

基于 A-NSGA-Ⅲ 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究

陶 洁^{1,2}, 王沛霖¹, 王 辉³, 袁建文⁴, 左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省引江济淮工程有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 河南省豫东水利保障中心, 河南 开封 475000)

摘要:为优化引江济淮工程河南段水资源配置,构建了以经济效益最大、缺水量最小和污染物排放量最小为目标函数的水资源优化配置模型,利用改进的第三代非支配排序遗传算法(A-NSGA-Ⅲ)对模型进行求解,并优选出了4种侧重不同目标的水资源优化配置方案进行模拟分析。结果表明:引江济淮水的引入可极大地缓解受水区供需矛盾,规划年2030年、2040年缺水率可分别降至10.43%、5.47%,并有助于优化供水结构,改善生态环境;耦合经济-社会-生态环境协调度最大的方案4为最优方案,方案4规划年地下水供水占比分别下降至53.32%、46.59%;A-NSGA-Ⅲ在解决多目标高维水资源配置问题时具有较好的适用性,优化方案可为引江济淮工程河南段水资源调配方案制定提供参考。

关键词:水资源优化配置;耦合协调;A-NSGA-Ⅲ;引江济淮工程河南段

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0111-09

Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-Ⅲ algorithm//TAO Jie^{1,2}, WANG Peilin¹, WANG Hui³, YUAN Jianwen⁴, ZUO Qiting^{1,2} (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Water Diversion Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 4. Henan Yudong Water Conservancy Guarantee Center, Kaifeng 475000, China)

Abstract: In order to optimize the allocation of water resources of the Henan Section of the Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project, the optimal allocation model of water resources with the maximum economic benefit, the minimum water shortage and the minimum pollutant emission as the objective function was constructed. The improved third generation non-dominated sorting genetic algorithm (A-NSGA-Ⅲ) was used to solve the model, and four optimal allocation schemes of water resources focusing on different objectives were selected. The results show that the water diversion from the Yangtze River to the Huaihe River can greatly alleviate the contradiction between supply and demand in the water-receiving area. The water shortage rate can be reduced to 10.43% and 5.47% in 2030 and 2040, respectively. The water supply structure can also be optimized and the ecological environment can be improved. The fourth scheme with the largest coupling economic-social-ecological environment coordination degree is the optimal scheme. Under the fourth scheme, the proportion of groundwater supply in the planning years can be decreased by to 53.32% and 46.59%. The A-NSGA-Ⅲ algorithm has good applicability in solving multi-objective and high-dimensional water resources allocation problem, which can provide reference for the formulation of water resources allocation scheme in the Henan Section of the Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project.

Key words: optimal allocation of water resources; coupling coordination; A-NSGA-Ⅲ; Henan Section of the Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project

基金项目:引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021002);河南省水利科技攻关计划项目(GG202022);国家重点研发计划项目(2021YFC3200201)

作者简介:陶洁(1986—),女,副教授,博士,主要从事河流生态水文、水环境与水资源管理研究。E-mail:taojie2015@zzu.edu.cn

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

引江济淮工程是沟通长江、淮河两大流域,实现长江下游向淮河中游地区跨流域补水,支撑中部地区崛起的重要战略水源工程。河南段为江水北送分段的一部分,主要通过西淝河向河南省商丘、周口地区供水。受水区是河南省乃至全国人口密度最大、耕地率最高的区域,区域内水资源短缺、地下水超采、水生态环境污染等问题已严重制约其经济社会可持续发展^[1-3]。

从20世纪80年代开始,水资源配置一直是水文学及水资源学科的研究热点^[4-6]。水资源配置研究也历经了层次性的发展变化,从“就水论水配置”“广义水资源配置”到“量质一体化配置”,从“以需定供”“以供定需”到基于宏观经济、可持续发展的水资源优化配置等^[7-8]。模型求解方面,遗传算法^[9-10]、模拟退火算法^[11-13]、粒子群优化算法^[14-15]、布谷鸟算法^[16-17]等大量智能优化算法得到应用。上述算法在求解时具有简单、高效的优点,却又存在着仅能针对单一目标函数,参数难以确定导致求解精度不理想等不同缺点。第三代非支配排序遗传算法(NSGA-III)能够较好地处理多目标高维问题,但存在过早收敛的问题^[18]。为此,改进的NSGA-III(A-NSGA-III)引入了自适应机制,利用参考点约束维持种群的多样性,收敛精度高,提高了NSGA-III求解大规模高维多目标优化问题的能力^[19]。

本文以2020年为现状水平年,以2030年、2040年为规划水平年,构建以经济、社会和生态环境效益最大化为目标函数的跨流域调水工程水资源优化配置模型,并运用A-NSGA-III进行模型求解和方案选择,以期为引江济淮工程河南段实现经济、社会与生态环境耦合协同发展与水资源高效利用提供参考。

1 研究区概况

引江济淮工程河南段地处淮河流域中上游的豫东地区,属暖温带大陆性季风气候,年均气温 $14.24\sim 15.8^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $723\sim 752\text{ mm}$,区域内主要有涡河、惠济河、清水河、包河、浍河、沱河等河流,均为典型的平原季节性河流,涉及商丘市的梁园区、睢阳区、永城市、柘城县、夏邑县,周口市的鹿邑县、郸城县、淮阳区和太康县这9个受水区(图1)。根据《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》(2019),受水区多年平均地表水资源量 11.63 亿 m^3 ,地下水资源量 16.86 亿 m^3 。2020年受水区总供水量 15.67 亿 m^3 ,其中地下水供水量 12.68 亿 m^3 (含矿坑水 0.31 亿 m^3),占供水总量的80.94%;地表水供水量 2.66 亿 m^3 ,仅占16.95%。多年来受水区水资源及其开发利用主要存在如下问题:①水资源短缺,供需矛盾尖锐。受水区人口密集、耕地率高,受河道季节性影响,范围内蓄引提调工程先天条件不足,有限的引黄调水仅用于农田灌溉,受水区人均水资源量仅为 312 m^3 ,远低于全国平均水平($2\,239.8\text{ m}^3$)。②水污染严重。2020年,受水区21个水功能区97个水质监测断面监测评价结果显示,I~Ⅲ类水质断面共27个,Ⅳ~Ⅴ类水质断面共70个。③地下水超采严重。据统计,受水区地下水超采面积达 $10\,685\text{ km}^2$,占受水区总土地面积的88.2%,导致地下水位大幅下降、地面沉降、地下水污染等系列生态环境问题。

水利部行政许可文件《引江济淮工程(河南段)初步设计报告准予行政许可决定书》(水许可决[2019]38号)许可引江济淮工程向试量站断面供水,2030年年均分配水量为 5.00 亿 m^3 ,2040年为

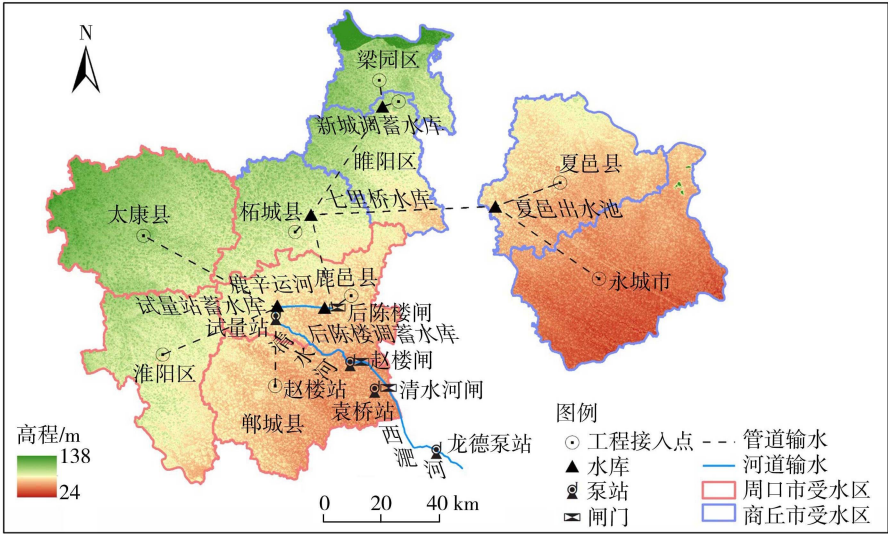


图1 引江济淮工程河南段示意图

6.34 亿 m³;工程建设任务为以城乡供水为主,兼顾改善水生态环境。河南段水资源配置系统网络图如图 2 所示。供水系统除引江济淮调水外,还包括当地地表水(含引黄调水)、地下水(含永城市的矿坑排水)和中水,其中供水工程有中小型蓄水工程、引水工程、拦河闸、引黄灌区和井灌区工程等。蓄水工程现状供水能力 0.22 亿 m³,设计供水能力 0.84 亿 m³;引提水工程现状供水能力 3.12 亿 m³,设计供水能力为 6.65 亿 m³;多年平均浅层地下水资源可开采量为 13.67 亿 m³。

2 水资源优化配置模型

2.1 基本原则

- a. 贯彻“山水林田湖草生命共同体”理念,优先保证各区域生态环境用水。
- b. 供水水源配置次序:引江济淮水、当地地表水(包括已经分配好的供给当地的引黄调水)、浅层地下水、中水。考虑到受水区地下水超采严重、地下水漏斗问题,规划年全面禁采深层地下水,只将其作为备用水源。
- c. 引江济淮水源配置用水次序:生活、工业、生态环境;当地水配置用水次序:生活、农业、工业、生态环境。
- d. 考虑到中水的水质和供水成本因素,主要将其用于煤电、工业园区等大用水企业、市政杂用水和生态环境用水等。浅层地下水主要用于农业灌溉及

少量乡镇工业用水。

2.2 目标函数

受水区供水水源分为独立水源和公共水源,其中独立水源包括当地地表水、浅层地下水和中水,分别用 $i=1,2,3$ 表示;公共水源仅有引江济淮水,用 $c=1$ 表示。受水区 9 个区(县),分别用 $k=1,2,\dots,9$ 表示。用水部门分为生活、工业、农业、生态环境,分别用 $j=1,2,3,4$ 表示。

a. 以受水区供水效益最大为经济目标,目标函数为

$$\max f_1(x)=\sum_{k=1}^9\sum_{j=1}^4\left[\sum_{i=1}^3(b_{ijk}-e_{ijk})x_{ijk}\gamma_k\chi_{ijk}+(b_{cjk}-e_{cjk})x_{cjk}\gamma_k\chi_{cjk}\right]\tag{1}$$

其中

$$\gamma_k=\frac{1+p_{k\max}-p_k}{\sum_{j=1}^4(1+p_{k\max}-p_k)}$$

$$\chi_{ijk}=\frac{1+q_{ik\max}-q_{ijk}}{\sum_{i=1}^3(1+q_{ik\max}-q_{ijk})}$$

$$\chi_{cjk}=\frac{1+q_{ck\max}-q_{cjk}}{\sum_{i=1}^3(1+q_{ck\max}-q_{cjk})}$$

式中: x_{ijk} 、 x_{cjk} 分别为独立水源 i 、公共水源 c 对 k 受水区 j 用水部门的供水量,万 m³; b_{ijk} 、 b_{cjk} 分别为独立水源 i 、公共水源 c 向 k 受水区 j 用水部门的单位供

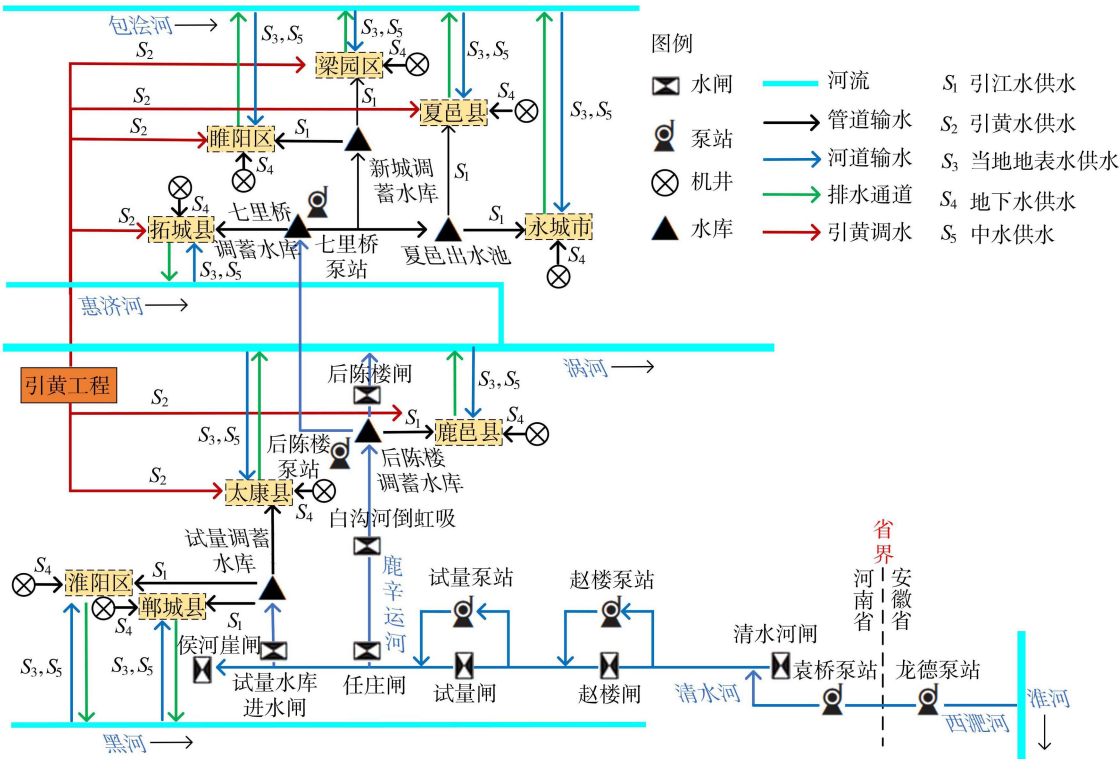


图 2 引江济淮工程河南段水资源配置系统网络

水的效益系数,元/m³; e_{ijk} 、 e_{cjk} 分别为独立水源 i 、公共水源 c 向 k 受水区 j 用水部门的单位供水的费用系数,元/m³; γ_k 为 k 受水区各个水源的供水次序系数; p_{kmax} 为 k 受水区水源供水次序序号的最大值; p_k 为 k 受水区各个水源的供水次序序号; χ_{ijk} 、 χ_{cjk} 分别为独立水源 i 、公共水源 c 向 k 受水区 j 用水部门的配水优先系数; q_{ikmax} 、 q_{ckmax} 为独立水源 i 、公共水源 c 向 k 受水区 j 用水部门供水次序序号的最大值; q_{ijk} 、 q_{cjk} 分别为独立水源 i 、公共水源 c 向 k 受水区 j 用水部门的供水次序序号。

b. 以缺水量最小为社会目标,目标函数为

$$\min f_2(x) = \sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^4 (D_{jk} - \sum_{i=1}^3 x_{ijk} - x_{cjk}) \quad (2)$$

式中 D_{jk} 为 k 受水区 j 用水部门的需水量,万 m³,包括生活需水量、工业需水量、农业需水量和生态环境需水量。

c. 以污染物排放量最小为生态环境目标,选取污水中主要污染物化学需氧量 (COD) 为评价其生态环境效益的主要因子,目标函数为

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^4 0.01 \rho_{jk} h_{jk} (\sum_{i=1}^3 x_{ijk} + x_{cjk}) \quad (3)$$

式中: ρ_{jk} 为 k 受水区 j 用水部门单位污水排放量中 COD 的质量浓度,mg/L; h_{jk} 为 k 受水区 j 用水部门的污水排放系数。

2.3 约束条件

a. 用水部门需水量约束:

$$D_{jkmin} \leq \sum_{i=1}^3 x_{ijk} + x_{cjk} \leq D_{jkmax} \quad (4)$$

式中 D_{jkmin} 、 D_{jkmax} 分别为 k 受水区 j 用水部门的最低需水量和额定需水量,万 m³,最低需水量的确定以满足部门最低需水保证率而定。

b. 供水系统的供水能力约束。独立水源和公共水源约束分别为

$$\sum_{j=1}^4 x_{ijk} \leq D_{ik} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^4 x_{cjk} \leq W_c \quad (6)$$

式中: D_{ik} 为 k 受水区独立水源最大供水能力,万 m³; W_c 为公共水源 c 的可供水量,万 m³。

c. 排水系统的水质约束:

$$\sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^4 0.01 \rho_{jk} h_{jk} (\sum_{i=1}^3 x_{ijk} + x_{cjk}) \leq W_0 \quad (7)$$

式中 W_0 为污染物允许排放量,万 t/a。

d. 非负约束:

$$x_{ijk} \geq 0 \quad (8)$$

$$x_{cjk} \geq 0 \quad (9)$$

3 参数确定和方案优选

3.1 参数确定

3.1.1 效益系数和费用系数

工业、农业用水的效益系数分别由工农业生产总值与相应用水量确定^[20]。生活用水的效益系数根据优先保障居民生活用水的原则,充分考虑受水区过去和现阶段经济社会发展状况确定;生态环境用水与生活用水净效益系数取值相同^[18]。由此计算出规划年 2030 年生活、工业、农业、生态环境的用水效益系数分别为 600.00、567.23、61.86、599.12 元/m³,2040 年分别为 700.00、670.21、83.22、699.00 元/m³;用水费用系数依据商丘市、周口市水费征收标准,最终确定 2030 年生活、工业、农业、生态环境的费用系数分别为 2.68、0.47、3.25、1.80 元/m³,2040 年在现状基础上取整,分别为 3、1、4、2 元/m³。

3.1.2 水源供水次序及用水部门配水优先系数

基于优化区域用水结构,保障区域经济社会可持续发展的总体目标,计算得各供水水源的供水次序系数分别为引江济淮水 0.4,当地地表水 0.3,浅层地下水 0.2,中水 0.1。受水区当地水源、引江济淮水源的生活、工业、农业、生态环境 4 个用水部门的配水优先系数分别为:对于当地水源,生活 0.4,农业 0.3,工业 0.2,生态环境 0.1;对于引江济淮水源,生活 0.5,工业 0.33,生态环境 0.17。

3.1.3 污染物排放质量浓度、污水排放系数、污染物允许排放量

根据近年来受水区城镇生活、工业和农业的用水与排水比例来确定污水排放系数。以污染物 COD 为主要水质指标,根据受水区污水排放状况,确定规划年生活废水中的 COD 排放质量浓度为 398 mg/L,污水排放系数为 0.5;工业污水中的 COD 排放质量浓度为 500 mg/L,污水排放系数为 0.8;梁园区、睢阳区、永城市、柘城县、夏邑县的农业污水中的 COD 排放质量浓度为 329 mg/L,污水排放系数为 0.2,而其余 4 个区(县)(郸城县、鹿邑县、太康县、淮阳区)农业污水中的 COD 排放质量浓度为 210.73 mg/L,污水排放系数为 0.2。污染物允许排放量综合考虑受水区污水处理工艺、水质管理目标和水域纳污能力等因素加以确定^[18]。

3.2 方案优选

利用 A-NSGA-Ⅲ 对模型求解,A-NSGA-Ⅲ 流程可参考文献[21]。在求解多目标优化问题时,由于每个目标函数达到最优解时所对应的非劣解不同,本文选取 4 种侧重于不同目标的方案供决策选择:

方案 1 以受水区经济效益最高为目标;方案 2 以受水区缺水最小为目标;方案 3 侧重于生态环境效益;方案 4 围绕受水区水资源可持续发展的目标,采用耦合协调度模型进行综合协调进而得到最优解。耦合协调度的计算公式^[22-23]为

$$U = \sqrt{CT} \tag{10}$$

其中

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{f_1(x)f_2(x)f_3(x)}}{f_1(x) + f_2(x) + f_3(x)}$$
$$T = af_1(x) + bf_2(x) + cf_3(x)$$

式中: C 为耦合度; $f_1(x)$ $f_2(x)$ $f_3(x)$ 分别为经济发展、缺水量和生态环境 3 个目标函数的综合得分; T 为 $f_1(x)$ $f_2(x)$ $f_3(x)$ 3 个目标函数的综合评价指数; U 为耦合协调度; a 、 b 、 c 为 3 个目标函数的权系数,本文取 $a=b=c=1/3$ 。

4 结果与分析

4.1 供需平衡分析

依据《河南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《商丘市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《周口市城市总体规划(2016—2030 年)》及各个县区发展规划等资料,结合河南省地方标准 DB41/T 385—2020《工业与城镇生活用水定额》、DB41/T 958—2020《农业与农村生活用水定额》,立足 2010—2020 年社会经济发展和用水情况,采用定额法,对基准年、2030 年和 2040 年引江济淮河南段受水区生活、工业、农业及生态环境进行需水量预测。基于现状情况下水利设施、水资源的开发利用程度和开发潜力,综合考虑《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》成果,分别开展地表水、地下水、其他水源的可供水量预测。基于供需预测结果开展供需平衡分析,其中未考虑引江济淮工程河南段引水方案下的受水区多年平均供需平衡分析成果见表 1。由表 1 可知,基准年 2020 年受水区多年平均总需水量为 22.54 亿 m³,未引入引江济淮水

时多年平均总供水量为 15.59 亿 m³,缺水量为 6.95 亿 m³,缺水率达到 30.82%,当地水源供水量已不能满足各行各业的水资源需求。规划年 2030 年、2040 年多年平均总需水量分别为 25.75 亿 m³、27.93 亿 m³,总供水量为 18.07 亿 m³、20.06 亿 m³,缺水率达到 29.80%、28.20%。引江济淮水引入后,缺水率分别降低至 10.43%、5.47%。

4.2 水资源优化配置方案

运用 A-NSGA-Ⅲ 求解多目标优化模型,设置种群规模为 200,迭代 1 000 次后得到帕累托最优解,选取的 4 种侧重于不同目标的方案见表 2,各个方案的经济、社会和生态环境目标效益见表 3。由表 2 和表 3 可知,在规划水平年 2030 年、2040 年,受水区在方案 1 下经济效益可得到最大程度发展,但缺水程度也较大,且污染物 COD 排放量最多;在方案 2 下,受水区缺水最小,但依然存在 COD 排放量较大的问题;在方案 3 下,受水区 COD 排放量最低,但经济效益较方案 1 分别减少 29.24 亿元、21.73 亿元,且缺水最大,社会效益得不到满足;方案 4 以耦合协调度最大为目标,缺水最低,且在经济与生态环境目标上表现良好,达到经济、社会与生态协同发展的耦合协调。因此,以方案 4 为最优方案,具体分配方案见表 4、表 5。

4.3 最优配置结果分析

4.3.1 受水区缺水率分析

引江济淮工程河南段不同水平年各受水区缺水状况如图 3 所示,引江济淮水引入后,2030 年受水区多年平均缺水率为 10.43%,其中夏邑县、柘城县缺水率相对较高,分别为 24.16%、20.43%,其次是永城市、睢阳区、梁园区和鹿邑县,缺水率均在 12% 左右,其余区(县)缺水率均在 3% 以内。2040 年受水区多年平均缺水率较 2030 年降低 4.96%,除了夏邑县的缺水率达到 18.78% 外,其余区(县)缺水率均在 10% 以内,供需矛盾得到缓解。缺水主要集中在农业上,其次是工业。受水区作为重要的粮

表 1 未考虑引江济淮工程情况下基准年、规划年受水区供需平衡分析 单位:万 m³

受水区	2020 年			2030 年			2040 年		
	可供水量	需水量	缺水量	可供水量	需水量	缺水量	可供水量	需水量	缺水量
郸城县	19 629	25 925	6 296	24 472	29 234	4 761	25 878	31 107	5 229
淮阳区	18 484	25 185	6 701	22 978	27 563	4 585	24 396	29 174	4 778
太康县	25 864	27 669	1 805	29 263	31 605	2 342	31 046	33 830	2 785
梁园区	12 168	13 513	1 345	19 206	29 598	10 392	21 397	33 542	12 145
睢阳区	12 113	19 168	7 055	12 978	16 093	3 115	15 864	18 153	2 289
柘城县	11 233	21 462	10 229	13 580	22 261	8 681	15 919	23 745	7 825
夏邑县	14 172	28 724	14 552	13 448	23 614	10 166	15 098	25 027	9 929
永城市	25 789	38 757	12 968	16 663	30 686	14 023	18 867	32 250	13 383
鹿邑县	16 462	24 969	8 508	28 083	46 878	18 795	32 134	52 440	20 306
合计	155 914	225 372	69 459	180 671	257 532	76 860	200 599	279 268	78 669

表 2 4 种侧重于不同目标的水资源优化配置方案										单位:万 m ³
方案	供水水源	供水量								
		2030 年				2040 年				
		生活	工业	农业	生态环境	生活	工业	农业	生态环境	
1	地表水	16 220.12	6 244.93	20 281.23	2 842.96	18 826.96	6 434.85	23 601.56	3 692.00	
	地下水	0	3 405.28	119 584.72	0	0	0	120 094.5	0	
	中水	0	7 585.49	0	4 506.68	0	0	0	4 476.08	
	引江济淮	24 966.34	22 774.33	0	2 256.37	36 056.93	34 478.30	0	3 027.04	
2	地表水	10 574.02	17 215.66	14 705.58	3 093.46	17 244.34	12 939.64	20 323.05	2 046.07	
	地下水	0	2 317.19	120 672.81	0.00	0	2 700.59	120 289.41	0.00	
	中水	0	6 845.18	0	5 245.82	0	17 359.20	0	7 697.86	
	引江济淮	30 698.46	17 987.84	0	1 317.47	36 056.93	25 917.45	0	1 426.41	
3	地表水	13 246.29	10 596.84	18 019.89	3 725.73	17 535.21	10 224.02	21 652.53	3 142.79	
	地下水	0	3 242.15	119 747.85	0	0	2 282.59	120 707.41	0.00	
	中水	0	7 804.29	0	4 292.73	0	21 124.31	0	3 931.06	
	引江济淮	27 962.93	2 0427.17	0	1 608.61	35 744.52	23 554.88	0	4 100.82	
4	地表水	17 162.63	5 066.06	21 513.38	1 847.22	17 590.63	6 791.21	24 213.70	3 958.42	
	地下水	0	3 136.00	119 854.00	0	0	3 305.94	119 684.06	0	
	中水	0	7 585.21	0	4 508.16	0	2 0381.30	0	4 674.27	
	引江济淮	23 858.89	22 858.26	0	3 281.88	35 700.13	25 158.54	0	2 541.52	

表 3 不同水资源优化配置方案下经济、社会和生态环境效益

方案	2030 年			2040 年		
	经济效益/亿元	缺水量/万 m ³	COD 排放量/t	经济效益/亿元	缺水量/万 m ³	COD 排放量/t
1	688.46	27 005.40	316.65	1 487.03	15 306.60	401.00
2	676.52	26 860.26	308.35	1 471.75	15 266.68	394.77
3	659.22	27 270.89	295.80	1 465.30	15 327.11	389.24
4	669.83	26 860.26	303.57	1 472.72	15 266.68	393.65

表 4 规划年 2030 年引江济淮工程河南段水资源最优配置方案

单位:万 m³

受水区	分水源供水量					分用户配置水量				
	地表水	地下水	中水	引江济淮	合计	生活	工业	农业	生态	合计
郸城县	6 100	17 259	1 113	3 908	28 380	4 400	3 913	19 716	351	28 380
淮阳区	6 489	15 544	946	4 037	27 016	4 187	3 270	18 011	1 548	27 016
太康县	6 213	21 687	1 358	2 016	31 274	4 831	5 267	20 098	1 078	31 274
鹿邑县	3 882	13 916	1 409	7 396	26 603	4 500	5 534	15 987	582	26 603
梁园区	5 994	6 065	923	1 475	14 457	3 503	3 104	6 681	1 169	14 456
睢阳区	5 156	7 252	1 172	6 215	19 795	4 466	3 549	10 915	864	19 794
柘城县	3 234	9 307	906	5 343	18 790	3 737	2 801	11 464	788	18 790
夏邑县	3 790	11 855	1 018	6 609	23 272	4 506	2 658	15 561	547	23 272
永城市	4 730	20 105	3 248	13 001	41 084	7 081	10 640	20 666	2 697	41 084
合计	45 588	122 990	12 093	50 000	230 671	41 212	40 736	139 099	9 625	230 671

表 5 规划年 2040 年引江济淮工程河南段水资源最优配置方案

单位:万 m³

受水区	分水源供水量					分用户配置水量				
	地表水	地下水	中水	引江济淮	合计	生活	工业	农业	生态	合计
郸城县	6 266	17 259	2 354	3 367	29 247	5 802	5 312	17 687	446	29 247
淮阳区	6 838	15 542	2 015	3 946	28 341	5 583	3 416	17 554	1 787	28 341
太康县	6 563	21 687	2 796	2 165	33 212	6 284	6 193	19 487	1 248	33 212
鹿邑县	4 262	13 916	3 220	11 020	32 418	5 761	9 134	16 672	851	32 418
梁园区	7 807	6 067	1 990	1 856	17 720	4 538	3 917	7 997	1 268	17 720
睢阳区	6 378	7 252	2 289	6 793	22 712	5 778	4 914	11 063	958	22 712
柘城县	3 908	9 307	1 882	7 500	22 597	4 713	4 060	12 905	919	22 597
夏邑县	4 870	11 855	2 142	7 325	26 192	5 822	4 178	15 552	640	26 192
永城市	5 663	20 105	6 367	19 429	51 564	8 999	15 720	23 787	3 059	51 564
合计	52 556	122 990	25 056	63 400	264 002	53 279	56 844	142 704	11 176	264 002

食产区,承担着粮食增产的重任。在现状情况下,生活用水和工业用水严重挤占了农业用水,引江济淮

水的引入可以返还出被挤占的部分农业用水,提高农业用水保障能力,但缺水问题仍然不可忽视,

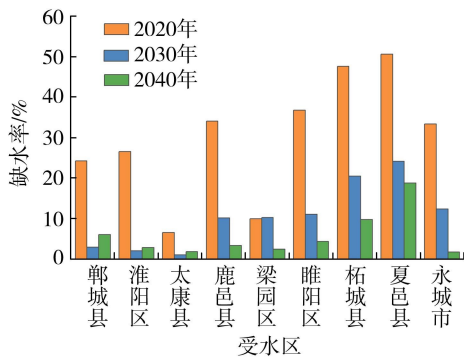


图3 引江济淮工程河南段受水区缺水状况

2030年、2040年多年平均农业缺水量分别为20694万 m^3 、12023万 m^3 ,分别占总缺水量的77.06%、78.41%。除了太康县,其余区(县)分配至农业的水量均未满足农业需水要求,夏邑县农业缺水率最高,不同规划年分别达到30.11%、27.77%。

综合分析,受水区未来应充分落实《河南省水利发展十三五规划》,继续完善与水土资源条件和现代农业发展要求相适应的节水灌溉体系,统筹协调发展农业与水环境,改善农村水生态环境。同时需要加快发展工业节水技术,提高工业用水利用率,提高水资源承载能力。

4.3.2 供用水结构优化分析

不同水平年引江济淮工程河南段受水区供用水结构如图4、图5所示(每组3个柱子从左到右依次表示2020年、2030年、2040年)。从供给侧来看,现状年2020年河南段受水区地表水、地下水、中水实际供水占比分别为16.95%、80.94%、2.11%。引江济淮水引入后,2030年上述水源供水占比分别为19.76%、53.32%、5.24%,2040年供水占比分别为19.91%、46.59%、9.49%。可见,新增了引江济淮水后,地下水供水占比显著降低,地表水和中水回用供水比例有所提升,供水结构优化明显。其中,太康县地下水供水占比最高(占69.34%),地下水源在满足农业用水要求时,仍可供给少量乡镇工业部门。

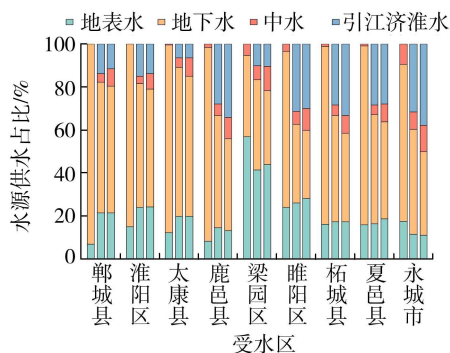


图4 引江济淮工程河南段受水区供水结构变化

从需求侧来看,现状年2020年河南段受水区实

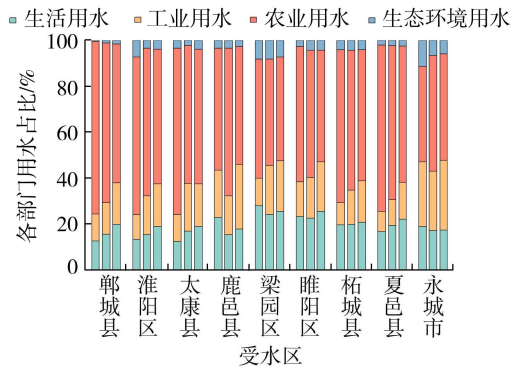


图5 引江济淮工程河南段受水区用水结构变化

际生活、工业、农业、生态环境用水占比分别为17.59%、14.22%、63.51%、4.68%;最优配置方案下,规划年2030年生活、工业、农业、生态环境用水占比分别为17.81%、18.19%、60.10%、3.90%,2040年用水占比分别为20.08%、22.17%、53.79%、3.96%。由于受水区经济快速发展,生活、工业等刚性部门用水占比呈现出增加趋势,而农业由于节水的推广,用水占比呈减少趋势,但依然是用水比例最高的部门。预计社会经济发展将使农业和工业用水部门保持规划年最大用水部门的地位,其次是生活用水和生态环境用水部门。各受水区中,永城市的水量分配最大,梁园区最小,这是因为永城市作为一座新型能源工业城市,工业需水量较大;而梁园区的农业耕地面积相对其他区(县)来说较少,农业相对不发达,导致农业需水量最小。

上述对供用水结构优化的分析,为引江济淮河南段产业结构改革提供一定的参考依据。引江济淮水的引入,优化了供水结构,通过禁用深层地下水,遏制了地下水的开采,使得生态环境得到改善。未来应落实“四水四定”原则,统筹城乡、工业、农业与生态环境用水,从供给侧和需求侧全方位推进结构改革。

5 结论

a. 利用A-NSGA-III对引江济淮工程河南段经济-社会-生态多目标水资源优化配置模型进行求解,基于生成的帕累托最优解设置4种侧重于不同目标的方案以供决策选择,最终确定耦合经济-社会-生态环境协调度最大的方案4为最优方案。

b. 引江济淮水的引入可极大地缓解受水区供需矛盾,优化供水结构,改善生态环境。规划年2030年、2040年受水区地下水供水占比明显降低,缺水率分别降至10.43%、5.47%,其中农业部门缺水量最大,不同规划年分别占总缺水量的77.06%、78.41%。受水区是全国重要的粮食产区,农业还存在一定的节水潜力,可以从调整农业种植结构、加强灌区工程节水配套改造、改善耕作方式等进行节水。

c. A-NSGA-Ⅲ在解决多目标高维水资源配置问题时具有较好的适用性,优化方案可为引江济淮工程河南段水资源调配方案制定提供参考。本文仅考虑了受水区多年平均下的水资源配置,在数据充足的情况下,有必要进一步开展平、枯水年情景下的精细化配置。同时,可运用其他求解方法并对其性能进行对比分析,进一步验证方法的适用性和有效性。

参考文献:

[1] 左其享,赵衡,马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报,2014,45(7):785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(7):785-792. (in Chinese))

[2] 李友光,袁榆梁,李卓成,等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价[J]. 人民黄河,2022,44(6):100-104. (LI Youguang, YUAN Yuliang, LI Zhuocheng, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Henan Province based on spatial-temporal variation of energy water ecological footprint[J]. Yellow River,2022,44(6):100-104. (in Chinese))

[3] 焦士兴,王安周,张崇崇,等. 河南省水资源效率综合测度及时空分异[J]. 水资源保护,2022,38(2):48-55. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, ZHANG Chongchong, et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):48-55. (in Chinese))

[4] 田进宽,郭佳航,左其享,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. (TIAN Jinkuan, GUO Jiahang, ZUO Qiting, et al. Thoughts and calculation model for water resources allocation in Shaying River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):62-67. (in Chinese))

[5] 姜秋香,何晓龙,王子龙,等. 基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):1-7. (in Chinese))

[6] 姜秋香,曹璐,王子龙,等. 基于 CVaR-TSP 的黑龙加城市水资源配置及风险管理[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):40-46. (JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, et al. Urban water resources allocation and risk management in Heilongjiang Province based on CVaR-TSP[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):40-46. (in Chinese))

[7] 王浩,游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水

利学报,2008,39(10):1168-1175. (WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(10):1168-1175. (in Chinese))

[8] 赵勇,裴源生,王建华. 水资源合理配置研究进展[J]. 水利水电科技进展,2009,29(3):78-84. (ZHAO Yong, PEI Yuansheng, WANG Jianhua. The progress of water resources rational allocation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(3):78-84. (in Chinese))

[9] 李琳,吴鑫淼,郗志红. 基于改进 NSGA-Ⅱ 算法的水资源优化配置研究[J]. 水电能源科学,2015,33(4):34-37. (LI Lin, WU Xinmiao, QIE Zhihong. Study on optimal allocation of water resources based on improved NSGA-Ⅱ[J]. Water Resources and Power,2015,33(4):34-37. (in Chinese))

[10] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报,2006,37(3):308-313. (CHEN Nanxiang, LI Yuepeng, XU Chenguang. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(3):308-313. (in Chinese))

[11] 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. (DU Bailin, ZHANG Jianfeng, GAO Zehai, et al. Optimal allocation of water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(3):292-299. (in Chinese))

[12] LI Xin, MA Xiaodong. An improved simulated annealing algorithm for interactive multi-objective land resource spatial allocation[J]. Ecological Complexity,2018,36:184-195.

[13] WANG Zhanping, TIAN Juncang, FENG Kepeng. Optimal allocation of regional water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Energy Reports,2022,8:9119-9126.

[14] ZARGHAMI M, HAJYKAZEMIAN H. Urban water resources planning by using a modified particle swarm optimization algorithm[J]. Resources, Conservation and Recycling,2013,70:1-8

[15] 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 swarm optimization algorithm[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):91-96. (in Chinese))

[16] 王钰娟,罗健,薛晴,等. 基于混沌高斯扰动布谷鸟算法的水资源优化配置[J]. 水电能源科学,2021,39(9):45-49. (WANG Yujuan, LUO Jian, XUE Qing, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water

[17] 陆晓,吴云,杨侃,等.基于改进多目标布谷鸟算法的水资源配置研究[J].中国农村水利水电,2020(4):56-60. (LU Xiao, WU Yun, YANG Kan, et al. Water resources allocation based on improved multi-objective cuckoo search[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4):56-60. (in Chinese))

[18] 王一杰,王发信,王振龙,等.基于NSGA-III的水资源多目标优化配置研究:以安徽省泗县为例[J].人民长江,2021,52(5):73-77. (WANG Yijie, WANG Faxin, WANG Zhenlong, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on NSGA-III algorithm in Sixian County, Anhui Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(5):73-77. (in Chinese))

[19] CHENG Qian, DU Bo, ZHANG Liangpei, et al. ANSGA-III: a multiobjective endmember extraction algorithm for hyperspectral images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(2):700-721.

[20] 李建美,田军仓.NSGA-III算法在水资源多目标优化配置中的应用[J].水电能源科学,2021,39(2):22-26. (LI Jianmei, TIAN Juncang. Application of NSGA-III algorithm in multi-objective optimization allocation of

[7] 傅春,付耀宗,肖存艳,等.基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun,FU Yaozong,XIAO Cunyan,et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan city[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):33-39. (in Chinese))

[8] 扶磊. 基于 FVCOM 模型模拟巢湖的水动力和水质过程[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[9] 陈珺,于明田,邓丽华,等.感潮河道桥梁和码头工程群对行洪累积影响[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):49-56. (CHEN Jun, YU Mingtian, DENG Lihua, et al. Cumulative influence of bridge and wharf engineering groups on flood propagation in tidal rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):49-56. (in Chinese))

[10] 廖康强. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2013.

[11] 陈庆江,丁瑞,赵海.平原河道区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40

[21] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18 (4): 602-622.

[22] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析: 兼论三系统耦合公式及其扩展形式 [J]. 自然资源学报, 2017, 32 (5): 788-799. (JIANG Lei, BAI Ling, WU Yuming. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (5): 788-799. (in Chinese))

[23] 赵晨光, 马军霞, 左其亭, 等. 黄河河南段资源-生态-经济和谐发展水平及耦合协调分析 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20 (4): 660-669. (ZHAO Chenguang, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Resource-ecology-economy harmonious development and coupling coordination analysis of the Henan section of the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (4): 660-669. (in Chinese))

[12] 吴凡杰, 吴钢锋, 董平, 等. 基于三维水动力水质数值模型的象山港排污策略研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 24-33. (WU Fanjie, WU Gangfeng, DONG Ping, et al. An investigation of the pollutants discharge control strategies in Xiangshan bay based on 3D hydrodynamic and water quality numerical modelling [J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 24-33. (in Chinese))

[13] 张立杰. 基于 Delft3D 模型的呼伦湖水质水动力数值模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.

[14] 柯庆, 王林森, 陶涛. 基于 Delft3D 模拟的城市黑臭水体治理方案评估[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 79-84. (KE Qing, WANG Linsen, TAO Tao. Assessment of malodorous black water treatment based on Delft3D simulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 79-84. (in Chinese))

[15] 毕潇伟, 徐聪, 何义亮. 基于 Delft3D 水动力模型对青草沙水库水温变化的模拟和预测[J]. 净水技术, 2018, 37(1): 14-21. (BI Xiaowei, XU Cong, HE Yiliang. Simulation and prediction of water temperature variation in Qingcaosha reservoir based on Delft3D hydrodynamic model[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(1): 14-21. (in Chinese))

水利水电科技进展, 2023, 43(6) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn