

文章编号: 1006-4710(2011)02-0165-06

陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究

张永永, 黄强, 姜瑾, 赵晶

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 结合引汉济渭工程, 根据资源系统复杂性和水源配置原则, 基于大系统分解协调理论建立了引汉济渭工程受水区水资源优化配置模型, 在考虑工业节水和引汉济渭不同调水量的基础上, 对2020水平年和2030水平年共10个方案应用遗传算法进行求解, 从不同方案下供需成果和供水量构成两方面对配置结果进行探讨, 得出引汉济渭工程是解决关中地区水资源短缺的重要保障。

关键词: 引汉济渭工程; 水资源; 优化配置; 大系统分解协调理论; 遗传算法

中图分类号: TV148

文献标志码: A

Research on the Optimal Allocation of Water Resources in Benefited Areas in Water Diversion from Han River to Wei River Project

ZHANG Yongyong, HUANG Qiang, JIANG Jin, ZHAO Jing

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the complex water resource system and allocation principle of water resources, and combining with water diversion from Han River to Wei River Project, based on large scale system decomposition coordination theory, the water resource optimization models of water receiving region are established. In considering the industrial water saving and the different water regulation from the water diversion from Han River to Wei River Project, the genetic algorithm is used to solve the ten schemes of the target year 2020 and 2030, and the result from two aspects of the supply and demand and the composing of water supply are discussed, which indicate that the project is a significant guarantee to solve the problems of water resource shortage in Guanzhong Area.

Key words: water diversion from Han River to Wei River Project; water resources; optimal allocation; large scale system decomposition coordination theory; genetic algorithm

陕西省位于中国西北地区东部, 属典型的大陆性季风气候, 全省水资源总量少、地区分布极其不均、丰枯季差剧烈, 多年平均降水量 656.2 mm, 水资源总量 438.93 亿 m^3 。境内以秦岭为界, 南北分别属于长江流域和黄河流域, 其中, 长江流域 214.10 亿 m^3 , 黄河流域 124.83 亿 m^3 。黄河流域关中地区和陕北极度缺水, 而长江流域丰富的水资源却未能充分有效的利用, 严重制约了陕西省经济快速发展。为了改善水资源供需紧张局势, 实现陕西省经济快速增长和跨越式发展, 陕西省实施引汉济渭

工程, 亟待汉江流域丰富的水资源调入关中地区, 以减缓水资源供需矛盾^[1]。

引汉济渭工程规划在汉江干流修建黄金峡水库, 通过库区左岸的抽水站抽取汉江水经过“黄三”隧洞进入汉江左岸支流三河口水库, 经水库调蓄后, 从库区向北以长隧洞穿过秦岭, 进入渭河支流黑河金盆水库, 向渭河流域关中地区供水。调水工程不仅涉及社会、经济、生态等多个方面, 而且受水区水资源优化配置问题也较为复杂, 其中不仅有当地水源与外调水之间的协调问题, 而且不同用水部门对

收稿日期: 2010-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50709027); 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2009ZX07212-002-003-004)。

作者简介: 张永永(1982-), 男, 河南灵宝人, 博士生, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: zzyongyong@yahoo.com.cn。
黄强(1958-), 男, 四川绵阳人, 教授, 博导, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: sy_sj@xaut.edu.cn。

水资源的需求也不尽相同,如何合理配置各种水源,使有限的水资源尽可能的提高效益,协调系统内各地区、各部门之间的用水矛盾,对提高水资源利用率,实现水资源复合系统社会、经济与生态的协调、可持续发展具有重要的实际意义和应用价值。

如何对有限的水资源进行合理配置,已成为众多学者日益重视的研究课题。

以水资源系统分析为手段、水资源合理配置为目的的各类研究工作始于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题;50年代以后,随着系统分析技术和优化理论的引入,以及60年代计算机技术的发展,水资源系统模拟技术得以迅速研究应用;进入80年代后期,随着水资源研究中新技术的不断出现,尤其是决策支持技术、模拟优化技术的应用,使得水资源优化配置得以蓬勃发展^[2-5]。90年代以来,新的优化算法,如遗传算法(GA)、模拟退火(SA)等开始应用在水资源优化配置中^[6]。

随着智能优化算法的不断应用,其在求解最优解和兼顾计算速度方面优于一般优化方法,陈南祥等^[7]应用多目标遗传算法求解水资源优化配置,表明了算法的有效性;陈晓楠等^[8]建立了基于粒子群的大系统优化模型,应用该模型将有限的水资源分配到灌区不同子区,取得了较好的效果。虽然水资源优化配置研究已经取得了众多的研究成果,但对于复杂水资源优化系统的研究还没有形成完善的理论体系,在求解复杂水资源系统优化配置时,由于求解方法的局限,影响了计算精度。

因此,本文在已有研究的基础上,通过对引汉济渭工程受水区水资源优化配置模型的研究,旨在探讨构建能够反映水资源优化配置问题的合理目标,进而应用基于遗传算法的大系统分解协调方法对受水区水资源优化配置研究。通过对这一问题的研究,可以为复杂水资源系统优化配置研究提供了一定的理论支持。

1 引汉济渭工程受水区水资源优化配置模型

陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置涉及到不同地区多个部门近期和远期规划水平年的水资源合理分配,解决社会、经济和生态环境等多个决策目标,是高度复杂的多目标、非线性的决策问题。

水资源优化配置涉及众多部门间的利益,仅仅从单一目标研究很难反映问题的公平性。因此,为了更加深入的研究,对陕西省引汉济渭工程受水区建立以经济、社会和生态目标为主的多目标计算

模型。

1.1 目标函数

以供水净效益最大为经济目标:

$$f_1(x) = \max \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k w_k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k w_k \right] \quad (1)$$

式中, i, c 分别表示私有水源、公共水源,其中公共水源仅有引汉济渭 $c = 1$; x_{ij}, x_{cj} 分别表示私有水源与公共水源对部门 j 的供水量; b_i^k, b_c^k 分别表示 k 子区私有水源与公共水源向 j 用户的单位供水量效益系数(元/ m^3); c_i^k, c_c^k 分别表示 k 子区私有水源与公共水源向 j 用户的单位供水量费用系数(元/ m^3); w_k 表示 k 子区权重系数。

以缺水最小为社会目标:

$$f_2(x) = \min \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} (D_j^k - \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k - x_{cj}^k) \right] \quad (2)$$

式中, D_j^k 表示 k 子区用户的需水量,包括城市生活需水量、城市工业需水量和城市生态需水量, x_{ij}^k, x_{cj}^k 分别表示私有水源与公共水源对 j 用户的供水量。

以污水排放量最小为生态目标:

$$f_3(x) = \min \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \alpha_j^k (x_{ij}^k + x_{cj}^k) \right] \quad (3)$$

式中, α_j^k 表示 k 子区 j 用户的污水排放系数。

1.2 模型约束条件

用水户需水量约束:

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + x_{cj}^k \leq D_{j\max}^k \quad (4)$$

式中, $D_{j\min}^k$ 为 k 子区 j 用户最小需水量, $D_{j\max}^k$ 为 k 子区 j 用户最大需水量,最小需水量的确定以满足部门最低需水保证率而定。

可供水量约束,各水源供水量不能超过其最大供水能力:

$$\begin{cases} \text{私有水源} & \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq D_i^k \\ \text{公共水源} & \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq D_c^k, \quad \sum_{k=1}^K D_c^k \leq W_c \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_i^k 为 k 子区私有水源最大供水能力, D_c^k 为公共水源分配给 k 子区的水量, W_c 为公共水源 c 的可供水量。

水源供水能力约束:

$$x_{ij}^k \leq Q_i^k, \quad x_{cj}^k \leq Q_c \quad (6)$$

式中, Q_i^k 为 k 子区 i 水源的最大输水能力, Q_c 为公共水源的最大输水能力。

水库库容约束:

$$V_{\min}(m,t) \leq V(m,t) \leq V_{\max}(m,t) \quad (7)$$

式中, $V_{\min}(m,t)$ 一般为死库容, $V_{\max}(m,t)$ 为允许的最大库容, 非汛期一般为正常蓄水位下的库容, 汛期为防洪限制水位下的库容。

2 模型的求解

陕西省引汉济渭工程受水区水资源系统是一个多目标、多水源、多用户的复杂大系统, 需要满足不同规划水平年、不同保证率下、不同用户的需水要求, 结构体系复杂, 影响因素和决策变量较多, 求解比较困难。

对于复杂水资源系统的求解, 应兼顾求解精度和计算速度, 目前, 在求解该问题上还没有成熟的方法, 多数学者应用基于模拟优化技术的方法求解, 取得了一定的成果, 但是, 智能方法的应用也仅仅局限在一般的水资源优化配置。因此, 本文首先应用大系统分解协调原理对整个水资源系统进行分解, 然后对每个计算单元采用遗传算法^[9]进行求解, 旨在探讨该方法在求解复杂水资源优化配置问题时的可行性和有效性。

2.1 模型求解方法

解决多目标优化问题, 最常用的技术是将多目标问题转化为单目标问题, 应用成熟的单目标优化方法求解^[10]。由于以污水排放量最小为目标函数时, 污水排放量资料不易获取, 将生态目标定为满足河道内生态需水。根据大系统分解协调原理按照行政区划将引汉济渭工程受水区划分为既相互独立, 又相互联系的西安、咸阳、渭南和宝鸡四个供水区, 将“引汉济渭”调水量在各个供水区内分配给各受水区城市, 各城市在分配到一定水量后, 又对城市内各用水部门之间进行合理分配, 从而形成满足经济、社会和生态目标要求的水资源最优配水过程。

不同供水区之间的配水属于整个受水区系统的优化过程, 而供水区内不同城市间各用水部门之间的配水则属于每个供水区子系统的优化。将引汉济渭工程受水区 4 个子区作为第一层, 引汉济渭调水量作为第二层, 通过分配给每个子区的供水量将两层联系起来, 成为一个具有两层结构的大系统, 水资源系统分解协调结构图如图 1。第一级子系统和第二级系统协调应用遗传算法进行求解, 计算流程图如图 2。

1) 第一级子系统优化

第一级子系统依行政区划将引汉济渭工程受水区划分为 4 个子区, 即宝鸡、咸阳、西安和渭南。各

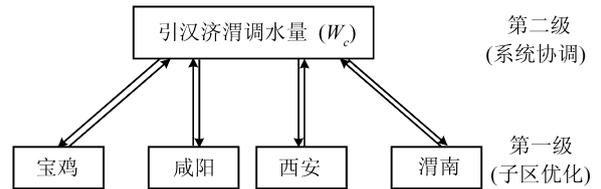


图 1 水资源系统分解协调结构图
Fig. 1 The decomposition coordination structure of water resources system

子区是在第二级系统(协调级)给定引汉济渭调水量 W_c 的前提下进行各子区优化, 子区优化以建立的经济、社会和生态目标进行优化, 应用遗传算法求解。将第一级各子区求得的最优解反馈到第二级, 进行第二级系统协调。具体步骤如下:

步骤 1 对决策变量进行编码, 在约束条件范围内产生初始种群, 对种群进行选择、交叉和变异操作, 直至满足迭代次数要求;

步骤 2 根据计算得到引汉济渭调水量的预分方案, 将预分方案传递到第二级系统进行协调, 以得出最优分配方案;

步骤 3 第二级系统协调优化, 应用遗传算法计算得到各子区的最优解, 将最优解反馈到第一级子系统, 经过第二级系统协调满足目标要求;

步骤 4 根据第二级系统协调反馈得到的信息为基础, 重新对第一级子系统进行求解, 得到新的适应度函数, 然后重复步骤 1~3;

步骤 5 判断计算得到的新的最优个体是否达到系统要求的收敛条件, 若满足, 即得到水资源最优分配方案, 停止计算, 输出最优成果。

2) 第二级系统协调

第二级系统协调的任务是协调各子区的最优解成为整个系统的最优解。第一级子系统各子区的水资源优化配置是把第二级系统协调预分给第一级子系统的引汉济渭调水量作为一种新的水源, 在第一级子系统各分区各城市不同部门间进行合理配置, 进而通过第二级系统协调来得到整个系统的最优分配方案。具体步骤如下:

步骤 1 对决策变量进行编码, 在约束条件范围内随机产生初始种群, 计算种群中每个个体的适应度;

步骤 2 对种群进行选择、交叉和变异操作, 产生新一代种群, 计算新一代种群每个个体的适应度;

步骤 3 重复步骤 2 直至满足迭代次数要求, 计算得到所有种群中最优的个体, 即各子区的最优解。

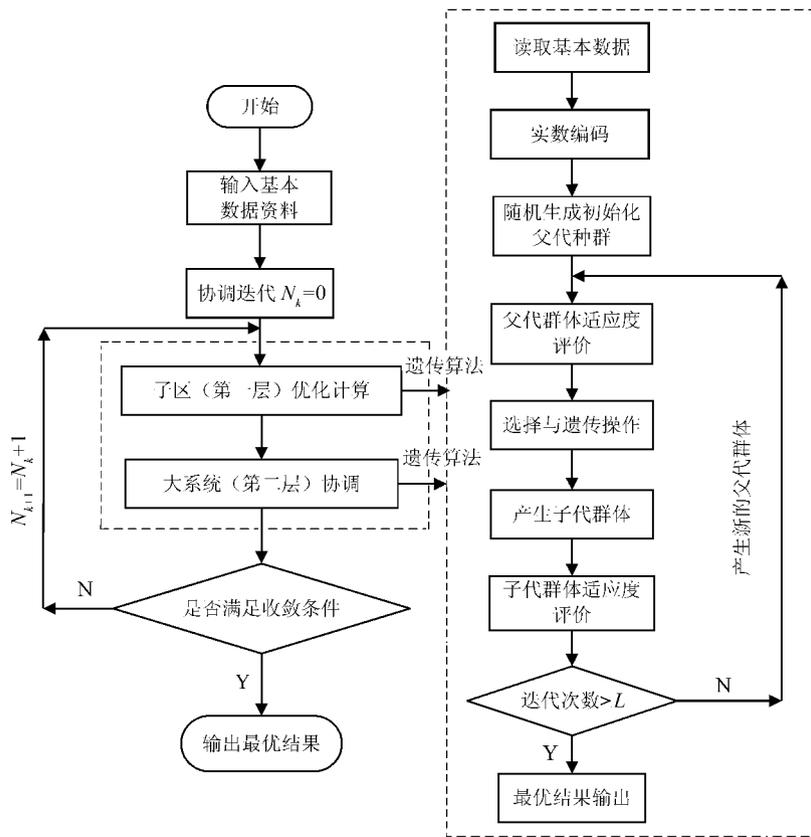


图2 基于遗传算法的大系统分解协调方法计算流程图

Fig. 2 The flowchart of based on genetic arithmetic large scale system decomposition coordination method

2.2 水资源配置方案

引汉济渭水资源系统进行优化配置,首先建立了规划水平年2020和2030的计算方案。对受水区进行开源节流和加强统一规划管理的基础上,从水资源需求和供给两方面进行调控,一是挖潜节水措施压缩用水需求,在保证生产正常进行的条件下,对工业实施节水措施,原则上保证城市生活用水,2020水平年在预测需水水平的基础上,考虑城市工业节

水5%进行组合,2030水平年考虑城市工业节水2%进行组合;二是在城市自身水资源根本不能满足需水要求时,采取跨流域调水方案,补充可供给利用的水量,缓解城市水资源供需矛盾,根据不同规划水平年的需水,2020水平年考虑引汉济渭调水量15亿m³、12亿m³、10亿m³,2030水平年考虑引汉济渭调水量15亿m³、14亿m³。2020水平年和2030水平年形成的不同方案集见表1。

表1 不同规划水平年方案集

Tab. 1 The scheme sets of different target year

水平年	方案名称	调控手段					
		引汉济渭工程调水量				节水手段	
		10 亿 m ³	12 亿 m ³	14 亿 m ³	15 亿 m ³	城市工业节水(5%)	城市工业节水(2%)
2020	方案1	★					
	方案2	★				★	
	方案3		★				
	方案4		★			★	
	方案5				★		
	方案6				★	★	
2030	方案7			★			
	方案8			★			★
	方案9				★		
	方案10				★		★

3 水资源优化配置结果分析

3.1 不同方案下引汉济渭水资源供需结果分析

根据建立的水资源优化配置模型,应用基于遗传算法的大系统分解协调方法计算设置的不同方案,统计不同方案的供需状况,不同方案的缺水量见图3。由图3可以看出:①方案5和方案6缺水量

为0,表明2020水平年在调水15亿 m^3 时受水区供需达到平衡;②当调水12亿 m^3 时,方案4的缺水量最小,表明在工业节水措施下可以有效的减少受水区的缺水量;③当调水10亿 m^3 时,缺水量的缺口较大,加剧了受水区的供需矛盾;④当调水能力提高时,可以在一定程度上缓解受水区水资源供需紧张。

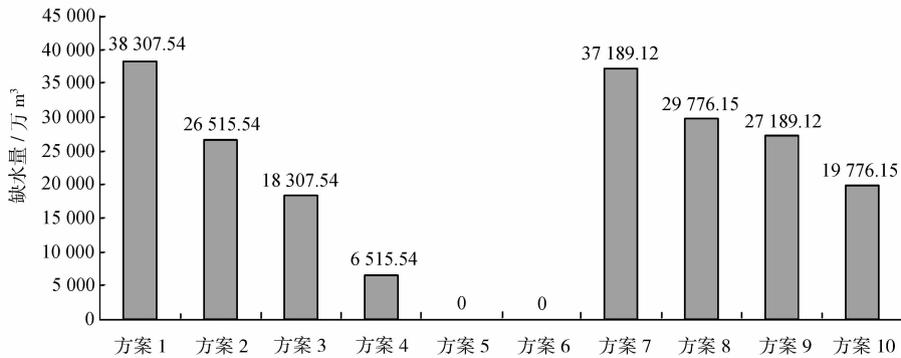


图3 不同方案下的缺水量示意图

Fig.3 The water deficit of different scheme

3.2 不同方案下引汉济渭工程受水区供水构成

引汉济渭工程受水区水源工程包括地表水工程,雨污水回用,地下水工程和引汉济渭工程,不同方案下受水区各水源工程的供水量构成,见图4所示,其中,百分数为各水源工程供水量占总供水量的百分比。由图4可以看出以下几点。①方案1~10中雨污水回用最高占15%,最低占11%;地表水工程最高占30%,最低占25%;地下水最高占17%,最低占13%;引汉济渭工程最高占50%,最低占40%,在受水区整个供水构成中引汉济渭工程占总供水量46%左右。②地表水工程占总供水量的

27%左右,地下水工程和雨污水回用占用的比例较低,这与当地水源的供水能力有关,在没有外调水源引汉济渭时,当地供水能力最强的是地表水工程,其次是在允许开采范围内地下水工程,雨污水工程相对较低。③当有引汉济渭供水时,在挖潜当地水源工程供水能力的情况下,引汉济渭工程供水就占有举足轻重的地位,这也突出了引汉济渭工程的重要程度。就当前来看,解决受水区缺水紧张的重要举措也就是实施引汉济渭工程。因此,研究引汉济渭水资源优化配置对于提高当地水源的供水能力,解决受水区供需矛盾具有重要的理论和应用价值。

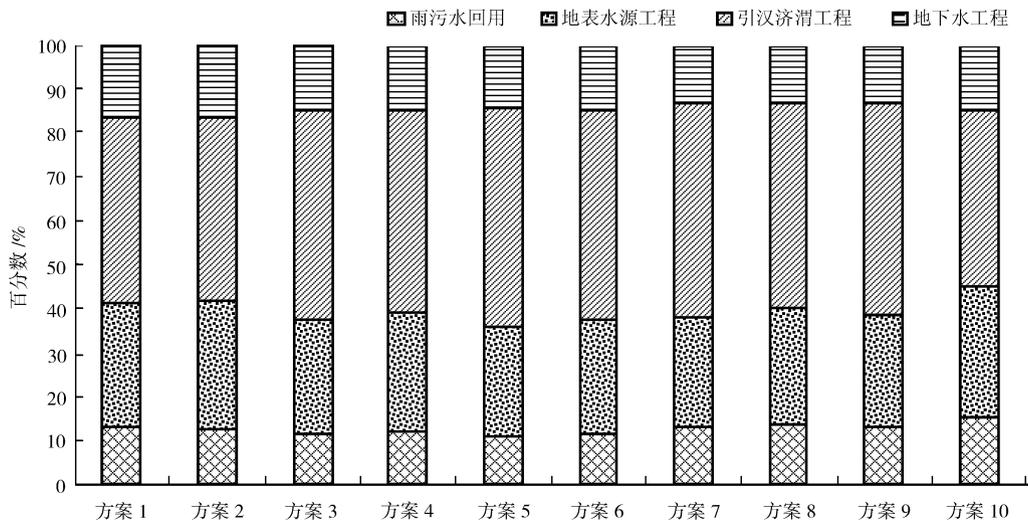


图4 不同方案下受水区供水构成

Fig.4 Composing of water supply for different scheme

4 结 论

跨流域调水是解决水资源空间分布不均匀的一种行之有效的办法,是受水区的经济和社会发展所需水资源的重要保障。本文应用基于遗传算法的大系统分解协调方法对引汉济渭水资源优化配置进行研究,分别从受水区不同方案水资源供需结果和受水区供水构成两方面对配置结果进行分析,研究表明引汉济渭工程是陕西省经济社会发展的战略基础,可以有效缓解受水区水资源供需紧张局势。

陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究,对于提高当地水资源利用率,解决受水区供需矛盾具有重要的指导意义和应用价值。但是,由于资料所限,本文对生态目标进行了简化,对于多目标问题的求解还存在不足之处。因此,对于复杂水资源系统的多目标优化配置问题还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张永永,黄文政,黄强,等. 陕西省南水北调受水区水资源供水情势综合评价[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1499-1504.
- Zhang Yongyong, Huang Wencheng, Huang Qiang, et al. Situation on water resources of the benefited areas of the South-to-North Water Transfer Project in Shaanxi Province [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1499-1504.
- [2] Lee D J, Howitt R E, Marino M A. A stochastic model water quality: application to salinity in the Colorado River [J]. Water Resources Research, 1993, 29(3): 475-483.
- [3] Culver T B, Shoemaker C A. Optimal control for groundwater remediation by differential dynamic programming with quasi-newton approximations [J]. Water Resources Research, 1993, 29(4): 612-620.
- [4] 张平,赵敏,郑垂勇. 南水北调东线受水区水资源优化配置模型[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 88-94.

Zhang Ping, Zhao Min, Zheng Chuiyong. Optimal allocation of water resources in the water import areas of the East Route of the South-to-North Water Transfer Region [J]. Resources Science, 2006, 28(5): 88-94.

- [5] 畅建霞,黄强,王义民,等. 南水北调中线工程水量仿真调度模型研究[J]. 水利学报, 2002, (12): 85-90.
- Chang Jianxia, Huang Qiang, Wang Yimin, et al. Water dispatch simulation model for Middle Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (12): 85-90.
- [6] Wang M, Zheng C. Ground water management optimization using genetic algorithms and simulated annealing: formulation and comparison [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, (7): 519-530.
- [7] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313.
- Chen Nanxiang, Li Yuepeng, Xu Chenguang. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 308-313.
- [8] 陈晓楠,段春青,邱林,等. 基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 103-106.
- Chen Xiaonan, Duan Chunqing, Qiu Lin, et al. Application of large scale system model based on particle swarm optimization to optimal allocation of water resources in irrigation areas [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 103-106.
- [9] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- [10] Gao Ying, Shi Lei, Yao Pingping. Study on multi-objective genetic algorithm [C] // Proceedings of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei, China, 2000: 646-650.

(责任编辑 杨小丽)