánor 等表示马蹄莲对铁具有一定耐受性并大量固定在根部,适合用于重金属污染湿地修复<sup>[17]</sup>。除了借助植物本身的特性,在土壤中添加 EDTA、CD-TA、柠檬酸、肥料等,可提高重金属在土壤根系中的活性<sup>[18]</sup>。张鑫等发现 PASP 对玉米修复重金属污染土壤有明显的强化作用<sup>[19]</sup>。汪楠楠等通过盆栽试验发现柠檬酸和 EDTA 对吊兰富集量的影响与其对土壤中铜的活化能力呈显著性正相关,柠檬酸对土壤铜有较强的活化作用,能够有效提高吊兰对铜的吸收,且在浓度为 5 mmol/L 时效果最为明显<sup>[20]</sup>。

植物挥发是利用植物根系分泌的一些特殊物质使土壤中重金属转变为可挥发的形态,或者是植物吸收重金属在植物体内转化为气态物质释放到大气中的过程,目前主要是针对 Hg 和 Se 的研究<sup>[21]</sup>。但将污染物释放到大气后,存在环境污染和危害人类健康的风险。

植物修复技术修复成本低,操作过程简单,且植物修复过程中不会对修复区域造成生态环境破坏,还能防风固沙,减少水土流失和土地荒漠化,净化空气和水,改善当地生态及生物栖息地,形成自然景观,美化地表环境。但目前,超积累植物缺乏完备的数据库,且其长期在重金属胁迫环境下,往往生长缓慢、植株矮小、生物量低,使得修复效率变低、修复周期延长。被污染土壤常常是同时受到多种重金属复合污染,而一种植物通常只忍耐或吸收一、两种重金属元素,对其他浓度较高的重金属可能表现出某些中毒症状,且外来物种的引种存在较高生物入侵风险。植物稳定只是将重金属转化为低毒态,并没有根本去除,外部环境的变化可将其重新激活。此外,随着季节更迭,植物的枯枝落叶也可能使重金属返回土壤。

**1.2 微生物修复技术** 微生物修复技术是指微生物通过转化作用和固定作用改变土壤重金属形态,降低重金属毒性、移动性和生物可利用性,从而达到治理重金属污染土壤的目的<sup>[22-23]</sup>。微生物一般采用天然存在的土著微生物,有时也加入经过人工驯化和特别培养的微生物以及商品化的适宜微生物菌剂。

微生物对重金属的转化作用包括氧化还原作用和甲基化与去甲基化作用,常见的有对铬、汞、硒和砷等的转化<sup>[22]</sup>。

通过生物还原反应,微生物能将六价铬还原为三价铬,目前已有多种对 Cr(VI)有还原作用的菌种被分离出来,如硫酸盐还原菌、芽孢杆菌属、埃希氏菌属、阴沟杆菌、大肠杆菌、假单胞菌属等<sup>[24]</sup>。彭祚全等发现鲍氏不动杆菌在含硒量为 25 000 μg/ml 的营养琼脂培养基中能生长并可还原硒,地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌在 33 000 μg/ml 时能正常生长并能还原无机硒为红色单质硒,在含硒量为 46 500 μg/ml 时仍能缓慢生长<sup>[25]</sup>。这些超耐硒微生物的发现,在治理土壤硒污染方面具有重要意义。

微生物固定作用可将重金属离子转化为有机结合态、残渣态或积累在微生物体内,包括胞外吸附作用、胞外沉淀作用和胞内积累作用 3 种形式<sup>[22-23]</sup>。曹德菊等利用大肠杆菌、枯草杆菌、酵母菌对重金属离子 Cu、Cd 进行生物修复试验,结果发现当环境中 Cu、Cd 浓度较低(≤5 mg/L)时,微生物修复性能良好,去除率可达 25%~60%<sup>[26]</sup>。李梦杰等利用裂褶菌 GHN08-116 菌株修复受 Hg、Pb、Cr 污染的土壤,试验研究发现该菌株对土壤中交换态铅和铬具有很强的富集能力,其最大富集率达 1.9%,交换态铬最大富集率为 2.6%,而对交换态汞的富集能力不强,最大富集率仅为 0.78%<sup>[27]</sup>。Benmalek 等研究金黄杆菌属的一个新菌种 *Solincola*,发现其能生长在一定浓度的有毒金属存在的环境中并具有较高的金属富集能力,能够用于原位生物修复重金属污染土壤<sup>[28]</sup>。

微生物与动植物相比有以下 5 个显著优点:个体微小、比表面积大、繁殖快、代谢能力强、种类多、分布广、适应性强、容易培养,这也造就了其在自然界物质循环污染土壤修复改良中的独特地位<sup>[29]</sup>。但微生物修复技术大多还处于实验室研究和田间试验与示范阶段,对修复机理的研究不够完善。且特定微生物只能降解特定类型的污染物,其活性极易受到温度和其他环境条件影响。若采用的微生物为非土著,加入到修复现场后将与土著菌株发生种间竞争,可能因其竞争力低使目标微生物数量减少或其代谢活性丧失。而且目前微生物修复效率较低,不能修复重度污染土壤。此外,微生物个体微小,难以从土壤中分离,存在后续回收问题。

**1.3 动物修复技术** 动物修复技术是利用土壤动物(如蚯蚓)通过食物链等作用吸收、降解或转移重金属,以降低土壤中重金属的浓度。国外对于动物修复的研究已有较长时间,而我国的动物修复研究起步较晚,尚处于探索阶段,孙艳芳等研究发现土壤无脊椎动物群落的多样性指数、蜱螨目和弹尾目的种群数量能够用来指示土壤重金属污染的程度<sup>[30]</sup>。徐霖林等发现在淀山湖重金属含量较高的区域,寡毛类大量存在,而不适合其他底栖动物的生存,因此,将颤蚓科的底栖动物作为淀山湖沉积物中重金属含量、污染指数的潜在指示生物具有一定的意义<sup>[31]</sup>。目前动物修复重金属污染土壤主要是指土壤动物,如蚯蚓、线虫、节肢动物甲螨等。伏小勇等经试验发现在耐受浓度范围内,蚯蚓对重金属的富集量随着重金属浓度的增加而增加,说明蚯蚓对重金属有一定的忍耐和富集能力,用蚯蚓修复重金属污染的土壤具有一定的应用

价值<sup>[32]</sup>。也有研究表明蚯蚓对 Pb 有较强的富集作用,可以作为检测重金属污染土壤中 Pb 的重要生物指标<sup>[33]</sup>。

土壤动物大规模养殖技术成熟、成本较低且操作简便,可利用农牧业产生的大量废弃物喂养,不仅能资源化利用,还可达到治理污染的目的。但动物吸收土壤中的重金属后,可能通过排便等方式重新回到土壤,且特定动物只能修复其耐受范围内的重金属污染土壤,一旦超出将会逃逸甚至死亡。

**1.4 植物-微生物联合修复技术与植物-微生物-动物联合技术** 植物-微生物联合修复技术是利用植物与微生物之间相互作用以提高土壤重金属污染的修复效率的技术,植物-动物-微生物联合修复技术则是植物、动物与微生物三者共同作用的结果。在土壤中投加微生物并提高营养和有机物含量能够加快土壤污染物的降解;土壤动物能够增加阳离子交换量、提高土壤孔隙度和持水量,使土壤保持健康并为微生物的代谢活动提供了良好的媒介;而植物不仅具有吸收、转化、积累土壤污染物的能力,还能促进根系微生物降解有机污染物,生物修复依赖于三者的共同作用<sup>[34]</sup>。近年来,联合修复技术逐渐引起各学者的研究兴趣。Gustavo 认为投加根系微生物、橄榄废物堆肥与植物共同作用修复重金属污染土壤具有可行性,不仅能提高植物耐性,且有利于橄榄加工厂的绿色生产<sup>[35]</sup>。田伟莉等发现 Cd、Cu、Pb 修复效果分别较单个动物修复和植物修复的简单叠加效果高 11.5%、7.2%、5.0%<sup>[36]</sup>。赵光试验发现经凝结芽孢杆菌处理后的印度芥菜根部 Cd 含量提高了 28%,表明该菌株可以增强印度芥菜对重金属 Cd 的吸收<sup>[37]</sup>。杨柳等研究了在 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 胁迫作用下蚯蚓、菌根菌及其联合作用对植物修复的影响,结果显示蚯蚓可以显著提高植物地上部分的生物量,菌根菌可以提高植物地上部分的重金属积累浓度,同时接种蚯蚓与菌根菌所能提高植物吸收的重金属总量的幅度最大,表明生物修复中同时接种蚯蚓与菌根菌,能使其发挥联合作用<sup>[38]</sup>。

与单一生物修复相比,联合修复构造了一个完整的修复系统,修复效率更高。但联合修复的修复机理和操作过程更加复杂,成本更高。目前,联合修复技术尚缺乏深入机理研究与实际应用经验,有待于进一步发掘联合修复技术的发展潜力。

此外,将纳米技术及转基因技术用于重金属修复也逐渐引起人们的关注<sup>[39-41]</sup>。Jiao 等利用零价铁纳米粒子(A-nZVI)去除 Cr(VI),结果发现在室温下,pH 为 2,Cr(VI)/A-nZVI 摩尔比为 0.025 时,浓度为 50 mg/L 的 Cr(VI) 的去除率达到 100%<sup>[42]</sup>。Navarro 等指出,通过移动遗传因素进行水平基因转移对于提高生活在高浓度重金属极端环境的微生物的适应性和通用性起着重要的作用<sup>[43]</sup>。

## 2 重金属污染土壤的生物修复技术存在的问题

尽管生物修复技术有操作管理简单、处理费用低、对周边环境扰动小等优点,但仍然存在以下几个主要问题:①对于重度重金属污染土壤无可奈何,植物、动物与微生物都有其对各种重金属的耐受范围,一旦土壤受重金属污染浓度超

出其耐受范围将大大减弱生物修复效果。②缺乏实际应用经验,存在与土著生物的种间竞争等原因,使得生物修复在大规模实际应用中修复效率往往大大降低。③生物修复过程极易受到外部环境(如温度、pH 等)干扰,适应性较差。④生物修复专一性太强,缺乏普遍性,现实中重金属污染土壤普遍为受到多种重金属及其他污染物的复合污染,这是只能修复特定污染物的生物修复技术所面临的一个重要问题。

## 3 重金属污染土壤的生物修复技术发展展望

目前,我国对生物修复技术的研究大多集中在植物修复和微生物修复两方面。由于当前科技水平的限制、研究资金的缺乏、研究时间尚短以及探索程度尚浅,所以探得的只是生物修复技术的沧海一粟,而植物修复技术较于微生物及动物修复技术方面,植物修复土壤重金属污染的治理机理较为简单、操作更为简便、易于得到预期治理效果,我国在生物修复中的植物修复技术方面研究最早,但是并不能因此忽视微生物和动物在治理重金属污染方面的作用和重要性。未来应该更加注重研究植物、动物、微生物三者之间相互作用,共同修复重金属污染土壤,主要有以下几个发展方向。

**3.1 基础理论研究的深化** 生物修复技术涉及恢复生态学、环境科学、土壤学、生物学、物理化学等多门学科理论知识,只有具备完备的基础理论知识储备,才能更加灵活地运用生物修复技术治理现实土壤污染问题,如土壤重金属形态及其相互转化机理、分子生物学水平上的生物解毒机理、金属螯合机理以及土壤-微生物-植物-动物系统及相互作用机理等。

**3.2 生物修复的后续处理** 目前对于生物修复的后续处理还缺乏统一的系统装置或完善方法,生物修复重金属污染土壤后如何进行后续处理并回收重金属将会是未来研究方向的一个热点。

**3.3 与其他技术联用** 加强生物修复技术与其他技术的联用,充分发挥各个修复技术的优势。如将分子生物学和基因工程技术应用于生物修复中;与纳米技术联用催化提高修复效率;利用稳定同位素标记(SIP)技术寻找可利用的生物;用转基因技术培育出大量耐性植物、动物和抗重金属微生物;物理、化学修复与生物修复技术联用等。

**3.4 植物-动物-微生物联合技术** 我国国土面积广、土壤类型多样,土壤污染状况复杂,且存在显著区域性,因此单一修复技术(如植物修复技术、微生物修复技术)往往很难达到修复目标,联合修复模式可能将成为未来修复土壤重金属污染的主要模式。只有土壤动物、植物、微生物三者结合,相互作用,进行重金属污染土壤的修复,重新建立起稳定的土壤生态系统才能做到真正高效、绿色地修复重金属污染土壤。

## 参考文献

- [1] WANG X Y. Characteristic and environmental risk assessment of heavy metals in farmland soil of based on speciation analysis[J]. Informatics and Management Science I, 2013, 204: 213-220.
- [2] FAROUK S, MOSA AA, TAHA AA, et al. Protective effect of humic acid and chitosan on radish (*Raphanus sativus*, L. var. *sativus*) plants subjected to cadmium stress[J]. Stress Physiol Biochem, 2011, 7(2): 99-116.

- [3] 白义,施时迪,齐鑫,等. 台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响[J]. 生态学报,2011,31(2):421-430.
- [4] 李孝刚,丁昌峰,王兴祥. 重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落结构的影响[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/10.5846/stxb201301310202.html>.
- [5] 王爱云. 草本植物对铬污染的响应[J]. 西北农业学报,2010(7):164-167.
- [6] 吴燕明,吕高明,周航,等. 湘南某矿区蔬菜中Pb、Cd污染状况及健康风险评估[J/OL]. 生态学报,2014(08), <http://www.cnki.net/kcms/detail/10.5846/stxb201212251868.html>.
- [7] JOLLY YN, ISLAM A, AKBAR S. Transfer of metals from soil to vegetables and possible health risk assessment[J]. Springer Plus, 2013(2):385-393.
- [8] 付晓萍. 重金属污染物对人体健康的影响[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004,24(6):8-9.
- [9] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013(2):293-298.
- [10] 无. 土壤“中毒”:重金属污染进入“集中多发期”[J]. 国土资源,2011(10):28-29.
- [11] 周振民. 开封市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(5):1-4.
- [12] 梁娟. 怀化市市区绿地土壤重金属污染现状研究[J]. 中国农学通报, 2013,29(32):291-295.
- [13] MIJOVILOVICH A, LEITENMAIER B, MEYER K W, et al. Complexation and toxicity of copper in higher plants II. Different mechanisms for copper versus cadmium detoxification in the copper-sensitive cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype)[J]. Plant Physiology, 2009, 151:715-731.
- [14] 高晓宇. 土壤重金属污染现状及修复技术研究进展[J]. 现代农业科技,2013(9):229-231.
- [15] 赵盈丽,游少鸿,刘杰,等. 商陆对锰污染土壤的修复实验研究[J/OL]. 广西植物, <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20131217.0917.001.html>.
- [16] 康薇. 超积累植物蓖麻对重金属铜的吸收[J]. 黄石理工学院学报, 2011,27(5):10-13.
- [17] CASIERRA-POSADA F, BLANKE M M, GUERRERO-GUÍO J C. Iron tolerance in calla lilies (*Zantedeschia aethiopica*) [J]. Gesunde Pflanzen, 2014,66(2):63-68.
- [18] 刘小宁,马剑英,张慧文,等. 植物修复技术在土壤重金属污染中应用的研究进展[J]. 中国沙漠,2009,29(5):859-865.
- [19] 张鑫,史璐皎,刘晓云,等. 聚天冬氨酸强化植物修复重金属污染土壤的研究[J]. 中国农学通报,2013,29(29):151-156.
- [20] 汪楠楠,胡珊. 柠檬酸和EDTA对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响[J]. 生态学报,2013,33(2):631-639.
- [21] 魏晓方,方凤满,林跃胜. 矿区重金属污染土壤修复技术的研究现状和展望[J]. 广东微量元素科学,2012,19(7):1-6.
- [22] 黄春晓. 重金属污染土壤原位微生物修复技术及其研究进展[J]. 中原工学院学报,2011,22(3):41-44.
- [23] KATARZYNA HRYNKIEWICZ,CHRISTEL BAUM. Application of microorganisms in bioremediation of environment from heavy metals[J]. Environmental Deterioration and Human Health,2014:215-227.
- [24] 邓红艳. 铬污染土壤的微生物修复技术研究进展[J]. 地球与环境, 2012,40(3):466-472.
- [25] 彭祚全,樊俊,向德恩. 3株超耐硒细菌的分离筛选与鉴定[J]. 微量元素与健康研究,2012,29(3):4-6.
- [26] 曹德菊. 3种微生物对Cu、Cd生物吸附效应的研究[J]. 农业环境科学学报,200423(3):471-474.
- [27] 李梦杰,王翠玲,李荣春,等. 汞、铅、铬污染土壤的微生物修复[J]. 环境工程学报,2013,7(4):1568-1572.
- [28] YAMINA BENMALEK, HALOUANE A, HOCINE HACENE, et al. Resistance to heavy metals and bioaccumulation of lead and zinc by *Chryseobacterium solincola* strain 1YB - R12T isolated from soil[J]. International Journal of Environmental Engineering, 2014,6(1):68-77.
- [29] 张艳,邓扬悟. 土壤重金属污染以及微生物修复技术探讨[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(1):63-66.
- [30] 孙艳芳,王国利,刘长仲,等. 污灌农田土壤无脊椎动物与土壤重金属污染及土壤理化性质的相关性[J]. 甘肃农业大学学报,2013,48(4):82-87.
- [31] 徐森林,马长安,田伟,等. 淀山湖沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系[J]. 环境科学学报,2011,31(10):2223-2232.
- [32] 伏小勇,秦赏,杨柳. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(1):78-83.
- [33] 寇永纲,伏小勇,侯培强. 蚯蚓对重金属污染土壤中铅的富集研究[J]. 环境科学与管理,2008,33(1):62-64.
- [34] MASCIANDARO G, MACCI C, PERUZZI E, et al. Organic matter - microorganism - plant in soil bioremediation: a synergic approach[J]. Environmental Science and Bio-Technology, 2013,4(12):399-419.
- [35] GUSTAVO CURAQUEO, MAURICIO SCHOEBITZ, FERNANDO BORIE, et al. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and addition of composted olive-mill waste enhance plant establishment and soil properties in the regeneration of a heavy metal-polluted environment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(12):7403-7412.
- [36] 田伟莉,柳丹,吴家森,等. 动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用[J]. 水土保持学报,2013,27(5):188-192.
- [37] 赵光. 促进植物吸收土壤重金属的产酸菌的筛选鉴定及特性研究[J]. 安徽农业科学,2010(18):9696-9698.
- [38] 杨柳,李广枝. Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>胁迫作用下蚯蚓、菌根菌及其联合作用对植物修复的影响[J]. 贵州农业科学,2010(11):156-158.
- [39] SINGH A, PRASAD S M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, April 2014.
- [40] GAUR N, FLORA G, YADAV M, et al. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals[J]. Environmental Science. Processes and Impacts, 2014,16(2):180-193.
- [41] ZHANG XF, XIA H P, LI Z A, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bio-resource Technology, 2010,101(6):2063-2066.
- [42] JIAO C, CHENG Y, FAN W, et al. Synthesis of agar-stabilized nanoscale zero-valent iron particles and removal study of hexavalent chromium[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, February 2014.
- [43] NAVARRO C A, VON BERNATH D, JEREZ C A. Heavy metal resistance strategies of acidophilic bacteria and their acquisition: importance for biomining and bioremediation[J]. Biological Research, 2013,46:363-371.

(上接第223页)

产的沼液是良好的农药,沼渣可作为有机肥使用。这样就降低了因焚烧秸秆导致的大气污染、畜禽粪便污染、因过度使用化肥农药导致的土壤及水体污染等,让农业发展走上无公害的道路。

#### 4 结语

作为第一产业的农业,关系国计民生,关系社会稳定与进步,是国民经济的基础产业。农业面源污染问题由来已久,现已成为我国农业发展的瓶颈。农业生产必须从依靠农药、化肥的高投入,从追求农业数量的增长,转变为有利于环

境保护和土地可持续耕种的高效农业,解决农业面源污染不容忽视。

#### 参考文献

- [1] 李其林,魏朝富,王显军,等. 农业面源污染发生条件与污染机理[J]. 土壤通报,2008(1):169-176.
- [2] 吴淑芬. 加强农业面源污染治理,提升农产品质量安全[J]. 福建农业, 2006(4):31.
- [3] 闫丽珍,石敏俊,王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J]. 中国人口·资源与环境,2010(1):99-107.
- [4] 柴世伟,裴晓梅,张亚雷,等. 农业面源污染及其控制技术研究[J]. 水土保持学报,2006(6):192-195.