

参赛队号：

2021 年（第七届）全国大学生统计建模大赛

参赛学校

中国人民大学

论文题目 中国县域二氧化碳排放及时空分布测度
——基于夜光灯数据和贝叶斯优化-提升
回归树模型

参赛队员

冯小芝、冯志昕、岳昊江

指导老师

白琰冰、吴翌琳

中国县域二氧化碳排放及时空分布测度——基于夜光灯数 据和贝叶斯优化-提升回归树(BO-BRT)模型

目录

摘要

一、 引言.....	1
(一) 研究背景.....	1
(二) 研究目标及意义.....	3
二、 文献综述.....	4
(一) 碳排放测度方法.....	4
(二) 卫星遥感数据与碳排放测度.....	4
三、 研究设计.....	8
(一) 数据来源.....	8
(二) 数据概览.....	10
四、 模型的分析 and 建立.....	14
(一) 模型选择——提升树回归 (BRT)	14
(二) 模型优化——贝叶斯优化 (BO)	15
(三) 模型检验——K 折交叉验证.....	17
五、 碳含量预测.....	18
(一) 碳排放估算模型建立.....	18
(二) 超参数优化.....	18
(三) 评价模型结果.....	19
(四) 回归结果对比和误差检验.....	20
(五) 结果分析.....	21
六、 碳排放时空特征分析.....	22

(一) 标准差椭圆方法	22
(二) 2000 年-2017 年碳排放时空特征分析	22
七、 结论及建议.....	24
参考文献.....	25
致谢.....	31

表格和插图清单

图 1 基于中国 1960-2020 面板数据碳排放量变化曲线	2
图 2 技术路线图	4
图 3 变量相关性热力图	10
图 4 不同省份的碳排放量分布	11
图 5 碳排放量与国内生产总值线性拟合	11
图 6 2000 年—2017 年各年碳排放量	12
图 7 五个省份碳排放量与城镇化率线性拟合	13
图 8 碳排放量与夜光灯强度线性拟合	14
图 9 贝叶斯优化框架	16
图 10 K 折交叉验证结构.....	17
图 11 贝叶斯优化迭代器结果	18
图 12 贝叶斯优化迭代器结果	19
图 13 模型预测值与真实值分布	20
图 14 2002 年-2017 年碳排放标准差椭圆及碳中心	24
表 1 回归模型拟合结果比较	21
表 2 碳中心参数	23

摘要

面临全球气候变化的巨大挑战,我国积极响应《巴黎协定》的号召,提出“2030年前碳达峰,2060年前实现碳中和”的碳排放发展目标,并将碳中和相关工作作为2021年的重点任务之一。目前我国主流的碳排放核算方法是基于产品、企业和项目的自下而上的方法,成本较大且效率较低,而且县级统计数据严重缺失,难以进行精细化的管理和政策指导。

夜光灯数据被广泛应用在社会经济指标的测度中,并表现出良好的解释能力。本文结合夜光灯和社会经济数据,利用提升回归树(BRT)建立其与碳排放的关系,并采用贝叶斯法优化(BO)模型超参数。本文利用2000–2017年中国省级数据,进行有监督学习,并通过K折交叉验证法对模型的表现结果进行评价,结果表明BO-BRT具有较高的拟合优度和泛化能力。

基于BO-BRT模型,我们对2000–2017年中国县级碳排放数据进行测度,并结合标准差椭圆对中国碳排放空间分布进行分析,结果发现碳排放主轴逐渐向西旋转,表明中国发展过程内蒙古、新疆等西部地区碳排放量逐渐增加。

本文结合夜光灯和社会经济数据建立的我国县域碳排放量的估计模型提供了一种成本低、精度高的小尺度碳排放核算方法,对我国县域碳排放测度、碳减排措施的落实乃至其经济发展都有着重要指导意义,同时针对中国全域碳排放分析的结果,对国家加强顶层设计、统筹协调各个地区碳排放具有重大实践意义。

关键词: 碳排放 夜光灯数据 BO-BRT 标准差椭圆

一、引言

（一） 研究背景

全球气候变化是 21 世纪人类社会面临的巨大挑战，2016 年由全球 178 个缔约方共同签署的应对气候变化的《巴黎协定》对 2020 年后全球气候变化的行动作出了统一安排，提出了尽快实现温室气体排放达到峰值的建议。在 2020 年时，我国第一次提出了碳排放发展目标：“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，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。”尤其在 2021 年两会，“碳达峰”“碳中和”这两个词首次被写进了政府工作报告；会议上制定的“十四五”规划也将加快推动绿色低碳发展列入其中。碳中和是贯彻新发展理念，构建新发展格局，推进产业结构转型，使我国走上以创新为驱动的绿色、低碳、循环的发展路径，实现高质量发展和生态环境质量持续改善的必经之路。

近年来我国煤炭消耗量正在逐渐减少，2017 年至 2020 年，中国国内煤炭消费在一次能源消费中所占的比重¹已经由 60.4%下降到 57%左右，同时非化石能源消费占比从 13.8%显著提升至 15.8%，碳排放结构逐步合理优化。但全国政协常委潘碧灵指出中国在接下来 15 年中对于能源的需求会持续增长以使经济以合理的速度增长，提气、降碳的压力很大，因此我国实现碳达峰碳中和时间紧迫并且任务繁重。根据世界银行数据，中国碳排放自 20 世纪以来长期保持高速增长，2015 年以来呈现下降趋势（见图 1），但仍然保持在很高的水平。

¹ 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017-2020.

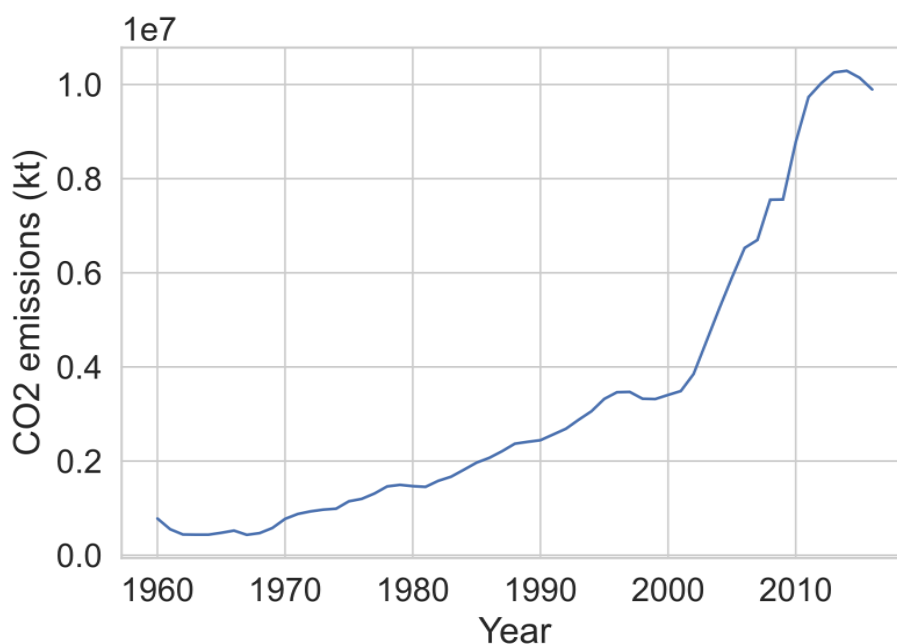


图 1 基于中国 1960–2020 面板数据碳排放量变化曲线

现有的与碳排放有关的数据库，包括世界银行(World Bank)、中国碳核算数据库(CEADs)、中国多分辨率排放清单(MEIC)以及全球基础设施碳排放数据(GID)等，它们所提供的碳排放数据大部分都以年份为最小时间单位，且大部分以国家、省份为最小空间单位，基本没有高分辨率且更新速率快的碳排放数据。另外，以上数据库所提供的碳排放数据大多基于能源消耗计算碳排放量，成本大、效率较低。为准确预测碳达峰、尽早实现碳中和战略目标，就必须密切、高效监测我国碳排放量，同时利用数据科学技术，优化测度碳排放量的方法，提高碳排放量测度的效率和精度。

目前，用数据落实碳标签的推广、落实技术成果的转化、助力实现碳中和目标已成为大势所趋。2021 年 5 月，国内首个碳中和大数据研究院成立，多个单位联合开发碳中和大数据云平台，未来各产业单位还将汇总集合各低碳领域内更多的减排技术及对碳排放核算工具的创新合理利用。中国工程院院士武强表示，大数据不仅表示数据的体量大，还意味着要多角度、多行业、大范围地寻找和利用与碳排放有关的数据。因此本文立足卫星数据，基于深度学习算法

探索碳排放量的新的测度方法并关注碳排放的时空分布情况。

(二) 研究目标及意义

在国内产业向低碳转型的过程中,宏观政府部门如何制定减排措施以及微观企业如何执行落实、我国区域经济结构如何协同发展都是各部门在未来计划里值得深入探讨的问题,而科学客观的碳排放数据则是政策实践强有力的理论支撑。科学测度碳排放,不仅可以对人类文明产业发展起到警示告诫作用,还能刺激各行业对于绿色和新清洁能源的技术创新与研究使用,推动促进中国作为世界第二大经济体进行绿色转型的模范作用,提早达到“碳高峰”对于人类社会发展与生态平衡二者之间的交锋也具有积极的示范意义。

在此上述背景之下,寻找一种低成本又高精度的二氧化碳排放强度测算方法对于研究我国高速增长的经济和二氧化碳排放量之间的关系显得尤为重要。本文通过收集国家统计局数据库中 2000-2017 年各省的年度 GDP、人均 GDP、人口总数、城镇化率等面板数据以及中国碳核算数据库中估算的 1997 - 2017 年中国 2735 个县域的 CO₂ 排放量数据结合,并且从经过统一后的 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星图像中得到了具有高质量并且时间跨度范围广度的稳定夜间灯光数据,并据此建立中国小地域尺度下的二氧化碳排放量核算模型,提出相应规划与建议。

本文提出的结果有助于弥补现有的数据差距,并有助于制定减少中国二氧化碳排放的战略。除了应用在碳排放领域具有借鉴价值,而且对于今后人口分布、GDP 预测和污染物估计等社会指标测度也提供着重要的参考意义。

(三) 技术路线

本文从整体上的大致研究思路和技术路线如图 2 所示,在此结构支撑下,逐步展开对碳排放测度的研究路径。

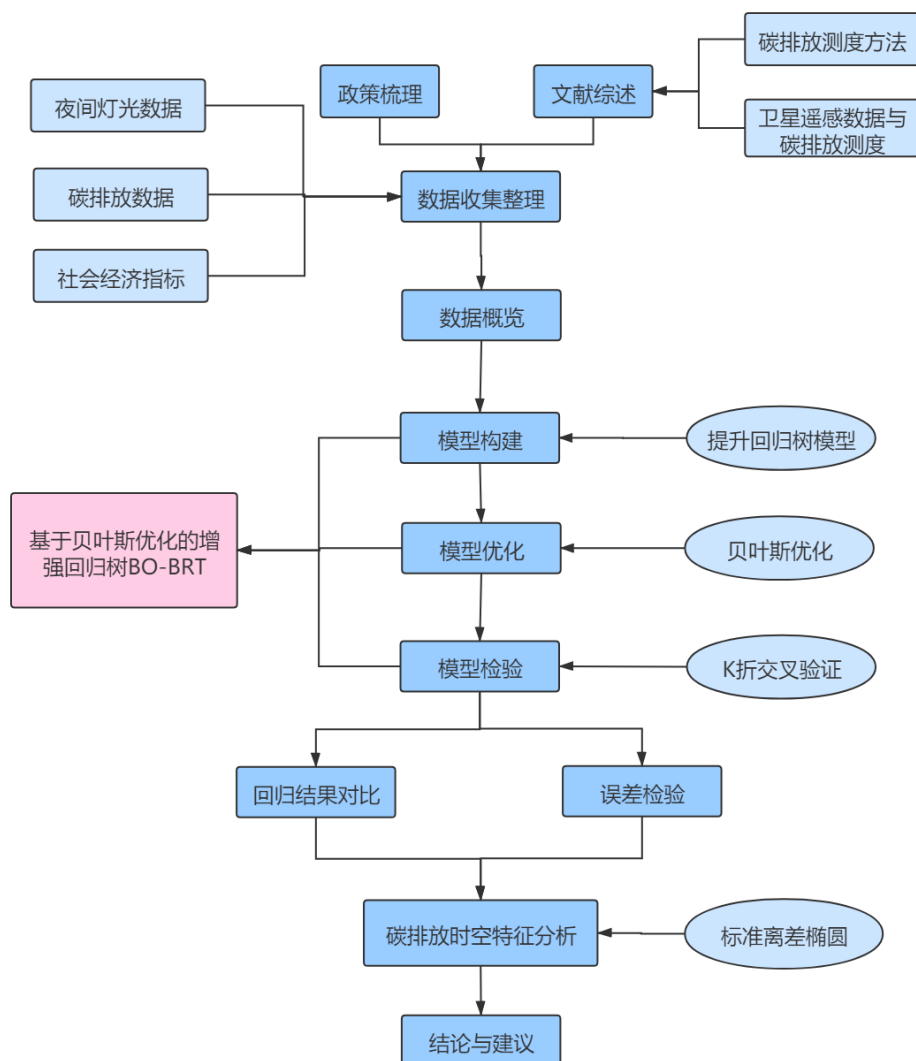


图 2 技术路线图

二、文献综述

(一) 碳排放测度方法

关于碳排放，主要采用的还是传统的方式，即利用各种数据集进行分解从而得出碳排放含量，包含自上而下和自下而上两种测度方法，前者主要基于国家或区域进行核算，后者主要基于产品、企业和项目进行核算。前者存在统计口径以及数据来源上的差异，而后者基于政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 专家委员会评审，在实施的连续性、一致性以及可比性上效果较好。其中，用自下而上的方法测度碳排放是目前学界和业界普遍认可的主流核算方法。

2019 年 5 月，IPCC 第四十九次全会通过了 2019 年新修订的 IPCC 指南，与

2006 年的 IPCC 清单指南以及 2013 年增补了“湿地”统计的清单指南一并使用，提供了世界各国编制温室气体清单的最新方法和规则。在上述 IPCC 材料中，新的方法体系的排放因子更加精细化，排放因子与活动水平的分类更加科学合理，将温室气体分为能源活动、工业生产过程、农业、林业和其他土地利用、废弃物及其他六个部门，每个部门下又有若干详细的划分。

常见的因素分解模型有拉斯尔斯指数法、LMDI 分解法(Logarithmic Mean Disivia Index)、IPAT 模型、STIRPAT 模型、Kaya 公式等。李齐云等(2009)，朱勤等(2010)，孙昌龙等(2013)则从 STIRPAT 模型出发，分析对碳排放的三个主要因素：人口(P)、人均消费(A)和技术(T)，并考虑引入其他的变量或者使用改进的算法，对 STIRPAT 模型做出改变从而使得拟合结果更符合中国国情。郭朝先(2012)用 LMDI 方法将碳排放因素分为经济总量效应、产业结构变动效应、能源利用效率因素和能源消费结构变动效应，研究中国 1996-2006 年不同产业结构间碳排放的动态变化。林伯强(2010)在 Kaya 恒等式包含的温室气体排放量、能源强度、人均 GDP 以及人口的基础上，引入城市化因素修正模型。田立新等(2011)则利用广义费雪指数方法，研究不同能源消费占比、能源使用效率和经济发展的变化对中国碳排放的影响。Dong 等(2016)选择城镇化(城市人口/总人口，URB)和能源结构(煤炭消费/能源消费，EM)作为关键自变量。根据皮尔逊相关结果，从科技进步、产业结构、开放程度、能源效率和经济发展四个方面选择其他控制变量。该文同时利用莫兰指数衡量空间相关性对于碳排放的影响。Xiong 等(2016)采用对数均值除指数分解方法，将农业碳排放分解为效率因子、结构因子、经济因子和劳动因子，研究新疆不同阶段农业碳排放变化及其影响因素。Lin 等(2015)选取经济增长、能源消耗、研发、金融发展、外商直接投资、贸易开放、工业化和城市化作为输入变量，利用神经网络研究这 9 个对碳排放强度的影响。

（二） 卫星遥感数据与碳排放测度

在碳排放测度上,过往研究基本利用的数据都来自国家统计局年鉴或者是省级区域的年鉴,但市级或更小尺度数据因为通常难以获取,小尺度碳排放相关研究很少。20 世纪 80 年代以来,随着卫星技术的进步和遥感技术的发展 DMSP /OLS 夜间灯光影像数据的充实,外国学者专家们在做经济社会指标、环境问题等方面的应用研究时越来越多地借助于夜间灯光数据的支撑,但目前国内利用夜间城市灯光数据做碳排放测度相关研究相对较少。现有的研究思路基本是先确定测算范围主体夜间灯光亮暗强度与二氧化碳排放强度之间的是否具有相关性,然后利用机器学习的分析模型再对碳排放进行估算预测。

D011 (2000) 通过获取美国国防气象卫星夜间灯光影像数据,对全球 46 个处于不同经济发展水平的国家灯光特征与其自身碳排放做了相关性分析,发现两者在统计学上的相关性显著,为学界利用夜间灯光数据去绘制碳排放的空间分布树立了典范,探寻出一条成本较低的可行道路。Raupach (2010) 选取中国、美国、日本等六大全球代表性经济体作为实验研究区域,依然进行统计学上假设检验的方法,确实碳排放与夜间灯光亮度值存在显著的线性关系。在同一时期,Ghosh T (2010) 等人通过加拿大、中国、美国等典型能源消耗大国的化石燃料碳排放强度,配合美国国防卫星遥感影像数据探寻二者数值之间存在的规律,确定了相关性的存在。

而国内相关研究起步较晚。Meng (2014) 基于世界各国夜间灯光图像和碳能源消耗统计年鉴数据,提出了一种自上而下的碳排放估算方法来测算中国城市级别的二氧化碳排放量,发现夜光灯数据可以作为一个合适的驱动动力来研究中国城市尺度下的与碳排放有关联的能源消耗估计核算。Su Yongxian (2015) 则是根据 DMSP /OLS 夜间灯光影像数据建立了一套完整的根据碳排放遥感评估体系来测度中国城市级能源消费状况,在一定意义上解决了中国城县市级能源消费统

计数据缺失以及各省市之间统计口径存在差异等问题。在城市级层面,Guo Xinyi (2016)综合利用 DMSP /OLS 和美国国家极轨卫星数据,配合经济社会发展相关指标作为次要的解释变量,通过网格模拟的空间研究方法对江苏省碳排放含量的空间分布进行可视化展示,构建了已经容纳了滞后的碳排放空间回归模型,但由于数据的滞后性,仍然存在时效问题。小尺度下,Shi 等(2016)通过相互校正、年内和年际间校正等系列处理,在中国年度分省的稳定夜间灯光数据的背景之下,提出了一种更新颖的时空碳排放动态模型,该模型的测量精度分辨率已经显著提高到了 1Km 以下,此学术研究对城市级别更小尺度的二氧化碳排放量估算有了创新突破。

然而,二氧化碳排放的受到的影响来源是一个复杂多层级的非线性结构。在国外,已有一些学者利用神经网络算法预测碳排放。Ahmadi M H 等(2019)采用人工神经网络(ANN)方法,根据作为一次能源供应的各种能源的份额和 GDP,来预测二氧化碳的排放。Alex O. Acheampong 等(2019)选取 9 个对碳排放强度起关键作用的参数作为输入变量,应用人工神经网络建立中国等五个国家碳排放强度预测模型。Di, Yang 等(2020)提出了一种基于集成结构的神经网络模型(NNEnsemble),用于分析国防气象卫星计划行扫描系统(DMSP-OLS)夜间稳定灯光(NSL)数据与省尺度碳排放统计数据之间的非线性关系。Jiandong Chen, Ming Gao(2020)等人采用粒子群优化-反向传播(PSO-BP)算法统一了 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星图像的尺度,并依据 PSO-BP 算法建立了夜光灯强度和二氧化碳排放量的关系,估计了 1997-2017 年中国 2735 个县的二氧化碳排放量。Fattah, M. 等(2021)采用基于多层感知器-马尔可夫链的人工神经网络模型预测未来的碳排放模式。Crespo 等(2021)引入了一种新的计算学习框架,结合 RReliefF 驱动的特征选择和迭代神经网络结构改进,用于碳排放预测。

（三） 综述总结

上述研究从“全球—国家—城市”等多维度以及各社会研究方向均验证了夜间灯光影像数据与二氧化碳排放含量之间的关系。但是，国内目前运用夜间灯光遥感影像数据来模拟中国碳排放强度的研究大部分是建立二者之间较为单薄的回归模型，或更偏向于结合经济社会指标作分析研究，未能将夜光灯数据和社会经济指标综合利用分析，而且在算法层面上模型的拟合优度和模拟效果以及研究的深度还有待提高。

因此，本文综合遥感数据中的夜光灯强度数据和社会经济指标，通过监督学习的方法建立其与二氧化碳排放量的非线性关系，从而提高模型的解释效果和拟合优度。

三、研究设计

（一） 数据来源

1. 卫星遥感数据

早在 20 世纪六十年代时，美国为了更好地规整军工行业发展导向，开启了国防气象卫星计划（DMSP）。该卫星计划的主要负责机构是美国空军航天导弹系统，来对卫星技术进行控制与数据采取更新，其运行机制原理是通过绕地卫星的运行环绕轨道，配合遥感扫描技术的线性扫描系统（OLS）使得绕地样本采写卫星传感器能够获取全球内每天的昼夜图像。此国防气象卫星计划扫描采取的数据丰富多样，能够对地球表面特征即人类活动有客观地观测视角。而其中应用价值特别高的夜间灯光影像数据则能够反映综合性信息，它容纳涵盖提供了自然景观、道路交通、人口流动、林农业、社会经济活动等与人类文明活动影响组成因子息息相关的特征数值。

并且美国又在 2011 年发射了一颗搭配了更新红外成像辐射（VIIRS）夜光传感技术绕地极轨卫星（Suomi-NPP）与 DMSP-OLS 相比，时间序列更长。由于两颗

卫星的轨道有差异,搭载了新技术的极轨卫星更准确地测量反映人类的经济活动空间信息。

然而,两个卫星的空间分辨率和传感器设计差异需要对两个数据集进行交叉传感器校准,本文采用了 Chen. z, Yu. b 等人对数据集校准后的结果,其根据 DMSP-OLS NTL 数据和每月的 NPP-VIIRS NTL 数据(2013 年)的新交叉传感器校准,构建了 NPP-VIIRS-like NTL 数据集,所拓展的 NPP-VIIRS-like NTL 数据集具有与合成的 NPP-VIIRS NTL 相比而言更好的空间模式和时间一致性,同时考虑到极端天气、节假日等因素的影响,对数据做了相应的平滑处理,使校准后的数据集能够较好地应用于一系列人类社会经济活动的监测。

本文基于其数据集使用 ArcGIS 对中国 2000-2017 年的省级夜光灯图像进行提取,并将各省的夜光灯强度进行汇总。

2. 碳排放数据

本文采用的省级碳排放数据取自于中国碳核算数据库(CEADs)。省级碳排放数据是基于能源消费统计来进行碳排放量核算的,采用自下而上的统计方法,先计算构建每个省份的 47 个工业部门对于 17 种能源的一次消耗数值组成的矩阵,再配合已有研究中不同能源的碳排放因子来计算各类含碳能源更为具体的二氧化碳排放量,最后将来自不同能源的二氧化碳排放量全部加和共同构成了某省份当年的二氧化碳排放量。这种方法虽然通过直接测量得到较为精确的数据,但通常需要耗费大量的时间,并且往往局限于某些特定的行业。

3. 社会经济指标

本文选取了具有代表性的社会经济指标作为辅助变量来评估碳排放量,本文选取省级的政府统计数据,所有数据均来自于国家统计局以及部分省不同年份的统计年鉴,综合了以往的文献和指标与碳排放量关系,选取了 2000-2017 年有关人口、生产、城镇化率等一系列指标。

（二）数据概览

根据相关性热力图 3，可以得知夜光灯强度、年末人口数、GDP 与CO₂排放量呈现较强的相关性，人均 GDP 和城镇化率未呈现较强相关性，原因可能是不同省份之间人均 GDP、城镇化率的结构化差异，详见下文。

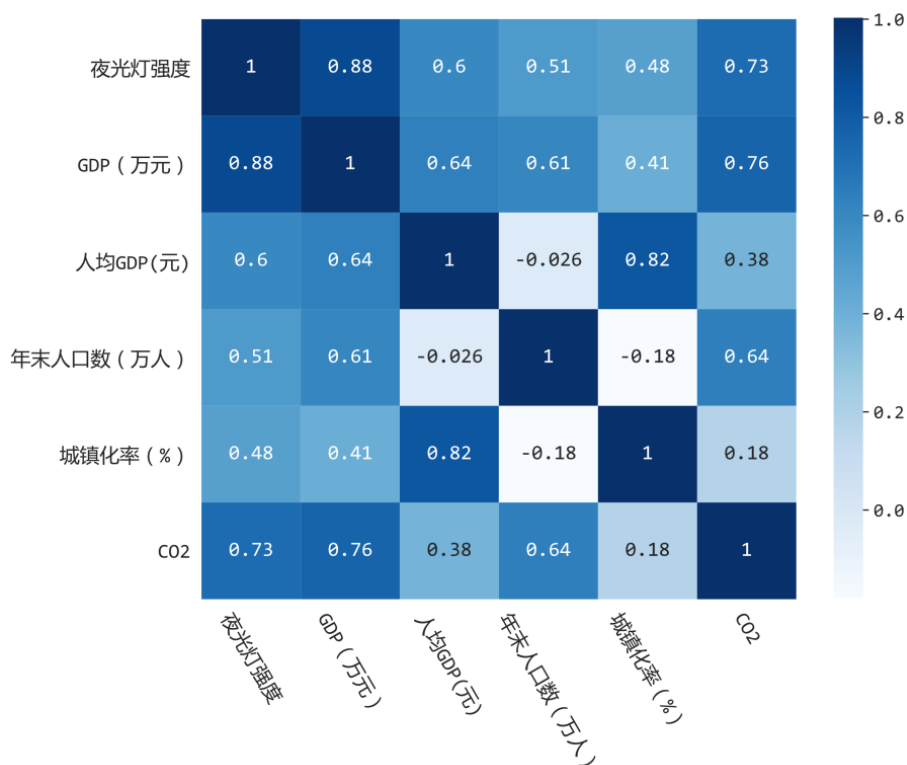


图 3 变量相关性热力图

在经济发展水平不同的各个省份，二氧化碳排放量会随着工业生产规模的不同以及人类活动的差异，展示出不同的水平。由图 4，可以直观发现在经济发展水平更高或工业生产水平更发达的省份，碳排放量整体处于较高水平且变化较大，在经济欠发达地区则处于较低的水平且变化较小，值得注意的北京和天津可能由于国家的调控和政策因素因而二氧化碳排放量较少。这在一定程度上体现了碳排放量的空间分布特征。

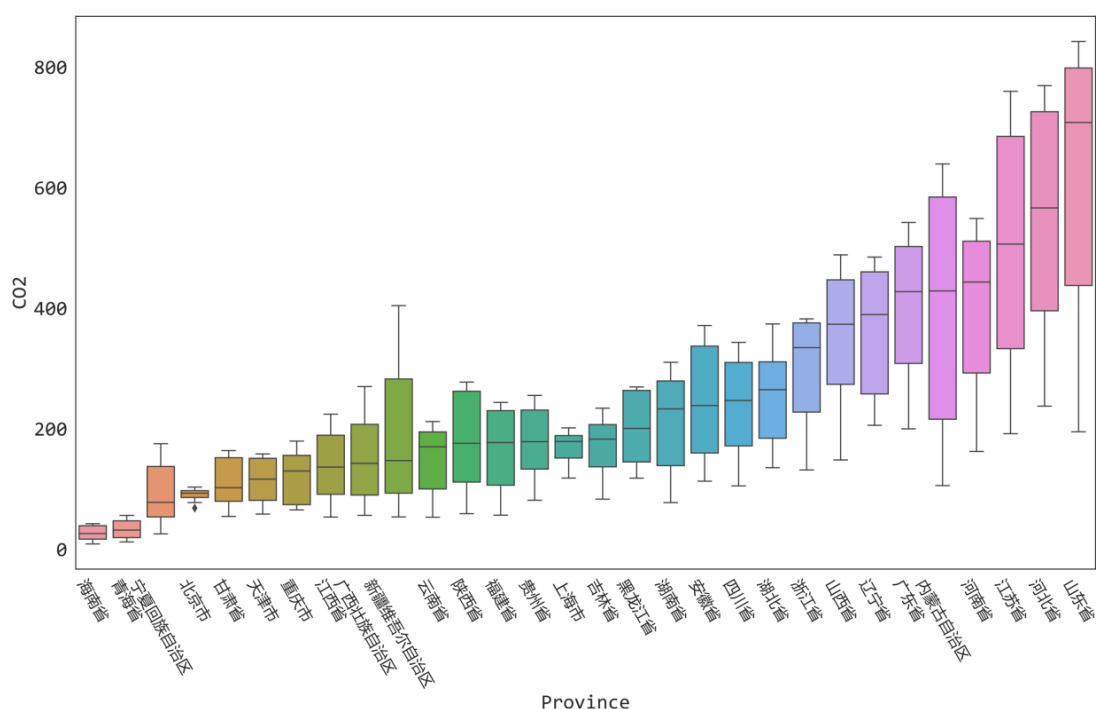


图 4 不同省份的碳排放量分布

由图 5，碳排放量与国内生产总值成显著的正相关关系。随着 GDP 的增长，人类经济活动规模的扩大使得碳排放量也呈现明显的上升趋势。再从人均 GDP 视角进行观察，碳排放量同样与人均 GDP 成正相关关系，但相关性比前者弱。这是因为我们所采用的碳排放量数据是相应省份在某一年的二氧化碳排放总量，与国内生产总值有着更好的对应关系。

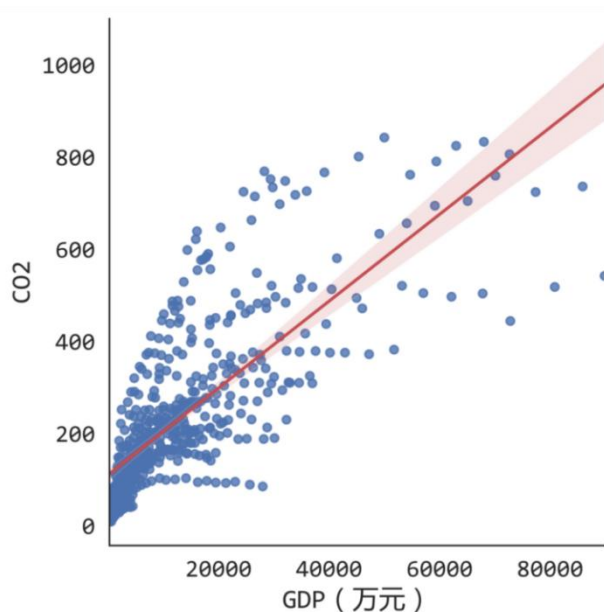


图 5 碳排放量与国内生产总值线性拟合

由图 6, 随着时间的推进, 中国各省碳排放量显然整体呈上升趋势逐年增加, 并且其浮动范围也不断扩大即离群点与中间水平差距加大, 这主要是由于我国经济迅猛发展带来的碳排放量上界的快速增长, 这种趋势在 2007 年至 2012 年尤为显著, 2013 年以来, 随着节能减排政策的逐步落实, 碳排放量的增长有所放缓。

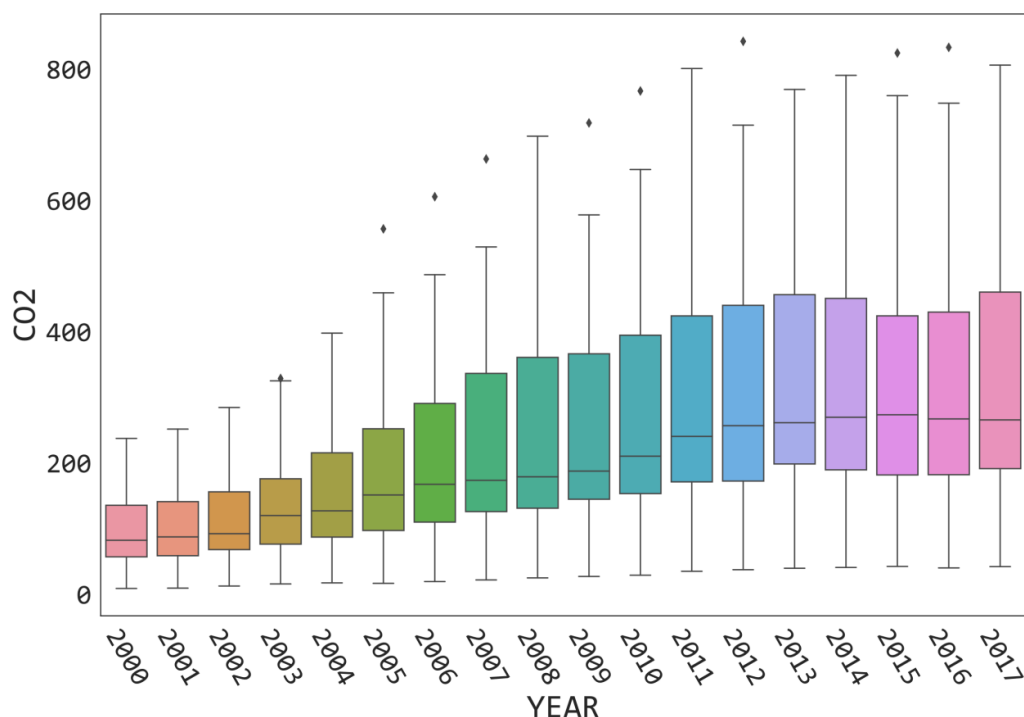


图 6 2000 年—2017 年各年碳排放量

近二十年来, 我国城镇化水平取得高速进步发展, 是推动产业进步和经济持续增长的一个重要动力源泉。但已有的先验结论是, 人类必须通过消耗更多的自然资源和生物能源来换取城市进程的发展, 这也必然会导致作为经济发展对立面的二氧化碳排放强度增加。我们拟合了 2000 年以来各省级单位城镇化率水平与二氧化碳排放量之间的关系图像 (如图 7, 以五个省份为例), 可以观测到图中点近似拟合成多条线性关系, 且多为正相关。在对于不同经济发展水平下的省份来说, 图像的斜率可能由于生产技术成果转化率的差异, 造成到达相同的城镇化水平进步所付出的能源代价有所区别。但不可否认的是, 城镇化水平对地区二氧化碳排放量有着一定程度的影响机制。处理好经济建设和环境保护之间的关系是当前全球命运共同体面临的严峻挑战。

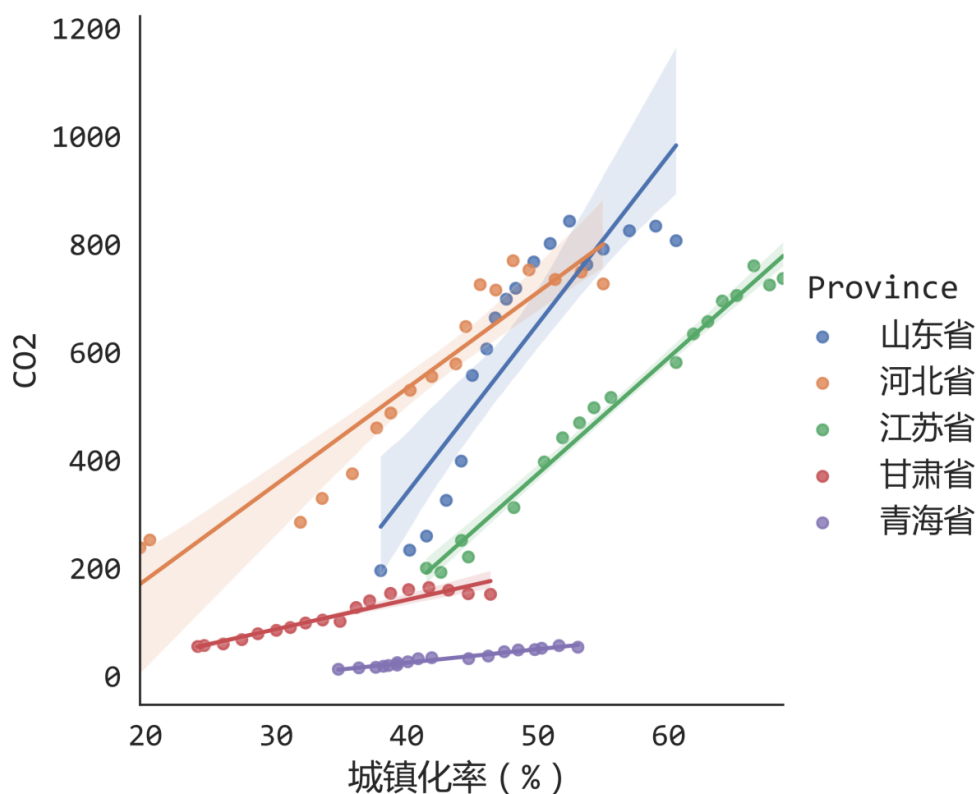


图 7 五个省份碳排放量与城镇化率线性拟合

夜间灯光数据作为能够客观表征人类社会活动的数据集，被广泛应用到关乎人类活动及其效应的各类领域中。通过对我们获取到的卫星遥感夜间灯光图像进行预处理，投影到中国各省级地区，可以获得各省的夜间灯光强度面板数据。结合时间序列可以与该地区二氧化碳排放量一一对应起来，观察两个指标关系的大致走向。如图 8 所示，直观上可以大致观测出具有高碳排放量的地区或时间节点，往往与之匹配着一个较高的夜间灯光光照强度，并且已经有研究表明大尺度地域下的碳排放量可能夜间光照强度有着较强正相关关系。并且从图中可看到大部分点聚集在坐标轴交点附近，表明在有特殊重大社会活动的情况之外，二氧化碳排放量与夜间光照强度变化较为稳定，显著提升变化或因为科学技术和产业生产活动取得突破性进步。

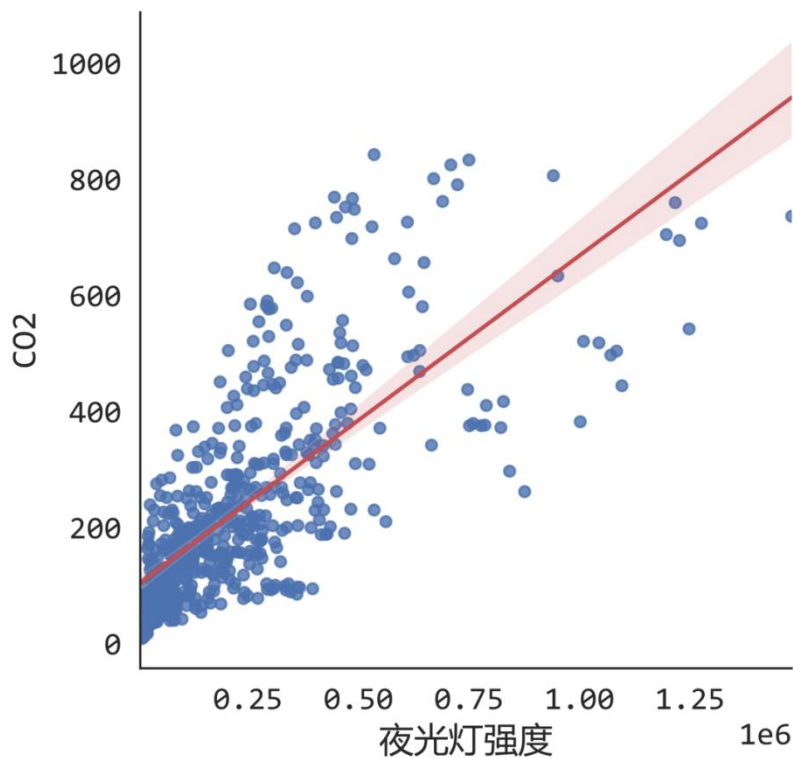


图 8 碳排放量与夜光灯强度线性拟合

四、模型的分析 and 建立

(一) 模型选择——提升树回归 (BRT)

BRT 是一种通过拟合多个模型并将它们组合起来进行预测，从而提高单一模型精度的方法。BRT 使用传统树结构中决策树与回归树 (CART) 中的回归树和构造增强来组合模型集。BRT, 有几个调节参数需要控制，比如树的数量 (nt)、学习速率 (lr) (即每次迭代种用于减少树的贡献的缩减参数)、树的复杂性 (tc) 或交互深度 (即变量交互的最大树深度)。

类似于其他 Boosting 算法，BRT 将模型构造为函数的加权和。先将 BRT 算法的一般步骤过程总结见下：

$$F_0(x) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, \gamma) \quad (1)$$

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \gamma_m h_m(x) \quad (2)$$

用一个常数 $F_0(x)$ 启动模型，BRT 算法的步骤包括一个决策树和一个用于评价

研究预测的好坏的损失函数。在每个阶段，在给定的现有的模型 F_{m-1} 及其拟合 $F_{m-1}(x_i)$ 下，选取决策树 $h_m(x)$ 使得损失最小化。残差计算公式如下：

$$r_{i,m} = - \left[\frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)} \right]_{F(x)=F_{m-1}(x)} \quad (3)$$

$r_{i,m}$ 是第 m 棵树的第 i 个样本的负梯度。 $h_m(x)$ 将 $r_{i,m}$ 作为目标变量。对残差值 $r_{i,m}$ 拟合一棵回归树，创建叶节点面积 $R_{j,m}$ ($j=1,2,\dots,J$)，通过求解最小化问题得到权重：

$$\gamma_{j,m} = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, F_{m-1}(x_i) + \gamma) \quad (4)$$

使用均方误差来作为模型确定性预测的损失函数：

$$L(y_i, F(x_i)) = \frac{1}{2} (y_i - F(x_i))^2 \quad (5)$$

对于分位数回归，当 α (分位数) 值在 0 到 1 范围内时，使用下面的表达式：

$$L(y_i, F(x_i), \alpha) = \begin{cases} \alpha(y_i - F(x_i)), & y_i \geq F(x_i) \\ (\alpha - 1)(y_i - F(x_i)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$R_{j,m}$ 是一个叶节点， j 是树中的叶节点数， v 是学习率。更新当前的模型：

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + v \sum_{j=1}^J \gamma_{j,m} I(x \in R_{j,m}) \quad (7)$$

这是一种拟合回归树的循环方法。一旦将第一棵树添加到模型中，模型将考虑树的误差预测，以平衡和提高下一棵树的精度。

$$F_m(x) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J v \gamma_{j,m} I(x \in R_{j,m}) \quad (8)$$

(二) 模型优化——贝叶斯优化 (BO)

贝叶斯优化 (Bayesian Optimization) 被认为是关于搜索所需的未知目标函数计算次数较少的最有效的方法之一，故贝叶斯优化方法的主要思路是通过顺序调查去尽量减少的待输入值去更快地找到未知目标函数 $f(x)$ 的最优解 x^* 。在贝叶斯优化的思路视角里中，形式未知的目标函数被当作任意形式的概率分布函数，

并对此函数有先验置信度。再依据每个新函数评估值去更新先验值来获得更好的后验分布，而获得的后验分布就近似于未知目标函数。如贝叶斯定理所述：

$$P(f | E_{1:i}) \propto P(E_{1:i} | f)P(f) \quad (9)$$

其中， $E_{1:i}$ 表示从初始样本 (x_1) 到当前样本 (x_i) 的累积的观察结果。可以清晰地看到，在贝叶斯优化中，只要观察到新的结果，后验概率 $P(f | E_{1:i})$ 就会更新，而且它与似然概率 $P(E_{1:i} | f)$ 和先验概率 $P(f)$ 成正比，它通过考虑改进（开发）和不确定性（探索）之间的权衡来帮助指导确定下一个采样点。

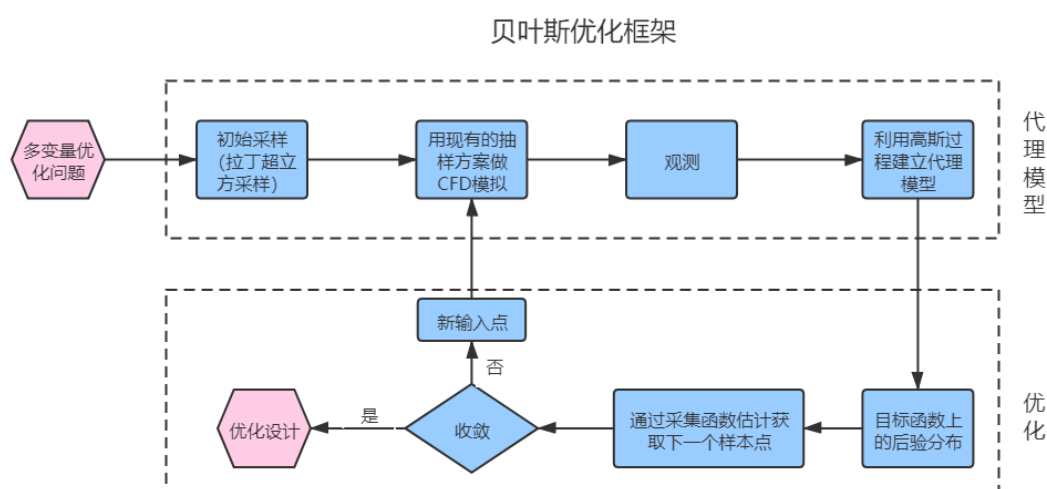


图 9 贝叶斯优化框架

一般情况下贝叶斯优化总是分为两个步骤来进行，优化框架如图 9 所示。起初，为了获得原始采样点来建立代理模型，推荐使用拉丁超立方采样法来进行最开始的样本采集。代理模型又被称作为响应面模型，是目前研究的基于输入值函数点 $(x_1, f(x_1)), \dots, (x_i, f(x_i))$ 的对未知目标函数形状的概率估计。更具体地说，它用高斯过程的概率分布估计 CFD 模拟的行为。因此，这种情况下的代理模型是以每个点的均值和协方差的概率分布的形式出现的，而不是以确定性的方式定义的。其次，利用采集函数对现有样本点构建的代理模型进行优化。代理模型的评估成本比原始的 CFD 黑箱模型低得多，因此可以通过采集函数在全尺寸范围对其进行评估，该函数推荐下一个候选输入 x_{i+1} ，这是迄今为止根据目标函数的概率

估计结果寻找最优输入值 x^* 最有用的方法。该算法继续取样和评估，直到获得无法进一步优化最优输入值。

（三）模型检验——K 折交叉验证

K 折交叉验证中实验者已有的数据集被通过随机函数按设定的比例分成 k 个相等的部分，称为 folds。保留一部分用于测试目的，其他 $(k-1)$ 部分用于训练模型。所以第一个模型建立在“2”到“ k ”次折叠上，然后在第一次折叠上进行测试。在第二部分中，除了作为第二个模型的测试集的第二部分之外，另一个模型在数据集的所有部分上进行训练。该过程重复 k 次。 k 值通常其值在 5-10 之间。

现将其主要步骤描述如下：将已有数据集分成 k 份；在每次分组完成后从 k 份里不重复地随机取其中一份当做测试集，用其他 $(k-1)$ 作为训练集来投入到构建好的模型的参数训练过程里，模型构建完成之后对测试集进行预测来演算得到该模型在测试集上的 MSE_i ；最终将获得的 k 次 MSE_i 取平均值来作为交叉验证检验方法里最后的 MSE （图 10）：

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k MSE_i \quad (10)$$

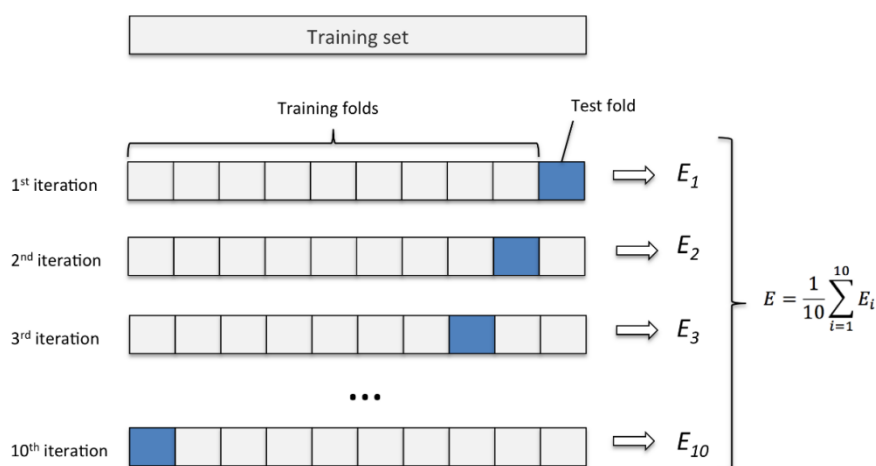


图 10 K 折交叉验证结构

五、碳含量预测

我们建立了一个基于贝叶斯优化 BO (Bayesian Optimization) 的增强回归树 BO-BRT (Boosted Regression Tree) 的数据模型来建立中国省级 2000 年-2017 年夜光灯强度、社会经济指标与二氧化碳排放量的关系。

(一) 碳排放估算模型建立

考虑到夜光灯强度 DN 值，以及社会经济指标与二氧化碳排放量不具备简单的线性关系，而且通过前期的数据初步分析可以得出碳排放在不同省份、不同年份具有明显差异，因此我们使用 BRT 模型，将不同省份和年份作为分类变量，省级夜光灯强度总和、人均 GDP、年末人口数、城镇化率作为数值变量，一起作为模型的输入，模型的输出结果为某省份某年的二氧化碳排放量。

(二) 超参数优化

我们采用了贝叶斯法 BO 对 BRT 的超参数进行优化，包括每片叶子的最小观测值(MinLeafSize)、学习率(LearnRate)、集成学习周期数(NumLearningCycles)等。

使用贝叶斯优化器对超参数进行优化迭代 30 次后，得到如下的结果：

Iter	Eval result	Objective	Objective runtime	BestSoFar (observed)	BestSoFar (estim.)	Method	NumLearningC- ycles	LearnRate	MinLeafSize
1	Best	8.4398	2.2896	8.4398	8.4398	LSBoost	55	0.22294	179
2	Best	7.2237	9.74	7.2237	7.3913	Bag	17	-	1
3	Accept	7.2738	9.81318	7.2237	7.2297	Bag	18	-	2
4	Accept	9.5954	4.9959	7.2237	7.2251	Bag	175	-	164
5	Accept	19.359	9.35846	7.2237	7.2237	Bag	19	-	268
6	Best	7.933	15.25	7.933	7.1359	Bag	496	-	1
7	Accept	7.3991	13.669	7.933	7.9328	Bag	495	-	9
8	Accept	7.6588	1.9549	7.933	7.9329	LSBoost	38	0.9254	21
9	Best	6.9431	12.288	6.9431	6.9434	LSBoost	497	0.964654	1
10	Accept	11.357	9.28472	6.9431	6.9433	LSBoost	19	0.9919195	1
11	Accept	9.9565	9.69838	6.9431	6.9435	LSBoost	24	0.931996	1
12	Accept	7.5996	11.57	6.9431	6.9436	LSBoost	499	0.94939	2
13	Best	6.9295	11.483	6.9295	6.9296	LSBoost	599	0.92253	4
14	Accept	6.1581	11.232	6.9295	6.9294	LSBoost	498	0.919272	1
15	Best	6.9965	19.118	6.9965	6.9971	LSBoost	424	0.929692	1
16	Accept	19.591	19.418	6.9965	6.9968	LSBoost	496	0.9911272	111
17	Best	5.9966	11.287	5.9966	5.9638	LSBoost	499	0.93577	2
18	Accept	7.931	2.6971	5.9966	5.9567	Bag	96	-	1
19	Accept	19.361	8.8158	5.9966	5.9935	LSBoost	495	0.86919	231
20	Accept	6.1161	7.1991	5.9966	5.993	LSBoost	314	0.919234	3
21	Accept	6.9363	11.614	5.9966	5.9949	LSBoost	499	0.918591	2
22	Accept	6.9145	11.425	5.9966	5.9951	LSBoost	495	0.939894	1
23	Accept	6.921	9.1595	5.9966	5.9973	LSBoost	398	0.939425	3
24	Accept	6.994	19.398	5.9966	5.9984	LSBoost	445	0.933488	2
25	Best	5.9964	11.48	5.9964	5.9982	LSBoost	491	0.929183	3
26	Accept	19.361	9.24652	5.9964	5.9982	LSBoost	19	0.96289	267
27	Accept	6.92	7.6258	5.9964	5.997	LSBoost	325	0.954917	1
28	Accept	6.9959	9.1499	5.9964	5.9978	LSBoost	396	0.941721	1
29	Accept	6.959	4.1227	5.9964	6.9998	LSBoost	177	0.994894	7
30	Best	5.9758	5.9826	5.9758	5.9782	LSBoost	212	0.983935	3

图 11 贝叶斯优化迭代器结果

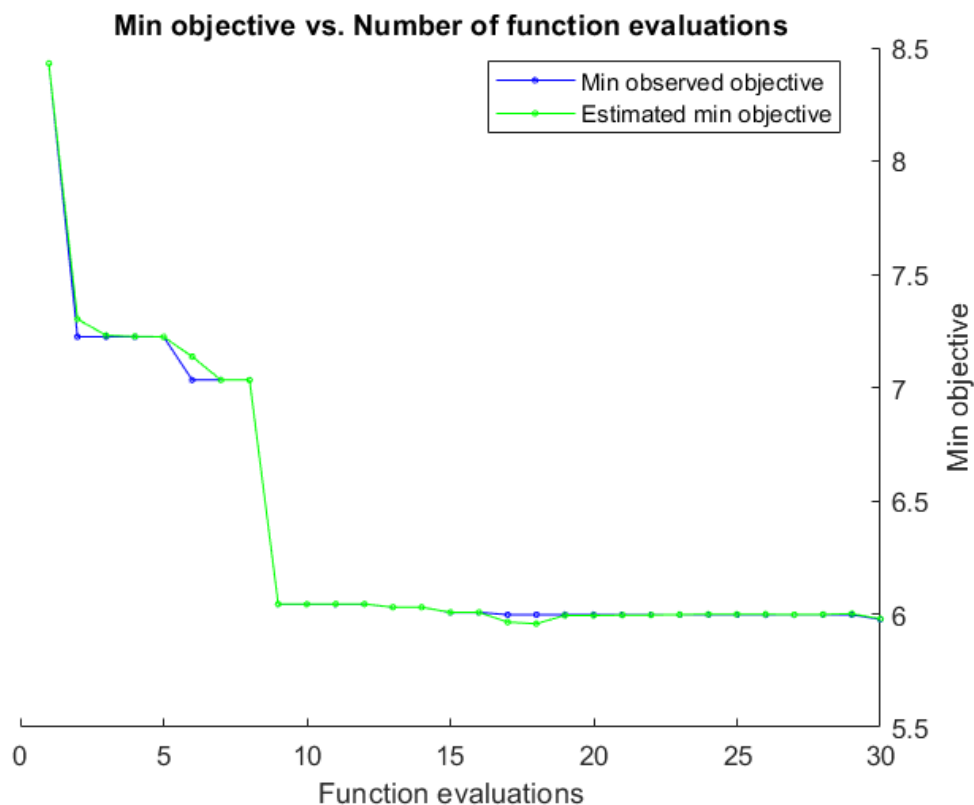


图 12 贝叶斯优化迭代器结果

根据贝叶斯优化器迭代的结果我们可以得知，当 Method = LSBoost, NumLearningCycles = 212, learnRate = 0.0839, MinleafSize = 3 时，超参数的设置达到最优结果，并且由下图可以得知，当迭代次数达到 20 时，预测结果和观测结果基本重合，当迭代次数达到 30 时，目标函数值达到最小，此时观测结果为 5.9758，预测结果为 5.9782。

(三) 评价模型结果

本文在此节使用的是十折交叉验证的方法来对模型的结果进行评估，通过对比预测结果与真实结果的大小关系，由图 13 可以得出，预测值和真实值基本分布在坐标对称轴两侧，该图像直观展示出本文建立的 BRT 模型具有良好的预测能力和解释能力。值得注意的是，本模型的 RMSE 为 17.144， R^2 达到 0.99067，优于 Jiandong Chen, Ming Gao 测算所得到的 0.9895，meng 等人得到的 0.94 和 Lv 等人得到的 0.6922。

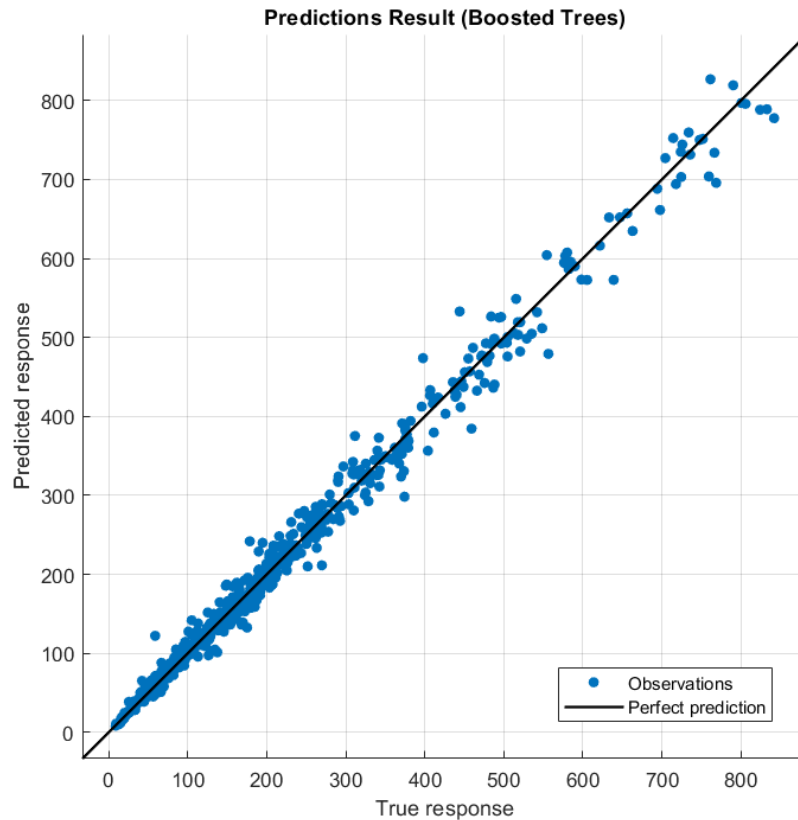


图 13 模型预测值与真实值分布

以上均表明基于贝叶斯优化的回归树对省级二氧化碳排放的预测具有极高的精确性，光强和社会经济指标能够较充分的解释和预测省级二氧化碳排放量。针对模型的高解释性，原因可能有三，一是本文综合利用了夜光灯强度数据和社会经济指标，对以往研究中数据来源单一性的问题做出了改进和解决，二是基于数据的初步分析得出二氧化碳排放量在不同年份和省际之间存在较大差异，所以将年份和省份设置为分类变量，从而得以充分了考虑二氧化碳排放的时空差异，三是采用 BO-BRT 模型，利用贝叶斯法对超参数进行了充分优化，同时 BRT 的监督学习方法建立了良好的非线性回归模型。

（四）回归结果对比和误差检验

为了进一步验证基于贝叶斯优化的回归树模型的优越性，我们采用了不同的回归模型，并结算其他各种回归模型的拟合结果与 BO-BRT 进行对比，所计算的

结果于表 1 中，不难发现基于 BO-BRT 模型的回归结果具有最优的RMSE和 R^2 ，这表明我们所采用的模型最优。

表 1 回归模型拟合结果比较

Model		<i>RMSE</i>	<i>R²</i>
Linear Regression Model	Linear	49.608	0.92
	Interactions Linear	60.953	0.88
	Robust Linear	64.533	0.87
	Stepwise Linear	35.098	0.96
Regression Tree	Fine Tree	40.154	0.95
	Medium Tree	44.421	0.94
	Coarse Tree	66.156	0.86
Ensembles of Trees	BO-BTR	17.144	0.99
	Bagged Trees	42.081	0.94

（五）结果分析

通过表 1 可知，模型的 R^2 普遍高于 0.85，说明进行回归的各指标之间具有良好的解释关系，说明选夜光灯强度以及社会经济指标作为解释变量具有科学性和有效性，将指标综合使用时候，各个回归的结果远远高于单独只使用夜光灯强度线性回归 R^2 为 0.52 的结果。

由于县级的二氧化碳排放测量成本高、测量精度低，但为了更好的完成碳中和指标，对细口径、精细化的统计要求刻不容缓。Jiandong Chen, Ming Gao 等人虽均对城市级，以及县级的二氧化碳排放量进行了测度，但其均只假设县级夜光灯强度和二氧化碳排放量呈线性关系，从而对省级的二氧化碳排放量进行了简单的分配，然而根据前文的结果显示，夜光灯强度对于二氧化碳排放量的 R^2 仅为 0.52，所以必然会造成极大的误差和问题。基于此，由于县级的夜光灯强度以及社会经济指标相较而言更容易测量和获得，接下来，我们根据建立的模型来测算县级的二氧化碳排放量，从而提高测度的精度，并构建碳排放的时空分布模型。

六、碳排放时空特征分析

(一) 标准差椭圆方法

为了进一步研究碳排放的方向和时空特征,本研究采用加权标准差椭圆方法对全国碳中心进行查找确定。标准差椭圆分析中主要有意义的参数包括椭圆中心、长轴、短轴和方位角,计算方法如下:

$$\bar{x}_i = \sum_{i=1}^n CT_i x_i / \sum_{i=1}^n CT_i, \bar{y}_i = \sum_{i=1}^n CT_i y_i / \sum_{i=1}^n CT_i, \quad (11)$$

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i^2 (\tilde{x}_i^2 - \tilde{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \right\}, \quad (12)$$

$$\tilde{x} = x_i - \bar{x}_i, \tilde{y} = y_i - \bar{y}_i, \quad (13)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \cos \theta - \omega_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}}, \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \sin \theta - \omega_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \quad (15)$$

式中, \bar{x}_i 和 \bar{y}_i 分别为碳排放加权平均中心的经纬度坐标; x_i 和 y_i 为第 i 格网城区的坐标; CT_i 表示碳排放量; σ_x^2 和 σ_y^2 为 SDE 中长轴和短轴的距离; θ 为 SDE 的方位角, 即从正北到椭圆的长轴方向的顺时针角度, 方位角则表示了碳排放量的方向的变化趋势。其余参数例如长轴、短轴的数值大小则展现了碳排放量的分布范围尺度, 长轴表示的是数据分布的方向, 短轴表示的是数据分布的范围, 椭圆的扁率越大, 表示数据的方向性越明显, 聚集程度越高。

(二) 2000 年-2017 年碳排放时空特征分析

根据本研究方法得到的碳排放, 在中国各县的空间位置坐标的基础上, 利用

ArcGIS 10.2 软件每隔五年计算一次碳排放的空间中心和标准差椭圆，分析中国不同时期碳排放中心的演化路径及方向分布的差异。中国碳排放中心变化如图 12 所示，碳排放中心参数在 2000 年至 2017 年的演变如表 2 所示。

表 2 碳中心参数

年份	经度	纬度	所属地点
2002	E114° 11' 5.628"	N34° 17' 2.205"	尉氏县
2007	E114° 10' 31.211"	N34° 32' 25.289"	尉氏县
2012	E113° 32' 26.185"	N34° 37' 37.565"	新密市
2017	E113° 3' 9.435"	N34° 38' 53.089"	巩义市

从图 14 可以看出，我国工业重心西移之前，碳排放的标准差椭圆的主轴方向为西南-东北方向，且标准差椭圆的长轴与短轴之比较大，说明碳排放分布的方向性较为明显，数据离散程度小，这表明我国各地碳排放量的空间分布差异很大，碳排放量高的地区较为集中。合理推测该现象的产生是由于我国东北地区工业发达、能源消耗多，且华北部地区产业经济发展水平高，相应地区的碳排放量高；而西北地区的工业和经济落后，碳排放量低。

在我国工业重心西移的过程中，我国西北地区的碳排放量在这 15 年间呈现显著的上升趋势，尤其是内蒙古、新疆、西藏等地区迅猛发展、碳排放量陡增，导致了碳排放的空间分布发生明显的变化，碳排放中心呈现向西北移动的趋势，经度逐渐减小、纬度有所增大，并且我国碳排放的主轴方向呈现向西旋转的趋势。同时需要注意到，随着工业重心西移以及各个地区的工业和经济发展趋于均衡，标准离差椭圆的短轴逐渐变大，长轴与短轴之比逐渐减小，说明我国各县碳排放分布的方向性越来越弱，各地碳排放量的差异性逐渐减弱。

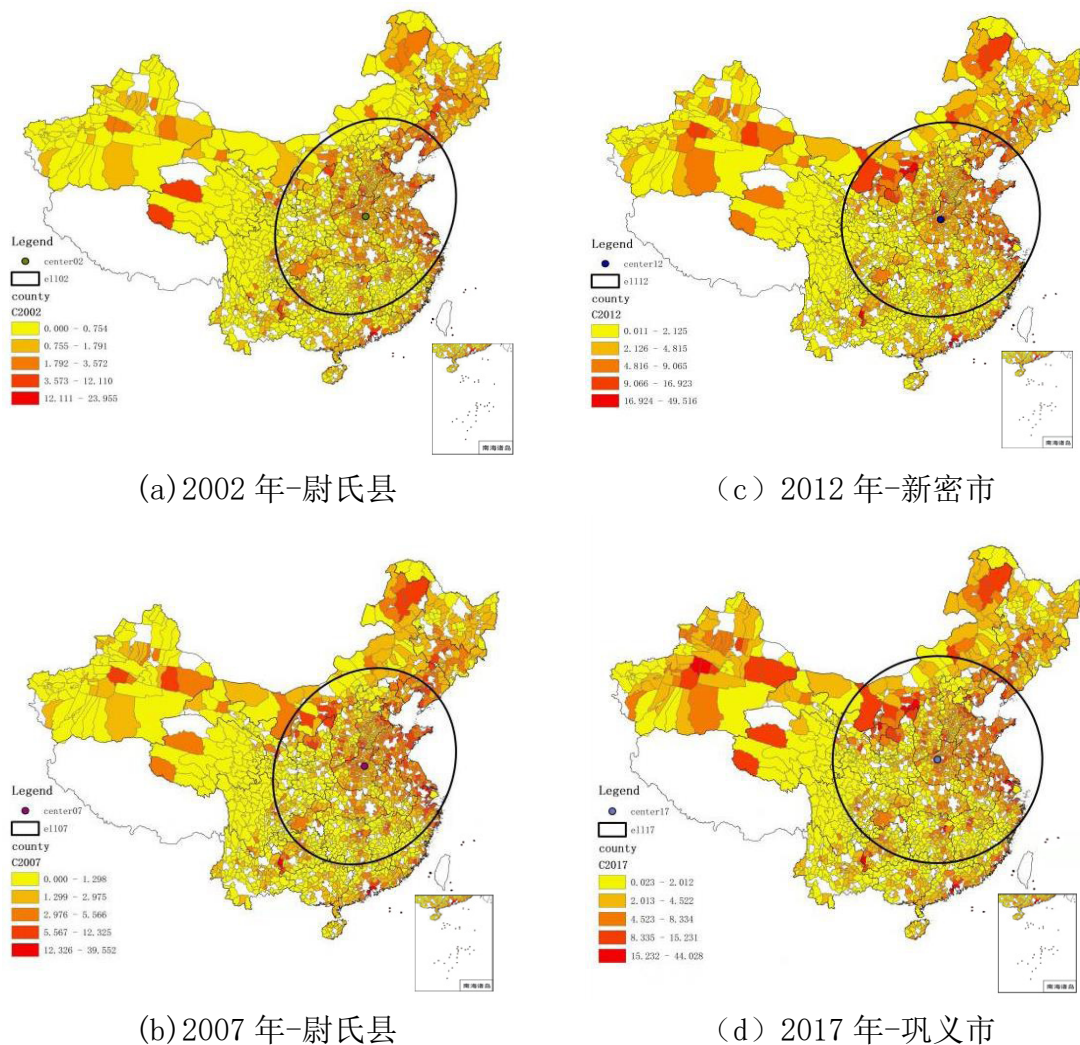


图 14 2002 年-2017 年碳排放标准差椭圆及碳中心

七、结论及建议

本文利用 2000—2017 年国家统计局数据库的官方面板数据和基于 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 的卫星遥感影像数据,建立通过经济指标与物理遥感数据的结合来对县(市)级区域未来二氧化碳排放强度的估计模型。

本文建立起的小尺度地域碳排放估测预算模型对于我国县(市)级区域经济发展导向有着重要的借鉴意义。在经济高速发展的同时,环境问题往往随之而来,在政策大框架既定的背景下,能否“精准落实”则是是否成功向目标迈进的第二个关键因素,地区产业节能减排的方案落实离不开测算监控系统对实际排放情况的科学客观鉴证。因此我们要在保证测算成本降低的前提下建立起效率以及估算

准确率更高的碳排放强度核算模型，从社会经济和客观科学指标多角度进行全面观测，做好打赢“碳达峰”和“碳中和”攻坚克难战的有力科学保障。

根据文献分析建立的理论框架加以实证分析，在我国 2021 年两会上设立的未来实现“碳达峰”和“碳中和”目标指导背景下，现向国家政府相关部门提出以下几点不成熟的建议：

（一） 更新碳排放核算体系，兼顾“利益”与“效率”

实现“碳中和”目标的前提条件是对碳排放强度的精准测度，传统碳排放系数方法通过统计各地区能源消耗核算碳排放，往往需要消耗大量的人力物资，面临成本大、耗时长、精度低等问题，效率低下。随着科技的进步、卫星数据的日臻完善，基于卫星遥感数据的碳排放测算方法能够显著提高核算效率、降低核算成本，根据学界前沿研究成果更新碳排放核算方法与体系，能够为国家提供更加及时且更加客观科学的数据基础，有助于制定更加有效的碳减排政策和措施。将实际与理论结合起来，兼顾核算过程的“利益与效率”才能健全更良好的经济发展结构。

（二） 细化碳排放统计口径，精益碳减排措施

尽管一些前沿研究提出的碳排放测度方法提高了碳排放核算的效率，但核算的尺度仍然较大。目前与中国碳排放核算的相关数据基本停留在国家层面或省级层面，鲜有县域或更小尺度的碳排放统计数据。进一步细化碳排放核算的统计口径，有助于研究我国县域或更小尺度上的碳排放量及其变化，从而有利于国家据此有针对性地制定因地制宜的碳减排相关方针政策，促使我国各地碳减排措施精准化、专属化、特色化。

（三） 关注碳排放时空分布特征，统筹区域碳减排

碳排放的标准差椭圆很好地展现了我国碳排放量的地区分布差异，从标准差椭圆的主轴方向、长短轴之比以及中心的变动能够看出我国碳排放量时空分布特

征的变化。虽然近年来我国各地区碳排放量整体趋于均衡，但密切关注碳排放标准差椭圆的参数变化仍然大有裨益。结合小尺度碳排放量核算，对标准差椭圆的分析将有助于探究我国碳排放的具体地域差异及其变化，发现我国碳减排过程中的优势与障碍，统筹区域碳减排，全面推进全国碳减排工作整体进程。

参考文献

- [1]Acheampong,Alex O;Boateng, Emmanuel B.Modelling carbon emission intensity: Application of artificial neural network. Journal of cleaner production, 2019-07-10, Vol.225, p.833-856
- [2] Chen, J., Gao, M., Cheng, S. et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997 - 2017. Sci Data 7, 391 (2020).
- [3]Chen, Z., Yu, B., Yang, C., Zhou, Y., Yao, S., Qian, X., Wang, C., Wu, B.,and Wu,J.: An extended time series (2000 - 2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration, EarthSyst.Sci.Data,13,889 - 906,<https://doi.org/10.5194/essd-13-889-2021>, 2021.
- [4]Di Yang, Weixin Luan, Lu Qiao, Mahardhika Pratama,Modeling and spatio-temporal analysis of city-level carbon emissions based on nighttime light satellite imagery,Applied Energy,Volume 268 (2020).
- [5]DOLL CNH,MULLER J P,ELVIDGE C D.Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J].Ambio,2000,29(3) : 157-162.
- [6]Dong, Feng ;Long, Ruyin ;Li, Zhuolin ;Dai, Yuanju. Analysis of carbon emission intensity, urbanization and energy mix: evidence from China. Natural hazards (Dordrecht), 2016-06, Vol.82 (2), p.1375-1391
- [7]GHOSH T, ELVIDGE C D, SUTTON P C, et al. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery[J].Energies,2010,3(12) : 1895-1913.
- [8]GUO Xinyi, YAN Qingwu, TAN Xiaoyue, et al. Spatial distribution of

- carbon emissions based on DMSP /OLS nighttime light data and NDVI in Jiangsu Province[J]. World regional studies, 2016, 25(4) : 102-110.
- [9]Lv, Q., Liu, H., Wang, J., Liu, H. & Shang, Y. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO₂ emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets. Sci. Total Environ. 703, 134394 (2020).
- [10]MENG L, GRAUS W, WORRELL E, et al. Estimating CO₂, (carbon dioxide) emissions at urban scales by DMSP /OLS (defense meteorological satellite program's operational linescan system) nighttime light imagery: methodological challenges and a case study for China [J]. Energy, 2014, 71(7) : 468-478
- [11]Park Seongho et al. Bayesian optimization of industrial-scale toluene diisocyanate liquid-phase jet reactor with 3-D computational fluid dynamics model[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 98 : 327-339.
- [12]RAUPACH M R, RAYNER P J, PAGET M. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO₂ emissions[J]. 2010, 38(9) : 4756-4764.
- [13]SHI K, CHEN Y, YU B, et al. Modeling spatiotemporal CO₂, (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied energy, 2016, 168(4) : 523-533.
- [14]Xiong, Chuanhe ;Yang, Degang ;Xia, Fuqiang ;Huo, Jinwei. Changes in agricultural carbon emissions and factors that influence agricultural carbon emissions based on different stages in Xinjiang,

China. Scientific reports, 2016-11-10, Vol.6 (1), p.36912-36912 樊星.

中国碳排放测算分析与减排路径选择研究[D]. 辽宁大学, 2013.

[15]陈丽江. 基于 ADF 检验的中国出口集装箱班轮运价随机特性研究[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2013, (1)

[16]段福梅. 中国二氧化碳排放峰值的情景预测及达峰特征——基于粒子群优化算法的 BP 神经网络分析[J]. 东北财经大学学报, 2018, (5):19-27.

[17]工业和信息化部电信研究院. 大数据白皮书[R]. 北京:工业和信息化部电信研究院, 2014.

[18]顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 关中美, 冯德显, 高亚红. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化[J]. 测绘科学, 2017, 42(02):140-146.

[19]郭朝先. 产业结构变动对中国碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(07):15-20.

[20]郝佳莹, 高健. 基于 NSGA-II 改进 BP 神经网络的建筑碳排放—碳减排预测模型[J]. 建筑节能, 2016, 44(09):122-124.

[21]胡初枝, 黄贤金, 钟太洋, 谭丹. 中国碳排放特征及其动态演进分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008(03):38-42.

[22]李齐云, 商凯. 二氧化碳排放的影响因素分析与碳税减排政策设计[J]. 财政研究, 2009(10):41-44.

[23]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[J]. 经济研究, 2010, 45(08):66-78.

[24]马忠玉, 肖宏伟. 基于卫星夜间灯光数据的中国分省碳排放时空模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 第 27 卷(9):143-150.

[25]宋杰鲲, 张宇. 基于 BP 神经网络的我国碳排放情景预测[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(17):4108-4111+4116.

- [26]苏泳娴. 基于 DMSP /OLS 夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015: 97-102.
- [27]孙昌龙, 靳诺, 张小雷, 杜宏茹. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异[J]. 地理科学, 2013, 33 (03): 266-272.
- [28]孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 陈志刚. 1995—2005 年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25 (08): 1284-1295.
- [29]田立新, 张蓓蓓. 中国碳排放变动的因素分解分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 (11): 1-7.
- [30]汪少华^{1, 2, 3}, 张茂震^{1, 2, 3}, 赵平安^{1, 2, 3}等. 基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟[J]. 生态学报, 2011, (4): 998-1008.
- [31]张国兴, 张振华, 刘鹏, 刘明星. 我国碳排放增长率的运行机理及预测[J]. 中国管理科学, 2015, 23 (12): 86-93.
- [32]章毅, 郭泉, 王建勇. 大数据分析的神经网络方法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49 (01): 9-18.
- [33]赵成柏, 毛春梅. 基于 ARIMA 和 BP 神经网络组合模型的我国碳排放强度预测[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (06): 665-671.
- [34]朱勤, 彭希哲, 陆志明, 于娟. 人口与消费对碳排放影响的分析模型与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20 (02): 98-102.

致谢

值此论文撰写完成之际，回望过去的一个多月，首先我们要由衷地感谢我们的指导老师。老师在本论文的选题、数据收集、方法选择和论文撰写等方面都给予了我们细心的指导，在讨论中给我们提出了许多有用的建议。老师渊博的专业知识、严谨治学的态度、谦逊包容的品质深深地影响着我们，让我们在学习和生活上都受益匪浅，再次表达我们对老师的深深谢意。

同时，也感谢在一个多月里一直陪伴、关心和支持我们的师兄，师兄在模型建构方面给予了我们很多指导和建议，参与我们的讨论并及时指出我们的问题，让我们少走了很多不必要的弯路。

另外，还要感谢每一位组员的辛苦付出。我们不断讨论、分析，合理分工，遇到问题时及时沟通、共同解决。正是我们在参赛过程中有着互补的技能和良好的团队精神，互相帮助、互相理解、互相鼓励，才能将团队的智慧和力量最大化，有条不紊地推进作品的完成和完善。

最后，感谢评委老师们，在百忙之中抽出时间评阅我们的论文并给予宝贵的建议，谢谢你们！