

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

地下水污染与防治

Groundwater Contamination

王焰新 主编

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

地下水污染与防治

Groundwater Contamination

王焰新 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

地下水污染与防治是在社会经济可持续发展需求的驱动下,水文地质学与环境科学交叉形成的新的学科分支,并逐渐成为水资源-环境保护基础研究和高新技术开发的重要领域。本书在系统总结国内外研究现状的基础上,综合本书创作集体多年的教学、科研实践,从污染物水文地质学基础,污染场地调查,地下水污染的评价、模拟与预测和地下水污染防治四个方面较全面、系统地阐述了该学科领域的基本概念、基本理论、基本模型和技术方法。

本书可作为环境科学与工程、水文学与水资源、土木工程、地质工程、地下水科学与工程、环境管理等专业的研究生教材,也可供科研及相关人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水污染与防治 / 王焰新主编. —北京:高等教育出版社,2007.1

ISBN 978-7-04-020462-9

I. 地... II. 王... III. 地下水污染-污染防治-研究生-教材 IV. X523.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第138032号

策划编辑 陈文 责任编辑 董淑静 封面设计 于文燕
责任绘图 黄建英 版式设计 史新薇 责任校对 俞声佳
责任印制 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
			http://www.landaco.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2007年1月第1版
印 张	24.75	印 次	2007年1月第1次印刷
字 数	420 000	定 价	31.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20462-00

前 言

地下水污染与防治属跨学科研究领域,其主体学科是水文地质学,即研究地下水的科学。自其诞生以来,水文地质学的发展目标始终定位于为人类社会进步和经济发展服务,同时为理解地球内部及其外层空间水的循环、形成、演化和与此相关的各种地质作用提供科学数据、理论模型和模拟技术,因此,水文地质学逐渐成为地球科学的基础、骨干学科,在地球科学服务社会方面发挥着举足轻重的作用。近30年来,水文地质研究与人类日益关注的水污染和生态环境问题紧密结合,使水文地质学获得了更大、更持续的发展空间,因此在环境科学与工程学科体系中也赢得了基础、骨干学科的地位。

地下水是地球内部及其外层空间水循环的产物,同时,地下水又直接参与地球内部及其外层空间物质循环和能量循环,是地球系统中最活跃的因子。地下水是重要的环境要素,具有资源功能、供水功能和维护生态功能。地下水的温度较高时,可作为地热资源开发,如我国的羊八井高温地热田;含有有益人体健康的组分时,可作为矿泉水资源开发,如我国的五大连池碳酸泉;含有工业元素时,则可作为工业矿水开发,如四川盆地的地下卤水。地下水污染问题主要与地下水的供水功能有关。地下水是弥足珍贵的淡水资源,地下水资源量约占全球淡水资源量的30%。我国地下水资源量仅占全国水资源总量的31%,却维持全国近70%的人口饮用和40%的农田灌溉,可见其在保证居民生活用水、社会经济发展和生态环境平衡等方面所起到的不可替代的作用。地下水维护生态的功能是近年来才引起高度关注的。地下水是生态系统的重要组成部分,是维持水系统良性循环的重要保证。由于过度开采地下水,已经引发了一系列环境问题,如我国河北、天津、上海、苏南、太原、西安等地出现的地面沉降问题;分布在我国近20个省、市、自治区的地面塌陷问题;沿海城市出现的海水入侵问题;西北和华北地区出现的河水断流、土地沙化、植被退化、湖泊萎缩等问题。

近几十年来,工业化和都市化进程带来了世界范围内的地下水水量衰竭和水质恶化,从中检测出的不同元素及其化合物的浓度,对于天然条件下形成的地下水而言是罕见的。地下水污染对于人类社会可持续发展的危害已经引起各国政府和公众的广泛关注。

我国是一个缺水国家,巨大的人口压力加剧了水资源短缺的严峻形势。而我国一些地区的地下水天然水质恶劣,水中某些元素含量过高或过低引发的氟中毒、砷中毒、甲状腺肿大、克山病等地方病,正严重制约着这些地区的社会经济发展,因而寻找合格饮用水源、改善水质是十分迫切的任务。而近几十年来,人类活动造成了大面积的地下水污染,已经在我国地下水中检测出各种持久性有机污染物,重金属污染物,氮、硫、磷污染物,使得我国“水质型”缺水形势日益严峻。水污染导致许多城市供水困难,严重危害人民身体健康。开展地下水污染及其防治技术研究,已经成为我国水资源-环境保护领域基础研究和高新技术研究的当务之急。

国际水文地质界自20世纪80年代以来,把研究的重点从地下水水资源评价与管理转移到地下水污染治理上来。传统地下水环境修复技术治理受污染地下水是基于这样一个概念:如果从受污染场地抽取足够的水,污染物最终可以被去除。这些传统技术被称为抽出-处理系统(pump-and-treat)。随着受污染场地中污染消除工作的进行,人们发现,传统修复技术已经越来越不能满足要求。在修复污染场地时,要求研究和应用新的技术。近20年来,各种替代技术如雨后春笋,得到迅猛发展。

由于地下水修复技术的快速进步,为环境科学和水文地质基础研究提出了全新的研究课题,并推动许多新的学科分支的形成,如环境有机水文地球化学、地质微生物学(geomicrobiology)等。

主要由于经济发展水平和与此相应的社会需求的差距,我国的地下水污染与防治研究仍十分薄弱。为了满足教学的需要,同时也为了让广大环境科学和水文地质工作者了解这些新进展,我们对国内外研究现状做了较全面的调研,并结合近年来我们承担完成的相关科研项目成果,编写了这本教材。本书被国务院学位委员会推荐为研究生教学用书。

全书共十三章,分别从污染水文地质学基础(第一章至第三章),污染场地调查(第四章至第六章),地下水污染的评价、模拟与预测(第七章至第十章),地下水污染防治(第十一章至第十三章)四个方面,试图循着地下水污染研究的主线,较全面、系统地反映该学科领域的基本概念、基本理论、基本模型和技术方法。各部分内容既避免重复,又相互呼应,力求形成完整的学术构架。具体写作分工如下:前言、第四章、第十二章由王焰新执笔;第一章由蔡鹤生、刘慧执笔;第二章由蔡鹤生、马腾执笔;第三章、第六章、第九章由李义连执笔;第五章由徐义贤执笔;第七章由周爱国执笔;第八章由许永胜执笔;第十章由马腾、李海龙执笔;第十一章由郭华明、马腾执笔。第十三章由王焰新、李义连、鲍建国执笔。马瑞、苏春

利、周俊、胥思勤、郭清海、郭永彬、梁震、甘义群、闫春森、杜斌等研究生承担了大量外文资料的翻译和资料整理、编排工作,沈仲智、蔡晓斌参加了部分编排工作。各章初稿完成后,由王焰新统稿,马腾、蔡鹤生协助完成统稿工作。

感谢加拿大滑铁卢大学的 Robert W Gillham 教授, Eric Reardon 教授, 美国约翰霍普金斯大学的 Edward Bouwer 教授和 Lawrence Berkeley 国家实验室的 Chin-fu Tsang 博士为本书提供部分文献资料和长期科研经验。姚爱国教授就本书有关钻探技术方面的内容给予了指导和帮助。2002 年本教材以校内教材形式在中国地质大学(武汉)试用以来,任课教师和同学们提出了许多宝贵的批评和意见;由林学钰院士,沈照理、邓南圣、吕锡武教授和王家源高工组成的教材评审组对修改稿提出了诸多建设性的意见和修改,谨致谢忱!

本教材有关的科研工作得到了国家自然科学基金(重点项目 49832005, 国家杰出青年科学基金 40425001, 面上项目 40402021 等)、科技部政府间国际合作项目(2004DFB01600)和教育部优秀青年教师教学科研奖励计划的资助。中国地质大学(武汉)研究生课程教材建设基金对教材编写、评审工作给予了经费支持。

我们期待在本教材的使用过程中,能得到广大师生、专家学者和读者的批评指正,以便本教材能够不断完善,为推动我国环境科学与工程、地下水科学与工程的教学、科研事业发挥应有的作用。

编 者

2006 年 5 月 28 日

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一篇 污染水文地质学基础

第一章 基本概念	1
第一节 地下水污染的概念	1
第二节 地下水污染源特征	2
第三节 地下水中的重要污染物	7
第四节 地下水污染的特点与途径	14
思考题	18
主要参考文献	18
第二章 污染物在地下水系统中的运移	19
第一节 地下水系统的基本特征	19
第二节 污染物在地下水系统中运移的物理动力作用	26
第三节 污染物在地下水系统中运移的其他作用	29
思考题	32
主要参考文献	33
第三章 污染物经历的水文地球化学作用	34
第一节 溶解与沉淀作用	34
第二节 氧化还原作用	48
第三节 吸附作用	52
思考题	63
主要参考文献	63

第二篇 污染场地调查

第四章 污染场地水文地质调查	65
第一节 初步场地勘察及初始评估	66
第二节 初步野外调查	69
第三节 详细场地调查	73
第四节 野外试验与室内实验	84
第五节 调查工作的总结及报告的编写	93
思考题	93

主要参考文献	94
第五章 地球物理调查	95
第一节 概论	95
第二节 探地雷达	100
第三节 电法和电磁法	108
第四节 地震法	118
第五节 测井和井中物探	122
第六节 实例——San Manuel 斑岩铜矿铜提取液监测	129
思考题	130
主要参考文献	131
第六章 水化学调查	132
第一节 污染源与污染途径的调查	132
第二节 调查范围与水化学监测网设计	133
第三节 地下水样采集与保存	135
第四节 现场分析与监测	138
第五节 地下水化学数据分析	140
思考题	141
主要参考文献	141
第三篇 地下水污染的评价、模拟与预测	
第七章 地下水污染评价方法	142
第一节 概述	142
第二节 确定权重的方法	146
第三节 评价方法	155
第四节 应用实例——黄石市地下水污染评价	171
思考题	176
主要参考文献	176
第八章 环境风险评价	178
第一节 人类健康风险评价的基本要素	179
第二节 危害识别	180
第三节 接触方式评价	181
第四节 毒性评价	187
第五节 风险定量综合评价	193
思考题	205
主要参考文献	205

第九章 水文地球化学模拟	207
第一节 概述	207
第二节 模拟基本概念	208
第三节 地球化学源程序	211
第四节 PHREEQC	214
思考题	231
主要参考文献	231
第十章 污染物运移数值模拟与预测	233
第一节 概述	233
第二节 水动力弥散系统及其定解条件	235
第三节 污染物运移模型的离散化方法	243
第四节 线性代数方程组的解法	263
思考题	264
主要参考文献	265
第四篇 地下水污染防治	
第十一章 地下水脆弱性评价与地下水保护	266
第一节 基本概念	266
第二节 DRASTIC 模型	267
第三节 基于 GIS 的脆弱性分区	275
第四节 地下水污染防治区划与环境影响评价	277
思考题	286
主要参考文献	287
第十二章 污染物自然衰减作用	288
第一节 概述	288
第二节 自然衰减作用的非生物过程	294
第三节 内在生物修复	307
思考题	322
主要参考文献	322
第十三章 地下水环境修复技术	323
第一节 概述	323
第二节 水力学方法	327
第三节 污染地下水的抽出-处理技术	331
第四节 反应性渗透墙技术	356
第五节 原位化学氧化技术	364

第六节 电动力学修复技术·····	366
第七节 真空增强回收技术·····	375
第八节 表面活性剂增溶的 DNAPL 污染含水层修复技术·····	377
思考题·····	382
主要参考文献·····	382

第一篇 污染水文地质学基础

第一章 基本概念

第一节 地下水污染的概念

在天然地质环境及人类活动影响下,地下水中的某些组分可能产生相对富集或相对贫化,都可能产生不合格的水质。在漫长的地质历史中形成的地下水水质不合格现象是无法预防的;而在人类活动影响下引起的地下水水质不合格现象是在相对较短的人类历史中形成的,只要查清其原因及途径,采取相应措施,是可以防止的。因此,把上述两种原因所产生的现象从术语及含义上加以区别,从科学严谨性及实用性上都更可取些。

在人类活动的影响下,地下水某些组分浓度的变化总是由小到大的量变过程,在其浓度尚未超标之前,实际污染已经产生。因此,把浓度变化超标以后才视为污染,实际上是不科学的,而且也失去了预防的意义。当然,在判别地下水是否污染时,应该参考水质标准,但其目的并不是把它作为地下水污染的标准,而是根据它判别地下水水质是否朝着恶化的方向发展。如朝着恶化方向发展,则视为“地下水污染”,反之则不然。

因此,地下水污染的定义应该是:凡是在人类活动的影响下,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”。不管此种现象是否使水质恶化达到影响其使用的程度,只要这种现象一发生,就应称为污染。至于在天然地质环境中所产生的地下水某些组分相对富集及贫化而使水质不合格的现象,不应视为污染,而应称为“地质成因异常”。所以,判别地下水是否污染必须具备两个条件:第一,水质朝着恶化的方面发展;第二,这种变化是人类活动引起的。

当然,在实际工作中要判别地下水是否污染及其污染程度,往往是比较复杂的。首先要有一个判别标准,这个标准最好是地区背景值(或称本底值),但这个值通常很难获得。所以,有时也用历史水质数据,或用无明显污染来源的水质对照值来判别地下水是否受到污染。

第二节 地下水污染源特征

引起地下水污染的各种物质的来源称为地下水污染源。污染源的种类繁多,分类方法各异。

按污染源的形成原因可以分为自然污染源和人为污染源(见表1-1)。

表 1-1 按造成地下水污染的原因分类表(据刘兆昌,1991 修改)

分类名称	主要原因
自然污染源	海水、咸水、含盐量高及水质差的其他含水层的地下水进入开采层,大气降水
人为污染源	城市液体废物:生活污水,工业废水,地表径流 城市固体废物:生活垃圾,工业固体废物,污水处理厂、排水管道及地表水体的污泥 农业活动:污水灌溉,施用农药,化肥及农家肥 矿业活动:矿坑排水,尾矿淋滤液,矿石选洗

按产生污染物的行业(部门)或活动可划分为工业污染源、农业污染源、生活污染源及区域性水体污染源。这种分类方法便于掌握地下水污染的特征。

按污染源的空间分布特征可分为点状污染源、带状污染源和面状污染源。这种分类方法便于评价、预测地下水污染的范围,以便采取相应的防治措施。

按污染源发生污染作用的时间动态特征可分为连续性污染源、间断性污染源和瞬时性(偶然性)污染源。这种分类方法对评价和预测污染物在地下水中的运移是必要的。

下面仅讨论按产生污染物的行业(部门)或活动划分的各种污染源的特征。

一、工业污染源

工业污染源是地下水的主要污染来源,特别是其中未经处理的污水

和固体废物的淋滤液,直接渗入地下水中,会对地下水造成严重污染。

工业污染源可以再细分为三类:居首位的是在生产产品和矿业开发过程中所产生的废水、废气和废渣,俗称“三废”,其数量大,危害严重;其次是储存装置和输运管道的渗漏,这往往是一种连续性污染源,经常不易被发现;第三种是由于事故而产生的偶然性污染源。

(一) 工业“三废”

当前,造成我国地下水污染的工业“三废”,主要来源于各工业部门所属的工厂、采矿及交通运输等活动。工业“三废”包含的各种污染物与工业生产活动的特点密切相关,不同的工业性质、工艺流程、管理水平、处理程度,其排放的污染物种类和浓度亦有较大的差别,对地下水产生的影响亦各不相同(见表1-2)。

表1-2 工业污染源分类表(据刘兆昌,1991修改)

工业部门	污染源	主要污染物		
		气体	液体	固体
动力工业	火力发电 核电站	粉尘,SO ₂ ,NO _x , CO 放射性尘	冷却系统排出的热水 放射性废水	粉煤灰 核废料
冶金工业	黑色冶金:选矿、烧结、炼焦、炼铁、炼钢、轧钢等 有色金属冶炼:选矿、烧结、冶炼、电解、精炼等	粉尘,SO ₂ ,CO, CO ₂ ,H ₂ S及重金属 粉尘,SO ₂ ,CO, NO _x 及重金属Cu, Pb,Zn,Hg,Cd,As 等烟尘	酚、氰、多环芳烃类化合物、冷却水、酸性洗涤水 含重金属Cu, Pb,Zn,Hg,Cd,As 的废水、酸性废水、冷却水	矿石渣、炼钢废渣 冶炼废渣
化学工业	化学肥料、有机和无机化工、化学纤维、合成橡胶、塑料、油漆、农药、医药等生产	CO, H ₂ S, NO _x , SO ₂ , F 等	各种盐类, Hg, As, Cd, 酚, 氰化物, 苯类, 醛类, 醇类, 油类, 多环芳烃化合物等	
石油化工工业	炼油、蒸馏、裂解、催化等工艺以及合成有机化学产品等的生产	石油气, H ₂ S, 烯烃, 烷烃, 苯类, 醛, 酮等各种有机气体	油类、酚类及各种有机物等	

续表

工业部门	污染源	主要污染物		
		气体	液体	固体
纺织印染工业	棉纺、毛纺、丝纺、针织印染等		染料、酸、碱、硫化物、各种纤维状悬浮物	
制革工业	皮革、毛发的鞣制		含 Cr, S, NaCl, 硫酸, 有机物等	纤维废渣, Cr 渣
采矿工业	矿山剥离和掘进、采矿、选矿等生产		选矿水及矿坑排水, 含大量悬浮物及重金属废水	废矿石及碎石
造纸工业	纸浆、造纸的生产	烟尘, 硫酸, H ₂ S	碱、木质素、酸、悬浮物	
食品加工工业	油类、肉类、乳制品、水产、水果、酿造等加工生产		营养元素有机物、微生物病原菌、病毒等	
机械制造工业	农机、交通工具及设备制造和修理、锻压及铸件、工业设备、金属制品加工制造	烟尘, SO ₂	含酸废水, 电镀废水, Cr, Cd, 油类	金属加工碎屑
电子及仪器、仪表工业	电子元件、电讯器材、仪器仪表制造等	少量有害气体, Hg, 氰化物, 铬酸	含重金属废水、电镀废水、酸等	
建材工业	石棉、玻璃、耐火材料、烧窑业及各种建筑材料加工	粉尘, SO ₂ , CO	悬浮物	炉渣
交通运输		CO, NO _x , 乙烯, 芳香族碳氢化合物		

1. 工业废水

工业废水是天然水体最主要的污染源之一,它们种类繁多、排放量大、所含污染物组成复杂。它们的毒性和危害较严重,且难于处理,不容易净化。

为了我国工业的可持续发展,国家各级主管部门已加大了管理的力度,采取了许多行之有效的对策和措施。但从整体看来,水污染仍呈恶化趋势,工业废水正是最重要的污染源。

2. 工业废气

一个大型工厂每天排放的废气量可达 10 万 m^3 以上,各类车辆亦排出各种废气,废气中所含各种污染物随着降雨、降雪落在地表,进而渗入地下,污染土壤和地下水。

3. 工业废渣

工业废渣及污水处理厂的污泥中都含有多种有毒有害污染物,若露天堆放或填埋,都会由于受到雨水淋滤而渗入地下水中。工业废渣成分相对简单,主要与生产性质有关,如采矿业的尾矿及冶炼废渣中主要的污染物为重金属。污水处理厂的污泥属于危险废物,污水中含有的重金属与有机污染物都会在污泥中聚积,从而使污泥中污染物成分复杂,且其含量一般高于污水。

(二) 储存装置和输运管道的渗漏

储存罐或池子,常用来储存化学物品、石油、污水,特别是油罐、油库及地下油库等,其渗漏与流失常常是污染地下水的重要污染源。渗漏可能是长期不被人发现的连续性污染源。但是,较多的实践表明,渗漏的管道和储存装置比较常见。如山西某农药厂管道的渗漏,使大量的三氯乙醛进入饮用的含水层中,迫使水源地报废。目前虽修复了管道,切断了污染源,但已进入含水层的三氯乙醛在对流弥散作用下不断扩大污染范围,尽管污染物浓度有所下降,但仍达 4 mg/L 。

(三) 事故类污染源

事故是偶然性的污染源,因此,往往没有防备,造成的污染就比较严重。例如,储罐爆炸造成的危险品突发性大量泄漏,输送石油的管道破裂以及江河湖海上的油船事故等造成的漏油,泄漏的污染物首先污染土壤及地表水,进而污染地下水。例如,2005年1月26日,美国肯塔基州的一条输油管道发生破裂,22万多升原油从裂缝溢出。由于管道距肯塔基河岸仅 17 m ,原油全都流入河道内,并形成了 20 km 的浮油污染带,浮油蔓延到了与肯塔基河交汇的俄亥俄河,威胁到饮用水源。泄漏的石油污染物还会随地表水的补给和雨水的渗流进一步污染地

下水。

二、农业污染源

农业污染源有牲畜和禽类的粪便、农药、化肥以及农灌引来的污水等,这些都会随下渗水流污染土壤和地下水。

1. 农药

农药是用来控制、扑灭或减轻病虫害的物质,包括杀虫剂、杀菌剂和除草剂等。与地下水污染有关的三大重要杀虫剂是有机氯(滴滴涕和六六六)、有机磷(1605,1059,苯硫磷和马拉硫磷)以及氨基甲酸酯。有机氯的特点是化学性质稳定,短期内不易分解,易溶于脂肪,在脂肪内蓄积,它是目前造成地下水污染的主要农药。有机磷的特点是较活跃、能水解、残留性小,在动植物中不易蓄积。氨基甲酸酯是一种较新的物质,一般属于低残留的农药。上述农药对人体都有毒性。

从地下水污染角度看,大多数除草剂都是中低浓度时对植物有毒性,在高浓度时则对人类和牲畜产生毒性。农药的细粒、喷剂和团粒施用于农田,经土壤向地下水渗透。

2. 化肥

化肥有氮肥、磷肥和钾肥。当化肥淋滤到地下水时,就成了严重的污染物,其中氮肥是引起地下水污染的主要物质。

3. 动物废物

动物废物是指与畜牧业有关的各种废物,包括动物粪便、垫草、洗涤剂、倒掉的饲料和丢弃的动物尸体。动物废物中含有大量的各种细菌和病毒,同时含有大量的氮,因此,可以引起地下水污染。

4. 植物残余物

植物残余物包括大田或场地上的农作物残余物、草场中的残余物以及森林中的伐木碎片等,这些残余物的需氧特性对地下水水质是一种危害。

5. 污水灌溉

目前我国城市污水回用于农田灌溉的比例很高,其中约 50% ~ 60% 为工业废水,其余为生活污水。因废水中含有多种有毒有害物质,尤其是重金属与持久性有机污染物(POPs),它们会在土壤中累积并向下游移,从而对土壤及地下水造成较严重的污染。

三、生活污染源

随着人口的增长和生活水平的提高,居民排放的生活污水量逐渐增