

# 粤港澳大湾区滨海自然与人工湿地演变及驱动因素分析

赵铜铁钢<sup>1</sup>, 吴迪熠<sup>1</sup>, 杨振华<sup>2</sup>, 陈文龙<sup>3</sup>

(1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 珠海 510275; 2. 生态环境部珠江流域南海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 广东 广州 510610; 3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

**摘要:**通过构建随机森林模型提取了1987—2020年粤港澳大湾区滨海湿地分布数据,采用环境库兹涅茨曲线(EKC)、主成分分析、敏感性分析等方法分析了其演变规律与驱动因素。结果表明:粤港澳大湾区滨海自然与人工湿地呈现不同变化特征,自然湿地面积持续减少,人工湿地面积呈周期性先增加后减少;滨海湿地面积与单位面积GDP之间的EKC在广州、珠海、中山、江门表现为“快速上升—快速下降”的二次倒U形曲线,在深圳为三次倒N形曲线,在惠州、东莞以下降趋势为主;人口、第一产业产值等经济社会因素是粤港澳大湾区滨海湿地的主要驱动因素,气候因素通过交互作用驱动湿地变化,不同驱动因素的敏感度体现了城市经济结构特征。

**关键词:**自然湿地;人工湿地;环境库兹涅茨曲线;经济社会驱动因素;粤港澳大湾区

中图分类号:TV148

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0038-10

**Evolution of coastal natural and constructed wetlands and its driving factor analysis in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area**//ZHAO Tongtiegang<sup>1</sup>, WU Diyi<sup>1</sup>, YANG Zhenhua<sup>2</sup>, CHEN Wenlong<sup>3</sup> (1. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Eco-Environmental Monitoring and Scientific Research Center, Bureau of Eco-Environmental Supervision of South China Sea Water and Pearl River Basin, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510610, China; 3. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** A random forest model for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area was constructed, the distribution of coastal wetlands from 1987 to 2020 was extracted year by year. Methods such as environmental Kuznets curve (EKC), principal component analysis, and sensitivity analysis were used to analyze the evolution patterns and driving factors. The results show that natural and constructed coastal wetlands in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area exhibit different characteristics, with natural wetland area continuing decreasing and constructed wetland area cyclically increasing and then decreasing. The EKC relationship between coastal wetland area and GDP per unit area exhibits inverted U-shaped curves of “rapid rising-rapid declining” in Guangzhou, Zhuhai, Zhongshan and Jiangmen cities, an inverse N-shaped curve in Shenzhen City, and downward trends in Huizhou and Dongguan cities. Economic and social factors such as population and output value of primary industry are the main driving factors of the coastal wetland in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Climate factors drive wetland changes through interactions. The sensitivity of different driving factors reflects the characteristics of urban economic structure.

**Key words:** natural wetland; constructed wetlands; environmental Kuznets curve; economic and social driving factors; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

滨海湿地具有涵养水源、固碳释氧、缓流消浪等生态功能<sup>[1-3]</sup>。全国湿地资源调查显示,滨海区域围垦与基建占用等人类活动是导致滨海湿地减少的关键因素<sup>[4]</sup>。滨海湿地面积损失与功能退化已对区

域水安全构成严重威胁,研究其演变过程与驱动因素对于区域水资源保护和 water 环境综合管控具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。近年来,国内外相关研究从流域与区域水循环的角度揭示了湿地资源的重要性及其生态环境

基金项目:广东省“珠江人才计划”青年创新团队项目(2019ZT08G090)

作者简介:赵铜铁钢(1986—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhaottg@mail.sysu.edu.cn

通信作者:吴迪熠(1999—),男,硕士研究生,主要从事遥感水文研究。E-mail:wudy27@mail2.sysu.edu.cn

功能,并针对生态风险、遥感提取、驱动机制等对滨海湿地进行了深入研究<sup>[7-10]</sup>。滨海湿地遥感提取难度大,尤其受潮位等水位动态变化影响,湿地与水域、不同类型湿地之间存在边界不清的问题<sup>[11]</sup>。提取方法方面,已有研究通过设置阈值、统计频率、分位数合成等方法,综合多幅影像的高质量信息以最大限度地获得滨海湿地区域<sup>[12-14]</sup>。模型选择方面,前期研究表明随机森林、决策树等模型在大范围高精度的湿地提取中能取得良好的分类效果<sup>[15-17]</sup>。虽然通过指数分位数、最值等指标可以有效避免水位影响以提高提取精度,但在滩涂、养殖水体、浑浊海水处等自然与人工湿地类间容易出现误分<sup>[18-19]</sup>。

快速城市化、工业化背景下,围垦、填海等人类活动直接导致滨海红树林、滩涂等自然湿地大幅减少,同时养殖水体等人工湿地增加,粤港澳大湾区滨海湿地演化及其驱动因素成为相关研究的焦点问题<sup>[20-22]</sup>。粤港澳大湾区湿地类型多样,4—9月雨季遥感图像质量受到云量的强烈影响且湿地水文情况复杂<sup>[23]</sup>,长期持续监测滨海湿地演变情况并量化其驱动因素的研究目前还较少。基于此,本文采用环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)、主成分分析、敏感性分析等方法<sup>[24-25]</sup>,聚焦大湾区滨海自然与人工湿地的演变特征,辨析并且量化滨海湿地变化的驱动要素,以期为粤港澳大湾区湿地保护与修复提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

粤港澳大湾区由广州、深圳、珠海、佛山、中山、惠州、东莞、江门、肇庆9个城市和香港、澳门两个特别行政区组成。粤港澳大湾区内滨海湿地类型丰富多样,围海养殖产业发达,还有内伶仃岛-福田、淇澳-担杆岛、镇海湾红树林等多个自然保护区与湿地

公园。自1980年以来,粤港澳大湾区滨海区域人类活动日益频繁,大规模的围垦、填海等活动导致滩涂、红树林等自然湿地大面积减少,围海养殖等活动导致水体污染、生物多样性丧失,深刻影响到区域水生态和水环境。《粤港澳大湾区发展规划纲要》提出要打造生态防护屏障,明确了保护区域内国际和国家重要湿地的要求。本文选择的研究区为沿海岸线缓冲带10 km范围,介于21°28′38″N~22°55′59″N、112°11′56″E~115°7′20″E<sup>[26]</sup>,由于统计口径与粤港澳大湾区其他研究不同,香港、澳门并未纳入研究,佛山、肇庆不属于滨海地区,也不纳入研究。图1为2010年研究区土地利用分类结果。

### 1.2 数据来源

采用Google Earth Engine(GEE)平台Landsat 5、7、8的Level 2、Collection2、Tier1的表面反射率数据集,时间为1986年5月1日至2021年12月31日,空间分辨率为30 m。数据经过几何校正、辐射校准和正射校正,具有较高精度,适合长序列定量分析。考虑2003年后Landsat 7获得影像存在条带问题和云量的影响,共采集2931张表面反射率图像,其中云量小于50%的共1744张,用于获得稳定图像以目视解译获得逐年训练数据。辅助数据包括SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)第3版数据集与中国土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)<sup>[27-28]</sup>。其中,SRTM数据集用于提取高程数据,CLCD用于比对部分地物目视解译结果。另外,降水数据来源于CHIRPS(Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station)数据集;气温数据来源于青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)提供的逐月平均气温数据<sup>[29-30]</sup>;经济社会数据来源于《中国城市统计年鉴》《广东统计年鉴》以及各市统计年鉴,考虑到数据的可获取性和可比性,经济模型选取1990—2020年作为研究期。

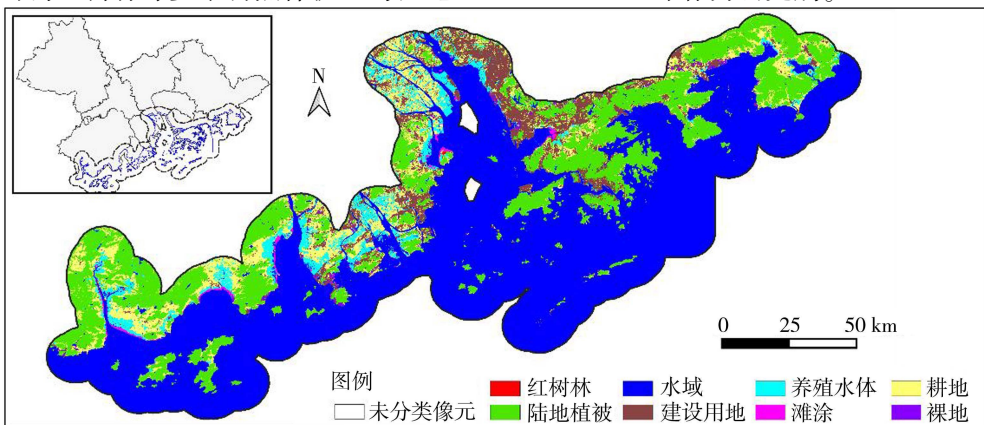


图1 2010年研究区土地利用分类结果

Fig. 1 Land use classification result of study area in 2010

## 2 研究方法

### 2.1 基于随机森林的滨海湿地数据提取

采用随机森林模型对滨海湿地进行动态监测,相关土地利用类型分为滩涂(自然湿地)、红树林(自然湿地)、养殖水体(人工湿地)、陆地植被、耕地、裸地、建设用地、水域共8类<sup>[31]</sup>。利用所有可获取图像计算不同指数的百分位数、标准差等指标作为特征变量,依据 Murray 等<sup>[18]</sup>构建的考虑潮位影响的模型,通过滑动3 a内云量小于50%的去云图像筛选出目视解译图像:对于滩涂,采用去云图像的真、假彩色图像与归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)、自动水体提取指数(automated water extraction index, AWEI)标准差图像提取分布区域;对于其他地物,按波段计算反射率的时空频率直方图,取第40百分位处的反射率作为稳定图像以选点<sup>[31]</sup>。增加淹没红树林指数(inundated mangrove forest index, IMFI)等特征变量用于分类<sup>[32-34]</sup>,特征变量具体包括:①原方法采用的Landsat多光谱波段与指数,计算其百分位数等指标;②添加IMFI的10、25、50、75、90的百分位数及标准差;③SRTM及其斜率;④K-means聚类算法对上述三者合成图像的分类结果。

构建逐年样本集,选点尽可能保证空间上的均匀和随机性。每年约含1800个样本点,1987—2020年总计约6万个样本,最小类别样本量不少于40个。按照7:3的比例随机分为训练集和验证集。由于随机森林模型决策树数量和K-means聚类算法分类个数对分类结果有较大影响,采用控制单变量测试后发现,K-means聚类算法随机抽取15000个点分16类,决策树数量取150时分类结果较好<sup>[35]</sup>。以上操作均在GEE平台上处理。后处理采用GDAL等Python库去除“椒盐噪声”与小斑块。

### 2.2 EKC

EKC被用于分析经济发展与环境质量之间的非线性关系,包含倒U、N等不同形态<sup>[24,36]</sup>。为剔除城市规模的影响,采用滨海湿地面积与单位面积GDP两者间的EKC进行分析,计算公式为

$$y_t = \alpha + \beta_1 x_t + \beta_2 x_t^2 + \beta_3 x_t^3 + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: $y_t$ 为 $t$ 时段对应的滨海湿地面积; $x_t$ 为 $t$ 时段单位面积GDP值; $\alpha$ 为常数项; $\beta_i$ 为对应的 $i$ 次模型系数,取不同值时,该曲线可变换成单调形、U形、N形等不同形式; $\varepsilon_t$ 为随机误差项。

### 2.3 主成分分析与敏感性分析方法

滨海自然与人工湿地变化过程受经济社会与气候因素的共同作用。选择GDP( $G$ )、单位面积人口

数( $H_U$ )、第一产业产值( $G_1$ )、第二产业产值( $G_2$ )、滨海建设用地占比( $R_1$ )、滨海耕地占比( $R_C$ )、年降水量( $P_A$ )和年均气温( $T_A$ )等作为解释变量,分析各驱动因素对于滨海湿地变化的影响,根据研究周期需要选择相对应的统计口径。其中,GDP相关数据采用1978年不变价格,以1990年为基准,核减修正得到历年可比价格。各市抽样KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)适合性检验的检验值均大于0.6,Bartlett球形检验显著性系数小于0.001,说明变量间存在显著相关性,需进行主成分分析<sup>[25]</sup>。主成分分析法是通过线性变化对数据进行降维的定量化研究方法,其将复杂信息浓缩为少数主成分,采用该方法可从众多驱动因素中筛选出主要的驱动因素<sup>[1,37-38]</sup>。然后采用敏感性分析法逐年计算湿地对各驱动因素的敏感度,敏感度越大,说明湿地该年对该因素变化越敏感。

对各市分别进行分析,具体步骤包括:①对原始数据进行KMO和Bartlett检验,选择合适的指标并采用Z-score法标准化数据;②计算方差贡献率,按从大到小排序并选取累积方差贡献率超过85%的主成分;③计算载荷矩阵、指标权重和敏感度等指标。敏感度计算公式为

$$s_{kj} = |\Delta B_k / B_k| / |\Delta X_{kj} / X_{kj}| \quad (2)$$

式中: $s_{kj}$ 为第 $j$ 个解释变量在第 $k$ 时段的敏感度; $B_k$ 、 $\Delta B_k$ 分别为对应湿地在第 $k$ 时段的面积与其变化量; $X_{kj}$ 、 $\Delta X_{kj}$ 分别为第 $j$ 个解释变量在第 $k$ 时段的值与其变化量。

## 3 结果与分析

### 3.1 长时序湿地演变情况

逐年提取粤港澳大湾区滨海土地利用分类数据,计算研究区及各市人工湿地和自然湿地面积,结果如图2所示。分类结果总体精度为89.23%,95%置信区间为88.78%~89.68%,Kappa系数大于0.8。其中,人工湿地的生产者精度和使用者精度均为80%以上;红树林的生产者精度和使用者精度为84%~87%,其面积及变化趋势与贾凯等<sup>[31]</sup>的研究结论一致,表明方法与结果合理。滩涂的生产者精度和使用者精度为85%左右,能满足研究需求。整体上,研究区滨海湿地自然湿地基本呈下降趋势;人工湿地呈现周期性变化,周期为8a左右,在2013年面积达到最大值后逐年减少。湿地的变化以2000年为界,之前自然湿地占总湿地的20%以上,其减少不影响人工湿地与总湿地变化的相似性。根据前期相关研究<sup>[20,39]</sup>,主要原因在于自然湿地向人工湿地转变,湿地变化的驱动因素与其内部转化存在相关关系。

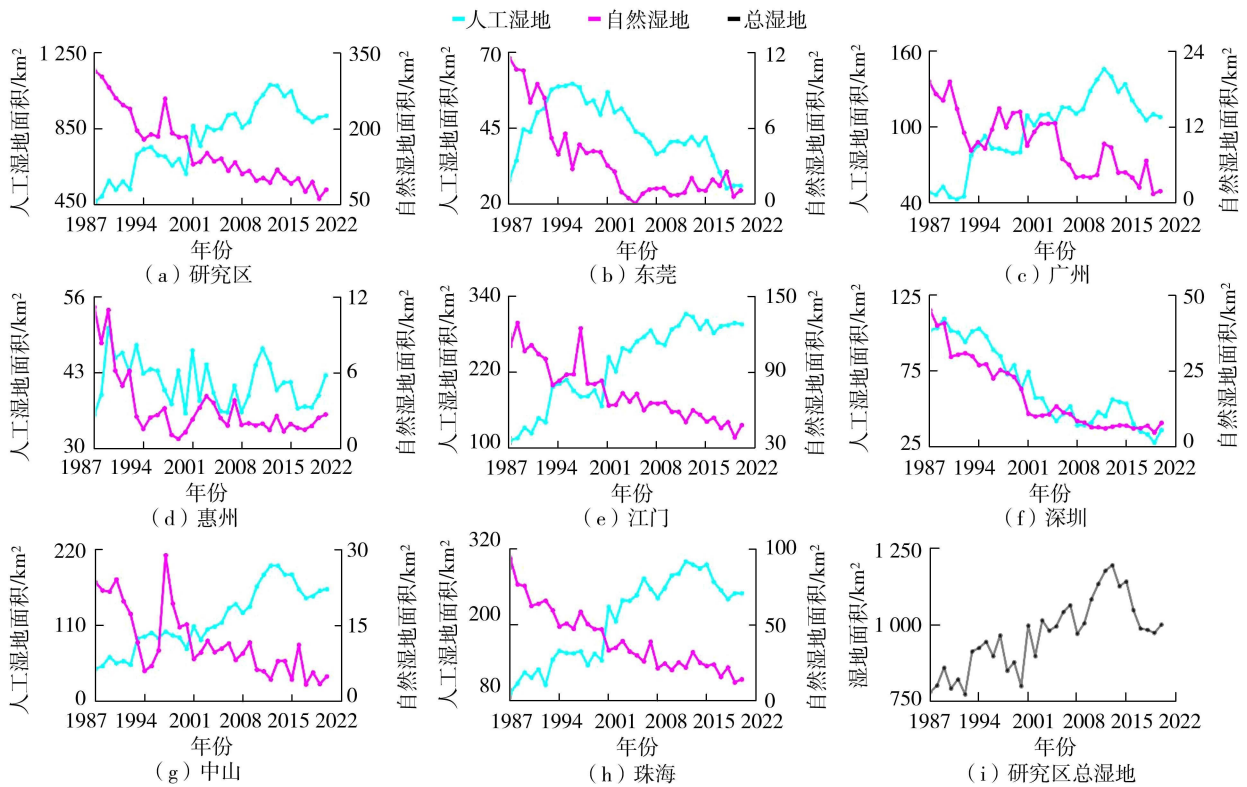


图2 研究区及各市滨海湿地演变情况

Fig. 2 Evolution of coastal wetlands in study area and cities

研究区 1987—2020 年逐 5 a 滨海湿地变化的空间分布如图 3 所示, 图中按照年份由远至近的顺序叠加图层, 年份愈近的图层愈位于上方<sup>[40]</sup>, 直观地展示出湿地的萎缩和扩张情况。整体上, 研究区滨海湿地空间分布呈现东少西多的特征。湿地扩张主要集中在广海湾、崖门出海航道、横门等出海口外; 湿地萎缩主要分布在广州、深圳、东莞等经济发达地区的滨海区域, 如横琴岛等地。现存滨海湿地中江门、珠海最多。

### 3.2 滨海湿地 EKC 变化特征

采用转移概率描述研究区各市滨海湿地与其他

土地利用类型之间的转换关系, 转移概率即湿地向其他土地利用类型转移的面积占当期该湿地面积的比值<sup>[21]</sup>。图 4 为各市逐 5 a 自然湿地与人工湿地向其余土地利用类型的转移概率, 同一年份中左边柱子为自然湿地, 右边柱子为人工湿地, 图例中其他表示该市除 3 种主要转移类型外发生的转移概率之和。结合图 4 与图 2 可知, 广州的自然湿地主要被养殖水体和城市扩张侵占, 中山的自然湿地在 2000 年前向农用地转化为主, 珠海与江门的自然湿地主要向养殖水体和水域缓慢转化, 这 4 市人工湿地增长主要依靠耕地、建设用地 (与耕地相邻村落迁出) 和

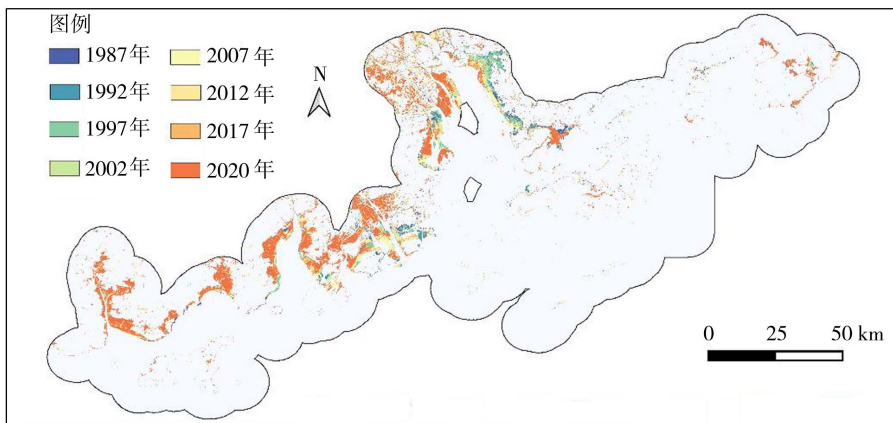


图3 研究区逐 5 a 滨海湿地变化的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of wetland changes in study area over period of 5 a

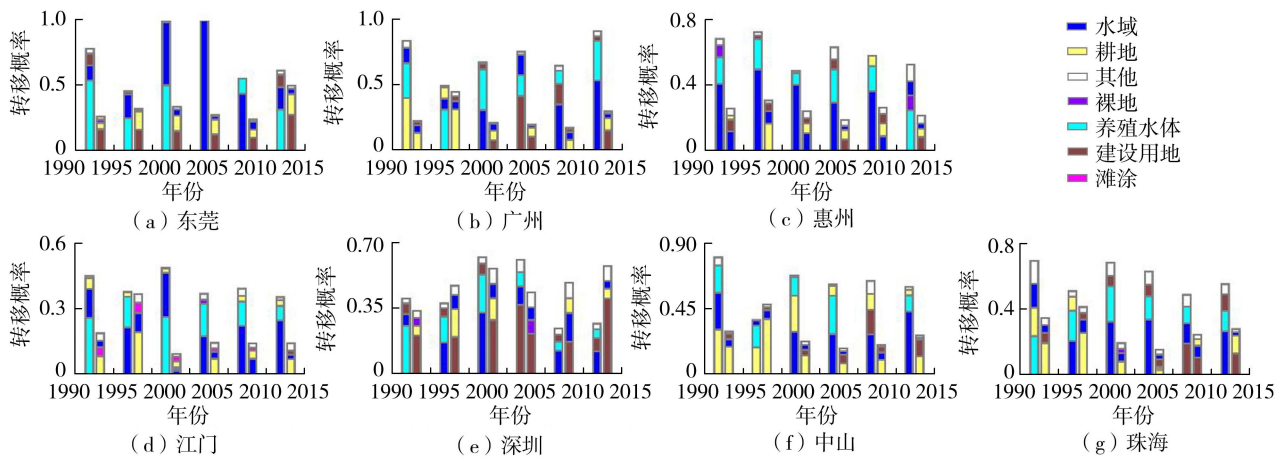


图4 各市逐5a滨海湿地的转移概率

Fig. 4 Transition probability of coastal wetlands in each city over period of 5 a

水域转化。深圳、东莞和惠州的人工湿地主要被城市扩张侵占,自然湿地主要转化为养殖水体和水域。深圳市滨海具有相对稳定的自然湿地区域,而东莞与惠州的自然湿地则基本消失。

图5为研究区各市EKC拟合结果,表1为各市各模型的决定系数( $R^2$ )与赤池信息准则(AIC)值。由图5和表1可见,除深圳、惠州和东莞外的城市EKC均呈现“快速上升—快速下降”的二次模型的倒U形特征。结合相关研究<sup>[20,41]</sup>,各市第一阶段快速增长原因为改革开放以来,城市吸收大量劳动力带来GDP和人口的快速增长,刺激对农业、养殖业产品的需求提升,促发人工湿地对自然湿地和水域的大量侵占;第二阶段下降的原因为城市化进程对用地的迫切需要,此阶段第一产业发展与城市扩张之间的矛盾、养殖污染与生态保护之间的矛盾逐渐显现。深圳EKC呈现三次模型的倒N形特征,其经济的快速发展使其在早期即大量侵占湿地以保证城

表1 各市EKC拟合系数

Table 1 EKC fitting coefficient of each city

城市	$R^2$		AIC 值	
	二次模型	三次模型	二次模型	三次模型
东莞	0.74	0.75	220.2	220.5
广州	0.81	0.84	266.2	261.9
惠州	0.23	0.34	204.2	201.2
江门	0.85	0.88	292.6	287.3
深圳	0.78	0.94	295.2	255.2
中山	0.88	0.90	280.8	278.0
珠海	0.87	0.89	296.7	292.1

市用地供应;对于惠州,其在2000年以前以自然湿地的减少为主,人工湿地面积以10a为周期波动;对于东莞,在1996年前以围垦等活动导致的人工湿地增长为主,此后湿地向建设用地和农用地转化并基本保持减少趋势。除深圳、东莞外,其他市均在2016年后出现湿地面积略增加的趋势。

### 3.3 主成分分析与敏感性分析

对影响研究区湿地的经济社会与气候因素进行

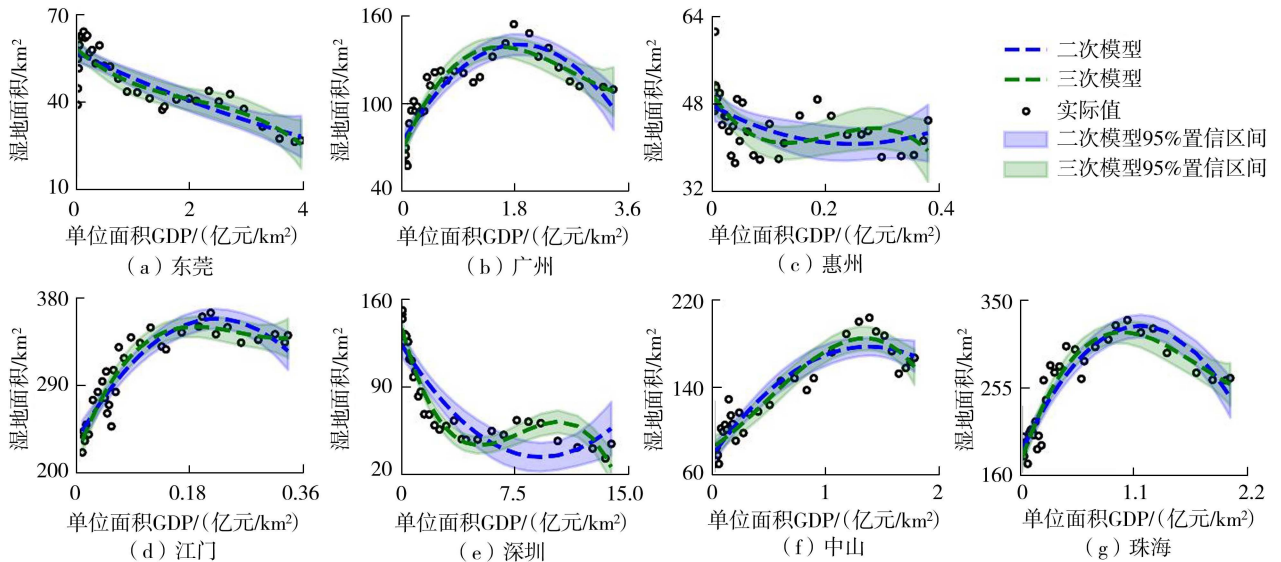


图5 各市EKC拟合结果

Fig. 5 EKC fitting results for each city

主成分分析,得到 2~3 个占主导的主成分,其载荷系数如图 6 所示。其中,第一主成分表征经济社会因素,各市第一主成分贡献率均大于 60%,是湿地变化的主导因素,且其中的滨海耕地占比与其他因素呈相反的驱动作用;第二、第三主成分表征气候因素。对广州和珠海,前两个主成分累积贡献率高于

85%。对第一主成分,广州、珠海、中山、东莞受 GDP ( $G$ )、单位面积人口数( $H_U$ )、第一产业产值( $G_1$ )、第二产业产值( $G_2$ )、滨海建设用地占比( $R_1$ )、滨海耕地占比( $R_C$ )的载荷较大(其中东莞第一产业产值呈相反的驱动作用);与上述城市相比,深圳受第一产业产值、惠州受滨海耕地占比、江门受滨海建设用地占比的影响相对小。对第二、第三主成分,年降水量( $P_A$ )比年均气温( $T_A$ )驱动力更大,年均气温对各主成分均有影响,表明年均气温通过对其他因素的交互作用驱动湿地变化。

图 7、图 8 分别为各市人工湿地和自然湿地变化对不同驱动因素的敏感度。由图 7、图 8 可见,经济社会因素方面,各市对单位面积人口数的变化均最为敏感,且多呈现短时段(2~5 a)持续的情况,说明研究区滨海湿地转变的主要原因是人口激增导致对城建、农业、养殖业的大量需求<sup>[42-43]</sup>。气候因素方面,各市滨海湿地对降水量变化较不敏感,但对年均气温变化较为敏感<sup>[22]</sup>。结合敏感度与转移概率进行分析,发现湿地对其他驱动因素的敏感度与该市滨海区域发展特性相关。广州、珠海、中山、江门人工湿地变化与单位面积人口数、滨海耕地占比和第一产业产值相关,即人口压力下促使耕地向高价值人工湿地转变;并且,自然湿地对于第二产业产值也较敏感,说明自然湿地同时受城市化、工业化过程的影响导致萎缩<sup>[44]</sup>。惠州与上述地市差异在于其变化受滨海耕地占比影响小,湿地面积变化小,更多依赖于当期对养殖业的投资力度。深圳自然湿地变化主要与滨海建设用地占比相关,人工湿地变化与滨海建设用地占比、第一产业产值、单位面积人口数相关,说明城市化带来的综合影响是促使深圳湿地转变的最主要因素。东莞与深圳相似,但其受单位面积人口数影响远超其他因素,结合其滨海建设用地占比的增长,可知促使湿地萎缩的最主要因素是东莞人口对居住面积的需要。

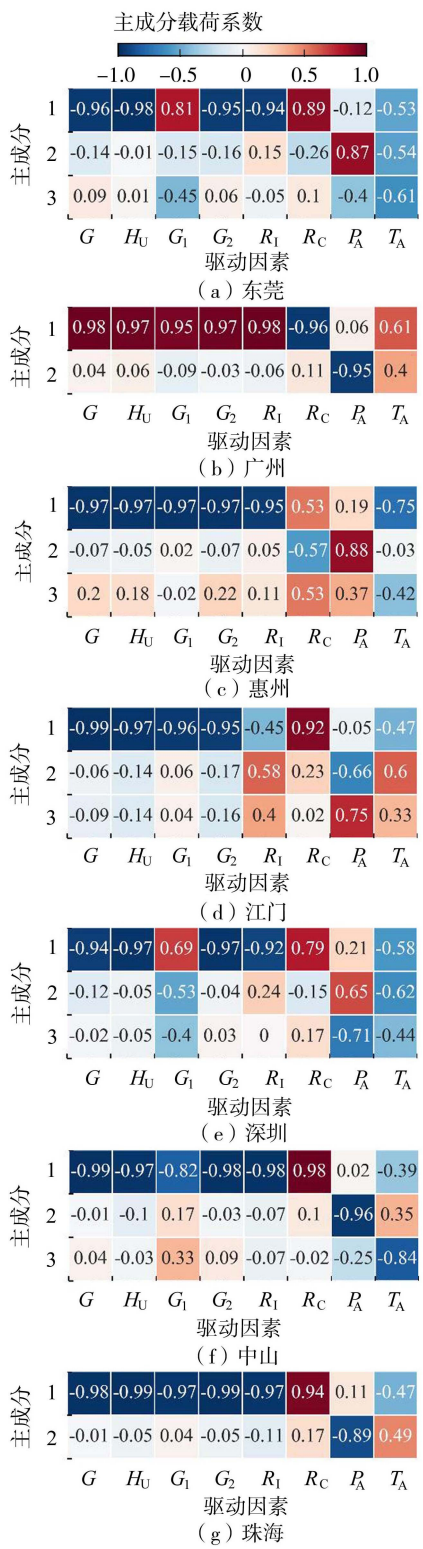


图 6 各市主成分的载荷系数

Fig. 6 Principal component loading matrixes of each city

## 4 结论

- a. 1987—2020 年粤港澳大湾区滨海湿地中自然湿地面积整体呈现下降趋势,人工湿地面积呈现周期性变化;滨海湿地空间分布呈现东少西多的特征,湿地变化主要集中于各出海口与发达地市滨海区域。
- b. 各市湿地变化存在明显差异,广州、珠海、中山、江门的 EKC 表现为“快速上升—快速下降”的二次倒 U 形曲线,深圳的 EKC 为三次倒 N 形曲线,惠州、东莞的 EKC 以下降趋势为主。
- c. 各市湿地变化主要由经济社会因素驱动,人

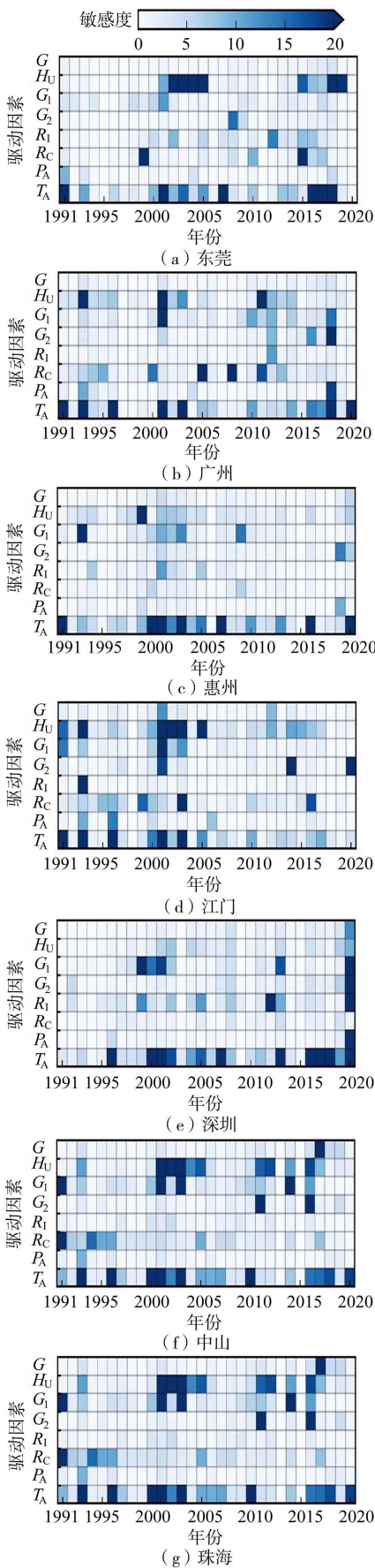


图7 各市人工湿地不同驱动因素的敏感度

Fig.7 Sensitivities of different driving factors for constructed wetland in each city

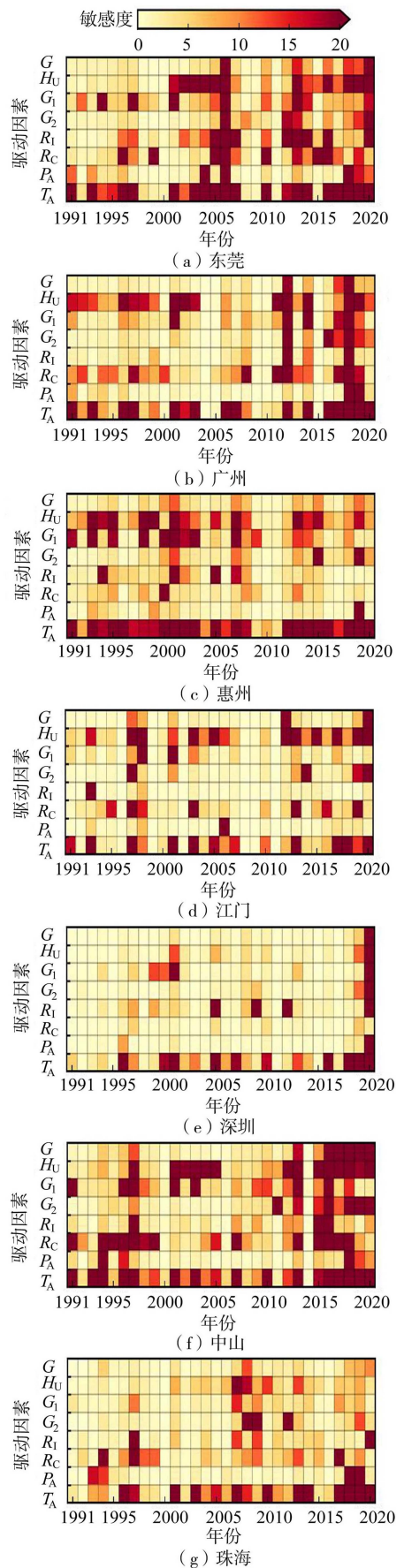


图8 各市自然湿地不同驱动因素的敏感度

Fig.8 Sensitivities of different driving factors for natural wethand in each city

口、第一产业产值等因素是各市主要的经济社会驱动因素,其敏感度差异体现了其滨海区域发展特性。

## 参考文献:

- [ 1 ] 吕佳南,李常斌,武磊,等. 黑河和白河流域湿地变化及其归因分析[J]. 水资源保护,2022,38(3):131-139. (LYU Jianan, LI Changbin, WU Lei, et al. Analysis on wetland change and its attribution in Heihe River and Baihe River basins [J]. Water Resources Protection, 2022,38(3):131-139. (in Chinese))
- [ 2 ] 劳聪聪,辛沛,左寅,等. 1996—2020年长江口九段沙湿地植被覆盖对潮沟演变规律的影响[J]. 水科学进展,2022,33(1):15-26. (LAO Congcong, XIN Pei, ZUO Yin, et al. Effect of fractional vegetation cover on the evolution of tidal creeks of the Jiuduansha shoal in Yangtze River Estuary (China) during 1996-2020 [J]. Advances in Water Science, 2022,33(1):15-26. (in Chinese))
- [ 3 ] 王法明,唐剑武,叶思源,等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊,2021,36(3):241-251. (WANG Faming, TANG Jianwu, YE Siyuan, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021,36(3):241-251. (in Chinese))
- [ 4 ] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观[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))
- [ 5 ] 荣馨宇,韩蕊,张殿光,等. 纳米氧化锌颗粒对滨海湿地微生物群落的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):43-51. (RONG Xinyu, HAN Rui, ZHANG Dianguang, et al. Effect of ZnO nano particles on bacterial community in coastal wetlands [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(1):43-51. (in Chinese))
- [ 6 ] 蒋卫国,张泽,凌子燕,等. 中国湿地保护修复管理经验与未来研究趋势[J]. 地理学报,2023,78(9):2223-2240. (JIANG Weiguo, ZHANG Ze, LING Ziyun, et al. Experience and future research trends of wetland protection and restoration in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(9):2223-2240. (in Chinese))
- [ 7 ] 吴燕锋,章光新. 流域湿地水文调蓄功能研究综述[J]. 水科学进展,2021,32(3):458-469. (WU Yanfeng, ZHANG Guangxin. A review of hydrological regulation functions of watershed wetlands [J]. Advances in Water Science, 2021,32(3):458-469. (in Chinese))
- [ 8 ] 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))
- [ 9 ] 刘燕君,刘凯,曹晶晶. 结合珠海一号高光谱影像和XGBoost算法的珠江口滨海湿地分类[J]. 测绘通报,2023(12):136-141. (LIU Yanjun, LIU Kai, CAO Jingjing. Classification of coastal wetlands in the Pearl River Estuary using Zhuhai-1 hyperspectral imagery and XGBoost algorithm [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(12):136-141. (in Chinese))
- [ 10 ] 尹小岚,谭程月,柯樱海,等. 1973—2020年黄河三角洲滨海盐沼湿地景观格局演化模式和驱动因素[J]. 生态学报,2024,44(1):67-80. (YIN Xiaolan, TAN Chengyue, KE Yinghai, et al. Evolution and driving factors of salt marsh wetland landscape pattern in the Yellow River Delta in 1973-2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):67-80. (in Chinese))
- [ 11 ] 罗茗,宫兆宁,张园. 水位波动条件下不同类型内陆湿地动态范围的精准识别[J]. 遥感学报,2023,27(6):1348-1361. (LUO Ming, GONG Zhaoning, ZHANG Yuan. Accurate identification of inland wetland dynamic range under water level fluctuation [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(6):1348-1361. (in Chinese))
- [ 12 ] 闫柏琨,甘甫平,印萍,等. 1989—2021年中国大陆海岸带潮滩、海岸线、养殖水体遥感观测[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):53-63. (YAN Bokun, GAN Fuping, YIN Ping, et al. Remote sensing observations of tidal flats, shorelines, and aquacultural water bodies along coastal zones in China mainland during 1989-2021 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,35(3):53-63. (in Chinese))
- [ 13 ] WANG Xinxin, XIAO Xiangming, ZOU Zhenhua, et al. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,163:312-326.
- [ 14 ] ZHAO Chuanpeng, QIN Chengzhi, TENG Jiakun. Mapping large-area tidal flats without the dependence on tidal elevations: a case study of Southern China [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,159:256-270.
- [ 15 ] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40(2):134-140. (HE Zhenfang, MOU Tingting, GUO Qingchun, et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen River Basin from 1979 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2024,40(2):134-140. (in Chinese))
- [ 16 ] 崔丽娟,李伟,窦志国,等. 近30年中国滨海滩涂湿地变化及其驱动力[J]. 生态学报,2022,42(18):7297-7307. (CUI Lijuan, LI Wei, DOU Zhiguo, et al. Changes and driving forces of the tidal flat wetlands in coastal China during the past 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica,



- 2022,42(18):7297-7307. (in Chinese))
- [17] 罗锋,代建成,陈治澎,等.基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究[J]. 淮海大学学报(自然科学版),2023,51(3):56-64. (LUO Feng, DAI Jiancheng, CHEN Zhipeng, et al. Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 56-64. (in Chinese))
- [18] MURRAY N J, PHINN S R, DEWITT M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. Nature, 2019, 565(7738):222-225.
- [19] 杨振华,赵钢铁,林鸿章,等.城市化地区 Landsat 水体指数适用性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 541-554. (YANG Zhenhua, ZHAO Tongtiegang, LIN Hongzhang, et al. Interpretation and applicability analysis of landsat water index in urbanized areas [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 541-554. (in Chinese))
- [20] 李婧贤,王钧,杜依杭,等.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, 2019, 17(3): 267-276. (LI Jingxian, WANG Jun, DU Yihang, et al. Change characteristics of coastal wetlands in the Pearl River Delta under rapid urbanization [J]. Wetland Science, 2019, 17(3): 267-276. (in Chinese))
- [21] 于博威,谢毅梁,马曦瑶,等.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, 2022, 4(5): 59-68. (YU Bowei, XIE Yiliang, MA Xiyao, et al. Wetland landscape pattern change and its damage degree in Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area in recent 40 years [J]. Environmental Ecology, 2022, 4(5): 59-68. (in Chinese))
- [22] 王海云,匡耀求,郑少兰,等.粤港澳大湾区2010—2020年湿地时空变化及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 126-134. (WANG Haiyun, KUANG Yaoqiu, ZHENG Shaolan, et al. Spatial-temporal changes of wetlands and its driving factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 126-134. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 杨振华,赵钢铁,田雨,等.粤港澳大湾区地表水体经济社会驱动要素[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6778-6787. (YANG Zhenhua, ZHAO Tongtiegang, TIAN Yu, et al. Socio-economic drivers of surface water bodies in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6778-6787. (in Chinese))
- [25] 陈达,钟菁,吴腾,等.江苏省长江岸线利用率影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 17-24. (CHEN Da, ZHONG Jing, WU Teng, et al. Factors influencing utilization rate of Yangtze River shoreline in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 17-24. (in Chinese))
- [26] 黄森文,韦春竹.广东省沿海城市人工水产养殖基地变化:基于2015—2019年 Sentinel-1 数据的实证研究[J]. 热带地理, 2021, 41(3): 622-634. (HUANG Senwen, WEI Chunzhu. Spatial-temporal changes in aquaculture ponds in coastal cities of Guangdong Province: an empirical study based on Sentinel-1 data during 2015-2019 [J]. Tropical Geography, 2021, 41(3): 622-634. (in Chinese))
- [27] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission [J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): RG2004.
- [28] YANG Jie, HUANG Xin. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [29] FUNK C, PETERSON P, LANDSFELD M, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes [J]. Scientific Data, 2015, 2(1): 150066.
- [30] 彭守璋. 中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901—2023) [EB/OL]. [2024-01-11]. <https://dx.doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961>.
- [31] 贾凯,陈水森,蒋卫国.粤港澳大湾区红树林长时间序列遥感监测[J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1096-1111. (JIA Kai, CHEN Shuisen, JIANG Weiguo. Long time-series remote sensing monitoring of mangrove forests in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(6): 1096-1111. (in Chinese))
- [32] MA Chunlei, AI Bin, ZHAO Jun, et al. Change detection of mangrove forests in coastal Guangdong during the past three decades based on remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2019, 11(8): 921.
- [33] CHEN Bangqian, XIAO Xiangming, LI Xiangping, et al. A mangrove forest map of China in 2015: analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 131: 104-120.
- [34] 贾明明. 1973—2013年中国红树林动态变化遥感分析[D]. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [35] 薛朝辉,钱思羽.融合 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据的红树林物候信息提取与分类[J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1121-1142. (XUE Zhaohui, QIAN Siyu. Fusion of

- Landsat 8 and Sentinel-2 data for mangrove phenology information extraction and classification [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26 (6): 1121-1142. (in Chinese))
- [36] 李一阳,王红瑞,杨默远,等. 基于多重检验 EKC 的中国用水与产业发展关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 190-198. (LI Yiyang, WANG Hongrui, YANG Moyuan, et al. Analysis of relationship between water consumption and industrial development in China based on multiple testing Kuznets curve [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 190-198. (in Chinese))
- [37] 何秋琴,王京伟,毕旭,等. 2005—2020 年山西省水源涵养功能时空格局及其演变驱动力分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(4): 861-873. (HE Qiuqin, WANG Jingwei, BI Xu, et al. Temporal and spatial dynamics of water conservation in Shanxi Province (2005-2020): patterns and influence analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(4): 861-873. (in Chinese))
- [38] 田智慧,尹传鑫,王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 816-827. (TIAN Zhihui, YIN Chuanxin, WANG Xiaolei. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake Basin [J]. Environmental Science, 2023, 44 (2): 816-827. (in Chinese))
- [39] 周昊昊,杜嘉,南颖,等. 1980 年以来 5 个时期珠江三角洲滨海湿地景观格局及其变化特征[J]. 湿地科学, 2019, 17(5): 559-566. (ZHOU Haohao, DU Jia, NAN Ying, et al. Landscape patterns of coastal wetlands in Pearl River Delta and their changes for 5 periods since 1980 [J]. Wetland Science, 2019, 17 (5): 559-566. (in Chinese))
- [40] WANG Xinxin, XIAO Xiangming, ZOU Zhenhua, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986-2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 238: 110987.
- [41] 程子浩,刘先锋,林港特,等. 近 40 年粤港澳大湾区桑基鱼塘演变监测和分析[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17 (3): 29-35. (CHENG Zihao, LIU Xianfeng, LIN Gangte, et al. Changes in fish ponds in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area over the past 40 years [J]. Wetland Science & Management, 2021, 17(3): 29-35. (in Chinese))
- [42] 张凌,江志坚,黄小平. 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, 2022, 47 (11): 160-165. (ZHANG Ling, JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping. The protecting strategies about the atmosphere, water and wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(11): 160-165. (in Chinese))
- [43] 杨晨晨,甘华阳,万荣胜,等. 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, 2021, 48 (3): 697-707. (YANG Chenchen, GAN Huayang, WAN Rongsheng, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018 [J]. Geology in China, 2021, 48 (3): 697-707. (in Chinese))
- [44] 王长建. 粤港澳大湾区城市群生态系统及人地关系可持续[J]. 科技管理研究, 2021, 41(13): 71-76. (WANG Changjian. Coupling human and natural systems for sustainability of complex ecosystem in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(13): 71-76. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-18 编辑:王芳)

(上接第 19 页)

- [25] 戴建华,薛恒新. 基于 Shapley 值法的动态联盟伙伴企业利益分配策略[J]. 中国管理科学, 2004, 12(4): 33-36. (DAI Jianhua, XUE Hengxin. The strategy of profit allocation among partners in dynamic alliance based on the Shapley value [J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(4): 33-36. (in Chinese))
- [26] 段金长,宋雅坪,纪昌明,等. 东北电网水库群发电调度风险分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(5): 163-165. (DUAN Jinchang, SONG Yaping, JI Cangming, et al. Risk analysis of multi-reservoir generation dispatch in northeast power grid [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (5): 163-165. (in Chinese))
- [27] 杨雄,李继清. 基于 Critic-Shapley 法的梯级水电站补偿效益分摊[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 185-189. (YANG Xiong, LI Jiqing. Sharing compensation benefits of cascade hydro-power stations based on Shapely and Critic value method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 185-189. (in Chinese))
- [28] 关涛,陈普瑞,肖一峰. 高拱坝时序多属性施工方案随机智能优化方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 45-51. (GUAN Tao, CHEN Purui, XIAO Yifeng. Stochastic and intelligent optimization method of time-series multi-attribute construction schemes for high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 45-51. (in Chinese))
- [29] 欧阳硕. 流域梯级及全流域巨型水库群洪水资源化联合优化调度研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
- [30] 卢程伟. 流域水库群蓄滞洪区综合防洪调度研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.

(收稿日期:2024-05-30 编辑:王芳)