

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.06.028

重庆市化石能源消耗的 CO₂ 排放 及其峰值测算研究^①

范登龙^{1,2}, 黄毅祥², 蒲勇健², 杨文芳¹

1. 重庆科技学院 重庆能源经济管理研究中心, 重庆 401331; 2. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400045

摘要: 运用实测法对重庆市 CO₂ 的排放量、排放强度和排放源进行了测算, 并在此基础上, 将 STIRPAT 拓展模型应用于重庆市化石能源消耗的 CO₂ 排放峰值的测算. 结果表明: (1) 伴随着重庆市经济的高速增长, 重庆市 CO₂ 排放量急剧增加, 重庆的经济发展还是粗放型增长; (2) 历史渊源(重工业基地) 和国家发展战略(东部优先发展) 决定了重庆市的碳排放强度与全国平均水平还有很大差距, 能源利用率相对较低; (3) 大量的煤炭消费是 CO₂ 的主要来源, 其平均贡献率高达 82.33%; (4) 按照当前发展趋势, 重庆市的 CO₂ 排放峰值将在 2025—2045 年期间出现; (5) 产业转型和碳排放强度对峰值的出现具有显著影响, 经济发展中成功实现产业转型升级和对碳排放强度的控制, 会推动峰值提前到来. 反之, 则会导致重庆市碳排放峰值出现时间后延.

关键词: 化石能源消耗; CO₂ 排放; 峰值预测

中图分类号: X502

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)06-0179-08

全球气候变暖已经是不争的事实, 这已经严重威胁到人类的生存环境和可持续发展. 节能减排压力与经济发展之间的矛盾愈发突出, 碳污染已经是国际社会聚焦的全球性问题. 2015 年第 21 届联合国气候大会在巴黎召开, 旨在促使 196 个缔约方(195 个国家+欧盟) 就共同应对全球变暖达成世界性的公约, 期望以此来维护人类赖以生存的环境. 中国政府在 2009 年也公布了“到 2020 年碳排放强度相对于 2005 年降低 40%~50%”的目标, 并纳入到“十二五”国民经济和社会发展规划中. 中国幅员辽阔, CO₂ 排放的区域分布上呈现出明显的地区差异^[1]. 中国碳排放减排压力很大, 如何在兼顾地区发展公平、缩小区域差距的前提下制定适用于特定区域的减排方案, 已经成了当前学术界研究的热点问题.

国内外学者一直都十分关注一个国家或地区碳排放量及其影响因素, 并采用了多种方法来对此进行研究. Ehrlich(1970)^[2] 最早提出了 IPAT 模型, 用来研究人类活动对环境的影响, 认为人口规模、经济发展水平和技术发展水平是主要因素. Waggoner 和 Ausubel(2002)^[3] 提出 IPAT 模型存在改进的空间, 除了人口、经济和技术外, 效率也对自然环境有显著影响, 于是建立了 ImPACT 模型. 随后, York R, Rosa EA, Dietz T(2003)^[4] 参考 IPAT 模型和 ImPACT 模型进一步提出 STIRPAT 模型, 他们认为自然环境与影响因素之间并非是单调和比例的效应关系, IPAT 模型和 ImPACT 模型均存在缺陷, 在这两个模型基础上提出一种包含人口规模、经济发展水平、技术发展水平和生态环境影响等因素的随机回归模型(STIRPAT). 此外, 还有很多学者采用 Granger 因果关系检验法对特定国家或区域的碳排放量及其影响

① 收稿日期: 2016-03-29

基金项目: 重庆市社会科学规划项目(2015YBJJ027); 国家社科基金西部项目(13XJL005).

作者简介: 范登龙(1980-), 男, 湖北洪湖人, 讲师, 博士研究生, 主要从事能源经济研究.

通信作者: 黄毅祥, 博士研究生.

因素进行了分析^[5-6]。对于中国 CO₂ 排放的相关研究,学者们也取得了丰硕的研究成果,这些研究成果可以归纳为两个方向:其一,对中国及国内特定区域的 CO₂ 排放量与峰值进行预测^[7-9];其二,分析和探讨 CO₂ 排放的局部收敛情况,包括 α 收敛和 β 收敛^[10-11],但现有文献对相关重工业基地这一特定区域的碳排放测量鲜有研究。

基于此,本文运用实测法对重庆市 CO₂ 的排放量、排放强度和排放源进行了测算,采取岭回归方法,利用 STIRPAT 拓展模型建立回归模型,并在此基础上,模拟不同排放情境下重庆市化石能源消耗的 CO₂ 排放峰值及出现的年份,得出实证结论和政策启示。

1 基于化石能源消费的 CO₂ 排放量估算

1.1 CO₂ 排放量的估算方法

学术界对化石能源消费 CO₂ 排放量的估算方法主要包括实测法、统计法和数学模型估算法。考虑估算的相对准确性和可操作性,实测法使用最为普遍^[12]。基于此,本研究选取实测法对重庆市的 CO₂ 排放量进行估算,具体模型为

$$I_t = \sum_{i=1}^n (EC_{i,t} \cdot \eta_i)$$

其中, I_t 为第 t 年的 CO₂ 排放总量, $EC_{i,t}$ 为第 t 年化石能源 i 的消费量, η_i 为单位化石能源 i 的 CO₂ 量,即化石能源 i 的 CO₂ 排放系数(见表 1), n 为消费的化石能源种类数。

表 1 各种化石能源的 CO₂ 排放系数

能源类别	CO ₂ 排放系数	能源类别	CO ₂ 排放系数
原煤	2.77	柴油	2.17
焦炭	3.14	煤油	2.11
原油	2.15	燃料油	2.27
汽油	2.05	天然气	1.64

数据来源: IPCC 各种燃料 CO₂ 排放系数(吨 CO₂/吨标准煤)。

1.2 数据来源

根据《中国能源统计年鉴》的口径,将终端能源消费划分为煤炭、焦炭、汽油、柴油、原油、煤油、燃料油、天然气和电力 9 类,在中国统计年鉴与地方统计年鉴中又进一步归纳为煤炭、天然气、油料和电力 4 类。考虑重庆市于 1997 年直辖,本研究使用到的能源数据和经济数据取自 1997 年至 2015 年的统计年鉴。重庆市历年各类能源消费情况见图 1。

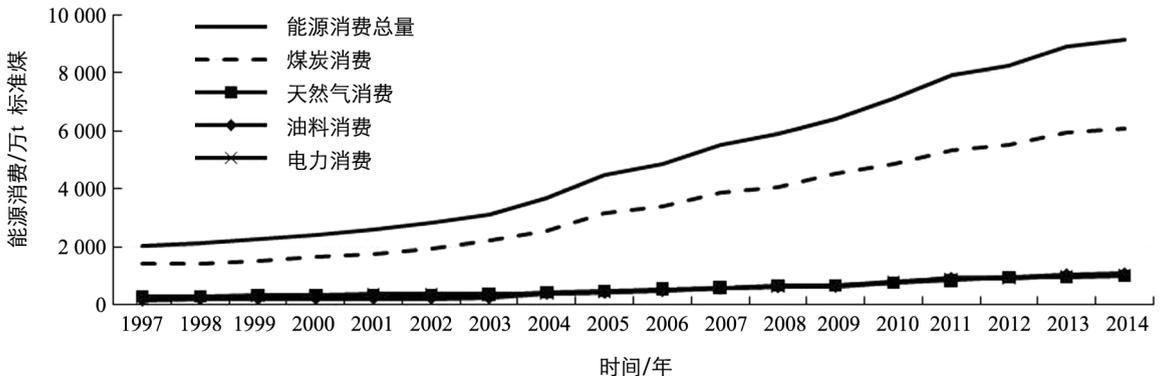


图 1 重庆市历年能源消费情况

1.3 化石能源 CO₂ 排放量的测算与分析

1.3.1 CO₂ 排放总量分析

以表 1 中原煤、液化天然气以及原油的 CO₂ 排放系数作为煤炭、天然气和油料的排放系数,根据公式

(1), 可以测算出 1997 年至 2014 年重庆市能源消费的 CO₂ 排放量及其增长率(图 2). 重庆市 CO₂ 排放量不断加剧, 由直辖之初 1997 年的 4680 万 t 增加到 2014 年的 20718 万 t, 年均增长率高达 9.26%. 当然, 这一现象与重庆市经济的高速增长密不可分. 从 CO₂ 排放量的变动与 GDP 的变动对比可以得到直观的体现, 两者增长趋势基本一致(图 3), CO₂ 排放与 GDP 变动的弹性系数高达 0.65, 这也折射出重庆经济是粗放型增长的本质特征. 不过, 欣慰的是“十一五”以来, 国家强化节能减排, 重庆市取得比较显著的效果, CO₂ 排放的增长率上得到了较好的控制, CO₂ 排放增长率呈现出显著的下行趋势(见图 2).

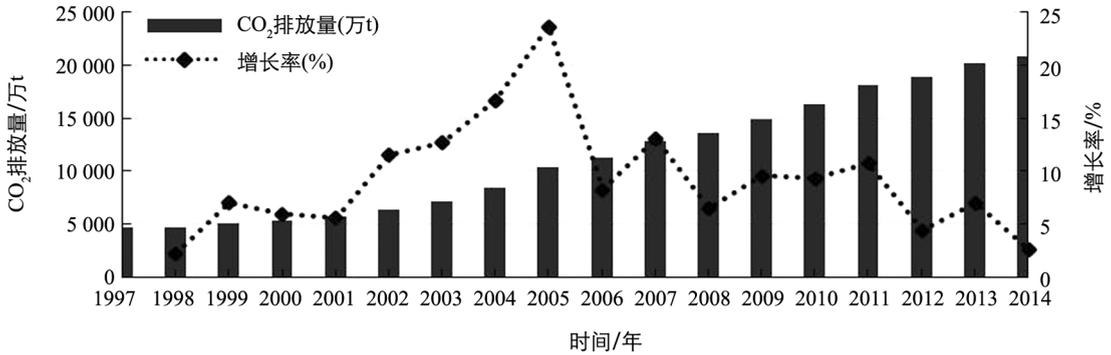


图 2 1997—2014 年重庆市 CO₂ 排放量及其增长情况

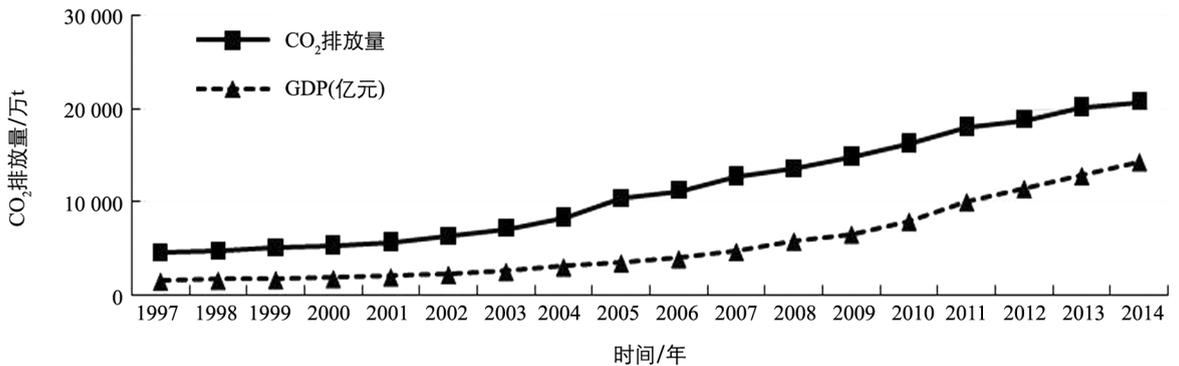


图 3 1997—2014 重庆市 CO₂ 排放量与 GDP 的比较

1.3.2 排放强度分析

碳排放强度是指单位国内生产总值的增长所带来的 CO₂ 排放量, 反映了一个地区在其经济发展的同时对气候环境变化的影响, 碳排放强度越低, 意味着能源利用率越高、经济效益越好. 本研究用 CO₂ 排放量与 GDP 的比值来度量碳排放强度(见图 4). 可以看出, 重庆市的 CO₂ 排放强度呈逐年下降的趋势, 由 1997 年的每万元 3.10 t 到 2014 年每万元 1.45 t, 下降了五成, 可谓卓有成效. 但与同期全国的碳排放强度下降近七成相比, 还有很大差距. 出现这一现状, 一方面, 是受中国阶段性发展战略需要的影响, 改革开放后, 东部地区优先发展, 而后逐步向中西部迁移, 从发展规律上相对滞后; 另一方面, 重庆长期以来都是重工业发展基地, 能源利用率较低是重工业的通病. 从人均 CO₂ 排放量看, 也可以得出相同的结论. 1997 年, 重庆的人均 CO₂ 排放量为 1.63 万 t, 低于全国人均 CO₂ 排放量 2.69 万 t; 但到 2014 年, 重庆的人均 CO₂ 排放量 6.93 万 t, 高于全国人均 CO₂ 排放量 6.42 万 t. 这就对重庆市政府在节能减排上提出了更高的要求, 任重道远.

1.3.3 排放的贡献源分析

按照燃煤、燃油和燃气为标志对 CO₂ 的排放源进行重新归类, 进一步分析各类化石燃料对 CO₂ 排放量的贡献率(见图 5). 可以看出, 大量的煤炭消费是 CO₂ 的主要来源, 其平均贡献率高达 82.33%; 石油次之, 平均贡献率为 10.86%; 天然气的贡献率为 6.82%. 一方面是使用量上, 煤炭高于石油和天然气; 另一方面, 化石能源的 CO₂ 排放系数上(原煤 2.77 > 原油 2.15 > 天然气 1.64), 单位质量的煤炭燃烧产生的

CO₂ 多于石油和天然气, 因此, 用天然气代替煤炭和石油, 能起到节能减排的效果. 这也就为重庆市政府做好节能减排部署提供了新的方向, 结合重庆的区域优势, 重庆燃气所处的四川盆地, 是我国天然气资源最丰富的地区之一, 所以把天然气作为主要能源具有得天独厚的优势.

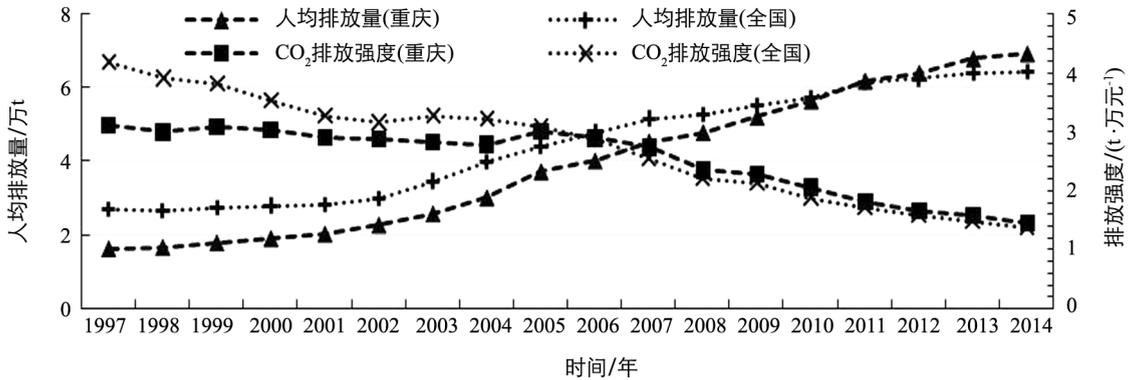


图 4 重庆 CO₂ 排放强度与全国的对比

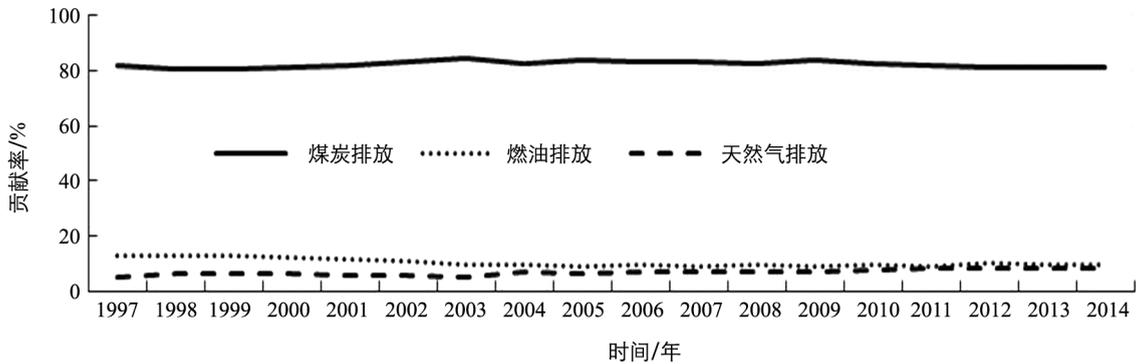


图 5 重庆市 CO₂ 排放各类化石能源的贡献率

2 重庆市碳排放峰值测算与分析

2.1 基本模型与数据处理

2.1.1 基本模型

本研究选取 STIRPAT 模型对重庆市碳排放峰值进行预测分析, 基本模型为

$$I = aP^bA^cT^de$$

两边取对数可以将模型改写为:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e$$

其中, P 表示人口, A 表示财富, T 表示技术(经济活动中的能源效率或碳排放强度), I 表示碳排放量. 参考 York R, Rosa EA, Dietz T(2003)^[4]等的研究, 考虑产业结构 C 的影响及经济发展指标的非单一的一次线性关系, 进一步对模型进行拓展, 建立二次模型:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + f \ln C + g (\ln A)^2 + e$$

2.1.2 数据来源

研究中涉及的变量和数据资料主要包括碳排放量、人口规模、经济发展、技术水平和产业结构 5 个方面. 对于 CO₂ 排放总量, 由 1.1 的方法测算而得. 对于人口规模 and 经济发展, 本研究分别选用重庆的户籍人口和地区生产总值来衡量. 对于技术水平和产业结构, 分别选用碳排放强度和工业增加值占 GDP 的比值来表征. 各变量的描述性统计量及其相关系数矩阵分别见表 2、表 3 所示. 本研究涉及的数据均来源于重庆市历年的统计年鉴.

表 2 变量的描述性统计量

变 量	最小值	最大值	均值	标准差
CO ₂ 排放量/万 t	4 680.22	20 717.56	11 381.00	5 709.69
总人口/万人	3 042.92	3 375.21	3 199.91	112.06
人均 GDP/元	5 253.13	47 694.42	18 624.32	13 978.36
碳排放强度/(万 t·亿元 ⁻¹)	1.45	3.10	2.52	0.57
产业结构/%	41.96	55.37	47.41	4.78

表 3 变量取对数后的相关系数矩阵

	lnI	lnP	lnA	lnT	lnC
lnI	1				
lnP	0.96	1			
lnA	0.97	0.82	1		
lnT	-0.95	-0.82	-0.98	1	
lnC	0.80	0.34	0.67	-0.70	1

2.1.3 估计结果

从表 3 可以看出, 自变量间的相关性比较高, 存在多重共线性. 为了消除共线性, 本研究选用岭回归对模型进行估计. 岭回归是最小二乘估计的一种改进算法, 当存在多重共线性时, 通过在变量标准化矩阵的主对角线元素加入一个非负因子 k , 来提高估计的稳定性. 根据建立的 STIRPAT 拓展模型, 运用 SPSS18.0 中的 Ridge Regression 宏程序, 拟合得出岭迹图(图 6、图 7).

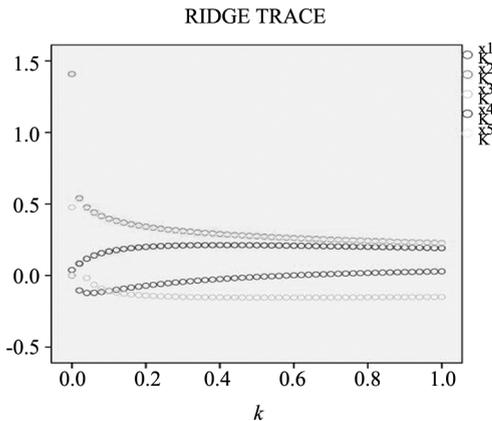
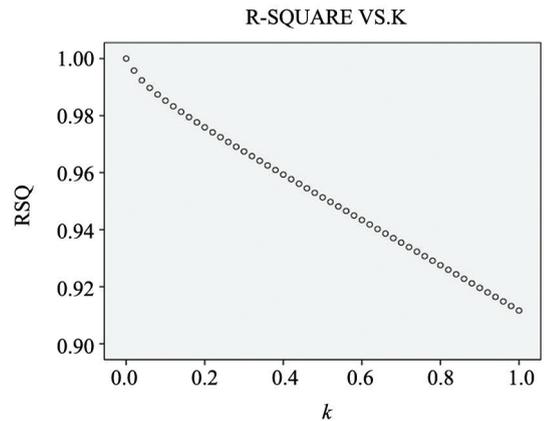


图 6 岭迹图

图 7 R² 与 k 的关系图

从图 6 和图 7 可以看出, 当 $k=0.08$ 时, 各自变量的回归系数变化趋于稳定. 此时, 拟合得到岭回归方程为

$$\ln I = -35.269 + 4.755 \ln P + 0.226 \ln A + 0.149 \ln T + 0.731 \ln C + 0.011 (\ln A)^2 + e$$

(-10.625)*** (11.288)*** (13.194)*** (2.498)** (3.185)*** (14.961)***

注: 括号内为 t 值, *, **, *** 分别表示在 10%, 5%, 1% 水平下显著.

其中, $R^2=0.987$, $\text{Adj } R^2=0.982$; $F=188.410$, $\text{Sig } F=0.000$. 模型的拟合优度较高, 各自变量回归系数在 5% 显著性水平下均能通过 t 检验. 碳排放量关于人口数量、经济发展、碳排放强度和工业产出占比的弹性均为正, 符合经济学意义检验, 模型整体拟合效果满足要求(见图 8).

2.2 碳排放情景分析与参数设定

参考渠慎宁、郭朝先(2010)^[13]的研究, 本研究假定今后的人口增长、经济发展、技术进步和产业升级均可以划分为高、中、低 3 种模式(具体组合情况见表 4). 相关参数的模式设定如下: 人口增长, 参考

联合国(2009)^[14]对中国人口的预测,于 21 世纪 30 年代达到峰值;经济发展,参考许宪春(2002)^[15]对中国人均 GDP 的预测,到 2050 年中国人均 GDP 为 2008 年的 10 倍,达到发达国家水平(结合重庆的高增长,本研究设定为 30 万元);碳排放强度和工业产业占比,同样假定到 2050 年达到发达国家的水平,分别为 0.5 万 t/亿元和 20%。基于此,进一步确定高模式和低模式条件下的参数(见表 5)。

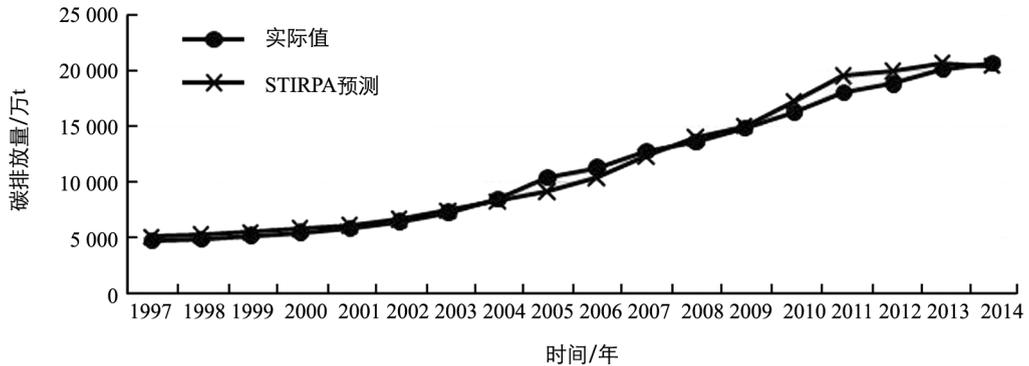


图 8 重庆市 1997—2014 年碳排放量实际值与预测值比较

表 4 情景模式的设定

情景	设定目标
低模式	各标量均以较低速度增长
中模式	各变量均以适中速度增长
高模式	各变量均以较高速速度增长
高中模式	人口与经济高模式+技术与产业转型中模式
高低模式	人口与经济高模式+技术与产业转型低模式
低中模式	人口与经济低模式+技术与产业转型中模式
中高模式	人口与经济中模式+技术与产业转型高模式
中低模式	人口与经济中模式+技术与产业转型低模式

表 5 情景模式及其设定目标

变量	情景	设定目标
人口	低模式	重庆人口在 21 世纪 20 年代达到峰值
	中模式	重庆人口在 21 世纪 30 年代达到峰值
	高模式	重庆人口在 21 世纪 40 年代达到峰值
人均 GDP	低模式	2050 年重庆市人均 GDP 达到 25 万元
	中模式	2050 年重庆市人均 GDP 达到 30 万元
	高模式	2050 年重庆市人均 GDP 达到 35 万元
碳排放强度	低模式	2050 年碳排放强度较 2010 年下降 70%
	中模式	2050 年碳排放强度较 2010 年下降 75%
	高模式	2050 年碳排放强度较 2010 年下降 80%
产业结构	低模式	2050 年重庆工业产业占比下降到 30%
	中模式	2050 年重庆工业产业占比下降到 20%
	高模式	2050 年重庆工业产业占比下降到 10%

2.3 重庆市碳排放峰值的预测结果

依照前文设定的 8 种情景模式,结合估计出的 STIRPAT 拓展模型,选取若干整数年节点值,利用三次函数插值,在 Matlab 中进行模拟,可以测算出 8 种模式下重庆市碳排放趋势图(见图 9)。

比较 8 种情境模式下的碳排放量估计,可以看出,在低、中、高、低中、中高等 6 种情景模式下重庆市的 CO₂ 排放峰值会出现。此外,技术进步和产业的改革升级对 CO₂ 排放峰值的影响尤为重要。若碳

排放强度和工业产业占比下降速度跟不上经济和人口的增长速度,则不能在2050年内出现峰值(如高中和高中模式);反之,若碳排放强度和工业产业占比降低速度比重庆的经济增长速度快,则会推动CO₂排放提前到达峰值(如低中和中高模式)。基于此,按照当前的发展趋势,可以推测重庆市的CO₂排放峰值出现时间在2025—2045年期间。但如果经济发展的同时,不重视产业结构的调整和能源使用效率的提高,也会导致峰值出现时间后延。因此,深化改革、加速产业的转型升级以及新能源的普及是未来的重点工作任务。

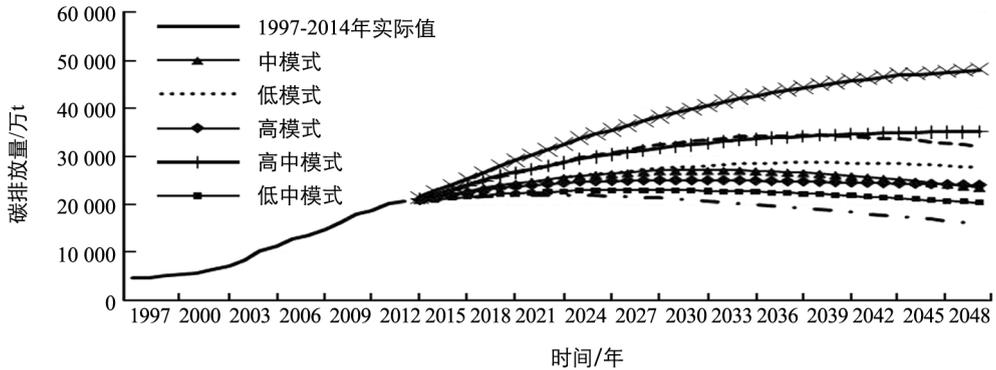


图9 不同情景模式下重庆市碳排放峰值的预测

3 结论与启示

本文以重庆直辖以来(1997—2014年)的数据为样本,将STIRPAT拓展模型应用于测算和预测重庆市化石能源消耗引致的CO₂排放量及其峰值,结果表明:(1)重庆市经济的高速增长伴随着CO₂排放量急剧增加,重庆的经济发展当前还是粗放型增长;(2)历史渊源(重工业基地)和国家发展战略(东部优先发展)决定了重庆市的碳排放强度与全国平均水平还有很大差距,能源利用率相对较低;(3)大量的煤炭消费是CO₂的主要来源,其平均贡献率高达82.33%;(4)按照当前的发展趋势,重庆市的CO₂排放峰值将在2025—2045年期间出现;(5)产业转型和碳排放强度对峰值的出现具有显著影响,经济发展中成功的实现产业转型升级和对碳排放强度的控制,会推动峰值提前到来,反之,则会导致峰值出现时间后延。本文的研究启示主要集中在以下两个方面:

第一、深化改革,加速产业升级和转型,降低化石能源的需求。重庆市单位GDP的CO₂排放量高于全国水平,主要是重庆市的产业结构偏向第二产业,尤其是重工业。因此,重庆市节能减排的关键也就在于调整产业结构,提高制造业的研发和创新能力,培育和发展高技术产业与节能环保产业。此外,还应该尽快完善相关经济政策和法律制度,引导企业低碳生产,激励公众低碳消费,实现生产和消费的低碳化。

第二、加快低碳能源开发利用,调整能源消费结构,有效控制化石能源的消费总量。受资源禀赋的局限,现阶段重庆的能源消费结构以煤为主,这不利于重庆节能减排目标的实现和经济社会的可持续发展。为了从源头上遏制碳排放的增长,重庆市政府应当充分利用财政补贴和税收等措施加大对新能源技术应用与推广,最终达到经济效益、社会效益和环境效益的协调统一与共同发展。

参考文献:

- [1] 刘华军,赵浩.中国二氧化碳排放强度的地区差异分析[J].统计研究,2012,29(6):46—50.
- [2] EHRLICH P R, EHRLICH A H. Population, Resources, Environment: Issues in Human Ecology [M]. San Francisco: Freeman, 1970.
- [3] WAGGONER P E, AUSUBEL J H. A Framework for Sustainability Science: A Renovated IPAT Identity [J]. PNAS, 2002, 99(12): 7860—7865.
- [4] YORK R, ROSE E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and IMPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351—365.
- [5] COONDOO D, DINDA S. Causality Between Income and Emission: A Country Group-Specific Econometric Analysis

[J]. *Ecological Economics*, 2002, 40 (3): 351–367.

- [6] 杨子晖. “经济增长”与“二氧化碳排放”关系的非线性研究: 基于发展中国家的非线性 Granger 因果检验 [J]. *世界经济*, 2010, 33(10): 139–160.
- [7] 中国能源与碳排放课题组. 2050 中国能源和碳排放报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 陈诗一. 节能减排与中国工业的双赢发展 [J]. *经济研究*, 2010, 45(3): 129–143.
- [9] 刘 伟, 李 虹. 中国煤炭补贴改革与二氧化碳减排效应研究 [J]. *经济研究*, 2014, 49(8): 146–157.
- [10] 张 成, 易建婷, 陈 宏, 等. 重庆市城镇生活污水处理碳排放核算 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(9): 135–139.
- [11] 林柏强, 黄光晓. 梯度发展模式下中国区域碳排放的演化趋势——基于空间分析的视角 [J]. *金融研究*, 2011(12): 35–46.
- [12] 李国立, 李宗植. 中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究 [J]. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(5): 22–27.
- [13] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究 [J]. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(12): 10–15.
- [14] UN. *World Population Prospects: The 2009 Revision* [R]. Geneva: United Nations Population Division, 2009.
- [15] 许宪春. 中国国内生产总值核算 [J]. *经济学(季刊)*, 2002, 1(4): 23–36.

CO₂ Emission from Fossil Energy Consumption in Chongqing and Prediction of Its Peak

FAN Deng-long^{1,2}, HUANG Yi-xiang²,
PU Yong-jian², YANG Wen-fang¹

1. *Chongqing Energy Research Center of Economics & Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;*

2. *School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400045, China*

Abstract: Adopting the actual measurement method, CO₂ emission, CO₂ emission intensity and emission sources in Chongqing are determined, and the STIRPAT model is applied to predict the occurrence of the peak of CO₂ emission from fossil energy consumption of the city. The findings are as follows. The economic development of Chongqing remains to be of the extensive mode, and with the rapid growth of its economy, CO₂ emission is dramatically increasing. Historically, Chongqing was a heavy industry base and the central government adopted a strategy of preferential development of the east, which contributed to a big gap between the carbon emission intensity of the city and that of the national average and to a comparatively low energy utilization rate. Huge amount of coal consumption is the main source of CO₂ emission, with a contribution rate of 82.33%. According to the current developing trend, the peak of Chongqing's CO₂ emission will arrive between 2025 and 2045. Industrial transformation and carbon emission intensity have significant influences on the arrival of the peak. Successful industrial transformation and upgrading and effective control of carbon emission intensity will advance the peak of Chongqing's carbon emission. Otherwise, the arrival of the peak will be delayed.

Key words: fossil energy consumption; CO₂ emission; peak forecast

