

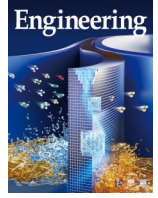


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Air Pollution Control—Article

粤港澳大湾区 CO₂ 排放趋势、驱动因素及减排路径

周雅^{a,*}, 李柯君^a, 梁笙^a, 曾雪兰^a, 蔡宴朋^a, 孟靖^b, 单钰理^c, 关大博^d, 杨志峰^a

^a Key Laboratory of City Cluster Environmental Safety and Green Development, Ministry of Education, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

^b The Bartlett School of Construction and Project Management, University College London, London, WC1E 7HB, UK

^c Integrated Research for Energy, Environment and Society (IREES), Energy and Sustainability Research Institute Groningen, University of Groningen, Groningen, 9747 AG, Netherlands

^d Department of Earth System Sciences, Tsinghua University, Beijing 100080, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2021

Revised 21 February 2022

Accepted 2 March 2022

Available online 25 May 2022

关键词

粤港澳大湾区

CO₂ 排放

驱动因素

低碳发展

碳中和

摘要

粤港澳大湾区是我国为建设世界级城市群提出的国家战略,其 CO₂ 排放趋势、社会经济驱动因素和减排路径对区域高质量发展具有重要意义。本研究编制了 2000—2019 年粤港澳大湾区 CO₂ 排放清单,采用对数平均迪氏指数法探究 CO₂ 排放的关键驱动力。结果表明,粤港澳大湾区 CO₂ 排放在 2017 年后明显放缓,已经与国内生产总值(GDP)增长脱钩。经济增长和能源强度分别是驱动和抑制粤港澳大湾区 CO₂ 排放增加的主要因素。能源生产和重工业对粤港澳大湾区 CO₂ 排放增长的推动作用降低,服务业正成为主要驱动力。粤港澳大湾区通过产业结构调整和升级实现低碳发展取得了显著成效。深圳和香港的产业升级以及深圳、广州和佛山的技术进步抑制了粤港澳大湾区 CO₂ 排放增长。粤港澳大湾区各城市异质性增加了减排指标分配难度和制定区域碳中和路线图的复杂性。本研究提出了粤港澳大湾区城市分级减排策略和碳达峰、碳中和建议,为制定粤港澳大湾区城市碳达峰和碳中和行动方案以及其他城市和地区的低碳发展提供了科学依据。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

气候变化是全球性环境挑战。减缓气候变化,实施《巴黎协定》,促进低碳转型是全球共同目标。作为世界第二大经济体、最大出口国和最大能源消费国[1–2],中国实施积极应对气候变化国家战略,采取了从能源结构优化到产业结构调整的一系列措施。中国已成为全球可再生能源增长的引领者[3–4],2020年占全球可再生能源新装机容量的45% [5]。中国制定了2030年实现碳达峰,2060年

实现碳中和的宏伟目标[6],成为世界主要排放国中第一个为碳中和设定期限的发展中国家。生态环境部于2021年1月发布的《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》中指出,碳减排是协同控制温室气体和污染物排放的关键[7]。在如此短时间内实现碳达峰和碳中和目标,需要付出非凡努力。城市是资源的主要消耗者,也是污染物和 CO₂ 的主要排放者。因此,城市低碳发展对国家实现碳中和以及减缓气候变化具有重要意义。

* Corresponding author.

E-mail address: yazhou@gdut.edu.cn (Y. Zhou).

2019年2月, 国务院发布《粤港澳大湾区发展规划纲要》, 其作为我国国家经济发展战略之一, 旨在将粤港澳大湾区(下文用大湾区表示)打造成世界级城市群和绿色低碳发展的典范[8]。大湾区由珠三角九个城市和香港、澳门两个特别行政区组成, 贡献了全国12%的GDP和5%人口。凭借先进的制造业和完善的供应链, 2020年传统产业(纺织、造纸和印刷、石油化工、钢铁和有色金属)的增加值占到大湾区第二产业的43% [9]。对煤炭的高度依赖使大湾区碳排放强度高于其他国际湾区[10]。随着经济和人口的增长, 大湾区能源需求总量和CO₂排放量将持续增长, 导致资源和环境压力持续增加[11]。大湾区城市的社会经济和产业发展不平衡, 尤其是香港、澳门、广州、深圳和其他城市之间差距较大。探讨大湾区城市CO₂排放趋势、驱动因素和差异化的减排路径, 既是实现区域绿色可持续发展的必要途径, 也是实现碳达峰和碳中和目标的重要步骤。

过去关于大湾区城市CO₂排放特征和社会经济驱动因素的研究遇到了一些挑战。第一, 如表1所示, 该领域大多数研究只考察了单个城市、年份和行业CO₂排放量, 而不是对整个地区较长时间跨度和全行业CO₂排放量进行研究, 无法评估大湾区整体CO₂排放趋势[12–17]。第二, 现有研究集中在广东省和特定城市CO₂排放驱动因素上, 难以研究单个城市或行业对大湾区CO₂排放的贡献[18–21]。第三, 城市经济发展、产业结构的异质性导致了不同低碳发展模式[22–23]。因此, “一刀切”碳减排方式对大湾区城市来说不可取。第四, 各城市使用不同排放核算方法, 数据无法比较。

为了解决现有研究的不足, 本研究根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的方法, 构建了大湾区2000—2019年城市级CO₂排放清单, 该清单与国家 and 省级清单具有可比性和一致性。基于对数平均迪氏指数(LMDI)模型分析了大湾区CO₂排放的关键驱动力(因素、城市和行

业), 提出了差异化城市减排路径和低碳发展路线, 探讨新常态下大湾区城市CO₂排放驱动因素和因地制宜的低碳发展路径, 为大湾区碳达峰、碳中和行动方案制定提供科学依据。本研究为《中华人民共和国环境保护法》中区域和城市环境保护责任划分奠定了基础。大湾区低碳发展可为长三角地区、京津冀地区提供可持续发展经验, 也为大湾区制定碳达峰和碳中和目标提供指引。

2. 文献综述

准确CO₂排放清单为制定和实施碳排放减缓政策提供了量化基础。Kennedy等[22]基于《联合国气候变化框架公约》自下而上方法计算了全球22个城市的温室气体清单。Wang和Liu [24]根据DMSP (defense meteorological program)/OLS (operational linescan system) “城市之光”卫星数据评估了城市层面的CO₂排放量。Du等[25]应用月度夜间灯光数据创建了快速核算的中国碳观测系统, 并以此计算了2020年1—5月省级城市和农村家庭月度碳排放量。这些研究中使用的大部分数据都来自于城市统计年鉴、遥感图像、发表报告和文献。然而, 这些数据必须经过系统审查以确保一致性和准确性。中国碳核算数据库(CEADs)从化石能源消费和工业生产过程两方面开发了核算中国城市CO₂排放清单方法[26–27], 可为中国城市提供统一和可比较的能源和排放统计数据[28]。

计量经济学和分解分析模型已被广泛用于识别CO₂排放的社会经济驱动因素[29–30]。在计量经济分析模型中, 选择CO₂排放量作为因变量, 潜在影响因素作为自变量, 如外国直接投资和城市化率[31–34]。计量经济学以条件均值函数假设为基础, 以模型估计和检验为核心, 在实际应用中具有不可逆性、时变性和非实验性[30,35]。

分解分析方法通常基于一个恒等式, 将碳排放分解为规模效益、结构效益和技术效应[36]。结构分解分析

表1 对粤港澳大湾区CO₂排放的已有研究

Reference	Scope and system boundary	Case region/cities	Industry	Time span
Xu et al. [14]	Production-based CO ₂ emissions of energy consumption, industrial processes, solid waste emissions, and wastewater emissions within urban boundaries	Pearl River Delta	Industry-wide	1990–2014
Dong et al. [13]	CO ₂ emissions from the operational phase of urban public transport	Shenzhen	Transportation	2005–2015
Huang et al. [12]	Embodied CO ₂ emissions in imports and exports	Hong Kong	Industry-wide	1990–2015
Lin and Li [15]	Production-based CO ₂ emissions within city boundaries	Guangdong Province	Industry-wide	2017
Dou et al. [16]	Energy-related emissions, emissions from cross-border electricity, and embodied trade-related emissions	Hong Kong and Macao	Industry-wide	2000–2015
Qian et al. [17]	Production-based CO ₂ emissions of energy consumption and industrial processes, consumption-side CO ₂ emissions based on input-output table accounting	47 Cities in the Pearl River Basin	Industry-wide	2012

(SDA)、指数分解分析 (IDA) 和生产理论分解分析 (PDA) 是代表性的分解方法[37]。通过结合生产理论、距离函数和环境数据的包络分析[38–40]，PDA 可以量化效率和生产技术对 CO₂ 排放变化的影响[41–43]。然而，PDA 方法无法捕捉结构（即产业结构和能源结构）的影响，这些效应是碳排放的重要驱动因素[30,44]。

SDA 方法最先用于经济结构分析，然后扩展到能源消费和碳排放的影响分析[45–47]。该方法在投入产出模型基础上评估生产和消费视角的影响，能够区分技术效应和最终需求效应。为了进一步追踪贸易隐含碳排放，SDA 可将 CO₂ 排放分解为消费、投资、出口和进口的影响[48–50]。SDA 方法主要基于投入产出表。由于缺乏国家级以下的投入产出数据，该方法不适用于城市尺度 CO₂ 排放驱动因素分析[46]。

IDA 方法被广泛用于生产端 CO₂ 排放驱动因素分析，其对数据要求不高，适用于对环境压力多个驱动因素进行加法分解和乘法分解分析[36,51–52]。在各种 IDA 方法中，LMDI 引入了对数均值权重函数来消除分解余项，具有适应性强、收敛性好、一致性好、使用和解释方便等优点[53–54]。过去的研究和经验表明，LMDI 适用于分析 CO₂ 排放社会经济驱动因素，并提供与政策相关的见解[23, 55–57]。

3. 方法

3.1. CO₂ 排放清单编制

按照 IPCC 指南，核算了 2000—2019 年大湾区城市行政区域范围内 CO₂ 排放清单，量化了区域范围内社会经济部门和居民活动的直接排放量[58]；分析了大湾区城市化化石燃料燃烧和工业过程的 CO₂ 排放趋势，涵盖 47 个社会经济部门、17 种化石燃料和 7 个工业过程[26]（附录 A 中的表 S1 至表 S3）。为避免重复计算，将化学原料能源消耗和运输过程损失从总能源消耗中剔除[59]。城市范围内生产的电力和热力的排放根据一次能源消费计算。行政区域排放清单不包括从城市边界以外进口的电力和热能的排放以及城市间运输消耗能源相关的排放。

3.1.1. 能源消费

根据 IPCC 的方法[58]，能源消耗所排放的 CO₂ 等于各社会经济部门能源活动（能源消耗量）和相应的排放因子的乘积，如公式（1）：

$$C_{\text{energy}} = \sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^{47} C_{ij} = \sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^{47} \text{AD}_{ij} \cdot \text{NCV}_i \cdot \text{CC}_i \cdot O_{ij} \quad (1)$$

式中， i 代表能源类型， j 代表社会经济部门。 C_{ij} 表示社会经济部门 j 消耗 i 种能源产生的 CO₂ 排放。 AD_{ij} 表示活动数据，即化石燃料消耗量。 NCV_i 、 CC_i 和 O_{ij} 是排放因子，分别代表净热值、碳含量和氧化率。该排放因子来自 Liu 等[28]，被认为能准确核算中国能源消耗 CO₂ 排放量，被许多学者广泛使用[60–62]。在本研究中，特定能源类型的时间序列碳排放核算中，排放因子是固定的。

3.1.2. 工业过程

工业过程的 CO₂ 排放是指工业产品生产过程中发生化学和物理变化产生的排放，如水泥和石灰生产。工业生产过程的 CO₂ 排放可用公式（2）计算：

$$C_{\text{process}} = \sum_{k=1}^7 C_k = \sum_{k=1}^7 \text{AD}_k \cdot \text{EF}_k \quad (2)$$

式中， k 代表工业过程； C_k 和 EF_k 工业过程相关 CO₂ 排放和排放因子； AD_k 代表活动水平数，即工业产品产量。水泥生产的排放因子来自 Liu 等[28]，其他工业过程的排放因子来自 IPCC。

3.2. LMDI 模型

本研究使用 LMDI 方法[公式（3）和公式（4）]探讨了不同驱动因素、城市和产业对大湾区 CO₂ 排放的贡献。以往研究表明，规模、结构和技术是 CO₂ 排放的主要影响因素[57,63–65]。根据恒等式，大湾区 CO₂ 排放的驱动因素被分解为六个因素：燃料质量、能源结构、能源强度、产业结构、人均 GDP 和人口。燃料质量和能源强度代表技术效应，产业结构和能源结构代表结构效应，人均 GDP 和人口代表规模效应。本研究 LMDI 计算针对珠三角九个城市和香港开展。澳门由于缺乏各行业能源消耗数据，以及其在大湾区 CO₂ 排放占比较小（0.3%），因此没有开展分解分析。

$$\begin{aligned} C_{n,t} &= \sum_i \sum_j C_{i,j,n,t} \\ &= \sum_i \sum_j \frac{C_{i,j,n,t}}{E_{i,j,n,t}} \times \frac{E_{i,j,n,t}}{E_{j,n,t}} \times \frac{E_{j,n,t}}{G_{j,n,t}} \times \frac{G_{j,n,t}}{G_{n,t}} \times \frac{G_{n,t}}{P_{n,t}} \times P_{n,t} \\ &= \sum_i \sum_j T_{i,j,n,t} \times N_{i,j,n,t} \times I_{j,n,t} \times S_{j,n,t} \times Y_{n,t} \times P_{n,t} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， n 和 t 分别代表区域和年份。 $C_{n,t}$ 代表 t 年 n 区域 CO₂ 排放量。 $T_{i,j,n,t} = \frac{C_{i,j,n,t}}{E_{i,j,n,t}}$ 代表 n 区域 t 年 j 部门 i 种燃料的排放强度，反映了燃料质量的升级（如使用无烟煤而不是褐煤）； $N_{i,j,n,t} = \frac{E_{i,j,n,t}}{E_{j,n,t}}$ 是 t 年 n 地区 j 部门中 i 种能源消费的占比，用于表示能源结构； $I_{j,n,t} = \frac{E_{j,n,t}}{G_{j,n,t}}$ 是能源强度，表示 n

地区的 j 部门在 t 年单位GDP能耗： $S_{j,n,t} = \frac{G_{j,n,t}}{G_{n,t}}$ 是 t 年 n 地区 j 部门GDP在整个行业的占比，用于表示产业结构； $Y_{n,t} = \frac{G_{n,t}}{P_{n,t}}$ 是 t 年 n 地区人均GDP，用于衡量经济发展； $P_{n,t}$ 是 t 年 n 地区的常住人口。47个社会经济部门被分为：能源生产业、重工业、轻工业、高新技术产业、服务业和其他等六大类。17种化石燃料被分为煤、石油和天然气等三类。

$$\begin{aligned} \Delta C_{n,t} = & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{T_{i,j,n}^t}{T_{i,j,n}^{t-1}} \right) + \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{E_{i,j,n}^t}{E_{i,j,n}^{t-1}} \right) + \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{I_{j,n}^t}{I_{j,n}^{t-1}} \right) + \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{S_{j,n}^t}{S_{j,n}^{t-1}} \right) + \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{Y_n^t}{Y_n^{t-1}} \right) + \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^6 L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) \ln \left(\frac{P_n^t}{P_n^{t-1}} \right) = \\ & \Delta T_{i,j,n,t} + \Delta N_{i,j,n,t} + \Delta I_{j,n,t} + \Delta S_{j,n,t} + \Delta Y_{n,t} + \Delta P_{n,t} \quad (4) \end{aligned}$$

式中， $L(w_{i,j,n}^t, w_{i,j,n}^{t-1}) = (C_{i,j,n}^t - C_{i,j,n}^{t-1}) / [\ln(C_{i,j,n}^t) - \ln(C_{i,j,n}^{t-1})]$ 是对数平均权重系数， $\Delta C_{n,t}$ 是区域 n 从 $t-1$ 年到 t 年 CO_2 排放量变化。 $\Delta T_{i,j,n,t}$ 、 $\Delta N_{i,j,n,t}$ 、 $\Delta I_{j,n,t}$ 、 $\Delta S_{j,n,t}$ 、 $\Delta Y_{n,t}$ 和 $\Delta P_{n,t}$ 分别代表燃料质量、能源结构、能源强度、产业结构、经济发展和人口增长对 CO_2 排放的贡献。

3.3. 数据来源

2000—2019年珠三角城市的常住人口、GDP、工业增加值、工业能耗、工业产品产量等数据均来自这些城市的统计年鉴。珠三角城市缺失的能源消耗数据由当年省级能源消耗数据或该市相邻年份的能源消耗数据按各行业增加值份额和人口数折算得出。香港各行业的能源消耗和碳排放根据GDP的份额来分配。以2010年为基期，将GDP转换为不变价，消除价格因素的影响。香港和澳门2000—2019年的常住人口和GDP分别来自香港政府统计处和澳门统计暨普查局。香港和澳门 CO_2 排放数据来自国际能源署(IEA)和全球大气排放研究数据库(EDGAR)。基于前期研究[27]，对大湾区城市 CO_2 排放量进行了更新，校验能源消耗数据有助于更准确核算，数据可从CEADs官方网站[†]免费下载。

[†] <http://www.ceads.net/>.

3.4. 不确定性分析

本研究采用IPCC推荐的蒙特卡洛方法来评估能源有关 CO_2 排放的不确定性[58]。假定能源消耗数据和排放因子为正态分布[28]。排放因子的变异系数(CV，标准偏差除以平均值)为3%(煤炭)、1%(石油)和2%(天然气)，能源活动数据CV值取决于行业类别，在5%~30%之间波动[28]。本研究开展了两万次蒙特卡洛模拟[28]。珠三角城市能源相关 CO_2 排放量在97.5%置信区间的不确定性为[-5.07%, 5.15%]，其中，2013年江门碳排放不确定性最高，为[-4.99%, 5.15%]，2009年深圳的不确定性最低，为[-1.30%, 1.29%]。由于工业过程相关 CO_2 排放在大湾区占比(4%~7%)较小，故不确定性分析中不考虑[66]。

4. 结果

4.1. 粤港澳大湾区 CO_2 排放趋势

大湾区2000—2019年 CO_2 排放量以3.8%的年均增长率快速增长，于2017年进入平台期(图1)。2000—2007年，大湾区 CO_2 排放量急剧上升，年均增长率为8.6%。2007—2009年期间，排放量呈现明显波动，全球金融危机后碳排放迅速反弹，2019年达到 3.87×10^8 t，比文献[10]估算结果(2017年 4.19×10^8 t)少8%。大湾区城市之间 CO_2 排放具有较大差异。珠三角城市占大湾区总排放量的89%。工业发展水平高的城市，如广州、香港、深圳、佛山和东莞，是大湾区主要 CO_2 排放源。广州贡献了最大 CO_2 排放量(2019年占大湾区总量的26%)，其次是深圳(12%)、香港(11%)、佛山(11%)和东莞(11%)。澳门以博彩业为主，产生 CO_2 排放量最少。肇庆、江门和惠州是大湾区中心城市产业转移承接地，其 CO_2 排放量呈明显上升趋势。大湾区低碳建设取得明显成效，2017年后 CO_2 排放量明显放缓，已实现与GDP增长脱钩(图2)。

大湾区对煤炭的依赖性仍然较强，2019年煤炭相关 CO_2 排放占56% [图1(b)]。石油相关和工业过程相关的 CO_2 排放占比继续下降，分别从2000年的42%和6%下降到2019年的30%和5%，天然气相关 CO_2 排放占比从2000年的4%上升到2019年的9%。虽然“十三五”开展较大力度的淘汰落后产能和能源结构调整等工作，2019年大湾区能源结构仍然不平衡。大湾区能源低碳转型需要在能源技术、能源布局和清洁能源利用等方面综合发力。

能源生产部门是大湾区主要的 CO_2 排放部门，占2019年 CO_2 排放量的53%，其中电力、热力生产和供应业占大

湾区CO₂排放量的51% [图1 (c)]。服务业CO₂排放量持续上升, 在2010年超过重工业成为第二大CO₂源, 并在2019年占大湾区CO₂排放量的21%。运输业是服务业CO₂最大贡献者 (2019年占大湾区总量的18%)。重工业是CO₂第三大贡献者 (13%)。2019年, 珠三角城市工业增加值占总产值的93%以上, 其中先进制造业 (即计算机、通信和其他电子设备制造业, 电气机械和器材制造业以及汽车制造业) 占总产值的42%, 产生1%的工业CO₂排放量。大湾区产业转型升级效果显著, 已形成以电子、电气、汽车、通用设备制造业等高端制造业为主导的产业发展格局。传统制造业 (即电力、热力生产和供应业, 金属制品业、化学原料和化学制品制造业) 的CO₂排放量占大湾区CO₂排放量的72%。大湾区应加快能源消费领域电气化进程以及石化和金属产品行业转型升级。

如图1 (d) 所示, 2000—2007年间大湾区人均CO₂排放量急剧增长, 在2007年达到峰值5.9 t, 然后缓慢下降到2019年的5.3 t, 相当于全国平均水平的76% [66]。在2000—2019年的19年中, 大湾区CO₂排放强度下降了53%,

2019年降至每万元人民币0.35 t。2018年大湾区碳排放强度[0.25 kg CO₂/2012年不变价购买力平价美元 (PPP)]不到全国平均水平的五分之三[66], 是同年加利福尼亚州 (0.15) 的1.7倍, 是纽约州 (0.12) 的两倍[67], 与全球湾区相比仍有差距, 大湾区产业结构应进一步优化升级。

4.2. 粤港澳大湾区CO₂驱动因素

4.2.1. 关键驱动因素

为了便于讨论大湾区能源相关CO₂驱动因素, 本研究将2001—2019年驱动因素分解结果平均分为六个阶段。经济增长是大湾区CO₂排放量增长的主要驱动因素 (图3, 红柱)。自2001年中国加入世界贸易组织后, 大湾区内地城市成为东亚地区劳动密集型产业转移承接地, 其工业化进程推动了大湾区GDP快速增长, 经济发展的规模效应驱动CO₂排放量大幅上升。大湾区在“前店后厂”的发展模式下, 制造业等产业高度依赖于外商直接投资。2007—2008年的全球金融危机削弱了大湾区经济发展的规模效应, 2007—2010年经济增长对CO₂排放贡献下降了

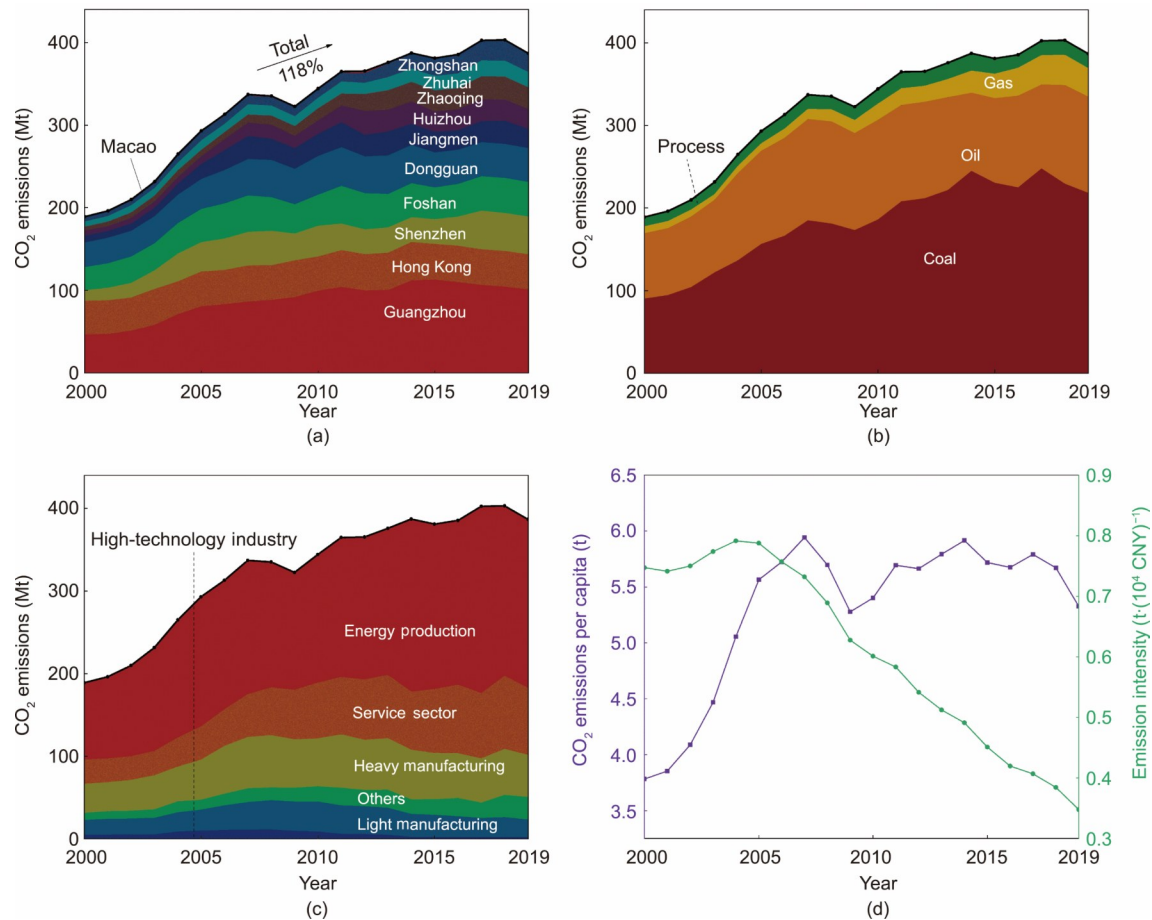


图1. 大湾区CO₂排放趋势。(a) 大湾区城市CO₂排放量; (b) 按能源类型划分CO₂排放量; (c) 按行业划分CO₂排放量; (d) 大湾区人均CO₂排放量和碳排放强度。

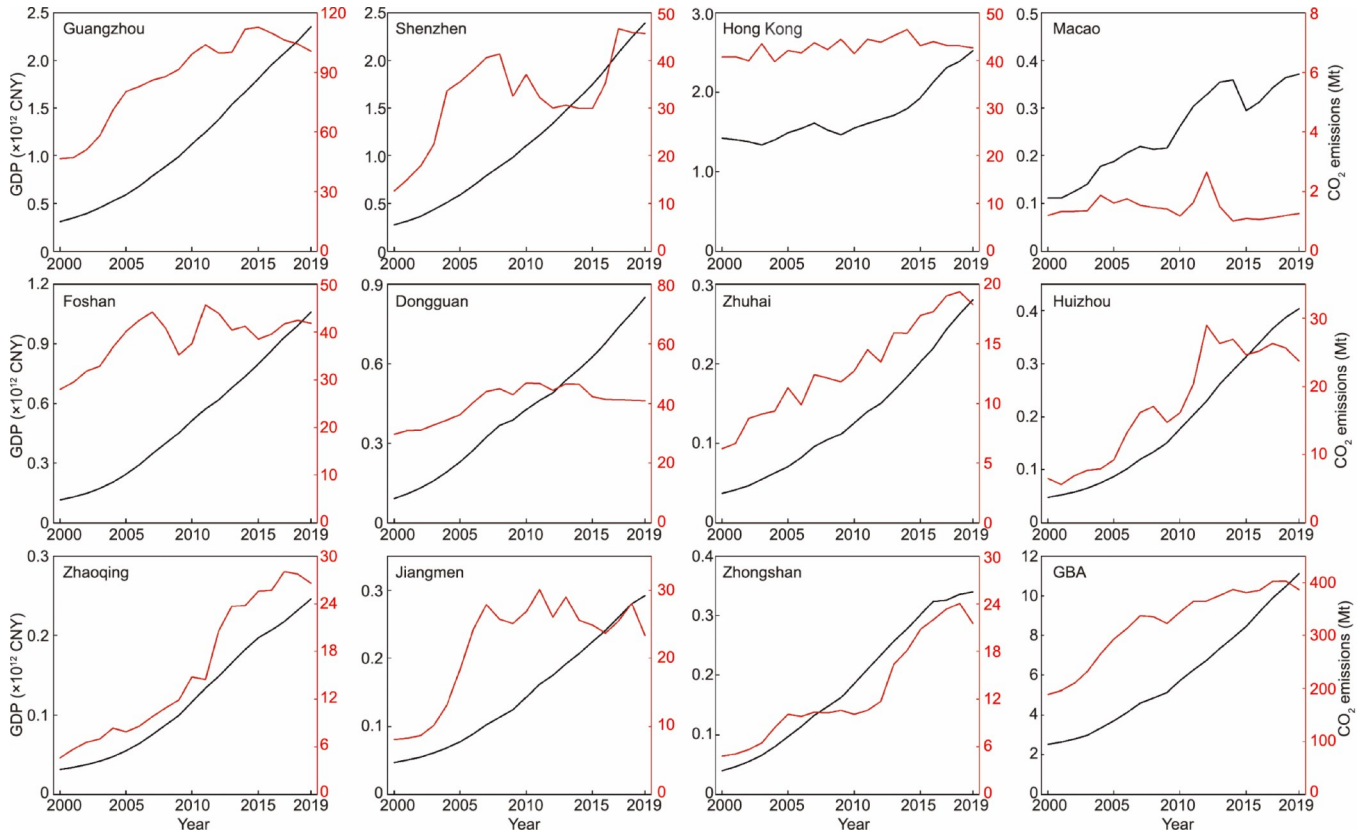


图2. 大湾区城市CO₂排放量和GDP。

10%。2010年后大湾区逐渐从全球金融危机中恢复过来，经济增长对CO₂排放的正贡献略有增加，但小于金融危机前。国家“十二五”规划（2010—2015年）[68]进一步深化了低碳发展目标，包括提高经济增长的技术含量，降低单位GDP的能耗和CO₂量，追求经济高质量发展[69]。2013年后大湾区进入了经济发展新阶段，经济增长对碳排放的驱动力减弱。综合六个时期经济增长对CO₂排放的

贡献，发现经济规模、国家和地区政策、国际金融环境直接影响大湾区CO₂排放。

燃料质量反映了大湾区燃料碳含量升级的变化。结果显示，由于工业锅炉和小火电机组淘汰等一系列政策引导，燃料质量始终抑制大湾区CO₂排放量增加（图3，蓝柱）。自2000年以来，大湾区城市陆续关闭了高耗能、重污染的工业锅炉。《珠江三角洲环境保护规划纲要（2004—

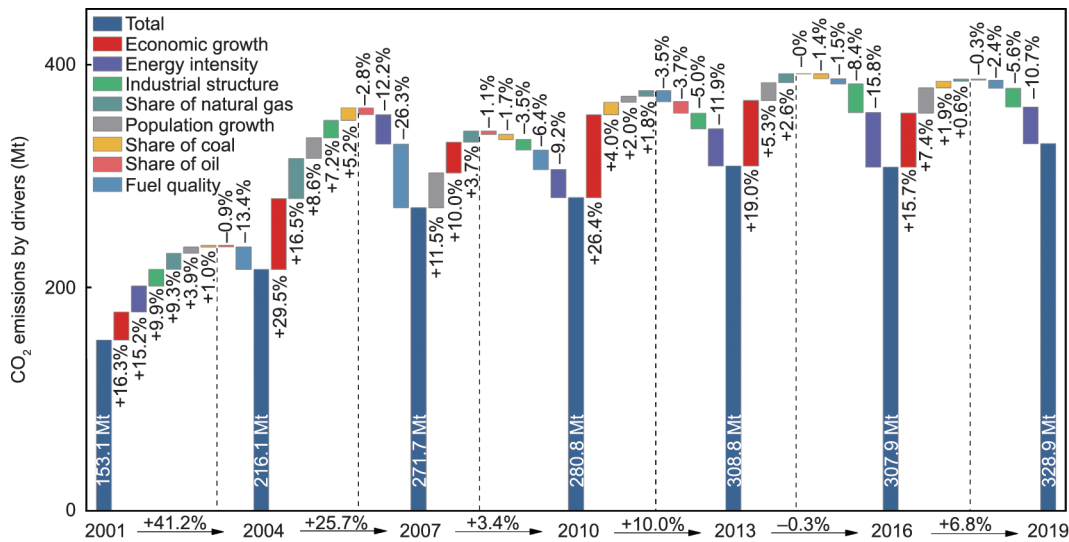


图3. 2001—2004年、2004—2007年、2007—2010年、2010—2013年、2013—2016年和2016—2019年社会经济因素对大湾区能源相关CO₂变化的贡献。

2020年)》提出,2005年年底前关停所有单机容量5万千瓦以下的小火电机组,2007年完成12.5万千瓦以上燃煤和燃油电厂的脱硫改造[70]。这些措施使燃料质量在2004—2007年期间遏制26.3%的大湾区CO₂排放增长。大型发电机组,如佛山三水恒益电厂(120万千瓦)于2011年投入使用。广东省用大容量、高参数、低消耗、低排放的机组取代了小型、低效、高污染的火力发电机组,大大改善了燃料质量。通过持续淘汰小火电机组和工业锅炉,大湾区燃料质量已达到较高水平,其碳减排潜力正在减小。

能源强度大大阻碍了大湾区CO₂增长(图3,紫柱)。随着清洁能源的使用、新型发电技术的普及以及“上大压小”和“油改气”政策的实施[71],2001—2019年广州和深圳等城市能源生产部门的能源强度大大降低。自2007年以来,广州和深圳高科技产业和服务业的能源强度大大抑制大湾区CO₂排放,这两个部门能源强度从2007年到2019年分别减少了8.9 Mt和48.1 Mt CO₂排放量。加快大湾区产业转型升级,发展高新技术产业和服务业,可显著遏制CO₂增长。

大湾区能源结构逐步优化,其对CO₂排放的贡献正在减少。由于“油改气”等政策实施,石油在工业一次能源消费中的比重持续下降,天然气消费量持续增加。2006年中国第一个液化天然气(LNG)试点项目(广东大鹏LNG接收站和珠海横琴岛海上天然气接收站项目)建成后,形成了沿海进口LNG、陆上跨省管道天然气、海上天然气的多气源供气格局,建成了覆盖珠三角主要城市的天然气管网。2010年西气东输二线建成并接入广东后,2013年天然气在广东一次能源消费的比重达到7.8%,比全国平均水平高两个百分点。值得注意的是,在西气东输二线建成之前,香港和深圳已率先调整能源结构。天然气消费比重的增加,分别推动了大湾区在第二和第三阶段16.5%和3.7%的CO₂排放增加。进一步加强香港和深圳在大湾区能源结构转型的主导作用,加快推广新能源技术,减少广州和佛山对煤炭消费的依赖,将有助于加速大湾区CO₂排放量下降。

产业结构显著抑制了大湾区CO₂排放(图3,绿柱)。2001—2007年间“上大压小”和“油改气”的政策逐步实施。电力、热力生产和供应业以及石油和天然气开采业的增加值份额略有增加,导致大湾区产业结构推动9.9%(2001—2004年)和7.2%(2004—2007年)的CO₂排放量增长(附录A中的图S1)。2009年大湾区城市关闭了小容量火力发电设备,能源生产部门的增加值份额大幅下降,遏制了该行业对CO₂排放的促进作用。2007—2010年期间,广东省提出“双转移”战略,大湾区劳动密集型产业逐步转移到粤北山区和粤东、粤西地区。各城市合作建立

工业园区,如肇庆大旺产业转移工业园(金属材料和电子产业)和广州(清远)产业转移工业园,以支持生物医药产业、先进机械和装备制造业的发展。2013年以后,能源生产部门的贡献继续下降,服务业成为大湾区CO₂增长的主要部门。深圳不断深化“产学研”发展模式,加快了大湾区服务业和高新技术产业快速发展。大湾区应加快推动传统产业向现代服务业(物流、会展、金融、旅游、信息等)和技术、知识密集型产业(电子信息产业和先进装备制造业)转型升级,充分发挥产业结构对低碳发展的促进作用。由于人口增长继续推动大湾区CO₂排放增加(图3,灰柱),增加知识密集型产业和现代服务业就业可以减少人口增长对CO₂排放的贡献。

4.2.2. 关键城市

为了进一步讨论2016—2019年间各城市对大湾区CO₂排放的贡献,本研究将六项CO₂驱动因素按城市进行了分解(附录A中的表S4)。图4显示CO₂增长并不完全由GDP增长决定。2016—2019年期间,深圳经济增长对大湾区CO₂的贡献排名第七(贡献最大的是广州),其GDP增长率(30%)却位列大湾区第一。产业结构是2016—2019年间遏制大湾区CO₂排放的关键因素之一。东莞、广州和佛山的产业结构对CO₂排放增长的抑制作用最强。东莞大力推进产业结构调整,淘汰了煤电、造纸、钢铁、平板玻璃、铝冶炼等落后产能。在“十三五”期间,东莞电子信息制造业的收入超过了一万亿元人民币,占全市工业总产值的一半,高端电子信息、太阳能光伏、智能装备、新能源汽车等新兴产业迅速崛起。2016—2019年第三产业对广州GDP增长的平均贡献率为74%。广州先进制造业起到了主导作用。广州工业发展形成了产值超过千亿元的产业集群(即汽车、电子、石油化工、电力热力)以及增加值超过千亿元的服务集群(批发和零售、房地产、金融、信息服务、交通运输)。佛山先进制造业增加值占规模以上工业的比重从35.6%提高到50.2%。2016—2019年,广州、佛山和东莞的产业结构调整使大湾区CO₂排放量减少了22.4 Mt,中山、江门和惠州的产业结构使湾区CO₂排放量增加了9.2 Mt,应加快这三个城市的产业结构调整 and 升级。佛山部分陶瓷业转移至肇庆,佛山非金属矿物制品行业能源消耗减少,佛山能源强度有效遏制了大湾区CO₂排放。

5. 粤港澳大湾区CO₂减排

大湾区城市发展不平衡和CO₂排放差异大大增加了低碳路径制定的复杂性。为了探究因地制宜、精准施策的减

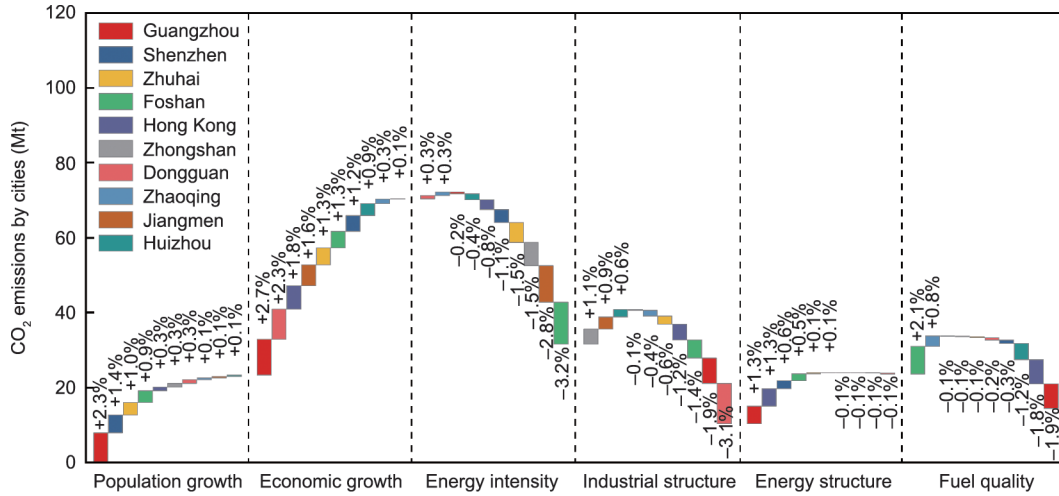


图4. 2016—2019年间各城市对大湾区CO₂排放的贡献。

排策略，本研究分析了2019年大湾区各城市各行业对CO₂的贡献率（图5）及其产业增加值占比（附录A中的表S5）。结果显示，大湾区逐渐形成了广港澳深、佛山东莞、珠海惠州中山、肇庆江门的梯度发展模式。广州、深圳和香港贡献了大湾区49%的CO₂排放，其服务业占大湾区服务业CO₂排放的75%，其中交通运输业占64%。CO₂的变化对交通运输部门很敏感，可通过减少交通运输对石油消费的依赖来降低其能源强度。广州和香港的能源生产部门贡献了大湾区该部门44%的CO₂排放。

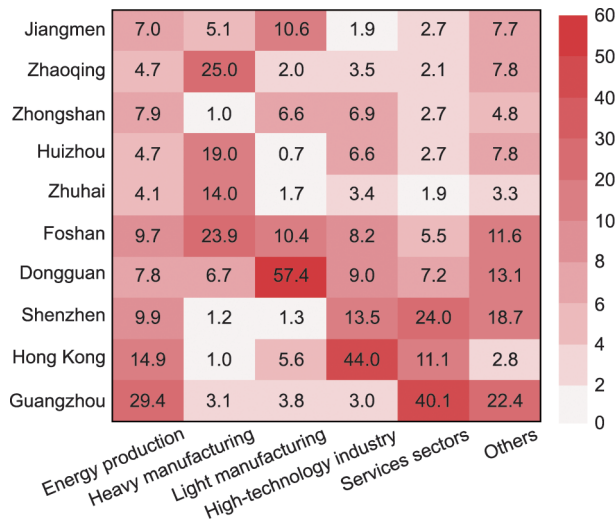


图5. 2019年大湾区城市各部门对CO₂排放的贡献（%）。

汽车制造业、电子设备制造业和石油化工制造业是广州的三大支柱产业，生物医药、航空航天制造业、信息技术和金融业正在快速发展。实现传统支柱产业的节能减排，带动新一代产业的发展，辐射周边城市的相关产业，是广州未来产业发展的目标。深圳传统制造业已升级为先进制造业。以信息技术产业为核心产业，深圳的装备制造、医疗器械、医药、新材料等先进制造业快速发展，企业合作和技术支持是深圳带动大湾区其他城市发展的主要方式。

造、医疗器械、医药、新材料等先进制造业快速发展，企业合作和技术支持是深圳带动大湾区其他城市发展的主要方式。

佛山和东莞是大湾区未来制造业发展和经济增长的重要动力，也是大湾区重工业和轻工业CO₂排放的主要贡献者，分别占24%和57%。佛山的非金属矿物制品业占大湾区重工业CO₂排放的18%，东莞的造纸和纸制品业占大湾区轻工业CO₂排放的52%。在佛山建设“国际制造业创新中心”和东莞建设“国际制造中心”的过程中，应有效控制非金属矿物制品业及造纸和纸制品业CO₂排放。佛山的高端电子信息、新能源汽车产业（承接广州），东莞的信息技术（承接深圳）以及电气机械和器材制造已经成为新一代支柱产业。东莞和佛山具有完备的制造业体系，通过产业结构优化和调整，其工业CO₂排放量有望进一步下降。

相比之下，珠海、惠州和中山的工业发展规模较小，这三个城市CO₂排放量仅占大湾区排放总量的16%。珠海以电力能源业、生物医药业、石化工业、家电电气业、精密机械制造业和电子信息业为支柱产业。珠海的电力生产、石化加工等传统行业的能源消费可替换为清洁能源（如LNG和海上风电）促进城市低碳发展。作为广东省两大石化加工基地之一，惠州在2019年石油加工业增加值占珠三角地区的73%。建设绿色工业园区，促进循环经济，发展脱碳技术[即碳捕集、利用和封存（CCUS）]，是惠州石油化工行业二氧化碳减排的重点。作为深圳都市圈的一员，惠州有足够的土地承载能力和条件承接深圳和东莞的先进制造业。中山支柱产业以传统制造业为主，如纺织服装、家具制造和金属制品，正在向高科技的先进制造业（即医药、电子、计算机和仪器仪表制造）转型，但

先进制造业规模仍然很小。

肇庆和江门的经济发展在大湾区中较落后，其第一产业增加值比例在大湾区城市中最高。肇庆是广东省商品粮基地，为大湾区其他城市提供农产品，第一产业增加值达到17%。肇庆工业以非金属矿物制品业为主，面临着巨大减排压力，传统工业CO₂排放量占其排放的80%以上。肇庆应加强与广州、佛山的合作，吸引广州、佛山的新能源汽车、先进装备制造、生物医药等产业，打造优势产业。江门的交通装备制造业已初具规模，轨道交通和重型卡车发展良好，未来可替代传统产业。

鉴于经济发展、产业结构和能源资源配置的空间异质性和差异性，大湾区城市差异化减排策略可以概括为以下几方面。广州、香港和深圳近年来已经实现了经济增长与CO₂排放的绝对脱钩（图2）。这些城市发展现代服务业，带动了高科技、知识密集型产业的转型和升级。未来应大力发展绿色交通，提高交通电气化程度，加快建设绿色物联网，控制服务业CO₂排放增长。应持续优化广州和香港的能源结构，推动能源低碳转型。佛山和东莞需要加快传统制造业向先进制造业的转型升级，构建绿色工业体系。通过发展新能源，促进工业清洁能源替代，发展循环经济，实现工业生态化，有助于进一步减少佛山和东莞CO₂排放。珠海、惠州和中山应优先发展绿色技术（海上风力发电和CCUS）和高科技先进制造业（电子信息和生物医药）。肇庆和江门应加快传统产业脱碳，淘汰落后工艺，承接广州、深圳和佛山的新能源汽车和先进设备制造业。作为国家和省级低碳试点城市，深圳、广州、珠海、中山应以零碳社区推动绿色消费和低碳生活方式，倒逼产业低碳转型。大湾区城市差异化低碳发展策略可为制定大湾区碳达峰和碳中和的路线图以及探索可复制、可推广的碳中和路径提供参考。

6. 结论和政策建议

作为中国高度开放、经济活跃、创新驱动的地区，粤港澳大湾区旨在构建世界级城市群，具有领先于国家实现碳达峰和碳中和目标的优势。为了探究大湾区低碳发展成功经验及可推广碳中和路径，本研究编制了大湾区CO₂排放清单（2000—2019年），分析了关键因素、城市和部门对CO₂排放的贡献。通过分析大湾区CO₂排放趋势，讨论各种驱动因素变化，本研究提出大湾区城市和部门差异化减排策略。

基于结果分析，得到以下发现：①大湾区低碳发展取得了显著成效。大湾区各城市CO₂排放逐渐放缓，与GDP

增长脱钩。大湾区走在全国低碳发展前列，CO₂排放强度低于2019年全国平均水平的五分之三，但约为加利福尼亚州和纽约州的两倍，与国际湾区仍有差距。②经济增长是推动CO₂排放的主要因素，贡献逐渐减弱。能源强度显著抑制了大湾区CO₂排放增加。低碳发展正通过产业结构调整 and 升级逐步实现。深圳和香港的产业升级以及深圳、广州和佛山的技术进步抑制了大湾区CO₂排放增长。③本研究提出了广州-香港-深圳-澳门、佛山-东莞、珠海-惠州-中山、肇庆-江门的梯级减排策略。广州、深圳和香港以服务业和高科技产业为主，其减排主要在交通领域。大湾区能源生产部门CO₂排放主要来自广州和香港，应持续优化能源结构，推动能源低碳转型。佛山非金属矿物制品业及东莞造纸和纸制品业对大湾区CO₂排放贡献很大，传统制造业向先进制造业和绿色产业转型是其低碳发展的关键。珠海、惠州和中山应扩大产业发展规模，积极承接深圳和广州的电子信息、生物医药等高科技产业。肇庆和江门是大湾区其他城市产业转移的承接地，重工业和能源生产部门分别是其CO₂排放的最大贡献者，应优先淘汰落后工艺，加快传统产业脱碳化进程。服务型城市应以零碳社区等方式推动绿色消费和低碳生活方式，倒逼产业低碳化转型。

为促进大湾区实现碳达峰和碳中和，我们提出了以下建议。第一，大力发展新能源技术，优化能源结构，加快能源转型。目前大湾区电力供应缺口较大，可再生能源禀赋较差，新建核电规模有限。应在非电力供应技术格局的基础上，制定大湾区中长期能源转型政策和技术路线图，以光伏和储能为主要电力供应来源，氢能和碳捕集并存。对电网、储能、氢能等技术的投资将促进新能源技术实现大规模应用。

第二，碳标签和碳排放交易可加快产业转型升级。园区内传统的高耗能产业在规模以上工业增加值中占比较高，应加快传统产业低碳转型升级。加快发展高新技术产业和生产性服务业，促进产业结构调整 and 升级，推动产业链再造和价值链提升。传统高耗能行业产品层面的节能减排标准可以加强能效标杆、低碳产品、碳标签认证，可利用现有的市场碳减排机制，如广东、深圳碳交易市场，倒逼大湾区高耗能行业企业低碳转型发展。

第三，加强区域协同和绿色发展。充分发挥香港、广州、深圳三个中心城市在现代服务业和先进制造业中的引领和溢出作用。利用这三个城市的科研开发、产业创新和学术研究的优势，加强能效等方面的基础科学研究，强化技术支撑，释放减碳潜力。中山、肇庆、江门应积极承接高新技术和其他高附加值产业。优先考虑大湾区各城市错位发展、产业集群互补的局面。

第四, 针对大湾区重点城市的关键因素和产业制定有针对性的减排方案。广州、深圳、香港正在向技术和知识密集型的高新技术产业转型升级, 应进一步减少对石油消费的依赖, 发展交通、零售、住宿、餐饮等服务行业。东莞和佛山应进一步加快传统产业向技术密集型高科技产业转型升级, 珠海、惠州和中山应扩大产业发展规模, 积极承接深圳和广州的电子信息、生物医药等高科技产业。肇庆、江门应加快推进高耗能、高污染企业转型, 大力推动产业链、价值链由低端环节向高端产品、高端要素、高端服务的深化和延伸。充分发挥产业结构作用, 遏制大湾区 CO₂ 排放增长, 推动大湾区发展成为生态安全、环境优美、充满活力的世界级城市群。

第五, 完善现有政策和纲要。CO₂ 排放的统计核算工作需要进一步完善, 特别是在落实各部门的统计核算责任和数据质量保障方面 (真实性、准确性和可追溯性)。政策制定应将污染物和温室气体排放的协同控制作为指导原则。尽快对《环境保护法》《环境影响评价法》和其他相关法律进行修订, 将碳排放纳入环境影响评价。

能源消耗数据的缺乏导致部分城市个别年份排放清单缺失, 从而使结果产生不确定性。例如, 由于缺乏详细的能源数据, 我们无法编制香港和澳门排放清单, 使得大湾区排放清单无法保持一致性。由于缺乏2016年以前东莞能源消耗数据, 无法将其纳入大湾区碳排放整体分析中。由于缺乏从广东电网进口电力和区域电网出口电力的时间序列 CO₂ 因子, 因此城市边界以外的间接 CO₂ 排放被排除在核算边界外。结果不确定性将影响减排责任的准确量化。未来研究应着重于调研以提高数据质量, 范围2排放 (外购电力和热能消耗的排放) 将被纳入框架中。采用多准则决策分析识别具有成本效益的减排途径, 评估大湾区城市群减排的协同效益, 将有助于探索区域合作对大湾区和“一带一路”沿线城市减排的作用和潜力。

致谢

本研究得到了中国工程院咨询研究项目(2020-XY-19)、广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515011230)和教育部人文社会科学研究项目(16YJCZH162)的支持。感谢黄玄昊和陈伟健对数据的贡献。

Compliance with ethics guidelines

Ya Zhou, Kejun Li, Sheng Liang, Xuelan Zeng, Yanpeng

Cai, Jing Meng, Yuli Shan, Dabo Guan, and Zhifeng Yang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.03.017>.

References

- [1] Guan D, Liu Z, Geng Y, Lindner S, Hubacek K. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nat Clim Chang* 2012;2(9):672–5.
- [2] Liu F, Liu C. Regional disparity, spatial spillover effects of urbanisation and carbon emissions in China. *J Clean Prod* 2019;241:118226.
- [3] Li B, Haneklaus N. The role of renewable energy, fossil fuel consumption, urbanization and economic growth on CO₂ emissions in China. *Energy Rep* 2021;7:783–91.
- [4] Liu J, Wang Q, Song Z, Fang F. Bottlenecks and countermeasures of high-penetration renewable energy development in China. *Engineering* 2020;7(11):1611–22.
- [5] RENEWABLES NOW 2021. Renewables 2021 global status report. Report. Paris: RENEWABLES NOW; 2021.
- [6] United Nations General Assembly (UNGA). Address to the general debate of the 75th session of the United Nations general assembly. New York: Seventy-fifth United Nations General Assembly; 2020.
- [7] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (MEE). Guidance on integrating and strengthening efforts related to climate change and ecological protection. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China; 2021. Chinese.
- [8] The State Council of The People's Republic of China (SC). Outline of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area development plan. Beijing: The State Council of The People's Republic of China; 2019. Chinese.
- [9] National Bureau of Statistics of China. Guangdong statistical yearbook 2021. Beijing: China Statistical Press; 2021. Chinese.
- [10] Project team of study on medium to long term scenario of energy transition in Guangdong. Study on medium to long term scenario of energy transition in Guangdong, Hong Kong and Macau Bay Area. Beijing: Science Press; 2020. Chinese.
- [11] Wu M, Wu J, Zang C. A comprehensive evaluation of the eco-carrying capacity and green economy in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *J Clean Prod* 2020;281:124945.
- [12] Huang R, Lv G, Chen M, Zhu Z. CO₂ emissions embodied in trade: evidence for Hong Kong SAR. *J Clean Prod* 2019;239:117918.
- [13] Dong D, Duan H, Mao R, Song Q, Zuo J, Zhu J, et al. Towards a low carbon transition of urban public transport in megacities: a case study of Shenzhen, China. *Resour Conserv Recycling* 2018;134:149–55.
- [14] Xu Q, Dong Y, Yang R. Urbanization impact on carbon emissions in the Pearl River Delta region: kuznets curve relationships. *J Clean Prod* 2018;180:514–23.
- [15] Lin B, Li Z. Spatial analysis of mainland cities' carbon emissions of and around Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Sustain Cities Soc* 2020;61:102299.
- [16] Dou X, Deng Z, Sun T, Ke P, Zhu B, Shan Y, et al. Global and local carbon footprints of city of Hong Kong and Macao from 2000 to 2015. *Resour Conserv Recycling* 2021;164:105167.
- [17] Qian Y, Zheng H, Meng J, Shan Y, Zhou Y, Guan D. Large inter-city inequality in consumption-based CO₂ emissions for China's Pearl River Basin cities. *Resour Conserv Recycling* 2022;176:105923.
- [18] Liu X, Ou J, Chen Y, Wang S, Li X, Jiao L, et al. Scenario simulation of urban energy-related CO₂ emissions by coupling the socioeconomic factors and spatial structures. *Appl Energy* 2019;238:1163–78.
- [19] Xie Z, Gao X, Yuan W, Fang J, Jiang Z. Decomposition and prediction of direct residential carbon emission indicators in Guangdong Province of China. *Ecol Indic* 2020;115:106344.

- [20] Xu W, Xie Y, Xia D, Ji L, Huang G. A multi-sectoral decomposition and decoupling analysis of carbon emissions in Guangdong province, China. *J Environ Manage* 2021;298:113485.
- [21] Zhang Y, Fu Z, Xie Y, Li Z, Liu Y, Hu Q, et al. Multi-objective programming for energy system based on the decomposition of carbon emission driving forces: a case study of Guangdong, China. *J Clean Prod* 2021;309:127410.
- [22] Kennedy C, Ibrahim N, Hoornweg D. Low-carbon infrastructure strategies for cities. *Nat Clim Chang* 2014;4(5):343–6.
- [23] Shan Y, Fang S, Cai B, Zhou Y, Li D, Feng K, et al. Chinese cities exhibit varying degrees of decoupling of economic growth and CO₂ emissions between 2005 and 2015. *One Earth* 2021;4(1):124–34.
- [24] Wang S, Liu X. China's city-level energy-related CO₂ emissions: spatiotemporal patterns and driving forces. *Appl Energy* 2017;200:204–14.
- [25] Du M, Zhang X, Xia L, Cao L, Zhang Z, Zhang L, et al. The China Carbon Watch (CCW) system: a rapid accounting of household carbon emissions in China at the provincial level. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;155:111825.
- [26] Shan Y, Guan D, Liu J, Mi Z, Liu Z, Liu J, et al. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China. *J Clean Prod* 2017;161:1215–25.
- [27] Zhou Y, Shan Y, Liu G, Guan D. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings. *Appl Energy* 2018;228:1683–92.
- [28] Liu Z, Guan D, Wei W, Davis SJ, Ciais P, Bai J, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature* 2015;524:335–8.
- [29] Dong F, Yu B, Hadachin T, Dai Y, Wang Y, Zhang S, et al. Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resour Conserv Recycling* 2018;129:187–201.
- [30] Wang M, Feng C. The impacts of technological gap and scale economy on the low-carbon development of China's industries: an extended decomposition analysis. *Technol Forecast Soc Change* 2020;157:120050.
- [31] Shahbaz M, Loganathan N, Muzaffar AT, Ahmed K, Ali Jabran M. How urbanization affects CO₂ emissions in Malaysia? The application of STIRPAT model. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;57:83–93.
- [32] Balsalobre-Lorente D, Shahbaz M, Roubaud D, Farhani S. How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO₂ emissions? *Energy Policy* 2018;113:356–67.
- [33] Zhao L, Zhao T, Yuan R. Scenario simulations for the peak of provincial household CO₂ emissions in China based on the STIRPAT model. *Sci Total Environ* 2021;809:151098.
- [34] Meng F, Su B, Thomson E, Zhou D, Zhou P. Measuring China's regional energy and carbon emission efficiency with DEA models: a survey. *Appl Energy* 2016;183:1–21.
- [35] Li Z, Qi L. Reflections on econometric modeling methodology. *Soc Sci China* 2010;182(2):69–83. Chinese.
- [36] Ang BW, Zhang FQ. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy* 2000;25(12):1149–76.
- [37] Wang Q, Hang Y, Su B, Zhou P. Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis. *Energy Econ* 2018;70:12–25.
- [38] Pasurka Jr CA. Decomposing electric power plant emissions within a joint production framework. *Energy Econ* 2006;28(1):26–43.
- [39] Wang C. Decomposing energy productivity change: a distance function approach. *Energy* 2007;32(8):1326–33.
- [40] Zhou P, Ang BW. Decomposition of aggregate CO₂ emissions: a production-theoretical approach. *Energy Econ* 2008;30(3):1054–67.
- [41] Li A, Zhang A, Zhou Y, Yao X. Decomposition analysis of factors affecting carbon dioxide emissions across provinces in China. *J Clean Prod* 2017;141:1428–44.
- [42] Zhang W, Tang X, Yang G, Zha D. Decomposition of CO₂ emission intensity in Chinese MIs through a development mode extended LMDI method combined with a production-theoretical approach. *Sci Total Environ* 2020;702:134787.
- [43] Zha D, Yang G, Wang Q. Investigating the driving factors of regional CO₂ emissions in China using the IDA-PDA-MMI method. *Energy Econ* 2019;84:104521.
- [44] Du K, Lin B. Understanding the rapid growth of China's energy consumption: a comprehensive decomposition framework. *Energy* 2015;90:570–7.
- [45] Leontief WW. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. *Rev Econ Stat* 1936;18(3):105–25.
- [46] Guan D, Hubacek K, Weber CL, Peters GP, Reiner DM. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030. *Glob Environ Change* 2008;18(4):626–34.
- [47] Mi Z, Zheng J, Meng J, Shan Y, Zheng H, Ou J, et al. China's energy consumption in the New Normal. *Earths Futur* 2018;6(7):1007–16.
- [48] Su B, Ang BW. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments. *Energy Econ* 2012; 34(1): 177–88.
- [49] Hoekstra R, van den Bergh J. Comparing structural decomposition analysis and index. *Energy Econ* 2003;25(1):39–64.
- [50] Feng K, Davis SJ, Sun L, Hubacek K. Drivers of the US CO₂ emissions 1997–2013. *Nat Commun* 2015;6(1):7714.
- [51] Choi KH, Ang BW. Attribution of changes in Divisia real energy intensity index—an extension to index decomposition analysis. *Energy Econ* 2012;34(1):171–6.
- [52] Peters GP, Andrew RM, Canadell JG, Fuss S, Jackson RB, Korsbakken JI, et al. Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nat Clim Chang* 2017;7:118–22.
- [53] Ang BW, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy* 2007;35(1):238–46.
- [54] Ang BW. LMDI decomposition approach: a guide for implementation. *Energy Policy* 2015;86:233–8.
- [55] Jiang J, Ye B, Xie D, Tang J. Provincial-level carbon emission drivers and emission reduction strategies in China: combining multi-layer LMDI decomposition with hierarchical clustering. *J Clean Prod* 2017;169:178–90.
- [56] Ou JM, Meng J, Shan Y, Zheng H, Mi Z, Guan D. Initial Declines in China's provincial energy consumption and their drivers. *Joule* 2019;3(5):1163–8.
- [57] Guan D, Meng J, Reiner DM, Zhang N, Shan Y, Mi Z, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems. *Nat Geosci* 2018;11(8):551–5.
- [58] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Report. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies; 2006.
- [59] Peters G, Weber C, Liu J. Construction of Chinese energy and emissions inventory. Report. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology (NTNU); 2006. Report No.:4/2006
- [60] Li L, Shan Y, Lei Y, Wu S, Yu X, Lin X, et al. Decoupling of economic growth and emissions in China's cities: a case study of the Central Plains urban agglomeration. *Appl Energy* 2019;244:36–45.
- [61] Li K, Zhou Y, Xiao H, Li Z, Shan Y. Decoupling of economic growth from CO₂ emissions in Yangtze River Economic Belt cities. *Sci Total Environ* 2021;775:145927.
- [62] Xiao H, Duan Z, Zhou Y, Zhang N, Shan Y, Lin X, et al. CO₂ emission patterns in shrinking and growing cities: a case study of Northeast China and the Yangtze River Delta. *Appl Energy* 2019;251:113384.
- [63] Mousavi B, Lopez NSA, Biona JBM, Chiu ASF, Blesl M. Driving forces of Iran's CO₂ emissions from energy consumption: an LMDI decomposition approach. *Appl Energy* 2017;206:804–14.
- [64] Le Quéré C, Korsbakken JI, Wilson C, Tosun J, Andrew R, Andres RJ, et al. Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies. *Nat Clim Chang* 2019;9(3):213–7.
- [65] Long Y, Yoshida Y, Liu Q, Guan D, Zheng H, Li Y, et al. Japanese carbon emissions patterns shifted following the 2008 financial crisis and the 2011 Tohoku earthquake. *Communications Earth & Environment* 2021;2(1):125.
- [66] Guan Y, Shan Y, Huang Q, Chen H, Wang D, Hubacek K. Assessment to China's recent emission pattern shifts. *Earths Futur* 2021;9(11): e2021EF002241.
- [67] US Energy Information Administration (EIA). State energy-related CO₂ emission data tables. Washington, DC: US Energy Information Administration; 2021.
- [68] The State Council of The People's Republic of China. China: 12th five-year plan (2011–2015) for national economic and social development. Beijing: The State Council of The People's Republic of China; 2011.
- [69] National Development and Reform Commission (NDRC). The 12th five-year plan for energy development. Beijing: National Development and Reform Commission; 2011. Chinese.
- [70] People's Government of Guangdong Province (PGGD). Notice on issuing the "Outline of the environmental protection plan for the Pearl River Delta (2004–2020)". Guangzhou: People's Government of Guangdong Province; 2005. Chinese.
- [71] The State Council of The People's Republic of China. Several opinions on speeding up the shutdown of small thermal power units. Beijing: The State Council of The People's Republic of China; 2007. Chinese. <http://www.ceads.net/>.