张守忠,吴相利,张旖琳.东北三省县区能源消费碳排放时空变化与影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5907-5920.
Zhang S Z, Wu X L, Zhang Y L. Spatio-temporal changes and influence factors of energy-related carbon emissions at county-level in Northeast China [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5907-5920.

# 东北三省县区能源消费碳排放时空变化与影响因素研究

张守忠[1,2*],吴相利[2],张旖琳[2] (1.黑龙江科技大学矿业工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022；2.哈尔滨师范大学地理科学学院,黑龙江 哈尔滨 150025)

**摘要**：测度了东北三省 182 个县区能源消费引致的人均碳排放量,采用核密度估计、空间自相关分析、Theil 指数、面板数据模型分析了 2000 年以来人均碳排放量的时空变化并剖析了影响因素的干扰作用,可为确定碳减排目标和细化政策设计提供依据.结果表明:期间县区人均碳排放量均呈持续增长态势,前 10a 增速快于后 10a,农业县的增长快于林业县,城市中心区最慢.县区人均碳排放存在空间正相关关系,总体上呈现为南高北低格局;从发展趋势看县区间的总差异逐渐缩小,城市间差异是引致总差异减小的主要因子,但总差异主要表现为城市内部各县区间的差异;经济增长和人口素质对所有类型县区均有显著影响,其中经济增长是促进碳排放的首要因素,除林业县外提高人口素质均有助于碳减排;居民消费和人口规模对区域总体、城市中心区以及农业县也有重要影响,其中居民消费表现为促进碳排放,区域总体与农业县的人口收缩和城市中心区的人口增长均会抑制碳排放;城镇化促进了区域总体的碳排放,但会抑制林业县的碳排放;技术水平和老龄化的提高均会促进碳排放,但作用较弱;环境规制对所有类型县区均无影响.实现碳减排,需加强低碳产业发展、提升科技人员效能、推进人口收缩与老龄化治理、倡导低碳生活,走因县制宜多策并举的道路.

**关键词**：能源消费碳排放；人均碳排放；时空变化；影响因素；县区尺度；东北三省
**中图分类号**：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5907-14

**Spatio-temporal changes and influence factors of energy-related carbon emissions at county-level in Northeast China.**

ZHANG Shou-zhong[1,2*], WU Xiang-li[2], ZHANG Yi-lin[2] (1.School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China；2.College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5907~5920

**Abstract**：The per capita carbon emissions(PCCE) of energy consumption in 182 county-level districts in Northeast China were measured in this paper. The spatio-temporal change of the PCCE from 2000 to 2020 were analyzed by using kernel density estimation, spatial autocorrelation analysis and Theil index and its influencing factors were discussed by panel data model, which provides a basis for determining carbon emission reduction targets and refining policy design. The results were as follows: The in county-level districts has shown a sustained growth trend since 2000. The growth rate in the first 10 years was faster than that in the second 10 years. Agricultural counties experienced faster growth than forestry counties, whereas urban core districts experienced the slowest growth.A significant spatial positive correlation was observed among county-level districts, exhibiting an overall south-north gradient with higher values in the southern regions and lower values in the northern areas.The relative difference of PCCE among county-level districts gradually decreased, and the differences among prefecture-level districts constituted the main factors behind the reduction in total differences, whereas total differences were mainly manifested as the differences among counties.Economic growth and population quality had significant effects on all types of counties, with economic growth being the primary promoting factor to PCCE. Improving population quality had contributed to PCCE reductions, except in forestry counties. Consumption and population size also had important effects on the regional overall, urban core, and agricultural counties, with consumption contributing to carbon emissions, population shrinkage in the regional overall and in agricultural counties, and population growth in urban core districts suppressing carbon emissions. Urbanization promoted regional carbon emissions overall, but it suppressed emissions in forest counties. Higher technological development and population aging contributed to carbon emissions, albeit to a lesser extent. Environmental regulation had no effect on all county-level districts. To realize carbon emission reduction, it is necessary to strengthen the development of low-carbon industries, enhance the effectiveness of scientific and technological personnel, promote the management of population shrinkage and aging, advocate a low-carbon life and take a county-specific and multi-pronged

**收稿日期**：2025-03-10
**基金项目**：国家社会科学基金资助项目(16BJY039);哈尔滨师范大学研究生创新项目(HSDBSCX2021-07);黑龙江省高校科研业务费项目(2024-KYYWF-1086)
* 责任作者, 副教授, 13674633817@163.com

approach.

**Key words**：energy-related carbon emissions；per capita carbon emissions(PCCE)；spatio-temporal change；influencing factors；county-level；Northeast China

能源消费产生的碳排放是导致全球气候变化的主要原因,减少碳排放已成为国际社会共同关注全球环境治理的紧迫任务[1-2].我国是世界上温室气体排放最多的国家,也是全球碳排放增长的主要贡献国[3-4],国际社会不断呼吁中国担负更大的减排责任,我国目前不仅提前实现了“2020 年碳排放强度较 2005 年下降 40%~45%”,还提出“至 2030 年前碳达峰,2060 年前碳中和”的“碳达峰碳中和”目标.显然,推进绿色低碳发展是积极应对全球气候变暖、回应国际压力的战略举措.县域是我国经济发展、行政管理及政策执行的基本空间单元,承担着分解省级政府碳减排指标、推进低碳发展的职责,开展县区尺度碳排放研究,可以避免省市级尺度研究中的数据“平均效应”,细化“碳不平衡”研究,可为落实减排责任、避免减排目标“一刀切”提供依据,对制定系统且差异化的减排政策体系乃至完善生态补偿机制有重要作用.

学界主要从碳排放的测度、时空变化、驱动因素三个方面开展碳排放研究:(1)在碳排放测度上,受限于能源消费数据和方法论,主要对国家[5-6]、区域[7-8]、省区[3,9-10]等大中空间尺度的测度并开展相关研究,近年来利用夜间灯光数据测度城市尺度碳排放的研究显著增加[11-14],但主要关注全国[4,15]、黄河流域[16]、京津冀[17]、西部地区[18]等,县区尺度的研究较少;(2)在时空变化上,主要探讨碳排放总量和碳排放强度的时空变化.结果显示,区域、省区以及市—县尺度的碳排放均存在集聚特征[4,9-14],市—县尺度的碳排放差异多呈缩小趋势[4,11],省区尺度的碳排放强度高值集聚区和低值集聚区存在空间锁定[9],空间上呈现为“东北部和西部较高”“东部和中部较低[1]; (3)在驱动因素上,主要使用 STIRPAT 模型、面板数据模型、指数分解法、KAYA 恒等式等方法进行定量分析[11],研究经历了由关注经济增长、人口规模等单一因素向综合考虑规模、结构、消费及技术等因素的转变.规模因素主要考察经济增长和人口规模,多认为经济发展是人均碳排放提高的主要因素[1,14],其影响遵循 EKC 假说[11,19],当前我国大部分地区表现为促进碳排放[1,12].人口增长或集聚会抑制人均碳排放[11,15],人口每增加 1%人均碳排放量将减少 0.3%[20].结构因素主要考察老龄化和城镇化,认为老龄化的增碳和减碳双向作用决定了在老龄化初期会促进人均碳排放[21],但长远看会抑制[22].城镇化对人均碳排放的影响因城镇化进程差异而表现不同[12,24],多认为其影响呈倒“U 型”[23].多数研究支持居民消费与人均碳排放之间存在正相关关系[25].主要从技术创新和碳排放效率视角研究技术的影响,多数研究认为技术创新与人均碳排放存在负相关关系[26].优化能源消费结构、降低排放强度能抑制碳排放[27].

东北三省是我国重要的老工业基地,域内重工业比重大,高碳能源消费占比高,加之农业机械化程度高,供暖期长,其社会经济发展具有能源消耗量大、能耗水平高、能源依赖度强的特征,减排压力大.该地区还是我国人口收缩最显著的区域[28],但人均碳排放量不降反升,形成“高碳收缩”[29-30].受资源禀赋等影响,该地区的碳排放区域差异明显,突出表现在发展本底迥异的县区尺度上,如资源型县区、农业主导县、林业主导县.开展该地区的碳排放研究,对于识别不同发展本底区域的碳排放及影响因素的异质性、揭示人口收缩和社会经济发展复合作用对碳排放的复杂影响有重要意义和研究价值,也可为其他已经或即将进入收缩的地区提供参考.对东北地区碳排放的研究主要是在地市层面展开[31-36],县区和人均角度的研究极少[31-32].研究显示,该地区的碳排放总量、人均量以及碳排放强度均呈空间正相关[32-33],域内存在多个热点和冷点[33].碳排放是多因素共同作用的结果,且多因子交互影响较单因子作用更明显[34].经济增长的促进作用最明显[33-34],人口增长不利于碳减排,而能源消费结构和产业结构调整则有助于碳减排[35],环境规制会抑制碳排放,因素作用存在明显的市域差异[36].

尽管学界对碳排放进行了大量研究,但仍存在如下不足: (1)在研究尺度上,关注大中空间尺度[37],县区微观尺度的研究明显不足,容易使地域内的差异被“平均”,难以精细刻画区域格局特征,既有研究结论的差异说明关注区域发展本底、微观尺度的

必要性;(2)在时空差异上,关注全国、经济发达地区及人口增长地区,对人口收缩的东北地区研究不足.关注碳排放的总量[1,4,13-14]和强度[9,11,32],对人均碳排放重视不足,采用户籍人口不利于准确揭示人均碳排放的不平衡程度[15];(3)在影响因素上,对不同类型区域的影响因素异质性及作用机理揭示不足[15],且很少考虑人口收缩与社会经济发展叠加的影响.多数研究中的回归系数不能比较各因素作用的强弱,削弱了成果的政策含义.

人均碳排放量是衡量区域温室气体排放的重要指标,可为确定减排目标和细化政策设计提供依据.而关注发展本底的异质性,关注人口规模变化对碳排放影响的区域差异同样可为政策设计提供参考.鉴于此,本文利用核密度估计、空间自相关、Theil指数找出了东北三省区域总体及3类县区人均碳排放的时空变化特征,进而利用面板数据模型揭示了各自的影响因素.

本文的边际贡献:(1)立足于东北区情,根据发展本底将县区划分为城市中心区、农业县、林业县,揭示了影响因素在各类型县区作用的异质性,深化了碳排放研究;(2)在标准化的基础上得到了各因素的标准回归系数,该系数可以比较各因素影响的强弱;(3)专门对人口收缩明显的东北三省县区开展研究,分别提出了各类型县区的碳减排建议,对推进资源型地区和传统农区碳减排更具指导性.

## 1　县区类型划分、数据来源与研究方法

### 1.1　研究区范围与县区类型划分

研究区为东北三省(不含大兴安岭地区的内蒙古部分,图 1),面积为 78.91×104km2,2020 年总人口为 9836 万.鉴于建成区内居住地与工作地分离现象普遍,基于数据的准确性和可获得性,将各设区市的建制区合并作为新的县区;抚顺县政府驻地在抚顺市顺城区,而县级政府驻地是碳排放的主要区域,将抚顺县并入抚顺市.处理后的县区共 182 个,辽宁、吉林、黑龙江三省分别为 56 个、48 个、78 个.

东北三省矿产、耕地、森林等资源丰富,但分布不均,由此形成了发展本底差异明显的不同类型县区,并在很大程度上造成了发展方向的差异和碳排放模式的不同.为剖析不同发展本底县区的碳排放,根据行政地位、产业结构、人口与经济规模以及在主体功能区规划中的定位等将县区划分为城市中心区、农业县、林业县三类,分别有 32 个、111 个、39 个(图 1).

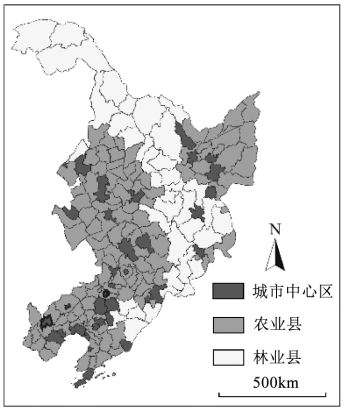



图 1　三种类型县区分布

Fig.1　Distribution of three types of counties

基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1697 号的标准地图制作,底图边界无修改,下同

城市中心区主要由设区市的建制区合并而来,是设区市的政治经济中心,也是东北三省工业特别是重工业的主要分布区,界定标准为人口、经济、城市规模大,城镇化率和非农产业比重高,其 2020 年常住人口集中度和城镇化率应分别不低于 20%、70%,非农产业比重大于 80%;林业县是指纳入大小兴安岭、长白山两个国家森林生态功能区的县区,“天保工程”和生态功能区建设对其碳排放有明显影响;其余县区为农业县,主要位于松嫩平原、辽河平原和三江平原,农业生产条件优越,但经济发展水平和城镇化率较低.

### 1.2　县区人均碳排放量的测度

以化石燃料为主的能源消费产生的碳排放是造成全球温室效应的主要人为原因,学界主要从能源消费碳排放角度开展研究,本文遵循该传统,将碳排放指标界定为能源消费产生的人均二氧化碳排放量(简称人均碳排放量).参与测度的能源有原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、天然气等 12 种.能源消费碳排放测度方法主要有实测法、排放因子法和模型反演法.我国并未建立碳排放监测体系,国家、省区尺度的碳排放主要利用排放因子法[3,9].在市—县尺度上,我国自上而下的能源统计体系决定了仅有少数城市的能源消费平衡表得以公布,大

部分区域的能源消费数据获取困难,尤其是县区层面,制约了排放因子法在该尺度上的应用,该尺度的碳排放测度主要是利用模型反演法,其中利用夜间灯光数据反演最广泛[1,9,11,16],本文使用该方法测度县区碳排放总量.能源折标准煤系数来自《综合能耗计算通则(GB/T 2589−2020)》,排放系数参照《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》.具体测度过程如下:

首先获取各省 2000~2020 年的夜间灯光数据总值(SDN)及各种能源消费数据,利用排放因子法计算各省的碳排放量(表 1,限于篇幅仅列出部分年份).修订 SDN,使三省同一亮度值对应的碳排放量相同.再利用三省 21a 的 SDN 和碳排放量进行模拟,构建碳排放量测度反演模型,验证模型精度,其中一元无截距的线性方程拟合效果最优(图 2).21a 省区拟合值均值较真实值均值低 0.36%,其中吉林省最高,为 0.6%,辽宁省最低,为 0.17%,平均相对误差为 10.93%.63 个相对误差中(21a×3 省),误差低于 12%的占 71.43%,误差在允许区间,故选择该模型作为县区碳排放量的反演模型.

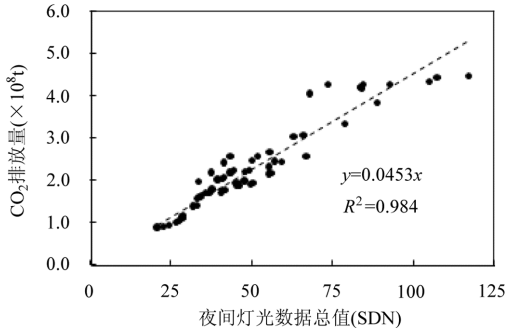



图 2 东北三省夜间灯光数据总值(SDN)与碳排放量散点图

Fig.2 Scatter plot of SDN and carbon emissions in Northeast China

将修正后的县区 SDN 代入反演模型获得初步的碳排放量,再利用施开放的方法[38]修正碳排放量,使各省所辖县区的排放量总和与基于能源消费测度的省区排放量一致,得到各县区最终的碳排放量.

夜间灯光数据来自 Wu 等[39]的成果,该数据整合了 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两种类型的夜间灯光数据,解决了不同类型、不同年份间数据不连续、过饱和、背景噪音等问题,形成了一个长时段的连续数据,行政界线来自国家基础地理信息中心.需将上述两种数据转为等面积的 Albers 投影.能源消费数据来自《中国能源统计年鉴》.我国人口普查周期为 10a,其它年份的常住人口数为推算数据,且县区尺度的数据不完整,故仅计算 2000 年、2010 年、2020 年常住人口的人均碳排放量(图 3),人口数据来自人口普查资料.

表 1 东北三省 $CO_2$ 排放量($\times10^4$t)

Table 1 $CO_2$ emissions in Northeast China ($\times10^4$t)

| 年份 | 辽宁省 | 吉林省 | 黑龙江省 | 东北合计 |
|---|---|---|---|---|
| 2000 | 19616.8 | 8605.8 | 11733.5 | 39956.1 |
| 2005 | 24263.2 | 14133.9 | 13610.0 | 52007.2 |
| 2010 | 38545.5 | 19495.0 | 17754.8 | 75795.2 |
| 2015 | 41719.7 | 20364.8 | 24883.5 | 86967.9 |
| 2020 | 44538.9 | 18965.2 | 24451.8 | 87955.9 |

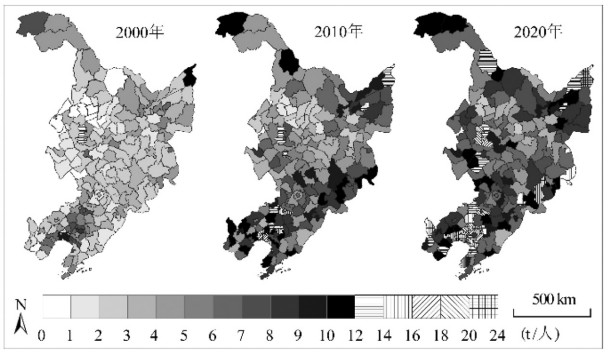



图 3 东北三省县域人均碳排放时空格局变化

Fig.3 Changes in spatio−temporal pattern of PCCE at county−level in Northeast China

### 1.3 研究方法

**1.3.1** 核密度估计用来衡量县区人均碳排放量的绝对差异及变化.该方法是利用平滑核函数作为权重对样本数据的概率密度曲线进行拟合的非参数估计方法(式 1),具有稳健性强、模型依赖性弱的特性,被广泛应用于描述随机变量的分布形态[4],其分析包括分布位置、分布态势及延展性等.

$$f(x)=\frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{X_i-\bar{x}}{h}\right) \quad (1)$$

$$K(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2)$$

式中:N 为样本数;$X_i$ 为独立同分布的观测值;$\bar{x}$ 为均值;$h$ 为带宽;$K(\cdot)$为核函数,采用高斯核函数.

**1.3.2** 空间自相关分析用来分析县区人均碳排放的空间分布模式及变化.全局空间自相关可揭示是

否存在显著的空间分布模式,选择全局 Moran's $I$ 指数(式 3).$I$ 值越接近 1,说明人均碳排放量相似的县区越趋于集聚,越接近−1 则越分散.Moran 散点图是 Moran's $I$ 指数的空间可视化,可以展示人均碳排放的空间关系,其第一、三象限分别为 H−H、L−L,表示县区人均排放量高(低),周边县区也高(低),为空间正相关,表现为空间同质性;第二、四象限分别为 L−H、H−L,表示县区人均排放量低(高),但周边县区高(低),为空间负相关,表现为空间异质性.

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{3}$$

式中:$x_i$、$x_j$ 是县区 $i$ 与 $j$ 的人均碳排放量;$\bar{x}$ 为平均值;$S^2$ 为方差;$w_{ij}$ 为权重值,本文基于邻接规则构造空间权重矩阵;$n$ 为县区数.

全局空间自相关只能反映县区人均碳排放在空间上是否存在集聚现象,难以确定对全局模式起决定作用县区的具体位置,故引入热点分析以识别县区人均碳排放量的热点和冷点(式 4),$G$ 通常用其标准化 $Z$ 值表征(式 5).当县区的 $Z$ 值显著为正,为人均碳排放量的热点,显著为负则为冷点.

$$G_i^*=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(d)x_j\Big/\sum_{j=1}^{n}x_j \tag{4}$$

$$Z(G_i^*)=[G_i^*-E(G_i^*)]\Big/\sqrt{VAR(G_i^*)} \tag{5}$$

式中:$E(G_i^*)$、$VAR(G_i^*)$ 为 $G_i^*$ 的期望值和方差.

1.3.3　Theil 指数用来揭示县区人均碳排放量的相对差异及其空间表现.碳排放的区域差异可以体现在不同的空间尺度上,对其揭示有助于深化区域碳排放差异的认识,可为减排指明方向.表征相对差异的指标有基尼系数、Dagum 基尼系数及 Theil 指数等,基尼系数只能表征总体差异及变化,不能揭示差异的复杂性与来源.Theil 指数不仅能够测度总差异,还能将总差异分解为相互独立的组内差异和组间差异,可以更好的考察差异的演变轨迹,解析总差异的来源,被广泛用于衡量区域间要素分布的相对差异.Dagum 基尼系数是对基尼系数的扩展,虽然也可进行差异分解,但计算复杂,且会受参数选择而影响结果的准确性,故选择 Theil 指数.以县区为基本单元,在衡量三省总差异 $T$ 的基础上,将其二阶嵌套分解,分解为三省间的省际差异($T_{bp}$)、省内地级行政区(简称城市)间的市际差异($T_{bd}$)以及城市内县际差异的市内差异($T_{wd}$).

先进行一阶分解,将 $T$ 分解为省际差异($T_{bp}$)和省内差异($T_{wp}$).

$$\begin{aligned}T&=T_{bp}+T_{wp}\\&=\sum_i\frac{x_i}{X}\ln\left(\frac{nx_i}{mX}\right)+\sum_i\sum_j\frac{x_{ik}}{X}\ln\left(\frac{nx_{ik}}{x_i}\right)\end{aligned} \tag{6}$$

再将 $T$ 进行二阶嵌套分解为 $T_{bp}$、$T_{bd}$、$T_{wd}$..

$$\begin{aligned}T&=T_{wd}+T_{bd}+T_{bp}\\&=\sum_i\sum_j\frac{x_{ij}}{X}T_{ij}+\sum_i\frac{x_i}{X}T_{di}+\sum_i\frac{x_i}{X}\ln\left(\frac{nx_i}{mX}\right)\end{aligned} \tag{7}$$

式中:$T_{di}=\sum_j\frac{x_{ij}}{x_i}\ln\left(\frac{nx_{ij}}{mx_i}\right),Tij=\sum_k\frac{x_{ijk}}{x_{ij}}\ln\left(\frac{nx_{ijk}}{kx_{ij}}\right)$

式中:$X$ 为所有县区人均碳排放量之和;$x_i$ 为 $i$ 省县区人均碳排放量之和;$x_{ij}$ 为 $i$ 省 $j$ 市县区人均碳排放量之和;$x_{ijk}$ 为 $i$ 省 $j$ 市 $k$ 县人均碳排放量;$m$、$n$、$p$ 分别为三省、$i$ 省、$j$ 市的县区数.

1.3.4　计量经济分析用来揭示引致县区人均碳排放量的影响因素.面板数据增加了样本数量,信息量更大,能够控制不可观测的地区特定效应或时间特定效应,克服了截面数据、时间序列数据的缺陷,可以获得更高的自由度,提高参数估计的有效性[40],故采用面板数据模型.模型设定如下:

$$pc_{it}=\alpha+\beta_i x_{it}+\mu_i+\nu_t+\varepsilon_{it} \tag{8}$$

式中:$pc_{it}$ 为 $i$ 县区 $t$ 年的人均碳排放量; $X$ 为一组影响因素;$a$ 为常数项,$\beta_i$ 为因素 $X_i$ 的回归系数;$u_i$ 为不随时间变化的个体效应;$v_i$ 为不随个体变化的时间效应;$\varepsilon$ 为随机误差项.

基于经济发展、人口、城镇化、居民消费、技术创新、环境规制是碳排放重要影响因素的普遍认识[7,9,11,14-16,24],结合数据可获得性及共线性诊断结果,选择如下指标:人均 GDP(表征经济增长),人口密度(表征人口规模),城镇化率(表征城镇化进程,常住人口中城镇人口比重)、老龄化指数(表征人口年龄结构,常住人口中 65 岁以上人口比重),受教育年限(表征人口素质),人均社会消费品零售额(简称人均社销额,表征居民消费),碳排放强度(表征产业技术水平,碳排放总量/GDP), $PM_{2.5}$ 浓度(表征环境规制).另外,老龄化指数、受教育年限可以从侧面反映人口收缩及其影响.受数据收集限制,未考虑能源消费结构、政府政策和专利授权方面指标.

采用指标原始值回归得到的回归系数会因指标量纲选择不同而变化,不能用来横向比较各因素的影响强弱,为此先对影响因素进行最小值标准化处理再进行回归得到标准回归系数.该系数的绝对值越大,对县区人均碳排放的影响就越大,反之则影响越小,系数的正负代表作用方向,即促进或抑制人均碳排放量的提高.

## 2 县区人均碳排放量时空变化特征

### 2.1 县区人均碳排放时序变化趋势分析

区域总体(182 个县区)的人均碳排放核密度曲线不断右移(图 4),表明县区人均碳排放量不断提高,期间 182 个县区的人均碳排放量均增长,由 3.74t 提高至 8.9t,年均增长 4.43%,但前 10a 曲线右移幅度明显大于后 10a,说明前 10a 提高更快,年均增速达 6.36%.虽然城市中心区的增速最慢,但其初期排放水平高,10a 间其人均碳排放量仍然提高了 2.8t,2010 年 32 个城市中心区的碳排放量较 2000 年增加 $1.55\times10^8$t,占总增量的 43.28%.2011 年以来,受重工业衰退、节能减排考核、淘汰落后产能等影响,增速明显放缓,区域总体的年均增速仅为 2.53%,三类县区的增速下降 3.3~4.1 个百分点,其中城市中心区增速仅为 1.04%,但其排放量增量占总增量的比重上升至 55.03%.从分布形态看,2000 年曲线波峰最窄,峰值最高,峰顶对应的排放量约为 2.5t,右拖尾短,说明多数县区集中在人均 2.5t 附近较小的排放区间内,县区间绝对差异较小.此后波峰明显变低变宽,曲线更扁平,说明县区人均碳排放量趋向离散.从延展性看,曲线的右拖尾不断延长,说明少量县区(盘锦、大庆、辽阳、本溪、营口、瓦房店、盘山等)的人均排放量与大部分县区之间存在明显差距且差距不断扩大.3 条曲线均为单峰状,意味着不存在两极或多级分化.

三类县区的曲线也明显右移,但曲线变化差异明显.城市中心区 2010 年的曲线右拖尾最长,且有次峰形成,说明该年县区间绝对差异最大,其原因是前 10 年国家和东北的重工业化带动了抚顺、吉林、辽源、本溪、盘锦等资源型城市发展,而哈尔滨、齐齐哈尔、佳木斯、四平等初期人均碳排放量较低,且提高较慢,故两极分化.“新东北现象”以来,资源型城市发展低迷,人均碳排放增长缓慢甚至个别县区下降,故差异减小.农业县的曲线展宽和峰值下降均最大,曲线最扁平,右拖尾也更长,说明其县区间人均碳排放最离散,这与农业县中有少数工业较为发达的县区有关.林业县的右拖尾不断延长,说明其绝对差异不断增大,但该差异均明显小于农业县和城市中心区,县区间人均排放水平较为均衡.

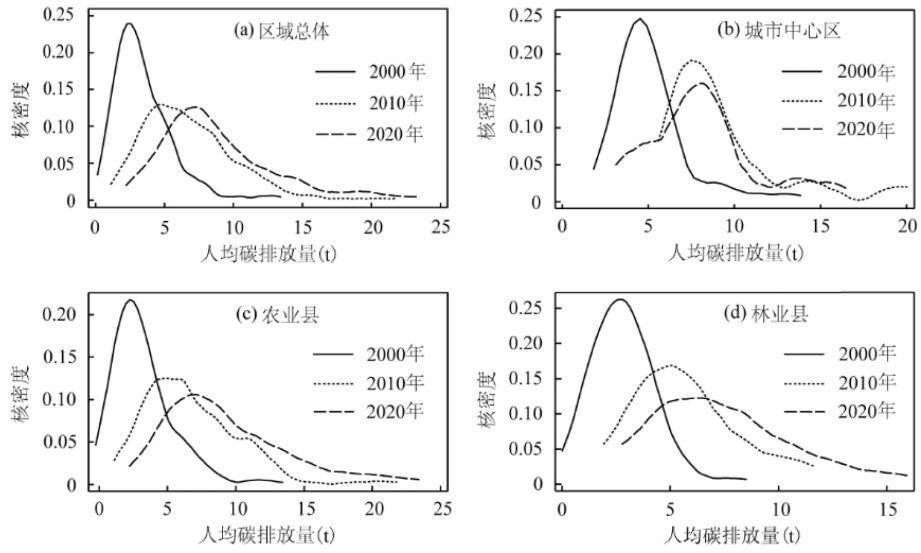



图 4 东北三省县区人均碳排放量核密度曲线

Fig.4 Kernel density curve of PCCEat county−levelin Northeast China

### 2.2 县区人均碳排放量空间格局变化分析

3a 的 Moran's *I* 值分别为 0.37、0.42、0.36,且显著为正,说明县区人均碳排放具有显著的空间正相关性,在空间上呈现集聚分布的特征,H−H 集聚和

L–L 集聚的县区占比均在 70%以上,是主要的全局空间自相关类型.其中,H–H 县区主要位于辽宁省(图 5),3a 分别有 29 个、36 个、29 个,占 H–H 县区数的比重均超过 60%;L–L 县区主要来自黑龙江省和吉林省,3a 分别占 85.71%、95.89%、94.25%,其中黑龙江省占 49.45%、73.97%、62.07%.*I* 值先增后减,即县区的空间趋同性先增强后减弱,说明前 10a 人均碳排放快速提高促进了县区的趋同,后 10a 增速减缓则强化了区域异质性.

主要受生态功能区建设影响,2020 年黑龙江省内的H–H 县区明显减少,这些县区均为林业县,.受人口收缩加速和农业机械化影响,三江平原的 H–H 县区先显著增加后减少.吉林省主要表现为 L–L 县区和 H–L 县区的转换,其中松嫩平原和长白山主要为 L–L 向 H–L 县区的互相转换,其原因与三江平原相似;H–L 向 L–L 转变的县区主要是城市中心区,其中长春主要是人口和低碳产业快速增长所致,吉林、四平、白山主要原因是工业经济比重下降.辽宁省的 L–L 县区主要是转变为L–H 和H–H 县区,前者主要位于辽中南,说明其人均碳排放趋向分化;L–L 向 H–H 转变的县区均来自辽西南.辽宁省 H–H 县区比重提高、吉林省与黑龙江省 L–L 县区增加,南高北低的二元分异特征日益明显.

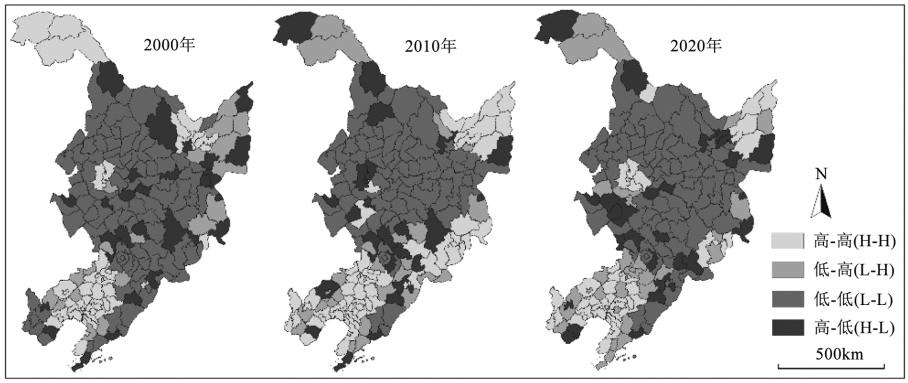



图 5　东北三省县区人均碳排放量分布模式

Fig.5　Distribution pattern of PCCE at county–level in Northeast China

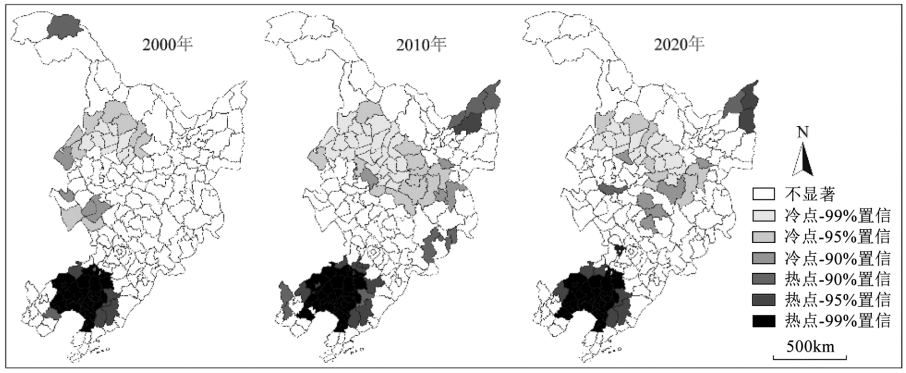



图 6　东北三省县区人均碳排放量热点与冷点

Fig.6　The hot spot and cold spot of PCCE at county–level in Northeast China

由图 6 可以看出,期间冷热点区域均先迅速扩张再明显收缩.2000 年,冷点区有 23 个县区,主要位于松嫩平原与大小兴安岭林区的交接地带,这些县区除齐齐哈尔外均为农业县和林业县,非农经济欠发达,故成为人均碳排放低值集聚区;2010 年,冷点区向东南方向扩展至黑龙江省内的长白山及哈大齐工业走廊,县区增至 41 个;受哈大齐工业走廊建设加快影响,2020 年冷点区的县区减少至 29 个,减少的县区多位于该走廊.3a 热点区的县区分别有 32 个、45 个、35 个,主要位于辽宁省中西部,域内矿产资源丰富,有多个城市中心区和工业经济较发达的农业县,是传统的重工业区,冶金、石化、机械、采矿、电力

等产业比重大,是人均碳排放的高值集聚区.后 2a 在三江平原也有少量热点县区,可归因于人口显著收缩和农机化水平的提高.冷点集中于黑龙江省,热点主要位于辽宁省,吉林省的冷热点县区均较少,进一步说明了南高北低的二元分异特征.

### 2.3 县区人均碳排放量相对差异变化分析

三个年份的总差异 $T$、省际差异 $T_{bp}$、市际差异 $T_{bd}$、市内差异 $T_{wd}$ 及各部分的贡献率见图 7.$T$ 由 0.1623 下降至 0.1017,降幅达 37.32%,表明县区间相对差异大幅下降,这与核密度估计分析中绝对差异扩大并不矛盾,这是由县区间人均碳排放异速增长造成的,即人均排放高的县区增速慢,而低的县区增速快.如 2000 年人均排放最高的 20 个县区的人均排放量由 8.35t 提高到 2020 年的 16.23t,年均仅增长 3.38%.这些县区主要是工业经济较发达的农业县和城市中心区;而人均排放最低的 20 个县区的人均排放量由 1.02t 提高到 5.56t,年均增长 8.83%,这些县区全部为人口收缩县区,其中收缩幅度超过 20%、30%的县区分别有 15 个、10 个.最高与最低的 20 个县区的人均碳排放量的绝对差距由 7.32t 扩大至 10.67t,其比值则由 8.15 减小至 2.92.总差异的减小并非是平稳的,而是有明显的阶段性,其中前 10a 共下降 0.0467,后 10a 仅减小 0.0139.

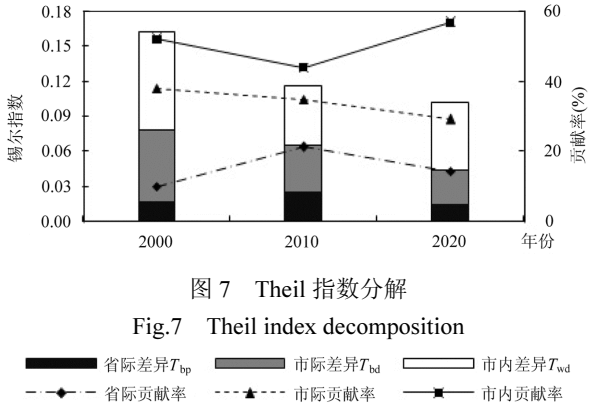



图 7 Theil 指数分解

Fig.7 Theil index decomposition

与 2000 年相比,2020 年 $T_{bp}$、$T_{bd}$、$T_{wd}$ 均下降,但变化趋势不同.其中,$T_{bp}$ 先增后减,而 $T_{wd}$ 先大幅下降后缓慢提高但总体大幅下降,$T_{bd}$ 则持续下降.期间 $T_{bd}$ 下降 0.032,占 $T$ 下降额的 51.9%,是引致总差异下降的主要来源.从差异的贡献看,$T_{wd}$ 的份额均最大,3a 平均为 50.94%,说明总差异主要表现为各城市内部县际间的差异,也充分说明从县区尺度研究的必要性.$T_{bd}$ 的份额也较大,3a 平均为 33.93%,但份额由 37.93%下降至 29.1%.$T_{bp}$ 份额均最小,3a 平均仅为 15.13%.

市内差异 $T_{wd}$ 是总差异的主要表现形式,其在空间上呈北部最高,南部次之,中间最低.2000 年,黑龙江省 13 个城市的 Twd 均值较东北三省 36 个城市的整体均值(0.0023)高 34.78%.辽宁省的均值次之,为 0.0019,略高于吉林省.与 2000 年相比,2010 年有 27 个城市的 $T_{wd}$ 下降,黑龙江省城市的下降尤其明显,但其均值仍然比辽宁省和吉林省分别高 26.01%、40.07%.到 2020 年,区域总体的 $T_{wd}$ 均值明显提高,虽然黑龙江省在 $T_{wd}$ 后四分之一分位的城市数依然为 6 个,但位次明显前移,其均值分别比辽宁、吉林两省高 48.75%、97.82%,说明三省间的 $T_{wd}$ 扩大.

## 3 县区人均碳排放量影响因素分析

### 3.1 回归结果

表 2 东北三省县区人均碳排放影响因素回归结果

Table 2 Regression results of influencing factors of PCCE at county-level in Northeast China

| 指标 | 区域总体 | 城市中心区 | 农业县 | 林业县 |
|---|---|---|---|---|
| 人均 GDP | 13.695*** | 17.121*** | 13.312*** | 26.015*** |
| | (5.11) | (2.97) | (3.91) | (4.3) |
| 人口密度 | 1.72** | −2.189* | 3.123*** | 1.785 |
| | (2.56) | (−1.79) | (2.67) | (1.07) |
| 城镇化率 | 2.268* | 7.349 | 0.892 | −3.468* |
| | (1.74) | (1.04) | (−0.47) | (−1.87) |
| 老龄化指数 | 0.422*** | 0.171 | 0.723*** | −0.278 |
| | (2.75) | (0.51) | (3.11) | (−0.74) |
| 受教育年限 | −2.662** | −4.107** | −3.771** | 7.834** |
| | (−2.14) | (−2.27) | (−2.19) | (2.6) |
| 人均社销额 | 4.005** | 7.703** | 4.857** | −2.753 |
| | (2.27) | (2.24) | (2.13) | (−0.75) |
| 碳排放强度 | 0.032* | 0.099* | 0.02 | 0.154*** |
| | (1.74) | (1.91) | (0.92) | (3.37) |
| $PM_{2.5}$ 浓度 | −1.892 | 8.92 | −2.459 | −3.915 |
| | (−0.76) | (1.41) | (−0.69) | (−1.03) |
| $c$ | −27.586*** | −37.558* | −32.049*** | −32.517*** |
| | (−4.97) | (−1.89) | (−3.68) | (−3.74) |
| $F$ | 11.86*** | 13.41*** | 12.61*** | 9.31*** |
| adj $R^2$ | 0.79 | 0.837 | 0.805 | 0.767 |

注: ***、**、*分别表示通过1%、5%、10%显著性检验.括号内数据为标准误.

受资源禀赋、发展政策、发展历程等影响,东北三省县区间社会经济发展差异显著,为减小数据波动对模型回归的影响,提高模型精度,对除老龄化指

数、受教育年限、碳排放强度之外的其它影响因素指标数据先取对数降维处理,再进行最小值标准化.分别进行混合效应、固定效应、随机效应回归,结果显示采取个体固定效应回归效果均最优,故选择该模型的回归结果进行分析(表 2).

### 3.2　区域总体影响因素分析

经济增长、居民消费、受教育年限、城镇化率、人口密度以及碳排放密度通过显著性检验,是影响区域总体人均碳排放的因素,其中受教育年限起抑制作用,其余因素为促进作用.

**3.2.1　经济增长**　虽然东北三省经济增长缓慢,但经济规模仍明显扩大,其人均 GDP、人均第二产业增加值分别由 0.87 万元、0.44 万元增长到 5.19 万元、1.74 万元,分别年均增长 9.35%、7.14%(按当年价格计算,下同).东北三省高碳能源消费占比大,经济增长对能源依赖性强,其人均碳排放量与人均 GDP 的偏相关系数显著为正,二者间的增速变化趋势均为前 10a 快于后 10a.其回归系数最大,表明经济增长是影响碳排放的最主要因素[14,32],也说明我国正处于碳排放和经济发展的同步增长阶段[25].“新东北现象”以来,东北经济发展陷入困境,重工业衰退明显,部分县区工业经济萎缩.另外,资源枯竭型城市转型、积极发展循环经济、大力发展可再生能源,导致能源需求下降,偏相关系数趋向减小,说明经济增长的影响减弱,虽然会降低对能源消费的依赖性,但如何既保证经济增长,又避免碳排放过快增长的问题亟待解决.

**3.2.2　居民消费**　期间区域总体的居民人均可支配收入年均增长 10.8%,收入增长促进了消费,居民对交通、住房、家电、旅游等的需求明显增加,如人均住房面积、万人家用汽车拥有量由 18.48m$^2$、51 辆提高到 34.24m$^2$、1786 辆,人均社销额由 3578 元提高到 18175 元,年均增长 8.46%,消费带动生产,进而带来人均碳排放的提高,这间接验证了“人均碳排放量与收入之间存在正相关关系”[26].人均社销额的标准回归系数虽然显著小于人均 GDP,但也明显大于其它因素,说明其影响强度仅次于经济增长.

**3.2.3　受教育年限**　其系数为负,表明提高人口素质有助于碳减排.受人口收缩等影响,区域总体的受教育年限提高值较全国同期低 0.62a,其受教育年限、万人大学生数由 2000 年分别比全国高 0.68a、179 人减少至 2020 年仅高出 0.07a、124 人,这也说明人口收缩过程中具有较高文化素质人员的流失更明显,导致人口素质相对下降,制约了技术创新和产业升级,其减碳效果不足以抵消经济增长、居民消费等的增碳效应,故会出现受教育年限与人均碳排放量均提高的状况.

**3.2.4　城镇化**　城镇化具有综合性,其对碳排放的影响不仅表现在可以与其它因素产生交互作用而促进碳排放[12],也会通过提高能源效率、提升集聚效益、促进产业升级从而减少碳排放,这种综合性决定了其对碳排放影响的双向性.期间城镇化率和城市建成区面积分别年均提高 0.74 个百分点、123.1km$^2$,带来了人均碳排放的提高.城镇化率与人均碳排放量的相关系数逐渐下降,表明其影响减弱,也说明二者间存在非线性关系[24].城镇化率的标准回归系数为正表明东北三省尚未到达城镇化与碳排放之间“倒 U 形”的拐点,即短期内城镇化不利于碳减排[41].

**3.2.5　人口密度**　其系数为正说明人口规模与人均碳排放量同向变化,即人口增长将提高人均碳排放量,与文献[15]的结论相反,主要是本文的研究区为人口全域收缩的东北,后者则是对全国县域的研究,人口增长是普遍现象,收缩县区仅占少数.系数为正并不意味着收缩必然带来人均碳排放量的下降.期间东北三省人口收缩加速推进,但人均碳排放量持续提高,可能的原因有:①人口收缩的效应有滞后性,这些效应对碳排放的影响也有滞后性.东北三省的人口显著收缩主要发生在近 10a,收缩时间短,对碳排放的影响尚在形成与积累中,作用机制不稳定,短期内不可能出现显著的减碳效应;②期间东北三省经济规模不断扩大,居民消费明显提高,加之能源消费惯性,故消费群体规模减小带来的减碳效应总体较小;③收缩抑制产业升级,制约技术创新和低碳技术的研发、引进与使用,可能会推高碳排放强度;④收缩导致供热、公共交通、城市照明、公共场所等的能源效率下降,该情况在城市中心区尤其明显;⑤人口密度提高有利于能源资源的有效配置和集约利用[42],而收缩则会降低能源的配置效率.以上说明,虽然人口收缩本身可能造成人均碳排放的降低,但受经济增长、居民消费等其他因素合并影响,整体可能仍表现为人均碳排放的提高.

为进一步说明人口规模的影响,根据人口增幅将

县区划分为快速增长、缓慢增长、轻度收缩、中度收缩、重度收缩等 5 个等级,各等级县区的人均碳排放量增速为重度收缩>中度收缩>快速增长>缓慢增长>轻度收缩(表 3),人口增幅与人均碳排放量增速的相关系数为−0.375,在 0.1%水平下显著,意味着人口收缩程度与人均碳排放量增速之间存在异向相关性,即人口收缩越明显,人均碳排放量增速越快,说明人口收缩在一定程度上促进了人均碳排放量的提高.

**表 3 东北三省不同人口收缩类型县区人均碳排放量变化**

Table 3 Changes in PCCE of county−level areas of different population shrinkage types in Northeast China

| 变化 | 收缩幅度 | 人均碳排放量(t) | | | 20a 平均增速(%) | 前 10a 平均增速(%) | 后 10a 平均增速(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2000 | 2010 | 2020 | | | |
| 快速增长 | >20% | 5.614 | 8.292 | 8.674 | 2.20 | 3.98 | 0.45 |
| 缓慢增长 | (0,20%] | 4.872 | 8.011 | 10.091 | 3.71 | 5.10 | 2.33 |
| 轻度收缩 | (−10%,0] | 4.390 | 8.230 | 10.294 | 4.35 | 6.49 | 2.26 |
| 中度收缩 | (−20%,−10%] | 3.518 | 6.755 | 9.710 | 5.21 | 6.74 | 3.64 |
| 重度收缩 | ≤−20% | 2.714 | 5.518 | 7.811 | 5.43 | 7.35 | 3.54 |

3.2.6 老龄化 东北地区冬季供暖用能多,老年人口较青壮年人口对供暖的要求更高,期间东北三省的老龄化由轻度老龄化进入到深度老龄化,65 岁以上老年人口增加 920.62 万,2020 年老龄化指数达到 16.39%,必然会增加供暖能源消费.但也要看到,老年人的消费能力较弱,其消费支出多集中于基本生活消费、医疗保健、养老等,消费具有明显的低碳型倾向[26],这在一定程度上会抵消其对供暖的能源需求,而且老龄化会抑制经济增长和居民增收,因而其增碳效应较小.该结果与“人口老龄化抑制人均碳排放”的观点[23]相反,原因是东北三省高碳能源消费占比高、产业重型化、人口收缩速度快、老龄化进程短但速度快,说明东北三省老龄化的减碳机制尚在形成中.

3.2.7 技术因素 碳排放强度系数为正,说明降低碳排放强度会抑制县区人均碳排放量的提高[15].受经济发展迟缓、产业结构调整缓慢、技改投入不足等制约,长期以来东北三省的碳排放强度处于高位且下降缓慢,如黑龙江省 2005 年以来万元 GDP 能耗下降 53.72%,较全国同期低 6.1 个百分点,其 2020 年能耗水平较全国高 36.94%;辽宁省近 10a 的能耗降幅较全国低 10.63 个百分点,且近年来能耗水平不降反增,均说明东北三省的碳排放强度下降有限,减排作用亟待提高.

3.2.8 环境规制 $PM_{2.5}$ 浓度的系数为负,但不显著,即环境规制对人均碳排放量无明显影响,这与丁斐[43]等“东北地区环境规制对城市碳排放强度的影响并不显著”的观点一致,但与王康等[35]“环境规制抑制碳排放”的观点相反,原因主要有三点: ①150 个农业县和林业县的第一产业占比大,工业经济落后,而环境规制主要对第二产业有影响; ②东北供暖用能占比大,但环境规制并不能改变东北三省供暖以煤炭为主的状况,且对农村供暖几乎无影响;③多数城市中心区的产业结构偏重,轻工业萎缩明显,煤炭开采、石油开采、石化、冶金等重工业对经济增长的支撑作用突出,该产业结构加剧了碳排放,加之国企比重大、技改投入不足,环境规制很难充分发挥作用.另外,受数据获取限制,选取的 $PM_{2.5}$ 不能全面反映环境规制,可能对结果产生影响.

3.3 各类型县区影响因素分析

3.3.1 城市中心区 依据显著性和标准回归系数可知经济增长是首要因素,居民消费、人口素质、人口规模是次要因素,技术的影响微弱.①城市中心区是东北的经济核心和增长极,第二产业在东北举足轻重,也是碳排放的主要来源[14],其 GDP、第二产业增加值占东北三省的比重始终分别在 60%、69%以上,2020 年更是达到 66.75%、81.56%,分别贡献了东北三省的 67.02%、83.8%的 GDP 和第二产增加值增量,成为影响其人均碳排放的首要因素;②虽然其人均社消额增速偏慢,但因城镇化率高,其居民消费水平远高于另两类县区,2020 年其人均社消额是区域总体 1.58 倍,期间其人均住房面积增速较区域总体快 0.67 个百分点,消费扩张带动了碳排放,近 10 年来其人均社销额增速显著下降,人均碳排放增速也明显下降,同驱化明显;③期间农业县和林业县人口特别是高素质人才不断流向城市中心区,在一定程度上

抵消了城市中心区自身的人口流失,居民素质明显提高,20a 间其受教育年限、万人大学生数分别提高 1.18a、1452 人,较区域总体高 0.12a、322 人.其回归系数为负说明其减碳作用强于增碳作用;④人口密度的系数为负说明城市中心区的人口增长有助于降低人均碳排放,这与人口集聚会减少人均 $CO_2$ 排放的观点一致[15,20],但与文献[32]相反,其原因在于城市中心区是以城市为核心的区域,其人口与产业集聚,集聚效益明显,而文献[32]则是对东北三省的研究.期间城市中心区人口增长 22.45%,人口和城镇规模的扩大促进了集聚效益,提升了技术创新和能源效率, 治污与减排的协同作用得以发挥,减缓了人均碳排放的增长; ⑤城市中心区结构重型化特征突出,受产业结构刚性和能源消费刚性制约,碳排放强度下降缓慢,其下降与传统产业萎缩有关,并非是产业技术和装备水平提高所致,而近 10a 来近三分之一的县区的碳排放强度上升,说明作用不明显.

3.3.2　农业县　经济增长是首要因素,居民消费、人口素质、人口规模是次要影响因素,老龄化作用较小.①大部分农业县正处于工业化初期,该阶段经济增长和碳排放多具有同步性.其 3 个年份的人均碳排放量与人均第二产业增加值在 1%水平下正相关,2011 年以来其第二产业比重和人均碳排放量增速同步明显下降;②人口密度系数为正,结合其人口减少 22.14%的事实可推知其人口收缩在一定程度上抑制了人均碳排放量的提高,但作用较弱,不足以抵消其它因素的增碳效应.另外,人口收缩及农业劳动力转移明显提高了农业劳动力的人均耕地面积,进而促进了农业机械化,削弱了人口收缩的减碳效果.期间吉林和黑龙江两省 71 个农业县的农用机械总动力由 1.56×104MW 增加到 6.67×104MW,增加了农业生产的碳排放.其人口密度的系数明显大于区域总体,说明人口收缩对农业县的减碳作用更明显;③虽然人口收缩制约农业县人口素质的提高,如其受教育年限提高值仅为区域总体的 62.5%,2020 年万人大学生数不及区域总体的 50%,但人口素质仍有明显提高,上述两个指标分别由 194 人、7.6a 提高至 816 人、8.88a,进而提升了创新能力,降低了碳排放强度,有助于碳减排;④老龄化指数的系数为正说明其增碳效应超过减碳效应,这与 Liu 等[44]“老龄化的后果是增加碳排放”的观点一致.期间农业县的老龄化指数提高 10.99 个百分点达到 17.27%,65 岁以上人口增加 386.99 万,因而必须高度重视老龄化对社会经济和碳排放的复杂影响;⑤居民消费的机理与区域总体一致,不再赘述.

3.3.3　林业县　人均 GDP、城镇化率、受教育年限、碳排放强度通过显著性检验,是影响林业县人均碳排放的因素.①“天保工程”实施以来,尤其是生态功能区建设禁止域内大规模的工业化与城镇化建设,导致林业县的经济增长主要依赖农业和第三产业,制约了经济发展,其经济增速在三类县区中最低.而人口显著收缩的“分母效应”则带来人均碳排放量的快速提高,故人均 GDP 的回归系数显著大于其它因素.如何既要加快经济发展、又遏制经济增长的显著增碳效应是其亟待解决的核心问题;②与其它县域不同,人口素质提高对林业县有明显的增碳效应,但并非是通过创新刺激经济增长实现的.期间林业县人口减少 25.84%,抑制了人力资本和创新能力的提高,其受教育年限、万人大学生数的提高值较区域总体分别低 0.72a、426 人,削弱了其通过创新发展高附加值、低碳经济的能力;③期间林业县的城镇化率提高了 9.81 个百分点, 人口集中提升了能源效率,也降低了边际碳减排成本,但城镇化率的提高并未带来大规模城镇建设, 如 2009~2016 年白山、伊春、黑河、大兴安岭 4 个城市的城镇建设用地仅增长 10%,明显低于东北及全国增幅,故系数为负.从过程看,其人均碳排放量增速前后两个阶段分别为 6.88%、2.78%,而城镇化率则分别提高 2.58、7.24 个百分点,也可以从侧面反映城镇化的减碳作用;④多数林业县的工业经济以木材加工等相关产业为主,全面停止商业性采伐政策的实施对这些产业影响明显,生态功能区建设则促进了污染产业的外迁或关停,带来农业和第三产业比重大幅提高,引致碳排放强度下降,且减碳作用较弱.

## 4　结论与建议

### 4.1　结论

4.1.1　核密度估计分析显示,研究期间区域总体和三类县区的人均碳排放量均明显提高,且前 10a 增速快于后 10a.农业县增速最快,林业县次之,虽然城市中心区的增速最慢,但对东北三省碳排放总量增长的作用更加突出.县区间人均碳排放量的绝对差

距趋向扩大;空间自相关分析显示,县区人均碳排放量呈现为集聚分布,H-H 县区主要分布在辽宁省,L-L 县区主要位于吉林省和黑龙江省,南高北低的二元分异特征明显.人均碳排放量的热点主要位于辽宁省,冷点主要来自黑龙江省,范围均先增大后减小;县区人均碳排放量的相对差异及三个部分的差异均减小,但变化趋势迥异.市际差异减小是总差异减小的主要原因,但总差异主要表现为市内差异.

4.1.2 经济增长、居民消费、城镇化、人口规模、人口素质均对区域总体的人均碳排放有重要影响,除人口素质外其余因素均起促进作用,但人口收缩的减碳效应不足以抵消其它因素共同作用的增碳效应.经济增长是首要因素,技术水平和老龄化作用小;对城市中心区来说,经济增长是首要因素,居民消费、人口素质和人口规模也有重要影响.经济增长、居民消费表现为促进,技术水平作用弱,人口素质和人口规模的提高会抑制人均碳排放;对农业县而言,经济增长是首要因素,居民消费、人口素质、人口规模是次要因素,老龄化的增碳作用显著小于其它因素,除人口素质外其余因素的提高均会促进人均碳排放;经济增长、人口素质对林业县人均碳排放有促进作用,城镇化则表现为抑制,技术水平作用微弱,经济增长的影响显著大于其它因素;环境规制对区域总体及三类县区均无影响.

4.2 建议

4.2.1 区域总体 人均碳排放是多因素共同作用的结果,应尊重不同类型县区影响因素差异现实,因县制宜设计差异化的减排对策.综合考虑各因素的影响,尤其要关注经济增长、居民消费等与人均碳排放量同步增长的事实,审慎设计与实施政策,精准施策,形成减排合力;重视人口素质的减碳作用,优化人才政策和人才使用环境,加大专项资金投入,减缓高素质人才流失,鼓励老年科技人才继续工作,提升技术创新对经济增长和节能减排的贡献率;加强教育宣传,倡导居民践行低碳生活方式;成立跨省区的减排管理机构,落实县区减排责任,优化奖惩机制,加强节能减排考核;完善碳交易机制,建立碳减排补偿机制;综合利用财税、行政、立法等手段提高低碳能源的消费比重.

4.2.2 城市中心区 城市中心区是推进东北三省碳减排的关键,要加快淘汰落后产能,降低资源型经济比重,提升工业装备水平,优先发展数字经济、网络经济、冰雪经济、边境贸易等现代服务业,发展循环经济,提高低碳产业比重,降低经济发展的能源依赖,尽快脱离“高碳锁定”;发挥哈尔滨、长春、沈阳、大连等科技人员富集优势,促进高技术产业发展,大力发展新质生产力,提升能源效率;扩大城镇规模,提高省会和次级城市的人口和产业集中度;加速新型节能技术的使用,协同推进治污与减排,加快绿色矿山建设.

4.2.3 农业县 加快经济发展是推进农业县社会进步的前提,要理性看待人均碳排放量的提高,协调经济发展与碳减排.促进特色种植业、特色农副产品深加工、乡村旅游的发展;降低燃油农业机械比重,提高新能源农业机械比重,推广节能型农业机械,促进黑土地保护性耕作;加强人口收缩综合治理,积极应对人口收缩与老龄化,既要减缓人口的过快收缩,又要减轻老龄化的增碳效应,完善养老服务设施,提高集中养老比例.

4.2.4 林业县 理性看待经济增长与碳排放的关系,践行“冰天雪地也是金山银山”理念,积极发展林下经济、康养旅游、特色林产品加工等产业,培育提升林下产品的品牌价值,加大特色林果业领域的招商引资,加快绿色转型发展;推进城镇化进程,促进人口向中心城镇的集中,加快以县城为重要载体的城镇化,提升城镇化质量;促进建成区内人口与产业以及教育、医疗等设施的集中;积极参与碳交易, 释放碳汇价值.

**参考文献:**

[1] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等.基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理 [J]. 地理学报, 2013,68(11):1513-1526.
Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, et al. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries [J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(11):1513-1526.

[2] Kikstra J S, Nicholls Z R J, Smith C J, et al. The IPCC sixth assessment report WGIII climate assessment of mitigation pathways: From emissions to global temperatures [J]. Geoscientific Model Development, 2022,15(24):9075-9109.

[3] Wu L, Sun L, Qi P, et al. Energy endowment, industrial structure upgrading, and $CO_2$ emissions in China; revisiting resource curse in the context of carbon emissions [J]. Resources Policy, 2021,74, 102329.

[4] 刘华军,邵明吉,吉元梦.中国碳排放的空间格局及分布动态演进

——基于县域碳排放数据的实证研究 [J]. 地理科学, 2021,41(11):1917−1924.
Liu H J, Shao M J, Ji Y M. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(11):1917−1924.

[5] Bruckner B, Hubacek K, Shan Y L, et al. Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions [J]. Nature Sustainability, 2022,5(4):311−320.

[6] Corinne Le Quéré, Korsbakken J I, Wilson C, et al. Drivers of declining $CO_2$ emissions in 18 developed economies [J]. Nature Climate Change, 2019,9(3):213−219.

[7] Wu Q L, Gu S T. Discerning drivers and future reduction paths of energy−related $CO_2$ emissions in China: Combining EKC with three−layer LMDI [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(27):36611−36625.

[8] Zhang Y, Yu Z, Zhang J. Analysis of carbon emission performance and regional differences in China's eight economic regions: Based on the super−efficiency SBM model and the Theil index [J]. PLoS One, 2021, 16(5):e0250994.

[9] 程叶青,王哲野,张守志,等.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.
Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(10): 1418−1431.

[10] 高长春,刘贤赵,李朝奎,等.近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态 [J]. 地理科学进展, 2016,35(6):747−757.
Gao C C, Liu X Z, Li C K, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumptionin China from 1995 to 2014 [J]. Progressin Geography, 2016,35(6):747−757.

[11] 王少剑,苏泳娴,赵亚博.中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素 [J]. 地理学报, 2018,73(3):414−428.
Wang S J, Su Y X, Zhao Y B. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city−level energy−related carbon emissions [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(3):414−428.

[12] 杜海波,魏　伟,张学渊,等.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(7):2051−2065.
Du H B, Wei W, Zhang X Y, et al. Spatio−temporal evolution and influencing factors of energy−related carbon emissions in the Yellow River Basin: Based on the DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data [J]. Geographical Research, 2021,40(7):2051−2065.

[13] 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(4):1436−1446.
Zhang Y N, Pan J H. Spatio−temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime lightdata [J] China Environmental Science, 2019,39(4):1436−1446.

[14] Su, Y X, Chen X Z, 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, 2014,35:231−243.

[15] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素 [J]. 地理学报, 2021,76(12):3103−3118.
Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of $CO_2$ emissions at the county level of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(12):3103−3118.

[16] 莫惠斌,王少剑.黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制 [J]. 地理科学, 2021,41(8):1324−1335.
Mo H B, Wang S J. Spatio−temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(8):1324−1335.

[17] 陈　亮,张　楠,王一帆,等.京津冀地区碳排放强度变化驱动因素及归因分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(8):4382−4394.
Chen L, Zhang N, Wang Y F, et al. Driving factors and attribution analysis of carbon emission intensity change in Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. China Environmental Science, 2023,43(8):4382−4394.

[18] 王　正,周侃,樊　杰.西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例 [J]. 生态学报, 2022,42(21):8664−8674.
Wang Z, Zhou K, Fan J. County−level carbon emission accounting and Major Function Oriented Zones in western regions:Taking Sichuan Province as anexample [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(21):8664−8674.

[19] Apergis N. Environmental Kuznets curves: New evidence on both panel and country−level $CO_2$ emissions [J]. Energy Economics, 2016, 54:263−271.

[20] Liu J H, Li M X, Ding Y T. Econometric analysis of the impact of the urban population size on carbon dioxide($CO_2$) emissions in China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2021,23(12):18186−18203.

[21] 刘辉煌,李子豪.中国人口老龄化与碳排放的关系——基于因素分解和动态面板的实证分析 [J]. 山西财经大学学报, 2012,34(1):1−8.
Liu H H, Li Z H. The relationship between Chinese population aging and $CO_2$ emission: Empirical analysis from decomposition and dynamic panel estimation [J]. Joumal of Shanxi Finance and Economics University, 2012,34(1):1−8.

[22] Dalton M, O'Neill B, Prskawetz A, et al. Population aging and future carbon emissions in the United States [J]. Energy Economics, 2008,30 (2):642−675.

[23] Wang Q, Li L J. The effects of population aging, life expectancy, unemployment rate, population density, per capita GDP, urbanization on per capita carbon emissions [J]. Sustainable Production and Consumption, 2021,28:760−774.

[24] 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.
Feng D, Li J. Impacts of urbanization on carbon dioxide emissions in the three Urban agglomerations of China [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2018,27(10):2194−2200.

[25] Golley J, Meng X. Income inequality and carbon dioxide emissions: The case of Chinese urban households [J]. Energy Economics, 2012,34(6):1864−1872.

[26] 刘金培,宋晓霞,陈华友,等.中国人均碳排放影响因素的长期均衡与因果动态关系研究——基于结构突变 ARDL−VECM 模型的实证分析 [J]. 运筹与管理, 2019,28(9):57−65.
Liu J P, Song X X, Chen H Y. Study on the long−term equilibrium and causality of the influencing factors of China's per capita carbon−based

on structural break ARDL model and VECM model [J]. Operations Researchand Managment Science, 2019,28(9):57-65.

[27] Wang C J, Wang F, Zhang X L. Examining the driving factors of energy related carbon emissions using the extended STIRPAT model based on IPAT identity in Xinjiang [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,67:51-61.

[28] 张旭亮,周思敏.中国县域人口收缩空间格局与影响因素 [J]. 经济地理, 2023,43(7):42-51.
Zhang X L, Zhou S M. Evolution of regional population decline and its driving factors at the county level in China [J]. Economic Geography, 2023,43(7):42-51.

[29] 辛奕霖,刘艳军,柳力玮.中国老工业城市人口增长与收缩对碳排放强度的影响效应 [J]. 地理研究, 2024,43(3):558-576.
Xin Y L, Liu Y J, Liu L W. The influence of population growth and shrinkage on carbon emission intensity in old industrial cities of China [J]. Geographical Research, 2024,43(3):558-576.

[30] Yang X, Jin K, Duan Z, et al. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of carbon emission trajectory in Chinese cities- A case study of 247 prefecture-level cities [J]. Science of The Total Environment, 2024,928,172325.

[31] 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.
Guan W, Li S M, Xu S T. Multiscale spatio-temporal characteristics of carbon emissions in Northeast Chinabased on DMSP/OLS nighttime light data [J]. Ecological Economy, 2022,38(11):19-26.

[32] 杨盛东,杨 旭,吴相利,等.环境规制对区域碳排放时空差异的影响——基于东北三省 32 个地级市的实证分析 [J]. 环境科学学报, 2021,41(5):2029-2038.
Yang S D, Yang X, Wu X L, et al. Impact of environmental regulation on spatial-temporal differences of regional carbon emisions: Empiricalanalysis based on 32 prefecture level cities in Northeast China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(5):2029-2038.

[33] 杨 迪,杨 旭,吴相利,等.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):4554-4564.
Yang D, Yang X, Wu X L, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from energy consumption and its driving mechanism in Northeast China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(11):4554-4564.

[34] 王勤升,王宁宁,韩欢欢.东北三省碳排放脱钩系数测定与影响因素研究 [J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2024,39(1):76-82.
Wang Q S, Wang N N, Han H H. Decoupling index measurement and influencing factors of carbon emission in the three northeastern provinces of China [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University(Science and Technology Edition), 2024,39(1):76-82.

[35] 马晓君,董碧滢,于渊博,等.东北三省能源消费碳排放测度及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2018,38(8):3170-3179.
Ma X J, Dong B Y, Yu Y B, et al. Measurement of carbon emissions from energy consumption in three northeastern provinces and its driving factors [J]. China Environmental Science, 2018,38(8):3170-3179

[36] 王 康,李志学,周 嘉.环境规制对碳排放时空格局演变的作用路径研究——基于东北三省地级市实证分析 [J]. 自然资源学报, 2020,35(2):343-357.
Wang K, Li Z X, Zhou J. The effects of environmental regulation on spatio-temporal carbon emissions patterns:Empirical analysis of prefecture-level cities in Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(2):343-357.

[37] 王 正,周 侃,樊 杰.市—县尺度能源消费排放核算方法研究进展 [J]. 地理科学进展, 2023,42(7):1406-1419.
Wang Z, Zhou K, Fan J. Progress of research on energy-related carbon emission accounting methods at the prefectural and county levels [J]. Progress in Geography, 2023,42(7):1406-1419.

[38] 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——基于 DMSP-OLS 夜间灯光遥感数据的分析 [D]. 上海:华东师范大学, 2017.
Shi K F. A multiscale analysis on spatiotemporal pattern of carbon emissions and its impact factors in China using DMSP-OLS data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

[39] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, et al. An improved timeseries DMSP-OLS-like data (1992-2022) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [DB/OL]. 2021.https://doi.org/10.7910/DVN/GIYGJU, Harvard Dataverse, V4.

[40] 田泽源,董 治,董治宇,等.基于面板数据模型关中平原城市群交通碳排放峰值预测与脱钩分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10):5901-5911.
Tian Z Y, Dong Z, Dong Z Y, et al. Predicting and decoupling analysis of transportation peak carbon emissions in Guanzhong Plain urban agglomeration based on panel data modeling [J]. China Environmental Science, 2024,44(10):5901-5911.

[41] Xu B, Lin B. Assessing $CO_2$ emissions in China's iron and steel industry: A dynamic vector autoregression model [J]. Applied Energy, 2016,161:375-386.

[42] 范建双,周 琳.城镇化及房地产投资对中国碳排放的影响机制及效应研究 [J]. 地理科学, 2019,39(4):644-653.
Fan J S, Zhou L. The mechanism and effect of urbanization and real estate investment on carbon emissions in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2019,39(4):644-653.

[43] 丁 斐,庄贵阳,刘 东.环境规制、工业集聚与城市碳排放强度——基于全国 282 个地级市面板数据的实证分析 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2020,20(3):90-104.
Ding F, Zhuang G Y, Liu D. Environmental regulation, industrial agglomeration and urban carbon emission intensity: Empirical analysis based on panel data of 282 prefecture-level cities in China [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2020, 20(3):90-104.

[44] Liu W, Luo Z, Xiao D. Age structure and carbon emission with climate-extended STIRPAT model: A cross-country analysis [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022(9):719168.

**作者简介：**张守忠(1977-),男,山东莒南人,副教授,博士,研究方向为区域与城市发展.发表论文 30 余篇.13674633817@163.com.