

考虑社会-经济-生态效益的衡邵干旱走廊水-能源-粮食纽带系统多目标优化调控研究

周光青¹,王新奎^{1,2},蒋昌波^{1,2},隆院男^{1,2},宋昕熠^{1,2},黄春福¹

(1.长沙理工大学水利与海洋工程学院; 2.洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室)

摘要:面对资源协同优化与区域高质量发展的严峻挑战,以衡邵干旱走廊为研究对象,立足县域基本单元,基于 NSGA-III 算法,构建了兼顾社会、经济、生态效益的现状年及规划年水-能源-粮食纽带系统多目标优化模型。通过熵权法-TOPSIS 综合评价法筛选不同水文年的最优配置方案,并借助地理探测器识别影响区域目标效益的关键驱动因子。结果表明:现状年供水量每提升 1%可驱动综合效益增长 3.875%~7.650%,通过调整种植结构与水资源再分配,可缓解部门间资源竞争现状,实现社会、经济、生态效益的协同增效;规划年平水年通过种植结构优化与水资源再分配,年内粮食产量可达 928.85 万 t,超出人均标准 24%,同时 COD 排放量下降 9.8%;枯水年可通过压缩高耗水作物种植面积维持粮食安全阈值,年内粮食产量超出人均标准 12.9%;驱动效应方面,平水年表现较为分散,而枯水年显著集中,多因子协同作用对社会-经济-生态效益变化的解释力显著增强,其中水资源供给保障与资源配置公平性的协同作用是衡邵干旱走廊目标效益演变的关键机制。

关键词:水-能源-粮食纽带;多目标优化;资源配置;种植结构优化;衡邵干旱走廊

中图分类号:TV213.4;F326.11 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2026)05-0110-13

Study on multi-objective optimization and regulation of water-energy-food nexus system in the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor considering social, economic, and ecological benefits//Zhou Guangqing¹, Wang Xinkui^{1,2}, Jiang Changbo^{1,2}, Long Yuannan^{1,2}, Song Xinyi^{1,2}, Huang Chunfu¹(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province)

Abstract: Facing the severe challenges of synergistic resource optimization and regional high-quality development, a multi-objective optimization model for the water-energy-food nexus system at the county scale was developed for the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor. The model was constructed based on the NSGA-III algorithm by considering social, economic, and ecological benefits under current and future scenarios. The optimal allocation schemes under different hydrological years were identified using the entropy weight-TOPSIS method, and key drivers affecting regional benefits were explored using the Geodetector. The results showed that a 1% increase in water supply could increase the comprehensive benefits by 3.875% to 7.650% in the current scenario. By optimizing crop structures and reallocating water resources, competition among sectors was alleviated, achieving synergistic improvements in social, economic, and ecological benefits. Under the future normal-flow scenario, crop structure optimization and water redistribution increased annual grain production to 9.2885 million tons, exceeding the per capita standard by 24%, while reducing COD emissions by 9.8%. Under the dry-year scenario, the food security threshold can be maintained by reducing the planting area of high-water-consumption crops, with annual grain production exceeding the standard by 12.9%. Regarding driving effects, influencing factors were more dispersed in normal-flow years but became significantly concentrated in dry years. The explanatory power of multi-factor synergistic effects on social, economic, and ecological benefit variations was substantially enhanced, indicating that the synergistic effect between water supply security and resource allocation equity was the key mechanism driving the evolution of target benefits in the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor.

Key words: water-energy-food nexus; multi-objective optimization; resource allocation; crop planting structure optimization; the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor

基金项目:湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2025JJ60264);国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232242);湖南省水利科技项目(XSKJ2023059-38);长沙理工大学研究生实践创新项目(CLSJCX24029)

作者简介:周光青(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。E-mail:2025402426@qq.com

通信作者:王新奎(1996—),男,讲师,博士,主要从事水资源系统规划研究。E-mail:xkwang@csust.edu.cn

水资源、能源和粮食是人类实现社会-经济-生态环境可持续发展的基本保障^[1]。然而,随着气候变暖加剧以及城市化进程的不断加快,有限资源与不断增长的资源需求之间的冲突愈发严重。国际可持续发展研究所的报告显示,至 21 世纪中叶,人类对粮食和能源需求的增幅将分别达到 50% 和 35%,而水资源供给缺口将扩大至 40%^[2]。粮食与能源需求的增长和水资源供给短缺之间的矛盾将成为当今社会人类面临的最大挑战^[3-4],如何通过种植结构调整与资源再分配推动水资源、能源与粮食的协同发展已成为国内外科学界关注的热点问题。水、能源与粮食三者并非独立存在,而是组成了一种相互关联、相互依存、相互制约的复杂纽带系统^[5]。传统针对单一资源系统的研究范式已无法有效应对可持续发展视角下复合型系统间纽带关系的复杂性^[6]。因此,亟须深入探索水-能源-粮食纽带(WEF Nexus)系统间的交互机制与协同优化调控,以实现社会、经济和生态效益之间的协调与平衡,从而缓解区域水资源短缺、能源约束与粮食危机。

自 2011 年波恩会议系统性地提出水-能源-粮食纽带研究框架以来^[7],不同机构与组织对其内在机理进行了阐释与完善^[8-10],国内外学者对水-能源-粮食系统开展了大量研究,主要差异体现在以下 3 个方面:①研究方法多样化,主要涵盖数据包络分析(DEA)、生命周期评估(LCA)、投入产出模型、足迹分析、计量经济模型以及系统动力学(SD)等。例如:Zhang 等^[11]提出了动态 DEA 模型和空间 Durbin 模型,揭示了中国水-能源-粮食系统效率特征及温度影响,强调子系统的关联优化;Li 等^[12]构建了可靠性-协调性-弹性指标体系,结合 Copula 函数揭示了黄河流域水-能源-粮食系统安全风险及协同韧性提升需求;王雨等^[13]基于 SD 建立了水-能源-粮食纽带仿真模型,针对黑龙江省的 4 种不同发展情景,提出了水-能源-粮食的优化配置方案。②研究内容侧重点不同,主要聚焦于水-能源-粮食纽带的互馈关系、系统模拟与情景分析、耦合风险、协调度评价以及优化调控等方面。例如:王慧敏等^[14]构建了“水-能源-粮食-经济社会”系统模型,定量刻画了山东省水-能源-粮食之间的“压力-状态-响应”(PSR)关系;Kamrani 等^[15]构建了基于农业水分配系统绩效的评估模型,对伊朗 Rudasht 灌区的水-能源-粮食纽带关系进行了综合评价;王璐琪等^[16]构建了安全综合指标体系,结合耦合协调度模型和障碍度模型分析了京津冀地区水-能源-粮食系统的安全性和影响因素;Sánchez-Zarco 等^[17]提出了一种融合 LCA 的循环经济优化方法,构建了多目标优化模型以协

调墨西哥的区域水-能源-粮食系统安全与生态足迹。③研究尺度多样,空间尺度上涵盖了全球、国家、省域、城市、流域等多个层次,其中大尺度研究占据主导地位^[9]。例如:Simpson 等^[18]构建了涵盖 21 项指标的国家层级 WEF Nexus 指数,评估了 181 个国家水-能源-粮食系统的协同与权衡特征;Covarrubias^[19]提出了“城市纽带”概念框架,从社会-物质视角解析了水-能源-粮食纽带系统的内在耦合机制;Bakhshianlamouki 等^[20]基于 SD 构建了乌鲁米耶湖流域水-能源-粮食系统模型,模拟了多项生态修复措施对资源系统的联动效应。尽管近年来有关水-能源-粮食纽带的研究在不断深入,但传统的资源管理模型通常侧重于单个维度,如水力发电^[21]、城市供水系统^[22]、作物分配与用水机制^[23]、灌溉用水^[24]等要素,难以捕捉资源之间的耦合特征,整体系统优化空间受限。城市系统中水、能源和粮食资源的高效管理亟需一种能够兼顾社会、经济与生态效益的综合性协同优化方法,这种多视角策略对于实现多目标协同优化至关重要^[25]。然而,现有研究主要集中于省级或流域尺度,针对县域尺度的水-能源-粮食纽带系统协同调控研究仍显不足,亟须构建适用于县域尺度的建模框架,以揭示并量化各子系统之间的权衡关系与协同机制。

衡邵干旱走廊位于江南丘陵与云贵高原过渡地带,土壤以红壤为主,质地黏重且透水性差,生态脆弱。受气候与地形的共同影响,衡邵干旱走廊干旱事件频发,再加上无控制性骨干水源工程,使得该区域面临水资源分布不均、季节性缺水和工程性缺水等现实问题^[26]。区域内虽建有 4 616 座水库,但其中 98% 为小型水库,总库容仅占全省的 12.4%,且空间分布不均,整体抗旱能力偏弱。因此,本文从县域单元出发,以 2022 年为现状年,构建兼顾社会、经济与生态效益的水-能源-粮食纽带多目标优化模型,并采用 NSGA-III 多目标遗传算法进行求解。在此基础上,以 2030 年为规划年,针对不同来水频率情景,开展区域水、能源与粮食资源的优化配置,并结合熵权法-TOPSIS 综合评价法筛选各水文年的最优配置方案,以期为推动衡邵干旱走廊实现水-能源-粮食纽带系统的统筹优化提供理论基础。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

衡邵干旱走廊(图 1)位于湖南省中部,介于 25°40'N~28°14'N、109°50'E~113°16'E 之间,覆盖衡阳市、邵阳市、娄底市全境以及永州市北部的新田县、祁阳县等共 33 个县级行政区。研究区总面积约

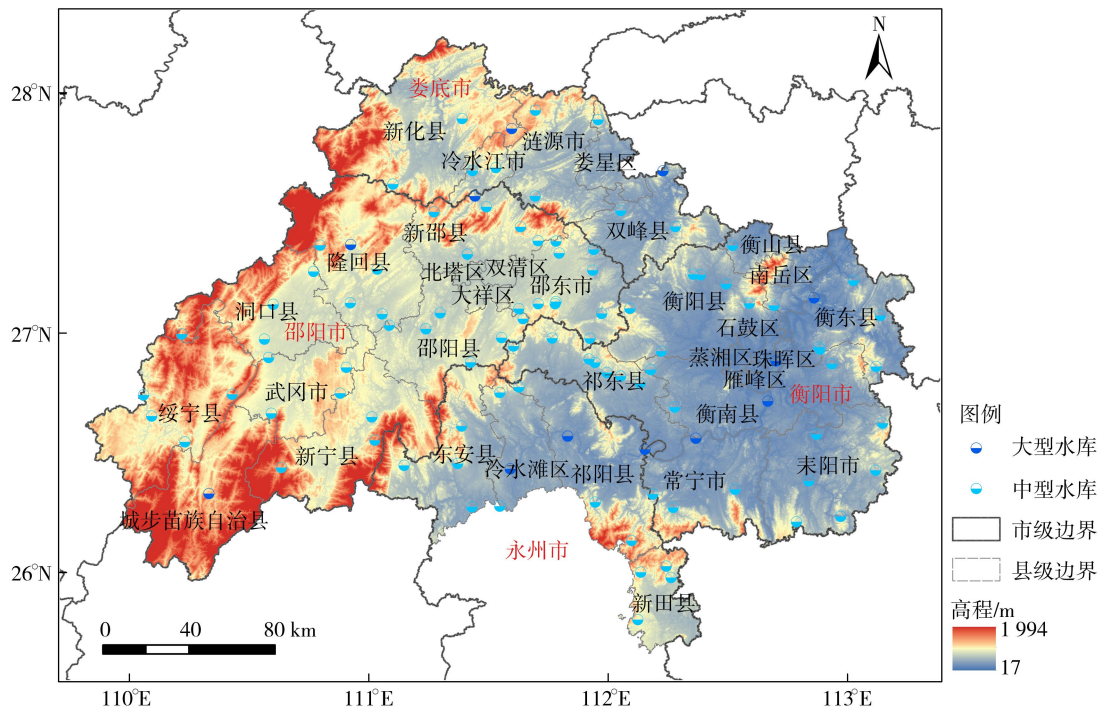


图1 衡邵干旱走廊区域概况

5.12 万 km^2 , 占湖南省总面积的 24.2%^[27]。地形以丘陵、盆地为主, 地势整体西高东低、南高北低, 四面环山, 东有罗霄山脉, 西有雪峰山脉, 南有南岭, 北部囊括南岳衡山等, 形成了衡阳、邵阳盆地。衡邵干旱走廊属于亚热带季风气候, 降水季节分配不均、年际变化明显, 年均降水量为 1384 mm^[28]。夏季由于太平洋的暖湿气流受到高山阻挡, 导致气流下沉, 易形成酷热干燥的环境。该区域主要作物为水稻、玉米、大豆、薯类, 其中双季稻以一年两熟为主, 中稻、玉米和油菜均为一年一熟。

1.2 数据来源

收集了衡邵干旱走廊地区 2022 年 33 个县域的水资源、农业生产、人口需求、水库装机容量以及能源消耗等数据。其中, 水资源数据来源于衡阳市、邵阳市、娄底市、永州市的水资源公报; 区县人口、作物种植面积、粮食产量数据来源于湖南省统计局 (<https://tjj.hunan.gov.cn>); 化肥使用量、农膜使用量数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》; 大中型水库装机容量数据来源于湖南省库区移民事务中心 (<https://hnym.hunan.gov.cn>); 能源消耗数据引用自文献[29]。能源消耗数据集提供了 1997—2017 年中国市县尺度的能源消耗信息 (<https://figshare.com>)。采用线性外推方法将该数据延伸至 2022 年, 并通过湖南省统计年鉴中的地市级能源消耗总量数据对外推结果进行校正。此外, 根据文献[30-31]确定作物含水量、人均粮食需求定额、部门供水效益系数等参数。单价与成本参数依据《全国

农产品成本收益资料汇编》中提供的亩产量、亩总成本及产品平均出售价格等信息换算得到。

2 研究方法

2.1 多目标优化模型

2.1.1 模型建立

2.1.1.1 目标函数

a. 社会效益。基尼系数反映不同区域的空间均衡性, 数值越小表示分配越平等。按 0~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~1 划分为绝对平均、比较平均、相对合理、差距较大和差距悬殊 5 个等级。本文选用人口-水资源、人口-能源、人口-粮食基尼系数表征社会效益, 并通过等权重处理以衡量人口、水资源、能源和粮食配置的空间均衡程度:

$$G = \frac{G_w + G_e + G_f}{3} \quad (1)$$

式中: G 为综合基尼系数; G_w 、 G_e 、 G_f 分别为人口-水资源、人口-能源和人口-粮食基尼系数。模型以 G 最小为社会效益优化目标。

b. 经济效益。本文采用各分区的粮食经济效益 ($E_{\text{粮食}}$)、水量经济效益 ($E_{\text{水资源}}$) 及能源经济效益 ($E_{\text{能源}}$) 最大作为经济目标的量化指标:

$$\max E_{\text{粮食}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N (Y_{nt} P_{ni} \mu_i - C_{nt}) A_{int} \quad (2)$$

$$\max E_{\text{水量}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} \left[\sum_{k=1}^K (b_{ijk} - c_{ijk}) W_{ijk} \right] \quad (3)$$

$$\max E_{\text{能源}} = 0.4895 \sum_{r=1}^R 8760 W_{Er} C_r \quad (4)$$

式中: Y_{nt} 为评估年 t 作物 n 的单位产量, kg; P_{nt} 为评估年 t 作物 n 的单价, 元/kg; μ_i 为分区 i 的供水保证率; C_{nt} 为评估年 t 作物 n 的灌溉单位综合成本, 元/kg; A_{int} 为评估年 t 分区 i 作物 n 的种植面积, hm^2 ; I 为研究区的总分区数; J 为总用水部门数量; K 为总可利用水源数量; α_{ij} 为分区 i 用水部门 j 的用水公平系数; b_{ijk} 、 c_{ijk} 、 W_{ijk} 分别为水源 k 向分区 i 用水部门 j 供水量的效益系数 (元/ m^3)、费用系数 (元/ m^3) 和供水量 (m^3); W_E 为单位发电量所需的水量, $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$; C_r 为水库 r 的设备容量, kW; R 为大中型水库数量; 0.4895 为湖南省 2022 年各月的电价均值, 元/(kW·h)。能源数据基于各市区水资源公报中万元国内生产总值用水量占比 (火电不折算) 进行折算处理, 并采用 1 t 标煤对应 8137 kW·h 的换算方式对能源进行约束。粮食数据根据 2022 年《全国农产品成本收益资料汇编》中各类作物的总成本、总产量及售价计算, 得到水稻、玉米、大豆、薯类折粮的单位综合成本分别为 2.87、2.44、5.88、5.40 元/kg, 单价分别为 2.83、2.69、5.23、4.76 元/kg。

c. 生态环境效益。化学需氧量 (COD) 是指处理水体中氧化物质所需的强氧化剂含量, 可在一定程度上表征水体污染程度。因此, 本文将区域水资源系统中 COD 排放总量 (E_{cod}) 最小作为生态环境目标:

$$\min E_{\text{cod}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J 0.01\beta_{ij}\rho_{ij}W_{ijk} \quad (5)$$

式中: β_{ij} 为分区 i 部门 j 的污水排放系数; ρ_{ij} 为分区 i 用水部门 j 污水处理厂二级出水单位废水排放量中 COD 污染因子的质量浓度, mg/L。

2.1.1.2 约束条件

- a. 承载能力约束: 区域水资源配置量不得超过供水工程的最大输水能力。
- b. 供水约束: 水资源配置过程中应优先满足除农业部门以外的各用水部门的供水保障率。
- c. 需水约束: 各用水部门的水资源配置量应满足其最低需水量, 同时不超过最大需水限制。
- d. 种植面积约束: 各区域不同作物种植面积应满足作物最小和最大种植规模限制。
- e. 粮食安全约束: 农业生产配置需确保不同区域粮食产量达到人口规模对应的基本粮食需求标准, 其中人均粮食需求定额按照我国不低于 400 kg 的标准计算^[32]。
- f. 非负约束: 模型中所有涉及水、能源、粮食的变量都应大于等于 0。

2.1.1.3 决策变量

多目标优化模型的决策变量主要包括两类: 各分区不同水源向生活、工业、农业、服务业和生态等用水部门的供水量 W_{ijk} 以及各分区不同作物的种植面积 A_{int} 。其中, W_{ijk} 用于刻画水资源在不同水源、分区、用水部门之间的配置关系, A_{int} 则用于反映农业生产结构在空间与作物类型上的调整特征。

2.1.2 模型求解

2.1.2.1 模型概化

根据《湖南省“十四五”水安全保障规划》、省内水资源配置工程实践及“生活与生态优先保障”的配置原则, 本文取生活、生态、服务业、工业、农业用水供水保证率分别为 90%、90%、80%、80%、60%。根据《湖南省取水许可和水资源费征收管理办法》中的水资源供应规定“少量取水的限额为每户每月 180 m^3 的地表水或 80 m^3 的地下水”, 确定了地表水、地下水供水量系数分别为 0.7 和 0.3; 2030 年衡邵干旱走廊用水参照各市水资源管理用水总量红线进行约束, 不超过 972679.7 万 m^3 ; 研究区内大中型水库对区域水资源利用起决定性作用, 其总库容占比超过 80%。因此本文仅选取衡邵干旱走廊内 106 座大中型水库, 设定水轮机效率及发电机效率不低于 90%, 取综合效率 η 为 0.81, 据此推算单位发电需水量。供水优先级根据湖南省“十四五”水资源配置及供水规划的要求执行, 确定用水优先顺序为生活用水、生态用水、服务业用水、工业用水、农业用水。

2.1.2.2 模型参数

a. 水源 i 向用水部门 j 的供水次序系数 φ_j :

$$\varphi_j = \frac{1 + m_{\max} - m_j}{\sum_{j=1}^J (1 + m_{\max} - m_j)} \quad (6)$$

式中: $m_{\max}$ 为供水次序序号最大值; m_j 为用水部门 j 的供水次序序号。生活、生态、服务业、工业与农业用水的供水次序系数分别为 0.33、0.27、0.20、0.13、0.07。

b. 效益系数与费用系数。生活用水与生态用水的效益系数通常难以精确量化, 本文参考文献[33-34], 对其赋予较高权重并对生活与生态用水取相同值, 均为 500 元/ m^3 。农业灌溉用水效益系数参考农田灌溉水有效利用系数和效益分摊系数计算^[35], 其中效益分摊系数依据《湖南省“十三五”新增 150 万亩高效节水灌溉面积实施方案》取 0.3, 计算得到农业灌溉用水效益系数为 20 元/ m^3 。工业用水效益系数采用万元工业增加值用水定额的倒数确定^[36], 万元工业增加值用水量来源于 2022 年《湖

南省水资源公报》,计算得到工业效益系数为296元/m³。服务业用水效益系数按服务业增加值与用水量之比确定^[37],服务业增加值来源于《湖南省2022年国民经济和社会发展统计公报》,用水量取自同一水资源公报,计算得到服务业用水效益系数为450元/m³。费用系数则基于各市州现状年水价均值,并结合相关研究取值^[34,38-39]综合确定,最终确定生活、生态、工业、农业与服务用水费用系数分别为2.89、2.89、2.90、0.50、3.60元/m³。

c. 用水部门排放污染物的质量浓度和污染物排放系数。依据GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》和GB 50318—2017《城市排水工程规划规范》,结合衡邵干旱走廊实际用水结构及污水处理水平确定各部门单位废水COD质量浓度和污染物排放系数,暂不考虑生态用水排污。最终确定生活、工业、服务业单位废水COD质量浓度均为120mg/L,农业单位废水COD质量浓度为150mg/L;生活、农业、工业、服务业污水排放系数分别取0.8、0.1、0.6、0.8。

2.1.2.3 需求预测

基于2022年基础数据,采用定额法对2030年衡邵干旱走廊需水量进行预测,预测结果见表1。

2.2 地理探测器

地理探测器模型是一种探究各类现象的驱动力和影响因子以及多因子交互作用的统计学方法^[40]。该方法无需预设线性关系假设,且不受多重共线性影响,能够更稳健地识别各驱动因子对目标效益的解释力^[41]。本研究采用地理探测器的因子探测和交互作用探测两个模块量化水-能源-粮食系统驱动因子对目标(社会、经济和生态)效益的影响:①通

过 q 统计值衡量系统驱动因子对目标效益的贡献率;②比较单因子 q 值与两因子叠加后的 q 值,识别不同影响因子之间交互作用的强弱和类型。

地理探测器的输入数据要求自变量为类型量。这表明在自变量为数值量的情况下,需要提前进行离散化处理。本研究采用自然间断法^[42]对各驱动因子数据进行离散,并将因子交互作用划分为非线性减弱、单因子非线性减弱、独立、双因子增强、非线性增强5类。

2.3 研究框架

本文以县域为基本单元,构建综合考虑社会、经济与生态效益的水-能源-粮食纽带多目标优化模型。以2022年为现状年,结合区域用水结构与资源约束,采用NSGA-III多目标遗传算法求解帕累托最优解集。同时,预测不同来水频率($P=50\%$ 、 $P=75\%$)情景下2030年规划年下的资源供需格局,开展多部门用水配置与作物种植结构优化,结合熵权法-TOPSIS综合评价法对不同水文年的配置结果进行综合评价与排序,确定最优配置策略。在此基础上,采用地理探测器量化各驱动因子对目标效益的解释力,并识别不同因子组合对目标效益的增强效应及其作用类型。

3 结果与分析

3.1 现状年模型验证与性能评估

根据2022年统计数据,衡邵干旱走廊的综合基尼系数为0.316,粮食经济效益为49.26亿元,水量经济效益为2680.06亿元。受限于能源数据完整性,能源效益取水库满发状态下的理论最大值20.26亿元,总经济效益上限为2749.58亿元,年内

表1 2030年衡邵干旱走廊各县(市、区)用水部门需水量预测结果 单位:万m³

县(市、区)	生活	工业	农业		服务业	生态	县(市、区)	生活	工业	农业		服务业	生态
			$P=50\%$	$P=75\%$						$P=50\%$	$P=75\%$		
珠晖区	0.22	0.41	0.30	0.34	0.28	0.04	隆回县	0.53	0.34	2.70	3.12	0.25	0.04
雁峰区	0.15	0.82	0.08	0.09	0.19	0.03	洞口县	0.38	0.40	2.16	2.43	0.20	0.03
石鼓区	0.16	0.25	0.11	0.12	0.20	0.03	绥宁县	0.17	0.35	0.78	0.98	0.08	0.01
蒸湘区	0.21	0.48	0.11	0.13	0.26	0.04	新宁县	0.27	0.20	1.89	2.19	0.14	0.02
南岳区	0.04	0.03	0.09	0.10	0.21	0.01	城步苗族自治县	0.13	0.13	0.60	0.62	0.06	0.01
衡阳县	0.50	0.64	4.10	4.58	0.35	0.03	武冈市	0.37	0.23	2.02	2.33	0.19	0.03
衡南县	0.44	0.75	4.20	4.92	0.36	0.03	邵东市	0.44	1.59	2.79	3.13	0.24	0.03
衡山县	0.18	0.36	1.25	1.50	0.14	0.01	冷水滩区	0.28	0.76	1.93	2.06	0.23	0.07
衡东县	0.29	0.59	2.05	2.29	0.24	0.02	祁阳县	0.40	0.71	4.07	4.79	0.17	0.04
祁东县	0.46	0.74	3.02	3.54	0.36	0.03	东安县	0.27	0.37	3.01	3.30	0.11	0.02
耒阳市	0.55	1.14	2.68	3.15	0.46	0.04	新田县	0.16	0.17	0.77	0.86	0.06	0.01
常宁市	0.39	0.84	2.78	3.24	0.33	0.02	娄星区	0.33	2.11	0.82	0.95	0.24	0.10
双清区	0.17	0.54	0.22	0.27	0.18	0.03	双峰县	0.37	0.81	2.26	2.70	0.11	0.04
大祥区	0.18	0.32	0.34	0.41	0.18	0.03	新化县	0.54	1.00	2.46	2.75	0.30	0.06
北塔区	0.06	0.14	0.16	0.19	0.06	0.01	冷水江市	0.18	2.14	0.36	0.40	0.13	0.03
新邵县	0.36	0.42	1.72	2.02	0.17	0.02	涟源市	0.45	0.98	2.31	2.53	0.14	0.05
邵阳县	0.43	0.37	3.19	3.76	0.21	0.03							

总供水量为 84.46 亿 m³。以上述实测数据为基础,系统验证多目标优化算法在现状年情景下的有效性与鲁棒性。经过多次数值测试,设置种群规模为 500,进化迭代次数为 1000 次,交叉算子采用模拟二进制交叉,交叉率为 0.8,变异率为 0.05,分布指数为 20。为深入分析各目标的相对重要性,消除单位和量级差异对优化结果产生的影响,在求解得到帕累托最优解集后,对各目标函数值进行归一化处理,并采用熵权法确定各目标指标权重,结合 TOPSIS 方法对优化方案进行综合评价,筛选综合最优方案。优化结果显示,各方案供水总量范围为 85.87 亿~91.69 亿 m³,其中综合基尼系数由 0.316 降至 0.276~0.302,降幅为 4.4%~12.7%,验证了模型通过调整资源分配可有效增强区域协同性;经济效益提升至 2 843.9 亿~3 254.3 亿元,较现状年实际产值增长 3.4%~18.4%,凸显了模型对经济目标的优化潜力;年内 COD 排放量控制在 1.22 万~1.41 万 t,虽缺乏原始数据对比,但其结果符合 GB 8978—1996《污水综合排放标准》要求。进一步量化分析表明,供水量每提升 1%可驱动综合效益增长 3.875%~7.650%,这一结果验证了模型通过优化粮食种植结构和水资源配置,能够显著提升水-能源-粮食系统的协调性。此外,模型在现状年情景下的稳健性验证,为后续规划年(2030 年)不同来水频率情景下的优化配置奠定了可靠基础。

3.2 规划年多情景下优化结果分析

3.2.1 目标效益优化结果

规划年采用基尼系数、经济效益和 COD 排放量作为评价指标,从 500 组非劣解中筛选出平水年和枯水年相对最优的配置方案,通过熵权法-TOPSIS 综合评价法得出综合效益最优方案为 S1、S5,其中平水年社会效益、经济效益、生态环境效益的权重分别为 0.33、0.27、0.39,枯水年分别为 0.31、0.40、0.29;方案 S2、S3、S4 和 S6、S7、S8 分别代表平水年和枯水年中社会效益、经济效益和生态环境效益最优的配置方案。枯水年各方案综合基尼系数为 0.240~0.264,

经济效益为 2 991.3 亿~3 211.3 亿元,COD 排放量为 0.825 万~0.884 万 t;平水年各方案综合基尼系数为 0.259~0.278,经济效益为 3 273.5 亿~3 408.6 亿元,COD 排放量为 1.159 万~1.204 万 t。

根据不同方案下的多目标效益结果(表 2)和多目标优化帕累托前沿三维图(图 2),可得到典型优化方案的目标权衡关系,结果如下:①社会效益、经济效益和生态效益之间存在协同与竞争并存的关系。其中,生态效益与社会效益、经济效益均成反比,表明生态效益提升需要在经济发展和资源公平配置方面进行一定协调;社会效益与经济效益成正比,即经济效益提升时资源配置公平性也随之提高。单一目标的优化难以同时实现其他目标的最优,需要通过多目标协调优化实现纽带系统综合效益提升。②平水年与枯水年情景下综合基尼系数、经济效益和 COD 排放量 3 个优化目标之间的协调关系存在明显差异。平水年的优化方案较为均衡,所得到的帕累托前沿分布均匀,且范围较广,体现了各目标之间的合理协调;而枯水年面临更为严峻的资源压力和环境负担,导致帕累托前沿相对更加收敛,优化范围相对缩小,经济效益与生态效益的牺牲较为显著。③在不同水文情景下,模型均能有效求解水-能源-粮食纽带多目标协调优化问题,表明该模型能够为区域水资源管理、能源优化调度及粮食安全保障提供强有力的技术支持。

3.2.2 不同情景优化方案下水量分配优化

平水年 S1、S2、S3、S4 的总供水量分别为 89.48 亿、89.70 亿、90.63 亿、88.68 亿 m³,其中地表水供水量占比为 84%,地下水供水量占比为 16%;枯水年不同方案的总供水量分别为 76.79 亿、79.20 亿、81.43 亿、76.02 亿 m³,其中地表水供水量占比为 86%,地下水供水量占比为 14%。缺水率可反映区域干旱情况,参考 SL 424—2008《旱情等级标准》,各县市区缺水等级如图 3 所示。在平水年的优化方案中,无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱发生的占比分别为 0.41、0.05、0.15、0.19、0.20,无旱和轻旱主要发生在邵阳市西南地区以及娄底市东部,重

表 2 规划年衡邵干旱走廊不同方案、不同水文年多目标效益

方案	水文年	目标	社会效益	总经济效益/亿元	COD 排放总量/万 t
S1	平水年	综合效益最优	0.259	3 273.5	1.203
S2	平水年	社会效益最优	0.259	3 292.8	1.204
S3	平水年	经济效益最优	0.271	3 408.6	1.192
S4	平水年	生态效益最优	0.278	3 401.6	1.159
S5	枯水年	综合效益最优	0.244	2 991.3	0.837
S6	枯水年	社会效益最优	0.240	3 155.0	0.862
S7	枯水年	经济效益最优	0.255	3 211.3	0.884
S8	枯水年	生态效益最优	0.264	3 165.7	0.825

● 综合最优方案 ● 社会效益最优方案 ● 经济效益最优方案 ● 生态效益最优方案

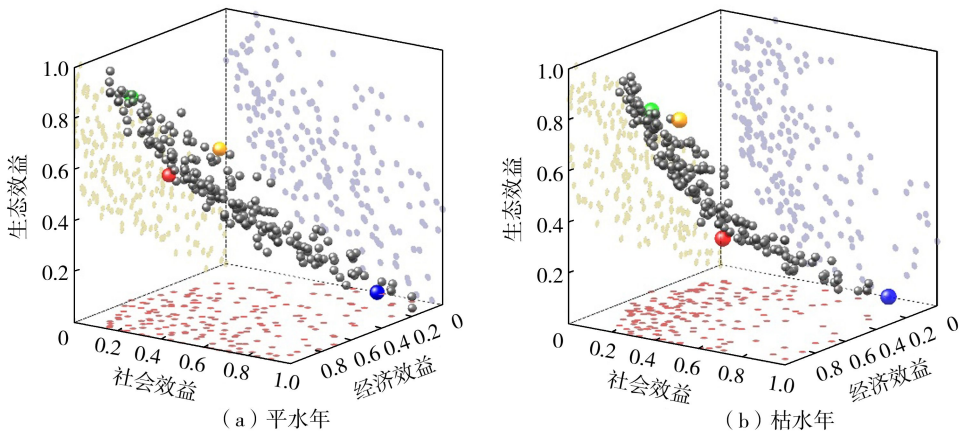


图2 规划年衡邵干旱走廊不同水文年多目标优化帕累托前沿结果

干旱等级 无旱 轻旱 中旱 重旱 特旱

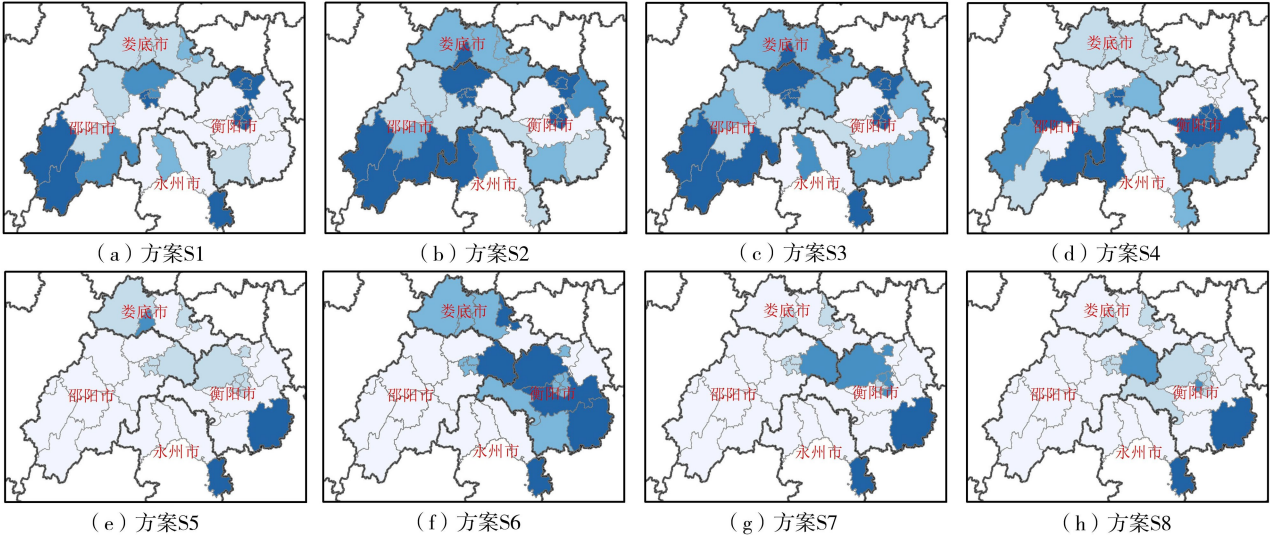


图3 衡邵干旱走廊不同水文年缺水等级对比分析

旱主要发生在娄底市、衡阳市市辖区周边县区、邵阳市市辖区周边县区以及永州北部的新田县、祁阳县；在枯水年的优化方案中,无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱发生的占比分别为 0.09、0.00、0.06、0.32、0.53。重旱发生区域在 S6、S7、S8 方案中加剧为特旱,干旱分布区域大体一致。该研究结果与杨扬等^[43]对该区域干旱等级的分析结果一致。

综上可知,优化后得到各水平年的综合效益最优方案 S1、S5 表现较优,因此本文选择 S1 与 S5 分

别作为平水年和枯水年的最典型方案进行分析,典型方案的部门供水量以及缺水量如表 3 所示。由表 3 可知:①平水年方案 S1 的整体缺水率为 7.1%,其中生活、工业、农业、服务业、生态部门的缺水率分别为 0、0、22%、0、0;枯水年方案 S5 的整体缺水率为 26.7%,其中生活、工业、农业、服务业、生态部门的缺水率分别为 0%、16.6%、41%、0%、6.7%。对于农业供水量的调高主要考虑在建的犬木塘水库工程覆盖衡邵干旱走廊的邵阳、永州、衡阳和娄底 4 市 8

表3 不同水文年综合效益最优方案下不同部门供水、粮食产量及发电情况

水文年	地区	生活供水量/亿 m ³	工业供水量/亿 m ³	农业供水量/亿 m ³	服务业供水量/亿 m ³	生态供水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	粮食产量/万 t	水库发电量/亿 kW·h
平水年	衡阳市	4.42	7.31	15.39	4.09	0.35	3.54	304.48	46.54
	邵阳市	4.28	5.05	15.05	2.31	0.30	2.32	343.51	
	永州市北部	1.77	4.96	8.72	0.92	0.27	0.82	150.02	
	娄底市	1.91	5.78	5.57	0.83	0.21	0.45	130.84	
枯水年	衡阳市	4.28	5.90	13.60	3.59	10.66	4.28	222.38	37.74
	邵阳市	4.17	4.56	13.62	2.05	7.54	4.17	265.77	
	永州市北部	1.70	3.27	7.24	0.93	5.41	1.70	149.06	
	娄底市	1.87	3.89	4.51	0.66	4.62	1.87	106.00	

县,可缓解走廊中心地带的灌溉缺水现状。②S1、S5方案的区域大中型水库发电量分别为46.54亿、37.74亿kW·h。相比之下,平水年在资源调配和目标实现上更具优势,其发电效率提升幅度高于枯水年,优化潜力更为显著。枯水年则受资源限制显著,目标竞争性更强,需通过精准调度和优先级分配实现局部效益提升。由于水库发电量主要受降水量、上游来水量和地下水供给等因素的影响,不同水文年的水库发电量变化较小,发电量变化所引起的经济效益波动幅度不超过0.1%。综合分析显示,在平水年和枯水年,大中型水库均能保持较高的发电效益,其稳定性在现状年的优化配置基础上得到了进一步提升。③衡邵干旱走廊作为粮食生产基地,粮食作物种植面积变化较小,仅在2016年急剧下降后呈小幅度波动。S1、S5方案农业部门实际供水量分别为44.73亿、38.96亿m³,供水率分别为78%、59%,较现状年总产量909.56万t分别增产2.07%、-18.33%。平水年粮食系统的经济效益略有上升,但粮食生产所产生的经济效益在整体经济目标效益中的占比仅为1.2%~1.3%,粮食产量减少对经济效益的贡献不足0.1%。在对农业部门进行调整时,平水年、枯水年人口-粮食基尼系数的最大波动幅度也仅为0.067、0.064,因此,优先满足其他4个部门的供水需求对整个系统的总体目标效益影响较小。

3.2.3 种植结构优化结果

为切合国家“粮食安全”与“双碳”战略需求,提高农业用水效率并兼顾系统多目标优化,模型引入了粮食作物种植结构调整模块。已有研究表明,衡邵干旱走廊农业用水占区域总供水量的50%以上,区域缺水的主要原因为工程蓄水能力不足和农业灌溉需水量未能得到满足^[44],不同作物在耗水量、产出效益等方面差异显著,直接影响系统目标的实现。为确保粮食安全和种植结构的合理性,模型参考2022年湖南省统计年鉴,设定各分区主要作物总种植面积的上下限为±10%。在综合最优水资源配置基础上,协同作物种植结构优化与资源配置,提升系统整体效益、降低生态压力。

不同水文年粮食产量与种植面积变化情况如表4所示。从作物种植结构来看,与种植结构优化前相比,平水年种植面积均呈小幅上升趋势,增幅为3.8%,粮食产量达928.85万t,超出人均粮食占有量标准24%。枯水年种植面积均呈下降趋势,降幅为16.90%,粮食产量为743.21万t,超出人均粮食占有量标准12.9%。此外,种植结构优化不仅改善了水资源配置效率,同时降低了区域污染物排放水

平,与2022年现状配置方案相比,规划年平水年、枯水年综合效益最优方案COD排放量分别下降9.8%、37.3%。平水年与枯水年的种植面积变化反映了气候变化对水资源配置的影响,枯水年优化空间受限,调整水稻等高耗水作物的面积有助于缓解水资源供需矛盾;从空间格局来看,衡邵干旱走廊的4个分区的面积变化趋势存在一定的差异(图4),其中,永州市因丘陵地形多且农田水利设施薄弱,灌溉用水保证率较低,导致其水-粮食状态较为滞后。尽管该地区作物种植面积呈下降趋势,但其占比相对较小,对总体的影响有限。相比之下,衡阳市、娄底市和邵阳市的水资源利用效率较高,但均面临水资源匮乏问题。平水年、枯水年粮食作物分别产生经济效益51.78亿、41.57亿元。其中平水年水稻、玉米、大豆、薯类种植面积增幅分别为4%、4%、8%、6%,总种植面积为148.373万hm²;枯水年水稻、玉米、大豆、薯类种植面积降幅分别为17%、16%、96%、12%,总种植面积118.697万hm²。对比现状年与规划年4种作物种植面积的变化程度可以发现,水稻种植面积变化最大,其次是玉米和大豆,最后是薯类。其中平水年水稻种植面积增加4.222万hm²,枯水年水稻种植面积下降21.002万hm²,薯类种植面积平水年仅增加0.251万hm²,枯水年减少0.483万hm²。大豆作为高耗水但低产的粮食作物在枯水年其种植面积被大量减少,占比下降96%。综上所述,规划期应优化调整种植结构,做到平水年“提单产,增面积”,枯水年保持“稳单产,降面积”,向《湖南省“十四五”农业农村现代化规划》的种植要求看齐。

表4 不同水文年粮食产量与种植面积变化情况

分区	现状年种植面积/万hm ²	现状年粮食产量/万t	规划年粮食产量/万t	
			平水年	枯水年
衡阳市	46.500	301.19	304.48	222.38
邵阳市	50.312	318.32	343.51	265.77
永州市	24.310	151.69	150.02	149.06
娄底市	21.818	138.36	130.84	106.00
合计	142.941	909.56	928.85	743.21

水稻是研究区最主要的粮食作物,具有高耗水、低耗能的特点,可作为适应不同水文情势的重要调节农作物。同时,水稻的产量和经济效益相对较高,在保障区域粮食安全的前提下,可适度提高其种植比例。相较之下,红薯耐旱耐瘠,玉米适应性强,对全域农业用水压力较小,适合在红壤、黄壤分布较广的邵阳市和娄底市生长,在枯水年可减少衡阳市、永州市这2类作物的种植面积。因此,衡邵干旱走廊的粮食作物种植结构总体调控趋势为:枯水年耕地结构基本保持稳定,平水年适当增加水稻种植面积、调减旱作物种植比例。

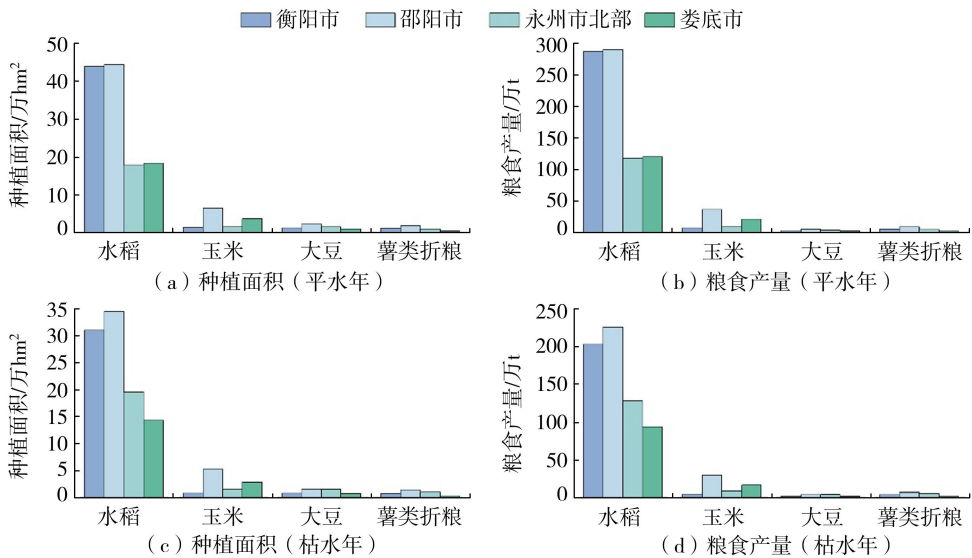


图4 不同水文年各粮食作物种植面积与粮食产量优化结果

3.3 关键驱动因子分析

考虑区域干旱特征、目标函数构成、指标代表性以及因子间相对独立性,选取了粮食总产量、总种植面积、缺水率、农业供水量、地表水供水量、地下水供水量、人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数共8个驱动因子。其中,粮食总产量和总种植面积反映粮食生产规模,地表水供水量、地下水供水量和农业供水量反映水资源配置格局,人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数反映分配公平性。此外,根据SL 424—2008《旱情等级标准》,城市旱情指标宜采用城市干旱缺水率,其定义为干旱期内日缺水量与正常日供水量的比值。因此,本文选取缺水率指标表征衡邵干旱走廊的水资源约束与干旱胁迫特征。

图5直观地显示了不同规划年(平水年、枯水年)下单个因子对目标(社会、经济和生态)效益的影响大小。结果显示,不同水文年下关键驱动因子对三类目标效益的主导机制存在显著差异。在平水年,三类效益的解释力整体较高,且驱动因子贡献分

布相对均衡。社会效益主要受“公平性与配置格局”因子主导,其中人口-粮食基尼系数、人口-水资源基尼系数和农业供水量的解释力最为突出,贡献率分别达到81.9%、71.7%和66.4%,表明社会效益对资源与粮食分配公平高度敏感。经济效益方面,人口-水资源基尼系数的贡献率最高(61.0%),农业供水量(30.9%)和地下水供水量(22.4%)次之,反映经济效益主要受水资源分配公平性及供水保障水平影响。生态效益则对区域干旱程度以及供水结构表现出高度敏感性,缺水率、农业供水量和地表水供水量的贡献率分别为81.5%、79.0%和78.1%。同时,粮食总产量和总种植面积仍保持中等解释力,说明农业生产强度通过用水规模及相关排放过程对生态效益具有持续影响。

在枯水年,三类效益的主控因子结构发生明显转变,驱动作用高度集中。社会效益几乎完全由人口-粮食基尼系数主导,其贡献率高达92.1%,人口-水资源基尼系数和地下水供水量的作用显著减弱,

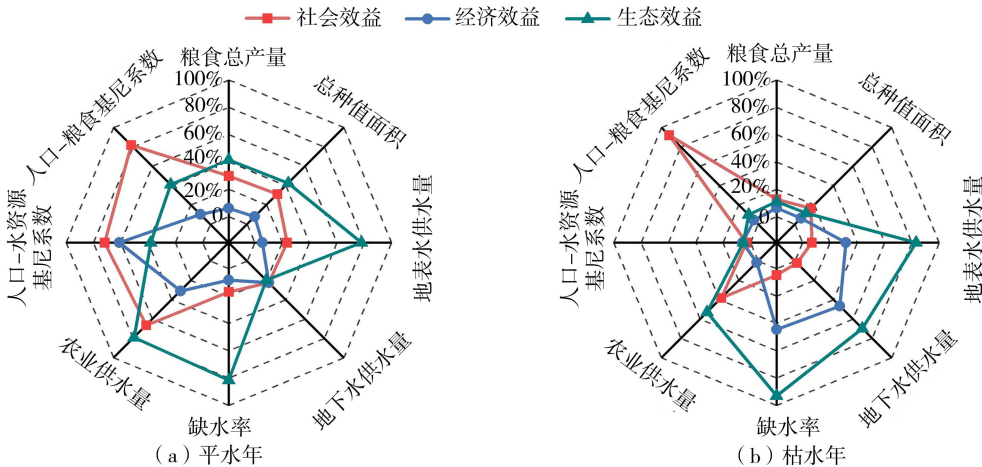


图5 不同水文年单个影响因子对社会、经济和生态效益的贡献率

表明社会差异主要体现为粮食分配格局变化。经济效益转为“供给-短缺”驱动模式,地下水供水量(46.5%)和缺水率(44.5%)成为最关键因子,地表水供水量(31.7%)次之,反映经济系统对水资源短缺和非常规供给的依赖显著增强。生态效益对水资源约束的敏感性进一步放大,缺水率的贡献率高达92.9%,同时地表水供水量、地下水供水量和农业供水量均保持较高解释力,显示生态系统在枯水情景下对水资源供需变化具有高度脆弱性。

不同水文年下双因子交互作用对衡邵干旱走廊不同目标效益的影响如图 6 所示。其中, $C_1 \sim C_8$ 分别代表粮食总产量、作物总种植面积、地表水供水量、地下水供水量、缺水率、农业供水量、人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数,红色方框表示对目标效益具有最大解释力的交互作用因子组,数值表示双因子交互作用对目标效益的最大贡献率。结果表明,在不同水文年和目标效益下,衡邵干旱走廊关键驱动因子的交互作用普遍显著强于单因子效应,表明区域社会-经济-生态目标效益的变化具有

明显的多因子耦合特征。在社会效益方面,粮食公平与水资源公平的协同作用始终占据主导地位。以平水年为例,人口-粮食基尼系数和人口-水资源基尼系数的单因子解释力分别为 81.9% 和 71.7%,其交互作用后解释力提升至 96.0%,成为对社会效益影响最显著的因子组合;枯水年该交互作用的解释力仍高达 95.3%。这一结果表明,衡邵干旱走廊社会效益的变化并非由单一公平因素驱动,而是由粮食分配公平与水资源配置公平的共同作用所决定。在经济效益与生态效益方面,农业供水量与缺水率构成的交互作用因子组在平水年和枯水年均表现出最强解释力,反映经济与生态系统对水资源供给强度及供需缺口变化的高度敏感性。这表明在不同水文情景下,农业用水保障与水资源短缺程度的耦合作用是影响区域经济运行效率和生态系统稳定性的关键约束因素。从交互作用类型来看,研究区不同水文年下各驱动因子组合对目标效益的影响均表现为双因子增强特征,说明任意两个驱动因子的协同作用均可显著提高对目标效益的解释力。

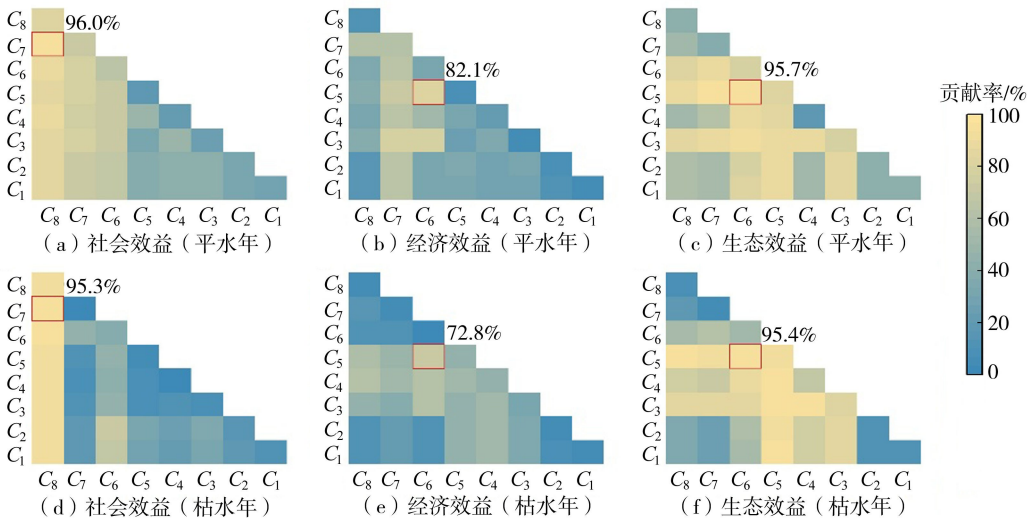


图 6 不同水文年双因子交互作用对社会、经济和生态效益的影响

4 结 论

- a. 在 2022 年现状年,供水量每提升 1%可驱动综合效益增长 3.875%~7.650%,说明通过调整种植结构与水资源再分配能显著缓解部门间资源竞争,促进社会公平性与经济效率的协同提升。
- b. 社会、经济和生态效益目标间存在显著权衡关系。平水年侧重保障生活与生态用水,粮食产量提升至 928.85 万 t,超出人均标准 24%,COD 排放量控制在 1.21 万 t 以内,较现状年下降 9.8%;枯水年压缩高耗水作物面积,水稻种植面积减少 17%,在资源约束下维持粮食安全,粮食产量仍超人均标准 12.9%。

- c. 平水年驱动因子作用较为分散、差异较小,而枯水年驱动效应显著集中,主导因子更加突出。相较之下,多因子综合作用会增强对衡邵干旱走廊社会-经济-生态效益变化的贡献,且为双因子增强类型。其中,人口-粮食基尼系数和人口-水资源基尼系数、农业供水量和缺水率构成的关键因子组合,在平水年和枯水年情景下均表现出显著的交互增强效应,表明水资源供给保障与资源配置公平性的协同调控是决定区域目标效益水平的核心机制。
- d. 未来研究可在现有模型框架上引入情景化气候变化参数与经济社会发展情景,对需水演变过程进行动态刻画,以提升模型在中长期规划中的适用性;同时,可进一步细化水源结构描述,将小型水

库群及地下水补给过程纳入统一调度体系,以更准确地反映区域水资源系统的调蓄能力与韧性特征。部分参数在后续研究中可通过实地调查或多源观测数据进行校准,从而进一步提高模型参数取值的现实一致性与结果可靠性。此外,在保持 NSGA-III 算法高效性的基础上,未来可结合分层优化或降维策略,提升模型在更精细空间尺度或更复杂政策组合情景下的求解能力,进一步增强研究成果在精细化管理和政策制定中的应用潜力。

参考文献:

[1] 贺正齐,周到,张振扬,等. 基于 PSR 与云模型的重要耕地后备资源区水资源-能源-粮食协同安全评价[J]. 水利经济,2025,43(1):26-31. (He Zhengqi, Zhou Dao, Zhang Zhenyang, et al. Evaluation of water-energy-food synergistic security in important reserve resource for arable land regions based on PSR and cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 26-31. (in Chinese))

[2] 许秋阳. 长春都市圈水-能源-粮食关联系统绿色效率评价及优化策略研究[D]. 黄石:湖北师范大学,2024.

[3] Conway D, van Garderen E A, Deryng D, et al. Climate and southern Africa's water-energy-food nexus[J]. Nature Climate Change,2015,5(9):837-846.

[4] 林志慧,刘宪锋,陈瑛,等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望[J]. 地理学报,2021,76(7):1591-1604. (Lin Zhihui, Liu Xianfeng, Chen Ying, et al. Water-food-energy nexus: progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1591-1604. (in Chinese))

[5] 王晶,赵美茹,高紫妍,等. 京津冀水能粮生态系统脆弱性与经济韧性脱钩分析[J]. 水利经济,2025,43(6):72-80. (Wang Jing, Zhao Meiru, Gao Ziyang, et al. Decoupling analysis of water-energy-food-ecology system vulnerability and economic resilience in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(6):72-80. (in Chinese))

[6] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):150-157. (Wang Heng, Fang Lan. Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):150-157. (in Chinese))

[7] Tan Zuowen, Li Han, Song Qiran, et al. Synergistic optimization and interaction evaluation of water-energy-food-ecology nexus under uncertainty from the perspective of urban agglomeration[J]. Sustainable Cities and Society, 2025,124:106291.

[8] Leck H,Conway D,Bradshaw M,et al. Tracing the water-energy-food nexus: description, theory and practice [J]. Geography Compass,2015,9(8):445-460.

[9] Li Jianxuan,Liu Sijing,Zhao Yizhao,et al. Water-energy-food nexus and eco-sustainability: a three-stage dual-boundary network DEA model for evaluating Jiangsu Province in China [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2021, 14(1): 1501-1515.

[10] Melo F P L, Parry L, Brancalion P H S, et al. Adding forests to the water-energy-food nexus [J]. Nature Sustainability,2021,4(2):85-92.

[11] Zhang Lina, Ji Zhanghanyu, Fu Shengrong, et al. Water-energy-food nexus efficiency and its factor analysis in China:a dynamic series-loop DDF model[J]. Journal of Cleaner Production,2024,436:140524.

[12] Li Wei, Jiang Shan, Zhao Yong, et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-energy-food nexus [J]. Science of the Total Environment,2023,856:159236.

[13] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):8-15. (Wang Yu, Wang Huixiao, Yang Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):8-15. (in Chinese))

[14] 王慧敏,洪俊,刘钢. “水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(6):74-84. (Wang Huimin, Hong Jun, Liu Gang. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6):74-84. (in Chinese))

[15] Kamrani K,Roozbahani A,Hashemy Shahdany S M. Using Bayesian networks to evaluate how agricultural water distribution systems handle the water-food-energy nexus [J]. Agricultural Water Management,2020,239:106265.

[16] 王璐琪,姜珊,刘红卫,等. 京津冀地区水-能源-粮食系统安全耦合协调发展特征评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(1):12-23. (Wang Luqi, Jiang Shan, Liu Hongwei, et al. Evaluation of coupling and coordinated development characteristics of water-energy-food system security in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2024,22(1):12-23. (in Chinese))

[17] Sánchez-Zarco X G, Ponce-Ortega J M. Water-energy-food-ecosystem nexus: an optimization approach incorporating life cycle, security and sustainability assessment[J]. Journal of Cleaner Production,2023,414:137534.

[18] Simpson G B,Jewitt G P W,Becker W,et al. The water-

- energy-food nexus index: a tool to support integrated resource planning, management and security[J]. *Frontiers in Water*, 2022, 4: 825854.
- [19] Covarrubias M. The nexus between water, energy and food in cities: towards conceptualizing socio-material interconnections[J]. *Sustainability Science*, 2019, 14(2): 277-287.
- [20] Bakhshianlamouki E, Masia S, Karimi P, et al. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia lake Basin, Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134874.
- [21] 赵林明, 杨海燕, 贾树枝, 等. 基于监测数据的水力发电系统人工神经网络建模[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(1): 73-75. (Zhao Linming, Yang Haiyan, Jia Shuzhi, et al. Monitoring data based artificial neural network modeling of hydropower generation system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(1): 73-75. (in Chinese))
- [22] Capodaglio A G, Olsson G. Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle[J]. *Sustainability*, 2020, 12(1): 266.
- [23] Davis K F, Rulli M C, Seveso A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(12): 919-924.
- [24] Kang Shaozhong, Hao Xinmei, Du Taisheng, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 5-17.
- [25] Su Yuxin, Liu Yahong, Huo Lijuan, et al. Research on optimal allocation of soil and water resources based on water-energy-food-carbon nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 450: 141869.
- [26] 李淑雅. 衡邵娄干早走廊干旱成因研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- [27] 谭军, 赵伟明, 黄草. 湖南省衡邵娄干旱走廊干旱防治措施适度性评价研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(7): 69-75. (Tan Jun, Zhao Weiming, Huang Cao. Study on the suitability evaluation of drought prevention and control measures in the Hengyang-Shaoyang-Loudi arid corridor of Hunan Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(7): 69-75. (in Chinese))
- [28] 符静, 秦建新, 黎祖贤, 等. “衡邵干旱走廊”历史降雨量时空特征及趋势分析[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 3097-3106. (Fu Jing, Qin Jianxin, Li Zuxian, et al. Spatial-temporal distribution pattern and trend analysis of rainfalls in the “Heng Shao drought corridor”[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 3097-3106. (in Chinese))
- [29] Chen Jiandong, Liu Jialu, Qi Jie, et al. City- and county-level spatio-temporal energy consumption and efficiency datasets for China from 1997 to 2017[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 101.
- [30] 王澎喆, 赵志轩, 吴皓天, 等. 基于分层需水的水资源均衡配置研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(4): 56-65. (Wang Pengzhe, Zhao Zhixuan, Wu Haotian, et al. Research on balanced allocation of water resources based on stratified water demand[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2024, 35(4): 56-65. (in Chinese))
- [31] 李泽宇, 赵喜萍, 李剑平, 等. 基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(5): 15-21. (Li Zeyu, Zhao Xiping, Li Jianping, et al. Research on optimal allocation of water resources in Yangquan City based on improved particle swarm optimization[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(5): 15-21. (in Chinese))
- [32] 秦长海, 王明, 赵勇, 等. 新中国成立以来中国粮食生产多元要素驱动定量研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(10): 1746-1758. (Qin Changhai, Wang Ming, Zhao Yong, et al. Quantitative study on the key driving factors of grain production in China from 1949 to 2020[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2024, 64(10): 1746-1758. (in Chinese))
- [33] 孙凯悦, 牛最荣, 王建旺, 等. 面向供水对象转型的引大入秦工程水资源优化配置研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(3): 93-100. (Sun Kaiyue, Niu Zuirong, Wang Jianwang, et al. Optimal allocation of water resources from Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project addressing water supply object transformation[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2023, 34(3): 93-100. (in Chinese))
- [34] 陈海枫. 宿州市水资源承载力评价及优化配置[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
- [35] 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))
- [36] 方国华, 宋子奇, 廖涛, 等. 跨流域引调水工程供水效益量化分析[J]. *水利经济*, 2021, 39(1): 15-19. (Fang Guohua, Song Ziqi, Liao Tao, et al. Quantitative analysis of water supply benefits of inter-basin water diversion projects[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(1): 15-19. (in Chinese))
- [37] 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 based in Taiyuan City on NSGA-II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))
- [38] 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))
- [39] 陶洁, 王沛霖, 王辉, 等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (Tao Jie, Wang Peilin, Wang Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))
- [40] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [42] Jenks G F. The data model concept in statistical mapping [J]. International Yearbook of Cartography, 1967, 7: 186-190.
- [43] 杨扬, 赵伟明, 胡颖冰, 等. “衡邵娄干旱走廊”干旱时空演变特征分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 550-559. (Yang Yang, Zhao Weiming, Hu Yingbing, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought in the “Heng-Shao-Lou drought corridor” [J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 550-559. (in Chinese))
- [44] 刘元沛, 盛东, 山红翠, 等. 衡邵干旱走廊典型灌区水资源优化调度研究[J]. 湖南水利水电, 2016(5): 52-56. (Liu Yuanpei, Sheng Dong, Shan Hongcui, et al. Optimal operation of water resources in a representative irrigation district of the Heng-Shao Drought Corridor [J]. Hunan Hydro & Power, 2016(5): 52-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-19 编辑: 俞云利)

(上接第 109 页)

- [12] 樊启祥, 孙洪昕, 雷振, 等. 大型梯级水电项目开发知识管理研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 102-109. (Fan Qixiang, Sun Hongxin, Lei Zhen, et al. Knowledge management in project development of large cascaded hydropower projects [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 102-109. (in Chinese))
- [13] 张天鸿, 王晓玲, 余红玲, 等. 基于大语言模型的灌浆工程知识服务系统[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 130-142. (Zhang Tianhong, Wang Xiaoling, Yu Hongling, et al. Grouting works knowledge service system based on large language model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 130-142. (in Chinese))
- [14] Li Xiao, Yi Wen, Chi H L, et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety [J]. Automation in Construction, 2018, 86: 150-162.
- [15] Jiang Junjie, Yang Zhile, Wu Chengke, et al. A compatible detector based on improved YOLOv5 for hydropower device detection in AR inspection system [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 225: 120065.
- [16] Lee D, Nie Guangyu, Han K. Vision-based inspection of prefabricated components using camera poses: addressing inherent limitations of image-based 3D reconstruction [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105710.
- [17] Zhou Ying, Luo Hanbin, Yang Yiheng. Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction [J]. Automation in Construction, 2017, 82: 112-121.
- [18] Chen Junjie, Fu Yonglin, Lu Weisheng, et al. Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: 119341.
- [19] Andrews C M, Henry A B, Soriano I M, et al. Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices [J]. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 2021, 9: 4900214.
- [20] Ahn H, Lee C, Kim M, et al. Applicability of smart construction technology: prioritization and future research directions [J]. Automation in Construction, 2023, 153: 104953.

(收稿日期: 2025-06-04 编辑: 俞云利)