

高媛媛, 杨亚锋, 杨荣雪, 等. 南水北调东线一期工程受水区生态环境效益演变[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 566-574. GAO Y Y, YANG Y F, YANG R X, et al. Eco-environment benefits evolution of the receiving area of Phase I of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 566-574. (in Chinese)

南水北调东线一期工程受水区生态环境效益演变

高媛媛¹, 杨亚锋², 杨荣雪³, 刘艺欣⁴, 王红瑞⁴

(1. 水利部南水北调规划设计管理局, 北京 100038; 2. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210;
3. 中国南水北调集团东线有限公司, 北京 100070; 4. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 研究南水北调东线一期工程通水以来受水区生态环境效益的演变态势, 对南水北调后续工程高质量建设、加快构建国家水网以及促进工程综合效益发挥有决策参考作用。以定性定量相结合的方式分析东线一期工程在优化水资源配置、保障饮水安全、复苏河湖生态环境和畅通南北经济循环等方面的作用, 进而结合层次分析法, 从直接效益和间接效益 2 个方面, 筛选构建东线一期工程受水区生态环境效益评价指标体系, 主要包括工程年供水量、水质改善度、生态补水量、地下水压采量、地下水水位、水域面积、绿地面积和涵养水源等, 并采用 VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) 多准则妥协解排序方法对南水北调东线一期工程通水以来即 2013—2022 年受水区生态环境效益演变态势进行分析。结果表明: 南水北调东线一期工程通水的 10 年以来, 受水区的生态环境整体复苏效果明显, 近 3 年排序值保持在 0.8 以上; 受降水偏枯进而影响地下水开采量和地下水水位等因素影响, 2019 年间接生态环境效益下降 29.2%, 之后迅速恢复并保持稳定。在分析直接效益和间接效益演变的基础上, 从工程提质增效、提高工程水质状况以及完善体制机制建设等方面提出东线一期工程进一步促进受水区生态环境持续改善的策略和建议, 以期为东线工程及受水区生态环境保护及高质量发展相关研究、决策制定等提供参考。

关键词: 南水北调东线一期工程; 生态环境效益; 指标体系; VIKOR

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0058

生态环境效益的概念源于 20 世纪后期的“生态系统服务”理论^[1], 其后, Costanza 等^[2]明确了相关概念、分类及评估方法。近几十年来, 随着生态文明建设的深入推进, 生态环境效益评估成为生态学和经济学等多学科的热点研究课题之一^[3-4]。

南水北调工程是实现我国水资源优化配置、促进经济社会可持续发展、保障和改善民生的重大基础设施^[5-6]。东线一期工程自 2013 年 11 月建成通水 10 余年的实践表明, 该工程在保障供水安全、防洪除涝、保护河湖生态、畅通南北经济循环、交通运输及文化传承等方面发挥了重要的作用^[7-8], 同时也对其受水区的自然-社会二元水循环系统产生了深远的影响, 进而对受水区生态系统服务功能的优化提升产生一定的效应。在此背景下, 南水北调东

线一期工程通水以来受水区生态环境效益也广受关注^[9-11], 相关研究成果为东线一期工程后续工程开展及相关政策的制定提供了重要的支撑。

生态环境效益原指生态系统通过发挥自身生态功能对生态和环境产生的效用及影响。结合南水北调工程实际, 本研究认为使用受水区各种生态系统在原有基础上所产生的生态系统服务功能增量表征受水区生态环境效益, 可在一定程度上反映南水北调东线一期工程的生态环境效益。

由于每项工程的目标任务不尽相同, 其在受水区生态环境改善中的作用也各有差异。为科学评估工程受水区生态环境效益, 有必要结合具体工程发挥的实际效益, 有针对性地建立工程受水区生态环境效益评价指标体系, 既要体现工程的共性, 也要体

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2024-04-12 网络出版时间: 2024-05-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240527.0932.011>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202404); 国家自然科学基金项目(52279005)

作者简介: 高媛媛(1985—), 女, 安徽阜阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事南水北调工程规划设计与管理研究。Email: gaoyy@mwr.gov.cn

通信作者: 王红瑞(1963—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水资源系统分析与水利经济研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

现工程的个性。刘楠等^[12]从水资源安全、居民生活质量改善、城市景观提升、水电保障、人文环境和谐、生态安全和气温调节等方面研究了南水北调中线工程产生的社会效益和生态效益。方国华等^[13]探讨了南水北调东线江苏境内受水区的现状节水措施及其成效,对节水的经济、社会及生态效益进行了分析。Su等^[14]从生态价值和生态风险的角度构建元耦合分析框架,揭示了南水北调中线工程生态环境的相互作用。曾子悦等^[9]围绕林地、城市绿地、压采地下水量、湿地和水域生态效益5个方面核算了南水北调中线一期工程为北京市带来的生态效益价值。可见,南水北调工程生态效益评价指标体系仍在不断发展完善之中。结合工程进展及受水区实际情况,构建适用的指标体系,进而开展受水区生态环境效益评价及演变分析,有助于南水北调后续工程的实施和区域高质量发展。

鉴于此,在分析一期工程实际发挥效益的基础上,从直接指标和间接指标2个方面构建东线一期工程受水区生态环境效益评价指标体系,进而采用VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje(VIKOR)方法进行演变态势分析,并提出相应的提升建议,以期对东线工程受水区生态环境保护及高质量发展相关研究及决策制定提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及数据来源

根据2002年国务院批复的南水北调工程总体规划,南水北调工程分别从长江下游、中游和上游调水148亿、130亿和170亿 m^3 ,形成东线、中线和西线3条调水线路^[15]。其中,东线工程利用江苏省江水北调工程,从长江下游扬州附近抽引长江水,利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送,出东平湖后一路向北穿过黄河输水到天津,另一路向东输水到烟台和威海,规划分3期建设。南水北调东线一期工程(下称东线一期工程)在江苏已有江水北调工程基础上扩大规模、向北延伸^[16]。

东线一期工程主体工程于2002年12月27日开工建设,2013年3月完工,2013年11月15日全线正式通水。多年平均抽江量87.66亿 m^3 ,受水区干线分水口门净增供水量36.01亿 m^3 。多年平均供水量187.55亿 m^3 (含江水北调),其中抽江水量87.66亿 m^3 ^[17]。扣除输水损失后,多年平均净供水量162.81亿 m^3 (含江水北调),其中江苏省133.70亿 m^3 、安徽省15.58亿 m^3 、山东省13.53亿 m^3 。根据江苏

省和山东省编制的南水北调一期工程配套规划及实施方案,一期主体工程和各省配套工程建成后,供水范围共涉及江苏省、安徽省、山东省的21个地市级以上城市和其辖内的65个县、市(区)。

使用的数据均来源于南水北调东线一期工程相关省市的统计年鉴(2013—2022年)、水资源公报(2013—2022年)、生态环境状况公报(2013—2022年)、南水北调工程效益统计相关报告、南水北调工程东线治污规划成效评估相关报告等。

1.2 指标体系构建

1.2.1 工程生态效益分析

东线一期江苏段工程有效改善苏北地区水资源短缺的局面,同时也为江苏排涝、航运等发挥积极作用;山东段工程从战略上调整山东省水资源布局,不仅缓解水资源短缺困难,更实现长江水、黄河水、淮河水与当地水的联合调度、优化配置,为保障山东省经济社会可持续发展提供强有力的水资源支撑;安徽省境内工程是东线一期工程的一部分,主要是一期工程实施后,洪泽湖非汛期蓄水位抬高,库容增加,由此影响的安徽省沿淮及怀洪新河低洼地的治理工程,包括改建、拆除重建和新建排涝泵站,疏浚排涝沟,在近几年汛期、非汛期的排涝和抗旱中发挥显著效益。

(1)优化水资源配置,重构受水区供水格局。东线一期工程调水沿线全长1467 km,初步打通长江流域向黄淮海地区调水的南北通道,阶段性构建依托南水北调工程的国家水资源配置骨干水网,促进我国水资源“空间均衡”,有效缓解受水区水资源供需矛盾,促使水资源配置优化。东线一期工程通水以来,累计向山东省调水61.39亿 m^3 ,受水区通过借助引江水开展水源置换,有效减少地下水开采量。以山东省为例,东线一期工程通水以来,长期处于超采状态的地下水供水量逐渐减少,从供水初期的85.99亿 m^3 降低至2021年的66.84亿 m^3 ,减少约19亿 m^3 (图1);地下水供水量在供水总量中的占比由40.1%降至2021年的31.8%,水资源配置格局进一步优化,地下水的战略储备功能得以涵养。

(2)保障群众饮水安全,提高沿线人民群众获得感。东线一期工程惠及沿线18个大中城市(不包括安徽省),受益人口约6767.81万人。东线治污规划提出,在东线一期工程通水前,江苏省进入输水干渠化学需氧量控制在2万t/a以内,氨氮量控制在0.1万t/a以内;山东省进入黄河以南段输水干渠化学需氧量控制在4.3万t/a以内,氨氮量控制在

0.43 万 t/a 以内。根据江苏、山东两省治污规划实施情况相关报告,2012 年两省主要污染物入河量已控制在规划目标范围内,见表 1。通水近 10 年以来,在总氮不参评的情况下,东线全线水质总体能够达到地表水Ⅲ类水质标准。

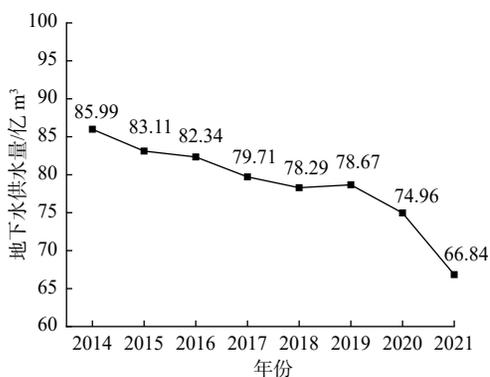


图 1 山东省近年来地下水供水量变化情况

Fig. 1 Changes in groundwater supply in Shandong Province in recent years

表 1 东线一期工程主要污染物入河削减情况

Tab. 1 Reduction of main pollutants entering the river in Phase I of the Eastern Route Project

省份	规划现状		规划目标		通水时实际	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
江苏省	15.6	0.8	2.0	0.10	1.08	0.038
山东省	35.6	4.2	4.3	0.43	1.20	0.085
合计	51.2	5.0	6.3	0.53	2.28	0.123

注:表中“规划现状”指《南水北调东线工程治污规划》编制时现状。

(3) 复苏河湖生态环境,促进生态文明建设。东线一期工程建设以来,输水河道及沿线的洪泽湖、骆马湖、南四湖等湖泊水质明显改善,输水期间水质满足地表水Ⅲ类水标准,通过水源置换、生态补水、地下水压采等综合措施,向南四湖、东平湖等生态补水,有效保障沿线河湖生态安全,显著改善河湖生态环境。据有关部门统计,南四湖如今栖息的鸟类达到 200 种,数量 15 万余只,绝迹多年的小银鱼、毛刀鱼等再现南四湖,其支流白马河更发现了素有“水中熊猫”之称的桃花水母,中华秋沙鸭、黑鹳等珍稀鸟类也来到南四湖有关区域安家落户,发挥显著的生态效益。

(4) 畅通南北经济循环,推动受水区高质量发展。东线一期工程打通水资源调配互济的堵点,解决北方地区水资源短缺的痛点,畅通两湖段的水上通道,为两岸经济绿色发展增添新的动力。通过构建国

家水网,将南方地区的水资源优势转化为北方地区的经济优势,北方重要经济发展区、粮食主产区、能源基地生产的商品、粮食、能源等产品再通过交通网、电网等运输到全国各地,畅通南北经济大循环,促进各类生产要素在南方和北方更加优化配置,实现生产效率、效益最大化。

基于以上分析,东线一期工程受水区生态环境效益评价指标的选取要充分结合南水北调工程定位及发挥的实际作用,确保客观真实体现工程对受水区生态环境的影响。

1.2.2 指标体系筛选

南水北调东线一期工程通水以来,生态文明建设高位推进并取得显著成效,在各种生态环境保护政策加持下,受水区生态环境状况明显改善。结合生态环境效益相关研究成果和工程的影响,生态环境效益指标可以从直接指标和间接指标 2 个方面进行构建。其中:直接指标表征南水北调已建工程通水以来受水区产生的直接生态环境效益,一般表现为对产生的直接自然变化的衡量;间接指标表征南水北调已建工程通水以来受水区产生的间接生态环境效益。结合南水北调东线一期工程发挥的生态环境功能,直接指标主要涉及生态补水量、水质变化情况、生态环境改善情况,间接指标具体包括地下水压采量、土壤保持、固碳释氧、净化空气、减弱噪声、水源涵养、大气调节(调节小气候)、杀菌等^[7, 12, 18]。

(1) 直接指标

直接指标包括生态补水、水质改善和生态环境改善等方面相关指标。工程年度供水量方面,南水北调东线一期工程供水量作为外调水源是对当地水源的有效补充,为生产、生活、生态提供重要水资源保障。将年供水量作为生态效益评价指标之一。生态补水方面,南水北调工程部分受水区在满足水厂供水的前提下,结合工程条件和受水区实际需求,开展生态补水实践,补充当地的河湖水量和地下水量。东线一期工程生态补水主要解决南四湖应急供水。生态补水效益的最直接的表征指标是河湖生态补水量。具体指标为生态补水量。水质改善方面,东线一期工程通水前编制相关治污规划实施,东线一期工程沿线河湖水质明显改善。通水以来,沿线各级人民政府严格落实水质目标考核责任制,确保输水期水质的持续稳定向好。东线一期工程

输水干线输水期水质、受水区河道及湖泊水质是能够达到并维持在工程设计水质控制范围,将直接影响受水区生态效益。因此,将输水干线输水期水质、受水区河道、湖泊主要国控地表水监测断面的水质监测情况作为指标之一。具体采用国控断面水质优良比例(达到或优于Ⅲ类比例)来表征水质改善度。环境改善方面,当前研究采用的生态效益指标主要涉及生态补水、水质改善、环境改善等方面,因此根据本项目研究需要,考虑新增水域面积量、绿地面积量指标。

(2)间接指标

南水北调东线一期工程为沿线受水区地下水压采提供重要的水源条件。自工程通水以来,山东省

和江苏省受水区利用南水北调水替换生产生活超采的地下水,有效减少地下水开采量,个别地区甚至利用南水北调水开展地下水回灌,加强对地下水的回补和涵养。因此,将地下水压采作为南水北调东线一期工程受水区的主要间接生态环境效益之一。该方面指标主要选取地下水压采量、地下水涵养以及由此引起的地下水水位回升。具体指标包括地下水压采量、地下水水位变化、地下水供水量等。

基于以上分析构建南水北调东线一期工程受水区生态环境效益指标集,采用层次分析法确定各指标权重,其中 $CR < 0.10$, 满足一致性检验。为确保所选指标的代表性并尽可能避免维度灾难,筛选权重较大的 8 个指标构成评价指标体系,见表 2。

表 2 东线一期工程受水区生态环境效益评价指标体系

Tab. 2 Eco-environmental benefits evaluation indicator system of the receiving area of phase I of the Eastern Route Project

目标层	准则层	指标层	具体表征指标	权重	类型
东线一期工程受水区生态环境效益	直接效益	工程供水	工程年供水量 $c_1/亿m^3$	0.138 1	+
		水质改善	国控断面达到或优于Ⅲ类比例 $c_2/亿m^3$	0.114 3	+
		水域面积	水域面积量 c_3/km^2	0.110 6	+
		绿地面积	绿地面积量 c_4/km^2	0.125 1	+
	间接效益	生态补水	生态补水量 $c_5/亿m^3$	0.135 4	+
		地下水压采	地下水压采量 $c_6/亿m^3$	0.123 1	+
		地下水水位	地下水埋深 c_7/m	0.106 2	-
		涵养水源	地下水供水量 $c_8/亿m^3$	0.147 2	-

注: +代表正向指标,其值越大越好;-代表负向指标,其值越小越好。

1.3 VIKOR 多准则妥协解排序法

VIKOR是 Opricovic 教授在 1998 年所提出的一种多准则妥协解排序法,可以有效弥补 TOPSIS 理想解法的不足,适用于多目标决策问题,尤其对于具有多属性的方案排序效果显著^[19]。VIKOR 方法已在诸多领域得到广泛的应用^[20-22]。根据 1.2 节的分析,南水北调东线一期工程受水区生态环境效益分析涉及多个指标,且处于动态变化之中,因此选择 VIKOR 方法探讨南水北调东线一期工程受水区生态环境效益的时序演变特征。

结合南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评价及演化趋势分析的实际情况,VIKOR 方法的具体步骤阐述如下:设评价年份集合为 $O = o_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 指标集合为 $C = c_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$)。 x_{ij} 代表第 i 个年份的第 j 个指标的取值, w_j 为第 j 个指标的权重。

(1)数据的标准化处理。为消除指标单位不同

引起的量纲问题,同时为保障计算的有效性,进行如下的数据标准化处理^[23],表达式为

对于正向指标 c_j :

$$y_{ij} = 0.001 + 0.998 \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (1)$$

对于负向指标 c_j :

$$y_{ij} = 0.001 + 0.998 \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

(2)计算正理想解 y^+ 和负理想解 y^- ,表达式为

$$y^+ = \{y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+\}, \quad y^- = \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-\} \quad (3)$$

式中: $y_j^+ = \max_i y_{ij}$, $y_j^- = \min_i y_{ij}$ 。

(3)计算群体效益值 S_i 、个体遗憾值 R_i 和利益比率 Q_i ,表达式为

$$S_i = \sum_j w_j \left(\frac{y_j^+ - y_{ij}}{y_j^+ - y_j^-} \right) \quad (4)$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \left(\frac{y_j^+ - y_{ij}}{y_j^+ - y_j^-} \right) \right] \quad (5)$$

$$Q_i = \tau \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - \tau) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (6)$$

式中: $S^+ = \max S_i$ 和 $S^- = \min S_i$ 分别为最大和最小群体效益; $R^+ = \max R_i$ 和 $R^- = \min R_i$ 分别为最大和最小个体遗憾; τ 为决策机制系数, 一般取 0.5。

(4) 计算生态环境效益的排序值。利益比率 Q_i 在 [0, 1] 取值, 其值越小, 代表方案越优。为更加适用于生态环境效益评价问题, 对其进行转化, 得到生态环境效益的排序值 B_i 为

$$B_i = 1 - Q_i \quad (7)$$

其中, B_i 越大, 代表生态环境效益越好。

2 结果与讨论

2.1 生态环境演变特征

结合南水北调东线一期工程通水以来受水区的实际情况, 以 2013—2022 年为研究期, 利用 1.3 节中的 VIKOR 方法, 对其生态环境效益的演变态势进行分析, 结果见图 2。

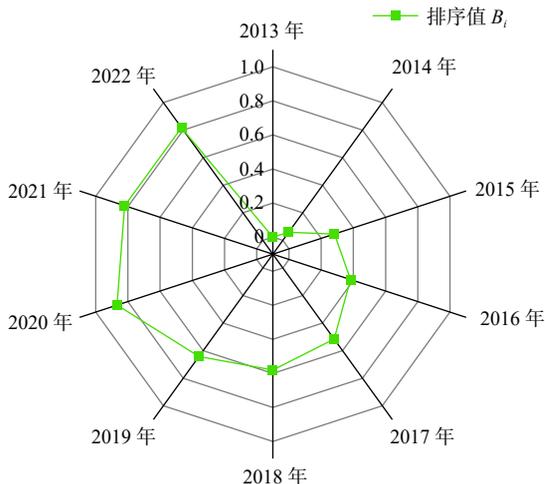


图 2 东线一期工程受水区生态环境效益演变态势

Fig. 2 Evolution trend of eco-environmental benefits in the receiving area of phase I of the Eastern Route Project

由图 2 可以看出, 自通水以来, 东线一期工程受水区生态效益整体状况良好, 且生态状况综合指标值呈逐渐增加的态势, 在 2020 年度达到峰值, 其后基本趋于稳定。主要原因是在生态文明建设的大背景下, 借助南水北调东线一期工程提供的重要水源, 水资源对经济社会、生态环境改善等方面的支撑作用明显增强。受水区在一定程度上优化水资源配置结构, 也开展生态补水, 有效减少地下水供水量, 进而促进地下水压采和水位回升, 压采量比

工程通水后至 2020 年前每年度新增压采量有一定幅度下降; 同时, 东线一期工程在调水过程中会调度应用东平湖、南四湖等沿线重要湖泊, 工程建设 30 余座调蓄水库, 调水期间均可能通过这些湖泊和水库加大水分蒸发, 在一定程度上改善湿度等局地小气候; 此外, 南水北调东线一期工程在规划、建设和实施各阶段均高度重视节水和沿线治污及水质保护工作, 有效改善河湖水质, 据相关报道, 南水北调东线一期工程通水以来沿线湖泊出现有“水中大熊猫”之称的水母——桃花水母, 沿线鱼类、鸟类等生物多样性明显增多。这些都说明南水北调东线一期工程通水以来, 在一定程度上改善沿线生态环境, 发挥生态效益。可见从此东线一期工程在水资源保护和生态修复等方面产生持续的效益, 若后续保持稳定的供水量, 可望达到一种稳态平衡机制, 持续改善受水区生态环境状况。

从直接效益和间接效益 2 个维度出发进行演变态势分析, 结果见图 3。

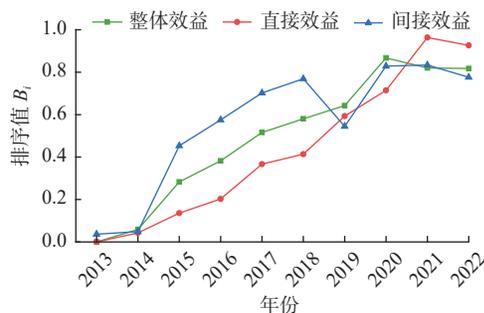


图 3 东线一期工程受水区直接与间接生态环境效益演变态势对比

Fig. 3 Comparison of direct and indirect eco-environmental benefits evolution in the receiving area of phase I of the Eastern Route Project

由图 3 可知: 工程通水以来, 直接指标评价结果显示, 受水区生态环境效益总体上呈上升态势, 于 2021 年度达到峰值, 在该年度工程年供水量、国控断面达到或优于 III 类比例、生态水量等均保持在较高的水平, 且国控断面达到或优于 III 类比例较 2020 年度增长 22%; 2022 年工程年供水量、生态水量等有所降低, 直接效益较 2021 年度有较大幅度的下降。间接指标评价结果表明, 随着地下水压采工作的稳步推进, 2013—2018 年间接效益总体上呈上升态势, 2019 年度间接效益有大幅降低, 主要原因是山东省 2019 年降水偏枯, 较上年度偏少 29%, 较多年平均偏少 17%。为保障生产生活尤其是农业灌溉用水, 抽取的地下水量较 2018 年有所增加, 其中农业灌溉

用水量增加 5 亿 m^3 , 相应地造成受水区地下水埋深增加, 影响间接效益。通水以来, 南水北调东线一期工程受水区生态环境整体上显著改善, 其中的直接生态环境效益逐年增加, 而与此同时更关键的是对于受水区地下水的源源不断的补充, 由此产生的间接效益增加迅速。2019 年间接效益的大幅降低导致整体效益增幅减缓, 然而间接效益的回升, 整体效益也随之回弹。总体来看, 南水北调东线一期工程的实施给受水区提供地表水资源保障, 直接效益持续提升, 而对地下水涵养的影响以及人们对地下水的开采使用则呈现波动态势, 不确定性显著。

2.2 讨论与建议

南水北调东线一期工程惠及江苏、山东等省多个地市, 工程通水以来, 为受水区经济社会发展和生态环境改善提供了稳定可靠的水资源保障。在南水北调东线工程以及一系列生态文明政策影响下, 受水区生态环境产生积极变化。通过选取指标计算生态环境效益演变趋势, 结果表明东线一期工程受水区生态环境效益在经历 2013—2020 年的稳步提升后, 出现了一定程度的下滑, 这意味着在当前的管理模式下, 受水区生态环境效益的进一步提升遇到“瓶颈”。结合本研究的相关结果, 针对工程管理运行提出如下策略性建议, 以期不断提升东线一期工程的生态环境效益提供支撑。

(1) 全面分析东线一期工程受水区生态环境效益。东线一期工程不同于中线工程, 其与沿线输水河湖平交, 调水期间增大了水域面积, 除供水产生的直接生态环境效益外, 对受水区的生态环境也有间接促进作用, 因此, 在构建指标体系时, 应统筹考虑, 选择适当的指标体现其间接生态效益。

(2) 促进东线一期工程生态效益发挥。在当前生态文明建设时代背景下, 应结合工程定位, 以国家水网建设、乡村振兴等国家战略加速推进为契机, 加强工程与各级水网的衔接力度, 扩展工程受益范围, 精准规范水量调度, 从提高引江水消纳、强化生态补水、促进地下水超采综合治理、服务河湖复苏等角度促进工程效益发挥。

(3) 提高水质安全保障能力。东线一期工程建成通水后, 输水湖泊等水体水质总体维持在地表Ⅲ类。水质监测断面达标率是影响东线效益发挥的重要指标, 为确保生态效益维持稳定向好态势, 建议进一步重视水质保护, 在调水期根据实际需要

加密监测水质频次, 不断提升预警预判能力和应急处置能力, 确保工程水质安全。

(4) 推进体制机制建设。充分利用南水北调工程新形势新机遇, 进一步理顺东线工程建设运营体制机制, 开展工程运行管理相关制度建设; 做到政府和市场两手发力, 对地下水压采、生态环境补水等进行总体的把握和调控, 充分发挥市场在资源配置中的决定性作用, 更好地发挥政府协调指导作用。

(5) 厘清东线一期工程对受水区生态环境效益的贡献。当前, 相关研究对于包括南水北调工程在内的调水工程的生态环境效益评价建立了多种指标体系, 总体上看这些指标体系体现的是工程相关区域生态环境改善的总体效果, 这些效果并非某项工程或管理措施单独作用的, 而是各类措施体系的综合效益。因此, 有必要识别各类措施对受水区生态环境改善的贡献率, 以客观并且尽可能地计算工程产生的生态环境效益。

3 结语

在分析工程实际效益发挥的基础上, 从直接指标和间接指标 2 个方面构建了东线一期工程受水区生态环境效益评价指标体系, 该指标体系贴合工程实际, 具有较强的针对性和可操作性。采用 VIKOR 方法对 2013—2022 年东线一期工程受水区生态环境效益演变态势进行分析, 厘清当前状态下生态环境改善的主要制约因素, 发现东线一期工程受水区生态环境效益自通水以来基本上呈现稳步提升的态势, 但在 2020 年后出现一定程度的下滑, 其中调水产生的水资源供给保障等直接生态环境效益逐年提升, 而对地下水涵养方面的间接生态环境效益则呈现波动态势, 不确定性突出。

需要指出的是, 南水北调东线一期工程通水 10 年来, 是我国推进生态文明建设推进力度最大的 10 年, 也是生态环境改善最明显的 10 年。水是生态之基, 客观上讲, 东线一期工程提供的南水北调水是沿线生态环境改善的重要因素, 但不是唯一因素。受水区沿线生态环境的改善是生态文明建设和人与自然和谐共生的时代背景下各类政策协同发力、叠加而形成综合效应, 进而体现在受水区生态环境改善和演变中, 具体来说即在选定的指标体系和评价方法下, 受水区生态环境状况总体向好。当前, 国家水网建设、南水北调后续工程高质量发

展等战略推进过程中,应正确、客观地认识东线一期工程在受水区生态环境改善方面发挥的真实作用,进而为相关决策提供有力支撑。

在评价东线一期工程受水区生态环境效益演变趋势时,如何厘清哪些生态环境改善是由东线工程供水引起的,选择合理的指标体系精准分析东线一期工程产生的生态环境效益,评价和预测受水区生态环境效益发展变化趋势,是值得后续研究深入挖掘和揭示的难点。此外,南水北调东线一期工程目前除直接为受水区调引长江水外,还通过调度东平湖水资源等发挥作用,作为一项战略性水资源配置工程,如何客观认识东线一期工程发挥的生态环境效益,也是后续研究中值得关注的焦点和难点。

参考文献:

- [1] XIE J L, LU Z X, XIAO S C, et al. Driving force and ecosystem service values estimation in the extreme arid region from 1975 to 2015: A case study of Alxa League, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(6): 1097-1107. DOI: [10.1007/s11769-021-1244-2](https://doi.org/10.1007/s11769-021-1244-2).
- [2] COSTANZA R, KUBISZEWSKI I, STOECKL N, et al. Pluralistic discounting recognizing different capital contributions: An example estimating the net present value of global ecosystem services[J]. *Ecological Economics*, 2021, 183: 106961. DOI: [10.1016/J.ECOLECON.2021.106961](https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.106961).
- [3] 樊霖, 严婷婷, 孙天合, 等. 敦煌水资源合理利用与生态保护规划实施效果评价研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 140-151. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.014](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.014).
- [4] FANG Y. Maximizing ecological environment benefits from the perspective of agricultural water resource transformation[J]. *Water Supply*, 2023, 23(10): 4214-4226. DOI: [10.2166/ws.2023.250](https://doi.org/10.2166/ws.2023.250).
- [5] 韩宇平. 遵循规律扎实推进南水北调后续工程高质量发展[J]. *中国水利*, 2021(11): 15-16. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2021.11.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2021.11.023).
- [6] 赵存厚. 南水北调工程概述[J]. *水利建设与管理*, 2021, 41(6): 5-9. DOI: [10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.06.03](https://doi.org/10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.06.03).
- [7] 杨爱民, 张璐, 甘泓, 等. 南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估[J]. *水利学报*, 2011, 42(5): 563-571. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.2011.05.008](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2011.05.008).
- [8] 杨亚锋, 高媛媛, 许新宜, 等. 水资源生态安全的时空分异特征: 以南水北调东线山东段为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 833-841. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0084](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0084).
- [9] 曾子悦, 许继军, 吴光东, 等. 南水北调中线一期工程生态效益评估: 以北京市为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1168-1178. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0115](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0115).
- [10] 菅宇翔, 殷庆元, 李加水. 南水北调东线一期工程环境影响回顾性评价[J]. *水利水电工程设计*, 2023, 42(2): 34-37. DOI: [10.3969/j.issn.1007-6980.2023.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-6980.2023.02.010).
- [11] 杨荣雪, 曾萌, 王红瑞, 等. 南水北调东线一期工程沿线代表城市水生态足迹研究[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(7): 40-44. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221019](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221019).
- [12] 刘楠, 尹茂想, 陈忠林, 等. 南水北调中线工程通水初期北京市产生的社会和生态效益分析[J]. *北京水务*, 2019(3): 39-44. DOI: [10.19671/j.1673-4637.2019.03.010](https://doi.org/10.19671/j.1673-4637.2019.03.010).
- [13] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线江苏境内受水区节水潜力分析[J]. *水利经济*, 2022, 40(4): 1-5,27. DOI: [10.3880/j.issn.1003-9511.2022.04.001](https://doi.org/10.3880/j.issn.1003-9511.2022.04.001).
- [14] SU Q M, CHANG H, CHEN X, et al. Metacoupling of water transfer: The interaction of ecological environment in the middle route of China's South-North Project[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(17): 10555. DOI: [10.3390/ijerph191710555](https://doi.org/10.3390/ijerph191710555).
- [15] 水利部南水北调规划设计管理局. 南水北调工程总体规划内容简介[J]. *中国水利*, 2003(2): 11-13,18. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2003.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2003.02.003).
- [16] 黄红虎, 谢伟东, 张娟. 南水北调东线工程简介[J]. *能源研究与利用*, 2004(4): 3-5. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5523.2004.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5523.2004.04.001).
- [17] FANG G H, ZHU X H, HUANG X F. Risk analysis of floodwater resources utilization along water diversion project: A case study of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project in China[J]. *Water Supply*, 2019, 19(8): 2464-2475. DOI: [10.2166/ws.2019.127](https://doi.org/10.2166/ws.2019.127).
- [18] 汪易森, 陈斌. 南水北调东线一期工程山东段通水效益分析与认识[J]. *中国水利*, 2022(9): 4-7. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2022.09.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2022.09.009).
- [19] 魏建涛, 李治军. 基于博弈论组合赋权—VIKOR模

- 型的洛阳市水资源承载力评价研究[J]. *吉林水利*, 2023(8): 21-27. DOI: [10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2023.08.002](https://doi.org/10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2023.08.002).
- [20] 杨亚锋,王红瑞,巩书鑫,等.可变勾股模糊VIKOR水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. *水利学报*, 2021, 52(6): 633-646. DOI: [10.13243/j.cnki.slx.20200455](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.20200455).
- [21] 汪伦焰,姚德胜,李慧敏,等.基于区间数多属性决策VIKOR法的南水北调中线工程应急决策研究[J]. *河南科学*, 2021, 39(4): 530-538. DOI: [10.3969/j.issn.1004-3918.2021.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-3918.2021.04.003).
- [22] 周铭毅,尚志海,蔡灼芬,等.基于VIKOR方法的广东省城市洪涝灾害韧性评估[J]. *灾害学*, 2023, 38(1): 206-212. DOI: [10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.031).
- [23] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等.可拓集与可变集的相容性辨析及耦合评价方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(8): 2137-2146. DOI: [10.12011/SETP.2019-1989](https://doi.org/10.12011/SETP.2019-1989).

Eco-environment benefits evolution of the receiving area of Phase I of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project

GAO Yuanyuan¹, YANG Yafeng², YANG Rongxue³, LIU Yixin⁴, WANG Hongrui⁴

(1. Bureau of South to North Water Transfer of Planning, Designing and Management, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 2. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 3. China South-to-North Water Transfer Group East Route Co., Ltd, Beijing 100070, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The phase I of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project (hereinafter referred to as Phase I) is an important part of the South-to-North Water Transfers Project and the backbone project of the national water network. Under the background of the current ecological civilization construction, the eco-environmental benefits of the receiving area of the project are widely concerned. Phase I has been in operation for nearly 10 years. As of the end of June 2023, a total of 6.139 billion m³ of water has been transferred to Shandong, which has brought remarkable benefits. So, scientific analysis of the eco-environmental evolution of phase I is conducive to the high-quality promotion of subsequent projects and the high-quality development of economy and society.

To analyze the evolution characteristics of eco-environmental of the phase I, the role of phase I is analyzed in optimizing water resources allocation, ensuring drinking water safety for the masses, reviving the eco-environment of rivers and lakes, and smoothing the North-South economic cycle by combining qualitative and quantitative methods. The indicators, such as annual water supply, water quality improvement, ecological replenishment, groundwater pressure recovery, groundwater level, water area, green area, water conservation, were selected, and the eco-environmental benefit evaluation indicator system of the phase I was established. On this basis, the eco-environmental evolution analysis method of the phase I was established based on VIKOR compromise solution ranking method, considering the incongruity between multiple indicators.

The constructed evaluation indicator system and evolution analysis method are applied to calculate and analyze the evolution situation of eco-environmental benefits of the phase I from 2013 to 2022. The results show that: The overall benefits have been gradually increasing since the opening of water supply, reaching a peak in 2020, and then basically stabilizing. The phase I has promoted the recovery of underground water pressure, water level, the pollution control and water quality protection along the route have also effectively improved the water quality of rivers and lakes, which have improved the eco-environment along the route. The phase I has produced sustained benefits in water resources protection and water ecological restoration, and is expected to achieve a steady equilibrium mechanism. The ranking value remained above 0.8 in the past three years; Affected by factors such as dry precipitation, which in turn affected groundwater extraction and groundwater level, indirect eco-environmental benefits decreased by 29.2% in 2019, and then quickly recovered and remained stable. Based on the analysis of the evolution of direct and indirect benefits, the corresponding improvement strategies are proposed from the aspects of improving quality and efficiency, ensuring water quality and evaluating mechanism construction, in order to provide

references for eco-environment evaluation of the Eastern Route project and relevant research and decision-making on high-quality development.

The constructed indicator system of eco-environmental of the phase I based on the analysis of the actual benefits from two dimensions of direct and indirect benefits is more targeted and operable. VIKOR method is adopted to analyze the evolutionary situation of eco-environmental of the phase I from 2013 to 2022, which can better clarify the main constraints of the improvement of eco-environmental in the current state. The eco-environmental of the phase I have basically shown a steady improvement since the water operation, but have declined to a certain extent after 2020. It should be pointed out that the improvement of the eco-environment along the phase I is the common result of the efforts of all parties under the background of ecological civilization construction and harmonious coexistence between human and nature. The water provided by the phase I is an important factor for the improvement of the eco-environment along the route, but it is not the only factor. When evaluating the ecological benefits of the phase I, how to clarify which eco-environment improvement is caused by the increase in water supply of the Eastern Route project, accurately calculate and analyze the ecological benefits of the phase I by selecting a reasonable indicator system, and evaluate and predict the development and change trend of the ecological benefits are difficulties worthy of further research and exploration.

Key words: phase I of the Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project; eco-environmental benefit; indicator system; VIKOR



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部