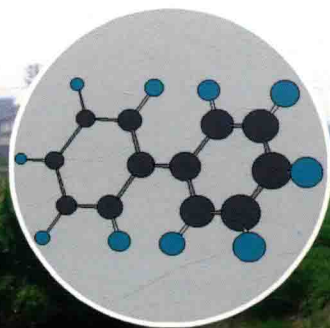


土壤污染与修复理论和实践研究丛书

有机污染土壤的 修复机制与技术发展

Remediation Mechanism and
Technological Development of
Toxic Organic Substance Polluted Soil

骆永明 等 著



科学出版社

土壤污染与修复理论和实践研究丛书

有机污染土壤的 修复机制与技术发展

骆永明 等 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是作者近 20 年来开展有机氯农药、持久性有机污染物、石油、农膜及化学武器等污染土壤及场地的物理修复、化学修复、生物修复和联合修复的理论、方法和技术研究工作的全面总结。重点介绍了滴滴涕、多氯联苯、多环芳烃、石油、酞酸酯、二苯砷酸等单一或复合污染土壤的修复机制与技术发展,包括低温等离子体氧化、光催化分解、络合蒸发浓缩、芬顿氧化、植物吸收、微生物降解、植物-微生物联合及物化-生物联合等修复研究进展。此外,还介绍了多孔炭、改性膨润土和纤维吸附材料等修复剂的研制及应用方面的新认识、新资源、新方法和新产品。提出了既能提高土壤肥力、又能净化土壤污染的豆科植物-根瘤菌共生联合生物修复新途径。这些研究成果对发展有机污染土壤的绿色可持续修复原理与技术、推动土壤修复学和修复土壤学建设具有重要的理论和实践指导价值。

本书可作为土壤污染防治与修复、环境保护、农业管理、生态建设、国土资源利用等专业和领域的管理者、科研工作者、研究生等的参考书,也可作为高等院校、科研院所土壤学、环境科学、环境工程、生态学、农学等相关学科的研究生教学参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

有机污染土壤的修复机制与技术发展/骆永明等著. —北京:科学出版社, 2016

(土壤污染与修复理论和实践研究丛书)

ISBN 978-7-03-052187-3

I. ①土… II. ①骆… III. ①土壤有机污染 ②修复机制-修复技术

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 022183 号

责任编辑:周 丹/责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:610 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

主要作者

骆永明 滕 应 涂 晨 刘五星 吴龙华
宋 静 章海波 李振高

作者名单 (按姓氏笔画排序)

丁克强	丁琳琳	马婷婷	马露瑶	王阿楠
王殿玺	毛 健	尹春艳	付登强	平立凤
过 园	邢维芹	朱 濛	刘五星	刘世亮
刘增俊	孙向辉	孙明明	孙剑英	李 华
李士杏	李秀华	李秀芬	李振高	宋 静
陈永山	陈海红	吴龙华	吴宇澄	余冬梅
张宇峰	沈源源	杨慧娟	骆永明	徐 莉
涂 晨	章海波	梁艳玲	虞 磊	滕 应
潘 澄				

序 言

自 20 世纪 80 年代以来,随着高强度的人类活动和经济社会的快速发展,大量人为排放的重金属和有机污染物以不同类型、方式、途径进入土壤,造成土壤污染,危及土壤质量安全与生态系统及人体健康。土壤环境质量与安全健康保障令人担忧。土壤污染管控与修复成为国家生态环境治理的重大现实需求。土壤污染与修复的基础理论研究、技术装备研发、监管体系建设和产业化发展已是新时期我国土壤环境保护的重要任务。

骆永明研究员应聘 1997 年度中国科学院“百人计划”,于 1998 年从英国留学回国,在南京土壤研究所组建了“土壤圈污染物循环与修复”研究团队。2001 年起,先后在国家杰出青年科学基金项目、973 计划项目、863 计划重大项目、国家自然科学基金重点、面上及重大国际合作项目、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目、环保公益性行业科研专项项目、江苏省创新学者攀登项目等支持下,他带领团队成员,系统开展了我国沿海经济快速发展地区(长江、珠江、黄河三角洲及香港地区)土壤环境污染状况、过程、效应、评估、植物修复、微生物修复及化学-生物联合修复等理论、方法、技术、标准及工程应用方面的研究与实践,取得了诸多创新性研究成果。他于 2005 年撰文提出了“土壤修复”是一门土壤科学和环境科学的分支学科的论述。自 2000 年以来,发起并连续组织召开第一、二、三、四、五届土壤污染与修复国际会议,不仅促进和带动了自身的科学前沿研究与技术发展,而且引领和推动了我国乃至世界土壤环境和土壤修复科技的研究与发展。

即将出版的“土壤污染与修复理论和实践研究丛书”正是骆永明及其团队(包括博士后、研究生)近 20 年来研究工作的系统总结。该丛书共分四册,分别介绍了《土壤污染特征、过程与有效性》、《土壤污染毒性、基准与风险管理》、《重金属污染土壤的修复机制与技术发展》和《有机污染土壤的修复机制与技术发展》。这是目前我国乃至全球土壤污染与修复研究领域的大作,既有先进的理论与方法,又有实用的技术与规范,还有田间实践经验与基准标准建议,为土壤科学进步与区域可持续发展做出了重大贡献。该丛书的出版,正逢国家“土壤污染防治行动计划”(“土十条”)颁布和各省(市、区)制定“土壤污染防治行动计划”实施方案之际。相信,该丛书可为全国土壤污染防治行动计划的实施提供借鉴,将推进我国土壤污染与修复的创新研究和产业化发展。



中国科学院院士、南京土壤研究所研究员

2016 年 12 月于南京

前 言

土壤污染是一个全球性环境问题,可以发生在农用地,也可以出现在建设用地,还可以存在于矿区和油田。早在 20 世纪 70 年代,世界上工业先进、农业发达的国家就开始调查研究工业场地和农业土壤的污染问题,寻找其解决的技术途径。在同一时期,我国进行了污灌区农田土壤污染与防治研究,开启了土壤环境保护工作。进入 20 世纪 80 年代,我国在土壤有机氯农药和砷、铬等重金属污染及其控制研究上取得了明显进展;90 年代初,基于第二次全国土壤调查数据确定了土壤环境背景值,揭示了其区域分异性,并于 1995 年首次颁布了土壤环境质量标准,为全国土壤污染防治与环境保护奠定了新基础。至 90 年代末,土壤重金属、农药、石油污染的微观机制和物化控制、微生物转化技术研究取得了新进展,重金属污染土壤的植物修复研究在我国起步。2000 年 10 月在杭州召开了第一届“International Conference of Soil Remediation”,标志着我国土壤修复科学、技术、工程和管理研究与发展序幕的全方位拉开。迈入新世纪后,我国土壤污染与修复工作得到进一步重视。科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院等相继部署了土壤污染与控制修复科技研究项目;2001 年,污染土壤修复技术与大气、水环境控制技术同步纳入国家“863”计划。2006 年,环保部和国土资源部首次联合开展了全国土壤污染调查与防治专项工作,2014 年,两部委联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》明确指出,全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出。土壤污染防治与修复成为国家环境治理和生态文明建设的重大现实需求。土壤修复的基础研究、技术研发、监管支撑和产业发展已是新时期我国土壤环境保护的重要任务。

恰逢其时,我应聘了 1997 年度中国科学院“百人计划”,于 1998 年回国,在南京土壤研究所开辟了土壤污染与修复研究方向。近 20 年来,在国家、地方和国际合作项目资助下和各方支持下,率领研究团队,系统研究了在我国经济快速发展过程中不同区域和不同土地利用方式下土壤重金属和有机污染规律,建立了土壤污染诊断、风险评估、基准与标准制定方法,发展了土壤污染的风险管理和修复技术,提出了“土壤修复”学科。“土壤污染与修复理论和实践研究丛书”就是这些研究工作及其进展的系统总结,丛书共分四册,分别为《土壤污染特征、过程与有效性》、《土壤污染毒性、基准与风险管理》、《重金属污染土壤的修复机制与技术发展》和《有机污染土壤的修复机制与技术发展》。希望该丛书的出版有助于全国各地“土壤污染防治行动计划”的设计与实施,有益于我国土壤污染与修复的创新研究和产业化发展。

本著作作为第四册,重点介绍了有机氯农药(滴滴涕)、持久性有机污染物(多氯联苯、多环芳烃)、石油(石油烃、油泥)、农膜(酞酸酯)及化学武器(二苯砷酸)等单一或复合污染土壤的修复机制与技术发展,包括低温等离子体氧化、光催化分解、络合蒸发浓缩、芬顿氧化、植物吸收、微生物降解、植物-微生物联合及物化-生物联合修复等研究进展。此外,还介绍了多孔炭、改性膨润土和纤维吸附材料等修复剂的研制及应用方面的新认识、新资源、新方法和新产品。提出了既能提高土壤肥力、又能净化土壤有机污染的豆科植

物-根瘤菌共生联合生物修复新途径。这些研究成果对发展有机污染土壤的绿色可持续修复原理与技术、推动土壤修复学和修复土壤学建设具有重要的理论和实践指导价值。

全书共分七篇。第一篇介绍多氯联苯污染土壤的修复机制与技术发展,共分五章:第一章 多氯联苯污染土壤的植物修复,第二章 多氯联苯污染土壤的微生物修复,第三章 多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合修复,第四章 多氯联苯污染土壤的农艺强化与原位生态调控修复,第五章 多氯联苯污染土壤的物理化学修复。第二篇介绍多环芳烃污染土壤的修复机制与技术发展,共分四章:第六章 多环芳烃污染土壤的植物修复,第七章 多环芳烃污染土壤的微生物修复,第八章 多环芳烃污染土壤的植物-微生物联合修复,第九章 多环芳烃污染土壤的物理化学修复。第三篇介绍石油污染土壤的修复机制与技术发展,共分三章:第十章 石油污染土壤的微生物修复,第十一章 石油污染土壤的植物-微生物联合修复,第十二章 石油污染土壤的异位生物修复。第四篇介绍二苯砷酸污染土壤的修复机制与技术发展,共分四章:第十三章 二苯砷酸污染土壤的二氧化钛光催化修复,第十四章 二氧化钛光催化降解二苯砷酸的机制,第十五章 二苯砷酸污染土壤的芬顿与类芬顿氧化修复;第十六章 二苯砷酸污染土壤的植物修复。第五篇介绍酞酸酯污染土壤的生物修复机制与技术发展,共分两章:第十七章 酞酸酯污染土壤的植物修复,第十八章 酞酸酯污染土壤的微生物修复。第六篇介绍滴滴涕污染土壤的低温等离子体氧化修复,共分两章:第十九章 反应釜式低温等离子体氧化修复,第二十章 转盘式低温等离子体氧化修复。第七篇介绍修复剂的研制与应用,共分三章:第二十一章 多孔炭材料的研制与应用,第二十二章 改性膨润土的研制与应用,第二十三章 颗粒状纤维吸附材料的研制与应用。

本书吸收了国家科技部“十五”“973”计划项目(2002CB410800)、“十二五”“863”计划重大项目(2012AA06A200)、国家自然科学基金委重点(40432005、41230858)及重大国际合作项目(40821140539)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)、知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-404)、江苏省创新学者攀登项目(BK2009016)等科研项目的部分研究成果,是在研究团队成员(包括博士后和研究生)的辛勤努力下共同完成的。本书的主要执笔人为:骆永明、滕应、涂晨、刘五星、吴龙华、宋静、章海波、李振高;参加相关研究和本书撰写工作的还有:丁克强、丁琳琳、马婷婷、马露瑶、王阿楠、王殿玺、毛健、尹春艳、平立凤、付登强、邢维芹、过园、朱濛、刘世亮、刘增俊、孙向辉、孙明明、孙剑英、李士杏、李华、李秀华、李秀芬、杨慧娟、吴宇澄、余冬梅、沈源源、张宇峰、陈永山、陈海红、徐莉、梁艳玲、虞磊、潘澄以及韦婧、刘颖等。全书由涂晨和骆永明统稿,骆永明定稿。需要指出的是考虑到丛书的系统性,本书中的部分内容引用我们早期出版的有关专著。还需要一提的是为保持早期研究工作的原始性,我们在研究内容及其参考文献上未作新的补充。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳切希望各位同仁给予批评指正。

骆永明

2016年12月于烟台

目 录

序言 前言

第一篇 多氯联苯污染土壤的修复机制与技术发展

第一章 多氯联苯污染土壤的植物修复	3
第一节 多氯联苯污染土壤的豆科植物单作修复	3
第二节 多氯联苯污染土壤的豆科-禾本科植物协同修复	9
第三节 多氯联苯与重金属复合污染土壤的多植物协同修复	15
参考文献	21
第二章 多氯联苯污染土壤的微生物修复	24
第一节 多氯联苯污染土壤的生物刺激修复效应与机理	24
第二节 多氯联苯降解菌的分离鉴定及其降解修复作用	30
第三节 中华苜蓿根瘤菌对多氯联苯的生物强化修复效应与机理	37
第四节 中华苜蓿根瘤菌制剂对多氯联苯污染土壤的微生物修复	41
第五节 紫云英根瘤菌对多氯联苯的生物强化修复效应与机理	43
第六节 土壤中联苯降解菌基因的克隆与多样性分析	48
参考文献	50
第三章 多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合修复	52
第一节 紫花苜蓿-根瘤菌共生体修复	52
第二节 紫花苜蓿-根瘤菌-菌根真菌双接种修复	69
第三节 紫云英-根瘤菌共生体修复	78
参考文献	80
第四章 多氯联苯污染土壤的农艺强化与原位生态调控修复	83
第一节 农艺强化调控修复	83
第二节 原位生态调控修复	89
参考文献	94
第五章 多氯联苯污染土壤的物理化学修复	96
第一节 芬顿氧化修复	96

第二节 低温等离子体氧化修复	100
第三节 络合蒸发修复	105
参考文献	108

第二篇 多环芳烃污染土壤的修复机制与技术发展

第六章 多环芳烃污染土壤的植物修复	111
第一节 不同豆科与禾本科植物对多环芳烃污染土壤的修复潜力比较	111
第二节 禾本科植物黑麦草对多环芳烃的修复效应	113
第三节 豆科植物单作修复	125
第四节 植物吸取修复多环芳烃污染土壤的机理	132
参考文献	134

第七章 多环芳烃污染土壤的微生物修复	136
第一节 生物刺激修复	136
第二节 细菌强化修复	154
第三节 真菌强化修复	167
第四节 菌群强化修复	184
参考文献	192

第八章 多环芳烃污染土壤的植物-微生物联合修复	195
第一节 紫花苜蓿-根瘤菌共生体修复	195
第二节 紫花苜蓿-菌根真菌联合修复	198
第三节 紫花苜蓿-根瘤菌-菌根真菌双接种修复	203
第四节 植物-菌群联合修复	207
参考文献	209

第九章 多环芳烃污染场地的物化修复	210
第一节 甲基- β -环糊精强化微生物异位增效洗脱	210
第二节 低温等离子体氧化修复	217
参考文献	224

第三篇 石油污染土壤的修复机制与技术发展

第十章 石油污染土壤的微生物修复	229
第一节 产表面活性剂菌株的分离鉴定及其石油洗脱效果	229
第二节 石油降解菌群的富集及其对石油的分解作用	237
参考文献	242

第十一章 石油污染土壤的植物-微生物联合修复	244
第一节 植物根际促生菌的筛选及其强化植物修复	244
第二节 产表面活性剂菌株及其强化植物修复	246
第三节 石油降解菌剂与植物联合修复	250
参考文献	253
第十二章 石油污染场地的异位生物修复	254
第一节 含油污泥的预制床修复	254
第二节 预制床修复后含油污泥的植物修复	258
第三节 含油污泥的生物堆修复	262
参考文献	265
第四篇 二苯砷酸污染土壤的修复机制与技术发展	
第十三章 二苯砷酸污染土壤的二氧化钛光催化修复	269
第一节 二氧化钛对土壤中二苯砷酸的吸附-解吸与降解动力学的影响	269
第二节 二氧化钛光催化降解二苯砷酸污染土壤的最优方法筛选	272
第三节 土壤性质对二氧化钛光催化降解二苯砷酸的影响	273
参考文献	278
第十四章 二氧化钛光催化降解二苯砷酸的机制	280
第一节 二氧化钛光催化降解二苯砷酸的非均相反应动力学	280
第二节 离子强度及 pH 对二苯砷酸光催化降解动力学的影响	282
第三节 溶解氧对二苯砷酸光催化降解动力学的影响	283
第四节 活性氧基团在二苯砷酸光催化降解中的作用	284
第五节 二氧化钛光催化降解二苯砷酸中间产物的鉴定及降解途径	284
参考文献	290
第十五章 二苯砷酸污染土壤的芬顿与类芬顿氧化修复	292
第一节 芬顿与类芬顿氧化修复效率及其影响因素	292
第二节 二苯砷酸的芬顿与类芬顿氧化降解产物	295
参考文献	298
第十六章 二苯砷酸污染土壤的植物修复	299
第一节 修复后土壤中二苯砷酸含量变化	299
第二节 土壤溶液中二苯砷酸含量变化	300
第三节 土壤中无机砷含量变化	301
参考文献	303

第五篇 酞酸酯污染土壤的生物修复机制与技术发展

第十七章 酞酸酯污染土壤的植物修复	307
第一节 土壤中的酞酸酯组成和含量	307
第二节 植物组织中酞酸酯组成与含量变化	308
第三节 植物富集系数、转运系数和植物吸取修复效率	311
第四节 植物修复对土壤微生物群落多样性的影响	314
参考文献	316
第十八章 酞酸酯污染土壤的微生物修复	317
第一节 酞酸酯降解菌的筛选鉴定及其降解特性	317
第二节 酞酸酯污染土壤的微生物修复效应	318
参考文献	320

第六篇 滴滴涕污染土壤的低温等离子体氧化修复

第十九章 反应釜式低温等离子体氧化修复技术	323
第一节 反应釜式低温等离子体设备的设计研发	323
第二节 反应釜式低温等离子体对滴滴涕污染土壤的修复技术参数优化	324
参考文献	329
第二十章 转盘式低温等离子体氧化修复	331
第一节 转盘式低温等离子体设备的设计研发	331
第二节 转盘式低温等离子体对滴滴涕污染土壤的修复效果	333
参考文献	335

第七篇 修复剂的研制与应用

第二十一章 多孔炭材料的研制与应用	339
第一节 多孔炭材料的制备方法及其表征	339
第二节 多孔炭材料对偶氮染料的吸附动力学	345
参考文献	355
第二十二章 改性膨润土的研制与应用	358
第一节 膨润土及改性膨润土的制备与表征	358
第二节 膨润土及改性膨润土在含重金属废水处理中的应用	361
第三节 膨润土及改性膨润土在含抗生素废水处理中的应用	371
参考文献	377

第二十三章 颗粒状纤维吸附材料的研制与应用·····	378
第一节 天然纤维材料对抗生素废水的吸附作用·····	378
第二节 改性纤维材料对抗生素废水的吸附作用·····	382
第三节 固定化颗粒吸附剂对抗生素废水的吸附作用·····	387
参考文献·····	396

第一篇 多氯联苯污染土壤的修复 机制与技术发展

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是环境中存在的一类典型含氯有机污染物, 因其具有半挥发性、持久性、生物富集性和高毒性等特点而被联合国环境规划署列为首批需要削减和控制的 12 种持久性有机污染物之一。土壤是环境中 PCBs 的最主要储存场所, 土壤中的 PCBs 可以通过食物链的生物富集和逐级放大, 最终危害人体健康。研究 PCBs 污染土壤的修复机理与技术对于控制环境污染、保障粮食安全和保护人体健康都具有重要的科学和实践意义。本篇系统介绍了 PCBs 污染土壤的植物修复、微生物修复、植物-微生物联合修复、原位生态调控修复以及物化修复技术, 旨在为保障 PCBs 污染区的农产品质量安全和人体健康、促进 PCBs 污染区土壤环境修复调控的深入研究提供理论参考。

第一章 多氯联苯污染土壤的植物修复

植物修复技术是指利用植物及其根际微生物去除、转化和固持土壤、底泥、地下水、地表水以及大气中污染物的一种新兴技术，是目前生物修复研究领域的热点。已有研究表明，对多氯联苯（polychlorinated biphenyls, PCBs）修复效果较好的植物有蔊草、柳枝稷、大豆、小麦、大麦、龙葵、白车轴草等。近年来，许多研究发现豆科植物（如紫花苜蓿、羽扇豆、鹰嘴豆等）因生长速度快、耐受性强，是修复有机污染物的理想植物（Fan et al., 2008）。植物对 PCBs 污染土壤的修复机制一般包括以下三类：①直接吸收 PCBs 并将其转化为非植物毒性的代谢物积累于植物组织中；②释放促进 PCBs 降解的生物化学反应酶类进行降解；③植物与根际微生物联合降解 PCBs（Aken et al., 2010）。此外，不同植物的混作还可以有效提高植株总生物量，进一步强化植物对 PCBs 的吸收富集能力（孙向辉等，2010）。本章重点介绍了 PCBs 污染农田土壤的单一植物修复技术、豆科-禾本科植物间作修复技术以及多植物协同修复技术，以期为进一步研发 PCBs 污染土壤的植物修复技术并为揭示根际微生物的协同修复机理提供科学依据。

第一节 多氯联苯污染土壤的豆科植物单作修复

本研究以长江三角洲某典型污染区 PCBs 污染农田土壤为对象，采用田间小区试验比较研究了豆科植物紫花苜蓿在不同播种方式下对 PCBs 污染土壤的植物修复效率，并采用土壤酶活性分析法和基于土壤核酸提取的 PCR-DGGE 技术对修复植物根际土壤微生物群落结构多样性进行了动态分析。

一、土壤中多氯联苯含量与同系物特征

播种方式直接影响植物的生物量、根系发育状况（如根系结构、根毛多少、根瘤的有无）以及同化能力，从而对 PCBs 的吸收同化能力和修复效果产生重要影响。常见的播种方式包括穴播、条播和撒播，其中条播的密度较大，使幼苗更易出土且可有力地抑制杂草滋生；而撒播则可以更充分利用土地的生产力。本研究共设置 3 个处理：①未种植植物的对照（CK）；②条播方式播种紫花苜蓿（PT）；③撒播方式播种紫花苜蓿（PS）。小区播种量为 2kg/亩，条播播种行距 30cm。每个处理设置 5 次重复，随机区组排列。

如图 1.1 所示，两种不同播种方式下土壤中 PCBs 的总量在修复前后均有显著差异，且与未种植的对照组相比均有显著降低（ $p < 0.05$ ）。与对照组相比，采用撒播方式种植紫花苜蓿 3 年后，土壤中 PCBs 的去除率分别为 9.2%、19.3%、50.2%。而采用条播方式种植 3 年后，土壤中 PCBs 的去除率则分别达到了 16.2%、39.5%和 66.1%。这可能是由于条播方式下紫花苜蓿群体具有较高的生物量，对 PCBs 表现出更高的代谢转化能力。另外，条播方式下紫花苜蓿的根系较发达，可分泌大量的糖类、醇类和酸类根系分泌物，进一步

刺激根际微生物如联苯降解菌的生长，强化了 PCBs 污染土壤的植物修复。

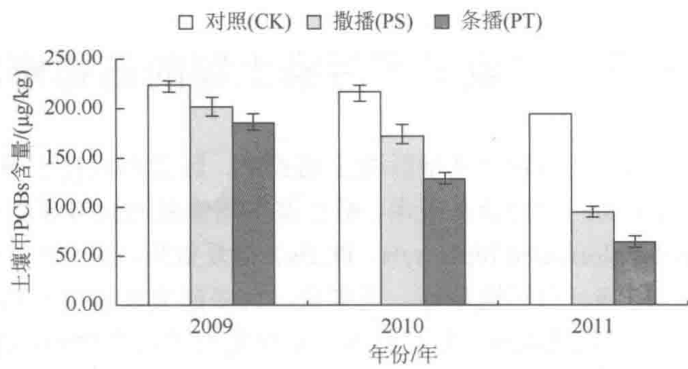


图 1.1 不同播种方式下土壤中 PCBs 含量变化

修复后土壤中 PCBs 组分变化见图 1.2。土壤中 PCBs 主要以低氯代（氯原子数≤5）组分为主。与对照相比，所有种植植物的处理中低氯组分的总量均有所下降，其中条播方式处理（PT）中二氯联苯组分含量降低最为显著（ $p<0.05$ ）。有研究表明，PCBs 生物降解程度与其氯原子的取代数量有关，随着氯原子的取代数目增加，生物可降解性逐渐降低（Wiegel et al., 2000）。这可能一方面由于植物根系更易于吸收和转运疏水性较弱的低氯代 PCBs 组分；另一方面，植物根际好氧微生物也优先分解低氯代 PCBs 组分，从而使土壤中低氯组分的含量降低，高氯组分因其难降解性而在土壤中逐渐累积，使其在 PCBs 总量中的比例不断增加。

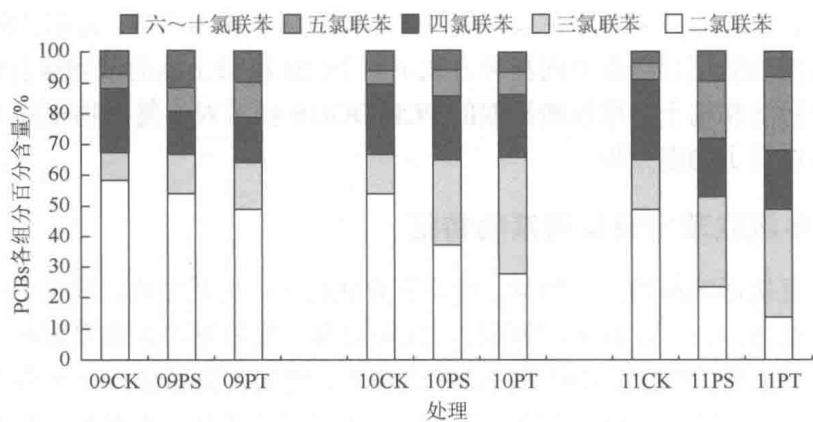


图 1.2 不同播种方式下土壤中 PCBs 各组分的含量变化

在另一个紫花苜蓿播种方式为条播的两年田间修复试验中，不同处理下土壤中 PCBs 总量的浓度见表 1.1。在种植紫花苜蓿修复 1 年后（2008 年）和 2 年后（2009 年），土壤中 PCBs 总量与未种植的对照相比均有显著降低（ $p<0.05$ ）。此外，无论是对照组还是修复组，土壤中 PCBs 的浓度在第 2 年的水平均显著低于第 1 年。在种植紫花苜蓿的处理中，土壤 PCBs 总量的去除率在修复后的第 1 年和第 2 年分别达到了 31.4%和 78.4%，显著高于对照组的 12.3%和 31.4%。

表 1.1 不同处理下土壤中 PCBs 的含量变化

处理	对照 (CK)		种植紫花苜蓿 (P)	
	浓度/ (μg/kg)	去除率/%	浓度/ (μg/kg)	去除率/%
起始浓度 (2007 年)	191.0±9.7a	0	191.0±9.7a	0
第 1 年 (2008 年)	167.5±9.2b	12.3±0.4	131.0±5.5c	31.4±0.6
第 2 年 (2009 年)	131.1±5.4c	31.4±0.7	41.3±3.9d	78.4±0.9

注：同一列中不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

在两年的田间修复过程中，土壤中不同 PCBs 同系物的组成变化见图 1.3。由图可知，与对照相比，紫花苜蓿的种植可显著促进土壤中二氯联苯的降解，同时提高了土壤中四氯、五氯甚至更高氯代联苯的比例。由图 1.3 还可知，无论是种植植物的修复组还是未种植的对照组，土壤中二氯联苯的含量都随着修复时间的增加而不断降低，表明土著微生物在低氯联苯的好氧降解中发挥了重要作用。

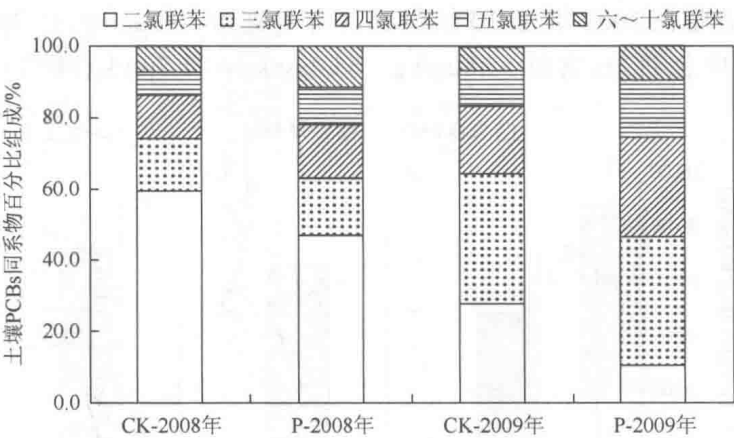


图 1.3 不同处理下土壤中 PCBs 同系物的含量变化

二、紫花苜蓿各组织的生物量

采用条播和撒播两种不同播种方式下，紫花苜蓿的生物量（鲜重）从第 1 年到第 3 年显著增加，但条播方式下紫花苜蓿的根、地上部以及总生物量均显著高于撒播方式（图 1.4）。这可能是由于条播植株两侧不与相邻植株发生营养竞争，群体内部具有较适宜的光照强度、空气温度、空气湿度、平均风速和浅层土壤温度，植物生长在可占用空间、获取的光能、根吸收的水分和营养能力等方面占优势，群体保持较高的光合速率，并最终形成了较高的生物产量（杨恒山等，2009）。另外，紫花苜蓿具有发达的根系，撒播方式与条播方式相比较，其根系更易絮结成坚韧的根系网，影响土壤通透性等理化性质，也导致了苜蓿生物量的下降。