

ZHONGJINSHU HUANJING JIANKANG FENGXIAN
ZHONGDIAN FANGKONGQU HUAFEN JI FENJI JISHU YANJIU



重金属环境健康风险

重点防控区划分及分级技术研究

程红光 崔祥芬 李倩 等著

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

重金属环境健康风险重点防控区 划分及分级技术研究

程红光 崔祥芬 李倩 路路 刘雪莲 等著
谢婧 陈菲 赵欣怡 程千钉 孙海旭

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

重金属环境健康风险重点防控区划分及分级技术研究/程红光等著. —北京: 中国环境出版社, 2016.7

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书/环境保护部科技标准司)

ISBN 978-7-5111-1594-2

I. ①重… II. ①程… III. ①重金属污染—环境污染—影响—健康—防治—研究 IV. ①X503.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 241516 号

出版人 王新程
责任编辑 孔 锦
助理编辑 高 艳
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67187041 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016 年 7 月第 1 版
印 次 2016 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 13.25
字 数 350 千字
定 价 68.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》

编委会

顾 问：吴晓青

组 长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是“转方式调结构”的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，“十一五”环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了“科技兴环保”战略，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。5年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制作修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。

环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长



2011年10月

前 言

近年来，环境与健康事件频繁发生，引发了公众对环境污染相关健康损害问题的高度关注，国家相关政府管理部门也越发重视环境与健康管理工作，但受限于相关基础工作薄弱，缺乏全面的调研、监控和统计，目前尚无法从时间和空间上对我国环境污染导致了多大程度人群健康损害给予回应和解释，而且也不掌握应当重点控制的有毒有害污染物种类，以及污染的主要行业、来源、排放总量、污染负荷和环境分布。环境健康损害发生的滞后性以及多因多果性，要求从“以人为本”的角度，开展基于科学环境健康风险评价结果的风险管理。然而在我国全面开展的建设项目环境影响评价中，绝大多数缺少对健康影响的充分考虑。在已有评价中，存在指标选取缺乏客观合理性、未对社会经济、生活习惯等影响暴露效率的关键因素加以充分考虑的不足。虽然环境健康风险评价在发达国家已进入较为成熟的阶段，但针对重金属环境健康风险分区和分级技术的研究却凤毛麟角。为此，建立一套适合我国国情的重金属污染环境健康风险重点防控区划分及分级技术迫在眉睫。

《重金属环境健康风险重点防控区划分及分级技术研究》（以下简称“本书”），在调研分析我国铅和镉等主要重金属的环境污染高风险区域特点和高风险人群的分布及特征的基础上，结合既有环境分区及风险评价理论与方法，提出适合我国重金属污染特征和人群特征的环境健康风险重点防控区划分方法体系和风险分级技术方法，旨在为国家开展重金属风险管理提供依据。

本书考虑我国重金属污染普遍存在但点上高发的现状，分别构建了重金属环境健康风险分区和分级技术，并考虑不同区域尺度上，污染源、暴露途径和效率等信息可及性的差异，提出了宏观、微观有别的风险分区方法。根据构建的分区方法，以典型重金属污染物（铅、镉为）例，开展了宏观微观两个层面的案例研究；并根据风险分级方法，开展了典型铅、镉污染区域的风险分级研

究;并在上述研究的基础上提出加强重金属环境健康管理能力的政策建议。

在研究撰写过程中,自始至终都得到了环境保护部健康管理处领导的悉心关怀和指导。环境保护部健康管理处宛悦处长、政策研究中心王建生主任、中国疾病预防控制中心职业卫生所孙承业研究员和张宏顺研究员、中国环境科学研究院段小丽副研究员、国务院发展研究中心苏杨研究员和北京师范大学环境学院林春野教授等领导 and 专家对本书的撰写和完善提出了许多宝贵的意见和建议。中国环境出版社对本书的编辑付出了大量的心血。在此,对关心和支持本书研究和出版的各位领导、专家和研究人員表示衷心的感谢,由于条件限制,书中不免存在不足和谬误之处,敬请批评指正。

作者

2016年6月

目 录

第一章 绪论	1
一、重金属矿产资源的储量及分布 / 1	
二、重金属的地球化学特征 / 3	
三、重金属污染的分布特征 / 8	
四、人体对主要重金属的暴露途径 / 10	
五、重金属暴露对人体的危害 / 12	
六、人体暴露于重金属的主要健康效应诊断方法 / 18	
第二章 重金属污染环境健康风险分区方法	22
一、重金属环境健康风险分区理论基础 / 22	
二、重金属环境健康风险区划原则研究 / 27	
三、重金属环境健康风险分区框架及分区单元 / 29	
四、重金属环境健康风险区划指标系研究 / 30	
五、重金属环境健康风险宏观分区方法 / 36	
六、重金属环境健康风险微观分区方法 / 46	
七、环境健康风险分区方法合理性分析 / 51	
第三章 重金属环境健康风险分级技术研究	52
一、重金属环境健康风险分级理论基础 / 52	
二、重金属环境健康风险分级原则研究 / 56	
三、重金属环境健康风险分级指标确定 / 57	
四、重金属环境健康风险分级模型研究 / 58	
五、重金属环境健康风险分级方法及标准 / 76	
六、重金属环境健康风险分级方法合理性分析 / 76	
第四章 全国铅污染环境健康风险分区研究	78
一、概述 / 78	
二、全国铅污染环境健康风险分区基本单元 / 78	
三、全国铅污染环境健康风险分区指标体系 / 78	
四、全国铅污染环境健康风险分区指标量化相关参数 / 79	
五、全国铅污染环境健康风险分区指标权重系数 / 87	
六、全国铅污染环境健康风险指数 / 87	

七、全国铅污染环境健康风险分区 /	88
八、全国铅污染环境健康风险分区合理性分析 /	90
第五章 云南省铅污染环境健康风险分区研究	92
一、概述 /	92
二、云南省铅污染环境健康风险分区基本单元 /	93
三、云南省铅污染环境健康风险分区指标体系 /	93
四、云南省铅污染环境健康风险分区指标量化相关参数 /	94
五、云南省铅污染环境健康风险分区指标权重系数 /	104
六、云南省铅污染环境健康风险指数 /	104
七、云南省铅污染环境健康风险分区 /	105
八、云南省铅污染环境健康风险分区合理性分析 /	107
第六章 云南省 ZH 镇铅污染环境健康风险分区研究	109
一、概述 /	109
二、ZH 镇铅污染环境健康风险分区基本单元 /	113
三、ZH 镇铅污染环境健康风险分区指标体系 /	113
四、ZH 镇不同评价单元人群铅污染暴露模式 /	113
五、ZH 镇不同评价单元人群易损性 /	116
六、ZH 镇铅污染环境健康风险分区 /	117
七、ZH 镇铅污染环境健康风险分区合理性分析 /	117
第七章 DY 县镉污染环境健康风险分区研究	119
一、概述 /	119
二、DY 县镉污染环境健康风险分区基本单元 /	123
三、DY 县镉污染环境健康风险分区指标体系 /	123
四、DY 县不同评价单元人群铅污染暴露模式 /	123
五、DY 县案例区不同评价单元人群易损性 /	125
六、DY 县镉污染环境健康风险分区 /	126
七、DY 县镉污染环境健康风险分区合理性分析 /	127
第八章 ZH 镇铅污染环境健康风险分级研究	129
一、概述 /	129
二、ZH 镇铅污染环境健康风险评价 /	129
三、ZH 镇铅污染环境健康风险分级 /	137
四、ZH 镇铅污染健康风险分级合理性分析 /	137

第九章 江西省 DY 县镉污染环境健康风险分级研究.....	139
一、概述 /	139
二、DY 县镉污染环境健康风险评价 /	139
三、DY 县镉污染健康风险分级 /	143
四、DY 县镉污染健康风险分级合理性分析 /	143
第十章 重金属环境健康风险分区分级技术的推广应用.....	145
一、重金属环境健康风险分区和风险分级的区别与联系 /	145
二、指导环境污染环境健康风险评价与管理 /	145
附录 A 我国大气重金属排放清单及铅污染空间分布特征	147
一、大气铅排放水平计算的相关参数设置 /	147
二、我国大气铅排放水平 /	151
三、大气镉排放水平计算的相关参数设置 /	155
四、我国大气镉排放水平 /	157
五、大气铬排放水平计算的相关参数设置 /	159
六、我国大气铬的排放水平 /	162
七、我国大气汞的排放水平 /	164
八、我国大气砷的排放水平 /	166
附录 B 云南省大气铅排放清单.....	168
一、大气铅排放水平计算的相关参数设置 /	168
二、云南省大气铅排放清单 /	173
三、云南省大气铅 12 km×12 km 网格排放清单 /	176
附录 C 血铅事件回顾.....	178
附录 D HZ 县儿童健康调查问卷	180
附录 E DY 县膳食调查问卷.....	183
参考文献	184

第一章 绪 论

改革开放 30 多年来,我国的综合国力不断增强,人民生活水平得以提高,但与此同时,环境污染问题日益严峻,我国正面临着历史累积污染问题的健康损害效应逐渐显现、工业化引发的新型环境污染健康风险日趋严重的局面。我国重金属污染是在长期的矿山开采、加工以及工业化进程中累积形成的,现阶段已经进入了环境与健康问题的高发期,对自然生态和群众健康构成了严重威胁,造成了严重的社会影响。自 2009 年以来,我国已连续发生了 30 多起特大重金属污染事件:湖南浏阳镉污染事件、中金岭南铊超标事件、四川内江铅污染事件、山东临沂砷污染事件、福建紫金矿业溃坝事件等,一系列重金属污染事件触目惊心。因此,明确重金属污染在全国的分布及地球化学特征,人体暴露于环境重金属的途径及其健康损害,建立人体重金属暴露健康的健康效应诊断方法,是开展重金属污染健康风险管理的基础工作。基于《重金属污染综合防治“十二五”规划》已将铅、镉、汞、铬和类金属砷列为重金属污染综合防治的重点物质,其中,铅是我国重金属污染健康相关健康损害事件的首要致害物,镉则是造成我国土壤污染的首要无机污染物。为此,本书以铅、镉为典型污染物,兼顾铬、汞、砷三类重金属重点污染物进行全局性分析。

一、重金属矿产资源的储量及分布

1. 铅锌矿

我国铅矿产资源储量丰富,其主要与锌矿、银矿和铜矿伴生存在。2014 年,我国铅资源储量和基础储量仅次于澳大利亚位居世界第二位,资源开采量为 295 万 t,位居全球之首(USGS, 2015),就国内而言主要分布在云南、内蒙古、广东、海南、甘肃、湖南、四川、江西、广东、广西和河南等省(地区),其他省市储量分布较少(马茁卉, 2008)。环境中的铅主要来源于因火山爆发、森林火灾等自然现象释放的自然源和人为生产生活活动排放的非自然源,其中人为排放是造成环境铅污染的主要原因。含铅矿产资源的开发利用以及含铅制品的消费使用均可向环境释放重金属铅,对区域环境造成污染。就大气铅而言,其主要来源于工业生产活动(Wang et al., 2000),以及电力生产和交通燃油排放(Pacyna et al., 2009),此外有色金属的冶炼和精炼是大气铅排放的重要来源之一。此外,钢铁生产的高温处理过程,生活垃圾的焚烧、水泥生产以及含铅金属的工业应用均可释放铅(Hutchinson et al., 1987)。在我国禁止使用含铅汽油前,机动车燃油是大气铅排放的主要来源,但自 2001 年禁止使用含铅汽油后,这一来源的贡献不断降低,与此同时燃煤和有色金属冶炼日渐成为主导源(Li et al., 2012)。

2. 镉

镉作为一种稀有重金属，普遍应用于电镀、印染、合成化学品、制陶业，电子工业等 (Safarzadeh et al., 2007)，中国是全球主要镉资源国之一 (中国地质矿产信息研究院, 1993)。截至 2005 年，我国有分布于 23 个省、市、自治区的 183 处伴生镉矿产地列入储量表，累计探明镉资源储量约为 71.95 万 t，其中镉资源储量约为 58.24 万 t。我国镉矿产资源分布相对集中，主要分布于我国中部、西南部以及华东地区。这些区域的累计探明镉资源储量占全国保有量的 87.10%，其中云南、甘肃、福建、四川四省的镉资源最为丰富，累计占全国探明总量的 77.3%。最为有名的矿区为云南金顶铅锌伴生镉矿和贵州都匀牛角塘大型镉矿 (袁珊珊等, 2012)。

3. 砷

矿业活动是导致环境砷污染的重要原因之一 (Baroni et al., 2004; Liao et al., 2005; Mandal & Suzuki, 2002)，从工业时代的 1850—2000 年，全球人为活动向环境排放的砷逐年增加，其中矿业活动产生的砷量占 72.6% (Han et al., 2003)。我国是世界砷矿产资源分布的大国之一，全球探明砷储量 70% 集中在我国 (魏梁鸿等, 1992)。截至 2003 年，我国 19 个省、自治区的 84 处砷矿产列入储量表，其中保有基础储量 58.0 万 t，主要集中分布于中南及西部地区，其中广西、云南和湖南三地区的累计探明量占全国的 61.6%。在此探明储量最多的三省区中，广西南丹和云南个旧两地的砷矿资源累计探明量分别为 106.3 万 t 和 41.0 万 t，分别占全国总储量的 26.8% 和 10.3% (肖细元等, 2008)。

4. 铬

我国铬矿资源匮乏，截至 2002 年年底，全国共有矿产地 54 处，主要分布于西藏、内蒙古、新疆和甘肃四省累计占全国总储量的 80.7% (刘随臣, 2004)。但与此同时，我国是世界上较大的铬铁矿进口国之一，且进口量逐年增长 (郑明贵等, 2011)。铬主要应用于电镀、染料、制药、皮革、颜料等行业，铬化物制造企业所排放的“三废”不断造成环境污染 (郭舜勤, 1992)。

5. 汞

汞是一种全球性污染物，可经大气进行长距离传输 (Lindqvist, 1991)。我国汞矿资源较为丰富，已探明有储量的矿区 103 处，累计探明金属汞储量 14.38 万 t，位居世界第三 (中国矿业网, 2003)，分布于 12 个省区，其中贵州位居榜首 (杨海等, 2009)。闻名于世的汞矿有贵州万山汞矿、务川汞矿，丹寨汞矿、铜仁汞矿 (仇广乐, 2005) 以及湖南的新晃汞矿等。汞矿山活动不仅会产生大量的采矿废石和冶炼矿渣等固体废弃物 (Gray et al., 2004; Li et al., 2008; Qiu et al., 2005)，还对周边土壤和水体造成严重的污染 (Gray et al., 2003; Gray et al., 2000; Li et al., 2008; Qiu et al., 2005; Qiu et al., 2006)，进而对区域食物造成严重的汞污染 (Feng et al., 2007; Gray et al., 2000; Horvat et al., 2003; Qiu et al., 2005)。此外，汞矿山活动还会释放高汞含量的废气，造成汞矿区大气的严重污染 (Ferrara

et al., 1998; S. Wang et al., 2007; Wang et al., 2007)。

二、重金属的地球化学特征

重金属元素普遍存在于大气、土壤、水体和生物体等各种环境介质中。由图 1-1 可见，土壤既是重金属元素源，也是汇。各介质中的重金属元素均可输入土壤，造成土壤重金属含量的增加，与此同时，土壤中的重金属可通过径流、起尘、渗漏、风化、侵蚀等外力作用向其他环境释放重金属。

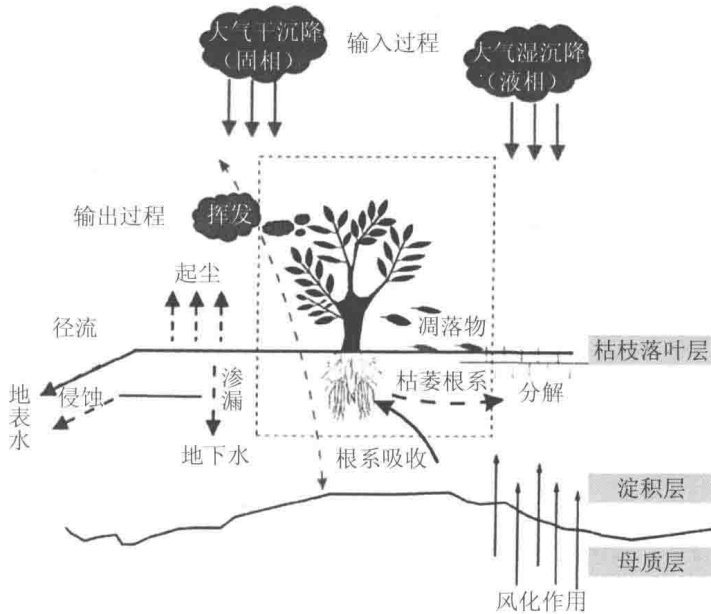


图 1-1 重金属元素的地球化学循环特征 (史贵涛, 2009)

重金属的环境归趋、潜在危害均与环境中重金属的生物地球化学行为特征密切，本书将铅、镉、砷、铬和汞五种重金属的理化性质、环境中存在的形态、主要用途及生物毒性梳理归纳如表 1-1 所示。

表 1-1 主要重金属的理化性质、存在形态及主要用途

重金属	理化性质及毒性	存在形态	主要用途
铅 (Pb)	灰白色金属，比重为 11.34，熔点 327.5℃，沸点 1 525℃，在干燥空气中不易发生化学反应，与酸反应可产生一层难以溶解的 Pb 酸盐保护膜。毒性系数为 5	可生成+2 价和+4 价化合物，无机化合物有 PbO、PbO ₂ 、Pb(OH) ₂ 、PbCO ₃ 等，有机化合物有四乙基铅等。在自然界中通常以+2 价，硫化物和氧化物形式存在，少数以金属态存在	化工设备和冶金工厂电解槽的内衬，电缆保护膜、电池板、合金材料、油漆涂料、抗爆剂等
镉 (Cd)	淡蓝具有银白色光泽，熔点 321℃，沸点 767℃。加热易挥发，高温下能与卤素发生反应，能与多数重金属形成化合物，溶于硝酸形成盐。其化合物中，氧化物的毒性最大，毒性系数为 30	自然环境中有时以+1 价存在，但主要为+2 价。常和锌矿共生，以 CdS、CdCO ₃ 、CdO 形式存在，锌矿、方镉矿、块硫镉矿中均含有 Cd，含量介于 0.1%~0.5%	常作为原料应用于颜料和涂料生产中、聚氯乙烯树脂的盐基稳定剂、阴极射线管和 Ni-Cd 电池；生产不锈钢、易熔合金、轴承合金的重要原料；电镀行业的 Cd 板，荧光体的生产等

重金属	理化性质及毒性	存在形态	主要用途
砷 (As)	类金属,有金属光泽的暗灰色固体,质脆;熔点为 814℃,不溶于水和有机溶剂,613℃时升华;一般以多原子分子存在,形成多种同素异性体;在空气中易氧化,可被 HNO ₃ 、王水和 NaClO 溶解而形成亚砷酸或砷酸。毒性系数为 10	环境中一般以+5、+3、0、-3 四种价态存在;主要的化合物种类有 As ₂ O ₃ 、As ₂ S ₂ 、As ₂ S ₃ 、As ₂ O ₅ 、AsH ₃ 、-CH ₃ 等;自然界中分布较多的矿石是砷黄铁矿、雄黄和雌黄等,多伴生于 Cu、Pb 和 Zn 等的硫化矿物中,和黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿一起生产	在工业生产过程中应用较广,其化合物,如 As ₂ O ₃ 等多年来被用作杀虫剂、除锈剂、杀菌剂等;用作木材防腐剂、肥料脱硫剂、脱色剂、脱毛剂;化学工业用 As 及其化合物制造燃料、涂料、农药等;Pb-As 合金用作蓄电池极板和电缆皮;高浓度 As 用作半导体材料;AsS 等可用于军火工业
铬 (Cr)	银白色有光泽的金属,比重为 7.2,熔点 1550℃,沸点 2469℃;在空气中是稳定的,不溶于水和硝酸,溶于稀盐酸和硫酸,生成相应的盐;单质 Cr 无毒;三价 Cr 有毒,六价 Cr 毒性最大,且具有腐蚀性。毒性系数为 2	在自然界中以多种价态形式存在,常以+2 价、+3 价和+6 价存在;Cr 化合物最多的是三价和六价,有 Cr ₂ O ₃ 、CrO ₃ 、K ₂ CrO ₄ 等;在有机质和还原条件下,Cr ⁶⁺ 可还原成 Cr ³⁺ ;在厌氧状态的水体中,一般以 Cr ³⁺ 形式存在,Cr ⁶⁺ 在富氧状态下是稳定的;一般沉积岩中含有较多 Cr,在菱铁矿中富集	主要用于钢铁生产,铁铬和硅铬的冶炼;在耐火材料方面生产铬镁火砖,用作铸钢造型的铬砂;化学材料上重铬酸盐广泛应用于电镀、皮革、制药、防腐剂、防磨剂、染料、颜料及合成催化剂等
汞 (Hg)	银白色发光液体,熔点为 -38.87℃,沸点为 365.95℃,比重为 13.546;具有溶解钾、钠、锌、镉和铅等多种重金属的能力,形成汞齐;可溶于硫酸和硝酸中;与硫和氯结合的能力较强。毒性系数为 40	在自然界中,多以金属 Hg,无机 Hg 和有机 Hg 的形式存在。无机 Hg 有+1 价和+2 价化合物,有机 Hg 有甲基 Hg、苯基 Hg 以及乙基 Hg 等。广泛分布于土壤、大气、生物和水体各圈层中;存在于岩石中含 Hg 矿物有辰砂、硫汞锑矿和汞黝铜矿,含量在 0.5%左右	Hg 的用途极为广泛:水银电解法中作阴极制造电解氯和苛性钠;应用于各种电器和机械工业,制造温度计、比重计、血压计、荧光灯、X 射线管、水银电池等;汞齐可应用于医疗、铸造以及金属冶炼等行业;Hg 的化合物可用作催化剂、颜料、起爆剂、防腐剂;有机 Hg 化合物可用作杀菌杀霉剂;医疗上用大量的红 Hg 作为消毒剂

1. 重金属铅的地球化学特征

铅 (Pb) 已成为全球性的污染物,含铅烟雾在空气中的半衰期为 7~30 d,可通过大气干湿沉降进入陆地和水体,其在地球各圈层中的地球化学循环过程如图 1-2 所示。水环境中铅主要以离子态的形式存在,其含量受水体中的 HO⁻、Cl⁻和 CO₃²⁻等离子的影响,二价铅可与多种离子形成络合物或配合物。一般而言,因悬浮颗粒物和沉积物等的强烈吸附作用,在实际自然水体中铅的含量相对较低。土壤环境中,铅主要以 PbCO₃、PbSO₄、Pb(OH)₂ 等固体形式存在,土壤溶液中可溶性铅的含量相对较低,故其迁移性相对较低。

2. 重金属镉的地球化学特征

重金属镉 (Cd) 广泛分布于大气、土壤和水体中,但其含量受人为影响较大,每年因人为排放向自然界输入的量比自然输入量高近一个数量级。Cd 在地球各圈层中的地球化学循环如图 1-3 所示 (Nriagu, 1980, 1989)。相较于其他几种重金属,Cd 更易在水环境和土壤中迁移。在自然水体中,Cd 主要以 Cd²⁺存在,其化合物除硫化镉 (CdS) 外均能溶

于水，属于是水迁移性的金属元素。Cd 也能与 HO^- 、 Cl^- 和 CO_3^{2-} 等多种离子结合形成配合物，进而加速在水体中的迁移。土壤 Cd 一般累积于表层土壤，深层则显著减少。通常有机质含量越高，粒径越细的土壤对 Cd 的吸附量越大。植物体内含 Cd 量一般较低，大多数均在 1 mg/kg 以下，在众多植物中，藏类植物和苔藓植物含量较高。在土壤环境中，Cd 的赋存形态十分复杂，包括可交换态、铁锰氧化物结合态、碳酸盐态、有机态、硫化物态、晶格态、可溶态七种，其中可溶态 Cd 会因降水产生的地表径流造成水体污染，也会因垂直渗透等作用污染地下水，而可交换态 Cd 则可通过食物富集进入生物圈。

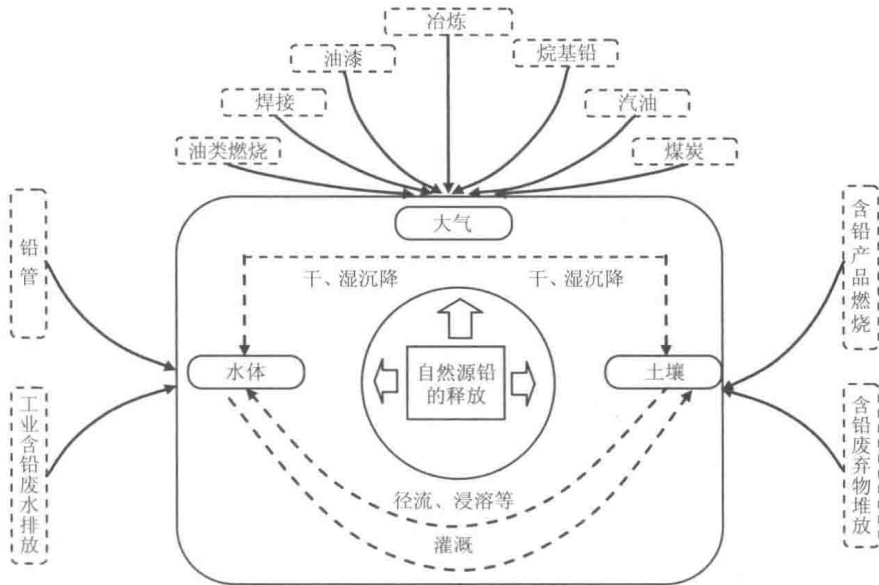


图 1-2 铅在大气—水体—土壤环境中的地球化学循环（许嘉琳等，1995）

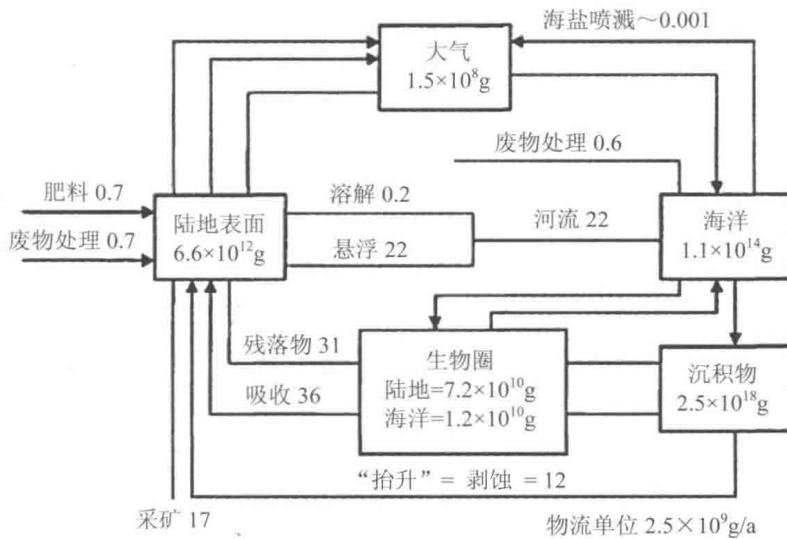


图 1-3 镉的生物地球化学循环（史贵涛，2009）

3. 重金属砷的地球化学特征

自然环境中，砷（As）的循环如图 1-4 所示。不同来源的 As 进入水环境后，可通过复杂的理化反应进入沉积物、生物或溶解在水体中，并可被微生物氧化还原为有机 As 化合物。环境中的砷酸盐在厌氧菌的作用下可生成甲基砷酸，在好氧条件下则先生成甲基砷酸，随后出现二甲基砷酸和三甲基砷酸。土壤环境中，As 多以 As^{+5} 价， As^{+3} 价存在，有机 As 较少，其毒性表现为 $As^{+3} > As^{+5} > \text{挥发性有机 As} > \text{不挥发性有机 As}$ 。在土壤环境中，As 经微生物还原甲基化作用后，可生成 $(CH_3)_2AsH$ 或 $(CH_3)_3As$ 而挥发逸散到大气中。土壤 As 也可被植物根部吸收，转化为 $(CH_3)_3As$ 从叶面排入大气，并与 O_2 反应生成 $(CH_3)_3AsO$ 或 $(CH_3)_2As(OH)$ ，并与大气中的 O_3 或 N_2O_4 反应生成 As_4O_6 液态微粒沉降回土壤表面，再转化为 $HAsO_2$ 。

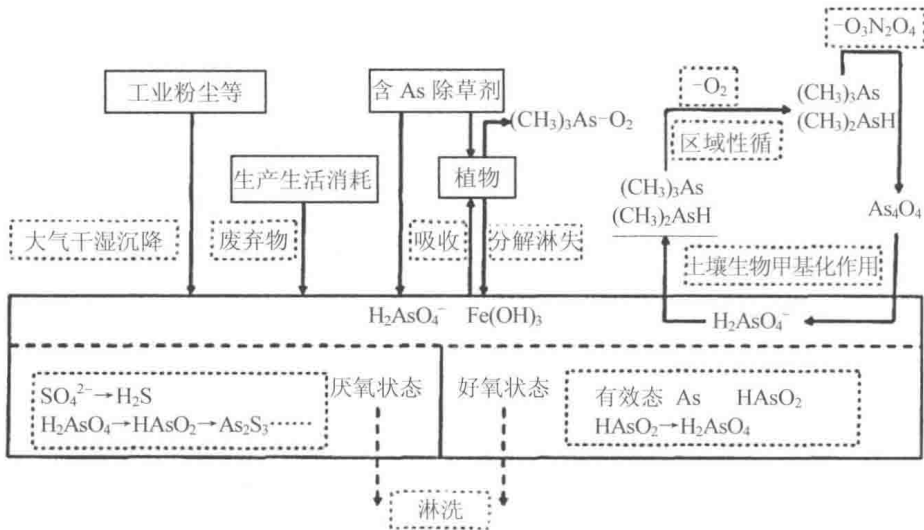


图 1-4 自然界砷循环示意（史贵涛，2009）

4. 重金属铬的地球化学特征

不同于其他四种重金属元素，铬（Cr）是生命活动的必需元素，其在地球化学生物环境中的循环过程如图 1-5 所示。大气是 Cr 向生态系进行长远距离传输的主要途径，土壤环境中，Cr 可能以 Cr^{3+} 、 CrO_2^- 、 CrO_4^{2-} 和 $Cr_2O_7^{2-}$ 四种形态存在，其中 Cr^{+3} 较稳定，是土壤 Cr 存在的主要形态（廖自基，1989）。 Cr^{+3} 进入土壤后，绝大部分被土壤吸附固定，以 Cr 和 Fe 的氢氧化物混合物或被封闭在 Fe 的氧化物中而存在，在土壤中难以迁移。相较而言， CrO_4^{2-} 和 $Cr_2O_7^{2-}$ 的迁移能力较强，可被植物吸收或淋溶到深层土壤、地下水或地表水中造成污染。 Cr^{3+} 和 Cr^{6+} 之间可以发生氧化还原反应，其过程受土壤环境的 pH、 O_2 浓度等因素影响（朱定祥等，2004）。