珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰

王少剑¹, 莫惠斌¹, 方创琳^{2*}

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

2021-10-15 收稿, 2021-12-08 修回, 2021-12-15 接受, 2021-12-31 网络版发表

国家自然科学基金创新研究群体项目(42121001)和教育部人文社会科学研究规划基金(21YJAZH087)资助

摘要 城市是减缓气候变化和实现碳达峰与碳中和目标的关键主体, 开展城市碳排放多情景研究与碳达峰研究能为城市碳达峰行动方案的制定提供科学依据. 本文基于蒙特卡罗法, 为模拟碳排放不确定性演化和愈发注重城市碳减排, 调整了不同时间段和不同碳排放情景的概率, 同时结合多情景分析、Mann-Kendall趋势检验、Theil-Sen's趋势斜率估计等方法, 动态模拟2021~2035年珠江三角洲(以下简称珠三角)城市群的碳排放量并分析了2006~2035年碳排放的演化路径、碳达峰与碳减排潜力, 丰富了后新冠肺炎疫情时期城市碳排放的相关情景研究. 结果表明: (1) 动态模拟显示珠三角城市群于2020年显著碳达峰, 2035年碳排放量减少至24885万~27006万t, 碳强度较2006年降低84.18%~85.21%; 相较于基准情景, 动态模拟下珠三角城市群2021~2035年累计碳减排潜力为-8168万~12825万t, 碳减排潜力有66.79%的概率为正, 即较基准情景进一步减排, 其中2744万t的概率最大; (2) 深圳、珠海、惠州和东莞属于倒“U”型演化的碳达峰类城市, 均不晚于2020年碳达峰, 2006~2035年特别是碳达峰后碳排放量显著下降, 但较早碳达峰降低了2021~2035年累计碳减排潜力; 广州、佛山、中山、江门和肇庆属多情景发散型演化的潜在碳达峰类城市, 部分情景存在未达峰风险, 广州、佛山和中山超过96.01%的概率完成广东省有条件地区2025年率先碳达峰目标, 而江门和肇庆则低于20.08%且存在最低2.04%的未达峰风险, 但累计碳减排潜力较大; (3) 城市尽早碳达峰有利于碳减排, 未来要预防平台期城市的假碳达峰, 注重高排放城市碳达峰带来的示范与加速作用, 更要挖掘碳达峰滞后城市的碳减排潜力.

关键词 碳排放, 城市碳达峰, 珠江三角洲城市群, 情景分析, 蒙特卡罗, 变概率动态模拟

人类活动是导致大气二氧化碳浓度升高与全球变暖的主要原因^[1~3], 《巴黎协定》提出全球应尽快实现温室气体排放达峰, 将全球平均气温较前工业化时期的上升幅度控制在2℃以内, 并努力限制在1.5℃以内. 为此国际社会积极商讨减排控温的科学措施, 超过130个国家或地区提出碳达峰或碳中和目标, 其中推动碳排放量占据全球71%~76%和人口占据全球1/2以上的城市实现碳达峰已成为减缓气候变化的关键议题^[1,4~8].

“十四五”规划指出要支持有条件的地方率先碳达峰, 尽快制定2030年前碳排放达峰行动方案, 深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型, 但纵观国内外, 城市碳达峰相关治理措施与时间路线依旧不明确^[9,10], 亟需相关研究为城市碳达峰行动方案提供理论支撑.

尽管碳排放情景研究已成为当下的热点话题^[4,8,11~22], 学者主要利用情景分析^[13,14,17,18,20~22]、IPAT模型(I指环境压力, P指人口, A指人均财富, T指技

引用格式: 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰. 科学通报, 2022, 67: 670–684

Wang S J, Mo H B, Fang C L. Carbon emissions dynamic simulation and its peak of cities in the Pearl River Delta Urban Agglomeration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 670–684, doi: 10.1360/TB-2021-0681

术)^[13,14,20]、长期能源替代规划系统模型(long-range energy alternatives planning system, LEAP)^[16]、可计算一般均衡模型(computable general equilibrium, CGE)^[15,22]、环境库兹涅茨曲线模型(environmental Kuznets curve, EKC)^[4]等方法研究全国^[19,21,22]、省域^[13,14,18]和主要行业^[17]的未来碳排放值与碳达峰状况,但大尺度的多城市碳排放情景研究依旧缺乏^[4,12],且存在设定一致预测参数而忽略城市之间社会经济与能源消费异质性的问题^[12],导致城市碳排放情景研究可信度下降。另外,由于未来碳排放与各影响因素的演化趋势具有不确定性^[17],大多数碳排放情景研究受限于静态模拟而易使研究结果不佳,应突破单情景研究^[12]与情景概率固定^[18,23]的局限,设定多情景多影响因素动态概率分布与开展大量蒙特卡罗随机取值模拟,模拟不同社会经济发展与低碳政策导致的多样化碳排放演化路径,并识别出最可能路径与最优路径。此外,类似方法的决策支持与应用潜力未得到充分挖掘,学者多侧重碳排放与拐点预测^[4,18,23],加上其研究结果的固定,未能结合各地碳达峰工作探讨碳达峰目标、碳达峰概率、碳减排潜力、路径择优等。更重要的是,新冠肺炎疫情使全球社会经济与碳排放发生剧烈动荡^[12,24-26],过去依据历史数据趋势的预测模型及其参数系数可能失灵,相关情景研究可能失去科学性与现势性,已有研究^[14,16,22]也未能较好地考虑新冠肺炎疫情对碳排放及其影响因素的影响程度与时长。

综上,现状碳排放情景研究存在城市增长参数设定精度不足、单情景与概率固定局限、碳达峰决策支持较弱、新冠肺炎疫情与未来碳排放演化趋势关系研究较少等问题,当前全国正商讨城市碳达峰行动方案,更显示了综合各市发展态势与疫情影响的碳排放情景研究的理论意义与实践价值。为此,本文选取立志于率先碳达峰并具有经济发展与生态治理代表性的珠江三角洲城市群(the Pearl River Delta Urban Agglomeration,以下简称珠三角或PRD)作为研究对象,基于可靠碳排放数据,结合多情景分析、蒙特卡罗法、Mann-Kendall趋势检验、Theil-Sen's趋势斜率估计等方法,创新性地在动态模拟中逐渐提高低碳情景和极低情景概率,以此来模拟各级政府对碳达峰工作的愈发重视,预测2021~2035年珠三角9市碳排放量,并分析2006~2035年碳排放演化路径、碳达峰状况、碳减排潜力等,以期既为珠三角碳达峰规划与行动方案提供科学的理论支撑,又为结合碳达峰工作和新冠肺炎疫情背景提供更完善的城市碳排放情景研究思路。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

珠三角城市群(图S1)是率先实现碳达峰的潜力地区之一,包含广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门和肇庆9个地级市。作为中国特色社会主义的先行示范区,其在中国社会经济发展与生态环境治理中具有高度代表性,既承受着快速城镇化与粗放工业化导致的生态胁迫^[27],同时面向高质量发展与生态文明建设主动促进社会绿色转型与环境质变。当前《广东省生态文明建设“十四五”规划》提出有条件的地区率先于2025年实现碳达峰,珠三角城市群各市加快碳达峰行动方案编制,开展珠三角城市群碳达峰研究既能提供决策支持,更能作为案例研究推广到其他城市。

1.2 数据来源

(1) 碳排放。我国城市能源消费数据不充足,难以从能源消费角度精确核算城市碳排放量。鉴于夜间灯光与社会经济活动、碳排放等的高度相关性,本文采用Chen等人^[28]利用粒子群优化-反向传播(particle swarm optimization-back propagation, PSO-BP)算法拟合训练DMSP/OLS和NPP/VIRRS数据得到的碳排放数据,其通过能源核算验证且拟合效果高达0.988,可靠性高且明显优于类似数据。结合中国城市温室气体排放数据^[29]进行处理,得到2006~2020年珠三角9市碳排放量。(2) 人口规模。2006~2019年人口数据来源于《广东统计年鉴2020》^[30],2020~2035年人口数据来源于Chen等人^[31]的中国1 km网格化人口预测数据,其基于历史人口数据、结合RCP-SSP情景、考虑我国生育政策和落户政策影响、利用多维递归模型进行预测,减少了SSP情景数据的系统性偏差,结果空间分辨率高、可靠性良好,并通过《中国人口和就业统计年鉴》、WorldPop与GPWv4的数据验证。该预测数据涵盖情景多(RCP2.6、4.5、6和8.5, SSP1~5),能有效模拟各种社会发展情景下人口规模及其空间分布的演变,已被广泛应用于我国碳达峰^[12,32]与碳中和^[33,34]的情景研究,并作为面向碳达峰与碳中和的情景参数设定依据^[32,35]。(3) GDP和能源消费总量来源于《广东统计年鉴2020》^[30]和各市统计年鉴。

1.3 基于Kaya恒等式的碳排放分解

Kaya恒等式是主流的碳排放驱动因素分解模型^[17,23,36-38],其包含人口规模、人均GDP、能源强度和

能源消费碳强度四大碳排放关键参数,其拥有分解无残差、对碳排放变化推动因素解释力强、不依赖历史碳排放数据等优点.相较于利用神经网络^[21]、灰色模型^[39]、多元线性回归^[13,14,20]等方法建立融合碳排放量与参数的预测函数,Kaya模型与蒙特卡罗法相结合的预测模型因无需根据历史碳排放数据调节模型系数,所以新冠肺炎疫情等重大事件对模型影响较小,已被广泛应用于城市碳排放情景研究中^[37,38].同时由于城市能源消费数据统计制度不一、口径有变、指标差异等问题,多城市碳排放情景研究更是大多选用这四大城市间统计口径一致的参数建立城市碳排放量预测模型^[20,39],其预测模型、历史碳排放值、碳排放预测值等均能通过不确定性检验,说明基于此四大参数开展多城市碳排放情景研究具有可行性.Kaya恒等式的公式为

$$CE_{it} = P_{it} \times \frac{GDP_{it}}{P_{it}} \times \frac{E_{it}}{GDP_{it}} \times \frac{CE_{it}}{E_{it}} \\ = P_{it} \times PGDP_{it} \times EI_{it} \times ECI_{it}, \quad (1)$$

其中, i 为城市; t 为年份; CE_{it} 、 P_{it} 、 GDP_{it} 、 $PGDP_{it}$ 、 E_{it} 、 EI_{it} 和 ECI_{it} 分别为城市 i 在 t 年的碳排放量、人口规模、地区生产总值、人均地区生产总值、能源消费总量、能源强度和能源消费碳强度.设 CE_{it} 、 P_{it} 、 $PGDP_{it}$ 、 EI_{it} 和 ECI_{it} 的变化率分别为 v_{CE} 、 v_P 、 v_{PGDP} 、 v_{EI} 和 v_{ECI} ,则

$$CE_{i,t+1} = P_{i,t+1} \times PGDP_{i,t+1} \times EI_{i,t+1} \\ \times ECI_{i,t+1} \\ = P_{it} \times (1+v_P) \times PGDP_{it} \times (1+v_{PGDP}) \\ \times EI_{it} \times (1+v_{EI}) \times ECI_{it} \times (1+v_{ECI}) \\ = CE_{it} \times (1+v_{CE}), \quad (2)$$

可得

$$v_{CE} = (1+v_P) \times (1+v_{PGDP}) \times (1+v_{EI}) \times (1+v_{ECI}) - 1. \quad (3)$$

因此可基于这4个影响因素的预测值得到未来碳排放量.

1.4 多情景分析和基于蒙特卡罗法的变概率动态模拟

典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)与共享社会经济路径(shared socioeconomic pathway, SSP)是IPCC提出的权威气候预测模型(表1),已被广泛应用于碳排放、人口、经济等预测中^[14,31].为科学模拟珠三角9市未来碳排放的演化趋势与减排潜力,结合RCP-SSP情景,基于各市演化趋势、政策措施和实际情况,设定5种碳排放情景:(1)基准情景(business as usual, BAU)主要依据RCP6-SSP2,为实现2030年碳达峰目标继续在短期和中期内采取一定低碳经济政策、能源结构优化政策等减少碳排放量,同时满足社会经济发展的一定碳排放需求,碳排放量增长达峰并缓慢减少.(2)高碳情景(high emissions, HE)主要依据RCP6-SSP5,基于过去各市发展路径,假设未来经济状况与技术环境不变,政府不出台新绿色低碳措施、继续放任碳排放增长,趋势外推得到的情景.(3)低碳情景(low emissions, LE)主要依据RCP4.5-SSP2,将率先于2025年实现碳达峰任务,依据“十四五”规划等减排工作部署,政府将着力提升能源利用效率、大力调整能源结构、加速低碳技术研发推广和健全低碳发展体制机制,城市碳排放量明显减少.另外,在高碳情景和低碳情景基础上分别补充建立更为激进的极高情景(extremely high emissions, EHE)和极低情景(extremely low emissions, ELE),分别依据RCP8.5-SSP5和RCP2.6-SSP1.考虑到RCP-SSP情景可能存在误差,以5种碳排放情景为基础,逐个增添高速状态(H)和低速状态(L),以这2种状态的取值范围判断某情

表1 RCP-SSP情景定义

Table 1 Definition of RCP-SSP scenario

情景	定义
典型浓度路径	RCP2.6 温室气体浓度低情景
	RCP4.5 在政府干预下温室气体浓度降低的情景
	RCP6 虽有政府干预但碳减排不明显情景
	RCP8.5 无气候政策干预情景
	SSP1 低生育率、提高能源效率、改善生态环境的可持续路径
共享社会经济路径	SSP2 致力实现可持续发展目标,但依旧依赖化石能源和碳减排处于中等水平的中间路径
	SSP5 维持高经济增长率、不致力于气候干预政策制定的以化石能源为主路径

景下碳排放预测值的误差范围。

蒙特卡罗法能按照一定概率分布对多个变量进行随机取值与组合,并对组合后的变量与模型进行运算,具有多情景组合研究与不确定性分析的模型优势^[17]。与主流的多元线性回归^[13,14,20]、神经网络^[21]、灰色模型^[39]等预测方法相比,蒙特卡罗法不依赖历史碳排放数据确定预测模型及其参数系数,避免了新冠肺炎疫情对预测模型造成的巨大误差。同时其能通过大量情景随机组合研究,模拟出城市碳排放量的多样化演化路径,更能对碳排放量最大值年、碳减排潜力等进行频数统计与概率计算,直观识别城市最有可能的碳达峰情况与减排量,并估算置信区间,为城市碳达峰行动方案提供更可靠的研究与数据支撑。

为突破碳排放情景分析的静态局限,分别为不同情景与不同影响因素建立差异化概率分布。对于影响因素而言,人口规模和人均GDP的概率相同,在2021~2025年极高、高碳、基准、低碳和极低情景中的概率分别为5%、25%、40%、25%和5%;能源强度和能源消费碳强度的概率相同,在2021~2025年5种情景中的概率分别为5%、20%、50%、20%和5%。前人多采取固定情景概率的设定方法^[17,18,23],本文考虑到各级政府愈发重视城市碳减排,因此在设定5种情景对应的概率分布时,逐渐提高低碳情景和极低情景的概率并降低高碳情景和极高情景的概率。最终利用蒙特卡罗法按概率随机取值并进行10万次碳排放动态模拟,识别出最可能的碳排放演化路径。为提高各市碳排放量情景研究的精确度,各城市设定差异化增长率,2021~2035年逐年随机抽取5种情景的4个影响因素增长率以模拟各年碳排放量。

1.5 结合Mann-Kendall趋势检验和Theil-Sen's趋势斜率估计的碳排放趋势分析与碳达峰判断

为分析城市碳排放量达峰路径与达峰前后的演化趋势,本文将2006~2035年进一步细分为2006年~碳达峰年和碳达峰年~2035年,计算这3个时间段内珠三角城市群各市的年均碳排放变化量和年均碳排放变化率,以此为主要依据分析不同城市的碳排放演化路径差异。此外,Mann-Kendall趋势检验能对非正态分布数据进行趋势分析且不受少数异常值干扰,被广泛应用于城市尺度气候序列趋势研究^[11,40],本文进一步利用其评估某时段内城市碳排放量变化趋势,公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (4)$$

$$Z_C = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, n \geq 10, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S < 0, \end{cases} \quad (5)$$

其中, x_i 和 x_j 为第*i*年和第*j*年碳排放量($i < j$); Z_C 服从正态分布。当 $n < 10$,趋势检验使用S分析变化趋势。结合Theil-Sen's趋势斜率估计能对时间序列中趋势幅度进行稳健估算,其公式为

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right). \quad (6)$$

虽然碳达峰前后城市碳排放量发生较大变化,Mann-Kendall趋势检验和Theil-Sen's趋势斜率估计得到的统计值处于合理范围,可利用此增强珠三角城市群碳排放演化趋势的分析。

本文对城市碳达峰的界定是该城市碳排放量达到最大值且此后数据量 ≥ 4 ^[11]。若达到最大值后4年内碳排放量显著下降(Mann-Kendall趋势检验达到显著性水平 $\alpha=0.05$),则认为该城市显著碳达峰。若仅达到最大值但此后数据量 < 4 ,则未达峰。

2 研究结果与分析

2.1 2006~2020年珠三角城市群碳排放现状分析

2006~2012年珠三角城市群碳排放量快速增加但此后演化路径发生分异(图1):深圳和东莞2012年碳达峰后碳排放量下降但2015~2016年有小幅增加,而邻近的惠州依旧快速增加;珠海虽于2016年显著碳达峰($\alpha=0.05$),但前后碳排放量变化幅度较小;未达峰城市也有不同,2012年后广州与中山处于平台期,佛山、江门与肇庆却保持较高增速。尽管同处相似的社会经济与政策环境,不同城市与不同时间却呈现差异化的演化趋势,说明城市碳排放具有主体差异与政策效应不确定性,城市碳达峰研究应分城市针对性设定增长率,同时有必要混合多种政策模式进行不确定性情景研究。为此本文依据宏观政策与社会背景精细化设定5种情景,利用变概率动态模拟的蒙特卡罗法探究碳排放演化趋势。

图1 2006~2020年珠三角城市碳排放量点线图

Figure 1 Carbon emissions of cities in PRD during 2006 to 2020

2.2 2021~2035年珠三角城市碳排放量情景研究

2.2.1 参数设定

(1) 人口规模. 尽管2016年起我国陆续出台“二孩”与“三孩”生育政策, 但宽松生育政策甚至完全放开生育对人口增长作用不明显, 多重抚养压力与新冠肺炎疫情疫情影响下生育率将维持缩减态势^[41]. 社会经济发展则是人口的核心影响要素, 对减缓气候变化和社会经济绿色转型的重视提高了气候因素对人口变化的影响力, RCP-SSP情景成为更精准的人口预测情景^[14,31], 因此基于Chen等人^[31]的城市人口预测数据设定5种情景的人口参数(表2).

(2) 人均GDP. 鉴于经济具有路径依赖“惯性”, 且时间越近的经济周期对未来发展影响越大^[17,42], 因此结合五年规划设定GDP增长率. “十一五”、“十二五”和“十三五”期间珠三角GDP年均增长率分别为15.82%、10.30%和6.96%, 2020年初爆发的新冠肺炎疫情对珠三角造成全方位与深层次的冲击^[25]. 得益于较强经济韧性, 疫情有效防控后广东经济持续稳健复苏并呈报复性增长, 《广东2021国民经济社会发展计划》、广东宏观经济形势分析与预测课题组^[25]等预测2021年广东省GDP增长率为6%~7%, 略低于世界银行^[43]与经济合作与发展组织^[44]预测的中国2021年8.5%和2022年5.4%~5.8%增长率. 长期来看, 广东省“十四五”规划指出2021~2025年广东省GDP年均增长率为5.0%左右, 并随着全球疫情控制, 经济重回正轨和“双循环”新发展格

局下珠三角拥有更好的发展机遇与空间^[25], 预估2021~2035年为4.2%~6.0%^[45~47]. 基于以上分析, 可认为基准情景下2021~2025年珠三角各市GDP增长率较“十三五”期间下降1%, 平均值为5.96%. 历年GDP数据显示珠三角GDP增速略高于全国平均水平, 参考前人相关预测数据^[45~47]设定2026~2030年和2031~2035年GDP增长率较其前一周期分别下降0.25%和0.6%. 不同减排策略与达峰目标对经济发展产生不同方向的影响, 参考前人关于不同碳达峰情景下经济增速的差异研究^[15,22], 基于基准情景设定极高(+0.96%)、高碳(+0.36%)、低碳(-0.34%)和极低(-0.98%)4种情景的GDP增长率, 最终结合人口预测数据得到各市人均GDP增长率.

(3) 能源强度. “十一五”、“十二五”和“十三五”期间珠三角年均变化率分别为-6.09%、-5.36%和-3.21%, 新冠肺炎疫情期间能源消费波动幅度小导致能源强度下降甚微, 未来能源需求增速放缓将使能源强度重回快速下降常态^[48]. 面向碳达峰与碳中和, 广东省发展和改革委员会已明确提出遏制高耗能、高排放项目的盲目发展, 同时《广东省制造业高质量发展“十四五”规划》提出逐步降低碳排放强度、主要污染物排放总量和规模以上工业企业单位增加值能耗, 通过支柱产业与新兴产业的合理布局实现珠三角城市群制造业的绿色低碳发展, 并推动绿色石化、先进材料等珠三角城市群原有高能耗行业绿色低碳升级与外迁,

表 2 碳排放情景设定^{a)}

Table 2 Scenarios of carbon emissions^{a)}

情景	时间	广州增长率				珠三角城市群平均增长率				概率	
		P (%)	PGDP (%)	EI (%)	ECI (%)	P (%)	PGDP (%)	EI (%)	ECI (%)	P&PGDP (%)	EI&ECI (%)
极高情景 EHE	2021~2025	1.01	6.39	-3.21	-3.35	0.65	6.22	-2.26	-5.25	5	5
	2026~2030	0.61	7.63	-2.91	-3.68	0.31	7.03	-1.96	-5.76	4	4
	2031~2035	0.33	6.91	-2.71	-3.17	0.08	6.31	-1.76	-4.99	3	3
高碳情景 HE	2021~2025	0.83	5.99	-3.41	-3.45	0.63	5.65	-2.46	-5.35	25	20
	2026~2030	0.47	6.99	-3.11	-3.78	0.30	6.42	-2.16	-5.86	20	17
	2031~2035	0.22	6.28	-2.91	-3.27	0.07	5.71	-1.96	-5.09	17	15
基准情景 BAU	2021~2025	0.81	5.65	-3.81	-3.65	0.67	5.25	-2.86	-5.55	40	50
	2026~2030	0.40	6.68	-3.51	-3.98	0.28	6.11	-2.56	-6.06	40	45
	2031~2035	0.13	5.93	-3.31	-3.47	0.05	5.35	-2.36	-5.29	40	45
低碳情景 LE	2021~2025	1.11	5.00	-4.21	-3.85	0.67	4.92	-3.26	-5.75	25	20
	2026~2030	0.64	6.40	-3.91	-4.18	0.28	5.77	-2.96	-6.26	30	28
	2031~2035	0.34	5.63	-3.71	-3.67	0.04	5.02	-2.76	-5.49	33	30
极低情景 ELE	2021~2025	1.09	4.38	-4.41	-3.95	0.59	4.36	-3.46	-5.85	5	5
	2026~2030	0.69	5.69	-4.11	-4.28	0.26	5.07	-3.16	-6.36	6	6
	2031~2035	0.40	4.97	-3.91	-3.77	0.03	4.36	-2.96	-5.59	7	7

a) 本文对所有城市设定了差异化的参数增长率, 因篇幅受限, 仅展示广州市的参数增长率设定

可预测珠三角城市群能源强度将稳步下降, 加快碳达峰目标的率先实现。《广东省生态文明建设“十四五”规划》提出了“十四五”期间广东省单位GDP能源消费累计降低14.5%的目标, 然而广东省能源强度边际下降速率逐渐放缓, 其既体现在能源强度下降目标, “十二五”到“十四五”期间目标累计变化率逐渐下调, 由-18%调至-17%再调至-14.5%, 也反映在实际完成值, 由“十二五”期间的-20.98%变为“十三五”期间的-17.05%, 可推测未来珠三角能源强度下降速率也将进一步放缓。此外, 近年珠三角能源强度下降速率低于广东省整体, 2016~2019年均下降速率慢1.11%, 为此结合2016~2019年广东省累计下降速率为13.51%(广东省“十四五”规划数据)、珠三角与广东省的速率差异、广东省“十四五”规划目标等, 设定“十四五”期间珠三角能源强度累计降低13.5%, 即年均变化率为-2.86%, 将此作为基准情景2021~2025年珠三角能源强度年均变化率。随着能源结构调整与能源利用效率提高, 能源强度下降速率进一步趋缓, 参照年均变化率随时期下降的主流设定方法^[17,18,23,49,50], 设定2026~2030年和2031~2035年分别较2021~2025年增加0.3%和0.5%。基于基准情景设定极高(+0.6%)、高碳(+0.4%)、低碳(-0.4%)和极低(-0.6%)4种情景的能源强度变化率。各

市能源强度变化率以2016~2020年能源强度年均变化率为基准进行权重赋值。

(4) 能源消费碳强度。我国能源消费碳排放受能源消费结构的重要影响, 其中非化石能源占比提升将有效推动城市节能减排与能源零碳化, 产生较为显著的碳减排效应^[23,51], 是广东省乃至我国推动能源变革和迈向碳中和愿景的重要措施^[51~53], 碳排放情景预测研究多依据非化石能源占比的年均变化率设定能源消费碳强度参数^[13,17,18,21,23]。2020年广东省非化石能源占比为29%, “十二五”期间和“十三五”期间占比分别提高6%和9%, 在能源结构低碳转型方面明显优于全国平均水平。然而《广东省生态文明建设“十四五”规划》却提出了2025年广东省非化石能源占比为29%的预期性目标, 既异于国家与广东省历来的约束性指标属性, 更不符合广东省现状与率先碳达峰诉求。《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》^[19]采用自下而上多部门能源消费分析和自上而下宏观模拟的方法, 具有研究系统、时间序列全、得到多个预测印证^[48,54,55]等优势, 因此参考此设定广东省未来非化石能源占比。该研究预测中国2020~2050年每5年非化石能源占比分别为16%、20%、25%、32%、45%、60%和73.2%, 非化石能源占比加速提升。近年来广东省非化石能源占比加

速提升,广东省政策、财政投入与企业投资愈发重视非化石能源装机,非化石能源占比和增速均快于全国平均水平,为此对广东省未来非化石能源占比与中国进行错位对比,设定“十四五”期间广东省保持“十三五”期间非化石能源占比增长量,提高9%达到38%。参考《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》^[19]非化石能源占比加速提升的预测,预计2030和2035年广东省非化石能源占比分别为51%和65%。在广东省“十四五”规划加大现代能源领域投资、新能源产业成为广东省战略性新兴产业、珠三角各市政企加大相关领域投资等背景下,未来珠三角非化石能源装机及其投资能有效满足设定的非化石能源占比预测。基于此非化石能源占比,设定基准情景下珠三角能源消费碳强度变化率,2021~2025年、2026~2030年和2031~2035年分别为-5.55%、-6.06%和-5.29%,各市以2016~2020年数据为基准进行权重赋值。参照前人能源消费碳强度情景设定^[17,18,23],以基准情景为基础设定极高(+0.3%)、高碳(+0.2%)、低碳(-0.2%)和极低(-0.3%)4种情景的能源消费碳强度变化率。

鉴于碳排放量与参数的演化存在不确定性,基于三角形分布^[17]建立高速、普通与低速3种状态下的参数变化率,将已设定参数变化率的5种情景作为普通状态,高速状态下各情景的人口规模、人均GDP、能源强度和能源消费碳强度分别+0.1%、+0.2%、-0.1%和-0.05%,低速状态则与之相反。通过对普通、高速和低速3种状态下碳排放量进行模拟,深化对5种情景研究误差范围的判断。

在动态模拟中,将人口规模与人均GDP这2个参数和能源强度与能源消费碳强度这2个参数设为相同概率,5种情景中基准情景概率最高,2021~2025年低碳情景与高碳情景概率相等,极低情景与极高情景概率最低,此后逐渐提高低碳情景与极低情景的概率,详细设定见表2。

2.2.2 碳排放量多情景研究

所有情景研究显示珠三角城市群2020年显著碳达峰(图2),不确定的动态模拟较好地模拟了未来状况:“十四五”期间碳强度下降30.83%~34.12%(图3);得益于非化石能源消费占比的大幅提升(约36%),能源消费更加节能环保与零碳化,2035年碳排放量将降低到24885万~27006万t,碳强度为0.11~0.12 t/万元,较2006年下降84.18%~85.21%,极大概率完成“十四五”规划提出的“十四五”期间下降18%任务和2030年较2005年下

降65%以上的中国国家自主贡献目标。此外,通过精细化设定城市增长率,情景研究更为精准且能清晰区分2种城市类型。

(1) 碳达峰类城市(深圳、珠海、惠州、东莞)。所有情景下均能不晚于2020年显著碳达峰,呈碳达峰后快速下降的倒“U”型演化。4城市峰值分别为3932万、1646万、4952万和4194万t,2035年降低到1415万~1540万、917万~994万、2407万~2608万和2236万~2424万t。由于较早实现碳达峰,除惠州外碳排放量在全时间序列显著下降($\alpha=0.001$),且碳达峰越早,此后减排更显著(不晚于2016年的深圳、惠州和东莞 $\Delta \leq -107$ 万t/a, $\alpha=0.001$)(表3)。

(2) 潜在碳达峰类城市(广州、佛山、中山、江门、肇庆)。碳排放量在2020年后呈多情景发散型演化,某些情景未能按时完成2030年碳达峰目标。该类城市不同情景的碳排放量差异明显,因此要对症下药并制定有效低碳政策,以减少非必要碳排放和提高能源利用效率。

尽管广州2020年前碳排放量趋稳,具有碳达峰潜力,高碳情景表明新低碳措施的缺失将产生2020年假碳达峰与无法率先碳达峰的风险。虽然动态模拟下减排效果显著,2035年碳排放量降低到5690万~6187万t,但其不同情景碳排放量差异最大,相当于2035年排名第3的江门,且在珠三角比重不断提升到几乎1/4,2021~2025年、2026~2030年和2031~2035年3个时间序列的 Z_c 和 β 均与珠三角城市群相似(表3),对珠三角的支配作用较大,可能是后者节能减排与碳达峰的重大隐患。与此同时,身为低碳试点城市的广州在能源消费、产业发展、人口增长等具有高代表性,制定碳达峰与碳中和规划时若重点关注广州并推行全领域绿色转型,既能确保广州实现2020年碳达峰目标,更能以点带面加速珠三角碳减排,在珠三角乃至全国起到率先碳达峰的示范作用。

佛山、中山、江门和肇庆的演化路径较为特殊,尽管动态模拟下均能完成国家的碳达峰目标,但2006~2035年碳排放量却递增($v \geq 0.77\%$, Z_c 和 β 均为正),碳达峰后减排态势偏弱($v \geq -1.54\%$, β 绝对值偏小)(表3),存在“十四五”规划碳强度下降目标落空的风险(中山仅下降10.40%~14.45%,肇庆仅下降17.81%~21.39%),甚至后三者在当前政策措施下无法停止增长态势,是亟需重点治理的城市类型。其中江门和肇庆的问题尤为严峻,全时间序列 $Z_c > 0$ 且明显高于其他城

图2 珠三角城市碳排放情景研究。动态模拟使用年均碳排放量,并基于此进行碳达峰判断,置信区间上下限计算公式为 $d = \mu \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 。5种碳排放情景的实线为普通状态下的碳排放量,虚线为高速状态和低速状态下的碳排放量,作为碳排放情景研究的误差范围

Figure 2 Scenario study of carbon emissions of cities in PRD. The dynamic simulation takes the average annual carbon emissions as the data and we judge carbon peak according to it. The confidence interval formula is $d = \mu \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. The solid lines of 5 carbon emissions scenarios are carbon emissions at normal speed. The dashed lines are carbon emissions at high speed and low speed, which are used as the error range of scenario analysis

图3 动态模拟下珠三角城市碳强度

Figure 3 Intensity of carbon emissions of cities in PRD under dynamic simulation

表 3 动态模拟下珠三角城市碳排放趋势分析^{a)}Table 3 Trend analysis of carbon emissions of cities in PRD under dynamic simulation^{a)}

地区	2006~2035年				2006年~碳达峰年				碳达峰年~2035年			
	Δ	ν (%)	$M-K$	β	Δ	ν (%)	$M-K$	β	Δ	ν (%)	$M-K$	β
广州	30	0.55	-2.00*	-29.82	135	2.30	3.37***	113.56	-69	-1.06	-5.36***	-65.02
深圳	-53	-2.43	-5.60***	-99.06	153	4.53	21.00***※	169.74	-107	-4.17	-6.77***	-115.07
珠海	-6	-0.59	-4.00***	-25.92	51	3.78	3.74***	51.05	-36	-2.82	-6.13***	-39.49
佛山	34	0.83	2.25*	23.52	93	2.09	5.03***	73.07	-78	-1.54	-4.20***	-78.74
惠州	1	0.04	-1.39	-24.18	122	3.82	4.85***	109.61	-112	-3.37	-5.36***	-120.01
东莞	-50	-1.67	-5.82***	-109.53	193	4.54	21.00***※	214.37	-114	-3.22	-6.77***	-120.67
中山	17	0.77	0.89	0.52	36	1.56	4.57***	18.13	-19	-0.72	-4.20***	-18.70
江门	45	1.60	5.82***	39.29	59	2.09	6.80***	51.70	-25	-0.70	-15.00***※	-25.27
肇庆	28	1.73	5.60***	21.64	38	2.29	6.52***	29.41	-20	-0.92	-15.00***※	-19.87
珠三角城市群	45	0.18	-2.53*	-208.90	663	2.31	3.07**	503.69	-531	-1.77	-5.15***	-533.56

a) Δ 指城市年均碳排放变化量, 单位为万t/a; ν 指城市年均碳排放变化率; $M-K$ 指Mann-Kendall趋势检验分析的统计量 Z_c , 其中*、**和***分别指达到0.05、0.01和0.001的显著性水平, ※指使用S描述变化趋势; β 指Theil-Sen's趋势斜率估计的倾斜率

市, 可能无法完成国家与广东省下达的碳达峰目标。

从上可知, 珠三角城市群与碳达峰类城市在多情景下碳达峰形势良好, 但潜在碳达峰类城市存在目标落空与持续增排的风险, 碳达峰与减排形势并不明朗。为此充分利用蒙特卡罗法的不确定性分析优势, 基于90万预测数据进一步探讨珠三角率先碳达峰与碳减排的具体情况。

2.3 珠三角城市碳达峰与碳减排潜力动态模拟

2.3.1 碳达峰年概率

动态模拟数据的最大值年分析清晰展示了潜在碳达峰类城市的碳达峰态势(图4)。尽管广州在高碳情景与极高情景下未能实现2020年碳达峰, 但在“十四五”规划、碳达峰相关工作等政策作用下, 其有99.12%完成目标。中山的概率曲线与佛山较相似, 完成率先碳达峰目标概率均高于96.01%, 前者更能突破碳排放平台期, 74.03%提前完成2025年碳达峰目标。而江门和肇庆碳达峰进程明显落后, 仅18.92%和20.08%不晚于2025年碳达峰, 研究期内也存在4.95%和2.04%的未达峰风险。

综上, 尽管江门和肇庆较大可能于2025年后碳达峰, 珠三角城市群与其他城市能极大概率于2025年碳达峰, 说明广东省有条件地区2025年率先碳达峰目标是科学合理的, 但其对碳减排的作用尚不明确, 为此进一步分析碳达峰年与碳减排的相互关系。

2.3.2 碳减排潜力

碳减排路径与碳减排量是减缓气候变化与推动城市社会经济绿色转型关注的重要话题^[6], 利用普通状态的碳排放情景研究数据, 基于2021~2035年基准情景的碳排放量, 计算2021~2035年低碳情景、极低情景和动态模拟的碳排放量减少量, 得到3种情景下的珠三角城市群累计碳减排潜力(图5)。假如各市积极响应率先碳达峰工作和采取低碳情景措施, 2021~2035年累计碳减排潜力将达到30486万t(图5(a)), 更严格的节能减排措施将再减排28236万t(极低情景, 图5(b))。动态模拟(图5(c), (d))能突破情景之间的静态局限进行随机情景组合, 较好地模拟了政策落实与碳排放演化的不确定性, 预测显示珠三角累计碳减排潜力为-8168万~12825万t(正值表示在基准情景基础上进一步碳减排, 负值表示减排效果弱于基准情景)(图5(c)), 66.79%的概率实现进一步碳减排且2744万t碳减排量的概率最高。

相较于低碳情景和极低情景展现的高排放城市碳减排潜力更大, 动态模拟进一步揭示了潜力、碳达峰年与城市类型的可能关系(图5(d)): 早实现碳达峰的城市潜力较小, 曲线相对集中, 2030年碳达峰的江门和肇庆的概率曲线较2012年碳达峰的深圳和东莞更为扁平且曲线范围更大, 剩余的3个潜在碳达峰类城市的碳减排潜力更是位列前3。综合来看, 碳减排边际潜力随时间推移不断增大(图5(a), (b), (d)), 因此越早采取低碳减排措施和尽早实现城市碳达峰将更大程度地提高珠三

图4 动态模拟下珠三角城市碳排放量最大值年. 不含在2020年达峰的广州(99.12%)与惠州(100%)和已达峰的深圳、珠海与东莞
Figure 4 Max year of carbon emissions of cities in PRD under dynamic simulation. This figure excludes 5 cities which peaks no later than 2020, including Guangzhou (99.12% probability of peaking in 2020), Huizhou (100% probability of peaking in 2020), Shenzhen (reached peak in 2012), Zhuhai (reached peak in 2016) and Dongguan (reached peak in 2012)

角的碳减排量, 制定碳达峰行动方案时要更加注重碳达峰相对滞后的城市, 加快其碳达峰进程。

3 讨论与结论

本文利用多情景分析、蒙特卡罗法、Mann-Kendall趋势检验、Theil-Sen's趋势斜率估计等方法, 动态模拟2021~2035年珠三角城市群碳排放量, 并分析2006~2035年碳排放的演化路径、碳达峰状况、碳减排潜力等, 主要结论如下。

(1) 2006~2016年珠三角城市群碳排放量快速增加, 动态模拟表明其于2020年显著碳达峰, 2035年碳排放量减少至24885万~27006万t, 碳强度较2006年降低84.18%~85.21%。在基准情景的减排基础上, 低碳情景和极低情景下2021~2035年累计碳减排潜力高达30486万和58722万t, 情景随机组合的动态模拟则为-8168万~12825万t, 碳减排潜力有66.79%的概率为正, 即较基准情景进一步减排, 其中2744万t的概率最大。广东省有条件地区2025年率先碳达峰的目标合理, 尽管江门和肇庆存在未达峰风险, 珠三角城市群与其他城市有较大概率完成。

(2) 深圳、珠海、惠州和东莞属于碳达峰类城市, 其中深圳和东莞于2012年实现碳达峰, 珠海和惠州为2016和2020年, 峰值分别为3932万、1646万、4952万

和4194万t, 动态模拟显示该类城市碳达峰后呈快速减排的倒“U”型演化, 全时间序列碳排放量显著下降, 2035年减少至1415万~1540万、917万~994万、2407万~2608万和2236万~2424万t。2021~2035年累计碳减排潜力较小, 分别为-799万~869万、-348万~487万、-597万~1539万和-877万~1262万t, 概率曲线较集中。

(3) 广州、佛山、中山、江门和肇庆属于潜在碳达峰类城市, 碳排放量多情景发散型演化。动态模拟下广州99.12%于2020年碳达峰, 峰值为6966万t, 新低碳措施的缺失可能导致2020年假碳达峰与无法率先碳达峰, 其碳排放量占珠三角比重近1/4且不同情景碳排放量差异最大, 深远影响着珠三角城市群碳排放演化。其他4市全时间序列碳排放量递增且碳达峰后减排态势弱, 存在碳强度下降目标落空与持续增排的风险。动态模拟显示佛山与中山2025年碳达峰的概率均不低于96.01%, 峰值为5265万~5540万和2616万~2740万t。江门和肇庆碳达峰进程落后且整体呈增排态势, 动态模拟显示其2025年碳达峰低于20.08%且存在最低2.04%的未达峰风险, 2030年碳达峰峰值为3527万~3761万和2128万~2274万t。2035年该类城市减排至5690万~6187万、4435万~4816万、2392万~2591万、3378万~3658万和2015万~2188万t, 2021~2035年累计碳减排潜力相对较大, 分别为-2375万~2660万、-1751万~2217万、

图5 2021~2035年珠三角累计碳减排潜力。(a) 低碳情景; (b) 极低情景; (c) 动态模拟下珠三角城市群; (d) 动态模拟下珠三角各市。图中涉及数据均为普通状态的碳排放情景研究值

Figure 5 Cumulative carbon reduction potential of PRD during 2021 to 2035. (a) Low emissions; (b) extremely low emissions; (c) dynamic simulation of the Pearl River Delta Urban Agglomeration; (d) cities in PRD under dynamic simulation. The data involved are carbon emissions at normal speed

-664万~1219万、-757万~1782万和-386万~1179万t。

(4) 城市尽早碳达峰对碳减排具有重要推动作用, 累计碳减排潜力曲线表明碳减排边际潜力随时间递增, 早采取减排措施与早实现碳达峰将提高碳减排量。制定碳达峰行动方案时要预防平台期城市的假碳达峰, 注重碳排放量占比较高城市碳达峰带来的示范与加速作用, 更要挖掘碳达峰滞后城市的碳减排潜力并优化其能源结构与利用效率。

本文通过综合各市发展态势与疫情影响设定城市差异化增长率, 基于不依赖历史碳排放数据建立模型和减少疫情重大影响的Kaya恒等式, 利用蒙特卡罗法进行每城市各10万次的变概率动态模拟, 有效识别出珠三角城市群碳排放最可能情况, 更精确模拟了后疫情时期珠三角城市群碳排放的演化、碳达峰状况与碳减排潜力。相较于侧重碳排放拐点与峰值研究的方法, 本文对城市碳达峰年和不同情景累计碳减排潜力的深入不确定性分析成为碳达峰行动方案的可靠参考, 同

时为后疫情时期城市碳排放情景研究与碳达峰决策支持提供了可靠的研究思路。由于城市尺度能源消费、人口规模等数据不足, 在一定程度上制约了本次珠三角城市群城市碳排放情景研究的开展, 未来可从以下方向进一步深化城市碳排放情景研究: (1) 面向2060年碳中和、1.5°C温控目标等政策背景, 加入RCP1.9情景分析, 深化碳排放情景设置与预测参数设定, 为我国城市碳达峰与碳中和提供降碳措施与路径择优的理论支撑; (2) 进一步扩充研究对象, 开展更广泛的城市碳排放情景研究与碳达峰路径对比, 从全国尺度探讨我国普适性与因地制宜的城市碳达峰路径。

城市碳达峰是全方位与宽领域的系统工程, 其实现离不开产业转型升级、能源供需优化、基础设施升级、低碳技术推广、绿色金融服务等, 未来碳达峰研究需深化量化产业升级、低碳技术、碳交易等带来的减排效应, 进一步提高预测的准确性与科学性, 服务于城市碳达峰行动方案与社会经济绿色转型。

参考文献

- 1 Lei L P, Zhong H, He Z H, et al. Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions based on satellite observations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2941–2950 [雷莉萍, 钟惠, 贺忠华, 等. 人为排放所引起大气CO₂浓度变化的卫星遥感观测评估. 科学通报, 2017, 62: 2941–2950]
- 2 Liu Z, Guan D B, Wei W. Carbon emission accounting in China (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2018, 48: 878–887 [刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 878–887]
- 3 He J H, Cai Y L, Qin P. Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 194–202 [何江浩, 蔡玉林, 秦鹏. 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析. 科学通报, 2020, 65: 194–202]
- 4 Wang H, Lu X, Deng Y, et al. China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities. *Nat Sustain*, 2019, 2: 748–754
- 5 Cai Z N, Cheng L J, Li T T, et al. Key scientific and technical issues in earth system science towards achieving carbon neutrality in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 602–613 [蔡兆男, 成里京, 李婷婷, 等. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析. 中国科学院院刊, 2021, 36: 602–613]
- 6 He J K, Chen W Y, Wang Z Y, et al. Climate change mitigation in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1055–1062 [何建坤, 陈文颖, 王仲颖, 等. 中国减缓气候变化评估. 科学通报, 2016, 61: 1055–1062]
- 7 Mo H B, Wang S J. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2021, 41: 1324–1335 [莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制. 地理科学, 2021, 41: 1324–1335]
- 8 Wang S J, Gao S, Huang Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 1316–1330 [王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. 地理学报, 2020, 75: 1316–1330]
- 9 Ürge-Vorsatz D, Rosenzweig C, Dawson R J, et al. Locking in positive climate responses in cities. *Nat Clim Change*, 2018, 8: 174–177
- 10 Duan H, Zhou S, Jiang K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit. *Science*, 2021, 372: 378–385
- 11 Jiang H Y, Duan Y R, Zhang Z, et al. Study on peak CO₂ emissions of typical large cities in China (in Chinese). *Clim Chang Res*, 2021, 17: 131–139 [蒋含颖, 段祎然, 张哲, 等. 基于统计学的中国典型大城市CO₂排放达峰研究. 气候变化研究进展, 2021, 17: 131–139]
- 12 Cao L B, Li M Y, Zhang L, et al. Research on carbon dioxide emission peaking in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration (in Chinese). *Environ Eng*, 2020, 38: 33–38 [曹丽斌, 李明煜, 张立, 等. 长三角城市群CO₂排放达峰影响研究. 环境工程, 2020, 38: 33–38]
- 13 Fang K, Tang Y, Zhang Q, et al. Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces. *Appl Energy*,

- 2019, 255: 113852
- 14 Zhang F, Deng X, Xie L, et al. China's energy-related carbon emissions projections for the shared socioeconomic pathways. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 168: 105456
- 15 Wang Y, Wang E D, Bi Y. Impact of a peak in carbon emissions on China's economy in different situations: Analysis based on CGE model (in Chinese). *Resour Sci*, 2017, 39: 1896–1908 [王勇, 王恩东, 毕莹. 不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于CGE模型的分析. *资源科学*, 2017, 39: 1896–1908]
- 16 Hong J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model (in Chinese). *Resour Sci*, 2021, 43: 639–651 [洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型. *资源科学*, 2021, 43: 639–651]
- 17 Shao S, Zhang X, Zhao X R. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector—Generalized dividia index method and dynamic scenario analysis (in Chinese). *Chin Ind Econ*, 2017, (3): 44–63 [邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析. *中国工业经济*, 2017, (3): 44–63]
- 18 Feng Z X, Wang A J. Decomposition of carbon emission factors and prediction of carbon peak in Shaanxi Province (in Chinese). *J SWUN Natl*, 2016, 37: 112–119 [冯宗宪, 王安静. 陕西省碳排放因素分解与碳峰值预测研究. *西南民族大学学报(人文社科版)*, 2016, 37: 112–119]
- 19 Institute of Climate Change and Sustainable Development, Tsinghua University. A comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transition path (in Chinese). *Chin Popul Resour Environ*, 2020, 30: 1–25 [清华大学气候变化与可持续发展研究院. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30: 1–25]
- 20 Wang Y, Xu Z Y, Zhang Y X. Influencing factors and combined scenario prediction of carbon emission peaks in megacities in China: Based on threshold-STIRPAT model (in Chinese). *Acta Sci Circum*, 2019, 39: 4284–4292 [王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测——基于门限-STIRPAT模型的研究. *环境科学学报*, 2019, 39: 4284–4292]
- 21 Xu G, Schwarz P, Yang H. Determining China's CO₂ emissions peak with a dynamic nonlinear artificial neural network approach and scenario analysis. *Energy Policy*, 2019, 128: 752–762
- 22 Lu C Y, Chen W Y. The scenarios of China reaching the peaking of carbon emission before 2030 and its macroeconomic implications (in Chinese). *J Environ Econ*, 2021, 6: 10–30 [鲁传一, 陈文颖. 中国提前碳达峰情景及其宏观经济影响. *环境经济研究*, 2021, 6: 10–30]
- 23 Lin B Q, Liu X Y. China's carbon dioxide emissions under the urbanization process: Influence factors and abatement policies (in Chinese). *Econ Res J*, 2010, 45: 66–78 [林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略. *经济研究*, 2010, 45: 66–78]
- 24 Le Quéré C, Peters G P, Friedlingstein P, et al. Fossil CO₂ emissions in the post-COVID-19 era. *Nat Clim Chang*, 2021, 11: 197–199
- 25 Guo Y W, Xiang X M. The Analysis and Forecast of Guangdong's Economic and Society (2021) (in Chinese). Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2021 [郭跃文, 向晓梅. 广东经济社会形势分析与预测(2021). 北京: 社会科学文献出版社, 2021]
- 26 Liu Z, Cui D, Deng Z, et al. Impact on China's CO₂ emissions from COVID-19 pandemic (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 1912–1922 [刘竹, 崔夺, 邓铸, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情对中国2020年碳排放的影响. *科学通报*, 2021, 66: 1912–1922]
- 27 Wang S J, Cui Z T, Lin J J, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2021, 76: 973–991 [王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76: 973–991]
- 28 Chen J, Gao M, Cheng S, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997–2017. *Sci Data*, 2020, 7: 391
- 29 China City Greenhouse Gas Working Group. China City Greenhouse Gases Emissions Dataset (in Chinese). Beijing: China Environment Publishing Group, 2019 [中国城市温室气体工作组. 中国城市温室气体排放数据集. 北京: 中国环境出版集团, 2019]
- 30 Statistics Bureau of Guangdong Province, Survey Office of National Bureau of Statistics in Guangdong. 2020 Guangdong Statistical Yearbook (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2020 [广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴2020. 北京: 中国统计出版社, 2020]
- 31 Chen Y, Guo F, Wang J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100. *Sci Data*, 2020, 7: 83
- 32 Bu C, Cui X, Li R, et al. Achieving net-zero emissions in China's passenger transport sector through regionally tailored mitigation strategies. *Appl Energy*, 2021, 284: 116265
- 33 Ren M, Lu P, Liu X, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality. *Appl Energy*, 2021, 298: 117209
- 34 Weng Y, Cai W, Wang C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060. *Appl Energy*, 2021, 299: 117263
- 35 Zhang S L, Wu Y Z, Liu X R, et al. Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 095011
- 36 Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group, May, 1989
- 37 Zhang Y, Liu C, Chen L, et al. Energy-related CO₂ emission peaking target and pathways for China's city: A case study of Baoding City. *J Cleaner*

- Prod, 2019, 226: 471–481
- 38 Gu S, Fu B, Thriveni T, et al. Coupled LMDI and system dynamics model for estimating urban CO₂ emission mitigation potential in Shanghai, China. *J Cleaner Prod*, 2019, 240: 118034
 - 39 Ye F, Xie X, Zhang L, et al. An improved grey model and scenario analysis for carbon intensity forecasting in the Pearl River Delta Region of China. *Energies*, 2018, 11: 91
 - 40 Chattopadhyay G, Chakraborty P, Chattopadhyay S. Mann-Kendall trend analysis of tropospheric ozone and its modeling using ARIMA. *Theor Appl Climatol*, 2012, 110: 321–328
 - 41 Zhang C L, Li Y, Yang W Z, et al. The influence of COVID-19 on birth numbers in China (in Chinese). *Pop Res*, 2021, 45: 88–96 [张翠玲, 李月, 杨文庄, 等. 新冠肺炎疫情对中国出生人口变动的影响. *人口研究*, 2021, 45: 88–96]
 - 42 Zheng S M. Political cycle, Five-Year Plan and environmental pollution—With empirical analysis of industrial sulfur dioxide emissions (in Chinese). *Cass J Polit Sci*, 2016, (2): 80–94 [郑石明. 政治周期、五年规划与环境污染——以工业二氧化硫排放为例. *政治学研究*, 2016, (2): 80–94]
 - 43 World Bank. *Global Economic Prospects*, June 2021. Washington DC: World Bank, 2021
 - 44 OECD. *OECD Economic Outlook*, Volume 2021 Issue 1: Preliminary version, No. 109. Paris: OECD, 2021
 - 45 Yi X, Guo C L. Trend of potential growth rate in China in the next 30 years and forecast of development level in 2049 (in Chinese). *Economist*, 2018, (2): 36–45 [易信, 郭春丽. 未来30年我国潜在增长率变化趋势及2049年发展水平预测. *经济学家*, 2018, (2): 36–45]
 - 46 Sheng L Y, Li T, Mao S Y, et al. Total factor productivity measurement and forecast of economic growth in China (in Chinese). *J Statist Inf*, 2018, 33: 3–11 [盛来运, 李拓, 毛盛勇, 等. 中国全要素生产率测算与经济增长前景预测. *统计与信息论坛*, 2018, 33: 3–11]
 - 47 Huang T Y, Zhang Z. The potential growth rate to achieve the development goal of 2035 (in Chinese). *Econ Theor Bus Manag*, 2021, 41: 4–12 [黄泰岩, 张仲. 实现2035年发展目标的潜在增长率. *经济理论与经济管理*, 2021, 41: 4–12]
 - 48 Liao H, Xiang F Z. Forecast and prospect of energy demand in China's "14th Five-year" Plan period (in Chinese). *J Beijing Inst Technol (Soc Sci Ed)*, 2021, 23: 1–8 [廖华, 向福州. 中国“十四五”能源需求预测与展望. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23: 1–8]
 - 49 Pan D, Li N, Li F, et al. Mitigation strategy of Eastern China based on energy-source carbon emission estimation (in Chinese). *Acta Sci Circum*, 2021, 41: 1142–1152 [潘栋, 李楠, 李锋, 等. 基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定. *环境科学学报*, 2021, 41: 1142–1152]
 - 50 Feng F, Bai Z E. Research on the forecasting of energy demand and the paths of carbon emissions reaching peak of Guangdong Province: Based on the hybrid-units energy input-output model (in Chinese). *Urban Env Stud*, 2019, (2): 8–27 [冯烽, 白重恩. 广东省能源需求预测与碳排放达峰路径研究——基于混合单位能源投入产出模型. *城市与环境研究*, 2019, (2): 8–27]
 - 51 Gao L, Zheng Y W, Yang D T, et al. Criterial equation of carbon neutrality for power systems (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3932–3936 [高林, 郑雅文, 杨东泰, 等. 构建碳中和电力系统——碳中和公式. *科学通报*, 2021, 66: 3932–3936]
 - 52 Huang Z, Xie X M. Energy revolution under vision of carbon neutrality (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 1010–1018 [黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革. *中国科学院院刊*, 2021, 36: 1010–1018]
 - 53 Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 1001–1009 [苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨. *中国科学院院刊*, 2021, 36: 1001–1009]
 - 54 IEA-International Energy Agency. *An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China*. Paris: IEA, 2021
 - 55 Energy Foundation, University of Maryland. *A New Journey of China's Modernization: A New Growth Story From the 14th Five-year Plan to Carbon Neutrality* (in Chinese). Beijing: Energy Foundation, 2020 [能源基金会, 马里兰大学. 中国现代化的新征程: “十四五”到碳中和的新增长故事. 北京: 能源基金会, 2020]

补充材料

图S1 珠三角城市群区位

本文以上补充材料见网络版, 补充材料为作者提供的原始文件, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰”

Carbon emissions dynamic simulation and its peak of cities in the Pearl River Delta Urban Agglomeration

Shaojian Wang¹, Huibin Mo¹ & Chuanglin Fang^{2*}¹ School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China* Corresponding author, E-mail: fangcl@igsnr.ac.cn

Cities account for more than 70% of global carbon emissions and play an important role in mitigating climate change and achieving carbon peak and carbon neutrality. As the Paris Agreement emphasizes the need to reach global peaking of greenhouse gas emissions as soon as possible, it is significant to predict carbon emissions at the city level. However, the current COVID-19 pandemic has dramatically impacted global socioeconomic development and carbon emissions, downplaying the reference value for most urban carbon emission prediction models. In fact, existing studies on urban carbon emission prediction have also suffered from some shortcomings, such as unclear analyses of the impact of the pandemic, single scenario prediction, unified setting of growth rates, and failure to provide decision support for the government's carbon peak work. Therefore, a multi-scenario study on urban carbon emission prediction and carbon peak in the post-pandemic period would provide local governments with scientific data to make their carbon peak action plan.

To that end, we set five-carbon emission scenarios: business as usual (BAU), high emissions (HE), extremely high emissions (EHE), low emissions (LE) and extremely low emissions (ELE). Based on the Monte Carlo method, we adjust the probabilities of different periods and different carbon emission scenarios to simulate uncertain evolution of carbon emissions as well as carbon emission reduction. Combining multi-scenario analyses with the Mann-Kendall trend test and Theil Sen's trend slope estimation method, we predict carbon emissions of the Pearl River Delta Urban Agglomeration (PRD) from 2021 to 2035 and analyze the evolution path of PRD's carbon emissions as well as its potential for carbon peak and carbon emission reduction from 2006 to 2035. Discussions are made on the possibility of achieving conditional areas' carbon peak goal in 2025 in Guangdong and China's carbon peak goal in 2030. We find that:

(1) Carbon emissions of PRD increased rapidly from 2006 to 2016. Dynamic simulation shows that carbon emissions a significant peak in 2020 and decrease to 248.85 M–270.06 Mt in 2035. Carbon intensity decreases by 84.18%–85.21% from 2006 to 2035. Based on the emission reduction of the BAU scenario, the cumulative carbon emission reduction potential of the LE scenario and ELE scenario is as high as 304.86 M and 587.22 Mt from 2021 to 2035. Carbon emission reduction potential based on dynamic simulation of random combination scenario is between –81.68 and 128.25 Mt, with a probability of 67.65% to achieve further emission reduction. The probability of reducing 27.44 Mt carbon emissions is the largest.

(2) Shenzhen, Zhuhai, Huizhou and Dongguan are four cities that show an inverted “U” shaped evolution path to achieve carbon peak. All of them reach the carbon peak no later than 2020. From 2006 to 2035, especially after the carbon peak, carbon emissions of these cities will decrease significantly. Their carbon emissions will reduce by 14.15 M–15.40 Mt, 9.17 M–9.94 Mt, 24.07 M–26.08 Mt and 22.36 M–24.24 Mt in 2035, respectively. The cumulative carbon emission reduction potential from 2021 to 2035 is –7.99 M–8.69 Mt, –3.48 M–4.87 Mt, –5.97 M–15.39 Mt and –8.77 M–12.62 Mt, respectively. However, being earlier to reach a carbon peak reduces their carbon emission reduction potential from 2021 to 2035.

(3) Guangzhou, Foshan, Zhongshan, Jiangmen and Zhaoqing are five cities that could potentially reach carbon peaks but with divergent evolution paths. Some scenarios are at risk of not reaching a carbon peak. The possibility for Guangzhou, Foshan and Zhongshan to achieve the carbon peak target of conditional areas in Guangdong Province in 2025 is more than 96.01%, while that for Jiangmen and Zhaoqing is less than 20.08%. Moreover, there is a possibility of 2.04% for Jiangmen and Zhaoqing not to reach a carbon peak. In 2035, the emission reduction of the five cities will be 56.90 M–61.87 Mt, 44.35 M–48.16 Mt, 23.92 M–25.91 Mt, 33.78 M–36.58 Mt and 20.15 M–21.88 Mt, respectively. The cumulative carbon emission reduction potential of these cities from 2021 to 2035 is significant, which is –23.75 M–26.60 Mt, –17.51 M–22.17 Mt, –6.64 M–12.19 Mt, –7.57 M–17.82 Mt and –3.86 M–11.79 Mt, respectively.

(4) Being earlier to reach a carbon peak is conducive for cities to reduce carbon emissions. The curve of cumulative carbon emission reduction potential shows that the marginal potential of carbon emission reduction increases with time. So early adoption of emission reduction measures and early realization of carbon peak will promote carbon emission reduction. When making action plans for carbon peak, we should prevent cities from reaching false carbon peak during the platform period, pay attention to the demonstration and acceleration effect of carbon peak cities with relatively high carbon emissions, and explore the carbon emission reduction potential of cities that have difficulties in reaching carbon peak by optimizing their energy structure and utilization efficiency.

carbon emissions, carbon emissions peak of the city, the Pearl River Delta Urban Agglomeration, scenario analysis, Monte Carlo, variable probability dynamic simulation

doi: [10.1360/TB-2021-0681](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0681)