

# Các phương pháp tính toán chỉ số năng suất tổng hợp xanh

Hoàng Minh Thu<sup>1</sup>, Nguyễn Quỳnh Hương<sup>2</sup>, Nguyễn Trí Quan<sup>3</sup> và Lâm Tấn Phát<sup>4</sup>

Ngày nhận bài: 17/3/2026 | Ngày gửi phản biện: 20/3/2026 | Ngày duyệt đăng: 10/4/2026

**Tóm tắt:** Mục tiêu của nghiên cứu này là phân tích và so sánh sự phát triển của các phương pháp đo lường và các ứng dụng của năng suất nhân tố tổng hợp xanh thông qua việc mở rộng việc ước lượng năng suất nhân tố tổng hợp truyền thống với các đầu ra không mong muốn. Nghiên cứu này xem xét tiến trình phát triển của các phương pháp đo lường từ Chỉ số Malmquist đến Malmquist-Luenberger, Chỉ số năng suất Malmquist-Luenberger toàn cục (GML) và các mô hình Malmquist-Luenberger toàn cục dựa trên độ nới lỏng (SBM). Kết quả cho thấy, khi các yếu tố môi trường được đưa vào phân tích, mức năng suất nhân tố tổng hợp xanh đo được thường thấp hơn so với năng suất nhân tố tổng hợp truyền thống, phản ánh sự đánh đổi giữa tăng trưởng kinh tế và chất lượng môi trường. Trên cơ sở đó, nghiên cứu cũng đề xuất một số gợi ý lựa chọn phương pháp ước lượng năng suất nhân tố tổng hợp xanh phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và đặc điểm của bộ dữ liệu.

**Từ khóa:** Năng suất nhân tố tổng hợp xanh, Malmquist-Luenberger, Chỉ số năng suất Malmquist-Luenberger toàn cục, SBM-GML.

## Methods and Applications of Measuring Green Total Factor Productivity Index

**Abstract:** The objective of this study is to synthesise and analyse the development of methods for measuring Green Total Factor Productivity (GTFP) by extending traditional Total Factor Productivity (TFP) estimation to include undesirable outputs. The study reviews the evolution of measurement approaches from the Malmquist index to the Malmquist-Luenberger (ML), Global Malmquist-Luenberger (GML), and more recent Slacks-based Measure Global Malmquist-Luenberger (SBM-GML) models. The synthesis results indicate that when environmental factors are incorporated into the analysis, the measured level of GTFP is generally lower than traditional TFP, reflecting the trade-off between economic growth and environmental quality. Accordingly, the study also offers several suggestions for choosing an appropriate GTFP estimation method that fits the research objectives and the characteristics of the dataset.

**Keywords:** T Green total factor productivity; Malmquist-Luenberger; Global Malmquist-Luenberger; SBM-GML.

### 1. Đặt vấn đề

Trong quá trình phát triển kinh tế, nhiều quốc gia đã đạt được tốc độ tăng trưởng cao nhờ mở rộng sản xuất và gia tăng sử dụng các yếu tố đầu vào như vốn, lao động và năng lượng. Tuy nhiên, quá trình

<sup>1</sup> Phân hiệu Trường đại học Ngoại Thương tại TPHCM; Email: k63.241115181@ftu.edu.vn

<sup>2</sup> Tác giả liên hệ, TS., Phân hiệu Trường đại học Ngoại Thương tại TPHCM  
Email: Nguyenquynhhuong.hcmc@ftu.edu.vn

<sup>3</sup> Phân hiệu Trường đại học Ngoại Thương tại TPHCM; Email: Nguyentriquan1805@gmail.com

<sup>4</sup> Phân hiệu Trường đại học Ngoại Thương tại TPHCM; Email: K63.2412155218@ftu.edu.vn

này thường đi kèm với các tác động tiêu cực đến môi trường, đặc biệt là gia tăng phát thải khí nhà kính và các dạng ô nhiễm khác. Khi các chi phí môi trường không được tính đến trong đánh giá hiệu quả sản xuất, mức độ hiệu quả của nền kinh tế có thể bị đánh giá cao hơn thực tế (Chung et al., 1997; Färe et al., 1994). Trong bối cảnh đó, việc đo lường năng suất nhân tố tổng hợp (Total Factor Productivity - TFP) theo hướng gắn với yếu tố môi trường ngày càng được quan tâm trong nghiên cứu kinh tế. Khái niệm năng suất nhân tố tổng hợp xanh (Green Total Factor Productivity - GTFP) được phát triển nhằm phản ánh đồng thời hiệu quả kinh tế và hiệu quả môi trường của quá trình sản xuất (Chung et al., 1997). Chỉ số này cho phép xem xét không chỉ sản lượng kinh tế mà còn các tác động môi trường phát sinh trong quá trình sản xuất.

Cùng với sự phát triển của khái niệm GTFP, nhiều phương pháp đo lường khác nhau đã được đề xuất nhằm đánh giá năng suất xanh. Các phương pháp phổ biến bao gồm Data Envelopment Analysis (DEA) và các chỉ số năng suất như Malmquist, Malmquist-Luenberger (ML) và Global Malmquist-Luenberger (GML) (Chung et al., 1997; Färe et al., 1994; Oh, 2010). Đặc biệt, Oh (2010) đã đề xuất chỉ số GML nhằm cải thiện khả năng so sánh năng suất giữa các giai đoạn thông qua việc sử dụng tập công nghệ chung cho toàn bộ thời kỳ nghiên cứu.

Bài viết này trình bày cơ sở lý thuyết nền tảng của GTFP, phân tích sự phát triển của các phương pháp đo lường và làm rõ các khoảng trống nghiên cứu hiện nay, để làm tiền đề cho các nghiên cứu thực nghiệm mới chuyên sâu hơn về GTFP trên phương diện toàn cầu, quốc gia, vùng và ngành.

## **2. Tổng quan nghiên cứu và cơ sở lý thuyết**

### **2.1. Khái niệm năng suất nhân tố tổng hợp xanh**

Năng suất nhân tố tổng hợp là một chỉ số quan trọng trong kinh tế học, được sử dụng để đánh giá mức độ hiệu quả của quá trình sản xuất. Trong cách tiếp cận truyền thống, TFP phản ánh phần tăng trưởng sản lượng không thể giải thích bởi sự gia tăng của các yếu tố đầu vào như vốn và lao động (Färe et al., 1994). Khi một nền kinh tế có thể tạo ra nhiều sản lượng hơn với cùng một lượng đầu vào, sự gia tăng này thường được xem là kết quả của tiến bộ công nghệ, cải thiện quản lý hoặc đổi mới tổ chức sản xuất (Färe et al., 1994).

Tuy nhiên, cách đo lường TFP thường không tính đến các tác động môi trường của hoạt động sản xuất. Trong nhiều trường hợp, tăng trưởng kinh tế đạt được thông qua việc sử dụng nhiều năng lượng hơn hoặc thông qua các hoạt động gây ô nhiễm môi trường. Khi các yếu tố này không được đưa vào phân tích, chỉ số TFP có thể phản ánh chưa đầy đủ hiệu quả thực sự của quá trình sản xuất. Để khắc phục hạn chế này, khái niệm GTFP được phát triển nhằm kết hợp yếu tố môi trường vào đo lường năng suất (Chung et al., 1997). Trong cách tiếp cận này, quá trình sản xuất được xem xét thông qua mối quan hệ giữa ba nhóm biến chính: đầu vào, đầu ra mong muốn và đầu ra không mong muốn (Färe et al., 1994). Đầu vào thường bao gồm các yếu tố sản xuất cơ bản như vốn, lao động và năng lượng. Đầu ra mong muốn là các kết quả kinh tế tích cực của quá trình sản xuất, chẳng hạn như giá trị gia tăng hoặc tổng sản lượng. Bên cạnh đó, quá trình sản xuất cũng tạo ra các đầu ra không mong muốn, bao gồm các dạng ô nhiễm môi trường như phát thải CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> hoặc chất thải rắn (Chung et al., 1997).

Việc đưa các đầu ra không mong muốn vào mô hình phân tích cho phép đánh giá chính xác hơn hiệu quả của quá trình sản xuất. Khi các yếu tố ô nhiễm được tính đến, GTFP thường thấp hơn so với TFP truyền thống, cho thấy một phần tăng trưởng kinh tế trước đây có thể đạt được thông qua việc đánh đổi với môi trường (C. Chen et al., 2018; Yu et al., 2022). Vì vậy, GTFP ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về tăng trưởng bền vững.

## 2.2. Sự phát triển các phương pháp đo lường GTFP

Các phương pháp đo lường GTFP đã phát triển qua nhiều giai đoạn khác nhau nhằm khắc phục những hạn chế của các mô hình trước đó.

Trong giai đoạn đầu, nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp Data Envelopment Analysis (DEA) để đánh giá hiệu quả sản xuất và hiệu quả môi trường. DEA là một phương pháp phi tham số sử dụng lập trình tuyến tính để xây dựng đường biên hiệu quả từ dữ liệu quan sát. Phương pháp này có ưu điểm là không cần giả định dạng hàm sản xuất và có thể xử lý đồng thời nhiều đầu vào và đầu ra (Charnes et al., 1978). Trên nền tảng đó, Caves et al. (1982) đặt cơ sở cho chỉ số Malmquist như một công cụ đo lường thay đổi năng suất theo thời gian. Theo hướng tiếp cận này, Woo et al. (2015) gần đây sử dụng DEA kết hợp với chỉ số Malmquist để đánh giá hiệu quả môi trường của năng lượng tái tạo tại các quốc gia thuộc OECD.

Tuy nhiên, DEA truyền thống chỉ phản ánh hiệu quả tại một thời điểm nhất định và chưa thể hiện được sự thay đổi năng suất theo thời gian. Để khắc phục hạn chế này, chỉ số Malmquist được phát triển nhằm đo lường sự thay đổi năng suất giữa các giai đoạn (Färe et al., 1994). Chỉ số này cho phép phân tách tăng trưởng năng suất thành hai thành phần chính là thay đổi hiệu quả kỹ thuật và thay đổi công nghệ.

Mặc dù vậy, chỉ số Malmquist truyền thống chưa xử lý trực tiếp các đầu ra không mong muốn. Trong bối cảnh nghiên cứu môi trường, điều này có thể dẫn đến việc đánh giá cao năng suất của các đơn vị sản xuất dù mức phát thải vẫn cao. Để giải quyết vấn đề này, chỉ số Malmquist-Luenberger (ML) được phát triển nhằm tích hợp các đầu ra không mong muốn vào phân tích. Phương pháp này dựa trên hàm khoảng cách định hướng, cho phép đồng thời tăng đầu ra mong muốn và giảm đầu ra không mong muốn (Chung et al., 1997). Phương pháp ML đã được áp dụng trong nhiều nghiên cứu thực nghiệm, chẳng hạn như nghiên cứu của Shen, Boussemart, và Leleu (2017) trong phân tích năng suất xanh của các quốc gia. Đây là bước chuyển quan trọng từ đo TFP truyền thống sang đo GTFP.

Tuy nhiên, việc áp dụng chỉ số Malmquist để đo GTFP vẫn tồn tại một số hạn chế khi phân tích dữ liệu theo chuỗi thời gian. Cụ thể, phương pháp này xây dựng đường biên công nghệ riêng cho từng giai đoạn, do đó có thể dẫn đến hiện tượng thiếu tính nhất quán khi so sánh năng suất giữa các năm (Pastor & Lovell, 2005). Bên cạnh đó, việc ước lượng TFP bằng chỉ số Malmquist còn có thể gặp vấn đề vô nghiệm và thiếu tính tuần hoàn khi so sánh liên thời gian (Pastor & Lovell, 2005). Để khắc phục hạn chế này, Pastor và Lovell (2005) đã đề xuất chỉ số Malmquist toàn cục (GM). Khác với Malmquist truyền thống, chỉ số GM sử dụng một tập công nghệ chung cho toàn bộ giai đoạn nghiên cứu, nhờ đó cải thiện khả năng so sánh năng suất giữa các thời kỳ. Bởi vì phương pháp ML cũng gặp những vấn đề như vô nghiệm và thiếu tính tuần hoàn khi so sánh liên thời gian, Oh (2010) đã mở rộng từ nghiên cứu của Pastor, Lovell (2005) phát triển nên Chỉ số năng suất Malmquist-Luenberger toàn cục.

Bên cạnh sự phát triển của các chỉ số năng suất, các mô hình DEA cũng được cải tiến nhằm phản ánh chính xác hơn đặc điểm của quá trình sản xuất. Một trong những cải tiến quan trọng là “Mô hình nói lỏng” (Slack-Based Measure - SBM) (Tone, 2001). Khác với các mô hình hướng tâm yêu cầu các biến điều chỉnh theo cùng một tỷ lệ, SBM cho phép xử lý trực tiếp phần dư của từng biến đầu vào và đầu ra (Tone, 2001). Hơn nữa khi kết hợp với chỉ số GML, mô hình SBM-GML cho phép đo lường năng suất xanh chi tiết hơn, đặc biệt trong các trường hợp tồn tại sự dư thừa đầu vào hoặc mức phát thải không đồng đều (Park et al., 2024)

**Bảng 1: Tổng hợp các nghiên cứu về phương pháp đo lường GTFP**

<b>Năm</b>	<b>Tác giả</b>	<b>Phương pháp</b>	<b>Nội dung / đóng góp chính</b>	<b>Bối cảnh dữ liệu</b>	<b>Chỉ tiêu đo lường</b>
1982	Caves et al.	Malmquist (M)	Đặt nền tảng cho đo lường thay đổi năng suất theo thời gian	Nghiên cứu lý thuyết	TFP
1994	Färe et al	DEA-Malmquist	Mở rộng chỉ số Malmquist trong khung DEA để phân rã tăng trưởng năng suất	Các nước công nghiệp hóa	TFP
1997	Chung et al	Malmquist-Luenberger (ML)	Lần đầu đưa đầu ra không mong muốn vào đo lường năng suất thông qua hàm khoảng cách định hướng	Công nghiệp Hoa Kỳ	GTFP
2001	Tone	Mô hình nói lỏng (Slacks-based measure - SBM)	Đề xuất mô hình phi hướng tâm xử lý trực tiếp phần dư (slacks) ở đầu vào và đầu ra	Nghiên cứu phương pháp DEA	Hiệu quả kỹ thuật
2005	Pastor & Lovell	Global Malmquist	Đưa ra công nghệ tham chiếu toàn cục, tăng khả năng so sánh liên thời gian	Các nước châu Âu	TFP
2010	Oh	Malmquist-Luenberger toàn cục (Global Malmquist-Luenberger - GML)	Phương pháp GML với tập công nghệ toàn cầu, khắc phục tốt hơn vấn đề vô nghiệm và tính tuần hoàn của ML	26 nước OECD	GTFP
2024	Park et al.	Chỉ số Malmquist-Luenberger toàn cục dựa trên độ nói lỏng SBM-GML (Slacks-based Measure Global Malmquist-Luenberger)	Kết hợp mô hình slacks-based measure (SBM) với chỉ số Global Malmquist-Luenberger (GML), xử lý trực tiếp phần dư ở đầu vào, đầu ra mong muốn và đầu ra không mong muốn, đảm bảo khả năng so sánh năng suất nhất quán giữa các quốc gia và qua thời gian.	Các nước OECD	GTFP

*Nguồn: Tổng hợp của các tác giả*

### **3. Các nghiên cứu thực nghiệm áp dụng các phương pháp tính năng suất các nhân tố tổng hợp xanh**

#### ***3.1. Xu hướng ứng dụng năng suất các nhân tố tổng hợp xanh trong nghiên cứu***

Các nghiên cứu về GTFP hiện nay chủ yếu sử dụng dữ liệu bảng dài hạn ở nhiều cấp độ không gian, từ quốc gia, tỉnh, thành phố đến ngành kinh tế. Ở cấp tỉnh, nhiều nghiên cứu tập trung vào 30-31 tỉnh của Trung Quốc trong giai đoạn 2000-2020; ở cấp thành phố hoặc cụm đô thị, thời gian quan sát thường khoảng 10-15 năm; trong khi ở cấp quốc tế đã có nghiên cứu mở rộng tới hàng trăm quốc gia hoặc so sánh giữa các nhóm nước lớn như BRICS và G7 (C. Chen et al., 2018; Y. Chen et al., 2021; C. Cheng et al., 2022; Li & Chen, 2021). Nhìn chung, xu hướng khá rõ là GTFP xanh thường được đo lường trên dài tương đối dài, thường từ 10 năm trở lên, nhằm bảo đảm khả năng phản ánh biến động động học và tăng độ ổn định của chỉ số năng suất.

Về phạm vi áp dụng, GTFP xanh đã mở rộng từ năng lượng và công nghiệp sang nông nghiệp, lâm nghiệp, logistics, thủy sản và bối cảnh đô thị, nhưng bằng chứng thực nghiệm vẫn tập trung mạnh ở Trung Quốc và các nền kinh tế phát thải cao, cho thấy literature còn mất cân đối về không gian nghiên cứu (Y. Chen et al., 2021; Wang & Long, 2024).

Quan trọng là việc tích hợp các đầu ra không mong muốn như CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, chất thải rắn và ô nhiễm nông nghiệp vào khung đo lường GTFP. Khi các đầu ra này được tính đến, năng suất xanh đo được thường thấp hơn TFP truyền thống, với hàm ý rằng một phần tăng trưởng trước đây đạt được thông qua sự đánh đổi với môi trường (C. Chen et al., 2018; Y. Chen et al., 2021; Yu et al., 2022). Dù vậy, cách lựa chọn và đo lường đầu ra không mong muốn giữa các nghiên cứu vẫn chưa hoàn toàn thống nhất, nên khả năng so sánh chéo giữa các bối cảnh vẫn còn là một hạn chế nhất định.

#### ***3.2. Sự phát triển về phương pháp luận trong đo lường năng suất các nhân tố tổng hợp xanh***

Về phương diện đo lường GTFP, sau khi ML được sử dụng để đưa các đầu ra không mong muốn vào phân tích, GML ngày càng trở thành lựa chọn phổ biến trong các nghiên cứu chuỗi thời gian gần đây (C. Cheng et al., 2022; Ma et al., 2025; Wang & Long, 2024). Nguyên nhân là ML dựa trên công nghệ tham chiếu theo từng kỳ nên có thể gặp vấn đề vô nghiệm, thiếu tính tuần hoàn và đôi khi tạo ra hiện tượng thoái lui công nghệ mang tính cơ học do sự co vào của đường biên (Oh, 2010). Ngược lại, GML xây dựng tập công nghệ toàn cầu cho toàn bộ giai đoạn, nhờ đó cải thiện tính nhất quán liên thời gian và độ tin cậy của so sánh động (Ma et al., 2025; Oh, 2010).

Song song với đó là sự chuyển dịch từ các mô hình hướng tâm sang các mô hình phi hướng tâm như SBM, đặc biệt khi kết hợp với GML. Các nghiên cứu cho thấy mô hình hướng tâm có thể bỏ qua phần dư ở đầu vào và đầu ra, từ đó dễ đánh giá quá cao hiệu quả môi trường và GTFP xanh, nhất là khi các đơn vị có mức điều chỉnh không đồng đều giữa đầu vào, đầu ra và phát thải (C. Chen et al., 2018; S. Cheng et al., 2023). Vì vậy, các cấu trúc như SBM-GML ngày càng được ứng dụng nhiều hơn do cho phép xử lý trực tiếp phần dư, tích hợp đầu ra không mong muốn và tăng khả năng so sánh liên thời gian (Zhan et al., 2022). Tuy nhiên, với panel ngắn hoặc dữ liệu hạn chế, ML hoặc SBM-ML vẫn có thể phù hợp nếu nhận thức rõ các đánh đổi đi kèm (C. Cheng et al., 2022; Li & Chen, 2021).

### **4. Các tiêu chí để lựa chọn phương pháp tính năng suất các nhân tố tổng hợp xanh**

Dựa trên các nghiên cứu đã tổng hợp, việc lựa chọn phương pháp tính GTFP xanh cần gắn với mục tiêu nghiên cứu và đặc điểm dữ liệu, thay vì chỉ dựa vào mức độ phổ biến của mô hình. Trong phạm vi các phương pháp đo lường GTFP xanh, quá trình lựa chọn có thể được nhìn nhận như một chuỗi quyết định có điều kiện liên quan đến thời gian quan sát, cấu trúc công nghệ và đặc điểm phần dư.

Trước hết, nếu nghiên cứu tập trung vào đo lường GTFP xanh với dữ liệu bảng theo chuỗi thời gian, cần cân nhắc giữa chỉ số ML và cấu trúc GML. Với các bộ dữ liệu có thời gian quan sát tương đối ngắn

và mục tiêu phân tích không quá nhấn mạnh khả năng so sánh liên thời gian trên một biên sản xuất toàn cục, ML hoặc các biến thể như SBM-ML vẫn được sử dụng rộng rãi và vận hành ổn định (Y. Chen et al., 2021; Li & Chen, 2021). Tuy nhiên, với các nghiên cứu dùng panel với thời gian dài (khoảng 8–10 năm trở lên), GML thường là lựa chọn phù hợp hơn vì giảm rủi ro vô nghiệm, cải thiện tính tuần hoàn của chỉ số và tăng độ tin cậy của so sánh động trong dài hạn (Oh, 2010).

Một bước quan trọng nữa là đánh giá mức độ tồn tại phần dư (slacks) ở đầu vào, đầu ra mong muốn và đầu ra không mong muốn. Khi các đơn vị quan sát có dư thừa đầu vào, thiếu hụt đầu ra hoặc mức phát thải cần cắt giảm không đồng đều, các mô hình hướng tâm thường dẫn đến đánh giá cao hơn thực tế về hiệu quả xanh do buộc mọi biến điều chỉnh theo cùng một tỷ lệ (Zhan et al., 2022). Trong bối cảnh đó, các mô hình phi hướng tâm như SBM hoặc EBM sẽ phù hợp hơn vì cho phép xử lý trực tiếp từng phần dư và tích hợp tốt hơn các đầu ra không mong muốn (Ma et al., 2025).

Như vậy, trong phạm vi các phương pháp tính GTFP, lựa chọn mô hình nên được hiểu như một quá trình ra quyết định theo điều kiện, chứ không phải tìm kiếm một mô hình tốt nhất và duy nhất. Các tiêu chí chính bao gồm: (i) Thời gian của bộ dữ liệu (ngắn hay dài); (ii) Mức độ phức tạp của cấu trúc phát thải và phần dư; và (iii) Nhu cầu so sánh động chặt chẽ qua thời gian (Li & Chen, 2021). Theo hướng đó, SBM GML và các biến thể gần gũi có thể được xem là mô hình phù hợp cho nhiều nghiên cứu GTFP hiện nay, đặc biệt khi dữ liệu có thời gian đủ dài và mục tiêu là đo lường tăng trưởng xanh một cách nghiêm ngặt (Ma et al., 2025). Tuy nhiên, đây không phải là lựa chọn duy nhất đúng trong mọi trường hợp; các mô hình như ML hoặc SBM ML vẫn hoàn toàn phù hợp khi panel ngắn, dữ liệu đơn giản hơn và trọng tâm nghiên cứu không đặt nặng yêu cầu về biên công nghệ tổng thể (Li & Chen, 2021).

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này cho thấy các phương pháp đo lường GTFP đã phát triển theo hướng ngày càng tích hợp tốt hơn các đầu ra không mong muốn như phát thải và chất thải, từ chỉ số Malmquist truyền thống đến ML, GML và các biến thể phi hướng tâm như SBM-GML. Tổng hợp các nghiên cứu trước cho thấy khi yếu tố môi trường được đưa vào phân tích, mức GTFP đo được thường thấp hơn TFP truyền thống, phản ánh rõ hơn sự đánh đổi giữa tăng trưởng kinh tế và chất lượng môi trường. Đồng thời, các nghiên cứu gần đây nghiêng về GML và SBM-GML nhờ khả năng cải thiện tính so sánh liên thời gian và xử lý phần dư trong dữ liệu. Tuy nhiên, không có một mô hình tối ưu cho mọi bối cảnh; việc lựa chọn phương pháp cần gắn với mục tiêu nghiên cứu, chiều dài thời gian của dữ liệu bảng và mức độ phức tạp của các đầu ra không mong muốn.

## Tài liệu tham khảo

1. Caves, D. W., Christensen, L. R., & Diewert, W. E. (1982). The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity. *Econometrica*, 50(6), 1393–1414. <https://doi.org/10.2307/1913388>
2. Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
3. Chen, C., Lan, Q., Gao, M., & Sun, Y. (2018). Green Total Factor Productivity Growth and Its Determinants in China's Industrial Economy. *Sustainability*, 10(4), 1052. <https://doi.org/10.3390/su10041052>
4. Chen, Y., Miao, J., & Zhu, Z. (2021). Measuring green total factor productivity of China's agricultural sector: A three-stage SBM-DEA model with non-point source pollution and

- CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128543>
5. Cheng, C., Yu, X., Hu, H., Su, Z., & Zhang, S. (2022). Measurement of China's Green Total Factor Productivity Introducing Human Capital Composition. *IJERPH*, 19(20), 1–19.
  6. Cheng, S., Addis, A. K., Chen, L., & Zhu, Z. (2023). Sustainable development efficiency and its influencing factors across BRICS and G7 countries: An empirical comparison. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1115459. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1115459>
  7. Chung, Y. H., Färe, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229–240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
  8. Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *The American Economic Review*, 66–83.
  9. Li, Y., & Chen, Y. (2021). Development of an SBM-ML model for the measurement of green total factor productivity: The case of pearl river delta urban agglomeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111131>
  10. Ma, M., Yang, Y., Ma, Y., & Wang, Z. (2025). Evaluation and heterogeneity of the green total factor productivity of Shandong Province, China: A super-SBM and GML analysis. *Scientific Reports*, 15(1), 21901. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08160-6>
  11. Oh, D. (2010). A global Malmquist-Luenberger productivity index. *Journal of Productivity Analysis*, 34(3), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0178-y>
  12. Park, N. R., Yun, H. S., & Choi, C. H. (2024). Green Trade and Cultural Innovation: Examining the Impact on GTFP and Greenhouse Gas Emissions in OECD Countries. *Sustainability*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/su16198339>
  13. Pastor, J. T., & Lovell, C. A. K. (2005). A global Malmquist productivity index. *Economics Letters*, 88(2), 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2005.02.013>
  14. Shen, Z., Boussemart, J.-P., & Leleu, H. (2017). Aggregate green productivity growth in OECD's countries. *International Journal of Production Economics*, 189, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.04.007>
  15. Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498–509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
  16. Wang, J., & Long, F. (2024). Grain industrial agglomeration and grain green total factor productivity in China: A dynamic spatial durbin econometric analysis. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26761>
  17. Woo, C., Chung, Y., Chun, D., Seo, H., & Hong, S. (2015). The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy: A Malmquist index analysis of OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.070>
  18. Yu, Z., Lin, Q., & Huang, C. (2022). Re-Measurement of Agriculture Green Total Factor Productivity in China from a Carbon Sink Perspective. *Agriculture*, 12(12), 1–26.
  19. Zhan, X., Li, R. Y. M., Liu, X., He, F., Wang, M., Qin, Y., Xia, J., & Liao, W. (2022). Fiscal decentralisation and green total factor productivity in China: SBM-GML and IV model approaches. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.989194>