

## Oceanic nutrient cycle responses to interhemispheric SAI

Dong-Geun Lee<sup>1</sup>, Hyung-Jeon Kang<sup>2</sup>, Jong-Seong Kug<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Given the exacerbating global warming, climate engineering is increasingly discussed as a means to deliberately cool the planet, including the stratospheric aerosol injection (SAI). It would raise planetary albedo and thereby reduce the Earth's surface temperature. Here we investigate how interhemispheric SAI—applied either in the Northern Hemisphere (NH\_SAI) or the Southern Hemisphere (SH\_SAI)—modulates the global marine biogeochemical cycle. As expected, NH (SH) SAI produce pronounced cooling in the NH (SH) and a weaker, cross-hemispheric cooling response. In the NH\_SAI experiments, Southern Ocean (SO) surface cooling deepens the mixed layer depth (MLD), reduces near-surface iron trapping, and prevents the warming-induced intensification of biological productivity. By curtailing diatom-driven nutrient drawdown in the SO—the primary gatekeeper of the global nutrient conveyor—NH\_SAI partially recovers global nutrient cycles. SH\_SAI experiment drives stronger regional cooling and even deeper MLD, however, although vertical mixing can increase surface iron availability, the combined effects with strong sea ice expansion sharply reduce light availability, limiting productivity and recovers global nutrient cycles. Therefore, both hemispheric SAI strategies effectively resolve the warming-driven weakening of the global nutrient cycle, but via different mechanism—nutrient limitation under NH\_SAI; light limitation under SH\_SAI.

**Keywords:** Climate engineering, Stratospheric Aerosol Injection (SAI), Nutrient Cycle, Primary productivity, phytoplankton

기후 분과 / 기후 8-2

## 폭염에 따른 자연식생의 탄소흡수량(GPP) 변화 모의

김종호, 정수종

서울대학교 환경대학원 환경계획학과

극한 고온의 빈도와 강도가 증가함에 따라 광합성 탄소흡수량(GPP)의 단기 시간 변동을 정밀 추적할 수 있는 체계가 요구된다. 본 연구는 정지궤도 위성(Himawari-8 AHI) 자료와 머신러닝 기반 LUE(빛 이용 효율) 프레임워크를 결합한 준실시간 고해상도 GPP 모형(Carbon Simulator from Space: CASS)을 개발하고, 이를 통해 여름 폭염 조건에서의 GPP 변화를 평가하는 것을 목표로 한다. CASS는 시간 단위 관측을 활용해 약 1 km 수준의 공간 해상도로 입력변수(PAR, EVI, 지표 열·수분 스트레스 지표 등)를 생성하여 식생의 GPP를 모의한다. 모형은 LUE 개념을 바탕으로 한 머신러닝 예측에 지식유도 머신러닝(Knowledge-Guided ML, KGML) 제약을 결합하여 계산 효율성과 물리적 합리성을 동시에 확보하였다.

모형 검증은 학습에 사용하지 않은 국내 플렉스 타워 관측을 활용하여 시간·일·월 스케일에서 수행하였고, 교차검증으로 일반화 성능을 점검하였다. CASS는 고온·고 VPD 환경에서 나타나는 단기적 GPP 감소를 시간 단위로 포착하였으며, 그 영향이 연간 숲 탄소흡수량을 최대 약 20%까지 저감시킬 수 있음을 보였다. 또한 지역별 공간적 이질성(도시·산림·고도 차이)을 정량적으로 제시하여, 도시 식생이 산림에 비해 폭염의 영향을 더 크게 받을 수 있음을 확인하였다. 특히 극궤도 위성 기반 모형에 비해 단기간(1-3일) 열 스트레스 신호를 더 명확히 재현하였고, 동일 기간 다년 평균 대비 편차( $\Delta$ GPP)와 상대 변화율( $\Delta$ GPP/GPP<sub>clim</sub>) 지표로 정책·현업 활용이 가능한 산출물을 제시하였다. 본 연구는 정지궤도 위성 기반 준실시간 GPP 모니터링의 가능성을 제시하며, 폭염·가뭄 등 극한 기상에 대한 식생 탄소흡수 진단에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사한다.

**Keywords:** 탄소 순환, 식생모형, 정지궤도위성, 머신러닝, 총일차생산량(GPP)

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066)

기후 분과 / 기후 8-3

## AMO 관련 대기 반응의 계절 의존성

정다정, 유창현

이화여자대학교 기후에너지시스템공학과

대서양 수십년 진동(Atlantic Multidecadal Oscillation; AMO)은 북대서양뿐만 아니라 전지구적 기후에 영향을 주는 대표적인 장주기 변동 기후 모드이다. 그러나 수십년 규모의 장주기 변동성이기 때문에 AMO 영향은 연평균이나 특정 계절에 대해 이해되어 왔으며 그 계절성은 상대적으로 간과되었다. 본 연구에서는 AMO에 따른 지면 기온과 강수 이상(anomaly)에 뚜렷한 계절적 특성이 있다는 것을 확인하였다. 연평균 분석에서는 중앙 유라시아, 동유럽 등의 지역에서 AMO의 영향이 약하게 나타난다. 그러나 이는 AMO의 영향이 계절적으로는 큰 차이를 보이기 때문이다. 예를 들어, AMO가 양의 위상일 때 중앙 유라시아는 겨울철 양의 온도 이상을, 봄철 음의 온도 이상을 보인다. 온도 이상이 계절적으로 바뀌는 것은 온도 이류, 즉 역학적 요인에 의하여 설명되며, 본 연구에서는 dynamical adjustment 기법을 통하여 이를 확인하였다. 또한 Community Atmosphere Model version 6을 이용한 대기 모형 실험을 통해 계절적 특성의 인과 관계를 검증 하고 강제력과 배경장의 역할을 분석하였다. 처방된 AMO 강제력과 배경장의 계절적 변화는 유럽 및 유라시아 지역 지면 기온과 강수의 계절성을 재현하였으며, 특히 AMO 해수면 온도와 함께 해빙 농도를 처방할 때 관측과 더 가깝게 재현됨을 확인하였다. 추가적으로 특정 계절별로 강제력을 고정하는 실험을 통하여 AMO의 영향이 배경장보다 해수면 온도 및 해빙 농도와 같은 강제력의 계절적 변화를 통하여 더 크게 작용함을 확인하였다. 이러한 결과는 AMO의 장주기 변동성뿐만 아니라 계절적 특성을 함께 고려하는 것이 기후변화 영향 평가와 지역 기후 대응 전략 수립에 중요함을 시사한다.

**Keywords:** 대서양 수십년 진동 (AMO), 계절성, 대기 모형 실험

## Hysteretic Response of Atmospheric River to Carbon Dioxide Removal

Seohyun Chung<sup>1</sup>, Chanil Park<sup>2</sup>, Yeeun Kwon<sup>1</sup>, and Seok-Woo Son<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Boston College

---

Atmospheric rivers are key agents regulating global hydroclimate and local hydrological extremes. Climate models project the increase and intensification of ARs in a warming climate, but their responses to CO<sub>2</sub> mitigation remain unclear. Based on large-ensemble climate model experiments in which CO<sub>2</sub> concentrations are systematically increased and then decreased to the present-day level, we show that AR frequency and intensity do not fully return to their present-day states when CO<sub>2</sub> concentrations are reduced. ARs are projected to be more frequent and intense even after CO<sub>2</sub> removal, particularly along the western coasts of North America, Europe and South America, in East Asia, and in Antarctica, leading to increased extreme precipitation in the midlatitudes and enhanced risk of Antarctica ice shelf destabilization. These hysteretic responses are attributed to both thermodynamic and dynamic changes that manifest differently by region but are closely related to the delayed recovery of the Atlantic meridional overturning circulation and the Southern Ocean surface temperature.

**Keywords:** Atmospheric river, Carbon Dioxide Removal, Extreme precipitation, Large-ensemble experiments, Climate change

기후 분과 / 기후 8-5

## Unraveling the interactions between tropical Indo–Pacific climate modes using a simple model framework

Hyo–Jin Park<sup>1</sup>, Soon–Il An<sup>1</sup>, Jae–Heung Park<sup>2</sup>, and Chao Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

---

The dominant interannual climate phenomena are mainly observed in the tropical Indo-Pacific Ocean (PO). While climate modes such as the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), and Indian Ocean Basin (IOB) can develop through intrinsic basin dynamics, interactions between the PO and IO significantly modulate their characteristics. Here, we quantified the impacts of tropical Indo-Pacific coupling using an extended nonlinear recharge oscillator model for ENSO that incorporates key tropical IO climate modes. Enabling the PO-to-IO effect increased the amplitudes of the IOD and IOB by 23% and 38%, respectively, and regulated IOB seasonality. Conversely, IO-to-PO connection increased ENSO peak variability by 5%, shortened its periodicity by 1 year, and more than doubled the frequency of extreme ENSO events when coupling strength was doubled. Over the past decade, strengthened Indo-Pacific interactions resulting from positive feedback between basins, have contributed to increased variability and occurrence of major climate modes.

**Keywords:** El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole, Indian Ocean Basin mode, Inter-basin interaction

기후 분과 / 기후 8-6

## Decadal variability of Eurasian winter surface temperature trend linked to North Atlantic sea surface temperature trend

Ye-Jun Jun<sup>1</sup>, Seok-Woo Son<sup>1\*</sup>, Kyong-Hwan Seo<sup>2,3</sup>, Jin-Yong Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

<sup>3</sup>Institute for Future Earth, Pusan National University

<sup>4</sup>Severe Storm Research Center, Ewha Womans University

---

Eurasia winter surface air temperature exhibits a distinct decadal variability. While a pronounced cooling trend appeared from the late 1980s to the late 2000s, a significant warming trend has occurred thereafter. This decadal trend change and the associated circulation change are investigated by conducting a series of nonlinear stationary wave model experiments. The model experiments reveal that upper-tropospheric convergence over the Greenland-Norwegian Seas and enhanced diabatic heating over the Labrador Sea act as Rossby wave sources. The induced stationary Rossby waves yield a cyclonic circulation trend over western Europe and an anticyclonic circulation trend over the Barents-Kara Seas in the pre-2000s, driving the observed Eurasian cooling trend. The post-2000s Eurasian warming trend is associated with opposite-signed Rossby wave sources, leading to a reversal of circulation trend. The Rossby wave sources over the two regions are found to be modulated by sea surface temperature trends in the North Atlantic subpolar gyre and by zonal wind trends at the exit of the Atlantic jet. This finding suggests that internal climate variability, especially dynamic processes induced by sea surface temperature trend changes, plays a vital role in the decadal variability of Eurasian winter temperature trend.

**Keywords:** Eurasian winter temperature trend, North Atlantic sea surface temperature, Rossby wave train, internal climate variability, nonlinear stationary model