

# 省市水网融合下台州市水资源优化配置研究

张亚琳<sup>1</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 方国华<sup>1</sup>, 董立翔<sup>2</sup>, 陆洋洋<sup>1</sup>, 王锐<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 台州市水利水电勘测设计院有限公司)

**摘要:**针对台州市水资源时空分布不均、供需矛盾突出及水资源系统韧性不足等问题,基于台州市内的省级、市级水网工程,考虑不同等级水网间的互济互调,构建了面向省市水网融合的多目标水资源优化配置模型。以供水经济效益最大、供水满意度基尼系数最小及总缺水量最小为目标,采用NSGA-III算法进行求解,对比分析了市内水网独立运行(S1方案)、市域水网互济(S2方案)、省级水网定点外补(S3方案)、省市水网深度融合(S4方案)4种方案在不同降水保证率(50%、75%、95%)下的配置效果。结果表明:对比S1基准方案,S2方案可显著缓解工业缺水,在不同降水保证率下供水经济效益提高10.7%~11.0%,供水满意度基尼系数降至0.045~0.071,短期实施效益显著;S4方案在3种不同降水保证率下均可实现最优综合效益,总缺水量降至0.278亿~1.028亿m<sup>3</sup>,供水经济效益为3238.93亿~3306.16亿元,供水满意度基尼系数为0.019~0.042,但对外部供水依赖增强;省市水网深度融合可在更大空间尺度上优化水资源调配,提升水资源系统的整体韧性 with 配置效率。

**关键词:**省市水网融合;水资源优化配置;NSGA-III算法;供水韧性;台州市

**Study on water resources optimization allocation in Taizhou City under provincial-municipal water network integration**//Zhang Yalin<sup>1</sup>, Li Xin<sup>1</sup>, Fang Guohua<sup>1</sup>, Dong Lixiang<sup>2</sup>, Lu Yangyang<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Taizhou Design Institute of Water Conservancy & Hydroelectric Power Co., Ltd.)

**Abstract:** This study addressed the uneven spatiotemporal distribution of water resources, prominent supply-demand conflicts, and insufficient resilience of the water resources system in Taizhou City. Based on the provincial- and municipal-level water network projects in Taizhou City, and considering mutual support and coordinated regulation between water networks at different levels, a multi-objective optimal allocation model for water resources under provincial-municipal water network integration was developed. The model aims to maximize water-supply economic benefits, minimize the Gini coefficient of water supply satisfaction, and minimize the total water shortage, and was solved using the NSGA-III algorithm. Four schemes were compared under precipitation guarantee rates of 50%, 75%, and 95%, including the independent municipal water network operation (S1), intra-municipal water network mutual support (S2), fixed-point supplementation from the provincial water network (S3), and deep integration of provincial and municipal water networks (S4). The results show that, compared to the baseline S1 scheme, the S2 scheme can significantly alleviate industrial water shortage, increase water supply economic benefits by approximately 10.7%-11.0%, and reduce the Gini coefficient of water supply satisfaction to 0.045-0.071 under different precipitation guarantee rates, yielding substantial short-term benefits. The S4 scheme achieves optimal comprehensive benefits under all three precipitation guarantee rates, with the total water shortage reduced to 27.8 million-102.8 million m<sup>3</sup>, water supply economic benefits reaching 323.893 billion-330.616 billion yuan, and the Gini coefficient of water supply satisfaction ranging from 0.019 to 0.042, though its dependence on external water supply increases. Deep integration of provincial and municipal water networks can optimize water resources allocation at a larger spatial scale, thereby enhancing the overall resilience and allocation efficiency of the water resources system.

**Key words:** provincial-municipal water network integration; optimal allocation of water resources; NSGA-III algorithm; water supply resilience; Taizhou City

在国家水网建设战略全面推进的背景下,如何有效应对水资源时空分布不均、供需矛盾突出及水

资源系统韧性不足等问题<sup>[1]</sup>,已成为区域水资源管理面临的核心挑战。当前我国水资源禀赋与经济社

**基金项目:**中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250205015)

**作者简介:**张亚琳(2001—),女,博士研究生,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhuzy12024@163.com

**通信作者:**方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufigh@163.com

会发展格局不匹配,干旱、洪涝等极端水文事件与气候变化影响叠加,进一步加剧了跨区域水安全风险<sup>[2]</sup>。为此,《国家水网建设规划纲要》明确提出构建以“四横三纵”为骨架的国家水网体系,旨在打通跨流域、跨省市的水资源调配通道。然而,国家水网的落地实施不仅依赖于主干工程的调控能力,更需实现省域骨干水网与市域配水网络的高效耦合,形成“纲目协同、上下联动”的调度体系,从而充分发挥跨层级水网的系统效益。因此,探索省市水网融合下的水资源优化配置机制,成为推动国家战略向地方实践转化的关键科学问题<sup>[3]</sup>。

近年来,水资源管理研究经历了从单一工程调度向系统化、网络化调控的重要转变。早期研究多聚焦于单一水库或调水工程的优化运行,而当前研究则逐渐拓展至多水源、多用户协同的网络调控体系<sup>[4]</sup>,并在目标体系中综合考虑经济、社会与生态效益<sup>[5-6]</sup>。此外,研究范围也扩展到复杂河网结构下的水动力与水质优化<sup>[7]</sup>,以及流域层面的水-能源-生态多目标协同框架<sup>[8-9]</sup>,旨在实现供水、发电与生态保护的动态均衡。例如:贾丹妮等<sup>[10]</sup>构建用户-枢纽群优化模型,实现了跨流域调水系统的精准供需匹配;方国华等<sup>[11]</sup>以南水北调东线江苏段为对象,以缺水量最小、能耗最小和综合效益最大为目标,考虑长江水、淮河水与本地水等多水源供水,构建了水资源优化调度与联合配置模型。与此同时,以基于参考点的非支配排序遗传算法(NSGA-III)等为代表的智能优化算法不断发展,为求解多目标、多约束的复杂水资源配置问题提供了有效工具,提升了决策灵活性与适应性<sup>[12-16]</sup>。

随着国家水网战略的深入实施,跨流域、多线路互济的水资源调度与配置成为当前研究的热点问题,相关成果在缓解区域缺水、提升供水安全与系统韧性方面展现出显著成效<sup>[17]</sup>。余运磊等<sup>[18]</sup>通过量化评估验证了国家水网建设对缺水城市供水安全的提升作用;黄志生等<sup>[19-20]</sup>研究进一步表明,水网构建可显著增强流域水资源系统韧性。为实现和保障上述效益,调水机制的优化与策略制定至关重要。付湘等<sup>[21-22]</sup>构建了“源-流-网-配”多尺度协同模型,为长江、黄河等跨流域水网的多水源、多线路互济需求提供了理论支撑;张金良等<sup>[23-24]</sup>针对黄河“几字弯”区域提出了“集中+分散”供水策略与水网总体布局方案,为区域水网一体化建设提供了重要支撑。此外,作为评估水网应对极端事件能力的核心指标,水资源系统韧性的研究正从可靠性向适应性与恢复性拓展。例如:范志鹏等<sup>[25]</sup>基于复杂网络理论构建韧性评估模型,验证了长江黄河跨流域水网的运行可靠

性与整体韧性,揭示了关键节点对水网连通性的重要作用;郑小康等<sup>[26]</sup>针对黄河流域极端枯水情景,提出面向“自然-社会”二元响应过程的“抵御-恢复-重构”韧性框架,构建了供给侧与需求侧的韧性调控策略。

尽管已有一些跨流域尺度的水网相关研究,但贯通不同层级水网工程的协同配置研究较少,国家水网战略在区域层面的落地面临在省市等不同层级之间协同的难题。一方面,现有成果多聚焦于单一层级,如流域层级或城市内部的优化问题,缺乏能够有效衔接不同层级水网配水系统的协同配置模型与调度机制;另一方面,部分水网工程虽已建成,却因配置效率低下而未能有效缓解水资源供需矛盾,亟须从系统优化角度构建更具适应性的配置体系。浙江省作为全国首批省级水网先导区,在水网建设与管理方面积累了丰富的经验,为探索多层级水网协同优化配置奠定了良好的基础。台州市作为省级水网南北联通的关键节点,已依托长潭水库、牛头山水库等大中型水源工程以及河道湖泊和输配水工程,初步构建了具备防洪排涝与水资源调配功能的省市协同水网架构。但在实际运行中该体系面临两大难题:①台州市降水时空分布不均、季节性旱涝并存,加之气候变化引发的极端水文事件频发,显著增加了系统运行风险和跨层级调度决策的不确定性;②水网结构过度依赖单一大型水源,难以应对连续干旱或突发水污染等情景,且用水需求持续增长与水源供给能力趋于饱和之间的矛盾日益突出。总的来说,台州市水网在结构上具备省市水网融合的可行性,但其面临多层级水网协同不充分、风险应对能力差的难题,亟须开展水网优化配置研究,以提升系统韧性。

本文聚焦省市水网融合背景下的水资源优化配置,构建多目标水资源配置模型,通过设置不同配置情景,系统模拟台州市在多种降水保证率下的供需响应,从而识别最优水资源配置路径,评估水资源系统韧性提升潜力,为台州市水资源优化配置提供科学依据,也为推进国家水网战略在区域层面的落地实施提供模型、方法与决策支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

台州市位于浙江省东部沿海,河网密布,水资源总量丰富但人均水资源量低,且降水时空分布不均,旱涝并存,区域性缺水问题突出。经过长期的水利建设,目前已形成较为完善的供水工程体系,以椒江、永安溪、始丰溪、永宁江等本地水系为脉络,依托长潭、牛头山、朱溪等大中型水库及其配套工程,以及长潭灌区、牛头山灌区、里石门灌区等灌溉工程,

形成城乡供水和农业灌溉双网络。

为系统性解决水资源时空不均问题,台州市正加速构建现代化水网,规划台州南线、中线、北线3条市内调配主线,并衔接浙东水资源通道,实现跨流域、跨层级水网网联。通过构建本地水源与外部引水互补、多源共济的供水体系,提升区域供水安全与韧性。本文依据行政单元、供水情况将台州市划分为沿海平原片(市区、温岭市、玉环市)、临海片、天台片、仙居片和三门片5个分区,进行省市水网融合下的水资源配置研究。

1.2 数据来源

本文分析计算采用的数据包括 1978—2022 年台州 5 个分区的经济社会、气象水文、供用水数据及水网建设相关规划信息等,主要来源于《台州统计年鉴》及各县市区统计资料、中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)、国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)、浙江省和台州市历年水资源公报及相关水利部门资料。此外,结合《台州市水资源节约保护和利用总体规划》《浙江水网建设规划》《台州水网建设规划》等规划文件,提取关键工程布局与节水目标等信息,用于设置台州市水资源配置情景。

2 研究方法

2.1 水资源配置系统概化

为反映水源工程、输水工程与用水户之间的内

在联系,本文以主要骨干河道与规划调配主线为脉络,将台州市实际供水体系概化为由节点和有向连线构成的网络模型。其中,节点依据其水力功能划分为水源节点(水库等)与用户节点(5 个受水区),有向连线则代表连接二者的输水线路,包括天然河道以及台州南、中、北 3 条调配主线及其配套工程。台州市水资源配置系统概化图如图 1 所示。

2.2 多目标水资源配置模型构建

2.2.1 目标函数

本文在构建台州市水网水资源多目标优化配置模型时,以供水经济效益最大、供水满意度基尼系数最小和总缺水量最小为目标,分别表征水资源配置的高效性、公平性、保障性目标。

a. 供水经济效益最大:

$$f_1 = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I b_{ijk} Q_{ijk} \alpha_{ik} \beta_{jk} \tag{1}$$

式中: $b_{ijk}$  为第  $k$  个计算单元第  $i$  种水源第  $j$  个用户的用水效益系数; $Q_{ijk}$  为第  $k$  个计算单元第  $i$  种水源向第  $j$  个用户供水水量; $K, J, I$  分别为台州市计算单元、用户和水源总数; $\alpha_{ik}$  为供水次序系数,数值越小,表示越优先利用该水源; $\beta_{jk}$  为用水公平系数,数值越小,表示优先将水源供给用户。

b. 供水满意度基尼系数最小:

$$f_2 = \min G_s \tag{2}$$

式中: $G_s$  为供水满意度基尼系数,取值范围为 0~1,数值越小,说明资源分配越公平。本文基于各计算

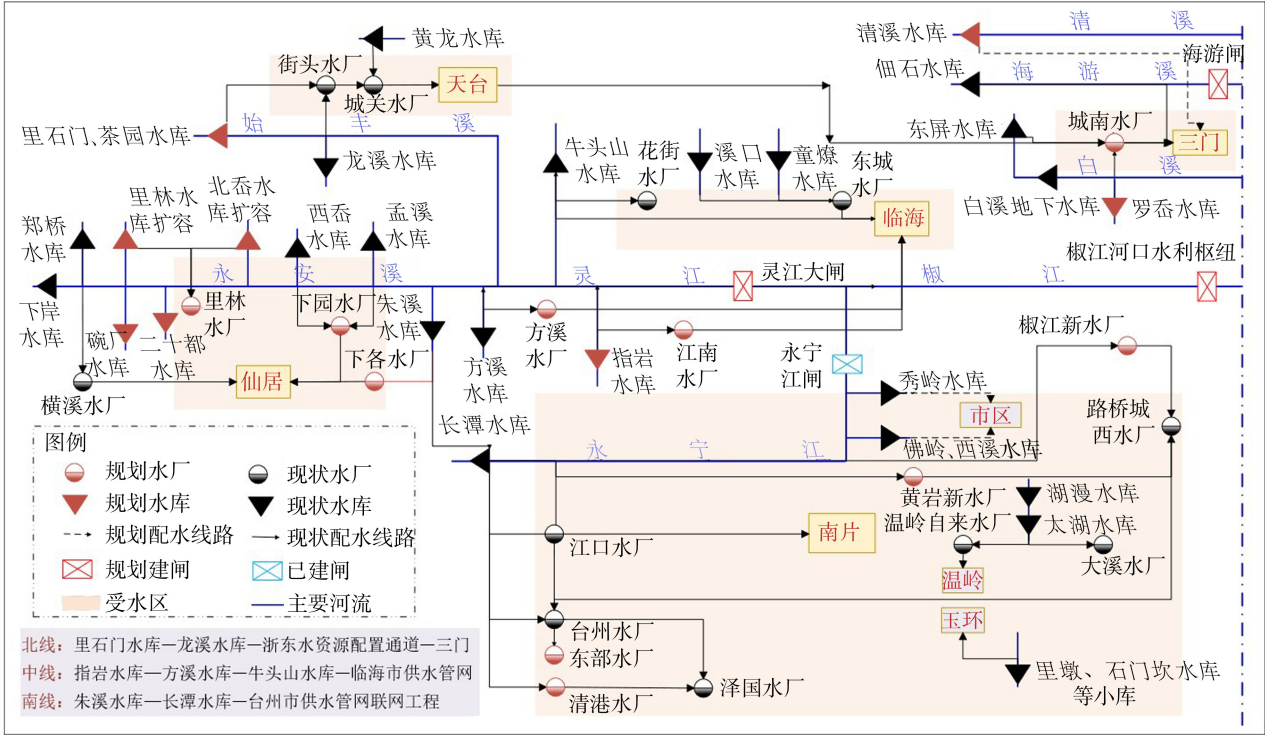


图 1 台州市水资源配置系统概化图

Fig.1 Generalized diagram of water resources allocation system in Taizhou City

单元供水满意度序列,采用梯形法计算。

c. 总缺水量最小:

$$f_3 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left( W_{jk} - \sum_{i=1}^I Q_{ijk} \right) \quad (3)$$

式中:  $W_{jk}$  为第  $k$  个计算单元第  $j$  个用户的需求水量。

2.2.2 约束条件

水资源优化配置过程中,为保证计算结果符合台州市水资源管理实际情况,本文设置多项约束条件,以确保水资源配置结果的合理性与科学性。

a. 水资源配置规则约束:根据水源与用户之间的供用水拓扑关系,只有当某水源与某用户存在明确的供用水关系时,才进行水资源配置。

b. 用户需水约束:

$$\sum_{i=1}^I Q_{ijk} \leq W_{jk} \quad (4)$$

c. 水源供水能力约束:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijk} \leq Q_{\max,ik} \quad (5)$$

式中:  $Q_{\max,ik}$  为第  $i$  个水源向第  $k$  个计算单元的最大供水能力。

d. 用水总量约束:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{ijk} \leq W \quad (6)$$

式中:  $W$  为台州市用水总量控制红线。

e. 非负约束:

$$Q_{ijk} \geq 0 \quad (7)$$

2.2.3 模型求解方法

运用 NSGA-III 算法<sup>[27]</sup> 求解水资源多目标配置模型,针对算法输出的帕累托非支配解集,构建基于理想点的 TOPSIS 评价模型,通过计算各解与理想解的贴近度,筛选出综合效益最优的折中方案。水资源多目标配置模型求解流程见图 2。

2.2.4 模型参数确定

a. 目标函数参数设置。目标函数中涉及的参数包括用水公平系数、供水次序系数和用水效益。用水公平系数和供水次序系数取值如表 1 和表 2 所示。对于用水效益,本文结合文献[28-29]和台州市的实际情况,采用分摊系数法计算农业、工业用水效益,分别为 11 元/ $\text{m}^3$  和 260 元/ $\text{m}^3$ ;生活用水效益取值较为复杂,基于当地发展的需要,结合台州市的实际情况,赋予较大值,取 290 元/ $\text{m}^3$ 。因城市生态环境与居民生活密切相关,故取生态用水效益等于生活用水效益。

b. NSGA-III 算法参数设置。基于文献[30]的推荐值,并根据本文模型决策变量的维度特征进行修正与试算验证,最终算法参数如下:种群规模为

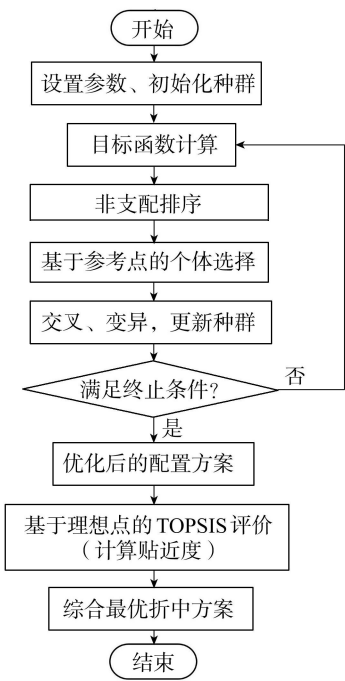


图 2 基于 NSGA-III 算法的水资源多目标配置模型求解流程

Fig. 2 Flowchart for solving multi-objective water resources allocation model based on NSGA-III algorithm

表 1 用水公平系数取值

Table 1 Value of water equity coefficient

| 水源   | 生活   | 生态   | 工业   | 农业 |
|------|------|------|------|----|
| 引水   | 0    | 0    | 0    | 1  |
| 提水   | 0    | 0    | 0    | 1  |
| 水库   | 0.67 | 0    | 0.33 | 0  |
| 地下水  | 1    | 0    | 0    | 0  |
| 非常规水 | 0    | 0.33 | 0.67 | 0  |

表 2 供水次序系数取值

Table 2 Value of water supply sequence coefficient

| 用户   | 生活   | 生态 | 工业   | 农业  |
|------|------|----|------|-----|
| 引水   | 0    | 0  | 0    | 0.5 |
| 提水   | 0    | 0  | 0    | 0.5 |
| 水库   | 0.67 | 0  | 0.67 | 0   |
| 地下水  | 0.33 | 0  | 0    | 0   |
| 非常规水 | 0    | 1  | 0.33 | 0   |

1000、进化代数 为 500 代、交叉概率为 0.9、变异概率为 1/60。

2.2.5 基于省市水网融合的水资源配置方案设置

为系统评估省市水网融合策略对区域水资源韧性的影响,本文以 2022 年为基准年,2035 年为规划水平年,设置 4 种水网运行方案(图 3),旨在对比分析不同降水保证率(50%、75%、95%)下台州市水网的供水能力、水资源分配效率及缺水量变化。

a. 市内水网独立运行方案(S1 方案):市域内各水源与水利工程独立运行,无互联互通与联合调度,用以模拟本地自给模式并识别其脆弱性。

b. 市域水网互济方案(S2 方案):在 S1 方案基

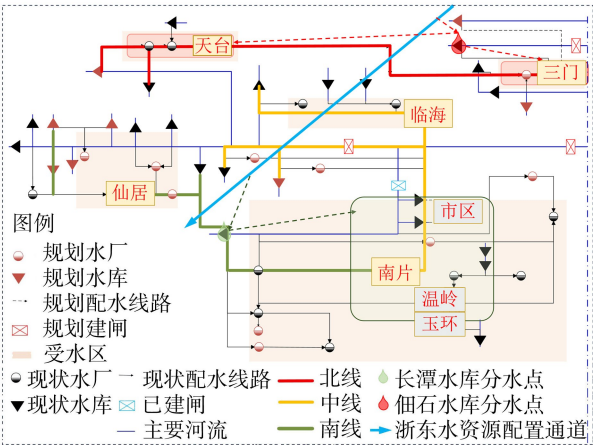


图3 台州市水资源配置方案

**Fig.3 Water resources allocation schemes in Taizhou City**  
础上,市域内南、中、北3条输水线路连通,以探究台州市水资源互济互调的效果。

c. 省级水网定点外补方案(S3方案):在S2方案的基础上,按规划引入浙东水资源配置通道,并在台南南线长潭水库设置分水点进行定点、定量的外部水源补给,用以评估外部定向补给对缓解局部缺水的作用。

d. 省市水网深度融合方案(S4方案):在S3方案的基础上,通过增设佃石分水点,使外部水源能够灵活引入南、北、中等多条市域输水干线,将外部通道与市域水网进行系统融合,构建起多节点、多方向的省市一体化联合配置体系。

3 结果与分析

3.1 需水量预测结果

需水量预测是开展水资源优化配置的基础,本

文以台州市沿海平原片、临海片、天台片、仙居片和三门片5个分区为基本预测单元,采用定额法开展需水量预测。具体而言,首先运用灰色预测法对人口规模和社会经济发展指标进行预测<sup>[31-32]</sup>,再结合相应用水定额,计算各分区规划水平年的需水量。以2022年为基准年、2035年为规划水平年,需水量预测涵盖生活、工业、农业及生态四大用水部门。鉴于农业用水受降水影响显著,分别计算了降水保证率(P)为50%、75%和95%下的农业需水量。2035年预测结果见表3。

3.2 受水区可供水量

可供水量是指受水区内通过地表水源工程、地下水源工程及其他供水设施,可被开发利用的各类水资源(包括本地地表水、地下水及非常规水等)的最大潜力。本文结合《台州市水资源节约保护和利用总体规划》的论证结果,考虑椒江河口建闸引水方案,对台州市2035年可供水量进行了预测分析。其中,椒江河口水利枢纽位于椒江入海口,主要功能是挡潮、蓄淡、引水和供水,该工程建成后能够置换出长潭水库和牛头山水库原用于农业灌溉的水量,用于保障城镇供水。台州市2035年本地可供水量预测结果见表4。

3.3 基于省市水网融合的水资源优化配置

在50%、75%和95%降水保证率下,从用水户和分区两个角度,结合目标函数值,对4种方案的水资源优化配置结果进行对比分析。不同降水保证率下各方案最优解对应的缺水量统计见表5。

3.3.1 各分区缺水情况

在S1方案下,沿海平原片的工业缺水最为突

表3 台州市各分区2035年需水预测结果

| 分区    | 生活需水量/亿 m <sup>3</sup> | 工业需水量/亿 m <sup>3</sup> | 农业需水量/亿 m <sup>3</sup> |       |       | 生态需水量/亿 m <sup>3</sup> |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|-------|------------------------|
|       |                        |                        | P=50%                  | P=75% | P=95% |                        |
| 沿海平原片 | 4.03                   | 1.82                   | 3.53                   | 4.44  | 5.36  | 0.58                   |
| 临海片   | 0.95                   | 0.65                   | 1.53                   | 1.92  | 2.31  | 0.12                   |
| 天台片   | 0.45                   | 0.22                   | 1.02                   | 1.28  | 1.50  | 0.06                   |
| 仙居片   | 0.41                   | 0.15                   | 0.89                   | 1.12  | 1.31  | 0.04                   |
| 三门片   | 0.36                   | 0.21                   | 0.64                   | 0.75  | 0.91  | 0.04                   |
| 台州市   | 6.20                   | 3.05                   | 7.61                   | 9.51  | 11.39 | 0.84                   |

表4 台州市2035年本地可供水量预测结果

| 分区    | 地表水/亿 m <sup>3</sup> | 椒江河口建闸供水/亿 m <sup>3</sup> | 地下水/亿 m <sup>3</sup> | 非常规水/亿 m <sup>3</sup> | 可供水总量/亿 m <sup>3</sup> |
|-------|----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 沿海平原片 | 8.31                 | 1.21(2.57)                | 0.047                | 1.76                  | 15.28(16.64)           |
| 临海片   | 3.45                 |                           | 0.006                | 0.49                  |                        |
| 仙居片   | 2.17                 |                           | 0.003                | 0.01                  |                        |
| 天台片   | 1.32                 |                           | 0.004                | 0.05                  |                        |
| 三门片   | 0.93                 |                           | 0.003                | 0.07                  |                        |
| 台州市   | 16.18                | 1.21(2.57)                | 0.063                | 2.38                  | 19.83(21.19)           |

注:椒江河口建闸供水范围为沿海平原片和临海片,括号中为特枯年(P=95%)的值。

表 5 不同降水保证率下各方案最优解对应的缺水量统计

Table 5 Statistics of water shortage corresponding to optimal solutions of each scheme under different precipitation guarantee rates

| 方案 | 分区    | 生活缺水量/<br>亿 m <sup>3</sup> | 工业缺水量/<br>亿 m <sup>3</sup> | 农业缺水量/亿 m <sup>3</sup> |       |       | 生态缺水量/<br>亿 m <sup>3</sup> |
|----|-------|----------------------------|----------------------------|------------------------|-------|-------|----------------------------|
|    |       |                            |                            | P=50%                  | P=75% | P=95% |                            |
| S1 | 沿海平原片 | 0                          | 1.133                      | 0                      | 0     | 0.506 | 0                          |
|    | 临海片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 仙居片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0.029                      |
|    | 天台片   | 0                          | 0                          | 0.365                  | 0.625 | 0.845 | 0.014                      |
|    | 三门片   | 0                          | 0.067                      | 0.209                  | 0.319 | 0.479 | 0                          |
| S2 | 沿海平原片 | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0.506 | 0                          |
|    | 临海片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0.143 | 0                          |
|    | 仙居片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 天台片   | 0                          | 0                          | 0.365                  | 0.625 | 0.845 | 0                          |
|    | 三门片   | 0                          | 0.067                      | 0.209                  | 0.319 | 0.479 | 0                          |
| S3 | 沿海平原片 | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 临海片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 仙居片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 天台片   | 0                          | 0                          | 0.365                  | 0.625 | 0.845 | 0                          |
|    | 三门片   | 0                          | 0.067                      | 0.209                  | 0.319 | 0.479 | 0                          |
| S4 | 沿海平原片 | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 临海片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 仙居片   | 0                          | 0                          | 0                      | 0     | 0     | 0                          |
|    | 天台片   | 0                          | 0                          | 0.069                  | 0.329 | 0.549 | 0                          |
|    | 三门片   | 0                          | 0                          | 0.209                  | 0.319 | 0.479 | 0                          |

出,缺水量高达 1.133 亿 m<sup>3</sup>,占工业总缺水量的 94.4%;天台与三门片的农业缺水较为集中,在 50%、75%、95%降水保证率下,天台片的农业缺水量分别为 0.365、0.625 和 0.845 亿 m<sup>3</sup>,三门片的农业缺水量分别为 0.209、0.319 和 0.479 亿 m<sup>3</sup>。生态总缺水量约为 0.043 亿 m<sup>3</sup>,相对较小,但空间分布不均衡。在 S2 方案下,台州市的工业缺水下降至 0.067 亿 m<sup>3</sup>,区域差异显著缓解;而在 S3、S4 方案下,整体缺水量减小,区域供水均衡性得到提升。

3.3.2 各用户缺水情况

生活用水在 4 种方案和 3 种降水保证率下均能得到有效保障,体现了系统在满足社会基本需求方面的稳健性。工业用水在 S1 方案下缺口最为突出,主要集中在沿海平原片;在 S2 方案下沿海平原片的工业缺水得到有效缓解,在 S3 和 S4 方案下工业缺水基本解决,表明在市域互济和外部补水条件下,工业用水得到较强的保障。

表 6 不同降水保证率下各方案最优解对应的目标函数值及供水总量

Table 6 Objective function values and total water supply volumes corresponding to optimal solutions of each scheme under different precipitation guarantee rates

| 方案 | 供水总量/亿 m <sup>3</sup> |       |       | 供水经济效益/亿元 |         |         | 供水满意度基尼系数 |       |       | 总缺水量/亿 m <sup>3</sup> |       |       |
|----|-----------------------|-------|-------|-----------|---------|---------|-----------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
|    | P=50%                 | P=75% | P=95% | P=50%     | P=75%   | P=95%   | P=50%     | P=75% | P=95% | P=50%                 | P=75% | P=95% |
| S1 | 16.51                 | 17.41 | 18.41 | 2896.05   | 2929.71 | 2951.58 | 0.114     | 0.125 | 0.136 | 1.817                 | 2.187 | 3.073 |
| S2 | 17.06                 | 18.59 | 19.44 | 3215.57   | 3249.23 | 3267.95 | 0.045     | 0.057 | 0.071 | 0.641                 | 1.011 | 2.040 |
| S3 | 17.06                 | 18.59 | 20.09 | 3215.57   | 3249.23 | 3282.23 | 0.045     | 0.057 | 0.066 | 0.641                 | 1.011 | 1.391 |
| S4 | 17.42                 | 18.95 | 20.31 | 3238.93   | 3271.05 | 3306.16 | 0.019     | 0.032 | 0.042 | 0.278                 | 0.648 | 1.028 |

农业用水受降水波动影响最为显著,且保障优先级相对较低。在 S1 方案下天台和三门片是主要缺水区,且随降水保证率提高,缺水量进一步提高。在 S2 方案下由于市域互济方案优先保障生活和工业用水,沿海平原片工业缺水得到有效改善;由于农业获得的调剂资源有限,农业缺水格局与 S1 基本一致,仅在临海片新增 0.143 亿 m<sup>3</sup> 的缺口,总体缺水状况并未明显改善。在 S3 方案下省市水网的初步协同虽然使沿海平原及临海片的农业供水保证率有所回升,但受限于关键分水节点的工程布局,对农业缺水的缓解作用尚不显著。与之相比,S4 方案依托外部补给与多水源全域优化调度,实现了系统层面的全局最优,该方案在有效改善天台片农业缺水和三门片工业缺水的同时,有效避免了前述方案中因水资源置换可能引发的局部缺水风险,体现出省市水网融合在兼顾公平性与效率性方面的优势。

不同降水保证率下各方案最优解对应的目标函数数值及供水总量见表 6。由表 6 可知,不同方案在供水总量、供水经济效益、公平性以及总缺水量上呈现出较明显的差异。与 S1 方案相比,S2 方案在不同降水保证率下供水总量提高 3.3%~6.8%,供水经济效益提高 10.7%~11.0%,缺水量降低 33.6%~64.7%,供水满意度基尼系数由 0.114~0.136 降至 0.045~0.071,说明市域内部互济能够在现有水资源条件下显著提升配置效率,并改善分区与用水户之间的供水均衡性。S3 方案在 50%和 75%保证率下与 S2 方案基本一致,但在 95%保证率下供水总量进一步提高约 3.3%,总缺水量较 S2 方案降低约 31.8%,基尼系数由 0.071 降至 0.066,表明外部补给主要在高保证率、强约束下发挥补充保障作用。S4 方案综合表现最优,其供水总量和供水经济效益在各保证率下均保持最高,总缺水量降至 0.278~1.028 亿 m<sup>3</sup>,基尼系数进一步降至 0.019~0.042,说明省市水网融合能够在提高供水规模和经济效益的同时,进一步提升供水公平性。但与此同时,S4 方案对外部供给和跨区协同的依赖增强,若外供中断或跨区水量分配不稳定,水资源系统韧性可能受到影响。

综上,4种配置方案呈现出生活用水保障刚性强、工业用水高度依赖互济、农业用水受来水波动影响显著、生态用水受配置优先级制约的总体格局。在策略选择上,短期可优先采用S2方案,以实现工业用水保障和高供水保证率;中长期可选择S4方案,优化区域均衡与生态效益,同时辅以跨区域协调机制和风险管理措施,以确保供水可靠性。

3.4 省市水网融合对水资源配置的驱动效应与建议

3.4.1 省市水网融合对水资源配置的驱动效应

基于4种方案在经济效益、供水公平性及缺水风险上的差异,进一步从水网运行机制出发,分析市域互济的空间再分配效应、省市水网融合的供水能力提升效应以及省市水网协同运行的系统韧性效应。

a. 市域互济的空间再分配效应。S2方案通过市域内部水网互济实现水资源在不同分区间间的再分配,使供水能力趋于均衡。以沿海平原片的工业用水为例,在S1方案下存在明显缺口,而市域水网互济运行后,通过从上游及水量富余分区调水可有效缓解水量短缺,使总体工业缺水量下降至约0.067亿m<sup>3</sup>。这表明,在现有工程条件下,通过打通南、中、北输水线路并实施库群联合调度,可以降低边际成本,提升工业用水保障能力,减少产业停产带来的短期经济损失,同时提升供水公平性。

b. 省市水网融合的供水能力提升效应。在S3和S4方案下,供水格局突破市域边界,外部水源补给使得供水总量增加,对农业用水的改善作用较为突出。S3方案受限于定点输水模式,其省市水网协同配置范围仅覆盖台州南线,尚难形成完善的区域水网格局,制约了区域水资源的优化配置效果。相比之下,S4方案通过两个分水点与南、北、中三大输水线路耦合,构建了多通道融合的供水体系,农业缺水基本得到缓解,总缺水量控制在0.278亿~1.028亿m<sup>3</sup>之间,相比S1方案大幅降低。这说明省市水网融合不仅能够强化农业用水保障,还能在保证生活与工业刚性需求的同时,为农业和生态单元配置更多水量。但与此同时,省市水网融合也会增加工程建设、运行维护和跨区域协调的复杂性,并可能带来跨区域水权分配、成本分摊及调度责任界定等管理风险,其长期可持续性取决于工程运维能力与协调机制的有效性。

c. 省市水网协同运行的系统韧性效应。随着水网层级的扩展,系统冗余度与调度灵活性增强。S1方案在单一区域运行模式下,缺水主要集中于沿海平原片工业用水以及天台、三门片农业用水,局部片区与特定部门的供水保障能力较弱。而S2~S4方案通过多水源、多路径联合调度实现风险分散,其中,

S4方案依托省市水网协同运行,不仅能满足局部刚性需求,还能在整体上维持系统稳定性,增强对外部冲击的抵御能力和长期适应性,并提升供水公平性。

3.4.2 建议

基于上述研究结果,针对省市水网融合背景下的台州市水资源优化配置,提出以下建议:①在近期规划及资源有限的条件下,应优先实施市内水网互济,以快速缓解局部缺水风险,直接提升工业与生活用水保障水平,并在有限投资下获得较高的边际收益;②中长期阶段则应逐步推进省市水网融合,先由点对点的试点工程过渡到多节点、多方向的全面融合,同时配套建立跨区域供水权属界定、成本分摊与应急互保机制,以降低外部供水带来的制度性与管理风险;③针对农业用水长期存在的脆弱性,应采取差异化的需求侧管理措施,如提高灌溉效率、建立用水弹性与补偿机制,在提升系统整体供水能力的同时避免局部低效。总体而言,省市水网融合通过市域互济、跨区域供水扩展以及韧性提升,实现了经济效益、供水公平性与缺水风险控制的综合改善。未来可进一步深入开展不同层级水网工程协同调度机制及调度风险研究,为省市水网融合下的水资源配置提供支撑。

4 结 论

a. 省市水网融合能够优化区域水资源配置格局。S2方案在不同降水保证率下的供水经济效益较S1方案提高约10.7%~11.0%,沿海平原片工业结构性缺水问题得到有效改善,供水满意度基尼系数降至0.045~0.071;S4方案在所有降水保证率下均能实现最优配置,供水经济效益最高可达3306.16亿元,基尼系数最低至0.019,总缺水量降至0.278亿~1.028亿m<sup>3</sup>,整体提高了台州市供水保障水平和系统韧性。

b. 省市水网融合有效提升了水资源配置能力。S2方案发挥空间再分配效应,通过加强市域内部连通,提升了水资源跨分区调配能力,可缓解局部供需不均衡问题,并优先保障工业和生活等刚性用水需求。S4方案通过引入外部水源和构建多通道联通体系,进一步发挥外部水源补给和多路径调度作用,在提升农业用水保障率的同时增强了系统韧性,实现了效率与公平更高水平的均衡。

参考文献:

[1] 钮新强,吴永妍,王磊,等. 高质量建设国家水网工程的思考与建议[J]. 中国工程科学,2024,26(6):108-119.  
(Niu Xinqiang, Wu Yongyan, Wang Lei, et al. Thoughts

- and suggestions on high-quality construction of national water network project[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6):108-119. (in Chinese))
- [2] 侯彩霞,陈柯成,付汉良. 西北地区水安全综合评价及障碍因子分析[J]. 水利经济, 2025, 43(2): 81-89. (Hou Caixia, Chen Kecheng, Fu Hanliang. Comprehensive evaluation of water security and obstacle factor analysis in Northwest China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 81-89. (in Chinese))
- [3] Cui Can, Dong Zengchuan, Han Yalei, et al. Modelling & assessment of the impact of water network construction on mitigating regional water supply-demand conflicts; strategies approaches for water resources planning and management[J]. Water Resources Management, 2025, 39(10):4735-4761.
- [4] He Yaru, Tu Yan, Liu Jun, et al. Quartet trade-off for regional water resources allocation optimization with multiple water sources; a decentralized bi-level multi-objective model under hybrid uncertainty [J]. Journal of Hydrology, 2023, 619:129341.
- [5] 靳世鑫,苏承国,黄佳荣,等. 响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 61-73. (Jin Shixin, Su Chengguo, Huang Jiarong, et al. Joint optimal allocation of regional water and land resources in response to ecological-economic-social demands[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 61-73. (in Chinese))
- [6] 卢娜,张佳明,苏承国,等. 考虑水土互馈关系的区域水土资源联合优化配置[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 208-219. (Lu Na, Zhang Jiaming, Su Chengguo, et al. Joint optimal allocation of regional water and land resources considering mutual feedback relationship[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 208-219. (in Chinese))
- [7] Luan Guangxue, Hou Jingming, Wang Tian, et al. Research on hydrodynamic and water quality optimization scheduling based on optimization technology for complex of river network structures [J]. Water Resources Management, 2024, 38(4): 1339-1358.
- [8] 唐晓宇,刘铁,黄粤,等. 开都河流域水-能源-生态综合收益下的水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 90-98. (Tang Xiaoyu, Liu Tie, Huang Yue, et al. Optimal allocation of water resources under integrated water-energy-ecological benefits in Kaidu River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 90-98. (in Chinese))
- [9] 张晓辉,刘冬梅,陈永明,等. 长白山区松花江流域水资源多目标协同调配技术[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(增刊1): 35-42. (Zhang Xiaohui, Liu Dongmei, Chen Yongming, et al. Multi-objective coordinated allocation of water resources in Songhua River basin Changbai Mountain area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(Sup1): 35-42. (in Chinese))
- [10] 贾丹妮,武连洲,粟晓玲,等. 跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 188-197. (Jia Danni, Wu Lianzhou, Su Xiaoling, et al. Joint optimization and allocation model of “user-hub” group in inter-basin water transfer project [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 188-197. (in Chinese))
- [11] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8. (Fang Guohua, Zhao Wencui, Li Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))
- [12] 张红涛,王逸飞,李新杰,等. 基于 NSGA-III 算法的黄河上游梯级水库多目标优化调度及方案优选[J]. 水电能源科学, 2025, 43(9): 212-215. (Zhang Hongtao, Wang Yifei, Li Xinjie, et al. Multi-objective optimization scheduling and optimization for cascaded reservoirs in the upper Yellow River based on NSGA-III algorithm [J]. Water Resources and Power, 2025, 43(9): 212-215. (in Chinese))
- [13] 刘欣,赵雪花,武雯昱,等. 基于 NSGA-II + ARSBX 算法的太原市水资源优化配置[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 79-86. (Liu Xin, Zhao Xuehua, Wu Wenyu, et al. Optimal allocation of water resources in Taiyuan City based on NSGA-II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))
- [14] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaxing, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [15] 方国华,王雪,方应学,等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 58-64. (Fang Guohua, Wang Xue, Fang Yingxue, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [16] 王文君,方国华,李媛,等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 91-96. (Wang Wenjun, Fang Guohua, Li Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle

- p>swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection,2022,38(2):91-96. (in Chinese))
- [17] Cuceloglu G, Vaghefi S A, Abbaspour K C, et al. Exploring the water availability and efficiency of inter-basin water transfer projects of urban water supply systems under climate change[J]. Urban Climate, 2025, 63: 102582.
- [18] 余运磊, 曹一一, 周琪, 等. 国家水网对中国地级市水资源短缺的缓解效果评估[J]. 水利学报, 2025, 56(4): 531-540. (She Yunlei, Cao Yiyi, Zhou Qi, et al. Assessment the impact of the national water network on water shortages in Chinese prefecture-level cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(4): 531-540. (in Chinese))
- [19] 黄生志, 闫俊, 郭怿, 等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 258-267. (Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 258-267. (in Chinese))
- [20] 万芳, 王煜, 王威浩, 等. 水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 19-26. (Wan Fang, Wang Yu, Wang Weihao, et al. Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 19-26. (in Chinese))
- [21] 付湘, 赵小丹, 彭少明, 等. 长江黄河跨流域多线路成网互济的调水机制研究 I: 机制与模型[J]. 水利学报, 2025, 56(8): 981-990. (Fu Xiang, Zhao Xiaodan, Peng Shaoming, et al. Study on water transfer mechanisms of the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route networking mutualism I: mechanisms and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(8): 981-990. (in Chinese))
- [22] 赵小丹, 付湘, 彭少明, 等. 长江黄河跨流域多线路成网互济的调水机制研究 II: 应用[J]. 水利学报, 2025, 56(9): 1189-1200. (Zhao Xiaodan, Fu Xiang, Peng Shaoming, et al. Study on water transfer mechanisms of the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route networking mutualism II: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(9): 1189-1200. (in Chinese))
- [23] 张金良, 崔萌, 唐梅英, 等. 黄河几字弯区水网优化策略与总体格局研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 118-128. (Zhang Jinliang, Cui Meng, Tang Meiying, et al. Water network optimization strategies and overall layout of Jiziwan region in the Yellow River Basin [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 118-128. (in Chinese))
- [24] 何国华, 赵勇, 王浩, 等. 黄河几字弯区水安全保障与一体化水网工程布局研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 129-140. (He Guohua, Zhao Yong, Wang Hao, et al. Water security safeguarding and integrated water network layout of the Jiziwan region in the Yellow River Basin [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 129-140. (in Chinese))
- [25] 范志鹏, 李云玲, 马睿, 等. 长江黄河跨流域多线路水网韧性评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 27-34. (Fan Zhipeng, Li Yunling, Ma Rui, et al. Resilience evaluation for the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route water network [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 27-34. (in Chinese))
- [26] 郑小康, 王煜, 张迪, 等. 黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略[J]. 水利学报, 2025, 56(10): 1253-1266. (Zheng Xiaokang, Wang Yu, Zhang Di, et al. Driving factors and regulation strategies for resilience of water resources system in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(10): 1253-1266. (in Chinese))
- [27] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- [28] 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. (Zhao Yan, Wu Penglin, Zhu Xueping. Optimal allocation of water resources based on modified firefly algorithm [J]. Yellow River, 2019, 41(5): 62-66. (in Chinese))
- [29] 吴山, 高瑞忠, 王英杰, 等. 水网联通情境下鄂尔多斯市多水源-多用户-多目标水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 176-185. (Wu Shan, Gao Ruizhong, Wang Yingjie, et al. Multi-source, multi-user and multi-objective optimal allocation of water resources under context of water network connection in Ordos City [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 176-185. (in Chinese))
- [30] Tian Ye, Cheng Ran, Zhang Xingyi, et al. Diversity assessment of multi-objective evolutionary algorithms: performance metric and benchmark problems [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2019, 14(3): 61-74.
- [31] 李嘉欣, 彭少明. 黄河流域用水现状及需水预测研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(7): 66-71. (Li Jiaxin, Peng Shaoming. Study on the current situation of water use and water demand forecast in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2024, 46(7): 66-71. (in Chinese))
- [32] 刘玘玘, 刘书芳, 李新一. 祁连山地区水资源-人口-经济-生态环境系统协调发展的时空演变及预测[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(5): 26-32. (Liu Honghong, Liu Shufang, Li Xinyi. Spatio-temporal evolution and prediction of the coordinated development of water resources, population, economy, and ecological environment system in the Qilian Mountains region [J]. Areal Research and Development, 2024, 43(5): 26-32. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-27 编辑:施业)