

分类号 C8/320
U D C

密级
编号 10741



硕士学位论文

(专业学位)

论文题目：兰西城市群县域能源消费碳排放时空分布特征及影响因素研究

研究生姓名：陈刚刚

指导教师姓名、职称：邓光耀 副教授

学科、专业名称：统计学 应用统计硕士

研究方向：经济统计应用

提交日期：2022年5月30日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 陈刚 签字日期： 2022年5月30日

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2022年5月30日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意” / “不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 陈刚 签字日期： 2022年5月30日

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2022年5月30日

**Spatio-temporal evolution pattern and
influencing factors of energy consumption
carbon emissions in Lanzhou-Xining city
group**

Candidate: CHEN Ganggang

Supervisor: DENG Guangyao

摘要

近年来,气候变暖的加剧在全球引发了一系列经济、社会和环境问题,已经严重威胁着人类的生存和可持续发展。作为世界第二大经济体和第一大碳排放国,虽然我国的国际影响力在不断增强,但是高碳排放也成为国际社会和舆论界关注的焦点。兰西城市群作为我国西部重要的跨省区城市群,是我国西部重要的生态屏障,也是黄河流域上游重要的工业和能源基地,对我国西部生态安全和社会经济发展具有重要的战略意义。

当前中国碳排放研究主要集中在国家、省域和经济较发达的地区,由于地级市及以下尺度能源消费统计数据缺失,导致对西部欠发达城市群碳排放的研究较少。因此,本文通过校正融合中国区域长时间序列 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,空间化模拟了 1995-2019 年兰西城市群的能源消费碳排放量;并从县级尺度视角出发,利用空间趋势分析、变异系数分析、探索性空间数据分析以及地理探测器等方法,对兰西城市群碳排放的时空分布特征、空间关联特征以及影响因素等问题进行研究。研究结果表明:

(1)从碳排放总量看,1995-2019 年兰西城市群碳排放总量呈增长趋势,增长速度表现出明显的阶段特征,整体呈先上升后下降的趋势。碳排放量从 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 上升到 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$,增长了 3.22 倍;碳排放年平均增长速度为 4.79%。从县域碳排放看,兰西城市群县域碳排放量增长明显,碳排放 (10^4t) 区间由 1995 年的 [13.4,425.4] 增长为 2019 年的 [103.2,1051.4],最低的贵南县和最高的城关区分别增长 8.46 倍和 2.47 倍,碳排放量分别增长 $48.92 \times 10^4 \text{t}$ 和 $625.95 \times 10^4 \text{t}$ 。从碳排放强度看,兰西城市群绝大多数县区的碳排放强度呈持续下降的态势,碳排放强度 (t/万元) 区间由 2005 年的 [4.2,9.7] 下降为 2019 年的 [1.6,5.0]。

(2)从时空分布看,1995-2019 年,兰西城市群碳排放一直表现出东高西低,中部高、南北低的空间分布态势,高碳县区主要集中在人口密集、经济相对发达的兰州市和西宁市主城区;兰西城市群县域碳排放存在显著的空间差异性和正自相关性,但空间差异在不断缩小,空间正自相关性呈现出逐步扩大的趋势;兰西城市群县域碳排放的局部自相关比较稳定,主要表现为高-高聚集和低-低聚集,高-高聚集主要集中在兰州市主城区,低-低聚集分布在青海省黄南州和海南州。

(3) 兰西城市群碳排放空间分异是多种因素综合作用的结果。其中, 经济发展水平的作用力始终最强, 财政支出、规模以上工业企业个数和产业结构也具有显著的作用力, 人口密度、城镇化水平和能源强度的作用力相对较弱; 影响因子经过两两交互以后, 对碳排放空间分异的作用力显著增强, 经济发展水平和规模以上工业企业个数分别与能源强度、产业结构、城镇化水平、人口密度所主导的交互作用是导致碳排放持续增长的主要推动力。

兰西城市群需协同发展, 统筹规划, 根据各县区资源环境承载力与国土空间规划, 合理控制人口密度与城镇开发力度; 在保持 GDP 持续增长的前提下, 有必要对城镇化水平、能源强度、产业结构和财政支出等因素进行宏观调控, 使其与关键因子之间的交互作用力得到削弱, 从而使得碳排放增速持续放缓; 同时, 根据各县区碳排放的实际情况, 制定精细化的碳减排政策, 争取尽早达到碳峰值。

关键词: 能源消费碳排放 夜间灯光影像 空间化 地理探测器 兰西城市群

Abstract

In recent years, the aggravation of global warming has caused a series of economic, social and environmental problems, which have seriously threatened the survival and sustainable development of mankind. As the world's second largest economy and the largest carbon emitter, Although China's international influence is increasing; its high carbon emissions have also become the focus of international community and public opinion circles. As an important inter-provincial urban agglomeration in the west of China, Lanzhou-Xining City agglomeration is an important ecological barrier in the west of China, as well as an important industrial and energy base in the upper reaches of the Yellow River Basin, which has important strategic significance for the ecological security and economic and social development in the west of China.

Currently, carbon emission studies in China are mainly focused on national, provincial and economically developed urban agglomerations. Due to the lack of statistical data on energy consumption at the prefecture-level and below, there are few studies on carbon emissions in the underdeveloped urban agglomeration in the west. Therefore, this paper spatially simulated the carbon emissions from energy consumption in the Lan-Xi urban agglomeration from 1995 to 2019 by combining long-term DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light images in China. From the

perspective of county scale, spatial trend analysis, coefficient of variation analysis, exploratory spatial data analysis and geographic detector were used to study the spatial and temporal distribution characteristics, spatial correlation characteristics and influencing factors of carbon emissions in Lan-Xi urban agglomeration. The results show that:

(1) From the perspective of total carbon emissions, the total carbon emissions in the Lan-Xi urban agglomeration showed an increasing trend from 1995 to 2019, and the growth rate showed obvious stage characteristics, with an overall trend of rising first and then declining. Carbon emissions increased from $36.23 \times 10^6 \text{t}$ in 1995 to $116.61 \times 10^6 \text{t}$ in 2019, an increase of 3.22 times. The average annual growth rate of carbon emissions was 4.79%. From the point of view of county carbon emissions, the carbon emissions at the county level of Lan-Xi urban agglomeration increased significantly, with the range of carbon emissions (10^4t) increasing from [13.4,425.4] in 1995 to [103.2,1051.4] in 2019. The lowest is Guinan county and the highest is Cheng'guan district which increased by 8.46 times and 2.47 times respectively. Carbon emissions increased by $48.92 \times 10^4 \text{t}$ and $625.95 \times 10^4 \text{t}$ respectively. From the perspective of carbon emission intensity, the carbon emission intensity of most counties and districts in The Lan-Xi urban agglomeration showed a trend of continuous decline, and the range of carbon emission intensity ($\text{t}/10^4 \text{ yuan}$) decreased from [4.2,9.7] in 2005 to [1.6,5.0] in 2019.

(2) From the perspective of spatial and temporal distribution, from 1995 to 2019, the carbon emission of Lan-Xi urban agglomeration showed a spatial distribution trend of high in the east and low in the west, high in the middle and low in the north and south. High-carbon counties are mainly concentrated in densely populated and relatively developed economies. There are significant spatial differences and positive autocorrelation of carbon emissions at county level in Lan-Xi urban agglomeration, but the spatial differences are narrowing, and the positive autocorrelation shows a trend of gradually expanding. The local autocorrelation of carbon emissions at county level in the Lan-Xi urban agglomeration was stable, dominated by high-high aggregation and low-low aggregation, and the high-high aggregation was mainly concentrated in the main urban area of Lanzhou, while the low-low aggregation was distributed in Huangnan prefecture and Hainan prefecture of Qinghai province.

(3) The spatial differentiation of carbon emissions in Lan-Xi urban agglomeration is influenced by multiple factors. The level of economic development always has the strongest influence on the spatial differentiation of carbon emissions. Fiscal expenditure, number of industrial enterprises above designated size and industrial structure also has significant influence on carbon emissions. The level of urbanization, population density and energy intensity have relatively weak influence on

carbon emissions. After pair interaction, the influence of influencing factors is significantly enhanced compared with the explanatory power of any single influencing factor. The interaction of economic development level and number of industrial enterprises above designated size with energy intensity, industrial structure, urbanization level and population density is the main driving force leading to the continuous growth of carbon emissions.

Lan-Xi urban agglomeration should be coordinated development, overall planning, according to the resources and environment carrying capacity and territorial space planning of each county, reasonable control of population density and urban development intensity. On the premise of sustained GDP growth, it is necessary to carry out macro-control on industrial structure, energy intensity, urbanization level and fiscal expenditure, so as to weaken the interaction between them and the leading factors, thus slowing down the growth rate of carbon emissions. At the same time, according to the actual situation of carbon emissions in each county, formula Refined carbon emission reduction policies and strive to reach the carbon peak as soon as possible.

Key Word: Energy consumption carbon emissions; Night light images; Spatialization; Geographical detector; Lan-Xi city group

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外相关研究综述	4
1.2.1 碳排放核算研究	4
1.2.2 碳排放时空演化特征研究	7
1.2.3 碳排放影响因素研究	8
1.2.4 文献述评	9
1.3 研究内容与技术路线	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 技术路线	11
1.4 论文的主要创新点	12
2 研究区概况与研究方法	13
2.1 研究区概况	13
2.2 理论基础	15
2.3 研究方法	16
2.3.1 夜间灯光影像处理	16
2.3.2 相关与回归分析	16
2.3.3 全局趋势分析法	16
2.3.4 变异系数分析法	16
2.3.5 探索性空间数据分析方法	17
2.3.6 地理探测器机理	19
2.4 本章小结	19
3 夜间灯光数据来源与预处理	20
3.1 夜间灯光数据来源	20

3.2	MDS/OLS 夜间灯光影像的处理与校正	21
3.2.1	投影转换、影像裁剪、重采样	21
3.2.2	传感器相互校正和影像饱和校正	21
3.2.3	MDS/OLS 夜间灯光影像连续性校正	25
3.3	NPP/VIIRS 夜间灯光影像的处理与校正	26
3.3.1	投影转换、影像裁剪、重采样	26
3.3.2	负值消除与年度均值影像合成	26
3.3.3	相对辐射校正	27
3.3.4	不稳定光源和背景噪声的消除	28
3.3.5	极高值消除与连续性校正	28
3.4	MDS/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像融合校正	29
3.5	兰西城市群长时间序列夜间灯光影像	30
3.6	夜间灯光影像校正评价	31
3.7	本章小结	32
4	兰西城市群能源消费碳排放空间化模拟	33
4.1	相关数据来源	33
4.2	能源消费碳排放计算	33
4.2.1	能源消费碳排放计算方法	33
4.2.2	能源消费碳排放测算结果	34
4.3	兰西城市群县域能源消费碳排放模拟	35
4.3.1	拟合模型的构建	35
4.3.2	拟合精度检验	37
4.3.3	修正模拟单位像元碳排放值	37
4.4	兰西城市群县域能源消费量模拟	39
4.5	本章小结	39
5	兰西城市群县域碳排放时空分布特征及影响因素研究	40
5.1	兰西城市群碳排放时间序列变化	40
5.1.1	碳排放总量变化趋势	40
5.1.2	县域碳排放量变化趋势	41

5.1.3 碳排放强度变化趋势.....	43
5.2 兰西城市群县域碳排放空间分布特征.....	44
5.2.1 正态性检验.....	44
5.2.2 空间趋势分析.....	44
5.2.3 变异系数分析.....	45
5.3 兰西城市群碳排放空间关联特征.....	46
5.3.1 全局自相关.....	46
5.3.2 局部自相关.....	47
5.4 兰西城市群县域碳排放影响因素研究.....	50
5.4.1 指标选取及理论依据.....	50
5.4.2 影响因素分析.....	52
5.5 本章小结.....	57
6 结论与展望	58
6.1 主要结论.....	58
6.2 政策启示.....	59
6.3 展望与不足.....	60
参考文献	61
作者攻读硕士期间研究成果	71
后记	72

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

近年来,气候变暖的加剧在全球引发了一系列经济、社会和环境问题,已经严重威胁着人类的生存和可持续发展。人类活动产生的能源消耗碳排放是主要的温室气体,也是导致全球气候变暖的主要原因之一(Seto 等,2012;杜海波,2021),自 18 世纪工业革命以来,随着生产力的快速提升,人类经济社会活动对化石能源的消耗日趋增多,因此产生了大量的二氧化碳(CO₂),导致全球气温不断上升。据统计,工业革命以来,全球化石能源燃烧所释放的 CO₂ 累计已达 2.2×10^{12} 吨(黄震和谢晓敏,2021),导致全球大气中的 CO₂ 浓度持续上升,特别是上世纪五十年代以来,CO₂ 浓度增长尤为明显,截至 2021 年 10 月,CO₂ 浓度已高达 415ppm,较 1958 年的 315ppm 上升了 100ppm,增长率达 31.75%^①,同时,全球地表平均温度也上升了 1.1°C。2015 年,《联合国气候变化框架公约》第 21 次缔约方会议(COP21)明确指出,在本世纪末将全球地表平均气温升幅较工业化前水平降低 2°C,并且努力把温升限定在 1.5°C 以内。2018 年,在《全球升温 1.5°C 特别报告》中再次指出,人类必须把温升控制在 1.5°C,2°C 的温升给世界造成的影响将难以承受^②。为此,《巴黎协定》呼吁全球温室气体排放尽快达峰,因而迫切需要各国强化碳减排行动。

我国自 1978 年改革开放以来,经济增长创造了人类经济史上不曾有过的奇迹,也拉动了世界其他经济体的经济增长(林毅夫,2018)。40 多年以来,我国国内生产总值(GDP)年均增长达 9.1%,2009 年 GDP 总量跃居世界第三位,2010 年经济规模超过日本成为世界第二大经济体,2013 年超过美国成为世界第一大货物贸易国,2020 年 GDP 总量突破百万亿元,经济增长取得了举世瞩目的成就。与此同时,我国经历了快速工业化和城镇化的历史进程,致使我国能源消费长期

^① <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

^② http://www.cma.gov.cn/kppd/kppdmsgd/201811/t20181122_483875.html

处于高位增长态势，由此引发的高碳排放问题成为了国际社会和舆论界关注的焦点，也引发了国际气候谈判和国内环境的双重压力。

根据国际能源机构的统计数据^①，2008年我国CO₂排放量达83.25亿吨，超过美国成为世界第一大CO₂排放国。国际能源机构在2010年发布的《世界能源展望》中，指出在2008-2035年期间，中国的能源消费量将会增加75%，到2035年能源消费增长将是世界能源消费增长的两倍^②，最新《世界能源展望》（2019版）预测，到2040年我国能源消费总量将占世界能源消费量的1/4，占全球净增长量的1/5^③。根据能源统计数据，我国的能源消费总量和能源消费碳排放量分别从1980年的5.86亿吨标准煤和7.4亿吨增加到2020年的49.8亿吨标准煤和99亿吨，2020年能源消费碳排放量占全球总排放量的30.9%（苏健等，2021）。同时，我国能源强度与碳排放强度也远高于世界平均水平及发达国家，2020年，我国能源强度与碳排放强度分别达3.4吨标准煤/万美元和6.7吨/万美元，均高于世界平均水平的2.2吨标准煤/万美元和3.8吨/万美元，也远高于美国的1.4吨标准煤/万美元和2.1吨/万美元。高能耗和高碳排的粗放型发展模式将严重制约我国社会经济的转型升级以及可持续发展，因此，作为世界第二大经济体和最大的CO₂排放国，经济与减排共同发展是我国从高速增长阶段向高质量发展阶段转变的目标之一，也是肩负全球碳减排工作的积极行动。

为强化气候安全，中国政府采取了一系列的碳减排举措，并取得实质性进展。2015年11月，在巴黎气候峰会上，我国承诺到2030年，碳排放强度比2005年降低60%-65%，且碳排放值达到峰值。2020年9月，习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上提出，中国将力争于2030年前达到碳峰值，2060年前实现碳中和。2020年12月，习近平主席在气候雄心峰会上将我国碳排放强度目标进一步提升，承诺到2030年，我国碳排放强度要比2005年下降65%以上。2021年4月，习近平主席在“领导人气候峰会上”指出，中国将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局。2021年11月，习近平主席向《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会世界领导人峰会发表书面致辞时提出，中国将构建碳达峰、碳中和“1+N”政策体系，助力“双碳”目标如期实现。中国在碳减排方面

^① <https://www.iea.org/>

^② 《世界能源展望》（2010）

^③ 《世界能源展望》（2019）

的积极行动与决心，不仅有助于树立中国在国际上负责任的大国形象，有利于国际社会在应对气候变化问题上的协调一致，同时，也事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。

1.1.2 研究意义

中国疆土辽阔，各地区经济发展水平、人口规模、产业结构以及能源结构差异甚大，且目前对碳排放的研究大多是从国家和省级视角出发，基于宏观的能源统计数据，使用能源平衡表和投入产出表来核算区域性的碳排放量，由于全国地级市及以下尺度数据的缺失，这些方法只适用于国家及省级的碳排放核算，绝大多数地级市及县域没有这样的资源和数据，也没有这样的编制能力，这限制了我国碳排放的研究尺度，对深入了解地级市及以下尺度碳排放情况造成了很大的阻碍。同时，我各地区各部门能源统计数据的统计口径也具有不一致性，再加之能源统计数据具有时间滞后性，其数据发布日期往往与数据获得日期相差一两年，能源消费碳排放研究的时效性无法得到保证（施开放，2017）。因此，为制定区域化、差异化和精细化的节能减排政策和实现碳减排目标，需要一种能实现更小尺度的区域能源消费碳排放核算的科学方法。

城市群作为引领区域发展的龙头，对我国区域协调发展和国土空间均衡开发具有重要的作用。当前国内外学者针对中国城市群碳排放的研究主要集中在长三角（Song 等，2015；冯冬和李健，2018；李建豹等，2019）、珠三角（赵亚南等，2014；洪凯和朱子玉，2017；Xu 等，2018）、京津冀（Wang 等，2015；苏旭冉和蔺雪芹，2019；吕倩和刘海滨，2019；宋珺等，2021）等经济发达的城市群，对于中、西部城市群碳排放的研究较少。而兰州-西宁城市群（下述简称“兰西城市群”）作为我国西部重要的跨省区城市群，是我国西部重要的生态屏障，也是黄河上游重要的工业和能源基地，正处于经济体制转型、产业结构调整优化、探索低碳经济之路的关键时期，同时，该地区也是生态环境保护和污染防治的重点区域（贾卓等，2021）。兰西城市群的绿色转型无论对推进黄河流域高质量发展，还是甘、青两省加强环境治理和生态保护都具有重要的现实意义，因此，对兰西城市群能源消费碳排放的时空分布特征及影响因素展开研究必要且迫切。

基于此，在全国碳减排目标框架下，本文选择兰西城市群作为研究区域，首

先借助卫星夜间灯光数据和能源消费统计数据,在长时间序列和县级尺度视角下,对兰西城市群能源消费碳排放量进行空间化模拟,然后对碳排放时空分布特征和空间关联特征进行分析,最后对碳排放空间分异的驱动因素进行探测,为我国西部城市群碳排放研究提供示范参考,也为兰西城市群制定精细化的碳减排政策提供较为科学的参考依据。

1.2 国内外相关研究综述

1.2.1 碳排放核算研究

(1) 传统碳排放核算研究

关于 CO₂ 排放量的核算,最主要和常见的方法有 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 清单估算法、实测法、生命周期估算法以及投入产出估算法等。其中 IPCC 清单估算法具有计算简单、容易实现等优点,是具体实践应用中最主要、最常用的估算方法(苏泳娴, 2015)。在实际计算中,IPCC 清估算法主要基于能源消费数据,利用 IPCC 提供的默认碳排放系数或相关权威机构和学者提供的各种能源燃烧的碳排放系数与相应的能源消费量相乘,对国家和地区的能源消费碳排放量进行估算。

基于 IPCC 提出的估算方法,国内外学者进行了大量关于 CO₂ 排放估算的研究。Schimel 等(1995)基于 IPCC 清单法,估算了 1980 年全球化石燃料燃烧和水泥业产生的 CO₂ 排放量,发现二者碳排放量约占人为碳排放量的 3/4。Quadrelli 等(2007)基于 IPCC 法,计算了全球 2003-2004 年的 CO₂ 排放量,指出煤炭燃烧释放的 CO₂ 占碳排放总量的 2/3。Raupach 等(2007)估算了全球不同发展水平国家的碳排放,研究发现,2004 年发展中国家和欠发达国家的碳排放总量占全球碳排放量的 41%。郭义强等(2010)基于 IPCC 法,估算了中国 1995-2006 年间的 CO₂ 排放量变化情况,发现我国人均 CO₂ 排放量由 1995 年的 0.62t 增长到 2006 年的 1.12t。Zhang(2012)估算了中国 1990-2008 年的能源消费碳排放,结果显示,20 年间中国 CO₂ 排放总量翻了近 1.7 倍,年平均增长率为 5.7%。程叶青等(2014)利用能源消费数据,估算了中国 1997-2010 年 CO₂ 排放量,发现我国 CO₂ 排放量从 1997 年的 4.16Gt 增加到 2010 年的 11.29Gt,年均增长率为

7.15%。×××和任苏灵（2017）根据 IPCC 法计算了中国 30 个省份 1997-2015 年的能源消耗碳排放量，结果表明，我国各省碳排放均表现出逐年增加的趋势。

基于其他常见碳排放估算方法。Azeez 等通过实测法计算了马来西亚巴生谷高速公路上机动车的碳排放量。Cho 等（2016）利用生命周期法，估算了韩国低碳建筑全过程释放的碳排放。Deng 等（2017）基于多区域投入产出模型，计算了全球 1995-2009 年贸易隐含碳排放，结果显示，2009 年贸易隐含碳前三位的国家为美国、中国和印度。×××和陈刚刚（2021）基于投入产出模型，利用 2012 年和 2017 年投入产出表数据，从需求侧计算了我国各部门碳排放量，发现不同需求类别和部门的碳排放差异较大。需要指出的是，利用投入产出模型核算各部门的隐含碳实际上仍利用了 IPCC 法核算的碳排放量。

基于传统估算方法，很多国际机构建立了碳排放数据库，主要有美国橡树岭国家实验室 CO₂ 分析中心(CDIAC)，国际能源署(IEA)，美国能源情报署(EIA)，全球碳排放数据库(EDGAR)，联合国气候变化框架公约(UNFCCC)，世界发展研究所(WDI)和世界银行(World Bank)等(苏泳娴, 2015; 刘竹等, 2018)，但大部分数据库只有国家层面的数据(董文, 2012)，地区、省级及以下尺度的较少，且有学者指出不同国际机构估算结果之间的差异较大(刘竹等, 2018)。另外，IPCC 估算法虽应用较广，但存在较大的局限性，其对数据的要求较高，需要数据种类较多，难以收集，仅适用于具有宏观统计数的国家或省级碳排放核算，且碳排放系数的不同决定了碳排放核算存在很大的不确定性，一方面限制了更小尺度的碳排放估算，另一方面缺乏碳排放估算的准确性与时效性。因此，为了弥补碳排放统计数据缺陷，国内外学者尝试利用空间信息手段，对区域碳排放量进行估算。

(2) 夜间灯光数据碳排放估算研究

随着空间信息技术的发展，卫星遥感数据开始出现在与人类社会经济活动相关领域的研究中。20 世纪 90 年代末，有学者研究发现，DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System, DMSP/OLS) 夜间灯光数据与人类活动相关的人口、GDP、电力消耗等社会经济指标具有显著的相关性(Elvidge 等, 1997)，加上夜间灯光影像具有较强的时效性(施开放, 2017)，很快被广泛应用于与人类活动密切相关的城镇化(Liu 等, 2012; Pandey 等, 2013;

Xiao, 2014)、经济状况 (Amaral 等, 2005; Doll, 2006; Henderson 等, 2012)、人口变化 (Elvidge 等, 2011)、自然灾害评估 (Witmer 和 Loughlin, 2002) 等相关研究之中。由于能源消耗与人类经济活动密切相关, 且有学者利用夜间灯光数据比较准确的估算了能源消费碳排放值 (Doll 等, 2000; 苏泳娴等, 2013; Zhao 等, 2015; 苏泳娴, 2015; 马忠玉和肖宏伟, 2017), 因此, 利用夜间灯光数据估算能源消费碳排放具有可行性和科学性。

Doll 等 (2000) 首次利用中国等 46 个国家的夜间灯光影像, 研究了夜间灯光面积与碳排放之间的关系, 发现二者具有较强的线性相关性, 拟合优度达到 0.84。苏泳娴等 (2013) 利用中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 估算了城市尺度能源消费碳排放量, 研究表明估算精度较高。Zhao 等 (2015) 研究发现, 夜间灯光影像的 DN (Digital Number, DN) 值与碳排放具有显著的指数相关性。苏泳娴 (2015) 再次利用夜间灯光影像, 研究了中国地级市尺度夜间灯光总值与能源消费碳排放之间的关系, 发现二者呈线性相关关系, 拟合优度达到 0.818。施开放 (2017) 通过校正中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 实证了夜间灯光影像与能源消费碳排放之间的关系, 发现二者具有显著的正线性相关关系。纪学朋 (2017) 通过校正 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 估算了 1992-2013 年环渤海地能源消费排放量, 结果表明环渤海地区碳排放总量呈不断增长的趋势。马忠玉和肖宏伟 (2017) 通过校正 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 利用空间计量模型研究了我国各省能源消费碳排放与 DN 值, 发现模型整体效果较好。

近几年来, 随着夜间灯光影像越来越精细化, 利用 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS (Suomi National Polar-Orbiting Partnership's/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, NPP/VIIRS) 夜间灯光数据估算碳排放的研究也越来越多。Cui 等 (2019) 基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 估算了 2012-2016 年华北地区地级市集中供热碳排放, 研究发现北京、天津、石家庄和青岛碳排量最多。武娜等 (2019) 基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 模拟了 1997-2016 年陕西、山西和内蒙古三省的能源消费碳排放量, 结果显示夜间灯光数据与能源消耗碳排放量之间的相关系数较高, 且碳排放总量呈逐年增长趋势。吕倩和刘海滨 (2019) 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 测算了 2000-2013 年京津冀县域能源消费碳排放量, 结果显示京津冀县域尺度碳排放呈现快速增长特征。于博等 (2020) 利用

2012-2016 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 测算了哈长城市群县级尺度碳排放量, 结果显示碳排放总量整体呈下降趋势。杜海波等 (2021) 通过校正 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 估算了黄河流域能源消费碳排放量, 结果表明 2000-2018 年, 黄河流域碳排放总量逐年上升。牛亚文等 (2021) 基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 测算了 2013-2019 年长株潭地区土地利用碳排放量, 结果表明碳排放基本上呈递减趋势。

1.2.2 碳排放时空演化特征研究

关于碳排放时空分布特征的研究, 大多数学者采用变异系数、动态分布分析方法、空间自相关分析以及探索性空间数据分析方法等 (Sather 等, 2011; 苏泳娴, 2013; 王文秀等, 2014; 施开放, 2017; 顾羊羊等, 2017; 许燕燕等, 2019; 于博等, 2020; 吕倩和刘海滨, 2020) 对碳排放的时空演化特征进行研究。

Sather 等 (2011) 利用变异系数等对我国东、中、西部碳排放强度的空间分布特征进行研究, 结果显示碳排放强度在区域间的整体差异不显著。苏泳娴等 (2013) 基于空间自相关分析, 研究了我国能源消费碳排放的时空分布特征, 结果表明, 我国碳排放总量逐年递增, 碳排放分布特征主要以“东部地区高高集聚, 西部地区低低集聚”为主导。施开放 (2017) 基于探索性空间数据分析方法, 分别对我国省、市、县三级碳排放时空分布特征进行研究, 发现三个尺度碳排放的空间自相关性都在不断增强。王文秀等 (2014) 基于空间自相关分析, 研究了广东省 1995-2011 年能源消费碳排放的分布特征, 发现碳排放总量和人均碳排放量都表现出显著的空间自相关性。吕倩和刘海滨 (2020) 基于探索性空间数据分析, 分析了黄河流域能源消费碳排放的空间分布特征, 发现该流域碳排放存在显著的空间正相关性。顾羊羊等 (2017) 通过动态分析法, 研究了 1995-2012 年河南省能源消费碳排放的时空分布特征, 结果显示河南省内碳排放强度具有明显的地区分布差异。许燕燕等 (2019) 采用空间自相关模型, 探究了成渝城市群碳排放时空分布特征, 发现该区域碳排放存在机枪的空间依赖性。于博等 (2020) 基于空间自相关分析, 研究了哈长城市群县级尺度城市碳排放空间特征, 研究发现该区域城市碳排放存在较强的空间自相关性。

1.2.3 碳排放影响因素研究

关于碳排放影响因素的研究，大多采用因素分解法（Zeng, 2014）、LMDI（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI）分解方法（陈军华和李乔楚, 2021）、STIRPAT（Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT）模型（Richard 等, 2003；孙贵艳等, 2020）、Tapio 脱钩模型（程慧, 2020）、面板数据模型（Mulali, 2012；Su, 2014；×××和任苏灵, 2017）、空间计量模型（程叶青等, 2013；赵金彩等, 2017；苏旭冉和蔺雪芹, 2019）以及地理探测器（赵领娣和吴栋, 2018；Wang, 2019；吾买尔艾力·艾买提卡力等, 2021；杜海波等, 2021）等方法研究经济发展、人口、能源强度、产业结构、城镇率等对碳排放的影响。

Zeng 等（2014）基于因素分解模型，分解了我国 1997-2007 年能源强度变化的主要因素，认为能源效率的提升是我国能源强度下降的主要因素。陈军华和李乔楚（2021）基于 LMDI 分解方法，对四川省能源消费碳排放的影响因素进行研究，发现经济发展对碳排放增长起促进作用，能源强度对碳排放增长起抑制作用。Richard 等（2003）利用 STIRPAT 模型，探究了人口状况对碳排放的影响，发现人口增长对碳排放增长起促进作用。孙贵艳等（2020）基于 STIRPAT 模型，探究了长江上游地区能源消费碳排放量变化的主要因素，发现人口密度和城镇化水平对碳排放增长起促进作用，经济增长对碳排放增长起先抑制后促进的作用。程慧等（2020）基于脱钩模型，对我国旅游业碳排放的影响因素进行研究，发现政府政策和经济发展水平是我国旅游业碳排放变化的主要因素。

Mulali（2012）基于面板数据模型，对 12 个中东国家碳排放的影响因素进行研究，发现影响这些国家碳排放的主要因素有一次能源消费总量、外商直接投资净流入、国内生产总值和贸易总额等。Su 等（2014）研究了我国地级市碳排放的驱动力，发现 GDP 增量是决定碳排放增长率的主要因素。×××和任苏灵（2017）基于面板数据模型，对中国能源消费碳排放的驱动因素进行分析，发现人口增长、经济发展水平和能源强度对能源消费碳排放的增长均起到促进作用。

程叶青等（2013）基于空间计量模型，对我国省级尺度能源消费碳排放强度的影响因素进行研究，结果表明碳排放强度空间分异主要受能源强度、能源结构、

产业结构和城市化率等因素的作用。赵金彩等（2017）基于空间计量模型，分析了中原经济区碳排放的影响因素，研究发现人均 GDP、碳排放强度、第二产业比重对碳排放增长起促进作用。苏旭冉和蔺雪芹（2019）利用空间计量模型分析了京津冀地区碳排放的影响因素，发现城镇化水平和人口规模对该地区碳排放增长起促进作用。

地理探测器作为分析空间异质性有力工具之一，最早应用于健康风险评估（Wang 和 Hu, 2005），近年来在城镇化（刘彦随和杨忍，2012）、社会（蔡佩汝等，2021）、人口（罗君，2020）等领域得到了进一步应用。赵领娣和吴栋（2018）基于地理探测器方法，对我国碳排放空间分异格局的主要影响因素进行探测，发现工业化水平和经济发展水平是影响碳排放空间分异格局的主要因素。Wang（2019）利用地理探测器探究了资源型城市规模以上工业能耗碳排放的影响机理，研究发现经济规模和能源结构是碳排放的主要影响因素。吾买尔艾力·艾买提卡力等（2021）基于地理探测器方法，研究了环鄱阳湖生态城市群碳排放的影响因素，发现人口增长是该地区碳排放空间分异的主导因子，且收入水平等所主导的交互作用力对碳排放空间分异具有明显的增强作用。

1.2.4 文献述评

纵观现有研究成果，目前国内外学者针对能源消费碳排放的研究主要集中在碳排放核算、时空分布特征、空间分异格局以及影响因素等主题上。碳排放核算尺度主要集中于国家、区域和省域层面，对县级尺度的研究相对缺乏；碳排放核算方法多集中于 IPCC 清单估算法和投入产出等传统估算方法，其对数据的依赖性较高，在数据缺乏的情况下，其核算难度大大增加，且核算结果缺乏科学性；碳排放核算数据主要来源于统计数据，数据相对缺乏时效性；国内基于夜间灯光数据对碳排放的估算研究主要集中在全国层面和经济较发达的地区，针对西部欠发达地区的研究较少；夜间灯光数据主要采用 DMSP/OLS 或 NPP/VIIRS 单一尺度，时间跨度较段，将两种数据相互校正为同尺度的长时间序列研究较少。对碳排放时空分布特征的研究多使用探索性空间数据分析方法，方法相对单一；对碳排放影响因素的研究主要利用空间计量模型，忽视了影响因素交互作用对碳排放空间分异的作用。

基于此，本文通过校正中国区域长时间序列 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像，构建能源消费碳排放统计值与校正后的夜间灯光亮度总值之间的拟合模型，选择兰西城市群为研究载体，结合变异系数、空间趋势分析、探索性空间数据分析以及地理探测器等研究方法，从长时间序列和县级尺度视角出发，着重研究以下内容：①空间化模拟兰西城市群能源消费碳排放量；②兰西城市群碳排放的时空分布特征；③兰西城市群碳排放的空间分异格局；④兰西城市群碳排放空间分异的驱动因素。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文基于已有研究成果，处理校正了中国区域 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像，并根据能源消费统计数据，计算了甘肃省和青海省省级尺度的能源消费碳排放量。利用处理校正后的夜间灯光影像和计算的能源消费碳排放量，空间化模拟了兰西城市群 1995-2019 年的能源消费碳排放量，并对其县域碳排放时空分布特征、空间关联特征和影响因素等展开研究。研究内容主要分为以下章节：

第一章是绪论。包括研究背景与意义、国内外相关研究综述、研究内容与技术路线以及论文的主要创新点。

第二章是兰西城市群概况与研究方法。主要介绍了兰西城市群的区域概况，对本文所使用的研究方法进行介绍。

第三章是夜间灯光影像的处理与校正。主要包括 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像的处理与校正，两类夜间灯光影像的相互融合，兰西城市群长时间序列夜间灯光影像的提取，以及对校正的夜间灯光影像进行评价。

第四章是兰西城市群能源消费碳排放空间化模拟。主要包括两部分内容，一是基于能源消费统计数据，利用 IPCC 清单法计算了甘肃省和青海省的能源消费碳排放量；二是通过构建夜间灯光影像像元总值（TDN）与碳排放统计值之间的拟合和修正模型，模拟了兰西城市群空间化的能源消费碳排放分布图。

第五章是兰西城市群县域碳排放时空分布特征及影响因素研究。主要包括四部分内容，一是分析了兰西城市群 1995-2019 年碳排放的时间序列变化；二是通

过空间趋势分析和变异系数分析等对兰西城市群县域碳排放的空间分布特征进行分析；三是利用空间探索性数据分析（ESDA）对兰西城市群的空间关联特征进行探究；四是借助地理探测器对兰西城市群碳排放的影响因素进行探测。

第六章是结论与展望。包括本文的研究结论与展望。

1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1.1 所示。

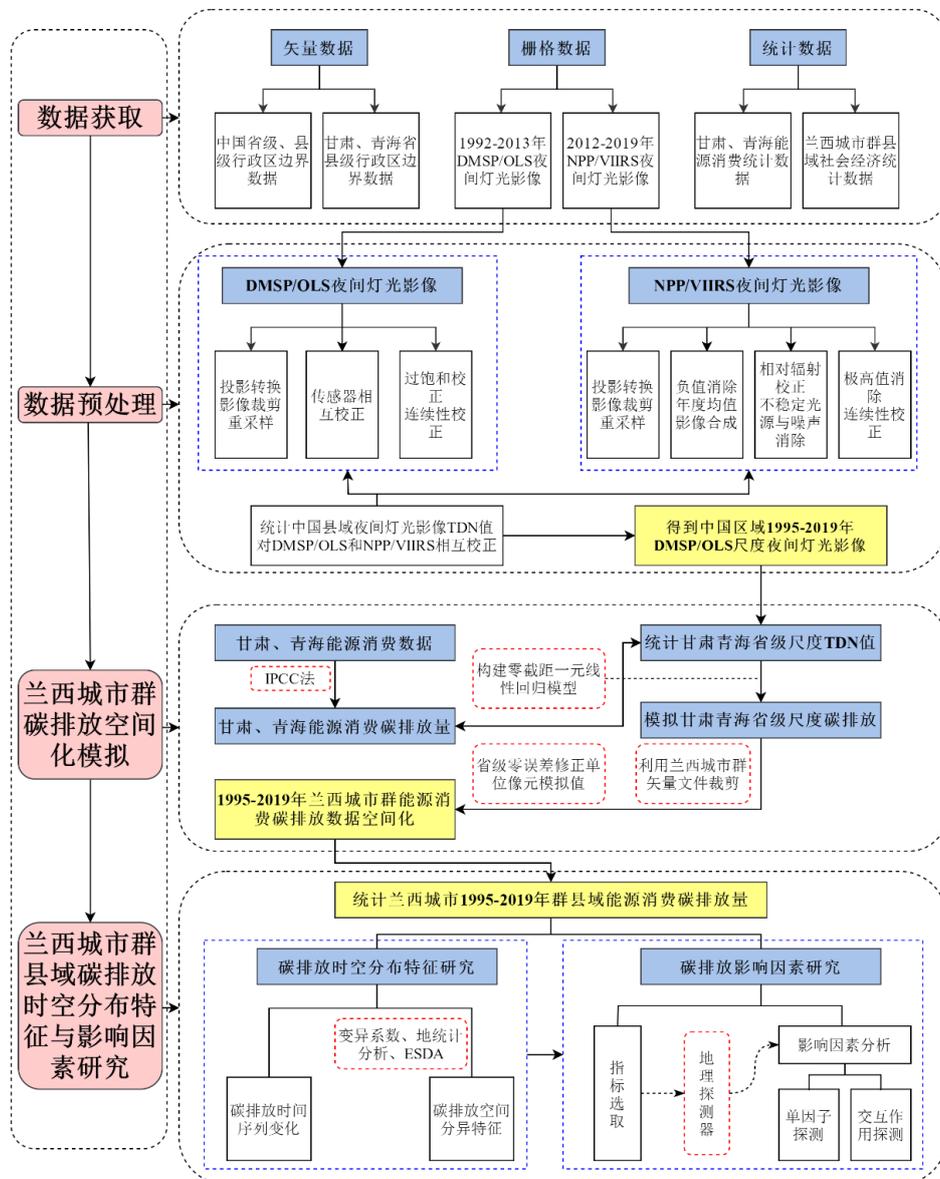


图 1.1 技术路线图

1.4 论文的主要创新点

(1) 通过校正长时间序列夜间灯光数据,为模拟更小尺度碳排放数据提供了数据支持。碍于数据的可获得性和真实性,大部分学者将碳排放研究的视角主要集中在国家、省级和地级市尺度,对于地级市以下尺度的研究较少;对中国城市群碳排放的研究主要集中在东部经济较发达的地区,对中、西部城市群的研究较少,且对于兰西城市群碳排放的研究尚处于空白。本文利用 ArcGIS 和 R 语言等图像处理软件,校正了中国区域 1995-2019 年 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,为县级尺度碳排放研究提供了科学的数据支撑;从县级尺度视角出发,选择兰西城市群为研究区域,以期为我国西部城市群碳排放研究提供示范参考。

(2) 解决了兰西城市群县域碳排放数据缺乏的问题。本文从长时间序列的角度出发,基于校正的夜间灯光影像,以 IPCC 清单估算法计算的省级能源消费碳排放统计值为训练数据集,分别构建甘肃和青海省的能源消费碳排放统计值与夜间灯光亮度总值之间的拟合模型,选择零截距一元线性回归模型进行拟合,并对拟合结果进行检验。为了提高模拟的精度,进一步从省级零误差的基础上对单位像元上的模拟结果进行了修正,得到兰西城市群 1995-2019 年碳排放空间化模拟结果。

(3) 克服了空间计量模型无法识别影响因素交互效应对碳排放空间分异驱动力的不足,方法新颖科学。利用 ArcGIS 对兰西城市群县域碳排放空间化模拟结果进行分区统计,得到 1995-2019 年县域碳排放数据。结合空间趋势分析、变异系数分析和探索性空间数据分析等方法对兰西城市群县域碳排放的时空分布特征和空间关联特征进行分析,利用地理探测器对兰西城市群县域碳排放空间分异的驱动因素进行探测并得出结论。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

2018年3月,国务院印发《兰州-西宁城市群发展规划》。根据规划,兰西城市群是指以甘肃省会兰州市、青海省会西宁市为中心的中国西部重要的跨省城市群,也是黄河上游重要的城市群,位于 $34^{\circ}51' \sim 37^{\circ}38'N$, $99^{\circ}1' \sim 105^{\circ}38'E$ 之间(研究区位置如图2.1)。

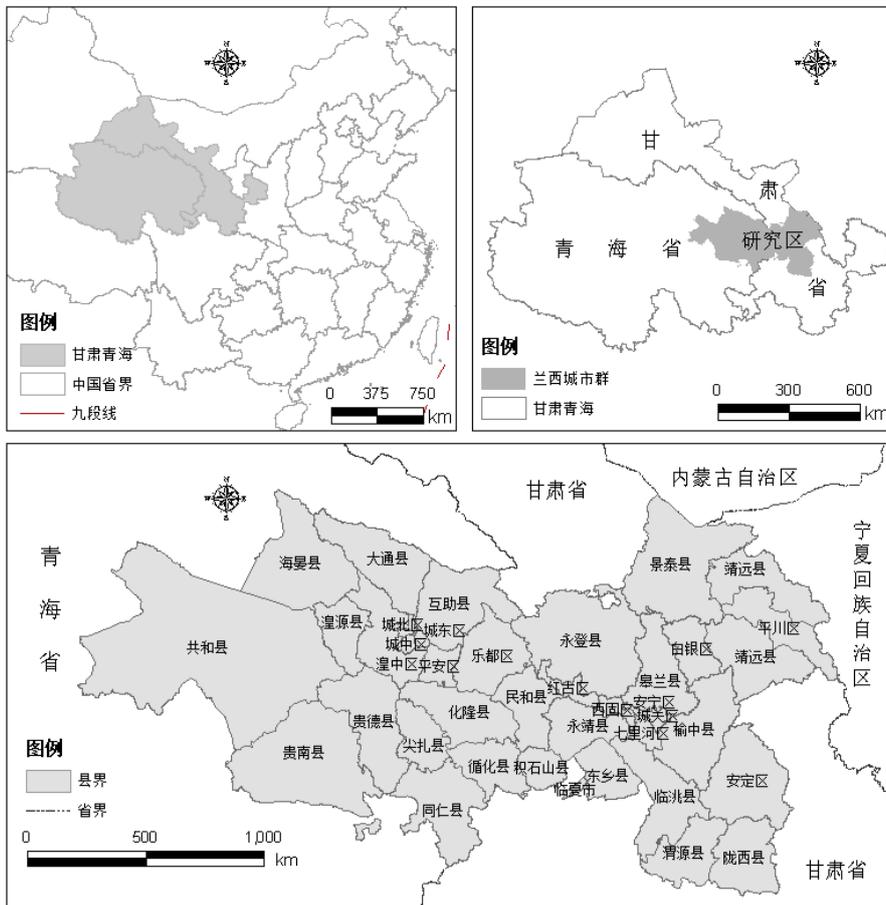


图 2.1 兰西城市群区位图

兰西城市群主要包括甘肃省4个地州市和青海省5个地州市共39个县区(见表2.1),总面积达9.7万 km^2 ,占国土面积的1.1%和甘肃、青海两省总面积的36.7%。兰西城市群人口规模和地区生产总值在甘青两省举足轻重,2019年,兰

西城市群年末总人口达 1257 万人，地区生产总值达到 5578.35 亿元，分布占甘肃、青海两省和的 38.62%和 47.74%，是甘肃、青海两省重要的人口集聚地和经济增长极。

表 2.1 兰西城市群县区

省份	地级市	县区
甘肃省	兰州市	城关区、七里河区、安宁区、西固区、红古区、永登县、榆中县、皋兰县
	白银市	白银区、平川区、靖远县、景泰县
	定西市	安定区、陇西县、临洮县、渭源县
	临夏州	临夏市、永靖县、东乡县、积石山县
青海省	西宁市	城北区、城东区、城西区、城中区、大通县、湟中县、湟源县
	海东市	乐都区、平安区、民和县、互助县、化隆县、循化县
	海北州	海晏县
	黄南州	同仁县、尖扎县
	海南州	共和县、贵德县、贵南县

兰西城市群地处我国西北内陆，平均海拔 2000m 以上，地势西高东低、黄河横贯而过，地貌形态复杂、降水较少且集中、气候干旱，形成凉冷、干燥气候特征。同时，该地农业条件也较好，区域内自然资源丰富，是我国重要的农产品生产基地和能源基地；兰西城市群的工业起步也较早，交通便利，劳动力资源丰富，科技实力较强，经济基础较好。

以黄河穿城而过的金城兰州和海藏咽喉西宁构成的兰西城市群地理位置得天独厚，发展区位优势明显，不仅是甘肃省和青海省经济发展的重要载体，而且是西北地区交通运输的枢纽，更是我国联通内地和支撑丝绸之路经济带发展的重要平台，对维护国家安全、促进西部地区繁荣稳定具有重要的战略意义（杨永春等，2020）。但是，兰西城市群处于我国三大高原的交叉地带，区域内生态环境十分脆弱，加上兰西城市群作为黄河流域上游重要的工业和能源基地，工业发展带来的污染十分严重（贾卓等，2021），是污染防治重点区域。因此，兰西城市群的绿色转型无论对甘、青两省加强环境治理和生态保护，还是对推进黄河流域高质量发展都具有重要的现实意义。同时，对兰西城市群能源消费碳排放的时空分布特征及影响因素展开研究必要且迫切，本文以兰西城市群内 39 个县区为研究载体，拟借助夜间灯光数据模拟兰西城市群县域的能源消费碳排放量，并对其时空分布特征及影响因素展开研究。

2.2 理论基础

DMSP/OLS 夜间灯光影像始于上世纪 70 年代，最初是美国国防气象局为了气象监测所建，由于 OLS 传感器具有较强的广电放大能力，使其可以探测到地表极光、城镇灯光、汽车尾灯、渔火以及火灾等近红外辐射（李小敏等，2018），因此，该传感器获取的夜间灯光影像被广泛用来研究人类活动（曹子阳等，2015）。DMSP/OLS 夜间灯光影像发布较早，包括由 6 个不同传感器获取的 1992-2013 年 34 期年度稳定灯光影像，但其存在像元值过饱和、空间分辨率低（1km）以及不同的传感器在获取影像时不连续等问题（Christopher 等，2007；Elvidge 等，2009）。

NPP/VIIRS 夜间灯光影像始于 2012 年，空间分辨率可达 500 米，分为年度均值影像和月度均值影像两种，可探测夜间的月光、星光、城市灯光与大气辉光等微弱的可见光辐射，且经星上校准后影像质量显著提高，但年度影像只有两期（2015 和 2016 年），月度均值影像自 2012 年 4 月起每月一期，且月度影像存在负值、极高值与不稳定光源等不足之处（周冀等，2019；胡为安等，2021）。因此，在使用 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像进行研究之前，必须对其存在的问题进行处理和校正。

近年来，随着对遥感影像处理与校正方法的成熟，加之 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像本身具有时效性与经济性，因此，夜间灯光影像被广泛应用于拟合人口（高义等，2013；黄杰等，2015；王旭等，2016）、GDP（王琪等，2013；李峰等，2016）、城市发展（苏泳娴，2015；高亚红等，2017；张梅等，2019）以及 PM_{2.5}（卢德彬等，2019；韩媛媛等，2020）等与人类活动密切相关的科学研究之中。由于能源消耗与人类经济活动密切相关，且有学者利用夜间灯光数据比较准确的估算了能源消费碳排放值（Doll 等，2000；苏泳娴等，2013；Zhao 等，2015；苏泳娴，2015；马忠玉和肖宏伟，2017；张永年和潘竟虎，2019；Cui 等，2019；吕倩和刘海滨，2020；杜海波等，2021），因此，利用夜间灯光数据估算能源消费碳排放具有可行性和科学性。

2.3 研究方法

2.3.1 夜间灯光影像处理

本文借助 ArcGIS、MATLAB、SPSS、GeoDa 和 R 语言等图像处理与空间统计分析工具，对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像进行预处理和校正，为模拟兰西城市群碳排放提供数据基础。

2.3.2 相关与回归分析

采用相关与回归分析对多个 DMSP 卫星传感器进行相互校正，并对 DMSP/OLS 夜间灯光影像和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像进行拟合，得到 DMSP/OLS 尺度长时间序列夜间灯光数据集。最后利用回归分析对统计数据得到的能源消耗碳排放数据与 DMSP/OLS 尺度夜间灯光数据值进行拟合分析，得出利用 DMSP/OLS 尺度夜间灯光数据值估算兰西城市群县域碳排放值的模型。

2.3.3 全局趋势分析法

全局趋势分析是将某一范围上的空间信息转化为点，并将这些点的某一属性量化投影到二维平面上（池建，2011）。实际运用中，将数据点置于三维空间，以 Z 轴衡量数据值的大小，将数据点的高度分别投影到 XZ 或 YZ 平面上，分别对投影点进行拟合，绘制出一条最佳拟合线，用以表征方向上变化趋势，而对其空间分布做出分析。通过对兰西城市群县域碳排放进行全局趋势分析，有助于深入揭示碳排放空间分布的分异规律。

2.3.4 变异系数分析法

依据统计学原理，变异系数能够反映数据集的离散程度（差异程度）。因此，本文使用变异系数度量并揭示兰西城市群碳排放在县级尺度的相对差异程度，其计算公式如下：

$$CV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \div \bar{Y} \quad (2.1)$$

式中, CV 为变异系数, CV 值越大表明兰西城市群碳排放的相对差异越大; Y_i 为*i*县区的碳排放量, n 为对县区总个数, \bar{Y} 为兰西城市群 39 个县区的平均碳排放量。

2.3.5 探索性空间数据分析方法

为了揭示兰西城市群碳排放的空间差异性, 本文使用探索性空间数据分析方法 (Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA) 对兰西城市群县域能源消费碳排放的空间分布特征进行研究。ESDA 是一系列空间数据分析方法, 主要运用全局空间自相关分析和局部空间自相关性分析对研究对象的空间关联特征进行度量与检验 (陈培阳和朱喜钢, 2012)。

(1) 全局空间自相关

目前, 全局空间自相关的衡量指标主要有全局 Moran' s I 和 Geary' s C 等。本文使用全局 Moran' s I 指数对兰西城市群县域尺度碳排放的全局空间自相关性进行刻度。全局 Moran' s I 指数介于[-1,1]之间, 大于 0 表示空间正相关, 且越接近 1, 正相关性越强, 即碳排放较高 (或较低) 单元之间的空间集聚性越强; 接近 0 表示邻接空间单元不相关, 即区域碳排放在空间上呈随机分布模式; 小于 0 表示空间负相关, 且越接近-1, 负相关性越强, 即区域碳排放与周围区域的差异性越明显 (王劲峰等, 2010; 陈强, 2015)。具体公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

式中, I 表示全局 Moran' s I 指数, n 为县区总个数, x_i 和 x_j 为*i*和*j*县区的碳排放值, \bar{x} 为县区碳排放均值。 w_{ij} 为空间权重矩阵, 用来刻度*n*个县区的空间邻接或邻近关系, 本文采用基于邻接概念的 Queen 空间权重矩阵, 即采用拥有公共边界为相邻原则建立兰西城市群县域的空间关系, 公式如下:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{空间位置 } i \text{ 和 } j \text{ 空间相邻} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2.3)$$

对 Moran' s I 指数的显著性可以通过以下 Z 统计量进行检验:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (2.4)$$

其中, $E(I)$ 为 Moran' s I 指数的数学期望, $\sqrt{Var(I)}$ 为 Moran' s I 指数的标准差。

(2) 局部空间自相关

全局 Moran' s I 指数是一种总体统计指标, 能够较好地识别碳排放的空间自相关性, 但无法识别区域碳排放的空间集聚模式, 而局部空间自相关分析可以揭示局部空间差异的异质性特征来识别局部区域碳排放的空间集聚性 (施开放, 2017)。因此, 本文利用局部空间自相关分析来揭示兰西城市群县域碳排放的空间关联和集聚特征, Moran 散点图可以展示县区之间的空间关联特征, 局部自相关指标 (Local Indicators of Spatial association, LISA) 则可以测度碳排放集聚特征 (Li 等, 2010)。Moran 散点图是利用研究对象标准化的观测值和对应的空间滞后值可视化的二维图示 (马晓熠和裴韬, 2010), 通常用来研究局部空间的异质性。

本文借助 Moran 散点图, 利用局部 Moran' s I 指数和 Lisa 值对兰西城市群碳排放空间关联和集聚特征进行研究, Moran' s I 指数如下:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (2.5)$$

式中, I_i 为局部 Moran' s I 指数 z_i 和 z_j 分别为县区 i 和 j 标准化碳排放值, w_{ij} 为空间权重矩阵。为了便于分析, 本文绘制了 Moran 散点图图解 (见图 2.2)。

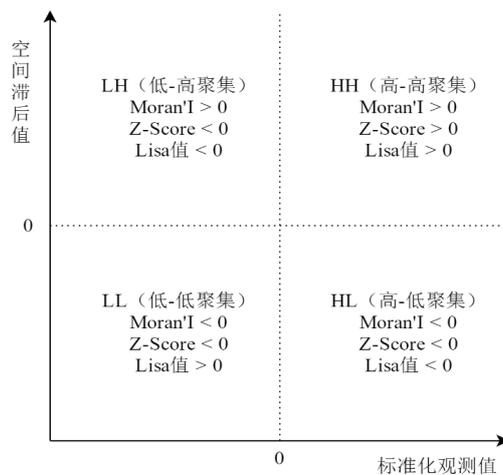


图 2.2 Moran 散点图图解

如图 2.3 所示, 在局部自相关上, 位于第一象限的县区呈 HH 聚集特征, 且

Moran' s $I > 0$, Z-Score > 0 , Lisa 值 > 0 ; 第二象限的县区呈 LH 聚集特征, 且 Moran' s $I > 0$, Z-Score < 0 , Lisa 值 < 0 ; 第三象限的县区呈 LL 聚集特征, 且 Moran' s $I < 0$, Z-Score < 0 , Lisa 值 > 0 ; 第四象限的县区呈 HL 聚集特征, 且 Moran' s $I < 0$, Z-Score < 0 , Lisa 值 < 0 。

2.3.6 地理探测器机理

地理探测器的核心思想是如果自变量对因变量有影响力, 那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性 (Wang 和 Hu, 2005)。具体地, 如果碳排放量 Y 与碳排放影响因子 X 的空间分布趋于一致, 那么两者是相互关联的, 其空间一致性程度可通过 q 统计量来测度因素 X 对 Y 的解释力。

$$q = 1 - \frac{\sum_{m=1}^K N_m \delta_m^2}{N \delta^2} = \frac{SSW}{SST} \quad (2.6)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, K$ 为碳排放影响因子 X 的分层; N 为研究区内县区数量; N_m 为影响因子 X 的 m 层包含的县区数; δ_m^2 和 δ^2 分别为层 m 和整个区域碳排放值的方差; δ_m^2 和 δ^2 分别为分层 m 的方差与总方差; $SSW = \sum_{m=1}^K N_m \delta_m^2$ 和 $SST = N \delta^2$ 分别为各层方差之和与全区域总方差; $q \in [0, 1]$, $q = 0$ 时, 表示碳排放呈随机分布, q 值越大, 碳排放的空间分异越明显, 说明影响因子对碳排放的解释力就越大, q 值表示 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 。

关于 q 值是否显著, 可通过以下 F 统计量进行检验:

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{q}{1-q} \sim F(L-1, N-L; \lambda) \quad (2.7)$$

$$\lambda = \frac{1}{\delta^2} \left[\sum_{m=1}^L \bar{Y}_m^2 - \frac{1}{N} (\sum_{m=1}^L \sqrt{N_m} \bar{Y}_m)^2 \right] \quad (2.8)$$

式中, λ 为非中心参数, \bar{Y}_m 为层 m 的均值。根据式 (2.8), 可以通过查表或者使用地理探测器软件检验 q 值是否显著。

2.4 本章小结

本章从地理位置、经济发展水平、区位优势等方面介绍了兰西城市群的区域概况, 对本文所使用研究方法及原理进行了阐释。

3 夜间灯光数据来源与预处理

由于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像存在像元值过饱和、传感器之间不连续等问题，NPP/VIIRS 夜间灯光影像存在年度数据缺乏、月度数据具有负值、极高值和背景噪声等问题，且两种数据集缺乏连续性和可比性，因此，在利用该数据进行长时间序列研究之前，必须进行相应的处理与校正。本章就两类夜间灯光数据集存在的问题进行预处理，并对预处理结果进行评价。

3.1 夜间灯光数据来源

本文所使用 1992-2013 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像和 2012-2019 年 NPP/VIIRS 夜间灯光影像均来源于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmosphere Administration/ National Geophysical Data Center, NOAA/NGDC) 官方网站⁶ (如图 2.2)。



图 3.1 DMSP/OLS 全球夜间灯光影像 (F152003)

另外，本文使用的中国省、市、县级级矢量数据均来中国国家基础地理信息中心。根据《兰州-西宁城市群发展规划》中对兰西城市群县区范围的划分，利用 ArcGIS10.8 从中国省、市、县级级矢量数据中提取了兰西城市群范围矢量数据，作为辅助数据存入本文构建的兰西城市群地区矢量数据库。

⁶ <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html>

3.2 DMSP/OLS 夜间灯光影像的处理与校正

3.2.1 投影转换、影像裁剪、重采样

为使数据更加准确，减小因网格变形而产生的影响，本文将全球 1992-2013 年 34 期 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像重投影转换为兰伯特等面积投影，然后利用中国行政边界矢量图和 ArcGIS 中按掩膜提取工具从全球 DMSP/OLS 夜间灯光影像中裁剪得到中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光影像，并对其重采样为 1km 分辨率网格栅格（图 3.2）。

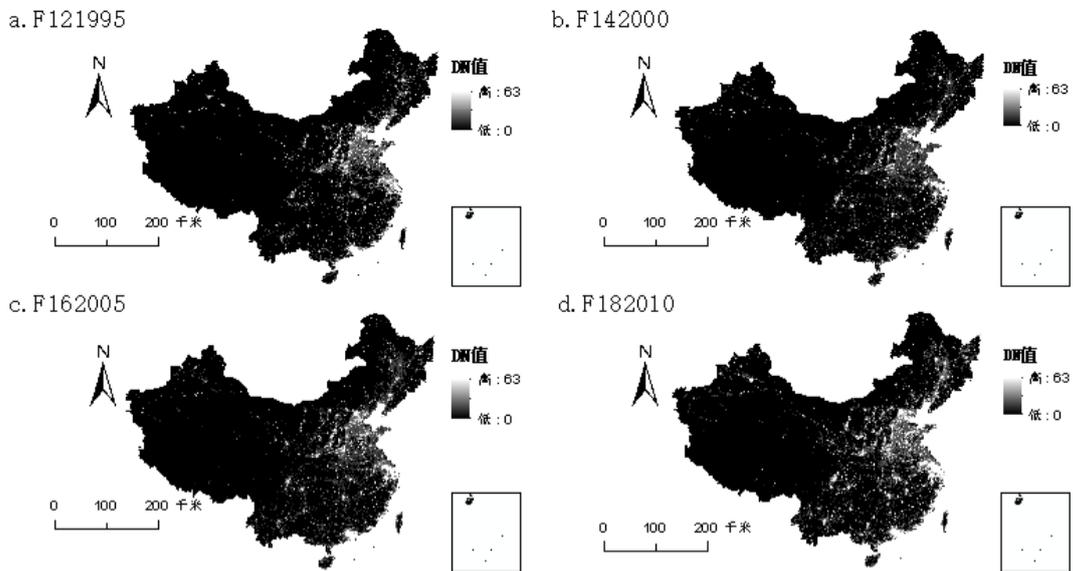


图 3.2 重采样后中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光图像

3.2.2 传感器相互校正和影像饱和校正

由于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像在获取时无法进行标准的星上定标，造成不同卫星获取的相同年份及同一卫星获取的不同年份（见表 3.1）夜间灯光影像的像元 DN 值异常波动（Elvidge 等，2009）。

对 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行重采样以后，图 3.3 统计了中国区域 1992-2013 年由不同传感器获取的 DMSP/OLS 夜间灯光影像像元 TDN 值，可以看出 TDN 值不具有明显的时间连续性，且像元值波动较大。因此，在利用 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行长时间序列研究时，需要对传感器进行相互校正，

使其具有可比性和连续性。

表 3.1 DMSP/OLS 夜间灯光影像卫星及年份

年份	F10	F12	F14	F15	F16	F18
1992	F101992					
1993	F101993					
1994	F101994	F121994				
1995		F121995				
1996		F121996				
1997		F121997	F141997			
1998		F121998	F141998			
1999		F121999	F141999			
2000			F142000	F152000		
2001			F142001	F152001		
2002			F142002	F152002		
2003			F142003	F152003		
2004				F152004	F162004	
2005				F152005	F162005	
2006				F152006	F162006	
2007				F152007	F162007	
2008					F162008	
2009					F162009	
2010						F182010
2011						F182011
2012						F182012
2013						F182013

资料来源：<https://www.ngdc.noaa.gov/>

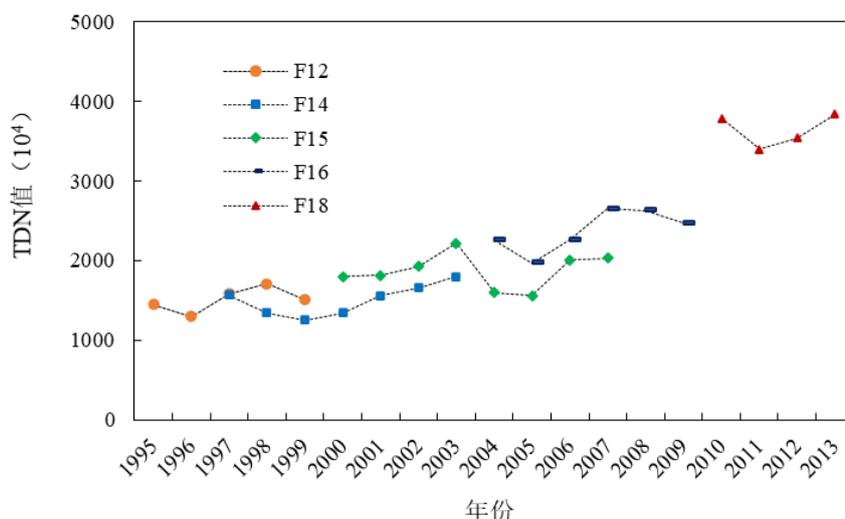


图 3.3 DMSP/OLS 不同传感器夜间灯光影像亮度值

为缓解夜间灯光影像像元值异常波动和像元饱和问题,很多学者提出了不同的校正方案。对像元值异常波动的校正,使用最为广泛的校正方法为 Elvidge 等(2009)提出的基于不变目标区域的校正方法,其原理是将不变目标区域影像作为参考影像,选取待校正影像与参考影像同一区域的像元值进行函数拟合,依据像元值之间的拟合函数进行校正,虽然该方法在一定程度上解决了像元值异常波动的问题,但像元饱和问题仍然没有得到解决。Zhao 等(2012)和 Zhang 等(2016)利用归一化植被指数(NDVI)等辅助数据对 DMSP/OLS 夜间灯光影像像元饱和问题进行了校正,但像元值异常波动问题却没能得到解决。为此,曹子阳等(2015)利用辐射定标的夜间灯光影像,结合不变目标区域法对中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行校正,该方法同时解决了像元值异常波动和像元饱和的问题。

因此,本文采用曹子阳等(2015)的校正方法对中国区域 1992-2013 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行校正。校正过程如下:以黑龙江省鹤岗市作为不变目标区域,以 F162006 辐射定标夜间灯光影像为参考影像,1992-2013 年 34 期稳定夜间灯光影像为待校正影像,分别使用一次函数、二次函数、三次函数、对数函数和幂函数对参考影像与待校正影像的像元值进行拟合,得到五种拟合模型的拟合优度(图 3.4),选取拟合优度最高的模型作为最终的校正模型。

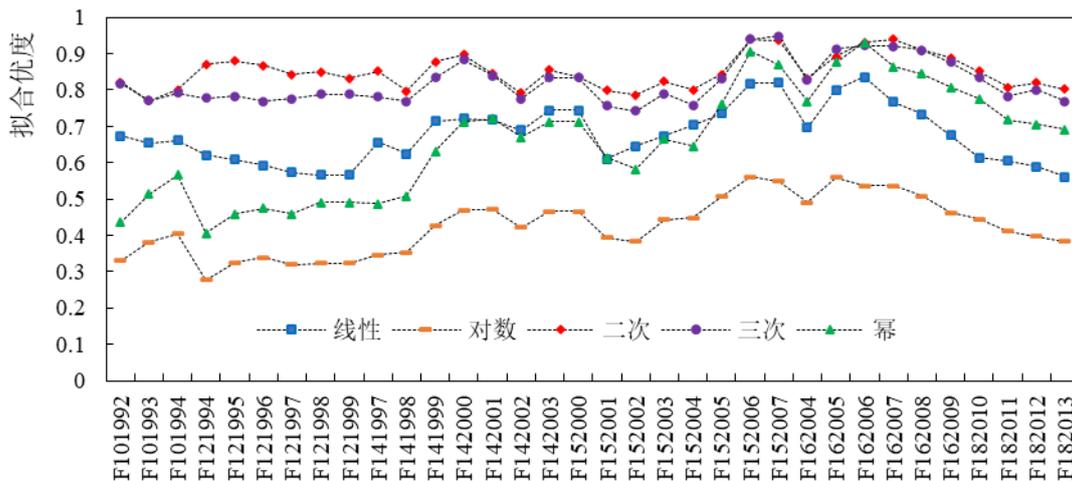


图 3.4 回归模型拟合优度

通过图 3.4 发现,二次函数拟合优度最高,因此选择二次函数作为相对传感

器校正的最优模型，模型形式如下：

$$DN_{cal} = a + b \times DN + c \times DN^2 \quad (3.1)$$

式中， DN 表示待校正影像像元 DN 值， DN_{cal} 表示校正后影像像元 DN 值， a 、 b 、 c 表示回归系数，回归结果见表 3.2。

表 3.2 不同传感器间的相互校正结果

传感器	R 方	显著性	a	b	c
F101992	0.822	0.000	7.987	-0.273	0.054
F101993	0.771	0.000	7.303	-0.170	0.058
F101994	0.801	0.000	8.173	-0.357	0.057
F121994	0.870	0.000	8.599	-0.395	0.062
F121995	0.880	0.000	10.014	-0.611	0.055
F121996	0.868	0.000	10.523	-0.722	0.059
F121997	0.844	0.000	12.161	-0.898	0.054
F121998	0.850	0.000	13.106	-1.022	0.053
F121999	0.832	0.000	13.106	-1.022	0.053
F141997	0.852	0.000	7.048	-0.028	0.050
F141998	0.798	0.000	8.560	-0.380	0.055
F141999	0.878	0.000	7.285	-0.061	0.047
F142000	0.898	0.000	8.779	-0.417	0.046
F142001	0.846	0.000	6.971	-0.078	0.038
F142002	0.792	0.000	6.137	0.191	0.031
F142003	0.856	0.000	5.536	0.378	0.029
F152000	0.836	0.000	6.536	0.298	0.033
F152001	0.798	0.000	9.811	-0.527	0.042
F152002	0.787	0.000	6.621	-0.065	0.039
F152003	0.824	0.000	7.606	-0.191	0.037
F152004	0.800	0.000	4.831	0.619	0.032
F152005	0.843	0.000	5.772	0.327	0.035
F152006	0.939	0.000	6.133	0.077	0.040
F152007	0.937	0.000	6.249	0.022	0.041
F162004	0.832	0.000	6.886	-0.064	0.037
F162005	0.892	0.000	5.350	0.116	0.042
F162006	0.932	0.000	5.262	0.169	0.037
F162007	0.939	0.000	7.520	-0.258	0.038
F162008	0.911	0.000	8.542	-0.421	0.040
F162009	0.889	0.000	10.348	-0.681	0.037
F182010	0.853	0.000	13.463	-1.015	0.040
F182011	0.809	0.000	9.375	-0.474	0.031
F182012	0.819	0.000	10.845	-0.650	0.031
F182013	0.803	0.000	11.909	-0.762	0.030

资料来源：利用公式（3.1）计算可得。

由表 3.2 可以看出，各年份的回归结果都非常显著，R 方均大于 0.75，即本文构建传感器校正模型具有较高的精度。

3.2.3 DMSP/OLS 夜间灯光影像连续性校正

通过上述对 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影像的校正可以削弱由灯光像元饱和引起的误差，但由于同一年影像是被不同的传感器所记录，并且相互之间的像元 DN 值存在差异，导致夜间灯光影像不连续。因此，需要对同一年不同传感器获取的夜间灯光影像利用公式（3.2）进行融合，形成 1992-2013 年年度 DMSP/OLS 夜间灯光影像。

$$DN_n^f = \begin{cases} 0, & DN_n^a = 0 | DN_n^b = 0 \\ \frac{(DN_n^a + DN_n^b)}{2}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3.2)$$

其中， DN_n^a 、 DN_n^b 表示第 n 年由传感器 a 和 b 记录的影像像元 DN 值（饱和校正后）， DN_n^f 表示第 n 年融合后影像像元 DN 值。

通过对同一年份不同传感器影像的年度融合，可以得到 1992-2013 年每年唯一的 DMSP/OLS 夜间灯光影像，接下来对融合后影像进行年际间连续性校正，具体如下：依据中国近几十年来社会经济状况（城镇化进程不断加快，GDP 迅猛增长），夜间灯光处于不断扩散和增强的状态（施开放，2017），本文假设卫星在前一年捕捉到的夜间灯光第二年不会消失，即认为后一年夜间灯光影像像元 DN 值应该大于或等于前一年影像像元 DN 值（Liu 等，2012），因此，利用 ArcGIS 中的栅格计算器，根据公式（3.3）对完成年度融合后 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行连续性校正。

$$DN_n = \begin{cases} 0, & DN_{n+1} = 0 \\ DN_{n-1}, & DN_{n+1} > 0 \cap DN_{n-1} > DN_n \\ DN_n, & \text{其他} \end{cases} \quad (3.3)$$

其中， DN_n 表示第 n 年经过年度融合后的影像像元 DN 值， DN_{n-1} 和 DN_{n+1} 分别表示前一年和后一年经过年度融合后的影像像元 DN 值。

通过以上对夜间灯光影像的初步处理与校正，可以得到具有可比性和连续性的 DMSP/OLS 尺度中国区域 1992-2013 年夜间灯光影像。

3.3 NPP/VIIRS 夜间灯光影像的处理与校正

3.3.1 投影转换、影像裁剪、重采样

为减少因网格变形所带来的影响,故也将 2012-2019 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据投影转换为兰伯特等面积投影,然后利用中国行政边界矢量图和 ArcGIS 中按掩膜提取工具从全球 NPP/VIIRS 夜间灯光影像中裁剪得到中国区域 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,并将其重采样为 1km 分辨率网格栅格。

3.3.2 负值消除与年度均值影像合成

由于 NPP/VIIRS 夜间灯光影像像元 DN 值存在负值,而 DMSP/OLS 夜间灯光影像不存在像元 DN 值为负值的情形,因此,可通过公式 (3.4) 对 2012 年月度 NPP-VIIRS 夜间影像中的负值用经过预处理后的 2012 年 DMSP/OLS 年度夜间灯光影像中的像元 DN 值予以代替。再按公式 (3.5) 求出 2012 年 NPP/VIIRS 年度均值影像,则 2013 年月度 NPP/VIIRS 影像中的负值用 2012 年年度 NPP/VIIRS 均值影像中的像元 DN 值代替,以此类推,2014-2019 各年 NPP/VIIRS 月度影像中的负值均以此方法进行消除,然后可得到 2012-2019 年 NPP/VIIRS 年度均值影像。

$$DN_{(npp2012,i)} = \begin{cases} DN_{(npp2012,i)} & DN_{(npp2012,i)} \geq 0 \\ DN_{dmsp2012} & DN_{(npp2012,i)} < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

其中, $DN_{(npp2012,i)}$ 表示 2012 年第*i*月 NPP-VIIRS 夜间灯光影像像元 DN 值, $DN_{dmsp2012}$ 表示经过预处理后 2012 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像像元 DN 值。

$$DN_{(npp,n)} = \frac{\sum_{i=1}^{12} DN_i}{12} \quad (3.5)$$

其中, $DN_{(npp,n)}$ 表示第*n*年 NPP/VIIRS 年度均值夜间灯光影像像元 DN 值。

以上处理虽然消除了 NPP/VIIRS 夜间灯光影像中的负值,但并没有消除极高值与不稳定光源,也没有进行影像间的可比性和连续性校正,因此需要进一步对年度 NPP/VIIRS 均值影像进行处理与校正。

3.3.3 相对辐射校正

有学者指出，NPP/VIIRS 夜间灯光影像在卫星上进行了校正处理（Elvidge 等，2013），但相对辐射差异并未彻底解决，因此，需要对合成的年度 NPP/VIIRS 均值影像进行相对辐射校正，使不同年份均值影像之间具有可比性（吴昫昭，2004）。

本文依据周翼等（2019）、胡为安等（2021）的研究，结合前文中介绍的不变目标区域法对年度 NPP/VIIRS 均值影像进行相对辐射校正。首先，通过统计 2012-2019 年中国地级市以上城市夜间灯光影像像元 DN 总值的变化幅度，选择 DN 总值变化幅度最小且 DN 值由低到高均匀分布的辽宁省抚顺市作为不变目标区域；然后对 2015 年和 2016 年年度 NPP/VIIRS 夜间灯光影像（去除了不稳定光源与背景值的影像）进行合成；再以合成的夜间灯光影像作为参考影像，各年度 NPP/VIIRS 均值夜间灯光影像作为待校正影像，利用抚顺市辖区的矢量文件对参考影像进行提取，得到该范围内的参考影像与待校正影像；最后，利用一次函数、二次函数、三次函数、指数函数和幂函数对参考影像与待校正影像的像元 DN 值进行回归拟合，得到五种回归函数的拟合优度，结果发现幂函数拟合优度最高，因此选择幂函数作为相对辐射校正的最优模型，模型参数见表 3.3。

表 3.3 相对辐射校正模型参数

年份	R 方	显著性	a	b
2012	0.825	0.000	1.211	0.807
2013	0.839	0.000	1.288	0.834
2014	0.899	0.000	0.895	0.939
2015	0.915	0.000	0.904	0.907
2016	0.924	0.000	1.040	0.884
2017	0.923	0.000	0.810	0.978
2018	0.900	0.000	0.898	0.952
2019	0.898	0.000	0.874	0.963

利用公式（3.6）和表 3.3 中的模型参数对 2012-2019 年 NPP/VIIRS 年度均值影像进行相对辐射校正，使各年度均值影像之间具有可比性。

$$DN_{rrc} = a \times DN^b \quad (3.6)$$

其中， DN_{rrc} 表示经过相对辐射校正后影像像元 DN 值，DN 表示待校正影

像像元 DN 值， a 、 b 表示相对辐射校正模型参数。

3.3.4 不稳定光源和背景噪声的消除

本文依据两期(2015 和 2016 年)去除了不稳定光源和背景噪声的 NPP/VIIRS 夜间灯光影像，对其他年份影像进行去背景和降噪处理。借鉴胡为安等(2021)的研究方法，首先对上述两期夜间灯光影像的进行二值化处理，然后相乘得到合成二值影像，再用合成二值影像分别与 2015 和 2016 年的均值影像相乘，可得到消除影像中背景值和不稳定光源的两期稳定可靠的年度均值影像。基于此方法，以合成二值影像为基准，对其他年份 NPP/VIIRS 年度均值影像中的不稳定光源和背景噪声进行消除，同样对各年份均值影像进行二值化处理，利用公式(3.7)和(3.8)分别对 2012-2015 年和 2016-2019 年年度均值影像中的不稳定光源进行消除，然后将消除不稳定光源的影像与相应年份年度均值影像相乘，即可获得去除不稳定光源和背景噪声的夜间灯光影像。

$$DN_m = \begin{cases} 0, & DN_i = 0 \text{ 且 } DN_{i+1} = 0 \\ 1, & DN_i = 1 \text{ 或 } DN_{i+1} = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$DN_m = \begin{cases} 0, & DN_{i-1} = 0 \text{ 且 } DN_i = 0 \\ 1, & DN_{i-1} = 1 \text{ 或 } DN_i = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

其中， DN_m 为待校正年份均值影像中的稳定光源， DN_i 为待校正年份影像的稳定光源， DN_{i+1} 和 DN_{i-1} 分别为待校正年份后一年和前一年二值影像的稳定光源。

3.3.5 极高值消除与连续性校正

由前文可知，NPP/VIIRS 夜间灯光影像像元 DN 值并不存在上限，因此，需要对影像中的极高值予以消除，本文采用降值法对极高值进行消除。根据中国社会经济发展的现状，在 2012-2019 年之间，中国 GDP 总量最大的省份一直为广东省，因此，本文假设其他地区的灯光最大亮度值应不高于广东省的最大灯光亮度值。具体处理如下：利用广东省矢量文件对 NPP/VIIRS 年度夜间灯光影像进行掩膜，得到 2012-2019 年广东省最大亮度灯光值分别为 189.424、204.532、217.14、

240.514、260.427、277.573、306.589 和 307.874。再将全国灯光亮度值大于该年广东省最大灯光亮度值视为极高值，对其进行消除。

消除了极高值的 NPP/VIIRS 年度均值影像还存在年际间影像不连续的问题，需要进一步处理，依据前文 DMSP/OLS 夜间灯光影像连续性校正的原则，以 2019 年年度均值夜间灯光影像为基准，利用公式（3.9）对 2012-2019 年 NPP/VIIRS 年度均值影像进行连续性校正。

$$DN = \begin{cases} DN_k, & DN_k \leq DN_{k+1} \\ DN_{k+1}, & DN_k > DN_{k+1} \end{cases} \quad (3.9)$$

其中， DN 为连续性校正后的年度夜间灯光影像像元 DN 值， DN_k 为待校正的年度夜间灯光影像像元 DN 值， DN_{k+1} 为后一年经过连续性校正的年度夜间灯光影像像元 DN 值。

3.4 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像融合校正

依据有关学者（吕倩和刘海滨，2020；杜海波，2021）的研究，本文分别统计了 2012 年和 2013 年中国县级行政单元 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 年度夜间灯光影像像元 DN 总值（TDN，Total Digital Number），以 DMSP/OLS 夜间灯光影像为参考影像，以 NPP/VIIRS 夜间灯光影像为校正影像，构建回归关系。两类夜间灯光影像 TDN 值回归的各项参数及拟合优度见表 3.4。

表 3.4 2012 年和 2013 年 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 拟合参数值

拟合函数	R 方	a	b1	b2	b3
线性	0.935	3777.900	11.795		
对数	0.145	38296.737	8629.381		
二次	0.939	4842.575	10.217	0.000018180	
三次	0.928	5402.078	9.147	0.000000000	0.000000001
幂	0.734	97.946	0.745		

可以发现，二次函数的拟合优度为 0.939，高于其他模型，因此选择二次函数作为两类夜间灯光影像相互融合的校正模型，校正方程如公式（3.10）。

$$f(x) = 0.00001818x^2 + 10.217x + 4842.575 \quad (3.10)$$

其中， $f(x)$ 为 2012-2013 年 DMSP/OLS 年度夜间灯光影像 TDN 值， x 为 2012-2013 年 NPP/VIIRS 年度夜间灯光影像 TDN 值。

最后,基于所建立的校正模型对 2014-2019 年 NPP/VIIRS 夜间灯光影像进行 DMSP/OLS 尺度时间序列连续性校正,得到 2014-2019 年 DMSP-OLS 尺度夜间灯光影像,再与前面已经校正好的 1992-2013 年 DMSP-OLS 夜间灯光影像进行合并,就可得到中国区域 1992-2019 年 DMSP-OLS 尺度长时间序列夜间灯光影像(图 3.5)。

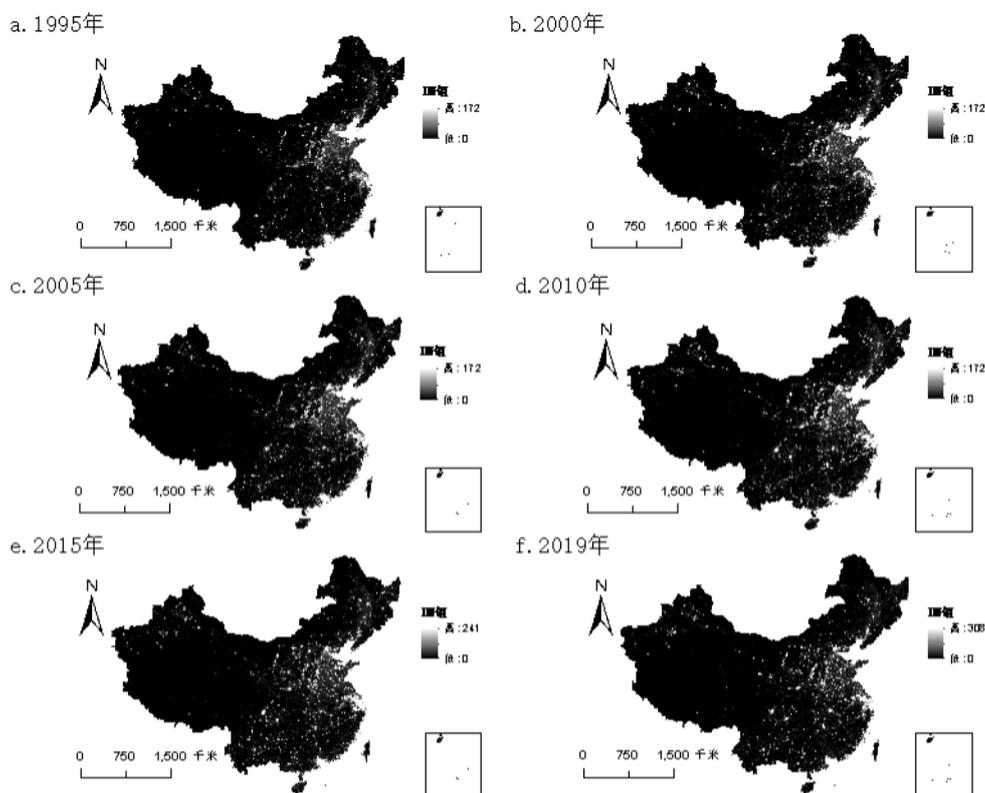


图 3.5 预处理后中国区域夜间灯光图像

3.5 兰西城市群长时间序列夜间灯光影像

基于 ArcGIS 按掩膜提取工具,利用兰西城市群区域矢量图对校正后的中国区域 1992-2019 年 DMSP/OLS 尺度夜间灯光影像进行裁剪,可得到兰西城市群 1992-2019 年 DMSP/OLS 尺度长时间序列夜间灯光影像(图 3.6),考虑兰西城市群社会经济数据的可获得性,本文选择 1995-2019 年 24 期夜间灯光影像作为后续研究的数据集。

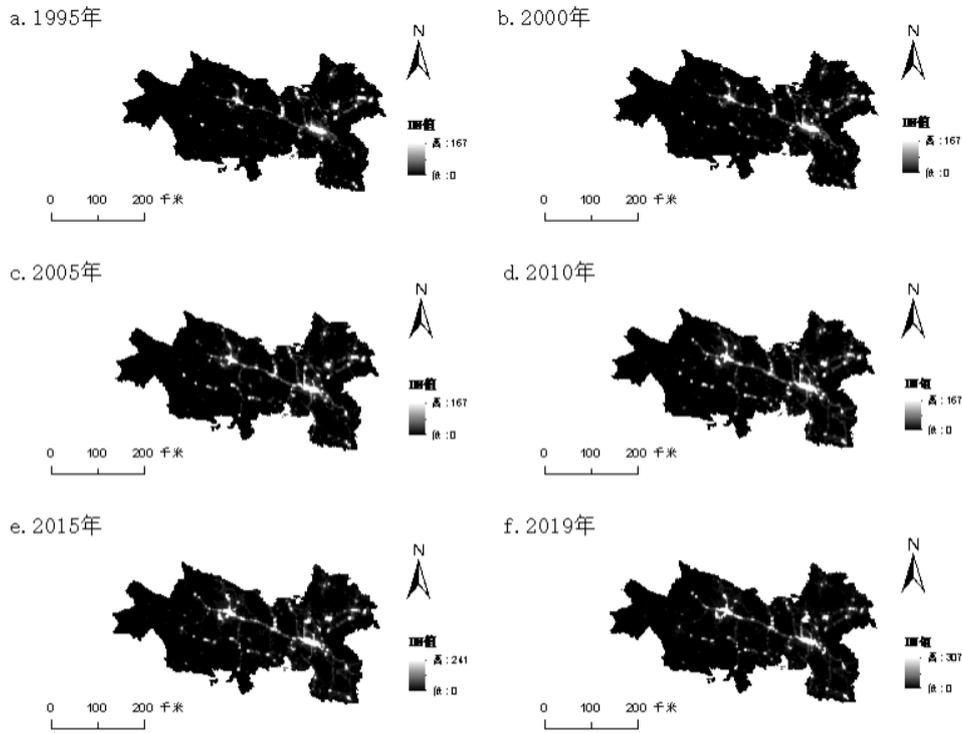


图 3.6 校正后兰西城市群区域夜间灯光影像

3.6 夜间灯光影像校正评价

如图 3.7 所示，1995-2019 年校正后的中国区域和兰西城市群夜间灯光影像像元 TDN 值在长时间序列中均呈现出良好的连续性，且 TDN 值逐年递增，符合中国社会经济发展的现状。

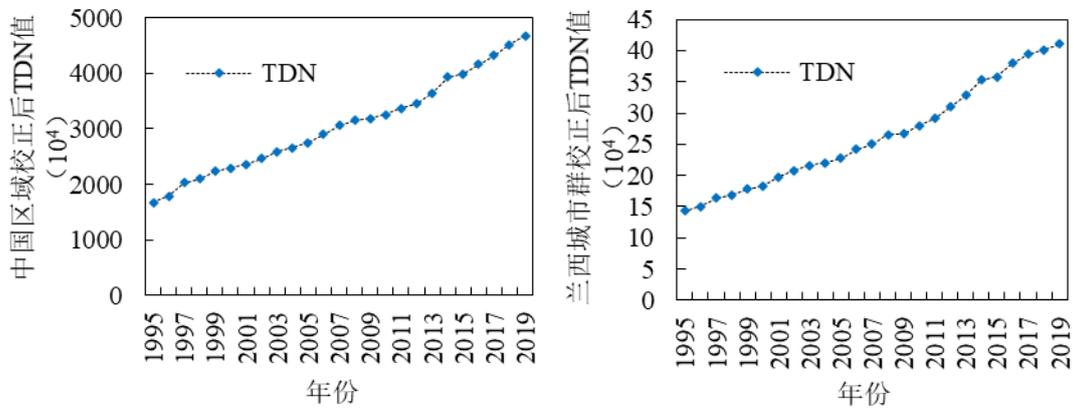


图 3.7 1995-2019 年校正后夜间灯光影像像元 TDN 值

在之前的相关研究中，有学者指出（王琪等，2013；周翼等，2019），在中国省级空间尺度上 GDP 与 TDN 值存在着线性相关关系。因此，本文选择 2005 和 2019 年作为样本年，基于校正后的夜间灯光影像，利用 ArcGIS 分别统计了中国各省份（不包含台湾省）在样本年的 TDN 值，与各省在相应年份的 GDP 值进行线性拟合，结果如图 3.8 所示。

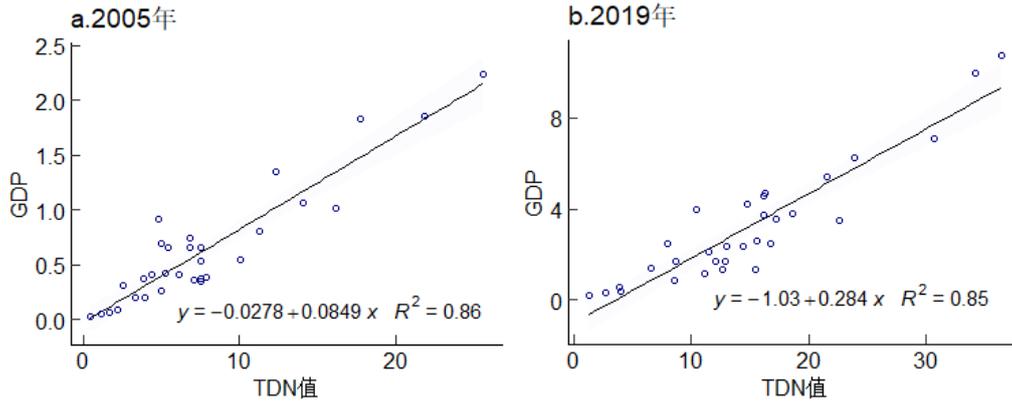


图 3.8 2005 年和 2019 年分省份 TDN 值 (10^6) 与 GDP (10^8 元) 拟合结果

可以发现，2005 和 2019 年在省级尺度上 TDN 值对 GDP 的拟合优度分别为 0.86 和 0.85，说明 TDN 值对 GDP 具有较好的拟合能力，进一步验证了本文校正的夜间灯光影像具有较高的可信度，也为后续研究提供了科学的数据支撑。

3.7 本章小结

本章对 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 时间序列夜间灯光影像的处理、校正与相互融合流程进行了详细的阐释，并完成了中国区域 1992-2019 年 DMSP/OLS 尺度夜间灯光影像的校正工作，使长时间序列夜间灯光影像具备了连续性和可比性；此外，本章在校正的中国区域夜间灯光影像基础上，提取了研究区的夜间灯光影像，并对本文所校正的夜间灯光影像进行了评价。

4 兰西城市群能源消费碳排放空间化模拟

基于能源消费统计数据 and 第 3 章校正的 1995-2019 年中国区域 DMSP/OLS 尺度夜间灯光影像,本章将构建甘肃和青海省省级能源消费碳排放统计值与夜间灯光影像 TDN 值的拟合模型,然后利用所构建的拟合模型模拟兰西城市群的能源消费碳排放量并进行空间化分析。

4.1 相关数据来源

能源消费数据来源于 1993—2020 年《中国能源统计年鉴》,社会经济数据来源于 2006—2020 年《中国县域统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《甘肃省统计年鉴》、《青海省统计年鉴》、《兰州市统计年鉴》、《西宁市统计年鉴》、《白银市统计年鉴》、《海东市统计年鉴》,部分缺失数据来源于相应省市国民经济与社会发展统计公报。

4.2 能源消费碳排放计算

4.2.1 能源消费碳排放计算方法

本文基于《中国能源统计年鉴》提供的甘肃省和青海省 1995-2019 年共 24 年的能源消费统计数据,采用联合国政府间气候变化专委会(IPCC)提供的《2006 年国家温室气体排放清单指南》确定的各类能源碳排放系数来测算甘肃省和青海省的能源消费碳排放量,具体参考苏泳娴等(2013)计算碳排放的方法,选取了 9 种常见能源测算其碳排放量,测算公式如下:

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{n=1}^9 K_n \times E_n \quad (4.1)$$

其中, E_n 表示甘肃和青海省当年第 n 种能源消费量 (10⁴t 标准煤), K_n 为第 n 种能源的 CO₂ 排放系数 (10⁴t 碳) / (10⁴t 标准煤)。本文所使用 9 种能源消耗折算标准煤系数和 CO₂ 排放系数见表 4.1。

表 4.1 能源消耗折算标准煤系数和碳排放系数

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
换算成标准煤 (t 标准煤/t)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.33	0.345
碳排放系数 (10 ⁴ t 碳/10 ⁴ t 标准煤)	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483	0.272

4.2.2 能源消费碳排放测算结果

基于能源消费量数据,根据公式(4.1)和表4.1中的系数,计算得到甘肃省和青海省1995-2019年的能源消耗碳排放量统计值及其增长速度(见图4.1)。可以看出,虽然甘肃省的能源消耗碳排放量远远大于青海省,但两省在1995-2019年间碳排放量的变化趋势大致相同,总体上都处于上升趋势。甘、青两省的能源消费碳排放量分别从1995年的 $83.07 \times 10^6 \text{t}$ 和 $13.70 \times 10^6 \text{t}$ 上升到2019年的 $216.98 \times 10^6 \text{t}$ 和 $57.57 \times 10^6 \text{t}$,24年分别上升了 $133.91 \times 10^6 \text{t}$ 和 $48.87 \times 10^6 \text{t}$,分别增长了2.61和4.2倍,年平均增长速度分别为4.08%和6.16%。

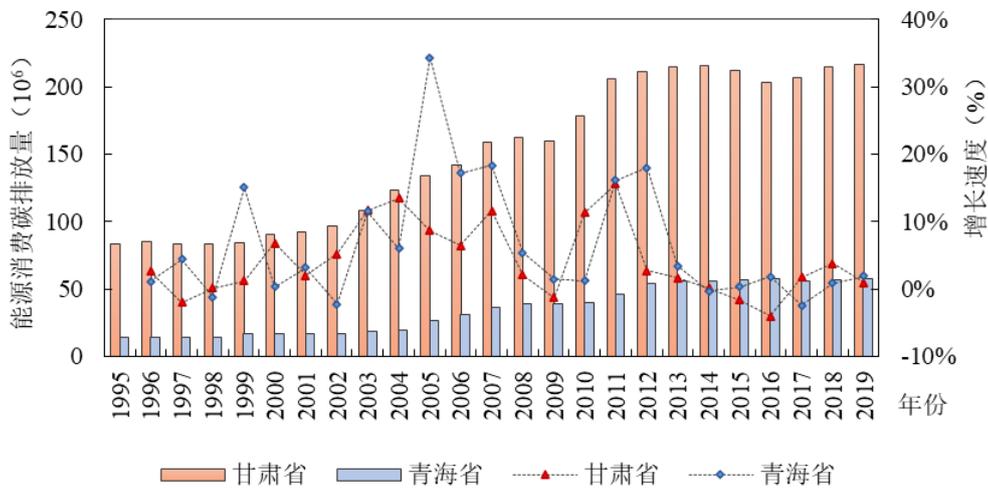


图 4.1 1995-2019 年甘肃省和青海省能源消费碳排放量及增长率

虽然,甘、青两省的能源消费碳排放总体上都处于上升态势,但不同时间段的增速存在较大差异,观察数据特征发现甘、青两省碳排放阶段特征明显,均呈现由增长缓慢到近似线性的快速增长,后达到拐点趋势逐渐变缓的特征。具体来看,甘肃省的能源消费碳排放在1995-2001年增速相对较低,6年上升了 $9.18 \times 10^6 \text{t}$;

在 2001-2011 年快速上升，其中在 2009 年出现了回落且增长率为负值的情形，但之后依旧快速攀升，10 年共上升了 $119.33 \times 10^6 \text{t}$ ；在 2011-2014 年缓慢上升，并在 2014 年出现了第一个峰值，为 $215.47 \times 10^6 \text{t}$ ；在 2014-2016 年出现了下降趋势，且 2015、2016 年的增长率为负值，说明这段时间减排效果明显；2016-2019 年处于缓慢上升，在 2019 年达到峰值，为 $216.98 \times 10^6 \text{t}$ 。而青海省能源消费碳排放量在 1995-2014 年增速也相对较低，9 年共上升了 $5.99 \times 10^6 \text{t}$ ；在 2004-2013 年上升最快，9 年上升了 $36.62 \times 10^6 \text{t}$ ；在 2013-2019 年处于波动起伏状态，期间出现了两个明显的峰值，分别为 2016 年的 $57.37 \times 10^6 \text{t}$ 和 2019 年的 $57.57 \times 10^6 \text{t}$ 。

4.3 兰西城市群县域能源消费碳排放模拟

4.3.1 拟合模型的构建

基于预处理后的中国区域 DMSP/OLS 尺度的夜间灯光影像，利用 ArcGIS 分区统计工具，统计了 1995-2019 年甘肃省和青海省省级行政单元内的夜间灯光影像像元 DN 总值 (TDN)，并绘制曲线变化图 (见图 4.2)，从图中可以看出，甘、青两省的 TDN 值呈逐年递增态势。

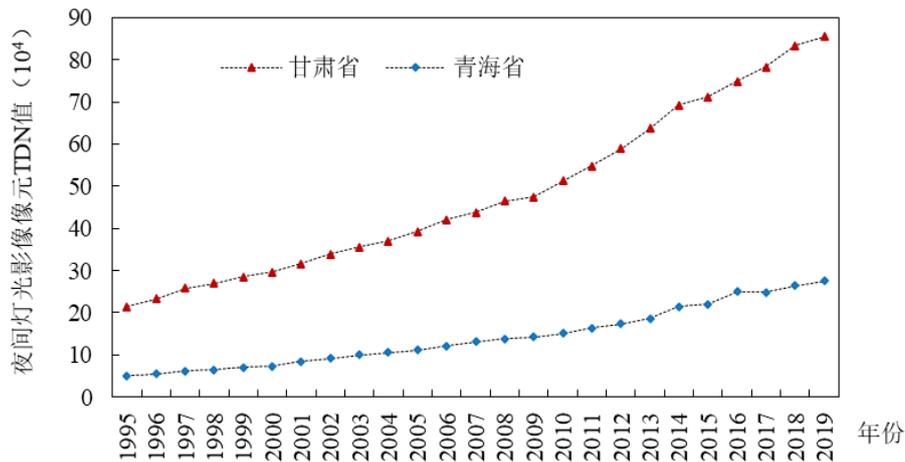


图 4.2 1995-2019 年甘肃省和青海省夜间灯光影像像元 TDN 值

对比图 4.1 和图 4.2，可以发现，甘、青两省的能源消费碳排放统计值与夜间灯光影像像元 TDN 值总体上都处于上升态势，均表现出时间序列上的一致性。进一步计算了甘、青两省能源消费碳排放统计值与夜间灯光影像像元 TDN 值之

间的相关系数，分别为 0.94 和 0.95，均呈现较高的相关关系，说明二者存在某种特定的联系，也进一步证实了利用夜间灯光影像可以较好的模拟能源消费碳排放量，这与相关学者（Doll 等，2000；于博等，2020；宋珺等，2021；牛亚文等，2021）的研究结果一致。

由于同一地区夜间灯光总值（TDN）与能源消费碳排放统计值具有较好的相关性（苏泳娴等，2013；顾羊羊，2017；武娜等，2019），本文假设夜间灯光影像 TDN 值与能源消费碳排放统计值存在线性相关性，即 TDN 值越大，碳排放统计值越大，且省级和县级尺度上存在与像元尺度上一致的相关关系（吕倩和刘海滨，2020）。利用 1995-2019 年甘肃省和青海省的夜间灯光影像像元 TDN 值与前文测算所得甘肃省和青海省相应年份的能源消费碳排放统计值构建碳排放模拟模型，考虑降尺度到栅格单元的精度问题（杜海波等，2021），本文采用无截距项的线性模型，如公式（4.2）所示：

$$CS_i = a \times TDN_i \quad (4.2)$$

其中， CS_i 为*i*年碳排放模拟值， TDN_i 为校正后相应区域*i*年所有稳定灯光影像像元DN值总和， a 为回归系数，甘肃、青海两省 1995-2019 年碳排放模拟结果如图 4.3 所示。

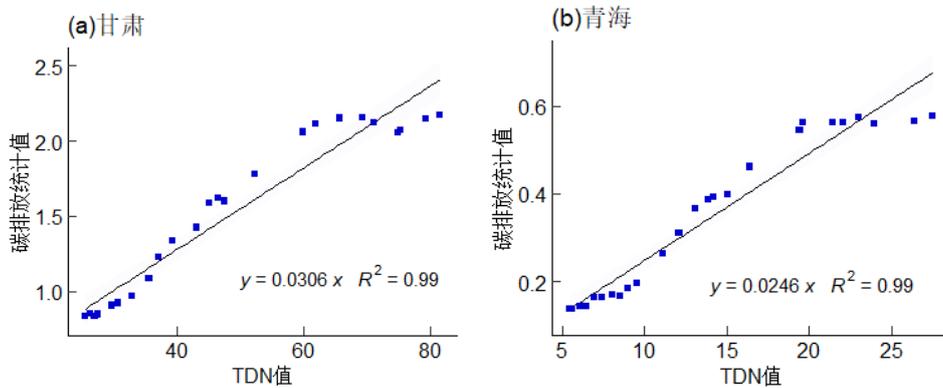


图 4.3 1995-2019 年甘肃 (a) 和青海 (b) 碳排放统计值 (10^5 t) 与 TDN 值 (10^5) 拟合结果

由图 4.3 中的拟合结果可知，夜间灯光影像 TDN 值与能源消费碳排放统计值具有良好的线性相关性，甘、青两省的拟合优度均高达 0.99，因此，利用夜间灯光影像模拟碳排放的假设前提是成立的，二者存在正向线性相关关系。

4.3.2 拟合精度检验

基于图 4.3 中的拟合方程计算得到甘、青两省的能源消费碳排放模拟值，为确保碳排放模拟值的精确性，进一步计算了甘、青两省能源消费碳排放统计值与模拟值之和的相对误差（表 4.2），进行模拟结果的精度检验。

表 4.2 甘肃、青海两省 1995-2019 年碳排放量模拟精度检验表

年份	统计值	模拟值	相对误差	年份	统计值	模拟值	相对误差
1995	96.78	85.48	-20.90%	2008	200.76	189.61	-12.13%
1996	99.10	92.44	-16.58%	2009	199.26	186.73	-9.25%
1997	98.00	94.13	-5.35%	2010	217.94	193.95	-12.00%
1998	97.97	98.39	-1.37%	2011	252.17	229.09	-18.52%
1999	101.17	104.34	2.94%	2012	266.04	249.11	-14.79%
2000	106.96	108.79	0.18%	2013	271.42	252.57	-9.27%
2001	109.29	115.66	5.17%	2014	271.63	264.90	-1.54%
2002	113.68	122.27	6.99%	2015	268.32	272.14	2.80%
2003	126.93	128.86	0.46%	2016	260.92	271.51	12.75%
2004	142.67	135.53	-7.74%	2017	263.03	272.71	15.72%
2005	160.14	147.78	-9.97%	2018	271.36	285.83	18.72%
2006	173.34	158.52	-9.53%	2019	274.55	294.30	20.68%
2007	195.50	174.34	-15.48%				

由表 4.2 可以发现，利用图 4.3 中拟合方程计算的碳排放模拟值与能源消费碳排放统计值的相对误差最小的为 2000 年的 0.18%，最大的为 1995 年的 -20.90%，其中，有 14 个年份的相对误差小于 10%，相对误差均值为 10.03%，小于一些学者（苏泳娴等，2013；顾羊羊，2017；吕倩和刘海滨，2019，2020）的研究结果。

4.3.3 修正模拟单位像元碳排放值

受回归函数误差的影响，能源消费碳排放统计值与模拟值并不完全相同。为了减小相对误差，进一步提高碳排放模拟的精度，同时保证空间统计单元的一致，本文采用省级碳排放零误差法对单位像元尺度上的碳排放模拟值进行修正（顾羊羊，2017）。参考有关学者（武娜等，2019）的研究，构建夜间灯光影像模拟的碳排放格网模型比例系数，然后将夜间灯光数据模拟出的初始碳排放值乘以相应的比例系数，使能源消耗碳排放值与模型统计值相同，最终得到空间化碳排放数据。其计算方法如下：

$$K_n = \frac{CE_n}{CS_n} \tag{4.3}$$

$$C_{s,n,k} = C_{x,n,k} \times K_n \tag{4.4}$$

式中, K_n 为第 n 年能源消费碳排放统计值与碳排放模拟值的比例系数, CE_n 为第 n 年能源消费碳排放统计值, CS_n 为第 n 年碳排放模拟值, $C_{s,n,k}$ 为第 n 年第 k 个栅格上分布的碳排放量, $C_{x,n,k}$ 为第 k 个栅格单元上分布的碳排放模拟值。

本文根据图 4.3 和公式 (4.2) - (4.4), 基于夜间灯光影像像元 TDN 值和能源消费碳排放统计值, 使用 ArcGIS 软件对兰西城市群县域 1995-2019 年的碳排放进行模拟并修正, 得到兰西城市群县域碳排放的空间化数据(如图 4.4 所示)。

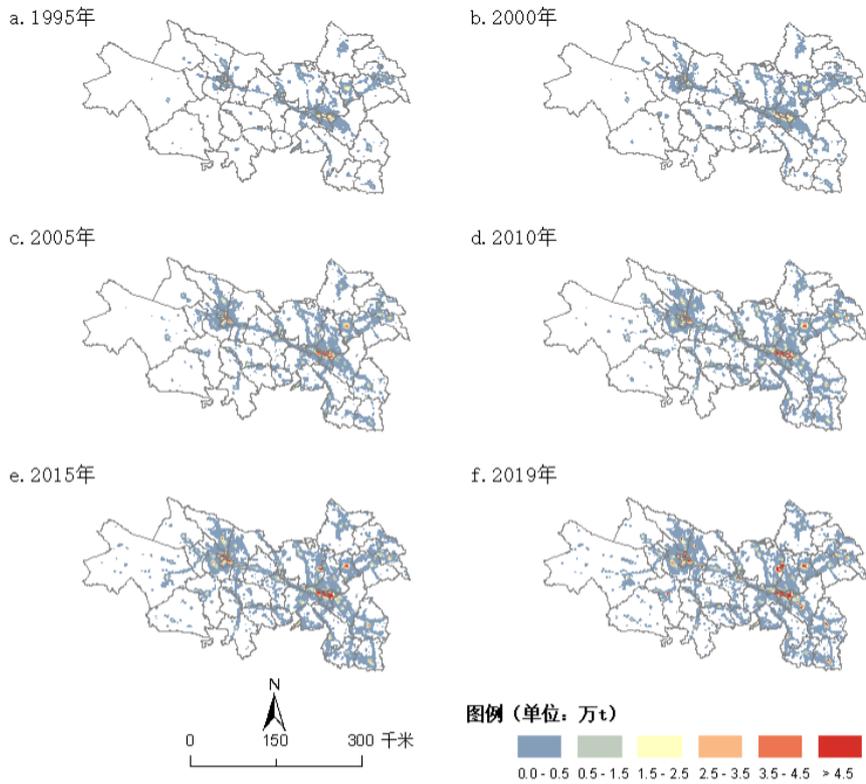


图 4.4 1995-2019 年兰西城市群县域碳排放空间化模拟结果

图 4.4 可以直观展示兰西城市群县域碳排放的高低以及不同县区的空间差异性, 1995-2019 年兰西城市群碳排放围绕兰州市和西宁市呈向心聚集与外围扩散并存态势。具体来看, 1995-2000 年间, 兰西城市群碳排放整体处于较低水平, 且分布范围较小; 2005 年以后, 兰州与西宁碳排放不断串联并向周边扩散, 白

银的碳排放扩散明显；2019年，出现3个明显的高碳排放区，分布在兰州市、西宁市和白银市。

4.4 兰西城市群县域能源消费量模拟

考虑到能源强度对能源消费碳排放具有重要的驱动作用（苏旭冉和蔺雪芹，2019；于博等，2020；韩媛媛等，2020；杜海波等，2021；王兴民等，2021），而我国县域行政单元的能源消费量数据缺失，本文采用校正后的夜间灯光影像和《中国能源统计年鉴》中甘肃、青海两省的能源消费数据，对兰西城市群县域的能源消费量进行模拟，并对模拟结果进行了修正，其模拟方法与4.2节中能源消费碳排放的模拟方法一致，拟合方程如图4.5所示，模拟结果将用于第5章碳排放影响因素指标构建中。

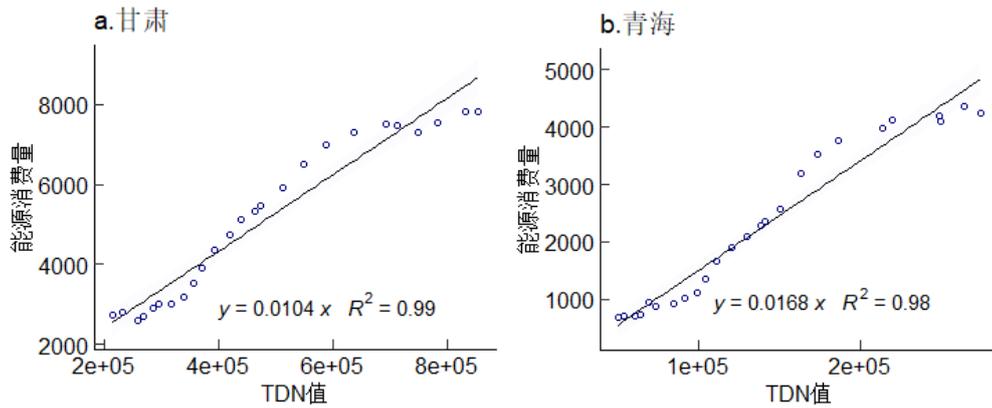


图 4.5 甘肃 (a) 青海 (b) 能与消费量 ($10^4 t$) 与 TDN 拟合

4.5 本章小结

本章根据能源消费统计数据计算了1995-2019年甘肃和青海省的碳排放量统计值，发现两省的能源消费碳排放量整体上处于逐年递增的趋势，且甘肃省的碳排放量是青海省的4倍左右。然后基于校正的夜间灯光影像，统计了甘肃和青海省的夜间灯光影像TDN值，并建立TDN值与碳排放统计值之间的拟合模型，利用拟合模型分别模拟了甘肃和青海的碳排放值，平均相对误差为10.03%。再利用拟合模型模拟了兰西城市群的碳排放量，为了提高精度，建立了省级零误差修正模型，从单位像元上修正了模拟结果，并对修正结果进行空间化。

5 兰西城市群县域碳排放时空分布特征及影响因素研究

基于第 4 章兰西城市群能源消费排放的空间化模拟结果, 本章将统计 1995-2019 年兰西城市群的能源消费碳排放量, 对其时间序列趋势进行描述分析, 并对兰西城市群县域碳排放的空间分布特征进行研究, 进一步利用地理探测器对兰西城市群 2005、2010、2015 和 2019 年 4 个样本年份县域碳排放空间分异的影响因子进行探测。

5.1 兰西城市群碳排放时间序列变化

5.1.1 碳排放总量变化趋势

对兰西城市群整体碳排放情况进行分析, 如图 5.1 所示, 1995-2019 年碳排放总量整体呈增长趋势, 碳排放量从 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 上升到 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$, 24 年上升了 $80.38 \times 10^6 \text{t}$, 增长了 3.22 倍; 增长速度整体呈先上升后下降的趋势, 年平均增长速度为 4.79%。

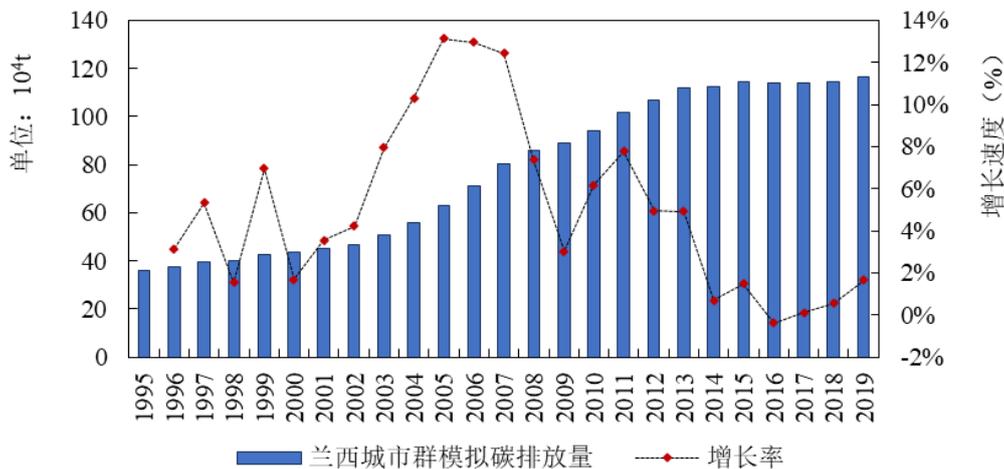


图 5.1 1995-2019 年兰西城市群整体碳排放及增长情况

虽然碳排放总量呈增长趋势, 但增长速度表现出明显的阶段特征, 根据碳排放量及其增长速度的变化趋势, 将 1995-2019 年碳排放变化情况分为以下三个阶段进行分析: 第一阶段 (1995-2002 年): 碳排放量处于缓慢增长阶段, 碳排放增

长速度呈波动起伏状态。碳排放量由 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 增长为 2002 年的 $46.92 \times 10^6 \text{t}$, 7 年间碳排放总量共增长 $10.69 \times 10^6 \text{t}$, 增长了 1.30 倍, 碳排放年均增长速度为 3.15%。在这一时期, 甘、青两省能源消费量的增长较为缓慢, 因此, 能源消费碳排放也处于缓慢增长。

第二阶段 (2002-2013 年): 碳排放量处于快速增长阶段, 碳排放量从 2002 年的 $46.92 \times 10^6 \text{t}$ 上升为 2013 年的 $111.88 \times 10^6 \text{t}$, 11 年间碳排放总量共增长 $64.96 \times 10^6 \text{t}$, 增长了 2.38 倍。在此阶段, 碳排放增长速度经历了“M”型变化过程, 年均增长速度为 7.88%, 具体来看, 2002-2005 年, 增长速度呈快速上升趋势, 由 2002 年的 4.23% 上升为 2005 年的 13.13%, 年平均增长速度为 8.86%; 2005-2009 年碳排放增长速度出现大幅下降, 由 2005 年的 13.13% 下降为 2009 年的 3.03%, 年均增长速度为 9.7%; 2009-2011 年增长速度处上升状态, 由 2009 年的 3.03% 上升为 2011 年的 7.77%, 年均增长速度为 5.64%; 2011-2013 年增长速度呈下降状态, 由 2011 年的 7.77% 下降为 2013 年的 4.92%, 年均增长速度为 5.87%。导致此阶段碳排放快速增长可能的原因为, 区域内经济的快速增长、城镇化进程的加快以及承接东部产业转移等。

第三阶段 (2013-2019 年): 碳排放量基本维持在同一水平, 碳排放增长速度相对较低。在此期间, 碳排放量出现了两个明显的峰值, 分别为 2015 年的 $114.34 \times 10^6 \text{t}$ 和 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$; 增长速度呈先下降后上升的趋势, 年均增长速度为 1.28%, 增长速度从 2013 年的 4.92% 下降为 2016 年的 -0.37%, 之后处于缓慢低增长状态, 2019 年增长速度为 1.67%。由于能源使用效率的提升、清洁能源的开发以及节能减排政策的落实, 使得此阶段能源消费碳排放增速持续放缓。

5.1.2 县域碳排放量变化趋势

1995-2019 年间, 兰西城市群县域尺度碳排放呈增长趋势, 各县区的增长速度不尽相同, 如图 5.2 所示。碳排放 (10^4t) 区间由 1995 年的 [13.4, 425.4] 增长为 2019 年的 [103.2, 1051.4], 最低县域 (海南州贵南县) 和最高县域 (兰州市城关区) 分别增长 8.46 倍和 2.47 倍, 分别增长 $48.92 \times 10^4 \text{t}$ 和 $625.95 \times 10^4 \text{t}$ 。

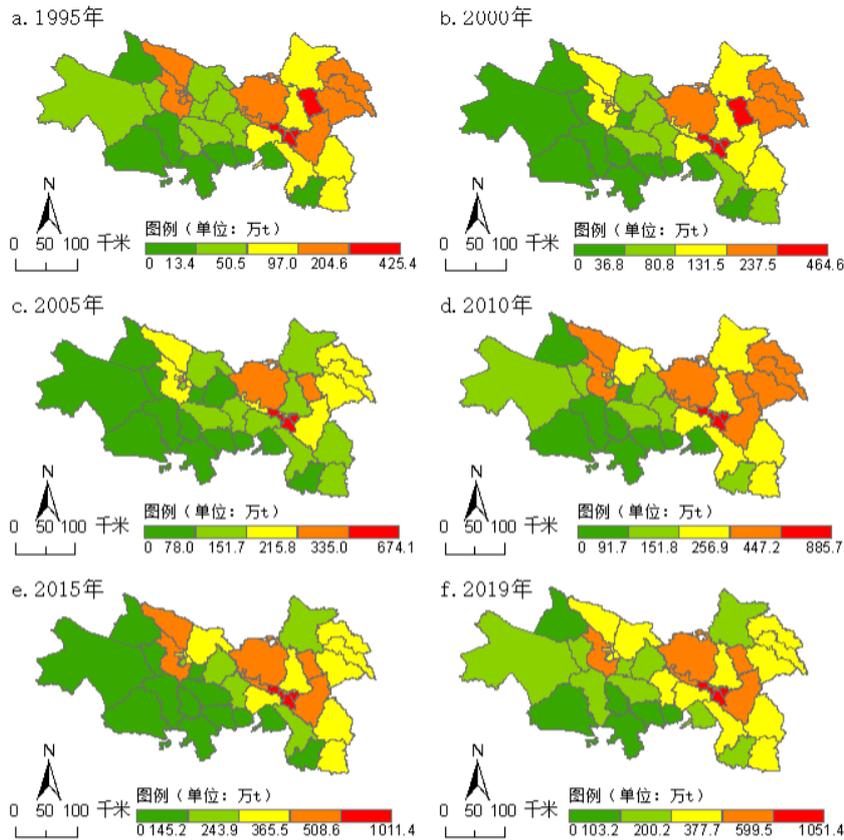


图 5.2 1995-2019 年兰西城市群县域碳排放量空间分布

具体来看，1995 年高碳排区域主要集中在甘肃兰州市主城区（西固区、城关区、七里河区）和白银市白银区，次高区域分布在西宁市县区、兰州市周围县域、白银平川区和靖远县，青海省县区碳排放处于较低水平，整体呈现东高西低的分布特征。2000 年，由于甘肃所属县区碳排放体量高于青海省所属县区，尽管增速相差不大，但高碳排区域还是集中在兰州市主城区和白银区，次高区有平川区、靖远县和永登县，东高西低的分布特征也更加明显。2005 年，由于兰州市区的碳排放增长速度远高于同期其他县区，导致碳排放最高区域一直集中在兰州市主城区，次高区为白银区和永登县，但其他县域碳排放都处于增长状态。

2010-2019 年，高碳排区域一直集中在兰州市主城区，次高区变化较大。在 2010 年，次高区有西宁市主城区（城北区、城西区、城东区 and 城中区）、湟中县和大通县，兰州市红古区、永登县和榆中县，白银市白银区、平川区和靖远县；同时，碳排放增长较为明显的县区有互助县、皋兰县、永靖县、安定区、陇西县、临洮县和景泰县，这些县域多围绕在兰州市和西宁市周围，表明二者碳排放具有区域溢出效应。2015 年，兰西城市群县区的碳排放增速较之前明显下降，而受

到碳排放基数的影响，除了西宁市县区以外，甘肃省县域碳排放明显高于青海省县域。2019年，碳排放围绕兰州市主城区和西宁市主城区逐渐分层分布的趋势尤为明显，就整个区域而言，虽然东高西低态势依然明显，但东西分层差异有所减小（其中海东市平安区、乐都区和民和县变化较为明显）。

以上结果表明，人口数量较多和经济发展水平较高的县区碳排放量较高，反之则较低。由于人口数量越多、经济发展水平越高的县区对能源消费量也越高，因此能源消费碳排放量也越高。

5.1.3 碳排放强度变化趋势

如图 5.3，在碳排放强度上，2005-2019 年，兰西城市群绝大多数县区呈持续下降的趋势，碳排放强度（t/万元）区间由 2005 年的[4.2,9.7]下降为 2019 年的[1.6,5.0]。其中，碳排放强度下降幅度最大的 5 个县区为临夏市、城西区、城东区、化隆县和七里河区，分别为 83.2%、82.5%、78.7%、75.5%和 74.9%；碳排放强度下降最多的 5 个县区为化隆县、榆中县、安定区、临夏市和临洮县，分别下降了 6.6t、6.5t、6.2t、6.1t 和 6.0t。而海晏县、尖扎县、贵南县、大通县、共和县以及渭源县共 6 个县的碳排放强度呈先上升后下降的趋势，分别在 2010 年或 2015 年达到峰值，下降速度比较缓慢。

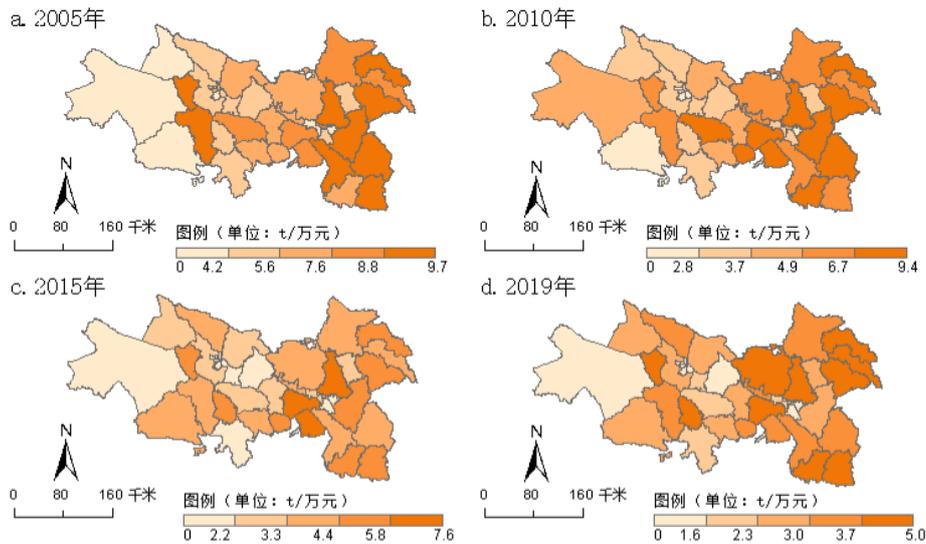


图 5.3 2005-2019 年兰西城市群县域碳排放强度

具体来看, 2005 年, 兰西城市群碳排放强度最高的为湟源县, 达到 9.7t, 最低的海晏县为 2.5t; 2010 年碳排放强度最高的是榆中县, 为 9.4t, 最低的城中区为 2.2t; 2015 年碳排放强度最高值为永靖县的 7.6t, 最低值为城关区的 1.3t; 到 2019 年, 碳排放强度最高和最低的县区仍然为永靖县和城关区, 分别为 5.0t 和 1.0t。总之, 无论从碳排放强度下降幅度和净下降量, 还是碳排放强度最高值与最低值的变化来看, 2005-2019 年, 兰西城市群碳排放强度的下降趋势都非常明显, 这与提高能源使用效率和节能减排政策等密不可分。

5.2 兰西城市群县域碳排放空间分布特征

5.2.1 正态性检验

选取兰西城市群县域尺度 1995 年和 2019 年的碳排放模拟值进行对数变换后得到正态 QQ 图 (图 5.4)。发现样本数据近似呈直线分布, 即兰西城市群县域尺度碳排放近似服从正态分布, 可以继续对样本数据进行空间趋势分析。

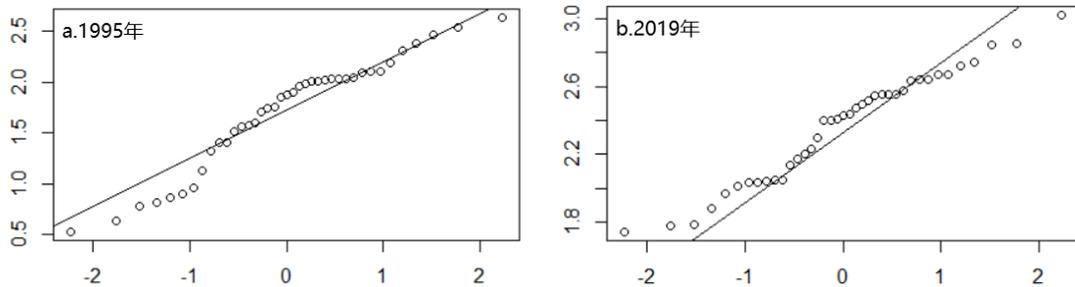


图 5.4 正态 QQ 图

5.2.2 空间趋势分析

为了进一步探讨兰西城市群县域尺度碳排放空间分布特征, 选取 1995 年和 2019 年栅格尺度 (图 5.5) 和分区统计 (图 5.6) 下的碳排放数据分析空间变化趋势, 其中 X 轴正方向指向东, Y 轴正方向指向北, Z 轴为碳排放量, 平面上杆的高度代表碳排放量的大小, 将高点分别投影到 XZ 平面和 YZ 平面上。

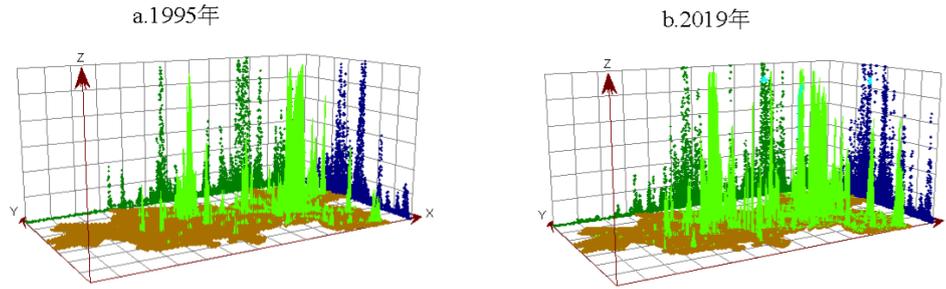


图 5.5 1995 年和 2019 年栅格尺度下兰西城市群碳排放空间分布趋势

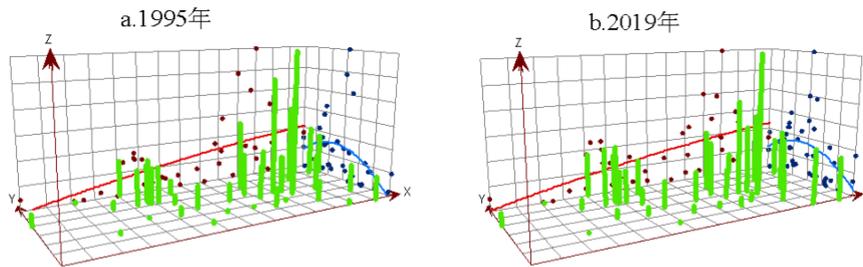


图 5.6 1995 年和 2019 年兰西城市群县域碳排放空间趋势

在图 5.6 中，39 个采样点位于 XY 平面上，利用二次函数分别对 XZ 平面和 YZ 平面上的投影点进行拟合，XZ 平面上的拟合曲线代表东西方向上碳排放的分布特征，YZ 平面上的拟合曲线代表南北方向上碳排放的分布特征。从 1995 年和 2019 年的空间趋势来看，1995 年兰西城市群县域碳排放由南向北呈“倒 U 形”曲线，东西方向呈现“东高西低”的态势；2019 年与 1995 年的分布趋势相同，即兰西城市群碳排放一直表现出东高西低，中部高、南北低的空间分布态势，兰西城市群高碳县域多集中在兰州市和西市周围人口密集、经济较发达区域，且甘肃省所属县域碳排放要高于青海省所属县域的碳排放，表明研究区的差异并没有显著改变，这与兰西城市群县域碳排放的总体分布特征相符。

5.2.3 变异系数分析

从图 5.7 的变异系数来看，1995-2019 年，兰西城市群县域碳排放差异演变趋势虽然在 2001-2004、2010-2011 和 2016-2017 年三个时间段经历了缓慢增长的过程，但总体表现出缩小的趋势。变异系数从 1995 年的 1.0152 缩小至 2019 年的 0.7003，表明在此期间，兰西城市群县域碳排放的差异在不断缩小。

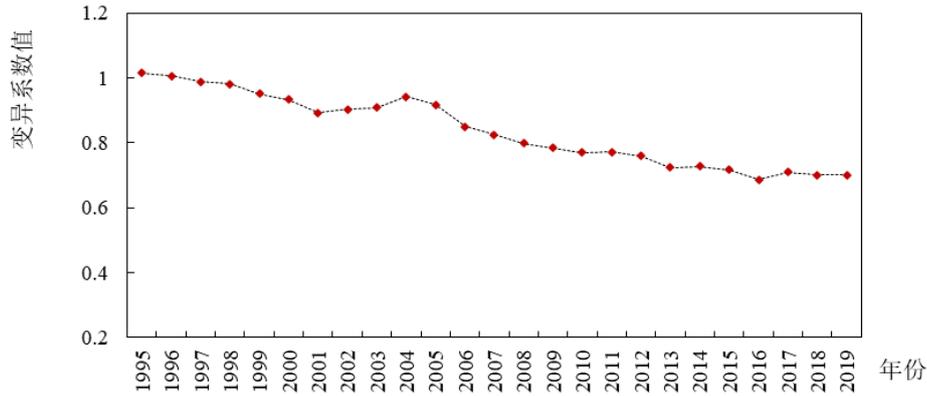


图 5.7 1995-2019 年兰西城市群碳排放变异系数

5.3 兰西城市群碳排放空间关联特征

5.3.1 全局自相关

由前文变异系数分析可知，兰西城市群县域碳排放的差异在不断缩小，但是从全局空间自相关分析来看（表 5.1），1995-2019 年，兰西城市群县域碳排放全局 Moran's I 指数呈现出波浪增长的态势，总体增长趋势明显，从 1995 年的 0.225 增长至 2019 年的 0.489，说明兰西城市群县域碳排放存在明显的空间正自相关性，且表现出逐步扩大的趋势。

表 5.1 兰西城市群碳排放量全局 Moran's I 指数

年份	Moran's I	Z-Score	p-value	年份	Moran's I	Z-Score	p-value
1995	0.225	2.442	0.041	2008	0.382	4.312	0.002
1996	0.362	4.062	0.004	2009	0.415	4.591	0.002
1997	0.360	3.998	0.004	2010	0.433	4.792	0.002
1998	0.362	4.017	0.004	2011	0.422	4.722	0.002
1999	0.350	3.910	0.004	2012	0.426	4.723	0.002
2000	0.364	4.079	0.004	2013	0.428	4.737	0.002
2001	0.370	4.137	0.003	2014	0.465	5.116	0.002
2002	0.380	4.251	0.002	2015	0.471	5.200	0.002
2003	0.371	4.128	0.002	2016	0.481	5.314	0.002
2004	0.354	3.971	0.002	2017	0.483	5.355	0.002
2005	0.329	3.632	0.002	2018	0.471	5.265	0.002
2006	0.358	4.039	0.002	2019	0.489	5.488	0.002
2007	0.362	4.103	0.002				

在全局 Moran's I 统计值中，除 1995 年只在 p -value=0.05 显著性水平上显著

外,其他年份均在 $p\text{-value}=0.01$ 的显著性水平上显著,表明兰西城市群县域碳排放存在显著的空间集聚分布模式。随着我国“西部大开发战略”的实施、“兰白都市经济圈”与“西宁都市经济圈”发展格局的形成以及“兰西城市群发展建设”的推进,使得兰西城市群整体得到了前所未有的发展机遇,能源消费碳排放也显著增长。但是,从空间布局来看,兰州市主城区和西宁市主城区仍然是兰西城市群社会经济发展的中心,同样也是高碳排区,加上兰州和西宁市对周围县区人口、经济等的“虹吸效应”,这种模式在短期内不会改变,甚至会呈现出增强的趋势。

5.3.2 局部自相关

局部空间自相关分析可以揭示局部空间差异的异质性特征以全面反映区域碳排放空间关联和差异的变化趋势。目前,衡量局部空间自相关的指标主要有 Moran 散点图和空间联系的局部指标(LISA)等。本文结合 Moran 散点图与 LISA 一同协力监测兰西城市群县级尺度碳排放的空间集聚性以及局部空间的不稳定性。变异系数和全局 Moran's I 指数只能从整体上判断和识别兰西城市群县域碳排放存在的区域差异性和空间正自相关性,但是无法识别区域内部碳排放是否存在明显的空间集聚性和正自相关性。因此,为了更好的揭示区域内部的差异以及集聚情况,本文依次选取 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年为时间断裂点来进行兰西城市群县域碳排放局部自相关分析(图 5.8 和图 5.9)。

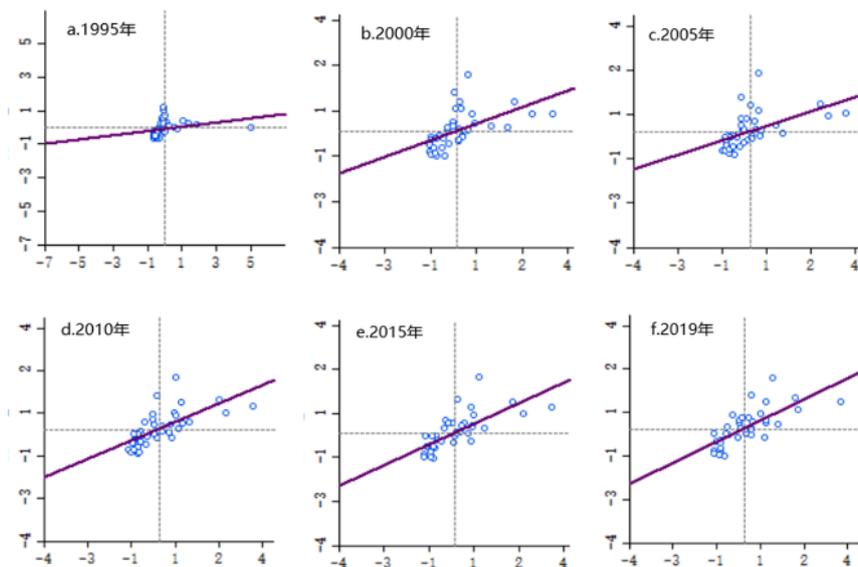


图 5.8 局部 Moran 散点图

图 5.8 展示了兰西城市群 39 个县区的碳排放 Moran 散点图，Moran 散点图刻画了各个县区所在的象限，从图中可以直观的看出，2010 年、2015 年和 2019 年紫色直线的斜率要明显大于 1995 年、2000 年和 2005 年，即兰西城市群县域的碳排放空间自相关性表现出增强的趋势，这与全局自相关分析得出的结果相符。继续观察可以发现，兰西城市群县区数主要集中在第一象限（HH）和第三象限（LL），这种结果导致碳排放呈现出显著的空间正自相关性。

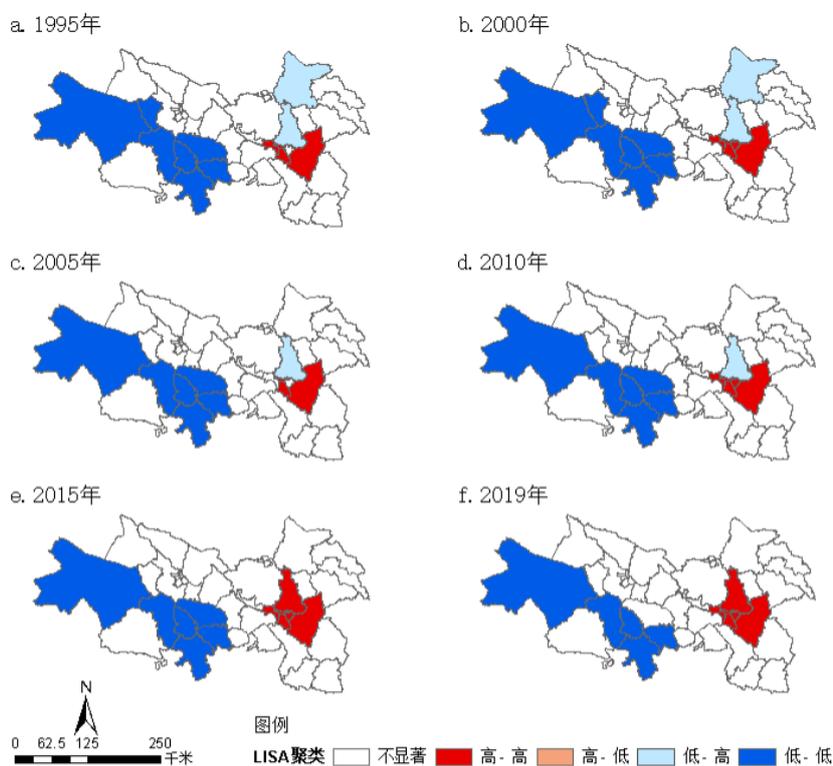


图 5.9 1995-2019 年兰西城市群县域碳排放 LISA 聚类

从图 5.9 可以看出，兰西城市群县域碳排放的显著空间关联特征以正相关集聚分布为主，具体表现为：1995 年，碳排放属于 HH 集聚和 LL 集聚的县区分别为 4 个和 7 个，占显著性集聚总数的 84.6%，属于 LH 集聚的县区为 2 个，占总数的 15.4%；2000 年，HH 集聚的县区增加到 5 个，其他均同 1995 年一致；2005 年，HH 集聚和 LL 集聚的县区分别减少到 3 个和 6 个，占显著性集聚总数的 90%，LH 集聚的县区减少到 1 个，占显著性集聚总数的 10%；2010 年，HH 集聚的县区又增加到 5 个，其他均同 2005 年一致；2015 年，HH 集聚和 LL 集聚的县区

均为 6 个，占显著性集聚总数的 100%，LH 聚集的县区减少到 0 个；2019 年，LL 聚集的县区减少到 5 个，其他均同 2015 年一致；1995-2019 年，没有出现 HL 聚集的县区。

从具体的空间位置可以看出，1995 年，HH 聚集县区主要集中在兰州市七里河区、西固区、安宁区和榆中县，这些县区人口较多、经济发展水平较其他县区要高，因此碳排放量偏高；自身碳排放最高的城关区没有表现出 HH 聚集，是由于邻接的皋兰县碳排放较低造成的；LL 聚集的县区主要分布在青海省的共和县、湟源县、贵德县、尖扎县、同仁县、循化县和化隆县，这些县区主要以第一产业为主、地广人稀且经济发展水平相对落后，碳排放量低；LH 聚集的县区为皋兰县和景泰县，主要是由于皋兰县毗邻城关区、西固区、安宁区和榆中县等高碳排放区，景泰县毗邻白银区和平川区等高碳排放区，但其自身的碳排放量较低，因此出现了 LH 聚集。

2000 年，因为城关区的碳排放增长较快，使得城关区由不显著转变为 HH 聚集；其他碳排放集聚类型和 1995 年相同，没有发生显著变化。2005 年碳排放集聚类型主要表现在西固区和城关区由 HH 聚集转变为不显著，这是由于毗邻西固区的红古区、永登县和永靖县的碳排放增长明显，使得西固区转变为不显著，而城关区是由于毗邻的七里河区、西固区和皋兰县属高碳排放区，而邻接的皋兰县碳排放相对较低造成的；景泰县由 LH 聚集转变为不显著，湟源县由 LL 聚集转变为不显著，这是由于景泰县和湟源县自身碳排放的增加导致的。2010 年，城关区和西固区由不显著再次转变为 HH 聚集型。2015 年碳排放集聚类型主要表现在皋兰县由 LH 聚集转变为不显著，可能的原因是皋兰县自身碳排放的增长所致；其他碳排放集聚类型和 2010 年相同，没有发生显著变化。2019 年，由于化隆县碳排放增长相对较快，使得其由 LL 聚集转变为不显著，其他碳排放集聚类型和 2015 年相同，没有发生显著变化。

总体而言，兰西城市群县域碳排放的局部自相关比较稳定，以 HH 聚集和 LL 聚集为主导，且 HH 聚集主要集中在兰州市主城区，LL 聚集集中在青海省黄南州和海南州。究其原因，区域内甘肃省会兰州市主城区经济发展水平相对较高，人口集聚分布，产业发展水平较高，形成较高的碳排放，由此形成地理空间位置碳排放 HH 型模式；青海省黄南州和海南州经济总量偏低，人口稀少，各县区的

碳排放均较低，在地理空间上表现为碳排放的 LL 型模式。

5.4 兰西城市群县域碳排放影响因素研究

5.4.1 指标选取及理论依据

参考已有研究成果，能源消费碳排放量受到经济发展水平、人口状况、能源强度、产业结构、城镇化水平、投资结构等诸多因素的影响（Gu 等，2013；Shi 等，2014；Song 等，2015；赵金彩等，2017；方叶兵等，2017；Liu 等，2018；Wang 等，2019；苏旭冉和蔺雪芹，2019；韩媛媛等，2020；于博等，2020；郭岫垚，2021；李峰和胡剑波，2021 杜海波，2021；吾买尔艾力·艾买提卡力等，2021），以往关于碳排放影响因素的研究大多从空间异质性的角度出发，借助空间计量方法探讨各因素的影响程度，但忽略了影响因素交互作用的影响。考虑到地理探测器不仅可以探测单个影响因子的解释力，还可以探测影响因子交互效应的解释力，因此，本文利用地理探测器，从空间分异性的角度出发，将碳排放影响因子引入地理探测器进行解释。

依据指标选取的科学性，并考虑兰西城市群县域尺度数据的可获得性，本文选择 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年 4 个年份作为样本年，着重探讨并深入分析以下 7 个影响因子对碳排放的影响，对影响因子的具体含义进行如下界定：包括经济发展水平（GDP），指标选取 GDP；人口密度（PD），指标选取单位平方公里上的人口数（年末常住总人口数/行政区面积）；产业结构（IS），指标选取第二、三产业占 GDP 的比重；能源强度（EI），指标选取单位 GDP 能源消费量；城镇化水平（UR），指标选取非农业人口占总人口的比重；财政支出（FE），指标选取地方财政一般预算支出占 GDP 的比重；企业个数（IL），指标选取规模以上工业企业个数。分别选取 4 个样本年份兰西城市群 39 个县区截面数据，如图 5.10 和图 5.11 所示。

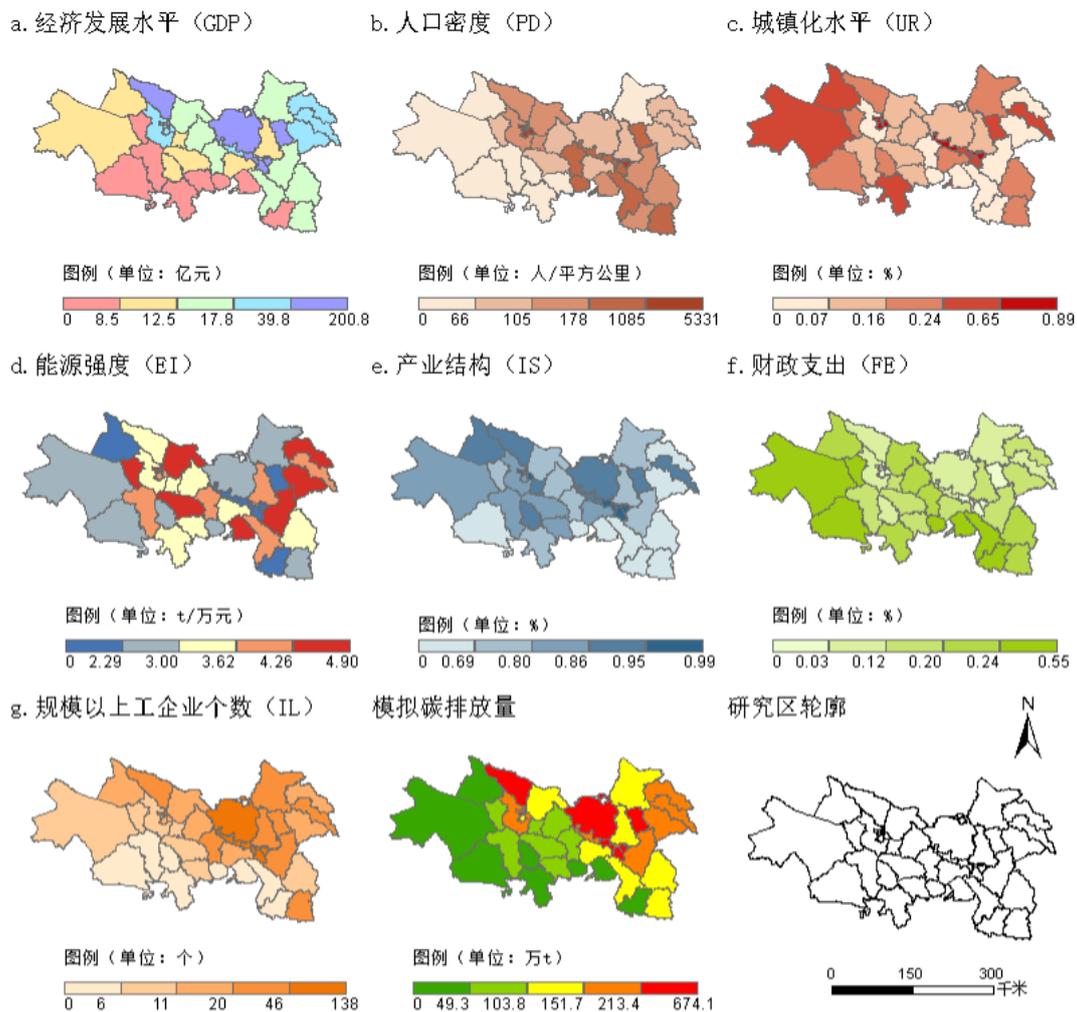


图 5.10 2005 年兰西城市群县域尺度碳排放影响因素空间分布

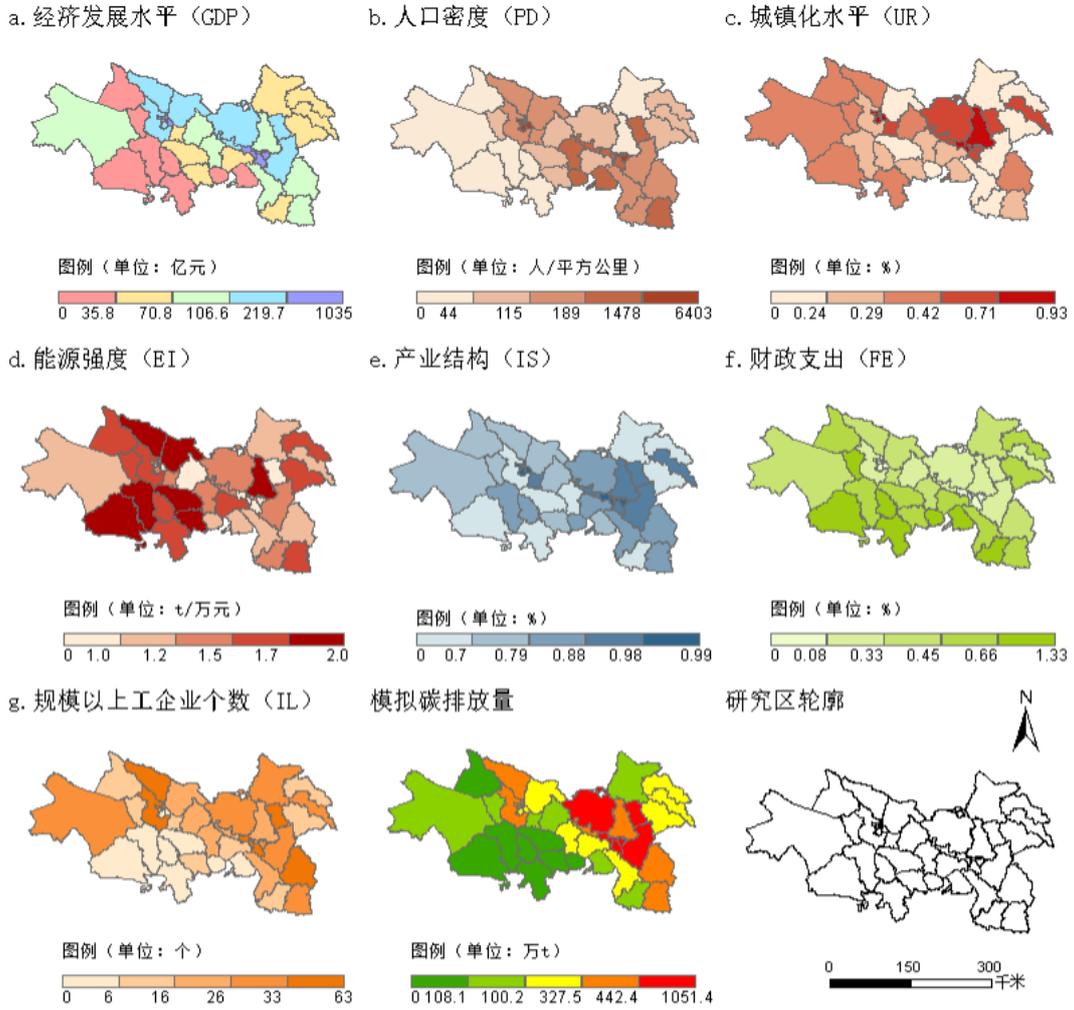


图 5.11 2019 年兰西城市群县域尺度碳排放影响因素空间分布

由于地理探测器擅长自变量为类型变量，因变量为数值型变量的分析（王劲峰和徐成东，2017），因此，借助 Arcgis10.8，利用分位数法对各样本年的碳排放影响因子进行类别化处理为 5 类（图 5.10 和图 5.11），然后利用地理探测器软件探测影响兰西城市群县域碳排放空间分异的驱动因素，得到各探测模块的结果，提取 Factor detector 和 Interaction detector 两个模块的数据，即分别为碳排放影响因素的单独解释程度和交互作用驱动力。

5.4.2 影响因素分析

(1) 单因子探测结果

如表 5.2 所示，在 4 个样本年份期，影响兰西城市群碳排放空间分异的主要

因素大致相同，经济发展水平的作用力始终最强；财政支出与、企业个数和产业结构也具有显著的作用力；城镇化水平、人口密度和能源强度的作用力相对较弱。

表 5.2 单因子探测结果

影响因子	q statistic			
	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
经济发展水平 (GDP)	0.710***	0.670***	0.663***	0.649***
城镇化水平 (UR)	0.208*	0.263*	0.267*	0.336**
财政支出 (FE)	0.555***	0.493***	0.619***	0.560***
人口密度 (PD)	0.266*	0.262*	0.267*	0.267*
企业个数 (IL)	0.572***	0.621***	0.587***	0.435***
产业结构 (IS)	0.512***	0.263*	0.475***	0.372**
能源强度 (EI)	0.365**	0.352**	0.260*	0.282*

注：* $p < 0.10$ ；** $p < 0.05$ ；*** $p < 0.01$ 。

经济发展水平对兰西城市群碳排放空间分异的作用力一直处于主导地位，但长期来看，其作用力在缓慢减弱，2005 年的 q 值最高为 0.710，2019 年下降至 0.649。近年来，由于技术的变革使得能源使用效率大幅提升（能源强度对碳排放的作用力也在减弱），加之碳减排政策的推动，使得碳排放增速放缓，经济增长对碳排放的作用力也在相对减弱，但经济增长带动的能源消耗仍旧是兰西城市群碳排放的主要来源。而人口密度对碳排放空间分异的驱动力比较稳定，q 值一直徘徊在 0.266 左右，这与兰西城市群大部分县区人口密度较小密切相关，兰西城市群高人口密度的地区主要聚集在兰州市主城区和西宁市主城区，主城区不仅人口众多、面积狭小，而且对周围城市具有很强的人口“虹吸效应”，反观其他县区不仅人口较少，面积较大。

财政支出和产业结构的 q 值呈波动性状态，分别介于 0.493-0.619 与 0.263-0.512 之间，从这两个指标的数据结构来看，财政支出和产业结构具有较强的阶段性，从而对碳排放空间分异的影响也表现为阶段特征。第二产业比重的下降势必会影响到第三产业的比重，而财政支出也具有很强的政策导向型。企业个数的作用力呈先增长后下降的态势，q 值在 2010 年达到最大为 0.621，到 2019 年下降为 0.435，这可能与兰西城市群企业转型发展相关，使得规模以上工业企业个数减少，从而对碳排放的作用力也在减弱。

城镇化水平的作用力趋于增强状态, q 值从 2005 年的 0.208 上升至 2019 年的 0.336, 2005-2015 年处于缓慢增长, 2015-2019 年增长较快。兰西城市群处于西部内陆, 大部分县区城镇化进程缓慢, 随着“西部大开发”、“促进中西部地区崛起”等战略的实施以及“兰白都市经济圈”和“西宁都市经济圈”的形成, 加速了兰西城市群城市化进程, 从而带来大量能源消耗拉动了碳排放增长。

(2) 交互作用探测结果

在厘清了各影响因子对兰西城市群碳排放空间分异单独的作用力之后, 接下来分析以上 7 个影响因子之间的交互作用对碳排放空间分异的影响力 (表 5.3a 至表 5.3d)。

表 5. 3a 2005 年影响因子交互作用探测结果

影响因子	GDP	UR	FE	PD	IL	IS	EI
GDP	0.710						
UR	0.801	0.208					
FE	0.795	0.703	0.555				
PD	0.809	0.654	0.706	0.266			
IL	0.785	0.777	0.816	0.662	0.572		
IS	0.821	0.654	0.678	0.746	0.734	0.512	
HI	0.912	0.598	0.815	0.747	0.829	0.762	0.365

表 5. 3b 2010 年影响因子交互作用探测结果

影响因子	GDP	UR	FE	PD	IL	IS	EI
GDP	0.670						
UR	0.744	0.263					
FE	0.747	0.590	0.493				
PD	0.744	0.635	0.652	0.209			
IL	0.783	0.774	0.769	0.791	0.621		
IS	0.734	0.361	0.568	0.613	0.773	0.263	
EI	0.821	0.604	0.797	0.608	0.837	0.624	0.352

表 5. 3c 2015 年影响因子交互作用探测结果

影响因子	GDP	UR	FE	PD	IL	IS	EI
GDP	0.663						
UR	0.708	0.267					
FE	0.687	0.685	0.619				
PD	0.733	0.579	0.753	0.267			
IL	0.804	0.806	0.788	0.786	0.587		
IS	0.902	0.773	0.848	0.697	0.873	0.475	
EI	0.820	0.580	0.835	0.634	0.812	0.594	0.260

表 5.3d 2019 年影响因子交互作用探测结果

影响因子	GDP	UR	FE	PD	IL	IS	EI
GDP	0.649						
UR	0.839	0.336					
FE	0.702	0.803	0.560				
PD	0.728	0.630	0.691	0.267			
IL	0.886	0.736	0.883	0.937	0.435		
IS	0.726	0.682	0.665	0.628	0.924	0.372	
EI	0.764	0.530	0.706	0.610	0.916	0.552	0.282

分别对 4 期影响因子交互作用力进行排序, 将交互作用影响力位于前十的因子组合整理到表 5.4。

表 5.4 2005-2019 年影响因子交互作用探测结果

2005 年		2010 年		2015 年		2019 年	
交互因子	q	交互因子	q	交互因子	q	交互因子	q
GDP∩EI	0.912	EI∩IL	0.837	GDP∩IS	0.902	PD∩IL	0.937
EI∩IL	0.829	GDP∩EI	0.821	IL∩IS	0.873	IL∩IS	0.924
GDP∩IS	0.821	FE∩EI	0.797	FE∩IS	0.848	IL∩EI	0.916
FE∩IL	0.816	PD∩IL	0.791	FE∩EI	0.835	FE∩IL	0.883
FE∩EI	0.815	GDP∩IL	0.783	GDP∩EI	0.820	GDP∩IL	0.886
GDP∩PD	0.809	UR∩IL	0.774	IL∩EI	0.812	GDP∩UR	0.839
GDP∩UR	0.801	FE∩IL	0.769	UR∩IL	0.806	FE∩UR	0.803
GDP∩FE	0.795	IS∩IL	0.773	GDP∩IL	0.804	GDP∩EI	0.764
GDP∩IL	0.785	GDP∩FE	0.747	FE∩IL	0.788	UR∩IL	0.736
UR∩IL	0.777	GDP∩PD	0.744	UR∩IS	0.773	GDP∩PD	0.728

结果显示, 影响因子经过两两交互以后, 对兰西城市群碳排放空间分异的作用力较任何单一影响因子的作用力, 均得到了显著的增强。特别地, 城镇化水平、人口密度和能源强度的单因子作用力相对较弱, 但通过交互作用以后, q 值得到明显提升。具体来看, 2005 年城镇化水平与人口密度的单因子探测 q 值相对较低, 分别为 0.208 和 0.266, 但 GDP∩UR、GDP∩PD 对碳排放的影响力达到 0.801 和 0.809; 2019 年人口密度和能源强度的单因子探测 q 值为 0.267 和 0.282, 但 PD∩IL、IL∩EI 的作用力达到 0.937 和 0.916, 各因子在交互作用下均比单因子的作用力更强。影响因子在两两交互作用以后, q 值大于 0.9 的有 5 对, 分别为 2005 年的 GDP∩EI (0.912), 2015 年的 GDP∩IS (0.902), 2019 年的 PD∩IL (0.937)、IL∩IS (0.924) 和 IL∩EI (0.916)。可以发现, 能源强度、产业结构和人口密度

等单独的作用力有限，但与经济发展水平等主导因子交互以后，对碳排放的作用力得到了飞跃性的提升，这表明包含能源强度、产业结构和人口密度的关键交互因子对碳排放具有重要的多重空间叠加效应。

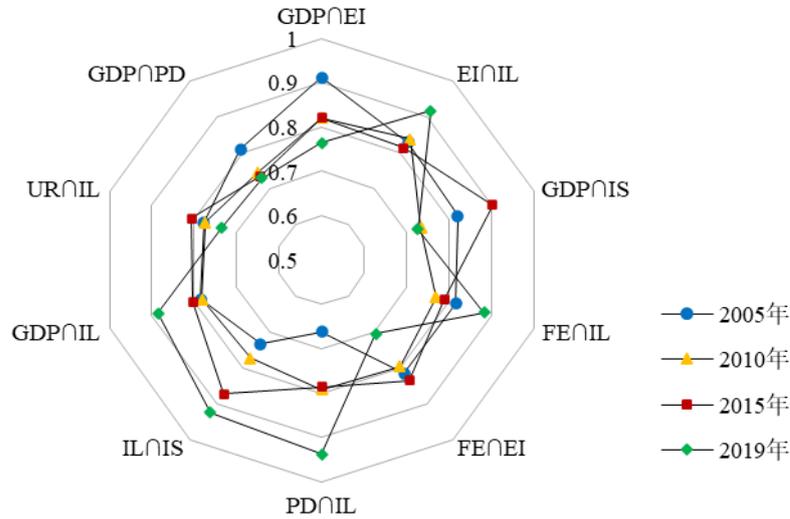


图 5.5 2005-2019 年主导交互因子影响力

为了更直观的看出主导交互因子在时间序列中的变化趋势，绘制了主导交互因子雷达图（图 5.5），可以发现，不同时间段，q 值最大的交互因子不同，2005、2010、2015 和 2019 年，q 值最大的交互因子分别为 GDP∩EI（0.912）、EI∩IL（0.837）、GDP∩IS（0.902）和 PD∩IL（0.937）。GDP∩EI、FE∩EI 和 GDP∩PD 的作用力逐渐减弱，q 值分别从 2005 年的 0.912、0.815 和 0.809 下降至 2019 年的 0.764、0.706 和 0.728。PD∩IL、IL∩IS 和 GDP∩IL 的作用力逐渐增强，q 值分别从 2005 年的 0.662、0.734、0.785 上升至 2019 年的 0.937、0.924 和 0.886，且 PD∩IL 的变化幅度最大。EI∩IL 和 FE∩IL 的作用力先减弱后增强，且在 2019 年作用力突显出来，q 值也最高，分别达到 0.916 和 0.883。GDP∩IS 和 UR∩IL 的作用力在 2015 年最强，q 值分别为 0.902 和 0.806。

因此，经济发展水平和企业个数分别与能源强度、产业结构、城镇化水平、人口密度所主导的交互作用是导致碳排放持续增长的主要推动力。伴随着“西部大开发”和“促进中西部地区崛起”等战略的实施以及“兰西城市群建设”的持续推进，兰西城市群的经济体量势必会持续扩大，在保持 GDP 持续增长的前提下，有必要对产业结构、能源强度、城镇化水平和财政支出等影响因子进行宏观调控，

使其与主导因子之间的交互作用力得到削弱，从而使得碳排放增速持续放缓，碳排放总量早日达峰。

5.5 本章小结

本章基于兰西城市群碳排放空间化模拟结果，统计了 1995-2019 年兰西城市群碳排放总量和县级单元的碳排放量，然后对兰西城市群碳排放的时间序列变化、空间分布特征、空间关联特征和碳排放空间分异的影响因素等问题进行了研究。结果显示，1995-2019 年碳排放总量整体呈增长趋势，增长速度整体呈先上升后下降的趋势，碳排放量从 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 上升到 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$ ；县域碳排放（ 10^4t ）区间由 1995 年的 [13.4, 425.4] 增长为 2019 年的 [103.2, 1051.4]，且碳排放强度下降趋势明显。兰西城市群碳排放一直表现出东高西低，中部高、南北低的分布态势，县域碳排放存在显著的空间差异性和空间正自相关性；局部自相关比较稳定，以高-高聚集和低-低聚集为主导。兰西城市群碳排放的空间分异受多种因素综合作用，经济发展水平影响力始终最强；财政支出与，企业个数和产业结构也具有显著的影响力；城镇化水平、人口密度和能源强度的影响相对较弱；经济发展水平和企业个数分别与能源强度、产业结构、城镇化水平、人口密度所主导的交互作用是导致碳排放持续增长的主要推动力。

6 结论与展望

6.1 主要结论

①从总量看, 1995-2019 年兰西城市群碳排放总量呈增长趋势, 增长速度整体呈先上升后下降的趋势, 表现出明显的阶段特征。碳排放量从 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 上升到 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$, 24 年增长了 $80.38 \times 10^6 \text{t}$, 增长了 3.22 倍; 碳排放年平均增长速度为 4.79%。具体来看, 在 1995-2002 年, 碳排放量处于缓慢增长阶段, 碳排放量由 1995 年的 $36.23 \times 10^6 \text{t}$ 增长为 2002 年的 $46.92 \times 10^6 \text{t}$; 碳排放增长速度呈波动起伏状态, 年均增长速度为 3.15%。在 2002-2013 年, 碳排放量处于快速增长阶段, 碳排放量从 2002 年的 $46.92 \times 10^6 \text{t}$ 上升为 2013 年的 $111.88 \times 10^6 \text{t}$, 11 年间碳排放总量共增长 $64.96 \times 10^6 \text{t}$, 增长了 2.38 倍; 在此阶段, 碳排放增长速度经历了“M”型变化过程, 年均增长速度为 7.88%。在 2013-2019 年, 碳排放量基本维持在同一水平, 碳排放增长速度相对较低, 在此期间, 碳排放量出现了两个明显的峰值, 分别为 2015 年的 $114.34 \times 10^6 \text{t}$ 和 2019 年的 $116.61 \times 10^6 \text{t}$, 增长速度呈先下降后上升的趋势, 年均增长速度为 1.28%。

②从县域看, 1995-2019 年间, 兰西城市群县域碳排放增长明显, 碳排放(10^4t) 区间由 1995 年的 [13.4, 425.4] 增长为 2019 年的 [103.2, 1051.4], 最低县域 (海南州贵南县) 和最高县域 (兰州市城关区) 分别增长 8.46 倍和 2.47 倍, 碳排放量分别增长 $48.92 \times 10^4 \text{t}$ 和 $625.95 \times 10^4 \text{t}$ 。从碳排放强度看, 2005-2019 年, 兰西城市群绝大多数县区的碳排放强度呈持续下降的态势, 碳排放强度 ($\text{t}/\text{万元}$) 区间由 2005 年的 [4.2, 9.7] 下降为 2019 年的 [1.6, 5.0]。

③从时空分布看, 1995-2019 年, 兰西城市群碳排放一直表现出东高西低, 中部高、南北低的空间分布态势, 高碳县域多集中在兰州市和西市周围人口密集、经济较发达的区域; 兰西城市群县域碳排放存在显著的空间差异性和空间正自相关性, 但差异在不断缩小, 空间正自相关性呈现出逐步扩大的趋势; 碳排放的局部自相关比较稳定, 主要表现为高-高聚集和低-低聚集, 高-高聚集主要集中在兰州市主城区, 低-低聚集分布在青海省黄南州和海南州。

④兰西城市群碳排放空间差异性是由多种因素综合作用的结果。经济发展水平

对兰西城市群碳排放空间分异的作用力始终最强，财政支出、企业个数和产业结构对碳排放也具有显著的影响力，城镇化水平、人口密度和能源强度对碳排放的影响相对较弱；2019年各影响因子对碳排放空间分异的作用力从大到小依次为：经济发展水平(0.649)>财政支出(0.560)>企业个数(0.435)>产业结构(0.372)>城镇化水平(0.336)>能源强度(0.282)>人口密度(0.267)。影响因子经过两两交互以后，影响力较任何单一影响因子的作用力，均得到了显著的增强，2005、2010、2015和2019年q值最大的交互因子分别为 $GDP \cap EI(0.912)$ 、 $EI \cap IL(0.837)$ 、 $GDP \cap IS(0.902)$ 和 $PD \cap IL(0.937)$ ；经济发展水平和企业个数分别与能源强度、产业结构、城镇化水平、人口密度所主导的交互作用是导致碳排放持续增长的主要推动力。

6.2 政策启示

更小尺度的碳排放空间分布为碳减排任务提供了基础数据，本文模拟的碳排放具有较高的精度，为兰西城市群政府部门制定系统化、差异化、精细化的减排措施，将减排任务具体到县级行政单元提供较为科学的参考依据，也为我国西部城市群碳排放研究提供示范参考。

①对于兰西城市群来说，以煤炭为主的能源消费结构难以在短期内转变，在提升能源利用效率的同时，充分发挥区域内太阳能、风能等得天独厚的资源优势，持续提升非化石能源及清洁能源的使用比重。从碳排放空间分布和集聚特征来看，碳减排重点既要落在以“兰白都市经济圈”为主的高碳排放区，也要落在碳排放强度较高的湟源县、榆中县和永靖县等县区。

②冬季集中供暖是兰西城市群碳排放调控的重点，提高集中供热能源使用效率，减少供热过程中的热量损失，创新绿色供暖技术，减少煤炭使用量，从供给端降低碳排放量。同时，兰西城市群需协同发展，统筹规划，根据各县区资源环境承载力与国土空间规划，合理控制人口密度与城镇开发力度。

③经济增长是兰西城市群碳排放增长的主要驱动力，而甘、青两省作为全国经济发展水平相对落后的地区，碳减排政策的实施需从低碳经济的视角出发，在保持经济增长的前提下，提升能源使用效率，优化产业结构，鼓励技术变革，实现城市群低碳、绿色发展。同时，要立足区域（兰州、西宁）科学城，积极引进

国际低碳技术与专家人才，加大能源领域技术创新。

④伴随着“西部大开发”、“促进中西部地区崛起”战略的实施，“丝绸之路经济带”的建设以及“兰西城市群建设”的持续推进，兰西城市群的经济体量势必会持续扩大，在保持 GDP 持续增长的前提下，有必要对产业结构、能源强度、城镇化水平和财政支出等影响因子进行宏观调控，使其与主导因子之间的交互作用力得到削弱，从而使得碳排放增速持续放缓，碳排放总量早日达峰。

6.3 展望与不足

受限于数据的可获得性，本文所计算的碳排放量仅为 9 种常用化石能源的消耗释放的碳排放，但在现实生活中，除了以上常用化石能源消耗会释放 CO₂ 以外，还有很多其他化石能源和人类活动都会向大气中释放 CO₂，如土地利用、水泥生产等。因此在未来的研究中，要对释放 CO₂ 的来源进行全面考虑，这样才能为各地区制定符合自身情况的碳减排政策提供参考。

在已有夜间灯光影像的研究中，尚未有研究对卫星捕捉的地表夜间灯光进行细分，因此，如何剔除景观照明等方面的影响有待进一步研究。

参考文献

- [1] Al-Mulali, U. Factors affecting CO₂ emission in the Middle East: A panel data analysis[J]. *Energy*, 2012, 44(1): 564-569.
- [2] Amaral, S., Camara, G., Miguel, A., Monteiro, V., Quintanilha, J. A. & Elvidge, C.D. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2005, 29(2): 179-195.
- [3] Christopher, E., Benjamin, T., Paul, S., Kimberly, B., Ara, H. & Cristina, M., et al. Global Distribution and Density of Constructed Impervious Surfaces[J]. *Sensors*, 2007, 7(9): 1962-1979.
- [4] Clarke-Sather, A., Qu, J., Wang, Q., Zeng, J. & Li, Y. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO₂ emissions in China 1997-2007[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 5420-5428.
- [5] Cui, X., Y Lei, Zhang, F., Zhang, X. & Wu, F. Mapping spatiotemporal variations of CO₂ (carbon dioxide) emissions using nighttime light data in Guangdong Province[J]. *Physics and Chemistry of The Earth*, 2019, 110: 89-98.
- [6] Deng G, Xu Y. Accounting and structure decomposition analysis of embodied carbon trade: A global perspective[J]. *Energy*, 2017, 137: 140-151.
- [7] Doll C, Muller J P, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery[J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(1): 75-92.
- [8] Doll, Christopher, N. H., Muller, Jan-Peter, Elvidge & Christopher, D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. *AMBIO - A Journal of the Human Environment*, 2000: 157-162.
- [9] Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., Kroehl, H. W. & Davis, E. R. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System[J]. *Eng & Remote Sens*, 1997, 63(6): 727-734.
- [10] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, et al. Why VIIRS data are superior to

- DMSP for mapping nighttime lights[J]. *Proceedings of the Asia Pacific Advanced Network*, 2013, 35(0): 62.
- [11] Elvidge, C. D., Daniel, Z., Baugh, K. E., Tuttle, B. T. & Mikhail, Z. A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data[J]. *Energies*, 2009, 2(3): 595-622.
- [12] Elvidge C D, Sutton P C, Baugh K E, et al. National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992-2009[J]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2011: 120-143.
- [13] Gu Z H, Sun Q, Wennersten R. Impact of urban residences on energy consumption and carbon emissions: An investigation in Nanjing, China[J]. *Sustainable Cities & Society*, 2013, 7: 52-61.
- [14] Guan, D., Zhu, L., Yong, G., Lindner, S. & Hubacek, K. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 672-675.
- [15] Henderson J V, Storeygard A, Weil D N. Measuring Economic Growth from Outer Space[J]. *National Bureau of Economic Research, Inc*, 2012, 102(2): 994-1028.
- [16] Kempe S. Contribution to: D. Schimel, L.G. Enting, M. Heimann et al. : CO2 and the carbon cycle [J], 1995,2(4): 94-102.
- [17] Lenzen M. Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input-output analysis[J]. *Energy Policy*, 1998, 26(6): 495-506.
- [18] Li H, Calder C A, Cressie N. Beyond Moran's I: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model[J]. *Geographical Analysis*, 2010, 39(4): 357-375.
- [19] Lin, Z., Ming, X., Liang, S., Zeng, S. & Zhang, T. Revisiting drivers of energy intensity in China during 1997–2007: A structural decomposition analysis[J]. *Energy Policy*, 2014, 67(4): 640-647.
- [20] Liu, Z., He, C., Zhang, Q., Huang, Q. & Yang, Y. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72.

- [21] Liu, J. P., Zhang, X. B. & Song, X. H. Regional carbon emission evolution mechanism and its prediction approach driven by carbon trading - A case study of Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 172(3), 2793-2810.
- [22] Lo C P. Modeling the Population of China Using DMSP Operational Linescan System Nighttime Data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(9): 1037-1048.
- [23] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(Complete): 49-61.
- [24] Quadrelli R, Peterson S. The energy-climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(11): 5938-5952.
- [25] Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Quere, C. L., Canadell, J. G. & Klepper, G., et al. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(24): 10288-10293.
- [26] Seto K C, Guneralp B, Hutyra L. Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools[J]. *AGUFM*, 2012, 2012.
- [27] Shi-Chun, Xu, Zheng-Xia, He, Ru-Yin, & Long. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using $\{LMDI\}$ [J]. *Applied Energy*, 2014, 127(8): 182-193.
- [28] Song M L, Zhou Y X. Analysis of Carbon Emissions and Their Influence Factors Based on Data from Anhui of China[J]. *Computational economics*, 2015, 46(3): 359-374.
- [29] Song, M., Guo, X., Wu, K. & Wang, G. Driving effect analysis of energy-consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 620-628.
- [30] Su-Hyun, C. & Chang-U, C. A Study on Life Cycle CO₂ Emissions of Low-Carbon Building in South Korea[J]. *Sustainability*, 2016, 8(6): 579.
- [31] Y Su, X Chen, Y Li, J Liao, Y Ye, & H Zhang, et al. China's 19-year city-level

- carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J], 2014, 35(5): 231-243.
- [32] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(none): 114-115.
- [33] Wang, S., Shi, C., Fang, C. & Feng, K. Examining the spatial variations of determinants of energy-related CO₂ emissions in China at the city level using Geographically Weighted Regression Model[J]. *Applied Energy*, 2019, 235(FEB.1): 95-105.
- [34] Wang Z, Yang L. Delinking indicators on regional industry development and carbon emissions: Beijing–Tianjin–Hebei economic band case[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 41-48.
- [35] Wang Z. Analysis of CO₂ Emissions and the Mechanism of the Industrial Enterprises above Designated Size (IEDS) in Resource-Based Cities by Application of Geographical Detector Technology[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(5): 537-545.
- [36] Witmer F, Loughlin O. Detecting the effects of wars in the Caucasus regions of Russia and Georgia using radiometrically normalized DMSP-OLS nighttime lights imagery[J]. *GIS science & Remote Sensing*, 2002, 48(4): 478-500.
- [37] Xiao, P., Wang, X., Feng, X., Zhang, X. & Yang, Y. Detecting China's Urban Expansion Over the Past Three Decades Using Nighttime Light Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(10): 4095-4106.
- [38] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Urbanization impact on carbon emissions in the Pearl River Delta region: Kuznets curve relationships[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 180(APR.10): 514-523.
- [39] York R, Rosa E, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [40] Zhang L. Analysis of Carbon Emission Characteristics of China[J]. *Physics*

- Procedia, 2012, 33(1): 1304-1308.
- [41] Zhang, Q., Pandey, B. & Seto, K. C. A Robust Method to Generate a Consistent Time Series From DMSP/OLS Nighttime Light Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 35(5): 231-243.
- [42] Zhao N, Ghosh T, Samson E L. Mapping spatio-temporal changes of Chinese electric power consumption using night-time imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(19-20): 6304-6320.
- [43] Zhao N, Samson E L, Currit N A. Nighttime-Lights-Derived Fossil Fuel Carbon Dioxide Emission Maps and Their Limitations[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(12): 935-943.
- [44] 蔡佩汝, 汪侠, 闫艺涵和张颖. 中国儿童多维贫困时空格局变化及其影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(10): 2551-2567.
- [45] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求和黄宁生. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(09): 1092-1102.
- [46] 陈军华, 李乔楚. 成渝双城经济圈建设背景下四川省能源消费碳排放影响因素研究——基于 LMDI 模型视角[J]. 生态经济, 2021: 1-14.
- [47] 陈培阳, 朱喜钢. 基于不同尺度的中国区域经济差异[J]. 地理学报, 2012, 67(08): 1085-1097.
- [48] 陈强. 计量经济学及 Stata 应用[M]. 高等教育出版社, 2015.
- [49] 程慧, 徐琼, 郭尧琦. 中国旅游业碳排放脱钩的空间异质性及其驱动因素[J]. 华东经济管理, 2020, 34(03): 86-93.
- [50] 程叶青, 王哲野, 张守志, 叶信岳和姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(04): 631-650.
- [51] 程叶青, 王哲野, 张守志, 叶信岳和姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [52] 池建. 精通 ArcGIS 地理信息系统[M]. 清华大学出版社, 2011.
- [53] 戴美玲: 阔不阔, 城市络[N], 2019-03-21.
- [54] 邓光耀, 陈刚刚. 中国能源消费碳排放整体隐含强度的结构分析[J]. 河北地

- 质大学学报, 2021, 44(04): 99-115.
- [55] 邓光耀, 任苏灵. 中国能源消费碳排放的动态演进及驱动因素分析[J]. 统计与决策, 2017(18): 141-143.
- [56] 董文. 江苏省能源消费碳排放时序演变及驱动因素研究[D]. 南京师范大学, 2012.
- [57] 杜海波, 魏伟, 张学渊和纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J]. 地理研究, 2021, 40(07): 2051-2065.
- [58] 冯冬, 李健. 我国三大城市群城镇化水平对碳排放的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2194-2200.
- [59] 高亚红, 顾羊羊, 乔旭宁, 宋雪桦, 叶润武和孙旭. 基于夜间灯光数据的南京城镇用地提取[J]. 测绘科学, 2017, 42(06): 93-98+154.
- [60] 高义, 王辉, 王培涛, 孙晓宇和吕婷婷. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2517-2523.
- [61] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 关中美, 冯德显和高亚红. 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.
- [62] 郭岫垚. 辽宁省碳排放效率时空演变及影响因素研究[D]. 辽宁师范大学, 2021.
- [63] 郭义强, 郑景云, 葛全胜. 一次能源消费导致的二氧化碳排放量变化[J]. 地理研究, 2010, 29(06): 1027-1036.
- [64] 韩媛媛, 皮荷杰, 时泽楠, 吕儒云和廖剑宇. 京津冀地区工业 CO₂ 排放测度及其影响因素研究[J]. 世界地理研究, 2020, 29(01): 140-147.
- [65] 洪凯, 朱子玉. 珠三角农地利用中的碳排放时空特征及影响因素——基于 1996—2014 年数据[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2017, 18(01): 70-76.
- [66] 胡为安, 刘传立, 詹淇雯. 中国区域 NPP-VIIRS 年度夜间灯光数据的合成方法与对比验证[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(01): 141-148.
- [67] 黄杰, 闫庆武, 刘永伟. 基于 DMSP/OLS 与土地利用的江苏省人口数据空间化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(05): 735-741.
- [68] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(09):

- 1010-1018.
- [69] 纪学朋. 基于夜间灯光数据的环渤海地区能源消费碳排放模拟、格局及机理[D]. 西北师范大学, 2017.
- [70] 贾卓, 杨永春, 赵锦瑶和陈兴鹏. 黄河流域兰西城市群工业集聚与污染集聚的空间交互影响[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2897-2913.
- [71] 李峰, 胡剑波. 中国产业部门隐含碳排放变化的影响因素动态研究——基于细分行业数据的实证分析[J]. 经济问题, 2021(11): 77-87.
- [72] 李峰, 米晓楠, 刘军和刘小阳. 基于NPP-VIIRS夜间灯光数据的北京市GDP空间化方法[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(03): 19-24.
- [73] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣和揣小伟. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析[J]. 地理研究, 2019, 38(09): 2188-2201.
- [74] 李通, 何春阳, 杨洋和刘志锋. 1995-2008年中国大陆电力消费量时空动态[J]. 地理学报, 2011, 66(10): 1403-1412.
- [75] 李小敏, 郑新奇, 袁涛. DMSP/OLS夜间灯光数据研究成果知识图谱分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(03): 351-359.
- [76] 林毅夫. 改革开放创40年经济增长奇迹 林毅夫认为经济快速发展离不开民营企业的参与[J]. 财经界, 2018(16): 31-33.
- [77] 刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J]. 地理学报, 2012, 67(08): 1011-1020.
- [78] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(07): 878-887.
- [79] 卢德彬, 毛婉柳, 杨东阳和赵佳楠. 基于多源遥感数据的中国 PM_{2.5} 变化趋势与影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3).
- [80] 罗君, 石培基, 张学斌. 基于乡镇尺度的兰西城市群人口分布特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(07): 104-111.
- [81] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. 经济地理, 2020, 40(12): 12-21.
- [82] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征_省略_基于DMSP_OLS夜间灯光数据[J]. 北京理工大学学报, 2019, 21(6): 41-50.

- [83] 马晓熠, 裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异[J]. 地理科学进展, 2010(12): 7.
- [84] 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, 27(09): 143-150.
- [85] 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(09): 3847-3856.
- [86] 施开放. 多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究[D]. 华东师范大学, 2017.
- [87] 宋珺, 周蕾, 赵盟和迟永刚. 2014—2019 年京津冀城市群能源碳排放的遥感监测[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2021, 44(04): 467-474.
- [88] 苏健, 梁英波, 丁麟, 张国生和刘合. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(09): 1001-1009.
- [89] 苏旭冉, 蔺雪芹. 基于夜间灯光数据的京津冀地区碳排放的时空演化特征及影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(04): 48-57.
- [90] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生等. 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, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [91] 苏泳娴, 王重阳, 张虹鸥, 陈修治, 林晖和许喜逢. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据提取城镇建设用地的邻域分析法[J]. 热带地理, 2015, 35(02): 193-201.
- [92] 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]. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- [93] 孙贵艳, 王胜, 肖磊. 基于夜间灯光数据的长江上游地区能源消费碳排放及影响因素研究[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(04): 159-162+174.
- [94] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 科学出版社, 2010.
- [95] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [96] 王琪, 袁涛, 郑新奇. 基于夜间灯光数据的中国省域 GDP 总量分析[J]. 城市发展研究, 2013, 20(007): 44-48.
- [97] 王文秀, 匡耀求, 黄宁生. 广东省能源消费碳排放空间自相关分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(03): 180-187+193.

- [98] 王兴民, 吴静, 白冰和王铮. 中国 CO₂ 排放的空间分异与驱动因素——基于 198 个地级及以上城市数据的分析[J], 2021(2020-11): 29-38.
- [99] 王旭, 吴吉东, 王海和李宁. 基于夜间灯光和人口密度数据的京津冀 GDP 空间化对比[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(07): 969-976.
- [100] 吾买尔艾力·艾买提卡力, 阿巴拜克热·艾买提卡力, 范昕和李江风. 2000—2018 年环鄱阳湖生态...碳排放时空分异规律及影响因素分析[J]. 生态经济, 2021, 37(6).
- [101] 吴昀昭, 田庆久, 金震宇, 张宗贵和惠凤鸣. ETM+数据绝对反射率反演方法分析[J]. 遥感信息, 2004(02): 9-12.
- [102] 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(07): 1040-1050.
- [103] 许燕燕. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的成渝城市群碳排放时空动态特征研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(12): 1504-1511.
- [104] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学, 2020, 42(03): 409-423.
- [105] 杨永春, 张旭东, 穆焱杰和张薇. 黄河上游生态保护与高质量发展的基本逻辑及关键对策[J]. 经济地理, 2020, 40(06): 9-20.
- [106] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的实证[J]. 环境科学学报, 2020, 40(02): 697-706.
- [107] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 朱振宇和汪煜. 胡焕庸线两侧城镇建设用地变化及其碳排放差异[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1262-1273.
- [108] 张文斌, 张志斌, 周翼, 董建红和高峰. 基于夜间灯光数据的兰西城市群时空演变特征[J]. 遥感信息, 2020, 35(06): 38-43.
- [109] 张永年, 潘竟虎. 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(04): 1436-1446.
- [110] 赵金彩, 钟章奇, 卢鹤立, 吴乐英和陈玉龙. 基于夜间灯光的城市居民直接碳排放及影响因素——以中原经济区为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2100-2114.

- [111] 赵领娣, 吴栋. 中国能源供给侧碳排放核算与空间分异格局[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(02): 48-58.
- [112] 赵亚南, 武岳, 武义青. 我国区域碳排放与经济成长的实证分析——以环渤海、长三角和珠三角地区为例[J]. 科技和产业, 2014, 14(11): 70-76.
- [113] 周翼, 陈英, 刘洋, 田丰和易鑫程. NPP-VIIRS 年度夜间灯光数据的合成方法与验证[J]. 遥感信息, 2019, 34(02): 62-68.

作者攻读硕士期间研究成果

发表论文：

- [1]邓光耀,陈刚刚.中国能源消费碳排放整体隐含强度的结构分析[J].河北地质大学学报,2021,44(04):99-115.DOI:10.13937/j.cnki.hbdzdxxb.2021.04.014.
- [2]邓光耀,陈刚刚.“一带一路”沿线国家低碳贸易竞争力研究[J].河北环境工程学院学报,2022,32(01):1-8.DOI:10.13358/j.issn.2096-9309.2021.0716.01.

参与课题与获奖比赛：

- [1]《虚拟水视角下中国各省水资源政策的多区域 CGE 模拟研究》，教育部人文社会科学研究项目（一般项目），2020JXZ0889，已结项。
- [2]《“食”局动荡，波澜中如何求存—新冠肺炎疫情下甘肃省餐饮业变化调查研究》，正大杯第十届全国大学生市场调查与分析大赛总决赛一等奖，2020.

后记

随着毕业论文的完成，三年的硕士生涯也即将步入尾声，回首兰财三年学习旅程，既有收获，也有遗憾，在此，以该文向给予过我教导和帮助的恩师和挚友致以由衷的感谢。

首先，我要感谢我的导师邓光耀，能成为您的第一个硕士研究生，我感到十分荣幸和骄傲，但也为我自己的愚钝和懒惰深感惭愧。十分感谢恩师在我三年学习过程中给予的无私帮助和悉心教导，感谢您对我的培养，在我研一的时候可以为我一个学生开设讨论班，引导我开拓自己的思路和研究方向，耐心指导我如何撰写学术论文等。邓老师渊博的知识和严谨的学术态度，不仅让我学到丰富的专业知识，也学到孜孜不倦的敬业精神和一丝不苟的科研精神。至此，谨向悉心教导我的恩师致以深深的谢意和由衷的敬意，也衷心祝愿您身体健康，工作顺利，阖家幸福。

回归本篇论文，本文是在邓老师的悉心指导下完成的，从文献的搜集、论文的选题、研究思路与方法的确定到论文的撰写与修改等方面，恩师都给予了全面的指导。从完成的过程来说，这篇论文进行的还是比较辛苦，由于这是我第一次开始接触夜间灯光数据，在数据预处理方面遇到了不小挑战，因此我也要感谢唐裕博同学，感谢你的热心帮助，正是你提供的硬件设备，使我论文的数据处理工作得以顺利完成。

最后，感谢参加本人论文评审的各位专家与教授，感谢您在百忙之中抽出宝贵时间来审阅我的论文，并提出宝贵的意见和建议。