

경험적 분위사상법을 이용한 미국 지표 기온 기반 농업기후지수의 지역 규모 계절 예측성 개선

송찬영¹, 안중배^{2*}, 이경도³

¹부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단 대기환경학과, ²부산대학교 대기환경학과, ³국립농업과학원 기후변화평가과

(2022년 10월 6일 접수; 2022년 12월 2일 수정; 2022년 12월 6일 수락)

Improvement in Regional-Scale Seasonal Prediction of Agro-Climatic Indices Based on Surface Air Temperature over the United States Using Empirical Quantile Mapping

Chan-Yeong Song¹, Joong-Bae Ahn^{2*}, Kyung-Do Lee³

¹Department of Atmospheric Sciences, BK21 School of Earth and Environmental Systems, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

²Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

³Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Republic of Korea

(Received October 6, 2022; Revised December 2, 2022; Accepted December 6, 2022)

ABSTRACT

The United States is one of the largest producers of major crops such as wheat, maize, and soybeans, and is a major exporter of these crops. Therefore, it is important to estimate the crop production of the country in advance based on reliable long-term weather forecast information for stable crops supply and demand in Korea. The purpose of this study is to improve the seasonal predictability of the agro-climatic indices over the United States by using regional-scale daily temperature. For long-term numerical weather prediction, a dynamical downscaling is performed using Weather Research and Forecasting (WRF) model, a regional climate model. As the initial and lateral boundary conditions of WRF, the global hourly prediction data obtained from the Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM) are used. The integration of WRF is performed for 22 years (2000-2021) for period from June to December of each year. The empirical quantile mapping, one of the bias correction methods, is applied to the timeseries of downscaled daily mean, minimum, and maximum temperature to correct the model biases. The uncorrected and corrected datasets are referred WRF_UC and WRF_C, respectively in this study. The daily minimum (maximum) temperature obtained from WRF_UC presents warm (cold) biases over most of the United States, which can be attributed to the underestimated the low (high) temperature range. The results show that WRF_C simulates closer to the observed temperature than WRF_UC, which lead to improve the long-term predictability of the temperature-based agro-climatic indices.

Key words: United States, Regional climate model, Empirical quantile mapping, Temperature, Agro-climatic indices



* Corresponding Author : Joong-Bae Ahn
(jbahn@pusan.ac.kr)

I. 서 론

우리나라의 최근 3년(2019/20~2021/22) 평균 곡물자급률은 20.3%로 전 세계 평균 값인 100.3%에 비해 낮은 수준이다(Choi *et al.*, 2022). 특히 2020년도 기준으로 밀, 옥수수, 대두에 대한 곡물자급률은 각각 0.5%, 0.7%, 7.5%이며, 해당 작물들은 대부분 해외국가로부터 수입에 의존하고 있다(농림축산식품부, <https://www.mafra.go.kr>). 미국은 최근 3년간 평균 곡물자급률이 121.6%이며, 2020년 기준 밀 생산량 세계 4위, 옥수수 생산량 세계 1위, 대두 생산량 세계 2위이다(Choi *et al.*, 2022). 따라서 미국의 주요 곡물 생산량은 전 세계 수출 시장을 좌우할 수 있으며, 이는 곧 우리나라의 수입량과 직접적으로 관련될 수 있다. 특히 미국 곡물 수확량은 생육시기 동안 기상 환경에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있기 때문에(Mishra and Cherkauer, 2010; Chung *et al.*, 2014; Lu and Kueppers, 2015; Leng, 2021), 우리나라의 곡물 수급을 안정적으로 계획하기 위해서 해당 지역에 대한 기상 현황을 지속적으로 감시하고 예측하는 것은 중요하다.

장기 기상 예측자료를 생산하기 위해 대기권, 수권, 빙권, 지권 등 지구 아시스템(subsystem)들의 상호작용을 고려한 접합대순환 모형(Coupled General Circulation Model; CGCM)이 널리 사용되고 있다(Molteni *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2012; MacLachlan *et al.*, 2015). 그러나 CGCM은 낮은 공간해상도로 인해 지역 규모의 기상 현상을 모의하기 어렵기 때문에 이를 농업적으로 활용하는 데 한계를 갖는다(Im *et al.*, 2021). 이러한 한계를 보완하기 위해 CGCM이 모의한 전지구 장기예측 결과를 지역기후모형(Regional Climate Model; RCM)의 측면 경계 및 초기 입력자료로 사용하여 역학적으로 상세화 하는 방법이 사용되고 있다(Ahn *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019; Hur *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021).

RCM에 의해 모의된 기상 예측자료는 강제력으로 사용된 CGCM에서 내재된 혹은 해당 모형 자체의 오차로 인한 편의(bias)가 존재하기 때문에 이를 다양한 편의보정방법을 통해 보정하는 연구들이 수행되고 있다(Piani *et al.*, 2010; Teutschbein and Seibert, 2012; Themeßl *et al.*, 2012). 그 중 경험적 누적분포함수(Empirical Cumulative Distribution Function; ECDF)를 이용하여 모형 자료들의 분포 값을 보정하는 경험적 분위사상법(Empirical Quantile Mapping, EQM)은

평균, 표준편차, 극 값에 대한 보정 효과가 우수한 것으로 알려져 있다(Themeßl *et al.*, 2011; Gudmundsson *et al.*, 2012).

부산대학교 기후예측연구실과 농촌진흥청은 지난 2010년부터 공동으로 Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM)과 RCM을 이용하여 미국에 대한 8개월 농업 기상 예측 자료를 생산하고 활용하고 있다(RDA, 2014; 2018; 2020). 일련의 과정으로 생산된 예측 자료의 편의를 개선하고 정확도를 향상시키는 것은 성공적인 농업적 활용을 위해 중요하다. 이를 위해 Song *et al.*(2021)에서는 RCM을 통해 생산된 미국 일 강수 예측 자료에 EQM을 사용하여 계절 및 일 규모 강수와 가뭄지수에 대한 예측성 향상을 확인하였으나, 일 기온에 대한 보정 효과는 아직 확인되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 RCM을 통해 생산된 미국 일 기온 예측 자료에 EQM을 적용하여 이에 대한 예측성을 향상시키고자 하였다. 향상된 일 기온 예측 자료는 이를 기반으로 산출되는 농업기후지수(agro-climatic indices)의 예측성 향상으로 이어질 수 있어 농업 생산성에 대한 신뢰할 만한 지표로 사용될 수 있다(Shim *et al.*, 2008).

II. 재료 및 방법

2.1. 관측 자료

본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 0.25°x0.25° 격자 간격의 ECMWF's fifth generation reanalysis (ERA5; Hersbach *et al.*, 2020)의 2m 기온 자료를 사용하였다. 지역 별 상세 분석을 위해서 Song *et al.* (2021)과 동일하게 서부 지역(West), 고평원 지역(High Plain), 남부 지역(South), 중서부 지역(Midwest), 남동부 지역(Southeast), 북동부 지역(Northeast)의 총 6개의 지역으로 분류하였으며, 해당 지역들의 위치는 Fig. 1a와 같다.

2.2. 실험 설계

본 연구에서 사용된 전지구 접합대순환모형은 Asia-Pacific Economic Cooperation Climate Center (APCC) 다중모형 앙상블을 위한 장기 예측 시스템에 참여하고 있는 PNU CGCM version 1.1이다. 해당 모형의 대기 성분모형은 National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (NCEP CCM3;

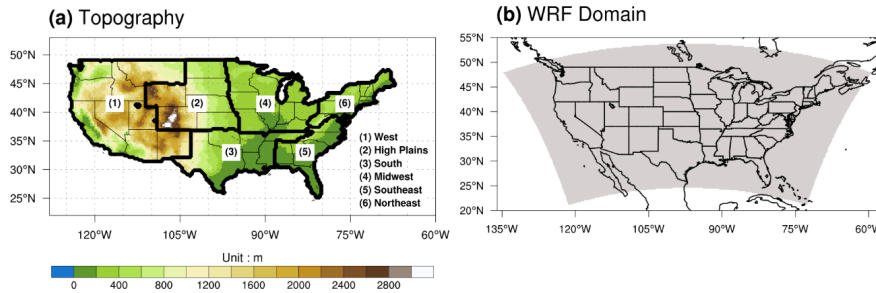


Fig. 1. (a) Topography (Unit: m) and (b) WRF domain (gray shading). The numbers in the (a) indicate the six sub-regions over the United States.

Table 1. Configuration of the WRF

Resolution	176 x 108 (spatial resolution: 30km), 28 levels
Initial and Lateral boundary condition	PNU CGCM version 1.1
Microphysics scheme	WSM6 (Hong and Lim, 2006)
Shortwave radiation scheme	Dudhia (Dudhia, 1989)
Longwave radiation scheme	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Surface layer scheme	Monin-Obukhov (Paulson, 1970)
Land surface scheme	Noah land-surface model (Chen and Dudhia, 2001)
Planetary boundary layer scheme	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch (Kain, 2004)

Kiehl *et al.*, 1996), 해양 성분모형은 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model (GFDL MOM3; Pacanowski and Griffies, 2000), 해빙 성분 모형은 Los Alamos National Laboratory elastic viscous plastic sea-ice model (LANL EVP; Hunke and Dukowicz, 1997)으로 Kim and Ahn (2015)에 자세히 설명되어 있다. 본 연구에서는 2000년부터 2021년 기간에 대해 PNU CGCM에서 매년 5월 중순에 적분을 출발하여 생산된 6월부터 12월까지의 전지구 예측자료를 사용하였다(즉, 0.5개월~6.5개월의 예측 선행시간을 갖는다).

본 연구에서 사용된 RCM은 Weather Research and Forecasting (WRF) version 3.0 (Skamarock *et al.*, 2008)이다. 적분도메인은 미국 전역을 포함하는 영역이며, 수평해상도는 30km이다(Fig. 1b). WRF의 초기 및 측면 경계조건으로 PNU CGCM에서 생산된 시간 단위의 전지구 예측자료가 사용되었다. 모형의 적분은 매년 및 매달 재시작 되어 1개월 동안 연속적으로 수행되며, 매달 spin-up 기간으로 4일을 설정하였다. WRF 구동을 위한 물리방안(physics schemes)은 Song *et al.*(2021)과 동일하며, Table 1에 제시하였다. 최종

적으로 WRF에 의해 생산된 2m 일 평균·최저·최고기온은 이중 선형 보간법(bi-linear interpolation)을 사용하여 ERA5에 해당하는 격자점으로 내삽되었다.

본 연구에서는 WRF가 모의한 일 평균·최저·최고기온의 편의를 보정하기 위해 다음과 같이 EQM을 사용하였다.

$$T_{mod,m,d}^{cor} = ECDF_{obs,m}^{-1} \left(ECDF_{mod,m} (T_{mod,m,d}) \right)$$

여기서 $T_{mod,m,d}^{cor}(T_{mod,m,d})$ 은 m월 d일의 보정 후(보정 전) 모형의 기온 값을 나타내며, $ECDF_{mod,m}$ 과 $ECDF_{obs,m}^{-1}$ 은 각각 전체 분석 기간에 대한 m월의 모형 ECDF와 관측 ECDF의 역함수를 나타낸다. 이 때, 특정 연도의 모형 값을 보정하기 위하여 모형과 관측의 ECDF를 산출하는 과정에서 전체 분석 기간 중에서 해당 연도를 제외하는 교차검증(Leave-one-out cross-validation) 방법(Michaelsen, 1987)이 사용되었다. 예를 들어, 모형이 모의한 2010년 6월의 일 평균기온을 보정하기 위해서 해당 연도를 제외한 분석 기간(2000~2009년, 2011~2021년) 동안 6월의 일 평균기온을 모형과 관측에 대해 수집한 후 각각의 ECDF를 산출한다. 이후 EQM

을 통해 보정된(보정되지 않은) WRF 자료를 WRF_C (WRF_UC)로 명명하였다.

2.3. 지표 기온 기반 농업기후지수

본 연구에서는 관측 및 모형에서 얻은 일 기온자료를 바탕으로 총 4가지의 농업기후지수를 정의하였다. 모든 지수는 매년 관측(1~5월)과 예측(6~12월) 자료를 혼합하여 산출되었다.

성장도일(Growing Degree Days, GDD)은 식물의 성장속도와 기온 사이의 양의 상관 관계를 고려하여 생육에 필요한 열적 에너지(thermal energy)를 추정하는 방법으로 적산온도 또는 유효적산온도라고 부르기도 한다. GDD는 다음과 같이 식물의 생육가능한 최저 온도(최저생육온도) 이상의 온도를 누적하여 계산된다(Hur and Ahn, 2015; Jo *et al.*, 2020).

$$GDD = \sum_{d=P_b}^{d=P_e} \frac{(T_{max_d} + T_{min_d})}{2} - T_{base}$$

여기서 T_{max_d} (T_{min_d})은 특정 d 일의 일 최고(최저)기온이다. T_{base} , P_b , P_e 는 각각 특정 작물의 최저생육 온도, 성장 시작일 또는 파종일, 성장 종료일 또는 수확일을 의미하며 작물의 종류에 따라 다른 값이 설정된다. 예를 들어 선행연구에서는 P_b , P_e , T_{base} 를 옥수수에 대해 각각 4월 1일, 10월 31일, 10°C로 설정하거나, 콩에 대해 각각 5월 1일, 11월 30일, 10°C로 사용하였다(McMaster and Wilhelm, 1997; Feng and Hu, 2004; Kukul and Irmak, 2018). 본 연구에서는 모형이 모의한 일 최저·최고기온 및 이를 기반으로 산출되는 GDD의 예측성을 살펴보는 것에 목적이 있기 때문에 작물의 종류에 따라 GDD를 구분하지 않고 미국 내 옥수수를 대표하여 P_b , P_e , T_{base} 를 각각 4월 1일, 10월 31일, 10°C로 설정하였다. 해당 값들을 다른 값으로 설정하더라도 본 연구의 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다. 만약, 일 최고기온과 일 최저기온의 평균값이 최저생육온도보다 낮은 경우에 해당 일의 GDD는 0으로 설정하였으며, Kukul and Irmak(2018)와 같이 일 별 GDD의 상한을 두지 않아 극심한 고온일의 기여가 계산에 포함되게 하였다.

식물성장가능기간(Growing Season Length, GSL)은 이론적으로 식물이 성장할 수 있는 기간을 의미하며 일 평균기온이 5°C 초과인 날이 6일 이상 지속된 첫번째 날(last frost in the spring)부터 7월 1일 이후

일 평균기온이 5°C 미만인 날이 6일 이상 지속된 첫번째 날(first frost in the fall)까지의 기간으로 정의된다(Donat *et al.*, 2013; Mueller *et al.*, 2015). 만약 특정 격자점에서 연간 모든 일 평균기온이 5°C를 초과하여 GSL을 정의할 수 없는 경우, 본 연구에서는 365일(윤년일 경우에는 366일)로 설정하였다.

서리일수(Number of frost days, FD)는 연간 일 최저기온이 0°C 미만인 일수로 정의하였다(Mooney *et al.*, 2002; Ahn *et al.*, 2010). GSL과 FD는 모두 World Meteorological Organization (WMO)에서 제시한 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI; http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)에 포함된다.

식물 열 스트레스(Plant heat stress; PHS)는 특정 식물 및 작물의 열 스트레스에 대한 위험도와 이와 관련된 생산량 감소를 확인하기 위한 지수로, 연간 일 최고기온이 임계 온도(threshold)를 초과하는 일 수로 정의된다. 임계 온도는 미국 내 옥수수에 대해 29°C, 콩에 대해 30°C로 설정하는 등 작물의 종류에 따라 다른 값을 갖는다(Schlenker and Roberts, 2009; Monier *et al.*, 2016). 본 연구에서는 작물에 따라 PHS를 분류하지 않고 GDD의 경우와 일치하도록 옥수수를 대표해 임계 온도를 29°C로 설정하였으며, 이는 다른 값으로 설정하더라도 본 연구의 결과에 영향을 미치지 않는다.

2.4. 예측성 평가 방법

본 연구에서는 WRF가 모의한 일 평균·최저·최고기온 및 이를 이용하여 산출된 농업기후지수의 예측성을 평가하기 위해 평균제곱근시간오차(Root mean square temporal error; RMSTE), 평균제곱근공간오차(Root mean square spatial error; RMSSE), 그리고 공간상관계수(spatial correlation coefficient; SCC)를 계산하였으며, 해당 값들은 다음과 같이 산출된다.

$$RMSTE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (mod_n - obs_n)^2}$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (mod_i - obs_i)^2}$$

$$SCC = \frac{\sum_{i=1}^I (mod_i) * (obs_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^I (mod_i)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^I (obs_i)^2}}$$

여기서 $mod_n (obs_n)$ 은 특정 n 번째 연도의 모형(관측) 값이고, N 는 총 연도(2000년부터 2021년까지, 총 22년)이다. $mod_i (obs_i)$ 은 특정 i 번째 격자점의 모형(관측) 값이며, I 는 총 격자점의 개수이다. SCC의 경우 위도에 따른 가중치를 반영하여 uncentered 방식으로 계산하였다(DelSole and Shukla, 2006).

III. 결 과

3.1. 기온 예측성

Fig. 2는 관측(Observation; OBS), WRF_UC, WRF_C의 분석 기간(2000~2021년, 6~12월)에 대해 평균한 일 평균·최저·최고기온의 공간분포를 나타낸 그림

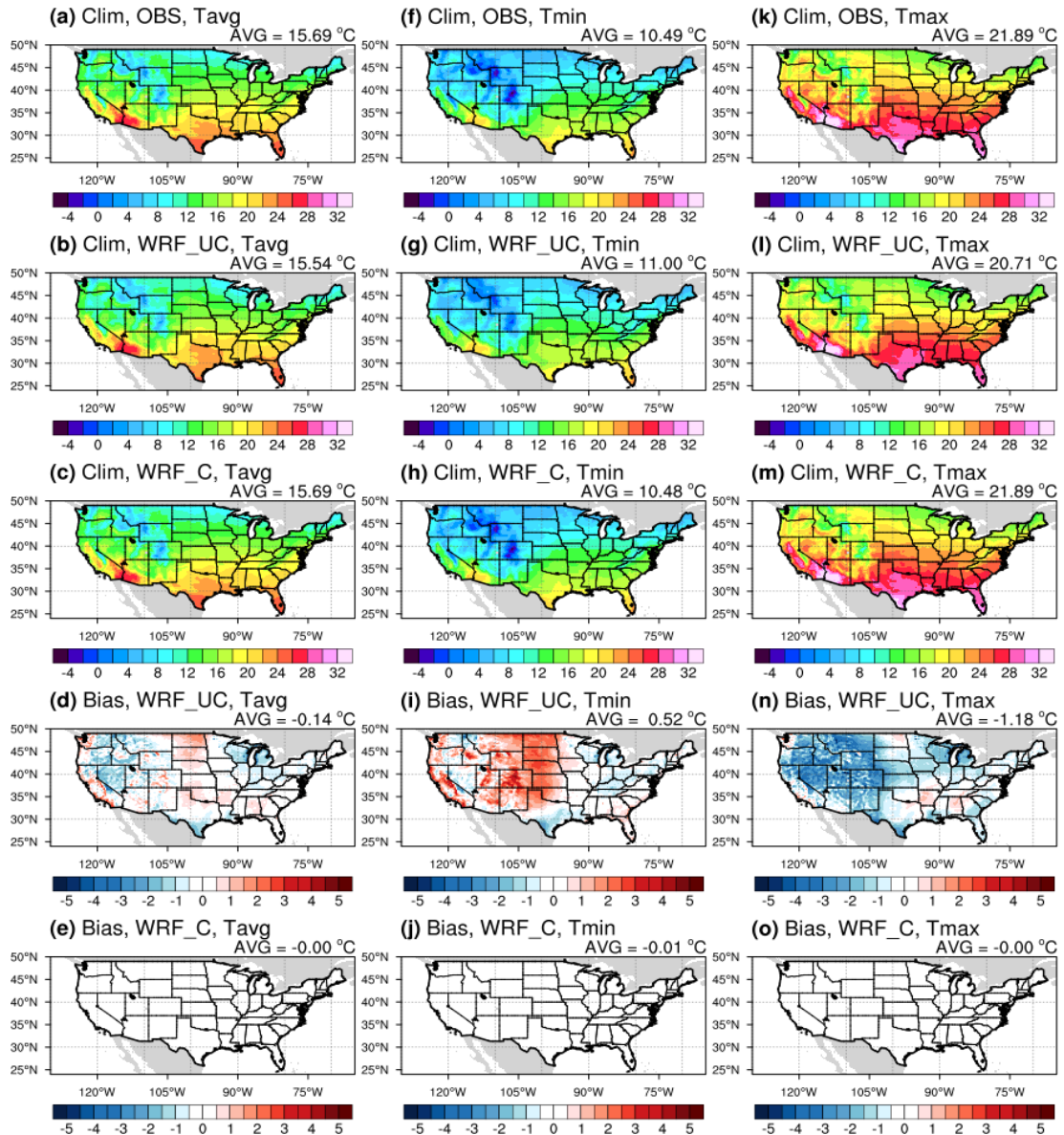


Fig. 2. Spatial distribution of the daily mean temperature (Unit: °C) during the 22 years of 2000-2021 (June to December) derived from (a) OBS, (b) WRF_UC, and (c) WRF_C, and the bias of (d) WRF_UC and (e) WRF_C. (f-j) and (k-o) are same as (a-e), but for daily minimum and maximum temperature, respectively.

이며, 미국 내 지역 별로 영역 평균한 기온 값들은 Table 2에 나타냈다. 관측의 일 평균기온은 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역, 중서부 지역, 남동부 지역, 북동부 지역에서 각각 14.47°C, 12.30°C, 21.05°C, 14.24°C, 20.45°C, 13.34°C로 나타났으며, 미국 전역에 대해서는 15.69°C였다. 적도에 근접한 남부 지역과 남동부 지역에서의 일 평균 기온은 다른 지역에 비해 비교적 높았고, 로키 산맥(Rocky Mountains)이 있는 고평원 지역에서는 낮았다(Fig. 2a). 관측의 일 최저기온(최고기온)은 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역, 중서부 지역, 남동부 지역, 북동부 지역, 미국 전역에서 각각 8.44°C

(21.40°C), 6.55°C (19.35°C), 16.06°C (27.13°C), 9.95°C (19.37°C), 16.19°C (25.81°C), 9.36°C (18.04°C), 10.49°C (21.89°C)으로 나타났으며, 공간분포는 일평균기온과 유사하였다(Fig. 2f and Fig. 2k). WRF_UC는 관측에서 나타난 일 평균·최저·최고기온의 공간패턴을 잘 모의했으나, 변수 및 지역에 따라 다양한 편의를 보였다. WRF_UC는 고평원지역과 남동부 지역을 제외한 대부분 지역에서 일 평균기온을 0.02~0.60°C정도 과소 모의하였다(Fig. 2b and Fig. 2d). 또한 중서부 지역 및 북동부 지역을 제외한 대부분 지역에서 일 최저기온을 0.09~1.82°C정도 과대 모의하지

Table 2. Climatology of the daily mean, minimum, and maximum temperature (Unit: °C) for the United States and their sub-regions during the 22 years of 2000-2021 (June to December) derived from OBS, WRF_UC, and WRF_C

Tavg (Unit: °C)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	14.47	14.16	19.64	-0.31	-0.01
High Plains	12.30	12.62	17.73	0.32	-0.01
South	21.05	21.02	26.61	-0.02	0.00
Mid-west	14.24	13.64	18.28	-0.60	0.00
Southeast	20.45	20.65	25.50	0.20	0.00
Northeast	13.34	13.14	17.68	-0.20	0.00
U.S.	15.69	15.54	20.71	-0.14	0.00
Tmin (Unit: °C)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	8.44	9.14	8.43	0.69	-0.01
High Plains	6.55	8.37	6.54	1.82	-0.01
South	16.06	16.15	16.05	0.09	0.00
Mid-west	9.95	9.63	9.95	-0.32	0.00
Southeast	16.19	16.52	16.19	0.33	0.00
Northeast	9.36	9.12	9.36	-0.24	0.00
U.S.	10.49	11.00	10.48	0.52	-0.01
Tmax (Unit: °C)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	21.40	19.64	21.39	-1.76	-0.01
High Plains	19.35	17.73	19.34	-1.62	-0.01
South	27.13	26.61	27.13	-0.52	0.00
Mid-west	19.37	18.28	19.39	-1.10	0.01
Southeast	25.81	25.50	25.81	-0.30	0.01
Northeast	18.04	17.68	18.05	-0.36	0.01
U.S.	21.89	20.71	21.89	-1.18	0.00

나(Fig. 2g and Fig. 2i), 대부분의 지역에서 일 최고기온을 0.30~1.76°C 정도 과소 모의하는 특징을 보였다(Fig. 2l and Fig. 2n). WRF_C는 WRF_UC에 비해 관측과 더 유사하게 기온 공간 분포를 모의하였으며, 각 지역에서 나타난 편의들이 개선되어 -0.01~0.01°C 범위의 낮은 편의를 보였다(Figs. 2c, e, h, j, m, and o).

WRF_UC와 WRF_C의 분석 기간 동안 연도 별로 누적한 편의를 비교하기 위하여 일 평균·최저·최고기온의 RMSTE 공간 분포를 Fig. 3에 나타냈으며, 미국 내 지역 별로 영역 평균한 값을 Table 3에 나타냈다. 일 평균기온의 경우 WRF_UC는 지역 별(미국 전역) 평균 RMSTE가 0.91~1.61°C (1.35°C)였으나, WRF_C

는 0.82~1.34°C (1.07°C)로 감소하였다(Fig. 3a and Fig. 3b). 일 최저기온의 경우 WRF_UC는 지역 별(미국 전역) 평균 RMSTE가 1.02~2.33°C (1.58°C)였으나, WRF_C는 0.85~1.32°C (1.07°C)로 감소하였다(Fig. 3c and Fig. 3d). 일 최고기온의 경우 WRF_UC는 지역 별(미국 전역) 평균 RMSTE가 1.19~2.43°C (1.95°C)였으나, WRF_C는 0.98~1.61°C (1.29°C)로 감소하였다(Fig. 3e and Fig. 3f).

WRF_UC와 WRF_C의 분석 기간 동안 연도 별 공간 분포 예측성을 살펴보기 위해 관측과 비교한 일 평균·최저·최고기온의 SCC와 RMSSE를 Fig. 4에 나타냈다. 일 평균기온의 경우 WRF_UC의 연간 SCC

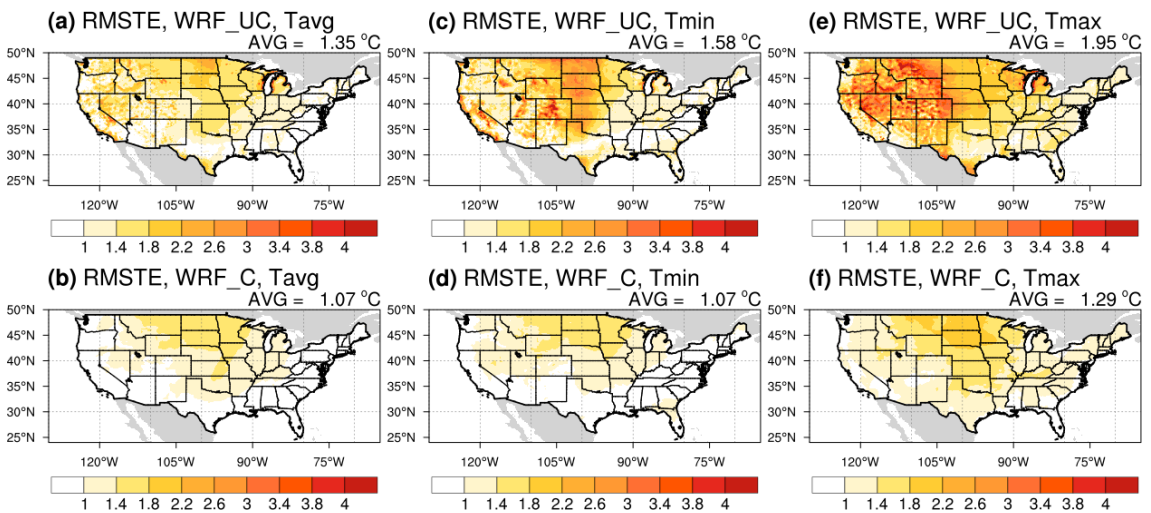


Fig. 3. Root mean square temporal error (RMSTE) of daily mean temperature (Unit: °C) during the 22 years of 2000-2021 (June to December) derived from (a) WRF_UC and (b) WRF_C. (c-d) and (e-f) are same as (a-b), but for daily minimum and maximum temperature, respectively.

Table 3. Root mean square temporal error (RMSTE) of the daily mean, minimum, and maximum temperature (Unit: °C) for the United States and their sub-regions during the 22 years of 2000-2021 (June to December) derived from OBS, WRF_UC, and WRF_C

RMSTE	Tavg (Unit: °C)		Tmin (Unit: °C)		Tmax (Unit: °C)	
	WRF_UC	WRF_C	WRF_UC	WRF_C	WRF_UC	WRF_C
Region						
West	1.39	0.98	1.62	1.04	2.29	1.22
High Plains	1.58	1.34	2.33	1.32	2.43	1.61
South	1.18	0.98	1.30	0.91	1.51	1.21
Mid-west	1.61	1.29	1.55	1.24	1.95	1.45
Southeast	0.91	0.82	1.02	0.87	1.20	0.98
Northeast	0.98	0.88	1.05	0.85	1.19	1.06
U.S.	1.35	1.07	1.58	1.07	1.95	1.29

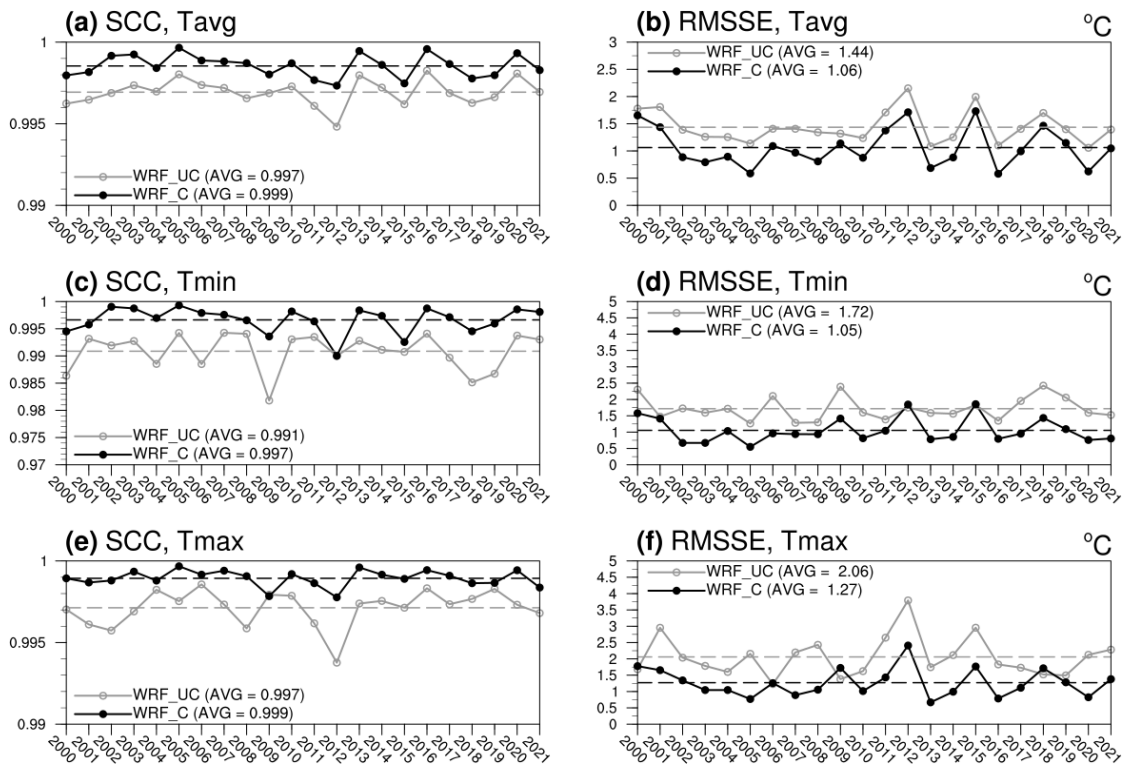


Fig. 4. Timeseries of (a) spatial correlation coefficient (SCC) and (b) root mean square spatial error (RMSSE), Unit: °C of the daily mean temperature during the 22 years of 2000-2021 (June to December) derived from WRF_UC and WRF_C. (c-d) and (e-f) are same as (a-b), but for daily minimum and maximum temperature, respectively.

는 0.994~0.998 범위로 나타나 평균값은 0.997였으나, WRF_C의 연간 SCC는 0.997~0.999 범위로 나타나 평균값은 0.999로 WRF_UC에 비해 향상되었다 (Fig. 4a). 또한 WRF_UC의 연간 RMSSE는 1.06~2.15°C 범위로 나타나 평균값은 1.44°C였으나, WRF_C의 연간 RMSSE는 0.58~1.73°C 범위로 나타나 평균값은 1.06°C로 WRF_UC에 비해 감소하였다 (Fig. 4b). 이와 유사하게 일 최저기온(최고기온)의 경우 WRF_C의 연간 SCC는 0.990~0.999 (0.998~0.999) 범위를 나타내 평균값은 0.997 (0.999)였으며, 연간 RMSSE는 0.55~1.86°C (0.67~2.41°C) 범위를 나타내 평균값은 1.05°C (1.27°C)로 WRF_UC에 비해 모두 개선되었다(Figs. 4c, d, e, and f).

Fig. 5는 OBS, WRF_UC, WRF_C의 분석 기간동안 일 평균·최저·최고기온의 크기 별 발생 빈도를 나타낸 그림이다. 관측의 일 평균기온은 22~24°C 범위에서 18.67%의 발생 빈도로 가장 빈번하게 나타났

다. WRF_UC와 WRF_C는 해당 범위의 발생 빈도를 관측에 비해 각각 1.04%, 1.21% 정도 과소 및 과대 모의하였으나 그 편이의 크기는 서로 비슷하였고, 관측과 유사하게 해당 범위를 가장 빈번하게 모의하였다. 또한 WRF_UC는 2~8°C, 14~22°C의 범위를 관측에 비해 과대 모의하고 8~14°C의 범위를 과소 모의하였으나, WRF_C에서는 해당 편이가 개선되어 WRF_UC에 비해 더 관측의 발생 빈도와 유사하였다 (Fig. 5a). 관측의 일 최저기온은 16~18°C 범위에서 18.99%의 발생 빈도로 가장 빈번하게 나타났는데, 일 평균기온과 유사하게 WRF_UC와 WRF_C는 해당 범위의 발생 빈도를 관측에 비해 각각 1.38%, 1.04% 정도 과소 및 과대 모의하였으나 편이의 크기는 서로 유사하였고, 해당 범위를 가장 빈번하게 모의하였다. WRF_UC는 특히 -2°C 미만의 기온의 발생 빈도를 과소 모의하고, 20~22°C 범위를 과대 모의하였는데 이와 같은 편이들은 전체 기간에 대한 일 최저기온의 과

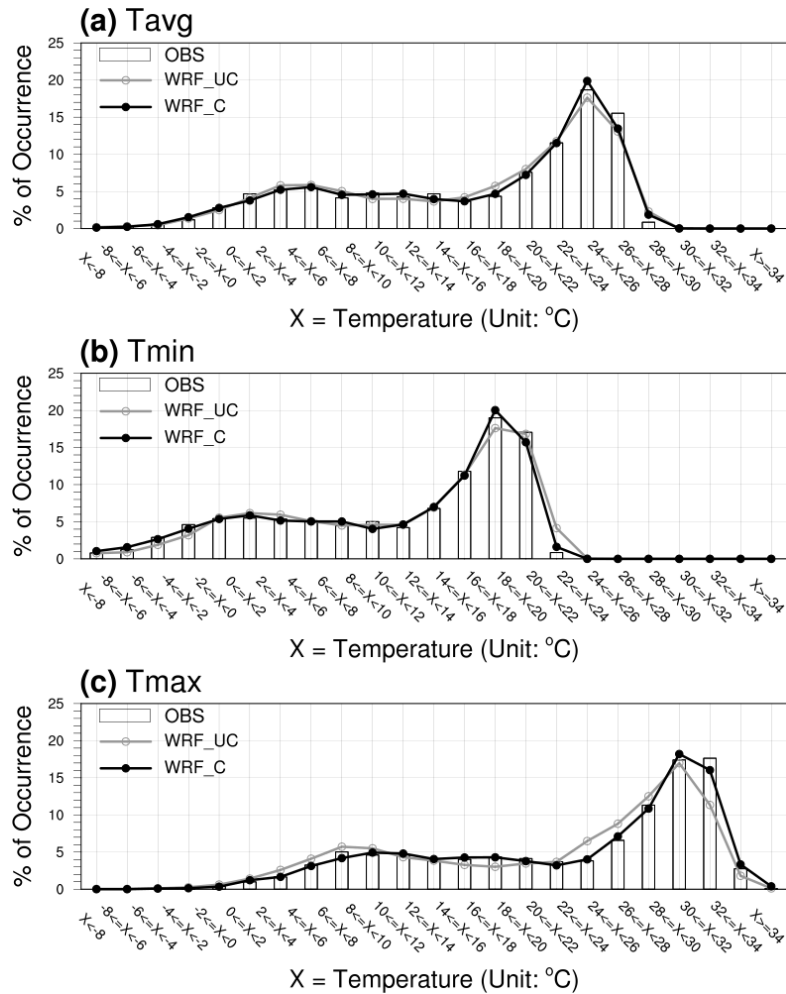


Fig. 5. Frequency distribution of area-averaged daily (a) mean, (b) minimum, and (c) maximum temperature (Unit: °C) over the United States.

대 모의(Fig. 2g and Fig. 2i)에 기여한 것으로 보인다. WRF_C의 경우 WRF_UC에서 나타났던 일 최저기온의 발생 빈도에 대한 편이가 비교적 완화되어 관측과 유사하게 모의하였다(Fig. 5b). 관측의 일 최고기온은 30~32°C 범위에서 17.63%로 가장 자주 발생했는데, WRF_UC와 WRF_C는 해당 범위의 발생 빈도를 관측에 비해 모두 과소 모의하였고, 해당 범위 대신 28~30°C 범위를 가장 빈번하게 모의하였다. 그러나 WRF_C는 해당 범위에 대한 과소 모의의 정도가 WRF_UC의 6.29%에 비해 1.59%로 감소하여 편의를 개선하였다. 또한 WRF_UC는 0~10°C, 20~28°C 범위의 기온 발생 빈도를 과대 모의하고 10~20°C, 28°C 이상의 범위를 과소 모의하였는데, 특히 고온 범위에 대한 과소 모

의는 전체 기간에 대한 일 최고기온의 과소 모의(Fig. 2l and Fig. 2n)에 기여한 것으로 보인다. WRF_C는 WRF_UC에서 나타났던 일 최고기온의 발생 빈도에 대한 편의를 완화시켜 비교적 관측과 유사하게 모의하였다(Fig. 5c).

3.2. 농업기후지수 예측성

Fig. 6은 총 4가지 농업기후지수(GDD, GSL, FD, PHS)에 대한 분석 기간동안 평균한 OBS, WRF_UC, WRF_C의 공간분포를 나타낸 것이다. 미국 내 지역 별로 영역 평균한 농업기후지수들의 값들은 Table 4에 나타났다. 관측의 GDD의 경우 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역, 중서부 지역, 남동부 지역, 북동부 지역

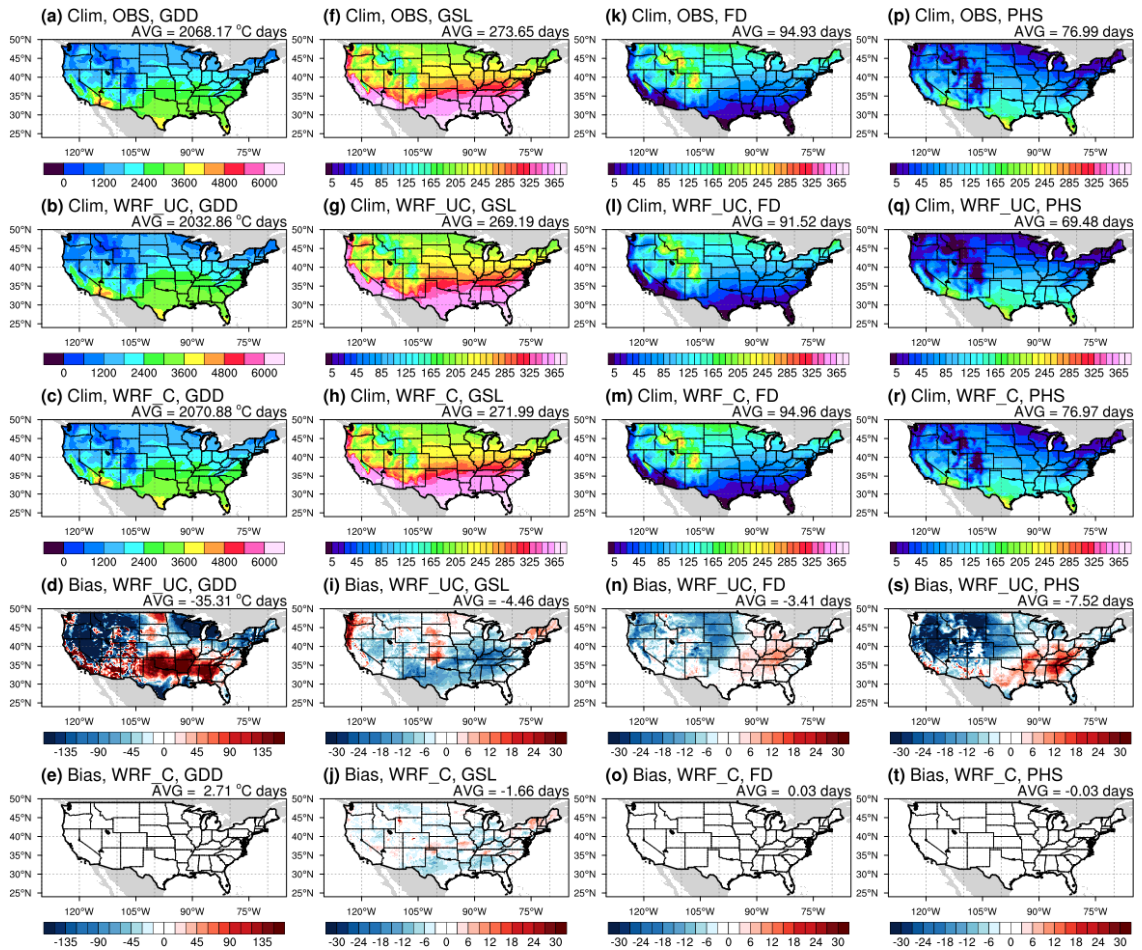


Fig. 6. Spatial distribution of the Growing Degree Days (GDD, Unit: °C days) during the 22 years of 2000-2021 derived from (a) OBS, (b) WRF_UC, and (c) WRF_C, and the bias of (d) WRF_UC and (e) WRF_C. (f-j), (k-o), and (p-t) are same as (a-e), but for the Growing Season Length (GSL, Unit: days), Number of frost days (FD, Unit: days), and Plant heat stress (PHS, Unit: days), respectively.

에서 각각 1792.90°C days, 1570.97°C days, 3074.35°C days, 1841.12°C days, 2860.03°C days, 1523.73°C days로 나타났으며, 미국 전역에 대해서는 2068.17°C days였다. 기온의 공간분포와 마찬가지로 GDD는 적도에 근접한 남부 및 남동부 지역에서는 높았고, 고평원 지역을 포함하여 고위도에 위치한 지역에서는 낮았다(Fig. 6a). WRF_UC는 이와 같은 GDD의 위도 별 특성을 반영한 공간분포를 잘 모의하였으나, 남부 및 남동부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 GDD를 낮게 모의하여 미국 전역에 대해서는 35.31°C days정도 과소 모의하였다(Fig. 6b and Fig. 6d). WRF_C는 WRF_UC에서 나타난 편들이 개선되어

각 지역(미국 전역)에서 0.65~4.81°C days (2.71°C days) 정도로만 과대 모의하였다(Fig. 6c and Fig. 6e). 관측의 GSL의 경우 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역, 중서부 지역, 남동부 지역, 북동부 지역, 미국 전역에서 각각 261.16days, 219.85days, 348.73days, 244.78days, 352.68days, 238.73days, 273.65days로 나타났으며, 고위도로 갈수록 GSL가 감소하는 특징을 보인다(Fig. 6f). WRF_UC는 GSL의 공간분포를 잘 모의하였으나, 고평원 및 북동부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 GSL을 짧게 모의하여 미국 전역에 대해서는 4.46 days정도 과소 모의하였다(Fig. 6g and Fig. 6i). WRF_C는 WRF_UC에서 나타난 편들이

Table 4. Climatology of the Growing Degree Days (GDD, Unit: °C days), Growing Season Length (GSL, Unit: days), Number of frost days (FD, Unit: days), and Plant heat stress (PHS, Unit: days) for the United States and their sub-regions during the 22 years of 2000-2021 derived from OBS, WRF_UC, and WRF_C

GDD (Unit: °C days)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	1792.90	1702.08	1795.30	-90.82	2.41
High Plains	1570.97	1565.65	1575.77	-5.31	4.81
South	3074.35	3131.68	3075.00	57.33	0.65
Mid-west	1841.12	1750.37	1845.57	-90.76	4.45
Southeast	2860.03	2909.80	2860.98	49.77	0.95
Northeast	1523.73	1458.66	1525.97	-65.07	2.25
U.S.	2068.17	2032.86	2070.88	-35.31	2.71
GSL (Unit: days)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	261.16	258.29	260.03	-2.87	-1.13
High Plains	219.85	219.96	218.25	0.11	-1.60
South	348.73	338.22	345.34	-10.51	-3.39
Mid-west	244.78	237.55	242.97	-7.22	-1.81
Southeast	352.68	345.83	350.44	-6.85	-2.24
Northeast	238.73	240.79	240.13	2.06	1.40
U.S.	273.65	269.19	271.99	-4.46	-1.66
FD (Unit: days)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	104.48	98.60	104.52	-5.89	0.03
High Plains	149.98	138.44	149.94	-11.54	-0.05
South	33.10	34.31	33.21	1.22	0.12
Mid-west	112.32	113.86	112.30	1.54	-0.02
Southeast	31.08	31.60	31.18	0.52	0.10
Northeast	113.85	113.44	113.85	-0.41	0.00
U.S.	94.93	91.52	94.96	-3.41	0.03
PHS (Unit: days)					
Region	Clim, OBS	Clim, WRF_UC	Clim, WRF_C	Bias, WRF_UC	Bias, WRF_C
West	73.96	57.60	73.98	-16.36	0.02
High Plains	57.25	41.54	57.29	-15.70	0.04
South	135.96	139.43	135.60	3.48	-0.36
Mid-west	45.05	44.11	45.18	-0.95	0.13
Southeast	110.88	113.33	110.74	2.45	-0.14
Northeast	21.72	19.11	21.94	-2.61	0.21
U.S.	76.99	69.48	76.97	-7.52	-0.03

대부분 개선되어 미국 전역에 대한 과소 모의 정도가 1.66days로 감소하였다(Fig. 6h and Fig. 6j). 관측의

FD와 PHS는 각각 미국 전역 평균 94.93days과 76.99days로 나타났으며, 위도 및 지형 별 공간분포

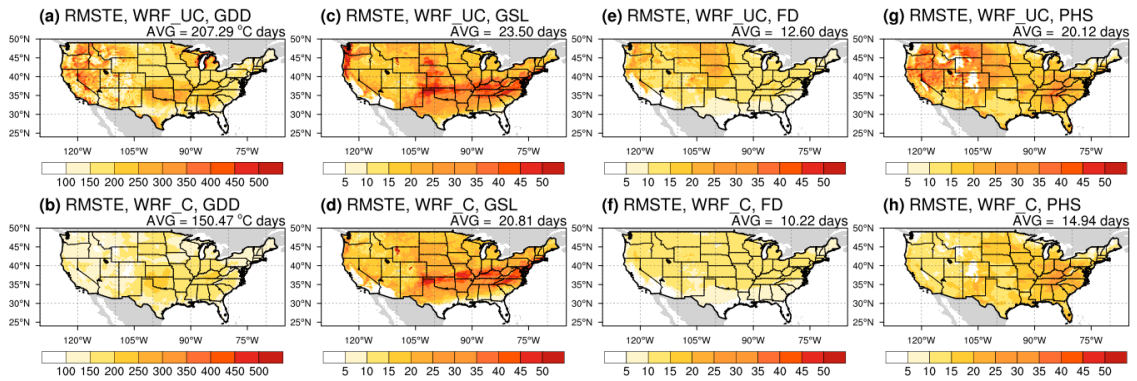


Fig. 7. Root mean square temporal error (RMSTE) of the Growing Degree Days (GDD, Unit: °C days) during the 22 years of 2000-2021 derived from (a) WRF_UC and (b) WRF_C. (c-d), (e-f), and (g-h) are same as (a-b), but for the Growing Season Length (GSL, Unit: days), Number of frost days (FD, Unit: days), and Plant heat stress (PHS, Unit: days), respectively.

Table 5. Root mean square temporal error (RMSTE) of the Growing Degree Days (GDD, Unit: °C days), Growing Season Length (GSL, Unit: days), Number of frost days (FD, Unit: days), and Plant heat stress (PHS, Unit: days) for the United States and their sub-regions during the 22 years of 2000-2021 derived from OBS, WRF_UC, and WRF_C

RMSTE	GDD (Unit: °C days)		GSL (Unit: days)		FD (Unit: days)		PHS (Unit: days)	
Region	WRF_UC	WRF_C	WRF_UC	WRF_C	WRF_UC	WRF_C	WRF_UC	WRF_C
West	226.58	137.12	19.82	16.62	13.13	10.27	23.19	12.61
High Plains	183.92	155.21	24.86	21.77	18.08	11.81	21.85	14.30
South	211.01	170.84	28.07	22.85	8.83	8.01	16.66	16.34
Mid-west	233.55	162.30	24.07	24.34	13.34	12.31	17.61	17.14
Southeast	166.46	147.31	21.93	19.54	7.49	7.26	21.32	19.00
Northeast	156.09	124.84	26.78	26.26	11.04	10.51	14.34	13.04
U.S.	207.29	150.47	23.50	20.81	12.60	10.22	20.12	14.94

특징을 보였다(Fig. 6k and Fig. 6p). WRF_UC는 대부분의 지역에서 이들을 과소 모의했는데(Figs. 6l, n, q, and s), FD는 0°C 미만의 일 최저 기온의 과소 모의 그리고 PHS는 28°C 이상의 일 최고기온의 과소 모의로부터 유도된 것으로 보인다(Fig. 5b and Fig. 5c). WRF_C는 WRF_UC에 비해 개선된 일 최저·최고기온의 크기 별 발생 빈도를 보였기 때문에 대부분의 지역에서 FD 및 PHS에 대한 편의가 감소하였다(Figs. 6m, o, r, and t).

WRF_UC와 WRF_C의 분석 기간 동안 연도 별 누적한 편의를 비교하기 위해 농업기후지수들의 RMSTE 공간분포를 Fig. 7에 나타냈으며, 지역 별 영역 평균 값들을 Table 5에 기술했다. GDD의 경우

WRF_UC는 각 지역(미국 전역) 평균 RMSTE가 156.09~233.55°C days (207.29°C days)였으나, WRF_C에서는 124.84~170.84°C days (150.47°C days)로 감소하였다(Fig. 7a and Fig. 7b). GSL의 경우 WRF_UC는 각 지역(미국 전역) 평균 RMSTE가 19.82~28.07days(23.50days)였으나, WRF_C에서는 16.62~26.26days (20.81days)로 감소하였다(Fig. 7c and Fig. 7d). FD의 경우 WRF_UC는 각 지역(미국 전역) 평균 RMSTE가 7.49~18.08days (12.60days)였으나, WRF_C에서는 7.26~12.31days (10.22days)로 감소하였다(Fig. 7e and Fig. 7f). PHS의 경우 WRF_UC는 지역 별(미국 전역) 평균 RMSTE가 14.34~23.19days (20.12days)였으나, WRF_C에서는

12.61~19.00days (14.94days)로 감소하였다(Fig. 7g and Fig. 7h).

Fig. 8은 WRF_UC와 WRF_C의 분석 기간 동안 연도 별 농업기후지수의 SCC와 RMSSE를 나타낸 그림이다. GDD의 경우 WRF_C의 연간 SCC는 0.996~0.999의 범위로 나타나 평균값은 0.998로 WRF_UC에 비해 향상되었으며(Fig. 8a), 연간 RMSSE는 48.96~126.99°C days의 범위로 나타나 평균값은 82.00°C days로 WRF_UC에 비해 감소하였다(Fig. 8b). GSL의 경우 WRF_C의 연간 SCC는 0.995~0.999의 범위

로 나타나 평균값은 0.997로 WRF_UC에 비해 향상되었으며(Fig. 8c), 연간 RMSSE는 7.90~18.76 days의 범위로 나타나 평균값은 12.67 days로 WRF_UC에 비해 감소하였다(Fig. 8d). FD의 경우 WRF_C의 연간 SCC는 0.993~0.999의 범위로 나타나 평균값은 0.997로 WRF_UC에 비해 향상되었으며(Fig. 8e), 연간 RMSSE는 3.26~9.87days의 범위로 나타나 평균값은 5.73days로 WRF_UC에 비해 감소하였다(Fig. 8f). PHS의 경우 WRF_C의 연간 SCC는 0.975~0.993의 범위로 나타나 평균값은 0.988로 WRF_UC

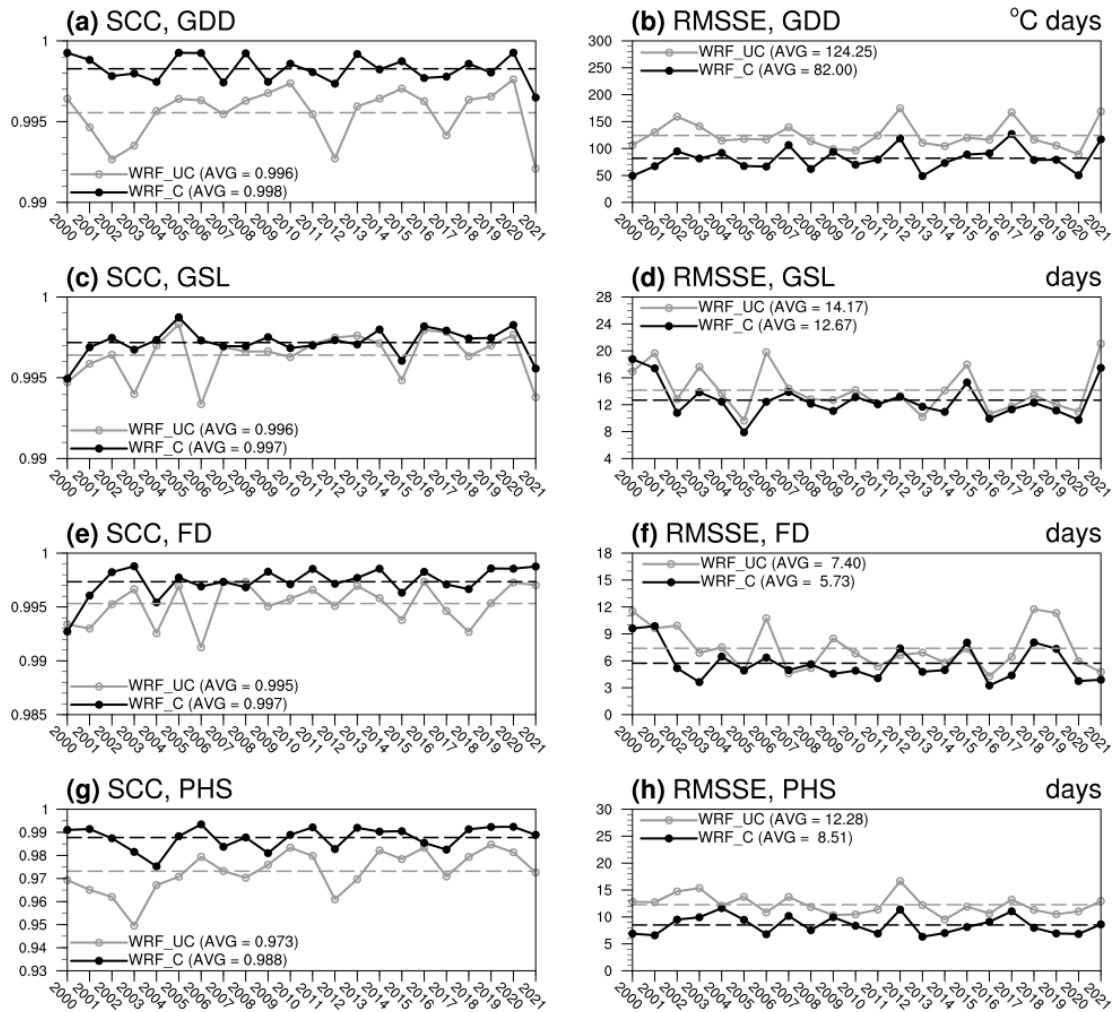


Fig. 8. Timeseries of (a) spatial correlation coefficient (SCC) and (b) root mean square spatial error (RMSSE, Unit: °C days) of the Growing Degree Days (GDD) during the 22 years of 2000-2021 derived from WRF_UC and WRF_C. (c-d), (e-f), and (g-h) are same as (a-b), but for the Growing Season Length (GSL, Unit: days), Number of frost days (FD, Unit: days), and Plant heat stress (PHS, Unit: days), respectively.

에 비해 향상되었으며(Fig. 8g), 연간 RMSSE는 6.33~11.64days의 범위로 나타나 평균값은 8.51days로 WRF_UC에 비해 감소하였다(Fig. 8h).

이와 같은 분석 결과들은 WRF_C가 WRF_UC에 비해 일 평균·최저·최고기온에 대한 편의 및 공간분포 예측성이 개선되어 이를 바탕으로 산출되는 농업기후지수의 예측성이 개선됨을 의미한다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 PNU CGCM의 시간 별 예측자료(2000년~2021년, 6~12월)를 WRF의 초기 및 측면 경계조건으로 사용하여 역학적 규모축소를 통해 미국에 대한 예측자료를 생산한 후 EQM을 이용하여 기온 보정 효과를 검증하였다. WRF_UC와 WRF_C의 일 평균·최저·최고기온과 이를 이용하여 산출되는 총 4가지 농업기후지수(GDD, GSL, FD, PHS)에 대해 예측성을 비교하였다.

WRF_UC는 분석 기간 동안 미국 내 기온의 공간패턴을 잘 모의하였으나, 대부분의 지역에서 일 평균기온을 과소 모의하고 최저기온(최고기온)을 과대(과소) 모의하는 특징을 보였다. 특히 WRF_UC는 -2°C 미만의 일 최저기온을 과소 모의하고, 28°C 이상의 일 최고기온을 과소 모의했다. WRF_C는 WRF_UC에 비해 모든 지역에서의 기온 편의 및 RMSTE가 감소했으며, 비교적 관측과 유사하게 일 기온의 크기 별 발생 빈도를 모의하였다. WRF_C는 WRF_UC에 비해 일 평균·최저·최고기온의 편의가 감소하고 SCC와 RMSSE로 특정할 수 있는 공간분포에 대한 예측성이 향상되었기 때문에 이를 기반으로 산출되는 총 4가지 농업기후지수(GDD, GSL, FD, PHS)에 대한 예측성도 개선되었다.

적 요

미국은 전 세계 주요 곡물(밀, 옥수수, 콩 등)의 생산 및 수출 국가로 알려져 있다. 따라서 신뢰할 만한 기상 예측 정보를 바탕으로 해당 지역에 대한 작황을 추정하는 것은 우리나라의 곡물 수급을 안정적으로 계획하기 위해서 중요하다. 본 연구에서는 지역 규모의 일 기온 및 이를 기반으로 산출되는 농업기후지수의 계절 예측성을 향상시키는 데 목적을 두었다. 이를 위해 먼저 역학적 규모축소법을 위한 지역기후모형으로 WRF가

사용되었으며, 해당 모형의 초기 및 측면 경계조건으로 PNU CGCM에서 생산된 시간 별 전지구 예측자료가 활용되었다. WRF의 적분은 22년(2000~2021년) 동안 매년 하반기를 포함하는 기간(6~12월)에 대해 수행되었다. 본 연구에서는 WRF에 의해 모의된 일 평균·최저·최고기온에 대해 EQM을 적용하여 모형이 갖는 편의를 보정하였다. EQM을 이용하여 보정된(보정되지 않은) 자료들은 WRF_C (WRF_UC)로 명명하였다. WRF_UC는 미국 내 대부분의 지역에서 일 최저기온(최고기온)을 과대(과소) 모의했는데, 이는 저온(고온) 범위를 과소 모의한 특징에서 비롯되었다. WRF_C는 WRF_UC에 나타난 일 평균·최저·최고기온의 편의가 감소하고 공간분포에 대한 예측성이 향상되었기 때문에 결과적으로 일 기온을 기반으로 산출되는 농업기후지수의 예측성 향상을 유도했다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두분의 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J.-Y. Hong, and K.-M. Shim, 2010: Agro-Climatic Indices Changes over the Korean Peninsula in CO₂ Doubled Climate Induced by Atmosphere-Ocean-Land-Ice Coupled General Circulation Model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(1), 11-22. (in Korean with English abstract)
- Ahn, J.-B., K.-M. Shim, M.-P. Jung, H.-G. Jeong, Y.-H. Kim, and E.-S. Kim, 2018: Predictability of temperature over South Korea in PNU CGCM and WRF hindcast. *Atmosphere* **28**(4), 479-490. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.479> (in Korean with English abstract)
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review* **129**(4), 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:Caalsh>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:Caalsh>2.0.Co;2)
- Choi, S.-C., J.-K. Kim, and J. Yang, 2022: *The Current Status of Korean Agriculture in the World*. Korea Rural Economic Institute, 194pp.

- Chung, U., S. Gbегbelegbe, B. Shiferaw, R. Robertson, J. I. Yun, K. Tesfaye, G. Hoogenboom, and K. Sonder, 2014: Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world. *Weather and Climate Extremes* **5-6**, 67-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.07.002>
- DelSole, T., and J. Shukla, 2006: Specification of Wintertime North American Surface Temperature. *Journal of Climate* **19**(12), 2691-2716. <https://doi.org/10.1175/jcli3704.1>
- Donat, M. G., L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroya, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, and S. Kitching, 2013: Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**(5), 2098-2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**(20), 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:Nsocod>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:Nsocod>2.0.Co;2)
- Feng, S., and Q. Hu, 2004: Changes in agrometeorological indicators in the contiguous United States: 1951-2000. *Theoretical and Applied Climatology* **78**(4), 247-264. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0061-8>
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* **16**(9), 3383-3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012> HESS
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **42**(2), 129-151.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review* **134**(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/mwr3199.1>
- Hunke, E. C., and J. K. Dukowicz, 1997: An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics. *Journal of Physical Oceanography* **27**(9), 1849-1867. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<1849:Aevpmf>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1849:Aevpmf>2.0.Co;2)
- Hur, J., and J.-B. Ahn, 2015: The change of first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation: peach and pear. *International Journal of Climatology* **35**(8), 1926-1937. <https://doi.org/10.1002/joc.4098>
- Hur, J., Y.-S. Kim, S. Jo, K.-M. Shim, J.-B. Ahn, M.-J. Choi, Y.-H. Kim, M. Kang, and W.-J. Choi, 2021: Estimation of Waxy Corn Harvest Date over South Korea Using PNU CGCM-WRF Chain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **23**(4), 405-414. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2021.23.4.405> (in Korean with English abstract)
- Im, E.-S., S. Ha, L. Qiu, J. Hur, S. Jo, and K.-M. Shim, 2021: An Evaluation of Temperature-Based Agricultural Indices Over Korea From the High-Resolution WRF Simulation. *Frontiers in Earth Science* **9**(357). <https://doi.org/10.3389/feart.2021.656787>
- Jo, S., K.-M. Shim, J. Hur, Y.-S. Kim, and J.-B. Ahn, 2020: Future Changes of Agro-Climatic and Heat Extremes over S. Korea at 2 and 3 °C Global Warming Levels with CORDEX-EA Phase 2 Projection. *Atmosphere* **11**(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/atmos11121336>
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology* **43**(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:Tkcpan>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:Tkcpan>2.0.Co;2)
- Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Briegleb, D. L. Williamson, and P. J.

- Rasch, 1996: Description of the NCAR community climate model (CCM3). Tech Rep. No. NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 152pp. [Available online at <https://openky.ucar.edu/islandora/object/technotes:187>]
- Kim, H.-J., and J.-B. Ahn, 2015: Improvement in Prediction of the Arctic Oscillation with a Realistic Ocean Initial Condition in a CGCM. *Journal of Climate* **28**(22), 8951-8967. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00457.1>
- Kim, Y.-H., E.-S. Kim, M.-J. Choi, K.-M. Shim, and J.-B. Ahn, 2019: Evaluation of Long-Term Seasonal Predictability of Heatwave over South Korea Using PNU CGCM-WRF Chain. *Atmosphere* **29**(5), 671-687. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.5.671> (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-H., M.-J. Choi, K.-M. Shim, J. Hur, S. Jo, and J. B. Ahn, 2021: A Study on the Predictability of the Number of Days of Heat and Cold Damages by Growth Stages of Rice Using PNU CGCM-WRF Chain in South Korea. *Atmosphere* **31**(5), 577-592. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.5.577> (in Korean with English abstract)
- Kukul, M. S., and S. Irmak, 2018: U.S. Agro-Climate in 20th Century: Growing Degree Days, First and Last Frost, Growing Season Length, and Impacts on Crop Yields. *Scientific Reports* **8**(1), 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25212-2>
- Leng, G., 2021: Maize yield loss risk under droughts in observations and crop models in the United States. *Environmental Research Letters* **16**, 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd500>
- Lim, E.-P., H. H. Hendon, S. Langford, and O. Alves, 2012: Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall. CAWCR Tech. Rep. No. 051, Centre for Australian Weather and Climate Research, 23pp. [Available online at https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_051.pdf]
- Lu, Y., and L. Kueppers, 2015: Increased heat waves with loss of irrigation in the United States. *Environmental Research Letters* **10**(6), 064010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/6/064010>
- MacLachlan, C., A. Arribas, K. A. Peterson, A. Maidens, D. Fereday, A. A. Scaife, M. Gordon, M. Vellinga, A. Williams, R. E. Comer, J. Camp, P. Xavier, and G. Madec, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **141**(689), 1072-1084. <https://doi.org/10.1002/qj.2396>
- McMaster, G. S., and W. W. Wilhelm, 1997: Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* **87**(4), 291-300. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Michaelsen, J., 1987: Cross-Validation in Statistical Climate Forecast Models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **26**(11), 1589-1600. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<1589:Cv iscf>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<1589:Cv iscf>2.0.Co;2)
- Mishra, V., and K. A. Cherkauer, 2010: Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**(7), 1030-1045. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.002>
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **102**(D14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Molteni, F., T. Stockdale, M. Balmaseda, G. Balsamo, R. Buizza, L. Ferranti, L. Magnusson, K. Mogensen, T. Palmer, and F. Vitart, 2011: The new ECMWF seasonal forecast system (System 4). ECMWF Tech. Memo. No. 656, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 49pp. [Available online at <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2011/11209-new-ecmwf-seasonal-forecast-system-system-4.pdf>]
- Monier, E., L. Xu, and R. Snyder, 2016: Uncertainty in future agro-climate projections in the United States and benefits of greenhouse gas mitigation. *Environmental Research Letters* **11**(5), 055001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/055001>
- Moonen, A. C., L. Ercoli, M. Mariotti, and A. Masoni, 2002: Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**(1), 13-27. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00012-6)
- Mueller, B., M. Hauser, C. Iles, R. H. Rimi, F. W. Zwiers, and H. Wan, 2015: Lengthening of the growing season in wheat and maize producing regions. *Weather and Climate Extremes* **9**, 47-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.04.001>
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, 2000: MOM

- 3.0 Manual. NOAA/GFDL, 682pp. [Available online at https://www.gfdl.noaa.gov/wp-content/uploads/files/model_development/ocean/mom3_manual.pdf]
- Paulson, C. A., 1970: The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **9**(6), 857-861. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:Tmrows>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:Tmrows>2.0.Co;2)
- Piani, C., J. O. Haerter, and E. Coppola, 2010: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology* **99**, 187-192. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>
- RDA, 2014: The Construction of Agrometeorological Information and Climate Modeling in Major Crop Production Area. Rural Development Administration, 138pp. [Available online at <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201400011432>]
- RDA, 2018: Production of Dissemination of Agro-climate Information in Major Crop Production Areas. Rural Development Administration, 86pp. [Available online at <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800043070&db=TRKO>]
- RDA, 2020: Development of Environment Information and Monitoring Service System for grain yield in foreign countries. Rural Development Administration, 232pp. [Available online at <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000030378>]
- Schlenker, W., and M. J. Roberts, 2009: Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 15594-15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Shim, K.-M., G.-Y. Kim, K.-A. Roh, H.-C. Jeong, and D.-B. Lee, 2008: Evaluation of Agro-Climatic Indices under Climate Change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(4), 113-120. (in Korean with English abstract)
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. Tech Rep. No. NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, 88pp. [Available online at <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>]
- Song, C.-Y., S.-H. Kim, and J.-B. Ahn, 2021: Improvement in Seasonal Prediction of Precipitation and Drought over the United States Based on Regional Climate Model Using Empirical Quantile Mapping. *Atmosphere* **31**(5), 637-656. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.5.637> (in Korean with English abstract)
- Teutschbein, C., and J. Seibert, 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* **456-457**, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Thiemeßl, M. J., A. Gobiet, and A. Leuprecht, 2011: Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology* **31**(10), 1530-1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- Thiemeßl, M. J., A. Gobiet, and G. Heinrich, 2012: Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change* **112**(2), 449-468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>