

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.008

基于碳足迹的区域水资源优化配置模型

黄显峰¹, 石志康¹, 金国裕², 方国华¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 昆山市水务集团有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要:为解决城市发展和生态低碳之间的矛盾,将碳足迹引入水资源配置,将缺水率和供用水过程碳的净排量最小纳入总体目标函数中,设置水源供水量、碳排放量、引提水量、生态需水量、最小供水保证率和非负约束6个约束条件,构建基于碳足迹的区域水资源优化配置模型,采用基于理想点和遗传算法的多目标规划方法进行求解,并以徐州市丰县为例,进行水资源供需平衡分析测算,结果表明,2030年丰县预计可减少缺水率6.2%,可实现碳减排5.8%。

关键词:水资源配置;碳足迹;碳减排;缺水率;多目标规划;遗传算法;理想点法

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)04-0047-05

Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint// HUANG Xianfeng¹, SHI Zhikang¹, JIN Guoyu², FANG Guohua¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Kunshan Water Group Co., Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: In order to resolve the contradiction between urban development and ecological low-carbon, carbon footprint is introduced into water resource allocation. We include water shortage rate and net carbon emission during water supply and water use processes in the overall objective function. Six constraints of water supply, carbon emission, water extraction, ecological water demand, minimum water supply guarantee rate and non-negative constraints are set to construct optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint. The model is solved by the multi-objective programming method based on ideal point and genetic algorithm. Taking Feng County of Xuzhou as an example, the analysis and calculation of water supply and demand balance are carried out. The results show that Feng County is expected to reduce the water shortage rate by 6.2% and carbon emission by 5.8% in 2030.

Key words: water resource allocation; carbon footprint; carbon emission reduction; water shortage rate; multi-objective programming; genetic algorithm; ideal point method

水环境恶化和水资源短缺问题日益突出,促使人类重视改善水环境和调整用水方式。城市用水过程中往往伴随着大量的碳足迹^[1],增加了能源消耗和温室气体的排放。要解决城市发展和生态低碳之间的矛盾,需正确分析用水过程与碳排放的关系。低碳的概念在21世纪初从经济领域扩展到社会发展各方面,国内外学者也对碳足迹与水系统的联系进行了一些研究。Cucek等^[2]对两个或多个单独足迹的复合足迹进行评估,介绍了包括碳足迹计算器在内的多种足迹评估工具。Smyth等^[3]调查了北爱尔兰实施家庭用水效率计划的碳影响,发现减少水处理、泵送过程和生活用水供暖的碳排放能有效提

高用水效率。Galli等^[4]对生态足迹、碳足迹和水足迹3个指标之间的相似性和差异进行了研究,说明这些指标是如何相互重叠、相互作用和互补的。Fang等^[5]选取生态足迹、能源足迹、碳足迹和水足迹作为指标来定义足迹家族,用于评估与自然资源利用和废物排放有关的环境影响。严登华等^[6]基于流域自然-人工二元水循环过程提出面向生态的水资源合理配置方案。赵荣钦等^[7]对区域水-土-能-碳耦合系统进行模拟,分析了区域碳排放强度与水、土、能等子系统之间的关系。李金燕^[8]通过量化区域生态环境需水量,针对干旱区域的特点提出生态优先的水资源合理配置模型。李健^[9]以常州

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400909);中央高校基本科研业务费专项(2019B11014);湖南省水利科技重点项目(湘水科计[2016]194-21);湖南省水利科技项目([2015]245-13)

作者简介:黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与水库调度研究。Email: hxfluang2015@163.com

市为例,对城市水系统碳排放量核算进行研究。

我国提出在建设社会主义现代化强国的同时,实现与全球减排目标相适应的低碳经济发展路径^[10-11]。考虑碳排放因素的水资源配置是解决城市水资源问题的一种尝试。为了缓解区域水资源供需矛盾,实现低碳发展,需要对低碳目标下的水资源配置进行研究。本文以减少区域水资源供用水过程的碳排放和提高区域水资源利用效率为目标,构建基于碳足迹的区域水资源优化配置模型,旨在为城市低碳可持续发展提供依据。

1 水资源系统碳足迹测算

1.1 对象识别

确立区域碳排放、碳吸收与水资源配置的关系,是基于碳足迹的区域水资源配置模型构建的关键。综合考虑供用水过程中的碳足迹,以每个配置对象在各个过程中碳的净排放量为依据,识别碳源与碳汇^[12],其中碳源过程包括水源取水过程、水厂处理过程、供水管网输水过程和社会经济系统用水过程,碳汇过程包括生态系统用水过程和再生水回用过程。

1.2 碳足迹测算模型

由水源取水过程、水厂处理过程、供水管网输水过程、用水户用水过程和再生水回用过程构建碳足迹测算模型:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - C_5 \quad (1)$$

其中 $C_1 = c_1 q_1 Q_1$ $C_2 = c_1 q_2 Q_2$ $C_3 = c_1 q_3 Q_3$

$$C_4 = c_2 Q_4 - c_3 Q_5 \quad C_5 = c_4 Q_6$$

式中: c_1 为单位电能的碳排放因子; q_1 为单方取水的耗电量; Q_1 为取水量; q_2 为处理单方水的耗电量; Q_2 为处理水量; q_3 为输送单方水的耗电量; Q_3 为输水量; c_2 为社会经济系统单方水的碳排放系数; c_3 为生态环境系统单方水的碳吸收系数; Q_4 为社会经济系统用水量; Q_5 为生态环境系统用水量; c_4 为使用单方再生水而减少的碳排放量; Q_6 为再生水使用量。

2 模型构建

2.1 总体思路

传统水资源配置模型一般以社会公平和经济高效为目标^[13],而基于碳足迹的区域水资源优化配置模型通过合理压缩社会经济系统用水量,制定科学合理的水资源可持续利用发展规划和行业水资源分配方案与供用水方案,来达到低碳发展的目标。

2.2 目标函数及约束条件

a. 目标函数。以一定供水条件下配置单元缺水率和碳净排放量最小为目标,构建目标函数 f :

$$f = \{f_1(x), f_2(x)\} \quad (2)$$

$$\text{其中 } f_1(x) = \frac{\min \left[\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D (Q_{m,d} - \sum_{b=1}^B x_{m,db}) \right]}{\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D Q_{m,d}}$$

$$f_2(x) = \min \left(\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B C_{m,d} x_{m,db} \right)$$

式中: $f_1(x)$ 为单元缺水率函数, $f_2(x)$ 为单元碳净排放量函数; $x_{m,db}$ 为计算单元 m 水源 b 供给用水户 d 的水量; $Q_{m,d}$ 为规划水平年计算单元 m 用水户 d 的需水量; $C_{m,d}$ 为计算单元 m 用水户 d 使用单方水的碳排(碳吸)系数; M 、 D 、 B 分别为计算单元数、用水户数、水源数。

b. 约束条件。基于碳足迹的区域水资源优化配置约束主要考虑水源供水约束、碳排放约束、引提水量约束、生态需水量约束、最小供水保证率约束和非负约束,表达式为

$$\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B x_{m,db} \leq W_m \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M C_{Rm} \leq C_R^* \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B x_{m,db} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^E d_{m,e} \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B x_{m,b} \geq \sum_{m=1}^M Q_{mmin} \quad (6)$$

$$\frac{1}{Q_m} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B x_{m,db} \right) \geq \eta_d \quad (7)$$

$$x_{m,db} \geq 0 \quad (8)$$

式中: W_m 为计算单元 m 的水源可供水总量; C_{Rm} 为计算单元 m 的碳净排放量; C_R^* 为碳净排放量的目标值; $d_{m,e}$ 为计算单元 m 中引提水工程 e 的设计规模; Q_{mmin} 为计算单元 m 的最小生态需水量; η_d 为用水户 d 的最小用水保证率; E 为引提水工程数。

2.3 模型求解

选取缺水率最小和供用水过程碳的净排量最小为优化配置目标,运用理想点法和遗传算法^[14-16]求解。先了解该区域的实际情况,然后将实例数据代入算法中进行计算,得到配置优化结果,并进行评价分析^[17-18]。具体步骤为:①计算水源的数量以及水源的可供水量,供水工程的数量以及供水规模,通过节水措施,合理压缩社会经济系统用水量,预测用水户的需水量;②以水源对用水户的供水量作为模型决策变量,计算各用水单元的用水量和碳排放量,对每个单目标应用遗传算法求解最优值 f_i^* ;③以各目标最优值 f_i^* 作为各目标函数的理想点,构建新的目

标函数 $\min F(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [f_i(x) - f_i^*]^2}$;④再对 $F(x)$ 应用遗传算法求得一个非劣解,据此得出各目

标函数目标值。

3 实例分析

3.1 研究区概况

丰县位于江苏省西北部,属于江苏省徐州市,处于苏豫鲁皖4省交界处。丰县易涝易旱,全县年均降水量少且年内年际时空分布不均,属典型的资源型缺水地区,也兼有工程型缺水 and 水质型缺水问题,全县用水无法得到保证。2018年,徐州市政府制定《徐州市“十三五”控制温室气体排放实施方案》,要求在“十三五”期间丰县单位GDP碳排放强度下降24.72%。因此,对丰县规划年的水资源进行低碳目标的优化配置势在必行。

《丰县水资源规划》中根据区域地形地貌、耕地情况、供水水源等情况的类似性和差异性,按流域将丰县划分为复新河分区、苗城河分区、大沙河分区及郑集南支河分区共4片。到2030年,规划丰县自来水厂规模扩建至30万m³/d,工业地表水厂规模扩建至25万m³/d,复兴河分区丰县再生水厂总规模扩建至6万m³/d。翻水线两条:南线范楼闸规划新增翻水能力至35m³/s,水源来自微山湖;北线李楼站翻水能力提高到35m³/s,水源来自邵阳湖。丰县未来水平年供水系统配置网络见图1。

3.2 决策变量设定

根据丰县供水现状和《丰县水资源规划》,丰县2030年生活用水全部来自微山湖;农业用水大部分来自邵阳湖以及微山湖,主要是依靠南北两条调水线路从外地调水;工业用水主要来源于本地水以及微山湖引水;第三产业用水主要来源于本地水;生态

用水主要是依靠本地水及再生水。

3.3 模型建立

丰县可划分为4个计算单元,每个单元分为生活、农业、工业、第三产业和生态5个用水户。由于取水、处理和供水过程中损失的水量占比很小,可忽略不计,且取水、水处理和供水过程均由水厂负责,故供应单方水的耗电量可由水厂统一折算,则可确立各目标函数:

$$f_1(x) = \min \left[\sum_{m=1}^4 \sum_{d=1}^5 (Q_{m,d} - \sum_{b=1}^4 x_{m,db}) \right] / \sum_{m=1}^4 \sum_{d=1}^5 Q_{m,d} \quad (9)$$

$$f_2(x) = \min [g_1(x) - g_2(x) + g_3(x) - g_4(x)] \quad (10)$$

式中: $g_1(x)$ 为水厂供水过程产生的碳排放量; $g_2(x)$ 为再生水回用而减少的碳排放量; $g_3(x)$ 为社会经济系统用水户的碳排放量; $g_4(x)$ 为生态系统用水户的碳吸收量。

根据国家生态环境部应对气候变化司《2017年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》,华东地区单位电能碳排因子 c_1 为0.8046t/(MW·h);根据丰县自来水厂年供水量和年耗电量,计算得供应单方水的耗电量 q_d 取值为0.24(kW·h)/m³;根据LCWRA模型^[18],对于丰县地区,社会经济系统单方水碳排放系数 c_2 和生态环境系统单方水碳吸收系数 c_3 的均值取为7.7kg/m³、2.2kg/m³;使用单方再生水减少的碳排放量 c_4 由 q_d 和 c_1 换算得0.1931kg/m³。

3.4 模型求解

徐州市丰县水资源常规配置情况下,根据经济、

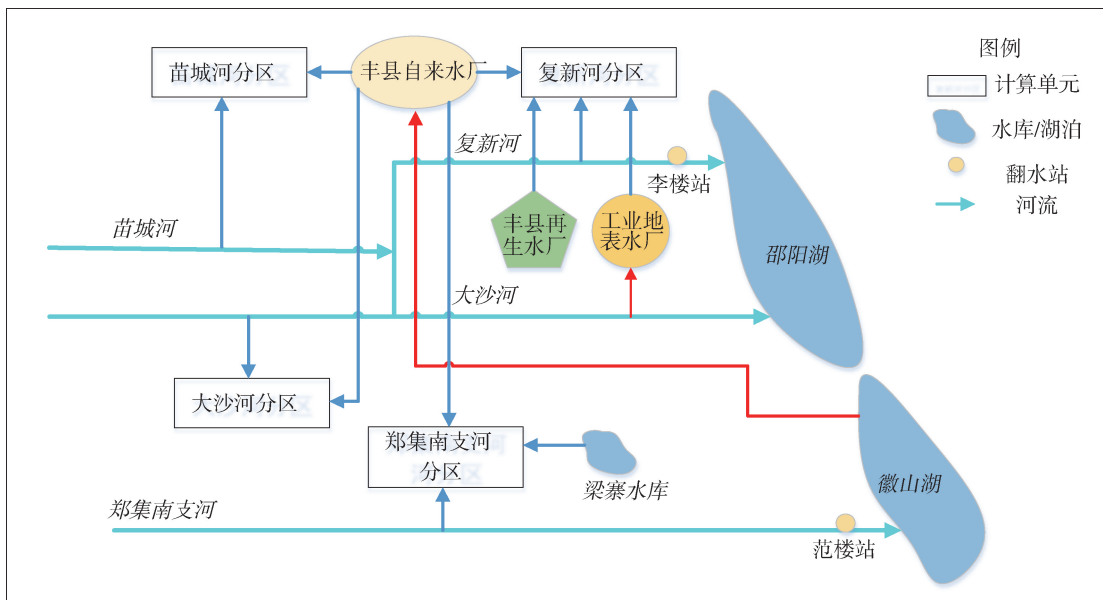


图1 丰县未来水平年供水系统配置网络示意图

Fig. 1 Water supply system configuration network diagram of Feng County in the future level year

社会及人口发展情况对 2030 年需水情况进行预测。生活需水分为城镇生活需水和农村生活需水,均采用定额法进行预测;生产需水量分为农业需水、工业需水和第三产业需水,其中农业需水根据农林牧渔畜牧业发展规划中的预测数量,采用定额法进行预测;工业需水考虑到收集实际资料的难度,采用万元工业增加值法对规划年工业需水量进行预测,第三产业需水采用万元增加值用水量法进行预测;生态需水包括河道内生态需水、湿地生态需水和城镇绿地需水三部分,河道内生态需水采用 Q_{90} 法预测,即 90% 频率下最小月平均净流量,湿地生态需水可借鉴相关研究成果预测,城镇绿地需水采用定额法预测。考虑丰县供水现状,结合《丰县水资源规划》中的规划工程进行供水量补充计算。丰县 2030 年常规水资源配置供需平衡分析结果见表 1。

根据丰县未来水平年供水配置网络,计算得到丰县 2030 年 50% 保证率下各水源地可供水量,其中微山湖 14 206 万 m^3 ,邵阳湖 13 312 万 m^3 ,本地水 9 284 万 m^3 ,再生水 2 190 万 m^3 ,合计 38 992 万 m^3 。基于低碳目标合理预测需水量,通过邵阳湖和微山湖调水增容,再生水厂增加向苗城河分区、大沙河分区和郑集南支河分区供水,运用基于碳足迹的区域水资源优化配置模型,求得低碳目标下的水资源配置方案。常规水资源配置方案(方案 1)和低碳水资源配置(方案 2)对比分析见表 1。

与常规水资源配置方案相比,需水总量降低 871 万 m^3 ,其中生活和生产需水量分别降低 1 209 万 m^3 、2 747 万 m^3 ,生态需水量增加 3 085 万 m^3 。供水量增加 1 696 万 m^3 ,主要来自邵阳湖和微山湖的调水增容。缺水量减少 2 567 万 m^3 ,缺水率降低 6.2%。碳排放量和碳的净排放量分别减少了 0.93 万 t 和 1.58 万 t,预期可实现碳减排 5.8%。

从计算结果可以看出,缺水量集中在生态和生产需水,这是由于生态用水的碳汇效益低于生产用水的碳源效益,减少大量的生产用水用于生态系统,不利于缺水率的降低,低碳水资源配置方案通过合理预测需水量、增加供水量和优化供水方案对缺水率和碳减排进行了平衡。可见,基于碳足迹的区域

水资源优化配置模型对于缓解丰县水资源供需矛盾,提高用水效率,达成节能减排目标有着显著的帮助。

3.5 提高丰县水资源利用率、减少碳排放的建议

a. 调水增容。目前丰县已有南北两条调水线路,为进一步改善水源条件,建议实施两线增容工程建设。在国家南水北调东线工程实施的基础上,南线增容在范楼、梁寨两处增建闸站,保障丰县的工农用水;北线调水工程增容改建李楼站、袁庄闸站、王梨园闸站等骨干河道上的控制性工程,提高引提水能力;同时疏浚相应过水河道,更新改造骨干翻水站。

b. 区域供水工程建设。南水北调东线一期工程建成通水后,丰县调水能力提高,净供水量明显增加。建议以微山湖为水源,建设地面水厂,实施区域供水工程建设,并进行相关设施配套建设。

c. 应急备用水源工程与清水廊道工程建设。建议在大沙河备用水源地建设备用水口,实施水源地生态保护及修复工程,水质预警在线监测,建设大沙河、沙支河、丰徐河清水廊道工程,在经济开发区建设再生水处理厂,实施再生水回用工程,增铺雨污管网。

d. 加快发展非化石能源,优化利用化石能源。推进生物质能利用,积极实施城市生活垃圾的资源化利用,建设清洁高效的垃圾焚烧和填埋气发电工程。优化工业能源利用结构,鼓励工业企业以天然气替代煤炭、柴油、燃料油;优化交通能源利用结构,建立完善通气设施;优化居民能源利用结构,全面消除民用散煤。

e. 加快发展低碳农业,增加生态系统碳汇。结合丰县实际,合理选用间歇滴灌、深水灌溉等技术,保护湿地生态系统,建立和完善湿地保护管理体系,建设生态文明教育基地,完善修复湿地公园生态系统,增强湿地储碳能力。

4 结 语

碳足迹测算模型中对于社会经济用水与碳排放、生态环境用水与碳吸收之间的关系还需进一步研究,同时在水循环过程中碳排放的度量还需进一步细化和完善,从而更全面地反映水资源配置过程中碳足迹的变化。

表 1 丰县 2030 年水资源供需平衡分析结果($P = 50\%$)

Table 1 Analysis results of water resources supply and demand balance in Feng County in 2030 ($P = 50\%$)

水资源分区	供水量/万 m^3		生活需水/万 m^3		生产需水/万 m^3		生态需水/万 m^3		需水总量/万 m^3		缺水量/万 m^3		缺水率/%		碳净排放量/万 t	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
复新河	18 688	20 067	3 144	2 563	17 969	16 633	1 058	2 116	22 171	21 312	3 483	1 245	15.7	5.8		
苗城河	2 930	3 210	535	443	2 424	2 167	300	600	3 259	3 210	329	0	10.1			
大沙河	8 620	8 614	1 990	1 620	5 665	5 064	965	1 930	8 620	8 614	0	0			27.23	25.65
郑集南支河	7 058	7 101	935	769	5 361	4 808	762	1 524	7 058	7 101	0	0				
全县	37 296	38 992	6 604	5 395	31 419	28 672	3 085	6 170	41 108	40 237	3 812	1 245	9.3	3.1		

参考文献:

- [1] 汤燕燕,张雅君. 城市节水“碳足迹”的探讨[J]. 环境保护与循环经济,2010(10):73-75. (TANG Yanyan, ZHANG Yajun. Investigation on “carbon footprint” of urban water saving [J]. Environmental Protection and Circular Economy,2010(10):73-75. (in Chinese))
- [2] CUCEK L, KLEMES J J, KRAVANJA Z. A Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability[J]. Journal of Cleaner Production,2012,34(SI):9-20.
- [3] SMYTH B, CRILLY A, MCDOWELL K. Water efficiency as a means of reducing carbon emissions in Northern Ireland(NI) water[J]. Journal of Water Supply:Research and Technology-Aqua,2013,62(8):525-533.
- [4] GALLI A, WIEDMANN T, ERCINE, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. Ecological Indicators,2012,16(SI):100-112.
- [5] FANG K, HEIJUNGS R, DESNOO G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family [J]. Ecological Indicators, 2014, 36, 508-518.
- [6] 严登华,王浩,杨舒媛,等. 面向生态的水资源合理配置与湿地优先保护[J]. 水利学报,2008,39(10):1241-1247. (YAN Denghua, WANG Hao, YANG Shuyuan, et al. Ecology-oriented reasonable deployment of water resources and giving priority to protection of wetland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (10): 1241-1247. (in Chinese))
- [7] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报,2016,71(9):1613-1628. (ZHAO Rongqin, LI Zhiping, HAN Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9):1613-1628. (in Chinese))
- [8] 李金燕. 基于生态优先的宁夏中南部干旱区域水资源合理配置研究[D]. 银川:宁夏大学,2014.
- [9] 李健. 城市水系统碳排放量核算研究:以常州市为例 [D]. 南京:南京大学,2011.
- [10] 王文涛,滕飞,朱松丽,等. 中国应对全球气候治理的绿色发展战略新思考[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(7):1-6. (WANG Wentao, TENG Fei, ZHU Songli, et al. New reflections on green development strategy of China addressing on the global climate governance [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28 (7):1-6. (in Chinese))
- [11] 朱智洛,王倩,符磊. 中国污水处理中碳排放的影子价格研究 [J]. 水利经济, 2018, 36 (6): 8-13. (ZHU Zhiming, WANG Qian, FU Lei. Shadow price of carbon emissions from wastewater treatment in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 (6): 8-13. (in Chinese))
- [12] 尚海洋,宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护,2018,34(2):15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 15-21. (in Chinese))
- [13] 杨小全,曲炜. 工业园区污水治理综合管控措施——以某工业园区污水厂为例[J]. 水利经济,2018,36(6):53-56. (YANG Xiaoquan, QU Wei. Comprehensive control measures for sewage treatment in industrial park: case study of sewage plant of an industrial park [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 (6): 53-56. (in Chinese))
- [14] 刘丽,方金云,梁对. 基于多目标遗传算法和理想点法的 Top-k 服务组合研究[J]. 高技术通讯,2014,24(2):131-137. (LIU Li, FANG Jinyun, LIANG Dui. A Top-k service composition research based on MOGA and TOPSIS [J]. Chinese High Technology Letters, 2014, 24 (2): 131-137. (in Chinese))
- [15] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用 [J]. 水资源保护,2018,34(2):34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 34-41. (in Chinese))
- [16] 李敏慧,荆立,朱彦君,等. 基于改进型遗传算法的水质溯源问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):402-407. (LI Minhui, JING Li, ZHU Yanjun, et al. Research on the water source identification based on an improved genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (5): 402-407. (in Chinese))
- [17] 熊雪珍,何新玥,陈星,等. 基于改进 TOPSIS 法的水资源配置方案评价[J]. 水资源保护,2016,32(2):14-20. (XIONG Xuezheng, HE Xinyue, CHEN Xing, et al. Evaluation on water resources allocation schemes based on improved TOPSIS [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2): 14-20. (in Chinese))
- [18] 严登华,秦天玲,肖伟华,等. 基于低碳发展模式的水资源合理配置模型研究[J]. 水利学报,2012,43(5):586-593. (YAN Denghua, QIN Tianling, XIAO Weihua, et al. Study on the model of water resources rational deployment for the low-carbon development mode [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (5): 586-593. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-29 编辑:彭桃英)