

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0045

张锴慧,王好芳,张泽玉,等.胶东地区跨流域调水优化配置研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):100-107. ZHANG K H, WANG H F, ZHANG Z Y, et al. Study on optimal allocation of inter basin water transfer project in Jiaodong area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 100-107. (in Chinese)

# 胶东地区跨流域调水优化配置研究

张锴慧<sup>1</sup>,王好芳<sup>1</sup>,张泽玉<sup>2</sup>,赵然杭<sup>1</sup>,杨静灵<sup>1</sup>,李杨<sup>2</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 山东省胶东调水局, 济南 250100)

**摘要:** 胶东地区是严重缺水地区,近年来随着城市人口不断增长,工农业生产和经济快速发展,缺水问题越来越突出。以胶东地区缺水较为严重的潍坊、青岛、烟台、威海四个地市为研究区域,结合引黄济青工程和南水北调东线工程实施跨流域调水,缓解供需矛盾,以2020年和2025年为规划水平年,基于水量平衡分析,构建以缺水量最小和调水工程效益最大为目标的多水源多目标优化配置模型,确定调引不同水源(黄河水,黄河水和长江水)时的水资源优化配置方案。配置结果表明:只调引黄河水,受水区不同规划年的缺水量分别降低14%~83%、10%~31%;同时调引黄河水和长江水,受水区不同规划年的缺水量分别降低28%~81%、19%~53%。可见优化配置方案可以有效缓解胶东地区水资源紧缺状况和供需水矛盾,为胶东地区的可持续发展奠定基础。

**关键词:** 跨流域调水;供需平衡分析;保证率;多目标;水资源优化配置;受水区

**中图分类号:** TV 213; TV 68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0100-08

## Study on optimal allocation of inter-basin water transfer project in Jiaodong area

ZHANG Kaihui<sup>1</sup>, WANG Haofang<sup>1</sup>, ZHANG Zeyu<sup>2</sup>, ZHAO Ranhang<sup>1</sup>, YANG Jingling<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1. College of Civil & Hydraulics Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jiaodong Diversion Water Bureau Shandong Province, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The shortage of water resources in Jiaodong area is becoming increasingly serious with the expansion of urban population and the rapid development of industrial and agricultural production and economy in recent years. The four cities with serious water shortage in Jiaodong area (Weifang, Qingdao, Yantai, and Weihai) were taken as the study areas. Inter-basin water transfer was implemented based on the East Route of South to North Water Transfer Project and the project of water diversion from Yellow River to Qingdao so as to alleviate the contradiction between supply and demand. The years of 2020 and 2025 were taken as the planning years. According to the water balance analysis, we built a multi-water source, multi-objective optimal allocation model that aimed for minimum water shortage and maximum benefits of the water transfer projects, and we determined the optimal allocation scheme for different water sources (Yellow River, Yellow River and Yangtze River). Results showed that when water was transferred from Yellow River alone, the water shortage in the water receiving area would decrease by 14%-83% and 10%-31% respectively in different planning years; when water was transferred from both Yellow River and Yangtze River, the water shortage in the water receiving area would decrease by 28%-81% and 19%-53% respectively in different planning years. The optimal allocation scheme can effectively alleviate the contradiction between water supply and demand and alleviate the shortage of water resources in Jiaodong area, and thus lay the foundation for sustainable development in Jiaodong area.

收稿日期: 2017-04-14 修回日期: 2017-10-11 网络出版时间: 2018-01-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180111.1024.006.html>

基金项目: 山东省重大水利科研与技术推广专项资助项目(SDSLKY201222; SDSLKY201501);“十二五”国家科技支撑项目(2015BA B07B02)

Funds: Special Funding Projects of Shandong Water Conservancy Bureau for Major Water Conservancy Research and Technology Promotion (SDSLKY201222; SDSLKY201501); National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2015BA B07B02)

作者简介: 张锴慧(1992-),女,黑龙江黑河人,主要从事水文与水资源管理方面研究。E-mail: 1422314589@qq.com

通讯作者: 赵然杭(1969-),男,山东沂水人,教授,博士生导师,主要从事水资源利用与管理、湿地水文与生态环境管理及工程模糊集理论与应用方面研究。E-mail: ranhang\_z@sdu.edu.cn

**Key words:** inter basin transfer; balance analysis between water supply and demand; assurance rate; multi objective; optimal allocation of water resources; water receiving area

水资源优化配置是在特定流域或区域内,以可持续发展战略为基本原则,对有限的、不同形式的水资源,在各受水区域之间及受水区域的各用水部门之间通过工程与非工程措施进行的科学分配<sup>[1,2]</sup>。我国行政区划 30% 以上地区区域发展与当地水资源量极不匹配,水资源已经成为我国社会经济发展的严重制约因素,实施水资源优化配置对解决水资源短缺及促进经济发展具有重要作用<sup>[3]</sup>。我国水资源优化配置存在层次性的发展变化,由“以需定供”、“以供定需”到基于宏观经济的水资源优化配置、可持续发展的水资源优化配置不断优化,为解决区域水资源紧缺问题提供了理论研究方法<sup>[4,6]</sup>。

胶东地区水资源紧缺,一方面,胶东地区水资源具有人均占有量少,时空分布不均匀等特点<sup>[7]</sup>;另一方面,随着胶东地区经济快速发展,用水量急剧增长,水供需矛盾突出,使有限的水资源更趋紧张<sup>[8]</sup>。山东省胶东调水工程是一项跨流域、远距离的大型调水工程,具备了跨流域调水的条件,通过对长江水、黄河水、当地水的联合优化配置,实现缓解胶东乃至山东省的水资源紧缺局面。因此,为了解决胶东地区水资源紧缺问题、提高水资源的有效利用率、保障社会经济与生态环境的协调发展和促进调水工程的整体效益和可持续发展能力,开展胶东跨流域调水优化配置提供了有效途径。该优化配置涉及到部门和地区多个决策主体,近期与远期等多个决策时段,社会效益和工程效益多个决策目标,是一个多阶段、多目标的决策问题。以胶东地区缺水尤为严重的四个地市潍坊、青岛、烟台、威海为研究对象,以 2014 年为基准年,2020 年、2025 年为规划年,以缺水量最小和工程效益最大为目标建立多目标、多水源的优化配置模型并对其进行优化配置。

## 1 研究区域概况

潍坊、青岛、烟台和威海四个地市分别位于山东省胶东半岛的西部、南、中、和东部,烟台东连威海,西接潍坊,西南与青岛毗邻。胶东调水工程是国家南水北调东线工程的重要组成部分,包括引黄济青工程和胶东引黄调水工程<sup>[9]</sup>。从滨州市打渔张引黄闸引黄河水,输送至威海米山水库,涉及滨州、东营、潍坊、烟台、威海、青岛 6 个地市,与南水北调山东段其他工程共同形成南北贯通、东西互济的“T”字型

调水大动脉,使受水区具备跨流域调水的条件。

研究区多年平均降水量 654.0 mm,年内降水分配不均,主要集中于汛期 7 月-9 月,约为全年降水量的 60%~80%,汛期降水又多集中于几场暴雨之内,降水年际间变化较大。目前水资源紧缺,供需矛盾突出,使有限的水资源更趋紧张,2014 年,研究区人均年供水量 266.3 m<sup>3</sup>,为资源型缺水地区。而且水资源利用率为 55.4%,开发利用程度较高,继续开发潜力有限,当地水资源难于支撑受水区社会经济的持续发展。因此,需要调水,缓解水资源供需矛盾。

## 2 水资源供需平衡分析

山东省胶东调水工程的跨流域水资源优化配置是涉及多个地市、多水源、多用水户的调水优化问题。研究区域选取胶东地区缺水较为严重的四个地市(潍坊市、青岛市、烟台市、威海市);各受水区水源种类众多,既有地表水、地下水、非常规水源(中水回用、雨水集蓄、海水淡化等),又有客水(黄河水和长江水);用水户包括生活、生产和生态等。因此,为了更好地实现调水工程四个受水区调水量的合理分配,需在不同规划年对不同水源进行水量平衡分析。在此基础上,进行多目标水资源优化配置。

### 2.1 水量供需平衡分析

通过研究区域不同规划年的可供水量和需水量预测并进行水量平衡分析。可供水量分析包括地表水、地下水、非常规水源利用和客水调水分析,对于不同水源分别计算各保证率(50%、75%、95%)下的可供水量,求得总可供水量。需水量包括生活、农业、工业、城镇公共和生态环境需水五部分,分别利用指标分析法以 2014 年为基准年对不同用水户进行 2020 年和 2025 年的需水量预测。

#### 2.1.1 供水分析

可供水量是指在可预见的时期内,在统筹考虑生活、生产和生态环境用水的基础上,通过经济合理、技术可行的措施可供河道外一次性利用的最大水量(不包括回归水重复利用量)<sup>[10]</sup>。

根据山东省统计年鉴及统计网,地表水和地下水可供水量分析以 1995-2014 年长系列的地表水资源量和地下水资源量的资料为基础,运用皮尔逊

0 型曲线, 确定不同频率下的水资源量, 同时考虑受水区的水利工程情况和水资源利用率, 进一步确定可供水量<sup>[11]</sup>; 非常规水源一方面考虑中水、雨水及海水的利用情况, 另一方面考虑更新改造、续建配套现有水利工程及规划的水利工程对中水、雨水及海水的

利用情况进行预测; 客水可供水量根据山东省发展计划委员会文件中各市调引客水的指标确定<sup>[12-13]</sup>。

在现状年和规划年不同水源组合情况下对各个保证率的可供水量进行计算, 其中只考虑当地水源和非常规水源时可供水总量见表 1。

表 1 当地水源的可供水总量

Tab. 1 The amount of water available from local water sources

万 m<sup>3</sup>

| 地区  | 2014 年可供水量 |           |           | 2020 年可供水量 |           |           | 2025 年可供水量 |           |           |
|-----|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|     | 50%        | 75%       | 95%       | 50%        | 75%       | 95%       | 50%        | 75%       | 95%       |
| 潍坊市 | 169 000.0  | 153 000.0 | 146 000.0 | 117 656.5  | 104 531.0 | 97 933.5  | 122 696.5  | 109 571.0 | 102 973.5 |
| 青岛市 | 123 000.0  | 112 000.0 | 107 000.0 | 64 226.5   | 64 101.8  | 64 040.1  | 66 226.5   | 66 101.8  | 66 040.1  |
| 烟台市 | 97 000.0   | 85 000.0  | 79 000.0  | 87 487.1   | 76 495.0  | 49 543.0  | 88 487.1   | 77 495.0  | 50 543.0  |
| 威海市 | 35 000.0   | 29 000.0  | 27 000.0  | 43 438.3   | 27 693.7  | 13 269.5  | 43 488.3   | 27 743.7  | 13 319.5  |
| 合计  | 424 000.0  | 379 000.0 | 359 000.0 | 312 808.4  | 272 821.5 | 224 786.2 | 320 898.4  | 28 0911.5 | 232 876.2 |

### 2.1.2 需水量分析

受水区需水量预测主要采用定量预测法, 目前需水量定量预测方法可以分为两大类, 数学模型法和定额法, 根据对数据处理方式的不同数学模型方法具体分类<sup>[14-15]</sup>, 根据国家《水资源供需预测分析技术规范(SL 429-2008)》, 本文主要以定额法和趋势法为主, 结合其他方法综合确定<sup>[16-17]</sup>。根据山东省统计年鉴<sup>[18]</sup>及统计网 1995-2014 年长系列的需水情况对受水区分别需水预测。需水预测包括生活、生产和生态环境需水预测三部分。生活用水分别按照城镇及农村的人口自然增长率预测规划年的人口, 从而采用定额法计算规划年生活需水量; 生产用水包括工业、农业和城镇公共用水, 通过对规划年工业产值及工业万元产值取水量的预测值确定工业需水量, 通过对农业不同种类农田实灌溉面积和灌溉定额的预测值进行农业需水预测; 生态用水和城镇公共用水采用趋势分析法预测。总需水量预测值符合山东省不同水平年用水总量控制指标, 胶东地区受水区总需水量计算结果见表 2。

表 2 受水区需水量计算结果

Tab. 2 Calculation results of water demand in water receiving areas

万 m<sup>3</sup>

| 规划年  | 潍坊        | 青岛        | 烟台        | 威海       | 总计        |
|------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 2014 | 215000.00 | 160000.00 | 117000.00 | 42000.00 | 534000.00 |
| 2020 | 190365.18 | 137869.81 | 105289.92 | 49711.91 | 483236.82 |
| 2025 | 210853.16 | 164934.55 | 132368.81 | 65631.44 | 573787.95 |

### 2.1.3 供需平衡分析

根据上述需水量和可供水量的预测结果, 分别对四个地市的现状年和规划年的不同水源组合情况分别进行供需平衡分析, 其中只考虑当地水源和非常规水源时现状年和规划年的分析结果见表 3。

表 3 水资源供需平衡结果

Tab. 3 Calculation results of supply and demand of water resources

| 年份   | 地区  | 缺水量/万 m <sup>3</sup> |           |           | 缺水率(%) |      |      |
|------|-----|----------------------|-----------|-----------|--------|------|------|
|      |     | 50%                  | 75%       | 95%       | 50%    | 75%  | 95%  |
| 2014 | 潍坊市 | 40 000.0             | 62 000.0  | 69 000.0  | 19.1   | 28.8 | 32.1 |
|      | 青岛市 | 35 000.0             | 48 000.0  | 53 000.0  | 22.2   | 30.0 | 33.1 |
|      | 烟台市 | 19 000.0             | 32 000.0  | 38 000.0  | 16.4   | 27.4 | 32.5 |
|      | 威海市 | 6 000.0              | 13 000.0  | 15 000.0  | 14.6   | 31.0 | 35.7 |
|      | 合计  | 100 000.0            | 155 000.0 | 175 000.0 | 19.1   | 29.0 | 32.8 |
| 2020 | 潍坊市 | 72 708.7             | 85 834.2  | 92 431.7  | 38.2   | 45.1 | 48.6 |
|      | 青岛市 | 73 643.3             | 73 768.0  | 73 829.7  | 53.4   | 53.5 | 53.6 |
|      | 烟台市 | 17 802.8             | 28 794.9  | 55 746.9  | 16.9   | 27.4 | 53.0 |
|      | 威海市 | 6 273.6              | 22 018.2  | 36 442.4  | 12.6   | 44.3 | 73.3 |
|      | 合计  | 170 428.5            | 210 415.3 | 258 450.7 | 35.3   | 43.5 | 53.5 |
| 2025 | 潍坊市 | 88 156.7             | 101 282.2 | 107 879.7 | 41.8   | 48.0 | 51.2 |
|      | 青岛市 | 98 708.1             | 98 832.8  | 98 894.4  | 59.9   | 59.9 | 60.0 |
|      | 烟台市 | 43 881.7             | 54 873.8  | 81 825.8  | 33.2   | 41.5 | 61.8 |
|      | 威海市 | 22 143.2             | 37 887.8  | 52 311.9  | 33.7   | 57.7 | 79.7 |
|      | 合计  | 252 889.6            | 292 876.5 | 340 911.8 | 44.1   | 51.0 | 59.4 |

从表 3 可以看出, 2014 年受水区缺水情况显著。50% 频率下研究区域缺水率为 19.1%, 缺水量为 10 亿 m<sup>3</sup>, 潍坊和青岛缺水较为严重; 75% 频率下研究区域缺水率为 29.0%, 缺水量为 15.5 亿 m<sup>3</sup>, 四个地市缺水率均接近 30%; 95% 频率下研究区域缺水率为 32.8%, 缺水量达到 17.5 亿 m<sup>3</sup>, 四个地市缺水率均在 33% 左右。

在 2020 年 50% 频率下研究区域缺水率为 35.3%, 缺水量为 17.04 亿 m<sup>3</sup>; 75% 频率下研究区域缺水率为 43.5%, 缺水量达到 21.04 亿 m<sup>3</sup>; 95% 频率下研究区域缺水率为 53.5%, 缺水量达到 25.85 亿 m<sup>3</sup>。2020 年四个地市在各频率下均缺水,

50% 频率下青岛市和潍坊市相对缺水严重, 75% 频率下各地市存在不同程度的缺水, 95% 频率下四个地市缺水严重, 缺水率均超过 45%。

在 2025 年 50% 频率下研究区域缺水率为 44.1%, 缺水量为 25.29 亿  $m^3$ ; 75% 频率下缺水率为 51.0%, 缺水量为 29.29 亿  $m^3$ ; 95% 频率下缺水率为 59.4%, 缺水量达到 34.09 亿  $m^3$ 。同比 2020 年缺水显著增加, 缺水率升高, 当地水和非常规水源明显不能满足受水区的需水需求。

### 3 调水优化配置模型

胶东调水工程是针对胶东地区水资源紧缺, 缓解当地水资源供需矛盾而建设。首先考虑缓解当地的水资源短缺问题和提高水资源的利用效率, 同时又为跨流域调水工程的整体效益和可持续发展能力, 实现其运行及设计功能, 因此, 调水优化配置的首要目标是受水区缺水最小, 以工程效益最大为次要目标<sup>[19]</sup>; 不同规划年供水均按照现状年的黄河水和长江水量分配的引水指标约束, 需水考虑不超过缺水量, 同时要满足基本生活用水需求, 因此建立供水、需水约束条件和非负条件。

表 5 需水量上下限

Tab. 5 Boundary values of water demand

万  $m^3$

| 规划年  | 客水      | 保证率 | 下限值      |          |          |          | 上限值       |          |          |          |
|------|---------|-----|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
|      |         |     | $Q_{12}$ | $Q_{22}$ | $Q_{32}$ | $Q_{42}$ | $Q_{11}$  | $Q_{21}$ | $Q_{31}$ | $Q_{41}$ |
| 2020 | 黄河水     | 50% | 21046.5  | 0        | 0        | 0        | 72708.68  | 73643.34 | 17802.82 | 6273.622 |
|      |         | 75% | 21046.5  | 0        | 0        | 0        | 85834.18  | 73768.01 | 28794.92 | 22018.24 |
|      |         | 95% | 21046.5  | 0        | 0        | 0        | 92431.68  | 73829.68 | 55746.92 | 36442.38 |
|      | 黄河水和长江水 | 50% | 21046.5  | 32851.15 | 15871.46 | 0        | 72708.68  | 73643.34 | 17802.82 | 6273.622 |
|      |         | 75% | 21046.5  | 32851.15 | 15871.46 | 7479     | 85834.18  | 73768.01 | 28794.92 | 22018.24 |
|      |         | 95% | 21046.5  | 32851.15 | 15871.46 | 7479     | 92431.68  | 73829.68 | 55746.92 | 36442.38 |
| 2025 | 黄河水     | 50% | 23281.59 | 0        | 0        | 0        | 88156.66  | 98708.08 | 43881.71 | 22143.15 |
|      |         | 75% | 23281.59 | 0        | 0        | 0        | 101282.16 | 98832.75 | 54873.81 | 37887.76 |
|      |         | 95% | 23281.59 | 0        | 0        | 0        | 107879.66 | 98894.42 | 81825.81 | 52311.91 |
|      | 黄河水和长江水 | 50% | 23281.59 | 36185.77 | 17541.54 | 8268.28  | 88156.66  | 98708.08 | 43881.71 | 22143.15 |
|      |         | 75% | 23281.59 | 36185.77 | 17541.54 | 8268.28  | 101282.16 | 98832.75 | 54873.81 | 37887.76 |
|      |         | 95% | 23281.59 | 36185.77 | 17541.54 | 8268.28  | 107879.66 | 98894.42 | 81825.81 | 52311.91 |

#### 3.1.3 水价与运行费

因各分水区水价不同, 所以在构建模型时通过考虑向四个地市的分水区调水建模, 调引黄河水和长江水的各分水区的水价分别为  $C_{ij}$ 、 $E_{ij}$ , 调黄河水和长江水运行费用分别为  $H_{ij}$ 、 $D_{ij}$ 。根据山东省物价局文件, 受水区调引客水的水价与运行费见表 6。

针对当地水、非常规水和黄河水的水源组合构建优化配置模型(L-U-G-Y), 针对当地水、非常规水、

### 3.1 参数确定

#### 3.1.1 供水上限

受水区调引客水水源为黄河水和长江水。受水区调引黄河水和长江水的分配指标作为供水量上限。根据山东省发展计划委员会文件<sup>[20]</sup>中各市调引客水的指标见表 4。

表 4 受水区调引客水指标

Tab. 4 Water transfer quota in water receiving areas

万  $m^3$

| 受水区 | 引黄     | 引江     | 合计     |
|-----|--------|--------|--------|
| 潍坊市 | 30 700 | 10 000 | 40 700 |
| 青岛市 | 23 300 | 13 000 | 36 300 |
| 烟台市 | 13 700 | 9 650  | 23 350 |
| 威海市 | 5 200  | 5 000  | 10 200 |

#### 3.1.2 需水上下限

由表 3 中受水区不同规划年不同保证率下的缺水水量  $Q_{i1}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 作为四地市对客水的需水量上限, 考虑到优先满足居民生活用水需求, 四个地市生活需水量  $Q_{i2}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 作为需水量下限值, 若当地水资源能够满足生活需水时,  $Q_{i2}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 调整为 0。需水量上下限见表 5。

黄河水和长江水的水源组合构建优化配置模型(L-U-G-Y)。

### 3.2 模型 L-U-G-Y

#### 3.2.1 目标函数

(1) 受水区缺水最小。

$$\min F_1(A_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (Q_{i1} - A_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $A_{ij}$  为向四个地市的实际黄河水供水量, 其中

表 6 胶东调水工程水价与运行费

Tab. 6 Water tariff and overall operational cost

| 地市  | 分水区    | 运行费<br>/万元 | 计量水价/(元·m <sup>3</sup> ) |       |
|-----|--------|------------|--------------------------|-------|
|     |        |            | 黄河水                      | 长江水   |
| 潍坊市 | 双王城水库  | 241.43     | 0.265                    | 1.059 |
|     | 潍北平原水库 | 241.43     | 0.296                    | 1.175 |
|     | 峡山水库   | 724.19     | 0.392                    | 1.313 |
| 青岛市 | 平度     | 132.33     | 0.572                    | 1.535 |
|     | 莱州     | 679.16     | 0.826                    | 1.885 |
|     | 招远     | 777.49     | 1.101                    | 2.308 |
| 烟台市 | 龙口     | 1119.51    | 1.514                    | 2.763 |
|     | 蓬莱     | 1164.87    | 1.694                    | 2.975 |
|     | 栖霞     | 571.44     | 1.874                    | 3.155 |
|     | 福山     | 4728.1     | 2.17                     | 3.452 |
| 威海市 | 牟平     | 825.33     | 2.7                      | 3.981 |
|     | 米山水库   | 6484.91    | 2.965                    | 4.246 |

$i(i=1, 2, 3, 4)$  分别为潍坊市, 青岛市, 烟台市, 威海市,  $j(j=1, 2, 3, \dots)$  分别为各个地市的分水区;  $F_1$  为缺水量;  $Q_{i1}$  为四个地市的缺水量。

(2) 供水工程效益最大。

$$\max F_2(A_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^i (A_{ij} \times C_{ij} - D_{ij}) \quad (2)$$

式中:  $F_2$  为工程效益;  $C_{ij}$  为调引黄河水的各分水区的水价;  $D_{ij}$  为调黄河水运行费用。

### 3.2.2 约束条件

(1) 供水约束。

$$\sum_{j=1}^3 A_{1j} \leq a_1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^1 A_{2j} \leq a_2 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^7 A_{3j} \leq a_3 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^1 A_{4j} \leq a_4 \quad (6)$$

式中:  $a_1, a_2, a_3, a_4$  为向潍坊、青岛、烟台和威海调引黄河水的指标。

(2) 需水约束。

$$Q_{12} \leq \sum_{j=1}^3 A_{1j} \leq Q_{11} \quad (7)$$

$$Q_{22} \leq \sum_{j=1}^1 A_{2j} \leq Q_{21} \quad (8)$$

$$Q_{32} \leq \sum_{j=1}^7 A_{3j} \leq Q_{31} \quad (9)$$

$$Q_{42} \leq \sum_{j=1}^1 A_{4j} \leq Q_{41} \quad (10)$$

式中:  $Q_{12}, Q_{22}, Q_{32}, Q_{42}$  分别为四个地市的生活需水量, 当地水源能够满足生活需水时  $Q_{12}$  调整为 0,  $Q_{22}, Q_{32}, Q_{42}$  同理。

(3) 非负约束。

$$A_{ij} \geq 0 \quad (11)$$

### 3.3 模型 L-U-G-Y-Y

#### 3.3.1 目标函数

(1) 受水区缺水量最小。

$$\min F_1(A_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^i (Q_{i1} - A_{ij} - B_{ij}) \quad (12)$$

式中:  $B_{ij}$  为向四个地市的实际长江供水量。

(2) 供水工程效益最大。

$$\max F_2(A_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^i (A_{ij} \times C_{ij} + B_{ij} \times E_{ij} - D_{ij} - H_{ij}) \quad (13)$$

式中:  $E_{ij}$  为调引长江水的各分水区水价;  $H_{ij}$  为调长江水运行费用。

#### 3.3.2 约束条件

(1) 供水约束。

$$\sum_{j=1}^3 A_{1j} \leq a_1 \quad \sum_{j=1}^3 B_{1j} \leq b_1 \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^1 A_{2j} \leq a_2 \quad \sum_{j=1}^1 B_{2j} \leq b_2 \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^7 A_{3j} \leq a_3 \quad \sum_{j=1}^7 B_{3j} \leq b_3 \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^1 A_{4j} \leq a_4 \quad \sum_{j=1}^1 B_{4j} \leq b_4 \quad (17)$$

式中:  $b_1, b_2, b_3, b_4$  分别为向潍坊、青岛、烟台和威海调引长江水的指标。

(2) 需水约束。

$$Q_{12} \leq \sum_{j=1}^3 A_{1j} + \sum_{j=1}^3 B_{1j} \leq Q_{11} \quad (18)$$

$$Q_{22} \leq \sum_{j=1}^1 A_{2j} + \sum_{j=1}^1 B_{2j} \leq Q_{21} \quad (18)$$

$$Q_{32} \leq \sum_{j=1}^7 A_{3j} + \sum_{j=1}^7 B_{3j} \leq Q_{31} \quad (20)$$

$$Q_{42} \leq \sum_{j=1}^1 A_{4j} + \sum_{j=1}^1 B_{4j} \leq Q_{41} \quad (21)$$

(3) 非负约束。

$$A_{ij} \geq 0 \quad B_{ij} \geq 0 \quad (22)$$

### 4 优化配置结果

利用 LINGO 求解多目标函数模型, 进行不同水源在受水区之间的水资源优化配置——山东省胶东受水区不同规划年(2020年、2025年)不同水源不同保证率(50%、75%、95%)下的水资源优化配置方案, 求出最优解, 优化配置结果见表 7、表 8。

### 5 优化配置结果分析

通过上述胶东调水优化配置结果, 在现有工程条件、不超过供水指标的前提下调引黄河水和长江水使潍坊、青岛、烟台、威海缺水量减少, 缺水率降

表7 调引黄河水时的水资源优化配置结果

Tab. 7 The optimal allocation of water resources when transferring water from the Yellow River

| 规划年    | 保证率 | 万 m <sup>3</sup> |        |        |       |
|--------|-----|------------------|--------|--------|-------|
|        |     | 潍坊市              | 青岛市    | 烟台市    | 威海市   |
| 2020 年 | 50% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        | 75% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        | 95% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
| 2025 年 | 50% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        | 75% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        | 95% | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |

表8 调引黄河水和长江水时的水资源优化配置结果

Tab. 8 Optimal allocation of water resources when transferring water from Yellow River and Yangtze River

| 规划年    | 保证率 | 水源 | 万 m <sup>3</sup> |        |        |       |
|--------|-----|----|------------------|--------|--------|-------|
|        |     |    | 潍坊市              | 青岛市    | 烟台市    | 威海市   |
| 2020 年 | 50% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 8 153  | 1 274 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |
|        | 75% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |
|        | 95% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |
| 2025 年 | 50% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |
|        | 75% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |
|        | 95% | 引黄 | 30 700           | 23 300 | 13 700 | 5 200 |
|        |     | 引江 | 10 000           | 13 000 | 9 650  | 5 000 |

低,同时实现工程效益最大化。也表明目前研究区域缺水量大于黄河和长江水分配的调水指标,供水按照指标调水明显不能满足当地的缺水。胶东调水优化配置后,不同水源情况下各个规划年不同保证率的缺水量见表9、表10。

表9 实施黄河水后的缺水量

Tab. 9 The water shortage after transferring water from Yellow River

| 规划年    | 保证率 | 受水区      |          |          |          |
|--------|-----|----------|----------|----------|----------|
|        |     | 潍坊市      | 青岛市      | 烟台市      | 威海市      |
| 2020 年 | 50% | 42 008.7 | 50 343.3 | 4 102.8  | 1 073.6  |
|        | 75% | 43 068.0 | 50 468.0 | 15 094.9 | 16 818.2 |
|        | 95% | 43 129.7 | 50 529.7 | 42 046.9 | 31 242.4 |
| 2025 年 | 50% | 68 008.1 | 75 408.1 | 30 181.7 | 16 943.2 |
|        | 75% | 68 132.8 | 75 532.8 | 41 173.8 | 32 687.8 |
|        | 95% | 68 194.4 | 75 594.4 | 68 125.8 | 47 112.0 |

通过表9和表3对比分析可知,调引黄河水后胶东受水区规划年的缺水量均降低,在2020年,潍

坊市50%保证率下缺水量降低42%,75%和95%保证率下缺水量大约降低50%;青岛市在各保证率下的缺水量均降低32%;烟台市在各保证率下缺水量分别降低约77%、48%和25%;威海市在各保证率下缺水量分别降低83%、24%和14%。在2025年,潍坊市在各保证率下缺水量均降低31%;青岛市在各保证率下的缺水量均降低24%;烟台市在各保证率下缺水量分别降低31%、25%和17%;威海市在各保证率下缺水量分别降低为23%、14%和10%。

表10 实施黄河水和长江水后的缺水量

Tab. 10 The water shortage after transferring water from Yellow River and Yangtze River

| 规划年    | 保证率 | 受水区     |         |         |         |
|--------|-----|---------|---------|---------|---------|
|        |     | 潍坊市     | 青岛市     | 烟台市     | 威海市     |
| 2020 年 | 50% | 32008.7 | 37343.3 | 0       | 0       |
|        | 75% | 45134.2 | 37468.0 | 5444.9  | 11818.2 |
|        | 95% | 51731.7 | 37529.7 | 32396.9 | 26242.4 |
| 2025 年 | 50% | 47456.7 | 62408.1 | 20531.7 | 11943.2 |
|        | 75% | 60582.2 | 62532.8 | 31523.8 | 27687.8 |
|        | 95% | 67179.7 | 62594.4 | 58475.8 | 42111.9 |

通过表10和表3对比分析可知,同时调引黄河水和长江水后胶东受水区规划年的缺水量均降低,在2020年,潍坊市在各保证率下缺水量分别降低近56%、47%、44%;青岛市在各保证率下缺水量均降低49%;烟台市在50%保证率下不缺水,75%和95%保证率下缺水量分别降低81%、42%;威海市在50%保证率下不缺水,75%和95%保证率下缺水量分别降低46%、28%。在2025年,潍坊市在各保证率下缺水量分别降低47%、40%、38%;青岛市在各保证率下的缺水量均降低近37%;烟台市在各保证率下的缺水量分别降低近53%、43%、29%;威海市在各保证率下的缺水量分别降低近46%、27%、19%。

## 6 结语

### 6.1 结论

结合胶东调水工程的实际情况,通过对调水系统的概化,基于受水区水资源供需平衡分析,以受水区缺水量最小、工程效益最大为目标,构建了胶东调水工程的水资源多目标优化配置模型,并进行跨流域水资源优化配置,确定优化配置方案。结论如下。

(1) 供需平衡分析结果为:在考虑当地水、非常规水源、黄河水和长江水不同组合情况下,四个地市

在2014年、2020年与2025年分别存在不同程度的缺水。考虑当地水源和非常规水源情况下,研究区域在50%、75%和95%不同保证率下,2014、2020和2025年缺水量分别为10亿 $m^3$ 、15.5亿 $m^3$ 、17.5亿 $m^3$ 和17.04亿 $m^3$ 、21.04亿 $m^3$ 、25.85亿 $m^3$ 与25.29亿 $m^3$ 、29.29亿 $m^3$ 、34.09亿 $m^3$ 。

(2)不考虑长江水时,通过优化配置,50%、75%和95%不同保证率下,2020年与2025年潍坊市、青岛市、烟台市和威海市的缺水量分别降低42%~50%、32%、25%~77%、14%~83%与31%、24%、17%~31%、10%~23%。

(3)考虑长江水时,通过优化配置,50%、75%和95%不同保证率下,2020年与2025年潍坊市、青岛市、烟台市和威海市的缺水量分别降低44%~56%、49%、42%~100%、28%~100%与38%~47%、37%、29%~53%、19%~46%。

由此可见,优化配置方案有效缓解胶东地区水资源短缺状况和供需矛盾,在现行工程条件、水质满足要求的前提下配置方案应用于胶东调水工程,具有重要的应用价值。

## 6.2 展望

目前为了满足胶东调水局的实际调水需要,规划年只考虑了现行供水指标进行调水研究,未考虑不同来水情况供水指标的调水。

(1)受水区缺水量较大,目前的调水指标不能满足规划年的用水需求,为满足规划年的用水需求,需要扩大调水工程规模、增加客水分配指标。

(2)参考同比例丰增枯减原则对不同情况下的供水指标进行调整,深入开展调度研究。

### 参考文献(References):

- [1] 刘默,赵加敏,蒋福春.水资源优化配置的分析[J].国土与自然资源研究,2005,(2):81-82.(LIU M,ZHAO J M,JIANG F C. Analysis on optimizative layout of water resources [J]. Territory & Natural Resources Study, 2005, (2): 81-82. (in Chinese)) DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2005.02.040.
- [2] 粟晓玲,康绍忠.石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J].农业工程学报,2009,25(11):128-132.(SU X L,KANG S Z. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 128-132. (in Chinese))
- [3] 汪党献,王浩,马静.中国区域发展的水资源支撑能力[J].水利学报,2000,(11):21-26.(WANG D X,WANG H,MA J. Water resources supporting capacity for regional development in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 21-26. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2000.11.004.
- [4] 邓建绵,刘铁军.关于我国水资源优化配置的研究[J].中国工程咨询,2004,(7):34-36.(DENG J M,LIU T J. Study on optimal allocation of water resource in China [J]. Chinese Consulting Engineers, 2004, (7): 34-36. (in Chinese))
- [5] 王顺久,侯玉,张欣,等.中国水资源优化配置研究的进展与展望[J].水利发展研究,2002,2(9):9-11.(WANG S J,HOU Y,ZHANG X, et al. Progress and prospect for study on water resources optimal allocation in China [J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(9): 9-11. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrd.2002.09.003.
- [6] 尤样输,谢新民,孙仕军等.我国水资源配置模型研究现状与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(2):131-140.(YOU Y S,XIE X M,SUN S J, et al. Review on the present situation and future prospect of water resources deployment models in China [J]. Journal of China Institute of Water, 2004, 2(2): 131-140. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2004.02.010.
- [7] 李志富.中国水资源的特点、存在的问题及对策[J].科技信息,2009(33):531.(LI Z F. Characteristics, problems and countermeasures of water resources in China [J]. Science & Technology Information, 2009(33): 531. (in Chinese))
- [8] 王海政,全允恒.可持续发展视角下的区域水资源优化配置模型[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(9):32-37.(WANG H Z,RONG Y H. Optimal allocation models for regional water resources with sustainable development [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(9), 32-37. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.09.022.
- [9] 山东省胶东调水局,山东省水利科学研究院.山东半岛蓝色经济区水系联通模式与合理布局研究[R].2014.(Bureau of Jiaodong Water Diversion in Shandong Province, Shandong Province Hydraulic Research Institute. Shandong peninsula blue economic zone drainage unicom mode and reasonable layout research [R]. 2014. (in Chinese))
- [10] 姚荣.基于可持续发展的区域水资源合理配置研究[D].南京:海海大学,2005.(YAO R. Study on rational allocation of water resources in a region based on the sustainable development [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [11] 蒋旭光.跨流域调水系统水资源管理研究[D].天津:天津大学,2008.(JIANG X G. Study on water resources management of interbasin water transfer system [D]. Tianjing: Tianjing university, 2008. (in Chinese))
- [12] 任艳粉,张林波.水资源系统分析法在水资源优化配置中的应用[J].水利科技与经济,2006,12(10):695-696.(REN Y F,ZHANG L B. System analysis method of water resources and the application of optimal allocation of water resources [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(10): 695-696. (in Chinese))
- [13] 任政,郑旭荣,夏明华,等.玛纳斯河流域水资源优化配置模型研究[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):34-36.(REN Z,ZHENG X R,XIA M H, et al. A model for water resources optimal distribution in Manas river basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(3): 34-36. (in Chinese))

- nese))
- [14] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (QU G D. Study on rational regional water resources allocation and its program comprehensive benefits evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [15] 朱成涛. 区域多目标水资源优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHU C T. Study on optimal allocation of regional multi objective Water Resources [D]. Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [16] 宋苏林. 济南市中心城区水资源优化配置及泉流量模拟研究[D]. 山东: 山东大学, 2010. (SONG S L. Water resources optimal allocation and simulation of spring discharge on Jinan Center Urban [D]. Shandong: Shandong University, 2010. (in Chinese))
- [17] 刘淋淋, 曹升乐, 于翠松. 用水总量控制指标的确定方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 1672-1683. (LIU L L, CAO S L, YU C S. Research on determination of the control index of total water use [J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 1672-1683. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.05159.
- [18] 国家统计局. 山东省统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015. (National Bureau of Statistics. Shandong Province statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese))
- [19] 张平, 赵敏, 郑垂勇. 南水北调东线受水区水资源优化配置模型[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 88-94. (ZHANG P, ZHAO M, ZHENG C Y. Optimal allocation of water resources in the water import areas of the East Route of the South to North Water Transfer Region [J]. Resources Science, 2006, 28(5): 88-94. (in Chinese))
- [20] 山东省发展计划委员会. 山东境内黄河及所属支流水量分配暨黄河取水许可总量控制指标细化方案[Z]. 2004. (Shandong Provincial Development Planning Committee. Water distribution of the Yellow River and its tributaries in Shandong Province and the detailed plan for the total amount control index of the Yellow River water intaking license [Z]. 2004. (in Chinese))
- 
- (上接第 63 页)
- [17] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69, 75. (WU Z D, WANG Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water [J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2010, 41(7): 64-69, 75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.014.
- [18] 赵小娥, 魏琳, 曹叔尤, 等. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 45-47. ZHAO X E, WEI L, CAO S Y, et al. Study on characteristics of overland flow with higher rain intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 45-47. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2009.06.030.
- [19] 张强, 田风霞, 马春艳. 黄土区土质道路人工降雨及放水试验条件下产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 83-87. (ZHANG Q, ZHENG S Q, TIAN F G, et al. Runoff and sediment yield characteristics of earth road under artificial rainfall and simulated overland flow tests conditions in loess plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 83-87. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.05.014.
- [20] 邓建才, 陈效民, 张佳宝, 等. 黄淮海平原主要土壤水力参数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2002, 21(3): F3. (DENG J C, CHEN X M, ZHANG J B, et al. Saturated Hydraulic Conductivities of three soils in Huang Huai Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(3): F3. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2002.03.001.
- [21] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. 水科学进
- 展, 2010, 21(6): 779-787. (ZHU Y J, SHAO M A. Simulation of Rainfall Infiltration in Stony Soil [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 779-787. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.06.018.
- [22] RIEKE-ZAPP D, et al. 2001. Rocks and Rills: the Impact of Rock Fragments on Soil Loss by Concentration Flow Erosion in Laboratory Experiments. In: D. E. Stott, R. H. Mohtar and B. c. Steinhart (eds). Sustaining the Global Farm. The 10th International Soil Conservation Organization Meeting Held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 796-802, pp.
- [23] BEIBEI Z, MING AN S, MINGXIA W, et al. Effects of coal gangue content on water movement and solute transport in a China loess plateau soil [J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2015, 38(11): 1031-1038.
- [24] BOUWER H, RICE R C. Hydraulic properties of stony vadose zones [J]. Groundwater, 1984, 22(6): 696-705.
- [25] REIGNER I C, PHILLIPS J J. Variations in bulk density and moisture content within two new jersey coastal plain soils, lakeland and lakelhurst sands [J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28(2): 287-289.
- [26] LOGSDON S D, JAYNES D B. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1426-1431.
- [27] 邵明安. 土壤物理学[M]. 高等教育出版社, 2006. (SHAO M A. Soil Physics [M]. Higher Education Press, 2006. (in Chinese))