

# CMIP6에서 나타난 아시아 지역의 Time of Emergence

이재희\* · 성현민\*\*† · 김지선\* · 선민아\* · 심성보\*\* · 변영화\*\*\*

\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, \*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, \*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관

## Time of Emergence in Asia based on the CMIP6 Multi-Model Ensemble

Lee, Jae-Hee\* · Sung, Hyun Min\*\*† · Kim, Jisun\* · Sun, Min-Ah\* · Shim, Sungbo\*\* and Byun, Young-Hwa\*\*\*

\*Researcher, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

\*\*Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

### ABSTRACT

This study investigates the Time of Emergence (ToE) over Asia based on the five sub-regions defined by the IPCC AR6 Atlas. Here, we investigate the ToE signal of temperature in 21 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) models. Consistent with previous studies, signals occur in low-latitude regions (Southeast Asia; SEA) due to small natural variability. Particularly, the ToE signal occurs sooner in the Shared Socio-economy Pathway (SSP) 5-8.5 than in the SSP1-2.6 scenario. In addition, the ToE of daily minimum (maximum) temperature generally occurs sooner (later) than daily mean temperature in both scenarios. In addition to analyzing the trends of changes in climate factors for detection of climate change, information of timing and origin is essential. The ToE signal can provide related information, and the results of this study are expected to provide useful scientific information for responding to climate change on a regional scale.

*Key words: Time of Emergence, CMIP6, Asia*

## 1. 서론

전지구 평균기온의 상승은 20세기 초반에 처음으로 밝혀졌다(Calendar, 1938). Calendar (1938)는 대기 중 이산화탄소 농도의 증가가 온난화에 일부 기여하고 있다고 주장했지만, 당시에는 관찰된 온도의 변화가 자연 변동성에 기인한 것인지, 장기적인 추세인지 정확하게 구분할 수 없었다. 20세기 중반 이후 지속적으로 관찰된 온난화 현상은 인위적인 온실가스의 증가가 주된 영향인 장기적인 기후변화 추세임이 연구커뮤니티에서 활발하게 보고되어 왔다(Bindoff et al., 2013). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 평가보고서에서는 1951년부터 2010년까지 관측된 기온 상승 중 절반 이상이 온실가스의 인위적 증가의 영향이라고 보고하였다(IPCC, 2013). 또한, 기후시스템 전반에서 나타나는 최근 수십 년 동안의 변화 규모와 인위적 활동에 의한 다양한 양상은 지

난 몇 세기 동안에도 전례없는 수준이라고 보고되고 있다(IPCC, 2021; Sung et al., 2021; Tebaldi et al., 2021). 이렇듯, 기후변화에 대한 “감지”와 “기여”에 대한 개념은 지속적으로 광범위하게 논의되어 왔다(Haustein et al., 2019; Knutson et al., 2016; Huber and Knutti, 2012; Allen et al., 2000).

기후변화에 미치는 영향은 온실가스 증가 및 인위적 활동에 의한 에어로졸과 같은 외부 강제력과 기후시스템이 가지고 있는 내부(자연) 변동성과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다(Sutton et al., 2015; Hawkins and Sutton, 2012, 2009; Tebaldi and Knutti, 2007). 기후시스템의 내부변동성은 대기, 육지, 해양 등 기후시스템을 구성하는 요소의 고유 생지화학 및 물리과정과 외부 강제력이 없는 환경에서의 상호작용을 말한다(Kay et al., 2015; Deser et al., 2014; Knutti et al., 2013). 기후연구 커뮤니티의 주요 관심은 전지구 평균기온의 상승과 이러한 상승에 내·외부 요인의 상대적 기

†Corresponding author : [sunghml22@korea.kr](mailto:sunghml22@korea.kr) (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, National Institute of Meteorological Sciences, Korea. Tel. +82-64-780-6631)

ORCID 이재희 0000-0003-3227-923X  
성현민 0000-0003-3120-7912  
김지선 0000-0002-8238-3521

선민아 0000-0001-9722-3654  
심성보 0000-0002-3533-5818  
변영화 0000-0002-6074-4461

여를 이해하는 것에 있다(Dai and Bloecker, 2019). Hawkins and Sutton (2012)은 기후시스템의 자연변동성은 2030년대까지의 평균기온 상승에 주요 역할을 하는 반면, 외부 강제력은 이후의 기온 상승에 상당한 영향을 미친다고 보고한 바 있다. 이는 온난화가 급격히 진행되는 기후시스템에서는 내부 변동성보다 변화하는 기후에서 상대적으로 빠르게 반응하는 외부 강제력의 영향이 더 크다는 의미이다. 이러한 변화를 감지하기 위해서는 기후변화의 “신호”를 파악하는 방법이 주로 사용되어 왔으며, 이를 Time of Emergence(이하 ToE)라고 한다(Hawkins and Sutton 2012). ToE는 기후 변화 요인의 상대적 기여가 급격하게 변화하는 시기를 설명하고, 이러한 변화가 잠재적인 생태계 적응성을 벗어나는지 여부를 조사하기 위한 도구로 활용되고 있다(Giorgi and Bi, 2009). 또한, 기후변화에 대한 인위적 영향 정도를 탐지하거나 위협에 처한 생태계를 보호하기 위한 목적으로 기온(Mahlstein et al., 2012, 2011), 강수(Muelchi et al., 2021; Gaetani et al., 2020; Kusunoki et al., 2020; Giorgi and Bi, 2009), 극한기후(Bador et al., 2016; King et al., 2015; Scherer and Diffenbaugh, 2014), 탄소 순환(Keller et al., 2014) 등의 기후시스템 요소들에서 이미 발생했거나 발생할 것으로 예상되는 기후변화 “신호”를 감지하기 위해 사용되고 있으며, 전지구 및 대륙 규모를 중심으로 개발되고 적용되어 왔다(Zappa et al., 2021; Lehner et al., 2017; Sui et al., 2014; Maraun, 2013; Hawkins and Sutton, 2012).

다양한 분야에서 활용되고 있는 ToE 분석방법은 기온에 대한 Signal-to-Noise (S/N) 비율 평가방법이 일반적으로 활용되고 있다. 하지만, 연구별로 사용되는 기준기간과 임계값이 다르기 때문에, 최근 발간된 AR6 WG1 (Assessment Report Six Working Group 1) 보고서(IPCC, 2021)에서는 기후변화 신호에 대한 과학정보를 수요에 맞게 활용하기 위해서 ToE 분석을 위한 기준시기와 S/N의 값이 어떤 임계점(주로 1 또는 2)을 초과하였는지에 대한 정보를 동시에 제공하도록 권장하고 있다. 이렇게 기후시스템 내에 작용하는 인위적 활동에 의한 기후변화 신호가 자연변동성과 비교하여 명확해지는 시기를 식별하는 것은 온난화의 가장 큰 부작용을 겪는 지역을 파악하는 데 도움이 될 수 있다. 하지만, 지역규모에서의 ToE 연구는 다소 드물게 수행되어 왔다(Sui et al., 2014). 본 연구에서는 기후변화와 관련된 아시아지역의 위험 평가 및 국제사회의 온난화 억제를 위한 적응 및 완화 노력에 유용한 과학정보를 제공하기 위하여 아시아지역을 AR6에서 구분하는 5개 지역으로 구분하여 ToE 분석을 수행하였다.

## 2. 자료 및 분석 방법

### 2.1. CMIP6 시나리오 자료

본 연구에서는 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 21개의 모델의 기온 변수를 사용하였고, 일평균기온(tas), 일최고기온(tasmax), 일최저기온(tasmin)에 대한 ToE를 계산하였다. 분석에 사용된 실험은 과거기후 실험(Historical) 165년(1850~2014년) 및 미래전망 시나리오 86년(2015~2100년)이다. 21개 모델에 대한 모델명, 산출기관 및 대기변수의 수평분해능이 Table 1에 제시되어 있다. 미래전망 시나리오는 CMIP6 ScenarioMIP의 SSP (Shared Socioeconomic Pathway)1-2.6과 SSP5-8.5 결과를 사용하였고, 과거기후 실험자료를 이용하여 자연변동성을 계산하였다. 수평해상도가 다른 여러 기후모델의 비교를 용이하게 하기 위해 수평해상도를 동일하게 맞춰 사용한다. CMIP6 모델을 UKESM1의 해상도(192 × 144)와 동일하게 격자변환하여 사용하였고, 전지구와 아시아(-11.5 ~ 53.0°N, 55.6 ~ 149.3°E) 영역을 분석 지역으로 정의하였다. Iturbide et al.(2020)에서 제안한 IPCC Atlas 영역 중 동아시아(EastAsia, EAS)를 포함하여 티벳고원(Tibetan-Plateau, TIB), 남아시아(SouthAsia, SAS), 동남아시아(SouthEastAsia, SEA), 중앙아시아 동부지역(Eastern Central Asia, ECA)의 5개 지역을 분석에 사용하였다(Fig. 1).

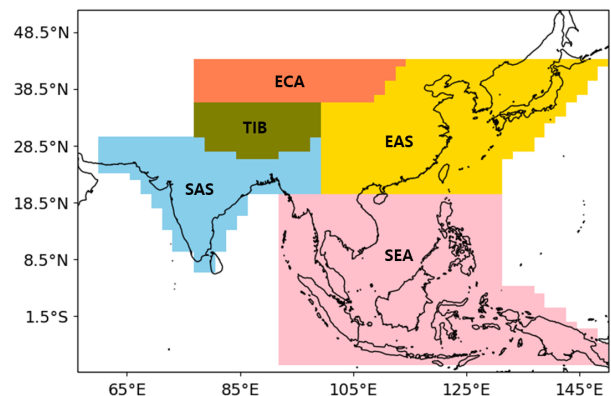


Fig. 1. Updated IPCC WG1 reference regions of Asia adopted from Iturbide et al.(2020). Shaded colors indicate different regions. It updated the AR5 reference regions for the climatic consistency and better representation of regional climate features of model results

Table 1. List of 21 climate models participated in CMIP6 and their resolution

No.	Model name	Institute	No. of grids
1	ACCESS-CM2	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia	192 × 144
2	ACCESS-ESM1-5	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia	192 × 145
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China	160 × 320
4	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	64 × 128
5	CNRM-CM6-1	The CNRM/CERFACS modelling group, France	128 × 256
6	CNRM-CM6-1-HR	The CNRM/CERFACS modelling group, France	360 × 720
7	CNRM-ESM2-1	The CNRM/CERFACS modelling group, France	128 × 256
8	EC-Earth3	Consortium of various institutions from EU	256 × 512
9	EC-Earth3-Veg	Consortium of various institutions from EU	256 × 512
10	FGOALS-g3	Chinese Academy of Sciences, China	80 × 180
11	GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA	180 × 288
12	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Center, UK	192 × 144
13	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russia	120 × 180
14	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia	120 × 180
15	IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre Simon Laplace, France	143 × 144
16	MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and RIKEN Center for Computational Science, Japan	128 × 256
17	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	192 × 384
18	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	96 × 192
19	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan	160 × 320
20	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology, China	96 × 192
21	UKESM1	Met Office Hadley Center, UK	192 × 144

## 2.2. ToE 계산방법

다중모델 앙상블을 활용한 ToE를 계산하는 방법은 개별 모델 각각의 ToE를 추정한 후 통계 함수를 이용하여 앙상블의 ToE를 계산하거나(Lee et al., 2016; Sui et al., 2014; Deser et al., 2012; Hawkins and Sutton, 2012), 다중 모델 앙상블의 내부 변동성을 단순 초과하는 시기로 ToE를 찾아내는 방법이 있다(Giorgi and Bi, 2009). 본 연구에서는 CMIP6 앙상블에서 계산된 내부 변동성(임계값)을 초과하는 시기를 ToE로 정의하는 방법을 사용하였다. 자연변동성은 IPCC 평가보고서의 방법을 토대로 과거기후실험의 1850~1900년 기간에 대한 표준편차의 2배( $2\sigma$ )로 정의하였다. 각 모델의 2

$\sigma$ 를 계산하고 이를 계절평균하여 사용하였다. 이는 기후변화 적응대책에 도움이 되려면 ToE 정의 시기가 보다 미래일수록 좋다는 선행연구의 토의내용(Hawkins and Sutton, 2012)을 바탕으로 결정하였다. 또한, 일부 선행연구들에서 자연강제력만 고려된 실험을 사용한 경우도 있지만, 본 연구에서 정의한 변동성과 유사한 결과를 보일 것으로 판단된다. 이에 IPCC 평가보고서의 방법을 적용하였다. 개별 모델의 과거기후 및 미래전망 실험의 기온시계열을 30년 이동평균하고, 이 이동평균 시계열이  $2\sigma$ 를 초과하는 연도를 각 모델마다 계산하였다. 그리고 총 21개 모델의 평균 연도를 ToE라고 정의하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. 자연변동성

21개의 기후모델에서 계산된 자연변동성의 진폭 평균값의 전지구 분포를 Fig. 2에 제시하였다. 여름철(Fig. 2a) 자연변동성의 진폭 평균값은 1.63, 겨울철(Fig. 2b)은 1.87로 나타났다. 육지의 변동폭이 해양보다 크게 나타났으며, 그 경향성은 북반구에서 뚜렷하게 나타났다. 또한, 고위도로 갈수록 변동폭이 크게 나타났는데, 여름철에는 남반구 고위도 지역에서, 겨울철에는 북반구 고위도 지역에서 가장 큰 변동폭의 분포를 확인할 수 있다. 자연변동성의 폭이 작을수록 ToE가 앞당겨질 가능성이 있으며(Lee et al., 2016), 계절별로 겨울보다 여름에 ToE가 먼저 나타난다는 선행연구들의 결과는 ToE 분석에 사용한 자연변동성의 진폭과 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. 추가적으로, 일평균기온 이외에 일최고, 일최저기온의 자연변동성 진폭을 살펴보면, 계절과 공간분포가 유사하게 나타났다(not shown). Fig. 2의 박스 부분은 아시아지역을 나타낸다. 여름철 아시아 육지의 자연변동성은 일평균, 일최고, 일최저기온이 각각 1.23, 1.34, 0.97이며, 겨울철은 2.00, 1.83, 1.87로 나타났다. 여름철은 전지구와 비교하여 아시아지역의 자연변동성이 작음을 확인할 수 있고, 반대로 겨울철은 전지구보다 아시아 육지 지역의 자연변동성이 비슷하거나 큰 것으로 나타났다. 이 결과는 선행연구의 분석결과와 일치한다.

#### 3.2. ToE

##### 3.2.1. 아시아 지역

아시아 육지 지역(55.6 ~ 149.3°E, -11.5 ~ 53.0°N)에 대한 계절별 일평균, 일최고, 일최저기온의 ToE 분석결과를 Table 2에 나타내었다. 먼저, SSP1-2.6 시나리오의 여름철 ToE는 2000 ~ 2030년대 범위와 2018년의 평균값이 나타났으며, 모든 기후모델에서 일평균기온의 변화가 2100년 이전에 자연변동성의 진폭을 넘는 것으로 확인되었다. 하지만, 겨울철에는 6개의 모델(FGOALS-g3, GFDL-ESM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-LR, MPI-ESM1-2-HR)을 제외한 15개의 기후모델에서 아시아 분석영역에 대한 일평균기온의 ToE가 2010 ~ 2060년대로 나타났다. 세부지역을 살펴보면(Fig. 1), 저위도 지역인 SEA 지역에서는 겨울철에도 모든 기후모델이 나타났으나, 중위도 EAS와 ECA 지역에서는 각각 8개, 7개 모델에서 시그널이 나타나지 않은 분석결과로부터 저위도 지역일수록 ToE 출현시기가 빨라지는 특성을 확인할 수 있다. 또한, TIB 지역은 EAS와 ECA 지역과 비슷한 위도대에 위치하고 있지만, ToE 시그널이 나타나지 않은 모델은 3개 뿐이었다. 이를 통해, 위도대 뿐만 아니라, 지역별 기후특성이나 기후시스템 피드백(e.g. 온난화에 따른 눈덮임 지역감소 피드백 등) 영향에 따라서 ToE 시기가 달라짐을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오에서 나타난 여름철과 겨울철의 ToE를 비교한 산포도이다. ToE에 도달하지 않은 모델들은 3 이하의 기후민감도를 가지고 있는 모델들이며, 여름철의 경우에도 기후민감도가 낮은 모델

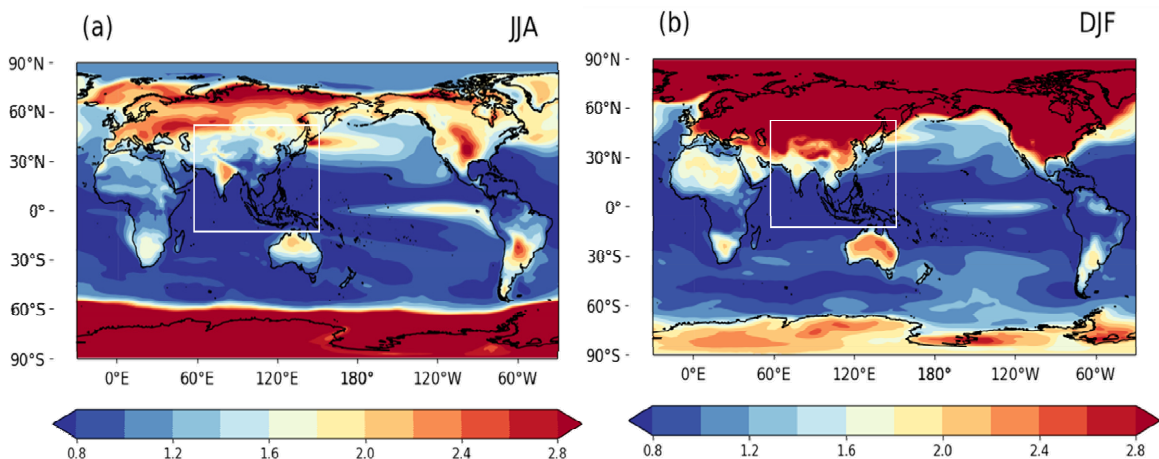


Fig. 2. Natural variability of surface mean temperature (defined by the 2 standard deviation; unit is K) in (a) JJA and (b) DJF averaged from 21 CMIP6 historical run and the reference period is 1850 ~ 1900. White box indicates the analyzed domain in this study

Table 2. Time of Emergence (ToE) of daily mean, maximum, and minimum temperature for JJA and DJF in Asia region

		JJA		DJF	
		SSP126	SSP585	SSP126	SSP585
tas	Min ~ Max	2001 ~ 2033	2001 ~ 2028	2009 ~ 2063	2010 ~ 2049
	ToE	2018	2017	2037	2033
tasmax	Min ~ Max	2006 ~ 2040	2006 ~ 2034	2012 ~ 2058	2015 ~ 2050
	ToE	2023	2021	2034	2033
tasmin	Min ~ Max	1991 ~ 2022	1991 ~ 2018	2006 ~ 2053	2006 ~ 2040
	ToE	2008	2007	2031	2026

들의 ToE가 늦게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3의 빈 삼각형). 기후변화 예측모델들에서 모의된 기온과 관련한 미래전망을 비교할 경우, 모델 간 기후민감도를 고려한 전망분석을 병행해야 할 필요가 있다. 왜냐하면, 기후민감도는 대기 중의 이산화탄소 농도의 증가에 따라 기후변화 예측모델에서 얼마나 민감하게 기온변화가 나타나는지를 간접적으로 확인할 수 있는 지표로 기후변화 연구 커뮤니티에서 광범위하게 활용되고 있기 때문이다. 또한, 최근의 CMIP6 모델들이 이전 CMIP 모델들에 비해서 기후민감도가 더 높다고 알려져 있기 때문에, 관련한 비교분석은 ToE 분석결과의 신뢰성을 제고할 수 있다.

반면에, SSP5-8.5 시나리오에서는 계절에 상관없이 모든 모델에서 ToE가 분석되었으며, 평균시기 1~4년 정도, 가장 늦은 시기는 5~14년 정도 SSP1-2.6 시나리오보다 빠른 시기에 ToE가 나타났다. 이러한 결과는 고탄소 시나리오의 기온상승이 저탄소 시나리오보다 더 빠르고, 겨울철의 자연변동폭이 여름보다 큰 것에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 또한, 시나리오에 상관없이 모델별 ToE의 편차는 겨울철(SSP1-2.6(54년), SSP5-8.5(39년))에 여름철(SSP1-2.6(32년), SSP5-8.5(27년))보다 크게 나타나는데, 이는 모델 간 편차가 작은 계절의 ToE가 가장 빠르다고 분석한(Sui et al., 2014) 선행연구의 분석과 일치하였다. 일최고기온과 일최저기온에서도 마찬가지로 SSP1-2.6 시나리오의 여름철에서는 모든 모델, 겨울철은 15개의 모델에서만 ToE가 나타났다. 일평균기온과 마찬가지로, 겨울철보다 여름철에서, SSP1-2.6 보다 SSP5-8.5 시나리오에서 ToE 시기가 더 빠르게 나타났다. 일최고기온(최저기온)은 일평균기온보다 다소 늦은(빠른) 시기에 나타났는데 이는 일최저기온이 일최고기온이나 일평균기온보다 기온상승이 빠르게 때문이라는 선행연구들의 결과와 유사한 분석결과이다(Boo et al., 2016; Lee et al., 2016; King et al., 2015).

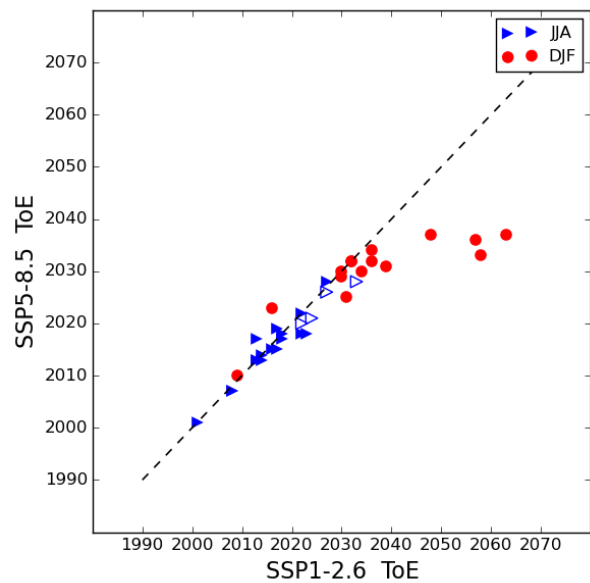


Fig. 3. Scatter plot of ToEs of 21 CMIP6 models. Comparison between results from SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. Red circles indicate DJF (December–January–February) and blue triangles indicate JJA (June–July–August) seasons. Empty-triangles indicate 4 CMIP6 models with small climate sensitivity

### 3.2.2. SEA, SAS 영역

5개의 Atlas 세부영역에 대해서 분포를 살펴보면, 일평균기온의 ToE 시그널과 비교하여 일최고기온은 늦게, 일최저기온은 일찍 나타남을 확인할 수 있다(Table 3). 두 시나리오를 통합하여 분석해보면, 여름철의 ToE 시그널은 대부분의 지역에서 일최저기온은 2005년~2012년, 일최고기온은 2015년~2026년, 일평균기온은 2012년~2020년 이전에 나

Table 3. Time of Emergence (ToE) for the JJA and DJF seasons of 5 sub regions in SSP1-2.6 and SSP5-8.5 experiment

ToE	Region	JJA		DJF	
		SSP126	SSP585	SSP126	SSP585
tas	TIB	2018	2017	<b>2039</b>	<b>2032</b>
	EAS	2020	2020	2039	2037
	SAS	<b>2040</b>	<b>2035</b>	<b>2036</b>	<b>2033</b>
	SEA	1997	1997	2005	2005
	ECA	2013	2012	<b>2041</b>	<b>2038</b>
tasmax	TIB	2026	2024	<b>2031</b>	<b>2026</b>
	EAS	2026	2024	2042	2040
	SAS	<b>2046</b>	<b>2045</b>	<b>2043</b>	<b>2039</b>
	SEA	2002	2001	2008	2008
	ECA	2016	2015	2040	2040
tasmin	TIB	2012	2011	<b>2037</b>	<b>2030</b>
	EAS	2012	2011	<b>2038</b>	<b>2032</b>
	SAS	2011	2010	2024	2024
	SEA	1990	1990	2000	2000
	ECA	2005	2005	<b>2033</b>	<b>2027</b>

타났고, 일평균기온과 일최고기온에 비해 약 10~15년 정도 이른시기에 나타남을 확인할 수 있다(SAS 제외). 겨울철의 시그널은 일최저기온이 2024년~2038년, 일최고기온은 2026년~2043년, 일평균기온은 2032년~2041년에 나타났고, 다른 기온변수에 비해 일최저기온이 약 3~5년 정도 이른 시기 나타났다. 여름철에 비해 변수에 따른 시그널의 출현시기 격차가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, ToE로 정의하는 기준인 겨울철 자연변동폭의 크기가 크기 때문에 변수별 시그널의 출현시기 격차가 비교적 작게 나온 것으로 볼 수 있다.

SEA 지역을 살펴보면, 모든 기온변수의 ToE 시그널이 1990~2010년에 나타나 계절과 탄소배출 시나리오에 상관없이 아시아지역에서는 가장 먼저 나타났다(Table 3). 기온변수별 시그널의 출현순서는 아시아 평균경향과 동일하게 나타났다. 이 분석결과는 인위적 영향으로 진행되고 있는 온난화로 인해 저위도 지역은 이미 다음 단계의 기후변화를 마주하고 있으며, 시간이 지날수록 온난화의 영향이 더욱 가속화될 수 있다는 의미이다.

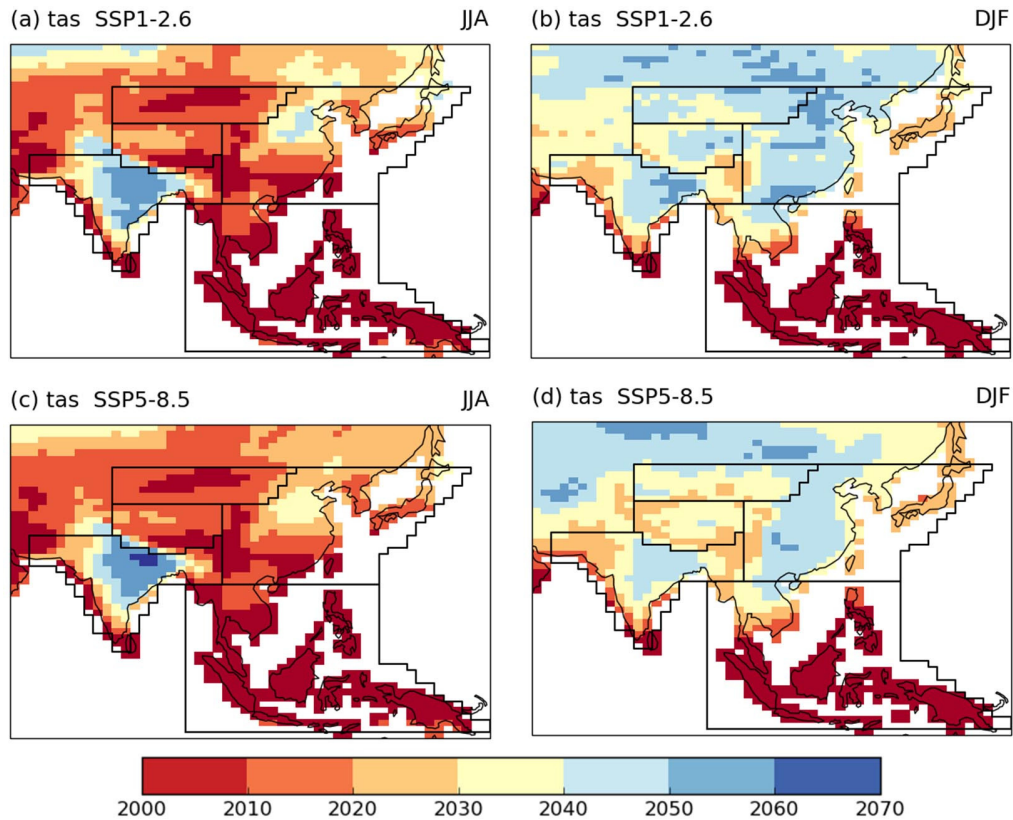


Fig. 4. Spatial distribution of ToE from SSP1-2.6 (first row; (a) JJA and (b) DJF) and SSP5-8.5 (second row; (c) JJA and (d) DJF) scenarios. Black lines represent each sub-regions of Asia

SAS 지역은 2040년대 이전에 대부분의 기온변수가 ToE에 도달할 것으로 분석되었다. 여름철의 일최저기온은 2010년으로 아시아지역의 평균시기와 유사하게 나타났으나 일평균기온(2035~2040년)과 일최고기온(2045~2046년)은 모두 약 18~25년 정도 늦게 나타나는 특징을 보였다. 또한, 일평균기온의 ToE 시그널이 저탄소 시나리오에서 5년 정도 늦게 나타나는 특징을 보였다. 공간분포(Fig. 4)와 같이 비교해보면, 인도 북서부 지역은 동위도의 주변지역보

다 ToE가 늦게 나타나는 특징을 보이는데, 이 지역은 벼농사가 활발하게 일어나는 지역으로 관개효과의 영향을 받은 것으로 판단되며, 관개효과는 기온의 상승을 억제하는 경향이 있다는 선행연구결과(Harding and Snyder, 2012)가 있다. 이에 더하여, 현재기후의 인도지역은 야간의 이상고온현상이 열적환경변화에 주요 역할을 한다는 선행연구결과(Dash and Mamgain, 2011)도 있다. 약간의 이상고온은 일최저기온과 연관이 있으며, 작은 자연진동폭의 영향으로 동위도대

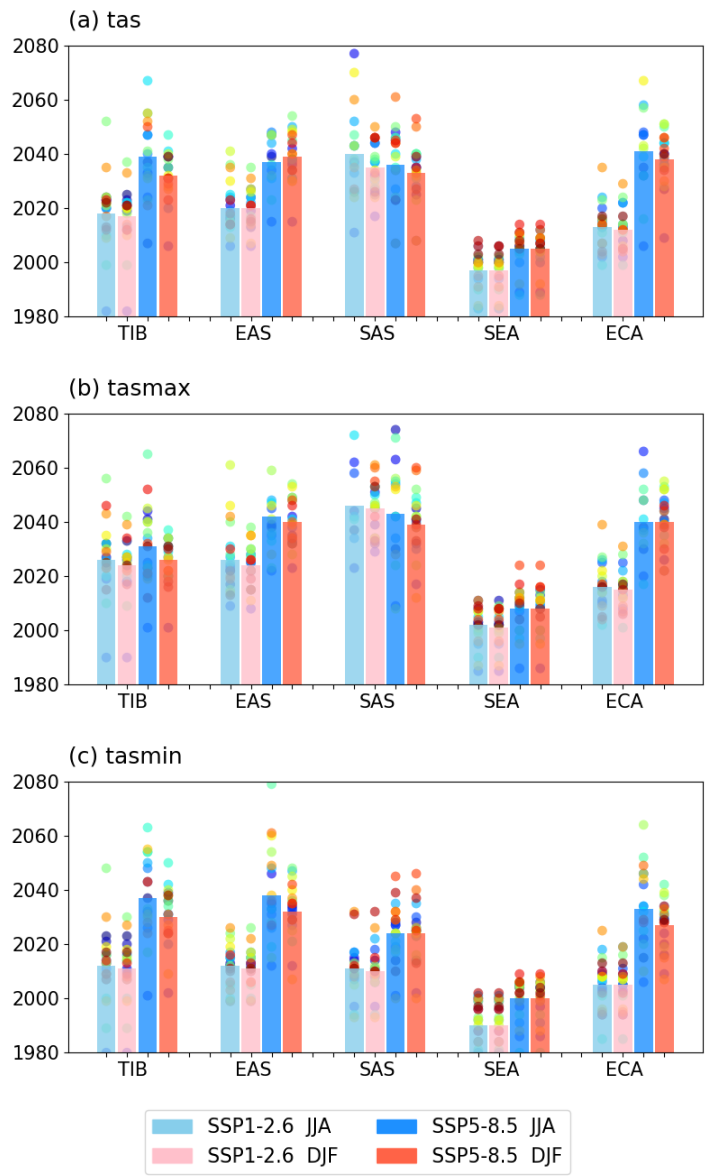


Fig. 5. Comparison of ToEs from daily (a) mean, (b) maximum, and (c) minimum temperature from SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios over 5 regions of Asia. Blue, red bars indicate JJA, DJF and light colors, deep colors indicate SSP1-2.6, SSP5-8.5, respectively. Dots represent ToE of each CMIP6 model

의 다른 지역보다 늦은 시기에 ToE 시그널이 나타난 것으로 판단된다.

### 3.2.3. EAS, TIB, ECA 영역

EAS, TIB, ECA 지역에서도 일최저기온, 일평균기온, 일최고기온의 순서대로 ToE 출현 시기가 나타났고, 여름철은 두 시나리오에서 비슷한 시기에, 겨울철은 SSP1-2.6 시나리오에서 3~7년 정도 늦은 시기에 나타나 아시아 전체평균과 동일한 경향을 가짐을 확인할 수 있다(Table 3). EAS 지역보다는 TIB, ECA 지역에서 ToE 시그널이 이른 시기에 나타나는 경향을 보였다. 공간분포를 살펴보면 (Fig. 4), EAS 지역의 중국 화북지역에서 ToE 시그널이 가장 늦게 나타났고, 이는 Fig. 2에 제시된 주변지역보다 큰 자연진동폭에 기인한 것으로 볼 수 있다.

세 지역은 모두 중위도에 위치하고 있기 때문에, 기온의 ToE 시그널이 나타나는 시기가 전반적으로 비슷하다. 하지만, 높은 고도에 위치한 TIB, ECA 지역에서는 CMIP6 모델 간 기온의 분포가 EAS 지역보다 뚜렷하게 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). TIB 지역에서는 일최저기온, 일평균기온, 일최고기온 모두 큰 양상불 범위를 보였고, 특히, 여름철의 범위가 다른지역보다 큰 것을 볼 수 있다. 반면, ECA 지역에서는 일평균기온과 일최저기온이 고탄소 시나리오 여름철에 뚜렷하게 큰 양상불 범위를 보였고(평균값을 기준으로 상하방향 모두 큰 편차를 보임), 나머지 여름철 기간에도 양상불 범위가 넓은 경향을 보였으나, 다른지역과 유사한 수준으로 나타났다. 이 분석결과는 지역별 편차를 고려하더라도, 일최저기온이 높은 고도지역의 일평균기온에 미치는 영향이 일최고기온에 비해 크다는 것을 시사하며, 지역적 ToE 시그널에 미치는 기온의 특성을 분류하기 위해서는 극한기온요소를 포함한 다양한 기온관련 변수의 포괄적인 분석이 추후 별도로 수행되어야 할 것으로 보인다.

## 4. 요약 및 토의

본 연구에서는 최근 제공되고 있는 6차 국제기후프로젝트(CMIP6)의 21개 전지구 기후모델을 활용하여 ToE 시그널의 발현 시기를 분석하였다. CMIP6에서 제공되는 자료 중 ScenarioMIP의 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 기후변화 시나리오 2종을 활용하였다. 인간활동에 의한 온실가스 배출의 증가가 지구온난화의 주요 원인이며, 이러한 변화가 자연

변동성의 한계를 초과할 경우에는 기온변화폭이 과거와는 다를 수 있다고 지적되고 있다(IPCC, 2021). 기온상승은 지역별로 다른 형태가 나타나지만, 작은 변화라고 할지라도 이전에는 없었던 것이거나 자연변동성의 한계를 초월한 상태일 수 있기 때문에 취약성의 측면에서 시의성 있는 기후변화대응 필요성이 언급되고 있다(IPCC, 2021). 또한, 아시아 지역은 인구밀도가 높기 때문에 그 관심도가 높으며, 기후변화대응을 위해서 얼마나 시간이 남아있는지에 대한 정책관점에서의 과학정보 수요가 급증하고 있다. 기존의 문헌들과 IPCC 제6차 평가보고서(IPCC, 2021)을 바탕으로 아시아 지역의 ToE를 분석하고, 세부 Atlas 지역에서 나타나는 기온의 ToE 특성을 확인하였다.

기후모델들의 평균 ToE 시그널 발현 시기를 분석한 결과, 아시아지역의 일평균기온에 대한 여름철 ToE는 2020년 이전, 겨울철 ToE는 2040년 이전 시기에 나타났다. 또한, 일최저기온(최고기온)은 일평균기온보다 빠른(늦은) 시기에 나타났다. 이 결과는 겨울철보다 여름철에서, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)보다 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 ToE 시그널의 발현 시기가 더 빠르다는 선행연구(Boo et al., 2016; Lee et al., 2016; Sui et al., 2014)들과 유사한 분석결과이다. 하지만, 본 연구에서의 ToE 시기는 선행연구들보다 약 10년 정도 빠르게 나타난 발현 시기 결과이며, CMIP6 기후모델의 커진 기후민감도와 세부물리과정의 차이에 기인한 것으로 보인다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이, 기후민감도가 낮은 기후모델은 여름철 ToE가 2030년에 나타나고, 겨울철 ToE는 2100년까지 나타나지 않는 기후모델들도 있다. 또한, 본 연구에서 육지를 분석영역으로 한정시켰기 때문에, 선행연구들에서 언급된 모델별 세부물리과정의 차이에 따른 불확실성을 고려한다면, 향후 다양한 CMIP 기후모델(이전 페이즈를 포함한)의 비교에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 이와 더불어, 자연변동성의 진폭도 ToE 시그널의 발현 시기에 중요한 영향을 미친다. 이는 분석하고자 하는 변수와 영역, 기준기간에 따라 달라지며, 자연변동폭이 클 경우에 ToE 시그널의 발현 시기가 늦게 나타난다. 선행연구마다 ToE 시그널의 발현 시기 계산에 사용되는 자연변동폭의 기준기간이 다르고, 사용되는 실험도 다르다. IPCC 제6차 평가보고서에서 권고하는 내용을 따르면, 기준기간과 사용자료에 따라 값이 달라지고 불확실성의 내용이 달라지기 때문에, ToE 발현 시기를 논의할 때는 기준기간과 ToE 결정에 사용되는 임계치에 대한 내용을 분명하게 언급해야 정보의 사용자가 정확한



내용을 파악할 수 있다. 이런 이슈에 기반하여 자연변동성에 대한 추가적인 이해도 필요하다.

추가적으로, 본 연구에서는 다른 극한기온의 값에 비해 접근성이 높은 일최저기온과 일최고기온에 대한 ToE 발현 시기를 분석하였고, 5개의 세부 Atlas 지역에 대한 각각의 ToE 산출을 통해 지역적인 발현 시기의 차이도 비교하였다. 전반적으로 위도에 따라 비슷한 ToE 발현 시기가 분석되었고, 특히, 저위도 지역에서 작은 자연진동폭으로 인한 ToE 시그널이 가장 먼저 나타남을 확인하였다. 비슷한 위도대 일지라도 ToE 발현 시기가 지역적으로 다른 곳(ex. 관개효과)도 있었다. 이러한 분석결과는 기후변화대응의 관점에서 국지적인 지역특성을 고려한 다양한 변수의 ToE 분석이 향후 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 기상청 국립기상과학원의 “기상업무지원기술개발-신기후체제 대응 기후변화 시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Allen MR, Stott PA, Mitchell JF, Schnur R, Delworth TL. 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature* 407(6804): 617-620.
- Bador M, Terray L, Boé, J. 2016. Emergence of human influence on summer record-breaking temperatures over Europe. *Geophys Res Lett* 43(1): 404-412. doi:10.1002/2015GL066560
- Bindoff NL, Stott PA, AchutaRao KM, Allen MR, Gillett N, Gutzler D, Hansingo K, Hegerl G, Hu Y, Jain S, Mokhov II, Overland J, Perlwitz J, Sebbari R, Zhang, X. 2013. Detection and attribution of climate change: from global to regional.
- Boo K-O, Shim S, Kim J-E, Byun Y-H, Cho C-H. 2016. Emergence of Anthropogenic Warming over South Korea in CMIP5 Projections (in Korean with English abstract). *J Climate Change Res* 7(4): 421-426. doi:10.15531/KSCCR.2016.7.4.421
- Callendar GS. 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Q J R Meteorol Soc* 64(275): 223-240. doi:10.1002/qj.49706427503
- Dai A, Bloecker CE. 2019. Impacts of internal variability on temperature and precipitation trends in large ensemble simulations by two climate models. *Clim Dyn* 52(1): 289-306.
- Dash SK, Mangain A. 2011. Changes in the frequency of different categories of temperature extremes in India. *J. Appl Meteorol Climatol* 50(9): 1842-1858.
- Deser C, Phillips AS, Alexander MA, Smoliak BV. 2014. Projecting North American climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *J Clim* 27(6): 2271-2296.
- Deser C, Knutti R, Solomon S, Phillips AS. 2012. Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nat Clim Change* 2(11): 775-779.
- Gaetani M, Janicot S, Vrac M, Famién AM, Sultan B. 2020. Robust assessment of the time of emergence of precipitation change in West Africa. *Sci Rep* 10(1): 1-10.
- Giorgi F, Bi X. 2009. Time of emergence (TOE) of GHG-forced precipitation change hot-spots. *Geophys Res Lett* 36(6).
- Harding KJ, Snyder PK. 2012. Modeling the atmospheric response to irrigation in the Great Plains. Part I: General impacts on precipitation and the energy budget. *J Hydrometeorol* 13(6): 1667-1686.
- Haustein K, Otto FE, Venema V, Jacobs P, Cowtan K, Hausfather Z, Way RG, White B, Subramanian A, Schurer AP. 2019. A limited role for unforced internal variability in twentieth-century warming. *J Clim* 32(16): 4893-4917. doi:10.1175/JCLI-D-18-0555.1
- Hawkins E, Sutton R. 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull Am Meteorol Soc* 90(8): 1095-1108.
- Hawkins E, Sutton R. 2012. Time of emergence of climate signals. *Geophys Res Lett* 39(1).

- Huber M, Knutti R. 2012. Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance. *Nat Geosci* 5(1): 31-36.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change.* Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Doschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, Eds. Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107415324.005
- IPCC. 2021. *Summary for Policymakers.* In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* MassonDelmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, Eds. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.001.
- Iturbide M, Gutiérrez JM, Alves LM, Bedia J, Cerezo-Mota R, Gimenez G, Gochis D, Gómez IG, Gómez P, Gómez R, Gómez S, Gómez V, Gómez W, Gómez X, Gómez Y, Gómez Z, Gómez AA, Gómez AB, Gómez AC, Gómez AD, Gómez AE, Gómez AF, Gómez AG, Gómez AH, Gómez AI, Gómez AJ, Gómez AK, Gómez AL, Gómez AM, Gómez AN, Gómez AO, Gómez AP, Gómez AQ, Gómez AR, Gómez AS, Gómez AT, Gómez AU, Gómez AV, Gómez AW, Gómez AX, Gómez AY, Gómez AZ, Gómez BA, Gómez BB, Gómez BC, Gómez BD, Gómez BE, Gómez BF, Gómez BG, Gómez BH, Gómez BI, Gómez BJ, Gómez BK, Gómez BL, Gómez BM, Gómez BN, Gómez BO, Gómez BP, Gómez BQ, Gómez BR, Gómez BS, Gómez BT, Gómez BU, Gómez BV, Gómez BW, Gómez BX, Gómez BY, Gómez BZ, Gómez CA, Gómez CB, Gómez CC, Gómez CD, Gómez CE, Gómez CF, Gómez CG, Gómez CH, Gómez CI, Gómez CJ, Gómez CK, Gómez CL, Gómez CM, Gómez CN, Gómez CO, Gómez CP, Gómez CQ, Gómez CR, Gómez CS, Gómez CT, Gómez CU, Gómez CV, Gómez CW, Gómez CX, Gómez CY, Gómez CZ, Gómez DA, Gómez DB, Gómez DC, Gómez DD, Gómez DE, Gómez DF, Gómez DG, Gómez DH, Gómez DI, Gómez DJ, Gómez DK, Gómez DL, Gómez DM, Gómez DN, Gómez DO, Gómez DP, Gómez DQ, Gómez DR, Gómez DS, Gómez DT, Gómez DU, Gómez DV, Gómez DW, Gómez DX, Gómez DY, Gómez DZ, Gómez EA, Gómez EB, Gómez EC, Gómez ED, Gómez EE, Gómez EF, Gómez EG, Gómez EH, Gómez EI, Gómez EJ, Gómez EK, Gómez EL, Gómez EM, Gómez EN, Gómez EO, Gómez EP, Gómez EQ, Gómez ER, Gómez ES, Gómez ET, Gómez EU, Gómez EV, Gómez EW, Gómez EX, Gómez EY, Gómez EZ, Gómez FA, Gómez FB, Gómez FC, Gómez FD, Gómez FE, Gómez FF, Gómez FG, Gómez FH, Gómez FI, Gómez FJ, Gómez FK, Gómez FL, Gómez FM, Gómez FN, Gómez FO, Gómez FP, Gómez FQ, Gómez FR, Gómez FS, Gómez FT, Gómez FU, Gómez FV, Gómez FW, Gómez FX, Gómez FY, Gómez FZ, Gómez GA, Gómez GB, Gómez GC, Gómez GD, Gómez GE, Gómez GF, Gómez GG, Gómez GH, Gómez GI, Gómez GJ, Gómez GK, Gómez GL, Gómez GM, Gómez GN, Gómez GO, Gómez GP, Gómez GQ, Gómez GR, Gómez GS, Gómez GT, Gómez GU, Gómez GV, Gómez GW, Gómez GX, Gómez GY, Gómez GZ, Gómez HA, Gómez HB, Gómez HC, Gómez HD, Gómez HE, Gómez HF, Gómez HG, Gómez HH, Gómez HI, Gómez HJ, Gómez HK, Gómez HL, Gómez HM, Gómez HN, Gómez HO, Gómez HP, Gómez HQ, Gómez HR, Gómez HS, Gómez HT, Gómez HU, Gómez HV, Gómez HW, Gómez HX, Gómez HY, Gómez HZ, Gómez IA, Gómez IB, Gómez IC, Gómez ID, Gómez IE, Gómez IF, Gómez IG, Gómez IH, Gómez II, Gómez IJ, Gómez IK, Gómez IL, Gómez IM, Gómez IN, Gómez IO, Gómez IP, Gómez IQ, Gómez IR, Gómez IS, Gómez IT, Gómez IU, Gómez IV, Gómez IW, Gómez IX, Gómez IY, Gómez IZ, Gómez JA, Gómez JB, Gómez JC, Gómez JD, Gómez JE, Gómez JF, Gómez JG, Gómez JH, Gómez JI, Gómez JJ, Gómez JK, Gómez JL, Gómez JM, Gómez JN, Gómez JO, Gómez JP, Gómez JQ, Gómez JR, Gómez JS, Gómez JT, Gómez JU, Gómez JV, Gómez JW, Gómez JX, Gómez JY, Gómez JZ, Gómez KA, Gómez KB, Gómez KC, Gómez KD, Gómez KE, Gómez KF, Gómez KG, Gómez KH, Gómez KI, Gómez KJ, Gómez KK, Gómez KL, Gómez KM, Gómez KN, Gómez KO, Gómez KP, Gómez KQ, Gómez KR, Gómez KS, Gómez KT, Gómez KU, Gómez KV, Gómez KW, Gómez KX, Gómez KY, Gómez KZ, Gómez LA, Gómez LB, Gómez LC, Gómez LD, Gómez LE, Gómez LF, Gómez LG, Gómez LH, Gómez LI, Gómez LJ, Gómez LK, Gómez LL, Gómez LM, Gómez LN, Gómez LO, Gómez LP, Gómez LQ, Gómez LR, Gómez LS, Gómez LT, Gómez LU, Gómez LV, Gómez LW, Gómez LX, Gómez LY, Gómez LZ, Gómez MA, Gómez MB, Gómez MC, Gómez MD, Gómez ME, Gómez MF, Gómez MG, Gómez MH, Gómez MI, Gómez MJ, Gómez MK, Gómez ML, Gómez MN, Gómez MO, Gómez MP, Gómez MQ, Gómez MR, Gómez MS, Gómez MT, Gómez MU, Gómez MV, Gómez MW, Gómez MX, Gómez MY, Gómez MZ, Gómez NA, Gómez NB, Gómez NC, Gómez ND, Gómez NE, Gómez NF, Gómez NG, Gómez NH, Gómez NI, Gómez NJ, Gómez NK, Gómez NL, Gómez NM, Gómez NN, Gómez NO, Gómez NP, Gómez NQ, Gómez NR, Gómez NS, Gómez NT, Gómez NU, Gómez NV, Gómez NW, Gómez NX, Gómez NY, Gómez NZ, Gómez OA, Gómez OB, Gómez OC, Gómez OD, Gómez OE, Gómez OF, Gómez OG, Gómez OH, Gómez OI, Gómez OJ, Gómez OK, Gómez OL, Gómez OM, Gómez ON, Gómez OO, Gómez OP, Gómez OQ, Gómez OR, Gómez OS, Gómez OT, Gómez OU, Gómez OV, Gómez OW, Gómez OX, Gómez OY, Gómez OZ, Gómez PA, Gómez PB, Gómez PC, Gómez PD, Gómez PE, Gómez PF, Gómez PG, Gómez PH, Gómez PI, Gómez PJ, Gómez PK, Gómez PL, Gómez PM, Gómez PN, Gómez PO, Gómez PP, Gómez PQ, Gómez PR, Gómez PS, Gómez PT, Gómez PU, Gómez PV, Gómez PW, Gómez PX, Gómez PY, Gómez PZ, Gómez QA, Gómez QB, Gómez QC, Gómez QD, Gómez QE, Gómez QF, Gómez QG, Gómez QH, Gómez QI, Gómez QJ, Gómez QK, Gómez QL, Gómez QM, Gómez QN, Gómez QO, Gómez QP, Gómez QQ, Gómez QR, Gómez QS, Gómez QT, Gómez QU, Gómez QV, Gómez QW, Gómez QX, Gómez QY, Gómez QZ, Gómez RA, Gómez RB, Gómez RC, Gómez RD, Gómez RE, Gómez RF, Gómez RG, Gómez RH, Gómez RI, Gómez RJ, Gómez RK, Gómez RL, Gómez RM, Gómez RN, Gómez RO, Gómez RP, Gómez RQ, Gómez RR, Gómez RS, Gómez RT, Gómez RU, Gómez RV, Gómez RW, Gómez RX, Gómez RY, Gómez RZ, Gómez SA, Gómez SB, Gómez SC, Gómez SD, Gómez SE, Gómez SF, Gómez SG, Gómez SH, Gómez SI, Gómez SJ, Gómez SK, Gómez SL, Gómez SM, Gómez SN, Gómez SO, Gómez SP, Gómez SQ, Gómez SR, Gómez SS, Gómez ST, Gómez SU, Gómez SV, Gómez SW, Gómez SX, Gómez SY, Gómez SZ, Gómez TA, Gómez TB, Gómez TC, Gómez TD, Gómez TE, Gómez TF, Gómez TG, Gómez TH, Gómez TI, Gómez TJ, Gómez TK, Gómez TL, Gómez TM, Gómez TN, Gómez TO, Gómez TP, Gómez TQ, Gómez TR, Gómez TS, Gómez TT, Gómez TU, Gómez TV, Gómez TW, Gómez TX, Gómez TY, Gómez TZ, Gómez UA, Gómez UB, Gómez UC, Gómez UD, Gómez UE, Gómez UF, Gómez UG, Gómez UH, Gómez UI, Gómez UJ, Gómez UK, Gómez UL, Gómez UM, Gómez UN, Gómez UO, Gómez UP, Gómez UQ, Gómez UR, Gómez US, Gómez UT, Gómez UU, Gómez UV, Gómez UW, Gómez UX, Gómez UY, Gómez UZ, Gómez VA, Gómez VB, Gómez VC, Gómez VD, Gómez VE, Gómez VF, Gómez VG, Gómez VH, Gómez VI, Gómez VJ, Gómez VK, Gómez VL, Gómez VM, Gómez VN, Gómez VO, Gómez VP, Gómez VQ, Gómez VR, Gómez VS, Gómez VT, Gómez VU, Gómez VV, Gómez VW, Gómez VX, Gómez VY, Gómez VZ, Gómez WA, Gómez WB, Gómez WC, Gómez WD, Gómez WE, Gómez WF, Gómez WG, Gómez WH, Gómez WI, Gómez WJ, Gómez WK, Gómez WL, Gómez WM, Gómez WN, Gómez WO, Gómez WP, Gómez WQ, Gómez WR, Gómez WS, Gómez WT, Gómez WU, Gómez WV, Gómez WW, Gómez WX, Gómez WY, Gómez WZ, Gómez XA, Gómez XB, Gómez XC, Gómez XD, Gómez XE, Gómez XF, Gómez XG, Gómez XH, Gómez XI, Gómez XJ, Gómez XK, Gómez XL, Gómez XM, Gómez XN, Gómez XO, Gómez XP, Gómez XQ, Gómez XR, Gómez XS, Gómez XT, Gómez XU, Gómez XV, Gómez XW, Gómez XX, Gómez XY, Gómez XZ, Gómez YA, Gómez YB, Gómez YC, Gómez YD, Gómez YE, Gómez YF, Gómez YG, Gómez YH, Gómez YI, Gómez YJ, Gómez YK, Gómez YL, Gómez YM, Gómez YN, Gómez YO, Gómez YP, Gómez YQ, Gómez YR, Gómez YS, Gómez YT, Gómez YU, Gómez YV, Gómez YW, Gómez YX, Gómez YY, Gómez YZ, Gómez ZA, Gómez ZB, Gómez ZC, Gómez ZD, Gómez ZE, Gómez ZF, Gómez ZG, Gómez ZH, Gómez ZI, Gómez ZJ, Gómez ZK, Gómez ZL, Gómez ZM, Gómez ZN, Gómez ZO, Gómez ZP, Gómez ZQ, Gómez ZR, Gómez ZS, Gómez ZT, Gómez ZU, Gómez ZV, Gómez ZW, Gómez ZX, Gómez ZY, Gómez ZZ.

- their seasonality. *Hydrol Earth Syst Sci* 25(6): 3577-3594.
- Scherer M, Diffenbaugh NS. 2014. Transient twenty-first century changes in daily-scale temperature extremes in the United States. *Clim Dyn* 42(5): 1383-1404.
- Sui Y, Lang X, Jiang D. 2014. Time of emergence of climate signals over China under the RCP4.5 scenario. *Clim Change* 125(2): 265-276.
- Sung HM, Kim J, Shim S, Seo J-B, Kwon S-H, Sun M-A, Byun Y-H. 2021. Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6 Model Based on New GHGs Concentration Pathways. *Asia-Pac J Atmos Sci* 57: 851-862. doi:10.1007/s13143-021-00225-6
- Sutton R, Suckling E, Hawkins E. 2015. What does global mean temperature tell us about local climate?. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 373(2054): 20140426. doi:10.1098/rsta.2014.0426
- Tebaldi C, Knutti R. 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 365(1857): 2053-2075. doi:10.1098/rsta.2007.2076
- Tebaldi C, Debeire K, Eyring V, Fischer E, Fyfe J, Friedlingstein P, Knutti R, Lowe J, O'Neill B, Sanderson B, Vuuren D, Riahi K, Meinshausen M, Nicholls Z, Tokarska KB, Hurtt G, Kriegler E, Lamarque J-F, Meehl G, Moss R, Bauer SE, Boucher O, Brovkin V, Byun Y-H, Dix M, Gualdi S, Guo H, John JG, Kharin S, Kim YH, Koshiro T, Ma L, Olivie D, Panickal S, Qiao F, Rong X, Rosenbloom N, Schupfner M, Séférian R, Sellar A, Semmler T, Shi X, Song Z, Steger C, Stouffer R, Swart N, Tachiiri K, Tang Q, Tatebe H, Voldoire A, Volodin E, Wyser K, Xin X, Yang S, Yu Y, Ziehn T. 2021. Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst Dyn* 12(1): 253-293. doi:10.5194/esd-12-253-2021
- Zappa G, Bevacqua E, Shepherd TG. 2021. Communicating potentially large but non-robust changes in multi-model projections of future climate. *Int J Climatol* 41(6): 3657-3669.