

基于空间场景的粤港澳大湾区生态承载力数据集 (1990–2019)

王梦迪¹, 唐玉芝², 石铁柱^{1*}, 刘潜³, 颜凤芹⁴, 吕品¹, 邓东平¹,
张紫红¹, 王志华⁴, 胡忠文¹, 邬国锋¹, 苏奋振⁴

1. 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室&粤港澳智慧城市联合实验室&亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 深圳 518060;
2. 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳), 深圳 518107;
3. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 999077
4. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

摘要: 作者以粤港澳大湾区为研究区, 基于面向对象方法完成空间场景分类数据; 耦合三维生态足迹方法, 建立基于空间场景的海岸带生态承载力数据集(1990–2019)。运用混淆矩阵计算1990、2000、2010和2019年空间场景分类结果的总体精度分别达到85.10%、82.72%、80.19%和80.65%。该数据集内容包括研究区以下数据:(1)4个历史时期(1990、2000、2010、2019年)海岸线、海岸带与海域空间场景空间分布数据;(2)每10年空间场景陆海变迁数据;(3)1990–2019年海岸带与海域生态承载力与生态足迹变化数据。数据集存储为.shp、.tif和.xlsx格式, 共58个数据文件, 数据量为2.75 GB(压缩为1个文件, 8.97 MB)。

关键词: 空间场景; 生态承载力; 粤港澳大湾区; 海岸带与海域

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.03>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.03>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.06.03.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.06.03.V1>。

1 前言

海岸带与近海处于陆海交互地带, 是一个“自然-社会-经济状况”综合体^[1], 陆-海-人相互作用强烈, 其可持续发展程度直接或间接影响海陆区域的人类福祉及区域经济绿色循环发展^[2,3]。粤港澳大湾区海岸带与近海地区地理环境复杂, 生态资源丰富多样, 社会经济发达, 珠江三角洲也是世界上最大和最密集的城市化三角洲之一^[4,5]。近年来, 随着经济和

收稿日期: 2024-03-15; 修订日期: 2024-05-20; 出版日期: 2024-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(42306245, 41890854); 广东省科学技术厅(2020B1212030009)

*通讯作者: 石铁柱 GBX-5637-2022, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, tiezhushi@szu.edu.cn

数据引用方式: [1] 王梦迪, 唐玉芝, 石铁柱等. 基于空间场景的粤港澳大湾区生态承载力数据集(1990–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(2): 132–146. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.03>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.03>.

[2] 王梦迪, 唐玉芝, 石铁柱等. 粤港澳大湾区生态承载力数据集(1990–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.06.03.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.06.03.V1>.

人口的持续增长，粤港澳大湾区海岸带面临的资源环境压力日益增大，生态安全风险剧增^[6]。海岸带与近海海域生态承载力是指海岸带与近海海域生态系统在人类干预下所能承受的资源开发和环境承载的能力^[7]。开展生态承载力指标的动态评估，将有助于科学厘清该区域可持续性变化的动因，对推进区域可持续发展具有重要意义^[8]。

本数据集以粤港澳大湾区海岸带与海域为研究区，构建了粤港澳大湾区海岸带与海域空间场景分类体系和生态承载力评估框架，并以遥感数据、社会经济数据和空间规划文件等为主要数据源，得到了1990–2019年研究区的空间场景时空分布数据、生态承载力和生态足迹动态演变数据。

2 数据集元数据简介

《粤港澳大湾区生态承载力数据集（1990–2019）》^[9]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

3 数据研发方法

本研究依据中国全国海岸带和海涂资源综合调查规定^[11]和国际海洋专属经济区^[12]确立研究区范围，基于土地覆被、生态功能、主导社会经济属性和外部性，并结合国家海洋局《全国海洋功能区划》^[13]构建研究区空间场景划分体系^[14]。其中，将沿海陆地根据其土地覆被特征和生态功能划分为林地、草地、耕地、水体与湿地，以及人工场景。进而对主要类型基于其社会经济属性和生态影响进行细分。例如，将林地分为以生态保护为主的森林和以经济效益为导向的种植园；水体与湿地则包括淡水开阔水域、养殖坑塘和具有重要生态调节作用的湿地。人工场景较为复杂，涵盖了居住区、公共服务设施、商业区和工业生产区等聚居地类型，以及交通物流和能源设施。

研究区空间场景划分所采用遥感数据为基于Google Earth Engine平台获取的1990年、2000年、2010年、2019年覆盖研究区的Landsat遥感影像。Landsat携带高分辨率多光谱传感器，具有11个光谱波段，空间分辨率均较高，常用的可见光及近红外波段的分辨率达到30 m；同一区域的影像能够实现16 d一景，时间分辨率较高。为了确保数据质量和准确性，本研究下载TOA（Top of Atmosphere）产品数据，已经进行了去云处理。

研究区内的生物资源和能源消费统计数据包括主要来源于《广东省统计年鉴》（1990–2020）^[15–18]和研究区涉及到的9个城市政府统计年鉴（1990–2020）^[19–46]，同时结合1990–2020年的广东省农村统计年鉴^[47–50]，中国能源、交通、渔业、海洋、汽车工业、电力、城市等分类统计年鉴^[51–78]，辅以补充各类地方政府、主管部门、行业和企业的调查报告以及市县年鉴或市县志书。根据研究区的实际情况，以及划分的27种空间场景和6种土地类型，对不同空间场景和土地类型中账户数据进行归纳统计。其中，生物资源账户主要

¹ 香港地区统计数据来自于香港特别行政区政府统计处官网：https://www.censtatd.gov.hk/tc/地区/page_1226.html；澳门地区统计数据来自于澳门特别行政区政府统计暨普查局官网：<https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/Statistic/Database>。

表1 《粤港澳大湾区生态承载力数据集(1990–2019)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	粤港澳大湾区生态承载力数据集(1990–2019)
数据集短名	GBA_SSECC_1990_2019
作者信息	王梦迪 JOK-0331-2023, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, wang-mengdi2020@email.szu.edu.cn 唐玉芝 DVW-4921-2022, 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳), tangyuzhi@gml.ac.cn 石铁柱 GBX-5637-2022, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, tiezhushi@szu.edu.cn 刘潜 JOK-0735-2023, 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, qian999.liu@polyu.edu.hk 颜凤芹 HGN-6431-2022, 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, yanfq@lreis.ac.cn 吕品 JOK-0446-2023, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 2100432095@email.szu.edu.cn 邓东平 JOK-0582-2023, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, dengdongping2021@email.szu.edu.cn 张紫红 HDN-8369-2022, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 2200325014@email.szu.edu.cn 王志华 HIF-7028-2022, 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, wang@lreis.ac.cn 邬国锋 B-8735-2018, 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, guofeng.wu@szu.edu.cn 苏奋振 DXY-6694-2022, 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, sufz@lreis.ac.cn
地理区域	粤港澳大湾区海岸带与海域
数据年代	1990–2019
时间分辨率	10 年
空间分辨率	30 m
数据格式	.xlsx、.tif、.shp
数据量	8.97 MB(压缩后)
数据集组成	1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年粤港澳大湾区海岸带与海域空间场景分布图(.tif 格式共包括 32 个文件); 1990–2019 年粤港澳大湾区海岸带(.shp 格式共包括 24 个文件); 1990–2019 年海陆空间场景转换(.xlsx 格式共包括 1 个文件); 1990–2019 年研究区生态承载力及生态足迹结果(.xlsx 格式共包括 1 个文件)
基金项目	国家自然科学基金(42306245, 41890854); 广东省科学技术厅(2020B1212030009)
数据计算环境	ArcGIS、SuperSIAT 2.1
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[10]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

以农产品、林产品、草产品、水产品等科目的产量数据作为评估依据；能源消耗账户以工业能源消费以及电力为主^[79]；收集了相关城市的常住人口数据，从而得到研究区的人均消费量。全球人均消费量来源于联合国粮食及农业组织²发布的《2020 年世界粮食及农业统计年鉴》^[80]，该数据综合介绍了当前全球粮食和农业领域的主要因素，涵盖了 245 个国家和地区约 20,000 项指标，提供粮食和农业主要事实和趋势；植被净初级生产力（Net Primary Production, NPP）来源于 MODIS 产品^[81]（陆地）和 VGPM 产品^[82]（海域）；海岸带常住人口数据主要基于统计年鉴数据和 WorldPop 人口空间分布数据³换算得到；分车型和能源类型汽车保有量数据主要从汽车行业公司购买；珠江口年度船舶航行密度图来源于 Marine Traffic⁴，大湾区海洋养殖空间分布数据来源于 Liu 等^[83]；此外，还辅以已发表文献、数据平台检索以及新闻报道等多个数据源渠道获取必要的参数。

3.1 算法原理

3.1.1 空间场景分类提取方法

相较于土地覆被类型，空间场景划分更为精细，且大多数人工场景的光谱信息相似，直接进行遥感分类较为困难且准确率较低，故采用遥感数据结合社会感知数据的分类策略（图 1）。

首先，基于面向对象的图像分类方法（Object-Based Image Classification, OBIC）结合随机森林算法于 SuperSIAT 2.1 平台^[84,85]从 Landsat 遥感影像中识别并划分六类土地利用/覆被（Land use/Land cover, LULC）类型-林地、草地、耕地、水体、人工用地和裸地；接着，结合 OSM、Google Earth 影像和 POI 数据以及遥感影响数据进行特征提取，生成空间场景训练样本（70%），用于提供关于不同空间场景的参考信息，可以为分类过程提供有价值的辅助信息，从而进一步细化分类结果。随后在 SuperSIAT 2.1 平台基于空间场景训练样本和随机森林算法进一步将土地覆被类型细分到与之相关的具体空间场景完成沿海陆地和潮间带的空间场景绘制。例如，将林地细分为森林和种植园，人工用地细分为居住区、商业贸易区、工业生产区、公共服务区和公铁桥梁等。根据空间场景的纹理特征和光谱信息以及社会感知数据中所提取的语义特征，对不同的土地覆被类型进行更加精细的分类。同时，根据相关政策指导，按照时间节点叠加绘制海域空间场景整合沿海陆地与潮间带空间场景得到空间场景初步分类结果。最后，通过人工目视解译对初步分类结果进行优化与修正。

3.1.2 基于三维生态足迹模型的海岸带与海域生态承载力测算

研究区生态承载力的测定算法基于 1990–2019 年研究区内生物资源和能源消费统计数据及 NPP 数据分别确定各空间场景的均衡因子、产量因子、账户包含产品类别和数据，并基于三维生态足迹模型进而对各空间场景和区域的足迹广度、足迹深度、生态承载力和生态赤字进行评估。MOD173AH 年度 NPP 数据为当年所有 8 天净光合作用（Annual Net Photosynthesis, PSN）产品（MOD17A2H）的总和，PSN 值是总初级生产力（Gross Primary

² 数据来自于联合国粮食及农业组织官网（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）。
<http://www.fao.org/>.

³ 数据来源于 WorldPop 官网。<https://www.worldpop.org/>.

⁴ 数据来源于 Marine Traffic 官网。www.marinetraffic.com.

Productivity, GPP) 和维持呼吸 (Maintenance Respiration, MR) 的差。空间分辨率 500 m, 时间分辨率为 1 年, 研究区涉及分幅影像为 h28v06。汇集了 1990、2000、2010 和 2019 年数据, 并对其进行投影变换、重采样、平均和裁剪等预处理。

(1) 均衡因子及产量因子计算

本研究中的 r_i 均衡因子以及 y_i 产量因子主要参考刘某承等^[86]基于净初级生产力 NPP 的方法进行评估, 计算公式如下:

$$r_i = \frac{NPP_{i, local}}{NPP_{local}} \quad (1)$$

$$y_i = \frac{NPP_{i, local}}{NPP_{i, global}} \quad (2)$$

式中, $NPP_{i, local}$ 为研究区第 i 空间场景或土地类型的 NPP 均值, NPP_{local} 为整个研究区的 NPP 均值; $NPP_{i, global}$ 为全球第 i 空间场景或土地类型的 NPP 均值。由于目前没有生成全球尺度的空间场景空间分布, 难以获得基于空间场景的全球平均 NPP 值, 但全球尺度的土地利用/覆被数据较多, 可获得基于土地类型的全球平均 NPP 值; 通过将研究区基于空间场景的 NPP 均值与其对应的土地类型 NPP 均值的比例, 乘以基于土地类型的全球平均 NPP 值, 可粗略计算得到基于空间场景的全球平均 NPP 值:

$$NPP_{i, global} = \frac{NPP_{i, local}}{NPP_{i_{land}, local}} \times NPP_{i_{land}, global} \quad (3)$$

式中, $NPP_{i, global}$ 和 $NPP_{i, local}$ 分别为全球和研究区第 i 空间场景的 NPP 均值, $NPP_{i_{land}, local}$ 和 $NPP_{i_{land}, global}$ 分别为研究区和全球第 i 空间场景对应的土地类型的 NPP 均值。

(2) 基于三维生态足迹的生态承载力指标计算

三维生态足迹在传统生态足迹模型基础上, 引入足迹深度和足迹广度两个指标, 以分别表征人类活动对自然资本存量消耗和自然资本流量占用的程度^[87,88], 较传统生态足迹模型更为科学合理, 其计算公式为:

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth} \quad (4)$$

式中, EF_{3D} 表示三维生态足迹; EF_{size} 表示生态足迹广度; EF_{depth} 表示生态足迹深度。目前的三维生态足迹模型主要基于六类土地类型, 即耕地、林地、草地、渔业用地、建设用地和能源用地, 分别确定各地类的均衡因子、产量因子、账户包含产品类别和数据, 进而对各地类和区域的足迹广度、足迹深度、生态承载力和生态赤字进行评估。

3.2 技术路线

本研究技术路线如图 1 所示。基于 Landsat 遥感影像、Google Earth、OSM (OpenStreetMap) 及 POI (Points of Interest) 等多数据源运用面向对象的分类方法使用随机森林算法完成研究区沿海陆地与潮间带的空间场景分类, 同时结合海洋生态系统主要功能、社会经济属性、海岸带和海洋空间规划以及研究区各市海洋经济发展保护规划按时间节点叠加绘制完成研究区海域空间场景分布, 最终合并完成研究区海岸带与海域空间场景分布数据集。同时基于研究区生物资源及能源消费统计数据进行研究区均衡因子及产量因

子计算。最后基于研究区空间场景分布，使用三维生态足迹法完成研究区生态承载力及生态足迹测算。

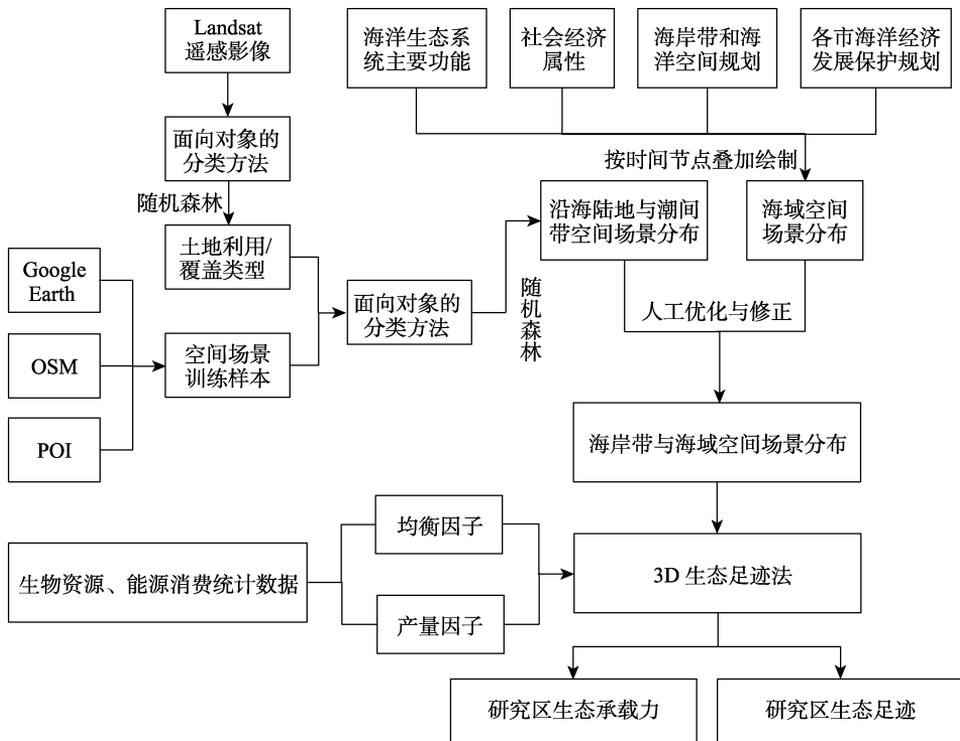


图 1 数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集由 4 个数据文件组成：

(1) 粤港澳大湾区海岸带及海域空间场景分布数据集；

该数据格式为.tif 文件，包含 1990 年、2000 年、2010 年及 2019 年 4 个年份的研究区空间场景分布图。

(2) 粤港澳大湾区海岸带及海域生态承载力及生态足迹数据；

该数据为.xlsx 格式，包含 1990–2019 年研究区中不同空间场景的总生态承载力、人均生态承载力以及生态足迹广度、生态足迹深度以及 3D 生态足迹测算结果。

(3) 粤港澳大湾区 1990–2019 年海岸线数据集；

该数据为.shp 格式，包含 1990 年、2000 年、2010 年及 2019 年 4 个年份粤港澳大湾区海岸带分布图。

(4) 粤港澳大湾区海岸带及海域海陆变迁数据

该数据格式为.xlsx 格式，呈现研究区海岸带变化情况，能够体现研究区的海陆变化状况。

4.2 数据结果

4.2.1 空间场景时空分布结果

图 2^[14]展示了 1990–2019 年研究区内空间场景的空间分布情况。结果显示,近 30 年来陆地与潮间带主要表现为森林和水田的转出,多转入海水养殖、居住、商业贸易、工业生产和公铁桥梁等空间场景,其中前 20 年转出最为剧烈;海域主要表现为开发保留海域和一般可捕捞海域转入海洋保护、海水养殖、旅游休闲、港口航道和工业城镇海域,2010–2019 年开发保留海域与海水养殖互转明显。

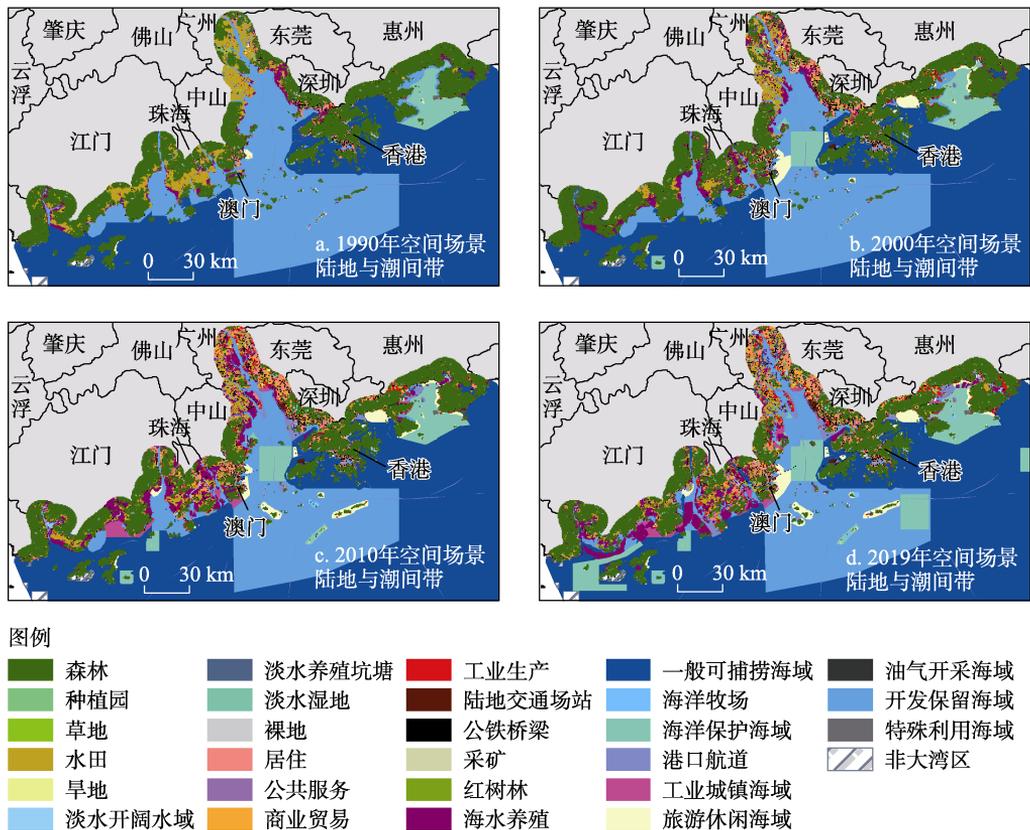


图 2 1990–2019 年大湾区陆地与潮间带区域空间场景时空分布图

4.2.2 生态承载力及生态足迹结果

研究区 1990–2019 年生态承载力结果如表 2 所示。1990–2019 年研究区总生态承载力呈现先上升后下降趋势,而人均生态承载力整体呈现下降趋势且 2000 年之后下降程度加剧。除水田和开发保留海域外,其余空间场景的总生态承载力均呈总体上升趋势。年人均生态承载力最高的空间场景为一般可捕捞海域、开发保留海域、森林和海水养殖,其中,一般可捕捞海域人均生态承载力的大幅下降是区域人均生态承载力下降的主要原因。

研究区 1990–2019 年的生态足迹演变如表 3 所示。人均生态足迹广度于 1990–2000 年呈现上升趋势 2000 年之后有所下降,整体呈现平缓变化趋势,主要由水田和一般可捕捞

表 2 1990–2019 年大湾区海岸带与海域总生态承载力与人均生态承载力统计表

空间场景	总生态承载力 (万 hm ²)				人均生态承载力 (hm ² /万人)			
	1990	2000	2010	2019	1990	2000	2010	2019
森林	18.00	17.55	36.70	48.21	193.94	114.29	193.12	219.18
种植园	0.16	0.29	0.16	0.46	1.70	1.92	0.83	2.07
草地	0.11	0.84	1.72	3.40	1.21	5.49	9.06	15.44
水田	31.01	14.54	12.84	11.67	334.07	94.70	67.58	53.07
旱地	0.15	0.59	0.16	0.34	1.58	3.83	0.83	1.55
淡水开阔水域	0.28	0.60	0.87	0.93	3.04	3.89	4.60	4.24
淡水养殖坑塘	0.04	1.07	0.15	0.26	0.43	6.96	0.80	1.20
淡水湿地	0.00	0.04	0.00	0.01	0.04	0.23	0.02	0.05
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
居住	2.85	6.38	8.44	11.00	30.72	41.54	44.40	50.00
公共服务	0.03	0.05	0.09	1.14	0.33	0.33	0.46	5.18
商业贸易	0.45	3.55	6.21	11.13	4.87	23.12	32.68	50.62
工业生产	0.77	2.92	4.67	8.72	8.24	19.01	24.55	39.65
陆地交通场站	0.07	0.35	0.43	0.80	0.75	2.29	2.25	3.62
公铁桥梁	1.67	3.96	4.32	6.36	17.98	25.81	22.74	28.92
采矿	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
红树林	0.01	0.01	0.06	0.05	0.07	0.07	0.32	0.24
海水养殖	1.87	24.24	46.16	46.17	20.18	157.89	242.92	209.89
一般可捕捞海域	467.73	745.07	657.71	515.58	5,038.62	4,853.48	3,461.47	2,344.01
海洋牧场	0.00	0.00	0.21	0.50	0.00	0.00	1.10	2.25
海洋保护海域	2.96	7.93	7.67	11.45	31.86	51.69	40.38	52.06
港口航道	2.15	3.89	4.56	3.92	23.13	25.37	24.00	17.83
工业城镇海域	0.02	0.10	1.74	1.36	0.19	0.64	9.14	6.19
旅游休闲海域	0.26	2.34	2.66	2.44	2.77	15.23	14.00	11.07
油气开采海域	16.76	26.75	23.65	18.68	180.60	174.25	124.45	84.91
开发保留海域	34.59	48.49	38.78	27.66	372.61	315.86	204.08	125.74
特殊利用海域	0.03	0.05	0.05	0.04	0.37	0.35	0.25	0.17
研究区总计	581.97	911.60	859.99	732.27	6,269.30	5,938.25	4,526.07	3,329.17

海域引起。绝大多数空间场景呈总体上升趋势，但年均增长量均较低。人均 3D 生态足迹持续增加，从 3.03 上升到 10.54，均超过原始值 1，显示了区域难以可持续发展的趋势。绝大多数空间场景的历年足迹深度均超过 1，表明绝大部分空间场景难以可持续发展的现状。

表 3 1990–2019 年大湾区海岸带与海域人均足迹广度、足迹深度和 3D 足迹变化统计表

空间场景	人均足迹广度 (hm ² /万人)				人均足迹深度				人均 3D 足迹 (hm ² /万人)			
	1990	2000	2010	2019	1990	2000	2010	2019	1990	2000	2010	2019
森林	193.94	114.29	193.12	219.18	18.46	85.39	94.25	74.82	3,579.37	9,759.44	1,8201.10	16,399.21
种植园	1.70	1.92	0.83	2.07	82.62	135.70	307.77	137.90	140.09	259.88	255.31	285.77
草地	1.21	5.49	9.06	15.44	623.44	161.78	109.13	107.96	751.84	888.08	988.34	1667.25
水田	334.07	94.70	67.58	53.07	3.65	7.32	6.19	9.91	1,219.64	692.75	418.20	525.81
旱地	1.58	3.83	0.83	1.55	455.58	278.52	798.17	421.01	719.47	1,065.85	661.96	653.17
淡水开阔水域	3.04	3.89	4.60	4.24	44.83	20.02	12.60	12.67	136.18	77.91	58.03	53.74
淡水养殖坑塘	0.43	6.96	0.80	1.20	146.89	6.73	38.42	23.16	63.19	46.88	30.63	27.69
居住	30.72	41.54	44.40	50.00	14.50	10.06	13.49	16.93	445.40	417.76	599.07	846.81
公共服务	0.33	0.33	0.46	5.18	69.38	365.74	309.19	48.89	22.82	121.74	141.94	253.08
商业贸易	4.87	23.12	32.68	50.62	8.76	8.47	10.20	11.54	42.63	195.75	333.24	584.26
工业生产	8.24	19.01	24.55	39.65	587.45	338.51	364.69	191.28	4,842.44	6,433.98	8,953.83	7,583.52
陆地交通场站	0.75	2.29	2.25	3.62	663.29	189.91	544.72	499.80	499.72	434.84	1,227.21	1,810.55
公铁桥梁	17.98	25.81	22.74	28.92	40.29	42.67	76.32	31.16	724.45	1,101.39	1,735.62	901.12
采矿	0.01	0.01	0.01	0.03	21.51	58.67	324.16	30.15	0.21	0.39	2.62	0.76
海水养殖	9.46	15.79	14.75	12.57	1.00	1.00	1.00	1.00	9.46	15.79	14.75	12.57
一般可捕捞海域	2,462.08	3,183.31	2,940.16	2,344.01	1.00	1.00	1.00	1.17	2,462.08	3,183.31	2,940.16	2,735.15
港口航道	23.13	25.37	24.00	17.83	6.31	3.81	7.17	15.59	146.00	96.74	172.11	277.88
工业城镇海域	0.19	0.64	4.23	6.19	62.25	8.01	1.00	1.18	11.55	5.16	4.23	7.32
旅游休闲海域	0.44	0.30	0.16	0.09	1.00	1.00	1.00	1.00	0.44	0.30	0.16	0.09
油气开采海域	0.06	3.79	2.92	4.89	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	3.79	2.92	4.89
研究区总计	3,094.21	3,572.39	3,390.14	2,860.33	3.03	4.58	8.37	10.54	9,373.54	16,343.71	28,371.11	30,156.50

注：淡水湿地和海洋牧场的生物资源产出数据不详；红树林和海洋保护海域属于保护区，不从事生产活动；开发保留海域和特殊利用海域的能源消耗数据无法获取；裸地无产出；因此这几类数据暂时不纳入生态足迹计算。

人均 3D 生态足迹呈先急增后缓增的变化趋势，主要与森林 3D 足迹增长较快有关。大多数空间场景的人均 3D 足迹呈总体上升趋势，仅水田、旱地、淡水开阔水域和淡水养殖坑塘场景的人均 3D 生态足迹呈现下降趋势。

4.2.3 空间场景海陆变迁动态结果

本数据集基于空间场景分类结果，提取了 1990 年至 2019 年的海岸线，具体如图 3^[14] 所示。可以发现，近 30 年间研究区海岸线变化显著，主要以向海洋延伸为主。特别在 1990–2000 年期间，海岸线的变化尤为显著，尤其是珠江口海岸线。进入 2010 年后，海岸线向海洋延伸的趋势有所减缓。

图 4 展示了 1990–2019 年海陆空间场景转换的状况。可以发现，该时期主要趋势

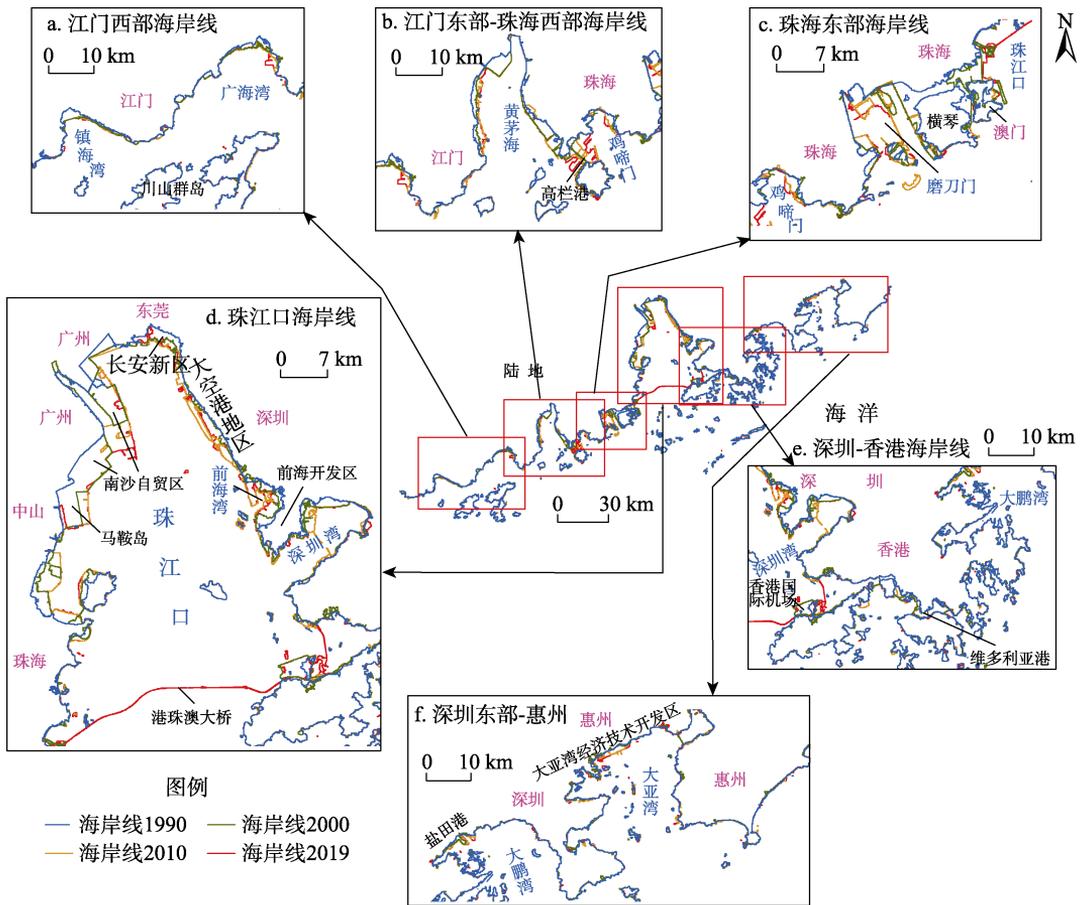


图 3 1990–2019 年大湾区海岸线时空动态图

是从开发保留海域和一般可捕捞海域向其他空间场景的转移，尤其是在 1990 年到 2010 年期间，这一变化主要集中在海域场景向陆域场景的大面积转变。然而，进入 2010 年后，海陆之间的相互转化成为主要特征，人类活动对海洋的扩张行为显著减少。这表明在近年来，对海洋资源的开发逐渐趋向平衡，以及人类对海洋环境的影响有所降低。

将 1990–2019 年陆海变迁空间场景面积乘以其转换前后单位生态承载力和生态足迹，得到陆海变迁引起的可持续性变化状况（图 5）。研究结果显示，陆海变迁区域的生态承载力在各个时期均呈增加趋势，陆地场景单位生态足迹明显高于海域场景，同时，在近 10 年内，海转陆的趋势减缓，这导致陆海变迁引起的生态赤字略有下降。

4.3 数据结果验证

为了验证空间场景分类结果的准确性，我们对各个时期的分类结果进行了精度检验。验证结果表明，1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年空间场景分类总体精度分别达到 85.10%、82.72%、80.19% 和 80.65%，符合研究需要。

5 讨论和总结

基于空间场景的生态承载力估算方法是一种考虑地理空间特征和局部环境条件的生态

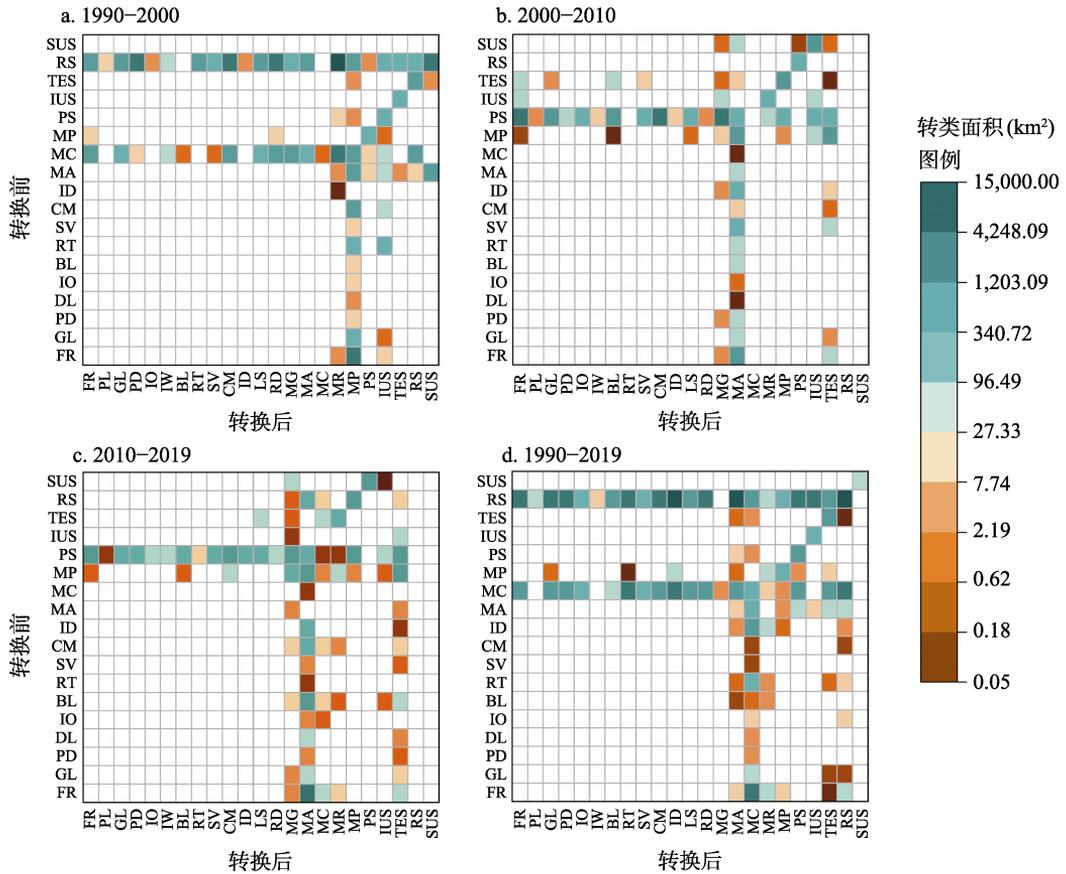


图 4 1990–2019 年大湾区空间场景陆海变迁面积图

承载力评估方法^[10]。它将地理信息系统 (GIS) 和空间分析技术与生态足迹模型相结合, 可以在特定地理范围内更准确地估算生态系统的可持续支持能力, 充分反映地区生态承载力和生态足迹主要来源与微观构成, 从而有助于厘清引起区域可持续性变化原因, 支撑科学决策。同时, 本数据集研发方法充分利用了多源数据, 运用面向对象的分类方法对研究区的空间场景进行了准确分类, 并结合三维生态足迹测算了 1990–2019 年的生态承载力和生态足迹。

数据结果表明了粤港澳大湾区近 30 年来的生态承载力和可持续性的变化趋势, 并揭示了可能存在的潜在生态环境问题。其中, 空间场景的动态变化主要特征是自然和农业用地向城市化和人工用途的转换, 同时海域利用也呈现多样化和保护导向的趋势, 体现出区域快速发展过程中空间场景利用压力和海洋资源管理政策的演变。而本数据集中的生态足迹与生态承载力数据结果表明, 尽管陆地场景的单位生态足迹显著高于海域, 但陆海变迁区域的生态承载力持续增加, 且近 10 年海转陆趋势减缓, 从而由海陆变迁引起的生态赤字略有下降, 一定程度地体现了研究区生态环境状况的改善。

本数据集四个阶段分类结果总体精度均在 80% 以上, 其中 1990 年空间场景分类精度最高达到 85.10%。因此, 该数据集有望为未来海岸带生态保护和综合管理提供有力支持, 可为制定海岸带可持续性发展策略提供科学决策基础。

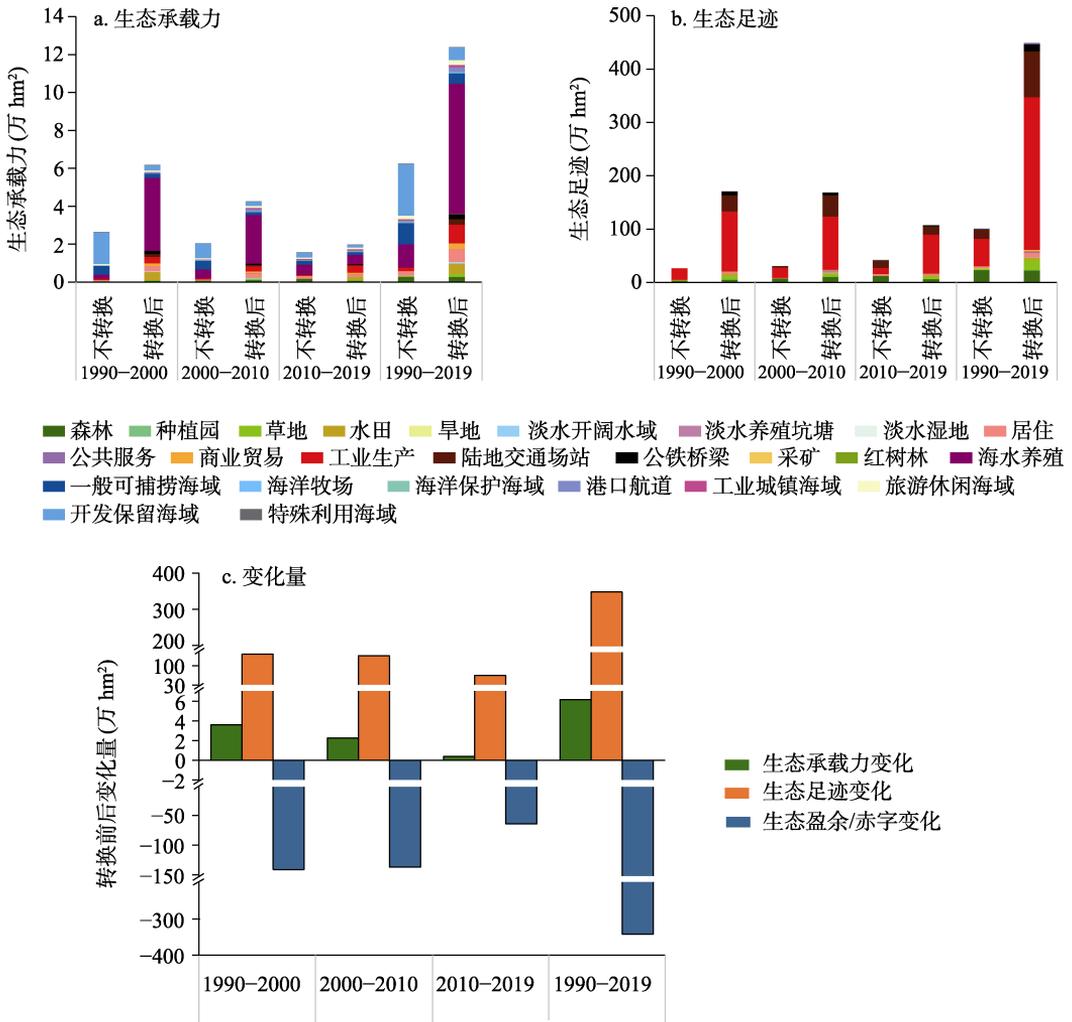


图 5 1990–2019 年大湾区陆海变迁区空间场景转换前后比较图

作者分工：唐玉芝、石铁柱和苏奋振对数据集的开发做了总体设计；王梦迪、刘潜收集和整理了样本数据、遥感影像数据；王梦迪、吕品、邓东平、张紫红、王志华收集和整理了生物资源和能源消费数据；唐玉芝设计了模型和算法；刘潜、王梦迪做了数据验证；王梦迪、唐玉芝撰写了数据论文；石铁柱、颜凤芹、胡忠文和邬国锋对论文进行了指导和修改等。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] Neumann, B., Ott, K., Kenchington, R. Strong sustainability in coastal areas: a conceptual interpretation of SDG 14 [J]. *Sustainability science*, 2017, 12: 1019–1035.

[2] Ye, G., Chou, L. M., Yang, S., et al. Is integrated coastal management an effective framework for promoting

- coastal sustainability in China's coastal cities? [J]. *Marine Policy*, 2015, 56: 48–55.
- [3] McKinley, E., Acott, T., Yates, K. L. Marine social sciences: Looking towards a sustainable future [J]. *Environmental Science & Policy*, 2020, 108: 85–92.
- [4] Zhao, W., Zhao, G., Yang, J., *et al.* Assessment of the ecological security of the coastal zone of the Guangdong/Hong Kong/Macao Greater Bay area [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 102(SI): 287–295.
- [5] Yang, C., Gan, H., Wan, R., *et al.* Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018 [J]. *China Geology*, 2021, 48(3): 697–707.
- [6] 赵蒙蒙, 寇杰锋, 杨静等. 粤港澳大湾区海岸带生态安全问题与保护建议[J]. *环境保护*, 2019, 47(23): 29–34.
- [7] Zhai, T., Wang, J., Fang, Y., *et al.* Assessing ecological risks caused by human activities in rapid urbanization coastal areas: towards an integrated approach to determining key areas of terrestrial-oceanic ecosystems preservation and restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135153.
- [8] 关道明, 张志锋, 杨正先等. 海洋资源环境承载力理论与测度方法的探索[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1241–1247.
- [9] 王梦迪, 唐玉芝, 石铁柱等. 粤港澳大湾区生态承载力数据集(1990–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.06.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.06.03.V1>.
- [10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [11] 全国海岸带和海涂资源综合调查技术指导小组. 中国海岸带和海涂资源综合调查报告(附图集) [M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [12] Nordquist, M. H., Nandan, S. N., Kraska, J. United Nations Convention on the Law of the Sea 1982, Volume VII: a Commentary [M]. Martinus Nijhoff Publishers, 2011.
- [13] 全国海洋功能区划(2011–2020年)[N]. *中国海洋报*, 2021.
- [14] 唐玉芝, 石铁柱, 刘潜等. 基于空间场景的海岸带与海域生态承载力及可持续评价[J]. *地理学报*, 2023, 78(11): 2811–2832.
- [15] 广东省统计局. 1990年广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [16] 广东省统计局. 2000年广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [17] 广东省统计局. 2010年广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [18] 广东省统计局. 2019年广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [19] 深圳市统计局. 1990年深圳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [20] 深圳市统计局. 2000年深圳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [21] 深圳市统计局. 2010年深圳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [22] 深圳市统计局. 2020年深圳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [23] 东莞市统计局. 1990年东莞统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [24] 东莞市统计局. 2000年东莞统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [25] 东莞市统计局. 2010年东莞统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [26] 东莞市统计局. 2019年东莞统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [27] 惠州市统计局. 1990年惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.

- [28] 惠州市统计局. 2000年惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [29] 惠州市统计局. 2010年惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [30] 惠州市统计局. 2019年惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [31] 中山市统计局. 1990年中山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [32] 中山市统计局. 2000年中山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [33] 中山市统计局. 2010年中山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [34] 中山市统计局. 2019年中山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [35] 广州市统计局. 1990年广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [36] 广州市统计局. 2000年广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [37] 广州市统计局. 2010年广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [38] 广州市统计局. 2019年广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [39] 珠海市统计局. 1990年珠海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [40] 珠海市统计局. 2000年珠海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [41] 珠海市统计局. 2010年珠海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [42] 珠海市统计局. 2019年珠海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [43] 江门市统计局. 1990年江门统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [44] 江门市统计局. 2000年江门统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [45] 江门市统计局. 2010年江门统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [46] 江门市统计局. 2019年江门统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [47] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴–1990 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [48] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴–2000 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [49] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴–2010 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [50] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴–2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [51] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴–1990 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
- [52] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴–2000 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [53] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴–2010 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [54] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴–2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [55] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴–1990[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 1991.
- [56] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴–2000[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2001.
- [57] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴–2010[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2011.
- [58] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴–2019 [M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2020.
- [59] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴–1990[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- [60] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴–2000[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [61] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴–2010[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [62] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴–2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [63] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴–1992[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.

- [64] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴—2000[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [65] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴—2010[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [66] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴—2019 [M]. 北京: 海洋出版社, 2020.
- [67] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴—1990[M]. 天津: 中国汽车工业年鉴社, 1991.
- [68] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴—2000[M]. 天津: 中国汽车工业年鉴社, 2001.
- [69] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴—2010[M]. 天津: 中国汽车工业年鉴社, 2011.
- [70] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴—2019[M]. 天津: 中国汽车工业年鉴社, 2020.
- [71] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 1992[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.
- [72] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [73] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [74] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [75] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴—1990[M]. 北京: 中国城市年鉴社, 1991.
- [76] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴—2000[M]. 北京: 中国城市年鉴社, 2001.
- [77] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴—2010[M]. 北京: 中国城市年鉴社, 2011.
- [78] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴—2019[M]. 北京: 中国城市年鉴社, 2020.
- [79] Tang, Y. Z., Wang, M. D., Liu, Q., *et al.* Ecological carrying capacity and sustainability assessment for coastal zones: a novel framework based on spatial scene and three-dimensional ecological footprint model [J]. *Ecological Modelling*, 2022, 466: 109881.
- [80] F Canton, H. Food and Agriculture Organization of the United Nations—FAO [M]//The Europa directory of international organizations 2021. Routledge, 2021: 297–305.
- [81] Running, S., Zhao, M. MOD17A3HGF MODIS/terra net primary production gap-filled yearly L4 global 500 m SIN grid V006 [DB]. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.006>.
- [82] Behrenfeld, M. J., Falkowski, P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 1–20.
- [83] Liu, Y. M., Wang, Z. H., Yang, X. M., *et al.* Satellite-based monitoring and statistics for raft and cage aquaculture in China's offshore waters [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 91: 102118.
- [84] Hu, Z. W., Li, Q. Q., Zou, Q., *et al.* A bilevel scale-sets model for hierarchical representation of large remote sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7366–7377.
- [85] Hu, Z. W., Wu, Z. C., Zhang, Q., *et al.* A spatially-constrained color-texture model for hierarchical VHR image segmentation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 120–124.
- [86] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592–597.
- [87] 方恺. 生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267–274.
- [88] Niccolucci, V., Galli, A., Reed, A., *et al.* Towards a 3D national ecological footprint geography [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16): 2939–2944.