

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 X Y, LIU T, HUANG Y, 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)

开都河流域水-能源-生态综合收益下的 水资源优化配置

唐晓宇^{1,2}, 刘铁^{1,2}, 黄粤^{1,2}, 潘晓辉¹, 凌瑜楠^{1,2}, 彭佳宾³, 张鹏⁴, 尚喻⁴

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 101408; 3. 云南大学地理科学学院, 昆明 650091; 4. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 针对干旱区水资源分配不合理的问题, 以新疆开都河流域水资源为研究对象, 以流域水-能源-生态综合收益最高为目标, 建立水资源多目标优化配置模型, 采用基于参考点的非支配排序进化算法(reference-point based many-objective, NSGA-III)对模型进行求解。针对优化方案选择问题, 以经济效益、社会效益和生态效益为准则层构建流域水资源最适配置方案评价指标体系, 采用层次分析法对优化结果进行评价分析。结果表明: 最适配置方案相较于传统配置方案, 水库发电量增加 5.83%, 农业经济效益减少 2.34%, 生态效益提高 40.08%; 当地种植结构需进行适当调整, 应增加玉米和西红栳的种植面积, 减少小麦、棉花和辣椒的种植面积; 博斯腾湖大湖和小湖水位均达到最适生态水位。研究成果可为当地制定水资源配置方案提供决策参考, 有重要的理论意义和应用价值。

关键词: 多目标; 水资源优化配置; 博斯腾湖; NSGA-III; 层次分析法

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2025.0009

水资源优化配置是提高水资源利用效率的重要方式^[1], 也是实现流域各目标综合收益最高的重要手段。水资源优化配置建模需要根据当地实际需求, 充分考虑各方因素对模型的影响。目前的水资源配置研究主要聚焦于灌区水资源优化配置^[2]、流域水资源优化配置^[3]、区域水资源优化配置^[4]、城市水资源优化配置^[5]和水库水资源优化配置^[6], 缺少对河湖库连通流域进行水资源优化配置研究。优化方法是求解优化模型的重要手段, 针对水资源优化配置模型的求解问题, 学者们提出了不同的方法。从传统的线性规划^[7]、非线性规划^[8]和动态规划^[9], 到目前的遗传算法^[10]、粒子群算法^[11]和各类性能优异的进化算法^[12]。基于参考点的非支配排序进化算法(reference-point based many-objective, NSGA-III)具有求解高维大规模优化问题的能力, 因其求解速度快、不易陷入局部最优的特点在水资源配置领域得到广泛应用^[13-14]。但优化算法每次会产生多组优

化方案, 会导致管理者陷入决策困境。评价模型可以结合当地实际情况, 通过建立方案评价指标体系, 选出最贴近当地实际情况的方案, 为管理者提供决策支撑。

新疆开都河流域位于我国西北干旱地区, 是塔里木河流域“四源一干”中的重要源头之一^[15]。流域内包括焉耆盆地、大山口水电站和博斯腾湖, 是典型的河湖库连通流域。博斯腾湖是我国最大的内陆吞吐淡水湖, 它既是开都河的尾间, 也是孔雀河的源头^[16]。流域内土地资源丰富, 光热条件优越, 拥有大量石油和天然气储量, 是我国重要的棉花生产区、粮食供应区和能源战略区, 但生态环境非常脆弱。过去 40 年间, 由于经济利益驱动, 农业生产规模不断扩大, 农业用水比例高达 90%^[17]。这种不合理的水资源利用方式导致了地表水短缺、地下水过度开采、生态用水被挤占以及生态环境恶化等一系列问题^[18]。因此, 提高当地水资源利用效率是缓

收稿日期: 2024-05-09 修回日期: 2024-11-22 网络出版时间: 2024-11-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241125.1522.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071245); 第三次新疆科学考察项目(2021xjkk1400); 王宽城教育基金项目(GJTD-2020-14)

作者简介: 唐晓宇(1995—), 男, 四川南充人, 博士生, 主要从事水资源模拟与优化配置研究。E-mail: tangxz1995@163.com

通信作者: 刘铁(1977—), 男, 山东临沂人, 研究员, 主要从事空间水文学研究。E-mail: liutie@ms.xjb.ac.cn

解水资源供需矛盾、保护生态环境的关键。

本研究以开都河流域水-能源-生态综合收益最高为目标,通过建立流域水资源多目标优化配置模型,以经济效益、社会效益和生态效益为准则层构建水资源最适配置方案评价模型,将优化模型的输出作为评价模型的输入,提出流域水资源配置的最适方案,为当地管理者提供理论依据和决策参考。

1 研究区概况

开都河流域位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州境内(41°15'N~43°21'N, 2°58'E~87°00'E),发源于天山中部南麓,属于雨雪混合补给型河流。流域年均径流量为33.62亿m³,是焉耆盆地重要的灌溉水源,支撑着当地的农作物种植。然而,上游密集的农业活动导致了博斯腾湖水环境恶化。焉耆盆地位于新疆塔里木盆地东北侧,东西长约170 km,南北宽约80 km,总面积约为1.3万km²。盆地气候特点是日均温差大、降水量少、蒸发量大、空气干燥,属于典型的干旱区绿洲气候。年均气温约为8.5℃,年平均降水量为79.8 mm,而年平均蒸发量高达1876.77 mm。流域内主要种植小麦、玉米、棉花、西红柿和辣椒,其中,小麦和玉米为粮食作物,棉花、西红柿和辣椒为经济作物。大山水电站位于开都河的出山口,是开都河上的第一座水电站,主要承担发电和农业灌溉任务。博斯腾湖为我国最大的内陆淡水吞吐湖,它位于开都河的尾间,是著名的水产养殖基地和旅游度假胜地。

2 模型建立

以开都河流域内的水资源为研究对象,考虑开都河沿线水库发电用水、农业灌溉用水、流域生态用水以及博斯腾湖入湖出湖水量,建立水资源多目标优化配置模型,配置尺度为逐日尺度,空间单元为开都河出山口到博斯腾湖出湖口之间,提出水资源在不同部门间的多套配置方案,并建立流域水资源最适配置方案评价模型,为当地管理者选择水资源配置方案提供决策参考。

2.1 优化模型

水资源优化模型需综合考虑各用水部门的利益,以水库发电量最大、流域农业经济效益最大和流域生态压力指数最小为目标函数。优化变量分为2个

方面:水资源与土地资源。水资源变量主要为水库发电水量、发电弃水、地表灌溉水量、地下灌溉水量、博斯腾湖大湖入湖量、博斯腾湖小湖入湖量、博斯腾湖大湖出流量和博斯腾湖小湖出流量。土地资源变量为各作物的耕地面积。

2.1.1 目标函数

水库发电量是当地居民生活质量、工厂运作和财政收入的重要保障。大山水库最大发电量为

$$\max f_{hg} = \eta g \sum_{t=1}^T W_t H_t \quad (1)$$

式中: f_{hg} 为水库发电量,kW·h; η 为水轮机出力系数; g 为重力加速度,m/s²; W_t 为水库在 t 时段的发电水量,kW·h; H_t 为水库在 t 时段的发电水头,m。

农业经济效益是衡量当地人民生活质量的的重要标准^[19]。焉耆盆地最大农业经济效益为

$$\max f_{ac} = \sum_{i=1}^n Y_i A_i P_i - \left(\frac{W_{i,sur} C_{sur}}{\eta_{sur}} + \frac{W_{i,gro} C_{gro}}{\eta_{gro}} + A_i C_{i,pla} \right) \quad (2)$$

式中: f_{ac} 为农业经济效益,元; Y_i 为作物 i 的单位面积的产量,kg/hm²; A_i 为作物 i 的种植面积,hm²; P_i 为作物 i 的市场价格,元/kg; $W_{i,sur}$ 为作物 i 单位面积生长地表水消耗量,hm²/m³; C_{sur} 为地表水成本,元/hm³; η_{sur} 为地表水损失系数; η_{gro} 为地下水损失系数; $W_{i,gro}$ 为作物 i 单位面积生长地下水消耗量,m³; C_{gro} 为地下水成本,元/hm³; $C_{i,pla}$ 为作物 i 的种植成本,元。

生态压力指数(ecological pressure index, EPI)可以表示为生态足迹与生态承载力的比值,反映农业水土资源的消耗是否超过资源的承载力^[20-21]。流域内最小生态压力指数为

$$\min f_{epi} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i (W_{i,sur} + W_{i,gro} + P_e)}{P_w} \cdot r \quad (3)$$

$$0.4r\varphi \frac{Q}{P_w}$$

式中: f_{epi} 为生态压力指数; P_e 为流域有效降水量,m³; P_w 为水资源全球平均生产能力,m³/hm²; r 为水资源全国均衡因子; φ 为水资源产量因子,m³/hm²; Q 为流域水资源总量,m³;0.4为可持续发展利用中定义的流域水资源的最大利用系数。

2.1.2 约束条件

博斯腾湖生态修复一直是当地流域管理局的重点工程,以博斯腾湖大湖和小湖生态水位为强约束。由于焉耆盆地地下水超采严重,采用“三条红线”限

定水量作为地下水约束。

整体水量平衡约束

$$W_t + W_{t,a} = W_{t,sur} + W_{t,li} + W_1 \quad (4)$$

式中: $W_{t,a}$ 为水库在 t 时段弃水量, m^3/s ; $W_{t,li}$ 为博斯腾湖在 t 时段的总入湖流量, m^3/s ; W_1 为开都河的河损, m^3/s 。

博斯腾湖入湖水平衡

$$W_{t,li} = W_{t,wli} + W_{t,eli} \quad (5)$$

式中: $W_{t,wli}$ 为博斯腾湖小湖入湖流量, m^3/s ; $W_{t,eli}$ 为博斯腾湖大湖入湖水量, m^3/s 。

水库水量平衡

$$(W_{t,inf} - W_t - W_{t,a})\Delta t + V_{t-1} = V_t \quad (6)$$

式中: $W_{t,inf}$ 为水库在 t 时段的入库量, m^3/s ; V_{t-1} 为水库在 $t-1$ 时段的库容量, m^3 ; V_t 为水库在 t 时段的库容量, m^3/s 。

博斯腾湖生态水位约束

$$W_{t,l,min} \leq W_{t,l} \leq W_{t,l,max} \quad (7)$$

$$E_{t,l,min} \leq E_{t,l} \leq E_{t,l,max} \quad (8)$$

式(7)和(8)中: $W_{t,l,min}$ 为小湖最小生态水位, m ; $W_{t,l,max}$ 为小湖最大生态水位, m ; $W_{t,l}$ 为小湖在 t 时段的水位, m ; $E_{t,l,min}$ 为大湖最小生态水位, m ; $E_{t,l}$ 为大湖在 t 时段的水位, m ; $E_{t,l,max}$ 为大湖最大生态水位, m 。

地下水开采约束

$$\sum_{i=1}^n W_{i,gro} \leq W_{gro} \quad (9)$$

种植面积约束

$$A_{i,min} \leq A_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i \leq A \quad (11)$$

式(9)~(11)中: W_{gro} 为当地地下水“三条红线”约束水量, m^3 ; $A_{i,min}$ 为当地政策规定作物 i 的最小种植面积, hm^2 ; A 为当地最大的耕地面积, hm^2 。

水库水位约束

$$X_{dsl} \leq X_t \leq X_{fcl} \quad (12)$$

水轮机出力约束

$$H_{min} \leq \eta g W_t H_t \leq H_{max} \quad (13)$$

汛期和生态下泄水量约束

$$W_{t,e} \leq W_t + W_{t,a} \leq W_{t,f} \quad (14)$$

式(12)~(14)中: X_{dsl} 为水库死水位, m ; X_t 为水库在 t 时段的水位, m ; X_{fcl} 为水库防洪限制水位, m ; H_{min} 为水轮机最小出力, kWh ; H_{max} 为水轮机最大出力,

kWh ; $W_{t,e}$ 为下游河道最小生态基流, m^3/s ; $W_{t,f}$ 为汛期最大下泄流量, m^3/s 。

下游需水约束

$$W_{t,d,min} \leq W_{t,elo} + W_{t,wlo} \leq W_{t,d,max} \quad (15)$$

式中: $W_{t,d,min}$ 为下游在 t 时段最小需水量, m^3/s ; $W_{t,elo}$ 为小湖在 t 时段出湖流量, m^3/s ; $W_{t,wlo}$ 为大湖在 t 时段出湖流量, m^3/s ; $W_{t,d,max}$ 为下游在 t 时段最大需水量, m^3/s 。

非负约束下所有决策变量都为正数。

2.2 评价模型

2.2.1 评价方法

目前主流的评价方法包括层次分析法^[22]、TOPSIS法^[23]、模糊综合法^[24]和集对分析法^[25]等。层次分析法具有计算简洁,解题思路更加系统、灵活的优点,其在水资源评价领域得到了广泛应用^[26]。因此,采用层次分析法确定各指标的权重。应用层次分析法解决实际问题包含以下4个步骤:

步骤一,建立分层次结构模型,包括目标层、准则层和指标层。

步骤二,构建各层次的判断矩阵。在准则层,不同准则对目标的评价重要性不同,因此它们的权重也不同。

步骤三,计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,进行层次单排序和一致性检验。一致性检验指标 I_C

$$I_C = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (16)$$

式中: λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

一致性比值

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (17)$$

当 $R_C < 0.10$ 时,可认为判断矩阵满足一致性检验;若 $R_C \geq 0.10$,则应修正判断矩阵,使其满足一致性检验。

步骤四,当一致性检验通过后,最大特征值对应的特征向量即为权重向量。对权重向量进行归一化处理,得到各指标的权重。

2.2.2 指标体系

流域水资源配置是一个复杂的系统,涉及经济、社会和生态等多方面因素,要全面反映多种因素的影响存在困难,因此需要根据实际问题建立评价模

型进行具体分析。开都河流域的水资源主要由冰川融水补给,而焉耆盆地的农业灌溉主要通过修建渠系引水和抽取地下水来实现。结合当地水资源

开发利用现状和用水特点,构建流域水资源最优配置方案的评价指标体系(表1)。

表1 流域水资源最适配置方案评价指标体系

Tab. 1 Indicator system for assessing the optimal allocation of water resources

目标层	准则层	指标层	计算公式	指标性质
流域水资源最适配置方案	经济效益	人均种植业纯收入 C_{11} /元	种植业纯收入/流域总人口	正指标
		经济作物占有量 C_{12} /%	经济作物种植面积/流域作物种植面积	正指标
		水电能源开发率 C_{13} /%	水电站发电量/总径流量	正指标
	社会效益	人均粮食占有量 C_{21} /kg	粮食总产量/流域总人口	正指标
		农业用水比例 C_{22} /%	农业用水量/流域可供水量	负指标
		人均灌溉面积 C_{23} /hm ²	总灌溉面积/流域总人口	正指标
	生态效益	生态压力指数 C_{31}	生态足迹/生态承载力	负指标
		地下水开采率 C_{32} /%	地下水开采量/“三条红线”规定可开采量	负指标
		化肥施用强度 C_{33} /(kg·hm ⁻²)	化肥施用量/耕地面积	负指标

评价指标体系最上层为目标层,即流域水资源最适配置方案;第2层为准则层,包括经济效益、社会效益和生态效益;第3层为指标层,由若干各有侧重又相互关联的具体指标构成。种植业和水电能源所产生的利益是当地主要的经济收入,因此经济效益子系统选用“人均种植业纯收入”“经济作物占有量”和“水电能源开发率”3个指标。可耕种面积和粮食产量是影响以农业生产为主地区的重要社会因素,因此社会效益子系统选用“人均粮食占有量”“农业用水比例”和“人均灌溉面积”3个指标。在灌溉农业区,地下水超采、农业化肥使用强度和生态压力指数是衡量生态环境的重要指标,因此生态效益子系统选用“生态压力指数”“地下水开采率”和“化肥使用强度”3个指标。

3 模型求解

3.1 进化算法

本研究建立的水资源多目标优化模型是一个高维多变量的大规模优化问题,模型中目标函数有3个,约束条件11个,决策变量有2295个。传统的进化算法在处理大规模优化问题时易陷入局部最优且算法不能完全收敛,因此采用高性能的基于参考点的非支配排序进化算法(NSGA-III)求解高维大规模优化问题。NSGA-III的计算步骤见图1。

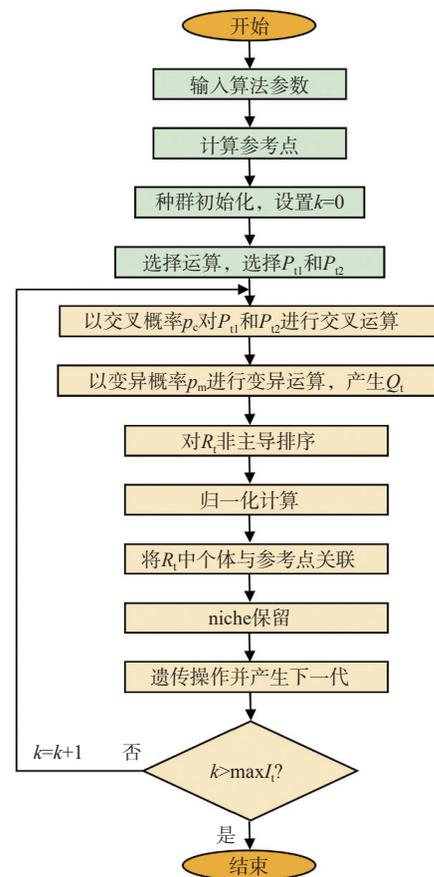


图1 NSGA-III流程

Fig. 1 Flowchart of NSGA-III

3.2 模型参数

选择2017年作为现状年,收集了2017年焉耆盆地作物种植系数、开都河径流数据和人口等数

据。根据《巴音郭楞统计年鉴 2018》^[27]可知,焉耆盆地农业经济效益为 22.18 亿元,大山口水电站发电量为 3.77 亿 kW·h,流域生态压力指数为 4.74,其中焉耆盆地作物种植系数见表 2。焉耆盆地常住人口约 44.5 万人,包含汉族、维吾尔族、回族、蒙古族、哈萨克族和其他民族。总灌溉面积为 96 366 hm²,高效节水灌溉水利用系数为 0.82,常规灌溉水利用系数为 0.58^[28]。山口电站具有日内径流的调节能力,总体上调峰时段出库流量增加,不调峰时则流量减少,大山口水电站夏秋季 1 天 24 小时基本都会发电,均有流量出库;冬春季,大山口水电站 5—10 时、13—18 时不发电,无水下泄。电站冬春季日内流量过程有所波动,但相比上游察汗乌苏电站而言波动次数大为减少,夏秋季日内出库过程比较稳定,波动不频繁。博斯腾湖大湖最低生态水位为 1 046.4 m^[29],小湖的最低生态水位为 1 047.2 m^[30]。NSGA-III 采用 MATLAB2021b 平台编写,种群数为 200,最大进化次数为 50 000,交叉系数为 0.89,变异系数为 0.11。层次分析法采用 MATLAB2021b 平台编写,判断矩阵由专家打分获得,对于不能通过一致性检验的指标层,后期进行修正,直到所有指标层通过一致性检验,或得各指标的综合权重。

表 2 研究区作物种植系数

Tab. 2 Crop cultivation coefficient

作物类型	灌溉定额 (m ³ ·hm ⁻²)	种植面积 (hm ²)	单位产量 (kg·hm ⁻²)	市场价格 (元·kg ⁻¹)	种植费用 (元·hm ⁻²)	化肥使用 (kg·hm ⁻²)
小麦	4 800	23 333	6 663	2.46	15 160	660
玉米	4 650	17 706	12 130	1.82	15 450	870
棉花	5 475	10 420	5 882	7.36	21 945	1 170
西红柿	3 300	11 747	111 134	0.38	24 600	1 125
辣椒	4 950	33 160	44 680	1.76	21 300	1 035

4 模型结果分析

4.1 Pareto 解集

采用 NSGA-III 对水资源多目标优化模型进行求解,得到每日的发电流量、弃水、小湖入流、大湖入流、小湖出流、大湖出流、地表水灌溉量、地下水灌溉量和各作物耕种面积。图 2(a)表示各目标函数取最优解时的 Pareto 解分布关系。在多目标优化问题中,各目标函数之间存在博弈。为更好地解释各目标函数之间的博弈和 Pareto 最优解的差异,采用平行坐标系绘制 Pareto 解,见图 2(b)。其中,平行坐标系中每个坐标轴表示不同的目标,每条折线与所有坐标轴相交的点为优化方案。发电量和农业经济效益为正向指标,生态压力指数为负向指标。

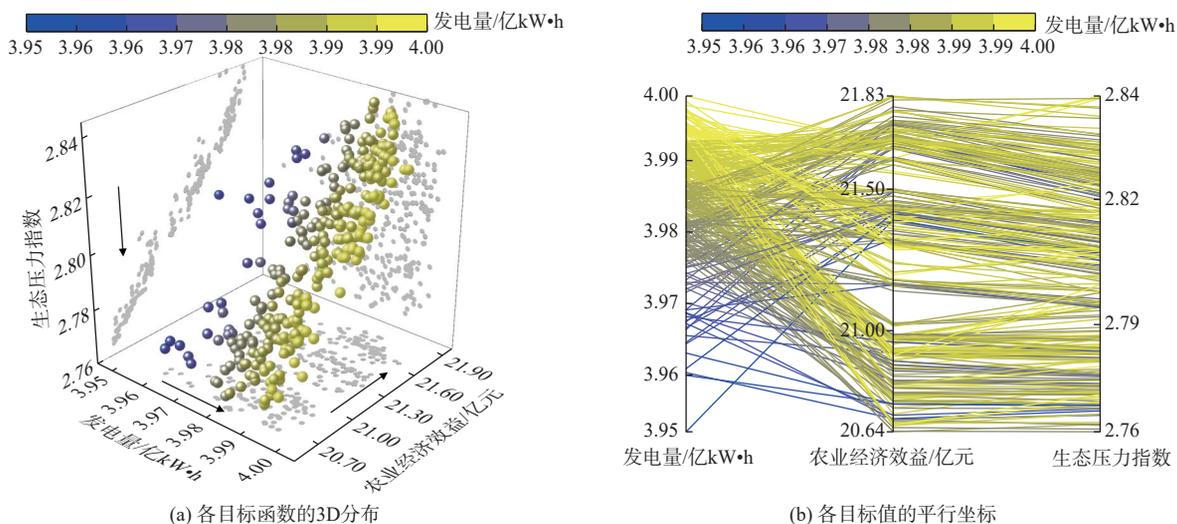


图 2 水资源优化配置的 Pareto 解

Fig. 2 Pareto solution for optimal allocation of water resources

由图 2(b)可知,发电量的取值范围为 3.95 亿~4.00 亿 kW·h,农业经济效益的取值范围为 20.64 亿~21.83 亿元,生态压力指数为 2.76~2.84。在忽略发电量的前提下,随着农业经济效益的增加,生态压力指数呈现增加的趋势,表明种植经济效益高的作物会加剧消耗当地农业水土资源,使其超过当地资

源的承载能力。当发电量增加时,农业经济效益呈现减小的趋势,表明会以损失部分农业经济效益的代价补偿发电量。这种补偿方式可以解释为水库为了提高水电出力,不能保证大规模泄水时间与经济作物的灌水时间相契合,将会导致经济作物种植面积减少。为削弱发电所造成的灌溉地表水所带

来的影响,农作物灌溉会提高地下水的开采量,导致地下水超采风险增加。因此,注重单方面利益不利于流域长期发展,考虑多方利益的多目标优化方式是解决流域可持续发展的重要方法。

4.2 方案评价分析

采用层次分析法对 200 组优化方案进行评价分析,建立的评价指标体系见表 1。各层次判断矩阵由专家打分获取,通过统计计算,不断修正各层次判断矩阵的值,确保准则层和指标层的 R_C 结果都小

于 0.1,使其都通过一致性检验,见表 3。通过层次分析法得到不同层次指标的权重,见表 4,经济效益的权重为 0.540,社会效益的权重为 0.297,生态效益的权重为 0.163。由此可知,对于以灌溉农业为经济导向的地区,人们比较侧重于流域的经济效益,其次为社会效益,生态效益的重要性最低。利用准则层的权重对各指标权重进行加权修正,得到指标层各指标的权重,各指标的权重为(0.297, 0.113, 0.130, 0.157, 0.041, 0.099, 0.067, 0.054, 0.042)。

表 3 一致性检验结果

Tab. 3 The results of the consistency test

类别	λ_{\max}	n	I_C	I_R	R_C	判断
准则层	3.009	3	0.005	0.520	0.009	<0.1
经济效益	3.018	3	0.009	0.520	0.018	<0.1
社会效益	3.054	3	0.027	0.520	0.052	<0.1
生态效益	3.054	3	0.027	0.520	0.052	<0.1

表 4 不同层次指标权重

Tab. 4 The weights of indicators at different levels

准则层		指标层		综合权重
子系统层	子系统权重	指标	指标权重	
经济效益	0.540	人均种植业纯收入 C_{11} /元	0.550	0.297
		经济作物占有率 C_{12} /%	0.210	0.113
		水电能源开发率 C_{13} /%	0.240	0.130
社会效益	0.297	人均粮食占有量 C_{21} /kg	0.528	0.157
		农业用水比例 C_{22} /%	0.140	0.041
		人均灌溉面积 C_{23} /hm ²	0.332	0.099
生态效益	0.163	生态压力指数 C_{31}	0.412	0.067
		地下水超采率 C_{32} /%	0.328	0.054
		化肥施用强度 C_{33} /(kg·hm ⁻²)	0.260	0.042

将 200 组优化方案的结果代入评价体系中进行指标计算,得到 200 组不同方案的指标值,并对各方案的指标进行消除量纲处理,最终得到不同方案的得分情况,见图 3。由图可知:方案 34 的得分最高,为 0.895;其次为方案 199,得分为 0.893。因此本研究最终选择方案 34 作为最适水资源配置方案,其发电量 3.99 亿 kW·h,农业经济效益 21.66 亿元,生态压力指数 2.84。方案 34 着重于发电量和农业经济效益,对比图 2(b)可知,生态压力指数为最差值。因此,通过水资源最适配置方案评价指标体系可以帮助管理者结合当地实际情况快速制定决策方案。

4.3 水资源优化配置结果分析

合理的农业种植结构调整有助于流域经济发展,优化方案 34 的作物种植结构和水资源用量见表 5。

现状年农业经济效益为 22.18 亿元,大山水电站发电量为 3.77 亿 kW·h,流域生态压力指数为 4.74,方案优选后水库发电量增加了 0.22 亿 kW·h,农业经济效益减少了 0.52 亿元,生态压力指数减少了 1.9。对比表 2 和表 5 可知,优化后减小了小麦、棉花和辣椒的种植面积,增加了玉米和西红柿的种植面积。其中:小麦的种植面积减少最多,为 3 312 hm²;其次为棉花的种植面积,为 795 hm²;辣椒的种植面积减少最少,为 320 hm²。种植结构优化调整与当年市场行情、种植成本和灌溉期的可用水量有直接关系。本研究对 2017 年焉耆盆地的作物进行优化调整,考虑到当年玉米和西红柿的种植净收益比其它作物高,因此相应增加了他们的种植面积。水资源使用总量为 4.50 亿 m³,地下水的开采总量为 1.70 亿 m³,未超过“三条红线”规定的 2.01 亿 m³。

棉花的地表水和地下水使用量接近,主要是在作物灌溉期,地表水可用水量远小于作物生长阶段需水量,需要消耗部分地下水存储量。

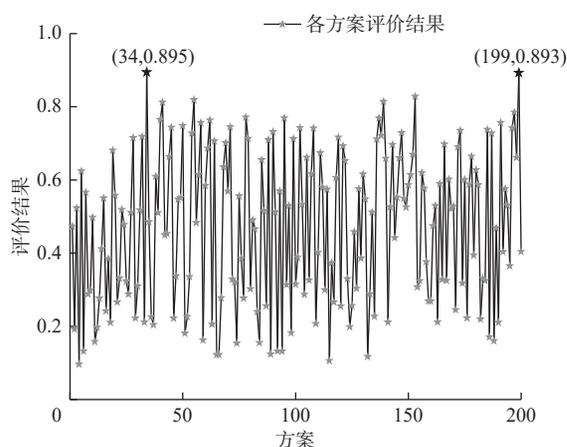


图 3 不同方案的评价结果

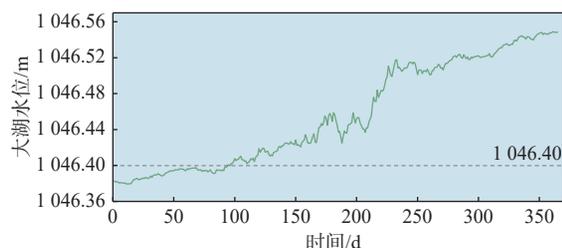
Fig. 3 The evaluation results of different scheme

表 5 优化后作物种植面积和水资源用量

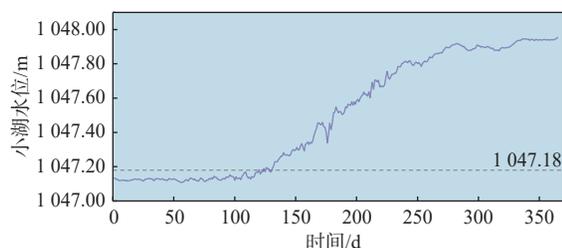
Tab. 5 Optimized crop area and water usage

作物类型	种植面积/ hm ²	地表水/ 亿 m ³	地下水/ 亿 m ³	水资源总量/ 亿 m ³
小麦	20 021	0.56	0.40	0.96
玉米	19 874	0.59	0.33	0.92
棉花	9 625	0.26	0.26	0.53
西红柿	14 006	0.28	0.18	0.46
辣椒	32 840	1.10	0.52	1.63

博斯腾湖大湖和小湖的每日水位变化见图 4。图 4(a)表示大湖水位变化,图 4(b)表示小湖水位变化。大湖的生态水位为 1 046.4 m,小湖的生态水位为 1 047.2 m。由图 4(a)可知,大湖优化后的最终水位大于生态水位。大湖整体水位呈现增加的趋势,前期水位增加较为平缓,在 4 月份增加趋势明显,这是由于山区积雪融化,径流量增加。在 6—7 月出现拐点呈现减小趋势,主要原因是 6—7 月是作物的灌溉高峰期,导致入湖流量锐减,又因为下游孔雀河需水,从博湖扬水站抽取大量水补给孔雀河。由图 4(b)可知,小湖整体也呈现增加趋势,但是小湖在前期和后期水位较为平缓,水位增加时间主要集中在 5—9 月。小湖前期水位变化不大主要是因为枯水期,开都河的来水较小,通过宝浪苏木分水枢纽将大部分径流分到了大湖中,后期在 5—6 月份出现下降的拐点主要有 3 个原因:一是上游灌区农业灌溉减少入湖流量;二是湖区芦苇生长消耗大量水资源;三是下游孔雀河需水,从达吾提闸下泄部分水量补充孔雀河。综上所述,优化后大湖和小湖的水位出现明显的增加趋势,湖泊的生态水位得到保障。



(a) 大湖每日水位变化



(b) 小湖每日水位变化

图 4 博斯腾湖生态水位变化

Fig. 4 Changes in ecological water levels in Lake Bosten

5 结论

本研究为提高当地水资源利用率,充分考虑水电站发电用水、农业灌溉用水、湖泊生态需水和农业种植水土资源承载压力之间的复杂关系,基于河湖库连通流域建立水资源多目标优化配置模型,采用 NSGA-III 对模型求解,得到多组优化方案,优化结果权衡了经济效益、社会效益和生态效益。针对优化方案选择问题,构建了流域水资源最适配置方案评价指标体系,采用层次分析法对优化结果进行评价分析,方案 34 被选为最适方案。方案 34 会牺牲部分经济效益提高生态效益,水库发电量达到 3.99 亿 kW·h,流域农业经济效益达到 21.66 亿元,生态压力指数为 2.84。通过种植结构调整和地下和地表水联合调度的方式,可以减少地下水的开采量,使其开采量满足当地“三条红线”的规定。通过优化配置博斯腾湖入湖水量和出湖水量,大湖和小湖水位均达到生态水位,这对湖泊水环境修复提供强力支撑。需要说明的是,本研究缺少对未来用水情况进行优化分析,而气候变化严重干扰以融冰雪补给河流的径流预测精度,因此后续研究应当采用具有物理机制的水文模型对开都河进行径流模拟,将其作为优化模型的输入参数,从而得到合理的未来焉耆盆地水资源优化配置方案。

参考文献:

- [1] 王浩,游进军. 中国水资源配置 30 年 [J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265-271. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150484.
- [2] LI M, XU Y, FU Q, et al. Efficient irrigation water al-

- location and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124888. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124888.
- [3] 赵英,王海霞,王毅,等.黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究[J].*中国工程科学*,2023,25(4):158-168. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.04.013.
- [4] 向龙,龚泓博.基于 IFMOP 的玉环市区域水资源配置[J].*水资源保护*,2021,37(6):49-53. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.008.
- [5] 张赵毅,何艳虎,谭倩,等.粤港澳大湾区城市群水资源配置模型[J].*水力发电学报*,2022,41(9):31-43. DOI: 10.11660/slfdbx.20220904.
- [6] AhmadAHMAD A, El-SHAFIE A, RAZALI S F M, et al. Reservoir optimization in water resources: A review[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11): 3391-3405. DOI: 10.1007/s11269-014-0700-5.
- [7] 王莎娜.基于 MATLAB 线性规划算法下豫西北地区水资源配置优化分析[J].*吉林水利*,2021(10):22-27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2846.2021.10.006.
- [8] 许耀文,王一涵,梁冬玲,等.基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究[J].*农业机械学报*,2020,51(10):299-309. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.034.
- [9] 董增川,倪效宽,陈牧风,等.流域水资源调度多目标时变偏好决策方法及应用[J].*水科学进展*,2021,32(3):376-386. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.03.006.
- [10] 张忠波,张双虎,蒋云钟.结合广度搜索的遗传算法在水库调度中的应用[J].*南水北调与水利科技*,2011,9(5):85-88. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05085.
- [11] 丁根宏,曹文秀.改进粒子群算法在水库优化调度中的应用[J].*南水北调与水利科技*,2014,12(1):118-121. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01118.
- [12] TIAN J, GUO S, LIU D, et al. A fair approach for multi-objective water resources allocation[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(10): 3633-3653. DOI: 10.1007/s11269-019-02325-5.
- [13] 何英,唐晓宇,彭亮,等.新疆丰收灌区水资源多目标优化配置方案优选[J].*农业工程学报*,2021,37(6):117-126. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.06.015.
- [14] 唐晓宇.新疆阿瓦提灌区水资源多目标优化及方案优选[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021. DOI: 10.27431/d.cnki.gxnyu.2021.000026.
- [15] 梁艺缤.基于“库-闸-河-湖”联合运用的开都-孔雀河流域水资源调配[D].西安:西安理工大学,2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000461.
- [16] 刘英,钟瑞森,段永超,等.博斯腾湖小湖区湿地生态需水量阈值研究[J].*干旱区地理*,2021,44(6):1525-1533. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.06.02.
- [17] 朱长明,李均力,张新,等.近 40 a 来博斯腾湖水资源遥感动态监测与特征分析[J].*自然资源学报*,2015,30(1):106-114. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.01.009.
- [18] 李肖杨,陈亚宁,刘璐,等.博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现[J].*水资源保护*,2020,36(6):53-59. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.009.
- [19] 付银环,李新旺,徐宝同,等.不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(3):470-479. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0047.
- [20] 曹晓旭.变化环境下农业水土资源可持续配置及虚拟水贸易研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2022. DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2022.000653
- [21] 雷亚君,张永福,张敏惠,等.新疆水资源生态足迹核算与预测[J].*干旱地区农业研究*,2017,35(5):142-150. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2017.05.21.
- [22] 郑哲敏.基于直觉模糊层次分析法的邯郸市水资源承载力评价研究[D].邯郸:河北工程大学,2015. DOI: 10.7666/d.Y2768656.
- [23] 冯怡,刘德波,苗智英,等.基于熵权 TOPSIS 的河南省水资源承载力综合评价[J].*河南水利与南水北调*,2021,50(4):30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2021.04.014.
- [24] WANG W, XU D, CHAU K, et al. Assessment of river water quality based on the theory of variable fuzzy sets and fuzzy binary comparison method[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(12): 4183-4200. DOI: 10.1007/s11269-014-0738-4.
- [25] 周亮广,金菊良,周玉良,等.基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析[J].*水资源保护*,2023,39(4):118-125. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.015.
- [26] 张修宇,秦天,孙菡芳,等.基于层次分析法的郑州市水安全综合评价[J].*人民黄河*,2020,42(6):42-45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.009.
- [27] 巴音郭楞蒙古自治州统计局.巴音郭楞蒙古自治州统计年鉴 2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [28] 秦国强.“三条红线”制度控制下焉耆盆地灌溉农业可持续开发研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
- [29] 李新虎,宋郁东,张奋东,等.博斯腾湖最低生态水位计算[J].*湖泊科学*,2007(2):177-181. DOI: 10.18307/2007.0211.
- [30] 凌瑜楠,刘英,彭佳宾,等.博斯腾小湖最低生态水位与水量盈缺分析[J].*环境工程*,2020,38(10):26-32. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010005.

Optimal allocation of water resources under integrated water-energy-ecological benefits in Kaidu River basin

TANG Xiaoyu^{1,2}, LIU Tie^{1,2}, HUANG Yue^{1,2}, PAN Xiaohui¹, LING Yunan^{1,2},
PENG Jiabin³, ZHANG Peng⁴, SHANG Yu⁴

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China; 4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Tarim River Basin Kaidu Peacock River Water Conservancy Management Center, Korle 841000, China)

Abstract: The Yanqi basin, located in northwestern China is one of the most water-stressed regions with highly developed irrigated agriculture. Bosten Lake of the Yanqi basin is the largest inland freshwater lake in China, which is the tail end of the Kaidu River and the source of the Kongque River. The local government plans to build seven hydroelectric power stations in the Kaidu River basin to improve the utilization of its water resources, and three hydroelectric power stations have been built so far. The dam seriously interferes with the natural flow regime of the river and alters the discharged surface irrigation water, making it difficult to reconcile the conflict between the irrigation water needed for agriculture and the water stored in the dam for power generation. Therefore, the Kai-Kong River basin is a river-lake-reservoir connectivity basin. The local agricultural irrigation extracts large amounts of groundwater, resulting in a rapid decline in the water level. The Kongque River has been delivering ecological water to the lower Tarim River since 2000, causing a dramatic drop in the Bosten Lake level. Therefore, win-win strategies should be considered in the management of water, agriculture, and energy resources with the aim to balancing agricultural production, energy development, and ecological protection.

To solve the problem of irrational allocation of water resources in the Kaidu River basin, based on the River, Lake, and Reservoir Connectivity Project. The multi-objective optimal allocation model of water resources is constructed to maximize the economic benefits of agriculture, as well as to maximize the benefits of reservoir power generation, along with minimizing the regional ecological pressure index, and the optimal ecological water level of Bosten Lake as the constraint. To improve the solution efficiency and accuracy of the optimization model, we used the reference-point many-objective algorithm to solve the model. The optimization model is solved to produce multiple sets of optimization scenarios, causing decision interference for the manager. To help managers choose the most appropriate decision-making scheme, we constructed an evaluation index system for the most appropriate regional water resources allocation scheme based on the criterion layers of economic, social, and ecological benefits, and used the hierarchical analysis process to evaluate and analyze it.

The option 34 is optimized for the most appropriate and local development after weighing economic, social, and ecological benefits. Option 34 would sacrifice some economic benefits to improve ecological benefits, with reservoir power generation reaching 3.99×10^8 kW·h and regional agricultural economic benefits reaching 2.166 billion yuan, while the ecological stress index is the smallest of the optimized options at 2.84. The optimization reduced the area planted with wheat, cotton, and pepper, and increased the area planted with corn and tomatoes. The largest reduction in the area under wheat was 3 312 hm², followed by cotton at 795 hm², and the smallest reduction in the area under pepper at 320 hm². By reformulating the Bolangsumu diversion station Bosten Lake diversion ratio, there is a clear trend of increase in the water level of the big and small lakes, and the ecological water level of the lakes is guaranteed.

This option increases reservoir power generation by 5.83%, reduces agricultural economic benefits by 2.34% while at the same time increases the ecological stress index by 40.08% compared to the traditional option. The optimized local cropping structure needs to be adjusted appropriately, with an increase in corn and tomato area and a decrease in wheat, cotton, and paper area. By improving the allocation of water into and out of Lake Bosten, the water level of both the large and small lakes has reached the optimum ecological level. The research results can provide a decision-making reference for local managers to formulate water resource allocation programs, which is of important theoretical significance and application value.

Key words: multi-objective; optimal model; Bosten Lake; NSGA-III; analytic hierarchy process