

基于 LEAP 模型的长江经济带 分区域碳排放核算及情景分析¹

杨顺顺

(湖南省社会科学院, 湖南长沙 410003)

【摘要】构建了长江经济带分区域碳排放 LEAP 模型,核算了现状排放量,并对 2015—2030 年碳排放变化进行了情景分析。结果表明:(1)2015 年长江经济带碳排放总量为 41,61 亿吨 CO₂,空间上东部区域排放占比最高,贡献源上以终端能耗碳排放为主。2030 年左右碳排放将达到峰值,基准情景峰值约为 57 亿吨 CO₂,碳排放强度较 2015 年累计下降 46.83%,中部区域将成为碳排放最高板块。(2)终端能耗部门中工业、第三产业,能源加工转换部门中火力发电,涉工业过程排放的水泥和钢铁产业是碳减排的关键部门。(3)随着发电结构的变化,能源加工转换碳排放有可能在 2025 年前达到峰值,工业过程碳排放控制将逐渐成为碳减排面临的新挑战。

【关键词】碳排放;情景分析;长江经济带;LEAP 模型

【中图分类号】F062.2;X24 **【文献标识码】**A **文章编号:**1671-4407(2017)09-026-05

1 引言

长江经济带覆盖 11 省市,人口和生产总值均超过全国的 40%,是我国国土空间开发最重要的东西轴线,其与“一带一路”、京津冀协同发展同列党的十八大以来中国三大发展战略。按照将长江经济带打造成“我国生态文明建设的先行示范带、创新驱动带、协调发展带”的战略定位,“共抓大保护,不搞大开发”的建设要求,长江经济带势必走出一条生态优先、绿色发展的道路,而低碳发展作为绿色发展的组成板块和新时期我国履行国际责任的重要领域,也必将随长江经济带发展战略的落实得到充分实践和不断深化。

虽然长江经济带上升为国家战略(2014 年 9 月《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》发布)才仅仅数年,但国内学界已全面展开了对长江经济带建设理论问题和对策研究的相关探索。目前学界对长江经济带碳排放的研究集中于以下方面:一是对影响长江经济带碳排放变化因素的考察。相对成熟的 Tapio 脱钩模型和对数均值 Divisia 指数法(LMDI)得到较广泛的应用,研究表明人口总量、经济水平、技术水平和城市化水平是影响长江经济带碳排放时空格局演化的重要因素、部分研究提出长江经济带碳排放历史上经历过脱钩—挂钩—再脱钩的过程,但受技术效率总体提高的影响,目前经济带碳排放脱钩情况整体趋好。二是基于全要素碳生产率核算对碳减排目标、减排空间和产业升级途径的讨论。赵晓梦和刘传江将碳排放纳入全要素生产率分析,认为长江经济带的 Malmquist-Luenberger 指数在近年呈倒“U”型,中部和东部区域分别出现技术进步滞缓和技术效率下降的问题。三是通过对碳排放与经济、能源系统作用规律的分析,对长江经济带未来碳排放趋势的预测和展望。徐如浓和吴玉鸣认为长三角城市群能源消费、经济增长、碳排放之间存在双向因果关系,未来随人均 GDP 的增加,长三角城市

基金项目:国家社会科学基金青年项目“我国工业部门碳排放转移路径及减排成本分担机制研究”(13CJY051);湖南省哲学社会科学基金一般项目“湖南省节能量交易试点及支撑机制研究”(13YBB139);2017 年度湖南省社会科学成果评审委员会课题“长江经济带绿色发展评价体系与政策仿真研究”(XSP17YBZZ077)

作者简介:杨顺顺(1981-),男,湖北宜昌人,博士,副研究员,研究方向为低碳经济与绿色发展、农村环境管理、复杂系统分析与仿真方法。E-mail: yangssmail@foxmail.com

群碳排放将逐步趋低。黄国华等测算了长江经济带碳排放总量、强度和产业结构演进水平，认为未来碳减排在东中西段应采取不同的策略和减排目标，兼顾公平与效率。

综上所述，既有研究已对长江经济带碳排放的影响因素、减排途径和发展规律做出了卓有成效的探讨，但仍有可商榷和完善之处：一是在碳排放核算中，一方面多以能源消费量代替能源燃用量，忽视了化石能源的非燃用用途（2015年长江经济带东部3省市油品燃料终端消费中，用于工业原料的部分占到49.13%），导致碳排放量被人为高估。另一方面，很多研究中仅测算了能耗碳排放，未测算工业过程碳排放，而仅水泥生产碳排放一项就可能占到碳排放总量的10%以上，导致碳排放量被显著低估。二是研究中更多强调历史排放分析，对未来发展趋势研究相对偏少。本研究将利用LEAP平台建立长江经济带碳排放核算预测模型，剔除非燃用能源的影响，并将核算范围扩展到工业生产过程碳排放，核算并预测不同发展模式下长江经济带东部、中部、西部区域2015—2030年碳排放趋势，研究结论对明确未来碳排放特征、优选减排模式和减排部门具有一定的现实指导意义。

2 模型构建与数据来源

LEAP模型(long-range energy alternatives planning, 长程能源替代规划)，是由SEI(Stockholm environment institute 斯德哥尔摩环境研究所)开发，并广泛应用于能源政策分析和气候变化研究的专业软件。LEAP能够核算用能部门和非用能部门的大气污染物排放(不限于温室气体)并整合分析区域中能源终端消费、能源加工转换、资源开采和非用能部门的排放情况。目前，LEAP模型已广泛用于产业结构与碳减排、碳排放情景预测、碳捕获等研究领域。

LEAP模型中对终端能耗和能源转换的碳排放估算有两组基本方程：

$$CEF_i = \sum_p cf_p \cdot \sum_j \sum_k AL_{k,j,i} \cdot EI_{k,j,i} \cdot EF_{k,j,i,p} \quad (1)$$

式(1)中： CEF_i 为部门*i*的终端能源消费所造成的碳排放总量； $AL_{k,j,i}$ 为部门*i*使用设备*j*消费第*k*类能源的活动水平； $EI_{k,j,i}$ 代表与这一活动水平对应的能源强度； $EF_{k,j,i,p}$ 为部门*i*使用设备*j*消费第*k*类能源所排放的第*p*类温室气体的量； cf_p 为第*p*类温室气体的GWP(全球变暖潜势)值，用于将

不同温室气体折算为碳当量。此外，本文中对终端能耗的计算还进一步剔除了能源的非燃用部分。

$$CET_s = \sum_p c f_p \sum_m \sum_t ETP_{t,m,s} \cdot \frac{1}{f_{t,m,s}} \cdot EF_{t,m,s,p} \quad (2)$$

式(2)中： CET_s 为第 s 种一次能源加工转换时所造成的碳排放总量； $ETP_{t,m,s}$ 为第 s 种一次能源使用能源转换设备 m 生产二次能源 t 的量； $f_{t,m,s}$ 为与之对应的能源转换效率； $EF_{t,m,s,p}$ 为第 s 种一次能源使用能源转换设备 m 生产二次能源 t 时排放的第 p 类温室气体的量。根据《中国能源统计年鉴》估算，2015 年我国供热和火力发电的能源转换平均效率为 72.56% 和 40.37%，平均碳排放因子分别为 4.051 7 吨 CO_2 /吨标煤热力、6.924 0 吨 CO_2 /吨标煤电力(火电)，此结果与 2010 年情况相比略有波动^[13]。

除终端能源消费和能源转换外，本研究依据《IPCC 国家温室气体清单指南》估算了不同工业部门的生产过程碳排放。本文建立的 LEAP 模型的体系结构如表 1 所示。

表1 长江经济带碳排放LEAP模型体系结构简表

模型一级目录	主要涉及部类	细类说明(均按东部、中部、西部区域分别设计)
关键假设	经济假设	经济增速、三产结构假设
	人口假设	常住人口增速、城镇化率假设
终端能源消费	第一产业	第一产业活动水平、能源强度和用能结构
	第二产业	分工业和建筑业的的活动水平、能源强度和用能结构
	第三产业	第三产业活动水平、能源强度和用能结构
	生活消费	分城镇、乡村的活动水平、能源强度和用能结构
能源加工转换	热力供应	—
	火力发电	—
工业过程排放	采掘工业	水泥、玻璃生产过程排放
	化学工业	纯碱生产过程排放
	金属工业	钢铁生产过程排放

模型需求数据来源于 2011 年、2016 年的《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》，终端能源类型按照不重复计算原则，包括煤、焦炭、油品能源、天然气、(液化天然气)、热力和电力，均按折标系数将实物量折算为标煤量。

3 碳排放现状核算与情景设计

3.1 长江经济带分区域碳排放现状核算

上述 LEAP 模型运行结果显示，2015 年长江经济带 11 省市碳排放总量为 41.61 亿吨 CO_2 ，其中：终端能源消费碳排放 18.66 亿吨，占 44.85%；能源加工转换碳排放 13.87 亿吨，占工业过程碳排放 9.08 亿吨，占 21.81%。研究中将长江经济带分为东部区域(上海、江苏、浙江 3 省市)、中部区域(安徽、江西、湖北、湖南 4 省)和西部区域(重庆、四川、贵州、云南 4 省市)分别核算，具体情况如表 2 所示。

表2 长江经济带各区域碳排放现状核算结果（2015年）

项目	部门	东部区域		中部区域		西部区域	
		碳排放量 / 亿吨 CO ₂	占总量比例 / %	碳排放量 / 亿吨 CO ₂	占总量比例 / %	碳排放量 / 亿吨 CO ₂	占总量比例 / %
终端能耗碳排放	第一产业	0.161	0.98	0.258	1.77	0.167	1.57
	工业	3.481	21.21	4.378	30.09	3.632	34.08
	建筑业	0.135	0.82	0.183	1.26	0.130	1.22
	第三产业	1.408	8.58	1.464	10.06	1.496	14.04
	城镇生活	0.353	2.15	0.336	2.31	0.283	2.66
	乡村生活	0.138	0.84	0.338	2.32	0.322	3.02
能源加工转换碳排放	热力供应	1.486	9.06	0.390	2.68	0.123	1.15
	火力发电	6.154	37.50	3.807	26.17	1.912	17.94
工业过程碳排放	水泥生产	1.554	9.47	2.371	16.30	2.101	19.72
	玻璃生产	0.010	0.06	0.014	0.10	0.007	0.07
	纯碱生产	0.004	0.02	0.003	0.02	0.003	0.03
	钢铁生产	1.525	9.29	1.006	6.92	0.480	4.50
终端能耗碳排放的化石能源贡献	煤及焦炭	2.843	50.10	4.789	68.85	3.964	65.73
	油品能源	2.386	42.05	1.922	27.62	1.649	27.36
	天然气	0.446	7.85	0.245	3.52	0.417	6.91

由表 2 可知，2015 年尽管东部区域万元 GDP 碳排放强度为 1.19 吨 CO₂/万元，在 3 个区域中最低（中部区域 1.50 吨 CO₂ / 万元，东部区域 1.52 吨 CO₂ / 万元），但从绝对量上看，东部区域碳排放在整个长江经济带中占比最大，达到总量的 39.43%，其次是中部区域。（34.96%）和西部区域（25.61%），此特征与前人其他相近年份研究结果一致。终端能耗中的工业、第三产业，能源转换中的火力发电，工业过程中的水泥、钢铁生产是各区域主要的碳排放贡献源，此外东部区域的热力供应碳排放占比较高，这些部门是目前碳减排的关键部门。终端能耗碳排放中，煤品能源碳排放为最主要贡献源，在各区域中均超过 50%。

3.2 长江经济带分区域碳排放情景设计

为研究长江经济带未来碳排放变化趋势，本文设计了 三类不同的发展情景：

(1) 基准情景：依据长江经济带 11 省市“十三五”规划目标(2020 年经济社会发展主要目标)，并按照 2010-2020 年社会、经济、能源系统发展的主要趋势，确定 LEAP 模型中长江经济带分区域重要时间节点(2020 年、2025 年和 2030 年)的关键假设和各个子部门的生产、消费和能耗参数，这可能是最接近于未来发展的情景。

(2) HA-LI (高调整低增长) 情景：相对于基准情景，假设碳减排投入更大成本，经济增速相对放缓，城乡结构、三次产业结构、能源利用效率和能源消费结构优化速度提升，工业过程碳排放涉及的工业产品消费弹性下降，生产工艺技术提升。

(3) LA-HI (低调整高增长) 情景：相对于基准情景，假设继续以高投资拉动经济增长，以追求经济总量提升为主要目标，城乡结构、三次产业结构、能源利用效率和能源消费结构优化速度弱于基准情景，工业过程碳排放涉及的工业产品消费弹性上升。

三类发展情景的基本假设条件如表 3 所示。

表3 不同情景经济—社会—能源主要参数假设表

类别	指标	情景	东部区域		中部区域		西部区域	
			2020年	2030年	2020年	2030年	2020年	2030年
经济社会发展假设	GDP年平均增速/%	基准	7.17	4.85	8.5	6	8.22	6.2
		HA-LI	6.2	4	7.5	5	7.22	5.2
		LA-HI	8.5	6.5	10	7.5	10	7.8
	三次产业结构	基准	4 : 40 : 56	3.4 : 33.6 : 63	8.6 : 45.9 : 45.5	4.4 : 42.7 : 52.9	10.2 : 42.5 : 47.3	6.2 : 42.1 : 51.7
		HA-LI	3.5 : 38.1 : 58.4	2.9 : 31.8 : 65.3	7.5 : 44.1 : 48.4	3.4 : 40.9 : 55.7	9.2 : 41.5 : 49.3	5.2 : 40 : 54.8
		LA-HI	4 : 42 : 54	3.6 : 38.2 : 58.2	10 : 45.5 : 44.5	8 : 42.6 : 49.4	11 : 43 : 46	9 : 42.5 : 48.5
	城镇化率/%	基准	71.31	75	58.62	71	54.65	68.5
		HA-LI	73	78	60	75	56	72
		LA-HI	70	71	56	64	52	60
终端能源消费	各产业终端能源强度五年累计下降	基准	第一产业、工业、建筑业、服务业单位GDP能耗下降达到国家相关规划要求					
		HA-LI	第一产业、工业、建筑业、服务业单位GDP能耗下降高于国家相关规划要求(5个百分点左右)					
		LA-HI	第一产业、工业、建筑业、服务业单位GDP能耗下降低于国家相关规划要求(5个百分点左右)					
	城乡生活能源强度/(吨标煤/人·年)	基准	0.285	0.370	0.227	0.295	0.277	0.322
		HA-LI	0.271	0.325	0.216	0.259	0.263	0.316
LA-HI	0.299	0.420	0.238	0.335	0.291	0.409		
能源加工转换	供热、火力发电需求	基准	单位GDP供热和火力发电需求按历史趋势外推					
		HA-LI	单位GDP供热和火力发电需求下降幅度高于基准情景					
		LA-HI	单位GDP供热和火力发电需求下降幅度低于基准情景					
工业过程碳排放	相关工业产品需求	基准	相关产品需求弹性与“十二五”常年情况保持一致,技术水平提升适中					
		HA-LI	相关产品需求弹性低于“十二五”常年情况,技术水平提升较快					
		LA-HI	相关产品需求弹性高于“十二五”常年情况,技术水平提升较慢					

注：模型中涉及货币单位的均转换为2015年价格，受篇幅所限，未给出2025年情景设计参数。

4 情景模拟结果分析

利用本文构建的LEAP模型对长江经济带在上述3种情景下2015—2030年碳排放进行了仿真模拟，总体情况如图1所示。

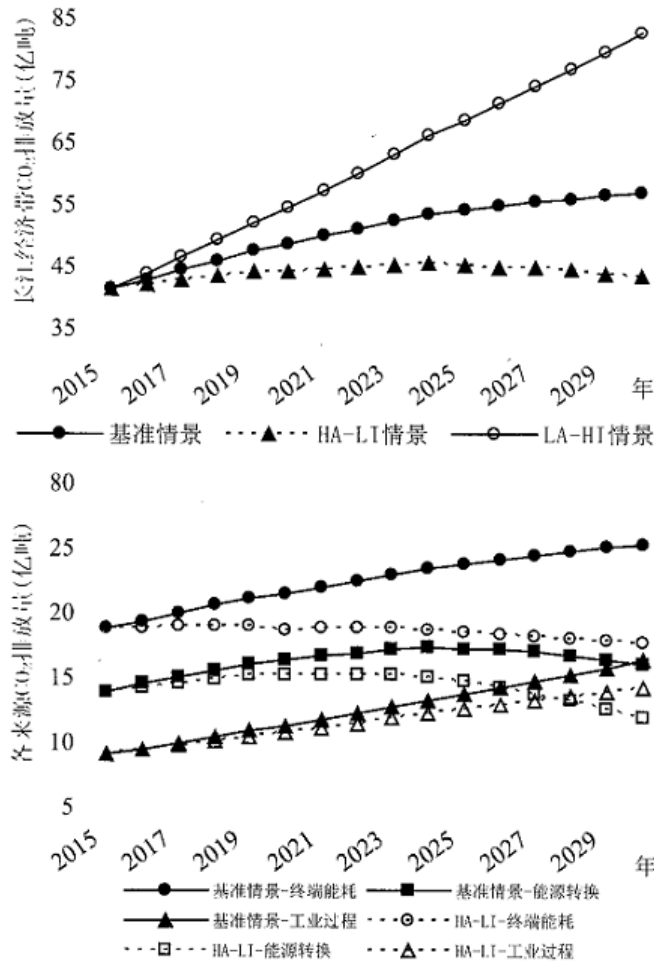


图1 2015—2030年长江经济带各情景及各来源碳排放变化趋势

由图 1 可知，按照规划目标类推的基准情景基本可以达到 2030 年左右碳排放达到峰值的目标，其 2030 年的排放量 57.28 亿吨 CO₂，年增长率仅为 0.73%，已经接近峰值，碳排放强度 0.73 吨 CO₂/万元 GDP，较 2015 年累计下降 46.83%。HA-LI 情景则在 2024 年即可达到碳排放峰值（45.71 亿吨 CO₂），LA-HI 情景碳排放量增长无减缓迹象，2030 年其碳排放量分别是基准情景和 HA-LI 情景的 1.45 倍和 1.91 倍，LA-HI 情景完全无法达到碳减排目标，这一情景在后续分析被放弃。可见，我国提出的 2030 年左右碳排放达峰目标不难实现，若需保证在 2030 年前碳排放达峰，只需在基准情景的基础上适度强化减碳引导即可，但若需要在 2025 年前达到碳排放峰值，则需要借鉴 HA-LI 情景中加速优化产业结构和能源结构的做法。进一步分析碳排放的主要来源，能源加工转换碳排放在基准情景和 HA-LI 情景中都呈现倒“U”曲线（在东部、中部、西部区域板块中也均呈现该趋势），说明随新能源广泛使用，长江经济带未来对化石能源供热和火力发电的依赖会逐步下降，能源加工转换碳排放对未来碳排放达峰为正贡献。工业过程碳排放在基准情景和 HA-LI 情景都呈上升趋势，此部分碳排放与能源结构调整无关，依赖于生产工艺的提升和利用碳捕捉技术的消减。终端能耗碳排放的不同是基准情景和 HA-LI 情景的主要差异，如何有效控制终端能耗排放是基准情景下完成碳减排目标的关键。

结合表 2 和表 4 分析，未来中部、西部区域在长江经济带碳排放中的占比将逐渐提高，中部区域（超过 37%）将取代东部区域（35%左右）成为碳排放总量最大的区域。碳排放来源方面：东部区域仍将以能源加工转换碳排放为主，其占比较 2015 年的 46.59%有所下降，但仍将超过 40%，其次是终端能耗排放；中部和西部区域则以终端能耗碳排放为首，其中中部区域终端能耗排放占比在 2015 年的基础上略有下降，但基准情景中西部区域终端能耗碳排放占比还会较 2015 年上升 0.51 个百分点；除终端能耗排放外，中部和西部区域工业过程碳排放将超过能源加工转换碳排放成为第二大贡献源，特别是西部区域其占比将达到

31%–36%，而西部的能源加工转换碳排放将由 2015 年的 19.10% 下降至 11% 左右，这一变化可能与西部相对丰富的非化石能源发电禀赋有关。未来碳排放贡献的关键部门与 2015 年类似，但其内部比例变化差异明显，在其他碳排放主要部门排放占比下降的趋势下，各区域板块的第三产业碳排放占比将提升，东部的钢铁生产碳排放、中部和西部地区的水泥生产碳排放占比增幅较大。各能源品种对终端能耗碳排放的贡献方面，油品能源和天然气（含 LNG）的排放比例明显提高，基准情景中，煤品能源依然是占比最大的贡献源（48.96%，较油品能源高出 9.27%），但在 HA-LI 情景中油品能源碳排放将成为最大的贡献源（44.47%），而且在这两个情景中，东部区域中油品能源碳排放占比均超过煤品能源。由于 HA-LI 情景对终端能耗碳排放的控制明显优于基准情景，若要有效降低终端能耗碳排放，基准情景应优先降低工业部门碳排放量（HA-LI 情景在各区域中工业部门碳排放控制均大幅超过基准情景）。此外，HA-LI 情景中城镇生活碳排放较基准情景上涨较快，值得关注。

表4 长江经济带各区域碳排放情景模拟结果（2030年）

单位：%

项目	部门	东部区域		中部区域		西部区域	
		基准情景 占总量 比例	HA-LI 情景占 总量 比例	基准情景 占总量 比例	HA-LI 情景占 总量 比例	基准情景 占总量 比例	HA-LI 情景占 总量 比例
终端能耗 碳排放	第一产业	0.78	0.60	0.79	0.58	0.77	0.59
	工业	15.68	13.36	24.62	20.71	30.00	25.39
	建筑业	1.01	0.96	1.61	1.59	2.36	2.38
	第三产业	10.77	10.19	12.69	12.14	17.24	17.31
	城镇生活	3.25	3.93	3.34	4.32	4.54	5.83
乡村生活	1.13	1.04	1.73	1.49	2.18	1.52	
能源加工 转换碳 排放	热力供应	7.07	6.84	1.72	1.66	0.81	0.79
	火力发电	34.29	33.45	25.16	24.77	10.67	10.23
工业过程 碳排放	水泥生产	8.92	11.22	22.10	24.98	26.94	30.50
	玻璃生产	0.05	0.07	0.20	0.20	0.06	0.08
	纯碱生产	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02
	钢铁生产	17.03	18.31	6.03	7.52	4.41	5.38
终端能耗 碳排放的 化石能源 贡献	煤及焦炭	36.67	32.32	54.69	46.42	54.50	49.09
	油品能源	48.72	48.52	38.01	43.80	37.74	42.21
	天然气	14.61	19.15	7.29	9.78	7.76	8.70
该区域占经济带 排放比例		34.88	35.29	37.71	37.49	27.42	27.22

5 结论

利用长江经济带分区域碳排放 LEAP 模型，对不同情景实施仿真分析，得到以下结论：

(1) 2015 年长江经济带碳排放总量为 41.61 亿吨 CO₂。区域分布上，东部区域占比居首，其次为中部、西部区域。排放来源上，终端能耗碳排放占比最大，其次为能源加工转换碳排放、工业过程碳排放。至 2030 年，中部区域将取代东部区域成为碳排放量最大的区域，未来东部区域中能源加工转换碳排放控制问题，其次是终端能耗碳排放，中部、西部区域主要是终端能耗碳排放控制问题，其次是工业过程碳排放。至 2030 年，参照各省市规划目标和历史变动趋势的基准情景碳排放接近达峰临界值，峰值约为 57 亿吨 CO₂，碳排放强度较 2015 年累计下降超过 45%，按时完成 2030 年碳排放达峰及碳强度较 2005 年下降 60%–65% 的双重目标可能性较大。若要确保在 2030 年前达峰，在完成即有规划目标下适度加快碳减排方面的产业、能源结构优化即可。

(2) 对比基准情景和 HA-LI 情景, 影响长江经济带碳排放达峰的主要因素是终端能耗碳排放的控制。长江经济带未来随火力发电比重的下降, 能源加工转换碳排放将可能在 2025 年前达峰走低。工业过程碳排放放在所有情景中均逐步提高, 但其不受能源消费结构影响, 主要依靠产品消费弹性和生产工艺控制, 削减难度较大。

(3) 2015—2030 年, 长江经济带碳排放控制的关键部门主要是涉及终端能耗碳排放的工业、第三产业, 能源加工转换碳排放的火力发电, 工业过程碳排放的水泥、钢铁生产部门, 这 5 个部门占到各区域碳排放总量的 86%-90%。其中, 工业、第三产业和火力发电碳排放放在各区域都属于排放量较大的部门。东部区域还需注意控制热力供应碳排放, 中部、西部区域则需要在水泥碳排放控制上更为努力。此外, HA-LI 情景较之基准情景的主要优势是工业碳排放削减较高, 但其主要问题是城镇居民碳排放占比提升较快, 由于碳减排高于规划目标的 9 八 II 情景也较符合历史情况 (“十二五”期间长江经济带多省碳减排目标均远高于规划目标), 居民生活碳排放控制也值得加强重视。

(4) 能源结构对碳排放的影响方面, 终端能耗和加工转换碳排放均由化石能源燃用造成, 化石能源燃用的碳排放 2015 年排放总量的 7%以上, 2030 年也将占到 70%左右, 未来必须加快实施煤改油、油改气进程, 东部区域终端能耗中油品能源碳排放占比将率先超过煤品能源。在碳排放达峰以后的远景, 工业过程碳排放将成为各区域碳排放控制的新目标。

参考文献

- ① 李建豹, 黄贤金. 基于空间面板模型的碳排放影响因素分析——以长江经济带为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2015(10):1665-1671.
- ② 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.
- ③ 曹广喜, 刘禹乔, 周洋. 中国制造业发展与碳排放脱钩的空间计量研究——四大经济区分析 [J]. 科技管理研究, 2015(21):224-228.
- ④ 赵晓梦, 刘传江. 节能减排约束下全要素生产率再估算及增长动力分析——基于长江经济带数据的研究 [J]. 学习与实践, 2016(8):12-22.
- ⑤ 徐如浓, 吴玉鸣. 长三角城市群碳排放、能源消费与经济增长的互动关系——基于面板联立方程模型的实证 [J]. 生态经济, 2016(12):32-38.
- ⑥ 黄国华, 刘传江, 赵晓梦. 长江经济带碳排放现状及未来碳减排 [J]. 长江流域资源与环境, 2016(4):638-644.
- ⑦ 何介南, 康文星. 湖南省化石燃料和工业过程碳排放的估算 [J]. 中南林业科技大学学报, 2008(5):52-58.
- ⑧ 徐成龙, 任建兰, 巩灿灿. 产业结构调整对山东省碳排放的影响 [J]. 自然资源学报, 2014(2):201-210.
- ⑨ 邓明翔, 李巍. 基于 LEAP 模型的云南省供给侧结构性改革对产业碳排放影响情景分析 [J]. 中国环境科学, 2017(2):786-794.
- ⑩ 王会芝. 交通能源消费碳排放情景预测研究——以天津市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2016(7):37-41.

-
- ⑪ Song H J, Lee S, et al. Environmental and economic assessment of the chemical absorption process in Korea using the LEAP model[J]. Energy Policy, 2007, 35(10):5109-5116.
 - ⑫ 冯悦怡, 张力小. 城市节能与碳减排政策情景分析——以北京市为例[J]. 资源科学, 2012(3): 541-550.
 - ⑬ 杨顺顺. 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究[J]. 中国工业经济, 2015(6): 55-67.
 - ⑭ IPCC. 2016 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Hayama: IGES for the IPCC, 2006.