

国家重点生态功能区“碳排放-人口-经济”耦合协调及其驱动因素研究

张帆

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年11月14日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月29日

摘要

运用熵值法、ArcGIS自然断点法、耦合协调模型、地理探测器等方法, 测度国家重点生态功能区及其毗邻区涉及黑龙江64县及12个地级市市辖区(杜尔伯特蒙古族自治县除外) 2005~2019年15年间“碳排放-人口-经济”系统耦合协调度, 分析其相互作用及协调程度。运用地理探测器探测影响“碳排放-人口-经济”系统协调发展的因素。结果表明: (1) 2005年以来研究区域内各城市碳排放总量以及人口数量都呈现出先上升后下降并逐步趋于稳定的趋势; 经济在15年间呈现稳步上升的态势。(2) 研究区域内各城市三大系统耦合状态良好, 相互作用强, 发展平稳有序但略有下降的趋势。协调度呈现出由北向南阶梯状分布, 整体协调发展状况较差的局面。(3) “碳排放-人口-经济”系统协调发展是多因子交互作用的结果。应因地制宜节能减排, 调整产业结构来提升区域耦合协调发展水平。

关键词

重点生态功能区, 耦合协调, 碳排放, 影响因素

Research on the Coupling Coordination and Driving Factors of “Carbon Emissions-Population-Economy” in National Key Ecological Functional Areas

Fan Zhang

School of Geographic Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Nov. 14th, 2023; accepted: Dec. 21st, 2023; published: Dec. 29th, 2023

Abstract

Using methods such as entropy method, ArcGIS natural breakpoint method, coupling coordination model, and geographic detector, this paper measures the coupling coordination of the “carbon emissions-population-economy” system in 64 counties and 12 prefecture level cities and districts (excluding Durbert Mongolian Autonomous County) of Heilongjiang Province and their adjacent areas from 2005 to 2019, and analyzes their interaction and coordination degree, using geographic detectors to detect factors that affect the coordinated development of the carbon emissions population economy system. The results indicate (1) since 2005, the total carbon emissions and population of each city in the study area have shown a trend of first increasing, then decreasing, and gradually stabilizing; The economy has shown a steady upward trend over the past 15 years; (2) The three major systems of each city in the study area have good coupling status, strong interaction, and stable and orderly development, but there is a slight downward trend. The coordination degree shows a stepped distribution from north to south, and the overall coordinated development status is poor; (3) The coordinated development of the “carbon emissions population economy” system is the result of the interaction of multiple factors. Energy conservation and emission reduction should be tailored to local conditions, and industrial structure should be adjusted to enhance the level of regional coupling and coordinated development.

Keywords

Key Ecological Functional Areas, Coupling Coordination, Carbon Emissions, Influencing Factors

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 文献综述与引言

1.1. 引言

日益严重的全球气候变化问题不仅引起了世界各国和社会各界的关注也成为许多学者关注的焦点。全球变暖造成的环境问题也威胁到了人类的生存和发展。政府间气候变化专门委员会发布的关于全球变暖 1.5°C 的特别报告强调,从 2010 年开始减少二氧化碳排放,截至 2030 年全球人为二氧化碳净排放量要下降约 45%。到 2050 年实现“净零”排放。研究显示截止到 21 世纪末,仅人口因素就将导致中国的二氧化碳排放量增加 45% 以上。作为 2006 年首次超越美国成为全球最大温室气体排放国^[1]的中国,化石能源是我国能源结构中的重要部分,减排压力较大。我国提出了碳中和和碳达峰的“双碳”战略,明确了发展经济与控碳减排要同步促进的基本思路。在我国“五级三类四体系”的国土空间规划体系中,县域是我国人口和社会经济发展的基础单元。历史上我国高速城镇化发展进程中的县级单元始终处于弱势地位,产业发展多依靠被动式承接,因此暴露出一系列诸如能源结构不合理、环境污染严重和土地利用粗放等问题。统计资料显示,我国能源消费领域中以煤炭为主的高碳排放能源比重过高,在县域层级,水电、风电等清洁能源的比重更低,加之技术水平受限所导致的能源利用效率偏低,各种因素所导致县域单位 GDP 碳排放量普遍高于全国均值。因此,从县域尺度刻画人口因素、经济发展与碳排放之间的关系,对中国碳中和战略和低碳排放发展的理论和实践作用具有重要意义。

本文可能的创新之处在于：一是目前国内外对于碳排放时空格局研究大多停留在大尺度范围上，国内对于碳排放时空格局及影响因素的研究很多都受限于数据的可获取性及处理难度，大多选择以省域为单元进行研究，本文选取以黑龙江省 64 县以及 12 个市辖区为研究对象从县域尺度上进行细致地刻画；二是对“碳排放 - 人口 - 经济”三大系统耦合协调程度以及影响“碳排放 - 人口 - 经济”整个系统协调发展驱动因素进行研究；三是对不同功能类型的城市进行对比及类比研究，揭示了区间发展差异、把握发展规律和因地制宜地提出对策，为“碳排放 - 人口 - 经济”系统协调发展以及节能减排提供借鉴与参考。

1.2. 文献综述

通过对国内外有关文献的回顾和梳理发现国外学者的论点大都集中在碳排放的影响因素、脱钩关系分析、具体行业或产业对碳排放的影响以及预测上。Bhattacharyya [2] 等人采用 LMDI 因素分解法证实了能源结构的改变、能源强度的下降以及生产工艺的提升是欧盟 15 国取得碳减排成功的主要原因。Obas [3] 等人通过对撒哈拉以南的非洲国家碳排放强度的分解，认为影响这些国家碳排放强度的主要原因是能源类型、能源强度和经济结构。Johan [4] 等人将欧洲四个国家的碳排放变化的影响因素分解为 9 个成分，其研究结果表明能源强度、经济增长的脱碳化对于碳排放量的影响最大，其次，一些国家的人口数量增长是也碳排放变化的重要影响因素。Ang 和 Nag [5] 等人的研究结果表明碳排放强度增大的主要原因是国民人均收入的不断增加，且认为二者之间存在倒“U”形的关系。国内万文玉等人[6] [7]采用 STIRPAT 模型法对中国城市居民生活能源碳排放的影响因素进行研究，得出结论认为城市人口规模、城市居民可支配收入、城市居民生活消费支出、青少年人口比重等因素对居民生活能源碳排放具有正向作用。中国对二氧化碳排放驱动因素的研究中，多数研究者认为工业行业结构、能源消费结构以及经济发展水平是影响地区二氧化碳排的主导三大因素[8] [9] [10]。目前现有的研究大都是通过建立多样化的多元相关分析模型，包括 IPAT 理论框架及其扩展 STIRPAT 模型等为基础，在控制其他变量的情况下，分析人口增长对二氧化碳排放的净作用而展开[11]。此外，利用 Divisia 指数分解法和 LMDI 分解法以及改进的 Kaya 恒等式也是目前探讨二氧化碳与人口规模关系运用得较多的方法[12]。综上所述的文献共同点是证明了人口增长对二氧化碳排放的影响。

2. 研究区域概况与研究方法

2.1. 研究区域概况

本文的研究区域为国家划定的三江平原湿地生态功能区、长白山森林生态功能区和大小兴安岭森林生态功能区三个生态主体功能区及其毗邻区，研究区域涉及了黑龙江省 64 县及 12 个地级市市辖区(杜尔伯特蒙古族自治县除外)(图 1)。区域内共有 33 个市县处于国家重点生态功能区范围，是我国北方重要的森林湿地生态功能区，也是国家重要的生态屏障区。本文将研究单元定位在县域尺度上，将国家重点生态功能区与其毗邻区作比较，研究该区域“碳排放 - 人口 - 经济”之间的关系以及影响碳排放的驱动因素。

2.2. 指标体系构建

研究区域正面临人口流失严重、经济发展缓慢、资源日趋枯竭等问题，结合城市“碳排放 - 人口 - 经济”3 个子系统，在遵循科学性、数据可获取性等原则基础上，参考相关文献，最终确定的指标体系如表 1 所示：

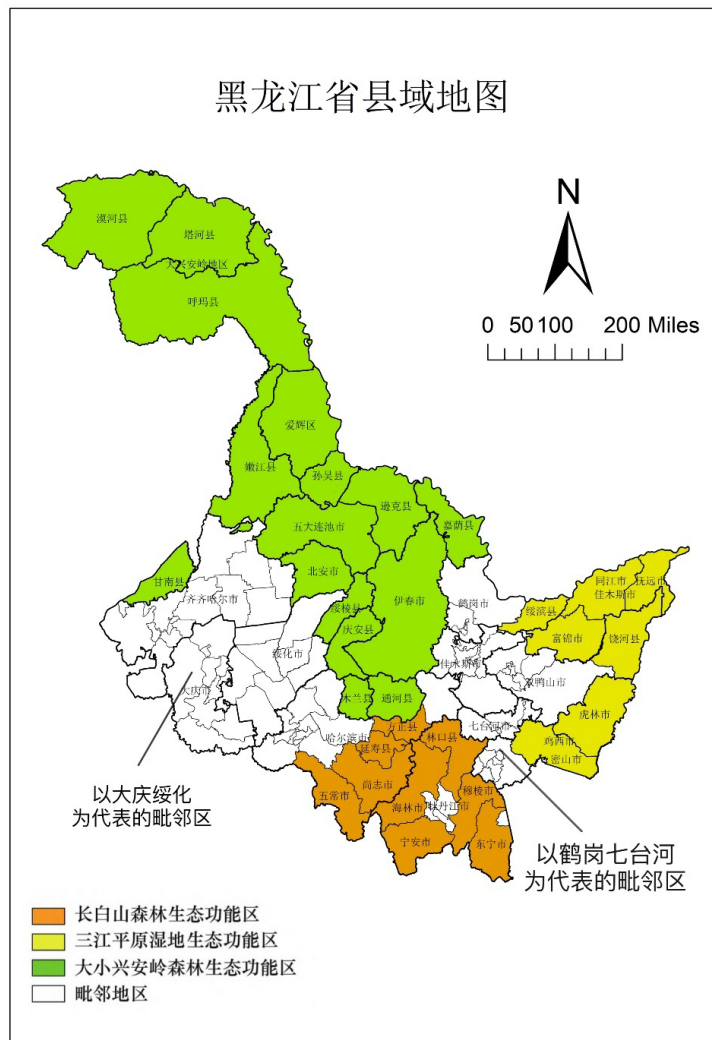


Figure 1. Research area
图 1. 研究区域

Table 1. Regional “carbon emissions population economy” research evaluation indicator system
表 1. 区域“碳排放 - 人口 - 经济”研究评价指标体系

I级指标	II级指标	单位	正/负向	权重
碳排放	碳排放量	t	负	0.399
	人均碳排放量	t/人	负	0.368
	碳排放强度	t/万元	负	0.233
人口	总人口	人	正	0.561
	人口密度	人/km ²	正	0.439
经济	地区生产总值	万元	正	0.29
	第一产业增加值	万元	正	0.173
	第二产业增加值	万元	正	0.211
	一般公共预算收入	万元	正	0.262
	一般公共预算支出	万元	正	0.064

2.3. 数据来源

本文主要选取 2005~2019 年面板数据, 来源于《县域统计年鉴》《黑龙江统计年鉴》、中国碳核算数据库(China Emission Accounts and Datasets, CEADs)以及黑龙江省各年各城市国民经济和社会发展统计公报。

2.4. 研究方法

2.4.1. 熵值法

熵值法是一种客观赋权法, 能够客观反映指标信息熵值的效用价值, 更适合对多元指标进行综合评价。本文利用熵值法对综合评价指标体系中的各指标进行赋权, 并采用线性加权法对 3 个子系统进行综合处理, 限于篇幅具体计算过程可参见文献。

2.4.2. 耦合协调度模型

耦合协调度模型用于分析事物是否协调发展以及水平的高低。耦合度指两个或两个以上系统之间的相互作用影响, 可以反映系统之间的互相依赖互相制约程度。协调度指耦合作用关系中协调状况好坏的定量指标, 它可体现出系统由无序走向有序的趋向。本文将运用耦合协调度模型来探讨黑龙江省各城市“碳排放-人口-经济”之间的动态变化, 前文已对各指标数据进行标准化处理, 确定了权重以及子系统的综合评价函数, 接着构建耦合协调度模型, 公式如下:

$$C = \left[\frac{A_1 \times A_2 \times A_3}{(A_1 + A_2)(A_1 + A_3)(A_2 + A_3)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$D = (C \times T)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$T = aA_1 + bA_2 + cA_3$$

式(5)为 3 个子系统的综合耦合度, 耦合度是由各子系统的综合评价函数共同决定的, 耦合度值 C 处于[0,1]。根据耦合度值的大小, 分为 4 种类型(见表 2); 式中 C 为耦合度, D 为协调性, T 为综合评价指标。考虑到经济发展水平及建设生态环境的迫切程度等, 认为经济发展与生态环境保护重要性相同, 因此 a 、 b 、 c 人为赋值均为 1/3, 10 多位专家的访谈反馈结果也支持该赋值设计。通过分析可知, 一般使 T 取值范围在(0,1), 这样 D 的取值范围就在[0,1]。据此, 设定耦合度及协调度等级及其划分标准见表(见表 2、表 3)。

Table 2. Classification of the coupling degree of regional “carbon emissions population economy” research

表 2. 区域“碳排放-人口-经济”研究耦合度等级划分

耦合度 C 值	[0,0.3]	(0.3,0.5]	(0.5,0.8]	(0.8,1]
耦合等级类型	低水平耦合	拮抗耦合	磨合耦合	高水平耦合

Table 3. Regional “carbon emissions population economy” research coordination level classification

表 3. 区域“碳排放-人口-经济”研究协调度等级划分

协调度 D 值	[0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.5]	(0.5,0.8]	(0.8,1]
协调度等级类型	严重失调	中度失调	基本协调	中度协调	高度协调

2.4.3. 地理探测器

地理探测器是基于空间异质性，对空间数据进行分析的工具。地理探测器不仅具有统计精度更高的优势而且还可以克服传统计量回归所产生的多重共线性问题。本文借鉴王劲峰等[13]提出的地理探测器方法来分析内外部影响因子对“碳排放-人口-经济”系统协调发展的影响。公式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

式中， q 为各因素对黑龙江省各县域“碳排放-人口-经济”系统的影响程度， N 为样本数， σ^2 为研究区域的总离散方差， σ_i^2 为因变量 Y 在分区 i 的离散方差。

3. 黑龙江省各县域“碳排放-人口-经济”发展的时空分异特征

3.1. 县域碳排放时空分异

图 2 为黑龙江省各县域碳排放时空分布，并利用 ArcGIS 将其进行可视化表达。结果表明，从空间分异来看，研究区域内三大生态功能区的碳排放量均小于其毗邻区碳排放量，差值在 100~150 万吨之间。且研究区域内各市辖区碳排放量远大于县域碳排放量，差值可达千万吨。时序变化上，15 年间研究区域内所有城市碳排放量总体上呈现出先上升后下降并逐步趋于稳定的趋势。

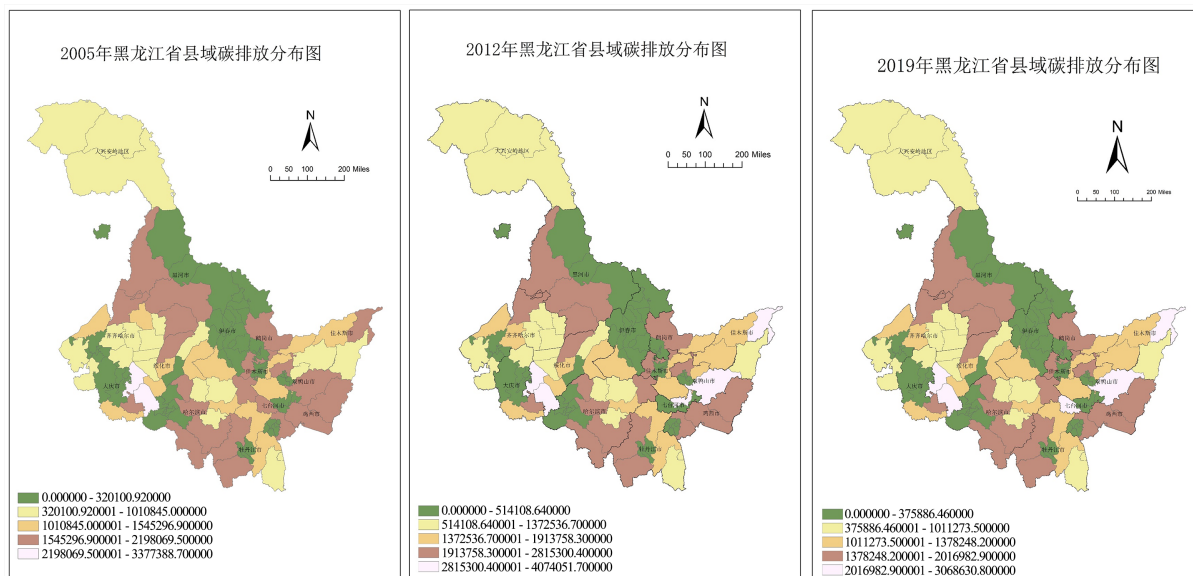


Figure 2. Spatial distribution of carbon emissions in counties of Heilongjiang Province

图 2. 黑龙江省县域碳排放空间分布

3.2. 县域人口时空分异

图 3 为黑龙江省各县域人口时空分布，并利用 ArcGIS 将其进行可视化表达。结果表明，从空间分异来看，研究区域内三大生态功能区的总人口在整体上小于其毗邻区人口数量，最大差值可达 60 万(市辖区除外)。且研究区域内各市辖区人口远大于县域人口，差值高达百万人。时序变化上，研究区内各县域人口在 2005~2012 年间呈现上升态势，2012~2019 年人口有所下降但下降幅度较小，各市辖区人口在 15 年间呈现出较为平稳的上升趋势。

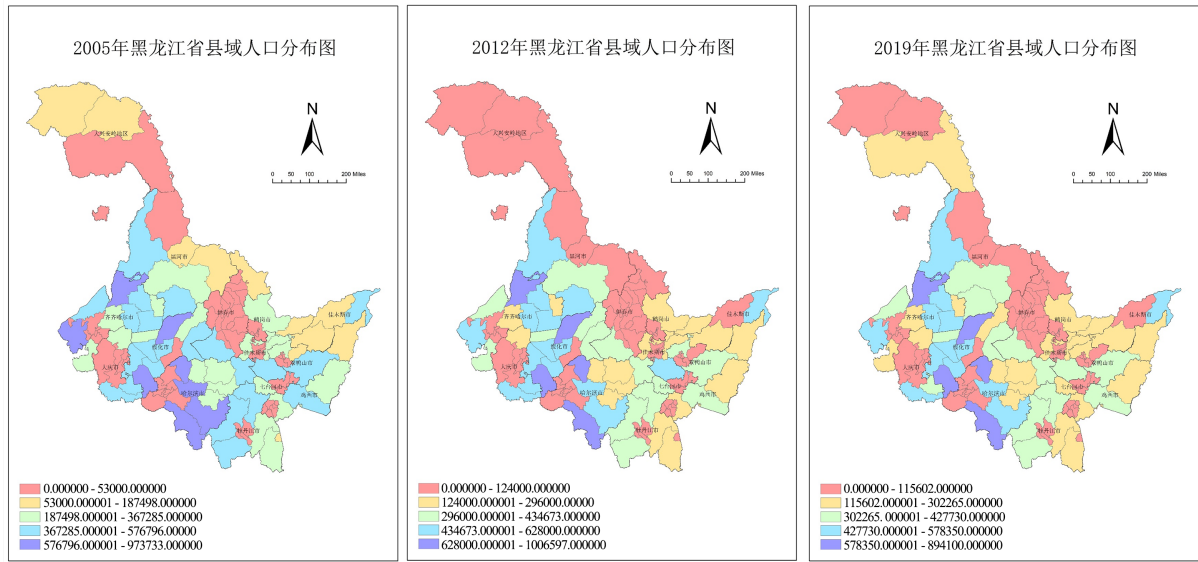


Figure 3. Distribution of county population in Heilongjiang Province
图 3. 黑龙江省县域人口分布

3.3. 县域经济时空分异

图 4 为黑龙江省各县域经济时空分布(选取 GDP 作为代表), 并利用 ArcGIS 将其进行可视化表达。结果表明, 从空间分异来看, 研究区域内生态功能区的经济发展相较于其毗邻区在整体上较为落后, 发展缓慢。时序变化上, 大庆市经济从 2005~2012 年呈现稳步上升趋势, 2012 年以后开始呈现下降趋势, 研究区域内其他城市经济整体在 15 年间均呈现上升趋势, 稳步发展。

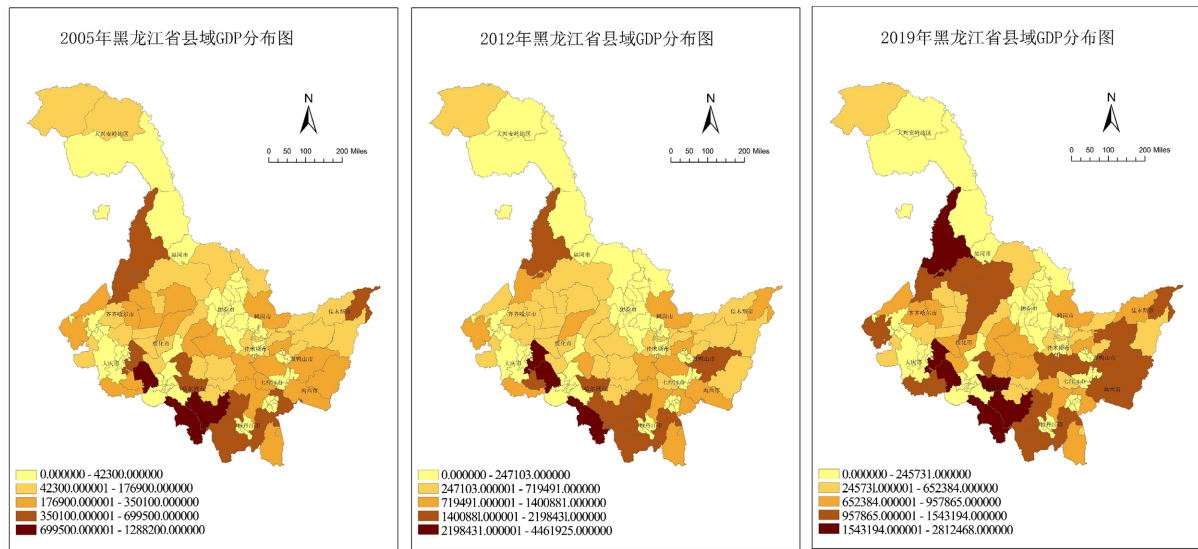


Figure 4. Temporal and spatial distribution of county economy in Heilongjiang Province
图 4. 黑龙江省县域经济时空分布

4. 黑龙江省各县域“碳排放 - 人口 - 经济”耦合协调结果与实证分析

表 4 为黑龙江省县域及地级市市辖区 2005~2019 年耦合度协调度的变化, 由于数据量过大及时间跨

度较久,所以选取三个相同时间跨度取其平均值进行分析。耦合度可用于衡量系统内部之间相互耦合的程度,但只能反映相互作用的强弱,无优劣之分,表明三者间的关联度和相互作用。根据耦合度等级划分标准(表 2) 2005~2019 年的各城市群耦合度均值可以看出,研究区域内生态功能区及其毗邻区均处于高水平耦合阶段,耦合度均值在 0.832~0.987 之间,变化幅度较小且并无明显的区域差异;时序变化上,研究期间区域内所有城市的耦合度均值由 2005 年的 0.983 增加至 2011 年的 0.992 后下降至 2019 年的 0.949,且一直处于高水平耦合。从空间分异变化看,只有 2005 年三大生态功能区毗邻区的泰来县,拜泉县,桦南县耦合度低于 0.90,除此以外其他时间段研究区域耦合度均大于 0.90。由此说明黑龙江县域以及地级市市辖区“碳排放-人口-经济”三大系统耦合状态良好,发展平稳有序但略有下降的趋势。

Table 4. Time evolution of regional “carbon emissions population economy” coupling coordination degree
表 4. 区域“碳排放-人口-经济”耦合协调度时间演化

地区	2005~2009 年		2010~2014 年		2015~2019 年	
	耦合度	协调度	耦合度	协调度	耦合度	协调度
漠河县	0.936	0.678	0.967	0.684	0.959	0.683
塔河县	0.964	0.684	0.984	0.691	0.982	0.690
呼玛县	0.961	0.644	0.902	0.672	0.975	0.683
黑河市辖区	0.986	0.689	0.973	0.684	0.979	0.686
嫩江县	0.918	0.684	0.956	0.683	0.977	0.683
孙吴县	0.971	0.686	0.984	0.690	0.902	0.693
大小兴安岭森林生态功能区	0.936	0.671	0.946	0.675	0.986	0.685
逊克县	0.975	0.701	0.962	0.698	0.974	0.698
北安县	0.981	0.680	0.911	0.686	0.957	0.671
甘南县	0.902	0.685	0.924	0.685	0.952	0.687
嘉荫县	0.962	0.698	0.957	0.697	0.964	0.698
铁力市	0.902	0.686	0.948	0.686	0.968	0.688
伊春市辖区	0.979	0.672	0.981	0.669	0.984	0.670
绥棱县	0.903	0.686	0.974	0.690	0.990	0.691
庆安县	0.988	0.684	0.959	0.687	0.986	0.689
木兰县	0.969	0.692	0.985	0.693	0.992	0.694
三江平原湿地生态功能区	0.987	0.687	0.939	0.690	0.975	0.692
抚远县	0.952	0.680	0.946	0.679	0.953	0.680
同江市	0.982	0.687	0.978	0.685	0.987	0.688
富锦市	0.976	0.681	0.929	0.679	0.953	0.681
虎林市	0.976	0.682	0.984	0.683	0.986	0.684
密山市	0.987	0.683	0.941	0.684	0.949	0.685
绥滨县	0.965	0.680	0.970	0.682	0.972	0.682
饶河县	0.928	0.693	0.982	0.689	0.981	0.688

Continued

	方正县	0.982	0.683	0.922	0.687	0.960	0.689
	延寿县	0.932	0.689	0.987	0.690	0.985	0.692
	五常市	0.986	0.676	0.987	0.670	0.983	0.673
	尚志市	0.959	0.686	0.983	0.683	0.907	0.684
	东宁县	0.979	0.695	0.925	0.694	0.954	0.695
	林口县	0.930	0.687	0.972	0.688	0.982	0.689
	海林市	0.944	0.687	0.967	0.686	0.980	0.687
	宁安市	0.912	0.685	0.975	0.685	0.901	0.685
	穆棱市	0.956	0.690	0.973	0.688	0.984	0.689
	依兰县	0.963	0.683	0.961	0.683	0.975	0.685
	宾县	0.902	0.680	0.941	0.678	0.958	0.680
	巴彦县	0.981	0.671	0.985	0.672	0.988	0.676
	通河县	0.975	0.687	0.939	0.690	0.987	0.692
	双城市	0.977	0.670	0.985	0.664	0.988	0.664
	龙江县	0.931	0.686	0.951	0.686	0.958	0.687
长白山 森林生 态功能 区	依安县	0.923	0.686	0.940	0.685	0.952	0.686
	泰来县	0.890	0.685	0.944	0.688	0.950	0.689
	富裕县	0.903	0.687	0.953	0.688	0.976	0.689
	克山县	0.903	0.683	0.983	0.685	0.943	0.686
	克东县	0.979	0.678	0.989	0.685	0.994	0.686
毗邻区	拜泉县	0.881	0.684	0.907	0.685	0.912	0.685
	讷河市	0.906	0.680	0.920	0.679	0.943	0.681
	鸡东县	0.892	0.684	0.937	0.685	0.942	0.685
	萝北县	0.950	0.673	0.961	0.675	0.965	0.676
	集贤县	0.982	0.677	0.989	0.679	0.985	0.679
	友谊县	0.963	0.679	0.880	0.668	0.832	0.659
	宝清县	0.986	0.681	0.905	0.682	0.989	0.681
	肇州县	0.972	0.670	0.932	0.677	0.948	0.678
	肇源县	0.922	0.683	0.973	0.685	0.976	0.686
	林甸县	0.985	0.684	0.967	0.690	0.968	0.690
	桦南县	0.878	0.680	0.958	0.684	0.985	0.684
	桦川县	0.926	0.668	0.974	0.679	0.988	0.684
	汤原县	0.960	0.675	0.982	0.680	0.989	0.684
	勃利县	0.964	0.674	0.971	0.672	0.970	0.674
	绥芬河市	0.928	0.688	0.922	0.685	0.928	0.686
	望奎县	0.982	0.675	0.989	0.679	0.921	0.681

Continued

兰西县	0.972	0.671	0.986	0.677	0.903	0.682
青冈县	0.984	0.678	0.989	0.682	0.920	0.684
明水县	0.989	0.683	0.944	0.687	0.958	0.689
安达市	0.983	0.673	0.953	0.671	0.950	0.674
肇东市	0.977	0.668	0.987	0.682	0.911	0.666
海伦市	0.980	0.674	0.987	0.674	0.909	0.676
哈尔滨市辖区	0.980	0.484	0.987	0.465	0.894	0.414
齐齐哈尔市区	0.937	0.652	0.959	0.646	0.947	0.644
鸡西市辖区	0.947	0.657	0.960	0.656	0.964	0.658
鹤岗市辖区	0.971	0.626	0.972	0.623	0.967	0.625
双鸭山市辖区	0.903	0.646	0.911	0.645	0.911	0.646
大庆市辖区	0.969	0.599	0.830	0.553	0.905	0.574
佳木斯市辖区	0.912	0.655	0.952	0.656	0.962	0.653
七台河市辖区	0.987	0.675	0.947	0.678	0.960	0.680
牡丹江市辖区	0.918	0.660	0.961	0.661	0.962	0.662
绥化市辖区	0.957	0.661	0.967	0.664	0.973	0.666

耦合度函数只能够描述子系统之间协调发展的程度，但是却无法确定系统协调发展水平的高低。所以，在此基础上引入耦合协调度，不仅能够反映其协调程度，还能体现系统协调发展水平的阶段性。依据协调度等级划分标准(表 3)可知，就 15 年间年研究区域内各城市协调度均值而言，只有哈尔滨市辖区处于(0.4,0.5]之间，属于基本协调。研究区域内其他各城市的协调度均处于(0.5,0.8]之间，研究区“碳排放-人口-经济”三个系统之间开始相互制约、配合，呈现出良性耦合的特征，问题修复取得了一定成效，属于中度协调水平。时间维度上看，协调度从 2005 年的 0.661 下降至 2011 年的 0.642 后又增加至 2019 年的 0.665，有轻微波动但总体呈现上升趋势，且一直处于中度协调。从空间维度上看，最低值出现在毗邻区哈尔滨市辖区为 0.414，最高值出现在大小兴安岭森林生态功能区内嘉荫县和逊克县为 0.698，表明区域内协调度由北向南呈现阶梯状分布，协调度依次下降，但研究区域仍属于协调状况较为良好且稳步上升的局面。

研究区域内各城市的耦合及协调度分别处于(0.8,1]、[0.4,0.8]区间，说明研究区域内各城市耦合度较高但协调程度不够，系统之间协调发展仍受到制约，没有达到高水平的协调状态。各城市在今后发展中要充分认识自身，弥补短板，推动更高质量发展，促进高水平协调。

5. 黑龙江省各县域“碳排放-人口-经济”系统的影响因素分析

5.1. 影响因素指标选取

由于研究区域内各城市“碳排放-人口-经济”系统不仅受其自身发展状况的制约，同时也受到不同的外部因素干预[14][15][16]。所以选取碳排放总量、碳排放强度、人均碳排放量、总人口、人口密度、地区生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、一般公共预算收入以及一般公共预算支出 10 个内部驱动因素，耕地面积、农村用电量以及粮食产量 3 个外部驱动因素指标，构建了“碳排放-人口-经济”系统影响因素指标体系(表 5)，以解读影响其发展的动因。

Table 5. Index system of influencing factors for the “carbon emissions population economy” system
表 5. “碳排放 - 人口 - 经济” 系统影响因素指标体系

目标层	指标层
内部因素	碳排放量(X_1)
	人均碳排放量(X_2)
	碳排放强度(X_3)
	总人口(X_4)
	人口密度(X_5)
	地区生产总值(X_6)
	第一产业增加值(X_7)
	第二产业增加值(X_8)
	一般公共预算收入(X_9)
	一般公共预算支出(X_{10})
外部因素	耕地面积(X_{11})
	农村用电量(X_{12})
	粮食产量(X_{13})

5.2. 影响因素作用分析

5.2.1. 单因子探测结果

黑龙江省各县域“碳排放 - 人口 - 经济”耦合协调度作为因变量,采用地理探测器探测 2005、2012、2019 年 10 个内部驱动因素、3 个外部驱动因素对其的影响强度(表 6)。

Table 6. Measurement of explanatory power of factors influencing the coupling coordination of “carbon emissions population economy”

表 6. “碳排放 - 人口 - 经济” 耦合协调影响因素解释力测度

因子	q05	q ¹²	q ¹⁹
X_1	0.462 ^{***}	0.382 ^{***}	0.482 ^{***}
X_2	0.118 ^{**}	0.449 ^{***}	0.172 ^{***}
X_3	0.149 ^{***}	0.210 ^{**}	0.330 ^{***}
X_4	0.137 ^{***}	0.481 ^{***}	0.618 ^{***}
X_5	0.322 ^{***}	0.268 ^{***}	0.103 ^{***}
X_6	0.779 ^{***}	0.781 ^{***}	0.446 ^{***}
X_7	0.753 ^{***}	0.729 ^{***}	0.450 ^{***}
X_8	0.612 ^{***}	0.307 ^{***}	0.401 ^{***}
X_9	0.365 ^{***}	0.633 ^{***}	0.070 [*]
X_{10}	0.729 ^{***}	0.900 ^{***}	0.379 ^{***}
X_{11}	0.465 ^{***}	0.248 ^{***}	0.408 ^{***}
X_{12}	0.196 ^{***}	0.429 ^{***}	0.378 ^{***}
X_{13}	0.363 ^{***}	0.398 ^{**}	0.351 ^{***}

注: q05、q12、q19 分别代表 2005、2012、2019 年的地理探测器 q 值, *** 表示 q 值的显著性水平为 0.00, ** 表示 q 值的显著性为 0.05, * 表示 q 值的显著性水平为 0.1。

由表 6 可知, 各指标始终是影响“碳排放 - 人口 - 经济”协调发展的驱动因素。从演变趋势看, 20 年间, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_{12} , 5 个影响因子解释力增强, X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} , 6 个影响因子解释力减弱, X_{11} 、 X_{13} , 2 个影响因子解释力变化程度较小, 趋于稳定。从影响程度看, 各驱动因素解释力三年均值由大到小排序依次为 X_{10} (0.670)、 X_6 (0.669)、 X_7 (0.643)、 X_1 (0.443)、 X_8 (0.440)、 X_4 (0.412)、 X_{11} (0.374)、 X_{13} (0.371)、 X_9 (0.355)、 X_{12} (0.335)、 X_2 (0.311)、 X_5 (0.232)、 X_3 (0.230), 按照影响因子解释力大小将其分为主导因子、次级因子和一般因子, 其中, 解释力大于 0.37 的影响因子为主导因子, 包括碳排放量、总人口、地区生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、一般公共预算支出、耕地面积、粮食产量; 解释力介于 0.37~0.31 之间为次级因子, 包括一般公共预算收入、人均碳排放量、农村用电量; 解释力小于 0.31 为一般因子, 包括碳排放强度以及人口密度。

5.2.2. 双因子交互探测结果

Table 7. Interactive detection results of coordinated development of carbon emissions population economy in 2019
表 7. 2019 年“碳排放 - 人口 - 经济”协调发展的交互探测结果

影响因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
X_1	0.482												
X_2	0.685	0.172											
X_3	0.701	0.565	0.330										
X_4	0.867	0.694	0.759	0.618									
X_5	0.639	0.346	0.501	0.732	0.103								
X_6	0.813	0.661	0.707	0.830	0.536	0.446							
X_7	0.792	0.619	0.685	0.797	0.596	0.780	0.450						
X_8	0.759	0.599	0.652	0.830	0.579	0.711	0.729	0.401					
X_9	0.640	0.333	0.459	0.718	0.240	0.586	0.557	0.571	0.070				
X_{10}	0.653	0.542	0.659	0.769	0.535	0.695	0.724	0.707	0.549	0.379			
X_{11}	0.763	0.612	0.643	0.762	0.576	0.700	0.745	0.724	0.543	0.653	0.408		
X_{12}	0.739	0.545	0.626	0.839	0.488	0.674	0.783	0.732	0.458	0.690	0.680	0.378	
X_{13}	0.772	0.501	0.780	0.777	0.479	0.696	0.654	0.826	0.544	0.744	0.742	0.706	0.351

注: 灰色底纹表示交互探测结果为非线性增强型, 无底纹则表示探测结果为双因子增强型。

表 7 为通过地理探测器的双因子交互探测作用得到的 2019 年各影响因子的交互探测作用结果, 可以看出, 每一对影响因子交互作用的 q 值皆大于这对影响因子的任一因子的 q 值, 其中有 28 对交互作用的 q 值大于两个影响因子 q 值之和, 表明它们对碳排放分布作用为非线性增强型, 而剩余 50 对交互作用的 q 值小于两个影响因子 q 值之和, 则说明它们对碳排放分布作用为双因子增强型。交互作用的类型为双因子增强为主, 非线性增强为辅。具体来看, 碳排放量与总人口交互作用的 q 值最大, 最大值为 0.867, 说明二者在空间叠加后对系统空间分布起主导作用, 其次总人口与地区生产总值 q 值为 0.830, 第三位是碳排放量与人口密度 q 值为 0.813。此外, 其他因子交互作用 q 值普遍大于 0.6, 交互作用也较为明显。表明各县域“碳排放 - 人口 - 经济”系统的协调发展是多重因素共同作用的结果。

6. 结论与建议

6.1. 结论

本文基于 2005~2019 年黑龙江省 64 县及 12 个地级市市辖区(杜尔伯特蒙古族自治县除外)的面板数据为研究样本,首先利用 ArcGIS 自然断点法对碳排放、人口以及经济进行可视化表达来研究其空间分异,其次运用耦合协调度模型来分析“碳排放-人口-经济”三个系统之间的相互作用强度以及协调程度,最后运用地理探测器来探测影响“碳排放-人口-经济”系统协调发展的影响因子,主要结论如下:

(1) 在 15 年的研究时间内研究区域内各城市碳排放总量以及人口数量均呈现出先上升后下降并趋于稳定的态势;经济在 15 年间呈现稳步上升的态势。长白山森林生态功能区、大小兴安岭森林生态功能区、三江平原湿地生态功能区总体协调发展水平低于其毗邻区的协调发展水平,研究区内各县域的发展水平也低于各市辖区。

(2) 研究区域内各城市耦合程度较高但是协调程度不够,三大系统耦合状态较为良好,相互作用强,耦合度均值一直处于 0.9 以上,发展平稳有序但略有下降的趋势。就 2005~2019 年研究区域内各城市协调度均值而言,除哈尔滨外研究区域内其他各城市的协调度均处于(0.5,0.8]之间,协调度由北向南呈现阶梯状分布。虽然研究期间协调状况有所改善,但是整个研究区仍处于高水平耦合但整体协调发展状况较差的局面。

(3) 黑龙江省各县域“碳排放-人口-经济”协调发展是以非线性增强为辅,双因子增强为主交互作用的结果。

6.2. 建议

基于以上结论,为尽早实现“碳排放-人口-经济”系统协调发展,提出以下建议:

(1) 针对碳排放空间分异显著的问题,排量大、涨幅大的区域,必须加强对碳排放绝对量的监管和控制,且不同的人口因素、社会经济因素对不同区域碳排放发挥的作用也不同,因此需结合实际,因地制宜采取控碳减排。加强区域间尤其是高碳排放区域联合控碳减排刻不容缓,开展区域联合治理,实现互利共赢。

(2) 注重提高研究区域内各城市的耦合协调发展水平,提升三系统之间的关联程度。碳排放量、总人口、地区生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、一般公共预算支出、耕地面积、粮食产量为影响区域“碳排放-人口-经济”系统协调发展的主要因子,建议调整产业结构,加大节能减排力度以提升区域耦合协调度水平。使研究区域不同城市均能做到协调发展。

参考文献

- [1] Simone, G., Petra, K. and Julia, K.S. (2011) Long-Term Changes in CO₂ Emissions in Austria and Czechoslovakia: Identifying the Drivers of Environmental Pressures. *Energy Policy*, **39**, 535-543. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.006>
- [2] Bhattacharyya, S.C. and Matsumura, W. (2010) Changes in the GHG Emission Intensity in EU-15: Lessons from a Decomposition Analysis. *Energy*, **35**, 3315-3322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.017>
- [3] Obas, J.E. and Anthony, J.I. (2006) Decomposition Analysis of CO₂ Emission Intensity between Oil-Producing and Non-Oil-Producing Sub-Saharan African Countries. *Energy Policy*, **34**, 3599-3611. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.10.012>
- [4] Albrecht, J., Francois, D. and Schoors, K. (2002) A Shapley Decomposition of Carbon Emissions without Residuals. *Energy Policy*, **30**, 727-736. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00131-8)
- [5] Nag, B. and Parikh, J. (2000) Indicators of Carbon Emission Intensity from Commercial Energy Use in India. *Energy Economics*, **22**, 441-461. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(99\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(99)00032-8)

-
- [6] 万文玉, 赵雪雁, 王伟军, 等. 我国农村居民生活能源碳排放的时空特征分析[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6390-6401.
- [7] 万文玉, 赵雪雁, 王伟军. 中国城市居民生活能源碳排放的时空格局及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3445-3455.
- [8] 曹俊文, 曾康. 基于 LMDI 和 M-R 分解模型的长江经济带碳排放驱动效应研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(8): 992-998.
- [9] 岳超, 胡雪洋, 贺灿飞, 等. 1995-2007 年我国省区碳排放及碳强度的分析: 碳排放与社会发展(III) [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 510-516.
- [10] 曲建升, 王琴, 陈发虎. 我国二氧化碳排放的区域分析[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 466-472.
- [11] Berger-Schmitt, R. (2000) Social Cohesion as an Aspect of the Quality of Societies: Concept and Measurement. Euro-reporting Working Paper No. 14.
- [12] Glaeser, E.L., *et al.* (2002) An Economic Approach to Social Capital. *The Economic Journal*, **112**, F437-F458. <https://doi.org/10.1111/1468-0297.00078>
- [13] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [14] 田娟娟, 张金锁. 基于地理探测器的中国碳排放时空分布特征及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 13-20, 27.
- [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.
- [16] 张赫, 彭千芮, 王睿, 强文丽, 张建勋. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8988-8998.