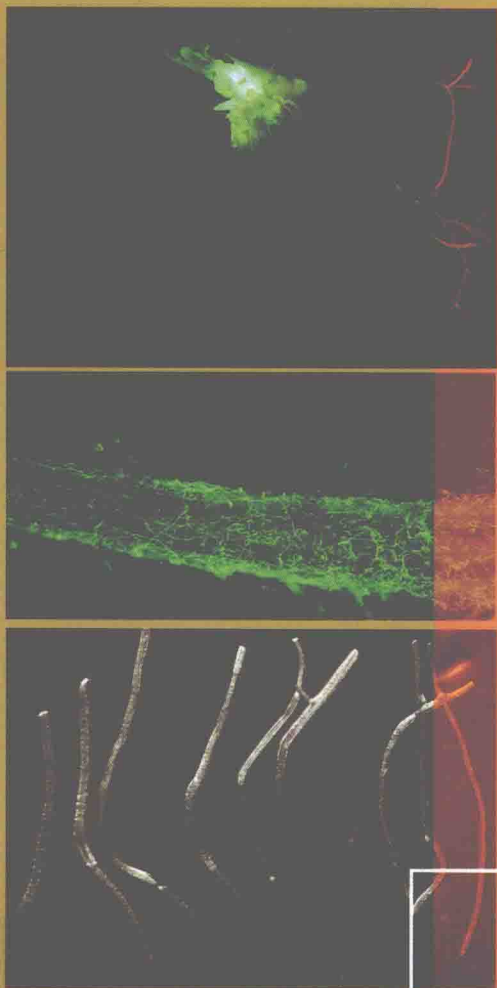


土壤环境的新型生物修复

New Bioremediation
of Soil Environment

李亮 著



土壤环境的新型生物修复

New Bioremediation of Soil Environment

李亮 著

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤环境的新型生物修复 / 李亮著. — 天津: 天津大学出版社,
2017.6
ISBN 978-7-5618-5883-7

I . ①土… II . ①李… III . ①土壤环境 - 生态恢复 - 研究
IV . ① X530.5
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 136456 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编: 300072)
电 话	发行部: 022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	廊坊市海涛印刷有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm×260mm
印 张	8
字 数	200 千
版 次	2017 年 6 月第 1 版
印 次	2017 年 6 月第 1 次
定 价	45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 烦请向我社发行部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介

个人概况:

姓名: 李亮

教育背景:

2012年9月—河北工业大学 工作

2009年1月—2012年7月 德国吉森尤斯图斯—李比希大学 植物分子病理 博士

2005年9月—2008年7月 东北师范大学 生命科学学院 细胞生物学 硕士



主持科研课题:

1. 河北省自然科学基金学术交流专项, S2015202003, 微生物与环境互作机制研讨, 2015/10-2017/10
2. 河北省自然科学基金项目, C2014202256, 印度梨形孢与蒺藜苜蓿互作机制研究, 2014/1-2016/12
3. 天津市应用基础与前沿技术研究项目, 135CYB3C37600, 印度梨形孢介导的蒺藜苜蓿耐盐因子挖掘研究, 2013/12-2016/9
4. 河北省高层次人才资助项目, C201400308, 贝壳杉烯合成酶基因的表达分析及其在植物发育和免疫中的功能研究, 2015/01-2017/12

发表论文

- [1] LIANG LI, XI CHEN, CHAOYANG MA, et al. Piriformospora indica requires kaurene synthase activity for successful plant colonization. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 102:151-160.

- [2] LIANG LI, XIUFENG WANG, LIPING YANG, et al. Large-scale production of foreign proteins via the novel plant transient expression system in *Pisum sativum* L. *Plant Biotechnology Report*, 2016, 10: 207–217.
- [3] LIANG LI, XIUFENG WANG, TAO YANG, et al. Single_chain variable fragment (scFv) expression in tobacco plants via agroinoculation. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2015, 62 (3) : 401–407.
- [4] JAFARGHOLI IMANI, LIANG LI, (CO-FIRST AUTHOR) PATRICK-SCHAFFER, et al. STARTS – A stable root transformation system for rapid functional analyses of proteins of the monocot model plant barley. *Plant Journal*, 2011, 67 (4) : 726–735.
- [5] KHALISSA DEFFAR, LIANG LI, XINGZHI WANG, et al. Nanobodies – the new concept in antibody engineering. *African Journal of Biotechnology*. 2009, 8 (12) : 645–2652.
- [6] LIPING YANG, HONGWEI WANG, LIANG LI, et al. A simple and effective system for foreign gene expression in plants via root absorption of agrobacterial suspension. *Journal of Biotechnology*. 2008, 134 (3–4) : 320–324.
- [7] YANG MEIYING, MA P D, LI WENMING, LI LIANG, ZHU XIAOJUAN & WANG XINGZHI. The 2, 3-Dihydroxybiphenyl Dioxygenase gene was first discovered in *Arthrobacter* sp strain PJ3. *Chinese Science. Bulletin*, 2007, 5 (9) : 1205–1211.
- [8] 李亮, 王晓阳, 主朋月, 等. 大麦根部快速稳定转化体系的建立. *生物技术*, 2016, 26 (5) : 487–494.
- [9] 李亮, 陈希, 王奋, 等. 印度梨形孢通过激活抗氧化酶活性及诱导 P5CS 基因表达提高紫花苜蓿耐盐性. *河北工业大学学报*, 2016, 45 (4) : 29–36.
- [10] 李亮, 武洪庆, 齐树亭, 等. 印度梨形孢促进蒺藜苜蓿生长及其提高耐盐性研究. *微生物学通报*, 2015, 42 (8) : 1492–1500.
- [11] 李亮. 高等学校科研与教学的统一是高校发展的必然选择. *教育教学论坛*, 2017.

前 言

人类广泛的生产活动，如工厂废弃化学物质的堆放、油田生产和运输过程中的事故性排放以及农田耕地时化肥和农药的大量使用，常常导致土壤污染。污染地中的某些化合物的含量或浓度已经达到直接或间接地对人类和环境产生危害的程度。常见的土壤污染有石油污染、有害或有毒化合物污染及重金属污染等。重金属及某些有毒化合物由于不易被降解，逐渐在土壤中积累下来，同时，它们经食物链传递后含量会积累，即生物放大，从而对人类造成危害。

对于污染地的处理现在多采用洗脱和吸附等物理或化学去污方法。这些方法需要较高的投资成本，并仅适用于严重污染的小范围地区。而涉及生物催化进行的降解、去毒或积累作用的生物修复则是利用生物的代谢活动来减少或清除环境中化学污染物，可用于大面积污染环境的治理。土壤生物修复技术，包括植物修复、微生物修复、生物联合修复等技术，在进入 21 世纪后得到了快速发展，成为了绿色环境修复技术。

微生物修复的基本原理很简单：调节污染地的环境条件以促进原有微生物或接种微生物的降解作用迅速且完全地进行。自然环境中的微生物种群可以通过改变环境条件（如营养有效性）等调节其数量和类群，这是在自然环境中存在的一种动态平衡。一般作用于污染物分子的微生物是一类相关的菌株。微生物对污染物的代谢反应形式多种多样，既有利于生态系统的，也有不利于生态系统的。

植物修复是通过种植某些特殊的植物类型以利用植物的吸收、富集或降解作用来达到降低或去除污染环境中的污染物的过程。植物修复具有投资维护成本低、操作简便、不造成二次污染、有潜在或显在经济效益等优点，更切合环境保护的要求，因此，植物修复越来越受到世界各国政府、科技界和企业界的高度重视和青睐。自从 20 世纪 80 年代问世以来，植物修复已经成为国际学术界研究的热点之一，并且开始进入产业化初期阶段。

近年来植物和微生物联用在修复土壤环境中发挥了重要作用，植物根际微生物和植物的作用方式有很多种，有根瘤菌，有丛枝菌根真菌，还有最近研究的比较热门的内生真菌：印度梨形孢。本书在分析物理修复、化学修复优缺点的基础上提出了使用微生物和植物协同作用治理土壤中污染的问题，并重点介绍一种新型的植物根际微生物——印度梨形孢和植物有效互动，提高植物产量和促进土壤环境修复的效果及作用机制。结合自身研究成果和最新的学术前沿，从分子水平剖析了该真菌和植物有效互动发挥生物学效应的分子机制。

目 录

第一章	导论	1
第一节	土壤与人类	1
	一、土壤的环境意义与土壤环境学	
	二、土壤与人类的关系	
第二节	土壤环境问题	2
	一、污染土壤的产生	
	二、污染土壤的危害	
第二章	污染土壤的修复	7
第一节	污染土壤的类型	7
	一、石油污染	
	二、化学农药污染	
	三、持久性有机污染	
	四、土壤重金属污染	
	五、土壤化肥污染	
第二节	污染土壤的修复	11
	一、污染土壤的物理修复	
	二、污染土壤的化学修复	

三、污染土壤的生物修复

第三章	植物修复	19
第一节	植物修复	19
	一、植物修复的概念及分类	
	二、植物修复的原理和方法	
第二节	应用土壤修复的植物种类	25
	一、应用重金属土壤污染修复的植物种类	
	二、应用盐碱土壤修复的植物种类	
第三节	植物修复的优缺点及实际应用中的问题	34
	一、植物修复的优点	
	二、植物修复的缺点	
	三、实际应用中的问题	
	四、植物修复技术的未来展望	
第四章	微生物修复	37
第一节	微生物修复	37
	一、微生物修复的概念	
	二、微生物修复的原理和方法	
	三、微生物修复的土壤类型	
第二节	微生物修复的优缺点及实际应用中的问题	40
	一、微生物修复的特点及实际应用中的问题	
	二、微生物修复技术的未来展望	
第五章	植物根际微生物	43
第一节	植物根的基本形态与功能	43
	一、根的发生、类型和生理功能	
	二、根尖的分区及生长动态	
	三、根的结构	
	四、侧根的发生	
第二节	根际环境	50
	一、根际环境的概念	

二、根际环境的作用	
三、植物根组织对土壤修复的机理	
第三节 根际周围的微生物种类	52
一、细菌	
二、放线菌	
三、根瘤菌	
四、真菌	
五、促生菌的促生理理	
六、原生动物	
第四节 植物与根际微生物联合修复土壤	57
一、重金属污染土壤的植物—微生物联合修复	
二、石油污染土壤的植物—微生物联合修复	
第六章 印度梨形孢与植物的互作	63
第一节 内生真菌新星——印度梨形孢	63
一、印度梨形孢的种属界定及宿主范围	
二、印度梨形孢在根部的定殖策略	
第二节 印度梨形孢的寄生对植物的作用	64
一、印度梨形孢促进植物生物产量提高	
二、植物根际微生物与宿主植物的免疫反应	
三、印度梨形孢与宿主植物的互利共生	
第三节 印度梨形孢的应用	68
一、案例 1: 印度梨形孢与植物协同作用修复石油污染土壤	
二、案例 2: 印度梨形孢提高蒺藜苜蓿耐盐性以及间接实现土壤盐渍化改良	
第七章 印度梨形孢介导生物学效应分子机制	97
一、印度梨形孢定殖与植物激素改变	
二、印度梨形孢定殖与赤霉素信号途径	
三、印度梨形孢定殖对植物体线粒体折叠蛋白的作用	
第八章 印度梨形孢的实验室培养技术	107
第一节 印度梨形孢的培养	107

- 一、印度梨形孢的培养
- 二、印度梨形孢在植物的定殖
- 三、印度梨形孢子在根部定殖的检测

第二节 印度梨形孢——新型生物菌肥

111

- 一、生物菌肥
- 二、印度梨形孢用于生物菌肥

第一章 导论

第一节 土壤与人类

一、土壤的环境意义与土壤环境学

土壤是地球表面一圈脆弱薄层，包含各种矿物质，它与我们人类息息相关。土壤是人类赖以生存和发展的重要物质基础和区域可持续发展的重要资源保障。土壤的形成和演化受物质、气候、生物、地形、时间和人类活动的影响。土壤是人类所处的环境之一，自然圈层通常被分为水圈、大气圈、生物圈、岩石圈、土壤圈等，其中土壤圈覆盖在陆地表面，在其他圈层的交界面上，它对其他各圈层的物质循环、能量流动以及信息传递起着非常重要的调节与维持作用，是有机界与无机界的联系中心，有着纽带的作用。绝大部分的植物、动物依赖于土壤，因此，土壤在维持生物多样性、全球变化及人类社会可持续发展过程中扮演着重要而独特的角色。

土壤不仅是一种资源，还是人类生存环境的重要组成部分。由于土壤特殊的结构、物质组成等，土壤具有重要的客观属性，如土壤的肥力、净化力等，它们使土壤在维持人类生存环境的稳定、保护其不受侵害等方面发挥着重要作用。人类渐渐意识到要保护土壤环境、合理利用土壤资源，从土壤环境的角度去了解土壤的作用，进一步研究和认识土壤。

土壤环境学是综合了土壤的形成、土壤环境、土壤的物理化学性质、土壤环境污染、土壤环境污染防治等内容，在应用土壤学、生态学等基本理论之上，构建的有关土壤环境的发生、发展及相关过程等的知识体系，尤其体现在人类对土壤环境的影响方面。

二、土壤与人类的关系

土壤与人类的关系是长期而复杂的，最早可以追溯到史前时期。人类从出现开始就与土壤环境建立了对立统一关系，这是人与环境统一关系的明显表现。显然，相互作用给两者带来改变，在利用土壤的过程中，人类获得诸多益处，而人类活动对土壤环境的影响也有不同程度的体现。原始社会时期，人类对土壤的利用很少，甚至是没有，只是停留在采集土壤中生长的植物来食用，对土壤环境的影响很小；到了石器时代，人们制作简单工具狩猎取食等，对土地的开垦开始慢慢多起来。但这些也只是破坏了土壤表层植被和表层土壤的肥力，土壤可以通过自然恢复或施加肥料来恢复土壤肥力；随着人类的进步和社会的发展，人类对土地的开发利用程度大大增强，超出了土壤的自然恢复能力，土壤难以恢复到原来的状态，便使得土壤沙漠化、盐渍化、沼泽化及肥力下降等现象发生。

如今的土壤环境被人类大范围地影响和改造着，肆意开垦土地使得土地沙漠化面积增加，同时有毒有害物质不断排入环境中，被污染的土壤面积不断增加，土地退化、土壤环境恶化，渐渐超出了土壤的承载能力。

第二节 土壤环境问题

一、污染土壤的产生

土壤是人类赖以生存的物质基础，与人类生产、生活密切相关。其所受污染多种多样，且分布十分广泛。

在日常生活方面，人类倾向于向陆地生态系统直接排放废弃物等。生活污水中往往含有很多厨房废弃油脂和 N、P 等营养物质，直接排放使得土壤稳定性受到干扰；生活固体垃圾中往往包括大量建筑垃圾及废弃合成塑料等，不管是直接堆放还是经过焚烧等二次处理，都会对土壤产生严重污染。

在农业生产方面，人口数量的不断增加使得人类不得不大力开发农业技术，追求高产、稳产，从而越来越离不开农药、化肥等的使用。农药和化肥的残留使得土壤中的农药、无机盐等逐渐累积，部分渗入地底还会造成地下水污染。并且，由于人类的农业生产活动而造成的土壤中群落微生物结构发生改变的情况也十分显著，严重的可能导致区域性土壤生物污染。

在工业生产方面，人类对自然土壤生态环境的破坏，如采矿、化工冶炼等，使得一些重金属元素、放射性元素由原来的分散性和低浓度性变成富集、高浓度存在的状态，危害局部陆地生态系统；另外，人类利用化学物质的性质进行加工合成，生产出更多可能对土壤产生污染的工业产品，对土壤造成危害，甚至超出土壤自净能力，对土壤造成不可恢复的影响。

以上几个方面对土壤造成污染的过程是：当土壤中的有害物质不断积累，超过土壤自净能力时，土壤的组成、结构及功能等就会发生改变；“土壤—植物—人”“土壤—水—人”这两条链作用使得土壤中的有害物质或其分解产物被人体吸收，对人类健康产生威胁。在这个过程中，污染的土壤形成。

二、污染土壤的危害

我国的土地污染情况越来越严重, 已经对可持续资源的利用与农产品生态构成严重威胁。全国受有机污染物(农药、石油烃和 PAHs)污染的农田达 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中农药污染面积约 $1.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 主要农产品的农药残留超标率高达 16% ~ 20%。在沈阳石油污水灌区, 表层和底层土壤多环芳烃含量有的超过 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 造成农作物和地下水的严重污染。污水灌溉导致天津近郊地区 2.3 万 hm^2 农田受到污染。全国受重金属污染的农业土地约为 $2.5 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中严重污染土地超过 $7 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 有 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 土地因镉含量超标而被迫弃耕。

(一) 土壤污染的特点

土壤污染具有以下特点。

1. 滞后性和隐蔽性

相比较大气污染、水污染等带来的直观后果, 土壤污染则不同, 它往往需要通过一些化学检测甚至是对生物健康检测等才能确定。因此土壤污染具有隐蔽性, 这就决定了它的滞后性。

2. 累积性

土壤流动性差, 一旦受到污染, 不易扩散, 从而造成累积, 以致超标。

3. 难治理性

积累在土壤中的一些难降解物, 譬如农用塑料薄膜等, 很难靠自身净化来消除。

4. 不可逆转性

很多有机物质造成的污染需要很久才能缓解, 而重金属对土壤造成的污染几乎是不可逆的。某些重金属对土壤的污染可能要几百年才能恢复。

一旦发生土壤污染, 像水污染那样只是切断污染源是不够的, 有时可能需要靠换土、淋洗土壤的方法才能解决, 在治理过程中又存在成本高、周期长等问题。土壤污染难治理, 而土壤污染问题的产生又具有明显的隐蔽性和滞后性等特点, 因此土壤污染问题一般都不大容易受到重视。

(二) 土壤污染的后果

土壤污染造成严重的后果, 会阻碍人类生存与现代农业可持续稳定发展。污染土壤的危害如下。

1. 影响农产品的品质和产量

土壤污染会影响作物生长, 使植物减产, 全国每年为此损失粮食达 $1.2 \times 10^{10} \text{ kg}$; 某种污染物可能会在农作物中吸收和富集, 影响农产品质量; 许多地方的粮食、蔬菜和水果等食物中汞、镉、砷、铅等重金属含量接近临界值甚至超标; 有些地区污水灌溉已经引起蔬菜的味道变差, 甚至出现难闻的气味。在沈阳市西部原张士镉污染区, 糙米镉含量最高达到 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是食品中镉限量卫生标准(大米 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 13 倍; 9 种蔬菜平均含镉量为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是对照区 ($0.135 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 5.6 倍。仅土壤中的重金属造成的土壤污染就给农业生产带来很大的经济损失。

2. 危害人体健康

土壤污染造成重金属在农作物中积累。人类食用后会引引起一系列疾病。①土壤汞污染，土壤中过量的金属汞多以不同的形态存在，能被植物直接吸收，植物叶片上的气孔也能吸收大气中的汞。植物吸收和积累汞的程度与汞的形态有关，挥发性越高、溶解度越大的汞化合物越容易被植物吸收，其顺序为：氯化甲基汞 > 氯化乙基汞 > 醋酸苯汞 > 氧化汞 > 硫化汞。汞被植物吸收后，常与根系中的蛋白质发生反应而沉积于根上，从而抑制了向植物地上部分的运输，所以汞在植物各部分含量大小的分布是：根 > 茎 > 叶 > 籽实。化合物除硫化汞外都有毒。无机汞化合物可以通过食物链被食入人体，也可吸入或者经皮肤吸收，在人体组织器官中富集，会导致患者在精神、口腔、肾脏等方面出现疾病。有机汞化合物中甲基汞毒性最大，危害最普遍。甲基汞是一种神经毒素，会引起一系列中枢神经中毒症状，俗称水俣病。此外，甲基汞还可导致心脏、肝脏、皮肤损害等。②土壤镉污染，当人体食入过量的“镉米”“镉菜”后，会引起慢性中毒（痛痛病）。进入人体的镉与金属硫蛋白结合，体内形成镉硫蛋白，然后随血液分布全身，最后主要蓄积于肾和肝中，能使许多酶系统受到抑制。镉还可引起贫血和肺气肿等病症，并有致癌（主要致前列腺癌）和致畸作用。

除上述两种重金属污染对人体造成危害以外，还有铅、铬、砷、锌、铜、钼和钴等重金属污染。铅中毒会引发动脉内膜炎、血管痉挛、动脉硬化；铜的过量摄入会破坏消化系统，引起腹痛、呕吐，甚至可导致肝硬化；锌的过量摄入会引起高血压、冠心病等。土壤中的放射性污染物通过放射性衰变能产生 α 、 β 、 γ 射线，这些射线可以穿透人体组织，造成机体的一些组织细胞死亡，可导致头昏、失眠、记忆衰退、疲乏无力、脱发、肌肉萎缩、食欲不振等病症。更为严重的是， α 、 β 、 γ 等射线都会诱发恶性肿瘤、皮肤癌、白血病等疾病，危害人类健康。

3. 威胁生态环境安全

污染土壤影响植物、土壤动物和微生物的生长和繁衍，会破坏正常的土壤生态过程与生态服务功能，土壤养分转化和肥力保持都会受影响，影响土壤的正常功能，降低作物产量。土地受到污染后，土壤中的污染物可能会发生转化和迁移，会在风力和水力的作用下分别进入大气和水体中，导致生态环境问题。据不完全调查，目前全国受污染的耕地约有 1.5 亿亩，污水灌溉污染耕地 3 250 万亩，固体废弃物堆存占地和毁田 200 万亩，合计约占耕地总面积的 1/10 以上，其中多数集中在经济较发达的地区。

（三）污染土壤修复的意义

土壤对人类乃至整个生态都有着极其重要的作用，土壤被污染后使得人类生产生活等受到很大影响。

同大气和水污染一样，土壤污染对人体健康和生态环境有严重危害。由于土壤的自净能力较弱，其危害期更长。土壤作为人类赖以生存的基本资源，对人类农业生产和自然环境等有着极其重要的作用。所以高效利用土地资源、保障土壤的生产力不受人类活动破坏、污染土壤的修复还原对人类生存

与现代农业可持续稳定发展起着关键性作用。土壤是人类社会生产活动的重要物质基础,是不可缺少、难以再生甚至是不可再生的有限自然资源。土壤是各种污染物的最大承受者,世界上 90% 的污染物最终都滞留在土壤内,并且通过生物的新陈代谢和食物链发生进一步的传播,直接影响农作物的生长和产品质量,并间接危及人体健康。

2003 年我国的耕地面积已经下降到 18.51 亿亩,人均耕地面积不到世界平均水平的 40%,优质土壤面积更是呈减少趋势。当前,我国土壤污染的形势已十分严峻,由土壤污染导致的农产品的生态安全问题已不容忽视。这一过程可能比较隐蔽,但土壤污染已威胁人类的安全。因此,研究污染土壤修复是人类对环境保护的需求,对环境科学与技术学科的发展起到推动作用。

