

# 面向供水对象转型的引大入秦工程 水资源优化配置研究

孙凯悦<sup>1</sup>, 牛最荣<sup>1</sup>, 王建旺<sup>2</sup>, 张小艳<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省引大入秦水资源利用中心, 甘肃 兰州 730300)

**摘要:** 引大入秦工程(以下简称引大工程)建成初期主要以秦王川农业供水为主,但随着兰州新区的建设发展,其供水对象开始向城市生活用水和工业用水转型,如何实现有限水资源的合理配置是目前研究的重点问题。基于此,依据引大工程供水区(以下简称引大供水区)可持续发展要求,构建以实现经济、社会、生态效益最大化为目标函数,可供水量、输水能力、用户需水量、排水系统排水量与变量非负为约束条件的多目标水资源优化配置模型,使用遗传算法进行求解。结果表明:2025年引大供水区不同用水部门配水量(保证率 $P=50%$ 、 $P=75%$ )分别为生活用水 $8\ 323.85 \times 10^4$ 、 $8\ 322.49 \times 10^4$   $m^3$ ,农业用水 $15\ 001.95 \times 10^4$ 、 $15\ 631.53 \times 10^4$   $m^3$ ,工业用水 $11\ 111.00 \times 10^4$ 、 $11\ 100.00 \times 10^4$   $m^3$ ,生态用水 $946.88 \times 10^4$ 、 $947.02 \times 10^4$   $m^3$ ,各部门总配水量与优化前供水量 $4.23 \times 10^8$   $m^3$ 相比,达到供需平衡;2030年引大供水区不同用水部门配水量(保证率 $P=50%$ 、 $P=75%$ )分别为生活用水 $12\ 650.51 \times 10^4$ 、 $12\ 666.53 \times 10^4$   $m^3$ ,农业用水 $16\ 397.77 \times 10^4$ 、 $17\ 019.70 \times 10^4$   $m^3$ ,工业用水 $20\ 498.00 \times 10^4$ 、 $20\ 508.00 \times 10^4$   $m^3$ ,生态用水 $948.00 \times 10^4$ 、 $948.88 \times 10^4$   $m^3$ ,不同保证率下各部门总体缺水率分别为12.27%、13.38%。2025—2030年引大供水区的非农业用水结构将大幅提升,农业灌溉用水量降低。研究结果可为引大供水区优化水资源配置决策提供参考依据。

**关键词:** 水资源优化配置; 多目标; 遗传算法; 引大入秦工程

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0093-08

## Optimal allocation of water resources from Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project addressing water supply object transformation

SUN Kaiyue<sup>1</sup>, NIU Zuirong<sup>1</sup>, WANG Jianwang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoyan<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Water Resources Utilization Center of Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project, Lanzhou 730300, China)

**Abstract:** Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project (hereinafter referred to as the DQ Project) was proposed initially for the purpose of agricultural water supply in the Qinwangchuan Basin at the early stages, but with the development of the construction of new district in Lanzhou, urban domestic water use and industrial water use started to take the largest share of the water supply, which brought the conundrum of reasonable allocation of limited water resources in current research. Regarding to this problem, a multi-objective water resources optimization allocation model was established with the realization of economic, social and ecological benefit maximization as the objective function, the non-negativeness of water supply, water conveyance capacity, water demand, discharge of drainage system and variables as the constraint condition, according to the sustainable development requirements of the Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project water supply area (hereinafter referred to as the DQ water supply area), then the model was solved by genetic algorithm. The results show that in 2025, the water distribution (assurance rate  $P=50%$ ,  $P=75%$ ) of different water use departments in the DQ

收稿日期:2022-10-16; 修回日期:2022-11-24

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(21YF5FA094); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(甘水建管发[2021]71号-7、甘水建管发[2021]71号-70)

作者简介:孙凯悦(1998—),女,甘肃宁县人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。

通讯作者:牛最荣(1964—),男,甘肃通渭人,博士,教授级高级工程师,研究方向为水文学与水资源。

Water Supply Area will be  $83.2385 \times 10^6$  and  $83.2249 \times 10^6 \text{ m}^3$  of domestic water use,  $150.0195 \times 10^6$  and  $156.3153 \times 10^6 \text{ m}^3$  of agricultural water use,  $111.1100 \times 10^6$  and  $111.0000 \times 10^6 \text{ m}^3$  of industrial water use,  $9.4688 \times 10^6$  and  $9.4702 \times 10^6 \text{ m}^3$  of ecological water use, respectively. The total water distribution of the departments is in balance with the water supply of  $423 \times 10^6 \text{ m}^3$  before optimization. In 2030, the water distribution (assurance rate  $P = 50\%$ ,  $P = 75\%$ ) of different water use departments in this area will be  $126.5051 \times 10^6$  and  $126.6653 \times 10^6 \text{ m}^3$  of domestic water use,  $163.9777 \times 10^6$  and  $170.1970 \times 10^6 \text{ m}^3$  of agricultural water use,  $204.9800 \times 10^6$  and  $205.0800 \times 10^6 \text{ m}^3$  of industrial water use,  $9.4800 \times 10^6$  and  $9.4888 \times 10^6 \text{ m}^3$  of ecological water use, respectively, and the overall water shortage rate of each department under different assurance rates is 12.27% and 13.38% respectively. From 2025 to 2030, the non-agricultural water use structure of the DQ Water Supply Area would increase greatly, which in turn would cause the decrease of the agricultural water use. In general, the research results can provide some references for the decision-making of the optimal water resources allocation in the DQ Water Supply Area.

**Key words:** optimal allocation of water resources; multi-objective; genetic algorithm; Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project

## 1 研究背景

水资源是经济社会发展的重要保障因素之一,其优化配置是节约水资源的重要举措。近年来,随着经济社会的发展与用水需求的增加,水资源短缺问题日益严峻<sup>[1-3]</sup>。以实现经济、社会、生态效益最优为目标,实现水资源安全、合理、高效利用已成为水资源优化配置研究的热点问题之一。目前,关于水资源优化配置研究主要集中于配置区域<sup>[4-6]</sup>、配置方法<sup>[7-8]</sup>、优化配置与平衡对策<sup>[9-10]</sup>等方面,对多目标供水工程开展水资源优化配置研究对供水区水源高效利用、生态合理规划具有重要意义。

已有诸多学者开展了水资源优化配置研究,配置方法大致分为机器算法和传统分析方法两种,常见的机器算法主要有遗传算法<sup>[11-13]</sup>、粒子群算法<sup>[14-16]</sup>、人工鱼群算法<sup>[17-19]</sup>等,传统分析方法包括线性及非线性规划<sup>[20-21]</sup>、动态规划<sup>[22-23]</sup>、多目标规划<sup>[25-27]</sup>等。传统分析方法计算结果精度较差,在收敛性与参数敏感性等方面不是很理想,水资源优化配置系统的不确定性、复杂性与高度非线性等特点超出了其处理能力,常导致计算方法难以求解或计算结果与实际不符等问题<sup>[28-29]</sup>。而机器算法具有概念简单、寻优能力强、求解效率高等优点,目前已广泛应用于水资源优化配置模型中<sup>[30]</sup>,但主要以市级及以上区域范围的应用居多,在区县级研究中较少。

目前,针对引大供水区水资源优化配置,主要是基于多目标线性规划建立水资源优化配置模型<sup>[31-32]</sup>。原引大工程是一项面向兰州市秦王川地区农业灌溉的自流供水工程,但是为了适应区域经

济发展新要求和兰白都市圈、兰州新区开发建设新形势,2009年11月国家发展改革委批准的《引大入秦工程供水结构优化调整方案修编报告》中指出:将灌溉面积由  $6.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$  调减为已完成配套的实际面积  $4.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,并将皋兰县、白银区与景泰县的生产生活供水纳入工程的供水范围与供水对象,这项工程也是近期给兰州新区供水的唯一水源。因此,引大工程的功能定位由当初的“发展灌溉,生产粮食,解决温饱”调整为“以兰白都市圈经济社会发展为依托,以经济、社会、生态效益最大化为目标,统筹农业、工业、城市生活、生态等各类用水需求,以城市供水为主,兼顾农业灌溉,为兰州新区开发、兰白都市圈建设和供水区经济社会发展提供水资源支撑”<sup>[33]</sup>。可见,引大供水区水资源优化配置由单一化转向了多目标,现有的水资源优化配置已经不符合目前供水结构的转变,如何对有限水资源进行合理的优化配置仍是引大供水区亟待解决的问题<sup>[34-36]</sup>。因此,本研究以经济、社会、生态效益最优为目标,构建了基于多目标遗传算法的水资源配置模型,旨在为引大供水区水资源配置提供优化方案,以此平衡供水区各区县间的用水需求,对推动供水区经济、社会与生态的协调发展有重要意义。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

引大供水区地处我国西北内陆,属于干旱缺水地区,其行政区域包括兰州新区、皋兰县、永登县、白银区和景泰县,季节特征明显,降水稀少,蒸发强烈,雨季多集中在7—9月,自然植被覆盖率较低。供水

区内较大河流仅有庄浪河,其余均为季节性沟道,仅在降雨时才形成径流<sup>[37]</sup>。供水区主要以农业生产为主,需水量较大,为缓解水资源供需矛盾,引大工程将位于甘肃、青海两省交界处的大通河水跨流域东调至秦王川盆地,总干渠从天祝县境内的天堂寺渠首引水,全长 87 km,设计引水量为 32 m<sup>3</sup>/s,加大引水流量为 36 m<sup>3</sup>/s<sup>[38]</sup>,有效解决了其干旱缺水的困扰,是西北地区的大型自流灌溉扶贫工程,其跨流域调水示意图如图 1 所示。自工程建成通水以来,供水区的农业生产条件得到了改善,生态环境、居民生活、城镇面貌也发生了极大的变化,为供水区经济社会的可持续发展奠定了基础。

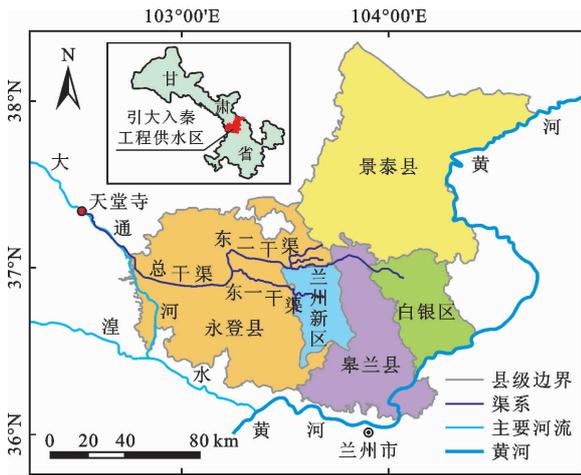


图 1 引大入秦工程跨流域调水示意图

## 2.2 数据来源

本研究采用的数据来自于《甘肃省统计年鉴(2009—2020年)》《甘肃省城镇体系规划(2013—2030年)》《引大入秦工程供水结构优化调整方案报告》《甘肃省人民政府办公厅关于下达甘肃省地级行政区 2015 年 2020 年 2030 年水资源管理控制指标的通知》(甘政办发[2013]171号)以及甘肃省引大入秦水资源利用中心相关监测数据与资料。

## 2.3 研究方法

2.3.1 决策变量 根据模型建立的需要,将  $x_{cmn}^{\pm}$  (公共水源  $c$  向  $m$  计算单元  $n$  用户的供水量) 作为决策变量。将兰州新区、皋兰县、永登县、白银区与景泰县 5 个计算单元分别记为  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$ ; 用水户主要包括生活、农业、工业和生态用水,分别记为  $n_1, n_2, n_3, n_4$ , 其主要由公共水源引大工程供水,记为  $c$ 。

2.3.2 目标函数 水资源优化配置实质上是供水区经济、社会与生态系统相互耦合的多目标优化问题,以此达到可持续发展的目的。因此,本研究选择

经济、社会和生态效益作为模型的目标函数<sup>[39-40]</sup>。

(1) 社会目标。用供水区缺水量的最小值来表示。

$$F_1(x) = \min \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (D_{mn}^{\pm} - \sum_{c=1}^C x_{cmn}^{\pm}) \right] \quad (1)$$

式中:  $F_1(x)$  为社会目标函数,即某计算单元某用水户的需水量与供水量之差的最小值,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $D_{mn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的需水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $x_{cmn}^{\pm}$  为公共水源  $c$  向  $m$  计算单元  $n$  用户的供水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $M$  为计算单元数目;  $N$  为  $m$  计算单元的用水户数目;  $C$  为供水区内公共水源数目,即引大水源。

(2) 经济目标。以供水区在经过水资源优化配置后的经济效益达到最大来表示。

$$F_2(x) = \max \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{c=1}^C (b_{cmn}^{\pm} - c_{cmn}^{\pm}) x_{cmn}^{\pm} \alpha_{cm}^{\pm} \right] \beta_{mn}^{\pm} w_m^{\pm} \right\} \quad (2)$$

式中:  $F_2(x)$  为经济目标函数,为供水效益与成本之差的最大值,  $10^4$  元;  $b_{cmn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元的公共水源  $c$  向  $n$  用户单位供水产生的用水效益系数,元/ $\text{m}^3$ ;  $c_{cmn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元的公共水源  $c$  向  $n$  用户单位供水产生的供水费用系数,元/ $\text{m}^3$ ;  $\alpha_{cm}^{\pm}$  为  $m$  计算单元的公共水源  $c$  的供水次序系数;  $\beta_{mn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的用水公平系数;  $w_m^{\pm}$  为  $m$  计算单元的权重系数。

(3) 生态目标。供水区内生态用水的同时必定造成排污,用能够代表供水区污染成分(例如 COD) 的排污量的最小值来间接表示。

$$F_3(x) = \min \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (0.01 d_{mn}^{\pm} p_{mn}^{\pm}) \sum_{c=1}^C x_{cmn}^{\pm} \right] \quad (3)$$

式中:  $F_3(x)$  为生态目标函数,即用能够代表供水区污染成分的排污量的最小值来间接表示,  $t$ ;  $d_{mn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元  $n$  用户单位废水排放量中 COD 的含量,  $\text{mg/L}$ ;  $p_{mn}^{\pm}$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的污水排放系数。

(4) 目标函数规范化。由于以上 3 个目标函数的量纲不一致,在求得各目标函数的最大值或最小值后,利用公式(4) 将其规范化,使得模型便于求解。

$$\gamma_i = \frac{F_i(x) - F_{i,\min}(x)}{F_{i,\max}(x) - F_{i,\min}(x)} \quad (4)$$

### 2.3.3 约束条件

(1) 可供水量。公共水源  $c$  对计算单元各用水户的总供水量不应多于其可供水量,即:

$$\sum_{n=1}^N x_{cmn}^{\pm} \leq D_{cm}^{\pm} \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M D_{cm}^{\pm} \leq W_c^{\pm} \quad (6)$$

式中:  $D_{cm}^{\pm}$  为公共水源  $c$  供给  $m$  计算单元的用水量,

$10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_c^\pm$  为公共水源  $c$  的可供水量,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

(2) 输水能力。公共水源  $c$  向各用水部门输送的水量不应大于其最大输水能力, 即:

$$x_{cmn}^\pm \leq P_{cm \max}^\pm \quad (7)$$

式中:  $P_{cm \max}^\pm$  为公共水源  $c$  向  $m$  计算单元的最大输水能力,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

(3) 用户需水量。公共水源  $c$  向各计算单元各用水户提供的水量不应低于该用水户的最小需水量, 不应大于其最大需水量, 即:

$$D_{mn \min}^\pm \leq \sum_{c=1}^C x_{cmn}^\pm \leq D_{mn \max}^\pm \quad (8)$$

式中:  $D_{mn \min}^\pm$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的最小需水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $D_{mn \max}^\pm$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的最大需水量,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

(4) 排水系统排水量。污水中的污染物需要进行合理的达标排放, 其排放总量不可超过允许的总排放量, 即:

$$C_{mne}^\pm \leq C_0^e \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (0.01 d_{mn}^\pm p_{mn}^\pm \sum_{c=1}^C x_{cmn}^\pm) \leq E_0 \quad (10)$$

式中:  $C_{mne}^\pm$  为  $m$  计算单元  $n$  用户所排放的污水中污染物  $e$  的浓度;  $C_0^e$  为污染物  $e$  规定达标的排放浓度;  $E_0$  为污染物  $e$  所允许排放的总量,  $t$ 。

(5) 非负变量。各计算单元各用水户的供水量为非负数, 且能够满足其正常用水, 即:

$$x_{cmn}^\pm \geq 0 \quad (11)$$

### 2.3.4 参数设置

(1) 用水公平系数、供水次序系数。用水公平系数反映了计算单元中某一用水户相对于其他用水户得到供水的优先程度。目前, 在对引大供水区进行水资源优化配置时, 按照“先生活, 后生产”的基本供水原则, 在水资源有限的条件下, 应最先满足生活用水和农业用水, 其次统筹规划工业用水及其他用水<sup>[41]</sup>。由此可得用水户的先后次序为生活用水、农业用水、工业用水和生态用水, 通过公式(12) 计算得到生活用水、农业用水、工业用水和生态用水的公平系数分别为 0.4、0.3、0.2 和 0.1。

$$\varepsilon_{mn}^\pm = \frac{1 + n_{mn \max}^\pm - n_{mn}^\pm}{\sum_{n=1}^N (1 + n_{mn \max}^\pm - n_{mn}^\pm)} \quad (12)$$

式中:  $n_{mn}^\pm$  为  $m$  计算单元  $n$  用户的用水序号;  $n_{mn \max}^\pm$  为  $m$  计算单元  $n$  用户用水序号的最大值。

供水次序系数反映了某一水源相对于其他水源供水的优先程度。由于引大供水区主要为引大供

水, 所以其供水次序系数为 1。

(2) 效益系数、费用系数。生活用水的效益系数难以赋值, 为使其供水量得到充分保证, 一般确定为较大值; 农业用水的效益系数通过农业生产与水利分摊系数确定; 工业用水的效益系数通过工业万元增加值用水定额的倒数确定; 由于生态与居民生活息息相关, 所以生态用水的效益系数参考生活用水的效益系数<sup>[42]</sup>。根据以上原则, 确定引大供水区的生活用水、农业用水、工业用水和生态用水的效益系数分别为 500、15、250、500 元/ $\text{m}^3$ 。

不同水源供应于不同用水户的费用系数一般根据水费征收标准来确定, 对于有资料的水源工程, 可直接进行计算, 缺乏资料时, 可参考临近水源工程的数据<sup>[43]</sup>。因此, 引大供水区的生活用水、农业用水、工业用水和生态用水的费用系数分别为 1.75、0.15、0.15 和 0.50 元/ $\text{m}^3$ 。

(3) 计算单元权重系数。计算单元的权重系数  $w_m^\pm$  表示供水区内某一计算单元相对于其他计算单元的重要程度, 一般通过层次分析法 (analytical hierarchy process, AHP)、二元对比定权法和德尔菲法 (Delphi method) 等决策方法确定<sup>[44]</sup>。本研究采用层次分析法得出计算单元兰州新区、皋兰县、永登县、白银区、景泰县的权重系数分别为 0.33、0.14、0.30、0.13、0.10。

2.3.5 求解方法 优化算法一般分为传统与智能两种计算类型。传统优化算法属于局部优化算法, 与初始点关联较大, 通常情况下, 寻找的极值点并不能保证全局最优, 需要用多个初始点与结果进行对比, 所以此算法只适合于小规模的问题计算, 而且有一定的局限性。而智能算法是一种启发式优化算法, 其中遗传算法是借鉴生物界的自然选择和进化规律发展得到的随机化搜索算法, 具有更好的寻优能力和较强的自适应性等特点, 适合解决传统优化算法无法解决的复杂非线性问题<sup>[45-46]</sup>。因此, 本研究考虑用遗传算法来求解引大供水区的多目标水资源优化配置问题。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 供需水预测

以 2020 年为基准年, 设定 2025 和 2030 年为规划水平年, 对引大供水区所辖兰州新区、皋兰县、永登县、白银区与景泰县进行平枯状态下的供需水预测, 采用定额法预测规划水平年生活、农业及生态需水量<sup>[47]</sup>, 采用万元产值指标法预测规划水平年工业需水量<sup>[48]</sup>。预测结果见表 1。由表 1 可以看出, 随

着农业节水工艺与技术的提高,引大供水区的农业需水量呈减少趋势。

根据 2013 年《甘肃省人民政府办公厅关于下达甘肃省地级行政区 2015 年 2020 年 2030 年用水总量控制指标的通知》,引大工程 2020、2030 年的用水总量控制指标分别为  $4.03 \times 10^8$ 、 $4.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,用内插法预测到引大工程 2025 年的用水总量控制指标为  $4.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,2025、2030 年引大工程可供水量分别按  $4.23 \times 10^8$ 、 $4.43 \times 10^8 \text{ m}^3$  控制。

### 3.2 水资源优化配置结果

依据上述介绍的基于遗传算法的大系统整体优化方法实现步骤,使用 MATLAB R2021a 编程计算得到不同规划水平年在不同保证率条件下引大供水

区水资源配置成果如表 2、3 所示。

### 3.3 讨论

3.3.1 水资源配置成果合理性分析 以计算单元中的兰州市和白银市为例,引大供水区不同规划年配置水量与用水总量控制指标对比结果见表 4。

由表 4 可知,2025 年引大供水区不同用水户的用水量均在用水总量控制指标范围之内,2030 年两市用水量之和超出用水总量控制指标范围,原因主要是兰州新区工业需水量的增加。根据兰州新区总体规划,远期引大工程优质水将配置给生活用水,新区工业需水不足部分可通过向有关部门申请用水指标或实施农业节水置换水量解决。因此,该水资源配置方案具有合理性。

表 1 引大供水区不同规划水平年各行业需水预测结果

规划水平年	用水类型	保证率 /%	兰州新区/ $10^4 \text{ m}^3$	皋兰县/ $10^4 \text{ m}^3$	永登县/ $10^4 \text{ m}^3$	白银区/ $10^4 \text{ m}^3$	景泰县/ $10^4 \text{ m}^3$
2025	生活需水		2475.02	853.43	2519.18	1410.63	1080.33
	农业需水	50	6342.54	1356.55	4626.75	780.87	1864.00
		75	6656.13	1414.09	4786.16	801.18	1920.69
	工业需水		11100.00	0	0	0	0
	生态需水		946.86	0	0	0	0
	合计	50	20864.42	2209.98	7145.93	2191.50	2944.33
75		21178.01	2267.52	7305.34	2211.81	3001.02	
2030	生活需水		5581.40	978.82	3134.22	1664.84	1310.46
	农业需水	50	6140.82	1382.43	6171.09	807.33	1872.08
		75	6427.64	1438.79	6374.58	825.51	1922.84
	工业需水		20493.00	0	0	0	0
	生态需水		946.86	0	0	0	0
	合计	50	33162.08	2361.25	9305.31	2472.17	3182.54
75		33448.90	2417.61	9508.80	2490.35	3233.30	

表 2 引大供水区不同规划水平年水资源优化配置成果表(  $P = 50\%$  )

规划水平年	计算单元	生活用水	农业用水	工业用水	生态用水	合计
2025	兰州新区	2476.10	6343.80	11111.00	946.88	20877.78
	皋兰县	847.85	1358.50	0	0	2206.35
	永登县	2529.60	4638.10	0	0	7167.70
	白银区	1390.80	783.55	0	0	2174.35
	景泰县	1079.50	1878.00	0	0	2957.50
	合计	8323.85	15001.95	11111.00	946.88	35383.68
2030	兰州新区	5585.90	6141.40	20498.00	948.00	33173.30
	皋兰县	971.11	1384.80	0	0	2355.91
	永登县	3138.20	6180.40	0	0	9318.60
	白银区	1647.60	812.47	0	0	2460.07
	景泰县	1307.70	1878.70	0	0	3186.40
	合计	12650.51	16397.77	20498.00	948.00	50494.28

表3 引大供水区不同规划水平年水资源优化配置成果表( $P = 75\%$ ) $10^4 \text{ m}^3$ 

规划水平年	计算单元	生活用水	农业用水	工业用水	生态用水	合计
2025	兰州新区	2475.80	6657.70	11100.00	947.02	21180.52
	皋兰县	848.39	1415.30	0	0	2263.69
	永登县	2520.10	4793.70	0	0	7313.80
	白银区	1402.40	804.23	0	0	2206.63
	景泰县	1075.80	1960.60	0	0	3036.40
	合计	8322.49	15631.53	11100.00	947.02	36001.04
2030	兰州新区	5585.20	6432.80	20508.00	948.88	33474.88
	皋兰县	977.23	1443.70	0	0	2420.93
	永登县	3136.30	6392.40	0	0	9528.70
	白银区	1659.40	827.00	0	0	2486.40
	景泰县	1308.40	1923.80	0	0	3232.20
	合计	12666.53	17019.70	20508.00	948.88	51143.11

表4 引大供水区不同规划水平年优化配置水量与用水总量控制指标对比

 $10^4 \text{ m}^3$ 

计算单元	项目	2025年		2030年	
		$P = 50\%$	$P = 75\%$	$P = 50\%$	$P = 75\%$
兰州市	优化配置水量	30251.83	30758.01	44847.81	45424.51
	用水总量控制指标	36500.00	36500.00	38300.00	38300.00
	差值	6248.17	5741.99	-6547.81	-7124.51
白银市	优化配置水量	5131.85	5243.03	5646.47	5718.60
	用水总量控制指标	5800.00	5800.00	6000.00	6000.00
	差值	668.15	556.97	353.53	281.40
合计	优化配置水量	35383.68	36001.04	50494.28	51143.11
	用水总量控制指标	42300.00	42300.00	44300.00	44300.00
	差值	6916.32	6298.96	-6194.28	-6843.11

3.3.2 水资源配置方案验证分析 经水资源优化配置后,引大供水区 2025、2030 年最大取水量分别为  $3.60 \times 10^8$ 、 $5.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,与表 5 中 2020 年引大入秦工程管理局在《甘肃省引大入秦工程取用水合理性分析研究与应用》<sup>[49]</sup>中预测的配水量  $4.03 \times 10^8$ 、 $5.83 \times 10^8 \text{ m}^3$  进行对比表明,使用遗传算法的水资源优化配置结果优于上述方案,2025、2030 年节水量分别达到  $0.43 \times 10^8$ 、 $0.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。经过对比分析发现,两种分析法得出的 2025 和 2030 年农业与工业配水量差距均较明显。根据兰州新区建设成国家级节水城市和西北干旱地区水资源循环利用示范城市的要求与节水措施的推进,工业用水量增加趋势缓慢,逐渐代替农业而占据主导地位,实现由农业生产向现代化产业新城区的转变。

表5 引大入秦工程取用水分析<sup>[49]</sup>  $10^4 \text{ m}^3$ 

用水部门	2025年	2030年
生活	9316	13194
农业	12656	30426
工业	17149	13517
生态	1166	1166
合计	40287	58303

## 4 结论与建议

本研究以引大供水区为研究区域,建立基于遗传算法的多目标水资源优化配置模型并进行求解,得到以下结论:

(1)2025 年引大供水区用水主要以农业为主,

其次是工业用水,相比较而言,2030年引大供水区的生活、农业、工业需水量均有所增加。随着节水灌溉的普及与发展,农业需水量增加空间较不明显。根据2030年的水资源优化配置结果,保证率为50%时引大供水区缺水率为12.27%,保证率为75%时缺水率为13.38%,表明2030年引大供水区水资源仍存在一定的供需缺口。

(2)引大工程供水对象与供水用途发生了很大变化,2025和2030年引大工程主要向兰州市供水,以兰州新区为主。随着兰州新区人口规模的扩大与城镇建设的推进,至2030年,兰州新区的城市生活和工业产业将成为引大工程最主要的供水对象。工业应进一步调整产业结构,发展高科技低耗水产业,增加水的循环使用,建立节水型工业。

(3)本研究从引大供水区水资源供需、水源供给情况分析水资源优化配置,结果表明,模型计算结果与引大供水区实际情况较为切合,可为引大供水区水资源优化配置提供决策依据,也可为其他内陆干旱供水区水资源优化配置提供参考。

#### 参考文献:

- [1] QI Shaoqun, WAN Luhe, FU Baoling. Multisource and multiuser water resources allocation based on genetic algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2018, 76: 3222 - 3230.
- [2] 李玲,周玉玺. 水资源非农化的区域差异及收敛性研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):235 - 241 + 249.
- [3] ZHANG Li, CHEN Fu, LEI Yongdeng. Climate change and shifts in cropping systems together exacerbate China's water scarcity[J]. Environmental Research, 2020, 15: 104060.
- [4] 周科. 基于红线管理的郑州市水资源优化配置研究[J]. 人民长江,2021,52(4):124 - 129.
- [5] 张帆,任冲锋,蔡宴朋,等. 基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业机械学报,2021,52(11):297 - 304.
- [6] 杜丽娟,陈根发,柳长顺,等. 基于GWAS模型的灌区水资源优化配置研究:以溧史杭灌区为例[J]. 水利水电技术,2020,51(12):26 - 35.
- [7] 单义明,杨侃,吴云,等. 基于ITSRP模型的吕梁市水资源优化配置研究[J]. 人民黄河,2020,42(11):42 - 47.
- [8] 伍鑫,陈植欣,温庆博,等. 基于强化学习的非常规水资源优化配置模型[J]. 水力发电学报,2021,40(7):23 - 31.
- [9] 栗晓玲. 农业水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报,2022,41(7):1 - 7 + 34.
- [10] 韩雁,张小玲. 张家口水资源优化配置与可持续利用研究[J]. 草业科学,2020,37(7):1376 - 1385.
- [11] LI Ruihuan, CHANG Yingli, WANG Zhaocai. Study of optimal allocation of water resources in Dujiangyan irrigation district of China based on an improved genetic algorithm[J]. Water Supply, 2021, 21(6): 2989 - 2999.
- [12] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护,2020,36(4):47 - 51.
- [13] 王庆杰,岳春芳,李艺珍. 基于MAGA - PPC模型的水资源配置方案综合评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):105 - 110.
- [14] 张倩,张建丰,李涛,等. 粒子群算法的改进及在农业水资源配置的应用[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(6):637 - 642.
- [15] 杜佰林,张建丰,高泽海,等. 基于模拟退火粒子群算法的水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(3):292 - 299.
- [16] CHEN Junfei, YU Cong, CAI Miao, et al. Multi-objective optimal allocation of urban water resources while considering conflict resolution based on the PSO algorithm: a case study of Kunming, China[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1337.
- [17] LIU Mingyu, LUAN Qinghai, LIU Man, et al. Optimal allocation of water resources through artificial fish swarm algorithm: a case study in Haixing, China[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.
- [18] 刘美钰,张雷,栾清华,等. 人工鱼群算法在河间市水资源优化配置中的应用[J]. 水利水电工程学报,2021(3):74 - 83.
- [19] 曾萌,王丰,张永鹏,等. 基于鱼群算法的广东省水资源优化配置研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2020,50(5):733 - 741.
- [20] 葛通达,方红远,梁振东. 基于因素分解与总量控制的区域社会经济用水分析[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(1):172 - 177.
- [21] 高仕春,刘宇栋,程西方,等. 基于水资源配置的水库群生态调度研究[J]. 中国农村水利水电,2020(5):63 - 67.
- [22] CHENG Jianhua, SHI Hansheng, ZHANG Yan, et al. Research and application of optimal water resources allocation based on improved multi-dimensional dynamic programming[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.
- [23] 徐淑琴,徐恩典,马圣洁. 基于动态规划模型的水资源优化配置——以泰来灌区为例[J]. 东北农业大学学报,2022,53(4):70 - 79.
- [24] 杨献献,郭萍,李莱. 面向生态的黑河中游模糊多目标水资源优化配置模型[J]. 节水灌溉,2016(5):65 - 70.
- [25] 杨改强,刘亚红,郭萍,等. 汾河灌区水资源多目标优化配置模型研究[J]. 节水灌溉,2022(8):8 - 15.
- [26] ALAMI M T, NOURANI V, FAZAEI H. Developing a

- surface water resources allocation model under risk conditions with a multi-objective optimization approach [J]. *Water Supply*, 2020, 20(4): 1167–1177.
- [27] PENG Jing, YUAN Ximin, QI Lan, et al. A study of multi-objective dynamic water resources allocation modeling of Huai River [J]. *Water Supply*, 2015, 15(4): 817–824.
- [28] 赵志强, 刘燕, 陈宇. 泾惠渠灌区水资源优化配置研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 30–38.
- [29] 张晓祥, 葛星, 黄诚, 等. 基于图论的抚河流域水资源多目标空间优化配置研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(2): 21–29.
- [30] 田林钢, 杨丹. 基于鲸鱼优化算法的区域水资源优化配置研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2021(7): 31–34+42.
- [31] 姚进忠, 牛最荣, 黄维东. 引大入秦工程水资源优化配置研究 [J]. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 295–299.
- [32] 牛最荣, 黄维东, 陈文, 等. 引大工程供水区水资源优化配置模型及方案研究 [J]. *水文*, 2007, 27(1): 49–55.
- [33] 黄维东, 牛最荣. 甘肃省水资源问题及对策分析 [J]. *人民黄河*, 2011, 33(8): 66–69.
- [34] 刘美钰, 张雷, 栾清华, 等. 人工鱼群算法在河间市水资源优化配置中的应用 [J]. *水利水电工程学报*, 2021(3): 74–83.
- [35] 王浩, 游进军. 中国水资源配置 30 年 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 265–271+282.
- [36] 贺建文. 内陆干旱区城市多目标水资源优化配置研究 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(S1): 26–29.
- [37] 张世彪, 李松, 牛珂平, 等. 甘肃秦王川灌区农业节水途径探讨 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(1): 270–275.
- [38] 张豫生, 莫耀升. 引大入秦灌溉工程简介 [J]. *人民黄河*, 1992, 19(6): 43–45.
- [39] DAVIJANI M H, BANIHABIB M E, ANVAR A N, et al. Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30: 927–946.
- [40] LIU Yong, ZHUANG Yongrui, LU Nan. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, 2016, 9(12): 69–80.
- [41] 田进宽, 郭佳航, 左其亭, 等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 62–67.
- [42] 刘寒青, 赵勇, 李海红, 等. 基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置 [J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 34–41+137.
- [43] 赵燕, 武鹏林, 祝雪萍. 基于改进萤火虫算法的水资源优化配置 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(5): 62–66.
- [44] 李苏, 刘彬. 改进的人工鱼群算法在邯郸市水资源优化配置中的应用 [J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 10–14.
- [45] 潘俊, 王瀚瀚. 基于遗传算法的多目标水资源优化配置——以沈阳地区为例 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2016, 32(5): 945–952.
- [46] IKHAR P, REGULWAR D G, KAMODKAR R U. Optimal reservoir operation using soil and water assessment tool and genetic algorithm [J]. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 24(2): 249–257.
- [47] 杨连海. 基于可持续发展的甘州区水资源合理配置研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(2): 6–10.
- [48] 何英, 彭亮, 耿曙萍. 基于区域经济层次的城市需水预测模型研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(1): 83–86.
- [49] 王建旺, 陈建伟, 胡普年, 等. 甘肃省引大入秦工程取水合理性分析研究与应用 [R]. 兰州: 甘肃省引大入秦工程管理局, 2020.