

전 지구, 대륙, 국가 규모에서 이산화탄소 순생물상교환량 자료 특성 분석

오혜련¹⁾ · 김현주²⁾ · 박두선^{1),3),4)*} · 고혜영¹⁾ · 윤정민⁵⁾

¹⁾경북대학교 대기환경탐사연구소, ²⁾차세대수치예보모델개발사업단, ³⁾경북대학교 지구과학교육과,
⁴⁾경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀, ⁵⁾캘리포니아 공과대학 제트추진연구소

(접수일: 2025년 9월 22일, 수정일: 2025년 10월 24일, 게재확정일: 2025년 11월 3일)

Comparison of Data on Net Biome Exchange of Carbon Dioxide at the Global, Continental, and National Scales

Hye-Ryun Oh¹⁾, Hyeon-Ju Gim²⁾, Doo-Sun R. Park^{1),3),4)*}, Hye-Young Ko¹⁾, and Jeongmin Yun⁵⁾

¹⁾Center for Atmospheric RE mote Sensing (CARE), Kyungpook National University, Daegu, Korea

²⁾Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

³⁾Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

⁴⁾BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Department of Atmospheric Sciences,
Kyungpook National University, Daegu, Korea

⁵⁾Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA

(Manuscript received 22 September 2025; revised 24 October 2025; accepted 3 November 2025)

Abstract This study examined net biome exchange (NBE) data from various institutions to evaluate the reliability and characteristics of NBE estimates on a global, continental, and national scale from 2015 to 2020. All three NBE datasets—CT2022, CMS-Flux, and CAMS—consistently showed that the global terrestrial biosphere acts as a net carbon sink. The mid- to high-latitude regions of the Northern Hemisphere, which are rich in vegetation, mainly absorb CO₂. However, the datasets show substantial discrepancies in the regional magnitude and variability of NBE. Large discrepancies in NBE exist among the datasets in the low-latitude Northern and Southern Hemispheres, where observational data are scarce. At the national scale, China, Canada, the United States, and Russia, while significant anthropogenic CO₂ emitters, are consistently identified as carbon sinks by the terrestrial biosphere across all datasets, indicating relatively low uncertainty in NBE estimates. However, countries such as India and Brazil show large inconsistencies in NBE estimates, highlighting significant uncertainties among the datasets. South Korea, Japan, and the United Kingdom exhibit near-zero NBE values across all datasets. These results underscore the necessity of multi-model comparisons, cross-validation, and expanded observational networks in underrepresented regions, as well as the importance of integrating biosphere carbon flux considerations into national carbon neutrality strategies.

Key words: Net biome exchange (NBE), CT2022, CMS-Flux, CAMS

*Corresponding Author: Doo-Sun R. Park, Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-5918, Fax : +82-53-950-5946
E-mail: dsrpark@knu.ac.kr

1. 서 론

대기 중 온실기체의 증가를 억제하여 궁극적으로 기후 변화를 완화하기 위해 우리나라를 포함한 세계 각국은 국가온실기체감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 설정하고, 온실기체 배출량 인벤토리를 정기적으로 구축하여 NDC 달성 여부를 공개적으로 평가받고 있다. 최근 전 세계적으로 재난 수준의 극한 기상 현상이 더욱 빈번하게 발생하고 있으며(Ritchie et al., 2022; NOAA, 2024), 이는 기후 변화의 한 단면으로 기후 적응 측면에서 인류 위기의 전조로 인식되고 있다(Paglia, 2018; Patterson et al., 2021). 기후 변화의 주 원인은 인간 활동으로 인한 대기 중 온실기체의 증가가 확실시 되고 있다(IPCC, 2023). 기후 변화 완화를 위한 국제적 노력의 일환으로, 2015년 파리협정(Paris Agreement)에서 전 지구 평균 기온을 산업화 이전 대비 2°C 이하로 유지하고, 가능한 한 1.5°C를 초과하지 않도록 하는 목표를 설정하였다. 우리나라도 2050년 탄소중립을 목표로 '탄소중립기본법'을 제정하는 등 다양한 노력을 기울이고 있다.

효과적인 국가 온실기체 감축 목표 달성을 위해서는 국가 단위의 온실기체 배출량과 흡수량을 정확하게 추정하는 것이 필수적이다. 인간이 대기 중으로 직접 배출하는 CO₂의 대부분은 화석 연료 사용과 시멘트 생산 과정에서 발생하는 화학 반응에 기인한다(Gilfillan and Marland, 2021). 파리협정에 따라 세계 각국은 배출량 인벤토리를 정기적으로 구축하고 있으며, 이를 기반으로 인위적 CO₂ 배출량이 산정되고 있다(Jones et al., 2021). 한편, 인위적으로 배출되는 온실기체의 상당 부분이 생물학적 활동과 현상을 통해 지면과 지중으로 흡수·배출된다(Friedlingstein et al., 2023). 주요 생물학적 교환 과정에는 식물의 광합성, 미생물의 호흡, 산불 등이 포함되며, 이러한 자연적 과정의 총합은 순생물상교환량(net biome exchange, NBE)이라 불린다. 그러나 이와 같은 다양한 생태계 과정을 통해 발생하는 온실기체의 배출과 흡수는 지구 규모 또는 국가 단위에서 측정이 어렵고 불확실성이 크다. 그럼에도 불구하고, 효과적인 국가 온실기체 감축 목표 달성을 위해서는 순생물상교환량을 국가 단위로 정량화하는 것이 필요하다.

순생물상교환량의 측정 및 추정은 다양한 방식으로 이루어져 왔다. 에디 공분산 기법을 이용한 지점 규모의 난류 속 측정이 생태학적 관점에서 전통적으로 널리 활용되어 왔다(Aubinet et al., 2012; Pastorello et al., 2020). 해당 방법은 견고히 확립된 관측기법으로 인정받고 있으나, 설비와 유지 비용이 높아 관측 지점의 수가 제한적이며, 개별 지점의 공간 대표성은 수 킬로미터에 불과하다. 최근에는 전 세계 관측망에서

일관된 절차로 생성된 자료가 배포되고 있으나(Pastorello et al., 2020), 이러한 자료로 국가 규모의 대표성을 확보하기에는 여전히 한계가 있다.

지역 또는 전구 규모에서 순생물상교환량을 추정하기 위한 대안으로 생물상의 물리적 과정을 수치적으로 구현한 과정기반 육상 생태계 수치모형을 활용할 수 있다(Sitch et al., 2008, 2015). 해당 수치모형은 지상 대기 상태에 따라 반응하는 대기 표층, 식생 및 토양에서 나타나는 생물리 과정을 수치적으로 모의한다(Sitch et al., 2003). 예를 들어, 식물의 광합성과 호흡, 식물체내 광합성 산출물의 축적, 미생물과 산불에 따른 합성물의 분해 및 대기 방출 등이 이에 해당한다. 이러한 과정기반 모델은 격자 공간 내 식생 및 미생물 군집의 생물리학적 특성을 모수화하기 위한 경험적 매개변수를 필요로 하는데 식물군집의 내재적 광합성 능력이나 생장계절의 시작을 결정하는 환경 조건 등이 이에 해당한다. 그러나 전 지구적으로 다양하게 분포하는 식물생태학적 특성을 충분히 반영하기에는 해당 물리 현상을 관측 하는데 제약이 크다. 따라서, 수치 모형은 그 개발 배경이나 적용 지역에 따라 모수화 방법 선정에 대한 임의성이 높고 이에 따라 모델 간 결과 차이가 크게 나타날 수 있다. 그렇기에, 순생물상교환량의 관측값이 부족한 시공간에 대해서 모의 결과의 현실성을 판단하기 어렵다.

이러한 수치모형의 불확실성을 줄이기 위한 노력으로, 자료동화기법과 대기수송모형을 결합한 역모델링(Inverse modeling) 시스템이 개발되어 왔다(Peters et al., 2007; Liu et al., 2021). 최근에는 비교적 설비 및 유지 비용이 저렴한 지상 대기 중 CO₂ 농도 관측망이 공간적으로 더욱 촘촘하게 구축되고 있으며(Masarie et al., 2014), 위성 기반의 CO₂ 복원 자료들이 생산되고 있다(Crisp et al., 2017; Taylor et al., 2022). 역모델링 기법은 다양한 관측 자료로부터 얻은 대기 중 CO₂ 농도와 대기 흐름(풍향과 풍속)의 시공간 분포를 고려하여 CO₂ 농도의 시간 변화를 추정하고, 이를 관측값과 비교하여 순생물상교환량을 산출한다(Tans et al., 1990; Gurney et al., 2004). 이 시스템에서는 과정기반 육상 생태계 모형의 수치 모의 결과를 대기수송 모형에 입력한 뒤, 모의된 CO₂ 농도와 관측값의 차이를 최소화하는 방향으로 초기 순생물상교환량 예측값을 보정한다. 이때, 초기 예측값과 관측값의 상대적인 불확실성을 반영하는 자료동화기법을 적용하여 불확실성이 낮은 정보에 더 큰 가중치를 부여함으로써 보다 신뢰도 높은 최종 산출물을 도출한다. 예를 들어, 관측자료의 불확실성이 비교적 작고, 관측자료가 많다면 최종 산출물은 관측 결과에 가까워진다. 반대로, 관측자료의 불확실성이 크고, 관측자료가 적은 경우에는 수치모의를 통해 산출된 초기 예측값에서 큰 변

화 없이 최종 산출물이 결정된다. 이러한 역모델링 기법은 공간적으로 조밀한 대기 중 CO₂ 농도 관측망이 구축된 지역에서는 국가를 대표하는 순생물상교환량의 산출이 가능하다는 장점이 있지만, 입력 자료인 풍향과 풍속의 공간 해상도와 대기 중 CO₂ 농도 관측 빈도 및 정확도에 민감하다는 단점이 있다(Tans et al., 1990; Gurney et al., 2004).

본 연구에서는 서로 다른 기관의 역모델링 시스템을 통해 생산된 전구 순생물상교환량의 격자 자료를 비교·분석하여 자료 간 특성을 확인하였다. 또한 해당 자료를 국가 단위 값으로 변환함으로써 전지구, 대륙, 국가 규모에서 각 자료의 순생물상교환량 특성과 불확실성을 종합적으로 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 순생물상교환량 자료

본 연구에서는 세 가지 역모델링 시스템에서 산출된 전구 규모의 순생물상교환량 자료를 사용하였다. 각 자료의 기본 정보를 Table 1에 요약하였다.

Carbon Tracker (CT)는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 개발한 역모델링 시스템으로(Peters et al., 2007), 전 지구에 구축된 지상 및 항공 대기 CO₂ 농도 관측 자료를 활용한다(Masarie et al., 2014). 총 66개 실험실에서 제공하는 559개 지점의 관측 자료가 자료동화 과정에 사용된다. 과정 기반 생태계 모델인 Carnegie-Ames Stanford Approach (CASA; Field et al., 1995; Potter et al., 1993)에서 예측한 순생태계생산량(Net Ecosystem Exchange) 지상생태계의 식물적 광합성을 통한 지상/지중 탄소 흡성량에 유기체 호흡을 통한 탄소 배출량을 제한 값과 Global Fire Emissions Database에서 제공하는 산불에 의한 탄소 교환량 값을 더하여 순생물상교환량을 생산하여 초기 예측값으로 활용한다. 대기 수송 모형으로는 Transport Model 5 (TM5; Huijnen et al., 2010)을 활용한다. 본 연구에서는 최신

Carbon Tracker 시스템인 CT2022에서 산출된 자료를 사용하였다. 이 자료는 순생태계생산량과 산불에 의한 교환량을 분리하여 제공하여, 두 변수의 합으로 순생물상교환량을 산출할 수 있다.

Carbon Monitoring System-Flux (CMS-Flux)는 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 개발한 역모델링 시스템이다(Liu et al., 2021). 이 시스템을 활용한 순생물상교환량 생산에는 Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT; Taylor et al., 2022)와 Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2; Crisp et al., 2017) 위성의 복원 대기 CO₂ 농도 자료를 각각 2010년부터 2014년까지, 2015년부터 2022년까지 사용한다. 과정 기반 생태계 모형으로는 Carbon Data Assimilation and Modelling (CARDAMOM; Bloom et al., 2016)이 활용되는데, 이 모형은 위성으로 복원되는 식생 자료를 동화하는 기능을 포함한다. 대기 수송 모형으로는 Goddard Earth Observing System-Chem (GEOS-Chem; Bey et al., 2001)을 활용한다. 본 연구에서는 CMS-Flux version 3을 사용하였으며, 해당 버전에서는 1° × 1° 자료를 제공한다.

코페르니쿠스 대기 감시 서비스(Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS)에서 운영하는 역모델링 시스템은 개발 버전에 따라 서로 다른 대기 중 CO₂ 농도 자료를 이용한다. 본 연구에서는, 최신 시스템 version 24r1을 통해 산출된 순생물상교환량을 사용하였으며, 해당 자료는 OCO-2 위성의 복원 대기 중 CO₂ 농도 자료가 역모델링에 활용되었다. 해당 시스템에서 과정 기반 생태계 모형으로는 Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE; Krinner et al., 2005)를 대기 수송 모형으로는 Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model (LMDz; Hourdin et al., 2006)를 각각 사용한다.

세 개의 순생물상교환량 자료는 서로 다른 기간을 갖는다. CT2022는 지상 및 항공 CO₂ 농도 관측망이 밀집되기 시작한 2000년부터 자료를 제공하고, CMS-Flux는 GOSAT 관측이 시작된 2010년부터 산출된다.

Table 1. Brief descriptions of datasets of global gridded net biome exchange.

| Dataset | Period | Horizontal resolution | Temporal resolution | Input CO ₂ concentration observation | Ecosystem model | Transport model |
|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---|-----------------|-----------------|
| CT2022 ¹ | 2000.1~2021.02 | 1° × 1° | 3-hourly | In-situ measurement network | CASA | TM5 |
| CMS-Flux ² | 2010.1~2022.12 | 1° × 1° | Monthly | GOSAT, OCO-2 | CARDAMOM | GEOS-Chem |
| CAMS ³ | 2014.10~2024.2 | 1° × 1° | 3-hourly | OCO-2 | ORCHIDEE | LMDz |

¹Obtained from <https://gml.noaa.gov/aftp/products/carbontracker/co2/CT2022/fluxes>

²Obtained from <https://acdsc.gsfc.nasa.gov/data/CMS/CMSFluxNBE.3>

³Obtained from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/cams-greenhouse-gas-ghg-flux-inversions>

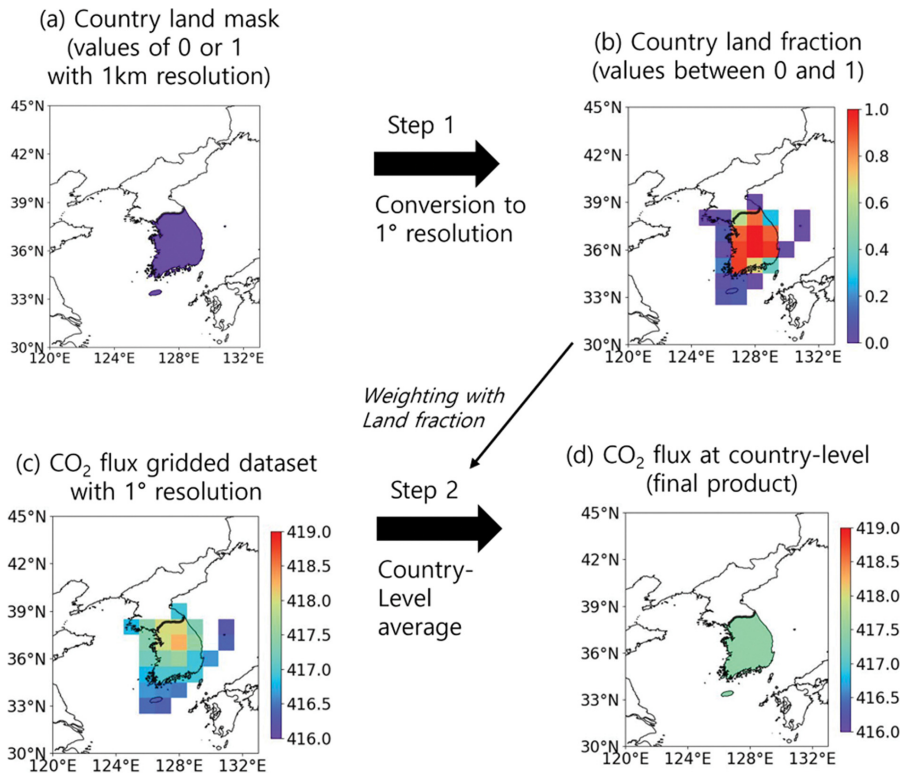


Fig. 1. Example process for generating country-level CO₂ NBE datasets. Step 1 uses a 1-km national territory mask to calculate weighting factors based on the proportion of each 1° grid cell covered by national land (a and b). In Step 2, these weights are applied to the gridded NBE dataset to calculate a weighted average, resulting in representative country-level values (c and d).

CAMS는 OCO-2 관측이 시작된 2014년 후반부터 자료를 제공한다. 세 자료는 공통적으로 2014년 후반부터 2021년 초반까지의 기간을 포함하므로, 해당 공통 기간에 대해 자료 간 비교가 가능하다.

2.2 국가 단위 순생물상교환량 자료 변환

전 지구 규모에 대해 격자 단위로 제공되는 순생물상교환량 자료를 국가 단위로 변환하였다. 이를 위해 TM World Borders Dataset 0.3의 1-km 국가 영토 자료를 활용하여(<https://larmarange.github.io/prevR/reference/TMWorldBorders.html#source-1>), 격자 가중 자료를 생산하였다(Figs. 1a-b). 즉, 순생물상교환량 자료 격자(1° × 1°)에 대한 국가 영토 비율을 산출하고, 이를 순생물상교환량 격자 값에 가중하여 국가 단위로 평균하여 국가별 대표값을 산출하였다(Figs. 1c-d).

3. 결 과

3.1 순생물상교환량의 시공간 분포

세 가지 순생물상교환량 자료(CT2022, CMS-Flux,

CAMS)의 공통 기간인 2015년부터 2020년까지 전 지구 및 세 위도대(30°N-90°N, 30°S-30°N, 90°S-30°S)에 대해 평균값과 표준편차를 비교하였다(Table 2). CT2022 자료의 90°S-30°S 지역을 제외한 대부분 지역에서 순생물상교환량이 음수로 나타났다. 이는 대부분의 지역에서 대기 중 CO₂가 지면으로 흡수되는 것을 의미한다. 전 지구적으로 볼 때, CMS-Flux는 연평균적으로 매년 8.57 Gt CO₂ yr⁻¹, CT2022는 매년 12.73 Gt CO₂ yr⁻¹가 흡수되는 것으로 추정하였다. CAMS는 이들 자료의 중간 정도인 매년 10.0 Gt CO₂ yr⁻¹의 순흡수를 보였으나, 다른 자료들에 비해 표준편차(160.83 Gt CO₂ yr⁻¹)가 가장 큰 것으로 나타나 순생물상교환량의 변동성이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 세 자료의 평균값 사이의 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석(ANOVA test)을 수행하였다. 그 결과, 모든 자료가 CO₂의 순흡수를 나타내고 있음에도 불구하고 자료들 간의 평균값에는 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다.

특히, 위도대별로 순생물상교환량의 두드러진 차이가 있었다. 다른 지역들에 비해 북반구 중·고위도(30°N-

Table 2. The period average (Mean), standard deviation (STDDEV) of the NBE of CO₂ of CT2022, CMS-Flux, and CAMS for the globe, 30°N-90°N, 30°S-30°N, and 30°S-90°S. The unit of average and standard deviation is Gt CO₂ yr⁻¹. All ANOVA tests are statistically significant at the 99% confidence level.

| Region | Dataset | Common period (2015~2020) | |
|-----------|----------|---------------------------|--------|
| | | Mean | STDDEV |
| Globe | CT2022 | -12.73 | 59.04 |
| | CMS-Flux | -8.57 | 38.37 |
| | CAMS | -10.00 | 160.83 |
| 30°N-90°N | CT2022 | -9.47 | 28.39 |
| | CMS-Flux | -8.13 | 19.47 |
| | CAMS | -7.81 | 38.42 |
| 30°S-30°N | CT2022 | -3.36 | 17.37 |
| | CMS-Flux | -0.43 | 8.28 |
| | CAMS | -1.84 | 83.16 |
| 30°S-90°S | CT2022 | 0.10 | 2.67 |
| | CMS-Flux | -0.02 | 1.27 |
| | CAMS | -0.35 | 14.13 |

90°N)에서는 CO₂ 흡수가 가장 크게 나타났다. CT2022, CMS-Flux, CAMS는 각각 매년 평균적으로 -9.47, -8.13, -7.81 Gt CO₂ yr⁻¹의 순흡수를 기록하며, 이는 북반구 중·고위도 지역이 전지구 탄소 흡수의 주요 지역임을 보여준다. 이러한 경향은 해당 지역에서 과거에 벌목되었던 숲의 재성장과, 온난화로 인한 생장 기간 연장으로 인해 광범위하게 분포한 산림의 영향을 반영한 것으로 해석된다(Pan et al., 2011; Ciais et al., 2019). 한편, CAMS는 전반적으로 평균값의 절대값은 가장 작지만 변동성은 가장 커서 지역별 탄소 플럭스 차이가 크다는 것을 유추할 수 있다. 저위도(30°S-30°N) 지역에서는 자료 간 순생물상교환량의 평균값 차이가 가장 크게 나타났다. CT2022는 -3.36 Gt CO₂ yr⁻¹로 순흡수가 상대적으로 강하게 나타난 반면, CMS-Flux는 -0.43 Gt CO₂ yr⁻¹로 상대적으로 약한 흡수를 보였다. 남반구 중·고위도(90°S-30°S)에서는 순생물상교환량이 -0.35 Gt CO₂ yr⁻¹ (CAMS)에서 0.10 Gt CO₂ yr⁻¹ (CT2022) 범위로, 전반적으로 순생물상교환량이 중립에 근접함을 의미한다. 위도대별로 살펴본 때에도 세 자료 간 평균값은 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 변동성 또한 크게 나타났다. 이는 각 자료의 불확실성이 상당히 크다는 것을 의미한다. 이러한 차이는 각 역모델링 시스템에 사용하는 관측 자료의 종류와 자료동화 방법의 차이에서 기인한 것으로 보인다. 즉, CT2022는 지상 관측망 자료를 기반으로 하기 때문에 관측 지점이 밀집한 북반구에서 상대적으로 높은 신뢰도를 보인다. 반면, CMS-Flux와 CAMS는 위성관측 기반 역모델링 시스템으로서 직접 관측이 부족한 열대 및 남반구에서도 일정 수준의 신

뢰성을 확보 할 수 있지만 고위도 지역에서는 불확실성이 상대적으로 큰 것으로 보고되고 있다(Jiang et al., 2022). 따라서 자료 간 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 순생물상교환량의 시공간적 특성을 자세히 살펴볼 필요가 있다.

Figure 2는 세 자료의 2015~2020년 기간 동안 연평균 순생물상교환량의 시간 변화를 보여준다. 전 지구적으로는 모든 자료에서 순생물상교환량의 순흡수를 나타내고 있지만 경년 변화가 크게 나타났다. 특히, 2017~2018년에 CO₂ 흡수가 최대치에 도달한 이후 점차 약화되는 경향이 특징적이다(Fig. 2a). CT2022와 CMS-Flux는 순생물상교환량의 절대적인 크기에는 차이가 있지만, 연도별 변화 패턴은 대체로 유사하다. 그러나 위도대별로 살펴보면 순생물상교환량의 시간 변화 패턴은 자료 간에 상이하였다(Figs. 2b-d). 북반구 중·고위도(30°N-90°N)의 경우, CT2022에서는 순생물상교환량의 감소 추세(CO₂ 흡수 강화)가 나타나는 반면, 나머지 두 자료에서는 오히려 순생물상교환량의 증가 추세(CO₂ 흡수 약화)가 나타났다(Fig. 2b). 저위도(30°S-30°N)의 경우, CMS-Flux와 CAMS 자료는 2017년을 기점으로 CO₂ 순배출에서 순흡수로 전환되었다(Fig. 2c). 그에 반해, CT2022 자료는 일관되게 CO₂ 순흡수를 유지하였다. 마지막으로 남반구 중·고위도(90°S-30°S)의 경우, CT2022와 CMS-Flux는 순생물상교환량이 중립 근처에서 상대적으로 작은 연변동성을 가지고 변동하는 반면, CAMS는 경년 변화가 매우 크게 나타났다(Fig. 2d). 이와 같은 순생물상교환량의 연변동성은 식생의 생장, 토양 미생물의 활동, 그리고 수분 스트레스 등에 직접적인 영향을 미치는

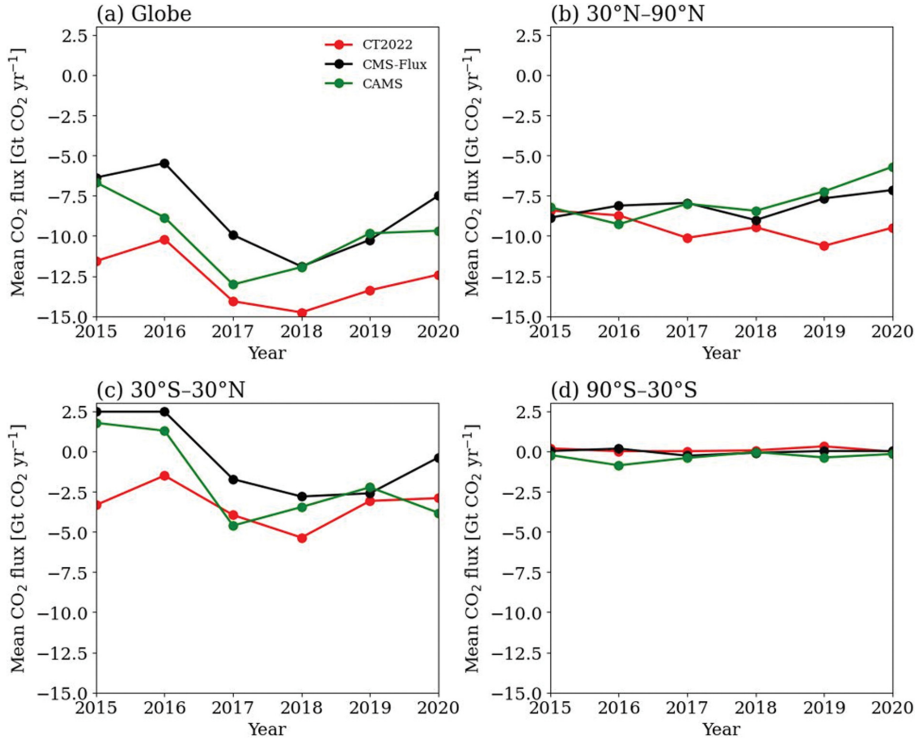


Fig. 2. Timeseries of the NBE ($\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$) from 2015 to 2020 derived from three inverse modeling systems CT2022 (red), CMS-Flux (black), and CAMS (green) for (a) the globe, (b) the Northern Hemisphere extratropics (30°N - 90°N), (c) the tropics (30°S - 30°N), and (d) the Southern Hemisphere extratropics (90°S - 30°S).

Table 3. The seasonal average (Mean), standard deviation (STDDEV) of the NBE of CO_2 of CT2022, CMS-Flux, and CAMS for the Northern hemisphere and Southern hemisphere. The unit of average and standard deviation is $\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$. All ANOVA tests are statistically significant at the 99% confidence level.

| Season | Dataset | Northern hemisphere | | Southern hemisphere | |
|--------|----------|---------------------|---------------|---------------------|--|
| | | Mean (STDDEV) | Mean (STDDEV) | | |
| DJF | CT2022 | 12.83 (0.68) | -0.82 (0.42) | | |
| | CMS-Flux | 15.04 (0.53) | -3.14 (0.89) | | |
| | CAMS | 10.13 (0.46) | -3.35 (0.69) | | |
| MAM | CT2022 | 2.62 (0.68) | -1.00 (0.85) | | |
| | CMS-Flux | 6.34 (0.48) | -3.05 (1.0) | | |
| | CAMS | 2.30 (0.36) | -3.22 (0.73) | | |
| JJA | CT2022 | -44.17 (0.77) | -0.17 (0.35) | | |
| | CMS-Flux | -40.64 (0.79) | 2.58 (0.4) | | |
| | CAMS | -27.78 (0.88) | 0.79 (0.44) | | |
| SON | CT2022 | 13.23 (0.90) | 0.51 (0.47) | | |
| | CMS-Flux | 8.25 (0.49) | 3.2 (0.84) | | |
| | CAMS | 9.10 (0.80) | 3.14 (0.66) | | |

온도 및 강수 패턴의 변화와 밀접하게 관련되어 있으며, 이는 엘니뇨(El Niño), 북극진동(Arctic Oscillation),

태평양 10년 변동(Pacific Decadal Oscillation) 등 다양한 대규모 기후 변동성과 연계되어 있다(Pan et al.,

2011; Zhang et al., 2021; Li et al., 2024). 특히, 2015년과 2016년에는 전 지구규모와 저위도 지역에서 탄소 흡수량이 상대적으로 감소했는데(Figs. 2a, c), 이는 이 시기에 발생한 강한 엘니뇨로 인해 열대 지역의 가뭄이 심화되면서 기온 상승과 강수량 감소가 동시에 발생한 결과로 알려져 있다(Bastos et al., 2018; Burton et al., 2020).

순생물상교환량은 실제 식생의 성장 활동과 밀접하게 연관되어 있으므로, 그 계절적 변동성을 함께 살펴볼 필요가 있다(Table 3). 북반구와 남반구를 나누어 살펴보았을 때, 전반적으로 자료 간의 절대값 차이는 있지만 계절적인 흡수/배출의 방향성은 유사한 것으로 나타났다. 세 역모델 모두 북반구의 여름철(JJA)에 매우 큰 음의 값(CT2022: $-44.17 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$, CMS-Flux: $-40.64 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$, CAMS: $-27.78 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$)이 나타나, 식생의 광합성이 극대화되는 시기에 강한 탄소 흡수가 이루어짐을 보여준다. 반면, 겨울철(DJF)에는 탄소의 순배출이 나타났다. 이러한 계절적 변동은 북반구 중·고위도 지역에 광범위하게 분포한 산림의 성장 주기를 직접적으로 반영한 결과로 해석된다. 한편, 남반구에서는 전반적으로 순생물상교환량의 변동 폭이 작으며, 남반구 여름철(DJF)을 제외한 다른 계절에서는 순흡수와 순배출이 혼재되어 나타났다. 이는 남반구의 육지 면적이 상대적으로 작고 해양 탄소 플럭스가 순생물상교환량에 영향을 미치기 때문으로 보인다(Williams et al., 2024).

순생물상교환량의 공간 분포 역시 자료 간 큰 차이를 보였다(Fig. 3). 세 자료 모두 유럽 남부, 일부 아시아와 북아메리카 지역을 중심으로 CO_2 흡수(음의 값)가 나타났다(Table 4). 그러나 CO_2 흡수의 강도와 최대 및 최소가 나타나는 지역은 자료마다 다르게 나타났다. 특히, 러시아, 미국 중부(네브래스카, 아이오와, 일리노이) 그리고 알래스카 지역은 세 자료 공통으로 강한 탄소 흡수 지역으로 나타났다. 이들 지역의 경우, 광범위한 북방림이 분포하고 있거나 농경지로 봄과 여름의 광합성 활동이 활발하고 다른 지역에 비해 상대적으로 낮은 온도로 인해 토양 탄소의 분해 속도가 느려 강한 순흡수 지역으로 나타나는 것으로 보인다(Crowell et al., 2019). 그 결과, 이들 지역이 북반구 중·고위도 지역의 CO_2 순흡수 강화에 주요하게 기여한 것으로 보인다(Table 4; Fig. 3b). 한편, 그 외 지역들은 자료에 따라 CO_2 흡수 또는 배출 양상이 다르게 나타났다. 예를 들면, CT2022의 경우, 북유럽(스웨덴, 핀란드)과 아프리카 대륙 중부(중앙 아프리카 공화국, 남수단)지역에서 각각 CO_2 배출과 흡수가 나타났다(Fig. 3a). 반면, CMS-Flux와 CAMS의 경우, 반대로 나타났다. 각 대륙별 순생물상교환량 역시 자료 간 평균값과 표준편차의 큰 차이를 보이는

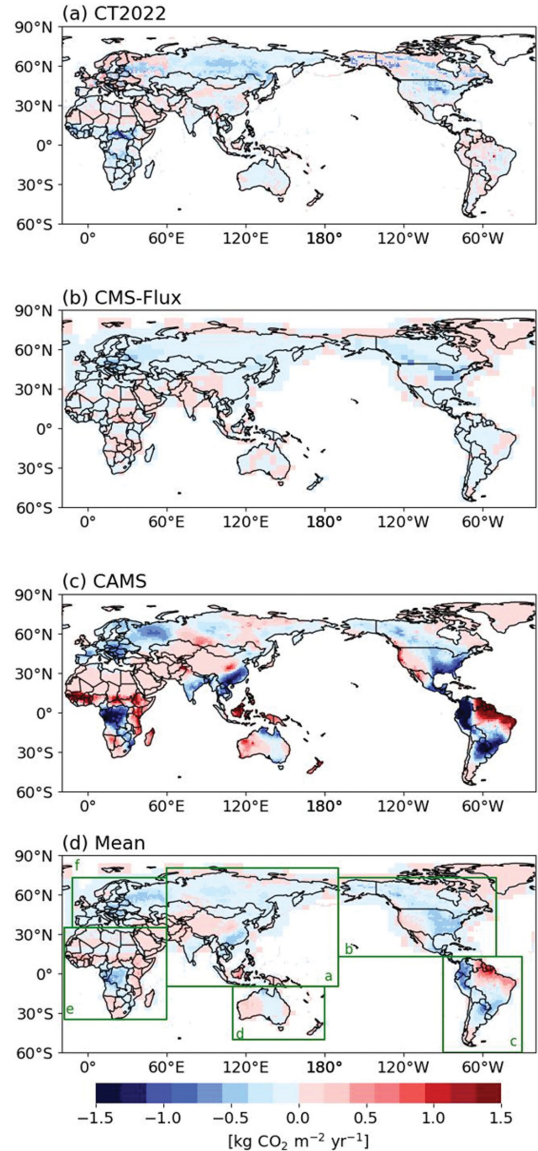


Fig. 3. The NBE of (a) CT2022, (b) CMS-Flux, (c) CAMS, and (d) average of the three data for 2015–2020.

것으로 나타났다(Table 4). 탄소 저장량이 큰 것으로 알려진 열대림은 탄소 흡수원으로서 역할이 상대적으로 작거나 불확실하게 나타났다. 남아메리카의 경우, CAMS는 브라질 동북부를 비롯한 수리남, 가이아나 지역의 강한 CO_2 배출을 나타내고 있지만, 다른 자료들은 해당 지역의 상대적으로 약한 배출로 인해 평균적으로 CO_2 순흡수를 나타내고 있다. 이는 대규모 산림 벌채, 농경지 전환, 산불 등으로 인한 탄소 배출이 자연적인 흡수량을 상당 부분 상쇄한 결과로 보인다.

Table 4. The period average of the NBE of CO₂, and standard deviation (STDDEV) of CT2022, CMS-Flux, and CAMS for six continents depicted as boxes in Fig. 2d. The unit of average and standard deviation is Gt CO₂ yr⁻¹. All ANOVA tests are statistically significant at the 99% confidence level, except for North America, which is significant at the 95% level.

| Region | Dataset | Common period (2015~2020) | |
|-------------------|----------|---------------------------|--------|
| | | Mean | STDDEV |
| Asia (a) | CT2022 | -6.06 | 13.07 |
| | CMS-Flux | -2.16 | 5.78 |
| | CAMS | -0.37 | 27.40 |
| North America (b) | CT2022 | -3.18 | 8.87 |
| | CMS-Flux | -3.47 | 8.30 |
| | CAMS | -3.74 | 16.75 |
| South America (c) | CT2022 | -0.00 | 0.02 |
| | CMS-Flux | -0.68 | 1.75 |
| | CAMS | -0.00 | 0.02 |
| Oceania (d) | CT2022 | -0.18 | 1.18 |
| | CMS-Flux | 0.00 | 0.49 |
| | CAMS | 0.46 | 5.33 |
| Africa (e) | CT2022 | -2.20 | 6.37 |
| | CMS-Flux | 0.28 | 3.16 |
| | CAMS | 0.61 | 19.14 |
| Europe (f) | CT2022 | -2.82 | 8.88 |
| | CMS-Flux | -1.88 | 5.96 |
| | CAMS | -2.52 | 19.31 |

Table 5. The averaged NBE (STDDEV) over the 2015~2020 period from the datasets of CT2022, CMS-Flux, and CAMS. AVG indicates the dataset-average values. All ANOVA tests are statistically significant at the 95% confidence level, except for South Korea, Canada, South Africa, Australia, and United Kingdom, which are not significant.

| Rank | Country (The number of grids within each country at 1° × 1° resolution) | NBE [Gt CO ₂ yr ⁻¹] | | | |
|------|---|--|--------------|--------------|-------|
| | | CT2022 | CMS-Flux | CAMS | AVG |
| 1 | China (1091) | -0.53 (0.46) | -0.34 (0.14) | -1.38 (0.56) | -0.75 |
| 2 | USA (1385) | -1.59 (0.52) | -1.71 (0.24) | -2.59 (0.67) | -1.96 |
| 3 | India (372) | -0.15 (0.16) | 0.10 (0.03) | -0.66 (0.46) | -0.24 |
| 4 | Russia (3497) | -4.95 (0.76) | -2.76 (0.39) | -2.55 (1.12) | -3.42 |
| 5 | Japan (107) | -0.01 (0.02) | -0.00 (0.00) | 0.05 (0.04) | 0.01 |
| 6 | Iran (198) | -0.00 (0.01) | -0.00 (0.00) | 0.04 (0.01) | 0.01 |
| 7 | Germany (70) | 0.05 (0.05) | -0.11 (0.06) | -0.12 (0.14) | -0.06 |
| 8 | Saudi Arabia (215) | 0.00 (0.00) | -0.00 (0.00) | 0.00 (0.00) | 0.00 |
| 9 | Indonesia (378) | 0.02 (0.07) | 0.00 (0.16) | 0.68 (0.29) | 0.23 |
| 10 | South Korea (26) | -0.00 (0.01) | -0.00 (0.00) | -0.00 (0.02) | -0.00 |
| 11 | Canada (2238) | -1.69 (0.27) | -1.72 (0.21) | -1.38 (0.73) | -1.60 |
| 12 | Brazil (811) | -0.07 (0.46) | -0.30 (0.58) | 1.15 (0.66) | 0.26 |
| 13 | Turkey (115) | -0.07 (0.03) | -0.00 (0.00) | 0.05 (0.10) | -0.00 |
| 14 | South Africa (153) | -0.05 (0.02) | -0.01 (0.02) | 0.04 (0.14) | -0.00 |
| 15 | Mexico (257) | -0.05 (0.05) | -0.00 (0.00) | -0.27 (0.16) | -0.11 |
| 16 | Australia (814) | -0.21 (0.08) | -0.00 (0.19) | 0.26 (1.08) | 0.01 |
| 17 | United Kingdom (73) | -0.00 (0.04) | -0.01 (0.01) | 0.02 (0.03) | 0.00 |
| 18 | Italy (74) | -0.00 (0.01) | -0.02 (0.00) | -0.07 (0.07) | -0.03 |
| 19 | Poland (60) | -0.06 (0.04) | -0.17 (0.05) | -0.23 (0.10) | -0.15 |
| 20 | Viet Nam (64) | -0.03 (0.02) | -0.00 (0.00) | -0.16 (0.09) | -0.07 |

이러한 결과는 자료에 따라 순생물상교환량의 방향성이 다를 수 있고, 지역별 불확실성이 매우 크다는 것을 의미한다. 그리고 CAMS의 경우, 순생물상교환량의 공간 변동성이 CT2022와 CMS-Flux에 대비 약 두 배 이상 크게 나타났다(Fig. 3c). CT2022와 CMS-Flux는 순생물상교환량이 -0.5 에서 $0.5 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 범위 안에 분포한 반면(Figs. 3a-b), CAMS는 -1.5 에서 $1.5 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 범위로 나타났다(Fig. 3c). 이러한 차이는 각 모델의 구조, 입력 자료, 역모델링 기법의 차이에서 기인하며, 지역별 탄소 플럭스 추정치의 불확실성이 상당함을 시사한다. 따라서 다중 모델 기반의 비교 및 교차 검증이 필수적임을 강조한다.

순생물상교환량의 불확실성은 대륙 차원에 머무르지 않고, 실제 탄소중립 정책 수립과 국제 협약 이행이 이루어지는 국가 단위의 평가에도 영향을 줄 수 있다. 특히, 인위적 CO_2 배출량이 많은 국가들의 경우, 국가별 순생물상교환량의 규모와 불확실성을 파악하는 것은 순 탄소수지 진단과 감축 이행에 핵심적이다. 따라서, 인위적 CO_2 배출량 상위 20개국을 대상으로 국가별 순생물상교환량을 비교하였다(Table 5). 평균적으로 주요 배출국들에서 음의 값(흡수)이 나타났으나, 그 규모와 방향성은 자료에 따라 차이를 보였다. 중국, 미국, 러시아, 캐나다는 세 자료 모두에서 강한 CO_2 흡수원으로 추정되었고, 특히, 러시아는 평균 $-3.42 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 로 가장 큰 순흡수원으로 나타났다. 이들 국가는 상대적으로 넓은 영토를 가지고 있고, 광범위한 산림을 보유하고 있어 자료 간 추정값도 비교적 일관되게 나타났으며, 따라서 국가 단위 불확실성이 상대적으로 작았다. 반면, 인도네시아는 모든 자료에서 공통적으로 순배출을 나타냈다. 한편, 인도, 독일, 브라질 등은 자료에 따라 흡수와 배출이 상반되게 나타나 국가 단위 순생물상교환량의 불확실성이 큰 것으로 보인다. 그리고 한국, 일본, 영국 등 일부 국가들은 세 자료 모두 순생물상교환량이 거의 0에 가까운 값으로 추정되었는데, 이는 이들 국가에서 생물권 기반의 흡수 규모가 제한적임을 보여준다. 이러한 국가들의 탄소중립 실현을 위해서는 에너지 구조 전환과 함께 토지 이용 변화를 통한 생물권 기반의 흡수 능력 확대가 필요함을 시사한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 세 가지 주요 역모델링 시스템(CT2022, CMS-Flux, CAMS)을 통해 산출된 순생물상교환량의 전구 격자 자료의 특성을 분석하고, 이를 국가 단위로 변환하여 국가별 특성을 비교하였다.

전지구 규모에서 CT2022, CMS-Flux, CAMS는 각각 -12.73 , -8.57 , $-10.0 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 의 연평균 흡수를 나

타냈으나, 세 자료 평균값에는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 각 역모델링 시스템이 사용하는 자료동화 입력자료와 방법론의 차이에서 비롯된 것으로, 결과적으로 순생물권교환량의 차이를 초래하는 것으로 판단된다. 지역별로는 상당한 시공간적 차이와 변동성이 확인되었으며, 특히, 식생이 밀집된 북반구 중·고위도(30°N - 90°N)에서 가장 많은 CO_2 흡수가 나타났다. 이는 산림의 재성장 과 기후 변화에 따른 식생 증가의 영향을 반영한 것으로 해석된다. 관측소가 밀집한 유럽과 미국, 그리고 동아시아의 일부 중위도 지역에서 자료 간 차이가 비교적 작게 나타났으며, 이는 관측 기반 정보가 순생물상교환량 추정의 불확실성을 줄이는데 기여했음을 시사한다. 이들 지역에 속한 국가들(중국, 러시아, 미국, 캐나다)은 세 자료 모두에서 뚜렷한 CO_2 흡수원으로 나타났다. 반면, 관측 자료가 상대적으로 부족한 북반구 저위도와 남반구에서는 자료간 순생물상교환량의 격차가 크게 나타나 불확실성이 큰 것으로 보인다. 이러한 불확실성은 국가 단위에서도 나타나, 인도와 브라질 등은 자료에 따라 흡수와 배출이 상반되게 나타났다. 또한 한국, 일본, 영국 등은 세 자료 모두에서 순생물상교환량이 거의 0에 가까운 값으로 추정되었는데, 이는 탄소중립 달성을 위해 토지 이용 관리에 기반한 흡수원 확충과 에너지 구조 전환이 동시에 필요함을 시사한다. 특히, 영토 면적이 상대적으로 작은 국가의 경우, 공간 해상도가 큰 자료를 활용할 때 결과의 불확실성이 더욱 커질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 전 지구적으로 이용 가능한 순생물상교환량 자료가 제한적인 상황에서 자료 간 일관성을 평가하는 것은 국가별 탄소수지 산정과 탄소중립 정책 수립에 있어 중요한 의미를 갖는다. 이를 위해서는 향후 보다 고해상도의 순생물상교환량 자료 개발과 검증이 지속적으로 이루어져야 함을 시사한다.

본 연구 결과는 역모델링 기반 순생물상교환량 추정의 상당한 불확실성이 있음을 보여주며, 자료 간 차이를 줄이기 위해서는 다중 모델 비교와 교차 검증, 그리고 저위도 및 남반구 지역의 관측망 확충이 필수적이다. 동시에, 국가별 탄소중립 전략 수립 시에는 이러한 불확실성을 충분히 고려하여, 과학적 근거에 기반한 흡수원 강화와 감축 노력이 병행되어야 함을 강조한다. 향후 연구에서는 기후 변화에 따른 순생물상교환량의 장기적인 변화 추세를 평가하고, 이를 국가적 감축 목표와 연계하는 노력이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 기초연구실 사업(RS-2023-00207866)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aubinet, M., T. Vesala, and D. Papale, 2012: Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. *Springer Science & Business Media*, 85-131, doi:10.1007/978-94-007-2351-1.
- Bastos, A., and Coauthors, 2018: Impact of the 2015/2016 El Niño on the terrestrial carbon cycle constrained by bottom-up and top-down approaches. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **373**, 20170304, doi:10.1098/rstb.2017.0304.
- Bey, I., and Coauthors, 2001: Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **106**, 23073-23095, doi:10.1029/2001JD000807.
- Bloom, A. A., J.-F. Exbrayat, I. R. van der Velde, L. Feng, and M. Williams, 2016: The decadal state of the terrestrial carbon cycle: Global retrievals of terrestrial carbon allocation, pools, and residence times. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **113**, 1285-1290, doi:10.1073/pnas.1515160113.
- Burton, C., R. A. Bett, C. D. Jone, T. R. Feldpausch, M. Cardoso, and L. O. Anderson, 2020: El Niño driven changes in global fire 2015/16. *Front. Earth Sci.*, **8**, doi: 10.3389/feart.2020.00199.
- Ciais, P., and Coauthors, 2019: Five decades of northern land carbon uptake revealed by the interhemispheric CO₂ gradient. *Nature*, **568**, 221-225, doi:10.1038/s41586-019-1078-6.
- Crisp, D., and Coauthors, 2017: The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 59-81, doi:10.5194/amt-10-59-2017.
- Crowell, S., and Coauthors, 2019: The 2015~2016 carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 9797-9831, doi:10.5194/acp-19-9797-2019.
- Field, C. B., J. T. Randerson, and C. M. Malmström, 1995: Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **51**, 74-88, doi:10.1016/0034-4257(94)00066-V.
- Friedlingstein, P., and Coauthors, 2023: Global Carbon Budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 5301-5369, doi: 10.18160/GCP-2023.
- Gilfillan, D., and G. Marland, 2021: CDIAC-FF: global and national CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement manufacture: 1751~2017. *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1667-1680, doi:10.5194/essd-13-1667-2021.
- Gurney, K. R., and Coauthors, 2004: Transcom 3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks. *Global Biogeochem. Cycles*, **18**, GB1010, doi:10.1029/2003GB002111.
- Hourdin, F., and Coauthors, 2006: The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, **27**, 787-813, doi:10.1007/s00382-006-0158-0.
- Huijnen, V., and Coauthors, 2010: The global chemistry transport model TM5: description and evaluation of the tropospheric chemistry version 3.0. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 445-473, doi:10.5194/gmd-3-445-2010.
- IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC, Geneva, Switzerland [Available online at <https://www.unep.org/resources/report/climate-change-2023-synthesis-report>].
- Jiang, F., and Coauthors, 2022: A ten-year global monthly averaged terrestrial NEE inferred from the ACOS GOSAT v9 XCO₂ retrievals (GCAS2021). *Earth Syst. Sci. Data*, **14**, 3013-3017, doi:10.5194/essd-14-3013-2022.
- Jones, M.W., R. M. Andrew, G. P. Peters, G. Janssens-Maenhout, A. J. De-Gol, P. Ciais, P. K. Patra, F. Chevallier, and C. Le Quéré, 2021: Gridded fossil CO₂ emissions and related O₂ combustion consistent with national inventories 1959~2018. *Sci. Data*, **8**, 2, doi:10.1038/s41597-020-00779-6.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice, 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles*, **19**, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.
- Li, G., Z. Yu, Y. Li, C. Yang, H. Gu, J. Zhang, and Y. Huang, 2024: Interaction mechanism of global multiple ocean-atmosphere coupled modes and their impacts on South and East Asian Monsoon: A review. *Glob. Planet. Change*, **237**: 104438, doi:10.1016/j.gloplacha.2024.104438.
- Liu, J., and Coauthors, 2021: Carbon Monitoring System Flux Net Biosphere Exchange 2020 (CMS-Flux NBE 2020). *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 299-330, doi: 10.5194/essd-13-299-2021.
- Masarie, K. A., W. Peters, A. R. Jacobson, and P. P. Tans, 2014: ObsPack: a framework for the preparation, delivery, and attribution of atmospheric greenhouse gas measurements. *Earth Syst. Sci. Data*, **6**, 375-384, doi:10.5194/essd-6-375-2014.
- NOAA, 2024: U.S. Billion-Dollar Weather and Climate

- Disasters. National Centers for Environmental Information (NCEI) [Available online at <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/>].
- Paglia, E., 2018: The Socio-scientific Construction of Global Climate Crisis. *Geopolitics*, **23**, 96-123, doi: 10.1080/14650045.2017.1328407.
- Pan, Y., and Coauthors, 2011: A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333**, 988-993, doi:10.1126/science.1201609.
- Pastorello, G., and Coauthors, 2020: The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Sci. Data*, **7**, 225, doi:10.1038/s41597-020-0534-3.
- Patterson, J., C. Wyborn, L. Westman, M. C. Brisbois, M. Milkoreit, and D. Jayaram, 2021: The political effects of emergency frames in sustainability. *Nat. Sustain.*, **4**, 841-850, doi:10.1038/s41893-021-00749-9.
- Peters, W., and Coauthors, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **104**, 18925-18930, doi:10.1073/pnas.0708986104.
- Potter, C. S., J. T. Randerson, C. B. Field, P. A. Matson, P. M. Vitousek, H. A. Mooney, and S. A. Klooster, 1993: Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**, 811-841, doi:10.1029/93GB02725.
- Ritchie, H., P. Rosado, and M. Roser, 2022: Natural Disasters. *Our World in Data* [Available online at <https://ourworldindata.org/natural-disasters>].
- Sitch, S., and Coauthors, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob. Chang. Biol.*, **9**, 161-185, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x.
- _____, and Coauthors, 2008: Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMS). *Glob. Chang. Biol.*, **14**, 2015-2039, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x.
- _____, and Coauthors, 2015: Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, **12**, 653-679, doi:10.5194/bg-12-653-2015.
- Tans, P. P., I. Y. Fung, and T. Takahashi, 1990: Observational constraints on the Global Atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**, 1431-1438, doi:10.1126/science.247.4949.1431.
- Taylor, T. E., and Coauthors, 2022: An 11-year record of XCO₂ estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm. *Earth Syst. Sci. Data*, **14**, 325-360, doi:10.5194/essd-14-325-2022.
- Williams, R. G., A. J. S. Meijers, V. M. Roussenov, A. Katavouta, P. Ceppi, J. P. Rosser, and P. Salvi, 2024: Asymmetries in the Southern Ocean contribution to global heat and carbon uptake. *Nat. Clim. Chang.*, **14**, 823-831, doi:10.1038/s41558-024-02066-3.
- Zhang, H., T. Zhao, S. Lyu, H. Wu, Y. Yang, and X. Wen, 2021: Interannual variability in net ecosystem carbon production in a rain-fed maize ecosystem and its climatic and biotic controls during 2005~2018. *Plos one*, **16**, e0237684, doi:10.1371/journal.pone.0237684.