

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.016

粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地时空变化及驱动因素分析

王海云^{1,2,3,4}, 匡耀求⁵, 郑少兰^{2,3}, 丘宇洲^{2,3}, 郑子豪⁶

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 广东省国土资源测绘院, 广东 广州 510500; 3. 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室, 广东 广州 510500; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 暨南大学环境学院, 广东 广州 511443; 6. 广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要:基于高分遥感影像提取 2010 年、2015 年和 2020 年湿地数据,使用探索性空间数据分析和地理探测器,定量解析了粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地时空变化及其驱动因素。结果表明:2010—2020 年粤港澳大湾区湿地面积不断减少,其中,人工湿地减少更明显(305.33 km²),自然湿地减少 90.17 km²,湿地向建设用地、草地转移是湿地损失的主要形式;2010—2015 年湿地损失的主要区域为大湾区中部核心区和沿海城镇带,2015—2020 年湿地损失区域在新区、新建产业基地等局部区域聚集;人工湿地变化主要受 GDP、渔业产量、第二产业产值等社会经济发展因素驱动,常住人口的影响力逐渐增强;气温、第一产业产值和道路密度对自然湿地变化起重要作用,其余因子影响较弱。

关键词:湿地;探索性空间数据分析;地理探测器;驱动因素;粤港澳大湾区

中图分类号:P962 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0126-09

Spatial-temporal changes of wetlands and its driving factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020 // WANG Haiyun^{1,2,3,4}, KUANG Yaoqiu⁵, ZHENG Shaolan^{2,3}, QIU Yuzhou^{2,3}, ZHENG Zihao⁶

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Institute of Land Resource Surveying and Mapping of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China; 3. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical Area of South China, Guangzhou 510500, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 6. School of Geographical Sciences and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on wetland data in 2010, 2015 and 2020 extracted by high-resolution remote sensing images, exploratory spatial data analysis method and geographic detector model methods are adopted to quantitatively analyze the temporal and spatial changes and its driving factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020. The results show that the wetland area in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020 continued to decrease, among which the reduction of constructed wetlands was more obvious (305.33 km²), the natural wetland decreased by 90.17 km², and the transfer of wetlands to construction land and grassland was the main form of wetland loss. From 2010 to 2015, the Greater Bay Area and coastal urban belts were the main areas of the reduced wetlands, and from 2015 to 2020, the reduced wetlands hot spots were concentrated in new areas and new industrial bases. The artificial wetland changes are mainly driven by social and economic factors including GDP, fish production and output value of secondary industry, with the influence of permanent population increasing gradually. Temperature, output value of primary industry and road density also play a vital role in wetland changes, while the other factors have insignificant influence.

Key words: wetlands; exploratory spatial data analysis; geographical detector; driving factor; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

基金项目:国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U1901219);广东省科技计划项目(2021B1212100003)

作者简介:王海云(1990—),女,博士研究生,主要从事环境规划与区域可持续发展研究。E-mail:hywang320@163.com

通信作者:匡耀求(1963—),男,教授,博士,主要从事资源环境、人口与区域可持续发展研究。E-mail:Kuangyaoqiu@jnu.edu.cn

湿地与森林、海洋一起被称为三大生态系统,具有涵养水源、净化水质、调节气候、碳存储、维持生物多样性等重要作用^[1-2]。联合国定义的17个可持续发展目标中,湿地至少可以为其中7个目标提供关键支持。然而,自19世纪以来,随着工业化和城市化进程的快速推进,世界上有多达57%的湿地被改造或消失^[3],湿地成为受人类活动影响最大、最濒危的生态系统^[4]。我国湿地面积约占全球湿地面积的10%,占我国国土面积的5.58%。据统计,1978—2008年,我国湿地面积减少了33%^[5];2009—2013年,在湿地保护范围不断增大的背景下,湿地总面积仍减少了8.82%^[6]。湿地损失和服务功能的退化对区域生态系统的稳定乃至气候会产生重要影响^[7],因此探讨湿地时空特征和驱动因素,对湿地生态系统健康发展至关重要。

湿地领域研究是各地政府、公众和学者关注的热点。从研究尺度来看,既有国家尺度的湿地分布及演变^[8]、存在问题与保护策略^[9-10]等研究,也有省域、流域、典型湿地区等局域尺度或国际重要湿地等单个湿地生态系统的研究^[11-15],但城市群湿地系统完整的监测和分析较少。研究方法上,王瑗玲等^[16-19]运用不同传感器的遥感卫星开展了湿地信息提取和分析,其中高分辨率遥感影像能更细致反映地物几何和纹理信息,与地面调查或辅助资料相结合,是进一步提高湿地解译精度的有效办法。湿地格局演变特征主要通过动态度^[20]、景观指数^[21]、重心迁移^[22]等方法进行量化,驱动机制的探讨则以定性或叙述性案例研究为主^[23],或利用主成分分析^[24]、灰色关联分析^[25]、地理加权回归分析^[26]等方法进行定量解析,但整体上侧重单因素的定量刻画与对比,多因子交互作用研究较少。地理探测器^[27]能够根据空间关联性探测各因子对模型的贡献率,识别因子间的相互关系,在探讨湿地驱动力方面具有潜力,但尚未得到广泛应用。

粤港澳大湾区“三江汇流,八门入海”,发育着种类多样、结构复杂、分布广泛的湿地资源,涵盖了包括近海湿地与内陆湿地、自然湿地与人工湿地框架下的几乎所有的湿地类型^[28]。随着经济高速发展和人类活动干扰不断增强,大湾区湿地急剧减少,对城市气候与环境、生态服务功能产生了显著影响,并影响到区域水环境和区域的可持续发展^[29],因此《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确提出加强湿地保护和修复的要求。然而,目前针对粤港澳大湾区湿地的研究主要关注红树林、基塘等特色湿地资源的变迁^[30-31]、生态评价和管理对策^[32]等,对研究区整体湿地系统的演变规律和驱动因素关注不够,制

约了湿地的系统性保护与修复。鉴于此,本文构建了兼顾近海和内陆、自然与人工的湿地分类体系,借助空间统计分析方法探究粤港澳大湾区2010年、2015年、2020年3个时间节点湿地时空演化特征,并采用地理探测器探讨各驱动因子对湿地变化的单独和交互作用,以期为大湾区湿地保护和修复提供参考,服务大湾区国家战略需求。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于北纬21°~25°、东经111°~116°之间,包括香港、澳门两个特别行政区和广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆9市,总面积5.6万km²,是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一。大湾区西部、北部和东部由低山、丘陵环绕,中部由珠江水系的西江、北江、东江及其支流冲击形成三角洲平原,属亚热带海洋性季风气候,多年平均降水量为1929.8mm,平均气温为21.9℃。粤港澳大湾区海岸线绵长,岛屿众多,湿地类型多样,水产养殖业发达,拥有惠东港口海龟国家级自然保护区、米埔沼泽内后海湾国际重要湿地和星湖、潼湖、华阳湖、金沙岛、镇海湾红树林、海珠、翠亨等国家湿地公园,是国际东亚候鸟迁徙的重要“中转站”和珍稀水鸟的重要栖息地。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

研究数据主要包括:①Google Earth (<http://earth.google.com/>)2010年多时相镶嵌的影像产品和17级海图产品,以及2015年和2020年的国产GF-1、GF-2影像数据;②土地利用调查、湿地资源调查、2019年香港土地利用等专题数据;③湿地实地采集数据;④2010—2020年《广东省统计年鉴》《广东农村统计年鉴》,以及澳门统计暨普查局《粤港澳大湾区统计专页》(<https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/>)和香港政府统计处 *Hong Kong Annual Digest of Statistics* (<https://www.censtatd.gov.hk/sc/>) 各类统计数据,对于统计数据中采用的货币币种不同的问题,采用研究年份当年12月末汇率统一换算为人民币后进行处理计算;⑤气温、降水等气象数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。

2.2 湿地分类体系

参考《全国湿地资源调查技术规程(试行)》,综合考虑遥感影像数据的可判读性和研究区各类型湿地的实际情况,划分自然湿地和人工湿地两个一级类,并细分为12个二级类(表1),其中人工湿地指人工修建或利用的湿地,包括库塘和养殖塘,因水稻

表1 粤港澳大湾区湿地分类及定义

Table 1 Classification and definition of wetlands in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GHMGBA)

湿地类型		定义	代表性湿地
一级类	二级类		
自然湿地	河流	天然形成的常年有河水径流的河流	西江、北江、东江及沿海诸河
	湖泊	天然形成的永久性湖泊	惠州潼湖和西湖、肇庆星湖
	沿海滩涂	沿海大潮高潮位与低潮位之间的潮浸地带	江门、珠海等泥质、砂质海滩
	河口水域	从近河口段的潮区界(潮差为0)至口外海滨段的淡水舌锋缘之间的水域	狮子洋河口、珠江口、那扶河入海口等
	浅海水域	多数情况下低潮时水深小于6 m的水域	江门、珠海海岸带水域
	红树林	由红树植物为主组成的潮间沼泽	香港米浦红树林、深圳湾红树林、镇海湾红树林、澳门路氹红树林等
	潟湖	海湾因湾口被泥沙所封闭而形成的湖	惠州考洲洋
人工湿地	库塘	以蓄水、发电、农业灌溉、城市景观、农村生活为主要目的而建造的蓄水区	白盆珠水库、大沙河水库、南沙湿地公园、翠亨湿地公园等
	养殖塘	以水产养殖为主要目的而修建的人工湿地	以佛山、江门等市最为集中

田主要作为农田资源,不纳入本次研究范围。根据解译标志和高分辨率影像,采用人工目视解译法进行湿地景观的提取。考虑到水深小于6 m的水域较难从影像识别,参考海图和广东省的第二次全国湿地资源调查数据成果辅助修正,确定浅海水域分布。以解译获取的2020年湿地信息为基础,逐年对比2015年和2010年影像,识别和提取变化较为明显的湿地斑块,通过核减和核增,依次确定2015年和2010年的湿地分布。其中,2020年的湿地数据成果与珠三角9市2020年土地利用现状图斑、2019年香港土地利用数据及实地照片进行对比,分析遥感解译的准确性,2010年和2015年的湿地数据则利用Google Earth影像进行精度检验,检验结果表明,整体分类精度均在85%以上,满足研究需要。

2.3 探索性空间数据分析

空间自相关性是探索性空间数据分析的核心内容,可用来表征空间对象与其邻域范围内其他对象间的相互关联关系,揭示研究对象在空间上的集聚或离散特征。本文将湿地变化数据聚集到1 km×1 km的格网中,统计每个格网湿地增加或减少的面积占比,以格网像元为评价单元,利用莫兰指数(Moran's I)表征时空动态度的空间自相关性,然后利用ArcGIS软件探测湿地变化的热点区域。

2.4 地理探测器

地理探测器包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4个模块^[33]。因子探测和交互作用探测模块可以识别自变量对因变量的影响以及自变量之间的交互作用,可用来定量探讨驱动因子对湿地变化的影响。本文选取2010—2015年和2015—2020年湿地变化面积作为结果变量,参考已有研究^[34],结合数据的可获取性,选取年平均气温

(x_1)、年降水量(x_2)表征自然因素对区域湿地演变的影响;选取GDP(x_3)、第一产业产值(x_4)、第二产业产值(x_5)、渔业产量(x_6)、常住人口(x_7)、建设用地面积(x_8)、道路密度(x_9)表征社会经济发展与湿地时空分布格局的关联程度。将以上影响因素空间分布进行网格化统计和离散化处理,利用因子探测和交互作用探测模块,得到各影响因子对湿地面积变化的影响力。通过因子探测得到影响因素对因变量的影响力或解释力 q ,其取值区间为 $[0,1]$, q 越大表示影响因素的解释力越强。交互作用探测通过比较两个单一解释变量和交互作用后的解释力来探索交互作用,交互作用类型可参见文献[33]。

3 结果与分析

3.1 湿地时序演化特征

2020年粤港澳大湾区湿地面积为8 963.41 km²,占研究区总面积的16.01%,其中自然湿地和人工湿地分别占8.41%和7.60%。2010—2020年湿地总面积呈下降趋势(表2),共减少了395.50 km²,其中人工湿地减少305.33 km²。人工湿地中,养殖塘年均减少面积为32.39 km²。但在湿地公园建设等政策引导下,库塘湿地面积增加18.53 km²。自然湿地以河流和沿海滩涂减少最明显,分别减少50.63 km²和37.03 km²。同时,红树林面积呈增长趋势,共增加7.28 km²,说明保护区的设立和红树林保护修复政策的实施对红树林保护作用显著。

不同时期湿地的转移途径表现出明显的差异。2010—2015年湿地主要转向建设用地、林地和草地,分别占42.83%、18.55%和16.15%。2015—2020年减少的湿地59.15%转向建设用地,草地作为湿地向建设用地转化的中间过程,占据了17.90%。同时,耕地对新增湿地的贡献率由53.60%

表 2 粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地面积及变化情况

Table 2 Area of wetlands and its changes in GHMGBA from 2010 to 2020

湿地类型		面积/km ²			年均变化率/%	
一级类	二级类	2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年	2015—2020 年
自然湿地	河流	1 574. 73	1 549. 27	1 524. 10	-0. 32	-0. 32
	湖泊	13. 17	13. 18	13. 21	0. 02	0. 05
	沿海滩涂	358. 15	329. 10	321. 12	-1. 62	-0. 48
	河口水域	1 539. 93	1 537. 33	1 536. 00	-0. 03	-0. 02
	浅海水域	1 262. 50	1 257. 38	1 256. 99	-0. 08	-0. 01
	红树林	24. 96	27. 97	32. 24	2. 41	3. 05
	潟湖	26. 60	26. 82	26. 21	0. 17	-0. 45
人工湿地	库塘	1 776. 04	1 772. 45	1 794. 57	-0. 04	0. 25
	养殖塘	2 782. 83	2 553. 56	2 458. 97	-1. 65	-0. 74
总计		9 358. 91	9 067. 06	8 963. 41	-0. 62	-0. 23

降为 28.70%。说明在严格落实耕地保护政策背景下,占用耕地挖塘现象得到一定的遏制。

湿地内部之间也存在相互转换。2010—2015 年,受围填海以及农业发展等因素影响,约 14.77 km² 的自然湿地(沿海滩涂、河口水域、河流等)转向人工湿地。如广州龙穴岛南部围填海工程导致该区域 29.19% 的沿海滩涂和 1.20% 的河口水域转为库塘。2015—2020 年,自然湿地之间存在相互转换,如潟湖、沿海滩涂向红树林的转换,面积分别为 1.41 km² 和 1.16 km²。一方面潟湖与外海分离,具有天然屏障作用,适宜红树林幼苗生长,另一方面,“退堤还滩造林”等政策对利用沿海滩涂种植红树林产生了明显推动作用。

3.2 湿地变化热点区域

利用全局莫兰指数刻画粤港澳大湾区湿地变化的空间分布特征,借助 Geoda 软件对其空间相关性进行检验。结果显示:各年份的莫兰指数均在 0.001 水平上显著,说明粤港澳大湾区湿地变化存在显著空间依赖性,因此,各研究单元应打破行政界线的约束,协同推进湿地保护和修复。2010—2015 年和 2015—2020 年湿地增加的莫兰指数分别为 0.360 和 0.305;湿地减少的莫兰指数分别为 0.454 和 0.409,说明湿地减少的空间相关性相比湿地增加更强,但无论增加还是减少,这种空间相关性均有所减弱,湿地变化趋于分散。

为进一步分析其在空间上的聚集态势,运用 ArcGIS 软件的热点分析工具对湿地变化的热点区域进行识别和可视化处理,结果如图 1 所示,Z 得分表示显著性,值越大表示热点越聚集。由图 1 可见:①2010—2015 年湿地损失的主要区域为大湾区中部的佛山顺德、中山横栏镇等地,以及深圳、广州、珠海、澳门等沿海经济带。顺德的湿地主要被高赞村工业集聚区等工业用地占用,横栏镇的湿地则是由于处在基本农田保护区范围内,在耕地保护政策驱

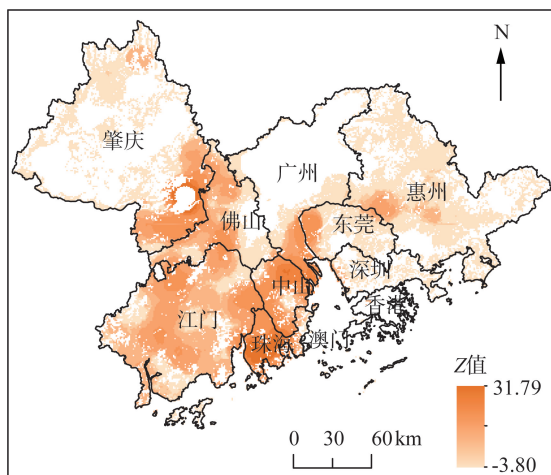
动下转为耕地。沿海经济带的湿地主要被建设占用,其中,深圳宝安区围垦养殖区被开发为建设用地,用于交通和东莞新城的建设;广州南沙区东部围填海用于龙穴岛港口和码头建设;中山横门岛北部及对岸、珠海北部沿海和横琴新区的围垦养殖塘逐渐被工程建设占用;珠海高栏港北部填海工程建设进一步扩张;“澳门新城区”填海计划有序推进;这些围填海、连岛工程导致沿海滩涂、河口水域等持续损失。②2015—2020 年湿地受损区域较为分散,在肇庆鼎湖区、东莞长安镇、深圳宝安区、香港等局部形成热点区。其中,肇庆新区的建设导致大量湿地转为公路、公园绿地以及工业用地;东莞和深圳受东莞长安滨海新区和深圳海洋新兴产业基地等建设项目影响,早期围垦而成的养殖塘逐渐转为建设用地;香港机场机场岛以北填海拓地侵占了河口水域。

2010—2015 年新增的湿地主要分布在肇庆鼎湖、珠海斗门以及中山北部,原因在于养殖塘的经济效率远高于传统农业种植的经济效益,受比较利益驱动,大量耕地被开垦为养殖塘。到 2020 年,新增湿地热点区域主要分布在肇庆和中山。肇庆新增的湿地主要分布在西南部的高要和北部的四会,该时期肇庆新区的建设促使鼎湖区近 200 个鱼塘转变为城市公园,养殖渔业往毗邻的四会和高要转移。此外,中山东部翠亨新区马鞍岛的建设带动了周边城市湿地公园等人工湿地的建设,说明近年来城市湿地景观逐渐得到重视。

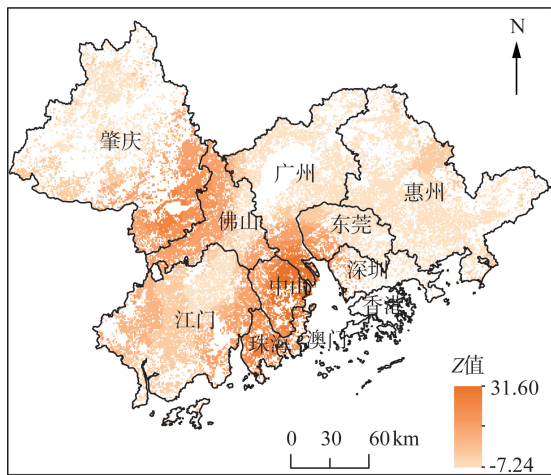
3.3 湿地演变驱动力

3.3.1 因子探测结果

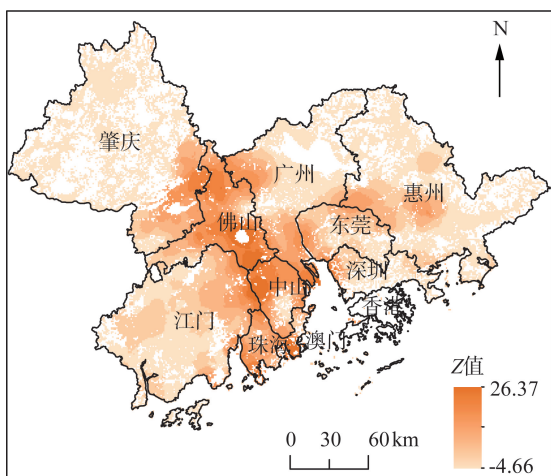
由表 3 可知,各类因子对湿地演变的影响程度存在较大差异,对人工湿地的作用更显著。2010—2015 年各驱动因子对人工湿地变化的影响力按从大到小排列为 x_3 、 x_6 、 x_5 、 x_9 、 x_7 、 x_8 、 x_1 、 x_4 、 x_2 ;2015—2020 年人工湿地变化驱动因子按对人工湿地的影响从大到小排列为 x_7 、 x_8 、 x_5 、 x_6 、 x_3 、 x_4 、 x_9 、 x_1 、 x_2 。可



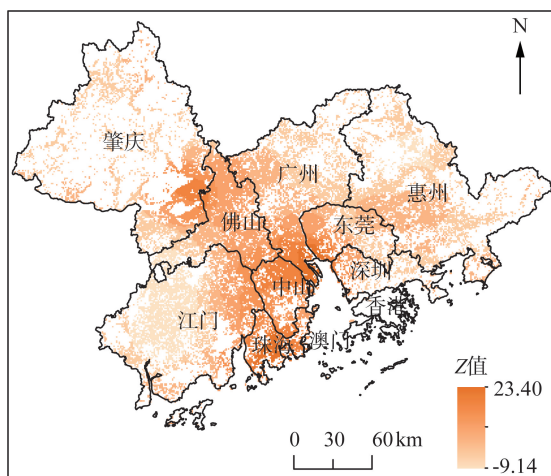
(a) 2010—2015 年新增湿地热点



(b) 2015—2020 年新增湿地热点



(c) 2010—2015 年减少湿地热点



(d) 2015—2020 年减少湿地热点

图 1 粤港澳大湾区 2010—2015 年和 2015—2020 年湿地变化热点区域

Fig.1 Hotspots of wetland changes in 2010-2015 and 2015-2020 in GHMGBA

表 3 粤港澳大湾区湿地演变影响因素地理探测结果

Table 3 Geographical detection results of influence factors of wetland changes in GHMGBA

类型	时间	q								
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
人工湿地	2010—2015 年	0.2094	0.1453	0.4147	0.2036	0.3911	0.4104	0.3365	0.3082	0.3785
	2015—2020 年	0.1699	0.1158	0.3065	0.2742	0.3267	0.3082	0.3510	0.3367	0.2613
自然湿地	2010—2015 年	0.3290	0.0909	0.0588	0.4888	0.2861	0.1449	0.0037	0.0825	0.1440
	2015—2020 年	0.1541	0.0964	0.0883	0.1655	0.2497	0.1835	0.2404	0.1360	0.3500

见社会经济因子表现更强的解释力,直接影响人工湿地空间分布的稳定性,自然因素作用不明显。研究前期 GDP 变化是导致人工湿地空间分异的主导因子,2010—2020 年大湾区 GDP 从 5.5 万亿元增至 11.5 万亿元,经济增长促进了研究区域的开发力度,导致湿地被占用或退化。但随着集约节约用地等政策的实施,GDP 增长对土地的依赖逐渐降低,其影响力从 0.4147 下降至 0.3065。产业发展必然伴随着工业园区建设等高强度人类活动,尽管受产业结构调整等因素影响,第二产业产值的影响力从 0.3911 下降为 0.3267,但排序均为第 3,对人工湿地格局影响显著。渔业产量对人工湿地格局的变化

起重要的作用,尤其佛山顺德、南海以及中山古镇、小榄镇等地养殖塘密集,但近年来村镇工业产业化的快速发展挤占了大量养殖塘,渔业产量的影响力下降。常住人口、建设用地面积的 q 值和排序均有所上升,说明由于人口的快速增长和向城市地区的进一步聚集,建设用地的扩张对人工湿地空间格局演变的影响加剧。粤港澳大湾区作为中国经济高度发达地区,人才吸引力强劲。2010—2020 年大湾区人口总量从 6382.2 万人增至 8634.7 万人,呈直线上升趋势。人口的激增扩大了对土地和粮食的需求,导致湿地转换趋向频繁。

气候因素对自然湿地演变产生的影响,以年平

均气温的影响较为显著。2010—2020 年粤港澳大湾区年平均气温呈上升趋势,气温高、水分蒸散快,在一定程度上导致湿地水位下降,造成湿地的流失和退化。由于年降水量波动较大,且大湾区总体雨量充沛^[35],年降水量对自然湿地的影响较弱。社会经济因子中,2010—2015 年第一产业产值影响最显著,说明该时期农业生产过程中围垦湿地、取水灌溉等活动导致了自然湿地的退化和消失;2015—2020 年道路密度影响最大,港珠澳大桥、深圳和香港机场扩建等工程实施直接导致滨海自然湿地减少。未来高速公路、铁路等交通设施的完善是城市发展和产业联系的重要支撑和纽带,为促进珠江口东、西两岸融合互动发展,深中通道等建设项目势在必行,这些交通设施的建设除直接侵占湿地,还将导致湿地被分割,使湿地的破碎程度加剧。

3.3.2 交互探测结果

图 2 为湿地面积变化影响因子交互探测结果,总体来看,任意两因子交互后的影响力均有不同程度的增强,说明驱动因子交互后对湿地格局演变多具有促进作用。人工湿地的驱动因子交互作用类型先以双因子增强为主,后以非线性增强为主。自然湿地的驱动因子交互作用类型均以非线性增强为主。

2010—2015 年,人工湿地的驱动因子中,年降水量对因子交互作用的影响最强,与其他因子交互后 q 值大幅提升,尤其与道路密度因子交互后影响最大。说明尽管单独的年降水量因子对人工湿地解释力较低,但与其他因子发生交互作用时能够强化其他因素作用,对湿地空间分异的影响显著增强。此外,道路密度与各因子交互后解释力显著提升,尤其与 GDP 等因子交互后解释力显著提升,说明道路基础设施的建设与经济因子叠加后,对人工湿地的变化产生显著的作用。自然湿地的驱动因子中,年平均气温和渔业产量的交互作用最强。渔业产量高在一定程度上反映渔业养殖设施的扩张,导致自然湿地缩减的同时,还会造成湿地水体污染,生态功能减弱。

2015—2020 年,人工湿地各驱动因子交互后影响力提升幅度有所减弱。其中第一产业产值与各因子交互增强作用较明显,尤其与常住人口叠加后 q 值明显提升。说明人口增长增加了粮食以及用水需求,对人工湿地的变化起到重要作用。自然湿地的驱动因子中,年降水量和建设用地面积交互作用最强,说明围填海等工程建设仍是驱动自然湿地格局变化的重要因素。

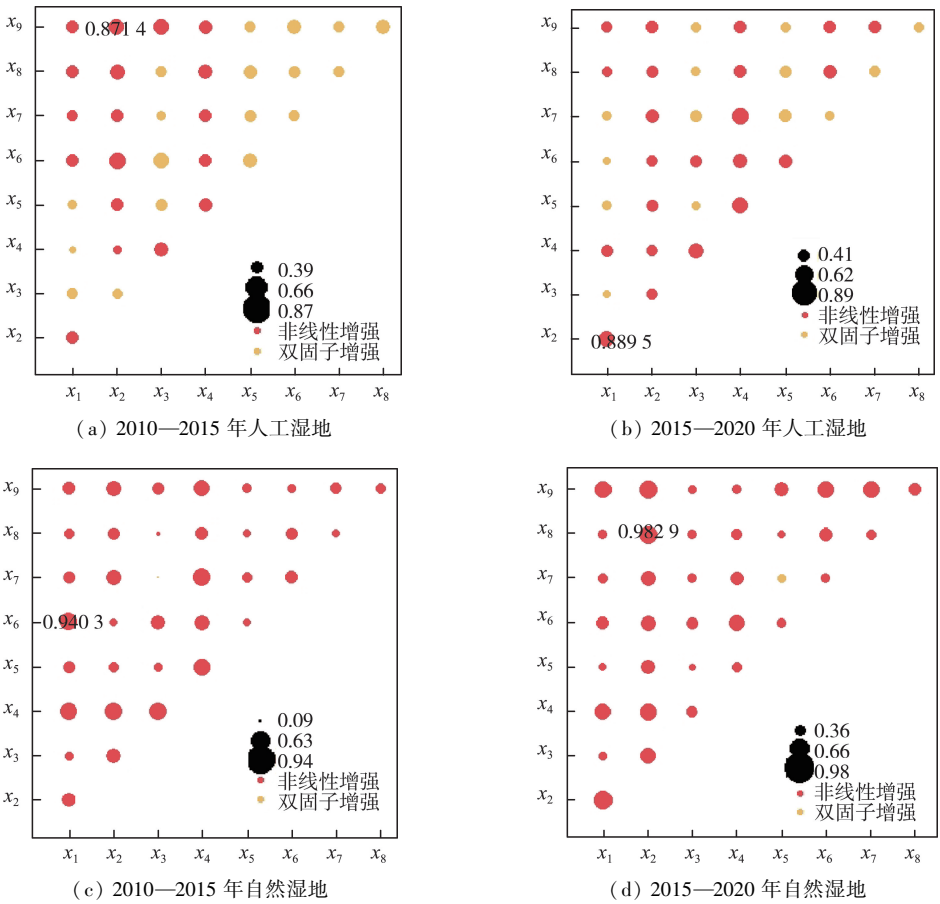


图 2 粤港澳大湾区湿地面积变化影响因子交互探测结果

Fig. 2 Interactive detection results of influence factors of wetland area changes in GHMGBA

3.4 湿地保护建议

随着粤港澳大湾区建设上升为国家战略,城镇化和人口增长压力会继续对区域湿地的保育带来巨大压力和挑战,如何平衡湿地保护与发展之间的关系值得深入思考。为此,提出如下建议:

a. 应分区施策,因地制宜制定保护措施。研究区湿地空间分布不均,约80%以上的湿地分布在珠江西岸,且湿地质心持续向西南向偏移,不均衡性有加剧趋势^[36]。因此,根据各地湿地情况和主要威胁,准确识别湿地保护空缺和潜在湿地恢复区,分区实施重点保护和优先修复,是提升湿地保护系统性、针对性的有效措施。

b. 应推进人工和自然湿地协同治理,促进湿地空间体系的完整和稳定。城市群地区的养殖塘、库塘等人工湿地作为“城市海绵体”,具有缓解城市热岛效应、化解洪水风险等重要作用^[37]。2010—2020年粤港澳大湾区养殖塘的锐减占湿地减少总面积的79.68%。重塑岭南基塘鱼塘文化,推进人工湿地与自然湿地在空间和功能体系上的衔接和共同治理,形成湿地网络体系,是提升湿地生态功能和区域水环境韧性的关键。

c. 应加快海岸带湿地的恢复和管控。粤港澳大湾区海岸线人工化程度高,沿海经济带是湿地减少的热点区域。天然缓坡变为立岸直接导致湿地植被的消失和物种的减少,围垦养殖破坏了湿地的自然演替过程,增加了污染压力^[38]。近年来政府实施的红树林保护修复专项行动计划、海岸线生态修复等政策起到了明显成效。然而在多重人地矛盾的影响下,粤港澳大湾区一些围而未填区、围垦养殖区和海岸带自然湿地仍面临被建设占用的风险。亟须通过合理评估和统一规划调整推进“退围还滩还湿”,形成稳定的生态屏障以应对风暴潮等自然灾害。

4 结 论

a. 粤港澳大湾区湿地呈“西翼多、东翼少”的分布格局,主要湿地类型为自然湿地,占研究区总面积的8.41%。2010—2020年湿地面积共减少4.23%,呈现以人工湿地变化为主导的变化趋势(减少7.00%)。在湿地保护和生态系统恢复工作不断强化的背景下,红树林湿地面积增长明显(增加29.17%)。

b. 湿地向建设用地和草地的转移是湿地损失的主要形式。2010—2015年沿海滩涂、河口水域等自然湿地受围填海影响向人工湿地转变,随后围垦活动得到遏制,自然湿地内部发生转变(沿海滩涂、

潟湖转向红树林)。

c. 粤港澳大湾区湿地变化热点区域存在显著空间依赖性。2010—2015年受城镇化、村镇工业化发展的影响,湿地损失的主要区域为大湾区中部高强度建设区和沿海城镇带。到2020年,湿地损失的区域呈“整体分散、局部集中”的分布特征,以新区、新建产业基地为中心聚集。

d. 人工湿地变化主要受GDP、渔业产量、第二产业产值等社会经济因素驱动,常住人口和建设用地面积的影响力呈增长趋势,年降水量和第一产业产值与其他因子交互时能够强化其他因素作用;自然湿地变化主要受气温、第一产业产值和道路密度影响,其余因子影响较弱,第一产业产值和常住人口交互、年降水量和建设用地面积交互,影响力均显著提升。

参考文献:

- [1] MITSCH W J, BERNAL B, HERNANDEZ M E. Ecosystem services of wetlands [J]. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2015, 11(1): 1-4.
- [2] 蒋卫国, 潘英姿, 侯鹏, 等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价[J]. *地理研究*, 2009, 28(6): 1665-1672. (JIANG Weiguo, PAN Yingzi, HOU Peng, et al. Assessment and analysis of wetland ecosystem health in Dongting Lake [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1665-1672. (in Chinese))
- [3] DAVIDSON N C. How much wetland has the world lost? long-term and recent trends in global wetland area [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934-941.
- [4] LI Binglun, HU Yuanman, CHANG Yu, et al. Analysis of the factors affecting the long-term distribution changes of wetlands in the Jing-Jin-Ji region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107413.
- [5] NIU Zhenguo, ZHANG Haiying, WANG Xianwei, et al. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [6] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观: 第二次全国湿地资源调查结果公布 [J]. *绿色中国*, 2014(3): 8-11. (GENG Guobiao. The situation of wetland protection in China is not optimistic [J]. *Green China*, 2014(3): 8-11. (in Chinese))
- [7] 张猛, 曾永年. 长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 241-249. (ZHANG Meng, ZENG Yongnian. Temporal and spatial dynamic changes and driving forces analysis of wetland landscape of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 241-249. (in Chinese))
- [8] 周婷, 马姣娇, 徐颂军. 2003—2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2496-2504. (ZHOU Ting, Ma Jiaojiao, XU Songjun. Spatial patterns and spatial autocorrelations of wetland changes in China during 2003-2013 [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2496-2504. (in Chinese))
- [9] MENG Weiqing, HE Mengxuan, HU Beibei, et al. Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement [J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 146: 50-59.
- [10] 潘佳, 汪劲. 中国湿地保护立法的现状、问题与完善对策[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 795-804. (PAN Jia, WANG Jing. The situation, problems and countermeasures surrounding wetland protection legislation in China [J]. Resources Science, 2017, 39(4): 795-804. (in Chinese))
- [11] 陈有明, 刘同庆, 黄燕, 等. 长江流域湿地现状与变化遥感研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 801-808. (CHEN Youming, LIU Tongqing, HUANG Yan, et al. Remote sensing research of wetland current status and change in the Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 801-808. (in Chinese))
- [12] 刘吉平, 高佳, 董春月. 1954—2015 年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4821-4831. (LIU Jiping, GAO Jia, DONG Chunyue. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang Plain from 1954 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4821-4831. (in Chinese))
- [13] 郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 等. 青藏高原湿地遥感监测与变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2): 230-237. (LANG Qin, NIU Zhenguo, HONG Xiaoqi, et al. Remote sensing monitoring and change analysis of wetlands in the Tibetan Plateau [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 230-237. (in Chinese))
- [14] 李冰, 万荣荣, 杨桂山, 等. 近百年鄱阳湖湿地格局演变研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 1018-1029. (LI Bing, WAN Rongrong, YANG Guishan, et al. Investigating spatiotemporal dynamics of Lake Poyang wetland for the recent century [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 1018-1029. (in Chinese))
- [15] 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估[J]. 科学通报, 2012, 57(4): 207-230. (ZHENG Yaomin, ZHANG Haiying, NIU Zhenguo, et al. Protection efficacy of national wetland reserves in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(4): 207-230. (in Chinese))
- [16] 王璵玲, 刘洁, 王彩艳, 等. 1987—2009 年东平湖湿地时空演变及其驱动力[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(增刊 3): 160-163. (WANG Ailing, LIU Jie, WANG Caiyan, et al. Spatial and temporal change and its driving force of Dongping Lake wetland during 1987-2009 [J]. Chinese Population, Resources and Environment, 2014, 24(Sup3): 160-163. (in Chinese))
- [17] 张雅春, 那晓东, 臧淑英. 基于 HJ-1A 高光谱影像的湿地精细分类[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1705-1712. (ZHANG Yachun, NA Xiaodong, ZANG Shuying. Wetland high precision classification based on the HJ-1A hyperspectral image [J]. Progress in Geography, 2018, 37(12): 1705-1712. (in Chinese))
- [18] SLAGTER B, TSENDBAZAR N E, VOLLRATH A, et al. Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: a case study in the St. Lucia wetlands, South Africa [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 86: 102009.
- [19] 高雨, 胡召玲, 樊茹. 高分辨率影像融合算法对滨海湿地土地利用分类精度的影响[J]. 测绘通报, 2022(1): 116-120. (GAO Yu, HU Zhaoling, FAN Ru. Effect of high-resolution image fusion algorithm on the classification precision of land utilization in coastal wetland [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(1): 116-120. (in Chinese))
- [20] 杨俊, 单灵芝, 席建超, 等. 南四湖湿地土地利用格局演变与生态效应[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 856-864. (YANG Jun, SHAN Lingzhi, XI Jianchao, et al. Land use pattern changes and ecological effects in Nansihu wetland [J]. Resources Science, 2014, 36(4): 856-864. (in Chinese))
- [21] 卢晓宁, 张静怡, 洪佳, 等. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 214-223. (LU Xiaoning, ZHANG Jingyi, HONG Jia, et al. Analysis of wetland landscape evaluation and its driving factors in Yellow River Delta based on remote sensing image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(Sup1): 214-223. (in Chinese))
- [22] 卢晓宁, 黄玥, 洪佳, 等. 基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324. (LU Xiaoning, HUANG Yue, HONG Jia, et al. Spatial and temporal variations in wetland landscape patterns in the Yellow River Delta based on Landsat images [J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4314-4324. (in Chinese))
- [23] 任玲玲, 栗云召, 于森, 等. 1984—2015 年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493-502. (REN Lingling, LI Yunzhao, YU Miao, et al. Evolution of artificial wetlands

- in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984-2015[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 493-502. (in Chinese))
- [24] 曹晨晨, 苏芳莉, 李海福, 等. 辽河口盐地碱蓬湿地景观破碎化及驱动机制[J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 581-589. (CAO Chencheng, SU Fangli, LI Fuhai, et al. Landscape fragmentation and driving mechanism of Suaeda salsa wetland in Liaohu Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 581-589. (in Chinese))
- [25] 易阿岚, 王钧. 上海市湿地景观格局时空演变与驱动机制的量化研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2622-2631. (YI Alan, WANG Jun. Quantitative study on spatio-temporal evolution and mechanisms of wetland landscape patterns in Shanghai [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2622-2631. (in Chinese))
- [26] 宫宁, 牛振国, 齐伟, 等. 中国湿地变化的驱动力分析[J]. *遥感学报*, 2016, 20(2): 172-183. (GONG Ning, NIU Zhenguo, QI Wei, et al. Driving forces of wetland change in China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 172-183. (in Chinese))
- [27] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J]. *地理科学*, 2018, 38(8): 1370-1378. (ZHANG Jinxi, GONG Jie, LIU Dongqing. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on geodetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1370-1378. (in Chinese))
- [28] 吴志峰, 曹峥, 宋松, 等. 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估: 现状、挑战及展望[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8440-8450. (WU Zhifeng, CAO Zheng, SONG Song, et al. Wetland remote sensing monitoring and assessment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: current status, challenges and future perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8440-8450. (in Chinese))
- [29] HUANG Xiaojun, WU Zhifeng, ZHANG Qifei, et al. How to measure wetland destruction and risk: wetland damage index[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109126.
- [30] 于凌云, 林绅辉, 焦学尧, 等. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 782-790. (YU Lingyun, LIN Shenhui, JIAO Xueyao, et al. Ecological problems and protection countermeasures of mangrove wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(4): 782-790. (in Chinese))
- [31] 陈彩霞, 叶玉瑶, 黄光庆, 等. 粤港澳大湾区基塘多功能性尺度效应及生态修复策略[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3394-3405. (CHEN Caixia, YE Yuyao, HUANG Guangqing, et al. Scale effect of the dike pond's multifunctionality and ecological restoration strategy in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3394-3405. (in Chinese))
- [32] 陈子娴, 周廷刚, 李洪忠, 等. 粤港澳大湾区湿地生态风险评估[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(5): 40-51. (CHEN Zixian, ZHOU Tinggang, LI Hongzhong, et al. Wetland ecological risk assessment of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(5): 40-51. (in Chinese))
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *ACTA Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [34] 高祖桥, 白永平, 周亮, 等. 宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3499-3508. (GAO Zuqiao, BAI Yongping, ZHOU Liang, et al. Characteristics and driving forces of wetland landscape pattern evolution of the city belt along the Yellow River in Ningxia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3499-3508. (in Chinese))
- [35] 付铁文, 徐宗学, 陈浩, 等. 粤港澳大湾区 1961—2014 年降水时空演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 56-65. (FU Tiewen, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on spatiotemporal evolution characteristics of precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2014 [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 56-65. (in Chinese))
- [36] 黄锋华, 黄本胜, 洪昌红, 等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 65-71. (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 65-71. (in Chinese))
- [37] 龙北辰, 杨景同. 小微湿地的环保功能及应用探究[J]. *环境与发展*, 2019, 31(12): 194-197. (LONG Beichen, YANG Jingtong. Research on environmental protection function and application of small and micro wetlands [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(12): 194-197. (in Chinese))
- [38] TIAN Bo, WU Wenting, YANG Zhaoqing, et al. Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010 [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 170: 83-90.

(收稿日期: 2022-06-20 编辑: 熊水斌)