

京津冀 2000—2021 年地表水面积 时空变化及其影响因素

马彩依¹, 曹洪涛¹, 崔铁军¹, 张甲波², 孙艳艳¹

(1.天津师范大学 京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387;

2.河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: [目的] 分析京津冀地区各市 2000—2021 年地表水面积的时空变化趋势、典型湿地的地表水空间形态演变及影响因素, 为该区域水资源保护及合理开发利用提供科学参考。[方法] 利用 JRC 全球地表水产品数据集提取 2000—2021 年京津冀各市不同类型的地表水, 分析京津冀各市近 22 a 地表水面积时空变化趋势, 利用形态学空间格局分析模型(MSPA)分析典型区域白洋淀、七里海湿地的地表水空间形态演变, 结合气候和人类活动数据, 采用相关性分析法, 阐明不同城市地表水时空变化的驱动机制。[结果] ①从时间上看, 2000—2021 年京津冀永久性水体面积整体呈下降趋势, 而季节性水体面积整体呈增长趋势。从空间上看, 地表水面积动态减少的重心区域主要集中在都市圈北京、天津、廊坊等城市, 而南北方向上“南水北调”中线沿线城市邯郸市、邢台市、石家庄市等城市地表水面积动态呈现增加趋势。②近 22 a 白洋淀核心湿地地表水面积在 2000—2005 年逐渐减少, 2005 年后开始逐渐增加。七里海的核心湿地面积在 2000—2010 年逐渐减少, 2010 年后开始逐渐增加。③京津冀南部城市最大水体面积与降水量呈正相关, 而东部沿海城市呈负相关, 显示人类活动与自然补给之间的不平衡性。北京市、承德市、唐山市的用水量与最大地表水面积之间存在显著正相关, 显示跨流域调水和生态补水的影响较大。而秦皇岛和天津市则表现为显著负相关和极显著负相关, 显示地下水超采对地表水资源有着不利影响。[结论] 地表水面积变化受气候和人类活动的显著影响, 未来京津冀应通过跨流域调水、节水宣传、生态恢复和减少地下水的开采, 有效保护地表水资源, 以应对气候和人类活动的影响。

关键词: 京津冀地区; 地表水面积; 湿地; 时空变化; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0309-12

中图分类号: X87

文献参数: 马彩依, 曹洪涛, 崔铁军, 等. 京津冀 2000—2021 年地表水面积时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 309-320. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.032; Ma Caiyi, Cao Hongtao, Cui Tiejun, et al. Spatiotemporal variation of surface water area in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021 and its influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 309-320.

Spatiotemporal Variation of Surface Water Area in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2021 and Its Influencing Factors

Ma Caiyi¹, Cao Hongtao¹, Cui Tiejun¹, Zhang Jiabo², Sun Yanyan¹

(1. Beijing-Tianjin-Hebei Ecological Civilization Development Institute,

Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal trends of surface water areas, evolution of surface water spatial patterns in typical wetlands, and imaging factors in the cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021 were analysed in order to provide scientific references for the protection, rational development, and utilisation of water resources in the region. [Methods] This study utilised the JRC global surface water dataset to identify surface water variations in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021. We examined

收稿日期: 2023-10-26

修回日期: 2024-03-25

资助项目: 河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心开放项目“海岸带水体盐度多源遥感建模与反演技术研究”(53H23039)

第一作者: 马彩依(1999—), 女(汉族), 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。Email: mcy5050@163.com。

通信作者: 曹洪涛(1988—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 高级工程师, 研究生导师, 主要从事海洋遥感应用等方面的研究。Email: caohongtao0714@163.com。

the spatiotemporal trends in surface water and morphological evolution within the Baiyangdian and Qilihai wetlands using morphological spatial pattern analysis (MSPA). Correlation analyses incorporating climatic and anthropogenic factors had identified the drivers of these spatiotemporal changes. [Results] ① During 2000—2021, from a temporal perspective, a notable decline occurred in the area of permanent water bodies across the Beijing-Tianjin-Hebei region, which was contrasted by a consistent increase in seasonal water bodies. In terms of spatial distribution, the reduction in surface water area was primarily concentrated in the metropolitan areas of Beijing, Tianjin, and Langfang City. Conversely, cities along the South-North Water Diversion central route, such as Handan, Xingtai, and Shijiazhuang City, experienced an increasing trend in surface water area, indicating a directional shift towards increased water resource availability. ② The surface water area of the core wetland of Baiyangdian gradually decreased from 2000 to 2005 and began to gradually increase after 2005. The core wetland area of Qilihai gradually decreased from 2000 to 2010 and gradually increased after 2010. ③ The maximum water body area in the southern cities of Beijing-Tianjin-Hebei was positively correlated with precipitation, whereas the eastern coastal cities were negatively correlated. This indicated an imbalance between human activities and natural recharge. A significant positive correlation was observed between water consumption and maximum surface water area in Beijing, Chengde, and Tangshan City, indicating a greater influence of cross-basin water transfer and ecological recharge. In contrast, Qinhuangdao and Tianjin City showed highly significant negative correlations, indicating that the over-exploitation of groundwater had a negative impact on surface water resources. [Conclusion] Changes in surface water area are significantly affected by climate and human activities. In the future, the Beijing-Tianjin-Hebei region should effectively protect surface water resources through inter-basin water transfers, water conservation campaigns, ecological restoration, and reduction of groundwater extraction to cope with the impacts of climate and human activities.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; surface water area; wetlands; spatiotemporal variation; influencing factors

京津冀地区水资源严重短缺,已经成为制约京津冀协同发展战略实施的突出因素^[1-3]。地表水作为水资源的一种存在形态,其分布和驻留情况对生态环境变化有着重要的影响^[4]。因此,加强对地表水资源的动态调查和分析有助于推进京津冀协同发展,对修复生态环境具有重要意义。近年来,国内外学者对地表水资源开发利用和管理进行了大量的研究^[5-7],研究表明,地表水资源的变化不仅与气温^[8]、降水^[9]、土地利用^[10]和人口^[11]等因素密切相关,而且还受到地下水资源^[12]、跨流域调水^[13]和生态补水^[14]等因素的重要影响。如王庆明等^[15]分析了京津冀平原区长时间序列水面面积的变化特征,得出生态补水是河湖水面面积增加的主要原因。郝金虎等^[16]构建了京津冀地表水体高时空分辨率连续变化图谱,发现 1997—2021 年水体面积呈波动下降趋势。在影响因素中降水量、前一年水体面积对京津冀地区水体变化为正向影响,而气温、潜在蒸散发、农业用水、工业用水和生活用水均起负向影响。吕金霞等^[17]分析了京津冀地区湿地景观时空变化及其驱动力,发现京津冀地区湿地面积的变化呈现从略微增长到快速减少趋势,近 10 a 减少趋势略有减缓。Wang Xiaoya 等^[18]采用 SMDPSO 方法提取 1984—2018 年白洋淀地表水体

并取得较好效果,表明白洋淀前期的水面变化是气候变化与人类活动的共同影响,后期水面变化受调水工程与国家政策等人为活动的影响更大。以上大多数研究主要为对京津冀地区地表水的综合研究,但缺乏对京津冀不同城市水体变化的分析和影响因素的探究。鉴于此,本文以 2000—2021 年长时间序列遥感数据、京津冀气候、人类活动数据为基础,基于 Google Earth Engine(GEE)云平台利用 JRC 数据集提取京津冀各类地表水,分析京津冀地区各市近 22 a 地表水面积时空变化趋势、典型湿地的地表水空间形态演变及影响因素,为京津冀水资源保护及合理开发利用提供科学参考。

1 研究区域、数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于东经 113°04′—119°53′,北纬 36°01′—42°37′,地处华北平原北部。该区域包括北京市、天津市和河北省的 11 个地级市,京津冀地区与辽宁、内蒙古、山西、河南、山东等省区相邻,东临渤海,属于典型的暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷少雪,夏季炎热多雨。地势呈西北高、东南低的地形特点。京津冀地区位于中国的海河流域,

主要河流有潮白河、蓟运河、永定河和大清河等^[19]。

1.2 数据来源

1.2.1 京津冀地表水体数据 地表水数据集为欧盟委员会联合研究中心(ECJRC)提供的全球地表水数据集。本文选用 JRC 全球地表水产品,该产品是欧空局研发绘制了过去 30 a 全球地表水的位置和时间分布的数据集^[20],其使用 1984—2021 年的具有多光谱、多时序的 Landsat 数据以及辅助数据自动提取地表水体。通过构造地物多光谱库、基于 NDVI 和色调—饱和度—亮度(HSV)的空间变换,再借助由视觉分析光谱库所存储信息获得多维特征空间描述的聚类方程,使用专家系统将每个像素单独分类为水/非水,最终达到水体分类总体的错分误差少于 1%,总体的漏分误差少于 5%。本文利用了 JRC Yearly Water Classification History, v1.4 数据集在 GEE 平台提取了京津冀 2000—2021 年不同类型的地表水。将 1 a 内 75% 以上时间都有水面的水体称为永久性水体,25%~75% 时间有水面的水体称为季节性水体,低于 25% 时间有水面的水体称为临时性水体。

1.2.2 京津冀气候、人类活动等数据 通过 2000—2021 年的海河流域水资源公报、河北省水资源公报、北京市水资源公报、天津市水资源公报,收集了京津冀各市每年的降水量和用水量(生活用水、农业用水、工业用水、生态用水)数据。

1.3 研究方法

1.3.1 地表水面积动态度分析 通过计算动态度来反映地表水面积变化的剧烈程度,为直观展现京津冀各城市地表水面积变化在空间上的分布,采用格网法

将研究区分割成 1 km×1 km 的空间格网,用研究期始末地表水面积占该格网面积的比重变化反映该地区地表水面积变化的趋势。计算公式为:

$$K = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 代表地表水面积的动态度;S₁ 指研究时段初期地表水面积;S₂ 指研究时段末期地表水的面积;T 为研究时段长度。

1.3.2 标准差椭圆分析 标准差椭圆是 1926 年由美国南加州大学的韦尔蒂·利菲弗(Lefever)首次提出^[21],是分析空间数据集分布离散、集聚方向性的重要方法。它通过重心位置、方位角、长短轴方向和标准差椭圆来定量描述要素数据集的中心、离散和方向趋势。其中,重心定义为数据集空间分布的平均中心,方位角表示与正北方向的夹角,长轴方向显示分布密集的方向,而短轴则表示分布的离散程度。长短半轴的差值越大,椭圆扁率越大,表示数据集空间分布的方向性越强。本文利用标准差椭圆来揭示京津冀各市地表水面积动态度变化的空间分布范围和集聚情况。

1.3.3 基于形态学空间格局分析模型(MSPA)的湿地地表水分类 利用形态学空间格局分析(MSPA),在白洋淀、七里海湿地的栅格二值影像中,将地表水设置为前景,其他类型设置为背景,利用 Guidos Toolbox 2.8 将地表水区域分为核心、孤岛、边缘、穿孔、桥接、环岛、分支等类型^[22]。根据不同 MSPA 景观分类的定义和特征,判断其在湿地地表水连通性的生态指标和意义。其生态学含义如表 1 所示。

表 1 形态学空间格局分析模型(MSPA)的景观类型及生态学含义

Table 1 Landscape types and ecological implications of morphological spatiapattern analysis (MSPA)

景观类型	生态学含义
核心	景观像元中较大的生境斑块,动物栖息地、自然保护区等。
孤岛	彼此不相连的孤立、破碎的小斑块,斑块内外沟通交流的可能性较小。
环道	连接同一核心区,是核心区内物种迁移的通道。
桥接	连接不同核心区,可代表生态网络中连接源地的廊道,对物种迁移和景观连接具有重要的意义。
穿孔	核心区与内部非潜在源地之间的过渡区域,不具有生态效益。
边缘	核心区与外界非潜在源地之间的过渡区域,具有边缘效应。
分支	只有一端与边缘区、桥接区、环道或者孔隙相连的区域。

1.3.4 趋势分析和相关分析 在 SPSS 软件中,利用一元线性回归法对京津冀每个市的 2000—2021 年最大地表水面积与降水量、用水量分别进行趋势性分析和相关分析。利用 Person 相关系数探究最大地表水面积与降水量、用水量之间的相互作用关系,并对其进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 地表水时间变化

通过计算永久性水体和季节性水体近 22 a 的面积比例及面积变化率,以此来分析研究区内地表水面积的变化情况。如图 1 和表 2 所示,2000—2021 年,

京津冀永久性水体面积呈现下降趋势,水域面积平均值为 10 373.29 km²,下降率为 -247.41 km²/a。2000—2021 年近 22 a 来永久性水体最大值为 2004 年的 12 917.92 km²,最低值是 2019 年的 7 259.55 km²。总的来说,在 2000—2004 年永久性水体面积略有上升,但自 2004 年起,开始呈现阶梯式下降,每一次显著的下降后通常会有一个短暂的稳定期,然后再进一步下降,直至 2019 年后才有所回升。而季节性水体面积呈现增长趋势,水域面积平均值为 3 473.76 km²,上升率为 12.36 km²/a。近 22 a 来季节性水体最大值为 2016 年的 4 122.33 km²,最低值是 2009 年的 3 057.92 km²。季节性水体面积变化呈现上升和下降的交替变化,反映了季节性水体对环境条件变化的敏感性,如丰水期与枯水期的自然交替,或受到其他短期内可变的气候因素的影响。

在对季节性水体和永久性水体的面积占总水域面积比例的变化进行分析时,季节性水体的占比从 2000 年的 23.38% 逐步上升到了 2021 年的 28.96%,这表明在总水域面积中,季节性水体所占的比例逐年增加。反之,永久性水体的占比在同期从 76.62% 下降到了 21.04%,显示出永久性水体在总水域中所占的比重逐渐减少。从面积变化率来看,永久性水体的面积变化率从 2000 年开始,整体呈现下降趋势,尤其

在 2012 年,面积变化率急剧下降了 20.7%,在 2012—2015 年,处于缓慢下降的趋势,尽管在 2016 和 2020 年出现了回升,但总体来看,永久性水体在近 22 a 期间持续减少。在 2000—2021 年间,季节性水体面积变化率波动较为显著。尤其是在 2001,2011 和 2021 年,面积增幅分别为 1.97%、12.28% 和 13.55%,这些年份季节水体面积显著增加主要是由于降水量的显著增加导致的,特别是 2021 年的降水量比 2020 年增加了 51.8%,属于丰水年。相反,在 2009 和 2018 年的面积大幅下降,分别为 18.81% 和 17.95%,这在一定程度上是由于京津冀地区在 2009—2010 年遭遇严重旱情^[23]。

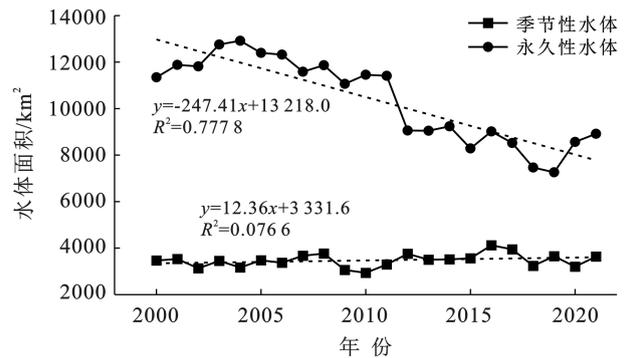


图1 京津冀 2000—2021 年地表水面积动态
Fig.1 Surface water area dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021

表2 京津冀 2000—2021 年季节性水体、永久性水体面积及比例

Table 2 Seasonal and permanent water bodies area and proportion in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021

年份	季节性水体			永久性水体		
	面积/km ²	面积比例/%	面积变化率/%	面积/km ²	面积比例/%	面积变化率/%
2000 年	3 462.77	23.38	—	11 346.92	76.62	—
2001 年	3 530.81	22.91	1.97	11 881.75	77.09	4.71
2002 年	3 131.52	20.95	-11.32	11 819.34	79.05	-0.53
2003 年	3 452.35	21.30	10.26	12 756.14	78.70	7.90
2004 年	3 164.55	19.68	-8.34	12 917.92	80.32	1.20
2005 年	3 473.17	21.88	9.74	12 399.41	78.12	-3.92
2006 年	3 372.01	21.49	-2.89	12 320.95	78.51	-0.64
2007 年	3 669.23	24.05	8.80	11 587.66	75.95	-5.93
2008 年	3 765.50	24.09	2.62	11 868.02	75.91	3.04
2009 年	3 057.92	21.65	-18.81	11 066.88	78.35	-6.78
2010 年	2 932.12	20.38	-4.11	11 455.97	79.62	3.48
2011 年	3 292.42	22.39	12.28	11 411.67	77.61	-0.38
2012 年	3 757.81	29.32	14.14	9 060.29	70.68	-20.7
2013 年	3 501.68	27.90	-6.80	9 046.92	72.10	-0.15
2014 年	3 513.79	27.56	0.35	9 237.51	72.44	2.14
2015 年	3 558.09	30.04	1.26	8 284.85	69.96	-10.34
2016 年	4 122.33	31.37	15.86	9 018.44	68.63	8.91
2017 年	3 943.71	31.64	-4.34	8 522.17	68.36	-5.62
2018 年	3 237.02	30.24	-17.95	7 465.73	69.76	-12.33
2019 年	3 648.93	33.45	12.72	7 259.55	66.55	-2.76
2020 年	3 201.04	27.20	-12.27	8 568.22	72.80	17.96
2021 年	3 634.07	28.96	13.55	8 915.99	71.04	4.26

由于京津冀地区城市较多,逐年分析该区各城市地表水所占比例变化较为复杂。因此,按照地理位置将城市划分为四大区域:东部沿海、中部、西部和南部。

如图 2 所示,京津冀各区中,东部沿海区的季节性水体和永久性水体面积所占比例最大。从季节性水体的所占比例中可以看出,2000—2012 年各区季节性水体比例变化相对稳定,但在 2015—2021 年期

间,东部沿海地区的季节性水体面积比例逐年减少,而中部、西部和南部地区则相反,其季节性水体面积比例有所增加。从永久性水体的比例中可以看出,2000—2012 年各区域的比例变化也相对稳定,但在 2012—2019 年逐年呈现出东部沿海区永久性水体比例减少,而其他区域永久性水体比例增加,直到 2019—2021 年,东部沿海区永久性水体才有所回升。这些变化显示了不同区域水资源分布的动态性。

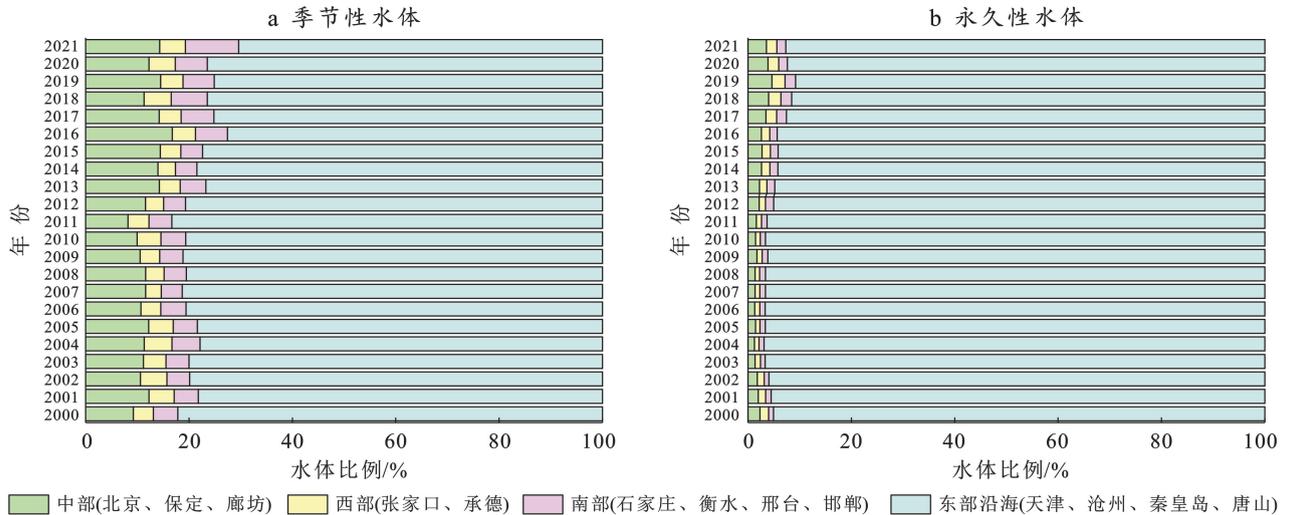


图 2 京津冀各区 2000—2021 年季节性水体、永久性水体比例变化

Fig.2 Proportion of seasonal and permanent water bodies in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021

2.2 地表水空间变化

由于京津冀各城市在不同时间段地表水变化情况不同,计算京津冀 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2021 年 4 个时段的地表水面积动态度、面积动态度标准差椭圆、面积动态度重心。其中,重心位置揭示了京津冀地表水动态变化的高值集中区域,而标准差椭圆则展示了这些变化在空间上的离散程度。如图 3—4 所示,2000—2010 年时间段内面积动态度所占比例程度整体表现为:降低 > 增加,呈现减少的趋势,表明动态度显著降低的区域逐渐增多。而 2010—2021 年时间段内面积动态度比例程度整体表现为:降低 < 增加,呈现增加的趋势,表明动态度显著增加的区域逐渐增多。如表 3 所示,从地表水面积动态度减少的重心经纬度来看,重心从廊坊市西南部逐步转移到廊坊市永清县,再向东南移至廊坊市与霸州市交界,最后北移到天津市武清区。通过椭圆参数(表 3)分析显示,初始阶段椭圆面积扩大,随后缩小,表明空间分布先分散后聚集。短半轴由 2000—2005 年的 143.03 km 增加至 2015—2021 年的

149.83 km,长半轴由 198.95 km 缩至 188.74 km,表明地表水动态度减少在东北—西南方向呈收缩态势,在西北—东南方向呈扩张态势。因此,动态度减少主要集中在都市圈北京、天津、廊坊等区域,该现象与都市圈人口和经济的快速增长相符合。这也表明以都市圈为核心保护生态环境,节约水资源是主要的方向。从地表水面积动态度增加的重心经纬度来看,重心从天津市西青区向西北移至廊坊市永清县,再向北至廊坊市安次区与永清县交界,最后向西南移至沧州市任丘市边界。通过椭圆参数(表 3)分析显示,椭圆面积先减少后增大,表明空间上先聚集后分散。短半轴由 2000—2005 年的 133.86 km 减少至 2015—2021 年的 131.07 km,长半轴由 186.66 km 增加至 237.25 km,表明地表水动态度增加在东北—西南方向呈扩张态势,在西北—东南方向呈收缩态势。自 2015 年后,南水北调工程东、中线陆续通水,海河流域河湖水系生态进入快速修复期^[15]。因此,在中线工程沿线的京津冀地区东北—西南方向上的城市,如邯郸市、邢台市、石家庄市等城市地表水面积动态度有所增加。

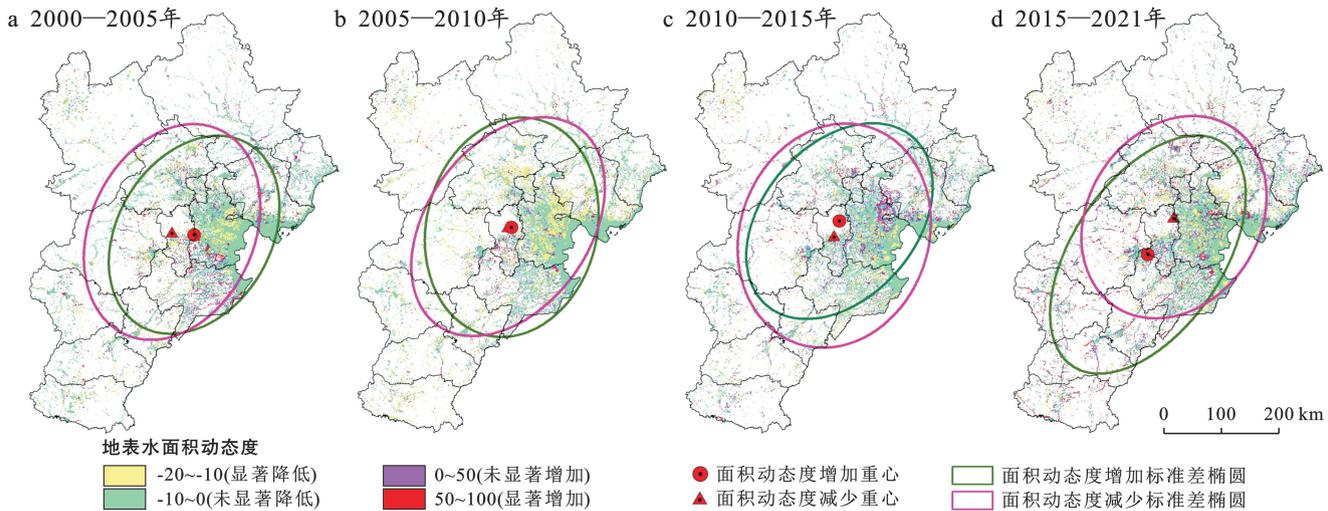


图 3 京津冀地表水面积动态空间变化

Fig.3 Dynamic and spatial changes of surface water area in Beijing-Tianjin-Hebei region

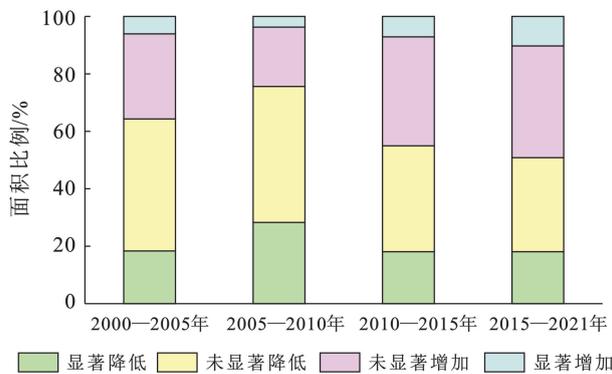


图 4 4 个时间段面积动态变化程度比例

Fig.4 Proportion of area dynamic attitude change degree in four time periods

2.3 典型湿地地表水时空变化

湿地包含地表水,同时也包含非水面的湿地植被和土壤等,是陆地与水体的过渡地带。湿地独特的地形结构,导致地表水与地下水交互作用复杂,丰水期主要以地表水补给地下水为主,枯水期主要以地下水补给地表水为主^[12]。近年来,国家开展湿地恢复与建设工程,是实现可持续发展的内在要求,也是践行生态文明建设的重要体现,其首要任务便是解决湿地生态系统当前面临的水源枯竭的问题。由于京津冀地区的白洋淀和七里海湿地地表水呈现出显著的空间异质性。因此,本文选取这两个湿地作为典型区域分析其地表水变化特征。

表 3 重心、标准差椭圆参数

Table 3 Center of gravity, standard deviation ellipse parameters

变化趋势	时段	重心经度	重心纬度	短半轴/km	长半轴/km	旋转角	面积/km ²	扁率
减少	2000—2005 年	116°25'23"	39°12'23"	143.03	198.95	23.78°	89 391.25	0.28
	2005—2010 年	116°35'19"	39°16'15"	142.43	213.77	34.5°	95 645.45	0.33
	2010—2015 年	116°32'08"	39°08'16"	164.5	201.52	17.58°	104 138.42	0.18
	2015—2021 年	116°47'48"	39°24'54"	149.83	188.74	30.79°	88 834.24	0.21
增加	2000—2005 年	116°51'42"	39°08'20"	133.86	186.66	29.63°	78 495.53	0.28
	2005—2010 年	116°39'24"	39°15'36"	148.87	196.3	12.46°	91 800.24	0.24
	2010—2015 年	116°39'48"	39°21'38"	134.03	195.97	39.85°	82 510.04	0.32
	2015—2021 年	116°14'10"	38°50'49"	131.07	237.25	33.25°	97 680.13	0.45

白洋淀是河北省最大的湖泊,七里海湿地素有“京津绿肺”之称,两者均位于海河流域内。经过 MSPA 分析得到 4 个时期白洋淀、七里海湿地水文连通性功能类型格局以及面积。如图 5、表 4 所示,在 2000—2005 年,白洋淀核心湿地面积出现了前期减少的趋势,在 2005 年达到最低点后开始逐渐增加。

不论是从空间还是面积上看,总体呈现出核心湿地在 2000—2021 年逐步破碎化后又逐渐恢复,边缘湿地逐年增加的特征。如图 6、表 4 所示,2000—2010 年,七里海的核心湿地、边缘湿地、桥接湿地在逐渐减少,2010 年后才逐渐增加。结合湿地水文连通性的变化,能够观察到核心湿地变化在整体变化中起着主导

作用。其中,核心斑块逐步分裂为分支、环岛、桥接、孤岛等细碎斑块,然后逐渐消退的过程称为消退期,核心湿地面积逐渐增加,分支向桥接转变的过程称为恢复期。如白洋淀(2000—2005)和七里海(2000—2010)的早期经历了消退期,这可能是由于人类活动和气候变化引起的。但随着湿地恢复措施的实施,核心湿地的面积逐渐增加,湿地连通性得到改善,白洋淀(2005—2021)和七里海(2010—2021)进入了恢复期,湿地生态系统正在逐步恢复其稳定和健康的状态。

近年来,国家开始重视湿地的生态保护,积极开展了生态修复工程并制定了一系列湿地管理政策。

从 2004 年起,对白洋淀地区实施多个引水入淀工程,2004 年实施了“引岳济淀”、2006 年实施“引黄济淀”、2008 年再次实施“引黄济淀”,这些工程一定程度上保护了白洋淀的生态环境,保证最低的生态水位,缓解了白洋淀干涸等问题。2014 年 12 月,天津市南水北调中线一期工程正式通水,实施了对七里海湿地的生态补水,2017 年批准了《七里海湿地生态保护修复规划(2017—2025 年)》,七里海开始实施退耕还湿政策,其中核心区的大部分养殖池被拆除,恢复成原有的沼泽状态。近年来,天津市动用海河水系各干支流打造 5 条补水线,自 2020 年以来,已累计补水 $1.25 \times 10^7 \text{ m}^3$,使得核心区水域面积较补水前扩大 $1\,000 \text{ hm}^2$ ^[24]。

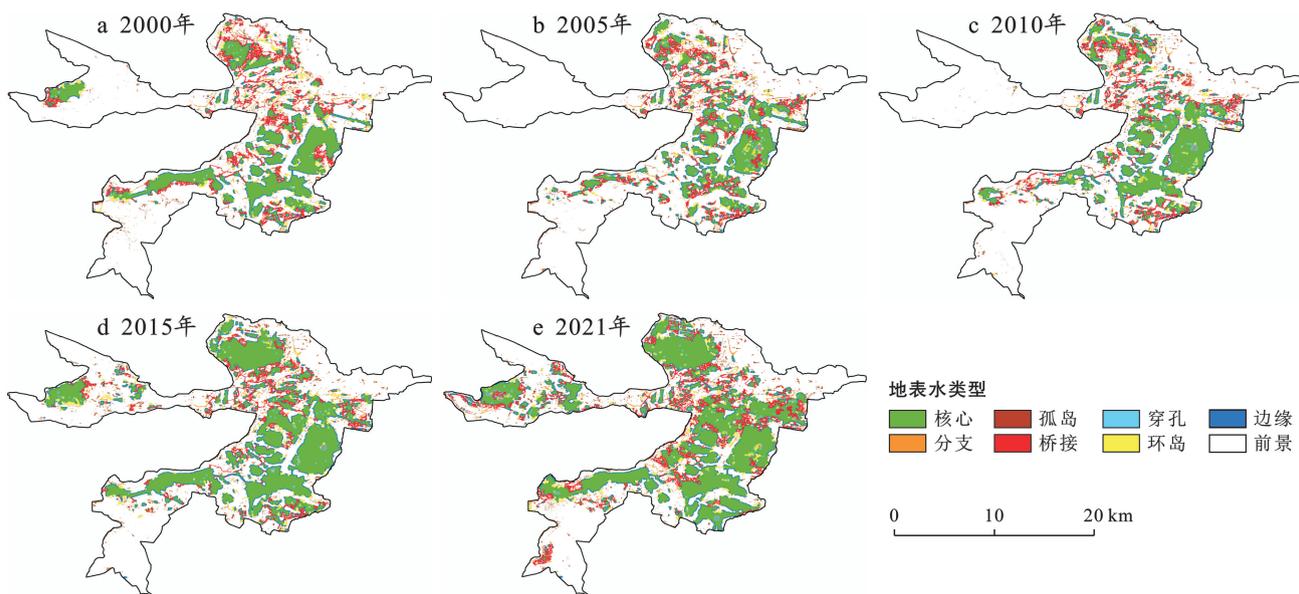


图 5 白洋淀 2000—2021 年地表水类型分布

Fig.5 Distribution of surface water types in Baiyangdian from 2000 to 2021

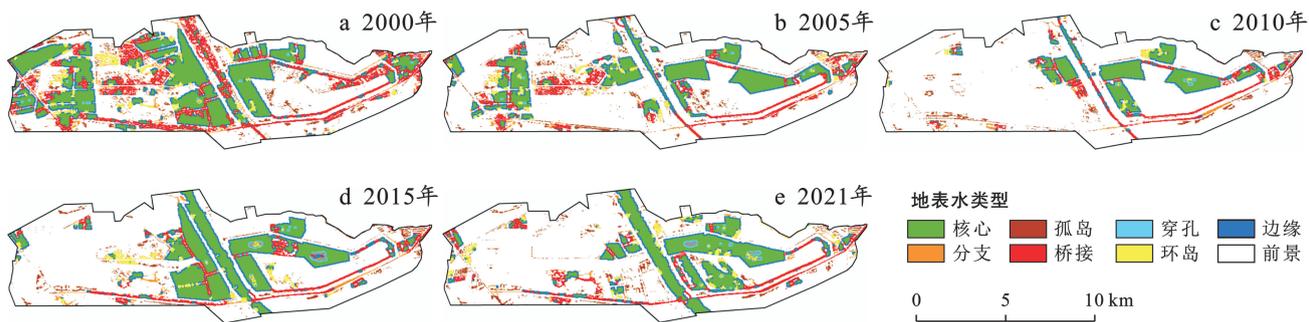


图 6 七里海 2000—2021 年地表水类型分布

Fig.6 Distribution of surface water types in Qilihai from 2000 to 2021

2.4 影响因素分析

气候变化和人类活动是影响京津冀地表水面积变化的主要因素。其中,将年降水量作为气候变化指标,用水量(生活用水、农业用水、工业用水、生态用

水)作为人类活动指标。总地表水包括季节性水体和永久性水体,其显示了京津冀地区年内最大地表水面积。因此,用京津冀最大水体面积与年降水量、用水量进行趋势性分析。由于京津冀各市受降水、用水量

的情况不同,利用一元线性回归法分别对每个市的 2000—2021 年最大地表水面积与降水量、用水量进行趋势性分析和显著性检验。并将地表水与降水量、用水量之间的相关性进行分类(表 5)。在气候对地表水面积变化的影响中,根据最大水体面积和降水量间的线性回归趋势的空间分布(图 7a)可知,2000—2021 年降水与各城市地表水面积之间存在相关。总体来看,存在正相关的城市多于负相关。其中,东部沿海地区的秦皇岛、唐山、天津和沧州市呈现未显著负相关,中部核心区域和西部生态涵养区的城市呈现未显著正相关。而南部的衡水市、邢台市呈现显著正相关,最南部的邯郸市呈现极显著正相关。随着全球气候变暖,冰川融化引起了全球海平面的上升,京津冀沿海地区因为海平面上升、地下水超采或城市化导致的地面硬化而影响降水对地表水的自然补给过程。海平面上升对中国沿海地区的影响是双重的。首先,它直接减少了陆地面积,导致一些低洼地区被海水淹没。其次,海水倒灌现象可能增加,进而影响淡水资源的质量,减少可用的地表水面积。同时,东部的沿

海地区还存在大量开采地下水的现象,地下水位的降低减少了地下水向地表水体的自然补给,从而导致地表水面积减少。这些因素共同作用,可能导致即使在降水增加的情况下,京津冀沿海地区的地表水面积并未显著增加,甚至可能出现减少的情况。位于西部生态涵养区张家口市和承德市政府均实施了一系列的生态保护和恢复措施,如退耕还林、水土保持等,有助于提高地区的水资源保持能力和改善水循环;中部地区的北京市以及紧邻首都的廊坊市、保定市城市化进程都较快,随着城市扩张,耕地、森林和草地等自然覆盖类型减少,而建设用地、道路、居住区等人工覆盖类型增加。人工覆盖的增加导致地面的不透水面积增加,降低了水分的渗透能力,增加了地表径流。更多的水流会直接汇入河流、湖泊和人工水库等,从而导致地表水面积的增加;而南部地区的衡水市、邢台市和邯郸市,地表水资源对于满足农业用水需求至关重要。随着降水量的增加,不仅农业灌溉的需求得到了更好的满足,而且通过建设小型水库和塘坝等水利措施,有效地增加了地表水面积。

表 4 白洋淀、七里海湿地 2000—2021 年各类地表水的面积

Table 4 Surface water area of Baiyangdian and Qilihai wetland from 2000 to 2021

km²

类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2021 年	
	白洋淀	七里海								
核心	49.23	18.72	38.94	10.88	46.66	6.81	79.22	14.18	90.51	11.36
孤岛	4.99	2.15	4.36	2.57	4.88	2.14	5.90	2.04	5.75	2.65
穿孔	0.49	0.22	1.14	0.15	1.23	0.12	1.48	0.38	2.28	0.43
边缘	14.60	7.04	16.7	5.29	17.43	3.21	20.03	5.25	21.29	5.02
环岛	5.80	2.03	5.28	1.25	5.24	0.52	6.45	1.28	7.53	1.58
桥接	19.30	11.16	18.57	5.34	15.65	3.02	14.53	3.96	23.43	3.93
分支	6.27	2.31	6.18	1.54	5.95	0.87	6.22	1.53	6.72	1.49
前景	206.44	34.08	216.34	52.58	212.25	63.55	167.38	58.53	142.47	55.82
总计	307.13	77.7	307.52	79.58	309.28	80.25	301.22	87.15	300	82.28

在人类活动对地表水面积变化的影响中,根据最大水体面积和用水量间的线性回归趋势的空间分布(图 7b)可知,2000—2021 年用水量与各城市地表水面积之间存在相关。其中,北京市、承德市、唐山市的用水量与最大地表水面积之间存在显著正相关,南部城市呈现未显著的正相关,而秦皇岛市存在显著负相关,天津市存在极显著负相关。如图 8 所示,多数城市与京津冀城市群整体情况类似,即农业用水比重下降较快,工业用水比重缓慢下降,而生活用水和生态环境用水比重均呈现出明显的上升趋势。京津冀地区通过提高农业灌溉的效率和优化工业用水的循环利用,成功实现了水资源的持续优化。生活用水和生态环境用水需求的增加既显示出城市化加速的趋势,也凸

显了公众对环境保护意识的提高。通过对城市环境以及河流、湖泊和湿地进行人工补水,进一步表明了国家对生态系统健康的关注。北京市通过实施严格的节水措施、提升水利设施效率、推广再生水使用,以及依靠南水北调等大型水利工程来增加水资源供给,通过这些措施的共同作用,不仅优化了用水结构,还提升了水资源的整体可持续性,确保了北京市在面对日益增长的用水需求时能够维持地表水资源的稳定性;承德市作为山水林田湖草系统较为完整的城市,其独特的地理位置和生态条件为水资源的自然补给和水土保持提供了良好的基础,通过有效的生态修复措施和水资源管理措施,能够在用水量增加的同时,保持甚至增加地表水面积;唐山市用水压力来自农业

和生态用水方面,主要矛盾是生活、工业用水同农业、生态用水的竞争^[25]。唐山市作为工业城市,工业用水量大,通过提高工业用水回用率、加强水资源保护和污染防治、建立健全的水资源管理制度等措施,实现用水需求与水资源可持续性之间的平衡。同时,唐山市也在实施河湖生态补水和水土流失治理,以强化对水资源的保护和合理利用。因此,北京市、承德市、唐山市用水量与最大地表水面积之间存在显著正相关,反映了跨流域调水和生态补水对地表水面积的影响较大。而天津市和秦皇岛市用水需求主要通过开采地下水来满足,天津市地下水严重超采,超采区范围涉及除蓟州区外的所有区,占市域面积的 79.2%,地面沉降形势严峻^[26]。秦皇岛市沿海区域是缺水地区,存在地下水超采现象^[27],由于用水量的增加加剧了地下水的超采,导致地下水位下降。这不仅影响地下水的可持续性,还会减少地表水面积,影响生态系统和水资源的可用性,显示了地下水过度开采对地表水资源的不利影响。

表 5 地表水与降水量和用水量的相关性分类
Table 5 Correlation classification of surface water with precipitation and water use

划分数值	程度
Slope<0, $p \leq 0.01$	极显著负相关
Slope<0, $0.01 < p \leq 0.05$	显著负相关
Slope<0, $p > 0.05$	未显著负相关
Slope>0, $p > 0.05$	未显著正相关
Slope>0, $0.01 < p \leq 0.05$	显著正相关
Slope>0, $p \leq 0.01$	极显著正相关

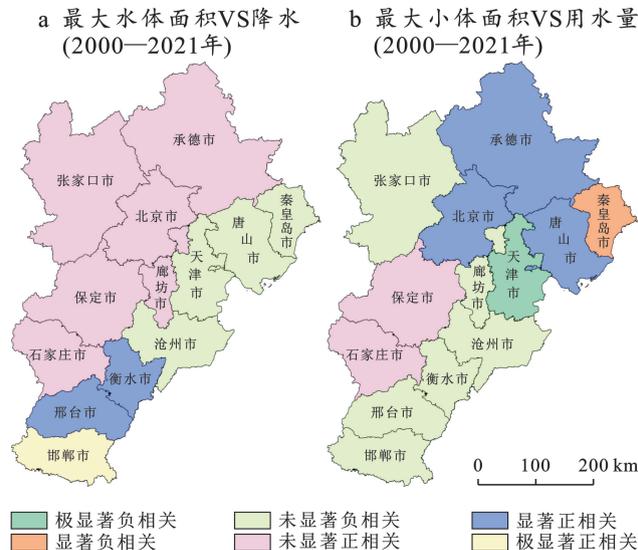


图 7 最大水体和降水量、用水量之间的线性回归趋势
Fig.7 Linear regression trends of maximum water body, precipitation and water consumption

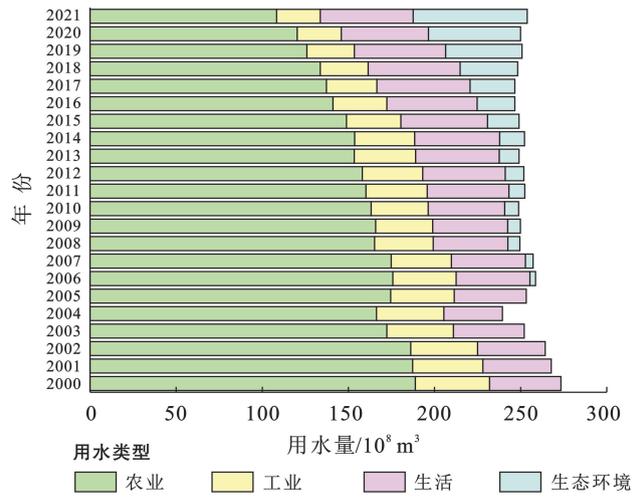


图 8 京津冀地区 2000—2021 年用水量组成
Fig.8 Composition of water consumption in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2021

3 讨论

(1) 从时间上分析,京津冀地区永久性水体面积呈现下降趋势,水域面积平均值为 10 373.29 km²,下降率为 -247.41 km²/a,而季节性水体面积呈现增长趋势,水域面积平均值为 3 473.76 km²,上升率为 12.36 km²/a,得出的结论与郝金虎等^[16]研究的京津冀长时序水体时空格局较为一致。王庆明等^[15]研究表明永久性水体,如水库和湖泊,在汛期后保持稳定水量,受降雨和人类调控影响,例如河湖的生态补水和水库的水量调度。季节性水体则主要受降雨影响,汛期降雨增加,水体面积扩大,非汛期降雨减少,水体面积缩小。因此,永久性水体减少、季节性水体增加说明流域内水资源管理和环境保护方面存在问题,过度的水资源开发和污染可能会对水体的生态系统造成破坏,导致永久性水体的减少。在京津冀各区中,东部沿海区的季节性水体和永久性水体地表水面积占比最大,自 2015 年后,随着南水北调工程的运行,京津冀的水资源矛盾得到有效缓解,其余城市的季节性水体和永久性水体相对占比逐渐增加。

(2) 从空间上分析,京津冀地区地表水体空间分布不均匀,整体上表现为东部沿海和中部的地表水资源较丰富,北部和南部的地表水相对匮乏^[28]。通过对地表水面积减少和增加的动态度分析可得,由于城市的飞速发展给水资源和生态环境带来了巨大压力,因此,近 22 a 地表水面积动态度减少的重心区域主要集中在都市圈,如北京、天津、廊坊等地。而南北方向上南水北调中线沿线城市邯郸市、邢台市、石家庄市等城市地表水面积动态度呈现增加趋势。

(3) 白洋淀和七里海湿地地表水在 2000—2021

年期间的时空动态变化中,白洋淀核心湿地在 2000—2005 年逐渐减少。2004 年,白洋淀陷入干淀危机,紧急从黄河引水 $3.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, 后续持续对白洋淀进行补水。到 2018 年,引江水逐渐成为主力生态补水的水源。截至 2020 年底,引江生态补水累计达到 $6.50 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[29]。因此,白洋淀的核心湿地在 2005 年达到最低点后开始逐渐增加。由于自然降水减少、上游河道断流和内部水系淤积,七里海长期面临干旱和缺水,导致七里海的核心湿地、边缘湿地和桥接湿地在 2000—2010 年逐渐减少,2010 年后才开始逐渐增加。近年来,天津市实施了跨域调水、区域蓄水及整合海河水系资源等措施,通过海河水系各干支流构建五条补水线路向七里海湿地输送水资源,年补水量达到 $8.0 \times 10^7 \text{ m}^3$, 使得七里海湿地水域面积从 $1\,333.33 \text{ hm}^2$ 增加到 $2\,333.33 \text{ hm}^2$ ^[30]。此外,2017 年《七里海湿地生态保护修复规划(2017—2025 年)》的批准及退耕还湿政策的实施,标志着七里海湿地的生态保护和修复工作正式启动。尽管在 2010 年之前七里海湿地景观趋向破碎化,生态系统不稳定,但 2010 年之后,通过一系列生态修复和保护措施,七里海湿地的生态状况得到了显著改善。直至 2017 年,七里海湿地的生态系统逐渐趋于稳定,其生态韧性水平也略有提升^[24]。

(4) 在气候对地表水面积变化的影响中,京津冀南部城市最大水体面积与降水量呈正相关,而东部沿海城市呈负相关。反映出人类活动与自然补给之间的不平衡。特别是沿海城市受到海平面上升、地下水超采等因素的影响,这些因素干扰了降水对地表水的自然补给过程。而西部城市的生态保护措施、中部城市的迅速城市化进程,以及南部城市对农业水资源的精细管理,这些地区对水资源的不同需求和所受的影响都显示出降水对于增加地表水面积的关键作用。在人类活动对地表水面积变化的影响中,北京市、承德市、唐山市的用水量与最大地表水面积之间存在显著正相关,南部城市呈现未显著的正相关,而秦皇岛市存在显著负相关,天津市存在极显著负相关。根据乔友凤等^[31]研究京津冀地区的人均水资源承载力表明,其中北京市人均水资源承载力年均下降率最高(2.68%),其次为承德市(2.58%)、唐山市(2.15%)。这也同时验证了本文的结论:北京市、承德市和唐山市人均水资源承载力年均下降率较高,表明对水资源过度利用,用水量较多,但这些城市在管理和优化水资源方面采取了有效措施,以平衡水资源的供需关系,进而促进水资源的可持续利用。而天津市和秦皇岛市的用水需求主要依赖于地下水的开采,导致地下

水位的下降^[32],过渡地开采地下水不仅对地下水资源的长期可持续性构成了威胁,还导致了地表水面积的减少,从而显示了地下水超采对地表水资源带来的不利影响。

4 结论

(1) 从时间上看,2000—2021 年近 22 a 来京津冀地区永久性水体面积整体呈现下降趋势,下降率为 $-247.41 \text{ km}^2/\text{a}$,而季节性水体面积整体呈现增长趋势,上升率为 $12.36 \text{ km}^2/\text{a}$ 。从空间上看,地表水面积动态减少的重心区域主要集中在都市圈北京、天津、廊坊等城市,而南北方向上南水北调中线沿线城市邯郸市、邢台市、石家庄市等城市地表水面积动态呈现增加趋势。

(2) 近 22 a 来白洋淀和七里海核心湿地面积有一个下降和上升过程,早期的白洋淀处于干淀状态,后期通过生态补水逐渐恢复。因此,白洋淀核心湿地地表水面积在 2000—2005 年逐渐减少,2005 年后开始逐渐增加。七里海的核心湿地面积在 2000—2010 年逐渐减少,政府通过退耕还湿政策以及一系列生态修复和保护措施,使得七里海湿地的生态状况得到了显著改善,因此,七里海核心湿地在 2010 年后开始逐渐增加。

(3) 在气候对地表水面积变化的影响中,京津冀南部城市最大水体面积与降水量呈正相关,而东部沿海城市呈负相关。反映出人类活动与自然补给之间的不平衡。在人类活动对地表水面积变化的影响中,承德市、北京市、唐山市的用水量与最大地表水面积之间存在显著正相关,显示跨流域调水和生态补水的影响较大。而秦皇岛市、天津市则表现为显著负相关和极显著负相关,显示出地下水超采对地表水资源有着不利影响。通过气候和人类活动对地表水面积影响的分析可知,未来京津冀应通过跨流域调水、节水宣传、生态恢复和减少地下水的开采,有效保护地表水资源,以应对气候和人类活动的影响。

参考文献 (References)

- [1] Wang Yong, Zhao Yang, Wang Yunyue, et al. Supply-demand risk assessment and multi-scenario simulation of regional water-energy-food nexus: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105799.
- [2] Tang Wenzhong, Pei Yuansheng, Zheng Hua, et al. Twenty years of China's water pollution control: Experiences and challenges [J]. Chemosphere, 2022, 295: 133875.
- [3] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价 [J].

- 水土保持通报,2016,36(3):211-218.
- Liu Yujie, Liu Junguo, Zhao Xu, et al. Assessment of vulnerability of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(3):211-218.
- [4] Li Yang, Niu Zhenguo, Xu Zeyu, et al. Construction of high spatial-temporal water body dataset in China based on sentinel-1 archives and GEE [J]. Remote Sensing, 2020,12(15):2413.
- [5] Huang Ze, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. Analysis of driving forces of water demand in Jing-Jin-Ji district in recent years based on water demand field theory [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(12): 2593-2605.
- [6] 陈华涛,任艺,朱阁晨,等.南阳市水资源承载能力计算分析[J].河南水利与南水北调,2022,51(2):47-48.
- Chen Huatao, Ren Yi, Zhu Gechen, et al. Analysis of water resources carrying capacity calculation in Nanyang [J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2022,51(2):47-48.
- [7] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, et al. Earth's surface water change over the past 30 years [J]. Nature Climate Change, 2016,6(9):810-813.
- [8] 李佳秀,陈亚宁,刘志辉.新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响[J].中国科学院大学学报,2018,35(3):370-381.
- Li Jiashou, Chen Yaning, Liu Zhihui. Variations in temperature and precipitation and their influences on surface water resource in different climate zones of Xinjiang [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018,35(3):370-381.
- [9] 钱名开,徐胜,梁树献,等.淮河流域地表水资源量变化及降水驱动效应分析[J].气象科技进展,2020,10(5):81-86.
- Qian Mingkai, Xu Sheng, Liang Shuxian, et al. Analysis on the change of surface water resources and the driving effect of precipitation in Huaihe River Basin [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020,10(5):81-86.
- [10] 代孟均,张兵,杜倩倩,等.不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例[J].环境科学,2024,45(3):1512-1524.
- Dai Mengjun, Zhang Bing, Du Qianqian, et al. Effects of land use types on water quality at different buffer scales: Tianjin section of the Haihe River Basin as an example [J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1512-1524.
- [11] 冯勇.西南边境地区“经济—人口—生态”耦合协调时空演变研究[D].云南昆明:云南师范大学,2021.
- Feng Yong. Research on coupling and coordinative spatio-temporal evolution of “Economy-Population-Ecology” in southwest border [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan Normal University, 2021.
- [12] 高福翔,徐东升,周金龙,等.新疆博尔塔拉河中游地表水与地下水转化关系及原因[J].干旱区研究,2023,40(11):1754-1764.
- Gao Fuxiang, Xu Dongsheng, Zhou Jinlong, et al. Relationship and cause of surface water and groundwater transformation in the middle reaches of Bortala River, Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2023,40(11):1754-1764.
- [13] 马永胜.引汉济渭跨流域调水系统优化调度关键技术理论与实践[D].陕西西安:西安理工大学,2021.
- Ma Yongsheng. Key technical theory and practical application for optimal operation of Han River to Wei River inter basin water transfer system [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2021.
- [14] 黎光和,潘兴瑶,李炳华,等.永定河北京段秋季生态补水对玉泉山泉的补给效果探究[J].水文,2023,43(1):30-34.
- Li Guanghe, Pan Xingyao, Li Binghua, et al. Study on the ecological replenishment of Yongding River (Beijing section) to Yuquan Mountain spring in autumn [J]. Journal of China Hydrology, 2023,43(1):30-34.
- [15] 王庆明,张越,窦鹏,等.1985—2020年京津冀平原水面面积演变特征及归因分析[J].水利学报,2023,54(4):451-460.
- Wang Qingming, Zhang Yue, Dou Peng, et al. Evolution law of water surface area in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1985 to 2020 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023,54(4):451-460.
- [16] 郝金虎,韦玮,李胜男,等.基于GEE平台的京津冀长时序水体时空格局及其影响因素[J].生态环境学报,2023,32(3):556-566.
- Hao Jintu, Wei Wei, Li Shengnan, et al. GEE based evaluation of the spatial-temporal pattern and drivers of long-term water body in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(3):556-566.
- [17] 吕金霞,蒋卫国,王文杰,等.近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(12):4492-4503.
- Lü Jinxia, Jiang Weiguo, Wang Wenjie, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei Region in recent 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4492-4503.
- [18] 王 Xiaoya, Wang Wenjie, Jiang Weiguo, et al. Analysis of the dynamic changes of the Baiyangdian Lake surface based on a complex water extraction method [J]. Water, 2018,10(11):1616.

- [19] 段维利,余新晓,陈丽华,等.京津冀城市群城镇化与生态建设对生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2023,30(4):404-411.
Duan Weili, Yu Xinxiao, Chen Lihua, et al. Impact of urbanization and ecological construction on the ecosystem services value in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):404-411.
- [20] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016,540(7633):418-422.
- [21] 何刚,张世玉,鲍珂宇,等.淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调及其时空分异[J].水土保持通报,2023,43(4):283-293.
He Gang, Zhang Shiyu, Bao Keyu, et al. Coupled coordination of land and water use efficiency in Huaihe River Basin and its spatial and temporal divergence [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):283-293.
- [22] 王崑,马春旭,郑伊含,等.基于 MSPA 模型和生态保护重要性评价的市域生态空间网络构建及优化[J].水土保持通报,2023,43(4):220-228.
Wang Kun, Ma Chunxu, Zheng Yihan, et al. Construction and optimization of urban ecological space network based on MSPA model and ecological protection importance evaluation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):220-228.
- [23] 姚璐.海河流域气象干旱与水文干旱演变特征及响应分析[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2023.
Yao Lu. Evolution characteristics and response relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Haihe River Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2023.
- [24] 高杰,高敏,赵志红,等.1987—2015 年七里海潟湖湿地景观格局变化及驱动力分析[J].水生态学杂志,2018,39(4):8-16.
Gao Jie, Gao Min, Zhao Zhihong, et al. Wetland landscape pattern changes and driving forces in qilihai lagoon, 1987—2015 [J]. Journal of Hydroecology, 2018,39(4):8-16.
- [25] 时玉涛.唐山市水资源优化配置研究[J].地下水,2024,46(1):206-208.
Shi Yutao. Research on optimal allocation of water resources in Tangshan City [J]. Ground Water, 2024,46(1):206-208.
- [26] 李华,董晓敏,张伟.天津市地下水超采区评价及综合治理成效分析[J].海河水利,2022(4):32-35.
Li Hua, Dong Xiaomin, Zhang Wei. Evaluation of groundwater over-exploitation area and analysis of comprehensive treatment effect in Tianjin [J]. Haihe Water Resources, 2022(4):32-35.
- [27] 刘林娟.秦皇岛市地下水超采区分析与保护对策研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(6):128-130.
Liu Linjuan. Analysis and protection countermeasure on groundwater overexploitation area in Qinhuangdao City [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2021,4(6):128-130.
- [28] 李鑫,邹长新,陈艳梅,等.2000—2019 年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2022,42(5):265-274.
Li Xin, Zou Changxin, Chen Yanmei, et al. Spatio-temporal pattern changes and driving factors of water conservation function in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):265-274.
- [29] 张梦嫚,吴秀芹.近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J].生态学报,2018,38(12):4205-4213.
Zhang Mengman, Wu Xiuqin. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4205-4213.
- [30] 国巧真,姚霖,杨光,等.七里海湿地景观变化和生态韧性评价[J].湿地科学,2023,21(2):230-238.
Guo Qiaozhen, Yao Lin, Yang Guang, et al. Landscape changes and ecological resilience evaluation of qilihai wetland [J]. Wetland Science, 2023,21(2):230-238.
- [31] 乔友凤,李奕曼,陈义忠,等.京津冀地区城镇化与水资源可持续利用的演变及匹配特征[J].水资源与水工程学报,2023,34(3):64-73.
Qiao Youfeng, Li Yiman, Chen Yizhong, et al. Evolution and matching characteristics of urbanization and water resources sustainable utilization in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023,34(3):64-73.
- [32] 鲍超,贺东梅.京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J].地理科学进展,2017,36(1):58-67.
Bao Chao, He Dongmei. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. Progress in Geography, 2017,36(1):58-67.