

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0118

王兴菊,孙杰豪,赵然杭,等.基于可变模糊集理论的跨流域调水工程水资源优化调度[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):85-92,100. WANG X J, SUN J H, ZHAO R H, et al. Optimal water resources dispatching of inter-basin water diversion project based on variable fuzzy set theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6):85-92,100. (in Chinese)

基于可变模糊集理论的跨流域调水工程 水资源优化调度

王兴菊¹,孙杰豪¹,赵然杭¹,王好芳¹,马吉刚²,赵洪丽²,顾士升³,赵立斌²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 山东省调水工程运行维护中心, 济南 250100

3. 山东省防汛抗旱物资储备中心, 济南 250000)

摘要:为实现水资源的高效利用,对胶东调水工程进行水资源优化调度研究。基于受水区潍坊、青岛、烟台、威海等4市的实际配水量与社会经济指标分析,利用可变模糊集理论,建立地市外调水量可变模糊优选模型进行优化调配系数计算,优化调配4市外调水量,并对优化后的外调水量与区域社会经济发展进行耦合协调度计算。以调水效率最高为原则,以4市缺水总量最小建立目标函数,利用Lingo软件编程求解,分别对平水年、枯水年、特枯年进行水资源优化调度。把基于调配水量调度与规划指标调度的结果进行对比分析。结果表明:2种调度结果均满足各分水口的最小需水要求;外调水量的优化调配提高了胶东4市水资源与社会经济发展的耦合协调度,调配水量调度后,青岛市缺水率明显下降,其他地市缺水率降幅则较小。

关键词:可变模糊集理论;耦合协调度;跨流域调水工程;优化调度

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Optimal water resources dispatching of inter-basin water diversion project based on variable fuzzy set theory

WANG Xingju¹, SUN Jiehao¹, ZHAO Ranhang¹, WANG Haofang¹, MA Jigang², ZHAO Hongli², GU Shisheng³, ZHAO Libin²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Water diversion project operation and maintenance center of Shandong Province, Jinan 250100, China;

3. Flood control and drought relief material reserve center of Shandong Province, Jinan 250000, China)

Abstract: The optimization of water resources scheduling in the Jiaodong water transfer project is studied to achieve the efficient utilization of water resources. Based on the analysis of the actual water allocation and socio-economic indicators of Weifang, Qingdao, Yantai, and Weihai, the variable fuzzy set theory is used to establish a variable fuzzy optimization model of external water transfer volume to calculate the optimal allocation coefficient. The allocation of external water transfer volume is optimized from the four cities and the coupling coordination degree between the optimized external water transfer volume and regional socio-economic development is calculated. An objective function is established and the solution is programmed by Lingo software based on the principle of the highest water transfer efficiency and the minimum total water deficit in the four cities. The optimal water resources regulation is carried out in the median water year, low water

收稿日期:2020-02-03 修回日期:2020-04-08 网络出版时间:2020-04-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200417.1112.004.html>

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAB07B02);山东省水利科研与技术推广项目(SDSLKY201222;SDSLKY201815;SDSLKY201807)

作者简介:王兴菊(1967—),女,山东邹城人,教授,硕士生导师,主要从事湿地水文与生态环境管理研究。E-mail: xjw@sdu.edu.cn

通信作者:赵然杭(1968—),男,山东沂水人,教授,博士生导师,主要从事水资源开发利用与水生态环境管理研究。E-mail: ranhang-z@sdu.edu.cn

year, and the extremely low water year, respectively. The results of optimal water resources regulation and planning indicator regulation are compared and analyzed. The results show that: the two scheduling results meet the minimum water demand of each water-diversion; the optimal allocation of external water transfer volume increases the coupling coordination degree between water resources and socio-economic development in the four cities of Jiaodong, after the optimal water resources regulation, the water-deficient ratio is significantly decreased in Qingdao, while the water-deficient ratio in other cities decreases slightly.

Key words: variable fuzzy set theory; coupling coordination degree; inter-basin water transfer project; optimal dispatching

跨流域调水是缓解区域水资源供需矛盾的有效措施之一,而水资源的优化调度是调水工程高效运行的有效方法。山东省胶东调水工程是一项大型跨流域水资源调配工程。工程实行长江水、黄河水和当地水多水源联合调度^[1],缓解了胶东地区供水紧张的局面,但近年来潍坊、青岛、烟台、威海 4 市(以下简称胶东 4 市)持续干旱,呈现出持续时间长、影响程度深、供水缺口大等特点^[2],为提高调水工程的调水效率,降低受水区缺水率,亟需开展水资源的优化调度研究。

关于水资源优化调度研究,最早在 1962 年,由 Massa 等^[3]提出以开发治理效益最大为目标建立水库调度非线性规划模型。1973 年, Windsor^[4]对水库群的联合调度研究采用线性规划的方法,并利用单纯形法或混合整数规划法求解。1984 年, Ozden^[5]针对水库群的联合优化调度问题,建立了二元 DP 算法。1994 年,都金康等^[6]提出了利用线性规划法来求解并联水库群洪水调度模型。1999 年,王栋等^[7]建立了淮河流域混联水库群最大防洪安全保证的线性规划模型。1977 年, Rossment^[8]结合 Lagrange 乘子理论和 DP 理论,建立了机会约束的动态规划模型。1992 年, Becker^[9]用约束扰动法研究了水库群系统的多目标问题。2005 年, Jain 等^[10]从水量平衡的角度分析跨流域调水系统。2006 年, Matete 等^[11]构建了跨流域调水工程的分析框架,以评估莱索托高地治水工程对莱索托及南非的生态影响。2014 年, Read 等^[12]针对里海地区的水资源优化调配问题提出了基于经济学的权力指数分配法,综合最优性及稳定性得出不同分配方案。

针对胶东调水工程,杨静灵等^[13]按照《山东省水资源综合利用中长期规划》中的外调水量指标(以下简称规划指标)进行了规划调度研究,没有将外调水量与地区实际配水量进行对比分析,缺乏对胶东地区社会经济发展状况的分析,不利于水资源的高效利用。本文针对胶东 4 市外调水量的随机性和非同一性,运用可变模糊集理论^[14-15],通过变换参数的

组合,综合线性与非线性模型,优化调配胶东 4 市的外调水量,以此为基础,进行水量优化调度,从而有效提高水资源与社会经济发展的协调度,为胶东调水工程日常运行决策提供科学依据。

1 受水区及数据来源

1.1 受水区及工程概况

胶东调水工程是山东省“百”字型骨干水网重要组成部分,由引黄济青工程和胶东地区引黄调水工程组成,见图 1。



图 1 胶东调水工程及沿线受水地区分布

Fig. 1 Jiaodong water transfer project and distribution water receiving area along the route

引黄济青工程是山东省大型跨流域、调水工程,是国家“七五”期间重点工程。该工程从滨州市博兴县打渔张引黄闸引取黄河水,途经滨州、东营、潍坊、青岛 4 市,至青岛白沙水厂,全长 290 km。工程输水明渠 250 多 km,穿越大小河流 36 条,各类建筑物 450 余座,设 5 级提水泵站和 1 级临时提水泵站,大型调蓄水库和沉沙池各 1 座。

胶东地区引黄调水工程是山东省投资的远距离、跨流域大型水资源调配工程。工程利用引黄济青既有输水线路 172 km,新辟输水线路 310 km,途经滨州、东营、潍坊、青岛、烟台、威海 6 市。工程新建 160 km 明渠、150 km 管道(暗渠)、7 级提水泵站、5 座大型隧洞、6 座大型渡槽、19 座倒虹,以及桥、涵、闸等建筑物 467 座。

胶东调水工程实行长江水、黄河水和当地水多

水源联合调度,为胶东地区重要的水资源保障和配置工程。截至 2016 年,胶东调水工程已累计引水 79.10 亿 m^3 ,累计配水 67.70 亿 m^3 ,有效缓解了胶东地区用水紧张的局面,为胶东地区尤其是胶东 4 市社会经济发展提供了有力的水资源支撑。

1.2 供水网络

黄河水、长江水为调水工程的主要引水水源。根据日常调度需要,主要考虑胶东 4 市输水干线上 22 个分水口。22 个分水口分别向各自对应的县(市、区)进行供水,调水工程供水网络关系见图 2。

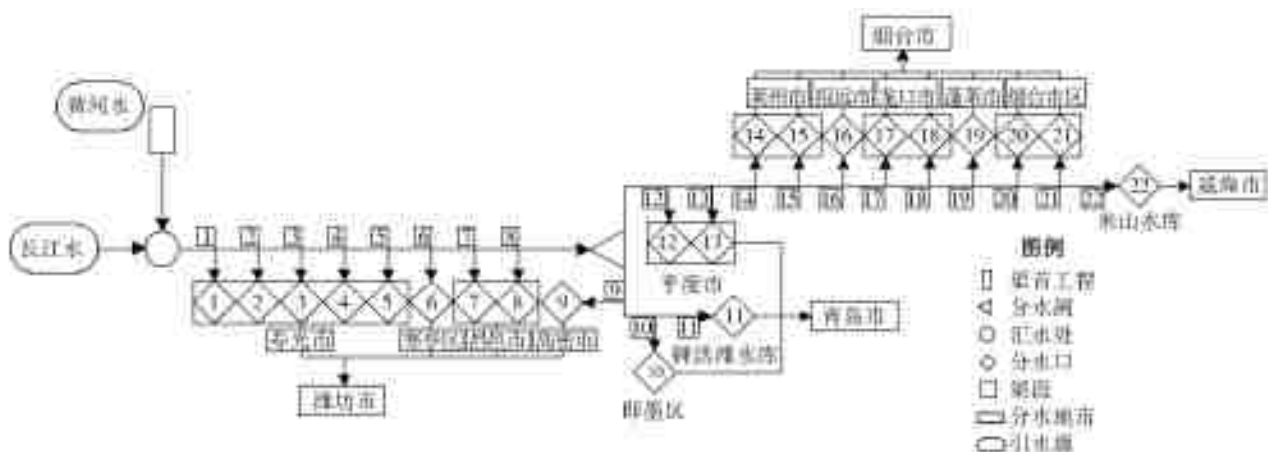


图 2 胶东调水工程供水网络关系

Fig. 2 Water supply network of Jiaodong water transfer project

1.3 数据来源

2015—2020 年规划指标、2020 年供需平衡分析等数据源于《山东省水资源综合利用中长期规划》^[16];胶东 4 市各行业用水量数据源于《山东省水资源公报》^[17];调水工程各渠段校核流量、调水工程各分水口设计流量等工程数据源于《山东省引黄济青工程技术经济指标资料汇编》^[18]及《胶东地区引黄调水工程建设管理文件选编》^[19]。

胶东 4 市规划指标。2015—2020 年胶东 4 市的外调水量指标分别为:潍坊 4.07 亿 m^3 ,青岛 3.63 亿 m^3 ,烟台 2.44 亿 m^3 ,威海 1.02 亿 m^3 。引黄指标:潍坊 3.07 亿 m^3 ,青岛 2.33 亿 m^3 ,烟台 1.37 亿 m^3 ,威海 0.52 亿 m^3 ,胶东 4 市总引黄指标 7.29 亿 m^3 。引江指标:潍坊 1.00 亿 m^3 ,青岛 1.30 亿 m^3 ,烟台 0.97 亿 m^3 ,威海 0.50 亿 m^3 ,胶东 4 市总引江指标 3.77 亿 m^3 。

2013—2018 年胶东 4 市实际配水量由山东省调水工程运行维护中心提供,其中 2013—2017 年数据源于文献^[20],各市配水量见表 1。

表 1 2013—2018 年胶东 4 市实际配水量

Tab. 1 The actual water distribution in four cities of Jiaodong from 2013 to 2018

胶东 4 市	年份					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
潍坊	0.060	0.390	1.770	0.625	2.880	1.380
青岛	2.130	2.300	2.780	2.480	5.330	3.340
烟台	0	0	0.330	0	0.870	0.240
威海	0	0	0.030	0.680	0.670	0.510

胶东 4 市各行业的用水量见表 2^[17]。

规划年 2020 年胶东 4 市水资源供需平衡结果见表 3。

表 2 胶东 4 市各行业用水量

Tab. 2 Water consumption in various industries in four cities of Jiaodong

用水行业	潍坊	青岛	烟台	威海
农田灌溉	5.92	1.93	3.60	1.57
林牧渔畜	0.73	0.33	1.82	0.73
工业用水	2.48	2.14	1.33	0.80
城镇公共	0.59	1.07	0.49	0.39
居民生活	1.96	3.16	1.48	0.64
生态环境	0.42	0.81	0.01	0.04

2 利用可变模糊集理论优化调配外调水量

胶东 4 市的社会发展用水具有不确定性以及模糊性,根据规划指标进行水资源的规划调度与各地市实际配水量存在差异,见表 1。为优化调配各地市的外调水量,运用工程模糊集理论^[21-22],通过变换隶属度函数的参数组合^[23-24],综合线性与非线性模型进行模拟,计算外调水量的调配系数,进而对胶东 4 市的外调水量进行优化调配。

由表 1 知:2013—2018 年潍坊实际配水量为 0.06 亿~2.88 亿 m^3 ,远小于规划指标;青岛实际配水量为 2.13 亿~5.33 亿 m^3 ,与规划指标相近,其中 2017 年的实际配水量超规划指标近 50%;烟台和威海分别为 0~0.87 亿 m^3 和 0~0.68 亿 m^3 ,远

远小于规划指标。为提高水资源的利用效率,需对外调水量进行优化调配。

表 3 规划年 2020 年胶东 4 市水资源供需平衡

Tab. 3 The balance between water resources demand and supply in the year of 2020 in four cities of Jiaodong

胶东 4 市	需水量/亿 m ³			当地水可供水量/亿 m ³			缺水量/亿 m ³			缺水率/%		
	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$
潍坊	21.6	22.2	22.2	15.2	13.5	12.8	6.4	8.7	9.4	29.6	39.2	42.3
青岛	17.0	17.2	17.2	10.8	9.6	9.0	6.2	7.6	8.2	36.5	44.2	47.7
烟台	12.9	13.1	13.1	9.5	8.2	7.7	3.4	4.9	5.4	26.4	37.4	41.2
威海	5.7	5.8	5.8	4.3	3.6	3.3	1.4	2.2	2.5	24.6	37.9	43.1
合计	57.2	58.3	58.3	39.8	34.9	32.8	17.4	23.4	25.5	30.4	40.1	43.7

2.1 外调水量优化调配系数

2.1.1 外调水量优化调配模型

基于可变模糊优选模型^[25-26],建立外调水量优化调配模型,步骤如下。

(1)设系统有 n 个地市需要确定外调水量分配系数,依据 m 个指标识别其分配系数相对大小,则目标特征值矩阵为

$$\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\cdots,m$ 为指标(目标); $j=1,2,\cdots,n$ 为方案(地市)。

根据待优选的特征值矩阵,进行规格化处理可得其相对优属度矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})$,规格化公式为

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_{i,\max}} \quad (\text{越大越优型指标}) \quad (2)$$

$$r_{ij}=\frac{x_{i,\min}}{x_{ij}} \quad (\text{越小越优型指标}) \quad (3)$$

相对优属度矩阵为

$$\mathbf{R}=(r_{ij})_{m \times n}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为方案 j 目标 i 的特征值相对隶属度。

(2)确定指标的权重向量 $\mathbf{W}=(\omega_i)$ 。分别计算胶东 4 市工业、城镇、生活及生态用水总和,以其占胶东 4 市用水总量的比例为权重 $\mathbf{W}$ 。

(3)根据相对优属度计算公式计算方案 j 的相对优属度

$$u_j=\left\{1+\left[\frac{\sum_{i=1}^m[\omega_i(1-r_{ij})]^p}{\sum_{i=1}^m(\omega_i r_{ij})^p}\right]^{\frac{1}{p}}\right\}^{-1} \quad (5)$$

式中: ω_i 为指标权重; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距

离, $p=2$ 为欧式距离; α 为模型优化准则参数, $\alpha=1$ 为最小一乘法, $\alpha=2$ 为最小二乘法。当 $\alpha=1$ 、 $p=1$ 时,式(5)变为模糊综合评判模型;当 $\alpha=1$ 、 $p=2$ 时,式(5)变为 TOPSIS 理想点模型;当 $\alpha=2$ 、 $p=1$ 时,式(5)变为描述神经网络系统中神经元的激励函数模型;当 $\alpha=2$ 、 $p=2$ 时,式(5)变为模糊优选模型。本文结合 4 种模型进行综合计算。

(4)根据式(5)计算各方案的相对优属度向量,其综合平均值即为方案的综合相对优属度向量 $\bar{u}$ 。

(5)根据 $\bar{u}$ 中各方案的相对优属度大小,对其进行归一化处理,即为外调水量分配系数 γ 。

2.1.2 外调水量优化调配

山东省用水量的统计分为农田灌溉、林牧渔畜、工业用水、城镇公共、居民生活及生态环境等行业^[17]。在枯水年、特枯水年情况下,需优先保证民生、生态、工业等用水。因此,选取表 2 中胶东 4 市的工业用水、城镇公共、居民生活及生态环境用水为指标,可得各地市的目标特征值矩阵 $\mathbf{X}$,根据式(2)可得到目标特征值的相对隶属度矩阵 $\mathbf{R}$ 。

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} 2.48 & 2.14 & 1.33 & 0.80 \\ 0.59 & 1.07 & 0.49 & 0.39 \\ 1.96 & 3.16 & 1.48 & 0.64 \\ 0.42 & 0.81 & 0.01 & 0.04 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.8629 & 0.5363 & 0.3226 \\ 0.5514 & 1.0000 & 0.4579 & 0.3645 \\ 0.6203 & 1.0000 & 0.4684 & 0.2025 \\ 0.5185 & 1.0000 & 0.0123 & 0.0494 \end{bmatrix}$$

分别计算胶东 4 市工业、城镇、生活及生态用水总和,以其占胶东 4 市用水总量的比例为权重 $\mathbf{W}$ 。

$$\mathbf{W}=(0.3790 \quad 0.1426 \quad 0.4065 \quad 0.0719)$$

根据式(5)可得到各地市在取不同参数下的相对优属度为

$$\text{当 } \alpha=1, p=1 \text{ 时, } \mathbf{u}=(0.7470 \quad 0.9480 \quad 0.4598$$

0.260 1)

当 $\alpha=1, p=2$ 时, $u=(0.730\ 9\ 0.913\ 1\ 0.490\ 0$

0.267 2)

当 $\alpha=2, p=1$ 时, $u=(0.558\ 1\ 0.898\ 8\ 0.211\ 5$

0.067 7)

当 $\alpha=2, p=2$ 时, $u=(0.880\ 6\ 0.991\ 0\ 0.480\ 1$

0.117 3)

其综合平均相对优属度为

$u=(0.729\ 2\ 0.937\ 7\ 0.410\ 4\ 0.178\ 1)$

归一化后,得到胶东4市外调水量优化调配系数

$\gamma=(0.323\ 2\ 0.415\ 8\ 0.182\ 0\ 0.079\ 0)$

胶东4市外调水量分配系数分别为:潍坊 $\gamma_1=0.323\ 2$,青岛 $\gamma_2=0.415\ 8$,烟台 $\gamma_3=0.182\ 0$,威海 $\gamma_4=0.079\ 0$ 。

2.2 外调水量优化调配结果与分析

2.2.1 外调水量优化调配结果

利用外调水量优化调配系数对胶东4市规划指标进行优化调配,得出各市的优化调配水量(以下简称调配水量)。潍坊市调配水量为3.57亿 m^3 ,青岛市调配水量为4.60亿 m^3 ,烟台市调配水量为2.01亿 m^3 ,威海市调配水量为0.87亿 m^3 。

2.2.2 合理性检验

利用区域水资源与社会经济发展的耦合协调度^[22-29]检验胶东4市的调配水量是否合理。

(1)确定需要进行耦合协调度计算的2个子系统,考虑“社会经济-外调水量”系统,以胶东4市的第二、三产业增加值为社会经济指标,各变量见表4。

表4 “社会经济-外调水量”系统变量
Tab.4 Variables of "Social economy-External water diversion" system

胶东4市	社会经济/亿元	规划指标/亿 m^3	调配水量/亿 m^3
潍坊	5 854.93	4.07	3.57
青岛	11 024.11	3.63	4.60
烟台	7 343.53	2.33	2.01
威海	3 512.91	1.02	0.87

(2)利用极差法对数据进行标准化处理,选用正向指标为

$$\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i}, \frac{y_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \quad (6)$$

式中: $\min_i$ 为变量中的最小值; $\max_i$ 为变量中的最大值。

(3)子系统综合效益 $f(x)$ 、 $g(y)$ 计算公式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m a_i x_i, g(y) = \sum_{i=1}^m b_i y_i \quad (7)$$

式中: a_i, b_i 分别为2个变量中胶东4市的权重,为体现公平原则, a_i, b_i 取0.25。

(4)耦合度计算公式为

$$C = \left\{ \frac{f(x) \times g(y)}{[(f(x) + g(y))/2]^2} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

式中: C 为“社会经济-外调水量”系统的耦合度。

(5)综合评价指数计算公式为

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (9)$$

式中: α, β 分别为两个子系统综合效益的权重, α, β 取0.5。

(6)耦合协调度计算公式为

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中: D 为“社会经济-外调水量”系统的耦合协调度。

由表4及式(6)~(10)计算得出外调水量优化前“社会经济-外调水量”系统的耦合协调度 $D=0.695\ 1$,优化后该系统的耦合协调度 $D=0.788\ 4$ 。可见,对外调水量进行合理的优化调整后,与胶东4市社会经济的发展耦合协调度更高。

3 水资源优化调度

分别以调配水量和规划指标为外调水量约束,构建调配水量调度模型(TPM)与规划指标调度模型(GHM),并运用Lingo软件编程求解,得出胶东4市的调配水量与规划指标调度方案,并对各方案进行对比分析。

3.1 调度水源、目标及原则

(1)调度水源。外调客水同时考虑黄河水及长江水。

(2)调度目标。以胶东4市总缺水量最小为调度目标。

(3)调度原则。调水效率最高原则:为充分利用有限的水资源,并提高实际调水效率,调水优先考虑输水距离较短的分水口并尽可能以分水口设计流量进行分水,从而使分水时间最短及损失水量最小。

调度时基于上述原则,在不同保证率、不同供需平衡分析情况下,根据外调水量将黄河水、长江水于调度期内调到其供水范围内各分水口,实现相应的调度目标。

3.2 调配水量调度模型(TPM模型)构建

(1)调度时段。综合考虑从渠首工程到各分水口的输水历时以及历年调度运营情况,确定调度时段为月,用 t 表示($t=1, 2, \dots, 12$)。

(2)决策变量。设决策变量 q_{ij} 为胶东4市第 t 月份第 i 分水口的月调度水量,分水口用 i 表示($i=1,2,\dots,22$)。

(3)目标函数

$$\min z = \sum_{k=1}^{13} \sum_{t=1}^{12} N_{kt} - \sum_{i=1}^{22} \sum_{t=1}^{12} q_{it} \quad (11)$$

式中: z 为调度期内各分水口总缺水量(即为调度水量不满足需水量的部分水量),万 m^3 ; N_{kt} 为第 t 月各县(市、区)的缺水量,万 m^3 ,县(市、区)用 k 表示($k=1,2,\dots,13$)。

(4)约束条件。外调水量约束:从汇水处给受水区每个分水口的总调度水量不大于胶东4市的调配水量,即

$$\sum_i \sum_t S_{it} \leq \gamma_j \cdot (Q_h \cdot \rho_0 + Q_c) \quad (12)$$

式中: S_{it} 为第 t 月从汇水处给第 i 个分水口的配水量,万 m^3 ; ρ_0 为从沉砂池出口到汇水处的输水效率; γ_j 为胶东4市的外调水量优化调配系数($j=1,2,3,4$); Q_h 为胶东4市总引黄指标,万 m^3 ; Q_c 为胶东4市总引江指标,万 m^3 。

胶东4市缺水约束:各市对应分水口的分水量不超出该市的用水需求,即

$$\sum_i \sum_t q_{it} \leq G_j \quad (13)$$

式中: G_j 为胶东4市的缺水量,万 m^3 。

县(市、区)缺水约束

$$\sum_i q_{it} \leq N_{kt} \quad (14)$$

分水口最小需水量约束

$$q_{it} \geq M_{it} \quad (15)$$

式中: M_{it} 为第 t 月份第 i 个分水口的最小需水量,万 m^3 。

分水口设计流量约束

$$q_{it} \leq Q_i \quad (16)$$

式中: Q_i 为第 i 个分水口的设计流量, m^3/s 。

渠段水量平衡约束

$$w_{t+1,t} = w_{it} \cdot a_{it} - q_{it} \quad (17)$$

式中: w_{it} 、 $w_{t+1,t}$ 分别为第 t 月份第 i 和第 $(i+1)$ 段渠段的输入水量,万 m^3 ; a_{it} 为第 t 月份第 i 段渠段的输水效率。

渠段过流能力约束

$$w_{it} \leq W_{it} \quad (18)$$

式中: W_{it} 为第 t 月份第 i 段渠段的过流能力,万 m^3 。

非负约束

$$N_{kt}, S_{it}, Q_h, Q_c, Q_{hj}, Q_{cj}, \rho_0, a_{it}, G_j, M_{it}, Q_i, w_{it}, W_{it} \geq 0 \quad (19)$$

3.3 模型参数的确定

(1)胶东4市缺水量为当地水可供水量不满足需水量的部分水量,见表3。

(2)县(市、区)缺水量。以各县(市、区)的地区生产总值占各地市生产总值的比例为权重,将不同水平年下胶东4市的缺水量分为各县(市、区)的缺水量。

(3)分水口最小需水量。优化调度时,需保证各分水口的最小需水,即供水下限。在山东省胶东调水工程日常运行调度的909组(2016年03月24日—2019年02月19日)配水数据中,首先筛选掉区间降雨导致各分水口日配水总量大于汇水处水量的57组配水数据,然后将筛选出的852组配水数据进行整合分析,得出各分水口每月最小需水量。

(4)渠段输水效率。输水效率为渠尾流量与渠首毛流量的比值。在不同的调度时段,外调水量不同,因此在不同调水流量下,利用筛选出的852组配水数据计算胶东调水工程各渠段的输水效率,得出全年各月份不同渠段的输水效率。

3.4 优化调度计算

运用 Lingo 软件,利用单纯形法对调配水量调度模型(TPM模型)进行编程求解,并得出不同保证率下的胶东4市联合优化调度方案,结果见表5。

3.5 调度结果对比分析

为与 TPM 模型调度方案进行对比分析,构建规划指标调度模型(GHM模型),以规划指标为外调水量约束,如式(20)所示,其余约束与 TPM 模型相同。利用上述方法求解调度模型,其调度结果见表5。

外调水量约束

$$\sum_i \sum_t S_{it} \leq Q_{hj} \cdot \rho_0 + Q_{cj} \quad (20)$$

式中: Q_{hj} 为胶东4市各自的引黄指标,万 m^3 ; Q_{cj} 为胶东4市各自的引江指标,万 m^3 。

从表5可以看出如下结果:

(1)平水年($p=50\%$),利用 TPM 模型与 GHM 模型调度后:胶东4市总缺水量分别为8.2亿、8.1亿 m^3 ,缺水率分别为14.4%、14.3%,缺水率分别下降了16.2%、16.3%;潍坊、青岛、烟台、威海缺水率分别为15.3%、14.5%、14.0%、12.3%及13.0%、19.3%、11.6%、10.5%,缺水率分别下降了14.3%、22.8%、12.4%、12.3%及16.6%、18.0%、14.8%、14.1%。

表 5 胶东 4 市不同保证率下的优化调度结果

Tab. 5 The result of optimum dispatching for water resources in four cities of Jiaodong under different guarantee rate

模型	地市	调度后缺水量/亿 m ³			缺水率/%			缺水率降幅/%		
		$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$	$p=50\%$	$p=75\%$	$p=95\%$
TPM 模型	潍坊	3.3	5.6	6.3	15.3	25.2	28.4	14.3	14.0	13.9
	青岛	2.4	3.8	4.4	14.5	22.6	26.2	22.8	22.6	22.6
	烟台	1.8	3.3	3.8	14.0	25.2	29.0	12.4	12.2	12.2
	威海	0.7	1.5	1.8	12.3	25.9	31.0	12.3	12.0	12.1
	合计	8.2	14.2	16.3	14.4	24.5	28.2	16.2	15.9	15.8
GHM 模型	潍坊	2.8	5.1	5.8	13.0	23.0	26.1	16.6	16.2	16.2
	青岛	3.2	4.6	5.2	19.3	27.4	31.0	18.0	17.8	17.8
	烟台	1.5	3.0	3.5	11.6	22.9	26.7	14.8	14.5	14.5
	威海	0.6	1.4	1.7	10.5	24.1	29.3	14.1	13.8	13.8
	合计	8.1	14.1	16.2	14.3	24.4	28.0	16.3	16.0	16.0

(2) 枯水年 ($p=75\%$), 利用 TPM 模型与 GHM 模型调度后: 胶东 4 市总缺水量分别为 14.2 亿、14.1 亿 m³, 缺水率分别为 24.5%、24.4%, 缺水率分别下降了 15.9%、16.0%; 潍坊、青岛、烟台、威海缺水率分别为 25.2%、22.6%、25.2%、25.9% 及 23.0%、27.4%、22.9%、24.1%, 缺水率分别下降了 14.0%、22.6%、12.2%、12.0% 及 16.2%、17.8%、14.5%、13.8%。

(3) 特枯年 ($p=95\%$), 利用 TPM 模型与 GHM 模型调度后: 胶东 4 市总缺水量分别为 16.3 亿、16.2 亿 m³, 缺水率分别为 28.2%、28.0%, 缺水率分别下降了 15.8%、16.0%; 潍坊、青岛、烟台、威海缺水率分别为 28.4%、26.2%、29.0%、31.0% 及 26.1%、31.0%、26.7%、29.3%, 缺水率分别下降了 13.9%、22.6%、12.2%、12.1% 及 16.2%、17.8%、14.5%、13.8%。

(4) 利用 TPM 模型进行优化调度后, 潍坊市缺水率降幅为 13.9%~14.3%, 青岛市缺水率降幅为 22.6%~22.8%, 烟台市缺水率降幅为 12.2%~12.4%, 威海市缺水率降幅为 12.0%~12.3%, 胶东 4 市总缺水率下降幅度为 15.8%~16.2%。与 GHM 模型的结果相比, 潍坊降幅下降了 2.3%, 青岛降幅增加了 4.8%, 烟台降幅下降了 2.3%, 威海降幅下降了 1.8%, 胶东 4 市总缺水率基本不变。TPM 模型考虑社会经济指标, 处于经济领先地位的青岛市缺水率下降幅度更加明显, 调度结果与社会经济的发展更加协调适应。

4 讨 论

(1) 在外调水量优化调配方面, 考虑社会经济发展用水的模糊性, 利用可变模糊集理论, 构建外调水

量优化调配模型, 通过变化参数 α 与 p 的组合, 综合模糊综合评价模型、TOPSIS 理想点模型、激励函数模型以及模糊优选模型等线性与非线性模型, 计算出外调水量优化调配系数, 能够避免单一模型的局限性。优化调配的胶东 4 市外调水量, 提高了其与胶东 4 市社会经济发展的耦合协调度。

(2) 在水资源优化调度方面, 调配水量调度模型 (TPM 模型) 以胶东 4 市缺水量最小为调度目标, 以优化调配水量为外调水量约束。与文献[12]相比, 渠道输水效率提高, 胶东 4 市缺水率降幅增加; 与规划指标调度模型 (GHM 模型) 相比, 其调度方案与社会经济的耦合协调度提高 13.42%, 将有限的外调水资源转化为较高的社会效益, 缓解胶东 4 市的水资源供需矛盾。

(3) 本文是基于现有的工程状况确定模型约束条件与参数, 随着胶东 4 市社会经济的发展, 黄水东调工程开工建设。今后需根据新建的工程条件, 相应调整调度模型中的约束条件, 并进行新的水资源优化调度研究。

5 结 论

基于可变模糊集理论, 建立地市外调水量可变模糊优选模型进行外调水量优化调配, 以此为基础, 构建胶东调水工程的水资源优化调度模型, 进行胶东 4 市的水资源优化调度, 结论如下:

(1) 外调水量优化调配模型能够提高胶东 4 市外调水量与社会经济发展的耦合协调度。2013—2018 年潍坊实际配水量为 0.06 亿~2.88 亿 m³, 远小于规划指标; 青岛实际配水量为 2.13 亿~5.33 亿 m³, 与规划指标相近, 其中 2017 年的实际配水量 5.33 亿 m³ 超规划指标 3.63 亿 m³ 近 50%;

烟台与威海分别为 $0 \sim 0.87$ 亿 m^3 与 $0 \sim 0.68$ 亿 m^3 , 远远小于规划指标。建立外调水量优化调配模型, 在考虑胶东 4 市社会经济的基础上对外调水量进行优化调配, 其与社会经济发展的耦合协调度由 0.695 1 提升为 0.788 4。

(2) 调配水量调度模型(TPM 模型)对胶东调水工程的水资源优化调度更加契合胶东 4 市社会经济的发展。与规划指标调度模型(GHM 模型)相比, 利用 TPM 模型进行调度模拟后, 潍坊市缺水率降幅下降了 2.3%, 青岛市缺水率降幅增加了 4.8%, 烟台市缺水率降幅下降了 2.3%, 威海市缺水率降幅下降了 1.8%, 胶东 4 市总缺水率基本不变。TPM 模型考虑胶东 4 市的社会经济指标, 处于经济领先地位的青岛市缺水率下降幅度明显, 调度方案与社会经济发展的协调度更高。该研究可为跨流域调水工程的水资源优化调度研究提供一定的参考和依据。

参考文献:

- [1] 马吉刚, 张泽玉, 王金山, 等. 山东半岛蓝色经济区调水工程水资源配置浅析[J]. 中国水利, 2012(3): 13-15.
- [2] 王艺华. 认真落实新时期治水方针全力构建具有山东特色水安全保障体系[J]. 中国水利, 2016(24): 81-82. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9589.2017.01.009.
- [3] MASSA, HUFSCMIDTMM, DORFMAN, et al. Design of water resources management[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1962.
- [4] WINDSOR J S. Optimization model for reservoir flood control[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1219-1226.
- [5] OZDEN M. A binary state DP algorithm for operation problems of multi-reservoir system[J]. Water Resources Research, 1984, 1, 4-14. DOI: 10.1029/wr020i001p00009.
- [6] 都金康, 周广安. 水库群防洪调度的逐次优化算法[J]. 水科学进展, 1994(2): 134-141.
- [7] 王栋, 曹升乐, 员汝安. 水库群系统防洪联合调度的线性规划模型及仿射变换法[J]. 水利管理技术, 1998, 18(3): 1-5.
- [8] ROSSMAN L A. Reliability constrained dynamic programming and randomized release rules in reservoir management[J]. Water Resources Research, 1977, 13(2): 247-255. DOI: 10.1029/WR013i002p00247.
- [9] BECKER G L. Multi-objective analysis of multi-reservoir system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(4): 356-370.
- [10] JAIN S, REDDY N S R K, CHAUBE U C. Analysis of a large inter-basin water transfer system in India [J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 50(1), 125-137. DOI: 10.1623/hysj.50.1.125.56336.
- [11] MATETE M, HASSAN R. Integrated ecological economics accounting approach to evaluation of inter-basin water transfers: An application to the Lesotho Highlands Water Project[J]. Ecological Economics, 2006(60): 246-259. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.12.010.
- [12] READ L, MADANI K, INANLOO B. Optimality versus stability in water resource allocation[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 133 (Complete): 343-354. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.11.045.
- [13] 杨静灵, 王好芳, 傅川, 等. 胶东调水工程水资源优化调度研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 58-62, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.05.013.
- [14] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [15] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [16] 山东省水资源综合利用中长期规划[R]. 济南: 山东省发展和改革委员会, 山东省水利厅, 2016. 8.
- [17] 山东省水资源公报[R]. 济南: 山东省水利厅, 2019. 11. 27.
- [18] 山东省引黄济青工程技术经济指标资料汇编[G]. 济南: 山东省引黄济青工程管理局, 2002. 6.
- [19] 胶东地区引黄调水工程建设管理文件选编[G]. 济南: 山东省胶东调水局, 2015. 8.
- [20] 曹倩. 胶东调水工程水资源优化调度管理研究[J]. 中国水利, 2018(13): 23-25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2018.13.008.
- [21] 陈守煜, 邱林. 模糊模式识别模型优选抽水蓄能电站[J]. 华北水利水电学院学报, 1998(3): 2-7, 24. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.1998.03.001.
- [22] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008(18): 146-153. DOI: CNKI; SUN; SSJS. 0.2008-18-021.
- [23] 陈守煜. 论相对隶属度[J]. 大自然探索, 1993, 12(2): 25-27.
- [24] 陈守煜. 相对隶属度函数的系统辩证论哲学基础[J]. 系统辩证学学报, 1996, 4(2): 26-29.
- [25] 陈守煜. 可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1066-1074. DOI: CNKI; SUN; SLXB. 0.2012-09-010.
- [26] 陈守煜, 柴春岭, 苏艳娜. 可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2007(3): 95-97. DOI: 10.3321/j.issn.1002-6819.2007.03.019.

(下转第 100 页)

- [14] 张旭东,高茂庭. 基于 IGA-BP 网络的水质预测方法[J]. 环境工程学报. 2016, 10(3): 1566-1571. DOI: CNKI;SUN;HJJZ. 0. 2016-03-090.
- [15] 曹栋华,陈佳袁,刘益志,等. 优化神经网络模型在水质预测中的运用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 12-16. DOI: 10. 13393/j. cnki. issn. 1672-948X. 2016. 04. 003.
- [16] MULIA I E, TAY H, ROOPSEKHAR K, et al. Hybrid ANN-GA model for predicting turbidity and chlorophyll-a concentration[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2013, 7: 279-299. DOI: 10. 1016/j. jher. 2013. 04. 003.
- [17] ZHAI X Y, XIA J, ZHANG Y Y. Water quality variation in the highly disturbed Huai River basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses[J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 594-606. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2014. 06. 101.
- [18] HALLIDAY SJ, SKEFFINGTON R A, WADE A J, et al. High-frequency water quality monitoring in an urban catchment: hydrochemical dynamics, primary production and implications for the water framework directive[J]. Hydrological processes, 2015, 29: 3388-3407. DOI: 10. 1002/hyp. 10453.
- [19] WAGH V M, PANASKAR D B, MULEY A A. Estimation of nitrate concentration in groundwater of Kadava River basin-Nashik district, Maharashtra, India by using artificial neural network model[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2017, 3(1): 36. DOI: 10. 1007/s40808-017-0290-3.
- [20] MAY R J, DANDY G C, MAIER HR, et al. Application of partial mutual information variable selection to ANN forecasting of water quality in water distribution systems[J]. Environ Modelling and Software, 2008(23): 1289-1299. DOI: 10. 1016/j. envsoft. 2008. 03. 008.
- [21] LIU J, GUO L, JIANG J P, et al. Emergency material allocation and scheduling for the application to chemical contingency spills under multiple scenarios[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(1): 956-968. DOI: 10. 1007/s11356-016-7811-x.
- [22] HILL D J, MINSKER B S. Anomaly detection in streaming environmental sensor data: A data-driven modeling approach[J]. Environmental Modelling & Software, 2010(25): 1014-1022. DOI: 10. 1016/j. envsoft. 2009. 08. 010.
- [23] 王伟. 基于计算智能方法的河流水质管理数字模拟研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [24] 史斌, 王鹏, 姜继平. 基于高频在线水质监测数据异常预警的突发污染预警[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4394-4400.
- [25] 朱炜玉, 史斌, 姜继平, 等. 基于水质时间序列异常检测的动态预警方法[J]. 环境科学与技术. 2018, 41(12), 131-137. DOI: 10. 19672/j. cnki. 1003-6504. 2018. 12. 019.

(上接第 92 页)

- [27] 钱凤魁, 王卫雯, 王秋兵. 基于耦合协调度模型量化耕地自然质量与立地条件协同关系[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 284-291. DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2018. 18. 035.
- [28] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 126-132. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2012. 05. 021.
- [29] 张慧利, 蔡洁, 夏显力. 水土流失治理效益与生态农业发展的耦合协调性分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 162-169. DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2018. 08. 021.