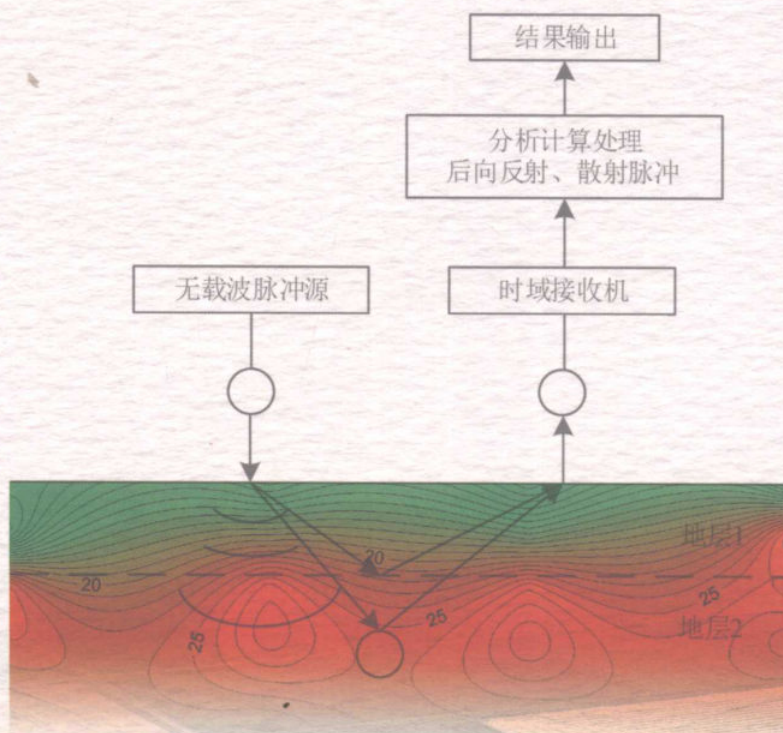


基于地质雷达信号波的 土壤重金属污染探测方法研究

◎ 刘少康 李志萍 尹彦礼 丁占稳 等著



地质出版社

基于地质雷达信号波的土壤 重金属污染探测方法研究

刘少康 李志萍 尹彦礼 丁占稳 等著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以地质雷达探测为主要技术手段,以土壤重金属污染为研究对象,在室内试验、野外取样和原位探测的基础上,分析在不同介质、重金属污染类型和含水率下介电常数的变化规律,研究介电常数与重金属污染特征的关系,探索地质雷达电磁波振幅属性与重金属污染的关系,构建重金属污染浓度与电磁波振幅属性之间的特征函数,探索一种基于地质雷达探测重金属污染的新技术,该技术具有高效、无损、抗干扰、精度高、探测深的优点,使之有望成为一种主要探测土壤重金属的方法。该技术方法在河南省济源市开展原位探测,对该方法进行了验证,为建立重金属污染浓度与电磁波振幅属性之间的关系模型提供理论依据,并对土壤环境保护以及探测、治理和修复重金属污染土壤具有重要意义。

本书可供从事土壤环境保护、土壤污染评价、重金属污染修复的科研工作者参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于地质雷达信号波的土壤重金属污染探测方法研究/
刘少康等著. —北京:地质出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-116-11420-3

I. ①基… II. ①刘… III. ①土壤污染-重金属污染
-雷达探测-研究 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 051492 号

Jiyu Dizhi Leida Xinhaobo de Turang Zhongjinshu Wuran Tance Fangfa Yanjiu

责任编辑:李惠娣

责任校对:王瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 66554646 (邮购部); (010) 66554579 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京金工印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm¹/₁₆

印 张:8

字 数:150 千字

版 次:2019 年 3 月北京第 1 版

印 次:2019 年 3 月北京第 1 次印刷

定 价:32.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-11420-3

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

土壤重金属污染问题已成为世界性的环境问题。土壤中的重金属污染具有持续时间长、残留毒性强、短期内难以恢复的特点，不仅影响植物生长，而且会通过食物链进入动物和人体内部，从而导致人类健康受到严重威胁。虽然传统的检测方法精准度较高，但其检测方法复杂，操作烦琐，检测时间较长，并且容易产生二次污染。然而，一些新型的检测方法还未得到推广，很难满足环境监测的需求，因此急需探索一种简单高效、方便快捷、准确度高、成本较低的重金属检测方法。

本书以国家自然科学基金面上项目“小流域尺度上包气带水分运动参数与探地雷达信号的耦合过程研究”（41372260）为依托，在室内试验和野外取样原位探测的基础上，分析在不同介质、重金属种类和含水率下介电常数的变化规律，研究介电常数与重金属污染特征的关系，在此基础上研究地质雷达信号波与重金属污染的关系，构建重金属污染浓度与电磁波振幅属性之间的特征函数，并在河南省济源市开展原位探测进行应用，为建立重金属污染浓度与电磁波振幅属性之间的关系模型提供理论依据，并对土壤环境保护以及探测、治理和修复重金属污染土壤具有重要意义。

本书共分六章。第1章在分析我国土壤重金属污染现状和重金属检测技术的基础上，对现有检测技术存在问题进行分析；第2章介绍了地质雷达和介电常数仪工作原理，分析地质雷达信号波的振幅属性计算过程；第3章对基于地质雷达信号波的土壤重金属污染探测技术的试验方案进行阐述；第4章分析了不同介质、不同含水率和不同重金属污染浓度下介电常数的变化规律；第5章在分析不同地质雷达信号波振幅属性对重金属污染响应特征的基础上，得到均方根振幅和平均绝对值振幅这两种电磁波属性对地质雷达信号波随浓度变化的反应最为敏感，构建重金属污染浓度与电磁波振幅属性之间的特征函数，在河南省济源市开展原位探测进行应用，对该方法进行了验证；第6章是本书的主要结论，并对今后研究进行了展望。

本研究得到了国家自然科学基金面上项目“小流域尺度上包气带水分运动参数与探地雷达信号耦合过程研究”(41372260)、中国科学院流域地理学重点实验室开放基金“基于地质雷达的鄱阳湖典型洲滩地下水-湖水转化机理研究”(WSG2015004)和浙江飞云江地质灾害调查项目(DD20160282)的资助,特此感谢。

本书主要由华北水利水电大学刘少康博士生、李志萍教授、尹彦礼、丁占稳编写,参加编写工作的还有浙江化工工程地质勘察院有限公司高菁、李岩。王莉莉、徐远志、张鑫、李强、肖洪胜等同学在试验和图件绘制过程中给予了无私帮助,在此深表感谢!

由于时间仓促,书中难免有不足和错误,敬请读者批评指正!

目 录

前 言

第1章 绪论	(1)
1.1 重金属污染研究意义与目的	(1)
1.2 我国土壤重金属污染概况	(2)
1.3 土壤重金属污染主要来源与特点	(5)
1.3.1 土壤重金属污染来源	(5)
1.3.2 土壤重金属污染的特点与危害	(10)
1.4 国内外研究现状	(12)
1.4.1 土壤重金属检测方法	(14)
1.4.2 存在问题	(17)
1.5 研究目的与内容	(17)
1.5.1 研究目的	(17)
1.5.2 研究内容	(18)
1.6 技术路线	(18)
第2章 地质雷达探测的理论基础与方法	(20)
2.1 地质雷达探测的基础理论	(20)
2.1.1 介电常数测定原理	(22)
2.1.2 麦克斯韦方程	(24)
2.1.3 分辨率	(24)
2.2 地质雷达主要参数	(26)
2.3 地质雷达数据处理	(28)
2.4 地质雷达野外探测方法	(30)
2.4.1 多偏移距反射法	(30)
2.4.2 固定距离法	(30)
2.4.3 钻孔雷达法	(31)

2.5	地质雷达信号波属性	(32)
2.5.1	均方根振幅	(32)
2.5.2	平均绝对值振幅	(33)
2.5.3	最大波峰振幅	(33)
2.5.4	平均波峰振幅	(33)
2.5.5	最大波谷振幅	(34)
2.5.6	平均波谷振幅	(34)
2.5.7	最大绝对值振幅	(35)
2.5.8	总绝对值振幅	(35)
2.5.9	总振幅	(36)
2.5.10	平均能量	(36)
2.5.11	总能量	(36)
2.5.12	平均振幅	(37)
2.5.13	振幅平方差	(38)
2.5.14	振幅立方差	(38)
2.5.15	振幅的峰态	(38)
第3章	地质雷达探测土壤重金属污染试验方案与设计	(41)
3.1	介质的介电常数变化特性	(41)
3.2	重金属污染条件下介电常数变化特性	(41)
3.2.1	重金属污染条件下介电常数随含水率的变化规律	(41)
3.2.2	重金属污染条件下介电常数随污染浓度的变化规律	(42)
3.3	试验介质配制与探测方法	(42)
3.3.1	污染土壤配制	(42)
3.3.2	介质含水率测定	(44)
3.3.3	土壤介电常数的测定	(44)
3.3.4	土壤重金属污染浓度检测	(44)
3.4	地质雷达原位探测	(45)
3.4.1	探测区概况	(45)
3.4.2	探测区镉、铅污染概况	(49)
3.4.3	原位探测方案	(51)
第4章	重金属污染条件下介电常数的变化特征	(52)
4.1	介质的介电常数的变化特征	(52)

4.2	重金属污染条件下含水率与介电常数关系分析	(53)
4.2.1	粉质黏土	(53)
4.2.2	粉土	(54)
4.2.3	粉砂	(55)
4.2.4	细砂	(56)
4.2.5	中砂	(57)
4.3	重金属污染条件下浓度与介电常数关系分析	(58)
4.3.1	重金属垂向分布特征	(59)
4.3.2	重金属浓度与介电常数的关系	(59)
4.4	本章小结	(61)
第5章	地质雷达信号波与重金属污染关系研究	(63)
5.1	原位探测试验点概况	(63)
5.2	软件简介	(64)
5.2.1	地质雷达信号波属性分析处理软件 V1.0	(64)
5.2.2	地质雷达信号波时深转换软件 V2.0	(69)
5.3	地质雷达信号波与重金属污染的关系	(73)
5.3.1	I-I剖面地质雷达信号波振幅属性变化特征	(74)
5.3.2	II-II剖面地质雷达信号波振幅属性变化特征	(74)
5.3.3	III-III剖面地质雷达信号波振幅属性变化特征	(74)
5.3.4	IV-IV剖面地质雷达信号波振幅属性变化特征	(78)
5.4	地质雷达信号波与重金属污染关系函数研究	(79)
5.5	地质雷达信号波探测土壤重金属污染的应用	(81)
5.6	本章小结	(82)
第6章	结论与建议	(83)
6.1	结论	(83)
6.2	建议	(84)
	参考文献	(85)
	附录1 地质雷达信号波属性分析处理软件 V1.0 源代码	(89)
	附录2 地质雷达电磁波时深转换软件 V2.0 源代码	(103)

第1章 绪 论

1.1 重金属污染研究意义与目的

近年来,随着社会经济的不断发展和进步,汽车尾气超标、工厂排污、工农业以及生活污水未处理排放等污染问题不断加剧,导致土壤重金属污染问题日益严重。土壤作为岩石圈、大气圈和水圈的交接面,遭受了人类活动(工业、农业、交通)带来的污染。同时,人类活动还可能进一步成为地表水、地下水、生物体、沉积物以及海洋等遭受污染的来源。重金属作为一类重要的土壤污染物,具有在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解的特点,并可经水、植物等介质最终影响人类健康(崔德杰等,2004)。大量的研究表明,交通、冶炼和采矿、污水灌溉等人为活动都会使土壤中重金属的含量显著增加,另外,土地使用类型的不同也可以显著影响重金属在土壤中的积累。此外,空气中的重金属颗粒还可以进行长距离的运移并最终污染清洁土壤,不仅严重威胁农作物和农产品的产量与质量,而且损害人们健康,影响社会稳定(杨卓,2014)。随着人口的快速增长及工业化和城镇化进程的加快,工业“三废”、城市生活垃圾和污水排放逐渐增加,农业生产大量施用化肥、农药以及污水灌溉等,致使许多有害物质进入农田系统,导致农田重金属污染加重。土壤重金属污染已成为全球面临的一个严重的环境问题,严重制约着农业综合生产能力的提高和农产品质量安全。

早在1955年,日本富山县神通川流域就有因人们食用被镉污染的食物而引发骨痛病的事件,后经查证是由于铅、锌炼厂排放含镉废水,污染当地环境造成的(周建军等,2014)。在我国,贵州赫章、浙江遂昌、辽宁张氏、广西阳朔、贵州铜仁等地区,均存在农作物中重金属含量超标,土壤重金属污染的区域,这些区域内人们极易产生嗅觉丧失、智力下降、肾脏受损等一系列疾病(郑莉,2009)。2010年,环保部、国家统计局、农业部联合发布的《第一次全国污染源普查公报》显示,中国重金属污染物的排放总量为900t,每年由于重金属污染造成的直接经济损失超过200亿元。湖南省发生的“镉大米”事件引起了社会普遍关注,

直击农产品质量安全，再次敲醒了重金属污染修复治理的警钟，开展重金属污染修复治理工作迫在眉睫（陈涛，2018）。

目前，我国受到镉、铬、砷等重金属污染的耕地面积约占总耕地面积的8.22%，约为1.5亿亩^①。每年有超过 1000×10^4 t的粮食被重金属污染，如“镉米”“砷米”等，有超过200亿元的经济产值因此而损失。据统计，全国大约有 2000×10^4 hm²耕地受到重金属污染，占总耕地面积的1/5，每年因土壤污染而少收的粮食近 1000×10^4 t，另外还有近 1200×10^4 t粮食因重金属超标而污染，给人们的生命健康带来极大的安全隐患（陈怀满，1996）。因此，为了保证粮食安全，我国应努力坚守18亿亩耕地红线，早日进行重金属污染土壤防护、治理、修复，加大力度解决重金属污染等污染问题。因此，为了提高优质粮食产量、减少经济损失，急需加强对土壤重金属污染的探测以及治理和修复方面的研究。

目前，传统的现场取样，后经实验室处理分析的方法已趋于完善。虽然传统的检测方法精准度较高，但其检测方法复杂，操作繁琐，检测时间较长，并且容易产生二次污染。然而，一些新型的检测方法还未得到推广，很难满足环境监测的需求，因此急需探索一种成本低、效率高、准确度高、操作简便的重金属检测方法。近年来地质雷达探测在土壤污染方面得到广泛应用，根据已有资料显示，地质雷达探测通过反射波的变化不仅能确定地下污染物质的分布，而且对土壤污染物迁移引起的土壤污染同样有效。地质雷达探测作为一种新的技术，具有高效、无损、抗干扰、精度高、探测深的优点，将有望成为一种主要探测土壤重金属的方法。

通过野外取样、原位探测及室内试验，分析在不同颗粒级配、重金属种类和含水率下介电常数的变化规律，研究介电常数与重金属污染特征的关系，在此基础上研究地质雷达信号波与重金属污染的关系，构建重金属污染浓度与信号波振幅属性之间的特征函数，并在济源市开展原位探测进行应用，为建立重金属污染浓度与信号波振幅属性之间的关系模型提供理论依据，并可为土壤重金属污染的探测、治理和修复，以及土壤环境保护提供技术支持。

1.2 我国土壤重金属污染概况

根据相关部门统计，我国约有 2000×10^4 hm²的耕地受到镉、砷、铅、铬、汞等重金属污染，约占总耕地面积的1/5，其中镉污染耕地约为 1.33×10^4 hm²，涉及11个省25个地区；被汞污染的耕地约为 3×10^4 hm²，涉及15个省21个地区。

① 1亩=666.6 m²。

根据 Nriagu et al. (1988) 的研究, 1983 年全球由于人为原因产生的重金属, 主要有镉 (3×10^4 t)、铜 (215×10^4 t)、铅 (116×10^4 t) 和锌 (23×10^4 t)。现阶段, 全世界平均每年排放铜 340×10^4 t, 汞 1.5×10^4 t, 铅 500×10^4 t, 镍 100×10^4 t, 锰 1500×10^4 t, 对土壤产生了严重的污染。这些重金属可通过大气、水体、生物、食物链等进入人体, 对人体健康造成严重危害, 由于进入土壤中的重金属很难被微生物降解, 它们迁移性小, 同时清除困难, 非常容易在土壤中富集。以农田土壤污染为例, 重金属以土壤作为媒介, 累积在农作物中, 直接危害人们健康(郭丹等, 2009)。郭朝晖等(2008)对湘江中下游农田及蔬菜的土壤重金属污染进行了分析研究, 发现土壤中砷、镉、铬、铜、镍、铅和锌等重金属积累严重, 主要表现为以镉为主, 多种重金属为辅的混合污染。王德光等(2008)对广西省环江县大环江沿岸土壤重金属污染也进行了研究, 由于受上游铅锌矿区尾沙坝坍塌的影响, 大环江沿岸土壤重金属污染严重。土壤中砷、铅、镉、锌严重超标, 其中砷、镉、锌含量有从中游到下游递减的趋势。垂直剖面分析结果表明, 土壤重金属污染主要集中在 0~17 cm 以内的土壤表层和耕作层。

据农业部环境监测系统近年的调查, 我国 24 个省(市)城郊、污水灌溉区、工矿等经济发展较快地区的 320 个重点污染区中, 污染超标的大田农作物种植面积为 60.6×10^4 hm^2 , 占调查总面积的 20%, 其中重金属含量超标的农作物种植面积约占污染物超标农作物种植总面积的 80% 以上, 尤其是铅、镉、汞、铜及其复合污染最为突出。对约 140×10^4 hm^2 的污水灌溉区调查发现, 遭受重金属污染的土地面积占污水灌区面积的 64.8%, 其中轻度污染的占 46.7%, 中度污染的占 9.7%, 严重污染的占 8.4%。国内某些区域水稻土的镉污染已经到了产生“镉米”的程度。沈阳张土灌区一闸严重污染区大米中镉含量达 1~2 mg/kg (吉普辉, 2011)。据成都市环保部门调查发现, 成都平原主要农作物和城市菜园、果园作物区的灰色冲积土壤都受到了重金属的严重污染。罗晓梅等(2003)研究结果表明, 成都地区蔬菜中的主要污染元素是镉和铅。另有研究表明, 成都东郊污灌区内大米镉含量高达 1.65 mg/kg。据目前已经完成的 127×10^4 km^2 的土地质量现状调查结果显示, 我国流域性和区域性土壤地球化学异常或污染规模空前: 长江流域、珠江流域、沿海经济带、松花江流域、辽河流域出现贯穿全流域的以镉为主, 铅、汞为辅的流域性、区域性异常; 黄河流域高氟、高砷、低碘异常显著; 全国大中小城市土壤普遍分布汞异常现象。据不完全统计, 我国有 217×10^4 hm^2 的土壤重金属污染都是由污水灌溉引起的, 可见污水灌溉引起的土壤重金属污染已相当严重, 已对农业生产产生了很大的不良影响, 污水中所含重金属含量见表 1.1 (唐成, 2013)。另外含重金属浓度较高的污染表土容易在江水的作用下进入水体, 进而进入农业灌溉水中。

表 1.1 部分工矿企业排放的污水中所含重金属

企业类型	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Pb	Ni	Sb	Ti
采矿选矿	+			+				+	+	+			
冶金电镀	+	+		+		+	+		+	+	+		
化工		+	+	+		+	+	+	+	+			+
陶瓷		+				+						+	
涂料		+				+				+			+
玻璃		+	+		+						+		+
造纸						+	+		+	+	+		+
制革		+	+			+	+	+	+				
纺织		+	+	+			+	+	+	+	+	+	
化肥		+		+		+	+	+	+	+	+		
氯碱工业		+		+		+		+	+	+			
炼油		+		+		+	+	+	+	+	+		

根据中科院亚热带农业生态研究所于 20 世纪 80 年代末至 90 年代初对湖南省主要城市工矿区附近土壤重金属的调查分析,发现调查区域范围内,稻田土壤镉含量为 1.3~51.3 mg/kg,平均为 2.3~15.1 mg/kg,各地区均比背景值高几倍乃至 100 多倍,其中衡阳冶炼厂附近土壤镉的平均含量是背景值的 130 倍,株洲工业冶炼区附近稻田土壤镉的平均含量是背景值的 138 倍,其他几个调查区的土壤镉平均含量是背景值的 28~39 倍(何电源等,1991)。戴军等(1995)研究发现,广东省广州市近郊因污水灌溉而污染农田 2700 hm²,因使用污染底泥造成 133 hm²的土壤被污染,污染面积占郊区耕地面积的 46%。骆永明等(2006)研究表明,我国农药、重金属污染的耕地约有 0.1×10⁸ hm²,占耕地总面积的 10%以上,全国每年重金属污染的粮食多达 1200×10⁴ t,因重金属污染而导致的粮食减产高达 1000×10⁴ t,重金属污染现象非常严重。

一些矿区作为重金属污染的主要区域,环境恶化趋势没有得到有效的遏制。据统计,目前我国矿区废弃地面积已高达 4×10⁴ km²,而且每年以 330 km²的速度增长(Li et al., 2004)。我国拥有丰富的铅锌矿,由于常年开采,矿渣、选矿、冶炼及电镀等工业废水源源不断地排放到周围环境中,导致周边土壤中铅、镉等重金属含量严重超标,农田污染面积已高达 90.6×10⁴ hm²(孙铁珩等,2001)。大宝山尾砂中镉、铅、铜和锌以残渣态居多,占重金属总量的 85%以上(许超等,2009)。大宝山矿以及 21 条周边矿,在开采、淋洗等过程中,导致矿区土壤中硫、

镉、锌、铅等多种重金属元素含量严重超标（周建民等，2004），被污染的水直接被村民饮用，严重影响生命及健康，使皮肤病、肝病、癌症等疾病成为附近村民的高发病症（常学秀等，2001）。湖南娄底市冷水江由于矿区发生泄露，导致 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 含铅、锌等重金属元素的尾砂流入河中，严重危害居民的饮水及健康安全。

农业生产尤其是近代农业生产过程中含有重金属的化肥、有机肥、城市废弃物和农药的不合理施用，亦是导致土壤重金属污染的重要原因。例如，生产磷肥的磷矿石成分复杂，含有较多如锌、铬、镍、铜、镉、铅等重金属，如果施用不合理，劣质磷肥中的重金属就会直接导致土壤被污染。我国磷肥中重金属的含量较高，长期使用会使污染型重金属在土壤表层积累（表 1.2）。

表 1.2 我国磷肥中重金属含量抽样调查 单位：mg/kg

抽样地点	肥料	As	Cd	Cr	Pb	Sr	Cu	Zn
山东	普钙	51.3	1.4	464	170.4	330	60.6	215.3
北京	普钙	36.4	1.9	39.9	124.1	267	61.4	253.3
云南	磷矿粉	25	3.8	47.3	242.1	464.5	54.2	225.3
浙江	钙镁磷肥	6.2	—	1057.2	—	414.9	63.2	169.4
湖南	铬渣磷肥	67.7	—	5144	—	189.5	48	768.8

1.3 土壤重金属污染主要来源与特点

1.3.1 土壤重金属污染来源

重金属元素是指其单质密度大于 5.0 g/cm^3 的金属元素，在自然界中大约存在 45 种。但是，由于不同的重金属在土壤中的毒性差别很大，所以在环境科学中人们通常关注汞、镉、铅、铬、铜、锌、镍、钼、钴等。砷和硒是非金属，但它们的毒性及某些性质与重金属相似，所以将砷、硒列入重金属污染元素。土壤中重金属的来源主要有自然来源和人为来源两种。在自然来源中，成土母质和成土过程对土壤重金属含量的影响很大。土壤重金属污染的人为来源有交通排放（汽车尾气排放、轮胎磨损颗粒、制动衬面磨损颗粒）、工业排放（金属冶炼、化工、煤燃烧、汽车修理、矿产开采）、生活排放（生活废水、市政污泥、废弃物处理）、污水灌溉、农药和化肥施用、建筑和路面风化、大气沉降等。

1.3.1.1 自然来源

土壤是由岩石风化而来，不同的岩石含有各种重金属元素，成土母岩的化学元素决定了土壤中最初的化学含量，影响着土壤中重金属元素的环境背景值；同时母岩在形成土壤过程中的影响因素也影响着土壤中的重金属含量，如抗风化能力强的石英质岩石对发育于其上的土壤中重金属含量起控制作用，然而抗风化能力弱的碳酸盐岩类岩石对其上发育的土壤中重金属含量控制作用则不强。此外，火山爆发、森林火灾、海浪飞溅、风力扬尘等过程使很多重金属尘浮于空中（任安芝等，2000），空气中的重金属元素部分被植物吸收，其余部分则通过大气干湿降尘进入水体、土壤。表 1.3 为部分岩石类型中重金属元素的平均含量。

表 1.3 部分岩石类型中重金属元素的平均含量 单位：mg/kg

元素	花岗岩	玄武岩	页岩	石灰岩	深海碳酸盐岩
As	2	2.2	13	1	1
Cd	0.13	0.21	0.3	0.3	0.1
Cr	10	185	100	11	11
Cu	20	94	50	4	30
Hg	0.03	0.09	0.4	0.04	0.1
Ni	10	145	60	20	30
Pb	17	7	20	9	9
Zn	50	118	85	20	35

1.3.1.2 人为来源

(1) 污水灌溉。随着城市化进程的加快和工业发展，全国有近 80% 的城市水资源紧张（马志毅，1997）。由于水资源短缺，污水便成为灌溉用水的重要组成部分，污水中的重金属元素在土壤中富集和分散，造成了土壤污染。当长期使用污水灌溉农田时，会导致土壤和稻米中的镉含量快速增加，人们食用了这种粮食而生病的事例很多，如日本著名的“骨痛病”事件（陈牧霞，2006）。据统计，目前中国经污水灌溉的农田面积约 $360 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，约占总灌溉面积的 7%，约占地表水灌溉总面积的 10.5%（王贵玲等，2003）。我国有 37 个主要污灌区，其中有明显污染的灌溉点有 22 个，它们多半属于积累性重金属超标（夏立江等，2001）。我国污水灌溉的农田主要集中在水资源严重短缺的海河、辽河、黄河、淮河四大流域，占全国污水灌溉面积的 85%。大型污水灌溉主要分布在天津武宝宁污灌区、北京污灌区、辽宁沈抚污灌区、新疆石河子污灌区和山西省太原市小店污灌区（袁保惠等，2004）。沈阳张士灌区有 2533 hm^2 土壤被

镉污染,其中有13%污染严重,土壤中含镉量已经达到 $5\sim 7\text{ mg/kg}$ (陈丙义等,2003)。石家庄污灌区纯污灌面积已达到 9922 hm^2 ,是污灌区总面积的92%;而污清混灌面积仅为 800 hm^2 ,占总面积的7.5%,全年总灌溉污水量为 $6692\times 10^4\text{ t}$,灌溉用污水量占灌溉用水总量的97.2%(崔邢涛等,2010)。北京市污水灌溉面积约为 $8\times 10^4\text{ hm}^2$,年污水灌溉量约 $2.2\times 10^8\text{ m}^3$,占全市污水排放量的27%(刘润堂等,2002)。

(2) 大气中重金属的沉降。大气沉降对土壤重金属的含量具有明显的影响,主要的大气重金属源有电厂、石油开采和加工、有色冶金、汽车尾气排放以及建筑材料开采和生产等。除汞外,重金属基本以气溶胶的形式进入大气,经自然沉降和雨淋沉降进入土壤(郑喜坤等,2002)。如挪威南部清洁的土壤已经遭到重金属的污染,主要是因为挪威北部的冶炼厂排放的大气污染物向南部长距离运输造成的(Steinnes et al., 1997)。南京某生产铬的重工业厂铬污染叠加已超过当地背景值4.4倍(张辉等,1997),以车间烟囱为中心,污染范围达 1.5 km^2 ,污染范围最大延伸下限 1.38 km 。公路、铁路两侧土壤中的重金属污染,主要是以铅、锌、镉、铬、钴、铜的污染为主,它们来自含铅汽油的燃烧,汽车轮胎磨损产生的含锌粉尘等。它们呈条带状分布,以公路、铁路为轴,向两侧重金属污染强度逐渐减弱,随着时间的推移,公路、铁路土壤重金属污染具有很强的叠加性。

(3) 废气排放。近几年,人们日益关注大气沉降对土壤和植物中重金属的积累(梁鸿霞等,2006)。据统计,通过自然来源进入大气的重金属中,铅占其向大气释放量的3.5%,而铬、铜的比例相对高些,分别占59%和44%,释放到大气中的重金属,人为因素产生的释放量远大于自然因素产生的释放量。据报道,工业发达国家大气沉降对土壤系统中重金属的累积贡献率在外源输入因子中排在首位(Kloke et al., 1984)。世界上每年有约 1000 t 的镉通过加工处理和冶炼厂释放到大气中,约占总镉量的45%,由此可见,有色金属冶炼厂是污染的主要来源之一(马君贤,2007)。此外,当温度达到 $766\text{ }^\circ\text{C}$ 时,镉将会变成气体,排放到大气中污染环境(高粱,1992)。燃煤也是土壤重金属污染的重要来源,王起超等(1999)研究表明,1995年我国燃煤排放汞约 3029 t ,其中向大气排放 213.8 t 。

(4) 固体废弃物。固体废弃物是指人类在生产、消费、生活和其他活动中产生的固态、半固态废弃物,通俗地说,就是“垃圾”,主要包括固体颗粒、垃圾、炉渣、污泥、废弃的制品、破损器皿、残次品、动物尸体、变质食品、人畜粪便等。废弃物在堆放或处理过程中,遭受日晒、雨淋、水洗,重金属以辐射状、漏斗状向周围土壤和水体中扩散。在我国,污泥和城市垃圾的农用以

及堆肥还很普遍,应当受到相关部门的重视。杨居荣等(1984)调查表明,长期施用城市污泥可导致土壤重金属含量有不同程度的增加,增加幅度与污泥的重金属含量、污泥施用量及土壤管理等有关。上海某乡,由于距日辉港较近,早在20世纪六七十年代就施用过日辉港的污泥肥料,每年施用量高达 4×10^4 t,时间达10年以上,造成当地土壤严重的重金属污染(庞金华,1994)。渗滤液是重金属污染土壤的载体,1 t垃圾可产生800 mL碳酸,能使垃圾中的汞、镉、锌等重金属以盐的形式溶入水中,导致重金属对周边环境的污染。沈阳锌冶炼厂冶炼过程中产生的矿渣主要含镉、锌,1971年开始把矿渣堆放在一个洼地,其浸入液中镉、锌含量分别达 7.5×10^3 mg/L、 6.6×10^3 mg/L,目前已扩散到离堆放场700 m以外的地区(董志高等,2010)。杭州铬渣堆放区、武汉市垃圾堆放场及哈尔滨韩家洼子垃圾填埋厂附近土壤中镉、汞、镉、铜、锌、铅、砷、锰等重金属含量均高于当地土壤背景值。垃圾中重金属的释放受到垃圾堆放年限的影响,释放率越大对环境的毒害作用也就越强。研究表明,垃圾中重金属的释放率大小顺序为:镉>铅>铬>砷(张辉等,2001)。目前我国生活垃圾的产生量每年以7%~9%的速度增长,所需要的填埋场面积会越来越大,因而垃圾填埋场对周边土壤环境的影响也会随之加剧。

(5) 农用物资。农药、化肥和地膜作为农用物资,在农业生产中起到不可或缺的作用,但长期不合理地施加和使用,会造成严重的土壤重金属污染。化肥和有机肥中普遍含有一定的重金属元素,如磷肥中含有少量的砷、镉等。镉属于土壤环境中重要的污染元素,会随磷肥进入土壤。研究发现,当磷肥及复合肥被大量施用时,土壤中可溶性镉的含量也会随之增加,同时作物对镉的吸收量也随之增加,很容易造成作物镉含量超标。从马耀华等(1998)的研究结果发现,农田施用磷肥后镉的含量是原来的2.46倍。美国橘园,每年施用磷量可达 172 kg/hm^2 ,36年后土壤中镉含量从 0.07 mg/kg 变为 1.0 mg/kg ,是原来的14.3倍(崔德杰等,2004)。新西兰也曾做过类似的试验,在相同地点施用磷肥,50年后取土样进行分析,土壤镉含量从 0.039 mg/kg 变为 0.85 mg/kg (Taylor,1997),是原来的21.8倍。大部分农药中都含有铜、汞、砷元素,地膜中一般含有镉、铅元素,如果大量使用农药和地膜,土壤重金属的含量将随之增加(夏家淇等,2006)。在农业地区,尤其在西方国家的家庭园林中,因为他们经常施用含有砷的农药,致使土壤中砷的残留量会显著增加。美国的密歇根州土壤中砷含量已达 112 mg/kg 。近些年,由于地膜的大面积使用,不仅带来白色污染,还增加了土壤重金属的含量。表1.4是世界上每年通过不同途径输入土壤中的一些重金属元素的含量。

表 1.4 世界上每年通过不同途径输入土壤中的一些重金属元素的含量

来源	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
农业和食品	0~0.6	0~0.3	3~38	0~1.5	6~45	1.5~27	12~150
厩肥	1.2~4.4	0.2~1.2	14~80	0~0.2	3~36	3.2~20	150~320
伐木与木材	0~3.3	0~2.2	3.3~52	0~2.2	2.2~23	6.6~8.2	13~65
城市垃圾	0.09~0.7	0.88~7.5	13~40	0~0.26	2.2~10	18~62	22~97
城市污泥	0.01~0.24	0.02~0.34	4.9~21	0.01~0.8	5~22	2.8~9.7	18~57
有机废物	0~0.25	0~0.01	0.04~0.61	—	0.17~3.2	0.02~1.6	0.13~2.1
金属加工固体	0.01~0.21	0~0.08	0.95~7.6	0~0.08	0.84~2.5	4.1~11	2.7~19
煤灰	6.7~37	1.5~13	93~335	0.37~4.8	56~279	45~242	112~484
肥料	0~0.02	0.03~0.25	0.05~0.58	—	0.2~0.55	0.42~2.3	0.25~1.1
泥炭	0.04~0.5	0~0.11	0.15~2	0~0.02	0.22~3.5	0.45~2.6	0.15~3.2
商品杂质	36~41	0.78~1.6	395~790	0.55~0.82	6.5~32	195~390	310~620
大气沉降	8.4~18	2.2~8.4	14~36	0.63~4.3	11~37	202~263	49~135
合计	52~112	5.6~38	541~1367	1.3~15	106~544	479~1113	689~2054

注：表中数据单位均为 1000 t/a。

(6) 其他来源。电子工业因为将金属用作半导体、导线、焊料和电池原料，电镀工业颜料，油漆工业和塑料工业一些副产品或废弃物，以及化工工业常用一些金属催化剂和电极等，这些金属最终进入土壤，并造成土壤重金属污染（陈怀满，1996）。一些有机化学品、焦油派生物和五氯酚被用于木材防腐，对土壤和地下水等都能造成污染。日常生活过程中，金属材料的腐蚀，能使附着在这些材料上的重金属释放，并最终进入土壤，造成污染。烟花燃放过程中也伴随重金属的释放，容易造成土壤污染。表 1.5 总结了重金属污染元素的部分来源。

表 1.5 重金属污染元素的部分来源

金属	来 源
As	化石燃料燃烧、冶炼工业、防腐剂、添加剂、杀虫剂、除草剂、纺织、染料、医药
Cd	化石燃料燃烧、金属腐蚀、电池、油漆和颜料、塑料、皮革、医疗行业、废弃物、冶金工业、钢铁厂、农药、化肥
Cr	玻璃制造、农药、化肥、水泥
Cu	电子行业、废弃物、冶金行业、农药、化肥、除草剂、轴承
Hg	化石燃料燃烧、冶炼工业、农药、化肥、医疗行业
Ni	电池、冶金行业、钢铁厂、农药、化肥
Pb	化石燃料燃烧、电池、油漆和颜料、制革行业、冶金工业、农药、化肥、除草剂、轮胎
Zn	化石燃料燃烧、金属腐蚀、电子行业、电池、油漆和颜料、塑料、制革、医疗行业、废弃物、冶金行业、钢铁厂、农药、化肥、轮胎