

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

Groundwater Pollution Control 地下水污染控制

主编 钱家忠

合肥工业大学出版社

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

地下水污染控制

主 编 钱家忠

副主编 许光泉 汪家权

编 委 钱家忠 许光泉 汪家权

刘 咏 武 君 胡淑恒

合肥工业大学出版社

内 容 提 要

本书综合编者多年的教学、科研实践,以地下水污染预防、控制和修复为中心,将地下水运动、地下水污染调查、模拟与修复有机结合,系统地阐述了地下水及其运动规律、地下水污染调查与评价、地下水污染物运移机理与模型、地下水污染数值模拟以及地下水污染修复等方面的基本概念、基本理论、基本模型、技术方法特点及其应用。

本书可作为环境科学与工程、地质资源与地质工程、地下水科学与工程以及水利工程等专业本科生教材,也可供相关专业研究生、高校教师、科研工作者及生产人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水污染控制/钱家忠主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2009. 8

ISBN 978-7-81093-972-0

I. 地… II. 钱… III. 地下水污染—污染控制 IV. X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 085118 号

地下水污染控制

主 编 钱家忠

责任编辑 陆向军

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2009年8月第1版
地 址	合肥市屯溪路193号	印 次	2009年8月第1次印刷
邮 编	230009	开 本	787毫米×1092毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198	印 张	15.5
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	377千字
E-mail	press@hfutpress.com.cn	印 刷	安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-81093-972-0

定价:27.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

地下水是人类生活的重要水源,近年来,地下水污染问题越发突出。地下水污染与地表水环境污染相比,具有隐蔽性、长期性、复杂性以及难治理等特点。为了有效地防治地下水环境污染问题,保障人民安全用水,地下水污染控制越来越受到社会各界的高度关注。

污染控制(pollution control)一般是指对人类在生产和生活过程中所产生的废水、废料以及化学物质等,在它们被释放到环境中之前,将其捕获或改变其形式,从而达到有效控制的目的。目前污染控制有更广泛的含义:除上述传统的含义之外,还包含两种含义:一种是指在污染没有产生之前,人类设法知道处理污染的方法,利用清洁生产技术,从源头进行污染控制即污染预防(pollution prevention),显然这种方法最经济;另外一种是指对人类在生产和生活过程中排放到环境中的污染物进行污染清除,即污染修复(pollution remediation)。地下水污染修复就是对人类生活和生产过程中造成的污染的地下水进行修复。地下水污染修复是我国水环境污染控制中一项重要内容。基于此,本书编写时,我们根据多年教学实践,以污染预防、控制和修复为中心,将污染调查、模拟与修复有机结合起来,进行组材和编辑;同时,本书还吸收了编者近年来在地下水污染模拟和防治方面的研究成果。

本书共分为六章。第1章为绪论,着重介绍地下水污染概念和地下水污染修复方法;第2章主要介绍地下水及其运动规律;第3章阐述地下水污染调查与评价;第4章为地下水污染物运移包括机理和模型;第5章陈述地下水污染数值模拟技术和应用实例;第6章着重介绍地下水污染控制的污染修复技术。为了便于学生理解所学内容、查找相关文献来源及文献内容,在每章之后,安排有思考题和参考文献;在书后附有专业英语词汇与术语。本书第1章由钱家忠、武君编写;第2章由许光泉编写;第3章由刘咏编写;第4章由钱家忠编写;第5章由汪家权、武君、胡淑恒编写;第6章第1节由武君编写,第2节由刘咏编写,第3节、第4节由胡淑恒编写;全书由钱家忠、胡淑恒统稿。

本书有关的科研工作得到了国家自然科学基金(编号:40872166,40672154)以及新世纪优秀人才计划项目(NCET-06-0541)的资助;中国矿业大学韩宝平教授、南京大学吴吉春教授、吴剑锋教授以及同济大学周念清教授对本书的编写给予了极大的鼓励和支持;单兰波博士生、马雷、王志平、周小平、张春雷、林曼利、叶良涛等研究生参加了部分文字的录入和电子图件的绘制工作,在此一并感谢!

本书内容涉及环境科学与工程、地下水科学与工程、地质资源与地质工程以及生物技术与工程等领域。书中既有经典内容,也有编者相关研究成果,我们期待在本教材的使用过程中,能得到广大师生和同行专家的批评指正,以便本教材能够不断完善,从而共同推动地下水污染控制技术的进一步发展。

编 者

2009年8月于合肥

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 地下水污染(Groundwater Contamination)	(1)
1.1.1 地下水污染的概念(Conception of Groundwater Contamination)	(1)
1.1.2 地下水中的污染物质(Contaminants of Groundwater)	(2)
1.1.3 地下水污染类型(Types of Groundwater Pollution)	(2)
1.1.4 地下水污染源及污染途径(Sources of Groundwater Contamination)	(3)
1.2 地下水污染修复(Pollution Remediation)	(6)
1.2.1 地下水污染修复概述(Introduction to Groundwater Pollution Remediation)	(6)
1.2.2 地下水污染修复技术分类(Types of Groundwater Pollution Remediation)	(6)
1.2.3 地下水污染修复的发展趋势(Tendency of Groundwater Pollution Remediation)	(8)
思考题(Questions)	(9)
参考文献(References)	(9)
第 2 章 地下水及其运动规律	(11)
2.1 概述(Introduction)	(11)
2.2 地下水的赋存(Storage of Groundwater)	(11)
2.2.1 岩石的空隙和水分(Space and Water in Rock)	(11)
2.2.2 饱和带与非饱和带(Saturated Zone and Unsaturated Zone)	(24)
2.2.3 含水层和隔水层(Aquifer and Aquiclude)	(25)
2.2.4 地下水分类(Types of Groundwater)	(26)
2.3 地下水的化学成分(Chemical Component of Groundwater)	(37)
2.3.1 地下水的化学成分特征(Chemical Characteristics of Groundwater)	(37)
2.3.2 地下水的化学成分形成作用(Formation)	(40)

2.3.3	地下水的化学分析资料的整理和分类图示(Analysis and Types)	(43)
2.4	地下水运动特征(Characteristics of Groundwater Flow)	(46)
2.4.1	地下水的补给、径流与排泄(Recharge, Run off and Discharge)	(46)
2.4.2	地下水动态与均衡(Balance and Change of Groundwater)	(55)
2.4.3	地下水运动规律(Groundwater Flow Law)	(59)
2.5	地下水运动数学模型(Maths Model for Groundwater Flow)	(78)
2.5.1	地下水运动方程(Equation for Groundwater Flow)	(78)
2.5.2	地下水数学模型的定解条件(Initial and Boundary Conditions)	(84)
2.5.3	地下水数学模型实例(Case Study)	(88)
2.5.4	地下水数学模型求解方法(Methods for Solving Maths Model)	(89)
	思考题(Questions)	(93)
	参考文献(References)	(94)
第3章	地下水污染调查与评价	(95)
3.1	地下水污染调查(Groundwater Contamination Survey)	(95)
3.1.1	地下水污染调查内容(Content of Groundwater Contamination Survey)	(95)
3.1.2	地下水污染调查方法(Survey Methods of Groundwater Contamination)	(96)
3.2	地下水污染监测(Monitoring of Groundwater Contamination)	(99)
3.2.1	监测布置(Monitoring Design)	(99)
3.2.2	监测指标与监测频率(Monitoring Index and Frequency)	(100)
3.3	样品采集(Sampling)	(100)
3.3.1	一般要求(General Demand)	(100)
3.3.2	采样准备(Sampling Preparation)	(101)
3.3.3	采样方法(Sampling Method)	(101)
3.3.4	样品保存与送检(Samples Conservation and Delivering)	(103)
3.4	样品检测(Samples Testing)	(105)
3.4.1	样品测试指标(Index of Samples Testing)	(105)
3.4.2	样品测试质量控制(Quality Control of Samples Testing)	(106)
3.5	地下水污染评价(Groundwater Contamination Assessment)	(107)
3.5.1	地下水质量评价(Groundwater Quality Assessment)	(107)
3.5.2	地下水污染评价(Groundwater Contamination Assessment)	(112)
3.6	地下水污染图件编制(Drawing Groundwater Contamination)	(112)
3.6.1	一般要求(General Demand)	(113)

3.6.2 基础图件	(113)
3.6.3 成果图件(Figures Demanded)	(113)
3.7 地下水污染调查评价成果报告编写提纲 (Outline for Report)	(114)
思考题(Questions)	(115)
参考文献(References)	(115)
第4章 地下水污染物运移	(116)
4.1 污染物运移过程中的物理、化学和生物作用(Physical, Chemical and Biological Action in the Process of Contaminant Transport)	(116)
4.1.1 渗流过程中污染物的吸附作用(Adsorption Action)	(116)
4.1.2 岩石中所含盐类的溶解作用(Solution Action)	(117)
4.1.3 放射性元素的衰变作用(Radionuclide Decay)	(119)
4.2 水动力弥散理论(Theory for Hydrodynamic Dispersion)	(120)
4.2.1 水动力弥散现象及其机理(Phenomena and Mechanism)	(120)
4.2.2 对流弥散方程及其定解条件(Advection—dispersion Equation)	(122)
4.2.3 某些简单解析解(Some Simple Analytic Solution)	(126)
4.2.4 水动力弥散系数确定(Coefficient of Hydrodynamic Dispersion)	(129)
4.3 多相流及其监测(Multiphase Flow and Monitoring)	(132)
4.3.1 基本概念(Basic Concepts)	(132)
4.3.2 轻的非水相流体的迁移(Migration of LNAPLs)	(133)
4.3.3 重的非水相流体的迁移(Migration of DNAPLs)	(138)
4.4 含水介质地下水热量运移(Heat Transport in Groundwater)	(140)
4.4.1 地下水热量运移应用概述(General Application)	(140)
4.4.2 地下水热量运移机理(Mechanism of Heat Transport in Groundwater)	(141)
4.4.3 地下水热量运移模型(Model for Heat Transport in Groundwater)	(143)
思考题(Questions)	(146)
参考文献(References)	(146)
第5章 地下水污染数值模拟	(148)
5.1 概述(Introduction)	(148)
5.2 地下水污染数值模拟法(Numerical Method)	(150)
5.2.1 数值模拟基本原理(Basic Principle)	(150)
5.2.2 数值模拟基本过程(Basic Process of Numerical Simulation)	(169)
5.3 地下水污染物运移模拟实例(Case Studies)	(171)

5.3.1 实例一(Case A)	(171)
5.3.2 实例二(Case B)	(179)
5.3.3 实例三(Case C)	(185)
思考题(Questions)	(190)
参考文献(References)	(190)
第6章 地下水污染修复技术	(192)
6.1 抽出一处理技术(Pump-and-Treat Technique)	(193)
6.1.1 概述(Introduction to the Pump-and-Treat Technique)	(193)
6.1.2 技术分析(Technique Analysis)	(194)
6.1.3 应用实例(Applied Case)	(197)
6.2 生物修复技术(Bioremediation Technique)	(200)
6.2.1 概述(Introduction to the Bioremediation)	(200)
6.2.2 技术分析(Technique Analysis)	(203)
6.2.3 应用实例(Applied Case)	(212)
6.3 反应渗透墙修复技术(Permeable Reactive Barrier Technique)	(221)
6.3.1 概述(Introduction to the Permeable Reactive Barrier)	(221)
6.3.2 技术分析(Technique Analysis)	(223)
6.3.3 应用实例(Applied Case)	(228)
6.4 其他修复技术(Others Techniques)	(229)
6.4.1 物理处理技术(Physical Technique)	(229)
6.4.2 气提处理技术(Air Stripping Technique)	(230)
6.4.3 地下水除铁锰技术(Vyredox Technique)	(231)
6.4.4 臭氧处理技术(Ozone Technique)	(232)
6.4.5 除砷技术(As Desposal Technique)	(232)
思考题(Questions)	(233)
参考文献(References)	(233)
附录 专业英语词汇与术语	(237)

第1章 绪论

1.1 地下水污染(Groundwater Contamination)

1.1.1 地下水污染的概念(Conception of Groundwater Contamination)

地下水是水环境系统的一个重要组成部分,是人类赖以生存的物质基础条件之一。地下水污染是指地下水受到人类活动的影响,从而导致地下水水质变差,以至于不再适合使用。关于地下水污染的概念,目前国内外尚无明确的定义,但是随着地下水污染的不断加剧,明确地下水污染概念,对于地下水污染研究是十分必要的。

有关英文文献中污染一词有两种词汇。一种是“pollution”,用以描述污染物质浓度超标后的污染情况;另一种是“contamination”,用以说明污染物质浓度虽然增高,但水质尚未明显恶化时的污染情况。而国外文献一般对地下水污染的划分也分为两种概念——污染和沾染(或传染)。其中污染一词是通用术语,包括作为一种污染类型的沾染在内,认为:水质在化学物质、热能或细菌影响下恶化到即使对人体健康不经常构成威胁,也对其在日常生活、市政公用、农业和工业利用方面有不利影响的程度者就是污染;而沾染(或传染)则是指水质由于化学物质或细菌污染而变坏,在居民中间造成中毒或疾病传播的情况。

我国1984年制定的《水污染防治法》中,对“水污染”定义为:“水污染是指水体因某种物质介入,而导致其物理、化学、生物及放射性等方面特征的改变,从而影响水的有效利用,危害人体健康或者破坏生态环境,造成水质恶化的现象。”

王秉忱等(1985)认为,地下水污染是整个水体污染的一部分,三水(地表水、地下水与大气降水)转化关系密切,应从水资源污染的总体观念出发阐述有关问题。基于此,对水污染所下的定义应是某些污染物质、微生物或热能以各种形式通过各种途径进入水体,使水质恶化,并影响其在国民经济建设与人民生活中正常利用,危害个人健康,破坏生态平衡,损害优美环境的现象。林年丰等(1990)的《环境水文地质学》一书中,对地下水污染的定义为:凡是在人类活动影响下,地下水水质变化朝着水质恶化方向发展的现象,统称为“地下水污染”。根据这一定义,可以理解为:不管此种现象是否使水质恶化达到影响使用的程度,只要这种现象一发生,就应该视为污染。至于在天然环境中所产生的某些组分相对富集及贫化而使水质恶化现象,应视为“天然异常”。所以,判断地下水是否污染必须具备两个条件:一是水质朝着恶化的方向发展;二是这些变化是由人类活动所引起的。

沈继方等(1995)认为在实际工作中判断地下水是否污染及其污染程度,往往比较复杂。首先需要有一个判断标准,这个标准最好是地区背景值(或本底值)。该值是指区域在未受或很少受到人类活动影响条件下,环境要素本身(在此仅指地下水)固有的化学成分和含量,它反映在自然发展过程中环境要素的物质组成和特征结构,表征一个地区环境的原有状态,但现今人类活动的影响遍及全球,未受污染的区域环境难以找到,该值很难获得,因此,背景

值只是一个相对概念。实践中常用历史水质数据或无明显污染来源的水质对照值来判断地下水是否受到污染。

综上所述,国内外学术界对水污染以及地下水污染的定义存在一些分歧,但主体含义是一致的。地下水污染一方面受人类社会经济活动影响较大;另一方面,它的污染对生态环境,尤其是生态安全包括人类生命安全产生严重威胁。因此,加强地下水污染研究,意义重大。

1.1.2 地下水中的污染物质(Contaminants of Groundwater)

引起地下水污染的物质称为地下水污染物。地下水受人类活动影响较大,其污染物质种类繁多,主要包括:合成有机化合物、碳氢化合物、无机阴阳离子、病原体、热量以及放射性物质等。这些物质中,大部分溶解于水,具有不同的溶解度,这类物质被称为溶质;但是有些有机化合物溶解度非常小,几乎不溶于水,被称为非水相。根据其密度是否大于水的密度,非水相可分为重的非水相(DNAPLs, Dense Non Aqueous Phase Liquids)和轻的非水相(LNAPLs, Light Non Aqueous Phase Liquids)。通常说的地下水污染一般是指溶解的污染物质所造成的污染,但目前,随着现代工农业的发展,非水相污染物质所引起的污染也越来越严重。溶质随地下水运移,而非水相物质和水组成二相流或多相流。

地下水中的污染物含量多少可以通过取样分析检测出来。当浓度较低时,大部分污染物质无色、无味、无臭。许多污染物质潜于地下水中,由于没有相对应的检测技术,因此,仍有一些污染物质尚未被发现。

目前,地下水中污染物浓度的检测下限在十亿分之几的水平,如果仔细检测,有些污染物质能够被量化到万亿分之几的水平。为了便于理解这一数量大小,我们可以借助于合乎透视原理的例子:地球至月球距离的万亿分之一约为0.4mm。

1.1.3 地下水污染类型(Types of Groundwater Pollution)

关于地下水污染类型的划分问题,一般根据物质成分及其对人体的影响划分为地下水细菌污染与地下水化学污染两大类。随着社会经济的发展以及人类对核能的开发利用程度加大,地下水的热污染以及地下水的放射性污染成为地下水污染的另外两种不同类型。比较而言,细菌污染、热污染以及放射性污染的时间和范围均有限;而化学污染则常常具有区域性分布特点,稳定性强,难以消除。

1. 地下水的细菌污染

地下水的细菌污染对人体健康构成严重威胁。世界上曾由于地下水细菌污染而多次爆发传染病流行事件。这种污染是指水体中出现了病原体。判断地下水是否遭到细菌污染的主要方法是大肠杆菌总数或细菌指数方法。按卫生部颁布的现行标准,1升水中大肠杆菌的数量(菌度)不超过3个或者一个大肠杆菌所占有的毫升水量(菌值)大于333时即为净水。细菌总数是指水样在相当于人体温度(37℃)下经24小时培养后,每毫升水中所含各种细菌簇的总个数。饮用水规定,细菌总数在1毫升水中不超过100个,游离性余氯在接触30分钟后不低于0.3毫克/升(对于集中式供水,管网末端水的游离性余氯还应不低于0.05毫克/升)的水称为净水。

鉴于病原体在地下水中的生存时间有限,可知细菌污染扩散面积不大,而且属于暂时性

污染。在大多数情况下,受细菌污染的含水层部位很浅,常常只是潜水受污染。平原地区地下水埋藏浅,受到污染的可能性很大。

2. 地下水的化学污染

地下水的化学污染是指地下水中出现了新的污染组分或已有的活性组分含量增大而构成污染。在地下水化学污染情况下对人体健康的影响程度可能是直接的(水中化学物质导致人体中毒或疾病)或间接的(水因污染而使气味、味道、颜色等变坏,不利于饮用)。判断水体是否遭到化学污染往往采用化学分析手段测定水中化学组分含量。当这些污染物质在含水层内的运移过程中不能自净时,就会长期存在于地下水中。地下水的化学污染给人们带来的危害是很大的。

3. 地下水的热污染

地下水热污染是指城镇工业企业或电站的冷却循环热水进入地下水而引起的污染。从20世纪60年代始,国外对热污染进行研究,做了许多工作。一般认为热水进入含水层后会形成固定的增温带,破坏了原有的水热动力平衡状态。在增温带,对地表水体有较多的研究资料。水温升高到 $27^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,会使绿苔丛生,水生植物迅速增长,水由于热污染而过分加热时,则会造成水生生物的灾难——水中缺氧使水生生物全部死亡。与地表水的热污染相比,地下水的热污染却从未被看作是个大问题,然而,由于世界性的水资源危机,地下水库的调节作用被越来越看重,因此,地下水的热污染机理、热污染后果等将会越来越受到人们的高度重视。

4. 地下水的放射性污染

地下含水层的放射性污染根据放射性核素来源不同可以分为两种不同的形式:一种是自然的形式,其放射性核素是天然来源的,如放射性矿床;另一种是人为的形式,其放射性核素是人为的,如核电厂、核武器试验的散落物,以及实验室和医院等部门使用的含有放射性同位素的物质。特别是近年来世界各国对核废料地质处置的关注,因此,放射性污染物进入地下含水层的几率日益增大。一般来说,放射性核废料的地质处置场地往往选在山区,但山区是平原区地下水的补给区,因此,地下水放射性污染将成为地下水污染的主要形式之一。

需要说明的是,上述四种污染类型有时会相伴发生。例如,由工业“三废”所造成的地下水化学污染,有时与城镇居民点、牲畜圈的生活污水导致的地下水细菌污染结合,成为两种类型污染并存的形式。此外,生活污水也可以造成持久的地下水化学污染。因为它们含有大量的在日常生活中广泛应用的表面活性物质。在工业企业地区,由于公开储存的废水废渣与大气降水渗滤溶解或存在水管泄流,固体废物以及某些原料和废水可以渗入含水层并直接污染含水层。

1.1.4 地下水污染源及污染途径(Sources of Groundwater Contamination)

1. 地下水污染源分析

引起地下水污染的物质称为地下水污染物,其来源称为污染源。按照污染源成因的不同,基本上可将污染源划分为天然污染源和人为污染源两种。根据美国国会技术评估办公室(OTA)和Fetter(1992)的分类,总共可将其分为下面六类:

(1) 排放废物的污染源

这类污染源包括化粪池、注水深井以及土地利用。

化粪池用来存放生活污水。化粪池的水来自于盥洗室、洗澡、洗碗以及洗衣用水等,当这些污水进入化粪池后,经过沉淀和厌氧分解,然后通过排放系统排放到土壤中。这一过程不仅给土壤带来大量的有机和无机污染物,同时也把含有如三氯乙烯、苯等合成有机化合物的化粪池清洁物等排放到地下,从而构成地下水污染来源。

注水深井用来将液体废物或其他液体注入地下水面以下某个区域。被注入的液体一般包括:危险废物、源自油井的盐水、雨水、市政污水、矿山废水等等。如果被注入的废水进入饮用水含水层,从而导致地下水污染。

用处理的或未经处理的市政和工业污水灌溉土地,或用污泥肥田,这样会带来大量有机污染物,也会构成地下水污染来源。

(2) 贮藏、处理与处置废物的污染源

这类污染源包括垃圾填埋场、露天垃圾堆、贮藏物贮藏地、住宅区的垃圾堆、地表污水坑、矿山开采废物、固体物料堆、坟场、动物埋藏场所、地表储藏箱、地下储藏箱、各种容器、露天火葬场、爆炸试验场以及放射性废物处理堆等。

(3) 运输过程中的污染源

这类污染源来自于运输管道渗漏以及材料的运输和运移过程。

运输管道主要包括输油管道及输气管道,一般在断面和接头处发生渗漏;另外,钢管容易产生锈蚀,由开始的锈蚀,逐渐可能发展成为管道渗漏。由于石油中含有多种有害的有机物,而且不易降解,所以常常成为地下水污染来源。

物质材料的运输和运移污染源常常是由产品和废物的运输而产生的。卡车和火车的运输通道以及由载重设备的副作用通常构成污染场所。特别是交通事故或者设备故障常引起地下水污染。

(4) 人类活动所导致的污染源

这些污染源来自于人类有计划的各种活动,主要包括农业灌溉、杀虫剂的使用、肥料的使用、农家肥的使用、高速公路上盐的使用、大气污染物的渗透以及矿山排水等。上述污染源有一个共同特点,即通过人类有计划的活动从而对地下水造成污染。需要指出的是,上述污染源通常只是地下水体的间接污染源,除非具有直接的补给通道,如钻孔、天然陷落柱等情况,一般通过包气带或地表水体,作用于地下水。

(5) 污染水体进入含水层的通道

污染水体进入含水层的通道也可以视为污染源。这类污染源主要有生产井、监测井、开采孔以及工程开挖的基坑。

生产井主要是指石油、天然气、地热能以及地下水的开采井。在开采期间,污染物被引入地下,进入含水层。监测井和勘探孔是为探矿和设计开采而设置的。这些井和钻孔使含水层存在交叉污染的危险。而开挖基坑由于开挖出表层天然的隔水保护层,从而导致地下水污染。

(6) 人类活动产生或加剧的自然污染源

这类污染源有地表水与地下水的相互作用、自然溶滤以及海水入侵等。

地表水与地下水相互作用是指地表水在一定条件下可以补给地下水,而地下水也可以

在一定的条件下补给地表水。地表水与地下水的相互作用,从而使天然污染物质相互扩散。

自然溶滤是指地下水在天然条件下,将岩石或土壤中的矿物质溶解使之进入水中,其中包含一些不为人们期望的阴阳离子。由于受人类活动影响,导致大气中发生酸沉降,酸雨的形成加剧了地下水的溶滤作用。

海水入侵也是一种由人类活动而加剧的自然污染源。天然条件下,海岸带含水层中的淡水和咸水间维持着一种平衡,它们之间有一个界面。界面以上的淡水向海洋流动。由于滨海地区社会经济的高速发展,地下淡水开采量逐年增大,而抽取淡水后,会引起潜水位下降。如果淡水抽水量超过了它的补给量,使得海岸带附近的潜水位下降到出现淡水水体的水头低于附近海水楔形体的水头时,界面就要向陆地推进,直至达到新的平衡,这种现象称为海水入侵。海水中含有大量的有毒有害物质,因此构成一种由人类活动而加剧的污染源。

2. 地下水污染入渗类型

根据地下水污染的人渗特点,可将地下水污染分为4种类型,下面简要说明。

(1) 间歇入渗型

间歇入渗型的特点是:污染物通过大气降水或灌溉水的淋滤,从污染源(固体废物或表土层)中周期性的通过包气带渗入含水层,其渗入形式多半呈非饱和状态的淋滤状渗流,或者呈短时间的饱水状态连续渗流。这种途径的污染组分是固态的,来自固体废物或土壤,因此,研究时要分析固体废物或土壤的成分,最好能取得包气带的淋滤液,才能查明污染来源。其主要污染对象为潜水。

(2) 连续入渗型

连续入渗型的特点是:污染物随污水或污染溶液连续不断地渗入含水层,其污染组分是液态的。常见的有污水积聚地(如污水池、污水渗坑、污水快速处理场和污水管道等)的渗漏。其主要污染对象是潜水。

(3) 越流型

越流型的特点是:被污染的含水层的污染物通过层间越流形式转入其他含水层。转移途径可以是天然的或是人为的。人工开采下部承压水,引起水动力条件的变化而改变越流方向,使上部已受污染潜水层中的污染物通过弱透水层转移到下部承压层。该类的研究难点是要查清越流地点及地质部位。

(4) 侧向补给型

侧向补给型的特点是:污染物通过地下水径流的形式进入含水层。各种污水或被污染的地表水,通过废水处理井或巨大岩溶通道进入含水层,并对地下径流在各含水层中迁移而形成污染带。其污染物有人为的和天然来源,污染对象是潜水或承压水。污染范围可能不是很大,但污染程度由于缺乏自然净化作用而十分严重。海水入侵是海岸区地下淡水超量开采而造成海水向陆地流动的径流型污染途径之一。

1.2 地下水污染修复(Pollution Remediation)

1.2.1 地下水污染修复概述(Introduction to Groundwater Pollution Remediation)

广义上看,地下水污染修复、地下水污染控制及地下水污染预防是人类处理污染的三种方式。地下水污染预防是指从源头上使用不至于产生污染的理想设施或环境友好材料的污染处理方式;地下水污染控制是指人类在生产、生活中产生的污染,在污染物被释放到环境之前,捕获或改变污染物结构形态,达到净化目的的污染处理方式;地下水污染修复是指人类在生产、生活中产生的污染,先释放到环境,然后再实施净化的污染处理方式。地下水污染修复代价极其昂贵。

伴随着与地下水污染有关的事件广泛的发生,污染地下水修复技术的研发已势在必行。由于很难获取评价地下水污染的环境影响所需的必要资料和对某些修复技术的应用范围知之甚少,所以在特定地区要选择出究竟哪一种修复技术最适合或者是否有必要去修复都是很困难的。正如图 1-1 所描述的那样,是否有进行修复的必要要取决于以下三种情况:第一,必须要知道污染物是否已经释放到环境中。第二,必须关注的是污染物从释放点到暴露到人群点的可能迁移路径。第三,决定要不要在某地进行地下水修复,必要条件是此地是否具备潜在的暴露人群。如果检查完污染物的迁移路径后,发现在生物圈的各个迁移终点都没有潜在的暴露人群,那也就是对人群不构成风险,则可能就要质疑修复的必要性。

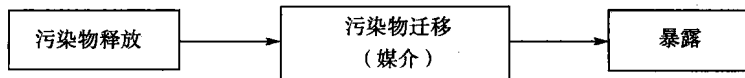


图 1-1 污染影响评价

1.2.2 地下水污染修复技术分类(Types of Groundwater Pollution Remediation)

第一类是最简单、最便宜的修复方法,即自然修复法或称被动修复法,其依赖于自然的过程作用,包括生物降解、挥发和吸附。Charbeneau 指出对于铀浸采矿地下水修复,铀矿经营者是不会提出的,而且州或联邦局也不会批准的基于自然过程修复计划。

自然修复的机制很复杂,而且重要的物理化学特征极其多变。这就使得通过自然净化来提高地下水质量改善程度是很困难的。尽管存在不确定性,但还是可以证实自然修复可以起到保护环境的目的。

第二类最简单的应用型修复技术是挖出土壤并将其运往适宜场所处理的技术。该类技术主要发展于 20 世纪 80 年代中期。由于垃圾场地有限以及处理成本高和长期负债运营等因素,尽管这是一项简单的技术,但已经被人们所抛弃。这项技术是将问题转移他处,而非像最新法规鼓励的那样,即要把污染物就地处理或控制在原地。

第三类地下水主要修复技术包括地下水的抽出一处理系统和土壤的气相抽提系统等。

总的说来,最常见的地下水修复系统是抽出一处理系统。污染的地下水通过生产井得到修复。在地表使用吹脱、活性炭吸附、生物处理或其他方法来处理废水。若存在碳氢化合物,则可能需要油水分离器。通过注射井或由表面排水处置过的废水可能会再次回到含水

层。已有经验表明对于地下水污染物的去除,抽出一处理系统效果明显。然而这种修复方法,代价高昂且耗时,所以常对整个修复所需的时间估计不足。

此外,生物处理因其适用性广,处理成本低廉等优势,近年来被广泛应用于地下水污染修复。地下水修复强化生物修复(Enhanced bioremediation)技术是利用自然环境中生息的微生物或投加的特定微生物,通过提供适宜的营养物质、电子受体及改善其他限制生物修复速度的因素,分解污染物,修复受污染的环境,目前主要分为原位生物修复和异位生物修复两种。

PRB(Permeable Reactive Barrier 缩写 PRB)技术是近年来兴起的一种地下水原位修复技术,采用一个填充有活性反应材料的被动反应区,当污染地下水通过时污染物能被降解或固定。其中,当污染物靠自然水力传输通过预先设计好的介质时,溶解的有机物、金属、核素等污染物被降解、吸附、沉淀或去除。PRB 技术作为污染地下水的原位修复技术,其主要优点是不需泵抽和地面处理系统,且反应介质消耗很慢,有几年甚至几十年的处理能力,除需长期监测外,几乎不需运行费用,能够长期有效运作,不影响生态环境,是一种很有远景的污染治理技术。

土壤气提法(也有称作真空抽提法、原位挥发法或土壤通风法)指的是通过在渗流区强迫通风将挥发性有机物驱赶出土壤的方法。这项技术类似于原位抽出一处理系统,除了有两点不同,即被去除的流体是气体和排出物可能进行处理或不处理了(使用活性炭进行空气吹脱)。土壤通风法是一种取决于化合物类型和基质多孔介质性的高效和高性价比的修复方法。

许多其他修复技术,包括原位修复技术中的浸出处理、玻璃固化、污染物分离,以及异位修复技术,如土地处理、热处理、沥青掺入法、凝固法或稳定法、化学提取法和开挖法等,也都在地下水污染修复中有一定的应用。

原位浸出是指用水(通常混有表面活性剂)淋洗或冲洗土壤,旨在将现存于土壤基质中化合物淋洗出使其进入地下水。然后在地下水通过位于淋洗位置的正下方或下游设置收集系统,污染物就会被捕获。收集到的污染物被运往地表系统进行处理和处置。

原位玻璃固化技术是将土壤通电而固化的一种热处理技术。由电流产生的热量穿过污染的土壤将其转变成一种具有化学惰性、稳定的玻璃化和水晶化产物。在玻璃固化过程中,最初存在于土壤中的化合物的主要成分同原存在于硬化土中的残余物一起挥发掉。原位玻璃固化技术最初由西北太平洋实验室研究出,旨在固定化原位高放射性废物。这是一项比较新的技术,要耗费大量的能量,所以成本相对较高。

原位隔离污染物技术指的是通过使用诸如这样装置——桩帽、帷幕灌浆、隔离水泥墙来将污染地同其他环境分开。隔离的目的是将污染物固定在某一确定区域防止污染物移往别处。有经验表明隔离污染物系统非常有效,但并没有彻底完成去除污染物的要求。

异位修复技术包括污染土壤的去除和对要处理的紧邻污染场所的受污染地下水的去除。土地处理就是这样一项可操作技术,它包括人为将废物移往地表和将废物运入上部土壤区。对污染地动用工程方法来促进废物降解和降低其迁移。

在热处理或焚烧过程中,土壤污染物从原地被去除和在接触高温后,通过挥发或其他热去除反应使有机物降低。现在有低温焚烧炉和高温焚烧炉两种。焚烧处理对去除土壤中的碳氢化合物是很有效的。然而,相应的处理费用也较高。

化学抽提或土壤冲洗方法是通过将开挖土壤用含有溶剂或表面活性剂的水冲洗来去除目标化合物。这项技术与原位淋洗处理法很相似。土壤冲洗对重金属、放射性核素和较大分子有机物的去除方面显示了良好的前景。

本书将在第6章中详细阐述抽出一处理技术、生物修复技术和PRB技术,其他技术如气提法、屏蔽法等也将在第6章中有所介绍。

1.2.3 地下水污染修复的发展趋势(Tendency of Groundwater Pollution Remediation)

为了保护地下水资源,国内外学者对污染物在土壤及地下水中迁移转化规律的研究高度重视,并开展了这方面的实验和理论研究,研究成果较多。但是由于土壤及地下水污染具有隐蔽性,以及地下溶质运移的不确定性,而且人们对溶质在地下水中的弥散机理和各种化学反应过程都了解不够。通过分析国内外对污染物在地下水中迁移转化研究的现状,发现存在的主要问题有:对污染物在非饱和—饱和土壤中迁移转化的整体模拟不多,大多数是对这一系统的分散的零碎的研究,并没有将这些过程联系起来综合研究;对污染物在非饱和带的实验和理论研究还不成熟,参数的尺度及其率定方法还需进一步研究。此外,已有的模型过分理想化,应用时难以达到精度要求。因此,对地下水污染问题的研究还有许多需要进一步探索的地方。未来,地下水污染修复应继续增强以下方面的研究:

1. 污染物在地下水中迁移机理的理论研究

各种含水介质(如孔隙、裂隙、岩溶)的存在使得地下水及溶质在其间的运动很复杂,目前与地下水污染有关的理论和模型一般是在一定的简化条件下建立起来的,如忽略各种溶质间的复杂化学反应、忽略或简化弥散的尺度效应等,所以模拟结果往往与实测值之间还有一定的差距。因此,污染物在地下水中迁移机理的理论研究、弥散“尺度效应”存在原因的分析研究工作还有待进一步开展。另外,现有模型从应用角度来衡量,过分理想化,应用时精度难以达到要求,因此还需要通过对室内、室外精密的实验研究,检验传统的对流弥散方程,动水—不动水体模型及随机传输函数模型等各种各样描述溶质运移的模型,并对它们的准确性、灵活性、通用性和可操作性做出科学的评价,更进一步地说,计算模型还有待向高效、准确、实用的方向发展。

2. 多相介质的存在对地下水中污染物迁移的影响研究

地下水环境存在固、液二相物质,这二相的溶质吸附机理和吸附参数的确定也是目前需要研究的内容之一。目前大多数的地下水溶质迁移模拟研究都是针对非吸附性溶质,如 Cl^- 、 Br^- 等离子进行的,而对吸附性溶质的水动力弥散试验研究还不多。与地表水溶质迁移不同,地下水中的溶质同时受到固、液两相的影响,在非饱和带还受到气体的影响,多相介质对溶质的吸附和反应,以及对溶质浓度分布和溶质迁移的影响都很大,因此应加强对存在的各种吸附和化学反应的机理的研究。

3. 参数确定的准确性和参数尺度效应的研究

参数估计是污染物在地下水迁移转化规律模拟计算的关键问题。目前,地下水水质模型中参数的确定大都是采用示踪实验或经验参数来实现,而室内试验结果与野外实际结果往往相差几个数量级,且野外试验限于人力和物力有限,实验的范围较小,不能真实地反映研究区域的地质参数变化情况,因此模型参数测定过程中的许多技术问题,参数确定的准确性和可靠度,以及参数的尺度效应等都有待于进一步探索。

4. 多组分溶质迁移模型的研究

在考虑污染物迁移转化的模型中,一般只考虑水流对溶质迁移的影响,把溶质在地质介质中的迁移仅仅看作随水的流动,基本不考虑水化学的作用。而污染物在地质介质中的运动除了受地下水中对流弥散作用影响外,还受到地下水多组分系统中络合作用、吸附解吸作用、溶解沉淀作用、氧化还原作用和酸碱作用的制约,仅考虑水动力因素是片面的。目前水动力迁移模型中处理固液界面发生的吸附反应都是利用经验公式来表达的,如利用 K_d 值综合了发生于固液界面的所有化学反应,却无法揭示发生在系统内部化学反应的机制,且这一类模型仅适用于以吸附解吸反应为主, K_d 值变化不大,地球化学环境较均匀的地区,而实际这种条件比较少见。因此,在模拟污染物迁移过程中,将对流弥散模型与多组分水化学模型结合起来,是非常必要的。

5. 污染物在非饱和带中的运移转化规律的研究

由于一般污染物并非直接接触地下含水层,而是经过非饱和带向下迁移的,而非饱和带由气、液、固三相组成,现有模型一般都忽略气相,对于易挥发性元素的迁移,如铵态氮,必然涉及气体在非饱和带中的运移问题。另外,研究非饱和带溶质运移时应考虑不流动水的影响,特别在溶质为核素或有毒有害物质时,该研究可以降低因预测不精确而带来的负面效应,但目前不流动水的范围划分还比较模糊,在建立模型时,对于实验条件及方程求解的假设条件过多,不能反映整个非饱和带的共性,尤其是非饱和带中影响水文地球化学和动力学作用的因素很多,污染物在非饱和带运移时,还会发生各种复杂的物理、化学和生物反应,导致各种物质浓度发生变化,因此对污染物在非饱和带的迁移机理研究则应进一步加强,并将非饱和带与饱和带联系起来,建立更为合理的整体模型。

6. 随机方法研究

随机模型在模拟多孔介质地下水流及污染物运移方面在国外发展迅速,在国内基本上还是空白。近二三十年来,由于一些国家对高放射性核废料进行地质处置的关注,部分学者对基岩裂隙介质地下水流及溶质运移模型研究取得了重要突破。但这方面研究用于解决实际问题,成功解决的还很少。因此要进一步加强随机模型的理论研究和实践应用。

思考题 (Questions)

1. 什么是地下水污染? 哪些物质可污染地下水? 地下水污染途径有哪些?
2. 地下水污染如何分类? 怎样防治?
3. 地下水污染修复常用技术有哪些?
4. 污染的地下水如何进行修复?
5. 地下水污染修复主要研究方向有哪些?

参考文献 (References)

- [1] 王秉忱,杨天行,王保金等. 地下水污染地下水水质模拟方法[M]. 北京:北京师范大学出版社,1985
- [2] 朱学愚,钱孝星. 地下水水文学[M]. 北京:中国环境科学出版社,2005
- [3] 王焰新. 地下水污染与防治[M]. 北京:高等教育出版社,2007
- [4] 林年丰,李昌静,田春生等. 环境水文地质学[M]. 北京:地质出版社,1990
- [5] 沈继方,高云福. 地下水与环境[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1995. 10