

引用格式: Liu Xianzhao, Yang Xu. The Accuracy of Nighttime Light Data to Estimate China's Provincial Carbon emissions: A Comparison with Carbon Emissions Allocated by International Carbon Database [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 319-332. [刘贤赵, 杨旭. 夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 319-332.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.2.0319

夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较

刘贤赵, 杨旭

(湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:快速准确获取省域碳排放数据是实时制定差异化碳减排政策的前提。基于DMSP/OLS和NPP-VIIRS夜间灯光数据,采用统计数据比较法提取1997~2017年中国大陆各省域(不包括西藏)建成区的夜间灯光总值(用TDN表示),并利用1997~2014年各省域的TDN值与同期核算的碳排放量建立各省域碳排放预测模型。然后,以2015~2017年的TDN值为自变量估算中国各省域的碳排放量;同时,利用熵值法和碳排放分配模型将四大国际权威数据库(IEA、EIA、EDGAR和CEADs)发布的中国碳排放量分配至各省;最后,将估算结果与四大典型碳数据库分配的省域碳排放值进行比较。研究表明:估算的省域碳排放量与分配的省域碳排放量大体一致,平均绝对百分比误差(MAPE)为6.45%~9.12%,并且基于夜间灯光数据估算的省域碳排放量与IEA和EIA数据库分配的碳排放量更为接近;各省域估算的碳排放量与分配的碳排放量均落在1:1线附近;单个省域的MAPE值变化在0.68%~14.85%,且多数省域的MAPE值均在10.0%以内。上述结果证明,基于夜间灯光数据通过提取TDN值估算省域碳排放量具有可行性和准确性。

关键词:夜间灯光数据;碳排放估算;国际碳排放数据库

中图分类号:X24;X22 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2022)02-0319-14

1 引言

21世纪人类面临的最大挑战之一是以气候变暖为主要特征的全球气候环境变化,而人类活动产生的CO₂排放(简称碳排放)是导致这一变化的主要原因^[1]。在碳排放持续增长和全球气候变化治理的双重压力下,如何采取有效措施削减碳排放成为世界各国的共同目标。作为负责任的大国,中国政府早在2015年巴黎举行的世界气候大会上,就庄严承诺到2030年单位GDP的碳排放量将比2005年下降60%~65%。这一目标的实现不仅取决于国家层面应对气候变化的减排行动,更有赖于中国各省碳减排措施的有效制定和低碳发展政策的落实。当前,

中国正处在工业化和新型城镇化加速发展阶段,碳排放刚性增长暂时不可逆转。由于中国缺乏实时省域尺度的碳排放数据,因此,作为减缓气候变化的核心主体,如何快速准确获取省域尺度的碳排放数据就显得尤为重要。目前,关于中国省域尺度碳排放量的估算大多是基于能源消费数据进行,采用的方法主要是投入产出模型法,能源平衡表法和碳排放系数法等^[2-3]。但由于能源统计数据的滞后性和不透明性,使得利用能源消费数据估算的碳排放无法实时反映中国省域碳排放量的变化;加上能源统计数据口径不一,省域间工业部门设定不同,以及估算方法使用的排放因子参数各异,极有可能导

收稿日期:2020-12-25;修订日期:2021-11-19

基金项目:国家社科基金项目(17BGL138),湖南省社科基金项目(18YBA151)资助。

作者简介:刘贤赵(1970—),男,湖南隆回人,教授,主要从事空间数据处理及环境管理研究。E-mail:xianzhao.liu@sina.com

致不同省域间的碳排放清单无法对比^[4],进而影响碳排放衍生的其他指标(如碳排放强度)的测度。尽管也有研究以能源平衡表和部门能源消费量为基础,提出了一套适合于中国碳排放的核算方法^[5],但在把握碳排放最新动态变化方面仍难以实时估算出各省域的碳排放量,从而在一定程度上限制了各省根据碳排放数据实时制定差异化的减排政策。

目前,关于碳排放估算的研究国内外学者主要集中在两个方面,即不同空间尺度的碳排放估算和不同土地利用类型的碳排放估算^[6-10]。就土地利用的碳排放估算来说,耕地的碳排放一般是采用耕地面积直接乘以耕地的碳排放系数;建设用地则是间接利用能源消耗量与其碳排放系数进行估算。尽管上述方法计算简单,但受限于基础数据源的不确定性和难获取性,其估算结果的有效性仍有待于证实。对于空间尺度的碳排放估算而言,现有的研究主要集中在统计数据相对较为丰富的国家、地区、省或地级市等。如国际能源署(International Energy Agency, IEA)、全球大气研究排放数据库(Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)和美国能源信息管理局(U.S. Energy Information Administration, EIA)以及中国碳排放数据库(China Emission Accounts & Datasets, CEADs)等均对世界各国碳排放估算进行了深入研究,并且有学者对部分国际数据库核算中国碳排放的结果与官方公布值进行了对比分析^[11-12]。尽管也有不少学者从不同角度对省、市或县级水平的碳排放估算进行过探索^[9],但由于能源消费数据的统计问题(如各省统计口径存在差异,同一项指标可能在统计报告中有着不同的数据采集渠道)和数据获取的滞后性,导致不同尺度的碳排放获取仍然没有形成一套实时、有效的估算方法。

从碳排放的估算方法来说,目前常用的方法主要有IPCC提出的排放因子法、部门法、投入—产出模型法、能源平衡表法和空间数据法等。排放因子法就是利用能源消费“活动水平数据”乘以“排放因子”核算能源消费碳排放。该方法简单实用,但在活动水平数据和排放因子系数的选择上碳排放编制人员有着较大的“自由裁量权”,从而有可能使不同核算者估算的碳排放出现明显偏差^[13];部门法则是通过广泛的实地调研和收集相关数据估算碳排放^[14-15],但需要消耗大量的人力、物力和时间;投入—产出模型法和能源平衡表法分别是基于编制的投

入—产出表和能源平衡表,结合相关数据对较大尺度地区的碳排放进行计算^[16-17]。由于省域间能源、产品等交流的复杂性和数据统计的不一致性,这两种方法均存在一定的研究难点和不确定性^[18];空间数据法是利用建立的大气观测站点和监测设备分析碳排放的变化及其空间分布,具有能实时反映碳排放变化的特性^[19]。尽管目前已有近170个碳排放监测站点,覆盖近60个国家,但监测结果都是单点的局地观测,缺乏对全球范围或区域大尺度统一的探测方法和能力。

近年来,随着遥感技术的飞速发展,遥感数据不断丰富,通过卫星遥感定量反演大范围乃至全球的碳排放已成为一种重要的研究方法和技术手段^[20]。其中,搭载传感器获取的DMSP/OLS和NPP-VIIRS数据因其具有稳定的夜间灯光影像和在夜间不受光线阴影影响的特性,而成为实时记录与碳排放有关的人类活动信息(如城市扩张、GDP、人口密度变化和能源消耗等)的重要手段^[21-25]。由于以人类活动为主体的生产、生活是碳排放产生的主要来源,因此一些学者利用夜间灯光数据对不同空间尺度的碳排放估算进行了大量的研究。如Elvidge等^[26]采用1994~1995年的DMSP/OLS夜间灯光数据对21个国家进行了研究,发现灯光面积与GDP、能源消耗以及碳排放量之间存在较强的线性关系。同样地,Doll等^[27]得出了国家的总照明面积与GDP和碳排放量具有显著的正相关关系,并且灯光数据可用来模拟碳排放的时空特征。Meng等^[28]利用夜间灯光影像和能源统计数据采用自上而下的方法估算了城市尺度的碳排放量。郭忻怡等^[29]综合DMSP/OLS夜间灯光影像、NDVI数据和统计数据,构建了碳排放的空间滞后回归模型,并用于江苏省碳排放的空间分布模拟。Chen等^[30]基于夜间灯光数据系统测算了1997~2017年中国县级尺度的CO₂排放量和陆地植被的固碳量,从而弥补了当前中国官方公布碳排放数据的不足。尽管上述工作将会极大推动中国国家层面有关碳排放的研究以及微观层面碳减排政策的制定,但在碳排放数据精度检验和有效性方面仍存在一些不足。首先,现有的文献大多是基于夜间灯光数据针对不同空间尺度的碳排放进行估算,而将估算结果与国际权威数据库分配得到的碳排放量进行对比分析的研究较少;其次,在利用遥感夜间灯光影像反演中国省域碳排放时,通常是基于所有省域的夜间灯光值

与能源消费核算的碳排放量建立一个整体回归模型^[31],并未考虑省域之间在经济发展水平、产业结构、资源禀赋和能源利用效率等方面存在的差异,因而利用整体回归模型去反演各省域的碳排放量未免有失偏颇;三是一些学者利用夜间灯光数据提取建成区面积与碳排放建立回归关系时,多是采用经验阈值法^[32-33],从而有可能导致碳排放的估算存在不确定性。

研究借助了夜间灯光数据,通过提取建成区灯光值与核算的碳排放量分别建立各省域碳排放估算模型,将模型估算结果与国际权威碳数据库分配得到的省域碳排放量进行比较,验证利用夜间灯光数据估算省域碳排放量的精度及其有效性,为政府部门因地制宜地实施减排政策提供科学依据,也为了解更细致单元的碳排放特征提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

基于数据的可获得性,选取中国大陆中的30个省、市、自治区进行研究,使用的数据主要有夜间灯光数据、统计数据及中国省级行政区划矢量数据。

2.1.1 夜间灯光数据

夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的国家地球物理数据中心(<https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>)。考虑国际碳数据库公布的碳排放时间跨度(表1),截取1997~2017年中国大陆30个省、市的两种夜间灯光数据(DMSP-OLS数据和NPP-VIIRS数据)用于反演中国省域的碳排放。DMSP/OLS稳定夜间灯光数据是由多个DMSP卫星传感器得到的1992~2013年共34期影像(研究使用的是1997~2013年共25期影像),该影像去除了云层和偶然灯光噪声的影响,包括居民地和永久性光源区域,像元灰度值范围为0~63,空间分辨率为30弧秒(约900 m)。由于DMSP-OLS数据是由不同传感器获得的,因而造成长时间序列的影像之间缺乏连续性和可比性,且单幅影像的DN值存在过饱和问题。NPP-VIIRS数据是合成的月平均灯光辐射数据,产品包括自2012年4月至今每月一期的影像(本研究截取2012~2017年的影像用于校正拟合和反演碳排放)。该数据继承了DMSP-OLS数据的微光探测能力,不仅具有DMSP-OLS数据的全部特性和更

高的空间分辨率(15弧秒,约500 m),而且在一定程度上减少了DMSP-OLS数据像元过饱和的问题。但由于两者来自不同的卫星传感器,使得NPP-VIIRS数据与DMSP-OLS数据存在两个方面的不同:一是NPP-VIIRS数据没有完全过滤火光、气体燃烧、火山或极光等背景噪声,且受非相干光辐射的影响使其存在灯光溢出现象;二是NPP-VIIRS数据多为月度夜间灯光数据,需要合成年度灯光数据。同时,NPP-VIIRS数据少数像元值存在诸如负值、极高值和光源不稳定等问题。因此,为获得用于估算碳排放的长时间序列稳定的夜间灯光数据,需要对上述两种夜间灯光数据进行校正与拟合。处理过程如下:①为避免影像网格随纬度变化而导致变形,将下载的DMSP-OLS和NPP-VIIRS数据(地理坐标系均为GSC_WGS_84)重投影为Albers等面积投影坐标系,并进行重采样使两种数据的像元分辨率均为1 km,然后利用中国省级行政区划矢量数据裁剪得到夜间灯光影像的中国区域;②运用不变目标区域法对中国区域所选的每一期DMSP-OLS影像进行校正,以解决灯光影像饱和、影像间不连续性和不可比的问题;③参考Shi等^[34]和周翼等^[35]的方法将NPP-VIIRS月度数据合成年度数据,并消除灯光数据中的负值和极高值,即把小于0的值设定为0.001,背景值设为0,把大于235的值设定为235(经统计,NPP-VIIRS合成年度数据在2012~2017年最大灯光亮度值分别为234.32、233.75、234.05、233.10、234.47和234.59,故将灯光亮度值大于235的视为极高值);④以校正后的DMSP-OLS夜间灯光影像为参考,对NPP-VIIRS数据进行重分类(即假定2012、2013年校正后的DMSP/OLS影像与同年份的NPP-VIIRS影像具有相同亮值区域,据此以同年份DMSP/OLS影像亮值区域为掩膜提取NPP-VIIRS影像中的有效区域),利用两者在时间和空间上的重叠数据对每一期的NPP-VIIRS数据进行拟合校正,最后得到时间跨度较长的稳定夜间灯光数据。图1仅列出了1997、2005、2010和2017年4个年份的夜间灯光影像空间分布。

2.1.2 国际碳排放数据

为与基于夜间灯光数据估算的省域碳排放量进行比较,考虑数据的全面性、权威性和有效性,本文选取IEA、EDGAR、EIA和CEADs四大典型碳数据库中的碳排放数据用于省域分配(具体分配方

表 1 国际权威碳排放数据库基本信息

Table 1 Basic information of international authoritative carbon emission database				
数据库名称	起止时间	碳排放空间边界	碳排放核算边界	数据库网址
IEA	1960~2017 年	中国大陆、香港	化石燃料	https://webstore.iea.org
EDGAR	1970~2018 年	中国大陆、港澳台	化石燃料和工业过程	https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/EDGAR
EIA	1979~2017 年	中国大陆	化石燃料	https://eia.gov/international/data/world
CEADs	1997~2017 年	中国大陆及各省区	化石燃料和水泥生产	http://www.ceads.net

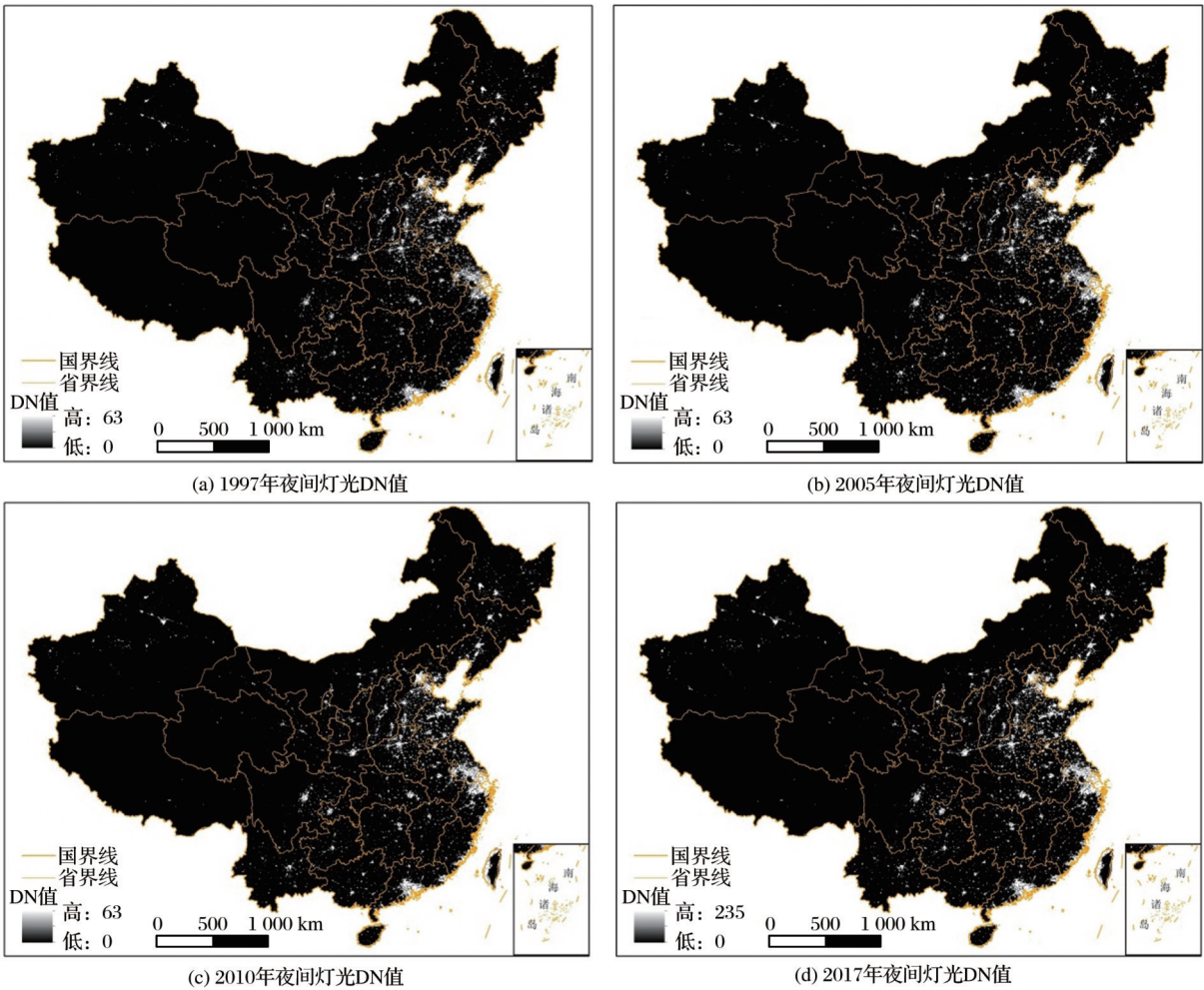


图 1 中国夜间灯光影像空间分布

审图号:GS(2020)4619

Fig. 1 spatial distribution of night light images in China

法见下文)。为便于数据对比,文中用来分配的国家尺度的碳排放数据均为上述数据库中中国大陆的碳排放量。四大权威数据库的基本信息如表 1 所示。

2.1.3 能源消耗和社会经济数据

核算中国省域碳排放 8 种主要化石能源(原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气)的消费数据和不同能源种类的排放因子系数分别来自 1998~2018 年中国能源统计年鉴和 IPCC 国家温室气体清单编制指南。社会经济数据(如人口、经济发展水平、产业结构和建成区面积)均来自 1998~

2018 年中国统计年鉴和中国城市统计年鉴;为消除价格波动的影响,使用的经济数据折算为 2000 年不变价。行政边界矢量数据来自国家基础地理信息中心。

2.2 研究方法

基于 1997~2014 年中国省域建成区提取的夜间灯光值与同期省域核算的碳排放量建立回归模型,在此基础上利用 2015~2017 年夜间灯光影像提取的灯光值估算中国各省域的碳排放量;然后采用熵值法将国际典型碳数据库中国家层面的碳排放量分配至中国各省,最后对比分析基于灯光值估算

的省域碳排放量与国际数据库分配至各省的碳排放量之间的差异,研究框架如图 2 所示。

2.2.1 省域历史碳排放量核算

省域能源消费碳排放核算采用 IPCC 方法中“活动水平数据乘以排放因子”进行,具体公式如下:

$$C=\sum Q_i\cdot EF_i\cdot 44/12 \tag{1}$$

其中: C 为某省化石燃料消耗产生的碳排放; Q_i 为第 i 种化石能源的终端消费量,利用折标准煤系数转换为标准煤单位消费量表示; EF_i 表示第 i 种化石能源对应的排放因子。

2.2.2 建成区 TDN 值提取

目前,提取建成区夜间灯光阈值的方法主要有经验阈值法、突变检测法和统计数据比较法。其中,统计数据比较法就是利用统计年鉴中公布的统

计数据(如建成区面积)与基于夜间灯光影像提取的建成区面积进行比较,然后来确定合理的阈值。鉴于统计数据比较法在提取建成区灯光阈值方面具有的科学性以及使用的广泛性^[36],本研究拟采用该方法,即利用 ArcGIS10.2 软件中的“Extract by Attributes”工具不断调整夜间灯光栅格数据的属性阈值,计算每个动态阈值下的建成区面积。当基于阈值计算的建成区面积与中国城市统计年鉴公布的建成区面积绝对差值最小时,提取结束,进而确定中国各省域的夜间灯光总值(即影像像元亮度总值,用 TDN 表示)。附录 1 为基于夜间灯光数据计算的建成区面积与统计年鉴记载的建成区面积二者绝对差值小于 4.0% 时提取的中国各省域建成区的 TDN 值。

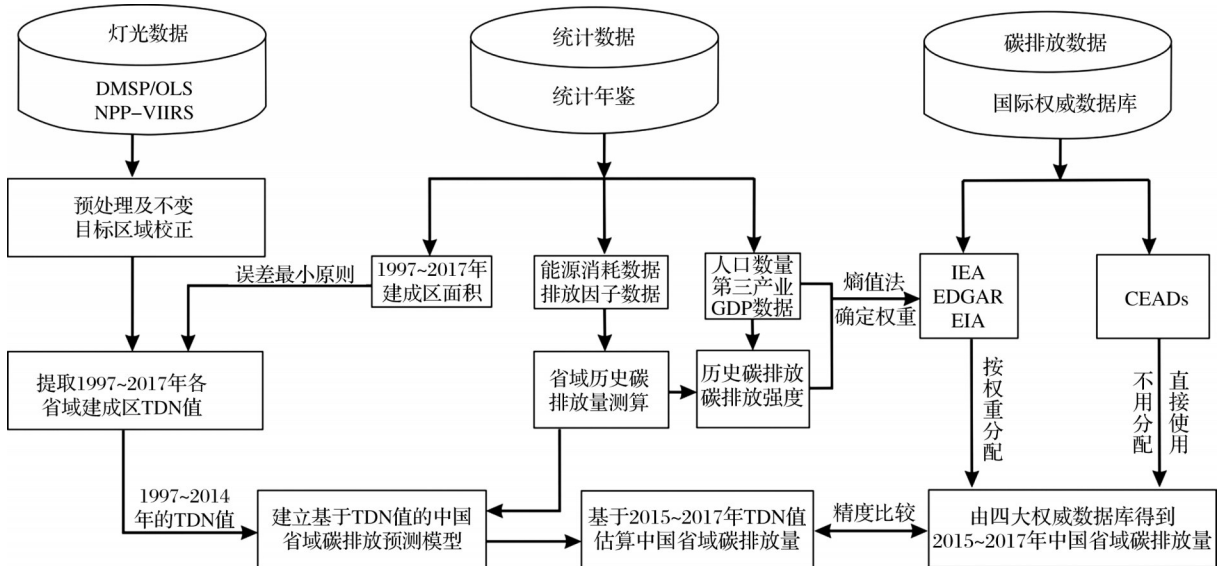


图 2 研究框架

Fig. 2 The research framework

2.2.3 碳排放估算模型构建

参考 Elvidge 等^[27]和苏泳娴等^[31]的研究成果,利用提取的 1997~2014 年中国省域建成区的夜间灯光 TDN 值(附录 1)和本研究核算的同期省域碳排放量进行回归,分别建立各省域的碳排放预测模型,其通用表达式如下:

$$CO_{2it}=a\times TDN_{it}+b \tag{2}$$

其中: i 、 t 分别代表省域和年份; CO_{2it} 为本文核算的省域碳排放量; TDN_{it} 为省域建成区的夜间灯光总值; a 和 b 为拟合参数。

2.2.4 国家层面国际碳排放数据的省域分配方法

为了验证利用夜间灯光数据估算中国省域碳排放的可靠性,拟选取 CEADs、IEA、EDGAR 和

EIA 四大权威数据库(表 1)发布的 2015~2017 年的碳排放数据与回归模型估算的同期碳排放量进行比较。考虑到 IEA、EDGAR 和 EIA 三大数据库提供的是国家层面的碳排放数据(CEADs 数据库提供了国家和省域两种尺度的碳排放数据,不用进行分配),因此需要先将这三大数据库的碳排放量分配至各省。本研究从规模效应、技术效应和结构效应的视角筛选影响碳排放的因素^[32],并兼顾公平性、效率性和可行性的原则^[37],选取人口规模、经济增长、历史碳排放量(3 个指标代表规模效应和公平性原则)、碳排放强度(代表技术效应和效率性原则)和产业结构(代表结构效应和可行性原则)作为国家层面碳排放的省域分配指标(表 2)。

表 2 国家层面碳排放量省域分配的指标体系

Table 2 An indicator system for provincial allocation of carbon emissions at national level

选取原则	指标	指标度量	影响方向	数据来源
公平性原则	人口规模	人口数量	正向	中国统计年鉴
	经济增长	GDP 数值	正向	中国统计年鉴
	历史碳排放量	化石能源消费产生的碳排放	正向	中国能源统计年鉴
效率性原则	碳排放强度	碳排放量/GDP	正向	中国能源统计年鉴/中国统计年鉴
可行性原则	产业结构	第三产业比重	负向	中国统计年鉴

为了客观科学地确定各指标在分配中的权重,本研究采用适合多指标综合确权的熵值法,根据各个指标传递的信息量确定各指标的权重。具体步骤如下:首先对各指标原始数据进行标准化处理,以消除量纲不同产生的影响。即针对正向指标和负向指标,分别采用公式 $r_{ij} = (x_{ij} - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin})$ 和 $r_{ij} = (x_{jmax} - x_{ij}) / (x_{jmax} - x_{jmin})$ 进行处理;其次,采用公式 $p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij}$ 计算指标概率,并利用公式 $e_j = -\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} / \ln n$ 计算第 j 项指标的信息熵,进而用 1 减去 e_j 得到第 j 项指标的信息效用值 g_j ;最后利用公式 $w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j$ 计算各指标权重。

计算的各省域指标权重平均结果显示,GDP 的权重最大,为 28.76%,历史碳排放量与人口规模的权重分别为 26.02% 和 16.37%,三项指标权重合计为 71.16%,意味着公平性原则是省域碳排放分配最重要的原则。此外,表征效率性原则的碳排放强度占比 18.69%,而代表可行性原则的第三产业比重占比最低,仅为 10.15%。

基于熵值法确定的上述 5 个指标权重,结合马海良等^[38]提出的碳排放总量测算模型,本研究构建省域碳排放分配模型如下:

$$Q_j = \frac{Q_g}{\sum_{j=1}^{30} P_j} P_j \times a + \frac{Q_g}{\sum_{j=1}^{30} G_j} G_j \times b + \frac{Q_g}{\sum_{j=1}^{30} C_j} C_j \times c + \frac{Q_g}{\sum_{j=1}^{30} I_j} I_j \times d + \frac{Q_g}{\sum_{j=1}^{30} T_j} T_j \times e \quad (3)$$

其中: Q_j 为 j 省分配的碳排放量; Q_g 为中国总的碳排放量; P_j 为第 j 省的人口规模; G_j 为 j 省的 GDP; C_j 为 j 省的历史碳排放量; I_j 为 j 省的碳排放强度; T_j 为 j 省第三产业比重; a 、 b 、 c 、 d 和 e 分别为上述 5 个指标(人口、GDP、历史碳排放量、碳排放强度和第三产业比重)进行碳排放分配时的权重,且满足 $a+b+c+d+e=1$ 。利用式(3)即可将 IEA、EDGAR 和 EIA 2015~2017 年国家层面的碳排放量分配至各省。

3 结果与讨论

3.1 中国省域碳排放预测模型

表 3 是基于 1997~2014 年各省域建成区 TDN 值(x)与同期核算的碳排放量(y)建立的碳排放回归预测模型。从表 3 可以看出,各省域碳排放量与建成区的 TDN 值存在极显著的线性相关关系($P < 0.0001$),这与国内外学者的研究结果相吻合^[28,39]。除上海和海南两个省域的 R^2 值与 F 值相对较小以外,其余各省域的 R^2 值均大于 0.850, F 值均在 87.0 以上,说明基于夜间灯光数据提取建成区 TDN 值,将建立的回归预测模型应用于 2015~2017 年中国大陆各省域(不包括西藏)碳排放量的估算是可行的。

3.2 省域估算的碳排放量与权威数据库分配的碳排放量比较

基于上述熵值法确定的指标权重,利用公式(3)得到中国 2015~2017 年由 IEA、EDGAR 和 EIA 国家层面碳排放分配至各省域的碳排放量(由于 CEADs 数据库本身提供了省级层面的碳排放数据,故此处无需进行分配;但便于表述,下文亦统称为分配至各省的碳排放量);同时借助碳排放回归预测模型(表 3),利用夜间灯光数据提取的 TDN 值估算出了 2015~2017 年各省域的碳排放量,结果列于附录 2。为了客观、准确地揭示基于夜间灯光数据估算省域碳排放量方法的有效性和合理性,本研究采用能避免正负误差相互抵消的平均绝对百分比误差(MAPE)对 2015~2017 年预测的省域碳排放量与国际权威数据库分配至各省的碳排放量进行对比分析。MAPE 的计算公式为:

$$\text{MAPE} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times \frac{100}{n} \quad (4)$$

其中: y_i 表示基于国际碳排放数据分配至 i 省的碳排放量; \hat{y}_i 表示基于回归模型预测的 i 省碳排放量, N 为样本个数。MAPE 值越小,则表示碳排放预测值与分配值越接近,预测模型精度越高。

表 3 基于 1997~2014 年中国省域建成区提取的 TDN 值与历史碳排放量建立的碳排放预测模型

Table 3 Carbon emission prediction model based on TDN values extracted from built-up areas of China's provinces and historical carbon emissions from 1997 to 2014

省份	回归结果				省份	回归结果			
	回归方程	R^2	F 值	P 值		回归方程	R^2	F 值	P 值
北京	$y=0.0003x+36.67$	0.855	87.03	0.000	河南	$y=0.0048x-275.57$	0.894	134.36	0.000
天津	$y=0.0022x-55.20$	0.887	125.57	0.000	湖北	$y=0.0037x-135.60$	0.925	196.84	0.000
河北	$y=0.0066x-312.23$	0.954	321.23	0.000	湖南	$y=0.0041x-115.36$	0.918	178.43	0.000
山西	$y=0.0217x-927.17$	0.874	111.41	0.000	广东	$y=0.0011x-65.86$	0.916	173.85	0.000
内蒙古	$y=0.0134x-525.89$	0.903	136.72	0.000	广西	$y=0.0033x-117.72$	0.884	100.08	0.000
辽宁	$y=0.0043x-367.74$	0.964	423.64	0.000	海南	$y=0.0053x-40.70$	0.832	79.10	0.000
吉林	$y=0.0038x-107.77$	0.847	85.38	0.000	重庆	$y=0.0019x+10.57$	0.865	103.00	0.000
黑龙江	$y=0.0052x-423.72$	0.869	105.95	0.000	四川	$y=0.0027x-41.93$	0.847	87.94	0.000
上海	$y=0.0012x+11.38$	0.827	78.18	0.000	贵州	$y=0.0131x-118.83$	0.864	94.49	0.000
江苏	$y=0.0024x-56.56$	0.960	371.73	0.000	云南	$y=0.0038x-28.45$	0.933	221.26	0.000
浙江	$y=0.0030x-76.64$	0.943	266.60	0.000	陕西	$y=0.0083x-327.95$	0.929	210.54	0.000
安徽	$y=0.0035x-128.89$	0.882	120.06	0.000	甘肃	$y=0.0046x-86.37$	0.895	136.98	0.000
福建	$y=0.0028x-57.68$	0.986	1140.46	0.000	青海	$y=0.0150x-75.01$	0.931	216.08	0.000
江西	$y=0.0024x-7.81$	0.952	307.82	0.000	宁夏	$y=0.0084x-86.28$	0.898	141.05	0.000
山东	$y=0.0040x-206.05$	0.936	233.76	0.000	新疆	$y=0.0086x-124.03$	0.927	193.88	0.000

附录 2 显示,在 2015~2017 年期间,各年份估算的省域碳排放量与四大国际典型碳数据库分配的省域碳排放量大体一致,总体差异并不大。各数据库中中国 30 个省域的平均 MAPE 值变化在 6.45%~9.12% 之间,这说明在此期间估算的省域碳排放量较国际碳数据库分配的碳排放结果平均仅偏离了 6.45~9.12 个百分点,意味着利用夜间灯光遥感影像提取建成区 TDN 值作为自变量来测算碳排放量具有较高的精度和一定的可行性。进一步分析发现,在这四大国际碳数据库中,30 个省域估算的碳排放量与分配的碳排放量的平均 MAPE 值较大的出现在 EDGAR 和 CEADs,平均 MAPE 值较小的分别是 IEA 和 EIA,这表明基于夜间灯光数据估算得到的省域碳排放总体上与 IEA 和 EIA 数据库分配的碳排放值更接近。造成这种差异的一个很重要的原因可能是上述四大国际数据库对中国碳排放的核算边界不尽相同所致(表 1)。例如,IEA 和 EIA 核算中国碳排放的边界是化石燃料燃烧所产生的 CO₂ 排放量^[40-41];CEADs 核算的范围除了化石燃料燃烧直接产生的碳排放外,还涉及了水泥生产所导致的 CO₂ 排放量^[5];EDGAR 核算中国碳排放的范围则更广^[13],不仅包括了化石燃料消耗和水泥生产所形成的碳排放,而且还包括了其他工业过程所产生的碳排放(如石灰石的碳酸化,燃料的非能源利用,化学溶剂和金属制造工艺过程,农

用石灰和尿素,废物和矿物燃料燃烧等)。由于 IEA 和 EIA 核算中国碳排放的边界与本文估算历史碳排放量的边界基本一致,即都是采用化石能源消耗量核算碳排放,从而导致 IEA 和 EIA 的 MAPE 值较 CEADs 和 EDGAR 的要小(附录 2)。此外,用于核算碳排放的燃料类别、活动水平数据来源及碳排放因子来源等的差异^[13],也可能是造成四大国际碳数据库的 MAPE 值各不相同的另一个原因。据报道,不同类别化石燃料(煤炭、石油和天然气)因排放因子的非本地化可导致约 3% 的总量估算差距^[5]。由于中国能源消费基数较大,采用不同来源的活动数据和排放因子,在测算中国碳排放量时可能会带来 14% 左右(约 0.35GTC)的估算差距^[4]。

从单个省域 2015~2017 年估算的碳排放量与国际碳数据库分配的碳排放量的 MAPE 值来看,四大国际数据库中所有省域的 MAPE 值均在 0.68%~14.85% 之间变化;即使同一个省域,不同国际碳数据库的 MAPE 值也存在差异(表 4)。以 IEA 和 EDGAR 两个碳数据库为例,在调查的中国大陆 30 个省域中,有 20 个省域的 MAPE 值是 EDGAR 的要大于 IEA 的,二者的差值范围变化在 0.1%(河北省)~11.70%(云南省)之间,平均差值为 4.42%,差距并不明显,表明基于夜间灯光数据通过提取建成区 TDN 值来估算省域碳排放量的方法具有较好的适用性和参考价值。至于碳数据库 ED-

表 4 2015~2017 年主要省域估算的碳排放量与国际数据库分配的碳排放量的平均绝对百分比误差 (MAPE, %)
Table 4 Mean absolute percentage error of provincial estimated carbon emissions and carbon emissions allocated from international databases in 2015~2017 (MAPE, %)

省份	IEA	EDGAR	EIA	CEADs	省份	IEA	EDGAR	EIA	CEADs
北京	5.17	3.74	5.14	7.15	河南	5.77	11.20	9.98	4.78
天津	14.85	7.95	7.17	14.19	湖北	4.87	7.81	10.34	3.39
河北	13.22	13.32	12.12	6.82	湖南	7.13	7.59	7.88	9.04
山西	3.71	3.61	3.29	9.74	广东	11.41	2.39	0.69	3.74
内蒙古	5.69	9.70	11.29	6.38	广西	3.65	12.45	8.94	11.73
辽宁	6.05	9.79	5.70	7.63	海南	2.47	9.90	6.32	5.99
吉林	5.16	5.87	5.84	4.45	重庆	6.16	12.57	11.36	13.70
黑龙江	5.79	5.27	4.39	6.82	四川	5.02	5.24	7.29	5.71
上海	12.58	8.70	11.81	3.61	贵州	5.37	9.66	12.43	5.89
江苏	11.60	10.18	12.94	11.67	云南	2.85	14.55	8.58	14.29
浙江	2.41	4.77	7.39	6.55	陕西	10.35	2.58	2.37	9.44
安徽	0.68	4.13	6.74	6.44	甘肃	6.36	8.70	6.02	9.04
福建	4.59	11.92	5.40	10.19	青海	8.96	14.13	10.85	2.85
江西	9.55	6.77	3.66	4.40	宁夏	5.67	11.85	9.65	5.50
山东	14.65	11.88	7.16	9.30	新疆	5.60	10.98	6.07	10.11

GAR 的 MAPE 值大于 IEA 的原因可能与 EDGAR 核算中国碳排放的边界较 IEA 的宽泛有关。此外, 由于中国各省域在经济发展水平、科技进步和资源禀赋上存在较严重的不平衡现象^[42], 同一国际碳数据库不同省域的 MAPE 值也表现出一定的差异, 但多数省域的 MAPE 值均控制在 10.0% 以内(表 4)。这一结果也说明基于夜间灯光数据估算中国省域的碳排放量具有一定的可靠性。仍以 IEA 数据库为例, 其 MAPE 值小于 10.0% 的省域有 23 个, 约占整个调查省域的 76.67%, 剩余的 7 个省域, 如天津 (14.85%)、山东 (14.65%)、河北 (13.22%)、上海 (12.58%)、江苏 (11.60%)、广东 (11.41%) 和陕西 (10.35%) 的 MAPE 值超过 10.0%, 但它们仍在一个可接受的范围内 (MAPE 值 < 15.0%)。至于上述省域 MAPE 值较大的原因可能是因为大部分省域都位于经济较发达、人口较密集的东部沿海地区, 参与省域碳排放分配的指标 (如经济、人口规模) 所占权重较大, 再加上这些省域的历史碳排放量相对较高, 因而基于前述的省域碳排放分配方法有可能分配到较多的碳排放量, 进而使基于夜间灯光影像估算的碳排放量与 IEA 数据库分配的碳排放量差异加大^[43]。其余三大国际碳数据库亦显示出类似的结果 (表 4), 在此不再赘述。

此外, 为了更直观地揭示基于夜间灯光数据估算省域碳排放量的有效性, 将 2015~2017 年中国 30 个省域估算的碳排放量与四大权威数据库分配的碳排放量进行对比。由图 3 可知, 基于夜间灯光数

据估算的省域碳排放量与四大典型数据库分配的碳排放量均落在 1:1 线附近, 二者回归方程的 R^2 系数分别为 0.956 (CEADs)、0.979 (IEA)、0.947 (EDGAR) 和 0.983 (EIA), MAPE 值分别为 8.10 (CEADs)、7.25 (IEA)、9.04 (EDGAR) 和 7.55 (EIA), 且均在 0.0001 水平下通过极显著性检验。这些结果进一步表明, 利用夜间灯光数据估算的省域碳排放量与国际权威数据库分配得到的省域碳排放量相差很小, 说明该方法是可行的, 估算结果是可靠的; 特别是基于夜间灯光数据估算的中国 30 个省域的碳排放量与 IEA 和 EIA 两个数据库分配的省域碳排放量更为接近, 再次表明基于夜间灯光数据通过提取 TDN 值估算省域碳排放量不管是在理论上还是在方法实践上都是可行的。

4 结 论

为解决当前中国省域碳排放数据缺失或不实时的问题, 基于 DMSP/OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光数据以及省域能源平衡表和相关社会经济数据, 采用统计数据比较法提取建成区 TDN 值与核算的历史碳排放量分别建立了中国各省域的碳排放估算模型。在此基础上, 利用提取的 TDN 值对 2015~2017 年中国大陆 30 个省域 (不包括西藏) 的碳排放量进行了估算, 将结果与四大国际权威碳数据库分配的省域碳排放值进行比较, 发现估算的省域碳排放量与四大国际碳数据库分配的碳排放量大体一致, 平均差距仅为 6.45%~9.12%, 并且基于

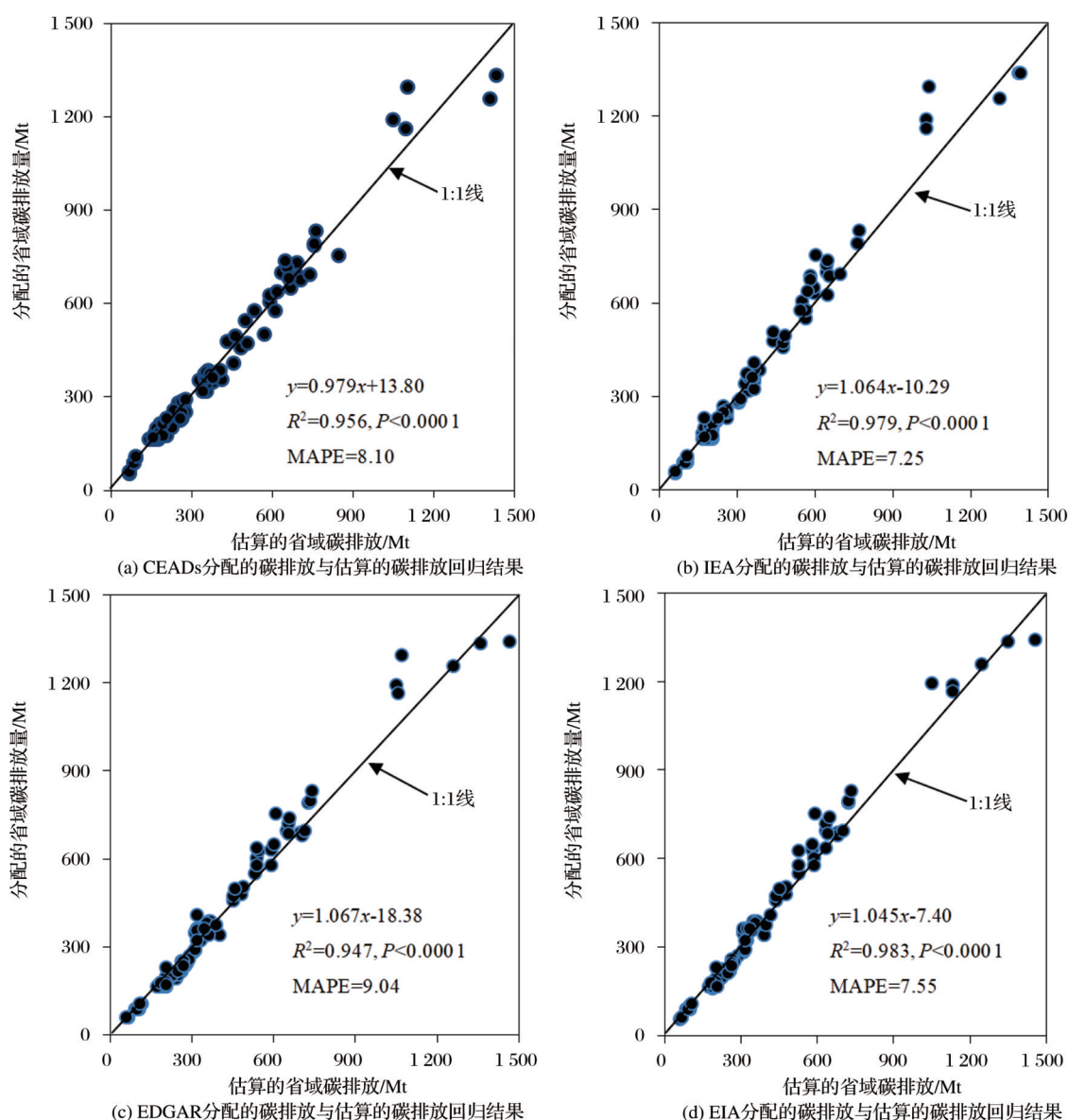


图3 2015~2017年国际数据库分配至省的碳排放与估算的省域碳排放比较

Fig.3 Comparison of carbon emissions allocated to provinces from the international databases and estimated provincial carbon emissions in 2015~2017

夜间灯光数据估算的省域碳排放量与IEA和EIA数据库分配的碳排放值更为接近;单个省域估算的碳排放量与国际数据库分配的碳排放量差距较小,各省域的MAPE值变化在0.68%~14.85%,且多数省域的MAPE值均小于10.0%;此外,各省域估算的碳排放量与分配的碳排放量均落在1:1线附近,二者回归方程的 R^2 系数均在0.94以上,MAPE值分别为8.10(CEADs)、7.25(IEA)、9.04(EDGAR)和7.55(EIA)。

这些结果表明利用夜间灯光数据估算中国省域碳排放量具有较高的精度,不仅避免了传统方法在核算碳排放过程中由于省域间社会经济状况和

能源类别的差异以及排放因子系数选取导致的不确定性问题,而且也弥补了前人研究对能源消费数据统计口径不一致和统计时间滞后的缺陷,最终实现对省域碳排放的实时准确估算,可以说,该方法在理论上和实践上是可行的。值得指出的是,由于在预测模型构建过程中忽略了省域碳排放因子的本地化,从而有可能导致模型误差;其次是在省域碳排放分配时,采用的指标体系不一定能够全面反映各省域的碳排放特征。因此,基于夜间灯光影像,如何将排放因子本地化和构建包含更多指标的分配体系对中国省域碳排放进行准确估算有待进一步研究。

附录 1 1997~2014 年中国主要省域建成区提取的 TDN 值

Appendix 1 TDN values extracted from China's provincial built-up areas between 1997 and 2014

省份	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
北京	72 748	72 750	72 763	72 858	109 060	135 214	153 397	153 690	154 897	158 207	164 833	165 123	168 991	163 397	168 207	169 843	170 833	172 931
天津	47 894	49 221	50 681	51 761	56 130	58 556	62 758	65 098	67 944	69 348	72 745	80 303	80 354	85 704	85 903	86 225	89 863	89 983
河北	79 332	81 548	83 438	85 770	87 660	94 249	104 046	106 638	111 893	117 606	121 333	124 973	127 673	130 165	135 684	198 647	139 957	147 247
山西	43 933	46 446	48 399	57 440	60 205	62 417	65 280	66 638	68 654	69 336	72 925	74 878	78 814	82 305	87 701	91 087	92 086	94 398
内蒙古	39 448	42 064	42 644	43 036	51 307	51 667	55 301	58 977	63 768	67 491	74 775	77 167	79 988	79 988	81 963	88 618	96 048	97 821
辽宁	140 263	144 545	147 679	148 755	152 907	160 283	161 662	165 844	168 506	172 324	178 674	183 946	186 666	201 998	206 673	209 561	209 871	212 737
吉林	54 031	54 308	52 684	54 518	57 122	58 753	61 653	63 569	67 208	80 236	82 616	88 995	80 376	83 527	85 715	87 080	88 668	97 537
黑龙江	108 519	109 865	107 806	116 262	116 456	116 536	117 191	126 745	129 139	131 434	132 534	134 969	137 687	141 730	146 815	149 185	151 681	152 218
上海	58 143	73 839	76 075	76 083	76 095	76 175	76 275	103 315	106 474	114 246	117 121	117 129	117 221	1 174 246	117 521	117 531	120 769	123 835
江苏	93 886	96 862	102 699	105 861	122 340	151 009	158 977	166 997	178 722	188 515	199 275	213 502	223 542	244 214	253 479	276 107	286 767	297 166
浙江	52 479	59 948	65 782	72 159	82 427	86 645	96 977	101 602	112 703	120 185	122 580	133 715	133 715	144 719	144 719	153 600	160 816	169 537
安徽	52 450	58 687	66 241	75 608	76 181	80 359	85 425	91 897	99 857	103 275	105 073	111 047	116 864	121 986	129 266	129 266	133 896	137 161
福建	31 194	33 740	35 833	38 360	41 071	43 440	53 037	55 210	57 896	62 033	67 186	71 493	74 564	84 930	92 163	94 163	95 513	99 519
江西	18 231	19 354	20 800	26 964	28 532	31 493	37 480	41 674	42 619	45 755	47 287	49 238	54 451	58 220	60 439	62 146	66 933	69 473
山东	109 654	114 468	122 926	129 673	144 029	156 950	176 031	186 841	200 688	218 280	223 811	244 417	253 996	263 472	273 482	298 132	321 071	334 859
河南	73 874	78 604	81 739	91 117	97 284	105 353	111 150	115 754	128 476	136 117	142 841	148 633	151 593	157 473	166 056	174 882	178 148	180 318
湖北	59 699	60 406	65 887	70 296	72 244	77 014	81 078	82 039	83 193	97 267	101 826	109 932	103 800	109 932	115 860	117 568	124 101	124 638
湖南	41 084	43 063	48 442	50 043	53 417	55 844	62 183	62 683	64 187	66 429	71 407	77 728	80 716	82 174	89 065	90 697	92 154	94 546
广东	151 524	164 755	177 684	196 348	218 782	258 966	319 463	334 299	343 321	353 215	373 721	398 141	407 293	416 151	431 491	454 112	468 180	576 298
广西	42 630	43 840	45 367	45 540	49 521	56 530	59 594	60 185	64 366	63 346	70 324	71 247	73 814	77 286	186 872	84 362	88 228	90 697
海南	7 667	7 670	8 234	8 245	8 734	9 258	11 595	10 276	12 535	14 339	16 073	16 453	13 674	13 921	14 403	17 420	17 536	19 335
重庆	17 300	21 705	22 422	23 628	24 075	34 171	35 147	34 797	39 271	47 713	51 406	52 049	52 572	61 305	67 381	70 043	72 017	75 965
四川	42 201	47 329	52 836	59 505	64 529	71 836	82 874	84 512	84 903	87 071	91 955	92 206	97 341	103 887	108 920	115 928	121 281	130 180
贵州	13 951	14 511	14 321	15 291	16 002	17 435	18 906	20 830	21 278	21 278	24 133	24 428	25 868	22 558	27 353	27 408	32 243	36 789
云南	18 285	22 306	22 369	24 480	25 570	26 428	35 118	35 878	44 502	41 165	43 958	46 010	49 353	50 244	52 627	54 564	61 832	62 613
陕西	41 665	41 847	46 782	49 175	51 554	52 601	56 175	58 148	59 857	68 942	66 319	72 858	75 045	81 365	81 505	86 488	92 580	93 297
甘肃	31 444	31 898	31 950	32 115	31 823	39 290	40 520	41 275	43 500	46 763	47 553	49 330	48 714	49 124	50 737	51 941	54 455	56 091
青海	5 706	5 773	6 122	6 278	6 444	6 319	6 411	6 565	6 643	6 769	6 711	6 741	6 792	7 116	7 668	8 658	9 445	10 853
宁夏	9 131	10 681	10 721	11 058	11 673	14 502	17 310	19 552	21 071	22 736	25 009	26 526	26 366	27 521	28 366	30 132	32 187	32 371
新疆	19 231	25 137	25 619	25 631	25 851	27 050	27 254	28 022	28 432	30 605	31 101	40 994	44 659	45 671	48 743	48 743	49 989	52 922

附录 2 2015–2017 年主要省域估算的碳排放量与国际数据库分配的碳排放量比较

Appendix 2 Comparison of estimated provincial carbon emissions with allocated provincial carbon emissions from the international databases in 2015–2017

省份	2015					2016					2017				
	PCE	IEA	EDGAR	EIA	CEADs	PCE	IEA	EDGAR	EIA	CEADs	PCE	IEA	EDGAR	EIA	CEADs
北京	89.41	93.63	89.65	83.84	83.39	89.84	92.64	93.56	83.55	85.94	90.03	97.82	96.78	91.16	88.06
天津	182.30	169.67	201.73	197.68	161.24	195.31	170.99	204.45	197.48	170.35	214.32	172.59	206.69	202.78	203.35
河北	633.86	598.05	592.14	580.26	689.37	650.15	596.03	600.13	579.67	664.57	755.75	606.62	606.71	595.23	841.90
山西	1258.18	1312.90	1255.23	1246.10	1404.50	1335.78	1381.34	1361.37	1345.64	1433.11	1338.47	1389.48	1466.43	1457.61	1521.41
内蒙古	791.45	761.22	729.46	720.84	753.80	787.50	759.75	735.25	720.41	754.62	831.33	767.43	740.02	731.70	765.07
辽宁	549.16	562.78	531.31	522.66	502.37	581.09	561.31	537.13	522.23	508.94	638.47	569.02	541.935	633.56	615.65
吉林	270.46	244.57	290.77	285.94	268.85	254.36	243.57	264.69	274.64	274.18	249.94	248.77	267.92	262.29	264.52
黑龙江	377.41	358.38	387.19	381.03	347.80	379.95	357.33	361.33	360.72	365.37	383.55	362.82	354.75	358.79	355.33
上海	163.69	205.28	193.51	187.42	161.65	164.63	184.25	177.60	187.12	158.23	165.22	178.67	170.98	185.09	156.58
江苏	698.44	642.14	644.56	631.63	634.16	720.12	639.94	653.26	630.98	653.12	739.37	651.47	660.42	647.92	645.05
浙江	455.72	476.79	447.97	438.98	481.50	474.48	475.26	454.01	438.53	509.18	496.00	483.27	458.99	450.31	461.44
安徽	364.24	362.81	360.01	352.79	392.85	387.32	381.58	364.87	352.43	361.18	387.51	388.00	368.87	361.89	397.02
福建	233.83	258.05	176.80	260.64	264.47	247.83	257.00	280.93	261.33	267.15	260.31	262.48	284.34	258.40	232.92
江西	168.76	203.94	1822.47	237.61	171.41	173.00	203.12	185.74	237.36	176.67	177.25	207.45	188.44	243.74	179.01
山东	1191.50	1029.58	1048.52	1133.50	1052.18	1164.12	1027.02	1058.61	1132.75	1096.70	1195.46	1040.41	1066.93	1052.42	1101.80
河南	604.86	551.53	536.83	586.05	537.07	627.20	549.69	544.07	525.52	536.84	686.78	559.29	650.03	639.63	557.62
湖北	339.83	334.47	397.66	389.68	352.88	340.65	333.11	363.02	389.28	353.98	376.84	340.23	387.44	399.73	366.93
湖南	281.54	308.34	306.59	309.24	250.52	286.60	307.09	311.54	308.87	265.51	294.71	313.64	315.61	318.50	275.97
广东	690.03	585.78	696.45	682.47	697.95	679.29	583.40	705.84	681.77	706.86	695.89	695.86	713.58	700.08	733.20
广西	191.42	205.85	244.74	209.83	173.23	207.93	205.02	248.04	219.58	182.48	214.66	209.39	250.76	246.02	193.85
海南	60.90	61.94	68.13	65.96	65.35	57.17	60.57	69.58	55.85	62.26	62.57	62.51	61.79	68.69	67.75
重庆	164.06	169.77	189.40	184.39	139.19	164.88	188.92	202.76	174.14	142.18	169.23	203.38	205.53	205.70	157.77
四川	320.88	347.95	332.58	321.90	353.58	363.19	346.14	339.76	321.36	350.14	363.99	355.66	345.68	335.36	379.76
贵州	352.32	362.86	312.52	306.25	327.57	365.61	361.80	316.74	305.94	348.36	322.78	367.39	320.21	314.15	340.34
云南	218.31	219.65	261.15	255.91	178.65	225.94	218.76	264.67	225.65	254.54	233.82	223.43	267.58	262.51	198.22
陕西	481.34	439.57	484.83	479.12	429.36	504.49	438.60	488.67	478.83	570.05	578.98	543.69	591.84	586.32	607.83
甘肃	177.28	192.50	188.88	184.28	206.58	183.50	191.73	201.96	194.05	169.72	182.36	195.82	204.51	200.07	173.99
青海	90.67	106.59	104.29	100.79	84.05	103.61	106.00	116.64	100.62	93.15	108.85	109.12	108.58	105.20	88.68
宁夏	196.86	188.50	224.12	219.62	193.38	199.16	187.74	227.14	219.39	189.7	204.21	191.75	229.63	225.28	226.24
新疆	347.62	362.33	311.89	305.64	379.09	358.28	361.27	316.10	345.32	410.85	410.52	366.85	319.57	413.52	452.26
平均MAPE	—	7.42	8.20	7.28	8.38	—	6.45	9.05	7.39	7.64	—	7.58	9.12	8.07	8.26

注:PCE表示根据回归模型基于省域建成区 TDN 值估算的碳排放量;表中碳排放量的单位为百万吨 (Million tons, Mt);MAPE 表示平均绝对百分比误差,单位为%。

参考文献(References):

- [1] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048 - 1057.[赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048 - 1057.]
- [2] Wang Xingmin, Wu Jing, Wang Zheng, *et al.* An accounting of CO₂ emission in Chinese cities and spatial pattern analysis [J]. *Urban and Environmental Studies*, 2020, 1: 67 - 80.[王兴民, 吴静, 王铮, 等. 中国城市 CO₂ 排放核算及其特征分析[J]. *城市与环境研究*, 2020, 1: 67 - 80.]
- [3] Bao Sen, Tian Lixin, Wang Junshuai. Trend forecast of energy production and consumption in China and research of carbon emissions[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1248-1254.[包森, 田立新, 王军帅. 中国能源生产与消费趋势预测和碳排放研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1248 - 1254.]
- [4] Lai L, Huang X J, Yang H, *et al.* Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (11): e1601063. DOI: 10.1126/sciadv.1601063.
- [5] Liu Z, Guan D, Wei W, *et al.* Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565): 335-338. DOI: 10.1038/nature14677.
- [6] Duan F M, Wang Y, Wang Y, *et al.* Estimation of marginal abatement costs of CO₂ in Chinese provinces under 2020 carbon emission rights allocation: 2005 - 2020[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 24445 - 24468. DOI: 10.1007/s11356-018-2497-x.
- [7] Wang G Z, Han Q, Bauke D V. Assessment of the relation between land use and carbon emission in Eindhoven, the Netherlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247: 413 - 424. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.064
- [8] Cui YF, Li L, Chen LQ, *et al.* Land-use carbon emissions estimation for the Yangtze River Delta urban agglomeration using 1994-2016 Landsat image data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1 - 21. DOI: 10.3390/rs10091334.
- [9] Liu Chang, Su Yun, Li Lingling. The estimation and spatial distribution of the carbon emissions of county units in China[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2020, 42(1): 113-119.[刘畅, 苏筠, 黎玲玲. 中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(1): 113-119.]
- [10] Jing Qiaonan, Hou Huimin, Bai Hongtao, *et al.* A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO₂ emissions[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 420-427. [景侨楠, 侯慧敏, 白宏涛, 等. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 420-427.]
- [11] Zhu S L. Comparison and analysis of CO₂ emissions data for China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5 (1): 17 - 27. DOI: 10.3724/SP.J.1248.2014.017.
- [12] Li Qingqing, Su Ying, Shang Li, *et al.* Comparison analysis of China's emissions accounting by typical international carbon databases[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(3): 275 - 280.[李青青, 苏颖, 尚丽, 等. 国际典型碳数据库对中国碳排放核算的对比分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 275 - 280.]
- [13] Abdul W S A, Charabi Y, Al-Maamari R, *et al.* CO₂ greenhouse emissions in oman over the last forty-two years: review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 1702 - 1712. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.193.
- [14] Aslan A, Destek M A, Okumus I. Sectoral carbon emissions and economic growth in the US: further evidence from rolling window estimation method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 402-411. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.237.
- [15] Wang J, Cai B F, Zhang L X, *et al.* High resolution carbon dioxide emission gridded data for China derived from point sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (12): 7085 - 7093. DOI: 10.1021/es405369r.
- [16] Singh P, Kansal A, Carliell M C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 22-30. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.017.
- [17] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, *et al.* China CO₂ emission accounts 1997-2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201. DOI: 10.1038/sdata.2017.201.
- [18] Lin J Y, Jacoby J, Cui S H, *et al.* A model for developing a target integrated low carbon city indicator system: The case of Xiamen, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 51 - 57. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.01.001.
- [19] Ray J, Yadav V, Michalak A M. A multi-resolution spatial parameterization for the estimation of fossil-fuel carbon dioxide emissions via atmospheric inversions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7: 1901-1918. DOI: 10.5194/gmd-7-1901-2014.
- [20] Chevallier F. On the statistical optimality of CO₂ atmospheric inversions assimilating CO₂ column retrievals[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(8): 11889-11923. DOI: 10.5194/acp-15-11133-2015.
- [21] Wang H, Zhang R, Liu M, *et al.* The carbon emissions of chinese cities[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12 (14): 6197-6206. DOI: 10.5194/acp-12-6197-2012.
- [22] Elvidge C D, Cinzano P, Pettit D, *et al.* Overview of the nightsat mission concept[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28 (12): 2645-2670. DOI: 10.1109/URS.2007.371851.
- [23] Yang Yang, Huang Qingxu, Zhang Liling. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data—A case study of Bohai Rim [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(2): 141-148.[杨洋, 黄

- 庆旭,章立玲.基于DMSP/OLS夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究:以环渤海地区为例[J].经济地理,2015,35(2):141-148.]
- [24] Zhang Q, Seto K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(9): 2320-2329. DOI:10.1016/j.rse.2011.04.032.
- [25] Doll C N, Pachauri S. Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery[J]. *Energy policy*, 2010, 38(10): 5661-5670. DOI:10.1016/j.enpol.2010.05.014.
- [26] Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, *et al.* Night-time lights of the world: 1994 - 1995[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 56(2): 81 - 99. DOI: 10.1016/S0924-2716(01)00040-5.
- [27] Doll C H, 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. DOI:10.1579/0044-7447-29.3.157.
- [28] Meng L, Graus W, Worrell E, *et al.* Estimating CO₂ emissions at urban scales by DMSP/OLS nighttime light imagery: methodological challenges and a case study for China[J]. *Energy*, 2014, 71:468-478. DOI:10.1016/j.energy.2014.04.103.
- [29] 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.[郭忻怡, 闫庆武, 谭晓悦, 等. 基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放的空间分布模拟[J]. *世界地理研究*, 2016, 25(4): 102 - 110.]
- [30] Chen J D, Gao M, Cheng S L, *et al.* County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 391-402. DOI: 10.1038/s41597-020-00736-3.
- [31] Su Yongxian, Chen Xiuzhi, Ye Yuyao, *et al.* The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 68(11): 1513 - 1526. [苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. *地理学报*, 2014, 68(11): 1513 - 1526.]
- [32] He Wenju, Zhang Huafeng, Chen xiongchao, *et al.* An empirical study about population density, economic agglomeration and carbon emission state of Chinese Provinces: based on the perspective of agglomeration economy effects, congestion effects and spatial effects[J]. *Nankai Economic Studies*, 2019, 2: 207-225.[何文举, 张华峰, 陈雄超, 等. 中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究—基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J]. *南开经济研究*, 2019, 2:207-225.]
- [33] Zhang Yongnian, Pan Jinghu. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1436-1446.[张永年, 潘竞虎. 基于DMSP/OLS数据的中国碳排放时空模拟与分异格局[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1436-1446.]
- [34] Shi K F, Yu B L, Huang Y X, *et al.* Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1705-1724. DOI: 10.3390/rs6021705.
- [35] Zhou Yi, Chen Ying, Liu Yang, *et al.* Generation and verification of NPP-VIIRS annual nighttime light data[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(2): 62 - 68.[周翼, 陈英, 刘洋, 等. NPP-VIIRS年度夜间灯光数据的合成与验证[J]. *遥感信息*, 2019, 34(2): 62 - 68.]
- [36] Henderson M, Yeh E T, Gong P, *et al.* Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 595 - 609. DOI:10.1080/01431160304982.
- [37] Wang Yong, Cheng Yu, Yang Guangchun, *et al.* Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(8): 3180-3188.[王勇, 程瑜, 杨光春, 等. 2020和2030年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(8): 3180-3188.]
- [38] Ma Hailiang, Zhang Hongyan, Wu Fengping. Research on the prediction of carbon emissions distribution based on simulation analysis[J]. *Soft Science*, 2016, 30(10): 75 - 78.[马海良, 张红艳, 吴凤平. 基于情景分析法的中国碳排放分配预测研究[J]. *软科学*, 2016, 30(10): 75 - 78.]
- [39] Li Haiping, Long Mi, Li Guangyi. Spatial-temporal dynamics of carbon dioxide emissions in China based on DMSP/OLS nighttime stable light data[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7): 2777-2784.[李海萍, 龙宓, 李光一. 基于DMSP/OLS数据的区域碳排放时空动态研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2777-2784.]
- [40] International Energy Agency (IEA). CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2016[R]. Paris, France, 2016:1-166.
- [41] U.S. Energy Information Administration (EIA). U.S. Energy Information Administration [EB/OL]. 2017 [2017-06-09]. <https://www.eia.gov>.
- [42] Jiang W B, Liu W D. Provincial-Level CO₂ emissions intensity inequality in China: Regional source and explanatory factors of interregional and intraregional inequalities[J]. *Sustainability*, 2020, 12:2529. DOI:10.3390/su12062529.
- [43] Wen L, Shao H Y. Analysis of influencing factors of the carbon dioxide emissions in China's commercial department based on the STIRPAT model and ridge regression[J]. *Environmental science and pollution research*, 2019, 26: 27138-27147. DOI:10.1007/s11356-019-05929-x.

The Accuracy of Nighttime Light Data to Estimate China's Provincial Carbon Emissions: A Comparison with Carbon Emissions Allocated by International Carbon Database

Liu Xianzhao, Yang Xu

(School of Earth Science and Space Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Fast and accurate access to provincial carbon emission data is the premise of real-time development of differentiated carbon emission reduction policies. Based on the DMSP/OLS and NPP-VIIRS night lighting data, the statistical data comparison method was used to extract the total nighttime light value (Expressed by TDN) of provincial built-up area in China's mainland (excluding Tibet) from 1997 to 2017, and the carbon emission prediction models of provinces were established by using the TDN values of 1997 to 2014 and the carbon emissions in the same period. Then, the TDN value from 2015 to 2017 is used as the independent variable to estimate the carbon emissions of China's provinces; at the same time, the total carbon emissions of China published by four international authoritative databases (IEA, EIA, EDGAR and CEADs) are allocated to each province by using entropy method and carbon emission allocation model. Finally, the estimated results are compared with the provincial carbon emission values assigned by four typical carbon databases. The results show that the estimated provincial carbon emissions are generally consistent with the allocated provincial carbon emissions, and the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is only 6.45%~9.12%. Meanwhile, the provincial carbon emissions estimated based on night light data are closer to the carbon emission values assigned by IEA and EIA databases. The estimated and allocated carbon emissions of each province fall near the 1:1 line; the MAPE value of a single province varies from 0.68% to 14.85%, and the MAPE values of most provinces are within 10.0%. The above results prove the feasibility and accuracy of estimating provincial carbon emissions by extracting TDN values based on night light data.

Key words: Night lighting data; Carbon emission estimation; International carbon emission database