

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405016



# 粤港澳大湾区大气碳污协同 减排水平评估

和思楠<sup>1,2</sup>, 石龙宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 采用碳污减排协同水平模型,从粤港澳大湾区全域-城市双维度开展粤港澳大湾区碳污相对减排量测度及协同减排水平测度。结果表明:大湾区城市平均 CO<sub>2</sub> 减排量总体呈现增长趋势,但降碳动力逐年下滑,而减排力度大;自 2014 年,粤港澳大湾区 81% 的城市群碳污协同减排指数渐趋于 1.0,不同地区之间的碳污协同减排水平整体呈现差异缩小趋势,发达地区的协同减排水平较高。

**关键词:** 大气环境; 可挥发性有机物; 协同水平模型; 粤港澳大湾区

**中图分类号:** X 8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)04-0494-07

## Evaluation of Carbon and Pollution Synergy Reduction Levels in Atmosphere in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

HE Sinan<sup>1,2</sup>, SHI Longyu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment,

Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The carbon and pollution reduction synergy level model is adopted to measure the relative carbon and pollution reduction and synergy reduction levels of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from regional-city dual-dimensional perspective. The results show that the urban average CO<sub>2</sub> reduction in the Greater Bay Area presents an overall growth trend, but the motivation for carbon reduction has been declining annually, and the reduction effort is strong. Since 2014, carbon and pollution synergy reduction indexes have gradually approached to 1.0 in 81% of the city clusters in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, meanwhile, carbon and pollution synergy reduction levels in different regions show a trend of decreasing difference, and the levels are higher in developed areas.

**Keywords:** atmospheric environment; volatile organic compounds; synergy level model; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

协同推进“降碳、减污”是促进人与自然和谐共生的重要内容<sup>[1]</sup>。大气污染物与二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放具有同源性和同效性,主要来自于化石燃料的燃烧和利用过程,这是开展减污降碳协同增效工作的基

收稿日期: 2024-05-29

通信作者: 石龙宇(1981-),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事减污降碳的研究。E-mail: lyshi@iue.ac.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1301201)

础。我国挥发性有机物(VOCs)减排与控制研究工作起步较晚,工作进展落后于二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)等其他大气污染物的减排与防控。随着一系列政策法规的颁布实施,大气中的 VOCs 被列入大气环境质量的约束性指标,其污染防治成为我国大气污染控制的关键与重点<sup>[2]</sup>。由于跨区域性特征,粤港澳大湾区(简称大湾区)面临着持续降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度和控制臭氧(O<sub>3</sub>)污染、实现碳达峰的要求,测度碳污协同减排水平是环境治理的前提<sup>[3]</sup>。

在全球气候变化的背景下,近几年的研究将视角转向减污降碳协同作用领域,已有研究涵盖了协同理论、减排水平的测度等<sup>[4]</sup>。协同作用起源于物理科学,是指两种不同系统同时向更好状态演化的现象<sup>[5]</sup>。文中的协同作用是指不同地区或区域的大气污染控制和碳排放的缓解在一定时期内向较好的状态发展。当前,国内外学者日益重视大气污染与碳减排的协同治理,对此进行了相关研究<sup>[6-9]</sup>。基于此,本文从粤港澳大湾区全域-城市双维度分析大气污染物与二氧化碳协同减排水平。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

2019 年 2 月印发的《粤港澳大湾区发展规划纲要》指出,港澳大湾区范围是“九市二区”,是由广东省珠江三角洲 9 个城市(广州市、深圳市、佛山市、东莞市、珠海市、惠州市、中山市、江门市、肇庆市)及香港特别行政区和澳门特别行政区形成的城市群。粤港澳大湾区位于珠江流域中下游,陆域面积约 5.6 万 km<sup>2</sup>,2020 年末,总人口约 8 617 万人,GDP 超过 11 万亿元,是世界第 4 大湾区<sup>[10]</sup>。

### 1.2 数据来源

1) 多尺度排放清单模型。研究数据来源于多尺度排放清单模型(<http://meicmodel.org.cn>)<sup>[11]</sup>。采用 ArcGIS 软件的分区统计功能,批量提取各地级市的排放量平均值。在此之前,为减小栅格分辨率带来的分区统计误差,将栅格像元大小参数 X,Y 分别缩小 10 倍,并进行重采样操作。

数据处理过程,如图 1 所示。

2) 经济数据。经济数据来源于各城市统计年鉴(2000—2020 年)、中华人民共和国国家统计局(<https://data.stats.gov.cn>)、香港特别行政区政府统计处(<http://www.censtatd.gov-hk-s.w.hqu.edu.cn>)及澳门特别行政区政府统计暨普查局(<http://www-dsec-gov-mo-s.w.hqu.edu.cn>)。

### 1.3 研究方法

采用碳污减排协同水平模型计算大气污染物和二氧化碳的协同减排量相对变化的程度。根据碳污相对于研究初始期的减排量,测算两者减排量的协同度变化指数,并分析大湾区 9+2 城市群的大气污染物和二氧化碳协同减排趋势。

1.3.1 相对减污水平的测算 相较于 2000 年,2000—2020 年大湾区 9+2 城市群的 VOCs 相对减排量为

$$VRR_{i,t} = \left( \frac{VR_{i,2000}}{GDP_{i,2000}} - \frac{VR_{i,t}}{GDP_{i,t}} \right) \times GDP_{i,t} \quad (1)$$

式(1)中:*i* 为城市;*t* 为年份;VRR 为 VOCs 相对减排量;VR 为 VOCs 排放量;GDP 为国内生产总值。

1.3.2 相对降碳水平的测算 为了剔除生产与经营的影响因素,可以得到不同年份、各城市 CO<sub>2</sub> 相对减排量为

$$CRR_{i,t} = \left( \frac{CR_{i,2000}}{GDP_{i,2000}} - \frac{CR_{i,t}}{GDP_{i,t}} \right) \times GDP_{i,t} \quad (2)$$

式(2)中:CRR 为 CO<sub>2</sub> 相对减排量;CR 为 CO<sub>2</sub> 排放量。

1.3.3 减污降碳协同水平的测算 根据文献[12]的方法,以相对减排量的增长率为基础,构建 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 的协同减排指数,该指数越大,表明 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 的协同减排水平越高。协同减排指数为

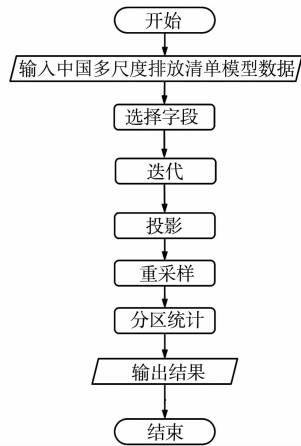


图 1 数据处理过程

Fig. 1 Data processing procedure

$$\gamma_{i,t} = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\text{VRRG}_{i,t} - \overline{\text{VRRG}}_i}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\text{VRRG}_{i,t} - \overline{\text{VRRG}}_i)^2}} - \frac{\text{CRRG}_{i,t} - \overline{\text{CRRG}}_i}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\text{CRRG}_{i,t} - \overline{\text{CRRG}}_i)^2}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$\text{VRRG}_{i,t} = \frac{\text{VRR}_{i,t+1} - \text{VRR}_{i,t}}{\text{VRR}_{i,t}} \quad (4)$$

$$\overline{\text{VRRG}}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{VRRG}_{i,t} \quad (5)$$

$$\text{CRRG}_{i,t} = \frac{\text{CRR}_{i,t+1} - \text{CRR}_{i,t}}{\text{CRR}_{i,t}} \quad (6)$$

$$\overline{\text{CRRG}}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{CRRG}_{i,t} \quad (7)$$

式(3)中: $\gamma$ 为CO<sub>2</sub>与VOCs的协同减排指数;VRRG为VOCs相对减排量增长率; $\overline{\text{VRRG}}$ 为VOCs相对减排量增长率的年平均值;CRRG为CO<sub>2</sub>相对减排量增长率; $\overline{\text{CRRG}}$ 为CO<sub>2</sub>相对减排量增长率的年平均值<sup>[13]</sup>。

经计算整理,可以得到2000—2020年大湾区9+2城市群CO<sub>2</sub>与VOCs协同减排指数的平衡面板数据集。

## 2 粤港澳大湾区减污降碳现状分析

### 2.1 粤港澳大湾区降碳水平

2000—2020年,大湾区CO<sub>2</sub>排放量,如图2所示。图2中: $\delta_{\text{CR}}$ 为CO<sub>2</sub>排放量年增长率。由图2可知:2000—2011年,CO<sub>2</sub>排放量变化呈逐年上升趋势,由8 443.3万t·a<sup>-1</sup>上升至24 345.6万t·a<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub>排放量增加15 902.3万t·a<sup>-1</sup>;2012—2020年,整体则呈波动下降趋势,CO<sub>2</sub>排放量在经历了2015年,2017年两次波动起伏后,2020年,下降至21 615.5万t·a<sup>-1</sup>,相较于峰值,CO<sub>2</sub>排放量下降了2 730.1万t·a<sup>-1</sup>。

2001—2020年,大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量(CRR<sub>ave</sub>),如图3所示。由图3及相关计算可知:大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量呈现逐年上升趋势,减排力度较大;2020年,大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量达到542.21万t,是2001年60.87万t的8.91倍,减排效果较为显著;年平均增长速率高达14.58%,呈持续上升趋势;大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量在2012年首次突破300万t,至2013年,再次突破400万t;除了2002年(CRRG=−2.86%)、2004年(CRRG=−13.85%)、2005年(CRRG=−16.85%)和2011年(CRRG=−0.99%)之外,大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量增长率均为正值;2006年,城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量增长率超过80.16%,大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量快速上升,但不同地区存在较大差异;2020年,大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量的标准差和变异系数的绝对值仍然很高,分别为584.79万t,1.08。

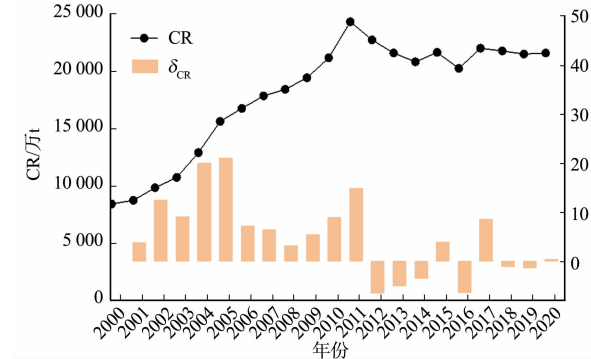


图2 大湾区CO<sub>2</sub>排放量

Fig. 2 CO<sub>2</sub> emission in Greater Bay Area

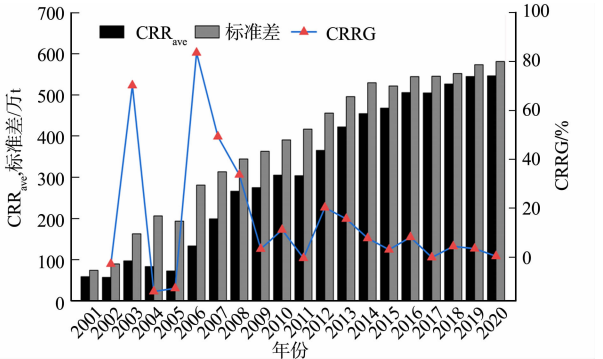


图3 大湾区城市平均CO<sub>2</sub>相对减排量

Fig. 3 Urban average CO<sub>2</sub> relative reduction in Greater Bay Area

## 2.2 粤港澳大湾区减污水平

2000—2020 年,大湾区 VOCs 排放量,如图 4 所示。图 4 中: $\delta_{VR}$  为 VOCs 排放量的年增长率。

由图 4 可知:2000—2015 年,VOCs 排放量变化呈上升趋势,由 54.1 万  $t \cdot a^{-1}$  上升至 113.7 万  $t \cdot a^{-1}$ ,VOCs 排放量增加 59.6 万  $t \cdot a^{-1}$ ;2016—2020 年,则呈波动下降趋势,VOCs 排放量在经历了 2018 年的波动起伏后,2020 年下降至 104.8 万  $t \cdot a^{-1}$ ,相较于峰值,VOCs 排放量下降了 8.8 万  $t \cdot a^{-1}$ 。

2001—2020 年,大湾区城市平均 VOCs 相对减排量,如图 5 所示。由图 5 及相关计算可知:大湾区城市平均 VOCs 相对减排量呈现缓慢上升的趋势,但减排力度逐年减弱,城市之间 VOCs 相对减排效果存在较大差距。大湾区城市平均 VOCs 相对减排量变化总体上可分为以下 3 个时期。

1) 2001—2005 年,大湾区城市平均 VOCs 相对减排量表现出强劲的增长势头,从 2001 年的 0.23 万 t 增加至 2005 年的 1.13 万 t;此研究期间,大湾区城市平均 VOCs 相对减排量增加了 1.08 万 t,年平均增速高达 51.94%。

2) 2005—2012 年,大湾区城市平均 VOCs 相对减排量总体呈上升趋势,减排动力逐渐减缓。相较于 2008 年,2009 年大湾区城市平均 VOCs 相对减排量增长仅 0.13 万 t。

3) 2012—2020 年,大湾区城市平均 VOCs 相对减排效果和减排动力进入瓶颈期,急需技术突破。

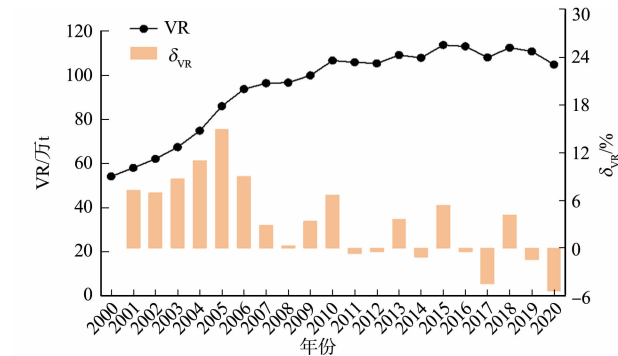


图 4 大湾区 VOCs 排放量

Fig. 4 VOCs emission in Greater Bay Area

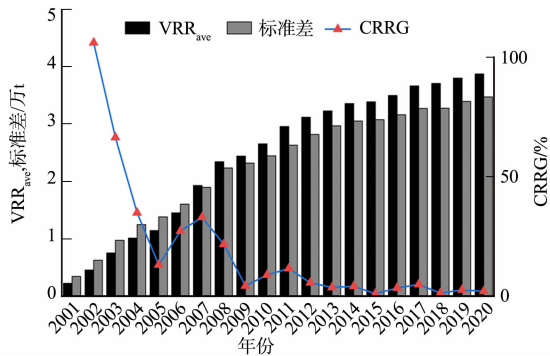


图 5 大湾区城市平均 VOCs 相对减排量

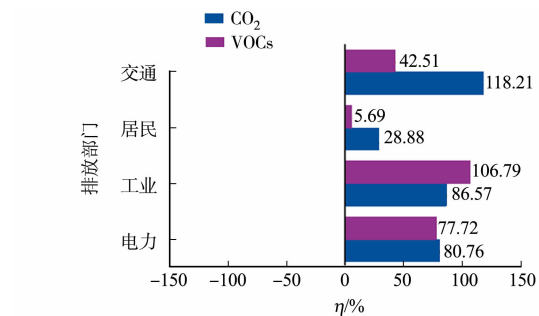
Fig. 5 Urban average VOCs relative reduction in Greater Bay Area

## 3 粤港澳大湾区减污降碳协同水平

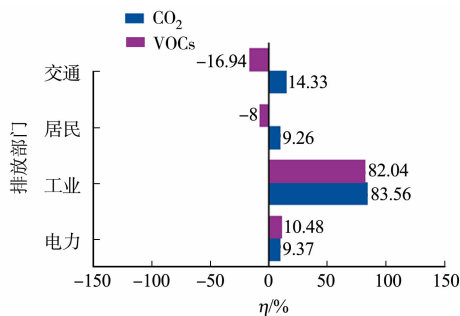
### 3.1 粤港澳大湾区碳污协同程度

2000—2020 年,大湾区  $CO_2$  与 VOCs 协同减排情况,如图 6 所示。图 6 中: $\eta$  为排放量变化率。

由图 6 可知:大湾区  $CO_2$  和 VOCs 减排总体呈现正协同效应;2005—2010 年交通和居民减排、2015—2020 年交通和工业减排均呈现负效应;交通部门自 2005 年起 VOCs 的治理有显著成效,2005—2010 年,2010—2015 年,2015—2020 年 VOCs 的排放量变化率逐期增大,分别为 -16.94%,-18.28% 和 -31.17%,;2010—2015 年的  $CO_2$  减排情况较差,虽然电力部门的  $CO_2$  排放量变化率为 -5.88%,但 VOCs 排放总体呈增长态势,小幅增长 0.3%。



(a) 2000—2005 年



(b) 2005—2010 年

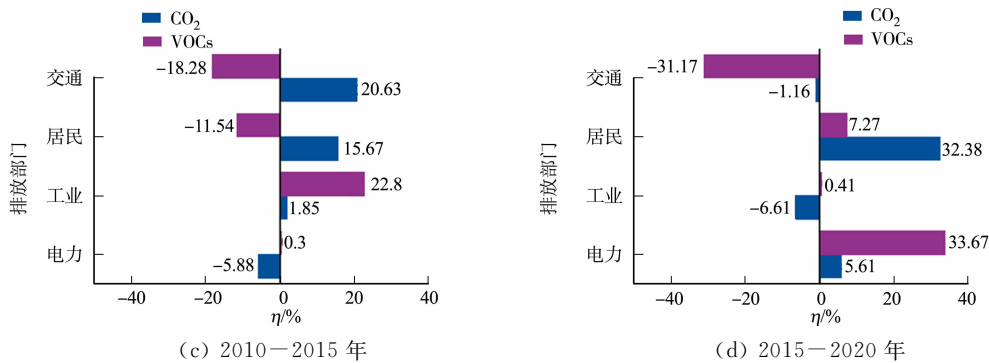


图 6 大湾区 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排情况

Fig. 6 Synergy reduction situation of CO<sub>2</sub> and VOCs in Greater Bay Area

3.2 粤港澳大湾区全域碳污协同减排水平

基于 CO<sub>2</sub> 减排与 VOCs 减污分析,测算大湾区碳污协同减排水平。2002—2020 年,大湾区 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排水平,如图 7 所示。图 7 中: $\gamma_{ave,11}$  为大湾区协同减排指数(平均值)。由图 7 可知:大湾区 CO<sub>2</sub> 和 VOCs 协同减排水平指数均大于 -1.0 且小于 1.0,协同减排水平呈现微下降趋势,这说明大湾区碳污协同减排存在压力,需要深入研究其影响因素,促进协同减排水平的提高。

考虑到香港特别行政区和澳门特别行政区与广东 9 个城市(广东 9 城)的碳污减排控制可能存在差异,故测算 2002—2020 年广东 9 城 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排指数,结果如图 8 所示。图 8 中: $\gamma_{ave,9}$  为广东 9 城协同减排指数(平均值)。由图 8 可知:与大湾区全域整体协同指数不同的是,除了 2009 年、2010 年和 2017 年外,碳污协同减排水平指数均大于 0 且小于 1.0,具有更好的减排协同性;广东 9 城的碳污协同减排水平逐年增长,近年来协同减排程度处于正向协同,即广东 9 城碳污减排具有内在的一致性。

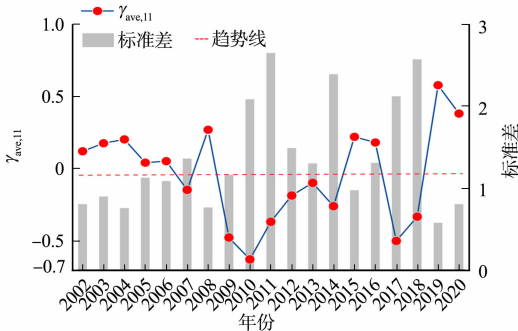


图 7 大湾区 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排水平

Fig. 7 Synergy reduction levels of CO<sub>2</sub> and VOCs in Greater Bay Area

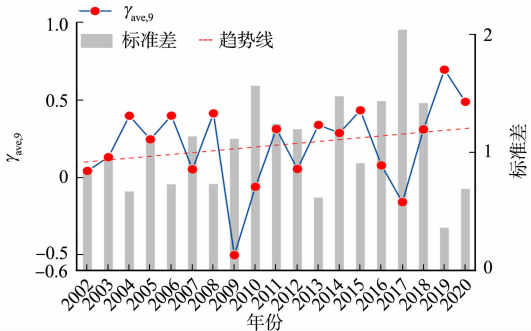


图 8 广东 9 城 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排水平

Fig. 8 Synergy reduction levels of CO<sub>2</sub> and VOCs in Guangdong 9 cities

3.3 城市碳污协同减排水平

2002—2020 年,大湾区 9+2 城市群减污降碳协同指数,如图 9 所示。由图 9 可得减排水平呈现以下 3 个阶段的特征。

1) 2002—2008 年,大湾区的协同减排指数并不稳定,而深圳市、澳门特别行政区的 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排指数于 2008 年都达到了 0.93 以上,深圳市甚至达到 1.0,这些城市的 VOCs 与 CO<sub>2</sub> 减排的协同程度非常高,即 VOCs 的减排能够有效地促进 CO<sub>2</sub> 的减排。肇庆市协同减排指数变化最大,甚至增长了 2.76。

2) 2008—2014 年,除广州市,大部分城市的 CO<sub>2</sub> 与 VOCs 协同减排指数保持正数或由负转正。2014 年末,协同减排指数均处于较高水平,大湾区 VOCs 减排与 CO<sub>2</sub> 减排相互促进。特别地,珠海市在此期间协同减排指数由负转正,呈现出协同治理效果具有滞后性的特征。

3) 2014—2020 年,81%的城市群 VOCs 与 CO<sub>2</sub> 协同减排指数保持较高水平,且趋于 1.0,显示 CO<sub>2</sub> 减排与 VOCs 减排相互促进。然而,大部分地区的协同动力不足,协同减排指数甚至呈现下降趋势。

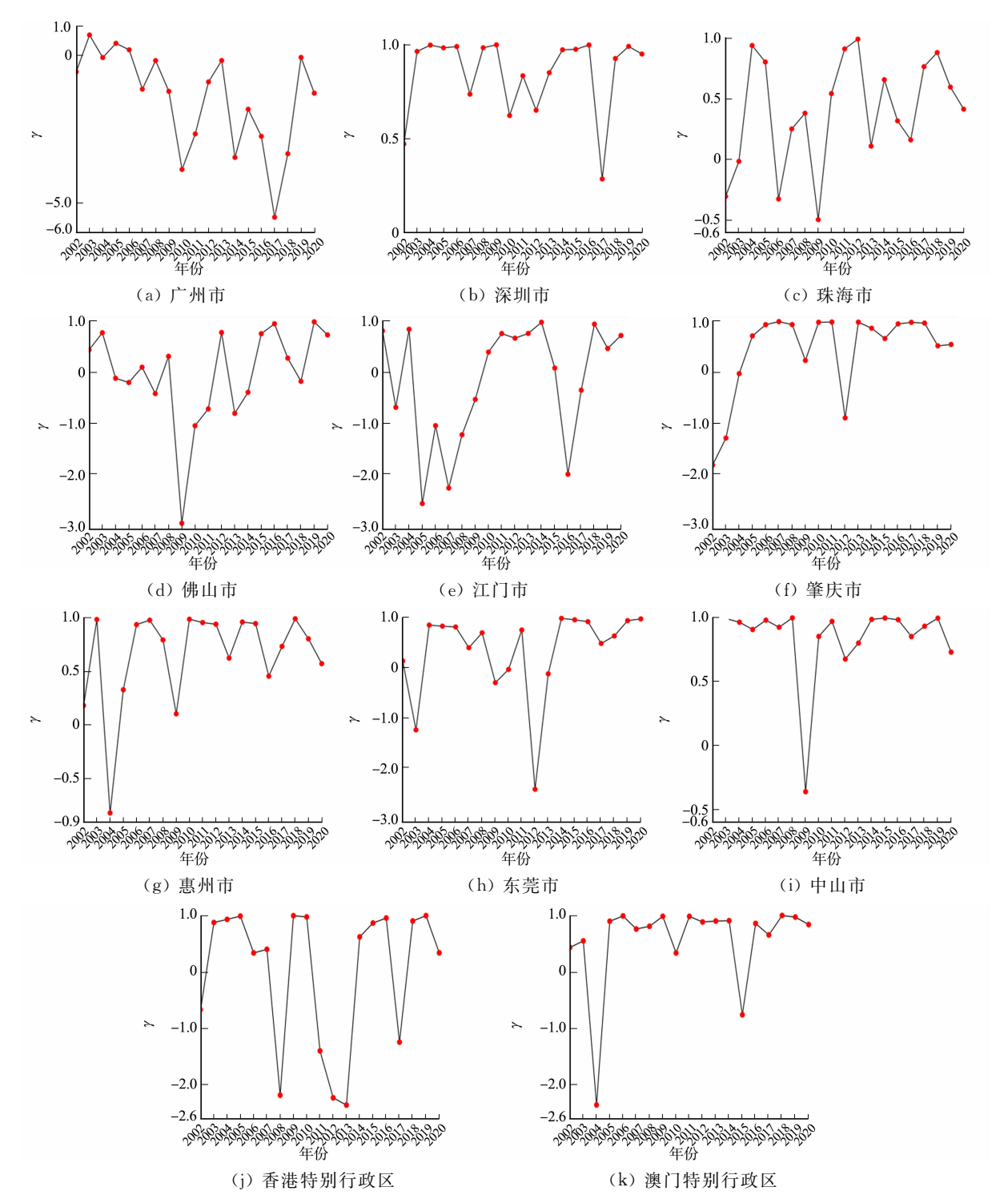


图 9 大湾区 9+2 城市群协同减排指数

Fig. 9 Synergy reduction indexes of 9+2 city clusters in Greater Bay Area

## 4 讨论

以往有少量减污降碳协同控制的研究,但关于 VOCs 的研究刚刚起步,分别从粤港澳大湾区全域-城市尺度分析大气污染物与二氧化碳协同减排水平。测度出大湾区二氧化碳和大气污染物排放量变化呈现 3 个时期的特征。大湾区 9+2 城市群 CO<sub>2</sub> 减排量逐年增加,2020 年,CO<sub>2</sub> 相对减排量较大,但减排动力逐年下滑;而城市平均 VOCs 排放量于 2016 年出现波动下降,相对减排量呈缓慢上升趋势,减排力度大。大湾区大气污染物的减排可以有效降低 CO<sub>2</sub> 的排放,在大湾区全域尺度上,自 2014 年,81%



的城市群 VOCs 与 CO<sub>2</sub> 协同减排指数渐趋于 1.0;在城市尺度上,不同地区之间的碳污协同减排水平整体呈现差异缩小趋势,发达地区的协同减排水平较高。

结合《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》及相关研究归纳出碳排放和大气污染物排放的影响因素主要为能源消费量、能源强度、经济发展、人口因素、经济结构、能源结构、工业化水平及生活水平和生活方式等<sup>[14-15]</sup>。特别地,实现碳减排的重要途径之一是生产结构的升级,包括促进技术进步、优化资源配置及推动环保产业的发展。因此,政府和企业需要共同努力,增加对产业结构升级的支持和投入,以实现碳减排目标。

参考文献:

[1] 习近平. 努力建设人与自然和谐共生的现代化[J]. 奋斗, 2022(11):6-11. DOI:10.16634/j.cnki.cn23-1001/d.2022.11.010.

[2] 江梅,邹兰,李晓倩,等. 我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨[J]. 环境科学, 2015,36(9):3522-3532. DOI:10.13227/j.hjxx.2015.09.051.

[3] 张焜辉,蔡卓弟,黄冰,等. 粤港澳大湾区典型区域 VOCs 污染整治的探索与展望[J]. 环境与发展, 2019,31(5):60-62. DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2019.05.036.

[4] 唐湘博,张野,曹利珍,等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022,35(10):2252-2263. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.10.

[5] 白列湖. 协同论与管理协同理论[J]. 甘肃社会科学, 2007(5):228-230. DOI:10.15891/j.cnki.cn62-1093/c.2007.05.065.

[6] OKORN K,JIMENEZ A,COLLIER-OXANDALE A,*et al.* Characterizing methane and total non-methane hydrocarbon levels in Los Angeles communities with oil and gas facilities using air quality monitors[J]. Science of the Total Environment, 2021,777:146194. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.146194.

[7] GUAN Yang,XIAO Yang,RONG Bing,*et al.* Heterogeneity and typology of the city-level synergy between CO<sub>2</sub> emission, PM<sub>2.5</sub>, and ozone pollution in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,405:136871. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136871.

[8] XUE Wenbo,LEI Yu,LIU Xin,*et al.* Synergistic assessment of air pollution and carbon emissions from the economic perspective in China[J]. Science of the Total Environment, 2023,858:159736. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.159736.

[9] YI Hongru,ZHAO Laijun,QIAN Ying,*et al.* How to achieve synergy between carbon dioxide mitigation and air pollution control? Evidence from China[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,78:103609. DOI:10.1016/j.scs.2021.103609.

[10] 李晓江,何舸,罗彦,等. 粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J]. 城市规划学刊, 2022(1):27-34. DOI:10.16361/j.upf.202201004.

[11] ZHENG Bo,TONG Dan,LI Meng,*et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2018,18(19):14095-14111. DOI:10.5194/acp-18-14095-2018.

[12] CERQUEIRA P A,MARTINS R. Measuring the determinants of business cycle synchronization using a panel approach[J]. Economics Letters, 2009,102(2):106-108. DOI:10.1016/j.econlet.2008.11.016.

[13] 叶芳羽,单汨源,李勇,等. 碳排放权交易政策的减污降碳协同效应评估[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022,36(2):43-50. DOI:10.16339/j.cnki.hdxbskb.2022.02.007.

[14] ZHENG Jiali,MI Zhifu,COFFMAN D M,*et al.* Regional development and carbon emissions in China[J]. Energy Economics, 2019,81:25-36.

[15] CHEN Jiandong,WANG Ping,CUI Lianbiao,*et al.* Decomposition and decoupling analysis of CO<sub>2</sub> emissions in OECD[J]. Applied Energy, 2018,231:937-950. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.09.179.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 刘源岗)