

陈星,袁晔,许钦,等.基于外调水调控的水资源承载力空间优化[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(6):1071-1079.CHEN X, YUAN Y, XU Q, et al. Spatial optimisation of water resources carrying capacity based on regulation of external water transfers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1071-1079. (in Chinese)

基于外调水调控的水资源承载力空间优化

陈星¹,袁晔¹,许钦^{2,3,4},张其成⁵,宋兰兰⁵,陈霞⁶

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098;
3. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院, 南京 210029;
5. 河海大学地理与遥感学院, 南京 210098; 6. 江苏省水利数字中心, 南京 210029)

摘要:为解决黄河流域下游城市水资源供需矛盾,实现水资源空间均衡利用,以聊城市为研究对象,引入外调水指标构建水资源承载力评价体系进行现状评价,通过障碍度模型分析区域空间差异形成原因,提出基于外调水调控的水资源承载力空间均衡策略,评估 2035 年不同来水频率下的水资源承载力。结果表明:聊城市水资源承载力空间差异明显,呈现东高西低的分布态势。水资源子系统是空间差异形成的主要原因;经济子系统中的人均 GDP、社会子系统中的城镇化率、生态子系统中的生态环境用水率和地下水开采系数也是重要影响因素。从供需两端进行调控,加强节水并高效利用外调水,对 2035 年水资源承载力的空间差异有明显均衡优化效果。研究成果可为区域水资源优化配置提供参考。

关键词:水资源承载力;空间均衡;外调水;供需调控;受水区

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0106

水资源作为经济社会发展的重要支撑资源^[1],区域发展规模与其相适应是实现持续发展的重要保障^[2]。针对黄河流域水资源供需矛盾突出的问题,要全面贯彻“四水四定”原则,把水资源作为最大的刚性约束,合理规划人口、城市和产业发展,大力发展节水产业和技术,推进产业现代化转型,促进水资源高效利用,提升水资源保障能力^[3-4]。水资源承载力可表征水资源对区域可持续发展的支撑能力,由水资源、经济、社会、生态等多方面因素共同决定^[5-6],是衡量水资源配置合理性的重要指标^[7]。开展水资源承载力研究一直是区域水资源优化利用的重要手段^[8-9]。

目前,国内外学者^[5,10]关于水资源承载力的研究主要集中在评价、预测,以及关键指标的识别和调控。此外,随着“空间均衡”治水理念的提出,有学者针对空间均衡的概念进行了深入探讨^[11],使其具有“表征水资源供需两端在空间分布上的均衡状态”的含义^[12-13]。为解决水资源分布不均与经济社会发展不协调的问题,我国提出实施国家水网建设战略,

通过水源调控实现水资源空间优化,目前已建设多项跨流域调水工程^[14-16]。调水工程对受水区供水时与当地水资源形成了多水源供水格局,可有效缓解缺水地区水资源短缺的压力^[17-19]。已有学者针对水源调控对水资源承载力的影响开展了研究。如: Xie 等^[20]在水资源承载力计算中考虑过境水和外调水的调控作用,结果表明水网工程调配下各地区水资源承载力有不同程度的优化效果。Du 等^[21]提出通过跨流域调水增加流域水资源循环总量并结合节水措施,可实现当地水资源和经济社会的良性平衡。这些研究虽然证实了水资源调控对水资源承载力有优化作用,但对于外调水在不同空间上的均衡调控效果,尤其是在市域的水资源刚性约束下,利用外调水对县级各行政区间进行水资源均衡调控的应用实践较少,亟待开展相关研究。

本文旨在探究水资源刚性约束下基于外调水调控的水资源空间优化方式,以聊城市为研究对象,将外调水指标加入水资源子系统,建立聊城市水资源承载力评价体系,评估当地水资源承载力。通过

收稿日期: 2024-05-21 修回日期: 2024-09-16 网络出版时间: 2024-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240927.1045.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209031); 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010905)

作者简介: 陈星(1980—),女,新疆伊宁人,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理、水环境与水生态保护、湖泊湿地保护等研究。E-mail: chenxing@hhu.edu.cn

障碍度分析识别水资源承载力空间差异的重要影响因素。在此基础上结合外调水的调控作用,从供需两端进行调控,以实现各子区域间水资源承载力空间均衡。研究成果可为受水城市水资源供需调控提供理论参考。

1 研究区概况

聊城市位于黄河下游,地处山东省西部,与河南、河北接壤,是黄河流域生态保护和高质量发展的重要城市,同时也是南水北调东线工程的受水城市。全市总面积 8 628 km²,辖东昌府区、临清市、冠县、莘县、阳谷县、东阿县、茌平区、高唐县 8 个县(市、区)。

聊城水资源匮乏,多年平均降水量为 560 mm,人均当地水资源量占有量仅有 199 m³,是严重缺水地区。降水时空分布不平衡,空间上自东南向西北依次递减,水资源开发利用难度大,需合理利用有限的外调水(黄河水和长江水)。目前全市对外调水和地下水依赖程度较高,2022 年黄河和长江供水分别占总供水量的 42.2% 和 43.1%。由于当地水资源刚性约束的深入实施和地下水开采的不断压减,需进一步优化聊城市供用水结构,保障水资源的高效利用。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2016—2022 年聊城市 8 个区县的水资源承载力评价所需的降水量、当地水资源量、供水和用水数据均来自聊城市 2016—2022 年度水资源公报和聊城市第三次水资源调查报告;人口、城镇化率、产业规模等数据来源于统计年鉴和第七次人口普查资料。此外,聊城市 2035 年的需水预测计算所需的指标数据主要参考聊城市节水总体规划(2021—2035)等报告。

2.2 水资源承载力评价方法

2.2.1 水资源承载力内涵及评价指标体系

国内外研究对于水资源承载力的定义尚未统一,主要分为水资源开发规模论、水资源支持可持续发展能力论、水资源承载最大人口论三类^[22]。本文使用的定义是生态环境保障下水资源对经济社会可持续发展的支撑能力。

依据此内涵,以区域均衡发展为目标,考虑水资源与社会、经济、生态环境之间的相互作用^[6,23],参

考已有文献^[7,24],结合研究区实际情况,剔除无法收集或信息重叠度高的指标^[25],从水资源、社会、经济、生态 4 个子系统中筛选出 17 个代表性指标构建评价指标体系(表 1)。其中,由于外调水量受工程调度及经济社会发展需求的影响,对当地水资源有补偿特性,其变化规律与天然来水不同。本文将外调水供水量作为单一指标加入水资源子系统,可增加计算的可靠性且符合实际导向。

2.2.2 指标权重确定

在水资源承载力评价之前,确定选取的各项指标在水资源承载力评价体系中所占的比重。采用主客观相结合的组合赋权法,借用拉格朗日乘法求解式(公式 1)对熵权法和层次分析法的权重进行联合计算,得到组合权重,见表 1。

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{1i}w_{2i}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{w_{1i}w_{2i}}} \quad (1)$$

式中: w_i 为综合权重值; w_{1i} 为层次分析法计算各指标权重值; w_{2i} 为熵权法计算各指标权重值。

2.2.3 模糊综合评价法

水资源承载力评价涉及众多影响因素,模糊综合评价法可对各指标进行单指标隶属度计算,再建立综合评判矩阵评判出水资源承载力等级。具体计算步骤如下:

评价指标分级。按照实际情况和官方标准将各指标划分为 3 个等级^[7,20],见表 1。 V_1 是超载,表示承载力水平较差; V_3 是可载,表示水资源有较大的开发潜力; V_2 属于临界承载状态。为了定量反映各指标对系统的影响程度^[26],分别给各评价等级赋值, V_1 、 V_2 和 V_3 的赋值为: $a_1=0.05$, $a_2=0.5$, $a_3=0.95$ 。该值越大,水资源承载效果越好。

计算各指标对评价等级的隶属度。将 m 个指标构成的集合设为 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, 3 个评价等级记为集合 $V = \{v_j | j = 1, 2, 3\}$, 各指标对等级的模糊隶属度记为 r_{ij} , 得到单因素隶属度矩阵 $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}\}$ 。

计算综合评价。通过权重矩阵 $A = \{\lambda_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 对综合隶属度矩阵进行加权变换可得到综合评价矩阵 B :

$$B = A \cdot R = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & \lambda_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 & \dots & b_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

利用各等级赋分原理计算出最终评价价值,无量纲。
 $u = 0.05b_1 + 0.5b_2 + 0.95b_3$ 。本文的承载能力是相对

表 1 聊城市水资源承载力评价指标与分级标准

Tab. 1 Water resources carrying capacity evaluation indicators and grading criteria for Liaocheng City

系统	准则层	目标层	类型	权重	V_1 超载	V_2 临界承载	V_3 承载
水资源	水资源禀赋	降水量 A_1/mm	正	0.089	<400	400~800	>800
		外调水供水量 A_2/m^3	正	0.077	<5 000	5 000~12 000	>12 000
		人均水资源量 A_3/m^3	正	0.071	<500	500~1 000	>1 000
	水资源开发	供水模数 $A_4/(万m^3 \cdot km^{-2})$	正	0.035	>15	15~25	<25
		水资源开发利用率 $A_5/\%$	负	0.075	>70	40~70	<40
经济	发展规模	人均GDP $B_1/元$	正	0.082	<30 000	30 000~5 0000	>60 000
		人均耕地面积 B_2/m^2	正	0.027	<667	667~1 333	>1 333
		第三产业占比 $B_3/\%$	正	0.058	<35	35~65	>65
	用水效率	万元工业增加值用水量 B_4/m^3	负	0.062	>45	15~45	<15
		耕地实际灌水定额 $B_5/(m^3 \cdot hm^{-1})$	负	0.030	>400	150~400	<150
社会	发展规模	人口密度 $C_1/(人 \cdot km^{-2})$	负	0.041	>700	300~700	<300
		城镇化率 $C_2/\%$	正	0.059	<40	40~70	>70
	用水效率	城乡居民人均用水量 $C_3/(L \cdot d^{-1})$	负	0.024	>140	40~140	<40
生态环境	生态条件	人均公园绿地面积 D_1/m^2	正	0.039	<5	5~30	>30
		生态环境用水率 $D_2/\%$	正	0.080	<1	1~5	>5
	生态压力	浅层地下水开采系数 D_3	负	0.076	>1.0	0.5~1.0	<0.5
		工业废水排放量 $D_4/万t$	负	0.075	>1 000	200~1 000	<200

2.3 障碍度模型

障碍度可反映系统中各指标对系统进一步提升的制约程度。为识别各区县水资源承载能力的关键影响因素,加入障碍因子分析模型。障碍度可通过因子的贡献度和偏离度求得(为体现同一指标在不同样本之间的变化趋势,未将障碍度进行归一化)。具体计算公式为

$$O_{ij} = w_i \times (1 - x'_{ij}) \quad (3)$$

式中: w_i 为各指标的权重; x'_{ij} 为各指标样本正向归一化后的正向数值, $1 - x'_{ij}$ 表征了指标的偏离度; O_{ij} 为障碍度,障碍度越高,约束作用越大^[27]。

2.4 约束条件与供需水预测

为响应黄河流域生态保护和高质量发展的要求,探索水资源刚性约束下聊城市水资源配置策略。首先在需水预测时,将聊城市用水总量和效率红线设置为刚性约束条件,结合历史数据和未来政策规划,分别对各区县 2035 年的城市发展、人口、产业结构等各类用水规模和用水定额指标进行预测,并使用定额法计算未来需水量。在可供水量预测时,考虑多水源供水特性,按照各区县的预测需水量对

引黄水和引江水总量进行市内调控分配,分析 2035 年各区县未来可供水量。

3 结果与讨论

3.1 水资源承载力评价价值分析

由 2016—2022 年各区县水资源承载力评价价值,绘制 8 个子行政区水资源承载力在时间序列下的空间分布变化(图 1)。

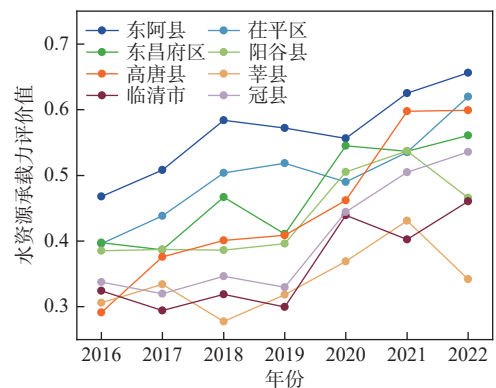


图 1 2016—2022 年聊城市 8 个县水资源承载力变化
 Fig. 1 Changes in spatial distribution of water resources carrying capacity in 8 counties of Liaocheng City from 2016 to 2022

从时间序列来看,2016—2022 年聊城市水资源承载力评价结果呈现波动上升趋势,8 个县的水资源承载力均值从 2016 年的 0.363 上升至 2022 年的 0.528,反映近几年聊城市水资源问题得到了关注和有效管理。

从空间分布来看,2016—2022 年聊城市各区县间的水资源承载力水平差异明显,评价一直呈现东边高西边低的空间分布态势:位于聊城市南部的东阿县的评价结果最优,2022 年可达 0.673;位于中部的茌平区、东昌府区、阳谷县和高唐县次之;位于聊城市西部的莘县、临清市和冠县的评价一直偏低,2022 年莘县的评价仅为 0.350。评价最优区域与最劣区域的评分差值从 2016 年的 0.177 至 2022 年上升为 0.314,这表明尽管近年来聊城市各

区县的水资源承载力得到了一定的提升,但空间差异仍然存在。

为进一步提升聊城市各区县的水资源承载能力并实现空间均衡,有必要探讨不同区县水资源承载力空间差异及随时间变化的成因。

3.2 水资源承载力空间差异的影响因素

对各区县的水资源承载力空间差异因素进行分析(图 2)。在空间分布上,水资源承载力评价结果较优的区县(如东阿县)障碍度低,评价结果较差的区域(如冠县、临清市和莘县)障碍度高,符合耦合度计算原理。从准则层角度进行分析,对各区县而言,水资源子系统对水资源承载力障碍度较高,是考虑进一步提高区域水资源承载力的重要影响因素,生态子系统和经济子系统次之。

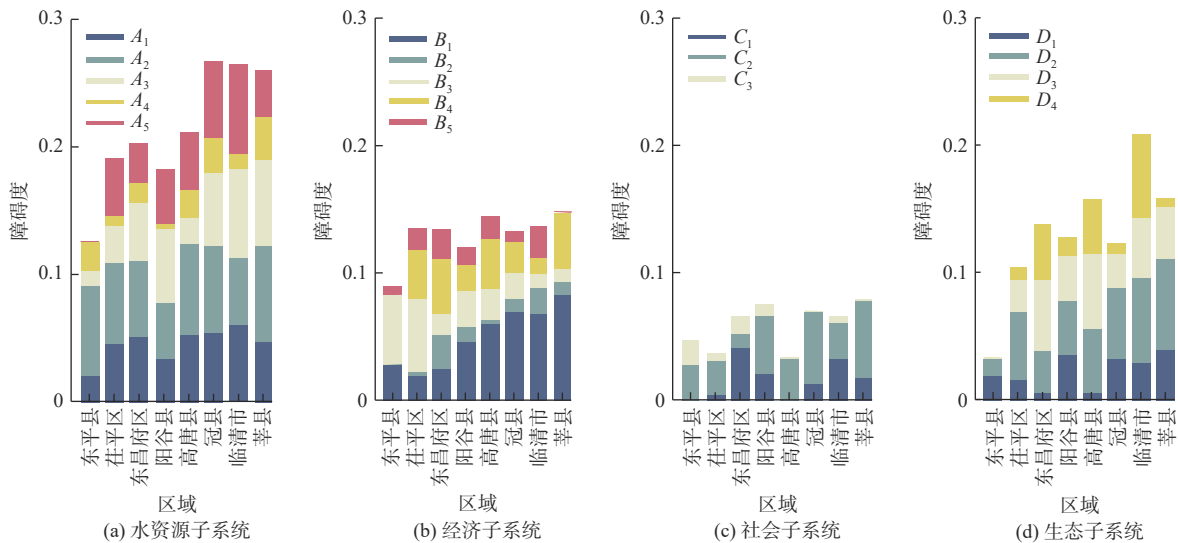


图 2 水资源承载力各指标障碍度

Fig. 2 Obstacles to water resources carrying capacity indicators

对各子系统的分项指标进行障碍度分析。水资源子系统中,造成承载力“东高西低”这一空间态势的主要因素为降水量(A_1)、人均水资源量(A_3)和水资源开发利用效率(A_5);经济子系统中,人均国内生产总值(B_1)是经济系统承载力区域差异形成的重要原因,其中 2022 年茌平区人均 GDP 为 7.2 万元,是莘县的 2.4 倍;社会子系统中的城镇化率(C_2)是造成空间差异的主要因素;在生态子系统中,生态环境用水率(D_2)和地下水开采系数(D_3)是影响区域间承载力变化的重要因素。此外,外调水供水量(A_2)对东昌府区以外各县的障碍度水平都较高,说明外调水量(A_2)也是各区县水资源承载力优化不可忽视的重要因素。

对导致水资源承载力空间差异的主要指标作

进一步分析。对各区县而言,水资源承载力在 2016—2022 年上升时,伴随着大部分指标障碍度降低(图 3)。有个别指标的障碍度有不减反增的趋势,是当地水资源承载力进一步优化的关键指标,如在茌平区、东昌府区、冠县、临清市和莘县的浅层地下水开采系数(D_3)障碍度在近几年有所增加,需进一步压减地下水开采量。此外,大部分区县的外调水(A_2)的障碍度变大,说明外调水供水量有优化的潜力。

综合来看,水资源子系统是聊城市可持续发展的重要影响因素。结合各区县空间差异形成的影响因素分析,提出水资源承载力空间均衡优化调控策略。①节水优先,以水资源量和用水效率为约束对各部门用水进行节水潜力分析。其中,茌平区的

第三产业占比低且万元工业增加值用水量较高,东昌府区也存在工业用水定额较高的问题,可调整工业结构,引入先进的新兴产业置换传统高耗水产业,降低工业用水定额,并通过节水装备改造提高工业废水循环利用水平。②通过外调水、再生水的高效利用改善供水条件。据规划聊城市已推进引黄闸改造、引江水配套工程等水源工程建设,可通过水

网合理分配外调水量以平衡区域水资源天然来水不均的情况,尤其关注冠县、临清和莘县这3个区县水资源子系统滞后的情况。③综合治理地下水超采,东阿县、茌平区、东昌府区、阳谷县、临清市、莘县近几年地下水开采系数增加,控制地下水开采量。

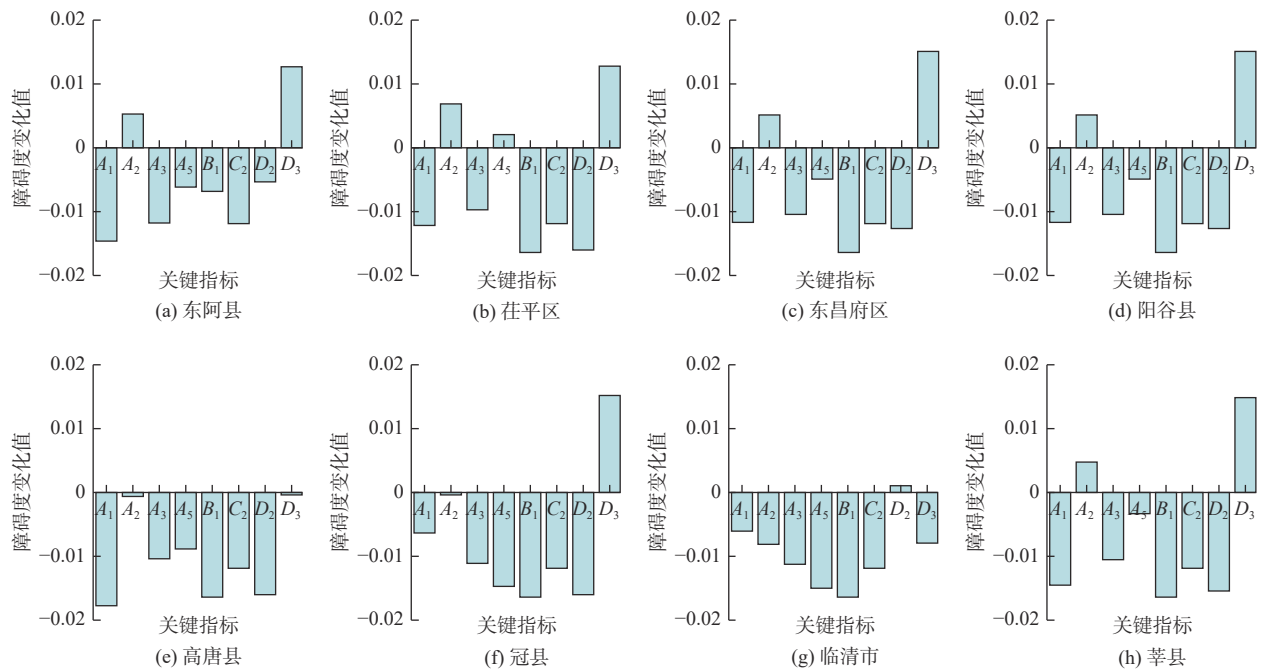


图3 各区县空间差异重要影响指标的障碍度年均变化值

Fig. 3 Average annual change in the degree of obstruction of important impact indicators of spatial disparities in the districts and counties

3.3 刚性约束下未来水资源承载力空间均衡

3.3.1 需水预测

依据水资源承载力空间均衡优化调控策略和节

水规划,对各区县的经济社会发展规模及用水指标进行预测,关键指标值见表2。基于此计算各区县的需水量,2035年聊城市平水年和枯水年的总需水量预测分别为21.1亿 m^3 和23.3亿 m^3 。

表2 2035年聊城市各区县关键指标预测

Tab. 2 Forecasts of key indicators for districts and counties in Liaocheng City in 2035

行政区	城镇化增长率/%	耕地面积/ 万 hm^2	农田耕地灌水定额/($m^3 \cdot hm^{-2}$)		GDP年 增长率/%	第三产业占比 增加值/%	万元工业增加值 用水量/ m^3
			$P=50\%$	$P=75\%$			
东阿县	10	4.9	2 175	2 475	5	6	10
茌平县	10	5.7	2 175	2 475	5	10	10
东昌府区	6	6.7	2 175	2 475	5	2	10
阳谷县	12	5.7	2 175	2 475	6	3	10
高唐县	10	5.5	2 175	2 475	6	5	10
冠县	14	6.7	2 175	2 475	6	5	10
临清市	10	5.5	2 175	2 475	6	5	10
莘县	16	7.8	2 175	2 475	6	3	10

3.3.2 可供水量预测及基于外调水调配的供需平衡分析

基于 2000—2022 年聊城市水资源数据, 结合规划工程, 对未来各行政区的可供水量进行预测: ①通过长序列计算得 50% 和 75% 来水频率下聊城市的当地地表水可供水量分别为 1.9 亿、1.1 亿 m^3 ; ②依政府规划推进引黄闸和南水北调工程的建设, 增加二期规划引江水量 2.4 亿 m^3 , 引黄水和引江水分别增至 7.9 亿和 3.9 亿 m^3 ; ③以地下水可开采量严格控制供水量, 退减地下水压采, 地下水可供水量为 7.6 亿 m^3 ; ④提升再生水回用量: 到 2035 年, 再生水回用率提高至 60%, 其他水源可供水量达 1.5 亿 m^3 。2035 年, 聊城市平水年和枯水年的预

测可供水总量分别为 23.0 亿、22.6 亿 m^3 。

根据预测结果, 至 2035 年, 平水年时各区县可供水量满足需水要求, 说明需水得到有效控制; 而在枯水年份, 多个县区需水量略微超出可供水量, 需进一步分析缺水原因并进行供需平衡分析。枯水年耕地灌溉需水量较高, 进一步发展节水农业, 减少灌溉用水量。此外, 各区县缺水率相差较大, 利用外调水(引黄水、引江水)的可调配特性, 在市级外调水总量控制的基础上设计外调水量分配方案, 对未来各区县的可供水量进行空间均衡的调控。调控后各区县均不缺水, 实现供需平衡。根据平衡分析后的可供水量和需水量确定 50% 和 75% 来水频率下的最终供水量, 见图 4。

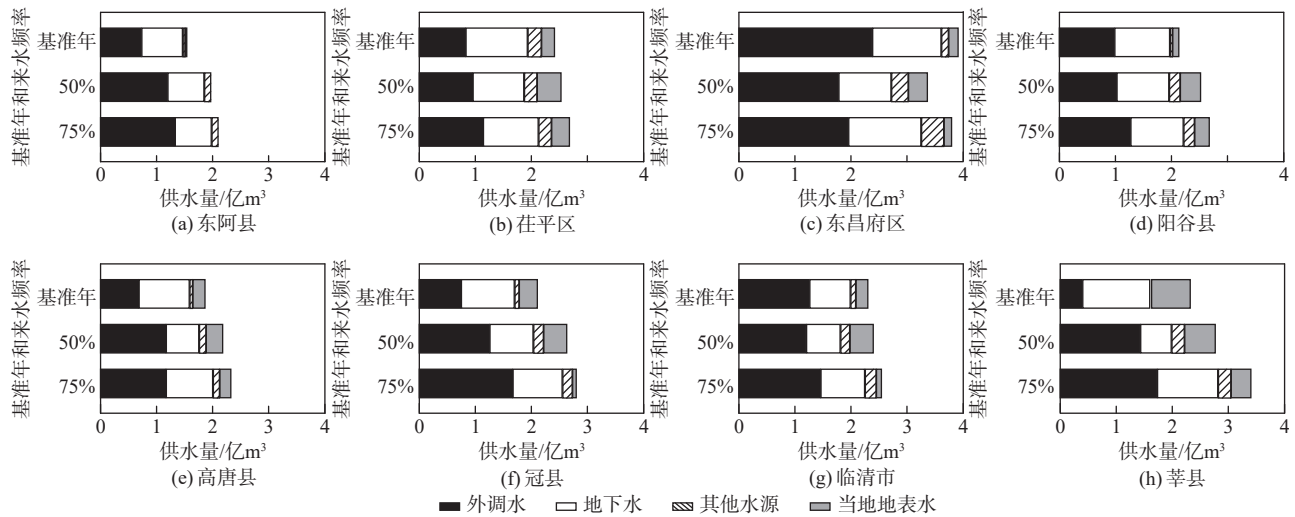


图 4 2035 年各区县不同来水频率下的供水量预测结果

Fig. 4 Water supply projections for each district and county at different incoming water frequencies in 2035

相对于 2022 年, 除东昌府区外各区县未来的供水量都有不同程度的增加。由于外调水占比最大, 其调控作用显著。其中, 莘县是全国重点蔬菜水果产地, 现状水资源不足以支撑产业可持续发展, 该县外调水分配的增量最大以保障粮食安全。供水量计算结果可为聊城市外调水分配方案提供依据。

此外, 考虑聊城市当地地表水资源偏少, 且在初次开展节水控制和供水潜力开发调控后, 仍出现平水年可供水量富余而枯水年不足的情况, 可通过水网建设提升河网水系蓄水能力, 提高地表水开发利用效率, 加大不同来水频率下的年际水资源调控能力, 更充分地利用自然资源。

3.3.3 未来水资源承载能力评价

为分析外调水调控下各区县在资源刚性约束下的水资源承载力空间均衡效果, 基于评价指标预测值对各区县进行规划年的水资源承载力评价, 评价

结果见图 5。在不同来水频率下, 各区县的水资源承载力均有不同程度提升。原承载力评价价值较低区域如高唐、冠县、临清和莘县的优化效果更明显, 平水年时平均优化率达到 25%; 原承载力评价价值较高的区域如东阿县、茌平区、东昌府区和阳谷县优化率稍低, 平均优化率为 11%。总的来看, 聊城市内各区县承载力的空间差异在减小, 区域间承载力最大值和最小值的差值从 2022 年的 0.314 减少为 0.151, 有效实现了空间均衡, 说明通过节水控制和高效利用外调水, 从供用水两端实现水资源空间均衡有利于聊城市水资源可持续发展。

相比于平水年, 由于农业用水压力变大, 枯水年情景下水资源承载力评价价值略微降低。但空间上水资源承载力最大值和最小值的差值保持在 0.153, 与平水年相差不大, 明显小于现状枯水年的空间差异。这说明基于外调水的水资源调控对不同来水频率下的水资源空间均衡均有优化效果。

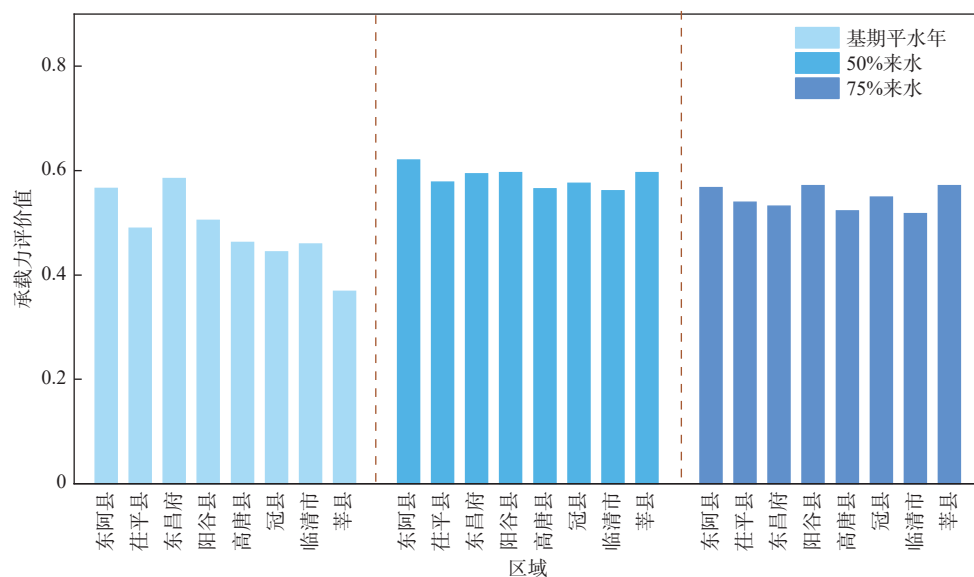


图5 2035年50%和75%来水频率下的水资源承载力预测

Fig. 5 Water resource carrying capacity projections at 50% and 75% incoming frequency in 2035

4 结论

以聊城市为研究对象,引入外调水指标构建水资源承载力评价指标体系,开展水资源承载力现状评价。通过障碍度模型分析其空间差异的形成原因,针对影响因素从供需两端提出水资源承载力空间均衡策略。

计算结果表明,2016—2022年聊城市8个县水资源承载力总体呈上升趋势,但在空间上分布不均,呈现东高西低的分布态势。对聊城市水资源承载力空间差异影响较大的因子为水资源子系统中的降水量、外调水供水量、水资源开发利用率和经济子系统中的人均GDP、社会子系统中的城镇化率、生态子系统中的生态环境用水率和地下水开采系数,据此提出聊城市水资源空间均衡优化调控策略。在节水潜力分析和外调水调控下,2035年各区县水资源承载力有不同程度的优化,尤其是水资源承载力滞后的区县,如莘县、临清和冠县,承载力增幅较大,有效实现了水资源承载力空间均衡。

需说明的是,在气候变化和日益增多的极端气候对区域水资源的影响下,未来可供水量预测存在不确定性。因此,今后可对气候变化下当地水资源的变化趋势进行模拟预测,同时进一步分析不同气候情景下外调水的调水潜力,并根据当年实际调水计划进行方案调整。

参考文献:

[1] SANDHU, G., WEBER, O., WOOD, M. O., et al. An interdisciplinary water risk assessment framework for

sustainable watermanagement in Ontario, Canada[J]. *Water Resources Research*, 2023,59(5): e2022WR032959. DOI: 10.1029/2022WR032959.

- [2] 游进军,贾玲,杨朝晖,等.协调公平与效率的“四水四定”研究I:方法与模型[J].*水利学报*, 2024, 55(02): 158-166. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230432.
- [3] 刘海娇,范明元,管清花,等.县域“四水四定”协调性评价及应用[J].*干旱区资源与环境*, 2023, 37(4): 194-200. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2023.103.
- [4] 陈岩,赵琰鑫,赵越,等.黄河流域“四水四定”推动高质量发展的实现路径[J].*环境保护*, 2022, 50(14): 32-35. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.14.004.
- [5] 黄昌硕,耿雷华,颜冰,等.水资源承载力动态预测与调控:以黄河流域为例[J].*水科学进展*, 2021, 32(1): 59-67. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.006.
- [6] WANG T, JIAN S, WANG J, et al. Dynamic interaction of water-economic-social-ecological environment complex system under the framework of water resources carrying capacity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368(39): 133132. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133132.
- [7] 金菊良,沈时兴,崔毅,等.半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J].*水利学报*, 2021, 52(5): 507-520. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200561.
- [8] 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.
- [9] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等.基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J].*水资源保护*, 2024, 40(3): 71-77. DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2024.03.009.

- [10] WANG Y, WANG Y, SU X, et al. Evaluation of the comprehensive carrying capacity of interprovincial water resources in China and the spatial effect[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575(8): 794-809. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.076.
- [11] ZHOU R, JIN J, CUI Y, et al. Spatial equilibrium evaluation of regional water resources carrying capacity based on dynamic weight method and dagum Gini coefficient[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 790349. DOI: 10.3389/feart.2021.790349.
- [12] 李家乐, 林鹏飞, 李彦彬, 等. 基于水资源配置的空间均衡度评价方法 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 215-227. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0023.
- [13] 汪梦植, 吴成国, 王晓宇, 等. 基于空间均衡指数的水资源空间均衡评价模型 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(6): 58-65. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2023068.
- [14] 张建云, 金君良. 国家水网建设几个方面问题的讨论 [J]. *水利发展研究*, 2023, 23(11): 1-7. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2023.11.001.
- [15] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题 [J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 11-23. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.01.002.
- [16] ZHANG W, FANG W. Physical and virtual water transfers in China and their implication for water planetary boundary[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(9): 13622-13637. DOI: 10.1007/s11356-024-31979-x.
- [17] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0025.
- [18] 郭世浩. 城市多水源联合供水优化配置及应急保障研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023. DOI: 10.27144/d.cnki.gghsc.2023.000412.
- [19] 王喜峰, 姜承昊. 水资源刚性约束下黄河流域高质量
- 量发展研究进展 [J]. *水利经济*, 2023, 41(2): 18-24. DOI: 10.3880/j.issn.1003-9551.2023.02.004.
- [20] XIE M, ZHANG C, ZHANG J, et al. Projection of future water resources carrying capacity in the Huang-Huai-Hai River basin under the impacts of climate change and human activities[J]. *Water*, 2022, 14(13): 2006. DOI: 10.3390/w14132006.
- [21] DU X, CHEN J, GU S, et al. An analysis of influences of inter-basin water transfer on water resources carrying capacity over Dianchi-Pudu River basin[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 525(1): 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/525/1/012040.
- [22] 姜锋, 张百祖. 基于层次分析法和变异系数法的酒泉市水资源承载能力分析评价研究 [J]. *节水灌溉*, 2023, 48(9): 1-13. DOI: 10.12396/jsgg.2023238.
- [23] 璩路路, 王永生, 刘彦随, 等. 乡村振兴导向的水土资源承载力评价及其优化 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 300-314. DOI: 10.31497/zrzyxb.20210203.
- [24] 张樾樾, 曹正旭, 张仁杰, 等. 黄河三角洲高效生态经济区水资源承载力评价及趋势预测 [J]. *世界地理研究*, 2022, 31(3): 549-560. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9479.2022.03.2020425.
- [25] 陈洪海. 基于反映象相关矩阵的评价指标筛选方法研究 [J]. *中国管理科学*, 2022, 30(11): 149-158. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0969.
- [26] WANG Y F, SUN K, LEI Y L, et al. The optimal allocation and the evaluation of water resources carrying capacity in Shendong mining area[J]. *Resources Policy*, 2022, 77(3): 102738. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102738.
- [27] ZHU L, LI X, BAI Y, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and its obstruction factor analysis: A case study of Hubei Province, China[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2573. DOI: 10.3390/w11122573.

Spatial optimisation of water resources carrying capacity based on regulation of external water transfers

CHEN Xing¹, YUAN Ye¹, XU Qin^{2,3,4}, ZHANG Qicheng⁵, SONG Lanlan⁵, CHEN Xia⁶

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Key Laboratory of Water Hazard Defense, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze River Protection and Green Development Institute, Nanjing 210098, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 210098, China; 6. Jiangsu Provincial Water Conservancy Digital Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: The shortage of water resources is an important constraint on regional development. The Yellow River basin belongs to the resource water shortage area. To solve the contradiction between the supply and demand of

water resources in the water shortage cities in the lower reaches of the Yellow River and its economic and social development mismatch, a number of cross-basin water transfer project constructions have been proposed in China. Water resources regulation brings certain changes and challenges to the water resources management and allocation work of the recipient cities. In this context, it is important to achieve spatial balance and efficient use of water resources in the receiving zones.

Liaocheng was chosen as the study area to quantitatively study the spatial equilibrium regulation of water resources carrying capacity by external water transfer from receiving cities. Firstly, the regulatory role of external water on the receiving area was fully considered. External water was introduced into the water resources sub-system as a single indicator to construct a regional water resources carrying capacity evaluation index system consisting of four sub-systems: water resources, economy, society, and ecology. The comprehensive weighting method was used to determine the weights of the indicators, and the fuzzy comprehensive evaluation method was used to calculate the status quo evaluation of the water resources carrying capacity of Liaocheng City from 2016 to 2022. Then, the barrier degree model was used to analyze the reasons for the formation of spatial differences in the water resources carrying capacity of Liaocheng City. The optimization strategy for the spatial balance of water resources in the districts and counties of Liaocheng City, which prioritized water conservation and efficiently utilized the external water and reclaimed water, was proposed in response to the results of the analysis of the influential factors. Finally, through the prediction of future water demand and available water supply, the supply and demand of water resources in Liaocheng City in 2035 under different water supply frequencies and the level of carrying capacity were evaluated.

The results of the study showed that the water resources carrying capacity of Liaocheng City showed a spatial pattern of high in the east and low in the west. The spatial differences always existed and had an increasing trend. The difference between the ratings of the best and worst evaluated areas rose from 0.177 in 2016 to 0.323 in 2022. The water resources sub-systems were considered to be the main cause of these spatial differences. In addition, a number of factors in the other sub-systems were also important in influencing spatial balance. These factors included GDP per capita in the economic sub-system, urbanization rate in the social sub-system, ecosystem water use rate, and groundwater extraction coefficient in the ecological sub-system. Under the spatial regulation of water conservation control and external water transfer, the future water resources carrying capacity of all districts and counties increased to different degrees. The optimization effect was more obvious in districts and counties with lagging carrying capacity, with an average optimization rate of 25 percent in the year of levelling off, and an average optimization rate of 11 percent in districts with higher original assessment values. The spatial difference in the value of the carrying capacity was reduced from 0.314 to 0.151, and the spatial equilibrium effect of the water resources carrying capacity was remarkable.

This paper combined the study of water resources carrying capacity and spatial equilibrium, evaluated the level of water resources carrying capacity of different incoming water frequencies under the balanced regulation of supply and demand, and demonstrated the optimization effect of spatial equilibrium of water resources based on the regulation of external water transfer. The results of the study can provide a reference basis for water resources management and control in similar cities with multiple water sources in the Yellow River basin.

Key words: carrying capacity of water resources; spatial balance; external water; regulation of supply and demand; receiving areas