

学校代码：10225



东北林业大学
NORTHEAST FORESTRY UNIVERSITY

本科毕业论文

夜间灯光数据视角下东北三省能源碳排放量的
时空演变及脱钩可视化呈现

刘斌

学院： 经济管理学院

专业班级： 经济统计学 2019-02

指导教师： 吕洁华 教授

学号： 2019212335

2023年06月

摘 要

在城市化不断进步发展的今天，现代化产业飞速发展，经济水平日益增长。但前进的步伐背后是一场生态自然与经济发展之间的博弈。具体表现为：能源消耗成了首要的驱动力，最终高浓度的以碳元素为主要组成的温室气体，得以充斥在空气中。现阶段，面对如此严峻的环境污染局势，《巴黎协定》、《京都议定书》等一系列国际性气候、控排公约得以颁布，也彰显着解决排放问题的国际重要性。在这样严峻的国际生态背景下，中国也在积极彰显着自己的责任和明确的态度，2020年习近平总书记在第75届国际联合国大会上向世界宣布了中国的“碳中和、碳达峰”的双碳目标。随后，在2022年，党的二十大报告中明确提出了“减污降碳”与“能源革命”等发展方向和目标。

东北三省地区作为我国老牌的重工业区域。地理区位特征明显，经纬度较高，森林禀赋与农业等自然条件较为优异。但人口流失于老龄化较为严重，整个东北三省区域特征较为鲜明。目前，对遥感技术的使用愈发娴熟。文章利用夜间灯光数据进行模拟，在探究能源碳排放量时空演变格局的同时，也对“排放-经济”进行了脱钩可视化呈现。

首先，基于所选取的8种主要能源的年鉴终端消耗量和IPCC的碳排放系数进行了省域能源碳排放量的折算及统计核算。结果显示：东北三省整体的省域能源碳排放区间为[27070.89, 51769.79] (万 t CO_2e)。其中，辽宁省以[12722.03, 26672.13] (万 t CO_2e) 远远高于其余2省，黑龙江省为[6000.417, 14166.96] (万 t CO_2e)，吉林省则为[7629.88, 13579.3] (万 t CO_2e)。其次，结合ArcGIS10.8，按照2005、2010、2015和2019年4个节点对模拟得到的东北三省36个地级市尺度能源碳排放量和人均能源碳排放量进行时空演变格局的探析，发现：(1) 黑龙江省的能源碳排放量类型以低排放为主，呈现出反向的演变趋势。吉林省排放量整体的演变趋势是愈发向好。辽宁省排放以较高排放为主，同时整体排放走势是愈发走高的。(2) 人均能源碳排放量的演变激烈程度和整体排放走势由小到大依次分别为：辽宁省、吉林省、黑龙江省及黑龙江省、吉林省、辽宁省。(3) 能源碳排放量在15个年份的空间全局自相关性均显著且Moran's I均呈现正相关。(4) 能源碳排放量的局域莫兰指数在东北三省36个地级市中呈现显著的区域主要集中于黑龙江省和辽宁省。对于人均能源碳排放量来说，局域莫兰指数的显著区域则相对较少。(5) 标准差椭圆在东北三省区域能源碳排放量的变化从大到小依次为，2015年、2019年、2005年、2010年。(6) 能源碳排放量SLOPE增长速率从快到慢依次为：黑龙江省、辽宁省、吉林省。最后，文章以每3年为一个变化过程对地区生产总值数据和能源碳排放量进行了脱钩可视化的呈现，结果显示：黑龙江省整体脱钩评价为正向演变，吉林省的整体脱钩关系质量日益下滑。辽宁省整体来看，没有较为明显的大面积脱钩评价质量的下滑。

关键词 能源碳排放量；夜间灯光数据；时空演变格局；脱钩可视化呈现

Abstract

With the continuous development of urbanization, the modern industry is developing rapidly and the economic level is increasing day by day. But behind the pace of progress is a game between ecological nature and economic development. The specific performance is as follows: energy consumption has become the primary driving force, and finally the high concentration of greenhouse gases mainly composed of carbon elements is filled in the air. At this stage, in the face of such a severe environmental pollution situation, a series of international climate and emission control conventions such as the Paris Agreement and the Kyoto Protocol have been promulgated, which also highlights the international importance of solving emission problems. Subsequently, in 2022, the report of the 20th National Congress of the Communist Party of China clearly put forward the development direction and objectives of " pollution reduction and carbon reduction " and " energy revolution. "

The three northeastern provinces are China 's old heavy industrial areas. The geographical location characteristics are obvious, the latitude and longitude are high, and the natural conditions such as forest endowment and agriculture are excellent. However, the population loss is more serious in aging, and the regional characteristics of the three northeastern provinces are more distinct. At present, the use of remote sensing technology is becoming more and more skilled. The article uses nighttime light data for simulation. While exploring the spatial and temporal evolution pattern of energy carbon emissions, it also presents the decoupling visualization of ' emission-economy '.

Firstly, based on the yearbook terminal consumption of the selected eight major energy sources and the IPCC carbon emission coefficient, the provincial energy carbon emissions are converted and statistically calculated. The results show that the overall provincial energy carbon emission range of the three northeastern provinces is [27070.89,51769.79] (ten thousand tons CO_2e). Among them, Liaoning Province [12722.03,26672.13] (ten thousand tons CO_2e) is much higher than the other two provinces, Heilongjiang Province [6000.417,14166.96] (ten thousand tons CO_2e), Jilin Province [7629.88,13579.3] (ten thousand tons CO_2e). Secondly, combined with ArcGIS10.8, according to the four nodes of 2005,2010,2015 and 2019, the spatial and temporal evolution pattern of energy carbon emissions and per capita energy carbon emissions in 36 prefecture-level cities in the three northeastern provinces was simulated. The results show that: (1) The type of energy carbon emissions in Heilongjiang Province is mainly low-emission, showing a reverse evolution trend. The overall evolution trend of emissions in Jilin Province is getting better. The emission of Liaoning Province is mainly high, and the overall

emission trend is increasing. (2) The evolution intensity of per capita energy carbon emissions and the overall emission trend from small to large are: Liaoning Province, Jilin Province, Heilongjiang Province and Heilongjiang Province, Jilin Province, Liaoning Province. (3) The spatial global autocorrelation of energy carbon emissions in 15 years is significant and Moran 'I is positively correlated. (4) The local Moran index of energy carbon emissions shows a significant area in 36 prefecture-level cities in the three northeastern provinces, mainly concentrated in Heilongjiang Province and Liaoning Province. For per capita energy carbon emissions, the significant areas of the local Moran index are relatively small. (5) The change of standard deviation ellipse in regional energy carbon emissions in the three northeastern provinces from large to small is 2015,2019,2005 and 2010. (6) The growth rate of energy carbon emissions SLOPE from fast to slow is: Heilongjiang Province, Liaoning Province, Jilin Province. Finally, the article takes every 3 years as a change process to visualize the decoupling of Gross regional product data and energy carbon emissions. The results show that the overall decoupling evaluation of Heilongjiang Province is a positive evolution, and the overall decoupling relationship quality of Jilin Province is declining. In Liaoning Province as a whole, there is no obvious decline in the quality of large-scale decoupling evaluation.

Key Words energy carbon emissions ; Night lighting data ; Space-time evolution pattern ; Visual presentation of decoupling

目 录

| | |
|--------------------------------|----------|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 目 录..... | IV |
| 1 绪论..... | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究的目的与意义 | 1 |
| 1.3 国内外研究现状分析 | 2 |
| 1.3.1 国内研究现状分析 | 2 |
| 1.3.2 国外研究现状分析 | 3 |
| 1.4 研究的相关概念及理论基础 | 4 |
| 1.4.1 相关概念 | 4 |
| 1.4.2 相关理论基础 | 4 |
| 1.5 研究的主要内容及技术路线 | 5 |
| 1.5.1 研究的主要内容 | 5 |
| 1.5.2 技术路线及研究框架 | 6 |
| 2 研究区域概况、数据来源及研究方法..... | 7 |
| 2.1 研究区域概况 | 7 |
| 2.1.1 东北三省自然地理区域概况分析 | 7 |
| 2.1.2 东北三省人文经济发展概况分析 | 7 |
| 2.2 数据来源 | 9 |
| 2.2.1 夜间灯光数据 | 9 |
| 2.2.2 东北三省相关能源消耗数据 | 9 |
| 2.2.3 东北三省的经济与人口数据 | 9 |
| 2.2.4 相关辅助数据及其他 | 9 |
| 2.3 研究方法 | 10 |
| 2.3.1 能源碳排放量的测算 | 10 |
| 2.3.2 标准差椭圆 | 10 |
| 2.3.3 冷热点分析 | 11 |
| 2.3.4 全局空间相关性分析 | 12 |
| 2.3.5 局部空间集聚程度分析 | 12 |
| 2.3.6 倾向值法 | 12 |
| 2.3.7 脱钩分析 | 13 |

| | |
|--|-----------|
| 3 基于夜间灯光数据下东北三省能源碳排放量的测算模拟 | 14 |
| 3.1 东北三省能源碳排放量省域尺度下的测算处理 | 14 |
| 3.1.1 东北三省能源消耗现状描述性统计分析 | 14 |
| 3.1.2 东北三省能源碳排放量省域尺度下的测算结果及现状描述 | 18 |
| 3.2 东北三省能源碳排放量在夜间灯光数据视角下的预测模拟及评价 | 19 |
| 3.2.1 夜间灯光数据的选择、校正与拟合 | 19 |
| 3.2.2 东北三省能源碳排放量地级市尺度下预测模型的建立 | 22 |
| 3.2.3 夜间灯光数据视角下能源碳排放量预测模拟模型的精度评价 | 22 |
| 3.2.4 东北三省能源碳排放量模拟单位像元碳排放值的修正 | 23 |
| 3.3 本章小结 | 24 |
| 4 东北三省能源碳排放量的时空演变格局探析..... | 26 |
| 4.1 东北三省能源碳排放量的时空演变格局 | 26 |
| 4.1.1 地级市尺度下东北三省能源碳排放量的时空演变格局 | 26 |
| 4.1.2 人均尺度下东北三省能源碳排放量的时空演变格局 | 29 |
| 4.2 东北三省能源碳排放量的时空差异及动态特征分析 | 30 |
| 4.2.1 东北三省能源碳排放量的全局空间相关性分析 | 31 |
| 4.2.2 东北三省能源碳排放量的局域空间集聚程度分析 | 31 |
| 4.2.3 东北三省能源碳排放量的冷热点分析 | 34 |
| 4.2.4 东北三省能源碳排放量的标准差椭圆分析 | 38 |
| 4.2.5 东北三省能源碳排放量的增长趋势程度评价 | 40 |
| 4.3 本章小结 | 41 |
| 5 东北三省能源碳排放量脱钩关系的可视化呈现..... | 44 |
| 5.1 东北三省能源碳排放量脱钩分析的相关测算 | 44 |
| 5.1.1 脱钩状态的含义及指标选择 | 44 |
| 5.1.2 脱钩分析的模型构建 | 45 |
| 5.1.3 地区生产总值数据的预处理 | 45 |
| 5.2 东北三省能源碳排放量脱钩关系的时空可视化呈现 | 47 |
| 5.2.1 2005 年至 2007 年脱钩关系的时空可视化呈现 | 47 |
| 5.2.2 2008 年至 2010 年脱钩关系的时空可视化呈现 | 48 |
| 5.2.3 2011 年至 2013 年脱钩关系的时空可视化呈现 | 50 |
| 5.2.4 2014 年至 2016 年脱钩关系的时空可视化呈现 | 51 |
| 5.2.5 2017 年至 2019 年脱钩关系的时空可视化呈现 | 53 |
| 5.3 本章小结 | 54 |
| 6 促进东北三省碳减排的对策建议..... | 56 |
| 6.1 政府监管的对策建议 | 56 |
| 6.1.1 政府应当积极出台相关政策，做好高排放企业群的“节能减排”引导 | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.2 政府应当大力推动技术创新和绿色资源领域的开发, 实现减污降碳 | 56 |
| 6.1.3 政府应当多从人口和地理区位入手, 有针对性地对城市展开排放监管 | 56 |
| 6.1.4 政府应当对绿色行业大力支持, 引领“绿色导向+”的乡村振兴 | 57 |
| 6.1.5 政府应当加强行业数据库的搭建, 助力各领域在减排导向的学术科研 | 57 |
| 6.2 产业发展的对策建议 | 58 |
| 6.2.1 产业应当发挥集体优势, 重视产品和服务的绿色化转型, 助力“双碳” | 58 |
| 6.2.2 产业应当自觉关注减排, 加强技术融合平台的搭建 | 58 |
| 6.3 居民行为的对策建议 | 58 |
| 结论 | 59 |
| 参考文献 | 60 |
| 致谢 | 62 |

1 绪论

1.1 研究背景

人类文明与社会生产力在飞速发展的同时，过度的资源消耗与污染物排放等问题层出不穷，且日益加重。归根到底，本质上这是一场生态自然与经济发展之间的极端博弈。这一系列极端过程的结果，不仅带来了全球气候变暖、温室效应等重大生态自然与气候问题，也对人类现有的发展方向发出了挑战。在“发现问题，解决问题”的逻辑推动下，首先对过度的资源消耗以及污染物排放问题进行剖析，不难发现炙手可热的化石能源（以石油、煤、天然气为主）始终在生产生活中占据着资源供给方的主要角色。加之经济发展需求在不断倒逼着能源消耗要持续紧跟脚步。最终在伴随着亮眼的经济与生产发展的同时，高浓度的以碳元素主要构成的温室气体，也得以充斥在空气中。面对如此严峻的环境污染局势，“减排”作为最直接有效的解决手段，呼之欲出。

与此同时，在《巴黎协定》、《京都议定书》等一系列国际性公约的颁布下，也从政策角度给解决温室效应带去了一个巨大的加持。2020年9月22日，习近平总书记在第75届国际联合国大会上向世界宣布了中国的“碳中和，碳达峰”双碳目标。2022年，党的二十大报告中明确提出了“减污降碳”与“能源革命”等发展目标和策略，来进一步助力中国“碳中和，碳达峰”双碳计划稳步践行。不难看出，在这样的国际形势中，中国也在积极地做出着回应。

东北三省，作为新中国的工业摇篮，在人口、经济和产业发展上有着较为鲜明的特点。东北三省在人口结构上，呈现较为严重的老龄化趋势。在第七次人口普查中，东北三省的老齡化程度位居全国前列，且对比前几次来看呈现正向变化。作为曾经的工业摇篮，东北三省在工业、制造业和军工产业都有较为壮观的发展成就。较好的资源基础和发展背景，不断促进着东北三省的经济的发展。但随着资源的过度消耗，可持续活力正在不断减退，同时人口流失及老龄化也愈发严重。简而言之，东北三省区域的排放和经济之间的矛盾，正在日益恶化。日前，这一问题也正在不断地向学术界发出着疑问与挑战^[1-3]。

综上所述，本文从“双碳目标”、“能源革命”、“可持续发展”、“生态文明”等鲜明的目标导向出发。在对能源碳排放量微观尺度进行时空演变及特征分析的同时，也对东北三省区域特殊的“排放-经济”的现状进行了表达。最后，文章也提供了较为鲜明且适时的减排政策引导。

1.2 研究的目的与意义

文章从政策导向为主的研究背景出发，从定量视角在东北三省区域针对能源碳排放与“排放-经济”的关系，进行了空间特征为主的统计表达。研究目的可以体现在：（1）

文章通过对主要的能源品种消耗量进行了一定时序年份的折算汇总、分类现状描述性统计分析，并对东北三省省域能源碳排放量进行了省域尺度的统计核算。基于以上几个步骤，文章最终可以进行夜间灯光模拟，来搭建地级市尺度的能源碳排放量预测模型。并借助 ArcGIS 等软件从空间分析和生态遥感角度，得到地级市微观尺度的比较和相应的时空演变格局。(2) 文章在得到东北三省 36 个地级市能源碳排放量的模拟预测结果后，可以进一步联动地区生产总值情况，计算脱钩指数。最终得到东北三省“排放-经济”的脱钩可视化结果。

基于以上研究目的，文章的研究意义体现在：本文从传统统计学原理出发，跨学科结合生态遥感技术，聚焦现阶段全球较为关注的碳排放和能源消耗问题。同时跳脱面板分析，更进一步从空间和经济视角，来探索了能源碳排放量的空间统计特征和“排放-经济”的关系。这样一来，可以对政府、产业和居民在日常的决策、产业调整、绿色化转型发展路径的探索以及居民的消费行为等提供一定的定量分析支撑。在具体落实和研究转化上具有较强的现实意义。

1.3 国内外研究现状分析

对国内外学者在能源碳排放量视角上，进行的相关核算、时空分异特征及“排放-经济”的关系进行相关学习，有利于文章在后续定量分析的操作，并为定性视角提供一定的文献参考。

1.3.1 国内研究现状分析

严峻的气候问题不断推动着，与碳排放空间格局相关的研究大力开展。其中，基于研究对象与研究方向存在着一定的时空性、区域性、动态性以及滞后性，让研究面板和格局角度对结果起到了重要的引导性作用。例如：杨迪等（2018）选取 2005-2014 年的能源数据在标准差椭圆、冷热点分析、局部与全局自相关以及地理加权回归等方法的加持下，从能源碳排放量的空间重心移动，排放含量格局变化以及碳排放的空间自相关性给出表述，同时对能源碳排放量的相关驱动影响机制进行了探究^[4]；在空间格局表述的方法选择上，对 ArcGIS 等地理遥感分析技术的运用较多，具体借助区域地图，从栅格、省级、县级尺度来对碳排放量进行可视化展示，同时将地理遥感可视化与空间格局分析进行了结合。这样一来，研究区域碳排放量的空间特征以及空间差异也得到了有效地可视化呈现^[2,5]；同时为了区别于传统的碳排放核算，引入夜间灯光数据（DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS），能有效做到在借助 ArcGIS 进行可视化的同时，细致地对碳排放量进行预测。有了微观尺度的预测数据后，可以帮助在传统演变格局的基础上，对排放量的趋势展开更为充分地探索^[6,7]。胡梦姍等（2022）则在传统碳排放量的视角上，对核算量进行了更加深入的核算，在长三角城市群开展省会城市的碳足迹深度研究。同样也对碳足迹深度进行了热点分析等时空特征统计表达，并开展了时空演变可视化分析^[8]。除此之外，面对夜间灯光数据下获取的地级市微观尺度的碳排放量，顾倩芸等（2022）在传统的时空演变

研究的基础上，引入经济数据来计算脱钩指数，并以此搭建了脱钩模型。紧抓经济和排放的矛盾点，对 2 者的发展方向进行了宏观解读^[7]。将研究的方向和现阶段“排放-经济”的矛盾进行了直观的结合与表达。简而言之，现阶段对于碳排放量的相关研究，主要以定量分析为主，并围绕着“核算”、“演变”、“时空分异特征”等关键词进行开展，这也指导文章后续对模型和方法展开了细致选择。

1.3.2 国外研究现状分析

面对碳排放的相关研究，国外的相关研究文献也主要聚焦于定量分析研究的视角，几乎可以将其归类为演变格局以及时空分异特征差异 2 个视角。对于指标表现，在 GIS 分析基础上引入包括人均碳排放强度等各项演变特征差异指标，可以丰富研究内容，同时对于为一定区域内提供差异针对性碳减排决策有很大的帮助。然而对于夜间灯光数据的时空性展现除了进行数据预测之外，也可以被运用在许多微观尺度碳排放的相关预测分析上^[9]。具体表现为借助其强大的时空性被宽泛地运用在包括以人口统计结果为校验依据进行的城市人口估算，或者进行 GDP 和城市发展水平上的相关探究^[10]，视角较为多元。例如：Shi K, et al. (2016) 将夜间灯光数据和 CO₂ 排放进行结合，得到中国 CO₂ 的高分辨排放数据，并在后续进行地理空间定位来进行排放分析，其中结果得到辽宁省东部属于一个高排放区，可以和本文后续涉及到辽宁省的排放结果进行简单比较^[11]。F. Bickenbach et al. (2016) 通过对比 GDP 收入水平具有一定差异的国家之间，在夜间灯光数据对 GDP 数据的表达和关联上的统计计量差异，可以发现夜间灯光数据和 GDP 发展水平之间有着较强的关联性。这为本文后续微观尺度模拟预测能源碳排放值与经济发展之间的关系讨论提供了显著的定量依据^[12]。Moutinho V et al. (2015) 利用环境库兹涅兹曲线以及 LMDI 分解法对 CO₂ 排放浓度与经济能源消耗的关系在东西南北欧 4 个区域的国家中进行了驱动分析，结果显示：人口、经济以及能源品种的消耗确实是主要的 CO₂ 排放驱动力^[13]。这也侧面反映了选取能源视角的碳排放研究是具有一定角色意义的。Han J, et al. (2018) 对中国的化石能源 CO₂ 排放量和基础设施用量存量，借助脱钩分析与经济发展方向进行了直接的宏观考证。同时通过因果检验得出经济发展与二氧化碳排放强度和物质储备有着十分密切的联系，对城市类型改革和消耗分配提供了很大的帮助^[14]。排放-经济问题之间的矛盾关系深入着城市、资源、人口与社会的方方面面。

综上所述，可以看出处理好经济和排放之间的矛盾，目前正是学术界的相关聚焦点。但对于碳排放量的侧重点有所区别，在国内视角，对于排放的研究多聚焦于宏观视角，且领域跨度较为宽泛，横跨包括地理、生态环境、经济管理与统计等在内的自然与社科两大领域。反观国外视角，运用范围更加微观。相同的是，研究对象和方法较为广泛和融合，在能源排放、人口以及经济等许多领域都广泛地在进行着统计、计量和遥感等方法的结合。本文在以上丰富的文献支撑下，同样以定量统计核算和处理为出发点，结合遥感和空间计量来展开在夜间灯光数据视角下，东北三省能源碳排放量时空演变逻辑及“排

放-经济”脱口可视化呈现的相关研究。

1.4 研究的相关概念及理论基础

1.4.1 相关概念

1.4.1.1 碳排放

碳排放，主要是指在进行资源利用或者自身反应循环后，产生的以“碳”为主要组成元素的产物排放。其中，最为主要的产生来源就是能源消耗，同时最为主要的排放产物就是以 CO_2 为主的温室气体。碳排放根据产生的行为和涉及行业的不同，可以较为宽泛地进行类型的划分。比如农业碳排放、工业碳排放、电力碳排放、交通碳排放等等。对于碳排放的相关研究中，最为主要的一环目前还是在数量层面的核算上。基于监测方式及排放产物的多元性，核算方式也是多种多样的。目前运用最为广泛的还是从碳元素角度进行转换分析将排放物均折算为二氧化碳当量来进行计量和测度。文章就在此基础上，从东北三省 8 种主要能源的消耗出发，对能源消耗碳排放量进行了多角度的测算，并以其为主体进行了后续的分析^[2-4]。

1.4.1.2 时空演变格局与空间分异特征

时空演变，是包含了时间变化和空间移动 2 个层面的格局改变。同时，基于传统的二维视角分析，加入了一定的空间变量后，能从数量层面挖掘出位置区域至今的空间集聚、溢出等等特征。其中包括，空间自相关性，局域空间自相关，标准差椭圆以及冷热点分析等等地理学和空间统计学中常用的分析方法。在时间和静态空间的数量基础上结合 ArcGIS 等地理信息系统相关的手段进行呈现，整体跨域的学科领域较为宽泛^[15,16]。

1.4.2 相关理论基础

彼得·霍尔城市演变模型理论，是由西方学者彼得·霍尔在 1984 年提出的。其中，该模型将城市的演变概括为 5 个时期 6 个阶段。其中演变主要由人口流动导致的城市格局、经济发展和条件等的演变，最终导致城市发生了更新和演变。(1)“流失中的集中”，城市在吸引人口的同时，自身城市人口也有一定程度的流失于其他城市。(2)“绝对集中”，由于产业化发展，人口呈现较大程度的往中心城市进行迁移，中心城市表现出了一定程度上的绝对集中。(3)“相对集中”阶段，这个阶段在人口增长速度上不同区域有所差别，但总体上仍然还是呈现向中心进行集中的。(4)“相对分散”阶段，在这个阶段，人口开始逐渐向郊区进行一定的转移和移动。(5)“绝对分散”阶段，这个阶段的人口流动的分散趋势明显加强，由城市区开始逐渐转向郊区。(6)“流失中的分散阶段”，在这个阶段，城市人口由于一些较为复杂的原因会逐渐从城市区流向郊区，不仅如此还会转而流向其他地区，城市开始发生了一定的逆城市化发展^[3]。

文章在这一理论的基础上，引入人口因素，同时也将整体的演变分析思路进行迁移，对地级市的人均碳排放量也进行了演变和动态特征分析。

1.5 研究的主要内容及技术路线

1.5.1 研究的主要内容

1.5.1.1 东北三省能源碳排放省域统计核算

在对东北三省 8 种主要的能源品种进行终端消耗量的数据整理后, 结合 IPCC 的碳排放系数来对东北三省的省域尺度进行能源碳排放量的核算。由于时间较为宽泛, 同时能源消耗量的完整尺度难以获取。现阶段, 通过此方法只能进行并得到东北三省省域尺度能源碳排放的核算量。不过在此省域尺度的基础上, 通过借助夜间灯光数据的预测搭建, 能在后续得到地级市尺度的微观模拟值。

1.5.1.2 夜间灯光数据下地级市尺度的测算模拟

鉴于微小尺度能源消耗量较为难以获取, 直接进行统计核算较为困难。目前较多学者通过借助遥感来探索更微观单元的反应与表达。现阶段使用的最多的就是夜间灯光数据。由于夜间灯光数据与社会、经济以及自然之间的关系较为密切, 同时尺度较为精细。本文就将夜间灯光数据作为地级市微观尺度能源消耗碳排放量的主要自变量元素, 统计核算的省域碳排放量为因变量元素, 构建二者之间的函数关系。借助这个关系, 进行价值转移, 利用地级市尺度的夜间灯光数据进行反应, 从而最终得到东北三省地级市微观尺度的能源碳排放量。

1.5.1.3 东北三省能源碳排放量的时空演变格局及动态特征分析

对得到的地级市尺度的碳排放值, 结合 ArcGIS 进行空间连接。对能源碳排放量和人均能源碳排放量在 2005、2010、2015 和 2019 年 4 个年份节点上采用自然断点法进行了 5 级划分的空间可视化呈现。并通过比较分析来进行演变格局的探究。同时也借助传统的空间统计指标对碳排放量进行了时空分异特征的解读。

1.5.1.4 “排放-经济”的脱钩动态可视化评价

文章非常主要的一个出发点就是经济发展与碳排放之间的矛盾关系。如何量化与发掘这个矛盾关系十分关键。文章对于这个问题, 引入了 tapio 理论, 对能源碳排放量 and 对应尺度的地区生产总值搭建了脱钩模型。通过对照脱钩指数的评价标准, 并结合可视化结果进行了相应的“排放-经济”的脱钩评价表达。

1.5.2 技术路线及研究框架

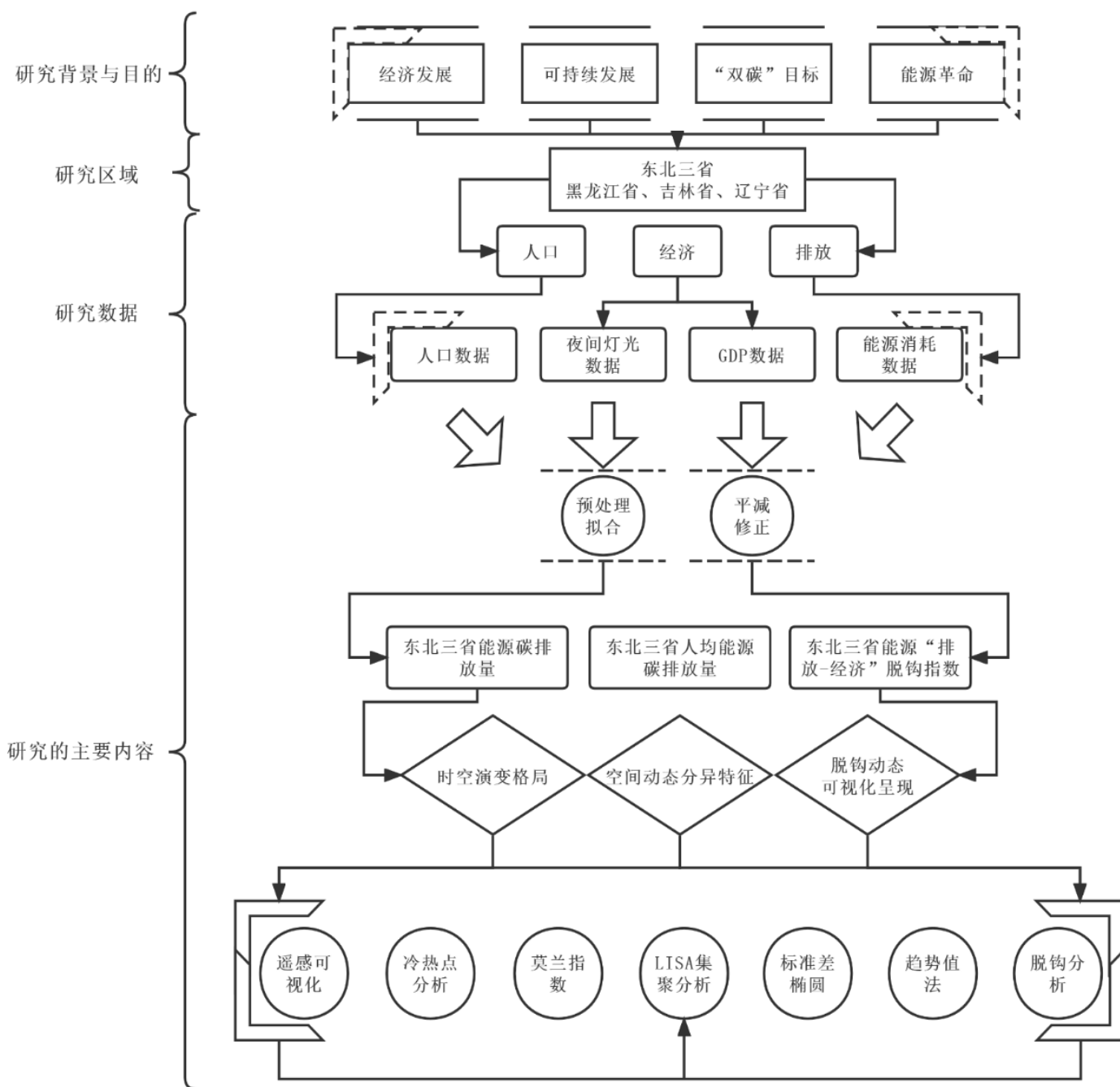


图 1.1 论文的研究技术路线图

2 研究区域概况、数据来源及研究方法

文章选取了东北三省作为主要的研究区域，开展东北三省 36 个地级市能源消耗为主导的碳排放量模拟和时空分异研究。东北三省具有极高的森林自然资源禀赋和优异的地理区位。同时，作为重点的老牌工业区之一，对其人口经济和能源消耗之间的矛盾关系和发展方向进行时空区位的演变探究具有一定的显著意义和发展前瞻性。文章在这个部分对研究区域概况进行了一定的阐述剖析，也对文章整体定量分析，包括能源碳排放量的核算、时空演变及时空分异特征的分析进行了方法的阐述与解读。

2.1 研究区域概况

在进行方法和数据的介绍之前，先对东北三省区域进行一定的概况分析，分别从自然地理和人文经济 2 个板块入手。

2.1.1 东北三省自然地理区域概况分析

东北三省，位于我国东北部（118° E-135° E，48° N-55° N），总面积 78.73 万平方公里，由黑龙江省、吉林省和辽宁省 3 个行政省份、36 个地级市组成。区位划分如图 2.1 所示。整体属于温带季风气候，由于所处的纬度较高，东北三省在季节上，四季分明，其中冬季较为寒冷而漫长，部分高纬度区域以冬季为主。在地形方面，东北三省整体以平原和山地为主，自然资源较为丰富。拥有大小兴安岭、长白山等我国重要的生态屏障，扎龙自然保护区、帽儿山以及凉水国家自然保护区等众多湿地、山林保护区。良好的自然生态也让东北三省成为了东北虎等许多野生动物的栖息地。同时，东北三省地区也拥有较为肥沃的“黑土地”。这也让东北三省在玉米、大豆等作物的产量方面，在全国遥遥领先。面对如此优越的自然资源禀赋，如何保护好生态自然资源并协调好和能源消耗及污染排放之间的矛盾，显得尤为重要^[1,17]。

2.1.2 东北三省人文经济发展概况分析

面对东北三省独特的气候环境和自然资源禀赋，东北三省的人口、经济以及产业的发展特点也较为鲜明。首先，东北地区的经济发展是较早的，尤其是在工业方面，我国的许多军工、汽车制造企业都集中于东北三省地区。它在我国的工业方面有着较为辉煌的发展历史和地位，东北三省被誉为新中国的“工业摇篮”。但随着资源的运用不合理，城市发展后劲不足以及东北三省地区寒冷的气候条件，导致了人口流失较为严重，同时也伴随着严重的人口老龄化。在第七次人口普查中，东北三省的老齡化程度再次位居我国前列^[4]。因此，在人口流失、经济发展和工业排放高程度矛盾并行的几大问题下，如何认知和处理现状，并平衡好几者之间的关系刻不容缓。

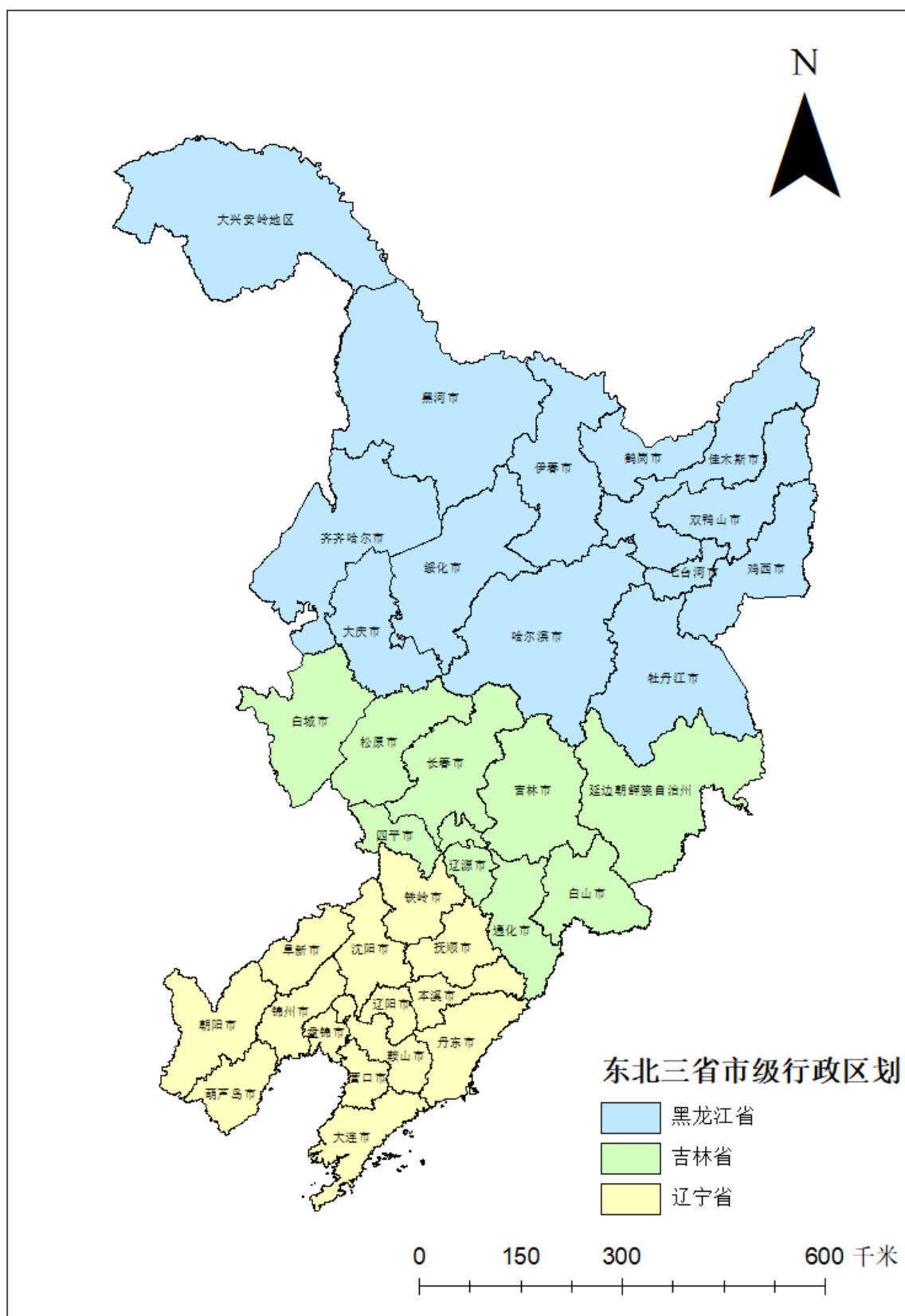


图 2.1 东北三省行政区划图

2.2 数据来源

2.2.1 夜间灯光数据

夜间灯光数据,由于观测年份和获取方式的不同,分为 DMSP-OLS 数据和 NPP-VIIRS 数据。DMSP-OLS 数据的运行时期为 1997 年至 2013 年,由美国国家地球物理数据中心提供,随后 DMSP-OLS 数据停止了获取。随后年份的夜间灯光数据是利用 Suomi 国家极地合作卫星上搭载的可见红外辐射成像仪的 Day/Night 波段获取的 NPP-VIIRS 数据^[6]。其中,夜间灯光影像的像元 DN 值范围为 0~63, DN 值的大小则代表平均的夜间灯光强度,TDN 则代表夜间灯光总值, DN 值越大则代表该区域的夜间灯光强度越高。在国内外相关文献的学习和研究基础上,本文选取了 2005 至 2013 年的 DMSP-OLS 数据,和 2012 至 2019 年的 NPP-VIIRS 数据为原始数据进行东北三省能源碳排放量地级市尺度的拟合预测。但由于 2 组数据在获取层面上有差异,存在一定的背景噪声等问题。故在使用前需要对其进行一定的去噪处理、校正和转换^[7]。

2.2.2 东北三省相关能源消耗数据

能源消耗的统计数据来自《中国能源统计年鉴》(2006-2020),本文选取了 8 种主要能源消耗品:原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气。并根据 2005 至 2019 年共 15 年的终端能源消耗量,进行了东北三省省域能源碳排放量和人均能源碳排放量的统计计算。其中天然气的核算单位为亿立方米,其余能源的统计核算单位均为万吨。不过,在进行核算之前,需要将能源消耗量进行标准煤的单位折算。

2.2.3 东北三省的经济与人口数据

文章中对于人均能源碳排放量(CP)和脱钩指数的测算中,分别利用到了 2005-2019 年东北三省 36 个地级市的人口数据(POP)以及地区生产总值数据。其中,以上数据来自《黑龙江省统计年鉴》(2006-2020)、《吉林省统计年鉴》(2006-2020)、《辽宁省统计年鉴》(2006-2020)、《中国城市统计年鉴》(2006-2020)、《延边朝鲜族自治州统计年鉴》以及部分地市的统计信息公报。

2.2.4 相关辅助数据及其他

这里所提到的辅助和其他数据,主要指的是折算标准煤系数和碳排放系数,如表 2.1 所示。其中,这 2 部分的数据,主要是用来帮助后续进行能源消耗数据的单位统一折算和省域能源碳排放量的测算。2 个参数的获取均来源于政府间气候变化专门委员 IPCC。其中,天然气折算标准煤系数的单位分别为:kg 标准煤/m³,天然气的折算标准煤系数选取为 1.33。

表 2.1 能源的相关折算数据

| 能源类别 | 折算标准煤系数 (t 标准煤/t) | 碳排放系数 (万 t 碳排放/万 t 标准煤) |
|------|----------------------|----------------------------|
| 原煤 | 0.7143 | 0.7559 |
| 焦炭 | 0.9714 | 0.8550 |
| 原油 | 1.4286 | 0.5857 |
| 汽油 | 1.4714 | 0.5538 |
| 煤油 | 1.4714 | 0.5714 |
| 柴油 | 1.4571 | 0.5912 |
| 燃料油 | 1.4286 | 0.6185 |
| 天然气 | 1.1~1.33 | 0.4483 |

(注: IPCC: <https://www.ipcc.ch/>.)

2.3 研究方法

2.3.1 能源碳排放量的测算

对于能源碳排放量的测算,本文依据 IPCC 清单法则进行测算。根据能源消耗量及碳排放因子(来自 IPCC,见表 2.1)进行能源碳排放量的统计核算,见式(2-1)和(2-2)[3,8]。

$$C_j = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^8 K_i E_i \quad (2-1)$$

$$CP_j = C_j / POP_j \quad (2-2)$$

其中 C_j 表示第 j 年的能源碳排放量(折算为 CO_2 当量), K_i 表示第 i 种能源的碳排放系数(万 t 碳排放/万 t 标准煤)、 E_i 表示第 i 种能源的消费量(在这里选取的是能源类型的终端消费总量,并按照标准煤进行折算(万 t))。44 和 12 则表示表示 CO_2 中碳和氧的分子量。式(2-2)中, CP_j 表示第 j 年人均能源碳排放量, POP_j 表示该地区第 j 年的人口总量。

2.3.2 标准差椭圆

标准差椭圆是分析空间分布方向特征的典型方法之一。通过对 SDE 参数进行测算与刻画,可以对变量在空间视角展示中心性、方向性和形态等整体的特征。对于标准差椭圆来说,其要素包含中心点、长半轴、短半轴和方位角,分别代表着空间分布的相对位置,发展的趋势方向,主要及次要的离散程度。本文主要通过对东北三省能源碳排放量和人均能源碳排放量进行 SDE 参数的刻画,利用 ArcGIS 进行地理区域对应的可视化展示,以帮助对能源碳排放量的重心和范围的格局演变进行剖析。对于标准差椭圆的主要

要素的计算公式见式 (2-3)、(2-4)、(2-5) 和 (2-6) [4,18,19]。

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^n CT_i x_i}{\sum_{i=1}^n CT_i}, \bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n CT_i y_i}{\sum_{i=1}^n CT_i} \quad (2-3)$$

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

$$\tilde{x} = x_i - \bar{x}_i, \tilde{y} = y_i - \bar{y}_i \quad (2-5)$$

$$\sigma_x = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \cos \theta - \omega_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \right), \sigma_y = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \sin \theta - \omega_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \right) \quad (2-6)$$

其中, \bar{x}_i 和 \bar{y}_i 分别表示标准差椭圆中心点的横、纵坐标; CT_i 则表示东北三省各个地级市的能源碳排放量值; σ_x 和 σ_y 分别表示标注差椭圆长短轴的距离; θ 表示标准差椭圆的方向夹角。本文主要通过对长短半轴的可视化重心移动以及大小变化, 来对排放量的演变方向和范围进行格局判定^[4]。

2.3.3 冷热点分析

利用 ArcGIS 10.8 对东北三省能源碳排放量进行 Getis-Ord G_i^* 指数的测算, Getis-Ord G_i^* 指数能对能源碳排放量的集聚程度进行程度划分, 这个集聚程度主要是通过区域之间的能源碳排放量的数值视角展开的。此外, 借助 ArcGIS 10.8 平台提供的自然断点法来对指数结果进行 5 级分类, 可以分为“冷点区”、“次冷点区”、“过渡区”、“次热点区”和“热点区”。具体的计算公式见式 (2-7) 和式 (2-8)。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}(d) X_i X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (2-7)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (2-8)$$

其中, ω_{ij} 表示地级市 i 和 j 之间的空间权重, $E(G_i^*)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别表示 G_i^* 的数学期望和变异方差。对于 Z 值得分, 是根据以上 G_i^* 的相关指标进行测算的统计显著性和集聚程度高低的判断指标。从数值层面反映着空间集聚的高低程度, 本文对于这个部分则是通过空间可视化进行展现的^[4,16]。在比较数量结果时, 也对其演变形式进行了适当解读。

2.3.4 全局空间相关性分析

全局空间自相关是用来刻画同一变量在不同空间位置上空间关联性的总体特征的一种空间统计方法。对于这一特征的判断是通过 Moran' I 的统计测算来进行表达的。Moran' I 的取值范围为[-1,1]，当测算值的正负号则代表正相关和负相关，同时越接近于-1 和 1，则表示全局的空间相关性就越强。此外，也可以根据 Z 得分和 p -value（在这里选取的显著性阈值为 0.05）进行全局自相关显著性的判别。本文对东北三省 36 个地级市的能源碳排放量进行全局空间自相关性的分析，具体的计算公式如式（2-9）^[2,4]。

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \sum_{j=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (2-9)$$

在式（2-9）中， N 代表的是行政单元的数量，在本文中取 36， y_i 和 y_j 分别代表行政单元 i 和 j 的能源碳排放量， \bar{y} 则表示 36 个地级市的能源碳排放量的平均值， ω_{ij} 为相邻单元 i 和 j 的空间权重矩阵。

2.3.5 局部空间集聚程度分析

相较于全局空间自相关对单元进行的空间总体集聚相关性的呈现，局部空间自相关（Local Moran' I ）则是对局部的单元与相邻单元间的碳排放空间关联特征进行局部揭示。通过采取 LISA 展开聚类测度来进行相关的表达。当相关性显著且 LISA 统计指标为正值时，则表示局域空间正相关，其中对于高集聚和低集聚，分别会出现“高-高（H-H）”集聚和“低-低（L-L）”集聚的表现；相反对于负值时刻的局域空间负相关，则呈现“高-低（H-L）”集聚和“低-高（L-H）”集聚的高（低）和低（高）集聚的演绎。LISA 指标的计算公式如（2-10）。式（2-10）中的变量含义与式（2-9）中变量含义一致^[4]。

$$I_i = \frac{N(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^N \omega_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (2-10)$$

2.3.6 倾向值法

为进一步探究东北三省能源碳排放量在数量层面上的增长类型，文章通过对 2005-2019 年东北三省能源碳排放量进行 SLOPE 值的测算来进行趋势类型的分析，并借助具体的趋势划分类型如表 2.2 所示，进行增长类型的区分和划分。SLOPE 指标的计算公式如式（2-11）^[6]。

$$SLOPE = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i C_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n C_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2-11)$$

式(2-11)中, n 表示碳排放量的测算年份(2005-2019), 取 15。 x_i 则取值 1~15, C_i 表示第 i 年对应的能源碳排放量。

表 2.2 2005-2019 年东北三省能源碳排放量增长趋势的划分标准

| 增长类型 | 缓慢增长 | 较慢增长 | 中速增长 | 快速增长 | 迅猛增长 |
|---------|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| $SLOPE$ | $< \bar{C} - 0.5S$ | $\bar{C} - 0.5S \sim \bar{C} + 0.5S$ | $\bar{C} + 0.5S \sim \bar{C} + S$ | $\bar{C} + S \sim \bar{C} + 1.5S$ | $> \bar{C} + 1.5S$ |

(注: \bar{C} 表示 2005-2019 年东北三省 36 个地市能源碳排放量的平均值, S 则代表其标准差。)

2.3.7 脱钩分析

文章为探究能源碳排放量和经济发展的方向趋势, 利用脱钩(Tapio)分析来构建东北三省能源碳排放量和地区生产总值水平之间的脱钩模型。通过对脱钩弹性指数的测算(见式 2-12)和关系的分类标准(见表 2.3)来进行具体的关系评价解读^[7,20,21]。

$$\alpha = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \text{地区生产总值} / \text{基期地区生产总值}} \quad (2-12)$$

其中, 式(2-12)的分子部分代表碳排放量的增长率, 分母部分则可以理解为地区生产总值的增长率。其中, C_0 代表的是时序组中的基期能源碳排放量。通过对模型指标的剖析, 可以发现对脱钩分析进行定量演绎的脱钩指数, 本质上可以理解为碳排放以及经济发展相同时空维度中的弹性变化表达。除此之外, 本文在测算脱钩指数的同时, 也借助 ArcGIS10.8 将脱钩类型按照每 3 年一个时序变化时期进行脱钩类型的地理空间呈现。以帮助文章进行相关的评价解读。

表 2.3 脱钩关系的分类标准

| 状态 | Tapio | C 增长率 | 地区生产总值 增长率 | 脱钩指数 |
|-----|-------|-------|---------------|----------------------|
| 脱钩 | 强脱钩 | - | + | $\alpha < 0$ |
| | 弱脱钩 | + | + | $0 < \alpha < 0.8$ |
| | 衰弱脱钩 | - | - | $\alpha > 1.2$ |
| 负脱钩 | 强负脱钩 | + | - | $\alpha < 0$ |
| | 弱负脱钩 | - | - | $0 < \alpha < 0.8$ |
| | 扩张负脱钩 | + | + | $\alpha > 1.2$ |
| 连接 | 扩张连接 | + | + | $0.8 < \alpha < 1.2$ |
| | 衰退连接 | - | - | $0.8 < \alpha < 1.2$ |

3 基于夜间灯光数据下东北三省能源碳排放量的测算模拟

夜间灯光数据，是基于卫星观测获取的对于各级单元夜间灯光值的一个量化统计结果。日前国内外对于碳排放相关的核算研究中，由于变量统计数据的可获取性和尺度性较为宏观，因此进行大范围的县市级尺度的核算研究较难进行。不过，随着跨越空间区位的遥感观测技术得到大力发展，人们通过研究发现夜间灯光数据能很好对人类活动的强度进行一定的关联解读。其中不乏有学者利用夜间灯光数据进行了碳排放各级尺度上的相应研究。例如，武娜等（2019）就曾利用夜间灯光数据对我国重要煤炭资源基地晋陕蒙地区进行了地级市尺度的能源碳排放拟合以及其时空格局的相关空间区位研究^[6]。

总而言之，夜间灯光数据在数据尺度和口径的局限上可以带去较大的帮助。因此本文借助夜间灯光数据进行东北三省能源碳排放量在地级市微观尺度上的模拟，以推动后续的时空演变及时空分异特征的统计测度。

3.1 东北三省能源碳排放量省域尺度下的测算处理

利用夜间灯光数据进行更微观单元的数据拟合模拟，首先需要建立起模拟关系。对于模拟关系的建立，主要是利用宏观省域碳排放量统计核算值和对应单元的夜间灯光数据开展拟合处理来得到的。在这个部分先对东北三省省域能源碳排放量进行核算，基于公式（2-1）中的变量所需，依次进行能源消耗量的标准煤折算以及省域尺度的能源碳排放量统计测算。

3.1.1 东北三省能源消耗现状描述性统计分析

对 8 种主要能源消耗品：原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气，在 2005 至 2019 年共 15 年的终端能源消耗量，进行标准煤进行折算，可以让能源消耗量具有数量可比性。随后以折算值对能源消耗现状展开描述性统计剖析。文章对消耗现状的剖析，主要是对 8 种能源按照物理状态进行划分后，分别对区域整体和 3 个省份的能源标准煤折算值进行统计图可视化，具体分类为：固态能源（如图 3.1 所示）、气态能源（如图 3.2 所示）和液态能源（如图 3.3 所示）。

3.1.1.1 固态能源消耗描述性统计分析

本文选取的 8 种主要消耗能源中，有 2 种固态能源：原煤和焦炭。如图 3.1 所示，分别对黑龙江省、吉林省、辽宁省以及东北三省整体的消耗情况，按照折算标准煤（万 t）进行了直方图和折线图的展示。对于这两种能源品种来看，原煤作为未经过多处理的开采煤，在使用过程中燃烧利用率较低，因此带来的排放污染也较为严重。焦炭则多用于炼铁，在工业和钢铁制造端中经常被消耗。

首先，就原煤来看：（1）在东北三省区域 3 个省份中，原煤的消耗量波动较为明显。

可以简单概括为，黑龙江省始终呈现一个较为明显的增加趋势，在 2013 年之前始终处于最少消耗的地位，从 2014 年开始逐渐走高并占据主要的消耗位置，其原煤消耗量的变化区间为 $[810.1519, 3482.641]$ （万 t）。对于吉林省和辽宁省来说，变化较为平和，并在 2013 年左右开始整体下降，消耗区间分别为 $[1162.045, 3202.964]$ （万 t）、 $[1774.7, 2680.504]$ （万 t）。（2）东北三省区域整体的消耗量变化较为平缓，整体的消耗区间为 $[4873.726, 7568.709]$ （万 t）。就占比的份额来看，吉林省和辽宁省不相上下。（3）通过可视化，不难发现 2012 至 2017 年是主要的增减变化区间。

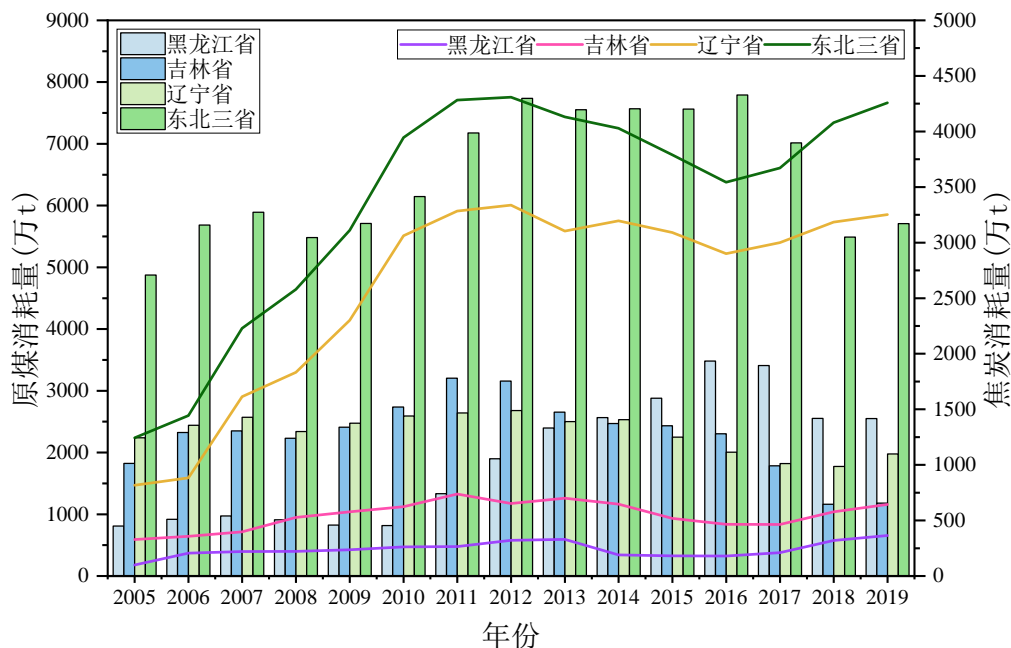


图 3.1 固态燃料折算标准煤的消耗情况

其次，就焦炭来说：（1）相较于原煤，焦炭整体的消耗趋势比较平整，在数量层面折线无交点。同时整体的消耗区间为 $[1242.051, 4308.46]$ （万 t），终端消耗量远小于原煤。

（2）对于黑龙江省、吉林省和辽宁省 3 个省份单独来说，终端消耗的焦炭数量差距较为明显。严格遵循黑龙江省 $[98.26682, 363.1287]$ （万 t）<吉林省 $[327.2841, 736.0395]$ （万 t）<辽宁省 $[816.5006, 3337.041]$ （万 t）。同时，黑龙江省和吉林省的波动较为平缓，辽宁省波动明显，2010 年前消耗量逐渐上升，2010 年后逐渐进入一个高平台期。（3）东北三省整体对于焦炭的消耗变动趋势和辽宁省的十分相似，在 2012 年（4308.46 万 t）呈现一个波峰，随后缓慢下降，随后消耗量又逐渐回升，最终在 2019 年呈现的消耗量为 4258.375 万 t。

3.1.1.2 液态能源消耗描述性统计分析

除了 2 种固态能源外，有 5 种液态能源。分别为原油、汽油、煤油、柴油和燃料油。以上 5 种液态能源均为化石能源，作为主要的发动能源，被广泛且极大量的使用在交通运输行业上。同时由于城市化的大力发展，不断促进着交通规划、汽车制造等等行为的匹配式前进。作为直接使用的主要能源类型，这 5 种化石液态能源的碳排放量占据了较为明确的主导地位。折算为标准煤的 5 种液态能源 2015 至 2019 年在东北三省的消耗量

如图 3.2 所示。在这里，文章分别从黑龙江省、吉林省和辽宁省 3 个省份单独的视角和东北三省整体区域的视角进行阐述：

首先，就黑龙江省而言：（1）在变化区间上呈现原油[64.187， 827.7594]（万 t）、汽油[408.4459， 686.4964]（万 t）、煤油[0.456134， 128.8211]（万 t）、柴油[480.945， 880.613]（万 t）、燃料油[4.328658， 98.0591]（万 t）。（2）在 2013 年之前，柴油消耗量始终稳居上风。汽油和原油紧随其后且数量曲线有交点。但在 2016 至 2018 年间，原油消耗量急剧下降，汽油和柴油稳定的同时有所回升。（3）5 种固态能源的波动主要呈现出两种变化趋势。除（2）中所展示之外，煤油和燃料油表现和波动基本一致，消耗量较低，2012 年之前燃料油高居煤油之上，随后煤油消耗量高居燃料油之上。

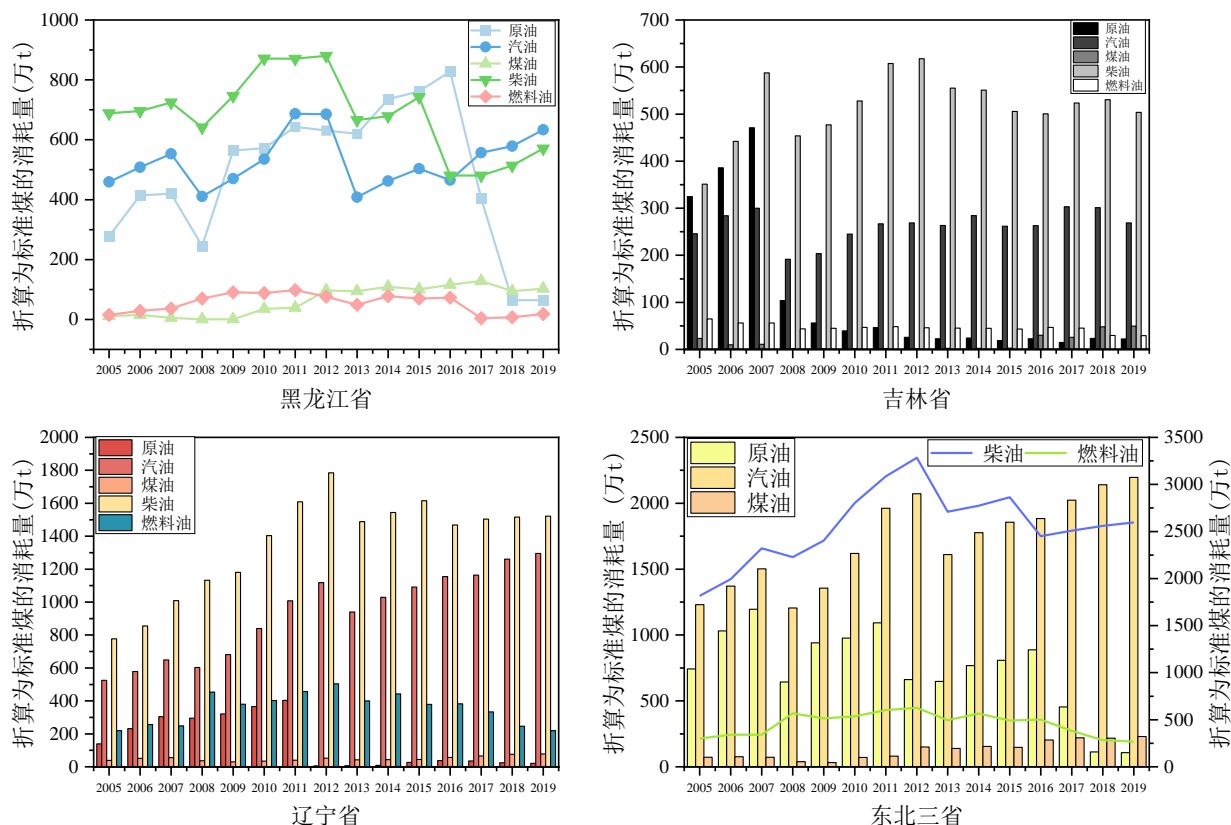


图 3.2 液态能源折算标准煤的消耗情况

其次，在吉林省：（1）变化趋势最为明显的是原油[14.88601， 471.1251]（万 t），原油在 2005 至 2007 年的消耗直线上升，但 2007 年后原油的消耗量呈现“断崖式”下降，在 2010 年后成为 5 种能源消耗最少的。此外，煤油也是变化最为明显的[1.191834， 49.55675]（万 t），消耗量极少。在 2008 至 2015 年间消耗量几乎仅有其他能源品种的十分之一，在 2016 年后消耗量才逐渐回升并走高。（2）相比之下，变化较为平缓的是汽油[191.7234， 302.9907]（万 t）、柴油[351.1902， 617.5481]（万 t）和燃料油[29.41487， 64.75844]（万 t），波动都较为正常，对这几类资源的刚需都较为稳定。

在辽宁省中：（1）严格的消耗量比较下，柴油[776.8092， 1784.802]（万 t）>汽油[524.9808， 1295.009]（万 t）。其余能源消耗区间为，煤油[30.34027， 77.66049]（万 t）、原油[5.314392， 403.5795]（万 t）、燃料油[219.6758， 503.9529]（万 t）。（2）从分布情况来看，燃料油和

柴油的分布类似，近似以 2012 年为中心的偏态分布。较为平稳波动的当属煤油，15 个年份间变化细微，整体的消耗量非常少。而原油则刚好相反，在 2011 年之前占据了一定的消耗量，在 2012 至 2014 年急剧下降，消耗量几乎是之前的百分之零点几，随后虽攀升但仍消耗甚微。

最后，对于整个东北三省来看：（1）在以上 3 个省份的单独剖析中不难看出，对于柴油有较大的消耗使用偏好，其次是汽油。这与城市化、道路交通与汽车制造的蒸蒸日上相辅相成。（2）面对总体消耗量来看，柴油[1816.406, 3282.963]（万 t）、汽油[1204.804, 2196.903]（万 t）仍是巨头消费品。对于煤油和燃料油的需求始终较少，面对产业不断发展和进步，煤油和燃料油大面积使用的情况愈发减少。

3.1.1.3 气态能源消耗描述性统计分析

本文也选取了得到大面积日常普及使用的气态能源，天然气。天然气作为一种清洁能源，在使用过程中能有效减少碳排放，并且能适配运用在许多工业、生产和生活行为活动中。其中最为主要用途为工业燃料、生活燃料，此外天然气相比之下也较为安全可靠。日前许多城市已经开始使用并搭建了天然气网络，关于天然气的使用备受瞩目。对天然气消耗量（亿立方米）的可视化展示如图 3.3 所示。

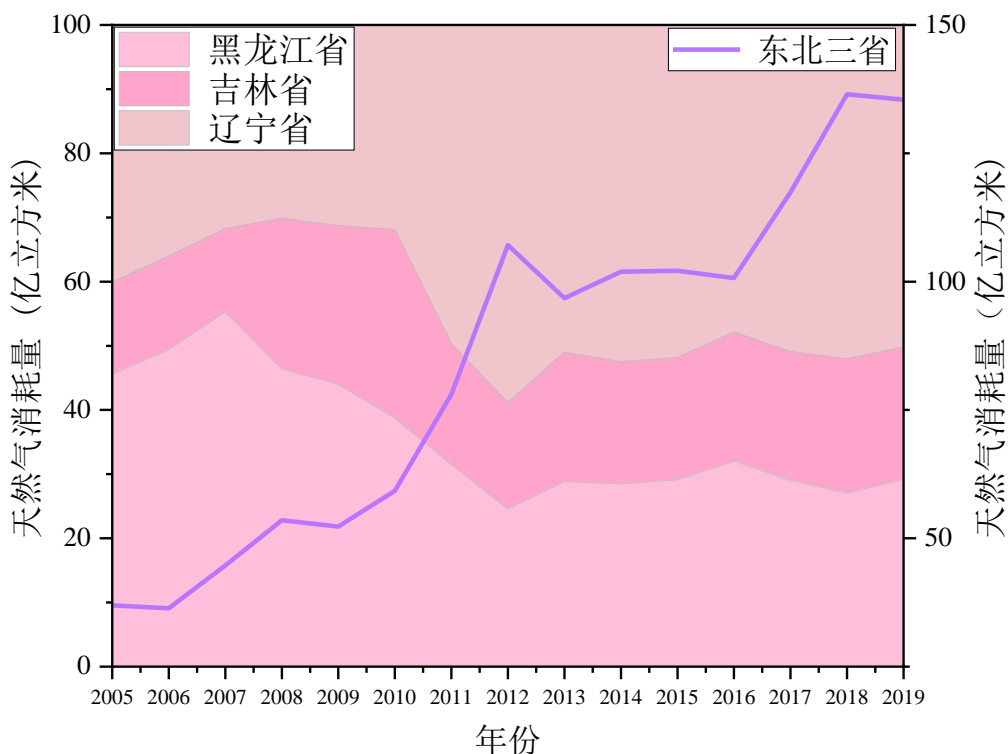


图 3.3 气态能源折算标准煤的消耗情况

首先，3 个省份的消耗区间分别为，黑龙江省[16.84, 39.6]（亿立方米）、吉林省[5.3, 28.53]（亿立方米）、辽宁省[13.1, 71.04]（亿立方米）。从图 3-3 可以直观感受到，辽宁省天然气消耗量多于黑龙江省，同时远多于吉林省。其次，从面积的波动来看，黑龙江省对于天然气的使用 2007 年后逐渐下降，吉林省在 2010 年后也呈现出一定的下降趋势，在 2010 年后辽宁省则是逐渐消耗上升。最后，就整个东北三省天然气的消耗曲线来看，

可以根据曲线的走势将其分为 4 个时期：增长期 1、平台期 1、增长期 2、平台期 2。其中，增长期 1，是从 2005-2012 年，增长的程度较为猛烈。2012 至 2016 年是一个波动较小的平台期 1。随后进入增长期 2（2016-2018 年），紧接着进入平台期 2。总的来说，天然气这一清洁能源的消耗在整体上较为可观，这背后离不开政策的相关引导。

3.1.2 东北三省能源碳排放量省域尺度下的测算结果及现状描述

基于式 (2-1) 对东北三省能源碳排放量进行了统计核算，并将东北三省在 2005-2019 年的能源碳排放量值进行分省和整体的统计图可视化，如图 3.4 所示。

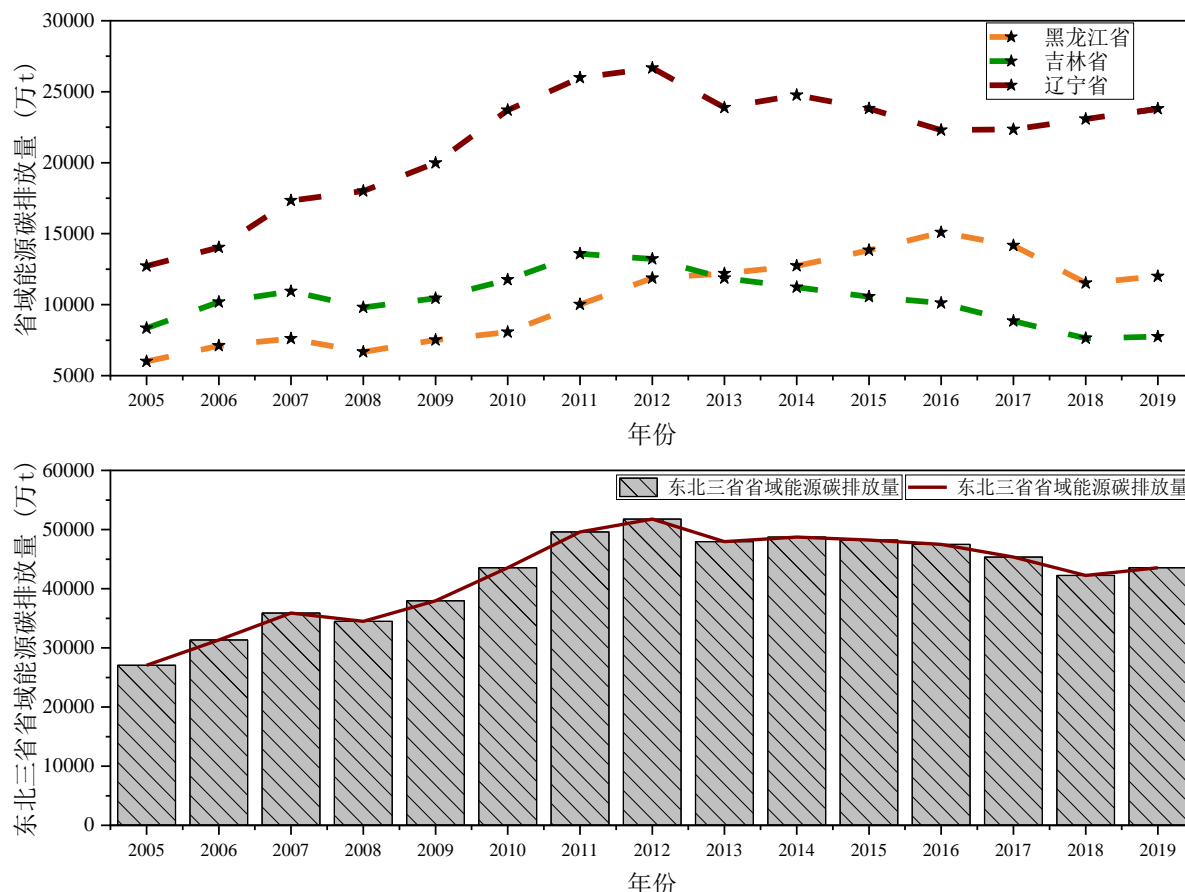


图 3.4 黑龙江省、吉林省、辽宁省及东北三省区域能源碳排放量的描述性统计分析

首先，对于 3 个省份来说，在 2005 至 2019 年，显而易见的辽宁省的能源碳排放量 [12722.03, 26672.13] (万 t CO_2e) 远远高于黑龙江省 [6000.417, 14166.96] (万 t CO_2e) 和吉林省 [7629.88, 13579.3] (万 t CO_2e)。2013 年之前，排放量排序为辽宁省 > 吉林省 > 黑龙江省。随后，黑龙江省的排放量超过吉林省，并呈小幅的上升趋势。辽宁省在 2013 年之后波动较为平缓，吉林省排放量则愈发下降。

其次，面对东北三省区域的能源排放量来看，整体排放量的区间为 [27070.89, 51769.79] (万 t CO_2e)。对于波动可以分为几个时期来进行，2005 至 2007 年 [27070.89, 35870.96] (万 t CO_2e) 为第 1 个排放量增长期；2007 至 2008 年 [34471.19, 35870.96] (万 t CO_2e) 则表现为第 1 个排放量下降期；2008 至 2012 年为第 2 个能源排放量增长期 [34471.19, 51769.79] (万 t CO_2e) 并在 2012 年达到了排放量的最高值；2012 至 2013 年

[47946.59, 51769.79] (万 t CO_2e)、2013 至 2018 年[42224.13, 48713.19] (万 t CO_2e) 分别为第 2 和 3 个排放量下降期, 其中 2013 至 2018 年的下降表现的较为平稳; 最后, 2018 至 2019 年[42224.13, 43537.91] (万 t CO_2e), 呈现出了一个小幅的排放量增长期。

3.2 东北三省能源碳排放量在夜间灯光数据视角下的预测模拟及评价

在对夜间灯光数据和东北三省省域能源碳排放量进行模拟函数拟合搭建之前, 需要对夜间灯光数据进行选择、校正、转换等多个步骤, 将数据进行转换和统一。最后, 根据微观地级市的夜间灯光数据来获取到东北三省地级市尺度的能源碳排放量模拟值。

3.2.1 夜间灯光数据的选择、校正与拟合

为了提高变量的精度和模拟结果的显著性, 由于研究年份区间横跨 2 个类型的夜间灯光数据, DMSP-OLS (2005-2013) 和 NPP-VIIRS (2012-2019), 同时由于数据获取方式等因素的差异, 因此需要将夜间灯光数据进行数据去噪、校正, 而后搭建拟合关系进行数据转换, 从而得到统一的夜间灯光数据。

3.2.1.1 夜间灯光数据的校正

现有的 2 组夜间灯光数据分别是 DMSP-OLS(2005-2013)和 NPP-VIIRS(2012-2019)。首先, 从 2 组数据之间的差异表现出发。这里由于地形遥感中, 部分湖泊、冰雪和观测误差等多样因素的存在, 会导致 2 组夜间灯光数据均存在一定的极端值或异常值。因此, 在数据拟合前需要对数据进行去噪声, 去饱和等校正处理^[5,22-25]。

3.2.1.2 夜间灯光数据的拟合

由于 2 组数据的差异, 需要对去噪声校正后的数据进行转换。转换的第一步便是数据拟合。即利用 2012 和 2013 年的 NPP-VIIRS (自变量 X) 去拟合 2012 和 2013 年的 DMSP-OLS (因变量 Y), 因为这几个年份的数据是两组数据的重合表现部分, 通过这样的拟合之后, 可以利用这个拟合关系完成后续的数据统一。本文为了提高模拟预测的精确性, 对于省域的夜间灯光数据和市级的夜间灯光数据分别进行了拟合搭建。

首先, 选取了一次、二次以及指数函数对省域尺度下 2012 和 2013 年 NPP-VIIRS 数据 (自变量) 与 2012 和 2013 的 DMSP-OLS 数据 (因变量), 搭建了线性和曲线的拟合关系, 如表 3.1 所示。

表 3.1 2012 和 2013 年 NPP-VIIRS 数据 (X) 与 2012 和 2013 年 DMSP-OLS 数据 (Y) 的拟合结果

| 拟合函数 | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>t-Statistic</i> | <i>P-value</i> | <i>R</i> ² | Adjusted <i>R</i> ² |
|---------------|----------|----------|----------|---|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| $y=ax$ | 13.87376 | | | 13.32337(a) | 0.0000(a)* | 0.8409 | 0.8409 |
| $y=ax+b$ | 10.52461 | 1.4637 | | 15.59158(a) 5.941791(b) | 0.0001(a)* 0.0040(b)* | 0.9838 | 0.9798 |
| $y=ax^2+bx+c$ | 12.5934 | 1.31717 | 2.592 | 1.678402(a) 0.238864(b) 3.688660(c) | 0.1919(a) 0.8266(b) 0.0345(c)* | 0.9917 | 0.9861 |
| $y=a\ln x+b$ | 3.13950 | 9.08249 | | 7.137323(a) 13.32393(b) | 0.0020(a)* 0.0002(b)* | 0.9271 | 0.9090 |

(注: *表示, 选取了t检验的p-value阈值为0.05前提下, 系数通过了t检验。)

如表3.1所示: 首先, 可决系数 R^2 和调整可决系数 R^2 均表现良好, 除一次无截距函数低于0.9 (但大于0.8) 外, 其余均大于0.9。说明函数的拟合表现均较为优异。其次, 从系数的显著性出发, t检验对应的*p-value*, 仅有一次带截距的函数和指数函数完全通过。

综上所述, 选取了一次带截距的函数和指数函数中可决系数最高的一次带截距的函数作为省域视角夜间灯光数据拟合转换的基础函数, 见式 (3-1)。

$$DMSP_i = 10.52461NPP_i + 1.4637 \quad (3-1)$$

式 (3-1) 中, NPP_i 表示的是2012至2013年东北三省的NPP-VIIRS数据, $DMSP_i$ 则表示的是2012至2013年东北三省的DMSP-OLS数据。

表 3.2 所做的是将搭建数据转换函数的自变量数据, 2012 和 2013 年的 NPP 数据和其余年份的 NPP 数据进行一定的相关性测度, 以此测度 2012 和 2013 年 NPP 数据对整体 NPP 数据的代表性。从拟合的可决系数的情况来看, 整体代表性较好。再次印证文章所搭建的拟合函数 (式 (3-1)) 具有较高的显著性。

表 3.2 2012 年、2014-2019 年 NPP-VIIRS 数据与 2013 年的 NPP-VIIRS 数据的简单相关测度

| 年份 | 拟合函数 | <i>a</i> | <i>R</i> ² |
|------|-------------|----------|-----------------------|
| 2012 | $f(x) = ax$ | 1.027993 | 0.9998 |
| 2014 | $f(x) = ax$ | 0.774832 | 0.9989 |
| 2015 | $f(x) = ax$ | 0.759962 | 0.9996 |
| 2016 | $f(x) = ax$ | 0.768292 | 0.9994 |
| 2017 | $f(x) = ax$ | 0.675622 | 0.9914 |
| 2018 | $f(x) = ax$ | 0.664843 | 0.9974 |
| 2019 | $f(x) = ax$ | 0.614259 | 0.9890 |

其次, 选取了一次、二次以及指数函数对对地级市尺度下东北三省 36 个地级市尺度

下 2012 和 2013 年 NPP-VIIRS 数据（自变量）与 2012 和 2013 的 DMSP-OLS 数据（因变量），搭建了线性和曲线的拟合关系，如表 3.3 所示。

根据系数的 t 检验结果、可决系数及调整可决系数进行筛选，最终选取了一元带截距的线性函数进行地级市夜间灯光数据的拟合，见式（3-2）。

$$DMSP_{ii} = 8.802962NPP_{ii} + 2.286926 \quad (3-2)$$

式（3-2）中， NPP_{ii} 表示的是 2012 至 2013 年东北三省 36 个地级市的 NPP-VIIRS 数据， $DMSP_{ii}$ 则表示的是 2012 至 2013 年东北三省 36 个地级市的 DMSP-OLS 数据。

表 3.3 2012 和 2013 年 NPP-VIIRS 数据（X）与 2012 和 2013 年 DMSP-OLS 数据（Y）的拟合结果

| 拟合函数 | a | b | c | t-Statistic | P-value | R ² | Adjusted R ² |
|---------------|----------|----------|-----|--|---------------------------------------|----------------|-------------------------|
| $y=ax$ | 11.2621 | | | 26.20657(a) | 0.0000(a)* | 0.7376 | 0.7376 |
| $y=ax+b$ | 8.802962 | 2.286926 | | 26.44758 (a) 11.48519 (b) | 0.0000(a)* 0.0000(b)* | 0.9090 | 0.9077 |
| $y=ax^2+bx+c$ | 0.82498 | 7.57975 | 2.5 | 0.978734 (a) 5.860447 (b) 9.188286 (c) | 0.3311(a) 0.0000(b)* 0.0000(c)* | 0.9103 | 0.9077 |
| $y=a\ln.x+b$ | 2.58575 | 10.0183 | | 12.33754 (a) 22.15734 (b) | 0.0000(a)* 0.0000(b)* | 0.6850 | 0.6805 |

（注：*表示，选取了 t 检验的 p-value 阈值为 0.05 前提下，系数通过了 t 检验。）

从表 3.4 显示的结果看，地级市尺度下的 2012 和 2013 年的 NPP 数据对整体的 NPP 数据有较高的整体代表性，因此式（3-2）具有较为优异的代表性。

表 3.4 2012 年、2014-2019 年数据与 2013 年的 NPP-VIIRS 数据的简单相关测度

| 年份 | 拟合函数 | a | R ² |
|------|-------------|----------|----------------|
| 2012 | $f(x) = ax$ | 1.032559 | 0.9937 |
| 2014 | $f(x) = ax$ | 0.802069 | 0.9823 |
| 2015 | $f(x) = ax$ | 0.784954 | 0.9721 |
| 2016 | $f(x) = ax$ | 0.791088 | 0.9670 |
| 2017 | $f(x) = ax$ | 0.698667 | 0.9588 |
| 2018 | $f(x) = ax$ | 0.672048 | 0.9634 |
| 2019 | $f(x) = ax$ | 0.631141 | 0.9670 |

最后，利用 2 种夜间灯光数据的拟合方程式（3-1）和式（3-2），将 2014 至 2019 的 NPP-VIIRS 数据按照省域和地级市不同尺度，分别将其拟合为 DMSP-OLS 数据。随后，和 DMSP-OLS 数据在 2005 至 2013 的原始数据进行汇总，得到后续进行数据模型使用的完整的 2005 至 2019 的 DMSP-OLS 数据。并以此作为后续进行分析的主要变量数据。

3.2.2 东北三省能源碳排放量地级市尺度下预测模型的建立

对夜间灯光数据进行去噪声校正、拟合和转换汇总后，利用统计测算出的省域能源碳排放量与汇总的省域夜间灯光数据 DMSP-OLS 的夜间灯光总值 TDN 进行地级市尺度能源碳排放量的预测模型搭建，本文选取了 3 次带截距的函数如式 (3-3) 所示，进行模型搭建。

$$C_i = aTDN_i^3 + bTDN_i^2 + cTDN_i + d \quad (3-3)$$

其中， TDN_i 表示对应省份的夜间灯光总值， C_i 则表示对应省域的能源碳排放数据。利用 Eviews7.2 对数据进行搭建，并输出了参数的结果。3 个省份夜间灯光数据和能源碳排放量之间的预测模拟结果，如表 3.5 所示。

表 3.5 夜间灯光数据与能源碳排放量的预测模拟函数表达式

| 省份 | 预测模拟函数表达式 |
|------|--|
| 黑龙江省 | $C_i = -1.01 \times 10^{-13} TDN_i^3 + 3.38 \times 10^{-7} TDN_i^2 - 0.355821 TDN_i + 126455$ |
| 吉林省 | $C_i = 1.22 \times 10^{-13} TDN_i^3 - 2.99 \times 10^{-7} TDN_i^2 + 0.227314 TDN_i - 43296.68$ |
| 辽宁省 | $C_i = 1.22 \times 10^{-13} TDN_i^3 - 4.68 \times 10^{-7} TDN_i^2 + 0.589041 TDN_i - 218435.7$ |

3.2.3 夜间灯光数据视角下能源碳排放量预测模拟模型的精度评价

通过式 (3-3) 得出东北三省省域能源碳排放量与夜间灯光数据建立起的黑龙江省、吉林省和辽宁省的地级市尺度能源碳排放量的模拟预测方程，如表 3.5 所示。

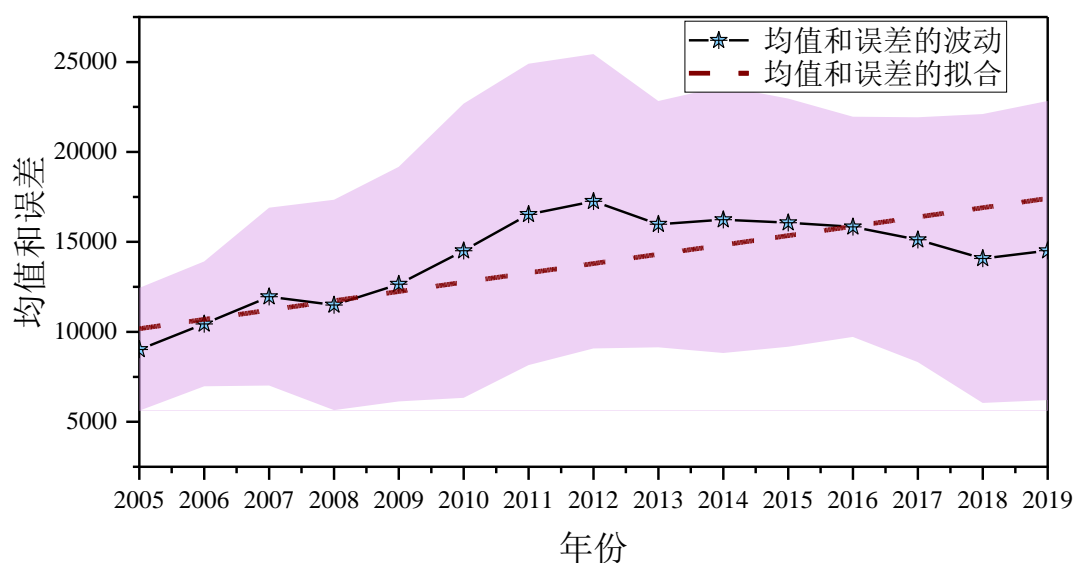


图 3.5 东北三省 2005 至 2019 年省域能源碳排放量的均值与误差波动表现

文章主要通过参数的 t 检验、方程的 F 检验（如表 3.6 所示）以及省域能源碳排放量（模拟预测模型的变量）均值和误差的波动及拟合关系（如图 3.5 所示），来对使用夜间灯光数据进行地级市尺度能源碳排放量的模拟预测模型开展精度评价。

如图 3.5 所示。首先，图中整体均值和误差的波动较为规律，同时从拟合曲线看，数量的变化趋势呈现小幅的上升趋势并和图 3.4 也保持一致。因此，在模型数据变量角度也为模型提供了一定因变量尺度的精度保证。

在 *P-value* 检验阈值 0.1 和 0.05 的设置下，3 个省份的地级市能源碳排放量预测模型函数以较为优异的表现通过了 t 检验和 F 检验，同时模型伴随着较为优异的可决系数（均大于 0.7）。

表 3.6 模拟预测模型的 t 检验与 F 检验结果

| 省份 | t-Statistic | <i>P-value</i> (t-statistic) | F-statistic | <i>P-value</i> (F-statistic) | R^2 |
|------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|--------|
| 黑龙江省 | -1.9608(a) | 0.0757(a)* | 15.9967 | 0.000252** | 0.8135 |
| | 1.9658(b) | 0.0751(b)* | | | |
| | -1.9022(c) | 0.0836(c)* | | | |
| | 1.9078(d) | 0.0829(d)* | | | |
| 吉林省 | 2.0341(a) | 0.0668(a)* | 8.83572 | 0.002874** | 0.7067 |
| | -2.3306(b) | 0.0398(b)** | | | |
| | 2.5757(c) | 0.0258(c)** | | | |
| | -2.2053(d) | 0.0496(d)** | | | |
| 辽宁省 | 2.4333(a) | 0.0332(a)** | 11.9560 | 0.000871** | 0.7653 |
| | -2.7063(b) | 0.0204(b)** | | | |
| | 3.0193(c) | 0.0117(c)** | | | |
| | -3.0469(d) | 0.0111(d)** | | | |

（注：**表示，选取了 t 检验的 *p-value* 阈值为 0.05 前提下，系数通过 F 检验。*则表示阈值为 0.1 下通过了 F 检验。）

3.2.4 东北三省能源碳排放量模拟单位像元碳排放值的修正

基于式（3-3）所得出的地级市能源碳排放预测函数，如表 3.5 所示。通过将校正整理汇总后的地级市夜间灯光数据对应代入后可以得到包含夜间灯光效应的地级市能源碳排放预测量，用 $C_{s(n)}$ 来表示，表示第 n 年的初始预测模拟碳排放量。但由于函数存在回归误差，同时结果的含义代表的主要的是夜间灯光效应下的数值，需要将得到的 $C_{s(n)}$ 进行修正，让其含义显示真正的能源碳排放含义的地级市能源碳排放量 $C_{r(n)}$ 。此时需要构建碳排放量的网格修正比例系数 m_n ，如式（3-4）。利用 $C_{s(n)}$ 与修正比例系数进行简单相乘，即可得到真正的东北三省地级市尺度的空间能源碳排放量，如式（3-5）^[2,6]。

$$m_n = C_{r(n)} / C_{s(n)} \quad (3-4)$$

$$C_{r(n)k} = C_{s(n)k} \times m_n \quad (3-5)$$

在式(3-5)中, $C_{r(n)k}$ 表示第 K 个栅格上的修正后实际的能源碳排放量, $C_{s(n)k}$ 则表示第 K 个栅格上夜间灯光数据内涵下的能源排放量。通过利用网格修正比例系数, 可以让每一个栅格上的能源碳排放量与实际量含义和数值上愈发接近, 让后续模型搭建和分析更加具有显著性, 网格修正比例系数如表 3.7 所示。

表 3.7 网格修正比例系数

| 黑龙江省 | 吉林省 | 辽宁省 |
|----------|----------|----------|
| 0.004302 | -0.0276 | -0.00482 |
| 0.005158 | -0.0346 | -0.00541 |
| 0.005637 | -0.03784 | -0.00676 |
| 0.005071 | -0.03498 | -0.00692 |
| 0.005776 | -0.0381 | -0.00771 |
| 0.006215 | -0.04384 | -0.0093 |
| 0.007781 | -0.0483 | -0.0103 |
| 0.009211 | -0.04859 | -0.01062 |
| 0.009906 | -0.04522 | -0.00967 |
| 0.010944 | -0.04798 | -0.0103 |
| 0.011874 | -0.04645 | -0.00991 |
| 0.013017 | -0.04421 | -0.00926 |
| 0.012465 | -0.0416 | -0.00949 |
| 0.010051 | -0.03551 | -0.00986 |
| 0.010571 | -0.03805 | -0.0103 |

3.3 本章小结

文章第 3 章主要进行了 8 种能源折算消耗量的描述性统计分析, 省域能源碳排放量的统计测算, 夜间灯光数据的去噪声校正、拟合转换、汇总统一以及地级市能源碳排放量预测模拟模型的搭建及精度评价。

首先, 对选取的 8 种能源品种在 2005 至 2019 年的折算消耗量, 按照自然物理状态以“固态”、“液态”和“气态”进行了描述性统计分析。结果显示:

(1) 原煤的消耗量在黑龙江省和吉林省中远远多于焦炭的消耗量。辽宁省原煤消耗则少于焦炭的消耗。黑龙江省的原煤消耗日趋增长, 吉林省原煤的消耗趋势则趋近偏态分布, 辽宁省原煤的消耗则在一定时期的稳定平台期后逐渐下降。反观焦炭的消耗波动, 黑龙江省焦炭的消耗趋势则是先增加后下降随后又增加, 这和吉林省焦炭的消耗波动趋势较为相同。辽宁省的焦炭消耗则是呈现稳定平台期后逐渐增长。

(2) 对于 5 种液态的化石能源,从黑龙江省、吉林省、辽宁省以及东北三省区域整体来看,汽油和柴油始终为主要消耗品,煤油和燃料油则消耗甚少。其中黑龙江省、辽宁省和吉林省都是柴油消耗较多,汽油消耗紧随其后。

(3) 本文选取的唯一气态能源是天然气。天然气的消耗趋势整体上都是呈现出一个上升的态势。其中辽宁省上升幅度较为明显,对于黑龙江省和吉林省来说上升较为平缓。对消耗量进行具体的比较,辽宁省>黑龙江省>吉林省。

其次,对于东北三省省域能源碳排放量的统计核算结果来看,能源碳排放量和能源消耗量呈现相对应的趋势。具体区间表现为:辽宁省能源碳排放量区间为[12722.03, 26672.13] (万 t CO_2e),远远高于其他 2 省。黑龙江省能源碳排放量区间为[6000.417, 14166.96] (万 t CO_2e),黑龙江省能源碳排放量在 2013 年后排放量开始多于吉林省,并呈现缓慢升高的趋势,同年辽宁省能源碳排放量开始下降并稳定。吉林省能源碳排放量区间为[7629.88, 13579.3] (万 t CO_2e),但吉林省在 2011 年后排放量严格下降。

最后,通过对夜间灯光数据进行清洗、拟合转换,将 NPP-VIIRS 数据和 DMSP-OLS 数据转化成了完整的 2005-2019 年的 DMSP-OLS 数据。在这整个过程中函数拟合效果都较优。随后利用转化完整的数据搭建了的地级市尺度下能源碳排放量的预测模型,预测模型的拟合优度都较为优异。其中:黑龙江省预测模型的拟合优度为 0.8135,吉林省预测模型的拟合优度为 0.7067,辽宁省预测模型的拟合优度为 0.7653。此外,模型函数均通过了精度评价。综上所述,这为后续对地级市尺度能源排放量的时空演变格局、时空分异特征表达和“排放-经济”关系的搭建提供了较为优异的保证。

4 东北三省能源碳排放量的时空演变格局探析

社会、经济以及各行各业的发展几乎都离不开资源的运用与消耗。其中，最主要的莫过于能源消耗。消耗在推动发展的同时，也伴随着大量的主要排放产物，碳。本文在第3章对东北三省的能源碳排放进行了省域尺度的统计核算，并在此基础上利用夜间灯光数据进行了地级市尺度的模拟，最终得到了地级市尺度上的相关能源碳排放量（ C ）以及人均能源碳排放量（ CP ）。

在第4章，文章对 C 和 CP 在时空维度上的演变与差异进行分析与讨论。通过借助ArcGIS10.8对碳排放在数量视角下的演变格局以及碳排放的差异特征进行可视化呈现，最后分析与归纳出东北三省能源碳排放量的时空演变格局和空间动态特征。

4.1 东北三省能源碳排放量的时空演变格局

本文将视角主要聚焦于能源消耗使用后的碳排放量上。主要利用ArcGIS技术对东北三省地级市尺度在2005年至2019年的碳排放量（ C ）以及人均碳排放量（ CP ）进行了可视化的剖析。借助ArcGIS10.8将数据和地理空间进行连接。并通过自然断点法，根据排放量的区间将排放结果进行五级评价：“低排放”、“较低排放”、“中等排放”、“较高排放”以及“高排放”。对此，能首要且直观地将演变的格局通过排放量本身进行展示与呈现。

4.1.1 地级市尺度下东北三省能源碳排放量的时空演变格局

将东北三省2005年至2019年间，地级市尺度下模拟的能源碳排放值（ C ）进行遥感可视化，其地理空间可视化结果如图4.1所示。

首先，在碳排放的数量结构上来看，2005年36个地级市的碳排放类型分布格局相较于2010年的较为均匀。随后格局在2015年被大尺度的打破并在2019年得到大程度的保留。具体表现为：各省内地级市的分布在2005年呈现出较为统一且有单一的排列。2010年则从北至南开始变得杂乱，省内分布较为多元。2010至2015年格局被大程度的进行打破，多元化在各省均加重。这一情况在2019年得到了较大程度的延续。

面对东北三省宏观上的碳排放类型和数量，黑龙江省的碳排放类型在2005和2010年均只反映出“低排放”和“较低排放”2种类型，整体来看排放较低。到了2015年格局复杂化，“中等排放”和“较高排放”开始出现，整体排放态势逐渐恶化，直到2019年仍延续了恶化的排放态势，“低排放”类型完全消失；吉林省在2005和2010年的碳排放类型均呈现出4种类型，但种类变化较大。吉林省在2005年存在“高排放”、“较高排放”、“中等排放”以及“较低排放”，整体较高的排放态势。但在2010年，类型格局却发生了较大改变，2005年还存在的“高排放”完全消失，开始出现了“低排放”类型，整体

的排放恶化程度有所缓和。并且这一缓和在 2015 年得到了较大程度的延续,“较高排放”与“中等排放”类型在减少的同时“较低排放”类型在增加。随后到 2019 年,吉林省格局变动较小,但仍是碳排放恶化程度锐减的正向变化;

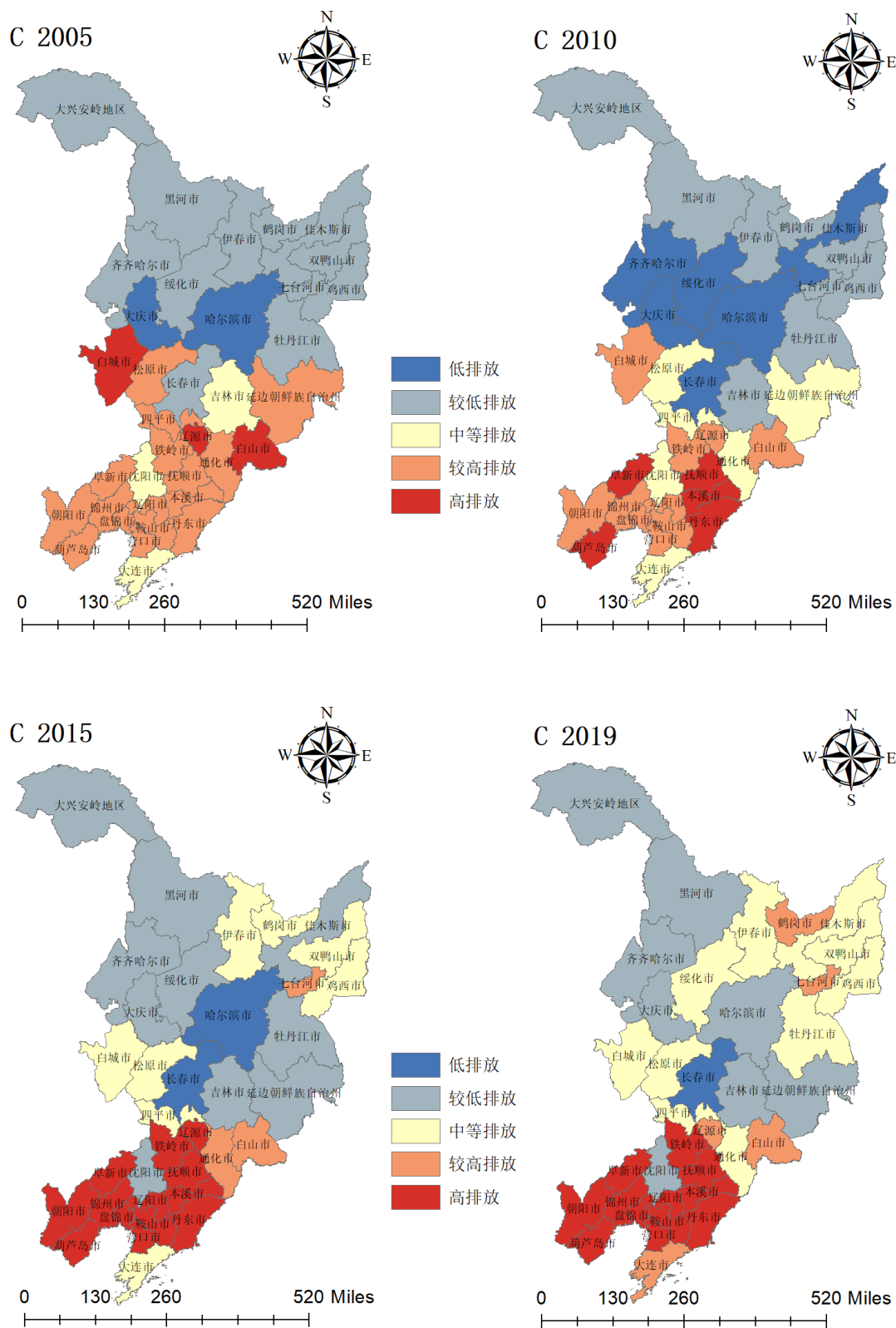


图 4.1 东北三省能源碳排放量 2005、2010、2015 及 2019 年的空间分布情况

辽宁省则在能源碳排放类型的格局变化上与吉林省相较则完全是相反的。辽宁省的能源碳排放在 2005 年呈现“较高排放”与“中等排放”2 者并存的格局，在 2010 年整体排放局势愈发严重，“高排放”加入并打破了原有的排放类型和数量格局。严重的态势在 2015 年最为直接的得到呈现，“高排放”和“较高排放”类型占据了最主要的排放格局，并且这样的格局几乎保持到了 2019 年。

最后，结合碳排放的数量和类型格局，对东北三省 36 个地级市的微观发展态势格局进行更加具体的深入讨论：（1）对于黑龙江省的几个地级市来说，相较 2005 年，2010 年内“低排放”类型从哈尔滨市和大庆市，蔓延到了西北方向的齐齐哈尔市和大庆市，东北方向蔓延到了佳木斯市。对于剩余几个地市来说，在 2005 和 2010 年均保持着“较低排放”的状态，格局单一且优异。2010 至 2015，格局大幅改变，除哈尔滨市之外，原本的“低排放”均演变为“较低排放”。伊春市、鹤岗市、双鸭山市以及鸡西市从“较低排放”演变为“中等排放”，其中七台河市则直接演变为“较高排放”。到了 2019 年，哈尔滨市碳排放类型演变为“较低排放”，牡丹江市、绥化市以及佳木斯市均演变为“中等排放”，与此同时，鹤岗市成为省内第 2 个“较高排放”地市，其余地级市格局保持不变。黑龙江省能源碳排放量（ C ）的时空演变大致可以概括为，西部地区排放格局单一且排放量较低，东部地区格局变化较为明显且排放量愈发走高。

（2）对于吉林省，一开始呈现的格局较为混乱且排放格局以“较高排放”为主。到 2010 年，格局向好发展，全省 9 个地级市的格局在这一年全部改变，碳排放类型均正向改变一级。长春市和吉林市都呈现出 2010 年吉林省唯一的“低排放”格局，松原市、四平市、通化市及延边州则正向优化为“中等排放”格局，其余三个地市均演变为“较高排放”类型。相较于 2005 年，“高排放”类型全部消失。格局继续演变至 2015 年，正负向的改变均存在。其中，正向演变包括白城市演变为“中等排放”、延边州演变为“较低排放”。然而通化市和辽源市则分别进一步负向演变为“较高排放”和“高排放”，其余地市不变。2019 年格局变动甚微，只发生了辽源市和通化市的碳排放类型的正向演变，其余地市格局统一。吉林省整体在能源碳排放量（ C ）的时空演变格局上整体呈现出，排放格局多元，但排放趋势愈发向好的排放格局。

（3）辽宁省在 2005 年能源碳排放量类型的格局和黑龙江省的较为类似，均较为单一。其中，除了沈阳市和大连市表现出“中等排放”外，其余地市均为“较高排放”。2010 年格局呈现的变化较为细微，仅发生了阜新市、葫芦岛市、抚顺市、本溪市以及丹东市呈现出“高排放”的演变结果。2010 至 2015 年，14 个地级市演变方向愈发朝向高排放。大面积的“高排放”类型席卷辽宁省，仅沈阳市进行着正向的演变（“较低排放”）。最后，高排放类型占据主要地位的格局保留到了 2019 年。辽宁省在 2005 至 2019 年的碳排放演变格局可以概括为，格局单一且演变方向明确，排放程度愈演愈烈。

4.1.2 人均尺度下东北三省能源碳排放量的时空演变格局

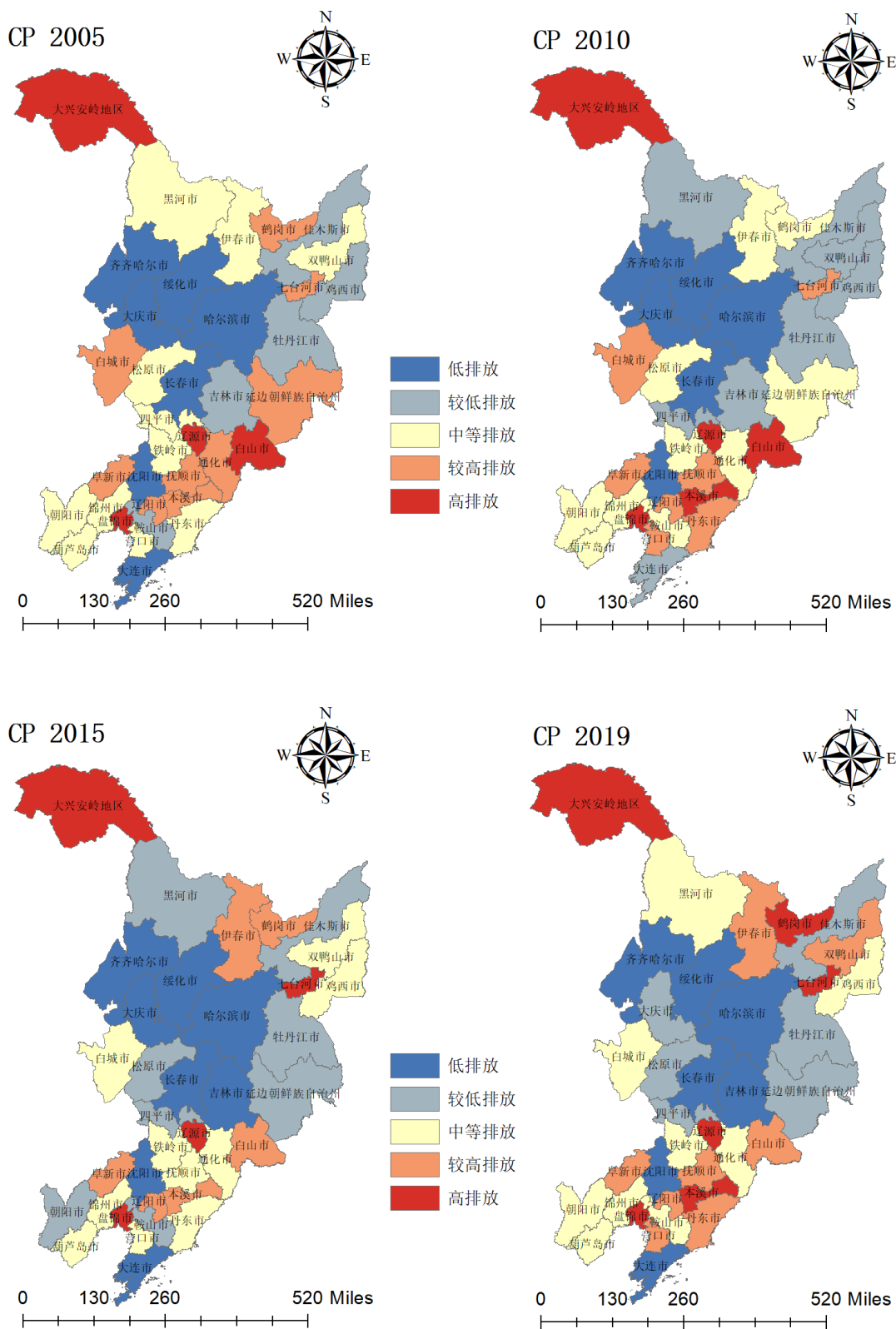


图 4.2 东北三省人均能源碳排放量 2005、2010、2015 及 2019 年的空间分布情况
能源的消耗和人们的日常生活及社会生产发展息息相关。其中人均能源碳排放量

(*CP*) 是来衡量人口规模与碳排放之间的主要统计量指标。能有效直观反映出人均主导和占有的碳排放量,并能有效反映出经济、人口与排放间的关系。将测算出的东北三省微观层面的人均能源碳排放量数据(*CP*)进行 ArcGIS 的地理空间连接,并将其基于自然断点法的 5 级划分进行呈现,如图 4.2 所示。

首先,整体上图 4.2 所呈现的人均能源碳排放类型的格局,在 4 个年份中都较为混乱且多元。同时,观察 4 个年份的变化,不难发现整体和省内地级市的格局变化程度较小,且变化地级市较为集中。三个省份人均能源碳排放量的变化程度由小到大依次为:辽宁省、吉林省、黑龙江省;同时人均能源碳排放量的整体排放程度由小到大依次为:黑龙江省、吉林省、辽宁省。

东北三省是老龄化较为严重的一个区域,第七次人口普查数据显示,东北三省老龄化一直是在持续加重的,整个区域 65 岁及以上的老龄人口占比居多,同时也伴随着一定程度的人口流失。这一系列的自然人文状况也无形中对能源消耗以及人均能源消耗碳排放量带去影响。因此也让研究东北三省人均能源碳排放量更加有意义。从微观视角对三个省份进行对比观察可以发现:

(1) 黑龙江人均能源碳排放量(*CP*)整体的格局变化程度是高于其他两个省份的,但变化的位置区域较为集中。在 4 个年份中,13 个地市排放类型发生变化的区域除了位于黑龙江省西南部的大庆市外,其余的都集中于黑河市以东的几个地市。但对于人均能源碳排放类型的种类来看,始终未曾改变。2005、2010、2015 以及 2019 这 4 个年份上,都呈现出“高排放”、“较高排放”、“中等排放”和“较低排放”并存的类型格局。

(2) 吉林省人均能源碳排放量(*CP*)的类型和种类格局 4 个年份中都较为多元。2005 年,吉林省 9 个地级市呈现 5 种排放类型共存的局面。演变至 2010 年时,仅在 3 个地市发生了格局改变,四平市(由“中等排放”演变为“较低排放”)、延边州和通化市(由“较高排放”演变为“中等排放”)。而较大的格局演变则发生在 2015 年,这一年份中除了长春市、四平市、辽源市和通化市外,其余几个地市均发生了排放类型的格局演变,但整体是朝着低排放的方向进行演变。而后 2015 年的格局被完整的保留到了 2019 年。

(3) 最后,剖析辽宁省人均能源碳排放量(*CP*)的演变情况。对比 2005 年,2010 年大连市、营口市、鞍山市、丹东市、本溪市的排放类型分别演变为为了“较低排放”、“较高排放”、“中等排放”、“较高排放”、“高排放”,其余地市的碳排放类型保持不变。对于这一次的演变,发生的演变均是朝向更高排放类型的演变。对比 2010 年,辽宁省也发生了较大的排放类型演变,但和 2010 年的演变方向恰好相反,而相似的格局仍被保留在了 2019 年,并未有较大演变发生。

4.2 东北三省能源碳排放量的时空差异及动态特征分析

在对数量层面进行演变比较可视化之后,这个部分对东北三省能源碳排放量的时空差异和动态特征进行统计分析。其中,时空差异部分,引入 Moran'*I* 和局域 Moran'*I* 分析

对全局和局域自相关进行统计表达。动态特征部分，则借助标准差椭圆、冷热点分析以及趋势值法来进行刻画。

4.2.1 东北三省能源碳排放量的全局空间相关性分析

对东北三省能源碳排放量利用 ArcGIS 提供的空间统计算法进行了莫兰指数的测算，并根据 P -value 和 Z 得分进行全局空间自相关的检验和解读，计算结果如表 4.1 所示。

表 4.1 东北三省能源碳排放量的莫兰指数测算结果

| 年份 | 碳排放量类型 | Moran' I | Z 得分 | P -value |
|------|--------|------------|--------|------------|
| 2005 | C | 0.62838 | 5.8093 | 0.000 |
| 2006 | C | 0.54614 | 5.0991 | 0.000 |
| 2007 | C | 0.62768 | 5.8015 | 0.000 |
| 2008 | C | 0.68800 | 6.3282 | 0.000 |
| 2009 | C | 0.69974 | 6.4315 | 0.000 |
| 2010 | C | 0.72879 | 6.6866 | 0.000 |
| 2011 | C | 0.73754 | 6.7717 | 0.000 |
| 2012 | C | 0.70811 | 6.5220 | 0.000 |
| 2013 | C | 0.64602 | 6.0005 | 0.000 |
| 2014 | C | 0.57169 | 5.3510 | 0.000 |
| 2015 | C | 0.48901 | 4.6581 | 0.000 |
| 2016 | C | 0.38768 | 3.7993 | 0.000 |
| 2017 | C | 0.43834 | 4.2676 | 0.000 |
| 2018 | C | 0.58256 | 5.4690 | 0.000 |
| 2019 | C | 0.54525 | 5.1620 | 0.000 |

东北三省能源碳排放量 2005 至 2019 年间全局自相关的 P -value 均为 0.000，均显著。对东北三省能源碳排放量所做的自相关分析是存在显著的统计意义的，东北三省能源碳排放量是存在一定的空间集聚效应的，全年呈现正相关，但 2015、2016、2017 这 3 个年份的正向相关趋势较弱（Moran' I 低于 0.5），在 2011 和 2010 年的正向相关程度较强（Moran' I 高于 0.7）。

4.2.2 东北三省能源碳排放量的局域空间集聚程度分析

对比莫兰指数，局域空间自相关，则可以将周边单元与邻结单元的集聚程度的差异性和相似性进行局部的刻画。通过对正向空间自相关的（“H-H”、“L-L”集聚）和负向空间自相关的（“H-L”、“L-H”集聚）进行地理区域的空间表达，如图 4.3 和 4.4 所示。首先对能源碳排放量（C），如图 4.3 所示：

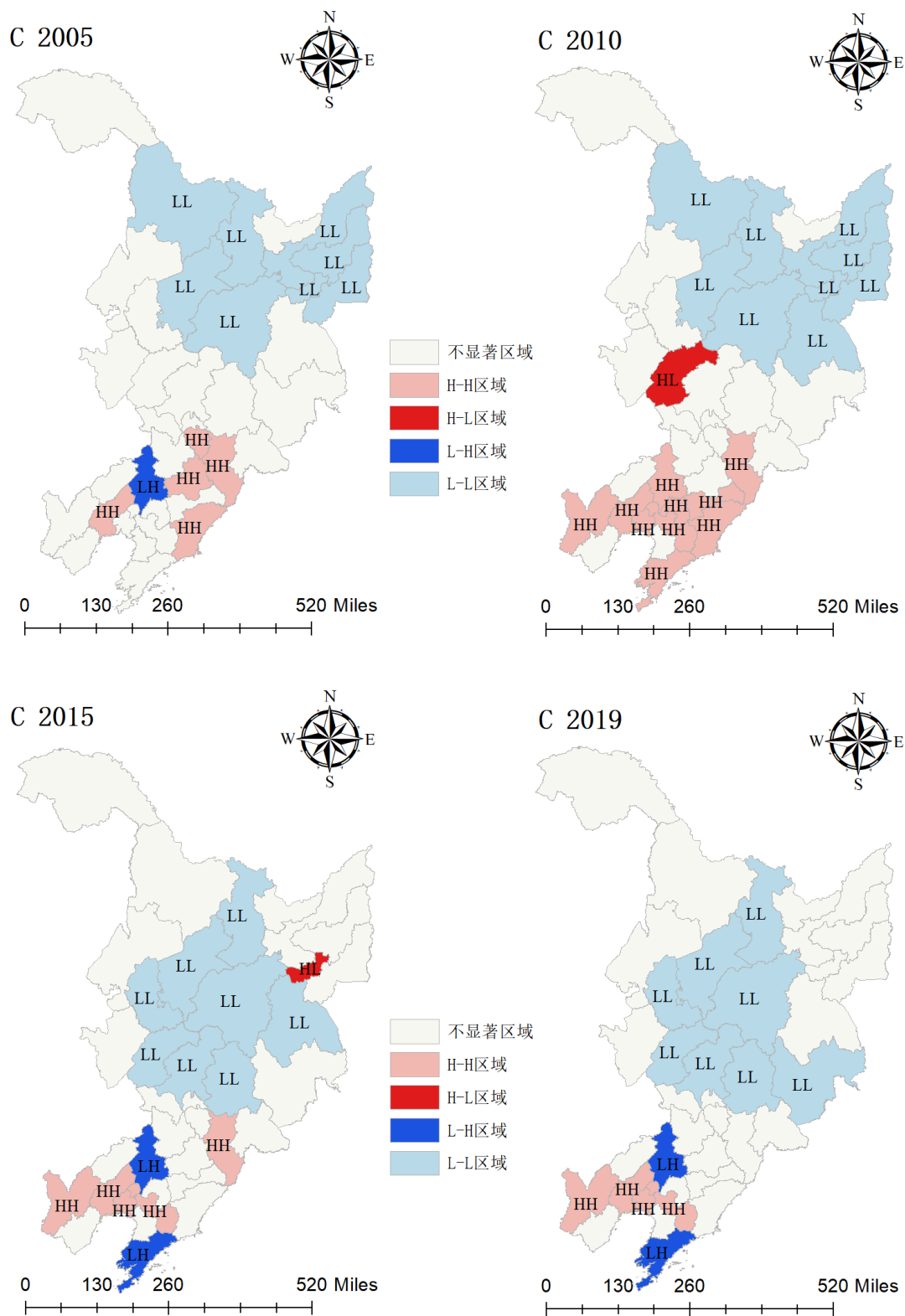


图 4.3 东北三省能源碳排放量 (C) 局域空间集聚程度 (LISA) 空间分布

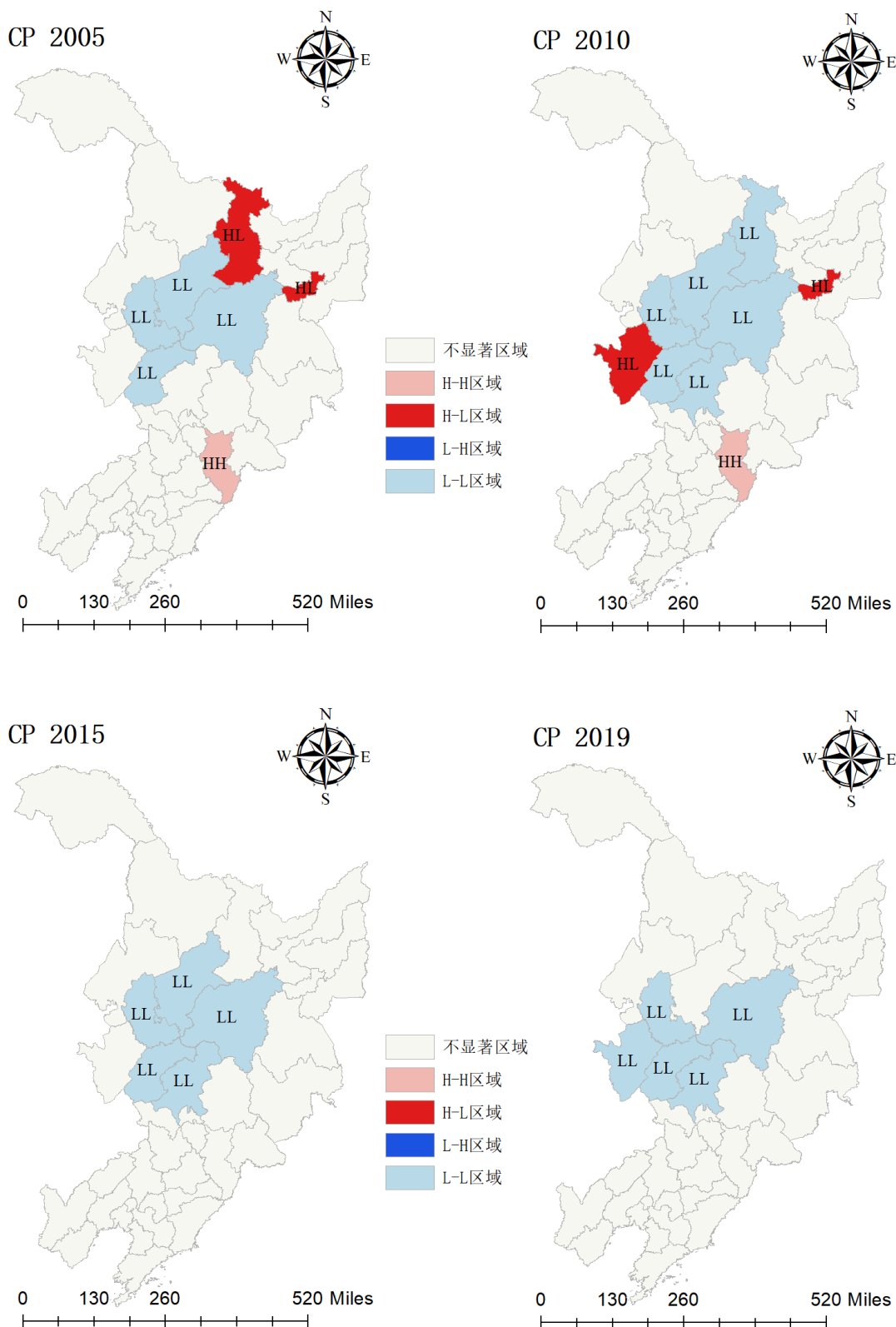


图 4.4 东北三省人均能源碳排放量 (CP) 局域空间集聚程度 (LISA) 空间分布

(1) 东北三省 36 个地级市中，局域空间自相关的显著区域主要集中于黑龙江省和辽宁省。同时正向自相关的分布数量远远多于负向正相关，正向相关的分布格局较为规律。其中，“L-L”集聚整体分布于黑龙江省和吉林省中部，整体位于东北三省区域的中

上区域，“H-H”区域则整体表现在辽宁省和吉林省的和辽宁沈的少数交界地级市。而对于负向相关的格局来说，出现次数较少，以“L-H”区域为主。同样就分布格局，“L-H”区域的分布较为稳定，仅在辽宁省出现过，“H-L”区域只在黑龙江省和吉林省有过表现。

(2) 对比 4 个年份的 LISA 格局，2005 和 2010 年格局排列较为类似，2015 和 2019 年的较为类似。首先，黑龙江省在 2005 年和 2010 年呈现较为大面积的“L-L”区域的集聚情况，在 2015 年，“L-L”区域逐渐向吉林省进行渗入，同时黑龙江省内出现了 1 处“H-L”区域。到 2019 年，黑龙江省的“H-L”区域消失，唯一表现的“L-L”格局也在数量上进行减弱。

(3) 吉林省在 2005 和 2010 年的集聚分布较为单一，吉林省 9 个地级市在 2005 年仅有 2 个地市呈现显著状态（“H-H”区域）。在 2010 年，仍只有 2 个地市呈现显著状态（“H-L”区域和“H-H”区域）。相比之下，在 2015 年集聚程度变得丰富起来，4 个地市显著（3 个“L-L”区域和 1 个“H-H”区域）。到 2019 年，数量格局保持不变，分布和类型变得单一化，省内仅呈现“L-L”区域的集聚情况，整个吉林省的格局演变较为强烈。

(4) 辽宁省整体的集聚类型较为统一，在 2005、2015、2020 仅存在“H-H”区域和“L-H”区域共存的格局，2010 年，则全域显著区域均为“H-H”区域。从数量格局来看，省内显著区域较多，其中 2010 年数量最多。同时不难发现，辽宁省在 2015 年和 2019 年的 LISA 集聚数量、分布和类型格局完全一致。

其次，仍然将人口因素进行考虑，对人均能源碳排放量（CP）进行分析，如图 4.4 所示：

(1) 对东北三省整体的格局来看，整体的显著区域相较能源碳排放量的数量较少。4 个年份间，仅在黑龙江省和吉林省有过少量的演绎。整个演变过程中，辽宁省都没有过显著的区域。从类型角度看，演变格局中仅出现了“L-L”区域、“H-L”区域和“H-H”区域。同时，以“L-L”区域为主。主要的表现区域还是集中于黑龙江省。

(2) 2005 和 2010 年的格局最为多元，2015 和 2019 年的格局较为单一。黑龙江省在 2005 和 2010 年，由 3 个“L-L”区域和 2 个“H-L”区域的格局，演变为 4 个“L-L”区域和 1 个“H-L”区域的格局。随后在 2015 年，“H-L”区域消失，“L-L”区域也在逐渐减少。同时，类型统一和数量减少的格局已然延续到了 2019 年。

(3) 对于吉林省来说，放眼 2005 年和 2010 年，显著区域从 2 个地市演变至 4 个地级市，同时在 2010 年也出现了“H-L”区域。到了 2015 年，吉林省的整体格局也开始进行单一化，仅呈现出少数的“L-L”集聚区域，2019 年亦是如此。

4.2.3 东北三省能源碳排放量的冷热点分析

冷热点分析，主要通过对 Getis-Ord G_i^* 指数的测算能将排放量的集聚效果进行“冷点”和“热点”的区分，并可以进行区域的可视区分。在这个部分，对排放的集聚程度以及集聚类型的分布借助 ArcGIS10.8 进行了 Getis-Ord G_i^* 指数的测算和数据结果的地理连接，如图 4.5（能源碳排放量 C）和图 4.6（人均能源碳排放量 CP）所示。对能源碳排放量（C），如图 4.5 所示：

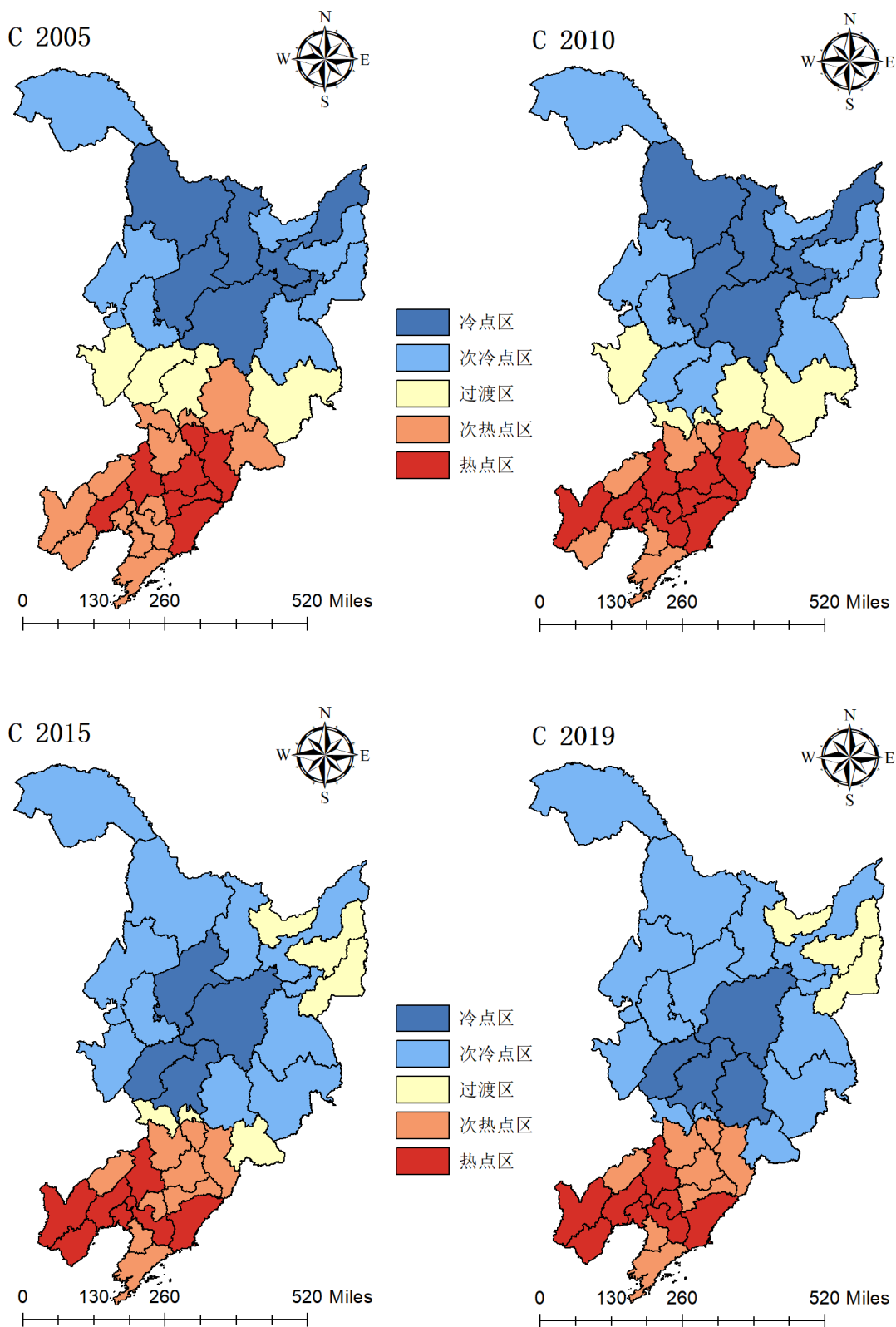


图 4.5 东北三省能源排放量的冷热点空间分布情况

首先,在这个部分采取了“冷点区”、“次冷点区”、“过渡区”、“次热点区”以及“热点区”5级类型进行分级。冷区和热区在东北三省的分布区位都较为明显和规律,冷区仅在吉林省和黑龙江省出现过,热区在辽宁省得到最为主要的演绎。冷区在2005年仅存在

于黑龙江省，其中 7 个地级市属于“次冷区”，6 个地级市呈现“冷点区”。2010 年，吉林省开始出现 2 个“次冷点区”，2015 年和 2019 年吉林省内冷区逐渐增多，且占据主要碳排放量的集聚类型。整体冷区分布是逐渐从黑龙江省往下渗透的，但仅在黑龙江省和吉林省得到了表现。

其次，对于热区来说，整体热区分布少于冷区的分布。辽宁省全域表现为热区分布，吉林省与辽宁省相邻的少数地级市也表现出热区类型。2005 年时，“热点区”的数量明显少于“次热点区”，直至 2010 年“热点区”的数量开始增加，但这一趋势在 2015 得到了反向变化，再次变化为“次热点区”为主导的形式。同时就“过渡区”来说，“过渡区”仅仅出现在 2005、2010、2015 年的吉林省内，以及 2015 和 2019 年的黑龙江省内。

最后，就各省省内的格局来看，黑龙江省不论是冷热点的类型、数量还是分布在 2005 和 2010 年都保持不变。2015 年相较于 2005 年变化较为明显，部分“冷点区”演变为“次冷点区”，位于东北区域的 3 个“次冷点区”演变为“过渡区”，这 3 个区域的表现 2019 年得到了延续。2015 至 2019 年的格局变化不大，仅有 1 个“冷点区”演变为“次冷点区”。吉林省是 3 个省份中格局最为复杂的，也是 3 个省份中唯一进行了热区和冷区交替的省份。2005 年呈现大部分的“过渡区”连同“次热点区”和“热点区”的表现格局。在 2010 年“次冷点区”逐渐渗入，2015 年“次冷点区”和少量的“冷点区”占据了吉林省当时碳排放量的主要格局。直至 2019 年，吉林省内“过渡区”全部消失，呈现 2 地“次热点区”、3 地“冷点区”、4 地“次冷点区”的碳排放量集聚格局。放眼始终处于热区的辽宁省来说，格局始终保持着“次冷点区”在外，“热点区”在内的表现形式。除此之外，从 2005 年至 2019 年，“热点区”是逐渐扩散至两边，再集中于中部，并在 2015 和 2019 年间格局进行了较好的保存。

紧接着，对人均能源碳排放量（CP），如图 4.6 所示：

首先，在视觉上不难观察到，人均能源碳排放量的冷热点集聚可视化分布格局远远比能源碳排放量的格局要多元和复杂。热区在 3 个省份中均有一定的表现，同时冷区也出现在了辽宁省。在整体的表现上，冷区在 4 个年份间的数量是逐渐减少的，主要横穿黑龙江省和吉林省。同时，在 2005、2010 以及 2015 年，“冷点区”的集聚明显多于“次冷点区”，但在 2019 年数量明显的减少。对于热区，整体的分布较为分散。在 2005、2010 年，黑龙江省仅有大兴安岭地区处于热区（呈现“热点区”）。随后在 2015 和 2019 年，出现了其他热区，东部集聚了“热点区”，部分地级市表现出了“次热点区”。这样的演变，也让黑龙江省的人均碳排放量的类型格局在复杂化。

其次，纵观吉林省集聚冷热点情况，4 个年份间，吉林省的冷热点变化甚微，基本集中于和辽宁省毗邻的几个地级市。整体的类型格局是较为复杂的。整体的变化趋势主要表现为，冷区在增多，热区程度在下降，“过渡区”的分布在上升。

最后，对辽宁省进行分析，辽宁省的冷点区仅出现过“次冷点区”，仅在 2005 年和 2015 年的边界 2 个地级市出现。辽宁省在 4 个年份中，2005 年和 2015 年的分布格局类似，2010 年和 2019 年的则是另外一组相似格局。对于热区格局来说，整体热区的分布热

度由高到低依次表现为，2010年、2019年、2005年、2015年。同时，辽宁省人均能源碳排放量的热区强度整体是弱于能源碳排放量的热区表现的。

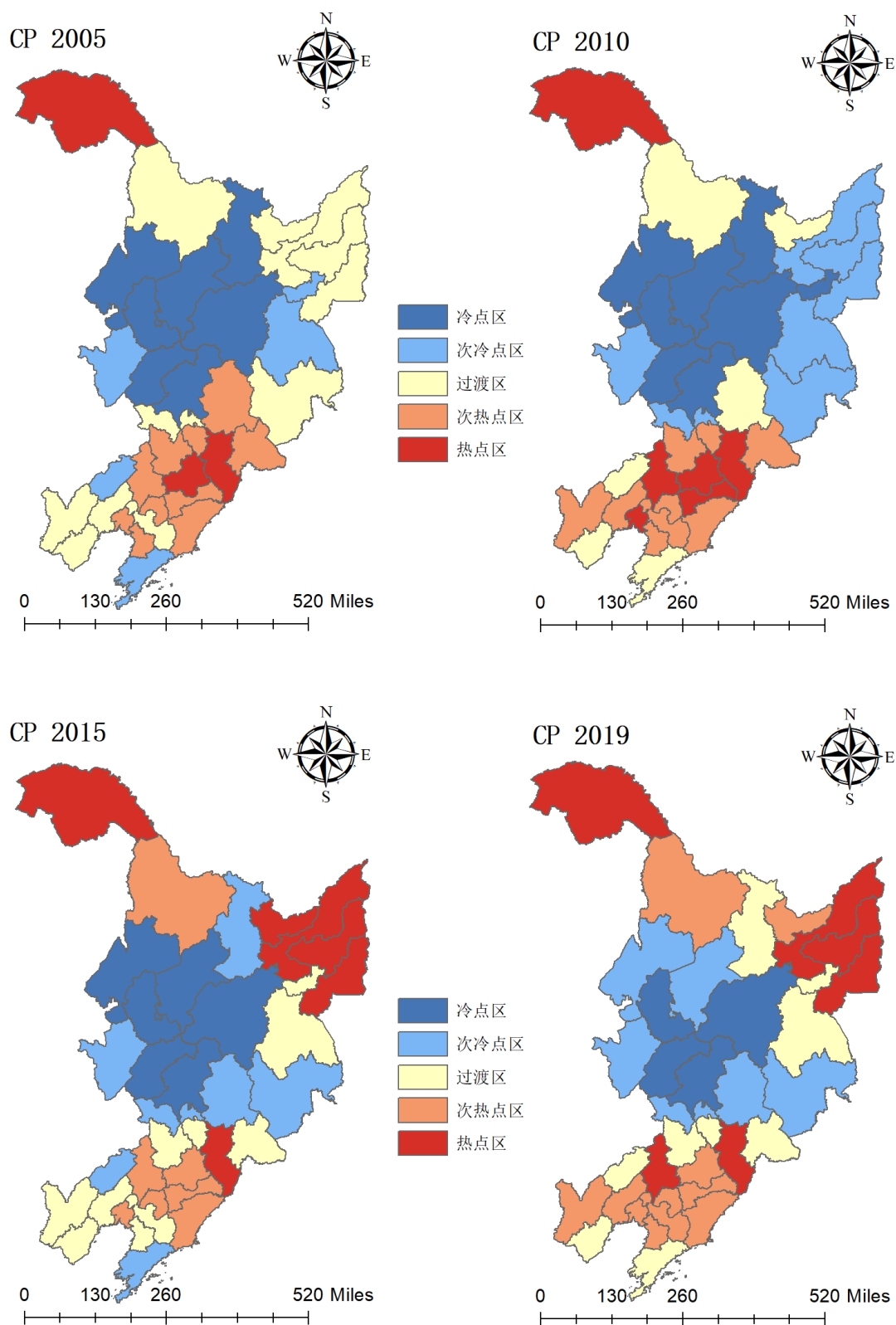


图 4.6 东北三省人均能源排放量的冷热点空间分布情况

4.2.4 东北三省能源碳排放量的标准差椭圆分析

面对能源碳排放量在数量和空间特征的表现,本文在这个部分利用 SDE 参数进行可视化的表达。采用标准差椭圆对 2005、2010、2015、2019 东北三省能源碳排放量的发展方向和变化范围进行展示,其中以能源碳排放量(C)和人均能源碳排放量(CP)为主体的 ArcGIS 可视化分别如图 4.7 和图 4.8 所示。

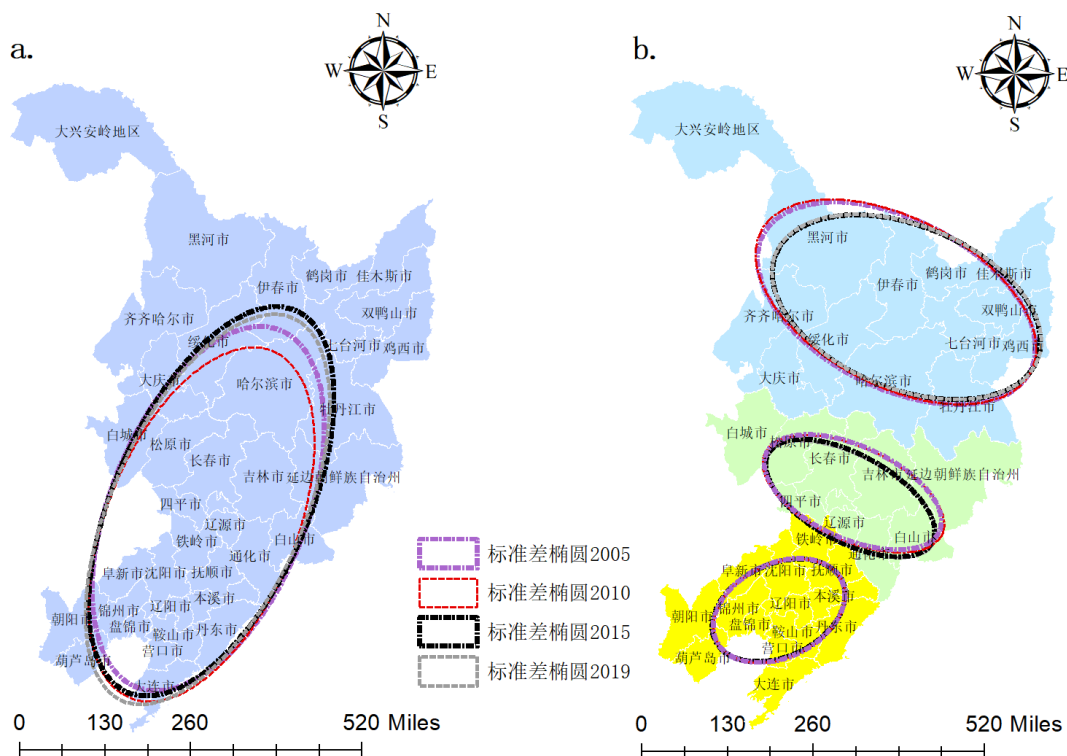


图 4.7 东北三省能源碳排放量的标准差椭圆分布情况 (a.东北地区尺度、b.省级尺度)

首先,对东北三省能源碳排放量进行整体区域和分省尺度的分析。

(1) 整体区域的标准差椭圆很清楚的展示了东北三省能源碳排放量的重心移动方向以及排放量范围的增减。2005、2010、2015、2019 的标准差椭圆重心移动以及变化范围都较为明显,如 a 所示。整体区域的能源碳排放量范围从大到小依次为,2015 年、2019 年、2005 年、2010 年。不难看出,范围的变动幅度明显高于排放重心的移动幅度。此外,通过对比可以发现演变格局大致表现为:2005 到 2010 年,排放量的重心明显网西南方向进行了移动,在范围明显缩小的同时,愈发笼罩吉林省和辽宁省。2010 相较 2015 年,能源碳排放量的 SDE 参数变化最为明显。重心急剧往东北方向移动,同时在原有的排放量范围中上,进行了大幅的范围扩张。最后在 2019 年,整体的波动都较为温和。能源碳排放量的范围上相较 2015 年的波动甚微,整体的重心则是往西南方向进行了小幅度的移动。

(2) 面向图 b 中的黑龙江省,黑龙江省在 4 个年份的标准差椭圆变化呈现出一定的组合形式。具体表现为,2005 与 2010 为一个相似的 SDE 参数分布组合,2015 和 2019 为另外一个。2005、2010 这 2 年能源碳排放量的排放范围明显大于 2015 和 2019 年。同时,

就碳排放的重心来看，4 个年份点的碳排放重心朝向一致，均由西北向东南排列。仔细观察可以发现 4 个年份间的细微演变为，2005 年排放范围较 2010 年扩张甚微，重心亦是如此，而后较 2010 年，2015 年有了一个较为明显的重心由西北向东南的移动，并伴随着范围的回缩。最后，2015 年的 SDE 参数状态在 2019 年得到了较为明显的保持。

(3) 吉林省在 4 个年份中能源碳排放量的标准差椭圆分布和黑龙江省有许多相似之处，4 个年份的排放重心均保持一致，表现为西北向东南。也可以根据相似形式将其分为 2005 和 2010、2015 和 2019，2 个 SDE 参数组合。4 个年份间，能源碳排放量的变化主要表现在重心的移动上，范围的变化甚微。总的来说，2015 和 2019 较 2005 和 2010 年，重心从东北方向朝西南方向进行了移动。

(4) 辽宁省，作为 3 个省份中变化最小的省份，从视觉上如图 b 所示，几乎没有变化。能源碳排放量的 SDE 参数整体朝向表现为从西南至东北，范围较为宽泛且重心较为居中。

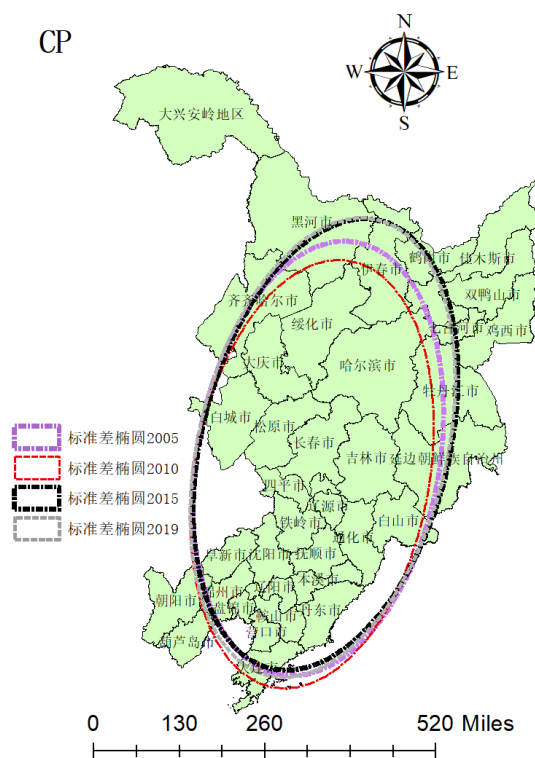


图 4.8 人均能源碳排放量在东北地区的标准差椭圆

东北三省的人口问题始终是一个重要的社会视角，在对排放量标准差进行分析时仍然选取了人均能源碳排放量（CP）进行 SDE 参数的分析，基于 ArcGIS10.8 的数据连接可视化如图 4.8 所示。

首先，东北三省地区整体的人均碳排放量的排放范围整体要比能源碳排放量的大，且分布重心更加水平，呈现轻微的西南-东北的趋势。从 4 个年份来看，4 年的 SDE 参数范围几乎保持一致，但重心变化较为明显。

其次，重心变化从大到小依次为，2010 至 2015、2005 至 2010、2015 至 2019。同时

重心的变化方向依次表现为，由西南至东北、由东北向西南、由东北向西南。

4.2.5 东北三省能源碳排放量的增长趋势程度评价

在对能源碳排放量（ C ）和人均能源碳排放量（ CP ）进行数量，空间等角度研究的同时，对碳排量增长趋势和类型的探究也是十分有意义的。为进一步对增长趋势进行分析，在这个部分对 2005-2019 年东北三省地级市尺度上的能源碳排放量按照 SLOPE 的分类标准进行了趋势值法的测算，得到了“缓慢增长型”、“较慢增长型”、“中速增长型”、“快速增长型”以及“迅猛增长型”5 个增长类型的分类区间，如表 4.1 所示。基于此，利用 ArcGIS10.8 将 SLOPE 测算结果与地理空间进行连接，得到如图 4.9 所示的东北三省能源碳排放量增长类型的空间分布情况。

表 4.1 东北三省能源碳排放量增长趋势的 SLOPE 分类区间

| 增长类型 | 缓慢增长型 | 较慢增长型 | 中速增长型 | 快速增长型 | 迅猛增长型 |
|--------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| <i>SLOPE</i> | <16.0 | 16.0~47.5 | 47.5~63.2 | 63.2~78.9 | >78.9 |

通过对图 4.9 的观察，可以看出：首先在增长类型的数量上，整个东北三省在 2005 至 2019 年间并未出现“迅猛增长型”。同时，“快速增长型”仅在鹤岗市和七台河市 2 个地市出现。整体的增长类型以“缓慢增长型”和“较慢增长型”为主。对比三个省份，黑龙江省的能源碳排放增长类型最为丰富，4 种类型都有包含，辽宁省包含 3 种。最为单一的能源碳排放增长类型为吉林省，仅包含 2 种增长类型。

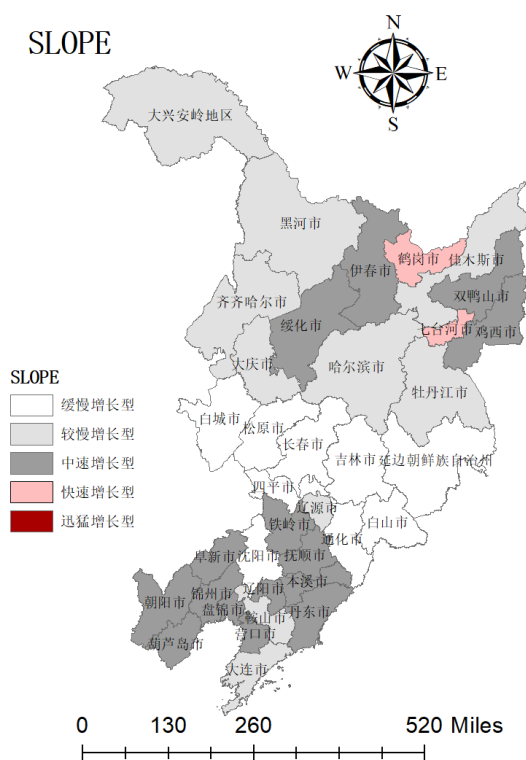


图 4.9 东北三省 2005-2019 年能源碳排放量的增长趋势空间分布情况

其次在增长类型的分布上，黑龙江省除伊春市、绥化市、双鸭山市和鸡西市为“中速增长型”，鹤岗市和七台河市为“快速增长型”之外，其余几个地级市均呈现出“较慢增长型”的格局关系。放眼吉林省，吉林省在 2005 至 2019 年间能源碳排放的增长速率除辽源市呈现“较慢增长型”之外，其余 8 个地市均统一表现出“缓慢增长型”的增速关系。吉林省在碳排放的增速视角上，在区域内有着最佳的表现。最后面向辽宁省，辽宁省的 14 个地市中，仅沈阳市处于“缓慢增长型”的行列，鞍山市和大连市处于“较慢增长型”中外，其余 11 个地市均反映出“中速增长型”的增速结果。

综上所述，东北三省能源碳排放量的在 2005 至 2019 年增长速率，整体区域表现良好。面向三个省份来说，增长速率的整体表现从快到慢依次为：黑龙江省、辽宁省、吉林省。

4.3 本章小结

文章在这个部分，主要对东北三省能源碳排放量（ C ）以及人均能源碳排放量（ CP ）进行了数量层面的空间可视化演变规律总结和统计分析层面的时空分异动态特征搭建。

首先，对数量角度进行时空演变解读：整体演变的分析是分别从 2005、2010、2015 和 2019 年 4 个年份层次来演绎的。

(1) 黑龙江省 36 个地市能源碳排放量的时空演变大致表现为西部地区排放格局单一且排放量较低，东部地区的格局变化相对多元且强烈，同时排放量在愈发走高。同时黑龙江省的能源碳排放量类型以低排放为主，愈发呈现反向的变化趋势。但整体后续反向变动结果的程度不严重。

(2) 吉林省整体的能源碳排放量类型较为多元且复杂，不过整体的变化方向是较为正向的，从一开始的“较高排放”类型主导，到后续逐渐排放程度降低，愈发向好。

(3) 对于辽宁省来说，整体排放格局和黑龙江省的较为类似，较为单一。整体的排放类型是愈演愈烈，本身开始就是以“较高排放”为主，后续大面积呈现更严重的“高排放”类型。不过，对于能源碳排放量（ C ）来看，3 个省份在 2015 至 2019 年演变程度来看，都较为微小，2010 至 2015 年的演变程度较大。

然而，面对碳排放主要活动主体的人来说，文章同时构建了人均能源碳排放量（ CP ），并以同样的方式在 2005、2010、2015、2019 年 4 个年份进行可视化地理区位空间展示。最终在整体上，可以发现整体和省内地级市的格局变化程度较小，且变化地级市较为集中。三个省份人均能源碳排放量的变化程度由小到大依次为：辽宁省、吉林省、黑龙江省；同时人均能源碳排放量的整体排放程度由小到大依次为：黑龙江省、吉林省、辽宁省。

其次，对动态时空分异部分进行统计分析：

维度一，空间自相关性。

(1) 莫兰指数，进行了东北三省能源碳排放量（ C ）的全局空间自相关性统计比较，

结果显示, 2005 至 2019 年间全局自相关的 p -value 均为 0.000, 均能源碳排放量的空间全局自相关显著。东北三省能源碳排放量是存在一定的空间集聚效应的, 全年呈现正相关, 但 2015、2016、2017 这 3 个年份的正向相关趋势较弱 ($Moran'I$ 低于 0.5), 在 2011 和 2010 年的正向相关程度较强 ($Moran'I$ 高于 0.7)。

(2) Local 莫兰指数, 通过对局部区域和临近区域进行了相关性和集聚类型的统计分析。结果显示, 东北三省 36 个地级市中, 局域空间自相关的显著区域主要集中于黑龙江省和辽宁省。同时正向自相关的数量远远多于负向正相关, 正向相关分布较为集中和规律, “L-L” 集聚整体分布于黑龙江省和吉林省中部, 整体位于东北三省区域的中上区域, “H-H” 区域则整体表现在辽宁省和吉林省的和辽宁沈的少数交界地级市。对于负向相关来说, “L-H” 区域的分布较为稳定, 仅在辽宁省出现过, “H-L” 区域只在黑龙江省和吉林省有过表现。

然而对于人均能源碳排放量 (CP) 来说, 整体东北三省的局域莫兰指数显著区域较少, 对于选取的 4 个年份来看, 仅有黑龙江省和吉林省有过一定的演绎。从类型角度看, 演变格局中仅出现了 “L-L” 区域、“H-L” 区域和 “H-H” 区域。同时, 以 “L-L” 区域为主。主要的表现区域还是集中于黑龙江省。对于空间自相关的变化无论是全局还是局域, 能源碳排放量还是人均能源碳排放量在 4 个年份的变化都较为微小。

维度二, 冷热点分析。

(1) 冷区和热区在东北三省的分布区位都较为明显和规律, 冷区仅在吉林省和黑龙江省出现过, 热区在辽宁省得到最为主要的演绎。整体冷区分布是逐渐从黑龙江省往下渗透的, 但仅在黑龙江省和吉林省得到了表现。

(2) 对于人均能源碳排放量 (CP) 来说, 人均能源碳排放量的冷热点集聚可视化分布格局远远比能源碳排放量的格局要多元和复杂。热区在 3 个省份中均有一定的表现, 同时冷区也出现在了辽宁省。在整体的表现上, 冷区在 4 个年份间的数量是逐渐减少的, 主要横穿黑龙江省和吉林省。

维度三, 标准差椭圆

(1) 从东北三省整体来看待, 标准差椭圆所展示出的排放量的空间区位移动区位及排放范围。整体区域的能源碳排放量 (C) 范围从大到小依次为, 2015 年、2019 年、2005 年、2010 年。不难看出, 范围的变动幅度明显高于排放重心的移动幅度。

(2) 对黑龙江省来看, 黑龙江省在 4 个年份的标准差椭圆变化呈现出一定的组合形式。具体表现为, 2005 与 2010 为一个相似的 SDE 参数分布组合, 2015 和 2019 为另外一个。2005、2010 这 2 年能源碳排放量的排放范围明显大于 2015 和 2019 年。同时, 就碳排放的重心来看, 4 个年份点的碳排放重心朝向一致, 均由西北向东南排列。

(3) 对吉林省来说, 4 个年份的排放重心均保持一致, 表现为西北向东南。也可以根据相似形式将其分为 2005 和 2010、2015 和 2019, 2 个 SDE 参数组合。4 个年份间, 能源碳排放量的变化主要表现在重心的移动上, 范围的变化甚微。

(4) 对辽宁省来说, 辽宁省, 作为 3 个省份中变化最小的省份, 从视觉几乎没有变

化。能源碳排放量的 SDE 参数整体朝向表现为从西南至东北，范围较为宽泛且重心较为居中。

(5) 东北三省地区整体的人均碳排放量的排放范围整体要比能源碳排放量的大，且分布重心更加水平，呈现轻微的西南-东北的趋势。重心变化从大到小依次为，2010 至 2015、2005 至 2010、2015 至 2019。同时重心的变化方向依次表现为，由西南至东北、由东北向西南、由东北向西南。

维度四，碳排放增长趋势 SLOPE 格局

(1) 在增长类型的数量上，整个东北三省在 2005 至 2019 年间并未出现“迅猛增长型”。同时，“快速增长型”仅在鹤岗市和七台河市 2 个地市出现。整体的增长类型以“缓慢增长型”和“较慢增长型”为主。黑龙江省的能源碳排放增长类型最为丰富，4 种类型都有包含，辽宁省包含 3 种。最为单一的能源碳排放增长类型为吉林省，仅包含 2 种增长类型。

(2) 东北三省能源碳排放量的在 2005 至 2019 年增长速率，整体区域表现良好。面向 3 个省份来说，增长速率的整体表现从快到慢依次为：黑龙江省、辽宁省、吉林省。

5 东北三省能源碳排放量脱钩关系的可视化呈现

在不断进步与发展的今天，“经济因素”始终处于各类发展事物的核心圈层并在事物的整体发展的过程中发挥着一定方向的驱动影响。如何发现并处理好“经济+”在发展过程中的作用形式及程度大小是十分必要的。望向本文的研究对象：能源碳排放量。从本质上，排放本身就是消耗过程最主要的产物。然而对于能源的使用以及消耗，最根本的原因是为了生产生活，促进经济发展。在这一视角下，不难看出能源碳排放量与经济发展之间的强烈交融性。再往深层次进行讨论：什么消耗形式的能源消耗才能为经济发展带去真正的正向动力，什么组合的消耗现状是与负向增长的经济表现相匹配的呢？因此，对“高、低排放”与“高、低经济发展”二者间关系走向的分析有着十分显著的多维意义。

在上述讨论的基础上，文章引入脱钩（Tapio）理论，聚焦于地级市尺度，利用第 3 章所测算出的能源碳排放量以及 36 个地级市的地区生产总值变动情况，构建了东北三省能源碳排放量与地区生产总值之间的脱钩关系，并从变化率的视角来输出脱钩指数。此外，在脱钩指数含义的帮助下解读出一定时间序列年份区间内“排放-经济”的正负方向，并最终结合 ArcGIS 将地级市结果进行了时空维度的可视化呈现。

5.1 东北三省能源碳排放量脱钩分析的相关测算

对“排放-经济”的方向进行组合形式的挖掘，探索能源碳排放量与经济发展之间的密切联系，能有效地为如何实现经济增长与能源控排的协同发展带去一定的决策指引。本文在脱钩理论的指引下，构建东北三省能源碳排放量和经济发展之间的脱钩分析模型。在脱钩指数定量测算的同时，通过对指数背后“排放-经济”含义的解读来搭建定性分析的桥梁。最后借助 ArcGIS10.8 将结果可视化呈现，赋予了分析结果一定的时空特性。

5.1.1 脱钩状态的含义及指标选择

在这个部分，本文将研究视角聚焦于东北三省能源碳排放量与经济发展水平。对 36 个地级市展开了脱钩分析。在脱钩（Tapio）理论的指引下，选取了 36 个地市的地区生产总值对经济发展水平进行表达。脱钩分析的结果，可以根据状态分类为 3 大类，“脱钩”、“负脱钩”、“连接”，分别可以对应细分为“强脱钩”、“弱脱钩”、“衰弱脱钩”；“强负脱钩”、“弱负脱钩”、“扩张负脱钩”；“扩张连接”以及“衰退连接”。

在脱钩状态的含义上，清晰地将碳排放和经济发展的伴随发展方向进行了表达。本文借鉴顾倩芸等（2022）对于长三角地区碳排放和经济发展水平的脱钩分析解读方式，也对脱钩状态的含义进行了主观的评价界定：，根据程度由浅入深表现为“好、较好、很好、最好”与“差、较差、很差、最差”，简单的 4 级评价^[7]，如表 5.1 所示。通过简单的 4 级评价约束，能更加清晰地对“排放-经济”的走向关系现状进行了解，及时认清脱钩状态的发展质量，结合理论的状态含义，能为后续的发展调整更高效地提供决策依据。

表 5.1 脱钩状态的含义表达

| 状态 | Tapio | “排放-经济”关系解读 |
|-----|-------|--------------------|
| 脱钩 | 强脱钩 | 经济增长，碳排放下降（最好） |
| | 弱脱钩 | 经济增长，碳排放缓慢增长（好） |
| | 衰弱脱钩 | 经济缓慢衰退，碳排放大幅下降（较好） |
| 负脱钩 | 强负脱钩 | 经济衰退，碳排放增长（最差） |
| | 弱负脱钩 | 经济衰退，碳排放缓慢下降（很差） |
| | 扩张负脱钩 | 经济增长缓慢，碳排放大幅增长（差） |
| 连接 | 扩张连接 | 经济增长，碳排放同步增长（一般） |
| | 衰退连接 | 经济衰退，碳排放同步下降（较差） |

5.1.2 脱钩分析的模型构建

本文将 2005 至 2019 年共 15 年间的数据进行每 3 年为一组的时序组合等分。对能源排放量（C）以及地区生产总值按照式（5-1）来进行脱钩指数的计算^[7,20]。

$$\alpha = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \text{地区生产总值} / \text{基期地区生产总值}} \quad (5-1)$$

其中，模型指数的分子部分代表碳排放量的增长率，分母部分则可以理解为地区生产总值的增长率。其中， C_0 代表的是时序组中的基期能源碳排放量。可以通过如表 5.2 所示，来通过脱钩指数的数值表现区分所述的脱钩状态。

表 5.2 脱钩指数辨别分类

| 状态 | Tapio | C 增长率 | 地区生产总值 增长率 | 脱钩指数 |
|-----|-------|-------|---------------|----------------------|
| 脱钩 | 强脱钩 | - | + | $\alpha < 0$ |
| | 弱脱钩 | + | + | $0 < \alpha < 0.8$ |
| | 衰弱脱钩 | - | - | $\alpha > 1.2$ |
| 负脱钩 | 强负脱钩 | + | - | $\alpha < 0$ |
| | 弱负脱钩 | - | - | $0 < \alpha < 0.8$ |
| | 扩张负脱钩 | + | + | $\alpha > 1.2$ |
| 连接 | 扩张连接 | + | + | $0.8 < \alpha < 1.2$ |
| | 衰退连接 | - | - | $0.8 < \alpha < 1.2$ |

通过对模型指标的剖析，对脱钩分析进行定量演绎的脱钩指数，本质上可以理解为碳排放以及经济发展相同时空维度中的弹性变化表达。

5.1.3 地区生产总值数据的预处理

由于每年的发展情况不同，人民币的绝对价值是有所区别的。因此在使用不同年份

的地区生产总值数据时，需要将名义地区生产总值进行平减，通过指数平减得到实际地区生产总值，实际地区生产总值才是真正可比较的。具体操作式（5-2）（上年=100）：

$$\text{实际地区生产总值} = \frac{\text{名义地区生产总值} \times 100 (\text{上年}=100)}{\text{地区生产总值平减指数}} \quad (5-2)$$

文章通过对《黑龙江省统计年鉴》、《吉林省统计年鉴》、《辽宁省统计年鉴》、《延边朝鲜族自治州统计年鉴》、各地市统计信息公报以及《中国城市统计年鉴》进行整理，获取到了东北三省 36 个地级市的实际地区生产总值数据。

结合式（5-1）和式（5-2）来看，由于脱钩指数中的地区生产总值变化率是一个分式，同时地区生产总值平减指数的倒数较小，可以简单将其进行大致的约分处理，最终对脱钩指数的影响几乎可以忽略不计。加之脱钩指数主要用于范围上的脱钩状态的宏观分类，对于脱钩指数在绝对数值上的较小差别是不会有直接影响的。综上所述，本文可以跳脱出 36 个地级市 15 年中地区生产总值平减指数的搜集困难，直接使用名义地区生产总值数据进行脱钩关系的搭建。

5.2 东北三省能源碳排放量脱钩关系的时空可视化呈现

通过对脱钩指数的计算，不难发现脱钩指数也可以理解为两个作用对象之间作用关系的线性弹性表达。事物的发展是多维的，在指数含义的定量表达的基础上，本文借助 ArcGIS10.8 将东北三省 36 个地级市在 5 个时序组合中计算出的脱钩指数连接到对应的地理区域中，把脱钩关系呈现进行了可视化呈现，如图 5.1 至图 5.5 所示。

5.2.1 2005 年至 2007 年脱钩关系的时空可视化呈现

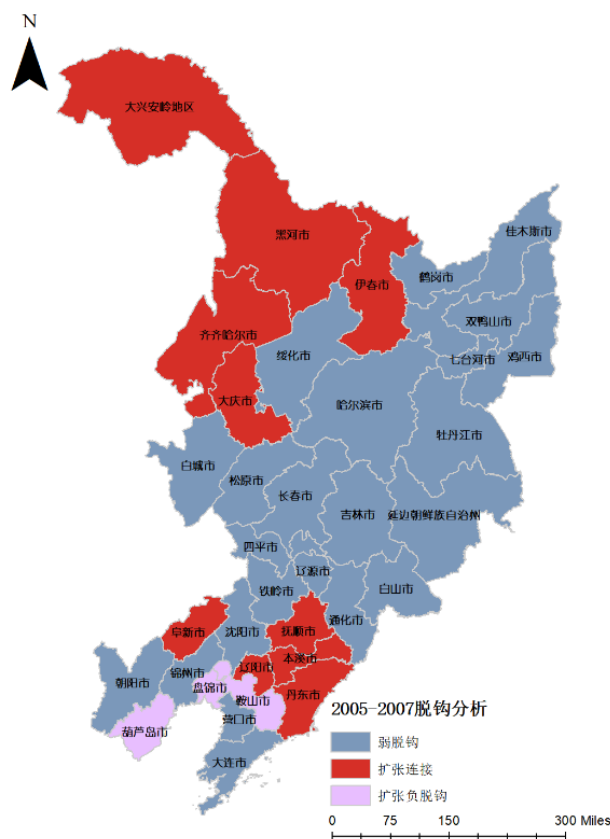


图 5.1 2005-2007 年脱钩分析地级市尺度呈现

基于对每个时序组合可视化呈现的分析，不仅能将脱钩关系生动化，同时也从整体上将脱钩关系的时空格局进行了一定程度的推敲。在这个部分主要从：脱钩关系现状、脱钩格局情况以及“排放-经济”的含义等多个角度来对可视化进行解读。

对东北三省地级市尺度在 2005 年至 2007 年间脱钩关系的可视化呈现，如图 5.1 所示。通过对图 5.1 进行剖析，可以发现：

(1) 从整体的脱钩表现及格局上来看，2005 至 2007 年东北三省 36 个地级市在整体的脱钩表现上较为单一，仅有 3 中脱钩状态的存在，即“弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”。同时，从脱钩关系的数量上来看，“弱脱钩”状态占据了主要的脱钩关系分布格局，紧随其后的是“扩张连接”，格局分布最少的是“扩张负脱钩”。

(2) 从脱钩格局上看: 吉林省整个省, 9 个地级市全部处于“弱脱钩”状态, 脱钩关系较为单一; 黑龙江省整体在脱钩格局上有 2 种表现, “弱脱钩”及“扩张连接”。从图 5-1 中也不难看出, 2 种脱钩关系的分布较为集中。“扩张连接”均位于黑龙江省的西北一侧, 由上往下依次包括: 大兴安岭地区、黑河市、伊春市、齐齐哈尔市以及大庆市。仔细观察可以看出, 表现为“弱脱钩”状态的绥化市被大庆市、伊春市、齐齐哈尔市以及黑河市 3 侧环抱。从绥化市东南侧紧挨的哈尔滨市开始, 黑龙江省其余地级市开始呈现均匀紧密分布的“扩张连接”格局; 对于辽宁省, 在整个 2005 至 2007 的时序组合中, 拥有最为丰富的脱钩状态分布。不仅是唯一一个同时分布着“弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”3 种状态的省份, 也是唯一一个拥有“扩张负脱钩”状态的省份。

(3) 从脱钩指数的含义进行解读: “弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”在“排放-经济”的关系走向中分别代表着: 经济增长同时碳排放缓慢增长; 经济增长同时碳排放同步增长; 经济增长缓慢同时碳排放大幅增长。从经济发展与生态建设的逻辑出发, 可以将三种状态主观用“好”、“一般”以及“差”3 种基础评价来辅助解读。从这一辅助解读出发, 在 2005 至 2007 年, 东北三省 36 个地市在“排放-经济”的关系上: 吉林省 9 个地市均处于“好”的状态, 经济增长的同时碳排放缓慢增长, 是 2 者发展较为协调且理想的状态; 望向黑龙江省, 13 个地市中除位于西北侧的 5 个地市处于“一般”的关系评价外, 其余 8 个地市均处于“好”的评价状态。对于 5 个“一般”评价的地市, “排放-经济”关系需要被优化, 应该在助力经济发展的同时, 及时调整产业结构并借助政策也平衡好低排放的发展需求。最后, 对于辽宁省, 除了同样对处于“一般”状态的地市及时采取调整之外, 葫芦岛市、盘锦市以及鞍山市 3 者经济增长缓慢, 碳排放大幅增长的“差”局面更应该引起重视。不仅要严抓产业高效率生产, 结构优化帮助经济水平活跃增长, 更应该对大幅的碳排放现针对性的整治, 努力调整“排放-经济”的关系稳步向好。

5.2.2 2008 年至 2010 年脱钩关系的时空可视化呈现

对东北三省地级市尺度在 2008 年至 2010 年间脱钩关系的可视化呈现, 如图 5.2 所示。在这个部分, 有了 2005 至 2007 年第一个时序组合脱钩关系的解读基础。对于随后的分析除了通过脱钩状态现状、脱钩格局以及“排放-经济”关系含义 3 个视角来展开外, 脱钩关系的演变也是不容忽视的。

(1) 不难看出, 图 5.1 与 5.2 二者之间所包含的脱钩关系种类完全一致: 都呈现出“弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”的表现。同样在格局数量上, 由多到少仍然是“弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”。整体脱钩关系的复杂程度较为单一。

(2) 在脱钩关系的格局上, 除了吉林省的 9 个地级市, 仍保持均匀密集且统一的“弱脱钩”状态之外, 其余的黑龙江省以及辽宁省的脱钩格局相较于上一个时序组合, 发生了一定的变化。黑龙江省目前除伊春市呈现“扩张负脱钩”(上一时序组合是“扩张连接”的状态)、哈尔滨市呈现“扩张连接”(之前的时序组合处于“弱脱钩”关系)之外, 其余部分地市由“扩张连接”转变为“弱脱钩”, 部分地市则一直保持着“弱脱钩”的脱钩关

系。在黑龙江省整体状态改变不大的对比下，辽宁省的格局改变就较为明显。原本处于“扩张负脱钩”的葫芦岛市、盘锦市以及鞍山市在 2008 至 2010 年间转变为了“扩张连接”的脱钩状态。沈阳市和大连市则这个阶段处于“扩张连接”(原本为“弱脱钩”关系)，而阜新市、抚顺市和丹东市的脱钩现状变化则刚好相反。其余地市的脱钩关系保持不变。整体上来看，在 2008 至 2010 年这一时序组合中，相较于上一组合的脱钩关系，变化程度由大到小依次为：辽宁省、黑龙江省、吉林省。

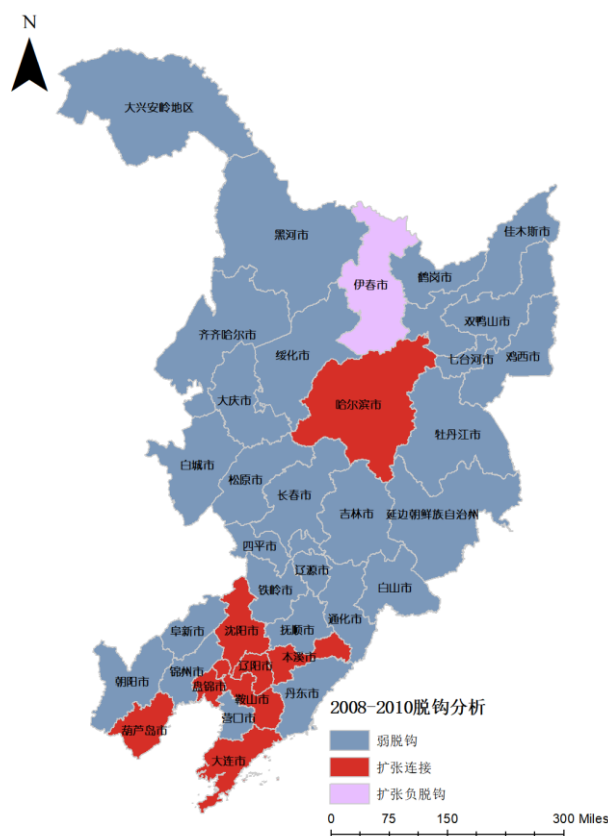


图 5.2 2008-2010 年脱钩分析地级市尺度呈现

(3) 从上一时序组合中对“弱脱钩”、“扩张连接”以及“扩张负脱钩”所进行的主观“好”、“一般”和“差”的状态评价出发。在 2008 至 2010 年间，吉林省 9 个地市依然保持在“好”的状态评价中，“排放-经济”的发展关系和状态处理以及保持的较好。黑龙江省上一时序中处于“一般”的 5 个地市中，在进行一定的调整发展下除伊春市外，均调整发展为“好”的状态行列中去。唯独伊春市“排放-经济”关系的发展每况愈下，从“一般”的关系发展为经济缓慢发展同时碳排放大幅度增加的“差”局面。其余地市中，还有哈尔滨市的脱钩关系在评价上也呈现出反向的变化趋势。如何有针对性的进行借鉴并优化整改，是二市十分需要注意的。此外，反向的状态变化在辽宁省也有发生。上一时序组合中处于经济增长同时碳排放缓慢增长的脱钩状态的沈阳市和大连市，在 2008 至 2010 的阶段则反向发展为“一般”的脱钩状态。当然，除了反向脱钩变化，正向的脱钩变化也不难被发现。例如，原本处于“差”的葫芦岛市，在这一时序组合中则优化成

双鸭山市、鸡西市、牡丹江市（“扩张负脱钩”）。相较于 2008 至 2010 年时序组，吉林省始终保持着统一的脱钩关系格局，辽宁省首次统一了脱钩表现，然而黑龙江省脱钩关系的格局则表现得愈发复杂。

（3）在这个时序组中，新呈现的“强脱钩”以及“强负脱钩”，分别代表的“排放-经济”的脱钩关系为：经济增长的同时碳排放下降、经济衰退的同时碳排放增长。2 着代表的脱钩含义可以分别用“最好”和“最差”进行简单的主观代表。在 2011 至 2013 年份间，辽宁省和吉林省均呈现出一致的脱钩表现，即经济增长与碳排放下降并行的“最好”脱钩状态。对比上一时序组，2 省共 23 个地级市“排放-经济”的关系，均得到了较高程度的优化和统一。相反，黑龙江省则整体表现为反向的脱钩调整。在这个阶段，大兴安岭地区、七台河市以及鹤岗市 3 市，有着评价为“最差”的脱钩输出；大庆市、伊春市、佳木斯市、双鸭山市、牡丹江市、鸡西市 6 个地市有着经济缓慢增长同时碳排放大幅度增长的脱钩关系，其中伊春市仍然延续着 2008 至 2010 年份间“差”的关系表现；最后剩余的黑河与齐齐哈尔市、哈尔滨市与绥化市则均分别表现出最开始在 2005 至 2007 年份间“排放-经济”的状态表达。

5.2.4 2014 年至 2016 年脱钩关系的时空可视化呈现

在上一时序组中，东北三省各地级市的脱钩表达开始出现了多元化的种类增长。在 2014 至 2016 年的脱钩可视化中，这一趋势虽不明显但仍然可以看出，如图 5.4 所示。通过对图 5.4 的可视化呈现观察，发现：

（1）2014 至 2016 年间的脱钩数量种类仍在增加，在 2011 至 2013 年 5 种脱钩关系种类的基础上缺失了“弱脱钩”及“扩张连接”，增加了“衰退连接”、“弱负脱钩”和“衰弱脱钩”，一共有 6 种脱钩表达。此时，表达最少的脱钩关系为“扩张负脱钩”、最多的是“强负脱钩”。由多到少依次为，“强负脱钩”、“弱负脱钩”、“强脱钩”、“衰弱脱钩”与“衰退连接”、“扩张负脱钩”。

（2）对于脱钩关系的格局，三个省份在这一时序组中的表现都较为复杂。首先，始终保持全省地级市统一脱钩表达的吉林省，相较于 2011 至 2013 年份，四平市和通化市有了改变，均由原来的“强脱钩”分别演变为“衰弱脱钩”和“衰退连接”，其余 7 个地市均保持“强脱钩”的状态。其次，相较在上一时序组中仍表现完全统一“强脱钩”的辽宁省，在 2014 至 2016 年间的脱钩状态则改变较大，14 各地市的脱钩状态均发生改变。葫芦岛市和大连市分别演变为“衰退连接”和“衰弱脱钩”，其余 12 个地市则均演变为“弱负脱钩”。放眼一贯脱钩状态格局较为复杂的黑龙江省，此次则表现出相较之下较为单一的“排放-经济”关系格局：除黑河市为“扩张负脱钩”外，其余 12 个地市均演变成“强负脱钩”。

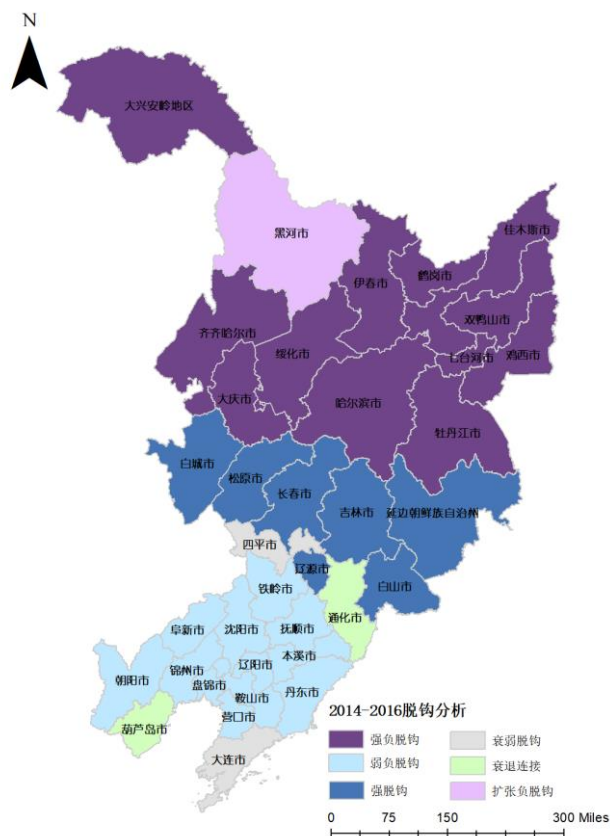


图 5.4 2014-2016 年脱钩分析地级市尺度呈现

(3) 新表现出的“衰退连接”、“弱负脱钩”和“衰弱脱钩”3者的脱钩含义分别为：经济衰退同时碳排放同步下降、经济衰退同时碳排放缓慢下降、经济缓慢衰退的同时伴随着碳排放的大幅下降。对比之前时序组中出现的脱钩状态，在2014至2016年间首次出现的脱钩中，经济与碳排放均出现衰退的表达。从“排放-经济”反向变化的原则及脱钩含义出发，将“衰退连接”、“弱负脱钩”和“衰弱脱钩”3者分别进行“较差”、“很差”、“较好”的评价约束。结合对其余之前出现过的脱钩状态的解读评价，黑龙江省在这一时序组中的脱钩表现整体处于较低评价层次，13个地市中除黑河市处于“差”的评价外，其余12个地市均整齐划一的演绎着经济衰退与碳排放同步增长的“最差”表现。处于黑龙江省下方的吉林省在此次则呈现出两极分化较为明显的“排放-经济”关系。省内9个地市中，7个地市呈现“最好”评价状态的“强脱钩”状态，四平市为“较好”的“衰弱脱钩”状态，整体优异评价占绝大多数，仅有通化市的“排放-经济”关系演绎着经济衰退，碳排放同步下降的“较差”关系。望向辽宁省，辽宁省在2014至2016年间的脱钩关系的质量整体正好和吉林省完全相反，较低评价占据绝大多数。辽宁省中的占少数的脱钩表现和吉林省完全一致，均为“衰弱脱钩”（“较好”）和“衰退连接”（“较差”），分别为大连市和葫芦岛市。其余12个地市则均为经济衰退，碳排放缓慢下降的“弱负脱钩”关系。综上所述，2014至2016年间东北三省的“排放-经济”关系整体表现都较差，输出的评价都较低。

负脱钩”表现。

(3) 对于首次出现的“强负脱钩”脱钩表达,其代表的“排放-经济”关系为经济衰退与碳排放增长的 2 者两极化关系,因此将这一脱钩状态视为“最差”的约束表达。首先,对于几乎占据半个东北三省同时完全占据黑龙江省的“强脱钩”状态,也预示着黑龙江省“排放-经济”关系发展成效优异,已达到将经济增长的同时碳排放下降的“最好”理想状态。相较下,脱钩状态最为复杂的吉林省则演变结果较差,以“很差”评价的“弱负脱钩”为主流的脱钩关系呈现,存在于白城市、松原市、吉林市、白山市和辽源市 5 个地市。相较于 2014 至 2016 年间的脱钩表现,四平市和通化市则刚好演变成了对方上一时序组的脱钩状态。长春市则演绎着“强负脱钩”的“最差”评价。不过值得一提的是,延边朝鲜族自治州的脱钩状态从 2011 至 2013 年开始到现阶段,始终保持着“强脱钩”的“最好”状态,同时再往前,在 2005 至 2007 和 2008 至 2010 时序组中,延边也统一的演绎着经济增长与碳排放缓慢增长并行的“弱脱钩”状态。延边也是吉林省在 2017 至 2019 年间唯一的优异脱钩关系演绎者。最后,在上一时序组中脱钩状态普遍也较差的辽宁省,在 2017 至 2019 年间开始有所进步,原本处于“很差”评价的“弱负脱钩”状态的 7 个地市(朝阳市、阜新市、沈阳市、辽阳市、盘锦市、鞍山市以及营口市)均发生了正向的演变,处于“弱脱钩”状态,演变至“弱脱钩”状态的还有葫芦岛市(原本为“衰退连接”)。而铁岭市则转变为了“扩张连接”(“一般”),本溪市则发生了低评价状态减轻形式的正向演变,演变为“扩张负脱钩”。说完正向演变,反向进行脱钩演变的现象也仍存在。例如,锦州市、抚顺市和丹东市就由“弱负脱钩”(“很差”)演变为“强负脱钩”(“最差”),大连市则从“衰弱脱钩”退步为“扩张负脱钩”。总而言之,在这 2017 至 2019 年间,整个东北三省的优异通过表现集中于黑龙江省和辽宁省,而吉林省则相对较差。

5.3 本章小结

文章在这个部分,基于夜间灯光数据预测出的东北三省 36 个地级市的能源碳排放量和地区生产总值情况,从 Tapio 理论出发,搭建脱钩分析。通过对脱钩指数的计算和指数含义的解读来描述东北三省能源消耗在“排放-经济”2 者关系和发展方向上的评价现状。此外,相较于数据结果本身,文章也利用 ArcGIS10.8 将脱钩分析的格局进行了行政区域地图可视化的连接,并按照一定的时序组合进行分类阐述和对比演变剖析。综上,本章的结果如下:

(1) 在脱钩关系种类上,在 2005 至 2019 年间,东北三省 5 个时序组中,一共出现了 9 种脱钩状态。从 2005 至 2007 时序组到 2017 至 2019 时序组,东北三省的脱钩数量格局分别输出了 3 种、3 种、4 种、5 种、6 种和 8 种的演变情况,可以看出全域的脱钩状态是愈发多元化的。进一步推敲,不难理解东北三省 2005 至 2019 年间,“排放-经济”之间的关系形式,也是愈发多元化的。

(2) 在脱钩格局上,得益于可视化的视觉帮助,在 5 个时序组中,3 个省份所演绎的脱钩状态的复杂性也呈现出较为明显的演变规律,吉林省和黑龙江省表现得尤为明显。

吉林省在 2005 到 2013 年，3 个时序组中，均保持着全省高度统一的脱钩状态表现。随后，从 2014 至 2016 年开始吉林省省内保持一致的脱钩关系格局被打破，但只存在单一的差异化。直到 2017 至 2019 时序组，吉林省开始出现大范围的省内脱钩关系多元差异表现。相较之下，黑龙江省则更好相反，直到最后一个时序组才开始演变出全省格局统一的脱钩表达。对于辽宁省来说，则呈现出多元到统一再到多元的转折式脱钩状态呈现。

(3) 在脱钩状态对“排放-经济”关系的解读上，文章将指数所代表的经济发展与碳排放的伴随趋势进行了主观的评价约束，通过对脱钩状态进行评价来进行展开分析。首先，对于黑龙江省而言，黑龙江省是 3 个省份中唯一一个“排放-经济”关系脱钩表现整体发展方向调整较为成功的省份。不破不立，黑龙江省在前 4 个时序组中，整体脱钩评价持续走低，直到 2017 至 2019 年间，开始恢复了正向的走向并呈现出全省统一“最好”脱钩评价的优质“排放-经济”关系演绎。对于吉林省来说，整体的质量演变趋势则和黑龙江省正好相反，从通过格局开始出现多元开始，整体脱钩关系质量日益下降。前 4 个时序组质量走低趋势还不算明显，直到在 2017 至 2019，吉林省呈现出了除延边州外，8 市全域低评价的格局。最后，就辽宁省来说，整体在 5 个时序组中的脱钩评价变化不大，除 2014 至 2016 年间，这一时序组中整个东北三省整体均呈现反向的低评脱钩发展外，没有演变呈现较为明显的大面积脱钩评价质量的下滑。

6 促进东北三省碳减排的对策建议

6.1 政府监管的对策建议

6.1.1 政府应当积极出台相关政策，做好高排放企业群的“节能减排”引导

东北三省在产业上，主要是一个以工业制造为主的区域。其中不乏黑龙江省内分布的一些大型军工产业、长春市包含的一些汽车制造等大型制造工业等等。作为国家发展基础产业主要聚集地。首先在资源角度，主要的排放源为制造过程中的资源消耗。政府部门应该积极出台相关政策，发挥好引导作用，调整产业资源消耗格局，严格控制资源消耗量，减少和避免不必要的资源消耗，做到低能耗发展；其次从排放角度考虑，由于生产过程中的排放是不可避免的，因此对于较为高排放行为的企业，政府部门应该完善并持续对企业出台相应的减排任务，并鼓励企业自身制定并做好“碳绩效”评估。这样能间接但有效地帮助“碳汇造林”、“林地修复”等资源补充型减排行为，当然对于部分企业也能通过碳交易的形式来完成减排任务，为我国和世界的碳市场搭建和完善，进行赋能。最终，引导高排放的企业群进行“减排”输出。

6.1.2 政府应当大力推动技术创新和绿色资源领域的开发，实现减污降碳

在传统高排放格局的视角下，从自身角度出发。从现阶段的技术整合创新和绿色资源的合理开发 2 个方面进行讨论。首先，对于现阶段的技术来说。政府应当大力鼓励和引导企业、工匠、高校及各科研院所对现有产业制造、能源品种、资源核算等方面的技术进行创新、优化的相关研究，并提高成果的转化率和应用率，以新方法赋能低排放。另外一个方面，对于现有的绿色资源的合理开发。从可持续发展的角度出发，探索现有绿色资源在减排，或者是消耗替代等方面的“绿色潜力”。就东北三省来说，最为丰富的绿色资源就是森林资源、水资源和土地资源。最为典型的代表为大小兴安岭、长白山和黑土地。怎样调动森林资源，发展好森林碳汇的固态效益、对水资源的保护、合理开发和可再生型的输出以及土壤合理开发等，都是值得去思考的。政府部分应当积极协调部分间合作、积极与高校、企业和科研院所进行相关研究，最终从消耗的本质角度进行技术创新，和绿色资源的保护型开发利用。

6.1.3 政府应当多从人口和地理区位入手，有针对性地对城市展开排放监管

从数量和动态展示的角度看，东北三省 36 个地级市的呈现类型较为多元，但仍有迹可循。对格局入手，宏观来看，整体呈现黑龙省最低、吉林省其次、辽宁省最高的排放格局。有针对性地对城市区域进行排放监管是十分重要的。首先，就人口角度来看，东北三省本身就处于我国维度较高的区域，天气寒冷，人口流失于资源消耗问题较为严重。越

往北走，越呈现出较为严重的地广人稀的现象。例如黑龙江省的大兴安岭、黑河等地区是较为明显的区域，相反的对于人口较为密集的区域包括哈尔滨市、长春市、沈阳市和大连市等城市。人口作为生产的主要承载以及一种基础碳源，在排放过程中发挥着直接和间接的双重作用。发现排放和人口之间的不匹配格局，如何进行调控，政府部门应该及时出台相应的积极政策，协调好资源的流动。其次，面对地理区位来看，东北三省的地理区位较为多元。在地理位置视角，辽宁省许多城市靠近海边，黑龙江省森林禀赋且靠近俄罗斯。重点关注边境城市群的碳排放格局是十分重要，匹配好资源、贸易、自身排放及排放溢出之间的关系，刻不容缓。因此，政府部门有针对性地从人口和地理区位特征对碳排放量进行考量，并进行相应的监管，对于碳排放溢出，跨区流动等是十分有帮助的。

6.1.4 政府应当对绿色行业大力支持，引领“绿色导向+”的乡村振兴

绿色产业主要是指一些排放低、能耗低的产业，其中不乏一些生态旅游、森林康养等生态经济产业。作为极强的资源导向性的产业，能做到很好的平衡排放与经济发展之间的矛盾。在保护和合理开发绿色资源并获取经济收益的同时，自然减排效应也在不断得到加持。形成了较为优质的循环。其中，不得不说东北三省的“森林+”生态产业。东北三省目前依托丰富的森林和生态环境资源，开发了包括雪村、长白山度假区、森林康养小镇、生态园区等等。面对如此得天独厚的条件和现状，政府有关部门应该做好大力宣传，和政策帮扶。在利用好绿色资源，解决其经济发展矛盾的同时，也可以发挥以下2点效益：（1）、助力乡村振兴，对当地的就业、农产品发展和区位宣传方面起到了极大的作用，带动绿色收益的同时，也增加了当地的人均收入。（2）为提高固碳效应和帮助可持续发展进行了大尺度的赋能。例如森林康养的森林碳汇效益，以及碳汇造林等措施，在根源尺度上就帮助了资源可持续性的提高并加强了碳汇效应。

6.1.5 政府应当加强行业数据库的搭建，助力各领域在减排导向的学术科研

对于资源和排放来说，政策引导的首要前提，是要进行数据的把控和监测。面对各行各业的百花齐放，做好数据的统计核算工作十分重要。通过搭建好各行业的数据库，能有效从定量视角对产业的发展进行记录和保存。目前，就碳排放的类型来看，交通碳排放、消费碳排放、能源碳排放、农业碳排放、电力碳排放等等，碳排放的门类众多。其中，相关的定量数据是政府各个职能部门进行决策和政策制定的主要依据。加强和完善好各个行业进行数据库的搭建，从而及时助力好碳排放的定量监测。同时，也能极大的加强了相关学术科研的可行性，最终助力产业创新。

6.2 产业发展的对策建议

6.2.1 产业应当发挥集体优势，重视产品和服务的绿色化转型，助力“双碳”

对于产业自身来说，产业是是市场的重要组成部分，牵动着供求关系的运转，也是排放的主要排放源之一。首先，从产品制造端出发。在保证效益的前提下，加大新能源的投入使用，从而替代传统化石能源，达到绿色化产品开发。最为常见的包括风、水利、太阳能发电。以及新能源汽车的市场份额日益上涨等良好的发展态势。其次，对于服务供给端。做好绿色化的转型是首要目标。继“山水林田湖草一体化”开端之后，绿色化转型的集体整治，始终把“以保护型为主”的合理利用作为对可持续发展的践行。例如像伊春森工集团等等林场企业，始终在禁止砍伐的前提下，进行着林区的维护。除此之外，对于产品加工端来说，包装材料的绿色化转型，现阶段得到了较大范围的应用。具体体现在各类一次性包装袋，服饰材料制品上。

6.2.2 产业应当自觉关注减排，加强技术融合平台的搭建

同时产业除了从排放视角做出反映外，也主动并自觉地关注减排目标，并认领减排任务，并高质量完成。产业作为自主减排任务的实施者，更应该配合好政府的减排政策。及时选取适当的减排手段，碳汇造林或者碳交易等等。除此之外，企业还应该主动充当好中间枢纽的角色，为各个领域的技术提供融合和发展平台，发挥各个产业间的优势，达到优势互补。其中，最为主要的做法就是产业融合。例如，生态资源和旅游产业融合后的生态旅游产业、森林资源与传统康养行业融合后的森林康养产业，等等。都是较为突出的正向发展的绿色产业，有较为明显的绿色减排性和经济发展协调性。

6.3 居民行为的对策建议

首先，居民应当积极主动地大力参与到污染排放、垃圾分类的普及和调查工作。其中包括积极参与到社区、街道和各部门组织的知识普及和社会调研中去。认真学习相关的排放污染识别以及怎样避免造成过度的排放污染，并进行生活实践。其中，居民在积极践行垃圾分类工作的时候，正确分类和实践垃圾分类后，能大力减少后续对垃圾再处理的投入和操作，直接从资源消耗角度来减少了碳排放。此外，居民通过参与各类调研普查，可以许多“行为类”排放研究提供主要的的数据支撑。例如，居民垃圾分类意愿、居民出勤行为调查等等。这样一来对标产业和政府设立的监测站，这一是一种监测方式。从社会科学的角度来对居民感知进行相关研究，并最终为绿色发展带去建议，以调整好格局和结构，来帮助实现居民视角的减排。同时也让居民认识和了解到可持续战略的发展意义。其次，居民是消费行为的主体，出台相关的消费优惠政策，能大力鼓励和培养绿色消费。做好不同年龄层次对于绿色消费的保障活动，做到在各年龄层中均匀互动，培养节能减排意识。尤其是绿色出勤，例如，在公共区实行试点区域，地铁站部分时段不进行纸质票的售卖，仅电子票通行。同时做好通勤大数据的构建，能助力低碳城市构建。

结论

发展离不开消耗，城市化推动着现代化、机械化、产业化、交通化等多领域全方位革新，能源消耗成了首要的驱动力。炙手可热的各类能源推动着生产生活的发展。不过在收获亮眼的经济与产业发展的同时，高浓度的温室气体含量，尤其以含碳元素为主的温室气体，也得以充斥在空气中。面对如此严峻的环境污染局势，正视碳排放的现状并及时处理排放与经济之间的矛盾，刻不容缓。现阶段，技术愈发交叉融合，对于遥感技术的使用也愈发娴熟。国内外许多学者开始利用夜间灯光数据探索更微观单元的发展和现代化情况。东北三省区域作为我国老牌的重工业区域，具有较为深厚的现代机械和军工制造业的历史背景与发展基础，在区域能源消耗、污染排放、经济以及人口几者的关系较为鲜明及典型。

基于以上背景，本文针对东北三省地区，利用夜间灯光数据与城市化发展之间强烈的关联性进行完整研究数据的预测模拟。展开了能源碳排放的相关微观尺度的时空演变及分异特征分析，并搭建脱钩模型来积极解读了能源碳排放和经济方向之间的关系。得到以下结论：

(1) 原煤的消耗量在黑龙江省和吉林省中远远多于焦炭的消耗量。辽宁省原煤消耗则少于焦炭的消耗。对于 5 种液态的化石能源，汽油和柴油始终为主要消耗品，煤油和燃料油则消耗甚少。天然气具体消耗比较体现为，辽宁省>黑龙江省>吉林省。能源碳排放量具体区间表现为：东北三省整体的省域能源碳排放区间为[27070.89, 51769.79] (万 t CO_2e)。其中，辽宁省以[12722.03, 26672.13] (万 t CO_2e) 远远高于其余 2 省，黑龙江省为[6000.417, 14166.96] (万 t CO_2e)，吉林省则为[7629.88, 13579.3] (万 t CO_2e)。

(2) 黑龙江省 13 个地市能源碳排放量的时空演变大致表现为西部地区排放格局单一且排放量较低。吉林省整体的能源碳排放量类型较为多元且复杂。辽宁省来说，整体排放格局和黑龙江省的较为类似，较为单一。东北三省能源碳排放量在 Moran' I 的表述下均存在一定的空间集聚效应的，全年呈现正相关。对于人均能源碳排放量 (CP) 来说，整体东北三省的局域莫兰指数显著区域较少。标准差椭圆所展示出的排放量的空间区位移动区位及排放范围。整体区域的能源碳排放量 (C) 范围从大到小依次为，2015 年、2019 年、2005 年、2010 年。此外，东北三省能源碳排放量面向 3 个省份来说，增长速率的整体表现从快到慢依次为：黑龙江省、辽宁省、吉林省。

(3) 在脱钩关系种类上，在 2005 至 2019 年间，东北三省 5 个时序组中，一共出现了 9 种脱钩状态。在脱钩状态对“排放-经济”关系的解读上，黑龙江省是 3 个省份中唯一一个“排放-经济”关系脱钩表现整体发展方向调整较为成功的省份。对于吉林省来说，整体的质量演变趋势则和黑龙江省正好相反。就辽宁省来说，整体在 5 个时序组中的脱钩评价变化不大。

参考文献

- [1] 刘斌,闫蝶深,浦旒,吕洁华. 基于云模型的森林康养产业供需维度可视化研究——以东北三省老龄人口的调查数据为例[J]. 林业经济,2022,44(04):19-37.
- [2] 关伟,李书妹,许淑婷. 东北三省碳排放时空演变多尺度分析——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据[J]. 生态经济,2022,38(11):19-26.
- [3] 杨盛东. 收缩情境下东北三省城市碳排放时空演变格局及驱动因素[D].哈尔滨师范大学,2022.
- [4] 杨迪,杨旭,吴相利,曹原赫,周嘉,范大莎,赵程. 东北地区能源消费碳排放时空演变特征及其驱动机制[J]. 环境科学学报,2018,38(11):4554-4565.
- [5] 李云燕,盛清,代建. 基于 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的京津冀城市群碳排放时空演变特征[J]. 环境工程技术学报,2023,13(02):447-454.
- [6] 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.
- [7] 顾倩芸,李兰英,杜治峰,李振阳. 基于夜间灯光数据的长三角地区能源碳排放时空演变及脱钩分析[J]. 新余学院学报,2022,27(05):44-55.
- [8] 胡梦姍,叶长盛,董倩,刘彦. 长江中游省会城市碳足迹深度时空演变及其影响因素[J]. 环境科学研究,2022,35(10):2282-2292.
- [9] Su Y, Chen X, Li Y, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014,35(C):231-243.
- [10] 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.
- [11] Shi K, Chen Y, Yu B, et al. Modeling spatiotemporal CO₂, (Carbon Dioxide) emission dynamics in China from DMSP- OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016,168:523-533.
- [12] Bickenbach, F., Bode, E., Nunnenkamp, P. et al. Night lights and regional GDP[J]. REVIEW OF WORLD ECONOMICS (2016) 152:425–447.
- [13] Moutinho V, Moreira A C, Silva P M. The driving forces of change in energy- related CO₂, emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: The LMDI approach to decomposition analysis[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2015,50:1485-1499.
- [14] Han J, Du T, Zhang C, et al. Correlation analysis of CO₂ emissions, material stocks and

- economic growth nexus: Evidence from Chinese provinces[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,180:395-406.
- [15]康宽,郭沛,陈景帅. 中国城市碳足迹压力测算与非均衡性研究——差异、极化与空间集聚特征[J]. *城市问题*,2022,(10):4-16.
- [16]陈义忠,乔友凤,姚澜,牛云飞,杨灵芝. 城市集群土地利用碳足迹时空分异及响应特征[J]. *环境科学与技术*,2022,45(04):227-236.
- [17]李守伟,王一泽. 东北三省人居环境气候舒适度评价[J]. *国土与自然资源研究*,2020,(06):14-17.
- [18]魏凌,张杨,李强,宋家宁. 基于标准差椭圆的我国国土生态空间分异研究[J]. *生态经济*,2020,36(07):176-181.
- [19]孙智君,张雅晴. 中国高技术制造业集聚水平的时空演变特征——基于空间统计标准差椭圆方法的实证研究[J]. *科技进步与对策*,2018,35(09):54-58.
- [20]顾倩芸. 长三角地区碳排放时空演变、驱动因素及脱钩分析[D].浙江农林大学,2022.
- [21]于卓卉,毛世平. 中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析[J]. *中国人口·资源与环境*,2022,32(11):30-4.
- [22]ZHAO M,ZHOU Y Y,LI X C,et al.Building a series of consistent night-time light data (1992-2018) in Southeast Asia by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J].*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2020,58(3):1843-1856.
- [23]Elvidge, D.C.; Ziskin, D.; Baugh, E.K.; Tuttle, T.B.;Ghosh, T.; Pack, W.D.; Erwin, H.E.; Zhizhin, M. A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data[J]. *Energies*. 2009(2): 595–622.
- [24]Zhifeng Liu, Chunyang He, Qiaofeng Zhang, QingxuHuang, Yang Yang. Extracting the dynamics of urban expansion in China usingDMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and UrbanPlanning*. 2012: 62–72.
- [25]Kang Wu, Xiaonan Wang. Aligning Pixel Values of DMSP and VIIRS Nighttime Light Images to Evaluate Urban Dynamics[J]. *Remote Sensing*, 2019,11, 1463.

致谢

“从西南到东北，三千多公里的空间距离，一趟汽车加两趟飞机的通勤时间。”

——2019 级经济统计学 2 班刘斌

在致谢的开头，我想对吕洁华教授、我阿妈、经统专业的所有老师、干妈、姨爹、姨妈、郭岩老师、浦旒同学、王润雨同学、段小嫂、很多学长学姐、20 级的小张、张薇学姐、17#606 的小伙伴、经济统计学专业的小伙伴们以及所有帮助过我的人，说一声谢谢！

当然更要对自己说一声谢谢！同时，我也缅怀并想念我的外婆！

不知不觉，时光荏苒。似乎 2019 年那个皮肤黝黑，弯腰驼背，口音独特同时内向至极的刘斌，在 2023 年 4 月 22 日（写致谢的这一天，把致谢拖到了论文内容完成后的好几天）成长为了一个皮肤不那么黑，但仍然弯腰驼背，不过普通话变得标准了些，同时愈发胆大社牛且独立的这个刘斌。我为自己的蜕变感到欣慰！

2001 年，我出生在云南省德宏州的一个西南边境小镇，陇川县章凤镇。从小家里只有我和我阿妈，阿妈今年已经 53 岁了。她，利落的短发，中性十足的穿着，自然大方的谈吐，友善真诚的笑容。阿妈从小生活的寨子，条件比较艰苦，但阿妈始终坚持读书，是县城职高毕业的文凭。由于路途遥远，每次去上学都需要走很远很远的山路，但阿妈都坚持下来了。她从小就知道读书的重要性，从小她对我的要求很严格。我深知书读百遍其义自见！

2020 年是我经历较多的一年，高学分考试的失利、外婆的离世，每一件事都在压抑着我。我非常感谢姨妈和阿妈给我的鼓励。后续，我开始认真投入到学习中。我敢于坐第一排、我敢于和老师互动、我也愈发发现了我对统计学和数据科学的热爱。大二上学期是我真正遇见自己的可能性的一年，后续我开始在吕洁华老师的指导下进行一系列的科研活动。我愈发发觉到自己的很多可能性，我非常感谢吕洁华老师在我科研道路上的指引，让我愈发坚定了自己对于科研的追求。在后续的几年中，我每天几点一线，食堂、空教室、宿舍、当然还有成栋楼 11 楼的教师休息室。每天沉浸在学习和科研之中让我很充实也很开心，愈发让我找到了自我，也敢于去展现自我。

每天的忙碌不断麻痹着我，不让我过度焦虑于保研名额的压力。我坚信坚持下去不放弃，我就会成功。宿舍自习室凌晨 4 点的静谧我很熟悉、竞赛报告的 deadline 与考试之间的冲突我遇到过、凌晨 4 点宿舍窗外哈尔滨的天蒙蒙亮也很美。高压下人成长的很快，我收获了许多，不断突破着自己的舒适圈，也不断收获着成绩和奖励。

我感谢自己，我感谢自己这几年来的坚持，我遇见了自己！我觉得一路走来我是幸运的，到最后一刻，专业的保研名额有所增多，我如愿拿到了保研名额，同时也去到了自己喜欢的学校进行自己喜欢的研究，未来在中科院生态中心做科研的日子，我会更努力！

最后感谢东北林业大学经济管理学院经济统计学专业吕洁华教授，国家社会科学基金项目《温室气体控排与森林碳汇的匹配均衡分析及政策启示》（21LBG166）的支持。

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的毕业论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明，其它未注明部分不包含他人已发表或撰写过的研究成果，不存在购买、由他人代写、剽窃和伪造数据等学术不端行为。

本人愿为此声明承担法律责任。

作者签名： 刘斌

日期： 2023 年 6 月 15 日

学位论文版权授权书

本学位论文作者同意授予东北林业大学对本论文全部内容的信息网络传播权、汇编权、发行权、转授权与复制权，具体包括但不限于将学位论文上传到有关数据库，影印、缩印或扫描等手段保存、查阅、借阅、汇编等。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

作者签名： 刘斌

日期： 2023 年 6 月 15 日