

网络出版时间:2016-05-03 14:05

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.06.027

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160503.1405.054.html>

基于模拟退火遗传算法的水资源优化配置研究

何国华¹, 解建仓¹, 汪 妮¹, 朱记伟¹, 杨 柳¹, 王德阳²

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 黄河水利委员会 西峰水文水资源勘测局, 甘肃 庆阳 745000)

[摘 要] 【目的】通过模拟模型描述水资源系统的复杂关系, 解决水资源配置难题, 为区域水资源合理开发利用提供决策依据。【方法】建立以经济、社会、生态环境综合效益为最优的水资源优化配置模型, 并采用模拟退火遗传算法对模型进行求解, 最后以咸阳市为例进行水资源优化配置。【结果】基于所建立的水资源优化配置模型对咸阳市的水资源进行优化配置, 在 50% 保证率情况下, 咸阳市 2020 年地表水、地下水、外调水、中水的供水量分别为 69 020 万、53 433 万、23 435 万和 7 900 万 m^3 , 2030 年供水量分别为 88 825 万、46 533 万、46 310 万和 12 100 万 m^3 , 分别较原始供水量节水 322.09 万和 432.46 万 m^3 , 除农业用水稍有欠缺外, 其他用水户的用水要求均可以得到满足。【结论】基于模拟退火遗传算法的水资源优化配置模型配水结果合理可行, 可以作为研究区水资源配置的决策依据。模拟退火遗传算法收敛速度快, 寻优能力强, 可以应用于水资源优化配置领域。

[关键词] 水资源; 优化配置; 模拟退火遗传算法; 咸阳市

[中图分类号] TV213.9

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)06-0196-07

Optimal allocation of water resources based on simulated annealing-genetic algorithm

HE Guo-hua¹, XIE Jian-cang¹, WANG Ni¹, ZHU Ji-wei¹,
YANG Liu¹, WANG De-yang²

(1 College of Waer Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Huanghe River Commission, Xifeng Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: 【Objective】 This study described the complex relationship of water resources system and solve the difficult allocation problem using simulation method to provide basis for reasonable development and utilization of regional water resources. 【Method】 The optimal allocation model for water resources was established with the consideration of economic, social, ecological and environmental benefits and it was solved by adopting the simulated annealing-genetic algorithm. Then, the model was used to obtain the optimal configuration of water resources in Xianyang. 【Result】 Based on the established model and under the condition of 50% guaranteed rate, the estimated surface water, ground water, water transfer and wastewater reuse in 2020 for Xianyang were $69\,020 \times 10^4 \text{ m}^3$, $53\,433 \times 10^4 \text{ m}^3$, $23\,435 \times 10^4 \text{ m}^3$, and $7\,900 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $88\,825 \times 10^4 \text{ m}^3$, $46\,533 \times 10^4 \text{ m}^3$, $46\,310 \times 10^4 \text{ m}^3$, and $12\,100 \times 10^4 \text{ m}^3$ in 2030, respectively. Compared with the original water supply, the total water supply was reduced by $322.09 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $432.46 \times 10^4 \text{ m}^3$ in 2020 and 2030. Except for agricultural water, requirements of other water users could be met. 【Conclusion】 The optimal allocation results of water resources by established model using simulated

【收稿日期】 2014-11-05

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51479160, 51209170); 陕西省水利科技计划项目(2013SLKJ-05)

【作者简介】 何国华(1990—), 男, 甘肃庆阳人, 在读硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: heguohua010@163.com

【通信作者】 解建仓(1963—), 男, 陕西眉县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源及水利信息化研究。
E-mail: jcxie@mail.xaut.edu

annealing-genetic algorithm were reasonable and feasible, and they can be regarded as decision making basis. The simulated annealing-genetic algorithm has the advantage of fast convergence and optimization, and can be used in water resources allocation.

Key words: water resources; optimal allocation; simulated annealing-genetic algorithm; Xianyang

近年来,随着经济发展和人民生活水平的提高,我国用水总量不断增加,水资源供需矛盾进一步加剧,水资源状况整体向不利的方向演变。水资源与能源、环境并列成为影响我国经济社会可持续发展的三大制约因素^[1]。为了缓解用水短缺给我国带来的发展压力,越来越多的专家学者开始致力于水资源优化配置和水资源可持续发展的研究。由于水资源系统的复杂性以及政治、社会、环境和决策者偏好等多种非技术因素的影响,采取简单的优化方法并不能取得令人满意的结果,而模拟模型技术却可以更加清晰地描述水资源系统中的复杂关系,并通过分析计算得到相对合理的结果,从而为水资源规划问题提供决策支持^[2]。最早的水资源合理配置研究始于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题^[3],1953年美国陆军工程师兵团设计出了最早的水资源模拟模型^[4],1962年,Masse等提出了单目标非线性静态规划模型的应用实例^[5],20世纪80年代N.伯拉斯所著的《水资源科学分配》和90年代联合国出版的《亚太水资源利用与管理手册》均系统研究并总结了水资源配置的理论和方法,标志着水资源优化配置开始进入到一个比较成熟的阶段^[6]。20世纪70年代后,计算机技术、数学规划理论、系统工程理论迅速发展并在水资源优化配置领域得到广泛应用^[4],水资源的优化配置手段开始不断丰富,配置水平也不断提高,相继提出了遗传算法^[7-8]、粒子群算法^[9-12]、蚁群算法^[13]、BP神经网络算法^[14-16]等新的水资源配置的智能优化算法。但是由于水资源系统存在多目标性、层次性、不确定性、非线性等特点,目前对水资源系统的研究尚存在一些问题,如人工河道、渠系对自然水循环的影响以及由此带来的对传统计算方式的改变,降水、径流、蒸发等对气候剧烈变化的响应过程,大范围调水对供水、受水流域的生态影响等。因此采用何种模型才能更加合理地模拟复杂水资源系统,如何解决算法中要求的连续、可微,如何提高运算速度,如何得到全局最优解等问题依然有待深入研究^[17]。基于上述研究成果及问题,本研究建立了经济、社会、生态综合效益最优的水资源优化配置模型,通过对模拟退火算法和遗传算法的深入研究,将模拟退火算法良好的局部

搜索能力和遗传算法良好的全局搜索能力相结合,建立了模拟退火遗传算法模型,以期丰富智能优化算法在水资源优化配置领域的应用。

1 水资源优化配置模型及求解算法

1.1 目标函数

水资源优化配置的目的是实现水资源的可持续利用,将有限的水资源科学、合理地分配给各用水部门,最终获得包括经济效益、社会效益、生态效益等多种目标的最大综合效益^[8]。因此,本研究以经济效益、社会效益、生态效益最优为目标确定目标函数。根据行政区划对研究区域进行分区,用 $k(k=1,2,\dots,K)$ 表示;供水水源包括地表水、地下水、回用水、外调水等,用 $i(i=1,2,\dots,I)$ 表示;用水户包括工业用水、农业用水、生活用水、生态用水等,用 $j(j=1,2,\dots,J)$ 表示,用 x_{ij}^k 表示 i 水源向 k 子区 j 用水户的供水量。

(1)经济效益目标。以各水平年各子区各行业供水净效益最大作为经济效益目标。计算公式为:

$$\max f_1(X) = \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i \beta_j^k \right\}. \quad (1)$$

式中: b_{ij}^k 表示 i 水源向 k 子区 j 用水户的单位供水效益系数,元/ m^3 ; c_{ij}^k 表示 i 水源向 k 子区 j 用水户的单位供水量费用系数,元/ m^3 ; x_{ij}^k 表示 i 水源向 k 子区 j 用户的供水量, m^3 ; α_i 表示 i 水源的供水次序系数, β_j^k 表示 k 子区 j 用水户的用水公平系数。

(2)社会效益目标。由于社会效益难以衡量,不易集成,尚无成熟的方法可供参考,因此在实际问题中通常选用代表性指标反映社会效益目标。由于粮食产量直接影响人民生活和社会稳定,因此选用各水平年各子区粮食产量与其期望产量之差最小作为代表性指标计算社会效益。计算公式为:

$$\max f_2(X) = \min \sum_{k=1}^K [F(k) - T_F(k)]. \quad (2)$$

式中: $F(k)$ 表示 k 子区实际粮食产量; $T_F(k)$ 表示 k 子区期望粮食产量。

(3)生态环境效益目标。以各水平年各子区重要污染物COD排放量之和最小作为生态环境效益目标。计算公式为:

$$\max f_3(X) = \min \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K 0.01 d_j p_j x_{ij}^k \right). \quad (3)$$

式中: d_j 为用水户 j 排放废水中重要污染物(COD)的质量浓度, mg/L; p_j 为用水户 j 的污水排放系数。

1.2 约束条件

约束条件包括供水能力约束、需水量约束、污染物排放的质量浓度及排放总量约束、非负约束等, 具体表示为:

(1) 供水能力约束。研究区的供水总量应小于最大可供水量, 即:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ij}^k \leq S_{\max}. \quad (4)$$

式中: $S_{\max}$ 表示研究区最大可供水量。

(2) 需水量约束。 i 水源向 k 子区 j 用水户的供水量应大于 j 用水户的最小需水量, 即:

$$x_{ij}^k \geq N_{j\min}. \quad (5)$$

式中: $N_{j\min}$ 表示 j 用水户的最小需水量。

(3) 污染物排放的质量浓度及排放总量约束。用水户 j 排放废水中重要污染物(COD)的质量浓度应小于标准规定的质量浓度, 且研究区的污水排放总量应小于最大允许排污量。即:

$$d_j \leq d_j^*. \quad (6)$$

式中: d_j^* 表示标准规定排放的 COD 质量浓度。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K 0.01 d_j p_j x_{ij}^k \geq Z_{\max}. \quad (7)$$

式中: $Z_{\max}$ 表示最大允许排污量。

(4) 非负约束。水源向用户的供水量应该是非负的, 即:

$$x_{ij}^k \geq 0. \quad (8)$$

1.3 模拟退火遗传算法

1.3.1 模拟退火算法 模拟退火算法是由 Metropolis 等于 1953 年模拟固体退火原理提出的一种智能优化算法^[18], 其求解过程如下:

Step1: 初始化退火温度 T_0 , 随机产生初始解 X_0 ;

Step2: 在某温度 T_z 时, 执行以下操作: ①在解 X 的某邻域中产生新解 X' ; ②计算解 X 的评价函数 $f(X)$ 和新解 X' 的评价函数 $f(X')$ 的差, 即 $\Delta f = f(X) - f(X')$; ③按照概率 $\min(1, \exp(-\Delta f/T_z)) > \text{random}[0, 1]$ 接受新解, 否则重新执行 Step1 ~ Step2。其中 $\text{random}[0, 1]$ 表示 $[0, 1]$ 之间的随机数。若温度 T_z 达到平衡态, 则执行 Step3, 反之重新执行 Step2;

Step3: 选择一定方式降温。如 $T_{z+1} = LT_z$, 其中 $L \in [0, 1]$;

Step4: 若满足收敛条件, 退火过程结束, 反之, 重新进行 Step2。

由以上求解过程分析可知, 模拟退火算法是一种双向随机搜索方法, 允许以一定的概率 $\exp(-\Delta f/T_z)$ 接受劣质解, 从而跳出局部最优解, 因此具有良好的局部搜索能力。

1.3.2 遗传算法 遗传算法是由 Holland 等于 1975 年模拟生物进化规律提出的一种高度并行、随机、自适应的搜索方法。与传统优化算法不同, 遗传算法直接对结构对象进行操作并自适应地调整搜索方向, 不需要明确的规则。遗传算法的算法流程如图 1 所示。

1.3.3 模拟退火遗传算法 遗传算法虽然运算简单, 但运行效率较低, 在微小空间内的搜索不具备精确定位和微调能力, 且在计算过程中由于优良个体急剧增加, 容易出现尚未成熟就提前收敛的早熟现象。根据以上分析, 将模拟退火算法局部搜索能力强的优点和遗传算法全局搜索能力强的优点相结合, 可以相互取长补短, 开发出性能良好的新的模拟退火遗传算法, 以提高算法的精度和寻优速度。模拟退火遗传算法的求解过程如下:

Step1: 初始化退火温度 T_0 , 将编码的染色体记为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, n 为编码串长度即决策变量个数。进化代数 m 对应的温度更新函数记为 T_m , 有:

$$T_m = T_0 / m^\theta. \quad (9)$$

式中: θ 为退火参数, 且 $\theta \geq 1$ 。

Step2: 将生成的随机变量记为 $z_i (i=1, 2, \dots, n)$, 有:

$$z_i = \left[\frac{r_1}{|r_1|} \right] T_m \left(\frac{1}{|r_1|^\theta} - 1 \right). \quad (10)$$

式中: r_1 为 $(0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

Step3: ① 将新的生成解记为 y_i , 有

$$y_i = x_i + z_i. \quad (11)$$

式中: x_i 为编码的染色体, z_i 为生成的随机变量。

② 将新生成解 y_i 的标准适应函数记为 $f_n(y_i)$, 对于最大化问题, 有:

$$f_n(y_i) = f_{\max} - f(y_i); \quad (12)$$

对于最小化问题, 有

$$f_n(y_i) = f(y_i) - f_{\min}. \quad (13)$$

式中: $f(y_i)$ 表示新生成解记为 y_i 的原始适应函数, 一般用目标函数表示; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别表示 $f(y_i)$ 的上界和下界。

③ 将新的生成解 y_i 被接受的概率记为 p_a , 则有:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left(\frac{f(x_i) - f(y_i)}{\mu T_m} \right) \right\}。 \quad (14)$$

式中: $f(x_i)$ 为编码染色体 x_i 的原始适应函数,一般用目标函数表示; μ 为对目标函数进行适当比例变换的常数。

Step4:记 r_2 为 $(0,1]$ 上均匀分布的随机数,若 $r_2 \leq p_a$,则表示新生成解 y_i 符合要求,将 y_i 作为新的编码染色体,重新进行 Step2~Step3,直至新生成解满足收敛条件。

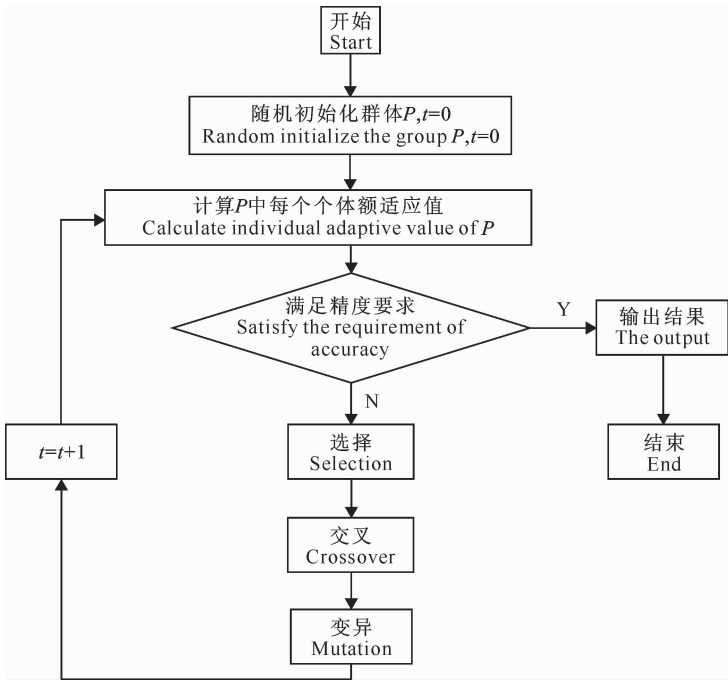


图 1 遗传算法的计算流程

Fig. 1 Flowchart of genetic algorithm

2 实例分析

2.1 研究区概况

以咸阳市为例进行水资源优化配置。咸阳市位于关中平原腹地,全市总面积 10 119 km²,总人口 538 万人(2012 年)。咸阳属黄河流域渭河水系,区内有渭河及其一级支流泾河两大水系。咸阳市属暖温带大陆性季风气候,全市年均降水量 500~600 mm,但年内分配不均,且多集中在夏季。咸阳市属于严重缺水城市,人均水资源占有量仅为 264.6 m³,相当于全国平均水平的 12.6%,世界平均水平的 3%。

咸阳市多年平均水资源总量 7.43 亿 m³,其中地表水资源量 4.29 亿 m³,地下水资源量 6.46 亿 m³,重复计算量 3.32 亿 m³。按照行政区划,将咸阳市分为咸阳市区、兴平市、武功县、乾县、礼泉县、泾阳县、三原县、永寿县、彬县、长武县、旬邑县、淳化县 12 个子区,即 $k=1,2,3,\cdots,12$;供水水源主要有地表水、地下水、外调水、中水,即 $i=1,2,3,4$;用水户主要有工业用水、农业用水、生态用水、居民生活用

水,即 $j=1,2,3,4$ 。咸阳市 2020 和 2030 年在 50%,75%,95%保证率下的需水量预测结果(引自《咸阳市十一五水资源综合规划》)见表 1。

2.2 参数设置

2.2.1 模型参数设置 咸阳市水资源配置按照生活用水、生态用水、工业用水和农业用水的先后顺序进行,参数设置参照文献[13]并结合研究区现状,其中生活、生态、工业、农业用水的公平系数 β_j^k 依次为 0.4,0.3,0.2,0.1;地表水、地下水、外调水、中水的供水次序系数 α_i 依次为 0.35,0.25,0.25,0.1;生活、生态、工业、农业的单位供水效益系数 b_{ij}^k 依次为 550,500,600,3 元/m³;城市居民、乡镇居民、农村居民生活用水及生态环境用水、工业用水、农业灌溉用水的用水费用系数 c_{ij}^k 依次为 2.43,1.4,0.8,1.8,3.18 和 0.3 元/m³;根据《城市排水工程规划规范(GB 50318—2000)》选定城市污水排放系数为 0.75。在信息论中,信息是系统有序程度的一个度量,熵是系统无序程度的一个度量,如果某指标的信息熵越小,则该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用理当越大,权重就应该越高。熵权法可

以有效避免人为因素对权重计算的干扰,因此本研究选用熵权法计算目标函数的权重,参考文献[19]的权重计算公式,计算得社会、经济、生态环境的目标函数权重依次为 0.3,0.4,0.3。

表 1 咸阳市不同规划水平年需水量预测

Table 1 Water demand forecasting results in Xianyang for different years														万 m ³
水平年 Level year	用水类型 Water type	保证率/% Guarantee	咸阳市区 Urban area	兴平 Xingping	武功 Wugong	乾县 Qianxian	礼泉 Liquan	泾阳 Jinyang	三原 Sanyuan	永寿 Yongshou	彬县 Binxian	长武 Changwu	旬邑 Xunyi	淳化 Chunhua
2020	生活需水 Domestic water		5 134	1 679	1 232	1 527	1 274	1 414	1 208	564	946	444	711	522
	工业需水 Industrial water		19 699	3 722	1 467	1 459	1 097	1 899	2 037	955	2 014	1 085	979	412
	农业需水 Agricultural water	50	9 400	12 370	8 260	13 819	9 586	13 876	8 852	1 757	1 170	961	1 630	1 567
		75	11 769	15 281	10 463	17 274	11 983	16 960	11 064	2 259	1 504	1 236	2 096	2 015
		95	14 137	18 191	12 666	20 728	14 379	20 044	13 277	2 887	1 922	1 579	2 678	2 575
	生态需水 Ecological water		997	229	137	173	122	132	143	42	64	31	54	54
	合计 Total	50	35 200	18 000	11 096	16 708	12 079	17 321	12 240	3 318	4 194	2 521	3 374	2 555
		75	37 569	20 911	13 299	20 163	14 476	20 405	14 452	3 820	4 528	2 796	3 840	3 003
		95	39 937	23 821	15 502	23 617	16 872	23 489	16 665	4 448	4 528	3 139	4 422	3 563
2030	生活需水 Domestic water		6 606	1 945	1 302	1 732	1 422	1 535	1 251	619	1 174	540	855	631
	工业需水 Industrial water		29 157	5 072	2 380	2 358	1 776	3 122	3 297	1 118	3 796	1 349	2 312	715
	农业需水 Agricultural water	50	9 058	11 941	7 987	13 353	9 258	13 876	8 549	1 704	1 136	933	1 583	1 522
		75	11 341	14 751	10 116	16 692	11 573	16 389	10 686	2 191	1 461	1 200	2 035	1 957
		95	13 624	17 561	12 246	20 030	13 888	19 369	12 823	2 800	1 867	1 533	2 600	2 500
	生态需水 Ecological water		1 329	259	155	196	184	201	161	61	100	48	80	62
	合计 Total	50	46 150	19 217	11 824	17 639	12 640	18 267	13 258	3 502	6 206	2 870	4 830	2 930
		75	48 344	22 027	13 953	20 978	14 955	21 247	15 395	3 989	6 531	3 137	5 282	3 365
		95	50 716	24 837	16 083	24 316	17 270	24 227	17 532	4 598	6 937	3 470	5 847	3 908

2.2.2 算法参数设置 在 MATLAB 算法工具箱中经过多次试算求解,最终设定种群规模 $N=100$,染色体编码长度 $n=30$,交叉概率 $P_c=0.75$,变异概率 $P_m=0.05$,模拟退火初始温度 $T_0=10\,000$,终止温度 $T=1$,退火参数 $\theta=1.2$,最大进化代数为 150。

2.3 配置结果及分析

通过所建立的水资源优化配置模型和模拟退火遗传算法对咸阳市水资源进行优化配置,配置结果见表 2。

表 2 咸阳市不同水平年及不同保证率下水资源优化配置结果

Table 2 Optimal allocation of water resources in Xianyang for different years and guaranteed rates															万 m ³		
水平年 Level year	保证率/% Guaranteed rate	生活用水 Domestic water			工业用水 Industrial water				农业用水 Agricultural water			生态用水 Ecological water					
		地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	中水 Wastewater reuse	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer			
2020	50	4 009.4	7 016.45	9 021.15	6 877.4	10 316.1	13 754.8	7 900	16 501.0	28 876.75	37 127.25	435.4	761.95	979.65			
	75	4 009.4	7 016.45	9 021.15	6 877.4	10 316.1	13 754.8	7 900	15 961.4	27 932.45	35 913.15	435.4	761.95	979.65			
	95	4 009.4	7 016.45	9 021.15	6 877.4	10 316.1	13 754.8	7 900	15 780.6	27 616.05	35 506.35	435.4	761.95	979.65			
2030	50	4 300.0	7 525.00	9 675.00	10 189.0	15 283.5	20 378.0	12 100	16 501.0	28 876.75	37 127.25	567.0	992.25	1 275.75			
	75	4 300.0	7 525.00	9 675.00	10 189.0	15 283.5	20 378.0	12 100	16 454.8	28 795.90	37 023.30	567.0	992.25	1 275.75			
	95	4 300.0	7 525.00	9 675.00	10 189.0	15 283.5	20 378.0	12 100	17 225.6	30 144.80	38 757.60	567.0	992.25	1 275.75			

表 2 结果表明,到 2020 年和 2030 年,除了农业用水稍有缺额外,其他用水户的用水要求均可以得到满足,且在不同保证率情况下,农业缺水率均未超

过 5%,可通过使用高效节水措施、调整种植结构等方法,促使农业用水达到供需平衡。通过表 3 可以看出,在优化配置情况下,2020 和 2030 年的供水量

均有所下降;其中 2020 年在 50%保证率情况下共节水 322.09 万 m³,2030 年在 50%保证率情况下共节水 432.46 万 m³,节水效果良好,满足了西北干旱地区保护水资源的要求。通过表 4 可以看出,咸阳

市 2020 和 2030 年的水资源经济效益、社会效益、生态环境效益均比较突出。通过以上分析可以看出,模拟退火遗传算法具有较好的寻优结果,丰富了智能优化算法在水资源优化配置领域的应用。

表 3 咸阳市不同水平年及不同保证率下供水量对比结果

		原始供水量 Original water supply				优化结果 Optimization result				差值 Difference			
水平年 Level year	保证率/% Guaranteed rate	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	中水 Wastewater reuse	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	中水 Wastewater reuse	地表水 Surface water	地下水 Ground water	外调水 Water transfer	中水 Wastewater reuse
2020	50	69 125.8	53 538	23 483.69	7 944.23	69 020	53 433	23 435	7 900	105.84	105.13	48.69	44.23
	75	64 659	53 527	23 480.91	7 944.23	64 562	53 433	23 435	7 900	97.01	94.08	45.91	44.23
	95	55 402.4	60 438	23 471.54	7 944.23	55 318	60 350	23 435	7 900	84.35	87.67	36.54	44.23
2030	50	88 959.3	46 674	46 404.38	12 162.43	88 825	46 533	46 310	12 100	134.32	141.33	94.38	62.43
	75	83 566.2	46 668	47 395.21	12 162.43	83 436	46 533	47 310	12 100	130.17	135.15	85.21	62.43
	95	79 947.4	54 074	47 385.22	12 162.43	79 823	53 950	47 310	12 100	124.36	124.01	75.22	62.43

表 4 咸阳市水资源优化配置的效益值

水平年 Level year	社会效益/kg Social benefits	经济效益/万元 Economic benefits	生态环境效益/(t·年 ⁻¹) Ecological environmental benefits
2020	8 254.32	283 862.54	—1 841.54
2030	6 168.77	346 215.86	—2 155.69

3 结 论

水资源优化配置是人类社会生存和发展的需要。随着水资源配置从单一目标向多目标发展,水资源配置问题越来越受到其他非技术性因素的影响,成为一个多目标、非线性的复杂巨系统。本研究建立了以经济、社会、生态环境综合效益为最优的水资源优化配置模型,运用模拟退火遗传算法对模型进行求解,并充分考虑了水源的供水次序和用水户的用水公平,对解决水资源优化配置问题提供了新的思路。通过实例分析可知,本研究提出的模拟退火遗传算法具有良好的收敛、寻优能力,完全克服了模拟退火算法和遗传算法相应的缺点,而且计算过程比较简单,结果合理。但是模拟退火遗传算法本身仍有缺点,比如各目标在适应函数中的不同影响程度如何体现,如何得出更加合理的搜索步长等,这些问题还需要进一步研究。

[参考文献]

[1] 王 浩,王建华. 中国水资源与可持续发展 [J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):352-331.
Wang H,Wang J H. Sustainable utilization of China's water resources [J]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,27(3):352-331. (in Chinese)
[2] 李雪萍. 国内外水资源配置研究概述 [J]. 海河水利,2002 (5): 13-15.

Li X P. Summary of water resources allocation research at home and abroad [J]. Haihe Water Resources,2002(5):13-15. (in Chinese)
[3] 王 浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置研究历程与发展方向 [J]. 水科学进展,2004,15(1):123-128.
Wang H,Wang J H,Qin D Y. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. Advances in Water Science,2004,15(1):123-128. (in Chinese)
[4] 赵 勇,裴源生,王建华. 水资源合理配置研究进展 [J]. 水利水电科技进展,2009,29(3):78-84.
Zhao Y,Pei Y S,Wang J H. The progress of water resources rational allocation [J]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2009,29(3):78-84. (in Chinese)
[5] 解建仓,廖文华,荆小龙,等. 基于人工鱼群算法的泸瀾河流域水资源优化配置研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(6):221-226.
Xie J C,Liao W H,Jing X L,et al. Artificial fish swarm algorithm based water resources optimal allocation in China river basin [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2013,41(6):221-226. (in Chinese)
[6] 甘 泓,水资源合理配置理论与实践研究 [D]. 北京:水利水电科学研究院,2000.
Gan H. The theory and practice research of water resources reasonable allocation [D]. Beijing:China Institute of Water resources and Hydropower Research,2000. (in Chinese)
[7] 黄曼丽,张 健,丁大发,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究 [J]. 人民长江,2008,39(6):29-32.
Huang M L,Zhang J,Ding D F,et al. Regional water resources optimal allocation based on Genetic Algorithm [J]. Yangtze

River, 2008, 39(6): 29-32. (in Chinese)

[8] 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 N X, Li Y P, Xu C G. Optimal deployment of water resources based on Multi Objective Genetic Algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 308-313. (in Chinese)

[9] 张 玲,徐宗学,张志果. 基于粒子群算法的水资源优化配置 [J]. 水文, 2009, 29(3): 41-45.
Zhang L, Xu Z X, Zhang Z G. Rational allocation of water resources based on Particle Swarm Optimization [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 41-45. (in Chinese)

[10] 沙金霞,刘 彬,谢新民,等. 基于粒子群算法的水资源优化配置研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 33-35.
Sha J X, Liu B, Xie X M, et al. Study of water resource optimal allocation based on Particle Swarm Optimization [J]. Water Resource and Power, 2012, 30(9): 33-35. (in Chinese)

[11] 裴 浩,袁 刚,唐 勇,等. 基于粒子群算法的邯郸市水资源优化配置系统研究 [J]. 水科学与工程, 2011(3): 8-10.
Pei H, Yuan G, Tang Y, et al. Rational allocation of water resources system researching based on Particle Swarm Optimization in Handan city [J]. Water Science and Engineering Technology, 2011(3): 8-10. (in Chinese)

[12] 王战平,田军仓. 基于粒子群算法的区域水资源优化配置研究 [J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 7-10.
Wang Z P, Tian J C. Research on rational allocation of water resources based on Particle Swarm Optimization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(1): 7-10. (in Chinese)

[13] 侯景伟,孔云峰,孙九林. 基于多目标鱼群-蚁群算法的水资源优化配置 [J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2255-2261.
Hou J W, Kong Y F, Sun J L. Optimal allocation of water resources based on the Multi-Objective Fish-Ant Colony Algorithm [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2255-2261. (in Chinese)

[14] 凌和良,桂发亮,楼明珠. BP 神经网络算法在需水预测与评价中的应用 [J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(22): 42-47.
Ling H L, Gui F L, Lou M Z. Forecasting and analysis of water demand in Jiangxi province in the near future [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(22): 42-47. (in Chinese)

[15] 苏 伟,刘景双,李 方. BP 神经网络在水资源承载能力预测中的应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(11): 1-4.
Sui W, Liu J S, Li F. Application of BP neural network to prediction of carrying capacity of water resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(11): 1-4. (in Chinese)

[16] 李 宁. BP 神经网络在水文数据中的应用研究 [D]. 太原:山西财经大学, 2011.
Li N. Research on the application of BP-Neural Network in the hydrologic data [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2011. (in Chinese)

[17] 黄显峰,邵东国,顾文权. 基于多目标混沌优化算法的水资源配置研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(2): 183-188.
Huang X F, Shao D G, Gu W Q. Optimal water resources deployment based on multi-objective chaotic optimization algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 183-188. (in Chinese)

[18] 周 丽. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究 [D]. 郑州:郑州大学, 2002.
Zhou L. Study on the optimal application of regional water resources based on genetic algorithm [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2002. (in Chinese)

[19] 苑 华. 管理决策与应用熵学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
Wan H. Management decision and the application of entropy [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002. (in Chinese)