

전지구 계절 예측 시스템의 토양수분 초기화 방법 개선

서은교¹⁾ · 이명인^{1)*} · 정지훈²⁾ · 강현석³⁾ · 원덕진⁴⁾

¹⁾울산과학기술원 도시환경공학부, ²⁾전남대학교 지구환경과학부,
³⁾국립기상과학원 기후연구과, ⁴⁾기상청 수치모델개발과

(접수일: 2015년 9월 30일, 수정일: 2015년 12월 18일, 게재확정일: 2015년 12월 18일)

Improvement of Soil Moisture Initialization for a Global Seasonal Forecast System

Eunkyo Seo¹⁾, Myong-In Lee^{1)*}, Jee-Hoon Jeong²⁾, Hyun-Suk Kang³⁾, and Duk-Jin Won⁴⁾

¹⁾School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

²⁾Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea

³⁾National Institute of Meteorological Research, Seogwipo, Jeju, Korea

⁴⁾Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 30 September 2015; revised 18 December 2015; accepted 18 December 2015)

Abstract Initialization of the global seasonal forecast system is as much important as the quality of the embedded climate model for the climate prediction in sub-seasonal time scale. Recent studies have emphasized the important role of soil moisture initialization, suggesting a significant increase in the prediction skill particularly in the mid-latitude land area where the influence of sea surface temperature in the tropics is less crucial and the potential predictability is supplemented by land-atmosphere interaction. This study developed a new soil moisture initialization method applicable to the KMA operational seasonal forecasting system. The method includes first the long-term integration of the offline land surface model driven by observed atmospheric forcing and precipitation. This soil moisture reanalysis is given for the initial state in the ensemble seasonal forecasts through a simple anomaly initialization technique to avoid the simulation drift caused by the systematic model bias. To evaluate the impact of the soil moisture initialization, two sets of long-term, 10-member ensemble experiment runs have been conducted for 1996~2009. As a result, the soil moisture initialization improves the prediction skill of surface air temperature significantly at the zero to one month forecast lead (up to ~60 days forecast lead), although the skill increase in precipitation is less significant. This study suggests that improvements of the prediction in the sub-seasonal timescale require the improvement in the quality of initial data as well as the adequate treatment of the model systematic bias.

Key words: Seasonal forecast system, soil moisture initialization, land-atmosphere interaction, anomaly initialization

*Corresponding Author: Myong-In Lee, School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, UNIST-gil 50, Ulsu-gun, Ulsan 44919, Korea.
Phone: +82-52-217-2813, Fax: +82-52-217-2299
E-mail: milee@unist.ac.kr

1. 서 론

전지구 수치예보 모델은 지난 수 십 년간 뚜렷한 발전을 이루어 현재 다양한 시간 규모의 대기과 기후의 변동성을 이해하고 예측하는 데 필수적인 도구로 되었다. 현재 현업에 사용되고 있는 전지구 모델들은 수 일 이내 규모의 일기 예보와 3~6개월 규모의 열대 태평양 ENSO예측 등에 있어서 실용적인 수준의 예보 성능을 보이고 있다. 한편, 시간 규모 2주 이상 3개월 이내의 이른바 계절 내 규모의 예측에 대해서는 그 잠재적인 예측성이 충분히 시험되지 않았으며, 예보 정확도 또한 실용적인 수준에 미치지 못하고 있다. 최근 계절 내 시간 규모에서 기후계의 비선형적인 상호 작용을 이해하기 위하여 대기-지면-해양-해빙 결합 기후모델을 사용하고 있다. 하지만, 기후시스템 내부 상호 작용 및 피드백 과정에서 발생하는 모델의 계통적 오차와 기후 요소들의 초기값 부정확성에 따른 오차 등으로 인해 발생하는 예보 오차는 여전히 개선이 필요하다(Stocker et al., 2014).

ENSO 및 중위도 해수면 온도 예측이 수 개월 이전부터 가능한 수준임에도 불구하고, 계절예보의 수요 및 활용도가 상대적으로 높은 중위도 대륙 지역에서의 기온 및 강수량의 예측 성능은 초기화 이후 1~2개월 이내에 비실용적인 수준으로 급격히 떨어진다(Wang et al., 2008). 이는 계절 내 규모에서 열대 및 중위도의 해수면 온도 변동이 중위도의 기후변동에 미치는 영향이 절대적이지 않으며, 다른 지배적인 과정이 중요할 수 있음을 시사한다.

선행연구들에 따르면, 계절 내 규모 예측 기술의 향상에 있어 중요한 과정 중의 하나로 지면과정의 초기화 및 대기-지면 상호작용에 대한 결합모델의 개선 등을 들 수 있다(Dirmeyer, 2003). 알려진 바와 같이 대기의 초기상태는 대개 2주 이내의 짧은 지속성을 가지고 있어 보다 긴 계절 내 규모에서의 영향이 제한적이며(Lorenz, 1982), 해양의 초기 상태는 계절 이상의 긴 지속성을 가지고 있지만, 계절 이내의 시간 규모에서 변동성이 작아 계절 내 변동에 미치는 영향이 제한적이다(Meehl et al., 2009). 반면, 지면과정의 초기 상태는 지속성이 수 개월 이내로서 예측하려는 시간 규모와 유사하여, 초기화로 인한 효과가 상대적으로 크다고 할 수 있다(Vinnikov and Yeserkepova, 1991; Entin et al., 2000; Koster et al., 2004a).

현재 계절예측에 사용되는 대부분의 현업 기후모델들은 지면과정을 식생 캐노피층, 지표면, 그리고 다층의 지중 토양층으로 분해하고, 에너지 및 물의 보존 방정식을 이용하여 예측한다. 지표면의 에너지 수지 방정식의 경우, 지표면 온도의 시간적 변화는 유입되는 순 복사량과 빠져나가는 잠열, 현열, 지중 수송 등

의 차이로 결정된다. 물 수지 방정식의 경우, 토양 습윤도의 시간적 변화는 유입되는 강수와 빠져나가는 증발량, 지표 유출량, 지중으로의 침투량의 차이로 결정된다. 이 때 토양 습윤도의 초기 상태는 시간적 지속성을 가지며 지면의 에너지 및 물 순환 모두에 직접적으로 기여하며 중요한 역할을 하게 된다(Seneviratne et al., 2010). 아울러, 본 연구에서는 다루지 않았지만 지표면의 적설량의 초기 조건 또한 에너지 및 물 순환 변화를 주도하는 중요한 변수로 알려져 있다(Cohen et al., 1991; Jeong et al., 2013; Orsolini et al., 2013).

최근 들어, 대기-지면 결합 과정을 이해하고, 계절 내 규모에서의 예측성능 향상을 위한 국제 공동연구들이 활발해 지고 있다(Dirmeyer, 2000; Douville, 2004; Koster et al., 2002, 2004a, 2004b, 2006, 2010, 2011). 선행 연구에 따르면, 대기-지면의 결합 과정의 강도와 지면 초기화의 효과는 지역에 따라, 그리고 사용된 기후모델에 따라 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 지면과정에 대한 우리의 이해가 충분하지 않으며 현재의 모델링 기법에 많은 불확실성이 포함되어 있음을 의미한다. 또 한편으로는 개선 효과가 모델마다 다르기 때문에, 특정 모델의 예측 정확도 향상을 위해서는 개별적인 모델의 특성을 고려한 경험적 기법이 필요함을 제시하고 있다.

본 연구에서는 영국 기상청(UK Met Office)이 개발하고 현재 한국 기상청에서 현업으로 운영하고 있는 Global Seasonal Forecast System version 5(이하 GloSea5)의 지면과정 초기화 기법을 개선하였다. 또한 개선된 기법을 장기간의 여름철 과거 기후(1996~2009)에 대한 앙상블 실험을 통하여 계절 내 규모에서의 기온 및 강수량의 예측성능 향상도를 정량적으로 검증하였다. 계절 내 규모에서 지면 초기화의 영향과 대기-지면의 비선형적 상호작용을 보다 쉽게 이해하기 위해서, 본 연구에서는 개발된 초기화 기법을 모든 지면과정의 예단변수에 적용하지 않았으며, GLACE-2 (Global Land-Atmosphere Coupling Experiment Phase 2; Koster et al., 2011)의 실험 설계에 따라 토양수분에 대한 초기화 효과만을 검증하였다.

본 연구에서 개발된 지면 초기화 기법은 앞서 기술한 바와 같이, 계절 내 규모에서의 예측성능에 중요한 영향을 미치는 두 가지 요소인 1) 토양수분 초기값의 부정확성을 개선하고, 아울러 2) 기후모델의 계통적 오차를 제어하는 것에 연구의 주안점을 두었다. 초기화에 필요한 토양수분 값의 전 지구적 분포는 아직까지 현재의 위성 및 지상 관측 기술의 제약으로 인하여, 정확한 관측 값을 얻을 수 없는 실정이다(Reichle et al., 2011). 이를 위하여 본 연구에서는 관측된 대기의 정보를 강제력으로 오프라인 지면모델 실험을 수행하고 이로부터 추정된 토양수분 값

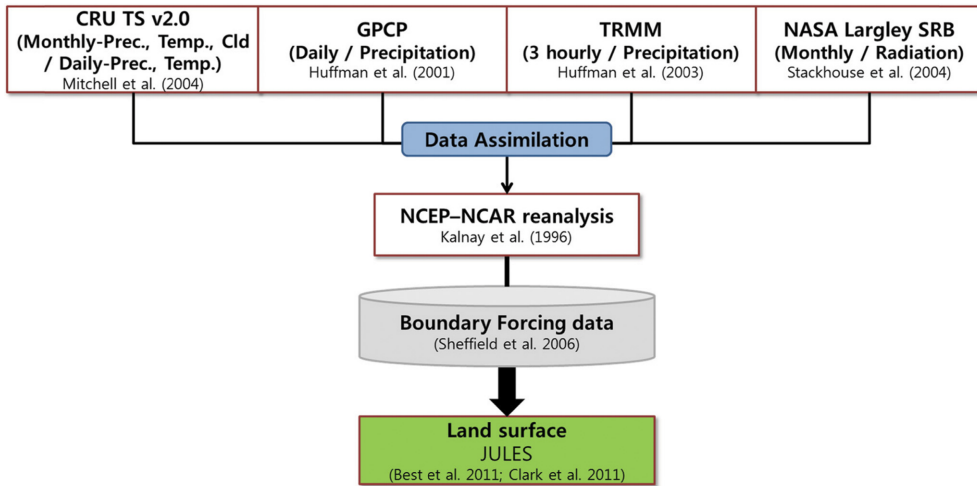


Fig. 1. A diagram of the long-term, offline land surface model simulation using JULES driven by observed and reanalysis atmospheric forcing data archived by Sheffield et al. (2006).

을 기후모델의 초기화 자료로 사용하였다. 현재 현업에 사용되는 대부분의 계절예측 시스템들은 토양수분 초기화 과정을 고려하지 않거나(예: 영국기상청의 GloSea5), 장기간의 ERA-Interim 혹은 NCEP CFSR 등의 기후재분석 자료를 사용하고 있어(예: 미국 NCEP Coupled Forecast System model version 2 (CFSv2)), 토양수분에 큰 영향을 미치는 강수량 값이 부정확하게 적용되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여, 관측 강수량 자료를 포함하는 Sheffield et al. (2006) 강제력을 사용하였다. 이렇게 생산된 토양수분 값의 재분석 자료는 관측된 대기 조건을 사용하였기 때문에, 계절예측을 위하여 기후모델에 직접 처방하는 경우, 관측된 기후로부터 기후모델 고유의 기후로 전이되는 기후표류가 발생하게 된다. 이러한 기후표류는 모델의 계통적 오차가 클수록 더 크게 된다. 본 연구에서는 기후모델의 계통적 오차를 제어하기 위하여, 간단한 형태의 편차 장 초기화 기법을 사용하였다.

본 논문의 2장은 연구에 사용된 계절예측 시스템과 자료를 설명하였으며, 토양수분 초기화 기법 및 장기간 앙상블 재 예측 실험 방법 등에 대해 기술하였다. 3장에서는 토양수분을 초기화한 경우와 초기화 하지 않은 경우를 대비하여 계절 내 규모에서의 예측 성능 향상도를 정량적으로 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 결과를 요약하고 결론을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 계절예측 시스템

영국 기상청에서 개발한 전 지구 계절예측시스템인

GloSea5 (MacLachlan et al., 2014; Lea et al., 2015)는 대기-해양-지면-해빙 과정이 결합된 기후모델이다. 대기과정은 Met Office Unified Model Global Atmosphere (GA) 3.0 모델에 기반하고 있으며(Walters et al., 2011; Maidens et al., 2013), 해양과정은 Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) 3.2 (Madec, 2008), 지면과정은 Joint UK Land Environment Simulator (이하 JULES) (Best et al., 2011), 해빙과정은 Los Alamos sea ice model (CICE) 4.1 (Hunke et al., 2010) 컴포넌트 모델들을 사용하였다. 대기모델의 수평해상도는 경도 $0.83^\circ \times$ 위도 0.56° 이며, 연직으로 hybrid-sigma 좌표 계를 이용하여 지면으로부터 85 km까지 총 85층의 연직 층을 가지고 있다. JULES 지면모델은 지표에서 지중 2 m 깊이까지 4개의 층을 가지며 각 층별로 에너지와 물 수지 예단 방정식을 이용하여 예측한다.

2.2 토양수분 재분석 자료 생산

Figure 1은 JULES 지면모델을 이용한 오프라인 실험의 개괄적인 흐름을 보여준다. JULES 오프라인 실험을 수행하기 위하여 Terrestrial Hydrology Research Group에서 제공하는 현장 및 위성 관측, 재분석 자료 기반의 전 지구 대기 강제력 자료(Sheffield et al., 2006)를 오프라인 모델의 입력조건으로 사용하였다. 이 대기 강제력 자료는 자료동화 과정을 거쳐 다양한 종류의 관측 자료들과 기후 재분석 자료들이 포함되어 있으며, Global Land Data Assimilation Systems (GLDAS) (Rodell et al., 2004)에도 사용되고 있다. 월 평균 강수, 온도, 수평 구름 덮이, 기온 일교차, 강수

Table 1. Description of GloSea5 experiments.

	Exp0	Exp1	Exp2
Atmosphere	Initialized from ERA-interim	Initialized from the ERA-interim data of same date as in Exp0 but different year chosen randomly	
Land	Initialized from the 10 year-average monthly climatology (no yearly variation)	Same as in Exp0 but soil moisture content from the AMIP simulation	Same as in Exp0 but standard normal deviate scaled (SNDS) soil moisture content from the JULES offline simulation
Ocean/Sea Ice	Initialized from Seasonal ODA reanalysis (Coupled simulation)	Prescribed by observations (AMIP simulation)	
Number of Ensemble Member	3	10	10
Ensemble generation	Stochastic Kinetic Energy Backscattering (SKEB2; Bowler et al., 2009)	Arbitrary chosen atmospheric initial condition	

빈도 등은 지상 관측자료 기반의 Climatic Research Unit (이하 CRU) TS version 2.0 자료를 이용하여 보정되었다. 일 평균 강수량은 NASA의 Global Precipitation Climatology Project(이하 GPCP) 자료가 사용되었으며, 강수량의 일 변동을 고려하기 위하여 위경도 40° 범위 이내 열대 및 중위도 지역에 대해 3시간 간격의 Tropical Rainfall Measuring Mission(이하 TRMM) 3B42RT 자료가 사용되었다. 지면으로 유입되는 단파 및 장파 복사량은 NASA Langley surface radiation budget (SRB) 자료가 사용되었다. 대기 최하층 기온, 습도, 풍속 등의 변수들은 National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) 재분석 자료가 사용되었다. 결과적으로 대기 강제력 자료는 대기-지면간 에너지 및 물 교환의 일변동 까지도 고려하기 위하여 3시간 간격으로 수평해상도 0.5°의 JULES 오프라인 전지구 지면 모델에 처방되었으며, 이후 GloSea5 계절예측 시스템의 수평해상도에 맞추어 경도 0.83° × 위도 0.56°로 선형보간 되었다.

본 연구에서는 이렇게 생산된 지면 재분석 자료를 초기화 과정을 거쳐 GloSea5 계절예측 시스템의 입력 자료로 사용하였으며(2.5절에서 상세하게 설명), 아울러 계절예측 시스템의 예측성능 검증을 위한 관측 자료의 대응으로도 사용하였다. 이것은 전 지구 영역의 격자화된 지면 관측자료의 부재로 인한 현실적인 선택이다.

2.3 GloSea5 AMIP 장기 적분실험

GloSea5 시스템의 전지구 모델 기후값을 얻기 위하여, Atmospheric Model Intercomparison Project(이

하 AMIP) 실험 방법과 유사하게 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) 해수면 온도와 해빙 위성 관측자료를 사용하여 모델을 1996년부터 2009년 14년간 장기 적분하였다(Reynolds et al., 2002). 위 자료들은 위성, 배, 부이로부터 관측된 해상 자료를 기반으로 전 지구 격자에 대해 제공된다. 자료는 0.25° 수평해상도와 일 단위의 시간해상도를 가지며, 선형보간법을 사용하여 GloSea5 수평해상도 격자에 맞추어 처방하였다. 본 장기적분 실험은 지면 초기화 과정에서 JULES 오프라인 실험에서 산출되는 토양수분 값을 모델의 초기자료로 직접 사용하지 않고, 2.5절에서 기술되는 기법에 따라 기후모델의 장기 간 평균장 값과 표준편차 값을 얻어내기 위하여 수행하였다.

2.4 과거 기후 실험

본 연구에서는 1996년부터 2009년 14년동안의 북반구 여름철(6~8월) 예측 성능을 검증하기 위하여 과거 기후 실험들을 수행하였으며, 각 실험 별 방법은 Table 1과 같다. Exp0는 현재 현업에서 사용하는 대기-해양-지면-해빙이 결합된 접합모델의 재예측 실험(Hindcast)에 대기 초기조건은 ERA-interim 대기 재분석 자료를 이용하고, 지면 초기조건은 연별 변동성이 없는 과거 10년 평균된 토양수분 월 평균 기후값을 사용하였다. 해양 초기조건은 Ocean modeling and Data Assimilation (ODA) 재분석 자료를 초기 장으로 사용하였다.

GloSea5 계절예측시스템의 토양수분 초기화에 따른 효과를 비교하기 위하여 Exp1과 Exp2 두 가지 과거

기후 실험을 수행하였다. Exp1과 Exp2는 Koster et al. (2011)에서 제안한 GLACE-2 실험 방법에 따라 관측 해수면 온도와 해빙값을 처방하여 AMIP 형식으로 수행되었다. 이러한 실험 방법은 결합모델 예측 시 발생하는 해수면 온도 예측의 오차를 배제하고, 단지 지면 과정 초기화에 따른 기후 재현 효과를 극대화 하기 위해서다. 처방된 관측자료는 2.3절에서 기술한 장기간 AMIP 기후실험에 사용된 자료와 동일하다. 이 경우 Exp1과 Exp2는 Exp0에 비해 해수면 온도 예측 보정에 따른 계절 예측성능 향상이 기대될 수 있으나, 모델 내 대기-해양 결합 과정이 없어서 생기는 예측성능의 저하 등이 우려될 수도 있다. 따라서, AMIP으로 실험한 Exp1과 Exp2의 과거 기후 실험 결과를 결합 모델을 이용하여 과거기후를 예측한 Exp0 실험결과와 직접 비교하는 것은 주의해야 한다. 본 연구에서는 지면-대기 상호작용이 유의한 영향을 주게 되는 초기 2개월 동안의 해수면 온도 변동이 지속성(persistence)이 크고, 계절예측 시스템의 예측 오차가 크지 않다는 가정하에 AMIP 형식의 대기실험을 수행하였다. 아울러 AMIP 실험은 GloSea5 결합모델의 적분 시 소요되는 계산 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

Exp1, Exp2는 1996~2009년 과거기후 재분석 실험 기간 동안 각 년도 별로 5월 1일, 6월 1일, 7월 1일 시작으로 부터 2개월간 적분되었다. 비교를 위하여 Exp0 실험에서는 매월 1일에 시작된 앙상블 예측자료를 사용하였다. 매 월 1일 Exp0는 3개, Exp1과 Exp2는 10개의 앙상블 실험이 수행되었다. Exp0의 3개 앙상블 실험들은 동일한 날짜의 ERA-interim 대기 재분석 장을 동일하게 사용하나, 모델의 불확실성을 고려하기 위하여 Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB2) 방법(Bowler et al., 2009)에 따라 개별 앙상블 실험마다 다른 매개변수를 설정하여 사용하였다.

Exp1, Exp2 실험에서도 대기 초기장의 자료로 ERA-interim 재분석 자료를 사용하였다. 각 앙상블 실험들은 동일한 지면 조건을 사용하지만(2.5절에서 설명), 대기 초기 조건으로 같은 날짜의 다른 년도 ERA-interim 자료를 임의로 선택하여 앙상블 섭동을 주었다. 예를 들어, 1996년 5월 1일 00시에 시작되는 예측 실험의 경우 첫 번째 앙상블 실험은 1996년 5월 1일 00시 ERA interim 재분석 자료를, 두 번째 앙상블 실험의 경우는 1997년 5월 1일 재분석 자료를 대기 초기조건으로 사용하는 등의 방식으로 총 10개의 앙상블 실험을 수행하게 된다. 위 방법으로 수행한 앙상블 실험은 각 실험에서 산출된 값을 앙상블 개수로 평균하여 사용하였다.

2.5 계절예측 시스템 지면 초기화

Table 1에 제시한 바와 같이 Exp1과 Exp2의 유일

한 차이는 토양수분의 초기화 방법이다. Exp1은 별도의 토양수분 초기화 과정 없이 장기간 AMIP 실험에서 나온 토양수분 값으로 처방한다. 반면에 Exp2는 Koster et al. (2004b)에서 소개한 표준 정규화 스케일링(Standard Normal Deviate Scaling-SNDS) 방법에 따라 토양수분 초기화 방법이 적용되었다. 이 방법은 기후모델 간의 계통적 오차를 제거하기 위한 간단한 형태의 편차장 초기화 기법이다. 표준 정규화 스케일링 방법을 사용한 토양수분 초기화하는 방법은 다음과 같다.

$$\frac{X_{mod} - \overline{X_{mod}}}{\sigma_{mod}} = \frac{X_{obs} - \overline{X_{obs}}}{\sigma_{obs}} \quad (1)$$

식 (1)에서 X_{obs} 는 장기간 JULES 오프라인 모델에서 계산된 임의의 시간에서의 토양수분 값이며, $\overline{X_{obs}}$, σ_{obs} 는 토양수분 평균값(기후값)과 연별변동에 의한 표준편차를 나타낸다. $\overline{X_{mod}}$, σ_{mod} 는 각각 GloSea5 AMIP 장기적분에서 산출된 토양수분의 기후평균값과 표준편차를 나타낸다. 식 (1)을 이용하면 계절예측 시스템의 토양수분 초기값으로 처방되는 X_{mod} 값을 얻을 수 있다. 즉, 먼저 JULES 오프라인 실험을 통하여 관측 상태를 재현하는 토양수분 값을 생산하고, 이를 기후모델의 기후 평균값과 변동성에 맞게 보정하는 방식이다. 이러한 표준 정규화 스케일링 방법은 오프라인 모델의 기후와 결합모델의 기후 차이에서 발생하는 초기 장 충격을 최소화 하는 방법이다. 초기값 생산 과정에서 스케일링에 따라 값이 음수가 되거나 GloSea5 AMIP 장기적분실험에서 모의한 토양수분 최대값보다 큰 값을 산출하게 되면, 해당 격자에서 AMIP 실험이 모의한 토양수분의 최소값 및 최대값을 각각 취하였다.

3. 결 과

토양수분 초기화의 필요성을 검증하기 위하여 GloSea5 계절예측 시스템의 접합기후 모델의 계통적 오차를 먼저 확인하였다. Figure 2는 JULES 지면모델의 오프라인 실험으로 산출한 토양(0~2 m)에서의 1996~2009년 북반구 여름철(6월~8월) 토양수분의 기후 평균값(Fig. 2a)과 관측 해수면온도를 경계값으로 고정하여 처방한 AMIP 실험으로 산출한 기후 평균값(Fig. 2b)을 비교한 결과이다. 비교적 GloSea5 AMIP 장기적분 실험이 JULES 오프라인 실험 결과와 유사하게 토양수분 공간 분포를 모의하지만, 두 실험 모두 지면과정을 모의하는 모델이 JULES로 동일하지만, 대기 모델과의 접합을 통해 지면-대기 상호작용이 고려되는 경우 토양수분 기후 값의 계통적 오차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 토양수분의 평균장이 상대적으로 습한 지역에 있어서는 GloSea5 AMIP 장기적분 실험이 전반적으로 과대 모의하는 경향을 보

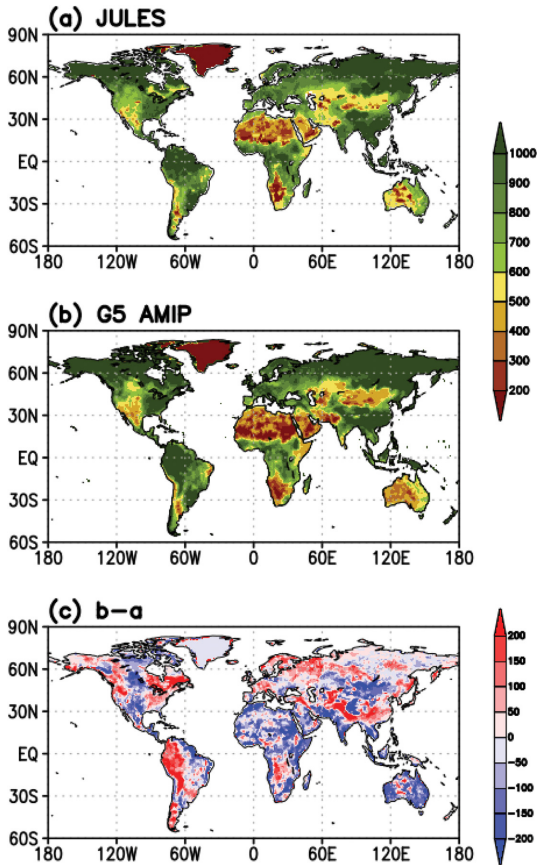


Fig. 2. Spatial distribution of soil moisture contents climatology during 14 years (1996~2009) July~August from (a) the JULES offline simulation, and (b) the GloSea5 AMIP simulation. (c) is the difference from (b)-(a). The soil moisture is in kg m⁻².

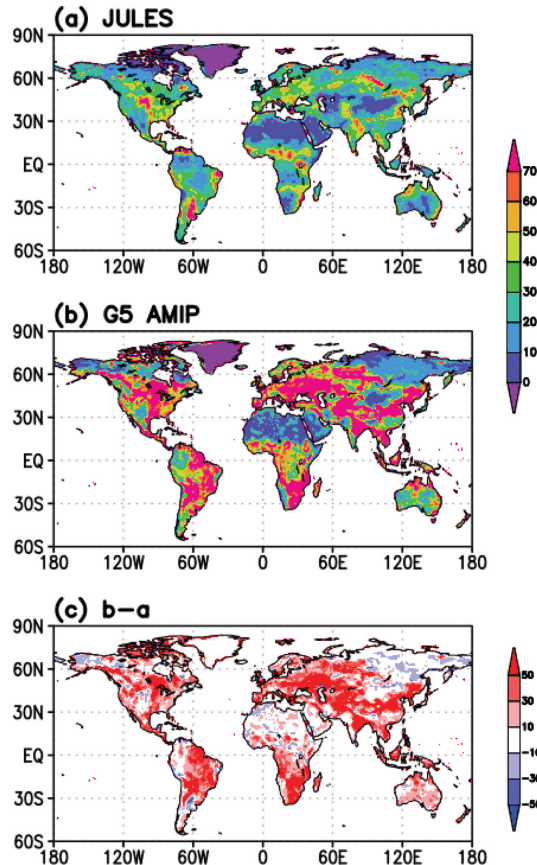


Fig. 3. As in Fig. 2 but for standard deviation of soil moisture contents.

이며, 평균장이 건조한 지역에 있어서는 과소 모의하는 결과를 보인다. 즉, 지면모델이 대기모델과 접합하게 되면 경우 토양수분이 건조한 지역은 더 건조하게 모의하고, 습한 지역은 더 습하게 모의하여 토양수분의 변동범위가 늘어났다.

14년 적분기간 동안 연간 변동성을 확인하기 위해 여름철 토양수분의 표준 편차(Standard deviation)의 공간 분포를 Fig. 3에서 확인하였다. 이전 평균장 분석에서 확인 하였듯이 JULES 오프라인 실험과 비교하여 GloSea5 AMIP 장기적분 실험에서 토양수분 변동 범위가 증가하여 중위도지역 변동성 증가를 나타낸다. 특히 이런 변동성 증가가 각 반구 중위도 지역에서 뚜렷하게 나타나며, 이는 해당 지역에서 경년 변동성이 커서 정확한 토양수분 초기장이 필요함을 시사한다.

Figure 4에 Exp1, Exp2에서 적분 후 0~1달(0 month

lead), 1~2달(1 month lead)기간 모의하는 평균 여름철 토양수분의 평균 제공근 오차(Root Mean Square Error)의 공간 분포를 확인해보았다. 평균 제공근 오차가 클수록 관측과의 편차가 크다는 것을 의미하고 그만큼 관측과 유사성이 떨어진다는 것을 시사한다. Exp1과 Exp2에서 평균 제공근 오차 값이 큰 지역은 Fig. 3에서 확인한 토양수분의 연간 변동성이 큰 지역과 일치한다. 즉, 지면과정이 중요한 지역에 있어서 관측과의 평균 제공근 오차 값이 감소하여, 지면과정이 대기 모의 과정에 미치는 영향이 보다 현실적으로 구현된다고 기대 할 수 있다. 하지만, 평균 제공근 오차가 적분 기간이 길어짐에 따라 그 개선 정도가 줄어들어, 토양수분의 지속성이 대기-지면 상호작용에 중요함을 알 수 있다.

Figure 5에 Exp0, Exp1, Exp2에서 모의하는 여름철 지표 온도의 예측 성능을 각각 비교하였다. 예측 성능은 기후 평균값이 제거 된 후에 나타나는 관측값의 경년 변동 시계열과 각 실험에서 산출된 예측 시계열

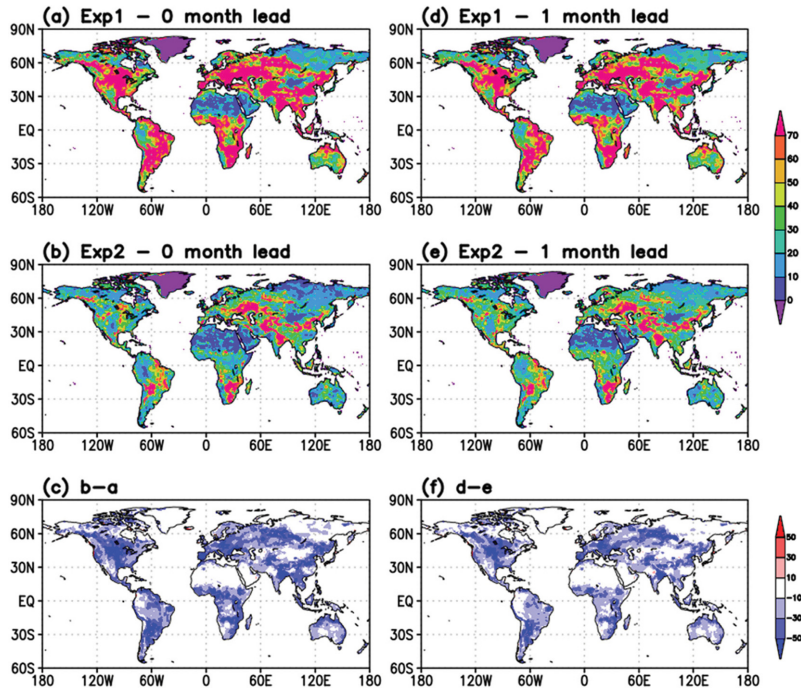


Fig. 4. Global distribution of Root Mean Square Error (RMSE) of soil moisture contents by lead month for 1996-2009 boreal summer seasons (July~August) ensemble experiments. (a) is for 0 month lead RMES by Exp1, (b) 0 month lead RMES by Exp2, (c) a-b, (d) 1 month lead RMES by Exp1, (e) 1 month lead RMES by Exp2 and (f) e-d. The unit is kg m^{-2} .

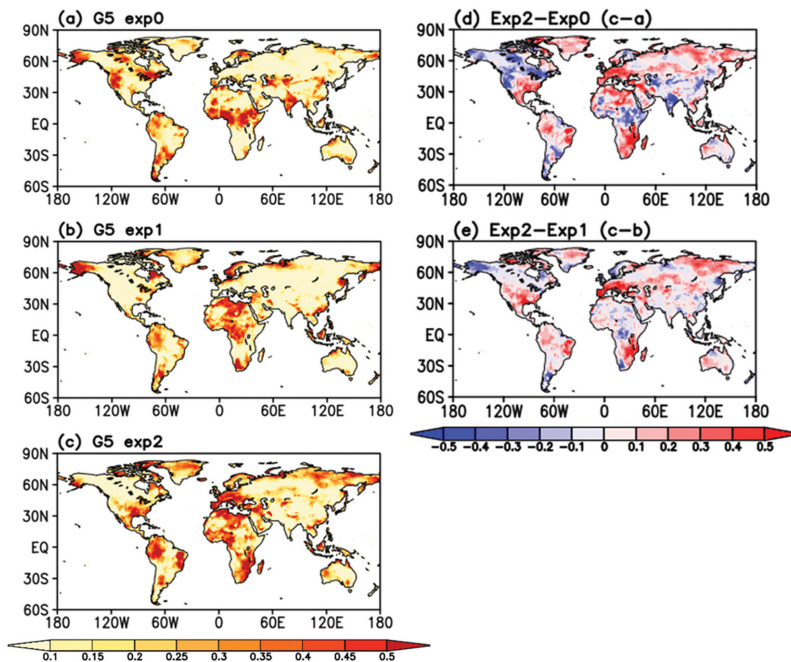


Fig. 5. One-month lead forecast skill for July-August mean surface temperature as measured by square temporal correlation coefficient for 1996-2009 ensemble experiments. (a) is for Exp0, (b) Exp1, (c) Exp2, (d) Exp2-Exp0, and (e) Exp2-Exp1.

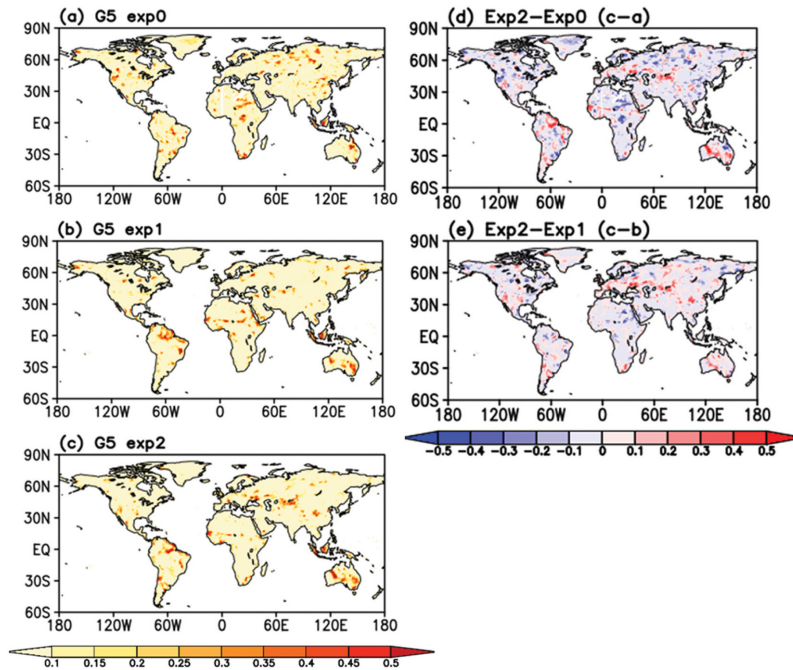


Fig. 6. As in Fig. 5 but for precipitation.

간의 상관계수의 제곱 값으로서, 전 지구적 공간 분포로 확인하였다. 초기화된 지면 정보의 영향이 최대 2~3개월 유지된다는 선행 연구 결과들에 기반하여, 6월 평균 온도는 5월 1일 적분 시작인 실험으로부터, 7, 8월은 각각 6월 1일, 7월 1일 적분 시작인 실험으로부터 예측된 결과를 1개월 선행 예측으로 정의한 후, 각각의 예측값으로부터 산출된 6월, 7월, 8월의 평균 온도에 대한 예측을 모아 6~8월 온도의 평균 값 예측 정보로 사용하였다. 비교를 위한 관측자료로는 JULES 오프라인 실험으로부터 나온 지면 재분석 자료의 결과값을 사용하였다. 지면 초기화를 적용한 실험 Exp2는 초기화를 적용하지 않은 Exp1 실험과 비교하여 토양수분이 건조하거나 습윤하여 대기-지면의 상호작용이 미비한 지역을 제외한 대부분의 지역에 있어서 지표 온도 예측 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 특히, 유럽 전역과 북아메리카, 남아프리카 지역 등 토양수분의 기후 값이 상대적으로 건조한 지역에서 예측 성능이 크게 향상된 것을 알 수 있다. Exp2에서 예측 성능의 향상이 나타나는 지역들은 해양과 해빙 과정이 현실적으로 결합된 Exp0의 예측 결과와 비교하여 예측성능이 높게 나타났다.

Figure 6는 각 실험 별 강수량 예측 성능을 비교한 결과이다. 지표 예측 성능과는 달리, 세 실험 모두 지면 초기 조건이 강수 예측 성능에 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 즉, 관측과 유사한 지

면 정보를 실험 초기 장으로 사용함에도 불구하고, 그 영향이 강수 모의에 있어서는 크게 영향을 주지 못한 것으로 보인다. 이는 GloSea5 계절예측 시스템에서 강수 모의과정에 대한 복잡성 때문에 단순한 대기 하층의 상태 변화로 그 지역의 강수 과정 모의 개선이 어렵다는 것을 보여준다.

대기-지면 상호작용에 따른 계절예측 성능의 개선을 유도하기 위해서는 초기화된 지면 정보가 상당기간 강제력으로 유지되어야 그 효과를 기대할 수 있다. 혹 그 정보가 지속되지 못한다면 정확한 지면 초기화 값을 처방하더라도 강제력으로서 지면-대기 피드백을 유도할 수 없다는 것을 의미한다. 기후모델에서 나타나는 지면 상태의 시간적 지속성을 확인하기 위해 GloSea5 AMIP장기적분 실험 자료를 사용하여 해당 월의 토양수분 정보와 그 다음달 값과의 자기 상관계수 값을 Fig. 7에 계절별로, 그리고 지면 깊이에 따라 토양 최상층(0~10 cm)과 지중(10~65 cm)으로 나누어 비교하였다. 토양수분은 최상층보다는 지중에서 지속성이 더 크게 나타나 대기-지면 상호작용의 강제력으로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 또한 비가 많이 오는 계절인 여름철에 그 지속성이 짧고, 지역적으로는 여름철 강수가 빈번하게 내리는 몬순 지역에서 지속성이 상대적으로 짧은 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 여름철 비가 많이 내리는 동아시아 몬순 지역의 경우 토양 최상층 및 지중 모두 토양수분의 지속

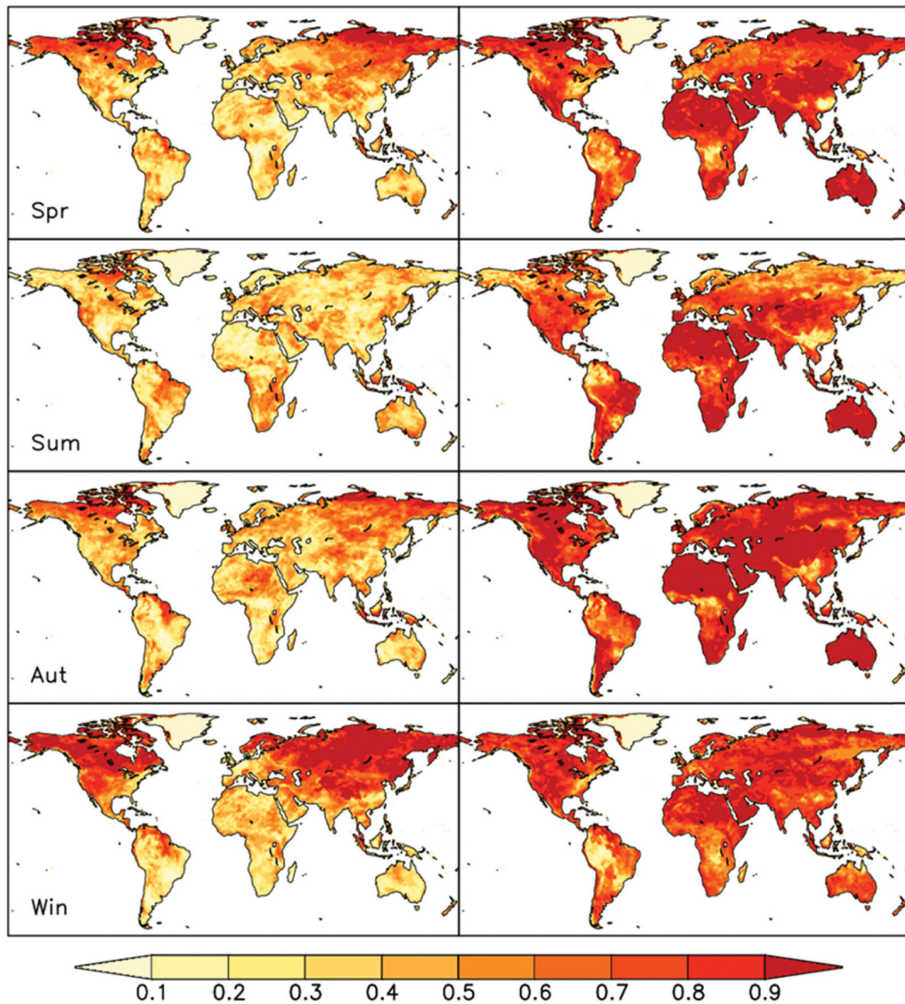


Fig. 7. The memory of soil moisture content simulated by the GloSea5 AMIP run as measured by auto-correlation with 1 month time lag for each season of spring, summer, autumn, and winter from the top to bottom panels. Left panels are for surface soil moisture and the right panels are for sub-surface.

성이 다른 지역에 비해 짧게 나타났으며, 이로부터 지면 초기화 과정이 여름철 보다는 강수 빈도가 적은 봄, 가을, 겨울철에 효과가 클 것으로 예상할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 한국 기상청에서 현업으로 사용하는 계절예측 시스템 GloSea5를 사용하여 토양수분 초기화 과정 개선이 북반구 여름철 계절예측에 미치는 영향을 분석하였다. 전 지구적으로 장기간 지면 변수에 대한 관측자료의 부족으로 인해, 관측된 대기 강제력을 이용하여 JULES 오프라인 지면모델을 장기간 적분한 지면 재분석 자료를 생산하였다. 대기 강제력 자료는

관측자료와 재분석 자료를 결합한 Sheffield et al. (2006) 자료를 사용하였다. 이 자료는 토양수분에 큰 영향을 미치는 강수량 자료의 경우 CRU TM v2.0, GPCP, TRMM 등 지상 및 위성 관측자료가 사용되었으며, 온도와 복사량의 경우에는 CRU TM v2.0와 SRB 자료가 각각 사용되었다. 오프라인 실험에서 산출된 지면 자료를 이용하여 GloSea5 계절예측시스템의 지면 초기화를 실행하였다. 관측 강제력을 이용하여 JULES 오프라인 모델로 생산한 지면 재분석 자료와 GloSea5 AMIP 장기 적분실험으로부터 나타나는 지면 변수의 기후 평균 및 변동성의 차이를 고려하기 위하여 본 연구에서는 표준 정규화 스케일링 기법(SNDS)을 사용하였다. 지면 초기화 기법 적용 유무에

따라 나타난 토양수분의 기후 값의 분포 차이는 지면-대기 상호작용에 따라 토양수분 평균 기후장이 건조한 지역은 더 건조해지고, 습한 지역은 더 습하게 모의하며, 이에 따라 극심하게 건조하거나 습한 지역을 제외한 지역에서 경년 변동성의 편차가 증가 하였다. 따라서 지면 초기화 과정에서 기후모델의 계통적 오차를 고려하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다.

위 과정으로부터 산출된 토양수분 자료를 계절예측 시스템에 적용하여 지면 초기화에 따른 지면 평균장의 계절예측 성능 개선을 검증하였다. 지면 초기화 기법을 적용한 Exp2와 적용하지 않은 Exp1을 비교에서 토양수분 평균 제공근 오차 값이 경년 변동성이 크게 나타나는 영역에서 크게 감소하는 것을 알 수 있고, 적분 시작 일로부터 길어질수록 초기장의 영향이 점차 감소하여 오차 값의 개선이 다소 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 아울러 현재 기상청에서 현업으로 예보에 사용하고 있는 GloSea5 과거 기후 재예측 실험인 Exp0와 비교하여 지면과정 개선을 통한 예측성 변화를 예상하였다. 실험결과 토양수분 초기화는 지면 온도의 1개월 예측에 있어서 특히 중위도 지역에서 예측 성능의 뚜렷한 개선이 이루어졌다. 반면에 강수량 예측 성능은 토양수분 초기화 여부에 크게 영향을 받지 않았다. 위 결과는 선행연구에서 결과와 유사하게 여름 반구 중위도 지역에서 지면효과가 수개월 내 시간 규모에 있어 대기 변동성 예측에 유의한 영향을 보였다. 또한, Koster et al. (2011) GLACE-2 11개의 계절 예측 시스템 실험에서 유럽지역에서의 지면 온도의 개선 효과가 나타나지 않았으나, 본 연구에서 사용한 GloSea5는 EC-Earth2.3 모델을 사용한 Prodhomme et al. (2015) 연구결과와 유사하게 해당 지역에서 유의한 수준의 예측성 향상을 보였다. 즉, 지면초기화 효과에 따른 예측성능 개선 효과가 각 모델마다, 그리고 지역별로 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 기후모델 적분 계산량 문제로 지면 초기화 실험을 북반구 여름철 기간에 한하여 수행하였지만, 지면 초기화가 계절예측 성능에 미칠 수 있는 잠재성을 파악하기 위하여, 계절별 토양수분의 지속성을 토양 최상층 및 지중으로 나누어 분석하였다. 그 결과 강수가 잦은 동아시아 몬순 지역에서는 여름철 토양수분의 지속성이 낮지만, 토양수분 지속성이 긴 타 계절에서는 더 넓은 지역에서 토양수분이 지면-대기 피드백의 강제로 작용할 수 있음을 암시한다.

본 연구는 GloSea5 시스템에서 지면초기화 효과를 AMIP 형식의 실험을 통해서 확인했으며, 예측 성능의 실용적 수준의 개선 효과를 얻을 수 있었다. 향후 기상청 현업 시스템과 동일하게 대기-해양-지면-해빙 결합과정이 포함된 기후모델에 본 연구에서 개발된 지면 초기화 방식을 적용하여 장기간 과거 기후예측

실험을 수행한 후에 예측성능을 평가하는 과정이 필요하다. 이를 통해서 추가적으로 앙상블 기법, 앙상블 개수, 해양-해빙모델과의 결합 여부, 지면 초기장 자료간의 차이로 인한 효과를 정량적으로 분석할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원강화사업 과제 “전지구 앙상블 계절예측시스템 개발(과제번호 APCC 2013-3141)”의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Best, M. J., and Coauthors, 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description - Part 1: Energy and water fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 677-699.
- Bowler, N. E., A. Arribas, S. E. Beare, K. R. Mylne, and G. J. Shutts, 2009: The local ETKF and SKEB: upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 767-776, doi:10.1002/qj.394.
- Cohen, J., and D. Rind, 1991: The effect of snow cover on the climate. *J. Climate*, **4**, 689-706.
- Dirmeyer, P. A., 2000: Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation. *J. Climate*, **13**, 2900-2922.
- , 2003: The role of the land surface background state in climate predictability. *Clim. Hydrometeorol.*, **4**, 599-610.
- Douville, H., 2004: Relevance of soil moisture for seasonal atmospheric predictions: is it an initial value problem? *Climate Dyn.*, **22**, 429-446.
- Entin, J. K., and Coauthors, 2000: Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, **105**, 11865-11877.
- Hunke, E. C., W. H. Lipscomb, and A. K. Turner, 2010: CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 4.1 LA-CC-06-012. T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory, 675.
- Jeong, J. H., H. W. Linderholm, S. H. Woo, C. Folland, B. M. Kim, S. J. Kim, and D. Chen, 2013: Impacts of snow initialization on subseasonal forecasts of surface air temperature for the cold season. *J. Climate*, **26**, 1956-1972.
- Koster, R. D., and Coauthors, 2002: Comparing the degree of land-atmosphere interaction in four atmospheric

- general circulation models. *Clim. Hydrometeorol.*, **3**, 363-375.
- _____, and Coauthors, 2004a: Realistic initialization of land surface states: Impacts on subseasonal forecast skill. *Clim. Hydrometeorol.*, **5**, 1049-1063.
- _____, and Coauthors, 2004b: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, **305**, 1138-1140.
- _____, and Coauthors, 2006: GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part I: Overview. *Clim. Hydrometeorol.*, **7**, 590-610.
- _____, and Coauthors, 2010: Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02402, doi:10.1029/2009GL041677.
- _____, and Coauthors, 2011: The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: Soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. *Clim. Hydrometeorol.*, **12**, 805-822.
- Lea, D. J., I. Mirouze, M. J. Martin, R. R. King, A. Hines, D. Walters, and M. Thurlow, 2015: Assessing a new coupled data assimilation system based on the Met Office coupled atmosphere, land, ocean, sea ice model. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4678-4694.
- Lorenz, E. N., 1982: Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, **34**, 504-513.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2014: Global seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.2396.
- Madec, G., 2008: NEMO ocean engine. *Note du Pole de Modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*, No 27 ISSN No 1288-1619.
- Maidens, A., A. A. Scaife, A. Arribas, J. Knight, C. MacLachlan, D. Peterson, and M. Gordon, 2013: GloSea5: The new met office high resolution seasonal prediction system. *EGU general assembly 2013, 7-12 April, 2013 in Vienna, Austria*, ID. EGU 2013-7649.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2009: Decadal prediction: Can it be skillful? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **90**, 1467-1485.
- Orsolini, Y. J., and Coauthors, 2013: Impact of snow initialization on sub-seasonal forecasts. *Climate Dyn.*, **41**, 1969-1982.
- Prodhomme, C., F. Doblas-Reyes, O. Bellprat, and E. Dutra, 2015: Impact of land-surface initialization on sub-seasonal to seasonal forecasts over Europe. *Climate Dyn.*, 1-17.
- Reichle, R. H., and Coauthors, 2011: Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *J. Climate*, **24**, 6322-6338.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.
- Rodell, M., and Coauthors, 2004: The global land data assimilation system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 381-394.
- Seneviratne, S. I., T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, and A. J. Teuling, 2010: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Rev.*, **99**, 125-161.
- 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.
- Stocker, T. F., and Coauthors, Eds., 2014: *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1552 pp.
- Vinnikov, K. Y., and I. B. Yesserkepova, 1991: Soil moisture: Empirical data and model results. *J. Climate*, **34**, 504-513.
- Walters, D. N., and Coauthors, 2011: The met office unified model global atmosphere 3.0/3.1 and JULES global land 3.0/3.1 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 919-941, doi:10.5194/gmd-4-919-2011.
- Wang, B., and Coauthors, 2008: Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004). *Climate Dyn.*, **33**, 93-117.