

## RCP 시나리오에 따른 미래 동아시아 지표복사에너지와 운량 변화 전망

이 철<sup>†</sup> · 부경온 · 심성보 · 변영화

국립기상과학원 기후연구과

### Future Changes in Surface Radiation and Cloud Amount over East Asia under RCP Scenarios

Lee, Cheol<sup>†</sup>, Boo, Kyung-On, Shim, Sungbo and Byun, Youngwha

National Institute of Meteorological Science, Seogwipo 697-845, Korea

#### ABSTRACT

In this study, we examine future changes in surface radiation associated with cloud amount and aerosol emission over East Asia. Data in this study is HadGEM2-CC (Hadley Centre Global Environmental Model version 2, Carbon Cycle) simulations of the Representative Concentration Pathways (RCPs) 2.6/4.5/8.5. Results show that temperature and precipitation increase with rising of the atmosphere CO<sub>2</sub>. At the end of 21<sup>st</sup> century (2070~2099) relative to the end of 20<sup>st</sup> century (1981~2005), changes in temperature and precipitation rate are expected to increase by +1.85 °C/+6.6% for RCP2.6, +3.09°C/+8.5% for RCP4.5, +5.49°C/10% for RCP8.5. The warming results from increasing Net Down Surface Long Wave Radiation Flux (LW) and Net Down Surface Short Wave Radiation Flux (SW) as well. SW change increases mainly from reduced total Aerosol Optical Depth (AOD) and low-level cloud amount. LW change is associated with increasing of atmospheric CO<sub>2</sub> and total cloud amount, since increasing cloud amounts are related to absorb LW radiation and remit the energy toward the surface. The enhancement of precipitation is attributed by increasing of high-level cloud amount. Such climate conditions are favorable for vegetation growth and extension. Expansion of C3 grass and shrub is distinct over East Asia, inducing large latent heat flux increment.

**Key words:** East Asia, Radiation, Climate Change, RCP Scenario, HadGEM2

#### 1. 서 론

IPCC 5차 평가보고서(IPCC AR5, 2013)의 미래 온실가스 증가로 인한 향후 기후변화 전망에 근거한 여러 기후 모델의 예측 실험 결과에 따르면 20세기 말(1986~2005) 대비 21세기 말(2081~2100)에 대표 농도 경로 시나리오(Representative Concentration Pathways, RCPs, Moss *et al.*, 2010) RCP 2.6/4.5/8.5 순으로 전지구 기온이 1.0°C(0.3~1.7), 1.8°C(1.1~2.6), 3.7°C(2.6~4.8) 상승하는 것을 전망하였다. 지구온난화의 주요 원인으로 인간 활동에 의한 온실가스 증가를 제시할 뿐만 아니라, 자연적 혹은 인위적인 복사강제력의 변화에 대해서 보고하였고, 음의 복사강제력으로 에어로졸 효과의 중요성도 언급하였다. 인간활동에 의한 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가는 탄소기후

되먹임 작용(climate-carbon feedback)을 통해 양의 되먹임(positive feedback)이나 음의 되먹임(negative feedback)의 결과로 기후변화에 영향을 미치게 된다. 이 과정은 전지구 탄소수지 변화에 큰 영향을 미친다(Heo *et al.* 2015). 이러한 지구온난화는 북반구에서 최근 20여 년간의 모델과 관측으로 조사한 결과, 증가하는 경향을 보였으며(Cohen *et al.* 2012), 지구온난화로 인한 북극의 해빙의 감소는 전지구 기후시스템을 변화하고, 대기순환에 영향을 미친다(Francis *et al.* 2009). RegCM4를 통해 CORDEX 동아시아 영역에 대해 미래 기후시물레이션을 통해 보고한 Oh *et al.*(2014)에서는 미래(2031~2050) 기후는 보다 따뜻하고 습할 것이며, 여름철 강수 감소를 전망하였다. 특히, 온실가스 및 에어로졸의 배출에 따른 인위적인 복사강제력과 자연적인 화산폭발에 의한 복사강제력의 변화는 대기로 확

<sup>†</sup> Corresponding author: [tetsulee83@korea.kr](mailto:tetsulee83@korea.kr)

Received August 26, 2016 / Revised November 2, 2016 / Accepted November 7, 2016

산하는 복사에너지를 반사하는 역할을 한다(IPCC AR5, 2013). 또한 대기에 입사하는 복사강제력의 증가로 인한 기온 증가에 대한 양의 피드백 작용은 Knutti and Hegerl(2008)에서 보고된 바 있으며, 대기의 복사수지의 변화를 통해 직접 혹은 간접적으로 대기의 온도구조와 구름의 분포에 영향을 줄 수 있다(Chen *et al.*, 2015).

대기 중 CO<sub>2</sub> 증가에 따른 기후시스템의 반응은 주로 복사 강제력의 변화에 기인한 것으로서, CO<sub>2</sub>는 지표에서 대기 밖으로 방출되는 장파 복사를 흡수하여 일차적으로 대류권의 기온을 높이고, 이는 구름이나 지표에서의 물리과정에 변화를 일으키게 된다(Baek *et al.*, 2003). 이러한 구름-강수-복사에너지의 물리적 관계에 대해 GCM(global climate model)으로 실험한 Li *et al.*(2014)은 태평양 ITCZ지역에서 지면의 장/단파 복사에너지에 대해 조사한 바 있고, Sohn(1996)에서는 두꺼운 대류운(deep convective type)의 지표복사효과가 중위도와 극지방에서 상당함을 보여주고 있음을 시사하였다.

에어로졸의 영향과 관련해서는 대기에서 입사하는 태양복사를 산란, 흡수하여 지표에 도달하는 복사 수지를 감소시키는 영향과 구름의 응결핵으로 작용하여 구름의 광학적 및 미세 물리적 성질을 변화시켜 구름수명을 변화시키는 등의 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Li *et al.*, 2011). 에어로졸은 지표면에 도달하는 태양복사 에너지를 감소시켜 지표면 냉각효과를 유발하지만(Hatzianastassiou *et al.*, 2007), 온실가스와 더불어 대기를 가열하는 역할도 한다(Ramana *et al.*, 2010). 그리고 에어로졸-구름상호작용과 관련해서는 대기 순환 변화가 하층운의 변화에 관련되어 강수와 직접적인 연관성을 보인다고 알려져 있다(Lohmann and Feichter, 2005; Tao *et al.*, 2012). 이러한 구름 복사특성에 미치는 에어로졸의 연구는 McFiggans *et al.*(2006)을 들 수 있다. 구름에 의한 복사 강제력은 구름의 고도, 두께, 구름의 광학적 성질에 따라 결과가 상이하게 나타나는데, 태양으로부터의 단파복사를 흡수하거나 반사함으로써 지표의 냉각효과를 유발함과 동시에 장파복사를 흡수하고 재방출하여 양의 피드백 작용인 지표의 승온 효과를 일으킨다(Baek *et al.*, 2003).

이에 본 연구에서는 RCP 시나리오에 따른 미래 동아시아 지역(15~65°N, 80~150°E)의 기온 및 강수 변화를 이해하고자 미래 지표복사에너지 변화에 관심을 두었다. 그리고 지표 복사에너지 변화와 관련된 구름과 이에 영향을 주는 에어로졸 광학두께에 대해 조사하고, 이들이 갖는 기후학적 의미를 파악하고자 한다.

## 2. 모델과 자료

본 연구에서는 RCP 시나리오 3중(2.6/4.5/8.5)에 따른 HadGEM2-CC(Carbon cycle)의 장기 적분 결과를 사용하였다. 분석 영역은 동아시아 지역 15~65°N, 80~150°E로 정의하였다. 적분에 사용한 HadGEM2-CC 모델은 영국기상청에서 개발된 것으로 대기-해양-해빙 모델에 탄소순환과정이 포함된 버전이다. 대기모델의 수평격자는 N96(1.875°×1.25°, ~135 km 간격, 192×145격자)으로 이루어져 있으며, 연직격자는 38층, 모델 고도는 약 40 km로 구성되어 있다. 모델의 지표복합형태는 9가지로 구성되며, 활엽수, 침엽수, C3형 초지, C4형 초지, 도시, 물, 나지, 얼음으로 이들 Fraction 총합은 1이다. 지면 식생 타입은 역학적 식생모형인 TRIFFID(Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics, Cox, 2001)를 통해 모델 적분과정에서 계산된다. TRIFFID 식생모형은 Lotka-Volterra 미분방정식을 사용하여 활엽수, 침엽수, C3형 식물, C4형 식물, 관목의 5개 자연 식생의 경쟁을 수치 모의한다. 토양수분, 빛, 그리고 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도를 고려하여 계산된 식생의 순 일차생산량은 지면모델인 MOSES2(Met Office Surface Exchange Scheme, version 2, Essery *et al.*, 2003)에서 계산한다. 해양모델의 수평격자는 360(동서)×216(남북)(1°×1/3°~1°)로 이루어져 있으며, 연직격자는 40층(~5,328 m)으로 구성되어 있다. 해양탄소순환모델(Hadley Centre Ocean Carbon Cycle, HadOCC, Palmer and Totterdell, 2001)은 Diatom 버전인 Diat-HadOCC으로 해양생지화학 과정을 포함하는데(Collins *et al.*, 2011), 동물성 플랑크톤과 식물성 플랑크톤 및 영양분(질산(N), 철(Fe), 규산(Si))을 다룬다. 그리고 6가지 종류(황산염, 검댕, 유기탄소, 바이오매스, 해염, 먼지)의 대류권 에어로졸을 다루며, 인위적 에어로졸은 황산염, 검댕, 유기탄소, 바이오매스 배출량을 입력자료로 사용하고, 자연적 에어로졸인 먼지, 해염은 모델 내에서 기상장에 의해 배출량이 모의된다(Bellouin *et al.*, 2007; Collins *et al.*, 2011).

모델 적분 시 RCP에 따른 온실가스 및 에어로졸 배출량과 더불어 역학적 식생과정을 위해 인간의 활동에 따른 경작지 및 목초지 변화(Jones *et al.*, 2011, 2013)가 고려된다. 이는 농경지 성장률로 입력되며 C3, C4초지 면적 성장률의 형태로 RCP 시나리오에 따라 적용되는데 농경지의 면적이 RCP2.6/RCP8.5시나리오에 따라 증가하며, RCP4.5/RCP6.0시나리오에서는 감소한다(Collins *et al.*, 2011).

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 기온, 강수

장기적분결과에 따르면 동아시아지역에서 기온과 강수의 증

가량은 20세기 말(1981~2005년) 대비 21세기 말(2075~2099년)에 RCP2.6은 +1.85°C/+6.6%, RCP4.5는 +3.09°C/+8.5%, RCP8.5는 +5.49°C/+10%로 각각 전망된다(Table 1). 21세기 말 동아시아 기온증가는 고위도로 갈수록 크게 모의되었다(Fig. 1(a)). 강수량은 동아시아지역에서 RCP 3개 시나리오의 수평 분포가 비슷하게 나타났고, 강도의 차이만을 보였다(Fig. 1(b)). 이에 미래 전망 비교에서 대체적으로 RCP 3개의 시나리오의 증감은 유사 경향을 띠는 것으로 판단되어 식생분포를 제외한 이후 각 변수 별 수평장은 RCP8.5 시나리오에 대해 제시한다. 식생의 지역적인 분포는 RCP 시나리오별로 차이가 나타나기 때문이다(Collins *et al.*, 2011). 수평분포에서 기온 증가는 대부분 육지에서 기인함을 알 수 있다. 기온은

Table 1. Changes of temperature (°C) and precipitation rate (%) for RCPs between the period of 2075~2099 from 1981~2005 in East Asia (15~65°N, 80~150°E).

RCPs	Temperature (°C)	Precipitation (%)
RCP8.5	5.49	10.0
RCP4.5	3.09	8.5
RCP2.6	1.85	6.6

50°N 이상에서 크게 증가하고 있으며, 강수량은 20~30°N부근에서 육지에서는 주로 증가가, 해양에서는 주로 감소가 나

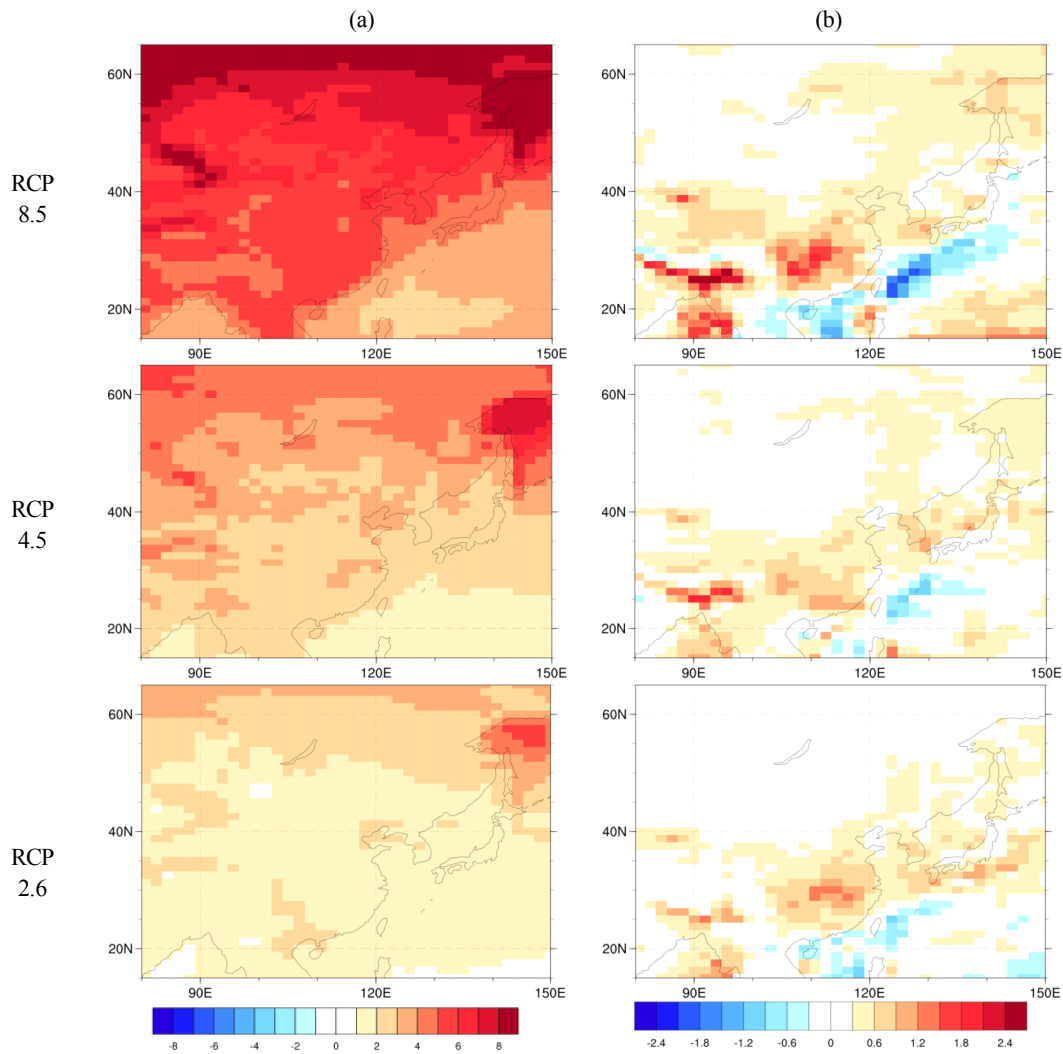


Fig. 1. Changes in (a) temperature (°C) and (b) precipitation (mm/day) for RCP8.5/4.5/2.6 between the period of 2075~2099 and 1981~2005.

타났다.

### 3.2 대기복사, 에어로졸

20세기 말 대비 21세기 말 동아시아의 기온상승 및 강수량 증가를 이해하고자 지표면 장파복사(Net Down Surface Short Wave Flux) 및 단파 복사(Net Down Surface Short Wave Flux)의 변화를 조사하였다. 지표면 장파복사는 30~50°N 위도대의 동아시아 내륙에서 증가하며, 단파복사는 내륙 고위도와 중국 남부에서 북동쪽 방향으로 증가하는 수평 분포를 보인다. 대기에 입사하는 복사강제력의 증가와 기온증가에 대한 양의 피드백 작용은 Knutti and Hegerl(2008)에서 보고된 바 있어, 21세기말 기온의 증가(Fig. 1(a))는 복사량의 증가(Fig. 2)와 연관된 것으로 생각되며, 장파복사량은 증가하고, 단파복사량은 감소와 증가가 혼재한 것으로 보인다. Table 2에 따르면 21세기 말 동아시아 장파복사량의 변화는 RCP 시나리오 3종(8.5/ 4.5/2.6)에 대해 4.61, 2.11, 0.87 Wm<sup>-2</sup> 증가하는 것으로 모의되었다. 이는 약 1~7%의 변화율로 상대적으로 단파복사량이 3% 정도 변화하는 것보다 변동폭이 크다. 장파복사의 변화는 RCP 시나리오에 비례하여 변동하나, 단파복사의 경우는 상대적으로 모든 RCP 시나리오에서 약 3%, 5 Wm<sup>-2</sup>의 거의 유사한 변화폭을 보인다.

21세기말 장파복사 변화의 수평분포를 보면, 해양에서 증가하고, 내륙에서는 30~50°N에서 증가한다. 이러한 장파복사의 증가(Fig. 2(a))는 지표로부터 방출된 복사가 구름/대기 등에 의해 반사되어 다시 지표로 방출되고, 지표기온을 증가시키는 양의 되먹임 효과로 이해되며(Kim, 1999), 이러한 대기

Table 2. Changes (Wm<sup>-2</sup>) of radiation fluxes for RCPs between the period of 2075~2099 from 1981~2005 in East Asia (15~65°N, 80~150°E)

RCPs		Net down surface LW flux	Net down surface SW flux
RCP	%	7.4	3.4
8.5	Diff. value	4.61	5.22
RCP	%	3.4	3.4
4.5	Diff. value	2.11	5.09
RCP	%	1.4	3.3
2.6	Diff. value	0.87	4.97

의 복사수지의 변화는 직접 혹은 간접적으로 대기의 온도구조와 구름의 분포에 영향을 줄 수 있다(Chen *et al.*, 2015). 더불어 Cess *et al.*(1989)에서는 기후모델의 결과를 이용하여 구름의 되먹임 효과를 조사하였고, Kim(1999)에서는 관측 값을 이용하여 온실기체 증가에 따른 지구온난화에 대해 상층 구름량과 지표면 사이의 양의 되먹임 관계를 조사하였다. 이는 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따른 온실효과와 더불어 지역적 이해를 위해서는 수반되는 구름의 변화 역시 중요함을 의미한다. Fig. 2(a)에서 30~50°N 부근 내륙에서 장파복사의 증가가 큰 지역에서 총 운량도 증가함을 볼 수 있다(Fig. 3(a)). 장파복사의 증가경향은 내륙지역에서 총 운량(Total Cloud Amount)의 변화량과 대체적으로 비례함을 볼 수 있으며, IPCC AR4에서 에어로졸-구름과 복사와의 관계를 언급한 내용과 일치하다.

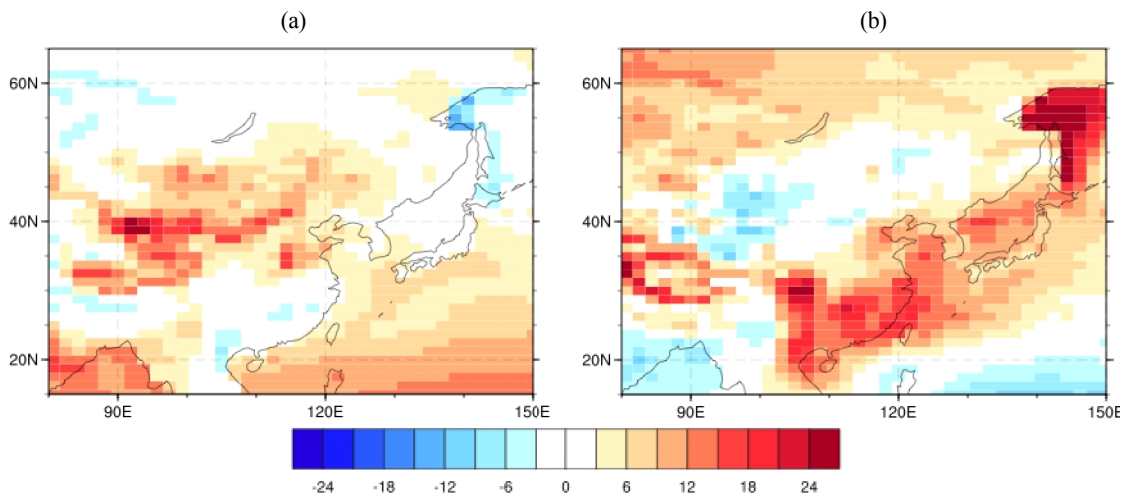


Fig. 2. Changes in (a) Net down surface LW flux (Wm<sup>-2</sup>), (b) Net down surface SW flux (Wm<sup>-2</sup>) for RCP8.5 scenario between the period of 2075~2099 and 1981~2005.

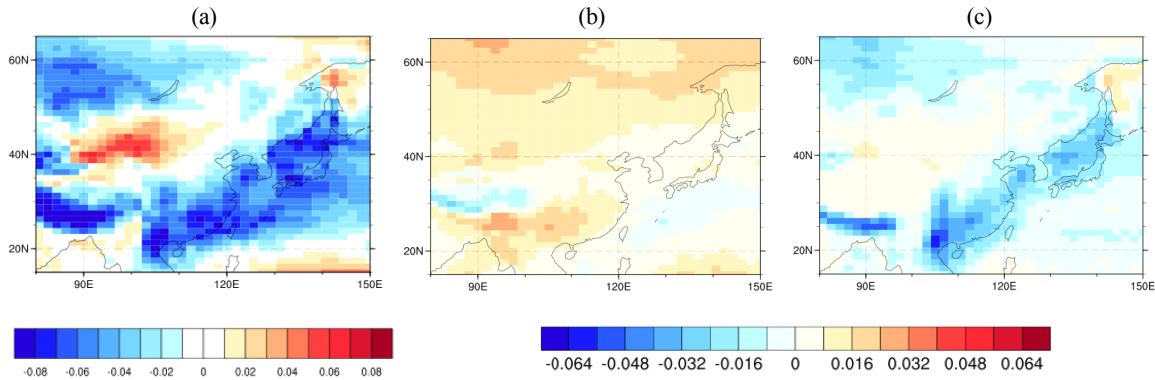


Fig. 3. Changes in (a) total cloud amount (fraction), (b) high-level cloud amount (fraction), (c) low-level cloud amount (fraction) for RCP 8.5 scenario in East Asia between the period of 2075~2099 and 1981~2005.

여기서 총 운량 중 장파복사 변화에 주로 연관된 구름특성을 살펴보고자 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project) 분류법을 이용하여 구름의 광학 깊이와 상단 고도에 따라 9가지 구름 종류로 구별하고, 이들을 상층운, 중층운, 하층운으로 구분하여 분석하였다. 일반적으로 상층운은 장파차단의 효과가 커서 대기 warming를 유도하며, 이와 반대로 하층운은 광학두께가 높아 단파복사 차단 효과가 커서 복사적으로 지표면 cooling을 가져오는 것으로 알려져 있다. 높이에 따라 21세기 말 동아시아에 증가한 구름은 상층운이다. 이 상층운은 동아시아 강수량 증가(Fig. 1(b))가 두드러진 남중국 내륙 20~40°N 부근에 영향을 준 것으로 분석된다(Fig. 3(b)). 21세기 말 총 운량의 변화(Fig. 3(a))에서 남중국에서 북동쪽 방향으로 크게 감소하는데, 이는 단파복사의 변화의 수평분포(Fig. 2(b))와 유사하다. 총 운량의 감소에는 하층운이 큰 역할

을 하였으며, 이 지역에 단파복사의 증가가 뚜렷하다.

에어로졸의 역할은 구름과 관련된 간접효과와 더불어 직접적으로 태양복사를 산란 또는 흡수함으로써 지표와 대기 상단에서의 복사량을 변화시키며(IPCC AR4, 2007), 에어로졸의 감소에 따른 구름입자 크기의 증가는 충돌/병합 효율을 높여 구름입자가 물방울로 성장하는 것을 도모하고(Rosenfeld, 2006), 잦은 강수로 인한 구름수명을 감소시킨다. 따라서 에어로졸 증가가 있는 화남지역을 중심으로 강수가 증가(Fig. 1(b))하여 하층운이 감소(Fig. 3(c))하는 것으로 설명된다.

RCP 시나리오에 따르면 21세기말 이산화황, 검댕, 유기탄소 에어로졸의 배출이 모두 감소할 것으로 전망되고, 특히 지역적으로 주요 배출원인 아시아지역의 감소가 두드러진다(NIMR, 2011). Fig. 4(a)에 따르면 Total AOD(Aerosol Optical Depth)가 중국 화남지역에서 이와 일치하는 감소 경향을 보

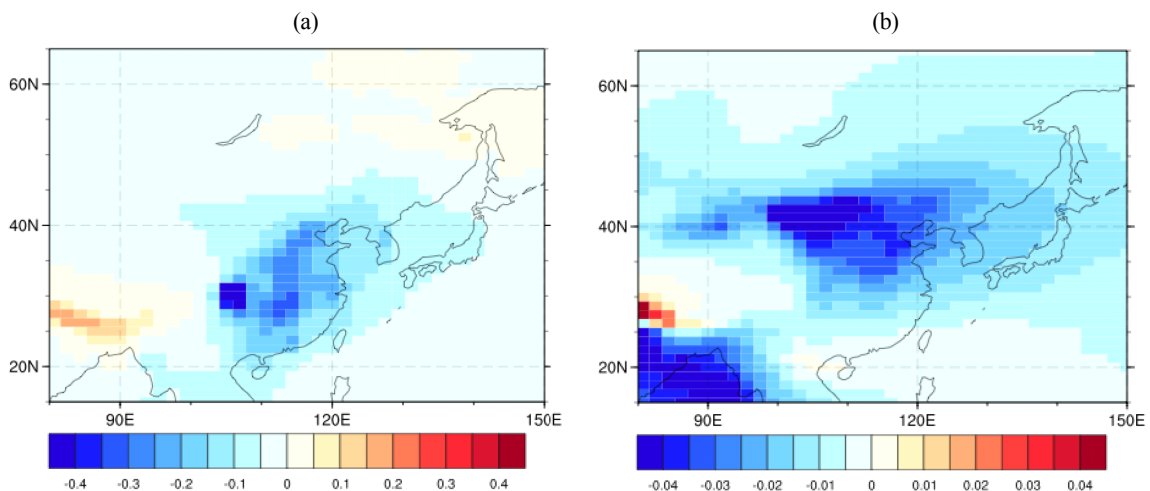


Fig. 4. Changes in (a) Total aerosol optical depth, (b) Mineral dust optical depth for RCPs between the period of 2075~2099 and 1981~2005 in East Asia (15~65°N, 80~150°E).

이고 있다. Total AOD의 감소는 입사하는 단파 복사를 증가시키는데, 특히 Total AOD의 급격한 감소가 나타나는 중국 화남지역에서 크게 단파복사가 증가한다(Fig. 2(b), Fig. 4(a)). Total AOD의 감소는 인위적 에어로졸 배출의 감소와 더불어 먼지와 같은 자연적 에어로졸 배출의 감소도 포함된다. 21세기 말 동아시아에서 에어로졸 배출량이 감소한다는 NIMR (2011)의 보고와 더불어 Fig. 4(b)는 동아시아의 MDOD(Mineral Dust Optical Depth)가 40°N에서 먼지배출량이 감소함이 뚜렷함을 전망한다. MDOD 감소는 나지면적 변화와 연관되는데(Fig. 6), 21세기말 식생증가에 따라 나지면적의 감소가 뚜렷하고, 이러한 나지 감소는 먼지 에어로졸 배출의 감소에 영향을 미쳐(Mahowald *et al.*, 2006) 대기 및 지표의 에너지 균형에 영향을 끼칠 수 있다(Li *et al.*, 2011). 그러나 이 MDOD 감소는 Total AOD 감소의 약 10%에 해당하는 작은 값으로 판단된다(Fig. 4).

3.3 열 속(현열, 잠열), 증발산

장/단파 복사에너지 증가에 따른 지표면의 열 속 변화를 살펴 보았다. 낮에는 장파복사와 단파복사의 증가로 인한 지면기온 상승이 대기기온보다 상승하게 되고, 이는 지면에서 대기로 열의 이동이 일어나 현열 속(Sensible Heat Flux)이 증가하게 되고, 밤에는 이와 반대로 혹은 더 약한 증가가 일어날 수 있다. Fig. 5(a)에서 육지에서 현열 속 증가가 전망되고, 티벳, 남중국의 지역적으로 증가하는 분포가 보이고, 면적 평균한 변화량(Table 3)은 잠열 속(Latent Heat Flux)에 비해 매우 작다. 잠열 속은 육지와 해양에서 양의 값을 보이나, 현열 속은 육지와 해양의 경향이 달라 면적평균에서 서로 상쇄되기 때문이다.

현열 속에 비해 미래 잠열 속은 더 크게 증가하고 있다

Table 3. Changes ( $Wm^{-2}$ ) of heat fluxes for RCPs between the period of 2075~2099 from 1981~2005 in East Asia ( $15\sim65^{\circ}N$ ,  $80\sim150^{\circ}E$ ).

RCPs		Latent heat flux ( $Wm^{-2}$ )	Sensible heat flux ( $Wm^{-2}$ )
RCP 8.5	%	10.0	0.0
	Diff.	7.76	0.00
RCP 4.5	%	8.7	0.2
	Diff.	6.77	0.05
RCP 2.6	%	7.1	-0.2
	Diff.	5.54	-0.05

(Table 3, Fig. 5(b)). 잠열 속은 지표면에서 이루어지는 증발, 증발산 또는 응결의 결과이기에 모델에서 모의하는 증발산과도 비슷한 결과를 보인다(Fig. 5(b)~(c), Bateni *et al.*, 2014). 식생면적의 증가가 뚜렷한(Fig. 6) 동아시아 대륙에서 잠열 속 증가가 높게 나타나는 것으로 보아 증발산 작용이 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

식생면적 증가에 따른 지면피복의 변화는 에너지 및 물 평형 등에 영향을 주어 알베도 및 거칠기 길이를 변화시키며, 지표면 온도 및 지면과 대기 사이의 열 속, 수분, 운동에너지 교환에도 영향을 미친다(Chase *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2010). 20세기 말 대비 21세기 말 미래 지면 식생 변화(Fig. 6)는 동아시아에서 20세기 말 대비 21세기 말에 C3 초지와 관목(Shrub)의 식생면적 증가가 크고, 나지(Bare soil) 면적이 감소한다. Lee *et al.*(2014)에 따르면 같은 위도대의 전지구 평균에 비하여 동아시아 지역의 기온 및 강수량 증가는 상대적으로 매우 컸고, 기온, 강수량의 증가가 식생 성장에 좋은 조건을 제공하였다고 보고하였으며, 모든 RCP 시나리오에서 나

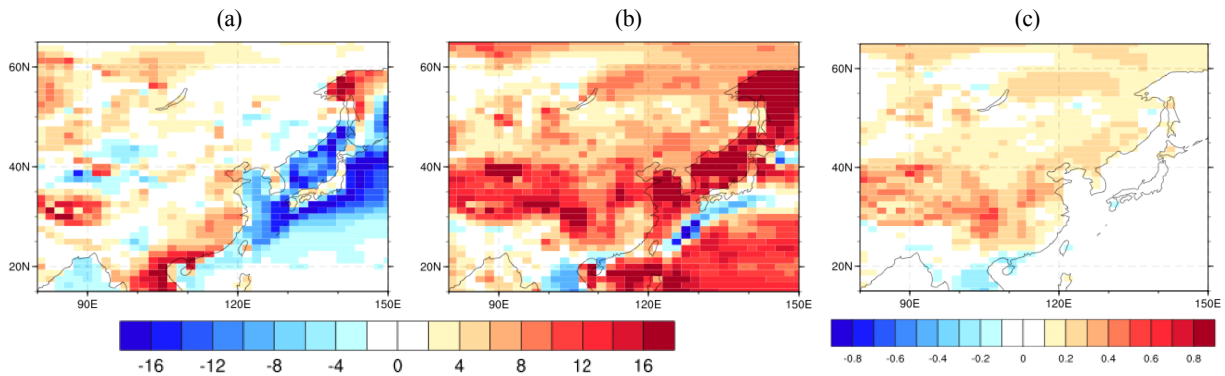


Fig. 5. Change of (a) Sensible heat flux ( $Wm^{-2}$ ), (b) Latent heat flux ( $Wm^{-2}$ ), (c) evaporation ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )for RCP 8.5 scenario between the period of 2075~2099 and 1981~2005 in East Asia ( $15\sim65^{\circ}N$ ,  $80\sim150^{\circ}E$ ).

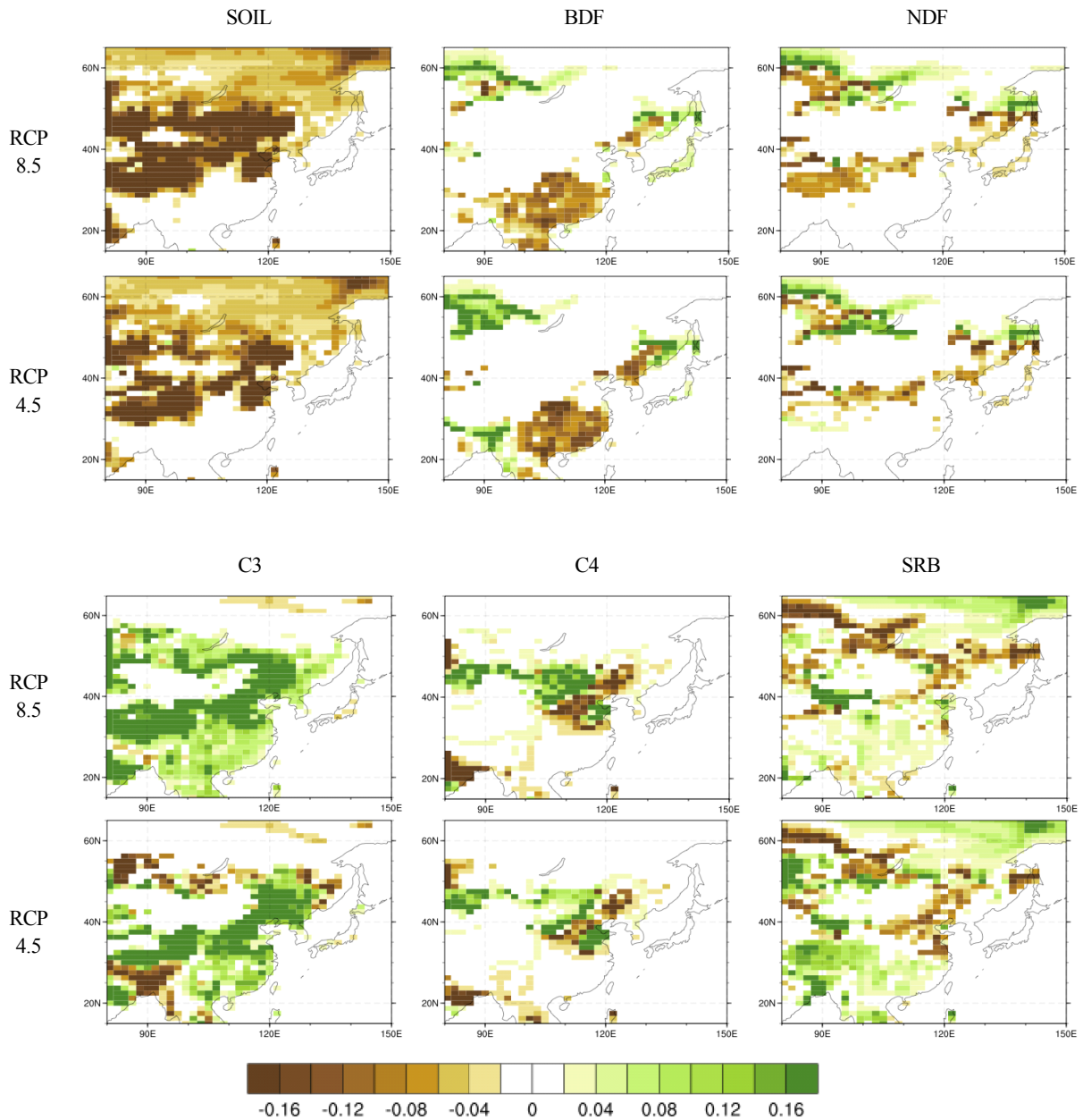


Fig. 6. Changes in the land surface fraction of bare soil (SOIL), broadleaf tree (BDF), needleleaf tree (NDF), C3 grass (C3), C4 grass (C4) and shrub (SRB) for RCP 8.5/4.5 between the period of 2075~2099 and 1981~2005.

지가 감소한 지역에 식생 증가가 나타났다. 이는 Martine and Levine(2012)과도 유사한 결과이다. 동아시아에서 두드러지게 증가하는 식생은 C3 초지, 관목으로, 상대적으로 활엽수, 침엽수와 C4 초지의 면적변화는 작다. 따라서 Fig. 5의 잠열 속과 증발산의 변화는 C3 초지의 큰 증가가 원인이며, 고위도의 잠열 속 증가는 관목의 증가로 분석된다.

#### 4. 요약

본 연구는 RCP 시나리오에 따른 미래 동아시아의 기후변화의 원인을 조사하기 위해 지표면 복사에너지 및 구름 종류별 변화에 초점을 두었다. RCP 시나리오의 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따라 미래전망을 이해하기 위해 탄소순환과정이 결합되어 있

는 HadGEM2-CC모델의 장기적분 결과를 사용하였다. 20세기 말 대비 21세기 말 동아시아 연평균 기온과 강수는 증가가 전망된다. 지표면에 입사하는 하향 장파복사의 증가는 지표와 구름/대기와의 양의 되먹임 효과로 이해되며, 여기에는 대기 중 CO<sub>2</sub>의 온실효과와 더불어 상승운 운량증가가 연관되고 장파복사량의 변화가 미래 기온전망에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 지표에 입사되는 단파복사량 역시 21세기말 증가하는데, 이는 에어로졸 배출량 감소로 인한 입사하는 단파복사 증가의 직접효과와 하층운이 감소하는 간접효과 영향으로 파악되었다. 하향복사의 증가는 총 운량의 증가를 수반하는데 이를 탄소모듈과 직접적 연관보다는 지면 식생면적 증가에 따른 증발산 증가가 대기 중 수증기를 통해 하향복사에 연관될 수 있다고 사료된다.

Matthew *et al.*(2003)에서는 지면피복 변화에 따라 전구 복사에너지가 변화한다고 하였다. 본 연구에서 지면피복 변화를 살펴본 결과, 미래 20세기 말 대비 21세기말 초지와 관목면적이 증가하고, 나지 면적이 감소하였다. 미래 기후 온난화 영향으로 동아시아 지역의 식생면적 증가로 인한 나지 면적 감소는 먼지 에어로졸 배출을 감소하여 단파복사의 입사를 증가시킬 것으로 생각되었으나, 본 연구에서는 단파복사에 미치는 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 식생면적의 증가와 나지 면적의 감소로 인한 알베도 변화(Houldcroft *et al.*, 2009)는 입사하는 태양 복사에너지를 더 많이 흡수하여 지면에 저장, 방출하는 양의 되먹임 현상인 기후-식생의 상호작용을 가져올 것으로 생각되나, 이 부분은 추가 연구가 필요하다. 또한 21세기 말 에어로졸 배출량 감소는 구름입자의 크기 성장을 도모하고(Rosenfeld, 2006), 잦은 강수로 인해 동아시아의 강수 증가를 일으킨 것으로 분석되었다.

복사 증가에 따른 지면기온 상승은 현열 속에 영향을 미치는 것으로 분석되었고, 지표 피복의 변화는 잠열 속에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. Bateni *et al.*(2014)에서는 식생의 면적 변화에 따라 열 속 변화를 모의하고, 모델에서 식생면적 변화에 따라 열 속의 변화가 뚜렷함을 보고하였는데, 본 연구에서도 미래 동아시아 지역에 식생면적 변화에 의한 열 속 변화를 확인하였다. 특히, 초지(C3, C4)면적 확장이 뚜렷한 동아시아 내륙에서 잠열 속 증가가 높게 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 증발량은 식생면적 확장에 따른 수증기 증가의 피드백을 통해 지표 증가에 기여하였다.

본 연구는 단일 모델에 근거한 것으로 미래 온실가스 증가에 따른 전지구 및 지역별, 위도별 모의결과가 모델마다 다양함을 볼 때 식생역학, 물리과정의 차이를 이용한 불확실성을 정량화할 필요가 있다. Martin and Levine(2012)에 따르면 식

생모형이 접합된 모델이 현재 및 미래 기후 전망에 중요한 역할을 한다고 보고하였는데, 향후 유의성 확보를 위해 다양한 CMIP5 모델을 이용한 앙상블실험 결과와 관측자료를 비교하는 추가분석이 필요하다.

## 사 사

이 연구는 ‘NIMR-2016-3100(기상업무지원기술개발연구)’의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Baek SK, Ryu JH, Ryoo SB. 2003. Analysis of the CO<sub>2</sub> bubbling experiment using METRI AGCM. Part II : The climate responses related to cloud-radiative forcing and surface energy budget. Atmosphere. Korea Meteorological Society 39(1):95-107.
- Bateni SM, Entekhabi D, Margulis S, Catelli F, Kergoat L. 2014. Coupled estimation of surface heat fluxes and vegetation dynamics from remotely sensed land surface temperature and fraction of photosynthetically active radiation. Water Resources Research 50:8420-8440, doi:10.1002/2013WR014573
- Bellouin N, Boucher O, Haywood J, Johnson C, Jones A, Rae J, Woodward S. 2007. Improved representation of aerosols for HadGEM2. Met Office Hadley Centre, Technical Note 73.
- Cess RD, Potter GL, Blanchet JP, Boer GJ, Ghan SJ, Kiehl JT, Le Treut H, Li ZX, Liang XZ, Mitchell JFB, Morcrette JJ, Randall DA, Riches MR, Roeckner E, Schlese U, Slingo A, Taylor KE, Washington WM, Wetherald RT, Yagai I. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. Science 245:513-516.
- Chase TN, Pielke Sr RA, Kittel TGF, Nemani RR, Running SW. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. Climate Dynamics 16:93-105.
- Chen G, Wang WC, Chen JP. 2015. Aerosol-stratocumulus-radiation interactions over the southeast pacific. Journal of the Atmospheric Sciences 72:2612-2621, doi:10.1175/JAS-D-14-0319.1



- Cohen JL, Furtado JC, Barlow M, Alexeev VA, Cherry JE. 2012. Asymmetric seasonal temperature trends. *Geophysical Research Letters* 39:L04705, doi:10.1029/2011GL050582
- Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Halloran P, Hinton T, Hughes J, Jones CD, Joshi M, Liddicoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, Senior C, Sitch S, Totterdell I, Wiltshire A, Woodward S. 2011. Development and evaluation of an earth-system model - HadGEM2. *Geoscientific Model Development* 4:1051-1075, doi:10.5194/gmd-4-1051-2011
- Cox PM. 2001. Description of the TRIFFID dynamic global vegetation model. Hadley Centre Technical Note 24
- Essery R, Best M, Betts R, Cox P, Taylor C. 2003. Explicit representation of subgrid heterogeneity in a GCM land-surface scheme. *Journal of Hydrometeorology* 4:530-543.
- Francis JA, Chan W, Leathers DJ, Miller JR, Veron DE. 2009. Winter northern hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophysical Research Letters* 36:L07503, doi:10.1029/2009GL037274
- Heo TK, Boo KO, Shim SB, Hong JK, Hong JW. 2015. Global carbon budget changes under RCP scenarios in HadGEM2-CC. *Atmosphere Korean Meteorological Society*. 25:85-97.
- Houldcroft CJ, Grey MF, Barnsley M, Taylor CM, Los SO, North PRJ. 2009. New vegetation albedo parameters and global fields of soil background albedo derived from MODIS for use in a climate model. *Journal of Hydrometeorology* 10:183-198, doi:10.1175/2008JHM1021.1
- Hatzianastassiou N, Matsoukas C, Drakakis E, Stackhouse Jr PW, Koepke P, Fortiadi A, Pavlakis KG, Vardavas I. 2007. The direct effect of aerosols on solar radiation based on satellite observations, reanalysis datasets, and spectral aerosol optical properties from Global Aerosol Data Set (GADS). *Atmospheric Chemistry and Physics* 7:2585-2599.
- IPCC. 2007. Climate change 2007, the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment, report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones CD, Hughes JK, Bellouin N, Hardiman SC, Jones GS, Knight J, Liddicoat S, O'Connor FM, Andres RJ, Bell C, Boo KO, Bozzo A, Butchart N, Cadule P, Corbin KD, Doutriaux-Boucher M, Friedlingstein P, Gornall J, Gray L, Halloran PR, Hurtt G, Ingram WJ, Lamarque JF, Law RM, Meinshausen M, Osprey S, Palin EJ, Parsons Chini L, Raddatz T, Sanderson MG, Sellar AA, Schurer A, Valdes P, Wood N, Woodward S, Yoshioka M, Zerroukat M. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 4:543-570, doi:10.5194/gmd-4-543-2011
- Jones C, Robertson E, Arora V, Friedlingstein P, Shevliakova E, Bopp L, Brovkin V, Hajima T, Kato E, Kawamiya M, Liddicoat S, Lindsay K, Reick CH, Roelandt C, Segschneider J, Tjiputra J. 2013. Twenty-first-century compatible CO<sub>2</sub> emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under four representative concentration pathways. *Journal of Climate* 26, doi:10.1175/JCLI-D-12-00554.1
- Kang JH, Suh MS, Kwak CH. 2010. Land cover classification over east asian region using recent MODIS NDVI data (2006-2008). *Atmosphere. Korean Meteorological Society* 40:415-426.
- Kim MK. 1999. The influence on the seasonal variability of surface air temperature due to high cloud amounts. *Atmosphere Korean Meteorological Society* 4:475-489.
- Knutti R, Hegerl GC. 2008. The equilibrium sensitivity of the earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience* 1:735-743.
- Lee C, Boo KO, Hong JK, Seong HM, Heo TK, Seol KH, Lee JH, Cho CH. 2014. Future changes in terrestrial carbon cycle under RCP scenarios. *Atmosphere Korea Meteorological Society* 24:303-315.
- Li Z, Li C, Chen H, Tsay SC, Holben B, Huang J, Li B, Maring H, Qian Y, Shi G, Xia X, Yin Y, Zheng Y, Zhuang G. 2011. East asian studies of tropospheric aerosols and their impact on regional climate (EAST-AIRC): An overview. *Journal of Geophysical Research* 116, D00K34,

- doi:10.1029/2010JD015257
- Li JLF, Lee WL, Waliser DE, Neelin JD, Stachnik JP, Lee T. 2014. Cloud-precipitation-radiation-dynamics interaction in global climate models: A snow and radiation interaction sensitivity experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119:3809-3824, doi:10.1002/2013JD021038
- Lohmann U, Feichter J. 2005. Global indirect aerosol effects: A review. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5:715-737.
- McFiggans G, Artaxo P, Baltensperger U, Coe H, Facchini MC, Feingold G, Fuzzi S, Gysel M, Laaksonen A, Lohmann U, Mentel TF, Murphy DM, O'Dowd CD, Snider JR, Weingartner E. 2006. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6:2593-2649.
- Mahowald NM, Yoshioka M, Collins WD, Conley AJ, Fillmore DW, Coleman DB. 2006. Climate response and radiative forcing from mineral aerosols during the last glacial maximum, pre-industrial, current and doubled-carbon dioxide climates. *Geophysical Research Letters* 33:L20705, doi:10.1029/2006GL026126
- Martin GM, Levine LC. 2012. The influence of dynamic vegetation on the present-day simulation and future projections of the South Asian summer monsoon in the HadGEM2 family. *Earth System Dynamics* 3:245-261.
- Mattews HD, Andrew JW, Michael E, Katrin JM. 2003. Radiative forcing of climate by historical land cover change. *Geophysical Research Letters* 30, doi:10.1029/2002GL016098
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756, doi:10.1038/nature08823
- NIMR. 2011. Development and application of methodology for climate change prediction (III).
- Oh SG, Park JH, Lee SH, Suh MS. 2014. Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 119:2913-2927, doi:10.1002/2013JD020693
- Palmer JR, Totterdell IJ. 2001. Production and export in a global ocean ecosystem model. *Deep-Sea Research I* 48: 1169-1198.
- Ramana MV, Ramanathan V, Feng Y, Yoon SC, Kim SW, Carmichael GR, Schauer JJ. 2010. Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source. *Nature Geoscience* 8:542-545.
- Rosenfeld D. 2006. Aerosol-cloud interactions control of earth radiation and latent heat release budgets. *Space Science Reviews*, DOI:10.1007/s11214-006-9053-6
- Sohn BJ. 1996. The impact of clouds on the surface long-wave radiation budget. *Atmosphere Korea Meteorological Society* 1996.5:229-242
- Tao WK, Chen JP, Li Z, Wang C, Zhang C. 2012. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Review of Geophysics* 50:RG2001, doi:10.1029/2011RG000369