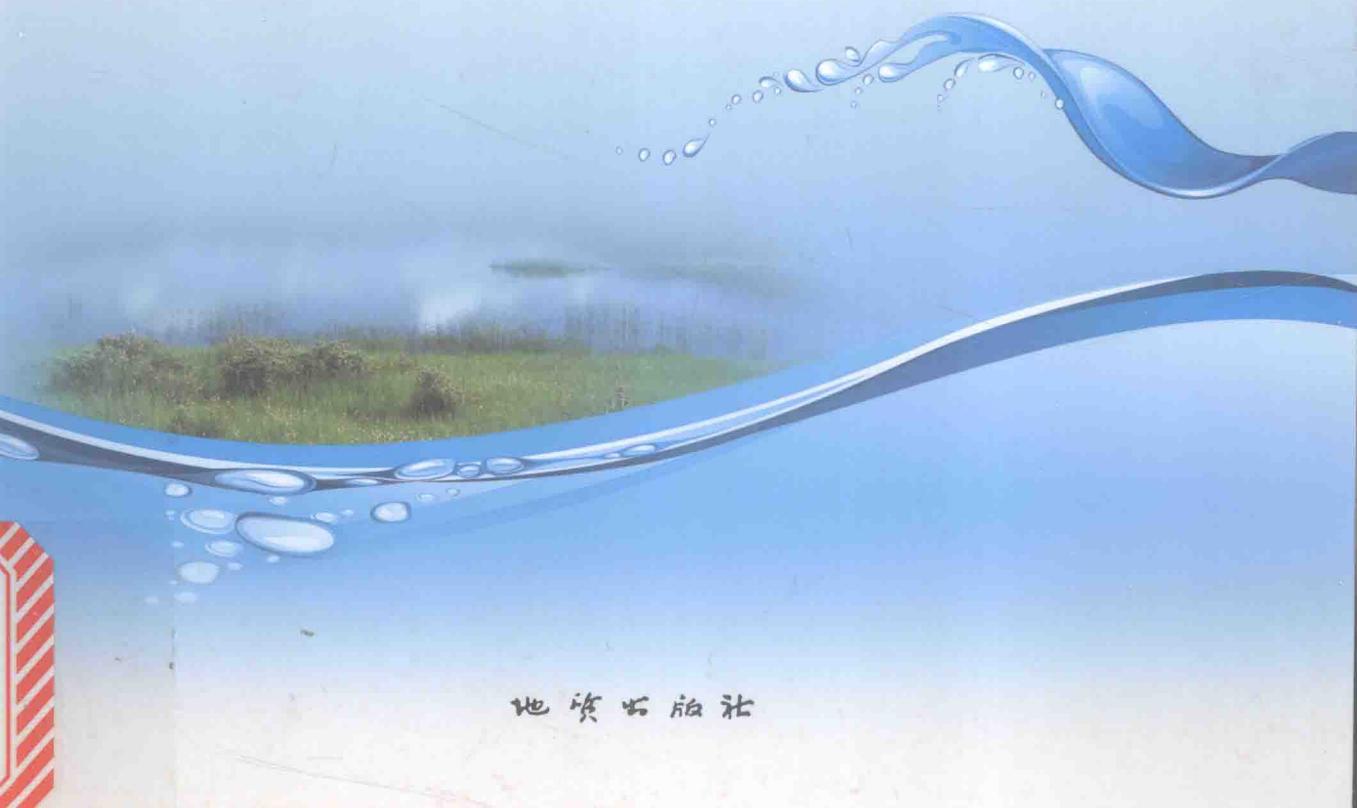


地下水型饮用水水源地 保护与管理

——以吴忠市金积水源地为例

左 锐 王金生 滕彦国 等 著



地质出版社

地下水型饮用水水源地保护与管理

——以吴忠市金积水源地为例

左 锐 王金生 滕彦国 等 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

地下水型饮用水水源地保护与管理：以吴忠市金积水源地为例 / 左锐等著. — 北京：地质出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 116 - 09332 - 4

I. ①地… II. ①左… III. ①饮用水 - 地下水保护 - 研究 - 吴忠市 IV. ①X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 164164 号

责任编辑：贺秋梅 程 静

责任校对：王 瑛

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话：(010) 66554528 (邮购部)；(010) 66554611 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

传 真：(010) 66554686

印 刷：北京地大天成印务有限公司

开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：11.5

字 数：260 千字

版 次：2015 年 7 月北京第 1 版

印 次：2015 年 7 月北京第 1 次印刷

定 价：48.00 元

书 号：ISBN 978 - 7 - 116 - 09332 - 4

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

前 言

地下水型饮用水水源地安全供水不仅是一个技术问题和经济问题，而且是一个重大的社会问题和政治问题，它关系到广大人民群众的生活与生存。因此，进行地下水型饮用水水源地环境保护与管理技术研究，对于保障人民群众的饮水安全，维护社会稳定具有重大的经济效益和社会效益。

本书依托国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题“地下水型饮用水水源地保护与管理技术研究与示范”开展相关研究，研究起始时间为2009年1月至2012年12月，主要开展了地下水型水源地污染物调查、监测、评估及识别技术研究，识别优先控制污染物，解析水源地地下水污染源类型和途径，评价其对饮用水源危害的范围和强度；在地下水型水源地脆弱性评价技术方法改进的基础上，开展了地下水型饮用水水源地污染风险评价技术方法研究；并研究了地下水型饮用水水源地保护区划分改进技术方法，提出针对特定水源地污染削减措施及对策；在我国北方典型水源地开展关键技术示范应用。本项研究面向地下水型水源地环境污染监测、风险评价、保护区划分及污染管控领域的国家重大需求，围绕我国地下水型饮用水水源地环境污染防治与管理急需解决的关键问题，通过上述关键技术的研发，为我国地下水环境污染防治提供必要的科技支撑，使地下水管理更具科学性和可操作性。

本书共分5章，编写分工如下：第1章，左锐、滕彦国、王金生；第2章，左锐、曹阳、王威、李霄；第3章，山丹、滕彦国、曹阳、韦宝玺；第4章，左锐、王金生、杨岩飞；第5章，胡立堂、左锐、邓媛媛、仪彪奇。全书由左锐统稿。

北京师范大学水科学研究院教师李剑、岳卫峰、翟远征、杨洁、于勇，

博士生李仙波、郇环、郭学茹、冯丹、盖鹏，硕士生郑艳红、马啸、谷鹏、孔慧敏、马丁山、王宾、李腾飞、刘丽、关鑫、冷苏娅、陈小娟、汪立娜、靳超等，吴忠市环境监测站徐宁保、马忠诚、沈立娟等参与了课题研究及本书的部分撰写工作。在研究及本书撰写过程中，环境保护部污染防治司、中国环境科学研究院、吴忠市环保局、吴忠市环境监测站、沈阳地调中心的有关领导和同仁给予了大力帮助和支持，在此一并致谢。

本书的不妥和不足之处，恳请广大读者批评指正！

作 者

2015 年 7 月

目 录

前 言

第1章 绪论	(1)
1.1 地下水型饮用水水源地环境管理现状	(1)
1.1.1 水源地管理技术存在不足	(2)
1.1.2 供水管理体系尚不完善	(2)
1.1.3 法律法规条例有待健全	(3)
1.1.4 分散式水源地保护监督力量薄弱	(4)
1.1.5 其他问题	(4)
1.2 地下水型饮用水水源地环境管理研究进展	(5)
1.2.1 国外饮用水水源地保护管理研究进展	(5)
1.2.2 我国饮用水水源地环境管理的研究进展	(6)
1.3 地下水型饮用水水源地保护技术研究进展	(7)
1.3.1 地下水污染源解析技术	(8)
1.3.2 地下水污染风险评价方法	(12)
1.3.3 地下水型水源地保护区划分方法	(15)
1.4 本书技术路线与框架	(19)
第2章 吴忠市金积水源地概况	(21)
2.1 自然地理概况	(21)
2.1.1 地理位置	(21)
2.1.2 地形地貌	(22)
2.1.3 气象水文	(23)
2.1.4 社会经济	(24)
2.2 地质概况	(24)
2.2.1 地层	(24)
2.2.2 地质构造	(25)
2.3 水文地质概况	(26)
2.3.1 含水岩层(组)的划分	(26)
2.3.2 含水层的导水性	(27)
2.3.3 地下水的补给、径流与排泄	(28)
2.3.4 金积水源地地下水流场特征	(30)

2.3.5	金积水源地地下水水化学特征	(31)
2.4	金积水源地污染现状分析	(32)
2.4.1	第一次野外调查取样	(34)
2.4.2	第二次野外调查取样	(37)
2.4.3	第三次野外调查取样	(40)
2.4.4	区域地下水水质分析	(42)
2.4.5	土壤中离子分布	(45)
2.4.6	区域地下水水质评价	(49)
2.5	金积水源地优先控制污染物识别	(54)
第3章	地下水型饮用水水源地污染源解析	(58)
3.1	地下水污染源解析技术框架	(58)
3.2	地下水化学组分来源解析的混合多元统计法	(59)
3.2.1	因子分析法 (FA)	(59)
3.2.2	主成分分析法 (PCA)	(61)
3.2.3	聚类分析法 (CA)	(62)
3.2.4	正定矩阵因子分解法 (PMF)	(64)
3.3	基于地统计学的土壤和地下水重金属源解析	(68)
3.3.1	方法原理	(68)
3.3.2	技术原理	(69)
3.3.3	方法流程	(70)
3.3.4	适用范围	(71)
3.4	基于数值模拟法的三氮类污染物的源解析	(71)
3.4.1	方法建立	(71)
3.4.2	技术原理	(72)
3.4.3	方法流程	(73)
3.4.4	水流、水质数值模拟基础模型	(74)
3.4.5	数值模型解法概述	(75)
3.4.6	粒子追踪法	(76)
3.4.7	数学模型反演解法概述	(76)
3.4.8	适用性分析	(77)
3.5	金积水源地污染源解析	(78)
3.5.1	多元统计法解析常规项来源	(78)
3.5.2	GMS 反向模拟	(85)
3.5.3	数值模拟验证	(86)
3.5.4	PMF 常规项来源解析	(90)
3.5.5	基于地理统计学的重金属元素污染解析	(97)

第4章 地下水型饮用水水源地污染风险评价	(103)
4.1 方法建立	(103)
4.2 方法原理	(104)
4.2.1 水源地地下水固有脆弱性评价方法	(105)
4.2.2 地下水型水源地污染风险评价方法	(110)
4.2.3 技术流程	(111)
4.3 方法验证	(113)
4.4 适用性分析	(114)
4.5 金积水源地地下水污染风险评价	(114)
4.5.1 区域地下水脆弱性评价	(114)
4.5.2 水源地污染风险评价	(119)
第5章 地下水型饮用水水源地保护区划分技术	(132)
5.1 地下水型饮用水水源地保护区划分的基本原则	(132)
5.2 水源地类型划分	(133)
5.3 保护区的划分技术方法	(134)
5.3.1 方法原理	(134)
5.3.2 技术参数	(140)
5.4 水源地保护区划分方法的筛选	(140)
5.4.1 概述	(140)
5.4.2 HEARLAW 模型的构建	(141)
5.5 水源地保护区划分工作的实施	(146)
5.6 金积水源地饮用水水源保护区划分	(148)
5.6.1 保护区划分方法的确定	(148)
5.6.2 保护区划分的数值模型	(149)
5.6.3 水源地保护区划分	(156)
5.6.4 保护区划分结果比较分析	(166)
5.6.5 金积饮用水水源地保护与管理措施	(168)
参考文献	(170)
后 记	(173)

第 1 章 绪论

我国一直高度重视饮水安全，颁布实施了一系列相关法律法规和政策，诸如《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国水污染防治法》（主席令第八十七号，2008）、《关于饮用水水源保护区污染防治管理规定》（〔89〕环管字第 201 号）、《生活饮用水卫生监督管理办法》（建设部、卫生部令第 53 号，1996）和《关于加强饮用水安全保障工作的通知》（国办发〔2005〕45 号）等相关法律，很好地保障了饮用水安全。与之相对应的，各级政府和相关部门落实对饮用水安全监督管理，如建设部的《中华人民共和国城市供水条例》（国务院令第 158 号）、《市政公用事业特许经营管理办法》（建设部令第 126 号）、《城市供水企业资质管理规定》（建设部令第 26 号）、《城市供水水质管理规定》（建设部令第 156 号）等制度的建立，有效地完善了我国饮水安全法律体系。

在水源地管理方面，《国家环境保护“十一五”规划》明确要求，把污染防治作为重中之重，把保障城乡人民饮水安全作为首要任务。2006 年来，国家环保总局开展了 661 个县级以上城市（含县级市）集中式饮用水水源地环境基础状况的调查评估工作；2007 年 10 月，国家发改委等五部委联合印发了《全国城市饮用水安全保障规划（2006～2020 年）》，对全国 661 个城市和县级政府所在地城镇的饮用水安全保障工作做了全面的部署；近年来，科技部、环保部等有关部门陆续开展一系列重大科学研究和探索，为饮用水安全保障提供了大量的技术积累。通过多年的努力，我国已经初步形成了饮用水水源地安全保障管理体系，但较发达国家的饮水安全保障管理还有较大的差距。

1.1 地下水型饮用水水源地环境管理现状

地下水源由于经过土壤自然净化，水质好、分布广、不易被污染、调蓄能力强、供水保证程度高，被人们广泛地开发利用。尤其是在我国北方干旱和半干旱区的许多地区和城市，地下水是极为重要的饮用水水源（陈梦熊，1998）。目前，地下水型饮用水水源地面临以下几种环境问题：一是地表水污染严重。《全国地下水污染防治规划（2011～2020 年）》表明，目前，我国地表水污染对地下水影响日益加重，特别是在黄河、辽河、海河及太湖等流域；二是部分水源地面临的农业面源污染问题。尤其是农村分散式、乡镇集中式等饮用水水源地，主要由于农业面源污染和生活污染，氨氮超标较为普遍；三是随着饮用水需求量的增加出现地下水超采的问题（周克英等，2008）。

地下水型饮用水水源地这些环境问题的产生，一方面与地下水资源短缺密切相关；另一方面也与地下水型水源地管理水平落后有直接的关系。尽管各相关部门对地下水资源管理开展了大量工作，取得了一些进展和成效，但总体来看，我国的地下水型饮用水水源地环境管理工作仍面临着诸多问题，如管理体制不完善、法律制度难以切实落实、管理基础

薄弱、设施不完善和管理人员不足等，这些都将作为今后地下水型饮用水水源地环境管理工作的挑战（关锋，2010）。

1.1.1 水源地管理技术存在不足

尽管我国饮用水安全保障管理体系已初步建立，但仍存在水源地污染严重，供水系统安全隐患突出和卫生安全检测低等问题。

（1）水源地污染严重

点源及面源污染使地下水水质变差。根据国家环保总局资料显示，2003 年全国地下水水质有恶化趋势，大部分城市和地区存在点状或面状污染，污染区以人口密集和工业化程度较高的城市中心区为主，超标指标有矿化度、总硬度、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、铁、锰、氯化物、硫酸盐、pH 值、氟化物、酚等。铁、锰和“三氮”污染在全国各地区均比较突出，矿化度、总硬度、硝酸盐超标主要分布在东北、华北、华东、中南和西北地区。同时，大面积施用化肥、农药，也是造成包气带及地下水污染的原因之一。被污染的浅层地下水向下渗流，使深层地下水污染。深层地下水循环缓慢，可再生能力一般小于浅层地下水，其污染后的修复要比浅层水困难得多。近年来，地下水的超量开采，也使得深层地下水的压力水头降低、地下水流场发生改变，使得浅层地下水渗入量增加，从而增加了易污染的脆弱性。根据住房和城乡建设部 2009 年对全国县级以上的城市供水水质普查，当前城市供水水质安全状况总体不容乐观。监察部数据统计显示，近几年我国水污染事件每年都在 1700 起以上，2011 年监测数据显示，我国十大水系监测的 469 个国控断面中，有 13.7% 的监测断面为劣 V 类水体，国家监测的 26 个国控重点湖泊（水库）中，重度富营养占 7.7%，中度富营养占 46.1%，轻度富营养占 46.2%（环境保护部，2012）。

（2）供水系统安全隐患突出

从城市供水结构来看，结合 2004 年建设部组织的专项调查和 2009 年建设部城市供水水质监测中心对个别城市的抽查，目前大多自备井供水过程没有消毒措施，且水质超标问题超 50%。其次，二次供水基本都委托管理，缺乏必要的专业知识，造成设施建设质量差，水质污染比较严重，约有 20% 的二次供水水质存在水质超标现象。此外，我国众多地区存在供水管网铺设时间长、长期超限运行、管网的更新率低、年久失修等问题，造成各种形式的明漏、暗漏，爆管事故频发，水质污染时有发生，如 2014 年爆发的兰州市局部自来水苯超标事件。

（3）卫生安全检测能力低

《生活饮用水卫生标准》（GB5749—2006）修订后，水质控制指标大幅增加，各地实施情况存在很大差异，普遍存在基层单位人力资源不足、检测能力不足、检验设备不配套等问题，导致难以开展全部项目的检测。目前的检测能力和水平已经难以满足全面开展饮用水监督工作的要求，严重影响饮用水卫生安全的有效监管。在全国 32 个省级疾控机构中，具备《生活饮用水卫生标准》中要求的全项水质指标检测能力的仅有 5 个实验室。

1.1.2 供水管理体系尚不完善

由于对水源地监管不力，致使企业违法排污，造成水源污染事件的频发。而供水系统

水质隐患总的来说是管理技术的落后和后期维护的懈怠造成的。主要原因有以下3方面:

(1) 责任不明确

表现为不同部门之间、政府与供水企业之间,以及消费者与供水企业之间等法律主体的法律地位不明确、法律责任难以认定。例如,我国水源地管理实行由环境保护部门主管、水量管理由水利部分管,供水设施及管网由住房和城乡建设部管理,水质质量保证由国家卫生和计划生育委员会监管,容易形成“多龙治水”现象。从近年来日益严重的突发水污染事件势头并未被遏止可以侧面反映出这种配合监管模式自身存在明显的缺失。

(2) 监管不力

城市供水行业引入市场机制后,投资主体或经营主体呈现多元化,供水企业包括国有、民营和外资,而相应的特许经营监管机制相对滞后。一方面传统的管理方式已经不能适应当前供水行业发展的需要;另一方面,对引入的外资和民营企业,主管部门基本丧失了对应的法律约束和管理控制。

(3) 应急机制不完善

由于目前缺乏完善的饮用水水源安全保障体制和机制,往往是突发水污染事件发生后,启动由环保、水务、海事部门主要负责,卫生、建设、交通、公安等其他部门通力合作的应急抢险机制,凸显疲于应付、治标不治本的结果。

由于部分地下水型饮用水水源地的管理缺乏组织机构保障,很多水源地尚未成立管理机构,水源地管理职能分散于各个部门,缺乏统一协调,主管部门的地位不明确。而且目前地下水饮用水水源地管理主要包括水量调节与水污染防治两大块,缺少对于生态保护、污染事故应急管理及管理的监督考核等必要的管理职能。同时,水源地管理人员素质较低、管理设备不足、行政经费短缺等问题,均影响地下水型饮用水水源地的环境管理质量(刘松,2013)。

1.1.3 法律法规条例有待健全

虽然我国相关的水源地管理办法、实施细则等在饮用水水源地的环境管理和保护层次均有所体现,但目前专门针对地下水型饮用水水源地的管理保护法规还没有出台。各水源地仍缺乏可操作的具体管理条例和规定。而且在管理方面,没有专职管理机构,环保、城建、供水、水利、国土、卫生等部门均有相应的管理职能。各机构之间缺乏必要的协调,因此,起草和颁布的相关法规较为松散,缺乏系统性、整体性和一致性(郭英卓,2012)。

(1) 划定饮用水水源保护区的方法和依据不统一

地下水饮用水水源地保护区的划分和建设,是水源地依法管理的基础。因此,科学合理划定饮用水水源保护区范围,明确饮用水水源保护区界线,是合理管理和保护饮用水水源的核心(王金生等,2013)。但我国各法规中对地下水饮用水水源地的划分规定却不统一,导致各地方在进行饮用水水源保护区划分时缺乏统一的方法依据。环保部颁布的《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338—2007)对饮用水水源保护区划分方法做出了统一规定,但仅作为行业推荐性标准;而水利部开展的“全国城市饮用水水源地安全保障规划”仍采用了本行业《全国城市饮用水水源保护区划分技术细则》,将水源地分



为保护区和准保护区，两者存在显著差异（左犀等，1996）。

（2）饮用水水源保护区水质目标管理依据缺乏针对性

我国地下水饮用水水源水质评价的主要依据是《地下水质量标准》（GB/T 14848—93）中关于集中式生活饮用地下水的水质要求，而该标准作为水质评价依据表现出诸多局限性，无法显示出水源地的的重要性，还需制定专门的水源保护区水质目标及国家标准，为政府主管部门和制水企业检验判定水源地水质提供科学依据（张力，2011；王研等，2009；李玉前，2009）。

（3）饮用水水源保护区保护措施尚不完善

我国法律法规中关于饮用水水源保护区污染排放规定不一致，其中，《中华人民共和国水法》规定，禁止在饮用水水源保护区内设置排污口；《饮用水水源保护区污染防治管理规定》（〔89〕环管字第201号）规定，二级保护区内原有排污口必须削减污水排放量以保证保护区内水质满足规定的水质标准，准保护区直接或间接向水域排放废水必须符合国家及地方规定的废水排放标准，也即允许在二级保护区和准保护区内排放达标污水（刘松，2013）。

水源地保护应涉及水量、水质、水生态等方面内容，而目前我国相关法律法规的重点主要还在水质的保护标准和措施方面，对水量和水生态尚未做出相应规定。此外，饮用水水源保护区保护措施仅对污染源的行为进行了禁止性规定，对保护和改善水源的措施缺乏指导性的意见，尚未提出鼓励性措施规定，有待进一步完善（左犀等，1996）。

1.1.4 分散式水源地保护监督力量薄弱

现行的环境保护法律法规，绝大部分均侧重城市的水源地保护和城市水污染防治，对农村水资源保护和农村水污染防治较少关注。如新的《中华人民共和国水污染防治法》在第五章设专章规定饮用水水源和其他特殊水体的保护，但重点指在城镇设立饮用水水源保护区，而对农村饮用水保护却没有提及；而农村地下水饮用水水源地水质普遍较差，主要由于农业面源污染和生活污染，使得氨氮超标较为普遍。此外，在农村环境保护监督管理方面，还存在力量薄弱的问题，一些基层限于资金、技术、人员方面的限制，往往不能很好履行环境监督管理职责；农村基层监管部门的执法人员的素质普遍不高，导致执法能力的下降；在广大的农村地区，因地下水源分散、规模小、重视程度不够（李玉前，2009）。

1.1.5 其他问题

作为水源地保护的基础，通过及时发现问题，有效预警预报，并针对性地采取积极措施，对保护饮用水水源具有重要的科学依据，而我国现行法规尚无此方面的规定（刘松，2013）；地下水型饮用水水源地突发事件的应急预案在水源地保护管理中越来越重要，现行法规对突发事件应急处理方面的规定尚不很明确（谭钰，2010）；饮用水安全关系到人民群众的切身利益，急需加大宣传力度，使公众进一步深入了解并参与饮用水水源地保护的规划、实施、管理、监督等过程，推进我国地下水型饮用水水源地环境管理的发展（刘琰等，2007）。

1.2 地下水型饮用水水源地环境管理研究进展

自20世纪下半叶起,全球范围内水资源短缺与水质恶化问题日趋突出,继而引发了对传统水源地环境管理技术的反思。在这一背景下,水源地的有效管理与保护正在成为国际研究热点。美国、英国、德国和日本等国相继提出了针对各自国情的水源地保护的理论框架,研究范围也从传统的市政工程逐渐向环境科学、资源科学、地理科学等多学科交叉领域拓展(石效卷,2012)。

1.2.1 国外饮用水水源地保护管理研究进展

1.2.1.1 国外地下水型水源地环境管理的模式

在地下水型水源地环境管理方面,国外有多种管理模式值得我们学习和借鉴,主要有环保部门或水利部门为主的地下水型水源地环境管理模式,分为分散式、集中式地下水型水源地环境管理模式,流域地下水型水源地环境管理模式,区域地下水型水源地环境管理模式。

(1) 以环保部或水利部为主的地下水型饮用水水源地环境管理模式

国外对地下水型饮用水水源地环境管理部门有的以环保部为主,有的以水利部为主。法国和德国是以环保部为主来进行管理的典型国家。法国在环保部主要设立了水务管理司与国家有关机构、社会团体等协同行动。在德国,联邦环保部负责地下水资源利用、水污染控制、水质监测及发布水质指标等各项工作。

以水利部为主体集中管理地下水型饮用水水源地的国家是荷兰。水利部负责制定相关的战略指导方针,以及地下水的开采等具体事宜。

(2) 分散、集中式地下水型饮用水水源地环境管理模式

这种模式主要包括普通分散式管理模式,部级别集成分散式管理模式和国家级集成分散式管理模式。

普通分散式管理模式主要以加拿大、日本和英国为代表。在加拿大,环境、海洋和农业部等联邦政府部门都设有专门的地下水型饮用水水源地环境管理机构;在日本,环境省负责用水与水环境保护工作,厚生省负责主管生活用水,其他水资源管理分别由其他管理部门负责。

部级别集成分散式管理模式就是将水环境管理等由政府的某一部主管,以色列就是这类模式的典型。主要由农业部负责水资源,包括地下水在内的管理工作,如制定规划、审批管理、污染防治等。

国家级集成分散管理模式就是由国家水资源委员会,全面负责水资源与水环境的管理工作。澳大利亚和印度就是这种模式。澳大利亚以国家水资源理事会、印度以国家水资源委员会为最高机构,制定全国水资源管理办法,制定饮用水标准,监督相关政策的落实。

(3) 流域水源地环境管理模式

按流域统一管理水环境,使水资源管理和水污染防治的统一,成为一种逐步被接受的水环境管理模式。经过多年的实践经验,英国在这方面取得了非常成功的经验。英国实施

的以流域为单元的综合性集中管理,在较大的流域周围设有流域管理委员会、水务局或水务公司,统一进行相关规划和工程建设,直至供水到用户,然后进行污水回收处理,形成一条龙的管理服务系统。

(4) 区域水源环境管理模式

发达国家的水环境管理模式证明,实行区域管理的模式,是对水资源和水环境进行有效管理的良好模式。20世纪80年代初,美国削弱了水资源管理委员会的作用,加强了各州政府对水资源管理的权限,使水资源和水环境管理更具有权威性。各州以内部流域为单位划分自然资源区来进行地下水保护,污水排放控制等(于万春,2007)。

1.2.1.2 国外饮用水水源地环境管理的法制建设研究

美国到目前有关饮用水水源管理的主要法律包括《清洁水法》、《饮用水安全法》及《水源保护手册》。但是专门针对水源地保护的法律到目前为止还未出台。美国饮用水水源地环境管理的特点是以各机构间协调协作为主,充分发挥公众参与的重要作用。在水源地环境管理过程中,利益方应为主导,非营利性组织、政府有关部门和社会公众给予监督管理(王玉秋等,2010)。

德国饮用水水源地的法律、法规和政策相对较为完善,主要有《水法》、《地下水水源保护区条例》等。其中,《水法》规定所有的饮用水取水口都要在建立水源保护区的基础上进行保护,要求尽可能保护取水口及其上游地区等水源保护区,积极要求当地居民和社会团体等的踊跃参与,共同完善水源地保护制度(李建新,1998)。

日本饮用水水源保护法规体系主要包括《河川法》、《公害对策基本法》、《水污染防治法》等。此外,还建立了“饮用水水源水质标准制度、饮用水水源水质监测制度、水源地经济补偿制度、紧急处置制度”等。国家环境部门下设水质保护局专门就饮用水水源地进行统一的保护与管理(蓝楠,2007)。

新加坡为了保护饮用水水源地的水质,污染源控制与治理主要依据环境部的《水源污染管制与排水法令》等。环境部与公用事业局联合运用网络系统来监测地面径流及水源地的水质,进行监测站点(断面)的优化及增设,并对水质、水量进行双重监控,有效地控制和减少了水源地污染(高斌等,2011)。

国外发达国家缺乏针对地下水型水源地环境管理的法律法规,是通过长期实践,在饮用水水源地保护法规方面也取得了以上较好的经验。特别是美国涵括水源地保护的一级立法、严格的公众参与制度,德国完善的饮用水水源保护区制度,日本的饮用水水源水质标准和水质监测制度、水源地经济补偿制度、紧急处置制度,以及新加坡的水源污染管理制度等,对我国饮用水水源地保护法规体系的进一步完善有很好的借鉴作用(唐克旺等,2012)。

1.2.2 我国饮用水水源地环境管理的研究进展

随着社会经济的发展,公众对水量、水质的要求不断提高,经济发展与水源地保护之间的矛盾不断加剧,使得我国对水源地保护日益重视。与发达国家比较,我国饮用水水源地的管理、研究和保护工作相对较落后。由于关于水源地的基础信息分散在水利部、建设部、环保部或地方、流域甚至大的工程管理部门,而且各部门所掌握的资料既不系统、

也不全面,更缺少共享机制和共享平台,水资源管理部门关于全国水源地基本状况的了解十分有限(陈静生等,1998)。

我国在水源地保护和管理方面,从国家法律、行政法规、部门规章、标准规范和地方法规等形成一个多层次的饮用水水源地保护法规体系,先后颁布了《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国水法》等国家法律和《中华人民共和国水污染防治法实施细则》等行政法规对饮用水水源保护管理进行了相关规定;国家环境保护部、卫生部、建设部、水利部、地矿部联合颁布《饮用水水源保护区污染防治管理规定》(〔89〕环管字第201号),规定了饮用水地表和地下水水源保护区的划分和防护、保护区污染防治的监督管理以及奖励与惩罚等内容;2007年新颁布的《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ/T 338—2007)对河流、湖泊、水库、地下水等不同类型水源地保护区划分方法规定了相关技术要求;2010年《全国饮用水水源地环境保护规划》对饮用水水源地的污染源调查、污染负荷控制、环境保护工程规划等提出详细的要求。

此外,各地方政府针对本地实际情况也制订了专门的水源保护管理条例,或在环境保护条例和水污染防治条例中对水源地保护进行了相关规定。如《北京市排水管理办法》,1986年制定的《北京市城市自来水厂地下水源保护管理办法》(京政发82号)和1989年制定的《北京市水资源保护规划》。此外,北京市科学技术委员会已立项开展“京郊农村安全饮水及污水处理技术与示范”,在13个郊区县组织开展饮水安全及污水处理示范工作,研发一批适合农村特点的技术,创新运行地下水型水源地的环境管理模式。

2009年以来,国家实施饮用水重大专项,设立“饮用水安全保障技术与示范”主题,进行“饮用水水源地保护与管理技术与示范”课题研究,旨在从国家层面上实施理顺规划关系,合理编制规范,完善规划技术体系。针对我国不同类型水源地的特点及其污染源特征,开展饮用水水源地环境保护与管理技术研究,建立饮用水水源地水环境质量管理技术体系,饮用水水源保护区污染源风险管理与控制技术体系,饮用水水源保护区水生态系统管理技术体系,保障饮用水水源地水质安全。

1.3 地下水型饮用水水源地保护技术研究进展

国外对水资源管理模型的研究始于20世纪50年代,而我国到20世纪80年代才开始关注地下水资源管理问题(周念清等,2001;董增川等,2012)。Bredehoeft等(1994)和Wagner(1995)对地下水管理模型形成、求解和应用以及分布参数下的地下水管理模型进行了详细的阐述。林学钰等(1995)系统论述了地下水管理模型的基本原理、建模步骤、求解方法。邵景力等(2003)以包头市地下水系统为研究实例,建立了包头市含水层地下水数值模拟模型,并求得地下水系统单位脉冲响应函数,构建了多目标地下水—地表水联合调度管理模型。

近年来,水资源学者开始将地下水的生态功能维持纳入到地下水管理的考虑范畴,将地下水的生态水位作为约束条件植入到地下水管理模型中。章光新等(2006)以吉林省大安实验区为研究对象,建立基于生态用水的地下水系统三维模拟与优化管理模型。万力等(2005)在考虑地表植被生态的基础上,构建了植被生态地下水管理模型。孙才志等

(2013) 以辽阳首山水源地作为研究对象,在地下水动力场模拟基础上,采用情景分析方法,建立了基于生态约束的地下水管理模型,采用线性规划方法求得 3 种不同情景下的地下水新增优化开采量。通过优化调整开采方案,在增加全区开采量的同时能够保证首山地下水漏斗的逐渐恢复,同时有利于解决研究区内潜在的土壤盐渍化威胁,实现经济效益与生态效益的统一。杨娟等(2013)从定量方法入手,选取西部典型城市广西贵港市的城市饮用水水源地为研究对象,运用模糊方法对其水环境的发展现状与趋势进行分析,在此基础上提出优化其水环境管理的对策与机制,进而构建饮用水水源地水环境的管理体系。郭英卓(2012)采用因果分析图法对水源地保护管理有影响的重要因素加以分析和分类,并在因果分析图上用箭线将其关系表示出来,通过整理、归纳、分析查找原因,理清因果关系,然后提出合理的对策措施,制定饮用水水源地保护管理方案。

21 世纪以来,Internet 日益成为信息化交流、信息获取的重要工具,成为当今世界最大的信息网络。地下水型水源地环境管理是自然科学与社会科学的交叉学科,它不仅涉及水文地质学的各个领域,而且涉及与地下水开发活动有关的自然环境、社会环境和技术经济环境等诸多方面的问题。研究地下水型饮用水水源地环境管理,除应用传统水文地质学科的理论和方法外,还需要应用计算机技术、通信技术、遥感技术、地理信息系统、全球定位系统等新技术与方法。近年来,随着科学技术的飞速发展,地下水资源管理进入了一个新阶段,地下水资源管理新技术与新方法不断涌现,涵盖了地下水资源管理的各个领域(陈静生等,1998)。

如地理信息系统(GIS)技术与网络技术结合使 WebGIS 成为现实。WebGIS 是 Internet 和 WWW 技术应用于 GIS 开发的产物,是实现 GIS 互操作的一条最佳解决途径。随着 WebGIS 技术的不断成熟,在国家环境保护管理信息系统的研制和建设中得到了广泛的应用。基于 WebGIS 的国家水环境管理信息平台以水环境管理信息为基础,以地理信息技术、网络技术等为支撑,进行了研究和开发,为我国水环境管理提供先进的手段和工具(朱琦等,2007)。黄勇等(2011)以傍河型水源地内的河流、地下水、地表水和环境等诸要素的基础特性及相互关系、水源地管理和污染监测业务的需求为理论依据,通过 ArcGIS Engine 技术相结合,研制了傍河型水源地基础信息管理软件平台。

地下水型饮用水水源地水环境管理机制是落实其环境管理对策、保证环境管理秩序、提高环境管理效率的重要保障。针对目前地下水型饮用水水源地水环境管理所存在的问题,健全完善法律法规是实现地下水型饮用水水源地水环境管理组织功能、监督功能的重要前提,不断学习国内外新的技术方法,从多层次、多领域、多学科交叉的角度来研究地下水型饮用水水源地水环境管理,是实现地下水型饮用水水源地水管理功能的最终目标。

1.3.1 地下水污染源解析技术

1.3.1.1 地下水污染源识别技术

污染源解析体系的建立,主要是污染源解析方法的建立,自 20 世纪中期以来,国内外学者对污染物在含水层中的运移、控制、修复进行了大量的研究,随着正问题研究方法以及理论的成熟,污染源识别的反问题逐渐成为研究的重点。源解析的方法根据研究对象的不同可分为扩散模型(Diffusion Model)和受体模型(Receptor Model)。前者以污染源

为研究对象,后者以污染区域为研究对象。由于扩散模型需要预先知道污染源的排放量,进而研究污染物的浓度分布或反应机理,但实际情况中我们往往便于得到污染物现状分布,而源的分布以及排放信息较难获得。受体模型通过分析源和受体的理化性质识别可能的污染源和源对受体各成分或各监测点的贡献。20世纪60年代,国外首先在大气领域开始了受体模型的研究,形成一套定性、定量的方法解析污染源,这些方法逐渐在土壤及水环境污染源解析中得到广泛应用。受体模型是相对于正向的扩散模型(源模型)而言,是一个反演未知参数的过程,污染源解析现阶段没有明确统一的定义,简称源解析、源识别,环境中各种元素和化合物含量的信息蕴藏着各污染源的特征信号,根据目标环境中检测到的信号,利用污染源与环境之间的“输入-响应”关系,结合实际条件判别、解析与评价污染物的来源、位置、排放强度和时间序列等要素即污染源的识别。

1.3.1.2 污染源解析数值模拟技术

地下水溶质运移反问题的研究起源于研究数理方程反问题,地下水污染源解析反问题求解也从其中借鉴而来,其反演算法主要有优化-仿真、概率统计等。

从20世纪80年代开始,Wagner(1992)首先在数值模拟基础上,结合线性规划与最小二乘法,将数值模拟的污染物浓度以响应矩阵形式嵌入优化模型中,进行地下水污染源的识别;Aral和Guan(2001)运用响应矩阵识别地下水污染源,并证明该方法比运用线性规划方法更有效;Mahar和Datta(1997)利用优化地下水监测系统来提高污染源识别的效率,利用监测井获得的数据运用于非线性优化模型中获得更精确的污染源预测;Atmadja和Bagtzoglou(2001)总结了污染源识别中的数学方法,将方法归纳为优化法、解析解法及概率统计方法和地学统计法。

Datta和Chakrabarty(2009)采用了模拟模型外部链接优化模型的方法识别污染源;Singh(2004)等利用人工神经网络法识别未知的污染源,同时研究了遗传算法解二维源解析优化模型;Khalil等(2005)综合利用4种模拟方法(人工神经网络(ANNS)、支持向量机(SVMS)、投影局部加权回归(LWPR)、相关向量机(RVMS))建立了相对复杂和耗时的数学模型,模拟地下水中硝酸盐浓度分布。Wang和Zabaras(2006)利用贝叶斯级数法解对流弥散方程,推导过去某一时间污染物浓度分布,研究了地下水连续渗流的污染来源;Bashi-Azghadi等(2010)利用多目标优化模型——非劣排序遗传算法II,链接到MODFLOW和MT3D模型中进行污染源识别,利用并行支持向量机和人工神经网络识别主要污染物。同时还有众多学者对地下水污染源位置及排放时间序列进行解析。

国内针对污染源解析的研究不多,多集中在地表水及水力参数识别领域。地下水方面,国内学者运用水动力-水质耦合模型,建立了基于贝叶斯推理的污染物点源识别模型,通过马尔科夫链蒙特卡罗后验抽样获得了污染源位置和强度的后验概率分布和估计量,较好地处理了模型的不确定性和非线性,在反演结果的可靠性和估计的精度方面采用贝叶斯推理和抽样方法获得的反问题的解具有信息量大,能给出环境水力学参数的后验分布且估计精度高的优点,该方法适用于水文地质条件以及水流运移过程相对复杂的多点源解析。

Sidauruk等(1998)提出一种基于解析解的反演方法,该方法只需要合理的污染浓度序列,可以预测弥散系数、水流流速、污染源浓度、初始位置和污染开始时间,利用参数