



地球化学模拟 理论及其应用

Theories and Applications of
Geochemical Modelling

朱 晨 [加] G. M. 安德森 吕 鹏 著



科学出版社

地球化学模拟理论及其应用

朱 晨 [加] G. M. 安德森 吕 鹏 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

地球化学模拟是研究水-岩相互作用的有效工具,实现定量论证地质和环境过程的模型和假说,优化环境治理、能源生产方案,预测地质环境变化等目标。本书由国际上该领域主要学科带头人所著,深入浅出地介绍了热力学、反应动力学和地球化学建模的理论知识,由简到繁地阐释了化学形态-溶解度、表面络合、反应路径,逆向质量守恒、耦合反应溶质迁移等模型的原理,演示了 PHREEQC、The Geochemist's Workbench™、TOUGHREACT 等流行的模拟软件的应用。本书通过丰富的案例(二氧化碳地质封存、成岩作用、酸性矿山废水、核废料处理、尾矿和采矿废物处置、深井灌注、垃圾填埋场渗滤液污染),全方位展示了地球化学模拟的实用性。

本书可为地质、水文环境科学、水土资源管理的技术和决策人员作教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地球化学模拟理论及其应用 / 朱晨, (加) G. M. 安德森 (G. M. Anderson), 吕鹏著. —北京: 科学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-03-053048-6

I. ①地… II. ①朱…②G…③吕… III. ①地球化学--系统建模--研究 IV. ①P59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 120787 号

责任编辑: 韦 沁 韩 鹏 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 22 3/4 插页: 4

字数: 539 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

近年来,国内外地球化学建模的理论研究和应用已有了长足的发展,日趋严格的环保法规纷纷制定、油气勘探开发不断涌现的新需求进一步促进了其广泛的应用。笔者期望通过本书的撰写,推动国内地球化学建模的理论发展并推广其应用,为学生和相关研究人员提供参考。此外,许多大学开设了或拟开设与地球化学建模相关的课程,本书亦可作为国内地球化学建模课程的教材。

本书主要关注地球化学模拟在“现实世界”环境问题中的应用,旨在建立学术研究与实际环境应用这两个看似独立领域之间的桥梁,并为地球化学家、水文地质学家、工程师以及政府职能监管部门的工作者提供地球化学模拟的指导,重点涵盖的地球化学背景、地球化学模拟软件以及实地案例研究三个方面的内容希望能够成为他们的首选参考。本书广泛涉及了环境和油气藏的开发问题,且绝大多数来源于真实的案例,其中许多来自于笔者的直接经验。近十多年来,地球化学模拟本身理论并未有大的突破,但在其应用方面却有了很大的发展。化学反应动力学研究积累了大量的矿物溶解实验数据,已作为研究水岩相互作用的重要理论支撑。同时,这十几年来地下二氧化碳封存的研究和非常规油气藏的开发,拓展了地球化学模拟应用的范围,因此有必要对其应用方面的内容进行补充。

本书的第1章为绪论、第2~11章主要讲述地球化学模拟的理论,并以一些例子介绍其在环境问题中的应用;第12~15章则通过具体实例分别介绍地球化学模拟在环境科学与工程和石油地质方面的应用;第12章以模拟挪威 Sleipner 二氧化碳咸水层封存为例,介绍地球化学建模在二氧化碳地质封存中的应用;第13章以模拟共沉淀为例,介绍地球化学建模在重金属和放射性元素污染处理中的应用;第14章介绍地球化学模拟在碎屑岩成岩作用中的应用;第15章介绍地球化学建模在碳酸盐岩成岩作用中的应用。

感谢笔者的学生和博士后(胡斌、张亦伦、张思亭、张冠儒、孟立丰、向芷莹、康晋霆、王新宇)对英文文字的翻译和对图表的修改。本书所列出的程序输入脚本,可通过扫描封底二维码下载。

朱 晨

2017年5月20日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 环境问题与地球化学模拟的必要性	1
1.2 环境监管框架	8
1.3 地球化学模拟的作用	10
1.4 当前地球化学模拟在环境问题方面应用的情况介绍	12
1.5 地球化学模拟在 CO ₂ 的地质封存中的应用	13
1.6 地球化学模拟在石油地质中的应用	15
1.7 本章小结	20
第2章 模型概念	21
2.1 模型定义	21
2.2 地球化学模型的整体认识	22
2.3 地球化学模型的分类	24
2.4 模型验证及确认	29
2.5 模型实用性和局限性	30
第3章 热力学背景	32
3.1 系统与平衡	32
3.2 化学反应	34
3.3 吉布斯自由能	34
3.4 活度、逸度和化学势	36
3.5 平衡常数	41
3.6 组分与物种	44
3.7 相律	49
3.8 氧化还原反应	52
3.9 碱度	55
3.10 酸度	60
3.11 局部平衡假设	63
3.12 本章小结	67
第4章 地球化学模拟软件	68
4.1 计算机程序、数据库和模型	68
4.2 常用模拟软件简介	69
4.3 数据库	71
4.4 化学浓度单位	75
4.5 输入/输出示例	75

第5章 建立地球化学模型	84
5.1 引言	84
5.2 确定目标	84
5.3 认识地下水流系统	84
5.4 野外和实验室数据采集	84
5.5 确定建立何种模型	89
5.6 化学特征数据收集	91
5.7 选择计算机程序	91
5.8 模型建立	92
5.9 模拟结果阐释	93
5.10 模拟结果的报告和展示	94
第6章 化学形态和溶解度模拟	95
6.1 引言	95
6.2 Bear Creek 铀矿尾矿库区的模拟计算结果	95
6.3 在生物可利用性和风险评估研究中的应用	112
6.4 反应柱实验的解释	114
第7章 表面吸附模拟	118
7.1 引言	118
7.2 离子交换	119
7.3 表面络合	122
7.4 吸附反应的计算机程序	125
7.5 Oak Ridge 放射性核素的阻滞实验	130
7.6 铀矿尾矿库区放射性核素的迁移性	132
7.7 砷在冶炼厂烟道灰中的吸附作用	136
第8章 反应路径模拟	137
8.1 引言	137
8.2 碱度滴定	139
8.3 酸性矿山废水的酸度	140
8.4 pH 缓冲	143
8.5 有害废弃物的深井灌注	145
8.6 矿坑湖化学特征	150
8.7 人工回灌	153
8.8 自然背景值研究的应用	153
8.9 古海水主要化学成分的计算	154
第9章 逆向质量守恒模拟	159
9.1 引言	159
9.2 模型假设	159
9.3 亚利桑那州 Black Mesa 地下水成因	161

9.4	亚利桑那州 Pinal Creek 盆地的酸性矿山废水	166
9.5	亚利桑那州 Black Mesa 地区 ^{14}C 定年	168
9.6	评估深层含水层微生物代谢率	171
第 10 章	耦合反应溶质迁移模型	175
10.1	前言	175
10.2	多组分反应溶质迁移模型	175
10.3	基于等温式的反应迁移模型	176
10.4	简单示例	180
10.5	反应迁移中的缓冲作用	184
10.6	铀矿尾矿酸性污染羽的迁移	189
10.7	铀矿尾矿储存库的修复设计	196
10.8	总结与评述	199
第 11 章	化学反应动力学模拟	201
11.1	引言	201
11.2	基本理论	201
11.3	沉淀-溶解反应的动力学过程	206
11.4	醋酸盐分解动力学	210
11.5	溶液物种形态和生物过程	215
11.6	垃圾填埋场渗滤液进入含水层过程中的应用	217
11.7	总结	219
第 12 章	地球化学模拟在 CO_2 地质封存中的应用	220
12.1	背景	220
12.2	CO_2 的封存机制	220
12.3	地球化学模拟的应用	221
12.4	矿物反应动力学对 CO_2 迁移转化的作用	226
12.5	本章小结	248
第 13 章	地球化学模拟共沉淀	250
13.1	引言	250
13.2	铁纳米颗粒对 Pb^{2+} 的吸附和 Pb 与 Fe 的共沉淀实验的模拟	250
13.3	镭和重晶石的共沉淀	262
13.4	本章小结	264
第 14 章	地球化学模拟在碎屑岩成岩作用方面的应用实例	265
14.1	引言	265
14.2	德国北部 Rotliegendes 油气聚集带的伊利石化	267
14.3	钾长石溶解的动力学反应路径模拟	269
14.4	本章小结	295
第 15 章	地球化学模拟在碳酸盐岩成岩作用中的应用	296
15.1	引言	296

15.2 沙特加瓦尔油田白云石化的反应溶质运移模拟	297
15.3 哈萨克斯坦 Tengiz 油田热对流引起的成岩作用及其对储层质量的影响	312
15.4 本章小结	314
参考文献	316
附录 数据库的修改	339
中英文对照	345
索引	349
彩图	

第1章 绪 论

地球化学建模应用领域相当广泛,包括环境科学与工程、石油地质及石油工程等。其在环境科学与工程方面的应用主要包括高放射性核废料的处置、与矿业开发相关的环境问题、垃圾填埋场、危险废物的深井封存、人工补给地下水和二氧化碳的地质封存等。其在石油地质方面的应用主要包括碎屑岩和碳酸盐岩的成岩作用及其对储层质量的影响,如白云石化、伊利石化、自生石英的过生长、胶结物生成等。而石油工程方面的应用主要包括人工成岩作用,一采、二采、三采中的水岩反应,化学物质对油藏及注井的影响等油藏和油井管理中的应用等。其中,人工成岩作用是指通过对油藏人工注入各种流体,改变油藏的温压和化学条件进而改变油气的物理和化学性质及油藏的孔渗属性。本书将着重介绍地球化学模拟在环境科学和石油地质中的应用,并详细阐述其正在解决或者可以解决的某些重要问题。

1.1 环境问题与地球化学模拟的必要性

当前,日渐突出的环境问题使社会对地球化学模拟的需求不断增加。地球化学模拟的必要性在以下几个领域表现得十分突出。

1.1.1 高放射性核废料的处置

核能发电与核武器的生产已产生了大量的乏燃料和高放射性核废料。

目前这些废料大都分散地存放在临时储存场地,场地的条件在不断地恶化,因而迫切需寻找合适的地点进行永久性存放。1978~2010年,美国能源部应美国国会要求,对内华达州南部的尤卡山(Yucca Mountain)进行了高放射性核废料永久性存放的可行性调查(图1.1)。调查结果认为,美国内华达州沙漠中的火山凝灰岩地区适宜作为一个永久性的高放射性核废料地质储存库。其原因在于:①该地区的深层地下水水位要比核废料地质储存库位置低250~300m;②该地区人口稀少;③其年降水量不超过15cm的沙漠型气候条件能极大地限制水和水蒸气的下渗(图1.2)。

但在决定将尤卡山作为国家级永久性核废料地质储存库之前,还必须获得美国核管理委员会颁发的许可证。因此,对于该地区能否安全地存放高放射性核废料一万年以上需要进行涉及多学科的综合安全性评估。评估过程中建立了地球化学模型,用以计算因不同事件和过程而进入环境的放射性物质的类型及其浓度变化。

地球化学模拟之所以能够成为其中具有重要价值且必不可少的工具之一,在于其契合了上述调查项目的两方面特征:



图 1.1 美国计划中的唯一高放射性核废料地质储存库——内华达州南部的尤卡山
(照片来源:美国核管理委员会的 Neil Coleman)

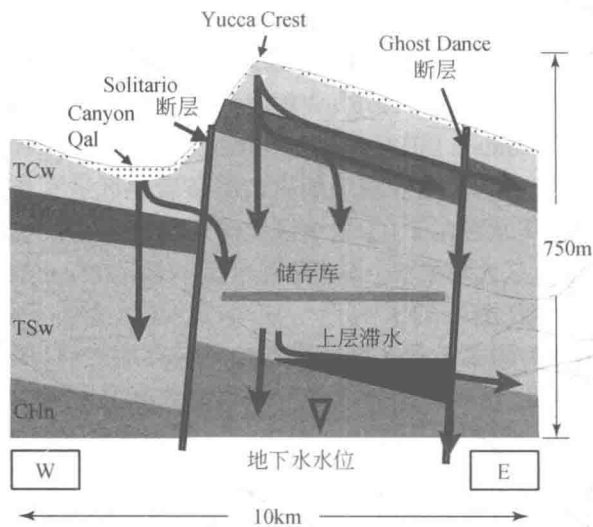


图 1.2 计划中位于厚层火山凝灰岩包气带中的储存库

TCw、PTn、TSw 和 CHn 分别代表 Tiva 峡谷凝灰岩组,其中 PTn 代表 Paintbrush 非熔结凝灰岩,TSw 代表 Topopah Springs 熔结凝灰岩,CHn 代表 Calio Hills 非熔结凝灰岩;Qal 代表第四纪冲积层。感谢美国西南研究所核废物管理分析中心的 Jim Winterle 提供此图

(1) 地球化学模拟可以模拟未来发生的事件。例如,一个存放高放射性核废料的储存库将来会发生什么?数学模型包括地球化学模型是目前能预测这类问题的唯一工具。

(2) 多种地球化学过程将会影响储存库的安全性。随着高放射性核废料的储存,该储存空间的热力学条件将发生改变而使矿物发生反应以达到新的平衡。而一旦放射性核素发生泄漏,它们将会与各种矿物发生化学反应,该过程可能会阻滞核素的迁移。

为此,美国国家实验室(National Laboratories)、美国核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)、美国西南研究院(Southwest Research Institute ®, SWRI)及美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的科学家对该储存库进行了大量的地球化学模拟研究。化学形态-溶解度及反应路径的地球化学模型已被用于解释水-岩相互作用实验(Knauss and Wolery, 1986)、研究地下水中核素的化学形态(Ogard and Kerrisk, 1984)及其地球化学演化(White and Chuma, 1987)和模拟表面吸附反应过程(Turner, 1995; Turner and Pabalan, 1999)。不仅如此,反应溶质迁移模型也被用于评估该地区的水文地质系统以及反应迁移过程等(Johnson et al., 1998; Winterle and Murphy, 1998)。以上只是大量相关研究结果的一小部分案例。

此外,地球化学模拟已被广泛用于评估其他国家的高放射性核废料储存地区的安全性。相比之下,笔者对美国高放射性核废料储存库的情况更为熟悉,因此本书中所涉及的案例主要发生在美国。

1.1.2 与矿业开发相关的环境问题

整个矿业的开发过程从最早的探矿和开发可行性研究到申请采矿许可证再到正式开发、治理、改造和闭矿等都会涉及一系列环境问题,而地球化学模拟在此一系列过程中均可以起到重要的作用。

1. 申请许可证

在采矿许可证申请阶段,必须评估其环境影响并审核相应的闭矿计划。这要求在破土动工之前就预测采矿之后的环境变化及其影响,因而尽管有时地球化学模型的预测结果尤其是其精度和有效性存在争议,但地球化学模拟的预测能力还是令其成为许可证申请过程中必不可少的工具。

地球化学模拟应用在该阶段的一个案例是矿坑湖的水化学特征和对野生动物及其栖息地的影响。尤其在采矿业发达的内华达州,大规模的露天金矿开采会形成几百个矿坑。在采矿活动停止后,这些矿坑会因地下水和地表水的注入而形成矿坑湖(图 1.3、图 1.4)。然而,这些采矿的潜在环境风险通常会在几十年后才得以显现,因此,对矿坑湖水水质及其对水生生物影响的预测都需要进行地球化学模拟,这是预测 100 年后目标水体水质的最佳方法。美国部分州政府规定,模拟工作是获得采矿许可证的重要条件之一,如内华达州政府规定,地球化学模拟的结果是决定能否获得采矿许可证的必备条件之一。

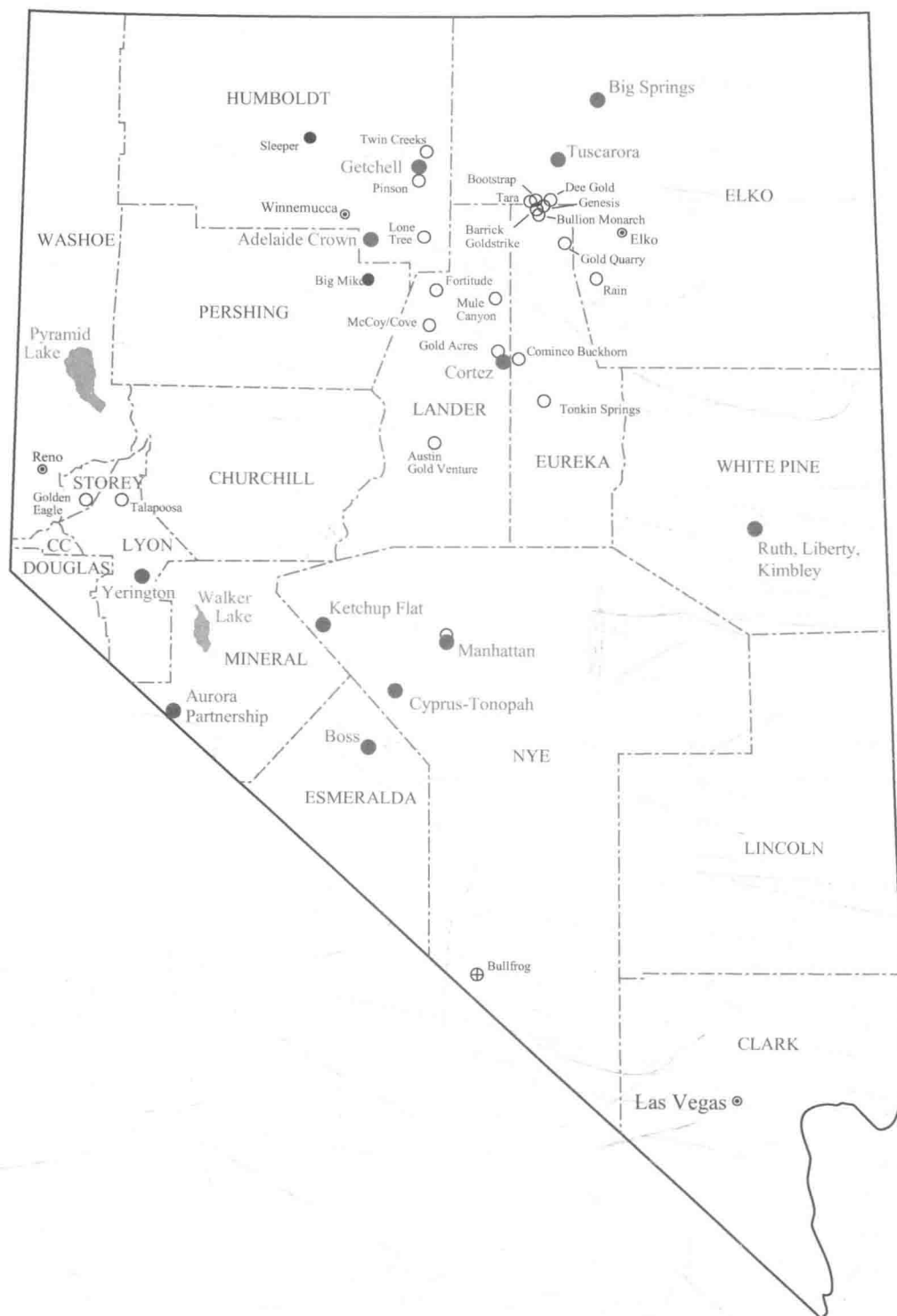


图 1.3 美国内华达州矿坑湖(Pit lakes)的分布
(图片来源: Lisa Shevenell 博士)

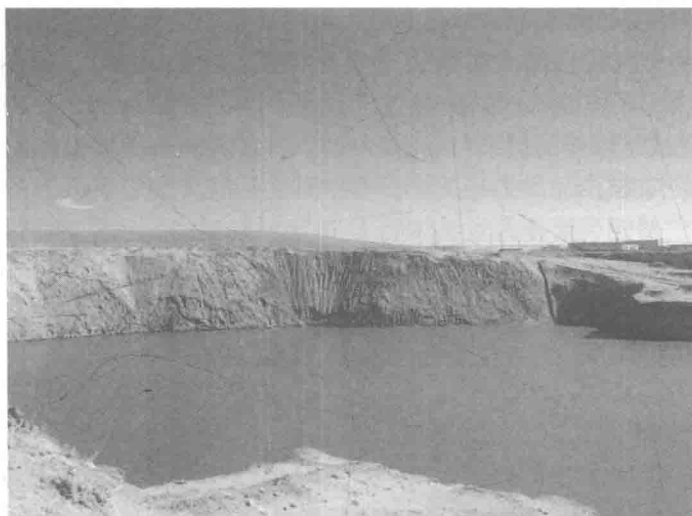


图 1.4 美国怀俄明州某个因铀矿的露天开采而形成的矿坑湖(图片来源:Melissa Pratt)

在怀俄明州的一些矿坑湖中的铀、硒和镭元素超过牲畜饮用水标准

2. 环境监测

在矿床开采阶段,必须依据相关的环境法规对采矿现场环境进行监测,该过程必须经监管机构批准,而且监测结果必须定期提交审议。在环境监测过程中,地球化学模拟已被用来预测水质恶化的情况或分析已产生的环境问题。

3. 尾矿和采矿废渣

在矿产开发过程中,矿石的提取、加工和处理过程中都将伴随着化学反应和金属逸出等。冶炼过程一般通过碾碎、化学处理和分离等流程将矿石进行提纯。随着提纯技术的不断提高,一些低品位的矿石逐渐成为矿产开发的对象,因而为得到等量的金属将会产生更多的矿渣。例如,新技术已经使开采黄金品位在 $1\text{oz}(\text{盎司})/\text{t}$ (约 $28.3\text{g}/\text{t}$) 的矿石时仍可盈利,然而这也意味着为了获得一枚普通的黄金婚戒将会产生约 3t 的矿渣。

提取金属后残留的已无经济价值的碎石和沙土即被称为尾矿。尾矿通常含有加工过程中使用的重金属和化学残留物,如硫酸和氰化物,常被填埋在尾矿池(或尾矿坑)内或回填至采矿坑道。

4. 酸性矿山废水

长期被埋藏在深部的含硫矿物,在开采后暴露地表,与大气中的氧气接触,易发生氧化反应。这些反应主要发生在矿石的处理过程,同时还发生在尾矿和矿渣在地下工地、尾矿、露天矿坑及废石堆等场所。该过程会产生大量富含有毒重金属的酸性废水,通常称为酸性矿山废水(Acid Mine Drainage, AMD)。酸性矿山废水对环境最明显的影响就是污染水体并导致水生生物的死亡。有时也使用酸性岩石废水(Acid Rock Drainage, ARD)这一名词,用以强调含硫矿的天然露头区发生的类似环境效应。

以往的矿产开发在全世界范围内遗留了大量的环境污染问题。仅在美国的 26 个州内就有 10 万 ~ 50 万个废矿,且绝大多数位于美国西部 (King, 1995)。例如,在科罗拉多州 Summitville 露天金矿,环境监管的缺失导致含氰废水泄漏并流入 Alamosa 河畔的 Wightman Fork,给整个国家造成了惨痛的损失 (King, 1995)。另在美国东部阿巴拉契亚山脉附近的几个州,高硫煤的开采污染了约 17600km 的小溪和河流并危及饮用水源。其修复所需费用估计在 320 亿 ~ 720 亿美元。据美国能源部估计,美国因铀矿加工和尾矿而污染的地下水大约为 3800 万 t。而挪威的一个经营百年的硫化铜矿已经造成了十几公里的河流中水生生物的匮乏。据估计,加拿大大约有 3.51 亿 t 的岩石废渣和 5.1 亿 t 的含硫尾矿,而治理这些相关的酸性矿坑废水问题大约需要 30 亿美元 (Feasby et al., 1991)。

1.1.3 垃圾填埋场

垃圾填埋场是指用于填埋城市固体废物(一般称为垃圾)的区域(图 1.5)。除一般生活垃圾,危险固体废物同样利用填埋法来处理。据美国国家环境保护署估计,1996 年美国每人每天产生的垃圾量大约为 2kg,而这个数字每年都在递增。绝大多数垃圾都需要埋入垃圾填埋场(图 1.6),导致美国拥有超过 3000 个正在使用的填埋场,而已关闭的填埋场的数目则更大 (USEPA, 1997)。尽管大多数新建的垃圾填埋场都配备了隔离屏障和其他安全措施以

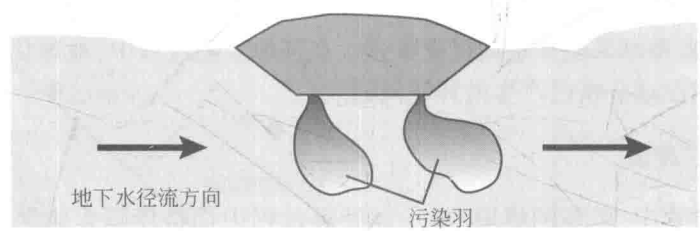


图 1.5 现代固体废物垃圾填埋场示意图

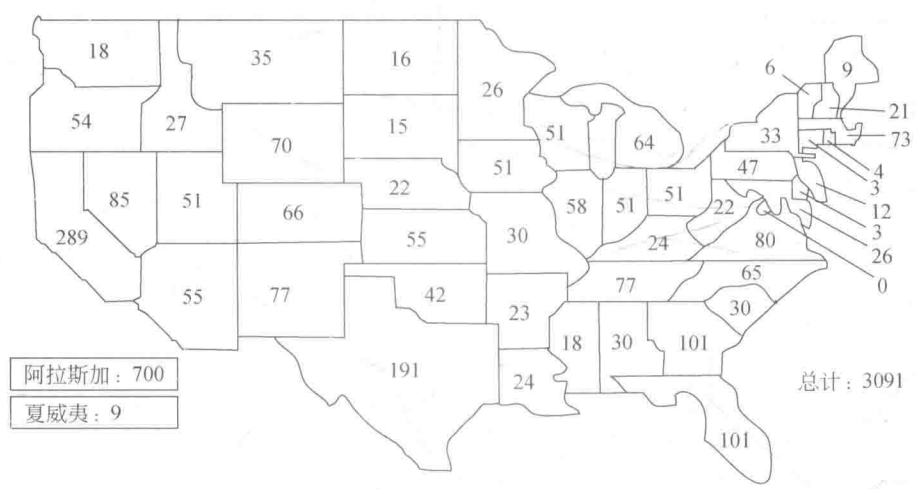


图 1.6 美国各州垃圾填埋场的数量分布 (来自美国国家环境保护署网站)

防止地下水受到污染,但是一些使用年限较长的填埋场还是会出现渗漏问题,导致重金属和有机污染物随渗滤液进入含水层系统,污染地下水,引起公众的担忧。1998年在弗吉尼亚州 Virginia Beach 的 Mt. Trashmore 填埋场附近,地下水被高浓度的砷污染引起了公众的恐慌。

利用化学形态-溶解度及表面吸附模型可以模拟垃圾填埋场中渗滤液与衬垫屏障之间的反应,并验证污染区域的治理效果。近来对渗漏污染物迁移的阻滞作用成为地球化学模拟研究的热点。需要特别指出的是,地球化学模拟已在美国国家环境保护署设立危险废物法规的过程中作出了突出贡献(USEPA,1995)。然而,由于缺乏有机物与金属离子络合物的热力学数据,地球化学模拟在填埋场环境问题上的应用受到了极大的限制。

1.1.4 危险废物的深井封存

长期以来,将危险废物注入深部地层进行封存是一种经典的危险废物处理方法。目前美国绝大多数废物注井位于墨西哥湾沿岸和五大湖地区(图 1.7)。美国仅在 1983 年就有 0.44 亿 m^3 的危险废物被注入深部地层(USEPA,1985)。这些废物流体可能是极强酸性($\text{pH}=0.03$)或极强碱性($\text{pH}=13.8$)的,且可能包含有毒有机物和重金属。由于注入的废液与所在地层的化学条件通常存在巨大差异,因而会引起剧烈的地球化学反应(USEPA,1990)。如图 1.8 所示,这些化学反应会造成地层结构的破坏、引起井喷事故和抑制微生物群落等后果。但在实际运作过程中却经常忽略这些化学反应的影响,从长远来看,这些潜在的地球化学反应应当引起重视,地球化学模拟在这个领域具有广阔的应用空间,详见 8.5 节。



图 1.7 美国深井封存场址的位置及其与沉积盆地间的关系(改自 Boulding,1990)

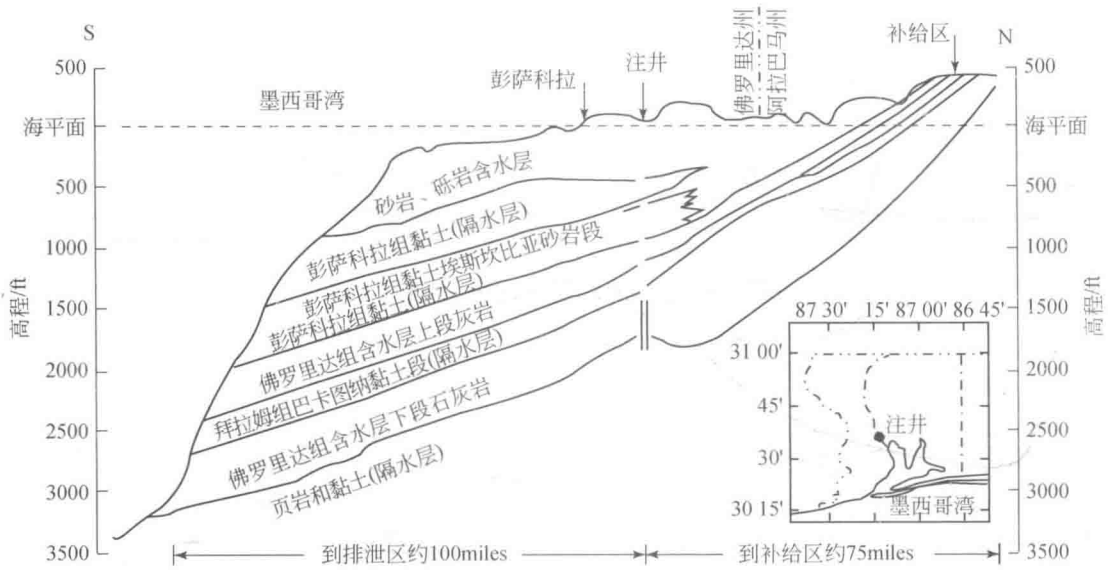


图 1.8 佛罗里达州彭萨科拉附近的 Monsanto 深井灌注设施实例

将酸性废水注入地下 1300 多英尺(400 多米)的含水石灰岩层中。观察到的现象包括石灰岩的溶解、在高温高压下废物之间的化学反应及对微生物活动的抑制(据 Boulding,1990)

1.1.5 人工补给地下水

地下水不断的开采已造成许多地下水资源的枯竭,从而引发了公众对地下水资源的减少、地面沉降及海水入侵等问题的担忧。因此出现人工回灌或者人为引导地表水进入含水层以补充枯竭的地下水的方法,以达到保护地下水的目的。据美国国家环境保护署估计,美国大约有 1695 个地下水注水井(USEPA,1999)。其补充的水源可能来自于地表水(河流),也可能采用处理过的废水。通常情况下,注入水的水质需要符合饮用水或者辅助饮用水标准。

尽管如此,两种不同化学性质的水体混合也会引起一系列的化学反应(USEPA,1999):①微生物的繁殖和降解作用;②化学氧化或者还原;③吸附作用和离子交换;④沉淀和溶解反应;⑤气体逸出。

这些化学反应可能会导致地下水补给工程的失败或引起有害化学物质活化。地球化学模拟对预测上述可能的问题非常有效,但是目前此方面的应用还远远不够。

1.2 环境监管框架

环保相关工作在大多情况下是由环保法规推动的,因此对所在国的环境立法依据的理解非常重要。下面以美国为例进行剖析。

1.2.1 《综合环境反应、赔偿和责任法》或超级基金项目(Superfund)

1980年12月11日,美国国会通过了《综合环境反应、赔偿和责任法》(*Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act*, CERCLA),并启动了危险废物的超级基金清理程序。1986年颁布的《超级基金修正案与再授权法案》对CERCLA做了大量修正并扩大了该法律的适用范围。《1990年综合预算调解法》将本应于1991年年底到期的CERCLA延长至1995年12月31日。

《综合环境反应、赔偿和责任法》授权美国联邦政府对危险废物进行应急快速处置,清理全国最危险废物源以保护公众健康和生存环境(Reish and Bearden, 1997)。该法旨在从经济上惩罚对危险废物处置不当的责任人,并赋予对责任人行为的追溯权。该法还建立了一个名为危险废物超级基金的信托基金,以应对那些无法找到责任人或责任人无力承担处理费用的情况,通过政府层面提供环境治理的财政支持。超级基金项目是美国联邦政府治理废弃的危险废物填埋场的主要措施和手段。

1.2.2 《资源保护与回收法》

《资源保护与回收法》(*Resource Conservation and Recovery Act*, RCRA)于1976年生效并于1984年加以修订。RCRA法案主要针对危险废物的处理、储存和处置(TSD)设施。该法案对危险废物进行了“从摇篮到坟墓”式的全程管理和追踪,其目的就是防范产生新的污染场址。RCRA法案中特别关注地下水水质的保护。RCRA条例还对固体废物和危险废物填埋场的设计制定了非常严格的规定。另外,该法案呼吁社会节约能源和自然资源,减少废物排放和推广环境友好型的管理模式。

1.2.3 《国家环境政策法》

1969年颁布的《国家环境政策法》(*National Environmental Policy Act*, NEPA)要求美国联邦政府的各级部门在实施任何会对环境产生显著影响的工程前,必须对环境给予足够的重视。该法案要求,在进行任何对环境有潜在破坏性的工程开发之前,必须优先开展环境影响评价且经过美国联邦政府的批准。环境影响评价可以对产生的潜在环境影响进行量化,同时权衡利弊并通过横向对比,确立最优工程方案。

1.2.4 《清洁水法》

《清洁水法》(*Clean Water Act*, CWA)是在1972年立法通过的一项美国综合型国家法案,旨在保护包括河流、湖泊、地下水和沿海地区的地表水。该法案的目的是控制水中的有毒污染物。据美国国家环境保护署估计,在过去的25年中,《清洁水法》所确立的公众健康保护