

郑文婷, 韩京成, 吴颖菊, 等. 城市水资源联合调配的综合效益评估: 以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 237-246. ZHENG W T, HAN J C, WU Y J, et al. Comprehensive benefit assessment of multiple water resources allocation and utilization: A case study of Beijing City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 237-246. (in Chinese)

城市水资源联合调配的综合效益评估

——以北京市为例

郑文婷¹, 韩京成¹, 吴颖菊¹, 曾洁薇¹, 魏加华^{2,3}

(1. 深圳大学化学与环境工程学院水科学与环境工程研究中心, 深圳 518055; 2. 清华大学水利系, 北京 100084;
3. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084)

摘要:通过分析城市水资源调配对“系统结构-社会-经济-生态环境”的影响, 系统梳理水资源联合调配与综合利用的效果, 基于层次分析和熵值的综合指数方法构建综合效益的评估体系。以北京市为例, 评价 2014—2021 年多水源联合调配的实施效果。研究表明: 北京市水资源调配对系统均衡结构、经济社会发展、生态环境改善等方面产生了不同程度的影响, 其中生态环境效益显著。此外, 综合效益指数的逐年提升表明近年来北京市水资源的联合调配有效促进了城市的可持续发展。

关键词: 水资源调配; 评价体系; 空间均衡; 综合指数; 效益评估

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0025

建设国家水网工程、实施区域水资源的系统调配与高效利用是解决水资源、水生态、水环境等问题的有效举措^[1]。自南水北调中线工程通水以来, 北京市供水保障体系逐步完善, 形成了由外调水、本地地表水、地下水、再生水、雨洪水共同组成的“五水润京城”供水格局, 有效改善了北京市水资源安全形势。为应对气候变化背景下愈加复杂的水文情势, 北京市适时提出“多水源联合调度”“藏水于地”“高水高用、低水低用”“空间均衡”的水资源配置调度原则, 统筹生活、生产和生态用水优化配置, 稳固支撑全市用水需求及经济社会的高速发展。但是, 水资源调配和运用方式影响着其资源价值和工程效益, 如何全面认识水资源调配的实施效果尚缺乏综合有效的评价体系^[2]。为科学提高城市水资源系统的韧性, 亟须对北京市水资源的调配和利用开展综合效益分析与量化评估。

国内外在水资源调配的经济社会问题上开展了

广泛深入的研究, 而有关调水工程对生态环境的影响、调水效益评估是水资源研究中的热点问题^[3]。例如: 刘昌明等^[4]系统梳理了水资源与人口、资源、环境的关系, 并探讨了水资源承载力的概念和研究方向; 袁伟等^[5]用多目标投影决策分析方法对黑河流域的水资源调配进行评价。彭博等^[6]通过引入耦合协调理论构建了中国经济-社会-环境协同发展的评价指标体系, 并测度评价了协调状态; 吕学研等^[7]分析了连通工程对生态环境的影响及潜在影响。郭丽峰等^[8]通过建立生态环境指标体系研究了河道整治对生态环境效益的改善; 冯晓晶等^[9]采用分摊系数法定量分析了引江济太工程的社会经济效益。席青海等^[10]计算了引黄济津工程的调水费用和对天津市的经济效益; 朱诗洁等^[11]采用模糊综合评价法和卫星遥感技术, 定量评价了鄱阳湖水系连通工程在生态方面的效益。常文娟等^[12]建立了调水影响下的产业用水系统协调度评价模型, 评估了引江

收稿日期: 2023-07-28 修回日期: 2024-01-17 网络出版时间: 2024-03-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240314.1425.003>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3201803); 青海省科技计划项目(2021-SF-A6); 深圳市高等院校稳定支持计划项目(20220807162217001)

作者简介: 郑文婷(2000—), 女, 湖北黄冈人, 主要从事水资源系统分析。E-mail: zhengwt2000@163.com

通信作者: 韩京成(1984—), 男, 山东济南人, 博士, 主要从事环境水利学研究。E-mail: hanjc@szu.edu.cn

济太调水工程对受水区产业用水系统的影响; Matete 等^[13]基于生态经济框架的经济评估模型,综合评价了莱索托高原调水工程的运行状况。水资源安全系统包含了自然、经济、社会、人口、结构和科学技术等多个要素,在城市尺度上耦合多维度调水效果分析并开展综合效益评估对于城市水资源高效利用和可持续发展十分重要。以往研究^[14-15]多关注水资源调配工程对经济、生态环境的影响,城市水资源调配的实施效果需要紧密结合调控目标原则和区域发展特点,构建综合的效益评估体系,更加全面地反映水资源调配对各个层面的影响。

基于城市水资源调配系统分析,结合效益的滞后性和复杂因子影响,本文以北京市水资源调配系统为研究对象,构建水资源联合调配综合效益的评估体系,进而对北京市 2014—2021 年水资源调配实施效果进行了分析与评价,为科学调配和高效利用水资源提供参考,促进生态环境健康循环和经济社会的可持续发展。

1 研究区水资源调配系统概况

北京市水资源调配工程主要包括外调水工程、水库调度工程和地下水取水工程等。因本地水资源有限,北京市借助区域调水工程和调蓄设施引入外部水源,如南水北调中线工程、引黄工程等。本地水源的利用则依赖密云水库、怀柔水库等水利工程设施实现安全供水,并利用地下水取水工程取用地下水。通过水库和自来水管网的运行调度,综合防洪安全和多部门供用水需求,持续提升城市供用水保障率。其中,河道/地下水补水主要用以满足生态用水和战略储备用水的需求。南水北调中线一期工程通水以来,北京市形成了“26213”式供水系统,包括两大动脉(南水北调中线总干渠和密云水库至第九水厂输水干线)、六大水厂(田村、第三、第八、第九、第十和郭公庄水厂)、2 个枢纽(团城湖调节池和大宁调节池)、1 条环路(基本沿五环建设的供水环路)和三大应急水源地(怀柔、平谷和张坊地下水应急水源地工程)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

所用数据主要取自 2001—2021 年的《北京统计年鉴》《北京市水资源公报》《中华人民共和国国

民经济和社会发展统计公报》。部分指标的评价结果和计算方法同时参考了《北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》(2014—2021 年)、《北京市水务统计年鉴》(2016—2021 年)和《北京市水生态监测及健康评价报告》(2019—2021 年)。由于存在部分指标评价口径不一致和数据缺失的情况,研究的时间集中在 2014—2021 年。

2.2 研究方法

2.2.1 评估指标体系建立

水资源联合调配对整个区域的经济社会产生的影响不是简单的叠加,而是相互制约、相互作用的复杂关系^[16-17]。水资源在人类生产和生活中扮演着重要角色,它是必不可少的生产资料和生活资料,同时参与社会生产和经济消费,对经济发展和社会进步具有推动作用和保障作用。因此,通过参考相关文献^[10, 14, 18-20]以及对北京市水资源调配系统的整体分析,构建包含 1 个目标层、4 个子系统、7 个准则层、25 个具体指标的“系统结构-社会-经济-生态环境”效益评估指标体系,见表 1。这个指标体系涵盖了水资源调配对社会、经济和生态环境效益各个方面的影响,4 个子系统可以较全面地反映水资源调配的综合效益。对于具体的指标的选取,不同的基准会对综合效益评价效果带来显著的影响。在文献调研的基础上,通过指标来源、可获得性和对比分析,综合专家意见最终确定和分类。

为检验指标体系的稳定性和可靠性,需要对指标体系进行一致性检验。以一致性指标(I_C)和一致性比率(R_C)来评估指标体系的一致性。当 $R_C < 0.1$ 时,认为其通过一致性检验^[21]。 I_C 和 R_C 计算公式为

$$I_C = \frac{\lambda - e}{e - 1}, R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (1)$$

式中: λ 为判断矩阵的特征根; e 为指标个数; I_R 为随机一致性指标。

为反映水资源调配系统与结构、经济、社会和生态环境适应性与匹配程度,引入基于洛伦茨曲线的基尼系数作为定量评价水资源联合调配的空间均衡程度,并分别用供用水量负载能力、供用水量与经济匹配度、供用水量与人口匹配度 3 个指标进行表征。其中,以北京市城六区(东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区和石景山区)以及其他 10 区共 11 个行政区作为分析单元开展均衡分析,水资源负载均衡系数基于各行政单元的水资源量负载

表 1 水资源调配综合效益评估指标体系
Tab. 1 Evaluation index system of comprehensive benefit of water resources allocation

目标层	子系统	准则层	指标层	指标定义	指标来源或计算方法	序号	指标性质
水资源调配综合效益评估 ⁴	调配系统结构效应指标 B_1	空间均衡水平 C_1	水资源承载力均衡系数	衡量水资源总量空间分布均衡性的指标	见 2.3.1 节	D_1	负
			供用水量与经济匹配度	供用水量与发展水平之间的匹配程度	见 2.3.1 节	D_2	负
			供用水量与人口匹配度	供用水量与当地人口数量之间的匹配程度	见 2.3.1 节	D_3	负
	社会效益指标 B_2	节水水平 C_3	区域缺水率/%	衡量某一地区的水资源供需缺口程度	计算方法参考相关文献 ^[23]	D_4	负
			万元GDP新水量/ m^3	每产生1万元GDP所需的新增水资源	计算方法参考相关文献 ^[23]	D_5	负
			工业用水重复利用率/%	工业部门对用水进行再利用的比例	《北京市水务统计年鉴》	D_6	正
	经济效益指标 B_3	经济水平 C_4	水力发电价值/亿元	水力发电所带来的经济效益	《北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》	D_7	正
			景观增值价值/亿元	自然景观或人工景观对环境和经济的增值效应	《北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》	D_8	正
			文化旅游服务价值/亿元	文化旅游产业对经济和社会的贡献价值	《北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》	D_9	正
		用水效益 C_5	生活用水效益/亿元	居民生活中用水的经济效益	计算方法参考相关文献 ^[24]	D_{10}	正
农业用水效益/亿元			农业生产中用水的经济效益	计算方法参考相关文献 ^[24]	D_{11}	正	
工业用水效益/亿元			工业生产中用水的经济效益	计算方法参考相关文献 ^[24]	D_{12}	正	
第三产业用水效益/亿元			服务业中用水的经济效益	计算方法参考相关文献 ^[24]	D_{13}	正	
生态环境本底 C_6	I~III类深层水占比/%	不同水质等级的深层水在总水量中的比例	《北京市水资源公报》	D_{14}	正		
	I~III类浅层水占比/%	不同水质等级的浅层水在总水量中的比例	《北京市水资源公报》	D_{15}	正		
	I~III类水质河长占比/%	不同水质等级的河流长度在总河流长度中的比例	《北京市水资源公报》	D_{16}	正		
	I~III类水质湖泊占比/%	不同水质等级的湖泊面积在总湖泊面积中的比例	《北京市水资源公报》	D_{17}	正		
	健康等级水体占比/%	符合健康水体等级标准的水体在总水体中的比例	《北京市水生生态监测及健康评价报告》	D_{18}	正		
生态环境效益指标 B_4	生态环境治理 C_7	水体健康指数	综合评价水体健康状况的指标	《北京市水生生态监测及健康评价报告》	D_{19}	正	
		生态清洁小流域达标率/%	小流域内生态环境达到规定标准的比例	《北京市水务统计年鉴》	D_{20}	正	
		地下水超采程度	地下水开采量超过可再生水资源的程度	计算方法参考相关文献 ^[25]	D_{21}	负	
		生态环境用水量/ m^3	用于维持生态环境需要的水资源量	《北京市水资源公报》	D_{22}	正	
	水源涵养价值/亿元	河湖补水占用水量比例/%	用于河湖补给的水量占总用水量的比例	《北京市水务统计年鉴》	D_{23}	正	
		预防地面沉降效益/亿元	合理用水措施预防地面沉降所带来的经济效益	计算方法参考相关文献 ^[26]	D_{24}	正	
		水源涵养价值/亿元	水源地对保护水资源和维持生态系统的贡献价值	《北京都市型现代农业生态服务价值监测公报》	D_{25}	正	

指数计算基尼系数得到^[27]。基尼系数计算公式为

$$G = 1 - \frac{1}{f} \left(2 \sum_{i=1}^{f-1} y_i + 1 \right) \quad (2)$$

式中: G 为基尼系数; y_i 为每个计算指标从第 1 组累计到第 i 组的总和占全部总量的百分比; f 为组数。

基于基尼系数的区域水资源空间均衡评价模型进一步用于分析水资源供用水量与人口和经济匹配度的空间均衡状态。其中, 水资源供用水量与人口、GDP 基尼系数的求解采用梯形面积法, 公式为

$$G_i = 1 - \sum_{i=1}^f (x_i - x_{i-1})(y_i + y_{i-1}) \quad (3)$$

式中: G_i 为 GDP 基尼系数; x_i 为人口或经济累计百分比; y_i 为水资源量累计百分比; i 为分配对象, 且当 $i=1$ 时, (x_{i-1}, y_{i-1}) 视为 $(0, 0)$; f 为组数。按照国际惯例, 通常把基尼系数等于 0.4 作为收入分配水资源是否均衡的“警戒线”, 基尼系数 ≥ 0.5 则表示“不均衡”。水资源基尼系数等级划分见表 2。

表 2 水资源基尼系数等级划分
Tab. 2 Water resources Gini coefficient classification

等级	基尼系数	均衡情况
I	[0,0.2]	均衡
II	(0.2,0.3]	较均衡
III	(0.3,0.4]	临界
IV	(0.4,0.5]	较不均衡
V	(0.5,1.0]	不均衡

2.2.2 指标权重确定

指标权重直接影响多指标综合评价结果, 因此确定指标权重的合理性显得尤为重要。根据主观赋权法和客观赋权法两大类^[20, 28-30]。然而, 这两种方法各自存在一些利弊。因此, 为了解决这一问题, 综合权重法应运而生。主观方法在确定指标权重时容易受到人的主观因素的影响, 从而导致评价结果的偏差。相比之下, 熵值法可以反映指标权重的无序化程度, 以尽量消除人为干扰, 使评价结果更加客观和实际。综合权重法的应用不仅能反映客观情况, 还能体现专家组对评价指标的偏好^[31-32]。

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵值法(entropy method, EM)分别求解各项指标的权重, 将两种方法得到的权重进行耦合, 从而得到各个指标的综合权重。该加权模型不仅降低了人为因素的影响, 还增加了评价过程的可控性。

计算步骤如下:

采用极值法对指标进行标准化处理。由于各个评价指标的量纲不同, 需要对其原始数据进行标准化处理, 使得数据在相同的范围内。根据不同评价指标的性质, 将评价指标分为成本型和效益型两类。

成本型指标:

$$b_{ij} = \frac{a_{\max} - a_{ij}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (4)$$

效益型指标:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (5)$$

式(4)和(5)中: a_{\max} 为上限阈值, 取北京市相应指标的最大值; a_{\min} 为下限阈值, 取北京市相应指标的最小值; a_{ij} 、 b_{ij} 分别为指标的原始值和标准值, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$, m 和 n 分别为评价指标和评价对象的个数。

根据熵的定义确定评价指标的熵值 H_j 以及熵权 w_j^* 。计算公式为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}} \ln \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}} \quad (6)$$

$$w_j^* = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (7)$$

计算评价指标的综合权重 W 。公式为

$$W = (w_j)_{1 \times n} = \left(\frac{w_j w_j^*}{\sum_{j=1}^n w_j w_j^*} \right)_{1 \times n} \quad (8)$$

式中: w_j 为评价指标的 AHP 权重。

2.2.3 综合效益评估

综合效益指数是由何理等^[14]提出的一种评估方法, 用于衡量水系连通工程对不同空间尺度区域的综合效益。本文通过综合效益指数来分析水资源调配工程对不同时空尺度区域的综合效益评估。基于主观赋权评估法与客观赋权评估法相耦合的加权模型计算得到各项指标权重, 将 4 个子系统中的指标及其权重代入计算模型中, 导出综合效益指数 I_{CE} ^[14, 33]。计算公式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (9)$$

$$I_{CE} = g[f(x)] = \sum_{j=1}^m a_j f(x), \sum_{j=1}^m a_j = 1 \quad (10)$$

式(9)和(10)中: a_i 为第 i 个指标在某子系统中所占的权重; b_i 为第 i 个指标的标准化指数; a_j 为第 j 个子系统的权重; $f_j(x)$ 为第 j 个子系统的连通效益指数。

3 结果与分析

3.1 水资源供用水结构变化

由图 1(a)可知,2001—2021 年地下水一直是北

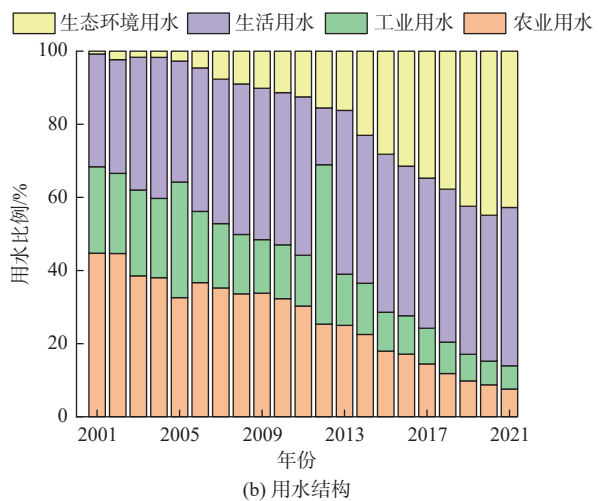
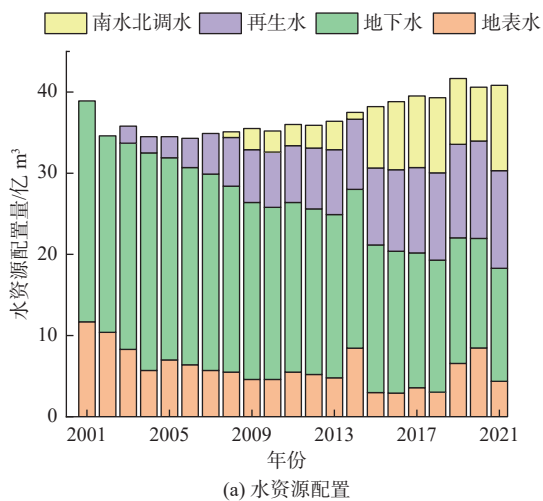


图 1 北京市水资源配置与用水结构

Fig. 1 Water resources source and water using structure of Beijing

伴随产业结构的调整、节水工作的开展及生态环境的保护,北京市的用水结构整体上呈工农业用水量下降、生活和环境用水量增长的趋势,见图 1(b)。

2008 年 9 月南水北调中线京石段工程通水,实现冀水进京。2014 年 12 月南水北调中线一期工程全面通水,北京市中心城区逐步形成以南水北调水为主要水源,本地地表水和地下水相结合的多水源保障格局。

水资源调配工程改变了可利用水资源量的时空分布,从而改善了北京市水资源短缺的状况。根据北京市各行政区供用水量负载能力分析(图 2)可知,基尼系数近年来基本呈现下降的趋势,水资源负载的空间均衡状态得到显著提升,特别是 2011 年之后,北京市水资源负载能力一直处于均衡或较均衡的状态,表明水资源调配工程发挥了积极的作用。结合 2010—2021 年供用水量与社会经济发展匹配程度的空间均衡分析结果,北京市水资源供用水与经济发展的适配程度要优于其与人口的匹配度,而其均衡系数在处于临界和较不均衡的区间波动。一方面,北京市城六区较为集中的人口和经济总量导致较大的空间差异;另一方面,变化水情下水资源

京市的主要水源。南水北调中线一期工程通水后,地下水用量虽有所下降,但仍占有较大比重(2021 年占供水总量的 34.1%)。近年来再生水利用量大幅增长(2021 年占 29.5%),受水情变化的影响,2021 年地表水供水量为 4.37 亿 m^3 ,南水北调中线工程供水量为 10.51 亿 m^3 。

调配系统服务范围的不同会带来各行政区水资源使用策略的变化,即各行政区水资源利用结构存在显著差异。

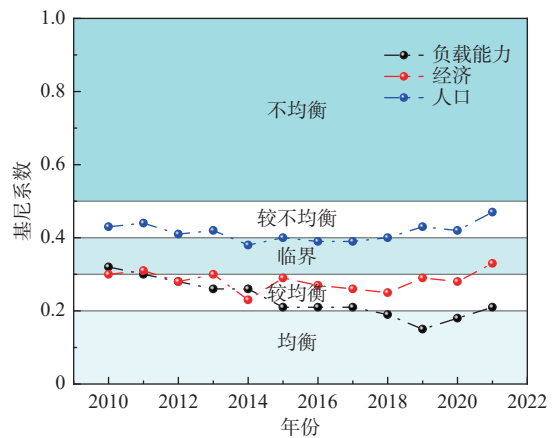


图 2 2010—2021 年北京市区域供用水量与负载能力、经济、人口的空间均衡分析

Fig. 2 Spatial equilibrium analysis of water supply and consumption, load capacity, economy and population in Beijing from 2010 to 2021

3.2 评价指标权重分析

分别计算调配系统结构、社会影响、经济影响、生态环境 4 个子系统以及 7 个准则层的一致性比率 R_c ,分析指标体系内部一致性可信度。结果见表 3。

表 3 评估指标体系内部一致性检验结果

Tab. 3 Test results of the internal consistency of the evaluation indicator system

子系统		准则层		指标数
指标	R_c	指标	R_c	
调配系统结构指标	0	空间均衡水平	0	3
社会影响指标	0	缺水水平	0	1
		节水水平	0	2
经济影响指标	0	经济水平	0.008 85	3
		用水效益	0.080 75	4
生态环境指标	0	生态环境本底	0.016 44	8
		生态环境治理	0.010 38	4

由表 3 可知,北京市水资源调配工程综合效益评估体系中,不论是调配系统结构、社会、经济以及生态环境 4 个子系统还是 7 个准则层的指标体系,

表 4 北京市水资源调配的综合效益评估指标体系及权重

Tab. 4 Evaluation index system and weight of comprehensive benefit of water resources allocation in Beijing

目标层	子系统	准则层	指标层	指标性质	权重		
					综合	AHP	EM
水资源调配 综合效益评估	调配结构特征指标	空间均衡水平	水资源负载能力均衡系数	负	0.325 2	0.328 6	0.330 0
			供用水量与经济匹配度	负	0.409 7	0.407 1	0.335 6
			供用水量与人口匹配度	负	0.265 1	0.264 3	0.334 4
	社会影响指标	缺水水平	区域缺水率	负	1.000 0	1.000 0	1.000 0
			万元GDP新水量	负	0.667 7	0.666 7	0.501 1
		节水水平	工业用水重复利用率	正	0.332 3	0.333 3	0.498 9
	经济影响指标	经济水平	水力发电价值	正	0.091 8	0.163 8	0.221 7
			景观增值价值	正	0.721 0	0.538 9	0.529 2
			文化旅游服务价值	正	0.187 2	0.297 3	0.249 1
		用水效益	生活用水效益	正	0.305 4	0.419 5	0.183 3
			农业用水效益	正	0.470 7	0.248 1	0.477 7
			工业用水效益	正	0.131 9	0.195 4	0.169 9
	生态环境指标	生态环境本底	第三产业用水效益	正	0.092 0	0.137 0	0.169 1
			I~III类深层水占比	正	0.146 3	0.185 3	0.088 8
			I~III类浅层水占比	正	0.208 1	0.185 3	0.126 3
			I~III类水质河长占比	正	0.050 4	0.040 9	0.138 5
			I~III类水质湖泊占比	正	0.053 6	0.040 9	0.147 3
		生态环境治理	健康等级水体占比	正	0.092 3	0.065 0	0.159 8
			水体健康指数	正	0.151 1	0.105 4	0.161 2
			生态清洁小流域达标率	正	0.077 9	0.098 1	0.089 3
			地下水超采程度	负	0.220 4	0.279 2	0.088 8
			生态环境用水量	正	0.199 7	0.089 6	0.458 0
			河湖补水占用水总量比例	正	0.079 0	0.089 6	0.181 2
	生态环境治理	预防地面沉降效益	正	0.279 1	0.319 1	0.179 7	
		水源涵养价值	正	0.442 2	0.501 7	0.181 1	

R_c 值均在 0.1 以下,表示指标体系内部一致性程度甚佳^[34],各个影响层面间的指标具有独立性,从而表明构建的北京市水资源调配的综合效益评估指标体系具有良好的可信度。

北京市水资源调配的综合效益评估指标的指标值和权重见表 4 和表 5,其中各评价指标权重由式(4)至(8)计算得到。计算得到调配系统结构指标、社会影响指标、经济影响指标、生态环境指标的综合权重分别为 0.390 6、0.284 1、0.064 6、0.260 7。相比于经济影响层面,水资源调配对社会影响、生态环境以及调配系统结构的权重较大,其中,调配系统结构所占权重最大。因此,北京市水资源调配方案的有效实施对社会、生态环境以及系统结构的影响更加重要。

表 5 北京市水资源调配的综合效益评价指标体系各子系统及准则层权重

Tab. 5 The evaluation index system of comprehensive benefit of water resources allocation in Beijing and the weight of each subsystem and criterion layer

目标层	子系统	综合权重	AHP	EM	准则层	权重		
						综合	AHP	EM
水资源调配 综合效益评估	调配系统结构指标	0.390 6	0.294 0	0.379 7	空间均衡水平	1	1	1
	社会影响指标	0.284 1	0.374 8	0.183 8	缺水水平	0.551 2	0.545 5	0.505 8
					节水水平	0.448 8	0.454 5	0.494 2
	经济影响指标	0.064 6	0.199 2	0.078 6	经济水平	0.627 3	0.384 6	0.729 2
					用水效益	0.372 7	0.615 3	0.270 8
	生态环境指标	0.260 7	0.176 6	0.357 9	生态环境本底	0.977 7	0.677 4	0.954 2
					生态环境治理	0.022 3	0.322 6	0.045 8

3.3 效益指数时空特征分析

北京市水资源调配工程在系统结构、社会影响、经济影响和生态环境影响 4 个维度的效益指数及综合效益指数变化趋势见图 3。由于早期的数据获取存在困难,故仅对 2014 年、2018—2021 年的数据进行分析。从图 3 可以看出,水资源调配在不同维度的效益呈现不同的影响和作用。由图 3(a)可知:生态环境效益指数呈现显著增加的趋势,这表明近几年北京市水资源调配对生态环境的保护和改善效果十分明显;系统结构效益指数也呈现增加趋势,尤其是在 2020—2021 年增加较快,说明北京市水资源调配的实施显著提升了水资源空间均衡状态;社会影响效益指数在 2018 年的值相对 2014 年增加了 0.834 0,并在 2018 年之后持续增加,到 2020 年

达到峰值 0.995 7;经济影响效益系数的变化相对稳定,先减小后缓慢增加,2021 年的经济效益与 2014 年南水北调中线工程通水时的水平相当,表明水资源调配随着政策变化对经济效应的影响在一定时期内可能减弱,但随着工程的推进和经济适应能力的提高,经济影响逐渐增加;综合效益指数从 2014 年的 0.168 9 增加到 2018 年的 0.477 4,并且在 2018 年之后持续增加,到 2021 年达到峰值 0.882 0。尽管北京市水资源调配的实施效果对经济、社会和生态环境产生了非一致性影响,但综合效益(I_{CE})的变化却得到了显著的改善,这进一步说明近年来北京市水资源调配的实施对城市可持续发展起到了积极作用。

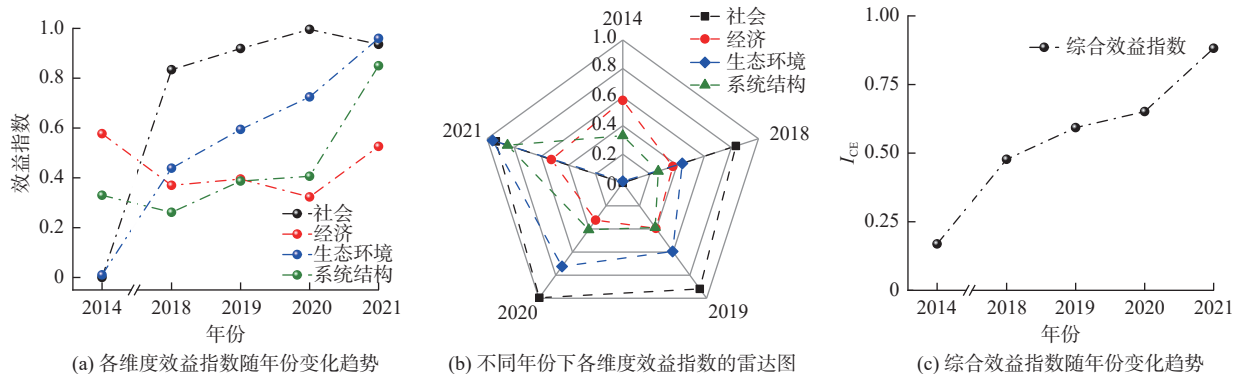


图 3 2014 年、2018—2021 年北京市水资源调配各维度效益指数及综合效益指数变化

Fig. 3 Changes of the effect index and comprehensive effect index of water resources allocation in each dimension in Beijing in 2014 and from 2018 to 2021

4 结论

本文构建了城市水资源联合调配综合效益的定量评估体系,对北京市 2014—2021 年的水资源调配与利用的实施效果进行了分析与评价,得到以下

结论:

分别从系统结构-社会-经济-生态环境多个维度系统反映了水资源调配的综合效益,北京市水资源调配对社会经济效果综合评价的影响明显的维度依次为调配系统结构指标、社会影响指标、生态环

境指标、经济影响指标。

城市水资源调配有效改善了北京市水资源承载能力的均衡状态,但由于经济、人口显著的空间差异以及变化水情的影响,水资源供用水与经济社会发展的适配度呈现较明显的分异特征,而区域供用水量与人口匹配度的空间不均衡性更为突出。

2014—2021 年北京市水资源调配系统的结构均衡效益指数和生态环境效益指数表现出显著增加的变化趋势,但经济影响和社会影响效益的变化不明显。尽管水资源调配产生的多个维度的效益呈现非一致性变化,但综合效益的逐年提升表明近年来北京市水资源调配的实施对城市可持续发展起到了积极的促进作用,城市品质得到全面提升。

参考文献:

- [1] 国家水网建设规划纲要[J]. 中国水利, 2023, (11): 1-7.
- [2] 吕素冰. 水资源利用的效益分析及结构演化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [3] BILALOVA S, NEWIG J, TREMBLAY-LéVESQUE L-C, et al. Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 343: 118179-118189. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118179.
- [4] 刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 635-644.
- [5] 袁伟, 郭宗楼, 楼章华. 黑河流域水资源调配评价的投影决策分析方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 76-82.
- [6] 彭博, 方虹, 李静, 等. 中国区域经济-社会-环境的耦合协调度发展研究[J]. 生态经济, 2017, 33(10): 43-47, 75.
- [7] 吕学研, 吴时强, 张咏, 等. 调水引流工程生态与环境效应研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 38-45. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.04.08.
- [8] 郭丽峰, 张辉, 刘明喆, 等. 农村河道综合整治生态环境效益评估体系研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(5): 474-480. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2018.05.013.
- [9] 冯晓晶, 金科, 梁忠民, 等. 引江济太工程调水效益评估[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(6): 135-138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2012.06.039.
- [10] 席清海, 冯平. 引黄济津应急调水的费用效益分析[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2012, 14(5): 396-400.
- [11] 朱诗洁, 毛劲乔, 戴会超. 资料缺乏地区水系连通工程效益评价方法研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(2): 12-19. DOI: 10.11660/slfdx.20210202.
- [12] 常文娟, 梁忠民, 冯晓晶. 调水工程对区域产业用水系统协调性影响研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(5): 19-22. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05019.
- [13] MATETE M, HASSAN R. An ecological economics framework for assessing environmental flows: The case of inter-basin water transfers in Lesotho[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2): 193-200. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.10.012.
- [14] 侯爱冰, 李长春, 聂龔, 等. 甘肃省水资源利用与经济增长的脱钩效应及驱动因素分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(5): 55-64. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.006.
- [15] DELAVAR M, EINI M R, KUCHAK V S, et al. Model-based water accounting for integrated assessment of water resources systems at the basin scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154810-154820. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154810.
- [16] ABDI-DEHKORDI M, BOZORG-HADDAD O, CHU X. Development of a combined index to evaluate sustainability of water resources systems[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(9): 2965-2985. DOI: 10.1007/s11269-021-02880-w.
- [17] ZARE F, ELSAWAH S, IWANAGA T, et al. Integrated water assessment and modelling: A bibliometric analysis of trends in the water resource sector[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 765-778. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.031.
- [18] 孙月峰, 张表志, 闫雅飞, 等. 基于熵权的城市水资源安全模糊综合评价研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(1): 87-91. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.01.022.
- [19] 王栋, 梁忠民, 常文娟, 等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1): 35-40. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.008.
- [20] SUN H, WANG S, HAO X. An improved analytic hierarchy process method for the evaluation of agri-

- cultural water management in irrigation districts of north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 324-337. DOI: [10.1016/j.agwat.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.002).
- [21] TAVANA M, SOLTANIFAR M, SANTOS-ARTEAGA F J. Analytical hierarchy process: Revolution and evolution[J]. *Annals of Operations Research*, 2023, 326(2): 879-907. DOI: [10.1007/s10479-021-04432-2](https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2).
- [22] 刘业伟, 雷声, 汪国斌. 基于缺水率模型的蓄水型水田灌区旱情预报[J]. *人民长江*, 2017, 48(3): 39-43. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.03.008](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.03.008).
- [23] XIANGMEI M, LEPING T, CHEN Y, et al. Forecast of annual water consumption in 31 regions of China considering GDP and population[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 27: 713-736. DOI: [10.1016/j.spc.2021.01.036](https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.036).
- [24] 王煜, 周翔南, 彭少明, 等. 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置[J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 336-348. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.002](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.002).
- [25] 陈飞, 羊艳, 史文龙, 等. 河北省地下水超采综合治理农业措施压采效果与技术经济性分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 1019-1026. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0101](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0101).
- [26] 杨丽, 朱启林, 孙静, 等. 北京市南水北调中线工程供水效益评估[J]. *人民长江*, 2017, 48(10): 44-46, 78. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.10.010](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.10.010).
- [27] 黄锋华, 黄本胜, 邱静. 基于均衡系数的广东省水资源空间均衡研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(5): 86-93. DOI: [10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.06.04.2020d024](https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.06.04.2020d024).
- [28] JI J, QU X, ZHANG Q, et al. Predictive analysis of water resource carrying capacity based on system dynamics and improved fuzzy comprehensive evaluation method in Henan Province[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(7): 500-509. DOI: [10.1007/s10661-022-10131-7](https://doi.org/10.1007/s10661-022-10131-7).
- [29] CUI Y, FENG P, JIN J, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. *Entropy*, 2018, 20(5): 359-369. DOI: [10.3390/e20050359](https://doi.org/10.3390/e20050359).
- [30] LV H, GUAN X, MENG Y. Comprehensive evaluation of urban flood-bearing risks based on combined compound fuzzy matter-element and entropy weight model[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(2): 1823-1841. DOI: [10.1007/s11069-020-04056-y](https://doi.org/10.1007/s11069-020-04056-y).
- [31] ZHOU K. Comprehensive evaluation on water resources carrying capacity based on improved AGA-AHP method[J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(5): 103-111. DOI: [10.1007/s13201-022-01626-2](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01626-2).
- [32] 张杰, 李建林, 李恩宽, 等. 基于 EWM-AHP-DEMATEL 模糊评价模型的区域水资源承载力研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 46-59. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.005](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.005).
- [33] XU Y, YANG L, ZHANG C, et al. Comprehensive evaluation of water ecological environment in watersheds: A case study of the Yangtze River Economic Belt, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(11): 30727-30740. DOI: [10.1007/s11356-022-24333-6](https://doi.org/10.1007/s11356-022-24333-6).
- [34] GOLDEN B L, WASIL E A, HARKER P T J A, et al. The analytic hierarchy process[M]. Berlin, Heidelberg: Applications and Studies, 1989.

Comprehensive benefit assessment of multiple water resources allocation and utilization: A case study of Beijing City

ZHENG Wenting¹, HAN Jingcheng¹, WU Yingju¹, ZENG Jiewei¹, WEI Jiahua^{2,3}

(1. *Water Science and Environmental Engineering Research Center, College of Chemical and Environmental Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518055, China*; 2. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Water is the most crucial and fundamental resource for driving social progress. To address the uneven distribution of water resource-related issues and the disparity between population and economic demands, China implemented a national water network project aimed at systematically allocating and efficiently utilizing regional

water resources. The operation of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project significantly enhanced Beijing's water supply system, leading to a multi-source water supply pattern that effectively improved urban water resource security. To tackle the challenges posed by climate change, Beijing proposed various water resource allocation principles to optimize the distribution of water for domestic, industrial, and ecological purposes, supporting the city's rapid development. However, how water resources are allocated, and what are the significant impacts and benefits? Thus, it is imperative to establish a comprehensive evaluation system that thoroughly assesses the beneficial effects of water resource allocation and utilization to enhance the resilience of the urban water resources system scientifically.

This study examined the benefits of multiple water resources joint allocation projects in Beijing using data from 2010 to 2021. This study systematically analyzed the effects of joint allocation and comprehensive utilization of water resources by identifying their impacts on the "structure-society-economy-ecology". An evaluation system of comprehensive benefits was constructed using the comprehensive index evaluation method of entropy weight. The comprehensive benefits of water resources allocation and utilization were analyzed and evaluated, thereby examining the changing characteristics of the benefit index across four dimensions: social impact, economic impact, ecological environment, and system structure.

The results indicated that Beijing's water structure became more resilient according to industrial structure adjustments, the active promotion of water-saving initiatives, and the emphasis on ecological environment protection. Water consumption in the industrial and agricultural sectors has decreased, while in the domestic and environmental sectors has increased. Urban water resource allocation effectively improved the equilibrium state of water resource carrying capacity in Beijing. However, due to significant spatial differences in the economy and population and the influence of changing water conditions, the suitability of water supply for economic and social development exhibited obvious differentiation, leading to a pronounced spatial imbalance between regional water supply and population. The joint allocation of water resources in Beijing had varying degrees of impact on structural balance, social impact, economic impact, and ecological environment benefits, with the ecological environment showing significant improvement. Additionally, the annual enhancement of the comprehensive benefit index indicates that water resource allocation in Beijing has contributed to the city's sustainable development.

In light of the above analysis, to further improve the efficiency and scientific management of water resource allocation in complex water conditions, it is significant to promote the construction of the water resource market system, continuously enhance the water resource management mechanism, and actively involve society communities in the sustainable use of water resources. It is highly recommended that an urban water economic model should be developed to further improve the effectiveness assessment of the urban water resources allocation system and the development of optimization plans .

Key words: water resources allocation; evaluation system; spatial equilibrium; composite index; benefit evaluation