

地下水资源管理理论与方法

Dixiashui ziyuanguanli lilunyufangfa

苏万益 陈南祥 等编著

陕西科学技术出版社

地下水资源管理理论与方法

苏万益 陈南祥等 编著

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下水资源管理理论与方法/苏万益等编著. —西安:
陕西科学技术出版社, 1999. 7
ISBN 7-5369-2999-4

I. 地… II. 苏… III. 地下水资源-资源管理 IV. P641

. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 20397 号

内 容 提 要

本书全面介绍了地下水系统的概念和地下水系统的分析方法;详细论述了地下水资源管理的主要内容(包括行政的、法律的和经济技术的);重点介绍了各类地下水资源管理模型的建立、求解及其应用;并对 GIS 和 DSS 及其在地下水资源管理方面的应用和进展作了阐述。本书在内容编排上遵循系统分析的思想,突出基本理论和基本方法,并注重实际应用。

本书可作为高等院校地质工程、环境工程和水文学及水资源专业的教材,也可供上述专业研究生及技术人员参考。

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号,邮政编码 710003)

西安理工大学印刷厂印装

(西安市金花南路 5 号,邮政编码 710048)

787 毫米×1092 毫米 1/16 开本 9.5 印张 22.8 万字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5369-2999-4/P · 54

定价:18.80 元

前 言

20 世纪中叶以来,计算机技术和系统工程的发展及其理论和方法在许多科学技术领域中的广泛应用,加速了科学技术的相互渗透与高度综合,极大地推动了科学技术的进步,一系列新兴的交叉学科相继诞生。地下水系统的研究和地下水资源管理即是在这样的背景下产生和发展的。地下水资源管理在我国的悄然兴起和迅速发展只是近 15 年来的事情。15 年来,我国广大科技工作者孜孜不倦,积极探索,无论在理论上还是实践上都做了大量卓有成效的工作,使得这门科学不断发展成熟,为我国的水资源开发利用和科学管理作出了积极的贡献。

本书作者自 80 年代中期开始,就一直紧紧追踪地下水系统和地下水管理的发展脉络,并积极地把有关内容和动向及时传授给学生。作者曾先后编写了《地下水系统及其系统分析》和《地下水资源科学管理》,作为华北水利水电学院水文地质与工程地质专业本科生和研究生的教材而使用多年。本书就是根据作者多年来的教学和科研实践,在原教材的基础上扩充改编而成的。这次改编加入了作者近年来的科研成果和大量反映目前国际先进水平的新成就、新进展。本书的编撰同样遵循系统分析的思想,突出基本理论和基本方法,并密切联系实际,注重实际应用,力求深入浅出。通过实例分析加深对理论的理解,努力达到科学性与适用性相统一。

全书共九章:第一章叙述了地下水系统的概念和地下水系统的分析方法;第 2、3、4、5、6 章详细介绍了各类地下水资源管理模型(集中参数系统管理模型、分布参数系统管理模型、水质系统管理模型、经济管理模型等)的建立求解及其应用;第 7 章介绍了地下水资源管理的法律和行政措施;第 8 章介绍了地下水资源管理的经济技术措施;第 9 章着重介绍了地理信息系统(GIS)和决策支持系统(DSS)及其在地下水资源管理方面的应用。

本书绪论,第 2 章的第 1、2 节,第 4 章,第 9 章由苏万益编写;第 2 章的第 3、4、5 节,第 3 章,第 7 章由陈南祥编写;第 1 章,第 5 章,第 6 章的第 3、4 节由杨素珍编写;第 6 章的第 1、2 节,第 8 章由徐建新编写,全书由苏万益统稿。

本书编写过程中参考了一些兄弟院校出版的专著、论文及有关材料,在此表示诚挚的感谢。

由于编著水平所限,书中尚有不尽如意的地方,甚至难免还有错误和不足之处,恳切希望各位读者和专家给予斧正。

作 者

1999 年 5 月

目 录

第 0 章 绪论

- 0.1 地下水资源管理的概念和内容 (1)
- 0.2 地下水资源管理的必要性 (2)
- 0.3 地下水资源管理的研究现状和发展趋势 (3)

第 1 章 地下水系统

- 1.1 地下水系统的概念 (7)
- 1.2 地下水系统的性质、基本结构和环境 (10)
- 1.3 地下水系统的功能 (15)
- 1.4 地下水系统的分类 (16)
- 1.5 地下水系统研究的主要内容与方法 (18)

第 2 章 地下水资源管理模型

- 2.1 地下水资源管理模型的概念 (22)
- 2.2 管理模型的决策变量、目标函数与约束条件 (25)
- 2.3 地下水资源管理模型的分类 (28)
- 2.4 地下水资源管理模型的研究内容与方法 (29)
- 2.5 建立地下水资源管理模型的理论基础 (32)

第 3 章 集中参数地下水资源管理模型

- 3.1 概述 (38)
- 3.2 集中参数地下水模拟模型 (39)
- 3.3 集中参数预报模型的精度检验与评价 (44)
- 3.4 集中参数系统预报与管理模型实例 (46)

第 4 章 分布参数地下水资源管理模型

- 4.1 嵌入法 (52)
- 4.2 响应矩阵法 (57)

4.3 实例分析	(61)
4.4 嵌入法和响应矩阵法的特点	(68)

第5章 其它类型的地下水资源管理模型

5.1 地下水水质系统及水质管理模型	(69)
5.2 地下水分布参数系统经济管理模型	(76)
5.3 层次分析模型	(82)

第6章 求解地下水资源管理模型的数学规划方法

6.1 线性规划	(84)
6.2 非线性规划	(97)
6.3 动态规划	(104)
6.4 多目标规划	(105)

第7章 地下水资源的行政管理

7.1 概述	(107)
7.2 水行政管理的特性	(108)
7.3 水资源管理的法律依据和原则	(109)
7.4 水资源管理体制	(110)
7.5 取水许可制度	(115)
7.6 水费和水资源费	(116)

第8章 地下水资源管理的技术措施

8.1 地下水资源管理模型的监测工作	(120)
8.2 地下水资源管理的措施	(124)
8.3 地下水资源管理的工作程序	(131)

第9章 GIS和DSS在地下水资源管理中的应用

9.1 地理信息系统	(135)
9.2 GIS在地下水领域中的应用开发现状与趋势	(137)
9.3 决策支持系统	(140)
参考文献	(145)

第0章

绪 论

0.1 地下水资源管理的概念和内容

现代水文地质学的一个重要内容就是地下水资源科学管理。随着人口的增加、经济与城市的发展,用水量迅速增加。因而就出现了由于大量开发利用地下水而产生的许多环境水文地质问题,如区域地下水位持续下降、水质恶化、海水入侵、地面沉降等地质公害,给人民生活与工农业建设带来严重的影响和巨大损失,水资源量的多寡与质的优劣明显地已成为制约人类生存与社会发展的控制性因素。因此,如何做到科学开发、统筹兼顾合理采排地下水,防止地下水公害的发生与发展,已成为地下水资源管理工作的核心任务。

地下水资源管理是自然科学与社会科学之间交叉而兴起的一门新兴学科。它综合运用社会科学、自然科学与技术科学的原理与方法,研究人们开采利用及管理地下水的规律性问题。

地下水资源管理是指管理者为了一定的目的,在一定的时间和空间范围内,对管理的各种基本要素(目标函数、决策变量、约束条件)通过行政法律措施、工程措施、技术手段,组成一个有机的管理系统,且经常对这个系统内部的各种信息进行传递、交换、调节,并通过系统输出信息的反馈对系统施加控制,同时,与外部环境保持相对平衡,以实现管理目标,获得最佳经济效益和社会效益。用系统的观点讲,地下水资源管理可表达为:在一定的约束条件下,通过对地下水系统中某些决策变量的操纵,使系统按既定目标达到最优。这个目标可以是地下水位、流量、经济效益、社会效益和环境效益等。

地下水资源管理不仅仅是单纯的水文地质问题,而且涉及经济、社会、政治、法律、制度、生态和技术条件等各个方面,这是一项复杂的综合性课题,需要采用应用数学、运筹学、系统分析、控制论、信息论等方法与水文地质学、水动力学、水文地球化学等基本理论相结合,运用优化技术、模拟技术和计算机技术去研究解决。

地下水资源管理的基本目的和任务是:把危害地下水系统的因素降低到最小,使用水者从经济、技术和制度上获得最大效益。通过水资源管理,进行优选水源,制定出水资源系统的规划方案,对含水层储存量、地下库容的容积、未来需水要求、环境保护措施、水资源合理开发、联合调度、人工调蓄等等问题,进行长远的规划与设计,以最终满足各方面对水的要求,或权衡利弊、保证满足重要用水对象的需求,并且采用行政、法律、经济技术等手段,对地下水资源进行调控和管理,兴利除弊,确保地下水系统的良性运行。

地下水资源管理的内容,包括法律管理、行政管理和经济技术管理等方面。法律管理即是国家或地方政府为有效管理地下水资源,制定和颁布有关地下水资源管理的法规、规章和制

度,依法管理地下水。行政管理即是为保证地下水资源管理法规和经济技术措施的贯彻执行,必须建立一套完善的水资源管理的行政机构,该机构应具有行政的和专业技术的双重职能,这是进行水资源管理工作不可缺少的组织保证。经济技术管理即是在全面考虑地下水资源形成的自然条件和人类活动与自然环境之间的复杂关系的前提下,采取一系列经济技术措施,合理的开发、调配、控制和保护地下水资源,以便兴利避害,充分利用有限水资源,最大限度提高水的利用率和经济效益。

0.2 地下水资源管理的必要性

地下水资源开发利用中存在的诸多问题,虽然有其自然的和人为的影响因素,但都从各个方面强烈地揭示了地下水资源管理的迫切性和必要性。

我国水资源及其开发利用状况,可归纳为以下几点:①资源贫乏;②水资源在时空分布上极不均匀;③用水量猛增;④开发利用程度较低而且不甚合理;⑤污染日趋严重;⑥浪费极大;再有一点,就是水资源的保护意识较差和管理措施不甚得力。

我国总降水量为 $6 \times 10^{12} \text{m}^3$,除蒸发渗漏外,地表径流量平均每年为 $2.71 \times 10^8 \text{m}^3$,居世界第6位。地下水资源量平均每年为 $0.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。扣除地表水与地下水在计算时的重复量,我国总水资源量平均每年为 $2.81 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。但人均占有量据最新资料仅为 2340m^3 ,居世界109位。我国已被列入世界13个最贫水国家的名单中。联合国粮农组织最近提醒国际公众:到2000年,全球各大洲人均占有水资源最低的是亚洲,只有 3300m^3 。全球27个国家将遭受缺水之苦。过分利用地下水问题最严重的国家和地区是:中国、印度、印度尼西亚、墨西哥、中东、北非诸国、泰国、美国西部以及一些岛国。可见,我国水资源人均占有量不但远远低于全世界的平均数,也低于亚洲的平均数。

我国是一个水资源贫乏的国家,人均占有水资源量仅相当于世界人均占有量的 $1/4 \sim 1/5$,亩均占有量仅为世界亩均占有量的 $3/4$ 。而且我国水资源在空间和时间分布上极不平衡。长江流域及江南地区,可耕地面积不到全国的 $1/3$,而地表径流量占全国的 $3/4$,地下水资源占全国的 67% 。华北和西北地区,可耕地面积占全国一半以上,而地表径流量却不到全国的 10% ,地下水资源仅占全国的 22% ,因而造成南方地少水多,北方地多严重缺水。此外,我国地处世界著名的季风气候区域,受季风气候影响,降水量在时间上分配很不均匀,全年 $60\% \sim 70\%$ 的降水量主要集中在雨季,降水量的年变幅又很大,并且存在连续二、三年甚至五年干旱和雨涝年交替出现的情况,因而导致水资源的补给,无论年内或年际之间的不均匀性都很显著。随着需水量剧增,相应排放的污水量也增多,使大量优质水源受到污染,可利用的地下水资源不断减少,再加上不合理开采,供需矛盾日益尖锐,而且带来了公害。为了避免和消除这些危害,就要对地下水资源进行科学管理。

据联合国统计,20世纪以来,世界农业用水量增长6倍,工业用水量增长20倍,总用水量年递增4%。日本、西德等发达国家自60年代以来,用水量增长1倍,前苏联增长了3倍。发达国家大部分用于工业,而第三世界国家主要用于农业;发达国家因水源大量消耗形成水荒,而第三世界国家则经常受旱灾威胁。美国在1960年平均每人每天的消耗量就达到 6m^3 ,相当于 $2000 \text{m}^3/\text{a}$,总用水量 $4000 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ (其中工业占 46% ,农业占 44% ,生活用水占 10%),占总径流量的 16% ;但1975年已增至 $8.3 \text{m}^3/\text{人}$,相当全年人均 3000m^3 水,总耗水量达 6000×10^8

m^3 , 占总径流量的 25%, 相当于欧洲与苏联的总用水量, 预测到 2000 年将增长 2 倍达到 $1.2 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{a}$, 其中 80% 用于工业。与世界各国相比, 我国工农业总产值远远落后于欧美国家, 而用水量远比这些国家多。 $3000 \times 10^8 \text{m}^3$ 水中农业用水占 80%, 地下水的开采量占 18%, 相当 $550 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。欧美或其它国家地下水用水量, 一般约占总用水量的 1/3 以上, 如荷兰地下水占 66%, 法、日占 33%, 美、苏等国 20%~25%。干旱地区国家如利比亚、沙特阿拉伯等, 地下水的供水量可达 100%, 以色列占 75%。美国地下水的开采量, 80% 主要集中在西部比较干旱的 17 个州。由此可见, 我国地下水的利用率较一般国家为低。

随着人口的增长与工业的发展, 我国用水量近年来增长较为迅速, 据 13 个城市统计, 1972 年的供水能力较解放初期已增加 9 倍, 但仍不能满足需要, 枯水季节经常因供水不足使部分厂矿被迫停产, 生活用水也很紧张。据对 287 个城市中 236 个城市的统计, 有 106 个城市不同程度缺水, 其中 40 个城市严重缺水约 $1240 \times 10^4 \text{m}^3$ 。据估计因缺水造成工业产值损失达 200 亿元之多。农业方面, 目前灌溉面积大约只占全部耕地面积的三分之一。因此今后用水量必然将继续大幅度增长, 特别是主要工业城市, 用水量的增长趋势将更为迅速。我们算一笔账大家就更清楚了。全世界人口已发展到 52 亿, 中国人口也已经由解放前的“四万万同胞”变成了 12 亿多人; 我国城市数量已由 1949 年的不到 200 个发展到目前的 600 多个; 农业灌溉面积比 1949 年增长了两倍多; 工业更是飞速发展; 城市生活需水量几十倍、甚至上百倍的增长。初步预测今后一二十年内, 地下水的开采量将增加 2~3 倍。

目前地下水资源除华北农业地区和若干主要城市利用程度较高外, 一般地区开发程度还比较低; 但由于缺乏统一规划和严格的管理制度, 因此有些地区地下水资源的开采存在严重的无政府状态: 任意打井, 用水不加限制, 灌溉无定额, 工业消耗量大, 水的重复利用率低, 水质污染的范围日渐扩大, 浪费现象也很严重, 对水资源造成不同程度的破坏, 以致有些地区水位持续下降, 水量日趋衰减, 工农业用水的矛盾日趋尖锐。如果不及时采取有效措施, 对人民生活与工农业生产, 将会造成严重的不利影响。

0.3 地下水资源管理的研究现状和发展趋势

地下水资源管理的研究是随着生产发展和社会进步而逐渐兴起的。最早将系统分析的决策科学应用于水资源的开发、利用与保护问题, 是 1950 年美国总统水资源政策委员会提出的。继而 1955 年哈佛大学开始制定水资源大纲, 其目的是为制定和设计复杂的现代水资源系统工程研究一种方法。从此, 人们才认识到水资源系统分析既有工程的性质, 而且还有经济、社会的内容。50—60 年代的水资源管理, 大多是将地下水资源作为集中参数系统来处理。如 Cashe 和 Lindedory (1960) 应用线性规划模型来分配两个农业区的地下水和地表水, Baras (1960) 和 Burt (1964) 把动态规划用于地下水—地表水联合调度等。美国陆军工程兵采用模拟技术也先后在密苏里河及哥伦比亚河流域进行系统规划工作, 使水资源系统分析方法形成了数学规划和模拟技术两大类。1962 年, 哈佛大学发表《水资源系统规划》一书, 此后, 水资源管理科学在美国及欧洲受到极大的重视和发展。世界上许多国家都相继成立有关水资源工程的研究机构, 如英国水资源研究协会、法国卡图电力试验研究中心、泰克尼—以色列工学院以及美国 Indianapolis, Butler 大学 Holcomb 研究所建立的世界地下水模型中心 (IGWMC) 等, 都进行了大量卓有成效的工作。

随着电子计算机技术的飞速发展,许多学者在把地下水数值模拟模型与最优化技术结合起来,形成耦合地下水管理模型方面的研究也取得了重要进展。Bredehoeft 和 Young(1970)首先将地下水模拟技术应用于农业管理模型,提出了确定农业决策的线性规划模型与拟合含水层的地下水模型。但是,直至响应矩阵法和嵌入法的提出,才解决了分布参数系统的地下水资源管理的模型建立问题。Wattenbarger(1970)通过有限差分模拟,应用响应矩阵法确定天然气的最大开采量。Deninger(1970)将响应矩阵法移植到求解地下水井场最大抽水量。Taylor(1970)则考虑到地下水与地表水的水力联系,运用响应矩阵法建立了含水层—河流系统的管理模型,实现地下水与地表水的宏观调控。Maddock(1972)在泰斯公式的基础上,应用线性系统原理和格林函数,导出了承压含水层多井、多时段抽水降深影响函数(或称代数技术函数)的表达式。1974年又导出潜水含水层的非线性降深响应函数式。Morel—Seytoux 和 Daly(1975)运用 Maddock 类似方法导出了有河流存在的响应函数。Schwarz(1976)把响应函数的离散形式应用到地下水水力管理模型中去。响应矩阵法已应用于区域性地下水管理中,如 Heidari(1982)对美国勘萨斯州 Pawnee 河谷地下水管理的研究,应用响应矩阵法,分别对 5 年、10 年规划期(每个规划期又分 5 个规划阶段)地下水最优开采方案进行决策。

嵌入法最早是由 Aguado 和 Remson(1974)提出的,他们采用有限差分法将地下水稳定流方程形成的线性方程组,直接作为线性规划模型的约束条件,实现数值模拟与管理模型的耦合,并通过算例获得成功。Alley、Aguado 和 Remson(1976)又应用嵌入法建立一系列地下水非稳定流的管理模型。

70 年代以来,Kaphan、Haimes 和 Yu 等对大型复杂地下水资源管理,采用大系统、多级、多目标建模方法进行研究,1977 年 Haimes 发表了《水资源系统分析》著作,从系统工程出发,总结了复杂系统水资源管理的建模和优化的原理和方法。1973 年美国 Saaty 提出以聚类分析和模式识别理论为基础的层次分析法,为地下水规划和管理方案的选择提供客观有效的决策。

当水资源成为经济发展的制约因素时,人们需要着眼于区域水资源开发的宏观经济效益分析,于是就提出了利用投入产出技术与水资源优化管理耦合模型。投入产出技术最早是由美国经济学家 Leontief 提出的,1965 年后,美国对西部各州各产业部门的水资源供需问题进行了经济研究,建立了投入产出分析与水资源优化管理模型,随后得到了应用和发展。

近几十年来,世界各国学者都十分重视地下水资源管理模型的研究,并已建立了许多地下水资源管理模型。许渭铭教授将其归纳为以下十种内容:①区域国民经济的产业结构规划与水资源优化;②地下水政策评估与分配;③地下水—地表水系统优化调度与开发;④含水层—河流系统优化开发与运行;⑤城市发展的地下水规划与管理;⑥供水水源地优化设计与管理;⑦灌溉地下水和含盐量控制的规划与管理;⑧排水的最优化设计与管理;⑨过量开采引起环境问题的地下水管理;⑩地下水污染源的地下水管理。但是,由于各国的社会、政治、经济及技术等原因,这些模型能在管理中起作用的只占 60%。所以说,地下水资源管理不只是孤立的技术问题,而是一个统筹的社会行为。

从发展的趋势来看,在国外,以美国、英国、瑞典、法国等为首的发达国家,在水资源的开发利用和管理方面,都经历了一个发展过程。从开采水源上讲,从单一水源、单一工程发展到了多种水源,配套工程综合利用,联合调度;从地域角度看,从单一水源地(局部地区)发展到了按流域或按整个行政区域对水资源进行系统开发、利用、保护与管理;从管理水平上讲,已从简单的人工管理、无偿服务,发展到科学化、商业化,乃至自动化;从发展目标而言,从单纯供水水源开

发利用发展到了综合系统的开发利用与整个社会、经济、环境的协调发展相结合;就理论分析方法而言,已摒弃了过去那些常规的计算与分析方法,较多地采用了系统工程理论、数学模拟、系统随机分析理论、层次分析与决策论以及计算机模拟与搜索等技术,从单目标管理发展到多目标管理,从静态管理发展到动态管理。目前,人工智能技术(专家系统)已在地下水资源管理工作中被应用,专家系统的研究和开发工作已有相当的发展。在国外,已研制出与水文地质及工程地质有关的专家系统,如,美国的 Anne Shepherd 等人(1995)研究了供水系统调度—评价专家系统方法;Palmer 和 Tull(1987)为 Seattle 用水部门研制了干旱水管理计划专家系统。随着计算机技术和信息技术的飞速发展,地理信息系统(GIS)和决策支持系统(DSS)的开发研究及其在地下水资源管理方面的应用正方兴未艾,它们为地下水资源管理的现代化开辟了广阔的前景。

与此同时,世界上许多国家,如美国、前苏联、日本、英国、德国、意大利、比利时、以色列、丹麦、罗马尼亚、伊朗、印度等,都十分重视和加强对水资源的行政和立法管理,美国从全国到各州、县和地区都建立水资源委员会,并颁布各种水法。前苏联是世界水法最完善的国家,1970年颁布“苏联和各加盟共和国水法纲要”。各加盟共和国又根据各自水资源状况和自然地理、社会经济条件制定水法典,使地下水资源管理纳入法制的轨道。

我国地下水资源管理研究起步较晚,60年代开始的上海地下含水层储能技术与控制地面沉降的研究,可以说是我国较早对地下水管理的成果,但未应用最优化技术。随着地下水资源供需矛盾日益尖锐和所引起的环境问题日益严重,70年代以来,逐渐引起人们对地下水资源管理的重视。但管理模型理论和应用技术的研究,则是80年代才开始的。我国第六和第七个五年计划期间(1981—1990),有关部门先后将华北平原、京津唐及西北地区和沿海开发城市的地下水资源评价与管理,列为重点科研项目,由生产、教学、科研部门共同协作,并相继取得了一批重要的成果。其中由地质矿产部水文地质及工程地质研究所负责的“水资源系统分析及其数学模型研究(以石家庄为中心的滹沱河冲积平原为试点)”和由长春地质学院与河北环境水文地质总站共同完成的“石家庄市地下水资源科学管理研究”等,可代表我国第六个五年计划期间的主要研究成果。随后国内其它科研院校和生产部门也都在地下水资源管理研究方面取得了可喜的成果。例如:中国地质大学完成了秦皇岛市石河流域地下—地表水库联合运用的研究,用水均衡建立地下水库的约束条件,通过线性规划模型确定地下水库的最优开采方案。该校还与河北第一水文地质大队合作,应用响应矩阵法和线性规划,完成河北平原地下水盆地管理模型的研究,开创了大区域地下水资源管理的先例。同时还应用投入产出分析技术,建立河北平原以可供水量为基础的产业结构优化模型;建设部综合勘察研究院用嵌入法和线性规划完成安阳冲积扇地下水优化开采管理模型;南京大学用响应矩阵法和线性规划完成山西祁县地下水管理模型;中国市政工程华北设计院应用层次分析法研究开封市水资源系统管理的优化决策;社会科学院用投入产出模型和线性规划对大同能源基地地下水资源进行优化管理;西安煤炭科学研究院应用多目标线性规划模型对矿区供水排水进行优化管理等。

进入90年代以来,随着科学技术的进步,我国在地下水资源管理方面的研究也取得了一些新成果,如人工智能技术的应用,这方面的代表性成果有汪家权(1993)进行了平原地下水资源评价专家系统设计;束龙仓等(1996)建立了基岩裂隙水寻找与开发的专家系统;田峰巍等(1993)进行了水库群联合优化调度的专家系统设计等。近几年来,在地下水资源管理方面的信息采集、信息处理和决策支持等技术的开发和应用研究进展很快、成果丰硕,最具代表的当数

林学钰教授领导研制的“郑州市水资源—环境管理决策支持系统(ZZWEMDSS,1996)”。这些研究成果在理论上和实践上都极大地丰富和发展了我国地下水资源管理科学。

地下水资源管理不只是单纯的技术问题,它还涉及社会、政治、经济、环境等方面。它不是简单地靠建立管理模型就能解决问题,它还必须依靠行政措施、法律措施和工程技术措施来实现。近年来,我国在水资源研究方面做了大量的工作,水资源管理已经引起全社会的极大关注,水资源管理的行政和立法工作也不断加强并日趋完善,一个完整的水资源管理科学体系正在逐步建立。水资源的可持续利用是社会经济可持续发展的基本保证。我国“水多、水少和水脏”的问题必须依靠水资源的统一管理、科学管理来解决。我们相信,我国的水资源管理(包括地下水资源管理)工作一定会开创一个崭新的局面。

第1章

地下水系统

1.1 地下水系统的概念

任何一个科学概念的提出,都不是凭空臆造的,而是与社会生产和科学技术的发展紧密相关的。社会生产的不断发展,必然会不断地提出新问题,要求人们去认识、去解决。随着社会生产的不断发展,人们的认识也在不断深化,从而建立新的概念、理论和方法。“地下水系统”概念的提出也不例外。

1856年,法国人 Henri Darcy 在总结前人经验的基础上,通过试验提出了水在孔隙介质中渗透的线性渗透定律,即达西定律。稍后, J. Dupuit 以达西定律为基础,研究了单向和平面径向稳定运动,奠定了地下水稳定流理论的基础。以后地下水动力学的发展,在很长一段时间内,一直是沿着这条稳定流理论的道路前进的。随着工农业的发展,地下水的开采规模越来越大,地下水运动的不稳定性明显地呈现出来。这样,继续采用稳定流理论来精确计算就存在一定困难。因而就必须要有新的理论来研究地下水运动的这一不稳定过程,从而促进了非稳定流理论的产生和发展。从此地下水动力学进入了一个新的发展阶段。1935年,泰斯(C. V. Theis)公式的发表表明非稳定流理论的产生。50年代雅柯布(C. E. Jacob)、汉士什(M. S. Hantush)等人又研究了有越流补给的情况,接着出现了考虑无压含水层迟滞反应、非完整井等情况的解析解。同时把稳定流计算中已经行之有效的叠加原理和映射法应用到非稳定流计算中来,以解决群井干扰和边界的影响以及抽水量呈阶梯变化等非稳定流问题。从而使非稳定流理论发展到比稳定流理论更完善、更符合实际。60年代,国外在地下水动力学方面最突出的进展之一是越流理论。自1969年美国纽曼(S. P. Neuman)等人发展了越流含水层这一新理论后,1972年发展了确定越流多层含水层水力性质的比率法,向解决地下水流向井的非稳定运动计算方面迈进了一大步。目前,国外在进行水文地质计算时,越流理论的应用已经相当普遍。60—70年代又相继发展了非饱和流理论、双重介质理论和水动力弥散理论。

近十几年来,由于各国都重视区域地下水资源的评价与预测,同时不断增多与加深的水文地质钻孔和水井,以及广泛应用数学原理对地下含水体进行模拟研究和许多关于地下水的科学实践,包括人类活动对地下水的影响和人们对地下水资源的要求,促使水文地质学家们对区域地下水及地下含水系统重新予以考虑。如美国地质调查所70年代开始的区域“含水层系统”的分析工作,法国著名水文地质学家G·卡斯塔尼的“含水层系统的水文地质概念模型”,前苏联水文地质学家提出的“水文地质系统”这个术语,以及稍后形成的“地下水系统”理论。它们总的可归纳为:由于现代地下水科学的发展和人们对地下水认识的深化,特别是用现代

科学方法研究与评价地下水资源时,传统的单学科的研究已不能解决问题,人们不应再被那些烦琐的、局部的、静止描述的陈旧观念所束缚,必须产生和利用比较概括性的更加科学的理论概念和方法。无疑,所有这些对水文地质科学将会产生很大影响。

地下水是自然界总水资源的一部分。地下水系统只是全球水循环系统中的子系统。全世界有许多地区,地下水资源已经成为最重要的供水水源。而人类活动对地下水所造成的各种影响使地下水的调查研究和资源评价愈加复杂。因而许多国家正在试图应用系统方法的原理探索新的水文地质调查途径。

目前,关于“地下水系统”还缺乏一个明确的定义。一些涉及“地下水系统”的有关名词和术语也比较混乱,含义不清,因而对地下水系统尚未形成一个完整的、统一的概念。荷兰阿姆斯特丹自由大学教授英格伦博士认为“地下水系统”可以看作在时间上和空间上具有四维性质,能量不断代谢的有机整体。它可以从出生、成长、一直到衰老和消失。它的主要特性表现在:①边界类型的模式;②容积;③结构;④阻力或势能转换能力;⑤流出系统;⑥相邻系统之间的联系;⑦水质类型和模式;⑧地下水系统的发展历史。

前苏联 H·B 鲍柯夫斯卡娅在“水文地质学概念的现状和预测问题”一文中指出:任何一个复杂系统可归纳为三个方面:①系统的组成;②系统的结构,它表征系统与周围介质的相互作用和系统内各要素的相互联系;③系统的作用、性质和发育历史。

地下水圈呈现一个多组分的复杂系统,其特点表现为系统内各组分和其相邻的系统(大气圈、陆上水圈、生物圈、地幔层和宇宙)的组分之间的相互作用。地下水圈多组分的概念是以运移条件的物质存在形式都不同的各系统组分之间的边界条件的存在为前提的。在此基础上进行着物质(水流和化学物质)和能量(热能、势能)的转换。

从系统分类方法的观点来看,地下水圈是一个处于等级从属关系的许多单元组成的复杂的动力学系统。水循环是决定地下水圈的作用和演化的主要机制,根据这一机制,可以在其范围内划出界线。在水循环各部分相互作用影响下发生演变表现为水质水量的变化。水圈的演变是它各个部分长期作用的结果。

鲍柯夫斯卡娅提出了“水文地质系统”这一术语作为水圈地下水部分的基本单位。它占有一定的三度空间体积,周围被具有非生物特征的较高梯度的面所限制。这一界限为水文地质的数学研究创造了前提,即在一定边界条件下,为定量描述系统内物质流动提供了基础。水文地质系统的每一个单元可能构造很复杂,并且实质上是次一级系统(亚系统)。通过对系统的研究,运用计算机模拟影响系统的各类作用,就可建立模拟模型,并与优选法结合起来,就能制定控制系统的最佳方案。鲍氏提出的“水文地质系统”,在含义上和本质上与“地下水系统”并无明显差别,只是所采用的名词有所不同而已。

1984 年莫斯科会议上,法国 G·卡斯塔尼在分组会的报告上认为正确的水资源评价必须从水资源保护、防止水资源枯竭、控制地下水污染和保护生态系统平衡出发,对地下水系统进行定量描述。主要包括六个基本内容:①非均质含水介质的空间分布特征;②补给量和排泄量随时间的变化;③包气带与矿物溶解物质的运移和变化;④温度场的变化;⑤合理开发和管理地下水资源的经济指标,即开采资源的基本平衡;⑥建立水文地质概念模型,为进一步建立数学模型奠定基础。

卡斯塔尼指出,每一个地下水系统都具有一定的时空特征及其水动力系统,并有固定的平衡形式和一定的水资源类型。归纳起来具有如下综合特征:①具有一定的连续的空间范围(流

域、盆地、建造);②地下水与空间介质的机械作用,包括水动力作用、水热作用和水生物作用;③水循环的连续性,表现为含水系统的时间状态,其连续性表现为脉冲—反应的双重性质。根据上述特征,地下水系统可划分为:以流域为水资源的均衡单位的地下水系统,它包括地表水、地下水及大气降水的均衡;以水文地质盆地为水资源的均衡单位,包括完全充满或未充满的盆地中的地下水,通常浅部含水层更有利于补给与开采;深部含水介质中的地下水,一般不具备平衡的意义,一旦开采就不易恢复,如北非的深层地下水及巴黎盆地地下水。

水文地质概念模型是在地下水系统研究的基础上所建立的综合模型,主要反映边界条件、补给量、排泄量、潜水及承压水的水动力、水化学特征及其相应参数的空间分布与形成的全部结构。

美国地质调查所水资源处拉尔夫·C·海斯认为:“地下水系统”这一术语指的是从潜水面到岩石裂隙带底面的这一部分地壳,是地下水贮存和运动的场所,由含水层(作为地下水运动的通道)和围闭层(阻碍地下水运动)所组成。有一些水文地质学家认为:地下水系统指的是具有某种特征的岩石集合体,它能自由地容纳水和运移水,并与其它不能自由容纳水和运移水的岩石相邻接。美国道济(Dooge, 1967)认为地下水系统的定义是“任何真实的或抽象的结构、装置、档案或过程在一定的时间内所反映的物质、能量、信息的输入和输出及其演变关系”。

美国 R·C 希恩(1982)按照地下水系统的五个特征将美国划分为 14 个区,这五个特征是:

- (1)系统的组成要素,包括含水层、弱透水层、隔水层及其组合关系;
- (2)主要含水层含水空间的性质,包括原生的与次生的;
- (3)主要含水层的岩性,包括可溶的与不可溶的;
- (4)主要含水层的贮水与导水性;
- (5)主要含水层的补排条件。

美国 S·多曼尼柯(1972)认为,地下水的研究中,无论是从科学研究、工业建设,还是资源管理的角度出发,都涉及到各自不同的地下水系统。根据所研究的问题和目的不同,系统可大可小,可简单可复杂,从源到汇的两条平行流线直至整个水文循环,都可应用系统这一概念。多曼尼柯还认为,研究问题应用系统概念,这是一种研究方法,其特点就是把所研究问题的各个有关方面联系起来作为一个整体来对待,并对系统建立模型和运行模型,以求得对问题有效而又合理的解决。

日本柴崎达雄等(1976)认为地下水系统是水循环总系统的一个子系统。地下水系统又分为潜水系统和承压水系统,这两个系统应该用地下水流动系统与地质构造的关系加以区分。

我国刘光亚教授(1984)是这样定义的:所谓地下水系统,就是把地下水看成在地质、地貌、水文、气象因素以及人为因素综合作用下形成的,且具有自身相对独立性又同外界有密切联系的地下水文体系。在这个体系内部不断地进行着能量转化,从而形成水资源的储存、运移和调节过程,并以输入和输出的形式不断地同外界进行着能量的信息交换,是一个四维空间内不断运动着的地下水文系统。地下水文系统包括地下水的流域系统,水循环系统、水动态平衡系统、能量转换系统以及作为信息交换的输入系统和输出系统等方面相互联系的综合概念。

由此可知,地下水系统是一个错综复杂,包括各种天然因素,人为因素所控制的,具有不同等级互有联系且互有影响,在时空分布上具有四维性质和各种特征,不断运动演化的若干独立单元的统一体。所以只有运用系统分析的方法,才有可能把如此错综复杂,支离分散的认识,概

括在一个完整的系统结构内。这一个统一结构,就是我们所称的地下水系统。

综上所述,地下水系统的基本概念可以归纳为:①地下水系统是由若干具有一定独立性,而又互相联系、互相影响的不同等级的亚系统或次亚系统所组成。②地下水系统是水文系统的一个组成部分,与降水地表水系统存在密切联系,相互转化;地下水系统的演变很大程度上受地表水输入与输出系统的控制。③每个地下水系统都具有各自的特征与演变规律,包括各自的水动力系统、水化学系统等。④含水层系统与地下水系统代表两种不同的概念,前者具有固定的边界,而后的边界是自由可变的。⑤地下水系统的时空分布与演变规律,既受天然条件的控制,又受社会环境,特别是人类活动的影响而发生变化。⑥地下水系统研究包括三个步骤,即系统分析、系统的模型化与系统的最优化。

到目前为止,对于“地下水系统”尚未建立一个完整的、统一的被大家公认的定义。为此,国际地下水委员会(ICGW)与国际水文地质协会(IAH)在国际水文计划的支持下,对此开展了专题研究,并组织了地下水系统研究的工作组,其主要任务就是要草拟一份研究报告,阐明“地下水系统”的基本概念与工作方法,包括在全球范围内,选择若干典型地区作为地下水系统研究的实例。我国也参与了这项工作,并以华北黄河冲积平原地下水系统的研究作为亚洲半干旱地区的一个实例。

可以看出,研究目的与内容的差异是形成目前地下水系统定义百家争鸣局面的主要原因。这是一种正常的现象,是“系统”具有相对性特点的体现,是新兴边缘科学综合性特点所决定的。如果我们认识到定义地下水系统的目的主要是明确研究对象,把握各个分析环节,以便使系统分析方法成为解决具体问题的桥梁,那么,我们就没有必要,也不应该拘泥于某个具体定义。而应从系统思想出发,对具体的对象给出具体的确实有利于分析研究的系统定义。

当前,国际上都很重视地下水系统的研究,其主要原因是随着国民经济的迅速发展,各国普遍存在由于大量开采地下水而造成过量开采以及水质恶化或水质污染等问题。因此不首先解决区域性水资源评价,就不能妥善解决局部地区的问题。研究地下水系统就是解决区域地下水资源评价的可靠途径,只有在全面研究地下水系统的基础上,才有可能正确地建立数学模型,并为建立管理模型奠定基础。

1.2 地下水系统的性质、基本结构和环境

为了讨论方便,我们在分析地下水系统的性质和基本结构等问题时,暂且把一个完整的水文地质单元视为一个地下水系统。分析的结论同样适用于大于一个水文地质单元或小于一个水文地质单元的地下水系统以及抽象的概念系统和自然人工复合系统。

1.2.1 地下水系统的性质

1. 地下水系统是由各个部分组成的整体

从水文地质学的观点来看,地下水系统的水流运移空间是由补给区,径流区,排泄区构成。它们可以看成是地下水系统的三个子系统。补给子系统是地下水系统接受环境给予具有较高势能的水的储容、运移空间。排泄子系统主要是地下水在系统的内部经过能量和质量的调整交换过程后地下水输出的部分。径流子系统则是协调补给子系统和排泄子系统的中间环节。这三个子系统因空间位置或地质构造的差异,对地下水形成起着不同的作用,具有各自独特的功

能。其水质、水位、水量、水温可以有一定的差异,但表现出规律性的变化,反映出这三个子系统的耦合关系。也就是说,地下水系统的特性是所有子系统相互作用的结果。有时地下水系统与环境的联系十分密切,构成系统的各个部分都可以接受大气降水或地表水的补给,从空间上不易将系统划分为补、径、排三个子系统。但就其功能和作用而言,仍是由三个子系统构成的。

在理论研究工作中,又常将地下水系统分成地下水子系统与介质子系统。分别研究介质的空隙发育特点,等级层次的联系,或地下水在不同介质空间中运移时水质和水温的变化规律。此时,地下水系统可视为由两个系统构成。另外,从渗流场势的角度出发,地下水系统还常按流面划分为局部流动子系统、中间流动子系统、广大地区流动子系统。

总之,无论从那个角度出发或者根据那些原则考察地下水系统,地下水系统都是由具有相对独立性和特定功能的多个子系统构成。推广到一般情况,用集合的概念可表示为:

$$X\{x_i \in X | i=1, 2, \dots, n\}$$

式中 X 表示地下水系统整体; x_i 表示第 i 个子系统。

2. 地下水系统的各个部分是相互联系的

组成地下水系统的各个子系统(要素)是相互联系、相互作用的。地下水系统从接受外界环境的补给时起,新进入地下的水就开始参与系统内部水量交换和能量转化过程,并改变着子系统的原有状态。某一子系统的状态变化必然会引起相邻子系统状态的变化。倘若某两个子系统之间的联系中断,必然会出现这样的情形,水流在其中某一个子系统中聚集,而另一个子系统因没有补给而枯竭。那么,这个子系统也就丧失成为地下水系统组成部分的必要条件。因此,任何一个子系统状态的变化,最终总会波及整个地下水系统。这是各个子系统相互联系的特性所决定的。正因如此,地下水系统才能适应环境的作用,保持一种相对稳定的形态与其它系统相区别。

地下水系统各子系统之间的联系或因果关系可用下式表示:

$$x_i R x_j \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; i \neq j$$

式中 x_i, x_j 为组成系统的子系统(要素); R 表示子系统之间存在的联系。

图 1-1 为裸露型岩溶水系统框图,由图中可以看出该岩溶水系统由三个子系统构成,每个子系统又有低层次的分支子系统,它们之间存在着水量交换的联系,从而构成从接受大气降水补给直至最终排泄的全过程。

3. 组成地下水系统的各个部分具有综合的总体性和统一性

组成地下水系统的各个部分既各自独立,又相互联系。它们各自独立是因为它们各有其自己的组成特征以及各自的行为方式,它们相互联系,相互作用,才能在彼此协调过程中使地下水的运动得以持久地进行,从而保持自身的存在。正是这种既独立又相互联系的特性,表现出地下水系统具有储容、释水、导水、排泄的行为和功能,以及伴随水运动而出现水化学成分和水温的变化。虽然这些活动在各子系统中均有反映,但最终构成空间的场(渗流场、水化学场、温度场)则是各子系统共同作用的综合结果。也就是说系统总体的特征和活动方式寓于系统各组成部分中,并在它们的相互联系、相互作用、相互制约的过程中表现出来。但是,它们各自独立的特征和活动的总和并不能反映系统整体的特征和活动方式。即作为系统整体中的组成要素具有它自身所没有的整体性,且与它们独立存在是有质的区别。地下水系统的这种特性也可表述为“整体大于它的各个部分总和”。

地下水系统的功能总是从地下水的补给直到排泄的全过程中体现出来的。当我们研究或