

doi: 10.12029/gc20231108001

赵良杰, 王莹, 栾崧, 杨杨, 吴树诚, 王喆, 李录娟. 2025. 近 40 年粤港澳大湾区水资源演变与生态环境格局变化[J]. 中国地质, 52(1): 215–231.
Zhao Liangjie, Wang Ying, Luan Song, Yang Yang, Wu Shucheng, Wang Zhe, Li Lujuan. 2025. Evolution of water resources and changes of ecological environment pattern in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area in the past 40 years[J]. Geology in China, 52(1): 215–231(in Chinese with English abstract).

近 40 年粤港澳大湾区水资源演变与生态环境格局变化

赵良杰^{1,2}, 王莹³, 栾崧^{1,2}, 杨杨^{1,2}, 吴树诚⁴, 王喆^{1,2}, 李录娟^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西百色 531406; 3. 广东省地质环境监测总站, 广东广州 510510; 4. 桂林水文中心, 广西桂林 541004)

摘要:【研究目的】受气候变化与人类活动的双重影响,亟需深化对粤港澳大湾区水资源演变规律的认识,以期为实现区域水资源的可持续管理提供科学依据和决策支持。【研究方法】本文采用定性与定量相结合、历史文献资料的深度挖掘以及多源水资源监测数据,全面分析大湾区自 1980 年以来近 40 年间的水文、降水、地表覆盖等水资源环境格局变化及其区域分异规律。【研究结果】大湾区水资源状况总体上呈现“西多东少、北多南少”的分布特征,1980—2022 年平均气温 22.2℃,降雨 2022.1 mm,主要变化周期约 4.1 a。西江、北江、东江干流平均径流量分别为 11231.09 m³/s、1479.63 m³/s、809.42 m³/s,径流变差系数介于 0.19–0.27,气候格局呈现出暖湿化的趋势,水体总量出现减少趋势,植被覆盖整体上升但局部出现退化,显著退化面积 6225.98 km²,改善面积 9537.31 km²;水体(含湿地)面积变化速率呈现“缓慢萎缩–加速萎缩–稳步增长–缓慢增长”的阶段性特征。【结论】提出具有开发远景的 41 处应急备用水源地,允许开采量达 234.26 万 m³/d。大湾区具有水资源与经济不协调、水生态服务功能退化、水资源时空分布不均及以地表水为主的供水水源结构单一等特点。

关键词: 水资源演变; 应急备用水源; 地质环境动力; 气候变化; 水文地质调查工程; 粤港澳大湾区

创 新 点: (1)全面分析大湾区自 1980 年以来的水文、降水、地表覆盖等水资源环境格局变化及其区域分异规律; (2)大湾区水资源状况总体上呈现出“西多东少、北多南少”的分布特征,水体(含湿地)面积变化速率呈现“缓慢萎缩–加速萎缩–稳步增长–缓慢增长”的阶段性特征,提出具有开发远景的 41 处应急备用水源地,允许开采量达 234.26 万 m³/d。

中图分类号: P641.3 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2025)01–0215–17

Evolution of water resources and changes of ecological environment pattern in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area in the past 40 years

ZHAO Liangjie^{1,2}, WANG Ying³, LUAN Song^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, WU Shucheng⁴, WANG Zhe^{1,2},

收稿日期: 2023–11–08; 改回日期: 2024–02–15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42102296)、国家重点研发计划项目(2023YFB3907703)、广东省水资源调查监测评价及广西重点研发计划项目(桂科 AB21220044)联合资助。

作者简介: 赵良杰,男,1986年生,副研究员,从事水资源评价工作; E-mail: zhaoliangjie@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 王莹,女,1985年生,高级工程师,从事地下水调查监测评价工作; E-mail: wymail5@163.com。

杨杨,女,1988年生,高级工程师,从事岩溶水资源评价工作; E-mail: yangyang_a@mail.cgs.gov.cn。

LI Lujuan^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Ministry of Nature Resources, Guangxi Key Laboratory of Karst Dynamics/UNESCO International Center for Karst Studies, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. National Field Scientific Observatory for Karst Ecosystems, Baise 531406, Guangxi, China; 3. Guangdong Provincial Geological environment monitoring Station, Guangzhou 510510, Guangdong, China; 4. Guilin Hydrology Center, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Due to the dual impacts of climate change and human activities, there is an urgent need to deepen the understanding of the evolution of water resources in the Greater Bay Area of Guangdong, Hong Kong and Macao, with a view to providing a scientific basis and decision-making support for the realization of the sustainable management of regional water resources. **[Methods]** This paper employs a combination of qualitative and quantitative methods, leveraging in-depth analysis of historical literature alongside multi-source water resource monitoring data to comprehensively examine changes in hydrology, precipitation, land cover, and other environmental factors related to water resources in the Greater Bay Area over the past 40 years (1980–2020). It also explores the regional patterns of differentiation in these changes. **[Results]** Our findings reveal a general water resource distribution trend of "abundance in the west and north, scarcity in the east and south," with an average temperature of 22.2°C and annual precipitation of 2022.1 mm from 1980 to 2022. The study observes a major cyclical change every 4.1 years. The average runoff of the Xijiang, Beijiang, and Dongjiang Rivers is quantified, alongside the variation in runoff coefficients, reflecting a warm and humid climatic trend. Concurrently, the total volume of water bodies exhibits a declining trajectory, while vegetation cover overall shows an increase but with local degradation. **[Conclusions]** The study identifies 41 potential emergency backup water sources, with a sustainable extraction capacity of 2342600 m³/day. It highlights the ongoing mismatch between water resources and economic development in the Greater Bay Area, the reduction of water ecosystem service functions, the spatial and temporal imbalances in water resource distribution, and the region's over-reliance on a predominantly surface water-based supply structure.

Key words: evolution of water resources; strategic water reserves; geo-environmental dynamics; climate alteration; hydrogeological survey engineering; Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area

Highlights: (1) This comprehensive examination sheds light on the evolution of environmental patterns related to hydrology, precipitation, and surface coverage within the Greater Bay Area since 1980, elucidating the regional divergences in these patterns; (2) The distribution of water resources across the Greater Bay Area typically exhibits a pattern characterized by abundance in the west and scarcity in the east, with a greater availability in the north compared to the south. The dynamic changes in the expanse of aquatic territories, including wetlands, undergo a phased progression marked by initial gradual reduction, followed by a phase of accelerated contraction, transitioning into a period of stable expansion, and culminating in a phase of gradual increase. In this context, we have identified 41 potential emergency backup water sources, with a collective feasible extraction volume amounting to 2342600 cubic meters per day.

About the first author: ZHAO Liangjie, male, born in 1986, associate researcher, engaged in water cycle and water resources evaluation; E-mail: zhaoliangjie@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WANG Ying, female, born in 1985, senior engineer, engaged in groundwater investigation, monitoring and evaluation; E-mail: wymail5@163.com. YANG Yang, female, born in 1988, senior engineer, engaged in karst water resources investigation, monitoring and evaluation; E-mail: yangyang_a@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Youth Foundation of China (No.42102296), National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB3907703), Guangdong Province Water Resources Survey, Monitoring and Evaluation and Guangxi Key Research and Development Program (No. Gui Ke AB21220044).

1 引 言

粤港澳大湾区涵盖多种气候类型,从滨海到内

陆,从低山丘陵到平原,水文和生态系统类型丰富多样,是中国南方的重要经济区域和生态屏障 (Wang et al., 2022; Li et al., 2022; 黄洋漫和陈晓宏,

2023)。近些年,经历了前所未有的经济增长和社会变革,与之伴随的是人类活动和气候变化对水资源和生态环境带来的深刻影响,包括土地荒漠化、生物多样性丧失、森林破坏、水危机和环境污染等复杂问题的叠加(赵良杰等, 2021; 夏日元等, 2022)。大湾区内工业化和城镇化迅速发展,塑造了人口、城市、水资源的供需格局,进一步改变了陆地表层的格局,又反作用于区域资源环境的开发与利用,导致人口和水资源空间分布不均,加之地表水质污染、植被湿地水体退化等生态环境问题严重。因此,在区域发展与生态保护之间寻找到平衡点,成为大湾区可持续发展的关键课题(吴盼等, 2021; Jiang et al., 2021; You et al., 2022)。资源环境的演变已不再仅仅是发展的条件,而是制约区域水生态安全的核心因素,对水资源环境格局变化和关键问题的认知不确定性,成为影响未来社会发展的潜在风险(杨杨等, 2022)。因此,提升大湾区供水安全保障水平,包括水污染防治、洪涝灾害预防、水资源区域联动性提升、流域生态环境治理等方面的制度优化和完善,成为紧迫的任务(曹建文等, 2021)。

从全球变化研究到地球系统科学联盟的多项科学计划,均将水环境作为研究重点,强调了在快速变化的地表环境和人类活动影响下,水资源、生态、污染等问题的重要性。近些年,许多学者对粤港澳大湾区的水资源现状及其社会经济协同演化趋势进行了严谨的分析,从气候因素、区域结构、水系、植被覆盖度、水资源等方面的时空分布、变化趋势、驱动因素、影响及适应策略进行了深入研究(刘畅等, 2019; Cheng et al., 2022; Huang et al., 2022; Li et al., 2022; 张凌等, 2022; 李娟等, 2022),谭奇峰等(2020)则从宏观政策引导层面,对大湾区水资源安全的整体形势进行预测,探讨了大湾区未来在对标国际湾区发展进程中可能面临的水资源约束问题。尽管前述研究对大湾区水资源问题提供了深刻见解,但在系统性和区域适应性策略方面仍有所不足,特别是在面对快速城市化和气候变化带来的综合性水资源挑战时,以往的研究往往局限于单一或分散的视角。因此,本研究综合利用了土地利用遥感解译数据、地质地貌、气温、降水和社会经济等多源多时相数据,重点关注大湾区水资源的演变规律与生态环境格局的变化以及二者间相

互作用机制。

笔者分析了从 1980 年至今粤港澳大湾区气候变化、山地水文、植被覆盖、城市化进程、水体湿地、人口增长和经济发展等多方面的资源环境系统变化,并预测了未来的发展趋势。通过对这些变化的系统分析,旨在识别区域内的重大水资源环境问题,并提出针对性的地质工作建议。这些工作将为粤港澳大湾区的国土空间规划、自然资源管理和战略性综合地质调查提供决策参考,支持区域的高质量发展和生态文明建设。

2 粤港澳大湾区概况

粤港澳大湾区是继美国纽约湾区、旧金山湾区、日本东京湾区之后的世界第四大湾区,在国家发展大局中具有重要战略地位。大湾区包括香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市,总面积 5.6 万 km^2 (李杰等, 2021)。2021 年末粤港澳大湾区常住人口达到 8670 万人,占全国人口的 5%。粤港澳大湾区属亚热带季风气候区,年平均气温 22°C ,相对湿度 80%,年降水量 1600~2000 mm,年蒸发量 1142~1738 mm,总体地势北高南低,东、北、西三面环山,南临南海,三角洲和河谷平原内残丘、台地棋盘状散布。大湾区位于中国第二大河流——珠江的出海口,区内地表河网密布,纵横交错,水域宽广,海潮频繁,海陆水体联系密切。丰沛的降水形成了大湾区密布的河网水系,汇集了西江、北江、东江和众多中小河流,各类河流 324 条,河道总长 1600 km,河网密度高达 0.83 km/km^2 ,是全国平均水平的 5 倍多。此外,区域内还有众多河口海湾,包括珠江河口、大亚湾、大鹏湾、广海湾及北海湾等(图 1)。水资源优化配置工程主要有两处,珠三角和东深(东江—深圳)供水工程。实施珠三角工程旨在解决深圳、东莞、广州南沙等地发展缺水问题,输水线路总长 113.1 km,取水规模 $80 \text{ m}^3/\text{s}$;东深供水工程担负着香港、深圳以及东莞等 2400 多万居民生活、生产用水重任,主线总长 68 km,取水规模 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,截至 2022 年 4 月,实现不间断对港供水达 277.5 亿 m^3 ,满足香港约 80% 的淡水需求。

大湾区地层隶属华南地层大区中的东南地层

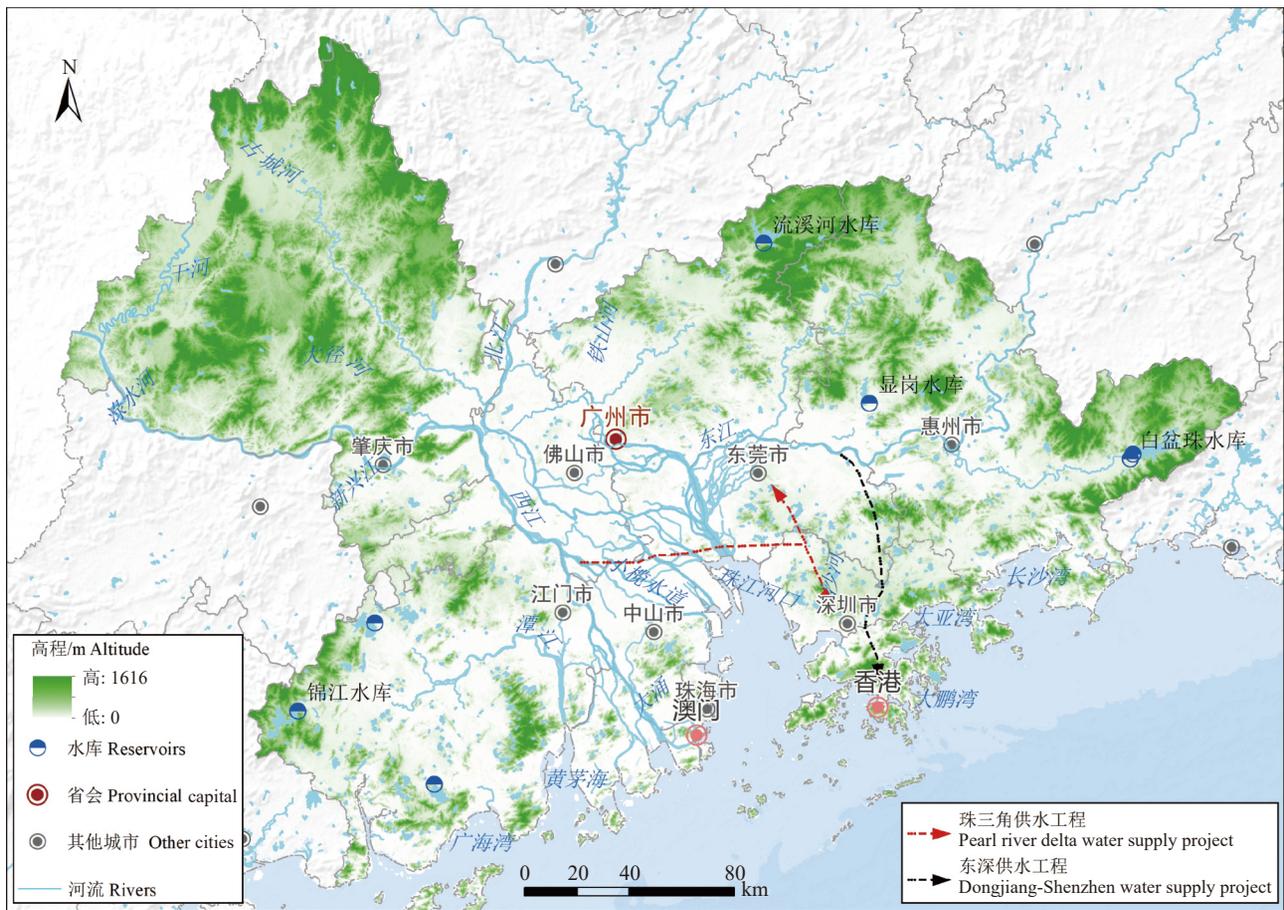


图1 粤港澳大湾区地理位置及水系

Fig.1 Geographic location and water system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

区,地表出露震旦系、寒武系、泥盆系、白垩系、古近系—新近系、第四系。岩浆岩主要为燕山期二长花岗岩类,以粗粒或粗粒斑状花岗岩为主,风化层发育;第四系分布最广,沉积类型有冲积、湖积、海积及海陆混合堆积,富水性主要取决于颗粒粗细、厚度大小和分布位置;古近系—新近系红色泥岩、砂砾岩为钙质泥质胶结,裂隙均被充填;碳酸盐岩地层在泥盆系、石炭系、二叠系均有发育,主要有上泥盆统天子岭组(D_3t)、下石炭统石磴子段(C_1ds)、上石炭统壶天群(C_2ht)、中二叠统阳新群(P_2y),总体来看,壶天群灰岩岩溶最发育,其次为石磴子段和阳新群灰岩。在构造单元上属华南褶皱系,经历了加里东期、印支期、燕山期和喜马拉雅期地壳运动,构造极为复杂。早期以褶皱为主,后期以岩浆活动和断裂作用为主,构造方向主要为北东和北东东向。历次构造运动形成的一系列褶皱和断裂,对地下水的赋存有着明显的控制作用:广大丘陵山区

构造裂隙和节理发育,风化层厚度大,因此裂隙潜水广泛分布;一系列的褶皱形成了多个向斜盆地,大部分向斜构造核部由上古生界碳酸盐岩组成,隐伏岩溶发育,蕴藏着丰富集中的岩溶水;区内岩浆岩广泛分布,深大断裂发育,形成多处温泉。

湾区潮湿多雨,水系发育,平原区河、渠、塘、湖密布;丘陵山区,局部岩石破碎,风化强烈,植被茂盛。北部、西南部、西北部及东部的丘陵山区为地下水的补给区,西江、北江及东江干流贯穿全区,汇集于珠江三角洲,构成湾区内地下水排泄的总渠道,各支流为地下水的局部排泄基准面(曹建文等,2021)。

3 数据来源与方法

数据来源包括1980—2020年每年精度30 m的土地利用类型,1981—2020年每年蒸腾蒸散比时空连续数据集,中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)

提供的中国气象背景数据集 500 m 分辨率、1971 年以来逐年降水量、平均气温空间插值数据集,中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1949—2020 年全国各市人均 GDP 空间分布公里网格数据集,1979—2022 年水文数据为陆地月平均数据(<https://cds.climate.copernicus.eu/>),水利部水文局提供的 2000—2021 年各水文站点流量、地表水位数据集,2000—2020 年人口密度数据 1 km×1 km 栅格数据(<https://www.worldpop.org/>),1998—2020 年广东省每年月度植被指数(NDVI)空间分布数据集,广东地质环境监测总站提供的 2000—2021 年地下水位监测数据集,2020 年国土“三调”粤港澳大湾区地市行政边界数据,2003—2018 年全球表层土壤水旬度数据集,1990—2010 年中国陆地生态系统空间分布数据集。

借助 ArcGIS 空间分析功能,从上述各种数据中提取生成相应的粤港澳大湾区数据(1 km×1 km),并利用傅里叶变换频谱分析(Fourier Transform Spectral Analysis)、小波分析(Wavelet Analysis)及 Gumbel 分布方法(Gumbel Distribution Extreme Value Prediction Method)等,研究大湾区水资源要素及生态环境格局变化规律。傅里叶变换频谱分析通过将时间序列数据转换为频率域来分析降雨事件的周期性和趋势,识别降雨数据中的主要周期成分和异常模式,有助于理解和预测未来的降雨模式。小波分析是一种用于识别时间序列中局部化的频率变化的技术,在分析径流周期变化方面,能更好地捕捉到短期和长期的变化趋势,对于理解流域的水文响应和预测未来变化极为重要。Gumbel 分布是一种用于建模极端值(如最大径流量)的统计方法,可以估计不同回归期下流域可能出现的极端径流事件。

4 水资源演变和生态环境格局变化

利用粤港澳大湾区相关资源环境数据,分析大湾区 1980 年以来气温、降水、水体湿地、植被、水文、城镇建设用地、人口、经济等多类资源环境系统时空格局变化,并预测其发展趋势。

4.1 气温、降水格局变化

粤港澳大湾区受季风和海洋气候的双重影响,其气候格局和变化特征相对复杂。1980—2022 年

数据显示,大湾区平均气温 22.2℃,每 5 年周期气温变化波动趋势(图 2)一直处于周期较短的波动变化当中,气温总体弱上升,增温率低于全国,既有自然周期性变化,也可能受到人类活动的影响。相对湿度和平均风速下降,极端降水更加频繁,呈现出增温增湿的末端趋势和较大的年际变化,尤其在珠江三角洲、深圳及香港等地区,形成明显的暖湿化特征。广州和深圳等受城市化进程影响,热岛效应明显,气温升高速度较快,其中增温幅度最为显著年份为 2003 年、1989 年和 1980 年(Wang et al., 2021; 毛智慧等, 2021; Li et al., 2021; 李佰和和龚建周, 2021; 柯宗贤等, 2023)。随着气温的升高,水体和植物的蒸发蒸腾作用加强导致河流流量减少和地下水位降低,引起降水模式的季节性变化和强度频率变化,进一步加剧城市水资源供需矛盾。从图 3 中可以看出气温变化具有明显的波动性和周期性特征,通过傅里叶变换(FFT)将温度转换到频率域,其变化与不同时间尺度切相关,主要体现在 3~4 a、16~17 a 和 25 a 的三个时间周期上。周期性变化直接影响水资源的季节分配,与极端天气事件(干旱/洪水)的发生频率和强度有关,针对这种周期性变化,未来对大湾区气温的预测和研究应当考虑不同的时间尺度,以更为准确地判断和应对气候变化带来的挑战。

大湾区降水格局复杂,受到多种气候因子共同影响,年降水存在显著的丰枯交替现象。1980—2022 年降水每五年周期变化特征(图 4)显示,平均年降水量约 2022.1 mm,最小降水 1476.9 mm(1991 年),最大降水 2551.5 mm(1983 年),汛期(5—9 月)雨量占全年的 81%。水资源调蓄能力较差,导致汛期洪水风险增加且利用率低,非汛期干旱事件频发又供给不足,对水资源管理和水库蓄水工程带来挑战。其中降水骤增变化出现在 1993 年和 2012 年(Wang et al., 2021; Li et al., 2022; Zhou et al., 2022; 张之琳等, 2022; 李宁宁等, 2023)。湾区南部(珠江三角洲)降水量普遍较高,与受到季风和热带气旋的影响有关。而北部地区(珠江上游)降水量相对较低,整体降水由南向北递减。通过对降水数据的频谱分析(图 5),变化具有明显的 3~4 a、6~7 a 和 12~13 a 周期性震荡,主要变化周期约 4.1 a,推测与太平洋和印度洋的海洋环流模式有关,尤其是与厄

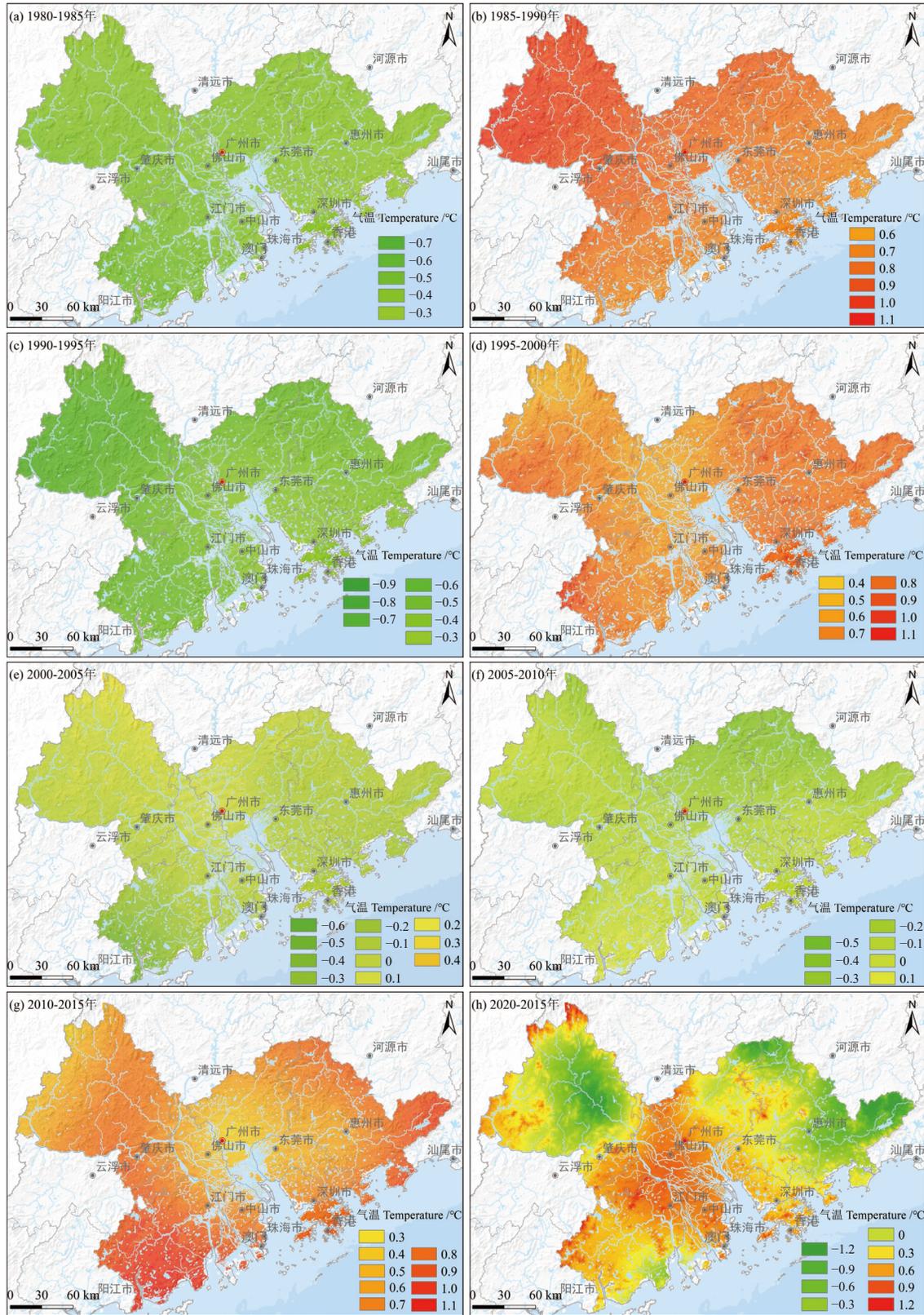


图2 粤港澳大湾区1980—2020年气温变化趋势格局

Fig.2 Patterns of temperature change trends in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area from 1980 to 2020

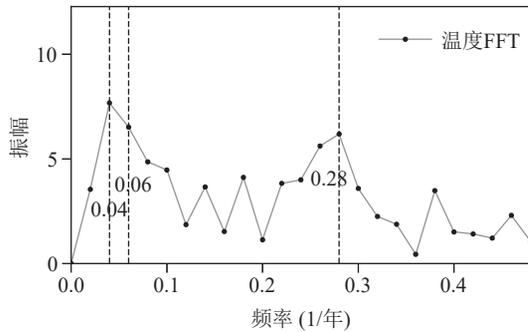


图 3 气温傅里叶变换确定周期性

Fig.3 Temperature Fourier transform to determine periodicity

尔尼诺和拉尼娜现象的交替出现有密切关系。珠江口海平面上升速率 3.5 mm/a, 高于全国平均水平。降雨周期性变化导致水资源季节性和年际波动, 对于长期的水资源规划和管理至关重要, 未来粤港澳大湾区的水资源可能会继续经历相似的丰枯交替现象, 但仍需考虑气候变化、城市化进程和土地利用模式等不确定性问题。

4.2 水文格局与水资源量变化

大湾区主要来水包含西江、北江和东江流域的径流量, 对各流域干流水文站 1980—2022 年各月流量进行系统分析, 包括流量的时空变化规律、主要径流特征以及潜在影响因素的深入研究(图 6)。平均径流量分别为 11231.09 m³/s、1479.63 m³/s、809.42 m³/s, 西江显著高于北江和东江流域; 周期性分析结果显示, 三个流域均呈现相似的季节性变化, 尤其在 5 月至 9 月, 径流量达到年度峰值, 径流变差系数较小, 介于 0.19~0.27, 表明年际的径流稳定性较高。为更清晰地展现长期趋势, 有效消弱短期气候波动(季节性降雨、洪涝/干旱事件)导致的流量波动, 5 年的时间跨度通常被认为是分析气候变化和人类活动影响的一个合适的窗口, 因此通过应用 60 个月的滑动平均法计算得出, 1980—1995 年流域径流量呈现逐年下降的趋势, 2005—2022 年径流量呈现出上升趋势。这种长期变化可能与气候变化、土地利用或其他环境因素有关。利用 Gumbel 分布预测西江、北江和东江流域不同回归期的极值径流, 百年一遇径流分别为 38582 m³/s、8211 m³/s、4203 m³/s。通过小波分析表明大湾区径流普遍存在 25~32 a、10~20 a、4~10 a 的周期变化, 长周期变化与大尺度气候模式有关, 在规划长期水资源管理策略时需要考虑地表水资源的可持续性

和调蓄能力, 中短周期变化与区域气候和季风强度有关, 引起供水量的快速波动, 需制定应急响应机制确保供水安全。近年来短历时特大暴雨、局部地区极端降水、风暴潮等造成极端水文事件, 其中 1994 年 6 月和 2022 年 6 月, 三个流域都发生特大洪水事件。加强气候变化对极端水文事件影响的基础研究, 预测其变化趋势是制定防洪减灾对策的重要手段(杨远东等, 2019; 刘幼萍, 2020)。

根据广东省水资源公报 1997—2022 年度地表水地下水资源量变化可知(图 7), 水资源量受降水影响较大, 变化趋势与降水相似, 相关性约 0.95。地表水资源量具有显著的年际波动, 平均值为 596.07 亿 m³, 地下水资源量变化相对平稳, 平均值约 141.87 亿 m³。

5 生态环境格局变化

5.1 植被格局变化

粤港澳大湾区归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 总体呈现弱上升趋势, 主要分为三个阶段, 波动期(2001—2009 年)、显著下降期(2010—2014 年)、缓慢上升期(2015—2020 年), 其中 2004、2008、2009、2011 年植被覆盖率偏低, 可能受华南地区严重旱情和城市的快速发展影响。从 2000—2020 年大湾区植被覆盖度显著性变化空间(图 8)可以看出, 主要分为显著退化(-1~-0.2)、退化不明显(-0.2~-0.1)、无变化(-0.1~0.1)、改善不明显(0.1~0.2)、改善显著(0.2~1)五类, 其中显著退化面积 6225.98 km², 改善面积 9537.31 km², 整体分布格局具有显著的四周高(山地丘陵地带)、中间低(平原城市群)的特征, 肇庆植被覆盖率最高, 广州市植被上升趋势最缓, 大湾区内植被改善区的面积大于退化区面积。年内 NDVI 的季节变化呈现出单峰结构, 最低值出现在冬季, 2013 年启动的“新一轮绿化广东大行动”使得植被环境初步改善, 2020 年大湾区重点推进山水林田湖草的生态保护修复工程, 植被改善已有成效(冯娴慧等, 2022; 付翔和刘昊, 2023), 结合土地利用类型变化, 城乡建设用地的植被退化趋势最高, 其次为水域和耕地。

5.2 水体湿地变化

粤港澳大湾区地表水体面积整体减少, 近年来

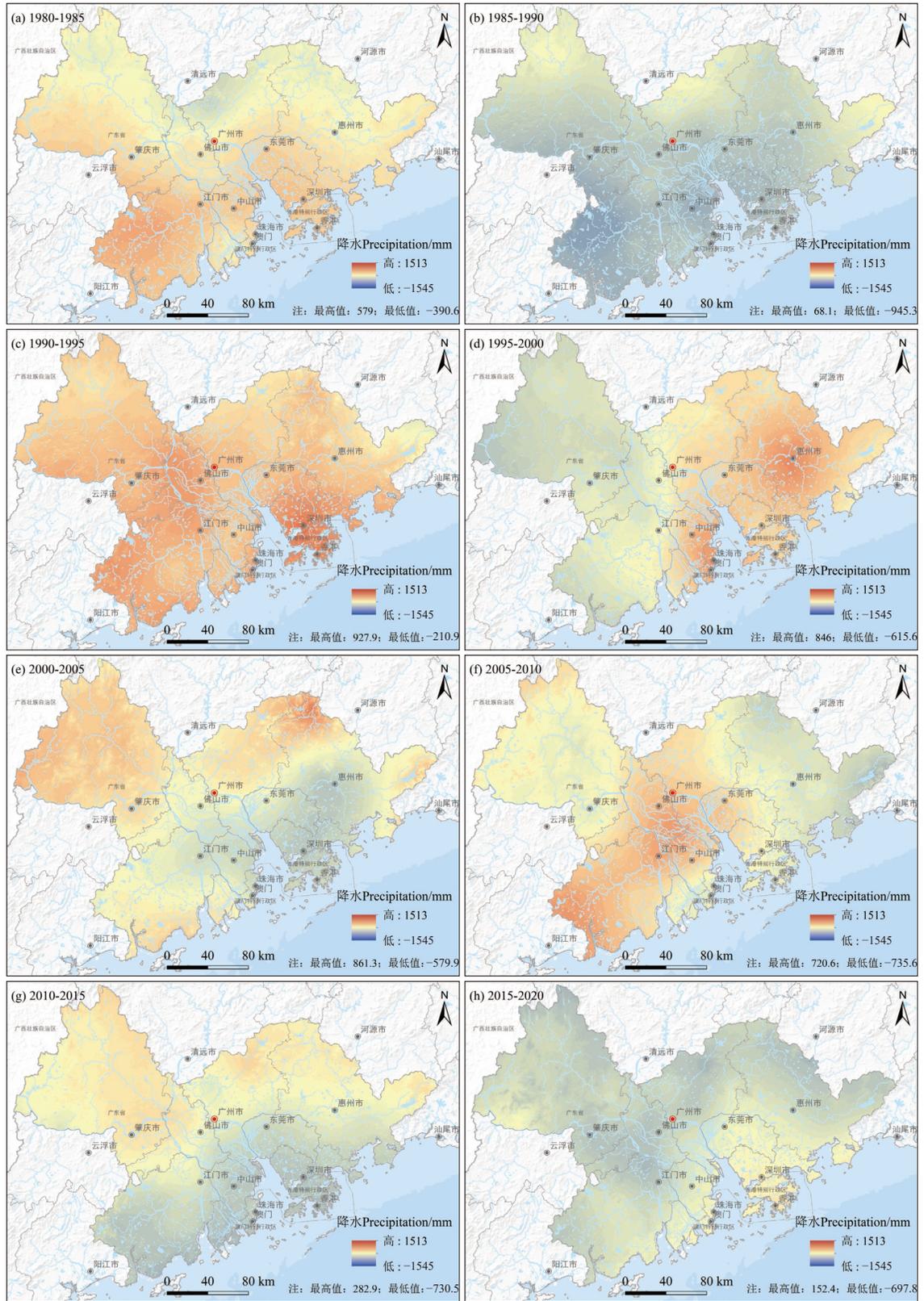


图4 粤港澳大湾区1980—2020年降水变化趋势格局

Fig.4 Trend patterns of precipitation changes in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area from 1980 to 2020

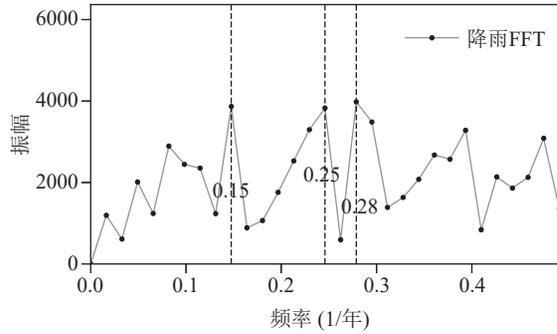


图 5 降水傅里叶变换确定周期性

Fig.5 Precipitation Fourier transform to determine periodicity

呈增加趋势;部分干支流污染严重,水生生物多样性减少。由于城市建设等人类活动影响,河湖空间被挤占,河口滩涂湿地减少,局部水生生境遭到侵占和破坏。水体(含湿地)面积变化速率呈现“缓慢萎缩-加速萎缩-稳步增长-缓慢增长”的阶段性特征,但整个大湾区水体仍未恢复至 1980 年的水平,2020 年相比 1980 年减少了 344 km²。1980—1990 年,地表水体面积减少 218 km²,萎缩速率为 21.8 km²/a;1990—2000 年,地表水体面积减少 463 km²,萎缩速率为 46.3 km²/a;2000—2010 年阶段,地表水体面积增加 218 km²,增长速率为 21.8 km²/a;2020—2010 年阶段,地表水体面积增加 119 km²,增长速率为 11.9 km²/a(表 1)。1980—2000 年地表水

体萎缩阶段(图 9),是在改革开放的大背景下陆续进入快速城市化阶段,人口聚集程度和城市快速扩张,通过填湖、填海等方式获取大量建设用地以缓解人地矛盾,如深圳、广州、佛山、珠海及东莞等地,水域较多转为耕地和建设用地;2000—2020 年地表水体缓慢增加阶段(图 10),大量季节性水体转化为永久性水体和易涝区,是经历大规模城市扩张与内部调整后,城市结构稳定,政府出台一系列水体保护规划,河网管理制度逐渐完善,湾区水体面积呈稳步增长阶段(吴宇凡等, 2023; 宋松等, 2023)。

大湾区海岸线在人为开发(围海养殖、填海造地)和各种自然因素(河口侵蚀、淤泥质岸线)的共同影响下,1980—1995 年,岸线长度上升明显,岸线类型格局变化显著;1995—2020 年,岸线长度增长较缓,但建设用地态势增长强劲,岸线向海推进年平均速率达 9.91 m/a,海洋经济快速发展,建设围堤岸线增长突出(杨晨晨等, 2021; 尹楠楠等, 2023)。1980—2020 年,大湾区湿地面积呈现先快速增加后略微减少的变化趋势,天然湿地转化为人工湿地和城镇用地,养殖塘和水库坑塘明显增加,但破碎化程度提高,连通性变低。湿地损失的主要区域为大湾区中部核心区和沿海城镇带,围垦养殖、交通建

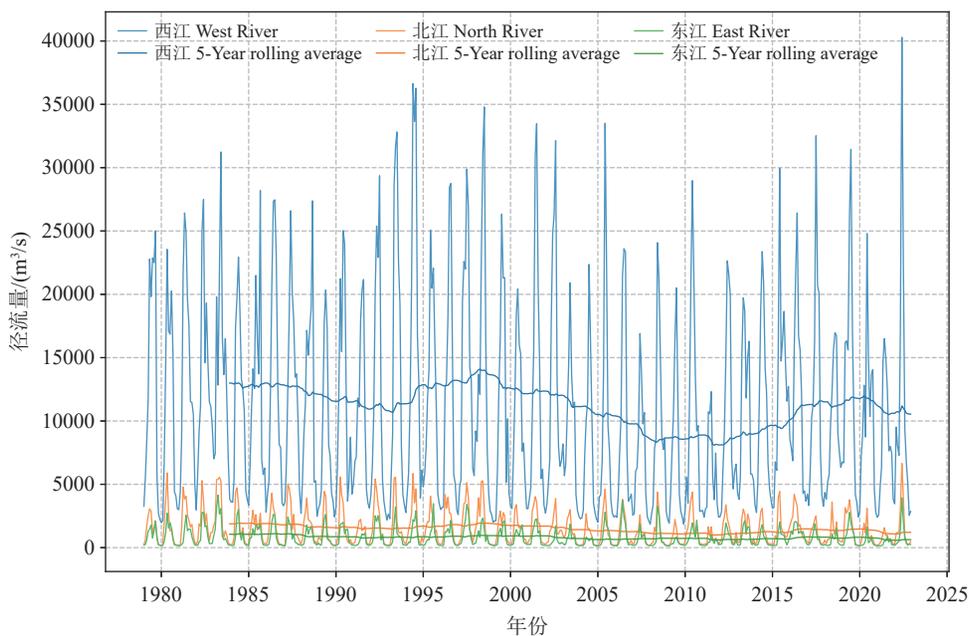


图 6 大湾区主要河流水文格局变化

Fig.6 Changes in hydrologic patterns of major rivers in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

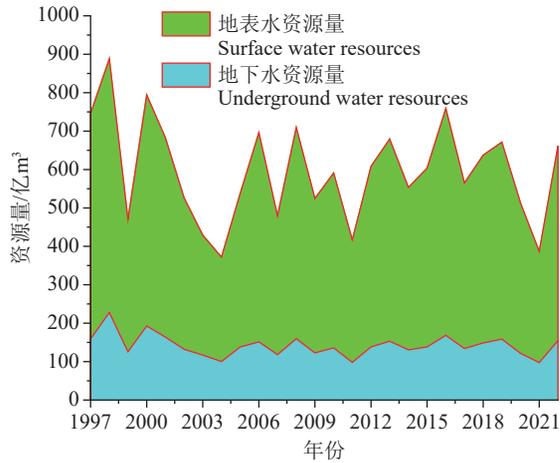


图 7 大湾区水资源量变化

Fig.7 Changes in the amount of water resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

表 1 大湾区水体面积变化特征

Table 1 Characteristics of water body area changes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

时间	阶段性特征	变化量/km ²	变化率/(km ² /a)
1980—1990	缓慢萎缩	-218	-21.8
1990—2000	加速萎缩	-463	-46.3
2000—2010	稳步增长	218	21.8
2010—2020	缓慢增长	119	11.9
合计		-344	-8.6

设、产业发展、保护政策等人为因素是导致水体湿地变化的主要原因(李婧贤, 2019; 于博威等, 2022)。近 10 年来水生态状态虽呈逐渐变好的趋势, 但整

体上仍处于亚健康状态(黄洋漫和陈晓宏, 2023)。

6 经济人口格局与水资源环境问题

6.1 经济人口格局

1999—2021 年, 大湾区的人口呈现稳定上升的趋势, 人口空间分布具有明显的多尺度和多中心特征(图 11)。人口增长率在 2000 年初经历显著的增长, 随后有所减缓。在特定年份, 例如 2008 年的全球金融危机和 2020 年的 COVID19 大流行期间, 人口增长率和人均 GDP 增长率均受到影响。广州、深圳作为大湾区的中心城市, 其人口集聚效应日益显著。人口分布结构经历了调整, 一方面, 珠江口东岸的城市群因其产业升级和生态环境改善, 吸引了大量人口迁入; 另一方面, 部分传统制造业基地因产业结构调整, 经历了人口外流。珠三角地区由于产业链完整、经济体量大、吸引力强, 持续保持人口净增长状态, 而西部和北部地区的人口增长相对缓慢, 呈现出人口流向经济发展更活跃区域的特征。但随着珠江口西岸的佛山、中山等城市的崛起, 大湾区的人口分布格局趋向于多中心化(林琿, 2018)。大湾区的经济发展呈现出明显的空间分异性, 经济活力不断东移, 且新兴经济增长点的出现正在逐步改变传统的“东高西低”的格局。1999—2021 年人均 GDP 的增长率显示出较为显著的波动性上升, 尤其在 2000—2010 年, 人均 GDP 的增长

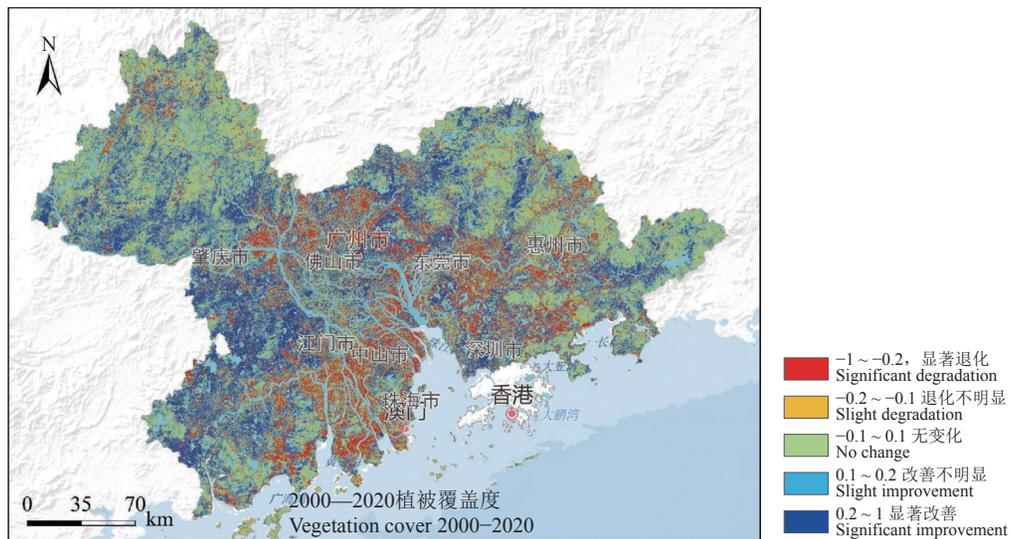


图 8 2000—2020 粤港澳大湾区植被覆盖度显著性变化空间分布

Fig.8 Spatial distribution of significant changes in vegetation cover in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2000 to 2020

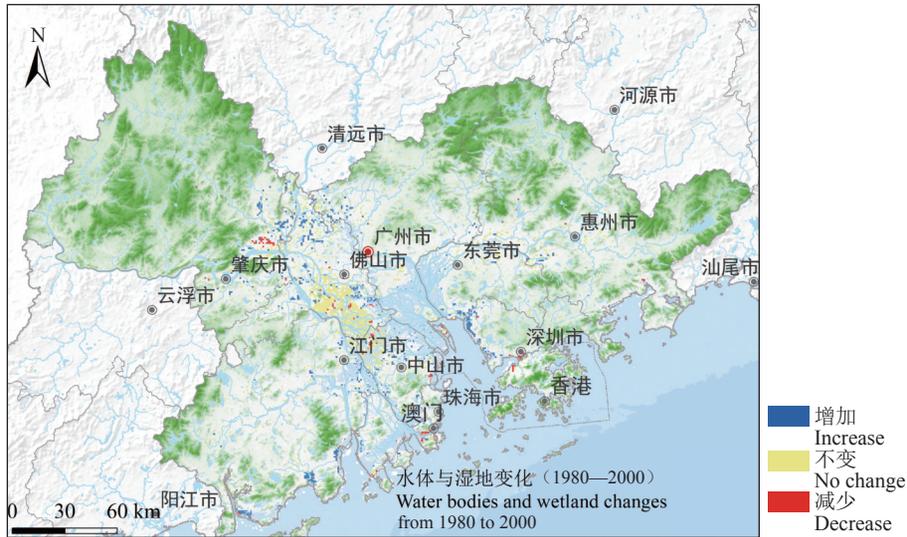


图 9 粤港澳大湾区 1980—2000 年水体湿地格局变化

Fig.9 Changes of wetland patterns in water bodies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1980 to 2000

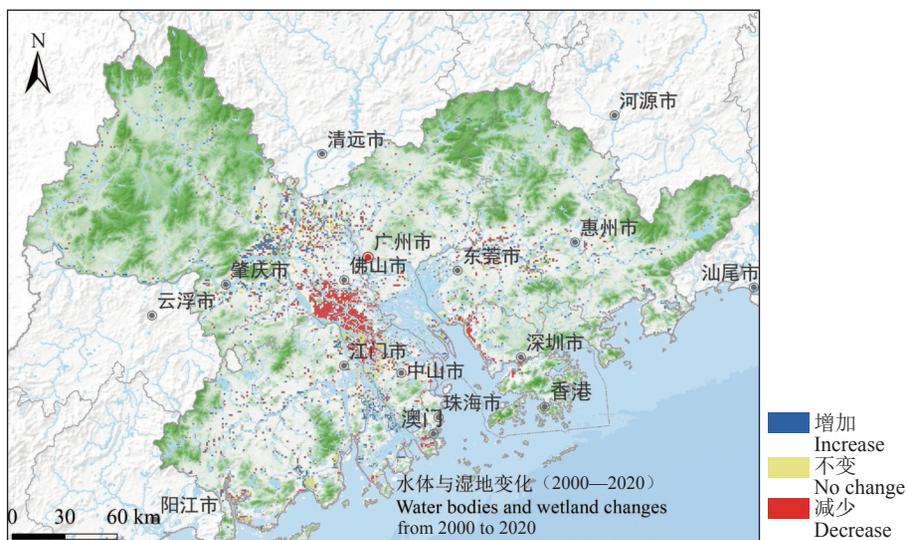


图 10 粤港澳大湾区 2000—2020 年水体湿地格局变化

Fig.10 Changes of wetland patterns in water bodies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2000 to 2020

速度较快。经济活动的空间分布呈现出由东向西递减的特征。东部的深圳、香港等城市因其国际化经济体系和先进的产业结构,成为区域内经济增长的主引擎。经济活动沿珠江以及主要的交通轴线集聚,构成了经济发展的主轴。广州、深圳等中心城市经济辐射作用明显,向周边地区递减。内部 GDP 增长的不均衡性显著。东部沿海城市经济增长迅猛,而西部和北部地区则相对缓慢。

随着人口的增加,受地理位置和气候条件限制,供水总量呈先上升再缓慢下降趋势,在 2004 年

和 2015 年到达顶峰(图 12),通过跨区域水资源优化调配、提高利用效率、实施有效管理策略,在一定程度上缓解了水需求的不断增长。但随着城市化和工业化进程进一步加快,生活、生产用水需求增长,进一步影响水循环和水资源的再生能力,在水资源有限的情况下加剧供需矛盾。

6.2 水资源环境问题

6.2.1 水资源与经济发展的不协调

高度的工业化和城市化进程,工业用水和居民生活用水需求急剧增加,水资源的供需矛盾尤为突

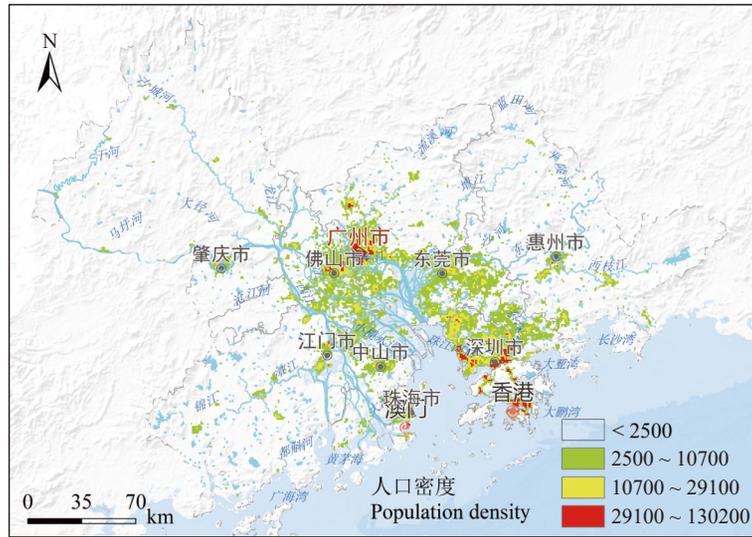


图 11 大湾区 2020 年人口密度分布

Fig.11 Distribution of population density in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in 2020

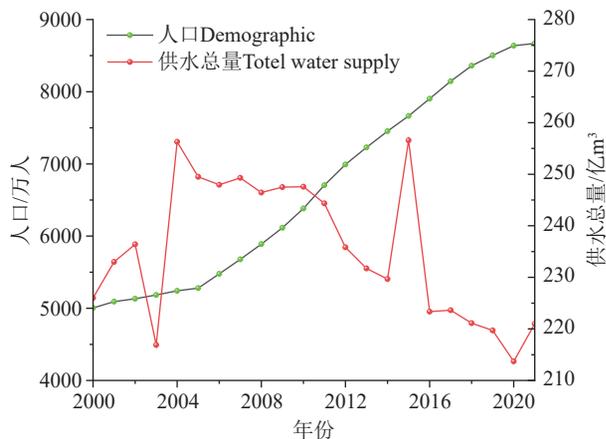


图 12 大湾区人口与供水总量

Fig.12 Total population and water supply in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

出, 尽管通过西江、东江调水等重大水利工程实现了区域水资源的调配, 但这种调配并不总有效解决季节性水资源短缺问题, 且可能带来生态环境的负面影响。水资源的不协调也体现在供水系统的脆弱性上, 由于对传统水源的过度依赖, 极端气候事件如干旱和洪水对大湾区的影响愈加显著。干旱季节水资源短缺严重制约了农业生产和工业生产, 而洪水则可能造成水资源设施的损坏, 影响供水安全。此外, 水资源管理体系在某些方面仍显不足, 如跨地区水资源配置的合理性、水价机制的市场化、水资源的节约和保护政策的落实等方面存在缺

陷。这些管理上的不足进一步加剧了水资源供需之间的不协调(孟瑞芳等, 2024)。

为了解决粤港澳大湾区水资源与经济发展之间的不协调, 需要采取综合性策略。包括改善水资源配置机制, 提高水利用效率, 加大水资源保护和污染治理力度, 以及推动水资源管理体系的改革。尤其是要加强区域间的合作, 建立一体化的水资源管理平台, 确保水资源的合理分配和高效利用, 支撑大湾区的经济可持续发展。

6.2.2 水生态服务功能退化

大湾区剧烈人类活动对江河湖库生态系统造成破坏和干扰, 江河湖库污染严重, 水生物减少, 导致流域水生态服务功能退化甚至丧失。工业废水、农业面源污染和城市生活污水排放不仅导致了水质的恶化, 还破坏了水生生物的栖息地, 影响了生物多样性, 降低了水生态系统的自我净化能力, 进而加剧了污染物在水体中的累积。同时河流的过度开发, 如水坝和堤防的建设, 改变了天然河流的流态和河床结构, 导致生态连通性下降; 进一步, 随着水资源的过度开采, 地下水位下降, 湿地等水生态敏感区域出现干涸现象, 这些地区的生态服务功能因此受损。湿地作为自然的“净水器”, 其功能退化直接关联到水质净化服务的下降; 大湾区正在采取措施恢复水生态系统。例如, 改善河湖系统的连通性, 促进水体流动性, 提高水资源和水环境的承

载能力(赵玲玲等, 2021)。为应对水生态服务功能的退化, 需要加强生态环境保护政策的实施力度, 推动生态修复项目, 提高污染物处理标准, 并促进绿色基础设施建设(孙张涛等, 2023)。

6.2.3 水资源时空分布不均, 人均水资源量较少

大湾区水资源总量充沛, 多年平均降水量为 2022.1 mm, 但由于广东省年内水资源量在丰水期与枯水期的数额有较大的差距, 具有明显的季节性特征, 实际可利用的水资源并不充足, 多年人均水资源量不足 1700 m³, 低于全国人均水平(约 2100 m³)。湾区内 4—9 月有 75% 的降水集中汇入地表水系统, 形成洪水和内涝, 且河网与入海口之间距离短, 汛期水资源难留存, 枯水期又面临咸潮上溯的危害, 这种时空分布的不均衡和人均水资源量的不足, 对水资源的合理配置和有效管理提出了挑战。需求驱动下的供水压力可能诱发地下水过度抽取、水资源开发利用的不合理性以及生态环境的破坏, 从而引发一系列生态、社会和经济问题。

推动跨区域的水资源调配, 优化水资源配置结构, 提高水资源利用效率和节水意识。同时, 加大水资源保护力度, 如实施跨季节的水库调度策略, 以平衡季节性水资源的不均。

6.2.4 以地表水为主的供水水源结构单一

地表水依赖性高的供水结构容易受到气候变化和极端旱涝事件的影响。大湾区降水存在较大的年际和年内变异性, 导致地表水量在不同年份甚至不同季节内波动显著, 从而影响到供水的稳定性。尤其是在干旱年份, 依赖地表水的供水系统可能无法满足区域的用水需求, 从而影响到经济和社会活动的正常运行。地表水更容易受到人类活动的影响, 包括工业排污、农业面源污染、城市生活污水排放等。这些污染源会直接影响到水质, 进而加大水处理的难度和成本。在一些高密度人口和工业活动集中的区域, 地表水的污染问题尤为突出, 严重时甚至可能导致水资源的短期内不可用, 限制了大湾区对水资源供需冲突的调节能力。

针对以地表水为主的供水结构单一问题, 开发和利用多种类型的水资源, 如地下水、再生水和海水淡化, 可以作为地表水的补充, 提高水资源供应的多样性和稳定性, 加强对极端天气事件和季节性变化的应对能力。

7 水资源可持续利用与地质工作建议

大湾区自 1980 年以来的多维资源环境时空格局变化显著, 反映了自然环境和人类活动的相互作用。由于气候变化带来的不确定性和区域发展需求的增加, 确保水资源的可持续管理和应急供应成为了一个关键议题。通过合理规划和管理后备水源地, 为应对极端气候和旱涝事件提供坚实的基础。

7.1 应急后备水源地靶区

应急水源地是在连续干旱或发生水安全突发事件情况下的非常规临时供水水源地, 具有“应急、备用、水质要求高”特点(曹建文等, 2021)。在粤港澳大湾区寻找和开发应急后备水源具有重要的战略意义和实际需求: (1) 确保水资源的安全稳定供应, 保障人口增长的供水安全, (2) 缓解干旱和水资源紧张的影响, 构建多元化水资源保障体系; (3) 提高水资源利用率, 缓解地表水资源压力; (4) 支撑湾区内环境保护和生态修复工作。

综合收集分析相关资料(广东省 2000—2022 年度开展的水源地调查报告、区域水文地质普查报告以及地下水资源开发状况调查报告), 提出 41 处具有开发远景的地下水区块做为应急水源地靶区(图 13, 表 2), 允许开采量达 234.26 万 m³/d, 主要分布于江门市那扶向斜盆地、惠州市仍图向斜盆地、肇庆市岩溶区和向斜谷地、广州市广花盆地、佛山市金利向斜谷地, 水源地地下水资源丰富, 水质总体优良, 应急/后备供水保障能力强, 其中大于 10 万 m³/d 的有 8 处, 最大的水源地为江门市恩平水源地, 允许开采量达 26.66 万 m³/d, 面积为 412.5 km², 属于孔隙潜水—承压水类型。

7.2 地质工作建议

粤港澳大湾区的供水主要依靠地表水, 水资源分布与区域经济发展不协调, 随着大湾区经济持续的发展与产业结构优化, 大湾区用水效率将提高, 人均用水量会逐步降低, 同时城市公共用水、生活用水需求量将持续上升(吴盼等, 2021; 曹建文, 2021), 这在一定程度上掩盖了该区域经济社会发展面临的水资源约束问题, 但也从侧面说明大湾区

表 2 主要水源地靶区允许开采量

Table 2 Allowable extraction in the target area of the main water source

所属地级市	水源地名称	面积/ km ²	允许开采量/ (10 ⁴ m ³ /d)	地下水类型
江门市	开平—恩平	412.50	26.66	孔隙潜水-承压水
惠州市	水口—良井	278.00	15.05	孔隙水
肇庆市	怀集—大岗	237.30	15.03	覆盖型岩溶水
广州市	花都—新华	169.65	13.29	覆盖型岩溶水
肇庆市	四会—大旺	369.40	12.29	孔隙潜水
惠州市	龙溪—博罗	364.80	12.28	孔隙潜水-承压水
广州市	龙潭—神岗	235.30	11.50	孔隙潜水
佛山市	丹灶—西樵	312.40	10.32	孔隙潜水

水资源约束问题具有复杂性,需要从多维角度进行分析和正视。

7.2.1 地质调查工作建议

以地球系统科学为理论框架,针对粤港澳大湾区的水资源环境问题进行系统调查研究。该区域地质过程复杂,受到华南地台构造活动、河流侵蚀、珠江三角洲沉积作用以及广泛的人类活动等多重因素的影响。综合考虑深部构造、地表过程、气候变化、海平面升降与生物作用等因素,进行系统的水资源环境研究。

水资源问题调查研究。聚焦粤港澳大湾区的水资源短缺与时空分布不均问题,研究气候变化对区域降水模式的影响,以及由此对水资源再生、水土保持和水源涵养的影响。加强地下水与地表水、城市与乡村,以及工业与农业用水等方面的水资源

综合评价,制定再优化配置方案,建立全区域的水资源监测与数据共享机制。

生态问题调查研究。系统评估大湾区生态退化问题,揭示其退化机制,并以此为基础提出生态保护与修复策略。依据区域生态特点和人为活动强度,划分自然修养与人工修复区,建立生态修复示范区,特别是珠江口周边的红树林等关键生态敏感区域。

城市地质问题调查研究。以粤港澳大湾区内的城市群为对象,识别自然资源、地质环境状况和主要环境地质问题。通过“双评价”工作,优化国土空间规划,为大湾区的城市群及中心城市的高质量发展提供决策支持。

7.2.2 研究方法和跨学科协作

采用地球系统科学研究方法,开展跨学科协作,整合地质、地理、生态、水文、气象等多学科的研究力量,形成对粤港澳大湾区自然资源与环境问题的综合认识。利用先进的遥感信息技术、水文模拟来改进水资源监测和评估,运用人工智能和大数据技术来优化水资源的管理和配置,以系统工程的思路,推动大湾区生态保护与高质量发展,提供多学科的科技支撑。基于地质云和大数据技术,构建数字化大湾区,支撑自然资源管理和国土空间的智能化管理系统。旨在促进粤港澳大湾区水资源环境问题的系统性解决,为区域的可持续发展提供科

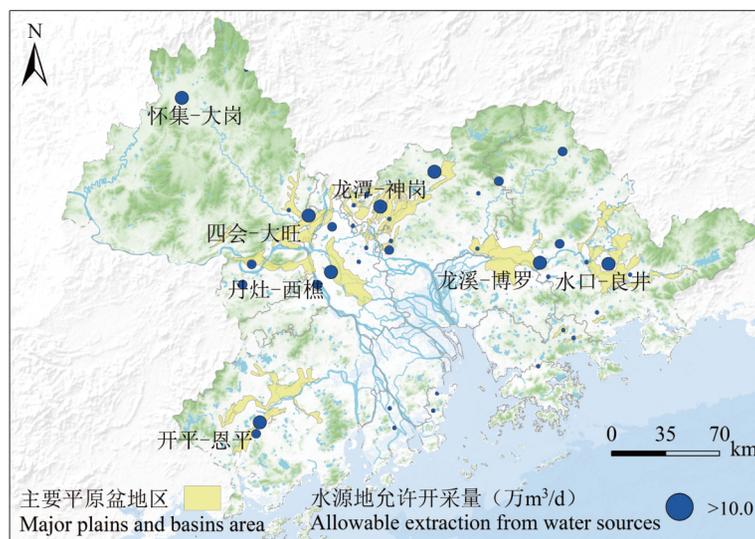


图 13 粤港澳大湾区应急水源地分布

Fig.13 Distribution of emergency water sources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

学依据和技术支撑。

8 结 论

以地球系统科学理论为指导,结合多源多时相调查研究数据,本文分析了近 40 年粤港澳大湾区的气温、降水、水资源、城市化等关键类别的资源环境格局变化及其区域分异规律。评估了粤港澳大湾区在面临水资源环境重大问题,得出以下结论:

(1)大湾区资源环境格局变化显著且表现出明显的区域分异规律。气温变化呈现出整体增温趋势,局部区域则表现为暖湿化现象,1980—2022 年平均气温 22.2℃,降雨 2022.1 mm,主要变化周期约 4.1 年。西江、北江和东江流域平均径流量分别为 11231.09 m³/s、1479.63 m³/s、809.42 m³/s,径流变差系数介于 0.19~0.27;山地及城市周边生态系统虽受到人类活动的强烈影响,但逐步实现了一定程度的恢复,2000—2020 年大湾区植被显著退化面积 6225.98 km²,改善面积 9537.31 km²;水资源面临着由于过度开发和污染导致的质量与数量下降,但近年来有所改善;水体(含湿地)面积变化速率呈现“缓慢萎缩—加速萎缩—稳步增长—缓慢增长”的阶段性特征,但整个大湾区水体仍未恢复至 1980 年的水平,2020 年相比 1980 年减少了 344 km²;城市化迅猛发展,造成了土地利用模式的显著变化,尤其是农田向城镇用地的转变;植被覆盖总体上呈现增加趋势,但也存在局部退化的问题;城市化进程中自然灾害频发,特别是洪水和地质灾害的风险增加;人口分布与经济活动重心进一步向城市群集中,经济产出呈现稳定增长趋势。

(2)在人类活动和气候变化的背景下,粤港澳大湾区面临着多样的生态与水资源环境问题。包括水资源与经济不协调、水生态服务功能退化、水资源时空分布不均,人均水资源量少、以地表水为主的供水水源结构单一等。

(3)在综合分析粤港澳大湾区的水文地质调查和地下水资源开发状况调查报告的基础上,研究确定了 41 个潜在的应急后备水源地,允许开采量达到 234.26 万 m³/d,位于江门市那扶向斜盆地、惠州市仍图向斜盆地、肇庆市岩溶区和向斜谷地、广州市广花盆地、佛山市金利向斜谷地等区域,其中江门市恩平水源地为允许开采量达 26.66 万 m³/d。水

源地地下水资源丰富,水质总体优良,具有较强的应急后备供水保障能力。开发应急水源地,可以有效确保湾区水资源供应的安全性与稳定性,缓解干旱及水资源紧张状况,提升水资源利用率,减轻地表水资源的开发压力,为湾区的环境保护和生态修复提供支持。

通过对粤港澳大湾区过去 40 年的水资源演变与格局变化进行综合评估,揭示了湾区水资源环境管理的挑战与成效,为未来的可持续发展与环境保护提供科学依据和策略建议。

References

- Cao Jianwen, Xia Riyuan, Tang Zhonghua, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song, Wang Song. 2021. Groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its development potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1075-1093 (in Chinese with English abstract).
- Cheng L, Song S, Xie Y. 2022. Evaluation of water resources utilization efficiency in Guangdong Province based on the DEA-Malmquist Model[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 17.
- Feng Xianhui, Zeng Zhilin, Zhang Deshun. 2022. Temporal-spatial evolution of vegetation coverage in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on MODIS NDVI Data[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 20(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiang, Liu Hao. 2023. Spatial-temporal variation of vegetation NDVI and its response to climate in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2012 to 2021[J]. *Pearl River*, 44(5): 73-80 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Cai Y, Xie Y. 2022. An optimization model for water resources allocation in Dongjiang River Basin of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multiple complexities[J]. *Science of the Total Environment*, 820: 153198.
- Huang Yangman, Chen Xiaohong. 2023. The evolution of water ecological state and driving mechanism in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 62(2): 93-103 (in Chinese with English abstract).
- Jiang H, Peng J, Dong J. 2021. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China[J]. *Landscape Ecology*, 36: 2135-2150.
- Ke Zongxian, Wang Donghai, Zeng Zhilin, Zhang Chunyan, Liang Zhaoming, Zhang Yu. 2023. Underlying surface effect on the extreme heavy rainfall event on 22 May 2020 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Meteorological Monthly*, 49(1): 12-26 (in Chinese with English abstract).
- Li Baihe, Gong Jianzhou. 2021. The variation of temperature in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in recent 60

- years[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 20(1): 78–86 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Chan P W, Deng T. 2021. Review of advances in urban climate study in the Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area, China[J]. *Atmospheric Research*, 261: 105759.
- Li Jie, Li Yuanyuan, Ji Hongxiang. 2021. Study on countermeasures for water supply security in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. *Pearl Rive*, (102): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingxian, Wang Jun, Du Yihang, Cai Ailing. 2019. Change characteristics of coastal wetlands in the Pearl River Delta under rapid urbanization[J]. *Wetland Science*, 17(3): 267–276 (in Chinese with English abstract).
- Li Juan, Li Xingpin, Li Jie. 2022. Status quo of and countermeasures for water resources management in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Water Resources Development Research*, 22(10): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Li Ningning, Qiu Jing, Chen Xiaohong, Li Zejun, Chen Yingyi. 2023. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of rainfall in Dongjiang River Basin within Guangdong Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 43(4): 74–80 (in Chinese with English abstract).
- Li Q, Wu J, Su Y. 2022. Estimating ecological sustainability in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area, China: retrospective analysis and prospective trajectories[J]. *Journal of Environmental Management*, 303: 114167.
- Lin Hui, Zhang Hongsheng, Lin Yinyi, Wei Shan, Wu Zhifeng. 2018. Spatiotemporal changes of gridded urban population in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area based on impervious surface–population correlation[J]. *Progress in Geography*, 37(12): 1644–1652 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chang, Lin Shenhui, Jiao Xueyao, Shen Xiaoxue, Li Ruili. 2019. Problems and treatment countermeasures of water environment in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 55(6): 1085–1096 (in Chinese with English abstract).
- Liu Youping. 2020. Tendency of fluvial process and hydrologic extreme events in river network of Pearl Delta under Changing environment[J]. *Journal of China Hydrology*, 40(3): 71–75 (in Chinese with English abstract).
- Mao Zhihui, Li Lili, Du Jianjun. 2021. Research on temporal and spatial evolution of extreme temperature in Guangdong Province during past 60 years[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 34(4): 30–39 (in Chinese with English abstract).
- Meng Ruifang, Yang Huifeng, Bao Xilin, Xu Buyun, Li Lei, Li Jjinzheng. 2024. Prospect analysis of unconventional water resources utilization and eco–environmental effects in Beijing–Tianjin–Hebei Plain[J]. *Geology in China*, 51(1): 221–233 (in Chinese with English abstract).
- Song Song, Wu Zhifeng, Cao Zheng, Sun Fangdi, Yang Jinxin, Zhang Qifei. 2023. The changing trend and driving factors of water frequency fluctuations in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Tropical Geography*, 43(3): 372–383 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhangtao, Yu Zhengwei, Shu Siqu, Xu Chuangsheng, Shu Yang. 2023. Evaluation of ecosystem services of Chinese provincial land and suggestions for ecological geological survey[J]. *Geology in China*, 50(2): 479–494 (in Chinese with English abstract).
- Tan Qifeng, Cui Fuyi, Zhi Shiping, Zheng Hanggui. 2020. Research Report on Water Resources in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [M]. Beijing: Social Science Literature Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Han Z, Gao R. 2021. Changes of extreme high temperature and heavy precipitation in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1): 1101–1126.
- Wang Y, Huang C, Wu G. 2022. Status and challenges of water resources and supply in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area (GBA) of China[J]. *Water Cycle*, 3: 65–70.
- Wu Pan, Zhao Xinwen, Gu Tao, Jiang Tuo, Wang Xusheng, Feng Yuqing. 2021. Water resources in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area and its co–evolution trend with social economy: A comparative study with the international bay area[J]. *Geology in China*, 48(5): 1357–1367 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yufan, Wang Jiangbo, Gou Aiping. 2023. The temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of surface water in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area since 1985[J]. *Tropical Geography*, 43(3): 395–407 (in Chinese with English abstract).
- Xia Riyuan, Lu Haiping, Cao Jianwen, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song. 2022. Characteristics of groundwater resources of karst areas in the Southern China and water resources guarantee countermeasures[J]. *Geology in China*, 49(4): 1139–1153 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chenchen, Gan Huayang, Wan Rongsheng, Zhang Yaoming. 2021. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018[J]. *Geology in China*, 48(3): 697–707 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Huang X. 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907–3925.
- Yang Yang, Zhao Liangjie, Xia Ri Yuan. 2022. Distribution and influencing factors of karst underground rivers in the Pearl River Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 41(4): 562–576 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuandong, Wang Yonghong, Cai Silong, Liu Feng. 2019. Interannual and intra–annual variation characteristics of runoff in downstream areas of Pearl River Basin during 1960–2017[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(5): 23–31 (in Chinese with English abstract).
- Yin Nannan, Tang Jun, Yang Yuanwei, Gao Xianjun, Song Shuhua, Hu Qian. 2023. Variations of shoreline and land use in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021[J]. *Marine Geology Frontiers*, 39(5): 1–11 (in Chinese with English abstract).

- English abstract)
- You X, Li Q, Monahan K M. 2022. Can collaborative innovation constrain ecological footprint? Empirical evidence from Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(36): 54476-54491.
- Yu Bowei, Xie Yiliang, Ma Xiyao, Cui Baoshan. 2022. Wetland landscape pattern change and its damage degree in Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area in recent 40 years[J]. *Environmental Ecology*, 4(5): 59-68 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ling Jiang Zhijian, Huang Xiaoping. 2022. The protecting strategies about the atmosphere, water and wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Environmental Science and Management*, 47(11): 160-165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhilin, Qiu Jing, Cheng Tao, Huang Bensheng, Feng Ziyang. 2022. Urban flood issues and analysis in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 53(7): 823-832 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liangjie, Yang Yang, Cao Jianwen, Xia Riyuan, Wang Zhe, Luan Song, Lin Yushan. 2021. Groundwater resources evaluation and problem analysis in Pearl River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1020-1031 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lingling, Xia Jun, Yang Fang, Yang Long, Xu Fei. 2021. Current situation, framework, problems and prospect of water ecological restoration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(12): 5054-5065 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Luo Z, Li S. 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area from 1961 to 2018[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1): 304-314.
- ### 附中文参考文献
- 曹建文, 夏日元, 唐仲华, 赵良杰, 王喆, 栾崧, 王松. 2021. 粤港澳大湾区地下水水资源特征及开发潜力[J]. *中国地质*, 48(4): 1075-1093.
- 冯娴慧, 曾芝琳, 张德顺. 2022. 基于 MODIS NDVI 数据的粤港澳大湾区植被覆盖时空演变[J]. *中国城市林业*, 20(1): 1-6.
- 付翔, 刘昊. 2023. 2012—2021 年粤港澳大湾区植被 NDVI 时空变化及其对气候响应[J]. *人民珠江*, 44(5): 73-80.
- 黄洋漫, 陈晓宏. 2023. 粤港澳大湾区水生态状态演变及驱动机制研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 62(2): 93-103.
- 柯宗贤, 王东海, 曾智琳, 张春燕, 梁钊明, 张宇. 2023. 粤港澳大湾区下垫面对“5·22”极端强降水过程影响的研究[J]. *气象*, 49(1): 12-26.
- 李佰和, 龚建周. 2021. 近 60 年来粤港澳大湾区气温变化规律[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 20(1): 78-86.
- 李杰, 李媛媛, 吉红香. 2021. 粤港澳大湾区供水安全对策研究[J]. *人民珠江*, (102): 1-5
- 李婧贤, 王钧, 杜依杭, 蔡爱玲. 2019. 快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征[J]. *湿地科学*, 17(3): 267-276.
- 李娟, 李兴拼, 李杰. 2022. 粤港澳大湾区水资源管理形势及对策[J]. *水利发展研究*, 22(10): 65-70.
- 李宁宁, 邱静, 陈晓宏, 李泽君, 陈颖毅. 2023. 广东省东江流域降水时空变化特征分析[J]. *水文*, 43(4): 74-80.
- 林琿, 张鸿生, 林殷怡, 魏姗, 吴志峰. 2018. 基于城市不透水面—人口关联的粤港澳大湾区人口密度时空分异规律与特征[J]. *地理科学进展*, 37(12): 1644-1652.
- 刘畅, 林坤辉, 焦学尧, 沈小雪, 李瑞利. 2019. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 55(6): 1085-1096.
- 刘幼萍. 2020. 珠江三角洲河网区变化环境下的河床演变趋势和人文极端事件[J]. *水文*, 40(3): 71-75.
- 毛智慧, 黎丽莉, 杜建军. 2021. 广东省近 60 年极端气温的时空演变研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 34(4): 30-39.
- 孟瑞芳, 杨会峰, 包锡麟, 徐步云, 李磊, 李谨丞. 2024. 京津冀平原非常规水资源利用前景分析及其生态环境效应[J]. *中国地质*, 51(1): 221-233.
- 宋松, 吴志峰, 曹崢, 孙芳蒂, 杨锦鑫, 张祺斐. 2023. 粤港澳大湾区水体淹没频率变化及驱动力分析[J]. *热带地理*, 43(3): 372-383.
- 孙张涛, 余正伟, 舒思奇, 许闯胜, 舒阳. 2023. 中国省域生态系统服务价值评价与生态地质调查工作建议[J]. *中国地质*, 50(2): 479-494.
- 谭奇峰, 崔福义, 支世平, 郑航桅. 2020. 粤港澳大湾区水资源研究报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社.
- 吴盼, 赵信文, 顾涛, 江拓, 王旭升, 冯雨晴. 2021. 粤港澳大湾区水资源现状及与其社会经济协同演化趋势——与国际湾区对比研究[J]. *中国地质*, 48(5): 1357-1367.
- 吴宇凡, 王江波, 苟爱萍. 2023. 1985 年以来粤港澳大湾区地表水体时空演变特征与驱动因素[J]. *热带地理*, 43(3): 395-407.
- 夏日元, 卢海平, 曹建文, 赵良杰, 王喆, 栾崧. 2022. 南方岩溶区地下水水资源特征与水资源保障对策[J]. *中国地质*, 49(4): 1139-1153.
- 杨晨晨, 甘华阳, 万荣胜, 张耀明. 2021. 粤港澳大湾区 1975—2018 年海岸线时空演变与影响因素分析[J]. *中国地质*, 48(3): 697-707.
- 杨杨, 赵良杰, 夏日元, 王莹. 2022. 珠江流域岩溶地下河分布特征与影响因素研究[J]. *中国岩溶*, 41(4): 562-576.
- 杨远东, 王永红, 蔡斯龙, 刘锋. 2019. 1960—2017 年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J]. *水土保持通报*, 39(5): 23-31.
- 尹楠楠, 汤军, 杨元维, 高贤军, 宋树华, 胡谦. 2023. 1989—2021 年粤港澳大湾区海岸线变迁及土地利用变化[J]. *海洋地质前沿*, 39(5): 1-11.
- 于博威, 谢毅梁, 马曦瑶, 崔保山. 2022. 近 40 年粤港澳大湾区湿地景观及其受损程度时空变化[J]. *环境生态学*, 4(5): 59-68.
- 张凌, 江志坚, 黄小平. 2022. 粤港澳大湾区大气、水环境及滨海湿地的保护研究[J]. *环境科学与管理*, 47(11): 160-165
- 张之琳, 邱静, 程涛, 黄本胜, 冯紫荧. 2022. 粤港澳大湾区城市洪涝问题及其分析[J]. *水利学报*, 53(7): 823-832.
- 赵良杰, 杨杨, 曹建文, 夏日元, 王喆, 栾崧, 林玉山. 2021. 珠江流域地下水水资源评价及问题分析[J]. *中国地质*, 48(4): 1020-1031.
- 赵玲玲, 夏军, 杨芳, 杨龙, 徐飞. 2021. 粤港澳大湾区水生态修复及展望[J]. *生态学报*, 41(12): 5054-5065.