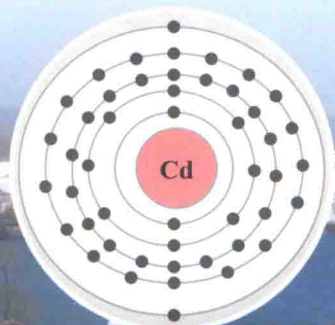


土壤污染毒性、基准与风险管理

Toxicity, Criterion and
Risk Management of Soil Pollution

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

土壤污染毒性、基准与风险管理

骆永明 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者近 20 年来开展土壤中重金属和有机污染物的生态毒性、环境基准和风险管理等研究工作的全面总结。系统介绍了土壤污染的生物毒性、风险评估和诊断指标等研究方法,阐明了土壤中重金属、有机污染物及重金属-有机复合污染物的生物毒性效应与机制。并以电子废旧产品拆解区、冶炼区、化工区等为典型案例,介绍了工业场地及周边土壤污染的生态风险、健康风险和环境迁移风险的评估与临界值制定方法,设计了土壤环境信息系统,建立了土壤环境安全预警方法与指标体系。在此基础上,构建了基于风险削减—环境改善—成本降低(REC)模型的污染土壤修复决策支持系统,提出了土壤污染防治和土壤环境管理对策建议。这些研究成果对认清土壤污染风险、制定土壤环境标准和监管土壤环境质量具有重要的学术价值和实践指导意义。

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、科研工作者的参考书,也可作为高等院校、科研院所中土壤学、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

土壤污染毒性、基准与风险管理/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 978-7-03-052185-9

I. ①土… II. ①骆… III. ①土壤污染—研究 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 049749 号

责任编辑:周 丹 梅靛雅/责任校对:彭 涛

责任印制:张 倩/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>

北京通州皇家印刷厂印刷

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:34

字数:810 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

主要著者

骆永明 涂 晨 宋 静 滕 应 吴龙华

章海波 刘五星

著者名单 (按姓氏笔画排序)

丁克强 卜元卿 马婷婷 王国庆 韦 婧

邓绍坡 尹春艳 田 晔 邢维芹 过 园

刘五星 李志博 李晓勇 吴龙华 吴宇澄

吴春发 宋 静 张红振 陈永山 罗 飞

郑茂坤 柯 欣 胡宁静 骆永明 高 岩

涂 晨 章海波 韩存亮 蒋先军 滕 应

潘云雨

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了第一、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,该丛书可供全国土壤污染防治行动计划的实施借鉴,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。

本著作为第二册，系统介绍了土壤污染的生物毒性、风险评估和诊断指标等研究方法，阐明了土壤中重金属、有机污染物及重金属-有机复合污染物的生物毒性及其机制。以电子废旧产品拆解区、冶炼区、化工区等为典型案例，介绍了工业场地及周边土壤污

染的生态风险、健康风险和环境迁移风险的评估与临界值制定方法,建立土壤环境信息系统和安全预警方法及指标体系。构建了基于风险削减—环境改善—成本降低(REC)模型的污染场地土壤修复决策支持系统,提出了基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)关联分析的土壤环境质量管理策略,以及土壤环境风险管理对策建议。这些研究成果对认清土壤污染风险、制定土壤环境标准和监管土壤环境质量具有重要的学术价值和实践指导意义。

全书共分两篇。第一篇介绍土壤中污染物的毒性、风险与基准,共分三章:第一章土壤污染物的生物毒性;第二章污染场地及周边土壤风险评估;第三章土壤污染的环境临界值方法制定和模型建立。第二篇介绍土壤污染与修复决策支持系统与管理策略,共分五章:第四章土壤环境信息系统的设计与开发;第五章土壤环境安全预警与风险管理;第六章污染场地修复决策支持系统;第七章基于DPSIR系统的土壤环境质量管理策略;第八章土壤环境管理对策与建议。

本书吸收了国家科技部“十五”“973”计划项目(2002CB410800),国家自然科学基金委杰出青年科学基金(40125005)、重点(40432005、41230858)及重大国际合作项目(40821140539),中国科学院“百人计划”项目(重金属污染土壤的评价与生物修复研究)、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)、环保公益性行业科研专项项目(201009016)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、涂晨、宋静、滕应、吴龙华、章海波、刘五星;参加相关研究和本书撰写工作的还有:丁克强、卜元卿、马婷婷、王国庆、韦婧、尹春艳、邓绍坡、田晔、邢维芹、过园、李志博、李晓勇、吴宇澄、吴春发、张红振、陈永山、罗飞、郑茂坤、胡宁静、柯欣、高岩、蒋先军、韩存亮、潘云雨,以及付传城、马海青、周倩、王晓雯等。全书由章海波和骆永明统稿,骆永明定稿。需要指出的是考虑到丛书的系统性,经科学出版社同意,本书中的部分内容来自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。



2016年12月于烟台

目 录

序言

前言

第一篇 土壤中污染物的毒性、风险与基准

第一章 土壤污染物的生物毒性	3
第一节 土壤污染物对植物的毒性	3
第二节 土壤污染物对微生物的毒性	48
第三节 土壤污染物对动物的毒性	114
参考文献	154
第二章 污染场地及周边土壤风险评估	162
第一节 污染土壤的风险评估理论与方法	162
第二节 电子废旧产品拆解场地及周边土壤的健康与生态风险评估	190
第三节 冶炼区及周边土壤的健康和生态风险评估	245
第四节 化工厂区污染场地及周边土壤的健康风险评估	295
参考文献	313
第三章 土壤污染的环境临界值方法制定和模型建立	326
第一节 基于土壤类型的土壤环境地球化学基线估算	326
第二节 基于提取态的土壤临界值	352
第三节 基于生态风险的土壤临界值与评估模型	373
第四节 基于人体健康的临界值与评估模型	376
参考文献	423

第二篇 土壤污染与修复决策支持系统与管理策略

第四章 土壤环境信息系统的设计与开发	431
第一节 系统总体设计	431
第二节 子系统的开发与主要功能	432
参考文献	435
第五章 土壤环境安全预警与风险管理	436
第一节 土壤环境安全预警方法和预警指标体系	436

第二节 土壤环境安全预警案例分析	437
第三节 土壤环境风险管理的措施与建议	443
参考文献	444
第六章 污染场地修复决策支持系统	445
第一节 污染场地修复决策原理	445
第二节 基于 REC 模型的污染场地修复决策支持	452
第三节 重金属污染土壤的植物修复决策系统和规范	456
参考文献	465
第七章 基于 DPSIR 系统的土壤环境质量管理策略	466
第一节 DPSIR 系统及模型参数	466
第二节 基于 DPSIR 系统的区域土壤环境质量管理框架	468
第三节 DPSIR 模型的适用性	481
第四节 典型废旧物资回收再利用区土壤环境质量的 DPSIR 策略	483
参考文献	511
第八章 土壤环境管理对策与建议	513
第一节 土壤环境管理的政策与法律法规制定	513
第二节 土壤环境监管能力建设与提高	517
第三节 土壤环境基准与质量标准的修订与制定	519
第四节 土壤环境科学管理与污染修复技术支撑	524
第五节 土壤环境治理的投融资机制建设	527
第六节 土壤环境保护的宣传与教育	529
第七节 土壤环境管理的中长期发展目标	529
参考文献	530

第一篇 土壤中污染物的毒性、 风险与基准

土壤中的污染物及其代谢产物种类繁多，含量、形态及生物有效性各异，单一的化学方法通常难以表征复杂土壤环境的复合污染及其生态风险。发展基于土壤生态系统中土著生物的生态毒理与风险评估体系是国际生态毒理学与环境生态风险研究的热点。本篇以土壤植物、微生物和土壤动物为敏感受体，建立了从基因到群落的土壤生物毒性诊断方法体系；开展了设施农田、电子废旧产品拆解场地、冶炼场地、化工厂区污染场地及周边土壤的人体健康和生态环境风险评估；探讨了土壤污染的环境临界值制定方法与模型，以期土壤环境风险管理提供科学依据。

第一章 土壤污染物的生物毒性

污染土壤生态毒理诊断包括高等植物毒性试验、蚯蚓毒性试验、陆生无脊椎动物试验、土壤原生动物毒性试验、土壤微生物试验等。当生物体暴露于各种逆境时，其体内组织、细胞以及分子结构会产生特定的生物信号，可用于土壤生态系统中土壤污染的生态毒理学诊断，并能够为土壤污染的预防和修复提供依据。本章以重金属、有机污染物以及重金属-有机复合污染为研究对象，开展了土壤-植物-动物-微生物系统的生物毒性和生态毒理学评价研究。这些研究成果为污染区土壤的环境质量评价提供了生物毒性数据，也为污染土壤生态毒性的研究和发展提供了科学方法和研究实例。

第一节 土壤污染物对植物的毒性

当土壤中的重金属和有机污染物超过一定的限值，会引起植物的吸收和代谢失调。污染物在植物体内的吸收、富集和转化，会影响植物的生长发育、破坏植物根系的正常吸收和代谢功能，甚至导致遗传突变。本节分别介绍了重金属（镉、铅、锌、铜）、有机污染物（多环芳烃、杀线剂）以及重金属-有机复合污染对植物（蔬菜和小麦）的毒性效应与机制。

一、重金属对植物的毒性

（一）镉高背景土壤对蔬菜生长的影响

我国西南地区，尤其是贵州沉积石灰岩分布地区土壤存在着明显的镉（Cd）自然高背景现象。贵州地表土壤与沉积物中 Cd 的地球化学背景值为 0.31 mg/kg（表 1.1），是我国平均水平的 2.5~3.5 倍，表现出贵州地表环境介质中具有 Cd 的高背景含量特征（何邵麟等, 2004）。

表 1.1 贵州不同地层单元发育的土壤和水系沉积物中 Cd 的平均含量 （单位：mg/kg）

贵州全省背景	Pt	Z	Є	O	S	D	C	P	T	J	K	E+N	Q	三级土壤临界值
0.31	0.22	0.23	0.39	0.32	0.31	0.33	1.07	0.79	0.29	0.21	0.19	0.28	0.32	1.00
γ	β	Є ₁	Є ₂	Є ₃	D ₂	D ₃	C ₁	C ₂	C ₃	P ₁	P ₂	T ₁	T ₂	T ₃
0.13	0.49	0.42	0.27	0.40	0.17	0.43	0.67	2.15	0.65	1.61	0.36	0.25	0.33	0.21

注：三级土壤临界值据国家土壤环境质量标准（GB 15618——1995）；Pt—梵净山群+下江群；Z—震旦系；Є—寒武系及上中下统；O—奥陶系；S—志留系；D—泥盆系及中上统；C—石炭系及上中下统；P—二叠系及上下统；T—三叠系及上中下统；J—侏罗系；K—白垩系；E+N—第三系；Q—第四系；γ—花岗岩；β—玄武岩；本表引自何邵麟等（2004）。

供试土壤采自贵州省碳酸盐岩地区，土壤中 Cd 含量呈现一定的梯度，是选出的具有代表性的碳酸盐岩发育的农田土壤，其中 6 个样点土壤分别采自贵阳、黔南和毕节地区农田，1 个样点（BJ-6）土壤采自于某已废弃的土法炼锌场附近的菜地，受 Cd 污染严重，同样也对该样点土壤中 Cd 经食物链对人体的健康风险进行评价，将其作为受到人为活动强烈影响的 Cd 污染土壤与其他地球化学异常土壤相对比。供试土壤主要的理化性质见表 1.2。供试植物为叶菜类蔬菜（小青菜与生菜），种子购于江苏省农业科学院。

表 1.2 供试土壤主要的基本性质

土壤 编号	pH (H ₂ O)	有机质 / (g/kg)	CEC / (cmol/kg)	N / (g/kg)	P / (g/kg)	K / (g/kg)	Cd / (mg/kg)	Zn / (mg/kg)	Cu / (mg/kg)	Pb / (mg/kg)
GY-3	8.10	70.5	26.3	0.53	1.40	12.2	0.88	104	28.0	36.3
QN-1	8.09	40.0	14.0	2.03	0.82	7.90	2.38	119	15.1	30.8
BJ-15	7.84	30.5	23.9	2.16	2.06	11.1	7.55	211	81.2	30.7
BJ-17	7.90	23.5	13.3	1.43	1.00	5.60	1.61	155	64.3	21.7
BJ-5	7.82	57.7	30.4	2.09	2.26	18.5	6.76	230	37.1	52.7
BJ-7	4.81	48.2	21.1	1.95	0.84	5.80	6.13	294	36.3	83.3
BJ-6	7.56	81.7	25.5	1.72	3.61	8.40	64.2	4191	231	1593

在所考察的土壤上种植青菜和生菜发现，毕节地区 BJ-6 和 BJ-7 两处土壤上两种蔬菜生长受到严重抑制，蔬菜可食部分鲜重显著低于其他 5 处土壤上的蔬菜鲜重（图 1.1）。

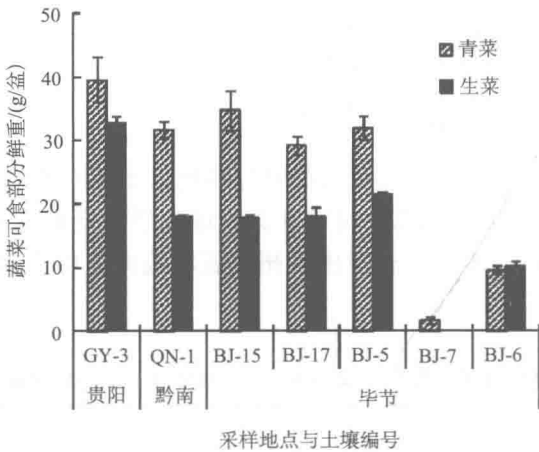


图 1.1 蔬菜可食用部分鲜重

对比各土壤的性质与重金属含量可知，BJ-7 处土壤与其他各处土壤最明显的差异在于其 pH 为 4.81，远远低于其他各处土壤的 pH（7.56~8.10），呈强酸性。在如此低的 pH 条件下，生菜已无法生长，试验结束时没有能收获到生菜样品。而青菜虽能生长，但每盆仅收获到约 1.7 g 可食部分鲜样。BJ-6 处土壤为受到当地土法炼锌活动影响的重污

染土壤，其土壤中 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的含量分别为 64.2 mg/kg、4191 mg/kg、231 mg/kg 和 1593 mg/kg，分别是我国土壤环境质量二级标准限量值的 107 倍、12.0 倍、2.3 倍和 5.3 倍，在如此严重的污染情况下，蔬菜生长缓慢、长势差且叶色发黄，是造成可食部分鲜重较低的直接原因。其他五处土壤上青菜和生菜均生长良好，其中贵阳地区 GY-3 处土壤采自于菜园地，该土壤上蔬菜可食部分鲜重相对最高，而另外 4 处均为农田土壤，每盆青菜与生菜的可食部分鲜重分别在 30 g 和 20 g 左右。

通过在土壤上种植叶菜类蔬菜发现，在已明显酸化的土壤上（pH 4.81），青菜的生长均受到严重抑制，而生菜根本无法生长，这与土壤的强酸性以及高量有效态镉的存在有关，因为在该酸性土壤中 0.01 mol/L CaCl_2 和 DTPA 提取态 Cd 含量分别为 1.12 mg/kg 和 2.12 mg/kg。而在中性至微碱性土壤上，即使土壤总 Cd 含量超过 7.0 mg/kg 时，青菜与生菜均能良好生长，此时蔬菜可食部分 Cd 含量与土壤 DTPA 提取态以及总 Cd 含量间均存在显著的对数关系（表 1.3 和图 1.2），而与土壤 0.01 mol/L CaCl_2 提取态镉含量间没有显著的对数或线性关系。这是因为，首先，0.01 mol/L CaCl_2 提取态重金属相当于水溶态和可交换态部分，这部分重金属虽然通常被认为是活动性最强而且最容易被植物吸收的部分，但是其与植物对重金属的吸收之间并不一定会表现出良好的相关性；其次，0.01 mol/L CaCl_2 提取态 Cd 在研究区中性或微碱性土壤中的绝对含量很低，因此该提取态含量相对于整个土壤重金属总库来说，对植物可利用态 Cd 的贡献可能不占据重要地位。而 DTPA 提取态与总 Cd 含量对蔬菜可食部分 Cd 含量的成功预测则表明，它们在土壤呈中性至微碱性时均能在一定程度上作为评价土壤中 Cd 的植物有效性或毒性的标准。

表 1.3 蔬菜可食部分 Cd 含量（Y）与土壤提取态总 Cd 含量（X）的关系（土壤 pH>7.5）

分析指标	蔬菜种类	回归方程（n=5）		R^2		超标临界值 ^a	
		对数	线性	对数	线性	对数	线性
CaCl_2	青菜	$Y=0.030 \times \ln X + 0.135$	$Y=17.1 \times X + 0.091$	0.572	0.269	—	—
	生菜	$Y=0.085 \times \ln X + 0.316$	$Y=49.5 \times X + 0.189$	0.640	0.300	—	—
DTPA	青菜	$Y=0.047 \times \ln X + 0.148$	$Y=0.067 \times X + 0.063$	0.871*	0.648	3.02	—
	生菜	$Y=0.132 \times \ln X + 0.350$	$Y=0.193 \times X + 0.110$	0.929**	0.714	0.32	—
全量	青菜	$Y=0.057 \times \ln X + 0.049$	$Y=0.015 \times X + 0.049$	0.937**	0.799*	14.1	10.1
	生菜	$Y=0.158 \times \ln X + 0.076$	$Y=0.044 \times X + 0.069$	0.967**	0.870*	2.19	2.98

注：a 超标临界值是指当蔬菜中 Cd 含量达到 0.2 mg/kg 时，土壤中相应的提取态或总 Cd 含量，该值是由表中相应的回归方程计算得到。

* 显著水平为： $p < 0.05$ ；** 显著水平为： $p < 0.01$ 。

（二）镉、铅对蔬菜生长的影响

供试土壤为理化性质差异较大的 3 种，分别为采自浙江嘉兴的普通潜育水耕人为土（青紫泥）、上海南汇的石质淡色潮湿锥形土（滩潮土）和浙江湖州的铁聚潜育水耕人为土（黄泥砂土）。土壤基本性质见表 1.4。盆栽试验在中国科学院南京土壤研究所温室

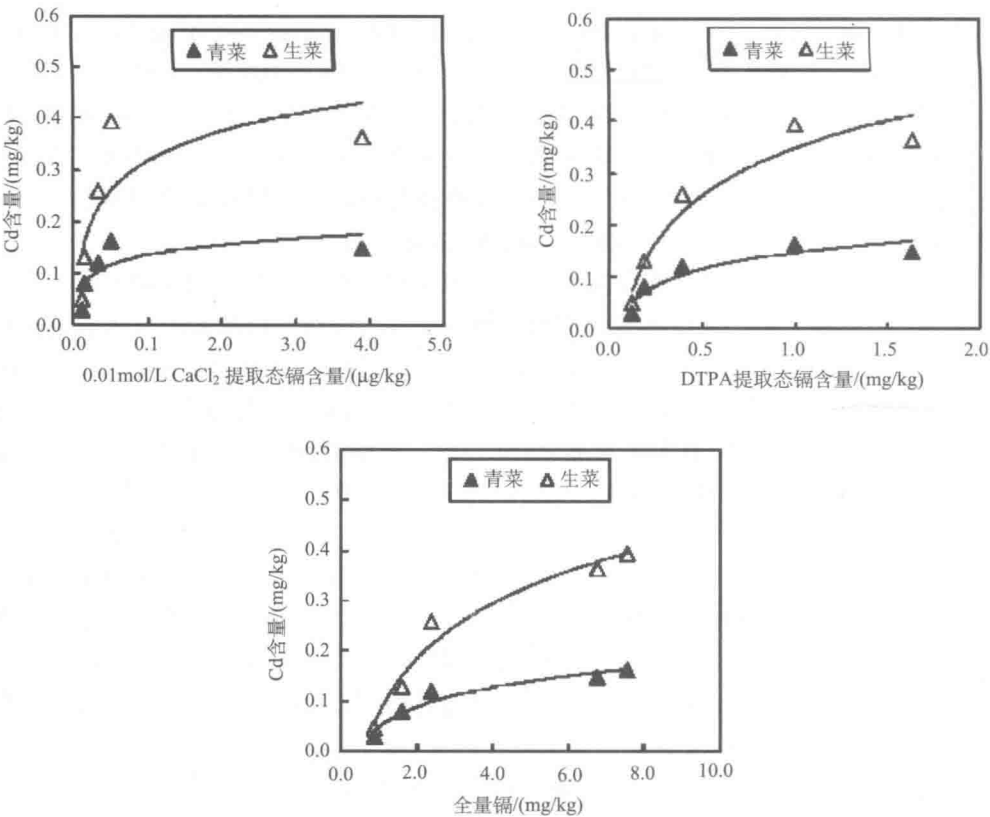


图 1.2 蔬菜可食部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量间的拟合曲线（土壤 pH>7.5）

中进行，供试蔬菜品种为青菜（*Brassica chinensis* L.）和苋菜（*Amaranthus fricolor* L.）。在塑料盆中装入风干过 2 mm 土样 1.5 kg，以尿素（0.6 g/kg 土）和磷酸氢二钾（0.6 g/kg 土）为底肥。镉（Cd）和铅（Pb）的试验浓度参考多个国家的土壤环境质量标准确定。土壤中添加镉化合物为 Cd（NO₃）₂·4H₂O，添加镉浓度为（以 Cd 计）：0、0.7、2.9、11、16 和 27 mg/kg；添加铅化合物为 Pb（NO₃）₂，添加铅浓度为（以 Pb 计）：0、125、281、407、532 和 625 mg/kg。每个处理重复 3 次，各个处理之间没有作补充性氮平衡。先将土壤与肥料混和，一周后加入镉和铅溶液混匀，加水至田间持水量的 60%，放置平衡，平衡期间定期加水维持含水量。平衡一个月后，在每盆中直播 16 粒种子，出苗整齐、长势良好后（7~10 天），每盆定植 4 株。生长期间土壤湿度保持在约 70% 田间持水量，生长 45 天后收获。收获时用不锈钢剪刀剪取地上部。

表 1.4 试验土壤基本性质

土样	pH	OM / (g/kg)	CaCO ₃ /%	CEC /(cmol/kg)	Clay /%	Cd ¹⁾ / (μg/kg)	Pb ¹⁾ / (mg/kg)	水解氮 / (mg/kg)	速效磷 / (mg/kg)	速效钾 / (mg/kg)
青紫泥	6.2	34.2	0.2	20.0	17.0	49.1	40.5	142.08	10.6	134
滩潮土	7.6	26.0	3.0	14.8	15.8	94.0	21.7	175.05	68.0	216
黄泥砂土	4.9	43.6	0.0	11.2	18.4	77.3	31.1	237.18	13.5	72

注：1) HF-HNO₃-HClO₄ 消煮。

1. 镉、铅对青菜、苋菜生物量的影响

由于土壤性质的差异，3 种土壤 Cd 污染对青菜生物量的影响不同（表 1.5）。在添加 Cd 浓度为 0.7~27 mg/kg 范围内，青紫泥青菜地上部的生物量与对照相比没有变化，而滩潮土在浓度为 0.7 mg/kg 时青菜地上部生物量与对照相比有显著增加，其他处理均对生物量没有影响，体现了该土壤 Cd 污染的隐蔽性和危害性。

对铅而言，黄泥砂土在添加 Pb 浓度≤407 mg/kg 时，与对照相比促进了青菜的生长，由于实验虽然施用尿素作为氮肥，但是未作基于硝酸盐加入的氮量进行各处理的补充性平衡，因此，可能是氮促进了青菜生物量的增加。其他处理与对照相比均无显著差异；青紫泥和滩潮土在添加 Pb 浓度为 125~625 mg/kg 内与对照相比无显著差异（表 1.5）。

滩潮土在 Cd 处理浓度为 16 mg/kg 时苋菜生长与对照相比，植株矮小，生物量下降，浓度为 27mg/kg 时生长受到明显抑制导致生物量明显降低（表 1.5）。

表 1.5 土壤中镉和铅对青菜和苋菜地上部分生物量的影响

Cd 处理						Pb 处理			
浓度	青菜/（g/盆）鲜重			苋菜/（g/盆）鲜重		浓度	青菜/（g/盆）鲜重		
/（mg/kg）	黄泥砂土	青紫泥	滩潮土	黄泥砂土	滩潮土	/（mg/kg）	黄泥砂土	青紫泥	滩潮土
0	6.16b	62.01a	58.76b	18.38b	51.29ab	0	2.81c	62.01a	37.12a
0.73	5.7b	53.47ab	75.88a	36.21a	64.48a	125.08	7.02ab	62.88a	31.34a
2.91	5.93b	62.39a	61.2ab	30.29ab	45.39abc	281.42	8.13a	66.53a	41.8a
10.91	8.04ab	36.29b	49.86b	38.93a	58.30a	406.50	9.53a	67.43a	44.08a
16.36	10.58ab	52.46ab	46.42b	32.28ab	22.30bc	531.57	4.51bc	58.31a	45.67a
27.27	13.37a	51.23ab	48.76b	17.77b	16.32c	625.38	1.85c	58.70a	41.75a

注：表中不同小写字母表示不同浓度处理之间有显著性差异，显著性水平为 0.05。

2. 镉、铅污染对蔬菜吸收的影响

1) 青菜中镉和铅的含量

从图 1.3（a）和（b）可以看出，3 种土壤表现出相同的趋势，即随着土壤中镉或铅浓度的增加，青菜地上部的镉或铅含量有明显的提高。已有研究结果表明（Xian, 1989; Lehn and Bopp, 1987），植物吸收重金属的量与土壤中重金属的污染程度有很大关系，总体表现为污染程度越高，植物吸收量越多。

在相同处理浓度下，3 种土壤中青菜地上部镉和铅含量顺序为：黄泥砂土>青紫泥>滩潮土[图 1.3（a）和（b）]。这与土壤的基本理化性质有关。如在添加 Cd 浓度为 0.7 mg/kg 时，黄泥砂土青菜镉含量高达 17.2 mg/kg（干重），而青紫泥和滩潮土则为 2.82 mg/kg 和 2.13 mg/kg（干重），这是因为青紫泥和滩潮土 pH 高于黄泥砂土，pH 升高会引起土壤对镉和铅吸附能力的增强、吸附量增加，生物有效性降低。从上面分析可以看出，酸性黄泥砂土中 Cd 浓度较低时（0.7 mg/kg），青菜 Cd 含量高达 17.2 mg/kg（干

重)，远远高于国家标准[荷兰基于人体健康风险评估的生菜质量标准为 4.0 mg/kg（干重），中国食品卫生标准 GB 15201—1994 按 90% 的含水量换算成干重为 0.5 mg/kg（干重）]，即使是中性青紫泥和滩潮土上的青菜 Cd 含量也超过了中国食品卫生标准。因此，在酸性土壤中，即使 Cd 污染浓度不高，也不宜种植此品种蔬菜，否则将可能通过食物链影响人体健康。

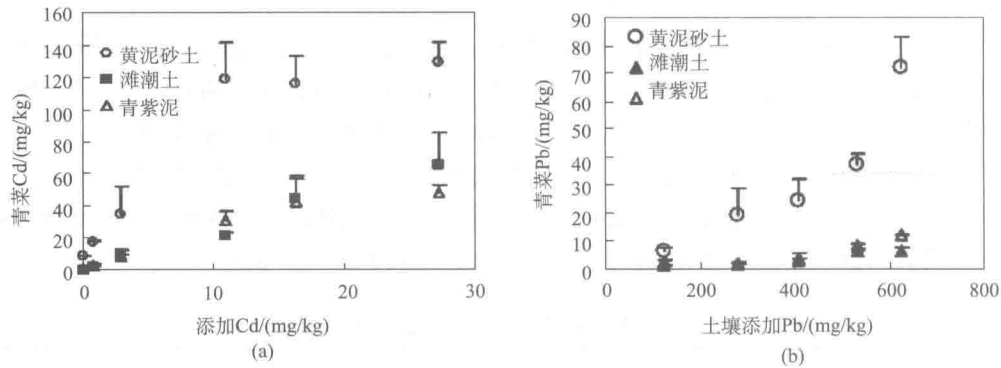


图 1.3 青菜地上部 Cd (Pb)（干重）含量与土壤添加 Cd (Pb) 的关系

2) 土壤化学有效性与植物吸收的相关性

将土壤 0.05 mol/L EDTA 可提取态镉或铅 (EDTA-Cd, EDTA-Pb)、0.43 mol/L HNO₃ 可提取态镉或铅 (HNO₃-Cd, HNO₃-Pb) 和 0.01mol/L CaCl₂ 可提取态镉或铅 (CaCl₂-Cd, CaCl₂-Pb) 与供试青菜和苋菜地上部镉或铅 (Q-Cd 或 Q-Pb, X-Cd 或 X-Pb) 含量 (干重) 分别作图得到图 1.4 (a) ~ (c)、图 1.5 (a) ~ (c) 和图 1.6 (a) ~ (c)。显然，CaCl₂-Cd (Pb) 与青菜或苋菜地上部 Cd (Pb) 含量关系图中数据点较为分散，而 HNO₃-Cd (Pb) 和 EDTA-Cd (Pb) 与青菜或苋菜地上部 Cd (Pb) 含量关系图中数据点较为收敛。

分别对上述 24 组数据进行相关性分析，结果表明 HNO₃-Cd、EDTA-Cd 和 CaCl₂-Cd 与青菜和苋菜地上部 Cd 含量 (干重) 之间相关性显著 ($r=0.74\sim0.94$, $p<0.01$, $n=18$)。HNO₃-Pb 和 EDTA-Pb 与青菜地上部 Pb 含量 (干重) 之间相关性也显著 ($r=0.88\sim0.91$, $p<0.01$, $n=18$)，但 CaCl₂-Pb 与滩潮土和青紫泥生长的青菜地上部 Pb 含量相关性不显著，尤其是滩潮土 ($r=0.28$, $n=18$)，表明除 CaCl₂ 提取态 Pb 外，其余两种可提取态 Cd 或 Pb 均能较好的指示青菜和苋菜对土壤中 Cd 或 Pb 的吸收。

(三) 重金属对印度芥菜生长的影响

土壤样品采自中国科学院常熟农业生态实验站，为河湖相沉积物发育的水稻土。采用温室盆栽试验研究了锌 (Zn)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、铅 (Pb) 的单一或复合处理对印度芥菜生物量的影响。土样混和均匀后，加入蒸馏水使含水量为田间持水量的 60%，保持 2 天后，播入印度芥菜种子，生长一周后间苗，每盆留 4 苗；植物生长期间保持土壤湿度为田间持水量的 60%。生长 66 天后收获，沿土面剪取地上部，测量株高、鲜重，同时洗出根系；在 105℃ 下烘干，称地上部和根的干重。