

## CMIP5 모형에서 나타난 겨울철 동아시아와 북태평양 지역의 엘니뇨 원격상관의 미래변화

김 선 용 · 국 종 성<sup>†</sup>  
포항공과대학교 환경공학부

### Future Changes in Atmosphere Teleconnection over East Asia and North Pacific associated with ENSO in CMIP5 Models

Kim, Sunyong and Kug, Jong-Seong<sup>†</sup>

*School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Korea*

#### ABSTRACT

The changes in the teleconnection associated with El Niño-Southern Oscillation (ENSO) over the East Asia and North Pacific under greenhouse warming are analyzed herein by comparing the Historical run (1970/1971~1999/2000) and the Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 run with 31 climate models, participated in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). It is found that CMIP5 models have diverse systematic errors in simulating the ENSO teleconnection pattern from model to model. Therefore, we select 21 models based on the models' performance in simulating teleconnection pattern in the present climate. It is shown that CMIP5 models tend to project an overall weaker teleconnection pattern associated with ENSO over East Asia in the future climate than that in the present climate. It can be also noted that the cyclonic flow over the North Pacific is weakened and shifted eastward. However, uncertainties for the ENSO teleconnection changes still exist, suggesting that much consistent agreements on this future teleconnections associated with ENSO should be taken in a further study.

Key words: ENSO, CMIP5 Models, Teleconnection, East Asian and North Pacific Climate, Global Warming.

#### 1. 서 론

열대태평양에서 발생하는 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation; ENSO)은 지구상에서 관측되는 가장 큰 규모의 기후변동성으로 전지구적인 기상 및 기후에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Bjerknes, 1969; Horel and Wallace, 1981). 특히, 엘니뇨의 발생으로 인한 열대태평양 해수면온도의 변동은 원격상관을 통해 중위도의 대기순환에 영향을 준다(Horel and Wallace, 1981; Hoskins and Karoly, 1981; Trenberth *et al.*, 1998; Wang and Fu, 2000; Wang *et al.*, 2000; Kug *et al.*, 2010). 지금까지 동아시아를 비롯하여 북태평양의 겨울철 기후시스템에 직·간접적인 영향을 주는 엘니뇨의 역학적인 과정에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다(Nitta, 1987; Kang and

Jeong, 1996; Hoerling *et al.*, 1997; Wang and Fu, 2000; Wang and An, 2001; Blade *et al.*, 2008; Son *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014a, Kim *et al.*, 2015). 최근에는 엘니뇨 현상과 엘니뇨 원격상관(teleconnection)에 미치는 지구온난화의 영향에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Meehl and Teng, 2007; Muller and Roeckner, 2008; Kug *et al.*, 2010; Bulic *et al.*, 2012; Stevenson, 2012; Zhou *et al.*, 2014b; Cai *et al.*, 2015). 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차 평가보고서(AR5, Fifth Assessment Report)에 의하면 지구온난화에 의한 기후변화는 여전히 높은 불확실성을 가지고 있다. 그러므로 다양한 모형분석을 통해 미래기후에서 대규모 기상현상인 엘니뇨의 변동성과 그로 인한 대기순환 변동을 전망하는 것이 중요하다.

<sup>†</sup> Corresponding author : [jskug1@gmail.com](mailto:jskug1@gmail.com)

Received September 9, 2015 / Revised November 2, 2015(1st), November 20, 2015(2nd) / Accepted November 30, 2015

하지만, 엘니뇨에 의한 미래기후에서의 대기순환 변동은 지금까지 합의된 결과를 도출하지 못하고 있다. 일부 선행연구에서는 모형실험을 통해, 미래기후에 열대 중태평양의 강수 아노말리가 동진하기 때문에, 그 결과 엘니뇨와 관련된 원격상관 패턴 역시 동쪽으로 이동한다고 제안하였다(Meehl and Teng, 2007; Kug *et al.*, 2010; Stevenson, 2012; Zhou *et al.*, 2014b; Cai *et al.*, 2015). 반면에 몇몇 연구에서는 지구온난화에 의해 엘니뇨 원격상관이 현재기후와 비교해 강화될 것이라고 전망한다(Muller and Roeckner, 2008; Schneider *et al.*, 2009; Bulic *et al.*, 2012). Schneider *et al.*(2009)는 모형실험을 통해 현재기후와 미래기후에서 엘니뇨 원격상관을 분석하였고, 파동 활동 플럭스(wave activity flux) 분석을 통해 그 차이를 보였다. 미래기후에 파동 활동 플럭스의 강제력이 변하는 원인에 대한 명확한 이유를 제시하지 못하였지만, 일시 에디 활동(transient eddy activity)의 위치나 강도의 변화로 인한 변동 가능성을 제안하였다. 이와 같이 미래기후의 원격상관 패턴 예측은 일관적이지 않고 또, 모형간의 편차가 크게 나타난다. 그러므로 다중모형을 이용한 앙상블 결과는 모형 의존성을 줄이면서 엘니뇨 원격상관 모의에 대한 모형의 구조적인 오차를 줄이는데 도움이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 31개 모형을 사용하여 엘니뇨와 관련된 동아시아와 북태평양의 겨울철 대기순환 변동을 전망하였다. 특히, 미래기후 전망에 대한 불확실성을 줄이기 위해 관측자료와 유사하게 현재기후를 모의하는 모형들을 선정하여, 모형에서 모의된 현재기후와 미래기후를 비교하였다. 2장에서는 연구에 사용된 CMIP5 모형 및 관측자료에 대하여 설명하였다. 3장에서는 모형의 평균적인 겨울내 동아시아와 북태평양의 대기순환 모의성능을 나타내었고, 4장에서는 미래기후에서 대기순환 변동의 계절적 변화를 전망하였다. 요약 및 제언을 비롯하여 추후 연구에 대한 내용은 5장에 제시하였다.

## 2. 자료 및 모형

### 2.1 CMIP5 모형

본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차 평가보고서(AR5, Fifth Assessment Report)에 참여한 31개의 CMIP5 모형의 실험 결과를 사용하였다. 평가보고서에 포함된 다양한 조건의 실험 가운데, 과거기후 모의실험(Historical run)과 RCP4.5의 미래 전망 시나리오를 이용하여 동아시아와 북태평양의

대기순환 변동을 비교하였다. 과거기후 모의실험은 화산 혹은 태양활동과 같은 외부강제력에 대한 자연변동성과 인간활동에 의한 변동성을 포함하고 있고, 1850년부터 2005년까지 수행되었다. RCP4.5의 경우, 21세기 말까지 복사강제력이  $4.5 \text{ W/m}^2$ 에 도달하는 시나리오이며, 2006년부터 2100년까지 적분하였다(Taylor *et al.*, 2012). 두 모의실험의 비교를 위해 1개의 앙상블 모형(r1i1p1)을 사용하였으며, 분석에 사용한 기간은 현재기후(1970/1971~1999/2000년), 미래기후(2070/2071~2099/2100년) 각각 30년이다. 모형 미래기후 자료의 한계 때문에 30년만을 분석하였지만, 30년의 기간은 모형의 ENSO 모의 특징을 대표하는데 한계가 있을 수 있다(Wittenberg, 2009). 하지만, 본 연구는 한 모형의 경향성만을 보기보다 여러 모형의 평균적인 변화 경향을 보기 때문에 여러 가지 모형 결과를 평균하는 과정에서 이러한 문제는 완화될 수 있을 것이다. 사용한 모형에 대한 세부사항은 Table 1에 나타내었다. 월별 평균한 표층온도, 500 지위고도 그리고 바람장을 사용하였으며, 관측과 동일한 해상도로 변환하기 위해 각각의 모형들을  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 격자로 선형 내삽(interpolation)하였다. 엘니뇨 원격상관의 경년 변동성을 살펴보고자 모형의 월별 기후평균(climatology)과 장기추세(trend)가 제거된 값을 사용하였다.

### 2.2 관측자료

엘니뇨와 관련된 대기순환 변동에 대한 CMIP5 모형자료의 검증에 위해 월 평균된 NCEP/NCAR(the National Centers for Environmental Prediction/the National Center for Atmospheric Research) 재분석자료(Kalnay *et al.*, 1996)를 사용하였다. 원격상관에 영향을 주는 열대태평양 해수면온도의 변동성을 살펴보기 위해 월 평균 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 3(ERSST.v3d; Smith *et al.*, 2008)를 사용하였으며, 분석에 사용된 재분석자료들은 각각  $2.5^\circ$ 의 위도와 경도를 가진다. 분석에는 1979/1980년부터 2013/2014년까지 35년의 기간이 사용되었고, 월별 기후평균과 선형 장기추세는 제거되었다.

## 3. 모형의 원격상관 모의

엘니뇨와 관련된 동아시아와 북태평양의 겨울철 대기순환 패턴을 살펴보기 위해, 관측과 현재기후에서 Nino3.4 지수를 500 지위고도와 바람장에 회귀분석하여 비교하였다. 현재기후를 나타내는 31개의 모형들은 원격상관 패턴을 다양하게 모의하기 때문에 모의성능을 객관적으로 평가할 수 없고, 그

Table 1. List of the model from the CMIP5 archives, with respective institutes used in this study

Model	Model number	Institute, County
bcc-csm1-1	1	BCC, CMA, China
*bcc-csm1-1-m	2	BCC, CMA, China
*BNU-ESM	3	GCESS, China
*CanESM2	4	CCCMA, Canada
*CESM1-BGC	5	NSF-DOE-NCAR, USA
*CESM1-CAM5	6	NSF-DOE-NCAR, USA
*CMCC-CM	7	CMCC, Italy
*CMCC-CMS	8	CMCC, Italy
*CMCC-CM5	9	CMCC, Italy
*FGOALS-g2	10	LASG-CESS, China
*FIO-ESM	11	FIO, SOA, China
*GFDL-CM3	12	NOAA-GFDL, USA
GFDL-ESM2G	13	NOAA-GFDL, USA
*GFDL-ESM2M	14	NOAA-GFDL, USA
GISS-E2-H	15	NASA/GISS, USA
GISS-E2-H-CC	16	NASA/GISS, USA
GISS-ER-R	17	NASA/GISS, USA
GISS-E2-R-CC	18	NASA/GISS, USA
*HadGEM2-ES	19	MOHC, UK
inmcm4	20	INM, Russia
*IPSL-CM5A-LR	21	IPSL, France
*IPSL-CM5A-MR	22	IPSL, France
*IPSL-CM5B-LR	23	IPSL, France
*MIROC5	24	AORI-NIES-JAMSTEC, Japan
MIROC-ESM	25	AORI-NIES-JAMSTEC, Japan
MIROC-ESM-CHEM	26	AORI-NIES-JAMSTEC, Japan
*MPI-ESM-LR	27	MPI-M, Germany
MPI-ESM-MR	28	MPI-M, Germany
*MRI-CGCM3	29	MRI, Japan
*NorESM1-M	30	NCC, Norway
*NorESM1-ME	31	NCC, Norway

\* Denotes the selected 21 models.

모형들이 모의하는 미래기후 역시 다양한 결과를 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 미래기후 전망의 불확실성을 줄이기 위해, 현재기후에서 관측과 유사하게 엘니뇨 시기의 중위도 대기순환장을 모의하는 모형들을 선정하여 분석하였다. 분석에 사용한 Nino3.4 지수에 대한 회귀분석은 엘니뇨/라니냐에 대한 선형 원격상관 패턴만 고려하는 것이므로, 잘 알려진 비선형적인 원격상관 패턴의 모의는 고려할 수 없는 한계를 가지고 있다.

Fig. 1은 관측과 현재기후 모형들의 북태평양(100°E~120°W, 0~70°N) 영역의 11월부터 3월까지의 월별 공간상관계수(spatial correlation coefficient)를 구한 뒤 평균한 값을 나타내었다. 현재기후 모의에 대한 모형간의 편차가 크게 나타나며, 일부 모형들은 현재기후에서의 대기순환 패턴을 모의하는데 한계를 나타내었다. 그러므로 각 모형의 결과를 고려하여, 그 중 관측에 대해서 상관계수가 0.5 이상인 21개 모형들을 선택하였다.

Fig. 2는 관측과 선정된 CMIP5 21개 모형 그리고 10개 모형에서 11월부터 3월까지의 평균적인 중위도의 대기순환 패턴을 나타내었다. Son *et al.*(2014)에서 언급된 것처럼 관측의 경우에는 동아시아의 쿠로시오 확장지역에 엘니뇨와 관련된 고기압성 흐름(쿠로시오 고기압)이 위치하고 있다(Fig. 2a). 쿠로시오 고기압은 초겨울에 남풍기류를 유도함으로써 한반도를 포함한 동아시아의 기후와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Son *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015). 그리고 북태평양에는 강한 저기압성 흐름이 존재하며, 이 저기압은 북미대륙의 기후에 영향을 주게 된다(Hoskins and Karoly, 1981). 북태평양 저기압은 엘니뇨와 관련된 열대 중태평양 양의 강수 아노말리의 전파로 인한 태평양/북미 순환형태(Pacific North America; PNA) 패턴의 일부로 해석될 수 있으며, 쿠로시오

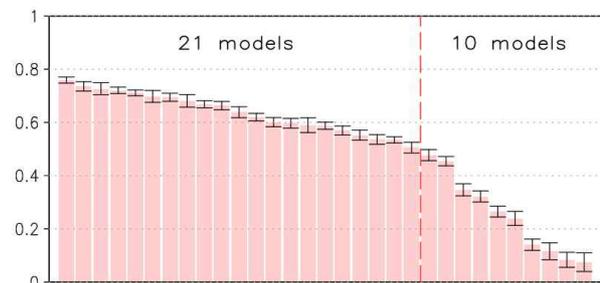


Fig. 1. The spatial correlation coefficients of 500-hPa geopotential height over the North Pacific between the observed and simulated CMIP5 Historical models in winter during 1970/1971 ~ 1999/2000. Black intervals indicate the 90% confidence level.

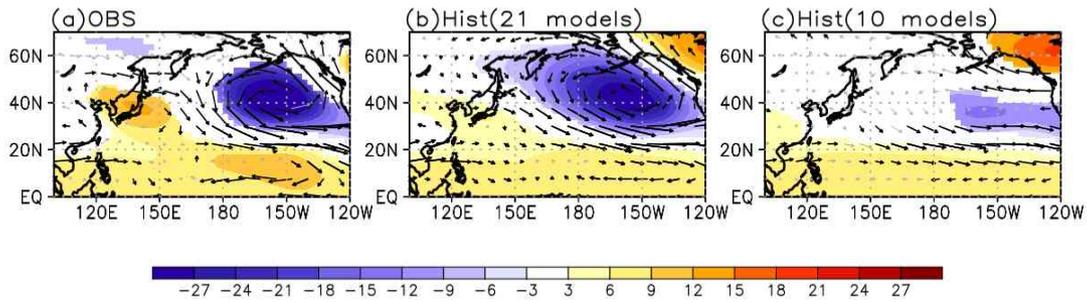


Fig. 2. Regression of 500-hPa geopotential height (shaded; m) and wind (vector; m/s) with respect to Nino 3.4 SST for (a) observed, (b) Historical 21 models and (c) Historical 10 models in averaged November-March. Shadings and black wind vectors indicate the exceeding the 90% confidence level.

고기압을 약화시키는 역할을 한다. 관측의 대기패턴을 잘 모의하는 21개 모형들은 관측에 비해 동아시아의 쿠로시오 고기압을 약하게 모의한다(Fig. 2b). 반면에, 북태평양 저기압은 관측보다 조금 약하지만 더 광범위하게 나타나며, 이로 인해 쿠로시오 고기압은 약간 남하하는 경향이 있다. 관측과 원격상관 패턴이 달랐던 10개의 현재기후 모형들에서는 쿠로시오 고기압이 유의하게 나타나지 않고, 북태평양의 저기압 역시 관측과 비교하여 약하게 모의되었다(Fig. 2c). 이는 개개의 모형이 모의하는 저기압의 크기가 약하기보다는, 모형들의 패턴에 대한 다양성이 커서 상쇄 효과에 의한 것으로 유추된다.

관측의 평균적인 엘니뇨 원격상관 패턴을 잘 모의하는 21개 모형에서의 미래기후 원격상관 패턴의 변화를 분석하였다(Fig. 3a). 미래기후를 전망하는 모형들은 현재기후와 마찬가지로 관측에 비해 쿠로시오 고기압을 약하게 모의하는 경향이 있으나, 유의하지 않은 것으로 나타난다. 이 때, 북태평양 저기압은 현재기후와 비교하여 고위도(60°N)에서 서쪽으로 확장되어 발달하지만, 상대적으로 약하게 나타나며, 저기압의 중심은 동진한다. 이는 기존의 연구와 일치하는 결과이다(Meehl and Teng, 2007; Kug *et al.*, 2010; Stevenson, 2012; Zhou *et al.*, 2014b; Cai *et al.*, 2015). 이와 같이 미래기후에서 나타나

는 북태평양 저기압의 변동은 미래기후와 현재기후의 대기패턴 차이를 통해 확인할 수 있다(Fig. 3b). 북태평양에서 전반적으로 나타나는 양의 차이는 미래기후에 저기압성 흐름이 상대적으로 약화되는 것을 의미하며, 북미대륙 서쪽에 위치한 음의 차이는 저기압의 동진을 의미한다.

#### 4. 미래기후의 대기순환 전망

3장에서는 11월부터 3월까지의 기간 동안 현재기후와 미래기후에서의 엘니뇨와 관련된 평균적인 대기순환을 살펴보았다. Son *et al.*(2014)은 동아시아의 겨울철 기후와 밀접한 관련이 있는 쿠로시오 고기압이 초겨울(11~12월)에는 지속적으로 유지되지만, 늦겨울(1월)이 되면 갑자기 사라지는 특징을 가진다고 제시하였다. 이처럼 한 계절 안에서의 계절적 변화(seasonal evolution)로 인한 쿠로시오 고기압의 발달과 소멸은, 엘니뇨와 동아시아 기후의 관련성에 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이러한 계절적 의존성(seasonal dependency)을 고려하여 엘니뇨 원격상관 패턴의 월별 특성을 살펴 볼 필요가 있다. 4장에서는 미래기후에서 계절적 변화에 의한 월별 동아시아와 북태평양의 대기순환 변동이 분

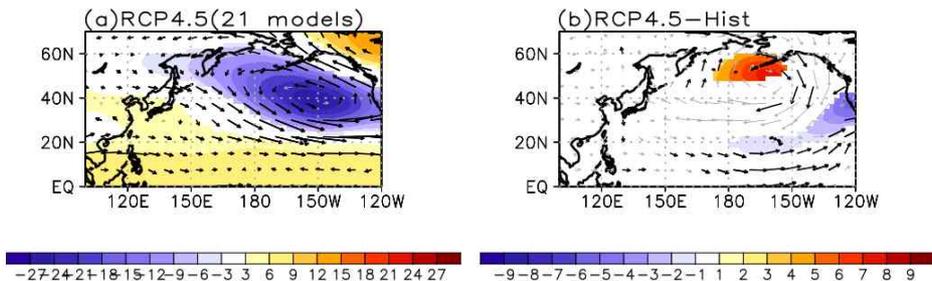


Fig. 3. The same as Fig. 2, except for (a) 21 models of RCP4.5 and (b) difference between RCP4.5 and Historical scenario, respectively. Shadings and black wind vectors indicate the exceeding the 90% confidence level.

석될 것이다.

Fig. 4에 11월부터 3월까지 현재기후와 미래기후의 Nino3.4 지수를 500 지위고도와 바람장에 각각 회귀분석한 원격상관 결과를 나타내었다. 현재기후에서 11월의 경우, 21개 모형의 겨울철 평균적인 대기순환 패턴과는 달리 동아시아에 약한 쿠로시오 고기압이 나타나며, 북태평양의 저기압은 북미대륙 서쪽 해안을 따라서 위치한다(Fig. 4a). 12월이 되면 쿠로시오

고기압은 약간 강해지며, 통계적으로 유의한 결과를 가진다(Fig. 4d). 이 때, 저기압성 흐름 역시 11월에 비해 강화되어 북태평양에 위치한다. 관측에서 1월에 쿠로시오 고기압의 급격한 소멸을 제시하였던 선행연구와는 달리(Son *et al.*, 2014), 모형들은 현재기후 모의에서 쿠로시오 고기압을 지속적으로 모의한다(Fig. 4g). 그리고 북태평양 저기압은 강화되며 고위도 지역(60°N)에서 서쪽으로 더 확장되어 나타난다. 1월까지 지속되

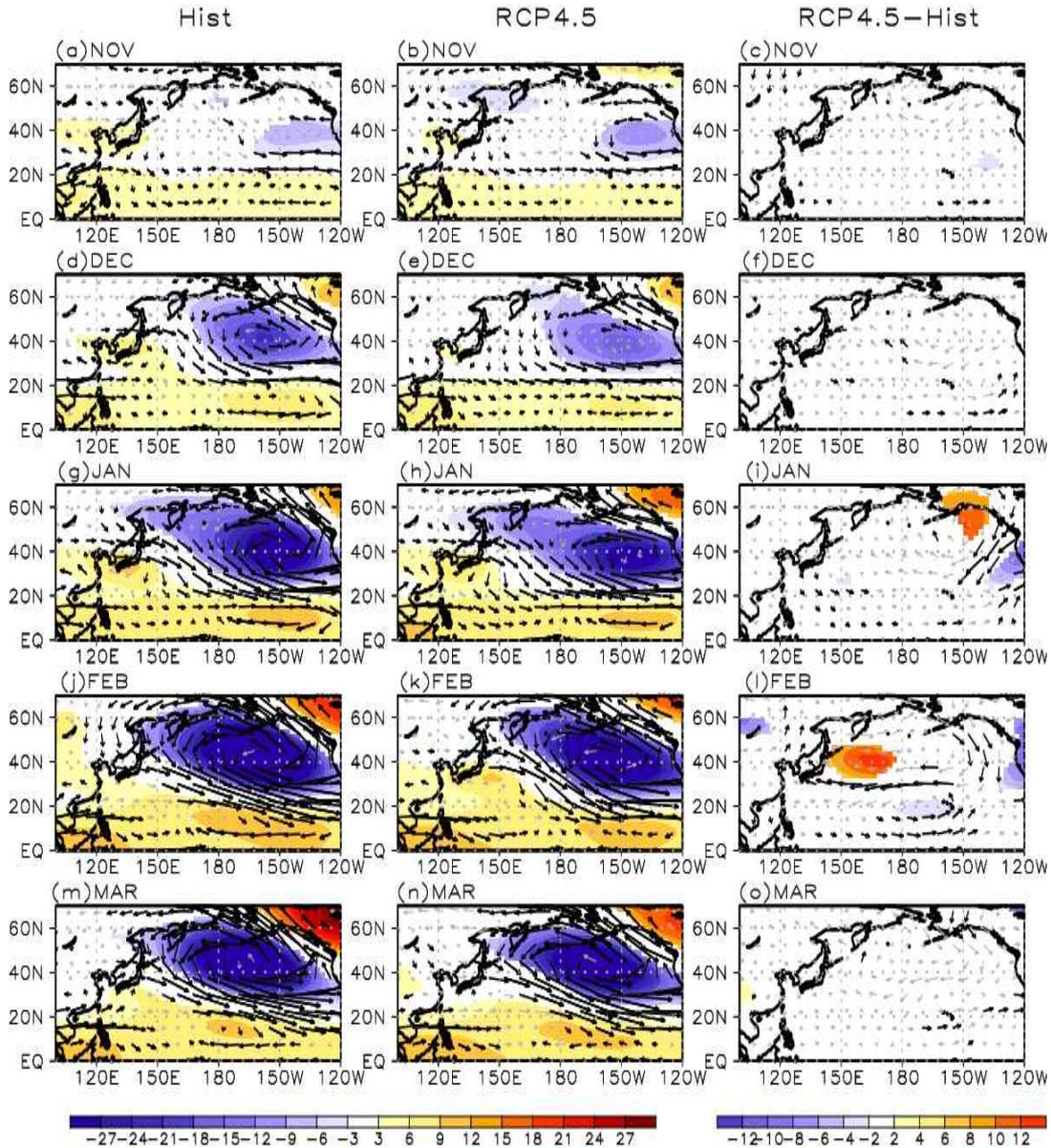


Fig. 4. The same as Fig. 2, except for each month with respect to Historical (left panels), RCP4.5 (middle panels) and difference between the RCP4.5 and Historical models (right panels) from November to March. Shading and black wind vectors indicate the exceeding the 90% confidence level.

던 쿠로시오 고기압은 2월이 되면 더 이상 유의미하지 않게 되고, 북태평양 저기압은 강화되며, 저기압의 중심이 1월보다 약간 서쪽으로 이동한다(Fig. 4j). 3월이 되면 쿠로시오 고기압은 동아시아 지역에서 모의되지 않으며, 북미대륙 북쪽에 위치한 고기압의 확장으로 인해 북태평양 저기압의 규모는 약간 줄어들면서 동시에 저기압의 중심이 서쪽으로 옮겨간다(Fig. 4m).

미래기후에서 21개 모형의 중위도 대기순환을 살펴보면 11월에 현재기후에 비해 약한 쿠로시오 고기압이 위치하며, 북태평양에 위치한 저기압의 경우 북태평양의 동쪽에서 작은 규모로 나타난다(Fig. 4b). 12월에 쿠로시오 고기압의 크기는 11월과 비슷하게 유지되며, 북태평양 저기압의 경우 강해지지만, 현재기후보다 약하게 전망된다(Fig. 4e). 1월이 되면 현재기후와 마찬가지로 쿠로시오 고기압이 강해지며, 북태평양 저기압 역시 강화되어 고위도(60°N)에서 서쪽으로 더 확장되고, 동시에 저기압의 중심이 동쪽으로 이동한다(Fig. 4h). 2월에는 동아시아에 위치한 쿠로시오 고기압이 더 이상 유의하지 않으며, 북태평양의 저기압성 흐름은 강화되고, 1월에 비해 저기압 중심이 서쪽으로 이동한다(Fig. 4k). 3월의 경우, 현재기후와 동일하게 미래기후의 쿠로시오 고기압은 모의되지 않게 된다. 이 때, 북미대륙 서쪽에 위치한 강한 고기압의 확장으로 인해 북태평양 저기압은 축소되어 서쪽으로 이동하는 경향이 있으며, 쿠로시오 고기압의 소멸에 영향을 줄 것으로 전망된다(Fig. 4n).

현재기후와 미래기후에서 모의된 중위도 대기패턴의 차이를 통하여 미래기후의 엘니노와 관련된 원격상관 변동을 전망하였다. 11월부터 1월까지 동아시아 지역에 나타나는 음의 차이는 미래기후의 쿠로시오 고기압이 현재기후에 비해 약화되는 것을 의미하며, 북태평양에 나타나는 양의 차이는 미래기후 저기압성 흐름의 약화를 보여준다(Fig. 4c, f, i). 특히, 북태평양의 동쪽에 위치한 음의 차이는 미래기후에 북태평양 저기압의 동진을 전망하는 것이다. 2월에는 북태평양 전반에 광범위한 양의 차이를 보여주는데, 이는 이 시기에 북태평양 대부분의 해역에서 모의되는 저기압성 흐름의 약화를 보여준다(Fig. 4l). 또한 북미대륙에 위치한 음의 차이는 대륙 북쪽의 고기압이 미래기후에는 약해지며, 북태평양 저기압의 동진을 전망하는 것이다. 3월이 되면 양의 차이의 규모와 강도는 2월에 비해 줄어들지만, 여전히 북태평양에 넓게 위치하며, 북미대륙에 나타나는 고기압의 약화로 인해 북태평양 저기압은 동쪽으로 확장하는 경향을 가진다(Fig. 4o). 특히, 한반도를 비롯한 동아시아의 기후와 밀접한 관련이 있는 쿠로시오 고기압은 미래기후에서 11월부터 1월까지 약화되고, 2월에는 강화되는 것으로 나타났다. 현재기후와 미래기후의 엘니노를 같은

크기로 두고 회귀분석을 하였기 때문에, 두 기후에서 원격상관 패턴의 차이가 나는 것은 열대 강수 반응의 차이나 미래기후의 배경장의 차이에 의해 설명될 수 있을 것이다. 미래기후에서 엘니노 원격상관에 의한 대기순환이 변하는 물리적인 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

현재기후와 미래기후에서 모의되는 동아시아의 쿠로시오 고기압과 북태평양 저기압의 상대적인 크기를 자세히 살펴보기 위해 영역을 지정하여 평균한 뒤 수주로 비교하였다. Fig. 5는 엘니노의 반응으로 나타난 쿠로시오 고기압(120~150°E, 30~40°N)과 저기압성 흐름(170~150°W, 40~50°N)을 비교한 막대그래프이다. Fig. 4에서 제시한 것처럼 11월부터 1월까지 현재기후에서의 쿠로시오 고기압은 지속적으로 크기가 증가한다(Fig. 5a). 같은 시기에 미래기후의 쿠로시오 고기압 역시 강해지지만, 현재기후보다는 약할 것으로 전망된다. 2월이 되면 현재기후의 쿠로시오 고기압은 약화되는데 비해, 미래기후에는 1월보다 강화되어 현재기후보다 상대적으로 강한 쿠로시오 고기압을 모의하게 된다. 그러나 2월에 모의되는 쿠로시오 고기압은 현재기후와 미래기후 모두 유의하지 않은 것으로 보인다(Fig. 4j, k). 3월에는 현재기후와 미래기후의 쿠로시오 고기압은 2월에 비해 약하게 나타나며, 유의하지 않은 비슷한 강도를 가지는 것으로 나타났다.

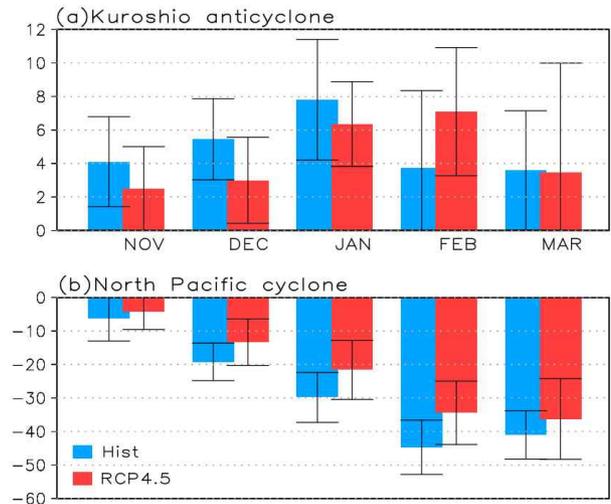


Fig. 5. The area-averaged 500-hPa geopotential height regressed with respect to Nino3.4 SST from November to March in Historical (blue bar) and RCP4.5 (red bar). Upper denotes (a) the Kuroshio anticyclone (120~150°E, 30~40°N) and below shows (b) the North Pacific cyclone (170~150°W, 40~50°N). Black intervals indicate the 90% confidence level.

북태평양의 저기압성 흐름은 11월부터 2월까지 현재기후와 미래기후에서 지속적으로 증가하는 경향을 가진다(Fig. 5b). 3월이 되면 현재기후에서의 북태평양 저기압은 2월과 비교해서 감소하는데 비해, 미래기후에서는 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 정리하면, CMIP5 모형들은 엘니노와 관련하여 북태평양에서 전반적으로 미래기후의 대기순환 패턴이 약해지는 것으로 전망하였다. 하지만, 현재기후와 미래기후에서 중위도 대기 패턴에 대한 모형 간의 편차가 크기 때문에 대부분의 월에서 강도에 대해 유의하지 않게 나타나는 것으로 판단된다. Son *et al.*(2014)은 쿠로시오 고기압의 발생 및 급격한 소멸을 비롯한 북태평양의 대기패턴이 열대 강수패턴과 밀접한 관계가 있음을 제시하였다. 따라서 기후변화에서 쿠로시오 고기압의 변화는 열대 강수패턴의 변화와 관련이 있을 수 있다. 엘니노 원격상관 변화에 대한 원인 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

지금까지는 현재기후와 미래기후에서 엘니노 원격상관으로 인한 북태평양의 대기패턴의 겨우내 변화를 비교하였다. Fig. 4에서 제시한 것처럼 미래기후에 북태평양에 위치한 저기압성 흐름은 현재기후와 비교해 동쪽으로 이동하는 것처럼 보인다. 그러므로 북태평양 저기압의 이동을 더 뚜렷하게 보이기 위해, 현재기후와 미래기후에서 21개 모형 각각의 저기압 중심을 나타내었다(Fig. 6). 일반적으로 북태평양 저기압이 위치하는 영역(170°E~120°W, 30~60°N)을 지정하여 각각의 모형에서 음의 아노말리 최소값을 가지는 지점을 표시하였다. 그리고 현재기후에서 21개 모형의 평균적인 북태평양 저기압의 중심(파란점)과 미래기후에서의 중심(빨간점)을 지도에 나타내어 비교하였다.

11월에 저기압의 중심은 모형 별로 북태평양에 다양하게 분포하고 있으며, 미래기후에서 평균 중심은 현재기후보다 남동쪽에 위치하고 있다(Fig. 6a). 12월이 되면 현재기후의 평균적인 저기압 중심은 11월에 비해 남동쪽으로 이동하지만, 미래기후의 저기압 중심 역시 남동진하며, 이러한 현상은 1월까지 지속된다(Fig. 6b, c). 2월의 경우에는 1월과 비교하여 현재기후와 미래기후 모두 평균적인 북태평양 저기압 중심의 약한 북서진을 모의한다(Fig. 6d). 그러나 미래기후에서 모의된 저기압성 흐름은 현재기후와 비교하면 여전히 남동쪽에 위치하는 것으로 나타난다. 3월에는 현재기후와 미래기후의 평균적인 저기압 중심이 2월에 비해 서진하는 경향이 있고, 미래기후의 저기압 중심은 오히려 현재기후보다 약간 북상하는 것으로 모의된다(Fig. 6e). 특히, 엘니노 원격상관의 변화로 인한 미래기후에 북태평양 저기압의 남동진은 북태평양 동쪽 해역이나 북미대륙의 온도와 기온은 같은 지역적인 기후에서

상당한 변화를 야기할 수 있다.

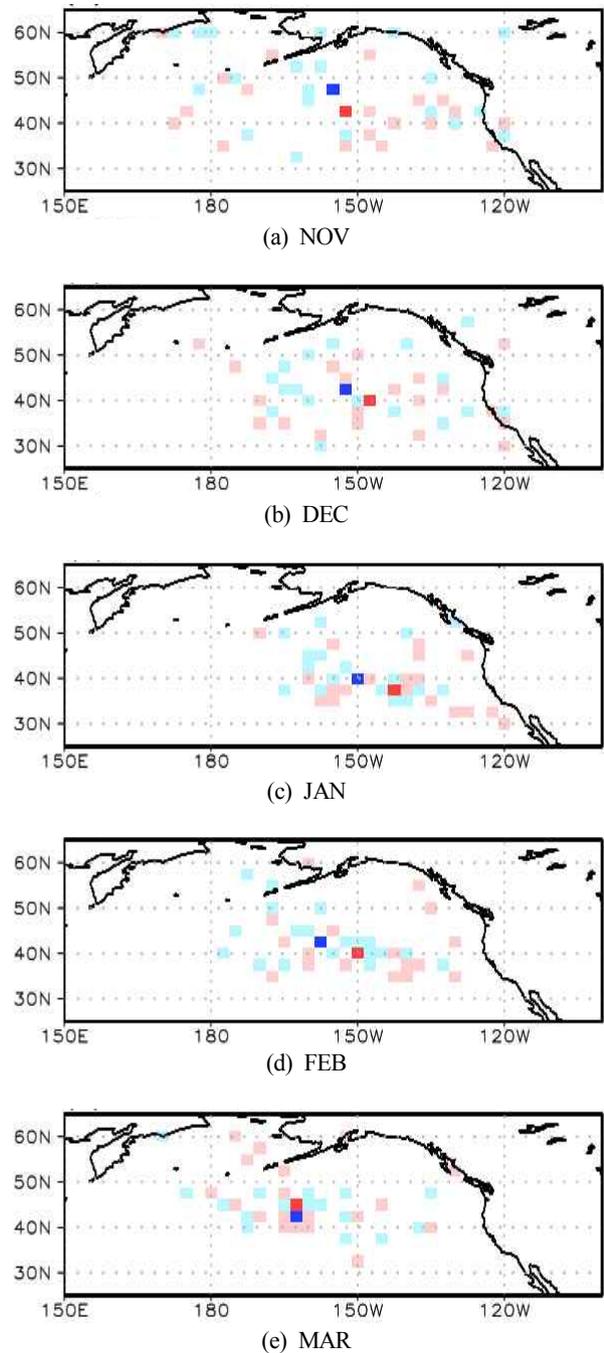


Fig. 6. The minimum center of North Pacific cyclone in 170°E~120°W, 30~60°N from November to March. Pink and sky blue dots denote Historical and RCP4.5 individual models, respectively. Red and blue dot is the same as pink and sky blue dots, except for multi-model ensemble.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 CMIP5 모형들을 이용하여 현재기후(1970/1971~1999/2000년)와 미래기후(2070/2071~2099/2100년)에서 엘니노와 관련된 겨울철 북태평양의 대기순환장 변동을 분석하였다. 특히 모형이 가진 미래기후 전망에 대한 불확실성을 줄이기 위해, 이용 가능한 31개의 모형 중에서 관측자료의 원격상관 패턴을 잘 나타내는 21개의 모형을 선정하여 미래기후에서의 변동을 분석하였다. 다시 말해, 서로 다른 초기조건과 모형이 가진 내부 변동으로 인한 오차를 줄여 미래기후에 대한 예측결과를 향상시켰다. 현재기후에서 11월부터 3월까지의 평균적인 엘니노 원격상관 패턴은 관측과 비교해서 약한 쿠로시오 고기압과 북태평양에 광범위하게 나타나는 저기압성 흐름을 모의한다. 이 모형들이 모의한 미래기후에는 동아시아에서 유의하지 않은 쿠로시오 고기압을 나타내며, 북태평양 저기압은 전체적으로 약화되고, 동남쪽으로 이동하는 것으로 전망된다.

Son *et al.*(2014)에서 제시된 것처럼 엘니노 원격상관에 의한 북태평양의 대기순환은 강한 계절 의존성을 가지며, 월별로 다른 결과를 가진다. 다시 말해, 12월까지 지속되던 동아시아의 쿠로시오 고기압은 1월이 되면 갑작스럽게 사라지게 된다. 동시에 북태평양 저기압은 12월에 비해 더 강하게 나타나며, 그 결과 쿠로시오 고기압의 소멸에 영향을 준 것으로 나타났다.

겨울철 평균적인 분석을 통해, 미래기후의 동아시아와 북태평양에서 나타나는 엘니노 원격상관 패턴의 계절적 변화를 전망하기에는 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해 월별 대기순환장을 분석하여 미래기후에서 모의되는 엘니노 원격상관 패턴의 변동을 살펴보았다. 첫째로, CMIP5 모형은 미래기후에 동아시아에 위치한 쿠로시오 고기압이 약해질 것으로 예측하고 있다. 특히 유의하지 않은 2월을 제외하면, 11월부터 3월까지 동아시아에 나타난 미래기후에서 엘니노와 관련된 대기순환 패턴의 약화는 뚜렷하게 전망된다. 두 번째로 미래기후에는 북태평양에 광범위하게 위치한 저기압성 흐름 역시 약해질 것으로 예측된다. 북태평양 저기압은 11월부터 3월까지 미래기후에서 지속적으로 약하게 전망되며, 이는 미래기후와 현재기후의 대기패턴 차이를 통해서도 확인할 수 있다. 세 번째, 미래기후에서의 북태평양 저기압은 현재기후에 비해 남동진하는 경향이 있다. 이러한 결과는 미래기후를 전망하는 모형들이 엘니노 원격상관의 원인이 되는, 동태평양 해수면온도의 상승으로 인한 강수의 동진을 모의하기 때문이다(Meehl and Teng, 2007; Kug *et al.*, 2010; Stevenson, 2012; Zhou *et*

*al.*, 2014b; Cai *et al.*, 2015).

하지만, 많은 선행연구에서 제시된 것처럼 모형실험에 기반한 지구온난화에서 엘니노 원격상관 패턴의 변동을 여전히 일치되지 않은 결과를 보여준다. 미래기후에서 엘니노의 변동은 전지구적인 기후에 영향을 주며, 특히 엘니노에 의한 대기순환 패턴의 변동은 기온과 강수 같은 지역적인 변동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 추가연구를 통해 모형이 가진 원격상관 패턴에 대한 구조적 오차를 이해하고, 통계 관련성을 얻을 수 있다면 미래기후에 대한 예측성을 향상시킬 수 있을 것이다.

## 사 사

이 연구는 기상청 R&D 사업(KMIPA 2015-2092)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev* 97:163-172.
- Blade I, Newman M, Alexander MA, Scott JD. 2008. The late fall extratropical response to ENSO: Sensitivity to coupling and convection in the tropical West Pacific. *J Climate* 21:6101-6118.
- Bulic IH, Brankovic C, Kucharski F. 2012. Winter ENSO teleconnections in a warmer climate. *Clim Dyn* 38:1593-1613.
- Cai W *et al.* 2015. ENSO and greenhouse warming. *Nature Clim Change* 5:849-859.
- Horel JD, Wallace JM. 1981. Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev* 125:773-788.
- Hoerling MP, Kumar A. 1997. Why do North American climate anomalies differ from one El Niño event to another? *Geophys Res Lett* 24:1059-1062.
- Hoskins BJ, Karoly DJ. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci* 38:1179-1196.
- Kalnay E *et al.* 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc* 77:437-471.
- Kang I-S, Jeong Y-K. 1996. Association of interannual variations of temperature and precipitation in Seoul with

- principal modes of Pacific SST. *J Korean Meteor Soc* 32:339-345.
- Kim S, Kim H-S, Min S-K, Son H-Y, Won D-J, Jung H-S, Kug J-S. 2015. Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia and North Pacific associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pac J Atmos Sci* 51(1):49-60.
- Kug J-S, An S-I, Ham Y-G, Kang I-S. 2010. Changes in El Niño and La Niña teleconnections over North Pacific-America in the global warming simulations. *Theor Appl Climatol* 100:275-282.
- Meehl GA, Teng H. 2007. Multi-model changes in El Niño teleconnections over North America in a future warmer climate. *Clim Dyn* 29:779-790.
- Muller WA, Roeckner E. 2008. ENSO teleconnections in projections of future climate in ECHAM5/MPI-OM. *Clim Dyn* 31:533-549.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical Western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J Meteor Soc Japan* 64L373-390.
- Schneider EK, Fennessy MJ, Kinter JL III. 2009. A statistical-dynamical estimate of winter ENSO teleconnections in a future climate. *J Climate* 22:6624-6638.
- Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. 2008. Improvements NOAAs historical merged land-ocean temp analysis (1880-2006). *J Climate* 21:2283-2296.
- Son H-Y, Park J-Y, Kug J-S, Yoo J, Kim C-H. 2014. Winter precipitation variation over Korean peninsula associated with ENSO. *Clim Dyn* 42:3171-3186.
- Stevenson SL. 2012. Significant changes to ENSO strength and impacts in the twenty-first century: Results from CMIP5. *Geophys Res Lett* 39:L17703.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc* 93:485-498.
- Trenberth KE, Branstator GW, Karoly D, Kumar A, Lau N-C, Ropelewski C. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res* 103(C7):14291-14324.
- Wang B, An S-I. 2001. Why the properties of El Niño change in the late 1970s? *Geophys Res Lett* 28:3709-3712.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate* 13:1517-1536.
- Wang H, Fu R. 2000. Winter monthly mean atmospheric anomalies over the North Pacific and North America associated with El Niño SSTs. *Am Meteorol Soc* 13:3435-3447.
- Wittenberg AT. 2009. Are historical records sufficient to constrain ENSO simulations? *Geophys Res Lett* 36:L12702.
- Zhou T, Wu B, Dong L. 2014a. Advances in research of ENSO changes and the associated impacts on Asian-Pacific climate. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 50(4):405-422.
- Zhou Z-Q, Xie S-P, Zheng X-T, Liu Q, Wang H. 2014b. Global warming-Induced El Niño teleconnections over the North Pacific and North America. *J Climate* 27:9050-9064.