

活性渗滤墙技术与

地下水污染修复

程荣 著



中国出版集团
世界图书出版公司

活性渗滤墙技术与地下水污染修复

程 荣◎著

中国出版集团
世界图书出版公司
广州·上海·西安·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

活性渗滤墙技术与地下水污染修复 / 程荣著 . -- 广州 :
世界图书出版广东有限公司 , 2014.4

ISBN 978-7-5100-7879-8

I . ①活… II . ①程… III . ①地下水污染—污染防治
IV . ① X523.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 080148 号

活性渗滤墙技术与地下水污染修复

责任编辑 杨力军

封面设计 刘 荣

版式设计 梁嘉欣

出版发行 世界图书出版广东有限公司

地 址 广州市新港西路大江冲 25 号

电 话 020-84459702

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

规 格 787mm×1092mm 1/16

印 张 13

字 数 220 千

版 次 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

I S B N 978-7-5100-7879-8/X·0042

定 价 39.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

地下水是水资源的重要组成部分，是人类赖以生存和发展的宝贵的、不可取代的自然资源。中国地下水资源占全国水资源总量的 1/3，维持着中国近 70% 的人口饮用和 40% 的农田灌溉，对中国社会经济的可持续发展起着举足轻重的作用。而全国 90% 的地下水已经遭受了不同程度的污染，其中 60% 污染严重。我国地下水污染已呈现由点向面、由浅到深、由城市到农村不断扩展和污染程度日益严重的趋势。由于我国地下水污染的严重性，国务院颁发的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》把包括地下水在内的水资源研究列为重点领域及优先主题。2011 年 8 月 24 日国务院常务会议讨论通过的《全国地下水污染防治规划（2011-2020 年）》，对保障我国地下水水质安全、全面提高地下水水质等提出了更高的要求。目前，随着地下水污染事件的不断发生，地下水污染也逐渐引起社会的广泛关注。

由于地下水赋存环境表现出的隐蔽性、延迟性和系统复杂性，致使地下水的污染修复极其困难和昂贵。世界各国尤其是欧美国家对地下水污染的修复进行了大量的研究，其中抽出-处理是应用最普遍的技术。该方法能有效地将污染区限制在抽出井上游，但是其作为一种长期的地下水修复方法则存在一些缺陷，如成本较高，只能限制污染物的进一步扩散，不能够进行现场修复，并可能影响生态环境等。活性渗滤墙技术通过在地下安置活性材料墙体形成一个被动反应区以拦截污染羽，污染羽靠自然水力传输通过预先设计好的活性填料时，溶解的有机物、金属、放射性核素等污染物通过氧化还原、吸附、沉淀等方式得到去除。相对于传统的抽出-处理技术，活性渗滤墙作为一种原位修复技术，能够持续处理多种污染物，修复较彻底，成本相对低廉，尤其是运行和维护简单、费用低，故在地下水污染修复领域得到了迅速发展。针对我国地下水污染态势，开展活性渗滤墙技术在地下水修复中的应用基础研究，有助于活性渗滤墙地下水修复技术在我国迅速推广，为我国的地下水污染治理提供理论基础和技术支撑。

填料是活性渗滤墙技术的核心组分。自活性渗滤墙技术发明以来，系统中所用填料便成为研究最广泛、发展最迅速的一个领域。尤其是本世纪初纳米材料的迅速发展，极大地促进了活性渗滤墙填料的改良与发展。作者长期从事环境纳米技术研究，在纳米铁系材料处理污染物领域积累了大量一手研究数据和资料。本书基于大量国内外工程案例及最新研究成果，结合作者的多年研究，从活性渗滤墙的结构与设计、填料、运行与评价、在地下水污染修复中的应用、经济分析、发展等七个方面全面阐述了活性渗滤墙技术的应用研究发展状况，尤其是在地下水污染修复中的应用现状及前景。内容囊括了最新理论研究进展与工程应用现状，同时结合典型案例分析，剖析了当前该技术的缺陷和技术难关，提出了该技术的研究方向和发展前景。

在研究和成长过程中，作者得到了师长、亲友及单位领导同事的多方关怀和帮助，在此致以诚挚的谢意。衷心感谢我的导师——清华大学钱易教授和王建龙教授，他们的言传身教使我终生受益，他们为学为人的态度是我终生学习的标尺。十分感谢中国人民大学马中教授、石磊副教授等领导同事的支持与鼓励，让我在新的环境中迅速成长。研究生李冠清、程灿参与了审校工作，在此一并表示感谢。感谢策划出版人唐新红先生及其团队的辛勤劳动与大力支持。感谢我的家人，永远是我坚强的后盾和前进的动力。在本书的写作过程中，作者参阅了国内外大量的相关研究成果，在此向这些研究成果的作者表示诚挚的谢意。感谢所有关心和帮助过我的人。

本书的出版，得到了国家自然科学基金（批准号：51108454）和中国人民大学科学研究基金（批准号：92345120）的支持，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中缺点、错误和不足之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

程荣

2014年2月

目录

前 言	1
第 1 章 概 述	1
1.1 我国地下水资源与水环境状况 / 1	
1.2 地下水污染整治与修复技术 / 8	
1.2.1 抽出处理技术 / 9	
1.2.2 原位修复技术 / 9	
1.3 活性渗滤墙技术 / 16	
1.3.1 活性渗滤墙的基本概念 / 16	
1.3.2 活性渗滤墙的类型及应用现状 / 18	
第 2 章 活性渗滤墙的结构与设计	20
2.1 污染物在地下水环境中迁移转化的数学模型 / 20	
2.1.1 污染物在地下水中迁移转化规律的研究进展 / 20	
2.1.2 污染物在地下水中迁移转化的数学模型 / 22	
2.2 活性渗滤墙的结构类型与安装形式 / 26	
2.2.1 活性渗滤墙的结构类型 / 26	
2.2.2 活性渗滤墙的安装形式 / 29	
2.3 活性渗滤墙的设计与施工 / 30	
2.3.1 活性渗滤墙的设计 / 30	
2.3.2 活性渗滤墙的施工 / 38	

3.1 氧化还原型填料 / 47

- 3.1.1 零价铁 / 47
- 3.1.2 纳米铁 / 49
- 3.1.3 Fe(II) 矿物 / 53
- 3.1.4 双金属 / 53

3.2 吸附型填料 / 56

- 3.2.1 活性炭 / 56
- 3.2.2 沸石 / 59
- 3.2.3 钢渣 / 63

3.3 化学沉淀型填料 / 65

- 3.3.1 石灰 / 65
- 3.3.2 羟基磷灰石 / 66

3.4 生物降解型填料 / 69

3.5 组合型填料 / 71

4.1 活性渗滤墙的监测与管理 / 73

- 4.1.1 合规性监测和性能监测 / 74
- 4.1.2 材料监管问题 / 76

4.2 长效性分析与评价 / 77

- 4.2.1 评估策略 / 77
- 4.2.2 案例分析 / 81

5.1 氯代有机物污染 / 100

- 5.1.1 氯代有机物的理化特性及污染现状 / 101
- 5.1.2 Fe⁰-PRB 对氯代有机物的脱氯性能 / 103
- 5.1.3 反应动力学及作用机理 / 107
- 5.1.4 工程实例 / 110

5.2 重金属污染 / 115

- 5.2.1 重金属污染及其危害 / 115
- 5.2.2 重金属行为特征及赋存形态 / 117
- 5.2.3 修复效果及作用机理 / 119
- 5.2.4 工程实例 / 121

5.3 石油烃类污染 / 122

- 5.3.1 地下水石油烃污染特征 / 122
- 5.3.2 石油烃污染的微生物修复及生物 PRB / 125
- 5.3.3 工程实例 / 130

5.4 营养盐问题 / 132

- 5.4.1 地下水中氮的转化过程与机理 / 132
- 5.4.2 处理营养盐污染的 PRB 应用研究现状 / 133
- 5.4.3 工程实例 / 135

5.5 放射性核素 / 137

- 5.5.1 放射性核素在地下水中的迁移行为 / 138
- 5.5.2 PRB 处理放射性核素污染的修复机理及影响因素 / 139
- 5.5.3 工程实例 / 142

5.6 其他有机污染 / 143

- 5.6.1 芳香族硝基化合物 / 143
- 5.6.2 农药类有机污染物 / 146

第 6 章 活性渗滤墙技术用于地下水污染修复的经济分析 149

6.1 评估场地基本信息 / 151

- 6.1.1 信息获取和方法 / 153
- 6.1.2 信息质量 / 154
- 6.1.3 信息存储和组织 / 154
- 6.1.4 成本参数分类 / 154

6.2 PRB 场地的经济数据 / 155

- 6.2.1 PRB 场地的公布成本和计算成本比较 / 155
- 6.2.2 PRB 场址评估成本 / 158
- 6.2.3 PRB 设计成本 / 158

- 6.2.4 PRB 建设成本 / 159
- 6.2.5 主要成本 / 资本成本组成总结 / 161
- 6.2.6 PRB 场地的运行与维护 / 162

6.3 P&T 场地的经济数据 / 166

- 6.3.1 在 PRB 场地的 P&T / 166
- 6.3.2 其它场地的 P&T / 168

6.4 PRB 与 P&T 技术的成本比较 / 168

- 6.4.1 基本原理和方法 / 168
- 6.4.2 每 1000 加仑净化水的 PRB 成本 / 169
- 6.4.3 每 1000 加仑净化水的 P&T 成本 / 174
- 6.4.4 在 PRB 场地的 P&T 和 PRB 单位成本比较 / 175

6.5 总结和结论 / 177

第 7 章 活性渗滤墙技术的发展 179

7.1 填料的改良与再生 / 179

7.2 组合工艺的研究与应用领域的拓展 / 182

参考文献 186

英文文献 / 186

中文文献 / 196

1.1 我国地下水资源与水环境状况

水资源是人类赖以生存的必不可少的资源，同时也是实现经济、社会可持续发展的重要保证。在地表水资源不足，且部分污染严重的情况下，地下水成为我们生产生活的重要来源。地下水有广义和狭义之分，广义地下水包括土壤、隔水层和含水层中的重力水和非重力水。狭义地下水指土壤、隔水层和含水层中的重力水。在中国北方，干旱、半干旱的许多地区和城市，地下水成为重要的甚至唯一的水源（范春辉，2007）。我国地下水资源量多年平均为 8218 亿 m^3 ，约占水资源总量的 30%，地下水资源较为有限，图 1-1 给出了我国近十年的地下水资源量及其在水资源总量中所占比例变化情况（图 1-1 数据来源于《2013 年中国统计年鉴》）。

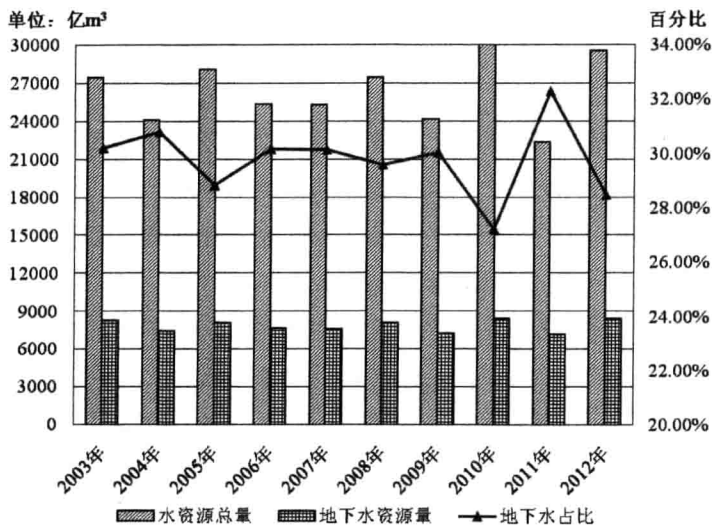


图 1-1 我国 2003 年~2012 年地下水资源量及其在水资源总量中的比例

我国地下水资源地域分布不均，其中，北方地区（占我国总面积的 64%）地下水资源量 2458 亿立方米，约占全国地下水资源量的 30%；南方地区（占我国总面积的 36%）地下水资源量 5760 亿立方米，约占全国地下水资源量的 70%。总体上，全国地下水资源量由东南向西北逐渐降低（摘自《全国地下水污染防治规划（2011-2020 年）》）。近十年来，随着我国经济社会的快速发展，地下水资源开发利用量呈逐渐增长态势（如图 1-2）。到 2012 年地下水开采总量已达 1134 亿立方米，占全国总供水量的 18.4%。北方地区 65% 的生活用水，50% 的工业用水和 33% 的农业灌溉用水来自地下水。全国 655 个城市中，400 多个以地下水为饮用水源，约占城市总数的 61%。地下水资源的长期过量开采，导致全国部分地区地下水水位持续下降（《全国地下水污染防治规划（2011-2020 年）》）。

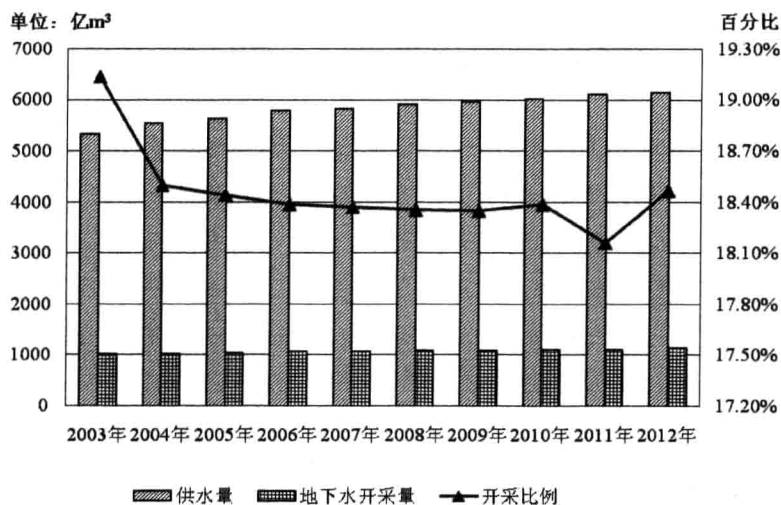


图 1-2 我国 2003 年~2012 年地下水开采量及其在供水总量的比例

地下水污染是人类活动引起地下水化学成分、物理性质和生物学特性发生改变而使质量下降的现象。2012 年，全国 198 个地市级行政区开展了地下水水质监测工作，监测点总数为 4929 个，其中国家级监测点 800 个。依据《地下水质量标准》（GB/T14848-93），综合评价结果为水质呈优良级的监测点为 580 个，占全部监测点的 11.8%；水质呈良好级的监测点为 1348 个，占 27.3%；水质呈较好级的监测点为 176 个，占 3.6%；水质呈较差级的监测点为 1999 个，占 40.6%；水质呈极差级的监测点为 826 个，占 16.8%（如图 1-3 所示）。主要超标组分为铁、锰、氟化物、“三氮”（亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨氮）、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物等，个别监测点存在重（类）金属项目超标现象（《2012 年中国国土资源公报》）。我国地下水污染的趋势为：由点状、条带状向面上扩散，由浅层向深层渗透，由城市向周边蔓延。南方地区地下水环境质量变化趋势以保持

相对稳定为主，地下水污染主要发生在城市及其周边地区。北方地区地下水环境质量变化趋势以下降为主，其中，华北地区地下水环境质量进一步恶化；西北地区地下水环境质量总体保持稳定，局部有所恶化，特别是大中城市及其周边地区、农业开发区地下水污染不断加重；东北地区地下水环境质量以下降为主，大中城市及其周边和农业开发区污染有所加重，地下水污染从城市向周围蔓延。

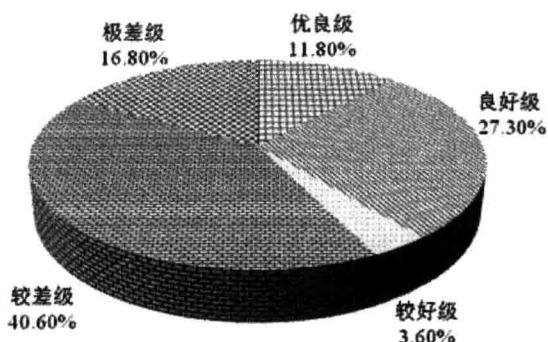


图 1-3 2012 年全国地下水水质状况

随着我国经济的发展，城市化与工业化进程加快，地下水污染状况不容忽视。地表以下地层复杂，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，也需十几年甚至几十年才能使水质复原。地下水受到污染的来源和途径可以分为以下几个方面：工业污染、农业污染、生活污染、矿业污染、海水入侵、自然污染。

1. 工业污染

工业“三废”（废水、废气、废渣）是地下水污染的主要因素之一。工业废水如工业电镀废水、工业酸洗污水、冶炼工业废水、轻工业废水和石油化工有机废水不经过处理而排入城市下水道、江河湖海或直接排到水沟、大渗坑里，导致地下水化学污染；工业废气如二氧化硫、二氧化氮等不仅会对大气产生污染，更会随着降水降落到地表径流，从而通过渗透等作用污染地下水；工业废渣如高炉矿渣、钢渣、粉煤灰等由于不合理处理及处置，其经过风吹、雨水淋滤，有害物质会随着降水直接进入地下水中，造成严重污染。同时，对于石油化工等行业，地下勘探或地下油罐泄露等也会导致地下水污染。

2. 农业污染

我国单位耕地面积化肥及农药用量分别为世界平均水平的 2.8 倍和 3 倍，大量的农药化肥通过土壤渗透，雨水淋溶进入地下水，或是使用污水灌溉，导致地下水中的氮磷、重金属等污染物超标。它们会引起大面积浅层地下水水质恶化，其中最主要的是 NO_3^- -N 增加和农药污染。

3. 生活污染

随着人口大量增加，城市急剧扩张，导致城市污水排放量大幅增加，大量未经处理过的生活污水直接排放，经下渗作用引起地下水的污染，同时基础设施和管制的缺失如管网泄漏等导致污水外渗，进入地下水体导致污染；城市扩张的同时，生活垃圾量也快速增长，垃圾渗滤液进入水体，也会严重污染地下水。

4. 矿业污染

矿业中尾矿、废石、选矿过程中所排放的污水以及矿坑水中的重金属或放射性元素会对地下水产生污染，有些地区在勘探和采矿过程中引起含水层之间的连通，使不同质的水发生混合，造成地下水水质的改变（罗兰，2008）。

5. 海水入侵

造成海咸水入侵的主要原因是地下水的过量开采。地下水过量开采将使滨海或岛屿上淡水—海水界面处于不平衡状态。我国北方沿海地区，进入1980年代以来，出现连续多年的干旱，降雨量偏低，地下水补给量减少，但是工农业需水量却不断增加，地下水“入不敷出”，导致海水入侵，污染了地下水。

6. 自然污染

在有些地区，由于特殊的自然环境与地质环境，地下水天然背景不良，有毒有害成分超标。根据中国地质环境监测院调查统计，我国部分地区分布有高砷水、高氟水、低碘水等。全国约有1亿多人在饮用不符合标准的地下水，使这些地区长期以来一直遭受砷中毒（皮肤癌）、地甲病、地氟病、克山病等地方病困扰（罗兰，2008）。

进入地下水的污染物有来自人类活动的，有来自自然过程的。生活污水和生活垃圾会造成地下水的总矿化度、总硬度、硝酸盐和氯化物含量的升高，有时也会造成病原体污染；工业废水和工业废物可使地下水中有机和无机化合物的浓度增加，同时可能造成汞、镉、铅、铬等重金属的污染；农业施用的化肥和粪肥，会造成大范围的地下水硝酸盐含量增高等现象。国土资源部从1999年以来，先后在京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等地区开展了地下水有机污染调查研究。地下水污染调查、监测工作初步显示：主要城市及近郊地区地下水中普遍检测出有毒微量有机污染物，有机污染物在地下水中的分布也存在明显不同。从目前初步调查结果看，地下水中检出的有机污染物含量普遍较低；在有限定值的指标中，邻苯二甲酸二正丁酯最大检出值超过我国生活饮用水卫生标准1.4倍；邻苯二甲酸二（2-乙基己）酯最大检出值超过我国生活饮用水卫生标准0.125倍。我国地下水污染已经相当严重。

在不同地区由于地质、水文地质条件的差异，地下水污染物、污染状况也不

尽相同。1999~2002年,在京津冀典型地区开展地下水有机污染调查,检测有机组分43项,实际检出36项,分别为单环芳烃12项、卤代烃、多环芳烃16项和有机农药8项。调查表明氯代烃中的三氯甲烷、四氯化碳、三氯乙烯、四氯乙烯是调查区主要检出的有机污染物。2003年以来,在长江三角洲典型地区开展了浅层地下水有机污染调查研究,120眼水井进行了卤代烃、单环芳烃和农药等有机污染组分的取样测试。挥发性有机物和农药均有不同程度检出,但有机污染物含量尚未发现超标。2005年开始,在珠江三角洲典型地区地下水调查中发现,挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物均有明显检出。珠江三角洲中心区地下水污染已呈现一定的区域分布特征。调查区中大多数地下水源地水质良好,地表水污染比地下水污染严重,丘陵区地下水污染轻微。地下水有机污染样品检出的污染物种类包括卤代烃类、单环芳烃类、多环芳烃类、酞酸酯类、酚类、酮类共6大类,均主要为化学工业品污染(姜建军,2007)。而在我国中东部城市和老工业基地,地下水主要污染组分为“五毒”(挥发酚、氰化物、砷、汞、六价铬)和其他重金属元素等。石油烃污染问题突出(金铭,2007)。

地下水污染不仅会导致传染性疾病等社会公害的发生,对工业、农业等行业产生不良影响;还会因其失去作为水资源的经济和生态价值而加剧水资源短缺的紧张局面,严重制约经济和社会的可持续发展。

地下水污染直接影响饮用水源的水质。当饮用水源受到合成有机物污染时,会导致如腹水、腹泻、肠道线虫、肝炎、胃癌、肝癌等疾病的发生,特别是人们饮用被硝酸盐污染的地下水后会导致癌症,还可能引起高铁血红蛋白症,导致患者死亡。与不洁的水接触会染上如皮肤病、沙眼、血吸虫、钩虫病等疾病。疾病不仅给广大居民身心带来极大损害,同时也增加了巨额医疗费用。地下水污染严重区甚至可导致水中雌激素增加,影响人类的繁殖能力,造成自然流产或是先天残疾(孙博,2008)。

我国的工业生产用水中地下水占很大比重,地下水的污染将严重影响工业生产。地下水硬度增高,会使工业锅炉的炉内和管道上结垢,直接影响炉寿命甚至引起爆炸。此外,高硬度地下水还会对化工、制药、酿酒等行业造成危害。由于受污染的地下水硬度过高,就迫使一些行业必须对硬水进行软化和纯化处理,从而增大了工业生产的成本。地下水污染对农业生产的危害也是显而易见的。如长期用pH值过高的井水灌溉农田,会改变土壤结构,使土壤板结,无法耕作。灌溉水中的硝酸盐含量过高,会减弱农作物的抗病力,降低作物的质量、等级。粮食作物吸收过量的硝酸盐会降低粮食中蛋白质的含量,导致粮食的营养价值下降;蔬菜作物则易腐烂,无法贮存和运输。此外,如果受污染的井水中硫酸盐、氯离

子含量过高，还会抑制农产品的生长，造成大面积减产，并且使农产品的质量大大降低。人类在开发利用地下水资源的同时，如果不积极加以保护，将会恶化人类赖以生存的生态环境，造成无法弥补的损失（李宏伟等，2009）。

由于人们对地下水资源的不合理开采利用及地下水受到各种污染，我国地下水资源已遭到一定的破坏，反过来对人们自身的生存与发展也产生了不可忽视的影响。为合理地开采利用地下水，防治地下水污染，促进地下水保护进程，所以制定、规范影响地下水资源的各种法律制度、保护政策就显得刻不容缓。

我国在1956年的《矿产资源保护试行条例》中，第一次提出应当对地下水水源进行水文勘探，制定合理的开采方案，防止地下水遭受破坏；有关部门对于排出的工业、医疗、生活污水，必须采取有效措施，防止污染地下水。截止至2013年，我国虽没有制定专门的地下水资源保护法，但在法律、行政法规、部门规章、标准及规划中都涉及到地下水资源保护的问题。目前，我国已初步形成一个以各种单行地下水资源保护法律规定集合为形态的地下水资源保护立法体系（胡夷光，2011）。

我国现阶段保护地下水资源的相关政策制度在《中华人民共和国环境保护法》（1989）、《中华人民共和国水污染防治法》（1996）、《中华人民共和国水法》（2002）等法律和《水污染防治法实施细则》（2000）、《城市地下水开发利用管理规定》、《城市供水条例》等行政法规中均有不同程度的规定。

《中华人民共和国水法》（下称：《水法》）的相关规定明确了我国地下水资源权属问题：地下水资源属于国家所有，即全民所有，并由国务院代表国家行使其所有权。2002年新《水法》修订后，进一步明确由水行政主管部门对地下水资源进行统一监督和管理，但是关于勘探、开采矿泉水和地下热水的管理问题在实际中仍存在着较大的争议。由于我国对水资源保护，在立法上采取的是资源利用与污染防治相结合的模式，依据《中华人民共和国水污染防治法》（下称：《水污染防治法》）的规定，环境保护行政主管部门是对地下水污染防治实施监督管理的机关。

我国水资源保护的基本法律《水法》和《水污染防治法》中，关于我国地下水资源保护的规定，主要包括以下内容：一是水资源开发利用中，关于合理组织利用地下水资源，防治盐碱化和渍害的规定等；二是水资源保护中，关于保护地下水量及生态用水、生活饮用水地下水源保护区，地下水超采区管理，沿海地区开采地下水要求的规定等；三是水资源配置和节约使用中，关于地下水取水许可和水资源费征收管理的规定等；四是水污染防治中关于防止地下水污染的一系列规定，如关于生活饮用水地下水源保护区污染防治的禁止性规定，关于限制开采多层地下水的规定，关于规范兴建地下工程设施或地下勘探、采矿活动中防止地

下水污染的规定,关于人工回灌补给地下水中防止地下水污染的规定,关于保障农业灌水水质防止地下水污染的规定,其它防止地下水污染的禁止性规定等(张毅婷,2007)。近年来,为了全面加强地下水超采区水资源管理工作,我国水利部于2003年制定了规范性文件《关于加强地下水超采区水资源管理工作的意见》,为完善水资源的配置,节约使用制度和控制地下水开采总量而出台了《取水许可和水资源费征收管理条例》,我国早在1989年就制订了部门规章《饮用水水源保护区污染防治管理规定》,规定了生活饮用水地下水源保护区的划分和防护。

目前,我国有关地下水污染的法律法规还不是很健全,需要进一步建立和健全法律制度或机制,如地下水资源价格制度,建立统一的跨区域地下水资源保护联动机制等。由于环境法自身所具有的特点如综合性、科学技术性,以及立法时的社会背景及社会关系的发展变化等因素的影响,相对于地下水资源保护的现状,我国现有的相关法律制度存在着一些不容忽视的问题:

①现行有关地下水资源保护的法律制度大多为禁止、限制性规定,缺乏鼓励性规定,这一缺陷在我国的《水污染防治法》第五章及其《细则》第四章和《水法》的相关规定中都有所反映,难以提高和调动广大群众及非公共机构参与保护地下水的意识和积极性。

②缺乏对地下水资源的开采利用行为,尤其是对超量开采地下水行为的法律责任的规定,显然目前的法律制度对地下水开采利用行为仍缺乏足够的约束力和威慑力,《水法》第二十三、二十五、三十一、三十六条对地下水资源作了一定程度的规定。但对于超量开采地下水的行为,仅在第三十一条中有规定其法律责任的相关内容:“从事水资源开发、利用、节约、保护和防治水害等水事活动,应当遵守经批准的规划;因违反规划造成江河和湖泊水域使用功能降低、地下水超采、地面沉降、水体污染的,应当承担治理责任。”其中适用该条款的前提是违反规划的行为的存在,而且对如何承担治理责任及承担到何种程度未作进一步阐述。这些都不利于有关部门在实际工作中进行操作。显然目前的法律制度对地下水开采利用行为仍缺乏足够的约束力和威慑力。

③规范污染地下水的行为的法律制度不足,惩罚力度不够,《水污染防治法》在第五章“防止地下水污染”中列举了一些对污染地下水行为的禁止性规定,但显然不足以概括所有对地下水造成污染的行为。而《水污染防治法实施细则》仅在第四十七条中对“利用储水层孔隙、裂隙、溶洞及废弃矿坑储存石油,放射性物质,有毒化学品,农药等”的危险行为规定了其法律责任,而且对于违规行为的惩罚仅处以10万元以下罚款,缺乏更为严厉的惩罚措施,这不仅不能达到制止现有污染者在经济利益的驱使下继续作出破坏地下水资源行为的目的,也不能有

效地防止新的污染者的出现。

④缺乏针对农村地下水资源保护的法律法规，农村用水尤其是农业生产用水在我国总用水量中占了极大的比重，在一些地表水缺乏或农业水利设施不完善的地区，地下水更成为农业用水的主要来源。这必将影响在农村广泛开展地下水资源保护工作，难以有效地遏止农村里现实存在的各种破坏性开采及污染地下水的行为。

⑤缺乏完整的人工回灌补充地下水资源的法律制度，地下水一旦过量开采使用后，仅靠其自然恢复远远不能达到保护和补充地下水以避免各种灾害性结果产生的目的。因此，对地下水的人工回灌（Aquifer Storage and Recovery, ASR）就显得十分必要，但是我国相关立法较少（朱小勇，2003）。

⑥管理责任不明确，缺乏综合协调机制，要明确政府环境保护部门、水行政主管部门、建设规划部门和国土资源管理部门等在地下水污染防治工作中的相应责任（罗兰，2008）。我国现有的相关法律法规在很大程度上已经不能满足人们对于保护地下水资源越来越强烈的要求，且在实质上对我国地下水资源保护的进程造成了一定的阻碍。因此，加强和完善我国地下水资源保护的法律制度已显得极为必要和紧迫。

法律的手段是防治地下水资源污染的有效手段之一，它能够为地下水资源的保护，提供重要的法律保障。所以在此过程中，要不断完善相关的法律法规，对地下水资源进行严加保护，做到有法可依、有法必依。同时，还应该健全各种水资源管理机构，明确它们各自的职责，做到地下水资源的科学开发与利用，应建立起地下水环境保护的综合协调机制，使各项地下水源保护工作得到落实并与地下水的开发利用协调一致，从政策制度层面使地下水资源可持续利用得到根本上的保障（田岳林等，2011）。并且，在地下水资源的开发与利用过程中，还不能忽视了有效的保护，要在保护的基础之上，实现它的合理开发与利用（严芳侠，2013）。

1.2 地下水污染整治与修复技术

随着现代社会工业化进程的不断发展，地下水作为人类宝贵的淡水资源，出现了不同程度的污染问题。废水的排放，工业废渣和城市垃圾填埋场的泄漏，石油和化工原料的传输管线，储存罐的破损，农业灌溉等都有可能造成土壤和地下水的污染，使本来就紧张的水资源短缺问题更加严重。特别是一些缺水的城市，