

高 森, 吴秀芹. 广西壮族自治区碳排放时空规律及达峰预测[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 763-774.
DOI: 10.11932/karst20230410

广西壮族自治区碳排放时空规律及达峰预测

高 森, 吴秀芹

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 广西壮族自治区是国家重要的工业原料供应地, 但工业化进程缓慢致使碳排放增长显著, 为了积极响应国家减排号召, 探究广西历史及未来碳排放规律, 以期尽早实现碳达峰目标。由于县级碳排放数据可获取性方面的限制, 研究以 2003—2017 年广西县级碳排放数据, 进行广西碳排放量、碳排放强度及碳排放压力的时空变化分析, 划分广西不同地域碳排放类型和碳排放情景, 并利用可扩展的随机性环境影响模型(STIRPAT)对 2022—2035 年间广西各地域碳排放类型进行了不同情景下碳排放达峰预测。(1)2003—2017 年间, 广西碳排放总量、碳排放压力增幅明显, 碳排放强度明显降低。碳排放总量变异系数总体趋势平稳, 呈高强度变异。(2)依据碳排放总量、强度、压力分级组合, 碳排放可分为高总量-高强度-高压力型等 6 种地域类型, 根据广西碳排放影响因素的现状及未来发展趋势划分基准情景、节能情景等 7 种情景。(3)广西全域达峰预测结果显示, 4 种节能发展情景均能在 2030 年前完成达峰目标。不同地域类型达峰预测结果显示高总量-高强度-低压力型与高总量-低强度-低压力型采用节能情景可以实现达峰目标。高总量-高强度-高压力型和高总量-低强度-高压力型无法完成达峰目标。低总量-低强度-低压力型, 基准情景等 5 种情景均能在 2030 年前完成达峰目标。低总量-高强度-低压力型在 2018 年便已实现达峰目标。研究系统分析了广西整体及内部碳排放变化, 指出了可达峰的情景模式, 可为广西碳排放预测, 制定减排措施提供理论与技术支持。

关键词: 广西壮族自治区; 县域碳排放; 时空变化特征; STIRPAT 模型

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0763-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

20 世纪 90 年代以来, 人类大量排放 CO₂ 导致全球气候变暖的话题得到国际社会的大量关注, 大多数国家提出并实施了一系列有效措施来应对减排^[1-2]。一些主要国际组织也提出了减排目标与措施。例如, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出全球排放量必须在未来 10-15 年达到峰值, 建议到 2050 年发展中国家温室气体排放量大幅小于当前排放量^[3]。中国作为最大的温室气体排放国家之一第一时间响应号召。2020 年, 习总书记在联合国大会上宣布: “中

国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 力争 2030 年前 CO₂ 排放量达到峰值”^[4]。

针对碳排放研究, 国内外学者从碳排放测算与时空格局^[5-6], 碳排放影响因素^[7-9], 碳排放情景模拟与预测^[10] 等方面进行探索。碳排放测算与时空格局相关成果较多。从研究尺度来看研究多以国家级或省级为单位^[11]。从研究内容来看, 多关注于碳排放量, 对于碳排放强度与碳排放压力研究较少^[12-13]。碳排放测算以 IPCC 清单指南法和遥感反演方法为主^[14-15], 时空格局的研究方法有探索性时空数据分析^[16]、变异系数法^[17], 标准差椭圆^[18]、核密度估计^[19]。

资助项目: 广西重点研发计划(广西岩溶生态系统碳汇功能及固碳潜力提升技术与示范)(桂科 AB22035004)

第一作者简介: 高森(1998—), 女, 硕士, 研究方向: 3S 技术集成开发与应用。E-mail: 530799032@qq.com。

通信作者: 吴秀芹(1974—), 女, 教授, 博士, 研究方向: 为 3S 应用、土地利用变化。E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn。

收稿日期: 2022-06-14

针对碳排放情景模拟与预测目前国内外研究较少。研究尺度可分为国家级层面与省级层面^[20-22],总体来说,研究尺度大、覆盖范围小,多数仅以一种情况回答碳达峰时间,缺乏多情况合理情景模拟。研究方法主要有 STIRPAT 模型^[23]、kaya 恒等式与 LMDI 因素分解模型^[24]、IPCC 与脱钩系数法^[25]、基于环境库兹涅茨曲线(EKC 曲线)^[26]、灰色预测 GM(1,1)模型^[27]。其中 STIRPAT 模型在近几年的碳排放影响因素分析与预测中得到广泛应用^[28]。

目前,碳排放研究聚焦于省级大尺度,缺乏市级及以下尺度。国家“十四五”规划纲要提出:“实现碳达峰需要各个地区的共同努力”。广西虽积极响应减排号召,先后出台多项省级尺度减排政策。但近二十年来,广西经济处于快速发展时期,工业化进程滞后,地区发展不平衡,依旧面临严峻挑战^[29]。因此,本文基于广西壮族自治区县级碳排放量,进行多尺度、多方面时空变化分析与达峰预测,目的是寻找在 2030 年前完成碳达峰的目标下,广西最优减排情景,为广西及其它省份碳达峰及减排工作提供数据支撑和理论依据。

1 区域概况

广西壮族自治区(以下简称“广西”),界于北纬

20°54′-26°24′,东经 104°28′-112°04′之间。东临广东,南临北部湾,西与云南毗邻,东北与湖南接壤。共有 14 个区市,60 个县,41 个市辖区,总面积 $2.38 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。地形中间高,四周低,属亚热带季风气候和热带季风气候,具有气候温暖,热量丰富,降雨充沛,干湿分明的气候特征。平均气温在 16.5~23.5 °C 之间,降水量在 1 080~2 760 mm 之间。截止 2020 年,广西总人口 $5.718 24 \times 10^7$ 人,人口年平均增长率 0.8%。人均 GDP 为 4.03×10^4 元·人⁻¹,年平均增速 12.5%。全省第一、二、三产业占比分别为 16.0%、32.1% 和 51.9%。其中第二产业占比近五年持续下降,平均下降速率 1.8%。近年来,在《广西壮族自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称《纲要》)中提出,推动绿色低碳发展,建立健全绿色低碳循环生态经济。随后,广西相继颁布一系列文件,推动绿色低碳生活。

2 材料与方法

2.1 数据来源

由于广西县域边界之间的变动会影响数据准确性,所以历史数据选取时间跨度为 2003—2017 年。

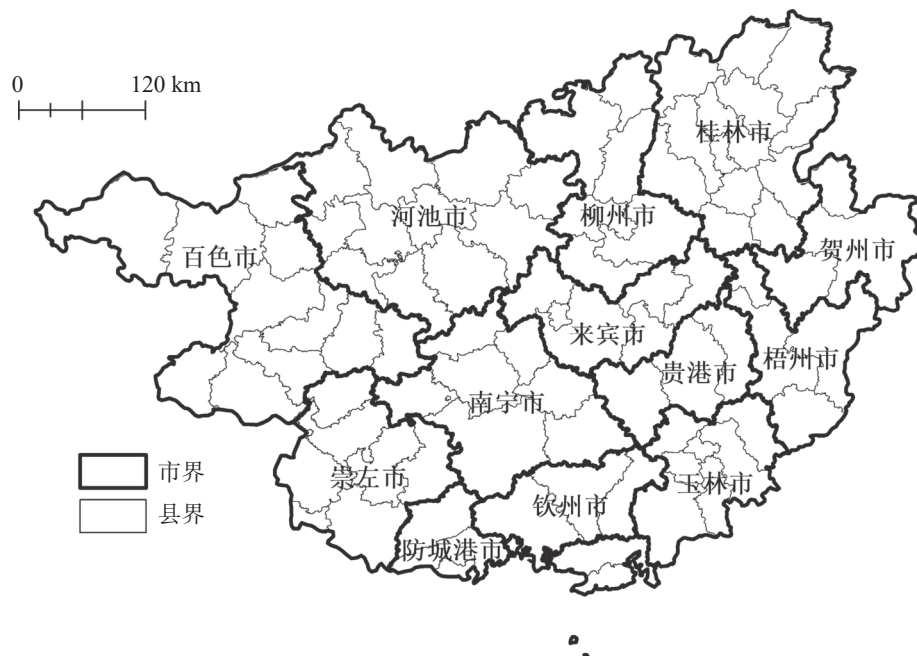


图 1 研究区行政分布示意图

注: 基于自然资源部标准地图服务网 GS(2019)3333 号标准底图制作, 底图边界无修改。

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

Note: The above map is produced based on the standard base map (GS (2019) 3333) from the standard map service network of the Ministry of Natural Resources. The base map boundary is not modified.

县级与碳排放相关的能源统计数据有限, IPCC 碳排放清单法仅支撑中国省级及部分市级碳排放计算。目前, 中国碳核算数据库 (Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADS) 拥有时间跨度最长 (从 1997—2017 年)、覆盖面最广、准确度最高的中国县级碳排放量数据。因此县级碳排放数据通过 CEADS 数据库中获得。人口数据、GDP 数据、第二产业增加值数据、行政区域面积数据, 通过《广西统计年鉴》、《玉林统计年鉴》、《桂林统计年鉴》中获得, 并核算成人均 GDP、碳排放强度、碳排放压力指数。

2.2 研究方法

2.2.1 碳排放强度

碳排放强度是指单位 GDP 二氧化碳排放量, 一般情况下, 指标随着技术进步和经济增长而下降^[30]。公式如下:

$$D = \frac{C}{G} \quad (1)$$

式中: D 代表碳排放强度 ($\text{t}/10^4$ 元), C 代表碳排放量 (t), G 代表 GDP (10^4 元)。

2.2.2 碳排放压力指数

碳排放压力指数是用来衡量一个地区碳排放所造成的压力, 由人均碳排放量和碳排放密度组成。公式如下:

$$Y = 0.5001 \times \frac{Y_p}{Y_{p,max}} + 0.4999 \times \frac{Y_a}{Y_{a,max}} \quad (2)$$

式中: Y 为碳排放压力指数; Y_p 为人均碳排放与应对气候变化目标 $2\text{tco}_2\text{e}$ (各国承担减排义务的目标)^[31] 之比; Y_a 为区域碳排放密度与目标值 $1.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之比; $Y_{p,max}$ 与 $Y_{a,max}$ 代表全球人均碳排放与碳排放密度上限, 分别为 15、20^[32]。

2.2.3 STIRPAT 碳排放趋势模型

STIRPAT 的标准形式为^[33]:

$$C = aP^bG^cD^de \quad (3)$$

式中: C 、 P 、 G 、 D 分别代表环境状况、人口数量、经济水平和技术水平。 a 为常数项, b 、 c 、 d 为系数项, e 为误差项。两边取对数得:

$$\ln C = \ln a + b \ln P + c \ln G + d \ln D + \ln e \quad (4)$$

根据广西产业结构, 引入第二产业占比作为影响因素。因此, 扩展形式为:

$$\ln C = \ln a + b \ln P + c \ln G + d \ln D + f \ln S + \ln e \quad (5)$$

式中: C 代表碳排放量 (10^4 t); P 代表人口 (人); G 代表人均 GDP (10^4 元/人); D 代表碳排放强度 ($\text{t}/10^4$ 元); S 代表第二产业 GDP 占总 GDP 之比; a 为常数项, b 、 c 、 d 、 f 为系数项, e 为误差。

3 结果与分析

3.1 广西碳排放时空格局

广西碳排放总量从 2003 年 $7.51 \times 10^7 \text{ t}$ 增长到 2017 年 $2.22 \times 10^8 \text{ t}$, 增幅高达 195.2% (图 2)。市级碳排放量呈现南宁市最高, 防城港市最低的空间格局。各市碳排放均呈现出波动上升态势, 说明减排力度较小。县级碳排放呈现非均衡特征, 东南部地区高于西北部地区并逐渐向西北部地区扩张 (图 3)。市辖区与沿海地区县级碳排放量明显高于其它县。碳排放变异系数总体趋势平稳, 呈高强度变异。

广西碳排放强度从 2003 年 $3.35 \text{ t}/10^4$ 元下降至 2017 年 $1.49 \text{ t}/10^4$ 元, 降幅 125%。市级碳排放强度呈现来宾市最高, 贺州市最低的空间格局。来宾市、北海市、贵港市, 高于省级平均碳排放强度 (图 4)。

碳排放压力指数从 2003 年 0.21 上升至 2017 年 0.56, 增幅 167%。北海市、来宾市、玉林市显著高于其它区域, 高于省碳排放压力指数。河池市最低 (图 5)。

3.2 广西碳排放峰值预测

3.2.1 碳排放地域类型划分

采用自然断点法对县域碳排放总量、强度、压力指数进行高、低 (H、L) 类型分级组合。排放总量排名前 13%, 加和占总排放量 48% 的区域作为高碳排放总量区; 排放强度排名前 33%, 数值在 $1.5 \text{ t}/10^4$ 元以上的区域作为高碳排放强度区; 排放压力指数排名前 5%, 数值在 0.84 以上的区域作为高碳排放压力区。可将广西碳排放分为 6 种地域类型 (图 6)。其中, L-L-L (低总量-低强度-低压力) 型为主要类型, 主要包括田林县、宁明县等 52 个县, 占比 60%。H-H-H (高总量-高强度-高压) 型占比最少, 包括玉州区和合山市, 占 2.2%。H-H-L (高总量-高强度-低压力) 型包括合浦县等 3 个县, L-H-L (低总量-高强度-低压力) 型包括隆安县等 24 个县, H-L-H (高总量-低强度-高压) 型包括桂林市辖区和北海市辖区, H-L-L (高总

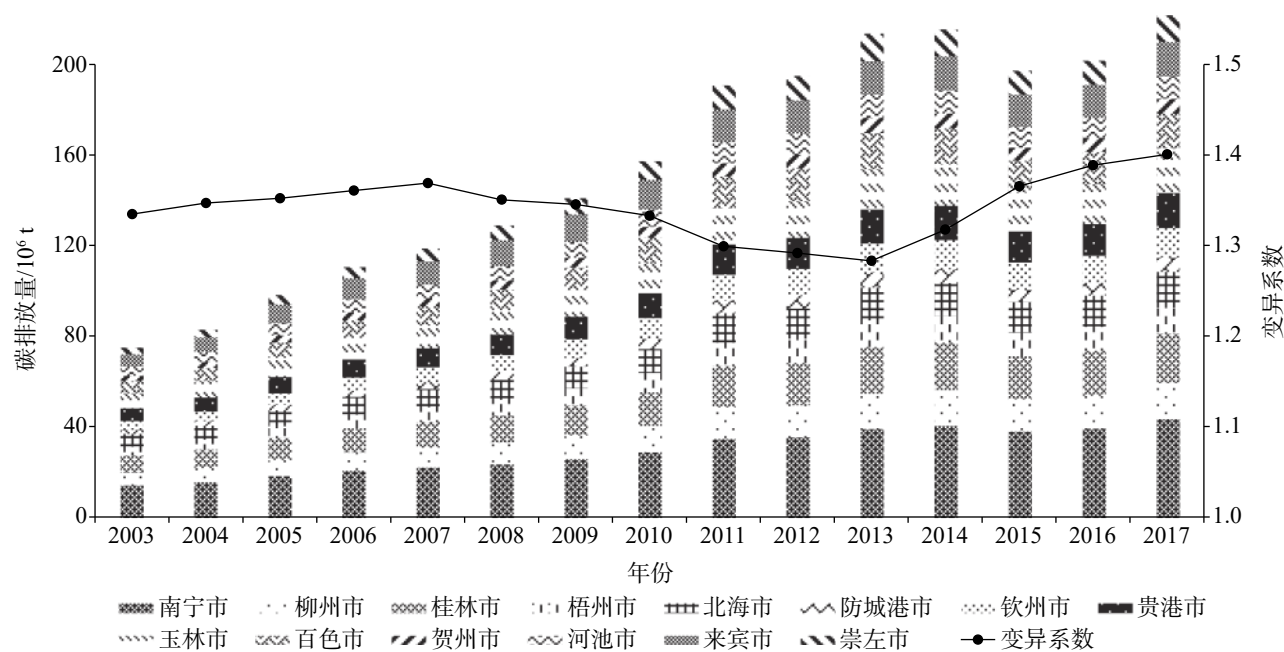
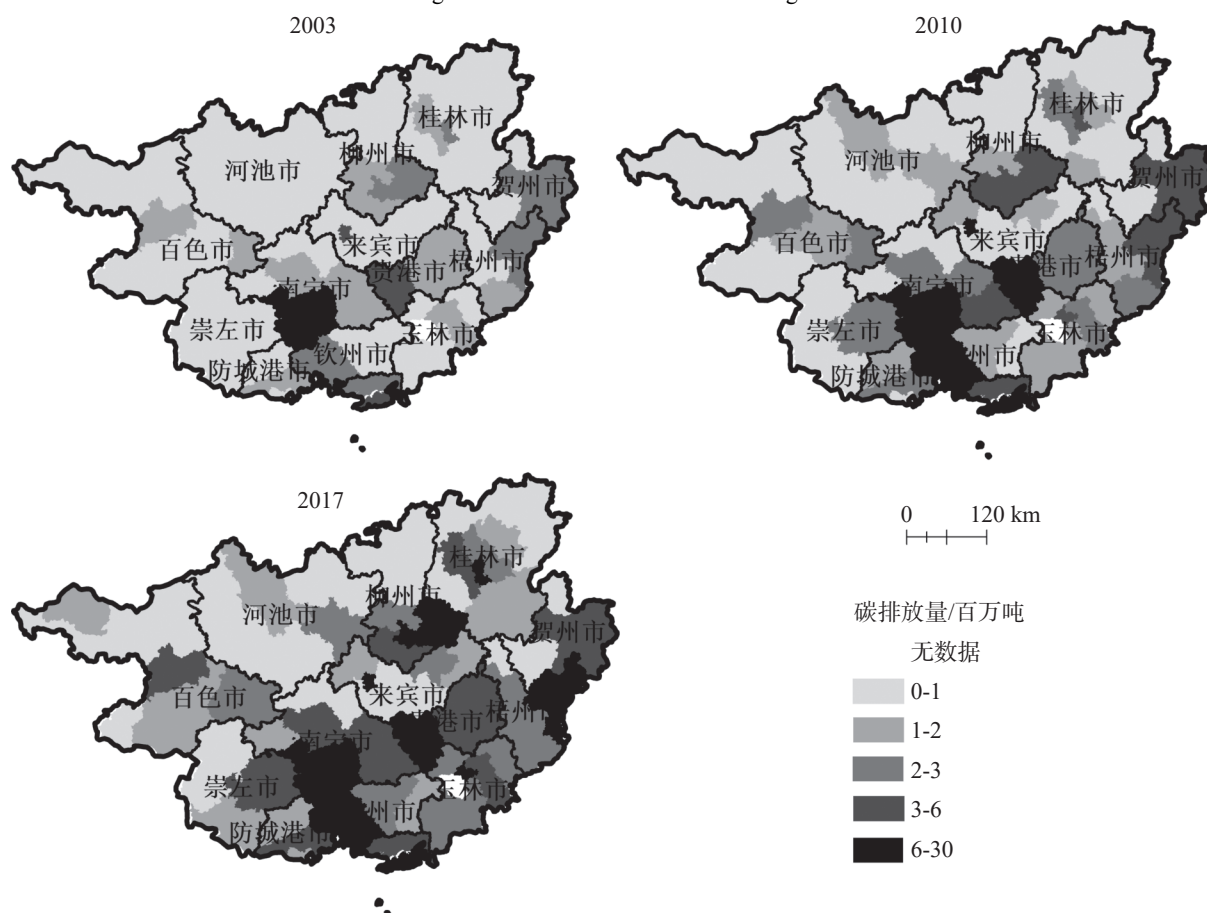


图 2 广西碳排放量趋势图
Fig. 2 Carbon emission trend of Guangxi



注: 基于自然资源部标准地图服务网 GS(2019)3333 号标准底图制作, 底图边界无修改。

Fig. 3 Distribution of carbon emissions at the county level in Guangxi

Note: The above map is produced based on the standard base map (GS (2019) 3333) from the standard map service network of the Ministry of Natural Resources. The base map boundary is not modified.

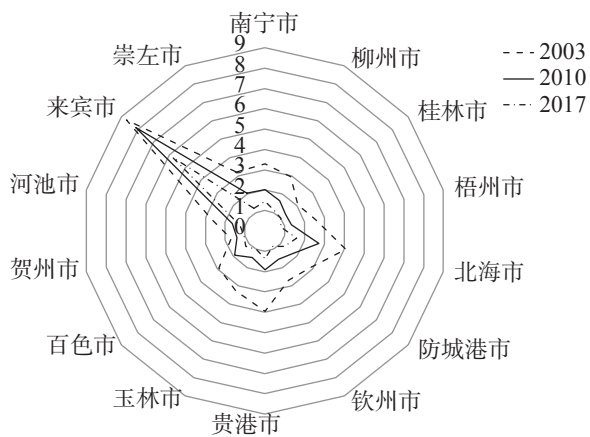


图 4 广西碳排放强度图
Fig. 4 Carbon emission intensity of Guangxi

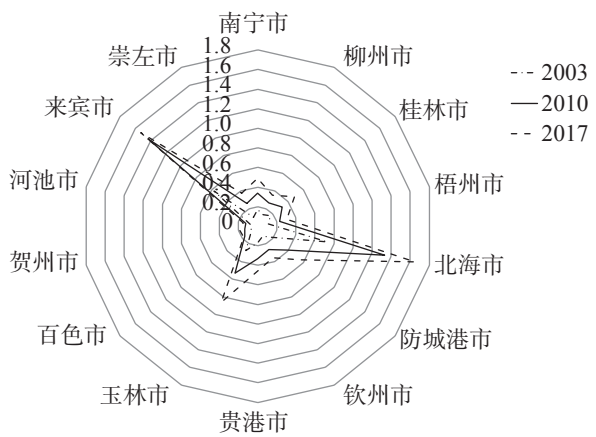


图 5 广西碳排放压力指数图
Fig. 5 Carbon emission pressure of Guangxi

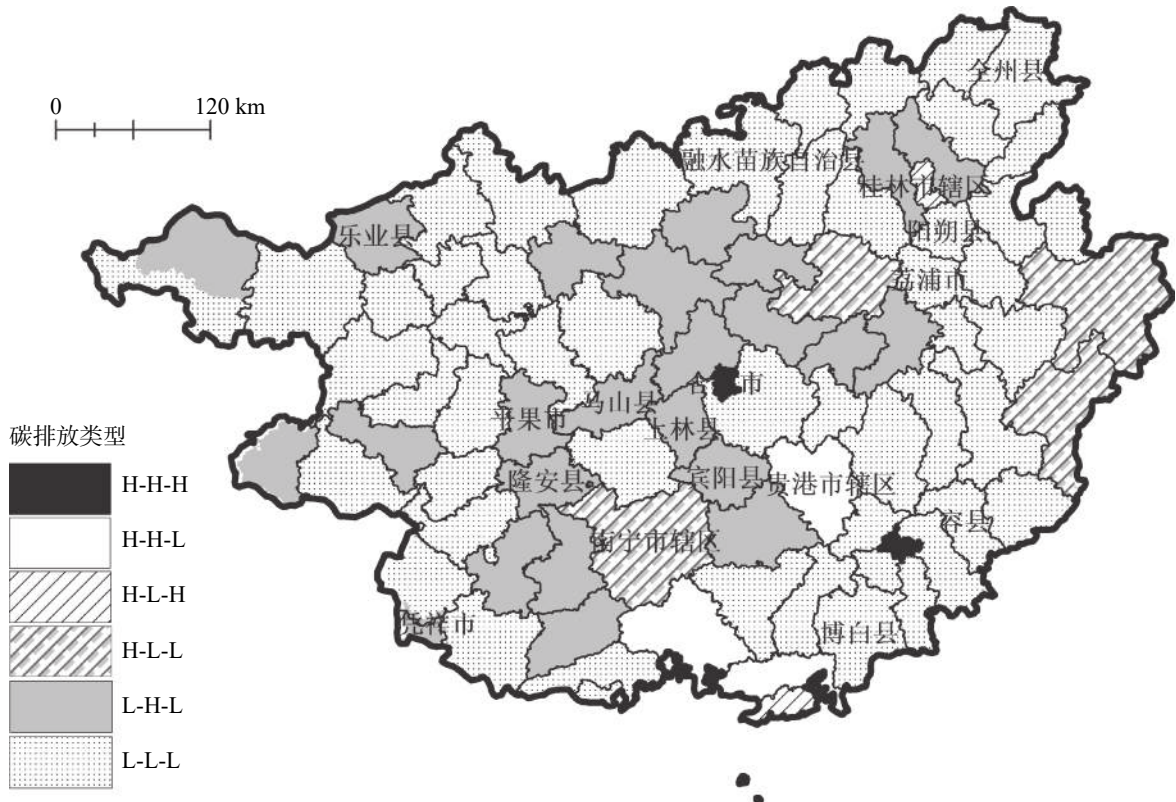


图 6 广西碳排放分类图
注：基于自然资源部标准地图服务网 GS(2019)3333 号标准底图制作，底图边界无修改
Fig. 6 Classification of carbon emissions in Guangxi

Note: The above map is produced based on the standard base map (GS (2019) 3333) from the standard map service network of the Ministry of Natural Resources. The base map boundary is not modified.

量-低强度-低压力)型包括南宁市辖区等 4 个县。

3.2.2 碳排放模型拟合

分别对广西全域及不同地域类型碳排放达峰时间进行预测,以求把握未来碳排放整体及局部变化情况。选取人口(P)、人均 GDP(G)、碳排放强度(D)、

第二产业占比(S)作为广西碳排放量的影响因素,将其划分为广西全域以及 6 种不同地域类型分别代入 STIRPAT 模型得到 7 种不同参数的回归方程(表 1)。从广西全域碳排放量来说,模型拟合度 $R^2=0.98$,拟合度较好。从模型系数来看三因素占比提高使碳排放量增加,人口对碳排放量增加影响最大。第二产

表 1 广西碳排放岭回归方程

Table 1 Ridge regression equation of carbon emissions in Guangxi

类型	名称	岭回归方程	k值	R ²
广西	广西	$\ln C = -10 + 1.93 \ln P + 0.17 \ln G - 0.24 \ln D + 0.9 \ln S$	0.18	0.98
H-H-H	高总量-高强度-高压	$\ln C = 9.10 + 0.22 \ln P + 0.19 \ln G - 0.24 \ln D - 0.66 \ln S$	0.13	0.98
H-H-L	高总量-高强度-低压	$\ln C = 8.1 + 2.3 \ln P + 0.033 \ln G + 0.0002 \ln D + 0.38 \ln S$	0.08	0.97
H-L-H	高总量-低强度-高压	$\ln C = 2.04 + 0.41 \ln P + 0.23 \ln G - 0.25 \ln D + 0.71 \ln S$	0.20	0.95
H-L-L	高总量-低强度-低压	$\ln C = -3.19 + 1.46 \ln P + 0.3 \ln G - 0.11 \ln D + 0.31 \ln S$	0.15	0.97
L-H-L	低总量-高强度-低压	$\ln C = -23.97 + 4.21 \ln P - 0.33 \ln G - 0.34 \ln D + 0.95 \ln S$	0.16	0.91
L-L-L	低总量-低强度-低压	$\ln C = -15.93 + 2.76 \ln P + 0.12 \ln G - 0.05 \ln D + 0.63 \ln S$	0.18	0.98

注: K 为岭参数, K 值的确定原则是各个自变量标准化回归系数趋于稳定时的最小 K 值, K 值越小偏差越小; R² 为方程显著性水平, 越接近于 1, 拟合效果越好。

Note: K is ridge parameter and its determination principle of K value is the minimum K value when the standardized regression coefficient of each independent variable tends to be stable. The smaller the K value is, the smaller the deviation is. R² is the significance level of the equation, and the closer it is to 1, the better the fitting effect is.

业占比提高引起碳排放量降低。就不同类型碳排放来说, 模型拟合度 R² 均在 0.9 以上。有所不同的是 L-H-L 类型的人均 GDP, H-H-H 类型的第二产业占比提高引起碳排放量降低, 可能由于地区间发展产业不同所引起。

3.2.3 碳排放情景设定

基于排放影响因素的未来发展趋势, 分别设定高、中、低三种发展模式 7 种碳排放情景(表 2, 表 3)。其中, 情景 1 为基准情景, 假设各变量按照中等速度发展, 是对目前社会发展水平的延续。情景 2 为节能情景, 以牺牲经济发展为代价, 加强减排力度, 以期尽早完成碳达峰与碳中和的目标。情景 3 为高经

济发展情景, 假设未来社会仍以经济发展为主体, 不过分强调节能减排。情景 4 与情景 5 为经济与减排同步发展情景, 假设未来社会经济高速发展的同时注重减排。情景 6 为绿色发展情景, 假设未来发展水平不变, 通过产业结构调整提升第三产业旅游业的发展来应对碳排放。情景 7 为减排情景, 假设未来发展水平不变, 提高技术水平, 通过电力替代燃煤、减少燃煤燃烧产生 CO₂ 量等方法应对碳排放。

3.2.4 碳排放峰值预测

根据上述 7 种发展情景, 对广西全域及 6 种不同地域类型未来碳排放进行预测(如图 7、图 8, 表 4)。从广西全域来说, 节能情景等 4 种发展情景均能在

表 2 广西碳排放影响因素发展模式设定

Table 2 Model setting of developing influencing factors of carbon emissions in Guangxi

影响因素	设定模式	设定参数	备注
人口	高	2025 年达峰, 每年降 0.1%	1) 《国家人口发展规划(2016—2030 年)》以下简称《规划》中提到我国人口数量在 2030 年左右达到最大值。
	中	2030 年达峰, 每年降 0.06%	2) 《纲要》中提到广西人口年平均增长率为 0.83%, 近五年持续降低。
	低	2035 年达峰, 每年降 0.045%	3) 《规划》中提到未来三孩政策的实施有可能使增长速率提升。
人均 GDP	高	年平均增长率 6.5%	1) 《纲要》中提到 2016—2020 年人均 GDP 年平均增长率为 5.2%
	中	年平均增长率 5.5%	2) 《纲要》中提到未来五年人均 GDP 年平均增长率为 5.5%。
	低	年平均增长率 4.5%	3) 未来经济增长速度会逐渐放缓 ^[34] 。
碳排放强度	高	年平均降低率 2.5%	1) 自主行动目标提出到 2030 年碳排放强度要比 2005 年下降 60—65% ^[35] 。
	中	年平均降低率 3.5%	2) 基于论文 3.1 研究结果显示近五年碳排放强度年平均下降 3.4%
	低	年平均降低率 4.5%	3) 未来技术水平可能突破困难 ^[36] 。
第二产业占比	高	年平均降低率 0.65%	1) 2016—2020 年《广西统计年鉴》中提到广西产业结构年平均下降率 1.8%。
	中	年平均降低率 0.55%	2) 《纲要》中提到未来广西省将大力发展旅游业、农业
	低	年平均降低率 0.45%	3) 第二产业实体业也不可丢弃 ^[37] 。

表 3 广西碳排放情景
Table 3 Scenario model of carbon emissions in Guangxi

情景	人口 (P)	人均 GDP(G)	碳排放 强度(D)	第二产业 占比(S)
基准情景	中	中	中	中
节能情景	低	低	高	高
高经济发展情景	高	高	低	低
经济与减排同步发展情景a	高	高	高	高
经济与减排同步发展情景b	中	高	中	高
绿色发展情景	中	中	中	低
减排情景	中	中	高	中

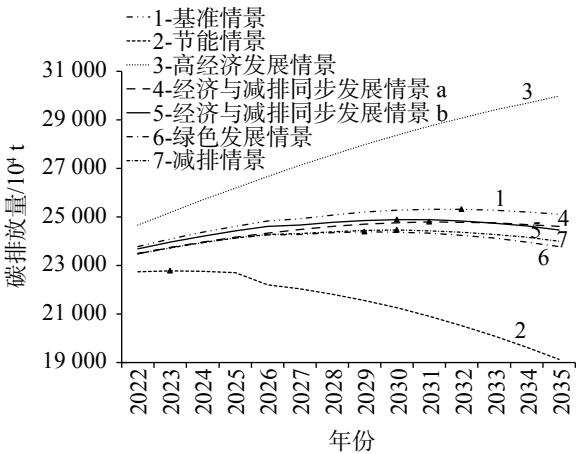


图 7 广西碳排放预测

注：黑色三角代表达峰时间
Fig. 7 Prediction of carbon emissions in Guangxi
Note: Black triangle represents time to peak.

2030 年前完成达峰目标。其中，节能情景达峰时间最早为 2023 年，峰值为 2.28×10^8 t，碳排放峰值最低。绿色发展情景等其它三种情景达峰碳排放量排序为：经济与减排同步发展情景 b (2.49×10^8 t) > 减排情景 (2.45×10^8 t) > 绿色发展情景 (2.44×10^8 t)。其中绿色发展情景碳排放量最低。

从 6 种不同地域类型碳排放来看，在碳排放总量高值区 H-H-L 型与 H-L-L 型采用节能情景可以实现达峰目标，峰值分别为 2.85×10^7 t、 1.71×10^7 t。H-L-H 型无法完成达峰目标，但在节能模式下 2031 年可达峰。H-H-H 型排放量持续增长，直至 2035 年无法完成达峰目标。在碳排放总量低值区，L-L-L 型，基准情景等 5 种情景均能在 2030 年前完成达峰目标。其中，节能情景达峰时间最早，为 2023 年，峰值为 5.18×10^7 t。L-H-L 型，碳排放量呈直线下降，分析历史数据发现在 2018 年便已实现达峰目标。

4 讨 论

现阶段，将全国视为一体共同实现 2030 年达峰是“双碳”目标中的首要任务。广西印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》中明确提出到 2030 年广西与全国同步实现碳达峰。然而就目前发展情景，在 2032 年，广西全域实现碳达峰预期目标将无法完成。全国范围内，无法实现达峰目标的省份呈现新疆至黑龙江、云南至福建南北条带状聚集的空间，包括广西在内，均是依赖于第二产业增速或第二产业空间调整较小的区域^[38-40]。习总书记视察广西重要讲话中提出了“在推动绿色发展上迈出新步伐”的要求，促使广西将加速节能减排，实现碳达峰提上日程^[41]。未来广西应借鉴成功省份的经验，结合适宜广西的发展模式，因地制宜的采取产业结构化升级，提升产业技术水平等方式实现低碳发展^[42-43]。

聚焦于广西不同地域类型，对于碳排放高值区 H-H-L 型与 H-L-L 型包括南宁市辖区、贵港辖区等七个市辖区，第二产业占比大于 40%，经济增长过快主要依赖于能源。采用节能情景完成达峰需多措并举，一方面对于重点产业需提高能源效率，提升产业发展技术水平。另一方面去除非重点产业，发展制造业等第三产业。相比来说，H-L-H 型同属于市辖区，人口多而密集，同时第二产业占比更高，碳排放发展模式有待提高，未来五年第二产业占比应至少以 4% 的速度下降，尽早实现达峰目标。H-H-H 型包括玉州区和合山市，其碳排放量排名前十，技术水平处于末位，是传统煤炭资源型城市^[44]。玉州区经济水平属于超前型^[45]，归功于第二产业的带动发展，但技术水平落后，离达峰目标相差甚远，应作为减排重点区域关注，加快以风能、电能等清洁能源代替煤炭，加大第二产业调整比例。

对于碳排放低值区 L-L-L 型，属于各个市的边缘县区，碳排放量、强度和压力相对较低，在完成达峰目标下进一步减少 CO₂ 产出，为整体碳达峰做贡献，同时进一步实现绿色发展。根据区域发展适时调整产业比重，去除落后产业，大力发展旅游业是明智之举。L-H-L 型包括隆安等 24 个县，主要以农业种植业，旅游业为主，第二产业占比较低^[46-47]。碳达峰目标提前完成，可作为人口迁入区、产业转移区，

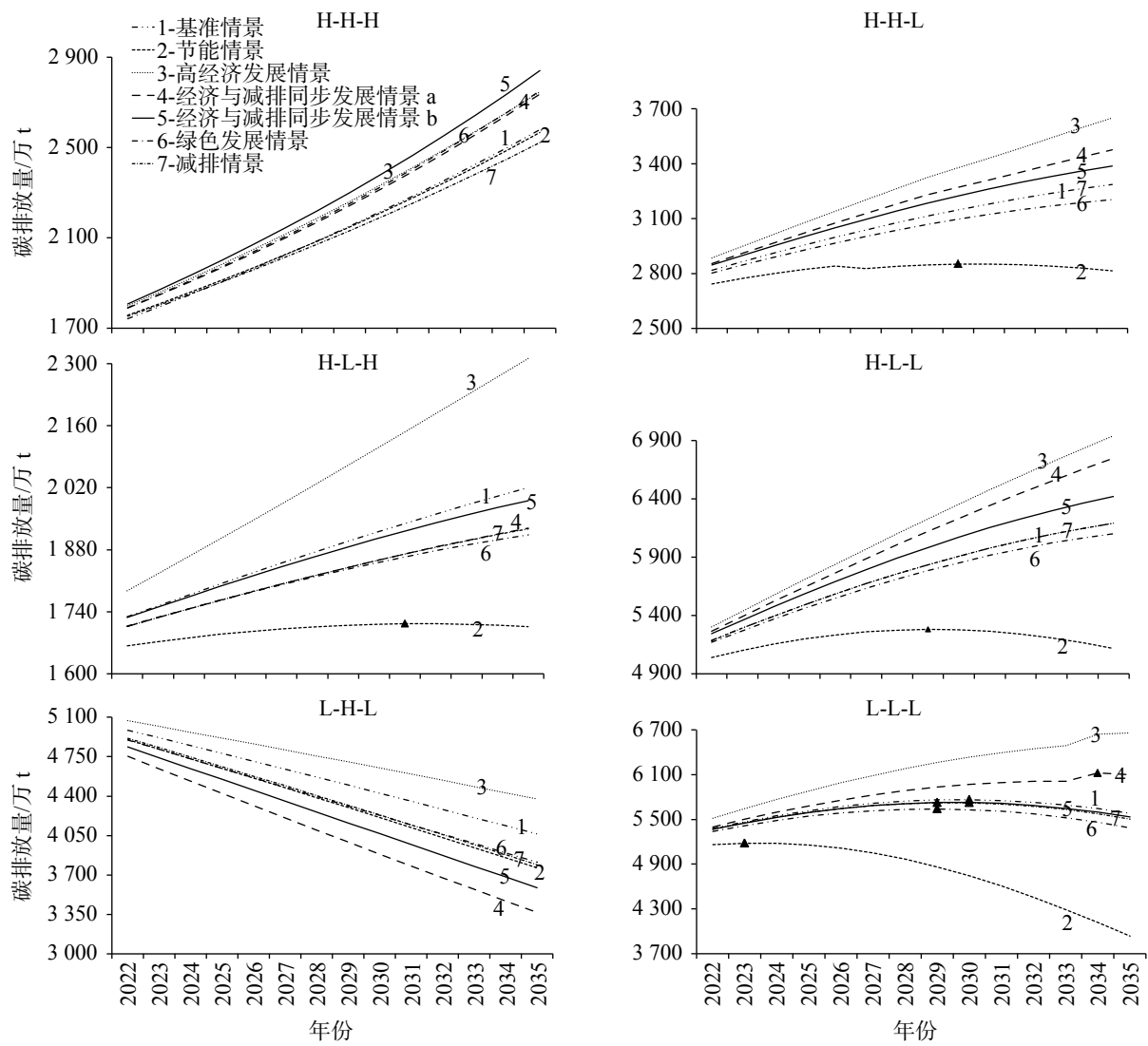


图 8 广西不同地域类型碳排放预测

Fig. 8 Prediction of carbon emissions in terms of different regional types in Guangxi

表 4 广西不同类型碳排放达峰时间

Table 4 peak time of different types of carbon emissions in Guangxi under seven scenarios

情景	广西全域	H-H-H型	H-H-L型	H-L-H型	H-L-L型	L-H-L	L-L-L型
基准情景	2032	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	2030
节能情景	2023	持续增长	2030	2031	2029	持续下降	2023
高经济发展情景	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	持续增长
经济与减排同步发展情景a	2031	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	2034
经济与减排同步发展情景b	2030	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	2029
绿色发展情景	2029	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	2029
减排情景	2030	持续增长	持续增长	持续增长	持续增长	持续下降	2030

分担过大碳排放量地区的压力。

系,有针对性提出减排措施。

广西是国家重要能源供给地,能源供给是国家战略布局的需要,因此需统筹好能源供给与减排的关系。在达峰的基础上,选择适合于广西发展的碳排放模式需要从长远考虑,处理好整体与局部的关

5 结 论

(1) 从广西碳排放时空格局来看,2003—2017 年

间,碳排放总量、碳排放压力指数增幅明显,增幅分别为195.2%、167%。碳排放强度明显下降,降幅125%。广西碳排放空间差异性明显,且无聚集趋势;

(2) 广西碳排放可分为 H-H-H、H-H-L、H-L-L、H-L-H、L-L-L、L-H-L 共 6 种地域类型;

(3) 广西全域达峰预测结果显示,节能情景等 4 种发展情景均能在 2030 年前完成达峰目标。不同地域类型达峰预测结果显示,在碳排放高值区,H-H-L 型与 H-L-L 型采用节能情景可以实现达峰目标。H-H-H 型和 H-L-H 型,无法完成达峰目标。在碳排放低值区,L-L-L 型,基准情景等 5 种情景能在 2030 年前完成达峰目标。L-H-L 型在 2018 年便已实现达峰目标。

参考文献

- [1] 张志强, 曾静静, 曲建升. 世界主要国家碳排放强度历史变化趋势及相关关系研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 859-869. ZHANG Zhiqiang, ZENG Jingjing, QU Jiansheng. An analysis of the trends of carbon emission intensity and its relationship with economic development for major countries[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 859-869.
- [2] 韩梦瑶, 刘卫东, 唐志鹏, 夏炎. 世界主要国家碳排放影响因素分析: 基于变系数面板模型[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2420-2429. HAN Mengyao, LIU Weidong, TANG Zhipeng, XIA Yan. Carbon emission impact factor analysis of major countries based on varying coefficient panel modeling[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2420-2429.
- [3] 曾静静, 曲建升, 张志强. 国际温室气体减排情景方案比较分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 436-443. ZENG Jingjing, QU Jiansheng, ZHANG Zhiqiang. Review of the international greenhouse gas emission reduction scenario programs[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 436-443.
- [4] 陈茜, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 12-18. CHEN Han, CHEN Wenying, HE Jiankun. Pathway to meet carbon emission peak target and air quality standard for China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(10): 12-18.
- [5] 周宝同, 邵俊明, 刘小波, 于晓凤, 刘颖. 重庆市不同功能区建设用地碳排放的库兹涅茨曲线特征分析[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 619-628. ZHOU Baotong, SHAO Junming, LIU Xiaobo, YU Xiaofeng, LIU Ying. Characteristics of Kuznets curve to the relationship between construction land expansion and carbon emission intensity in different functional areas of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(6): 619-628.
- [6] 郭芳, 姜光辉, 裴建国, 章程. 广西主要地下水水质评价及其变化趋势[J]. 中国岩溶, 2002(3): 44-50, 54. GUO Fang, JIANG Guanghui, PEI Jianguo, ZHANG Cheng. Assessment on the water qualities of major subterranean rivers in Guangxi and their changing trend[J]. *Carsologica Sinica*, 2002(3): 44-50, 54.
- [7] 李涛, 曹建华, 张美良, 黄艳梅, 陈家瑞, 严毅萍, 李光超, 朱晓燕. 桂林盘龙洞岩溶表层带土壤CO₂浓度的季节变化研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 348-353. LI Tao, CAO Jianhua, ZHANG Meiliang, HUANG Yanmei, CHEN Jiarui, YAN Yiping, LI Guangchao, ZHU Xiaoyan. The seasonal variation of soil CO₂ concentration in epikarst in the Panlong cave, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(3): 348-353.
- [8] 赵先超, 彭竞霄, 胡艺觉, 张子兮. 基于夜间灯光数据的湖南省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 91-99. ZHAO Xianchao, PENG Jingxiao, HU Yijue, ZHANG Zixi. Spatial-temporal pattern and influence factors of county carbon emissions in Hunan Province based on nightlight data[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 91-99.
- [9] 李强. 水利工程对岩溶水体碳循环的影响[J]. 中国岩溶, 2013, 32(3): 253-257. LI Qiang. Influence of hydraulic project on the carbon cycle in the karst reservoir[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(3): 253-257.
- [10] 李莉, 董棒棒, 敬盼. 环境规制背景下新疆能源碳排放峰值预测与情景模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1444-1452. LI Li, DONG Bangbang, JING Pan. Prediction and scenario simulation of energy carbon emission peak in Xinjiang under the background of environmental regulation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(11): 1444-1452.
- [11] 魏媛, 简小玉. 基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 108-114. WEI Yuan, JIAN Xiaoyu. Research evolution of carbon emissions from land use in Guizhou Province based on carbon peak and carbon neutrality and the according predictions[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(4): 108-114.
- [12] 马彩虹, 邹淑燕, 赵晶, 文琦, 米文宝. 西北地区能源消费碳排放时空差异分析及地域类型划分[J]. 经济地理, 2016, 36(12): 162-168. MA Caihong, ZOU Shuyan, ZHAO Jing, WEN Qi, MI Wenbao. Temporal-spatial difference analysis of carbon emission from energy consumption and its regional type division in Northwest China[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(12): 162-168.
- [13] 蔡炳贵, 沈凇梅, 郑伟, 李克普, 白云志, 董春志. 本溪水洞洞穴空气CO₂浓度与温、湿度的空间分布和昼夜变化特征[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4): 348-354. CAI Binggui, SHEN Linmei, ZHENG Wei, LI Kepu, BAI Yunzhi, DONG Chunzhi. Spatial distribution and diurnal variation in CO₂ concentration, temperature and relative humidity of the cave

- air: A case study from water cave, Benxi, Liaoning, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 348-354.
- [14] 武娜, 沈镭, 钟帅. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(7): 1040-1050.
- WU Na, SHEN Lei, ZHONG Shuai. Spatio-temporal pattern of carbon emissions based on nightlight data of the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region of China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(7): 1040-1050.
- [15] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于NPP-VIIRS夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- NIU Yawen, ZHAO Xianchao, HU Yijue. Spatial variation of carbon emission from county land use in Chang-Zhu-Tan area based on NPP-VIIRS night light[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [16] 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[J]. *地理科学*, 2021, 41(8): 1324-1335.
- MO Huibin, WANG Shaojian. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1324-1335.
- [17] 高新才, 韩雪. 黄河流域碳排放的空间分异及影响因素研究[J]. *经济经纬*, 2022, 39(1): 13-23.
- GAO Xincui, HAN Xue. Study on the spatial differentiation and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. *Economic Survey*, 2022, 39(1): 13-23.
- [18] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进: 基于县域碳排放数据的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(11): 1917-1924.
- LIU Huajun, SHAO Mingji, JI Yuanmeng. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(11): 1917-1924.
- [19] 张昌兵, 华丽香, 余梅丽. OFDI对中国碳排放的影响: 基于省际空间面板数据的实证检验[J]. *福建江夏学院学报*, 2022, 12(2): 9-21.
- ZHANG Changbing, HUA Lixiang, YU Meili. Impact of OFDI on carbon emissions in China: Empirical research based on inter-provincial spatial panel data[J]. *Journal of Fujian Jiangxia University* 2022, 12(2): 9-21.
- [20] 王宪恩, 王泳璇, 段海燕. 区域能源消费碳排放峰值预测及可控性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 9-16.
- WANG Xian'en, WANG Yongxuan, DUAN Haiyan. Forecasting area's carbon emissions of energy consumption and controllability study[J]. *China's Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 9-16.
- [21] 朱永彬, 王铮, 庞丽, 王丽娟, 邹秀萍. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J]. *地理学报*, 2009, 64(8): 935-944.
- ZHU Yongbin, WANG Zheng, PANG Li, WANG Lijuan, ZOU Xiuping. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 935-944.
- [22] 邓小乐, 孙慧. 基于STIRPAT模型的西北五省区碳排放峰值预测研究[J]. *生态经济*, 2016, 32(9): 36-41.
- DENG Xiaole, SUN Hui. Forecast of the northwest five provinces' carbon emissions based on STIRPAT model[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(9): 36-41.
- [23] 张巍. 基于STIRPAT模型的西安市碳足迹预测和情景分析[J]. *生态经济*, 2021, 37(4): 25-29.
- ZHANG Wei. Prediction and scenario analysis of carbon footprint in Xi'an based on the STIRPAT model[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(4): 25-29.
- [24] 杨青林, 赵荣钦, 丁明磊, 满洲, 王帅, 余娇, 杨文娟. 中国城市碳排放的空间格局及影响机制: 基于285个地级市截面数据的分析[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(9): 1243-1249.
- YANG Qinglin, ZHAO Rongqin, DING Minglei, MAN Zhou, WANG Shuai, YU Jiao, YANG Wenjuan. Spatial pattern and influencing mechanism of urban carbon emission in China: Based on cross-section data of 285 cities[J]. *Resource Development & Market*, 2018, 34(9): 1243-1249.
- [25] 臧宏宽, 杨威杉, 张静, 伍鹏程, 曹丽斌, 许野. 京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(11): 19-24, 77.
- ZANG Hongkuan, YANG Weishan, ZHANG Jing, WU Pengcheng, CAO Libin, XU Ye. Research on carbon dioxide emissions peaking in Beijing-Tianjin-Hebei City agglomeration[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11): 19-24, 77.
- [26] 束兰根, 辛晴. 碳达峰视角下的中国地级以上城市碳排放与经济发展相关性研究[J]. *电子科技大学学报(社科版)*, 2021, 23(5): 1-11.
- SHU Langen, XIN Qing. Research on the relationship between urban carbon emissions and economic development of China from the perspective of carbon peak[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(5): 1-11.
- [27] 高冠龙, 张小由. 内蒙古碳排放现状及森林碳汇的重要性分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(Supp.2): 24-27.
- GAO Guanlong, ZHANG Xiaoyou. Carbon emission present situation and the analysis of the importance of forest carbon sinks in the Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *China's Population, Resources and Environment*, 2014, 24(Supp.2): 24-27.
- [28] 萨和雅, 罗翔, 王一辰. 基于STIRPAT模型的内蒙古自治区碳排放预测研究[J]. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2021, 50(4): 347-352.
- SA Heya, LUO Xiang, WANG Yichen. Prediction of carbon emission in Inner Mongolia based on STIRPAT model[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 50(4): 347-352.
- [29] 何愿, 张颖, 朱明. 桂江流域地下水污染途径及防控措施研究[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(4): 387-394.
- HE Yuan, ZHANG Ying, ZHU Ming. The pollutant infiltration pathways and measures to control groundwater pollution in the Guijiang river drainage system[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 387-394.

- [30] 张靖妮, 王慧丽. 基于市域尺度的陕西省碳排放空间特征分析[J]. 能源环境保护, 2022, 36(2): 96-103.
ZHANG Jingni, WANG Huili. Spatial characteristics of carbon emission in Shaanxi Province based on city scale[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 96-103.
- [31] Stern N. Stern Review: The Economics of Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [32] Han X J, Yu J L, Xia Y, Wang J H. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions in energy-enriched areas and the evolution of regional types[J]. Energy Reports, 2021, 7: 7224-7237.
- [33] 张帆, 徐宁, 吴锋. 共享社会经济路径下中国2020-2100年碳排放预测研究[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9691-9704.
ZHANG Fan, XU Ning, WU Feng. Research on China's CO₂ emissions projections from 2020 to 2100 under the shared socioeconomic pathways[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9691-9704.
- [34] 钟润涛. 基于居民生活水平与质量的国民经济核算研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
ZHONG Runtao. Research on national economic accounting based on residential living standard and quality[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [35] 姜睿. 碳减排——企业实现可持续发展之利器[J]. 企业研究, 2017(2): 40-43.
- [36] 王琪. 基于STIRPAT模型的河北省碳排放峰值预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
WANG Qi. Forecast of carbon emission peak in Hebei Province based on STIRPAT model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [37] 杨冬妮, 刘红宇. 产业转型升级对劳动力需求的影响研究: 基于广西2009-2018年面板数据分析[J]. 中国商论, 2021(14): 185-188.
YANG Dongni, LIU Hongyu. Research on the impact of industrial transformation and upgrading on labor demand: Based on the panel data of Guangxi from 2009 to 2018[J]. China Journal of Commerce, 2021(14): 185-188.
- [38] 杨丛丛. 双碳目标下广西能源发展的难点及战略分析[J]. 市场论坛, 2021(12): 15-19.
- [39] 蒋昀辰, 钟苏娟, 王逸, 黄贤金. 全国各省域碳达峰时空特征及影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1289-1302.
JIANG Yunchen, ZHONG Sujuan, WANG Yi, HUANG Xianjin. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emission peak by province of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1289-1302.
- [40] 尹文嘉, 吕雪贞. 广西生态环境保护与社会经济发展耦合协调度评估[J]. 桂海论丛, 2021, 37(6): 71-79.
- [41] 杨丛丛. 碳达峰碳中和目标指引推动广西能源高质量发展[J]. 广西节能, 2022(1): 15-18.
- [42] 韩楠, 罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288.
HAN Nan, LUO Xinyu. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1277-1288.
- [43] 杨廷锋. 贵州岩溶地区生态足迹的动态变化研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 155-161.
YANG Tingfeng. Study on the dynamic change of eco-footprints in Guizhou karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(2): 155-161.
- [44] 潘永忠. 关于资源枯竭型城市发展循环经济的思考: 以广西合山市煤炭资源型城市为例[J]. 广西轻工业, 2009, 25(9): 106-107.
- [45] 蔡卓杰, 卢远, 华瑾. 广西县域人口与经济集聚时空演变分析[J]. 地理空间信息, 2016, 14(1): 13-16.
CAI Zhuojie, LU Yuan, HUA Cui. Spatial temporal evolution analysis of population and economy agglomeration of Guangxi county[J]. Geospatial Information, 2016, 14(1): 13-16.
- [46] 钱开胜. 广西: 新认定22个特色水果示范区[J]. 中国果业信息, 2021, 38(12): 53-54.
- [47] 许小红, 覃爽姿, 阮柱, 甘永萍. 县域休闲农业旅游资源开发格局及优化策略研究: 以广西为例[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 102-113.
XU Xiaohong, QIN Shuangzi, RUAN Zhu, GAN Yongping. Research into the development pattern and optimization strategy of leisure agricultural tourism resources in county areas: A case study of Guangxi Province[J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2021, 38(3): 102-113.

Temporal and spatial characteristics and peak prediction of carbon emissions in Guangxi Zhuang Autonomous Region

GAO Miao, WU Xiuqin

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract Under the background of increasing international attention to the topic of global warming, in 2020 China was committed to peaking carbon emissions by 2030 with its enhancing independent contribution and powerful policies and measures. All provinces and localities actively respond to the commitment. Guangxi Zhuang Autonomous Region is an important source of industrial raw materials for China, but the slow industrialization and the excessive reliance of economic growth on industrial development have led to a significant increase in carbon emissions.

Therefore, the purpose of exploring the historical and future laws of carbon emissions in Guangxi Zhuang Autonomous is to achieve the carbon peak goal as soon as possible.

The research is based on the county-level carbon emission data of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2003 to 2017, sourced from Carbon Emission Accounts and Datasets (CEADS) which has the longest time span (from 1997 to 2017), the widest coverage and the highest accuracy of China's data on county-level carbon emissions. By GIS spatial analysis method, trend analysis and analysis of exploratory spatial data, the temporal and spatial changes of three indicators—carbon emissions, carbon emission intensity and carbon emission pressure—are analyzed at provincial, municipal and county levels in Guangxi. According to the hierarchical combination of the three indicators, Guangxi Zhuang Autonomous Region is divided into six different types of regional carbon emissions, and on this basis, seven carbon emission scenarios are simulated in terms of future population, and social and economic development. The extensible stochastic environmental impact model (STIRPAT) is used to predict the peak of carbon emissions in different scenarios for the types of regional carbon emissions in Guangxi from 2022 to 2035.

(1) From 2003 to 2017, the total carbon emissions of Guangxi Zhuang Autonomous Region increased significantly, and the carbon emissions at the city level showed a spatial pattern of Nanning City being the highest and Fangchenggang City being the lowest. Carbon emissions at the county level showed disequilibrium. Though the carbon emission intensity significantly reduced, it showed a spatial pattern of being the highest in Laibin City and the lowest in Hezhou City. The index of carbon emission pressure increased significantly. The overall trend of variation coefficient of total carbon emissions is stable, showing high-intensity variation. (2) According to the classification and combination of total carbon emission, carbon emission intensity and carbon emissions pressure, carbon emissions can be divided into six regional types, including high total amount-high intensity-high pressure type (H-H-H), high total amount-low intensity-high pressure type (H-L-H), high total amount-low intensity-low pressure type (H-L-L), high total amount-high intensity-low pressure type (H-H-L), low total amount-high intensity-low pressure type (L-H-L), and low total amount-low intensity-low pressure type (L-L-L). According to the current scenario and future development of influencing factors of carbon emissions in Guangxi, seven scenarios are divided, including benchmark scenario, energy-saving scenario, scenario of rapid economic development, scenarios of simultaneous development of economy and emission reduction (a and b), scenario of green development and scenario of emission reduction. (3) The forecast results of Guangxi's whole carbon peak period show that four scenarios such as energy-saving scenario, scenario of simultaneous development of economy and emission reduction (b), scenario of green development and scenario of emission reduction can achieve the peak carbon emissions by 2030. The peak time of carbon emissions is 2023, 2030, 2029 and 2030 respectively. The prediction results of reaching peak carbon emissions in different regions show that the energy-saving scenarios of H-H-L and H-L-L can achieve the goal of peak reaching. The H-H-H type and H-L-H type cannot achieve the peak goal. The benchmark scenario and the rest five scenarios of L-L-L can all achieve the peak by 2030. The L-H-L type reached its peak in 2018.

The research systematically analyzes the overall and internal changes of carbon emissions in Guangxi Zhuang Autonomous Region, and points out the scenario mode of reaching the peak carbon emissions, which provides a strong reference for the measures and plans of emission reduction taken by Guangxi government. In the future, Guangxi Zhuang Autonomous Region should coordinate the relationship between energy supply and emission reduction, and take specific measures for emission reduction according to local conditions by referring to the scenario model of peak carbon emissions, so as to achieve the goal of reaching the peak carbon emissions in 2030.

Key words Guangxi Zhuang Autonomous Region, carbon emissions at the county level, the temporal and spatial changes, STIRPAT

(编辑 张玲 杨杨)