

文章编号: 1007-4929(2007)07-0011-05

CAS 理论在复杂水资源系统优化配置中的应用

王艳芳^{1,2}, 崔远来¹, 顾世祥³, 谢波³, 王建鹏¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 黑龙江省水利水电勘测设计研究院, 哈尔滨 150080;
3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

摘要: 针对多库联合调度复杂水资源系统, 以滇中洱海流域水资源系统结构及其特点为背景, 综合考虑缺水量最小及弃水量最小目标, 基于 CAS 理论建立了水资源系统优化配置的理论框架与数学模型, 运用 CAS 理论的 Swarm 模拟平台, 以 2030 水平年水资源条件和开发利用状况为基础, 进行水资源长系列供需平衡模拟, 依据多方案模拟结果, 重点分析了各蓄水工程之间的优化调水运行规则, 以及相应优化规则条件下的水资源调配方案和最小缺水量。

关键词: CAS 理论; 水资源配置; 供需平衡; 运行规则; 优化; Swarm

中图分类号: **文献标识码:**

Application of Complex Adaptive System Theory in Optimal Allocation of Complex Water Resources System

WANG Yan-fang^{1,2}, CUI Yuan-lai¹, GU Shi-xiang³, XIE Bo³

(1. Wuhan University State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;
2 Heilongjiang Provincial Institute of Investigation, Design and Research in Water Resources and Hydropower Engineering,
Haerbin 150080, China; 3 Yunnan Provincial Institute of Investigation, Design and Research in Water Resources
and Hydropower Engineering, Kunming 650021, China)

Abstract: Based on the background of structure and features of water resource system of Erhai basin in Center Yunnan—a multi-reservoir co-regulation water resources system, a Complex Adaptive System framework and model of water resource optimal allocation is established in order to minimize water shortage and spill water. Using the Swarm simulation platform of CAS, long-term supply-demand balance of water resources is simulated based on the condition and development of water resources of the level year 2030. With the results of multi-scheme simulation, this paper mainly focuses on optimizing water-transfer operation rules between storage reservoirs and water resource allocation schemes and minimum volume of shortage water within corresponding optimizing operation rules.

Key words: complex adaptive system theory; allocation of water resources; supply-demand balance; operation rule; optimize; swarm

水资源配置系统涉及多目标、多水源、多用户等, 表现出系统组成元素的多层次和大规模、水资源系统各要素之间的非线性关系、系统的开放性、系统空间结构的复杂性等诸多方面的复杂性。因此, 近年来, 越来越多的水资源配置研究突破单纯使用数学规划模型或模拟模型思路, 如联合使用数学规划方法和模拟技术、采用新的优化方法等^[1,2]。复杂适应系统(CAS)理论是近年来发展起来的针对复杂系统运行进行优化的方法, 赵建世等^[3]应用 CAS 理论构建了水资源配置系统分析模型, 并用该模型对南水北调工程受水区水资源配置进行了

研究; 王慧敏等^[4]进行了基于 CAS 的流域水资源配置与管理及建模仿真研究。本文以滇中洱海流域水资源系统为背景, 探讨 CAS 理论在具有多库混合调度的复杂水资源系统优化配置中的应用。

1 基于 CAS 理论的水资源配置理论框架

复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)理论将系统中的成员称为具有适应性的主体, 简称主体 Agent。CAS 理论的基本思想就是适应性造就复杂性^[5]。CAS 理论涉及到聚

收稿日期: 2007-09-26

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0664)及《滇中水资源大系统优化配置专题研究》(合同号: YSZY-2003-01)部分研究内容。

作者简介: 王艳芳(1982-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术及水资源规划方面研究。

集、非线性、流、多样性、标识、内部模型、积木等几个基本特性,水资源配置系统可以看成是一类 CAS。

(1)聚集:水资源系统是由多“主体”组成,这些主体行为贯穿于从“供”到“需”的全过程。区域内的地表水、地下水、回归水是三个供水主体,这三个供水主体可以聚合成更大的主体即总的供水量。然而这三个供水主体中每一个主体也是通过更小的主体聚合而成的,例如灌溉回归水、雨水、处理后的污水这三个“主体”聚合成“主体”——回归水。

(2)非线性:水资源配置中,几乎每一环节都体现着非线性,正是这些非线性使系统处于不断变化中,而变化恰恰是系统演化的动力基础。例如,在水库的属性中,水面面积与水库库容之间就是非线性的关系。

(3)流:指物质流、能量流和信息流。水资源配置系统中存在着水量和信息(水量信息、决策信息等)的交互,这是系统演化发展的几条主线。物质流涉及有关水的输送过程,信息流涉及有关水的需求预测、供需信息的传递等。

(4)多样性:水资源配置系统中主体的多样性表现在不同灌区、不同城市、不同产业和不同生态区的性质各不相同。

(5)标识:标识的主要作用是实现信息的交流。在水资源配置系统中,不同的主体对水量的政策等消息具有不同的识别和反应机制。

(6)内部模型:例如一个子区域内,其供水子系统中某个水库有自己的径流信息、供水范围及顺序等运行规则以及它与其他供水水库的供水顺序等的关系,对于整个区域的水资源配置系统来说属于内部模型。CAS 用 IF-THEN 规则或称刺激—反应规则描述主体的内部模型。

(7)积木:也称作构件。积木的概念主要用来加强层次的概念,用于研究系统的整体性质。水资源配置系统中,其整体特性,如水量的调度、节水尺度变化、区域经济发展等,都是由一些基本构件(各个行业、各个子区域等)的组合形成的。不同的组合形式形成不同的整体特性。

从复杂适应系统的角度来看,任何一个复杂的系统都是在多个分散的小单元、小个体、小构件的基础上通过某些“流”交织组合在一起而形成了复杂系统。一种水源供一个用水户,这是一个最小的水资源配置系统。在此系统中,只有一个用水户“主体”和一个供水水源“主体”,用水户 Agent 向供水水源 Agent 发出信息即需水量,“供水水源”结合自身的属性对收到信息进行分析计算,即利用 IF-THEN 规则,最后确定出可供水资源量。这样,两个“主体”在互相“适应”对方的基础上就进行了一次水资源的供需分析。在一个大的水资源优化配置系统中,就是由许多个这样的小系统通过各种组合方式形成复杂的大系统。因此在建模时,要从最基本的主体定义做起,“自下而上”进行建模,这就是 CAS 理论的基本思想。

2 基于 CAS 理论的洱海流域水资源优化配置数学模型

2.1 洱海流域水资源系统结构

滇中洱海流域位于金沙江、澜沧江、红河三大水系的分水岭地带,其中由洱海供水的地区有洱源、大理、宾川和巍山。洱

海流域在远景 2030 水平年时,区内调水工程有“引漾入洱”、“引洱入宾”和“引洱入巍”工程。大中型水库主要有洱源县的茈碧湖、海西海和三岔河水库,大理市的洱海,宾川县的福庆水库,以及巍山县的海稍水库、仙鹤水库、大银甸水库和花桥水库^[6]。根据这四个受水区,将洱海流域水资源系统划分为洱源区、大理区、宾川区 and 巍山区 4 个计算单元。洱海流域水资源系统概化见图 1。

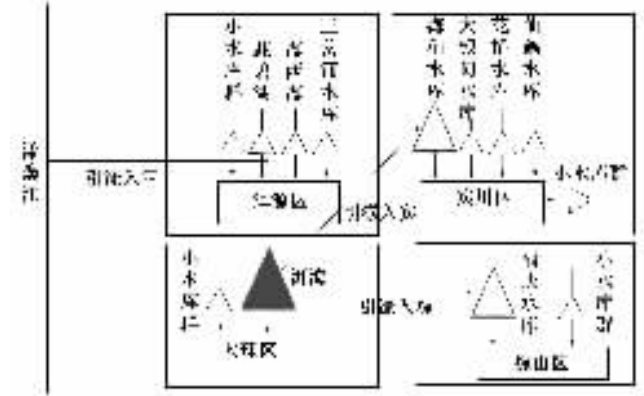


图 1 洱海流域水资源系统概化图

水资源系统主要由供水工程、调水工程和用水户(即需水量)组成。供水工程包括蓄水工程、河道引水工程及提水工程,蓄水工程中的中小型水库群按照水文比拟法进行概化,需水量根据全国水资源规划有关规定,按照生活、生产和生态的“三生”需水进行划分。

2.2 基于 CAS 理论的洱海流域水资源配置模型的层次结构

本文采用 CAS 理论中 Agent 建模方法来进行水资源系统的仿真。首先,定义出模型中的主体 Agent。按照水资源管理以及流域内供水规则,将洱海流域水资源配置系统分为多个区域 Agent,即大理水资源配置系统 Agent、洱源水资源配置系统 Agent、巍山水资源配置系统 Agent 和宾川水资源配置系统 Agent。而对于每一个区域 Agent 又可以分为多个 Top 功能主体,包括供水 Agent、用水 Agent、弃水 Agent、管理 Agent 等。Top 功能主体层中的每个 Agent 又可以根据研究的需要细分为子功能 Agent 层。在本文的研究中,供水 Agent 主要由自备水 Agent、小水库群 Agent、大中型水库 Agent 与调水工程 Agent 组成;用水 Agent 主要由城市生活用水 Agent、工业生产用水 Agent、农业生产用水 Agent、农村生活用水 Agent 和生态环境用水 Agent 组成。由于 CAS 理论的一个思想是每一个主体都是独立的单元,因此可以继续将 Agent 细分下去,例如大中型水库 Agent 可以由多个水库供水主体组成,在大理水资源配置系统主体中的大中型水库 Agent 只包括一个水库供水主体即洱海 Agent,而在宾川水资源配置系统中(2030 年)的大中型水库 Agent 包括了四个水库供水主体即海稍水库 Agent、大银甸水库 Agent、花桥水库 Agent、仙鹤水库 Agent。具体的层次结构如图 2。

2.3 主体属性及主体行为

本文建立的模型是以不同层次的、具有适应性的主体为基本单位的,主要通过同一个层次间主体的行为和相互关系,以

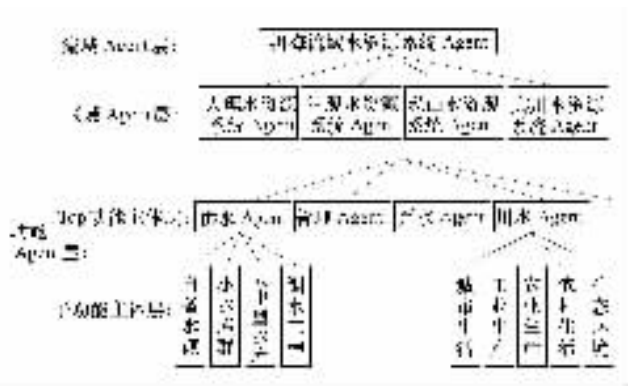


图2 基于CAS理论的洱海流域水资源配置系统模型的层次结构

及不同层次间信息的传递来描述水资源配置问题的。因此,建立模型的关键是对主体以及对主体行为的描述。

2.3.1 用水主体的分类及其描述

(1)用水主体的分类:用水主体按照生活用水、生产用水和生态用水来划分。又可以细分为城市生活、农村生活、工业生产、农业生产、河道内生态、河道外生态等6个用水主体。

(2)用水主体的描述:用水主体的行为主要是对水资源的需求,因此下面只对细分的用水主体的属性进行描述,对主体行为不再描述。

①城市生活用水主体。

主体输入:城市生活需水量、城市生活污水处理率、供水主体供水能力、回归系数;

主体输出:实际城市生活用水量、重复利用水量;

主体适应性表现:优化目标是保证率不低于95%;

农村生活用水主体和城市生活用水主体行为方式基本一致,在此省略。

②农业生产用水主体。

主体输入:林果地需水量、草场需水量、鱼塘需水量、农业灌溉需水量、农业灌溉回归系数、供水主体供水能力;

主体输出:实际林果地用水量、草场用水量、鱼塘用水量、农业灌溉用水量、农业灌溉可重复利用水量等;

主体适应性表现:优化目标是保证率为75%;

同样,工业生产用水主体和农业用水主体的描述也基本一致,优化目标有所不同,保证率为90%。

③生态环境用水主体。

主要输入:生态环境需水量、供水主体供水能力;

主要输出:实际生态环境用水量;

主体适应性表现:满足生态用水的最低要求。

2.3.2 供水主体的分类及其描述

(1)供水主体分类:供水主体的分类主要按水源分类,一般分为地表水、地下水和非常规水。地表水主要有工程蓄水、工程引水、区域内调水、区域外调水等;地下水主要为浅层地下水;非常规水是指处理后的污水、灌溉回归水、雨水利用等。

(2)供水主体的描述。

①自备水源供水主体。

现状年该供水主体的数据已知,规划水平年自备水供应量是按照1.5%的年均增长率估算。

②小水库群以及大中型水库供水主体。

主体输入:初始库容、径流量、蒸发系数、渗漏系数、用水量、可重复利用水量;

主体输出:各时段初、末库容、蒸发渗漏量、有效库容、可供水量等;

行为约束方程:主要有水量平衡约束、水库库容约束、水库可供水量约束。

水量平衡关系约束

$$V(M+1, N) = V(M, N) + I(M, N) - L(M, N) - SP(M, N) - D(M, N) \quad (1)$$

式中: $V(M+1, N)$ 为水库节点 N 第 $M+1$ 时段的蓄水量; $I(M, N)$ 为水库入流量,包括水库入库径流量、重复利用水量等; $L(M, N)$ 为水库的蒸发渗漏损失总量; $SP(M, N)$ 为水库的各种供水总量,包括给5个供水主体的供水量; $D(M, N)$ 为水库的弃水量。

水库库容约束

$$V_{\min}(M, N) \leq V(M, N) \leq V_{\max}(M, N) \quad (2)$$

式中: $V_{\min}(M, N)$ 为水库 N 的死库容; $V_{\max}(M, N)$ 为水库最大库容。

水库可供水量约束

$$0 \leq SP(M, N) \leq V(M, N) - V_{\min}(M, N) \quad (3)$$

主体适应性表现:区域之间供水协调,减小供需矛盾。

③调水工程主体描述。

洱海流域主要的调水工程有引洱入宾工程、引洱入巍工程和引漾入洱工程。

主体主要行为:供水、蓄水

行为约束方程:由于这些调水工程主要是输水隧洞,故主要考虑这些输水隧洞的过水能力约束。

2.3.3 弃水主体的描述

定义弃水量来存储每个时段的弃水。

主体优化目标:总的弃水量趋于最小。

2.3.4 管理主体的描述

管理主体单独提出来,主要是来描述模型中的各类评价指标。主要考虑两个总体评价标准(即目标函数):洱海流域内总缺水最小,以及用水保证率达到一定程度。此外还要兼顾流域内的弃水量较小,这个指标是由弃水主体来描述的。

管理主体的输入主要是用水主体、供水主体以及调水主体的所有信息。

管理主体的输出:缺水、用水保证率

2.4 模型运行规则

各供水主体对各计算单元用水主体的供水优先次序为城市生活→工业→农村生活→农业灌溉→生态环境。原则上应尽可能先用集雨、浅层地下水等非常规水源供水主体,然后使用大中型水库供水主体供水,最后考虑区域内的调水工程主体(如“引洱入宾”、“引洱入巍”、“引漾入洱”),并充分发挥水库等各种蓄水设施的补偿和反调节作用。区间调水是解决水资源时空分布不均,减少水资源供需矛盾的有效手段。

调水时,对可调蓄水库供水主体供水完毕后,当充蓄的最大有效库容(即充蓄后的库容与死库容之差)与兴利库容的比

值超过一个临界值则停止调水,这一临界值称为蓄水系数上限。另外,就洱海这个供水主体而言,还存在一个外调水下限系数,即洱海供水完毕后仍存有的有效库容与兴利库容之比的下限,当低于这个系数时,洱海不向其它调蓄水库充蓄水量。根据洱海流域的具体水资源系统结构,实际涉及到 4 个系数,即:系数 1 为巍山地区福庆水库的蓄水系数,系数 2 为宾川地区海稍水库的蓄水系数,系数 3 为洱海蓄水系数,系数 4 为洱海外调水下限系数。改变 4 个系数即得到不同的调度规则。

2.5 数学模型

2.5.1 目标函数

目标函数由管理主体的输出变量来描述,是多年平均缺水量最小,即

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^5 \left[\sum_{k=1}^4 S_m^k \right] \right\} \quad (4)$$

式中: S_m^k 为第 k 个区域主体的第 m 个用水主体的缺水量。

除了上述一个主目标外,还有两个次目标,即供水保证率最大、弃水量最小。供水保证率仍由管理主体来描述,其保证率的要求参照各用水主体的适应性表现,与各用水主体的优化目标相一致。而弃水量最小这个目标函数由弃水主体来描述。

2.5.2 约束条件及初始条件

约束条件主要包括各主体的行为约束以及模型运行规则的约束,不再详述。

模型初始条件:大中型水库供水主体都从死库容起调,起调时段为长序列初的 1956 年 6 月。

2.5.3 求解方法

将以上各种约束条件转化为程序的算法,采用 Java 语言编程,在基于 CAS 理论的模拟平台 Swarm 软件^[7]上运行得到配置方案。按照 Swarm 建模的一般步骤来设计洱海流域水资源优化配置的 Swarm 模拟模型,见表 1,主要包括主体的构建、ModelSwarm 的构建以及 ObserverSwarm 的构建等,其中主体的构建是整个模拟模型设计的基础及重点,例如主体的种类、属性、行为以及相互间行为发生的次序和信息的传递等^[8]。以 2030 年水平年为例,分析缺水情况以及水资源优化配置方案。

表 1 洱海流域水资源优化配置的 Swarm 模拟模型

主程序	StartAllocations.java	开始模拟程序
定义主体的文件	Allocations.java	Agent 类,是模拟的主体
定义 ModelSwarm 的文件	ModelSwarm.java	初始化模型,进行模拟
定义 ObserverSwarm 的文件	ObserverSwarm.java	模拟过程图形化显示

3 模拟结果及分析

根据洱海流域四个片区 2030 水平年的需水过程等数据(从 1956 年 6 月到 2000 年 5 月,计算时段为月)以及系统运行规则,模拟运行上述模型即得到配置方案。模型主要输出各计算单元及片区的需水过程、用水过程(供水过程)、缺水过程、水库弃水过程等。本文主要考虑流域主体层即洱海流域水资源系统主体总的缺水和弃水情况,对主要参数进行优化以寻求缺

水总量与弃水总量都较小的目标。

3.1 初始模拟结果

初始模拟时假设各调蓄水库供水主体的蓄水系数上限以及洱海的外调水下限系数均为 0.75。2030 水平年洱海流域 45 年长系列模拟的多年平均缺水量为 3 764.2 万 m^3 ,多年平均弃水量为 25 714.5 万 m^3 。

3.2 水库运行参数的优化

基于 CAS 理论的 Swarm 建模引进了随机因素的作用,并且处理随机因素的方法很特别,因为它引入了遗传算法的某些思想,“随机因素的影响不仅影响状态而且影响组织结构和行为方式”^[9]。本文正是利用了 Swarm 提供的解决随机问题的随机数库与优化功能,实现了水库运行参数优化的目的。

3.2.1 模型参数敏感区间

主要对前面提到的 4 个系数进行优化,由定义可知 4 个系数的变化范围为 0~1.0。采用单因素变化分析法,其他参数不变(均设定为 0.75),将洱海调水下限系数(系数 4)设置为 0~1.0 之间变化,从该范围内随机取值 100 个数,得到对应的缺水量与弃水量。图 3 为缺水量和弃水量随系数 4 变化的情况。可见洱海流域总的缺水量随系数 4 的增加而增加。弃水量随系数 4 的增加是先减少后增加。综合考虑认为洱海调水下限系数的敏感区间定为 0.33~0.36。在这一区间内,缺水量和弃水量都处于较小的数值,并且供水保证率亦较高,缺水量的变化速率较快,弃水量的变化速率比较平缓。

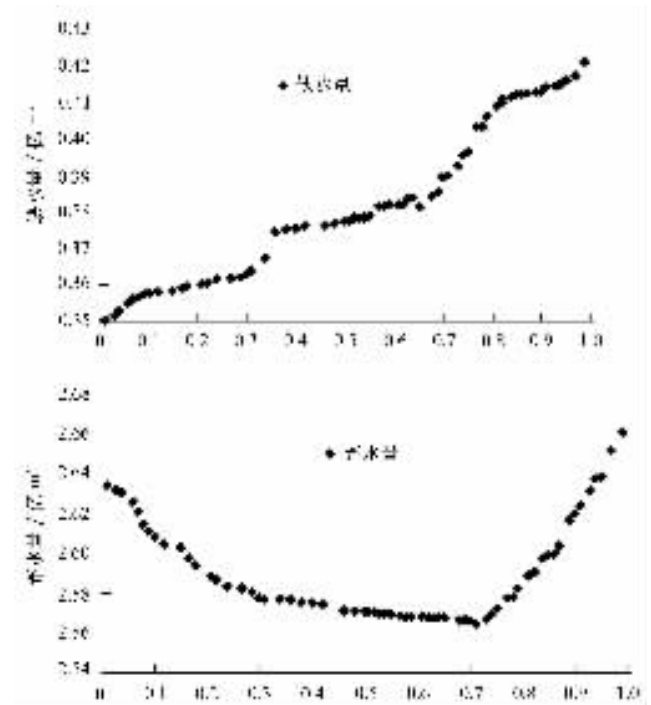


图 3 缺水量与弃水量随系数 4 的变化情况
同样方法分析其他各参数的敏感区间,见表 2。

表 2 各参数的敏感区间

参 数	福庆水库蓄 水上限系数 (系数 1)	海稍水库蓄 水上限系数 (系数 2)	洱海蓄水 上限系数 (系数 3)	洱海调水 下限系数 (系数 4)
敏感区间	0.73~0.79	0.77~0.82	0.74~0.81	0.33~0.36

3.2.2 最优参数值

Swarm 提供了优化的功能,从 Swarm 类库中提炼并做进一步修改即可以用以优化。模型的主要目标是缺水最小,即让各参数在已求得的敏感区间内变化,求缺水最小目标下的相关参数。该阶段的模拟中,将模型运行次数设置为 3 000。运行模型,得到各个参数的优化值分别为:系数 1 为 0.76,系数 2 为 0.79,系数 3 为 0.8,系数 4 为 0.34。参数优化后多年平均缺水为 3 798.7 万 m^3 ,多年平均的弃水量为 25 589.2 万 m^3 ;与优化前相比,缺水减少了 165.5 万 m^3 ,弃水量减少了 124.7 万 m^3 。

3.2.3 缺水随参数变化的概率分析

在实际的调配水过程中,由于存在很多的不确定因素,精确控制某一参数在实际调水配水过程中可能并不现实,因此,我们希望知道当某个参数在最优值左右的较小范围变化时,目标函数的数值会在什么范围内变化,或者目标函数落在某一范围内的概率是多大,这对实际的水资源调度问题更有意义。因此将蓄水上限系数和外调下限系数定义为随机变量,给定变化范围及运行次数,以观察缺水最小目标落在某些范围段内的概率。

以洱海调水下限系数为例,将该系数的变化区间设置为 $(0.34 \pm 5\%)$ 即 $(0.32, 0.36)$,其他系数设置为最优状态。在 $(0.32, 0.36)$ 区间随机读取系数 3 运行模型 100 次。统计 100 个缺水数值,其中最小值为 3 798.68 万 m^3 ,最大值为 3 924.6 万 m^3 ,平均值为 3 839.4 万 m^3 ,标准偏差为 27.95。

缺水最大值与最优参数对应的缺水最小值之间的变化幅度为 126 万 m^3 ,增加了 3.3%,因为该参数的变化幅度为 5%,故说明目标函数的变化幅度并没有参数变化幅度大;即当该参数在 5% 的变化幅度之内时,缺水将在 3.3% 的增长幅度内变化。同样可得其他各参数变化对缺水变化的影响分析结果,见表 3。

4 结论

(1)根据洱海流域水资源大系统的特点以及层次结果分析,结合复杂适应系统(CAS)的理论,探讨了CAS理论在多库

(上接第 10 页) 水资源的可持续利用支撑社会经济的可持续发展。

总体来说,对临海市水资源可持续利用规划项目评价“好”“较好”“一般”“较差”“差”的程度分别为 0.128 5, 0.600 0, 0.156 4, 0.091 3, 0.012 9。临海市水资源可持续利用规划综合评判指数 $LU=6.425 3$,可知综合效果为较好。

3 结语

(1)该评判模型在对水资源可持续利用规划项目进行后评价时,不仅有对单个因素影响程度的分析,而且有对综合因素影响程度的分析,并且得出了一个数学运算结果来表示综合评判指数的影响程度,其分析可信度高。

(2)该模型操作简便,应用此模型,决策者能够及时了解水资源的开发利用、配置、治理、节约和保护情况,掌握水资源的可持续利用情况,并能做出相应变革措施。同样,在规划的可

表 3 参数与缺水量的变化幅度比较

参 数	参 数	参 数	缺 水 量
	最优值	变化幅度/%	变化幅度/%
福庆水库蓄水上限系数	0.76	3	1.6
海稍水库蓄水上限系数	0.79	3	2.0
洱海蓄水上限系数	0.80	3	2.7
洱海调水下限系数	0.34	5	3.3

联合调度的水资源系统优化配置中的应用。

(2)利用 Swarm 软件提供的优化寻优功能,基于洱海流域水资源优化配置系统模型,对蓄水工程的主要运行规则——四个水库的调水下限系数及蓄水上限系数进行优化研究,确定了各个参数的敏感区间及最优目标对应的参数最优值。

(3)利用 Swarm 提供的随机数库,进一步分析当参数在最优值附近的一定幅度范围内变化时对应的目标缺水量的频率分布。

(4)本文的优化只涉及与水量平衡有关的流域物理系统的运行规则,并没有涉及到经济核算问题。 □

参考文献:

- [1] 张雪花,郭怀成,张宝安. 系统动力学——多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用. 水科学进展,2002,13(03):351—357.
- [2] 王艳芳,崔远来,顾世祥,等. 系统动力学在水资源优化配置的应用. 水电能源科学,2006,24(05):8—11.
- [3] 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. 地理学报,2002,57(06):639—647.
- [4] 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. 系统工程理论与实践,2005(12):118—124.
- [5] 陈禹,钟佳佳. 系统科学与方法概论[M]. 中国人民大学出版社,2006.
- [6] 伍立群,顾世祥. 滇中水资源研究[M]. 云南科技出版社,2006.
- [7] <http://www.swarm.org/>.
- [8] 王艳芳. 基于 CAS 理论的水资源优化配置研究[D]. 武汉:武汉大学硕士学位论文,2007,06.
- [9] 陈森发. 复杂系统建模理论与方法[M]. 东南大学出版社,2005.

行性研究阶段,亦可以用此模型反映出目前水资源利用存在的问题,为水资源可持续利用规划提供有力的支持。

(3)本模型尚处于研究阶段,文中判断矩阵是请来从事多年水资源可持续利用规划的专家进行评判的,他们的评判基本能够反映目前水资源可持续利用规划的主流趋势。

(4)本文所提出和设计的模型对于自然科学、社会科学的许多领域等,例如房地价格、期货交易、股市情报、资产评估、工程质量分析、产品质量管理、可行性研究、人机工程设计、环境质量评价、资源综合评价、各种危险性预测与评价、灾害探测等多方面亦有一定的参考价值。 □

参考文献:

- [1] 中国水利经济研究会,水利部规划计划司. 水利建设项目社会评价指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 银川:宁夏人民教育出版社,2000.
- [3] 刘恒,耿雷华. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展,2003,14(3):265—270.