

基于多目标遗传算法的西安市水资源优化配置研究

王宏伟¹, 张鑫¹, 邱俊楠¹, 孙天青²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 对基于多目标遗传算法的水资源优化配置模型进行研究, 可为城市水资源可持续利用和规划管理提供一定的参考依据。根据西安市的水资源实际情况, 建立水资源优化配置模型, 并利用多目标遗传算法对该区域水资源进行了优化配置。结果表明, 在各水平年不同保证率条件下, 西安市水资源经优化配置后的总供水量有所减少, 各个水源的供水量亦有不同程度的减少, 其中地表水和地下水减少的供水量较为明显。研究结果表明, 多目标遗传算法在水资源优化配置中的应用效果较好, 优化结果合理可靠。

关键词: 多目标遗传算法; 水资源; 优化配置

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0150-04

中图分类号: TV213

Optimal Deployment of Water Resources Based on Multi-objective Genetic Algorithm in Xining City

WANG Hong-wei¹, ZHANG Xin¹, QIU Jun-nan¹, SUN Tian-qin²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The optimal deployment scheme based on multi-objective genetic algorithm can provide references for urban sustainable utilization and management of water resources. The optimal deployment scheme for Xining City was established according to the actual situation of water resources, and was optimized by using multi-objective genetic algorithm. The results show in different years with various guarantee rates, the supplies of total and individual water resources reduced substantially after optimal deployment, while the reductions in surface water and groundwater were more significant. The application of the multi-objective genetic algorithm in optimizing water resource deployment showed preferable effects, resulting in reasonable and reliable results.

Keywords: multi-objective genetic algorithm; water resources; optimal deployment

随着社会经济的发展, 西安市水资源供需矛盾日益突出, 同时由于水资源的不合理利用, 亦产生了诸多生态环境问题。

因此, 进行西安市水资源优化配置研究, 对社会经济和生态环境的协调发展以及水资源的可持续利用具有重要意义。水资源合理配置的实质是提高水资源配置效率, 一方面是提高水的分配效率, 合理解决各部门和各行业(包括环境和生态用水)之间的竞争用水问题; 另一方面则是提高水的利用效率, 促进各部门或各行业内部高效用水^[1]。水资源优化配置是典型的多目标规划问题, 涉及到人口、资源、社会经济以及生态环境等多方面的因素。传统的方法(如主要目标法、加权和法、理想点法、可行方向法等)因

受决策者的偏好影响, 未能很好地解决多目标问题, 然而遗传算法由于不依赖于梯度信息和问题本身并且具有鲁棒性和全局搜索能力, 是解决此类问题的有效途径^[2]。

本研究基于多目标遗传算法原理与水资源可持续发展理论^[3-5], 针对西安市的供水关系、水质、水资源特征以及水资源开发利用现状, 结合水资源优化配置原则、西安市水资源相关规划, 构建水资源多目标优化配置模型; 采用多目标遗传算法对该区域的水资源进行优化配置, 以期能为西安市水资源可持续利用和规划管理提供理论依据。

收稿日期: 2011-05-11

修回日期: 2011-07-12

资助项目: 国家高技术研究(863) 发展计划项目“作物水分亏缺补偿技术”(14110209); 国家重大科技支撑项目(2006BAD11B05); 西北农林科技大学博士科研启动基金资助项目(01140504); 西北农林科技大学科研专项(08080230)

作者简介: 王宏伟(1985—), 男(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: welfare2000@139.com。

通信作者: 张鑫(1968—), 男(汉族), 河南省淅川县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水资源开发利用及合理配置方面的研究。E-mail: zhxm@163.com。

1 西宁市水资源现状

西宁市位于青海省东部,地理位置介于东经 100°54′—101°55′和北纬 36°13′—37°25′之间,属于高原大陆性气候,其地处黄河一级支流湟水流域中上游,湟水河自西向东贯穿市区,在西宁市境内汇入湟水的各主要支流约有 56 条。该市多年平均径流深 151 mm,地表水资源量为 $1.11 \times 10^9 \text{ m}^3$,地下水资源量为 $7.90 \times 10^8 \text{ m}^3$,可供开发利用的潜力较大。此外,随着工业的发展和城市人口增长,西宁市水资源供需矛盾日益尖锐的同时,污水排放量亦不断增加,河道水体污染十分严重。根据现状调查,西宁市水质污染严重的河流主要有湟水干流(西宁市市区段)、南川、北川,全年非汛期劣 V 类水质,水污染不仅使水资源可利用量越来越少,而且严重影响工农业生产和人民健康。

2 水资源优化配置模型

水资源优化配置就是将流域或区域水资源在不同子区域、不同用水部门、不同时期进行优化配置^[6]。水资源优化配置可以间接地调控社会经济的发展规模和速度,保护生态环境,最终目的是水资源的可持续利用和社会经济的可持续发展以及在水资源有限的条件下,如何发挥水资源的最大效用,建立优化配置模型是最常用的手段^[7]。

水资源优化配置是一个多目标问题,在众多优化目标中侧重地选取 3 个目标:经济目标、社会目标和生态环境目标,建立水资源优化配置模型,其形式一般为:

$$Z = \max [f_1(x) \quad f_2(x) \quad f_3(x)]$$

$$G(x) \leq 0 \quad (1)$$

$$x \geq 0$$

式中: x ——决策变量; $f_1(x)$ $f_2(x)$ $f_3(x)$ ——经济目标、社会目标和生态目标; $G(x)$ ——约束条件集。

2.1 决策变量

西宁市的地表水源地和地下水源地所受污染程度较小,可用于生活、工业、农业和生态需水部门;中水由于水质不符合生活用水标准,不考虑用于生活,但可用于其它 3 个需水部门;其它水源(主要是雨水利用)可用于生活和农业两个部门,对工业和生态不予供水(表 1)。

2.2 目标函数

(1) 经济目标。经济目标通常比较容易量化,以区域供水净效益最大来表示:

$$\max f_1(x) = \max \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (b_{ij} - c_{ij}x_{ij}\alpha_{ij}) \right] \quad (2)$$

式中: x_{ij} ——水源 i 向用户 j 的供水量 (10^4 m^3); b_{ij} ——效益系数 (元/ m^3); c_{ij} ——费用系数 (元/ m^3); α_{ij} ——水源 i 向用户 j 的供水效益修正系数,与供水次序、用户类型有关。

表 1 研究区决策变量的选取

水源	生活用水	工业用水	农业用水	生态用水
地表水	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
地下水	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
中水		x_{32}	x_{33}	x_{34}
其它	x_{41}		x_{43}	

(2) 社会目标。社会目标是一个不易度量的目标,在实践中常常是建立一些更具体的指标来表示。由于缺水程度直接对社会发展有影响,可较好地体现水资源配置中的公平原则,因而以区域总缺水最小来表示:

$$\max f_2(x) = -\min \left[\sum_{j=1}^J (D_j - \sum_{i=1}^I x_{ij}) \right] \quad (3)$$

式中: D_j ——用户 j 的需水量 (10^4 m^3)。

(3) 生态环境目标 (COD)。化学需氧量是一个反映废水污染程度而且能较快测定的重要有机物污染参数。因它与生态环境息息相关,本研究以区域主要污染物 COD 最小为生态环境目标:

$$\max f_3(x) = -\min \left[\sum_{j=1}^J 0.01 d_j p_j \sum_{i=1}^I x_{ij} \right] \quad (4)$$

式中: d_j ——用户 j 排放废水中 COD 浓度 (mg/L); p_j ——用户 j 的污水排放系数。

2.3 约束条件

(1) 人均经济收入约束。人均经济收入约束可表示为:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (b_{ij} - c_{ij}) x_{ij} \alpha_{ij} \geq MT_0 \quad (5)$$

式中: M ——该区域总人口 (人); T_0 ——该区域最低收入标准 (元/人)。

(2) 供水能力约束。即水源 i 向所有用户的供水量之和应小于其可供水量:

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq W_i \quad (6)$$

式中: W_i ——水源 i 的可供水量,不同水源的可供水量分别由现有的供水工程和规划的供水工程来确定。根据西宁市水资源评价与水资源可持续利用研究资料,西宁市 2020 年外调地表水水量为 $2.77 \times 10^8 \text{ m}^3$,2030 年外调地表水水量为 $4.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 用水系统供需变化约束。即用户 j 从水源获得的水量应该介于该用户需水量的上下限之间:

$$L_j \leq \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq H_j \quad (7)$$

式中: H_j, L_j ——用户 j 需水量的上、下限。本研究中生活、工业、农业和生态用户需水量分别由指标分析法预测求得,即为各自的需水量上限;而下限分别按照生活需水量预测值的 90%、工业需水量预测值的 85%、农业需水量预测值的 70%、生态需水量预测值的 75% 来确定。

(4) 排水系统的水质约束。

$$\text{达标排放: } d_j \leq d_j^0 \quad (8)$$

式中: d_j^0 ——用户 j 的 COD 达标排放的规定浓度。

$$\text{总量控制: } \sum_{j=1}^I 0.01 d_j p_j \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq D \quad (9)$$

式中: D ——允许的 COD 排放总量。

$$(5) \text{ 变量非负约束。} x_{ij} \geq 0 \quad (10)$$

2.4 模型参数确定

(1) 效益系数。工业用水效益系数采用工业总产值分摊方法;农业用水效益主要表现在农产品的灌溉增产量方面,其系数按灌溉增产量与各种农作物价格以及水利分摊系数相乘来确定;生活用水效益系数按供水工程的理论价格来计算;生态用水效益因与社会效益密切相关,难以准确地定量分析,其系数不易确定,可依据文献[8—9]计算。

(2) 费用系数。从水厂取水的用户以水价作为其费用系数;从自备井取水的用户以水资源费、污水处理费与提水成本之和作为其费用系数;从水利工程取水的用户以水资源费、污水处理费与输水成本之和作为其费用系数;农业用户的费用系数参考水费征收标准确定^[10]。

(3) 供水次序系数及用户公平系数。遵循水资源优化配置公平性、有效性、可持续性以及优先性原

则,按照先生活后生产、地表水水源优先、尽量减少地下水的开采、多种水源联合配置、统筹规划等安排,确定水源供水先后次序为地表水、地下水、中水、其它,用户得到供水的先后次序为生活、生态、工业、农业,依据文献[11]依次计算出供水次序系数为 0.4、0.3、0.2、0.1;用户公平系数分别为 0.4、0.3、0.2、0.1。

(4) COD 排放浓度、污水排放系数、纳污能力。参照城市排水工程规划规范^[12]与西宁市水资源评价与水资源可持续利用研究,结合西宁市的污水排放现状、污水处理工艺以及城镇排污管网的建设等因素,依次确定生活、生态、工业、农业等用户排放的污水中 COD 浓度、污水处理后的浓度、污水排放系数以及纳污能力。

2.5 模型求解

在建立西宁市水资源优化配置模型后,采用多目标遗传算法进行求解。具体过程为:(1)利用多目标遗传算法将水资源优化配置问题模拟为生物进化问题,将模型的决策变量编成二进制码(基因),由若干基因组成一个染色体(水资源优化配置方案)。(2)将随机产生的几个染色体代入水资源优化配置模型,计算每个染色体的适应度值(目标值),进行优胜劣汰,从中选择适应度相对较好的一些方案作为下一次遗传操作的初始方案集。(3)在经过多次重复迭代后寻得最优方案,完成水资源优化配置,实现水资源 3 个目标综合效益最佳。在采用多目标遗传算法进行求解时计算参数为:种群规模为 60,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.3,迁移率为 0.2,最大迭代代数为 400。西宁市不同水平年水资源优化配置计算结果详见表 2。并根据计算结果,将西宁市各水源的供水量在优化配置前后进行比较(图 1)。

表 2 西宁市不同水平年水资源优化配置结果

10^4 m^3

水平年	保证率	生活用水			工业用水			农业用水				生态用水	
		地表水	地下水	其它	地表水	地下水	中水	地表水	地下水	中水	其它	地表水	中水
2015 年	95%	5 633	10 372	19	19 404	9 248	69	19 837	14 736	21	57	1 929	74
	75%	5 470	9 081	22	20 269	10 594	77	24 382	14 651	17	70	1 859	53
	50%	6 019	7 764	25	22 439	12 177	74	24 442	14 361	15	68	1 660	57
2020 年	95%	7 969	10 581	26	22 849	9 684	73	25 502	10 210	33	108	2 117	99
	75%	8 197	8 606	33	25 409	9 804	83	29 352	12 039	27	118	1 937	79
	50%	7 802	8 139	31	28 439	10 114	87	30 192	12 173	27	101	1 691	91
2030 年	95%	15 303	8 003	46	37 331	11 474	72	32 822	8 024	53	152	2 591	176
	75%	13 131	8 053	51	43 809	9 960	98	38 862	9 454	47	128	1 997	173
	50%	11 898	8 146	59	54 703	9 962	97	34 412	9 340	38	158	1 697	143

3 结果分析

分析表 2 与图 1 可以看出,在各水平年不同保证

率下,西宁市水资源经优化配置后的总供水量有所减少。2015、2020 和 2030 年分别在保证率为 50% 时减少的供水量最多。各个水源的供水量亦有不同程度

的减少,其中地表水和地下水减少的供水量较为明显。地表水源在 2015 年保证率为 50% 时减少的供水量最多,地下水源在 2030 年保证率为 50% 时减少的供水量最多。经过优化配置后减少的供水量有限,但提高了水资源的利用率。对于供需矛盾日益突出的西宁市来说,一定程度上缓解了该市的水资源压力。

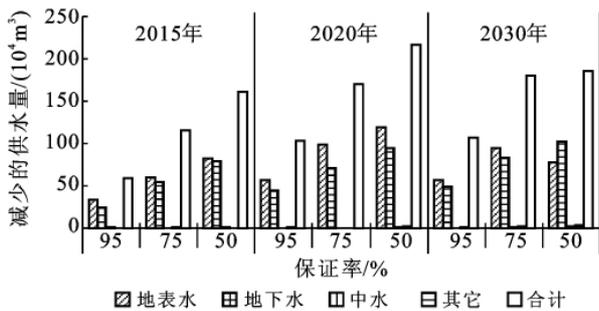


图 1 西宁市水资源优化配置后减少的供水量

4 结论

(1) 经优化配置后的各水源供水量能够保证生活和生态用水,基本满足工业和农业用水,也使经济、社会与生态环境的综合效益达到最优,实现协调发展。与此同时各水源供水量均有所减少,促进了水资源的合理高效利用,为西宁市水资源可持续利用和管理提供指导依据。从而表明多目标遗传算法在水资源多目标优化配置中的应用效果较好,优化结果合理可靠。

(2) 西宁市水资源可供水量有限,水资源优化配置结果仅仅是在需水量上下限之间,并没有完全满足工业和农业用水,缺水量较大,供需矛盾突出。同时,

水污染形势严峻,生态环境不断遭到破坏。可以预见,在未来相当长一段时间内,水资源短缺、水污染仍将制约着西宁市经济社会的发展。

[参 考 文 献]

- [1] 李力,沈冰. 太原市水资源合理配置研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(2): 199-204.
- [2] 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.
- [3] 李丽荣. 求解 Pareto Front 多目标遗传算法的研究[D]. 湖南湘潭:湘潭大学, 2003.
- [4] Fonseca C M, Fleming P J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization [J]. Evolutionary Computation, 1995, 3(1): 1-16.
- [5] 赵瑞. 多目标遗传算法应用的研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [6] 何俊仕,栗晓玲. 水资源规划与管理[M]. 北京:中国农业出版社, 2006: 203-204.
- [7] 黄强,杨建霞. 水资源系统多维临界调控的理论和方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007: 107-133.
- [8] 张鑫,蔡焕杰. 区域生态环境需水量与水资源合理配置[M]. 陕西杨凌:西北农林科技大学出版社, 2008: 65-85.
- [9] 栗晓玲,康绍忠,石培泽. 干旱区面向生态的水资源合理配置模型与应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1111-1117.
- [10] 高佳,赵本龙,索惠霞. 馆陶县水资源优化配置研究[J]. 海河水利, 2008, 13(4): 7-9.
- [11] 安鑫. 西安市节水型社会建设的水资源优化配置及评价研究[D]. 陕西西安:长安大学, 2009.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB50318—2000 城市排水工程规划规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.

(上接第 136 页)

- [13] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(13): 2869-2872.
- [14] Schlerf M, Atzberger C, Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 177-194.
- [15] Seeking H D, Hoehn A, Stodieck L S, et al. The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible, near, and short-wave-infrared [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(13): 3701-3713.
- [16] Hill M J, Held A A, Leuning R, et al. MODIS spectral signals at a flux tower site: Relationships with high-resolution data, and CO₂ flux and light use efficiency measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(3): 349-351.
- [17] 王惠文,陈梅玲. Gram—Schmidt 回归及在刀具磨损预报中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 729-733.
- [18] 王惠文,郭丽娟. 基于 Gram—Schmidt 过程的多项式回归建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(11): 1349-1352.