

文章编号: 1672-3031 (2004) 02-0131-10

我国水资源配置模型研究现状与展望

尤祥瑜¹, 谢新民², 孙仕军³, 王浩²

(1. 辽宁省石佛寺水库建设管理局, 辽宁 沈阳 110003; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044;

3. 沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 本文系统地分析和回顾了以水库(群)调度和地下水管理以及地表水与地下水联合运用管理为先导的水资源配置, 到考虑基于宏观经济的水资源优化配置, 进一步拓展到面向社会经济、水资源与生态环境协调发展的水资源优化配置, 以及基于城市原水-净化水耦合配置的水资源安全保障体系研究等不同阶段的主要研究成果, 并在此基础上, 根据国家新时期的治水方针, 结合我国水资源开发利用及管理中出现的新问题与新情况, 提出了未来我国水资源配置研究的发展方向。

关键词: 水资源; 水库调度; 地下水管理; 宏观经济; 配置; 模型

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

1 研究现状

“配置”在一般的汉语词典里解释为“配备、布置”。随着社会经济的不断发展, 人对水的依存性越来越大, 水资源优化配置的概念逐步明确, 内涵日益丰富, 至今仍在发展之中。

1.1 水库(群)调度模型 国际上以水资源系统分析为手段, 水资源合理配置为目的的实践研究, 最初源于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题。我国在水资源配置方面的研究起步较迟, 但发展却很快。20世纪60年代就开始了以水库优化调度为先导的水资源分配研究。水库调度是实现水资源配置的主要手段。迄今为止, 水库调度的研究经历了两个阶段, 第一阶段是以常规调度方法为主的经验寻优调度阶段。该阶段调度方法简单直观, 但没有充分发挥水库的调控作用, 难以处理多目标、多约束和复杂水利系统的调度问题。针对这一问题, 人们在水库调度实践中, 对一些常规调度方法进行了改进, 提出了如利用判别系数和调度图相结合的方法进行水电站群的径流补偿调节等; 第二阶段是以运筹学为基础的水库群优化调度阶段, 发展到现在, 大致可以划分为线性规划(LP)、非线性规划(NLP)、动态规划(DP)、模拟技术、控制方法、神经网络方法(ANN)、遗传算法、多目标决策技术、大系统理论与方法、随机优化方法、模糊优化方法以及衍生的一些其他方法等^[1~25]。如1982年张勇传等将变向探索法引入动态规划中, 并研究了在水库优化调度中的应用; 同年, 施熙灿等研究了考虑保证率约束的马氏决策规划在水电站水库优化调度中的应用问题, 建立了马氏决策规划模型; 1983年董子敖等研究了改变约束法在水电站水库优化调度中的应用; 1986年马光文和颜竹丘利用大系统递阶控制原理和方法, 以水电站群保证出力最大为准则, 供水期出力相等作为关联, 应用关联平衡法进行分解, 通过上下级反复协调迭代来求原问题的最优解; 陈守煜和周惠成(1991)提出了多阶段多目标系统的模糊优化决策理论, 建立了多阶段多目标系统的模糊优化决策模型, 并研究了水资源系统多目标模糊优化问题; 谢新民和周之豪(1994)研究和提出一种基于大系统理论和传统动态规划技术的水电站水库群优化调度模型与改进目标协调法, 有效地克服了动态规划的“维数灾”问题; 谢新民和陈守煜等(1995)利用大系统理论、模糊数学规划理论和动态规划技术, 研制出一种水电站水库群模糊优化调度模型与目标协调-模糊规划法, 该模型可以充分地考虑人的知识、经验和决策过程中所存在的模糊性因素对水库调度的影响, 并较好地解决了大规模水库群优化调度计算问题; 黄强和田峰巍(1998)研究了水库调度决策中的风险及其传递计

收稿日期: 2003-12-30

作者简介: 尤祥瑜(1950-), 男, 辽宁本溪人, 高级工程师, 从事水资源管理等方面研究和管理工作。

算方法;王本德和周惠成等(1999)研究出一种有效增加洪水利用的水库预蓄效益预风险控制模型,为提高我国洪水资源的有效利用奠定了理论基础。

1.2 地下水管理模型 随着水资源的日益紧缺,作为水资源重要组成部分的地下水资源的开发利用和研究也日益受到重视。20世纪70年代开始了以地下水数值模拟、规划与管理为主要内容的水资源分配研究,也取得了重要成果,并受到了广泛的关注^[26~49]。自从Maddock(1972)提出响应函数这一概念以来,响应矩阵法在地下水规划与管理中的应用越来越广泛,Maddock(1974)利用响应矩阵法建立了一个河流-含水层系统的联合管理模型;同年,他又提出了一种非线性技术函数的概念,并给出了计算方法。E. Aguado和I. Semson(1974)提出了嵌套法。国内自20世纪80年代引进响应矩阵法和嵌套法以来,在地下水规划、管理、海水入侵综合治理,以及地表水与地下水联合运用等方面的研究取得了突破性进展。李慈君(1985)以美国加利福尼亚州山海盆地为例,介绍了用响应矩阵法建立研究最优人工回灌方案的管理模型;陈雨孙等(1986)探讨了用嵌套法解决非稳定流地下水管理问题时压缩矩阵阶数的一种近似简化方法,他们利用有界非均质含水层中定流量开采降落漏斗曲面各点的降速相等的概念,建立降深~时间关系式,利用嵌套法优化少数几个时段的降落漏斗曲面后,根据降深~时间关系式推求其余时段的最优水位值;王恩志和陈家军(1990)运用响应矩阵法对秦皇岛滨海平原区地下水的开采进行优化管理,以期达到防止海水进一步入侵,并充分开发地下水资源的目;李竟生和戴振学(1990)利用响应矩阵法建立了地下水多目标管理模型,并探讨了几种求解方法;王和平(1991)提出了一种求解线性非齐次系统响应矩阵的剩余降深法;谢新民(1991)将工程经济分析的理论和方法引入地下水资源系统规划研究中,提出了一种研究新思路,解决了以往研究中的某些不足,拟将经济效益最大作为决策目标,同时考虑社会和环境效益,利用响应矩阵法建立规划与管理模型,这种新的研究方法更趋于科学化,所建立的决策模型可更有效地解决地下水资源的合理开发和利用问题;赵天石和张国祥(1991)利用响应矩阵法建立了下辽河平原东部区域地下水资源管理模型,为几个水源地地下水资源系统的联合运行管理提供了科学依据;谢新民(1992)利用多目标决策理论和响应矩阵法,提出一种地下水资源系统多目标管理模型及交互式方法;谢新民(1993、1994)根据模糊数学规划理论和响应矩阵法,先后建立了济南地下水资源系统多目标管理模型、地下水资源系统多目标模糊管理模型及相应的计算方法;谢新民和王春义等(1995)建立了莱州湾王河流域海水入侵综合治理分层多目标优化模型,为地下水资源的有效保护、合理调整开发布局和优化地下水人工回灌位置及规模等提供了科学依据。

1.3 地表水与地下水联合运用模型 随着水资源供需矛盾的日趋尖锐,单纯考虑和研究地表水或地下水均不能有效解决水资源紧缺问题,需要将地表水与地下水统一考虑。近年来,国内外研究其联合运用规划和管理等问题,并取得了重要成果^[50~77]。自N. Buras和W. A. Hall(1961)用动态规划求解地表与地下水的分配问题以来,地表水与地下水联合规划与管理问题的研究有了较大进展,解决了一些重要的实际问题。翁文斌等(1984、1988)用不同方法研究了地表水与地下水联合运用的模拟计算问题;许涓铭等(1986)建立了地下水-地表水库联合运用的规划模型;方淑秀、黄守信等(1990)对滦河的跨流域引水多水库联合优化调度进行了研究;谢新民(1992)对水资源大系统的运行管理问题进行了分析和研究,建立了水资源大系统分布参数谱系管理模型,并提出了一种二级分解-协调算法;谢新民和陈守煜等(1994)利用大系统理论和模糊数学,应用数值模拟和相应矩阵法,研究了地表-地下水资源系统多目标管理模型与模糊决策问题,建立了水电站水库群与地下水资源系统联合运行管理模型,并提出一种目标-协调计算方法。1995年由中国水利水电科学研究院主编的《水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编》一书正式出版,系统地介绍了我国20世纪80~90年代初在水资源大系统优化规划和优化调度方面的新理论、新技术和新方法。

1.4 水资源配置模型 20世纪80年代初,由华士乾教授为首的课题组对北京地区的水资源利用系统工程方法进行了研究,并在“七五”国家重点科技攻关项目中加以提高和应用。该项研究成果考虑了水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设次序以及水资源开发利用对国民经济发展的作用,成为我国水资源配置研究的雏形。“水资源优化配置”一词,在我国正式提出是1991年,当时,为了

借鉴国外水资源管理的先进理论、方法和技术,在国家科委和水利部的领导下,中国水利水电科学研究院陈志恺和王浩等在 1991~1993 年期间承担了联合国开发计划署的技术援助项目“华北水资源管理 (UNDP CPR/88/068)”,首次在我国开发出了华北宏观经济水资源优化配置模型,研制了京、津、唐地区宏观经济水规划决策支持系统,它包括由宏观经济模型、多目标分析模型和水资源模拟模型等 7 个模型组成的模型库,由 Oracle 软件及 ARC/INFO 软件支持的数据库和多级菜单驱动的人-机界面等,实现了各模型之间的连接与信息交换。随后,国家科委和水利部又启动了“八五”国家重点科技攻关专题“华北地区宏观经济水资源规划理论与方法”,许新宜、王浩和甘泓等系统地建立了基于宏观经济的水资源优化配置理论技术体系,包括水资源优化配置的定义、内涵、决策机制和水资源配置多目标分析模型、宏观经济分析模型、模拟模型,以及多层次多目标群决策计算方法、决策支持系统等。中国水利水电科学研究院、黄河水利委员会和长江水利委员会等,分别结合亚洲银行海南项目、UNDP 华北水资源管理项目、国家“八五”攻关华北地区宏观经济水资源配置模型、世界银行黄河流域经济模型、新疆北部地区水资源可持续开发利用项目以及南水北调项目等,开发和改进了水资源配置优化模型和模拟模型,有效地解决了一批区域性水资源综合规划问题,取得了较好的效果。甘泓、尹明万 (1998) 结合邯郸市水资源管理项目,率先在地市一级行政区域研究和应用了水资源配置动态模拟模型,并开发出界面友好的水资源配置决策支持系统。马宏志、翁文斌和王忠静 (1998) 根据可持续发展理论,在总结和延伸了水资源规划的多目标发展、相互作用、动态与风险性、公众接受和滚动规划的原则基础上,提出一种交互式宏观多目标优化与方案动态模拟相结合的决策支持规划思想和操作方法,用分段静态长系列法模拟水资源系统的动态特性,开发出相应的规划决策支持系统。尹明万和李令跃等 (1999) 结合大连市大沙河流域水资源实际情况,研制出第一个针对小流域规划的水资源配置优化与模拟耦合模型。在“九五”期间,国家又启动了“九五”国家重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”,将水资源配置的范畴进一步拓展到社会经济-水资源-生态环境系统,配置的对象也发展到同时配置国民经济用水和生态环境用水,并且研究和提出了生态需水量计算方法。甘泓和尹明万等 (1999) 结合新疆的实际情况,研制出了第一个可适用于巨型水资源系统的智能型模拟模型,该模型有两个突出特点:一是考虑了生态供水的要求;二是水系统巨大,要素众多,为保证计算精度和加快计算速度,模型中采用了智能化技术。谢新民、裴源生和秦大庸等 (2000) 根据宁夏的实际情况和亟待研究解决的问题,基于社会经济可持续发展和水资源可持续利用的观点,利用水资源系统分析的理论和方法,分析和确立宁夏水资源优化配置的目标及要求,建立的水资源优化配置模型系统由 4 个计算模型和两种模式组成:浅层地下水模型、需水预测模型、基于灌溉动态需水量计算的水均衡模型、目标规划模型,以及南部山区当地水资源高效利用模式、引黄灌区地表水与地下水联合高效利用模式等,通过各模型之间不断交换信息、循环迭代计算,对各种方案进行分析和计算,然后建立了能评价和衡量各种方案的统一尺度,即评价指标体系,利用所建立的评价模型对各方案进行分析和评价,最后研制出水资源配置智能型决策支持系统,可友好地为决策者或决策部门提供全面的决策参考和可供具体操作、实施的水资源优化配置推荐方案,为宁夏水资源的合理开发和可持续利用提供决策支持。王浩、秦大庸和王建华等 (2001) 在“黄淮海水资源合理配置研究”中,首次提出水资源“三次平衡”的配置思想,系统地阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法,其核心内容是在国民经济用水过程和流域水循环转化过程两个层面上分析水量亏缺态势,并在统一的用水竞争模式下研究流域之间的水资源配置问题,是我国水资源配置理论与方法研究的新进展。王劲峰和刘昌明等 (2001) 针对我国水资源供需平衡在空间上的巨大差异造成了区际调水的需求,提出了水资源在时间、部门和空间上的三维优化分配理论模型体系,包括含 4 类经济目标的目标集、7 类变量组合的模型集和 6 种边际效益类型的边际效益集,由此组成了 168 种优化问题,并提出一种解析解法。王浩、秦大庸和王建华 (2002) 系统地阐述了在市场经济条件下,水资源总体规划体系应建立以流域系统为对象、以流域水循环为科学基础、以合理的配置为中心的系统观,以多层次、多目标、群决策方法作为流域水资源规划的方法论。尹明万和谢新民等 (2002) 结合河南省水资源综合规划试点项目,根据国家新的治水方针和“三先三后”的原则,在国内外首次建立了基于河道

内与河道外生态环境需水量的水资源配置动态模拟模型, 无论从规划思想、理念和理论上, 还是从模型技术、仿真与求解方法上都有所创新和突破, 该模型是一个充分反映了水资源系统的多水平年、多层次、多地区、多用户、多水源、多工程的特性, 能够将多种水资源进行时空调控, 实现动态配置和优化调度模拟有机结合的模型系统, 为科学地制定各种水源配置方案提供了强有力的技术支撑。贺北方等(2002)研究和提出一种基于遗传算法的区域水资源优化配置模型, 利用大系统分解协调技术, 将模型分解为二级递阶结构, 同时探讨了多目标遗传算法在区域水资源二级递阶优化模型中的应用。赵建世、王忠静和翁文斌(2002)在分析了水资源配置系统的复杂性及其复杂适应机理分析的基础上, 应用复杂适应系统理论的基本原理和方法, 构架出了全新的水资源配置系统分析模型。谢新民和岳春芳等(2003)针对珠海市水资源开发利用面临的问题和水资源管理中出现的新情况, 采用现代的规划技术手段, 包括可持续发展理论、系统论和模拟技术、优化技术等, 根据国家新的治水方针, 在国家“九五”重点科技攻关研究成果的基础上, 建立了珠海市水资源配置模型——基于原水-净化水耦合配置的多目标递阶控制模型, 并通过3种配置模式和750多种配置方案的模拟计算和综合对比分析, 给出了2种优先推荐的配置模式和70多个推荐配置方案, 为珠海市未来20年时间尺度上的水资源优化配置和统一管理提供了科学的依据。总之, 上述研究成果标志着我国经过了几代人坚持不懈的努力, 使我国水资源优化配置研究从无到有, 逐步走向成熟。

2 研究展望

水资源配置系统为一规模庞大、结构复杂、功能综合、影响因素众多的大系统, 必须考虑系统固有的特征: 多目标、多属性、多层次、多阶段及多不确定性因素等。为此, 水资源配置研究正朝着水资源复杂系统所要求的方向发展。根据国家新时期的治水方针, 并综合考虑到我国水资源开发利用及管理中出现的新问题与新情况, 目前可以预见的发展方向是: 以单纯追求一个目标最优的择优准则, 正向由复杂事物固有的多目标优化满意准则转化; 从单一整体、功能有限的模型结构形式, 将发展为分散的、多层次的、而且又能协调和聚合的多功能模型系统; 从“策略导向”的个人决策模式, 正演化为“决策过程导向”的个人或群体决策模式等^[78~83]。

2.1 从单一目标趋向于多目标 以前在研究和解决水资源配置问题时, 多采用最优准则(如发电、供水量最大, 工程成本最小, 或投资最小, 淹没损失最小等)和单一目标(将一些相互竞争目标作为约束条件处理后, 选用一个目标)进行优化, 给出最优方案(或策略)供决策者参考和采用。这样的最优方案, 主要问题是易于失真, 不易被决策者所采纳。原因是: 其一, 决策者若考虑到模型未能概括的其它因素, 如环境、社会和政治等, 最优方案可能急剧变坏, 甚至成为不可行方案, 即使并非如此严重, 考虑到不确定性因素的影响, 也无法保证它确是唯一的最优方案; 其二, 不能反映作为约束条件处理的各个目标之间的利益转换关系, 难以为利害冲突的有关各方所接受; 其三, 也是最大的问题, 这种唯一的最优, 常常不能反映决策者的愿望, 甚至引起疑虑; 其四, 往往受水资源配置系统本身及与之相关的决策机构的体制、管理不协调及缺乏评审考核标准与相应的奖励办法、制度等影响。这些不能不说是当今水资源配置研究成果虽多, 而真正能被采纳实施不多的原因之一。

鉴于上述弊端, 采用最满意准则(体现的形式很多, 如目的、理想、优先权(级)、效用、最佳均衡等, 总之与决策者偏好有关)和多目标函数(如经济的、环境的、社会的等)是必要的。早在20世纪50年代末期, J. G. March 和 H. A. Siman 就指出, 人们关心的是寻找和选择满意的决策方案, 仅在特殊情况下, 方去寻找和选择所谓最优的决策方案。J. P. Ignizio 还补充说, 即使人们确实要寻找最优决策方案, 但从实际意义来说, 除了特别简单的现实世界问题外, 这样的最优方案是不可能得到的。

由于多目标决策技术的性质和灵活性, 可以给出各个目标之间的利益转换关系, 也能给出所有方案的排队关系, 还可根据决策者的偏好和效用给出相应的决策方案, 因此, 应用多目标决策方法, 研制水资源配置多目标分析模型, 能适应问题的各种决策要求和扩大决策范围, 有利于决策者选出最佳均衡方案。

2.2 模型功能向多功能方向发展 为了使模型具有反映客观事物内在联系、符合人类思维方式和成为决策过程的有力工具,水资源配置模型的功能应该是重点研究内容之一,使其具有产生方案、比较方案和评价方案的多种功能。产生方案,是指通过模型求解,能得到供决策者挑选的多种组合形式的较好方案。比较方案和评价方案,是指可对模型生成的各种方案的各个方面影响作出详尽的分析,并可根据一定的评价准则(其中包括决策者的愿望或偏好)对方案进行分类、比较、排序和择优。

如果水资源配置模型具备上述的功能,就可较好地适应水资源配置所面临的复杂局面:水资源的开发与利用,涉及国计民生、生态环境等广阔领域,其中包括国民经济发展、结构调整、产业布局、地区开发、社会福利、生态环境保护等诸多方面,以及国家、集体和个人的眼前、长远利益与人们的心理状态等因素。面对如此复杂、相互矛盾的目标,任何一项水资源配置决策,常常需要反复考虑各种因素、权衡各方面利益后,才能作出一种协调平衡的决策。如果水资源配置模型具有上述的多目标功能时,不仅可提供使决策者具有全面权衡利弊得失的各种方案,而且在比较挑选方案过程中,还可以为决策者提供大量决策信息,帮助决策者找到最佳均衡方案。

水资源配置决策过程是一个反复研究和逐步深化的动态过程。决策分析伊始,并不能对目标、约束等作出全面准确的定义,也不可能对影响决策的各种因素及其矛盾程度具有全面深刻的认识,而只能在决策过程中逐步深化。如果决策分析模型具备产生、比较和评价方案的功能,就可在决策过程中,随着决策分析的深入,决策信息的增加,调整模型结构,改善参数等,重新产生方案,作出全面准确的评价,为最终决策提供源源不断的有用信息。

2.3 用模型系统取代整体模型 为了使水资源配置模型具备上述功能,模型结构的形式也要作出相应的改进。过去采用一个整体的、复杂的、维数(阶数)众多、求解困难的水资源配置模型,分析者的精力主要倾注于模型的求解计算,很少有余力关注决策分析的其它环节。特别是采用策略导向的决策方式,决策者对模型不易理解,对求解成果也免不了持怀疑或不信任的态度。将单一整体模型结构代之以模型系统结构,可以弥补上述缺陷。这种模型系统视问题的复杂程度和求解要求,可由简单的优化模型和评价模型所组成,也可由复杂的层次(递阶)优化模型、仿真模型和评价模型所构成,还可能由其它另外的结构形式(只要满足产生、比较和评价方案的功能),如嵌入模型、启发式模型、组合模型等。因为大系统具有多目标、多属性、多层次、多阶段的特性,可以采用若干子模型在不同层次不同阶段真实细致地描绘大系统的某个侧面或某个问题,解决决策分析中的一个或几个子问题;而模型系统中高层次的模型又可按一定关系将子模型组织起来,解决决策分析中更宏观的问题。这样,一些子模型具有相对的独立性,不同的模型可用不同的优化技术求解,而且求解容易,使用方便。这样的模型结构,既可解除维数障碍,又能够解决大系统的总体问题,各个子模型还可单独使用,解决大系统中某个方面的问题。

目前,水资源配置模型多以实物或物理量为目标,而少用或不用经济量作为目标。主要原因是经济资料不全不准,社会、生态、环境等资料尤为短缺。但是,物理量值最大与经济效益、社会效益最优并不等价,因而只好以策略导向方式提供备选方案由决策者选择。采用模型系统,可以把优化模型(产生方案)与用经济效益、社会效果和生态环境影响等的评价模型结合起来,尽可能地避免不确定的因素进入优化目标函数,并进行多目标优化,生成非劣解集;然后用模拟模型来分析各种非劣解的经济、社会 and 环境影响;最后按一定的评价准则(可包括经济的、社会的和环境的,以及决策者的偏好等),通过评价模型评比各种方案,从而选出最终的决策方案。

根据大系统问题的性质和要求,构造不同功能组成的模型系统,其最终决策方案是比较全面合理的。这样的模型系统,描述复杂问题更真实、灵活、简单、便于修改,有利于进行交互程序分析,可以实现决策过程导向的决策模式,也是水资源配置研究发展的趋势和方向。

2.4 考虑不确定因素的方案选择 水资源配置系统另一个特点是不确定因素的存在与影响。水资源配置模型方法可以把不确定因素引导到决策者的视野之中,并尽可能地加以处理。但是,其处理不确定因素影响的能力还是有限的。为使现时的决策在今后的多变条件下较好地发挥模型的预定功能和作用,考虑不确定因素的影响是绝对不可忽视的,而且还要加强研究处理不确定因素影响的模型技术和

方法。处理不确定性因素影响的方法与途径有：^①用确定的期望值与灵敏度分析相结合的方式来评估不确定因素影响，即以确定的期望值或可接受的临界值来代替不确定的变量，从而用确定性方法来求解，并给出优化方案，然后通过灵敏度分析评估非确定性因素对优化方案的影响程度。这种方法适用于不确定因素变化幅度小，且对系统性能影响不大的场合；^④当考虑的非确定因素变化幅度大，或变幅虽不大而对系统性能影响比较大的场合，这时既要考虑对系统性能的影响，又要估计对所选方案失效的风险程度，因此，可采用风险决策中的最大最小准则来处理不确定性因素的影响；^④将多变的和非确定性因素，并入目标和模型之中，即所谓的随机模型法。这种方法目前只能解决一些较为简单的水资源配置问题。

考虑不确定因素影响，使现今的决策方案具有适应未来多变的性能，不从模型直接入手，而从方案选择中想办法，也是一种值得尝试的途径。这种设想是在决策分析的方案评价准则中，增添一种方案适应条件变化能力的标准，称为稳健性准则，用其作为评价选择方案的一种标准。根据这种评价准则，在水资源配置决策分析中，不去寻找效益响应面陡峭的顶峰，而是选择顶峰附近的一块较为平坦的坡地，作为挑选最终决策的方案适宜场所；这就是说，考虑未来的随机因素变化，不去选择最优的方案(峰值)，而是选择适应多变能力强的次优方案，甚至哪怕再次优的方案，作为最终的决策方案。因为最优方案，在条件略加变化下，可能急剧下降变坏，甚至成为不可行解。

考虑随机因素对配置方案的未来影响，还可对有关参数和主要决策变量进行敏感性分析，以便为决策分析提供更多的信息，使决策者在选定方案时有一定的余地考虑随机因素影响的后果。

发展多目标随机规划的非劣解生成技术是很有意义的，但难度相当大。正如 Rogers 和 Fiering 教授指出：解决复杂的水资源配置决策问题，多目标优化、递阶分析方法是很有潜力的，但还不能应用到随机条件之下。考虑随机问题，仍不能从整体的随机模型入手，而是利用模型系统在相对独立的子模型中考虑随机因素，并利用现有的随机规划方法来求解，然后再利用高层次的模型生成非劣解集。这样，将随机优化与向量优化分开处理，但又通过高层次模型把它们统一起来，将是一种解决问题的新途径。

2.5 大系统多目标分析技术势必迅速发展 众所周知，由于大系统的特点，使得 20 世纪 70 年代分别发展起来的大系统递阶分析与多目标决策分析逐步融汇一起，形成了大系统多目标递阶分析技术。这是系统分析解决复杂问题的又一重要发展途径。

大系统递阶分析中，“分解—协调”技术是目前广泛使用的方法，国内译著不少，应用也在逐渐扩展。此外，还有用于动态分散控制的交叠分解法，在水资源配置中应用较广的具有不同形式的多模型方法，这些都为系统分析解决问题的范围增添了新领域。

多目标决策思想出现于 19 世纪末。作为多目标决策理论基础之一的向量优化理论，是 1951 年由 Kuhn 和 Tucker 导出的非劣性条件奠定的。另一理论是效用理论。大多数的多目标决策技术是 20 世纪 70 年代发展起来的，大体上有非劣解生成技术、基于决策者偏好的决策技术、交互式的生成决策技术、以及对非劣方案和方案排队的评价技术等。这些技术有的较为成熟，有的仍在检验发展中。

大系统多目标递阶分析是反映大系统的递阶和多目标的多属性这两个相互联系特点的产物。据 1986 年第四届大系统理论与应用国际会议 (IFAC/IFORS) 报道，Haines 等人的综述文章介绍，目前大系统多目标递阶分析方法有：多目标“分解—协调”法、效用函数法、权重法、权衡法、生成法等、多目标交叠分解法和多目标模型技术等。

2.6 水资源配置决策支持系统 (WRDSS) 将得到迅速发展 根据水资源配置决策支持系统 (WRDSS) 研究、应用现状和存在的问题，以及水资源规划与管理的实际需要等，作者认为 WRDSS 的发展有以下几种趋势。

(1) 智能型水资源配置决策支持系统 (IWRDSS)。智能型水资源配置决策支持系统 (IWRDSS) 是水资源配置决策支持系统 (WRDSS) 的一个重要发展方向。在水资源规划与管理决策中除部分结构化程度高的问题可以用数学模型描述、定量计算外，有很多问题仅借用于数学模型描述、定量计算是不够的，有一些需要考虑的因素(如决策者的偏好等)是无法定量表示的。因此，开发和研制智能型水资源配置决

策支持系统(IWRDSS)是解决水资源配置决策问题的有效途径。在 WRDSS 的基础上,研究和开发同时处理含有定量和定性问题的知识库与推理机等,是今后的一个重要研究课题。

(2) 多目标水资源配置群决策支持系统。水资源规划与管理决策是由各级部门的多个决策者共同作出的,故水资源配置多目标群决策支持系统较适合目前我国各级决策部门的集体决策方式。随着计算机网络的日益发展,分布式 WRDSS 将是今后的一个重要研究方向。

(3) 集成式水资源配置决策支持系统。单一基于信息的系统、单一基于模型的系统或单一基于知识的系统都无法满足复杂水资源配置决策的需要,将各种方法、知识、工具集成化,形成面向具体问题的综合型决策支持系统是解决水资源配置问题的理想途径。集成式 WRDSS 应具有数据自动采集和处理、综合信息预警、紧急情况报警和系统监控等功能。

(4) 数据采集和通讯系统的发展。水资源配置决策所需要的数据量大、类型多,因此各种类型的数据采集和通讯系统的发展将促进 WRDSS 的进一步开发和广泛应用。同时,数据采集与通讯系统的准确性和可靠性问题将会得到进一步重视和深入的研究、解决。

(5) 通用商业软件的广泛应用和友好界面的进一步发展。各种先进的数据库管理软件、计算机图形软件等为水资源规划、设计和运行管理提供了友好界面,节约了很多编程工作,用户友好界面如语言识别、图象识别等将进一步推动 WRDSS 的发展和应用。

(6) 水资源配置决策专家系统。随着人们在水资源开发利用中不断积累和丰富实践经验,以及考虑的因素不断增多和全面,水资源配置问题越加复杂和庞大,决策者或决策机构作出科学的判断和决策将会变得更加困难,因此迫切需要借助于领域专家的知识、经验等来辅助决策者或决策机构作出科学的判断和决策。因而,随着信息技术的不断发展和完善,水资源配置决策专家系统将会应运而生,并将得到迅速发展、普及和应用。

2.7 基于可持续发展的水资源配置理论将不断发展和完善 根据国家新时期的治水方针、我国水资源开发利用和管理中出现的新问题与新情况,研究和指导水资源开发利用的理论、观点,正逐步向着基于可持续发展的水资源配置理论发展。社会经济的不断发展,使得对水资源的需求量不断增加,而对水资源的盲目、掠夺式开发和利用则会危及人类赖以生存的生态环境,而生态环境的破坏,又反过来会阻碍社会经济的发展,最终危及人类的生存与发展。因此,只有实现水资源合理开发和高效利用、积极恢复和修复被破坏的生态环境,人类才能保障自己的生存和可持续发展。因此,基于可持续发展的水资源配置理论将会不断得到发展和完善。

3 结束语

本文系统地查询了近一、二十年来我国在水资源配置研究方面所取得的研究和应用成果,并对主要成果进行了简单介绍,希望能起到抛砖引玉的作用,使广大的科技工作者不仅能较全面地了解我国水资源配置研究的历史和现状,而且能略知我国水资源配置研究发展的趋势。随着我国水资源问题的日益突出,有关水资源配置研究的领域也在不断拓展,如为实现水资源的优化配置,在水资源承载能力和水价、水权水市场,以及水资源实时监控管理、水务一体化管理、水量水质双总量控制和有关政策法规等方面的研究,已日益受到人们的普遍关注。当今迫切需要开展深入、系统的研究和联合攻关,才真正可望为我国水资源的优化配置和科学管理提供强有力的理论和技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] 张勇传,等.微分动态规划及回归分析在水库优化调度中的应用[J].水电能源科学,1987,5(2).
- [2] 余永青,戴国瑞.基于 POA 算法的变维线性规模在水电站群优化调度中的应用[J].水电能源科学,1989,7(1): 65-71.
- [3] 张玉新,冯尚友.多目标动态规划逐次迭代算法[J].武汉水利电力学院学报,1988,(6).

[4] 问德溥. 多维随机动态规划的参数迭代法及在库群调度中的应用 [J] . 水利学报, 1986, (3): 1- 9.

[5] 张勇传, 等. 变向探索法及其在水库优化调度中的应用 [J] . 水力发电学报, 1982, (2).

[6] 施熙灿, 王浩, 等. 考虑保证率约束的马氏决策规划在水电站水库优化调度中的应用 [J] . 水力发电学报, 1982, (2).

[7] 董子敖, 等. 改变约束法和国民经济效益最大准则在水电站水库优化调度中的应用 [J] . 水力发电学报, 1983, (2).

[8] 许自达. 二维动态规划在梯级水电站参数选择中的应用 [J] . 水力发电学报, 1985, (2).

[9] 张玉新, 冯尚友. 多维决策的多目标动态规划及其应用 [J] . 水利学报, 1986, (7).

[10] 董子敖, 等. 径流时空相关的梯级水库群补偿调节和调度的多目标多层次优化法 [J] . 水力发电学报, 1986, (2).

[11] 马光文, 颜竹丘. 水电站群补偿调节的递阶控制——关联平衡法 [J] . 水力发电学报, 1986, (4).

[12] 王杨, 董子敖. 用多层次参数迭代法进行水电站水库群长期优化调度 [J] . 水力发电学报, 1988, (1).

[13] 田峰巍, 颜竹丘. 用大系统递阶控制理论确定梯级水电站水库群最优死水位和保证出力 [J] . 水能科学, 1988, 6 (4): 301- 308.

[14] 裘杏莲. 大型水电站系统功能指标优化计算聚合库偶动态规划法 [J] . 水力发电学报, 1989, (2).

[15] 梅亚东, 冯尚友. 网络规划在水电站水库系统长期优化运行中应用 [J] . 武汉水利电力学院学报, 1989, (2).

[16] 胡振鹏, 冯尚友. 综合利用水库运行管理的多目标风险分析 [J] . 水电能源科学, 1990, 8 (2): 133- 142.

[17] 陈守煜. 多阶段多目标决策系统模糊优选理论及其应用 [J] . 水利学报, 1990, (1): 1- 10.

[18] 陈守煜, 周惠成. 多阶段多目标系统的模糊优化决策理论与模型 [J] . 水电能源科学, 1991, 9 (1): 9- 17.

[19] 谢新民. 混联水电站水库群系统优化调度问题的研究 [J] . 水电能源科学, 1992, 10 (2): 86- 93.

[20] 谢新民, 周之豪. 水电站水库群经济优化调度数学模型与方法研究 [J] . 水电能源科学, 1994, 12 (1): 21- 28.

[21] 谢新民, 陈守煜, 等. 水电站水库群模糊优化调度模型与目标协调模糊规划法 [J] . 水科学进展, 1995, 5 (3): 189- 197.

[22] 谢新民, 尹明万, 等. 基于知识的水电站水库群优化补偿调节模型研究 [A] . 水利部首届青年学术交流会优秀论文集 [C] . 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

[23] 谢新民. 基于知识的水电站水库群模糊优化补偿调节模型研究 [J] . 水利学报, 1998, (3): 74- 81.

[24] 王本德, 周惠成, 等. 水库预蓄效益预风险控制模型 [J] . 大连理工大学学报, 1999, (3): 39.

[25] 郭生练. 水库调度综合自动化系统 [M] . 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.

[26] 威利斯, 于汉城译. 地下水质量管理的规划模型 [J] . 水文地质工程地质译丛, 1982, (3).

[27] 许涓铭, 邵景力. 地下水管理讲座 [J] . 工程勘察, 1988, (4- 5).

[28] 王思志, 陈家军. 优化技术在管理海水入侵问题中的应用 [J] . 工程勘察, 1990, (4).

[29] 李竞生, 戴振学. 地下水多目标管理模型的研究 [J] . 水文地质工程地质, 1990, (2).

[30] 陈雨孙, 孙宝祥, 等. 非稳定有限分析格式 [J] . 工程勘察, 1991, (2).

[31] 谢新民. 地下水资源系统经济管理模型及二次规划算法 [J] . 工程勘察, 1991, (2): 32- 37.

[32] 王和平. 剩余降深法解线性非齐次系统响应矩阵 [J] . 水文地质工程地质, 1991, (1).

[33] 谢新民. 工程经济分析在地下水系统规划中的应用 [J] . 长春地质学院学报, 1991, 21 (2): 205- 212.

[34] 谢新民. 地下水资源系统经济管理模型研究 [J] . 水文地质工程地质, 1991, 18 (4): 6- 10.

[35] 赵天石, 张国祥. 辽宁下辽河平原东部地下水管理模型研究 [J] . 水文地质工程地质, 1991, 18 (3).

[36] 谢新民. 新疆喀什市地下水系统管理模型的研究 [J] . 河海大学学报, 1991, 19 (5): 1- 8.

[37] 谢新民. 喀什市地下水系统确定一随机耦合模拟模型 [J] . 河海大学学报, 1992, 20 (1): 77- 84.

[38] 谢新民. 地下水资源系统多目标管理模型及交互式方法 [J] . 河海大学学报, 1993, 21 (1): 1- 8.

[39] 谢新民. 济南地下水资源系统多目标管理模型及模糊带权方法 [J] . 自然资源学报, 1993, 8 (1): 63- 72.

[40] 谢新民. 地下水管理系统规划与管理研究现状及发展趋势 [J] . 河海科技进展, 1993, 13 (1): 46- 51.

- [41] 谢新民, 赵全升. 地下水资源系统多目标管理模型及模糊决策分析 [A]. 中国控制与决策学术年会论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- [42] 谢新民. 地下水资源系统多目标管理模型及模糊带权二次规划方法 [J]. 水文地质工程地质, 1993, 20 (4): 17- 21.
- [43] 谢新民. 喀什市地下水系统随机经济管理模型研究 [J]. 大连理工大学学报, 1993, 33 (6): 711- 717.
- [44] 谢新民. 喀什市地下水系统经济学管理模型及其二级分解- 协调算法 [J]. 系统工程理论与实践, 1994, 14 (1): 45- 53.
- [45] 谢新民, 周之豪. 地下水资源系统模糊管理模型及计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 1994, 21 (6): 27- 32.
- [46] 谢新民, 赵全升, 等. 沿海地区海水入侵综合治理优化决策模型研究 [A]. 中国控制与决策学术年会论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1995.
- [47] 谢新民, 王春义, 等. 莱州湾王河流域海水入侵综合治理分层多目标优化模型研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3 (2): 170- 175.
- [48] 谢新民, 周之豪. 地下水资源系统多目标模糊管理模型研究 [J]. 水利学报, 1995, (8): 33- 38.
- [49] Xie xinmin, Tang Kewang. Study of an optimal program for sea water intrusion control in the Wanghe river watershed, Laizhou Gulf, China [A]. 未固结合水层开发与管理国际学术研讨会论文集 [C]. 青岛海洋大学出版社, 1999.
- [50] [美] N. 伯拉斯. 水资源科学分配 [M]. 戴国瑞, 等译. 北京: 水利水电出版社, 1983.
- [51] 冯尚友. 水资源大系统分析应用的目前动态与发展趋势 [J]. 系统工程理论与实践, 1990, (5).
- [52] 谢新民, 周之豪. 水电站水库群与地下水资源系统联合运行多目标管理模型 [J]. 水电能源科学, 1993, 11 (2): 96- 104.
- [53] 谢新民, 周之豪. 水电站水库群与地下水资源系统联合运行经济管理模型研究 [J]. 河海大学学报, 1993, 21 (5): 62- 69.
- [54] 谢新民, 陈守煜, 等. 地表- 地下水资源系统多目标管理模型与模糊决策研究 [J]. 大连理工大学学报, 1994, 34 (2): 240- 248.
- [55] 叶永毅, 黄守信, 等. 水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [56] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [57] 甘泓, 尹明万, 等. 河北省邯郸市水资源规划管理决策支持系统应用研究 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1998.
- [58] 尹明万, 李令跃, 等. 大连市大沙河流域规划 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1999.
- [59] 甘泓, 李令跃. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系 [J]. 水科学进展, 2000, 11 (3).
- [60] 王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [61] 甘泓, 尹明万, 等. 新疆经济发展与水资源合理配置及承载能力研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [62] 谢新民, 秦大庸, 于福亮, 等. 宁夏水资源优化配置模型与方案分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2000, (1): 16- 26.
- [63] 谢新民, 赵文骏, 裴源生, 等. 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [64] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [65] 王劲峰, 刘昌明, 等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨 [J]. 水利学报, 2001, (4): 7- 14.
- [66] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论 [J]. 水利学报, 2002, (8): 1- 6.
- [67] 贺北方, 周丽, 等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型 [J]. 水电能源科学, 2002, 20 (3): 10- 12.
- [68] 赵建世, 王忠静, 翁文斌. 水资源复杂适应配置系统的理论与模型 [J]. 地理学报, 2002, 57 (6).

[69] 谢新民, 岳春芳, 阮本清, 等. 珠海市优化配置的水资源安全保障体系综合规划 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.

[70] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[71] 李雪萍. 国内外水资源配置研究概述 [J]. 黄河水利, 2002, (5): 13- 15.

[72] 丁晶, 张欣莉, 侯玉. 中国水资源优化配置研究的进展与展望 [J]. 水利发展研究, 2002, 2 (9): 9- 11.

[73] 冯耀龙, 韩文秀, 等. 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究 [J]. 系统理论与实践, 2003, (2): 133- 138

[74] 谢新民, 张海庆, 尹明万, 等. 水资源评价及可持续利用规划理论与实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.

[75] 尹明万, 谢新民, 王浩, 等. 安阳市水资源配置系统方案研究 [J]. 中国水利, 2003, 488 (7): 14- 16.

[76] 尹明万, 谢新民, 王浩, 等. 基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型研究 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (2): 5- 8.

[77] 冯尚友. 水资源系统分析应用的目前动态与发展趋势 [J]. 系统工程理论与实践, 1990, (5): 43- 48.

[78] 冯尚友. 水资源系统工程 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1990.

[79] 刘健民. 水资源规划与管理决策支持系统的发展和应用 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (3): 255- 259.

[80] 陈晓红. 智能决策支持系统设计思想探讨 [A]. 中国控制与决策学术年会论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.

[81] 谢新民, 蒋云钟, 闫继军, 杨小庆. 流域水资源实时监控管理系统研究 [J]. 水科学进展, 2002, 14 (3): 256- 259.

[82] 胡铁松, 等. 水资源决策支持系统目前动态及展望 [J]. 水科学进展, 1993, 4 (3): 237- 241.

Review on the present situation and future prospect of water
resources deployment models in China

YOU Xiang-yu¹, XIE Xin-min², SUN Shi-jun³, WANG Hao²

(1. Bureau of Liaoning Shijishi Reservoir, Shenyang 110003, China;

2. Dept of Water Resources, IWHR, Beijing 100044, China;

3. Water Conservancy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Some theoretical aspects of the water resources optimal deployment and the relevant applied methods were reviewed and analyzed systematically. It involved multiple factors, including reservoir (s) operation, groundwater management, joint management of surface water and ground-water. Further more, the water resources optimal distribution based on macro economy aiming at concordant development of water resources orienting to social economy as well as ecological environment was considered. Water safety based on coupling of primary water and purified water was studied. According to the new situations appearing in the management and development of water resources and current water policies of China, the future development of water resources deployment was prospected.

Key words: water resources; reservoir operation; groundwater management

(责任编辑: 王成丽)