Journal of Digital Convergence
Vol. 20. No. 5, pp. 375-381, 2022

ISSN 2713-6434 / eISSN 2713-6442
https://doi.org/10.14400/JDC.2022.20.5.375

# DEA-Malmquist 지수를 이용한 중국 환경효율에 관한 평가 연구

LU YULIN, HE YAN*
목원대학교 공공정책학과 학생

# Research on Eco-efficiently Evaluation of China Based on DEA-Malmquist Index

LU YULIN, HE YAN*
Student, Department of Public Policy, Mokwon University

요 약 본 연구는 중국 30개 성시를 연구 대상으로 하여 정태적, 동태적 두 가지 각도에서 연구의 시발점으로 하였으며, DEA-BCC 모델과 Malmquist 지수를 사용하여 2011~2020년 중국 30개 성시의 환경 효율성을 산정하였다. 연구에 따르면 중국 30개 성시의 정태 환경 효율성은 평균 0.643으로 전국 범위에서 뚜렷한 차이를 보인다. Beijing, Shanghai는 환경 효율성이 유효하고 나머지 28개 성시는 모두 차원이 다른 비효율 상태를 가지고 있다. 구역발전에서도 차별성이 있어 전반적으로 동고서저형 공간 구도를 보인다. 전국 30개 성시의 환경 효율성인 Malmquist 지수는 상승하는 성장세를 보이며 기술진보가 주요한 추진력이 된다. 향후 정책에서는 동부지역의 방사선 견인능력을 높이고 각 구역 간 시너지를 강화하여 구역 우위를 충분히 발휘해야 할 것이다. 그리고 산업구조 최적화, 과학기술 수준 제고, 전국 환경 효율성의 상승을 견인하여 녹색 발전을 실현한다.

주제어 : 환경 효율성; DEA 모델; 중국; 동태; 정태; Malmquist 지수

Abstract The DEA-BCC model. And the Malmquist index have been used, from static and dynamic perspectives, to measure the eco-efficiency of 30 cities and provinces in China from 2011 to 2020. The results shows that: the average static eco-efficiency of 30 cities and provinces in China is 0.643. Differences exists all over China. While Shanghai and Beijing are ecologically efficient, other 28 cities and provinces are faced with different extents of inefficiency. There are also differences among regions, which generally show the spatial distribution pattern with high efficiency in the eastern regions while low in the western regions. The Malmquist index of eco-efficiency in total 30 cities and provinces shows a healthy growth trend, and the technological progress. Acts as its main driving force. Therefore, eastern regions should enhance the. radiation capacity, strengthen the synergy among regions, give full play to. The advantages of each regions. It is sensible to improve the eco-efficiency by means of optimizing the industrial structure, enhancing the technological level and improving eco-efficiency of China and realizing green development.

Key Words : eco- efficiency; DEA model; China; Dynamics; Static; Malmquist index

*Corresponding Author : HE YAN(940806heyan@naver.com)
Received May 2, 2022 Revised May 12, 2022
Accepted May 20, 2022 Published May 28, 2022

## 1. 서론

중국은 개혁개방 이래, 사회경제가 비약적으로 발전하여 세계가 주목하는 많은 성과를 이루었다. 그러나 이러한 경제의 급속한 성장은 주로 고투입, 고소비, 고오염의 조방식 발전 패턴에 의존하고 있다. 이런 패턴으로 경제발전이 추진되면서 많은 부정적인 문제점이 발생했다. 자원 소모, 온난화, 계절적 스모그 등의 문제가 이어져 중국 생태환경의 파괴를 초래하였다. 따라서 중국 생태문명 건설 수준 및 발전 추세를 어떻게 과학적이고 효과적으로 측정할 것인가가 현재 중국 경제, 자원, 환경 조화 발전에서 직면한 핵심 과제 중 하나가 될 것이다. 경제, 자원, 생태 등 각 방면의 종합이익을 고려한 환경효율은 자원과 환경의 조화로운 발전을 촉진하고 생태 문명을 함께 건설하는 중요한 접점이 된다.

환경효율의 개념은 미국 학자인 Schaltegger와 Sturm에 의해 최초로 제시되었다[1]. 1992년 WBCSD는 처음으로 환경적 효율을 일종의 비즈니스 개념으로 제시하였다. 1996년 BASE그룹은 제품 생산의 관점에서 환경효율의 개념을 규정했다. 1998년 OECD는 정부, 산업체, 기타 조직으로 개념을 확대했다[2]. 이로써 환경효율은 학계와 재계의 광범위한 이정과 수용을 받아들여 경제와 환경의 조화로운 발전을 측정하는 중요한 참고자료가 되었다. 현 단계에서 환경효율의 연구는 주로 생태효율 적용과 환경효율 산정의 두 가지 측면에 집중되어 있다. 환경 효율성 응용에 있어서 학자들은 이를 지역[3-5], 도시[6, 7], 산업[8-10], 산업[11-13], 공업단지[14], 제품[15] 등의 다양한 분야에 폭넓게 적용하여 적지 않은 연구 성과를 거두었다. 환경 효율성 산정에 있어 학계에서는 DEA와 그 확장 방법이 주를 이룬다. 예를 들어 DENG Bo 등은 환경 변수의 통제 불능성을 고려해 3단계 DEA 모델을 적용해 지역 환경 효율성을 산정했다.[4]; YANG Jia-wei 등은 비기대 산출을 고려해 네트워크 DEA 모델을 적용해 지역 환경 효율성을 산정했다[16]; WU Zhenhua 등은 환경 효율성 산정의 정확도를 높이기 위해 Bootstrap-DEA 방법을 채택했다[17]. 또한, 환경 효율성을 측정하기 위해 DEA 모델을 다른 모델 방법과 결합한 방식으로 측정하는 학자들도 있다. 예를 들어, WU Xiaoqing[18], LI Jian[19], CHENG Xiaojuan[11]의 연구는 계층 분석법(Analytic Hierarchy Process), 비모수 거리 함수법(Non-parametricDistance Function), 주성분 분석법(Principal Component Analysis)과 DEA모델을 각각 결합하여 관련 분야의 환경 효율성을 산정하였다. 선행 연구에서 환경 효율성에 관한 연구 시간 범위가 짧고, 데이터 업데이트가 시기적절하지 않거나 변수 데이터가 포괄적이지 않은 등의 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구는 중국 30개 성시의 2011~2020년까지 10년간의 데이터를 연구 대상으로 하였다. 먼저 DEA 모델 기반의 환경 효율성 투입과 산출 지표 체계를 구축한다. 이후 DEA-BCC 모델을 Malnquist 지수 방법과 효과적으로 결합한다. 그리고 정태적이고 동태적인 두 가지 관점에서 환경 효율성을 측정한다. 중국 환경 효율성의 계량화된 연구를 위한 새로운 시각과 방법을 제공함으로써 정부 및 유관 부처에 맞춤형 환경정책을 수립할 수 있는 의사 결정의 근거가 마련되길 바란다.

## 2. 연구변수 및 연구 방법

### 2.1 연구변수

투입산출지표가 지역의 환경 효율성에 영향을 미치는 요인은 다양하며, 투입산출지표를 선정할 때 이들 간의 상호의존관계를 충분히 고려하여야 한다. DEA 모형의 특수성을 고려할 때 지표 간의 선형 상관관계는 가급적 피해야 한다. 본 연구에서는 데이터 획득 가능성과 이전 문헌[6,24]을 참고한 기초를 고려하여 생태 효율성 지표 체계를 구성한다. 자원 소비 지표와 환경오염지표를 투입지표로, 경제적 가치를 산출지표로 삼는 것은 구체적으로 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Environmental Efficiency Evaluation Index System

| Index | Classification | Index composition | content |
|---|---|---|---|
| Input index | Resource consumption | Energy consumption | Electricity consumption |
| | | Water resources usage | Total water consumption |
| | | Number of labor force | Number of employment in environmental protection |
| | Pollution of the environment | Discharge of waste water | Chemical oxygen demand |
| | | Exhaust gas discharge | Sulfur dioxide emissions |
| | | Ammonia nitrogen emission | Ammonic nitrogen emissions |
| | | Solid waste discharge | Solid waste production |
| Output index | | Total econmic development | Regional GDP |

중국 30개 성시의 환경효율의 투입산출지표에서 데이터 시간 스팬은 2011~2020년이다. 모든 데이터는 중국 국가통계국에서 연도별 '중국통계연감', '중국 환경통계연감', '중국노동통계연감'으로 반포되었으며 출처는 진실하고 믿을 만하다.

## 2.2 연구 방법

### 2.2.1 DEA-BCC

Charnes, Cooper 등은 1978년에 DEA-CCR 모델을 제안했다. 이 모형은 규모에 대한 수익 (Returns to scale) 불변에 따른 효율성을 산정하였고, 규모에 대하여 수익이 가변적인 실태를 고려하지 않았다[20]. 이어 Banker, Charnes, Cooper 등이 규모에 대한 수익이 가변적인 상황의 DEA-BCC 모델을 제시했다. 기술 효율성(TE)을 순수 기술효율성(PTE)과 규모 효율(SE), 즉, TE=PTE×SE로 분해한다[21]. DEA모델은 투입지향형과 산출지향형으로 나뉜다. 투입지향형은 산출 불변을 전제로 투입을 줄임으로써 효율성을 높이는 것이다. 산출지향형은 투입 불변을 전제로 산출을 늘려 효율성을 높이는 것이다. 본 연구에서는 다음과 같은 투입지향형 DEA-BCC 모델을 채택한다.

$$Min\theta$$
$$s.t\begin{cases}\sum_{j}^{n} \lambda jXj + S^{-} = \theta Xk \\ \sum_{j}^{n} \lambda jYj - S^{+} = Yk \\ \sum_{j}^{n} \lambda j = 1 \\ S^{+} \geq 0,\ S^{-} \geq 0, \lambda j \geq 0, j = 1,2,\cdots,n\end{cases}$$

그 중 $\theta$는 스칼라, $\lambda$는 $N\times 1$의 벡터 상수(Vector Constant)로 풀이된 $\theta$값은 유닛($DUM_j$)의 효율값으로 하며 일반적으로 $\theta \leq 1$가 있고 $\theta = 1$인 경우 해당 유닛은 기술이 유효하고 프론티어에 위치한다는 것을 의미한다.

### 2.2.2 Malmquist 지수 모델 방법

Malmquist 지수는 Malmquist에 의해 제안되었으며, Caves 등이 1982년에 이 지수를 생산성 변화 산정에 처음 적용해 이를 Malmquist 생산성 지수로 명명했다[22]. 1994년 Fare 등은 Malmquist 지수와 DEA 이론을 결합하여 t와 t+1기를 참조로 하는 Malmquist 생산성 지수를 구축하여 Malmquist 지수가 널리 활용되게 하였다[23]. 구체적인 공식은 다음과 같다.

$$m(x^{t}, y^{t}, x^{t+1}, y^{t+1}) = [\frac{Dc^{t}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Dc^{t}(x^{t}, y^{t})} \times \frac{Dc^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Dc^{t+1}(x^{t}, y^{t})}]^{1/2}$$

$M(x^{t}, y^{t}, x^{t+1}, y^{t+1}) > 1$일 때 t에서 t+1기까지 총요소생산성 수준이 향상되고, 반대로 $M(x^{t}, y^{t}, x^{t+1}, y^{t+1}) < 1$가 되면 t에서 t+1기까지 총요소생산성 수준이 하락하고 구체적인 Malmquist 생산성지수는 다음과 같이 분해된다고 설명한다.

$$M = EFFCH \times TECHCH$$
$$M(x^{t}, y^{t}, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{Dc^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{Dc^{t}(x^{t}, y^{t})} \times [\frac{D^{t}c(x^{t+1}, y^{t+1})}{Dc^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D^{t}c(x^{t}, y^{t})}{Dc^{t+1}(x^{t}, y^{t})}]^{1/2}$$

그 중 $EFFCH$는 기술 효율성 변화 지수로, $EFFCH > 1$이 의사 결정 유닛이 생산 프론티어에 가까울수록 기술 효율성이 모두 개선되고, 반대로 $EFFCH < 1$의 경우 의사 결정 유닛이 기존 기술 활용에 그다지 좋지 않다는 것을 나타낸다. $TECHCH$는 기술진보변화지수이며, $TECHCH > 1$인 경우 기술진보나 기술혁신이 나타나고 생산 프론티어는 전면 이동을 지향한다는 것을 보인다.

# 3. 결과 분석

## 3.1 정태 분석

Stata 소프트웨어를 사용하여 종합 효율성 값, 순수 기술 효율성 값, 규모 효율성 값을 포함한 중국 30개 성시의 2011~2020년 환경 효율성 값을 산정했다. 구체적으로 표 2 참조이다.

표 2에 따르면, 중국 30개 성시 환경 효율치는 0.643이다. 성급 차원에서 보면 환경 효율성 상위 10개 성시에는 Beijing, Shang hai, Tianjing, Zhejiang, Guangdong, Hu nan, Chongqing, Shandong, Jiangsu, Fu jian이다. 그중 Beijing과 Shanghai의 생태효율은 1에 달해 프론티어에 있다. 환경 효율성 순위 마지막 10위는 Guangxi, Hebei, Yunnan, Guizhou, Neimenggu, Shanxi, Qinghai, Gansu, Xinjiang, Ningxia이다. 그중 Ningxia의 환경 효율치는 0.189로 전국 평균치의 29.39%에 불과해 환경 효율성이 지극히 낮다. 상위 10위권의 성시 중 대다수는 동부 연해지역에 있고, 경제가 발달하였으며 환경보호 의식이 높은 편이다. 환경 효율성 평균치보다 낮은 성시는 거의 중서부 지역에 있다. 이들은 뚜렷한 계단 효과를 나타낸다. 구역 차원에서는 동부구역 환경 효율성 수준이 0.798로 가장 높아 전국 평

균을 훨씬 웃돈다. 중부구역 환경 효율치는 0.681로 전국 평균치를 약간 웃도는 수준이다. 서부구역 환경 효율치는 0.459로 전국 평균보다 훨씬 낮다.

Table 2. Average Environmental Efficiency of 30 Provinces in China (2011-2020)

| Name | Environmental efficiency | Order | Name | Environmental efficiency | Order |
|---|---|---|---|---|---|
| Beijing | 1.000 | 1 | Anhui | 0.663 | 16 |
| Shanghai | 1.000 | 2 | Henan | 0.640 | 17 |
| Tianjin | 0.964 | 3 | Hainan | 0.608 | 18 |
| Zhejiang | 0.883 | 4 | Shannxi | 0.601 | 19 |
| Guangdong | 0.843 | 5 | Liaoning | 0.531 | 20 |
| Hunan | 0.842 | 6 | Guangxi | 0.509 | 21 |
| Chongqing | 0.838 | 7 | Hebei | 0.496 | 22 |
| Shandong | 0.837 | 8 | Yunnan | 0.476 | 23 |
| Jiangsu | 0.821 | 9 | Guizhou | 0.452 | 24 |
| Fujian | 0.798 | 10 | Neimenggu | 0.422 | 25 |
| Jilin | 0.791 | 11 | Shanxi | 0.372 | 26 |
| Hubei | 0.771 | 12 | Qinghai | 0.316 | 27 |
| Jiangxi | 0.700 | 13 | Gansu | 0.282 | 28 |
| Sichuan | 0.692 | 14 | Xinjiang | 0.276 | 29 |
| Heilongjiang | 0.672 | 15 | Ningxia | 0.189 | 30 |
| The East | 0.798 | | The Central | 0.681 | |
| The West | 0.459 | | Average | 0.643 | |

종합하면, 중국의 3대 구역에서 뚜렷한 차별성을 보이며 전반적으로 동고서저 구도를 보인다. 동부구역은 천혜의 입지로 탄탄한 경제, 과학기술, 교육역량을 통해 산업구조가 합리적이며 발전방식이 녹색 성장에 이르면서 환경 효율성이 점점 높아질 것으로 보인다. 중부구역은 전국 평균과 비슷한 수준이며, 그 투입과 산출 사이에는 큰 차이가 있으나 여전히 상승 여지가 강하다. 서부구역은 내륙지역에 위치해 경제발전이 낙후되고 자연환경이 비교적 열악해서 투입과 산출 비중의 격차가 지나치게 크므로 정부의 강력한 개입이 요구된다. 이들 지역은 동부의 경험을 학습해 자체의 환경효율을 높이고 녹색 발전을 실현할 필요성이 있다.

## 3.2 동태분석

중국의 30개 성시 환경효율의 변화 추이를 더 자세히 분석하기 위한 연구이다. 본 연구는 중국 30개 성시의 2011~2020년 사이 패널 데이터를 사용한다. Malmquist 지수모형을 이용하여 효율 변동치를 산정한다. 그중 Mal은 동태 변동을 반영하는 Malmquist 지수, EC는 기술효율성, TC는 기술진보를 나타내며 구체적으로 표 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. Annual average Malmquist Index and Decomposition for 30 provinces in China (2011-2020)

| Name | Mal | EC | TC | Order | Name | Mal | EC | TC | Order |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Guizhou | 1.107 | 1.049 | 1.052 | 1 | Hebei | 1.049 | 0.976 | 1.049 | 16 |
| Zhejiang | 1.098 | 1.003 | 1.057 | 2 | Guangdong | 1.049 | 1.014 | 1.034 | 17 |
| Qinghai | 1.096 | 0.975 | 1.079 | 3 | Qinghai | 1.049 | 0.982 | 1.038 | 18 |
| Shanghai | 1.083 | 1.000 | 1.063 | 4 | Jiangxi | 1.044 | 0.998 | 1.035 | 19 |
| Chongqing | 1.080 | 1.020 | 1.040 | 5 | Tianjin | 1.043 | 0.982 | 1.044 | 20 |
| Yunnan | 1.075 | 1.008 | 1.051 | 6 | Ningxia | 1.040 | 0.987 | 1.042 | 21 |
| Jiangsu | 1.073 | 1.016 | 1.039 | 7 | Gansu | 1.037 | 0.976 | 1.039 | 22 |
| Henan | 1.071 | 1.022 | 1.036 | 8 | Shannxi | 1.033 | 0.989 | 1.028 | 23 |
| Hubei | 1.062 | 1.001 | 1.041 | 9 | Hainan | 1.026 | 0.983 | 1.022 | 24 |
| Shandong | 1.062 | 0.984 | 1.057 | 10 | Guangxi | 1.020 | 0.972 | 1.039 | 25 |
| Sichuan | 1.061 | 0.999 | 1.045 | 11 | Liaoning | 1.016 | 0.969 | 1.032 | 26 |
| Fujian | 1.061 | 1.012 | 1.039 | 12 | Neimenggu | 1.009 | 0.964 | 1.018 | 27 |
| Anhui | 1.056 | 1.006 | 1.031 | 13 | Jilin | 0.995 | 0.947 | 1.039 | 28 |
| Beijing | 1.054 | 1.000 | 1.042 | 14 | Heilongjiang | 0.986 | 0.938 | 1.032 | 29 |
| Hunan | 1.050 | 0.991 | 1.062 | 15 | Xin jiang | 0.969 | 0.942 | 0.989 | 30 |
| The East | 1.056 | 0.994 | 1.043 | | The Central | 1.039 | 0.986 | 1.039 | |
| The West | 1.048 | 0.989 | 1.038 | | All over the country | 1.048 | 0.990 | 1.040 | |

표 3에 따르면, 2011~2020년, 중국 30개 성시 환경효율성의 Malmquist 지수의 평균은 1.048로 전국 환경효율성이 줄곧 상승 상태였음을 말해준다. 전국 27개 성시의 환경 효율성인 Malmquist 지수는 1보다 크다. Jilin, Heilongjiang, Xinjiang 3개의 성시만 1 미만으로 유효상태에 이르지는 못했지만, 유효상태에 무한 근접해 상승 잠재력이 크다는 설명이다. Malmquist 지수의 연평균 성장률은 4.8%로 10년간 전국 환경 효율성의 고속성장을 보인다. 기술 효율성 EC의 연평균 성장률 -1%, 기술진보 TC의 연평균 성장률 4%는 전국 환경 효율성 성장이 기술진보나 기술혁신 때문이라고 설명된다. 성급 차원에서 보면 전국적으로 18개 성시에 있는 Malmquist 지수가 평균치를 넘어 전국의 60%를 차지한다. Guizhou는 환경 효율성은 낮지만, 환경 효율성은 10.7%로 가장 빠르게 증가해 전국 평균 성장 속도의 2.23배에 달한다. 구역 구도로 볼 때 동부지역의 연평균

Malmquist 지수는 1.056으로 전국 평균 수준을 초과해 전국 발전을 견인하는 중요한 동력이다.

그러나 서부지역 환경 효율성의 연평균 성장수준은 1.048로 전국 평균과 같은 수준으로 환경 효율성의 총량은 낮으나 발전속도가 빠르고 성장 잠재력이 크다는 것을 말해준다. 중부구역의 Malmquist 지수는 1.039로 전국 평균을 밑돌고 있어 환경 효율성은 증가하고 있지만, 성장세는 둔화하고 있다는 설명이다. 그 성장 둔화를 초래한 주요 원인은 기술 효율성 EC 성장률이 -1.4%로 중부지역은 구조를 조정하고 구성을 최적화해 기술 효율성을 제고해야 한다는 설명이다.

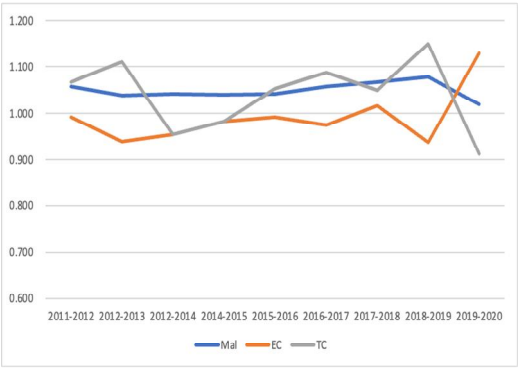


Fig. 1. 2011-2020 China's 30 provinces environmental efficiency development trend chart

그림 1 중국 30개 성의 10년간 발전 동향을 보면 전국 2011~2020년의 발전은 비교적 평온하다. 그 중 Malmquist 지수는 모두 1 이상이며 전국은 상향 발전 태세에 속한다. 하지만 기술 효율성 지수는 대부분 시간이 1 이하여서 전국 환경효율 발전을 제약하는 중요한 요소이다. 기술진보 TC지수의 절대다수가 1 이상에 있다는 것은 기술진보와 혁신이 중국의 환경효율 발전을 주도하는 중요한 추진력이라는 설명이다.

## 4. 결론

환경 효율성의 정태 산정을 보면 중국 30개 성시 전체의 환경 효율성은 0.643이다. Beijing, Shanghai 환경 효율성은 1로 프론티어에 있다. 나머지 28개 시·도는 모두 차원이 다른 비효율 상태로 상승할 공간이 크다. 성급 차원에서 보면 중국 30개 성시에는 큰 차별성이 존재하고 동부지역은 평균 효율성 수준이 높아 선두에 있다. 중부지역의 수준은 전국 수준과 대체로 동일하다. 서부지역은 환경 효율성이 가장 낮다. 전국으로 보면 계단식 모양의 형태를 띠고 있다. 따라서 동부 연안구역에서 중, 서부지역으로 방사선 형태로 방사해 견인능력을 강화하는 방사선 효과를 형성하기 위해 노력해야 한다. 또한, 지역 간 시너지를 강화해 동부지역의 정책, 자금, 인프라, 기술진보와 교육에서의 강점을 충분히 발휘할 수 있도록 해야 한다. 에너지 소비가 낮고 오염이 적으며 부가가치가 높은 첨단기술 기업, 금융업, 관광업 등의 제3산업을 발전시켜 산업구조에서 제3산업의 비중을 높이고 산업구조의 최적화를 달성하도록 추진하여야 한다. 중서부 지역의 자원 우세를 발휘해 에너지 절감을 대대적으로 추진하고 녹색 생산, 순환 생산을 실현하여 청결하게 생산하고 에너지 이용 효율을 높이어야 한다.

환경 효율성의 동태 산정을 보면 중국 전국의 환경 효율성의 Malmquist 지수는 1.048로 성장 추세가 비교적 좋다. 27개 성시 환경 효율성의 Malmquist 지수는 모두 1보다 크고 연평균 Malmquist 지수 성장률은 4.8%로 60%의 성시 성장 속도가 전국 평균 수준을 초과한다. Guizhou는 가장 빠른 10.7%를 기록, 전국 평균 성장 속도의 2.23배에 달한다. 구역으로 보면 동부지역 성장 속도가 가장 빠르며 다음으로 서부지역이고 중부지역이 가장 낮다. 성장동력 측면에서 기술진보는 Malmquist 지수의 주요 추진력이며, 기술 효율성은 환경 효율성 증가를 제약하는 주요 요인이다. 따라서 중국의 환경 효율성을 높이려는 Malmquist의 지수 성장률은 두 가지 측면에서 접근해야 한다. 먼저, 과학기술에 대한 자원 투입 강도를 대대적으로 높여 과학기술 정비의 원천 통로를 확장하고 외자 기업, 고등교육기관, 과학연구원과의 교류 협력을 적극적으로 전개해야 한다. 자체 기술 연구개발 능력을 높여 과학기술 투자와 산출이 함께 발전할 수 있도록 하고, 기술진보를 활용해 환경 효율성을 개선한다. 다음으로, 자원을 합리적으로 구성하고 생산 규모를 보완하며 최적화된 기업을 통합하고 낙후된 생산능력을 지양하여 기술효율을 높임으로써 환경 효율성을 제고해야 한다.

## REFERENCES

[1] SCHALTEGGER S, STURM A.. (1990). ökologischerationalität: ansatzpunktezurausgestaltung von ökologieorientierten managementinstru- menten. *Die unternehmung, 1990(4),* 273-290.

DOI : jstor : stable/24180467

[2] WANG Enxu, WU Chunyou. (2011). Spatial-temporal Differences of Provincial Eco-efficiency in Chian Based on Super Efficiency DEA Model. *Chinese Journal of Mangenment, 2011(3),* 443-450.
DOI : 10.3969/j.issn.1672-884X.2011.03.018

[3] CHEN Ao. (2008). Empirical Analysis of the Evaluation of Regional Ecology Efficiency and Influential Factors in China - Evidences from Provincial Data during 2000-2006. *Chinese Journal of Management Science, 2008(s1),* 566-570.
DOI : 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2008.s1.023

[4] DENG Bo, ZHANG Xue-jun, GUO Jun-hua. (2011). Research on Ecological Efficiency Based on Three - Stage DEA Model. *China Soft Science, 2011(1),* 92-99.
DOI : 10.3969/j.issn.1002-9753.2011.01.010

[5] Zheng H, Jia S, Zhao X. (2017). An analysis of regional eco-efficiency in China under the background of new-type urbanization. *Resources Science, 2017(7),* 1314-1325.
DOI : 10.18402/resci.2017.07.09

[6] FU Li-na, CHEN Xiao-hong, LENG Zhi-hua. (2013). Urban Agglomerations Eco-efficiency Analysis Based on Super-efficienty DEA Model: Case Study of Chang-Zhu-Tan "3 + 5"Urban Agglomeration. *China Population, Resources and Environment, 2013(4),* 169-175
DOI : CNKI:SUN:ZGRZ.0.2013-04-028

[7] Huang Xueqin ,Wang Tingting. (2015). An assessment for the eco - efficiency of resource - based cities. *Science Research Management, 2015(7),* 70-78
DOI : CNKI:SUN:KYGL.0.2015-07-009

[8] ZHANG B, BI J, FAN Z. et al. (2008). Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach. *Ecological economics, 2008(1),* 306-316.
DOI : 10.1016/j.ecolecon.2008.03.009

[9] WANG Bao-yi, ZHANG Wei-guo. (2016). A research of agricultural eco-efficiency measure in China and space-time differences. *China Population Resources and Environment, 2016(6),* 11-19.
DOI : 10.3969/j.issn.1002-2104.2016.06.002

[10] Lu Y Q, Yuan P. (2017). Measurement and spatial econometrics analysis of provincial industrial ecological efficiency in China. *Resources Science, 2017(7),* 1326-1337.
DOI : 10.18402/resci.2017.07.10

[11] CHENG Xiaojuan, HAN Qinglan, QUAN Chunguang. (2013), The Ecological Efficiency of the Coal Industry Based on PCA and DEA Modeling. *Resources Science,* 6, 180-187.
DOI : CNKI:SUN:ZRZY.0.2013-06-024

[12] YAO Zhi-guo, CHEN Tian. (2015). Tourism Eco-efficiency Model and an Empirical Research. *China Population Resources and Environment, (11),* 113-120.
DOI : 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.11.015

[13] ZHOU Ye, ZHANG Meng-xiao, YANG Jie. (2015). A Study on the Eco-eficiency of Logistics Industry in Provincial Domain Based on SE-DEA Method. *Journal of Beijing Jiaotong University(Social Sciences Editio n), 2015(4),* 99-106.
DOI : 10.3969/j.issn.1672-8106.2015.04.013

[14] WU Chunyou, SUN Yuanyuan. (2009). Eco-efficiency Appraisal based on Carrying Capacity for Industrial Parks. *Chinese Journal of Management, 2009(6),* 751-754.
DOI : 10.3969/j.issn.1672-884X.2009.06.008

[15] KUOSMANEN T. KORTELAINEN M. (2005). Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *Journal of in-dustrial ecology, 2005(4),* 59-72.
DOI : 10.1162/108819805775247846

[16] YANG Jia-wei, WANG Mei-qiang. (2017). Research on the Provincial Eco-efficiency Evaluation Based on Network DEA Model with Undesirable Intermediate Outputs. *Soft Science, 2017(2),* 92-97.
DOI : 10.13956/j.ss.1001-8409.2017.02.20

[17] WU Zhenhua, TANG Qin, WANG Yabei. (2016). Evaluation of Ecological Efficiency of Urban Construction Land in Jiangsu-Zhejiang-Shanghai Area: Based on Three-Stage DEA and Bootstrap-DEA Methods. *Ecological Economy , 2016(4),* 105-110.
DOI : 10.3969/j.issn.1671-4407.2016.04.023

[18] WU xiaoqing, WANG Yaping, HE Limei, LU Gengfa. (2012). AGRICULTURAL ECO-EFFICIENCY EVALUATION BASED ON AHP AND DEA MODEL-A CASE OF WUXI CITY . *Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012(6),* 714-719.
DOI : CNKI:SUN:CJLY.0.2012-06-011

[19] LI Jian, DENG Chuanxia, ZHANG Songtao. (2015). The evaluation and dynamic analysis on regional eco - efficiency based on Non - parametric Distance Function. *Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015(4),* 19-23.
DOI : 10.13448/j.cnki.jalre.2015.110

[20] CHARNES A, COOPER W, RHODES E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units, *European journal of operational research, 1978(6),* 429-444.
DOI : 10.1016/0377-2217(78)90138-8

[21] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. (1984). Some models for estimatingtechnical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science, 1984(9),* 1078-1092.
DOI : 10.1287/mnsc.30.9.1078

[22] CAVES D W, CHRISTENSEN L R, DIEWERT W E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input, out-put and productivity Econometrica. 1982(6), 1393-414.
DOI : 10.2307/1913388

[23] FARE R, GROSSKOPF S. (1994). SORRIS M. Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *American economic review, 5,* 66-83.
DOI : jstor : stable/2117971

[24] LONG Liang-jun, WANG Xia. GUO Bing. (2017). Evaluation of Urban Ecological Well-being Performance Based on Revised DEA Model —A Case Study of 35 Major Cities in China. *Journal of Natural Resources, 2017(4),* 595-605.
DOI : 10.11849/zrzyxb.20160515

록 어 린(LU YULIN) [정회원]

· 2013년 6월 : 산동과학지술대학교 관리학(관리학사)
· 2016년 6월 : 산동과학지술대학교 환경 및 자원보호 법학 (법석사)
· 2019년 9월 : 목원대학교 공공정책학과 박사과정(재학중)
· 관심분야 : 환경보호, 환경정책
· E-Mail : luyulin@naver.com

하 염(HE YAN) [정회원]

· 2016년 6월 : 흑룡강대학교 한국어학(문학학사)
· 2019년 2월 : 충남대학교 한중어 통번역학 (문학석사)
· 2020년 3월 : 목원대학교 공공정책학과 박사과정(재학중)
· 관심분야 : 환경정책, 유학생 행정관리
· E-Mail : 940806heyan@naver.com