

# 区域低碳发展及空间依赖

## ——基于2005—2015年中国省级数据的分析

雷明, 马海超, 李浩民, 孙淑晓

北京大学光华管理学院, 北京 100871

**摘要** 低碳发展是可持续发展的重要方式, 发展低碳经济是中国既定战略目标。结合2005—2015年中国省级层面的实证数据, 运用TOPSIS模型对中国部分省份低碳发展进行评估、排序和分析。TOPSIS计算结果表明, 本次统计的中国30个省份的低碳发展指数总体上较为稳定, 一些省份的低碳指数表现出下降趋势。通过聚类分析可以将30个省份分为表现最好、中上游、中下游、表现最差4个梯队, 单因素方差分析结果表明, 不同梯队的低碳发展指数具有一定差异, 表现差的省份与表现好的省份之间差距显著。为了检验省级低碳发展指数是否存在空间依赖性, 计算了“莫兰指数  $I$ ”进行空间自相关检验, 检验结果表明省级低碳经济发展的空间依赖性并不显著。

**关键词** 低碳发展; TOPSIS; 聚类分析; 单因素方差分析; 空间依赖性检验

众多科学研究成果表明, 大气中二氧化碳等温室气体排放量增加是造成全球气候变暖的主要原因<sup>[1]</sup>, 碳减排日益引起国际社会的广泛关注。从《联合国气候变化框架公约》的签署, 到《京都议定书》的生效, 从《哥本哈根协议》的艰难谈判, 到《巴黎协定》的多方博弈, 关于发展权与排放权的讨论不断升级, 也催生了低碳经济的理念<sup>[2-3]</sup>。低碳经济是以低耗能、低排放、低污染为基础的经济模式, 是人类社会继原始文明、农业文明、工业文明之后的又一大进步。低碳经济实质是提高能源利用效率和创建清洁能源结构, 其核心是技术创新、制度创新和发展观的转变。发展低碳经济, 是一场生产模式、生活方式、价值观念和国家权益的全球性革命<sup>[4]</sup>。

自2008年超过美国成为全球最大的碳排放国以来, 中国的二氧化碳排放量持续居高不下。2016年, 中国二氧化碳排放量为91.23亿t, 占全球总排放量的27.3%, 是全球第二大碳排放国美国的1.7倍, 是欧盟国家总和的2.6倍; 2005—2015年间, 中国二氧化碳排放量年均增长率达4.2%<sup>[5]</sup>。二氧化碳排放量的过快增长使中国的低碳发展面临巨大挑战, 承担着越来越大的减排压力。2009年11月26日, 中国发布的《2009中国可持续发展战略报告》中提出了发展低碳经济的战略目标, 到2020年单位GDP的二氧化碳排放降低50%左右<sup>[6]</sup>。在2006年, 中国“十一五”规划中就已提出单位能耗降低20%、二氧化硫减少10%左右的目标, 并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。在

收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2017-12-17

基金项目: 国家发改委基金项目子项目(417-106-002)

作者简介: 雷明, 教授, 研究方向为决策分析、绿色管理及可持续发展, 电子邮箱: leiming@gsm.pku.edu.cn

引用格式: 雷明, 马海超, 李浩民, 等. 区域低碳发展及空间依赖——基于2005—2015年中国省级数据的分析[J]. 科技导报, 2018, 36(2): 20-37; doi:

10.3981/j.issn.1000-7857.2018.02.003

“十二五”和“十三五”规划中,对碳排放控制提出了更加刚性的要求,中国低碳战略进入冲刺期<sup>[7]</sup>。

作为发展中大国,中国能源环境方面的问题尤为突出。中国的单位GDP能耗是美国的4倍,按照这种以高能耗为代价的发展模式,能源短缺和环境恶化将是今后制约中国发展的最大瓶颈。实行节能减排,实现低碳发展,构建生态文明社会,已经成为不可逆转的趋势<sup>[8]</sup>。低碳经济的发展模式,为节能减排、发展循环经济、建立节约型社会提供了操作性诠释,完全符合十九大报告提出的“加快生态文明体制改革,建设美丽中国”的发展思路。

本研究对中国省级低碳经济发展进行评价,通过分析影响低碳发展的因素,有针对性地提出相关政策建议。

## 1 省级低碳经济发展的TOPSIS排序

### 1.1 评价方法

#### 1.1.1 TOPSIS

TOPSIS (technique for order preference similarity to ideal solution) 是一种逼近于理想解的排序方法,根据有限个评价对象与理想化目标之间的接近程度确定优劣顺序<sup>[9]</sup>。正理想解是一个虚拟的最优解,它的各个指标均为评判对象中的最优值;负理想解是虚拟的最劣解,它的各个指标都是评判对象中的最差值。距离正理想解越近同时距离负理想解越远的评价对象,在TOPSIS模型中的评价排序越高。TOPSIS模型主要有以下计算步骤。

1) 数据标准化。由于各项指标的计量单位不统一,在计算前需进行标准化处理,即把指标的绝对值转化为相对值,使得各项不同质指标同质化。

2) 构造规范化矩阵。

3) 构造加权规范化决策矩阵。

4) 计算到正理想解的距离和到负理想解的距离。

5) 构造贴近度指标,用来判断与理想解的接近程度,贴近度越大,表明越接近于理想解。

6) 计算出的贴近度即为TOPSIS指数,根据指数的高低对评价对象排序。

利用TOPSIS模型进行评价排序,需要结合指标权重。指标权重分为主观权重和客观权重两类,主观权重反映决策者基于个人的经验、感受和偏好所作出的主观评价;客观权重是根据客观实际数据计算出的权

重。常用的主观权重计算方法是层次分析法,常用的客观权重计算方法有熵值法、主成分分析法等<sup>[10]</sup>。本文分别采用层次分析法和熵值法计算主观权重和客观权重,进而取平均得出综合权重,利用综合权重进行TOPSIS评价排序。

#### 1.1.2 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)最早由美国运筹学家A. L. Saaty于20世纪70年代提出,是一种定性和定量相结合的多目标决策方法<sup>[11]</sup>。应用AHP方法,决策者通过将问题分解成若干层次和因素,得到多层次的分析结构,在各因素之间进行重要性相对比较,通过计算就可以得出权重,为决策提供依据<sup>[12]</sup>。AHP常用方法有和积法和方根法,和积法有以下几个主要步骤。

1) 构造层次结构模型。层次分析法将性质相同或相近的元素归为1类,形成互不相同的层次,构造出的结构模型分为3层:目标层、准则层和方案层。

2) 建立两两比较判断矩阵。判断矩阵表示针对上一层的某单元,本层次有关单元之间相对重要性的比较。为了使判断定量化,采用1~9标度方法给出数量标度。

3) 单层次排序计算。对判断矩阵的每一列进行归一化处理,将归一化后的判断矩阵按行相加,计算判断矩阵的特征向量和最大特征根,利用平均随机一致性指标和随机一致性比率对判断矩阵进行一致性检验。

4) 层次总排序的计算。利用单层次排序的计算结果,综合出对上一层的优劣顺序,即可以得出层次总排序。

#### 1.1.3 熵值法

在信息论中,熵是对不确定性的一种度量。信息量越大,不确定性就越小,熵也就越小;信息量越小,不确定性越大,熵也越大<sup>[13]</sup>。根据熵的特性,可以通过计算熵值判断一个事件的随机性及无序程度,也可以用熵值判断某个指标的离散程度,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大<sup>[14]</sup>。熵值法主要有以下计算步骤。

1) 数据标准化,方法与前文相同。

2) 计算第j项指标下、第i个评价单元占该指标的比重

$$p_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$$

式中,  $X_{ij}$  表示第  $i$  个评价单元的第  $j$  项指标的属性值,  $p_{ij}$  表示第  $j$  项指标下第  $i$  个评价单元所占的比重。

3) 计算第  $j$  项指标的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij})$$

式中,  $k$  为大于 0 的常数,  $k = 1/\ln(n)$ ;  $e_j \geq 0$  为  $j$  指标的熵值。

4) 计算第  $j$  项指标的差异系数。对第  $j$  项指标, 指标值的差异越大, 对方案评价的影响就越大, 熵值就越小。定义差异系数

$$g_j = \frac{1 - e_j}{m - E_e}$$

式中,  $E_e = \sum_{j=1}^m e_j$ ,  $0 \leq g_j \leq 1$ ,  $\sum_{j=1}^m g_j = 1$ 。

5) 求权重

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j}, \quad 1 \leq j \leq m$$

## 1.2 评价指标与数据来源

为了度量实现低碳发展过程所处的发展阶段、存在的差距及可采取的政策手段, 必须建立多维度综合性评价指标体系<sup>[15]</sup>。低碳发展是涉及经济、资源、环境、社会的综合性发展模式<sup>[16]</sup>, 因此低碳发展的总体目标必然包括相应的子目标, 低碳发展评价体系中也应该涵盖经济指标、资源指标、环境指标和社会指标<sup>[17]</sup>。参照联合国可持续发展委员会(UNCS D)第 3 次修订的可持续发展指标体系, 构建指标体系需考虑以下原则: 指标简洁, 具有代表性; 指标可得性, 各经济体之间具有可比性; 指标选择与政策目标相联系; 社会经济指标与环境指标的相容性<sup>[18-19]</sup>。综合考虑各个方面, 本文确定的低碳发展评价体系中 共有 4 个一级指标和 16 个二级指标(表 1)。

碳生产率是单位碳当量排放所产出的 GDP, 是单位 GDP 碳排放的倒数, 一般用以衡量一个经济体的效率水平, 值越高表明碳效率越高<sup>[20]</sup>, 因此是一个正向指

表 1 低碳发展评价指标

Table 1 Evaluation indexes for low carbon development

一级指标	二级指标	指标计算方法
经济	碳生产率 <sup>+</sup>	GDP(亿元)/碳排放量(万吨)
	经济增速 <sup>+</sup>	GDP 增速(%)
	产业结构 <sup>+</sup>	第三产业增加值贡献率(%)
	贸易结构 <sup>+</sup>	工业品净出口占出口总额比重(%)
资源	能源消耗强度 <sup>-</sup>	单位 GDP 能耗(等价值)(万吨标准煤/亿元)
	能源结构 <sup>+</sup>	零碳能源消费量(万吨标准煤)/能源消费量(万吨标准煤)
	能源转换效率 <sup>+</sup>	能源生产量(万吨标准煤)/能源消费量(万吨标准煤)
环境	三废排放强度 <sup>-</sup>	废水排放量(万吨)/GDP(亿元)
	三废治理达标率 <sup>+</sup>	生活垃圾无害化处理率(%)
	三废利用 <sup>+</sup>	三废综合利用产品产值(万元)
	环保投资 <sup>+</sup>	工业污染治理完成投资(万元)
	碳排放 <sup>-</sup>	碳排放量(万吨)
	碳汇密度 <sup>+</sup>	森林覆盖率(%)
社会	人均 GDP <sup>+</sup>	GDP(亿元)/总人口(万人)
	就业率 <sup>+</sup>	城镇人口登记就业率(%)
	城镇化率 <sup>+</sup>	城镇人口(万人)/总人口(万人)

注: + 表示正向指标, - 表示负向指标; 三废指废气、废水、废渣。

标。经济增速反映经济发展的速度,用各省当年的GDP增长率表示。产业结构用第三产业贡献率衡量,即第三产业增加值在三次产业增加值总和中的比重,用于反映经济结构的优化程度,因为通常认为第三产业在三次产业中的碳密度最低<sup>[21]</sup>。贸易结构用工业品净出口额占出口总额比重衡量,反映贸易结构的优化程度<sup>[22]</sup>。能源消耗强度用单位GDP的能源消费量衡量,数值越高说明能源利用效率越低,因此是一个负向指标。能源结构用零碳能源消费量在能源消费总量中的比重衡量,反映能源结构的优化程度<sup>[23]</sup>。其中,水能、风能、太阳能、生物质能等可再生能源和核能属于零碳排放的能源,由于零碳能源消费量不易计算,采用能源消费总量减去含碳能源消费量得出,而计算含碳能源消费量时考虑了原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、焦炭7种化石能源。能源转换效率是能源系统流程中的重要环节,是衡量能源加工转换装置和生产工艺先进程度的重要指标<sup>[24]</sup>。提高能源转换效率意味着以较少的一次能源投入得到较高的二次能源产出,这是节能减排和低碳经济的重要方面<sup>[25]</sup>。能源转换效率用能源生产量与能源消费量的比值表示,能源生产量的计算包括上述7种化石能源,各种能源折算标煤系数参照《2006年IPCC国家温室气体清单指南》给出的参考值<sup>[26]</sup>。碳汇是吸收二氧化碳从而减少碳排放的物质基础,森林资源是最重要的碳汇,因此用森林覆盖率衡量碳汇密度。有研究表明,减缓气候变化和节能减排的成效与环境保护之间具有协同效应<sup>[27-28]</sup>,因此环境质量改善也是衡量低碳经济发展水平的重要指标。三废排放强度用单位GDP的废水排放量表示,反映了单位经济产值的废弃物产生量。三废治理达标率用生活垃圾无害化处理率表示,反映了废弃物的治理水平。三废利用用三废综合利用产品产值表示,反映了废弃物再利用水平。环保投资用工业污染治理完成投资表示,反映了对工业污染治理的重视程度<sup>[29]</sup>。碳排放用碳排放量表示,反映在碳减排上取得的成效。人均GDP用GDP与总人口的比值表示,表示人均占有的社会财富。就业率用城镇人口登记就业率表示,城镇化率用城镇人口与总人口的比值表示。

以上指标的实证数据均来自官方统计资料,其中地区生产总值(GDP)、三次产业增加值、经营单位所在地出口总额、规模以上工业企业出口交货值、单位地区

生产总值能耗、废水排放总量、生活垃圾无害化处理率、工业污染治理完成投资、森林覆盖率、人均GDP、城镇登记失业率、年末常住人口、城镇人口来自国家统计局网站<sup>[30]</sup>,三废综合利用产品产值来自历年《中国环境统计年鉴》,能源消费量、焦炭生产量、原油产量、汽油产量、煤油产量、柴油产量、燃料油产量、天然气产量来自历年《中国能源统计年鉴》,各种化石能源的折算标准煤系数和碳排放系数来自《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的参考值。

### 1.3 权重计算

评价指标的权重是对各个评价指标在整个评价指标体系中相对重要性的数量表示,科学合理地确定指标权重是整个方法的核心环节。确定权重的方法很多,如专家咨询法、层次分析法、秩和比法、相关系数法、主成分分析法和因子分析法等,各种方法均有优缺点<sup>[31]</sup>。本文使用将主观性与客观性结合的组合方法确定指标权重,先用层次分析法和熵值法分别确定主观权重和客观权重,对二者取加权平均后利用综合权重计算TOPSIS指数,以兼顾主观性和客观性<sup>[32]</sup>。

层次分析法在一定程度上反映了决策者的主观偏好,而熵值法完全依赖于客观数据,通过加权平均将两者结合使得权重更有代表性<sup>[33]</sup>。对权重加权平均的方法为

$$\omega_i = \lambda \omega_{ic} + (1 - \lambda) \omega_{is}$$

式中, $\omega_i$ 为第*i*项指标的综合权重, $\omega_{ic}$ 为层次分析法确定的第*i*项指标的权重, $\omega_{is}$ 为熵值法确定的第*i*项指标的权重, $\lambda$ 为主观偏好系数,( $1-\lambda$ )为客观偏好系数,取值范围为[0,1],具体值根据决策者偏好给出。在本文中同等对待主观性和客观性, $\lambda$ 取0.5。

运用层次分析法计算主观权重时,采用专家打分,为4项一级指标和16项二级指标打分。通过在网上发布问卷的方式,共邀请到52位专家进行打分,其中包括3位环境科学相关专业的教授、学者、研究人员,41位环境科学相关专业的在校本科生、研究生,4位环境保护相关政府机构、企事业单位的工作人员。将52位专家的打分平均值作为每项指标的得分,构造两两比较矩阵,利用层次分析法中的和积法计算每项指标的主观权重,计算结果如表2所示。对计算结果进行一致性检验,全部通过一致性检验。

根据收集整理的客观统计数据,运用熵值法计算

客观权重,由于客观数据随年际变动,因此历年计算得出的客观权重会变化,与主观权重平均得出的综合权重也随年际变化(表3、表4)。

表2 低碳发展指标主观权重

Table 2 Subjective weights of low carbon development indexes

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重	对目标层权重
低碳发展	经济指标	0.237759919	碳生产率	0.230907225	0.054900483
			经济增速	0.264842472	0.062968925
			产业结构	0.236844839	0.056312210
			贸易结构	0.267405464	0.063578301
	能源指标	0.231749134	能耗强度	0.325066430	0.075333864
			能源结构	0.337466785	0.078207635
			转换效率	0.337466785	0.078207635
	环境指标	0.233718674	三废排放强度	0.160214980	0.037445233
			三废治理达标率	0.166185725	0.038840707
			三废利用	0.172063677	0.040214494
			环保投资	0.170419756	0.039830279
			碳减排	0.160696106	0.037557681
			碳汇密度	0.170419756	0.039830279
	社会指标	0.296772273	人均GDP	0.306605019	0.090991868
			就业率	0.329089387	0.097664605
			城镇化率	0.364305594	0.108115799

表3 低碳发展指标客观权重

Table 3 Objective weights of low carbon development indexes

指标	客观权重										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
碳生产率	0.0615	0.0642	0.0618	0.0693	0.0755	0.0726	0.0664	0.0638	0.0662	0.0691	0.0755
经济增速	0.0716	0.0513	0.0310	0.0485	0.0276	0.0355	0.0230	0.0347	0.0536	0.0290	0.0231
产业结构	0.0498	0.0531	0.0548	0.0541	0.0536	0.0609	0.0786	0.0982	0.0813	0.0996	0.1212
贸易结构	0.0609	0.0554	0.0535	0.0634	0.0785	0.0705	0.0783	0.0925	0.0998	0.0639	0.0639
能耗强度	0.0198	0.0195	0.0187	0.0207	0.0199	0.0190	0.0250	0.0252	0.0187	0.0236	0.0243
能源结构	0.0154	0.0204	0.0155	0.0206	0.0214	0.0260	0.0319	0.0268	0.0228	0.0293	0.0313
转换效率	0.1404	0.1442	0.1374	0.1340	0.1306	0.1308	0.1185	0.1128	0.1099	0.1024	0.1056
三废排放强度	0.0175	0.0153	0.0130	0.0126	0.0157	0.0137	0.0424	0.0270	0.0248	0.0488	0.0498
三废治理达标率	0.0441	0.0548	0.0404	0.0345	0.0383	0.0319	0.0308	0.0420	0.0309	0.0234	0.0157
三废利用	0.1081	0.1285	0.1345	0.1454	0.1364	0.1368	0.1328	0.1334	0.1433	0.1335	0.1377
环保投资	0.1084	0.0965	0.0824	0.0904	0.0712	0.0829	0.0846	0.0533	0.0378	0.1053	0.0801
碳减排	0.0256	0.0252	0.0219	0.0221	0.0236	0.0216	0.0248	0.0297	0.0315	0.0185	0.0173
碳汇密度	0.0782	0.0768	0.0733	0.0793	0.0631	0.0615	0.0591	0.0580	0.0606	0.0565	0.0582
人均GDP	0.1008	0.0952	0.0893	0.0922	0.0951	0.0833	0.0755	0.0737	0.0747	0.0918	0.0848
就业率	0.0224	0.0305	0.1109	0.0505	0.0879	0.0767	0.0596	0.0643	0.0795	0.0379	0.0396
城镇化率	0.0754	0.0690	0.0616	0.0625	0.0615	0.0764	0.0689	0.0647	0.0644	0.0674	0.0717

表4 低碳发展指标综合权重  
Table 4 Hybrid weights of low carbon development indexes

指标	客观权重										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
碳生产率	0.0582	0.0595	0.0584	0.0621	0.0652	0.0638	0.0606	0.0594	0.0606	0.0620	0.0652
经济增速	0.0673	0.0571	0.0470	0.0558	0.0453	0.0492	0.0430	0.0488	0.0583	0.0460	0.0430
产业结构	0.0531	0.0547	0.0556	0.0552	0.0550	0.0586	0.0675	0.0772	0.0688	0.0779	0.0887
贸易结构	0.0622	0.0595	0.0585	0.0635	0.0711	0.0670	0.0709	0.0780	0.0817	0.0637	0.0637
能耗强度	0.0476	0.0474	0.0470	0.0480	0.0476	0.0472	0.0502	0.0503	0.0470	0.0495	0.0498
能源结构	0.0468	0.0493	0.0469	0.0494	0.0498	0.0521	0.0551	0.0525	0.0505	0.0537	0.0548
转换效率	0.1093	0.1112	0.1078	0.1061	0.1044	0.1045	0.0984	0.0955	0.0941	0.0903	0.0919
三废排放强度	0.0275	0.0264	0.0252	0.0250	0.0266	0.0256	0.0399	0.0322	0.0311	0.0431	0.0436
三废治理达标率	0.0414	0.0468	0.0396	0.0367	0.0386	0.0354	0.0348	0.0404	0.0349	0.0311	0.0273
三废利用	0.0741	0.0843	0.0874	0.0928	0.0883	0.0885	0.0865	0.0868	0.0918	0.0869	0.0890
环保投资	0.0741	0.0682	0.0611	0.0651	0.0555	0.0613	0.0622	0.0465	0.0388	0.0726	0.0600
碳减排	0.0316	0.0314	0.0297	0.0298	0.0306	0.0296	0.0312	0.0336	0.0345	0.0281	0.0275
碳汇密度	0.0590	0.0583	0.0565	0.0596	0.0514	0.0507	0.0495	0.0489	0.0502	0.0481	0.0490
人均GDP	0.0959	0.0931	0.0901	0.0916	0.0931	0.0871	0.0832	0.0823	0.0829	0.0914	0.0879
就业率	0.0600	0.0641	0.1043	0.0741	0.0928	0.0872	0.0786	0.0810	0.0886	0.0678	0.0687
城镇化率	0.0918	0.0886	0.0849	0.0853	0.0848	0.0922	0.0885	0.0864	0.0863	0.0878	0.0899

#### 1.4 TOPSIS评价、排序与分析

利用TOPSIS模型,根据综合权重计算各省历年的贴近度,将贴近度作为各省历年的低碳发展指数并进

行高低排序,中国部分省市、地区2005—2015年低碳发展指数和排序结果分别见表5、表6(由于未获取相关数据,本结果中未包括香港、台湾、澳门和西藏自治区)。

表5 中国部分省市、地区低碳发展指数(2005—2015)  
Table 5 Low carbon development indicators of some of China's partial provincial regions (2005-2015)

地区/方差	低碳发展指数										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
北京	0.4371	0.4200	0.4034	0.3839	0.4018	0.3882	0.3838	0.3828	0.3808	0.3806	0.3926
天津	0.5108	0.4872	0.4384	0.4240	0.4531	0.4731	0.4474	0.4147	0.3926	0.3772	0.3917
河北	0.3102	0.2887	0.2889	0.3310	0.2905	0.2926	0.2929	0.2922	0.3034	0.3179	0.2923
山西	0.3181	0.3350	0.3315	0.3296	0.2956	0.2965	0.2740	0.2454	0.2468	0.2382	0.2453
内蒙古	0.2202	0.2183	0.2230	0.2372	0.2504	0.2359	0.2610	0.2573	0.2634	0.2551	0.2160
辽宁	0.4319	0.4388	0.3601	0.3348	0.3496	0.3265	0.3096	0.3036	0.3123	0.2883	0.2757
吉林	0.2745	0.2757	0.2650	0.2556	0.2701	0.2553	0.2460	0.2511	0.2740	0.2561	0.2664
黑龙江	0.4309	0.4074	0.3726	0.3655	0.3555	0.3457	0.3358	0.3268	0.3265	0.2948	0.3085
上海	0.4382	0.4100	0.3988	0.3666	0.3810	0.3659	0.3444	0.3340	0.3331	0.3282	0.3495
江苏	0.4645	0.4664	0.4922	0.4744	0.4842	0.4770	0.5029	0.5115	0.5180	0.5170	0.5476
浙江	0.4321	0.5092	0.5267	0.4919	0.5255	0.5313	0.4945	0.4707	0.4499	0.4784	0.4914
安徽	0.2439	0.2434	0.2551	0.2609	0.2862	0.2787	0.2969	0.3253	0.3514	0.2563	0.2655
福建	0.3978	0.3450	0.3262	0.3248	0.3597	0.3499	0.3323	0.3198	0.3152	0.3212	0.3272
江西	0.3196	0.3268	0.3189	0.3230	0.3676	0.3438	0.3182	0.3256	0.3353	0.3078	0.3182
山东	0.5266	0.4932	0.4865	0.5189	0.5092	0.5071	0.5102	0.4635	0.4357	0.4702	0.4361
河南	0.3650	0.3295	0.2930	0.2858	0.2952	0.2886	0.3061	0.3202	0.3366	0.3128	0.3082
湖北	0.3270	0.3054	0.2908	0.2807	0.3457	0.3547	0.3034	0.2912	0.2983	0.3068	0.3132
湖南	0.2969	0.2987	0.2870	0.2943	0.3177	0.3306	0.3375	0.3635	0.3914	0.3300	0.3506
广东	0.4640	0.4256	0.4133	0.4064	0.3947	0.4151	0.3662	0.3397	0.3345	0.3406	0.3526

表5 中国部分省市、地区低碳发展指数(2005—2015)(续)

Table 5 Low carbon development indicators of some of China's partial provincial regions (2005—2015) (Continued)

地区/方差	低碳发展指数										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
广西	0.2808	0.2765	0.2788	0.2728	0.2764	0.2807	0.2874	0.3126	0.3539	0.2883	0.3068
海南	0.2959	0.3240	0.4117	0.3862	0.4111	0.3797	0.3656	0.3557	0.3498	0.2825	0.2868
重庆	0.2562	0.2508	0.2450	0.2344	0.2615	0.2513	0.2484	0.2653	0.2935	0.2998	0.3107
四川	0.3358	0.3156	0.2826	0.2646	0.2772	0.2593	0.2867	0.3149	0.3440	0.3035	0.3036
贵州	0.1928	0.1944	0.1754	0.1772	0.1965	0.1845	0.1837	0.2028	0.2332	0.2119	0.2286
云南	0.2748	0.2477	0.2512	0.2480	0.2493	0.2461	0.2425	0.2552	0.2801	0.2692	0.2903
陕西	0.4208	0.4226	0.4220	0.3971	0.4515	0.4789	0.4711	0.4532	0.4486	0.4345	0.4451
甘肃	0.2358	0.2441	0.2248	0.2096	0.2289	0.2213	0.2165	0.2327	0.2627	0.2272	0.2297
青海	0.2731	0.2681	0.2435	0.2444	0.2396	0.2507	0.2553	0.2726	0.2922	0.2757	0.2860
宁夏	0.1738	0.1758	0.1613	0.1761	0.1878	0.1794	0.1678	0.1766	0.2192	0.1433	0.1546
新疆	0.4225	0.4303	0.4195	0.4158	0.4137	0.4098	0.3753	0.3351	0.3049	0.2607	0.2575
方差	0.0090	0.0085	0.0087	0.0078	0.0080	0.0087	0.0078	0.0061	0.0045	0.0063	0.0067

表6 中国部分省市、地区低碳发展排名(2005—2015)

Table 6 Low development rank of some of China's provincial regions (2005—2015)

地区	排名										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
北京	6	9	9	9	8	8	6	6	7	5	5
天津	2	3	4	4	4	5	5	5	5	6	6
河北	18	20	18	13	19	18	19	20	20	11	18
山西	17	13	13	14	17	17	22	27	28	27	26
内蒙古	28	28	28	26	25	27	23	24	26	26	29
辽宁	8	5	12	12	14	16	15	19	18	19	22
吉林	23	22	22	23	23	23	26	26	25	25	23
黑龙江	9	11	11	11	13	13	12	12	16	17	14
上海	5	10	10	10	10	10	10	11	15	9	9
江苏	3	4	2	3	3	4	2	1	1	1	1
浙江	7	1	1	2	1	1	3	2	2	2	2
安徽	26	27	23	22	20	21	18	14	9	24	24
福建	12	12	14	15	12	12	13	16	17	10	10
江西	16	15	15	16	11	14	14	13	13	13	11
山东	1	2	3	1	2	2	1	3	4	3	4
河南	13	14	16	18	18	19	16	15	12	12	15
湖北	15	18	17	19	15	11	17	21	21	14	12
湖南	19	19	19	17	16	15	11	7	6	8	8
广东	4	7	7	6	9	6	8	9	14	7	7
广西	21	21	21	20	22	20	20	18	8	18	16
海南	20	16	8	8	7	9	9	8	10	20	20
重庆	25	24	25	27	24	24	25	23	22	16	13
四川	14	17	20	21	21	22	21	17	11	15	17
贵州	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	28
云南	22	25	24	24	26	26	27	25	24	22	19
陕西	11	8	5	7	5	3	4	4	3	4	3
甘肃	27	26	27	28	28	28	28	28	27	28	27
青海	24	23	26	25	27	25	24	22	23	21	21
宁夏	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
新疆	10	6	6	5	6	7	7	10	19	23	25

由于各省经济、社会、资源、环境等方面实际情况不同,不同地区的低碳发展指数也表现出较大差异,表现最好的省份低碳发展指数超过0.5,而表现最差的省份低碳发展指数不到0.2。同时从每年低碳发展指数的方差中可以看出,历年的方差在减小,说明中国各省份低碳发展水平的差异程度在逐年缩小,不同地区之间的低碳发展水平有收敛趋势。根据以上TOPSIS计算结果,画出各省份历年的TOPSIS指数折线图(图1)。由图1可见,中国各省份的低碳发展指数为0.1~0.6,大多

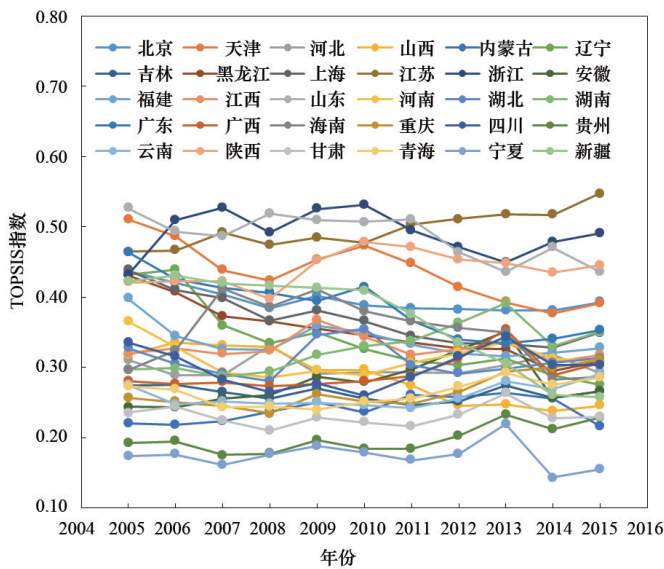


图1 中国部分省份历年TOPSIS指数(2005—2015)

Fig. 1 Provincial TOPSIS indicators in years 2005—2015

数省份的低碳发展指数总体上较平稳,一些省份呈现出下降趋势(由于没有获取相关数据,本结果未包括香港、台湾、澳门和西藏自治区)。

### 1.4.1 梯队聚类分组

为了总结和对比中国30个省份的低碳发展绩效,根据各省份历年低碳发展指数,采用聚类分析的统计方法将各省份分为几个梯队。运用SPSS 20软件,对各省历年低碳指数进行Z得分标准化,采用质心聚类法,以平方Euclidean距离进行层次聚类。如果聚类分组数太多,则出现很多省份单独成组的情况,这样聚类分析就失去意义。从图1可见,总体上将30个省份分为3~5类比较合理,初步分类结果如表7所示。

由表7可见,将30个省份分为3~5组比较合理。为了更清晰地反映聚类过程和结果,给出层次聚类的系统树状图(图2)。

由图2可以直观地看出,从组间距离为5处进行分割,将30个省份分为4组最合适,依次命名为表现最好组、中上游组、中下游组和表现最差组。各梯队所包含的省份如表8所示。

低碳发展表现最好的省份有浙江、山东、江苏、天津、陕西,这5个省市大多位于东部沿海地区(除陕西外),经济和社会发展水平较为发达。这5个省市的各项指标均处于全国前列,尤其是GDP增长率、城镇化率和就业率。江苏、山东和浙江的GDP总量长期占据全

表7 中国部分省份低碳发展聚类结果(3~5群集)

Table 7 Clustering of China's provincial low carbon development (3~5 clusters)

地区	5 群集	4 群集	3 群集	地区	5 群集	4 群集	3 群集
北京	1	1	1	河南	3	3	1
天津	2	2	2	湖北	3	3	1
河北	3	3	1	湖南	3	3	1
山西	3	3	1	广东	1	1	1
内蒙古	4	3	1	广西	3	3	1
辽宁	1	1	1	海南	1	1	1
吉林	4	3	1	重庆	4	3	1
黑龙江	1	1	1	四川	3	3	1
上海	1	1	1	贵州	5	4	3
江苏	2	2	2	云南	4	3	1
浙江	2	2	2	陕西	2	2	2
安徽	3	3	1	甘肃	4	3	1
福建	3	3	1	青海	4	3	1
江西	3	3	1	宁夏	5	4	3
山东	2	2	2	新疆	1	1	1

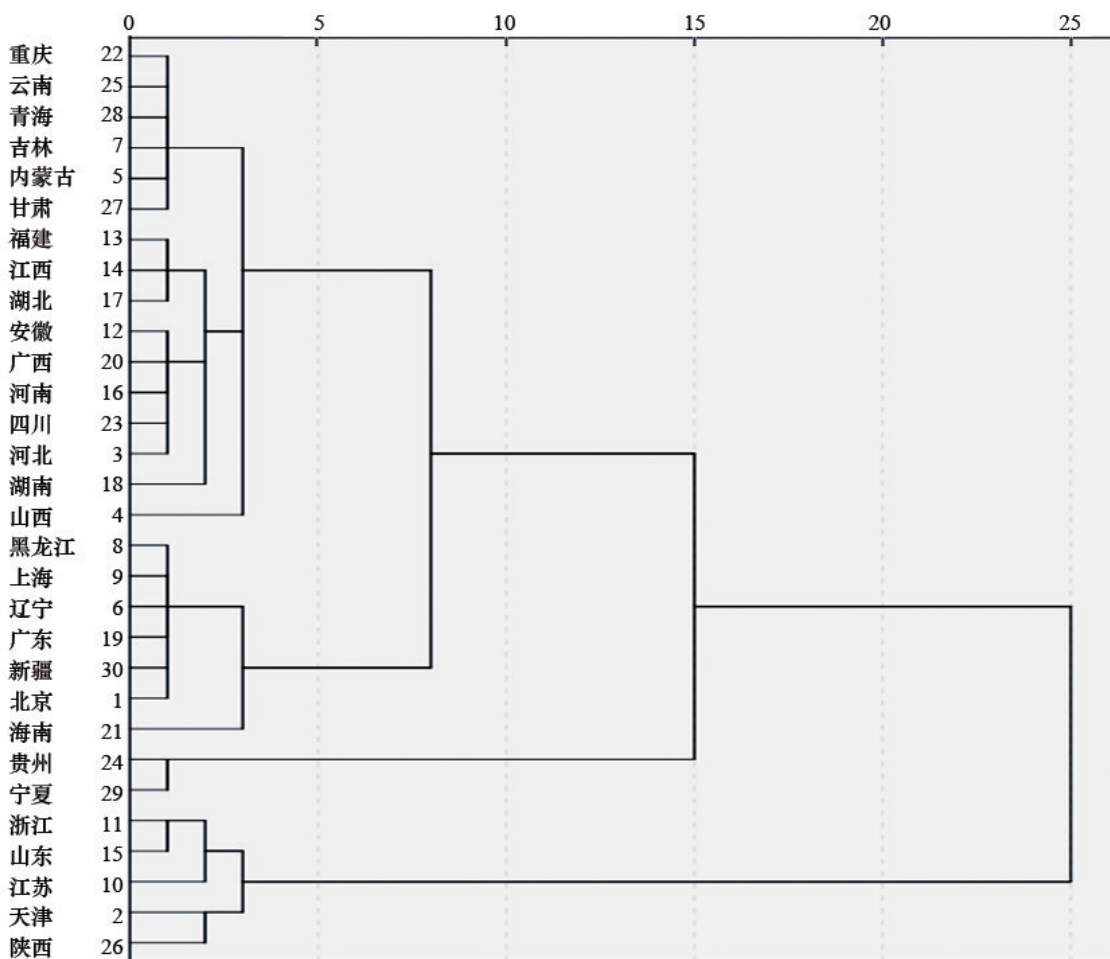


图2 中国部分省份低碳发展聚类分析系统树状图

Fig. 2 Clustering dendrogram of China's provincial low carbon development

表8 中国部分省份低碳发展梯队分组  
Table 8 Grouping of China's partial provincial low carbon development

梯队分组	省份
表现最好	浙江, 山东, 江苏, 天津, 陕西
中上游	黑龙江, 上海, 辽宁, 广东, 新疆, 北京, 海南
中下游	重庆, 云南, 青海, 吉林, 内蒙古, 甘肃, 福建, 江西, 湖北, 安徽, 广西, 河南, 四川, 河北, 湖南, 山西
表现最差	贵州, 宁夏

国第2~4位,经济实力处于前列。天津作为直辖市,虽然经济总量不高,但是人均占有社会财富名列前茅,2015年人均GDP达到10.796万元,名列全国第一。这4个地区的优势指标在低碳经济发展的指标评价体系中均拥有较高权重,因此能够获得最高评价指数。陕西作为西北内陆省份,与东部沿海省份的情况有所不同。陕西之所以能够跻身于低碳发展第1梯队,主要得

益于能源转换效率上的巨大优势,在该项指标上陕西几乎每年排名全国第一,而能源转换效率在低碳评价指标中拥有最高的权重。陕北地区近年来开发的长庆油田、延长油田成为中国新的重要的原油生产供应基地,如果陕西能够保持在能源转换效率上的优势,将对中国总体的低碳发展产生巨大推进作用。

低碳发展指数处于中上游的省份有黑龙江、上海、辽宁、广东、新疆、北京、海南,这些省份的资源、环境、经济、社会情况不尽相同,分别有各自的优势指标和劣势指标。(1) 北京在碳生产率、产业结构、能耗强度和能源结构这几项指标上优势非常明显,说明北京作为首都在产业结构和能源结构的优化方面走在全国前列。但是北京的GDP增长率并不高,落后于全国大多数省份,而且贸易结构、三废综合利用产品产值、工业污染治理投资是北京的劣势指标,如能在这些方面加以改进,北京的低碳经济发展将能获得更高的评分。(2) 上

海作为中国第一大城市,在城镇化率、产业结构、能源结构等方面表现较好,但是三废治理达标率较低,同时碳排放量也高居全国前列。因此上海的低碳经济发展绩效并非领先,只处于全国中上游位置。(3) 广东省最早实行改革开放,是全国经济实力最强的省份,GDP总量长期位居全国第一。在低碳经济的指标评价体系中,广东省在碳生产率、贸易结构、碳汇密度、城镇化率等指标上也领先于其他省份,但在能源转换效率、三废治理达标率等方面的表现却差强人意。对于广东这样的经济发展“优等生”,在维持经济体量上传统优势的同时,还需要在改进能源生产和利用工艺、提高三废治理达标率两方面加以重视。(4) 新疆作为地处西北内陆的欠发达省份,能够在全国低碳经济评价中处于中上游,主要得益于远高于其他省份的能源转换效率。从上文计算 TOPSIS 指数的综合权重中可以看出,能源转换效率是权重最高的指标,在评价体系中最为重要。在该项指标上,新疆连年占据全国前两名的位置,并且优势十分明显。新疆是能源产出大省,有塔里木油田、克拉玛依油田、吐哈油田等超大规模油气田,是中国重要的一次能源供应基地,新疆的能源转换效率提高有助于中国更好地实现能源集约化利用的战略目标。海南是以第三产业为主导的岛屿省份,自然环境优美,在低碳发展方面具有先天优势。(5) 海南在碳生产率、能源结构、能源转换效率、单位 GDP 废水排放量、碳汇密度等指标上均表现较好,因此获得较高的低碳评价值。特别值得一提的是,海南是全国碳排放量最低的省份,每年的碳排放量只占全国的 0.2% 左右,只相当于北京的 1/6、上海的 1/11 及山东的 1/50 左右,是名副其实的低碳省份。辽宁和黑龙江同为东北地区的省份,绝大多数指标都处于全国中等水平,但也有一些差异。(6) 辽宁在指标绩效上较为均衡,没有明显的优势项目和劣势项目,而黑龙江在能源转换效率上具有明显优势,但在三废治理达标率上劣势十分明显,处于全国倒数第一,这是黑龙江亟待改进的地方。

低碳发展指数处于中下游的省份有重庆、云南、青海、吉林、内蒙古、甘肃、福建、江西、湖北、安徽、广西、河南、四川、河北、湖南、山西,主要为中西部非沿海省份(除福建和广西外)。(1) 河北省作为与首都毗邻的省份,承接了来自北京的产业转移,长期以来以牺牲自己为代价分担首都北京的节能减排和治理污染的压力,因此河北省的低碳发展表现不够理想。河北省的产业

结构仍以第二产业为主,第三产业比重落后于全国平均水平。由于钢铁行业等高污染、高排放的重工业是支柱性产业,河北省的单位 GDP 能耗强度很高,碳排放量也处于全国前列,因此河北省要想在低碳发展绩效上有所改善,当务之急是加快推进产业结构的优化升级。(2) 山西省作为产煤大省,尽管 GDP 增长比较迅猛,但能耗强度高居全国前列,碳生产率、能源结构、三废治理达标率、三废综合利用产品产值等指标也均远落后于全国平均水平。这说明“中国煤都”山西的经济增长是以消耗资源和牺牲环境为代价的,这样的发展模式与低碳理念背道而驰,也是不可持续的。因此,山西省的低碳评价指数不够理想,还有很大提升空间。(3) 内蒙古自治区近年来 GDP 增长速度保持在全国前列,但主要是靠自治区境内多处煤矿、油气田、稀土矿、黄金矿等矿产资源的开采拉动经济增长,是一种不可持续的发展方式,同时造成严重的生态破坏。内蒙古自治区内的土地沙漠化问题日益严重,巴丹吉林沙漠、科尔沁沙地、浑善达克沙地、查干诺尔湖盆的沙化面积逐年扩张,阿拉善地区也出现严重的生态破坏。因此内蒙古自治区应当重视对资源和环境的保护,转变经济增长方式,走低碳发展道路。(4) 吉林省的各项指标均处于全国中等水平,没有十分突出的优势项目,但在三废治理达标率上表现不佳,几乎每年都在全国 30 个省份中表现最差,因此吉林省提高低碳发展绩效的首要着眼点在于重视三废治理。安徽省和四川省的各项指标也均处于中国中等水平,没有明显的优势指标,但是安徽省人均 GDP 比较低,是人均 GDP 后几名中唯一非西部地区的省份。(5) 河南省是农业大省和人口大省,第一产业在经济结构中占较大比重,人口基数大,农业人口多,因此产业结构指标和城镇人口比重指标限制了河南省低碳发展指数的提高。两湖地区(湖北和湖南)的情况比较相似,各项指标比较接近,在全国各省份中位居中游,突出存在的问题是能源转换效率低,尤其是“有色金属之乡”湖南,能源转换效率亟待提高。由于能源转换效率在低碳评价体系中权重最高,这成为两湖地区低碳绩效提升的限制性因素。(6) 广西壮族自治区是南方沿海省份,由于碳汇密度高,广西在低碳发展评价中具有先天优势,但是由于能源转换效率低、单位 GDP 三废排放量高这些短板的存在,广西只能被归入中下游梯队。(7) 重庆作为最大的直辖市,是西部地区重要的省份,但是重庆的能源转换效率在中国排

名较低,这是重庆低碳发展面临的重大问题。(8) 云南省境内森林资源丰富,森林覆盖率达到50%,在碳汇密度上具有优势,但是云南省的人均GDP和城镇人口比重太低,这2项社会指标拉低了低碳评价指数。(9) 青海省在贸易结构、单位GDP能耗、三废综合利用、碳汇密度这几项指标上存在非常大的劣势,但难能可贵的是三废治理达标率较高,因此青海低碳指数排名不至于太差。(10) 甘肃省的三废治理达标率每年在中国的排名较低,而且森林覆盖率只有不到10%,在这2项指标上远落后于其他地区,因此甘肃的低碳排名不够理想。(11) 福建和江西这2个南方省份具有一些相似之处,在碳生产率、贸易结构、碳汇密度这些指标上具有优势,同时碳排放量处于较低水平,但是能源转换效率

有待进一步提高。

低碳发展表现最差的省份是宁夏和贵州,这2个省份均为西部欠发达地区。这2个省份的共同问题是单位GDP能耗强度太高,在该项指标上远落后于其他省份。除此之外,宁夏的单位GDP三废排放远高于其他省份,三废综合利用产品产值和碳汇密度远低于其他省份。贵州省的人均GDP和城镇人口比重均为全国最低,在这2项社会指标上劣势明显。

计算每年各梯队低碳发展指数的平均值和相关统计量见表9。由表9可见,各组间低碳发展水平的阶梯性比较明显,表现最好的组低碳指数接近0.5,而表现最差的组低碳指数只有0.2左右,这说明中国不同地区之间低碳经济发展水平差异较大。

表9 各梯队低碳发展指数描述性统计(2005—2015)

Table 9 Descriptive statistics of grouping low carbon development indicators (2005—2015)

年份	群集	样本量	均值	标准差	均值的95%下限	置信区间上限	极小值	极大值
2005	1	7	0.41721310	0.055058062	0.36629289	0.46813331	0.295854	0.464039
	2	5	0.47096582	0.046763123	0.41290174	0.52902991	0.420826	0.526596
	3	16	0.29560933	0.047784538	0.27014674	0.32107191	0.220167	0.397819
	4	2	0.18331933	0.013451109	0.06246591	0.30417275	0.173808	0.192831
	总数	30	0.34572362	0.096222356	0.30979361	0.38165364	0.173808	0.526596
2006	1	7	0.40799933	0.038639214	0.37226402	0.44373464	0.323995	0.438766
	2	5	0.47570242	0.033426673	0.43419772	0.51720712	0.422563	0.509159
	3	16	0.28557828	0.038501852	0.26506209	0.30609447	0.218282	0.344951
	4	2	0.18512532	0.013117836	0.06726623	0.30298440	0.175850	0.194401
	总数	30	0.33913369	0.093884698	0.30407656	0.37419081	0.175850	0.509159
2007	1	7	0.39705441	0.022337304	0.37639585	0.41771297	0.360086	0.419530
	2	5	0.47314309	0.042524741	0.42034165	0.52594453	0.422008	0.526715
	3	16	0.27532676	0.033568756	0.25743923	0.29321428	0.223002	0.331545
	4	2	0.16832870	0.009980167	0.07866045	0.25799694	0.161272	0.175386
	总数	30	0.32956606	0.094913690	0.29412471	0.36500742	0.161272	0.526715
2008	1	7	0.37989657	0.027249716	0.35469479	0.40509835	0.334841	0.415753
	2	5	0.46125755	0.049851468	0.39935878	0.52315632	0.397126	0.518914
	3	16	0.27479220	0.037526902	0.25479553	0.29478888	0.209622	0.330956
	4	2	0.17666151	0.000804298	0.16943518	0.18388784	0.176093	0.177230
	总数	30	0.32385207	0.089779214	0.29032796	0.35737618	0.176093	0.518914
2009	1	7	0.38677169	0.025798125	0.36291240	0.41063097	0.349630	0.413657
	2	5	0.48469395	0.033036790	0.44367336	0.52571455	0.451479	0.525520
	3	16	0.28822026	0.041493037	0.26611018	0.31033034	0.228893	0.367563
	4	2	0.19215924	0.006176777	0.13666310	0.24765538	0.187792	0.196527
	总数	30	0.33755714	0.091094885	0.30354175	0.37157253	0.187792	0.525520
2010	1	7	0.37585721	0.032416754	0.34587671	0.40583771	0.326483	0.415085
	2	5	0.49348091	0.025088443	0.46232949	0.52463233	0.473112	0.531312
	3	16	0.28351083	0.042160287	0.26104519	0.30597646	0.221342	0.354687
	4	2	0.18194433	0.003668425	0.14898485	0.21490382	0.179350	0.184538
	总数	30	0.33328223	0.095040189	0.29779364	0.36877082	0.179350	0.531312

表9 各梯队低碳发展指数描述性统计(2005—2015)(续)

Table 9 Descriptive statistics of grouping low carbon development indicators (2005—2015) (Continued)

年份	群集	样本量	均值	标准差	均值的 95%下限	置信区间上限	极小值	极大值
2011	1	7	0.35441120	0.025872710	0.33048294	0.37833947	0.309647	0.383814
	2	5	0.48522476	0.025777415	0.45321788	0.51723165	0.447365	0.510240
	3	16	0.28156781	0.034481527	0.26319390	0.29994172	0.216529	0.337508
	4	2	0.17578856	0.011253807	0.07467712	0.27690001	0.167831	0.183746
	总数	30	0.32545548	0.089780218	0.29193099	0.35897996	0.167831	0.510240
2012	1	7	0.33969724	0.024606095	0.31694040	0.36245408	0.303638	0.382793
	2	5	0.46272075	0.034786267	0.41952790	0.50591361	0.414652	0.511459
	3	16	0.29030314	0.037261771	0.27044775	0.31015854	0.232728	0.363467
	4	2	0.18967144	0.018511148	0.02335537	0.35598751	0.176582	0.202761
	总数	30	0.32385592	0.079185457	0.29428759	0.35342426	0.176582	0.511459
2013	1	7	0.33456415	0.025215016	0.31124415	0.35788415	0.304882	0.380826
	2	5	0.44897527	0.045043314	0.39304661	0.50490393	0.392644	0.518001
	3	16	0.30888219	0.040128823	0.28749905	0.33026533	0.246776	0.391372
	4	2	0.22618580	0.009882690	0.13739335	0.31497824	0.219198	0.233174
	总数	30	0.33271040	0.068373734	0.30717923	0.35824157	0.219198	0.518001
2014	1	7	0.31080981	0.041088189	0.27280958	0.34881005	0.260720	0.380585
	2	5	0.45547378	0.052671789	0.39007312	0.52087445	0.377228	0.517044
	3	16	0.28537719	0.031801666	0.26843128	0.30232310	0.227242	0.329978
	4	2	0.17757099	0.048495620	-0.25814487	0.61328685	0.143279	0.211863
	总数	30	0.31247382	0.080763221	0.28231634	0.34263130	0.143279	0.517044
2015	1	7	0.31760748	0.048761469	0.27251064	0.36270432	0.257535	0.392637
	2	5	0.46236926	0.059346050	0.38868141	0.53605712	0.391725	0.547595
	3	16	0.28937748	0.036423699	0.26996866	0.30878630	0.216036	0.350639
	4	2	0.19159937	0.052371890	-0.27894339	0.66214213	0.154567	0.228632
	总数	30	0.31827790	0.083101599	0.28724726	0.34930855	0.154567	0.547595

注:群集1、2、3、4分别代表中上游组、表现最好组、中下游组、表现最差组。

为了更加严格地检验4个梯队的低碳指数均值之间是否存在统计学上的显著差别,进一步做单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA),结果如表10所示。可以看出每年的检验结构都是显著的,说明上述4个梯队之间确实存在低碳发展水平的显著差别,这从一方面说明中国省级层面上的低碳发展具有地区性差异,也同时证明了前文中的聚类结果比较合理。

#### 1.4.2 年际变化分析

根据各省份历年的低碳发展指数排序,可以进一步评估各省份的低碳发展绩效是否进步或退步。根据历年低碳指数排序,将30个省份分为表现稳定、稳中有升、稳中有降、进步较快和退步较快5组(表11)。表现稳定的省份有江苏、山东、贵州、甘肃和宁夏,稳中有升的省份有河北、江西和广西,稳中有降的省份有北京、天津、吉林、黑龙江、上海、福建、河南、湖北、重庆、四

川、云南、青海和新疆,进步较快的省份有内蒙古、浙江、安徽、湖南、海南和陕西,退步较快的省份有山西、辽宁和广东。

在低碳排名表现稳定的省份中,江苏和山东低碳发展绩效较好,而贵州、甘肃和宁夏低碳表现较差。江苏和山东的低碳评价指数每年稳居前5名,贵州、甘肃和宁夏则排最后5名,其中贵州几乎每年均排倒数第2位(2015年除外),宁夏则每年均排最后1位。

在低碳排名稳中有升的省份中,各省取得进步的年份和原因也不尽相同。河北在2008年取得大幅进步,由2007年的第18名跃升至第13名,这样的进步是由于碳生产率提高、能源转换效率提高、三废综合利用产品产值提高、单位GDP能耗降低、单位GDP三废排放量降低等原因共同导致的。其中,2008年河北省三废综合利用产品产值比2007年增长了68.13%,这是河北

表 10 单因素方差分析结果  
Table 10 Analysis of variance results

		平方和	df	均方	F	sig
2005	组间	0.207	3	0.069	29.253	0.000
	组内	0.061	26	0.002		
	总数	0.269	29			
2006	组间	0.220	3	0.073	53.153	0.000
	组内	0.036	26	0.001		
	总数	0.256	29			
2007	组间	0.234	3	0.078	74.484	0.000
	组内	0.027	26	0.001		
	总数	0.261	29			
2008	组间	0.198	3	0.066	48.366	0.000
	组内	0.036	26	0.001		
	总数	0.234	29			
2009	组间	0.206	3	0.069	52.277	0.000
	组内	0.034	26	0.001		
	总数	0.241	29			
2010	组间	0.226	3	0.075	55.285	0.000
	组内	0.035	26	0.001		
	总数	0.262	29			
2011	组间	0.209	3	0.070	73.567	0.000
	组内	0.025	26	0.001		
	总数	0.234	29			
2012	组间	0.152	3	0.051	44.499	0.000
	组内	0.030	26	0.001		
	总数	0.182	29			
2013	组间	0.099	3	0.033	23.807	0.000
	组内	0.036	26	0.001		
	总数	0.136	29			
2014	组间	0.150	3	0.050	33.641	0.000
	组内	0.039	26	0.001		
	总数	0.189	29			
2015	组间	0.149	3	0.050	25.368	0.000
	组内	0.051	26	0.002		
	总数	0.200	29			

注:df为自由度,F为F统计量,sig为显著性。

表 11 中国部分省份低碳指数排序变化分组(2005—2015)  
Table 11 Groups of provincial low carbon indicator rank changes  
(2005—2015)

梯队分组	省份
表现稳定	江苏,山东,贵州,甘肃,宁夏
稳中有升	河北,江西,广西
稳中有降	北京,天津,吉林,黑龙江,上海,福建,河南 湖北,重庆,四川,云南,青海,新疆
进步较快	内蒙古,浙江,安徽,湖南,海南,陕西
退步较快	山西,辽宁,广东

省 2008 年低碳排名进步的主要原因。江西省排名在 2009 年取得较大进步,由 2008 年第 16 名提升至第 11 名,取得进步的原因包括碳生产率提高、贸易结构优化、单位 GDP 能耗降低、三废治理达标率提高及三废综合利用产品产值提高,其中三废综合利用产品产值比 2008 年增加了 20.3%,提高的幅度相当大。广西在 2013 年由之前的第 18 名迅速升至第 8 名,这是由贸易结构优化、单位 GDP 能耗降低、能源转换效率提高、人均 GDP 增加等多方面原因共同导致的。

在低碳排名稳中有降的省份中,大多数省份的排名在年际波动中出现小幅下降,只有少数省份排名下降得比较明显。新疆由2012年的第10名降至2013年的第19名,主要是由于GDP增速降低、能源转换效率下降及碳排放量增加导致的;上海由2012年的第11名降至2013年的第15名,主要是由于三废治理达标率降低及环保投资减少造成的。

低碳排名进步较快的省份进步较快的原因:安徽主要是由于碳生产率提高、贸易结构优化、单位GDP能耗降低、能源结构优化、单位GDP三废排放量降低及三废治理达标率提高等原因;湖南主要是由于碳生产率提高、三废排放强度下降、三废治理达标率提高及三废综合利用产品产值提高等原因;海南主要是由于产业结构优化、贸易结构优化、能源转换效率提高及三废排放强度降低等原因;陕西主要是由于碳生产率提高及单位GDP能耗降低等原因。

在低碳排名退步较快的省份中,山西退步较快的主要原因是贸易结构不够优化、能源转换效率降低及碳排放量增加;辽宁排名下降快的主要原因是能源转换效率降低、环保投资降低及碳排放量增加;广东低碳排名下降是由于能源转换效率降低及碳排放量增加。

## 2 低碳发展指数的空间依赖性检验

### 2.1 空间依赖性度量方法

许多经济数据涉及一定的空间位置,针对本文研究对象而言,各省份之间有广泛联系,且依照常识,距离越近的省份联系通常越密切。将各省变量数据,再加上各省位置信息,就构成“空间数据”(spatial data)。所谓空间数据,就是在原有横截面数据或面板数据上,加上横截面单位的位置信息或相互距离。空间计量经济学充分考虑横截面单位之间的空间效应,包括空间依赖性和空间异质性<sup>[34]</sup>。

进行空间计量分析的前提是度量区域之间的空间距离,记区域*i*与区域*j*之间的距离为 $w_{ij}$ ,可定义空间权重矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix}$$

其中,主对角线上元素 $w_{11}=\cdots=w_{nn}=0$ ,因为同一区域之间的距离为0。常用的距离函数是“相邻”,即如果区域*i*与区域*j*有共同的边界,则 $w_{ij}$ 为1;反之, $w_{ij}$ 为0。

比照时间序列,空间数据有时也称为空间序列。时间序列可视为在时间轴上分布的随机过程,而空间序列则为在空间分布的随机过程。时间序列的一个重要特性是可能存在自相关,尤其是一阶自相关。而对于空间序列,自相关的情形则更为复杂;因为时间序列只可能单向相关(过去可能影响现在,但现在无法影响过去),而空间序列则可能在多个方向上相关,而且可以互相影响。

空间自相关(spatial autocorrelation)是指,位置相近的区域具有相似的变量取值。如果高值与高值聚集在一起、低值与低值聚集在一起,则为正空间自相关;反之,如果高值与低值相邻,则为负空间自相关;如果高值与低值完全随机地分布,则不存在空间自相关。

考虑空间序列 $\{x_i\}_{i=1}^n$ ,基于空间自相关的复杂性,文献中提出了一系列度量空间自相关的方法,最为常用的是“莫兰指数*I*”(Moran's *I*)

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

式中, $S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$ 为样本方差, $w_{ij}$ 为空间权重矩阵的(*i*,*j*)元素,而 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 为所有空间权重之和。如果空

间权重矩阵为行标准化矩阵,则 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} = n$ ,此时莫兰指数*I*可写为

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

莫兰指数*I*的取值一般为-1~1,大于0表示正空间自相关,即高值与高值相邻,低值与低值相邻;小于0表示负空间自相关,即高值与低值相邻;如果莫兰指数*I*接近0,则表明空间分布是随机的,不存在空间自相关。

为了进行严格检验,需导出莫兰指数*I*的渐近分布。考虑原假设“ $H_0: Cov(x_i, x_j) = 0, \forall i \neq j$ ”(H<sub>0</sub>代表原假设, Cov代表协方差),即不存在空间自相关。在此原假设下,可以证明莫兰指数*I*的期望值为

$$E(I) = \frac{-1}{n-1}$$

莫兰指数*I*的方差记为 $Var(I)$ ,可以证明,标准化的

莫兰指数  $I$  服从渐近标准正态分布

$$I^* = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \xrightarrow{d} N(0, 1)$$

式中,  $I^*$  为标准化的莫兰指数,  $\xrightarrow{d}$  为服从渐近分布。

因此, 可以使用标准正态分布的临界值进行检验。

## 2.2 空间依赖性检验结果

为检验中国省级层面的低碳经济发展是否存在空间位置上的依赖性, 根据上述方法计算莫兰指数  $I$ , 并

进行统计检验。其中所考查的空间序列是当年各省份的 TOPSIS 指数, 空间权重矩阵参照中国地图手动制出。

对莫兰指数  $I$  的计算结果如表 12 所示。从表 12 可以看出, 每年 30 个省份 TOPSIS 评价值的莫兰指数统计量大多在 5% 的水平下不显著 (个别年份除外), 这说明 30 个省份在低碳经济评价体系下的发展不存在显著的地理相关性。

表 12 中国 30 个省份 TOPSIS 评价值的莫兰指数统计量分布 (2005—2015)

Table 12 Moran's  $I$  of TOPSIS indicators of China's 30 provincial regions (2005—2015)

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Moran's $I$	0.112	0.099	0.172	0.213**	0.437	0.446	0.465	0.153	0.137	0.221**	0.259**
Z 值	1.277	1.167	1.809	2.176	1.934	1.505	1.529	1.661	1.528	2.148	2.474

注: 数据利用 Matlab 2013b 计算得到, \*\*表示在 5% 的水平下显著 (临界值为 1.96)。本次统计中未包括中国台湾、香港、澳门和西藏自治区。

## 3 结论与建议

构建了一个低碳经济的指标评价体系, 包括经济、资源、环境、社会 4 方面的一级指标和 16 项二级指标, 对中国省级层面的低碳经济发展水平进行评价和分析。通过专家调查, 运用层次分析法计算出了各项指标的主观权重。根据搜集到的历年统计数据, 运用熵值法计算出各项指标的客观权重。对主观权重和客观权重进行加权平均, 得出兼顾主观性和客观性的综合权重。随后, 利用 TOPSIS 模型, 在实证数据和综合权重的基础上计算得出各省份在 2005—2015 年的低碳评价价值, 并对 30 个省份进行排序 (本次统计中未包括中国台湾、香港、澳门和西藏自治区)。

TOPSIS 模型的计算和排序结果表明, 中国大多数省份的低碳发展水平在 2005—2015 年保持稳定, 一些省份的低碳评价价值出现下滑, 这说明近年来中国省级层面的低碳发展并没有取得明显进步。运用聚类分析将研究的 30 个省份分为表现最好、中上游、中下游、表现最差 4 个梯队, 其中低碳发展表现最好的省份有浙江、山东、江苏、天津和陕西; 低碳发展水平处于中上游的省份有黑龙江、上海、辽宁、广东、新疆、北京和海南; 低碳发展水平处于中下游的省份有重庆、云南、青海、吉林、内蒙古、甘肃、福建、江西、湖北、安徽、广西、河南、四川、河北、湖南和山西; 低碳发展表现最差的省份是贵州和宁夏。运用 ANOVA 检验发现, 各梯队的低碳

指数均值存在显著差异, 这说明中国省级层面的低碳发展水平不均衡, 各地区之间阶梯性明显。从时间序列上考察各地区低碳发展水平的年际变动, 可以将研究的 30 个省份分为表现稳定组、稳中有升组、稳中有降组、进步最快组及退步最快组。其中表现稳定组包括江苏、山东、贵州、甘肃和宁夏; 稳中有升组包括河北、江西和广西; 稳中有降组包括北京、天津、吉林、黑龙江、上海、福建、河南、湖北、重庆、四川、云南、青海和新疆; 进步较快组包括内蒙古、浙江、安徽、湖南、海南和陕西; 退步较快组包括山西、辽宁和广东。

为了检验中国省级层面的低碳经济发展是否存在地理位置上的空间关联, 本文对计算得出的 TOPSIS 评价价值进行了空间依赖性检验, 手动生成空间权重矩阵, 并计算得出莫兰指数  $I$ 。检验结果表明, 绝大多数年份的莫兰指数  $I$  均不显著, 说明中国省级层面的低碳发展并不存在空间相关性, 也就是说, 各地区的低碳经济发展水平差异主要是由内部原因导致的, 受邻近地区的影响很小。

基于以上结论, 对中国省级层面的低碳经济发展政策提出以下建议。

1) 中国各地区之间的低碳经济发展水平不均衡, 梯队之间差异较大, 因此有必要加大对落后省份的扶持, 包括政策、资金、技术及人才等方面的倾斜<sup>[35]</sup>, 以帮助低碳经济发展水平落后的地区尽快取得进步, 从而

使得中国低碳经济发展整体水平得以提升。

2) 中国省级层面上的低碳经济发展并不存在空间相关性,因此在制定国家层面的低碳经济发展目标时应充分考虑地区异质性<sup>[36]</sup>;地方政府在出台地区规划时也应因地制宜,基于自身情况制定切实可行的目标,切不可盲目与邻近地区攀比。

3) 基于对各省份优势指标和劣势指标及排名进步或退步原因的分析,各地区应当充分认清现实,根据具体情况有针对性地弥补劣势,努力实现赶超。

### 参考文献(References)

- [1] 杜婷婷, 毛锋, 罗锐. 中国经济增长与 CO<sub>2</sub> 排放演化探析[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(2): 94-99.  
Du Tingting, Mao Feng, Luo Rui. Analysis on China's economic growth and CO<sub>2</sub> emission evolution[J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(2): 94-99.
- [2] 陈跃, 王文涛, 范英. 区域低碳经济发展评价研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 124-130.  
Chen Yue, Wang Wentao, Fan Ying. Review on regional low carbon economy development evaluation[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(4): 124-130.
- [3] 蔡昉, 都阳, 王美艳. 经济发展方式转变与节能减排内在动力[J]. 经济研究, 2008(6): 4-11.  
Cai Fang, Du Yang, Wang Meiyang. The political economy of emission in China: Will a low carbon growth be incentive compatible in next decade and beyond[J]. Economic Research Journal, 2008(6): 4-11.
- [4] 张坤民, 潘家华, 崔大鹏. 低碳经济论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 36.  
Zhang Kunmin, Pan Jiahua, Cui Dapeng. Low carbon economy theory[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 36.
- [5] British Petrol. Statistical review of world energy[R/OL]. London: BP, 2017. [2017-10-10]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [6] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略报告: 探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 101.  
Sustainable Development Strategy Study Group at Chinese Academy of Sciences. China's sustainable development strategy report: Exploring Chinese featured low carbon path[M]. Beijing: Science Press, 2009: 101.
- [7] 马忠玉, 肖宏伟. “十三五”时期我国碳排放控制目标与对策研究[J]. 中国能源, 2016, 38(3): 14-18.  
Ma Zhongyu, Xiao Hongwei. China's carbon emission control target and strategy during the 13th five-year plan[J]. Energy of China, 2016, 38(3): 14-18.
- [8] 陈诗一. 节能减排与中国工业的双赢发展: 2009—2049[J]. 经济研究, 2010, 45(3): 129-43.  
Chen Shiyi. Win-win development of China's energy-saving, emission abatement and industries: 2009—2049[J]. Economic Research Journal, 2010, 45(3): 129-143.
- [9] Kaya T, Kahraman C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 6577-6585.
- [10] Hwang C L, Kwangsun Y. Multiple attribute decision making [M]. Berlin: Springer, 1981: 147-149.
- [11] Saaty T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 127-130.
- [12] Peng Y, Kou G, Wang G, et al. FAMCDM: A fusion approach of MCDM methods to rank multiclass classification algorithms [J]. Omega, 2011, 39(6): 677-689.
- [13] 江文奇. 多属性决策的组合赋权优化方法[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 40-43.  
Jiang Wenqi. Multi attribute decision weighting optimization methodology[J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(6): 40-43.
- [14] 梁昌勇, 曹清玮, 吴坚. 基于主客观权重集成的电子商务网站评价方法[J]. 运筹与管理, 2009, 18(6): 146-150.  
Liang Changyong, Cao Qingwei, Wu Jian. An e-commerce evaluation method based on subjective and objective weights combination[J]. Operations Research and Management Science, 2009, 18(6): 146-150.
- [15] 付加锋, 庄贵阳, 高庆先. 低碳经济的概念辨析及评价指标体系构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 38-43.  
Fu Jiafeng, Zhuang Guiyang, Gao Qingxian. Conceptual recognition on low carbon economy and construction of evaluation indexes[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(8): 38-43.
- [16] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 14-19.  
Fu Yun, Ma Yonghuan, Liu Yijun, et al. A study on low carbon economy development patterns[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(3): 14-19.
- [17] 胡大立, 丁帅. 低碳经济评价指标体系研究[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(22): 160-164.  
Hu Dali, Ding Shuai. A study on low carbon economy evaluation index system[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2010, 27(22): 160-164.
- [18] Lazzaretto A, Toffolo A. Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design[J]. Energy, 2004, 29(8): 1139-1157.

- [19] 张志强, 程国栋, 徐中民. 可持续发展评估指标、方法及应用研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 344-350.  
Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, Xu Zhongmin. Sustainable development evaluation index, method and application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 344-350.
- [20] 陈文颖, 高鹏飞, 何建坤. 二氧化碳减排对中国未来GDP增长的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 744-747.  
Chen Wenyong, Gao Pengfei, He Jiankun. The influence of carbon abatement on China's future GDP growth[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2004, 44(6): 744-747.
- [21] 雷明, 李沙浪, 华胜亚, 等. 结构、效率与CO<sub>2</sub>排放强度变动—基于1997—2010中国绿色投入产出分析[C]//2015中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 66-82.  
Lei Ming, Li Shaleng, Hua Shengya, et al. Structure, efficiency and carbon emission variation: based on 1997—2010 China's green input-output analysis[C]//Proceedings of 2015 Chinese Environmental Science Society Annual Conference. Beijing: China Environmental Science Press, 2015: 66-82.
- [22] 虞晓雯, 雷明. 面板VAR模型框架下我国低碳经济增长作用机制的动态分析[J]. 中国管理科学, 2014 (22): 731-740.  
Yu Xiaowen, Lei Ming. A dynamic analysis on China's low carbon economic growth mechanism within panel VAR model framework[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014 (22): 731-740.
- [23] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009, 4(4): 27-36.  
Lin Boqiang, Jiang Zhujun. China's carbon dioxide and environmental Kuznets curve forecasting and influential factors analysis[J]. Management World, 2009, 4(4): 27-36.
- [24] 雷明, 廖博, 殷子涵, 等. 低碳发展下增长核算与经济增长分析[C]//2014中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 829-842.  
Lei Ming, Liao Bo, Yin Zihan, et al. Low carbon growth accounting and economic growth analysis[C]//Proceedings of 2014 Chinese Environmental Science Society annual conference. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 829-842.
- [25] 魏楚, 沈满洪. 能源效率及其影响因素—基于DEA的实证分析[J]. 管理世界, 2007, 167(8): 66-76.  
Wei Chu, Shen Manhong. Energy efficiency and its influential factors: DEA based empirical analysis[J]. Management World, 2007, 167(8): 66-76.
- [26] Eggleston S, Buendia L, Miwa K. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Industrial processes and product uses[M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006: 75.
- [27] Bollen J C, Brink C J, Eerens H C, et al. Co-benefits of climate policy[R]. Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2009.
- [28] 胡涛, 田春秀, 李丽平. 协同效应对中国气候变化的政策影响[J]. 环境保护, 2004(9): 56-58.  
Hu Tao, Tian Chunxiu, Li Liping. The influence of co-effects on China's climate change policy[J]. Environmental Protection, 2004(9): 56-58.
- [29] 陆玲玲, 倪权生. 国内城市低碳建设程度的实证分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(7): 1631-1635.  
Lu Lingling, Ni Quansheng. Empirical analysis on China's low carbon city construction[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(7): 1631-1635.
- [30] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2017-12-10]. <http://data.stats.gov.cn/>.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. National Data[EB/OL]. [2017-12-10]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [31] 马军, 周琳, 李薇. 城市低碳经济评价指标体系构建[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(22): 165-167.  
Ma Jun, Zhou Lin, Li Wei. Construction of cities' low carbon economic evaluation index system[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2010, 27(22): 165-167.
- [32] 王中兴, 李桥兴. 依据主客观权重集成最终权重的一种方法[J]. 应用数学与计算数学学报, 2006, 20(1): 87-92.  
Wang Zhongxing, Li Qiaoxing. A method to generate a hybrid weight based on subjective and objective weights[J]. Communication on Applied Mathematics and Computation, 2006, 20 (1): 87-92.
- [33] 王赢政, 周瑜瑛, 邓杏叶. 低碳城市评价指标体系构建及实证分析[J]. 统计科学与实践, 2011(1): 48-50.  
Wang Yingzheng, Zhou Yuying, Deng Xingye. Low carbon city evaluation index construction and empirical analysis[J]. Statistical Theory and Practice, 2011(1): 48-50.
- [34] 陈强. 高级计量经济学及Stata应用[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 442-443.  
Chen Qiang. Advanced econometrics and Stata application [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 442-443.
- [35] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 经济研究, 2012(8): 32-44.  
Chen Shiyi. China's regional low carbon economy transition evaluation[J]. Economic Research Journal, 2012(8): 32-44.
- [36] 杨骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素—基于1995—2009年省际面板数据的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2012(5): 36-49.  
Yang Qian, Liu Huajun. Regional difference decomposition and influential factors of China's carbon emissions: Based on 1995-2009 provincial panel data[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2012(5): 36-49.

## Regional low carbon development and spatial interdependence: Analysis based on China's provincial data based analysis (2005—2015)

LEI Ming, MA Haichao, LI Haomin, SUN Shuxiao

Guanghua School of Management, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** The low carbon development is an important way of sustainable development. It is China's established strategic goal to develop a low-carbon economy. In this background, based on the empirical data on China's provincial level from 2005 to 2015, this paper evaluates, ranks and analyzes the low carbon development performance for China's 30 provincial regions using the TOPSIS (technique for order preference similarity to ideal solution) model. It is indicated that low carbon development indicators of China's provincial regions are stable in general while some provinces show a downward trend. By clustering analysis, the 30 provincial regions can be divided into 4 groups, which are the best performed group, the upper-middle performed group, the middle-lower performed group and the worst performed group. The Analysis of Variance shows that there exist significant differences between the better performed groups and the worse performed groups. In order to examine whether there exists a spatial interdependence in terms of the provincial low carbon development, the statistical variable Moran's  $I$  is calculated to test the spatial reliance and it is found that the spatial interdependence is not significant among the provincial low carbon development indicators.

**Keywords** low carbon development; TOPSIS; clustering analysis; analysis of variance; spatial interdependence test ●



(编辑 王志敏)