



# 经济理论与经济管理

工作论文系列

Working Paper Series

## 中国八大综合经济区绿色全要素生产率 增长测算与因素分解

程开明 李泗娥

ETBMWP2022034

2022. 06. 30

\* 本刊编辑部推出工作论文项目，将“拟用稿”而尚未发表的稿件，以工作论文的方式在官网呈现，旨在及时传播学术成果，传递学术动态。

本刊所展示的工作论文，与正式刊发版可能会存在差异。如若工作论文被发现存在问题，则仍有被退稿的可能。各位读者如有任何问题，请及时联系本刊编辑部，期待与您共同努力、改进完善。

联系人：李老师；联系电话：010-62515330

# 中国八大综合经济区绿色全要素生产率增长测算与因素分解<sup>\*</sup>

程开明 李泗娥

**[摘要]** 随着绿色发展理念得以贯彻落实,科学测算与解析绿色全要素生产率增长对于经济高质量发展意义重大。为直接完整测度区域层面的绿色全要素生产率增长及其构成,本文构造聚合环境广义 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标及分解子项,利用蒙特卡洛模拟检验该指标测算结果的有效性,发现其相对于聚合  $L$  指标更具优势;根据 2003—2019 年地级以上城市的投入、产出指标数据,测算八大综合经济区的绿色全要素生产率增长及动力来源。结果表明,八大经济区绿色全要素生产率均实现增长但增速凸显分化特征;八大综合经济区绿色全要素生产率增长技术层面的动力主要源于技术进步与规模效率增长,要素层面主要源于期望产出效率增长与非期望产出治理效率增长,技术进步和期望产出效率增长是八大经济区绿色全要素生产率增长差异的主要成因。结论对于有针对性地提升地区绿色全要素生产率具有启示意义。

**[关键词]** 八大综合经济区;绿色全要素生产率增长;聚合环境广义 Luenberger-Hicks-Moorsteen 指标;结构效率变化

## 一、引言

党的十九大报告指出,中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,必须以供给侧结构性改革为主线,推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革,大力提高全要素生产率(Total Factor Productivity,简称  $TFP$ )。面对过去高投入、高消耗和高排放所引致的环境污染问题,需积极推进绿色发展,建设美丽中国。那么,纳入环境污染因素的中国全要素生产率增长态势究竟如何?清晰地回答

这一问题,需要科学开展绿色全要素生产率(Green Total Factor Productivity,简称  $GTFP$ )增长的测算与解析,探究  $GTFP$  增长的主要动力来源,以准确把握我国绿色全要素生产率增长及源泉,贯彻落实绿色发展理念,推动经济高质量发展。

中国是一个发展中大国,区域经济发展在不同层级上既呈现出差异特征,又具有类聚特征(李金铠等,2020)。随着经济空间格局的发展变化,我国传统三大经济带、四大板块等划分标准已不能准确呈现人口发展和城镇分布的基本态势,难以反映区域经济空间格局变动(汤学兵和陈秀山,2007),

<sup>\*</sup> 改成: \* 程开明、李泗娥(通讯作者),浙江工商大学统计与数学学院,邮政编码:310018,电子信箱:chengkaim@163.com。本文得到国家社科基金重点项目(19ATJ003)、浙江省重点建设高校优势特色学科(浙江工商大学统计学)项目(1020JYN4120004G-081)的资助。感谢匿名审稿人提出的修改意见,笔者已做相应修改,本文文责自负。

在此背景下采用八大综合经济区<sup>①</sup>的划分标准来开展分析可能更为恰当。由于八大综合经济区在地域优势、资源禀赋、经济基础、人口规模及生态环境等方面存在较大差异（邓宗兵等，2020），导致各个经济区的绿色全要素生产率增长也存在明显差异，一定程度上影响到区域协调发展。因此，根据国务院发展研究中心的标准，将中国大陆划分为八大综合经济区，全面揭示八大经济区 *GTFP* 增长差异及动力来源，对于推动区域经济协调发展具有突出的现实意义。

## 二、文献综述

对于区域绿色全要素生产率增长的测算与分解，学者们开展了大量有价值的研究，结合本文的研究内容，现主要从个体 *GTFP* 增长测度和聚合 *GTFP* 增长测度两方面梳理各类 *GTFP* 指数（指标）。

*GTFP* 增长测算方法主要包括随机前沿分析（*SFA*）、数据包络分析（*DEA*）及拓展指数两类，其中基于 *DEA* 的系列指数得到广泛应用。早期文献基于 Malmquist 指数（简称 *M* 指数）的理论基础，尝试在生产率测算中纳入非期望产出（Pittman, 1983），此后将方向性距离函数引入生产率测算框架，构建了 Malmquist-Luenberger 生产率指数（简称 *ML* 指数），以适应包含非期望产出的生产率测算（Chung *et al.*, 1997）。然而，*ML* 指数基于比率形式来开展测算，适合于考察 *GTFP* 的变动情况，难以反映“差值”变量，且当变量等于或接近零时，基于比率的生产率指数变得不稳定，因此 Chambers *et al.*（1996）进一步引入基于差值形式的 Luenberger 生产率指标（简称 *L* 指标）来衡量 *GTFP* 变动。鉴于方向性距离函数（*DDF*）存在径向、角度选择问题，部分学者使用非径向非角度且具可加性的 *SBM* 方向性距离函数

（Tone, 2001），构建生产率指标以测算 *GTFP* 变动（董敏杰等，2012）。Zhou *et al.*（2012）提出与效率测度公理化方法更为一致且具有理想数学性质的非径向方向性距离函数（*NDDF*）来代替 *SBM* 模型，以避免 *DDF* 的径向与角度问题，显示出较好的效果（汪克亮等，2018）。

*M* 指数、*ML* 指数及 *L* 指标在规模报酬可变技术（*VRS*）下能够衡量局部技术变化，但不能完整测度 *GTFP* 变化；在规模报酬不变技术（*CRS*）情况下，*M* 指数的测算与分解虽较为合适但存在子项遗漏而分解不完整的问题（Grifell-Tatjé & Lovell, 1995）。基于此，Bjurek（1996）提出以产出导向 *M* 指数和投入导向 *M* 指数的比率表示的 Hicks-Moorsteen-Bjurek 生产率指数（简称 *HMB* 指数）。针对 *L* 指标的类似缺陷，Briec & Kerstens（2004）在 *HMB* 指数基础上引入 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标（简称 *LHM* 指标），即 *L* 产出指标与 *L* 投入指标的差值，*LHM* 指标满足加法完备性原则。为利用 *LHM* 指标测算纳入环境污染的生产率变化，Abad（2015）在 *LHM* 指标与环境 Luenberger 生产率指标的基础上进一步引入环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标（简称 *EGLHM* 指标），但未给出相应的分解方法。王兵和杨欣怡（2019）及 Shen *et al.*（2019）则分别基于该指标分析了中国工业和农业的 *GTFP* 增长，将 *GTFP* 增长归因于技术进步、技术效率变化和规模效率变化。

现有文献多注重测算各个省份或城市（个体）层面的 *GTFP* 增长及分解子项，对于区域（群组）层面的 *GTFP* 增长则由区域内各省份或城市 *GTFP* 增长的均值来表征，而不是直接评估区域（群组）层面的 *GTFP* 增长。为了既能够直接测算区域（群组）层面的 *GTFP* 增长，又可以反映群组内个体资源分配结构差异而引起的生产率变动，有必要构造基于群组层面的聚合指标来开展分析。聚

<sup>①</sup> 国务院发展研究中心于 2005 年 6 月发布《区域协调发展的战略与政策》报告，提出八大综合经济区划分标准，分别为东北地区（辽宁、吉林、黑龙江）、北部沿海地区（北京、天津、河北、山东）、东部沿海地区（上海、江苏、浙江）、南部沿海地区（福建、广东、海南）、黄河中游地区（陕西、山西、河南、内蒙古）、长江中游地区（湖北、湖南、江西、安徽）、西南地区（云南、贵州、四川、重庆、广西）、西北地区（甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆）。

合概念最初源于 Debreu (1951) 对资源利用系数的分析, 用以衡量一个经济体的整体效率。此后 Farrell (1957) 提出通过“行业内企业(个体层面)的绩效”来衡量“一个行业(群组层面)的生产效率”, 该方法得到的行业技术效率被称为结构效率。在 Koopmans (1957) 基础上, 进一步提出根据一个行业的总体效率与该行业内所有企业的技术效率之和来推断该行业的结构效率或分配效率的思路, 具体以给定价格向量的方向性距离函数来表示 (Briec *et al.*, 2003)。

将结构效率理念与  $M$  指数相结合则能够构造出聚合  $M$  指数 (Zelenyuk, 2006), Färe & Primont (2003) 进一步提出聚合  $L$  指标。为利用  $HMB$  指数的优势, Mayer & Zelenyuk (2014) 依据同样的思想构造了聚合  $HMB$  指数。然而, 实际应用中要素价格信息尤其是非期望产出的价格信息往往难以获取, 因此 Ferrier *et al.* (2010) 基于给定向量的方向距离函数来测度效率, 并将效率分解为技术效率和结构效率。Boussemart (2020) 则以给定向量的方向性距离函数构造了聚合 Luenberger 生产率指标 (简称  $AL$  指标), 开展生产率变动的实际测算, 并分解出因投入或产出再分配而导致的结构效率变动 ( $SEC$ ) 部分。

纵观现有文献, 侧重于  $GTFP$  增长区域比较的实证分析通常存在以下问题: 一是采用区域内各个省份或城市  $GTFP$  增长的均值来表征区域  $GTFP$  增长, 这种用个体层次的数据来解释宏观层次的现象特征容易出现“简化论”和“过度概括”的谬误; 而且区域内各个城市使用的投入比例可能并不一致, 所以区域  $GTFP$  增长不一定是区域内所有城市  $GTFP$  增长的简单或加权平均 (Boussemart *et al.*, 2020)。二是多数实证分析仅关注个体层面的技术进步与技术效率增长对区域  $GTFP$  增长的贡献, 较少关注区域内城市间投入或产出重新分配的结构效应, 从而忽略了投入产出组合变化对  $GTFP$  增长的贡献。三是常用的  $M$  指数、 $ML$  指数和  $L$  指标都没有同时考虑投入与产出变化, 偏离了全要素生产率的本质内涵 (Shen *et al.*, 2019)。所以, Grosskopf (2003) 建议称  $M$  指数为技术指数, 因其不能完整测度全要素生产率变

动。Kerstens *et al.* (2018)、Sala-Garrido *et al.* (2018) 均使用了  $EGLHM$  指标及  $L$  指标进行测算, 发现  $EGLHM$  指标的测算结果大于  $L$  指标。Shen *et al.* (2019) 也指出,  $EGLHM$  指标测算全要素生产率变动原则上没有偏差, 测算结果优于其他指标。

针对现有指数(指标)存在的问题, 本文从区域(群组)层面构造一种新型的聚合绿色全要素生产率指标——聚合环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标 (简称  $AEGLHM$  指标), 并基于技术和要素角度开展分解, 以有效测算我国八大综合经济区的  $GTFP$  增长, 探究区域  $GTFP$  增长的动力源泉。本文的主要贡献在于: (1) 基于聚合非径向方向性距离函数, 构造一种新型聚合绿色全要素生产率指标。聚合环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标既能代替  $L$  指标完整衡量  $GTFP$  增长, 也可以直接测算区域层面的  $GTFP$  增长。(2) 双重视角开展  $AEGLHM$  指标的完全分解。鉴于  $NDDF$  与  $EGLHM$  指标均具有可加性,  $AEGLHM$  指标既可基于技术角度完全分解为技术变化、技术效率变化、规模效率变化以及结构效率变化, 又可基于要素角度进行分解; 既能识别区域内城市间投入和产出变化对  $GTFP$  增长的贡献, 又能识别一个区域的要素效率变化对  $GTFP$  增长的贡献。(3) 全面揭示中国八大经济区绿色全要素生产率的生长及动力来源。依据 2003—2019 年全国 281 个地级以上城市的面板数据, 利用  $AEGLHM$  指标多角度开展八大经济区  $GTFP$  增长的实际测算和分解, 有利于解析八大经济区的  $GTFP$  的增长及来源构成。

### 三、聚合环境广义 $LHM$ 指数构造及其子项分解

#### (一) 环境广义 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标

囿于传统的  $L$  指标不能同时考虑投入变化与产出变化完整测度  $GTFP$  增长, Abad (2015) 采用方向性距离函数构建了环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标, 定义为环境 Luenberger 产出量 ( $ELO^{OU}$ ) 指标与环境 Luenberger

投入量 ( $ELI^{LUU}$ ) 指标的差值, 同时考虑了投入与产出变化, 符合全要素生产率最初定义。考虑到方向性距离函数存在径向问题, 在此选择采用非径向方向性距离函数构建  $EGLHM$  指标。假设在  $t$  时期, 第  $k$  个群组 ( $k=1, 2, \dots, K$ ) 内的第  $j$

个体 ( $j=1, 2, \dots, J$ ) 使用  $N$  种投入  $x_{jt}^N \in R_+^N$ , 生产出  $M$  种期望产出  $y_{jt}^M \in R_+^M$  和  $U$  种非期望产出  $b_{jt}^U \in R_+^U$ , 此时生产技术  $T_{jt} = \{ (x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}) : x_{jt} \text{ 可以生产 } (y_{jt}, b_{jt}) \}$ 。采用  $NDDF$  构建的  $EGLHM$  指标表示为:

$$\begin{aligned} & EGLHM_{t,t+1}^{I,O} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left[ \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}; 0, gk_{jt}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{jt}, y_{j(t+1)}, b_{jt}; 0, gk_{j(t+1)}, 0) \right] \right. \\ & \quad \left. - \left[ \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{j(t+1)}, y_{jt}, b_{j(t+1)}; -gh_{j(t+1)}, 0, -gl_{j(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}; -gh_{jt}, 0, -gl_{jt}) \right] \right. \\ & \quad \left. + \left[ \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{j(t+1)}, y_{jt}, b_{j(t+1)}; 0, gk_{jt}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{j(t+1)}, y_{j(t+1)}, b_{j(t+1)}; 0, gk_{j(t+1)}, 0) \right] \right. \\ & \quad \left. - \left[ \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{j(t+1)}, y_{j(t+1)}, b_{j(t+1)}; -gh_{j(t+1)}, 0, -gl_{j(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{jt}, y_{j(t+1)}, b_{jt}; -gh_{jt}, 0, -gl_{jt}) \right] \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

由于  $EGLHM$  指标与  $L$  指标相比具有加法完备性, 且可完全分解。因此, 若仅考虑个体层面, 在可变规模报酬 (VRS) 条件下  $EGLHM$  指标可完全分解为三个部分: 技术变化 (TC)、技术效率变化 (TEC) 及规模效率变化 (SCALEEC), 具体见式 (2):

$$\begin{aligned} EGLHM_{t,t+1}^{I,O} &= TC_{t,t+1} + TEC_{t,t+1} \\ & \quad + SCALEEC_{t,t+1} \quad (2) \end{aligned}$$

## (二) 聚合环境广义 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标

$EGLHM$  生产率指标及其分解仅适用于测算城市 (个体) 层面的  $GTFP$  变化及潜在来源, 并不能直接衡量一个区域 (群组) 的  $GTFP$  变化及区域 (群组) 内城市 (个体) 间投入或产出再分配引起的结构效率变化。因此, 为了既能直接反映区域的  $GTFP$  变化, 又能体现城市间的投入或产出组合变化的贡献, 在  $EGLHM$  的基础上进一步构造聚合环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标, 并开展更全面的分解。

首先, 构造聚合 (群组) 技术。聚合技术继承了个体技术的特性, 形式上聚合技术可定义为个体技术的总和<sup>①</sup>:

$$\begin{aligned} T_t^{group} &= \left\{ (X_t, Y_t, B_t) = \left( \sum_{j=1}^J x_{jt}, \sum_{j=1}^J y_{jt}, \sum_{j=1}^J b_{jt} \right), \right. \\ & \quad \left. (x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}) \in T_{jt}, j=1, \dots, J \right\} = \sum_{j=1}^J T_{jt} \\ &= \sum_{j=1}^J T_{jt} \quad (3) \end{aligned}$$

为确保  $AEGLHM$  指标及其所有分解项是可以同单位度量的, 采用  $NDDF$  时所有时间段内所有城市须采用一个共同的方向, 以利用  $NDDF$  的可加性, 形成聚合层面的测度。至少有三种方向向量可供选择, 初期所有区域即全国整体的总投入产出值、末期全国整体的总投入产出值以及两时期的平均值。在此选择初期 (即 2003 年) 全国整体的总投入产出值构造聚合方向向量, 如式 (4) 所示, 进一步构造聚合  $NDDF$  表示为式 (5)。

$$\begin{aligned} G_t &= \sum_{k=1}^K g_{kt} = \left( - \sum_{k=1}^K gh_{kt}, \sum_{k=1}^K gk_{kt}, - \sum_{k=1}^K gl_{kt} \right) \\ &= \left( - \sum_{k=1}^K x_{kt}, \sum_{k=1}^K y_{kt}, - \sum_{k=1}^K b_{kt} \right) \\ &= (-X_{1t}, Y_{1t}, -B_{1t}), t=2003 \quad (4) \\ & \quad \overrightarrow{ND}(X_t, Y_t, B_t; -X_{1t}, Y_{1t}, -B_{1t}) = \end{aligned}$$

<sup>①</sup> 记  $X_t = \sum_{j=1}^J x_{jt}$ ,  $Y_t = \sum_{j=1}^J y_{jt}$  和  $B_t = \sum_{j=1}^J b_{jt}$  分别为  $t$  期各区域 (群组) 的总投入、总期望产出和总非期望产出向量;  $X_{1t} = \sum_{k=1}^K x_{kt}$ ,  $Y_{1t} = \sum_{k=1}^K y_{kt}$  和  $B_{1t} = \sum_{k=1}^K b_{kt}$  分别为 2003 年全国总投入、总期望产出和总非期望产出向量。

$$\sup_{\beta} \left\{ \beta_t \left| \beta_t = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \beta_t^n + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_t^m + \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U \beta_t^u \right) : \right. \right. \\ \left. \left. (X_t - \beta_t^n X_{1t}, Y_t + \beta_t^m Y_{1t}, B_t - \beta_t^u B_{1t}) \in P(x) \right\} \quad (5)$$

进而定义规模报酬可变 (VRS) 技术下<sup>①</sup>聚合环境广义的 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标为:

$$AEGLHM_{t,t+1}^{t,0} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_t, B_t; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_{t+1}, B_t; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \\ & - [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_{t+1}, Y_t, B_{t+1}; -X_{1(t+1)}, 0, -B_{1(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_t, B_t; -X_{1t}, 0, -B_{1t})] \\ & + [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_t, B_{t+1}; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \\ & - [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; -X_{1(t+1)}, 0, -B_{1(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_t, Y_{t+1}, B_t; -X_{1t}, 0, -B_{1t})] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### (三) 聚合环境广义 Luenberger-Hicks-Moorsteen 生产率指标双重分解

1. 基于技术角度的 AEGLHM 指标分解。

EGLHM 指标的分解仅使用城市 (个体) NDDF, 而 AEGLHM 指标的分解既使用区域 (群组) NDDF, 也采用城市 (个体) NDDF。

AEGLHM 生产率指标可分解为技术变化 (TC)、效率变化 (EC) 和规模效率变化

(SCALEEC), 其中效率变化 (EC) 代表整个区域层面的总体效率变化, 不仅包含区域内城市技术效率变化的总和 (TEC), 还包括考虑区域内各城市之间潜在的产出和投入组合变化而引起的结构效率变化 (SEC)。最终, AEGLHM 生产率指标可分别基于产出导向和投入导向分解, 具体分解框架见式 (7) 所示, 基于产出导向的分解子项表达式分别见式 (8) ~ 式 (11)<sup>②</sup>。

$$AEGLHM_{t,t+1} = TC_{t,t+1} + EC_{t,t+1} + SCALEEC_{t,t+1} = TC_{t,t+1} + TEC_{t,t+1} + SEC_{t,t+1} + SCALEEC_{t,t+1} \quad (7)$$

$$TC_{t,t+1}^0 = \frac{1}{2} \{ [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_t, Y_t, B_t; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_t, B_t; 0, Y_{1t}, 0)] \\ + [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; 0, Y_{1(t+1)}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \} \quad (8)$$

$$TEC_{t,t+1}^0 = \sum_{j=1}^J [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{j(t+1)}, y_{j(t+1)}, b_{j(t+1)}; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \quad (9)$$

$$SEC_{t,t+1}^0 = [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_t, B_t; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \\ - \left\{ \sum_{j=1}^J [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(x_{jt}, y_{jt}, b_{jt}; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(x_{j(t+1)}, y_{j(t+1)}, b_{j(t+1)}; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \right\} \quad (10)$$

$$SCALEEC_{t,t+1}^0 = \frac{1}{2} \{ [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_t, B_{t+1}; 0, Y_{1t}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_t, Y_t, B_t; 0, Y_{1t}, 0)] \\ + [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; 0, Y_{1(t+1)}, 0) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_{t+1}, B_t; 0, Y_{1(t+1)}, 0)] \\ - \frac{1}{2} \{ [\overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_{t+1}, Y_t, B_{t+1}; -X_{1(t+1)}, 0, -B_{1(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^t(X_t, Y_t, B_t; -X_{1t}, 0, -B_{1t})] \\ + [\overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, B_{t+1}; -X_{1(t+1)}, 0, -B_{1(t+1)}) - \overrightarrow{ND}_{VRS}^{t+1}(X_t, Y_{t+1}, B_t; -X_{1t}, 0, -B_{1t})] \} \} \quad (11)$$

① 测算全要素生产率变动需假定规模报酬情况, 本文选择 VRS 假设, 原因在于决策单元在 CRS 假设下的规模是理想规模, 实际中各决策单元的生产规模可能处于递增或递减阶段, 因而 VRS 假设下的测算结果更为准确。

② 与 EGLHM 相同, AEGLHM 指标可使用产出导向或投入导向进行分解, 分解指标值是基于产出导向的分解值与基于投入导向分解值的算术平均值。基于产出导向与基于投入导向的分解相类似, 在此仅列出产出导向的分解。

2. 基于要素角度的 AEGLHM 指标分解。

基于技术层面的 GTFP 分解无法描述各投入产出要素与 GTFP 增长之间的直接关系，不能解析各个要素对 GTFP 增长的影响效应。因此，有必要基于要素视角对 AEGLHM 指标进行分解，分解为投入利用效率增长、期望产出效率增长和非期望产出治理效率增长，见式 (12)：

$$AEGLHM_{t,t+1} = \sum_{n=1}^N (AEGLHM_{t,t+1})_{x_n} + \sum_{m=1}^M (AEGLHM_{t,t+1})_{y_m}$$

$$+ \sum_{u=1}^U (AEGLHM_{t,t+1})_{b_u} \quad (12)$$

各子项分别代表 GTFP 增长中相应要素的生产率变动，投入要素（期望产出、非期望产出）大于（小于、等于）0 表示相应要素生产率增长（下降、保持不变），进而促进（阻碍、不影响）区域 GTFP 增长。

基于技术视角和要素构成角度对 AEGLHM 生产率指标进行双重分解，得到各分解子项的具体含义见表 1 所示。

表 1 AEGLHM 生产率指标的分解子项及含义

分解角度	分解子项	英文缩写	含义
基于技术角度	技术进步	TC	衡量生产前沿的变化
	技术效率变化	TEC	衡量群组内个体到有效生产前沿面的追赶程度
	结构效率变化	SEC	衡量群组内个体之间的投入产出分配的异质性
	规模效率变化	SCALEEC	衡量向最佳规模移动实现的生产率增益
基于要素角度	投入利用效率变化	AEGLHM <sub>X</sub>	衡量各投入要素利用效率变化
	期望产出效率变化	AEGLHM <sub>Y</sub>	衡量各期望产出效率变化
	非期望产出治理效率变化	AEGLHM <sub>B</sub>	衡量各非期望产出治理效率变化

四、AEGLHM 指标测算效果的模拟实验

理论上，AEGLHM 指标避免了 AL 指标不能同时考虑投入与产出变化以完整准确测算群组 GTFP 增长的缺陷，为检验 AEGLHM 指标在测算群组 GTFP 增长时相对于 AL 指标的优势，以下采用蒙特卡洛 (MC) 模拟实验，基于生产过程中不同的参数设置来测算绿色无效率得分<sup>①</sup>，进而评估 AEGLHM 指标与 AL 指标模型用于群组 GTFP 增长测算的效果。

(一) 数据生成过程

鉴于柯布一道格拉斯生产函数具有灵活性和简洁性特点，学者通常利用其来生成投入和产出样本 (Banker et al., 2010)。假设有  $j=1, 2, \dots, J$

个 DMU，使用两种投入 ( $x_1$  和  $x_2$ ) 生产一种期望产出 ( $y$ ) 与两种非期望产出 ( $b_1$  和  $b_2$ )，其中  $x_1$  为与环境污染相关的投入， $x_2$  为与环境污染无关的投入。采用 Hampf (2018) 相类似的蒙特卡洛模拟方法，设定生产函数形式为：

$$y_j = x_{1j}^{\alpha_1} (z_j x_{2j})^{\alpha_2} \exp(-u_{yj} + v_{yj}) \quad (13)$$

$$b_{ij} = x_{1j} ((1 - z_j) x_{2j} + 1)^{-1} \exp(u_{bij} + v_{bij}) \quad (14)$$

假定在式 (13) 和式 (14) 所表示的生产函数中，两种投入  $x_1$  和  $x_2$  均来自于双重截断的正态分布 (Badunenko & Mozharovskyi, 2019)，具体见式 (15)，其中  $N_{((0,0)',(10,5)')}$  表示  $x_1$  和  $x_2$  的下限均为 0，上限分别为 10 和 5。

① 由于 GTFP 增长是基于绿色无效率得分计算得到，考虑到模拟的可行性，在此开展绿色无效率测算的模拟。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \sim N_{((0,0), (0.5, 0.5))} \left( \begin{bmatrix} 2 \\ 1.5 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0.5\sqrt{\sigma_{x_1}^2\sigma_{x_1}^2}/3 \\ 0.5\sqrt{\sigma_{x_1}^2\sigma_{x_1}^2}/3 & \sigma_{x_1}^2/3 \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

式 (13) 中, 当  $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5)$  时表示期望产出 ( $y$ ) 的生产函数是规模报酬不变的 C-D 生产函数, 当  $(\alpha_1, \alpha_2) = (0.45, 0.35)$  时表示期望产出 ( $y$ ) 的生产函数呈现规模报酬递减。式 (13) 和式 (14) 中,  $z_j$  衡量从生产期望产出转移到减少非期望产出的非污染投入 ( $x_2$ ) 的份额,  $z_j = 1$  意味着没有发生减排。

生产函数中  $u_{yj}$  和  $u_{bij}$  分别表示期望产出与两种非期望产出的无效率, 且均为来自于多元半正态分布  $|N(0, \Sigma_1)|$  中的随机变量 (Coelli *et al.*, 2005), 方差矩阵为式 (16), 其中  $\sigma_{uy}^2$  和  $\sigma_{ub_i}^2$  是预先选定的, 计算公式为:  $\sigma_{uy}^2 = \sigma_{ub_1}^2 = \sigma_{ub_2}^2 = \sigma_u^2$ ,  $\sigma_{uyb_1} = \sigma_{uyb_2} = \sigma_{ub_1b_2} = \rho_1$ 。

$$\Sigma_1 = \begin{bmatrix} \sigma_{uy}^2 & \sigma_{uyb_1} & \sigma_{uyb_2} \\ \sigma_{uyb_1} & \sigma_{ub_1}^2 & \sigma_{ub_1b_2} \\ \sigma_{uyb_2} & \sigma_{ub_1b_2} & \sigma_{ub_2}^2 \end{bmatrix} = \sigma_u^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

此外, 噪声变量  $v_{yj}$  和  $v_{bij}$  同样来自多元正态分布  $|N(0, \Sigma_2)|$ , 其方差矩阵如式 (17) 所示,  $\sigma_{vy}^2$  和  $\sigma_{vb_i}^2$  为预先选定, 计算公式为:  $\sigma_{vb_1}^2 = \sigma_{vb_2}^2 = \sigma_v^2$ ,  $\sigma_{vyb_1} = \sigma_{vyb_2} = \sigma_{vb_1b_2} = \rho_2$ 。参照 Chen & Delmas (2012) 的做法, 设定  $(\sigma_u^2, \sigma_v^2) = (0.15^2, 0.04^2)$ 。

$$\Sigma_2 = \begin{bmatrix} \sigma_{vy}^2 & \sigma_{vyb_1} & \sigma_{vyb_2} \\ \sigma_{vyb_1} & \sigma_{vb_1}^2 & \sigma_{vb_1b_2} \\ \sigma_{vyb_2} & \sigma_{vb_1b_2} & \sigma_{vb_2}^2 \end{bmatrix} = \sigma_v^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho_2 & \rho_2 \\ \rho_2 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

表 2 给出数值模拟中采用的各种参数的选定值, 其中粗体代表基准参照。在基准参照中, 考虑 100 个决策单元 (分为两组, 每组 50 个决策单元), 假设其期望产出的生产函数规模报酬不变,

非污染投入份额服从均匀 (0, 1) 分布; 期望产出与各非期望产出的无效率值与噪声变量均呈现出相关系数为 0.5 的中等相关性。

除基准参照之外, 为检验结果的稳健性, 进一步评估减少和增加样本量的无效率得分; 同时, 考虑不投入非污染投入减少非期望产出的情形, 即  $z_j = 1$ ; 此外, 考虑无效率与噪声变量之间较小 ( $\rho_1 = \rho_2 = 0.2$ ) 与较大 ( $\rho_1 = \rho_2 = 0.8$ ) 相关性的影响; 最后, 考虑无噪声变量的情形。

表 2 MC 模拟的参数选择

参数	期值
$(\alpha_1, \alpha_2)$	{ (0.5, 0.5), (0.45, 0.35) }
$(\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_{x_1}^2)$	(0.15 <sup>2</sup> , 0.04 <sup>2</sup> , 25)
$\rho_1 = \rho_2$	{0.2, 0.5, 0.8}
$z_j$	{1, U(0, 1)}
$n$ (样本量)	{50, 100, 200}
$L$ (迭代次数)	500

基于以上数据生成过程, 接下来具体比较以 AEG LHM 指标和 AL 指标计算的绿色无效率结果, 模拟结果产生于 500 次迭代。采用平均绝对偏差 (MAD) 与均方误差 (MSE) 来评估和比较两种指标测算结果的效果优劣, 分别见式 (18) 和式 (19)。MAD 与 MSE 结果越小, 代表指标的测算效果更好。

$$MAD = \frac{1}{nL} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^N | \hat{I}_{jl} - I_{jl} | \quad (18)$$

$$MSE = \frac{1}{nL} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^N (\hat{I}_{jl} - I_{jl})^2 \quad (19)$$

## (二) 蒙特卡洛模拟结果

蒙特卡洛 (MC) 模拟实验的随机数据生成采用 R 语言完成, 绿色无效率得分根据式 (5) 采用 Matlab 编程得到, 表 3 给出在 MC 基准参照实验及七种对比实验 (稳健性检验) 条件下, 根据 AEG LHM 指标与 AL 指标模型计算的绿色无效率得分的检验结果。



表 3 蒙特卡洛模拟结果

实验编号	参数选择	模型	MAD			MSE		
			组 1	组 2	总体	组 1	组 2	总体
基准	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j \sim U(0, 1), n = 100$	AEGLHM	0.050 2	0.068 0	0.059 1	0.003 7	0.007 3	0.005 5
		AL	0.062 4	0.099 1	0.080 7	0.006 2	0.014 0	0.010 1
(一)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.45, 0.35), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j \sim U(0, 1), n = 100$	AEGLHM	0.047 7	0.052 1	0.049 9	0.003 5	0.005 1	0.004 3
		AL	0.053 3	0.080 6	0.068 0	0.005 5	0.010 7	0.008 1
(二)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.2, z_j \sim U(0, 1), n = 100$	AEGLHM	0.068 6	0.063 6	0.066 1	0.006 9	0.006 2	0.006 5
		AL	0.065 1	0.073 4	0.069 3	0.007 4	0.009 3	0.008 4
(三)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.8, z_j \sim U(0, 1), n = 100$	AEGLHM	0.065 8	0.061 5	0.063 6	0.006 4	0.005 8	0.006 1
		AL	0.066 6	0.077 1	0.071 8	0.007 8	0.010 0	0.008 9
(四)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j = 1, n = 100$	AEGLHM	0.049 2	0.082 9	0.066 1	0.004 4	0.011 8	0.008 1
		AL	0.073 5	0.109 1	0.091 3	0.008 0	0.017 5	0.012 7
(五)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j \sim U(0, 1), n = 50$	AEGLHM	0.054 0	0.056 8	0.055 4	0.004 1	0.006 2	0.005 2
		AL	0.049 9	0.078 7	0.064 3	0.004 3	0.010 6	0.007 5
(六)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j \sim U(0, 1), n = 200$	AEGLHM	0.067 9	0.048 4	0.058 1	0.005 3	0.004 2	0.004 7
		AL	0.050 2	0.057 3	0.053 7	0.005 5	0.005 7	0.005 6
(七)	$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5), \rho_1 = \rho_2 = 0.5, z_j \sim U(0, 1), n = 100, \text{无 } v$	AEGLHM	0.044 4	0.064 1	0.054 3	0.003 5	0.007 1	0.005 3
		AL	0.111 8	0.131 2	0.121 5	0.015 4	0.022 5	0.018 9

在基准 MC 实验中, AEGLHM 指标计算的组 1、组 2 和总体绿色无效率得分的平均绝对偏差与均方误差都小于 AL 指标的计算结果, 且七组对比实验结果均与基准实验结果相似, 总体来说 AEGLHM 指标的测算结果优于 AL 指标。

具体来看, 实验 (一) 的结果表明 AEGLHM 指标优于 AL 指标与期望产出生产函数的规模报酬性质无关; 实验 (二) 与实验 (三) 的结果表明, 各产出无效率得分之间的相关性大小不会影响 AEGLHM 指标与 AL 指标的比较结果; 实验 (四) 给出了不增加非污染投入以减少非期望产出的情形, 实验结果类似于基准实验结果; 实验 (五) 和实验 (六) 展示了无论是减少样本量还是增加样本量, 利用 AEGLHM 指标计算的组 1 绿色无效率得分的 MAD 均大于 AL 指标, 结果与基准实验相似; 实验 (七) 中不包含噪声变量, 实验结果也与基准实验结果基本一致。可见, 相对于 AL 指标, AEGLHM 指标测算得到的绿色无效率

得分更为准确有效。

## 五、中国八大经济区绿色全要素生产率增长及构成

蒙特卡洛模拟实验结果显示, 基于聚合 ND-DF 构建的 AEGLHM 指标计算绿色无效率得分的准确性高于 AL 指标, 因此接下来采用 AEGLHM 指标对中国八大经济区 GTFP 增长进行测算与分解。AEGLHM 指标不仅可以避免用城市 GTFP 增长的均值来表征区域 GTFP 增长存在的偏差, 而且能够直接完整地测算区域 GTFP 增长并识别区域内城市之间的投入产出重新分配对区域 GTFP 增长的贡献。

### (一) 指标处理与数据说明

#### 1. 指标处理。

(1) 产出变量。鉴于 GTFP 增长测算同时考虑期望产出增加和非期望产出减少, 因此产出变量

包含期望产出和非期望产出两个方面。①期望产出。选用地级以上城市的地区生产总值(GDP)来代表期望产出,转换为以2003年为基期的可比价地区生产总值。②非期望产出。考虑到城市环境污染指标数据的可得性及目前我国工业化进程导致的突出城市空气污染与水污染问题,因而选取地级以上城市的工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟粉尘排放量作为非期望产出的代理变量,个别年份的缺失数据通过插值法或平滑法加以插补。其中《中国城市统计年鉴》公布了2011—2019年各城市的工业烟粉尘排放量,而2010年之前仅为工业烟尘排放量,2003—2010年各地级以上城市的工业烟粉尘排放量由各城市所属省份历年工业烟粉尘排放量乘以历年各城市工业烟尘排放量在所属省份工业烟尘排放量中所占比重估算得到。

(2)投入变量。生产要素中自然资源、劳动力、资本等变量影响到一个国家或地区的经济效率与竞争力,故本文将资本、劳动力和能源消费作为投入变量纳入全要素生产率评估框架。①资本存量。资本投入以资本存量表征,采用永续盘存法(PIM)公式 $K_{j,t} = (1 - \delta_{j,t}) K_{j,t-1} + I_{j,t}$ 计算,基期资本存量为 $K_0 = I_{j,t} / (g_{j,t} + \delta_{j,t})$ ,其中 $K_{j,t}$ 和 $K_{j,t-1}$ 分别表示第 $j$ 城市在 $t$ 时期和 $t-1$ 时期的物质资本存量, $I_{j,t}$ 表示第 $j$ 个城市在 $t$ 时期的实际固定资产投资总额, $\delta_{j,t}$ 表示第 $j$ 个城市在 $t$ 时期的资本折旧率, $g_{j,t}$ 为5年投资平均增长率<sup>①</sup>。鉴于数据可得性,地级以上城市的实际投资额 $I_{j,t}$ 选用各城市“全社会固定资产投资额”与各城市所属省份的固定资产投资价格指数估算得到,并以2003年为基期进行调整。②劳动投入。理论上劳动投入应综合考虑劳动人数、劳动时间、劳动质量(效率)等因素(王恕立和胡宗彪,2012),但我国这方面的详细数据难以获取,故选用各地级以上城市年末城镇单位从业人员数、城镇私营和个体从业人员数的总和来代表劳动投入指标(李卫兵和涂蕾,2017)。③能源投入。大部分文献采用能源消费量作为能源投入的代理指标(王兵等,2010;李兰冰和刘秉镰,2015),部分文献也选用煤炭消费

量(涂正革,2008)或全社会用电量(林伯强,2003)作为替代指标,显然不全面。与多数文献相一致,在此采用“能源消费总量”来代表能源投入,借鉴李卫兵和涂蕾(2017)的做法,地级以上城市的能源消费总量根据各省能源消费总量乘以各城市生产总值占所在省份生产总值的比重估算得到。

## 2. 数据说明。

实证分析主要是根据上述的投入、产出指标,采用AEGLHM生产率指标测算中国八大经济区的GTFP增长及分解子项。考虑到2003年前很多地级以上城市的指标数据缺失较多,特别是西藏自治区与青海省的地级市部分年份数据缺失严重,因此将研究时间段确定为2003—2019年,研究对象为剔除数据缺失较严重城市后剩下的281个地级以上城市,包括北部沿海地区30个城市,东部沿海地区25个城市、南部沿海地区30个城市,黄河中游地区47个城市、长江中游地区52个城市、东北地区34个城市、西南地区44个城市以及西北地区19个城市。

实证分析中涉及的指标数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及各个省(市、自治区)统计年鉴、相应城市的统计年鉴和环境状况公报。

## (二)八大经济区GTFP增长测算

根据AEGLHM指标计算得到不同时期八大经济区的GTFP增长见表4所示,样本期内八大经济区GTFP总体均呈现增长态势,但经济区之间的GTFP增速分化较为明显。八大经济区GTFP增速排序为北部沿海>东部沿海>长江中游>南部沿海>黄河中游>西南地区>东北地区>西北地区,大致可分为四个等级:第一等级为北部沿海和东部沿海(GTFP增长>0.01),第二等级为长江中游、南部沿海、黄河中游和西南地区(0.008<GTFP增长<0.01),第三等级为东北地区(0.006<GTFP增长<0.008),第四等级为西北地区(0<GTFP增长<0.006),GTFP增长大致呈现出“东部→中部→西部”依次递减的趋势。

<sup>①</sup> 在此借鉴单豪杰(2008)做法,假定折旧率为10.96%, $g_{j,t}$ 为2003—2008年可比价固定资产投资总额的年均增长率。

表 4 不同时期的八大综合经济区 *GTFP* 增长

时期	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	东北	西南	西北
整个样本期	0.013 5	0.013 3	0.009 0	0.008 7	0.009 6	0.006 0	0.008 2	0.001 0
“十五”时期	0.001 6	0.001 6	0.001 3	-0.005 7	-0.002 5	-0.001 9	-0.003 0	0.000 8
“十一五”时期	0.011 8	0.011 2	0.008 0	0.008 8	0.007 7	0.007 5	0.007 3	0.000 4
“十二五”时期	0.010 1	0.013 8	0.012 0	0.008 6	0.010 1	0.004 6	0.009 9	0.000 6
“十三五”时期	0.025 8	0.021 6	0.010 1	0.016 2	0.017 1	0.010 2	0.013 0	0.002 2

在“十五”时期（2004—2005年）、“十一五”时期（2006—2010年）、“十二五”时期（2011—2015年）及“十三五”时期（2016—2019年），北部沿海与东部沿海地区的 *GTFP* 增长均位居前列，而西北地区 *GTFP* 增长除“十五”时期外均处于末位。此外，虽然八大经济区 *GTFP* 增速随时间推移均实现了不同程度的提升，但北部、东部沿海与西北地区的 *GTFP* 增速差距由“十五”时期的 0.000 8 和 0.000 8 分别扩大至“十三五”时期的 0.023 6 和 0.019 5。可见，我国经济区（如北部、东部沿海地区与西北地区）之间的差距不仅表现为经济总量差距，更重要的是经济发展质量差距，实现区域协调发展仍旧任重而道远。

通过上述分析可以发现，样本期内我国八大经济区均实现了 *GTFP* 增长且增速在阶段性变化中呈上行趋势，那么推动八大经济区 *GTFP* 增长的内在动力究竟是什么因素？这个问题需要进一步从多视角对八大经济区 *GTFP* 增长的动力源泉进行探究。

### （三）八大经济区 *GTFP* 增长分解：基于技术角度

鉴于以往多数文献未关注到区域内城市之间投入产出组合的变化，在此将 *AEGLHM* 指标分解为技术进步（*TC*）、技术效率变化（*TEC*）、规模效率变化（*SCALEEC*）和结构效率变化（*SEC*）四个子项。图 1 显示了样本期内八大经济区 *GT-FP* 增长分解子项的变动情况。

首先，从技术进步来看，整个样本期内 *GT-FP* 增长最快的北部沿海与东部沿海地区在“十一五”时期、“十二五”时期和“十三五”时期技术进步速度均居于八大经济区前两位，两个地区的技术进步年均增速分别为 0.011 5 和 0.007 6。“十五”时期，处于我国中部板块的长江中游与黄河中游地区技术进步速度最快；*GTFP* 增长处于末两位的东北地区与西北地区的技术进步速度在八大经

济中垫底，尤其是西北地区的技术进步在样本期出现下滑。与 *GTFP* 增长类似，技术进步也呈现明显的分化特征，以传统工业为主或经济条件相对落后的经济区技术进步较为缓慢，而以第三产业和高新技术产业为支撑的经济区技术进步明显。此外，八大经济区技术进步对 *GTFP* 增长的贡献均超过 50%，其中黄河中游与北部沿海地区以及西北地区技术进步的贡献率超 80%，技术进步构成八大经济区 *GTFP* 增长的主要驱动力。

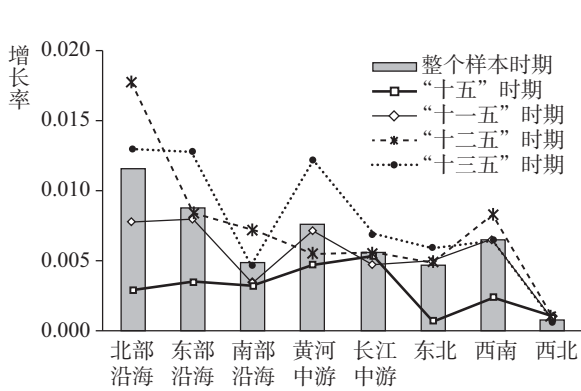
其次，从规模效率增长来看，“十五”时期仅有南部沿海和西北地区的规模效率实现增长；“十一五”时期和“十二五”时期分别仅有西北地区和北部沿海地区的规模效率下降；到“十三五”时期，八大经济区的规模效率均实现增长。总体来说，八大经济区规模效率增速在样本期内呈现上行趋势，其中东部沿海、南部沿海、长江中游地区规模效率年均增长大于 0.004，东北、黄河中游以及西南地区规模效率年均增长介于 0.002 到 0.004 之间，而西北地区规模效率年均增长仅为 0.000 2。可见，我国八大经济区的 *GTFP* 增长不仅仅是依靠技术进步这一“单轮驱动”，也受益于规模效率增长的推动。

再者，从技术效率变化来看，“十五”时期至“十三五”时期，八大经济区技术效率的变动态势差异较大。总体来看，样本期内仅有黄河中游、西南和西北三个经济区的技术效率得到改善但幅度较小，其他五大经济区的技术效率均有所恶化，这说明黄河中游、西南和西北经济区虽不断向有效前沿面追赶，但追赶速度较慢，其他五大经济区则存在着逐步远离有效前沿面的情况。值得注意的是，虽然八大经济区技术效率增速较低甚至负增长，但各个经济区的技术效率增速随时间变化都有所提高，因此不应忽视技术效率增速加快对于 *GTFP* 增长

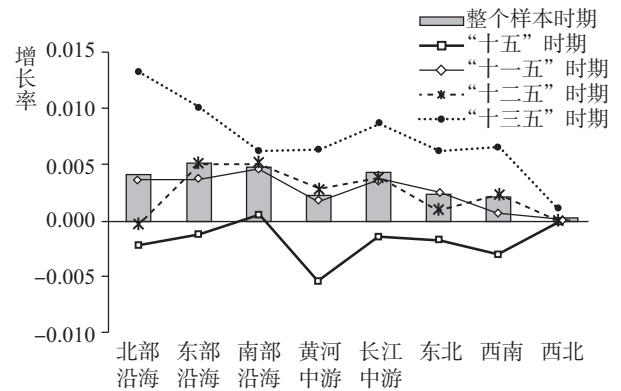
的推动作用，而应通过提升技术管理水平及管理模式创新来带动技术效率提高。

最后，从结构效率变动来看，整个样本期八大经济区的结构效率年均增速均为负，意味着八大经济区结构效率有所恶化，抑制了GTFP增长。其中，北部沿海与黄河中游地区的结构效率恶化最为严重，结构效率年均分别下降0.0017和0.0013，东北和西南地区次之，年均均下降0.0007，东部沿海、南部沿海与长江中游地区结构效率年均增速

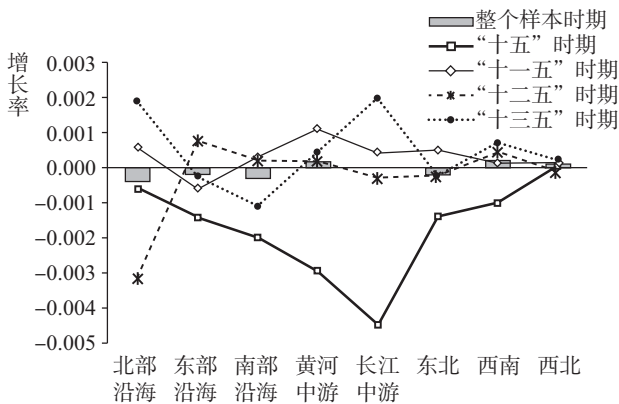
都为-0.0003，而西北地区结构效率恶化程度最轻，年均增速为-0.0001。从“十五”时期到“十三五”时期，不同经济区结构效率变动的差异较大，多数地区结构效率均呈现不同程度的下降态势。结构效率变化衡量了区域内城市之间投入产出分配的异质性，结构效率均下降意味着八大经济区内城市之间投入产出分配差异性较大，需注重城市之间资源的合理配置。



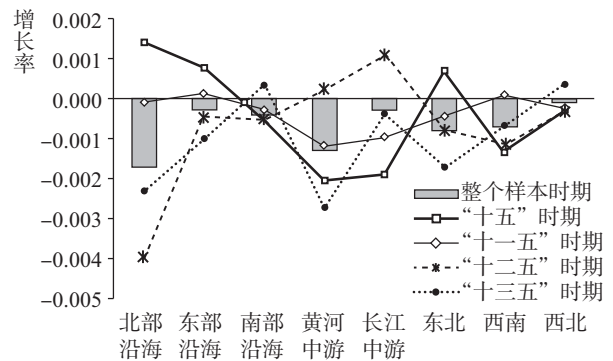
(a) 技术进步



(b) 规模效率变化



(c) 技术效率变化



(d) 结构效率变化

图1 样本期间八大经济区GTFP增长及其分解

综上，我国八大经济区GTFP增长主要源于技术进步与规模效率增长的“双重动力”，其中技术进步是主要驱动力。同时，技术效率增长对GTFP增速提升的推动作用和区域内城市之间资源

再分配引起的结构效应也不容忽视。

(四) 八大经济区GTFP增长分解：基于要素角度

尽管上文已对GTFP增长进行了完全分解，但如果分解仅停留在技术层面，那么NDDF的特

程开明等：中国八大综合经济区绿色全要素生产率增长测算与因素分解

点和 *EGLHM* 指标的优势并未得到充分体现。实际上，技术层面的生产率变化分解仅通过分解子项的取值来判断技术是否取得进步，或者技术效率、规模效率、结构效率是否提升，并没有回答这样的

问题：在投入和产出的诸多要素中，究竟是哪些要素导致 *GTFP* 增长或下降？为了回答这些问题，还需从要素视角开展 *GTFP* 增长的子项分解，具体结果见表 5。

表 5 2003—2019 年八大经济区 *GTFP* 增长及要素角度分解子项的平均值

<i>GTFP</i> 增长及分解子项	北部沿海	东部沿海	南部沿海	黄河中游	长江中游	东北	西南	西北
<i>GTFP</i> 增长	0.013 5	0.013 3	0.009 0	0.008 7	0.009 6	0.006 0	0.008 2	0.001 0
资本 ( <i>K</i> ) 利用效率增长	-0.000 9	-0.000 9	-0.000 5	-0.000 6	-0.000 6	-0.000 3	-0.000 6	-0.000 1
劳动 ( <i>L</i> ) 利用效率增长	-0.001 2	-0.002 3	-0.001 9	-0.000 9	-0.001 2	0.000 0	-0.001 5	-0.000 2
能源 ( <i>E</i> ) 利用效率增长	-0.001 8	-0.001 4	-0.001 1	-0.001 8	-0.001 1	-0.000 7	-0.001 3	-0.000 6
期望产出 ( <i>Y</i> ) 效率增长	0.015 4	0.016 1	0.012 1	0.009 3	0.010 6	0.006 0	0.008 9	0.001 4
工业废水 ( <i>IW</i> ) 治理效率增长	0.000 2	0.000 6	-0.000 1	0.000 2	0.0006	0.000 3	0.000 7	0.000 1
工业二氧化硫 ( <i>IS</i> ) 治理效率增长	0.001 0	0.000 8	0.000 4	0.001 2	0.000 5	0.000 3	0.001 0	0.000 2
工业烟(粉)尘 ( <i>IF</i> ) 治理效率增长	0.000 8	0.000 4	0.000 1	0.001 3	0.000 8	0.000 4	0.001 0	0.000 2

其一，从投入要素利用效率增长来看，整个样本期内八大经济区三大投入要素利用效率均有所下降。其中，资本投入利用效率下降幅度最小，对 *GTFP* 增长的抑制效应均在 10% 以下；而劳动和能源投入利用效率的下降幅度均较大，对 *GTFP* 增长的抑制效应超过 10%。配合技术角度分解发现，三大投入要素利用效率下降受规模效率、技术效率与结构效率下降的三重拖累，其中规模效率下降的拖累效应最大。观察三大投入要素利用效率降速在不同时期的变化发现，虽然四个“五年规划”时期三大投入要素利用效率均呈下降状态，但多数经济区的投入要素利用效率降速得到不同程度的遏制。可见，投入要素利用效率虽然抑制了八大经济区的 *GTFP* 增长，但其降速的有效控制也一定程度上有利于 *GTFP* 增速的提高。因此，需通过优化资本、劳动与能源要素配置等途径有效激发投入要素的利用效率。

其二，从期望产出效率增长来看，整个样本期内八大经济区期望产出效率均实现增长。其中经济实力雄厚的东部沿海、北部沿海和南部沿海三大沿海地区的期望产出效率年均增速最高，分别为 0.016 1、0.015 4 和 0.012 1，而经济实力较薄弱的西北地区期望产出效率年均增速最低，仅为 0.001 4，经济区之间期望产出效率增速差异明显。八大经济区期望产出效率增长也源于技术进步与规模效率增长的双重推动，技术效率与结构效率均产

生抑制作用。值得注意的是，不管是经济发达的经济区，还是经济较落后的经济区，期望产出效率增长对 *GTFP* 增长的贡献均超过 100%。此外，从“十五”时期至“十三五”时期，八大经济区的期望产出效率增长呈现不同程度的上升趋势。可见，期望产出效率增长是八大经济区的 *GTFP* 增长的主要组成部分，期望产出效率增速加快推动了八大经济区的 *GTFP* 增速提升。

其三，从非期望产出治理效率增长来看，样本期内八大经济区的工业二氧化硫治理效率与工业烟粉尘治理效率均实现增长，工业废水治理效率也多呈增长态势。然而，八大经济区非期望产出的治理效率增速有明显差异，如北部沿海地区与黄河中游地区的工业二氧化硫治理效率与工业烟粉尘治理效率增速较高，东部沿海地区的工业二氧化硫治理效率增速较高，而西南地区的工业废水治理效率增速较高。配合技术角度的分解发现，八大经济区非期望产出的治理效率增长不仅受益于技术进步，还不同程度地受益于技术效率增长、规模效率增长与结构效率增长。从“十五”到“十三五”时期，八大经济区非期望产出治理效率增速呈现不同程度的上升态势，非期望产出治理效率增速的提高有利于推动 *GTFP* 增速提升。这意味着我国八大经济区在环境治理方面取得一定的成效，应进一步加强环境规制力度，加大对污染治理的资金和技术投入，充分发挥非期望产出治理效率增长对 *GTFP* 增长的

提升作用。

综上,在要素构成层面,一方面我国八大经济区 *GTFP* 增长主要受益于期望产出效率增长与非期望产出治理效率增长,也一定程度上受累于投入要素利用效率下降;另一方面各投入要素、期望产出与非期望产出效率增速的提高共同推动了八大经济区 *GTFP* 增速提升。

## 六、进一步讨论:八大经济区 *GTFP* 增长差距的成因解释

中国八大经济区的 *GTFP* 增长存在明显差异,是什么因素导致这种差距?有必要聚焦 *GTFP* 增长的内部构成,采用方差分解法分别从技术与要素视角测算八大经济区各分解子项的差距对 *GTFP* 增长差距的贡献,探寻 *GTFP* 增长差距的主要成因,为实现八大经济区 *GTFP* 增长协调均衡发展提供参考。

### (一) 基于技术角度的成因解释

从技术角度利用方差分解法可以计算得到技术

进步、技术效率变化、规模效率变化以及结构效率变化的差距对八大经济区 *GTFP* 增长差异的贡献率,具体见表 6。整个样本期内,八大经济区之间的技术进步、技术效率增长、规模效率增长以及结构效率增长存在一定的差距,这种差距对八大经济区 *GTFP* 增长差距的贡献率分别为 73.46%、-2.92%、35.33%和 -5.87%,显然技术进步和规模效率增长差异是造成八大经济区 *GTFP* 增长差距的主要成因。

分阶段来看,“十五”时期技术进步的差距对八大经济区 *GTFP* 增长差距的贡献率为负,而技术效率变化、规模效率变化和结构效率变化差距的贡献率分别为 27.82%、55.90%和 36.14%,构成了八大经济区 *GTFP* 增长差距的主要原因。从“十一五”时期开始,技术进步的差距均为构成八大经济区 *GTFP* 增长差距的主要原因,规模效率变化差距均为次要原因。从“十五”时期到“十三五”时期,技术效率变动和结构效率变动的贡献率都波动较大且总体上有所下降,结构效率变动的贡献率由正转负。

表 6 *GTFP* 增长的区域差距分解:基于技术角度

时期	各因素贡献率			
	技术进步	技术效率变化	规模效率变化	结构效率变化
整个样本期	73.46%	-2.92%	35.33%	-5.87%
“十五”时期	-19.86%	27.82%	55.90%	36.14%
“十一五”时期	65.16%	-0.06%	33.95%	0.95%
“十二五”时期	64.35%	1.59%	37.25%	-3.19%
“十三五”时期	55.81%	7.23%	46.36%	-9.40%

总体来说,技术进步在八大经济区 *GTFP* 增长差异中扮演最主要贡献者的角色,其次是规模效率变化,这意味着技术进步落后的东北与西北地区需加大科技投入和引进先进技术的力度,大力促进科技创新;技术进步较快的北部沿海与东部沿海地区则要充分发挥科技创新的引领作用,通过技术外溢促进不同经济区之间技术创新的融合发展,以缩小经济区之间的技术进步差距。此外,规模效率增速落后的西北地区,还需大力促进产业聚集,发挥规模经济效应,缩小与其他经济区之间的规模效率增长差距。

### (二) 基于要素角度的成因解释

从技术角度考察投入要素利用效率增长、期望产出效率增长与非期望产出治理效率增长的差距对八大经济区 *GTFP* 增长差距的贡献率,具体见表 7。样本期内期望产出效率增长、工业废水治理效率增长、工业二氧化硫治理效率增长、工业烟(粉)尘治理效率增长的差距对八大经济区 *GTFP* 增长差距的贡献率均为正,表明缩小期望产出效率增长与三种非期望产出治理效率增长的区域差距有助于八大经济区 *GTFP* 增长的均衡发展。期望产出效率增长对八大经济区 *GTFP* 增长差异的贡献

程开明等：中国八大综合经济区绿色全要素生产率增长测算与因素分解

率高达 118.28%，而三种投入要素利用效率增长的贡献率均为负，非期望产出治理效率增长的贡献率较小，说明西北地区还需大力提升投入要素的利用效率，进一步提高非期望产出的治理效率。

表 7 GTFP 增长的区域差异分解：基于要素角度

时期	各因素贡献率						
	资本 (K) 利用效率	劳动 (L) 利用效率	能源 (E) 利用效率	期望产出 (Y) 效率	工业废水 (IW) 治理效率	工业二氧化硫 (IS) 治理效率	工业烟粉尘 (IF) 治理效率
整个样本期	-6.52%	-14.12%	-9.02%	118.28%	2.51%	5.46%	3.41%
“十五”时期	-3.11%	-20.08%	4.34%	52.92%	-11.02%	38.42%	38.53%
“十一五”时期	-8.37%	-11.58%	-16.01%	119.00%	-1.75%	8.77%	9.94%
“十二五”时期	-5.83%	-26.22%	-2.55%	123.87%	8.44%	5.27%	-2.98%
“十三五”时期	-2.12%	1.64%	-2.90%	70.29%	6.99%	8.66%	17.44%

分阶段考察发现，四个“五年规划”时期期望产出效率增长的差距均是驱动八大经济区 GTFP 增长差距的主导因素。“十五”时期八大经济区 GTFP 增长差距还受到能源利用效率增长差距、工业二氧化硫治理效率增长差距和工业烟（粉）尘治理效率增长差距的重要影响；“十一五”时期 GTFP 增长差距还受到工业二氧化硫治理效率增长差距和工业烟（粉）尘治理效率增长差距的主要驱动；“十二五”时期 GTFP 增长差距形成的次要原因还包括工业废水治理效率增长差距和工业二氧化硫治理效率增长差距，而“十三五”时期仅有资本和能源利用效率差距不是导致 GTFP 增长差距的主要原因。从各因素贡献率的变化趋势看，期望产出效率增长的贡献率明显下降，而劳动利用效率增长、工业废水治理效率增长和工业烟（粉）尘治理效率增长的贡献率明显上升。

以上结果表明，期望产出效率增长差距是导致八大经济区 GTFP 增长差距的首要成因，但非期望产出治理效率增长的贡献也不容忽视，可见在缩小经济区之间经济总量差距的同时，也需要大力推进环境污染治理工作，加大生态环境保护力度，重视工业“三废”排放，以缩小非期望产出治理效率增长差距，进而减小区域 GTFP 增长差距。

七、结论及启示

本文基于聚合非径向方向性距离函数构造了一种新型绿色全要素生产率指标，即聚合环境广义的

LHM 指标 (AEGLHM 指标)，进而对其进行分解以揭示绿色全要素生产率增长的主要动力来源。这一方法创新具有双重意义：一是将绿色全要素生产率增长分析从个体层面扩展到群组层面；二是 AEGLHM 指标相较于 AL 指标不仅能够准确地衡量 GTFP 增长，而且可基于技术与要素角度进行完全分解。

依据 2003—2019 年中国 281 个地级以上城市的投入产出指标数据，运用 AEGLHM 指标开展中国八大经济区 GTFP 增长的实际测算及分析，结果表明：(1) 八大经济区绿色全要素生产率均实现增长但增速呈现分化特征。从整个样本期内八大经济区 GTFP 年均增速看，北部沿海与东部沿海地区 GTFP 增长最快，而西北地区 GTFP 增长最慢；随时间推移八大经济区 GTFP 增速均有所提升，但地区之间的 GTFP 增速差异也随之扩大。(2) 八大经济区绿色全要素生产率增长动力及差异成因在技术与要素层面各有侧重。八大经济区 GTFP 增长主要源于技术层面技术进步和规模效率增长的双重动力，以及要素层面期望产出效率增长与非期望产出治理效率增长的双轮驱动；其中技术进步与期望产出效率增长既是八大经济区 GTFP 增长的主要驱动力，也是八大经济区 GTFP 增长差异形成的主要原因。

研究结论对于促进八大经济区的绿色协调发展具有启示意义。其一，八大综合经济区绿色全要素生产率增长的区域差异特征较为显著，意味着在制定和实施有关旨在解决环境污染等问题的政策及措

施时，应充分考虑到不同区域的实际情况，采取差异化策略，以有效缓解区域绿色全要素生产率增长的差异，促进区域协调发展。其二，推动八大经济区绿色全要素生产率的持续增长，既要依赖技术进步和规模效率增长，也要激发技术效率以及结构效率增长潜力。各地区一方面应加大技术创新投入特别是 R&D 经费投入力度，创造良好的创新氛围和制度环境，促进技术创新和产业聚集，充分发挥规模经济效应，推动 *GTFP* 快速增长；另一方面要不断创新管理模式和优化区域资源配置能力，大力提升技术效率，充分发挥结构效应，避免科技投入的隐形损耗，促使区域 *GTFP* 增长。其三，在提升期望产出效率增长的同时，释放投入要素利用效率的潜力也是促进区域绿色全要素生产率增长的重要途径。通过加大人力资本投资、加强高技术人才培养与引进促进劳动利用效率增长，对资本要素的集聚、重组和高效运营以促进资本利用效率增长，通过产业结构优化和能源消费结构调整提高能源利用效率，均是提升区域 *GTFP* 增长的有效手段。其四，缩小

地区绿色全要素生产率增长差异是促进区域协调发展的重要任务。技术进步和非期望产出治理效率增长是地区 *GTFP* 增长差异形成的主要原因，而西北地区 *GTFP* 增长远低于其他地区，因此应加大西北地区教育、医疗和环保的投入，引导高端生产要素逐步流入，同时增加污染治理的投入力度，尝试建立工业“三废”跨区域排放权交易市场，提升非期望产出治理效率，加快西北地区 *GTFP* 增长。

值得注意的是，虽然利用 *AEGLHM* 指标测算群组 *GTFP* 增长具有明显优势，但参照当期生产前沿面的 *AEGLHM* 指标仍存在一些不足，譬如方向向量设定存在主观性、没有修正小样本带来的效率偏差、在计算跨期方向性距离函数时易出现线性规划无可行解问题等。未来，应进一步综合考虑不同的效率测度方法譬如 *RAM* 模型、网络 *DEA*、*Bootstrap-DEA* 等，以及不同生产前沿面构建方法（序列 *DEA*、全局 *DEA*、两期 *DEA* 等），开展绿色全要素生产增长测算与分解方法的创新研究。

#### 参考文献

- 邓宗兵、何若帆、陈钰、朱帆，2020：《中国八大综合经济区生态文明发展的区域差异及收敛性研究》，《数量经济技术经济研究》第 6 期。
- 董敏杰、李钢、梁泳梅，2012：《中国工业环境全要素生产率的来源分解——基于要素投入与污染治理的分析》，《数量经济技术经济研究》第 2 期。
- 李金钤、马静静、魏伟，2020：《中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究》，《数量经济技术经济研究》第 6 期。
- 李兰冰、刘秉镰，2015：《中国区域经济增长绩效、源泉与演化：基于要素分解视角》，《经济研究》第 8 期。
- 李卫兵、涂蕾，2017：《中国城市绿色全要素生产率的空间差异与收敛性分析》，《城市问题》第 9 期。
- 林伯强，2003：《电力消费与中国经济增长：基于生产函数的研究》，《管理世界》第 11 期。
- 单豪杰，2008：《中国资本存量 K 的再估算：1952~2006 年》，《数量经济技术经济研究》第 10 期。
- 汤学兵、陈秀山，2007：《我国八大区域的经济收敛性及其影响因素分析》，《中国人民大学学报》第 1 期。
- 涂正革，2008：《环境、资源与工业增长的协调性》，《经济研究》第 2 期。
- 汪克亮、利娟、刘悦、杨宝臣，2018，〈中国节能减排效率的地区差异、动态演进与驱动因素——基于非径向加权 Russell DDF 与 Luenberger 生产率指标〉，《华东经济管理》第 1 期。
- 王兵、吴廷瑞、颜鹏飞，2010：《中国区域环境效率与环境全要素生产率增长》，《经济研究》第 5 期。
- 王兵、杨欣怡，2019：《中国工业行业全要素生产率分析（1981—2015）：波特假说的验证》，《产经评论》第 6 期。
- 王恕立、胡宗彪，2012：《中国服务业分行业生产率变迁及异质性考察》，《经济研究》第 4 期。
- Abad, A., 2015, "An Environmental Generalised Luenberger - Hicks-Moorsteen Productivity Indicator and an Environmental Generalised Hicks-Moorsteen Productivity Index", *Journal of Environmental Management*, 161: 325 - 334.
- Badunenko, O., and P. Mozharovskyi, 2019, "Statistical Inference for the Russell Measure of Technical Efficiency", *Journal of the Operational Research Society*, 71 (3): 1 - 11.



## 程开明等：中国八大综合经济区绿色全要素生产率增长测算与因素分解

- Banker, R. D., Z. Zheng, and R. Natarajan, 2010, "DEA-based Hypothesis Tests for Comparing Two Groups of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, 206 (1): 231 - 238.
- Bjurek, H., 1996, "The Malmquist Total Factor Productivity Index", *Scandinavian Journal of Economics*, 98 (2): 303 - 313.
- Boussemart, J., G. D. Ferrier, H. Leleu, and Z. Shen, 2020, "An Expanded Decomposition of the Luenberger Productivity Indicator with an Application to the Chinese Healthcare Sector", *Omega*, 91: 102010.
- Briec, W., and K. Kerstens, 2004, "A Luenberger-Hicks-Moorsteen Productivity Indicator: Its Relation to the Hicks-Moorsteen Productivity Index and the Luenberger Productivity Indicator", *Economic Theory*, 23 (4): 925 - 939.
- Briec, W., B. Dervaux, and H. Leleu, 2003, "Aggregation of Directional Distance Functions and Industrial Efficiency", *Journal of Economics*, 79 (3): 237 - 261.
- Chambers, R. G., R. Färe, and S. Grosskopf, 1996, "Productivity Growth in APEC Countries", *Pacific Economic Review*, 1 (3): 181 - 190.
- Chen, C., and M. A. Delmas, 2012, "Measuring Eco-Inefficiency: A New Frontier Approach", *Operations Research*, 60 (5): 1064 - 1079.
- Chung, Y. H., R. Färe, and S. Grosskopf, 1997, "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach", *Journal of Environmental Management*, 51 (3): 229 - 240.
- Coelli, T. J., D. S. P. Rao, C. J. O'Donnell, and G. E. Battese, 2005, *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, NY: Springer Science + Business Media, Inc.
- Debreu, G., 1951, "The Coefficient of Resource Utilization", *Econometrica*, 19 (3): 273 - 292.
- Färe, R., and D. Primont, 2003, "Luenberger Productivity Indicators: Aggregation Across Firms", *Journal of Productivity Analysis*, 20 (3): 425 - 435.
- Farrell, M. J., 1957, "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society (Series A)*, 120 (3): 253 - 290.
- Ferrier, G. D., H. Leleu, and V. G. Valdmanis, 2010, "The Impact of CON Regulation on Hospital Efficiency", *Health Care Management Science*, 13: 84 - 100.
- Grifell-Tatjé, E., and C. A. K. Lovell, 1995, "A Note on the Malmquist Productivity Index", *Economic Letters*, 47: 169 - 175.
- Grosskopf, S., 2003, "Some Remarks on Productivity and Its Decompositions", *Journal of Productivity Analysis*, 20 (3): 459 - 474.
- Hampf, B., 2018, "Measuring Inefficiency in the Presence of Bad Outputs: Does the Disposability Assumption Matter?", *Empirical Economics*, 54 (1): 101 - 127.
- Kerstens, K., Z. Shen, and I. Van de Woestyne, 2018, "Comparing Luenberger and Luenberger-Hicks-Moorsteen Productivity Indicators: How Well is Total Factor Productivity Approximated?", *International Journal of Production Economics*, 195: 311 - 318.
- Koopmans, T. C., 1957, *Three Essays on the State of Economic Science*. NY: McGraw-Hill.
- Mayer, A., and V. Zelenyuk, 2014, "Aggregation of Malmquist Productivity Indexes Allowing for Reallocation of Resources", *European Journal of Operational Research*, 238 (3): 774 - 785.
- Pittman, R. W., 1983, "Multilateral Productivity Comparisons with Undesirable Outputs", *Economic Journal*, 93 (372): 883 - 891.
- Sala-Garrido, R., M. Molinos-Senante, and M. Mocholí-Arce, 2018, "Assessing Productivity Changes in Water Companies: A Comparison of the Luenberger and Luenberger-Hicks-Moorsteen Productivity Indicators", *Urban Water Journal*, 15 (7): 626 - 635.
- Shen, Z., T. Baležentis, and G. D. Ferrier, 2019, "Agricultural Productivity Evolution in China: A Generalized Decomposition of the Luenberger-Hicks-Moorsteen Productivity Indicator", *China Economic Review*, 57: 101315.

Shen, Z. , T. Baležentis, X. Chen, and V. Valdmanis, 2018, “Green Growth and Structural Change in Chinese Agricultural Sector during 1997—2014”, *China Economic Review*, 51: 83 - 96.

Tone, K. , 2001, “A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis”, *European Journal of Operational Research*, 130 (3): 498 - 509.

Zelenyuk, V. , 2006, “Aggregation of Malmquist Productivity Indexes”, *European Journal of Operational Research*, 174 (2): 1076 - 1086.

Zhou, P. , B. W. Ang, and H. Wang, 2012, “Energy and CO<sub>2</sub> Emission Performance in Electricity Generation: A Non-radial Directional Distance Function Approach”, *European Journal of Operational Research*, 221 (3): 625 - 635.

(责任编辑: 刘舫舸)

## MEASUREMENT AND DECOMPOSITION ON GREEN TOTAL FACTOR PRODUCTIVITY GROWTH IN EIGHT COMPREHENSIVE ECONOMIC ZONES OF CHINA

CHENG Kaiming LI Sie

(School of Statistics and Mathematics, Zhejiang Gongshang University)

**Abstract:** With the implementation of the green development philosophy in China, scientifically measuring and analyzing the growth of green total factor productivity (GTFP) is of great significance for high-quality development. In order to measure the growth of GTFP and its compositions at the regional level, this paper innovatively proposes the aggregate environmental generalized Luenberger-Hicks-Moorsteen (AEGLHM) productivity indicator and its decomposition subitems. The results of Monte Carlo simulation show that the AEGLHM indicator is more effective and accurate than the aggregate Luenberger indicator. Then, we applied this new indicator to measure the growth of GTFP and its components in eight economic zones with data of prefecture-level cities from 2003 to 2019. Results show that the GTFP of the eight economic zones has increased, but the growth rate highlights the characteristics of polarization. Moreover, the main driving forces of GTFP growth in the eight economic zones are technological progress and scale efficiency growth from the technical perspective, as well as desirable output efficiency growth and undesirable output governance efficiency growth from the factorial perspective. Finally, we find that the technological progress and the desirable output efficiency growth are the dominant causes that drive the difference of GTFP growth in the eight economic zones. The conclusions have some enlightenment for improving regional GTFP with targeted strategies.

**Key words:** eight comprehensive economic zones; green total factor productivity growth; aggregate environmental generalized Luenberger-Hicks-Moorsteen productivity indicator; structural efficiency change