长江经济带碳减排能力综合评价研究

唐德才[1] 张燕[2] 王路霞[21]

（1.三江学院 法商学院 江苏 南京 210012；

2.南京信息工程大学 管理工程学院，江苏 南京 210044）

【摘 要】：长江经济带是我国“三大支撑带”之一，其碳减排目标实现对我国生态文明建设具有重要意义。文章以长江经济带的 11 个省份作为研究对象，构建包含经济发展能力、科技发展能力、碳汇能力、能源消耗与碳排放能力、社会发展能力 5 个准则层的低碳能力综合评价指标体系，结合 TOPSIS 模型对 2005 年、2010 年、2017 年的样本数据进行碳减排能力测度，并利用障碍因子诊断法计算了不同省份的碳减排障碍度，并运用四象限矩阵法探讨不同类型省份的碳减排路径，提出有针对性的碳减排政策建议，以期为长江经济带低碳经济发展提供参考。

【关键词】：碳减排能力 障碍因子 减排路径

【中图分类号】：F062.2**【文献标识码】**：A**【文章编号】**：1671-4407(2021)06-044-07

低碳经济已经成为当今世界经济发展的基本方向，经济中节能减排是世界各国选择应对气候变化的主要手段。随着各项节能减排政策的不断推进，长江经济带碳排放快速增长的局面得以初步扭转。相关数据显示，与 2005 年相比 2018 年碳排放强度下降约 45.8%，充分满足 2020 年降低 40%～45%的碳排放强度的目标。长江经济带作为国家三大发展战略，其低碳发展日益受到社会各界的关注。长江经济带主要包括 11 个省份，其经济发展主要依靠资源和成本优势，由于其横跨中国东、中、西部，区域间的经济发展水平存在显著差异，东部地区依靠良好的地理位置优势和资源禀赋的优势，经济发展水平明显高于中、西部地区，随着区域经济的发展，这些优势正在不断弱化[1]。随着国家节能减排政策的不断加强，碳排放能力成为评价区域经济发展的重要指标，本文在已有研究的基础上构建长江经济带碳减排能力综合评价指标体系，为进一步丰富区域经济的碳减排绩效评价指标体系提供借鉴。同时，本文对碳减排能力进行实证研究，为促进长江经济带低碳经济的发展提升提供理论依据和决策参考。

1 文献综述

近年来，节能减排的相关研究主要包括评估区域节能减排效率和评价区域节能减排发展水平这两方面。对于区域节能减排效率及影响因素的研究，学者们主要从单要素框架和全要素框架进行分析。早期的单框架研究主要从碳排放量和排放强度等指标来衡量能源利用水平及分析影响因素，Fisher 等[2]以工业企业 1997—1999 年的数据为样本进行分析，得出研发力度、能源价格和企业所有制改革是自 1996 年以来能源绝对使用量下降的主要原因。Fan 等[3]认为 1980—2003 年能源强度的下降是导致经济增长且 CO_2 下降的主要原因。而 Zhang 等[4]研究发现产业结构是导致中国碳排放强度变化的主要因素。全要素框架下的研究引入更多的资源、环境、生活水平等因素，多角度综合考察区域的减排发展情况。Zhou 等[5]和刘骏等[6]分别采用基于环境 DEA 的 Malmquist 指数法和基于碳源—碳汇分析框架的方法，前者主要以世界上 18 个排放大国为目标，测算 CO_2 减排绩效及分析其影响

[1]**作者简介**：唐德才，博士，教授，博士研究生导师，研究方向为产业经济、区域经济。E-mail:tangdecai2003@163.com
基金项目：2019 年度江苏高校哲学社会科学重点研究基地开放课题重点项目“长江经济带智能制造能力综合评价研究”(SK20190090-15)

因素，后者主要以 36 个低碳试点城市为目标，选用 13 个指标，研究其低碳经济的发展水平。武盈盈和李燕[7]以山东省工业全要素能源效率为研究对象，构造能源效率随机前沿理论模型对 2006—2013 年山东省 37 个工业行业面板数据进行估计。邓健和王新宇[8]采用差分内差分方法研究 1987—2012 年东北振兴战略和西部大开发战略对我国环境约束下全要素能源效率的影响。

围绕区域节能减排发展评价的一系列研究，主要由评价指标体系的设计和评价模型的构建组成。目前，对于评价指标体系的设计尚未形成统一标准，且相关研究比较分散。Su 等[9]从经济发展和社会进步、能源结构和利用效率、生活消费和发展环境的角度出发，提出了城市低碳发展的评价指标体系。屈小娥和曹珂[10]首次将人民生活水平、低碳消费、低碳排放等民生指标作为一级评级指标，纳入低碳经济评价指标体系，且应用于陕西省低碳经济发展水平评价过程。对于评价模型的构建，研究思路相对统一，第一类方法是通过层次分析技术确定各指标权重，具有操作简单、应用性较强的优点，但模型可靠性有待提高。第二类方法是对层次分析法的改进，体现了多学科融合的思想，其中 Jia 等[11]为了降低评价中的模糊性和非线性问题的影响，将 TOPSIS 方法引入评价模型之中，并采用模糊层次分析技术确定指标权重。Guo[12]利用指数增量和时间熵权对传统的静态 TOPSIS 方法进行改进，以评价区域低碳经济竞争力并分析其空间差异。Wang[13]将区域绿色低碳转型和评价框架定义为构建区域绿色低碳转型的过程，并建立了系统创新绿色转型的协作模型，对两个系统的变化和发展进行数据包络分析，动态评估区域绿色转型能力，深入分析了两个系统之间相互作用的发展内部机制。

无论是从定性还是定量角度对节能减排绩效进行的评价，均存在一些共同点：一是针对特定区域的碳减排综合评价研究的文献较少，二是低碳经济的评价指标体系有待完善。针对以上问题，本文以长江经济带 11 个省份为研究对象，构建合理的碳减排综合评价指标体系，考察各省份的碳减排能力，并引入四象限分析法分析减排路径，提出相应的对策与建议。

2 研究方法

2.1 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法首先需要通过熵权法确定指标权重，然后通过 TOPSIS 法逼近理想解，确定评价对象的排序，其实质是对传统 TOPSIS 评价法的改进。熵权法是一种客观赋权的方法，其评价结果主要依据客观资料，避免了主观因素的影响。根据各指标的变异程度，利用信息熵计算出各指标的熵权，再通过熵权对各指标的权重进行修正，从而得出较为客观的指标权重，其能够反映出指标权重随时间的变化，适用于碳减排能力评价研究。其次，TOPSIS 法又称优劣解距离法，通过对有限评价对象与理想化目标进行排序，逐渐逼近理想解，是分析多目标决策的常用方法。

熵权 TOPSIS 法的主要计算步骤如下：

(1)标准化矩阵：

为统一评价指标的单位和量纲，本文采取极差法对数据行标准化处理，具体计算公式如下：

正向指标：

$$X'_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}(i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n) \qquad (1)$$

负向指标：

$$X'_{ij}=\frac{x_{\max}-x_{ij}}{x_{\max}-x_{\min}}(i=1,2,3,\cdots,m;\ j=1,2,3,\cdots,n) \qquad (2)$$

式中：X_{ij}和X'_{ij}分别为第 i 个样本第 j 项指标的原始值和标准化值。

(2)信息熵：

$$H_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij} \qquad (3)$$

式中：$p_{ij}=\frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x'_{ij}}$表示第 i 个样本的第 j 个指标的比重。

(3)指标 j 的权重：

$$\omega_j=\frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-H_j)} \qquad (4)$$

式中：$\omega_j\in[0,1],\sum_{j=1}^{n}\omega_j=1$。

(4)加权矩阵：

$$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{m\times n},r_{ij}=\omega_j\times x'_{ij}(i=1,2,3,\cdots,m;\ j=1,2,3,\cdots,n) \qquad (5)$$

(5)最优方案 X^+和最劣方案 X^-：

$$\begin{aligned}&X^+=\{x_1^+,x_1^+,x_1^+,\cdots,x_n^+\}\\&X_j^+=\max_j\{r_{ij}\}(i=1,2,3,\cdots,m)\end{aligned} \qquad (6)$$

$$\begin{aligned}&X^-=\{x_1^-,x_1^-,x_1^-,\cdots,x_n^-\}\\&X_j^-=\min_j\{r_{ij}\}(i=1,2,3,\cdots,m)\end{aligned} \qquad (7)$$

(6)单个样本与 X^+和 X^-的距离D_i^+和D_i^-：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \omega_j (r_{ij} - x_j^+)^2} \, (i = 1, 2, 3, \cdots, m) \qquad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \omega_j (r_{ij} - x_j^-)^2} \, (i = 1, 2, 3, \cdots, m) \qquad (9)$$

(7)各样本与正理想解的贴进度：

$$C_j = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} (i = 1, 2, 3, \cdots, m) \qquad (10)$$

2.2 障碍因子诊断模型

碳减排能力综合评价目的在于识别差距和改善方向，对影响碳减排能力的障碍因子进行诊断与分析，可以更有针对性地制定相应对策。因此引入障碍度模型，对碳减排展开延伸性研究。障碍度计算采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度三个指标进行诊断。一是因子贡献度 ω_j 是单项指标对碳减排总目标的贡献度。二是指标偏离度 O_j 是单项指标实际值与最优目标值之间的差距，此处设为单项指标标准化值与 100%之差。三是障碍度 I_j 是子系统或单项指标对碳减排能力的影响程度，公式如下：

$$O_j = 1 - x'_{ij} \qquad (11)$$

$$I_j = \frac{O_{ij} \times \omega_j}{\sum_{i=1}^{n} O_{ij} \times \omega_j} \qquad (12)$$

3 实证研究——长江经济带碳减排能力综合评价

2007 年，在发展中国家中，中国第一个制定并实施了应对气候变化的国家方案，并且以 2005 年碳强度为标的制定了 2020 年与 2030 年的碳排放强度下降目标。“十一五”是中国提出碳强度目标后的第一个发展规划期，与 2005 年相比较，2010 年末碳强度降低 19.1%，完成了“十一五”的碳减排目标。2017 年碳强度下降约 46%，充分满足 2020 年碳强度下降 40%～45%的目标。因此，本文选取具有代表性的年份 2005 年、2010 年、2017 年，测算长江经济带各省份整体以及各子系统的碳减排能力。

3.1 指标体系构建

建立系统科学的综合评价指标体系是实证研究的关键一步，本文根据相关文献中碳减排相关指标的引用频率和长江经济带碳减排的发展实际情况，筛选出碳减排能力评价体系中的二级指标。然后，运用因子分析法对评价指标的样本数据进行分析以获取公共因子，并将其作为制造能力评价指标体系中的一级指标，从而构建出碳减排能力评价指标体系(表 1)，最终建立了经济发展能力、科技能力、碳汇能力、能源消耗与碳减排能力、社会发展能力 5 个方面共 26 个指标来反映长江经济带 11 个省份的碳减排能力发展现状。本文的基础数据来源于《中国统计年鉴》，与价格相关的数据均以 2000 年为不变价格计算。

表 1 碳减排能力评价指标体系

一级指标		二级指标		单位	属性
A_1	经济发展能力	B_1	人均 GDP	元/人	正向
		B_2	GDP 增长率	%	正向
		B_3	城镇居民人均可支配收入	元/人年	正向
		B_4	农村居民人均纯收入	元/人年	正向
		B_5	全社会固定资产投资	亿元	正向
		B_6	外商投资企业货物进出口总额	万美元	正向
		B_7	第三产业占 GDP 比重	%	正向
A_2	科技能力	B_8	国内三种专利授权数	件	正向
		B_9	产品质量情况	%	正向
		B_{10}	技术市场成交额	万元	正向
A_3	碳汇能力	B_{11}	森林覆盖率	%	正向
		B_{12}	人均公园绿地面积	平方米	正向
		B_{13}	森林碳吸收量	万吨	正向
		B_{14}	农作物碳吸收量	万吨	正向
A_4	能源消耗与碳排放能力	B_{15}	能源强度	吨标煤/万元	正向
		B_{16}	碳排放强度	吨/万元	正向
		B_{17}	能源足迹	吨标煤/人	正向
		B_{18}	碳足迹	吨/人	正向
		B_{19}	煤炭消费占能源消费比重	%	逆向
A_5	社会发展能力	B_{20}	民用汽车拥有量	万辆	正向
		B_{21}	城市化率	%	正向
		B_{22}	城市居民消费水平	元/人年	正向
		B_{23}	农村居民消费水平	元/人年	正向
		B_{24}	普通高校师生比	教师人数=1	正向
		B_{25}	每万人拥有公共交通车辆	标台	正向
		B_{26}	城市燃气普及率	%	正向

3.2 碳减排能力评价结果与分析

3.2.1 碳减排能力综合评价

根据公式(1)～(11)的计算可以得到长江经济带 11 个省份 2005 年、2010 年、2017 年碳减排能力综合评价结果(表 2)。此外，使用标准差分级法将各个贴近度分为中、较高、高水平三个等级，并运用 Arc-GIS 绘图以便更直观地显示各省份碳减排能力的空间分异。

从时间尺度分析，2005—2017 年长江经济带 11 个省份碳减排综合能力呈现不同幅度的增减趋势，上海、浙江呈小幅下降趋势，这与其初期碳减排能力较强，提升空间有限，且经济快速发展带来碳排放量的快速增长有关，其他省份均呈不同幅度的上升态势。其中，安徽碳减排综合能力的提升幅度最大，11 年间提高了 40.7%，原因是初期碳减排能力过低，提升空间大，且安徽快速发展起步时间相对较晚，能源消耗碳排放量相对较低。四川碳减排综合能力的提升幅度最小，11 年间提高了 5%，原因是初期碳减排能力居中，提升空间有限，但经济增速放缓导致的治理投入增长缓慢和碳汇能力增速放缓是四川碳减排综合能力的提升幅度不大的重要原因。其余省份 11 年间的碳减排综合能力提升幅度多在 10%～20%之间，增长幅度差距不大，各省份碳减排综合能力有明显的提升。

图 1 显示，从空间尺度分析，各省份碳减排能力存在一定的差距，2005 年江苏、上海、浙江为高水平区，其余省份为中水平区。2010 年江苏、上海为高水平区，浙江为较高水平区，其余省份为中水平区。2017 年江苏、上海为高水平区，浙江、重庆为较高水平区，其余省份为中水平区。总体来看，2005—2017 年长江经济带碳减排能力呈现东部强，中、西部弱的格局，且从标准差看 11 个省份间差距呈缩小态势。一是我国区域发展差异和自然环境差异较大，碳排放总量和碳排放承载力必然存在差距。二是“十一五”期间，我国初步建立了以促进新能源和可再生能源发展、节约能源和增加碳汇为目标的低碳发展政策体系，各地开始大力贯彻落实节能减排工作，差距开始缩小。此外，首末位省份碳减排能力绝对差值由 2005 年的 0.532 降为 2017 年的 0.449，这与各省份间加强交流合作，协同推进创新与产业转型升级，增加环境治理投入等有重要联系。

3.2.2 碳减排能力子系统评价

为了更深入分析长江经济带各省份碳减排能力变化趋势的可能原因，计算 5 个子系统贴近度，据此分析长江经济带 11 个省份各子系统碳减排能力特征与演变趋势，如表 3 所示。

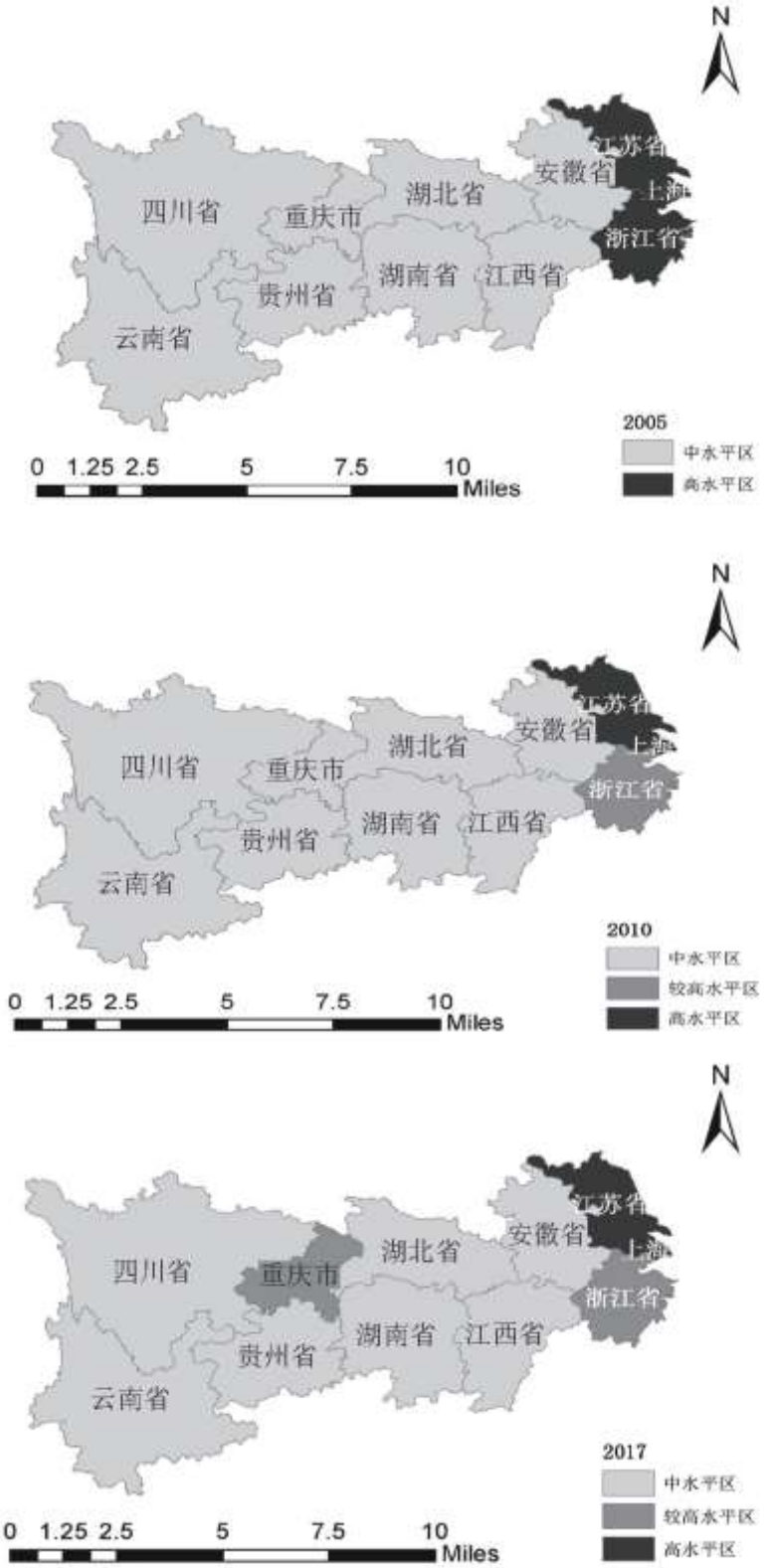

图 1 碳减排能力综合得分情况空间分布

2005—2017 年长江经济带 11 个省份各子系统得分呈现不同幅度的增减趋势。(1)经济发展能力子系统，上海、浙江、湖北

呈小幅下降态势，江苏、安徽、江西、湖南、重庆、四川、贵州、云南呈上升趋势。从空间分布看，长江经济带经济发展能力呈现东部强，中、西部弱的格局，首位省份为上海、江苏，末位省份为云南，首末位省份经济发展能力绝对差值由 0.671 降为 0.621。(2)科技发展能力子系统，上海、江西、湖南、重庆呈小幅下降态势，江苏、浙江、安徽、湖北、四川、贵州、云南呈上升趋势。从空间分布看，长江经济带科技发展能力呈现东部强，中、西部弱的格局，首位省份为上海、江苏，末位省份为安徽、云南，首末位省份科技发展能力绝对差值由 0.692 降为 0.642。(3)碳汇能力子系统，江苏、浙江呈小幅下降态势，上海、安徽、江西、湖南、重庆、四川、贵州、云南呈上升趋势。从空间分布看，长江经济带碳汇发展能力呈现中、西部强，东部次之的格局，首位省份为云南，末位省份为安徽，首末位省份碳汇发展能力绝对差值由 0.623 降为 0.477。(4)能源消耗与碳排放能力子系统，上海、湖南、云南呈小幅下降态势，江苏、浙江、安徽、江西、湖北、重庆、四川、贵州呈上升趋势。从空间分布看，长江经济带能源消耗与碳排放能力呈现东、西部强，中部次之的格局，首位省份为贵州，末位省份为江西，首末位省份能源消耗与碳排放能力绝对差值由 0.417 上升为 0.502。(5)社会发展能力子系统，上海和浙江有小幅度的下降，其余省份则呈现上升趋势。从空间分布看，长江经济带能源消耗与碳排放能力呈现东部强，中、西部次之的格局，首位省份为上海、浙江，末位省份为贵州，首末位省份社会发展能力绝对差值由 0.692 降为 0.413。

3.3 障碍因子诊断

结合上述评价结果，利用公式(11)、公式(12)测定出影响长江经济带碳减排能力各子系统以及各项指标的障碍度，对影响碳减排能力的障碍因子进行诊断。

3.3.1 子系统障碍因子

表 3 碳减排能力子系统得分

年份	指标	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	贵州	云南
2005	A_1	0.740	0.692	0.433	0.085	0.088	0.109	0.128	0.125	0.104	0.065	0.069
	A_2	0.759	0.563	0.550	0.067	0.175	0.196	0.188	0.145	0.178	0.085	0.117
	A_3	0.137	0.455	0.567	0.413	0.647	0.439	0.598	0.230	0.719	0.296	0.760
	A_4	0.520	0.275	0.275	0.139	0.114	0.248	0.194	0.211	0.202	0.531	0.298
	A_5	0.772	0.445	0.630	0.151	0.137	0.181	0.192	0.170	0.267	0.080	0.174
2010	A_1	0.671	0.756	0.393	0.093	0.094	0.125	0.134	0.222	0.126	0.105	0.069
	A_2	0.554	0.733	0.568	0.108	0.120	0.194	0.169	0.126	0.186	0.167	0.055
	A_3	0.224	0.565	0.471	0.689	0.597	0.664	0.401	0.432	0.496	0.258	0.581
	A_4	0.461	0.339	0.313	0.206	0.152	0.325	0.253	0.278	0.281	0.628	0.355
	A_5	0.662	0.520	0.647	0.180	0.144	0.234	0.249	0.231	0.285	0.086	0.192
2017	A_1	0.640	0.708	0.391	0.087	0.100	0.106	0.123	0.376	0.097	0.129	0.087
	A_2	0.552	0.720	0.587	0.199	0.078	0.210	0.178	0.220	0.219	0.143	0.165
	A_3	0.312	0.404	0.487	0.476	0.668	0.488	0.627	0.384	0.745	0.406	0.789

	A_4	0.486	0.473	0.346	0.271	0.172	0.269	0.176	0.226	0.221	0.674	0.251
	A_5	0.583	0.555	0.598	0.263	0.185	0.256	0.296	0.376	0.317	0.185	0.249

为了研究便利只列出障碍度排名第一的影响因子。根据表 4 来看，长江经济带各省份不同时点上碳减排能力的主要障碍因子存在一定的差异性。2005—2017 年，高水平区的上海主要障碍是碳汇能力子系统，其障碍度由 52 上升至 79.36，因此上海在今后的发展过程中要加强对生态环境的保护，提高碳汇能力。高水平区的江苏主要障碍是能源消耗与碳排放能力子系统和社会发展能力子系统，其障碍度由 47.69 下降至 41.94，因此，江苏在今后的发展过程中应保持优势并注重提高能源利用效率与社会发展水平。较高水平区的浙江主要障碍是能源消耗与碳排放能力子系统和经济发展能力子系统，其障碍度从 42.54 上升至 47.25，因此，浙江省在今后的发展过程中应注重发展低碳技术、提高经济发展质量。中水平区的安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南 8 个省份主要障碍是经济发展能力子系统和社会发展能力子系统，其障碍度在 64.27～98.68 之间，呈上升趋势，贵州与云南的障碍度远大于其他 6 个省份，因此，安徽等 8 个省份在今后的发展过程中应注重提高经济发展水平与社会发展水平，进一步统筹经济社会发展。

表 4 碳减排能力子系统障碍因子及其障碍度

地区	2005 年		2010 年		2017 年	
上海	A_3	52	A_3	71.34	A_3	79.36
江苏	A_4	47.69	A_5	50.17	A_5	41.94
浙江	A_4	42.54	A_1	45.88	A_1	47.45
安徽	A_1	75.62	A_1	77.22	A_1	78.46
江西	A_1	75	A_5	78.66	A_5	80.91
湖北	A_1	71.16	A_1	70.84	A_1	75.54
湖南	A_1	69.69	A_1	69.46	A_1	74.39
重庆	A_1	72.46	A_5	72.39	A_5	64.27
四川	A_1	71.12	A_1	69.66	A_1	77.7
贵州	A_1	80.81	A_5	98.68	A_5	89.45
云南	A_1	87.09	A_1	83.35	A_5	88.36

3.3.2 指标层障碍因子

为了研究便利，只列出障碍度排名前 2 位的影响因子，根据表 5 可以看出，排列前 2 位的障碍因子占碳汇能力和社会发展能力的比重较大，即障碍因子主要集中在碳汇能力子系统和社会发展能力子系统两个子目标层中。2005—2017 年，根据出现频次来看，农作物碳吸收量(B_{14})、森林覆盖率(B_{11})对较高水平及高水平区碳减排能力的影响最大，普通高校师生比(B_{24})也有一定的影响，表明江苏、浙江、上海 3 个省份在碳汇能力上有所欠缺。煤炭消费占能源消费比重(B_{19})对中水平区的安徽、江西、贵

州 3 个省份碳减排能力的影响最大，每万人拥有公共交通车辆(B_{25})、普通高校师生比(B_{24})也有一定的影响，表明安徽、江西、贵州 3 个省份的能源消费结构尚不合理。人均公园绿地面积(B_{12})对中水平区的湖北、湖南碳减排能力的影响最大，产品质量情况(B_9)、森林碳吸收量(B_{13})也有一定的影响，表明湖北、湖南在碳汇能力上也有所欠缺。产品质量情况(B_9)对中水平区的重庆碳减排能力的影响最大，农作物碳吸收量(B_{14})、人均公园绿地面积(B_{12})也有一定的影响，表明重庆的科技能力尚需提高。城镇居民人均可支配收入(B_3)对中水平区的四川碳减排能力的影响最大，碳足迹(B_{18})、城市燃气普及率(B_{26})也有一定的影响。城市燃气普及率(B_{26})对中水平区的云南碳减排能力的影响最大，GDP 增长率(B_2)、普通高校师生比(B_{24})也有一定的影响，表明四川、云南经济发展能力与社会发展能力有待提高。

表 5 碳减排能力指标层障碍因子及其障碍度

地区	2005 年				2010 年				2017 年			
	1		2		1		2		1		2	
上海	B_{14}	22.4	B_{11}	11.5	B_{14}	23.4	B_{12}	19.6	B_{14}	22.8	B_{11}	20.5
江苏	B_{11}	17	B_7	13.2	B_{24}	23.7	B_{11}	18.7	B_{24}	19.3	B_{11}	18.4
浙江	B_{14}	17.2	B_{15}	12	B_{14}	18.8	B_2	13.7	B_{24}	19.7	B_{14}	18.7
安徽	B_{19}	18.7	B_9	13.6	B_{19}	20.2	B_{25}	14.2	B_{19}	19.8	B_{11}	13.5
江西	B_{24}	19.6	B_{20}	13.9	B_{25}	14.7	B_7	14.4	B_{25}	19.3	B_9	17.8
湖北	B_{25}	12	B_{12}	11.7	B_3	11.6	B_7	11.5	B_9	13.4	B_{12}	13.3
湖南	B_{20}	11.2	B_6	11	B_{13}	15.1	B_{12}	13.6	B_{12}	14.2	B_{18}	13.3
重庆	B_9	17	B_{12}	16.4	B_9	19	B_{14}	16.8	B_{14}	16.6	B_{25}	14.7
四川	B_{25}	12.4	B_3	11.9	B_{26}	13.2	B_9	13.1	B_{18}	14.4	B_3	13.1
贵州	B_{19}	22.5	B_{24}	16.8	B_{26}	25.6	B_{19}	19.1	B_{19}	22.1	B_{26}	22
云南	B_2	19.4	B_{24}	15.5	B_{26}	20	B_9	15	B_{26}	32.5	B_4	14.7

3.4 碳减排路径规划

以 2005 年、2010 年、2017 年长江经济带各省份碳减排能力得分为横轴，以对各子系统加权平均得到的碳减排障碍度得分为纵轴绘制四象限矩阵图，对 4 种状态省份的碳减排潜力和路径进行分析(图 2)。象限Ⅰ，成熟型：位于该象限的省份已完成碳减排优化改革，减排效果显著，各方面的障碍度较小，因此，处于该象限的省份应该在保持现有优势的基础上，加大区域创新能力，进一步降低碳排放水平。象限Ⅱ，改善型：由于受经济增长方式的惯性趋势，位于该象限的省份有一定的优势能力，但减排效果达到理想水平，仍需充分利用自身能力，加大节能减排的力度，不断转向成熟型。象限Ⅲ，发展型：位于该象限的省份正处于发展萌芽期，经济发展水平较低，通常来说，为促进经济的快速发展，政府通常会以牺牲生态环境为代价，当经济达到一定水平后，再转为低碳经济。此方法不仅造成生态环境恶化、矿产资源浪费，而且耗时长。为避免这些问题，应在现有碳排放水平的基础上，创新发展路径，寻找一条绿色发展之路。象限Ⅳ，落后型：位于该象限的省份经济发展水平较低，能耗强度大，碳减排的障碍较大，是先发展后减排的发展方式，具体路径为象限Ⅳ—象限Ⅱ—象限Ⅰ，然而在当前环境硬约束发展需

兼顾经济效益和生态效益，应转变发展方式，分解过剩产能，边发展边减排。

4 结论与建议

4.1 研究结论

本文选取长江经济带 11 个省份为研究对象，运用 TOPSIS 法动态地呈现了各省份 2005—2017 年的碳减排发展状况，对碳减排的障碍因子进行分析，并对长江经济带碳减排路径进行探讨。具体研究结论如下。

(1)从综合得分看，东、中、西部省份间的碳减排能力水平差异较大，东部的沪苏浙减排能力远大于其他省份，从动态角度来看，省份间碳减排能力的差值减小，较高水平区的碳减排能力呈下降趋势，中水平区呈上升趋势，安徽的碳减排能力水平年际波动幅度差异明显。从子系统得分看，经济、科技、社会发展能力呈现东部强，中、西部次之的格局，碳汇能力呈现中、西部强，东部次之的局面，能源消耗与碳排放能力呈现东、西部强，中部次之的局面。

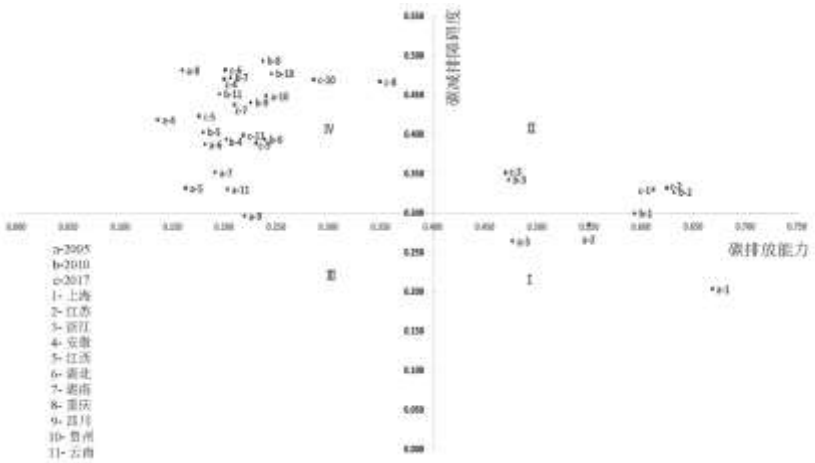

图 2 长江经济带碳减排潜力四象限矩阵图

(2)从子系统障碍因子看，东部的沪苏浙主要障碍因子是碳汇能力和能源消耗与碳排放能力，其他省份主要障碍因子是经济和社会发展能力。从指标层障碍因子看，各省份的主要障碍因子各不相同，影响最大的障碍因子主要来自碳汇能力和社会发展能力，包括农作物碳吸收量、森林覆盖率、每万人拥有公共交通车辆、城市燃气普及率等。

(3)不同减排状态的省份其减排潜力是不同的，减排路径的规划要同时考虑减排能力与障碍度，东部的沪苏浙主要为成熟型和改善型，减排路径应为改善型—成熟型，是着力于技术创新提高发展质量的发展方式。其他省份为落后型，减排路径为落后型—改善型—成熟型，是先发展后减排的发展方式。

4.2 对策建议

(1)东部地区承担更多的减排责任。

由于长江经济带东部各省份经济发展和产业结构相对完善，具有较强的减排能力，且历史碳排放量大，因此减排责任较大。而中、西部地区基于经济发展与产业转型时间需要，承担相对较小的碳减排责任。

(2)抓住碳源和碳汇两个重点。

积极发展清洁能源，大力开发低碳技术对碳减排具有巨大促进作用[14-16]，东部的沪苏浙应借助其技术条件，实现清洁能源替代，中、西部地区可以加大对煤炭的清洁化处理，并逐渐淘汰落后产业。另外，加大绿化投入，提高碳汇能力，提高环境自净能力，是降低碳排放的有效手段[17-18]。

(3)有序推进产业升级与产业转移。

东部省份应推进自主创新，提升产能并推进产业低碳化，中部省份应淘汰落后产能，依靠技术革新减轻经济发展对资源的依赖程度，西部省份应加大科技投入，承接发达地区的产业转移。同时，加强地区间的经济交流，形成带动效应，推动区域经济的均衡、高质量发展。

参考文献:

[1]Zheng D F,Zhang Y,Zang Z,et al.The driving forces and synergistic effect between regional economic growth, resources and the environment in the Yangtze River Economic Zone[J].Journal of Resources and Ecology,2014,5(03):203-210.

[2]Fisher V K,Jefferson G H,Liu H M.What is driving China’s energy intensity?[J].Resource and Energy Economics,2004,26(1):77-97.

[3]Fan Y,Liu L C,Wu G,et al.Changes in carbon intensity in China:Empirical findings from 1980-2003[J].Ecological Economics,2007,62(3):683-691.

[4]Zhang M,Mu H L,Ning Y D.Accounting for energy-related CO2 emission in China:1991-2006[J].Energy Policy,2009,37(3):767-773.

[5]Zhou P,Ang B W,Han J Y.Total factor carbon emission performance:A Malmquist Index Analysis[J].Energy Economics,2010,32(1):94-201.

[6]刘骏，胡剑波，罗玉兰.低碳城市测度指标体系构建与实证[J].统计与决策，2015(5)：59-62.

[7]武盈盈，李燕.山东省工业能源效率及其影响因素研究[J].中国人口·资源与环境，2015(6)：114-120.

[8]邓健，王新宇.区域发展战略对我国地区能源效率的影响——以东北振兴和西部大开发战略为例[J].中国软科学，2015(10)：146-154.

[9]Su M R,Chen L,Chen B,et al.Low-carbon development patterns:observations of typical Chinese cities[J].Energies,2012,5(2):291-304.

[10]屈小娥，曹珂.陕西省低碳经济发展水平评价研究[J].干旱区资源与环境，2013(2)：30-35.

[11]Jia J S,Fan Y,Guo X D.The low carbon development (LCD) levels’ evaluation of the world’s 47 countries

(areas) by combining the FAHP with the TOPSIS method[J].Expert Systems with Applications,2012,39(7):6628-6640.

[12]Guo J H.The efficiency evaluation of low carbon economic performance based on dynamic TOPSIS method[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics,2017,20(1),231-241.

[13]Wang C M.Study on the dynamic evaluation of the regional green low-carbon transformation in China evidence from Qingdao,Yantai and Weihai.Chaos,Solitons & Fractals.2016,89:147-152.

[14]Shimada K,Tanaka Y,Gomi K,el al.Developing a long term local society design methodology towards a low-carbon economy:An application to Shiga prefecture in Japan[J].Energy Policy,2007,35(9):4688-4703.

[15]Tang J X,Zhang C,Zhou W L.Environmental regulatory efficiency and its influencing factors in China[J].Energy Efficiency,2018,12:947-962.

[16]Zhang G L,Zhang N,Liao W M.How do population and land urbanization affect CO2 emissions under gravity center change?A spatial econometric analysis[J].Journal of Cleaner Production,2018(202):510-523.

[17]Lebron I,Mcgiffen E M J,Suarez D L.The effect of total carbon on microscopic soil properties and implications for crop production[J].Journal of Arid Land,2012,4(3):251-259.

[18]Zhang C,Li C F,Chen X,et al.A spatial-explicit dynamic vegetation model that couples carbon,water,and nitrogen processes for arid and semiarid ecosystems[J].Journal of Arid Land,2013,5(1):102-117.