

직접관측자료를 이용한 동아시아 토양수분 재분석자료 성능 진단

이보라¹⁾ · 서은교^{1),2)*}

¹⁾부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공,

²⁾조지메이슨대학교 Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies

(접수일: 2024년 8월 28일, 수정일: 2024년 8월 30일, 게재확정일: 2024년 8월 30일)

Evaluation of Soil Moisture Reanalysis Datasets over East Asia Using In-situ Measurements

Bora Lee¹⁾ and Eunkyo Seo^{1),2)*}

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

²⁾Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, George Mason University, Fairfax, Virginia, United States

(Manuscript received 28 August 2024; revised 30 August 2024; accepted 30 August 2024)

Abstract This study evaluates the performance of various soil moisture reanalysis datasets over the East Asian region to identify the most suitable product for climate and hydrological studies. The analysis includes land reanalysis products generated by the Noah, VIC, and Catchment land surface models (LSMs), driven by GLDAS2.0 near-surface atmospheric forcing, alongside MERRA2 and ERA5-land datasets. The 62 in-situ soil moisture measurements observed from 1980 to 2014 are used to validate the modeled data across the entire study period, while 58 of these measurements are used for the May to September (MJJAS) period. Results indicate that, when driven by the same atmospheric forcing, the Noah and Catchment models outperform VIC, and MERRA2 shows lower errors compared to ERA5-land. Seasonal soil moisture variability, primarily driven by the East Asian monsoon, peaks in September, with MERRA2 providing the most realistic simulation of seasonal phase and amplitude. Daily soil moisture variations are better captured by MERRA2 and ERA5-land than by GLDAS2.0-based products. Overall, MERRA2 emerges as the most reliable reanalysis dataset for evaluating both the climatological mean and variability of soil moisture in East Asia. Additionally, multi-model mean analysis reveals a long-term trend of drying soil moisture and enhanced land-atmosphere coupling in northern East Asia.

Key words: Soil moisture reanalysis datasets, East Asia, Long-term trend, Land-atmosphere coupling

1. 서 론

토양수분은 지표면과 대기 간의 에너지 및 물 순환을 조절하는 중요한 변수로, 기후와 생태계, 농업 생

산성에 직간접적인 영향을 미친다. 이는 수문학적 및 기상학적 과정의 핵심 요소로, 물리적 지면 과정과 대기 상호작용을 이해하는 데 필수적인데, 특히 토양수분은 강수량, 증발산, 지표면 온도 등 다양한 기상 요소와 밀접하게 연관되어 있어, 토지-대기 상호작용에서 핵심적인 역할을 한다(Santanello et al., 2018). 예를 들어 토양수분은 지표면 에너지 플럭스의 분배를 조절하여 현열 플럭스와 잠열 플럭스 간의 균형을 결정짓는 데 영향을 미친다(Seo and Dirmeyer, 2022b).

*Corresponding Author: Eunkyo Seo, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-51-629-6637, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: eseo@pknu.ac.kr

이러한 조절은 대기 경계층의 발달과 대류 과정의 시작에 필수적이며, 이는 가뭄이나 폭염과 같은 극한 기상 현상의 발생으로 이어질 수 있다(Seo et al., 2020; Dirmeyer et al., 2021).

토양수분은 기후예측 시스템에서도 중요한 역할을 한다. 특히, 토양수분 변수의 메모리가 대기변수보다 길기 때문에 계절 내 시간부터 계절(Subseasonal-to-Seasonal, S2S) 시간 규모에서의 예측 성능에 큰 영향을 미친다(Seo et al., 2019; Seo and Dirmeyer, 2022a; Richter et al., 2024). 지면-대기 상호작용은 토양수분 변화에 따른 지표면의 에너지와 물 교환에 의해 제어된다. 이들 간의 상대적인 우세에 따라, 수분 제한(water-limited) 체제와 에너지 제한(energy-limited) 체제가 구분되며, 현열과 잠열 플럭스 간의 분할은 각각 토양수분의 가용성과 변동성 또는 대기에 의해 주로 결정되는 순 복사량에 의해 영향을 받는다(Seo et al., 2024). 체제는 토양수분의 임계 값에 따라 수분 제한 결합 과정과 에너지 제한 결합 과정으로 구분된다. 지표면 플럭스 분배에 대한 지배적인 반응이 토지 상태에 기인한 경우에는 토지에서 대기로, 대기에 기인한 경우에는 대기에서 토지로의 결합 방향이 결정된다.

지면-대기 상호작용은 대기의 상태와 토양의 상태 간의 피드백 메커니즘을 통해 극한 기상 현상의 발생에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 토양수분이 부족한 상황에서는 대기 중으로 방출되는 수증기 양이 줄어들어, 지역적으로 가뭄이 심화되거나 폭염이 발생할 가능성이 높아진다(Benson and Dirmeyer, 2023; Hsu et al., 2024; Tak et al., 2024). 반면, 토양이 충분히 습윤한 경우, 잠열 플럭스가 증가하여 대기 불안정성을 유발할 수 있으며, 이는 국지적 강수 패턴에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 토양수분의 정확한 측정과 예측은 기후 모델의 신뢰성을 높이고, 장기 예측 시스템의 성능을 개선하는 데 필수적이다(Dirmeyer, 2003).

그러나, 동아시아 지역에서는 관측자료의 부족으로 인해 토양수분과 관련된 지면 재분석 자료들의 성능을 체계적으로 평가하거나 진단한 연구가 충분하지 않다(Dirmeyer et al., 2006; Guo and Dirmeyer, 2006; Guo et al., 2006; Dirmeyer et al., 2018). 따라서, 동아시아에서 토양수분의 특성을 정확하게 진단하고 예측하는 데에는 여전히 상당한 어려움이 있다. 현재 토양수분 재분석 자료가 모델을 검증하거나 모델 적분에 필요한 초기장 자료로 사용되고 있지만, 직접관측과의 진단이 이루어지지 않은 상태에서 사용되고 있다. 이는 모델에서 모의하는 토양수분에 대한 정확한 진단을 어렵게 하며 잘못된 초기장을 처방하여 나타나는 모델의 오차로 인하여 예측 성능을 저하하는 결

과를 불러일으킨다.

따라서, 본 연구에서는 동아시아 지역에서 가용한 직접 관측자료를 활용하여 현재 사용되고 있는 토양수분 재분석 자료들의 성능을 진단하고자 한다. 이를 통해 동아시아 지역에서 발생하는 토양수분 재분석 자료의 문제점을 파악하고, 향후 기후 예측시스템의 성능 개선에 기여할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다. 본 연구의 결과는 동아시아 지역의 이상 기상 현상의 예측 정확도를 높이고, 농업 및 자원 관리 전략 수립에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 표층 토양수분(Surface Soil Moisture, SSM) 검증에 사용하는 직접관측자료와 재분석자료들과 진단에 사용된 기법들을 Section 2에서 기술하였다. Section 3에서 직접관측자료 기반으로 토양수분 재분석 자료의 성능을 진단하였고, multi-model ensemble 평균을 이용하여 장기간 토양수분과 지면-대기 상호작용에 대한 평균장과 추세를 확인하였다. 마지막으로 Section 4에서 본 연구의 내용을 정리하였다.

2. 자료 및 방법

동아시아 지역에서 가용한 토양수분 재분석 자료 수집을 위해 본 연구에서는 Global Land Data Assimilation System (GLDAS; Rodell et al., 2004) 프로젝트 중 Princeton Global Meteorological Forcing (Sheffield et al., 2006) 자료를 강제하여 지면모델 오프라인 실험을 수행한 version2.0 산출물을 사용한다. 동일한 대기 강제력을 이용하여 Variable Infiltration Capacity (VIC; Liang et al., 1994), Noah (Chen et al., 1996; Ek et al., 2003), Catchment (Koster et al., 2000) Land Surface Model (LSM)에서 계산된 토양수분 자료를 진단하였다. 모델의 물리과정에 따른 토양수분 모의 성능을 확인하기 위하여 동일한 수평 해상도(1.0°) 자료를 사용하였고, 대기 강제력 기간이 최근까지 제공되지 않아 과거 67년도(1948-2014) 자료가 가용하다.

또한, National Aeronautics and Space Administration Global Modeling and Assimilation Office (NASA GMAO)에서 제공하는 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA2; Gelaro et al., 2017) 자료와 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ECMWF Reanalysis 5th Generation Land (ERA5-land; Muñoz-Sabater et al., 2021) 자료를 검증하였다. MERRA2에서 제공하는 토양수분 자료는 Goddard Earth Observing System (GEOS)을 구성하는 Catchment (Koster et al., 2000) LSM이 MERRA2 대기 강제력으로 구동되어 산출되며, 토양수분 모의에 중요한 강수

변수의 경우 GEOS 모델의 오차를 보정하여 강제력에 사용된다. MERRA2는 $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 공간 해상도를 갖는다. ERA5-land는 Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (H-TESSEL) 지면모델을 사용하는 모델격자를 타일형태로 나뉜 ECMWF에서 사용하는 지면교환 스킴을 적용한 오프라인 지면 재분석 자료이다. ERA5 대기 재분석 자료에 의해 대기 경계조건이 강제된다. ERA5-land는 약 0.1° 의 수평 해상도의 시간별 자료를 제공한다. ERA5-land의 공간 해상도를 향상시키기 위해 경계 조건으로 사용되는 ERA5의 지면 근처 대기 변수(예: 온도, 습도, 기압)는 ERA5의 낮은 해상도에서 발생하는 고도 차이를 보정하여 사용한다.

동아시아 지역에 대해 모델에서 모의하는 토양수분 기후 평균과 변동성을 평가하기 위하여 International Soil Moisture Network (ISMN; Dorigo et al., 2021) 자료를 사용하였다. 주로 표층 토양수분을 진단하기 위하여 5 cm에서 10 cm 범위에서 측정된 일평균 토양수분 자료를 사용하였고, 관측자료의 품질 검증을 위

하여 자료에서 함께 제공되는 quality flag에서 “Good”으로 분류된 자료만을 사용하였다. 추가적으로 데이터 중복 및 잘못된 토양수분이 관측된 정보를 제거하기 위하여 추가적인 품질 관리를 진행하였다. 첫째, SNOWpack TElemetry (SNOTEL) 네트워크는 눈 변수를 측정하도록 설계되어 토양수분 추정에 큰 불확실성이 있어 제외하였다. 둘째, 동일한 관측 지점에서 해당 범위 내 여러 깊이에서 관측이 이루어진 경우, 5 cm에 가까운 값을 사용한다. 이전 단계의 자료처리에도 불구하고, 동일한 위치와 깊이에서 다른 센서로 토양수분이 측정된 경우, 여러 센서의 단순 평균으로 인해 토양수분 자체의 특성을 잃지 않도록 하나의 센서만 선택한다. 앞선 관측자료 품질 검증을 거친 지점 중에서 전체 기간에 대해 62개 지점에서 관측한 토양수분 관측자료를 동아시아 지역에 대한 검증자료로 사용하였으며, 5~9월의 기간에는 그 중 58개의 지점을 사용하였다(Fig. 1). 동아시아지역의 land cover는 대부분 shrubland, forest, savannas으로 구성되어 있으며, 일부 cropland가 발달되어 있는 공간 패턴을 나

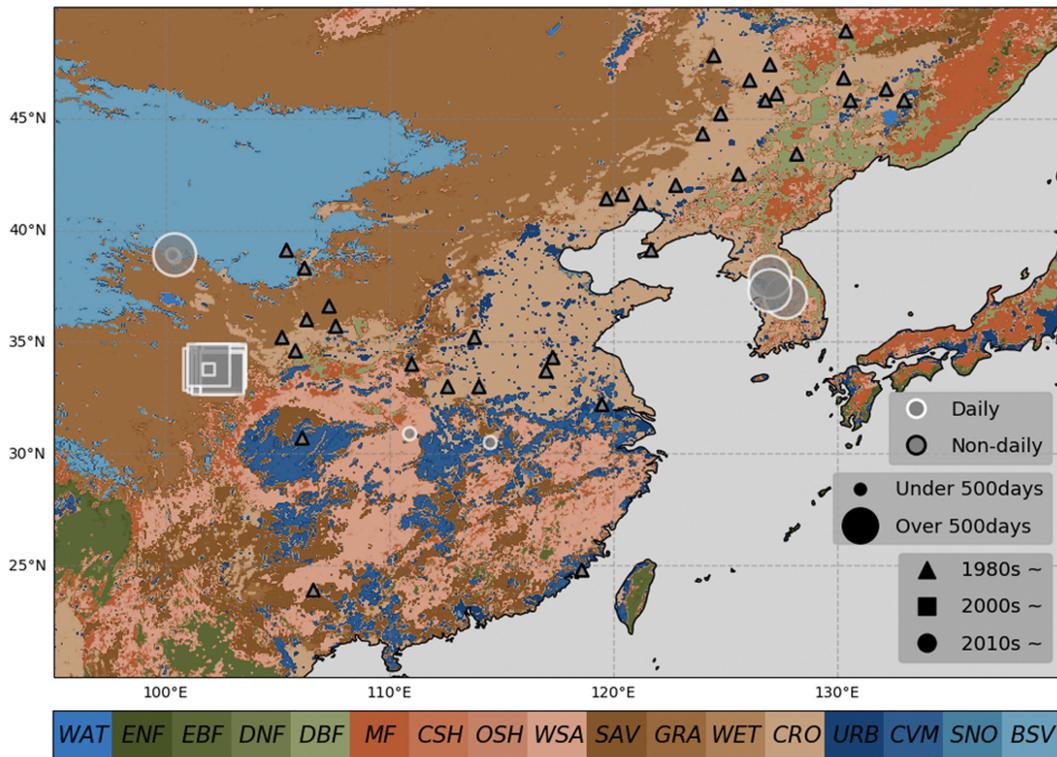


Fig. 1. Spatial distribution of MODIS IGBP landcover types of 2001 year (shaded) and observation sites measuring surface soil moisture (marker) over East Asia ($90^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$). Marker shapes indicate the starting year of observations for each station and its size represents the available day sample of the observation data. The edge color of each mark indicates the observed sample constructed by daily (white) or lower-frequency (black) temporal resolution.

타낸다. 또한, 토양수분 관측지점은 주로 내륙지역에 위치해 있으며, 1980년대에 관측자료가 공간적으로 크게 분포하고 있다. 본 연구에서는 해당 관측자료를 이용하여 SSM 재분석자료들이 공통적으로 가용한 1980~2014년 기간을 진단하였으며, 표층 토양수분의 평균장과 계절성을 진단하는 부분은 전계절을 사용하였고, 토양수분의 시계열 일치와 장기간 트렌드 분석은 변동성이 활발한 5~9월 기간에 대하여 분석하였다 (Figs. 6, 7).

동아시아 지역의 지면-대기 상호작용의 기후평균 및 장기간 트렌드를 확인하기 위하여 Terrestrial Coupling Index (TCI) 개념을 사용하였다(Dirmeyer, 2011; Seo and Dirmeyer, 2022b). TCI는 지면 플럭스가 토양수분 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내는 지수이다. 이 지수는 토양수분 변화에 따른 지면 플럭스의 민감도를 나타내는 두 변수 간의 상관관계와 지면 플럭스의 변동성을 나타내는 표준편차의 곱으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 이 진단 기법을 활용하여 두 변수 간의 민감도를 나타내는 소스 항과 타겟 항을 SSM과 잠열(Latent Heat flux, LH)로 각각 정의하고, 일평균 시계열 자료를 이용하여 계산하였다. 높은 민감도 지수는 토양수분 변동성이 잠열 변화에

큰 영향을 미치는 것을 나타내며, 낮은 값은 타겟 항의 변화에 미치는 영향이 낮은 것을 의미한다.

$$TCI = \rho(SSM, LH)\sigma_{LH} \quad (1)$$

$\rho(SSM, LH)$ 은 SSM와 LH의 상관관계, σ_{LH} 는 LH의 표준편차이다. TCI는 LH의 표준편차에 의해 가중된 SSM와 LH 사이의 선형 회귀의 기울기로 해석할 수 있다.

3. 결 과

동아시아 지역의 기후평균 토양수분 공간 패턴을 확인하면 주로 중국 남부와 한반도 지역은 여름철 몬순에 의한 강수로 상대적으로 토양수분이 습하며, 몽골지역의 경우 건조한 토양수분을 나타낸다(Fig. 7a). 전반적으로 토양수분 관측 지점이 상대적으로 토양수분이 습한 지역에 분포해 있으며, 사용하는 자료의 해상도에 따라 한 격자에 관측자료가 2개 이상 있는 경우 격자 내 관측자료 중 기간이 가장 긴 지점을 선택하여 사용하여 검증자료의 개수가 자료마다 다르다. ERA5-land의 공간 해상도는 사용한 자료 중 가장 좋지만, 동아시아 토양수분의 기후평균을 모의하기에는

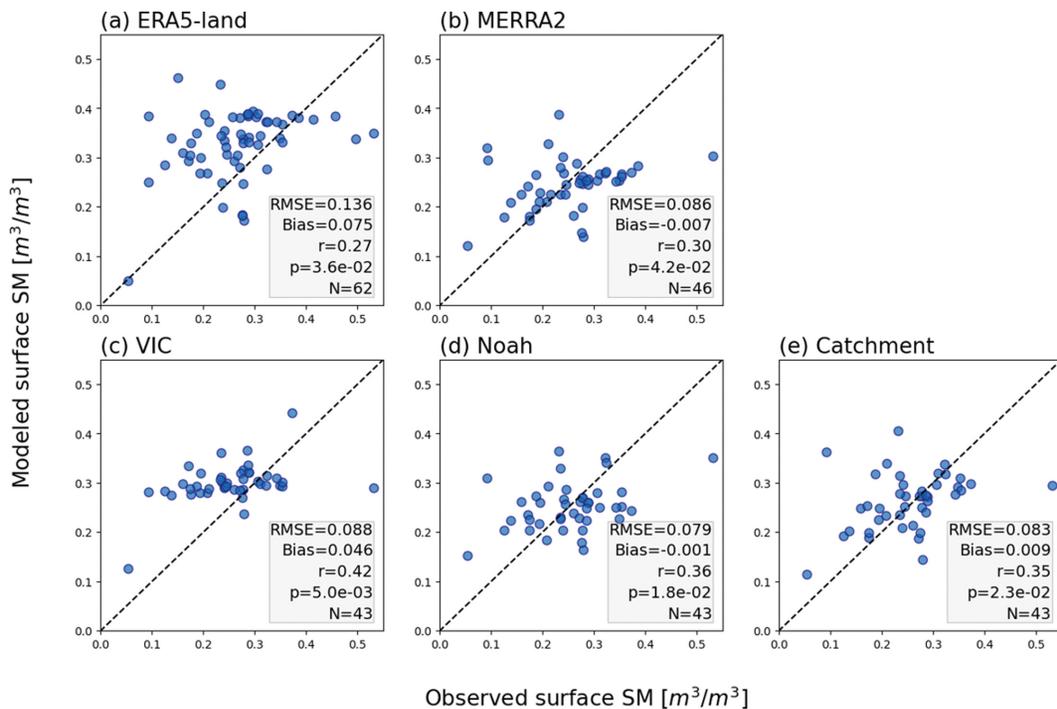


Fig. 2. Scatter plots of the climatological mean of surface soil moisture simulated by the models (y-axis; a: ERA5-land, b: MERRA2, c: VIC, d: Noah, e: Catchment) against in-situ observations (x-axis) where RMSE, bias, spatial correlation coefficient, its p-value, and number of sites used in the validation is denoted at bottom-right corner in each panel.

강한 습윤 오차로 검증에 사용한 재분석 자료 중에 가장 큰 에러를 나타낸다(Fig. 2a). 또한, MERRA2 재분석 자료도 상대적으로 높은 해상도에 비해 에러가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 2b). GLDAS version2.0 자료 모두 습윤 오차를 나타내고 있어, 동아시아 지역에서 사용하는 대기 강제력에 따라 나타나는 공통적인 특성이라고 이해할 수 있다(Figs. 2c, d, and e). 하지만 GLDAS 자료들이 전반적인 에러와 공간적인 상관관계를 비교하였을 때 MERRA2, ERA5-land자료와 비교하여 유사하거나 다소 나은 성능을 나타낸다. Catchment 지면모형을 공통적으로 사용하는 MERRA2 재분석 자료와 GLDAS 자료 간의 비교를 통하여 대기 강제력의 영향에 대해 이해할 수 있다. MERRA2가 공간해상도는 더 좋지만 토양수분 모의

성능에 전반적으로 더 나은 성능을 보이지 못하는데, 그 이유로는 지면모형을 강제하는 GLDAS 대기 강제력이 기후평균 관점에서 MERRA2 강제력 보다 현실적인 정보를 제공한다는 것을 의미한다.

동아시아 지역 토양수분의 평균장뿐만 아니라 시간 규모에서 나타나는 주요 변동성을 확인하기 위하여 power spectrum (멱 스펙트럼) 분석을 수행하였다. 관측자료의 경우 샘플이 가장 많은 한국에 위치한 Seolmacheon-A2 (126.9°W, 37.9°N) 자료를 사용하여, 재분석 자료에서 나타나는 토양수분 변동성과 비교하였다. 그 결과, 토양수분 직접 관측자료에서 년도와 계절 시간 주기에서 강한 변동성이 존재했다(Fig. 3a). MERRA2와 ERA5-land 재분석 자료의 경우 두 자료 모두 계절 및 장주기(low-frequency) 시간규모에서 토

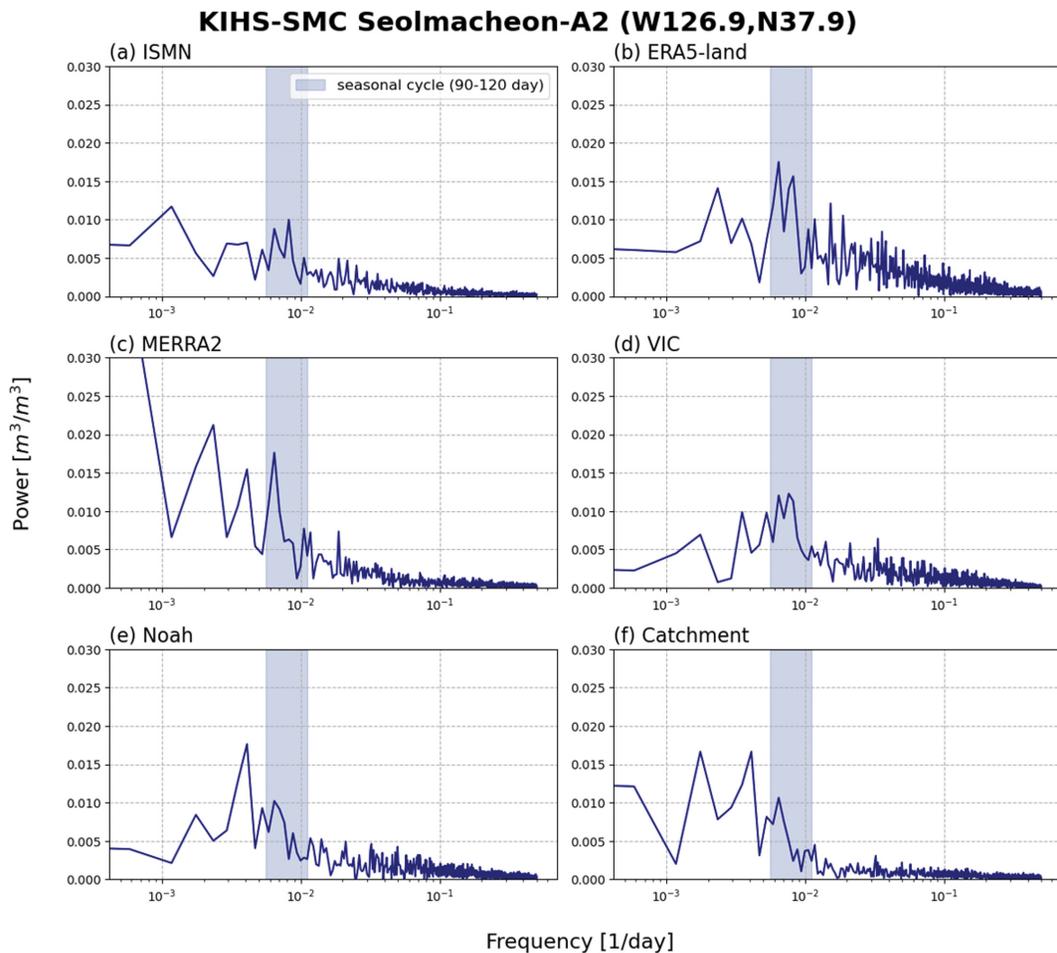


Fig. 3. Power spectrum of surface soil moisture from (a) ISMN, (b) ERA5-land, (c) MERRA2, (d) VIC, (e) Noah, and (f) Catchment at Seolmacheon-A2 station (126.9°W, 37.9°N) for 8-year (2007~2014). The shaded range in temporal frequency indicates seasonal variability specifying 90~180 days.

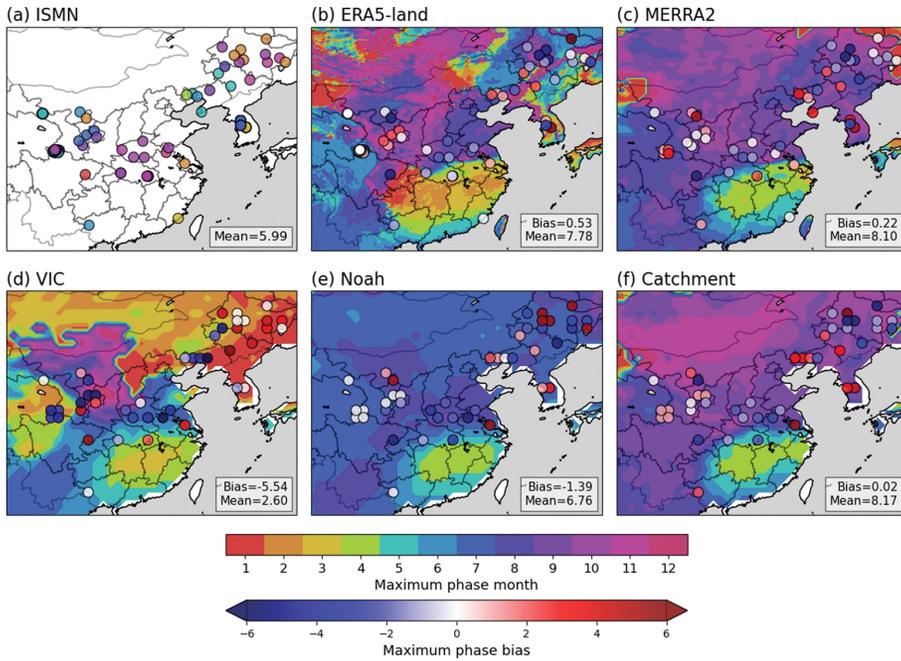


Fig. 4. Maximum phase month of (a) observation surface soil moisture (marker) over East Asia. For plots (b) VIC, (c) Noah, (d) Catchment, (e) MERRA2, and (f) ERA5-land, the spatial distribution of the maximum phase (shading) from each model is shown with the circular mean bias compared with ISMN observational data (scatter). Additionally, the mean maximum phase month and bias are displayed in the bottom right corner of each plot.

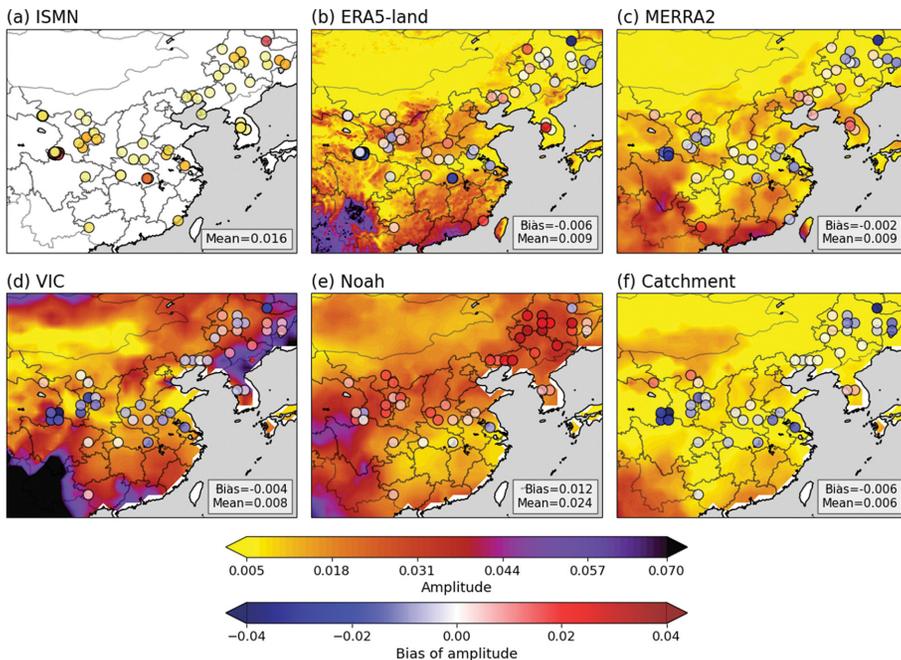


Fig. 5. Same as in Fig. 4, but for surface soil moisture amplitude. The scatter denotes the amplitude bias compared with ISMN observational data.

양수분 변동성을 관측과 비교하여 과대모의 하고 있다. 단주기(high-frequency) 시간규모에서 ERA5-land의 경우 관측과 비교하여 강한 변동성을 모의하지만, MERRA2는 관측과 유사한 변동 세기를 모의한다(Figs. 3b, c). GLDAS 자료들은 동일한 대기 강제력에 의해서 산출된 토양수분 자료지만 각 자료의 시간 변동성은 서로 다르게 나타난다(Figs. 3d, e, and f). 예를 들어, VIC 모델의 경우 계절 시간규모에서 가장 강한 변동성을 나타내는데, Noah, Catchment 모델에서는 계절보다는 장주기 시간규모에서 변동성이 더 크게 나타나 관측과 보다 유사한 변동 특성을 모의한다.

앞서 분석한 power spectrum 분석에서 토양수분 자료의 계절변동성이 크다는 것에 착안하여, 모델이 실제로 토양수분의 계절변동의 위상과 세기를 잘 모의하는지 확인하였다. 각 지점마다, 각 월마다 토양수분의 평균값을 구하여 12개월에 대한 시계열을 기반으로 최대값이 나오는 월을 최대 위상으로 정의하고 진폭을 이용하여 계절변동의 세기를 비교하였다. 우선 직접 관측자료에서 동아시아 지역의 평균 토양수분 최대 위상이 약 6월쯤에 확인된다(Fig. 4a). 중국 중부 지역은 주로 약 9월에 최대 위상이 나타나는데, 이는 해당지역에서 6~7월 동안 몬순이 활발하여 연중 강수량의 대부분이 여름철에 나타나고, 토양수분의 경우 물 수지 방정식에 따라 강수량의 누적 값에 의해 영향을 받으므로 강수량이 집중된 이후 토양수분 최대값이 나타난다고 이해할 수 있다. 이러한 토양수분 계절 위상에 대한 모델 간 모의 성능의 차이는 크게 나타난다. GLDAS 모델의 경우 대기 강제력으로 처방되는 강수량 값은 동일하지만, 계절변동에 대한 최대 위상 차이가 크다(Figs. 4d, e, and f). 즉, 모델에서 모의하는 토양수분에 대한 물리과정에 따라 그 계절성 모의에 크게 영향을 미친다고 이해할 수 있다. Catchment 모델이 VIC, Noah 모델과 비교하여 토양수분 계절성에 대한 위상모의가 현실적으로 모의되며, 나머지 두 모델의 경우 관측과 비교하여 최대위상을 나타내는 계절이 다소 느리게 모의된다. 이는 물 수지 방정식에서 잠열과 유출량 모의가 상이하여 서로 다른 토양수분의 시간 변화량을 모의하기 때문이다. MERRA2 재분석 자료의 경우 관측과 유사한 계절변동 위상 값을 모의하여, 동일한 지면모델을 사용하는 Catchment 모델과도 유사한 토양수분 계절 위상을 나타낸다(Fig. 4c). 이는 동아시아 지역의 계절성이 모델 물리과정에 의해 큰 영향을 받는다고 이해할 수 있으며, 중국 북동부 지역의 경우 Catchment 모델과의 위상차이가 크게 나타나는 것은 해당 지역의 계절성 모의에 대기 강제력에 따른 영향이 있다고 이해할 수 있다. ERA5-land도 관측과 유사한 토양수분의 계절성을 모의하지만, 관측과 비교하여 0.5달 정도 이른 토양수분 최대

위상을 나타낸다(Fig. 4b). 모든 재분석자료 결과에서 공통적으로 중국 남부 지역의 계절변동성이 봄철에 최대 위상을 나타내고 있는데, 이는 물 수지 방정식에 포함된 변수의 계절 변동성을 통하여 확인할 수 있다. 중국 북부 지역과 달리 남부 지역에서는 2월 이후 증발량 증가에 비해 강수량의 증가가 크게 나타난다. 따라서, 중국 남부지역에서는 이 시기에 토양수분이 양의 추세를 나타내기 때문에 봄철 토양수분의 위상이 크게 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

동아시아지역 토양수분 계절변동성 세기측면에서도 진단을 수행하였다. 직접관측자료에서 나타나는 토양수분 계절적 변동성의 세기가 지역별로 차이가 크지 않지만, 재분석 자료의 경우, 사용된 모델마다 공간적 특징이 다양하게 나타난다(Fig. 5a). ERA5-land와 MERRA2 재분석 자료의 경우 몽골, 한국지역과 비교하여 중국지역에서 계절 변동성을 크게 모의한다(Figs. 5b, c). GLDAS에서 제공된 세 가지 모델의 경우 동일한 대기 forcing을 사용하지만, 위상과 마찬가지로 변동 세기도 서로 다르게 모의된다. VIC 모델의 경우 계절 변동성이 중국 남서부 지역과 북동부 지역, 몽골 북부 지역에서 크게 모의되며 상대적으로 내륙지역에서는 작게 나타난다(Fig. 5d). Noah 모델의 경우 전반적으로 토양수분 계절성이 크게 나타나 관측과 비교하여 계절변동의 세기를 과대모의 한다(Fig. 5e). Catchment 모델의 경우 MERRA2 재분석 자료와 동일한 지면 모델을 사용하지만, 재분석 자료의 결과와 비교하여 전반적으로 몽골 지역에서 계절변동을 크게 모의하고, 중국 지역에서는 작게 모의하여 대기 강제력에 따른 차이를 나타낸다(Fig. 5f). 지면모델과 대기 강제력에 따라 나타나는 토양수분의 계절 변동성을 종합적으로 진단하였을 때 MERRA2 재분석자료가 관측과 가장 유사한 결과를 나타낸다.

앞선 power spectrum 분석결과에서 토양수분의 계절 주기 변동성이 단주기 규모 변동성보다 크기 때문에, 계절성이 토양수분 시계열 상관성에 큰 영향을 미칠 수 있다(Fig. 3). 따라서 계절 변동성의 유무에 따른 동아시아의 토양수분 모의 성능을 구별하여 상관관계를 진단하였다(Fig. 6a). ERA5-land와 MERRA2는 계절 변동성 유무에 따른 토양수분 모의에 유의미한 차이가 나타나지 않지만, GLDAS 자료들의 경우 계절 내 변동성을 제외한 단주기 규모 변동성에 대해 토양수분 모의 성능의 유의미한 감소를 보인다. 즉, GLDAS 대기 강제력의 경우 계절 시간 규모에서의 품질이 단주기 시간규모보다 성능이 좋으며, ERA5-land와 MERRA2 재분석에 사용하는 대기 강제력의 경우 단주기 시간 규모에서도 계절성만큼이나 성능이 좋을 것을 의미한다. 같은 지면 모델을 사용하는 Catchment 모델과 MERRA2 재분석 자료를 비교하였

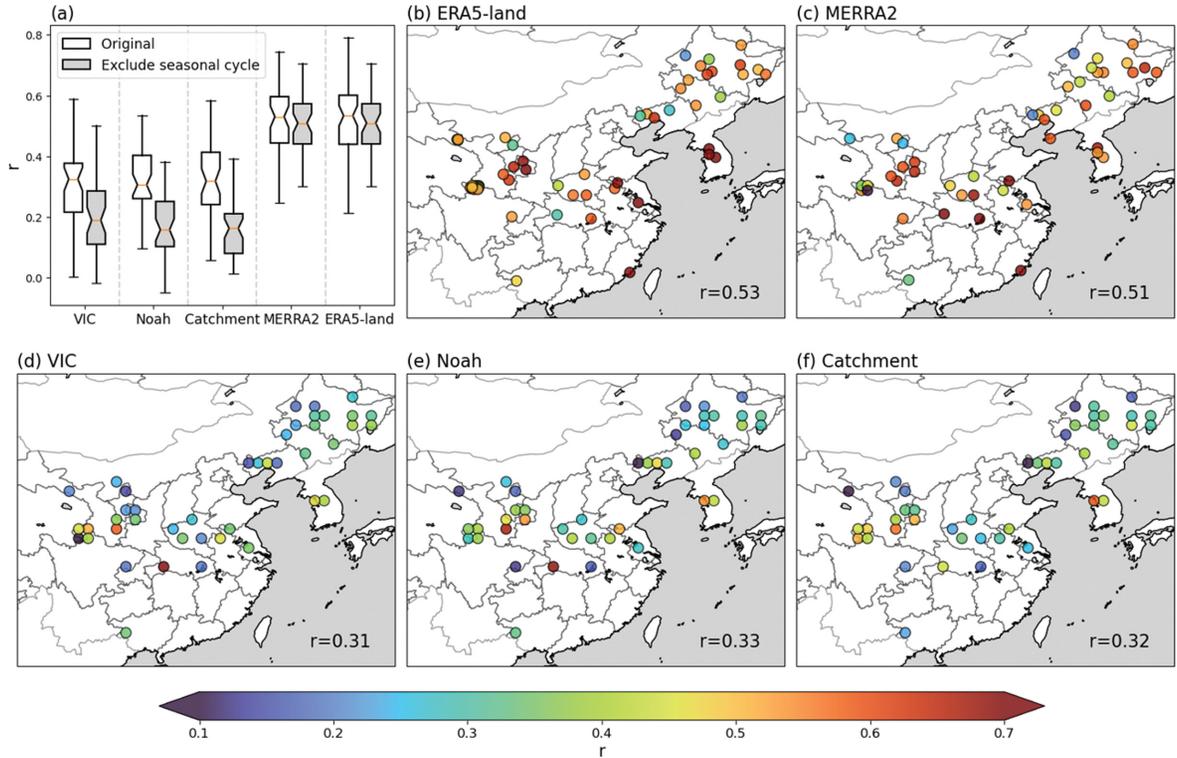


Fig. 6. (a) Box plot of temporal correlation coefficients from SSM products, where left and right boxes are calculated with including and excluding seasonal cycle, respectively. Special distribution of the temporal correlation coefficient of SSM from (b) ERA5-land, (c) MERRA2, (d) VIC, (e) Noah, and (f) Catchment against in-situ measurements and area-averaged correlation coefficient value is displayed in the bottom-right corner of each plot.

을 때, 성능차이가 크게 나타나는데 이는 주로 대기 강제력 품질에 따른 결과라고 이해할 수 있다. ERA5-land 자료의 경우에는 전체 모델 중 한국 지역에 대해 토양수분 상관계수가 0.7 이상으로 모의 성능이 가장 높게 나타났으며, 전반적으로 관측과 유사한 결과를 나타낸다(Fig. 6b). 특히, 한반도 지역에서 검증에 사용한 토양수분 재분석자료 중에 가장 높은 상관계수 값을 나타낸다. MERRA2의 경우 ERA5-land와 유사한 상관계수 공간패턴을 보이며, 동아시아 지역에서 0.51의 상관계수를 나타낸다(Fig. 6c). 반면, GLDAS 자료 모두 전반적으로 앞선 두 재분석 자료와 비교하여 상관계수가 0.2 정도 낮은 토양수분 모의 성능을 나타낸다(Figs. 6d, e, and f). 이는 GLDAS의 대기 강제력 품질이 토양수분의 계절성과 일변동 모의 성능에 영향을 미치는 성분 모두 최선 재분석 자료와 비교하여 상대적으로 성능이 좋지 않은 것을 나타낸다.

앞서 진단에 사용한 5개의 재분석 자료를 평균하여 동아시아 지역 SSM의 공간 분포와 이에 따른 지면-

대기 상호작용의 장기간 기후 값을 비교하였다. 중국 북부와 몽골 남부에 위치한 고비사막 지역에서 $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이하의 낮은 토양수분 값이 나타났고, 양의 TCI(SSM, LH) 값이 크게 나타났다(Figs. 7a, b). 이와 같이 건조한 지역은 주로 토양수분의 양에 따라 증발산의 양이 변화하여 지표 플럭스의 민감도가 커지고 잠열 플럭스와 양의 상관성을 나타내는 수분 제한 체제 지역으로 이해할 수 있다. 반면, 중국 남부 지역은 주로 $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이상의 습한 토양과 음의 TCI(SSM, LH)를 나타낸다. 즉, 토양수분의 양이 충분히 많기 때문에 추가적인 토양수분의 증가에 따른 증발산의 변동이 적고 에너지 변화에 의한 민감도가 있는 에너지 제한 지역인 것을 알 수 있다. 추가적으로 동아시아 지역의 토양수분과 지면-대기 상호작용의 장기간 트렌드에 대해 확인해보았다(Figs. 7c, d). 몽골 북부, 만주, 중국 내륙 지역에서 유의미한 토양수분의 감소추세를 나타내고, 중국 서쪽 지역 일부 토양수분 증가 추세를 나타낸다(Fig. 7c). 지면-대기 상호작용의 세기를 나타내는 TCI(SSM, LH)의 추세는 몽골 북부, 만

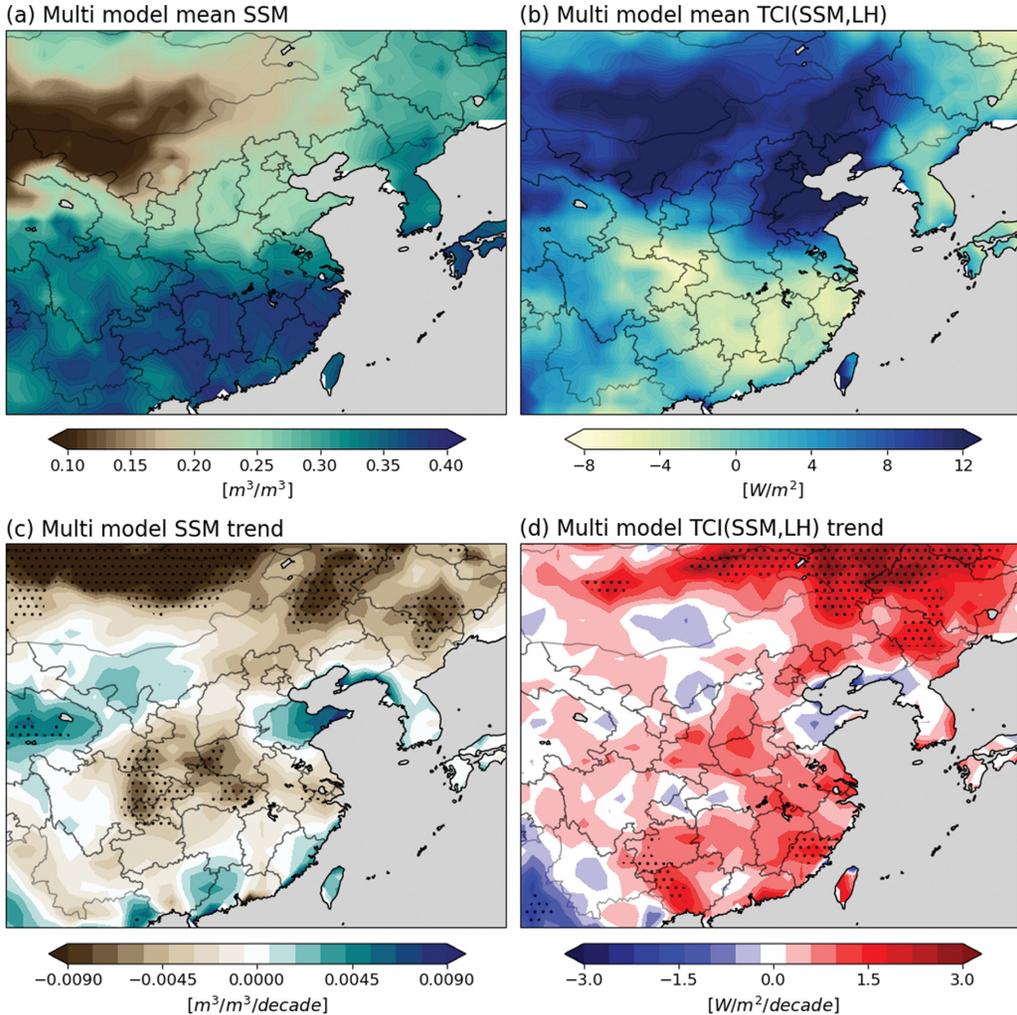


Fig. 7. Spatial pattern of multi-model (5 reanalysis products) mean climatology (upper row) and long-term trend (bottom row) of (a, c) SSM and (b, d) TCI(SSM, LH) for 35 years (1980~2014). In the trend maps, the dotted areas indicate that the linear trend is statistically significant at a 95% confidence level.

주 지역에서 토양수분 감소에 따라 수분 제한 결합이 강해지는 것을 나타내지만, 중국 남부지역에서 나타나는 지면-대기 상호작용 강도 증가는 해당 지역에 에너지 제한 지역임을 고려하여 토양수분 감소와 큰 관련성이 없음을 알 수 있다(Fig. 7d). 따라서, TCI(SSM, LH) 구성 성분 중 SSM와 LH의 상관성을 나타내는 $\rho(SSM, LH)$ 보다 LH 변동성 증가에 따른 σ_{LH} 값의 증가로 인한 결과로 이해할 수 있다.

4. 결 론

토양수분은 지표면과 대기 간의 에너지 및 물 순환

을 조절하는 수문학적 및 기상학적 과정의 핵심 요소이지만, 동아시아 지역은 직접 관측 자료의 부족으로 인해 토양수분에 관한 지면 재분석 자료들의 성능을 체계적으로 분석하는 연구가 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 가용한 직접 관측 자료를 활용하여 동아시아 지역의 토양수분 재분석 자료의 성능을 평가하여 기후 예측 시스템을 개선하기 위한 기초 정보를 제공한다. 1980~2014년간 동아시아 지역 토양수분 재분석 자료들을 직접 관측 자료와 비교한 결과 각 지점에서의 평균 토양수분 모의 성능은 GLDAS version2.0 자료가 동아시아 지역 대기 강제력에 의해 공통적으로 습윤 오차를 나타내고 있으나, 전반적인 에러와 공간

적인 상관관계는 MERRA2와 ERA5-land 자료와 비교하여 유사하거나 다소 나은 성능을 가진다(Fig. 2). 동아시아 지역 토양수분의 변동성은 계절 시간규모에서 크게 나타나며, 관측자료를 이용하여 계절주기의 위상을 확인하였을 때 6월에 토양수분 최대값을 나타내었다. 이는 동아시아 몬순으로 인해 6월에 강수가 집중된 결과이며, 이러한 토양수분의 계절변동 위상과 세기 모의를 MERRA2 자료가 관측과 가장 유사하게 모의한다. 또한, 토양수분의 시계열에 대한 관측과의 상관성을 확인한 결과 MERRA2, ERA5-land 자료가 GLDAS 자료들과 비교하여 전반적으로 나은 성능을 보인다. 특히, GLDAS 자료는 계절성을 제외하고 토양수분의 단주기 시간규모의 변동성 모의 성능이 좋지 않아 이는 고주파 시간 규모에서의 대기 강제력 성능에 문제가 있음을 시사한다. 종합적으로 MERRA2 재분석 자료가 가용한 재분석 자료 중 동아시아 지역의 토양수분 모의 성능에서 가장 현실적인 결과를 보였으며, 이는 이 지역에서 토양수분 평균장 및 변동성에 대한 진단 연구에 활용될 수 있음을 시사한다. 하지만 토양수분 장주기 변동성과 최고 위상을 모의하는 성능은 다른 모델의 결과와 비교하였을 때 개선이 필요하다는 점도 확인되었다.

추가적으로, 본 연구에서는 가용한 지면 재분석자료를 활용하여 동아시아 지역의 토양수분과 지면-대기 상호작용의 기후 평균장을 분석하였다(Fig. 7). 그 결과 몽골과 중국 북부의 건조 지역에서 낮은 토양수분 값과 양의 TCI(SSM, LH) 값을 나타내어 해당 지역이 지면-대기 상호작용의 수분 제한 체제에 해당하는 것을 알 수 있었다. 또한, 장주기 트렌드 분석을 통해, 몽골 북부와 중국 북동부 일부 지역에서는 지난 35년간 유의미한 토양수분 감소와 함께 TCI 값의 증가가 확인되었다. 이는 해당 지역에서 수분 제한 체제가 강화되고 있으며, 시간이 지남에 따라 지면과 대기 간의 상호작용이 더욱 강해지고 있음을 시사한다. 이러한 경향은 가뭄이나 폭염과 같은 극한 기상 현상의 발생 가능성을 높아지고 있다는 것을 시사한다.

본 연구의 결과는 동아시아 지역의 토양수분 다중 재분석자료와 직접관측 자료를 비교하여, 해당 지역의 토양수분 평균장과 변동성, 계절 내 시계열 상관성 부분의 검증 결과를 포함하고 있다. 또한, 토양수분과 지면-대기 상호작용의 장기간 트렌드 분석 제공을 통해 기후 예측 모델을 개선하고, 기후 변화에 대한 대응 전략을 마련하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 따라서, 향후 연구에서는 동아시아 지역에서 나타나는 지면-대기 상호작용의 변화에 대해 더 많은 관심을 기울이고, 개선을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Benson, D. O., and P. A. Dirmeyer, 2023: The soil Moisture-Surface flux relationship as a factor for extreme heat predictability in subseasonal to seasonal forecasts. *J. Climate*, **36**, 6375-6392, doi:10.1175/JCLI-D-22-0447.1.
- Chen, F., and Coauthors, 1996: Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268, doi:10.1029/95JD02165.
- Dirmeyer, P. A., 2003: The role of the land surface background state in climate predictability. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 599-610, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<0599:TROTLS>2.0.CO;2.
- _____, 2011: The terrestrial segment of soil moisture-climate coupling: SOIL MOISTURE-CLIMATE COUPLING. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L16702, doi:10.1029/2011GL048268.
- _____, and Coauthors, 2018: Verification of Land-Atmosphere coupling in forecast models, reanalyses, and land surface models using flux site observations. *J. Hydrometeorol.*, **19**, 375-392, doi:10.1175/JHM-D-17-0152.1.
- _____, X. Gao, M. Zhao, Z. Guo, T. Oki, and N. Hanasaki, 2006: GSWP-2: Multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1381-1397, doi:10.1175/BAMS-87-10-1381.
- _____, G. Balsamo, E. M. Blyth, R. Morrison, and H. M. Cooper, 2021: Land-Atmosphere interactions exacerbated the drought and heatwave over northern Europe during summer 2018. *AGU Advances*, **2**, e2020AV000283, doi:10.1029/2020AV000283.
- Dorigo, W., and Coauthors, 2021: The international soil moisture network: serving earth system science for over a decade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **25**, 5749-5804, doi:10.5194/hess-25-5749-2021.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the national centers for environmental prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.

- Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419-5454, doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Guo, Z., and P. A. Dirmeyer, 2006: Evaluation of GSWP-2 soil moisture simulations, Part I: Inter-model comparison. *J. Geophys. Res.*, **111**, D22S02, doi:10.1029/2006JD007233.
- _____, _____, Z.-Z. Hu, X. Gao, and M. Zhao, 2006: Evaluation of GSWP-2 soil moisture simulations. Part 2: Sensitivity to external meteorological forcing. *J. Geophys. Res.*, **111**, D22S03, doi:10.1029/2006JD007845.
- Hsu, H., P. A. Dirmeyer, and E. Seo, 2024: Exploring the mechanisms of the soil moisture-air temperature hypersensitive coupling regime. *Water Resour. Res.*, **60**, e2023WR036490, doi:10.1029/2023WR036490.
- Koster, R. D., M. J. Suarez, A. Ducharne, M. Stieglitz, and P. Kumar, 2000: A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure. *J. Geophys. Res.*, **105**, 24809-24822, doi:10.1029/2000JD900327.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, **99**, 14415-14428, doi:10.1029/94JD00483.
- Muñoz-Sabater, J., and Coauthors, 2021: ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 4349-4383, doi:10.5194/essd-13-4349-2021.
- Richter, J. H., and Coauthors, 2024: Quantifying sources of subseasonal prediction skill in CESM2. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **7**, 59, doi:10.1038/s41612-024-00595-4.
- Rodell, M., and Coauthors, 2004: The global land data assimilation system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 381-394, doi:10.1175/BAMS-85-3-381.
- Santanello, J. A., and Coauthors, 2018: Land-atmosphere interactions: The LoCo perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 1253-1272, doi:10.1175/BAMS-D-17-0001.1.
- Seo, E., and P. A. Dirmeyer, 2022a: Improving the ESA CCI daily soil moisture time series with physically-based land surface model datasets using a Fourier time-filtering method. *J. Hydrometeorol.*, **23**, 473-489, doi:10.1175/JHM-D-21-0120.1.
- _____, and _____, 2022b: Understanding the diurnal cycle of land-atmosphere interactions from flux site observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **26**, 5411-5429, doi:10.5194/hess-26-5411-2022.
- _____, and Coauthors, 2019: Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Clim. Dyn.*, **52**, 1695-1709, doi:10.1007/s00382-018-4221-4.
- _____, M.-I. Lee, S. D. Schubert, R. D. Koster, and H.-S. Kang, 2020: Investigation of the 2016 Eurasia heat wave as an event of the recent warming. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 114018, doi:10.1088/1748-9326/abb-bae.
- _____, P. A. Dirmeyer, M. Barlage, H. Wei, and M. Ek, 2024: Evaluation of land-atmosphere coupling processes and climatological bias in the UFS global coupled model. *J. Hydrometeorol.*, **25**, 161-175, doi:10.1175/JHM-D-23-0097.1.
- Sheffield, J., G. Goteti, and E. F. Wood, 2006: Development of a 50-Year High-Resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *J. Climate*, **19**, 3088-3111, doi:10.1175/JCLI3790.1.
- Tak, S., E. Seo, P. A. Dirmeyer, and M.-I. Lee, 2024: The role of soil moisture-temperature coupling for the 2018 Northern European heatwave in a subseasonal forecast. *Wea. Climate Extremes*, **44**, 100670, doi:10.1016/j.wace.2024.100670.