

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220858

基于 MOEA/D 算法的衡水市水资源多目标优化配置

朱思峰, 刘程泰

(天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津 300384)

摘要: 水资源供需之间的矛盾日趋激化, 优化配置、高效利用区域内有限水资源变得尤为重要。以衡水市水资源配置为例, 综合考虑衡水市水资源优化配置需求, 建立了以社会效益、经济效益和生态效益为目标函数的水资源多目标优化配置模型, 给出了基于 MOEA/D 算法的水资源优化配置方案, 并将所提方案与基于 NSGA-III 算法的方案进行了对比试验。结果表明, 所提方案优于文献方案, 可为衡水市水资源合理配置提供依据。

关键词: 水资源优化配置; 多目标优化算法; MOEA/D 算法; 衡水市

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0035-04

1 概况

河北省衡水市地处华北平原, 属于温暖半干旱型大陆季风气候区, 冷暖干湿差异较大, 降水量分配不均匀。根据衡水市第二次水资源调查评价成果, 衡水市人均水资源量仅为全国人均水平的 6.6%; 亩均水资源量远低于农灌需水量; 水资源系统主要由地表水、地下水 and 外调水构成, 其中衡水市的中水回用率非常低。衡水市用水矛盾突出, 缺水情况严重, 是河北省乃至全国严重缺水地区之一。为此, 本文通过分析衡水市水资源现状(图 1), 结合衡水市水资源多水源、多用户、多目标的特点, 设计衡水市水资源优化配置模型。采用 MOEA/D 算法^[1] 进行求解, 给出的水资源配置方案可为衡水市水资源未来发展规划等提供依据。

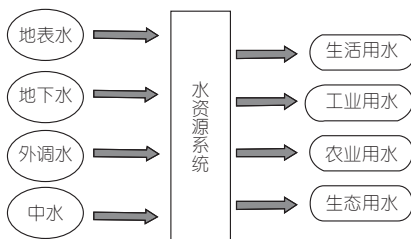


图 1 衡水市水资源供给系统

Fig. 1 Water resource supply system of Hengshui City

2 水资源优化模型

2.1 模型参数确定

(1) 需水量。结合衡水市水资源资料, 采用定额法预测 2025 年衡水市各子区各用水部门的需水量, 见表 1。

表 1 衡水市各部门需水量预测

Tab. 1 Water demand forecast of various departments

部门	in Hengshui City					总计
	桃城	枣强	武邑	冀州	深州	
生活部门	3 938.54	1 189.57	849.36	1 047.33	1 503.75	8 528.55
工业部门	8 447.86	2 672.36	1 450.25	3 160.45	2 094.02	17 824.94
农业部门	8 396.59	11 969.56	10 659.68	14 129.91	24 345.97	69 501.71
生态部门	1 468.82	591.25	429.96	1 273.48	569.18	4 332.69
总计	22 251.81	16 422.74	13 389.25	19 611.17	28 512.92	100 187.89

(2) 供水量。根据衡水市水资源现状及发展前景, 给出规划水平年 75% 保证率下的可供水量, 见表 2。

表 2 衡水市可供水量预测

Tab. 2 Hengshui City water supply forecast 10⁴t

类型	桃城	枣强	武邑	冀州	深州	总计
地表水	1 949.97	171.29	115.19	1 731.51	9 188.65	13 156.61
地下水	660.10	5 249.25	4 072.56	1 346.98	6 149.89	17 478.78
外调水	18 501.76	6 547.00	4 723.62	9 583.36	11 130.28	50 486.02
中水	4 000.00	0	0	3 049.00	650.00	7 699.00
总计	25 111.83	11 967.54	8 911.37	15 710.85	27 118.82	88 820.41

(3) 供水效益系数、成本系数。衡水市生活、工业、农业、生态部门的供水效益系数分别为 530、220、5、530 元/t, 成本系数分别为 2.35、4.70、0.50、2.35 元/t。

(4) 污染物排放浓度、污染物排放系数。污染

收稿日期: 2022-04-27, 修回日期: 2022-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61972456)

作者简介: 朱思峰(1975-), 男, 博士(后)、教授、硕导, 研究方向为人工智能算法、水资源优化配置等, E-mail: zhusifeng@163.com

物排放系数、污染物排放浓度需综合考虑区域污水处理能力、污水处理设备及处理流程等多种因素。不考虑农业和生态用水产生的污染物含量,生活用水、工业用水的污水排放系数分别为 0.80、0.55,污水排放浓度分别为 300、250 mg/L。

(5)子区权重系数。子区权重系数表示子区的重要性程度,衡水市各子区桃城、枣强、武邑、冀州、深州的权重系数分别为 0.41、0.05、0.10、0.07、0.17。

2.2 决策向量

衡水市有 4 种水源, $i=1,2,3,4$ 分别表示地表水、地下水、外调水和中水。区域分为 5 个子区, $k=1,2,3,4,5$ 分别表示桃城、枣强、武邑、冀州和深州。用水部门有 4 种, $j=1,2,3,4$ 分别表示生活、工业、农业和生态部门。设衡水市中水水源 i 分配给 k 子区中 j 部门的水量为 x_{kj}^i , 本文的决策向量为 $\mathbf{X} = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{kj}^i, \dots, x_{54}^4\}$ 。

2.3 优化目标

(1)社会效益目标函数为 $f_1(\mathbf{X})$ 。缺水程度会影响社会经济发展,以综合缺水率最小为社会效益目标,则有:

$$f_1(\mathbf{X}) = \min \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^4 \left| (D_{kj} - \sum_{i=1}^4 x_{kj}^i) / D_{kj} \right| \quad (1)$$

式中, D_{kj} 为规划区域内 k 子区中 j 部门的需水量。

(2)经济效益目标函数 $f_2(\mathbf{X})$ 。以水源对各子区各部门产生的净经济效益最大为经济效益目标,则有:

$$f_2(\mathbf{X}) = \max \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^4 (b_{kj} - c_{kj}) \sum_{i=1}^4 x_{kj}^i \tau \omega_k \quad (2)$$

式中, b_{kj} 为 k 子区中 j 部门的经济效益系数,元/ m^3 ; c_{kj} 为 k 子区中 j 部门的经济成本系数,元/ m^3 ; $\tau \omega_k$ 为 k 子区的权重系数。

(3)生态效益目标函数 $f_3(\mathbf{X})$ 。以排放废水中的化学需氧量(COD)的含量最小表示,为:

$$f_3(\mathbf{X}) = \min \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^4 0.01 d_{kj} e_{kj} \sum_{i=1}^4 x_{kj}^i \quad (3)$$

式中, d_{kj} 为 k 子区 j 部门的污水排放系数; e_{kj} 为 k 子区中 j 部门单位立方米废水中 COD 的浓度, mg/L。

新构建的衡水市水资源多目标优化配置模型 $f(\mathbf{X})$ 为:

$$f(\mathbf{X}) = \text{Opt}\{f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), f_3(\mathbf{X})\} \quad (4)$$

2.4 约束条件

构建水资源优化模型的主要约束包括水源供水约束、部门需水约束、环保约束、变量非负约束。

(1)水源供水约束。水源 i 分配的供水量总

和小于或等于水源 i 的最大供水量 R^i , 为:

$$\sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^4 x_{kj}^i \leq R^i \quad (5)$$

(2)部门需水约束。水源 i 分配给各部门的水量要结合自身需水情况,既要满足最低需水量也不能超过额定需水量,为:

$$L_{kj} \leq \sum_{i=1}^4 x_{kj}^i \leq M_{kj} \quad (6)$$

式中, L_{kj} 为 k 子区 j 部门的最小需水量; M_{kj} 为 k 子区 j 部门的最大需水量。

(3)环境保护约束。用水部门排放废水中所含的重要污染物含量应在国家允许范围内,为:

$$d_{kj} \leq P_{kj} \quad (7)$$

式中, P_{kj} 为 k 子区 j 部门按照国家标准所允许排放重要污染物 COD 浓度的最大值, mg/L。

(4)决策变量非负约束。水源 i 分配给 j 部门的水量要满足非负约束才有实际意义,为:

$$x_{kj}^i \geq 0 \quad i=1,2,3; k=1,2,3,4,5; j=1,2,3,4 \quad (8)$$

3 基于 MOEA/D 算法的水资源优化

3.1 编码

求解问题时需将问题的候选解(决策向量)编码为染色体。通过调查衡水市水源和用水部门需水情况,采用十进制染色体编码方式编码,见图 2。染色体 $X = \{x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{kj}^i, \dots, x_{54}^4\}$ 表示各水源分配给各子区中的各用水部门的水量,其中 x_{kj}^i 为水源 i 分配给 k 子区中 j 部门的水量。每个基因在设计供水能力之间随机生成,若产生不满足约束条件的基因则重新生成直至满足约束条件。

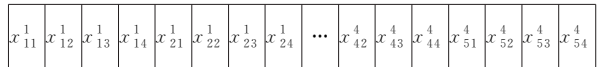


图 2 染色体结构

Fig. 2 Chromosome structure

3.2 适应度评价函数

对 3 个目标函数 $f_1(\mathbf{X})$ 、 $f_2(\mathbf{X})$ 、 $f_3(\mathbf{X})$ 均取最小值,通过仿真试验获得各目标的最优值,其中对目标 $f_2(\mathbf{X})$ 进行倒数处理,即取最小值 $\frac{1}{f_2(\mathbf{X})}$, 然后进行归一化得到各目标的适应度评价函数。其中,社会效益评价函数 $F_1(\mathbf{X})$ 为:

$$F_1(\mathbf{X}) = (f_1(\mathbf{X}) - f_{1\min}) / (f_{1\max} - f_{1\min}) \quad (9)$$

式中, $f_{1\max}$ 、 $f_{1\min}$ 分别为 $f_1(\mathbf{X})$ 的最大值和最小值。

经济效益评价函数 $F_2(\mathbf{X})$ 为:

$$F_2(\mathbf{X}) = \left(\frac{1}{f_2(\mathbf{X})} - \frac{1}{f_{2\min}} \right) / \left(\frac{1}{f_{2\max}} - \frac{1}{f_{2\min}} \right) \quad (10)$$

式中, $f_{2\max}$ 、 $f_{2\min}$ 分别为 $f_2(\mathbf{X})$ 的最大值和最小值。

生态效益评价函数 $F_3(\mathbf{X})$ 为:

$$F_3(\mathbf{X}) = (f_3(\mathbf{X}) - f_{3\min}) / (f_{3\max} - f_{3\min}) \quad (11)$$

式中, $f_{3\max}$ 、 $f_{3\min}$ 分别为 $f_3(\mathbf{X})$ 的最大值和最小值。

MOEA/D 算法是一种种群迭代进化算法, 需要适应度评价函数来推动染色体个体的选择与种群的更新。本文从三个子目标的维度来考核染色体的适应度, 设计的综合适应度评价函数 $F(\mathbf{X})$ 为:

$$F(\mathbf{X}) = \langle F_1(\mathbf{X}), F_2(\mathbf{X}), F_3(\mathbf{X}) \rangle \quad (12)$$

采用基于偏好权重的适应度评价函数, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题来得到一个具体的水资源配置方案 $G(\mathbf{X})$ 为:

$$G(\mathbf{X}) = \lambda_1 F_1(\mathbf{X}) + \lambda_2 F_2(\mathbf{X}) + \lambda_3 F_3(\mathbf{X}) \quad (13)$$

式中, λ_i 为 i 子目标选择偏好权重, 其值由水务局决策者给出, 具体见表 3。

表 3 选择偏好权重组合

Tab. 3 Select preference weight combination

选择偏好权重组合	λ_1	λ_2	λ_3
组合 1	0.6	0.2	0.2
组合 2	0.1	0.7	0.2
组合 3	0.1	0.3	0.6
组合 4	1/3	1/3	1/3

先将水资源配置问题作为多目标优化问题来求解, 采用综合适应度评价函数 $F(\mathbf{X})$ 来评价染色体, 利用 MOEA/D 算法求出问题的 pareto 占优解集(每一个解代表一种水资源配置方案), 分析 pareto 占优解集在解空间的分布情况(pareto 前沿面); 再采用基于偏好权重的适应度评价函数 $G(\mathbf{X})$ 来评价染色体, 求出问题的最优解, 即根据衡水市水务决策者的四种选择偏好, 给出四种具体的水资源配置方案。

3.3 MOEA/D 算法求解水资源优化配置问题的基本框架

- (1) 输入水资源优化模型的参数。
- (2) 输入算法参数。
- (3) 初始化操作: ① 设置外部非支配种群并计

算权重向量之间的欧氏距离。② 计算权重向量的邻居权重向量并产生初始种群。③ 初始化目标点。

(4) 更新操作: ① 随机从邻居权重向量中选择数个个体并产生新解。② 新解若优于父代则替换并更新参考点。③ 更新邻域解和外部非支配种群。

(5) 停止准则, 判断是否满足循环结束条件, 若满足则输出外部非支配种群; 否则返回(4)。

4 仿真试验及分析

使用 Matlab 软件编写程序, 为公平比较, 在试验中 MOEA/D 和 NSGA-III 算法均采用相同参数, 设置如下: 个体基因数目 $D=80$; 种群大小 $N=105$; 迭代次数 $G=100$; 邻居数量 $T=10$; 交叉概率 $P(\text{ProC})=1$; 变异概率 $P(\text{ProM})=1/D$ 。

4.1 算法的 pareto 前沿面及计算时间

MOEA/D 和 NSGA-III 算法得到的 pareto 前沿面见图 3。由图 3 可知, 与 NSGA-III 算法相比, MOEA/D 算法生成的 pareto 前沿面更接近于中心点, 表明 MOEA/D 算法应用于衡水市水资源优化配置模型的仿真试验结果在收敛性和多样性方面更加优秀。MOEA/D 算法的计算时间约为 0.956 s, NSGA-III 算法的计算时间约为 0.972 s。

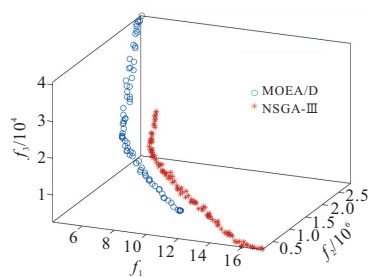


图 3 两种算法生成的 pareto 前沿面

Fig. 3 The pareto front of two algorithms

4.2 两种算法对目标函数的评价能力

社会效益和生态效益的关系见图 4(a)。由图 4(a)可知, 与 NSGA-III 算法相比, 在缺水率相同的情况下, MOEA/D 算法生成解的 COD 含量

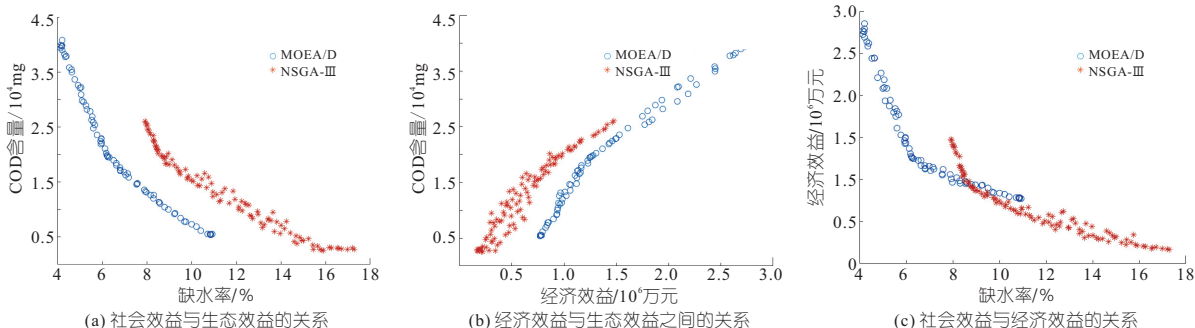


图 4 社会效益、生态效益、经济效益之间的关系

Fig. 4 Relationship among social benefit, ecological benefit and economic benefit

值更小,说明 MOEA/D 算法更有利于找到更好的解集,其收敛速度更快。

经济效益和生态效益的关系见图 4(b)。由图 4(b)知,在 COD 含量相同的情况下,MOEA/D 算法产生的经济效益比 NSGA-III 算法产生的经济效益高,说明 MOEA/D 算法对本文设计的经济和生态效益目标的优选能力更强。

社会效益和经济效益的关系见图 4(c)。由图 4(c)可知,与 NSGA-III 算法相比,在缺水率相同的情况下,除个别解集,MOEA/D 算法能找到更好的 pareto 最优解集。

4.3 水资源配置方案

决策者可以通过设置选择偏好权重组合来生成需要的配置方案。根据衡水市水务决策者的四种选择偏好,采用基于偏好权重的适应度评价函数 $G(X)$ 求出四种具体的水资源配置方案,见表 4。

表 4 水资源配置方案

Tab. 4 The allocation scheme of water resources $10^4 t$

方案	项目	桃城	枣强	武邑	冀州	深州	合计
$\lambda_1=0.6, \lambda_2=0.2, \lambda_3=0.2$	1 生活部门	3 938.54	825.98	543.75	789.33	1 381.13	7 478.73
	工业部门	8 447.86	1 927.08	898.37	2 458.25	1 861.03	15 592.59
	农业部门	8 396.59	8 152.35	6 811.27	10 754.38	22 278.92	56 393.51
	生态部门	1 468.82	423.89	273.75	957.76	507.00	3 631.22
	合计	22 251.81	11 329.30	8 527.14	14 959.72	26 028.08	83 096.05
$\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.7, \lambda_3=0.2$	2 生活部门	3 938.54	821.61	541.17	798.81	1 361.95	7 462.08
	工业部门	8 447.86	1 793.14	909.75	2 371.31	1 903.05	15 425.11
	农业部门	8 396.59	8 100.21	6 710.69	10 820.77	22 945.72	56 973.98
	生态部门	1 468.82	412.18	273.75	956.42	522.60	3 633.77
	合计	22 251.81	11 127.14	8 435.36	14 947.31	26 733.32	83 494.94
$\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.3, \lambda_3=0.6$	3 生活部门	3 655.17	792.29	529.31	780.82	1 310.48	7 068.07
	工业部门	2 267.82	1 813.32	883.06	2 368.80	1 818.74	9 151.74
	农业部门	8 387.36	7 911.32	6 769.80	10 647.07	21 282.33	54 997.88
	生态部门	1 468.82	397.18	265.88	941.48	499.09	3 572.45
	合计	15 779.17	10 914.11	84 48.05	14 738.17	24 910.64	74 790.14
$\lambda_1=1/3, \lambda_2=1/3, \lambda_3=1/3$	4 生活部门	3 938.54	832.91	526.64	771.78	1 312.07	7 381.94
	工业部门	8 447.86	1 776.43	894.12	2 372.96	1 894.72	15 386.09
	农业部门	8 396.59	8 638.13	6 770.13	11 111.98	22 218.15	57 134.98
	生态部门	1 468.82	423.08	279.47	990.40	519.42	3 681.19
	合计	22 251.81	11 670.55	8 470.36	15 247.12	25 944.36	83 584.20

Multi-objective Optimal Allocation of Water Resources in Hengshui City Based on MOEA/D Algorithm

ZHU Si-feng, LIU Cheng-tai

(School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The contradiction between the supply and demand of water resources becomes increasingly acute, so it is particularly important to optimize the allocation and efficiently utilize the limited water resources in the region. Water resources allocation in Hengshui city was taken as a case study. The demand of optimal allocation of Hengshui city water resources was considered comprehensively. The multi-objective optimal allocation of water resources model was established by taking the social benefit, economic benefit and ecological benefit as the objective function. The scheme of optimal allocation of water resources based on MOEA/D algorithm was given, and comparison experiments between the proposed scheme and the scheme based on NSGA-III algorithm was done. The experimental results show that proposed scheme is superior to the scheme reported by literature, which can provide relevant support for the rational allocation of water resources in Hengshui city.

Key words: optimal allocation of water resources; multi-objective optimal algorithm; MOEA/D algorithm; Hengshui City

水资源配置方案下的社会效益(缺水率)、经济效益、生态效益(COD 含量)见表 5。由表 5 可知,方案 1 为偏好社会效益方案,其缺水率最低(社会效益最高);方案 2 为偏好经济效益方案,其经济效益值最高;方案 3 为偏好生态效益方案,其 COD 含量最低(生态效益最高);方案 4 为均值方案,其社会效益、经济效益、生态效益均居中。衡水市水务局决策者可根据当前实际情况,选择其中的一种水资源配置方案。

表 5 四种水资源配置方案的效益比较

Tab. 5 Benefit comparison of four water resources allocation schemes

水资源配置方案	缺水率 /%	经济效益 /万元	COD 含量 /mg
1	4.139	2 770 023.626	39 855.854
2	4.214	2 854 860.938	40 786.864
3	5.169	2 084 211.052	29 547.018
4	4.213	2 794 141.195	39 783.240

5 结论

a. 本文构建了衡水市水资源多目标优化配置模型,利用 MOEA/D 算法求解并在仿真中与 NSGA-III 算法所得解集进行比较。试验结果表明,MOEA/D 算法对本文设计的三个目标函数的优选能力更好,利用该优化配置方案可为衡水市水资源的高效利用和合理分配提供参考。

b. 下一步工作将研究水质和水量分配联系,以及在更大区域内多约束条件下的水资源优化配置问题。

参考文献:

[1] ZHANG QINGFU, LI HUI. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2017,11(6):712-731.