

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.002

南水北调西线一期工程对水源区的综合影响评价

卢仪思^{1,2}, 景来红^{1,2}, 严登明^{1,2}, 樊新颖^{1,2}, 张 钰^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要: 为了科学识别和评价南水北调西线一期工程对水源区水文水资源、生态环境以及社会经济等方面的影响, 基于水源区工程区域概况, 结合文献和规范标准, 建立了一套兼顾水文水资源、生态环境、水能利用、社会经济的多准则层的西线一期工程调水综合影响评价指标体系, 并采用基于模糊层次分析法和改进熵权法的主客观综合权重法确定评价指标的权重, 结合 TOPSIS 法对 2012—2021 年西线一期工程水源区综合状况进行客观评价。评价结果表明, 西线一期工程水源区综合状况整体呈现改善趋势, 从 2017 年以前的不良状态改善到 2021 年更为健康的状态。

关键词: 跨流域调水; 南水北调西线一期工程; 水文水资源; 生态环境; 社会经济; 影响评价
中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0010-08

Comprehensive impact assessment of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I) on water source areas

LU Yisi^{1,2}, JING Laihong^{1,2}, YAN Dengming^{1,2}, FAN Xinying^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources
(under Construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to scientifically identify and evaluate the impact of the Western Route of the South-to-North Water Diversion Project (Phase I) on the hydrology and water resources, ecological environment, and social economy of water source areas, the comprehensive situation of the project-affected water source areas was considered. In addition, based on literature and normative standards, a comprehensive impact assessment system for the Western Route of the South-to-North Water Diversion Project (Phase I) was established, covering multiple criterion levels including hydrology and water resources, ecological environment, water energy utilization, and social economy. Moreover, the weights of the evaluation indicators were determined by the subjective and objective comprehensive weight method based on the fuzzy analytic hierarchy process and the improved entropy weight method. Combined with the TOPSIS method, the comprehensive situation of the water source areas along the Western Route of the South-to-North Water Diversion Project (Phase I) from 2012 to 2021 was objectively evaluated. The results indicate that the comprehensive situation of the water source areas along the Western Route of the South-to-North Water Diversion Project (Phase I) has improved, transitioning from a poor state prior to 2017 to a healthier one by 2021.

Key words: inter-basin water transfer; the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I); hydrology and water resource; ecological environment; social economy; impact assessment

跨流域调水通过调剂水量余缺的方式对流域间的水资源进行合理开发和高效利用, 是实现水资源空间均衡和优化配置的重要举措^[1-2]。我国作为世界上最早建设调水工程的国家之一, 已建成或在建的调水工程有 137 项^[3-4]。随着国内外跨流域调水工程建设和运行, 调水对区域造成的影响日益凸显且不可忽视^[5]。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202405); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52209038); 河南省青年人才托举计划项目(2023HYTP017)

作者简介: 卢仪思(1994—), 女, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: luyisityut@163.com

通信作者: 严登明(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水网调控研究。E-mail: 18519500795@163.com

引用本文: 卢仪思, 景来红, 严登明, 等. 南水北调西线一期工程对水源区的综合影响评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 10-17.

LU Yisi, JING Laihong, YAN Dengming, et al. Comprehensive impact assessment of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I) on water source areas[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 10-17.

跨流域调水产生的影响以及影响的应对策略也成为实现调水工程全生命周期内水源区、调水沿线以及受水区生态环境保护和经济社会长远协调发展的战略性工作之一。

一般而言,跨流域调水工程对自然环境产生影响的过程为:调水—改变原有水文情势—自然环境变化—社会经济变化^[6]。在水文水资源方面,跨流域调水工程会大幅度增加受水区河川径流量,但是可能会降低水源区下游枯水年的月平均流量,甚至导致水源区生态环境用水不足^[7-8]。在生态环境方面,跨流域调水工程有利于受水区水循环、水质和环境的改善等。然而,跨流域调水可能会引起植物群落变化,甚至导致外来生物入侵^[9],如汉江中下游因南水北调工程和引汉济渭工程导致水源区的生物多样性下降,水污染加剧,并形成新的沙化危害^[10-11]。南水北调东线工程、加拿大詹姆斯湾工程以及希腊阿谢洛奥斯河调水工程均由于调水导致水源区变成了咸水河口,严重影响耕地以及生态环境,同时受水区还可能发生土壤盐碱化和污染物扩散^[9,12-13]。此外,水源区的水环境对调水工程运行效果至关重要:南卡罗来纳州调水工程对受水区产生了泥沙负荷^[14];引黄入晋工程由于上游黄河水出现较严重污染导致受水区汾河的电导率显著增大^[15];南水北调东线工程的洪泽湖调水时水质存在富营养化污染的风险,因此水源区的污染防治工作应当进一步加强^[16]。在社会经济方面,调水必然会影响到工程范围内相关地区的社会经济。水源区经济发展是水源得到保护的基本保障,然而水源区的保护涉及多方利益,一定程度上可能会抑制水源区经济的发展,损害当地政府和居民的权益^[17-18]。跨流域调水工程必然会对流域内水能资源的时空转换产生影响,特别是南水北调西线工程水源区位于长江流域上游,河道落差大,水能资源丰富,因此西线工程调水对水源区的综合影响必然要考虑水能利用的变化。

现阶段,学者们提出了基于水资源-经济社会-生态环境、压力-状态-响应框架、资源-社会-经济-环境-工程技术、物理要素-生物要素-社会生产要素等模型的综合评价指标体系^[19-23]。但目前关于调水工程对水源区影响的因子识别与分析研究中,缺乏对跨流域调水工程全面、系统、定量的综合影响评估,尤其在高寒高海拔地区,相关研究工作更是匮乏。世界上建在高寒高海拔地区的调水工程并不多见,著名的澳大利亚雪山工程海拔 2 228 m,然而由于河流径流量的减少和长期的资源管理不当,雪山工程水源区的生态环境产生了恶化^[24]。南水北调西线工程包含高寒高海拔生态环境脆弱区,亟待结合实际工程规划和当地气候特征,开展系统的跨流域调水工程影响因子识别与分析。

本文从水文水资源、生态环境、水能利用和社会经济四大方面系统地总结国内外跨流域调水工程的实践和经验,立足南水北调西线一期工程水源区区域的特殊性,综合运用模糊层次分析法和改进熵权法确定评价指标的权重,并通过 TOPSIS 法对西线一期工程水源区的现状进行评价,以期助力我国跨流域调水工程的高质量建设和发展。

1 水源区概况

南水北调西线一期工程是从长江上游雅砻江、大渡河调水,通过输水隧洞调入黄河上游的大型跨流域调水工程。雅砻江干流全长 1 633 km,多年平均径流量 606 亿 m³;大渡河干流全长 1 062 km,多年平均径流量 626 亿 m³^[25]。西线一期工程调水规模为 80 亿 m³,现阶段拟有 2 个方案:①雅砻江两河口调水 40 亿 m³,大渡河双江口调水 40 亿 m³;②包含上线和下线两条独立线路的上下线组合方案,均为自流引水,是西线一期调水推荐方案。方案②上线从雅砻江干支流、大渡河支流联合调水 40 亿 m³,在贾曲河口附近注入黄河干流,线路长 326 km。下线从在建的大渡河双江口水库调水 40 亿 m³,在甘肃省岷县中寨镇入洮河后流入黄河刘家峡水库,调水线路长 414 km^[26-27]。

西线一期工程水源区涉及青海、四川和云南 3 省(图 1)。西线一期工程区位于青藏高原东南部,大部分地区海拔在 3 000 m 以上,以高原丘陵为主,地势开阔、平缓,零星分布河谷植被,植被类型以高寒草甸、高寒草原为主,乔灌覆盖较低,生态

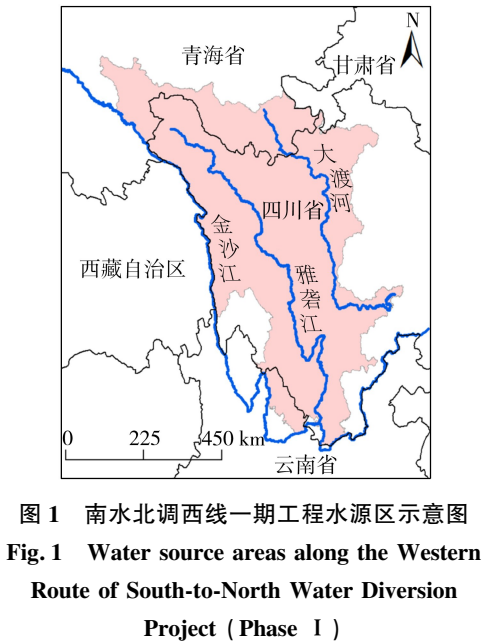


图 1 南水北调西线一期工程水源区示意图
Fig. 1 Water source areas along the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I)

脆弱,植被自我修复能力较低,此外山原地貌也较多,山高谷深,滩地阶地发育^[28]。参照全国生态脆弱区保护规划纲要划分,工程影响范围与西南山地农牧交错生态脆弱区重叠较大^[29]。西线一期工程区域生态敏感区占比较大,整体属于西南横断山生态脆弱区^[30]。西线一期工程水源区涉及我国生物多样性保护的重要区域三江源地区、川西高山峡谷地区以及横断山区域,分布有多种国家重点保护植物及动物,是我国生物多样性关键地区。

2 研究方法数据来源

2.1 指标体系构建方法

基于改变原有水文情势—自然环境变化—社会经济变化的跨流域调水工程对自然环境的影响模式以及长江上游水能利用的特殊性,本文将水文水资源、生态环境、水能利用、社会经济作为评价准则,判别四者的关系从而对西线一期工程调水对水源区的综合影响进行系统评价。结合西线一期工程的地域特性,通过文献分析、标准规范参考等方式,根据科学性、可比性、独立性、全面性与针对性相结合等原则^[31-32],建立西线一期工程调水综合影响的评价指标体系。

2.2 评价方法

TOPSIS 法即优劣解距离法,是采用距离作为评价标准的综合评价法^[33]。TOPSIS 法作为一种多目标决策分析评价方法,能够充分利用指标信息,具有良好的客观性,被广泛应用于城市绿色发展、新型城镇化高质量发展等方面的客观评价。评价的主要步骤如下:①构建样本数为 n ,评价指标数为 m 的原始矩阵 $X_{ij}(i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m)$,通过极差法和偏离计算等对各项评价指标进行正向化处理,得到正向化矩阵 X'_{ij} ;②将 X'_{ij} 进行归一化处理,得到规范化矩阵 Y_{ij} ;③用评价指标的权重对 Y_{ij} 进行加权处理,得到加权规范化矩阵 Z_{ij} ;④计算各项评价指标的正、负理想解的欧氏距离 D_i^+, D_i^- ;⑤计算样本的综合评价指数,即样本到正理想解的贴近度 $S_i(S_i = D_i^- / (D_i^- + D_i^+))$ 。

2.3 指标权重计算方法

合理确定指标权重是应用 TOPSIS 法进行综合评价的关键。为了提高权重的客观性,本文对主观权重确定方法和客观权重确定方法进行改进。采用模糊层次分析法确定评价指标的主观权重^[34],采用改进熵权法确定评价指标的客观权重^[35]。最终通过主客观组合权重法计算得到评价指标的权重^[36-37]:

$$w_{Cj} = w_{Aj}w_{Ej} / \sum_{j=1}^m w_{Aj}w_{Ej} \tag{1}$$

式中: w_{Cj} 为评价指标 j 的主客观组合权重; w_{Aj} 为模糊层次分析法计算得到的评价指标 j 的主观权重; w_{Ej} 为改进熵权法计算得到的评价指标 j 的客观权重。

2.4 数据来源

评价指标的主要数据来源为《水资源公报》《城市建设统计年鉴》、各省/市《国民经济和社会发展统计公报》以及中国资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)等,获取的年份为 2012—2021 年。为确保指标数据能够真实地反映南水北调西线一期工程水源区的现状,本文使用线性插值法对个别缺失的指标数据进行计算补全。

3 结果与分析

3.1 评价指标体系

文献分析采用文献计量分析法^[38],选取 Web of Science 核心数据库(WoS)和中国学术期刊总库(CNKI)为数据源,并综合考虑目标领域的质量、数量和覆盖范围,利用 CiteSpace 进行统计分析。WoS 的高级检索公式为“(‘water transfer * project’ or ‘South to North Water Diversion * Project’ or ‘inter-basin water transfer *’) and (‘impact’ or ‘assessment’))”;CNKI 以“(南水北调 + 调水工程 + 跨流域调水) * (影响 + 评价)”为主题词进行高级检索,文献检索年限设定为“不限—2024”。共得到原始文献 4 802 篇,其中 WoS 收录的英文文献 458 篇,CNKI 中文文献 4 344 篇,CiteSpace 能够有效统计的中文文献数量为 4 201 篇。基于 CiteSpace 对 WoS 和 CNKI 的文献关键词进行词频分析,结果如图 2 所示。

总结历年来调水工程影响的研究热点以及相关标准规范(共 17 部,编号分别为 SL/T 712—2021、SL

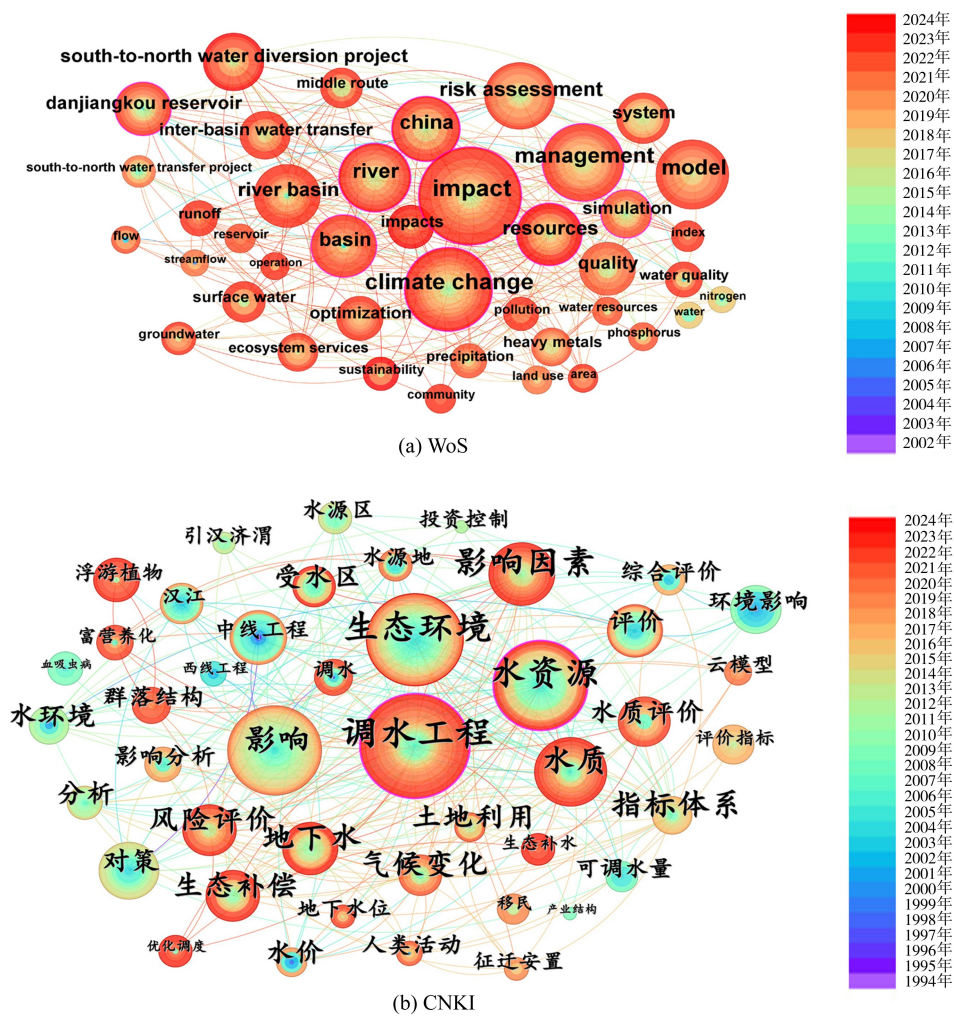


图 2 调水影响相关关键词

Fig. 2 Keywords regarding impact of water transfer

395—2007、SL 709—2015、SL 733—2016、SL/Z 738—2016、SL/T 800—2020、SL/T 793—2020、SL/T 813—2021、SL/Z 572—2014、SL/Z 479—2010、SL 45—2006、SL/T 534—2023、GB/T 51240—2018、GB/T 50434—2018、SL/T 238—1999、HJ 192—2015、HJ 623—2011)提及的评价指标(图3),可以发现调水影响评价的研究

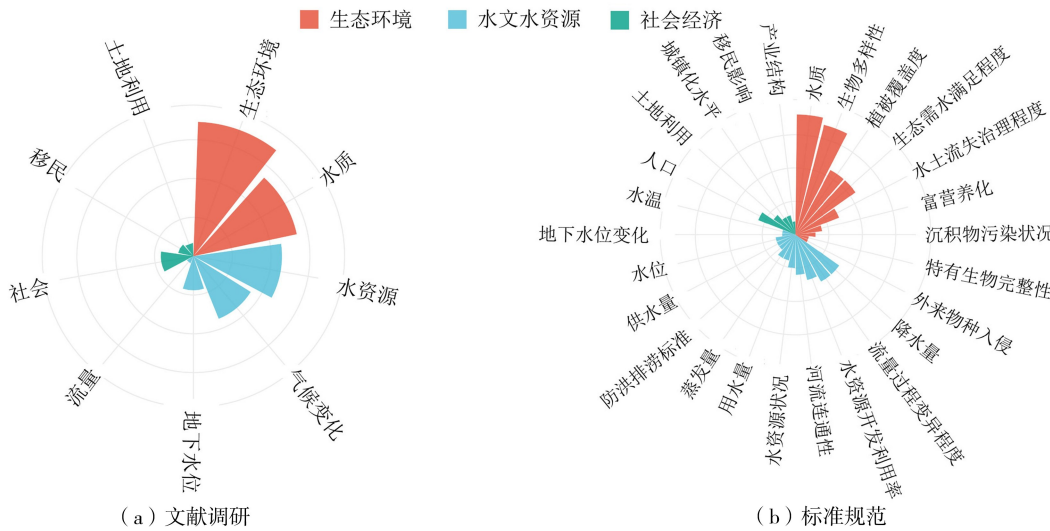


图3 调水影响研究热点及指标

Fig. 3 Research hotspots and indicators regarding impact of water transfer

重点和考察指标均主要集中在生态环境、水文水资源和社会经济三大方面。文献调研中生态环境层面有生态环境和水质等,水文水资源层面有水资源、气候变化、地下水位和流量等,社会经济层面有社会、移民和土地利用等。标准规范中生态环境层面指标有水质、生物多样性、植被覆盖度、生态需水满足程度等,水文水资源层面指标有降水量、流量过程变异程度、水资源开发利用等,社会经济层面指标有人口、土地利用、城镇化水平、移民影响和产业结构等。

南水北调西线工程的运行必然会对长江流域内水能资源的时空转换产生影响。屠晓峰^[39]研究表明,西线调水 145 亿 m³ 对长江电站保证出力和电量的影响小于 8%,而黄河干流增加的电站保证出力和电量超过 60%。此外,李庆国等^[40]计算得到西线一期工程能够使黄河干流规划梯级电站增加保证出力 29%,多年平均年发电量增加 26.8%。因此,西线工程调水应当计算其梯级多年平均发电量,及时优化调度从而减少实际调度中长江流域的发电损失。

综上,本文以水文水资源、生态环境、水能利用和社会经济 4 个评价准则为基础,构建西线一期工程调水对水源区综合影响的评价指标体系。评价指标体系包括目标层、准则层和指标层,保证评价指标选取原则中的科学性、全面性与针对性。根据可比性等原则在水文水资源、生态环境和经济社会三大准则层中选择频次较高的指标作为南水北调西线一期工程水源区综合影响的评价指标,结合水能利用准则层最终共选取 12 个指标构建西线一期工程调水对水源区综合影响的评价指标体系(图 4),其中指标 C₃ 为负向指标,其他均为正向指标。

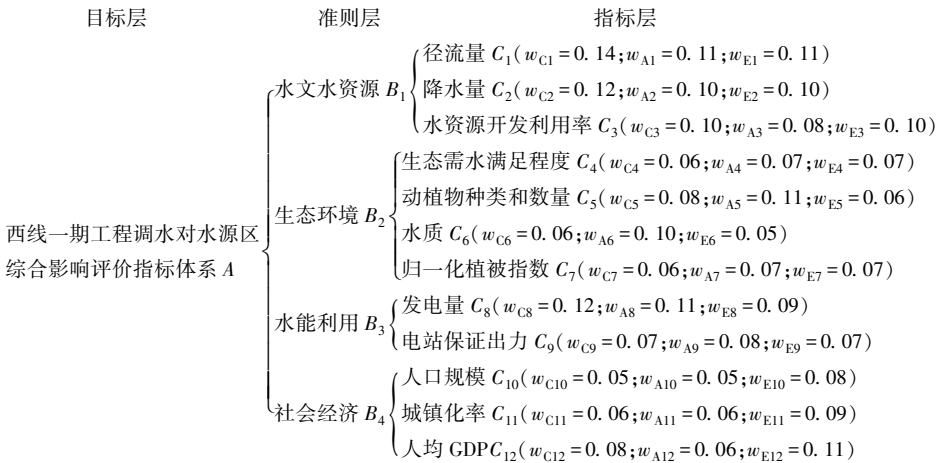


图 4 西线一期工程调水对水源区综合影响评价指标体系

Fig. 4 Assessment indicator system for comprehensive impact of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I) on water source areas

3.2 评价指标相关性和权重

采用 SPSS 软件对选取的 12 个评价指标进行相关性分析,以保证评价指标间相互独立,避免明显的包含关系。由图 5 可知,C₁ 和 C₃、C₁₁ 和 C₁₂ 两组评价指标的相关系数较大,其余各项评价指标相关系数较小,均呈现显著不相关性,由于 C₁ 和 C₃、C₁₁ 和 C₁₂ 两组评价指标的相关系数均在 0.9 以下,且指标的表征意义也存在显著差异,因此可以选作为独立的评价指标进行评价。

本文将西线一期工程调水对水源区综合影响的评价指标作为西线一期工程水源区现状综合评价的评价指标,对水源区的现状进行客观全面的综合评价。图 4 列出了 12 个评价指标的主观权重 (w_{Aj})、客观权重 (w_{Ej}) 以及主客观组合权重 (w_{Cj})。其中,权重相对较大的评价指标有径流量、降水量、水资源开发利用率、动植物种类和数量、发电量以及人均 GDP。

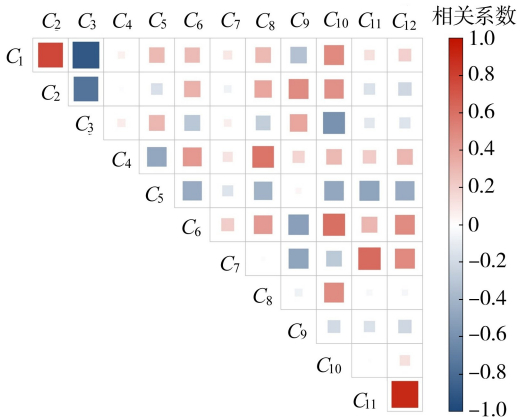


图 5 评价指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of assessment indicators

3.3 现状评价

本文利用 TOPSIS 法对南水北调西线一期工程水源区的现状进行综合评价,根据综合评价指数进行分级,从优到差为:Ⅰ级 0.85~1.0、Ⅱ级 0.65~<0.85、Ⅲ级 0.45~<0.65、Ⅳ级 0.25~<0.45、Ⅴ级 0~<0.25。

由表 1 可知,2012—2021 年西线一期工程水源区状况综合评价指数经历过明显的提高,特别是 2020 年达到了Ⅰ级,整体呈现出改善的趋势,体现出西线一期工程水源区的水文水资源、生态环境、水能利用以及社会经济的综合状况正在逐渐从 2017 年以前的不良状态转变为 2021 年更为健康的状态。西线一期工程水源区综合状况的整体向好为西线工程的开工建设提供了较好的数据支持和发展保障。

4 结 语

根据评价指标体系构建原则和南水北调西线一期工程区域概况,建立了基于水文水资源、生态环境、水能利用和社会经济四大准则的西线一期工程调水对水源区综合影响的评价指标体系,基于改进熵权法和模糊层次分析法的主客观综合权重法计算评价指标权重,进一步提高权重的客观性,最后通过改进的 TOPSIS 法对西线一期工程水源区的现状进行客观全面的综合评价。评价结果表明,西线一期工程水源区的综合状况正在逐渐从 2017 年以前的不良状态改善到 2021 年更为健康的状态。

参考文献:

[1] 鞠连义. 贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路 推进南水北调后续工程高质量发展[J]. 水利发展研究,2021,21(7):55-58. (JU Lianyi. The water management concept of “prioritizing water conservation, balancing space, systematic governance, and dual efforts” promotes the high-quality development of the follow-up projects of the South to North Water Diversion Project[J]. Water Resources Development Research,2021,21(7):55-58. (in Chinese))

[2] SUN Siao,ZHOU Xian,LIU Haixing,et al. Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China[J]. Water Research,2021,194:116931.

[3] 张文忠. 经济区位论[M]. 北京:科学出版社,2000.

[4] 高媛媛,徐子恺,姚建文,等. 中国引调水工程及区域分布特点分析[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(1):173-177. (GAO Yuanyuan,XU Zikai,YAO Jianwen,et al. Water transfer projects and the regional distribution characteristics analysis of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2016,14(1):173-177. (in Chinese))

[5] FAÚNDEZ M,ALCAYAGA H,WALTERS J,et al. Sustainability of water transfer projects;a systematic review[J]. Science of the Total Environment,2023,860:160500.

[6] 左大康,刘昌明,许越先. 南水北调对自然环境影响的初步研究[J]. 地理研究,1982,1(1):31-39. (ZUO Dakang,LIU Changming,XU Yuexian. Preliminary study of the impacts of water transfer from South to North on natural environment[J]. Geographical Research,1982,1(1):31-39. (in Chinese))

[7] 徐鑫,倪朝辉,沈子伟,等. 跨流域调水工程对水源区生态环境影响及评价指标体系研究[J]. 生态经济,2018,34(7):174-178. (XU Xin,NI Zhaohui,SHEN Ziwei,et al. Research on ecological impact identification and evaluation index system in water source of inter basin water diversion project[J]. Ecological Economy,2018,34(7):174-178. (in Chinese))

[8] MATOS J P,COHEN LIECHTI T,BOILLAT J L,et al. Analysis of flow regime changes due to operation of large reservoirs on the Zambezi River[J]. Environmental Hydraulics,2010,20:337-342.

[9] YAN Hanlu,LIN Yuqing,CHEN Qiuwen,et al. A review of the eco-environmental impacts of the South-to-North Water Diversion; implications for interbasin water transfers[J]. Engineering,2023,30:161-169.

[10] 徐少军,林德才,邹朝望. 跨流域调水对汉江中下游生态环境影响及对策[J]. 人民长江,2010,41(11):1-4. (XU Shaojun,LIN Decai,ZOU Chaowang. Impact of inter-basin water diversion on ecological environment of middle and lower reaches of

表 1 2012—2021 年西线一期工程水源区状况综合评价指数
Table 1 Comprehensive assessment indexes for water source areas along the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I) from 2012 to 2021

年份	标准化得分	综合评价指数	排序	等级
2021	10.28	0.45	5	Ⅲ
2020	21.25	0.94	1	Ⅰ
2019	12.10	0.53	3	Ⅲ
2018	15.98	0.70	2	Ⅱ
2017	5.54	0.24	7	Ⅴ
2016	2.63	0.12	9	Ⅴ
2015	1.25	0.06	10	Ⅴ
2014	11.23	0.49	4	Ⅲ
2013	3.75	0.16	8	Ⅴ
2012	9.60	0.42	6	Ⅳ

Hanjiang River and countermeasure suggestion[J]. Yangtze River,2010,41(11):1-4. (in Chinese))

[11] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):14-19. (in Chinese))

[12] 贲克平. 国外大规模跨流域调水的经验教训与展望[J]. 湖南水利水电,2000(6):26-29. (BEN Keping. Experience, lessons, and prospects of large-scale cross basin water transfer in foreign countries[J]. Hunan Hydro & Power,2000(6):26-29. (in Chinese))

[13] 王光谦,欧阳琪,张远东,等. 世界调水工程[M]. 北京:科学出版社,2009.

[14] MASERO J A, PÉREZ-GONZÁLEZ M, BASADRE M, et al. Food supply for waders (Aves:Charadrii) in an estuarine area in the Bay of Cádiz (SW Iberian Peninsula) [J]. Acta Oecologica,1999,20(4):429-434.

[15] 袁瑞强,张文新,王鹏,等. 引黄调水对汾河受水区水环境的影响[J]. 自然资源学报,2018,33(8):1416-1426. (YUAN Ruiqiang, ZHANG Wenxin, WANG Peng, et al. Impacts of water transfer from the Yellow River on water environment in the receiving area of the Fenhe River[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(8):1416-1426. (in Chinese))

[16] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49. (LIU Ruiyan, ZHANG Jianhua, LIU Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):42-49. (in Chinese))

[17] 李雪松,张杰平. 南水北调中线工程水源区经济社会与生态环境协调发展评价[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(1):113-116. (LI Xuesong, ZHANG Jieping. Evaluation on coordinated development between economic society and ecological environment of water resources district of the South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2014,12(1):113-116. (in Chinese))

[18] 卢丽荣,刘卫东,姚丽华,等. 南水北调中线工程跨区域转让水价成本核算体系研究[J]. 水利经济,2023,41(4):45-52. (LU Lirong, LIU Weidong, YAO Lihua, et al. Study on cost accounting system of trans regional water transfer[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(4):45-52. (in Chinese))

[19] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):55-62. (WU Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):55-62. (in Chinese))

[20] 常玉苗. 跨流域调水对区域生态经济影响综合评价研究[D]. 南京:河海大学,2007.

[21] 王贞琴. 浙北引水工程方案选优综合评价[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[22] 高永年,高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J]. 地理科学进展,2010,29(1):59-64. (GAO Yongnian, GAO Junfeng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the middle-lower Hanjiang River Basin[J]. Progress in Geography,2010,29(1):59-64. (in Chinese))

[23] WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Tradeoff analysis between economic and ecological benefits of the inter basin water transfer project under changing environment and its operation rules[J]. Journal of Cleaner Production,2020,248:119294.

[24] 魏昌林. 澳大利亚雪山调水工程[J]. 世界农业,2001(11):29-31. (WEI Changlin. The snowy mountains scheme of Australia [J]. World Agriculture,2001(11):29-31. (in Chinese))

[25] 景来红,李福生,崔荃,等. 南水北调西线工程上线调水方案沿革及研究[J]. 人民黄河,2023,45(5):6-8. (JING Laihong, LI Fusheng, CUI Quan, et al. Research on the upper-route water transfer scheme of the West Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Yellow River,2023,45(5):6-8. (in Chinese))

[26] 张金良,景来红,李福生,等. 南水北调西线工程总体布局及一期工程方案研究[J]. 人民黄河,2023,45(5):1-5. (ZHANG Jinliang, JING Laihong, LI Fusheng, et al. Study on overall layout and phase I project of West Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Yellow River,2023,45(5):1-5. (in Chinese))

[27] 张金良,谢遵党,左琪. 南水北调西线工程综合开发的筹融资模式[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1041-1048. (ZHANG Jinliang, XIE Zundang, ZUO Qi. Financial modes of comprehensive development of the Western Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(6):1041-1048. (in Chinese))

[28] 王玉莲,杨泽凡,闫龙,等. 基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J]. 水资源保护,2024,40

(4):137-147. (WANG Yulian, YANG Zefan, YAN Long, et al. Research on ecological water demand in water source area of west route of South-to-North Water Diversion Project based on multi-method comprehensive comparison [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4):137-147. (in Chinese))

[29] 环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要[R]. 北京:环境保护部, 2008.

[30] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 等. 中国生态环境脆弱区范围界定[J]. 生物多样性, 2015, 23(6):725-732. (LIU Junhui, ZOU Changxin, GAO Jixi, et al. Location determination of ecologically vulnerable regions in China[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(6):725-732. (in Chinese))

[31] 廖迎娣, 范俊浩, 张欢, 等. 长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统影响的评价指标体系[J]. 水资源保护, 2022, 38(4):189-194. (LIAO Yingdi, FAN Junhao, ZHANG Huan, et al. Evaluation index system for ecological revetment impact on river ecosystem in plain river network at lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4):189-194. (in Chinese))

[32] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2):35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):35-41. (in Chinese))

[33] 朱洁, 冯建刚, 高玉琴, 等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进步, 2022, 42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):8-14. (in Chinese))

[34] 崔威, 李晓英, 郭宜薇. 基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2):408-416. (CUI Wei, LI Xiaoying, GUO Yiwei. Risk evaluation of hydropower station accidents based on combination weighting of game theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2):408-416. (in Chinese))

[35] 李兵, 庄文化, 孙海龙. 改进熵权法在岩石边坡生态护坡效果综合评价中的应用[J]. 中国水土保持, 2019(9):58-63. (LI Bing, ZHUANG Wenhua, SUN Hailong. Application of improved entropy weight method in comprehensive evaluation of eco-engineering protection for rock slope[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(9):58-63. (in Chinese))

[36] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 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 Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. 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. (in Chinese))

[37] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进步, 2024, 44(3):80-87. (ZHANG Xiaofeng, SHI Yongjie, LIU Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):80-87. (in Chinese))

[38] 宋松, 曾庆宝, 钟润菲. 基于 CiteSpace 的《水资源保护》创刊 35 年文献计量分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):141-150. (SONG Song, ZENG Qingbao, ZHONG Runfei. Bibliometric analysis of *Water Resources Protection* in past 35 years based on CiteSpace[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):141-150. (in Chinese))

[39] 屠晓峰. 南水北调西线工程调水对长江、黄河电能影响的分析与计算[J]. 水电能源科学, 1999, 17(1):17-20. (TU Xiaofeng. Analysis and calculation of the influence of the west route of the project of water transfer from south to north on the hydropower supply by the Yangtze River and Yellow River[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1999, 17(1):17-20. (in Chinese))

[40] 李庆国, 郭兵托, 段高云, 等. 南水北调西线一期调水对黄河梯级发电作用分析[J]. 水力发电, 2020, 46(2):90-92. (LI Qingguo, GUO Bingtuo, DUAN Gaoyun, et al. Analysis on the effect of the first phase water transfer of the west route of the South-to-North water diversion project on cascade power generation of Yellow River [J]. Water Power, 2020, 46(2):90-92. (in Chinese))