

祖佳, 尤立, 刘美, 等. 基于组合赋权—TOPSIS 模型的斯里兰卡北中省水资源承载力与时空变化影响分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 144-155. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.011

ZU Jia, YOU Li, LIU Mei, et al. Analysis of water resources carrying capacity and spatiotemporal variation impacts in North Central Province of Sri Lanka based on combined weighting—TOPSIS model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 144-155. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.011

基于组合赋权—TOPSIS 模型的斯里兰卡北中省水资源承载力与时空变化影响分析

祖佳^{1,2}, 尤立², 刘美², 胡春明², 朱长军¹

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国科学院生态环境研究中心
工业废水无害化与资源化国家工程研究中心, 北京 100085)

摘要:【目的】在气候变化与人类活动的双重胁迫下, 水资源承载力成为区域可持续发展的刚性约束, 而调水工程作为重构水资源空间均衡的重要手段, 其承载力评估关乎工程效益与生态安全。【方法】针对斯里兰卡水资源时空分布不均与短缺问题, 聚焦当地“南水北调”工程, 采用基于熵权—CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 模型, 在评估过程中考虑了气候变化的潜在波动影响, 系统分析了调水工程对北中省 11 个区域水资源格局时空演变的影响。【结果】结果表明: 工程显著优化了水资源配置, 生活需水增长 37.9%, 农业需水涨幅 26%(部分被灌溉效率提升抵消), 生态需水小幅增加; 水资源承载力在空间上呈现中部低、东北与西南部高的分布布局, 差异性逐渐缩小; 调水工程实施后指标趋于均衡, 农业节水成为长期调控关键。【结论】调水工程使得中北省多数区域由“较弱”等级(Ⅱ级)升至“中等”等级(Ⅲ级), 但各区域间仍存在差异, 未来应建立基于水资源供需动态评估的调水优先级调控机制, 为“一带一路”框架下跨流域水资源协同管理提供科学依据。

关键词: 水资源承载力; 调水工程; 组合赋权; TOPSIS 模型; 时空变化; 斯里兰卡; 气候变化; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0144-12



听语音
扫一扫
与作者互动

Analysis of water resources carrying capacity and spatiotemporal variation impacts in North Central Province of Sri Lanka based on combined weighting—TOPSIS model

ZU Jia^{1,2}, YOU Li², LIU Mei², HU Chunming², ZHU Changjun¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;
2. National Engineering Research Center of Industrial Wastewater Detoxication & Resource Recovery, Research Center

收稿日期: 2025-11-03; 修回日期: 2025-12-21; 录用日期: 2025-12-23; 网络出版日期: 2026-01-05

基金项目: 中国-斯里兰卡水技术研究与示范联合中心资助项目; 中国科学院中国-斯里兰卡联合科教中心资助项目; 国家科技重大专项(2025ZD1203304)

作者简介: 祖佳(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: z15100492728@163.com.

通信作者: 尤立(1989—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: liyou@rcees.ac.cn.

朱长军(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事水环境模拟与规划和环境系统模拟与信息技术研究。E-mail: christorf@126.com.

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] Under the dual pressures of climate change and human activities, water resources carrying capacity has become a critical constraint on regional sustainable development. Water transfer projects, as a vital means to reconstruct the spatial equilibrium of water resources, require carrying capacity assessment that is crucial for project benefits and ecological safety. [Methods] To address the uneven spatiotemporal distribution and scarcity of water resources in Sri Lanka, a focus was placed on the local “South-North Water Transfer” project. The TOPSIS model based on entropy weight-CRITIC combined weighting was employed, and the potential fluctuating impacts of climate change were considered during the assessment. The effects of the water transfer project on the spatiotemporal evolution of water resource patterns across 11 regions in the North Central Province were systematically analyzed. [Results] The result showed that the project significantly optimized water resource allocation. Domestic water demand increased by 37.9%, and agricultural water demand rose by 26% (partially offset by improved irrigation efficiency). Ecological water demand experienced a modest increase. Spatially, water resources carrying capacity exhibited a distribution pattern characterized by lower values in the central region and higher values in the northeast and southwest, with disparities gradually diminishing. After the implementation of the water transfer project, the evaluation indicators tended toward equilibrium, and agricultural water conservation became the key focus for long-term regulation. [Conclusion] The water transfer project elevates the water resources carrying capacity of most regions in North Central Province from “Weaker” (Grade II) to “Moderate” (Grade III), but disparities among regions still exist. Future efforts should focus on establishing a priority regulation mechanism for water transfer based on dynamic assessments of water supply and demand. The findings provide a scientific basis for coordinated inter-basin water resource management within the Belt and Road framework.

Keywords: water resources carrying capacity; water transfer project; combined weighting; TOPSIS model; spatiotemporal variation; Sri Lanka; climate change; influencing factors

0 引言

可持续发展目标六(SDGs 6)对清洁饮水、可持续用水和水资源保护均做了明确要求,提供了更广泛的可持续水资源管理框架,以降低由于极端水文变化和疾病对人类造成的水相关风险^[1-2]。“一带一路”合作倡议实施面临的重要问题之一是水资源问题,受人类活动和气候变化的双重影响,印度洋周边“一带一路”共建国家极端水文气象事件频发、水资源不均衡问题突出^[3]。斯里兰卡是“一带一路”重要节点国家,受热带季风气候影响,水资源时空分布不平衡^[4]。为实现区域水资源平衡,斯里兰卡政府将西南部可用水资源转移至北部和西北部干旱地区,用于灌溉、饮用和其他用途,此工程也被称为斯里兰卡的“南水北调”。跨流域调水工程是优化水资源配置、提升区域水资源承载力并保障生态安全的关键举措。

自20世纪80年代以来,国内外学者围绕“一带一路”沿线地区水资源承载力的格局变化开展了广泛研究^[5-7]。曹丽娟等^[8]运用主成分分析法对甘肃省2006—2015年水资源承载力下降趋势进行追因,结果表明下降主要是受水资源供需不平衡、农业生产用水差异较大和经济发展及人口因素的影响。刘庆芳

等^[9]基于PSR模型,从生产、生活与生态系统功能角度评价了2015—2020年西藏自治区水资源承载力,总体呈现出波动上升的演化态势。ANAMAGHI等^[10]以伊朗扎里内赫鲁德河流域为例,构建了压力—支持—状态框架下的评估标准体系,显示1991—2012年历史时段水与环境资源承载能力不足,基准情景将加剧环境风险。吴晓远等^[11]针对跨境河流的特点构建了水资源短缺性指数测度模型,测算了澜湄流域内中国及缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南六个流域国的水资源短缺状况。在水资源承载力评估过程中TOPSIS方法因其计算过程简洁且能充分利用原始数据进行纵向与横向比较的优势,受到研究者的广泛应用,但仅依赖欧氏距离计算贴近度易导致评价结果主观化^[12-13]。因此,采用熵权—CRITIC组合赋权法则可有效降低评价随机性,增强权重分配的合理性及结果的可信度。左其亭等^[14]采用层次分析法和熵权法组合赋权的TOPSIS模型对黄河流域九省区2002—2017年的的水资源承载力进行了综合评价,结果表明九省区水资源承载力整体呈现出增大趋势但均未达到I级(可承载)水平。NAIMI等^[15]以阿尔及利亚的阿尔及尔省为例,通过整合CRITIC方法的TOPSIS模型评估当地水资源承载能力;得出城市发展依赖于需求管理和淡水供应,应改进现有水系统并使其适应

预期增长和干旱趋势,减少对传统水资源的依赖。

熵权—CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 模型为有效量化评估水资源时空变化及区域收益提供了有效支撑。然而,气候变化通过多尺度的复杂过程对区域水资源承载力施加多重影响,显著增加了评估过程中的不确定性与复杂性^[16]。现有评估框架往往未能充分考量气候变化驱动下(如 CO₂ 浓度上升和温度升高)引发生态需水量的潜在波动及其动态变化^[17],这无疑削弱了评估结果的全面性与实践意义。因此,本研究针对斯里兰卡北中省正在开展的“南水北调”工程,通过核算与预测气候变化背景下斯里兰卡北中省 11 个重点受水区的生活、农业、生态需水量,构建基于熵权—CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 评估模型,系统解析斯里兰卡跨流域调水工程对北中省水资源供需格局时空演变的具体影响,识别影响承载力提升的关键调控指标。为北中省水资源精准调控与农业用水结构优化提供定量地决策依据,并为“一带一路”沿线发展中国家在跨流域调水工程背景下实现水资源可持续管理(SDG 6)提供可借鉴的方法与案例参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

斯里兰卡是印度洋上的岛国,连接着马六甲海峡

与波斯湾,是东西方海运的十字路口^[18]。受热带季风气候影响,全年高温,分为旱季和雨季^[19];且水资源空间分布不均,西南部相对集中形成湿润区,但中部、北部和东部水资源缺乏,为干旱或半干旱区^[20]。北中省是斯里兰卡最大的省份,面积为 10 714 km²,由阿努拉德普勒(Anuradhapura)和波隆纳鲁沃(Polonnaruwa)两个行政区组成,以其数百年历史的灌溉农业而闻名。北中省属于干旱区,平均年降水量仅约为 1 600~1 900 mm^[21],水资源相对匮乏。为解决北中省灌溉和饮用水资源短缺的问题,当地政府计划于 2015—2035 年修建多处引水调水工程,通过北中省运河项目、米尼佩左岸运河项目及西北省运河项目三个阶段实施,逐步构建区域水资源调配管理体系。工程从南到北贯穿整个斯里兰卡岛国,利用其库容把雨季丰富的水资源调节到旱季使用,把中部的水源调节到北部使用,亦称作“斯里兰卡的南水北调”,从根本上改变斯里兰卡水资源分布不均的状况,改善区域水资源格局,满足沿线农业灌溉和生活用水需求。北中省研究区概况如图 1 所示。

1.2 数据来源

本文将研究区划分为 11 个区域,分别命名为: R1. 库杜拉、R2. 索马瓦蒂亚、R3. 哈巴拉那、R4. 波洛纳鲁瓦、R5. 锡吉里耶、R6. 马南皮蒂亚、R7.

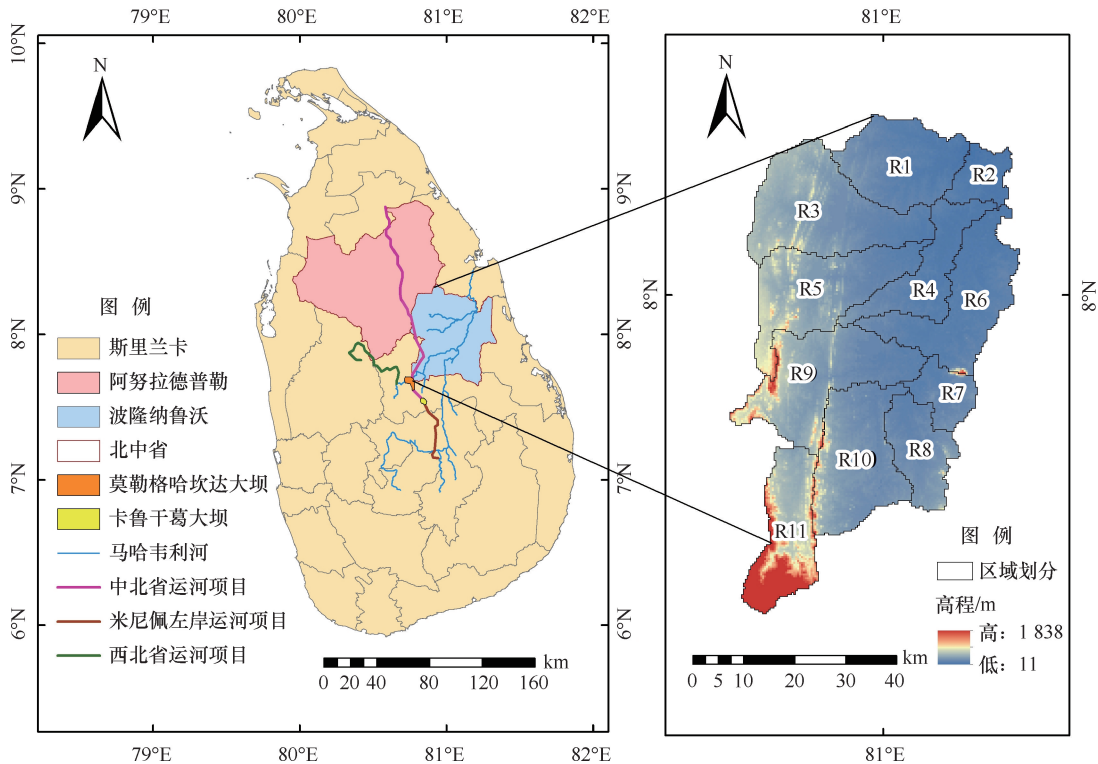


图 1 北中省研究区概况

Fig. 1 Overview of study area in North Central Province

达卢卡内、R8. 迪布拉加拉、R9. 丹布勒、R10. 瓦斯加穆瓦、R11. 伊卢昆布拉。空间数据库中的 DEM 数字高程数据由美国地质勘探局 (United States Geological Survey, 简称 USGS) 提供; 斯里兰卡行政区划和人口数据来自《Mahaweli Statistical Hand Book 2021》; 农作物分布数据 (<https://www.maps-pam.info/data/>); 气候变化数据参考斯里兰卡地方政府能力发展 (CDLG) 项目联合国开发计划署编写《Climate Vulnerability Risk Assessment in North Central Province and Guidance for Capacity Development of Local Governments on Assessing Climate Change Vulnerability》(2023) 以及美国国家海洋和大气管理局 NOAA 相关数据 (2021—2030); 工程数据参考《SRI: Water Resources Development Investment Program》(2014)。

1.3 现状需水量计算及未来需水量预测方法

1.3.1 生活需水

随着北中省经济逐渐复苏, 人口数量呈增长趋势, 年增长率为 1.1%。由于当地水源为存在水质问题的地下水, 大部分家庭采用购水模式^[22]。生活需水量受人口规模和需水定额的影响, 公式为

$$W_n = RQ_d \frac{365}{1\ 000} \quad (1)$$

式中, W_n 为年生活需水量 (m^3); R 为区域用水人口 (人); Q_d 为生活用水定额 ($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。

1.3.2 农业需水

本研究选取水稻、大豆、木薯、玉米等 15 种主要农作物作为对象^[23], 受益于调水工程主要受水区农业种植密度将从 1.2 提高至 1.8。同时, 考虑气候变化引起的 ET_0 上升对农业需水量影响的估算公式为

$$W_{gi} = \alpha_i \times ET_0 \times 100 \times \sum_{i=1}^{15} M_i \times N_i \quad (2)$$

式中, W_{gi} 为第 i 个区域的农业需水总量 (m^3); α_i 为第 i 个区域的灌溉水有效利用系数, ET_0 为参考作物蒸散量; M_i 为第 i 个区域的农作物面积 (km^2); N_i 为第 i 种农作物每公顷的年需水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 生态需水

根据生态需水量的分项计算得到区域生态需水总量, 公式为

$$W_e = W_p + W_d + W_s + W_r \quad (3)$$

式中, W_p 为植被生态需水 (植被蒸散发); W_d 为地下水需水量; W_s 为土壤渗漏需水量; W_r 为河道径流量。

在全球气候变化背景下, 气温升高与 CO_2 浓度上升共同作用于水文循环系统, 影响了生态与农业水资源格局。温度升高直接加剧了植被蒸散发与土壤无

效蒸发, 抬升了生态系统和农业灌溉的基准耗水量; CO_2 浓度增加通过调节植被气孔行为, 进一步改变了蒸散发过程, 间接影响作物生理耗水与植被生态需水。整体上, 气候变化通过改变蒸散发、土壤水分运移及径流形成机制, 使得生态需水与农业需水同步增长。为深入量化上述影响机制, 需对气候变化下需水量的动态响应进行精确评估。因此, 参考高辐射强迫下常规发展 (SSP5—8.5) 情景模式下的 CO_2 浓度和温度数据, 通过 Penman-Monteith 方法计算 ET_0 ^[24], 公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (E_s - E_a)}{\Delta + \gamma \{1 + u_2 [0.34 + 2.4 \times 10^{-4} (C_{\text{CO}_2} - 300)]\}} \quad (4)$$

式中, Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率; R_n 为表面净辐射量; G 为土壤热通量; γ 为湿度计常数; u_2 为近地面 2 m 处的风速; E_s 为空气饱和水汽压; E_a 为空气实际水汽压; C_{CO_2} 为大气中二氧化碳浓度 (2021 年 CO_2 浓度取 420.29 ppm, 2030 年 CO_2 浓度取 454.29 ppm)。

1.4 水资源承载力评价

1.4.1 指标体系构建

综合分析北中省受水区水资源禀赋条件、开发利用现状及未来供需态势, 结合区域经济社会用水特征与生态环境状况对水资源承载力的影响机制^[25], 在系统梳理相关研究高频指标的基础上^[26-28], 依据科学性、代表性、独立性及可操作性等原则^[29], 最终从目标层、准则层和指标层 3 个层面构建涵盖水资源、社会、经济、生态环境 4 个维度, 建立包含 10 个指标的水资源承载力评价体系。在水资源系统方面, 针对北中省水资源时空分布不均、部分地区开发接近上限的现状, “单位面积水资源量” “水资源开发利用率” 等指标可有效识别其资源系统的薄弱环节。在社会系统方面, 鉴于研究区以村镇集聚区为主, 故选用 “人口密度” 作为关键指标, 用以表征人口分布对水资源形成的压力。在经济系统方面, 紧密结合北中省农业主导、灌溉依赖度高而天然降水不足的区域特点, 选取 “单位面积灌溉用水量” 与 “耕地灌溉率” 作为核心评价指标, 系统反映区域经济结构、农业用水效率及灌溉发展水平对水资源承载力的影响。在生态系统方面, 引入 “生态环境用水率” 作为生态维度的核心指标, 用以衡量区域生态需水的满足程度。各层级指标体系具体项目如表 1 所列。

表 1 选取的水资源承载力综合评价指标体系

Table 1 Selected comprehensive evaluation indicator system for water resources carrying capacity

目标层	准则层	指标层	计算方法	含 义	类 别
水资源承载力评价	水资源系统	单位面积水资源量 $C_1/\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	水资源总量/区域面积总量	反映水资源动态变化	正
		供水模数 $C_2/\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	供水量/区域面积总量	反映水资源供水能力	负
		人均水资源量 $C_3/\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$	水资源总量/区域人口总量	反映水资源人均拥有量情况	正
		水资源开发利用程度 $C_4/\%$	供水量/水资源总量	反映水资源开发利用程度	负
		生活用水量 $C_5/\text{万 m}^3$	统计数据	反映生活用水的动态变化	负
	社会系统	人口密度 $C_6/\text{万人} \cdot \text{km}^{-2}$	区域人口总量/区域面积总量	反映人口的分布稀疏程度	负
	经济系统	万元 GDP 用水量 C_7/m^3	用水量/GDP 总量	反映水资源与经济平衡关系	负
		单位面积灌溉用水量 $C_8/\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	农业灌溉用水量/耕地灌溉面积	反映农业灌溉水利用程度	负
		耕地灌溉率 $C_9/\%$	耕地灌溉面积/耕地面积	反映耕地灌溉程度	负
	生态环境系统	生态环境用水率 $C_{10}/\%$	生态环境用水量/水资源总量	反映生态环境的保障程度	负

1.4.2 权重确定

熵权法是一种成熟的客观赋权法，广泛应用在多个领域，根据指标差异程度判断指标信息熵的大小来确定各个指标的权重值，具体为

$$w'_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m 1 - e_j} \tag{5}$$

式中， e_j 为第 j 个指标的熵值。

而 CRITIC 法用于多指标多对象的综合评价问题，其通过对比强度指标和冲突性指标的分析，消除指标之间的相关性，减少信息上的重叠，从而得到可信的评价结果，具体为

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \tag{6}$$

$$R_j = \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) \tag{7}$$

$$w''_j = \frac{S_j R_j}{\sum_{i=1}^n S_j R_j} \tag{8}$$

式中， S_j 为指标变异性； $\bar{X}_j$ 为第 j 个指标的平均值； r_{ij} 为指标 j 在第 i 年的相关系数； R_j 为指标冲突性。

为规避复杂水资源状况下不同专家判断的主观差异与潜在认知偏差，并充分利用客观数据，本研究摒弃了常见的主客观组合赋权模式，采用熵权法与 CRITIC 法相结合的客观组合赋权。旨在通过双重客观模型的相互校验，减少单一赋权方法可能存在的随机性与片面性。熵权法与 CRITIC 法的组合实现了纵向离散度与横向相关性的双重考量：熵权法通过信息熵捕捉指标内部数据差异，CRITIC 法通过标准差和相关系数识别指标间冲突。两者的组合兼顾了指标内部分异特征与指标间独立关系，提升权重分配的全面

性与客观性^[30]。本文选取乘法集成法来计算综合权重，使决策结果真实可信，综合权重计算公式为

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \tag{9}$$

式中， w_j 为第 j 个指标的组合权重； w'_j 为第 j 个熵权法的权重； w''_j 为第 j 个 CRITIC 的权重。

1.4.3 基于熵权—CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 模型

TOPSIS 法是一种有效依据较多指标和较多目标去决策的分析方法，基于无量纲决策矩阵，计算所需评估对象与最优、最劣之间的欧氏距离^[31]。获得每个评估对象的相对贴近度和最优解的同时，并根据贴近度最终排序，作为评估项目优缺点的基础，然后综合评价和分析水资源承载力。具体方法为

(1) 将 m 个方案和 n 个指标数据构建指标决策矩阵并将指标数据归一化，具体为

$$X = (X_{ij})_{m \times n} \tag{10}$$

(2) 确定各个指标中的理想解 A^+ 和最劣解 A^- ，具体为

$$A_j^+ = \{A_1^+, A_2^+, \dots, A_n^+\} \tag{11}$$

$$A_j^- = \{A_1^-, A_2^-, \dots, A_n^-\} \tag{12}$$

(3) 各评价指标与理想解和最劣解之间的加权欧氏距离 D_j^+ 和 D_j^- ，具体为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (A_{ij} - A_j^+)]^2} \tag{13}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (A_{ij} - A_j^-)]^2} \tag{14}$$

D_j^+ 和 D_j^- 为每个方案与最优解的接近程度和最差解的远离程度，考虑所有方案中最理想的参考点和所有方案中应避免的极端情况，避免单方面评价

的偏差。

(4)各个方案的贴近度 S_i 为

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \tag{15}$$

1.5 评价等级划分

在本研究中，将贴近度 S_i 用来表示北中省的水资源承载力等级，评价指标等级划分的科学与否对最终评价结果影响显著，根据北中省水资源状况，参考目前比较公认的水资源承载能力评价指标分级标准及国内外相关规范^[32-33]，将各评价指标分为 I—V 共 5 个等级，贴近度越接近 1 说明水资源承载力越好，评价值越接近 0 说明水资源承载力越差。水资源承载能力水平等级和具体分区描述如表 2 所列。

2 结果与分析

2.1 需水量现状及预测结果

2015—2020 年为调水工程前期筹备阶段，

2021—2030 年为大规模建设与核心输水通道贯通阶段，至 2030 年工程将从建设期全面转入效益发挥期。2021 年(基准年)北中省现状需水量与未来调水工程实施至 2030 年的需水量预测结果如图 2 所示。北中省生活需水变化主要受人口规模、水价水平和人均收入等多重因素驱动，2030 年北中省生活需水总量预计为 $18.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，其中丹布勒和瓦斯加穆瓦两个区域需水量较大，分别为 $2.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $2.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。丹布勒作为北中省重要的宗教旅游中心，区域人口聚集，瓦斯加穆瓦位于农业—生态过渡带，近年因移民安置同样导致人口增长^[34]。预测期内北中省生活需水量呈现显著增长趋势，涨幅高达 37.93%，这主要归因于人口规模扩大、居民生活水平提升以及斯里兰卡经济恢复等因素。

农业作为北中省的支柱产业，受益于大面积的水稻种植，农业需水占北中省总需水量的 90%左右，区域 81.8%以上的种植面积依赖于大型灌溉计划。

表 2 水资源承载力水平等级评价与分区

Table 2 Level evaluation and zoning of water resources carrying capacity

承载力等级	贴近度	水资源承载力
I	[0, 0.2]	水资源承载力差，人类经济活动与水资源处于不协调发展状态
II	(0.2, 0.4]	水资源承载力较弱，人类经济活动与水资源处于较差协调发展状态
III	(0.4, 0.6]	水资源承载力中等，人类经济活动与水资源处于中等协调发展状态
IV	(0.6, 0.8]	水资源承载力较强，人类经济活动与水资源处于较好协调发展状态
V	(0.8, 1]	水资源承载能力强，人类经济活动与水资源处于良好协调发展状态

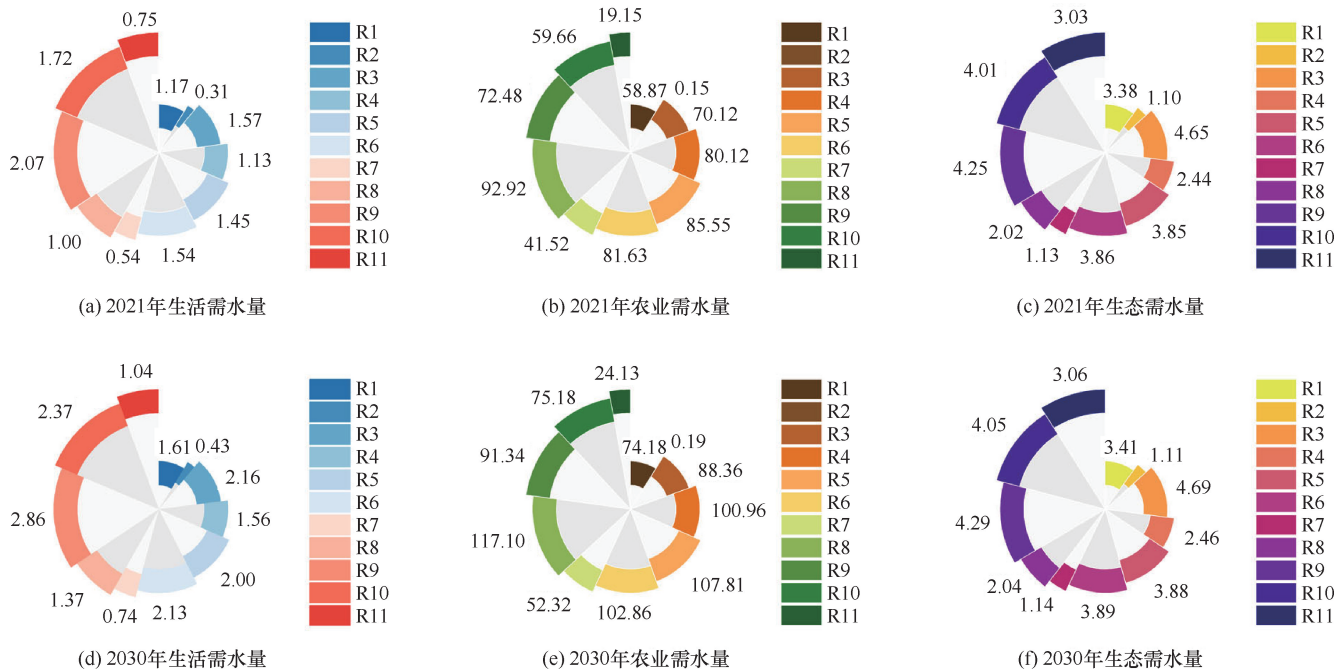


图 2 各区域水资源需求现状与未来需水量预测(单位: 10^6 m^3)

Fig. 2 Current status of water resource demand and projections for future water demand by region (Unit: 10^6 m^3)

2021 年农业需水总量为 $662.18 \times 10^6 \text{ m}^3$, 2030 年增长到 $834.42 \times 10^6 \text{ m}^3$, 农业需水量整体涨幅为 26.01%, 主要是因为种植密度以及农田灌溉有效利用系数的提升, 但不同地区的需水量却差异较大。达卢卡内农业需水量高达 $92.92 \times 10^6 \text{ m}^3$, 索马瓦蒂亚地区的农业需水仅为 $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。达卢卡内位于干旱带, 年蒸发量高, 水稻生长季需依赖灌溉补充, 且作为政府重点粮食生产基地, 享受保价收购政策, 农民倾向于扩大种植面积; 而索马瓦蒂亚毗邻马哈韦利河洪泛平原, 人工灌溉需求较低。

受气候变化影响, 预计到 2030 年, 生态需水量涨幅在 0.84%~0.91%之间, 整体变化较为平稳, 哈巴拉那生态需水量最大, 为 $4.69 \times 10^6 \text{ m}^3$, 而丹布勒涨幅较快, 两区域河道径流量和植被蒸散发量明显高于其他区域^[35]。哈巴拉那是湿地湖泊复合生态系统, 调水方案中通过马哈韦利河支流补充湿地生态水量, 河道径流量大, 温度变化导致植被蒸散发占比高于其他地区; 丹布勒属于干旱区灌木林地, 人工绿洲扩展带来附加蒸散发需求, 使得该地生态需水的涨幅较快。调水工程对生态需水的影响具有显著的空间异质性, 在生态敏感区(哈巴拉那等)主要表现为维持高基准需水, 在人类活动密集区(丹布勒)则更多体现为满足新增生态服务功能需求^[36]。

2.2 评价指标组合权重结果分析

未来调水工程的实施对权重的影响如图 3 所示。权重占比情况可以看出水资源承载力情况受水资源、社会、经济的共同调控, 生态环境影响则相对较小。调水工程实施前, 单位面积灌溉用水量 C_8 (0.208) 和水资源开发利用率 C_4 (0.261) 为权重最大的两个指

标, 主要原因是北中省农业用水量占经济社会用水总量比例最高, 而单位面积灌溉用水量直接决定区域用水总量规模和水资源利用效率, 对于这两个指标结果显著的区域, 水资源承载力更强。

调水工程实施后区域内权重差异性显著缩小, 不同指标间的综合权重值由 0.038~0.261 调整至 0.053~0.178, 说明调水工程改变了不同指标间的离散程度, 优化了如水资源开发利用率(C_4)这样的单一指标对系统的影响。其中单位面积水资源量 C_1 (0.127)、人口密度 C_6 (0.178) 和耕地灌溉率 C_9 (0.112) 占比相对较大, 这主要是因为调水工程通过跨流域补给, 调水工程预计输水 $80 \times 10^6 \text{ m}^3$, 提高了北中省的水资源总量, 改变了原本北中省的水资源禀赋格局, 使水资源极度匮乏区域的单位面积水资源量 C_1 提升, 缩小了区域间资源禀赋差异; 调水工程促使城镇化进程加快, 生活用水相关指标占比提高, 人口密度 C_6 占比增多; 同时调水工程缓解了农业用水短缺, 重构了农业水资源利用, 使种植结构发生变化, 水稻等高耗水作物占比降低, 促使高价值经济作物的种植比例上升, 优化了水资源支撑下的农业生产格局, 以及用水效率观念的转变, 致使节水指标耕地灌溉率 C_9 权重值上升。这一演变规律表明, 调水工程不仅改变了水资源的空间分布, 更推动了水资源承载力影响机制从“资源约束主导型”向“复合系统协调型”转变。

2.3 水资源承载力时间差异结果分析

最优解的相对贴近程度反映了研究区水资源承载力差异, 评价结果如图 4 所示。2021 年北中省水资源整体相对匮乏, 贴近度大部分地区处于 0.3 以下,

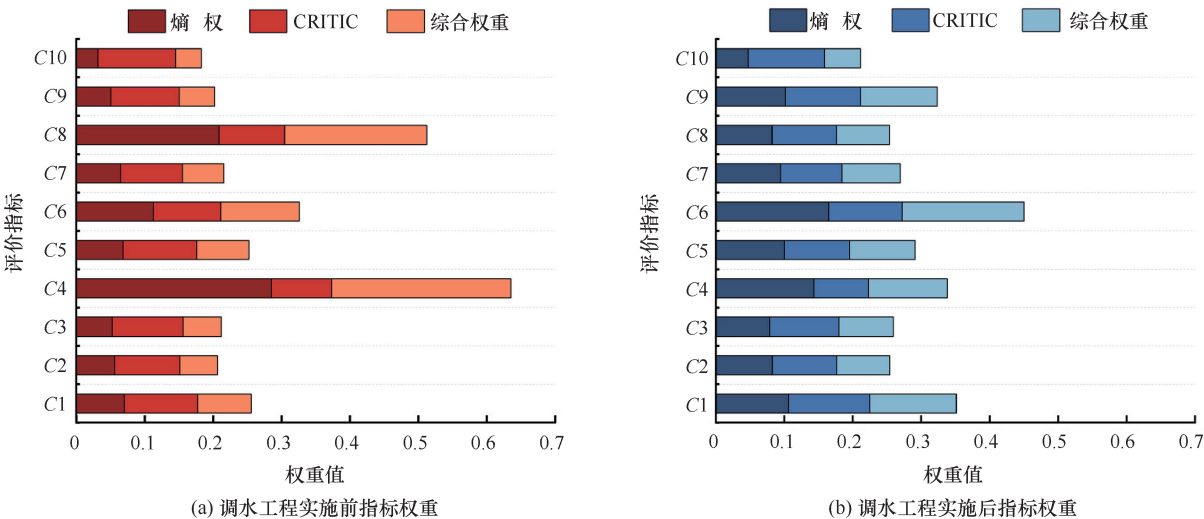


图 3 水资源承载力评价指标权重

Fig.3 Weights of evaluation indicators for water resources carrying capacity

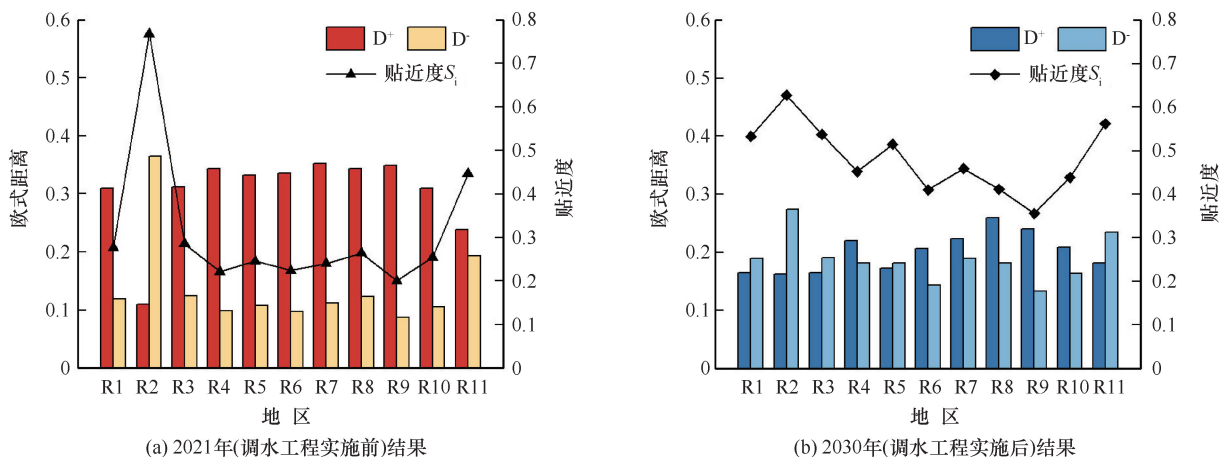


图4 欧氏距离趋势和贴近度评价结果

Fig. 4 Evaluation results of Euclidean distance trend and closeness degree

承载力为“较弱”水平,甚至丹布勒贴近度不到0.2,承载力为“差”等级。这主要是因为北中省地处马哈韦利河下游干旱区,其灌溉方式仍以传统漫灌为主,缺乏节水政策的同时,农民因经济压力难以升级灌溉设施,水资源利用效率相对较低^[37]。2030年水资源承载力基本处于0.4以上,如库杜拉等五个区县贴近度超过0.5,水资源承载力达到“中等”水平,基本可以实现发展目标下的水资源平衡,人类活动与水资源的交互关系呈现出中度协调发展的态势。受益于调水工程,北中省50%以上的地区水资源承载力等级实现了跨越。工程有效解决了干旱区灌溉用水短缺的核心矛盾,通过向马哈韦利河下游的北中省调水,水稻种植区的灌溉保证率显著提升,不仅使旱季耕地撂荒率下降,更为农业结构调整创造了条件。

研究期内调水工程满足了近46%的用水量缺口,为北中省水资源提供了极大的补充,但对于北中省呈现典型的农业主导型发展特征来说,粗放型灌溉农业形式下的调水工程对受水区灌溉缺水状况改善效果相对有限,水资源禀赋不佳、灌溉需水量较大且对于旱程度敏感性较高的地区供水保障仍显不足^[38]。尽管当前的调水工程在一定程度上缓解了受水区的缺水问题,但受自然条件与产业结构的制约,部分灌区仍面临季节性断水风险。因此,推广滴灌与微灌等高效节水灌溉技术可有效降低农田水分无效蒸发与深层渗漏损失,从而实现显著的农业节水效益;同时,种植短周期水稻品种,通过减少种植面积提高种植密度提升农业用水效率和用水经济,能够实现区域农业水分生产力的阶梯式提升。

2.4 水资源承载力空间差异分析

评价调水工程实施前后空间变化特征有助于了解

北中省11个区域的水资源平衡情况,以便从空间协调角度为提高北中省水资源承载力提出针对性措施(见图5)。“南水北调”工程的实施使得贴近度由0.200~0.768变化到0.356~0.628,空间异质性呈现显著收敛趋势,也间接说明研究区经济发展的不平衡在逐渐缩小,而水资源承载力在空间上呈现出中部低、东北与西南部高的空间布局。

丹布勒作为北中省的核心区域,其调水工程实施前后的水资源承载力水平分别为Ⅰ级“差”(贴近度为0.200)和Ⅱ级“较差”(贴近度为0.356),虽然承载力水平有所改善,但在11个区域中水资源承载力仍然最差,面临水资源及生态失衡的风险。伊卢昆布拉区域调水前后的水资源承载能力均维持在Ⅲ级“中等”水平,由0.446提升至0.562,该区域位于调水工程的源头卡卢河水坝附近,靠近斯里兰卡西南角的湿润地带,调水前的水资源本底条件已接近Ⅲ级承载力阈值;同时12.89%的旱作占比(含大豆、木薯等节水作物)形成的农业用水效率缓冲带,使得区域整体需水量始终处于中等负荷区间。索马瓦蒂亚区域水资源承载力在调水工程实施前后均保持最优状态的核心在于其独特的资源禀赋—需求调控—生态约束的平衡机制,形成了稳定的高承载力系统:该区域位于研究区东北部,在地貌格局上为马哈韦利河下游冲积平原区,年均降水量达2000 mm以上且含水层补给充足,先天水资源禀赋远超其他区域。作为野生动物保护区缓冲带,严格的耕地限制政策客观上抑制了农业用水需求的扩张,其水库群调节能力使得区域用水总量得到控制^[39],最终表现为承载力指数长期稳定在0.628~0.768的Ⅳ级较优区间。

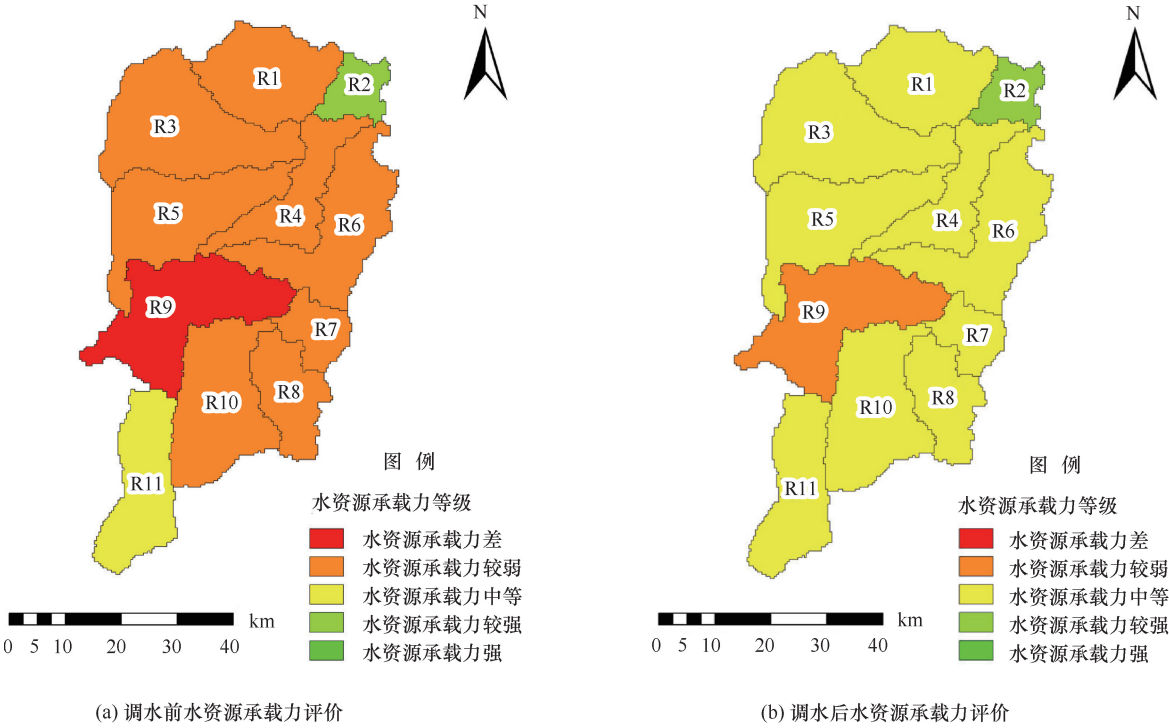


图 5 调水工程实施前后各区域水资源承载力

Fig. 5 Water resources carrying capacity in different regions before and after implementation of water transfer project

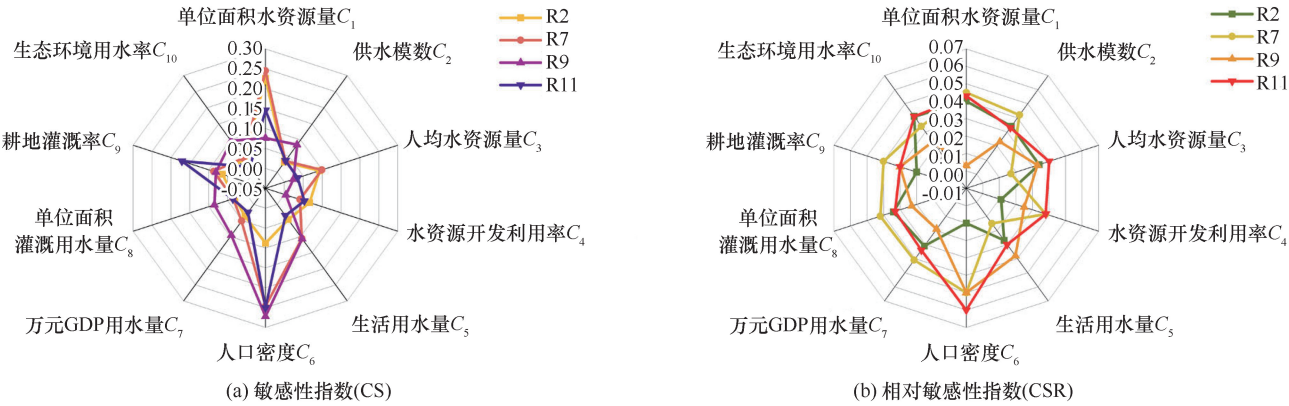


图 6 调水工程实施后指标敏感性及相关敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity and relative sensitivity analysis of indicators after implementation of water transfer project

3 讨论

为进一步识别水资源承载力的主要影响因素，进行敏感性分析及相对敏感性分析。通过敏感性指数 (CS) 和相对敏感性指数 (CSR) 评估各指标对水资源承载力的直接影响和潜在影响，并识别其中的关键控制因子。本研究选取索马瓦蒂亚、达卢卡内、丹布勒和伊卢昆布拉四个典型区域作为研究对象，调整幅度设置为 10%。对 2030 年影响水资源格局的指标开展敏感性分析与相对敏感性分析^[40]，如图 6 所示，工程实施后 11 个区域水资源承载力排名均未发生明显

变化，表明模型结果具有较强稳定性。单位面积水资源量 (C_1)、人口密度 (C_6) 和耕地灌溉率 (C_9) 对综合评价结果影响最为显著，属于高敏感性指标；而供水模数 (C_2) 和水资源开发利用效率 (C_4) 的影响相对较弱。通过相对敏感性分析进一步发现，人口密度 (C_6) 表现出最强的潜在影响力，其相对敏感性值超过 0.05，说明该指标一旦增长，将最快导致水资源承载力下降，是未来区域水资源压力的关键驱动因子。

从本文评价结果来看，北中省水资源承载力呈现出“中部低、东北与西南高”的空间分布特征，以丹布勒为代表的中部区域，由于人口密度高，水资源

供需矛盾突出,同时,农业水稻种植占比高,单位产量耗水量大,田间蒸散发与深层渗漏严重,由此形成“低供给-高消耗-低效率”的恶性循环。自然系统的刚性约束与社会经济系统的高强度需求共同作用,导致中部地区的用水压力长期处于超载状态,水资源承载力表现持续低下,这与人口密度(C_6)为当地水资源关键驱动因子的结果是吻合的。因此未来应重点针对中部地区推动农业节水转型、优化产业结构,以实现区域间的协同发展。

此外,受制于不同的自然条件、社会制度与经济发展阶段,国内外调水工程呈现出一定的共性与差异。我国的南水北调水利工程(如引大入秦工程沿线^[41]及河南受水区^[42])和斯里兰卡的跨区域调水工程均采用以丰补缺的形式解决干旱区域的资源性缺水问题;不同之处在于我国生态用水易被挤占,而在斯里兰卡则表现为农业用水效率低下以及对气候变化的高度敏感。在社会经济层面,在强有力的政策驱动与综合管理体系支持下,我国的调水工程能够有效促进水资源、经济与生态子系统之间的协同提升;相比之下,斯里兰卡受限于产业结构单一和技术基础薄弱,工程效益更多体现为资源补给,尚未完全转化为系统协调型发展模式。因此跨流域调水工程并非简单的“资源迁移”,而是深度嵌入区域自然本底、社会经济结构与治理体系中的系统性干预。

4 结 论

斯里兰卡北中省水资源分布不均,制约了当地农业生产和民生可持续发展。斯里兰卡在施的跨流域调水工程显著提升了北中部干旱区的水资源承载力,保障了农业灌溉需求,同时为当地居民提供了安全的饮用水源。本研究以水资源可持续利用为出发点,对北中省11个受水区调水工程实施前后的生活、农业、生态需水进行核算和预测,综合考虑了气候变化对水资源格局的影响,构建了水资源框架下自然禀赋—经济社会—生态环境的指标评价体系。结论如下。

(1)北中省水资源需求在人口规模扩大、居民生活水平提升以及斯里兰卡经济恢复等多重因素驱动下,整体呈现显著增长趋势。2030年生活和农业需水量较基准年分别增长37.93%和26.01%,生态需水量涨幅在0.84%~0.91%之间。气候变化加剧了植被蒸发与用水压力,而调水工程通过引入优质水源、替代原有地下水开采,缓解了饮用水安全问题,改善了农业水资源供需平衡。

(2)2021—2030年北中省水资源承载力整体呈现

显著提升趋势,受益于调水工程实施与水资源管理优化,灌溉保证率提升且旱季耕地撂荒率下降,区域整体从“较弱”水平(贴近度 <0.3)逐步改善至“中等”水平(贴近度 >0.4)。但农业用水效率低下是制约承载力进一步提升的主要因素,调水工程虽补充了46%的用水缺口,但受粗放型灌溉的影响,部分灌区季节性缺水风险依然存在。

(3)水资源承载力的空间异质性趋于收敛,贴近度由0.200~0.768变化到0.356~0.628,但仍呈现“中部低、东北与西南高”的分布特征。中部丹布勒等人口密集区面临“低供给-高消耗”失衡风险,仍是承载力最弱的区域;伊卢昆布拉作为水源输出区,因先天湿润条件与低需水压力,承载力稳定在Ⅲ级(中等);索马瓦蒂亚则凭借丰沛降水、生态约束与高效调控,长期维持Ⅳ级(较强)承载力。

参考文献(References):

- [1] ZHANG J Z, WANG S, PRADHAN P, et al. Mapping the complexity of the food-energy-water nexus from the lens of sustainable development goals in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 183: 106357.
- [2] 刘爽,陈伏龙,姜波,等.基于集对分析的新疆喀什地区水资源可持续利用评价[J].排灌机械工程学报,2025,43(2):194-201.
LIU Shuang, CHEN Fulong, JIANG Bo, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Kashgar region of Xinjiang based on set-pair analysis [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(2): 194-201.
- [3] 左其亭,郝林钢,刘建华,等.“一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J].水资源保护,2018,34(4):16-21.
ZUO Q T, HAO L G, LIU J H, et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21.
- [4] BURT T P, WEERASINGHE K D N. Rainfall distributions in Sri Lanka in time and space: An analysis based on daily rainfall data [J]. Climate, 2014, 2(4): 242-263.
- [5] 王文国,何明雄,潘科,等.四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J].自然资源学报,2011,26(9):1555-1565.
WANG W G, HE M X, PAN K, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [6] HADIPOUR M, POUREBRAHIM S, HEIDARI H, et al. Evaluation of water resource balance in the Urmia Lake Basin: Integrating carrying capacity and water footprint model for sustainable management [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112464.
- [7] 文高峰.基于改进IAVOA-BP算法的区域水资源承载力度量研究[J].水利发展研究,2025,25(12):117-123.

- WEN Gaofeng. Research on regional water resource carrying capacity based on improved IAVOA-BP algorithm [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(12): 117-123.
- [8] 曹丽娟, 张小平, 西北师范大学地理与环境科学学院, 等. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906-912.
- CAO L J, ZHANG X P. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 906-912.
- [9] 刘庆芳, 王小坤, 朱青, 等. 基于“三生”功能的西藏自治区水资源承载力系统耦合关系[J]. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1618-1631.
- LIU Q F, WANG X K, ZHU Q, et al. Coupling relationship of water resources carrying capacity system in Xizang Autonomous Region based on “production-living-ecological” function [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1618-1631.
- [10] ANAMAGHI S, BEHBOUDIAN M, MAHJOURI N, et al. A resilience-based framework for evaluating the carrying capacity of water and environmental resources under the climate change [J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 165986.
- [11] 吴晓远, 吴凤平. 流域国水资源短缺性组合评价模型及应用[J]. 经济与管理评论, 2024, 40(3): 45-58.
- WU X Y, WU F P. Combined evaluation model and application of water resources shortage in basin countries [J]. Review of Economy and Management, 2024, 40(3): 45-58.
- [12] 顾文权, 胡雅洁, 包秀凤, 等. 典型南方小流域水资源承载能力分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(5): 381-386.
- GU W Q, HU Y J, BAO X F, et al. Water resources carrying capacity analysis in typical small basin in Southern China [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(5): 381-386.
- [13] DU L L, NIU Z R, ZHANG R, et al. Evaluation of water resource carrying potential and barrier factors in Gansu Province based on game theory combined weighting and improved TOPSIS model [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112438.
- [14] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨, 等. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7.
- ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.
- [15] NAIMI AIT-AOUDIA M. Design and sustainability assessment of water strategy scenarios based on resource carrying capacity and multi-criteria decision-making: The case of Algiers [J]. Utilities Policy, 2025, 96: 101987.
- [16] XIE M M, ZHANG C F, ZHANG J Y, et al. Projection of future water resources carrying capacity in the Huang-Huai-Hai River Basin under the impacts of climate change and human activities[J]. Water, 2022, 14(13): 2006.
- [17] SHAH M H, HASSAN S T, ULLAH I, et al. Sustainable water management practice in South Asian Countries: The importance of water resources, temperature, and bioenergy on ecological footprint [J]. Gondwana Research, 2025, 144: 109-122.
- [18] 尤立, 齐天杰, 胡春明, 等. 斯里兰卡极端降水时空演变特征及趋势预测[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 5152-5161.
- YOU L, QI T J, HU C M. Temporal and spatial evolution characteristics and trend prediction of extreme precipitation in Sri Lanka [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5152-5161.
- [19] 周晗, 叶虎平, 魏显虎, 等. 基于 Sentinel-1/2 的水体提取方法对比研究: 以斯里兰卡小型水体为例[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(6): 794-802.
- ZHOU H, YE H P, WEI X H, et al. Comparative study on water extraction methods based on Sentinel-1/2: A case study of small water body in Sri Lanka [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(6): 794-802.
- [20] 李健锋, 叶虎平, 张宗科, 等. 基于 Landsat 影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 781-788.
- LI J F, YE H P, ZHANG Z K, et al. Spatiotemporal change analysis of Sri Lanka inland water based on landsat imagery [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(5): 781-788.
- [21] 刘美, 尤立, 胡春明, 等. 不确定性条件下斯里兰卡马哈韦利河流域农业水权交易研究[J]. 环境工程学报, 2024, 18(11): 3059-3070.
- LIU M, YOU L, HU C M, et al. Research on agricultural water rights trading in the Mahaweli River Basin of Sri Lanka under uncertainty [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(11): 3059-3070.
- [22] 胡大洲, TITUS C, 郑利兵, 等. 斯里兰卡 CKDu 病区地下水水质分析及纳滤膜技术在该地区饮用水处理中的应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1937-1945.
- HU D Z, TITUS C, ZHENG L B, et al. Water quality analysis of and application of nanofiltration membrane technology in treating groundwater in CKDu affected areas of Sri Lanka [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 1937-1945.
- [23] BURCHFIELD E K, GILLIGAN J. Agricultural adaptation to drought in the Sri Lankan dry zone [J]. Applied Geography, 2016, 77: 92-100.
- [24] 栗晓玲, 刘雨翰, 姜田亮, 等. 西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 9-18.
- SU X L, LIU Y H, JIANG T L, et al. Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystems in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 9-18.
- [25] 武兰珍, 赵霞, 成艺, 等. 黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(9): 897-903.
- WU L Z, ZHAO X, CHENG Y, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and water resources security in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(9): 897-903.
- [26] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25.
- LI S P, ZHAO H, WANG F Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model

- [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 20-25.
- [27] 王美慧, 唐德善, 尚静, 等. 基于组合赋权结合中心点三角白化权函数的水资源承载力评价[J]. *水文*, 2022, 42(4): 38-43.
WANG M H, TANG D S, SHANG J. Water capacity evaluation based on combination weighting method and center-point triangular whitenization weight function[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 42(4): 38-43.
- [28] 何伟, 陈素雪, 仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(6): 1208-1219.
HE W, CHEN S X, QIU L Y. Comprehensive evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Three Gorges Ecological and Economy Corridor of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(6): 1208-1219.
- [29] 赵佳慧, 张利平, 张艳军, 等. 塔里木河流域水资源承载力评价及模拟预估[J]. *中国农村水利水电*, 2025(9): 25-32.
ZHAO J H, ZHANG L P, ZHANG Y J, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and simulation prediction in the Tarim River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(9): 25-32.
- [30] HASSAN I, ALHAMROUNI I, AZHAN N H. A CRITIC-TOPSIS multi-criteria decision-making approach for optimum site selection for solar PV farm[J]. *Energies*, 2023, 16(10): 4245.
- [31] 张腾举, 胡仁强, 李治军, 等. 基于组合赋权—TOPSIS 模型的汕头市水资源承载力评价[J]. *农业与技术*, 2024, 44(18): 100-103.
ZHANG T J, HU R Q, LI Z J, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Shantou City based on combined weighting-TOPSIS model[J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(18): 100-103.
- [32] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 91-97.
QU X E. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 91-97.
- [33] 徐政华, 曹延明. 基于熵权 TOPSIS 模型的长春市水资源承载力评价[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(5): 2900-2907.
XU Z H, CAO Y M. Application of TOPSIS method based on entropy weight evaluation of water resources carrying capacity in Changchun City[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(5): 2900-2907.
- [34] 王亚伟, 万祎, 李刚, 等. 斯里兰卡不明原因肾病追因研究与中斯相关科技合作进展[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(8): 2089-2099.
WANG Y W, WAN Y, LI G, et al. International research progress and China-Sri Lanka cooperation on the etiology of chronic kidney disease of unknown etiology (CKDu) in Sri Lanka[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(8): 2089-2099.
- [35] KAFLE K, BALASUBRAMANYA S, HORBULYK T. Prevalence of chronic kidney disease in Sri Lanka: A profile of affected districts reliant on groundwater[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133767.
- [36] DE SILVA C S, WEATHERHEAD E K, KNOX J W, et al. Predicting the impacts of climate change: A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(1/2): 19-29.
- [37] AMARASINGHE U A, AMARNATH G, ALAHACON N, et al. Adaptation to Climate Variability in Sri Lanka: a Case Study of the Huruluwewa Irrigation System in the Dry Zone. Colombo[R], Sri Lanka; International Water Management Institute (IWMI), 2021.
- [38] 吕胜楠, 万东锦, 杜志敏, 等. 南水北调西线工程对水源区生态环境影响研究综述[J]. *水利发展研究*, 2026, 26(3): 67-74.
LYU Shengnan, WAN Dongjin, DU Zhimin, et al. A review of the ecological and environmental impacts of the Western Route of the South-to-North Water Diversion Project on the water source area[J]. *Water Resources Development Research*, 2026, 26(3): 67-74.
- [39] MENG Z Q, DONG J W, ELLIS E C, et al. Post-2020 biodiversity framework challenged by cropland expansion in protected areas[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(7): 758-768.
- [40] 张宇冕, 夏唯一, 骆玉川, 等. 基于系统动力学模型的内蒙古水资源承载力及其影响因素[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(4): 274-287.
ZHANG Y M, XIA W Y, LUO Y C, et al. Water resources carrying capacity of Inner Mongolia under different scenarios and its influential factors based on a system dynamics model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(4): 274-287.
- [41] 王新苑, 张芮, 舒和平, 等. 引大入秦工程受水区水资源承载力评价[J]. *人民黄河*, 2025, 47(1): 78-82.
WANG X Y, ZHANG R, SHU H P, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in the water receiving area of the Water Diversion Project from Datong River to Qinwangchuan Region[J]. *Yellow River*, 2025, 47(1): 78-82.
- [42] 郭辉, 吴思远, 夏帆. 南水北调工程河南省受水区生态安全评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(2): 47-55.
GUO H, WU S Y, XIA F. Ecological security assessment of water-receiving areas in Henan Province under the South-To-North Water Diversion Project[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2025, 46(2): 47-55.

(责任编辑 王海锋)