

长江经济带碳排放驱动因素及其空间特征

——基于 LMDI 模型^{*1}

黄勤¹ 何晴²

【内容摘要】本文运用 LMDI 模型将 1995—2014 年长江经济带能源消费 CO₂ 排放增量的驱动因素分解为经济规模、产业结构、能源强度和能源结构“四大效应”。结果表明，经济规模、产业结构变化对 CO₂ 排放表现为正效应，能源强度、能源结构对 CO₂ 排放则表现为负效应，各效应对 CO₂ 排放的累积贡献率绝对值由大到小依次是：经济规模效应、能源强度效应、产业结构效应和能源结构效应；长江经济带上、中、下游三大地区的碳排放因素存在较为明显的空间差异，下游经济规模扩张对 CO₂ 排放的增长影响最为明显，产业结构变化对中上游 CO₂ 排放的正效应较为明显，能源强度对减少 CO₂ 排放的作用从大到小依次为中游、下游、上游。据此，本文从创新驱动、产业转型升级、发展可再生能源及提高能源管理效率等方面提出具体的对策建议。

【关键词】：能源消费；CO₂ 排放；因素分解；LMDI 模型

【中图分类号】:F205 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1000-8306(2017)03-0080-13

长江经济带发展战略已正式上升为国家战略。《长江经济带发展规划纲要》强调指出，推动长江经济带发展必须坚持“生态优先、绿色发展”的战略定位，在保护生态的条件下推进发展，实现经济发展与资源环境相适应，走出一条绿色低碳循环发展的道路。节能降碳既是坚持绿色低碳发展道路的基本要求，又是实现绿色低碳发展的重要标志。

一、文献综述

随着我国经济快速增长，能源消费不断增加，CO₂ 排放问题也逐渐凸显。尤其是 2009 年我国在哥本哈根世界气候大会上作出降碳承诺后，学者们对 CO₂ 排放的研究迅速增多。在能源消费 CO₂ 排放领域，学者们主要选择因素分解法和结构分解法进行研究，主要有 Divisia 指数、Laspeyres 指数、Theil 指数、随机 STITPAT 等分解模型。其中，由 Ang 和 Liu^[1]提出的对数平均迪氏指数法分解模型（LMDI）相比于其他分解模型，以其自身的优点，被较早引入我国能源消费 CO₂ 排放领域，其发展也较为迅速。通过 LMDI 模型，学者们主要将地区 CO₂ 排放增量分解为经济规模效应、产业结构效应、能源强度效应和能源结构效应，^[2~18]在此基础上有学者将经济规模效应分为人口效应与经济发展水平效应，^{[2][7][8][11][12][14][15]}还有学者将 CO₂ 排放增量分解成更多效应。^{[2][9][12][13]}学者们的研究结论较为一致：经济类因素的变化对 CO₂ 排放产生的正效应最大，能源强度变化则产生了最大的负效应，其他因素变化对 CO₂ 排放产生的影响相对较小。从研究的空间尺度来看，学者们以我国^[2~6]及其细分区域^[7~14]作为研究对象，来研究 CO₂ 排放变化及影响因素，而由于我国 CO₂ 排放存在较大的地区差异，因此对不同区域^[7~10]或省市^[11~14]的研究就具有更大的现实意义，如京津冀^{[7][8]}、长江经济带^[9]、中部六省^[10]等区域以及北京^[11]、江苏^[12]、广东^[13]、陕西^[14]、云南^[15]等省市逐渐成为学者们近年来关注的热点内容。在此基础上，学者们通过对产业结构进行三次产业^{[2][7][8][10][14][15]}及其他划分^{[3~6][11~13]}，或者对化工业^[16]、交通运

¹ 作者简介：黄勤（1969—），四川大学经济学院，教授。电子邮箱：466349416@qq.com。何晴（1993—），四川大学经济学院。电子邮箱：549071512@qq.com。

基金项目：国家社科基金项目《资源环境约束下西部产业结构调整优化研究》（12BJL088）；四川省地理国情与资源环境承载力监测工程技术研究中心资助项目（GC201501）。

输制造业^[17]、服务业^[18]等单个产业的能源消费 CO₂ 排放进行因素分解，来揭示产业变化对 CO₂ 排放造成的影响。部分学者将能源种类从三种^{[5][7][8][10]}细分至六种^{[6][11]}、八种^[3]甚至更多^{[9][12]}，以此来提高 CO₂ 排放的估算精度，有利于分析能源结构变化对 CO₂ 排放的影响。

显然，学者们对我国不同区域、各类产业的能源消费 CO₂ 排放分解研究已十分丰富，且对于分解模型的应用也日趋成熟，但是，以长江经济带作为对象的 CO₂ 排放分解研究还很少，且研究时段不长，同时缺乏对长江经济带内部差异性的探讨。本文借鉴已有研究，以长江经济带为对象，采用 LMDI 模型，以 1995—2014 年数据为样本，对 CO₂ 排放增量进行因素分解，并结合长江经济带发展历程和区域差异，分析碳排放因素的时空特征。

二、研究方法 with 数据处理

（一）研究方法

目前，在能源消费 CO₂ 排放分解领域，应用较为广泛的是 Ang 和 Liu^[1]提出的对数平均迪氏指数法分解模型（LMDI）。LMDI 有别于其他分解模型，具备以下显著优点：^[19]方法通过了因素差异测试和时间差异测试；分解结果为完全分解，无不能分解的残余项；乘法分解法与加法分解法之间具有简明关系；乘法分解法具备加法特性。Ang 还针对增量分解中出现负值^[20]和零值^[21]的情况进行了讨论：通常情况下数据中不会出现负值。而对于零值，则可由一个 10 的 -20 次方和 -10 次方之间的极小正值替代，不影响计算结果。因此，本文将采用 LMDI 模型对长江经济带的能源消费 CO₂ 排放进行分解研究。

本文将采用如下恒等式进行 CO₂ 排放分析：

$$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{Q_i} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = \sum_{ij} Q S_i I_i M_{ij} U_{ij}$$

其中：*i* 表示部门，*j* 表示能源消费种类；*C* 为 CO₂ 排放总量，*C_{ij}* 为第 *i* 部门第 *j* 种能源产生的 CO₂；*Q* 为 GDP，*Q_i* 为第 *i* 部门的部门增加值；*E_i* 为第 *i* 部门的能源消费量，*E_{ij}* 为第 *i* 部门第 *j* 种能源的消费量；*S_i*（= *Q_i*/*Q*）为第 *i* 部门增加值占 GDP 比重；*I*（= *E*/*Q*）为总能源强度，*I_i* 为第 *i* 部门的能源强度；*M_{ij}*（= *E_{ij}*/*E_i*）表示第 *i* 部门的能源结构；*U_{ij}*（= *C_{ij}*/*E_{ij}*）表示第 *j* 种能源碳排放系数。

从基期到 *T* 期，能源消费 CO₂ 排放增量的“加法分解”和“乘法分解”分别为：

$$\begin{aligned}
\Delta C_{tot} &= C^T - C^0 = \Delta C_{act} + \Delta C_{str} + \Delta C_{int} + \Delta C_{mix} + \Delta C_{emf} \\
&= \sum_{ij} \left(w_{ij} \cdot \ln(Q^T/Q^0) + w_{ij} \cdot \ln(S_i^T/S_i^0) + w_{ij} \cdot \ln(I_i^T/I_i^0) + w_{ij} \cdot \ln(M_{ij}^T/M_{ij}^0) + w_{ij} \cdot \ln(U_{ij}^T/U_{ij}^0) \right) \\
D_{tot} &= \frac{C^T}{C^0} = D_{act} \cdot D_{str} \cdot D_{int} \cdot D_{mix} \cdot D_{emf} \\
&= \exp\left(\sum_{ij} \tilde{w}_{ij} \ln(Q^T/Q^0)\right) \cdot \exp\left(\sum_{ij} \tilde{w}_{ij} \ln(S_i^T/S_i^0)\right) \cdot \exp\left(\sum_{ij} \tilde{w}_{ij} \ln(I_i^T/I_i^0)\right) \cdot \exp\left(\sum_{ij} \tilde{w}_{ij} \ln(M_{ij}^T/M_{ij}^0)\right) \cdot \\
&\quad \exp\left(\sum_{ij} \tilde{w}_{ij} \ln(U_{ij}^T/U_{ij}^0)\right)
\end{aligned}$$

$$w_{ij} = \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0}, \quad \tilde{w}_{ij} = \frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^0)/(\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0)}{(C^T - C^0)/(\ln C^T - \ln C^0)}$$

其中：

$$L(a, b) = \begin{cases} \frac{a-b}{\ln a - \ln b}, & a \neq b \\ a, & a = b \end{cases}$$

定义：

角标为 tot 的部分表示 CO₂ 排放增量，角标为 act, str, int, mix 和 emf 的部分分别表示总产出水平、产业结构、能源强度、能源结构和碳排放系数变化对 CO₂ 排放的影响大小，分别对应经济规模效应、产业结构效应、能源强度效应、能源结构效应和碳排放效应。能源的碳排放系数一般在一段时期内不会变动，对 CO₂ 排放不会造成影响，因此本文假定 $\Delta E_{emf} = 0$ $\Delta C_{emf} = 0$ ， $D_{emf} = 1$ $D_{emf} = 1$ 。效应大于 0（加法）或 1（乘法）表示该效应促进 CO₂ 排放的增加，反之亦然。因 LMDI 为完全分解，故分解公式中无其他残余项。

$$\text{因} \frac{\Delta C_{act}}{\ln D_{act}} = \frac{\Delta C_{str}}{\ln D_{str}} = \frac{\Delta C_{int}}{\ln D_{int}} = \frac{\Delta C_{mix}}{\ln D_{mix}} = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0}, \text{故加法分解法与乘法分解法具有同等解}$$

释效力，下文将采用加法分解法进行 CO₂ 排放分解。

为更清楚地反映出各因素对 CO₂ 排放增量影响的贡献率，定义各效应的贡献率计算公式如下：

$$\delta_{act} = \frac{\Delta C_{act}}{\Delta C_{tot}}, \delta_{str} = \frac{\Delta C_{str}}{\Delta C_{tot}}, \delta_{int} = \frac{\Delta C_{int}}{\Delta C_{tot}}, \delta_{mix} = \frac{\Delta C_{mix}}{\Delta C_{tot}}$$

$$\delta'_x = \frac{\sum_0^T \Delta C_x}{\sum_0^T \Delta C_{tot}}$$

累积贡献率的计算公式为：

式中 δ_{act} 、 δ_{str} 、 δ_{int} 、 δ_{mix} 分别表示经济规模效应、产业结构效应、能源强度效应、能源结构效应的贡献率， δ'_x 表示以上任意一种效应的累积贡献率。

（二）研究对象

1. 研究对象的空间范围

依据《长江经济带发展规划纲要》，本文研究的空间范围为上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南 11 个省市。

2. 产业与能源分类

鉴于各省市统计年鉴产业结构的划分及能源数据衔接情况，本文将长江经济带 11 省市的产业结构划分为四大生产部门：第一产业（农、林、牧、渔、水利业）；工业；建筑业；第三产业（交通运输、仓储和邮政业，批发零售业和住宿餐饮业，其他）。为方便统计和计算，本文将来自《中国能源统计年鉴》地区能源平衡表中的 28 种能源整合为煤、焦炭、油品、天然气、热力、电力共六种能源，本文研究的能源种类只包含除热力、电力以外的四种一次能源。

（三）数据处理

本文将 LMDI 模型计算所需数据分为两类：一类为基础数据，主要包含各省市经济数据和能源消费量数据；另一类为 CO₂ 排放量数据，需计算得到。

1. 基础数据来源

除作特殊说明外，长江经济带 11 个省市所有经济数据和能源消费量数据的时间范围均为 1995—2014 年，且数据均来源于各省市《统计年鉴》与《中国能源统计年鉴》。为剔除价格因素的影响，各省市的 GDP 与各部门增加值均以 1978 年可比价格折算。各省市的能源消费量取自《中国能源统计年鉴》地区能源平衡表中煤、焦炭、油品、天然气四种能源消费量（实物量）。为便于比较与分析，本文参考《中国能源统计年鉴》提供的各种能源折算标准煤参考系数表将各种能源实物消费量折算为标准煤消费量（标准煤折算系数如表 1 所示），得到长江经济带的能源消费总量与各部门能源消费量。所有基础数据中的零值均由 10⁻¹⁵ 替代。

表 1 四种能源的标准煤折算系数

	煤	焦炭	油品	天然气
标准煤折算系数(kg ce/kg、m ³)	0.7143	0.9714	1.4286	1.33

2. CO₂排放量测算

目前我国尚未建立起有关碳排放的统计体系，无法直接获得长江经济带 CO₂排放 数据，因此国内学者基本根据能源消费量与能源碳排放系数来估算 CO₂排放量。本文 CO₂排放量的估算方法来自国家发改委应对气候变化司所编写的《省级温室气体清单编制指南》。其计算公式如下：

$$C = \sum_{i=1, j=1}^4 E_{ij} \cdot CE_j \cdot e_j \cdot \frac{44}{12}$$

式中，C 表示 CO₂排放总量，E_{ij} 表示第 i 部门能源 j 的实物消费量，CE_j 表示能源 j 的标准煤折算系数，e_j 表示能源 j 的碳排放系数。如表 2 所示，煤、油品、天然气的碳排放系数取自国家发改委能源研究所编制的《中国可持续发展能源暨碳排放情景分析综合报告》，焦炭的碳排放系数来源于《省级温室气体清单编制指南》。经对比，本文碳排放系数与顾阿伦等^[6]、王佳^[8]、黄国华等^[9]、杨红娟等^[15]学者所计算的碳排放系数十分接近，因此本文选取的碳排放系数是具有合理性的。

表 2 四种能源的碳排放系数

	煤	焦炭	油品	天然气
碳排放系数(kg/kg ce)	0.7476	0.7578	0.5825	0.4435

三、长江经济带 CO₂排放量分析

根据以上数据，通过公式估算得到 1995—2014 年长江经济带的能源消费 CO₂排放量（如下图 1 所示）。

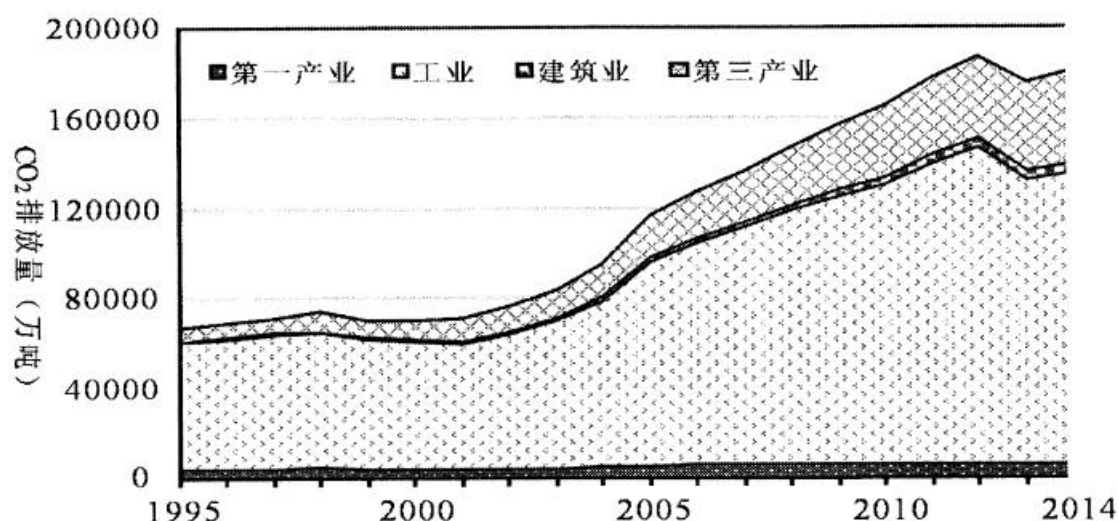


图 1 长江经济带能源消费 CO₂排放量变化

整体上看，1995—2014 年，长江经济带整体 CO₂排放量增长较快，2014 年的 CO₂排放量为 1995 年的 2.71 倍。各部门 CO₂排

放占比由高到低依次为工业、第三产业、农业和建筑业，CO₂排放结构与其能源结构相似。工业部门的CO₂排放占比虽然呈不断下降趋势，但最低占比也达到了71.69%，无法阻止其成为CO₂排放的“最大贡献者”，因此工业部门应为长江经济带节能降碳重点关注的部门。第三产业的CO₂排放处于不断上升趋势，平均占比为15.65%，这与长江经济带持续发展第三产业有关。第一产业和建筑业的CO₂排放占比都保持着较为稳定的状态，平均占比分别为4.27%和1.44%。

四、长江经济带CO₂排放因素分析

运用LMDI模型对长江经济带1995—2014年的CO₂排放增量进行因素分解，得到经济规模、产业结构、能源强度和能源结构“四大效应”数据。（如表3和图4所示）。

表3 长江经济带能源消费CO₂排放增量的因素分解

年 份	CO ₂ 排放增量 ΔC _{tot} (万吨)	经济规模效应 ΔC _{act} (万吨)	产业结构效应 ΔC _{str} (万吨)	能源强度效应 ΔC _{int} (万吨)	能源结构效应 ΔC _{mix} (万吨)
1996	2113.9	7919.4	91.0	-5747.9	-148.5
1997	2580.2	7884.8	45.8	-5319.7	-30.8
1998	2836.3	6968.2	-182.4	-4121.8	172.2
1999	-4046.6	6443.1	96.6	-9952.6	-633.7
2000	-249.8	6638.9	177.5	-6677.4	-388.7
2001	760.5	6729.9	219.7	-6328.2	139.2
2002	5804.4	8005.3	408.7	-2564.7	-44.9
2003	7300.3	10014.7	710.6	-3268.0	-157.1
2004	10827.0	12058.9	730.9	-2221.0	258.3
2005	21736.5	13082.7	658.2	7896.4	99.0
2006	10057.7	16245.0	804.6	-6760.5	-231.4
2007	9510.5	18751.0	809.9	-9785.2	-265.3
2008	11002.0	16386.9	520.0	-6456.8	551.9
2009	9552.1	16880.1	-314.8	-7142.1	128.9
2010	8805.6	21858.8	1093.9	-13621.2	-525.9
2011	12279.3	20597.8	730.6	-9586.5	537.4
2012	9477.6	18438.1	52.8	-8974.4	-38.9
2013	-11269.0	17176.3	-0.1	-26384.9	-2060.3
2014	5112.4	14941.3	-112.4	-9413.0	-303.5

分解后的各因素中，经济规模和产业结构变化对CO₂排放表现为正效应，而能源强度和能源结构则表现为负效应。各效应对CO₂排放的累积贡献率绝对值由大到小依次是：经济规模效应（216.32%）、能源强度效应（-119.47%）、产业结构效应（5.73%）和能源结构效应（-2.58%）（如图2所示）。

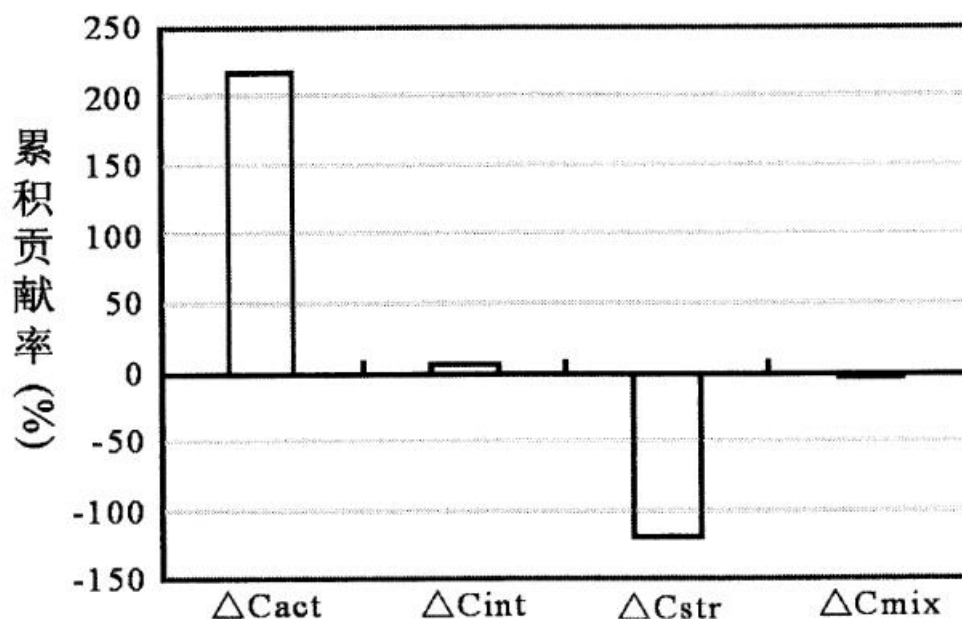


图2 长江经济带 CO₂排放各因素累积贡献率

（一）经济规模持续扩张是长江经济带 CO₂排放增长的第一主导因素

1995—2014 年长江经济带 GDP 总量增长了 750.58%（按 1978 年可比价格折算），而同期 CO₂排放总量增长了 171.38%。从图 3 可以明显看到，长江经济带经济规模效应经历了三个阶段：第一阶段（1996—1999 年）经济规模效应短暂下降，同期经济增速下降了 3.05 个百分点。第二阶段（2000—2007 年）经济规模效应急剧上升。该阶段经济增速也出现相同增长趋势，从 9.95% 上升为峰值 15.38%，该阶段，我国相继提出了西部大开发和中部崛起战略，带动经济的快速增长，但同时 CO₂排放量也迅速增加。第三阶段（2008—2014 年）经济规模效应明显放缓，受 2008 年金融危机的影响，长江经济带经济增速出现下滑，CO₂排放增速放缓，而 2009 年的“四万亿”投资更助推了长江经济带 CO₂排放量的增加。但之后，随着我国经济进入速度换挡期，2010—2014 年经济规模效应下降。若未来经济增速继续降低，则经济规模效应将会进一步缩小。根据环境库兹涅茨曲线（EKC），环境压力与经济发展呈“倒 U 型”关系。显然，长江经济带现阶段仍处在 EKC 的左端，“拐点”尚未出现。

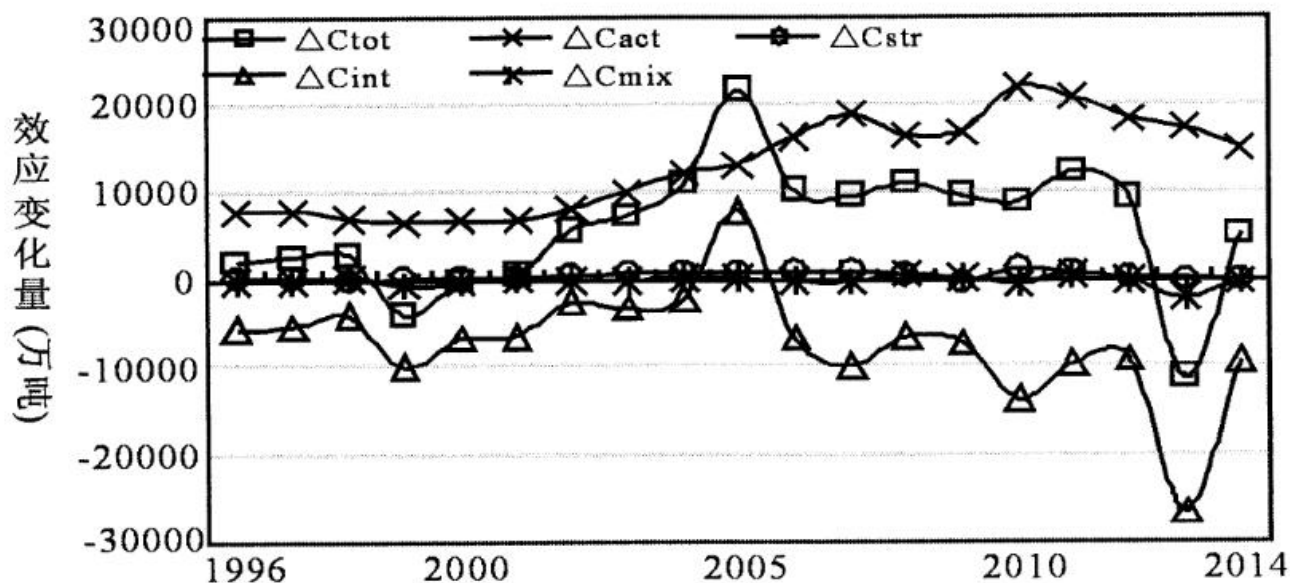


图3 长江经济带能源消费CO₂排放增量因素分解

（二）能源强度变化有利于降低CO₂排放，是CO₂排放增长的第二影响因素

由图4可知，1995—2014年，长江经济带能源强度表现出较大幅度的下降，从1995年的2.88吨标煤/万元下降到2014年的0.96吨标煤/万元，下降幅度达到66.67%，对长江经济带CO₂排放的影响可分为两个阶段。第一阶段（1996—2005年）能源强度变化对减少CO₂排放的作用尚不明显，尤其是2000年我国加入世界贸易组织以后，国内投资热情高涨，一批高耗能项目的投产致使能源利用效率降低，能源强度降幅缩小，2004年、2005年的能源强度变化甚至还提高了CO₂排放。第二阶段（2006—2014年）能源强度的节能降碳作用逐步显现，这得益于我国在“十一五”规划纲要与“十二五”规划纲要中相继提出能源强度限制目标与CO₂排放强度限制目标，各地采取措施来减少能源消费与CO₂排放。

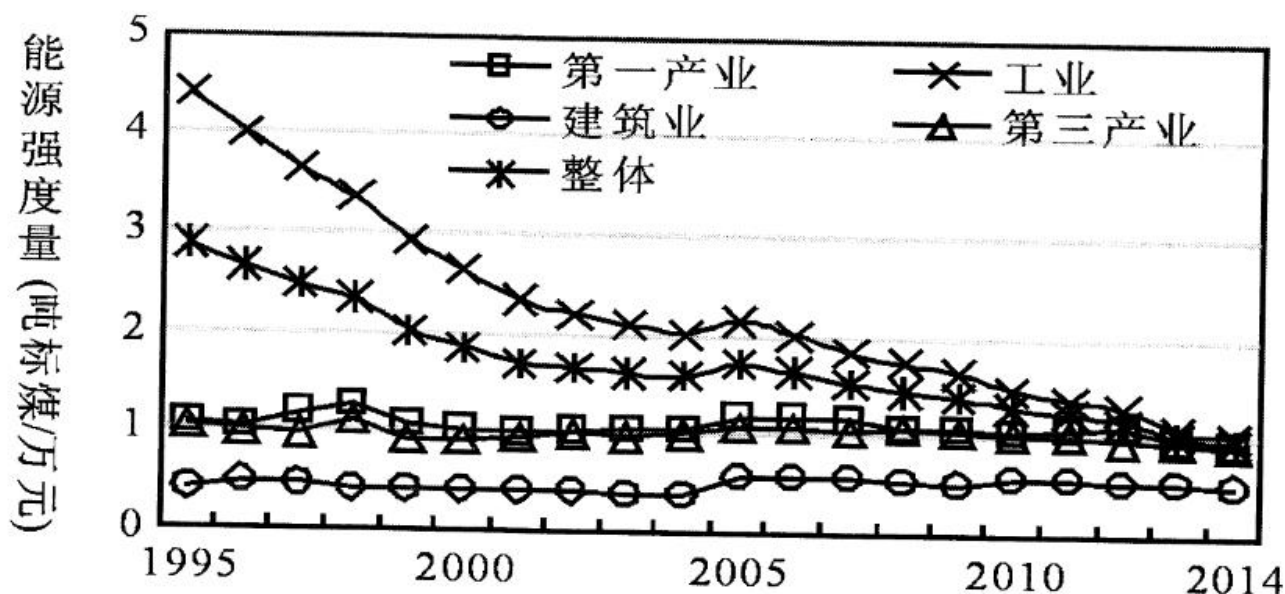


图4 长江经济带各部门能源强度的变动

(三) 产业结构变化对长江经济带 CO₂ 排放表现为微弱的正效应

由于工业是能源消费和 CO₂ 排放“大户”，所以产业结构效应主要表现为工业变化对其的影响。1995—2014 年长江经济带工业产值比重从 55.28% 上升至 64.74%，对 CO₂ 排放的影响可以分为两个阶段：第一阶段（1996—2007 年）工业比重急剧上升，11 年上升了 6.68 个百分点，CO₂ 排放快速增长；第二阶段（2008—2014 年）工业比重上升速度放缓，2008—2014 年仅上升了 2.23 个百分点，产业结构效应下降。值得注意的是，2009 年与 2008 年相比，工业比重下降，由此导致产业结构效应出现负值。可见，长江经济带工业比重的变化与产业结构效应的变化是一致的。因此，降低工业比重将是释放节能降碳潜力的着力点。由于重工业为高耗能、高排放产业，因此有必要进一步分析工业内部的轻重结构。1995—2014 年长江经济带重工业比重^①与产业结构效应之间的灰色关联分析^[22]表明，^②二者之间存在正相关关系，印证了工业内部持续重型化是导致长江经济带 CO₂ 排放增加的关键因素。

(四) 能源结构对于减少 CO₂ 排放的作用不甚显著

如表 4 所示，1995—2014 年，长江经济带能源消费总量出现较大增长，增幅达 184.81%。四种能源中，煤、焦炭、油品和天然气的碳排放系数差别较小，因此四种能源消费占比的此消彼长对 CO₂ 排放减少的作用并不显著。煤的消费量在四种能源中最高。值得注意的是，煤的消费占比在 2006 年下降到 50% 以下。因此，可以 2006 年作为分界点，将能源结构变化对长江经济带 CO₂ 排放的影响分为两个阶段。第一阶段（1996—2005 年）能源结构效应波动较小，节能降碳作用较微弱；第二阶段（2006—2014 年）能源结构效应波动增大，尤其是 2012—2013 年煤的消费占比下降了 6.11 个百分点，造成了能源结构效应大幅下降。2006—2014 年的能源结构累积效应为 1996—2005 年的 3 倍，表明能源结构的负效应在进一步增强。因此，可以通过优化能源内部结构与寻求新能源来共同促进长江经济带实现节能降碳。

表 4 1995—2014 年长江经济带能源结构的变化

	煤		焦炭		油品		天然气		整体	
	消费占比(%)	变动	消费占比(%)	变动	消费占比(%)	变动	消费占比(%)	变动	消费占比(%)	变动
第一产业	37.76	-16.58	1.14	1.08	60.57	14.96	0.54	0.54	3.27	-1.61
工业	53.93	-11.81	23.23	5.90	14.3	1.23	8.46	4.68	68.70	-15.90
建筑业	17.30	-17.79	0.44	-0.88	81.85	19.08	0.41	-0.42	2.63	1.94
第三产业	16.45	-9.89	0.01	-0.23	77.90	5.45	5.63	4.67	25.40	15.57
整体	42.92	-18.18	16.01	1.31	33.79	12.89	7.27	3.97	—	—

五、长江经济带 CO₂排放的空间特征：以上、中、下游为空间单元

长江经济带横跨我国三大地理阶梯，上中下游的资源禀赋、环境容量以及经济发展水平都存在显著的差异。下面分别对长江经济带的上游、中游、下游^③三个地区 CO₂排放量及其影响因素进行分析（如图 5 所示）。

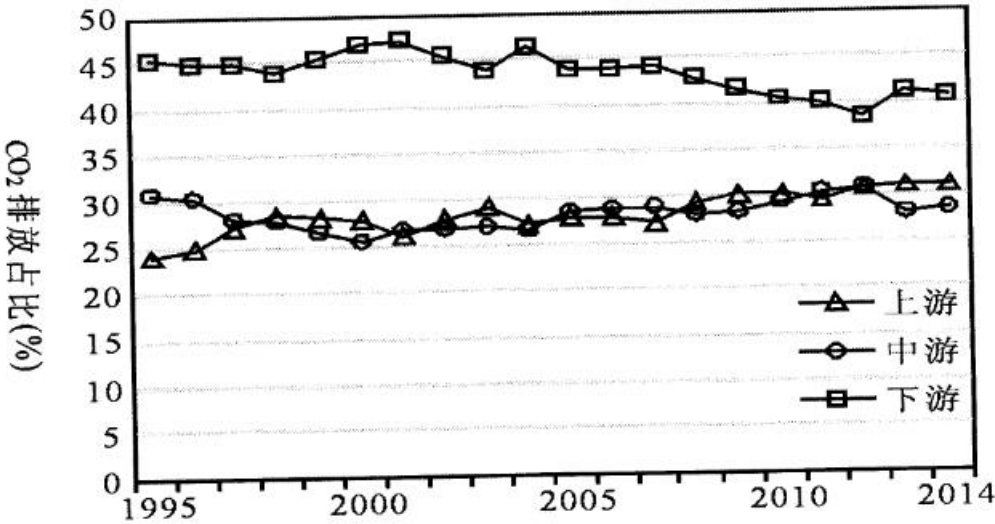


图 5 长江经济带上游、中游、下游 CO₂排放占比

长江经济带 CO₂排放总量中，下游占比最大，几乎占到经济带 CO₂排放的“半壁江山”，但总体下降趋势明显，从 1995 年的 45%下降到 2014 年的 40%；从三个地区 CO₂排放的变化来看，2008 年之前，CO₂排放由大到小依次为下游、中游、上游，呈现为明显的“下、中、上”依次递减特征，但 2008 年之后，上游超过中游成为经济带 CO₂排放量的“第二大贡献者”。

通过图 6 可以发现，上游、中游、下游各因素的累积贡献率与长江经济带整体类似，但同一个因素对不同地区 CO₂排放的影响不同。其中，下游经济规模扩张的作用最为明显，中上游产业结构效应大于下游，中下游能源强度效应长期大于上游，下游能源结构效应大于中上游。

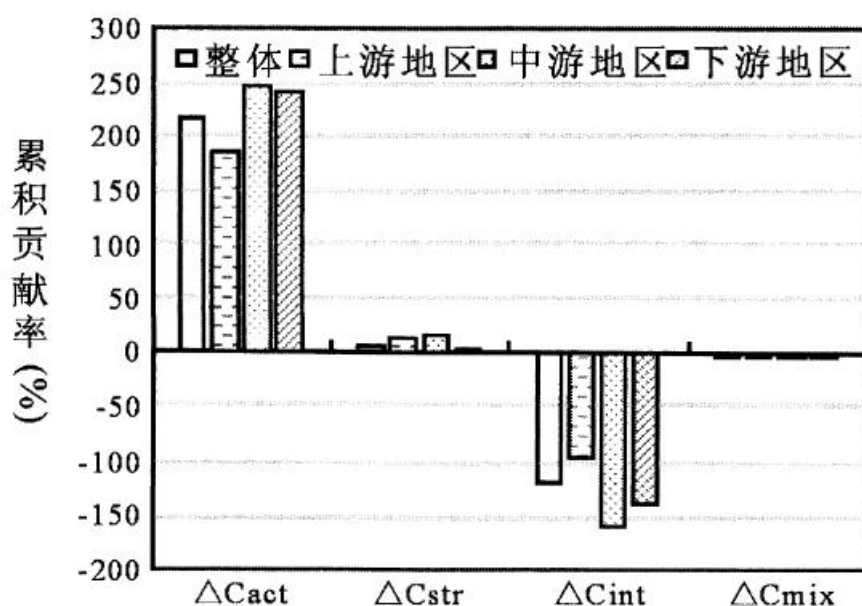


图6 长江经济带上游、中游、下游各效应累积贡献率

（一）下游经济规模扩张对 CO₂ 排放的增长影响最为明显

2012 年之前，经济规模效应的累积贡献率大小呈现“下、中、上”逐个减小的阶梯特征，而到 2014 年，中游接替下游成为经济规模效应的“贡献最大者”。在经济发展速度由高速增长过渡到中高速增长的背景下，下游先于中上游出现经济增速放缓的势头。

（二）产业结构变化对中上游 CO₂ 排放的正效应较为明显

1996—2014 年各地区产业结构效应的累积贡献率由大到小依次为中游（17.49%）、上游（13.99%）、下游（0.82%）。产业结构效应的变化趋势与长江经济带各地区所处的工业化阶段相吻合，中上游处于工业化阶段的初中期，因此工业比重在不断上升，能源消费量和 CO₂ 的排放量随之上升。而下游从 2007 年开始工业比重便保持在 67%，因此下游的产业结构效应一直处于较低水平。这表明下游很可能已经进入结构降碳为主的时期，而中上游目前仍停留在技术降碳为主的时期，结构降碳尚未启动。因此，各地区应尽早谋划结构降碳，否则结构降碳发展越迟缓，未来调整付出的代价就越大。

（三）能源强度对减少 CO₂ 排放的作用从大到小依次为中游、下游、上游

1995—2014 年，能源强度效应的累积贡献率按绝对值大小排序依次为中游（-159.41%）、下游（-136.69%）、上游（-97.45%），上游、中游、下游能源强度分别从 3.61 吨/万元、4.04 吨/万元、2.21 吨/万元下降至 1.51 吨/万元、1.19 吨/万元、0.68 吨/万元，且从 1997 年开始，各阶段中下游能源强度均明显低于上游。这是由于上游产业结构偏向重型化，技术水平相对较低，能源利用效率普遍低于中下游，而中下游较高的产业聚集度也进一步提升了能源利用效率。反过来说，上游的能源利用效率提升空间与幅度就要高于中下游，而中下游能源强度进一步降低的难度不断加大，因此。上游在短期内应抓住技术进步这一关键，中下游应努力寻找通过其他方面来挖掘其节能降碳潜力。

（四）能源结构对中上游降碳的作用较小，对下游降碳的作用相对较大

能源结构效应的累积贡献率按绝对值大小排序依次为下游（-4.31%）、中游（-2.48%）、上游（-1.04%）。这是由于能源需求的上升致使下游部分能源消费需要依靠进口来满足，而进口的能源大部分为碳排放系数较低的石油，其能源结构中油品的消费占比由 28.4% 上升为 42.1%，碳排放系数较高的煤消费占比则下降到 32.6%，这有助于下游 CO₂ 排放的降低。而且 21 世纪初随着我国西气东输、川气东送、忠武线等重要天然气长输管道的陆续建成投产，中下游能源结构中碳排放系数最小的天然气消费占比逐渐上升，部分替代了煤、焦炭及油品，因而这使得能源结构变化的负效应进一步加强。

六、对策

（一）实施创新驱动发展

长江经济带产业要实现绿色低碳发展，必须打破传统粗放型发展路径，由要素驱动向创新驱动转变。整合现有的科研资源，强化长江经济带创新基础平台建设，建立国省能源创新中心和实验室，充分利用长江三角洲地区创新资源优势，在长江经济带内探索创新平台跨机构、跨地区开放运行和共享机制。促进能源企业、高校、研究机构的产学研用合作，共建产业技术创新联盟，提升企业节能降碳技术创新能力，加速科技成果转移转化，充分发挥能源企业的自主创新能力。给予优惠政策，吸引高层次人才进行创新创业，培育能源科技领军人才与团队。充分发挥创新示范试点的平台作用，把握下游上游（四川）的全面改革创新试验和上海张江、苏南、杭州、武汉东湖、长株潭、成都等自主创新示范区建设机遇，促进各地区共享创新资源，发挥辐射带动作用，提升能源技术创新水平。

（二）加快产业转型升级

能源消费是一个经济系统正常运行的必备要素，在一定程度上满足国家生产活动和国民生活需求，能源消费量的不断增加势必导致环境压力的上升，因此长江经济带节能降碳更应注重优化产业结构和提高能源利用效率，而不是限制经济产出。应大力推进传统产业转型升级，以低碳改造为目标，在重化工领域进行资源整合，淘汰落后产能，促进产品技术更新换代。积极发展节能环保、新能源、新一代信息技术等战略性新兴产业。实施“互联网+”行动计划，优化资源配置，大力发展现代服务业特别是生产性服务业，不断提高第三产业在国民经济中的比重。紧抓新一轮西部大开发机遇，促进上、中、下游各地区的产业联动，有序引导下游地区劳动密集型产业向中上游地区转移，调整生产方式，优化工业结构，谨慎发展重化工业。将产业园区作为产业发展和绿色低碳的结合点，优先发展节能、低碳、循环、清洁等技术，引导企业在园区内实现绿色生产，推行绿色园区、循环园区建设。加快建设长江经济带国家级转型升级示范开发区，发挥开发区辐射带动作用，加速推动长江经济带从外延粗放型发展向内涵集约型发展转变。

（三）大力发展可再生能源

由于长江经济带以煤为主的能源资源禀赋在短期内发生改变的可能性较小，若要增强未来能源结构效应对节能降碳的促进作用，主要的对策应是发展油气资源以及提高非化石能源的消费占比。加快推进石油和天然气能源替代煤炭能源、非化石能源替代化石能源的双重更替步伐，多元化发展天然气勘探开采投资模式，降低天然气开采与利用成本，扩大天然气消费，降低 CO₂ 排放强度。充分利用长江经济带中上游地区丰富的水能、风能、太阳能、生物质能等可再生能源，下游有条件的地区应适度谋划核电。保持非化石能源消费比重的持续增长趋势，提升能源结构调整对长江经济带节能降碳作用。

（四）提高能源管理效率

能源管理效率的提高能够有效促进长江经济带实现节能降碳。加强工业、建筑、交通等重点行业的能效管理，推动重点企业建设能源管理体系，提高长江经济带能源管理效率。完善能源标准、统计、计量体系，运用大数据、云计算等信息技术，提高能源数据统计决策能力。探索节能降碳长效管理机制，强化政府与企业的节能降碳责任考核。健全能源交易和碳排放交易制

度, 优先在长江经济带内探索建立用能权交易试点和长江经济带碳排放交易市场。通过政府、市场和社会公众共同努力, 早日实现节能降碳目标。

注释:

①因从 2013 年下半年起, 国家统计局在工业数据发布中不再使用“轻工业”“重工业”分类, 因此轻重工业比重数据由长江经济带 11 个省市历年《统计年鉴》中规模以上工业企业轻、重工业总产值加总所得。为节约篇幅, 长江经济带上游、中游、下游的重工业产值比重数据在这里没有给出, 读者可向作者索取。

②为节约篇幅, 长江经济带上游、中游、下游及整体的综合关联系数在这里没有给出, 读者可向作者索取。

③这里将长江经济带上游、中游、下游地区划分为: 上游地区, 包括重庆、四川、贵州、云南; 中游地区, 包括江西、湖北、湖南; 下游地区, 包括上海、江苏、浙江、安徽。

主要参考文献:

[1] Ang, B. W., Liu, F.L. A new energy decomposition method:perfect in decomposition and consistent in aggregation[J].Energy, 2001, 26(6): 537-548.

[2] 赵志耘, 杨朝峰. 中国碳排放驱动因素分解分析[J]. 中国软科学, 2012 (6) :175-183.

[3] 鲁万波, 仇婷婷, 杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究[J]. 经济研究, 2013 (4) :106-118.

[4] 郭朝先. 产业结构变动对中国碳排放的影响[J]. 中国人口. 资源与环境, 2012 (7) :15-20.

[5] 董 锋, 杨庆亮, 龙如银, 程铎博. 中国碳排放分解与动态模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2015 (4) :1-8.

[6] 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 (10) :1861-1870.

[7] 宗 刚, 牛钦玺, 迟远英. 京津冀地区能源消费碳排放因素分解分析[J]. 生态科学, 2016 (2) :111-117.

[8] 王 佳, 于维洋. 京津冀区域 C 排放量驱动因子分析[J]. 统计与决策, 2012 (1) :114-117.

[9] 黄国华, 刘传江, 李兴平. 长江经济带工业碳排放与驱动因素分析[J]. 江西社会科学, 2016 (8) :54-62.

[10] 刘传江, 黄桂然, 章铭. 我国中部六省碳排放量影响因素分解分析[J]. 技术经济, 2013 (1) :101-105+128.

[11] 张宏艳, 江悦明, 冯婷婷. 产业结构调整对北京市碳减排目标的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016 (2) :58-67.

[12] 田 泽, 董凯丽, 吴凤平. 江苏省终端能源消费 CO₂ 排放总量测算及驱动因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015 (11) :19-27.

[13] 张 捷, 石柳, 赵秀娟. 广东省终端能源消费碳排放增长的驱动因素[J]. 技术经济, 2014 (5) :64-71.

-
- [14] 赵选民, 卞腾锐. 基于 LMDI 的能源消费碳排放因素分解——以陕西省为例[J]. 经济问题, 2015 (2) :35-39.
- [15] 杨红娟, 李多云, 刘红琴. 云南省生产部门碳排放影响因素分析——基于 LMDI 模型[J]. 经济问题, 2014 (2) :125-129.
- [16] 范体军, 骆瑞玲, 范耀东, 张莉莉, 常香云. 我国化学工业二氧化碳排放影响因素研究[J]. 中国软科学, 2013(3):166-174.
- [17] 宗 刚, 陈 鸣, 韩建飞. 交通运输设备制造业碳排放变动研究[J]. 统计研究, 2014, 11:72-79.
- [18] 王 凯, 李 娟, 唐宇凌, 刘浩龙. 中国服务业能源消费碳排放量核算及影响因素分析[J]. 中国人口. 资源与环境, 2013(5):21-28.
- [19] Ang, B.W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, 32:1131-1139.
- [20] Ang, B.W. Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach [J]. Energy Policy, 2007, 35:739-742.
- [21] Ang, B.W. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach [J]. Energy Policy, 2007, 35:238-246.
- [22] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 (第 7 版) [M]. 北京: 科学出版社, 2014:63-108.