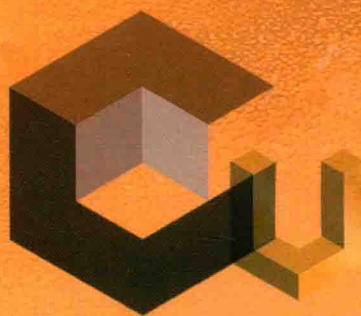


TURANGZHONG TONG DE
FENGXIAN PINGGU YU WURAN FANGZHI

土壤中铜的 风险评估与 污染防治

马义兵 等 著



 中国农业出版社

土壤中铜的风险评估与 污染防治

马义兵 等 著

中国农业出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤中铜的风险评估与污染防治/马义兵等著. —

北京: 中国农业出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-109-23885-5

I. ①土… II. ①马… III. ①土壤—铜污染—风险评估
②土壤—铜污染—污染防治 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 011329 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 贺志清

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 15.25

字数: 345 千字

定价: 98.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

编 委 会

主 著：马义兵

副 主 著：韦东普 陆 韬 陈世宝 颜增光

李 波 罗 磊 王学东 王小庆

周世伟 宋宁宁

参编人员：段雄伟 徐 猛 周友亚 陈桂葵

李发生 华 珞 宋文恩 李 娜

前 言

中国是世界上最早发现和使用铜的文明古国之一。从3 000年前的青铜器时代，一直到15世纪前，我国炼铜及加工技术在上世界上遥遥领先。直到今天，铜与铜合金产品在人们生产和生活中起着不可替代的作用。随着工业化和城市化的发展，铜的应用范围以及铜的需求量也随之增加。尤其在在我国，精铜消费量约从1990年的73万t增至2013年的810万t。尽管铜是维持生命所必需的微量营养元素，但过量的铜会对生态环境和人类健康带来一定的风险，所以由含铜三废排放所导致的生态环境和人类健康问题越来越引起人们的广泛关注。中国环境保护部和国土资源部于2014年4月17日发布的全国土壤污染状况调查公报数据显示，我国土壤调查点位铜超标率为2.1%，且铜污染事件时常发生。因此，中国土壤环境中铜的来源、转化过程、风险评价、基准及防治措施和途径对环境保护和工农业稳定永续发展至关重要。

近年来，在环境科学、土壤化学、分析化学、风险评价、环境基准和污染防治等领域科研人员的共同努力下，我国对土壤环境中铜的研究取得了一系列显著的成就。尤其在国际铜业协会健康、环境与可持续发展项目、国家自然科学基金面上项目（污染土壤中铜的老化机理，40571071；土壤中铜对植物和微生物毒害的生物配体模型研究，20677077）、国家自然科学基金委员会重大国际合作项目（土壤中铜和镍的生物毒性及其主控因素和预测模型研究，40620120436）、国家农业行业专项（主要农产品产地土壤重金属污染阈值研究与防控技术集成示范）等资助下，在土壤中铜的风险评价与污染防治方面取得了一系列科研成果。在此基础上，本书系统地汇总和论述了土壤环境中铜对植物、动物、微生物的毒害，环境风险评价，基准推导，转化过程及模型，以及铜污染防治和修复等方面的研究成果，以期能够给从事相关研究的科研工作者提供一个集中交流的机会，进一步促进土壤环境中铜的研究。

全书共分10章。各章编写人员：第1章，宋宁宁、马义兵；第2章，李波、马义兵；第3章，段雄伟、颜增光、徐猛、周友亚、陈桂葵、李发生；第4章，韦东普、马义兵；第5章，周世伟、马义兵；第6章，罗磊、马义兵；第7章，王学东、马义兵、华珞；第8章，王小庆、马义兵；第9章，陆韬、

马义兵；第 10 章，陈世宝、宋文思、李娜。全书由马义兵、韦东普统稿。

在本书出版之际，对参与此项研究工作的专家学者、博士后、研究生等，对在科学研究和本书编写过程中国内外专家的指导和支持一并致以诚挚的谢意。

由于著者水平和时间有限，不妥之处，敬请批评指正。

著 者

2018 年 5 月 27 日

目 录

前言

第 1 章 铜污染土壤环境风险评价	1
1.1 环境风险评价的定义及发展	1
1.1.1 环境风险评价的定义	1
1.1.2 环境风险评价的发展历程	1
1.1.3 生态风险评价与健康风险评价的区别	3
1.2 铜污染土壤的生态风险评价	3
1.2.1 生态风险评价概述	4
1.2.2 铜污染土壤风险评价受体和终点的选择	5
1.2.3 生态风险评价方法学	10
1.2.4 低剂量刺激作用	15
1.3 铜污染土壤的健康风险评价	20
1.3.1 铜污染土壤的健康风险评价概述	21
1.3.2 铜与人体健康	22
1.3.3 人体摄入铜的机制与剂量表示	22
1.3.4 剂量—反应关系	26
1.3.5 铜污染土壤健康风险评价中的不确定性	28
参考文献	29
第 2 章 土壤中重金属铜的植物毒害	35
2.1 植物铜胁迫诊断	35
2.1.1 表观症状诊断	35
2.1.2 浓度指标诊断	36
2.2 植物铜胁迫的影响因素	37
2.2.1 品种异质性	37
2.2.2 土壤性质的影响	38
2.3 植物铜胁迫的机理	39
2.3.1 铜对植物细胞结构的影响	39
2.3.2 铜对植物光合作用的影响	40
2.3.3 铜对植物养分吸收的影响	40
2.3.4 铜对植物酶活性的影响	41

2.4 植物耐铜生理机制	41
2.4.1 细胞壁钝化作用	41
2.4.2 质膜的选择性排斥	42
2.4.3 细胞质的螯合作用	42
2.4.4 液泡的区隔化作用	43
2.4.5 抗氧化酶体系活性增强	43
参考文献	44
第3章 土壤环境中铜对土壤动物的毒害效应	49
3.1 铜对蚯蚓的毒性效应研究	51
3.1.1 铜对蚯蚓的急性毒性	51
3.1.2 铜对蚯蚓的慢性毒性	52
3.1.3 蚯蚓对铜污染土壤的回避行为反应	55
3.2 铜对跳虫的毒性效应研究	57
3.3 铜对土壤动物群落结构的影响	58
3.4 铜与其他污染物复合污染对土壤动物的联合毒性	59
3.5 土壤动物对铜的生理生化反应及生物标志物研究	60
参考文献	64
第4章 土壤中重金属铜的微生物毒害	70
4.1 土壤中铜污染的微生物毒性诊断方法	70
4.1.1 土壤硝化势	70
4.1.2 土壤酶活性	70
4.1.3 发光细菌法	71
4.2 土壤中铜微生物毒性的影响因素	71
4.2.1 土壤性质	71
4.2.2 土壤中铜的形态	72
4.2.3 土壤溶液的提取	73
4.3 铜对发光细菌——青海弧菌的毒性效应及其影响因素研究	73
4.3.1 我国土壤中铜对发光细菌的毒性效应	74
4.3.2 我国土壤中铜毒性效应的回归模型及影响因素	75
4.4 微生物毒性测试方法与其他方法的结果比较	77
参考文献	79
第5章 土壤中铜的老化机理、过程与调控	84
5.1 土壤铜的有效性/毒性评价方法	85
5.1.1 铜有效性评价方法	85
5.1.2 铜生物毒性评价方法	87

5.2 土壤铜的形态研究方法	88
5.2.1 化学法	88
5.2.2 谱学技术	89
5.3 土壤铜的老化机理	91
5.3.1 扩散作用	93
5.3.2 聚合/沉淀作用	94
5.3.3 包裹作用	95
5.4 土壤铜老化的动力学过程	96
5.4.1 常用描述土壤铜老化的动力学方程/模型	96
5.4.2 影响/控制土壤铜老化过程的因素	98
5.5 土壤铜老化的调控	102
5.5.1 土壤改良剂	102
5.5.2 重金属固定/稳定剂	103
5.5.3 土壤的水肥管理	104
5.6 前景展望	106
参考文献	106
第6章 土壤中铜的来源及调控	119
6.1 农田土壤中铜的主要来源	119
6.1.1 大气沉降	119
6.1.2 畜禽粪便	121
6.1.3 肥料及农药	122
6.1.4 污水灌溉及污泥施用	124
6.1.5 其他来源	125
6.1.6 铜输入清单及风险分析	125
6.2 农田土壤铜污染的调控措施	128
参考文献	129
第7章 生物配体模型 (BLM) 及在制定重金属环境基准中的应用	132
7.1 重金属生物毒性及其评价	133
7.1.1 重金属的生物毒性	133
7.1.2 重金属生物毒性的影响因素	133
7.1.3 重金属生物毒性的评价方法	134
7.1.4 重金属生物毒性的评价模型	135
7.2 生物配体模型的理论基础	136
7.2.1 生物配体模型的基本理论	136
7.2.2 生物配体模型的实现	137
7.3 生物配体模型的应用	139

7.3.1 水体生态系统	139
7.3.2 沉积物	142
7.3.3 陆地生态系统	142
7.4 生物配体模型的局限性和未来的研究方向	147
7.4.1 重金属的介质传输、吸收、累积和致毒机理	147
7.4.2 重金属在固液中的分配	149
7.4.3 阳离子的保护作用	149
7.4.4 金属有机、无机络合物的毒性	150
7.4.5 重金属联合毒性的生物配体模型	150
参考文献	151
第8章 土壤铜环境基准及其相关研究	158
8.1 有关土壤铜环境基准的研究现状	158
8.1.1 国外研究现状	159
8.1.2 我国土壤铜环境质量标(基)准	160
8.2 建立土壤环境质量基准的技术框架	161
8.3 我国土壤铜生态风险基准的建立	162
8.3.1 毒理学数据的收集与筛选	162
8.3.2 毒理学数据归一化	164
8.3.3 铜生态基准的建立	165
8.3.4 铜生态基准值的验证	168
8.3.5 铜生态基准的应用	169
参考文献	170
第9章 城市污泥农用土壤环境中的铜及其控制基准研究	173
9.1 污泥中铜的含量、来源及赋存形态	174
9.1.1 含量	174
9.1.2 来源	176
9.1.3 赋存形态	177
9.2 城市污泥农用土壤中铜的生物有效性和毒性	179
9.2.1 生物有效性	179
9.2.2 毒性	181
9.3 铜的现行污泥农用标准及其研究进展	184
9.3.1 现行标准	184
9.3.2 研究进展	187
参考文献	198
第10章 土壤中铜的污染防治与修复措施	206
10.1 土壤环境中的铜	206

10.1.1 土壤中铜的来源	206
10.1.2 土壤中铜的生物毒性	208
10.2 土壤中铜的有效性影响因素	211
10.2.1 土壤中铜的形态	211
10.2.2 不同土壤性质的影响	212
10.3 土壤酸化对土壤中铜有效性的影响	213
10.4 土壤铜的污染防治与修复	214
10.4.1 土壤铜污染的预防	216
10.4.2 土壤铜污染的治理措施	217
参考文献	223

第 1 章 铜污染土壤环境风险评价

近年来,伴随着矿产资源的大量开发利用,工业生产的迅猛发展和各种化学产品、农药及化肥的广泛使用,我国土壤面临的重金属污染问题日益显现。重金属污染具有普遍性、隐蔽性、长期性和稳定性等特点,成为最难治理的污染类型之一,由此引起的生态和健康问题也受到人们的高度重视。我国已经逐步开始对包括铜在内的重金属污染土壤进行环境调查与监测、风险评估及治理修复等相关工作。环境风险评价作为重金属污染土壤全过程管理中的重要组成部分,在现阶段土壤环境质量标准及导则的修订、场地评估中风险值的计算、治理修复中目标值的制定上均起着极其重要的作用。

本章节针对铜污染土壤的环境风险特征,以环境风险评价的基本步骤为主线,从生态风险评价和健康风险评价两个方面,简要介绍了铜污染土壤环境风险评价过程中所涉及的风险评价内容及方法,分析了目前环境风险评价存在的问题,并据此初步提出今后环境风险评价的发展方向和建议,从而为正在兴起的土壤重金属污染环境风险评价提供借鉴意义。

1.1 环境风险评价的定义及发展

1.1.1 环境风险评价的定义

环境风险评价(Environmental Risk Assessment, ERA)是衡量环境风险的方法,与环境风险同时存在的。环境风险评价广义上是指对人类的各种社会经济活动以及自然灾害所引发的危害进行评价,评价其对人体健康、社会经济发展、生态系统等所造成的风险,可能造成的损失,并以此进行管理和决策的过程。狭义上的环境风险评价通常是指对有毒物质(包括环境化学物、放射性物质等)危害人体健康和生态系统的可能程度进行概率估计,并提出减少环境风险的方案和决策。本文中的环境风险评价主要指狭义上的有毒害的化学物质造成的生态风险和人体健康评价。

1.1.2 环境风险评价的发展历程

1.1.2.1 国外发展历程

20 世纪 70 年代以前,人们对于环境危害的研究主要集中在危害发生后的治理研究,但是很多毒害物质一旦进入环境,对人体健康和生态环境将造成长期的危害,且治理难度大,费用高。欧美等发达国家在付出了沉重的代价后,终于认识到风险评价的重要性,环境风险评价由此应运而生。

环境风险评估初期主要针对人类健康而言,采用毒理分析范式评估单一化学污染物经

过食物链的传递最终可能对人类健康造成的风险^[1]。20 世纪 70~80 年代为健康风险评价研究的高峰期,基本形成较完整的评价体系。美国在该时期取得了极为丰富的成果,1983 年美国国家科学院(NAS)出版被称为健康风险评价典范的红皮书《联邦政府的风险评价:管理程序》,该书将健康风险评价概述为 4 个步骤:危害鉴别、剂量—反应评估、暴露评估和风险表征,目前已被荷兰、法国、日本等许多国家和国际组织采用^[2]。同时,美国国家环保局(USEPA)制定了包括《致癌风险评价指南》、《致突变风险评价指南》和《超级基金污染场地健康风险评价指南》等一系列风险评价指南和技术性文件^[3~5]。自此,环境风险评价的科学体系基本形成,并处于不断发展和完善的阶段。

20 世纪 90 年代,环境风险评估的内容与热点逐渐从毒理风险、人体健康风险向生态风险转变,研究者开始尝试生态风险评估框架的构建与评估指南的编写。1990 年,美国国家研究委员会(NRC)成立的风险评估方法委员会在进行广泛案例研究的基础上,将人体健康评估与生态评估融入新的框架中,但生态风险评估尚未形成统一的评估标准与指南。直到 1992 年,美国国家环保局确定了一个生态风险评价框架,并提出土壤生态风险评价是为了分析和预测土壤生态系统对于外界胁迫的响应,并且指出这种胁迫可以是这些能对个体、种群、群落和土壤生态系统导致不利影响的化学的、物理的以及生物的反应^[6]。1998 年,USEPA 正式颁布了《生态风险评估指南》,明确表述了生态风险评估的准则,并提出生态风险评估“三步法”,即提出问题、分析(暴露和效应分析)和风险表征^[7]。目前,美国大部分生态风险评价仍然使用 1998 版《生态风险评估指南》作为研究标准。澳大利亚生态风险评价研究集中在对化学污染物和重金属对土壤的影响上,澳大利亚国家环境保护委员会于 1999 年也建立了一套比较完善的土壤生态风险评价指南,其 B5 部分是生态风险评价指南专题^[8]。欧洲各国也相继制定了适应本国需求的环境风险评估指导性文件,其研究与美国的生态风险评价有较大不同,主要是在新化学品评价的基础上发展起来的,对高残留、高生物有效性物质予以特别关注^[9]。其他国家比如加拿大、南非和新西兰等,其环境风险评价研究大多按照美国 1998 版《生态风险评估指南》展开,并在此基础上对评价流程和具体操作方法进行适合本国的调整和改进,构建适合本国实际的环境风险评价体系^[10~11]。

此后,在 USEPA 的指导框架下,环境风险评估逐渐从人体扩展至种群、群落、生态系统乃至流域景观等更高层次,风险来源也由单一的化学污染物延伸至化学、物理、生物等多领域的复合风险源及可能造成生态风险的事件,并且开始考虑人类活动对生态系统的干扰^[12,13]。

1.1.2.2 国内发展历程

与国外环境风险评价研究相比,国内的风险评价研究起步相对较晚,尚处于对我国环境风险评价基础理论和技术方法的探讨阶段,部分学者开始尝试引进国外生态风险理论和方法来研究我国环境中的风险问题,并取得了一定进展。曹云者等^[14]分析了国际上石油烃污染场地环境管理方法的特点和发展趋势,并结合我国的实际情况,提出了在我国建立基于风险的石油烃污染场地环境管理模式的对策建议;赵沁娜等^[15]以某区域土地置换开发为案例,结合区域未来土地利用类型,采用健康风险评价模型对土壤多环芳烃

(PAHs) 污染可能给未来人住人群带来的健康风险进行了评价;何巧力等^[16]利用 ISO 推介的标准试验方法研究了蚯蚓回避行为试验在蔡污染土壤生态风险评价中的应用。宣昊等^[17]在地球化学基线的基础上利用潜在生态风险评价方法对江西省德兴铜矿周围土壤中 7 种重金属进行了评价,将研究区划分为轻微生态风险区、中等生态风险区和强生态风险区。陈鸿汉等^[18]和堪宏伟等^[19]分别对污染场地健康风险评价的理论和方法开展了探讨,提出了叠加风险和多暴露途径同种污染物人群健康风险的概念,并以常州市某厂有机溶剂洒落导致的土壤和地下水污染为例,综合评价厂区人群由于皮肤接触污染土壤与呼吸挥发性气体和厂区下游居民由于饮用地下水带来的非致癌健康风险,是针对具体污染场地开展的较为完整的健康风险评价。

从国内外研究进展来看,风险评估、风险分析方法和风险管理已经逐渐作为一种政策分析工具和管理手段广泛应用于解决复杂、困难的环境问题,特别是在污染土壤的治理方面。虽然在环境风险评价方面已经取得一些进展,但目前我国尚无权威机构发布诸如土壤环境风险评价技术指南或指导性文件。如何根据我国国情,在借鉴国外经验的基础上,探讨我国环境风险评价标准和风险管理制度,是今后环境保护工作面临的一个新的挑战。

1.1.3 生态风险评价与健康风险评价的区别

1.1.3.1 评价对象

生态风险评价的对象是一个复杂系统,需要综合物理、化学和生态过程及它们之间的相互关系,不是单一物种所遭受的危害,还包括生态系统的各个部分,如种群、群落乃至生态系统,更多的关注于多个物种所遭受的风险,强调种群和生态系统的过程和功能。健康风险评价则主要侧重于人体的健康风险,通过选择与人类类似的动物进行试验,以达到保护人类自身的目的。

1.1.3.2 评价范围

健康风险评价的范围可以是具有完整生态系统的片区,也可以是具有特定用途的地块,灵活性较强。而生态风险评价的范围则是以物种、种群甚至生态系统所处的区域,对于有限边界的土地适用性不强。

1.1.3.3 技术方法

健康风险评价起源于 20 世纪 30 年代,至今世界范围内已经建立起了比较完善的技术理论和方法标准;而生态风险评价起源于 20 世纪 90 年代,目前仅有美国环境保护局颁布了一套技术指南。因此,就技术上比较而言,健康风险评价更成熟一些。

1.2 铜污染土壤的生态风险评价

过量的铜以不同的途径进入到土壤中之后,会影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程,进而影响生态系统的结构与功能。铜污染土壤是否会对生态系统产生危害,需要

通过灵敏和有效的方法如生态毒理实验对污染程度和污染效应进行予以诊断，并进行环境风险评价。根据铜污染土壤的生态风险的评价过程，本节内容将重点介绍生物受体和生态终点的选择，剂量效应关系、生态风险评价方法学及表征方法。

1.2.1 生态风险评价概述

对铜污染土壤进行生态风险评价是一个预测铜对整个土壤生态系统或者其中某些部分产生有害影响或者带来风险的可能性过程。根据 USEPA 于 1998 年提出的生态风险评价框架（图 1-1），对铜污染土壤进行生态风险评价需要由 3 个主要部分组成：①问题描述；②分析（暴露和效应分析）；③风险表征。

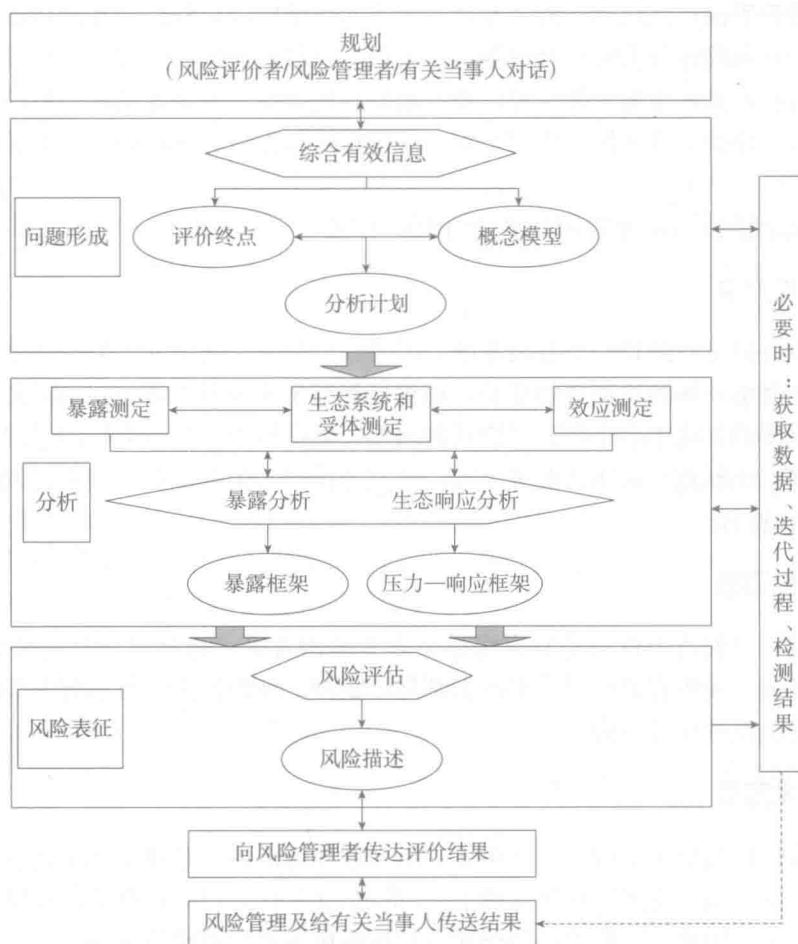


图 1-1 美国 EPA 生态风险评价框架^[7]

1.2.1.1 问题描述

问题描述，是铜污染土壤生态风险评价的首要步骤，是指利用现有数据描述铜的理化性质及其在土壤中的分布，明确受到铜污染影响的生物种群，建立铜暴露途径的概

念模型,明确风险评价的目标。简单来说,问题描述是一个对受体进行分析,对危险性进行界定的风险因素识别阶段,即对铜污染土壤可能存在的毒害及其影响范围进行判断。受体分析是问题描述部分的重要内容,能够提供可能受到铜危害的生物个体、种群、群落或生态系统的信息。受体分析的关键是要能选到研究一种或几种有代表性的生物,其受铜危害的情况可以反映整个生态系统中大多数生物受危害的程度和可能性大小。

1.2.1.2 暴露和分析

暴露分析是铜进入土壤环境到被生物所吸收,并对生态受体发生作用的过程进行评价。暴露分析提供铜在土壤中的形态、浓度分布及浓度变化过程,受体与铜的接触方式,铜对受体的作用方式及进入受体的途径,以及受体对铜暴露的定量分析。暴露分析是生态分析评价的重要内容,它直接关系到风险评价结果的可信程度。

效应分析通过一些敏感物种的实验结果,提供铜对不同生物的毒理作用方面的信息,如铜对受试生物的半抑制浓度(EC_{50})等或者剂量效应的关系,来估计铜对生态系统产生危害的环境浓度,作为给定的铜浓度是否会对指示生物(或生态)因子的危害或者危害大小的判别依据。

1.2.1.3 风险表征

风险评价结果表征,是根据以上4个部分提供的信息进行综合分析,得到铜污染土壤有无风险或风险大小的结论,作为环保部门或规划部门的参考,作为生态环境保护决策的依据。由于实验数据和实际情况有差异,所以得出的结论不可避免地具有不确定性。

1.2.2 铜污染土壤风险评价受体和终点的选择

选择合适的受体和评价终点,进行生物毒性试验被认为是生态风险评价过程的关键。受体分析的内容由两方面决定:一方面是通过受体分析,确定什么受体为生态风险评价的代表受体,这种代表受体可以是生物个体、生物种群、生物群落或者生态系统;另一方面是确定评价的终点,即用什么指标反映有害物质对受体作用的效应,这些指标可以是生物个体的死亡、种群的丰度、生物多样性、生态系统的稳定性和持久性等。原则上终点选择要根据所关注的生态系统和污染物特性来进行,对生态系统和污染物特性了解得愈深刻,终点选择就愈准确。

评价铜污染土壤生态风险时,常用于生态毒理试验的受体一般应该能够反应铜在暴露过程中对土壤生态系统种生物的潜在总危害。生活在土壤中的陆生植物(根系)、土壤微生物和土壤无脊椎动物与土壤紧密接触并(或通过根系)从中获取物质和能量,因此能够比较及时、真实地反映土壤污染状况。长期以来,其中的一些物种由于对铜具有较好的敏感性,以及具备易于获取、培养和观察的特点,而成为评价铜污染土壤最主要的指示生物。下面对铜污染土壤生态风险时常用的代表性生物受体及评价终点方法进行简要介绍。

1.2.2.1 植物

进入土壤—植物系统的铜超过一定浓度时就会对该系统产生毒害影响,这种影响可以直接通过植物生长的状态得到表征。用于快速评价铜污染土壤状况的植物通常具有灵敏度高、生长周期短和易于培养的特点,具体的评价指标包括地上/地下部干重或鲜重、根伸长、种子发芽率等。Kjaer 等^[20]的研究表明,旋花科植物 *Fallopia convolvulus* 种子萌发率随着铜浓度的增加而下降。赵树兰和多立安^[21]通过研究表明, Cu^{2+} 递进胁迫下,高羊茅的生长在各处理浓度均不同程度上受到抑制,其抑制效应随重金属浓度增加而增强。齐雪梅等^[22]通过发芽试验及幼苗生长试验研究了铜对大麦和玉米的生态毒性效应,研究发现玉米对铜胁迫比大麦稍微敏感,各项指标的敏感性依次为:根伸长>根干重>发芽率>株高>地上生物量,可以看出与其他指标相比根伸长最具有敏感性,可作为铜污染的生物标记物。薛艳等^[23]采用室内培养方法研究 2 种不同耐性青菜种子发芽率和根伸长对铜响应的影响时,也发现根伸长和下胚轴生长对铜的响应要比种子萌发本身敏感,而根伸长较下胚轴生长更敏感。这可能是由于植物根系从一开始就与土壤紧密接触,是最直接和最先的受害器官,其生长和发育全过程受土壤铜浓度的影响最大,因此对铜污染的反应最为敏感。

研究重金属铜对高等植物的毒害作用的常用的生理指标主要集中在叶绿素含量、酶学系统、细胞结构、细胞分裂等的变化上。铜污染也会导致叶绿素含量的变化,可作为指示铜毒性的一个重要指标。王友保和刘登义^[24]在研究 Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响时发现,小麦叶片叶绿素的下降与土壤中铜浓度的提高呈显著正相关。铜污染也会导致脯氨酸含量的变化,刘登义等^[25]在研究铜尾矿对小麦生长发育和生理功能的影响时指出,小麦叶片游离脯氨酸含量随铜增加而增多,两者成显著正相关,说明脯氨酸的增加是对铜污染的一种适应性反应,其含量可作为鉴定植物铜抗性的指标。史吉平等^[26]研究发现 SOD 与 Cu 关系密切,用 100mg/L Cu 处理小麦幼苗,叶片 SOD 活性先升后降,而根系 SOD 活性则一直下降。处理 24h 后,铜处理的根系 SOD 活性为对照的 38.3%,因此 SOD 活性被建议用作植物抗铜毒害的生理指标。在铜的胁迫下,植株叶片膜质过氧化作用增强的同时,还原型谷胱甘肽含量显著下降,氧化型谷胱甘肽所占百分比增加含巯基螯合物含量升高,这些都可作为植物受害的重要评价指标^[27~29]。此外,铜污染会对植物细胞分裂产生很大影响,造成其他超微结构的破坏,尤其是根部细胞。Leep 等^[30]研究发现,高浓度铜会导致根冠细胞分裂受抑,根生长停止,可能是铜的毒害作用致使分生区细胞核尤其是核仁变小,阻滞了根冠细胞的分裂。张莉等^[31]利用蚕豆根尖细胞微核技术检测 Cu、As 污染的诱变性时发现,随铜浓度的增加蚕豆根尖细胞微核千分率升高,所受毒害作用增强,当达 400mg/L 时,根尖细胞有丝分裂严重受阻,分裂细胞数较对照下降 30% 以上。微核试验正是根据环境中的铜能引起 DNA 损伤,诱发染色体畸变而形成微核,通过检测诱变物质对染色体损伤的可以有效评价环境铜污染的程度。

目前,用植物毒害风险评价方法得出的铜剂量与植物效应关系,主要建立在短期盆栽或者水培试验的基础上。在今后的风险评估中,需要考虑短期盆栽试验和长期田间试验的差别,从而增加土壤铜的生态风险评价的准确性^[32]。