

# 국가 단일 탄소시장 통합 위한 중국 지역별 배출권 가격 동태 분석

Qu Jingyu\* · 전우영\*\*†

\*전남대학교 일반대학원 경제학과 박사과정, \*\*전남대학교 경제학부 부교수

## Dynamic Analysis of Regional Carbon Prices in China for Integration Into a Single National Market

Qu Jingyu\* and Jeon, Wooyoung\*\*†

\*Ph.D Student, Department of Economics, General Graduate School, Chonnam National University, Gwangju, Korea

\*\*Associate Professor, Department of Economics, Chonnam National University, Gwangju, Korea

### ABSTRACT

As global pressure on carbon reduction has increased since the Paris Agreement, China, the world's largest carbon emitter, is pushing to achieve its carbon net zero target by 2060. The emission trading scheme (ETS), China's key policy tool for carbon reduction, operates in eight regional markets, and individual markets have their own reduction goals, market rules, and verification systems. In this study, the long-run equilibrium and causal relationship between regional ETS markets was analyzed through dynamic analysis of carbon permit prices in the three major markets (Hubei, Guangdong, and Shanghai) that account for 77% of China's total emission permits. Results show that co-integration exists among the three major markets and Vector Error Correction Model (VECM) analysis indicates the existence of a partial short-run and long-run causal relationship between those markets. Since 2021, China has been promoting phased integration of regional ETS markets into a single national market. This study shows that the efficient market integration is promising.

*Key words: China ETS, Carbon Price, VECM, Co-Integration, Granger Causality*

### 1. 서론

2015년 파리협정이 175개국에 의해서 체결된 이후 세계 각국은 단계적으로 탄소중립 목표를 이행해 나가고 있다. 미국, EU, 한국 등의 국가는 2050년, 중국은 2060년까지 탄소중립목표 달성을 발표하였으며, 이들 국가는 탄소중립 이행의 가장 직접적이고 효과적인 정책인 배출권 거래제를 시행하고 있다. 탄소 배출 총량을 제한하는 배출권 거래제를 통해서 각 국가의 경제수준과 산업구조에 맞게 단계적으로 탄소배출량을 조절해 나감으로써 탄소중립에 대한 동력을 계속해서 구체화해 나가는 것이다. 이 과정에서 탄소의 한계 저감비용이 배출권 가격에 반영되어 탄소의 외부비용이 시장에서 내재화되게 된다. 따라서

배출권 가격의 추이와 동태에 대한 분석을 통해서 탄소저감의 속도와 그 경제적 영향을 간접적으로 파악할 수 있고, 또한 지역별 배출권 가격의 동조화 현상이나 인과관계 경로 분석을 통해서 시장간 상호작용이나 탄소저감 기술의 파급효과 등을 함께 살펴볼 수 있다.

중국은 세계 최대 온실가스 배출 국가로 2018년 기준 전 세계 배출량의 28%를 배출했으며 뒤를 이어서 미국 15%, 인도 7%, 러시아 5%, 일본 3%를 배출하였다. 중국은 2005년 이후로 GDP 단위당 탄소배출량을 뜻하는 탄소 집약도(carbon intensity)를 개선시켜서 2019년에 2005년 대비 48.1%를 감축했고, 2020년의 탄소 집약도 목표를 2017년에 선제적으로 달성하였다. 이와 함께 계속해서 원단위 탄소배출 효율을 개선시켜서 2030년까지 탄소

†Corresponding author : wyjeon@jnu.ac.kr (Department of Economics, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea. Tel. +82-62-530-1558)

ORCID Qu Jingyu 0000-0002-8822-1881 전우영 0000-0003-2264-7289

집약도를 2005년보다 60~65% 감축시킬 것을 목표로 제시하였다.

탄소중립 달성과 탄소집약도 개선을 위해서 중국은 배출권 시장을 2013년 6월부터 개설하여 1차적으로 Shenzhen (深圳) · Shanghai (上海) · Beijing (北京) · Guangdong (廣東) · Tianjin (天津) · Hubei (湖北) 6개의 지역 시장을 시작하였고, 2014년 7월에 Chongqing (重慶), 2017년 초 Fujian (福建) 시장을 개설해서 2020년 기준 총 8개의 지역 배출권 시장을 운영하고 있다. ICAP (International Carbon Action Partnership) 통계에 따르면 2020년 세계 21개 탄소시장의 할당 총량은 약 47.8억 톤이며, 그 중에 EU 탄소 시장 할당량은 18.2억 톤(38.0%), 한국은 5.6억 톤(11.5%), 캘리포니아는 3.3억 톤(7.0%), 멕시코는 2.7억 톤(5.7%)을 차지했으며 중국의 8개 시범 시장은 총 14.3억 톤으로 29.8%를 차지하여 EU 다음으로 세계에서 두 번째로 큰 배출권 거래 시장이 되었다. 2020년 세계 최대의 탄소배출량과 2060년 탄소중립 달성을 위한 탄소효율성 개선 및 저감 정책시행을 고려할 때 머지않아 중국 배출권 시장이 세계 최대 규모가 될 것으로 예상된다.

중국 배출권 거래 시장은 2020년 말 기준으로 약 104.31억 위안의 규모를 보이고 있으며, 누적 거래량 기준 지역 시장의 규모는 Guangdong (50%) · Hubei (14%) · Shanghai (13%) · Shenzhen (11%) · Beijing (6%) · Fujian (4%) · Chongqing (1%) · Tianjin (1%)순이었다. 전체 시장의 약 77%가 Guangdong, Hubei, Shanghai 상위 3개 시장에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 각 지역 시장들은 평소에는 거래가 드물다가 계약이행 시기에 거래가 폭발적으로 이루어져서 배출권 가격 변동 폭이 커지는 현상을 공통적으로 경험했다. 이를 안정화하기 위해서 2017년 주요 지역시장인 Hubei와 Shanghai는 선물거래 시스템을 도입해서 배출권 기반 파생상품의 헤지 기능을 통해서 가격변동을 억제하고 유동성을 증대시켜 가격 안정화, 배출권 시장의 안정적인 성장을 이루었다.

중국의 지역별 배출권 시장은 각 지역의 경제발전 수준, 산업구조, 거래 및 할당 정책 등의 차이에 의해서 배출권 가격 변동 폭이나 추이가 상이한 측면이 있는데 이런 지역별 배출권 가격에 대한 동태 분석을 한 연구는 많지 않다. 예를 들어, Guangdong과 Hubei는 정부가 배출 할당량을 정해 경매 최저가를 정하는 방식으로 할당이 이루어지고 있고, Shanghai 거래소는 3년의 할당량을 한 번에 발행해서 해당년도의 배출 할당량은 모두 거래할 수 있도록 하고, 차년도 할당량은 절반만 거래할 수 있는 방

식을 취하고 있다. 또한 중국의 배출권 시장은 아직 미성숙한 단계로 정부의 정책요소에 영향을 많이 받는다는 특징이 있다. 탄소 배출량에 대한 계측이 정확하지 않고, 배출권 가격과 기업의 한계 감축 비용 사이에는 여전히 큰 차이가 존재하며, 시장은 주로 정부 지원과 일부 대기업의 참여에 의해 크게 영향을 받는 구조이다. 따라서 이러한 중국 탄소배출권 시장의 여건을 반영해서 각 지역별 배출권 시장의 동조화가 어떻게 이루어지고 있고, 개별 배출권 시장의 가격 간에 인과관계가 어떤 경로로 발생하는지 분석하는 것은 중국의 지역별 배출권 시장을 이해하고 추후 지역시장 통합 과정을 전망하는데 중요한 참고자료가 될 수 있다.

실질적으로 중국은 국가 발전 개혁위원회의 종합 계획에 따라 중국 배출권 시장의 개발을 크게 3단계로 구분해서 추진중이다. 2014~2017년은 지역 단위의 배출권 시장을 출범시켜서 기본적인 배출권 거래제의 기능을 살펴보는 도입 단계, 2018~2020년은 지역별 시장을 안정화시키고 국가 단일 배출권시장으로의 통합을 준비하는 단계, 2021년 이후는 국가 단일 배출권시장을 단계적으로 도입하고 본격적으로 배출권 거래제를 운영하는 단계이다. 2021년 6월 지역 배출권 시장이 단계적으로 단일 시장으로 통합되는 상황에서 지역 시장간 배출권 가격의 동조화를 분석하는 것은 향후 단일 시장으로의 효율적인 통합 가능성에 중요한 시사점을 제공할 수 있다.

본 연구에서는 중국 전체 배출권 시장의 77%를 차지하는 3대 주요 시장인 Guangdong, Hubei, Shanghai 시장의 배출권 가격 정보를 바탕으로 시장 간의 동조화 현상을 분석하고, 지역별 배출권 가격 간의 장단기 인과관계의 경로를 살펴보았다. 이를 바탕으로 지역 배출권 시장의 효율적인 통합 가능성을 살펴보고자 한다.

본 연구의 구조는 다음과 같다. 2장에 선행연구와 본 연구의 기여를 서술하고, 3장에서는 본 연구에 적용된 모형과 데이터에 대해서 설명한다. 4장에서는 시장간 동조화와 장단기 및 강 인과관계에 대한 분석결과를 제시하고 5장에서 논문을 결론짓는다.

## 2. 선행연구

2005년 EU 탄소 배출권 거래 시장이 시작된 이후 중국은 2014년, 한국은 2015년에 자체 탄소 배출권 거래 시장

을 구축하였다. 배출권 거래제가 시행된 이후로 배출권 가격에 대한 분석이 많이 이루어졌는데 분석 주제는 크게 3가지 종류로 분류 가능하다. 첫째는 탄소 가격의 변동성과 역학에 관한 연구, 둘째는 배출권 가격에 영향을 미치는 경제·사회·기후 요인에 대한 분석, 셋째는 국가별 혹은 지역별 배출권 거래 시장의 동조화와 인과관계에 대한 분석이다.

배출권 가격 변동성과 역학에 대한 연구에는 Ellerman and Buchner (2008), Parsons et al.(2009), Jaehn and Letmathe (2010), Feng et al.(2011), Daskalakis et al.(2009) 등이 있다. Ellerman and Buchner (2008)에서는 EU 탄소 배출권 거래 시장에서 탄소 가격이 2007년에 거의 0에 가까웠으며 이는 초과 할당 때문이 아니라 시장 참여자들이 탄소 배출 수준을 과대 평가하고 배출 감소를 과소 평가한 것에 기인한 것이라고 분석하였다. Parsons et al.(2009)은 EU 배출권 가격 변동성에 영향을 미치는 주요 요소는 배출권이월(banking)과 차용(borrowing)을 금지하고 있기 때문인 것으로 분석하였다. 또한 Jaehn and Letmathe (2010)는 거래 가격의 비정상적인 변동을 분석했으며 여기에 영향을 미치는 요소는 시장 요인 외에도 정보 비대칭, 기본 상품 가격 및 탄소 배출 가격의 상호 의존성이 주요 유인이라고 분석하였다. Feng et al.(2011)는 비선형 방법론을 이용하여 거래가격의 변동성을 연구하였으며, 탄소 배출권 가격의 과거 정보는 현재 가격에 반영되지 않으며 랜덤 워크하지 않는 것으로 분석하였다. 배출권 가격은 단기 기억성을 가지고 있고 탄소 배출 시장의 내부 가격결정 메커니즘과 정책 등에 의해서 결정되는 이질적 환경의 영향을 받음을 보였다. Daskalakis et al.(2009)은 탄소 배출권 가격의 형성 과정은 점프를 하는 기하학적 브라운운동에 가깝고 안정성이 떨어짐을 보였다.

배출권 가격에 영향을 미치는 경제·사회·기후요인에 대해 분석한 논문으로는 Zhang and Wei (2010), Boersen and Scholtens (2014), Hammoudeh et al.(2015), Alberola et al.(2009), Oberndorfer (2009), Blyth et al.(2009), Xun et al.(2010), Goulder et al.(2010), Zhao et al.(2010) 등이 있다. Zhang and Wei (2010)은 상태 공간 모형과 VAR 모형을 기반으로 화석 에너지 가격과 탄소 가격 사이에 유의한 장기적인 균형 공적분 관계가 있음을 발견했으며, 세 가지 화석 에너지 가격 중에서 유가 충격이 탄소 가격에 가장 큰 영향을 미치는 요인임을 보였다. Boersen and Scholtens (2014)의 연구에서도 가스, 원유, 석탄, 가스 전환 가능성이 EU의 배출권 거래제 2단계에서 탄소 가격의

주요 영향 요인으로 분석되었다. Hammoudeh et al.(2015) 원유가격은 장기적으로 탄소 가격에 부정적, 비대칭적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 단기적으로 석탄 가격 하락시 탄소 가격 상승보다 탄소 가격에 더 큰 영향을 미치고, 천연가스와 전력 가격은 탄소 가격에 대칭적인 영향을 주는 것으로 나타났다. Alberola et al.(2009)에서는 공업생산액이 탄소배출권 거래가격에 미치는 영향을 연구한 결과, EU 9개 업종 중 2개 업종(연소와 철강업종)의 공업생산액만이 교역 가격에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Oberndorfer (2009)의 연구에 따르면 EU 탄소 배출 가격은 대부분의 유럽 전력 회사의 주식 수익률과 양의 상관 관계가 있음을 보였다. Blyth et al.(2009)는 탄소 가격 형성을 정책목표, 동적 기술 비용과 시장 규칙이 상호작용하는 복잡한 과정으로 보고 있다. 배출권 가격은 회사의 배출 감축 비용을 반영 할 뿐만 아니라 시장의 수급 상황도 반영한다. 탄소 거래 시장에서 배출 저감 기업은 최선의 선택을 위해 배출 저감 정책을 고려한다는 전제하에 배출권 가격과 배출 저감 비용을 비교해야 한다고 주장하였다. Xun et al.(2010)은 호주 전력 시장의 다양한 배출권 무상 분배 방법이 기업의 잠재적 이익에 미치는 영향을 분석하고 무상 분배의 비율을 논의했다. Goulder et al.(2010)은 할당량의 15% 미만으로 무상으로 할당하면 대부분의 미국 기업이 손실을 보는 것을 방지할 수 있으며 이를 넘어서는 과도한 무상 할당은 기업들에게 과잉 보상이 될 수 있음을 발견했다. Zhao et al.(2010)은 투자 행동의 왜곡을 피하기 위해 할당량 배정은 생산 능력보다는 판매량의 비율을 기반으로 해야 한다고 주장하였다.

배출권 가격에 대한 본 연구의 분석관점이기도 한 국가별 혹은 지역별 배출권 거래 시장의 동조화와 인과관계에 대해 분석한 연구에는 Kim and Park (2008), Mo et al.(2005), Kim et al.(2019) 등이 있다. Kim and Park (2008) 논문에서는 EU ETS의 배출권 가격 데이터를 적용해 주요 시장 간 가격을 실증적으로 분석했다. 제품 동질성에 기반한 배출권의 표준화로 실물 거래 뿐만 아니라 선물 거래도 활발하게 이루어지고 있다. 가격발견과정에서 Nord Pool 선도 시장의 역할이 주목되었으며, Power next와 EEX 등 주요 전력거래소의 영향도 큰 것으로 나왔다. Mo et al.(2005)의 연구는 EU ETS와 Nord Pool의 탄소 가격 사이의 단일 가격 및 Granger Causality를 테스트하고 Johansen 공적분 검정을 통해서 EU ETS와 Nord Pool 가격 사이에 장기적인 균형이 존재하고 일물일가 원

칙이 적용됨을 보였다. Granger 테스트는 EU ETS가 거래되는 모든 거래 연도에 대해 Nord Pool을 이끌고 새롭게 떠오르는 탄소 시장을 놓고 경쟁을 시작한 EU의 대표적인 탄소 시장으로 간주 될 수 있음을 시사한다. Kim et al.(2019)의 연구에서는 유럽연합, 뉴질랜드, 한국 3국의 배출권 시장 가격의 동조화 현상을 분석했다. 벡터 오차 수정 모형(VECM)을 통해 탄소 가격과 Granger 인과관계 사이의 조정 관계를 분석하고 충격반응함수를 통해 시장 간 파동 경로를 분석했다. 분석 결과, 세 시장에서 배출 가격의 공적분 관계가 있었고, 이 사이에 조율이 이뤄진 것으로 확인됐다. 이 연구는 한국의 탄소 배출권 가격과 다른 국가의 탄소 배출권 가격과의 동시성, 동적 인과 관계, 유통 경로를 분석했기 때문에 배출 시장 간의 연관성을 높이기 위해 시장 설계에 중요한 참조 표준이 제시될 것으로 예상된다.

중국의 탄소 배출권 시장을 분석한 연구는 다음과 같다. 먼저 지역별 탄소 시장간 영향을 분석한 연구에는 Li et al.(2020), Xie et al.(2017), Chang et al.(2017), Zhao et al.(2020), Lyu (2020), Fan et al.(2019a)가 있다.

Li et al.(2020)의 논문은 2013년 6월부터 2019년 3월까지 중국의 8개 배출권 시장의 가격 데이터를 패널 공적분 분석을 이용해 각 시장간 장기균형이 존재하는지 분석하였다. Xie et al.(2017)과 Chang et al.(2017)은 2016년 이전의 초기 시범사업 단계의 지역별 배출권 시장을 대상으로 지역가격간 동조화 현상을 분석하였으며 특히 Chang et al.(2017)은 AR-GARCH 모형을 기반으로 regime-switching을 분석하였다. Zhao et al.(2020)는 역시 2018년 이전의 비교적 초기 자료를 기반으로 SVAR모형을 기반으로 비선형 그레인저 인과관계를 분석하였다. Lyu (2020)은 탄소 가격 수익의 변동성 관점에서 MCMC-SV 방법론으로 분석하였으며 Fan et al.(2019b)은 visibility graph network 기법을 바탕으로 지역탄소시장을 유사성을 가지는 소그룹으로 분류하였다.

중국 배출권 가격과 타 국가시장 혹은 타 에너지 가격 및 거시지표와 관계를 살펴본 연구는 Fan and Todorova (2017), Fan et al.(2019b), Wen et al.(2022), Lin and Jia (2019), Cheng et al.(2023) 등이 있다. Fan and Todorova (2017)은 초기 탄소가격과 국제 천연가스의 동적관계를 분석하였으며, Fan et al.(2019b)은 탄소가격과 석탄가격과의 관계를 분석하였다. Wen et al.(2022)은 탄소가격과 거시경제요인, 에너지가격, 환경질 등의 3가지 요소와의 관계를 분석하였다. Lin (2019)은 탄소

가격이 에너지소비, 탄소배출, 경제발전에 미치는 영향을 분석하였으며, Cheng et al.(2023)은 중국과 유럽탄소 시장간의 동적 역학관계를 분석하였다.

본 연구가 선행연구와 가지는 차별성은 다음의 두 가지로 요약 가능하다. 첫째, Xie et al.(2017), Chang et al.(2017), Li et al.(2020)는 배출권 거래제 시행 초기에 수행된 분석으로 2019년 중반 Hubei를 중심으로 있었던 급격한 변동성 증가와 하락추세 반전의 구조적 변화를 포함하지 못하고 있다. 본 연구는 2020년 말까지 시범기간 전 기간에 걸쳐 초기와 후기의 변화를 모두 반영한 분석을 수행했다. 둘째, 본 연구는 중국 전체 배출권의 77%를 담당하는 주요 3개 시장을 선택해서 장기균형과 함께 장단기 및 강 인과관계, 충격반응함수까지 면밀히 분석하였다. 선행연구는 대부분 8개 지역시장을 아우르는 분석으로, 20~30% 비중을 차지하는 시장과 5% 이하의 비중을 차지하는 시장을 동일하게 처리해 핵심시장 간의 인과관계 파악에 노이즈가 존재하고, 주요시장 간 보다 종합적인 인과관계 분석 제공을 하지 못했다. 본 연구는 전체를 대표하는 핵심적인 3개 시장에 대한 면밀한 인과관계 분석을 통해 전체 지역 중국시장 통합 가능성을 보다 사실적으로 분석했다는 점에서 차별성을 가진다.

본 연구는 앞서 제시한 차별성과 함께 다음의 3가지 측면에서 중요한 의의를 가진다.

첫째, 세계 최대 탄소발생국가이자 EU-ETS에 이어 두번째로 큰 ETS인 중국의 탄소가격 동태성을 이해함으로써 중국 탄소배출권 시장의 변화 방향을 가늠해 볼 수 있다.

둘째, 중국 내에서 독립적으로 운영되는 지역 배출권 시장의 동조화를 분석함으로써 시장간 상호작용 여부를 파악을 통해 탄소저감기술 전파 경로 등을 추론할 수 있다. 이를 바탕으로 2021년부터 단계적으로 추진되고 있는 중국 탄소 배출권 시장의 성공적인 통합가능성을 살펴볼 수 있다.

셋째, 본 연구에서 분석하는 국가 내 독립적인 탄소배출권 시장의 동태적 분석을 토대로 향후 국가간 탄소배출권 시장의 동태적 분석과 비교를 통해 지역범위와 국가범위에 따른 시장 동조화 차이 분석의 기초자료를 제공한다.

본 연구에서는 중국 지역 배출권 시장의 통합을 앞두고 있는 시점에서 전체 시장의 약 77%를 점유하는 주요 시장인 Guangdong, Hubei, Shanghai 시장을 대상으로 각 시장간 동조화 현상과 시장간 가격의 장단기 인과 관계 경로를 분석하였다. 중국 주요 시장간 동조화 현상 분석을 통해 효율적인 시장 통합가능성을 모색하고, 시장간 장단

기 인과관계 경로 분석을 통해 시장간 영향력의 흐름과 규모를 분석해 보고자 한다.

### 3. 모형 및 데이터

#### 3.1. 모형

중국의 세 가지 주요 탄소 시장 가격 간의 상호연관성 분석은 크게 세 부분으로 구성된다. 첫번째는 세 가지 개별 탄소가격 시계열 자료가 정상성(stationary)을 가지는지 단위근 검정을 통해서 분석한다. 기초 시계열 자료의 정상성 여부는 변수간 장기적인 인과관계 분석을 하기 위한 필수적인 조건이 된다. 본 연구에서는 단위근 검정에 가장 보편적으로 적용되는 Augmented Dickey-Fuller (ADF)와 Phillips-Perron (PP) 방법론을 적용하여 분석하였다.

두 번째는 세가지 탄소가격 간에 장기적인 균형이 존재하는지 살펴보는 공적분 관계를 분석하는 것이다. 일반적인 경우 탄소가격은 시간의 흐름에 따라 증가하는 구조를 가지기 때문에 첫 단계의 단위근 검정에서 단위근이 존재하는 비정상성(non-stationary)의 특성을 가진다. 이럴 경우 변수간 장기적인 균형의 존재 여부에 따라 벡터자기회귀(Vectir Autoregression, VAR) 혹은 벡터오차수정 모형(Vector Error Correction Model, VECM)을 구분하여 적용하게 된다. 공적분 검정은 Johanson 검정을 적용하여 분석한다.

셋째, 장기균형관계가 존재할 경우 VECM을 적용하여 탄소가격간 장기와 단기의 관계와 Granger 인과성 검정을 수행한다. 장기균형관계가 존재하지 않을 경우 차분후 VAR 모형을 통해 단기적 관계에 국한된 분석을 수행한다.

본 연구에서 주요하게 적용될 VECM 모형의 구조는 다음의 식 (1)과 같다.

$$\Delta \ln Y_t = \alpha + \beta T_t + \Pi \ln Y_{(t-1)} + \sum_{(i=1)}^{(p-1)} \Gamma_i \Delta \ln Y_{(t-i)} + \epsilon_t \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 와  $T_t$ 는 각각 절편 항과 추세 항을 나타내고  $\Delta$ 는 차분 연산자,  $Y_t$ 는 공적분 관계를 갖는 벡터, 즉 Hubei (HBEA), Guangdong (GDEA), Shanghai (SHEA)의 탄소 가격의 (d, b) 차수 공적분 벡터이므로 식 (1)을 식 (2)와 같이 확장할 수 있다:

$$\Delta (\ln HBEA_t, \ln GDEA_t, \ln SHEA_t)' = \alpha + \beta T_t + \Pi \ln (\ln HBEA_{(t-1)}, \ln GDEA_{(t-1)}, \ln SHEA_{(t-1)})' + \sum_{(i=1)}^{(p-1)} \Gamma_i \Delta (\ln HBEA_{(t-i)}, \ln GDEA_{(t-i)}, \ln SHEA_{(t-i)})' + \epsilon_t \quad (2)$$

k 차원 벡터 시계열의 경우 최대 k-1 선형 공적분 벡터가 있을 수 있다. 이 중  $\Pi_{(k \times k)} = ab^T$  ( $m = \text{rank}(\Pi)$ 로 표시),  $\alpha$ 를 로딩 행렬(loadings matrix)이라고 하며, 공적분 벡터로 구성된 행렬 b의 MLE (Maximum Likelihood Estimator)는 OLS를 통해 얻을 수 있다. 그런 다음  $Y_t$ 가 k-m 단위근을 갖고 있으며 이러한 단위근은 k-m 공통 추세를 제공한다고 판단 할 수 있다. 행렬  $\Pi$ 의 위수는 공적분 벡터의 수와 같다. 따라서  $\Pi=0$ 이면 공적분 관계가 없고,  $\Pi \neq 0$ 이면 장기 공적분 관계가 있다.  $ECT_{(t-1)} = b^T Y_{(t-1)}$ 는 오차 수정항이고  $\alpha$ 는 조정 속도를 반영한다. 차분 항목  $\Gamma_i$ 은 가격 간의 단기적 동태 관계를 나타낸다.

#### 3.2. 데이터

본 연구에서 분석될 2015 ~ 2020년 Gwangdong, Hubei, Shanghai 3개 시장의 일별 탄소 거래 가격 기초 통계량과 시계열 자료 구조는 다음과 같다.

Table 1. Basic Statistic

Variables	Num of obs	Average	Standard deviation	Min	Max
HBEA	1468	22.97	6.89	158	57.74
GDEA	1468	18.03	6.04	106	37
SHEA	1468	29.62	12.19	3.15	49.98

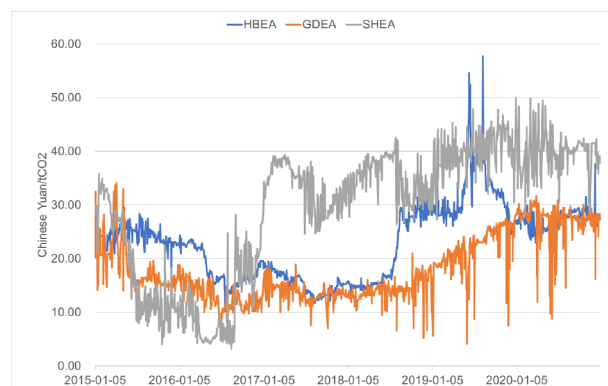


Fig. 1. Price Trends of China's Three Major Carbon Markets from 2015 to 2020

지역별 탄소시장은 제도가 시작된 이후 공통적으로 큰 하락기를 겪었고, 이후 각종 규제가 완화되면서 매매가격 변동폭은 줄었지만 시장별 거래가격 변동폭은 여전히 큰 차이를 보이고 있다.

2019년 이전에는 Hubei 시장이 중국내 가장 큰 지역 탄소시장이었는데, 2019년 이후에는 Guangdong이 최대 탄소시장이 되었다. Guangdong 시장은 중국 최초로 단일성이 탄소 관리 지역으로 지정된 탄소 시장이며, 대기업 뿐만 아니라 중소기업, 가정 및 개인이 탄소 배출 감축에 직접 참여가 가능하도록 하는 배출권 거래 시스템을 선구적으로 추진하고 있다. 자발적 배출 감축과 시장 거래가 통합되어 거래량이 꾸준히 증가하고 있다.

Shanghai 탄소 시장은 3년간의 배출 할당량을 한번에 정해 거래 가능하도록 하고 있어 탄소 시장 유통에 유리하지만, 유통량이 너무 많아 시장에서 거래량을 제한하기도 한다. 2017년 이후에 배출권 미이행 상황에 대한 징벌제도와 시장 관리를 강화한 후, 상해 탄소 가격은 35위안/tCO<sub>2</sub> 내외로 유지되고 있다.

## 4. 분석 결과

### 4.1. 단위근 검정

3개 중국 탄소가격의 안정성 여부를 판단하기 위해 단위근 검정을 실행하였다. 단위근 검정은 시계열이 안정적인지 확인하는 방법으로, 그 중 Augmented Dickey-Fuller (ADF)와 Phillips-Perron (PP)이 일반적으로 많이 사용된다. ADF는 단위근검정 과정에서 자기상관을 보정하기 위해 차분항의 자기상관항을 포함시켜서 이문제를 해결한다. 반면 PP는 비모수 방법론으로 자기상관항 포함없이 자기상관과 이분산에 대해서 자체적으로 보정된 통계량을 제시해준다. PP는 점근적(asymptotic) 방법론에 근거하기 때문에 표본이 많은 경우에 잘 작동한다는 단점이 있다. 본 연구는 일일 가격 시계열 자료를 활용하기 때문에 충분한 시계열자료가 사용된다.

AR(p)가 적용되는 시계열  $y_t$ 의 경우 ADF 단위근 검정 모델은  $\Delta y_t = \alpha + \rho y_{(t-1)} + \sum_{s=1}^p a_s \Delta y_{t-s} + \epsilon_t$ 의 형태를 가진다. ADF 검정의 귀무 가설은  $H_0: \rho=0$ 이고, 대립 가설은  $H_1: \rho < 0$ 이다.  $\rho$ 가 0보다 작으면 시계열이 안정적이라는 것을 의미한다.

Table 2. Unit Root Test Result

Test method	HBEA		GDEA		SHEA	
	level	diff	level	diff	level	diff
ADF	-1.60	-17.46***	-2.836	-12.427***	-2.359	-12.271***
PP	-1.864	-67.438***	-17.566**	-272.715***	-6.044***	-96.665***

Optimal lags are chosen based on AIC, \*\* and \*\*\* are significant at the 5% and 1% levels.

ADF와 PP 방법론을 적용해 검증할 때 데이터 생성 과정을 확인하고, 랜덤 프로세스에 추세 항과 절편 항이 있는지 확인해야 한다. 단위근 검정 분석 결과 중국 3개 주요시장의 탄소가격은 수준 시계열에서 ADF방법론은 모두 단위근이 있고, PP방법론은 Hubei만 단위근이 있는 것으로 나타났다. 1차 차분의 경우 모든 변수가 두가지 방법론에서 안정적인 모습을 보여준다. 일반적으로 방법론별로 테스트결과가 일치하지 않으면 단위근이 존재하는 방향으로 간주한다. 이를 바탕으로 모든 탄소가격의 수준변수는 비정상성을 가지며, 1차차분변수는 정상성을 가지는 I(1)로 결론지을 수 있다.

### 4.2. 공적분 검정

Johansen의 검정을 사용하여 3개 탄소 가격 간의 장기 균형관계가 존재하는지 분석하였다. 공적분 분석을 위한 모델의 지연 차수(Lag Order)는 Johansen 검정 전에 결정되어야 하며 너무 작은 지연차수는 계수추정의 비일치성을 초래하고, 너무 큰 지연차수는 과도한 계수를 포함해서 모형의 자유도를 낮추게 된다. 따라서 너무 극단적인 차수는 비하면서 AIC, SC 값을 기반으로 최적의 지연차수를 선택한다. Table 3에서 이 세 탄소 시장 가격의 최적 결합 지연 차수는 4로 나타났다. Johansen 모형에서 특정한 추세는 없기 때문에 추세는 배제하였다.

Table 3. Lag Order Selection Criteria

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
1	3386.835	NA	1.99e-06	-4.614	-4.582	-4.602
2	3740.286	704.0058	1.24e-06	-5.085	-5.020	-5.061
3	3830.105	178.534	1.11e-06	-5.195	-5.098	-5.159
4	3870.400	88.994*	1.06e-06*	-5.241*	-5.112*	-5.153*
5	3878.598	16.277	1.06e-06	-5.240	-5.078	-5.180

Table 4는 Johansen 공적분 결과를 보여준다. 연구 결과는 공적분 행렬( $\Pi$ )의 위수(rank)가 없다(none)이라는 귀무가설의 p-value가 0.000으로 나타났기 때문에 기각하고 공적분 벡터가 적어도 하나 이상은 존재함을 알 수 있다. 공적분 행렬 위수가 하나 초과(at most 1)이라는 귀무가설의 p-value는 0.118로 5% 유의수준에서 기각할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 3개 중국 탄소 가격 간에는 한 개의 공적분 벡터가 존재함을 알 수 있다. 이는 세 시장 간의 가격 추세가 단기적으로는 다른 방향으로 나타날 수 있지만, 장기적으로는 같은 방향으로 함께 움직인다는 것을 나타낸다.

중국 3개 주요 탄소 가격간의 동조화는 2가지 측면에서 어느정도 예상가능한 결과이다. 첫째, 지역별 탄소가격은 중국 중앙 정부의 ETS 정책 수준과 속도에 크게 영향을 받기 때문에 이러한 정책요소가 공통적으로 적용되어 가격이 동조화 될수 있다. 둘째, 다양한 연구에서 화석연료 가격이 배출권 수요와 가격을 결정하는 주요 요인으로 언급한다. 이 화석연료의 대표요소인 석유와 천연가스는 중국도 대부분 수입의 의존하기 때문에 지역간 가격격차가 거의 존재하지 않는다. 따라서 동질적인 화석연료 가격이 탄소시장간 동조화를 유발한다. 특히 유가가 높아질 경우 석탄발전이 천연가스나 유류발전을 대체하기 때문에 배출권 수요가 올라가고 따라서 배출권 가격이 함께 상승하게 된다.

Table 4. Johansen Cointegration Test Result (p=4)

Null Hypothesis	Eigenvalue	Trace statistic	5% Critical value	Prob
None*	0.036	66.611	29.797	0.000
At most 1	0.006	12.912	15.494	0.118
At most 2	0.002	3.922	3.841	0.047

### 4.3. VECM 분석

공적분 검정에 이어서 3가지 탄소가격간 장·단기적인 관계의 유무와 인과관계의 방향성을 보다 면밀히 분석하기 위해서 VECM 분석을 수행하였다. 분석결과는 Table 5와 같으며 분석에서 제시된 오차 수정 항(Error Correction Term, ECT)은 식 3과 같다.

$$ECT_{(t-1)} = \ln HBEA_{(t-1)} - 1.35 \ln GDEA_{(t-1)} + 0.186 \ln SHEA_{(t-1)} + 0.135 \quad (3)$$

ECT 계수는 그 방향성과 유의성을 함께 살펴봐야 한

다. 먼저 방향성 관점에서 기초변수인 HBEA가 증가하면 ECT 항은 양수가 된다. 이때 장기적인 추세는 정상성을 가져야함으로 ECT를 다시 감소시켜야하기 때문에 Table 5에서 HBEA의 ECT 계수가 음수(-0.015)인 것은 타당하다. 반면 GDEA 관점에서 GDEA가 증가하면 ECT 항은 음수가 된다. 위와 같은 이유로 ECT를 증가시켜야하기 때문에 GDEA의 ECT 계수가 양수(0.114)인 것은 타당하다. 유의성 관점에서는 중국내 50% 이상을 담당하는 최대 탄소 시장인 Guangdong만 장기적인 관계가 유의하였다.

단기적인 관계는 자기 시차변수의 경우 모두 유의하게 나타났으며, t-1기에서는 Hubei가 Guangdong 시장에, t-2기에서는 Shanghai가 Guangdong 시장에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 Guangdong 시장은 중국 최대 탄소 시장으로 탄소 가격의 변동성을 예측할 때 장기균형관계, 자기 변동 및 일부 타시장 변동이 중요하게 영향을 미치는 것으로 이해가능하다. 반면 Hubei와 Shanghai 시장은 자기 과거 변동만이 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 5. VECM Estimation Result

	$\Delta \ln HBEA_t$	$\Delta \ln GDEA_t$	$\Delta \ln SHEA_t$
$\Delta \ln HBEA_{(t-1)}$	-0.666*** (0.026)	-0.091** (0.042)	-0.003 (0.040)
$\Delta \ln GDEA_{(t-1)}$	-0.016 (0.018)	-0.282*** (0.028)	-0.009 (0.027)
$\Delta \ln SHEA_{(t-1)}$	-0.014 (0.008)	0.038 (0.025)	-0.620*** (0.026)
$\Delta \ln HBEA_{(t-2)}$	-0.415*** (0.029)	-0.063 (0.047)	-0.001 (0.044)
$\Delta \ln GDEA_{(t-2)}$	-0.016 (0.018)	-0.282*** (0.028)	-0.009 (0.044)
$\Delta \ln SHEA_{(t-2)}$	-0.002 (0.019)	0.056** (0.030)	-0.376*** (0.026)
$\Delta \ln HBEA_{(t-3)}$	-0.194** (0.025)	-0.026 (0.040)	0.001 (0.038)
$\Delta \ln GDEA_{(t-3)}$	-0.010 (0.010)	-0.207*** (0.026)	-0.025 (0.024)
$\Delta \ln SHEA_{(t-3)}$	0.004 (0.017)	0.038 (0.027)	-0.137*** (0.026)
ECT_(t-1)	-0.015 (0.009)	0.114*** (0.014)	-0.01 (0.014)
Constant	0.0001 (0.002)	-1.86E-05 (0.004)	0.0004 (0.004)

\* ( ) is the standard error.

Table 6. Causality Test Result between the Three Markets in China

Dependent variable	Short-run casual relationship			Long-run casual relationship		Joint casual relationship		
	$\Delta \ln \text{HBEA}(t-1)$	$\Delta \ln \text{GDEA}(t-1)$	$\Delta \ln \text{SHEA}(t-1)$	ECT(t-1)		ECT(t-1) $\Delta \ln \text{HBEA}_-(t-1)$	ECT(t-1) $\Delta \ln \text{GDEA}_-(t-1)$	ECT(t-1) $\Delta \ln \text{SHEA}_-(t-1)$
				coefficient	t-value			
$\Delta \ln \text{HBEA}_t$	-	0.082 [0.969]	0.270 [0.846]	-0.015	-1.629	-	0.138 [0.968]	0.251 [0.908]
$\Delta \ln \text{GDEA}_t$	12.951*** [0.000]	-	0.202 [0.895]	0.114***	7.648	34.900*** [0.000]	-	38.374*** [0.000]
$\Delta \ln \text{SHEA}_t$	0.009 [0.998]	3.873*** [0.009]	-	-0.010	-0.764	0.101 [0.982]	2.935** [0.019]	-

P-value in [ ]

Table 6에서는 VECM 모형 결과를 적용해서 각 시장간의 단기, 장기, 그리고 단기와 장기를 함께 결합해서 인과관계를 살펴보는 강인과관계를 분석하였다. 단기 인과관계의 경우  $p=3$  시차까지 적용되었기 때문에 wald test를 기반으로 검정통계량과 p-value를 도출하였다. 분석결과 Hubei가 Guangdong 시장을 단기 인과하며, Guangdong이 Shanghai 시장을 단기 인과하는 것으로 나타났다. 장기적 관점에서는 앞서 Table 5의 결과와 동일하게 Guangdong의 장기균형관계만 유의하게 나타나서, Hubei와 Shanghai가 장기적으로 Guangdong 시장을 인과하는 것으로 나타났다. 단기인과와 장기인과를 wald test로 함께 분석한 강(Joint) 인과 관계에서는 Hubei와 Shanghai가 Guangdong 시장을 1% 유의수준에서 강하게 인과하며, Guangdong 시장이 Shanghai 시장을 5% 유의수준에서 인과하는 것으로 나타났다.

인과성 검정에 이어 시장간 충격에 따른 반응 양상과 지속시간에 대한 분석을 하기위해서 충격반응함수(Impulse Response Function, IRF)를 이용한 분석을 Fig. 2와 같이 수행하였다. 충격반응함수는 1 표준편차에 해당하는 충격이 특정 내생변수에 가해질 경우, 이 변수 자신과 모델의 동적 구조를 통해 다른 모든 내생 변수에 전달되는 구조를 파악하게 해준다.

Guangdong시장이 Hubei와 Shanghai 시장에 가해진 충격에 대한 반응은 양의 영향을 받고 그 영향은 이후에 지속되는 것으로 나타났다. 이는 앞서의 인과성 분석의 결과를 지지해 준다. Hubei 시장은 Guangdong과 Shanghai 시장의 충격에 대해 단기적으로 양과 음의 영향을 번갈아 가지다가 장기적으로는 영향이 거의 0에 수렴한다. Shanghai 시장은 Guangdong과 Hubei 시장으로부터 받는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

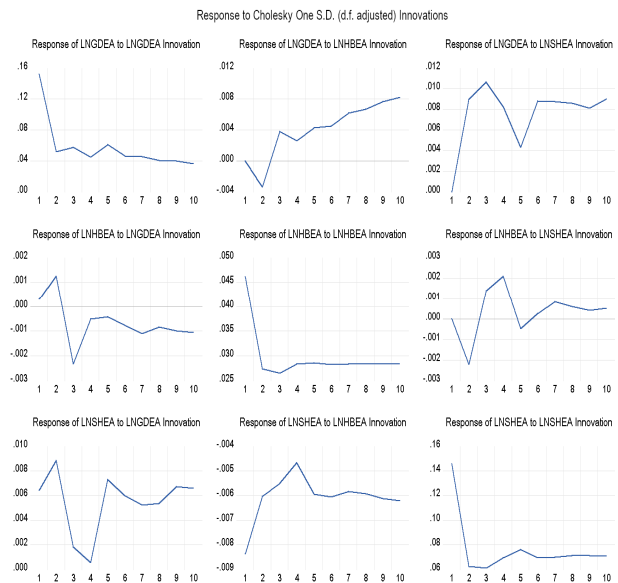


Fig. 2. Impulse Response Function between Three Carbon Markets in China

### 5. 결론

국가 내 개별 탄소 시장이 단일시장으로 통합되는 과정을 겪고 있는 국가는 세계적으로 중국이 유일하다. 세계 최대 탄소 발생국인 중국의 거대한 탄소 시장 통합이 효과적으로 이루어지고 중국의 ETS 제도가 효과적으로 작동할지 선제적으로 살펴보는 작업은 세계적 기후변화 대응 공조 관점에서 중요한 의미를 가진다. 본 연구는 EU ETS에 이어 세계에서 2번째로 큰 배출권 시장을 운영 중인 중국의 주요 3개의 지역시장 간 배출권 가격의 동조화 현상과 장단기 인과관계의 경로를 분석하였다. 2014년 배



출권 거래제를 지역단위로 시작해서 2021년부터 단계적으로 시장 통합을 추진하고 있는 상황에서 지역 주요 시장의 동조화와 인과관계분석은 거대 중국 탄소시장 통합을 전망하는데 있어서 의미있는 분석을 제시해준다.

본 연구의 주요 분석결과는 다음과 같다. 첫째, 3개 시장 간 공적분 관계가 존재하며 장기적인 균형 상태를 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 중국내 개별 배출권 시장이 중앙의 ETS 정책 기조, 화석연료가격에 공통되게 영향을 받는 결과로 이해가능하다. 주요 3개 시장의 장기적인 동조화는 향후 하나의 국가시장으로 통합하는 것이 큰 무리가 없음을 의미한다. 둘째, VECM을 기반으로 시장간 인과관계를 분석한 결과 Hubei와 Shanghai 시장이 최대 시장인 Guangdong 시장에 유의한 강 인과관계를 미치는 것으로 나타났다. 이는 최근 Guangdong 시장이 급성장하는 과정에서 기존 최대시장이었던 Hubei와 Shanghai로부터 탄소저감 기술이 전파되고 기타 영향을 직간접적으로 받은 이유인 것으로 해석된다. 셋째, 충격반응함수를 이용하여 시장간 충격에 따른 반응을 살펴본 결과 Guangdong 시장이 Hubei와 Shanghai의 충격에 양의 영향을 받고 이 영향이 이후 지속된다는 점에서 앞서 인과관계 결과를 지지해 주었다.

본 연구는 중국 지역별 시장의 탄소가격 간에 동조화가 이루어지고 있는 것은 보였지만 지역 개별적인 감축목표와 운영방법을 하나로 통일하는 과정은 일정 부분 진통이 예상되기 때문에 다음의 사항을 눈여겨 볼 필요가 있다. 제조업 기반 경제구조를 가진 중국의 지역들에 탄소저감 부담을 할당하는 것은 경제성장을 저해하는 요소이다. 따라서 개별 지역의 특성을 반영해서 자체적인 배출권거래제를 운영하는 방식에서 중앙할당 방식으로의 변화는 상당부분 형평성 관점에서 갈등에 직면할 수 있다. 또한 단일 시장으로써 탄소 배출권 거래의 공정성과 개방성을 증진하기 위해서는 지역의 탄소배출량 검증도 더욱 체계적으로 이루어져야 한다. 추가적으로 배출권관련 파생상품 시장 개발이 중국 탄소시장 통합에 긍정적인 역할을 할 수 있다. 거대한 중국 단일 탄소 시장에서 정보를 효율적으로 전달하고, 거래 유동성을 강화하며, 다양한 위험 헷지를 가능케하는 파생상품 시장은 시장 통합에 기여를 할 것으로 판단한다.

본 연구의 후속연구로 지역시장간 배출권 가격 인과관계 전파의 매개로 언급한 탄소저감기술 투자와 탄소가격 간의 관계를 살펴본다면 탄소가격 인과관계의 원인과 경로를 더욱 구체적으로 분석할 수 있을 것이다. 또한 이후 전국시장의 시계열자료가 축적될 경우 계속 유지되고 있

는 지역시장 간의 동조화 여부도 흥미로운 연구주제가 될 것이다.

## References

- Alberola E, Chevallier J, Chèze B. 2009. Emissions compliances and carbon prices under the EU ETS: A country specific analysis of industrial sectors. *Journal of Policy Modeling* 31(3): 446-462.
- Blyth W, Bunn D, Kettunen J. 2009. Wilson. Policy interactions, risk and price formation in carbon markets. *Energy Policy* 37(12): 5192-5207.
- Boersen A, Scholtens B. 2014. The relationship between european electricity markets and emission allowance futures prices in phase of the Eu (European Union) emission trading scheme. *Energy* 74(0): 585-594.
- Cheng Q, Qiao H, Gu Y, Chen Z, 2023. Price dynamics and interactions between the chinese and european carbon emission trading markets. *Energies* 2023, 16(4). doi: 10.3390/en16041624.
- Chang K, Pei P, Zhang C, Wu X. 2017. Exploring the price dynamics of CO<sub>2</sub> emissions allowances in China's emissions trading scheme pilots. *Energy Economics*, 67: 213-223. doi: 10.1016/j.eneco.2017.07.006.
- Daskalakis G, Psychoyios D, Markellos RN. 2009. Modeling CO<sub>2</sub> emission allowance prices and derivatives: Evidence from the european trading scheme. *Journal of Banking & Finance* 33(7): 1230-124.
- Ellerman A, Buchner B. 2008. Over-allocation or abatement? A preliminary analysis of the EU-ETS Based on the 2005-06 emissions data. *Environmental and Resource Economics* 41(2): 267-287.
- Feng Z, Zou L, Wei Y. 2011. Carbon price volatility: evidence from EU ETS. *Applied Energy* 88(3): 590-598.
- Goulder H, Hafstead M, Dworsky M. 2010. Impacts of alternative emissions allowance allocation methods under a federal cap-and-trade program. *Journal of Environmental Economics and Management* 60(3): 161-181.

- Fan J, Todorova N. 2017. Dynamics of China's carbon prices in the pilot trading phase. *Applied Energy* 208: 1452-1467. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.007.
- Fan X, Li X, Yin J, Tian L, Liang J. 2019b. Similarity and heterogeneity of price dynamics across China's regional carbon markets: A visibility graph network approach. *Applied Energy* 235: 739-746. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.07.026.
- Hammoudeh S, Lahiani A, Nguyen D, Sousa R. 2015. An empirical analysis of energy cost pass-through to CO<sub>2</sub> emission prices. *Energy Economics* 49: 149-156.
- Jaehn F, Letmathe P. 2010. The emissions trading paradox. *European Journal of Operational Research* 202(1): 248-254.
- Kim K, Won D, Jung S. 2019. An empirical analysis on the co-movement between international carbon emission trading prices. *Journal of Environmental Policy and Administration* 27(3): 1-20.
- Kim S, Park H. 2008. Research on price discovery process of CO<sub>2</sub> allowance trades in EU markets. *Journal of Korean National Economy* 26(1): 1-20.
- Li S, Gu G, Li L. 2020. Research on the common trend characteristics of China's carbon market transaction price. *Issues of Forestry Economics* 40(3): 270-277. doi: 10.16832/j.cnki.1005-9709.20190243.
- Lin B, Jia Z. 2019. Impacts of carbon price level in carbon emission trading market. *Applied Energy* 239: 157-170. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.194.
- Lyu J, Cao M, Wu K, Li H, Mohiuddin, G. 2020. Price volatility in the carbon market in China. *Journal of Cleaner Production* 255. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120171.
- Mo J, Yang S, Cho Y. 2005. The law of one price and dynamic relationship between EU ETS and nord pool carbon prices. *Environmental and Resource Economics Review* 14(3): 569-593.
- Oberndorfer U. 2009. Eu emission allowances and the stock market: Evidence from the electricity industry. *Ecological Economics* 68(4): 1116-1126.
- Parsons J, Ellerman A, Feilhauer S. 2009. Designing a U.S. market for CO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Corporate Finance* 21(1): 79-86.
- Wen F, Zhao H, Zhao L, Yin, H. 2022. What drive carbon price dynamics in China? *International Review of Financial Analysis* 79. doi: 10.1016/j.irfa.2021.101999.
- Xie X, Fang Y, Li S. 2017. The study on the integration degree in china's carbon market: Analysis based on the sample of pilot provinces and cities. *Journal of Finance and Economics*. doi: 10.16538/j.cnki.jfe.2017.02.006.
- Xun Z, James G, Liebman A, Zhao D, Ziser C. 2010. Partial carbon permits allocation of potential emission trading scheme in Australian electricity market. *Power Systems, IEEE Transactions on* 25(1): 543-553.
- Zhang Y, Wei Y. 2010. An empirical study on the dynamic impact of the fossil energy market on the international carbon market. *Management Review* 22(6): 34-41.
- Zhao J, Hobbs B, Pang S. 2010. Long-Run equilibrium modeling of emissions allowance allocation systems in electric power markets. *Operations Research* 58(3): 529-548.
- Zhao L, Wen F, Wang X. 2020. Interaction among China carbon emission trading markets: Nonlinear Granger causality and time-varying effect. *Energy Economics* 91. doi: 10.1016/j.eneco.2020.104901.