

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2022.0044

翟家齐,赵勇,赵纪芳,等.南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):440-450. ZHAI J Q, ZHAO Y, ZHAO J F, et al. Impact of South-to-North Water Transfer on water competitiveness in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 440-450. (in Chinese)

南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响

翟家齐¹,赵勇¹,赵纪芳^{1,2},付雯琪^{1,3},李海红¹,姜珊¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;2. 河北农业大学城乡建设学院,保定 071001;3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,西安 710065)

摘要:为量化描述南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响,提出基于驱动增长率、刚性需水量、用水效益和用水紧缺程度等4项评价指标的用水竞争力指数模型,分析南水北调不同来水情景下京津冀地区的用水竞争力变化。结果表明:在南水北调来水与本地水联合供水情况下,京津冀地区3个行业的用水紧缺程度得到不同程度的缓解,行业刚性需水量均可得到满足,其中,生活用水紧缺程度降幅最大,工业次之,农业最小;与基准情景 S_0 相比,各受水区在不同情景下的农业、工业和生活用水竞争力指数(water competitiveness index, WCI)平均减小17.3%,缓解了该区域的行业用水竞争压力;在不同来水情景下,京津冀地区用水竞争力指数呈现显著下降趋势,各情景下WCI值平均减小16.1%,区域用水竞争力分布呈现从环渤海湾区和河北南部地区双中心向河北南部单中心转变的特点。

关键词:用水竞争力;京津冀地区;南水北调来水

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



京津冀地区人均水资源量不足全国平均值的1/10,用水竞争激烈,水资源短缺成为影响京津冀协同发展进程中的重要因素^[1]。竞争性用水是一种普遍的社会现象,通常表现为水资源利用在目的、时间和地域等3个方面的矛盾与冲突,其本质是水资源的稀缺性和时空分配不均^[2-3],而工业规模、人口数量及灌溉面积的迅速增长加剧了用水竞争。在供水量有限的条件下,现有水资源无法满足各区域、各行业发展用水需求^[4-6],通过跨流域调水增加供水量是缓解当前水资源短缺的有效途径^[7-8]。南水北调工程作为缓解我国北方地区水资源短缺局面的重要举措,对保障京津冀地区水资源安全、减小用水竞争压力具有重要作

用^[9-10]。2014年12月,南水北调中线工程正式通水,规划南水北调东线工程二期建成后也将向京津冀地区多个城市供水。大规模外调水的进入将显著改变京津冀地区水资源供需格局及行业用水竞争态势,定量分析和掌握南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响对保障区域水资源安全具有重要参考意义^[11-12]。目前国内外对于资源竞争定量分析应用最广泛的是指标体系法,以竞争力的主要影响因素为评价指标,构建多指标评价模型,最后赋权逐级综合得到竞争主体的竞争力量量化值,如TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)法、主成分分析法、聚类分析法、加权平均法等^[13-15]。本文基于用水竞

收稿日期:2021-11-15 修回日期:2022-04-02 网络出版时间:2022-04-11

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220410.1014.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401407);中国水科院创新团队项目(WR0145B622017)

作者简介:翟家齐(1984—),男,河南信阳人,正高级工程师,主要从事平原区水循环模拟、农业节水潜力评估、区域干旱评估等研究。

E-mail:jiaqizhai@163.com

通信作者:赵勇(1977—),男,安徽灵璧人,正高级工程师,主要从事分布式水循环模拟、水资源合理配置与高效利用等研究。E-mail:

zhaoyong@iwhr.com

竞争力的概念,建立用水竞争力评价模型,采用行业和区域用水竞争力指数表征京津冀地区用水竞争力状况,定量分析南水北调在不同来水情景下京津冀地区各行业与区域用水竞争力变化,为区域水资源的协同调配以及水资源的可持续利用提供参考。

1 研究方法

1.1 用水竞争力的概念

用水竞争力的概念目前没有统一的定义,有学者^[16]认为用水竞争力是指由于水资源的短缺和水质不达标等原因导致用水主体的用水需求未得到保障,该用水主体与其他竞争主体相比,具备获得更多的更优质水资源的能力。从用水竞争对象看,可以划分为多种类型,如行业间用水竞争、区域间用水竞争、流域内与跨流域用水竞争、省内与省际用水竞争、国内与国际用水竞争等^[17-18]。以行业用水竞争力和区域用水竞争力为例,生活、工业、农业灌溉、生态环境都离不开水资源的保障,但各行业间水资源所产生的经济效益差别巨大,导致水资源优先流入高收益行业,其背后反映了行业间的用水竞争力差别^[19-20]。行业用水竞争进一步反映到区域层面,区域水资源稀缺无法满足用水需求,造成不同区域之间用水竞争矛盾愈发突出,进而产生用水争夺现象^[21-22],反映了不同地区间的用水竞争力差异。为了更好地刻画和定量描述水资源竞争态势,将用水竞争力定义为用水主体为获得更多水资源以保障其自身生产生活用水、社会经济稳定发展需水以及生态环境健康用水而对有限水资源的吸引和争夺能力,包括竞争主体、利益需求、竞争本质和竞争目标等4个部分。其中:竞争主体是参与用水竞争过程的行政区域、行业(工业、农业、生活等)等用水主体;利益需求是指竞争主体对水资源的需求,如水量、水质、保障时间等;用水竞争力本质是指对水资源的刚性需求程度、用水优先级别、经济效益的综合度量,直接反映了用水主体的竞争力强弱;竞争目标指获取水资源的最终用途或目的,如提高生活质量、获取经济效益或者改善居住环境等。

1.2 用水竞争力评价模型

1.2.1 评价指标筛选及处理

基于用水竞争力的定义及影响因素,选取驱动增长率、刚性需水量、用水效益、用水紧缺程度作为用水竞争力的评价指标,4项指标的含义及计算思路如下。

驱动增长率表征用水量的变化趋势及方向,利用农作物播种面积、工业产值占GDP比重、人口规模等不同行业指标系列值的变化率来表示行业用水的驱动增长率。

刚性需水量是指满足某一地区社会经济发展、居民生产生活和生态环境平衡的最低水量,按行业特点可以分为农业刚性需水量、工业刚性需水量和生活刚性需水量。其中:农业刚性需水量可通过确定作物的调亏灌溉系数,再将作物在生育期的最小需水量减去有效降水来计算,区域农业刚性需水量是不同种类作物的单位面积农业灌溉刚性需水量与其播种面积乘积的求和;工业刚性需水量是指一定时期内生产工艺最先进时,工业生产各环节需水量的总和,此时工业需水量最小即为刚性需水量,某一区域的工业刚性需水量由该区域工业行业的种类数和该行业的产品质量以及生产该产品单位产量的最小需水量的乘积之和来计算;生活刚性需水量是指满足居民日常生活和活动所需的最低水量,区域生活刚性需水量则可表示为人均刚性需水量与人口数的乘积。

用水效益是影响用水竞争力的重要因素,能体现水资源使用之后所产生的经济效益,通过经济产值和用水量的比值来计算。

用水紧缺程度是反映水资源供需关系的指标。当可供水量>刚性需水量时,水资源紧缺程度较低;当可供水量<刚性需水量,水资源紧缺程度较高。计算公式为

$$W_s = \frac{D}{S} = \frac{D}{W_Q \times p} \quad (1)$$

式中: W_s 为用水紧缺程度; D 为刚性需水量, m^3 ; S 为行业可供水量, m^3 ; W_Q 为区域水资源量, m^3 ; p 为该行业的用水结构系数。当用水紧缺程度大于1时,表示本地水资源可供水量小于行业刚性需水量,水资源紧缺程度较高;当用水紧缺程度小于1时,表示本地水资源可供水量大于行业刚性需水量,水资源紧缺程度相对较低。其他3项评价指标的具体计算方法及计算公式参照文献^[23]所述,不再赘述。

1.2.2 计算行业用水竞争力指数

为便于量化表达用水主体的用水竞争力强弱,引入用水竞争力指数(water competitiveness index, WCI),构建用水竞争力评价模型,基于所选取的评价指标计算不同主体的WCI值,本文基于评价指标计算农业、工业和生活的行业用水竞争力指数。WCI值的计算参考人类发展指数的改进计算方法,

将所选指标序列进行标准化处理,经几何平均、算数平均计算得到 WCI 值^[24] 见式(2),该方法实现了对

$$I_{WC_j} = \frac{Y_1^{N-1} \sqrt{Y_2 Y_3 \cdots Y_N} + Y_2^{N-1} \sqrt{Y_1 Y_3 \cdots Y_N} + \cdots + Y_N^{N-1} \sqrt{Y_1 Y_2 \cdots Y_{N-1}}}{\sum_{i=1}^N Y_i} \quad (2)$$

式中: I_{WC_j} 为 j 行业的 WCI 值; N 为评价选取的指标数量; Y_i 为采用第 i 项评价指标值,需要先分类进行标准化处理,将各指标值换算到 0~1。其中正向指标采用式(3)计算,逆向指标采用式(4)计算。以农业用水竞争力值计算为例,第一步计算农业用水的驱动增长率、刚性需水量、用水效益、用水紧缺程度各项评价指标值,第二步将单项指标值代入式(3)或(4)进行标准化处理,第三步采用式(2)计算得到农业用水竞争力指数值。

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

$$y_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: x_i 、 y_i 分别表示指标系列值和标准化系列值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别表示 x 指标系列的最大值与最小值,具体计算参照对人类绿色发展指数测算时采用的处理方法^[25],取第 95 个百分位为最大值,第 5 个百分位为最小值,使所有取值都在可信区间之内,并去除变化异常的值,以免对评价结果产生影响。对于正向指标,若其值大于第 95 个百分位值则取 1,若小于第 5 个百分位值则取 0,逆向指标的处理则相反。

1.2.3 计算区域用水竞争力指数

将区域内各行业用水竞争力指数累加,即得到区域用水竞争力指数,以此来表示不同地区的区域用水竞争力强弱。

$$I_{WC_r} = I_{WC_1} + I_{WC_2} + I_{WC_3} \quad (5)$$

式中: I_{WC_1} 、 I_{WC_2} 、 I_{WC_3} 分别为农业、工业和生活用水竞争力指数; I_{WC_r} 为不同区域的综合用水竞争力指数。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

京津冀地处我国华北地区,西北多高山丘陵、东南部为平原,区域总面积 21.8 万 km^2 。京津冀地区是我国水资源短缺矛盾最为突出的区域之一,根据《2018 年中国水资源公报》,2018 年京津冀地区水资源总量为 217.2 亿 m^3 ,仅占全国水资源总量的 0.79%,人均水资源量 192.6 m^3 ,不足全国平均的 1/10,而同年京津冀地区用水总量 250.1 亿 m^3 ,其中农业用水 135.3 亿 m^3 、工业用水 27.8 亿 m^3 、生活用水 53.6 亿 m^3 、生态用水 33.5 亿 m^3 ,现状用水

不同指标的动态客观赋权,避免主观赋权人为因素的干扰。

总量远超本地水资源量,区域间、行业间用水竞争十分激烈,水资源供需矛盾已成为经济社会发展的关键性约束,超采地下水和跨流域调水成为缓解该地区水资源短缺的主要途径。自 2014 年南水北调中线一期工程正式通水后,北京、天津、河北、河南等沿线城市供水不足问题得到了一定程度的缓解。截至 2018 年调水年度结束,南水北调中线一期工程累计向京津冀地区输水 107.9 亿 m^3 ,其中北京市 40 亿 m^3 、天津市 33.9 亿 m^3 、河北省 34 亿 m^3 (<https://www.nsbdl.cn>);根据南水北调工程总体规划,除中线工程外,东线一期北延工程和二期工程也担负着向京津冀地区增加供水的功能,对于进一步缓解区域用水紧张具有重要意义。

2.2 数据来源

研究所采用的水资源数据资料引自中国水资源公报、京津冀三地的水资源公报及河北省部分地市水资源评价成果。气象数据资料采用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)国家气象站点逐日观测数据,社会经济数据资料采用京津冀三地经济统计年鉴的公开资料。受不同口径数据资料序列完整性的限制,省级行政区数据采用 2001—2015 年序列,地市行政区数据采用 2005—2015 年序列。南水北调中线及东线工程向京津冀地区调配水量参考《南水北调工程总体规划》《南水北调东线后续工程规划总体方案》《南水北调东线一期工程向北延伸应急供水方案研究报告》,供用水的分配原则及次序也按照规划确定的方案,优先满足城市生活及工业用水。

3 南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响

3.1 方案设置

为了定量分析南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响,根据《南水北调工程总体规划》《南水北调东线后续工程规划总体方案》,设置 4 种来水情景方案,对比分析调水后京津冀地区用水竞争力指数变化。其中:以 2015 年作为基准情景(S_0),代表调水前的用水状态; S_1 为中线一期工程调水情景,规划向京津冀地区生活、工业、农业供水 46.3 亿 m^3 ; S_2 为在中线一期工程基础上叠加考虑东线二期后续工程调

水情景,规划向京津冀地区输水 70.3 亿 m^3 ; S_3 为中线二期工程叠加东线二期后续工程调水情景,规划向京津冀地区输水 85.2 亿 m^3 。为保障不同方案的可比性,假定各情景方案的驱动增长率、刚性需水量和用水效益指标保持现状情景不变,重点比较分析不同调水情景下用水紧缺程度的变化,以此反映南水北调来水对京津冀地区用水竞争力的影响。根据规划,研究区各市及不同行业分水情况见表 1。

表 1 南水北调工程不同情景方案京津冀各行业分水情况

Tab. 1 Different scenarios of the South-to-North Water Transfer Project, the water distribution of each industry in Beijing, Tianjin and Hebei

行业	区域	S_0	S_1	S_2	S_3
		刚性需水/ 亿 m^3	调入水量/ 亿 m^3	调入水量/ 亿 m^3	调入水量/ 亿 m^3
农业 用水	北京市	1.7	1.2	1.9	2.7
	天津市	4.6	3.0	5.9	5.9
	石家庄市	11.2	4.8	4.8	6.9
	唐山市	6.2	0	0	0
	秦皇岛市	0.6	0	0	0
	邯郸市	11.5	1.1	1.1	2.5
	邢台市	13.2	1.6	2.8	4.1
	保定市	11.1	3.8	3.8	5.6
	张家口市	4.1	0	0	0
	承德市	1.0	0	0	0
	沧州市	9.3	3.1	4.8	6.0
	廊坊市	4.9	1.9	3.4	4.0
	衡水市	10.1	1.9	3.4	4.6
京津冀	89.5	22.4	31.9	42.3	
工业 用水	北京市	2.1	0.7	1.2	1.6
	天津市	2.8	1.3	2.5	2.5
	石家庄市	1.7	0.8	0.8	1.1
	唐山市	2.8	0	0	0
	秦皇岛市	0.7	0	0	0
	邯郸市	1.4	0.5	0.5	0.5
	邢台市	0.9	0.3	0.6	0.6
	保定市	1.3	0.4	0.4	0.6
	张家口市	0.7	0	0	0
	承德市	1.0	0	0	0
	沧州市	1.1	0.6	0.9	1.2
	廊坊市	0.7	0.2	0.3	0.4
	衡水市	0.7	0.2	0.5	0.5
京津冀	17.9	5.0	7.7	9.0	
生活 用水	北京市	15.7	6.7	12.2	14.3
	天津市	5.0	3.5	6.9	6.9
	石家庄市	3.3	2.0	2.0	2.4
	唐山市	2.4	0	0	0
	秦皇岛市	0.9	0	0	0
	邯郸市	2.9	1.9	1.9	1.9
	邢台市	2.2	1.4	2.9	2.9
	保定市	3.5	1.3	1.3	1.5
	张家口市	1.4	0	0	0
	承德市	1.1	0	0	0
	沧州市	2.3	0.7	1.0	1.3
	廊坊市	1.4	0.4	0.6	0.8
	衡水市	1.4	1.0	1.9	1.9
京津冀	43.5	18.9	30.7	33.9	

3.2 不同来水情景下的用水紧缺程度变化

用水紧缺程度取决于区域需水量与可供水量的匹配程度。基准情景(S_0)下,京津冀地区的刚性需

水总量为 150.5 亿 m^3 ,可供水量 163.1 亿 m^3 ,京津冀地区整体可供水量大于刚性需水量。图 1 为不同调水情景下农业、工业和生活可供水量以及用水紧缺程度的变化情况,分行业来看,生活用水紧缺程度在南水北调工程加大调水后显著降低,保障程度大幅提高,其中:基准情景 S_0 下可供水总量为 32.8 亿 m^3 ,满足率仅为 75.4%,用水紧缺程度达到 1.33,说明生活用水还存在较大缺口,见图 1(a);而在 S_1 、 S_2 、 S_3 调水情景下,分别新增生活可供水量 18.8 亿、30.8 亿、34.0 亿 m^3 ,可供水总量均超过刚性需水总量,刚性需水满足率均达到 100%,用水紧缺程度降至 0.65,这与南水北调来水优先保障城市生活用水直接相关。农业刚性需水和工业刚性需水由于时空差异性大,存在总体满足、局部短缺的问题,4 个情景下区域农业、工业可供水总量均大于其对应的刚性需水总量,通过加大调水则显著改善这一问题,农业用水紧缺程度从 0.83 降至 0.59,降幅在 15.6%~28.1%,工业用水紧缺程度从 0.80 降至 0.57,降幅在 21.1%~28.7%,这一点在后面有更详细的阐述。

从区域变化看:基准情景 S_0 条件下,北京、邢台、石家庄的刚性需水量在 13 个市排名前三,而保定、北京、沧州的可供水量在 13 个市排名前三;邢台、邯郸、衡水是区域内缺水量最大、刚性需水满足率最低、用水紧缺程度指数最大的 3 个城市。在南水北调通水前,京津冀地区形成了以邢台、邯郸、衡水为中心的平原缺水片区,山区的张家口、承德、唐山、秦皇岛等地则供水保障相对安全,用水紧缺程度的空间差异十分显著。根据设定的多个调水情景, S_1 、 S_2 、 S_3 情景的可供水量较 S_0 情景分别增加了 28.4%、43.0%、51.9%(图 2),尤其是天津、邢台、廊坊在 S_3 情景下的可供水量增加最显著,增幅达 121%~125%。随着可供水量的增加,在 S_1 和 S_2 情景下京津冀 13 个市中有 10 个市的刚性用水量得到满足,剩余 3 个市未能满足;在 S_3 情景下,仅有邯郸和邢台的刚性需水量未能得到满足,并且仍然面临较大的用水缺口,刚性需水满足率分别为 73.4%、85.3%。

3.3 行业用水竞争力变化

农业用水竞争力变化。南水北调来水直接或间接增加了农业可利用水资源量,一定程度上缓解了农业用水的紧缺形势,增加调水量促使京津冀各市的农业用水竞争力指数缓慢下降(表 2), S_1 、 S_2 、 S_3 情景下农业用水竞争力指数分别为 0.19、0.18、0.17,与 S_0 相比分别减小了 8.4%、13.0%和 17.0%。从各市变化看,在 S_0 情景下,农业用水紧缺程度及用水竞争力较高地区主要集中在京津冀南部地区,其中邯郸农业

用水竞争力最大(0.81),其次是邢台(0.74)、石家庄(0.68),形成了以邯郸为竞争中心并向周边城市逐渐扩张的态势。增加外调水源后,受水区各市农业用水竞争力指数均呈下降趋势,但变化幅度及排名存在差异性,例如:天津的农业竞争力指数变化幅度最大,从 0.36 降至 0.29,减小了 16%,但区域排名维持不变(第 9 名);其次是廊坊,其农业用水竞争力由 0.55 变为 0.45,减小了 15.9%,竞争力指数排名则较基准情景 S_0 下降 2 位,从第 4 名降为第 6 名,说明外调水在

廊坊增加水源、提升供水保障、缓解用水紧缺方面的作用更为显著;石家庄的农业用水竞争力指数也下降显著,由 0.68 降至 0.57,减小了 13.3%,排名维持不变(第 3 名)。此外,外调水分配结构及区域间相对变化导致保定、唐山的竞争力指数排名产生波动,其中保定在情景 S_2 、情景 S_3 条件下,农业用水竞争力指数排名升高了 3 位,从第 7 名升至第 4 名,说明按照现有的分配方案,保定市的农业用水竞争力相对其他市有所提升。

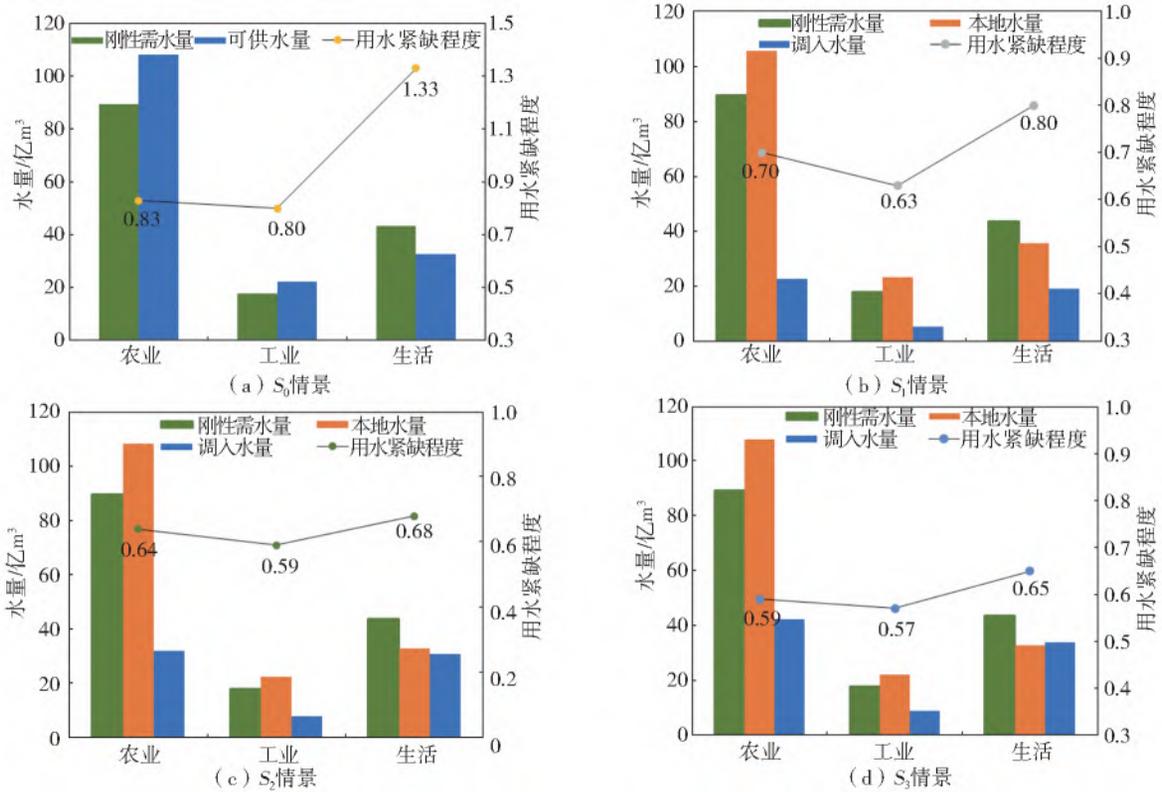


图 1 不同来水情景下各行业可供水量和用水紧缺程度变化

Fig. 1 Changes in water availability and water scarcity in various industries under different water transfer scenarios

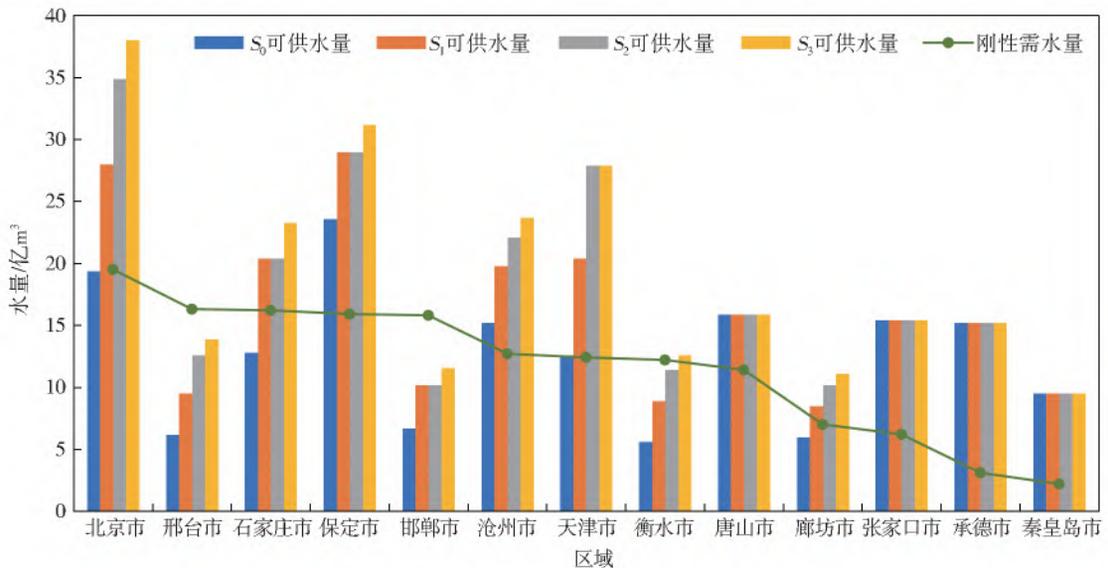


图 2 不同来水情景下京津冀各市可供水量变化

Fig. 2 Changes in water availability of Beijing-Tianjin-Hebei cities under different water transfer scenarios

表2 不同来水情景下京津冀各市农业用水竞争力变化

Tab. 2 Changes in the competitiveness of agricultural water use in Beijing-Tianjin-Hebei cities under different water transfer scenarios

区域	农业用水竞争力指数变化及排名							
	竞争力指数变化图	S ₀ 情景	S ₁ 情景		S ₂ 情景		S ₃ 情景	
	(S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 情景)	排名	排名	变化	排名	变化	排名	变化
邯郸市		1	1	持平	1	持平	1	持平
邢台市		2	2	持平	2	持平	2	持平
石家庄市		3	3	持平	3	持平	3	持平
廊坊市		4	6	↓2	6	↓2	6	↓2
沧州市		5	5	持平	5	持平	5	持平
唐山市		6	4	↑2	7	↓1	7	↓1
保定市		7	7	持平	4	↑3	4	↑3
张家口市		8	8	持平	8	持平	8	持平
天津市		9	9	持平	9	持平	9	持平
衡水市		10	10	持平	10	持平	10	持平
承德市		11	11	持平	11	持平	11	持平
秦皇岛市		12	12	持平	12	持平	12	持平
北京市		13	13	持平	13	持平	13	持平

工业用水竞争力变化。工业用水竞争力指数反映了各市工业生产及其用水格局,在南水北调不同来水情景下,京津冀工业用水竞争力平均降幅为13.5%,多数城市工业竞争压力有所减小(表3)。基准情景 S₀ 条件下,工业用水保障需求主要集中在石家庄、天津、唐山、邯郸等工业比重较大的城市,其中石家庄的工业用水竞争力指数最大,达到0.73,天津、唐山、邯郸依次减少,分别为0.50、0.44、0.35。调水后:天津工业用水竞争力指数降至0.36,减小了27.6%,且排名下降1位;唐山工业用

水竞争力指数虽然也降低,但排名上升1位;沧州工业用水竞争力指数从0.54降至0.47,排名从第7名降至第9名;衡水从第9名升至第7名;石家庄工业用水竞争力指数从0.73变为0.57,减小了18.1%,排名维持不变。总的来看,京津冀地区工业用水总量相对较小,且工业节水普及度最高、节水技术发展最快,京津冀地区整体上工业用水基本得到保障,但石家庄、天津等核心工业城市的工业用水保障存在明显短板,而外调水源的补充对于缓解核心工业城市的用水短缺问题成效显著。

表3 不同来水情景下京津冀各市工业用水竞争力变化

Tab. 3 Changes in the competitiveness of industrial water use in Beijing-Tianjin-Hebei cities under different water transfer scenarios

区域	工业用水竞争力指数变化及排名							
	竞争力指数变化图	S ₀ 情景	S ₁ 情景		S ₂ 情景		S ₃ 情景	
	(S ₀ 、S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 情景)	排名	排名	变化	排名	变化	排名	变化
石家庄市		1	1	持平	1	持平	1	持平
天津市		2	3	↓1	3	↓1	3	↓1
唐山市		3	2	↑1	2	↓1	2	↓1
邯郸市		4	4	持平	4	持平	4	持平
邢台市		5	5	持平	5	持平	5	持平
北京市		6	6	持平	6	持平	6	持平
沧州市		7	9	↓2	9	↓2	9	↓2
廊坊市		8	8	持平	8	持平	8	持平
衡水市		9	7	↑2	7	↑2	7	↑2
秦皇岛市		10	10	持平	10	持平	10	持平
承德市		11	11	持平	11	持平	11	持平
张家口市		12	12	持平	12	持平	12	持平
保定市		13	13	持平	13	持平	13	持平

生活用水竞争力变化。生活用水与人口集聚程度及节水水平息息相关,南水北调不同来水情景下,京津冀的生活用水竞争力指数平均减小了23.5%,在一定程度上缓解了当地的生活用水压力。基准情景 S₀ 条件下,生活用水竞争以天津、北京为中心,向

南延伸到石家庄、邯郸、保定、邢台等地,生活用水保障需求也最为迫切。其中:天津的生活用水竞争力指数最大(0.49,排名第1);其次是北京(0.42,排名第2)。增加外调水源后:天津的生活用水竞争力指数降至0.24(S₃ 情景),排名降至第4名,平均减小了

44.2%;其次是邢台市,生活用水竞争力指数由 0.19 降至 0.12,平均减小了 31.4%;北京的生活用水竞争力指数则降至 0.27(S_3 情景),平均减小了 29.7%。石家庄、邯郸、沧州、廊坊、衡水的生活用水竞争力在

南水北调不同来水情景下平均减小了 22.9%,南水北调来水对缓解京津冀主要城市的生活用水竞争问题成效突出(表 4)。

表 4 不同来水情景下京津冀各市生活用水竞争力变化

Tab. 4 Changes in domestic water competitiveness of cities in Beijing-Tianjin-Hebei under different water transfer scenarios

区域	生活用水竞争力指数变化及排名								
	竞争力指数变化图 (S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 情景)	S_0 情景		S_1 情景		S_2 情景		S_3 情景	
		排名	排名	变化	排名	变化	排名	变化	
天津市		1	2	↓1	4	↓3	4	↓3	
北京市		2	1	↑1	2	持平	2	持平	
石家庄市		3	4	↓1	1	↑2	1	↑2	
唐山市		4	3	↑1	3	↑1	3	↑1	
邯郸市		5	5	持平	5	持平	5	持平	
保定市		6	6	持平	6	持平	6	持平	
沧州市		7	7	持平	7	持平	7	持平	
邢台市		8	8	持平	9	持平	8	持平	
廊坊市		9	9	持平	8	持平	9	持平	
衡水市		10	10	持平	10	持平	10	持平	
秦皇岛市		11	11	持平	11	持平	11	持平	
张家口市		12	12	持平	12	持平	12	持平	
承德市		13	13	持平	13	持平	13	持平	

3.4 区域用水竞争力变化

区域用水竞争力是各行业用水竞争力指数的综合反映。在南水北调不同来水情景下,与 S_0 比较,区域用水竞争力指数 WCI 显著减小, S_1 、 S_2 、 S_3 情景下 WCI 值依次减少 11.5%、16.9%、19.8%,区域用水竞争分布从环渤海湾区和河北南部地区双中心向河北南部单中心转变,此外由于唐山不在南水北调受水区范围,其用水竞争指数一直处于较高状态,需要采取措施予以缓解。从区域用水竞争变化

来看(表 5、图 3),京津冀各市的区域综合用水竞争力分布特点是竞争中心由北京、天津进一步向南扩张,石家庄、邢台和邯郸的竞争力指数进一步增大,其中石家庄的 WCI 值最高。在补充南水北调水后:天津的综合用水竞争力变化率最高,WCI 值的平均减幅为 28.8%;其次是北京,区域综合用水竞争力指数平均下降 24.4%,说明南水北调来水对京津地区用水形势的缓解作用十分显著,也侧面反映了南水北调工程的调水基本达到了预期目的。

表 5 不同来水情景下京津冀地区综合用水竞争力变化

Tab. 5 Changes in the competitiveness of comprehensive water use in the Beijing-Tianjin-Hebei region under different water transfer scenarios

区域	综合用水竞争力指数变化及排名								
	竞争力指数变化图 (S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 情景)	S_0 情景		S_1 情景		S_2 情景		S_3 情景	
		排名	排名	变化	排名	变化	排名	变化	
石家庄市		1	1	持平	1	持平	1	持平	
邯郸市		2	2	持平	2	持平	4	↑2	
天津市		3	4	↑1	4	↑1	2	↓1	
唐山市		4	5	↑1	5	↑1	5	↑1	
邢台市		5	3	↓2	3	↓2	3	↓2	
沧州市		6	6	持平	6	持平	6	持平	
廊坊市		7	7	持平	7	持平	7	持平	
保定市		8	8	持平	9	持平	8	持平	
北京市		9	9	持平	8	持平	9	持平	
衡水市		10	10	持平	10	持平	10	持平	
张家口市		11	11	持平	11	持平	11	持平	
秦皇岛市		12	12	持平	12	持平	12	持平	
承德市		13	13	持平	13	持平	13	持平	

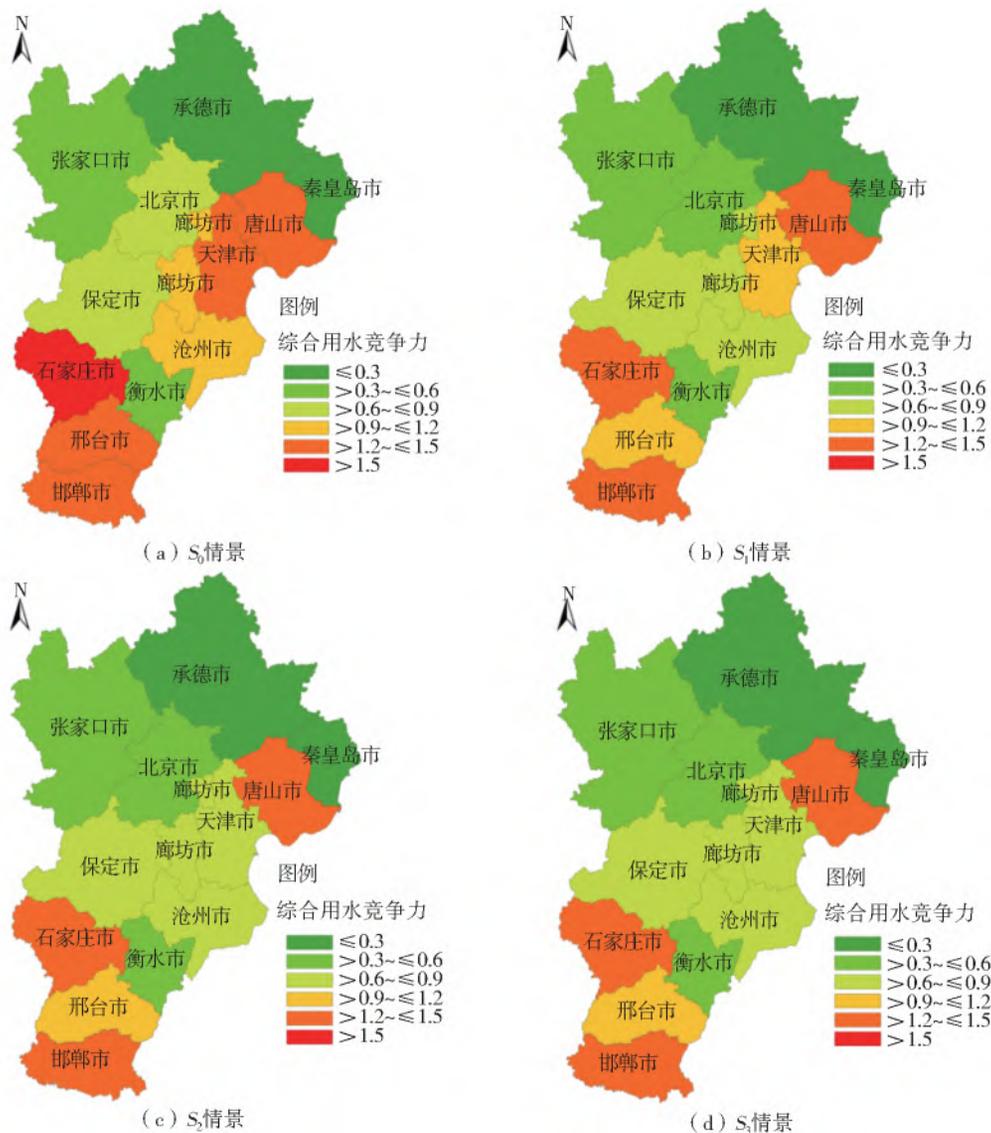


图3 不同来水情景下京津冀地区用水竞争力变化

Fig. 3 Changes in water competitiveness of the Beijing-Tianjin-Hebei region under different water transfer

无论是现状情景还是未来调水情景,用水竞争力指数高值区域都集中在河北省,其中:石家庄综合用水竞争力指数最高, S_0 情景下,区域综合用水竞争力指数 WCI 为 1.70, S_1 、 S_2 、 S_3 情景下 WCI 值分别为 1.42、1.42、1.35,平均减小了 17.8%,但仍然是京津冀地区用水竞争最激烈的地区;其次是邯郸, S_0 情景下的区域综合用水竞争力指数为 1.42, S_1 、 S_2 、 S_3 情景下 WCI 值分别为 1.30、1.30、1.26,平均减幅为 9.5%;沧州在 S_0 情景下的综合用水竞争力指数为 1.02, S_1 、 S_2 、 S_3 情景下 WCI 值降至 0.90、0.84、0.80,平均减小了 16.9%;其他受水城市的综合用水竞争力指数在南水北调供水条件下平均减小了 12.1%。总体来看,南水北调来水虽然并未消除京津冀地区的用水竞争问题,但仍然有力缓解了京津冀地区水资源竞争的紧张状态,协同优化配置京

津冀地区的本地水资源和外调水,对于支撑京津冀地区各行业用水保障及可持续发展具有积极意义。

4 结论

基于构建的用水竞争力指数(WCI)模型,定量分析了南水北调来水对京津冀地区用水竞争态势的影响,京津冀受水区可供水量在南水北调来水后,较基准情景(S_0)平均增加 85%,但邯郸、邢台的刚性需水量在中、东线二期完成后(S_3)仍存在较大的供水缺口,其他受水区域的刚性需水量在南水北调补给情景下均能够得到保障。在南水北调来水与本地水联合供水情况下,生活、工业和农业等 3 个行业的用水紧缺程度得到了不同程度的缓解,行业刚性需水量均可以得到满足,其中:生活用水紧缺程度下降最快;工业次之;农业最小。

分行业看,南水北调增加调水条件下,京津冀各受水城市的行业用水竞争力指数均呈减小趋势。与 S_0 情景相比, S_1 、 S_2 、 S_3 情景下农业、工业、生活用水竞争力指数平均减小了 10.6%、15.1% 和 26.1%。从受水区各行业的用水竞争力指数来看,天津、廊坊的农业用水竞争力指数下降明显,平均减小 15.9%,其农业用水压力得到显著缓解。沧州、天津的工业用水竞争力指数下降较大,平均减小达到 24.3%,在一定程度上缓解了京津冀地区的工业用水压力。北京、天津、邢台的生活用水竞争力指数下降最大,平均减小 35%,说明对京津冀地区的生活用水保障能力提升十分显著。

分区域看,在南水北调工程不同来水情景下,京津冀地区用水竞争力指数呈现显著减小的趋势,各情景下 WCI 值平均减幅为 16.1%,天津、北京两市综合用水竞争力减幅最大,平均减小 26.6%,区域用水竞争分布从环渤海湾区和河北南部地区双中心向河北南部单中心转变,主要用水竞争中心在石家庄、邯郸和邢台,建议在中东线后续工程水量分配中,增加该区域水量指标,缓解河北南部区域用水竞争压力。

总体来看,南水北调工程来水极大的缓解了京津冀地区的用水压力,对京津冀水资源安全保障及可持续发展具有重大意义。

参考文献(References):

- [1] 余灏哲,李丽娟,李九一. 一体化进程中京津冀水资源利用与城市经济发展关系时空分析[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(2):29-39. (YU H Z, LI L J, LI J Y. Temporal and spatial relationships between water resources utilization and urban economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region during integration process [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 29-39. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0031.
- [2] 张春玲,阮本清,刘云,等. 论竞争性用水的经济补偿机制[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005(3): 183-187. (ZHAN C L, RUAN B Q, LIU Y, et al. On the economic compensation mechanism of competitive water use [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005(3): 183-187. (in Chinese)) DOI: 10. 13244/j. cnki. jiwahr. 2005. 03. 005.
- [3] 李曦,杨卫国. 水资源区域竞争与协调[J]. 科技进步与对策,2005(2): 22-24. (LI X, YANG W G. Water re-

sources regional competition coordination [J]. Science and Technology Progress and Countermeasures, 2005 (2): 22-24. (in Chinese)) DOI: 10. 13244/j. cnki. jiwahr. 2005. 03. 005.

- [4] 尚文绣,彭少明,王煜,等. 缺水流域用水竞争与协作关系:以黄河流域为例[J]. 水科学进展,2020, 31(6): 897-907. (SHANG W X, PENG S M, WANG Y, et al. Competition and cooperation relationship of water utilization in water shortage basins: A case study of Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (6): 897-907. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2020. 06. 009.
- [5] 曾勇. 跨界水冲突博弈分析[J]. 水利学报,2011, 42(2): 204-210. (ZENG Y. Game analysis of cross-border water conflicts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 204-210. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 02. 019.
- [6] FARHHAT C, CHRISTOPHER L, BENEDYKT D. A century of water supply expansion for ten U. S. cities [J]. Applied Geography, 2013, 45. DOI: 10. 1016/j. apgeog. 2013. 07. 020.
- [7] 王建华,翟家齐,赵勇. 北京水资源演变形势及应对策略[J]. 中国水利,2012(S1): 15-17. (WANG J H, ZHAI J Q, ZHAO Y. Water resources evolution and countermeasures in Beijing [J]. China Water Resources, 2012(S1): 15-17. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; SLZG. 0. 2012-S1-008.
- [8] ZHONG C, DUAN Q Y, PAT J Y, et al. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126156. DOI: 10. 1016/J. JHYDROL. 2021. 126156.
- [9] 韩雁,张士锋,吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究[J]. 资源科学,2018, 40(11): 2236-2246. (HAN Y, ZHANG S F, LYU A F. Research of effect on water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region by water transfer [J]. Resources Science, 2018, 40(11): 2236-2246. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2018. 11. 10.
- [10] 吴丹. 京津冀地区产业结构与水资源的相关性分析及双向优化模型构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(9): 158-166. (WU D. Correlation analysis and bidirectional optimization model of industrial structure and water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(9): 158-166. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; ZGRZ. 0. 2018-09-018.
- [11] 颜明,贺莉,孙莉英,等. 京津冀产业升级过程中水资

- 源利用结构调整研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 152-156. (YAN M, HE L, SUN L Y, et al. Water resources utilization during the restructuring optimization of industries in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(12): 152-156. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.380.
- [12] 苏心玥,于洋,赵建世,等. 南水北调中线通水后北京市辖区水资源配置的博弈均衡[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(2): 239-251. (SU X Y, YU Y, ZHAO J S, et al. Game analysis of trans-regional water game analysis of trans-regional water resources allocation in Beijing[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(2): 239-251. (in Chinese)) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.02.001.
- [13] 付雯琪. 区域用水竞争演变规律与评价[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018. (FU W Q. Evolutionary law and evaluation of regional water competition [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese))
- [14] 倪鹏飞,赵璧,魏劭琨. 城市竞争力的指数构建与因素分析: 基于全球 500 典型城市样本[J]. 城市发展研究, 2013, 20(6): 72-79. (NI P F, ZHAO B, WEI S K. Index construction and factor analysis of urban competitiveness: Based on a sample of 500 typical cities in the world[J]. Urban Development Studies, 2013, 20(6): 72-79. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-3862.2013.06.011.
- [15] 刘春香,朱丽媛. 浙江省渔业竞争力比较研究[J]. 农业经济问题, 2014, 35(3): 102-109. (LIU C X, ZHU L Y. A Comparative study on fishery competitiveness in Zhejiang Province[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(3): 102-109. (in Chinese)) DOI: 10.13246/j.cnki.iae.2014.03.017.
- [16] 李曦,熊向阳. 水资源区域竞争失范的原因及规制[J]. 求索, 2007(8): 68-70. (LI X, XIONG X Y. Causes and regulations of regional competition anomie in water resources[J]. Seeker, 2007(8): 68-70. (in Chinese)) DOI: 10.16059/j.cnki.cn43-1008/c.2007.08.006.
- [17] 韩叶. 国际河流: 规范竞争下的水资源分配[J]. 外交评论(外交学院学报), 2019, 36(6): 155. (HAN Y. International rivers: Water resource allocation under norm competition[J]. Foreign Affairs Review, 2019, 36(6): 155. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WJXY. 0.2019-06-008.
- [18] 郑军,张永庆,王顺林. 跨境水资源竞争制度模型与竞争行为[J]. 运筹与管理, 2017, 26(8): 45-53. (ZHENG J, ZHANG Y Q, WANG S L. Cross-border water resources competition institutional model and competitive behavior [J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(8): 45-53. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; YCGL. 0.2017-08-007.
- [19] HERMAB B. Urban and agricultural competition for water, and water reuse[J]. International Journal of Water Resources Development, 2015, 9(1): 13-25. DOI: 10.1080/07900629308722570.
- [20] 白鹏,刘昌明. 北京市用水结构演变及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 1-6, 34. (BAI P, LIU C M. Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 1-6, 34. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0090.
- [21] 常玉苗. 区域水资源环境竞争力评价及空间差异研究[J]. 节水灌溉, 2018(2): 88-92. (CHANG Y M. Evaluation of regional water resources environmental competitiveness and spatial differences [J]. Water Saving Irrigation, 2018(2): 88-92. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; JSGU. 0.2018-02-020.
- [22] 侯保灯,肖伟华,赵勇,等. 水资源层次化需求计算与合理配置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 39-42. (HOU B D, XIAO W H, ZHAO Y, et al. Hierarchical demand calculation and reasonable allocation of water resources [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017: 39-42. (in Chinese))
- [23] 翟家齐,赵勇,赵纪芳,等. 用水竞争力指数评价方法及其应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 122-129. (ZHAI J Q, ZHAO Y, ZHAO J F, et al. Evaluation method of water competitiveness index and its application [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 122-129. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200151.
- [24] 陆康强. 要素均衡: 人类发展指数的算法改进与实证研究[J]. 统计研究, 2012, 29(10): 45-51. (LU K Q. Factor balance: Algorithm improvement and empirical research on human development index [J]. Statistical Research, 2012, 29(10): 45-51. (in Chinese)) DOI: 10.19343/j.cnki.11-1302/c.2012.10.007.
- [25] 李晓西,刘一萌,宋涛. 人类绿色发展指数的测算[J]. 中国社会科学, 2014(6): 69-95, 207-208. (LI X X, LIU Y M, SONG T. Calculation of human green development index [J]. Social Sciences in China, 2014(6): 69-95, 207-208. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZSHK. 0.2014-06-004.

Impact of South-to-North Water Transfer on Water Competitiveness in Beijing-Tianjin-Hebei RegionZHAI Jiaqi¹, ZHAO Yong¹, ZHAO Jifang^{1,2}, FU Wenqi^{1,3}, LI Hailong¹, JIANG Shan¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Urban and Rural Construction College, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Beijing-Tianjin-Hebei region is a political and economic center of North China, but its water resources per capita are less than one-tenth of the national average. Water resources competition caused by the contradiction between supply and demand has become a normal situation in this region. The phenomenon of water competition referred to the contradictions and conflicts in the use of water resources in terms of purpose, time and location. Due to water resources scarcity and uneven distribution, the disputes between the Guanting Reservoir and the Miyun Reservoir are the same. Given the limited water supply in this area, it is far from being able to meet the needs of regional development. Through the implementation of the South-to-North Water Transfer Project, China has transferred a part of the water resources from the abundant southern areas to the water-deficient areas in the north. The goal is to alleviate the current outstanding water competition pressure. The transfer of a large number of externally transferred water sources has contributed to ensuring the sustainable development of the social economy and water resources of the Beijing-Tianjin-Hebei. But at the same time, it has also changed regional water supply and demand pattern, directly affecting water competition situation. Therefore, a quantitative analysis of the impact of the South-to-North Water Transfer Project on the competition of water resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region is of great significance to ensure the rational use of regional water resources.

The proposed water competitiveness mainly includes four parts; the main body of the competition, the demand for interests, the nature of the competition, and the objectives of the competition. If the existing water resources can not meet the water needs of all the main water users, the main water users had to obtain more and better water resources through competition to ensure basic production and domestic water use. This kind of water main body's attraction and competition for water resources was defined as regional water competitiveness. The competitiveness of water use was inseparable from factors such as water driving factors, rigid demand, and water efficiency. Therefore, this study used driving growth rate, rigid water demand, water efficiency, and water scarcity as the four evaluation indicators of water competitiveness. The four evaluation indicators of each industry need to be calculated according to formulas to obtain different types of water competitiveness. Then the four evaluation indicators are standardized and substituted into corresponding formulas to calculate the water competitiveness index of each industry. Finally, the water competition index of each industry in the region was added to obtain the regional water competitiveness, to quantitatively analyze the size of the water competitiveness of each industry and region.

Results showed that according to the set of multiple water scenarios (S_1, S_2, S_3), the supply amount of a baseline scenario (S_0) rose more than 20%, respectively, and Beijing-Tianjin-Hebei is tapping to Handan, Xingtai, phase ii of the eastern front in the (S_3), there is still a large gap of water supply, after the completion of other local rigid demand in south-to-north water transfer supply. In addition, compared to S_0 scenario, agricultural, industrial and domestic water competitiveness indices of Beijing-Tianjin-Hebei water-affected cities decreased by 10.6%, 15.1%, and 26.1% on average under S_1, S_2 , and S_3 scenarios, and regional water competitiveness indices decreased by 11.5%, 16.9%, and 19.8%, respectively. Among them, Tianjin and Beijing displayed the biggest decline in their comprehensive, with an average of 26.6%.

Under the combined supply of water from the South-to-North Water Transfer project and the local water resources, the water shortage in the three industries of living, industry, and agriculture has been alleviated to varying degrees. The rigid water demand of all industries can be satisfied, and the domestic water shortage decreases the fastest, followed by industry and agriculture. Compared with the baseline scenario (S_0), the industrial water competitiveness of each water supply area in Beijing-Tianjin-Hebei decreased by 17.3% and the regional water competitiveness decreased by 16.1% on average. In terms of space, the distribution characteristics have changed from a double center in the Bohai Bay Rim and southern Hebei to a single center in southern Hebei. In general, although the water transfer from the south to north does not eliminate the water resource competition problem in Beijing-Tianjin-Hebei region, it still greatly alleviates the water pressure, which is of great significance to the sustainable development of water resources and the optimal allocation of water resources in the region.

Key words: water competitiveness; Beijing-Tianjin-Hebei region; South-to-North Water Project Transfer