

石家庄经济学院学术著作出版基金资助

华北煤田排水供水环保 结合优化管理

李 铎 武 强 许广明 宋雪琳 著
张燕君 于开宁 牛平山 王生力

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统地论述了矿山排水供水结合和地下水系统优化管理国内外研究现状和展望。分析了矿山排水引发的环境问题，探讨了地下水系统优化管理的基本模式，提出了多目标规划在矿山排水、城市供水和环境保护三位一体优化管理的优越性。将菲力浦多目标单纯形法引入排水供水与环保结合地下水资源多目标管理模型的求解中，改进了传统加权法人为确定权数的随意性和难度。应用模糊层次分析法确定水资源分配的价值系数，将定性与定量分析相结合，在目标结构复杂且缺乏必要数据的情况下更为实用。最后将这些新理论和新方法应用于太原东山煤矿和郑州矿区的排水、供水和环保结合的优化管理中。

本书可供高校、科研院所、生产单位、管理部门的相关人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

华北煤田排水供水环保结合优化管理 / 李铎等著.

北京: 地质出版社, 2005. 8

ISBN 7-116-04521-X

. 华... . 李... . 矿山 - 给排水系统 - 研究
. TD74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086337 号

责任编辑: 何 蔓 郝梓国

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324580 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787mm× 1092mm

印 张: 8

字 数: 190 千字

印 数: 1—500 册

版 次: 2005 年 9 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 25.00 元

ISBN 7-116-04521-X/T · 121

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

前 言

我国煤炭资源丰富，是世界产煤最多的国家之一，原煤总产量的95%来自地下开采。然而我国煤田地质条件十分复杂，突水事故是世界上最严重的国家，受水威胁的煤炭储量占探明储量的27%，采矿中频繁发生的地质灾害严重威胁着煤矿的安全生产。

华北煤矿区的主要矿床水文地质特征是多层含水层立体充水地质结构。因其充水水源多且充水强度大，矿井水害严重制约着煤炭工业的发展。具体表现在：水害威胁的煤炭比重较大；底板岩溶突水严重影响矿井安全生产；受水害困扰的煤矿井排水量大，排水费用昂贵。鉴于华北煤矿区所面临的上述问题，如果要想在保证安全采煤、满足水资源需求及减缓矿区生态环境恶化的前提下使矿区地下水系统处于合理的动平衡开采状态，就必须把矿区的排水、供水、生态环境保护三个方面统筹规划，统一管理，作为一个完整的系统工程去研究。

本书是作者近年来从事华北煤矿区排水、供水和环境保护问题研究的部分成果，部分内容是在武强教授指导下完成的博士学位论文的一部分，主要取得以下成果。

(1) 华北煤田具有相同的地质特征和水文地质条件，存在着严重的排水、供水和环境保护的矛盾。并且随着开采深度的增加，矛盾愈来愈突出。排水、供水、环保三位一体相结合的管理，以环境问题为约束，以供水和排水为目标，并考虑了水资源的优化分配和合理利用，具有较好的应用前景。

(2) 总结归纳了矿井排水引发的环境问题和灾害问题，主要有：地下水资源枯竭、岩溶塌陷、地面沉降、污染地表水、地下水环境条件恶化、海水倒灌、矿井突水和矿区积水回渗等。

(3) 对矿井排水、城市供水和环境保护联合管理的模式，由于要求供水量最大，排水量最小，所以适合于多目标规划。本文首次将菲力浦多目标单纯形法引入求解地下水资源多目标规划模型中，该方法首先寻找一个可行解，接着进行搜索以确定是否存在将使这个具体的解达到最大的权数。改进了传统加权法人为确定权数的随意性和难度。

(4) 在水资源优化调度模型中，有些效益系数是难以量化的，如生活用水并不产生直接经济效益，但是生活用水的供给是必须的，比任何工业和农业用水都重要，其效益系数是一个模糊值，且比较高。模糊层次分析法可以充分地考虑这些模糊因素，将定性定量分析相结合，特别是将决策者的经验判断给予量化，对目标结构复杂且缺乏必要的数据情况下更为实用。本文在对多水源优化分配中，应用模糊层次分析法确定效益系数，取得了良好的效果。AHP法的最大难点是动态判断矩阵整体一致性的满足，本文利用了一种较好的改进判断矩阵一致性的方法。

(5) 利用排水、供水和环境保护结合优化管理模型，对太原市东山煤矿和郑州矿区奥陶系灰岩地下水进行优化管理和合理分配。

在项目研究中，郑州煤炭集团地质勘探工程公司、山西煤田水文地质229队等单位和个人给予了许多支持，在此向他们表示衷心的感谢！由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请各位同行及专家学者指正。

目 录

前 言

第一章 导论	(1)
第一节 研究意义	(1)
第二节 排供结合研究现状	(2)
一、国外研究现状	(2)
二、国内研究现状	(2)
三、存在的主要问题	(3)
四、排水、供水、生态环保三位一体结合系统	(4)
第三节 地下水系统优化管理国内外研究现状与展望	(7)
一、地下水系统	(7)
二、地下水数值模拟	(9)
三、地下水管理和模型	(10)
第二章 矿山排水引发的环境问题	(14)
第一节 地下水资源枯竭	(14)
第二节 岩溶塌陷和地面沉降	(15)
第三节 地表水污染	(16)
第四节 地下水环境恶化和海水倒灌	(17)
第五节 矿井突水	(17)
第六节 矿区积水回渗	(18)
第三章 地下水系统优化管理模式	(19)
第一节 线性规划	(19)
一、线性规划问题及其数学模型	(19)
二、线性规划问题的范式及标准式	(19)
三、具有人工变量的单纯形法计算	(20)
四、线性规划的对偶问题和灵敏度分析	(21)
第二节 多目标规划	(21)
一、多目标规划模型及其特点	(22)
二、多目标决策方法	(22)
第三节 动态规划	(24)
一、动态规划的基本概念	(25)
二、动态规划数学模型	(26)
三、动态规划的基本原理和递推方程	(27)
第四节 非线性规划	(28)

第四章 菲力浦多目标单纯形法	(30)
第一节 基本原理	(30)
第二节 算法步骤	(33)
第五章 水资源系统优化的模糊层次分析法	(39)
第一节 水资源模糊优化调度模型的建立	(39)
第二节 判断矩阵的构建	(40)
第三节 判断矩阵的一致性	(40)
第四节 判断矩阵一致性改进方法	(42)
第六章 东山煤矿排水、供水、环保结合管理模型	(43)
第一节 概述	(43)
第二节 自然地理概况	(43)
一、交通位置	(43)
二、地形地貌	(43)
三、气候和水文	(45)
第三节 区域地质条件	(46)
一、地层	(46)
二、区域构造	(48)
三、岩溶发育规律	(50)
第四节 区域水文地质条件	(52)
一、含水岩组划分及其特征	(52)
二、东山岩溶地下水的补给、径流、排泄条件	(53)
三、东山岩溶地下水动态	(54)
四、岩溶地下水富水区划分	(55)
第五节 地下水渗流系统数值模拟	(56)
一、水文地质条件概化	(56)
二、数学模型与数值模拟模型	(59)
三、模型调试与识别	(61)
四、模拟计算结果	(63)
五、地下水开采数值预报	(66)
第六节 东山煤矿排水、供水、环保结合管理模型	(75)
一、地下水系统排水、供水、环保结合水力管理模型	(75)
二、响应矩阵的确定	(76)
三、管理模型的求解	(77)
第七节 水资源分配优化管理模型	(78)
一、水资源分配优化管理的数学模型	(78)
二、判断矩阵的确定	(79)
三、求效益系数	(80)
四、优化模型的求解	(81)

第七章 郑州矿区排供环保结合管理模型	(82)
第一节 自然地理概况	(83)
一、交通位置	(83)
二、地形地貌	(83)
三、气候和水文	(83)
第二节 区域地质和水文地质条件	(84)
一、地层	(84)
二、构造	(86)
三、水文地质条件	(88)
四、矿井突水特征	(92)
第三节 地下水渗流系统数值模拟	(93)
一、水文地质条件概化	(93)
二、数学模型与数值模型	(94)
第四节 地下水开采数值预报	(99)
一、预报模型环境设置	(99)
二、预报方案	(100)
三、预报结果	(100)
第五节 郑州矿区排水、供水、环保结合管理模型	(105)
一、地下水系统排水、供水、环保结合管理模型	(105)
二、响应矩阵的确定	(106)
三、管理模型的求解	(108)
第六节 水资源分配优化管理模型	(108)
一、水资源分配优化管理的数学模型	(108)
二、判断矩阵的确定	(110)
三、求效益系数	(111)
四、优化模型的求解	(112)
参考文献	(113)

第一章 导 论

第一节 研究意义

我国煤炭资源丰富，是世界产煤最多的国家之一，原煤总产量的95%来自地下开采。然而我国煤田地质条件十分复杂，突水事故是世界最严重的国家，受水威胁的煤炭储量占探明储量的27%，采矿中频繁发生的地质灾害严重威胁着煤矿的安全生产。在国民经济从计划经济向市场经济转轨的新形势下，随着矿井开采深度的增加，开采环境日趋复杂，水压不断增大，突水等灾害性问题突出。煤矿突水被认为是安全生产的重大灾害之一，也是世界产煤国家面对的一大安全开采难题。从早期前苏联、波兰、匈牙利等国家，到当今科技和产煤大国美国、英国、澳大利亚，许多专家学者进行了不懈的探索，推动了该领域研究的进展。我国从“六五”将煤矿防治水列入国家重点攻关项目，到“七五”、“八五”煤矿防治水一期和二期工业性试验的完成，在煤矿灾害机理研究、采煤方法、防治技术和装备等多方面取得了丰硕成果，同时相关行业和院校也进行了多方面的研究并取得进展。

众所周知，因各种类型内外边界沟通形成的多层含水层立体充水地质结构是华北型煤矿区的主要矿床水文地质特征。因其充水水源多且充水强度大，矿井水患严重制约着煤炭工业的发展。具体表现在：水害威胁的煤炭比重较大，在峰峰、邢台、焦作、淄博、淮北和淮南矿区，受水害威胁的煤炭储量分别占探明储量的52%，71%，40%，60%，48%和90%，显然，水害压煤现象甚为严重；底板岩溶突水严重影响矿井安全生产，据不完全统计，华北煤矿井从1927年至1985年发生水量大于 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的特大型底板突水恶性事故已达17次之多；受水害困扰的煤矿井排水量大，排水费用昂贵，如焦作煤矿区历年平均吨煤排水量达 50m^3 ，全矿区平均排水量达 $30000\text{m}^3/\text{h}$ 。另一方面，煤矿区及其周围地区各类供水十分紧张，许多国家重点建设项目急需在这类地区上马，需要一定数量的水资源作为保证。造成这种紧张局面的原因除华北煤田干旱、半干旱的气候条件外，煤矿区大降深、大流量疏排水和各类供水设施在时、空域的不合理开采等也是造成供水困难的主要因素。与此同时，煤矿区及其周围地区生态环境日趋恶化，含煤盆地地下水系统处于多年负均衡状态，地下水水位大幅度持续下降，煤矿区地面岩溶塌陷现象随处可见，矿井污水的地面排放严重污染了各供水水源，许多著名岩溶大泉失去了昔日的美丽景观^[1,2]。

鉴于华北煤矿区所面临的上述问题，如果要想在保证安全采煤、满足水资源需求及减缓矿区生态环境恶化的前提下使矿区地下水系统处于合理的动平衡开采状态，就必须把矿区的排水、供水、生态环境保护三个方面统筹规划，统一管理，作为一个完整的系统工程去研究。

第二节 排供结合研究现状

一、国外研究现状

国外发达产煤国家在这方面的实践与研究起步较早，由于他们具有先进的工业技术，拥有许多一流的抽（排）水设备，如各种型号的大流量、高扬程潜水电泵，同时因为大部分煤矿均属私人企业，老板追求煤炭开采的整体经济效益，把矿山排水作为煤炭开采的一种伴生资源，矿井水量愈大，盈利愈多，经济效益愈好。因此，这些国家的矿井水利用率较高，美国煤矿井排水在20世纪80年代初的利用率就已达到81%，原苏联顿巴斯矿区1985年矿井水的利用率已高达90%。但总体而言，国外煤矿山的排供结合思路较为简单，且十分有效，但在结合的理论及方式方法研究方面存在不足^[4-6]。他们购置大量的潜水泵，在矿区地面实行强排，疏干主采煤层的直接充水含水层组的地下水，在解除水患危险后，开始进行大规模机械化作业采煤。由于在矿区地面直接排水，避免了地下水流入矿井被污染这个环节，故地面排放水的水质绝对优良，无需或稍加处理便可以直接输入需水用户，按照不同的供水用户和输送距离等指标收取水费。因此，国外煤矿矿井排水不是一种负担，而是一种获利的手段，矿井水量越大，盈利越多，经济效益越好。例如，从20世纪70年代开始，德国的莱茵褐煤矿和希腊南部的米加罗波里褐煤矿，就是利用大量的潜水电泵，在煤矿井地下水补给边界处强排，排出的地下水直接通过管道输送至电厂，供其发电用。20世纪80年代匈牙利外多瑙河煤矿和铝土矿把矿井的排水直接卖给城市供水部门作为当地人们的生活饮用水源。这些煤矿仅依靠经营矿井排水这一项伴生矿产资源，就获得了十分可观的经济效益。

二、国内研究现状

纵观我国煤矿区排水供水结合发展历史，可大致划分为三个阶段。

第一阶段为矿井水利用阶段。在煤矿开采过程中，利用矿井排水作为矿山的供水水源，在我国已有近百年的历史。建国以来，我国煤炭工业的迅速发展，矿井涌水量不断增加，特别是一些喀斯特大水煤矿的开发，矿井排水量甚为可观。大流量的矿井排水形成了大面积的地下水降落漏斗，使得矿区地下水水位大幅度下降，许多矿区自备水源井的供水能力受到了影响，出现了矿区供水紧张的局面。因此，华北地区的部分煤矿区开始利用部分矿井排水作为矿区自身的生产和生活用水，即自排自供。矿区附近的农民也开始利用矿井水灌溉农田，实现了矿井水与灌溉的初步结合。在这一阶段，焦作矿区是华北煤田矿井排水、供水结合较为成功的代表。总之，第一阶段的排水供水结合理论研究主要着重于矿区的矿井水利用，以提高矿井水的使用率为目的。在排水供水结合的实践方面，主要以自排自供为特征，矿井既是排水点又是供水水源。

第二阶段为水害防治与矿井水综合利用阶段。自1974年在广东肇庆召开的全国首次“综合治理和利用矿床大面积地下水”的经验交流大会以后，无论矿区排水供水结合的理论研究，还是实践运用，均得到了进一步的发展与深化，特别是在理论研究方面，对矿区排水供水结合的内涵进行了更深层次探讨，认为矿区排水供水结合不仅仅简单指矿井水的综合利用，使矿井的排水为矿区所用，而包含着更深层次的涵义，即排水供水结合本身也是一项防治水害、解除矿井水患威胁的防治水技术，所以说，排水供水结合的实质就是指

在解除矿山水害前提下，将矿井排水经过一定处理后用于矿区供水。排水供水结合的首要任务是解除水患、保证煤炭安全开采，其次才考虑矿井水的综合利用。但该阶段缺乏生态环境保护意识^[7-9]。

第三阶段为矿山排水、供水、环境保护三位一体结合的优化管理阶段。前两个阶段的排水供水结合研究，主要考虑矿井排水的利用，而未考虑矿区环境地质问题。煤矿的开采常形成数十至数百平方公里的地下水疏降漏斗，如此大范围的漏斗严重影响了矿区和周围地区各类供水设施的供水能力，从而产生排水供水矛盾。同时，矿区深降深、大流量排水引起了一系列严重的环境地质问题，特别对于已逐步转入石炭系下组煤开采或上组开采水平正在逐渐向深部延伸的北方各煤矿山，类似矛盾和问题更为突出。

武强教授于1989年在全面分析华北煤田矿井水患和矿区水资源合理开发利用以及矿区生态环境等方面的基础上，首次提出了煤矿矿井排水、供水、环境保护三位一体结合的新思想。根据研究矿井所在区域的水资源开发情况和矿井自身的水文地质条件，划分出排水、供水、环保结合的两大基本模式和对应的优化结合管理模式^[10]。

排水、供水、环保三位一体结合模式是一种理论性较强的新型模式。它从理论上探讨了综合解决我国煤矿区目前和今后愈来愈严重的排水供水矛盾和环境问题的可能性，使得这些本来相互联系甚为密切的矛盾和问题能够在统一的模型中同时得以解决，从而大大减小了由于分别处理和解决这些矛盾和问题所带来的计算上的误差，提高了评价和管理它们的准确程度。同时，对于不同的排水、供水、环保三位一体的结合模式，还从理论上论证了它们的具体适用条件，使它们发展成为能够进行具体实施操作的实用性模式。

煤矿区排水、供水、环保三位一体优化结合的管理模型在实践中不仅涉及到解决水患，使矿井水得以综合利用等水力技术方面的问题，而且也包括经济效益评价和环境保护等方面的问题，它在保证地下水压力疏降到安全开采标高且满足矿区一定的需水量但不引起其环境质量降低的条件下，以寻求不同供水目的所获得最大经济效益为优化目标。

总之，第三阶段的煤矿区排水、供水、环保三位一体优化结合的研究，丰富和创造性的发展了以往有关的研究成果，使得该研究领域逐渐趋于成熟、完善，可望能够解决我国煤矿区目前普遍存在的日益严重的排水供水矛盾与环境问题。

三、存在的主要问题

充分利用煤矿井排水资源，变害为利，变废为宝，是造福于人类、有益于整个社会的伟大事业。利用矿井水比新建其他的引水水利工程投资少、见效快、效益好，同时，综合利用矿井水可大大消除矿井水患威胁，解放大量的水害压煤，并有利于保护矿区环境质量，彻底治理矿井污水对环境的严重污染。

近年来，我国在该领域的研究工作中，已经积累了较为丰富的经验，走在了世界的前列，在理论上已被大多数国家的同行专家和学者认可，但在实践中还存在着许多管理和技术方面的问题，有待进一步研究解决。

(1) 供水系统水源稳定问题。大多数煤矿的矿井涌水量因受季节性气候影响而波动较大，但一般需水用户却对其供水量要求稳定且连续，所以，彼此间存在一定的矛盾。如果用枯水期矿井最小涌水量作为供给需水用户的设计水量，虽然供水量稳定问题解决了，但矿井水资源未能充分利用，丰水期大于最小涌水量的那部分矿井涌水量就只能白白流失。反之，如果采用丰水期煤矿井最大涌水量作为设计供水量，那么枯水期供水系统的水

源又无法满足。

(2) 技术管理方法。目前在地下水资源管理中,多采用单目标规划,而在排水、供水、环保三位一体结合的管理中,常常为多目标规划。多目标规划的方法很多,选择适合于排水、供水、环保结合的管理模型的求解方法尤为重要。

(3) 排水成本问题。煤矿井排水深度较大,排水成本高,一般是地面取水费用的2~4倍。故用户不愿意使用矿井排出的水,这是目前矿井水利用率较低的又一个重要原因。

(4) 水资源分配问题。矿井排水一般均有不同程度的污染,且距用户比较远,因此,水资源的单位成本比较高,利用率低。所以,应对矿井排水和供水水源实现联合分配,并强制执行,以谋求效益的最大。

(5) 效益问题。开展煤矿区排水、供水、环保三位一体优化结合的管理模型研究,要从定量管理的角度综合研究排水、供水与环境保护三者的关系,以便使三者的总体社会效益和经济效益最优,避免出现三个部门因只从各自局部的最佳经济效益出发,而使得总体社会效益和经济效益降低的现象。

(6) 协调问题。排水、供水、环保三位一体的优化结合问题涉及三个不同部门,而目前各个部门相互独立,彼此分家。因此,要想使三者成功结合,就必须组织建立一个由各有关部门参加的协调中心,对煤矿水害防治,矿井水合理排放、净化、利用,以及矿区生态环境保护等问题进行统一规划、统筹解决。只有这样,才能真正使三位成为一体化。

四、排水、供水、生态环保三位一体结合系统

从排水、供水、生态环保三位一体结合系统的组成来看,它包括排水、供水和矿山与其周围地区的生态环境质量保护三个方面;从它们彼此间的结合方式来看,应包括两种形式,排、供、生态环保结合与排、供、生态环保配合。

排水、供水、生态环保结合就是指将在保证生态环境质量前提下,井下排水和地面抽水用于各种目的的供水,矿井既是排水点,又是供水水源。排水、供水、生态环保配合是指在对矿井水疏降较为有效的地下水系统的某些补给部位,建立能够保证生态环境质量的各种用途的供水水源地,预先截取补给矿井的地下水水流,这样既可满足矿井周围各类供水需求,又可达到疏降矿井水之目的,有效地降低了我国煤矿因只采取井下大流量疏放而造成昂贵的吨煤排水费用和水污染处理费用,变被动的井下防治水工作为积极主动的地面截流工作。强喀斯特径流带和地下水集中补给带是较为理想的地下水系统截流配合部位。

排水、供水、生态环保三位一体结合的管理模型考虑了排水系统的疏降效果和安全运营,而供水系统的供水需求和生态环境系统质量保护也是优化模型设计的重要约束指标。在模型中,排水、供水、生态环境保护三者之间没有主辅之分。三位一体结合模型控制所研究矿区的各层充水含水层的水头压力,使其不仅满足安全带压开采的需要,而且要确保矿井和周围地区一定数量的供水需求,但不允许超过导致生态环境质量降低的最大允许水位降深。

排水、供水、环保三位一体结合的优化管理模型,在保证环境质量和矿井安全生产的前提下,提供给矿井和其周围地区一定数量的水资源,可向多个用户供水。根据向不同用户的供水价格(水资源费)、抽(排)水费、管道输送费(包括管道成本和占地费用等)和水处理费,通过比较目标函数中它们各自所产生的经济效益大小,模型会自动优化分配

各自的供水数量和具体的供水方案。所以，排、供、环保三位一体结合模型不仅实现了将保证环境质量的矿井排水和地面抽水用于供水之目的，而且通过选择多种供水用户所产生的经济效益最大的目标函数和适当的约束条件，完成了综合制定排水、供水、环保三位一体的具体的水资源优化管理方案。

排水、供水、环保三位一体模式是多种多样的。根据矿区的具体区域地下水资源开采情况和矿井水文地质条件的复杂程度，武强教授认为，排水、供水、环保三位一体的结合应该划分为狭义和广义的两大基本模式。

1. 狭义的排水、供水、环保结合管理模型

狭义的排水、供水、环保结合管理模型就是只注意排水系统的疏降效果和环境系统的质量保护，而不直接考虑供水系统的供水要求，在首先保证矿井安全生产和环境质量的前提下，将矿井的排水汇流后，经水质处理用于各种目的的供水。这种结合模式以矿井排水和环境保护为主，供水只作为被动辅助的一方加以考虑。

该模式主要适用于区域地下水资源比较紧张，且矿井水文地质条件复杂或极复杂的矿区。对于矿井水文地质条件简单或中等的矿区，没有排水、供水、环保结合研究的必要。如管理期划分为三个管理时段，则具体结合的管理模型如下：

目标函数：矿井总排水量最小。

主要约束条件：

- (1) 保证疏降区地下水水头满足安全带压开采的需要。
- (2) 确保矿井排水不引起周围环境质量的降低。

其数学模型为：

$$\text{Obj: Min} Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q(i, j)$$

$$\text{st: } \sum_{i=1}^N (k, i, 1) Q(i, 1) = s(k, 1)$$

$$\sum_{i=1}^N (k, i, 2) Q(i, 1) + \sum_{i=1}^N (k, i, 1) Q(i, 2) = s(k, 2)$$

$$\sum_{i=1}^N (k, i, 3) Q(i, 1) + \sum_{i=1}^N (k, i, 2) Q(i, 2) + \sum_{i=1}^N (k, i, 1) Q(i, 3) = s(k, 3)$$

$$Q(i, j) \leq q_0(i)$$

$$Q(i, j) \geq 0$$

式中：C(i, j) 为管理时段时间 (d)；Q(i, j) 为决策变量 (m³/d)；(k, i, j) 为单位脉冲响应函数 (m)；s(k, j) 为约束点 k 在第 j 管理时段的允许降深 (m)；q₀(i) 为各抽水井的额定抽水能力 (m³/d)。

2. 广义的排水、供水、环保结合管理模型

广义的排水、供水、环保结合管理模型不仅注意了排水系统的疏降效果和环境系统的质量保护，而且直接考虑了供水系统的供水需求，三者同时作为优化管理设计的重要约束指标，它们之间没有主、辅之分。广义排水、供水、生态环保三位一体结合系统控制矿区水头压力不仅满足安全带压开采高度，而且确保矿区及周围地区的一定供水需求，但不允许超过最大允许降深。

该模式主要适用于区域地下水资源比较充沛，且矿井水文地质条件复杂或极复杂的矿区。

三位一体优化管理模型，在保证生态环境质量和矿井安全生产的前提下，提供给矿井及其周围地区一定数量的水资源，可用于生活、工业、农业等方面的供水。根据三种不同供水单位的供水价格、抽（排）水费、管道输送费（包括管道成本和占地费用等）和水污染处理费，通过比较目标函数中它们各自所产生经济效益大小，模型会自动优化分配各自的供水数量和具体的供水方案。所以，这个三位一体的优化模型除涉及地下水水力技术管理之外，也牵涉经济评价、社会和生态环境保护以及产业结构调整等。它不仅实现了三位一体结合过程的经济运行，同时整个结合系统的安全运营得到了保证，避免或减少了突发性事故。

具体优化结合的经济水力管理模型如下：

目标函数：多种供水目的的经济效益最大。

主要约束条件：

- (1) 疏降流场满足安全带压开采条件，但不得超过最大允许降深；
- (2) 排水量加开采量须保证一定供水量，但不得超过地下水系统的剩余资源量；
- (3) 矿井排水不引起本地区和周围地区环境质量的降低。

其数学模型为：

$$\begin{aligned}
 \text{Obj: Max } Z &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_s(i, j) (sp_i - sd_i - st_i - sg_i) \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_g(i, j) (gp_i - gd_i - gt_i - gg_i) \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_n(i, j) (np_i - nd_i - nt_i - ng_i) \\
 \text{st } s(k, 1) &\geq \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 1) Q_s(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 1) Q_g(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 1) Q_n(i, 1) \\
 &\leq s(k, 1) \\
 s(k, 2) &\geq \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 2) Q_s(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 2) Q_g(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 2) Q_n(i, 1) \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 1) Q_s(i, 2) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 1) Q_g(i, 2) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 1) Q_n(i, 2) \\
 &\leq s(k, 2) \\
 s(k, 3) &\geq \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 3) Q_s(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 3) Q_g(i, 1) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 3) Q_n(i, 1) \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 2) Q_s(i, 2) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 2) Q_g(i, 2) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 2) Q_n(i, 2) \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_1} (k, i, 1) Q_s(i, 3) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (k, i, 1) Q_g(i, 3) + \sum_{i=1}^{N_{31}} (k, i, 1) Q_n(i, 3) \\
 &\leq s(k, 3) \\
 Q &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_s(i, j) + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_g(i, j) + \sum_{i=1}^{N_{31}} \sum_{j=1}^3 C(i, j) Q_n(i, j) \quad Q
 \end{aligned}$$

$$Q_s(i, j) \leq q_s(j); \quad Q_g(i, j) \leq q_g(j); \quad Q_n(i, j) \leq q_n(j)$$

$$Q_s(i, j) \geq 0; \quad Q_g(i, j) \geq 0; \quad Q_n(i, j) \geq 0$$

式中: $Q_s(i, j)$, $Q_g(i, j)$, $Q_n(i, j)$ 分别为生活、工业、农业用水的决策变量 (m^3/d); sp_i , gp_i , np_i 分别为生活、工业、农业供水单位立方米的水价 (元); sd_i , gd_i , nd_i 分别为生活、工业、农业供水单位立方米的抽水费用 (元); st_i , gt_i , nt_i 分别为生活、工业、农业供水单位工万米的输送费用 (元); sg_i , gg_i , ng_i 分别为生活、工业、农业供水单位立方米的水处理费用 (元); N_1 , N_2 , N_3 分别为用于生活、工业、农业供水抽水井数; $s(k, i)$, $s(k, i)$ 分别为约束点 k 在 i 时段的最小和最大允许降深 (m); Q 为管理系统的剩余可开采资源量 (m^3/a); Q 为管理系统的供水需求量 (m^3/a)。

第三节 地下水系统优化管理 国内外研究现状与展望

地下水是我国生活和工农业用水的重要供水水源, 全国约有三分之二的城市和部分的农田以地下水作为主要供水水源。由于地下水资源开发利用过程中缺乏宏观规划和科学、严格管理, 在很多城市和地区导致地下水严重超采乃至逐步枯竭, 并造成一系列环境问题, 如地下水污染、生态环境问题和地质环境问题。因此, 对地下水资源的科学管理, 是解决地下水资源短缺及其环境问题的主要途径。地下水管理模型作为地下水科学管理的重要工具, 在地下水管理中起着非常重要的作用。自 20 世纪 70 年代初将地下水流模型和最优化技术相结合, 形成地下水管理模型以来, 地下水管理模型得到了长足的发展。

一、地下水系统

20 世纪 40 年代提出一般系统论以来, 系统思想与系统方法广泛地渗透到各学科领域。不同的人对系统所下的定义各有侧重, 目前国内比较普遍接受的定义是 1978 年钱学森等提出的“系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的具有特定功能的整体”。系统思想与方法的核心是把所研究的对象看作一个有机的整体, 并从整体的角度去考察、分析与处理事物。

加拿大科学家 Toth 根据野外观测到的水文现象, 提出了描述天然地下水流运动的二维解析解模型。地下水流开始和终于不透水边界, 潜水面随地形变化。结果发现, 随着地形形态的复杂化, 地下水流动系统也变得越来越复杂, 可划分为局部的、过渡型的和区域的三种类型, 这就是地下水系统的最初认识。之后, Toth 等对天然地下水系统进行了广泛深入的研究, 用它来探讨石油和天然气的运移和富集规律, 并发现地下水运动的滞流点是油气的理想生成富集地。Engelen 发展了这一理论, 形成了区域地下水系统分析的方法, 这一方法应用了与地下水有关的众多资料、图件, 形成了比较客观的天然地下水系统的认识, 并把它应用于地下水观测网的设计和地下水立法过程中。地下水系统的模拟随着地下水系统理论的发展逐步开始, 一些数值模拟软件也随之产生, 如 FLOWSA、TDFLOW 和 MODFLOW 等。

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: 系统的组成; 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; 系统的作用、性质和发育历史。

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,周围被具有自然特征的较高梯度的面所限制;这一界限为水文地质系统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,并且实质上是一次系统(亚系统)。通过对系统的研究,运用电子计算机模拟影响于系统的各类作用,就可建立模拟模型,并与优选法结合起来,就能制订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。

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,是地下水赋存和运动的场所,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。

美国S·多曼尼克(1972)认为,在地下水的研究中,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。

“地下水系统”的概念,经历了较长一段时间的讨论,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Engelen博士认为“地下水系统”可以看作在时间和空间上具有4维性质、能量不断新陈代谢的有机整体。它可以从生成、成长,一直到衰老或消失。它的主要特性表现在:边界类型的模式;容积;结构;阻力或势能转换能力;流出系统;相邻系统之间的联系;水质类型和模式;地下水系统的发展“历史”。

在中国最早从事地下水系统研究的是陈梦熊和许志荣等。他们对黄河平原冲洪积物的地下水系统进行系统分析。由于地下水系统理论在地下水资源的合理认识和开发、污染防治与治理、监测网设计等方面都有着重要的理论和应用意义,所以得到了比较广泛的研究和应用。

“地下水系统”概念的提出是水文地质学发展的必然产物^[11]。狭义的地下水系统“是指由隔水或相对隔水岩层圈闭的,具有统一水力联系的含水岩系统”^[12]。而从地下水系统的环境功能和社会属性角度来看,地下水系统包括地下含水系统和与之相关的社会、经济、环境要素的总体。地下水系统的形成及其特性,一方面取决于自然因素,如地质和水文地质条件、水文和气象条件等,另一方面它受社会因素的控制和制约,如经济、技术、法律等,而且人类总是通过对地下水系统的操作和控制,来达到一定的目的。从这种意义上讲,地下水系统是一个自然与人工的复合系统。

狭义的地下水系统由三部分组成^[46]

(1) 输入:即地下水系统接收环境的物质、能量或信息。在系统工程中,通常称输入为输入变量,它又可分为可控变量和非可控变量。前者是可人为操作的,又称为决策变量,如抽水量、人工回灌量等,正是通过对决策变量的操作,来达到对地下水系统控制和管理的目的。

(2) 输出:即地下水系统对输入的响应,这种响应可以是系统状态的变化或系统向环境给出的物质、能量或信息。如上述输入引起的地下水位和泉流量变化,即为地下水系

统的输出。在系统工程中，将输出称为输出变量；用来表示系统状态的一组独立的输出变量称为状态变量，如地下水位、地下水矿化度均为地下水系统的状态变量。

(3) 系统实体：又称为水文地质实体，即系统的结构，如含水层的类型、结构、水文地质参数、边界条件等，它决定了输出对输入的响应程度。

地下水系统的输入和输出关系可表示为：

$$Y = f(X)$$

输入、输出或系统实体（参数）随空间位置变化的地下水系统称为分布参数地下水系统，而不随空间变化的称为集中参数地下水系统。由于赋存地下水的含水岩体和相对隔水岩体是在一定的空间展布的，且地下水的输入（如降水入渗、人工开采等）和输出（如地下水位、泉流量）也与空间有关，故实际的地下水系统都是分布参数系统。

二、地下水数值模拟

20 世纪 60 年代初，随着电子计算机运算速度和容量的提高，数值模拟开始广泛地应用于大规模实际地下水流的计算。Pinder 和 Bredehoeft 将 Peaceman 和 Rachford 提出的交替方向隐式方法用于地下水的计算，稍后又引入强隐式^[13-15]。有限元法为我国数学家冯康创建。该方法于 60 年代后期，开始应用于地下水流计算中，如 1966 年 Zienkiewicz 把有限元用于二维稳定流计算，1968 年 Jevendel 等进一步用有限元方法解非稳定流问题^[16]；1972 年引入等参有限元，1976 年 Capta 等人用三维等参有限元对多层地下水盆地进行了数值模拟；张宏仁和李俊亭（1979）发现了有限元求解地下水流问题时不满足局部质量守恒^[17]，Neuman 和 Narasimhan 亦发现由于释水矩阵的非对角性所构成的缺点，因此提出了相应的改进措施^[18]。

我国自 1973 年以来在地下水的数值模拟方面发展很快，1980 年薛禹群和谢春红教授的《水文地质数值法》一书问世以来，孙讷正、陈崇希、张蔚榛、罗焕炎、陈雨孙、李俊亭、杨天行、林学钰等相继出版了多部有关地下水数值模拟的专著、教材和学术论文^[19-33]。地下水数值模拟的应用已遍及与地下水有关的各个领域和各个产业部门。高校、科研院所与生产部门相结合，已运用数值模拟解决了很多国民经济建设中急需解决的各类问题，其中包括：水资源评价问题；地下水污染问题，水-岩作用和生物降解作用的模拟；非饱和带水分和盐分运移问题；海水入侵、高浓度咸水或卤水入侵问题；热量运移和含水层贮能问题；地下水管理与合理开发、井渠合理布局和渠道渗漏问题；地下水-地表水联合评价调度问题；地面沉降问题；参数的确定问题。它所涉及的地质条件多种多样，有潜水，也有承压水；有单个含水层，也有多个含水层存在越流的情况，以及种种复杂的地质构造和岩相变化的情况，由此，探讨了相应的模型概化与边界条件的处理。模型有二维的（平面的、剖面的），也有三维的，但以二维为主。水流模型有饱和的、非饱和的、饱和-非饱和的。

溶质运移模型在我国多数是处理低浓度的水质（地下水污染）问题。因此，由水流方程和对流-弥散方程分别组成的两个子模型可以独立求解，运动方程也以传统的达西定律为基础。只有少数研究海水入侵、卤水或咸水入侵和污水中高浓度污染物运移问题中，密度、粘度要由状态方程决定。此时，上述两个子模型要耦合起来求解。迭代法是解这类问题常用的解法。我国最早的三维可混溶海水入侵模型，是在 20 世纪 80 年代末期建立的。在我国这些海水入侵、卤水或咸水入侵模型以及热量运移模型、运动方程中，除了根

据传统的达西定律考虑以水头梯度为基础的强迫对流外，还考虑了自然对流。卤水或咸水入侵由于浓度高，还考虑了由于粘滞性产生的切应力对水流运动的阻滞。

热量运移模型，已考虑了与热量运移有关的各种主要因素（对流、传导、热机械弥散、自然对流、水-岩间的热交换）。形变模型一般只考虑垂向变形（地面沉降或抬升），沉降计算是建立在由水流子模型求得的水头或水压强变化与水压强和含水层形变间有关关系的基础上的。

总之，我国地下水数值模拟的研究虽然起步较晚，但由于一开始在人员上就实行水文地质界与数学界的结合，在选题上一开始就结合生产实际中面临的问题开展研究，所以进展很快。在推动水文地质数值模拟工作中作出重要贡献的数学教授有：清华大学数学系肖树铁教授、南京大学数学系谢春红教授、山东大学数学系孙讷正教授、中国地质大学陈明佑教授和杨天行教授等。1978年12月首届地下水资源评价学术会议上就出现了一批理论和应用成果、以后继续沿着这条道路走下去，成绩越来越喜人，基本满足了国民经济发展建设的需要。一些成果接近或达到国际先进水平。本学科国际权威刊物《Water Resources Research》、《Journal of Hydrology》、《Advances in Water Resources》、《Ground Water》上均出现了中国学者的文章，两年一次的国际水资源计算方法会议（ICCMWR）等重要国际会议上也有了中国人的声音。在国内还成功地举办了地下水水流和污染模拟国际会议（1991），地下水和环境国际讨论会（1992）等学术会议。我国的地下水数值模拟开始走向世界。

三、地下水管理和模型

1. 地下水管理

管理是指为了达到既定目的而实施的措施。对于地下水管理来讲，不同的研究者有着不尽相同的认识。Todd指出：地下水管理是指为一定目的而对地下水开发利用的一个计划，这种目的通常具有社会或经济属性。一般地下水管理所追求的目标是以最低的费用得到满足一定水质要求的地下水量^[34]。Beer认为，地下水资源系统的管理，无论是单独的还是与地表水联合的，都是通过作出有关该系统开发和（或）运营一组决策（或政策）来达到确定的目的^[35]。许涓铭等将地下水管理定义为“在一定的约束条件下，通过对某些决策变量的操纵，使系统按既定的目标达到最优”。林学钰等认为：“地下水管理是和地下水的存储、传输和抽取的合理规划和利用有关的地下水盆地（系统）的管理活动”^[36]。简言之，地下水管理就是为了达到既定的目标，对地下水系统可控输入进行的控制 and 操作。

地下水管理的根本目的就是合理开发利用和保护地下水资源，使有限的地下水资源发挥最佳的社会、经济和环境效益，达到社会、经济可持续发展和地下水资源永续利用的目的。

2. 地下水管理模型及其组成

地下水优化管理是指以科学、合理和最优的决策来满足既定目标，或使目标达到最优值。地下水管理模型就是运用运筹学方法建立的求解地下水最优管理决策的一类数学模型。其一般形式为：

$$\begin{cases} \text{Obj Min (Max)} & Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_L)^T \\ \text{st } g_i (X,) = 0 & i = 1, \dots, m \end{cases}$$

式中: X 为决策变量向量; Y 为地下水系统的状态变量; Z_1, Z_2, \dots, Z_L 为 L 个目标函数, $Z_i = f_i(X, Y)$, 这些目标可以是水力的、环境的或经济的; Z 为目标向量函数, $Z = F(X, Y)$; $g_i(X, Y) = 0$ 为第 i 个约束条件, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

由以上表达式可知, 地下水管理模型由决策变量、目标函数和约束条件三部分组成。决策变量是为达到系统目标而对系统进行的控制和操作。目标函数是管理者或决策者追求系统目标的数学表达式, 针对不同的管理问题, 有不同的目标函数及其表达式。目标函数主要有经济、水力、环境和多目标等。约束条件即地下水系统管理决策的限制和制约因素的数学表达式, 通常用等式或不等式表示。

3. 地下水管理模型分类

根据不同的分类准则, 可对地下水管理模型进行分类, 以便运用相应的方法求解模型。

- | | | |
|------------------|---|----------------|
| (1) 按地下水系统的参数形式分 | { | 集中参数地下水管理模型 |
| | | 分布参数地下水管理模型 |
| (2) 按解决问题的性质分 | { | 地下水水力管理模型 |
| | | 地下水水质管理模型 |
| | | 地下水政策评价和经济管理模型 |
| (3) 按模型是否为线性结构分 | { | 线性地下水管理模型 |
| | | 非线性地下水管理模型 |
| (4) 按系统目标多少分 | { | 单目标地下水管理模型 |
| | | 多目标地下水管理模型 |
| (5) 按系统的随机性分 | { | 随机性地下水管理模型 |
| | | 确定性地下水管理模型 |

如果决策变量和状态变量与空间位置有关, 则称为分布参数地下水管理模型。建立这类模型必须要把地下水分布参数模拟模型耦合到管理模型中, 因而使模型变得比较复杂。其建模方法和算法研究是当前地下水管理模型研究的重点和难点。

4. 地下水优化管理发展历史

Todd 在他的经典论著《Ground Water Hydrology》中明确提出了地下水管理的概念^[37]。20 世纪 60 年代以来, 迅速发展起来的地下水数值模拟模型大大推进了地下水定量化研究。根据模型研究程度、研究内容及使用的方法等, 水资源管理模型的研究过程大致划分为以下 4 个阶段: 模型理论探索阶段 (20 世纪 50 ~60 年代)、模型理论发展及成熟阶段 (20 世纪 70 年代)、模型推广应用阶段 (20 世纪 80 年代)、模型实用性研究阶段 (20 世纪 90 年代至今)。

20 世纪 50 ~60 年代的水资源管理, 主要是提出一些设想, 探索经济目标、工程分析与政府决策间的关系, 始于美国、日本, 继而加拿大、以色列、荷兰等国。如 Banks 指出了地下水 - 地表水联合运用会产生经济效益; Todel 指出, 地下水 - 地表水联合使用要比单独使用更为可靠; Cashe 和 Lindedory 应用线性规划分配两个农业区的地下水和地表水; Baras 和 Burt 把动态规划用于地下水 - 地表水联合调度; 美国经济学家 Leontief 对美国西部各州各产业部门的水资源供需问题进行经济研究, 建立了投入产出分析与水资源优化管理模型等。这一阶段主要是将地下水系统作为集中参数系统来处理, 使用的数学方法主要