

国土资源部两权专项项目 共同资助  
国土资源部百人计划项目

赵元艺 王金生 等著

# 矿床地质环境模型与环境评价

KUANGCHUANG DIZHI HUANJING MOXING  
YU HUANJING PINGJIA

地质出版社

国土资源部两权专项项目  
国土资源部百人计划项目 共同资助

# 矿床地质环境模型与 环境评价

赵元艺 王金生 李德先 蔡剑辉 著  
初 娜 张光弟 李九玲 熊群尧

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书系统论述了矿床地质环境模型与环境评价的理论与方法。以德兴斑岩铜矿床为主,辅以个旧锡多金属矿床,以重金属元素在岩(矿)石、尾砂、水、土壤和种植物中的迁移转化为主线,详细研究了矿山环境特征及其变化。将野外环境地质与地球化学调查及监测、室内环境矿物学、模拟实验等技术有机结合,探索了一套从矿床到其开发的各个阶段的具有矿床学、地球化学、矿物学、水文地质学、土壤学及环境评价等学科特点的环境科学研究新思路。分别以国家标准和地球化学基线为基础,对德兴铜矿地区的环境质量现状进行评价;以国家标准为基础,对个旧锡多金属矿地区的环境质量现状进行评价,为矿山进行环境评价工作提供了可参照的方法。

本书附有大量的原始数据和相关的参考文献与资料,以备查用。

本书是一部矿床地质环境研究与评价的系统论著,适宜于从事矿产资源、土地、矿山企业、食品、环境保护等方面的科研、教学与环评工作人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

矿床地质环境模型与环境评价/赵元艺等著. —北京:地质出版社, 2007.9

ISBN 978-7-116-05487-5

I. 矿… II. 赵… III. 矿床—地质环境—研究 IV. P61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 143586 号

---

组稿编辑:王大军

责任编辑:白铁 汪福妍

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324579(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:21 彩版:9 面

字 数:530 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2007 年 9 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05487-5

---

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

# 前 言

本书是国土资源部财务司主管的公益类“两权”专项项目“矿产资源开发对矿山环境的影响及整治示范研究”(编号:30302408,负责人:张光弟)的第2个子项目《矿床地质环境模型与环境评价研究》(编号:30302408-02,负责人:赵元艺,执行期限为2002年6月至2006年8月)的研究报告的基础上,根据有关专家的意见经修改而成。子项目以江西德兴大型铜多金属矿床(山)为重点、辅以云南个旧锡多金属矿床(山)作为研究靶区。重点研究:①矿床地质环境概念与定量模型的建立方法;②查明矿山环境污染的机理;③基于区域地球化学基线与国家标准的矿山环境评价方法与评价模型。技术路线与方法是在矿床地质环境模型的基本理论的基础上,从矿床地质环境概念模型出发,以查明污染现状为主线,研究污染环境效应及地质影响因素;通过环境容量和容量指标研究,完成地质环境定量模型;建立环境评价指标和环境评价模型。总体看来,本书的最大特色是将调查与监测、环境矿物学、模拟实验等有机结合,探索了一套从矿床到其开发各个阶段的具有矿床学、地球化学、矿物学、水文地质学及土壤学等学科特点的环境科学研究新思路,为国土资源、环境保护以及矿山企业等部门进行环境评价与整治提供了可参照的实用方法。

完成的实物工作量统计如表1所示。

表1 完成的实物工作量统计表

序 号	类 别	工作量/件
1	土壤样品采集	204
2	水样品采集	119
3	种植物样品(包括稻谷与小白菜)采集	47
4	土壤与尾砂样品重金属元素形态分析	44
5	土壤重金属元素淋滤试验	8
6	矿石矿物学样品采集	100
7	元素总量测试	518
8	尾砂样品采集	43
9	X射线衍射分析	23
10	光电子能谱分析	4
11	大气飘落物样品采集	3

具体工作量为:

- 1)野外矿床(山)地质环境调查与监测6次,共计100余天。
- 2)野外数码照片800张。

3)收集各种相关论文及资料 300 余份。

德兴矿区:

4)土壤与尾砂样品形态分析 44 件。

5)采集、处理并分析河水、酸性水等水样共 104 件。分析的项目有:Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、TCr、As、Hg、pH 等 9 项;大部分水样除分析 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、TCr、As、Hg 元素外,还检测了  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等六种阴离子,共 17 项。

6)采集各种土壤样品 176 件。样品分析项目有:Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、pH 值,共 9 项。

7)采集尾砂样品 43 件(德兴铜矿)。分析项目有:Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、Se,共 9 项。

8)采集并分析测试小白菜样品 23 件,分析项目 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、As、Hg、Se、Cr、水分,共 10 项。

9)采集稻谷样品 24 件,分析项目 Pb、Cd、Mo、As、Hg、Se、Cu、Cd、Zn 共 9 项。

10)室内实验:德兴铜矿废石场低品位矿石喷淋实验 2 套。原状土柱实验样品 2 件。共分析测试水样 105 件。

11)矿物学:分析南山排石场低品位矿石的化学成分 23 件、黄铁矿单矿物样品的化学组成 23 件,黄铁矿光电子能谱分析 4 件,土壤、废矿石粉末及黄铁矿表面成分分析 10 件,土壤矿物的 X 射线衍射物相分析 23 件。

个旧矿区:

12)大气飘落物样品 3 件,分析项目 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、Sn、W、Sb 与 pH 值共 12 项。

13)水样 15 件,分析项目 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、Sn、W、Sb 与 pH 值、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、耗氧量共 19 项。

14)土壤样品 28 件,分析项目 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、Sn、W、Sb、Na 与 pH 值,共 13 项。

15)尾砂样品 12 件,分析项目 Cu、Pb、Zn、Cd、Mo、Cr、As、Hg、Sn、W、Sb、Na 与 pH 值,共 13 项。

16)完成或即将完成学位论文 3 份:

《德兴铜矿土壤重金属元素的形态及其环境效应》

(作者:初娜,学位层次:硕士,单位:中国地质科学院矿产资源研究所,时间:2008 年)。

《德兴铜矿水污染源项确定》

(作者:赵金艳,学位层次:硕士,单位:北京师范大学,时间:2005 年)。

《金属矿山环境影响评价模式研究》

(作者:李宏艳,学位层次:博士,单位:北京师范大学,时间:2006 年)。

由上述实物工作量可以看出,作者开展了大量室内、外相关工作,取得了丰富的第一手资料,为完成有关研究奠定了坚实的基础。

本书共分为八章:

第一章(执笔人:赵元艺、王金生、初娜、李德先、李九玲、蔡剑辉)重点论述了矿床地质环境模型与环境评价的基本概念、内容、工作方法、国内外研究现状,以及本书的基本研究思路

与技术方法。

第二章(执笔人:张光弟、熊群尧、初娜)至第三章(执笔人:赵元艺、初娜、李德先、蔡剑辉)为德兴铜矿床(山)的地质环境模型,其中第二章为其开发之前的地质环境特征,第三章为其开发过程中的地质环境特征及其定量模型等。

第四章(执笔人:初娜)系统研究了德兴铜矿床(山)开发过程中及部分功能区关闭之后有关尾砂与土壤重金属元素的存在状态。

第五章(执笔人:蔡剑辉)为德兴铜矿床(山)开发过程中的环境矿物学特征。

第六章(第一、二、三节执笔人:王金生、赵金艳、李宏艳、王长申;第四节执笔人:赵元艺、初娜)为德兴铜矿开发过程中的祝家村排石场低品位矿石与大坞河下游沽口村的土壤淋滤实验及大坞河水质预测模型,以及矿山部分功能区关闭后的环境特征。

第七章(执笔人:李德先)为德兴铜矿床(山)的基于区域地球化学基线与国家标准的环境质量现状评价。

第八章(执笔人:李九玲、赵元艺、初娜)为个旧地区的矿床地质环境模型与环境评价研究。

前言、结束语由赵元艺完成,图版野外照相由赵元艺完成,图版矿物显微镜下照相由蔡剑辉完成,图版室内实验照相由王金生完成,图版说明及图版整理由蔡剑辉与赵元艺完成,全书由赵元艺、王金生、初娜统稿定稿。

全书共 328 页,彩色图版 9 幅包括 54 张照片,反映了两个研究区不同功能区的环境状况及德兴矿区低品位矿石被酸浸前后的硫化物表面变化特征。本书是集智慧结晶,是全体成员团结一致、群策群力、共同努力的成果。特别是张光弟、李九玲、熊群尧三位老同志在成果方面所作出了突出贡献,但他们一致要求排名靠后,本书作者对这种只讲奉献、不计名利、推举年轻人及构建和谐科技界的高风亮节表示由衷的感谢。不足之处,敬请指正。

在本书的研究工作过程中,得到项目专家组和指导小组陈毓川院士、李家熙研究员、张彦英院长、侯增谦所长的具体指导和帮助,得到中国地质科学院矿产资源研究所所长王瑞江博士、副所长毛景文博士、副书记张佳文高工、科技处长吕庆田博士与项目办公室孙文泓、亓峰两位女士及资源环境与综合利用研究室主任王高尚研究员的关怀与支持;在德兴地区工作期间得到中国地质科学院矿产资源研究所李文智硕士、江西省地质环境监测总站颜春总工、王景来高工、蔡伟娣高工及德兴铜矿孙信芽副总经理、地测部陈乐晃部长、陈兴海助理工程师的协助;个旧地区工作期间,得到云南省个旧市人民政府、个旧锡矿、卡房选厂、劳动保护研究所、个旧市防癌办公室的支持;样品分析过程中得到江西地质矿产分析测试中心王学田高工、刘爱东高工、罗琼高工与云南地质矿产分析测试中心梁明科高工的支持;得到子项目 1<sup>①</sup>、3<sup>②</sup>、4<sup>③</sup> 全体成员特别是焦鹏程研究员、邓坚副研究员、滕彦国副教授、杨峰杰教授、周广柱副教授,王安建教授、韩梅女士、修群业高工、高兰女士、赵汀博士的大力支持。在文字录入与图件制作过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所矿之源公司王娜、王娟娟、李芹等同志的帮助。另外,书中引用了前人未曾公开的部分资料。本书的部分出版经费得到国土资源部百人计划项目的支持。在此对上述单位和个人表示衷心的感谢。

① 名称为《区域地球化学基线与大型矿山和矿集区环境评价示范》。

② 名称为《矿山土地复垦与生态重建技术示范》。

③ 名称为《矿山(研究)可持续发展决策支持系统》。

# 目 次

## 前 言

<b>第一章 矿床地质环境模型与环境评价的理论、进展及研究思路</b> .....	( 1 )
<b>第一节 矿床地质环境模型</b> .....	( 1 )
一、概念 .....	( 1 )
二、内容 .....	( 2 )
三、研究方法 .....	( 2 )
四、研究意义 .....	( 4 )
五、研究现状 .....	( 4 )
<b>第二节 环境评价</b> .....	( 21 )
一、概念 .....	( 21 )
二、评价方法 .....	( 21 )
三、研究现状 .....	( 21 )
<b>第三节 本书研究的思路与技术方法</b> .....	( 25 )
一、研究对象的确定 .....	( 25 )
二、研究思路与技术方法 .....	( 28 )
<b>第四节 样品的采集、处理与分析</b> .....	( 30 )
一、水 .....	( 30 )
二、土壤 .....	( 31 )
三、河床沉积物、底泥、尾砂及低品位矿石 .....	( 34 )
四、种植物 .....	( 34 )
<b>第二章 德兴铜矿床(山)的地质环境特征</b> .....	( 39 )
<b>第一节 德兴铜矿床简介</b> .....	( 39 )
<b>第二节 德兴铜矿床(山)开发之前的地质环境特征</b> .....	( 42 )
一、开矿之前影响环境的潜在的地质因素 .....	( 42 )
二、开矿之前的环境特征恢复 .....	( 57 )
<b>第三节 小结</b> .....	( 58 )
<b>第三章 德兴铜矿床(山)开发过程中的地质环境特征</b> .....	( 59 )
<b>第一节 矿床(山)开发过程中的环境问题</b> .....	( 59 )
一、源区 .....	( 59 )

二、大坞河流域 .....	( 77 )
三、4 <sup>#</sup> 尾砂库及其下游 .....	(107)
第二节 矿区污染源的确定 .....	(119)
一、计算方法 .....	(119)
二、计算过程和分析 .....	(121)
第三节 德兴铜矿土壤环境容量研究 .....	(122)
<b>第四章 德兴铜矿床(山)开发过程中的重金属元素形态研究</b> .....	(128)
第一节 样品 .....	(128)
第二节 样品的分析过程与精度 .....	(128)
一、样品分析过程 .....	(128)
二、检验测定数据的精密度与准确度 .....	(131)
第三节 结果与讨论 .....	(133)
一、低品位矿石堆浸场与大坞河流域 .....	(133)
二、4 <sup>#</sup> 尾砂库地区土壤和尾砂的元素形态 .....	(148)
第四节 小结 .....	(158)
<b>第五章 德兴铜矿床(山)开发过程中的环境矿物学特征</b> .....	(160)
第一节 德兴铜矿矿山环境矿物化学 .....	(160)
第二节 土壤粉末及主要金属硫化物矿物表面 XPS 特征 .....	(163)
一、土壤、低品位矿石粉末及黄铁矿表面成分分析 .....	(163)
二、低品位矿石粉末和黄铁矿表面 S、Fe 和 Cu 的化学态分析 .....	(166)
第三节 德兴铜矿矿山环境土壤矿物学特征 .....	(173)
一、土壤矿物的 X 射线衍射物相分析 .....	(174)
二、土壤矿物中粘土矿物 X 射线衍射定量分析 .....	(181)
第四节 小结 .....	(185)
<b>第六章 德兴铜矿床(山)开发过程中重金属迁移模拟及矿山部分功能区     关闭后的环境特征</b> .....	(187)
第一节 排石场低品位矿石喷淋实验 .....	(187)
第二节 土壤静态吸附实验 .....	(194)
第三节 大坞河水质的 RAVLAK 预测模型 .....	(201)
第四节 矿山部分功能区关闭之后的环境特征 .....	(203)
<b>第七章 德兴铜矿床(山)地区环境质量现状评价</b> .....	(212)
第一节 水环境评价 .....	(212)
一、地下水 .....	(212)
二、地表水 .....	(216)
三、小结 .....	(233)
第二节 土壤环境评价 .....	(235)
第三节 底泥环境评价 .....	(255)



第四节	尾砂环境评价·····	(257)
第五节	种植物环境评价·····	(259)
一、	德兴地区小白菜质量评价·····	(259)
二、	德兴地区水稻质量评价·····	(262)
第六节	小结·····	(264)
一、	环境质量综合评价·····	(264)
二、	地球化学基线评价·····	(265)
三、	存在的问题·····	(273)
<b>第八章</b>	<b>个旧锡(铜)矿床地质环境模型与环境评价·····</b>	<b>(274)</b>
第一节	个旧锡(铜)矿床的地质环境模型·····	(274)
一、	开发之前影响环境的潜在地质因素·····	(274)
二、	矿山开发之前的环境特征恢复·····	(284)
三、	矿山开发过程中的环境问题·····	(286)
四、	个旧锡(铜)矿床部分功能区关闭之后的环境特征·····	(307)
第二节	个旧地区环境质量现状评价·····	(310)
一、	评价数学模型·····	(310)
二、	评价结果·····	(310)
第三节	小结·····	(313)
<b>结束语</b>	·····	<b>(314)</b>
<b>参考文献与资料</b>	·····	<b>(318)</b>
<b>图版说明及图版</b>	·····	<b>(325)</b>

# 第一章 矿床地质环境模型与环境评价的理论、进展及研究思路

## 第一节 矿床地质环境模型

### 一、概念

在以往的资源勘查评价中建立的概念矿床地质模型只注意到矿床地质特征和成矿控制条件以及矿床成因的研究,其最终目的以发现和预测未知矿床、并为开采矿床服务,基本上未重视矿床本身及其开发过程对环境造成的影响。20世纪90年代以来,由于人们对环境问题的忧虑,西方发达国家纷纷制定苛刻的矿山环境保护条例,致使矿业界的生存产生严重危机,矿业市场逐年萎缩,传统资源学家生存面临极大挑战。为了迎接挑战,西方国家特别是美国地质调查局资源学家及时改变思路,将其研究领域由单纯的资源勘查与评价转向资源-环境一体化研究,摆脱了生存危机(汪明启等,2004)。由于资源学家了解矿床的地质与地球化学特征,在此知识基础上的资源-环境一体化认识,可以让矿山环境条例的制定更具科学性,为矿业生存营造更轻松的环境。另外,从元素的含量可以看出,多数地质体(矿体)例如矿体与原生晕是有用元素相对富集的地段,但从环境角度看,他们却是环境的综合性的污染源(兰雅莉,2002),不进行开采也会产生环境危害(汪明启等,2006)。自1995年以来,美国地质调查局矿产资源计划中,有一半以上的工作量投入到与环境有关的研究中,在很多方面取得了较大进展(汪明启等,2004),因此,矿产资源开发所带来的环境问题已成为国外环境地球化学研究的重点(兰雅莉,2002)。

矿床地质环境模型的概念是:反映矿床开采前,以及由于矿山开采、矿石处理和冶炼所造成的环境行为的地质、地球化学、地球物理、水文和工程信息的集合(Geoffrey S. Plumlee等,1999)。因此准确地说,矿床地质环境模型应称作矿山地质环境模型,因为该模型中已包括了矿床开采前以及矿山开采两个阶段的环境效应。

可以看出,矿床地质环境模型是近几年发展起来的一个新的概念模型。它是在矿床模型的基础上,增加了环境因素及其效应内容。1998年美国内政部和联邦地质调查局在网上发布了Edward A. du Bray主编的《矿床地质环境模型》专著。第一次系统地描述了各类型矿床的地质、地球物理、地球化学特征及矿床环境特征和潜在的环境效应、影响环境效应的地质因素等,以矿床自然类型为主线,进行环境模型分类。在以后,各国特别是国际上一些重要核心刊物中有关矿山环境与环境效应、环境污染与治理的研究论文、评述和综合报道越来越多,但有关地质环境模型的表述却很少见。我国在这方面的研究成果非常少见,仅有对

国外关于矿床环境模型的基本概念的介绍(王安建等,1999;汪明启等,2004)、资源-环境一体化的建议(汪明启等,2006)、西北地区矿山环境地质问题调查与评价(徐友宁等,2006)及对矿山个别功能区环境特征的调查与研究,缺乏系统的工作。其原因是我国为发展中国家,没有足够的从国外进口各种矿产资源的资金,因此社会发展的多种资源主要靠国内提供,各地为了发展地方经济,多数存在有重经济效益、轻环境质量的现象,导致国内多数矿山基本上处于“先污染、后治理”的状况;从矿床地质环境模型的实用性角度看,国内在这方面的不足可能与模型本身还处于定性描述的阶段、难于操作有关。

综合矿床地质环境模型的基本概念,并结合有关矿山地质灾害的发生发展特征,本书认为,很有必要将矿山地质灾害的内容包括在矿床地质环境模型中去,因为矿山地质灾害也是地质环境的一部分。基于此,本书将矿床地质环境模型分为狭义的和广义的两种,狭义的矿床地质环境模型为反映矿床开采前,以及由于矿山开采、矿石处理和冶炼所造成的环境行为的地质、地球化学、地球物理、水文和工程信息的集合,不包括矿山地质灾害;而广义的矿床地质环境模型除狭义的内容之外,还应包括矿山地质灾害(图 1-1)。

本书描述的矿床地质环境模型为狭义的矿床地质环境模型。

## 二、内 容

狭义的矿床地质环境模型的内容有:

- 1) 矿山开采前的土壤、水系沉积物以及地下水和地表水的状态。
- 2) 矿山开采、矿物处理造成的后果(矿山排放水、矿山废弃物、碎矿残渣、尾矿水和堆浸)。
- 3) 冶炼所带来的后果(炉渣和矿堆放射性)。

对每一类成因的矿床,其地质环境模型的结构为:①有关地质、环境和地球物理信息的概述。②影响环境潜在效应的地质因素。③环境特征。

对具体的某一种矿床或矿山(如斑岩型铜矿床与矽卡岩型锡矿床等)的地质环境模型应包括(图 1-1):

1) 影响潜在环境效应的地质因素——矿床规模、容矿围岩、周围地质体、围岩蚀变、矿石特征、矿床微量元素地球化学、矿石矿物脉石矿物及其分带、矿物特征、次生矿物、地形自然地理、水文、采矿选矿方法。

2) 环境特征——来自固体废弃物的排放特征及金属活性(迁移率)、采矿前土壤沉积物特征、矿物处理过程中的潜在环境效应、冶炼特征、气候对环境特征的影响、地质环境的地球物理方法。

总之,矿床地质环境模型应以元素对环境的影响为核心,具体包括:①矿山开发之前的环境特征——影响潜在环境效应的地质因素及矿床开发之前的环境恢复。②矿山开发过程中的环境特征。③矿山关闭之后的环境特征。

## 三、研究 方 法

按照矿床地质环境模型的基本内容,对矿床研究与开发的不同阶段,其研究方法是不同的。

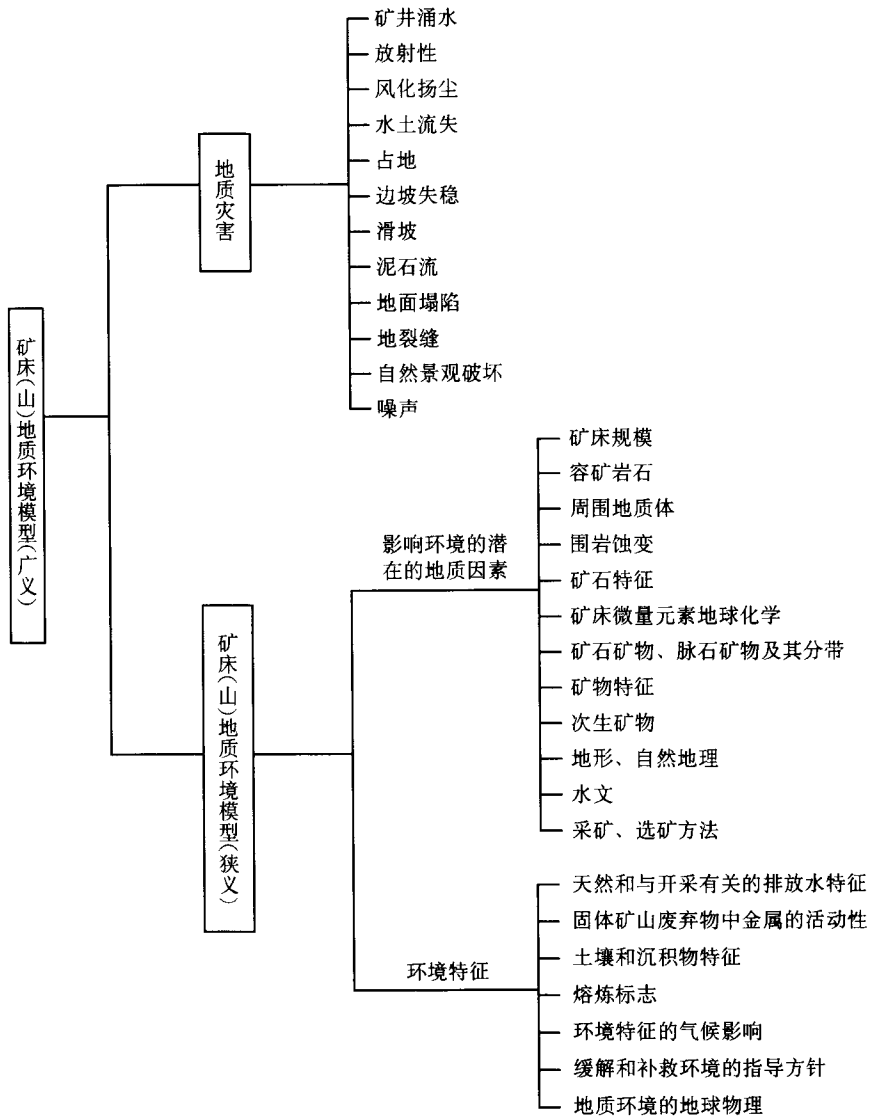


图 1-1 矿床地质环境模型的主要内容

狭义矿床地质环境模型的内容据 Geoffrey S. Plumlee and J. Thomas Nash, 王全明译, 王安建校, 1999, 整理

### 1. 矿床开发之前的环境特征的恢复

由于一些矿山已经开发, 部分矿体与围岩已不存在, 对这部分, 主要靠收集矿床勘查阶段的资料进行; 对矿体或围岩依然存在的, 需辅以必要的现场调查和室内分析测试。

### 2. 矿山开发阶段

需进行现场调查, 查明矿山采、选、冶的基本方法和流程, 包括废石堆放、尾砂储存、尾砂水的排放、低品位矿石的回收利用方法等过程对环境的影响。室内开展大量的分析测试与模拟试验, 以查清矿山开发各阶段对环境的影响特征。

### 3. 矿山或部分功能区关闭之后阶段

需进行现场调查,查明尾砂库的复垦方法、尾砂及其中有关环境影响因素在后期的变化。

## 四、研究意义

### 1. 为矿产勘查评价服务

在今后的矿床勘查评价中利用地质环境模型,对地质因素与环境效应关系进行评价,将进一步完善矿床评价体系。由于增加了环境评价内容,使矿床经济评价更趋合理,企业由此而减少了投资的盲目性,可避免不必要的经济损失。

### 2. 为矿山开采服务

对设计开采的矿山可根据地质环境模型,制定近期和远期的环境保护和治理方案,以最低的环境代价,获取最大的经济效益;对正在开采的矿山和废弃矿山,特别是生态环境已被破坏和污染的矿山,可根据地质环境模型,采取有效措施,有针对性地进行治理,将环境破坏和污染降低到最低程度。

### 3. 为政府职能部门服务

通过地质环境模型建立环境评价指标和指标体系,可为国土资源部、环境部门和矿山管理部门制定政策法规、实施监督职能提供技术支持。

## 五、研究现状

近年来,国内外有关矿山环境研究的成果,涉及矿床风化淋滤、废石堆、尾矿、矿山排水、废渣、废水、烟尘等矿山废弃物中所含重金属和有毒物质对环境介质(土壤、水、植物及人体等)作用造成的危害和潜在效应等诸多方面(Gray N. F., 1997; Lin et al., 1997; Boulet et al., 1998; He et al., 1998; 卢龙等, 2001; 李红阳等, 2001; 吴攀等, 2001; 许乃政等, 2001; Borrego et al., 2002; Kim et al., 2002; 陈天虎等, 2002)。其中在 1995 年在捷克首都布拉格召开的第三届国际应用矿床地质学会年会出版的论文集《矿床成因与环境效应》中约有 30 多篇论文代表了 20 世纪 90 年代初各国矿山环境研究的成果,涉及矿床与矿山废弃物中所含重金属和有毒物质对环境介质(土壤、水、植物及人体等)作用造成的危害和潜在效应等,基本上涵盖了矿床地质环境模型的所有内容。在 2004 年 8 月召开的第 32 届国际地质大会上,与矿产资源开发对环境的影响有关的专题就有 2 个,它们是“采矿对地表水和地下水的环境影响的生物化学研究”和“酸性矿山排水”,其中交流论文多篇。总之,在最近的 10 年间,矿床与矿山环境问题的研究已越来越引起地质与环境学者的重视,并开展了大量的卓有成效的工作。

### (一) 重金属微量元素的生态环境效应

在历史发展的进程中,人类为了自身的生存和发展,不断地开发和利用自然资源,导致环境污染问题的发生。而且,当人类对自然资源不适当的开发和利用时,还将引起生态环境的破坏、水土流失、土壤退化、气候变迁等。从而导致大量生物资源急剧减少,反过来又破坏

了人类赖以生存的环境,也就是人们常说的“大自然的报复”。著名的世界八大公害都是由环境污染造成的。

### 1. 铜

铜原子序数为 29,位于第四周期,第 IB 族,外层电子构型为  $3d^{10}4s^1$ ,是人体必需的微量元素之一,也是植物生长所必需的微量元素。但过量的 Cu 却对人体和动植物有着很高的毒性。

Cu 的地壳丰度值为  $5.5 \times 10^{-5}$ ,正常土壤中的总 Cu 含量一般为  $15 \sim 40\text{mg/kg}$ (范围为  $2 \sim 250\text{mg/kg}$ ),而有效态 Cu(DTPA)则为  $0.11 \sim 10\text{mg/kg}$ 。铜进入人体主要有两条途径,即饮用水和食物链。人体摄入过量的铜会引起一系列病变。可能影响婴儿免疫功能的建立,使血液黏稠度增大,肺动脉血压升高,加重肺心病,并伴有低氧血症,铜代谢紊乱可能还与脑血管意外有关。过量铜还能明显降低精子活力,甚至导致不育。

野外实地研究证实(倪吾钟等,2003),土壤中总 Cu 含量达到  $150 \sim 400\text{mg/kg}$ ,或者是有效态 Cu(DTPA)超过  $15\text{mg/kg}$  时,就会对植物产生毒害。铜污染对植物根系具有直接的毒害作用,导致根系新陈代谢过程紊乱而出现根系伸长严重受阻,褐变畸形,出现“鸡爪根”,叶片黄化并有褐斑,抑制种子的萌发和籽粒的发育等症状。

### 2. 铅

铅原子序数为 82,位于第六周期第 IV A 族,外层电子构型为  $4f^{14}5d^{10}6s^26p^2$ 。铅在地壳岩石中的平均丰度为  $16 \times 10^{-6}$ ,土壤含铅量一般为  $(2 \sim 200) \times 10^{-6}$ 。人为来源是环境铅污染的主要来源。

铅不是人体必需的营养元素,相反却会随着在人体内积蓄量的增加而对人体正常生理功能和健康造成极大的危害。铅在人体内的半衰期很长,约为 1460d,有积蓄作用,且 90% 的铅沉积在骨骼中。高浓度的铅可致人死亡,低浓度的铅可使人体的神经系统和肾脏等所有系统和器官产生损害。美国疾病控制中心认为当人体血液中铅大于  $15\mu\text{g}/(100\text{mL})$  时,就会引起中毒,即使每天摄入很低的铅量,也会在人体内储存积累而导致慢性中毒,甚至致癌(宋玉芝,2005)。

铅中毒表现为神经衰弱、多发性神经炎、消化不良和贫血等;儿童的铅中毒表现生长和智力发育受损(汪晔君,2004)。铅能置换骨骼中的钙而储存在骨中,当其进入血液中将会引起许多疾病,如贫血、肝炎、肾炎、高血压、神经错乱等,甚至导致死亡。铅中毒还能降低免疫系统的防御功能,使人因减少抗体合成而易受细菌和病毒的侵害。更为严重的是,由于铅是一种不能降解、广泛存在于环境中的金属污染物,在环境中可以长期积蓄,当铅中毒患者脱离污染环境或经治疗后的血铅水平明显下降时,受损伤的器官组织已经不能再修复,其对身体的损害将伴随终身。由于儿童的造血系统和神经系统尚未发育完全,因而铅对儿童具有更高的毒性。当儿童发生铅中毒后,损害主要体现在智力发育、学习能力、心理行为、生长发育等方面。患儿表现为面色发黄、生长迟缓、便秘、腹泻、呕吐、注意力不集中、好动等。

### 3. 镉

镉原子序数为 48,位于第五周期第 II B 族,价电子构型  $4d^{10}5s^2$ 。镉是一种潜在危害性的环境污染物质,虽然 Cd 本身无毒,但其化合物、Cd 的蒸气、特别是 Cd 的氧化物毒性很大,对人和动物产生积累性毒害。自从 1955 年日本发现二战后富山县出现的骨痛病为长期食用含 Cd 食物和饮用含 Cd 水所致以来,Cd 污染问题开始引起了人们越来越多的关注。

1971 年的国际会议上 Cd 被列为环境污染中最为危险的五种物质之一。世界卫生组织提出每个成年人每天对 Cd 可耐受的最大摄入量为 60~70 $\mu\text{g}$ 。1993 年镉被国际抗癌联盟 (IARC) 定为 IA 级致癌元素 (段玉梅等, 2003)。

地壳中 Cd 的浓度一般为 0.18mg/kg, 土壤中为 0.01~0.7mg/kg。国际上公认的土壤本底质量分数是 0.3~0.4mg/kg, 我国主要农业土壤中 Cd 的质量分数背景值在 0.01~1.34mg/kg 之间, 平均为 0.12mg/kg。镉在海水中的浓度为 0.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 淡水中浓度为 0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 地下水中浓度为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。大气中镉浓度为 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。土壤中镉浓度为 0.2 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。人体中的镉浓度为 50 $\mu\text{g}/\text{L}$  (赵中秋等, 2005)。

Cd 对人体、动物和植物都是非必需元素, 不参与生物有机体的结构和代谢活动。但它可以通过食物链进入人体并具有可累积性, 达到一定的剂量会影响人体健康。严重时则会导致各种疾病, 如高血压、骨痛病、肾功能紊乱、肝损害、肺水肿、贫血等。由于动植物的逐级生物富集效应, 即使土壤中低浓度的镉也可以通过食物链对人体造成严重的危害。

#### 4. 锌

锌原子序数为 30, 位于第四周期第 II B 族, 外围电子构型为  $3d^{10}4s^2$ , 是植物、动物及人生命活动不可或缺的微量元素。土壤中 Zn 含量一般在 3~790mg/kg 之间, 而植物中的平均含量仅有 0.59~3.54mg/kg。作物缺 Zn 不仅降低产量, 也使稻米、麦粒、玉米、蔬菜等 Zn 含量不足。人体缺 Zn 与人体生长、免疫、生殖、大脑发育等有密切联系 (刘勤等, 2001), 缺锌会导致生长发育期的儿童食欲不振, 发育受阻, 智力不良等。动脉硬化、肺癌、心肌梗塞等疾病都与体内 Zn 含量有关。食物中的 Zn 含量差别很大, 大部分 Zn 位于小麦的麦麸和胚芽中。动物产品和海产品 Zn 含量明显高于谷物。由于我国的膳食结构以一般谷物为主, 因此, Zn 摄入不足的可能性更大。

$\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  可抑制植物吸收锌。或许是它们竞争同一载体位点, 特别是  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  对水稻吸收锌有拮抗作用。

#### 5. 汞

汞原子序数为 80, 位于第六周期第 II A 族, 价电子构型为  $5d^{10}6s^2$ , 是人体非必需元素。汞在常温下为液体, 银白色, 易流动, 在常温下即能挥发, 汞蒸气易被墙壁或衣物吸附, 常形成持续的污染空气的二次汞源。1953 年日本九州水俣湾发现一种怪病就是甲基汞中毒造成的, 称水俣病。患者精神失常、痛苦万分, 甚至连镇上的猫也纷纷跳海自杀。此事件之后, 汞污染得到了全世界的关注。

元素汞毒性不大, 通过食物和饮水摄入的金属一般不会引起中毒 (王宏等, 2000), 但金属汞蒸气有高度扩散性和较大脂溶性, 侵入呼吸道后可被肺泡吸收并经血液循环至全身。汞对人体的危害主要累及中枢神经系统、消化系统及肾脏, 此外对呼吸系统、皮肤、血液及眼睛也有一定影响。金属汞和无机汞损伤肝脏和肾脏, 但一般不在身体内长时间停留而形成积累性中毒。其慢性中毒的临床表现主要是神经性症状, 如头痛、头晕、肢体麻木和疼痛、肌肉震颤, 运动失调等。大量吸入汞蒸气会出现急性中毒, 其症候为肝炎、肾炎、尿血和尿毒等。急性中毒常见于生产环境, 一般生活环境很少见。无机汞化合物中汞有剧毒, 但因其溶解度较小, 很难被吸收, 因此对人体不会构成危害。但有机汞 (如甲基汞) 进入人体容易被吸收并输送到全身各器官, 特别是肝、肾和脑组织, 首先受害的是脑组织。研究表明 (万双秀等, 2005), 人的病状与甲基汞积蓄量存在一定的关系: 25mg 可以使人知觉异常, 55mg 能够

表现步行障碍,90mg 能够发生发音障碍,200mg 以上就会导致死亡。根据动物实验,汞还具有致癌性。

有机汞在人体内的半衰期为 60~70d,而无机汞的半衰期仅 3~4d。以人的平均体重 50kg 计算(王德铭,1997),甲基汞的体负荷为 7~10mg,按每人每日摄入甲基汞 100 $\mu$ g 量计算,人体血液中甲基汞阈浓度为 1mg/L;在暴露到甲基汞的人群中,允许接受的水平是 0.1mg/L。淡水中溶解汞的含量为 0.02~0.06 $\mu$ g/d $\cdot$ m<sup>3</sup>,而海洋中平均值为 0.01~0.03 $\mu$ g/d $\cdot$ m<sup>3</sup>。人由于吃食了含有大量甲基汞的鱼和贝类等水产品而发生甲基汞中毒,造成中枢神经病患。

## 6. 铬

铬原子序数为 24,位于第四周期第 VI B 族,外层电子构型为 3d<sup>5</sup>4s<sup>1</sup>。自然界铬主要以三价铬和六价铬的形式存在。三价铬参与人和动物体内的糖与脂肪的代谢,是人体必需的微量元素。三价铬广泛存在于各种植物和动物组织中,且是人体中惟一随着年龄的增长而含量降低的元素。美国食品营养委员会(FNB)最近公布的铬(Cr<sup>3+</sup>)每日推荐量(RDA)成年男性为 35 $\mu$ g/d,成年女性为 25 $\mu$ g/d。研究发现(施秀芳,2006),铬缺乏可以引起空腹高血糖、葡萄糖耐受削弱、胰岛素受体数减少及外围神经性疾病等。铬(Cr<sup>3+</sup>)是胰岛素的一种“协同激素”,作为胰岛素的增敏剂参与并影响糖、脂肪和蛋白质的代谢。

六价铬的化合物有毒,具有致癌并诱发基因突变的作用。美国环境保护局(EPA)将六价铬确定为 17 种高度危险的毒性物质之一。六价铬化合物口服致死量约 1.5g 左右,水中六价铬含量超过 0.1mg/L 就会中毒。研究发现(梁奇峰,2006),六价铬的长期摄入会引起扁平上皮癌、腺癌、肺癌等疾病;吸入较高含量的六价铬化合物会引起流鼻涕、打喷嚏、搔痒、鼻出血、溃疡和鼻中隔穿孔等症状;短期大剂量的接触,在接触部位会溃疡、鼻黏膜刺激和鼻中隔穿孔;摄入超大剂量的铬会导致肾脏和肝脏的损伤以及恶心、胃肠道不适、胃溃疡、肌肉痉挛等症状,严重时会使循环系统衰竭,失去知觉,甚至死亡。长期接触六价铬的父母还可能对其子代的智力发育带来不良影响。

## 7. 硒

硒原子序数 34,位于第四周期第 VI 族,外围电子构型 3d<sup>10</sup>4s<sup>2</sup>4p<sup>4</sup>。世界卫生组织 1973 年确认硒是人类生命必需的 14 种微量元素的第一种微量元素,缺硒会严重影响人的身体健康。因此硒被誉为“生命火种”、“抗癌之王”、“心脏的守护神”。

硒在地壳中的丰度为 0.05~0.09mg/kg(李家熙等,1999),在地表的各种岩石中分布极不均匀。变质岩中含量最高(0.031~0.131mg/kg),其次为沉积岩(0.028~0.118mg/kg),最低为岩浆岩(0.059~0.108mg/kg)。土壤中硒的范围为 0.1~2.0mg/kg,平均硒含量为 0.2mg/kg;低硒土壤平均含量为 0.01mg/kg,高硒土壤可达 30~324mg/kg。

一般河水含硒量为 0.15~10 $\mu$ g/kg,海水含硒量为 4~6 $\mu$ g/kg。低硒地区河流中水的含硒量低于 0.1 $\mu$ g/kg,高硒地区河流中水的含硒量可高达 50 $\mu$ g/kg。通常饮用水中硒含量甚低,一般在 1 $\mu$ g/kg 以下,对人体的总摄入量影响不大,其中毒限量为 10 $\mu$ g/kg(王美珠,1995)。高硒地区饮用水中硒含量可高达 56 $\mu$ g/kg。

硒在大气中的浓度一般较低,通常每立方米大气中仅有几个毫微克,不构成危害。职业环境空气中允许接触的限值在美国为 0.2mg/m<sup>3</sup>,高于前联邦德国和日本(0.1mg/m<sup>3</sup>),但远低于原苏联规定的上限 0.2mg/m<sup>3</sup>。植物中的硒含量不均匀,原生蓄硒植物仅生长在高



硒土壤中, 硒含量高达几千( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ); 次生蓄硒植物硒含量可达几百( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ); 非蓄硒植物浓度非常低, 一般不超过  $30\mu\text{g}/\text{kg}$ 。人体中的硒约为  $15\text{mg}$ , 即约相当于  $0.2\mu\text{g}/\text{kg}$ 。肌肉中有  $4.55\text{mg}$ , 占人体总硒含量的  $30.3\%$ , 血液中硒含量为  $1.1\text{mg}$ , 占  $7.3\%$ 。其余的硒分布于各个脏器、头发和指甲中。机体从环境摄入硒进行正常的代谢。硒的半衰期为  $30\text{d}$ 。

硒作为人体必需的微量元素, 参与体内多种内分泌代谢活动, 如: 参与甲状腺急速的代谢、雄性激素的代谢、胰岛素的代谢等。人体缺硒会导致多种疾病。克山病(Keshan Disease, KD)是较早发现的与机体缺硒有关的一种地方性心肌病(荀黎红, 2005)。它是中国特有的一种呈慢性病程经过的独立的疾患。KD的病区主要分布在中国从东北到西南一条狭长的低硒地带。结果证明, KD区不仅土壤、粮食中的硒含量低于非病区, 而且病区人群血硒、发硒含量也普遍低于非病区, 研究表明KD病区外环境低硒水平是造成人体内环境低硒状态的根本原因。据统计全世界有40多个国家缺硒(江川等, 2005), 我国恰恰处于全球缺硒地带, 全国缺硒省份多达22个, 面积约占地国土面积的  $72\%$ 。其中严重缺硒区(含硒量小于  $0.02\text{mg}/\text{kg}$ )占  $29\%$ , 缺硒区(含硒量  $0.03\sim 0.05\text{mg}/\text{kg}$ )占  $43\%$ 。即含硒量低于  $0.05\text{mg}/\text{kg}$ 占  $72\%$ , 这些居民的硒摄入量普遍较低。中国营养学会调查表明, 我国居民平均日硒摄入量为  $26\sim 32\mu\text{g}$ , 远低于中国营养学会推荐的摄入量  $50\sim 200\mu\text{g}$ 。

硒还是一种癌变抑制剂(史丽英, 2005), 能起到抗癌作用, 缺硒可导致胃肠道癌、口腔癌、喉咽癌、鼻咽癌、口腔及面部肿瘤、淋巴瘤、肺癌、乳腺癌、膀胱癌、食道癌、胰腺癌等。还可导致甲状腺疾病, 白内障, 糖尿病。此外, 硒可能是HIV感染患者的一个重要的营养素, 对体外HIV复制有强大的抑制作用。缺硒还可导致关节炎、胰腺炎和哮喘疾病。硒还具有提高生育能力, 抗衰老等功效。

硒浓度与生物效应作为微量元素, 硒在人体内的含量虽然很有限, 但过低或过高都会影响人体的健康(史丽英等, 2005)。过低可引起硒缺乏症, 过高可引起硒中毒。在最佳浓度和中毒浓度之间只有一个狭窄的安全区, 超过或低于这个范围就会引起疾病。硒中毒可分为慢性和急性两种。硒慢性中毒表现为脱发、脱指甲, 而且可损害肝脏和骨髓的功能。硒的毒性很强, 各种动物每千克体重摄入长期  $5\sim 10\text{mg}$  硒可以产生慢性中毒(刘来利等, 2005), 其表现为消瘦、贫血、关节强直、脱毛、脱蹄和影响繁殖等, 每千克体重摄入  $500\sim 1000\text{mg}$  硒可出现急性或亚急性中毒, 轻者盲目蹒跚, 重者死亡, 病理损害主要有肝坏死、肾炎、肾出血和上呼吸道溃疡。

人体每日所需硒的摄入量最低需要量  $17\text{mg}/\text{d}$ (董海兴, 2006); 生理需要量  $40\text{mg}/\text{d}$ ; 每日营养推荐量  $50\sim 250\text{mg}/\text{d}$ ; 最高摄入量  $400\text{mg}/\text{d}$ ; 界限中毒量  $800\text{mg}/\text{d}$ 。

## 8. 砷

砷原子序数为33, 位于第四周期, 第VA族, 外围电子构型为  $3\text{d}^{10}4\text{s}^24\text{p}^3$ , 是一种类金属, 属亲硫元素, 常以硫化物的形式存在于自然界中。是否为人和动植物所必需的微量元素尚未定论。砷从价态上分有单质砷、三价砷和五价砷。单质砷不溶于水和强酸, 不易被人体吸收, 因此毒性极低。砷化氢的毒性最大, 无机砷的毒性大于有机砷, 三价砷的毒性大于五价砷, 无机三价砷的毒性是无机五价砷的60倍。

在地壳中的丰度为  $1.8\times 10^{-4}$ , 土壤砷的世界平均含量(常思敏等, 2005)为  $5\text{mg}/\text{kg}$ , 中国为  $(11.2\pm 7.9)\text{mg}/\text{kg}$ 。中国表层土壤中砷含量的分布显现出从西南到东北逐渐由高到低的趋势, 高海拔地区土壤砷含量高于低海拔地区, 地形较高的土壤砷含量高于地形较低的