

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.003

# 南水北调中线受水区 2001—2023 年水资源量与 用水量变化分析

刘万新<sup>1</sup>, 刘洋<sup>2</sup>, 王瑶<sup>3</sup>

(1. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048; 2. 浙江华安工程设计咨询有限公司, 浙江 舟山 316000;  
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对南水北调中线主要受水区京津冀地区, 应用 Mann-Kendall 趋势检验分析了海河流域与京津冀三省市 2001—2023 年水资源量与用水量的变化趋势, 应用 Spearman 秩次检验分析了京津冀三省市农业、工业和生活用水变化与工农业生产以及社会经济指标的相关性, 探究了用水变化的主要原因。结果表明: 2001—2023 年海河流域与京津冀三省市水资源总量均为上升趋势, 河北省总用水量有显著减少趋势, 北京市、天津市总用水量则有显著增加趋势; 北京市农业、工业用水均有显著减少趋势, 且与多个工农业生产指标呈极强的正相关性, 说明北京市工农业用水主要受产业结构调整影响; 天津市农业用水有显著减少趋势, 与奶类产量有一定的正相关性, 工业用水无明显变化趋势; 河北省农业用水有显著减少趋势, 且与农作物播种面积有较强的正相关性, 工业用水也有显著减少趋势, 与第二产业 GDP 占比有一定的正相关性, 但与其他工业生产指标的正相关性较弱; 京津冀三省市的生活用水均与人口数量、城镇居民人均可支配收入、建筑业总产值、第三产业 GDP 占比呈较强的正相关性, 说明京津冀生活用水增加主要源于人口、建筑业、第三产业的同步增长。

**关键词:** 水资源量; 用水量; 用水结构; 南水北调中线工程; Mann-Kendall 趋势检验; Spearman 秩次检验; 海河流域; 京津冀

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)05-0018-08

## Changes in water resources and water consumption in receiving areas along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023

LIU Wanxin<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>3</sup>

(1. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China;  
2. Zhejiang Huaan Engineering Design and Consulting Corporation, Zhoushan 316000, China;  
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The trend of water resources and water consumption in the Haihe River Basin and three provinces (municipalities) of Beijing, Tianjin, and Hebei in the main receiving area along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023 was analyzed using the Mann-Kendall test. The Spearman's rank order test was applied to analyze the correlation between the changes in agricultural, industrial, and domestic water consumption with indicators of industrial production, agricultural production, and social economy in the three provinces (municipalities) and to explore the main reasons for the changes in water consumption. The results show that the total water resources of the Haihe River Basin and the three provinces (municipalities) exhibit an upward trend from 2001 to 2023. The total water consumption of Hebei Province has a significant decreasing trend, while the total water consumption of Beijing City and Tianjin City has a significant increasing trend. Beijing's agricultural and industrial water consumption has a significant reduction trend, with many industrial and agricultural production indicators showing a strong positive correlation, indicating

**作者简介:** 刘万新(1974—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水利水电咨询与评估研究。E-mail: 13810269160@163.com

**通信作者:** 王瑶(1995—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wyyyyy@hhu.edu.cn

**引用本文:** 刘万新, 刘洋, 王瑶. 南水北调中线受水区 2001—2023 年水资源量与用水量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 18-25.

LIU Wanxin, LIU Yang, WANG Yao. Changes in water resources and water consumption in receiving areas along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 18-25.

that Beijing’s industrial and agricultural water consumption is mainly affected by industrial restructuring. In Tianjin, the agricultural water consumption has a significant decreasing trend and a certain positive correlation with milk production. The industrial water consumption in Tianjin shows no significant variation. In Hebei Province, the agricultural water consumption shows a significant trend of reduction and a strong positive correlation with the sown area of crops. The industrial water consumption in Hebei also shows a significant trend of reduction, which has a certain positive correlation with the proportion of GDP in the secondary industry, but the positive correlation with other indicators of industrial production is weak. The domestic water consumption in Beijing, Tianjin, and Hebei all show strong positive correlation with population size, per capita disposable income, construction output value, and GDP ratio of tertiary industry, indicating that the increase in domestic water consumption in Beijing, Tianjin, and Hebei mainly originates from the synchronized growth of population, construction, and tertiary industry.

**Key words:** water resource; water consumption; water consumption structure; the middle route of South-to-North Water Diversion Project; Mann-Kendall trend test; Spearman’s rank order test; the Haihe River Basin; Beijing, Tianjin, and Hebei

南水北调东、中线工程自 2014 年底建成通水后,持续为北京市、天津市、河北省、山东省、河南省等省市的中大型城市供水,截至 2024 年 5 月,已累计供水超过 700 亿 m<sup>3</sup>,直接受益人口超过 1.76 亿人,在经济社会发展和生态修复保护方面发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。自 2002 年国务院批复《南水北调工程总体规划》以来,我国经济总量、产业结构、城镇化水平显著提升<sup>[2-4]</sup>,京津冀协同发展等区域重大战略相继实施,南水北调后续工程建设与水资源配置面临新形势和新要求<sup>[5-8]</sup>。为推进南水北调后续工程高质量发展,提高水资源集约节约利用水平,更好地贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路,亟须开展南水北调受水区用水趋势变化相关研究。

京津冀在我国经济社会发展中占据重要地位,也是南水北调中线工程的主要受水区,其多年平均受水量占中线工程总调水量的 60% 以上。本文以京津冀地区为研究对象,采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验方法和 Spearman 秩次检验方法分析京津冀和海河流域 2001—2023 年的水资源量和用水量变化趋势及影响用水量变化的主要社会经济因子,并探究用水量变化的主要原因,以期为南水北调后续工程科学决策以及京津冀协同高质量发展提供参考。

# 1 研究方法

## 1.1 数据来源与分析方法

本文基于海河流域与京津冀三省市 2001—2023 年的水资源量、用水量数据开展趋势分析,结合气象、经济、社会资料探究用水量变化的主要原因。研究数据来源于中国水资源公报、海河流域水资源公报和京津冀三省市水资源公报与统计年鉴。本文采用 M-K 趋势检验方法<sup>[9-12]</sup>分析水资源量与用水量的变化趋势,采用 Spearman 秩次检验方法<sup>[13-16]</sup>分析用水量变化与主要社会经济因子的相关性,M-K 趋势检验的显著性水平定为 0.05。

## 1.2 用水量相关性分析影响因子选取

分别从农业、工业和生活用水三方面选取理论上与用水量有关联且易于从统计年鉴获取的气象、社会、经济指标,同时参考相关文献的分析结果作为补充<sup>[17-19]</sup>,最终确定用于相关性分析的影响因子如表 1 所示。本文未对生态环境用水展开相关性分析,因研究区生态环境用水大部分用于河湖生态补水,较难与生产、社会、经济等指标建立联系。以北京市为例,2023 年北京市生态环境用水为 16.36 亿 m<sup>3</sup>,而其中 94.25% 即 15.42 亿 m<sup>3</sup> 直接用于河湖生态补水。

表 1 相关性分析的影响因子

| Table 1 Influencing factors for correlation analysis |                                |                                                                 |
|------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 用水分类                                                 | 主要分项                           | 影响因子                                                            |
| 农业用水                                                 | 农田灌溉、果地灌溉、草地灌溉、鱼塘补水            | 年降水量、年平均气温、农作物播种面积、造林面积、肉类产量、禽蛋产量、奶类产量(或牛奶产量)、水产品产量、第一产业 GDP 占比 |
| 工业用水                                                 | 工业企业生产用水                       | 第二产业能源消费总量、工业能源消费总量、工业企业数量、工业企业年平均用工人数、第二产业 GDP 占比              |
| 生活用水                                                 | 居民用水、服务业用水、餐饮业用水、货运邮电业用水、建筑业用水 | 常住人口(或总人口)、城镇居民人均可支配收入、建筑业企业数量、建筑业总产值、第三产业 GDP 占比               |

注:本文工业企业均指规模以上工业企业。

2 结果与分析

2.1 水资源量变化

海河流域 2001—2023 年水资源总量与地表水资源量均波动上升,且上升趋势显著(图 1)。海河流域 2022—2023 年年均水资源总量为 410.29 亿 m<sup>3</sup>,年均地表水资源量为 223.87 亿 m<sup>3</sup>,水资源总量与地表水资源量相比 2001—2004 年的平均水平分别增长了 67.8%和 112.4%。2021 年海河流域发生了罕见的夏秋连汛<sup>[20]</sup>,水资源总量达到 734.77 亿 m<sup>3</sup>。海河流域 2001—2023 年地下水资源量虽也表现出一定上升趋势,但趋势不显著,未通过 M-K 检验。

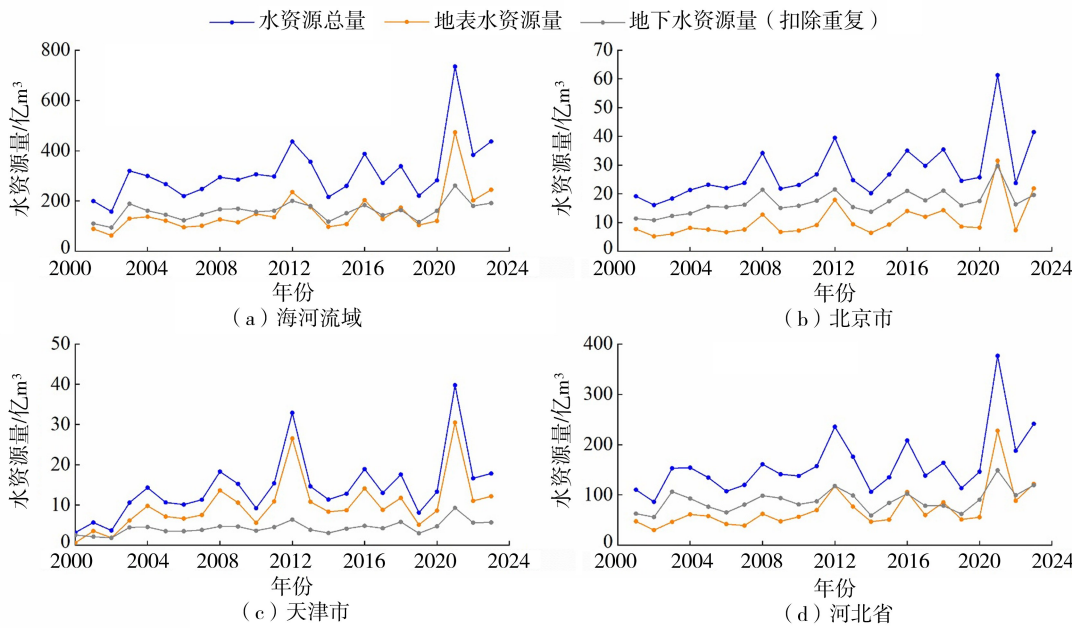


图 1 海河流域与京津冀 2001—2023 年水资源量变化

Fig. 1 Changes in water resources for the Haihe River Basin and Beijing, Tianjin, and Hebei from 2001 to 2023

与海河流域结果类似,京津冀三省市的水资源总量和地表水资源量均表现出显著上升趋势。在地下水资源量方面,河北省 2001—2023 年无显著变化趋势,这一结果与海河流域一致。但是,北京市和天津市地下水资源量均有显著上升趋势,M-K 检验统计量 Z 值分别达到 3.33 和 3.05。

2.2 用水量变化分析

海河流域 2001—2023 年总用水量趋于下降(图 2),2023 年海河流域的总用水量相比 2001 年减少了 5%。但是,海河流域总用水量的下降趋势不显著,未通过 M-K 检验。在用水结构方面,海河流域农业和工业用水均有显著下降趋势。海河流域 2001—2023 年农业用水减少了 33.5%,工业用水减少了 36.8%。相反,海河流域的生态环境和生活用水均有上升趋势,且上升趋势显著。与 2001 年相比,2023 年海河流域的生活用水增加了 37.5%;海河流域 2003—2023 年生态环境用水由 1.9 亿 m<sup>3</sup> 增长为 77.0 亿 m<sup>3</sup>。

与海河流域相反,北京市和天津市 2001—2023 年总用水量有显著增加趋势,且总用水量的增长主要源于生态环境用水的增长。北京市 2001—2023 年总用水量由 38.93 亿 m<sup>3</sup> 增长至 40.69 亿 m<sup>3</sup>,其中生态环境用水增长了 16.16 亿 m<sup>3</sup>;天津市的总用水量由 19.14 亿 m<sup>3</sup> 增长至 32.72 亿 m<sup>3</sup>,其中生态环境用水增长约 11.16 亿 m<sup>3</sup>;到 2023 年北京市和天津市的生态环境用水均超过生活用水。北京市 2001—2023 年的农业用水、工业用水基本单调递减,减少趋势显著,而生活用水则基本单调递增,且增加趋势显著。天津市 2001—2023 年农业用水呈现先增加、后减少的变化特征,但整体趋势仍显著减少。天津市 2001—2005 年农业用水由 9.97 亿 m<sup>3</sup> 快速增长至 13.78 亿 m<sup>3</sup>,至 2023 年又缓慢减少至 9.40 亿 m<sup>3</sup>。天津市工业用水在近年的变化较小,无显著趋势。天津市 2001—2023 年生活用水也基本单调递增,增加趋势显著。

河北省用水量变化趋势与海河流域基本一致。河北省 2001—2023 年总用水量由 221.24 亿 m<sup>3</sup> 减少至 186.52 亿 m<sup>3</sup>,减少了 15.7%,减少趋势显著。河北省总用水量的减少主要源于农业用水的减少,河北省

2001—2023 年农业用水由 161.23 亿 m<sup>3</sup> 减少至 100.69 亿 m<sup>3</sup>,减少了 60.54 亿 m<sup>3</sup>。在其他用水组成上,河北省 2001—2023 年工业用水有显著减少趋势,而生态环境用水则显著增加。

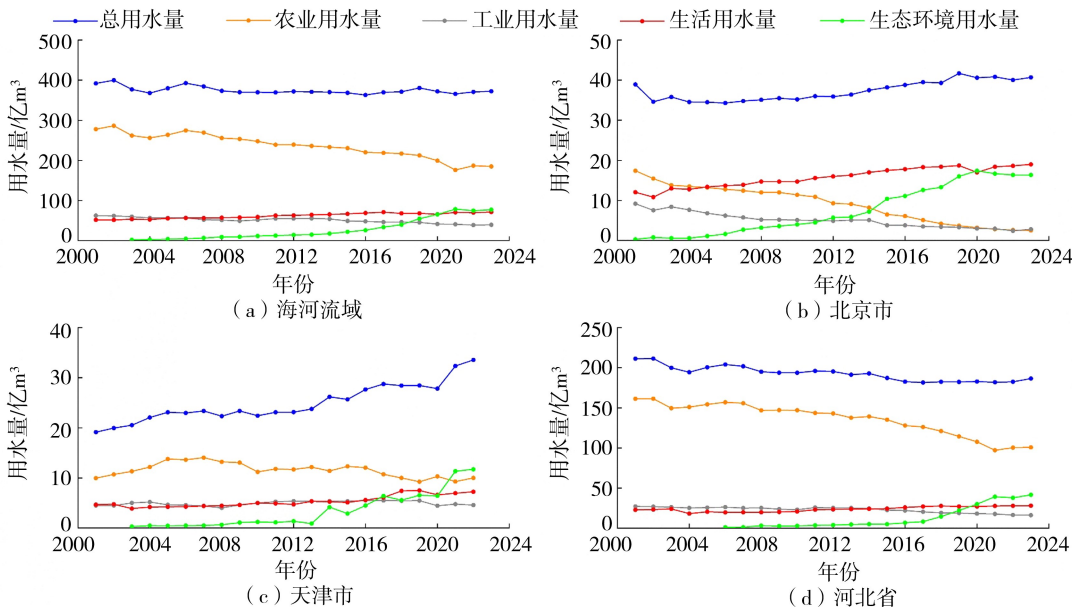


图 2 海河流域与京津冀 2001—2023 年用水量变化

Fig. 2 Changes in water consumption for the Haihe River Basin and Beijing, Tianjin, and Hebei from 2001 to 2023

2.3 用水变化原因分析

2.3.1 北京市

北京市农业用水与第一产业 GDP 占比、农作物播种面积、肉类产量 3 个影响因子均呈现极强的正相关关系,Spearman 秩相关系数均达到 0.9 以上(图 3(a))。北京市农业用水与水产品产量也呈现较强的正相关关系,Spearman 秩相关系数达到 0.804,而与造林面积、禽蛋及奶类产量、气象条件的相关性较弱。此外,第一产业 GDP 占比与农作物播种面积、肉类产量、水产品产量也存在较强的正相关性。

北京市工业用水与第二产业 GDP 占比、第二产业能源消费总量(以万吨标准煤计算,下同)两个影响因子呈现极强的正相关性,Spearman 秩相关系数达到 0.9 以上(图 3(b))。北京市工业用水与工业企业数量也存在较强的正相关关系,Spearman 秩相关系数为 0.808。同时,第二产业 GDP 占比、第二产业能源消费总量、工业企业数量这 3 个影响因子存在较强的自相关性。

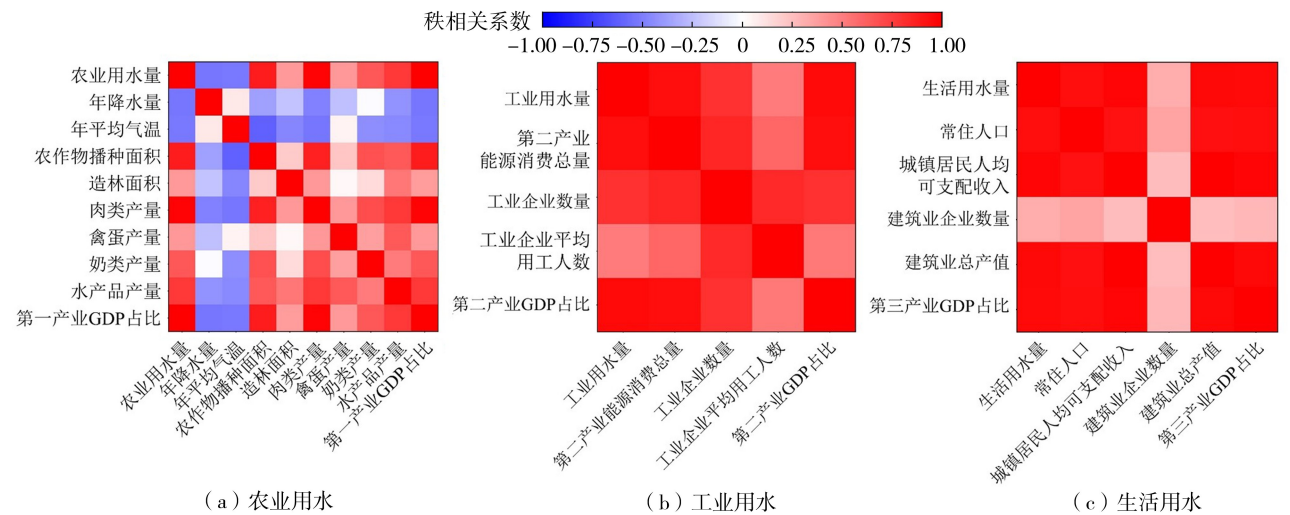


图 3 北京市 2001—2023 年农业、工业和生活用水 Spearman 分析结果

Fig. 3 Results of Spearman analysis for agricultural, industrial, and domestic water consumption in Beijing from 2001 to 2023

北京市生活用水与第三产业 GDP 占比、常住人口、城镇居民人均可支配收入、建筑业总产值 4 个影响因子均呈现极强的正相关性, Spearman 秩相关系数均达到 0.9 以上(图 3(c))。此外,这 4 个影响因子彼此之间也表现出极强的正相关性。

以上分析结果表明,产业结构调整可能是导致北京市 2001—2023 年用水结构发生变化的主要原因。北京市 2001—2023 年第一产业和第二产业有明显调整,农作物播种面积、肉类产量、水产品产量、第二产业能源消费总量、工业企业数量等工农业生产相关指标持续降低,导致农业用水与工业用水减少。例如,与 2001 年相比,2023 年北京市农作物面积减少了 67.6%,肉类产量减少了 91.5%,第一产业 GDP 占比也随之由 2.4%降低为 0.3%(图 4(a))。类似地,北京市 2001—2023 年第二产业能源消费总量减少了 31.1%,第二产业 GDP 占比也随之由 31.2%降低至 15.9%(图 4(b))。与此同时,北京市常住人口、城镇居民人均可支配收入、建筑业及第三产业相互促进、共同增长,导致生活用水显著增加。相比 2001 年,2023 年北京市常住人口增加了 60.2%,建筑业总产值增加了约 6 倍,第三产业 GDP 占比由 66.4%增长为 83.9%(图 4(c))。

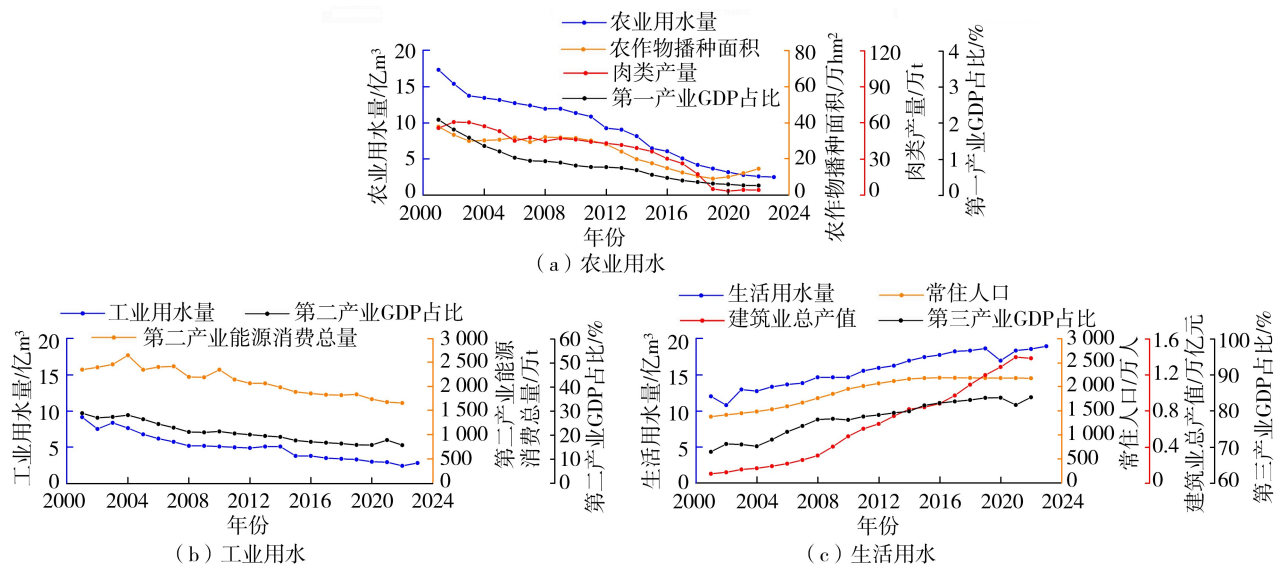


图 4 北京市 2001—2023 年农业、工业和生活用水及主要社会经济指标变化

Fig. 4 Changes in agricultural, industrial, and domestic water consumption and main social economy indicators in Beijing from 2001 to 2023

2.3.2 天津市

天津市农业用水与工业用水的 Spearman 秩次分析均没有识别出相关性较强的影响因子(图 5(a))。天津市农业用水与奶类产量相关性最强,但 Spearman 秩相关系数仅为 0.5980,其次为水产品产量、第一产业 GDP 占比, Spearman 秩相关系数分别为 0.4478、0.4421(图 5(b))。天津市工业用水仅与第二产业能源消费总量呈现一定的正相关性, Spearman 秩相关系数为 0.5356。但是,天津市生活用水与第三产业 GDP 占比、建筑业企业数量、城镇居民人均可支配收入均呈现出较强的正相关性,秩相关系数分别达到 0.9108、0.8354、0.8408(图 5(c))。

天津市农业用水、工业用水与各影响因子相关性不强,这可能是农业和工业用水变化幅度较小导致的:天津市 2001—2023 年工业用水无显著变化趋势,农业用水虽有显著减少趋势,但最小年(2019 年  $9.24 \text{ 亿 m}^3$ )与最大年(2007 年  $14.06 \text{ 亿 m}^3$ )仅相差 34.3%,远小于北京市的农业用水变化(85.6%)。

以上分析结果表明,天津市 2001—2023 年奶类产量与水产品产量变化可能是导致农业用水变化的主要原因。天津市 2001—2023 年农业用水、奶类产量以及水产品产量都呈现出先增加、后减少的变化特征。天津市 2001—2005 年奶类产量由 24.06 万 t 迅速提升为 63.41 万 t,至 2022 年又逐渐降低至 51.13 万 t;天津市 2001—2014 年水产品产量由 26.46 万 t 逐渐上升至 40.80 万 t,至 2022 年又降低至 28.12 万 t(图 6(a))。天津市工业用水与几个工业生产相关指标均未表现出明显的相关关系,这可能是由于天津市 2001—2023 年工业用水较为稳定,无明显变化趋势,从长期过程来看,天津市工业用水接近于一个常量,故而较难识别天津市工业用水的主要影响因素。天津市生活用水增长的主要原因可能是城镇居民人均可支配收入、建筑业及

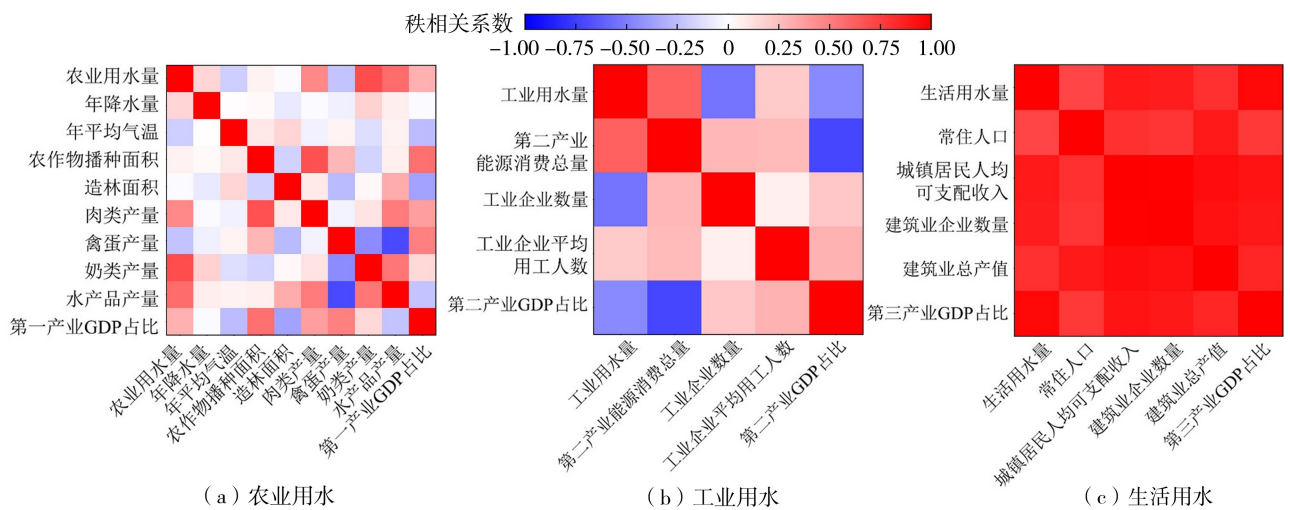


图 5 天津市 2001—2023 年农业、工业和生活用水 Spearman 分析结果

Fig. 5 Results of Spearman analysis for agricultural, industrial, and domestic water consumption in Tianjin from 2001 to 2023

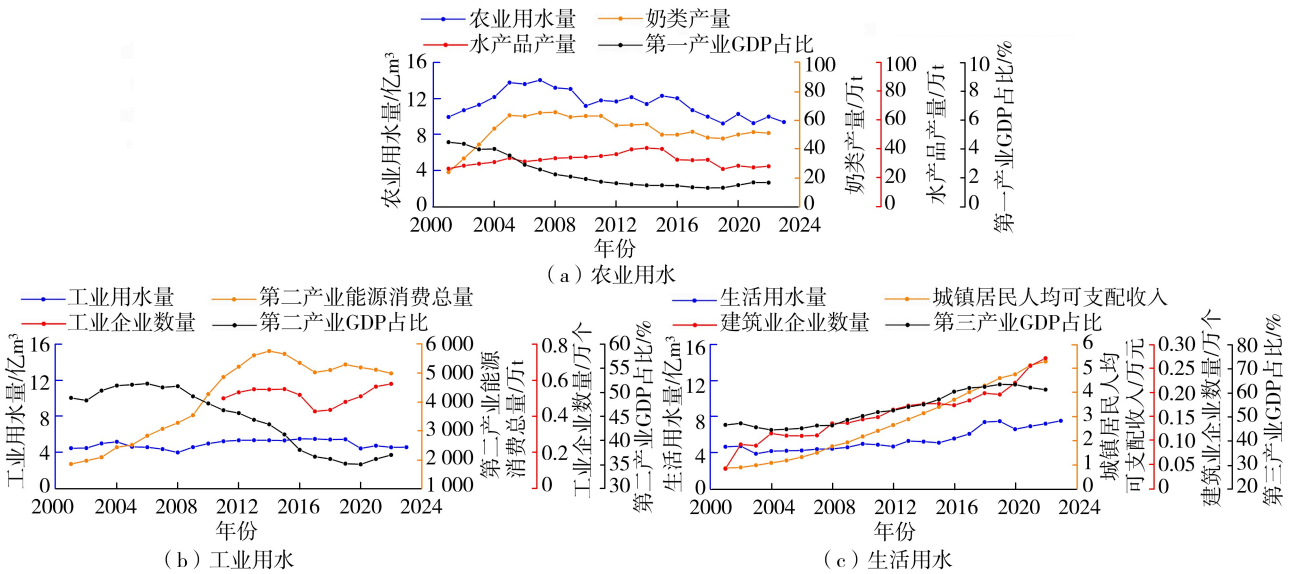


图 6 天津市 2001—2023 年农业、工业和生活用水及主要社会经济指标变化

Fig. 6 Changes in agricultural, industrial, and domestic water consumption and main social economy indicators in Tianjin from 2001 to 2023

第三产业的同步增长。天津市 2001—2022 年城镇居民人均可支配收入增加了 5 倍,建筑业企业数量由 420 个增长为 2719 个,第三产业 GDP 占比由 46.6%增长为 61.3%(图 6(c))。

2.3.3 河北省

河北省农业用水与第一产业 GDP 占比、农作物播种面积存在较强的正相关关系,Spearman 秩相关系数分别为 0.945 8 和 0.733 5,同时,这两个影响因子之间也存在较强的相关性,Spearman 秩相关系数为 0.716 5(图 7(a))。河北省工业用水与第二产业 GDP 占比、工业企业平均用工人数存在一定的正相关关系,Spearman 秩相关系数分别为 0.6544 和 0.5604,而与第二产业能源消费总量相关性不大(图 7(b))。河北省生活用水与总人口、城镇居民人均可支配收入、建筑业总产值、第三产业 GDP 占比均有较强的正相关性,Spearman 秩相关系数达到 0.80 以上(图 7(c))。

以上分析结果表明,农作物播种面积的减少是河北省 2001—2023 年农业用水显著减少的可能原因之一。2001 年河北省农作物播种面积为 899.08 万  $\text{hm}^2$ ,至 2022 年减少至 811.40 万  $\text{hm}^2$ ,减少约 9.75%(图 8(a))。河北省 2001—2023 年工业用水和第二产业 GDP 占比均有降低趋势,但第二产业 GDP 占比又与工业能源消费总量、工业企业数量表现出较强的负相关性,即 2001—2023 年第二产业 GDP 占比虽然降

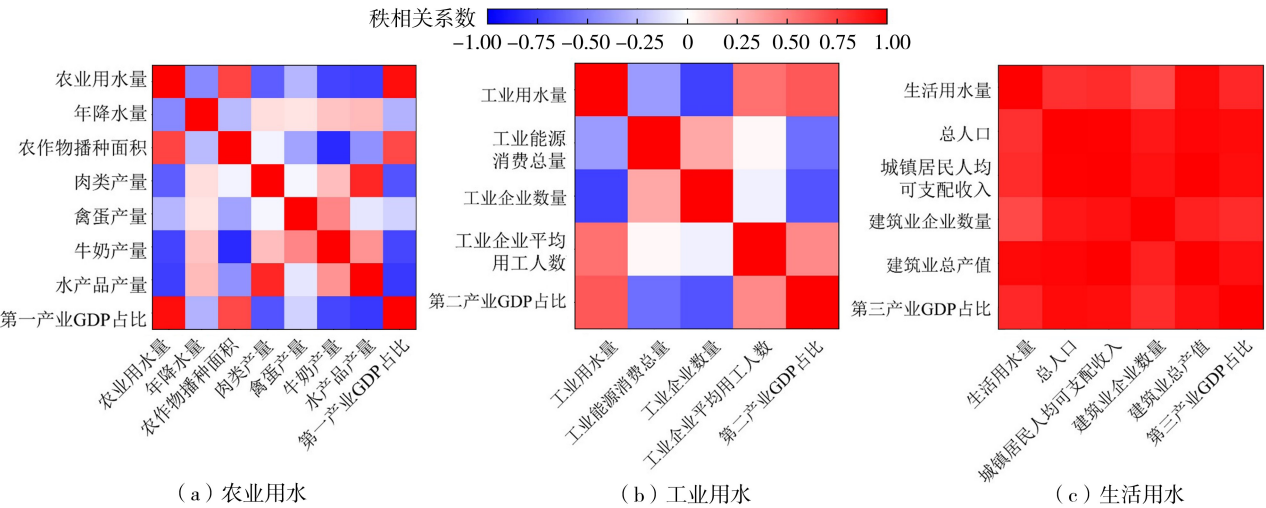


图 7 河北省 2001—2023 年农业、工业和生活用水 Spearman 分析结果

Fig. 7 Results of Spearman analysis for agricultural, industrial, and domestic water consumption in Hebei from 2001 to 2023

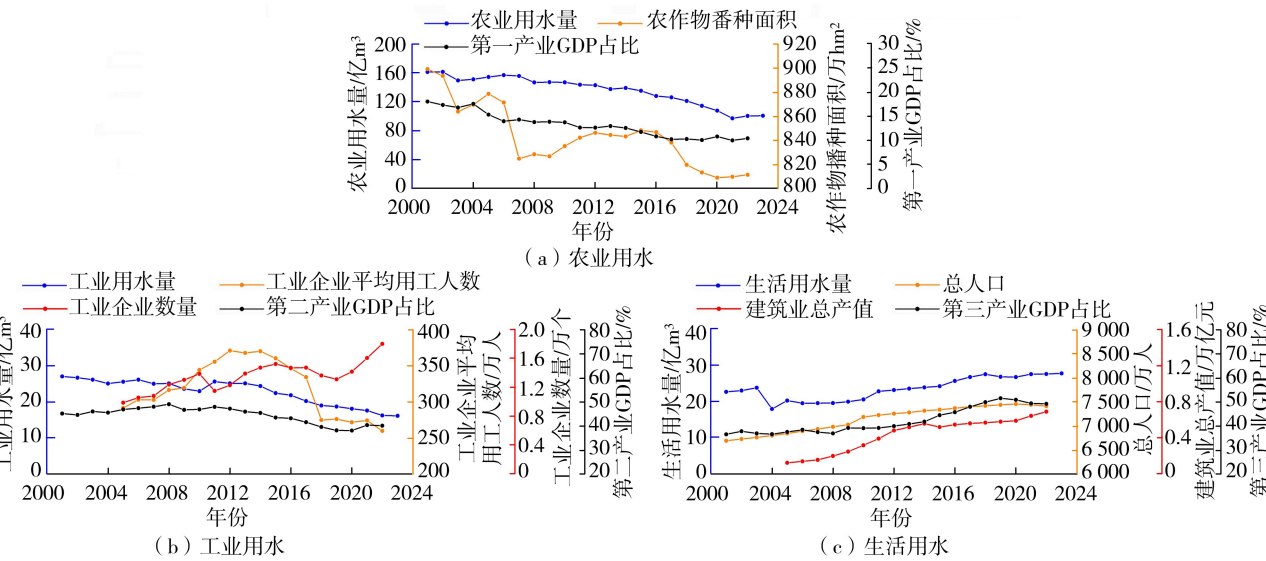


图 8 河北省 2001—2023 年农业、工业和生活用水及主要社会经济指标变化

Fig. 8 Changes in agricultural, industrial, and domestic water consumption and main social economy indicators in Hebei from 2001 to 2023

低,但工业生产相关指标却增长,表明第二产业 GDP 占比的降低主要源于第三产业的增长,而非工业生产的缩减。这进一步说明,河北省工业用水的显著减少可能主要源于工业企业用水效率的提升<sup>[21-22]</sup>。与北京市、天津市类似,河北省总人口、城镇居民人均可支配收入、建筑业和第三产业的共同增长应是导致其生活用水显著增加的主要原因(图 8(c))。

3 结 论

- a. 海河流域与京津冀三省市 2001—2023 年水资源总量均有显著上升趋势。
- b. 海河流域 2001—2023 年总用水量有一定减少趋势,但趋势不显著。在用水结构上,海河流域农业和工业用水有显著减少趋势,生活和生态环境用水有显著增加趋势。
- c. 北京市 2001—2023 年总用水量有显著增加趋势,且主要源于生态环境用水量的增加。北京市农业和工业用水均显著减少,生活用水显著增加。相关性分析结果表明,北京市用水结构的变化应是产业结构调整造成的。北京市 2001—2023 年多个工农业生产指标均显著降低,而第三产业、建筑业、人口相关指标同步增长。
- d. 天津市 2001—2023 年总用水量有显著增加趋势,且主要源于生态环境用水量的增加。天津市

2001—2023 年农业用水先增加后减少,整体有显著减少趋势;天津市工业用水无明显变化趋势,生活用水有显著上升趋势。相关性分析结果表明,天津市 2001—2023 年农业用水的变化可能主要受奶类产量及水产品产量的影响;天津市生活用水的增加主要源于城镇居民人均可支配收入、建筑业及第三产业的同步增长。

e. 河北省 2001—2023 年总用水量有显著减少趋势。在用水结构上,河北省农业和工业用水均显著减少,生活和生态环境用水均显著增加。相关性分析结果表明,河北省农业用水的减少可能主要是农作物播种面积减少导致的;河北省 2001—2023 年工业生产相关指标没有明显的降低趋势,意味着工业用水的减少可能主要源于工业企业用水效率的提升;河北省生活用水的增加主要源于总人口、城镇居民人均可支配收入、建筑业和第三产业的同步增长。

参考文献:

[ 1 ] 南水北调工程累计调水 700 亿立方米[ EB/OL]. ( 2024-03-18 ) [ 2024-10-18 ]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content\\_6939957.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939957.htm).

[ 2 ] 夏军,石卫,王强,等.海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[ J]. 水资源保护,2017,33( 1 ):1-8. ( XIA Jun,SHI Wei,WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [ J]. Water Resources Protection,2017,33( 1 ):1-8. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 孙叶飞,夏青,周敏.新型城镇化发展与产业结构变迁的经济增长效应[ J]. 数量经济技术经济研究,2016,33( 11 ):23-40. ( SUN Yefei,XIA Qing,ZHOU Min. The economic growth effects of new urbanization development and industrial structure change [ J]. Journal of Quantitative & Technological Economics,2016,33( 11 ):23-40. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 徐传谟,王鹏,崔悦,等.城镇化水平、产业结构与经济增长:基于中国 2000—2015 年数据的实证研究[ J]. 经济问题,2017( 6 ):26-29. ( XU Chuanchen,WANG Peng,CUI Yue, et al. The urbanization level, industrial structure and economic growth: based on China's empirical data from 2000 to 2015[ J]. On Economic Problems,2017( 6 ):26-29. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 赵勇,王庆明,王浩,等.京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[ J]. 中国工程科学,2022,24( 5 ):8-18. ( ZHAO Yong,WANG Qingming,WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei Region: challenges and strategies [ J]. Strategic Study of CAE,2022,24( 5 ):8-18. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 许继军,曾子悦.适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[ J]. 长江科学院院报,2021,38( 10 ):27-32. ( XU Jijun,ZENG Ziyue. Towards high-quality development: ideas, strategies and suggestions for water resources allocation of the South-to-North Water Diversion Project[ J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2021,38( 10 ):27-32. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 徐蕴韵,吴昊,李永泰,等.南水北调东线江苏段用水结构及其时空演变[ J]. 水资源保护,2022,38( 2 ):97-102. ( XU Yunyun,WU Hao,LI Yongtai, et al. Water consumption structure and its temporal and spatial evolution in Jiangsu section of east route of South-to-North Water Diversion Project[ J]. Water Resources Protection,2022,38( 2 ):97-102. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等.南水北调中线干线智慧输水调度的思考[ J]. 河海大学学报( 自然科学版 ),2023,51( 5 ):46-55. ( CHEN Xiaonan,JIN Yanguo,XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[ J]. Journal of Hohai University( Natural Sciences ), 2023,51( 5 ):46-55. ( in Chinese ) )

[ 9 ] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[ J]. 水科学进展,2013,24( 4 ):490-496. ( ZHANG Danwu,CONG Zhentao,NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [ J]. Advances in Water Science,2013,24( 4 ):490-496. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 左大幸,臧传富,汪丽娜.1980—2019 年珠江流域潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析[ J]. 人民珠江,2022,43( 10 ):41-49. ( ZUO Daxing,ZANG Chuanfu,WANG Lina. Temporal and spatial variation of potential evaporation and its influencing factors in Pearl River Basin from 1980 to 2019[ J]. Pearl River,2022,43( 10 ):41-49. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 卓莹莹,赵慧霞,魏敏,等.近 59a 黄河流域蒸发量变化规律及影响因素[ J]. 人民黄河,2021,43( 7 ):28-34. ( ZHUO Yingying,ZHAO Huixia,WEI Min, et al. Temporal and spatial changes of pan evaporation and its influence factors in the Yellow River Basin in recent 59 Years[ J]. Yellow River,2021,43( 7 ):28-34. ( in Chinese ) )

[ 12 ] 赵静怡,张翔,柯航.1956—2016 年武汉市降水变化规律分析[ J]. 武汉大学学报( 工学版 ),2021,54( 7 ):588-593. ( ZHAO Jingyi,ZHANG Xiang,KE Hang. Analysis of precipitation variation in Wuhan city from 1956 to 2016[ J]. Engineering Journal of Wuhan University,2021,54( 7 ):588-593. ( in Chinese ) )

Yuzhen,LIU Nianwu, LIANG Jintao, et al. Laboratory test of influence of thixotropic slurry composition on drag reduction performancel[J]. Bulletin of Science and Technology ,2024,40(10) :36-39. ( in Chinese ) )

[ 18 ] 王义盛,赵小鹏,袁锐,等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报( 自然科学版 ),2023,51(4) :65-71. ( WANG Yisheng,ZHAO Xiaopeng,YUAN Rui,et al. Analysis on performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University( Natural Sciences ),2023,51(4) :65-71. ( in Chinese ) )

[ 19 ] 黄汉仁,杨昆鹏,罗平亚. 泥浆工业原理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1994:62-65.

[ 20 ] ZHANG Xianwei,KONG Lingwei,YANG Aiwu,et al. Thixotropic mechanism of clay:a microstructural investigation[J]. Soils and Foundations,2017,57(1) :23-35.

[ 21 ] ZHANG Xianwei, LIU Xinyu, WANG Gang. Discussion of “ experimental study of the thixotropic strength recovery and microstructural evolution of marine clays ” [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2023,149(6) :11079.

[ 22 ] 刘勇,刘思峰,FORREST J. 一种新的灰色绝对关联度模型及其应用[J]. 中国管理科学,2012,20(5) :173-177. ( LIU Yong,LIU Sifeng,FORREST J. A new grey absolute degree of grey incidence model and application[J]. Chinese Journal of Management Science,2012,20(5) :173-177. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2025 - 03 - 31 编辑:熊水斌)

( 上接第 25 页)

[ 13 ] 余鹏明,管孝艳,陈俊英,等. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究[J]. 节水灌溉,2019( 10 ) :78-82. ( YU Pengming,GUAN Xiaoyan,CHEN Junying,et al. Study on factors affecting reclaimed water utilization based on Spearman rank correlation[J]. Water Saving Irrigation,2019( 10 ) :78-82. ( in Chinese ) )

[ 14 ] 陈旭,韩瑞光. 基于水文分区的海河流域洪水演变影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2021( 11 ) :69-77. ( CHEN Xu,HAN Ruiguang. An analysis of the influencing factors of flood evolution in Haihe River Basin based on hydrologic regionalizations [J]. China Rural Water and Hydropower,2021( 11 ) :69-77. ( in Chinese ) )

[ 15 ] 李艺珍,岳春芳,曹伟. 基于滑动 Copula 函数的金沟河流域径流-气温关系变异诊断[J]. 长江科学院院报,2020,37( 11 ) :33-39. ( LI Yizhen,YUE Chunfang,CAO Wei. Variation diagnosis of runoff-temperature relation in Jingou River Basin based on sliding Copula function[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37( 11 ) :33-39. ( in Chinese ) )

[ 16 ] 毕可心,董增川,李大勇,等. 温州市不同海拔极端降水时空演变[J]. 河海大学学报( 自然科学版 ),2025,53( 1 ) :31-40. ( BI Kexin,DONG Zengchuan,LI Dayong,et al. Temporal and spatial evolution of extreme precipitation at different altitudes in Wenzhou City,China[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2025,53( 1 ) :31-40. ( in Chinese ) )

[ 17 ] 侍雪. 泰州市用水影响因素与变化趋势分析[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

[ 18 ] 王浏琳,陈家栋,张方敏. 基于神经网络的南京市用水量预测[J]. 水电能源科学,2023,41( 12 ) :28-31. ( WANG Liulin,CHEN Jiadong,ZHANG Fangmin. Prediction of Nanjing water consumption based on neural network[J]. Water Resources and Power,2023,41( 12 ) :28-31. ( in Chinese ) )

[ 19 ] 李彦彬,闫文晶,张海涛,等. 基于改进 GM-LSSVR 模型的郑州市用水量预测[J]. 中国农村水利水电,2022( 1 ) :141-146. ( LI Yanbin,YAN Wenjing,ZHANG Haitao,et al. Forecast of water consumption in Zhengzhou City based on improved GM-LSSVR model[J]. China Rural Water and Hydropower,2022( 1 ) :141-146. ( in Chinese ) )

[ 20 ] 王文生. 海河流域防御 2021 年夏秋连汛经验启示[J]. 中国水利,2022( 8 ) :4-7. ( WANG Wensheng. Experience and enlightenment of flood defense in the summer and autumn of 2021 in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources,2022( 8 ) :4-7. ( in Chinese ) )

[ 21 ] 刁子乘,赵晶,韩宇平. 中国北方地区工业用水边际效益及影响因素研究[J]. 人民珠江,2022,43( 11 ) :8-15. ( DIAO Zicheng,ZHAO Jing,HAN Yuping. Marginal benefit of industrial water use in Northern China and its influencing factors[J]. Pearl River,2022,43( 11 ) :8-15. ( in Chinese ) )

[ 22 ] 田贵良,高廷艳. 水资源税改革对缺水地区工业用水效率的影响[J]. 资源与产业,2022,24( 3 ) :43-52. ( TIAN Guiliang,GAO Tingyan. Impacts of water resource tax reform on industrial water use efficiency inwater shortage areas[J]. Resources & Industries,2022,24( 3 ) :43-52. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2024 - 11 - 05 编辑:熊水斌)