

基于碳减排的水资源优化配置

王国杰 车应龙

陇西县住房和城乡建设局，甘肃陇西，748100；

摘要：为提升水资源利用效率并兼顾低碳发展，本文构建了以经济效益、社会效益、地下水取水量、废水排放量和碳排放量为目标的水资源优化配置模型，结果表明：（1）优化配置能够有效改善区域供水结构，地表水与再生水合计占总供水量的 90%以上，再生水利用逐年增加，地下水开采量逐渐减少；（2）水资源优化配置后经济效益显著提升，累计经济效益增加 56.10 亿元，累计污水排放量减少 560.45 万 m³，有效改善了水环境质量；（3）优化配置具有显著碳减排效益，碳排放量降低 1.99%-11.60%，累计获得 66.36-673.17 万元经济收益。综合来看，水资源优化配置为区域水资源高效管理与低碳转型提供了重要参考。

关键字：水资源优化配置；碳减排；NSGA-III 算法

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.051

表 1 术语

符号	含义
$Q_{\text{再生水}}$	再生水可以利用量，万 m ³ ；
$Q_{\text{生活}}$	生活需水量，万 m ³ ；
$Q_{\text{工业}}$	工业需水量，万 m ³ ；
$W_{\text{生活}}$	生活用水排放系数；
$W_{\text{工业}}$	工业用水排放系数；
γ	产水率
$Q_{\text{雨水}}$	雨水资源可利用量，万 m ³ ；
P	多年平均降雨量，mm；
A	汇水面积，m ² ；
ϕ	径流系数；
$f_1(x)$	供水净效益，万元
e_j	用水部门 j 的用水净效益系数，万元/万 m ³
x_{ij}	水源 i 向用水部门 j 的配水量，万 m ³
R_{ij}	水源 i 向用水部门 j 的配水关系
$f_2(x)$	水资源缺水量，万 m ³
DS_j	用水部门 j 的缺水量，万 m ³
D_j	用水部门 j 需水量，万 m ³
α_j	用水部门的缺水系数
$f_3(x)$	地下水取水量，万 m ³
w_j	用水部门 j 的污水排放系数
$f_5(x)$	取水系统和用水系统水的碳排放量，t
$C_{\text{生产}i}$	水源 i 处理的碳排放因子，kgCO ₂ /m ³
$C_{\text{使用}j}$	用水部门 j 的碳排放因子，kgCO ₂ /m ³
S_i	S_i 为水源 i 的可供水量，万 m ³
R_e	再生水回用率，%
Q_y	雨水可供水量，万 m ³
R_y	为雨水可利用率，%

1 引言

水是人类生存的基本要素与经济运转的依赖要素^[1]。在经济和社会快速发展的背景下，人口扩张和城市化进程加快，给水资源带来了巨大压力^[2]。2020 年我国提出“双碳”目标，而我国水资源系统碳排放量超过 1.2×1014t^[3]，因此，水资源合理配置研究逐渐由注重供水和经济效益最大化的模式，转向更加关注水资源可持续利用和绿色发展的模式^[4]。然而，目前从水-碳角度进行的研究主要关注各因素之间的耦合和相关性，缺乏从碳排放角度出发的对水资源进行配置优化的研究。

优化算法被广泛用于水资源优化配置模型，当前研究中常用的算法包括人工神经网络、NSGA-II 算法等^[5,6]，其中人工神经网络等只能产生单目标；NSGA-II 算法更适合于 3 个目标以下的问题；NSGA-III 算法引入了参考点机制，提高了解集的一致性和收敛速度，保持了解的多样性，适合于多维目标。因此本文采用 NSGA-III 算法进行求解。

基于此，本文在城市水资源供需矛盾及“双碳”目标背景下，建立以经济效益、社会效益、地下水取水量、废水排放量和碳排放量为目标的水资源优化模型，以陇西县为例，采用 NSGA-III 算法求解，以期达到水资源有效合理的利用，促进经济、社会和环境协调发展。

2 研究区域概况

2.1 基本信息

陇西县位于甘肃省定西市中部，陇西县境内属黄河流域，分渭河和祖厉河两大水系，属于内陆干旱半干旱区，多年平均降雨量 415mm。由于该区域处于内陆腹地，降水量较少，同时蒸发量大，水资源开发利用主要依靠泾河干流。随着城市的发展，用水需求也在增长。因此陇西县的水资源供需矛盾将进一步突出。

2.2 研究区域可供水量

（1）常规水可供水量

陇西县在现有自然经济和技术条件下，地表水资源可利用量 6890 万 m³，地下水可开采量 1401 万 m³，引洮水年可供水量 8103 万 m³。

（2）非常规水可供水量

2015-2023 年各部门用水量见图 1。再生水可供水量由生活和工业用水排放量确定（式 1），依据《城市排水工程规划规范》，取生活污水排放系数为 0.85，工

业污水排放系数为 0.7, 产水率为 0.8, 2015-2023 年再生水可利用量如图 2 所示。雨水可供水量仅计算屋顶、铺装及道路形成的径流量, 计算公式如式 2 所示, 雨水可利用量为 385.82 万 m³。

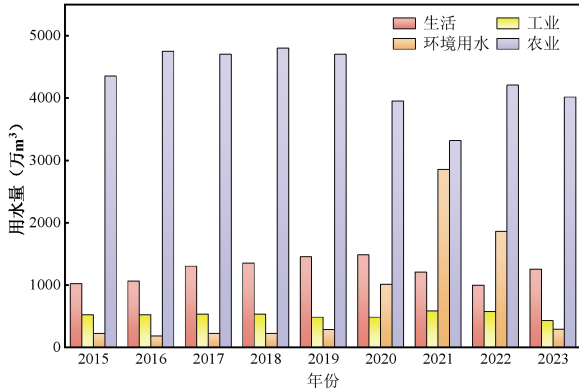


图 1 陇西县各用水部门用水量

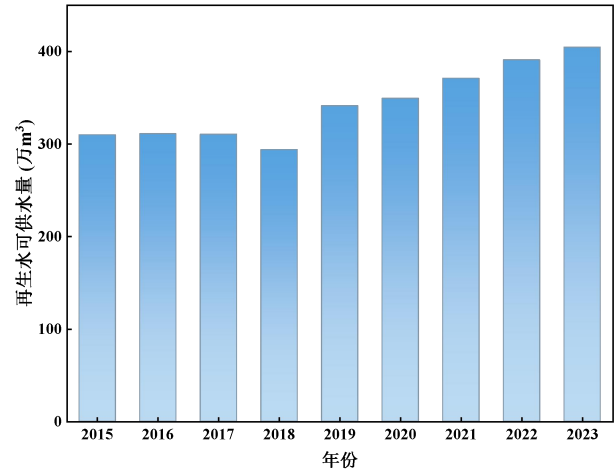


图 2 陇西县各年份再生水可供水量

$$Q_{\text{再生水}} = Y \times (Q_{\text{生活}} \times W_{\text{生活}} + Q_{\text{工业}} \times W_{\text{工业}}) \quad (1)$$

$$Q_{\text{雨水}} = P \times A \times \varphi \times 10^{-7} \quad (2)$$

3 水资源优化配置模型构建

资源优化配置是一个涉及经济与环境的复杂多目标问题。本文在“双碳”背景下构建碳减排导向的水资源优化配置模型, 考虑各用水部门和水源的配水关系及

约束, 选取碳排放量等 5 个目标函数, 以陇西县为例, 提高再生水和雨水等非常规水资源的综合利用水平, 建设低碳运行的城市水系统。

3.1 目标函数

(1) 经济效益目标: 以区域供水净效益最大为目标。

$$f_1(x) = \max \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 e_j R_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

(2) 社会效益目标: 以区域水资源缺水最小为目标。

$$DS_j = \begin{cases} \left(D_j - \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \right) \times \alpha_j & \text{当 } D_j > \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } D_j \leq \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(x) = \min \sum_{j=1}^4 DS_j \quad (5)$$

(3) 地下水取水量目标: 以研究区域内地下水取水量最小为目标。

$$f_3(x) = \min \sum_{j=1}^4 R_{2j} x_{2j} \quad (6)$$

(4) 环境目标: 用废水排放量表示, 以区域内主要废水排放量最小为目标。

$$f_4(x) = \min \sum_{j=1}^4 \left(w_j \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \right) \quad (7)$$

(5) 碳排放目标：以区域内取水系统和用水系统的碳排放量最小为目标。

$$f_5(x) = \min \left(10 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 C_{\text{生产}} R_{ij} x_{ij} + 10 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 C_{\text{使用}} R_{ij} x_{ij} \right) \quad (8)$$

3.2 约束条件

(1) 供水量约束：水源 i 向用水部门的供水量之和小于等于该水源的可供水量。

$$\sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \leq S_i, \forall i \quad (9)$$

(2) 需水量约束：水源向用水部门 j 的总供水量不大于需水量的 1.1 倍，不小于 0.9 倍。

$$0.9D_j \leq \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij} \leq 1.1D_j, \forall j \quad (10)$$

(3) 再生水回用率约束：

$$\frac{\sum_{j=1}^4 R_{3j} x_{3j}}{Y \sum_{j=1}^4 (w_j \sum_{i=1}^4 R_{ij} x_{ij})} \geq R_z \quad (11)$$

(4) 雨水利用率约束：城市雨水利用率根据实际发展情况确定。

$$\frac{\sum_{j=1}^4 R_{4j} x_{4j}}{Q_y} \geq R_y \quad (12)$$

(5) 非负约束：水源 i 向用水部门 j 的供水量为非负。

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad (13)$$

3.3 模型参数确定

3.3.1 碳排放因子

不同水源在处理和分配过程中的碳排放主要包括取水和输配水两个阶段：取水阶段主要来自地表水和地

下水取水中的能源消耗；供水系统则包括输水、水处理和配水环节的能源消耗。根据相关研究，确定不同水源的取用碳排放因子。研究表明，终端用水环节碳排放远超取水和供水过程。基于对各用水部门的估算^[7, 8]，确定其碳排放因子（图 3）。

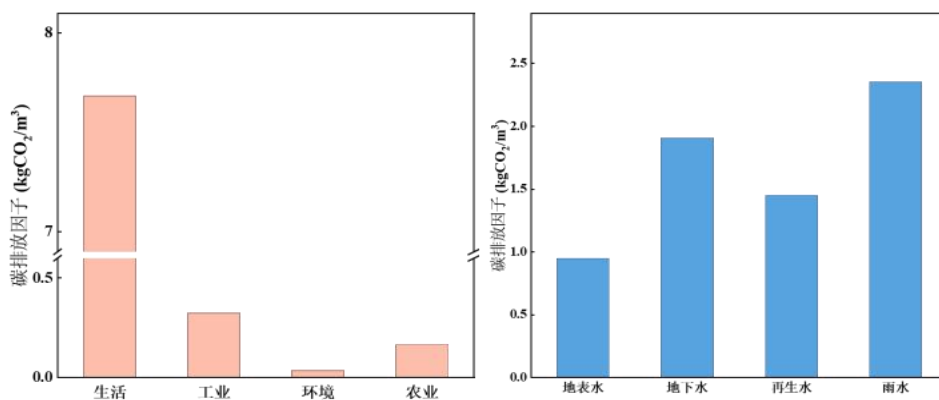


图 3 不同水源与不同用水部门碳排放因子

3.3.2 用水净效益系数

依据参考文献^[9]确定各用水部门净效益系数。生活

用水净效益系数 GDP 除以综合生活用水量；工业、农业用水系数分别取万元工业、农业用水量的倒数；考虑到

环境和居民生活息息相关，取环境用水系数与生活用水一致。

3.3.3 配水关系

鉴于地下为优质水资源，故不供给生态用水；再生水与雨水不供给生活用水，再生水可供给工业、农业和环境用水；雨水用于供给农业与环境补水。配水关系如图4所示，填充表示配水 $R_{ij}=1$ ；无填充表示不配水 $R_{ij}=0$ 。

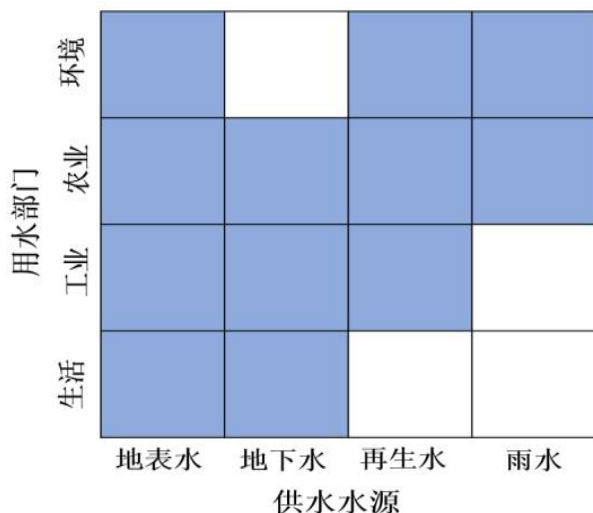


图4 供水水源向用水部门配水关系

3.3.4 缺水系数

依据行业需求与用水效益分配缺水权重，以最大限度降低区域缺水。本文取生活、工业、农业、环境用水缺水系数分别为0.4、0.3、0.2、0.1。

3.3.5 污染物排放系数

取生活污水排放系数为0.85，工业污水排放系数为0.7，农业与环境用水在本文中不予考虑。

3.3.6 非常规水利用率

根据节水型社会建设的相关要求，设定雨水利用率不低于6%，再生水利用率为20%。

4 结果与分析

4.1 水资源优化配置结果

陇西县2015-2023年水资源优化配置结果如图5所示，在各供水水源中，地表水供水量最大，其次是再生水供水，再生水与地表水水量占全部供水的90%以上。经过水资源优化配置，再生水和雨水供水量呈增长趋势，占比3.41%-5.32%，非常规水资源在优化方案中逐渐发挥出替代与发挥作用，充分利用城市中含有巨大节水潜力的非常规水资源，为陇西县水资源的绿色可持续利用

提供了有力支撑。

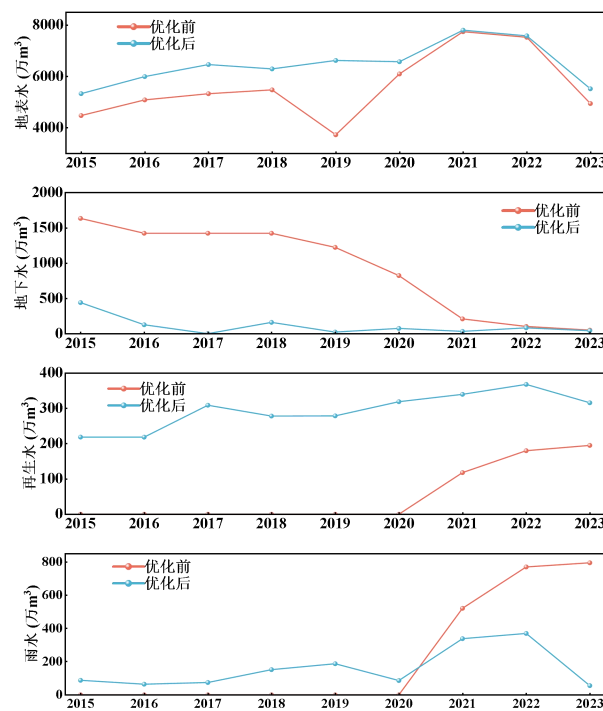


图5 2015-2023年水资源优化配置结果

4.2 经济、环境效益分析

水资源优化配置前后经济与环境效益对比如图6。经济效益方面，优化后各年均高于原方案，年均增长率为1.26%-7.43%；累计经济效益增加56.10亿元。环境效益方面，优化前污水排放量始终高于优化后的方案，优化后累计减少560.45万m³，有效减轻了污水处理厂的运行压力并降低水环境负荷。总体而言，优化配置既提升了经济效益，又通过削减污水排放缓解环境压力，实现经济、社会 and 环境的协同提升。

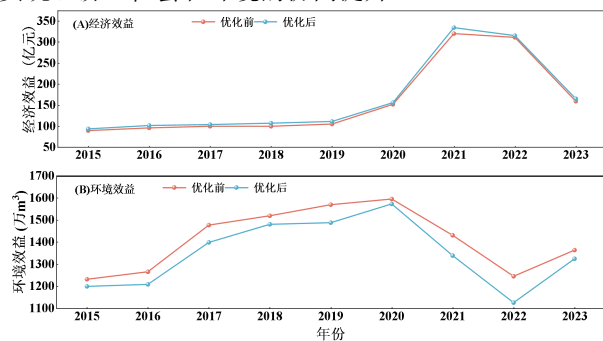


图6 2015-2023年经济与环境效益优化前后对比图

4.3 碳减排效益

4.3.1 碳排放总量分析

水资源优化配置碳排放对比如图7所示，优化前水资源开发利用的碳排放范围为16.09—19.56万t，优化

后水资源开发利用的碳排放范围为 14.89—19.17 万 t, 碳排放量降低了约 1.99%—11.60%。从整体来看, 通过科学合理的水资源优化配置, 有效降低了水资源利用过程中的碳排放水平。

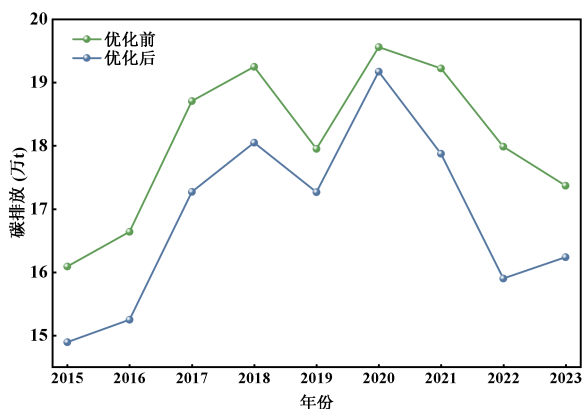


图 7 水资源配置优化前后碳排放对比图

4.3.2 碳减排效益分析

2021 年我国碳排放权交易市场启动, 为城市创造潜在价值。碳减排效益评估需结合碳定价机制。本文基于中国八大碳交易市场数据^[10], 取北京市、重庆市和八市平均交易价格分别代表高、低和平均水平, 计算陇西县 2015—2023 年优化后的碳减排效益 (图 8) 结果显示, 高水平交易收益 630.73 万元, 低水平收益 62.18 万元, 平均水平收益 266.20 万元。

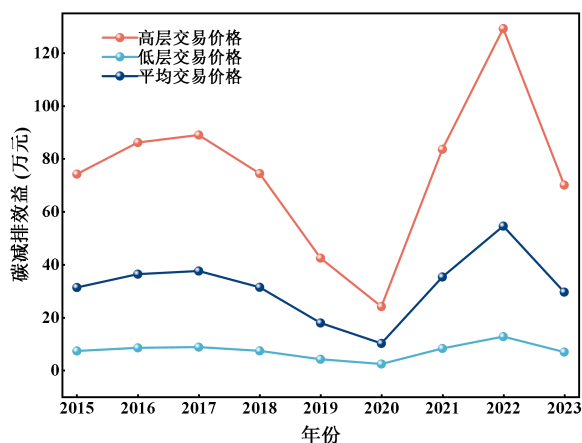


图 8 水资源优化后碳减排效益

5 结论

本文在“双碳”目标背景下, 将碳排放和非常规水资源纳入水资源优化配置, 构建了以碳排放、经济效益、社会效益、污水排放量和地下水取水量为目标的水资源优化配置模型, 以陇西县 2015—2023 年实例数据进行了研究, 采用 NSGA-III 算法进行求解, 优化配置结果如下所示:

(1) 水资源优化配置能够有效改善区域供水结构并提升综合效益。2015—2023 年陇西县优化结果表明, 地表水始终是最主要的供水来源, 地表水与再生水合计占总供水量的 90%以上; 地下水作为补充水源得到有效控制, 再生水和雨水利用量总体呈增加趋势。

(2) 水资源优化配置在经济及环境效益方面均表现出显著作用。优化后各年份优化方案经济效益显著提升, 累计经济效益增加 56.10 亿元。优化后污水排放量累计削减 560.4 万 m³, 显著减轻了水环境污染负荷。

(3) 资源优化配置具有突出的碳减排效益。优化方案下碳排放量整体较优化前降低 1.99%—11.60%, 2015—2023 年陇西县可获得 62.18—630.73 万元的碳减排效益。

参考文献

- [1]Zhang D, Xie X, Wang T, et al. Research on Water Resources Allocation System Based on Rational Utilization of Brackish Water [J]. Water, 2022, 14(6): 948.
- [2]Shang W-L, Lv Z. Low carbon technology for carbon neutrality in sustainable cities: A survey [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 92: 104489.
- [3]Ma J, Yin Z, Cai J. Efficiency of urban water supply under carbon emission constraints in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104040.
- [4]Feng T, Liu B, Ren H, et al. Optimized model for coordinated development of regional sustainable agriculture based on water-energy-land-carbon nexus system: A case study of Sichuan Province [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291: 117261.
- [5]Verma S, Pant M, Snasel V. A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems [J]. IEEE access, 2021, 9: 57757-91.
- [6]Akter A, Zafir E I, Dana N H, et al. A review on microgrid optimization with meta-heuristic techniques: Scopes, trends and recommendation [J]. Energy Strategy Reviews, 2024, 51: 101

298.

[7]Plappally A K, Lienhard V J H. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4818-48.

[8]赵荣钦,余娇,肖连刚,etal. 基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究[J]. 地理学报,2021,76(12):3119-34.

[9]夏帆,陈莹,窦明,etal. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护,2020,36(01):52-7.

[10]Su X, Shao W, Liu J, et al. How does sponge city construction affect carbon emission from integrated urban drainage system? [J]. J Clean Prod, 2022, 363: 132595.

作者简介：王国杰（1986—），男，甘肃陇西人，本科学历。

车应龙（1997—），男，甘肃陇西人，硕士研究生。

基金项目：陇西县科技计划资助（LXBYY004）