

# An Estimation and Spatiotemporal Evolution Analysis of Green Total Factor Productivity in China

Rui Han

School of Economics, Ocean University of China, Qingdao Shandong  
Email: HRui1995@163.com

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 31<sup>st</sup>, 2020; published: Feb. 7<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The energy consumption and environmental pollution were taken into the input-output analysis framework and the green total factor productivity and its decomposition of Chinese provinces were estimated by using DEA-Malmquist index analysis method based on 2000 - 2015 panel data of 29 provinces and cities in China. Then, the development trend and heterogeneity of green total factor productivity in different provinces and cities from the perspective of spatio-temporal evolution were analyzed. The results show that the improvement of China's green total factor productivity depends on the progress of green technology to a large extent, and there are differences between coastal areas and inland areas. Therefore, different policies and measures should be taken to tap the potential of sustainable economic development when promoting sustainable economic and social development.

## Keywords

Green TFP, DEA-Malmquist, Green Technology Progress

---

# 中国绿色全要素生产率估算及时空演化分析

韩睿

中国海洋大学经济学院, 山东 青岛  
Email: HRui1995@163.com

收稿日期: 2020年1月15日; 录用日期: 2020年1月31日; 发布日期: 2020年2月7日

## 摘要

基于2000~2015年中国29个省市的面板数据,将能源消耗和环境污染纳入投入产出分析框架,利用DEA-Malmquist指数分析法估算了中国各省市的绿色全要素生产率及其分解项,并据此从时空演变层面分析了各省市的绿色全要素生产率的发展态势及其异质性。结果表明:我国的绿色全要素生产率的改善很大程度上依赖于绿色技术进步,并且在沿海地区和内陆地区具有差异性,在推进经济社会可持续发展时,要注重采取不同的政策措施,挖掘经济可持续发展潜力。

## 关键词

绿色全要素生产率, DEA-Malmquist指数, 绿色技术进步

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自从改革开放以来,中国经济建设取得了巨大成就,国内生产总值从1978年的3645.2亿元上升到2019年的900,309亿元,自2010年就已跃居为世界第二大经济体。但是高投入、高消耗、高污染的发展模式会导致资源环境代价过大,自2007年来中国成为世界上最大的二氧化碳排放国,造成了经济发展的严峻局面。近年来,经济发展增速放缓,中国经济面临最大、最核心的问题在于高速增长阶段结束后如何保持全要素生产率较高的增速,这是经济可持续发展过程中一个比较严峻的挑战。同时,绿色经济成为经济社会可持续发展的着力点,建设人与自然和谐共生的现代化,是党的十九大报告的明确定位。

生产率通常是指某种投入与产出的度量比,按照投入要素可分为单要素生产率和全要素生产率,但是单要素生产率是一个比较粗糙的指标,不能很好地反映投入产出关系,甚至包含很大的测量误差,因此,研究全要素生产率成为探寻经济增长背后动力的中心内容。在全要素生产率的测算上,罗伯特·索洛(Robert Merton Solow)最早改进“柯布-道格拉斯生产函数”并估算出索洛余值,即产出增长率减去劳动和资本生产率的加权之和后的余值[1],为全要素生产率的测算做出了重要贡献,也为后期学者的改进和研究奠定了基础。目前,学术界普遍认为全要素生产率的增长率是产出增长率超过要素投入增长率的部分,即在全部生产要素的投入量不变的情况下,生产量仍能增加的部分。因此全要素生产率的增长率有更加明确的经济含义,在理论研究和实际应用中,学者们将全要素生产率的增长当作技术进步的标志,并对其展开研究。在理论研究层面,全要素生产率的测算研究大致可分为三个阶段,即指数法、索洛余值法和和前沿分析法[2];在实际应用层面,主要从产业角度以及总体和区域角度进行实证分析。例如,杨汝岱(2015)基于OP、LP等方法测算了企业层面全要素生产率并发现中国制造业整体全要素生产率增速存在较大的波动[3];余泳泽(2015)采用超越对数生产函数的随机前沿模型对1978~2012年中国省际全要素生产率进行了再估算并对空间收敛性进行了研究[4]。但是以上研究不管是从产业层面还是区域层面均未涉及到投入产出过程中的能源消耗以及污染排放等问题,为了经济的可持续增长,绿色全要素生产率是兼顾经济增长以及生态平衡保护的更为全面的衡量指标[5]。由于能源消耗和环境污染主要来源于制造业等第二产业和重工业中,所以现有的对绿色全要素生产率的研究中,大多集中在产业的角度进行分析,例如,岳鸿飞(2018)利用基于松弛变量的方向距离函数(SBM-DDF)及Luenberger生产率指数测算了中国

36个工业行业2006-2015年的绿色全要素生产率并测评了技术创新在工业绿色发展中的贡献水平[6];岳会(2019)将农膜使用量作为一种非期望产出,测算了中国棉花2004-2018年的绿色全要素生产率变化指数[7]。虽然也有一些学者从区域角度进行了研究,但都把研究重点放在了影响因素上面,因此,本文将从估算绿色全要素生产率入手,将能源消耗和污染排放同时纳入投入产出过程,并在测算结果的基础上进行时空分析,以探清中国经济绿色发展的区域差异。

## 2. 研究方法

大致来说,全要素生产率指数的测算经历了指数法、索洛余值法和和前沿分析法三个阶段。Aigner和Chu(1968)在Farrell(1957)基础上,提出了前沿生产函数法,将经济增长归因于要素投入增长和全要素生产率改进两个方面;同时将全要素生产率分解为技术进步和技术效率两部分,用前者刻画所有生产者投入产出函数的边界,用后者描述个别生产者实际技术与技术前沿的差距[2][8]。依据前沿生产函数和距离函数估算方法的不同,前沿生产函数产生了数据包络分析法(DEA)和随机前沿分析法(SFA)两个分支。由于数据包络分析法是以相对效率概念为基础直接利用线性规划计算前沿生产函数和距离函数,无需对生产函数作出假设,避免了较强的理论约束,是一种应用广泛的非参数法。因此,本文选用数据包络分析方法进行研究。

以各省市为决策单元,假设有 $K$ 个省市,每个省市中有 $L$ 个投入指标和 $M$ 个产出指标。假设 $x_{ji}$ 为第 $j$ 个省市指标 $i$ 的投入量, $y_{jm}$ 为第 $j$ 个省市指标 $m$ 的产出量,那么第 $n$ 个省市基于凸性、锥性、无效性和最小性公理假设下的规模报酬不变的模型可如公式(1)所示:

$$\begin{aligned} & \min [\theta - \varepsilon(\hat{e}^T s^- + e^T s^+)]; \\ & \text{s.t. } \sum_{j=1}^k x_{jk} \lambda_j + s^- = \theta x_n^k, \sum_{j=1}^k y_{jm} \lambda_j - s^+ = y_m^n; \\ & \lambda_j, s^-, s^+ \geq 0, n=1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\theta$ 为综合效率指数; $\lambda_j$ 为权重变量; $s^-$ 为松弛变量; $s^+$ 为剩余变量; $\varepsilon$ 为无穷小量; $e$ 为单位向量空间。 $\theta$ 越大效率值越高,当 $\theta=1$ 时表明在最优前沿面上,产出相对于投入而言达到最优。

DEA-Malmquist指数模型最早在1953年由瑞典的经济学家和统计学家Malmquist提出,用来对动态效率的变化趋势进行分析。目前,由Fare提出的DEA-Malmquist指数模型[9],是国内外学者们最常使用的测算模型。它假定在 $t$ 时期的技术条件下,从 $t$ 到 $t+1$ 时刻的DEA-Malmquist全要素生产率指数模型,如公式(2)所示:

$$M_0^t(x^t, y^t) = \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \quad (2)$$

同理,在 $t+1$ 时刻的技术条件下,从 $t$ 到 $t+1$ 时刻的DEA-Malmquist全要素生产率指数模型,如公式(3)所示:

$$M_0^{t+1}(x^t, y^t) = \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \quad (3)$$

其中, $x^t$ 为第 $t$ 时刻的投入向量, $y^t$ 为第 $t$ 时刻的产出向量, $x^{t+1}$ 为第 $t+1$ 时刻的投入向量, $y^{t+1}$ 为第 $t+1$ 时刻的产出向量, $D_0^t(\cdot)$ 为第 $t$ 时刻的产出导向距离函数, $D_0^{t+1}(\cdot)$ 为第 $t+1$ 时刻的产出导向距离函数,下同。

为了避免生产技术条件不变选择的任意性,用公式(2)和公式(3)的几何平均值来衡量从时刻 $t$ 到

$t+1$  的生产率的变化, 如公式(4)所示:

$$M_0(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \left[ \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \cdot \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

DEA-Malmquist 全要素生产率指数大于 1, 意味着全要素生产率增长, 反之则意味着下降。DEA-Malmquist 全要素生产率指数可进一步分解被分解, 如公式(5)所示:

$$M_0(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \cdot \left[ \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$= \text{EFFCH}_t^{t+1} \cdot \text{TECHCH}_t^{t+1}$$

其中, EFFCH 为从  $t$  到  $t+1$  期间的效率变化指数, TECHCH 为从  $t$  到  $t+1$  期间的技术进步变化指数。如果 EFFCH 和 TECCH 都大于 1 则表明效率和技术进步都发生了改善, 反之, 则表明出现了恶化和退步。

### 3. 绿色全要素生产率估算

#### 3.1. 变量选择及数据来源

为了更全面和准确地估算全国以及区域层面经济社会可持续发展的潜力, 本文在估算全要素生产率的基础上将能源消耗和非期望产出的污染排放纳入投入产出过程来测算绿色全要素生产率, 以期对全国各区域的绿色经济发展状况进行总体分析。基于数据可得性的考虑, 选取了 2000~2015 年除黑龙江省和西藏自治区的年度数据进行研究, 在投入层面, 选取了劳动投入、资本投入和能源消耗三个变量, 在产出层面选取了地区 GDP、工业废水排放量、工业废气排放量和工业废物排放量四个变量。其中, 用年末就业人数衡量劳动投入(L); 用资本存量衡量资本投入(K), 关于资本存量的借鉴了张军(2014)永续盘存法[10], 基期资本存量用 1978 年的固定资本形成总额除以 10%, 作为该省区市的初始资本存量, 折旧率取 9.6%; 用电量来衡量能源投入(E); 用地区 GDP 来衡量期望产出; 用工业废水排放量(W)、工业废气排放量(G)和工业废物排放量(R)来衡量非期望产出, 以上数据均来自国家统计局等发布的各年度的《中国统计年鉴》、《中国环境年鉴》以及中电联数据, 投入产出变量及数据来源如表 1 所示。

**Table 1.** Overview of input-output variables

**表 1.** 投入产出变量概述

投入/产出	变量	指标	数据来源
投入	劳动投入	年末就业人数(万人)	《中国统计年鉴》
	资本投入	资本存量(亿元)	
	能源投入	电力消费量(亿千瓦时)	中电联
产出	期望产出	地区 GDP (亿元)	《中国统计年鉴》
	非期望产出	工业废水排放量(万吨)	《中国环境年鉴》
		工业废气排放量(亿立方米)	
		工业废物排放量(万吨)	

#### 3.2. 统计性描述

为了更清晰地了解我国各地区经济发展的异质性, 对投入产出过程的各项变量进行描述, 得到的

统计性描述如表 2 所示。

**Table 2.** Statistical description of input-output variables  
**表 2.** 投入产出变量统计性描述

Variable	Obs	Mean	Std.Dev.	Min	Max
L	464	2437.234	1634.812	238.6	6636
K	464	11892.01	12778.32	352.451	77566.73
E	464	1156.628	1006.5	38.37	5310.69
GDP	464	11809.5	12538.63	263.68	72812.55
W	464	75016.78	62348.98	2080	296000
G	464	13991.06	13058.05	434	79121
R	464	6764.517	7067.827	75	45576

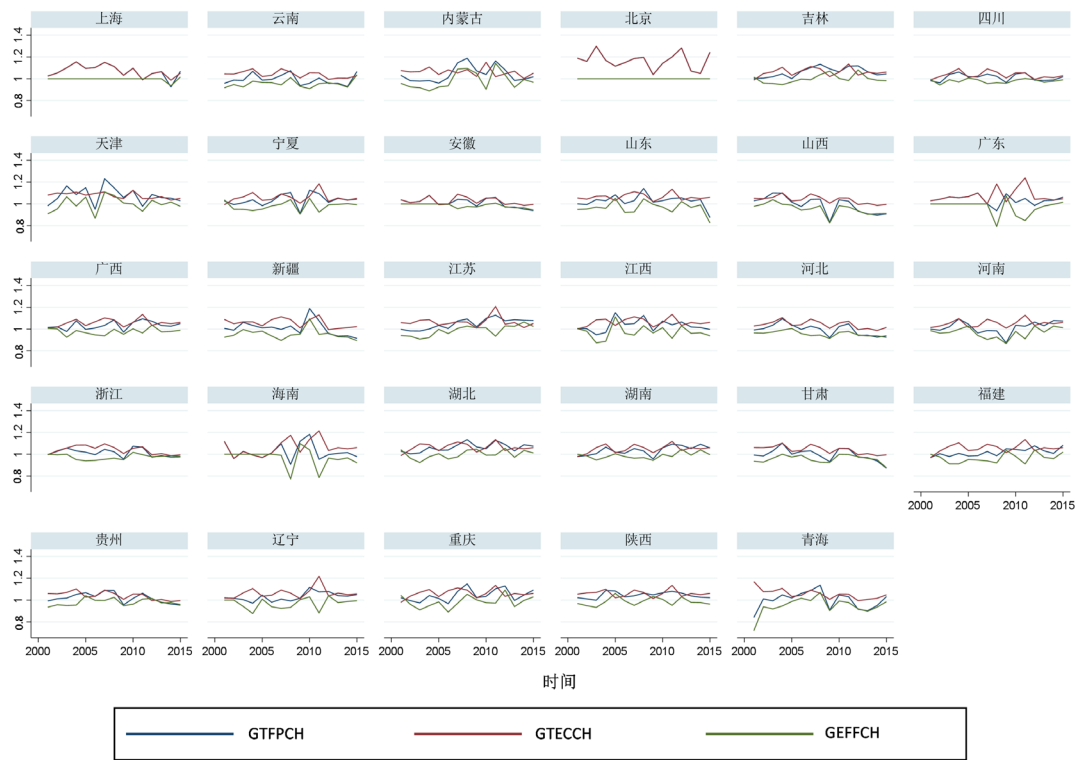
由表 2 可以看出, 我国的经济状况存在很大的异质性。从投入来看, 劳动投入的最高年末就业人数达到 6636 万人, 最低的仅为 238.6 万人; 资本存量的标准差达到 12778.32 亿元; 能源投入的最高值是最低值的 130 多倍。从产出来看, 不管是期望产出的地区 GDP 还是非期望产出的“三废”排放量, 标准差都非常大。虽然我国各个地区的地理位置、资源禀赋、对外开放程度以及发展政策等都存在巨大差异, 但是各个地区也都有着不同的经济发展动力和潜力, 因此对衡量的各个地区经济发展源泉的绿色全要素生产率进行时空演化分析具有重要的意义。

### 3.3. 绿色全要素生产率估算结果

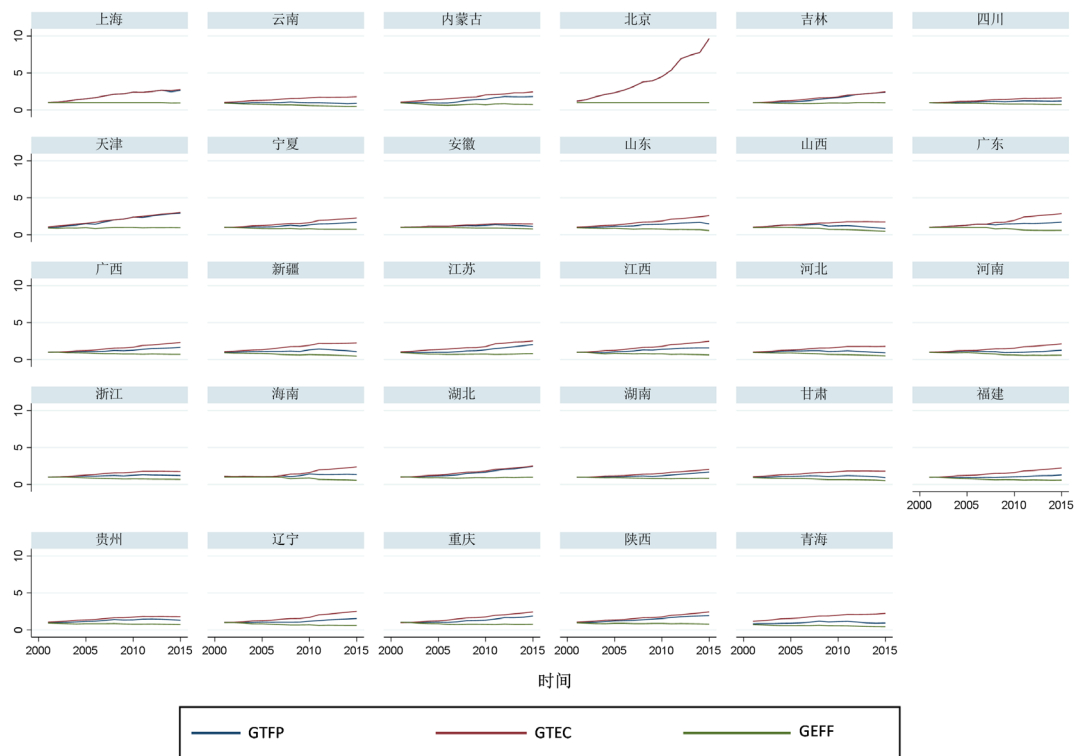
基于上述搜集到的数据并将非期望产出纳入到投入因素利用 DEAP2.1 软件估算的衡量中国各省绿色全要素生产率的 Malmquist 指数(GTFPCH)、绿色效率指数(GEFFCH)、绿色技术进步指数(GTECHCH), 得到中国各省的全要素生产率的计算结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 2000~2015 年期间, 全国各个省份的 Malmquist 指数, 即 GTECHCH 都围绕 1 出现了不同程度的波动, 除了广东、江西、海南和青海之外, 大多数省份的 Malmquist 指数都与绿色技术进步指数 GTECHCH 保持相同的变动趋势, 而相对来说绿色效率指数 GEFFCH 变动都比较平缓, 这表明全国各个省份的绿色全要素生产率的改善或者退步大部分都来自于绿色技术进步的改善或者退步的贡献。由于 GTFPCH 是相对于上一年 GTFPCH 的变化率, 因此为了分析 2000~2015 年时间段全国各省整体的绿色经济发展情况, 还需对其进行相应的变换, 因此, 参考邱斌等(2008) [11]的做法, 假定 2000 年的绿色全要素生产率水平 GTFP 为 1, 则 2001 年的 GTFP 水平为 2000 年的 GTFP 水平乘以 2001 年的 GTFPCH 指数。依次类推, 可以得到 2001~2015 年的全国各省的绿色全要素生产率相关指标, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在 2000~2015 年期间, 除了北京的绿色全要素生产率增速较快之外, 其他全国各个省份的绿色全要素生产率都呈现比较平缓的上升态势, 这表明全国各个地区的绿色全要素生产率逐年得到改善。总体来看, 沿海省份的绿色全要素生产率要比内陆省份的绿色全要素生产率增速更快。在 2000~2015 年期间, 从绿色效率来看, 全国各省的绿色效率基本上都比较平缓, 既没出现太大的改善也没出现太大的恶化; 从绿色进步来看, 全国各省的绿色进步都出现了不同程度的平缓上升的情况, 并且和绿色全要素生产率保持着一致的增长趋势。综上可以说明中国各省的绿色全要素生产率显著增长主要依靠绿色技术的进步, 相对于大幅度绿色技术进步, 新技术的利用效率不高, 消化吸收能力有待增强。



**Figure 1.** Overview of green total factor productivity related indexes in Chinese provinces  
**图 1.** 中国各省绿色全要素生产率相关指数概况



**Figure 2.** Overview of green total factor productivity in Chinese provinces  
**图 2.** 中国各省绿色全要素生产率概况

## 4. 绿色全要素生产率时空演化分析

### 4.1. 绿色全要素生产率时间演化态势分析

对 2000~2015 年期间中国的绿色全要素生产率进行分解并对其增长特征进行分析, 具体如表 3 所示。总体来看, 绿色技术进步指数在 2000~2011 年期间所有年份都大于 1, 这对绿色全要素生产率都起到了一个改善作用促进了绿色全要素生产率的逐年增长, 而绿色全要素生产率除了 2008~2009 年间小于 1 之外其他年间都大于 1, 这可能是因为 2008 年金融危机对中国整个经济体带来冲击的原因。2009 年之后, 中国的绿色技术进步指数大于 1, 而绿色效率指数几乎都小于 1, 表明我国对新技术的利用效率不高, 应该增强对新技术的消化吸收的能力, 尽快转化为生产力。

**Table 3.** Overview of national green total factor productivity from 2000 to 2015

**表 3.** 2000~2015 年全国绿色全要素生产率概况

时间	GEFCH	GTECHCH	GTFPCH
2000~2001	0.971	1.038	1.009
2001~2002	0.968	1.043	1.01
2002~2003	0.96	1.074	1.031
2003~2004	0.963	1.095	1.054
2004~2005	0.998	1.036	1.034
2005~2006	0.964	1.057	1.019
2006~2007	0.97	1.097	1.064
2007~2008	0.982	1.084	1.065
2008~2009	0.975	1.016	0.991
2009~2010	0.991	1.076	1.066
2010~2011	0.957	1.112	1.064
2011~2012	1.005	1.03	1.035
2012~2013	0.967	1.042	1.008
2013~2014	0.979	1.025	1.003
2014~2015	0.97	1.047	1.016

### 4.2. 绿色全要素生产率区域对比分析

沿海省市 2000~2015 年的绿色全要素生产率与内陆省市的绿色全要素生产率进行对比分析, 如表 4 和表 5 所示。总体来看, 2000-2015 年期间, 沿海省市除了河北, 内陆省市除了山西、云南、甘肃和青海的绿色全要素生产率指数都大于 1, 并且沿海省市的绿色全要素生产率指数略大于内陆省市, 表明沿海地区和内陆地区的绿色全要素生产率都得到改善, 虽然沿海地区的 GDP 在一定程度上要整体高于内陆地区, 但是绿色全要素生产率却仅仅略高于内陆地区, 这可能意味着东部沿海地区的发展更多地忽视了资源的节约和环境的保护。并且, 不管是沿海地区还是内陆地区各个省市的绿色经济发展都呈现出很大程度的异质性, 但总体来看, 绿色全要素生产率的变动主要取决于绿色技术进步。

**Table 4.** Overview of green total factor productivity in coastal areas**表 4.** 沿海地区绿色全要素生产率概况

省份	GEFFCH	GTECHCH	GTFPCH
天津	0.997	1.077	1.074
河北	0.957	1.04	0.995
辽宁	0.968	1.064	1.03
上海	0.997	1.07	1.066
江苏	0.986	1.064	1.048
浙江	0.975	1.038	1.013
福建	0.964	1.055	1.017
山东	0.964	1.065	1.026
广东	0.967	1.072	1.037
广西	0.978	1.058	1.034
海南	0.962	1.06	1.02
平均	0.974	1.060	1.033

**Table 5.** Overview of green total factor productivity in inland regions**表 5.** 内陆地区绿色全要素生产率概况

省份	GEFFCH	GTECHCH	GTFPCH
北京	1	1.163	1.163
山西	0.954	1.038	0.99
内蒙古	0.98	1.061	1.04
吉林	0.998	1.062	1.06
安徽	0.983	1.026	1.009
江西	0.971	1.062	1.031
河南	0.966	1.052	1.016
湖北	0.999	1.063	1.061
湖南	0.987	1.048	1.035
重庆	0.983	1.061	1.043
四川	0.98	1.034	1.012
贵州	0.98	1.04	1.019
云南	0.954	1.04	0.992
陕西	0.985	1.061	1.045
甘肃	0.956	1.04	0.995
青海	0.943	1.056	0.996
宁夏	0.98	1.057	1.035
新疆	0.953	1.056	1.006
平均	0.975	1.057	1.030



## 5. 结论

通过以上分析可以看出, 第一, 在 2000~2015 年间, 不管是从时间层面、分省级层面还是区域层面, 绿色全要素生产率的发展都呈现出很大的异质性, 但是绿色技术指数与绿色全要素生产率在这三个层面也都呈现出一定程度的变动趋势, 表明我国的绿色全要素生产率的改善很大程度上依赖于绿色技术进步。第二, 在 2000~2015 年间, 我国绿色效率平缓波动并且几乎都小于 1, 对绿色全要素生产率恶化的作用, 表明我国各地区对新技术的利用效率不高, 应该在新技术推出以后在不同地区采取对应的转化措施, 增强对新技术的吸收和使用效率。第三, 虽然我国沿海地区经济要比内陆地区的经济发达, 但是绿色全要素生产率却仅仅略高于内陆地区, 这可能归因于经济的快速扩张牺牲了资源和环境, 因此在推进沿海地区和内陆地区经济可持续发展时, 要采取不同的政策措施, 东部沿海地区经济的发展不能唯 GDP 论, 要考量能源消耗和环境保护, 可持续发展; 内陆地区也要因地制宜, 挖掘经济发展潜力, 释放活力。本文主要关注了中国各省市的绿色全要素生产率的时空演变特征, 并未就相关影响因素以及其对经济社会发展的影响进行深入细致的研究分析, 因此这是进一步研究的主要方向。

## 参考文献

- [1] Solow, R.M. (1957) Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics*, **39**, 312-320. <https://doi.org/10.2307/1926047>
- [2] Aigner, D.J. and Chu, S.F. (1968) On Estimating the Industry Production Function. *American Economic Review*, **58**, 826-839.
- [3] 杨汝岱. 中国制造业企业全要素生产率研究[J]. *经济研究*, 2015, 50(2): 61-74.
- [4] 余泳泽. 中国省际全要素生产率动态空间收敛性研究[J]. *世界经济*, 2015, 38(10): 30-55.
- [5] Ahmed, E.M. (2012) Green TFP Intensity Impact on Sustainable East Asian Productivity Growth. *Economic Analysis & Policy*, **42**, 67-78. [https://doi.org/10.1016/S0313-5926\(12\)50005-6](https://doi.org/10.1016/S0313-5926(12)50005-6)
- [6] 岳鸿飞, 徐颖, 周静. 中国工业绿色全要素生产率及技术创新贡献测评[J]. *上海经济研究*, 2018(4): 52-61.
- [7] 岳会, 于法稳. 中国棉花绿色全要素生产率及影响因素分析——基于 Malmquist-Luenberger 指数分析[J]. *价格理论与实践*, 2020: 1-5.
- [8] Farrell, M.J. (1957) The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, **120**, 253-290. <https://doi.org/10.2307/2343100>
- [9] Fare, R., Grosskopf, S., Lindgren, B., et al. (1992) Productivity Changes in Swedish Pharmacies 1980-1989: A Non-Parametric Malmquist Approach. *Journal of Productivity Analysis*, **3**, 81-97. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1923-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1923-0_6)
- [10] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004(10): 35-44.
- [11] 邱斌, 杨帅, 辛培江. FDI 技术溢出渠道与中国制造业生产率增长研究: 基于面板数据的分析[J]. *世界经济*, 2008(8): 20-31.