

대기질 개선 정책에 따른 동아시아 기후변화 반응 분석

성현민*† · 이재희** · 김지선** · 심성보*** · 장필훈**** · 변영화****

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원,

기상청 기후변화감시과 사무관, *국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관

A study on the climate responses of East Asia due to air quality controls under climate change scenarios

Sung, Hyun Min*† · Lee, Jae-Hee** · Kim, Jisun** · Shim, Sungbo*** · Chang, Pil-Hun**** and Byun, Young-Hwa****

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

**Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

***Deputy Director, Climate Change Monitoring Division, KMA, Daejeon, Korea

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

ABSTRACT

This study investigates the impact of air quality controls on climate change in East Asia by analyzing two scenarios (SSP3-7.0 and SSP3-7.0-lowNTCF) provided by the AerChemMIP (Aerosols and Chemistry Model Intercomparison Project). The comparative analysis reveals that improvements in air quality are anticipated to result in further increases in both the annual mean temperature (+0.24K) and the frequency of the warmest day (TX90p; 7.7 additional days) by the mid-21st century (2045 ~ 2054) compared to the present-day climate (1995 ~ 2014). Similarly, the annual mean precipitation and extreme precipitation amount (R95p) are projected to increase by approximately 3.27% and 11.40% in mid-21st century, respectively. This implies that the air quality controls could potentially increase hydrological risks in the East Asia region. Therefore, it is essential to consider the potential negative impacts of environmental policies on the climate system during the policymaking process. Additionally, our results show clear evidence that the additional increases of mean and extreme temperature are primarily driven by fast response to reductions in NTCF (near-term climate forcer) emission. Furthermore, the horizontal distribution of additional warming is influenced by the local distribution of NTCF reductions over East Asia region. In contrast to temperature, the primarily climate responses of precipitation increases exhibit significantly depending on region. These findings reveal that the impacts of environmental policies on the climate system are nonlinear. Consequently, continuous research is essential, and this study is anticipated to serve as a valuable reference for further research and policy formulation.

Key words : Near-Term Climate Forcer, Air Quality Control, Environment Policy, Fast Response, Slow Response

1. 서론

전 세계적으로 산업화와 도시화가 진행되면서 대기질 문제가 심각한 환경 및 보건 리스크로 이슈화되고 있다. 주요 영향을 미치는 물질은 단기 기후인자(Near-Term Climate Forcers; NTCF)로서, 에어로졸(황산염, 유기탄소,

암모늄염 등) 및 오존과 이들의 전구물질(아황산가스, 질소산화물, 일산화탄소 등)들을 포함한다. NTCF는 대기 중에 체류하는 시간이 비교적 짧고, 단기적인 기후 및 대기질 변화에 복합적인 영향을 미치기 때문에 중요한 물질이다(Myhre et al., 2013). 특히, 공간적으로 불균일한 특성을 가지기 때문에, 지역의 배출량 차이에 따라 기후시스

†Corresponding author : sunghm122@korea.kr (National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6784)

ORCID 성현민 0000-0003-3120-7912 심성보 0000-0002-3533-5818
이재희 0000-0003-3227-923X 장필훈 0000-0003-1665-1273
김지선 0000-0002-8238-3521 변영화 0000-0002-6074-4461

템에 미치는 영향이 상이하게 발생한다고 알려져 있다 (Liao et al., 2015; Shindell et al., 2015). 또한, 지역별 배출량을 감축할 경우, 비교적 빠르게 효과를 볼 수 있어 대기질 개선을 목표로 하는 환경정책들은 NTCF 배출량 감소에 초점을 맞추고 있다(Forster et al., 2021).

최근 승인된 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernment Panel on Climate Change; IPCC)의 제 6차 평가보고서(Assessment Report; AR6)에 따르면, 산업혁명 이후의 NTCF 배출에 의한 유효복사강제력은 총괄적인 관점에서 음의 효과를 가진다고 보고되었다. 따라서, 대기질 개선(NTCF 감축)에 의한 순 온난화 효과는 미래의 지표 기온을 증가시킬 수 있고, 그에 따른 극한 고온의 강도와 출현 빈도를 크게 증가시킬 수 있다(Hienola et al., 2018; Lelieveld et al., 2019; Luo et al., 2020; Samset et al., 2018; You et al., 2020). 또한, 유효복사강제 효과에 의한 대류권 열 반응은 동아시아/남아시아의 여름몬순에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 기온 뿐만 아니라 강수에서도 지역에 따라 상이한 영향을 준다(Li et al., 2022; Mu and Wang, 2021; Richardson et al., 2016; Scannell et al., 2019; Zanis et al., 2020). 이러한 선행연구 결과들은 대기질 개선에 의한 기후변화 영향이 중요하다는 것을 의미한다(Wilcox et al., 2020). 현재의 주요 배출은 중국, 인도, 유럽 등의 인구 밀집 지역에 집중되어 있으며, 대부분의 동아시아 국가들은 대기질 개선정책을 적극적으로 추진하고 있다. NTCF는 대기오염과 기후변화에 모두 영향을 주기 때문에, 이를 감축하는 정책은 두 종류의 문제에 영향을 미치는 잠재력을 가진다. 따라서, NTCF 배출 감축에 따른 지역별 기후 반응을 이해하는 것은 지속 가능한 환경 정책 수립에 필수적이며, 더 나아가, 기후변화 억제를 위해 노력 중인 국제사회의 동향을 고려한다면, 탄소 중립 미래사회에서의 더 깨끗한 공기에 대한 수요 증가는 과학정보의 필요성을 증가시킬 것이다(Allen et al., 2020; Clarke et al., 2018; Fiore et al., 2015; Shindell et al., 2015; Szopa et al., 2021; Wilcox et al., 2020).

하지만, 관련 선행연구들은 이상적인 가정(e.g. 배출량을 즉시 제거)을 활용한 연구이거나 에어로졸 및 화학반응 전구물질의 단순화(Armet et al., 2009) 또는 소수의 기후모델 분석(Kirtman et al., 2013)을 기반하기 때문에, NTCF가 가까운 미래기후에 미치는 영향을 정량화하기에는 불확실성을 많이 내포하고 있다. Coupled Model Intercomparison Project(CMIP6)에서는 전지구 및 지역 규모에서의 다양한 대기화학적 구성요소의 변화와 기후변

화의 상호작용을 더욱 명확하게 할 수 있는 에어로졸 및 화학 모델 비교 프로젝트(The Aerosol and Chemistry Model Intercomparison Project; AerChemMIP, Collins et al., 2017)가 추진되었다. 또한, 기후시스템의 여러 요소들(대기, 해양, 육지, 생지화학순환 등)의 결합을 보다 종합적으로 고려하는 지구시스템모델을 이용하여 세계 각국의 모델링 센터에서 CMIP6에 참여했기 때문에, AerChemMIP의 앙상블 자료를 활용한 NTCF의 영향연구는 개선된 과학적 근거를 제공할 수 있다(Allen et al., 2020; O'Connor et al., 2021; Turnock et al., 2019; Zanis et al., 2022). 이를 배경으로, 본 연구에서는 UKESM1 모델을 통해 AerChemMIP의 실험을 수행한 결과와 국제자료공유센터에서 제공되는 CMIP6 다중모델 앙상블을 활용하여 대기질 개선 정책(NTCF 배출감소)이 동아시아 지역의 기후변화에 미치는 영향에 대한 정량적 분석을 시도하였다. 또한, 한반도를 포함한 동아시아 지역 중심의 분석을 통하여, 전지구 규모에 초점이 맞춰져 있는 커뮤니티의 연구동향을 보완하고자 하였다. 평균기온과 평균강수량 뿐만 아니라 극한기후지수 기반의 근미래 전망에 대한 분석도 수행하였다. 2장에서는 AerChemMIP 자료와 분석방법에 대한 자세한 설명을 기술하였다. 또한, 3장에서는 분석결과를 보였고, 결론을 4장에 제시하였다.

2. 자료 및 연구 방법

2.1. 대기질 개선 시나리오에 적용된 NTCF 변화전망

IPCC AR6 대응을 위해 개발된 신규 온실가스 농도 경로인 공통사회경제경로(SSPs; Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오는 다양한 수준의 대기질 개선정책을 포함하고 있다. 먼저, 중간 강도의 대기질 개선은 21세기 내에 기술적으로 최대한 감축이 가능한 수준(약 75% 감축)까지 개선하는 내용을 포함하고 있다. 약한 강도의 대기질 개선은 정책의 운용이 2050년 이후로 지연되는 미래 사회를 나타내고, 강한 강도의 대기질 개선(SSP1 수준)은 최대감축노력이 2030년 이전에 시작되는 미래 사회를 담고 있다(Rao et al., 2017). AerChemMIP에서는 탄소감축정책이 없고, 약한 대기질 개선정책을 가지고 있는 SSP3-7.0 시나리오가 기준 시나리오로 활용되고 있으며, 강한 대기질 개선 정책을 가지고 있는 SSP3-7.0-lowNTCF 시나리오(대기질 개선 시나리오; Gidden et al., 2019)가 비교실험으로 수행되었다(Collins et al., 2017). 기준 시나리오와 대기

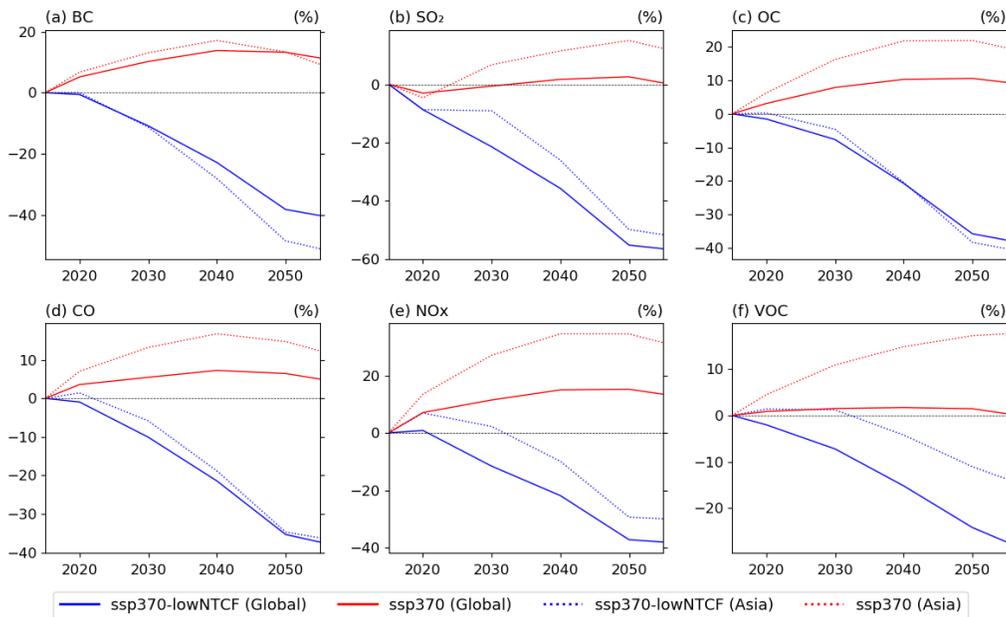


Fig. 1. Time series of global (solid line) and Asia (dotted line) average emissions of (a) BC (black carbon), (b) SO₂ (sulfur dioxide), (c) OC (organic carbon), (d) CO (carbon monoxide), (e) NO_x (nitrogen oxides), and (f) VOC (volatile organic compounds) from 2015 to 2054 under SSP3-7.0(red) and SSP3-7.0-lowNTCF(blue) scenarios. Y-axis indicates the percent change of NTCF mitigation (Collins et al., 2017; Gidden et al., 2019).

질 개선 시나리오는 SSP3의 사회경제 미래전망이 동일하게 적용된 시나리오로서, 두 시나리오의 비교를 통해 나타나는 기후상태나 대기질의 차이는 시나리오에 포함된 온전히 대기질 개선정책의 결과라고 설명할 수 있으며, 대기질 개선 시나리오에서의 전망에서 기준 시나리오의 전망을 뺀 값으로 그 효과를 정의할 수 있다(Collins et al., 2017; Gidden et al., 2019).

Fig. 1은 2014년 대비 시나리오에 따른 2055년까지 NTCF 배출량 변화의 시계열이며, 전지구 및 동아시아 지역에 대한 평균값을 각각 실선과 점선으로 보여준다. 이 배출량 자료는 AerChemMIP 실험을 위해 제공되는 입력 강제력이며, 10년 단위의 월별 값이 국제자료공유센터에 제공되고 있다. 약한 대기질 정책을 따르면, 2055년까지 SO₂를 제외한 NTCF의 배출량이 약 5~10% 정도 증가하며, 아시아 지역에서는 2배(약 10~20%) 정도 증가한다. 반면, 강한 대기질 정책을 따르면, 2055년까지 전지구적으로 모든 NTCF 배출량의 약 40~55%정도를 감축시키며(VOC는 약 30% 감소), 아시아 지역에서도 전지구와 유사한 비율로 감축한다.

2.2. CMIP6 모델자료 및 분석방법

시나리오의 종류에 따른 기후변화는 2030년 이후부터 뚜렷해지기 시작하고(Sung et al., 2021), SSP3-7.0과 대기질 개선 시나리오는 AerChemMIP의 실험체계를 기반으로 2055년까지만 자료가 산출되어 있는 부분을 고려하여, 본 연구에서는 2045년부터 2054년의 기간을 중미래로 정의하고 대기질 개선 정책이 이행될 경우, 현재기후(1995~2014년) 대비 동아시아 기후변화 전망에 대해 분석하였다. 이 방법은 관련 선행연구(Allen et al., 2020)에서 검증된 방법이며, 분석 결과는 관련 정책 이행을 위한 신뢰성 있는 과학적 근거로 활용할 수 있다. 국제자료공유센터에서 일 단위 기온과 강수량의 다운로드가 가능한 6개의 모델과 UKESM1을 직접 수행한 총 7개 모델 자료를 이용하여 CMIP6 다중모델 앙상블을 분석에 사용하였다(Table 1). 선행연구(Lee et al., 2021)에 따르면, 본 연구의 분석에 사용된 7개의 CMIP6 모델은 ERA5 (ECMWF ReAnalysis version 5) 재분석자료를 기준으로 현재기후에 대한 모의성능을 평가하였을 때, 평균기온과 평균강수량

의 공간 패턴의 상관계수가 0.9 이상, 극한지수에 대한 테일러 기능 평점(Skill Score)이 0.8 이상으로 우수한 평가 결과를 가진 모델이다. CMIP6 모델의 각각 다른 격자자료의 불확실성을 줄이기 위하여, 모든 모델 자료를 UKESM1의 수평 해상도로 내·외삽 하여 평균기온과 평균강수량을 분석하였다. 또한, 극한기후의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 ETCCDI (Expert Team for Climate Change Detection and Indices) 중 상위 10퍼센타일 이상의 일 최고기온이 나타난 연중 일수를 나타내는 극한고온지수 TX90p (온난일; day)와 상위 5퍼센타일의 강수량을 나타내는 극한강수지수인 R95p (mm)를 선정하였으며(Table 2), Iturbide et al. (2020)에서 제안한 IPCC Atlas 영역 중 동아시아(East Asia, EAS)를 포함하여 티벳고원(Tibetan-Plateau, TIB), 남아시아(SouthAsia, SAS), 동남아시아(SouthEastAsia, SEA), 중앙아시아 동부지역(Eastern Centra Asia, ECA)의 5개 지역을 분석에 사용하였다(Fig. 2).

외부 강제요인들(ex. NTCF)에 대한 기후 반응은 빠른 반응과 느린반응의 조합으로 개념화될 수 있다. 빠른반응(Fast response)은 대기 복사 가열과 구름형성, 대기 순환의 변화와 관련되며, 몇 일에서 몇 개월 이내에 발생할 수 있다. 반면, 느린반응(Slow response)은 해수면 온도의 변화와 같은 장기적인 기후 피드백을 포함하며 몇 년에 걸쳐서 진행될 수 있습니다. 일반적으로 느린 구성요소가 기후시스템에 지배적인 영향을 미치지만, 동아시아 지역의 NTCF 배출변화에 따른 기후반응은 공간적, 시간적 특성에 의존적인 경향이 강하기 때문에 전체반응을 두 가지

로 나누어서 분석하는 방법은 연구커뮤니티에서 널리 사용되고 있는 방법이다(Allen and Sherwood, 2011; Ganguly et al., 2012; Hansen et al., 2005; Shindell et al., 2015; Yang et al., 2022). 따라서, 본 연구에서는 SSP 시나리오의 대기질 개선정책에 기반한 NTCF의 변화가 동아시아 지역의 기후반응에 기여한 정도를 빠른반응과 느린반응으로 구분하여 정량분석을 시도하였다. 이러한 연구 결과는 정책연구 커뮤니티에서 배출이 많은 지역의 기후변화 완화와 대기질 개선의 균형성 있는 정책방안을 마련하는 데 실효성 있는 과학정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

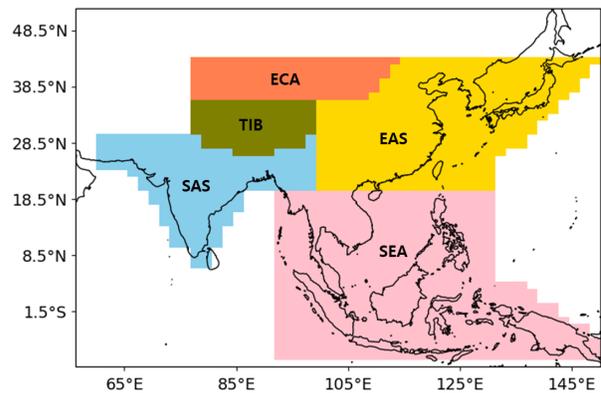


Fig. 2. IPCC Atlas regions in Asia regions adopted from Iturbide et al. (2020)

Table 1. Summary of CMIP6 models used in this study

	Model name	Institute	No. of grids
1	CESM2-WACCM	National Center for Atmospheric Research, USA	192×288
2	CNRM-ESM2-1	The CNRM/CERFACS modelling group, France	128×256
3	EC-Earth3-AerChem	Consortium of various institutions from EU	256×512
4	GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA	180×288
5	GISS-E2-1-G	The NASA Center for Climate Simulation, USA	90×144
6	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan	160×320
7	UKESM1	Met Office Hadley Center, UK	192×144

Table 2. Definitions of the temperature and precipitation extreme climate indices used in this study

Index Name	Index Definition	Unit
Warm days (TX90p)	The number of days when daily maximum temperature > 90th percentile	day
Total wet-day precipitation (R95p)	Annual total precipitation when daily precipitation > 95th percentile	mm

3. 결과

3.1. 동아시아 평균기온과 강수량 변화

Fig. 3은 현재기후 대비 각 시나리오에서 나타난 중미래의 동아시아 평균기온과 강수량 변화의 공간분포를 나타낸 그림이다. 현재기후 대비 SSP3-7.0에서의 중미래 평균기온은 약 1.64K 상승할 것으로 나타났고, 대기질 개선 시나리오에서는 약 1.88K의 평균기온 상승이 전망되었으며, 고위도 지역으로 갈수록 상승폭이 커지는 경향이 나타났다(Fig. 3a, 3b). Fig. 3c는 SSP3-7.0-lowNTCF의 기온상승과 SSP3-7.0의 기온상승 간 차이를 나타내는 그림이며, 대기질 개선정책의 강도가 강해지면, 동아시아 지역의 평균기온은 약 0.24K 더 상승함을 보여준다. 이 비교결과는 동아시아에 위치한 국가들의 대기질 개선이 온난화를 심화시킬 수 있음을 의미한다(Samset et al., 2018). 분석영역을 IPCC Atlas에서 제시된 세부지역을 적용하여 살펴보면(Table 3), SEA 지역에서 상승폭(약 0.18K)이 동아시아 평균 상승폭 보다 낮은 값이 나타났는데, 이는 SEA 지역이 해양을 많이 포함하고 있기 때문이라고 할 수 있

다. 하지만, SEA 지역과 유사하게, 해양을 포함하고 있는 EAS 지역(약 0.30K)에서는 중국 중부지역의 높은 상승폭(0.4K 이상)의 영향으로 동아시아 평균보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 3c를 통해 동아시아 전체적인 기온상승에 통계적 유의성을 가짐을 확인할 수 있다. 평균기온의 추가 상승이 지역마다 다르게 나타나는 것(세부지역 내에서도 불균일한 수평분포를 보임)은 NTCF 배출량 변화의 공간적 분포의 영향으로 해석할 수 있으며, 관련된 내용은 3.3절에 기술하였다.

Fig. 3d, 3e, 3f는 시나리오에 따른 동아시아 중미래 평균강수량의 변화와 시나리오 간 차이를 보여준다. SSP3-7.0 시나리오에서는 현재기후 대비 중미래 기간의 평균강수량이 약 4.04% 증가할 것으로 전망되며, 기온상승에 따라 1~3%/K 정도의 비율로 상승한다는 선행연구 결과들과 유사함을 확인할 수 있다(Held and Soden, 2006; Sung et al., 2021). 대기질 개선 시나리오에서는 약 7.31%의 증가가 전망되며, 추가적인 기온상승과 연계되어 동아시아 지역의 평균강수량이 증가함을 확인하였다(Table 3). 이는 선행연구의 결과(Samset et al., 2018)와 유사한 증가량이지만, 공간적으로 중미래의 평균강수량의

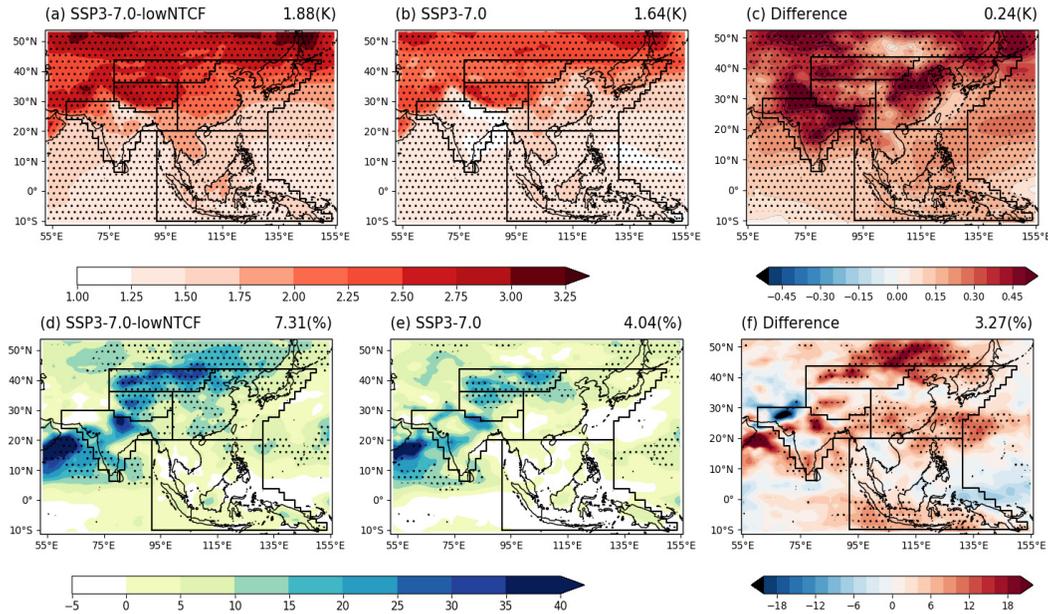


Fig. 3. Spatial patterns of changes in surface temperature (units: K) and precipitation (units: %) during 2045 ~ 2054 relative to 1995 ~ 2014 under the (a, d) SSP3-7.0-lowNTCF and (b, e) SSP3-7.0 scenarios, and (c, f) their difference (SSP3-7.0-lowNTCF minus SSP3-7.0) caused by the NTCF reductions. The dotted areas indicate 95% confidence interval

Table 3. Projected changes in mean surface temperature (units: K) and precipitation (units: %) during 2045 ~ 2054 relative to 1995–2014 under two scenarios (SSP3–7.0 and SSP3–7.0–lowNTCF) and their difference in five IPCC Atls regions

		ASIA	TIB	EAS	SAS	SEA	ECA
Temp. (K)	SSP3-7.0-lowNTCF	1.88	2.58	2.10	1.78	1.56	2.51
	SSP3-7.0	1.64	2.25	1.81	1.38	1.39	2.16
	Difference	0.24	0.33	0.29	0.40	0.18	0.35
Precip. (%)	SSP3-7.0-lowNTCF	7.31	15.65	8.70	11.73	1.63	22.68
	SSP3-7.0	4.04	11.69	3.45	8.56	-1.12	15.39
	Difference	3.27	3.96	5.25	3.17	2.75	7.29

증가가 약 10% 정도 이상인 지역에서만 통계적 유의성이 나타났다(Fig. 3d, 3e). 대기질 개선의 영향으로 추가 상승한 평균기온(약 0.24K; Table 3)과 평균기온 상승에 따라 예상되는 평균강수량의 증가비율(약 1~3%/K)을 고려하면, 대기질 개선의 영향으로 발생할 수 있는 평균강수량의 증가는 약 1% 내외이다. 하지만, 대기질 개선 시나리오에 따른 강수의 증가(약 3.27%; Table 3)는 동아시아 지역의 강수증가율이 전지구보다 큰 것을 고려하더라도, 더욱 큰 증가가 나타남을 보여준다. 또한, Fig 3f를 살펴보면, 북위 20~30도 지역을 중심으로 강수가 증가하고, 북위 20도 이하의 남중국해 및 북서태평양 지역에서 강수가 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 동아시아 몬순밴드의 이동(북향)에 따른 영향으로 볼 수 있다(Fig. S1). 이러한 분석결과는 대기질 개선이 동아시아 지역의 몬순변화를 유도하였고, 그에 따라 강수가 증가하였다고 해석할 수 있다(Bond et al., 2013; Shi et al., 2019; Stjern et al., 2017). 결과적으로 동아시아 지역에서 몬순변화에 따른 수문학적 지역 리스크를 감안할 경우, 대기질 개선 정책이 부정적인 영향을 유발할 수도 있음을 시사한다.

3.2. 동아시아 극한기온과 강수량의 변화

Fig. 4a~4c는 온난일(상위 10퍼센타일 이상의 일 최고기온이 나타난 연중 일수; 2.2절)의 공간분포와 대기질 개선에 따른 동아시아 지역의 온난일 발생 차이를 보여준다. 두 시나리오에서 나타난 중미래 기간의 온난일 발생은 현재기후 대비 약 57.99일(대기질 개선 시나리오), 50.28일(SSP3-7.0) 증가하는 것으로 나타났고, 전반적으로 95% 신뢰수준의 통계적 유의성이 있음을 확인할 수 있다. 시나리오에 따른 온난일 증가의 공간분포 경향은 평균기온의 상승 경향과 다르게, 저위도 지역(e.g. SEA 지역)에서의 온난일 증가폭이 대륙에 비해 약 4배 정도 큰

것으로 나타났다. 기온 변동성이 작은 저위도 지역의 특성으로 인해 시나리오에 따라 평균기온이 증가하게 되면, 현재 기후에서의 상위 10퍼센타일 기준에 해당되는 온난일은 크게 증가하기 때문이다. 대기질 개선정책이 시행될 경우, 동아시아의 평균 온난일은 약 7.7일 정도 증가할 것으로 나타났고, SEA의 남부지역(e.g. 인도네시아 등)이 EAS, SAS 지역에 비해 2배 이상 온난일이 증가할 것으로 전망된다(Table 3). 반면에, 중국남부지역과 인도-차이나 반도지역에서는 대기질 개선에 따른 온난일 추가 발생이 주변지역보다 작거나 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 4c).

Fig. 4d~4f는 시나리오에 따른 상위 5퍼센트의 극한강수량의 중미래 전망과 대기질 개선으로 변화하는 극한강수량의 공간분포를 보여준다. 두 시나리오에서 나타난 중미래 기간의 상위 5퍼센타일 극한강수량은 현재 기후 대비 약 33.8%(대기질 개선 시나리오), 22.4%(SSP3-7.0) 증가하는 것으로 나타났고, 일부 지역에서만 95% 신뢰수준의 통계적 유의성이 있음을 확인할 수 있다. 평균강수량의 중미래 전망과 유사한 공간분포가 나타나며, 극한기온의 분포와는 다르게, 극한강수량 증가율은 지역적으로 변동성이 크게 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 4d, 4e). 대기질 개선에 의한 극한강수량 변화는 동아시아에서 약 11.4% 증가하는 것으로 전망되었고(Fig. 4f), 모델별 공간분포와 극한강수량의 증가폭은 극한기온에 비해 다소 차이를 보였다(not shown). 또한, Fig. 3f와 비교를 통해 대기질 개선에 따른 평균강수량과 극한강수량 변화는 유사한 공간분포를 가짐을 확인할 수 있다. 온실가스 배출이 증가함에 따라 동아시아 지역에서 현재기후 대비 강한 극한강수의 발생이 증가한다는 선행연구(Sun et al., 2022; Wang et al., 2016) 결과를 고려하면, Fig. 3f와 4f에서 확인된 유사한 공간분포는 대기질 개선이 평균 강수량의 증가를 유발함에 따라 결과적으로 극한강수의 강도가 강해짐을 시사

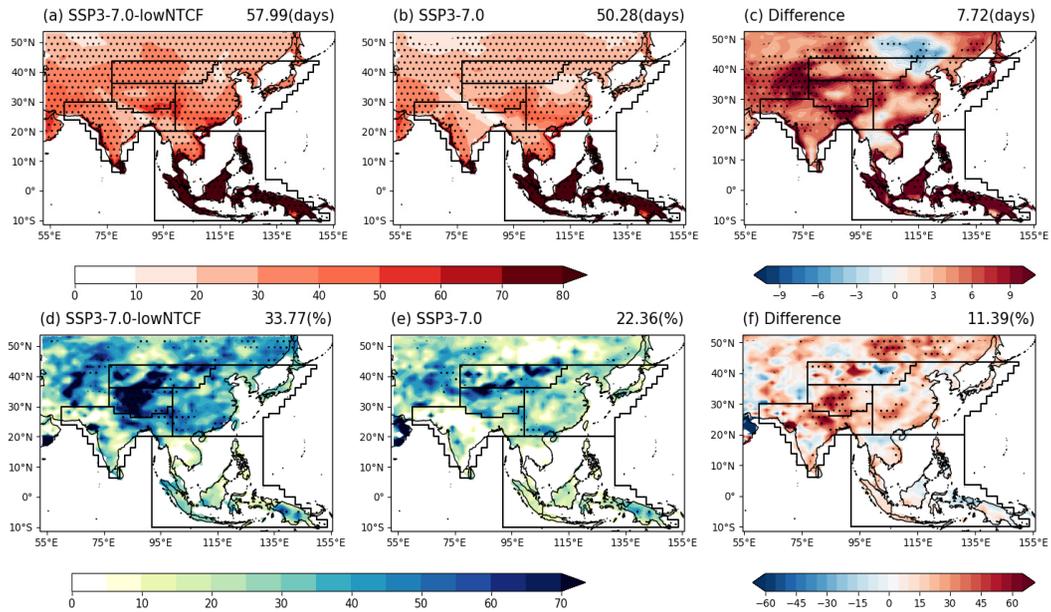


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for (a,b,c) extreme temperature (TX90p) and (d,e,f) extreme precipitation

한다. 결과적으로 대기질 개선이 동아시아 지역 수문학적 리스크의 잠재 위험성을 높이는 방향으로 영향을 줄 수 있기 때문에, 환경정책이 기후시스템에 미치는 부정적인 영향력을 정책 수립 과정에서 고려해야 할 필요가 있다.

3.3. 대기질 개선에 따른 기후시스템의 반응 분석

Fig. 5a는 대기질 개선이 동아시아 지역의 평균기온 증가에 미치는 영향에 대한 전체 반응(Total Response)을 보여준다. 빠른 반응(Fig. 5b)과 느린 반응(Fig. 5c)의 공간분포를 비교해보면, 빠른 반응이 평균기온 증가를 유도하는 주요 메커니즘이라고 할 수 있으며, 해당 지역의 에어로졸 변화에 따른 복사강제력의 변화는 빠른 반응에 의한 단파복사의 변화가 큰 영향을 미친다는 선행연구도 있다(Xie et al., 2023). 또한, 대기질 개선 시나리오에 적용된 NCTF 배출감소의 공간분포를 고려하면, 해당 지역에서 BC의 배출감소(냉각효과)와 SO₂, OC, NO_x의 배출감소(온난효과)에 따른 빠른 반응이 결과적인 온난효과를 유발하였음을 확인할 수 있다. 이는 중국 동부지역에서 BC, OC, SO₂의 배출 변화가 지면에 도달하는 단파복사 강제력의 변화를 일으켜서 온난효과를 유도하며, 특히, SO₂의 배출감소가 지면기온의 상승에 큰 영향을 미친다는 선행 연구들과 같은 맥락이다(Baker et al., 2015; Kasoar et al.,

2016; Xie et al., 2023; Zanis et al., 2020). Fig. 5d~5f는 온난일 증가에 미치는 영향에 대한 전체 반응, 빠른 반응, 느린 반응을 보여주며, 대부분 지역에서 빠른 반응이 많은 영향력을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 5e). 하지만, 주변 지역 대비 온난일 발생이 크게 증가한 TIB와 SEA 지역에서는 느린 반응이 주도적으로 나타났다(Fig. 5f). 이 지역에서의 NCTF 배출 변화가 느린 반응을 통해 상대습도와 운량을 변화시키고, 복사강제력의 변화(단파복사 반사와 장파복사 흡수)와 온난효과를 유도한다는 선행연구가 있다(Hill et al., 2018; Shukla et al., 2009). 특히, TIB 지역은 높은 고도에 위치하고 있고, SEA 지역은 주변에 해양이 많이 분포하기 때문에 로컬지역의 NCTF 배출감소에 따른 느린 반응이 타 지역에 비해 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다(95% 신뢰구간의 통계적 유의).

Fig. 6은 대기질 개선에 따른 평균강수량과 극한강수량의 증가에 대한 전체 반응, 빠른 반응과 느린반응을 보여주는 그림이다. Fig. 6b와 6c, Fig. 6e와 6f를 비교해보면, 기온과 다르게, 평균 강수량의 변화에 대한 빠른 반응과 느린 반응은 서로 반대 부호의 경향성을 보여준다. 특히, SAS와 SEA 지역에서 반대 부호의 반응이 뚜렷하며, TIB와 EAS(중국 동부_ 지역에서도 동일한 경향성이 나타났다. 이는 중위도 지역이 온난 또는 냉각효과를 가지는 NCTF 타입의 지역별 변화에 따라 강수의 증감 경향성이

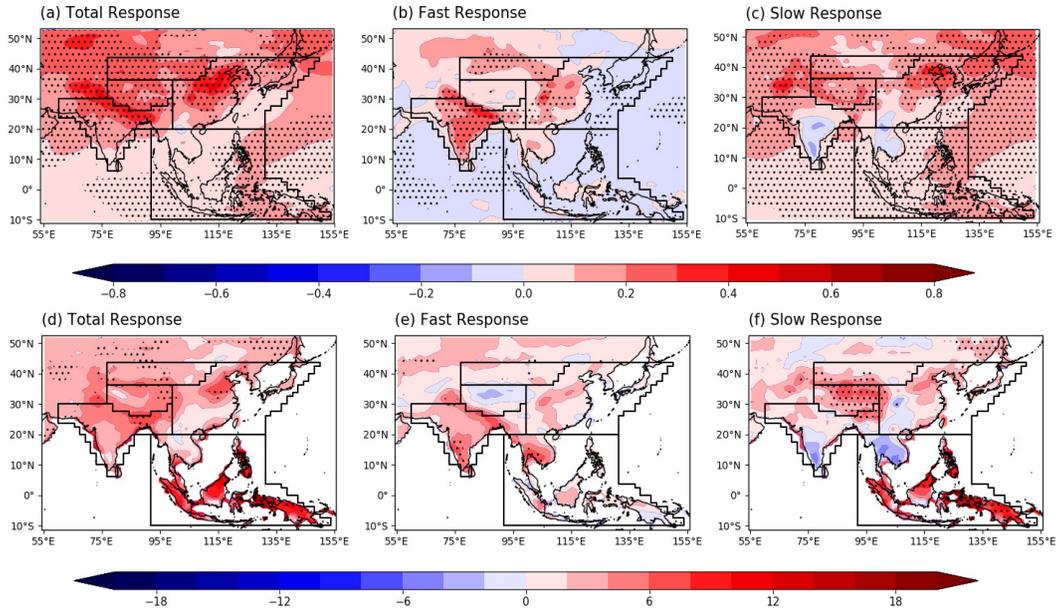


Fig. 5. The total response (a and d), fast response (b and e), and slow response (c and f) of mean surface temperature (upper panel) and TX90p (lower panel) in analysis region. The dotted areas indicate significance at $\geq 95\%$ confidence level from the t-test

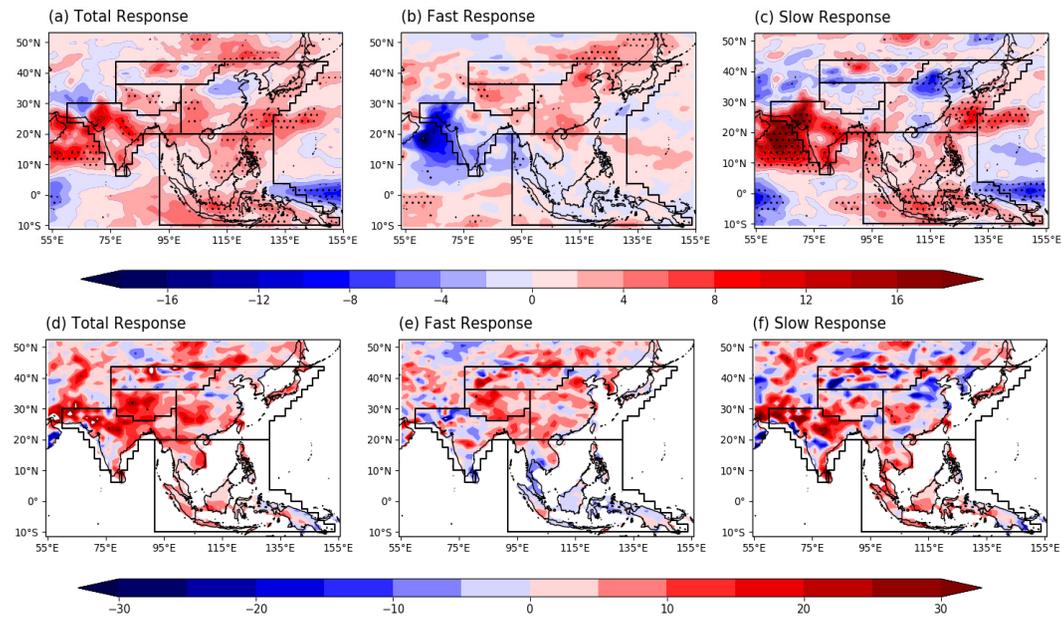


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for mean precipitation (upper panel) and R95p (lower panel)

다르게 변화하기 때문이다(Chemke and Dagan, 2018; Johnson et al., 2019; Shaw and Voigt, 2015; Zhang et al., 2016). 대기질 개선에 따라 평균강수량(Fig. 3f)이 증가하는 지역에서 전체 반응이 크게 나타남을 확인할 수 있고

(Fig. 6a), 중국 남부지역에서는 빠른 반응이 주요 영향이지만, 아라비아 해, 동중국해 및 남반구 적도지역에서는 느린 반응이 강수 메커니즘의 변화를 주도하는 것을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 AerChemMIP에서 제공되는 SSP3-7.0 시나리오와 SSP3-7.0-lowNCTCF 시나리오를 기반으로 대기질 개선정책(NCTF 배출감소)이 동아시아 기후변화에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 분석을 위해 UKESM1 모델을 이용하여 실험을 수행하였고, 국제공유센터에서 제공되는 6개의 모델자료를 활용하여 총 7개의 앙상블을 구성하였다. 현재기후(1995~2014년) 대비 중미래(2045~2054) 기간의 평균기온과 평균강수량 및 온난일(TX90p)과 상위 5% 극한강수량(R95p) 미래전망을 비교하였으며, 대기질 개선정책에 따른 기후시스템의 빠른 반응, 느린 반응과의 비교를 통해 연관성을 분석하였다.

두 시나리오의 분석 결과에 따르면, SSP3-7.0시나리오에서의 대기질 개선정책은 중미래의 동아시아 평균기온과 온난일(극한고온현상)을 현재기후 대비 각각 약 0.24K, 7.7일정도 추가 상승(증가)시킬 것으로 전망된다. 이는 대기질 개선정책이 동아시아의 온난화를 심화시키고, 폭염과 같은 극한고온현상의 더욱 빈번한 발생에 영향을 미칠 것을 의미한다. 또한, SSP3-7.0 시나리오에서의 중미래 평균강수량과 상위 5% 극한강수량은 대기질 개선정책의 영향으로 각각 약 3.27%, 11.39% 정도 추가 증가할 것으로 전망된다. 선행연구들의 결과에 따르면, 전지구 평균강수량과 극한강수량은 온난화에 따라 약 1-3%/K, 약 7%/K 정도 상승하는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서 나타난 대기질 개선에 따른 추가 온난화와 추가 강수량을 비교해보면, 대기질 개선에 따른 동아시아의 강수량의 변화경향은 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 분석결과는 동아시아 지역은 NCTF 배출이 가장 많은 지역이기 때문에 관련 정책의 효과가 전지구 대비 더욱 뚜렷하게 나타날 뿐만 아니라, 다른 기후요소에 미치는 영향도 크게 나타나므로 과학적 근거에 기반한 정책 수립과 이행이 필요함을 시사한다.

대기질 개선정책에 따른 추가적인 온난화의 공간분포 변화를 비교해보면, 평균기온과 극한기온의 상승이 나타난 지역은 서로 다른 경향을 나타냈다. 평균기온 추가 상승을 빠른 반응과 느린 반응으로 나누어 살펴보면, 빠른 반응이 동아시아의 추가적인 온난화를 유도하는 주요 메커니즘임을 확인할 수 있다. 동아시아 로컬지역에서의 BC 배출감소(냉각효과)와 SO₂, OC, NO_x의 배출감소(온난효과)가 빠른 반응을 통해 단파복사 강제력의 변화를 유도하고, 결과적인 온난효과가 나타났다고 해석할 수 있

다. 또한, 평균기온의 추가 상승이 불균일한 수평분포를 보이는 결과도 NCTF의 배출감소의 지역적 분포에 따라 온난효과가 나타났음을 뒷받침한다. 하지만, 대기질 개선 정책에 따른 온난일의 추가 상승은 TIB와 SEA 지역을 중심으로 느린 반응이 주도적으로 나타났다. 이는 선행연구들의 결과와 비교해보면, NCTF의 배출감소가 느린 반응을 통해 상대습도와 운량을 변화시키고, 복사강제력의 변화(단파복사 반사와 장파복사 흡수)와 온난효과를 유도한 결과라고 유추할 수 있다. 대부분 높은 고도의 지형인 티벳고원과 섬으로 이루어진 동남아시아 지역의 특성이 이러한 해석을 뒷받침한다(95% 신뢰구간의 통계적 유의). 종합해보면, 기온요소의 강도와 빈도 특성은 각각 빠른 반응과 느린 반응에 많은 영향을 받음을 확인할 수 있다. 하지만, 기온과는 다르게, 대기질 개선 정책에 따른 평균과 극한강수량의 증가는 유사한 공간분포를 보였다(기온 상승의 공간분포와는 다른 경향을 보임). NCTF 배출감소에 따른 평균 강수량의 변화는 느린 반응이 크게 나타나는 지역에서 95% 신뢰구간에서의 통계적 유의성을 확인하였고, 이는 동아시아 몬순 강수대의 이동(Fig. S1)에 따른 강수증가의 영향임을 확인하였다. 하지만, 중국 남부지역에서는 빠른 반응, 아라비아 해 및 남반구 적도지역에서는 느린 반응이 강수량의 변화와 연관성이 있는 것으로 나타남을 통해 대기질 개선에 따른 지역별 강수 메커니즘의 변화는 다르다는 것을 확인하였다. 온난화가 진행된 미래에는 현재 기후 대비 극한강수의 강도가 증가할 것이고, 대기질 개선 정책의 효과가 더해지면 그 경향성은 가속화될 것이다. 이는 대기질 개선 정책의 시행이 동아시아 지역 수문학적 리스크의 잠재 위험성을 높이는 방향으로 영향을 줄 수 있다는 것을 의미하기 때문에, 환경정책이 기후시스템에 미치는 부정적인 영향력을 정책 수립 과정에서 고려해야 할 필요가 있다.

본 연구 결과를 통해 SSP3-7.0 시나리오에 따른 온난화 미래사회에서 대기질 개선 정책이 성공적으로 실현되면, 중미래의 동아시아 지역 기온과 강수와 관련된 기후특성이 모두 강화되는 효과가 나타남을 확인하였다. SSP3-7.0 시나리오의 미래에 국한된 것이 아니라, 온난화가 진행된 미래사회의 환경정책이 기후시스템에 미치는 영향은 비선형적이기 때문에, 정책수립의 과학적 근거마련을 위한 NCTF 배출감소 영향에 대한 정량적 분석연구도 지속적으로 수행되어야 한다. 본 연구 결과는 정책입안자 및 관련 연구자들의 커뮤니티에서 레퍼런스로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가 (KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Allen RJ, Sherwood SC, 2011. The impact of natural versus anthropogenic aerosols on atmospheric circulation in the community atmosphere model. *Clim Dyn* 36: 1959-1978. doi: 10.1007/s00382-010-0898-8
- Allen RJ, Turnock S, Nabat P, Neubauer D, Lohmann U, Olivie D, Oshima N, Michou M, Wu T, Zhang J, et al. 2020. Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. *Atmos Chem Phys* 20(16): 9641-9663. doi: 10.5194/acp-20-9641-2020
- Arneth A, Unger N, Kulmala M, Andreae MO. 2009. Clean the air, heat the planet? *Science* 326(5953): 672-673. doi: 10.1126/science.1181568
- Baker LH, Collins WJ, Olivie DJL, Cherian R, Hodnebrog Ø, Myhre G, Quaas J. 2015. Climate responses to anthropogenic emissions of short-lived climate pollutants. *Atmos Chem Phys* 15(14): 8201-8216. doi: 10.5194/acp-15-8201-2015
- Bond TC, Doherty SJ, Fahey DW, Forster PM, Berntsen T, DeAngelo BJ, Flanner MG, Ghan S, Kärcher B, Kochet D, et al. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J Geophys Res* 118(11): 5380-5552. doi: 10.1002/jgrd.50171
- Chemke R, Dagan G. 2018. The effects of the spatial distribution of direct anthropogenic aerosols radiative forcing on atmospheric circulation. *J Clim* 31(17): 7129-7145. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0694.1
- Clarke L, Eom J, Marten EH, Horowitz R, Kyle P, Link R, Mignone BK, Mundra A, Zhou Y. 2018. Effects of long-term climate change on global building energy expenditures. *Energy Econ* 72: 667-677. doi: 10.1016/j.eneco.2018.01.003
- Collins WJ, Lamarque JF, Schulz M, Boucher O, Eyring V, Hegglin MI, Maycock A, Myhre G, Prather M, Shindell D, et al. 2017. AerChemMIP: Quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6. *Geosci Model Dev* 10(2): 585-607. doi: 10.5194/gmd-10-585-2017
- Fiore AM, Naik V, Leibensperger EM. 2015. Air quality and climate connections. *J Air Waste Manag Assoc* 65(6): 645-685. doi: 10.1080/10962247.2015.1040526
- Forster P, Storelvmo T, Armour K, Collins W, Dufresne JL, Frame D, Lunt DJ, Mauritsen T, Palmer MD, Watanabe M, et al. 2021. The earth's energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M, et al. (eds). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.* p. 923-1054. doi: 10.1017/9781009157896.009
- Ganguly D, Rasch PJ, Wang H, Yoon J. 2012. fast and slow responses of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols. *Geophys Res Lett* 39(18). doi: 10.1029/2012GL053043
- Gidden MJ, Riahi K, Smith SJ, Fujimori S, Luderer G, Kriegler E, van Vuuren DP, van den Berg M, Feng L, Klein D, et al. 2019. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geosci Model Dev* 12(4): 1443-1475. doi: 10.5194/gmd-12-1443-2019
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Nazarenko L, Lacis A, Schmidt GA, Russell G, Aleinov I, Bauer M, Bauer S, et al. 2005. Efficacy of climate forcings. *J Geophys Res* 110(D18). doi: 10.1029/2005JD005776
- Held IM, Soden BJ. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J Clim* 19(21): 5686-5699. doi: 10.1175/JCLI3990.1

- Hienola A, Partanen AI, Pietikäinen JP, O'Donnell D, Korhonen H, Matthews HD, Laaksonen A. 2018. The impact of aerosol emissions on the 1.5°C pathways. *Environ Res Lett* 13: 044011. doi: 10.1088/1748-9326/aab1b2
- Hill PG, Allan RP, Chiu JC, Bodas-Salcedo A, Knippertz P, 2018. Quantifying the contribution of different cloud types to the radiation budget in Southern West Africa. *J Clim* 31(13): 5273-5291. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0586.1
- Iturbide M, Gutierrez JM, Alves LM, Bedia J, Cerezo-Mota R, Cimadevilla E, Cofiño AS, Di Luca A, Faria SH, Gorodetskaya IV, et al. 2020. An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: Definition and aggregated datasets. *Earth Syst Sci Data* 12(4): 2959-2970. doi: 10.5194/essd-12-2959-2020
- Johnson BT, Haywood JM, Hawcroft MK. 2019. Are changes in atmospheric circulation important for black carbon aerosol impacts on clouds, precipitation, and radiation? *J Geophys Res Atmos* 124(14): 7930-7950. doi: 10.1029/2019JD030568
- Kasoar M, Voulgarakis A, Lamarque JF, Shindell DT, Bellouin N, Collins WJ, Faluvegi G, Tsigaridis K. 2016. Regional and global temperature response to anthropogenic SO₂ emissions from China in three climate models. *Atmos Chem Phys* 16(15): 9785-9804. doi: 10.5194/acp-16-9785-2016
- Kirtman B, Power SB, Adedoyin JA, Boer GJ, Bojariu R, Camilloni I, Doblas-Reyes FJ, Fiore AM, Kimoto M, Meehl GA, et al. 2013. Near-term climate change: Projections and predictability. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. p. 953-1028.
- Lee J, Sung HM, Kim J, Shim S, Ha JC, Byun YH, Kim YH. 2021. Assessment of model performance in East Asia based on the CMIP6 multi-model ensemble (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(5): 461-478. doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.5.461
- Lelieveld J, Klingmüller K, Pozzer A, Burnett RT, Haines A, Ramanathan V. 2019. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proc Natl Acad Sci USA* 116(15): 7192-7197. doi: 10.1073/pnas.1819989116
- Li J, Carlson BE, Yung YL, Lv D, Hansen J, Penner JE, Liao H, Ramaswamy V, Kahn RA, Zhang P, et al. 2022. Scattering and absorbing aerosols in the climate system. *Nat Rev Earth Environ* 3(6): 363-379. doi: 10.1038/s43017-022-00296-7
- Liao H, Chang W, Yang Y. 2015. Climatic effects of air pollutants over China: A review. *Adv Atmos Sci* 32(1): 115-139. doi: 10.1007/s00376-014-0013-x
- Luo F, Wilcox L, Dong B, Su Q, Chen W, Dunstone N, Li S, Gao Y. 2020. Projected near-term changes of temperature extremes in Europe and China under different aerosol emissions. *Environ Res Lett* 15: 034013. doi: 10.1088/1748-9326/ab6b34
- Mu J, Wang Z. 2021. Responses of the East Asian summer monsoon to aerosol forcing in CMIP5 models: The role of upper-tropospheric temperature change. *Int J Climatol* 41(3): 1555-1570. doi: 10.1002/joc.6887
- Myhre G, Samset BH, Schulz M, Balkanski Y, Bauer S, Bernsten TK, Bian H, Bellouin N, Chin M, Diehl T, et al. 2013. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos Chem Phys* 13(4): 1853-1877. doi: 10.5194/acp-13-1853-2013
- O'Connor FM, Abraham NL, Dalvi M, Folberth GA, Griffiths PT, Hardacre C, Johnson BT, Kahana R, Keeble J, Kim B, et al. 2021. Assessment of pre-industrial to present-day anthropogenic climate forcing in UKESM1. *Atmos Chem Phys* 21(2): 1211-1243. doi: 10.5194/acp-21-1211-2021
- Rao S, Klimont Z, Smith SJ, van Dingenen R, Dentener F, Bouwman L, Riahi K, Amann M, Bodirsky BL, van Vuuren DP, et al. 2017. Future air pollution in

- the Shared Socioeconomic Pathways. *Glob Environ Change* 42: 346-358. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012
- Richardson TB, Forster PM, Andrews T, Parker DJ. 2016. Understanding the rapid precipitation response to CO₂ and aerosol forcing on a regional scale. *J Clim* 29(2): 583-594. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0174.1
- Samsat BH, Sand M, Smith CJ, Bauer SE, Forster PM, Fuglestedt JS, Osprey S, Schleussneret CF. 2018. Climate impacts from a removal of anthropogenic aerosol emissions. *Geophys Res Lett* 45(2): 1020-1029. doi: 10.1002/2017GL076079
- Scannell C, Booth BBB, Dunstone NJ, Rowell DP, Bernie DJ, Kasoar M, Voulgarakis A, Wilcox LJ, Acosta Navarro JC, Seland Ø, et al. 2019. The influence of remote aerosol forcing from industrialized economies on the future evolution of East and West African rainfall. *J Clim* 32(23): 8335-8354. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0716.1
- Shaw TA, Voigt A. 2015. Tug of war on summertime circulation between radiative forcing and sea surface warming. *Nat Geosci* 8(7): 560-566. doi: 10.1038/ngeo2449
- Shi H, Xiao Z, Zhan X, Ma H, Tian X. 2019. Evaluation of MODIS and two reanalysis aerosol optical depth products over AERONET sites. *Atmos Res* 220: 75-80. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.01.009
- Shindell DT, Faluvegi G, Rotstayn L, Milly G. 2015. Spatial patterns of radiative forcing and surface temperature response. *J Geophys Res Atmos* 120(11): 5385-5403. doi: 10.1002/2014JD022752
- Shukla BP, Sathiyamoorthy V, Pal PK, Joshi PC. 2009. Effects of cloud types on cloud-radiation interaction over the Asian monsoon region. *Theor Appl Climatol* 97: 287-295. doi: 10.1007/s00704-008-0064-y
- Sjerner CW, Samsat BH, Myhre G, Forster PM, Hodnebrog Ø, Andrews T, Boucher O, Faluvegi G, Iversen T, Kasoar M, et al. 2017. Rapid adjustments cause weak surface temperature response to increased black carbon concentrations. *J Geophys Res Atmos* 122(21): 11462-11481. doi: 10.1002/2017jd027326
- Sun MA, Sung HM, Kim J, Lee JH, Shim S, Byun YH. 2022. Present-day and future projection of East Asian Summer Monsoon in Coupled Model Intercomparison Project 6 simulations. *PLoS ONE* 17(6): e0269267. doi: 10.1371/journal.pone.0269267
- Sung HM, Kim J, Shim S, Seo J, Kwon SH, Sun MA, Moon H, Lee JH, Lim YJ, Boo KO, et al. 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
- Szopa S, Naik V, Adhikary B, Artaxo P, Bernsten T, Collins WD, Fuzzi S, Gallardo L, Kiendler-Scharr A, Klimont Z, et al. 2021. Short-lived climate forcers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, et al. (eds). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. p. 817-922. doi: 10.1017/9781009157896.008
- Turnock ST, Smith S, O'Connor FM. 2019. The impact of climate mitigation measures on near term climate forcers. *Environ Res Lett* 14: 104013. doi: 10.1088/1748-9326/ab4222
- Wang Z, Lin L, Yang M, Xu Y. 2016. The effect of future reduction in aerosol emissions on climate extremes in China. *Clim Dyn* 47: 2885-2899. doi: 10.1007/s00382-016-3003-0
- Wilcox LJ, Liu Z, Samsat BH, Hawkins E, Lund MT, Nordling K, Undorf S, Bollasina M, Ekman AML, Krishnan S, et al. 2020. Accelerated increases in global and Asian summer monsoon precipitation from future aerosol reductions. *Atmos Chem Phys* 20(20): 11955-11977. doi: 10.5194/acp-20-11955-2020
- Xie B, Zhang H, Yu X, Wang Z. 2023. Fast and slow responses of surface air temperature in China to short-lived climate forcers. *Sci Total Environ* 882:

162888. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162888
- Yang D, Zhang H, Wang Z, Zhao S, Li J. 2022. Changes in anthropogenic particulate matters and resulting global climate effects since the industrial revolution. *Int J Climatol* 42(1): 315-330. doi: 10.1002/joc.7245
- You Q, Wu F, Shen L, Pepin N, Jiang Z, Kang S. 2020. Tibetan Plateau amplification of climate extremes under global warming of 1.5°C, 2°C and 3°C. *Glob Planet Change* 192: 103261. doi: 10.1016/j.gloplacha.2020.103261
- Zanis P, Akritidis D, Georgoulas AK, Allen RJ, Bauer SE, Boucher O, Cole J, Johnson B, Deushi M, Michou M, et al. 2020. Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study. *Atmos Chem Phys* 20(14): 8381-8404. doi: 10.5194/acp-20-8381-2020
- Zanis P, Akritidis D, Turnock S, Naik V, Szopa S, Georgoulas AK, Bauer SE, Deushi M, Horowitz LW, Keeble J, et al. 2022. Climate change penalty and benefit on surface ozone: A global perspective based on CMIP6 earth system models. *Environ Res Lett* 17(2): 024014. doi: 10.1088/1748-9326/ac4a34
- Zhang S, Wang M, Ghan SJ, Ding A, Wang H, Zhang K, Neubauer D, Lohmann U, Ferrachat S, Takeamura T, et al. 2016. On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models. *Atmos Chem Phys* 16(5): 2765-2783. doi: 10.5194/acp-16-2765-2016

부록

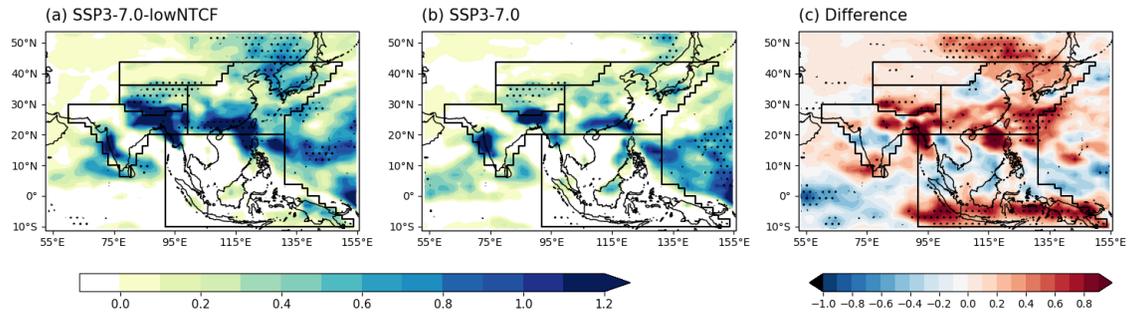


Fig. S1. Spatial patterns of changes in mean summer (June to August) precipitation (units: mm/day) during 2045–2054 relative to 1995–2014 in the (a) SSP3-7.0-lowNTCF and (b) SSP3-7.0 scenarios, and (c) their difference (SSP3-7.0-lowNTCF minus SSP3-7.0). The dotted areas indicate 95% confidence interval.