

## 基于规则的水资源系统模拟

游进军<sup>1,2</sup>, 甘泓<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 汪林<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 本文在归纳总结国内外水资源系统模拟研究现状的基础上, 提出以规则控制方式实现水资源系统模拟。通过分析水资源系统供、用、耗和排各个环节中所涉及各类元素及其作用, 抽象概括出系统中存在的主要对象, 建立符合实际的水资源系统节点图。模型以不同类型的规则描述水利工程的运行和水源对用户的分配, 以及天然与人工二元耦合关系下各类水源在网络系统的运移转化和相互作用, 实现对系统水量运移转化的透明化控制, 建立适用于不同区域的通用化模型。实例证明, 通过该种模拟方式可以结合不同区域实际状况、用户需求和实际经验, 灵活制定和调整计算规则, 提供可靠有效的模拟结果。

**关键词:** 水资源系统; 概念化; 系统模拟; 水资源配置; 面向对象

**中图分类号:** TV214      **文献标识码:** A

随着社会的发展, 人类活动日趋加剧, 水循环系统涉及因素也逐渐增加。水资源的开发利用一定程度上影响了水文循环过程, 也改变了流域下垫面结构, 使得产汇流机制发生变化。单纯采用水文模型已难以精确分析人类活动影响下的水资源系统过程, 这就要求以一种新的理念, 将天然水循环和开发利用侧支循环结合为一个整体研究, 从而得出全面综合的结果, 为规划管理的决策提供参考。目前已有一些研究和模型, 采用精细手段对水资源系统不同环节进行模拟分析。但由于对系统的综合性描述不足或较高的资料要求限制了其应用范围, 尤其是针对大区域的应用。考虑规划层次要求, 需要耦合天然水资源循环和开发利用侧支循环两个层面, 合理描述水资源运移转化的宏观过程, 模拟不同开发利用模式下的供需平衡、总水量平衡等系统总体状况。

F. Reitsma等<sup>[1]</sup>提出基于面向对象技术模拟水资源实际过程的多准则模拟评价模型。Khaled Kheireldin<sup>[2]</sup>提出了水资源系统符合面向对象技术思想的天然特点, 分析了面向对象编程技术(OOP)在水资源管理模型中应用的优势。国外一些专业研究机构也推出了各种商业化的水资源规划管理软件, 如MODSIM<sup>[3]</sup>、MIKEBASIN<sup>[4]</sup>、EMS系统<sup>[5]</sup>、IQQM<sup>[6]</sup>、Waterware<sup>[7]</sup>等, 也都以水资源系统模拟为基础。国内学者在对水资源规划管理以及水库调度等研究中, 也进行了各种水资源系统模拟研究工作。中国水利水电科学研究院等单位开发出华北宏观经济水资源优化配置模型, 包括由宏观经济、水资源模拟等7个模型组成的模型库, 由数据库驱动, 实现了各模型间的连接与信息交换<sup>[8]</sup>。甘泓等<sup>[9]</sup>考虑了水系统范围大、要素多的特点, 研制了可适用于巨型水资源系统动态模拟模型, 开发了相应的决策支持系统。还有一些学者以面向对象技术为基础, 在水库水电站调度系统通用化设计方面作了尝试<sup>[10~13]</sup>。

收稿日期: 2004-11-29

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50239050); 全国水资源综合规划专题研究资助项目“流域及区域通用化水资源供需分析及配置模型分析系统研制”

作者简介: 游进军(1977-), 男, 四川成都人, 博士, 从事水文学及水资源方面研究。E-mail: youjj@iwhr.com

研制具有一定通用性的系统模拟模型是本领域的必然发展趋势,而包含系统基本要素及相互关系的系统框架是建立这类模型的基础。系统框架应能描述各类实体的属性、功能和相互关系,并能将外部数据对应转换到模型所描述的实体和过程,建立从实际流域到数学模型表达的基础。

目前对水资源系统模拟主要还是以优化方法或结合模拟技术的优化技术为主,通过对设定目标确定约束建立数学规划模型,进而求解得到结果。实际应用证明,在系统目标和约束都较为清晰且规模不是十分庞大时,优化模型得到较为满意的结果。但由于水资源系统本身的复杂性,难以完全采用目标函数和约束一次性构建完整的规划模型,且容易出现规模过大模型难以求解或优化结果的过程难以与实际对应的情况。

本文提出一种全模拟手段建立水资源系统分析模型的方法,针对水资源系统涉及的主要元素和过程,遵循水量平衡原则提出了反映系统水量运动的框架。并建立一套通过规则控制的模拟计算流程,基于规范和决策程序设计系统供、用、耗、排以及水利工程运行调度,通过参数控制各个环节。最后通过面向对象编程技术完成模拟过程的程序化实现,可以快速有效的完成系统的模拟计算和人机交互。

## 1 系统主要元素及其概化

**1.1 系统主要元素** 模拟是反映系统各类过程和关系的基本方法,有效的系统模拟必须建立在对系统一定深度和精度识别的基础上。水资源系统涉及因素众多,结构复杂,要反映其复杂过程必须充分考虑系统相关的各方面因素。因此,一般模拟多以某具体区域为对象建立反映区内水量运移过程的模型。这种以特定区域为背景建立的模型不能概括流域一般性特点,因而难以应用到其它区域。

提炼出具有代表性意义的系统对象是建立系统框架和通用性模型的基础。这一步工作可以称为系统概化,就是将具有共同属性的不同系统实体归纳为以各类参数表达的概念性元素,并建立框架描述各类元素内部和相互之间水量运移转换的物理过程。通过系统概化将实际系统抽象为可以用参数表达的系统框架,为建立数学模型表征系统奠定基础。

水资源系统所涉及各类实体可以概括为点和线两类基本元素。点元素包括水利工程、用水户、分汇水点以及各类人为设置的控制性节点;线元素主要包括不同点元素之间存在的水量传输或影响关系。考虑区域资料获取的便利性,可以根据区域划分将不同用水户集中形成计算单元,便于不同地区的资料统一化处理。表1给出了通过系统概化提取的要素及其对应实体。

表1 水资源系统概化要素及其对应实体

基本元素	类型	所代表系统实体
点元素	水源节点	蓄引提工程、跨流域调水工程
	计算单元	一定区域范围内多类实体的概化集合,包括区域内用水户、面上分布的用水工程(包括不作单独考虑的地表水工程和地下水工程)、非常规水源(海水、雨水)利用工程、污水处理与再利用工程等。
	水汇	汇水节点,系统水源最终流出处,如海洋、湖泊尾间、出境等
	控制节点	有水量或水质控制要求的河道或渠道断面
线元素	河道/渠道	代表水源流向和水量相关关系的节点间有向线段,如天然河道、供水渠道、污水排放途径、地表水和地下水转换关系等。

系统概化还需处理不能提取为概化要素的影响因素和过程。由于精度限制,无论概化到何种深度,始终存在一部分对系统有影响但是难以单独考虑的因素,如分散的小型水资源利用工程。为实现规范统一的处理,对于不能单独考虑的相关元素,将其概化到计算单元统一处理,并通过相应参数控制这类概化元素中的水量传输转化过程。如通过计算单元中概化设置的河网描述不能在系统网络图单列的中小型水利工程对相关水量的调节利用。根据以上系统概化思路得到系统点线类基本元素,通过点线之间的联系即可描述整个水资源系统中的主要水量传递过程,为建立数学模型奠定基础。

系统概化应具有一定的普遍适用性,应用中可以将一些需求等价或近似的转化为系统概化框架中的元素,并以参数反映实际。如对于湿地补水等河道内生态需水要求,可以设定单元的河道外需水用户反映。而对于有河道内生态用水需求的河流,可以设置专门的生态用水控制断面,通过上游地区供水工程的水量调节和用户需水的抑制协调经济用水和生态用水的矛盾关系,并依据生态用水和不同类别经济用水的优先级得出合理的协调结果,对于有发电、航运或环境用水任务的控制断面,也可以类似处理。对于河流的行政区界也可以设置水量控制断面,反映上游地区不同用水对下游过境水量的影响,由此可以衡量上下游之间的水权分配关系,从总体上协调区域间的水资源开发利用格局,为规划管理决策提供有力的参考依据。

**1.2 系统水源用户及其配置关系** 水资源系统模拟的最终目标通常是宏观决策作参考和信息支持但微观过程的合理性直接决定了最终宏观结果的可靠性,所以必须作深入分析保证微观过程模拟的合理性。水资源系统模拟的一大核心是完成不同水源到各类用水户的合理分配。根据系统用户对所需水源的不同要求、系统概化结构及对实际状况模拟的精细程度等需要,可以对一般意义上的水源作进一步细分,使配置模拟能更接近实际情况。对于用水户,可以根据其对水源的不同要求和供水方式上存在的差别以及资料的可获取程度,在满足同类用户对水源供给要求和供水保证程度一致的原则下进一步划分。表2列出了系统对水源和用户的划分及其说明。通过建立细化的系统水源到不同用户的配置关系,完成不同因素影响下的时间、空间和用户间三个层面的水源调控分配。结合实际以参数控制同类水源在不同用户间的分配关系,可以提高水量配置在微观层面的合理性,从而确保模型最终提供的各类统计分析结果的有效性。

表2 模拟系统划分的水源和用户

基本水源	系统细化水源	说明	用户分类	三生口径	用水户
地表水源	本地地表水源	通过计算单元内本地引提工程利用的天然径流	河道外	生产	农业
	河网水	计算单元内概化蓄水工程所蓄天然径流以及退水等			工业及三产
	地表供水	系统节点图单列工程供水		生态	农村生活
	外调水	模拟区域范围外的供水河道外			城镇生活
地下水源	深/浅层地下水,微咸水	河道内		农村生态	
其它水源	海水、雨水、处理后污水			城镇生态	
				发电、航运	
				河道内生态需水	

**1.3 系统概化框架** 确定系统主要元素后,还需明晰系统中各类元素的水量传递转化过程,反映天然水循环和人工侧支循环相结合的耦合过程。图1描述了以系统网络节点为核心的水量转化关系图。该框架中,

以系统概化网络节点图为水量运动依据，描述了系统概化元素以及相互之间存在的水量运动转化途径。同时也考虑了跨流域调水和其他水源利用等对水资源供、用、耗、排造成影响的水资源开发利用过程。该框架完整描述了天然水源的一次利用以及排放转化再利用等一系列复杂过程，包括天然径流过程、地表工程供水弃水计算、耗水排水计算、污水处理再利用以及退水回归水、跨流域调水等各个相关环节及其相互间关系。

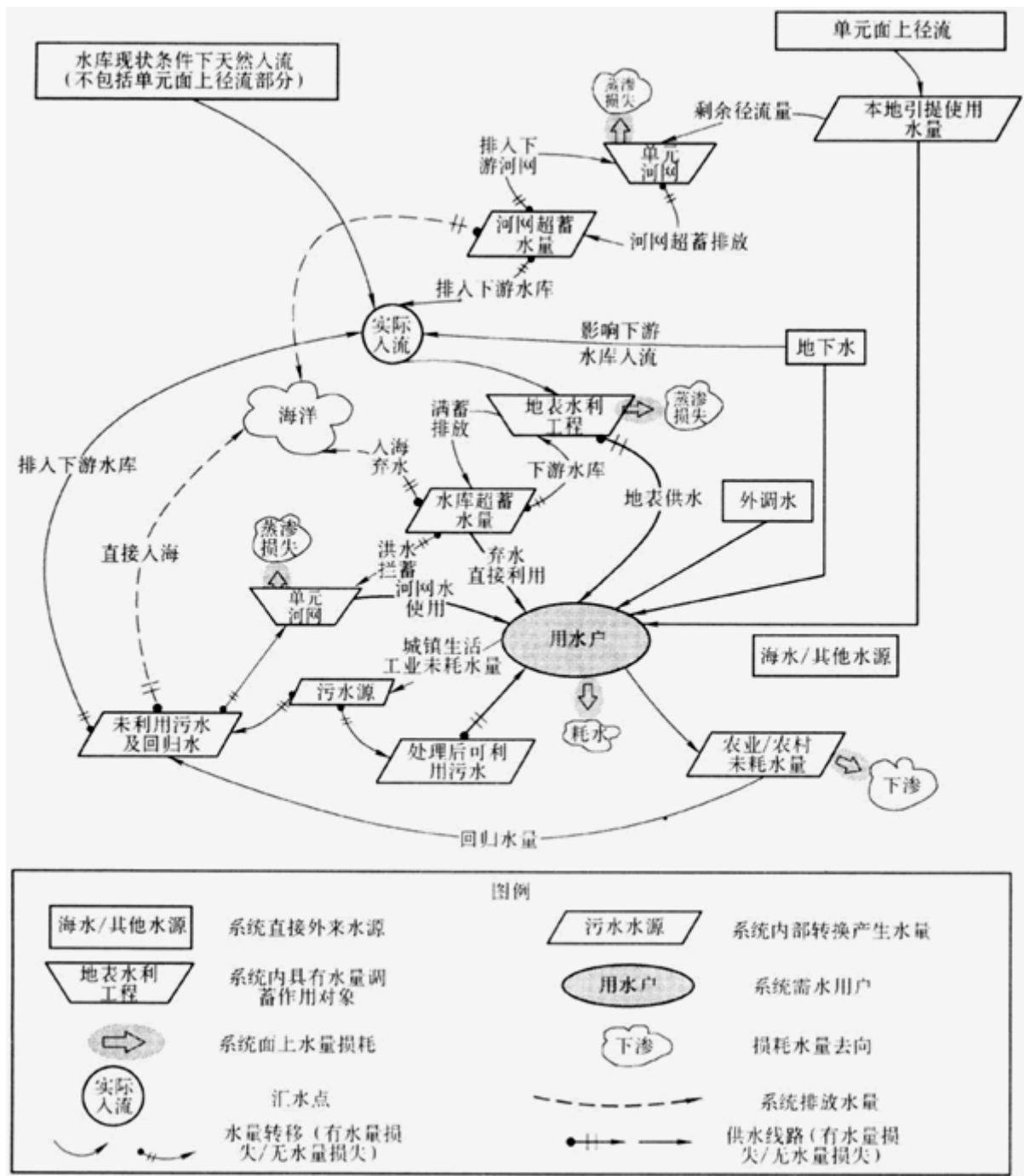


图1 概化水资源系统水源传输转化示意

分析系统概化元素基本关系，可以得到如图2所示的系统节点图，该图反映了整个系统概化要素对象

及其相互间关系。通过对不同区域水资源系统的概化分析,可以得到相应的水资源系统节点图。在确定了区域内水资源系统各类要素并建立符合其相互间水量传输关系的系统网络图后,根据图1中的水源传输转化过程,即可按照确定的规则和参数对该过程进行规则化模拟。

## 2 基本模拟规则

计算规则是控制模拟过程的有效方法。系统模拟框架宏观上描述了系统水源转换过程的各种可能途径,要得出具体的系统水量运动过程,还需以实际情况结合经验给出不同情况下的计算方式。

分析模拟所涉及的不同层次问题,可将模拟规则划分为基本规则、概化规则和运行规则三类。其中基本规则是系统必须遵循的框架和原则,制定其他相应规则时必须遵守;概化规则是实现系统概化的依据,也包括为减小系统规模、方便计算而确定的一些假设条件;运行规则是模型系统对水源、用户、工程等所制定的基本算法。表3列出了各类规则及其意义。

各类规则构成的规则集为系统模拟提供了不同的约束,使模拟能满足宏观指导思路和微观计算要求。基本规则是系统必须遵守的原则,同时也给定了模拟的框架。概化原则给出了实际系统的简化原则,是从实际复杂系统到数学方法描述的映射转换所应遵循的实际存在或假定的依据,是构建模型的基础。而运行规则是模型运行的具体算法,需根据水资源系统基本问题的解决方案及大量的实践经验制定,同时需要相应的专家经验在运行过程中不断摸索进行反馈修正。

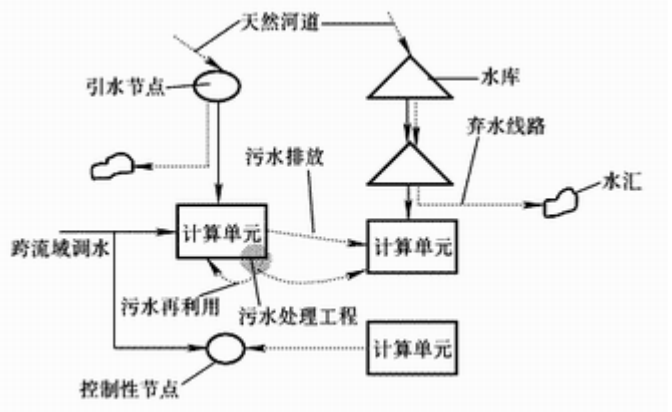


图2 水资源概化系统网络节点

## 3 模型实现方法

面向对象技术是一种目前应用较为广泛的建模与程序实现思想。所谓面向对象就是将现实世界中的实体及其行为作为一个整体来考虑,用对象的概念反映客观事物;通过设置对象属性,控制方法或事件将其转化为符合程序设计要求的类<sup>[14]</sup>。基于这种思想,考虑概化水资源系统中的基本元素属性和相应水源转换过程,使用面向对象方法进行抽象概括,得到表4所列的基本类及其属性方法。

表3 系统规则分类及其意义

类型	分类规则	意义
基本规则	安全运行要求	确保工程安全条件必须遵守的强制性约束
	地域划分	兼顾流域水资源特性和行政区特性划分计算单元,认为单元内均匀一致
	需水要求及满足顺序	确定需要进行水量供给的河道内和河道外用水户及其用水优先顺序
	按质供水	确定不同类别用水户对供水水质要求
	水源划分及利用顺序	水源划分及利用顺序根据系统概化和实际供用水情况划分水源,确定各类水源可以供给的用户和利用顺序
	计算时段划分	适应长系列计算要求,结合资料状况按月或旬划分时段考虑入流、需水等过程

概化规则	本地地表径流概化	反映面上散布的水资源利用,按中小型工程对地表水资源控制程度划分部分地表水资源量进行非系统节点图单列工程的水量利用计算
	河网水利用概化	对系统图单列之外面上散布的蓄水工程,概化为一个有一定调蓄能力的河网,它可存蓄非本地地表径流、单元污退水以及其它工程的超蓄水量,并为本单元用户进行供水
	污水退水及污水处理再利用概化	按城镇和农村用水的未消耗水量统计污水和退水。单元概化一个污水处理厂,处理后污水优先为本单元利用,多余水量按系统图确定的走向为其他单元所利用或流入下游节点。污水处理率和再利用率由参数确定。未处理污水和退水按系统图走向排入下游。
	需水口径	需水为受水口端净值,故各类供水的传输均需考虑输水损失
	来水确定规则	系统图节点入流为天然入流量,计算实际入流包括上游工程供弃水、相关单元河网排水、区间污退水以及相关单元污水等各项。单元本地地表径流量由当地中小型水库、塘坝和未控径流概化组成,本地地表水资源与系统节点入流之和为系统地表水资源总量
运行规则	地表工程供水	按调度规则以用户优先顺序计算系统图蓄引提工程节点的供水
	本地地表水利用	非系统图单列的引提工程对单元本地水资源利用的计算
	河网水调蓄利用	概化的单元河网调蓄工程的蓄、供以及排水计算
	外调水利用	跨流域调水工程运行及水量分配计算
	地下水利用	以设定的开采策略以及与地表水利用关系对深浅层地下水开采计算
	非常规水源利用	对海水、雨水及微咸水等数量较小的水源分配利用计算
	地下水地表水影响关系	上游地下水开采利用影响下游节点的地表入流量计算
污退水产生排放及利用	各类用户实际用水量计算单元耗水量、污水退水产生量及下渗水量	
	地表工程弃水	工程超蓄水量按照超蓄水传递线路进行排放的计算

使用类对系统节点图所涉及的元素进行实例化描述,所研究的水资源系统即可表达为一定数量的类对象。通过不同的类对象完成其自身相关的底层计算,主控程序对各类存在相关数据交换关系的类对象之间的计算进行协调,最终可以得到以各对象为基础的计算结果系列。通过对大量结果作各类综合分析,可以对规划决策提供有效的支撑信息。

## 4 应用实例

海河流域面积32万 $\text{km}^2$ ,其中60%为山区,40%为平原,多年平均降雨深539mm,多年平均径流深69mm,人口1.26亿,人均水资源量不足300 $\text{m}^3$ ,远低于全国平均水平。由于经济发展速度较快,水资源条件已成为限制经济可持续发展的瓶颈,同时强烈的社会经济活动极大地改变了水循环过程。

根据上述系统模拟思路和方法,对海河流域水资源系统进行了模拟研究,得出了未来南水北调是否实施两种方案下全流域的情景分析。采用系统概化方法,将全流域划分为61个计算单元、50个地表水利工程节点以及400多条主要的水量传递线路。由于篇幅所限,图3给出了局部的海河流域水资源系统网络图。以所建立的模拟模型为工具,采用1956~2000年的长系列水文资料计算流域在2030水平年下的供需平衡状况以及流域水资源总平衡分析。

## 表4 水资源概化系统的主要类及其基本属性和方法

类	属性	方法
计算单元	-用户间水源分配系数 -耗水率、污水处理及回用率 -本地地表水资源量及河网参数 -各类用户用水需求	+地下水开采计算 +各类水源到用户的配置 +污水退水计算处理 +本地河网水量调节计算
水利工程节点	-基本属性、调度线参数 -天然入流	+实际入流量计算 +供水调度、超蓄水量排放
各类水力连线(渠道等)	-上下游节点、过水能力 -蒸渗损失系数	+过流损失计算 +下游节点获取水量计算
水汇	-基本属性 -各类入水汇水量	+网络关系创建 +入水汇水量计算

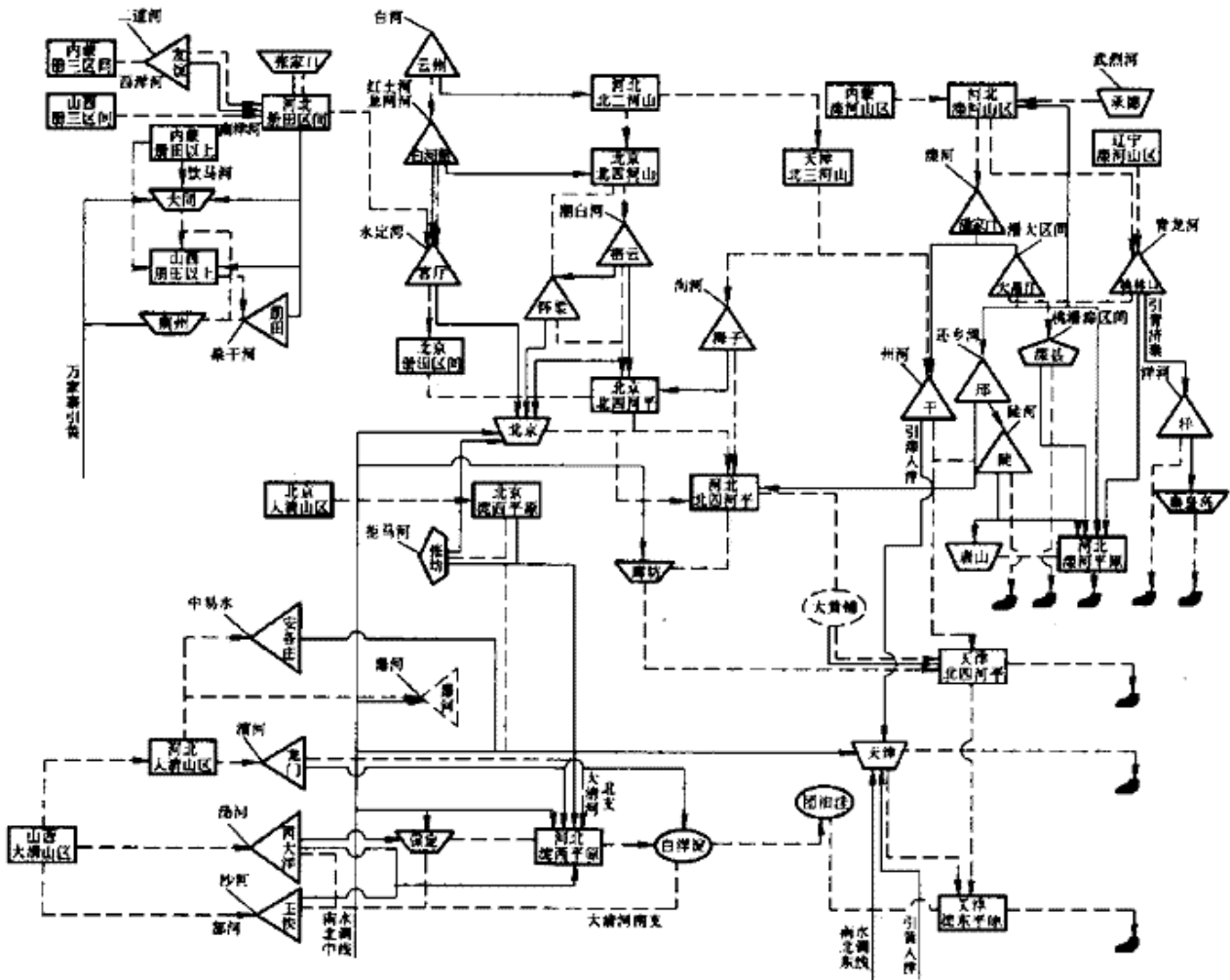


图3 海河流域水资源系统网络(局部)

表5 不同方案主要模拟结果(单位: 亿m<sup>3</sup>)

方案	供需平衡			供水结构						入海水量
	需水	供水	缺水	地表水	地下水	引黄水	引江水	污水	其它	
1	531.5	439.8	91.7	133.7	257.8	38.7	0	6.3	3.2	24.7
2	531.5	520.3	11.2	136.5	225.4	38.9	108.7	5.4	5.4	101.9

模型计算两种方案, 方案1不采用南水北调工程, 尽量挖掘流域内水资源开发潜力, 允许地下水一定程度超采; 方案2为高水平供水方案, 兴建南水北调工程, 同时限制地下水开采。计算结果见表5, 可见在不实施调水方案时, 流域将出现较大供需平衡缺口, 经济用水大量挤占生态用水, 地下水会进一步超采, 入海水量维持在较低水平, 河道内生态需水难以满足。水资源的缺乏将严重限制社会经济发展和生态环境的维持与改善。在实施调水后, 基本能达到供需平衡, 入海水量大为增加, 地下水利用也可控制在可开采量范围内, 从而维持并改善流域生态状况, 通过调水实际增加了流域水资源承载能力。

## 5 结论

实例证明通过系统概化, 采用规则控制进行水资源系统模拟, 可以清晰实现复杂系统到计算机模型的转换。规则的建立面向客观实体, 以问题为导向, 通过规范的过程设计和实际经验引导系统进行确定的水量分配, 并通过参数控制决策过程和方式, 使得模拟的微观过程结果合理可控。同时, 系统规则可以根据需要和实际情况的变化进行调整, 充分挖掘规划决策人员和专家对流域的认知和实际工作经验, 避免系统模拟失真。采用基于规则的全模拟技术, 针对存在复杂关系的大规模水资源系统能快速有效地进行多水源向多用户的水量分配, 提高了结果和参数间反馈交互的效率。

今后的工作: (1)改进系统模拟框架适应不同的实际状况, 并尝试适当的参数自动优选方法, 以解决大系统长系列模拟时参数过多难以采用人工调整的困难; (2)对部分复杂过程进行子模块划分, 如在水量模拟为主的基础上增加对水质模拟的考虑。针对不同资料条件提出不同处理方案, 以可选方式的子模块为主框架模块提供支撑; (3)GIS等技术提高人机交互和结果分析展示功能, 增强模型的可操作性。

## 参考文献:

- [1] René F Reitsma, John C Carron. Object oriented Simulation and Evaluation of River Basin Operations [J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis. 1997, 1(1):9-24.
- [2] K haled kheireldin, Aly E L. Object Oriented Programming: A Robust Tool for Water Resources Management [A]. Seventh Nile 2002 Conference, Comprehensive Water Resources Development of the Nile Basin: The Vision for the Next Century [C]. Cairo, Egypt, 1999. 15-19.
- [3] Larson R, Labadie J, Baldo M. MODSIM Decision Support System for River Basin Water Rights Administration [A]. Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference [C]. Las Vegas, Nev. 1998. 19-23.
- [4] Jha M K, Das Gupta A. Application of Mike Basin for Water Management Strategies in a Watershed [J]. Water International, 2003, 28(1):27-35.
- [5] Engineering Computer Graphics Laboratory, Brigham Young University. Watershed Modelling System Reference Manual [R]. Brigham Young University, 368B CB, Provo, Utah 84602, 1998.
- [6] Tahir H, Geoff P. Use of the IQQM simulation model for planning and management of a regulated river system [J]. Integrated Water Resources Management. IAHS Publ., 2001, 272:83-89.
- [7] Fedra K. GIS and simulation models for Water Resources Management: A case study of the Kelantan River, Malaysia



- [J]. GIS Development, 2002, (6):39-43.
- [8] United Nations Development Program(UNDP). Water Resources Management in North China, 3 vols[R]. Research Center of North China Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1994.
- [9] 杨小柳, 刘戈力, 甘泓, 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.
- [10] 王义民, 黄强, 畅建霞, 田峰巍. 水库洪水调度仿真模型及应用[J]. 西安理工大学学报, 2001, (3): 283-287.
- [11] 张玉山, 左园忠, 乔秋文. 面向对象技术在梯级水电站调度中的应用[J]. 水力发电, 2002, (1): 54-57.
- [12] 周惠成, 梁国华, 王本德, 殷峻暹. 水库洪水调度系统通用化模板设计与开发[J]. 水科学进展, 2002(1): 42-48.
- [13] 游进军, 王浩, 甘泓, 彭定志. 面向对象的水库调度系统设计[A]. 水问题研究与进展[C]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2003. 354-360.
- [14] Victor Shetern et al. Core C++:A software engineering Approach [M]. Prentice Hall PTR, 2000.

### Simulation of water resources system based on rules

YOU Jin-jun<sup>1,2</sup>, GAN Hong<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The method for simulating the water resources system according to rules is suggested. The major objects in the system are extracted based on the analysis on the conceptualized basic elements of the system in the procedure of providing, using, consuming and drainage of water and their relationships. The frame work describing the system conforming to the reality is established. The simulation model describes the operation of hydro project, way of water resources deployment and the transformation and interaction of various water sources in the network due to the coupling of nature with mankind activities according to different kinds of rule. In the framework, the complicated process of water resources system can be described flexibly by adjusting relevant rules and respective parameters according to experiences and pragmatic demands. A case study is given to illustrate the feasibility of the proposed model.

**Key words:** water resources system; simulation; conceptualization; water resources deployment; object-oriented technology; rules

(责任编辑: 王成丽)