

Study on Nature Geographical Factors and Regional Energy-Related Carbon Emissions

Yuhong Sun¹, Yan Jiang², Hongtao Bai^{2*}

¹Yunnan Environmental Engineering Assessment Center, Kunming Yunnan

²College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin

Email: 348039435@qq.com, *baiht@nankai.edu.cn

Received: Mar. 26th, 2020; accepted: Apr. 19th, 2020; published: Apr. 26th

Abstract

Based on panel data of China's 30 provinces in 2003-2014, an econometrics panel model was used to explore the effects of natural geographical factors, using per capita primary fossil fuel energy production as an indicator, on energy-related carbon emissions in Chinese provinces. The main findings were as follow. 1) Primary fossil fuel energy production significantly influenced energy-related carbon emissions both for the whole of China and for regions. 2) With the economic and social development, the carbon emission elasticities of natural geographical factors showed some trends. 3) It is important for the low-carbon development of areas to focus on the import and export of energy. In the economically developed low-carbon area, the elasticity of this influence was high, but decreased as the economy grew during rapid socioeconomic development. The province should concentrate on restructuring their industrial systems, improving techniques and controlling primary fossil fuel energy inputs for decreasing carbon emissions. In the balanced low-carbon area, technological development is a major factor for the decrease of the elasticity. In the developing high-carbon area, provinces should focus on improving the fossil fuel energy import structure to import more primary fossil fuel energy with low carbon emission coefficients. The elasticity of resource high-carbon area was weak, the local governments should develop policies to regulate primary fossil fuel exploration and export, and develop reasonable measures to mitigate energy-related carbon emissions considering local natural geographical factors.

Keywords

Regional Energy-Related Carbon Emissions, Nature Geographical Factors, Per Capita Primary Fossil Fuel Energy Production, Difference of Influence, Elasticities

自然地理因素对区域能源碳排放影响研究

孙宇红¹, 蒋妍², 白宏涛^{2*}

*通讯作者。

¹云南省环境工程评估中心, 云南 昆明

²南开大学环境科学与工程学院, 天津

Email: 348039435@qq.com, *baiht@nankai.edu.cn

收稿日期: 2020年3月26日; 录用日期: 2020年4月19日; 发布日期: 2020年4月26日

摘要

本文基于中国30个省份的面板数据, 以人均一次化石能源产量为指标探索了自然地理因素对能源碳排放的影响规律。结果表明: ①一次化石能源生产对全国及区域能源碳排放均有显著正向影响; ②影响弹性系数随着社会经济的发展呈现某种变化趋势; ③关注区域能源进出口政策对区域的低碳发展十分重要。在发展型高碳发展省份, 人均GDP低但社会经济快速发展, 影响弹性系数较高但随着经济增长而下降, 应注重调整产业体系, 提高减排技术, 并控制一次化石能源的进口。在均衡型低碳发展省份, 人均GDP处于国家平均水平之上, 技术的发展进步是弹性系数下降的主要因素。在发达型低碳发展省份, 经济发达, 影响弹性系数增加, 应注重改善化石能源进口结构, 进口更多低碳排放系数的一次化石能源, 增加公众的环境意识。资源型高碳发展省份作为特例, 资源产量大, 影响弹性系数较弱, 当地政府应严格控制一次化石能源的开采与出口, 根据当地发展水平合理制定减排目标。

关键词

区域能源碳排放, 自然地理因素, 人均一次化石能源产量, 影响差异性, 弹性系数

Copyright © 2020 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. 引言

全球气候变暖问题日益凸显, 我国碳排放形势尤其严峻。2015年, 我国确定了到2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%, 非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右的低碳发展目标。鉴于中国幅员辽阔, 不同区域之间自然地理环境、经济发展水平差异较大, 导致不同区域的能源碳排放及其驱动因素存在差异性, 因此, 探讨碳排放影响的区域特征对低碳政策的制定具有指导意义[1]。

目前, 社会经济因素对碳排放的影响研究较为成熟, 涵盖经济、城镇化、产业、技术、人口等方面[2][3][4][5][6]。碳排放影响的区域差异性也已被广泛研究, 区域分类多集中于东中西(东北)区域[7]、省域[8], 或利用碳排放量进行分区[9], 以及通过聚类分析将特征相似的地区归类[10]。这些研究均确认碳排放受社会经济因素影响的显著区域差异性。

但是, 从现有文献看, 自然地理因素与区域碳排放关系的研究停留在表层。姜磊等证实能源丰沛会推高地区能源强度[11]。赵领娣[12]等发现全国及区域层面, 能源禀赋会通过经济增长、产业结构和技术进步3个中介变量抑制就业增长。吴海兵[13]等发现产业结构的演进对能源禀赋存在一定依赖性, 能源自给率对工业增加值占比的影响是显著的。贺灿飞[14]证实资源密集型产业倾向于分布在资源丰富的区域。Xu [15]等发现中国黄河中心地区、东北地区、西北部等地区资源禀赋对区域经济增长产生了负面影响。

以上研究均揭示了自然地理因素对社会经济因素的影响,从而间接影响了碳排放,但很少有自然地理因素对碳排放直接作用的研究。张翠菊[16]对资源禀赋和碳排放之间的进行了探究,发现能源禀赋对地区碳排放强度具有显著正向影响,能源丰裕地区倾向于发展能源依赖型产业,形成高碳发展路径。虽然有研究证实自然地理因素与碳排放存在关系,且存在区域差异,但区域层面的研究缺乏对区域发展模式的考虑。因此,本文综合社会经济发展水平、资源禀赋和碳排放特征对全国进行分区,探讨了社会经济发展过程中自然地理因素对碳排放影响的变化规律,同时从区域能源进出口的角度提出低碳发展建议。

2. 方法和数据

2.1. 能源碳排放估算

本文采用混合责任模型[17]估算中国区域能源碳排放,将区域能源碳排放分解为本地非火电活动引起的直接碳排放以及电力消费实现的间接碳排放两部分。生产过程中的碳排放责任由生产相关的工业部门所属地区承担,地方政府可以通过实施产业政策积极推动低碳发展。同时,电力生产过程中的碳排放责任由电力消费地区承担,提高电力利用效率。其估算公式如式(1)~(5):

$$C_{\text{总量}} = C_{\text{间接}} + C_{\text{直接}} + C_{\text{电力}} \quad (1)$$

$$C_{\text{直接}} = \sum_i [(Q_{\text{终端供热}_i} + Q_{\text{损失}_i} + Q_{\text{终端}_i}) \times \beta_i \times \alpha_i - B_i \times \beta_i \times \alpha_i \times \eta_i] \times \gamma_i \quad (2)$$

$$C_{\text{电力}} = (E + \varepsilon) \times \sigma \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{TC}{TE} \quad (4)$$

$$TC = \sum_i TQ_i \times \beta_i \times \alpha_i \times \gamma_i \quad (5)$$

式中: $C_{\text{总量}}$ 是区域的碳排放总量(t); $C_{\text{电力}}$ 是本地电力消费的间接碳排放量(t); $C_{\text{直接}}$ 是本地非电力生产的能源消费直接碳排放量(t); $Q_{\text{终端}_i}$ 是第 i 种化石燃料的终端消费量(t); $Q_{\text{供热}_i}$ 是用于本地供热的第 i 种化石燃料消费量(t); $Q_{\text{损失}_i}$ 是第 i 种化石燃料的损失量(t); $C_{\text{直接}}$ 是本地非电力生产的能源消费直接碳排放量(t); β_i 是第 i 种化石燃料的能源转换系数(TJ/tce); α_i 是第 i 种化石燃料的潜在碳排放因子(t/TJ); B_i 是第 i 种化石燃料用作原料、材料的实物消费量(t); η_i 是第 i 种化石燃料用作原料、材料时的固碳率; γ_i 是第 i 种化石燃料燃烧过程的碳氧化率; E 是区域的电力终端消费量(kW·h); ε 是区域的电力损失量(kW·h); σ 是全国电力消费平均等效排放因子(t/kW·h); TC 是全国电力生产的碳排放总量(t); TE 是全国电力生产总量(t); TQ_i 是用于全国电力生产的第 i 种化石燃料消费量(t)。

通过上述方法,选取人均碳排放量(C_p)表征能源碳排放量。化石能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》(2004~2015)。不同省份人均碳排放量差异如图1所示。

2.2. 影响因素遴选

区域碳排放主要与经济发展程度、能源消耗、地理位置、产业结构和技术水平等因素有关。在已有研究基础上,本文选取以下变量表征碳排放的影响因素(表1)。

本文选取2003~2014年中国30个省(不包括西藏,台湾,香港,澳门)的面板数据。地区GDP、人口、产业产值数据来自《中国统计年鉴》(2004~2015年)。除人均GDP采用1990年不变价外,其余包含GDP的经济指标均采用当年价格。工业增加值数据来源于《中国工业经济统计年鉴》(2004~2015年)。各省一次化石能源产量、各类化石能源终端消费量数据取自《中国能源统计年鉴》(2004~2015年)。为了方便统计分析,一次化石能源产量利用原煤、原油、天然气生产量数据统一换算为标准煤单位后计算得到。

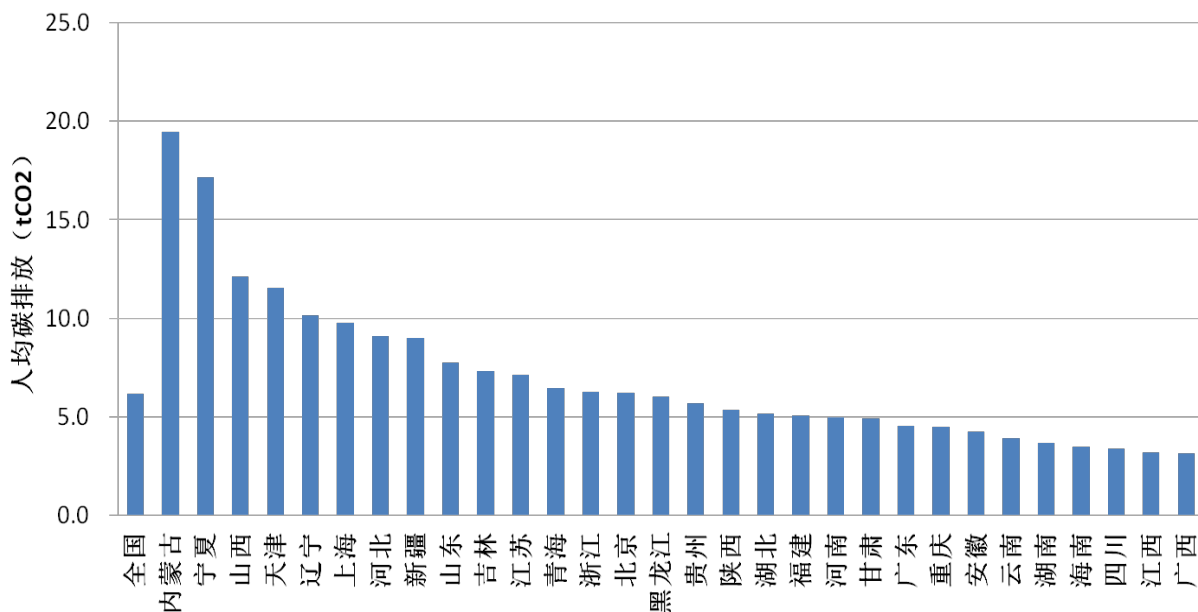


Figure 1. The average value of per capita carbon emissions in Chinese provinces between 2003 and 2014

图 1. 2003-2014 年各省人均碳排放均值

Table 1. The characterization variables of the influenced factors for energy-related carbon emission

表 1. 能源碳排放影响因素表征指标

影响因素	表征变量	指标说明
自然地理	人均一次化石能源生产量(PEP_{pc})	化石能源产量不同于化石能源消费量。由于区域间存在能源进、出口，化石能源产量可通过能源生产结构、能源进、出口量来影响区域碳排放。人均一次化石能源生产量由各省份一次化石能源与人口比值计算得到，反映地区的资源禀赋的丰富程度
经济发展	人均地区生产总值(GDP_{pc}) 地区生产总值(GDP)	
能源结构	煤炭占一次能源比重衡量(EM_{coal})	
产业结构	工业增加值占地区生产总值比重(IS_2) 第三产业增加值占地区 GDP 比重(IS_3) 高耗能产业增加值占工业增加值比重(IS_{high})	
技术水平	能源消费强度(ECl) 工业能源消费强度($IECI$) 一次化石能源生产强度($PEPI$)	单位 GDP 能耗 单位工业增加值能耗 单位 GDP 一次化石能源生产量

2.3. 区域类型划分

本文采用逐步筛选回归模型，确定三个影响区域碳排放差异性的关键指标，即人均 GDP、化石能源生产强度和高耗能产业比重。在识别差异性驱动因素的基础上，本文运用聚类分析将我国划分为四个区域(表 2)。在发达型低碳发展省份，经济水平发达，低碳强度，资源匮乏，化石能源产量极少，高耗能行业比重低于全国水平；均衡型低碳发展省份均位于东部沿海地区，产业结构相对优化，除人均 GDP 较高外，碳强度、高耗能产业比重、资源禀赋均低于全国平均水平；在发展型高碳发展省份，人均 GDP 较低，

资源禀赋差异较大,但处于社会经济高速发展阶段,高耗能产业占工业体系比重日益提高,碳强度较高;资源型高碳发展省份大部分位于中国西部,资源禀赋丰富,经济发展水平较低,由于大力发展高耗能行业,形成高碳发展形势。具体特征如图2所示。白宏涛[18]等详细描述了该区域的划分。

Table 2. The regional classification in China

表 2. 中国区域类型划分

区域类型	省份
发达型低碳发展省份	北京、天津、上海
均衡型低碳发展省份	辽宁、山东、江苏、浙江、福建、广东
发展型高碳发展省份	河北, 吉林, 黑龙江, 安徽, 江西, 河南, 湖北, 湖南, 广西, 海南, 重庆, 四川
资源型高碳发展省份	山西、内蒙古、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆

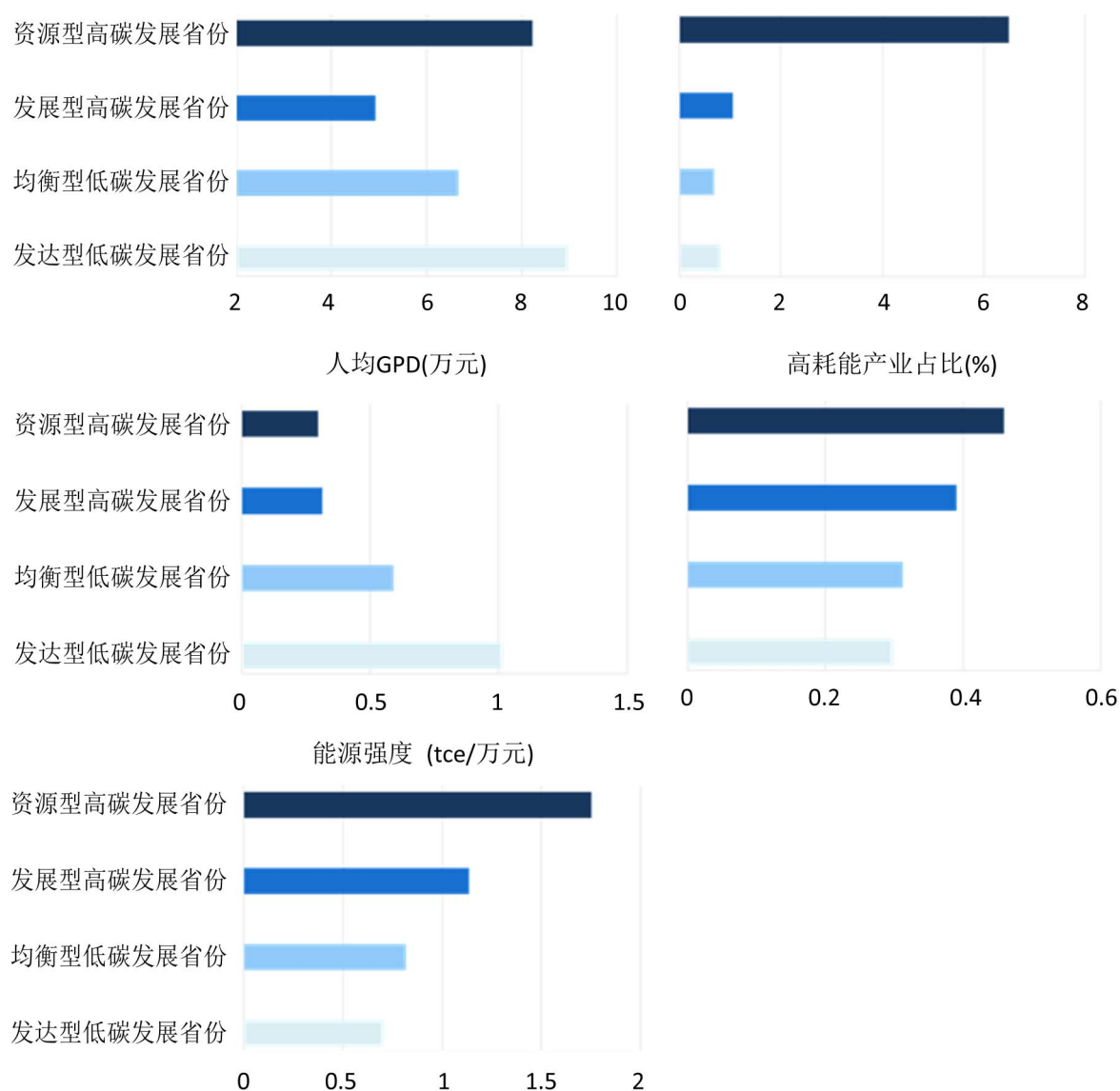


Figure 2. The four regional characteristics in China (the average value in 2003-2014)

图 2. 中国区域特征(2003~2014 年平均值)

2.4. 面板模型构建

本文采用面板模型从国家和区域层面分析面板数据。人均一次化石能源产量作为主要变量，并引入经济发展、能源结构、产业结构、技术水平等社会经济因素作为控制变量，来分析自然地理因素对能源碳排放的影响。面板模型构建如式(6)：

$$LnC_p = \lambda + \omega_1 LnPEP_{pcnt} + \omega_2 LnGDP_{pcnt} + \omega_3 LnGDP_{nt} + \omega_4 LnEM_{coalnt} + \omega_5 LnIS_{2nt} + \omega_6 LnIS_{3nt} + \omega_7 LnIS_{highnt} + \omega_8 LnECI_{nt} + \omega_9 LnIECI_{nt} + \omega_{10} LnPEPI_{nt} + \delta_{nt} \quad (6)$$

其中， $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 表示各省(市)； $t = 1, 2, 3, \dots, T$ 表示各年份； λ 是常数； $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{10}$ 是各指标的长期弹性估计； δ_{nt} 是误差项。每个变量数据进行对数变换。统计分析利用 Eviews7.2 软件。

3. 实证分析

3.1. 面板数据单位根检验

为了避免伪回归，应用 Levin, Lin & Chu 测试和 Im, Pesaran & Shin 测试对各面板变量进行单位根检验[19]。结果表明全国、发达型低碳发展省份、均衡型低碳发展省份及资源型高碳发展省份变量的一阶差分序列均不存在单位根，其余面板变量的二阶差分序列不存在单位根，故可以对数据做协整检验(表 3)。

Table 3. Results of unit root test
表 3. 面板单位根检验结果

变量	LLC		IPS		差分阶数
	统计量	P 值	统计量	P 值	
全国					
LnC_p	-17.34***	0.00	-6.58***	0.00	1
$LnPEP_{pc}$	-22.23***	0.00	-8.25***	0.00	1
$LnGDP_{pc}$	-12.74***	0.00	-3.28***	0.00	1
$LnGDP$	-15.52***	0.00	-4.04***	0.00	1
$LnEM_{coal}$	-17.56***	0.00	-7.05***	0.00	1
$LnIS_2$	-14.94***	0.00	-7.09***	0.00	1
$LnIS_3$	-25.05***	0.00	-11.00***	0.00	1
$LnIS_{high}$	-16.75***	0.00	-8.06***	0.00	1
$LnECI$	-16.71***	0.00	-6.94***	0.00	1
$LnIECI$	-14.30***	0.00	-5.15***	0.00	1
$LnPEPI$	-24.76***	0.00	-10.78***	0.00	1
发达型低碳发展省份					
LnC_p	-5.10***	0.00	-2.53***	0.01	1
$LnPEP_{pc}$	-3.09***	0.00	-1.65**	0.05	1
$LnGDP_{pc}$	-4.53***	0.00	-1.56*	0.06	1
$LnGDP$	-12.55***	0.00	-5.18***	0.00	1
$LnEM_{coal}$	-4.42***	0.00	-1.30*	0.10	1
$LnIS_2$	-10.79***	0.00	-5.93***	0.00	1

Continued

<i>LnIS₃</i>	-12.64 ^{***}	0.00	-7.27 ^{***}	0.00	1
<i>LnIS_{high}</i>	-3.78 ^{***}	0.00	-1.89 ^{**}	0.03	1
<i>LnECI</i>	-5.85 ^{***}	0.00	-2.11 ^{**}	0.02	1
<i>LnIECI</i>	-5.81 ^{***}	0.00	-1.88 ^{**}	0.03	1
<i>LnPEPI</i>	-3.31 ^{***}	0.00	-1.34 [*]	0.09	1
均衡型低碳发展省份					
<i>LnC_p</i>	-4.61 ^{***}	0.00	-1.76 ^{**}	0.04	1
<i>LnPEP_{pc}</i>	-4.55 ^{***}	0.00	-1.38 [*]	0.08	1
<i>LnGDP_{pc}</i>	-5.96 ^{***}	0.00	-1.46 [*]	0.07	1
<i>LnGDP</i>	-6.35 ^{***}	0.00	-1.64 ^{***}	0.00	1
<i>LnEM_{coal}</i>	-5.93 ^{***}	0.00	-2.32 ^{***}	0.01	1
<i>LnIS₂</i>	-9.44 ^{***}	0.00	-3.86 ^{***}	0.00	1
<i>LnIS₃</i>	-13.37 ^{***}	0.00	-7.31 ^{**}	0.02	1
<i>LnIS_{high}</i>	-4.65 ^{***}	0.00	-2.52 ^{***}	0.01	1
<i>LnECI</i>	-7.07 ^{***}	0.00	-2.90 ^{***}	0.00	1
<i>LnIECI</i>	-7.44 ^{***}	0.00	-2.87 ^{***}	0.00	1
<i>LnPEPI</i>	-5.19 ^{***}	0.00	-1.93 ^{**}	0.03	1
发展型高碳发展省份					
<i>LnC_p</i>	-7.75 ^{***}	0.00	-2.39 ^{***}	0.01	2
<i>LnPEP_{pc}</i>	-12.55 ^{***}	0.00	-3.40 ^{***}	0.00	2
<i>LnGDP_{pc}</i>	-13.43 ^{***}	0.00	-6.10 ^{***}	0.00	2
<i>LnGDP</i>	-17.73 ^{***}	0.00	-3.60 ^{***}	0.00	2
<i>LnEM_{coal}</i>	-19.85 ^{***}	0.00	-6.51 ^{***}	0.00	2
<i>LnIS₂</i>	-43.03 ^{***}	0.00	-8.10 ^{***}	0.00	2
<i>LnIS₃</i>	-11.30 ^{***}	0.00	-3.23 ^{***}	0.00	2
<i>LnIS_{high}</i>	-15.47 ^{***}	0.00	-4.35 ^{***}	0.00	2
<i>LnECI</i>	-11.03 ^{***}	0.00	-2.74 ^{***}	0.00	2
<i>LnIECI</i>	-9.17 ^{***}	0.00	-2.85 ^{***}	0.00	2
<i>LnPEPI</i>	-18.02 ^{***}	0.00	-6.18 ^{***}	0.00	2
资源型高碳发展省份					
<i>LnC_p</i>	-14.57 ^{***}	0.00	-5.68 ^{***}	0.00	1
<i>LnPEP_{pc}</i>	-9.34 ^{***}	0.00	-4.70 ^{***}	0.00	1
<i>LnGDP_{pc}</i>	-7.71 ^{***}	0.00	-2.26 ^{***}	0.01	1
<i>LnGDP</i>	-7.28 ^{***}	0.00	-1.76 ^{**}	0.04	1
<i>LnEM_{coal}</i>	-8.61 ^{***}	0.00	-3.65 ^{***}	0.00	1
<i>LnIS₂</i>	-10.76 ^{***}	0.00	-4.59 ^{***}	0.00	1

Continued

<i>LnIS₃</i>	-14.45 ^{***}	0.00	-6.56 ^{***}	0.00	1
<i>LnIS_{high}</i>	-9.26 ^{***}	0.00	-4.97 ^{***}	0.00	1
<i>LnECI</i>	-6.80 ^{***}	0.00	-2.27 ^{***}	0.01	1
<i>LnIECI</i>	-8.37 ^{***}	0.00	-2.69 ^{***}	0.00	1
<i>LnPEPI</i>	-9.42 ^{***}	0.00	-5.39 ^{***}	0.00	1

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著，下表同上。

3.2. 面板数据协整检验

采用 Kao 协整检验分析变量之间是否存在长期的协整关系。结果表明变量之间在 1%显著性水平下存在协整关系，人均碳排放与选取指标之间存在长期稳定的发展趋势(表 4)。

Table 4. Results of cointegration test

表 4. 面板数据协整检验

面板	T 统计量	P 值
全国	-12.48 ^{***}	0.00
发达型低碳发展省份	-3.34 ^{***}	0.00
均衡型低碳发展省份	-6.78 ^{***}	0.00
发展型高碳发展省份	-6.53 ^{***}	0.00
资源型高碳发展省份	-8.06 ^{***}	0.00

3.3. 面板模型识别与估计

通过 Hausman 检验确定建立固定效应模型或随机效应模型，*F* 检验确定建立固定(随机)效应模型或混合模型，*F* 检验方法[20]如下所示：

$$F = \frac{(R^2 - R_{mix}^2)/(n-1)}{(1-R^2)/(nT-n-K)} \sim F(n-1, nT-n-K) \quad (7)$$

式中，*n* 指的是省份的数目；*T* 为时间跨度；*K* 为解释变量个数；*R*² 和 *R*_{mix}² 分别为随机(固定)模型和混合模型的拟合优度。

由 Hausman 检验可知，全国及发展型高碳发展省份应建立随机效应模型。*F* 检验的零假设被拒绝，应选择混合回归模型。其余区域面板由于对应省份个数的制约，无法使用随机效应模型。*F* 检验的零假设均被拒绝，因此选择混合回归模型。

面板数据混合模型估计结果(表 5)表明，所有模型的 Adj*R*²、*F* 统计值、DW 值、P 值表明回归良好。模型(1)、(3)、(5)、(7)、(9)中，均有变量没有通过显著性水平检验。对每个模型进行修正，依次去掉最不显著的变量，直至所有变量系数均通过显著性水平检验。

由估计结果可知，全国范围内人均一次化石能源产量增长 1%，引起人均碳排放量增加 1.03% (表 5)。研究期间，人均一次化石能源产量平均每年增长 9.07%，人均碳排放增长 7.88% (图 3)。弹性系数大于 1，可能与一次化石能源生产结构有关，煤炭占一次化石能源生产比重每年增加 1.01% (图 4)，且煤炭的碳排放系数高于其他化石能源。另一方面，弹性系数也可能受到一次化石能源进口量的影响，各行业和生活的能源需求量增加提高了对化石能源进口的依赖性。我国每年一次化石能源进口量平均增长 16.80%，其中煤炭占一次化石能源进口比重每年增加 20.65% (图 4)。

Table 5. Estimation results of modles

表 5. 面板数据模型估计结果

变量	全国		发达型低碳发展省份		均衡型低碳发展省份		发展型高碳发展省份		资源型高碳发展省份											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)										
	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值										
$LnPEP_{pc}$	1.03***	0.00	1.04***	0.00	0.63	0.20	1.10***	0.00	0.86***	0.00	0.80***	0.00	1.25***	0.00	1.19***	0.00	1.05***	0.00	0.98***	0.00
$LnGDP_{pc}$	0.10***	0.00	0.09***	0.01	0.07	0.76	—	—	-0.16	0.45	—	—	-0.11	0.47	—	—	0.11	0.34	0.21**	0.03
$LnGDP$	-0.04***	0.00	-0.04***	0.00	0.42	0.34	—	—	0.18***	0.00	0.19***	0.00	-0.15***	0.00	-0.14***	0.00	-0.02	0.63	—	—
$LnEM_{coal}$	0.59***	0.00	0.59***	0.00	0.83***	0.00	0.73***	0.00	0.22***	0.02	0.23***	0.01	0.60***	0.00	0.60***	0.00	0.61***	0.00	0.58***	0.00
$LnIS_2$	-0.37*	0.08	-0.24***	0.00	0.17	0.47	—	—	-0.18	0.79	—	—	-1.07***	0.03	-1.08***	0.00	-0.26	0.56	-0.41***	0.00
$LnIS_3$	-0.23***	0.00	-0.24***	0.00	-0.04	0.80	—	—	-0.72***	0.00	-0.77***	0.00	-0.24***	0.00	-0.23***	0.03	-0.21	0.20	—	—
$LnIS_{high}$	0.03	0.37	—	—	-0.14	0.39	—	—	0.35***	0.00	0.38***	0.00	0.16***	0.00	0.17***	0.00	-0.12**	0.05	-0.10*	0.09
$LnECI$	1.10***	0.00	0.97***	0.00	0.50	0.17	0.75***	0.00	0.41***	0.00	—	—	1.98***	0.00	1.94***	0.00	0.88*	0.07	1.08***	0.00
$LnIECI$	-0.14***	0.00	—	—	0.19	0.44	—	—	0.57	0.53	0.96***	0.00	-0.99***	0.00	-0.98***	0.00	0.20	0.68	—	—
$LnPEPI$	-1.07***	0.00	-1.09***	0.00	-0.59	0.27	-1.11***	0.00	-0.91	0.39	-0.84***	0.00	-1.28***	0.00	-1.21***	0.00	-1.12***	0.00	-1.05***	0.00
C	0.49***	0.00	0.45***	0.00	-0.81	0.54	0.48***	0.00	-0.76***	0.00	-0.78***	0.00	0.85***	0.00	0.88***	0.00	0.24	0.23	0.36***	0.00
DW	0.94	0.92	2.59	2.24	0.87	0.90	0.91	0.91	1.56	1.57										
AdjR ²	0.96	0.96	0.96	0.97	0.93	0.93	0.96	0.96	0.96	0.96										
F	781.94	979.49	85.18		95.89	140.15	345.91	385.68	272.70	393.94										
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00										

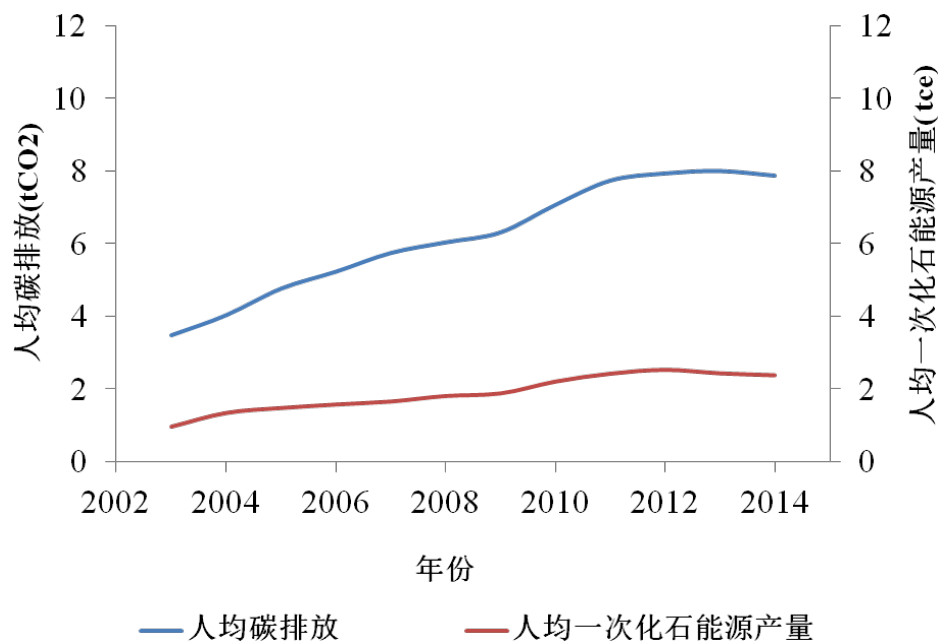


Figure 3. Trends in per capita primary fossil fuel energy production and per capita carbon emissions in China between 2003 and 2014

图 3. 2003~2014 年全国人均一次化石能源生产量和人均碳排放量趋势

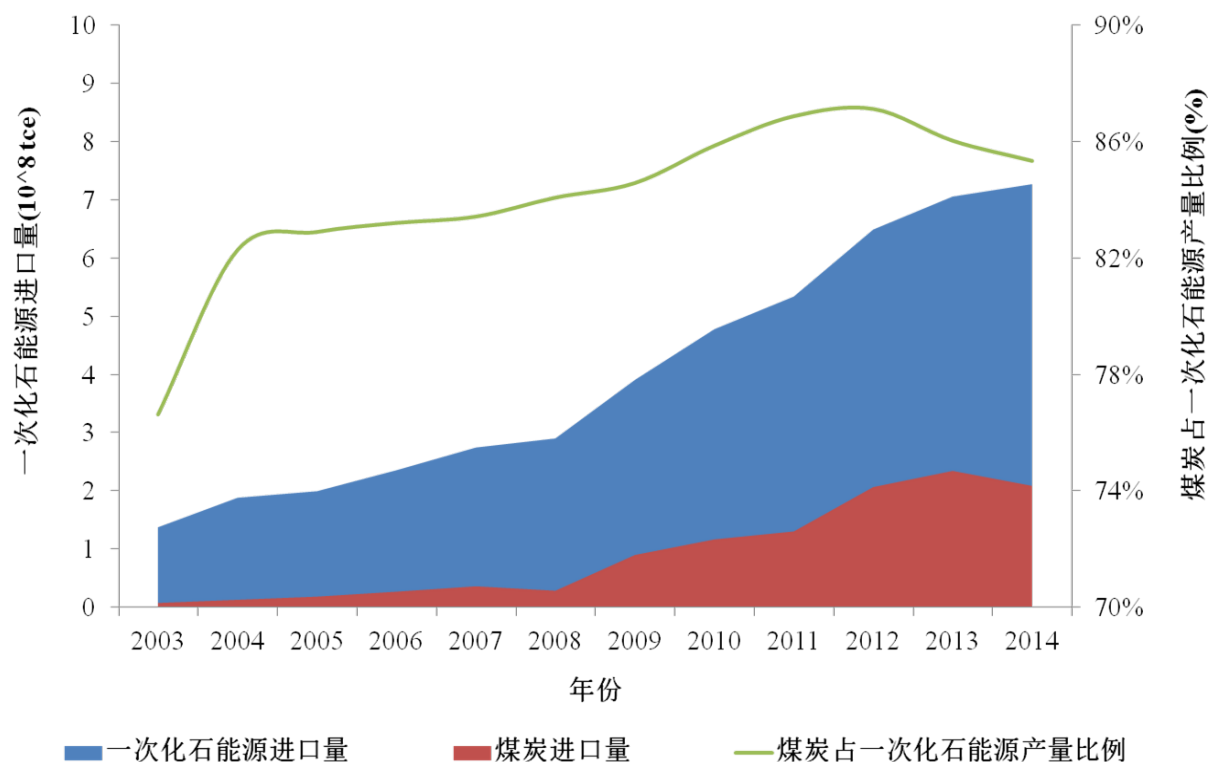


Figure 4. Trends in primary fossil fuel energy imports and coal imports to China and in the contribution of coal to total primary fossil fuel energy production in China between 2003 and 2014

图 4. 2003~2014 年全国一次化石能源进口量、煤炭进口量趋势以及煤炭在一次化石能源产量占比趋势

各区域人均一次化石能源产量与人均碳排放呈显著正相关性，且存在区域差异。随着社会经济的发展，人均一次化石能源产量变动所引起的人均碳排放变动的弹性系数呈现一定的变化趋势(图 5)。

在发展型高碳发展省份，人均 GDP 处于 0.3 万元以下，1% 人均一次化石能源产量的增长引起 1.19% 人均碳排放的增加(表 5)。该区域人均碳排放量年增长率为 8.16%，人均一次化石能源产量年增长率仅为 3.92%。期间高耗能行业迅速发展，在工业体系中平均占比达到 39.98% (图 2)，导致当地一次化石能源产量增加，此外当地化石能源资源较少，需要从省外大量进口满足发展的能源需求，导致该区域高能耗和高碳排放，从而处于经济快速发展阶段的省份弹性系数较为强烈。

在均衡型低碳发展省份，人均 GDP 达到 0.6 万元左右，发展水平较高，人均一次化石能源产量增长 1%，人均碳排放增加 0.80% (表 5)。弹性系数在经济快速发展过程中呈现下降趋势。该区域中高耗能行业占工业体系的 31.16%，比发展型高碳发展省份低 7% 左右(图 2)，能源强度亦降低 0.32 tce/万元，技术的发展与进步，可能是导致弹性系数下降的主要原因。

发达型低碳发展省份经济水平遥遥领先，人均 GDP 达到 1 万元以上，回升到 1.10 的高弹性系数(表 5)。该区域处于快速城镇化阶段，虽然一次化石能源产量有限，且能源强度和高耗能行业比重处于较低水平，但城市的高电力消耗导致大量省外能源调入，不依赖与当地有限能源，所以弹性系数增加。

资源型高碳发展省份呈现了较低的弹性系数，0.98 (表 5)。该地区发展水平较差，人均 GDP 在 0.3 万元以下，1% 人均一次化石能源产量增长引起 0.93% 人均碳排放量增长。该区域能源禀赋十分丰富，人均一次化石能源产量快速增长，年增长率为 14.76%，但碳排放量每年仅增长 8.85%，高耗能产业作为当地经济支柱形成高碳发展模式，但部分能源输出用于外省补给，剩余化石能源支持当地经济活动，因此资源型高碳发展省份情况较为特殊，呈现较低弹性系数。

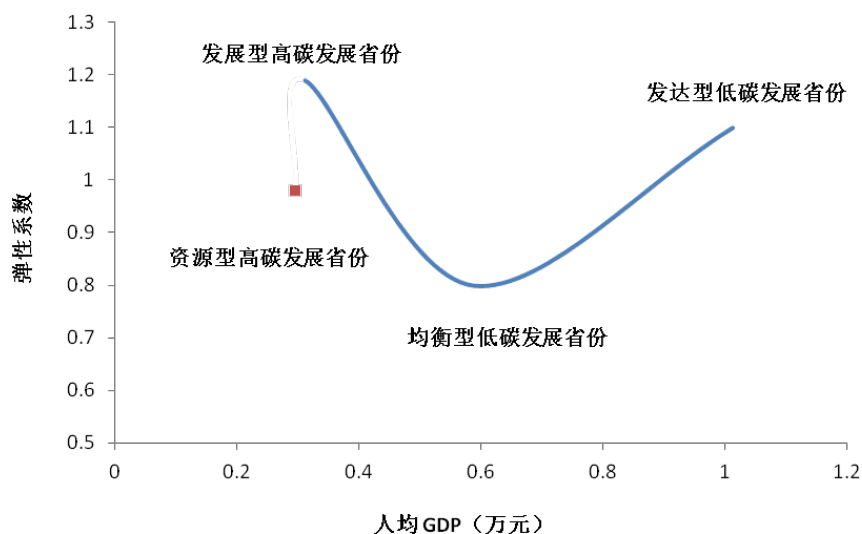


Figure 5. Trend in carbon emission elasticity of per capita fossil fuel energy production as socioeconomic development increased

图 5. 人均碳排放变动受人均一次化石能源产量变动影响的弹性系数在社会经济发展中的变动趋势

4. 结论

本文基于中国 30 个省份 2003~2014 年的面板模型,研究了自然地理因素对国家和地区能源碳排放的影响。结果证实,自然地理因素与碳排放之间存在显著的正相关关系,且存在区域差异;同时在社会经济发展过程中,人均一次化石能源生产变动对碳排放变动的的影响程度存在变化趋势,这与能源进出口情况可能有关。

研究期间,自然地理因素显著影响了我国碳排放。我国应重点控制全国一次化石能源的开采,调整能源生产结构,提高清洁能源的获取,重点减少煤炭占一次化石能源的产量;减少一次化石能源进口量,进口更多低碳排放系数的能源;调整产业结构,加快发展第三产业,降低高耗能行业对工业的贡献。

能源碳排放受自然地理因素影响的弹性系数与社会经济发展水平有关。发展型高碳发展省份处于社会经济快速发展阶段,弹性系数较高但随着经济增长呈现下降趋势,应优先调整产业结构和提高产业技术水平,降低高耗能行业比重,同时调节一次化石能源进口结构与当地产业结构一致,降低化石能源对碳排放的影响,加强供应侧结构改革,减少煤炭使用比重。均衡型低碳发展省份弹性系数极低,先进的技术水平是发展中弹性系数下降主要因素。发达型低碳发展省份经济水平领先,弹性系数增加,该发展阶段省份工作重点应从调整产业结构转向改善化石能源进口结构,进口更多低碳排放系数的一次化石能源;推广可再生能源使用来替代一次化石能源;通过教育和宣传提高大众环保意识,减少能源消耗和排放,减少自然地理因素对碳排放的影响。

资源型高碳发展省份较为特殊,该区域发展水平低,由于向外出口大量一次化石能源,导致弹性系数较低。该区域地方政府要严格控制一次化石能源开采,特别是控制煤炭生产比重。政府还应严格限制能源出口,调整高碳排放系数能源的比例,根据当地发展水平合理制定减排目标。

综上,政府应实施具有针对性的能源生产和进出口政策来实现减排,同时考虑到我国不同区域的发展差异,减少区域自然地理因素对碳排放的影响,确保社会经济持续发展的同时减少碳排放。

基金项目

国家自然科学基金青年科学基金项目(41301648);教育部人文社会科学研究青年基金项目 (17YJCZH002)。

参考文献

- [1] 张晓梅, 庄贵阳. 中国省际区域碳减排差异问题的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 135-143.
- [2] 王芳, 周兴. 人口结构、城镇化与碳排放——基于跨国面板数据的实证研究[J]. 中国人口科学, 2012(2): 47-56.
- [3] 张腾飞, 杨俊, 盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 47-57.
- [4] 顾阿伦, 何崇恺, 吕志强. 基于 LMDI 方法分析中国产业结构变动对碳排放的影响[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1861-1870.
- [5] 许士春, 习蓉, 何正霞. 中国能源消耗碳排放的影响因素分析及政策启示[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 2-12.
- [6] 张兵兵, 徐康宁, 陈庭强. 技术进步对二氧化碳排放强度的影响研究[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 567-576.
- [7] Zhang, C. and Zhao, W. (2014) Panel Estimation for Income Inequality and CO₂ Emissions: A Regional Analysis in China. *Applied Energy*, **136**, 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.048>
- [8] Ye, B., Jiang, J., Li, C., et al. (2017) Quantification and Driving Force Analysis of Provincial-Level Carbon Emissions in China. *Applied Energy*, **198**, 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.063>
- [9] 胡艳兴, 潘竟虎, 王怡睿. 基于 ESDA-GWR 的 1997-2012 年中国省域能源消费碳排放时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1896-1906.
- [10] 张彬, 姚娜, 刘学敏. 基于模糊聚类的中国分省碳排放初步研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(1): 53-56.
- [11] 姜磊, 季民河. 基于空间异质性的中国能源消费强度研究——资源禀赋、产业结构、技术进步和市场调节机制的视角[J]. 产业经济研究, 2011, 2011(4): 61-70.
- [12] 赵领娣, 杨明晔, 张磊. 能源禀赋与就业增长——基于省际面板数据的实证分析[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1801-1811.
- [13] 吴海兵, 肖地楚, 王欣欣, 等. 基于固定效应模型的能源资源禀赋与产业结构关系研究[J]. 宏观经济研究, 2013(10): 59-66.
- [14] 贺灿飞, 朱彦刚. 中国资源密集型产业地理分布研究——以石油加工业和黑色金属产业为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 488-501.
- [15] Xu, X.L., Xu, X.F., Chen, Q., et al. (2016) The Research on Generalized Regional “Resource Curse” in China’s New Normal Stage. *Resources Policy*, No. 49, 12-49. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.002>
- [16] 张翠菊, 张宗益. 能源禀赋与技术进步对中国碳排放强度的空间效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 37-43.
- [17] Bai, H., Zhang, Y., Wang, H., et al. (2014) A Hybrid Method for Provincial Scale Energy-Related Carbon Emission Allocation in China. *Environmental Science & Technology*, **48**, 2541-2550. <https://doi.org/10.1021/es404562e>
- [18] 白宏涛, 王会芝, 徐鹤. 我国省域碳排放差异性及其转型发展模式研究[J]. 经济地理, 2012, 32(12): 21-26.
- [19] Shuai, C., Shen, L., Jiao, L., et al. (2017) Identifying Key Impact Factors on Carbon Emission: Evidences from Panel and Time-Series Data of 125 Countries from 1990 to 2011. *Applied Energy*, **187**, 310-325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.029>
- [20] 虞义华, 郑新业, 张莉. 经济发展水平、产业结构与碳排放强度——中国省级面板数据分析[J]. 经济理论与经济管理, 2011(3): 72-81.