

长江经济带终端能源消费

碳减排效率与产业结构耦合分析¹

田 泽，黄萌萌

(河海大学 低碳经济研究所，江苏 常州 213022)

【摘 要】：打造沿江绿色能源产业带、建设生态文明的示范带是长江经济带低碳绿色发展道路的重要目标。论文结合非期望产出 EBM 和超效率 DEA 模型测算长江经济带终端能源消费碳减排效率，并构建终端能源碳减排效率与产业结构的耦合模型，研究结论显示：①长江经济带碳减排效率在 2006 年到 2015 年间整体呈现出扁“U”型先降后升的演进特征；②长江经济带碳减排效率区域差异较大，下游效率最高，中游次之，上游最低；③各省市整体处于中低耦合协调阶段，碳减排效率与产业结构演化尚未实现协调发展，且区域空间耦合度分布不均衡；④经济带产业结构集中度、高级度与碳减排效率耦合协调度较高，说明产业结构集中化和高级化优化有利于提升碳减排效率。为此，提出长江流域区域协同发展、加强节能环保科技投入、促进产业结构优化升级等对策及建议。

【关键词】：长江经济带；终端能源消费；碳减排效率；EBM 超效率模型；耦合模型

【中图分类号】：F062.1

【文献标志码】：A

【文章编号】：1001-2435 (2018) 01-0092-09

提高碳减排效率、促进产业结构升级是经济新常态下促进区域发展低碳转型的关键路径。长江经济带贯穿我国东中西部地区，在中国经济发展中发挥着重要的战略支撑和示范引领作用，经济持续快速增长为长江经济带带来福利的同时，也使得该地区能源与生态环境承受了巨大压力。“打造沿江绿色能源产业带”“建设生态文明的先行示范带”是长江经济带当前绿色低碳建设的主要目标。在此背景下，探索产业结构转型与碳排放效率之间的关系对促进长江流域经济发展、切实推进我国生态文明建设具有重要的实践意义。

一、文献综述

关于碳排放效率评价方法的应用，主要以数据包络 (DEA) 法为主，目前运用较多的模型有 DEA-CRS，SBM，超效率 DEA 以及 DEA Malmquist 指数法等。近年来，部分学者对 DEA 模型进行修正，纳入环境变量作为非期望产出运用到经济学领域，使得计算得出的效率结果更科学。吴传清^[1]1647 基于超效率 DEA 模型和 ML 指数法，以工业废气排放为负向产出指标测算长江经济带全要素能源效率时，发现导致流域内效率低下的主要原因是污染排放。申建良^[2]11 以全国 29 个省份的面板数据为研究对象，运用 DEA-CRS 模型测算发现 1995-2013 期间，考虑环境约束的全要素能源效率整体呈下降走势的同时，区域差距有不断扩大的趋势，表现出自东向西依次递增的形态。孙秀梅^[3]168 揭示了 2005-2012 年山东省 17 市碳排放效率的差异性特征，并认为不同排放水平的城市应根据自身情况采取不同的减排措施。田泽^[4]38 应用超效率 DEA-EBM 模型和全局 ML 指数法相结合对长江经济带各省市节能减排效率

¹**【基金项目】**：国家自然科学基金项目 (41471457)；江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX17_0548)；中央高校基本科研业务费 (学生项目) (2017B746X14)；江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心项目

【作者简介】：田 泽 (1964-)，男，甘肃张掖人，教授，博士生导师，低碳经济研究所所长，研究方向为低碳经济政策与国际贸易；黄萌萌 (1994-)，浙江台州人，硕士研究生，主要研究方向为低碳经济政策。

进行评价，发现效率呈 U 型演变趋势以及东高西低的空间分布特点。

产业结构转型升级及演进会对碳排放效率有所影响，两者内在的耦合交互关系值得探索。柴莎莎^{[5]130}的研究解释了畸形的产业结构导致江西省经济发展与环境污染耦合协调度偏低的原因。江洪^{[6]152}在研究我国各省能源管理效率与产业结构耦合度时，发现两者均存在由东向西，由南向北逐渐先升后降的趋势，地区差异性极为明显；且经济发展水平的高低与二者耦合协调度成正比。关伟^{[7]520}通过耦合度评价模型分析了能源效率与产业结构的耦合特征，发现整体耦合度不高且区域差异显著。马丽^{[8]1299}应用耦合度评价指标体系测算数百个地级单元经济环境耦合度，发现全国经济环境系统整体耦合度和协调度均较低，沿海地区较高，内陆地区则次之。

上述研究大多的是全国或某省份的社会经济与生态环境系统的时空耦合情况，而针对长江经济带碳减排效率与产业结构的耦合情况的研究很少。本文旨在通过对长江经济带终端能源消费碳减排效率的测算评价，分析其时空演变特点，并进一步揭示长江经济带终端能源消费碳减排效率与产业结构的空间分布特征及其耦合关系。

二、长江经济带终端能源消费碳减排 DEA 效率评价

（一）指标选取与数据来源

1. 研究对象

论文研究对象是长江经济带 11 个省市的终端能源消费碳减排效率。根据前面的理论模型，采用年度面板数据，选取 2006–2015 年为样本区间。设定资本存量（K）、劳动力（L）能源消耗量（E）为生产投入变量，同时设定地区生产总值（GDP）为期望产出，二氧化碳排放量（CO₂）为非期望产出来测算碳减排效率。数据来源于各省市对应年份的《统计年鉴》、《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》

2. 指标选取

（1）资本存量（K）用折算成 2005 年不变价的社会固定资产投资来衡量资本存量这一指标，以消除价格因素的影响。资本的价值会随时间的推移而有所损耗，且与陈旧的资本相比，最新资本的技术含量高且优质^{[9]148}。因此，运用“永续盘存法”来计算折旧后的资本存量，同时通过定义资本年龄来衡量资本质量，最终得到考虑质量的资本存量，数据均来源于国家统计局。

（2）劳动力（L）劳动力的质量和数量是核算劳动力投入的两大要素，选取就业总人数来衡量劳动力数量，劳动力质量则根据《中国 2010 年人口普查资料》提供的人口数量分布与人均教育年数来计算。

（3）能源消耗量（E）能源消耗量主要考虑了包括煤炭类、石油类、电力及热力在内的 19 种能源的消耗量，并将其折算成标准煤。

（4）二氧化碳排放量（CO₂）。本文测算的是，沿用齐绍洲^{[10]88-90}提出的方法对长江经济带各省份电力热力的 CO₂ 排放因子和终端承担比进行计算，测算出 19 种终端能源消费的二氧化碳排放量。

（5）地区生产总值（GDP）。各省市的 GDP 是以 2005 年不变价计算。

（二）长江经济带终端能源消费碳减排效率测算

数据包络法（DEA）是目前用于测算效率的主流方法。最开始的是径向测算规模报酬不变 CCR 模型^{[11]229-245}，所有投入要素等比例缩减这一严格的条件往往容易使得其结果与现实相背离。随后 Tone^{[12]1225-1231} 提出非径向 SBM 模型避免了 CCR 模型中投入要素等比例缩减这一局限，但却损失率效率前沿投影值，为克服 CCR 和 SBM 模型的缺陷，Tone 创建了 EBM 模型^{[13]1554-1563} 同时具备径向和非径向特点。但上述模型均默认产出为期望产出，而生产过程中不可避免的会附带一些非期望产出，因此本文通过构建考虑非期望产出的 Undesirable-EBM 模型，Undesirable-EBM 模型具体如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Undesirable-EBM}^* = r^* = \min_{\theta, \lambda, s^+} & \left(\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{w_i^+ s_i^+}{x_{i0}} \right) \\
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{ik} + s_i^+ = \theta x_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, I) \\
 & \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{mk} \geq y_{m0} \quad (m = 1, 2, \dots, I) \\
 & \sum_{k=1}^K \lambda_k u_{jk} = u_{j0} \quad (j = 1, 2, \dots, I)
 \end{aligned}$$

$$\lambda_k \geq 0, s_i^+ \geq 0 \quad (1)$$

θ 为 CCR 模型计算的径向效率值， s^+ 代表非径向的投入要素的松弛向量， λ 为权重向量， X 代表投入矩阵、 Y 代表期望产出矩阵， U 代表非期望产出矩阵， ε 为非径向部分的重要程度（当 ε 为 0 时，即 CCR 模型；当 $\varepsilon = 1$ 时，即 SBM 模型）， γ^* 为考虑非期望产出的效率，当 $\gamma^* < 1$ 时无效， $\gamma^* = 1$ 时有效。

Undesirable-EBM 模型虽成功地考虑了非期望产出并得到有效决策单元，但由于其效率最大值为 1 且有效的决策单元效率值均为 1，而测算结果往往会出现多个决策单元被评价为有效，因此无法准确地判断有效决策单元之间的差异。Andersen 等提出的超效率 DEA 模型^{[14]1261-1264} 恰好弥补了这一缺陷，可准确地判断出处于生产前沿有效的多个决策单元的要素组合的优劣。超效率 DEA 原理是在评价某个决策单元时，用其他决策单元的投入和产出的线性组合来代替自身组合，一个有效决策单元按比例增加自身投入时可以达到效率值不变的效果，这个比例则是超效率评价值。因此本文在 Undesirable-EBM 模型基础上，结合超效率 DEA 模型的优点，综合为 EBM 超效率模型对长江经济带的碳排放量效率进行测算，由此得到的效率分值可大于 1，大于 1 时表明可追加投入以进一步提高碳减排效率。

运用 MAXDEA6.6PRO 计算了长江经济带 11 个省份的碳减排效率，结果如表 1 所示：

表 1 长江经济带碳减排效率指数（2006 年-2015 年）

省份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值
上海	1.012	0.948	0.914	0.945	0.956	0.96	0.973	0.979	0.904	1.024	0.961
江苏	1.001	0.91	0.883	0.874	0.925	0.895	0.904	0.91	0.931	1.002	0.924
浙江	1.007	0.958	0.915	0.905	0.926	0.898	0.899	0.885	0.889	1.001	0.928
安徽	0.917	0.67	0.669	0.677	0.691	0.687	0.676	0.648	0.65	0.679	0.696
江西	0.774	0.656	0.663	0.605	0.744	0.763	0.763	0.732	0.722	0.752	0.717
湖北	0.971	0.737	0.612	0.586	0.602	0.592	0.592	0.667	0.676	0.753	0.697
湖南	1.002	0.782	0.652	0.638	0.746	0.754	0.753	0.784	0.801	0.822	0.773
重庆	0.685	0.672	0.547	0.548	0.576	0.574	0.579	0.685	0.666	0.734	0.627
四川	0.958	0.719	0.648	0.621	0.617	0.649	0.629	0.612	0.614	0.668	0.673
贵州	0.516	0.398	0.366	0.362	0.38	0.387	0.383	0.399	0.411	0.418	0.402

云南	0.524	0.446	0.445	0.423	0.448	0.462	0.468	0.497	0.501	0.567	0.478
经济带	0.875	0.714	0.697	0.69	0.727	0.72	0.708	0.726	0.738	0.789	0.738

（三）碳减排效率结果分析

1. 长江经济带整体碳减排效率时间演变分析

长江经济带碳减排效率在 2006 年到 2015 年间整体呈现出扁“U”先降后升的特征（见图 1），十年间碳减排平均效率为 0.738。2006 年是碳减排效率最高的年份，效率值高达 0.875，随后受国际金融危机的影响，碳减排效率在 2007 年至 2009 年期间骤降至 0.690，下降率高达 21.14%。2010 年之后开始回升。但由于流域内产业结构主要以高能耗高污染工业为主，且近年来这些产业发展迅速，导致碳减排效率回升速度缓慢，截至 2015 年，碳减排效率回升至 0.789，尚未达到 2006 年的效率值，这表明长江经济带的碳减排效率还有很大的进步空间。

为了更有针对性的分析该流域碳减排的具体情况，本文将 11 个省份按照上中下游分类，上游包括四川重庆贵州云南，中游包括湖北湖南安徽江西，下游包括上海江苏浙江。观察图 1 发现，上中下游碳减排效率趋势与长江经济带整体情况基本一致，但区域差异明显，上游城市的平均减排效率在 0.55 左右，中游城市稳定在 0.7 上下，下游城市高居 0.9，区域减排效率呈明显的梯级增长趋势^②。

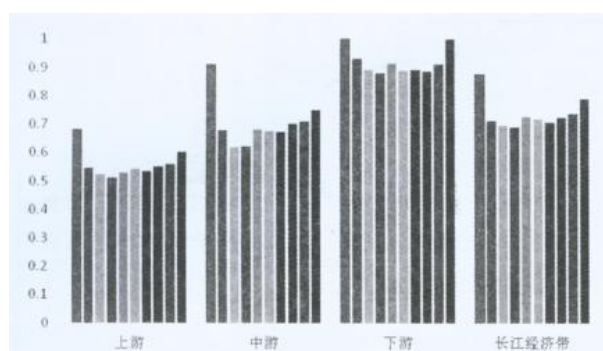


图 1 长江经济带 2006-2015 年分区域碳减排效率

2. 长江经济带各省市碳减排效率空间演变分析

根据 DEA-EBM 效率指数的大小，将流域内的碳减排效率分为完全有效（ $\theta > 1$ ）、高效（ $0.8 \leq \theta \leq 1$ ）及低效（ $\theta \leq 0.8$ ）。2006 年，完全有效的省市有 4 个（上海、浙江、湖南和江苏），高效的 3 个（湖北、四川及安徽），剩下的江西、重庆、云南和贵州则处于低效阶段；2015 年各省市减排效率明显下降，完全有效省市仅剩江浙沪三省，湖南省减排效率降低至高效水平，成为唯一一个处于高效阶段的省份，2006 年位于高效阶段的三个省份均降低到低效阶段，2015 年低效省份高达 7 个。

另外，折线图 2 反映了各省份历年碳减排效率走势情况，我们可以发现长江经济带各省份的碳减排效率差异明显，大多数省份位于 0.6-0.8 之间。最高的是上海市，每年效率均超过 0.9，且有两年超过 1（2006 年和 2015 年）；效率最低的是贵州省，平均效率为 0.402。

^②①上、中和下游各柱条为 2006—2015，10 年各区域的碳减排效率。

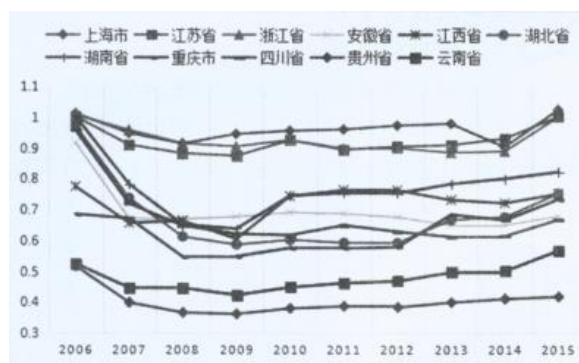


图2 长江经济带11省市碳减排效率演进

3. 碳减排效率的空间收敛性分析

变异系数能有效地反映空间差异，图3展示了长江经济带碳减排效率变异系数的走势：①可以发现上中下游变异系数差距较大：上游碳减排效率的变异系数最大，在0.2-0.3范围内波动，中游均值约为0.08，下游地区均值则低于0.03，这主要是因为长江经济带的经济发展水平从上游到下游呈阶梯递增演变，上游省份经济落后，科技水平不高，发展水平层次不齐。②上中下游变异系数时间走势不同：上游地区10年间变异系数呈现逐渐走低趋势，但是绝对值仍高居首位；与上游不同的是，中下游的系数波动大，形成先降后升再减的波动演变。

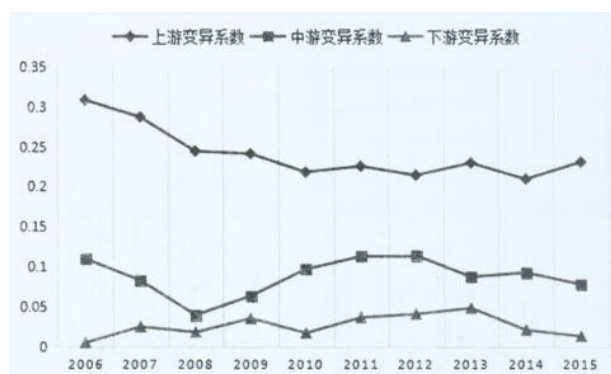


图3 2006-2015年长江经济带碳减排效率快空间差异的变化走势

三、长江经济带碳减排效率与产业结构空间耦合分析

（一）碳减排效率与产业结构空间耦合模型构建

“耦合”是一个物理学概念，衡量的是多个不同系统之间的相互作用，耦合分析是在评估各子系统的基础上在再对耦合度进行计算和分析。近年来耦合开始被用到经济环境领域，在产业高级度、产业偏差度及产业集中度和碳减排效率的测算基础上，对区域产业结构演变与碳排放关系进行更全面深入的研究，以期推动区域经济可持续发展。本文构建了长江经济带碳减排效率与产业结构耦合模型，耦合度用C表示，C值越大表明系统间的耦合程度越高，C的计算公式如下：

$$C = \left(\frac{E(x)S_i(y)}{[E(x) + S_i(y)]^2} \right)^{1/k} \quad (2)$$

K 可根据具体情况取不同的值，此处假定 k 为 2。E (x) 和 S_i (y) 代表碳减排效率与产业结构综合指数，E (x) 为表 1 中的碳减排效率值，S_i (y) 包括 S₁ (y) ， S₂ (y) 和 S₃ (y) ， 分别表示产业结构高级度、偏差度、集中度指数。在碳减排效率及产业结构“三度”计算结果的基础上，将其进行 0-1 标准化处理带入上述公式计算出耦合度 C。

为避免耦合模型 C 的不平衡性，使耦合效应的分析结果更具有科学性和准确性，本文在为 E (x) 和 S_i (y) 分别设定 0.6 和 0.4 的权重的基础上，引入耦合协调度模型，协调度用尺表示，计算公式如下。

$$R = \sqrt{C \times (0.6E(x) + 0.4S_i(y))} \quad (3)$$

(二) 产业结构综合指数测算

1. 长江经济带产业结构高级度 (G)

产业结构高级度度量的就是地区经济由低级水平向高级水平进化的动态过程，即由农业向工业、服务业转化的过程，并能反映出某个时间点上经济发展水平及未来变动趋向，本文借鉴付凌晖^{[15]80}构造的产业高级化指标来衡量产业高级度。首先定义产业低层次向量为 X₁=(1, 0, 0)，产业中层次向量为 X₂=(0, 1, 0)，产业高层次向量 X₃=(0, 0, 1)，随后由三大产业增加值占地区生产总值比例构成三维向量 X₀=(x₁, , 0, x₂, 0, x₃, 0)，之后分别算出 X₀与 X₁, X₂, X₃的夹角 θ₁, θ₂, θ₃：

$$\theta_j = \arccos \left[\frac{\sum_{i=1}^3 (x_{i,j} \cdot x_{i,0})}{(\sum_{i=1}^3 x_{i,j}^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (\sum_{i=1}^3 x_{i,0}^2)^{\frac{1}{2}}} \right], j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

随后，定义产业结构高级化 Upgrading Index 如下：

$$G = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^k \theta_j = 3\theta_1 + 2\theta_2 + \theta_3 \quad (5)$$

2. 产业偏差度 (P)

产业结构偏差度测算的是在标准产业结构基准下，当地实际产业结构与标准偏差的大小，反映出当前地区产业规模与产业结构是否与经济发展水平一致，也是评价产业结构合理化的重要指标。目前对产业结构合理化的比较方法和测定指标有多种，本文借鉴关伟^{[7]525}所用的方法，根据人均 GDP 大小将全国 31 个省份分为高收入地区、中收入地区及低收入地区，并测算出各个收入水平地区的三大产业结构比例，以此作为长江经济带标准产业结构 (x^{*})，从而测算出各个省份的产业偏差度。以 2015 年为例，2015 年长江经济带第一产业标准值为 10.3，第二产业标准值为 44.1，第三产业标准值为 45.6，则将 x^{*}₂₀₁₅=(10.3, 44.1, 45.6)作为标准对长江经济带各省份的产业结构偏差度进行测算，偏差度越小表明产业结构越合理，具体计算公式如下：

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - x_i^*)^2} \quad (6)$$

3. 产业集中度 (I)

产业集中度体现的是地区产业的集中程度而非发展水平的高低，在一定意义上能有效量化流域内产业专门化程度，其计算公式如下：

$$I = (A - R) \div (M - R) \tag{7}$$

其中 A 为某地 3 大产业实际累计占比；R 为该地 3 大产业平均分布时的累计占比，值为 200，M 为该地产业全部集中于某个产业时的累计占比，值为 300。

（三）耦合结果分析

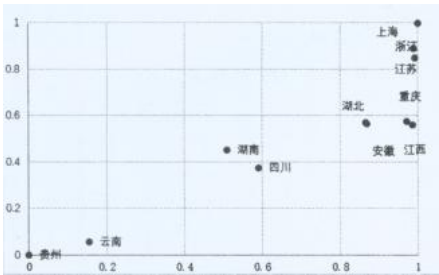
在借鉴前人研究的基础上，结合长江经济带实际耦合度分布情况，将公式（2）和公式（3）计算得到的耦合度和协调耦合度进行分段分析，C 和 R 数值越大，耦合程度则越高，具体如表 2 所示：

表 2 长江经济带碳减排效率与产业结构耦合度与协调耦合度阶段

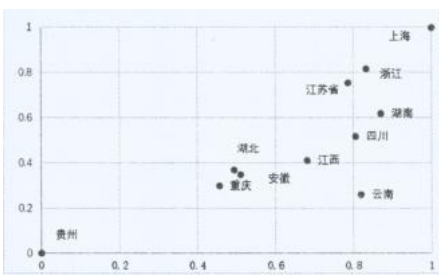
耦合度	耦合阶段	耦合协调度	协调耦合阶段	综合耦合阶段
0	相互独立	0	不协调耦合	独立不协调
$0 < C \leq 0.3$	分离阶段	$0 < R \leq 0.3$	弱协调耦合	分离弱协调
$0.3 < C \leq 0.6$	拮抗阶段	$0.3 < R \leq 0.6$	中协调耦合	拮抗中协调
$0.6 < C \leq 0.8$	磨合阶段	$0.6 < R \leq 0.8$	较强协调耦合	磨合较强协调
$0.8 < C \leq 1.0$	耦合阶段	$0.8 < R \leq 1.0$	强协调耦合	耦合强协调

1. 静态分析

图 4 展示了长江经济带碳减排效率与产业结构集中度、偏差度、高级度的耦合关系图，分别对应集中耦合关系图、合理耦合关系图和高级耦合关系图。



图（a）集中耦合关系



图（b）合理耦合关系图

（1）整体上看，长江经济带碳减排效率与产业结构高级度、偏差度、高级度的耦合关系图分布情况有明显的区别。图（a）显示集中耦合度分布较为极端，大部分集中在右上角，少部分集中于左下角；而合理耦合度（见图 b）和高级耦合度（见图 c）分布则都呈从左到右阶梯状分布，但合理耦合图比高级耦合图分布更集中；反映出长江经济带流域产业结构集中化、高级化、合理化与其碳减排效率的提高密切相关。

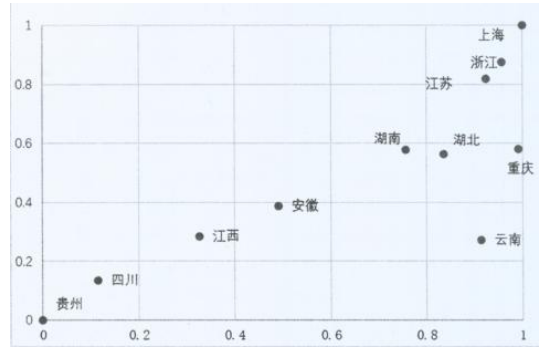


图 (c) 高级耦合关系图

图 4 2006-2005 年长江经济带节能减排效率与产业就结构耦合关系图

注：图 4（a）（b）（c）的横坐标为耦合度（C），纵坐标为耦合协调度（R）

（2）从耦合度分布分析，具体体现在以下方面：①碳减排效率与产业结构高级度方面，2006-2015 年长江经济带各省市碳减排效率与产业结构高级度存在显著的耦合差异：贵州省处于独立阶段（ $C=0$ ）；四川省处于分离阶段（ $0 < C \leq 0.3$ ）；江西省和安徽省处于拮抗阶段（ $0.3 < C \leq 0.6$ ）；湖南省处于磨合阶段（ $0.6 < C \leq 0.8$ ）；云南省、湖北省、浙江省、江苏省、重庆市和上海市处于耦合阶段（ $0.8 < C \leq 1$ ），这表明产业高级度与碳排放效率的相互作用显著，但存在较大的区域差异。

②碳减排效率与产业结构偏差度方面，有 5 个省市处于磨合及以下阶段，6 个达到耦合阶段，其中贵州省为独立阶段（ $C=0$ ）；重庆市、湖北省和安徽省为拮抗阶段（ $0.3 < C \leq 0.6$ ），江苏省和江西省为磨合阶段（ $0.6 < C \leq 0.8$ ）；上海市、湖南省、浙江省、四川省和云南省为耦合阶段（ $0.8 < C \leq 1$ ），反映出各省市产业偏差度差异明显。

③碳减排效率与产业结构集中度方面，处于独立阶段的有贵州省（ $C=0$ ）；处于分离阶段的有云南省（ $0 < C \leq 0.3$ ）；处于磨合阶段的有四川省与湖南省（ $0.3 < C \leq 0.6$ ），而处于耦合阶段的有浙江省、江苏省、重庆市、江西省、湖北省、安徽省和上海市（ $0.8 < C \leq 1$ ），反映出中下游产业集中度情况良好，产业规模效应利于碳减排效率的提升。

（3）通过比较可以发现耦合协调度 R 值明显比耦合度 C 值小，且更具科学性。从耦合协调度分布看：①碳减排效率与产业结构高级度方面，贵州省为不协调耦合阶段，四川省和云南省处于弱协调耦合阶段，安徽省、江西省、湖北省、重庆市位于中协调耦合阶段，湖南省处于中协调耦合阶段，而上海市、浙江省、和江苏省 3 个省处于强协调耦合阶段，这与中上游地区承接产业转移息息相关，可以反映出碳减排效率随着产业结构高级化程度的加剧而不断提高。

②碳减排效率与产业结构偏差度方面，处于强协调耦合阶段只有上海市和浙江省，处于较强耦合阶段的仅有浙江省和湖南省，剩下 7 个省市均处于中协调耦合及以下阶段，占比高达 64%，这说明当前流域内产业结构分布欠合理，未来产业结构的合理化与碳减排效率提升有巨大潜力。

③碳减排效率与产业结构集中度方面，江苏省、浙江省和上海市位于强协调耦合阶段；其他多数省份（贵滇渝湘川赣鄂皖）处于中协调耦合及以下阶段，反映出从耦合协调度看，流域内未来碳减排效率的提升空间巨大，可进一步通过提高产业集中度以提高减排效率。

（4）区域差异。2006-2015 期间长江经济带碳减排效率指数与产业结构指数的耦合强度和协调程度在空间上具有不对称性。

从耦合协调度看，减排效率与产业结构高级度、偏差度、集中度之间的耦合度和协调耦合度均呈现出自下游到上游递减趋势；而从耦合度看，上中下游各自区域内产业耦合情况差异同样显著。“三度”的横向比较可以发现产业结构合理耦合情况在三个模型里是最低的，说明与高级度和集中度相比，反映出当前流域内各省市产业结构分布的合理度对碳减排的作用效果并不明显，而高级度与集中度的作用则相对更为明显。

2. 动态分析

观察图 5 发现，①在 2006-2009 的金融危机前后，期间，长江经济带的产业结构与碳减排效率的耦合协调度有一个明显的下降趋势，②金融危机过后的 2010-2013 年间，集中耦合协调度与高级耦合协调度开始缓慢波动上升，而偏差耦合协调度则在 0.5 上下平缓波动。这主要是因为流域内产业结构不够合理，仍以高污染高排放的第二产业为主，金融危机的冲击会使其急剧减少污染治理投入，导致耦合度降低。③2013 年以后长江经济带集中耦合协调度与高级耦合协调度的变化趋同，且呈现出明显的加速上升趋势，而偏差耦合协调度则再次呈现出缓慢下降趋势。反映出流域内各省市产业结构调整推动了产业高级化，提高了产业规模，但没有实现提高产业合理度的目标，这可能与当地在进行产业规划时没有很好的因地制宜有关。综上所述，通过调整产业结构以提高碳减排效率，从而实现长江经济带各省市的节能减排任务目标仍很艰巨。



图 5 2006-2015 年长江经济带耦合协调度演变

四、结论与建议

(一) 结论

域内产业耦合情况差异同样显著。“三度”的横向比较可以发现产业结构合理耦合情况在三个模型里是最低的，说明与高级度和集中度相比，反映出当前流域内各省市产业结构分布的合理度对碳减排的作用效果并不明显，而高级度与集中度的作用则相对更为明显。

2. 动态分析

第一，长江经济带碳减排效率在 2006 年到 2015 年间整体呈现出扁“U”型先降后升的特征，且上中下游流域减排效率差距较大，下游最高，中游次之，上游最低，整个经济带仍有较大的减排空间；另外由于上游省份经济落后，科技欠发达，导致其碳减排空间变异系数大，不同省份减排效率层次不齐。

第二，从终端能源消费碳减排效率与产业结构的空间耦合协调关系看，长江经济带各省市耦合协调度呈先降后升缓慢波动趋势，整体处于中等协调耦合阶段，碳减排效率与产业结构演化没有实现协调发展，且区域空间耦合度分布不均衡。这可能是

因为长江经济带一体化程度不高，上中下游未能根据自身比较优势形成合理分工，产业重复建设，导致能源利用效率不高。

第三，经济带各省域产业结构集中度和高级度与碳减排效率耦合度较禽，说明产业结构集中化和高级化有利于提升碳减排效率，更好的实现绿色 GDP 的增长。上海市作为长江经济带的龙头，其碳减排效率和产业结构耦合程度最高，与产业高级度、集中度、合理度的耦合度及协调耦合度均接近 1，处于耦合强协调阶段，而碳减排效率和产业结构偏差最大的是贵州省，说明低级分散产业结构不利于节能减排，并会严重阻碍社会经济的整体发展。

（二）建议

1. 整合产业链，促进长江流域区域协同发展

充分发挥上海、武汉、重庆等中心城市的辐射带动作用和各地区比较优势，构建区域间产业协同平台和区域联动合作机制。整合长江经济带产业链，打破地区封锁和利益藩篱，加强上中下游产业互动，推动长江流域产业结构优化升级，实现沿线城市区域经济的协同发展。

2. 培育特色产业，推动经济带产业结构优化升级

产业结构高级度、合理度、集中度是影响碳减排效率的重要因素。加强长江经济带产业整体规划和调控，利用和发挥好各省市自身资源禀赋，建设若干特色产业和绿色生态产业，重点发展高新技术产业、智能制造业与服务业，提高产业集中度、推动产业高级化来解决传统工业带来的能耗和污染问题，最终实现产业结构的绿色低碳发展。

3. 加强节能与环保科技投入，建设沿江绿色低碳生态长廊

应加大低碳技术、节能减排技术和绿色能源技术的投入力度，充分发挥科技进步在环境治理和生态保护中的重要作用。优化沿江地区能源消费结构，建立绿色低碳循环产业体系。坚持保护优先，加强环境治理，做好长江沿岸生态修复，全力打造大气、水和土壤污染防治与保护的绿色生态长廊。健全资源有偿使用和生态补偿机制，落实最严格水资源管理制度，探索建立长江经济带区域排污权、碳排放权、用能权和用水权交易等多元生态保护补偿机制。

〔参考文献〕：

[1]吴传清，董旭. 环境约束下长江经济带全要素能源效率的时空分异研究——基于超效率 DEA 模型和 ML 指数[J]. 长江流域资源与环境，2015（10）：1647-1653.

[2]申建良，冉启英，陈彤. 环境约束下的中国全要素能源效率研究——基于 DEA-Tobin 模型[J]. 资源与产业，2010（8）：1-6.

[3]孙秀梅，张慧，王格. 基于超效率 SBM 模型的区域碳排放效率研究——以山东省 17 个地级市为例[J]. 生态经济，2016（5）：68-73.

[4]田泽，严铭，顾欣. 碳约束下长江经济带区域节能减排效率时空分异研究[J]. 软科学，2016（12），38-42.

[5]柴莎莎，延军平，杨谨菲. 山西经济增长与环境污染水平耦合协调度[J]. 干旱区资源与环境，2010（1）：130-134.

-
- [6]江 洪, 赵宝福. 碳排放约束下能源效率与产业结构解构、空间分布及耦合分析[J]. 资源科学, 2015 (1) : 152-162.
- [7]关 伟, 许淑婷. 辽宁省能源效率与产业结构的空间特征及耦合关系[J]. 地理学报, 2014 (4) : 520-530.
- [8]马 丽, 金凤君, 刘 毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012 (10) : 1299-1307.
- [9]李 科. 我国省际节能减排效率及其动态特征分析[J]. 中国软科学, 2013 (5) : 144-157.
- [10]齐绍洲, 付 坤. 低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2013 (2) : 85-92.
- [11]Ferrier G D , Lovell C A. Measuring cost efficiency in banking: Econometric and Linear programming evidence [J]. Journal of Econometrics, 1990, 46 (2) : 229-245.
- [12]Tone K. A strange case of the cost and allocative efficiencies in DEA[J]. Journal of the operational Research Society. 2002 (53) : 1225-1231.
- [13]Tone K , Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA : a third pole of technical efficiency[J]. European Journal of Operational Re-search, 2010 (3) : 1554-1563.
- [14]Anderson P , Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1993, 39 (10) : 261-1264.
- [15]付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. 统计研究, 2014 (11) : 79-81.