



全国高等院校环境科学与工程统编教材

地下水污染控制

DIXIASHUI WURAN KONGZHI

郑西来 主编

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

地下水污染控制

主 编 郑西来
副主编 韩志勇 于玲红 陈余道
参 编 李 涛

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

地下水污染控制/郑西来 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年7月
ISBN 978-7-5609-5355-7

I. 地… II. 郑… III. 地下水污染-污染控制-高等学校-教材 IV. X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084133 号

地下水污染控制

郑西来 主编

责任编辑:熊彦

封面设计:潘群

责任校对:汪世红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:通山金地印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:14

字数:263 000

版次:2009年7月第1版

印次:2009年7月第1次印刷

定价:25.00元

ISBN 978-7-5609-5355-7/X·19

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

地下水污染控制是水文地质学与环境工程交叉形成的一门新兴分支学科,已经逐渐成为环境工程、岩土工程和水文水资源的重要研究领域。本书在系统总结国内外最新研究成果的基础上,也吸收了编写者多年的教学和研究成果。全书分地下水污染概论、地下水污染场地调查、地下水污染评价、地下水污染原位治理技术 4 篇,具体包括地下水系统的基本特征、地下水污染源与途径、污染场地水文地质调查、地下水污染调查、地下水污染现状评价、地下水脆弱性评价、地下水环境影响评价、地下水污染的抽出-处理方法、渗透性反应墙技术、气相抽提技术、生物通风技术、原位曝气技术共 12 章,内容突出了教材的系统性、完整性和新颖性,特别是全面介绍了地下水污染原位治理的新技术和新方法。

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、地下水科学与工程等专业的本科教材,也可供研究生、科研人员和工程技术人员学习和参考。

全国高等院校环境科学与工程统编教材 编写指导委员会

(按姓氏拼音排序)

- 陈亮 东华大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
韩宝平 中国矿业大学教授,2006—2010 环境科学类专业教学指导分委员会委员
胡筱敏 东北大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
李光浩 大连民族学院教授,2006—2010 环境科学类专业教学指导分委员会委员
刘勇弟 华东理工大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
刘云国 湖南大学教授,2006—2010 环境科学类专业教学指导分委员会委员
陆晓华 华中科技大学教授,2001—2005 环境科学类专业教学指导分委员会委员
吕锡武 东南大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
王成端 西南科技大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
夏北成 中山大学教授,2006—2010 环境科学类专业教学指导分委员会委员
严重玲 厦门大学教授,2006—2010 环境科学类专业教学指导分委员会委员
赵毅 华北电力大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
郑西来 中国海洋大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员
周敬宣 华中科技大学教授,2006—2010 环境工程专业教学指导分委员会委员

作者所在院校

南开大学	东华大学	西安科技大学
湖南大学	中国人民大学	长安大学
武汉大学	北京交通大学	中国石油大学(华东)
厦门大学	北京理工大学	山东师范大学
中山大学	北京科技大学	青岛农业大学
重庆大学	北京建筑工程学院	山东农业大学
中国矿业大学	天津工业大学	聊城大学
华中科技大学	天津科技大学	泰山医学院
中国地质大学	天津理工大学	大连民族学院
四川大学	西北工业大学	东北大学
华东理工大学	西北大学	江苏大学
中国海洋大学	西安理工大学	江苏工业学院
东南大学	西安工程大学	扬州大学

中南大学
长沙理工大学
南华大学
华中师范大学
华中农业大学
武汉理工大学
中南民族大学
湖北大学
长江大学
江汉大学
福建师范大学
西南交通大学
成都理工大学
成都信息工程学院
华东交通大学
南昌大学

景德镇陶瓷学院
长春工业大学
东北农业大学
哈尔滨理工大学
河南大学
河南工业大学
河南理工大学
河南农业大学
湖南科技大学
洛阳理工学院
河南城建学院
韶关学院
郑州大学
郑州轻工业学院
河北大学
河北理工大学

华北电力大学
广西师范大学
桂林电子科技大学
桂林工学院
仲恺农业工程学院
华南师范大学
嘉应学院
茂名学院
浙江工商大学
浙江林学院
太原理工大学
兰州理工大学
石河子大学
内蒙古大学
内蒙古科技大学
内蒙古农业大学

前 言

随着工业生产的高速发展,我国地下水污染的问题日益突出,地下水污染所带来的对环境和经济发展的影响也日趋严重。目前,我国在地下水污染调查及地下水污染物迁移转化模式方面做了不少基础性工作,但在具体的地下水污染治理技术方面的研究和开发与国外差距还较大。自 20 世纪 70 年代以来,国外(尤其是欧美国家)在地下水点源污染治理方面取得了很大的进展,且逐渐发展形成较为系统的地下水污染治理技术。

在地表以下,地层岩性变化很大,地下水流动极其缓慢。因此,地下水污染具有过程缓慢、不易发现和难以治理的特点。地下水一旦受到污染,即使彻底消除其污染源,也需要几年,甚至几十年才能使地下水水质恢复。如果要对污染的含水层进行人工恢复,不但涉及的治理技术复杂,而且费用很高。为此,必须对地下水进行必要的长期监测,一旦发现地下水遭受污染,就应及时采取控制措施,尽量减少污染物进入地下含水层的机会和数量。同时,必须加强对地下水污染控制和治理技术的开发,并加强对地下水污染场地进行原位治理。

地下水污染场地进行原位治理是一个复杂系统的工程。如果要对一个地下水污染场地进行治理,必须首先进行水文地质调查和监测,掌握污染场地地下水的赋存规律、地下水的水化学特征、地下水的补给—排泄—径流、地下水动态、地下水污染源与途径、地下水污染现状及污染物的迁移-转化规律。另外,在可能的情况下,建立地下水水流-水质,修正、完善和补充地下水污染治理方案,以最短时间、最低投入使地下水污染场地恢复功能。

郑西来主编全书,并编写第 1 章地下水系统的基本特征、第 2 章地下水污染源与途径、第 3 章污染场地水文地质调查、第 4 章地下水污染调查。韩志勇、郑西来编写第 5 章地下水污染现状评价,郑西来、李涛编写第 6 章地下水脆弱性评价,韩志勇编写第 7 章地下水环境影响评价,陈余道编写第 8 章地下水污染的抽出-处理方法,于玲红编写第 10 章气相抽提技术和第 11 章生物通风技术,韩志勇编写第 9 章渗透性反应墙技术和第 12 章原位曝气技术。

这里特别要感谢中国海洋大学环境工程专业研究生栾熙明、宋帅、张俊杰,帮助修订和清绘了书中部分图件和表格;中国海洋大学 07 级环境工程专业的部分研究生翻译了部分的英文文献,一并表示感谢。

在本书的编写过程中,得到华中科技大学出版社的大力支持和帮助;出版社的编辑们对书稿提出了不少好的建议,为保证成书质量付出了辛勤劳动。作者在此表示深切的谢意。

编 者

2009 年 5 月

目 录

第 1 篇 地下水污染概论

第 1 章 地下水系统的基本特征	(1)
1.1 地下水系统的组成特征	(1)
1.1.1 岩石中的空隙	(1)
1.1.2 岩石空隙中的水	(3)
1.2 地下水系统的结构特征	(4)
1.2.1 包气带水	(5)
1.2.2 潜水	(5)
1.2.3 承压水	(5)
1.3 地下水运动特征	(6)
1.3.1 达西定律	(6)
1.3.2 渗透流速	(7)
1.3.3 渗透系数	(7)
1.4 地下水化学特征	(8)
1.4.1 地下水中主要气体成分	(8)
1.4.2 地下水中主要离子成分	(9)
1.4.3 地下水中的其他成分	(11)
1.5 地下水中污染物迁移特征.....	(12)
1.5.1 水动力弥散机理	(12)
1.5.2 水动力弥散方程	(13)
思考题	(17)
主要参考文献	(17)
第 2 章 地下水污染源与途径	(18)
2.1 地下水污染源.....	(18)
2.1.1 工业污染源	(19)
2.1.2 农业污染源	(21)
2.1.3 生活污染源	(22)
2.2 地下水中污染物.....	(23)
2.2.1 化学污染物	(23)
2.2.2 生物污染物	(29)

2.2.3 放射性污染物	(30)
2.3 地下水污染途径	(30)
2.3.1 间歇入渗型	(30)
2.3.2 连续入渗型	(31)
2.3.3 越流型	(31)
2.3.4 径流型	(32)
思考题	(32)
主要参考文献	(32)

第2篇 地下水污染场地调查

第3章 污染场地水文地质调查	(34)
3.1 污染场区资料收集与踏勘	(35)
3.1.1 收集已有的资料	(35)
3.1.2 初步现场踏勘	(36)
3.2 初步野外调查	(37)
3.3 详细场地调查	(40)
3.3.1 钻进方法	(40)
3.3.2 监测孔设计	(42)
3.3.3 监测孔安装技术	(44)
3.3.4 群井及多水平监测孔	(45)
3.4 调查工作总结及报告编写	(47)
思考题	(48)
主要参考文献	(48)
第4章 地下水污染调查	(49)
4.1 污染源与途径的调查	(49)
4.1.1 工业污染源调查	(49)
4.1.2 农业污染源调查	(49)
4.1.3 固体废物调查	(50)
4.1.4 地表水体调查	(50)
4.2 调查范围与地下水污染监测网设计	(50)
4.2.1 调查范围	(50)
4.2.2 水污染监测网设计	(50)
4.2.3 监测项目	(51)
4.3 地下水样采集与保存	(52)
4.3.1 采样容器的选择与洗涤	(52)

4.3.2 采样的基本要求	(53)
4.3.3 样品保存技术	(54)
4.4 现场分析与监测	(54)
4.5 地下水化学数据整理	(56)
思考题	(57)
主要参考文献	(57)
第3篇 地下水污染评价	
第5章 地下水污染现状评价	(58)
5.1 概述	(58)
5.1.1 概念与内涵	(58)
5.1.2 程序和内容	(59)
5.2 确定权重的方法	(62)
5.2.1 专家打分法	(63)
5.2.2 调查统计法	(63)
5.2.3 序列组合法	(66)
5.2.4 公式法	(66)
5.2.5 数理统计法	(68)
5.2.6 层次分析法	(68)
5.2.7 复杂度分析法	(70)
5.3 评价方法	(71)
5.3.1 综合污染指数法	(71)
5.3.2 系统聚类分析法	(75)
5.3.3 灰色聚类分析法	(78)
5.3.4 模糊数学法	(79)
5.3.5 人工神经网络分析法	(82)
5.4 应用实例	(85)
5.4.1 原始数据的获取	(85)
5.4.2 评价标准	(85)
5.4.3 评价方法	(85)
思考题	(89)
主要参考文献	(89)
第6章 地下水脆弱性评价	(91)
6.1 基本概念	(91)
6.1.1 地下水脆弱性定义	(91)

6.1.2 地下水脆弱性评价的分类	(91)
6.2 DRASTIC 模型	(92)
6.2.1 模型简介	(92)
6.2.2 DRASTIC 模型指标体系	(94)
6.3 基于 GIS 的脆弱性分区	(98)
思考题	(99)
主要参考文献	(99)
第 7 章 地下水环境影响评价	(101)
7.1 评价的等级划分	(101)
7.2 评价类型	(102)
7.3 评价的主要内容和程序	(103)
7.3.1 环境状况调查	(103)
7.3.2 工程分析	(103)
7.3.3 污染源调查与评价	(103)
7.3.4 污染现状调查与评价	(104)
7.3.5 水资源调查	(104)
7.3.6 环境影响评价	(104)
7.3.7 防治对策及建议	(104)
7.4 地下水环境影响预测方法	(106)
7.4.1 类比法	(106)
7.4.2 数值模拟法	(106)
思考题	(107)
主要参考文献	(107)

第 4 篇 地下水污染原位修复技术

第 8 章 地下水污染的抽出-处理方法	(108)
8.1 技术原理与适应条件	(108)
8.1.1 抽出-处理技术的基本构成	(108)
8.1.2 污染物清除和控制	(109)
8.1.3 场地特征	(110)
8.1.4 抽水场地的动态管理	(111)
8.1.5 可实现的清除目标	(111)
8.2 有效水力隔离	(112)
8.2.1 拖尾与回弹问题	(112)
8.2.2 地下水流的控制	(116)

8.2.3 水力隔离的其他问题	(119)
8.3 抽出-处理系统的设计与运行	(121)
8.3.1 截获带分析与模型优化	(121)
8.3.2 抽水运行的有效性	(123)
8.3.3 污染地下水的处理	(124)
8.4 动态监测	(124)
8.4.1 水头监测	(125)
8.4.2 水质监测	(125)
8.4.3 含水层恢复监测	(125)
8.4.4 修复效果与封场的评价	(126)
思考题	(127)
主要参考文献	(127)
第9章 渗透性反应墙技术	(129)
9.1 反应墙的结构、类型与反应机理	(130)
9.1.1 反应墙的结构	(130)
9.1.2 反应墙的类型	(130)
9.2 反应介质的选择	(134)
9.2.1 反应介质的筛选原则	(134)
9.2.2 金属介质	(135)
9.3 反应墙的可行性实验	(138)
9.3.1 批量实验	(138)
9.3.2 土柱实验	(139)
9.4 反应墙系统的安装	(144)
9.4.1 反应单元的安装	(144)
9.4.2 隔水墙的安装	(147)
9.5 渗透性反应墙的应用与管理	(149)
9.5.1 渗透性反应墙的应用实例	(150)
9.5.2 渗透性反应墙的运行管理	(150)
思考题	(151)
主要参考文献	(151)
第10章 气相抽提技术	(153)
10.1 技术原理与适应条件	(153)
10.2 污染物特性与分配关系	(154)
10.2.1 蒸气压	(154)
10.2.2 溶解度	(155)

10.2.3	污染物的分配关系	(155)
10.3	影响因素	(158)
10.3.1	土壤密度和孔隙率	(158)
10.3.2	土壤吸附	(158)
10.3.3	含水量	(159)
10.3.4	场地地形	(160)
10.3.5	地下水位埋深	(160)
10.3.6	介质均匀性	(160)
10.4	系统工艺设计	(161)
10.4.1	系统设计的目的	(161)
10.4.2	井的设计	(161)
10.4.3	空气流量	(162)
10.4.4	抽提速率	(163)
10.4.5	修复时间	(163)
10.5	运行与监测	(164)
10.5.1	抽提系统的运行	(164)
10.5.2	抽提系统的监测	(164)
	思考题	(164)
	主要参考文献	(165)
第 11 章	生物通风技术	(166)
11.1	技术原理与适应条件	(166)
11.1.1	原理	(166)
11.1.2	适用条件	(167)
11.2	影响因素	(167)
11.2.1	土体	(167)
11.2.2	污染物	(168)
11.2.3	微生物	(169)
11.3	系统工艺设计	(169)
11.3.1	系统工艺类型	(169)
11.3.2	系统工艺设计	(169)
11.4	模拟实验简介	(170)
11.4.1	实验室实验	(171)
11.4.2	野外呼吸实验	(171)
11.4.3	气体渗透性实验	(173)
11.5	运行与监测	(173)

11.6 生物通风技术的强化	(174)
11.6.1 热通风	(174)
11.6.2 提供氧源	(174)
11.6.3 添加有效降解菌	(174)
思考题	(174)
主要参考文献	(175)
第12章 原位曝气技术	(176)
12.1 技术原理与适用条件	(177)
12.1.1 技术原理	(177)
12.1.2 适用条件	(181)
12.2 原位曝气系统设计	(183)
12.2.1 原位曝气过程研究	(183)
12.2.2 原位曝气系统设计的主要参数	(188)
12.3 改进的曝气方式	(193)
12.3.1 水平槽式曝气	(193)
12.3.2 井式曝气	(194)
12.3.3 生物曝气	(195)
12.3.4 沟槽蒸气	(196)
12.3.5 气体致裂曝气	(196)
12.4 监测与运行	(197)
12.4.1 中试实验	(197)
12.4.2 现场监测	(199)
12.4.3 处理效果	(200)
12.5 应用实例	(201)
12.5.1 问题	(201)
12.5.2 解决方法	(202)
12.5.3 中试实验计划	(202)
12.5.4 中试实验操作	(205)
12.5.5 数据评估	(205)
思考题	(208)
主要参考文献	(208)

第 1 篇 地下水污染概论

第 1 章 地下水系统的基本特征

地下水是指赋存于地面以下岩石空隙中的水。地下水的质和量,都是在不断地变化之中。影响其变化的因素有天然的和人为的两种。天然因素的变化往往是缓慢的、长期的;而人为因素对地下水水质和量的影响越来越突出。地下水污染是指人为因素影响下的地下水水质的明显变化。

流动性这一基本特征,决定了地下水不会孤立赋存于某一空间之中,其内部各要素之间存在着相互作用,而且还与外部环境发生联系,所以研究地下水水质和量的变化,研究污染物在地下水系统中的迁移,就必须用系统论的思想与方法把地下水及其环境看成一个整体,即以地下水系统的观点,从整体的角度去考察、分析与处理。为此,首先需要认识地下水系统的基本特征。

1.1 地下水系统的组成特征

地下水系统实际是由两个要素组成:一是具有空隙的岩石;二是赋存于岩石空隙中的水。

1.1.1 岩石中的空隙

地壳表层一定深度范围内的岩石都或多或少存在着空隙,这种空隙是地下水的储存场所和运动通道。空隙的多少、大小、形状、连通情况和分布规律,对地下水的分布和运动具有重要影响。按岩石空隙的形态可分为三类,即松散岩石中的孔隙、坚硬岩石中的裂隙和可溶岩石中的溶隙(穴)。

1. 孔隙

松散岩石是由大小不等的颗粒组成的。颗粒或颗粒集合体之间的空隙称为孔隙。

岩石中孔隙的多少是影响其储容地下水能力大小的重要因素,孔隙的多少可用孔隙度表示。孔隙度是指某一体积岩石(包括孔隙在内)中孔隙体积所占的

比例。

$$n = \frac{V_p}{V} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中： n ——岩石的孔隙度，无量纲；

V_p ——岩石中孔隙的体积，量纲为 L^3 ；

V ——包括孔隙在内的岩石体积，量纲为 L^3 。

孔隙度的大小主要取决于松散岩石中颗粒的分选程度及颗粒的排列情况，颗粒形状及胶结充填情况也影响孔隙度。对于黏性土，结构孔隙及次生孔隙（如虫孔、根孔等）常是影响孔隙度的重要因素。一般来讲，自然界中松散岩石分选程度愈差，颗粒大小愈悬殊，孔隙度便愈小。组成岩石的颗粒形状愈不规则，棱角愈明显，通常排列就愈松散，孔隙度也就愈大。

孔隙大小对地下水运动影响很大。孔隙通道最细小的部分称为孔喉，最宽大的部分称为孔腹。孔喉对水流起着阻滞作用，讨论孔隙大小时常以孔喉直径进行比较。

孔隙大小取决于颗粒大小。对于分选程度较好的松散岩石，组成颗粒愈大，一般孔隙就愈大。对于颗粒大小悬殊的松散岩石，由于粗大颗粒形成的孔隙被细小颗粒所填充，孔隙大小取决于实际构成孔隙的细小颗粒的直径。

颗粒排列方式也影响孔隙大小，通常在同等粒径组成情况下，颗粒排列愈松散，则孔隙愈大。

2. 裂隙

固结的非可溶性的坚硬岩石，包括沉积岩、岩浆岩和变质岩，在应力作用下岩石破裂变形而产生的各种裂隙，按其成因分为成岩裂隙、构造裂隙和风化裂隙。

成岩裂隙是岩石在成岩过程中受内部应力作用而产生的原生裂隙。沉积岩固结脱水、岩浆岩冷凝收缩等均产生成岩裂隙，这些裂隙常常是闭合的，连通性差，例如在陆地喷溢的玄武岩中有柱状裂隙发育。浅成岩浆岩冷凝收缩时，由于内部张力作用，可产生垂直于冷凝面的六方柱状节理和层面节理，其大多张开，且密集均匀，连通性好。

构造裂隙是在地壳运动过程中岩石受构造应力作用产生的，较之其他成因类型的构造裂隙最为常见，分布范围最广。这类裂隙具有强烈的非均匀性、各向异性和随机性的特点。构造裂隙的张开宽度、延伸长度、密度、连通性等很大程度上受岩石性质（如岩性、岩层厚度、相邻岩层的组合情况）的影响。塑性岩石（如泥岩、页岩等）常形成闭合裂隙，往往其密度很大，但张开性很差，延伸不远，多构成相对隔水层。脆性岩石（如岩浆岩、钙质胶结的沙岩等）中的构造裂隙一般比较稀疏，但张开性好，延伸远，具有较好的导水性。

风化裂隙是暴露于地表附近的岩石，在温度变化和水、空气、生物等风化营