



济南大学学报(自然科学版)

Journal of University of Jinan (Science and Technology)

ISSN 1671-3559, CN 37-1378/N

《济南大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 中国能耗的时空演化及其影响因素
作者: 王瑞莉, 王成新, 薛明月, 唐永超
DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.20200821.001
收稿日期: 2019-12-02
网络首发日期: 2020-08-21
引用格式: 王瑞莉, 王成新, 薛明月, 唐永超. 中国能耗的时空演化及其影响因素. 济南大学学报(自然科学版). <https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20200821.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

文章编号: 1671-3559 (2021) 01-0000-00

中国能耗的时空演化及其影响因素

王瑞莉, 王成新, 薛明月, 唐永超

(山东师范大学 a. 地理与环境学院, b. 人地协调与绿色发展山东省高校协同创新中心, 山东 济南 250358)

摘要: 以 2000—2017 年中国能耗数据为基础, 从能耗总量、能耗结构、能耗强度 3 个方面分析中国能耗的发展演化特征, 并应用灰色模型对中国能耗未来趋势进行预测; 选取 2005、2010、2015、2017 年作为时间截面, 采用主成分分析法对中国 30 个省、市(区)的综合能耗水平进行评价, 并借助地理探测器对能耗区域空间差异的影响因素进行测度。结果表明: 近年来中国能耗增速有所回升, 能耗结构性矛盾日益突出, 能耗强度持续降低; 各年份地区能耗水平空间分布特征各异, 总体呈现出“高能耗区环带集聚—条带集聚—区域能耗水平均衡化”的空间分布态势; 人口规模、科技创新水平对能耗总量的区域差异具有显著影响效应, 并且人口规模的影响作用大于科技创新水平的, 各因素影响由大到小的排序为科技创新水平、对外贸易水平、居民消费水平、产业结构。

关键词: 能耗; 时空演化; 主成分分析; 影响因素; 地理探测器

中图分类号: F124.5



文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Temporal and Spatial Evolution of Energy Consumption and Influencing Factors in China

WANG Ruili, WANG Chengxin, XUE Mingyue, TANG Yongchao

(a. College of Geography and Environment, b. Collaborative Innovation Center of Human-Nature and Green Development in Universities of Shandong, Shandong Normal University, Jinan 250358, Shandong, China)

Abstract: Based on energy consumption data from 2000 to 2017 in China, development and evolution characteristics of energy consumption in China were analyzed from 3 aspects of total energy consumption, energy consumption structure, and energy consumption intensity. The future trend of energy consumption in China was predicted by using the gray model. Selecting the years of 2005, 2010, 2015, and 2017 as time sections, the method of principal component analysis was used to evaluate comprehensive energy consumption levels of 30 provinces and cities (districts) in China. Influencing factors of regional spatial differences were measured with the help of geographical detector. The results show that the energy consumption growth in China picks up in recent years, the structural contradiction of energy consumption becomes increasingly prominent, and the energy consumption intensity continuously reduces. Spatial distribution characteristics of energy consumption levels in each year are different, presenting the spatial distribution trend of single-core agglomeration to banding agglomeration to regional energy consumption level equalization in high energy consumption areas. The population scale and level of scientific and technological innovation have significant influence on the regional difference of total energy consumption. The influence of population scale is greater than that of the scientific and technological innovation level. The order of influence of each factor from the largest to the smallest is the scientific and technological innovation level, the foreign trade level, the household consumption level, and the industrial structure.

Keywords: energy consumption; temporal and spatial evolution; principal component analysis; influential factor; geographical detector

随着中国经济发展步入新常态, 经济增速已由高速增长调整为中高速增长^[1], 中

国能耗增速总体趋缓, 能耗强度持续降低。2017 年中国能源消费增长率为 2.92%, 较

收稿日期: 2019-12-02

网络出版时间:

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701177); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MD043)

第一作者简介: 王瑞莉 (1997—), 女, 山东潍坊人。硕士研究生, 研究方向为区域规划与城镇发展。E-mail: 446776399@qq.com。

通信作者简介: 王成新 (1971—), 男, 山东新泰人。教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为区域规划与城镇发展。E-mail: 404122665@qq.com。

网络出版地址:

2016 年的 1.38% 有明显回升, 但仍低于过去 10 年平均 5.14% 的增速, 能耗强度较 2000 年已下降 61.22%; 然而, 就能耗总量而言, 中国仍处于较高水平, 一次能源消费总量已连续多年居于世界首位, 约占全球能源消费的 23%^[2]。此外, 中国能耗结构虽有显著优化, 但仍然处于不平衡状态, 这种由中国能源资源赋存特点所决定的、以煤炭为主的能耗结构短期难以改变; 2017 年中国化石能源消费占能源消费总量的百分比高达 86.4%, 环境污染问题不容忽视。中国各区域能源利用状况差异显著, 作用机制复杂, 宏观的政策措施无法完全适应不同区域的实际状况, 因此, 开展全国各地区能耗发展的区域差异研究尤为必要。

国际能源形势日益严峻, 低碳经济迅速兴起, 能源问题成为学术界关注的热点话题, 并形成了丰富的理论成果和方法基础, 大致可概括为 4 个方面: 1) 从时间维度对全国能耗特征的阶段性演化及发展趋势进行研究^[3-7]。已有的研究大多以定性描述为主, 或结合单一预测方法, 选取不同时间尺度, 分析中国能耗的发展演化特征。2) 能源利用水平的区域差异及影响因素的分解^[8-17]。实证方法已相对完善, 空间自相关^[12]、回归分析^[12-13]、主成分分析法^[16-17]等方法应用较广泛。3) 从不同时空尺度, 定性研究能源消费结构特征及其发展演化, 并借此探讨全局性、区域性的优化对策^[18-19]。4) 以统计数据为基础, 结合国家能源安全政策, 从能源供应、需求结构等角度, 对中国能源安全现状及问题进行探讨^[20-22]。综上, 关于中国能耗问题的研究已取得丰硕成果, 但在研究视角方面, 多局限于时间、空间单维度或宏观、区域单层次展开研究, 缺乏时空融合、区域对比的多角度、多层次的研究; 在研究尺度方面, 大多研究均采用单一年份数据进行评价, 缺乏对能耗水平的时间和空间差异的演化分析; 在影响因素方面, 采用定性方式进行分析的研究较多, 定量研究多应用回归模型等常规方法, 而以地理探测器为

工具, 测度能耗空间分异的影响因素作用强度的研究较少。

“十三五”节能减排的关键时期已经到来, 为了深入了解现有能耗问题及发展态势, 有效实现双控目标, 精准定位现阶段我国宏观能耗发展特征及区域差异状况具有重要意义。鉴于此, 本文中从能耗总量、能耗结构、能耗强度 3 个方面分析中国宏观能耗的发展演化特征, 应用灰色模型(GM)对该发展趋势进行预测分析, 以全面了解中国能耗发展所面临的问题; 选取 2005、2010、2015、2017 年截面数据, 采用主成分分析法对各省、市(区)综合能耗水平进行评价, 并借助地理探测器对地区能耗水平差异的影响因素进行测度。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 GM 模型

GM 模型不考虑能源系统内部国内生产总值(GDP)、人口、经济结构等信息的相互作用关系, 而是通过灰色理论进行预测, 对样本数据需求量小, 预测精度高, 客观性强^[6], 目前应用最广泛的是关于数列预测的单变量一阶微分 GM 模型, 即 GM(1,1)模型。为了降低时间跨度增大对数据预测精度的影响, 本文中选取 2010—2017 年数据, 应用 GM(1,1)模型, 针对单数列数据对我国能耗需求进行预测, 具体计算步骤如下。

1) 设原始时间序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, n 为正整数。

2) 求原始数列级比, 并检验该序列是否在可容范围 $e^{-2/n+1} \sim e^{2/n+1}$ 之内, 其中 e 为自然对数的底。

$$\sigma^{(1)}(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k-1)}, \quad (1)$$

式中: $\sigma^{(1)}(k)$ 为原始数列级比, 即后一时刻与前一时刻原始数据之比; k 为原始数据的时序变量, 取值范围为 $[2, n]$ 。

3) 对原始数列进行一次累加, 获得新数列 $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 以弱化数据本身的随机性

$$x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1), \quad (2)$$

$$x^{(1)}(2) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2), \quad (3)$$

.....

$$x^{(1)}(n) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + \dots + x^{(0)}(n), \quad (4)$$

式中: $x^{(1)}$ 为原始序列累加值。

4) 通过一阶微分方程对生成的新数列

进行拟合, 并定义白化模型

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u, \quad (5)$$

式中: t 为累加数据的时序变量, 取值范围为 $[1, n]$; a 为发展系数; u 为灰色作用量。

5) 应用最小二乘法求得参数 $\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ u \end{pmatrix}$, 获得 GM(1,1)模型, 并根据结果还原 $X^{(0)}$ 模拟值

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}, \quad (6)$$

式中: $\hat{x}^{(1)}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的序列预测值; $x^{(0)}(1)$ 为原始时间序列的起始值。

6) 计算方程平均相对误差, 以检验 GM(1,1)模型精度, 精度等级如表 1 所示。

表 1 灰色预测精度检验等级

模型精度检验等级	平均相对误差	小误差概率
一级 (好)	0.01	≥ 0.95
二级 (较好)	0.05	$0.80 \sim < 0.95$
三级 (合格)	0.10	$0.70 \sim < 0.80$
四级 (不合格)	0.20	< 0.70

1.1.2 主成分分析法

本文中应用主成分分析法, 选取 2005、2010、2015、2017 年 4 个时间截面, 借助统计产品与服务解决方案软件 SPSS22.0 对我国 30 个省、市 (区) 的能耗水平进行综合评价。主成分分析法通过抽取包含原数据大部分信息的综合变量, 避免了信息重叠, 并通过客观地确定指标权重, 避免了主观因素影响, 是常用的降维方法之一。具体计算步骤如下。

1) 对数据进行标准化处理, 以消除数量级和量纲差异影响

$$y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j}, \quad (7)$$

式中: y_{ij} 为第 i 个区域的第 j 个指标数据的标准化值; X_{ij} 为第 i 个区域的第 j 个指标数据的原始值; $\bar{X}_j$ 、 S_j 分别为第 j 个指标数据的均值及标准差。

2) 计算数据表 y_{ij} 的 $I \times J$ 型相关矩阵 R 。

3) 计算 R 的 j 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j$

($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j$) 及对应的特征向量 U , 特征值与特征向量标准正交, $U_1, U_2, \dots, U_j$ 为主轴, 且 $U_1 \geq U_2 \geq \dots \geq U_j$ 。

4) 计算主成分累计贡献率以及最终的成分得分。

5) 根据主成分得分矩阵以及方差贡献率, 计算最终分区指标综合得分。

1.1.3 地理探测器

地理探测器是基于统计学原理的空间方差分析, 通过分析层内方差与层间方差的异同来定量表达研究对象的空间分层异质性^[23], 探测地理要素空间分异规律, 探究地理空间分异内外影响因素的重要方法, 包括因子探测、交互探测、风险探测和生态探测, 被广泛应用于经济、社会、生态等领域^[24]。本文中采用地理探测器中的因子探测方法, 分析各个因子对能耗空间分异的作用强度, 即

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^n N_h \sigma_h^2, \quad (8)$$

式中: q 为影响因素的探测力指标, 取值为 $[0, 1]$, q 值越大, 表示因子对区域能耗水平空间差异的影响程度越大; h 为因变量或自变量分层的层数, 取值范围为 $[1, n]$; N_h 和 N 分别为第 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 为第 h 层和全区因变量的方差。

1.2 指标体系构建与数据来源

1.2.1 指标体系构建

由于经济发展水平、技术水平等方面存在的较大差距, 我国能耗特征呈现出明显的地域差异。为了综合评测各省、市 (区) 能耗水平, 本文中从能耗总量、能耗强度、能耗增速 3 个方面选取能耗份额、能耗增量份额、经济总体能耗强度等 6 项指标构建中国能耗区域差异的评价指标体系^[14-15], 如表 2 所示。

表 2 中国能耗区域差异的评价指标体系

指标名称	代码	指标含义
能耗份额	X_1	地区能源消费总量与同期全国能源消费总量之比
能耗增量份额	X_2	地区能源消费增量与同期全国能源消费增量之比
经济总体能耗强度	X_3	地区单位生产总值与该地区能源消费总量之比
相对能耗强度	X_4	地区能源消费总量占全国比例与同期地区生产总值占全国比例的比值
能源消费总量增速	X_5	目标年的地区能源消费量比前一年的增长幅度

人均能源消费增速

 X_6

目标年的地区人均能源消费量比前一年的增长幅度

1.2.2 数据来源

本文中所采用的数据均来自 2000—2018 年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及中国大陆 30 个省、市、区(除西藏自治区)的统计年鉴。为了避免价格变动影响,各省份历年 GDP 均根据 GDP 指数折算为 2000 年的不变价格数据,全国总体能耗强度数据均为统计年鉴不变价数据;另外,全国能耗总量数据为发电煤耗计算法所得。

2 结果与分析

2.1 中国能耗的发展演化

目前在单一预测法中,应用最广泛的预

测方法是灰色预测法,已有研究^[6]应用区间灰色预测对中国部分地区的能源消费进行预测分析,并在中短期预测中得到了较好的预测结果。为了进一步验证该方法的合理性和有效性,本文中基于 2010—2017 年基础数据,结合 GM(1,1)模型、线性回归模型,对中国能耗的发展趋势进行预测,并对这 2 种模型的预测精度进行检验,结果如表 3 所示。通过比较 2 种模型预测结果可知,GM(1,1)模型的预测精度明显优于线性回归模型,模型精度等级多为一级或二级,预测效果表现较好。因此,本文中选取 GM(1,1)模型预测我国能耗未来发展趋势具有一定合理性。

表 3 预测模型对比及预测精度检验

预测变量	预测方法	拟合模型	平均相对误差 (模型精度等级)	小误差概率 (模型精度等级)
能耗总量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 14\ 644\ 563.51e^{0.03t} - 14\ 283\ 915.65$	0.012 (二级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = 13\ 638.56t - 27\ 043\ 868.4$	0.363 (四级)	1.00 (一级)
煤炭消费量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 9\ 378\ 8617e^{0.002\ 9t} - 93\ 539\ 045.9$	0.016 (二级)	0.83 (二级)
	线性回归模型	$y = 4\ 280.4t - 8\ 342\ 486$	1.231 (四级)	0.33 (四级)
石油消费量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 137\ 1252e^{0.046t} - 1\ 308\ 499$	0.007 (一级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = 3\ 135.143t - 6\ 239\ 442.667$	0.156 (四级)	1.00 (一级)
天然气消费量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 187\ 830.7e^{0.09t} - 173\ 404.7$	0.028 (二级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = 2\ 196.686t - 4\ 400\ 286$	0.144 (四级)	1.00 (一级)
水电消费量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 219\ 687.9e^{0.102t} - 196\ 606.4$	0.056 (三级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = 2\ 575.802t - 5\ 155\ 730$	0.223 (四级)	1.00 (一级)
核电消费量	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 14\ 552.68e^{0.165t} - 12\ 028.15$	0.061 (三级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = 512.46t - 1\ 027\ 792$	0.204 (四级)	1.00 (一级)
能耗强度	灰色模型	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 13.19e^{-0.07t} + 14.07$	0.039 (二级)	1.00 (一级)
	线性回归模型	$y = -0.047t + 95.09$	2.437 (四级)	1.00 (一级)

注: t 为时序变量,取值范围为 $[1, n]$; $\hat{x}^{(1)}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的预测值; y 为线性回归模型预测值。

2.1.1 中国能耗总量的发展演化

图 1 所示为 2000—2020 年我国能耗总量的增长趋势。从图中可以看出,我国能耗总量一直处于持续增长状态,预计在 2020 年总量将达到 4.95×10^9 t 标准煤,明显低于“十三五”能耗总量控制目标;能耗增长率变化具有一定周期性,周期峰值呈递减趋势。这种周期性变化大致可被分为 3 个阶段:第一阶段为 2000—2008 年。随着我国经济的复苏,工业化进程加快,经济的粗放式发展及产业结构的不合理因素使得国内能耗迅速增长,能耗增长率在 2004 年达到峰值 16.80%;2006 年以后,国

家将节能降耗纳入宏观指标体系,随着经济发展方式的转变、产业结构的调整及节能减排措施的制定,能源消费增速总体趋缓;受 2008 年全球金融危机影响,我国能耗增速再次大幅下降,能耗增速跌至 2.94%。第二阶段为 2009—2015 年。在金融危机后,能耗增速有所回升,在 2011 年达到峰值,能耗增速为 7.32%,但仍低于过去 9 年的平均增速 9.69%;随着国家“十二五”规划节能降耗措施的进一步强化,我国能耗增速再度放缓,截至 2015 年,能耗增速已降至 0.96%。第三阶段为 2016—2020 年。受宏观经济持续复苏影响,我国能耗

增速又出现了明显的回升, 预计在 2018 年能耗增速会达到峰值 4.80%, 之后增速将有

所下降, 但我国能耗总量大, 净增能耗量仍然较大。

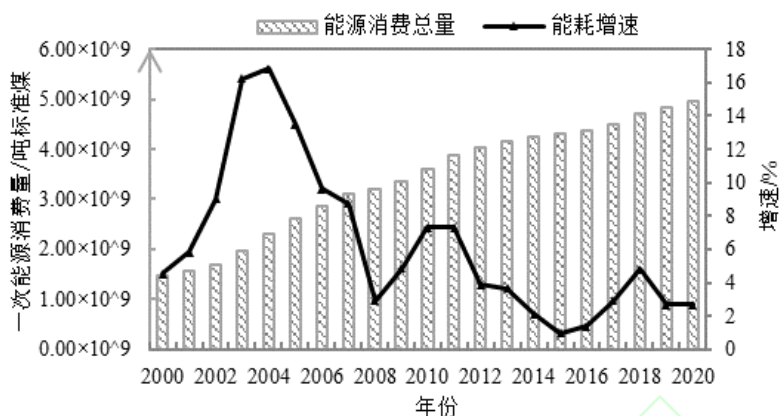


图 1 2000—2020 年中国能耗增长趋势

2.1.2 中国能耗结构的发展演化

近年来, 我国能耗结构持续优化, 2000—2020 年中国主要能源消费趋势如图 2 所示。从图中可以看出, 能源消费的多元化、清洁化趋势较明显: 煤炭消费所占比例持续下降, 已由 2000 年的 68.5% 降至 2017 年的 60.4%, 预计将在 2020 年降低至 56.9%; 天然气的消费需求日益增长, 消费量占能源消费总量的百分比已由 2000 年的 2.2% 上升至 2017 年的 6.6%, 预计将在 2020 年达到 8.3% 左右; 石油消费总量增长相对较缓, 所占比例较平稳; 水电、核电能耗量稳步提升, 根据预测结果, 两者消费占比在 2020 年约为 14.12%。就目前形势而言, 我国以煤炭为主的能耗结构短期内仍无法改变,

化石能源消费仍占优势地位, 水电、核电等清洁能源消费占能源消费总量的比例较低, 2017 年化石能源消费占能源消费总量比例高达 86.4%; 煤炭消费占能源消费总量的百分比虽有显著下降, 但消费总量仍在增长, 2017 年我国煤炭消费量已增长为 2000 年的 2.69 倍, 预计在 2020 年将达到 2.82×10^9 t 标准煤; 随着国内能源需求的增长及转变, 我国石油、天然气的对外依存度亦逐年提升, 2017 年石油对外依存度高达 67%, 天然气对外依存度已上升至 39%, 能源结构性矛盾较突出^[21-22]。若考虑长期能源安全及环境压力, 加速向非化石能源转型才是必由之路。

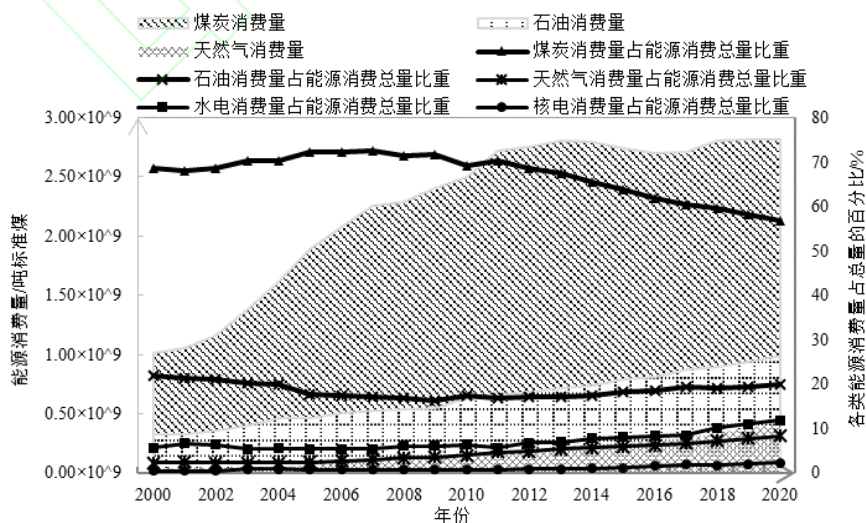


图 2 2000—2020 年中国主要能源消费趋势

2.1.3 中国能耗强度的发展演化

经济能源效率即能耗强度, 是指单位

经济产出所消耗的能源量,反映经济对能源的依赖程度,受经济发展水平、产业结构、人口等多重因素影响。图 3 所示为 2000—2020 年中国能耗强度发展趋势。从图中可以看出,我国能耗强度呈现先升后降的趋势,预计在 2020 年全国能耗强度将降至 0.47 t 标准煤/万元。从能耗强度的变化速率来看,在 2000—2004 年间,粗放型经济增长方式使得我国经济发展进入高度依赖资源和能源投入的阶段^[25],能耗强度出

现明显增长;2005—2015 年间,我国能耗强度变动大致以 5 年为周期呈现出“降速骤减—平稳波动—降速骤增”的梯度变化趋势;2016 年后,能耗强度降速趋于平稳。结合预测结果,2020 年我国能耗强度降速约为 6.69%,在“十三五”规划决胜期如何延续能耗降速的 5 年周期规律,进一步实现能源效率的大幅度提升,将是能源可持续发展不断探索的目标。

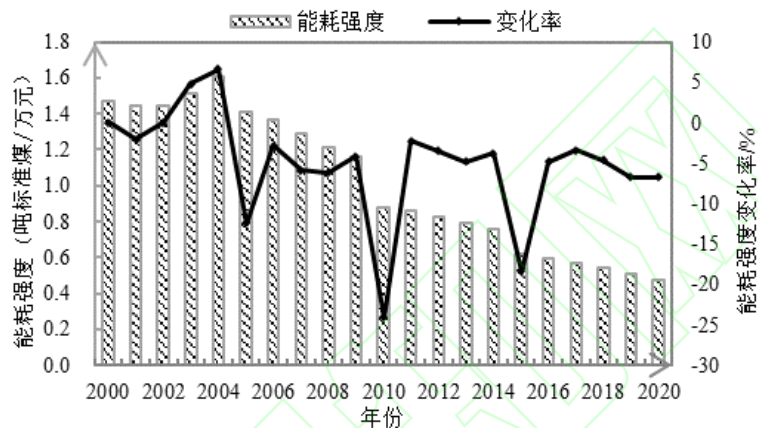


图 3 2000—2020 年中国能耗强度发展趋势

2.2 中国能耗的空间差异

采用 SPSS22.0 软件中的主成分分析法对 6 项区域能耗差异指标进行提取、浓缩,得到新的综合变量,并对综合变量进行分析。为了突出显示各因子解释力,本文中采用最大方差法对因子荷载矩阵进行正交旋转,正交旋转后输出的因子载荷矩阵如表 4 所示。由表可知,4 个年份的主成分提取结果较相似,指标能耗份额 X_1 与能耗增量份额 X_2 、经济总体能耗强度 X_3 与相对能

耗强度 X_4 、能源消费总量增速 X_5 与人均能源消费增速 X_6 分别在 3 个主成分上有较高荷载,因此,提取 3 个主成分可以基本反映全部指标信息。根据指标含义,可将 3 个因子分别命名为能耗规模因子、能耗强度因子、能耗增速因子。由因子得分系数矩阵,分别计算各地区 3 个因子的得分,最终以因子的方差贡献率为权重,得出各地区的能耗水平综合指数。

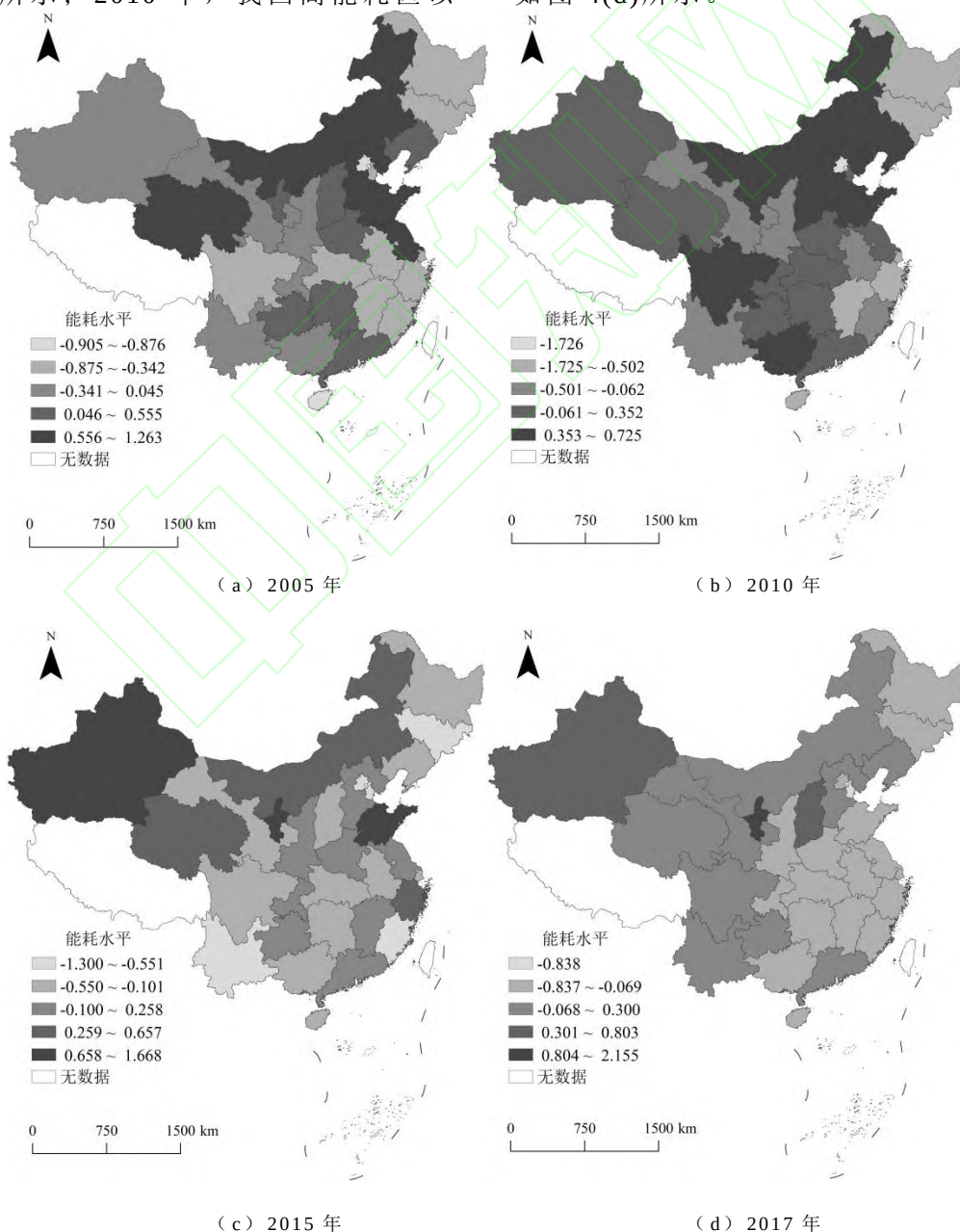
表 4 正交旋转后各指标的因子荷载矩阵

指 标	2005 年			2010 年			2015 年			2017 年		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
X_1	0.056	-0.099	0.987	0.976	-0.108	-0.177	-0.070	-0.107	0.975	-0.392	0.046	0.805
X_2	0.414	-0.107	0.894	0.988	-0.136	0.018	0.582	-0.077	0.797	0.235	-0.101	0.879
X_3	-0.027	0.990	-0.105	-0.150	0.975	-0.075	0.169	0.969	-0.124	0.456	0.871	-0.046
X_4	0.018	0.993	-0.082	-0.093	0.986	-0.036	0.057	0.989	-0.044	0.255	0.949	-0.034
X_5	0.962	-0.019	0.198	-0.063	-0.120	0.888	0.966	0.189	-0.115	0.903	0.383	0.011
X_6	0.967	0.016	0.151	-0.070	0.017	0.896	0.962	0.146	-0.117	0.895	0.384	-0.068

注: X_1 为指标能耗份额; X_2 为能耗增量份额; X_3 为经济总体能耗强度; X_4 为相对能耗强度; X_5 为能源消费总量增速; X_6 为人均能源消费增速。

选取 2005、2010、2015、2017 年我国能耗水平综合指数作为基础数据,借助 ArcGIS 软件进行空间可视化,中国综合能耗水平的区域差异如图 4 所示。从图中可以看出,我国各年份能耗水平呈现不同的分布特征,但区域均衡性发展趋势极为明显,呈现出高能耗区“环带聚集一大范围条带状聚集一区域能耗水平均衡分布”的发展趋势。其中,2005 年,我国高能耗区呈“环带状”分区集聚状态,形成了以辽宁、河北、山东为中心延展至内蒙古、山西、河南、江苏的环海高能耗地带,由贵州、湖南、广东 3 个省构成的小环状较高能耗地带,以青海高能耗区为核心、由新疆、甘肃、宁夏、陕西、重庆、云南 6 个省、市(区)构成的西部次高能耗地带,如图 4(a)所示;2010 年,我国高能耗区以

广西高能耗区为支点,以贵州、四川、青海、新疆 4 个省(区)为渐弱轴,以湖北、湖南、河南 3 个省及环海高能耗地带为渐强轴,总体形成“V”字形分布格局,且较 2005 年而言,以辽宁、河北、山东为内核的环带地区能耗水平进一步增强,如图 4(b)所示;2015 年,高能耗省市呈现“π”字形分布,新疆、青海、宁夏、内蒙古 4 个省(区)构成高能耗横轴带,陕西、重庆、贵州 3 个省与河北、山东、河南、江西、广东 5 个省构成 2 条次一级高能耗纵轴带,相较 2010 年而言,我国各省区能耗水平综合指数均有了明显下降,如图 4(c)所示;2017 年,我国各地区能耗水平以胡焕庸线为界,基本呈现出西北高、东南低、低能耗大片集聚、高能耗小点分散的分布态势,如图 4(d)所示。



中国地图从标准地图服务系统官网下载, 地图审批号为 GS (2019) 1711 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/browse.html?picId=4028b0625501ad13015501ad2bfc0259>) 经过 ArcGIS10.2 软件数据化处理后得到。

图 4 中国综合能耗水平的区域差异

2.3 中国能耗区域差异的影响因素分析

我国能耗水平存在显著的区域差异是多种因素综合作用的结果, 借鉴已有研究^[26-30], 遵循客观性和数据可获取性等原则, 选取经济发展水平、产业结构、人口规模、城市化水平、居民消费水平、科技创新水平、对外贸易水平 7 个方面作为影响我国

能耗区域差异的探测因子, 相关指标要素如表 5 所示。选取能耗总量和能耗强度 2 项指标表征地区能耗水平, 通过地理探测器分别测度 8 项指标要素对能耗总量、能耗强度的影响作用强度, 从而揭示各因素对我国能耗水平空间差异的作用机制。

表 5 能耗水平空间分异的影响因子地理探测结果

探测因子	指标要素	能耗总量		能耗强度	
		显著性水平	因子探测力	显著性水平	因子探测力
经济发展水平	人均国内生产总值	0.089	0.371	0.237	0.246
产业结构	第二产业占比	0.198	0.253	0.577	0.107
	第三产业占比	0.985	0.021	0.048*	0.326
人口规模	年末常住人口	0**	0.681	0.547	0.133
城市化水平	城镇化率	0.376	0.256	0.166	0.248
居民消费水平	居民消费水平	0.754	0.153	0.038*	0.372
科技创新水平	研发经费支出	0.026*	0.595	0.013*	0.468
对外贸易水平	地区货物进出口额	0.852	0.313	0.008**	0.438

注: **表示相关性在显著性水平 0.01 上显著; *表示相关性在显著性水平 0.05 上显著。

借助 ArcGIS 软件的自然断点法, 对各指标要素进行离散化处理, 并划分为 5 个等级, 并应用地理探测器软件 GeoDetector 测度各指标要素对中国能耗空间分异的影响强度, 结果如表 5 所示。从表中可以看出, 人口规模和科技创新水平对能耗总量的区域差异具有显著影响, 并且人口规模的影响作用大于科技创新水平的, 并通过了显著性水平 0.05 的检验; 第三产业占比、居民消费水平、科技创新能力、对外贸易水平均对能耗强度的影响作用显著, 也通过了显著性水平 0.05 的检验, 各因素影响由大到小的排序为科技创新水平、对外贸易水平、居民消费水平、产业结构。

结合已有研究对我国能耗水平影响因素的作用机制进行分析, 得到如下结论: 1) 科技创新水平对我国能耗总量及能耗强度空间差异的综合影响作用最为显著, 这与大多研究^[9-10]中的结果一致, 说明节能技术、工业制造技术的创新可通过推动新工艺、新产品的应用, 进一步提升能源利用效率。2) 人类衣、食、住、行各方面需求的满足都以能源消耗为基础, 因此, 人口规模的大小必然会对能耗总量产生影响, 并

直接影响能源利用方式及能源人均占有量^[31]。3) 出口贸易是以区域内部生产为基础的人类活动, 出口的增加必然导致区域内生产规模扩大, 加剧当地能源消耗^[32], 进而导致区域能耗水平的整体提升。4) 随着收入水平的提高, 居民生活需求的增长必然导致生产环节中能源投入的同步增长; 同时, 居民消费需求的变动会通过产业关联而对能源消耗产生不同影响^[33]。5) 各产业能源利用状况存在较大差异, 如工业部门的单位产出能耗较高, 而服务业及新兴产业等则能以少量的能源消耗获得较高的经济效益^[27], 因此, 省际产业结构的巨大差异也是造成我国能耗水平空间分异的重要原因。

上述结论说明, 在保证经济发展和提高人民生活水平的情况下, 要实现控制能耗总量、降低能耗强度的“双控”目标, 可以考虑从改善能源技术、调整人口政策、引导居民绿色消费、加快产业结构转型等方面着手。

3 结论

基于 2000—2017 年统计数据, 本文中

从能耗总量、能耗结构、能耗强度 3 个方面分析并预测中国能耗的发展演化, 采用主成分分析法, 对中国 30 个省、市(区)的综合能耗水平进行评价并探析区域空间分异特征, 借助地理探测器探究影响能耗区域空间差异的因素作用强度, 得到以下主要结论。

1) 近年来我国能耗增速趋缓, 能耗结构有所优化, 能耗强度持续降低, 整体呈现出良好的发展态势, 但仍存在较多问题: ①能耗总量基数大, 净增能耗量多, 且近年来能耗增速又有回升趋势, 仍需有效措施来严格控制能耗总量; ②能源消费结构不平衡, 煤炭消费占能源消费总量的比例居高不下, 石油消费占能源消费总量的比例较不充分, 天然气、水电、核能等清洁能源比例偏低, 且这种能耗结构近年来虽有优化但短期内仍难以改变, 我国急需构建清洁、高效的能耗结构; ③我国能耗强度持续降低, 但近几年来能耗强度降速趋缓, 为了实现“十三五”规划的降耗目标, 需要寻求新的针对性政策以有效降低能耗强度, 提高能源效率。

2) 我国能耗的区域差异显著, 2005—2017 年间, 省际能耗水平总体呈现出由小区域聚集到整体均衡的发展态势: 2005 年我国能耗水平综合指数在空间上呈现出高能耗区“环带状”集聚的分布状态; 2010 年则形成以广西高能耗区为支点, 以贵州、四川、青海、新疆 4 个省(区)为渐弱轴, 以湖北、湖南、河南 3 个省及环海高能耗地带为渐强轴的“V”字形分布格局; 2015 年, 高能耗省市呈现“π”字形分布; 到 2017 年, 我国各地区能耗水平以胡焕庸线为界基本呈现出西北高、东南低、低能耗大片集聚、高能耗小点分散的分布态势。

3) 人口规模和科技创新水平对能耗总量的区域差异具有显著影响效应, 并且人口规模的影响作用大于科技创新水平的; 产业结构、居民消费水平、科技创新能力、对外贸易水平均对能耗强度的影响作用显著, 各因素影响作用强度由高到低的排序为科技创新水平、对外贸易水平、居民消费水平、产业结构。

参考文献:

- [1] 张秀生, 王鹏. 经济发展新常态与产业结构优化[J]. 经济问题, 2015(4): 46-49, 82.
- [2] 英国石油公司(BP). BP 世界能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [3] 张晓平. 20 世纪 90 年代以来中国能源消费的时空格局及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(2): 38-41.
- [4] 杨占红, 吕连宏, 曹宝, 等. 国际能源消费特征比较分析及中国发展建议[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 94-102.
- [5] 李瑞忠, 陈铮, 苏宏田. 2018 年我国能源消费形势分析[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(7): 4-9.
- [6] 汪行, 范中启. 基于改进 GM(1,1)模型的能源消费预测研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 305-307.
- [7] 杨明, 杜萍静, 刘凤全, 等. 能源消费发展及预测方法综述[J/OL]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 56-62, 71.
- [8] 孙学英. 中国能源消费地区差异的特征分析[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(4): 52-55.
- [9] ANG B W, ZHANG F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J]. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176.
- [10] 王玉潜. 能源消耗强度变动的因素分析方法及其应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2003(8): 151-154.
- [11] 张惠茗. 区域能源消费差异及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [12] 喻翠玲, 梁彩懿. 能源效率地区差异、能源消费结构与中国碳排放[J]. 开发研究, 2015(6): 88-91.
- [13] 展秀萍. 中国能源消费强度的区域差异研究[J]. 智库时代, 2019(32): 25, 28.
- [14] 杨保河, 刘伟. 基于因子分析的河南能源消费强度区域差异研究[J]. 开发研究, 2015(4): 111-114.
- [15] 张晓平. 中国能源消费强度的区域差异及影响因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(6): 883-889.
- [16] 屈甜利. 基于主成分分析的中国化石能源供给研究[J]. 商, 2015(29): 274-275.
- [17] 唐志晶, 秦梦真, 王执政, 等. 基于主成分分析的能源结构研究[J]. 无线互联科技, 2018, 15(14): 106-108.

- [18] 罗斐, 罗婉婉. 中国能源消费结构优化的问题与对策[J]. 中国煤炭, 2010, 36(7): 21-25.
- [19] 马晓微. 中国能源消费结构演进特征[J]. 中国能源, 2008, 30(10): 23-27.
- [20] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. 地理学报, 2012, 67(12): 1634-1644.
- [21] 张雷. 中国能源安全问题探讨[J]. 中国软科学, 2001(4): 7-12.
- [22] 李齐. 中国能源安全现状与矛盾转变[J]. 国际石油经济, 2018, 26(4): 18-26.
- [23] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [24] 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.
- [25] 董志凯. 转型之路: 中国社会主义市场经济起步(1992—2001)[J]. 中国经济史研究, 2008(4): 11-19.
- [26] 贺灿飞, 王俊松. 经济转型与中国省区能源强度研究[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 461-469.
- [27] 杨洋, 王非, 李国平. 能源价格、产业结构、技术进步与我国能源强度的实证检验[J]. 统计与决策, 2008(11): 103-105.
- [28] RICHARD F G, MUN S H, DALE W. Why has the energy-output ratio fallen in China?[J]. The Energy Journal, 1999, 20(3): 63-91.
- [29] 张文玺. 中日韩 GDP、人口、产业结构对能源消费的影响研究[J]. 中国人口.资源与环境, 2013, 23(5): 125-134.
- [30] 黄飞雪, 靳玲. 城市化对中国能源消费的影响机制研究[J]. 产业经济评论, 2011, 10(1): 104-121.
- [31] 张雷, 蔡国田. 中国人口发展与能源供应保障探讨[J]. 中国软科学, 2005(11): 11-17.
- [32] 姜巍, 高卫东. 中国能源消费增长特征及影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2013, 22(3): 160-168.
- [33] 李洋. 居民消费对能源消耗的动态影响检验[J]. 商业经济研究, 2015(12): 52-54.

(责任编辑: 于海琴)