특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 1

위성 영상과 인공지능을 활용한 시공간 고해상도 탄소 흡수량 추정

손보경[1], 성태준[1], 배세정[1], 임정호[1], 홍정현[2], 이호진[3], 김현석[2,3,4]

[1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
[2]서울대학교 농림생물자원학부
[3]서울대학교 협동과정 농림기상학전공
[4]서울대학교 농업생명과학연구원

식생은 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 지구 탄소 순환에서 중요한 역할을 수행한다. 이러한 식생의 탄소 흡수 능력을 정확히 평가하기 위해서는 정밀한 산정 기술이 필수적이다. 위성 영상은 넓은 지역의 식생을 관측하는 데 유리하나, 가용한 자료의 시간 해상도 및 공간 해상도 간 상충 관계가 존재한다. 본 연구에서는 다양한 자료를 활용하여 시공간 고해상도의 탄소 흡수량을 추정하였다. 특히, 1일 방문 주기로 약 500 m 급 공간 해상도를 갖는 Moderate Resolution Imagining Spectroradiometer와 16일 방문 주기로 30 m 공간 해상도를 갖는 Landsat 위성의 식생 지수를 사용하여, 인공지능 기반의 일간 총일차생산량(Gross primary productivity, GPP)을 추정하고 이를 융합적으로 활용하였다. 인공지능 모델 학습에는 글로벌 데이터 셋인 FLUXNET2015 등의 일간 GPP 자료를 종속 변수로 사용하였다. 인공지능 모델의 20-fold 교차 검증 결과, Light Gradient Boosting Machine (LGBM) 모델의 성능은 상관계수(r)=0.82, 평균 제곱근 오차(RMSE)=2.35 gC/m^2/d로 나타났다. 또한, 글로벌 데이터 셋으로 훈련된 LGBM 모델을 서울대학교 태화산 학술림 내 플럭스 관측자료로 검증한 결과, 2023년도 침엽수림에서 r=0.84 및 RMSE=2.81 gC/m^2/d, 활엽수림에서는 r=0.94 및 RMSE=1.51 gC/m^2/d의 성능을 보였다. 이후 시공간 자료 융합 기법을 통해 우리나라 지역에서 일간 30m 해상도의 GPP를 추정하였고, 해당 GPP 추정 결과는 저해상도 영상에서 누락된 탄소 흡수원들을 효과적으로 모의할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 시공간 고해상도 GPP 정보를 제공함으로써, 자연 및 도시 녹지의 지속적이고 정확한 탄소 플럭스 모니터링의 기초를 마련하는 데 기여할 것으로 기대된다.

Key words: 탄소 흡수량, 총일차생산량, 위성 영상, 인공지능

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

특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 2

딥러닝 기반 1차 총 생산량 1-10년 예측 시스템 개발

주용식[1], 함유근[2,3], 김정환[4]

[1]전남대학교 지구환경과학부
[2]서울대학교 환경계획연구소
[3]서울대학교 환경대학원 환경계획학과
[4]한국과학기술원

인간 활동에 의해서 대기 중으로 이산화탄소가 방출되고 있고 이에 따라서 대기 중의 탄소 농도가 증가하고 있다. 하지만, 대기 중의 탄소 농도는 인간이 배출한 탄소 농도보다 더 적게 증가하고 있다. 이는, 해양과 바다가 대기 중으로 방출된 이산화탄소의 일부를 흡수하기 때문이다. 이처럼 미래 대기 중의 탄소 농도를 예측에 있어서 자연에 의한 탄소 흡수량의 변화를 아는 것이 중요하며, 육지의 탄소 흡수량이 해양의 탄소 흡수량보다 상대적으로 크다. 본 연구에서는 상대적으로 흡수량이 큰 육지 탄소 흡수량 예측을 시도하였고, 육지 탄소 흡수량을 대표하는 지표 중 식생의 총 광합성을 나타내는 1차 총 생산량 (Gross Primary Productivity; GPP)를 딥러닝 기법 기반 1-10년 예측시스템을 개발하였다. 관측만 사용하여 딥러닝을 학습시키기에는 자료의 개수가 부족하기 때문에 과정 기반 모형자료인 CESM2-LENS를 사용하여 학습하였다. 학습된 딥러닝 모형에 재분석자료, 위성자료를 사용해서 GLASS에서 제공한 GPP와 성능 비교를 하였다. 3년까지 딥러닝 모형의 예측 성능이 과정 기반 모형의 예측 성능보다 높았다. 1년 예측에 대한 상관 계수 맵을 통해서 예측 성능을 확인하였고, 딥러닝 모형은 아극지역을 제외하고 대부분 0.6이상의 성능을 보였으며, 특히 아마존 지역에서 과정 기반 모형들의 예측 성능은 음의 값을 가지는데 비해서 딥러닝 모형은 0.6이상의 높은 값을 가졌다.

Key words: 대기-지면 탄소 순환, 딥러닝, 육지 탄소 흡수

특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 3

딥러닝을 활용한 미래 육상 GPP 변화 예측

김영준, 정수종

서울대학교 환경계획연구소

식물에 의한 총 1차 생산(Gross Primary Production, GPP)은 육상 생태계의 탄소 순환과 균형을 이해하는 핵심 지표로 활용된다. 전 지구 규모의 육상 GPP를 추정하기 위해 다양한 지구 시스템 모델(Earth System Model, ESM)이 개발되었으나, 각 모델 간 추정치의 편차가 커 신뢰할 수 있는 추정 및 예측 기법의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 딥러닝 기법과 상대적으로 불확실성이 적은 기후 변수를 활용하여, 불확실성이 감소된 미래 육상 GPP 예측 기법을 제시한다. 2000년 3월부터 2022년 12월까지의 월별 Global dataset of solar-induced chlorophyll fluorescence (GOSIF) GPP 자료와 Climatic Research Unit gridded Time Series (CRU-TS) 월평균 기온, 강수량, 일교차 및 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 월평균 단파 복사량을 활용하여 0.5도 격자 단위의 월평균 GPP를 추정하는 딥러닝 모델(Convolutional Neural Networks, CNN)을 개발하였다. CNN을 활용한 딥러닝 기반 GPP 추정 모델은 높은 평균 검증 정확도를 보이며(R^2 = 0.78; RMSE=17.61 g C m^{-2} $month^{-1}$) GOSIF GPP의 평균 시계열 변동에 대해 높은 재현성을 보였다(R^2 = 0.99). 이 딥러닝 기법을 이용해 총 10개의 서로 다른 CMIP6 GCM에서 제공하는 기후 예측 자료를 활용하여 미래 GPP 변화를 예측하였고, 각 CMIP6 ESM에서 제공하는 전 지구 육상 GPP 예측 자료와 정량적으로 비교하였다. 네 가지 SSP 시나리오(ssp126, 245, 370, 585)를 바탕으로 2015년부터 2100년까지 GPP 변화를 예측하였으며, 딥러닝 기반 GPP 예측 결과와 CMIP6 ESMs 앙상블 GPP 예측 결과를 시·공간적으로 비교하였다. 개발된 딥러닝 기반 GPP 예측 모델은 기존 ESMs 예측 범위보다 좁은 범위를 나타내었으며(ssp585 2100년 기준, CMIP6 ESM GPPs: 86 – 220 Pg C yr^{-1}; DL-based GPPs: 147 – 210 Pg C yr^{-1}), 기존 지구 시스템 예측 모델보다 작은 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

Key words: GPP, 딥러닝, CMIP6

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

특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 4

도시 탄소순환 평가를 위한 지상 및 위성 관측과 역모델링 기반 서울 이산화탄소 배출량 산정

심소정[1,2], 정수종[1,2]

[1]서울대학교 환경대학원
[2]서울대학교 기후테크센터

지구온난화 1.5도 특별보고서는 산업화 이전 대비 지구 온도의 1.5도 상승을 막기 위하여 2050년까지 전 지구적으로 탄소중립을 달성해야한다고 밝혔다. 기존의 이산화탄소 배출량을 줄이고 흡수량을 늘려서 대기 중 이산화탄소 농도가 더 이상 증가하지 않는 탄소중립을 달성하기 위해서는 탄소순환에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구는 전 세계 면적의 3%만 차지하지만, 세계 인구의 56%가 거주하고 있으며, 인위적 이산화탄소 배출량의 70% 이상을 차지하는 도시의 탄소순환을 평가하기 위하여 정확한 이산화탄소 배출량을 산정하고자 한다. 지상 및 위성 관측 자료, 대기 수송 모형, 이산화탄소 초기 배출량과 흡수량, 배출량 및 관측 오차 공분산을 이용하여 서울의 이산화탄소 배출량 최적값을 산출하는 베이지안 역모델링 프레임워크를 개발하였다. 서울의 배출량에 대한 시공간 상관성을 결정하기 위하여 민감도 분석을 진행하였고, 서울의 배출량은 2일 및 10 km 범위에 대해 상관성을 가지는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 역모델링을 수행하여 서울의 이산화탄소 배출량 최적값을 얻었고, 초기 배출량과 비교하여 배출량의 보정(correction) 정도를 정량화하였다. 또한 역모델링 프레임워크의 수행 능력을 확인하고자 관측값과 모델값간 평균 절대 오차를 계산하여 이산화탄소 배출량 초기값 대비 최적값을 이용했을 때 오차가 줄어드는 결과를 얻었다. 지상 및 위성 관측의 기여도를 평가하기 위하여 관측 자료에 따른 민감도 분석을 수행하였으며, 관측 기간이 긴 지상 관측 자료를 사용하였을 때 배출량의 불확실도가 크게 줄어들었다. 하지만 위성 관측의 경우 공간 범위가 넓기 때문에 지상 관측이 기여하지 못한 서울의 북쪽 지역에 대해 불확실도 저감율이 컸다. 즉, 역모델링의 최적화 능력을 최대화하기 위해서는 지상 및 위성관측을 모두 활용해야함을 밝혔다. 이후에는 역모델링 적용 도시를 서울에서 전 세계의 주요 도시들로 확장할 예정이다. 지상 및 위성관측 자료와 역모델링을 기반으로 얻은 도시의 이산화탄소 배출량은 현재의 상태를 정확하게 파악하고, 미래의 탄소순환 예측의 불확실도를 낮춤으로써 전 세계 탄소중립 달성에 도움을 줄 것으로 기대된다.

Key words: 도시 탄소순환, 이산화탄소 관측, 역모델링, 탄소중립

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

특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 5

육상 탄소 체류 시간 장기 추세의 TRENDY 지면 모델 간 차이에 대한 원인 규명

현동규[1,2], 박창의[1]

[1]한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단
[2]서울대학교 지구환경과학부

육상 탄소 체류 시간(τ)은 육상 생태계에 고정된 탄소가 대기 중으로 되돌아가는 데 걸리는 시간으로서 지면의 탄소 저장량을 조절하는 중요 인자이다. 지난 세기 동안 기후변화로 인해 τ가 감소하고 있으나, 정량적인 추세값은 모델마다 크게 다르며 이에 대한 원인은 아직 불확실하다. 본 연구에서는 TRENDY(Trends in the land carbon cycle) 프로젝트에 참여한 15개 과정 기반 지면 모델을 이용하여 1901년부터 2021년까지 모의된 τ의 장기 추세에 대한 모델 간 차이를 정량화하였다. 또한, traceability analysis를 기반으로 τ 장기 추세의 분산에 대한 τ의 기훗값 및 τ의 기훗값 대비 변화율의 기여도를 산출하여 τ 장기 추세의 모델 간 차이를 설명하였다. 전지구 τ 장기 추세의 분산에 대한 τ의 기훗값 및 τ의 기훗값 대비 변화율의 기여도는 각각 50%로 분석되었으나, 위도에 따른 두 변수의 기여도는 다르다. 20°S–20°N 및 20–50°N, 50°–80°N의 세 개 위도대에서 모델 간 τ 추세의 분산에 대한 τ의 기훗값이 기여하는 바는 39%와 20%, 38%이며, τ의 기훗값 대비 변화율의 기여도는 각각 61%와 80%, 62%이다. 즉, 고위도 지역에서의 τ 추세의 모델 간 차이의 원인은 대부분 τ의 기훗값 대비 변화율이며, 저위도 및 중위도 지역에서의 τ의 기훗값 대비 변화율이 τ의 기훗값보다 τ 추세의 모델 간 차이를 내는데 더 기여함을 알 수 있다. 이는 모델에 따른 τ의 외부 강제력에 대한 민감도 차이가 τ 장기 추세의 모델 간 차이에 중요하며, 이에 대한 불확실성을 줄이는 것이 더 정확한 탄소 수지 모의를 위해 필요함을 시사한다.

Key words: 지면 탄소 순환, 탄소 체류 시간, TRENDY, 모델 간 차이, traceability analysis두

※ 이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업(RS-2023-00232066)의 지원을 받아 수행되었습니다.

특별세션 5 / AI/역학모델 탄소순환 연구 6

The impact of urbanization on vegetation and climate on the island of Borneo, Indonesia

Danbi Lee[1,2], So-Won Park[2], Ji-Hoon Oh[2] and Jong-Seong Kug[2]

[1]Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology
[2]School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Indonesia's capital, Jakarta, is one of the world's fastest-sinking cities due to extremely high rates of land subsidence and sea level rise. In May 2019, the Indonesian government announced plans to relocate the capital to East Kalimantan province on the island of Borneo. The relocation of the capital would accelerate deforestation in one of the world's largest tropical rainforest, increasing CO_2 emissions. However, there is a limited number of studies on the effects of urbanization on the island of Borneo.

Here, we assess the impacts of urbanization on terrestrial ecosystems and climate on the Borneo island using Community Earth System Model (CESM2) simulations for the 2025-2034 period. We compared two land cover scenarios for the island of Borneo: one with an abrupt 20% increase in urban land units in 2025, and another that retains the original land units.

Simulations revealed that urbanization led to a warmer and drier climate, along with a reduced leaf area index (LAI), exceeding the direct impact of urbanization. In addition, the decrease in evapotranspiration induced by urbanization weakens terrestrial moisture recycling in dry periods and further amplifying rainfall reduction. As a result, the dry period experienced more than 8 times the reduction in rainfall compared to the wet period. Based on the significant positive correlation between LAI and GPP (gross primary productivity) with dry period rainfall, we suggest that the decrease in dry period rainfall induced by urbanization contributes to the additional decrease in both LAI and GPP on the island of Borneo. Therefore, not only the land use change forcing, but also the climate changes induced by these land use changes reduces vegetation and vegetation productivity. These results indicate that urbanization will likely weaken Borneo's role as a carbon sink more than expected. Consequently, these factors should be taken into account in the urbanization process.

Key words: Terrestrial ecosystem, Earth System Model, Urbanization, Land use change