

16-21

地表地下水联合管理模型及优化方法研究综述

石玉波 朱党生

(河海大学水力发电工程系 南京 210098)

TV 211.11

摘要 本文介绍了国内外关于地表地下水联合运用系统管理模型及优化方法的研究现状。对地表地下水联合运用问题进行了分类及数学描述,介绍了应用于联合运用问题的各种优化方法及其优缺点,对重点工作及代表性文献进行了评述,并对地表地下水联合运用中的一些问题提出了个人看法。

关键词 地表水 地下水 联合运用 优化方法 响应函数 系统控制 管理模型

一个地区可供开发利用的水资源主要有地表水和地下水两种类型,而两者之间存在着密切的联系。水资源的最优利用在很大程度上要由联合优化运用来达到,随着系统工程理论和最优化技术的发展,使人们能够在科学基础上建立地表水和地下水联合运用系统的规划设计和运用管理模型。

美国哈佛大学水规划小组在60年代初期首先采用数学模拟方法解决地表水与地下水的联合运用问题。进入70年代,由于地下水分布参数数值模型的发展,联合管理模型开始以分布参数为基础。70年代中期,Yu和Haimes^[1]提出了联合管理的分解协调方法,将大系统理论引入这一领域,Hantush等^[2]发展了机遇约束随机管理模型以求解随机规划问题。30年来,地表地下水联合运用的优化管理始终是水资源研究中最活跃的领域之一,大量的新理论、新技术被引用,各国专家学者发表了众多有价值的文献。本文以国内外有关的主要期刊上发表的几十篇有代表性的文献为基础,简要介绍地表地下水联合运用的数学模型及其优化方法研究现状,以期为进一步的研究工作提供一些有价值的信息和资料。

1 地表地下水联合运用问题

1.1 联合运用问题的分类

地表地下水联合运用,就是在考虑地表地下水各自水文规律及相互作用的基础上,合理利用地表及地下水量以满足区域经济发展及环境要求,并产生较大的经济效益。每一个联合运用优化模型都是针对具体的地表地下水联合运用问题而提出的。

a. 根据实际物理系统及水源情况,可将问题分成河流含水层联合运用问题,水库含水层联合运用问题以及水库、河流外引水等多种水源条件下的联合运用问题。

b. 根据所采用的优化方法,可分为模拟方法,线性规划与动态规划方法以及各种改进型方法,随机规划方法,大系统分解协调方法等。

c. 按优化目的及管理时段,可分为用于确定地面蓄水能力、输送能力、地下水开采能力的长时段系统规划设计问题及用于确定联合运用系统操作策略的短期运行问题。

d. 根据模型性质,可分为将来水量及需水量处理为随机变量的拟随机模型以及将输入及模型参数均处理为随机项的随机模型和

常规的确定性模型。

e. 按模型中参数与地理位置的关系,可分为分布参数地表地下水资源管理问题以及集中参数地表地下水资源管理问题。

f. 根据所考虑的目标,可分为考虑联合供水最大或经济效益最大的单目标规划问题以及综合考虑经济、社会、环境等多目标地表地下水联合运用问题。

g. 根据管理机构的设置,可分为集中管理问题、分散控制问题以及基于上下级关系的递阶多级管理问题。

这几种方法是为说明问题方便而从不同的角度划分的,实际地表地下水联合运用问题可以包括在各种不同的划分中。

1.2 联合运用问题的数学模型

联合运用可以分为描述水资源系统特性的物理子模型(水文模型),表达管理目标及各种社会、经济、环境约束的管理子模型(经济模型)以及两者之间的耦合方法三部分。

1.2.1 物理子模型

a. 集中参数模型。集中参数模型将地下含水层处理为地下水库,并与地表水库联合调节,分别用地表地下水系统的水量平衡方程进行描述。Buras^[3,4]的工作是这种方法的代表。1990年,Buras^[5]又提出在集中参数系统中将时段抽水量与含水层降深用一种经验公式表达,从而简化系统,以利于在优化模型中耦合政策因子。袁宏源^[6]利用一个概化的四参数模型模拟一个灌区的水文系统及地表地下水运动,并应用随机方法生成降雨、蒸发与灌溉用水的长期系列。曾赛星和李寿声^[7,8]将地下含水层概化为单一地下水库,并模拟了非饱和带水分变化。颜志俊^[9]将地下水处理成分区水均衡模拟模型,考虑了分区地下水动态,通过迭代使动态过程收敛。集中参数模型对资料要求不高,有利于考虑地表地下水转化关系,但由于状态变量以含水层系统的平均水位代表,只能用于较小区域

均质含水层或规划问题。

b. 分布参数模型。70年代后,随着分布参数地下水模型的发展,联合管理模型大多以分布参数地下水模型为基础。Young和Bredehoeft^[10]将地下水有限差分数值模型作为地下水系统的物理模型,并考虑了地下水开采与河流流量的关系。Maddock^[11]应用响应函数模拟河流与地下含水层之间的水力联系。Haimes和Dreizin^[12~14]用多单元模型以及递阶响应函数描述各单元之间开采的相互影响。Seshadri^[15]将管理区与有限差分的剖分网格统一起来,并在每个单元上考虑地表地下水的联系作为上边界,因而将质量守恒方程描述的河流系统与用偏微分方程的有限差分方程组描述的地下水系统统一起来。由于分布参数系统较为精细地描述了地下水系统的动态变化过程,可以应用于大规模、非均质复杂地下含水层系统与地表水系统的联合运用问题,既可用于长期规划问题,也可用于短期运行问题。不足之处是对资料要求较高,与集中参数系统比较,地表地下水水力联系描述较难。分区管理问题中管理区与数值法剖分网格的关系有待于进一步处理。

1.2.2 管理子模型

早期的管理子模型一般是以供水经济效益最大或供水费用最小做为单一目标。Bredehoeft等^[10]建立的管理模型在规划阶段根据线性规划模型决定作物种类和播种面积,同时用月运行模型决定实际的灌溉过程。Maddock^[11]提出的管理模型考虑了由于降深变化而引起的抽水费用变化。

随着水资源多目标管理问题的提出,在地表地下水联合运用系统中也引入了政策的、社会的、环境的和经济的目标。Haimes和Dreizin^[13]应用多层优化方法在区域地表地下水联合运用系统中考虑了环境目标和经济目标。James^[16]以地下水开采量最大、对河流量影响最小以及供水费用最小做为系统

运行目标。Matsukawa 等^[17]考虑了发电、供水、地下水开采费用以及总供水效益构成的多目标问题。

Bredehoeft 等^[18]考虑了地表水与地下水利用的经济比较,同时考虑了预期收入与收入变差之间的权衡,建立了无差曲线,找到了投资与预期收益、收入风险之间的定量关系。邵景力^[19]将地下水管理问题与投入产出模型相结合以决定最优的产业结构。

1.2.3 物理子模型与管理子模型的耦合

模拟方法最早被用于联接物理子模型与管理子模型,Young 和 Bredehoeft^[10]通过模拟方法将含水层、河流特性与优化模型联系起来,应用物理模型对不同决策变量的响应函数,建立一组非线性方程组,迭代求解。翁文斌^[20,21]用模拟方法研究了多个供水水库与单一地下含水层组成的水资源系统。

基于嵌入法概念的耦合方法也是经常被采用的方法,这种方法将整个物理模型做为等式约束直接加入到优化模型中,或做为状态转移方程加入到依时序决策的动态规划问题中。一般的集中参数模型由于描述物理系统的方程简单,都可以以约束形式嵌入到优化模型中,成为物理可行约束。Buras 的大部分工作,袁宏源 1984 年的工作,是这种方法的代表。而分布参数模型由于形成的代数方程组规模庞大,且随时段增加而增大,一般不易使用这种方法。地矿部水文地质研究所^[22]在滹沱河冲积平原水资源系统分析中应用了嵌入法的概念,他们首先优化分配可用地表水到各个管理区,然后进行地下水开采决策,在实际工作中采用有效集技术求解大规模线性规划问题。

由于线性系统的叠加性和倍比性,对于线性或拟线性系统,可以应用脉冲响应函数与卷积积分的概念表达物理系统对不同管理决策的响应,从而使物理系统与优化模型联系起来。Maddock^[23]发展了代数技术函数(响

应函数)并应用于河流含水层系统联合管理问题中。Haimes 等^[24]为解决不同管理区开采决策及其相互影响,提出了递阶响应函数概念。Morel-seytoux^[24]引入离散积分核函数及其卷积形式,描述河流含水层系统对决策变量的响应,并在 South Platte 应用了这种方法。1986 年,Morel-seytoux^[25]分别推导了河流系统、含水层系统以及复合系统的离散积分核函数和卷积形式,从而对联合运用系统进行了严格的物理描述,该方法只在物理模型中求解单位脉冲条件下系统的响应,从而使模拟模型与管理模型解耦。针对集中参数系统的河流含水层联合管理问题,Handtush, Jenkins^[16]引入了一个开采引起的河流水量损失函数 SDF,可以应用迭加原理反映河流对含水层开采的响应。

在这三种耦合方法中,嵌入法最为方便直观,可以直接在优化中考虑物理可行性约束,但因其使优化问题规模增大,从而对算法、内存提出过高的要求。响应函数法是一种间接方法,要通过运行物理模型求得单位脉冲作用下系统响应,然后在优化模型中通过卷积积分表达决策与系统响应的关系。它物理意义明确,其离散形式能使物理约束转化为线性约束,从而使规划问题易于求解,是一种最有生命力的方法。但对于水力联系复杂的联合运用系统,如何推得其响应函数,以及非线性系统中响应函数应用等,仍有待进一步研究。

2 地表地下水联合管理优化方法

2.1 动态规划方法

动态规划方法以及很多改进的方法(状态增量法、离散微分法等)已成为地表地下水分配的常见手段。Buras, Burt 和 Aron 等在 60 年代都作了大量工作。文献 [4] 是这方面的代表作。为了克服多水源联合运用问题的维数障碍, Noel^[26]将联合运用问题表达

为离散时间、线性二次控制问题,应用动态系统最优控制理论求解。Nathan 和 Buras^[5]在 6 个流域、2 个水库和一条河流组成的复杂水资源系统中,也应用了地表水系统动态分配的优化控制模型。

2.2 线性规划与非线性规划方法

线性规划由于方法的通用性,在联合运用系统中得到了广泛的应用。详见文献[27]。初期的非线性规划问题多是用线性化方法求解的。Willis^[28]应用线性规划方法求解了一个地表水库与四个地下含水单元构成的地表地下水运行管理问题,地下水运动用基本方程的有限差分式表达,目标为供水费用最小或当供水不足情况下缺水损失最小。同时,用 SUMT 法求解了一个水库与地下含水层的联合管理问题。Matsukawa^[17]应用非线性规划的广义简约梯度法求解分布参数的水库、河流与地下水系统联合运用问题,并考虑了发电、供水、环境等多目标。

2.3 大系统分解协调方法

地表地下水系统是复杂的大规模系统,随着近代控制理论与大系统理论的发展,这一方法广泛应用于地表地下水联合运用问题中。1973 年,Chaudhry^[29]利用空间分解和多级优化技术确定印度河流域一个子系统的联合运用优化设计及运行调度问题。Yu 和 Haimes^[1]应用这种方法研究了河流含水层联合运用系统的运行策略问题。其中地下水系统用分布参数模型描述,并引入了递阶及综合响应函数的概念以联系模拟模型和优化模型。在不同的层次考虑了多目标问题。1977 年,Haimes 和 Dreizin^[12]研究一个由河流、含水层和下游地表水库组成的联合运用系统,各子系统操作上级分配的地表水量,并决定地下水开采,目标是本区费用最小;上级协调器协调各区开采的相互影响,同时考虑由管理机构征税用于人工回灌。1980 年, Jamshidi^[30]应用分解协调技术解决 Grande

流域开发问题,首先按空间分解为子系统,然后再将每个子系统按时间分解,构成三级谱系结构。

茹履绥^[31]在进行井渠双灌灌区扩建规划时,对地表地下水大系统进行了按水源和按地域分解的重叠分解技术,对按水源分解的供水系统采用调节计算,而对按地域分解的系统进行逐层优化。将灌溉可用水量作为重叠分解最高协调层的协调变量。曾赛星和李寿声^[7]运用大系统分解协调方法建立了优化灌溉制度的灌区地面水地下水联合运用谱系模型,分别在子系统优化和协调模型中应用动态规划和线性规划方法,确定作物种植面积、地面引水、地下水开采量以及各种作物的灌水定额及次数。刘健民等^[32]在京津唐地区水资源大系统供水规划和调度中,建立了大系统供水规划和调度优化三级递阶模型和三层递阶模拟模型,提出模拟技术和优化方法相结合的求解方法。对已建水库群和地下含水层进行优化调度。

大系统分解协调方法适于求解复杂的地表地下水系统管理问题,由于不同的子系统可以采用不同的优化方法,甚至模拟方法,因而具有很大的灵活性,且使问题的规模大大减小。Haimes^[14]的工作是大系统分解协调方法在联合管理问题中应用的代表,考虑了各种约束及社会、经济目标,并应用分布参数模型描述地下水系统,但由于因素众多,过于复杂,难于在实际工作中应用。而国内的一些工作,多将地下水处理成集中参数系统,不考虑区际地下水的水平运动,对物理实体的描述不够精确。如何使模型既有足够精度又能实际应用,是尚待研究的问题。

2.4 随机规划方法

早期的联合运用问题随机规划方法考虑的是一种拟随机系统,即确定型的模型参数与随机分布的输入项(一般为河流或地表水库的来水量)。Dudley 和 Burt^[33]考虑了在随

机来水条件下的河流含水层系统。而 Maddock^[11]1974年提出一种随机用水需求下的河流含水层系统的运行管理问题,其中河流来水也是由均值、标准差和自相关函数描述的随机过程。Jimshidi^[30]提出了多级随机管理模型,使用了机遇约束方法,管理目标为寻找一个在系统可以接受的风险下费用最小或收益最大的运行策略。Bredehoeft 和 Young^[10]基于风险决策技术,建立了投资与收益期望值、收入风险之间的定量关系,用随机模型检验了由于供水的不确定性而导致的收益不确定性。随着地下水随机模型的发展,对随机模型(参数与输入均为不确定)的研究也日益深入。Hantush^[2]建立了考虑参数不确定性的机遇约束模型,以描述系统及其输入的不确定性。随着人们对系统随机特性认识的深化,今后的管理模型将更多地考虑随机因素。

3 存在问题与发展趋势

3.1 尽管联合运用中考虑的因素越来越多,对联合运用系统的物理模型及经济模型刻画得越来越精细,但所建立的模型仍与真实反映实际系统的特性有一定的距离。这主要是由于简化后的模型未能反映联合运用系统所处的环境以及对水文及经济因素的随机性考虑不足,如何将地表地下水联合运用的理论成果应用到生产实践中去,是研究人员面临的主要课题。

3.2 大系统递阶优化方法是解决复杂水资源系统规划设计与运行管理问题的最有前途的方法,因为真实的水资源系统都是复杂的大系统,通过分解可以把所研究的系统从整个系统中分解出来,从而在不同的层次和规模上研究联合运用问题。

3.3 由于联合运用问题涉及河流来水、降水量等随机因素以及系统参数等的不确定性,在地表地下水系统中引入随机规划方法与风

险分析技术可以更真实地逼近实际系统。然而目前随机规划只能处理系统输入或参数特性的极为有限的随机因素,这方面具有广泛的研究领域。

3.4 文献中提出的大部分办法只能用于解决经过概化的一些特殊的联合运用问题,对于复杂的水资源系统或区域水资源联合管理问题,研究较少。很少的文献是从方法论的角度构筑联合运用问题的理论框架,这也是今后研究的主要内容。

本文是在导师周之豪教授指导下完成的,特此致谢。

参考文献

- 1 Yu W, Haimes Y Y. Multilevel optimization for conjunctive use of ground and surface water. *W. R. R.*, 1974, 10 (4): 625~636
- 2 Hantush M M. Chance-constrained model for management of stream-aquifer management. *J. W. R. Plan. & Manag. ASCE*, 1989, 115(3): 259~277
- 3 Buras N. Conjunctive operation of dams and aquifers. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 1963, 89 (HY6): 111~131
- 4 N. 伯拉斯著(美). 水资源科学分配. 北京: 水利电力出版社, 1984
- 5 Nathan, Baras. 地表地下水系统动态管理. 水文地质工程地质译丛, 1993 (2): 1~8
- 6 袁宏源. 地面水与地下水联合利用的数学模型——人民胜利渠最优运行策略研究. 武汉水利电力学院学报, 1984 (4): 157~168
- 7 曾赛星, 李寿声. 灌溉水量分配大系统分解协调模型. 河海大学学报, 1990, 18 (1): 67~74
- 8 李寿声. 灌溉工程的地面水与地下水联合运用. 华东水利学院学报, 1983 (4): 1~11
- 9 颜志俊. 地表水地下水联合运用的一种算法. 水利学报, 1991 (7): 40~43
- 10 Young R A, Bredehoeft J D. Digital computer simulation for solving management problems of Conjunctive ground and surface water system.

- W. R. R. , 1972, 8 (3); 553~556
- 11 Thomas Maddock ■. The operation of a stream-aquifer system under stochastic demands. W. R. R. , 1974, 10 (1); 1~10
 - 12 Haimes Y Y, Dreizin Y C. Management of groundwater and surface water via decomposition. W. R. R. , 1977, 13 (1); 69~76
 - 13 Dreizin Y C, Haimes Y Y. A hierarchy of response functions for groundwater management. W. R. R. , 1977, 15 (1); 77~82
 - 14 Haimes Y Y. Hierarchical Analyses of water resources systems. New York: McGraw - Hall, 1977
 - 15 Seshadri, Sarganaragana. Conjunctive use of surfacewater and groundwater management. Symposium on groundwater ASCE, 1991
 - 16 James W M. Model for prescribing groundwater use permits. J. W. R. Plan. & Manag. ASCE, 1992, 118 (5); 224~230
 - 17 Matsukawa J. Conjunctive use planning in Madriver basin California. J. W. R. Plan. & Manag. ASCE, 1994, 120 (2); 115~131
 - 18 Bredehoeft J D, Young R A. Conjunctive use of groundwater and surfacewater for irrigated agriculture; Risk averisn. W. R. R. , 1983, 19 (5); 1112~1121
 - 19 邵景力等. 水资源-经济管理模型及其应用. 水文地质工程地质, 1994 (4); 1~8
 - 20 翁文斌等. 大石河流域地面和地下水联合运用的模拟计算. 水文, 1984 (5); 19~26
 - 21 翁文斌等. 地面水、地下水联合调度动态模拟方法及应用. 水利学报, 1988 (2); 1~10
 - 22 38-1-20 课题组. 漳沱河冲积平原水资源系统分析及其数学模型研究. 水文地质工程地质研究所所刊 第5号, 北京: 地质出版社, 1989
 - 23 Thomas Maddock ■. Algebraic Technological Function from a simulation model. W. R. R. , 1972, 8 (1); 129~134
 - 24 Morel-seytoux H J, Daly C J. A discrete kernel generator for stream-aquifer studies. W. R. R. , 1975, 11 (4); 253~260
 - 25 Morel-seytoux H J. A simple case of conjunctive surface-ground water management. Groundwater, 1975, 13 (6); 506~515
 - 26 Noel J E, Howitt R E. Conjunctive multibasin management; an optimal control approach. W. R. R. , 1982, 18 (4); 753~763
 - 27 Castle E N, Lindebory K H. Economics of groundwater allocation. Agri. Exp. Sta. Misc. Pap. 108, Oreg. State. Univ. , Corvallis, 1961
 - 28 Willis R, William W-G Yeh. Groundwater system planning and management. New Jersey: Prentice-Hall, 1987
 - 29 Chaudry M T. Optimal conjunctive use model for Indus basin. J. Hydraul. Div. ASCE, 1974, 100 (HY5); 661~674
 - 30 Jamshidi M, Hegger R J. A multilevel stochastic management model for optimal conjunctive use of ground and surface water. In: Haimes Y Y ed. Water and related land resources systems. Cleveland, Ohio: Pergamon, 1980; 327~334
 - 31 荀履绥. 灌区扩建改建规划的大系统优化模型. 水利学报, 1987 (1); 43~51
 - 32 刘建民, 张世法. 京津唐地区水资源大系统供水规划和调度优化的递阶模型. 水科学进展, 1993 (2); 98~105
 - 33 Daubert J. Conjunctive ground and surface water allocation, the economics of a quasi-market solution. Ph.D thesis, Colo. State. Univ. , 1978
 - 34 Flores E Z. A stochastic model of the operation of a stream-aquifer system. W. R. R. , 1978, 14 (1); 30~38
 - 35 Vasilier O F. System modeling of the interaction between surface and groundwater in problems of hydrology. Hydrological Sciences Journal. , 1987, 32 (3); 297~312
 - 36 朝伦巴根. 美国含水层系统管理及发展动向. 地下水, 1987 (2); 1~10

(收稿日期, 1994-09-10)