

DOI: 10.5846/stxb202004301062

蔡文博, 韩宝龙, 逯非, 冼超凡, 欧阳志云. 全球四大湾区生态环境综合评价研究. 生态学报, 2020, 40(23): 8392-8402.

Cai W B, Han B L, Lu F, Xian C F, Ouyang Z Y. Comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8392-8402.

# 全球四大湾区生态环境综合评价研究

蔡文博, 韩宝龙, 逯非, 冼超凡, 欧阳志云\*

中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

**摘要:** 全球四大湾区既是经济发达区, 也是生态环境脆弱区, 对全球可持续发展至关重要。粤港澳大湾区的生态环境问题正在限制其可持续发展, 有碍于全面建成国际一流湾区目标的实现。然而, 过去的研究对生态环境方面关注较少, 缺少湾区生态环境综合评价体系的构建。通过综合国内外统计和遥感多源数据, 建立四大湾区生态环境评价数据库; 围绕生态质量, 环境质量和资源利用效率建立指标体系, 构建湾区生态环境综合评价指数。结果表明: 2015 年, 生态环境综合评价, 东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区; 生态质量, 纽约湾区>旧金山湾区>粤港澳大湾区>东京湾区; 环境质量, 旧金山湾区>东京湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区; 资源利用效率, 东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区。2005—2015 年, 粤港澳大湾区环境质量增速缓慢, 在生态质量和资源利用效率增幅排名首位。旧金山湾区和纽约湾区优势在生态和环境质量, 短板在资源利用效率; 东京湾区在资源利用效率方面优势明显, 短板在生态质量; 综合来看, 粤港澳大湾区与其他湾区都存在差距。研究建议粤港澳大湾区从生态空间、生态环境治理和资源利用方面, 吸取发达国家湾区的经验。

**关键词:** 粤港澳大湾区; 东京湾区; 旧金山湾区; 纽约湾区; 生态环境评价

## Comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas

CAI Wenbo, HAN Baolong, LU Fei, XIAN Chaofan, OUYANG Zhiyun\*

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Four global bay areas (Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area, Tokyo Bay Area, San Francisco Bay Area, and New York Bay Area) are highly economically developed yet ecologically vulnerable, whose development are crucial to global sustainable development. Despite the rapid economic development, the ecological and environmental problems limit the sustainable development of Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area, and thus hinder its goal to build a first-class international bay area. Few previous studies addressed the issue of ecological and environmental development of the Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area, nor did they establish a comprehensive ecological and environmental assessment system for bay areas. In this study, we built an ecological and environmental evaluation database for the four bay areas by integrating multisource domestic and foreign statistics and remote sensing data. The ecologically and environmentally comprehensive evaluation index system was established based on the ecological and environmental quality, as well as the resource utilization efficiency. The results showed that in 2015, Tokyo Bay Area had the highest comprehensive evaluation index, followed by San Francisco Bay Area, New York Bay Area, and Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area; for the ecological quality, New York Bay Area had the highest score and Tokyo Bay Area has the lowest, with San Francisco Bay Area, and Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area ranking second and third; as to the environmental quality San Francisco Bay Area ranked first, followed by Tokyo Bay Area, New York Bay Area, and Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area; in terms of the resource utilization efficiency, Tokyo Bay Area performed the best, San Francisco Bay Area, New York Bay

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (71804180)

收稿日期: 2020-04-30; 网络出版日期: 2020-10-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

Area, Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area followed accordingly. From 2005 to 2015, Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area grew slowly in the area of environmental quality. However, it ranked first in ecological quality and resource utilization efficiency. Based on the above analysis, San Francisco Bay Area and New York Bay Area excelled in the development of ecological and environmental quality, but did not perform as good in resource utilization efficiency. By comparison, Tokyo Bay Area had great advantage in resource utilization efficiency, but its disadvantages were in ecological quality. In general, there was still a gap between Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area and the other three bay areas in terms of ecological and environmental development, and we suggested that Guangdong-Hong Kong-Macao Bay area should learn from the developed countries with regard to the management of ecological space, eco-environmental governance, and resource utilization efficiency.

**Key Words:** Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area; Tokyo Bay Area; San Francisco Bay Area; New York Bay Area; Eco-environment evaluation

粤港澳大湾区与东京湾区、旧金山湾区和纽约湾区并称为世界四大湾区<sup>[1-2]</sup>,其中粤港澳大湾区是我国城镇化水平最高的城市群区域,也是四大湾区中最“年轻”的地区。粤港澳大湾区作为我国国家区域发展战略地,是我国建设世界级城市群和参与全球竞争的重要空间载体<sup>[3-4]</sup>。粤港澳大湾区城镇化速度快、人口集聚水平高,人与自然的矛盾也十分突出<sup>[5-8]</sup>,尤其是近年来,粤港澳大湾区快速发展带来的生境破碎、大气污染等生态环境问题逐步暴露<sup>[9-13]</sup>。随着生态文明建设的深入推进,生态修复亟待开展<sup>[14-15]</sup>,处理好“发展”与“保护”的关系成为粤港澳大湾区高质量发展的关键,需要科学地评价湾区的生态、环境质量与资源利用效率。旧金山湾区、纽约湾区和东京湾区发展较早,在生态环境治理取得了相对成熟的经验<sup>[14,16-17]</sup>。通过对比世界四大湾区在生态环境治理、资源利用等方面的现状和趋势,研究这些发达湾区的发展经验,对于引导粤港澳大湾区可持续发展至关重要。

目前全球湾区的比较研究,以社会经济领域居多<sup>[3-4,18-21]</sup>,包括经济发展<sup>[20]</sup>、科技创新<sup>[22]</sup>和人才培养<sup>[4]</sup>等多个方面;而生态环境方面的比较较少<sup>[2,14]</sup>,部分学者从生态系统格局变化<sup>[2]</sup>、环境保护政策<sup>[23]</sup>方面进行了定性分析,但缺乏定量指标的评价。主要原因是由于国内外生态与环境数据统计口径不一、收集难度较大,难以建立统一的定量评价体系。

为了建立适合全球湾区比较的生态环境综合评价体系,本研究遍历国内外主要统计数据,利用美国宇航局全球卫星产品和欧洲宇航局全球土地利用产品等数据,建立 2005—2015 四大湾区生态与环境综合数据评价数据库;围绕生态质量、环境质量和资源利用效率三方面建立指标体系,构建湾区生态环境综合评价指数。通过对比,识别粤港澳大湾区相较其他发达湾区的优势和短板,为粤港澳大湾区可持续发展提供科学支持。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

粤港澳大湾区位于珠三角地区,由我国香港、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(珠三角)九个地级市组成。中部是平原,四周是山地、丘陵和岛屿;属于亚热带气候,气候温和,雨量充沛,日照时间长。旧金山湾区是美国西海岸加利福尼亚州北部的一个大都会区,主要包括旧金山半岛上的旧金山、东部的奥克兰和南部的圣何塞;可分为东湾、北湾、半岛和南湾四大片区;大多是丘陵地带;位于地中海式气候带上,有湿润温和的冬季和干旱的夏季;降雨方面,有着分明的干湿季<sup>[13,20]</sup>。纽约湾区是美国东海岸地跨纽约州和新泽西州的大都会区,位于美国东北部太平洋沿岸平原,平地比较多,海拔比较低,属于北温带,四季分明,雨水充沛,气候宜人;夏季平均气温 23℃,冬季 1℃。水资源丰富,湾区周围有哈德逊河、东河、哈林河等河流分布<sup>[25-27]</sup>。东京湾区位于日本本州岛中部太平洋海岸,主要包括东京都、埼玉县、千叶县、神奈川县;地形主要有河岸平原和海岸平原,还有少量的台地、低地、湿地和丘陵的分布;发源于北方

的西方河川广泛分布在湾区各地;气候温和,降水丰沛,初夏有雨,夏秋多台风<sup>[28]</sup>。

粤港澳大湾区范围采用广东 9 市与香港、澳门;纽约湾区的范围采用美国国家统计局的统计范围 (Metropolitan Statistical Area);旧金山湾区采用湾区美国官方统计范围;东京湾区采用一都三县的边界范围。四大湾区的面积根据欧洲宇航局 2015 年土地利用遥感影像解译得(表 1)。

表 1 全球四大湾区概况  
Table 1 Overview of four global bay areas

| 湾区<br>Bay areas                                 | 2015 年人口<br>Population/万人 | 2005—2015 年<br>人口变化率<br>Population<br>change rate/% | 2015 年 GDP/<br>(亿元人民币) | 2005—2015 年<br>GDP 变化率<br>GDP change<br>rate/% | 面积 Area<br>/km <sup>2</sup> | 气候带<br>Climatic zone |
|-------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 粤港澳大湾区<br>Guangdong-Hong<br>Kong-Macao Bay Area | 5874.28                   | 11.35                                               | 88416.71               | 169.78                                         | 58443.33                    | 亚热带季风                |
| 旧金山湾区<br>San Francisco Bay Area                 | 745.82                    | 9.94                                                | 47544.14               | 26.35                                          | 18245.99                    | 地中海气候                |
| 纽约湾区<br>New York Bay Area                       | 1932.10                   | 2.78                                                | 94663.37               | 4.89                                           | 31353.28                    | 温带大陆性气候              |
| 东京湾区<br>Tokyo Bay Area                          | 3613.10                   | 4.79                                                | 116807.27              | 20.97                                          | 19769.43                    | 亚热带季风                |

数据来源:2005 和 2015 年,粤港澳大湾区(9+2 行政区)人口和 GDP 由广东省统计年鉴<sup>[29]</sup>和中国统计年鉴<sup>[30]</sup>的 9 个地级市及 2 个特别行政区数据累计获得;旧金山湾区和纽约湾区人口和 GDP 获自美国国家统计局<sup>[31]</sup>、美国经济分析部<sup>[32]</sup>和旧金山湾区统计局<sup>[33]</sup>;东京湾区人口和 GDP 数据获自日本国家统计局<sup>[34]</sup>。其中,人民币兑美元汇率和人民币兑日元汇率,使用 2005 和 2015 年央行汇率中间价。湾区面积由 2015 年欧洲宇航局全球卫星产品数据<sup>[35]</sup>获得

在气候带上,四大湾区处于两个梯度,旧金山湾区(地中海气候)和纽约湾区(温带大陆性气候)位于温带,东京湾区和粤港澳大湾区北部地区(温带季风气候)位于亚热带。由于区位的不同,导致从北到南,四大湾区的温度和降雨量大致呈现随纬度的降低逐步升高的趋势。其中,大湾区跨亚热带和热带,雨量充足,温度常年较高。

在经济发展水平上,全球主要的湾区也处于不同的发展水平。从 2015 年人均 GDP 来看,旧金山湾区和纽约湾区分别为 63.75 万元(人民币)和 49.00 万元(人民币),东京湾区和粤港澳大湾区分别为 32.33 万元(人民币)和 15.05 万元(人民币)。

1.2 数据库构建

从社会经济、自然遥感和资源利用三方面,综合美国、日本和我国统计与全球卫星遥感产品多源数据,建立全球四大湾区社会—经济—自然数据库(表 1 和表 2)。

由于数据获得性年份不一,为保证数据年份统一和比较的代表性,根据数据可获得性(如美国用水县级调查五年一次,最新为 2015 年)和湾区的社会经济发展阶段(2005—2015 年为大湾区快速高速发展期),选取 2005 和 2015 年两个时间节点进行对比。

其中,全球土地利用数据获取自欧洲宇航局全球卫星产品,分辨率为 300 m,时间为 2005 和 2015 年。总初级生产力(GPP)和 PM<sub>2.5</sub>数据由美国宇航局全球卫星产品获得,分辨率为 500 m。粤港澳大湾区的土地利用数据及其环境遥感数据与其他湾区一致。

1.3 指标体系建立

本研究的全球湾区生态与环境综合评价指标体系包含 3 个方面(表 3):生态质量、环境质量和资源利用效率。其中,生态质量和环境质量指标可反映湾区的生态系统健康,资源利用效率指标可反映湾区的资源利用可持续性,以上三方面指标均反映了湾区可持续发展的重要基础。

在此三方面指标分指标确立和计算方面,研究克服了阻碍四大湾区国际生态环境综合比较中的多项问题:一方面,寻找四大湾区生态、环境和资源利用共同监测或统计的指标有难度,有些国内常用指标国外并不

使用,需要通过指标计算和单位换算,例如,资源利用的三项分指标;另一方面,共同监测或统计指标的统计年限不一,某些指标国内监测晚于国外,需要重新选取或统一数据充分的年份比较。

表 2 全球四大湾区自然-社会-经济综合数据库  
Table 2 Socio-economic-natural database of the four global bay areas

| 指标类<br>Indicator types                       | 指标<br>Indicators                      | 数据来源 Data sources                                                                   |                                                    |                         |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
|                                              |                                       | 粤港澳大湾区                                                                              | 旧金山湾区和纽约湾区                                         | 东京湾区                    |
| 社会经济<br>Socio-economic                       | 人口                                    | 广东省统计年鉴 <sup>[29]</sup> , 中国统计年鉴 <sup>[30]</sup>                                    | 美国国家统计局 <sup>[31]</sup> , 旧金山湾区统计局 <sup>[33]</sup> | 日本国家统计局 <sup>[34]</sup> |
|                                              | GDP                                   | 广东省统计年鉴 <sup>[29]</sup> , 中国统计年鉴 <sup>[30]</sup>                                    | 美国经济分析部 <sup>[32]</sup> , 旧金山湾区统计局 <sup>[33]</sup> | 日本国家统计局 <sup>[34]</sup> |
| 自然遥感<br>Natural ecosystem and Remote sensing | 土地利用                                  | 欧洲宇航局全球土地利用产品数据 <sup>[35]</sup>                                                     |                                                    |                         |
|                                              | 总初级生产力(GPP)                           | 美国宇航局全球卫星产品数据 <sup>[36]</sup>                                                       |                                                    |                         |
|                                              | PM <sub>2.5</sub>                     | 美国宇航局全球卫星产品数据 <sup>[36]</sup>                                                       |                                                    |                         |
| 环境报告<br>Environmental report                 | NO <sub>2</sub> /(μg/m <sup>3</sup> ) | 广州市环境质量状况公报 <sup>[37]</sup> , 深圳市生态环境状况公报 <sup>[38]</sup> , 香港环境保护署 <sup>[39]</sup> | 美国环保部 <sup>[40]</sup>                              | 东京都环境局 <sup>[41]</sup>  |
|                                              | 海湾水质/(mg/L)                           | 中国近岸海域生态环境质量公报 <sup>[42]</sup> , 广东省环境质量状况报告 <sup>[43]</sup>                        | 纽约港水质报告 <sup>[44]</sup> , 旧金山湾环境报告 <sup>[45]</sup> | 日本环境年报 <sup>[46]</sup>  |
| 资源利用<br>Resource utilization                 | 用水量                                   | 广东省水资源公报 <sup>[47]</sup> , 中国统计年鉴 <sup>[30]</sup>                                   | 美国用水县级调查 <sup>[48]</sup>                           | 日本国家统计局 <sup>[34]</sup> |
|                                              | 总能源消耗                                 | 广东省统计年鉴 <sup>[29]</sup> , 中国统计年鉴 <sup>[30]</sup>                                    | 美国能源信息部                                            | 日本国家统计局 <sup>[34]</sup> |

表 3 湾区生态与环境综合评价指标体系  
Table 3 Comprehensive evaluation system of the eco-environment in the four global bay areas

| 类型<br>Categories                          | 指标<br>Indicators                        | 定义<br>Definition                                                                        | 方向<br>Trends | 定义参照<br>Definition references | 获取和计算方法<br>Data collection and calculation                        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 生态质量<br>Ecosystem quality                 | 绿地比例/%                                  | 森林、灌木和草地面积总和占湾区总面积的比例                                                                   | 正            |                               | (林地+灌木林+草地)/湾区总面积                                                 |
|                                           | 绿地总初级生产力(GPP)相对量                        | GPP 是指单位时间和单位面积上,绿色植被通过光合作用所产生的有机碳总量。湾区绿地 GPP 相对量定义为“湾区绿地 GPP 均值”与“前 10%的绿地 GPP 高值”的比值。 | 正            | [39]                          | 使用 ArcGIS 的 Zonal Statistics 计算绿地 GPP 均值和标准差;绿地 GPP 相对量的计算法见公式(1) |
| 环境质量<br>Environmental quality             | PM <sub>2.5</sub> /(μg/m <sup>3</sup> ) | 指大气中空气动力学直径小于或等于 2.5μg 的颗粒物                                                             | 负            | [40]                          | 使用 ArcGIS 的 Zonal Statistics 计算遥感数据均值和标准差                         |
|                                           | NO <sub>2</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )   | 是一种重要的大气污染物,主要来自高温燃烧过程的释放                                                               | 负            | [40]                          | 核心城市 NO <sub>2</sub> 浓度平均                                         |
|                                           | 海湾水质/(mg/L)                             | 以无机氮为指标,参照我国海水水质标准 GB—3097—1997                                                         | 负            | [41]                          | 海湾无机氮浓度                                                           |
| 资源利用效率<br>Resource utilization efficiency | 万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>               | 总用水量(单位:m <sup>3</sup> )除以总 GDP(单位万元)                                                   | 负            | [42]                          | 湾区用水总量/GDP                                                        |
|                                           | 单位 GDP 建设用地/km <sup>2</sup>             | 指在一定时期内,每生产单位 GDP(亿元)所占用的建设用地面积                                                         | 负            | [43]                          | 建设用面积/GDP                                                         |
|                                           | 万元 GDP 能耗(吨标准煤/万元)                      | 每产生万元 GDP(国内生产总值)所消耗掉的能源                                                                | 负            | [13]                          | 湾区总能耗/GDP                                                         |

经过生态与环境方面专家的讨论与咨询,选取生态质量的 2 项指标、环境质量 3 项指标和资源利用的 3 项指标,筛选指标的原则是:

(1) 每项指标的分指标指示内容不同,同类指标不重复选取:生态质量两项分指标分别指示生态系统面积和质量;环境质量三项分指标分别指示空气和水的质量,其中  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{NO}_2$  虽同为空气质量指标,但是  $\text{PM}_{2.5}$  与空气颗粒物相关,而  $\text{NO}_2$  与能源消耗密切相关;资源利用效率三项分指标分别指示用水、用地和用能三方面。

(2) 在同类指标中选取同时满足内地与港澳和国际通用的生态环境指标,例如,  $\text{PM}_{2.5}$  是全球常用城市环境测度指标之一,对于空气质量具有代表性和通用性;

(3) 选取内地与港澳和其他国家湾区可获得性高或计算简易的指标,例如,单位 GDP 建设用地采用易于获取的城市 GDP 和全球免费卫星产品数据计算。

生态质量的 2 项指标、环境质量 3 项指标和资源利用的 3 项指标,由以下表 3 中方法直接或计算获得。表 3 指标获取和计算方法中,需要指出:生态质量指标中,绿林地的 GPP,由 ArcGIS 平台处理的土地利用产品数据<sup>[35]</sup>的绿林地范围,截取 GPP 卫星产品数据<sup>[36]</sup>统计获得。绿林地的 GPP 指标计算为相对量,计算方法参见表 3。针对生态质量指标中的绿林地 GPP 指标,为了减少不同纬度带绿林地 GPP 差异的影响,研究采用  $\text{GPP}_{(\text{均值})}$  ‘四个湾区分别的绿林地 GPP 平均值’与  $\text{GPP}_{(10\%)}$  ‘前 10% 的绿林地 GPP 高值’的比值,根据公式 1 计算  $\text{GPP}_{(\text{相对量})}$ :

$$\text{GPP}_{(\text{相对量})} = \frac{\text{GPP}_{(\text{均值})}}{\text{GPP}_{(10\%)}} \quad (1)$$

式中,各湾区前 10% 的绿林地 GPP 高值区的生态系统类型是森林;2015 年四大湾区前 10% 的绿林地 GPP 值为旧金山湾区 ( $666.0 \text{ g/m}^2$ ) > 粤港澳大湾区 ( $630.9 \text{ g/m}^2$ ) > 东京湾区 ( $527.4 \text{ g/m}^2$ ) > 纽约湾区 ( $468.9 \text{ g/m}^2$ ); 2005 年四大湾区前 10% 的绿林地 GPP 值为旧金山湾区 ( $715.5 \text{ g/m}^2$ ) > 粤港澳大湾区 ( $596.7 \text{ g/m}^2$ ) > 纽约湾区 ( $504.9 \text{ g/m}^2$ ) > 东京湾区 ( $451.8 \text{ g/m}^2$ )。

环境质量指标中,  $\text{NO}_2$  ( $\mu\text{g/m}^3$ ) 指标使用深圳、广州和香港指代粤港澳大湾区,纽约、旧金山和东京都的值分别指代纽约湾区,旧金山湾区和东京湾区。海湾水质使用珠江口、纽约湾、旧金山湾,东京湾无机氮浓度值指代,其中根据中国近岸海域生态环境质量公报珠江口水质主要为四类和劣四类,采用海水水质标准 GB—3097—1997 无机氮四类底线值 ( $0.5 \text{ mg/L}$ ),纽约湾、旧金山湾,东京湾无机氮浓度值来源参照表 2。资源利用指标中,万元 GDP 能耗采用美国能源信息部州级能耗数据(表 3)测算金山湾区和纽约湾区。其中,美国加州分为以旧金山市为中心的北加州和以洛杉矶市为中心的南加州两大区域,旧金山湾区作为北加州重镇,采用加州总能耗的 1/2 指代旧金山湾区的总能耗。纽约湾区地跨纽约州和新泽西州,两个州的能耗平均值指代旧金山湾区的总能耗。美国能耗单位  $1\text{btu} = 1055.06 \text{ J}^{[49]}$ ,以及日本能耗单位  $\text{kJ}$ ,根据我国能耗标准转换为标准煤 ( $1 \text{ 千克标准煤} = 29271 \text{ kJ}^{[50]}$ )。其中, GPP 计算栅格平均量 (Mean);  $\text{PM}_{2.5}$  计算栅格平均量;为了表示结果的不确定性,栅格平均量 (Mean) 计算标准差,显示内部差异。2015 年,四大湾区绿林地 GPP 标准差分别为旧金山湾区 ( $120.15$ ) > 粤港澳大湾区 ( $113.64$ ) > 东京湾区 ( $73.79$ ) > 纽约湾区 ( $46.89$ ); 四大湾区  $\text{PM}_{2.5}$  标准差分别为粤港澳大湾区 ( $3.67$ ) > 旧金山湾区 ( $2.79$ ) > 纽约湾区 ( $1.38$ ) > 东京湾区 ( $1.59$ )。

#### 1.4 生态环境综合评价指数构建

首先,将表 4 中 9 个分指标方向统一调整为正向,指数越高代表正面评价越高:正向指标绿地比例和绿林地 GPP 均量方向不变,负向指标  $\text{PM}_{2.5}$  调整为“ $1/\text{PM}_{2.5}$ ”,  $\text{NO}_2$  调整为“ $1/\text{NO}_2$ ”,海湾水质调整为“ $1/\text{海湾水质}$ ”,万元 GDP 用水量调整为“单位用水 GDP”,单位 GDP 建设用地调整为“单位用地 GDP”,单位 GDP 能耗调整为“单位用能 GDP”。

其次,并对表 4 中调整为正向后的生态质量的 2 个分指标,环境的 3 个分指标和和资源利用的 3 个分指标,进行四个湾区指标数值加总后,分别除以总值,转换值到 (0—1) 之间(公式 2)。

$$E_n = X_n / (A_n + B_n + C_n + D_n) \quad (2)$$

式中,  $E_n$  代表每类转换为(0—1)之间的第  $n$  个分指标,  $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$  和  $D_n$  分别代表粤港澳大湾区、纽约湾区、旧金山湾区和东京湾区的第  $n$  项分指标,  $X_n$  代表  $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$  或  $D_n$  中的一项。

接着, 使用几何平均法, 对生态质量、环境质量和资源利用效率的三大类指标内部分指标进行等权重叠加, 构建生态质量、环境质量和资源利用效率三大指数。

$$G = \sqrt[n]{E_1 \times E_2 \times E_3 \times E_n} = \sqrt[n]{\prod E_n} \quad (3)$$

式中,  $G$  是三类指标内部分指标的几何平均值,  $E_n$  代表每类转换值(0—1)的第  $n$  个分指标。最后, 对三大类指标进行等权重叠加, 构建湾区生态与环境综合评价指数。 $G$  是湾区生态与环境综合评价指数, 采用生态质量、环境质量和资源利用效率 3 个分指数数值的几何平均值表征。

表 4 湾区生态与环境综合评价指标对比

Table 4 Evaluation indexes of the eco-environment in the four global bay areas

| 类型<br>Categories                          | 指标<br>Indicators                        | 粤港澳大湾区<br>Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area |        | 旧金山湾区<br>San Francisco Bay Area |        | 纽约湾区<br>New York Bay Area |        | 东京湾区<br>Tokyo Bay Area |        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|---------------------------|--------|------------------------|--------|
|                                           |                                         | 2005                                         | 2015   | 2005                            | 2015   | 2005                      | 2015   | 2005                   | 2015   |
| 生态质量<br>Ecosystem quality                 | 绿地比例/%                                  | 40.38                                        | 46.17  | 64.35                           | 64.07  | 56.95                     | 54.54  | 32.17                  | 31.64  |
|                                           | 绿地总初级生产力<br>GPP/(g/m <sup>2</sup> )     | 399.20                                       | 416.66 | 425.79                          | 328.82 | 326.36                    | 329.26 | 264.91                 | 318.23 |
| 环境质量<br>Environmental quality             | PM <sub>2.5</sub> /(μg/m <sup>3</sup> ) | 34.76                                        | 27.83  | 7.20                            | 7.80   | 12.24                     | 9.13   | 11.36                  | 10.48  |
|                                           | NO <sub>2</sub> /(μg/m <sup>3</sup> )   | 56.07                                        | 45.51  | 22.93                           | 19.15  | 38.62                     | 29.53  | 25.00                  | 19.00  |
|                                           | 海湾水质<br>(无机氮/(mg/L))                    | >=0.50                                       | >=0.50 | 0.14                            | 0.15   | 0.30                      | 0.23   | 0.21                   | 0.17   |
| 资源利用效率<br>Resource utilization efficiency | 万元 GDP 用水量/(m <sup>3</sup> /万元)         | 79.25                                        | 25.78  | 170.27                          | 52.09  | 194.95                    | 84.22  | 8.12                   | 6.53   |
|                                           | 亿元 GDP 建设用地/(km <sup>2</sup> /亿元)       | 0.15                                         | 0.08   | 0.07                            | 0.06   | 0.09                      | 0.10   | 0.06                   | 0.06   |
|                                           | 万元 GDP 能耗/(t 标准煤/万元)                    | 0.48                                         | 0.37   | 0.04                            | 0.03   | 0.01                      | 0.01   | 0.01                   | 0.01   |

结果中, 使用 2005—2015 年分指标和总指标的变化率; 如果变化率为正, 说明这项指标正增长; 如果变化率为负, 说明这项指标负增长; 如果变化率为零, 说明这项指标保持不变。

## 2 结果

### 2.1 生态质量指数对比

2015 年, 四个大湾区的生态质量指数排序为: 纽约湾区>旧金山湾区>粤港澳大湾区>东京湾区(图 1)。各分指标中, 绿地比例指数排序为, 旧金山湾区>粤港澳大湾区>纽约湾区>东京湾区(图 1), 说明总绿地比例旧金山湾区和粤港澳大湾区较高。同时, 人均绿地面积中, 旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区>东京湾区, 首位旧金山湾区是粤港澳大湾区的 3.41 倍。绿地 GPP 指数方面, 纽约湾区>东京湾区>粤港澳大湾区>旧金山湾区, 说明粤港澳大湾区与发达国家湾区存在差距。

其中, 绿地比例指数差距较大(图 2): 粤港澳大湾区(35.32%)>东京湾区(12.71%)>旧金山湾区(-9.43%)>纽约湾区(-21.56%); 绿地 GPP 指数, 纽约湾区(7.98%)>东京湾区(4.21%)>粤港澳大湾区(3.65%)>旧金山湾区(-17.40%)。

2005—2015 年间, 四大湾区生态质量指数变化不同(图 2): 港澳大湾区(8.40%)>纽约湾区(1.26%)>东

京湾区(0.81%)>旧金山湾区(-9.70%)。

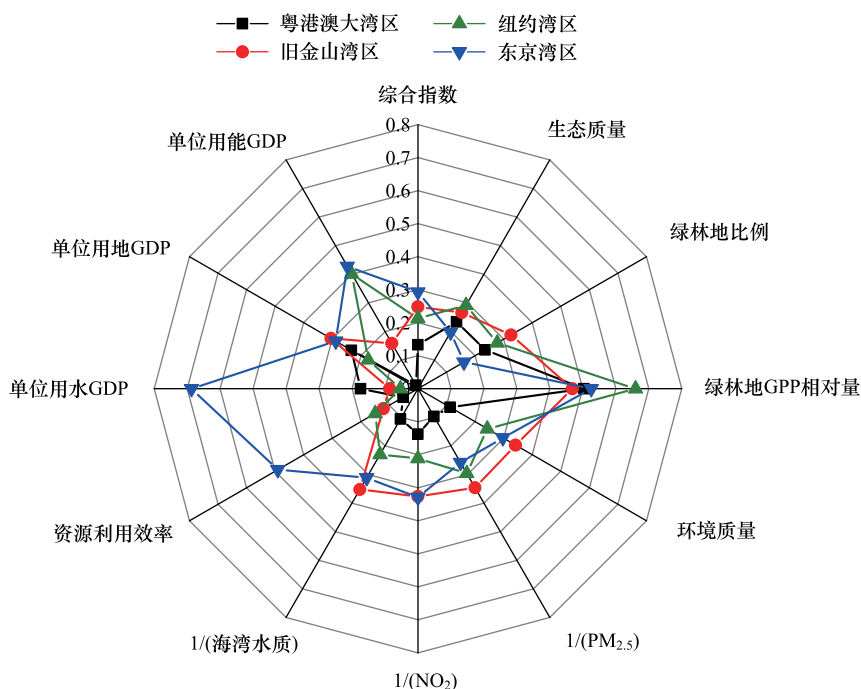


图1 2015 全球四大湾区生态环境评价分指标对比

Fig.1 Evaluation Secondary Indexes of the Eco-environment in the Four Global Bay Areas in 2015

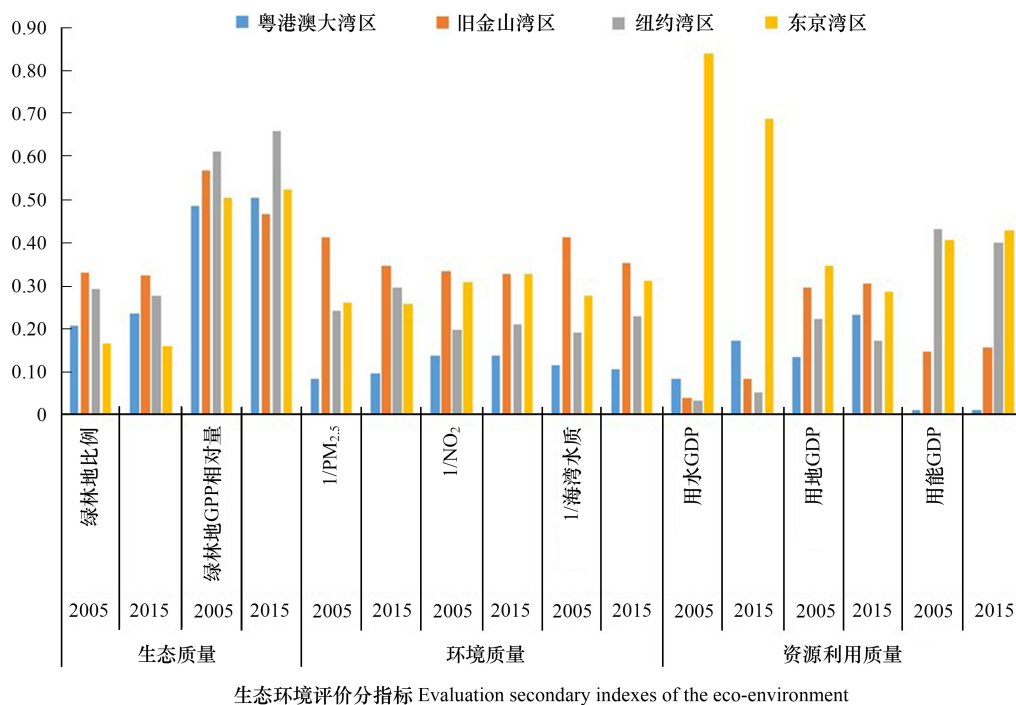


图2 2005 和 2015 全球四大湾区生态环境评价分指标对比

Fig.2 Comparison of Evaluation Secondary Indexes of the Eco-environment in the Four Global Bay Areas in 2005 and 2015

## 2.2 环境质量指数对比

2015 年,旧金山湾区>东京湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区(图 1)。其中,旧金山湾区是粤港澳大湾区的 3.09 倍。 $1/\text{PM}_{2.5}$  指数,旧金山湾区>纽约湾区>东京湾区>粤港澳大湾区(图 1),粤港澳大湾区与发达国家湾区的差距较大。从标准差看,粤港澳大湾区的栅格平均  $\text{PM}_{2.5}$  的变异性最大,为 3.67,是纽约湾区的 2.67 倍,东京湾区的 2.31 倍,旧金山湾区的 1.32 倍。 $1/\text{海湾水质指数}$  中,旧金山湾区>东京湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区(图 1)。珠江口水质与发达湾区差距很大,旧金山湾和东京湾分别达到我国海洋水质标准的一类,纽约湾区达到二类,而珠江口为劣四类。

2005—2015 年间,四大湾区环境质量指数变化幅度不一(图 2),纽约湾区增幅最高,旧金山湾区降幅最高,纽约湾区(15.64%)>东京湾区(5.99%)>粤港澳大湾区(1.31%)>旧金山湾区(-11.33%)。其中, $1/\text{PM}_{2.5}$  指数,纽约湾区(22.32%)>粤港澳大湾区(13.90%)>东京湾区(-1.15%)>旧金山湾区(-15.82%); $1/\text{NO}_2$  指数,东京湾区(6.91%)>纽约湾区(6.26%)>粤港澳大湾区(0.10%)>旧金山湾区(-2.71%); $1/\text{海湾水质指数}$ ,纽约湾区(18.97%)>东京湾区(12.67%)>粤港澳大湾区(-8.79%)>旧金山湾区(-14.87%)。

## 2.3 资源利用效率指数对比

2015 年,东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区(图 1),东京湾区总体指数最高,是粤港澳大湾区的 5.5 倍。单位用水 GDP,东京湾区>粤港澳大湾区>旧金山湾区>纽约湾区,东京湾区用水效率最高,是粤港澳大湾区的 4.06 倍。单位用地 GDP,旧金山湾区>东京湾区>粤港澳大湾区>纽约湾区,旧金山湾区用地效率最高,是粤港澳大湾区的 1.55 倍。单位用能 GDP,东京湾区>纽约湾区>旧金山湾区>粤港澳大湾区,粤港澳大湾区与三个发达国家湾区的差距都较大。

2005—2015 年,四大湾区资源利用效率指数变化中(图 2),粤港澳大湾区总体增幅最大,粤港澳大湾区(53.12%)>旧金山湾区(32.84%)>纽约湾区(3.59%)>东京湾区(-10.55%)。其中,单位用水 GDP,粤港澳大湾区增幅最大,旧金山湾区(115.19%)>粤港澳大湾区(102.40%)>纽约湾区(52.39%)>东京湾区(-18.17%);单位用地 GDP,粤港澳大湾区增幅最大,粤港澳大湾区(63.17%)>旧金山湾区(14.16%)>东京湾区(-18.95%)>纽约湾区(-19.02%);单位用能 GDP,旧金山湾区增幅最大,旧金山湾区(6.41%)>东京湾区(4.90%)>粤港澳大湾区(2.37%)>纽约湾区(-6.92%)。

## 2.4 综合指数对比

对比可见(图 1),旧金山湾区和纽约湾区的优势在生态质量和环境质量,特别是环境质量,短板在资源利用效率。东京湾区在资源利用效率方面优势明显,短板在生态质量。粤港澳大湾区与其他三个湾区相比,三个方面都有一定差距。

2015 年,东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区,整体上粤港澳大湾区与发达国家湾区都有一定差距。从三大方面看,生态质量,纽约湾区>旧金山湾区>粤港澳大湾区>东京湾区;环境质量,旧金山湾区>东京湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区;资源利用效率,东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区。

2005—2015 年,四大湾区综合指数都有增幅,粤港澳大湾区综合指数增幅最大,粤港澳大湾区(23.92%)>旧金山湾区(3.52%)>纽约湾区(2.15%)>东京湾区(-2.41%)(图 3)。其中,生态质量指数增幅,粤港澳大湾区>纽约湾区>东京湾区>旧金山湾区;环境质量指数增幅,纽约湾区>东京湾区>粤港澳大湾区>旧金山湾区;资源利用效率指数增幅,粤港澳大湾区>旧金山湾区>纽约湾区>东京湾区(图 3)。粤港澳大湾区在生态质量和资源利用效率两项增幅最大。

## 3 讨论与结论

### 3.1 湾区生态环境治理与发展

二战之后的美日湾区经历过类似粤港澳大湾区早期以生态环境为代价的经济发展阶段,在磨砺中积累了湾区生态环境治理与发展经验;二战之后,东京湾区生产大规模的扩张造成了较为严重的工业污染,继而引发

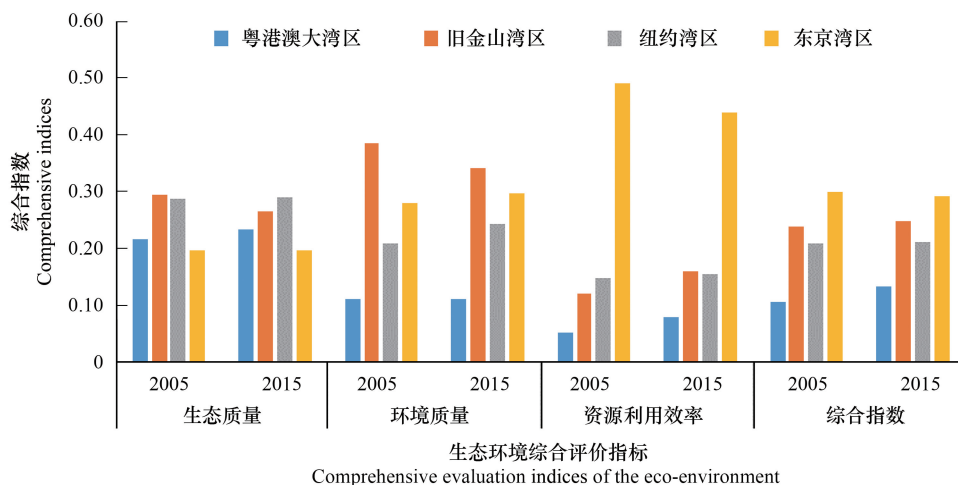


图3 2005 和 2015 年全球四大湾区生态环境综合指标对比

Fig.3 Comparison of comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas in 2005 and 2015

了大气污染、水污染等一系列环境问题;针对环境污染,东京湾区制定了有针对性标准体系、积极推动环保技术发展、调整产业结构等措施<sup>[51-53]</sup>。同一时期,伴随城市扩展和经济发展,旧金山湾区出现大气污染、水体污染和湿地减少等生态环境问题,为此旧金山湾区严格的环保监管以及绿色低碳发展等措施<sup>[17,54]</sup>。纽约湾也曾出现过湿地面积减少和大气污染等严重的生态环境问题,为此推出了立法、提高清洁能源比例和湿地保护建设等多项措施改善生态环境质量。现阶段,粤港澳大湾区亟需在认识差距的同时,利用后发优势取长补短,汲取发达国家湾区的经验和教训。

### 3.2 粤港澳大湾区生态空间丧失明显,应加强生态空间保护,降低生态功能衰退风险

生态质量方面,纽约湾区>旧金山湾区>粤港澳大湾区>东京湾区。大湾区仅高于东京湾区,需要避免建设用地扩张导致对生态系统结构及其功能的负面影响,避免生态质量的下降风险<sup>[26]</sup>。2005—2015 年间,城镇用地增幅中,粤港澳大湾区(34.27%)>东京湾区(25.10%)>纽约湾区(10.03%)>旧金山湾区(6.43%),粤港澳大湾区增幅最大;同时,森林面积变化中,纽约湾区(-4.59%)>粤港澳大湾区(-3.84%)>东京湾区(-1.52%)>旧金山湾区(-0.68%),粤港澳大湾区降幅排第二位,需要警惕用地扩张导致对自然生态系统结构及其功能的负面影响。美国湾区的生态质量控制值得粤港澳大湾区借鉴:以旧金山湾区为例,旧金山湾区是国际公认的生态宜居湾区之一<sup>[55]</sup>,完善的湿地分级保护体系和公园保护地体系是其生态质量控制良好的主因之一<sup>[24,56]</sup>。

### 3.3 粤港澳大湾区生境质量较高,但环境质量偏差,污染治理应是当前主要工作

环境质量方面,旧金山湾区>东京湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区,粤港澳大湾区与发达国家湾区都有一定差距,需要吸取发达国家湾区环境质量控制经验和科技。例如,旧金山湾区重视科研对环境治理的支持<sup>[21,55]</sup>:在大气治理方面,加利福尼亚州空气资源委员会,积极研发了较为成熟的各种污染源减排技术,先进的机动车排放控制技术;同时,委员会设有专门的科研部门和健康风险评估小组,负责对污染物质可能造成的风险进行评估,为进一步研究并降低湾区污染暴露提供重要支撑。此外,东京湾区的先进环保技术值得借鉴:大力发展液化天然气海运,推广无铅汽油和三元催化器的使用,都对东京湾区空气质量控制起到良好作用;另外,东京湾区的地表水监测项目众多,并根据情况变化及时调整更新污染物质控制标准,对水污染控制行之有效<sup>[46]</sup>。

### 3.4 粤港澳大湾区资源利用效率低,应多管齐下,提升用水用能效率

资源利用方面,东京湾区>旧金山湾区>纽约湾区>粤港澳大湾区,同时 2005—2015 年间,粤港澳大湾区的人口和 GDP 增长在四大湾区中都占据首位(表 1),随之带来的资源的需求也迅速增长。然而,资源利用效

率方面,粤港澳大湾区与发达国家湾区都有一定差距,与东京湾区的差距最大,需要借鉴发达国家湾区高新技术。其中,用水效率,与东京湾区差距较大,可借鉴日本的水资源利用技术和节水教育理念<sup>[17,23]</sup>;东京都政府通过推广再生水循环系统来节约用水,同时还改革了给水、排水系统,采用“上、中、下”三水道的供水来节水,大大提升了用水效率。用地效率,与旧金山湾区和东京湾区有差距,可借鉴其严格的土地管理政策。用能效率,与发达国家湾区的差距较大,需要转变产业结构,借鉴清洁能源技术。建议借鉴能源技术,建设低碳城市<sup>[18]</sup>;旧金山湾区通过电力和太阳能清洁能源使用建设低碳城市<sup>[19]</sup>。为实现大湾区的低碳能源转型和减排,应优先考虑能源系统优化,使清洁能源和可再生能源的发电组合多样化,进行新能源项目投资<sup>[57]</sup>。

#### 参考文献 (References):

- [1] Hui E C M, Li X, Chen T T, Lang W. Deciphering the spatial structure of China's megacity region: a new bay area—The Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the making. *Cities*, 2018, doi: 10.1016/j.cities.2018.10.011.
- [2] Yang C, Li Q Q, Hu Z W, Chen J Y, Shi T Z, Ding K, Wu G F. Spatiotemporal evolution of urban agglomerations in four major bay areas of US, China and Japan from 1987 to 2017: evidence from remote sensing images. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 232-247.
- [3] 樊明捷. 世界湾区的区域协同机制. *城乡建设*, 2019(20): 67-69.
- [4] 余碧仪, 黄何, 王静雯. 国际三大湾区科技人才发展经验对粤港澳大湾区的启示. *科技创新发展战略研究*, 2019, 3(3): 45-50.
- [5] Yang C, Zhang C, Li Q, Liu H, Gao W, Shi T, Liu X, Wu G. Rapid urbanization and policy variation greatly drive ecological quality evolution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China: A remote sensing perspective. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106373.
- [6] Shao Q, Liu X, Zhao W. An alternative method for analyzing dimensional interactions of urban carrying capacity: Case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Journal of Environmental Management*, 2020, 273: 111064.
- [7] Fang X, Fan Q, Liao Z, Xie J, Xu X, Fan S. Spatial-temporal characteristics of the air quality in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China during 2015 - 2017. *Atmospheric Environment*, 2019, 210: 14-34.
- [8] Gu Y, Ke C, Liu Q. Characterization, sources, and ecological hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in the intertidal sediments of Zhelin Bay, the biggest mariculture area on the eastern Guangdong coast of China. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 130: 192-197.
- [9] Yang G, Zhao Y L, Xing H F, Fu Y C, Liu G L, Kang X Y, Mai X. Understanding the changes in spatial fairness of urban greenery using time-series remote sensing images: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay. *Cities*, 2020, 715: 136763.
- [10] Wu P F, Tang Y Y, Dang M, Wang S Q, Jin H B, Liu Y S, Jing H, Zheng C M, Yi S P, Cai Z W. Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of the Total Environment*, 2020, 717:135187.
- [11] Huang W K, Guo Y Y, Xu X X. Evaluation of real-time vehicle energy consumption and related emissions in China: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay Area. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121583.
- [12] Chong Z H, Pan S. Understanding the structure and determinants of city network through intra-firm service relationships: The case of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Cities*, 2020, 103: UNSP 102738.
- [13] Chen Y P, Yan H, Yao Y J, Zeng C L, Gao P, Zhuang L Y, Fan L Y, Ye D Q. Relationships of ozone formation sensitivity with precursors emissions, meteorology and land use types, in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Environmental Sciences*, 2020, 94: 1-13.
- [14] 范丹, 王明旭. 国际三大湾区环境保护对粤港澳大湾区的经验启示. *环境科学与管理*, 2019, 44(4): 13-16.
- [15] 唐天均. 粤港澳大湾区水环境保护对策和建议. *广东化工*, 2018, 45(2): 153-154.
- [16] 赵玉灵. 粤港澳大湾区自然资源遥感调查与保护建议. *国土资源遥感*, 2018, 30(4): 139-147.
- [17] 赖梅东, 吴锋, 赵振业. 粤港澳大湾区生态资源与环境一体化建设. 北京: 中国环境出版集团, 2019: 128-129.
- [18] 陈相. 国外先进地区经验对粤港澳大湾区创新发展的启示. *科技创业月刊*, 2018, 31(03): 117-120.
- [19] 田栋, 王福强. 国际湾区发展比较分析与经验借鉴. *全球化*, 2017, (11): 100-113.
- [20] 沈子奕, 郝睿, 周墨. 粤港澳大湾区与旧金山及东京湾区发展特征的比较研究. *国际经济合作*, 2019, (2): 32-42.
- [21] 林贡钦, 徐广林. 国外著名湾区发展经验及对我国的启示. *深圳大学学报: 人文社会科学版*, 2017, 34(5): 25-31.
- [22] 张峰, 宋晓娜, 董会忠. 粤港澳大湾区制造业绿色竞争力指数测度与时空格局演化特征分析. *中国软科学*, 2019, (10): 70-89.
- [23] 唐天均, 谢林仲, 彭溢, 陈纯兴. 东京湾水环境治理对深圳的启示. *环境科学与管理*, 2014, 39(12): 42-44.
- [24] Cloern J E, Jassby A D. Drivers of change in estuarine - coastal ecosystems: Discoveries from four decades of study in San Francisco Bay. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): 1-33.
- [25] Ekman P. From prophecy to projection: the New York Metropolitan Region Study and the rescaling of the urban future. 1956- 1968. *Planning*

- Perspectives, 2020, doi: 10.1080/02665433.2020.1766546.
- [26] Loeb R E, Walborn T N. Conservation of three historic forest landscapes in the New York metropolitan area. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2018, 145(2): 136-146.
- [27] Qian Y, Gallagher F, Deng Y, Wu M Y, Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30): 23549-23558.
- [28] Sakamoto A, Shirakihara K. Ecosystem dynamics in Tokyo Bay with a focus on high trophic levels using Ecopath with Ecosim. *Journal of Marine Science and Technology*, 2017, 22(1): 1-10.
- [29] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [30] 中国国家统计局. 2005—2016 年中国统计年鉴. 国家统计局网站, [2019-12-03]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [31] United States Census Bureau. U.S. Census Data and Statistics. [2019-12-03]. <https://www.usa.gov/statistics#item-36987>.
- [32] U.S. Department of Commerce. Bureau of Economic Analysis. [2019-12-03]. <https://www.bea.gov/>.
- [33] Bay Area Census. Metropolitan Transportation Commission and Association of Bay Area Governments. [2019-12-03]. <http://www.bayareacensus.ca.gov/>.
- [34] Statistics of Japan (e-Stat). [2019-12-03]. <https://www.e-stat.go.jp/>.
- [35] European Space Agency (ESA). CCI Land Cover products. [2019-12-03]. <https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/164>.
- [36] National Aeronautics and Space Administration. U.S. Geological Survey. [2019-12-03]. [https://lpdaac.usgs.gov/product\\_search/?query=npp&view=cards&sort=title](https://lpdaac.usgs.gov/product_search/?query=npp&view=cards&sort=title).
- [37] 广州市生态环境局. 2005—2016 年广州市环境质量状况公报. [2019-12-03]. <http://sthjj.gz.gov.cn/zwgk/hjgb/>.
- [38] 深圳市生态环境局. 2005—2016 年深圳市环境状况公报. [2019-12-03]. <http://meeb.sz.gov.cn/xxgk/tjsj/ndhjkzgb/>.
- [39] 香港特别行政区政府环境保护署. 2005—2016 年空气质素健康指数与空气质量. [2019-12-03]. <https://www.aqhi.gov.hk/tc.html/>.
- [40] United States Environmental Protection Agency (EPA). [2019-12-03]. <https://www.epa.gov/>.
- [41] Bureau of Environment Tokyo Metropolitan Government. [2019-12-03]. <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/>.
- [42] 中国环境监测总站. 2005—2016 年中国近岸海域环境质量公报. [2019-12-03]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zgjahyhjzlg/>.
- [43] 广东省生态环境厅. 2005—2016 年广东省环境状况公报. [2019-12-03]. <http://gdee.gd.gov.cn/hjkzgb/>.
- [44] NYC Environmental Protection. 2017 New York Harbor Water Quality Report. New York City, 2017.
- [45] Wallitner K, Pincetich A. Freshwater Quality Monitoring in the San Francisco Bay Area Network: Biennial Report on Water Years 2015 and 2016. Fort Collins, Colorado, Natural Resource Stewardship and Science, National Park Service, U.S. Department of the Interior, 2017.
- [46] Ministry of the Environment. Annual Report on Environment in Japan 2016. Tokyo, 2017.
- [47] 广东省水利厅. 2005—2016 年水资源公报. [2019-12-03]. <http://slt.dg.gov.cn/sjfb2018/index.html>.
- [48] Dieter C A, Linsey K S, Caldwell R R, Harris M A, Ivahnenko T I, Lovelace J K, Maupin M A, Barber N L. Estimated Use of Water in the United States County-level Data for 2005 and 2015. U.S. Geological Survey. [2019-12-03]. <https://doi.org/10.5066/F7TB15V5>
- [49] U.S. Energy Information Administration (EIA). Independent Statistics and Analysis. [2019-12-03]. <https://www.eia.gov/>.
- [50] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [51] Kunugi Y, Arimura T H, Iwata K, Komatsu E, Hirayama Y. Cost-efficient strategy for reducing PM<sub>2.5</sub> levels in the Tokyo metropolitan area: an integrated approach with air quality and economic models. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0207623.
- [52] Wang R C, Dourdour A, Murayama Y. Spatiotemporal simulation of future land use/cover change scenarios in the Tokyo metropolitan area. *Sustainability*, 2018, 10(6): 2056.
- [53] Aramaki T, Sugimoto R, Hanaki K, Matsuo T. Evaluation of appropriate system for reclaimed wastewater reuse in each area of Tokyo using GIS-based water balance model. *Water Science and Technology*, 2001, 43(5): 301-308.
- [54] Santos M J, Thorne J H, Christensen J, Frank Z. An historical land conservation analysis in the San Francisco Bay Area, USA: 1850-2010. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 127: 114-123.
- [55] 陈利, 卢瑛莹, 陈琴, 冯晓飞. 先进湾区生态环保历程及对浙江大湾区建设的经验启示. *环境与可持续发展*, 2018, 43(2): 70-73.
- [56] Breaux A, Cochrane S, Evens J, Martindale M, Pavlik B, Suer L, Benner D. Wetland ecological and compliance assessments in the San Francisco Bay Region, California, USA. *Journal of Environmental Management*, 2005, 74(3): 217-237.
- [57] Zhou Y, Shan Y L, Liu G S, Guan D B. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings. *Applied Energy*, 2018, 228: 1683-1692.