

长江经济带大气环境效率的时空异质性与驱动因素研究^{*1}

汪克亮¹ 史利娟¹ 刘蕾¹ 杜宇¹ 孟祥瑞¹ 杨宝臣²

(1. 安徽理工大学经济与管理学院, 安徽淮南 232001;

2. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

【摘要】:将大气污染物视为“坏”产出, 基于SBM-Undesirable模型与Global Malmquist-Luenberger (GML) 生产率指数实证测算2006~2015年间长江经济带11省市的大气环境效率与大气环境全要素生产率, 并考察其时空异质特征与驱动因素, 利用泰尔指数分解方法揭示大气环境效率地区差距的形成根源, 通过构建“效率-生产率”矩阵分析长江经济带各省市大气环境效率提升的优势与不足。结果表明:长江经济带大气环境效率整体水平偏低, 不同地区差异较大且在考察期间维持了下降趋势, 大气污染减排潜力巨大; 长江上游、中游与下游三大地区之间差距与长江上游地区内部省市之间差距是长江经济带大气环境效率地区差距形成的主要根源; 大气环境全要素生产率提升完全依靠技术进步来驱动, 技术效率恶化是长江经济带大气环境生产率提升的主要障碍; 不同省市大气环境效率提升的优势与不足存在差异, 因而必须因地制宜地制定大气污染防治对策。研究结论可以为长江经济带改善大气环境质量、促进经济社会可持续发展提供决策依据。

【关键词】:长江经济带; 大气环境效率; 时空异质性; 驱动因素

【中图分类号】:F427 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)03-0453-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201803001

长江经济带横跨我国东中西三大区域, 囊括9省2市, 总面积205万km², 占我国国土总面积的21.38%, 人口与GDP占全国的比重均在40%以上, 在我国经济发展中的重要地位不言而喻。然而, 多年来“高污染、高能耗、高排放”的粗放型经济增长模式使得长江经济带正面临着严峻的环境危机, 已经开始严重威胁到当地各行各业的生产经营、居民身体健康与生态环境质量。2014年9月, 国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》, 标志着长江经济带建设成为我国又一个国家层面的重大发展战略。《指导意见》指出, 长江经济带建设的目标定位之一是生态文明建设的先行示范带, 从而对长江流域的生态环境管理提出了更高的要求。2016年1月, 习近平总书记在重庆推动长江经济带发展座谈会上郑重强调:长江是中华民族的

¹ 收稿日期:2017-04-25; 修回日期:2017-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(71403003); 国家社会科学基金项目(14BJL105); 教育部人文社会科学研究项目(13YJC790136); 中国博士后科学基金项目(2014M551787, 2015T80643); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016075); 安徽理工大学研究生创新基金(2017CX2055)

作者简介:汪克亮(1980~), 男, 博士后, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为资源与环境管理、效率与生产率分析。E-mail:klwang@163.com

母亲河，也是中华民族发展的重要支撑。推动长江经济大发展必须从中华民族长远利益考虑，走生态优先、绿色发展之路，使母亲河永葆生机活力。因此，在长江经济带建设进程中不仅要追求经济效益，更应注重环境的保护，这是实现长江经济带经济社会可持续发展的客观要求。本文立足于长江经济带的大气环境保护问题，通过系统考察该地区大气环境效率的时空异质性与驱动因素，为相关决策部门大气污染防治政策的制定提供理论与现实依据。

环境效率是指在一定时间内生产者利用各种要素进行经济活动所产生的环境影响，数值上可以用经济产出与环境影响之间的比值来衡量，旨在反映经济活动的环境代价。近年来，数据包络分析(DEA)^[1]方法在环境效率中得到了广泛应用。杨俊等^[2]、王俊能等^[3]、袁鹏等^[4]、汪克亮等^[5]采用径向 DEA 模型测算中国不同地区、行业的环境效率。但是，由于径向 DEA 模型忽略了松弛变量，因而容易高估决策单元效率的真实水平。为了改进这一局限，Tone^[6]提出基于松弛测度的 SBM 模型。作为一种非径向、非角度的 DEA 模型，SBM 模型突出了松弛变量在效率测度中的重要作用。刘勇等^[7]、李静等^[8]和宋马林^[9]均采用 SBM 模型测度中国不同地区的环境效率。Tone^[10]将环境污染物视为“非期望产出”，对传统 SBM 模型进行改进，提出 SBM-Undesirable 模型，目前已广泛用于中国不同地区、行业环境效率测算之中^[11~14]。动态效率测度的传统方法为 Malmquist 指数法，但 Malmquist 指数法多是基于传统 shephard 距离函数，受到径向和角度的限制，且无法处理非期望产出问题，因而有很大局限性。Chung 等^[15]基于方向性距离函数提出的 Malmquist-Luenberger (ML) 生产率指数较好地克服了这一缺陷，他将污染物视为“坏”产出，在追求经济产出最大化的同时尽可能减少“坏”产出，更加契合经济与环境双赢的可持续发展意涵。杨俊等^[16]、吴军^[17]利用考虑非期望产出的 ML 生产率指数测算了 1998~2007 年间中国地区工业全要素生产率并对其进行分解，发现技术进步是生产率增长的主要驱动因素；周五七^[18]运用共同前沿 ML 指数测度了能源与碳排放约束下中国省区绿色全要素生产率及其分解指数，同样发现中国地区绿色全要素生产率增长的动力主要来自于技术进步，技术效率则起到了抑制作用；然而，由于传统 ML 指数在测算方向性距离函数时是以当期生产前沿作为参考对象，在计算混合期方向性距离函数时会出现线性规划无可行解的情况。与此同时，以几何平均形式表示的传统 ML 生产率指数也不具备传递性这一重要性质。基于此，Oh^[19]基于全局生产技术提出了一种新型的 ML 指数—Global Malmquist-Luenberger (GML) 生产率指数，它不仅完全继承了传统 ML 指数的优点，而且可以有效避免线性规划无解问题，同时还具备循环传递特性，因而近年来应用愈加广泛。齐亚伟等^[20]利用 GML 指数对 2000~2009 年中国各地区环境全要素生产率变动进行了测算并分解；赵良仕等^[21]则通过 GML 指数测度了 1998~2010 年中国各地区水资源全要素生产率并考察其驱动机制，等。这些研究均在一定程度上表明利用 GML 指数研究中国资源环境生产率问题具有无可比拟的优势。

研究聚焦长江经济带大气环境效率问题。近年来雾霾天气频发，大气污染防治重新成为学界关注的焦点，但专门针对中国大气环境效率问题的研究并不多，以特定区域作为研究对象的文献则更加鲜见。为了丰富这一领域的研究，本文以长江经济带为研究对象，基于 SBM-Undesirable 模型测算大气环境效率并利用泰尔指数分解方法揭示地区差距的形成根源，运用 GML 生产率指数分析大气环境全要素生产率的动态演进特征与驱动机制，并为长江经济带提升大气污染防治水平和改善大气环境质量提供可行的对策建议。

1 方法与模型

1.1 SBM-Undesirable 模型

根据 Tone 提出的非径向和非角度的 SBM-Undesirable 模型从静态角度来测算长江经济带各省市的大气环境效率。该方法能避免传统 DEA 方法造成的投入要素拥挤或松弛的问题，进而能减免传统 DEA 方法测算效率带来的误差。假设该评价系统存在 $N(n=1, \dots, N)$ 个决策单元，在时间 $t(t=1, \dots, T)$ 内用 $m(m=1, \dots, M)$ 种投入产生 $k(k=1, \dots, K)$ 种“好”产出和 $l(l=1, 2, \dots, L)$ 种“坏”产出。投入指标矩阵表示成 $X \in \mathbb{R}^n$ ，“好”产出定义为 $Y \in \mathbb{R}^k$ ，“坏”产出指标表示成 $B \in \mathbb{R}^l$ ，在规模报酬不变的前提下，生产可能性集：

$$P(x) = \{(x, y, b) \mid x \geq X\lambda, y \leq Y\lambda, b \geq B\lambda, \lambda \geq 0\} \quad (1)$$

则决策单元 DMU0 的效率为:

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_m^- / x_{m0}}{1 + \frac{1}{K+L} \left(\sum_{k=1}^K s_k^y / y_{k0} + \sum_{l=1}^L s_l^b / b_{l0} \right)}$$

$$s. t. \quad x_0 = X\lambda + s^-, \quad y_0 = Y\lambda + s^y,$$

$$b_0 = B\lambda + s^b, \quad s^- \geq 0,$$

$$s^y \geq 0, \quad s^b \geq 0, \quad \lambda \geq 0 \quad (2)$$

式中: s 表示投入产出的松弛量, 具体即 s^- 表示投入要素的冗余; s^y 表示期望产出的不足; s^b 表示非期望产出的过量或多余; λ 是权重矩阵, 其与投入、产出指标矩阵的乘积分别表示前沿上的投入量与产出量; ρ 关于 S 严格递减, 且 $0 \leq \rho \leq 1$, 当且仅当 $\rho=1$ 时, 该决策单元有效, 当 $\rho < 1$ 时, 决策单元无效, 说明此时存在投入过度、“好”产出不足或“坏”产出过量的情况。

1.2 泰尔指数分解

在测算长江经济带 11 省市大气环境效率的基础上, 本文进一步采用泰尔(Theil)指数分解方法揭示效率地区差距的形成根源。作为广义熵指标体系的一种特殊形式, 泰尔指数的突出优点是可以将地区总体差距分解为地区内部差距和地区之间差距, 并由此衡量它们在总体差距中的重要性与贡献率。泰尔指数的取值范围为 0~1 之间, 数值越小, 表明地区差距越小; 反之, 则表明差距越大。本文借鉴陈德湖等对于泰尔系数及其结构分解的方法^[22], 得到长江经济带大气环境效率的泰尔指数及其分解公式如(3)–(6)式所示。

$$Theil = Theil_w + Theil_b = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} \frac{e_i}{\bar{e}} \ln \frac{e_i}{\bar{e}} \quad (3)$$

$$Theil_p = \frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^{n_p} \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p} \ln \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p} \quad (4)$$

$$Theil_w = \sum_{p=1}^3 \left(\frac{n_p}{11} \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) Theil_p \quad (5)$$

$$Theil_b = \sum_{p=1}^3 \frac{n_p}{11} \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \ln \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \quad (6)$$

式中： n_p ($p=1, 2, 3$) 表示长江上、中、下游省市数量； \bar{e}_p/\bar{e} 表示各地区大气环境效率均值与整个长江经济带大气环境效率均值之比； $Theil_p$ 代表长江经济带大气环境效率总体差距的泰尔指数； $Theil_{p_i}$ 表示某个地区(上、中、下游)内各省市大气环境效率差距的泰尔指数； $Theil_{p_i}$ 和 $Theil_{p_j}$ 分别表示长江经济带大气环境效率的地区内差距与地区间差距的泰尔指数。

1. 3GML 生产率指数

Malmquist-Luenberger (ML) 生产率指数最早由 Chung 等提出。本文利用其用来考察长江经济带 11 省市大气环境全要素生产率的增长状况。ML 指数以方向性距离函数 (DDF) 为基础，可以将“坏”产出纳入 TFP 测度框架，在保证经济增长的同时能够有效兼顾节能减排，符合“又好又快”的绿色发展思想。测算 ML 指数时需要求解 4 个 DDF，包括 2 个当期 DDF 与 2 个混合期 DDF，在求解混合期 DDF 时可能会遇到线性规划无可行解问题。为了避免这一问题的出现，本文遵从 Oh 的做法，采用基于全局 Malmquist-Luenberger (GML) 来测算大气环境全要素生产率 (AETFP)，并将其分解为技术效率变化 (EFFCH) 与技术进步 (TECHCH)，具体如下 (7) - (10) 式所示。

$$AETFP_t^{t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^G(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + \vec{D}_0^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g^{t+1})} \quad (7)$$

$$AETFP_t^{t+1} = EFFCH_t^{t+1} \times TECHCH_t^{t+1} \quad (8)$$

$$EFFCH_t^{t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g^{t+1})} \quad (9)$$

$$TECHCH_t^{t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^G(x^t, y^t, b^t; g^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; g^t)} \times \frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g^{t+1})}{1 + \vec{D}_0^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g^{t+1})} \quad (10)$$

式中： $\vec{D}_0^G(\cdot)$ 为全局方向性距离函数，本文方向向量设为 $(g_x, g_y, g_b) = (-x, y, -b)$ ，即追求目标为实现“好”产出最大化的同时，最大限度的缩减投入与“坏”产出，且投入与“好”产出是强可处置的，“坏”产出是弱可处置的。AETFP 大于 1、等于 1 和小于 1 表示大气环境全要素生产率上升、不变和下降；AETFP 可以分解为技术效率变化 (EFFCH) 与技术进步指数 (TECHCH)，EFFCH 大于 1、等于 1 和小于 1 分别表示技术效率上升、不变和下降，反映决策单元对效率前沿面的“追赶”情况；TECHCH 大于 1、等于 1 和小于 1 分别表示技术进步、不变和退步，反映效率前沿面向外扩展或收缩的程度。

2 实证测算与结果分析

2.1 指标与数据

对于模型投入指标，本文选择从业人数、资本存量与能源消费总量分别描述劳动投入 (L)、资本投入 (K) 和能源投入 (E)。其中，由于资本存量数据无法直接获得，本文根据单豪杰的估算方法^[23]与结果将各省市资本存量数据更新至 2015 年并以 2006 年

为基期进行调整；由于指标数据所限，本文以各省市二氧化硫(SO₂)、烟粉尘(Dust)以及氮氧化物(NO_x)作为大气污染物的代表，并将其作为“坏”产出纳入 DEA 效率模型。“好”产出指标采用各省市 2006 年不变价格的地区生产总值(GDP)来表征。此外，本文按照地理位置将长江经济带分为长江上、中、下游三大地区，其中，上游地区包括重庆、四川、贵州和云南 4 省市，中游地区包括安徽、江西、湖北与湖南 4 省份，下游地区包括上海、江苏与浙江 3 省市。上述指标变量数据来自历年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》与《中国环境统计年鉴》。表 1 给出了投入产出指标的描述性统计。

表 1 样本投入产出指标的描述性统计(2006~2015 年)

变量	最小值	最大值	平均值	标准差
K (亿元)	7 199.01	143 355.30	38 613.14	26 677.10
L (万人)	866.90	4997.60	3 098.75	1 176.82
E (万 t 标准煤)	4 660.10	30 535.82	12 845.26	5 809.63
GDP (亿元)	2 338.98	56 372.62	14 844.13	10 518.26
SO ₂ (万 t)	17.08	146.50	72.03	26.15
NO _x (万 t)	18.00	153.60	57.60	28.20
Dust (万 t)	8.09	122.50	42.01	19.93

2.2 长江经济带大气环境效率的时空异质特征

根据式(2)测算得到 2006~2015 年间长江经济带 11 省市及长江上、中、下游三大地区的大气环境效率如表 2 所示。根据表 2，2006~2015 年间，长江经济带 11 省市的大气环境效率均值为 0.6022，整体水平偏低，距离前沿面尚存在 40%左右的改进空间，污染减排潜力较大；上、中、下游三大地区的大气环境效率均值分别为 0.4692、0.5379 和 0.8653，下游地区的效率值明显高于中游地区和上游地区，上游地区效率值最低，表明大气污染防治水平的高低与地区发展水平有很强的正相关。但是，我们必须认识到，本文所用的 DEA 方法只是一种“相对效率”评价方法，效率测算结果虽然能够准确衡量长江经济带各省市大气环境效率水平的相对高低，但是效率测算结果与研究样本密切相关。一旦研究样本发生变化，效率测算结果可能会大相径庭。所以，长江下游省市较高的大气环境效率只是相对于长江经济带 11 省市而言，一旦超出这一范围，如测算样本中加入大气污染防治水平更高的西方发达国家或地区，则其效率数值会明显下降。

表 2 长江经济带 11 省市与三大地区的大气环境效率值(2006~2015 年)

地区	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	平均
重庆	0.412 4	0.399 6	0.401 8	0.405 0	0.409 3	0.429 8	0.435 4	0.468 9	0.481 8	0.476 9	0.432 1

四川	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.468 1	0.461 8	0.445 0	0.837 5
贵州	0.289 6	0.270 5	0.286 0	0.284 4	0.283 0	0.286 2	0.281 5	0.280 4	0.277 2	0.267 0	0.280 6	
云南	0.379 1	0.357 3	0.350 9	0.345 2	0.332 9	0.313 6	0.301 9	0.304 1	0.295 9	0.283 2	0.326 4	
安徽	0.524 7	0.515 6	0.500 8	0.504 0	0.472 7	0.451 6	0.441 8	0.431 4	0.424 4	0.412 4	0.467 9	
江西	0.677 6	0.604 6	0.606 7	0.621 2	0.618 6	0.511 3	0.496 4	0.481 9	0.479 1	0.461 6	0.555 9	
湖北	0.585 8	0.572 4	0.569 0	0.567 1	0.552 5	0.456 9	0.528 3	0.451 6	0.449 2	0.434 0	0.516 7	
湖南	0.552 6	0.810 3	1.000 0	1.000 0	0.491 7	0.451 4	0.446 3	0.456 2	0.455 8	0.446 4	0.611 1	
上海	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
江苏	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.663 7	0.663 6	0.658 6	0.681 0	0.671 6	0.833 9	
浙江	1.000 0	0.701 1	1.000 0	0.664 6	1.000 0	0.651 6	0.656 1	0.634 6	0.661 1	0.651 4	0.762 1	
整体	0.674 7	0.657 4	0.701 4	0.672 0	0.651 0	0.565 1	0.568 3	0.512 4	0.515 2	0.504 5	0.602 2	
上游	0.520 3	0.506 8	0.509 7	0.508 7	0.506 3	0.507 4	0.504 7	0.380 4	0.379 2	0.368 0	0.469 2	
中游	0.585 2	0.625 7	0.669 1	0.673 1	0.533 9	0.467 8	0.478 2	0.455 3	0.452 1	0.438 6	0.537 9	
下游	1.000 0	0.900 4	1.000 0	0.888 2	1.000 0	0.771 8	0.773 2	0.764 4	0.780 7	0.774 3	0.865 3	

从各省市来看, 根据表 2, 2006~2015 年间, 上海一直位于生产前沿之上, 在经济增长进程中有效避免了大气污染物的过度排放, 代表了长江经济带大气污染防治的最高水平。浙江与江苏两省的大气环境效率也在 11 省市中处于较高位次; 作为中国能源和制造基地, 中游地区聚集了大量高能耗、高污染的重化工业企业, 经济增长方式粗放, 大气环境效率主要受制于低层次的产业结构, 结构减排潜力巨大; 而上游地区经济发展水平较低, 生产与污染治理技术落后, 单位经济产出所付出的资源环境代价较高, 再加上近年来又不断承接中下游地区的高污染产业, 因而上游多数省市大气环境效率长期被“锁定”在一个较低水平。从时间维度来看, 2006~2015 年间, 长江经济带大气环境效率并未得到有效改善, 效率值从 2006 年的 0.6747 下降到 2015 年的 0.5045, 表明长江经济带经济增长与大气环境保护之间的矛盾日渐突出, 实现经济与环境协调可持续发展仍然面临艰巨挑战。长江上游、中游与下游三大地区的大气环境效率也呈现出与整体经济带类似的趋势特征。上游地区的效率值从 2006 年的 0.5205 下降至 2015 年的 0.3680, 中游地区从 0.5852 下降到 0.4386, 下游地区从 1.0000 下降至 0.7743。持续走低的大气环境效率表明长江经济带大气环境保护形势异常严峻, 强力推进节能减排与经济绿色转型已经刻不容缓。

根据式 (2) 中松弛变量的计算, 表 3 给出了长江经济带整体及其三大地区投入与“坏”产出变量的冗余状况, 可以为改善长江经济带全要素大气环境效率提供有针对性的方向。由表 3 可知, 整体来看, 冗余率最高的是烟粉尘排放, 达到 58.0%。劳动投入与 SO_2 排放的冗余率也较高, 都在 50% 以上; NOX 排放的冗余率为 32.9%, 能源投入冗余率为 25.8%; 相比之下, 资本投入冗余率较低, 只有 9.9%。分地区来看, 长江上、中、下游三大地区变量冗余率排序与整体长江经济带基本一致, 但是冗余水平有很

大差别。其中，上游地区烟粉尘排放、SO₂排放与劳动投入的冗余率分别高达 69.8%、68.0%与 66.0%，能源与资本投入冗余率为 42.0%和 19.7%。除了烟粉尘，其它变量投入或污染排放的冗余率在三大地区中都是最高的，这说明上游地区经济发展过程中伴随了严重的资源浪费与环境污染，经济增长效率低下。由于人力资本与科技水平低下所限，上游地区经济发展付出的资源环境代价最高；中游地区烟粉尘排放冗余率在 3 大地区中是最高的，达到 73.5%，主要源于其偏重的产业结构和以煤为主的能源结构，另外中游地区劳动投入与 SO₂ 排放冗余率也较高，分别达到 63.7%与 57.8%；下游地区所有变量的冗余率在 3 大地区中都是最低的。资本投入、劳动投入、能源投入、SO₂排放、NO_x排放、烟粉尘排放的冗余率分别只有 2.8%、18.9%、2.6%、16.5%、10.9%、21.4%，资源利用与污染排放效率都处于相对最优水平。较高的资本产出效率、高质量的人力资源、高层次的产业结构与发达的节能减排技术使得下游地区在维持经济持续增长同时，有效地实现了资源节约与污染减排，经济增长与环境保护之间的协调度较高，是长江经济带经济绿色低碳转型的示范地区。从动态角度来看，长江经济带投入与污染排放冗余率都呈现随时间推移而不断上升趋势，这与前文给出的大气环境效率逐年降低的结论保持一致，需要相关决策部门采取得力措施，在实现经济持续增长的同时强力推进大气污染防治，注重经济增长质量的提高，促进经济与环境之间的协调发展。

表 3 长江经济带大气环境效率投入产出变量冗余率(2006~2015 年)

地区	变量	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	平均
上游	K	12.8%	15.6%	16.8%	16.0%	17.8%	18.6%	20.2%	22.9%	26.9%	29.4%	19.7%
	L	65.3%	65.2%	65.0%	64.4%	64.2%	59.0%	58.3%	76.5%	71.4%	71.0%	66.0%
	E	39.1%	39.6%	39.1%	39.5%	38.7%	40.0%	40.4%	45.3%	47.8%	50.1%	42.0%
	SO ₂	58.9%	58.8%	59.2%	60.6%	60.7%	65.3%	64.9%	82.9%	84.2%	84.0%	68.0%
	NO _x	24.1%	38.7%	27.7%	35.0%	37.0%	49.2%	49.3%	57.7%	59.6%	59.1%	43.7%
	Dust	67.5%	67.8%	67.1%	66.3%	64.1%	64.9%	64.7%	83.2%	75.8%	76.6%	69.8%
中游	K	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%	0.1%	2.4%	6.3%	11.4%	15.5%	18.1%	5.4%
	L	57.9%	52.7%	48.3%	47.0%	69.6%	77.0%	68.4%	75.9%	70.5%	69.9%	63.7%
	E	26.0%	21.1%	19.1%	19.1%	28.3%	31.1%	32.2%	28.6%	31.3%	34.3%	27.1%
	SO ₂	44.9%	38.6%	37.8%	38.6%	56.0%	71.5%	71.0%	71.2%	73.7%	74.7%	57.8%
	NO _x	24.2%	18.3%	20.9%	20.4%	26.6%	55.2%	54.6%	54.3%	56.3%	55.9%	38.6%
	Dust	70.7%	70.4%	56.3%	55.0%	76.1%	82.9%	82.3%	83.2%	78.6%	79.7%	73.5%
	K	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	0.0%	2.2%	4.0%	5.9%	7.2%	7.8%	2.8%

下游	L	0.0%	20.8%	0.0%	21.2%	0.0%	33.6%	32.8%	31.8%	24.4%	24.1%	18.9%
	E	0.0%	0.4%	0.0%	0.1%	0.0%	3.2%	3.6%	4.4%	6.1%	7.8%	2.6%
	SO ₂	0.0%	2.3%	0.0%	6.4%	0.0%	30.8%	30.0%	29.7%	32.9%	33.3%	16.5%
	NO _x	0.0%	4.5%	0.0%	9.6%	0.0%	19.2%	20.0%	18.0%	18.3%	19.2%	10.9%
	Dust	0.0%	17.8%	0.0%	18.0%	0.0%	39.5%	33.7%	40.7%	32.3%	32.4%	21.4%
整体	K	4.6%	5.9%	6.1%	6.1%	6.5%	8.2%	10.7%	14.1%	17.4%	19.4%	9.9%
	L	44.8%	48.6%	41.2%	46.3%	48.7%	58.6%	55.0%	64.1%	58.2%	57.8%	52.3%
	E	23.7%	22.2%	21.2%	21.4%	24.4%	26.8%	27.4%	28.1%	30.4%	32.8%	25.8%
	SO ₂	37.8%	36.1%	35.3%	37.8%	42.4%	58.1%	57.6%	64.1%	66.4%	66.8%	50.2%
	NO _x	17.6%	21.9%	17.6%	22.8%	23.1%	43.2%	43.2%	45.6%	47.1%	47.0%	32.9%
	Dust	50.3%	55.1%	44.9%	49.0%	51.0%	64.5%	62.6%	71.6%	65.0%	65.7%	58.0%

2.3 长江经济带大气环境效率地区差距的形成根源

由式(3)~(6)计算可得,2006~2015年间,长江经济带大气环境效率地区差距的泰尔指数及地区之间差距与地区内部差距的分解结果,通过衡量地区之间差距与地区内部差距在地区差距中的贡献率,从而揭示长江经济带大气环境效率地区差距形成的主要根源。泰尔指数测算与分解结果如表4所示。

表4 长江经济带大气环境效率地区差距的分解结果(2006~2015年)

年度	总体差距	地区之间差距		地区内部差距				
		数值	贡献率 (%)	数值	贡献率 (%)	上游贡献率 (%)	中游贡献率 (%)	下游贡献率 (%)

2006	0.078 8	0.041 3	52.33	0.037 6	47.67	45.77	1.90	0.00%
2007	0.077 6	0.027 5	35.42	0.050 1	64.58	51.67	6.76	6.16
2008	0.087 4	0.037 2	42.58	0.050 2	57.42	41.84	15.57	0.00
2009	0.083 0	0.024 5	29.57	0.058 4	70.43	46.38	16.81	7.23
2010	0.091 7	0.049 6	54.11	0.042 1	45.89	44.06	1.84	0.00
2011	0.079 3	0.024 0	30.31	0.055 3	69.69	59.28	0.54	9.87
2012	0.079 6	0.023 1	29.03	0.056 5	70.97	60.26	1.08	9.63
2013	0.061 2	0.044 2	72.29	0.017 0	27.71	12.09	0.41	15.21
2014	0.064 3	0.048 0	74.64	0.016 3	25.36	12.67	0.46	12.23
2015	0.068 9	0.051 4	74.58	0.017 5	25.42	12.60	0.39	12.43
平均	0.077 2	0.037 1	49.49	0.040 1	50.51	38.66	4.58%	7.28

由表 3 可知, 2006~2015 年间, 长江经济带大气环境效率的泰尔指数从 2006 年的 0.0788 下降至 2015 年的 0.0689, 表明地区差距整体上是缩小的。根据指数分解结果, 平均来看, 上中下游地区之间差距与地区内部差距在总体差距中的贡献率相当, 分别为 49.49%和 50.51%。从时间变化来看, 地区内部差距与地区之间差距交替成为影响地区差距的主要因素。从 2013 年开始, 地区之间差距的贡献率迅速增加, 成为影响地区差距的决定因素。至 2015 年, 地区间差距贡献率已达到 74.58%, 远超地区内部差距贡献率的 25.42%。从地区内部差距来看, 上游内部省市之间差距最大, 贡献率最高, 达到 38.66%, 其次为下游地区的 7.28%, 中游地区各省市之间的差距相对最小, 贡献率只有 4.58%。泰尔指数的分解结果表明, 缩小上中下游地区之间差距与上游地区省市之间内部差距应该成为未来长江经济带大气环境效率提升的关键。但值得注意的是, 下游地区省市之间内部差距自 2013 年开始迅速扩大, 贡献率在 2015 年已经接近上游地区, 主要是由于 2013~2015 年间江苏、浙江的大气环境效率下降比较明显所致, 须引起重视并及时采取措施。

2.4 长江经济带大气环境效率的动态演进与驱动因素

为了进一步考察长江经济带各省市大气环境效率的动态演进特征与驱动因素, 本文利用式(7)~(10), 采用 GML 生产率指数

来测算大气环境全要素生产率(AETFP),并将其分解为技术效率变化(EFFCH)与技术进步(TECHCH),具体分解结果如图1~图3所示。结果表明,2006~2015年间,长江经济带11省市大气环境全要素生产率平均值为0.9902,年均下降0.98%,表明长江经济带经济增长与大气环境保护之间的关系趋于恶化,形势不容乐观。从指数分解结果来看,技术效率变化指数EFFCH平均值为0.9896,年均下降1.04%,技术进步指数TECHCH平均值为1.0014,年均上升0.14%,意味着长江经济带大气环境生产率的下降主要是由于技术效率恶化所致,技术进步则起到正向促增作用。追根溯源,这表明由于长江经济带在经济增长与大气污染防治过程中过分依赖生产与污染防治技术进步,更加偏重于工艺设备的更新改造与升级换代,而忽视了对传统落后环境管理模式的改革、外部市场制度环境的优化和先进环保理念的推行,从而导致对前沿技术吸收的追赶效应逐渐消失,技术效率在不断下降,与技术进步“南辕北辙”,严重制约了长江经济带大气环境保护效率与大气污染防治水平的进一步提升。从单个省市来看,如图1所示,2006~2015年间,长江经济带11省市大气环境生产率中,只有上海和重庆大于1,浙江等于1,其它8省市都小于1。根据指数分解结果,重庆与贵州的技术效率是提升的,上海维持不变,其它8省市技术效率都呈下降态势;重庆、上海与江苏3省市的技术进步指数值大于1,其它8省市皆出现不同程度的技术退步。

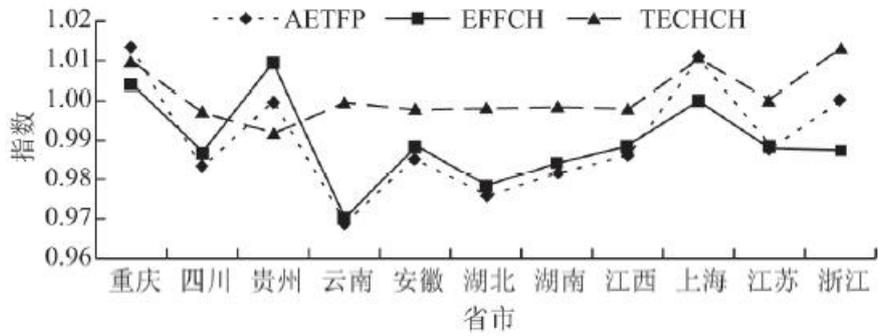


图1 长江经济带11省市大气环境生产率及其分解指数(2006~2015年平均值)

Fig. 1 Air environmental productivity and its decomposition indexes of Yangtze Economic Zone's 11 provinces from 2006 to 2015

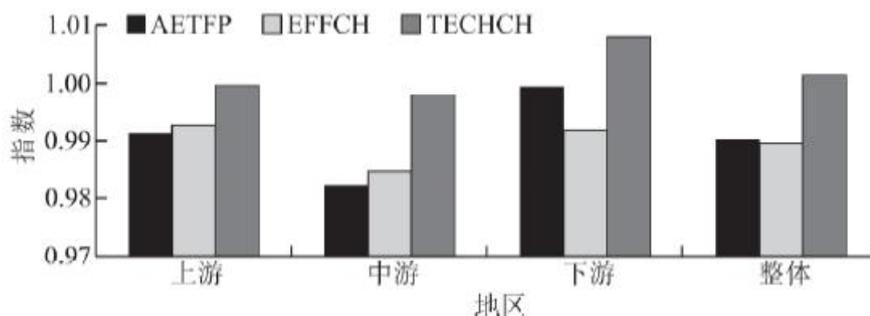


图 2 长江上中下游三大地区大气环境生产率及其分解指数 (2006~2015 年平均值)

Fig. 2 Air environmental productivity and its decomposition indexes of Yangtze Economic Zone's three major areas from 2006 to 2015

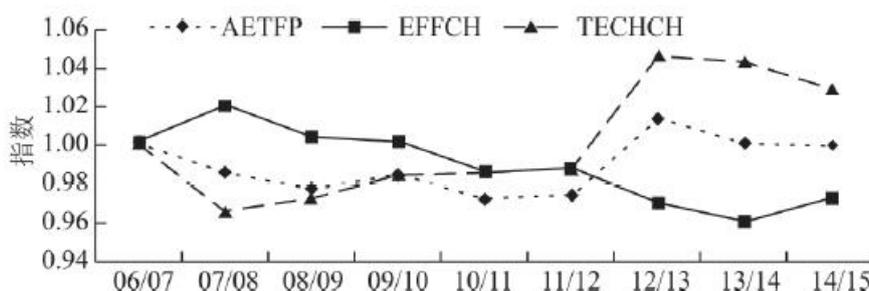


图 3 长江经济带大气环境生产率及其分解指数的变化趋势 (2006~2015 年)

Fig. 3 Trend of air environmental productivity and its decomposition indexes of Yangtze Economic Zone from 2006 to 2015

从地区层面来看,如图 2 所示,长江上中下游三大地区大气环境生产率无一例外的出现了下降趋势,年均分别下降 0.87%、1.78%和 0.05%,其中中游地区下降速度最快,上游次之,下游地区下降速度最慢。根据指数分解结果,三大地区技术效率在研究期内都是下降的,年均分别下降 0.74%、1.52%和 0.82%;另外,只有下游地区技术进步指数大于 1,为 1.0080,年均上升 0.80%,上游与中游技术进步指数则年均分别下降 0.03%和 0.20%,都遭遇了技术退步。大气环境生产率的分解结果充分表明长江经济带目前仍然没有摆脱传统高消耗、高排放的发展模式,实现经济绿色转型任重道远。另外,长江中游大气环境生产率、技术效率和技术进步在三大地区中的表现都是最差的,经济增长与大气环境保护之间的协调程度最低,是未来长江经济带大气污染防治与实现经济社会可持续发展的重点关注地区。从动态视角来看,如图 3 所示,2007~2011 年间,长江经济带大气环境生产率一直处于下降状态,2012~2015 年间转为上升通道,希望这是长江经济带大气环境效率积极向好的一大信号。技术效率变化指数在 2006~2009 年间维持正向增长状态,但 2010~2015 年间一直处于下降区间;技术进步指数则在 2007~2011 年间出现持续下降趋势,2012~2015 年间转为正向增长,是近年来长江经济带大气环境生产率提升的关键驱动因素。综上所述,为了优化长江经济带经济增长效率,实现经济与环境的和谐发展,重点是要改善技术效率,力求让技术效率增进与技术进步协同促进大气环

境全要素生产率的提升。

2.5 长江经济带各省市大气环境效率提升的优势与不足

前文给出了长江经济带 11 省市大气环境效率与全要素生产率的测度结果，本部分将两者结合起来进一步揭示各省市在大气环境效率提升方面的优势与不足，为未来各省市大气污染防治工作的开展提供战略导向。本文以经济带各省市大气环境效率与大气环境生产率的平均值为界，构建“效率-生产率”矩阵，并将经济带各省市归入具有不同特征的 4 大方阵：第 1 方阵：效率大于平均值，生产率大于平均值，效率高且增长速度快；第 2 方阵：效率大于平均值，生产率小于平均值，效率高但增长速度慢；第 3 方阵：效率小于平均值，生产率小于平均值，效率低且增长速度慢；第 4 方阵：效率小于平均值，生产率大于平均值，效率低但增长速度快。经过效率与生产率的比较，图 4 给出了长江经济带 11 省市大气环境效率提升优势与不足的归类结果。

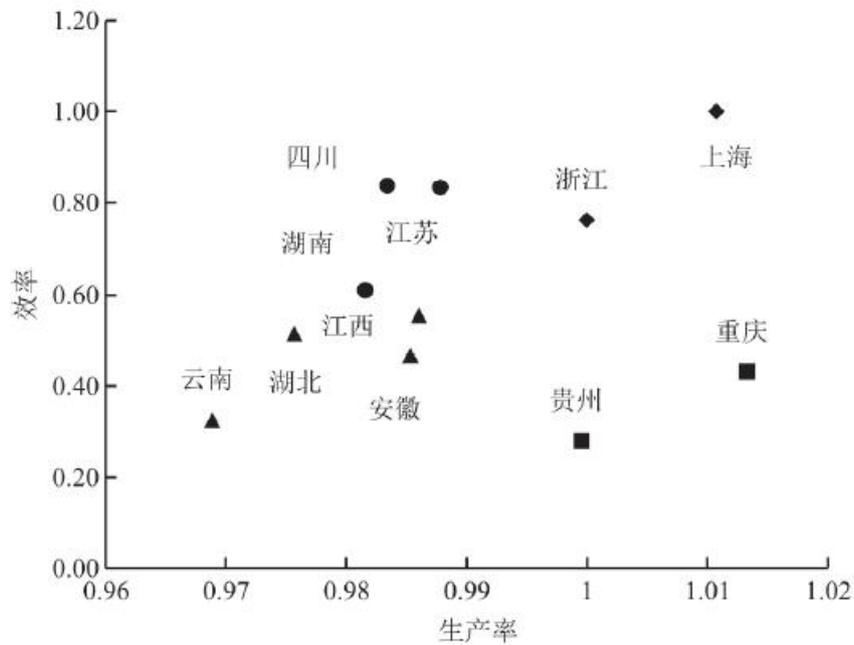


图 4 长江经济带各省市大气环境效率提升优势劣势的“效率-生产率”分析矩阵

Fig. 4 “Efficiency-Productivity” matrix for analyzing advantage and disadvantage of air environmental efficiency improvement of Yangtze Economic Zone's each province

如图 4 所示，横轴表示大气环境生产率，纵轴表示大气环境效率，以二者平均值为界，将坐标平面划分为 4 个部分，分别对应大气环境效率特点的 4 大方阵。通过比较发现，处于第 1 方阵为浙江和上海 2 省市，其大气环境效率高且增长速度快，具备双重优势，是长江经济带大气环境保护的“标杆”与领先省市；四川、江苏、湖南 3 省份处于第 2 方阵，大气环境效率较高但增长速度较慢，优势在于大气环境效率较高，劣势在于生产率低，效率增长速度较低，未来大气环境效率可能会被其它省市所超越；贵州与重庆 2 省市位于第 3 方阵，不足在于大气环境效率较低，优势在于生产率较高，效率“追赶”速度较快，大气环境效率在未来有较大增长潜力；云南、湖北、安徽、江西 4 省份位于第 4 方阵，大气环境效率与大气环境全要素生产率都小于平均值，处于双重劣势状态，效率低且增长速度缓慢，追赶先进省份的难度趋于加大，是当前长江经济带大气污染防治形势

最为严峻的省份。

3 结论与启示

运用 SBM-Undesirable 模型与 GML 生产率指数分别从静态与动态两个维度考察长江经济带大气环境效率的时空异质特征与驱动因素,揭示长江经济带大气环境效率地区差距的形成原因,分析各省市大气环境效率提升的优势与不足。研究发现:

(1)2006~2015 年间,长江经济带 11 省市的大气环境效率均值为 0.6022,整体水平偏低,投入与污染排放的冗余率较高,大气污染减排潜力巨大。上中下游地区之间的差距以及上游地区内部省市之间的差距是长江经济带大气环境效率地区差距形成的主要根源;

(2)不同地区大气环境效率的差异性比较明显,下游地区的效率水平显著高于中上游地区;

(3)大气环境全要素生产率在研究期内出现下降态势,经济增长与大气环境保护之间的协调度进一步下降,技术效率下降是长江经济带大气环境全要素生产率恶化的决定因素;

(4)长江经济带 11 省市中,不同省市大气环境效率提升的优势与不足存在差异,可以据此制定有针对性的对策与措施。

结论蕴含了深刻启示:当前大气环境恶化已经严重影响到民众福祉的提升,要从根本上解决大气污染问题,必须通过转变发展方式,提高资源利用与污染排放效率,改善经济增长质量,这是实现长江经济带经济与社会可持续发展的客观要求与必然选择。针对长江经济带大气环境效率存在显著的地区差异性,各地区之间应加强合作交流,破除条块分割与地方保护主义,实现节能减排技术的全流域共享,逐渐形成各地区优势互补、良性互动的区域发展新格局。为了推动长江经济带大气环境效率的全面提升,必须要尽快改变当前过分依赖技术进步的不合理模式,补齐技术效率低下的短板,充分发挥技术效率改善与技术进步的协同效应,实现两股力量齐头并进,在推动节能减排技术进步的同时,也应注重先进环境管理模式的普及,通过顶层设计创造更好的市场竞争环境,促进资源的优化配置,不断改善资源利用效率和环境保护水平,为长江经济带实现经济与环境协调发展提供更为强劲的推动力。另外,在政策制定时应充分考虑地区发展实际与大气污染防治的优势和不足,因地制宜地制定节能减排政策,充分发挥政策的导向与激励作用。

参考文献:

[1] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6) : 429—444.

[2] 杨俊, 陆宇嘉. 基于三阶段 DEA 的中国环境治理投入效率 [J]. 系统工程学报, 2012, 27(5) : 699—711.

YANG J N, LU Y J. Environmental investment efficiency in China based on three-stage DEA model [J]. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(5) : 699—711.

[3] 王俊能, 许振成, 胡习邦. 基于 DEA 理论的中国区域环境效率分析 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(4) : 565—570.

WANG J N, XU Z C. Analysis of environmental efficiencies and their changes in China based on DEA theory [J]. China Environmental Science, 2010, 30(4) : 565—570.

-
- [4] 袁鹏, 程施. 中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验 [J]. 中国工业经济, 2011(2) : 79—88.
- YUAN P, CHENG S. Examining kuznets curve in environmental efficiency of China' s industrial sector [J]. China Industrial Economics, 2011(2) : 79—88.
- [5] 汪克亮, 王丹丹, 孟祥瑞. 技术的异质性、技术差距与中国区域大气环境效率 [J]. 华东经济管理, 2017, 31(5) : 48—55.
- WANG K L, WANG D D, MENG X R. Heterogeneous technology, technology gap and China' s regional air environmental efficiency [J]. East China Economic Management, 2017, 31(5) : 48—55.
- [6] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in Data Envelopment Analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001(130) : 498—509.
- [7] 刘勇, 李志祥, 李静. 环境效率评价方法的比较研究 [J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(1) : 84—92.
- LIU Y, LI Z X, LI J. Comparative study on DEA methods of environmental efficiency measurement [J]. Mathematics in practice and theory, 2010, 40(1) : 84—92.
- [8] 李静. 中国区域环境效率的差异与影响因素研究 [J]. 南方经济, 2009(12) : 24—35.
- LI J. Eco-efficiency differences and its influential factors across provinces in China [J]. South China Journal of Economics, 2009(12) : 24—35.
- [9] 杨杰, 宋马林. 可持续发展视阈下我国区域环境效率研究——基于 Super-SBM 与面板数据模型 [J]. 商业经济与管理, 2011(9) : 57—62.
- YANG J, SONG M L. Research on regional environmental efficiency from the perspective of sustainable development based on super-SBM and panel data model [J]. Journal of Business Economics, 2011(9) : 57—62.
- [10] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacksbased measure approach [EB /OL]. ftp: / /220. 130. 147. 155 // Undesirable outputs. pdf, 2003: 1—17.
- [11] 李谷成, 范丽霞, 闵锐. 资源、环境与农业发展的协调性——基于环境规制的省级农业环境效率排名 [J]. 数量经济技术经济研究, 2011(10) : 21—36.
- LI G C, FAN L X, MIN R. The coordination of agricultural development with environment and resource [J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2011(10) : 21—36.
- [12] 朱承亮, 岳宏志, 安立仁. 节能减排约束下中国绿色经济绩效研究 [J]. 经济科学, 2012(5) : 33—44.
- ZHU C L, YUE H Z, AN L R. China' s green economic performance under the constraint of energy saving and pollution reduction [J]. Economic Science, 2012(5) : 33—44.

-
- [13] 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 S Y. Evaluation of low carbon transformation process for Chinese provinces [J]. Economic Research Journal, 2012(8) :32—44.
- [14] 汪克亮, 杨力, 杨宝臣, 等. 能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长 [J]. 管理科学, 2013, 26(3) : 86—99.
- WANG K L, YANG L, YANG B C. Energy economic efficiency, the energy environmental performance and regional economic growth [J]. Journal of Management Science, 2013, 26 (3) :86—99.
- [15] CHUNG Y H, FARE R, GROSSKOPF S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach [J]. Journal of Environmental Management, 1997, 51 (3) :229—240.
- [16] 杨俊, 邵汉华. 环境约束下的中国工业增长状况研究——基于 Malmquist-Luenberger 指数的实证分析 [J]. 数量经济技术经济研究, 2009(9) : 64—78.
- YANG J, SHAO H H. Empirical study on China' s industrial growth under the binding of environment [J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2009(9) : 64—78.
- [17] 吴军. 环境约束下中国地区工业全要素生产率增长及收敛分析 [J]. 数量经济技术经济研究, 2009(11) : 17—27.
- WU J. TFP growth and convergence across China' s industrial economy considering environmental pollution [J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2009(11) : 17—27.
- [18] 周五七. 效率增进与技术进步对绿色生产率增长的影响——来自中国 36 个两位数工业行业的实证 [J]. 统计与信息论坛, 2014, 29(4) : 63—69.
- ZHOU W Q. The effect of efficiency improvement and technological progress on green productivity growth: an empirical analysis for 36 sub-industrial sectors in China [J]. Statistics and Information Forum, 2014, 29(4) : 63—69.
- [19] OH D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index [J]. Journal of Productivity Analysis, 2005, 34 (2) : 183 —197.
- [20] 齐亚伟, 陶长琪. 我国区域环境全要素生产率的测度与分解——基于 GML 指数 [J]. 上海经济研究, 2012(10) : 3—14.
- QI Y W, TAO C Q. Measurement and decomposition of environmental total factor productivity growth in China' s regional economics [J]. Shanghai Journal of Economics, 2012(10) : 3—14.
- [21] 赵良仕, 孙才志. 基于 Global-Malmquist-Luenberger 指数的中国水资源全要素生产率增长评价 [J]. 资源科

学, 2013, 35(6) : 1229—1237.

ZHAO L S, SUN C Z. Water resource total factor productivity efficiency in China using the Global-Malmquist-Luenberger index [J]. Resources Science, 2012, 35(6) : 1229—1237.

[22] 陈德湖, 潘英超, 武春友. 中国二氧化碳的边际减排成本与区域差异研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10) : 86—93.

CHEN D H, PAN Y C, WU C Y. Marginal abatement costs of CO₂ emission in China and its regional differences [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(10) : 86—93.

[23] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952—2006 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008(10) : 17—31.

SHAN H J. Re-estimating the capital stock of China: 1952 —2006 [J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2008(10) : 17—31.