

基于 CAS 理论的南水北调东线水资源优化配置模型

牛文娟,王慧敏

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 水资源工程规模的不断扩大,使水资源优化配置问题变得越来越复杂.为此,应用复杂适应系统(complex adaptive system,简称 CAS)理论研究水资源优化配置问题,并建立了南水北调东线水资源优化配置仿真模型.仿真结果表明,除个别省份外,其他各省和系统的社会、经济和环境的发展协调度都随着调水量的增加而增加;个别省份社会、经济和环境的发展协调度与调水量的非完全正比例关系,是子系统在调水量发生变化时所表现出的适应性行为.

关键词 CAS 理论;水资源;优化配置模型;南水北调;Agent;仿真

中图分类号 TV213.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)04-0384-04

水资源优化配置涉及资源、环境、经济和社会等,且随着现代水资源工程规模的不断扩大,水资源优化配置问题变得越来越复杂,其大系统、多目标、非线性等复杂系统的特点会越来越明显,水资源系统会逐渐演变成一个动态、多变、非平衡、开放耗散的“非结构化”或“半结构化”系统.20 世纪 90 年代以来,我国对以系统工程理论为基础的水资源配置与管理理论和方法进行了探讨,实现了水资源配置与管理理论和方法的转变^[1-2],取得了一定的研究成果,如建立了水资源大系统递阶控制理论^[3]和水资源生态经济复合系统理论^[4],提出了面向全属性功能的水资源配置理念^[5]、基于宏观经济的区域水资源系统^[6-7]和水资源复杂适应系统配置模型^[8]等.这些研究成果说明,水资源配置与管理方法论发生了变革,水资源配置与管理领域越来越注重系统的整体性.与传统的水资源配置与管理理论相比,复杂性科学强调从智能性和自适应性等系统生命特征出发研究系统复杂性的行为、特征和成因.从 CAS 的角度来看,水资源的优化配置正是水资源系统不同层次上的主体不断学习、适应和协调的结果^[9-10].文献[11-12]详细讨论了水资源复杂适应系统的研究框架和基于 Agent 建模仿真的研究方法.本文在文献[11-12]研究结果的基础上对基于 CAS 理论的南水北调东线水资源优化配置模型进行研究.

1 仿真模型

1.1 仿真模型中 Agent 的确定

本文在确定仿真模型的 Agent 时遵循了以下基本原则:(a)多目标实现原则;(b)协调发展原则;(c)概化原则.仿真模型中以一个“政府”来代表整个南水北调东线工程.这可以体现政府的意志,实现政府宏观调控的功能.用水地区按行政区域进行概化,即分为江苏、安徽、山东、河北和天津 5 个用水区.用水户按行业进行概化,认为每个用水地区有 1 个城市家庭 Agent(代表城市生活用水)、1 个企业 Agent、1 个农业 Agent 和 1 个农村家庭 Agent(代表农村生活用水).这种概化作了这样的假设:在一定的供水条件下,每一个具体的家庭、生产者的行为总是能够达到其概化模型所能达到的效果,并且也只能达到这种效果.这样的简化完全可以满足仿真模型的精度要求,并且可以有效地降低仿真的难度,使仿真能够实现.这样,就可以得到南水北调东线工程水资源配置的 3 层仿真模型了.

收稿日期 2006-12-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(70471083);国家社会科学基金资助项目(06BJY026);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060294008)
作者简介:牛文娟(1972—),女,山西运城人,博士研究生,主要从事复杂适应系统、管理系统工程研究.

1.2 Agent 的行为规则

1.2.1 政府 Agent 和区域 Agent 的行为规则

本模型中的政府 Agent 是南水北调东线工程管理机构以及相关行政管理机构的抽象.通过对政府 Agent 的行为及其适应性表现的描述,可以实现南水北调东线水资源系统的宏观层次的功能和目标.政府 Agent 的行为包括 (a)水量分配管理.政府 Agent 根据南水北调东线调水状况、各省的经济社会发展状况和水资源利用状况,在整个东线受水区范围内,以行政区域为单位,对各省 Agent 进行水量配置.(b)水价管理.政府 Agent 负责制定包括生活、工业和农业等各类用水的水价,依据其管理目标进行水价调节.(c)社会经济统计.由政府 Agent 负责,统计数据是政府 Agent 获取的整个系统状态信息,与政府 Agent 的优化目标密切相关,是其适应性行为的结果,也是其适应性行为变化的基础.社会统计行为对各个受水区域 Agent 的信息进行汇总,为政府 Agent 的优化决策服务.社会统计的指标包括总产出、GDP、粮食产量、居民用水满意度和污水排放量等,涵盖了社会、经济和生态环境等.(d)信息发布.政府 Agent 接收其下一级 Agent 的信息,经过决策后将制定的政策信息发布给其下一级 Agent.

政府 Agent 的适应性表现是一个包括经济目标、社会目标和生态环境目标在内的多目标优化问题.本模型用 GDP 代表经济发展目标,人均生活用水满意度代表社会发展目标,生物化学需氧量 BOD 代表生态环境指标.

这样,政府 Agent 的适应性表现可用下式来表示.

$$y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \quad f_1(x) \Rightarrow \max G_{GDP} = \max \sum_{p=1}^5 P_{GDP}$$
$$f_2(x) \Rightarrow \max G_{SFW} = \max \frac{1}{5} \sum_{p=1}^5 P_{SFW} \quad f_3(x) \Rightarrow \min G_{BOD} = \min \sum_{p=1}^5 P_{BOD}$$

式中: G_{GDP} 、 G_{SFW} 、 G_{BOD} ——整个东线系统的 GDP、人均生活用水满意度和 BOD; P_{GDP} 、 P_{SFW} 、 P_{BOD} ——下一级 Agent,即各省 Agent 的 GDP、人均生活用水满意度和 BOD; x ——政府 Agent 的决策变量,即各个区域 Agent 分配的水量和制定的水价.符号 $\Rightarrow$ 表示 G_{GDP} 、 G_{SFW} 和 G_{BOD} 为社会统计量,是决策变量 x 导致的结果,而并不是决策变量 x 的直接函数.符号 $\Rightarrow$ 中隐含了政府 Agent 与其下一级 Agent 以及下下一级 Agent 之间的一个调控与反馈的动态过程,反映了由系统不同层次微观个体的适应性行为所表现出的系统整体的适应和演化特性.这个政府宏观调控与微观个体动态反馈的过程使水资源多 Agent 系统不同层次之间有了联系并相互作用着,使以水资源优化配置为主线的社会经济系统得以良性运行,而这也正是基于 CAS 理论的本模型的特别之处.

区域 Agent 是政府 Agent 与各类微观用水 Agent 沟通的桥梁,起到了上行下达和中间调节的作用.通过对区域 Agent 的行为及其适应性表现的描述,实现了南水北调东线水资源系统的中观层次的功能和目标.区域 Agent 的行为规则与政府 Agent 的行为规则类似,只是管理范围限制在本区域内.

1.2.2 用水 Agent 的行为规则

本模型选取了 3 类用水 Agent^[8]:生活用水 Agent、工业用水 Agent 和农业用水 Agent.生活用水 Agent 的主要行为表现为:根据需要消费水并支出水费,同时产生污水,关注用水定额及水价政策,进行必要的节水以降低水费的支出,从而追求最大用水满意度.工业用水 Agent 的主要行为表现为:用水生产并支出水费,产生污水,经济效益核算,关注用水定额及水价政策,进行必要的节水改造以降低水费的开支,从而追求企业经济效益的最大化.农业用水 Agent 的主要行为表现为:用水生产并支出水费,经济效益核算,关注用水定额及水价政策,选择节水灌溉策略,调整种植结构并进行灌区改造,以增加收益,减少用水支出,从而追求农业经济效益的最大化.

1.3 仿真模型中的调控与反馈

a. 政府 Agent 为各个区域 Agent 分配水量.区域 Agent 根据政府 Agent 分配的水量为本区域内的各个用水 Agent 分配水量.各个用水 Agent 根据区域 Agent 分配的水量进行生活和生产活动,以追求各自的效用最大化为行为目标.

b. 各个用水 Agent 将各自的实际用水量、实际效用等分送到本区域 Agent 进行数据统计.区域 Agent 根据各种统计数据和本区域的适应性目标在本区域内调整水资源的配置,并将配置信息发布给它的下一层

Agent. 下一层 Agent 在区域 Agent 配置的水资源量的条件下根据自身的适应性目标优化自身的行为,并将产生的各类数据送给它的上一层.

- c. 重复上述过程,直到达到区域整体的水资源优化配置目标为止.
- d. 区域 Agent 将本区域的统计数据上传给政府 Agent,政府 Agent 根据系统整体的优化目标和各个区域 Agent 的统计数据调整分配给各个区域 Agent 的水量,从而在系统内开始新一轮的调控与反馈过程.

2 模型仿真

2.1 模型的数据来源

模型仿真需要大量的基础数据,包括工农业生产用水参数、生活用水参数、社会经济数据和必要的水文数据等.本模型采用的数据主要来源于各省的统计年鉴,部分数据来源于文献[13].

2.2 仿真结果及分析

仿真程序中设定了4种情景(a)Sntp0表示无南水北调水量(b)Sntp1表示南水北调东线工程一期调水量(c)Sntp2表示南水北调东线工程二期调水量(d)Sntp3表示南水北调东线工程三期调水量.这4种情景的设置依据是随着南水北调东线三期调水工程的进行,受水地区的可供水量不断增加,设置目的是比较不同供水量条件下各受水地区的水资源配置状况和社会经济发展状况.因此,仿真程序返回3类结果(a)水量分配方案(b)社会经济统计指标(c)社会、经济和环境发展协调度^[14].本文仅给出社会、经济和环境发展协调度的仿真结果,如表1所示.

表1 4种情景下的系统发展协调度
Table 1 System development coordination degree in 4 situations

情景	江苏省	安徽省	山东省	河北省	天津市	系统
Sntp0	0.037 63	0.037 63	0.037 63	0.037 63	0.037 63	0.135 3
Sntp1	0.045 77	0.041 38	0.033 99	0.031 93	0.034 22	0.328 3
Sntp2	0.043 87	0.042 79	0.034 51	0.047 56	0.048 96	0.448 7
Sntp3	0.049 24	0.061 99	0.059 94	0.044 47	0.064 79	0.547 1

从表1可以看出,各省和系统的发展协调度随着调水量的增加而增加.这一方面说明随着可供水资源的增加,水资源对经济、社会和环境发展的瓶颈作用会减小,另一方面说明政府在发展经济和社会的同时注重了生态环境的保护和投入,从而促进了社会、经济和环境的协调发展.从表1还可以看出,个别省份社会、经济和环境的发展协调度与调水量不完全呈正比例关系.例如:江苏省 Sntp1 下的发展协调度是 0.045 77,而 Sntp2 下的发展协调度是 0.043 87;河北省 Sntp2 下的发展协调度是 0.047 56,而 Sntp3 下的发展协调度是 0.044 47.这种非完全正比例关系,是各省社会、经济和环境等子系统在调水量发生变化时所表现出的适应性行为.但是,各个子系统在调水量发生变化时所表现出的适应性行为的激烈程度不同,各个子系统的适应性行为也并不是步调一致的,有的子系统反应迅速,而有的子系统反应相对迟缓.

3 结 语

随着现代水资源工程规模的不断扩大,水资源优化配置问题变得越来越复杂.本文针对水资源工程的大系统、多目标和非线性等特点,应用复杂适应系统(complex adaptive system,简称CAS)理论研究水资源优化配置问题,并建立了南水北调东线水资源优化配置仿真模型.仿真结果表明,除个别省份外,其他各省和系统的社会、经济和环境的发展协调度都随着调水量的增加而增加;个别省份社会、经济和环境的发展协调度与调水量的非完全正比例关系,是子系统在调水量发生变化时所表现出的适应性行为.

参考文献:

[1] 王慧敏. 流域可持续发展系统理论与方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
[2] 王慧敏, 徐明, 方乐润, 等. 都江堰灌区可持续发展评价体系[J]. 水利学报, 1999(5): 13-18.
[3] 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1991.
[4] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[5]王浩 ,秦大庸 .“ 十五 ”国家科技攻关计划重大项目 :基于流域水循环的黑河水资源合理配置研究报告[R]. 北京 :中国水利水电科学研究院 ,2003.

[6]王浩 ,王建华 ,秦大庸 . 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展 ,2004 ,15(1) :123-128.

[7]翁文斌 ,蔡喜明 ,王浩 ,等 . 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报 ,1995(2) :1-11.

[8]赵建世 . 基于复杂适应理论的水资源优化配置整体模型研究[D]. 北京 :清华大学 ,2003.

[9]王慧敏 ,佟金萍 ,马小平 ,等 . 基于 CAS 范式的流域水资源配置与管理及建模仿真[J]. 系统工程理论与实践 ,2005 ,25(5) :34-36.

[10]王慧敏 ,胡震云 . 南水北调供应链运营管理的若干问题探讨[J]. 水科学进展 ,2005 ,16(6) :865-869.

[11]NIU Wen-juan , WANG Hui-min . A discussion on water resources complex adaptive system[C]//YANG S X . Proceedings of the International Conference on Complex Systems and Applications . Waterloo :Watam Press ,2006 :54-58.

[12]NIU Wen-juan , WANG Hui-min . A simulation model framework of water resources multi-agent system[C]//SHI Wen-ren . Proceedings of the International Conference on Sensing , Computing and Automation . Waterloo :Watam Press ,2006 :2372-2375.

[13]李善同 ,许新宜 . 南水北调与中国发展[M]. 北京 :经济科学出版社 ,2004.

[14]周丽 . 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[D]. 郑州 :郑州工业大学 ,2002.

CAS-based water resources optimal allocation model for
east route of South-to-North Water Transfer Project

NIU Wen-juan , WANG Hui-min

(State Key Laboratory of Hydrology , Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :With the development of water resources , the problem of water resources allocation becomes more and more complex . In consideration of the fact , the theory of complex adaptive system(CAS) was applied to optimal allocation of water resources , and a simulation model for optimal allocation of water resources was developed for the east route of South-to-North Water Transfer Project . The simulation result shows that the coordination degree of society-economy-environment development of the east route system and most provinces increases with the volume of water diversion , and that the non-complete-direct-proportion relationship between the society-economy-environment coordination degree and the volume of water diversion of other one or two provinces results from the adaptability of the subsystem when the volume of water diversion is changed .

Key words :CAS theory ; water resources ; optimal allocation model ; South-to-North Water Transfer ; Agent ; simulation