

미래 기후 변화 시나리오에 따른 환북극의 변화

이지연¹⁾ · 조미현¹⁾ · 고영대²⁾ · 김백민³⁾ · 정지훈^{2)*}

¹⁾극지연구소, ²⁾전남대학교 해양학과, ³⁾부경대학교 환경대기과학과

(접수일: 2018년 9월 14일, 수정일: 2018년 11월 10일, 게재확정일: 2018년 11월 18일)

Projection of Circum-Arctic Features Under Climate Change

Ji Yeon Lee¹⁾, Mee-Hyun Cho¹⁾, Youngdae Koh²⁾, Baek-Min Kim³⁾, and Jee-Hoon Jeong^{2)*}

¹⁾Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

²⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

³⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 14 September 2018; revised 10 November 2018; accepted 18 November 2018)

Abstract This study investigated future changes in the Arctic permafrost features and related biogeochemical alterations under global warming. The Community Land Model (CLM) with biogeochemistry (BGC) was run for the period 2005 to 2099 with projected future climate based on the Special Report on Emissions Scenarios (SRES) A2 scenario. Under global warming, over the Arctic land except for the permafrost region, the rise in soil temperature led to an increase in soil liquid and decrease in soil ice. Also, the Arctic ground obtained carbon dioxide from the atmosphere due to the increase in photosynthesis of vegetation. On the other hand, over the permafrost region, the microbial respiration was increased due to thawing permafrost, resulting in increased carbon dioxide emissions. Methane emissions associated with total water storage have increased over most of Arctic land, especially in the permafrost region. Methane releases were predicted to be greatly increased especially near the rivers and lakes associated with an increased chance of flooding. In conclusion, at the end of 21st century, except for permafrost region, the Arctic ground is projected to be the sink of carbon dioxide, and only permafrost region the source of carbon dioxide. This study suggests that thawing permafrost can further to accelerate global warming significantly.

Key words: Global warming, permafrost, CLM, CO₂ emission, methane emission

1. 서 론

여름철에도 녹지 않고 온도가 두 해 이상 영하로 유지되고 있는 토양을 영구동토층(permafrost)이라 한다. 영구동토층은 주로 알래스카, 캐나다 북부, 시베리아, 알프스, 티베트 고지대 등에 분포하며, 북반구 지표면 면적의 약 25%를 차지한다(Camill, 2005). 일부 동토층은 겨울철에는 결빙 상태가 유지되지만 여름철에 토양온도가 영상으로 올라가면서 해동(thawing)

되어 식물이 자랄 수 있는 활동층(active layer)으로 변하게 된다. 이렇듯 지구온난화의 진행에 따라 활동층의 깊이가 점점 깊어지면서 영구동토층이 사라지는 곳이 증가하고 있다(Jorgenson et al., 2006; Bunn et al., 2007; Brown and Romanovsky, 2008; Romanovsky et al., 2010; Schuur et al., 2013). Quinton et al. (2011)은 캐나다 북서부 지역인 스코티크리크유역의 영구동토 지역 1 km² 영역을 원격탐사한 결과, 1947년 0.7 km²이었던 영구동토의 면적은 2008년 0.43 km²으로 감소했음을 제시하였으며, Wu and Zhang (2010)에서도 티벳고원 활동층의 깊이가 1995년부터 2007년까지 1년에 약 7.5 cm씩 깊어지고 있음을 보고하였다. CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase

*Corresponding Author: Jee-Hoon Jeong, Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea.
Phone: +82-62-530-3466, Fax: +82-62-530-3469
E-mail: jjeehoon@jnu.ac.kr

5; Taylor et al., 2012) 실험 결과에서도 미래 기후 변화 시나리오에 의한 영구동토층의 변화가 예측되었는데, 21세기 후반까지 지표면 근처의 영구동토층 면적이 RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6 시나리오에서는 약 37%, RCP8.5 시나리오에서는 약 81%까지 감소할 것으로 전망되었다(IPCC, 2013).

영구동토층의 해동은 지구 기후 시스템에 다양한 영향을 미치는데, 특히 탄소순환에 미치는 영향은 매우 중요하다. 영구동토층에는 많은 양의 동식물의 사체가 묻혀있어, 해동 시 미생물의 분해가 증가되면서 땅속의 탄소가 대기 중으로 방출되기 때문이다(Deconto et al., 2012). 북반구 고위도의 동토층이 해동되면 동토층 안에 있던 얼음은 녹아 토양 수상(liquid)으로 변하게 되면서 활동층이 습지가 될 수 있다. 이러한 습지에서의 토양 수분(soil water)은 토양 온도의 영향을 받아 토양 속 탄소를 메탄으로 생성시켜 방출하기 때문에, 메탄 방출량은 습지의 분포와 밀접한 연관성을 갖는다(Cao et al., 1996; Xie et al., 2011). 실제로 시베리아 동북부 지역에서 1993년부터 1995년까지 여름철 토양온도와 메탄 방출의 관계를 살펴본 결과 토양온도와 지표면온도가 높을수록 메탄 방출이 강해지는 것으로 나타났다(Nakano et al., 2000). 메탄은 온실효과를 일으키는 주요 온실가스(Greenhouse gas, GHG)의 하나로써, 분자당 이산화탄소의 21배에 해당하는 온실효과를 가진다(Lombardi et al., 2006). 또한 메탄은 대기 중으로 방출된 후에는 평균 잔류시간이 12.4년으로 다양한 과정에 의해 소멸이 가능하여 5년에서 200년까지 편차가 큰 이산화탄소의 잔류시간보다 짧은 잔류시간을 갖고 있지만, 이산화탄소보다 에너지 흡수율이 훨씬 높아 지구온난화 잠재력(Global warming potential)이 매우 크므로 주목해야 한다고 보고된 바 있다(IPCC, 2013). 그러나 IPCC 5차 보고서의 미래 기후변화 RCP 시나리오에는 동토로부터 방출되는 탄소와 메탄은 고려되지 않고 있다. 또한 기후변화에 따라 탄소와 메탄의 방출량과 방출 속도 및 형태 등 포괄적으로 답을 주는 연구는 아직 부족하다.

본 연구에서는 생지화학 과정을 고려한 지면 모델을 사용하여 미래 온난화된 기후에 따른 동토층의 해동에 의한 활동층의 깊이와 면적의 변화, 동토층의 토양온도 변화 및 토양 내 수상과 얼음의 변화를 현재(2005~2017)와 21세기 후반(2085~2099)으로 나누어 비교하였다. 또한, 21세기 후반으로 가면서 동토층의 해동으로 인해 방출되는 탄소와 메탄의 변화를 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 동토층 및 전 지구의 미래변화를 모의하기 위하여 NCAR (National Center for Atmospheric

Research)에서 개발한 생지화학 모듈이 결합된 지면모델 CLM4.5BGC (Community Land Model version 4.5 Bio Geo Chemistry, Koven et al., 2013)를 사용하였다. CLM4.5는 CESM (Community Earth System Model)의 지면을 구성하는 모델로써 생지물리, 수문, 생지화학 과정들이 포함되어있다. Lawrence et al. (2012)에 의하면, 현재 기후 하에서 CLM은 연속 동토층과 불연속 동토층의 수평분포를 관측과 유사하게 모의하고 있다. 또한, BGC 모듈은 탄소순환뿐 아니라 메탄의 생성과 산화, 증발, 습지에 있는 식물의 통기조직 내 운송, 지표면에서의 방출 등 메탄순환까지 고려되어 있는 모듈이다(Riley et al., 2011). BGC 모듈에서의 메탄 방출량(P)은 식 (1)과 같이, 토양 속 미생물들의 호흡량(heterotrophic respiration from soil and litter, R_h)과 이산화탄소와 메탄의 생성 비율(baseline ratio between CO₂ and CH₄ production, f_{CH}), 토양온도(soil temperature, f_T), PH (f_{pH}), 산화환원전위(redox potential, f_{pE}), 계절적 침수율(factor accounting for the seasonal inundation fraction, S)이 고려되어 계산되어진다(Oleson et al., 2013).

$$P = R_h f_{CH} f_T f_{pH} f_{pE} S \quad (1)$$

이 연구에서는 미래 기후변화 시나리오를 강제력으로 CLM4.5BGC를 2005년부터 2099년까지 적분하여 동토 영역의 변화를 살펴보았다. 실험에 사용된 대기 강제력은 NCAR PCM (Parallel Climate Model)의 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A2 시나리오 결과를 이용하였다. CLM4.5 오프라인 적분을 위해서는 모델의 적분 기간 동안의 온실기체의 연 평균값과 6시간 미만 해상도의 대기 강제력이 필요하지만, IPCC 5차 보고서의 RCP 시나리오는 위와 같은 조건을 충족시키는 자료가 아직 없으므로 SRES A2 시나리오에 따른 미래기후 전망 자료를 이용하였다. SRES 시나리오는 사회경제 유형별 온실가스 배출량을 설정 후, 기후변화 시나리오로 산출한 것이다. SRES A2 시나리오는 2000년부터 2099년까지 이산화탄소의 농도가 약 350 ppm에서 850 ppm으로 증가하도록 설정되어있다(Li et al., 2010). 대기 강제력 자료의 수평 해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이며, 시간 해상도는 3시간 간격으로 강수, 바람장, 기온, 습도, 태양입사량, 기압변수가 지면모델에 입력되었다. PCM 적분 중 첫 번째 앙상블 결과만을 택하여 모델의 input 강제력으로 사용하였다. 모델 실험은 계산의 효율성을 위해 단일 실험으로 수행하였다.

3. 연구결과

3.1 미래 동토의 전망

SERS A2 미래 기후변화 시나리오 실험의 경우, 21

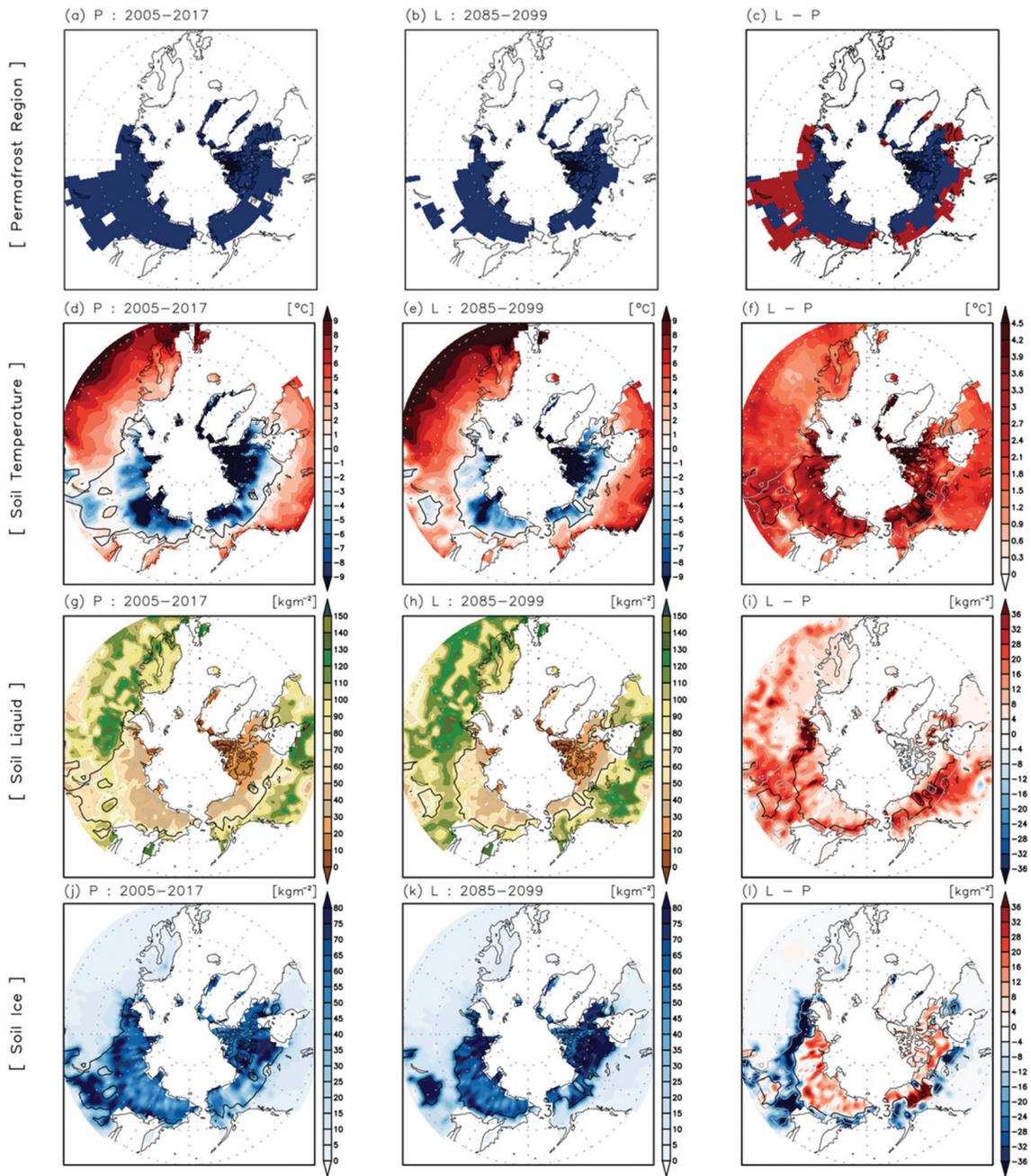


Fig. 1. Projection of permafrost region (a) at the present (Present, P: 2005-2017), (b) at the end of 21st century (Last, L: 2085-2099) and (c) difference between present and end of 21st century (red color : thawing region), (d), (e) and (f) same as (a), (b) and (c) but for soil temperature (g), (h) and (i) same as (a), (b) and (c) but for soil liquid, (j), (k) and (l) same as (a), (b) and (c) but for soil. Contour line is projection of active layer thickness (black line : < 3 m).

세기 동안 꾸준한 온도상승이 나타났다. 지구 평균 지표면온도는 현재 12.53°C에서 21세기 후반 14.95°C까지 약 2.42°C 상승했으며, 특히 동토층이 존재하는 북

극지역(60~90°N)에서는 -11.77°C에서 -7.99°C까지 약 3.78°C 상승하였다. 기온의 상승으로 인한 동토 영역 활동층의 깊이 변화를 살펴보았다. Lawrence et al.

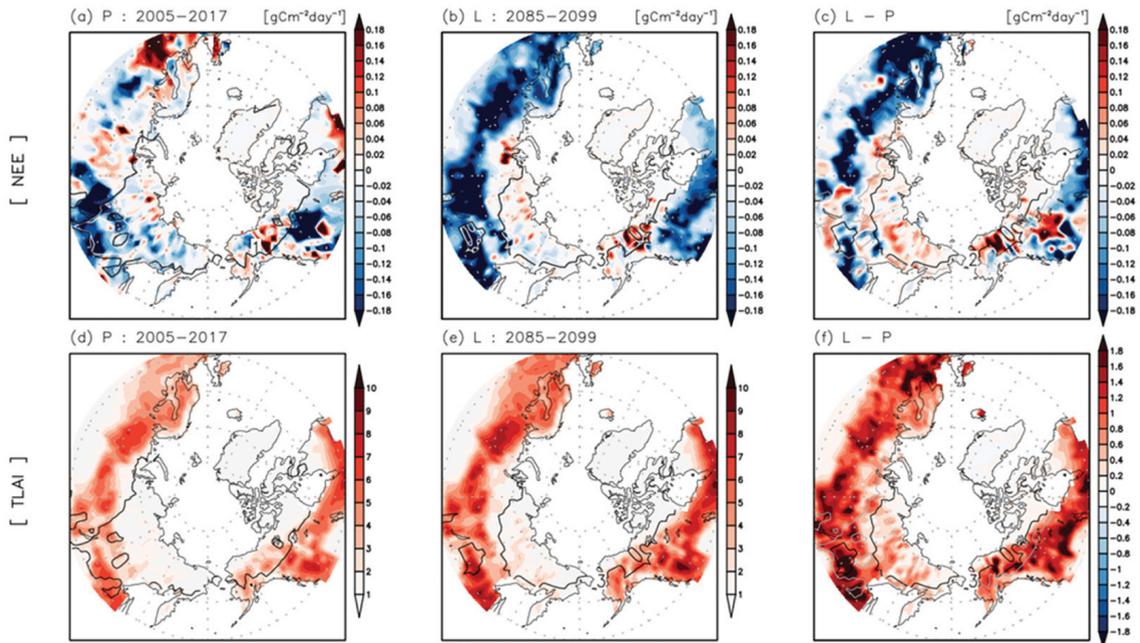


Fig. 2. Same as Fig. 1 but for net ecosystem exchange (NEE) and total projected leaf area index (TLAI).

(2015)의 정의에 따라 실험기간 동안 토양 상위 3 m 이내에서 토양이 한 번이라도 얼어있는 경우 동토층이라 정의하였다. 따라서 Fig. 1에는 현재와 21세기 후반을 나누어 활동층이 3 m인 지점을 표시하였다. 그 결과, 현재는 50°N 이상의 유라시아 동쪽 지역과 알래스카, 캐나다 고위도에서 동토층이 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 1a). 그러나 21세기 후반에는 바이칼호 주변 영구동토층과 60°N 이상의 동유라시아 고위도 지역, 알래스카와 캐나다 고위도 지역에서만 동토층이 나타나면서 동토 면적이 현재보다 약 30% 감소하였다(Fig. 1b).

미래 기후변화로 인한 토양온도를 살펴보기 위하여 모델 내 지표면부터 지중 10층(2.86 m)까지의 평균 토양 온도, 토양 속 얼음과 수장 변화를 살펴보았다(Fig. 1). 21세기 후반과 현재의 토양온도 차이를 살펴보면, 북극지역은 -4.53°C에서 21세기 후반에는 -2.03°C로 약 2.5°C 정도 상승하였다(Fig. 1f). 그러나 온난화에 의한 토양온도 상승에도 동토층의 토양온도는 빙점 이하로 유지되었다. 토양 속 수분의 변화를 살펴보면, 21세기 후반으로 가면서 북반구 고위도 대부분 지역에서 토양 수분이 증가하였다(Fig. 1i). 특히 토양 수분은 현재 동토지역이지만 21세기 후반에는 해동된 곳을 중심으로 토양 수분의 증가가 나타났다. 토양 내 얼음 변화를 살펴보면 동토를 제외한 지역에서는 21세기 후반으로 갈수록 현재에 비해 많은 양의 얼음이 감소하고,

얼음이 분포하는 지역도 점점 줄어드는 것을 볼 수 있었다(Figs. 1j, k). 반면, 동토 영역에서는 오히려 얼음의 양이 증가하였는데, 이는 온난화가 진행되어도 동토 영역의 토양온도는 빙점 이하로 유지되고 토양온도의 증가로 인한 토양 수분 증가와 주변 지역의 유출량 유입의 증가 때문인 것으로 분석된다(Fig. 1l).

3.2 미래 동토의 이산화탄소 전망

Figure 2에는 순 생태계 교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)의 변화를 나타냈다. 이 값은 대기에서의 순 이산화탄소 교환량을 나타낸 것으로, 총 생태계 호흡량(Total Ecosystem Respiration, TER)에서 총 일차 생산량(Gross Primary Production, GPP)을 제외한 값이다. 21세기 후반으로 갈수록 동토 영역이 유지되는 지역을 중심으로 순 생태계 교환량(NEE)이 증가하고, 따라서 이 지역에서 이산화탄소의 방출이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). Schuur et al. (2009)과 Hicks Pries et al. (2013)은 지구온난화에 따라 동토층이 해동되면서 이곳에 얼어있던 식물과 오래된 토양 유기물이 분해되어 미생물들의 호흡이 증가되고 결과적으로 이산화탄소 방출이 증가한다고 언급하였다. 따라서 지구온난화가 진행된 동토층에서는 이산화탄소 방출이 증가하게 되고, 동토층의 지면 생태계는 이산화탄소의 배출원이 되는 것으로 예측할 수 있다. 모델의 적분기간 동안 동토 영역에서 순 생태계

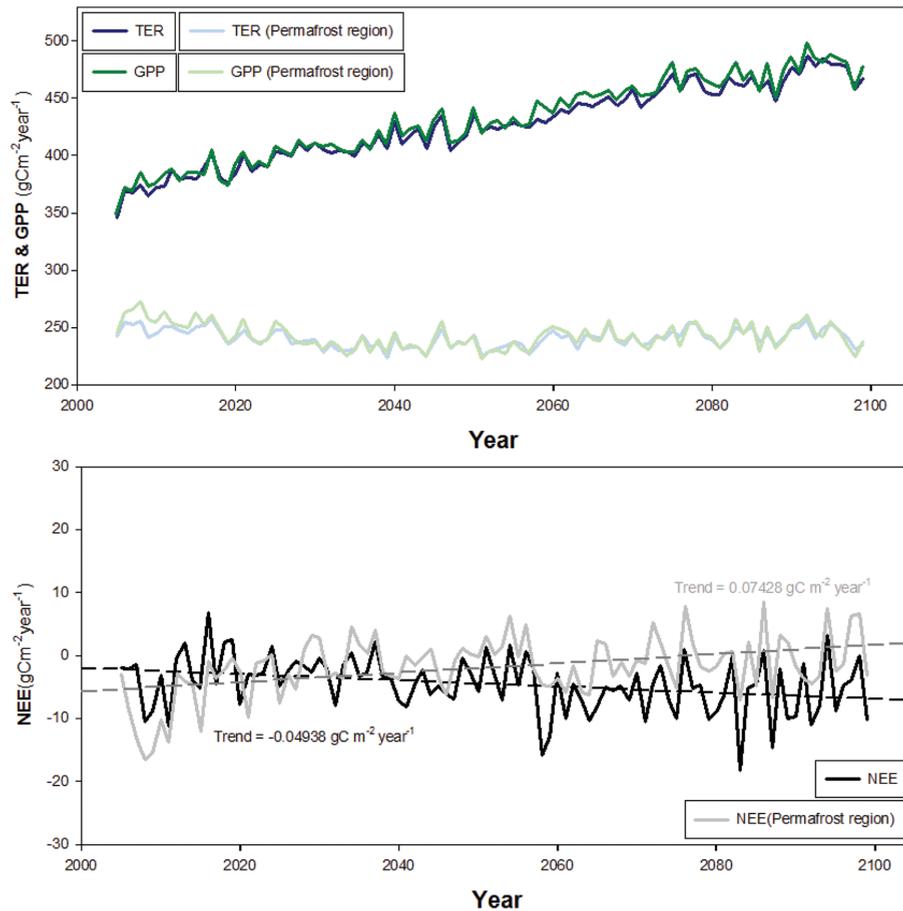


Fig. 3. Time series for total ecosystem respiration (TER) and gross primary production (GPP) and net ecosystem exchange (NEE) in the arctic (60-90°N) and permafrost region under global warming.

교환량(NEE)은 $0.07428 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 증가하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 3). 그러나 북극지역 전체의 순 생태계 교환량(NEE)은 $-0.04938 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 감소하는 경향이 나타난다. 북극지역의 순 생태계 교환량(NEE)을 살펴보면, 동토 영역을 제외한 지역에서는 대부분 음의 값으로 나타났다. 특히 지구온난화로 인하여 총 잎 면적지수(Total Leaf Area Index, TLAI)가 강하게 나타난 지역에서 음의 값이 크게 나타났다(Figs. 2d-f). 이는 동토를 제외한 지역에서는 지구온난화로 인하여 총 잎 면적지수(TLAI)가 증가하면서 총 생태계 호흡량(TER)의 증가량 보다 총 일차 생산량(GPP)의 증가량이 더 큰 것으로 분석되었다. 즉, 북극지역 전체 지면생태계는 순 생태계 교환량(NEE)의 감소로 이산화탄소의 흡수원이 되지만, 동토 영역에서는 동토의 해동으로 인한 이산화탄소의 방출로 인하여 지면생태계가 이산화탄소의 배출원이 되는 것을 확인할 수 있었다.

토양호흡(Soil Respiration, SR)은 토양 속 미생물의 호흡(Heterotrophic Respiration, HR)과 식물의 뿌리 호흡(Root Respiration, RR)으로 구성되어 있다(Hanson et al., 2000). 21세기 후반으로 갈수록 미생물 호흡(HR)과 뿌리 호흡(RR) 모두 증가하였는데, 미생물 호흡(HR)과 뿌리 호흡(RR)의 차이를 살펴보면 현재와 21세기 모두 동토 영역에서는 미생물 호흡(HR)이 뿌리 호흡(RR)보다 우세한 것으로 나타났다(Fig. 4). 북극지역에서 토양호흡(SR)량의 변화를 살펴보면, 미생물 호흡(HR)이 현재 약 $183 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 21세기 후반에는 약 $226 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 까지 증가하고 뿌리 호흡(RR)도 약 $118 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 약 $150 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 까지 증가하였다(Fig. 5). 미생물 호흡(HR)과 뿌리호흡(RR)의 차이를 살펴보면 $0.1458 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 증가하는 경향을 보여주었다. 즉, 북극지역에서는 지구온난화로 인하여 동토가 녹게 되어 뿌리 호흡(RR)보다 동토 안에 있던 호기성 미생물들의 호

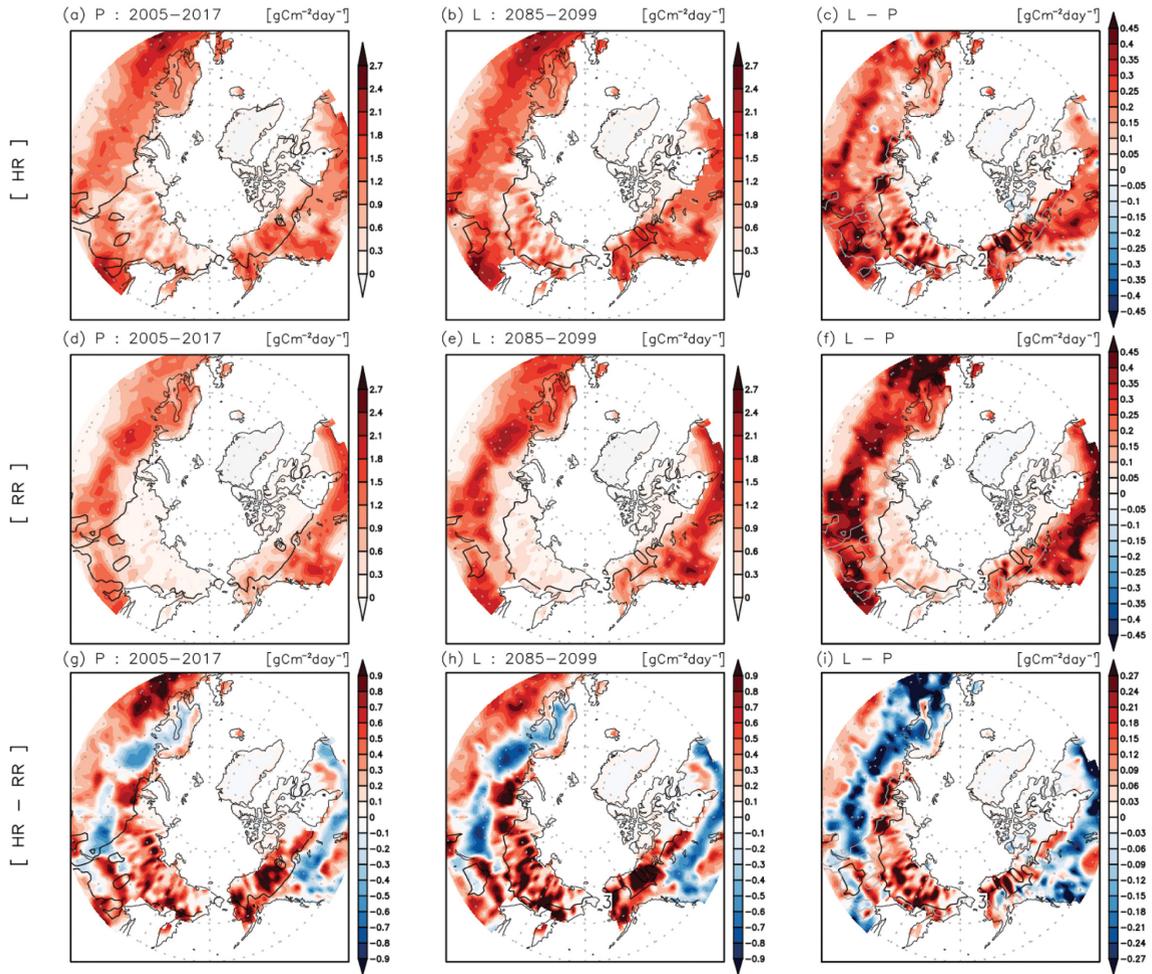


Fig. 4. Same as Fig.1 but for heterotrophic respiration (HR), root respiration (RR) and difference between heterotrophic respiration and root respiration (HR-RR).

흡(HR)이 활발하게 일어난다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 동토 영역에서는 미생물 호흡(HR)은 $143 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 21세기 후반에는 약 $148 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 증가하였지만, 뿌리호흡(RR)은 $62 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 21세기 후반에는 약 $55 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 로 감소하여 미생물 호흡(HR)과 뿌리호흡(RR)의 차이가 커지면서 $0.1559 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 증가하는 경향이 나타났다.

3.3 미래 동토의 메탄 전망

동토층의 해동으로 인하여 습지가 생성되면 동토층에서 방출된 이산화탄소와 물이 결합되면서 메탄이 생성된다. Anthony et al. (2012)에 따르면 북반구 고위도 지역에서는 동토층의 해동과 빙하의 해빙으로 인하여 메탄의 방출이 증가한다고 언급했다. 이 연구의 실험결과에서도, 현재에서 21세기 후반으로 갈수

록 북극지역의 메탄 방출량은 증가한다(Fig. 6c). 지역적으로 살펴보면, 동토 영역에서는 메탄의 증가가 뚜렷하나 동토 영역을 제외한 지역에서는 그 경향이 일정하지 않았다. 원인을 분석하기 위해 메탄 방출과 밀접한 관계를 갖고 있는 토양의 총 수분(Total Water Storage, TWS)을 살펴보았다. 그 결과, 수분의 양이 증가한 지역은 메탄의 방출량도 증가하였고 수분의 양이 감소한 지역은 메탄의 방출량이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6f). 북극지역에서의 메탄의 방출량을 확인해보면, 현재는 약 $1 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 21세기 후반에는 약 $1.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 로 $2.786 \text{ mgC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 증가하는 추세가 나타났다(Fig. 7). 또한, 토양수분 증가가 큰 동토 영역에서는 현재 약 $0.86 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 에서 21세기 후반에는 약 $1.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 로 $4.841 \text{ mgC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 으로 크게 증가하는 추세를

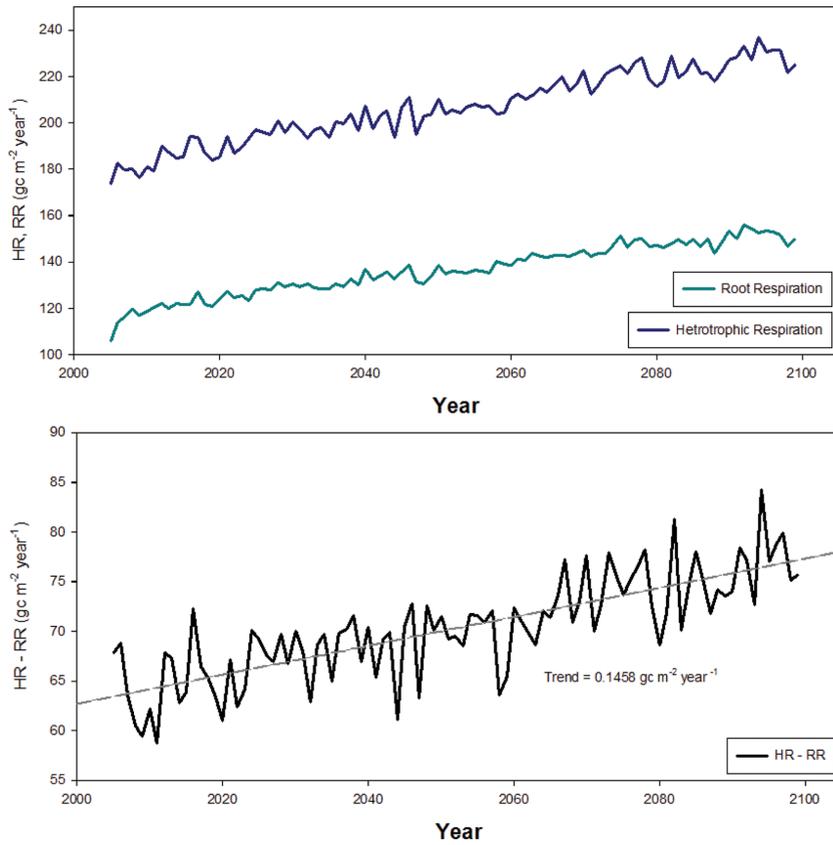


Fig. 5. Same as Fig. 3 but for heterotrophic respiration (HR), root respiration (RR) and difference between heterotrophic respiration and root respiration (HR-RR).

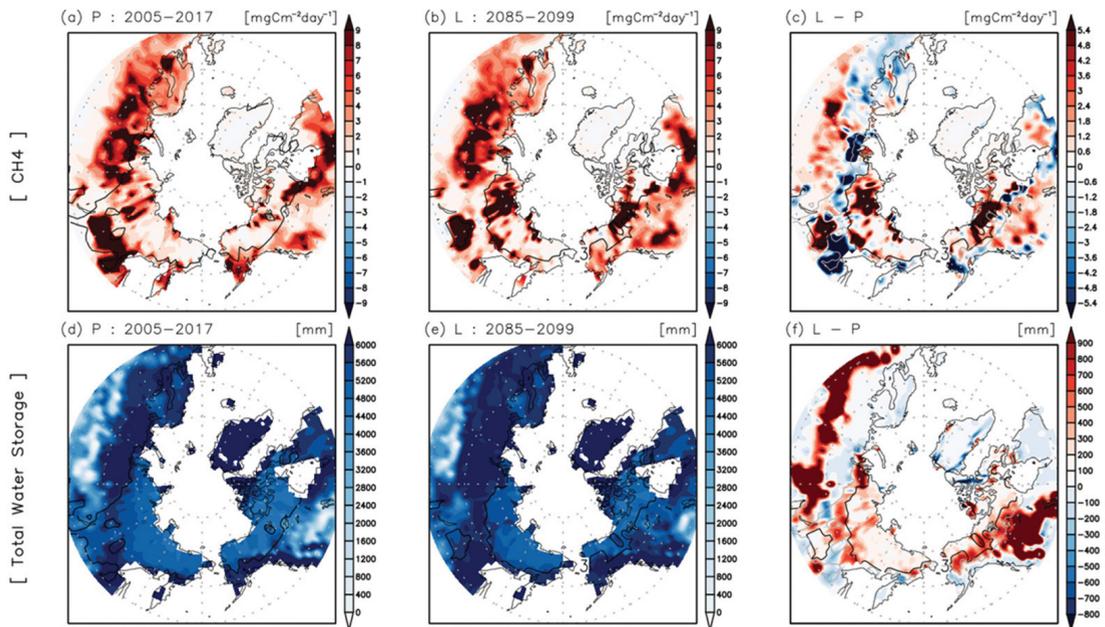


Fig. 6. Same as Fig. 1 but for methane (CH₄) and total water storage (TWS).

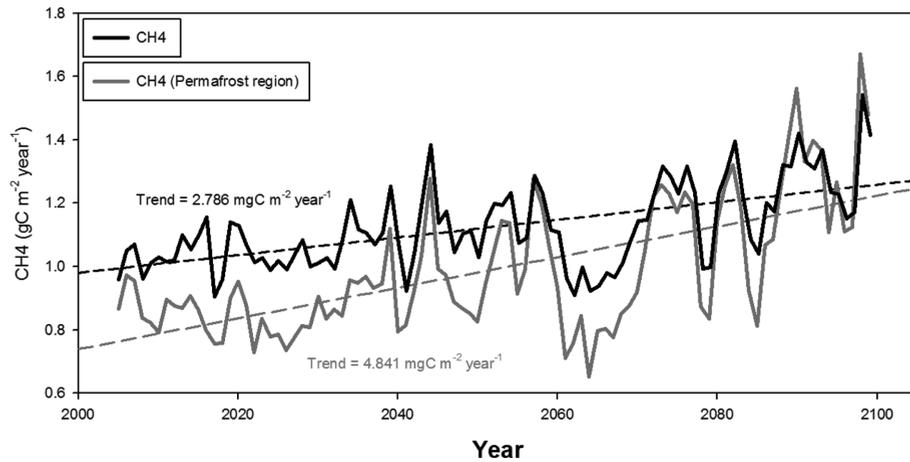


Fig. 7. Same as Fig. 3 but for methane (CH_4).

보인다. Christensen et al. (2003)에서도 주로 60°N 이상에 해당하는 북극권 지역에서 토양의 온도가 올라갈수록 메탄 방출이 증가하는 것으로 관측되었다. 즉, 토양의 온도가 상승되어 동토층이 해동되고, 그로 인하여 토양 수분의 증가와 함께 메탄 방출이 증가되는 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소순환 및 메탄 모의가 결합된 지면 모델 CLM4.5BGCM과 SRES A2 미래 기후 변화 시나리오를 이용하여 21세기 환북극 동토의 탄소와 메탄 flux의 변화를 예측하였다. 현재부터 21세기 후반까지 지구 온난화가 진행됨에 따라 북극지역 중 유라시아 동부지역과 알래스카 및 캐나다 고위도에서 동토지역의 면적이 줄어들었다. 토양온도는 전 지역에서 증가하였는데, 동토 영역에서는 여전히 빙점 이하로 유지되었다. 토양온도가 증가함에 따라 동토 영역에서는 토양 수상의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 동토 지역을 제외한 북극 지역에서는 토양온도가 영상으로 증가하기 때문에 토양 속 얼음이 감소하였지만, 동토 지역에서는 해동으로 인한 토양 수상 증가와 주변 지역에서 유출량이 유입됨과 동시에 여전히 토양 온도가 빙점 이하로 유지되기 때문에 토양 속 얼음이 증가하였다. 21세기 후반으로 갈수록 동토 영역에서 순생태계 교환량(NEE)은 양의 값을 나타내었고, 동토 영역을 제외한 지역에서는 대부분 음의 값을 나타내었다. 지구온난화가 진행될수록 동토 영역에서는 동토의 해동으로 인하여 미생물들의 호흡의 증가로 순생태계 교환량(NEE)이 증가하지만, 동토 영역을 제외한 지역에서는 총 일차 생산량(GPP)이 총 생태계 호

흡량(TER)보다 강하게 나타나기 때문에 순 생태계 호흡량(NEE)은 감소하는 것으로 분석되었다. 특히, 동토 영역에서는 뿌리 호흡(RR)보다 미생물의 호흡(HR)이 강하게 나타나면서 동토층은 이산화탄소의 배출원이 되는 것으로 다시 한번 확인할 수 있었다. 이산화탄소뿐만 아니라, 동토의 해동으로 습지가 증가하게 되면서 메탄 방출도 증가하였다. 동토가 아닌 지역에서도 메탄 방출은 토양이 갖고 있는 총 수분량(TWS)과 비례하는 것을 확인하였다.

결론적으로 본 연구에서는 지구온난화가 진행될수록 북극지역, 특히 동토 영역에서 이산화탄소와 메탄 방출이 증가하고 주요 온실기체(GHG)인 두 기체의 증가로 인하여 미래 온난화를 더 가속화 시킬 수 있는 요인으로 분석되었다.

그러나 이 실험은 오프라인(offline) 지면 모델을 사용한 연구이기에 기후변화에 따른 식생 분포의 변화와 그에 따른 피드백이 고려되어있지 않다. 또한 모델 실험에서 대기 강제력은 지면에 영향을 미치도록 설계되어 있지만 지면의 강제력에 대한 대기의 변화는 고려되어있지 않다. 이 때문에 지면에서 생성된 온실가스에 의한 대기온도의 민감도는 확인할 수 없었다. Friedlingstein et al. (2006)에서도 언급되었듯이, 미래 기후의 탄소순환에 대한 지면 모델 예측은 불확실성이 있으며, 탄소에 대한 지면 민감도에 대한 논쟁은 계속되고 있는 중이다. 특히, 영구동토층의 탄소 손실을 예측할 수 있는 능력과 기후 변화에 대한 고위도 생태계 탄소순환은 불확실하며, CLM 모델에서는 동토 영역 내에서 발생하는 모든 물리 과정을 모의하지 못하기 때문에 북극지역의 예측에는 한계가 있다(Koven et al., 2015). 또한 A2 시나리오도 하나의 가설이기 때문에 시나리오 자체에도 불확실성을

갖고 있다(Déqué et al., 2007). 따라서, 향후 보다 정확한 미래 기후예측을 위해서는 동토 영역의 미생물의 군집 역학이나 광물 표면에서의 상호작용, 뿌리의 상호작용 등 동토 영역의 해동으로 인한 분해에 초점을 맞추어 본 연구의 불확실성을 보완하는 연구를 수행해야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 “극지 기후변화/기상재해 예측시스템(KPOPS)의 개발 및 활용 연구(PE18130)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anthony, K. M. W., P. Anthony, G. Grosse, and J. Chanton, 2012: Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers. *Nat. Geosci.*, **5**, 419-426, doi:10.1038/ngeo1480.
- Brown, J., and V. E. Romanovsky, 2008: Report from the International Permafrost Association: State of permafrost in the first decade of the 21st century. *Permafrost Periglac.*, **19**, 255-260.
- Bunn, A. G., S. J. Goetz, J. S. Kimball, and K. Zhang, 2007: Northern high?latitude ecosystems respond to climate change. *Eos. Transactions American Geophysical Union*, **88**, 333-335.
- Camill, P., 2005: Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, **68**, 135-152.
- Cao, M., S. Marshall, and K. Gregson, 1996: Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **101**, 14399-14414.
- Christensen, T. R., and Coauthors, 2003: Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1414.
- Deconto, R. M., S. Galeotti, M. Pagani, D. Tracy, K. Schaefer, T. Zhang, D. Pollard, and D. J. Beerling, 2012: Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. *Nature*, **484**, 87-91, doi:10.1038/nature10929.
- Déqué, M., and Coauthors, 2007: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, **81**, 53-70.
- Friedlingstein, P., and Coauthors, 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C⁴MIP model intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337-3353.
- Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten, and J. A. Andrews, 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, **48**, 115-146.
- Hicks Pries, C. E., E. A. Schuur, and K. G. Crummer, 2013: Thawing permafrost increases old soil and autotrophic respiration in tundra: partitioning ecosystem respiration using $\delta^{13}C$ and $\Delta^{14}C$. *Glob. Change. Biol.*, **19**, 649-661, doi:10.1111/gcb.12058.
- 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, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Jorgenson, M. T., Y. L. Shur, and E. R. Pullman, 2006: Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02503.
- Koven, C. D., W. J. Riley, and A. Stern, 2013: Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models. *J. Climate*, **26**, 1877-1900, doi:10.1175/JCLI-D-12-00228.1.
- _____, D. M. Lawrence, and W. J. Riley, 2015: Permafrost carbon-climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics. *Proc. Natl Acad. Sci.*, **112**, 3752-3757, doi:10.1073/pnas.1415123112.
- Lawrence, D. M., A. G. Slater, and S. C. Swenson, 2012: Simulation of present-day and future permafrost and seasonally frozen ground conditions in CCSM4. *J. Climate*, **25**, 2207-2225, doi:10.1175/JCLI-D-11-00334.1.
- _____, C. D. Koven, S. C. Swenson, W. J. Riley, and A. G. Slater, 2015: Permafrost thaw and resulting soil moisture changes regulate projected high-latitude CO₂ and CH₄ emissions. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 094011, doi:10.1088/1748-9326/10/9/094011.
- Li, H., J. Sheffield, and E. F. Wood, 2010: Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D10101, doi:10.1029/2009JD012882.
- Lombardi, L., E. Carnevale, and A. Corti, 2006: Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. *Energy*, **31**, 3208-3219.
- Nakano, T., S. Kuniyoshi, and M. Fukuda, 2000: Temporal variation in methane emission from tundra wetlands in a permafrost area, northeastern Siberia. *Atmos. Environ.*, **34**, 1205-1213.
- Oleson, K. W., and Coauthors, 2013: Technical Descrip-

- tion of version 4.5 of the Community Land Model (CLM). NCAR Tech. Note NCAR/TN-503+STR, 420 pp.
- Quinton, W. L., M. Hayashi and L. E. Chasmer, 2011: Permafrost-thaw-induced land-cover change in the Canadian subarctic: implications for water resources. *Hydrol. Process.*, **25**, 152-158, doi:10.1002/hyp.7894.
- Riley, W. J., Z. M. Subin, D. M. Lawrence, S. C. Swenson, M. S. Torn, L. Meng, N. M. Mahowald, and P. Hess, 2011: Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences*, **8**, 1925-1953, doi:10.5194/bg-8-1925-2011.
- Romanovsky, V. E., S. L. Smith, and H. H. Christiansen, 2010: Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007-2009: a synthesis. *Permafrost Periglac.*, **21**, 106-116.
- Schuur, E. A. G., J. G. Vogel, K. G. Crummer, H. Lee, J. O. Sickman, and T. E. Osterkamp, 2009: The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. *Nature*, **459**, 556-559.
- _____, and Coauthors, 2013: Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climatic Change*, **119**, 359-374, doi:10.1007/s10584-013-0730-7.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Wu, Q., and T. Zhang, 2010: Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D09107, doi:10.1029/2009JD012974.
- Xie, K., Y. Zhang, G. Meng, and J. T. Irvine, 2011: Direct synthesis of methane from CO₂/H₂O in an oxygen-ion conducting solid oxide electrolyser. *Energ. Environ. Sci.*, **4**, 2218-2222, doi:10.1039/C1EE01035B.