

기후변동성에 따른 육상 탄소 순환의 반응

선민아* · 조천호 · 김영미 · 이조한 · 부경온 · 변영화

국립기상과학원 기후연구과

(접수일: 2017년 1월 19일, 수정일: 2017년 6월 8일, 게재확정일: 2017년 6월 8일)

Response of the Terrestrial Carbon Exchange to the Climate Variability

Minah Sun*, Chun-Ho Cho, Youngmi Kim, Johan Lee, Kyoung-On Boo, and Young-Hwa Byun

Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 19 January 2017; revised 8 June 2017; accepted 8 June 2017)

Abstract The global terrestrial ecosystems have shown a large spatial variability in recent decades and represented a carbon sink pattern at mid-to-high latitude in Northern Hemisphere. However, there are many uncertainties in magnitude and spatial distribution of terrestrial carbon fluxes due to the effect of climate factors. So, it needs to accurately understand the spatio-temporal variations on carbon exchange flux with climate. This study focused on the effects of climate factors, i.e. temperature, precipitation, and solar radiation, to terrestrial biosphere carbon flux. We used the terrestrial carbon flux that is simulated by a CarbonTracker, which performs data assimilation of global atmospheric CO₂ mole fraction measurements. We demonstrated significant interactions between Net Ecosystem Production (NEP) and climate factors by using the partial correlation analysis. NEP showed positive correlation with temperature at mid-to-high latitude in Northern Hemisphere but showed negative correlation pattern at 0-30°N. Also, NEP represented mostly negative correlation with precipitation at 60°S-30°N. Solar radiation affected NEP positively at all latitudes and percentage of positive correlation at tropical regions was relatively lower than other latitudes. Spring and summer warming had potentially positive effect on NEP in Northern Hemisphere. On the other hand as increasing the temperature in autumn, NEP was largely reduced in most northern terrestrial ecosystems. The NEP variability that depends on climate factors also differently represented with the type of vegetation. Especially in crop regions, land carbon sinks had positive correlation with temperature but showed negative correlation with precipitation.

Key words: Partial correlation, carbontracker, terrestrial carbon flux

1. 서 론

육상 생물권은 인간이 배출한 이산화탄소 중 25~30%를 흡수하고 있으며 근래 들어 육상 생물권에서 이산화탄소 흡수가 증가하고 있다(House et al., 2003; Le Quéré et al., 2009). 전지구 육상 생물권의 이산화탄

소 흡수는 지구 시스템을 제어할 수 있는 과정으로 탄소 순환에 중요한 역할을 하고 있다(Heimann and Reichstein, 2008). 이러한 육상 생태계의 탄소 순환은 여러 공간 규모에서 토지 이용, 기후 변수, 식생 유형 등과의 상호작용에 의해 매우 복잡하고 다양한 제약을 받는다(Churkina and Running, 1998; Beer et al., 2010; Deng and Chen, 2011; Yu et al., 2013). 또한 육상 이산화탄소 플럭스의 경년변동성과 추세는 여러 시간 규모에서 광합성과 호흡의 불균형으로 나타났다(Law et al., 2002; Chapin III et al., 2005). 이러한 육상 탄소 흡수의 경년변동성은 기후-탄소 피드백을 이

*Corresponding Author: Minah Sun, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6680, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: masun@korea.kr

해하고 기후 요소에 가장 민감하게 반응하는 육상 탄소 순환의 지역 메커니즘을 분석할 수 있도록 한다 (Anderegg et al., 2015).

기상학적 요소와 대기 이산화탄소는 상호작용을 하여 기후와 탄소 순환의 피드백에 영향을 준다(Cox et al., 2000). 육상에서 이산화탄소의 흡수와 배출은 기온과 강수에 강한 상관관계를 가지고 있으며, 특히 총 일차 생산량(Gross Primary Production, GPP)은 북반구에서 기온, 강수, 일사량과 상관관계가 높다(Beer et al., 2010). 열대 지방과 온대 지방에서 탄소 플럭스의 경년변동성은 주로 강수의 영향이 크고, 냉대나 아한대 지방에서는 기온과 일사량에 더 민감하게 반응한다(Piao et al., 2009; Jung et al., 2011). 일부 열대 지역에서는 GPP가 기온과 강하게 상관성을 가지지만, 강수가 호흡의 경년 변동성과 큰 상관성을 가진다. 이는 열대 지방에서 토양 호흡의 변동성이 순 생태계 생산량의 경년 변동성에 영향을 주며, 토양 호흡이 낙엽 등의 함수량에 더 제한적이기 때문이다(Jung et al., 2011). 또한, 탄소 흡수의 경년변동성은 지역 규모 내에서 화산 폭발, 열파나 가뭄과 같은 극한 현상에 의해 변동하는 것이 밝혀졌다(Ito and Oikawa, 2000; Potter et al., 2003; Zeng et al., 2005; Zhao and Running, 2010).

이러한 육상 탄소 플럭스의 변동성은 매 해마다 다르게 나타나고 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, 이하 ENSO)과도 관련이 있다. ENSO는 전지구 및 지역적으로 기온, 강수나 토양 수분에 영향을 주게 되고 이들은 또 다시 순 일차 생산량(Net Primary Production, NPP), 육상 탄소 흡수의 크기(Nemani et al., 2003; Le Quére et al., 2009; Raupach, 2011), 대기 이산화탄소 증가율(Heimann and Reichstein, 2008; Friedlingstein and Prentice, 2010; Ballantyne et al., 2012) 등에 영향을 주게 된다. 그 결과 일반적으로 엘니뇨일 때 육상 이산화탄소의 흡수가 약화되고, 라니냐일 때는 육상 이산화탄소의 흡수가 강화된다(Patra et al., 2005; Heimann and Reichstein, 2008; IPCC, 2013). 엘니뇨 해 동안 지역적으로 기온이 상승하고 강수는 감소하는 경향이 있으며 라니냐 해 동안은 반대의 경향이 있다(Ropelewski and Halpert, 1987; Halpert and Ropelewski, 1992). ENSO와 관련하여 이산화탄소 농도에 영향을 주는 주요 세 가지 메커니즘은 산불 변화, NPP 변화, 토양 호흡과 낙엽 분해를 통한 미생물 호흡의 변화로 설명된 바 있다(Zeng et al., 2005). 엘니뇨가 발생한 해에는 고온·건조해진 지역에 지속된 가뭄이 산불을 야기시키게 되고, 이로 인해 생물량이 연소되고 전지구 GPP 감소에 양의 영향을 미친다(Jung et al., 2010; Zhao and Running, 2010; Kim et al., 2016). 또한 열대 지역에

서는 지표 온도에 강하게 의존하는 종속영양 호흡이 증가하게 되어 NPP가 감소하며 이로 인해 광합성 효율이 저하된다(Patra et al., 2005). 반면 라니냐가 발생한 해에는 변화된 기후 조건이 독립영양 호흡에 음의 영향을 주고 이는 다시 NPP 증가에 직접적으로 영향을 미치게 된다(Patra et al., 2005; Bastos et al., 2013). 여러 기후 조건 내에서 육상 생태계의 반응은 대부분 비슷하지만 지역적으로 강도는 다르게 나타난다.

육상과 대기 사이의 탄소 플럭스 교환은 공간 변동성이 크고, 기후 변동에 따른 탄소 흡수의 변화 규모에서도 불확실성이 크게 나타난다. 또한 경년이나 계절의 시간 규모에서 기후 요소들은 육상 생물권 이산화탄소 교환의 변동성에 미치는 역할이 명확하지 않다. 이는 지상 플럭스 관측 기술이 아무리 정교한 자료를 제공한다 해도, 부족한 관측 지점과 불균질하고 비연속적인 관측 등으로 인해 전지구 육상 생태계 내의 탄소 순환의 시간 변동성과 공간 패턴 분석이 한계를 가질 수 밖에 없다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해 관측값 기반의 자료동화 기법을 이용한 탄소추적시스템 결과(Peters et al., 2007)를 사용할 필요가 있다. 탄소추적시스템은 역분석 모델링을 활용하여 탄소 배출 및 흡수원에 대해 보다 정확한 정보를 얻을 수 있으며 3차원의 시공간 분석이 가능하다는 장점이 있다. GOSAT (Greenhouse gases Observing Satellite) 등 위성 관측 자료와 TCCON (Total Carbon Column Observing Network) 지상 관측 자료와 함께 비교검증된 바 있으며(Schneising et al., 2012; Schneising et al., 2014; Kulawik et al., 2016; Zeng et al., 2017), CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner) 프로젝트에서 제공하는 항공 관측 자료와도 비교검증된 바 있다(Basu et al., 2011). Kim et al. (2017)에서는 탄소추적시스템에 시베리아 관측 지점을 추가하여 최적화된 지표 이산화탄소 플럭스를 분석하여 주로 시베리아 지역에 불확실성이 감소된다고 밝혔다. 하지만 여전히 육상을 다 포괄하지 못하는 부족한 관측 지점 수로 인해 이산화탄소 농도 및 플럭스 값을 완벽하게 재현해내는데 한계가 있다.

본 연구에서는 탄소추적시스템 결과를 이용하여 전지구 육상 생물권의 이산화탄소 플럭스가 시·공간적으로 어떠한 특징을 가지고 있는지 분석하였다. 또한 편 상관관계 분석을 이용하여 기온, 강수, 일사량이 이러한 육상 생물권 탄소 흡수의 변동성에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 모델 자료 및 분석 방법

2.1 탄소추적시스템

본 연구에서는 국립기상과학원에서 운영하고 있는

탄소추적시스템을 사용하였으며, 이는 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하의 ESRL (Earth System Research Laboratory)에서 개발한 탄소추적시스템(Peters et al., 2005)을 기반으로 하고 있다. 이러한 탄소추적시스템은 관측값을 이용하여 전지구 표면에서 이산화탄소 농도 및 육지와 해양의 이산화탄소 플럭스를 산출할 수 있는 역분석 시스템이다. 탄소추적시스템에서 사용한 이산화탄소 농도 관측값은 NOAA, EC (Environment Canada), NCAR (National Center for Atmospheric Research), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 관측한 자료들이다(Masarie et al., 2014). 자료동화 시 관측값은 대부분 낮 시간대인 12~16 LST에 관측된 값을 평균하여 사용된다. NOAA의 탄소추적시스템과는 다르게 아시아 지역에 대해 이중 격자 구조를 가지고 있으며, 이산화탄소 농도의 경우 전지구 3° × 2°와 아시아 지역에 대해 1° × 1° 수평 해상도를 가지고 있다. 또한 연직으로 25개 층으로 구성되어 있고 플럭스 자료의 경우 전지구 1° × 1° 수평 해상도를 가지고 있다.

탄소추적시스템에서는 이산화탄소 흡수와 배출에 대한 네 개의 초기 추정치(생물권, 해양, 화석연료, 산불 모듈)를 이용하여 TM5 수송 모델(Krol et al., 2005; Huijnen et al., 2010) 내에서 이산화탄소 물분율 값을 모의한다. 이렇게 모의된 이산화탄소 물분율 값을 관측값과 차이를 최소화하도록 앙상블 칼만 필터 기반의 자료동화 과정을 통해 이산화탄소 플럭스 값을 최적화한다. 이러한 이산화탄소 플럭스 값들은 다음의 식을 통해 계산이 될 수 있다.

$$F(x, y, t) = \lambda_{bio}F_{bio}(x, y, t) + \lambda_{oce}F_{oce}(x, y, t) + F_{ff}(x, y, t) + F_{fire}(x, y, t) \quad (1)$$

여기서 F_{bio} , F_{oce} , F_{ff} , 그리고 F_{fire} 는 각각 초기 육상 생물권, 해양, 화석연료, 산불 배출 플럭스이다. 또한 λ 는 자료 동화 과정에서 추정된 선형 scaling factor로 육상 생물권과 해양에만 적용되고 화석연료와 산불 모듈에는 적용되지 않는다. 이는 생태지역에 대해 각각 존재하고 있으며, 생태지역은 Olson et al. (1985)의 19개 식생 유형과 TransCom 연구(Gurney et al., 2002)에서 사용한 지역 범주 중 11개의 육상 범주, 30개의 해양 범주로 이루어져있다. 최적화된 네 개의 플럭스 값들을 이용하여 TM5 수송 모델을 통해 최종적으로 삼차원의 이산화탄소 농도 분포 및 플럭스 분포를 계산한다(Krol et al., 2005). TM5 수송 모델 구동 시 3시간 간격의 ERA-Interim 기상장을 이용하며, 해당 기상장에 의해 모의된 이산화탄소 농도는 전지구

관측 지점에서 관측한 자료와 자료동화를 통해 이산화탄소 플럭스를 산출한다.

2.2 분석 방법

탄소추적시스템에서 계산된 순 생태계 생산량(Net Ecosystem Production, NEP) 자료를 사용하였으며, ERA-Interim의 기온, 강수, 일사량 자료를 사용하였다. 모든 자료들의 수평해상도는 탄소추적시스템의 결과와 동일하게 1° × 1°이며, 분석 기간은 2001년부터 2012년까지로 월 자료를 사용하였다.

각 기후 요소들의 변화에 따른 NEP의 변동성을 살펴보기 위해 편 상관관계 분석(Partial Correlation analysis)을 적용하였다. 편 상관관계 분석은 하나 또는 그 이상의 변수의 효과를 제거한 뒤 나머지 두 변수의 관계를 나타내는 것이다. 이는 각 변수들의 상관관계로 계산할 수 있고 제어되는 변수의 수로 차수가 정해진다. 식 (2)~(4)는 0~2차 편 상관관계에 대한 계산 식을 나타내고 해당 식을 이용하여 고차항의 편 상관관계를 표현할 수 있다. x , y , z , 그리고 t 를 고려했을 때, 만약 식 (4)의 2차 편 상관관계의 결과가 단순 상관관계인 식 (2)의 결과에 비해 유의하게 작은 값을 가진다면 x 와 y 의 상관관계는 각각 z 와 t 와의 상관성으로 인한 것을 의미한다.

$$0^{\text{th}} \text{ order partial correlation: } r_{xy} = \frac{\text{cov}(xy)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} \quad (2)$$

1st order partial correlation:

$$r_{xy.z} = \frac{r_{yx} - r_{yz}r_{xz}}{\sqrt{(1 - r_{yz}^2)(1 - r_{xz}^2)}} \quad (3)$$

2nd order partial correlation:

$$r_{xy.zt} = \frac{r_{yx.t} - r_{yz.t}r_{xz.t}}{\sqrt{(1 - r_{yz.t}^2)(1 - r_{xz.t}^2)}} \quad (3)$$

이러한 편 상관관계를 사용한 주된 이유는 기온, 강수, 일사량과 NEP에 대해 각 변수들의 의존성을 제거하여 온전히 두 변수 간의 관계를 보기 위해서이다. 본 연구에서는 2차 편 상관관계를 이용하여 각 기후 변수들과 NEP의 상관성을 분석하였다. 각 변수들의 계절변화에 대한 특성을 고려하여 위도대별 특징을 보기 위해 계절 주기를 포함하였으며 분석 기간 동안 월별 자료에 대해 식 (4)를 이용하여 상관관계를 계산하였다. 또한 계절별 기후 변수들과 NEP의 상관성 분석 시 계절의 정의는 북반구를 기준으로 하였다. 예를 들어 여름철 분석 시 북반구는 6월~8월, 남반구는 12월~2월로 정의하였으며 겨울철 분석 시 북반구는 12월~2월, 남반구는 6월~8월로 정의하였다.

각 기후 변수들의 변동성에 따른 NEP의 반응을 식

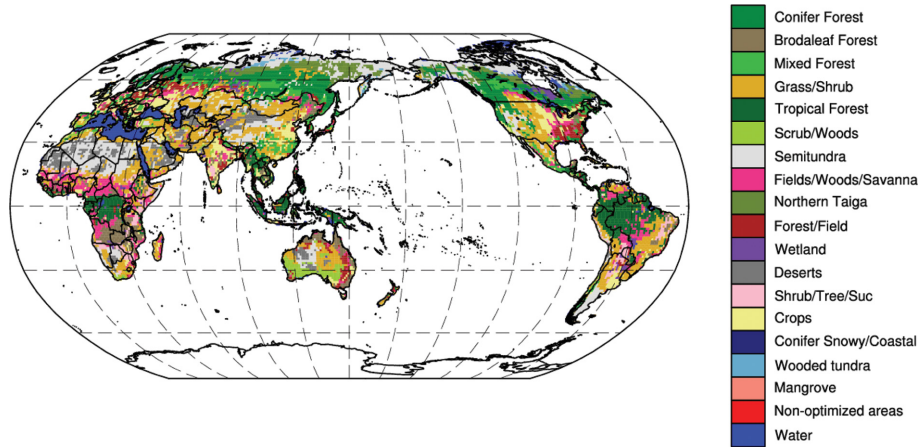


Fig. 1. Global distribution of ecosystem types, based on Olson vegetation classification.

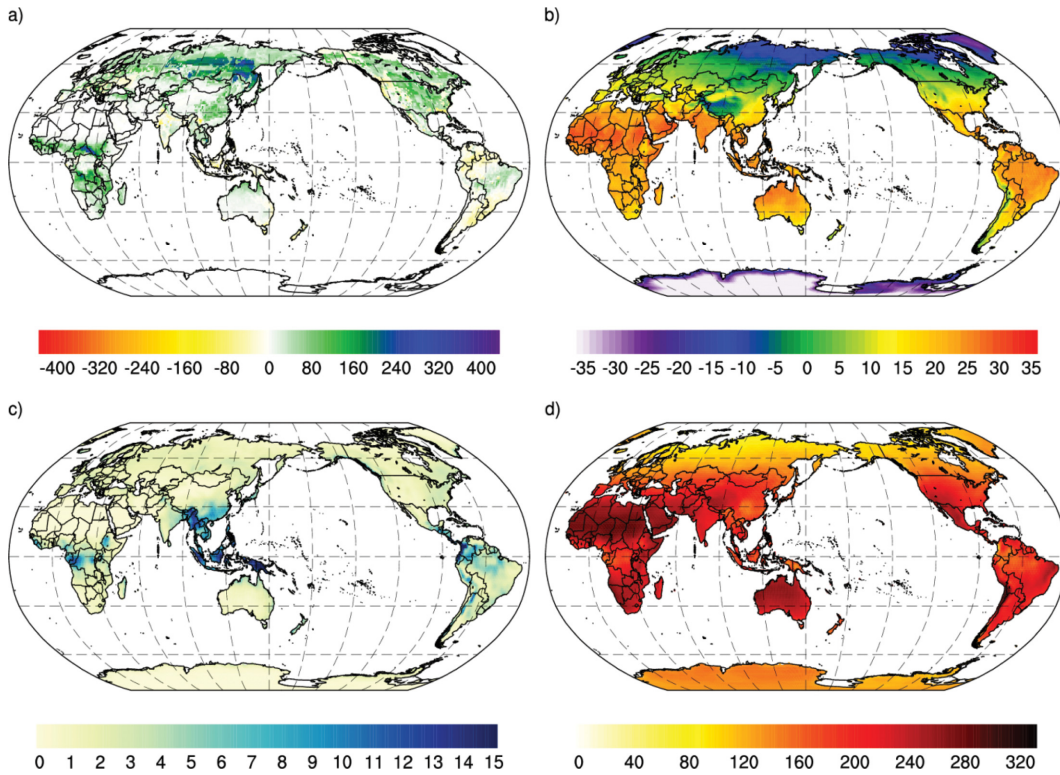


Fig. 2. Spatial distribution of annual mean a) Net Ecosystem Production (gC yr^{-1}) simulated by CarbonTracker, b) temperature at 2 m ($^{\circ}\text{C}$), c) precipitation (mm day^{-1}), and d) surface net shortwave radiations for the period 2001~2012 (W m^{-1}).

생 유형 별로도 분석하였다. 탄소추적시스템 내 식생 유형은 Olson 식생 분류를 이용하여 나누어져 있다 (Olson et al., 1985). 식생 유형은 19개의 토지 피복 유형으로 분류되어 있으며, 이는 침엽수림, 활엽수림,

혼합림, 초목/관목, 열대림, 관목림/숲, 세미 툰드라, 들판/숲/사바나, 북부 타이가, 삼림/들판, 습지, 사막, 관목/나무, 농작지, 눈/해안가의 침엽수, 우거진 툰드라, 맹그로브, 최적화되지 않은 지역, 물과 같다.

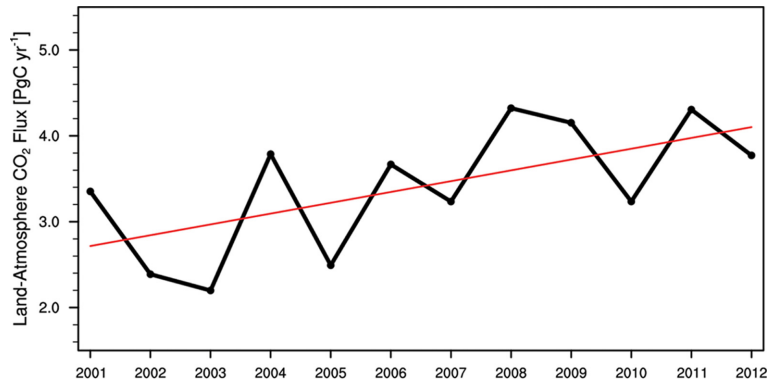


Fig. 3. Interannual variability of global NEP during 2001 to 2012.

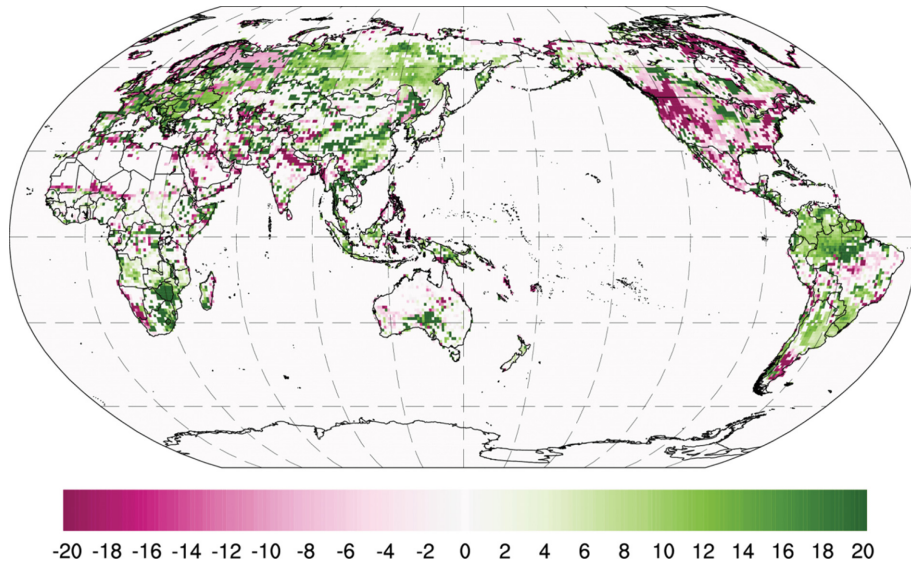


Fig. 4. Spatial distribution percentage of linear trend (%/y) in NEP from 2001 to 2012. Shown are significant linear trends at confidence level 99% using f-test.

3. 결 과

탄소추적시스템으로 산출한 육상 생물권 이산화탄소 플럭스와 각 기후 요소들의 변동성을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 전지구 연평균 NEP, 기온, 강수, 일사량의 공간 분포를 나타내었다. NEP는 대부분 북반구 30° 이상의 식생대에서 양의 값 즉, 탄소를 흡수하고 있으며 러시아 중동부 지역과 아프리카 대륙의 중부 지역에서 탄소 흡수가 강하게 나타났다(Fig. 2a). 또한 남아메리카 대륙의 브라질 중부 지역과 호주 북부 지역에서도 탄소 흡수가 나타났다. 이러한 지역에는 주로 침엽수림, 열대 사바나, 활엽수림 등의 식생이 위치하며 탄소 흡수가 나타났다(Fig. 1). 기온과 일

사량은 지역적으로 차이를 보이고 있지만, 대부분 열대 지방에서 높으며 호주 중북부, 아프리카 북부, 중국 북서부 지역 등 기온과 일사량이 다소 높은 지역에서는 탄소 흡수가 낮게 나타났다(Figs. 2a, b, d). 기온이 낮고 강수량이 적은 티베트 고원은 세미 툰드라와 건조한 초목의 식생이 위치하고 있으며 탄소 흡수가 거의 없다(Figs. 2a, b, c). 또한 강수량이 연 평균 약 이상이면서 일사량이 상대적으로 적은 중국 남부, 말레이시아 등 동남아시아와 아프리카 중부, 남미 대륙 아마존 지역들은 대부분 열대 우림이 위치하고 있으며 탄소 흡수가 적거나 탄소 배출이 나타났다(Figs. 2a, c, d).

Figure 3은 2001년부터 2012년까지 전지구 NEP의

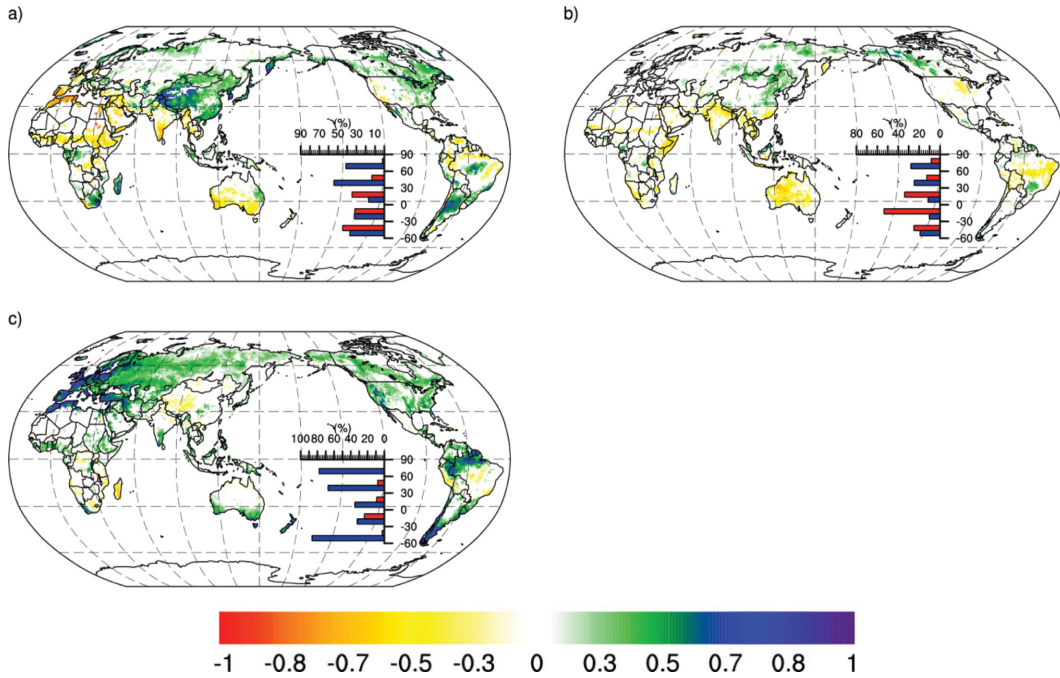


Fig. 5. Partial correlation coefficient between NEP and temperatures at 2 m (a), precipitation (b) and surface net shortwave radiations (c). The added figure in a-c show percentage (%) distribution of positive (blue bars) and negative (red bars) correlation at 30° latitude intervals. Shadings are significant correlation coefficient at confidence level 90% using student t-test.

경년변동성을 분석한 것이다. 육상 탄소 플럭스의 연 평균 값은 3.41 PgC yr⁻¹이고, 분석 기간 동안 2.2 PgC yr⁻¹에서 4.32 PgC yr⁻¹의 범위를 나타내고 있다. 또한 해마다 큰 경년변동성을 보이며 육상 탄소 흡수의 추세는 증가하고 있다(R² = 0.38, p < 0.05). 탄소 흡수가 감소하고 있는 해인 2003년, 2005년, 2007년, 2010년, 그리고 2012년은 엘니뇨가 발생했던 해였으며, 탄소 흡수가 가장 컸던 해인 2008년과 2011년은 라니냐가 발생했던 해였다.

매 해마다 육상 탄소 플럭스의 선형 추세는 Fig. 4와 같이 지역마다 다르게 나타났다. 2001년부터 2012년까지 NEP는 유럽 북부 일부, 러시아 북서부, 북아메리카 대륙의 남서부와 북부, 인도 북부 일부 지역을 제외하고 북반구 대부분 지역에서 탄소 흡수가 유의하게 증가했다(p < 0.01). 러시아는 주로 침엽수림, 북부 타이가, 혼합림 등이 위치하고 있으며(Fig. 1), 우랄산맥을 기준으로 상반된 흡수 추세가 나타났다. 이는 지형에 의한 육상 탄소 흡수·배출의 차이로 2004년 이후 유럽 북부와 러시아 북서부 지역에서는 이산화탄소를 배출하는 패턴이 나타났다(not shown). 북아메리카 대륙의 북부는 주로 세미툰드라, 침엽수림, 습지, 혼합림 등이 위치하고 있으며, 중부는 초목, 관목, 농작지 등이 위치하고 있다(Fig. 1). 북아메리카 중북

부의 일부 지역들에서는 농작지, 혼합림, 습지가 위치하고 있는 지역에서 증가 추세를 나타냈다. 하지만 북아메리카 서부 지역의 침엽수림, 초목, 관목이 위치하고 있는 지역에서는 감소 추세를 나타냈다. 남반구의 경우 대부분 탄소 흡수가 증가했으며 열대 우림, 사바나, 초목, 습지, 관목의 식생이 위치하고 있는 곳에서 탄소 흡수 증가가 두드러지게 나타났다. 또한 호주 남부 지역의 초목, 관목, 그리고 숲 지역에 대해서 탄소 흡수가 유의하게 증가했다. 지역적으로 차이를 보이고 있는 육상 탄소 흡수의 추세는 기후 변동과 식생 사이의 피드백이나 토지 이용 변화 등과 같은 다양한 메커니즘들로부터 나타난 것으로 보인다.

NEP가 기온, 강수, 일사량의 변화에 어떻게 영향을 받는지 알아보기 위해 편 상관관계 분석을 적용하여 결과를 살펴보았다(Fig. 5). 각 변수들은 추세를 제거한 후 편 상관관계를 적용하였다. Figure 5에서 상관관계 분포는 신뢰수준 90%에서 유의한 상관계수를 나타낸 것이다. 또한 각각 덧붙여진 그림들은 위도 30° 간격에 대해 양의 상관과 음의 상관의 분포 비율을 나타낸 것이다. 기온과 NEP의 편 상관관계는 강수와 일사량의 상관성을 제거한 것으로, 북반구 중위도 이상의 지역에서 대부분 양의 상관관계가 나타났다(Fig. 5a). 이는 기온이 상승함에 따라 탄소 흡수가

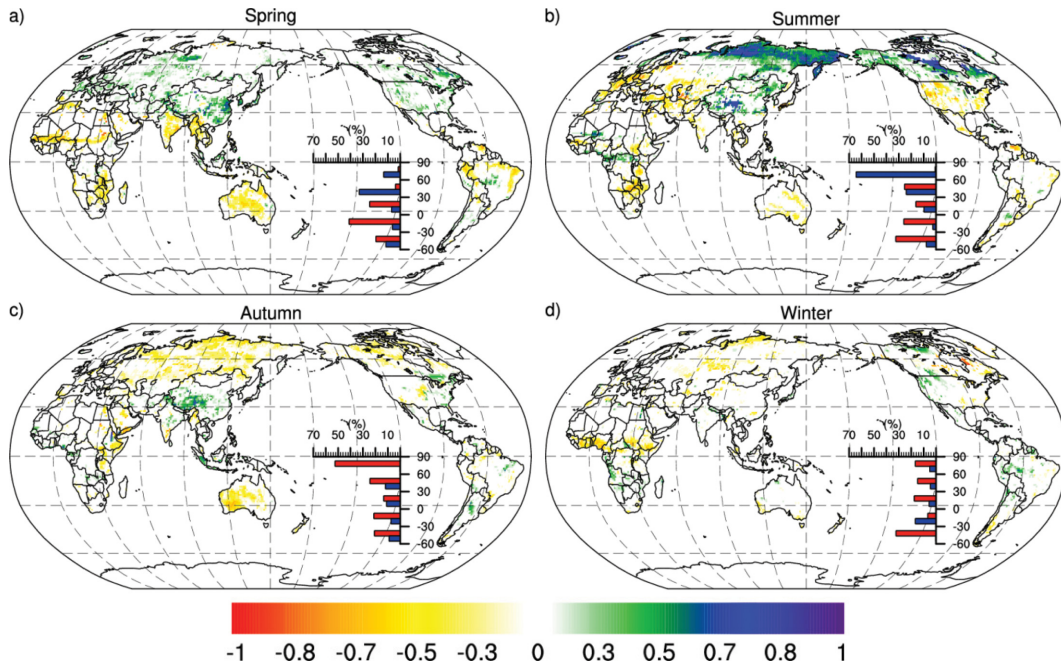


Fig. 6. Partial correlation coefficient between net ecosystem production (NEP) and spring, summer, autumn, and winter temperature (a-d). Different months for a season have been used for each Hemisphere, and a season has been represented by the Northern Hemisphere. The added figure in a-d show percentage (%) distribution of positive (red bars) and negative (blue bars) correlation at 30° latitude intervals. Shadings are significant correlation coefficient at confidence level 90% using student t-test.

증가하는 것을 의미하며 중국 대부분, 한반도, 북아메리카 대륙의 동부 지역에서 뚜렷하게 나타났다. 기온이 상승하게 되면 식물의 성장 기간에 영향을 미치게 되고 식생 활동을 강화시켜 육상 생태계에서 탄소 흡수가 증가하게 된다고 밝혀진 바 있다(Malhi, 2002; Kato and Tang, 2008). 하지만 아프리카 중부, 인도, 호주 중남부 등의 열대와 아열대 지역들에 대해 탄소 흡수는 기온과 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 기온이 토양 미생물 분해 증가 등에 큰 영향을 미치고 이로 인해 종속영양 호흡이 상대적으로 광합성 증가보다 높아졌기 때문인 것으로 보인다(Ise et al., 2010; Bradford and Crowther, 2013; Bradford et al., 2013). 기온은 주로 아한대 지방보다 열대 지방에서 호흡에 민감하게 영향을 미치며, 이는 열대 지방 내 자체 GPP에 대한 NPP 비율 값을 넘어서게 되어 기온과 탄소 흡수가 음의 상관관계를 나타낸 것으로 보인다(Patra et al., 2005; Ise et al., 2010).

Figure 5b는 강수와 육상 탄소 흡수의 편 상관관계 결과이며 기온과 일사량의 상관성을 제거한 결과이다. 강수는 북반구 중위도 이상의 지역에서 식생 활동의 증가에 큰 영향을 미치게 되며, 이로 인해 강수와 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 음의 상관관계 비율

보다 더 높게 나타났다. 하지만 북위 30° 이하의 지역들에 대해서는 음의 상관관계 비율이 높게 나타났다. 특히 북반구와 남반구 모두 열대 지역에서는 음의 상관관계 분포 비율이 크게 나타났으며, 이는 열대 지역의 강수가 토양의 미생물 분해 등에 영향을 미쳐 토양 호흡이 광합성을 초과했기 때문인 것으로 보인다(Cleveland et al., 2010).

기온과 강수의 상관성을 제거한 일사량과 육상 탄소 흡수의 편 상관관계 결과는 Fig. 5c와 같으며, 일사량과 탄소 흡수는 모든 위도대에서 양의 상관관계 비율이 음의 상관관계 비율보다 높게 나타났다. 유럽, 남아메리카 대륙의 북부와 남부 지역에서는 이러한 양의 상관관계 패턴이 강하게 나타났다. 북반구와 남반구 모두 저위도에서는 다른 위도대에 비해서 상대적으로 일사량과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 낮게 나타났다. 이는 열대 지역에서는 일사량 증가가 물 수지에 변화를 주게 되고 이로 인해 GPP를 감소시키는 간접적 영향에 의한 것이라 밝혀진 바 있다(Beer et al., 2010).

기온, 강수, 일사량의 변화는 각 계절별 육상 생물권 탄소 흡수의 변동성에 직·간접적으로 영향을 주며 지역적으로 서로 다른 특징을 나타냈다. 이에 대

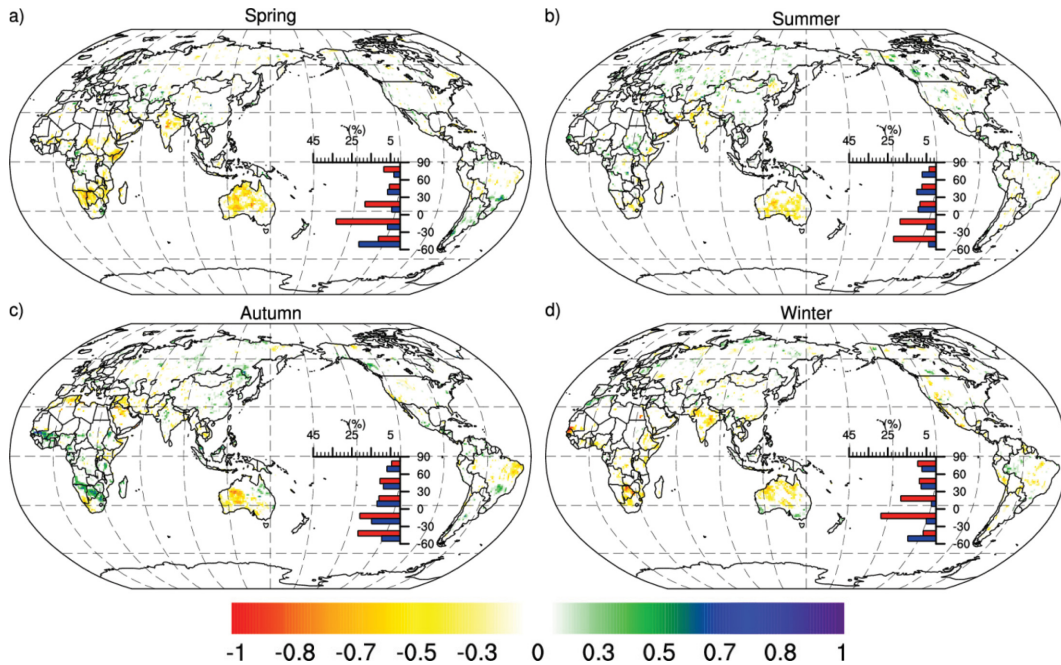


Fig. 7. Same as Fig. 6 but for using precipitation.

해 Fig. 6에서는 계절별로 기온과 육상 탄소 흡수의 편 상관관계를 나타냈다. 기온은 봄철 북반구 중위도와 고위도 일부 지역에 대해 양의 영향을 미쳤다(Fig. 6a). 이는 봄철의 기온 상승이 식생의 생육 시기와 개엽 시기를 앞당기게 되어 식생 성장 기간에 영향을 주기 때문이다. 반면 북위 30° 이하의 대부분 지역에서는 음의 상관관계 비율이 높게 나타났다. 여름철에는 북반구 고위도에서 양의 상관관계 비율이 매우 높게 나타났다(Fig. 6b). 이는 북반구 고위도의 대부분 식생대에서 기온이 순 일차 생산량(Net Primary Production, NPP)에 크게 영향을 미치기 때문이다. 하지만 미국 서부, 중동 지역, 지중해 지역과 아프리카 대륙의 중남부 지역에서는 음의 상관관계가 나타났다. 이러한 반건조 초목 지역과 건조한 지역들에서는 기온이 토양 수분 감소에 기여하기 때문에 탄소 흡수가 감소한 것으로 보인다(Niu et al., 2008; Xia et al., 2014). 가을철에는 대부분 위도대에서 양의 상관관계 비율 보다 음의 상관관계 비율이 높게 나타났으며, 북반구 고위도에서는 기온이 탄소 흡수에 미치는 음의 영향 비율이 매우 높게 나타났다(Fig. 6c). 가을철 기온은 주로 NPP에 양의 영향을 미치는 것 보다 음의 영향을 미친다고 밝혀진 바 있다(Piao et al., 2008; Xia et al., 2014). 이는 기온이 상승함에 따라 북반구 식생들의 낙엽 분해를 강화시키고 이로 인해 토양 호흡이 증가하기 때문이다. 겨울철의 경우 북반구 고위

도에서 가을철에 비해 기온과 탄소 흡수의 음의 상관관계 비율이 낮아졌지만, 여전히 음의 상관관계가 나타났다(Fig. 6d). 북반구 고위도에서 이러한 특징이 나타나는 이유로, 몇몇 연구들은 겨울철 기온 상승은 눈 덮임의 감소와 토양 결빙의 약화를 강화시키고 이로 인해 툰드라와 온대림으로부터 토양 탄소의 침출 손실이 증가 되어 탄소 흡수가 감소하는 것이라 밝힌 바 있다(Hobbie and Chapin III, 1996; Fitzhugh et al., 2001; Xia et al., 2014).

강수는 육상 생물권 탄소 플럭스의 변동성을 조절하는데 중요한 요소이며 이들의 편 상관관계 결과는 Fig. 7과 같다. 강수는 봄철 열대 지역에서 탄소 흡수와 음의 상관관계 비율이 다른 위도 위도대에 비해 높았으며, 인도 중부, 아프리카 대륙의 남부, 호주 대부분 지역에서 뚜렷하게 나타났다(Fig. 7a). 이는 열대와 아열대 지역에서는 우기가 시작되는 시기로 특히 습윤한 지역에 대해 강수는 토양 표면에서 많은 양의 탄소를 분해하는 등 토양 호흡에 큰 영향을 미치기 때문이다(Cleveland et al., 2006; Wieder et al., 2009). 여름철에는 북반구 중위도뿐만 아니라 고위도에서도 강수와 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 높게 나타났다(Fig. 7b). 이는 북반구 중위도 이상의 일부 지역에 대해 강수가 식생 활동의 증가에 영향을 미치게 되어 탄소 흡수가 증가한 것으로 보인다. 하지만 남반구의 호주 중남부 지역과 아프리카 대륙의 중남부

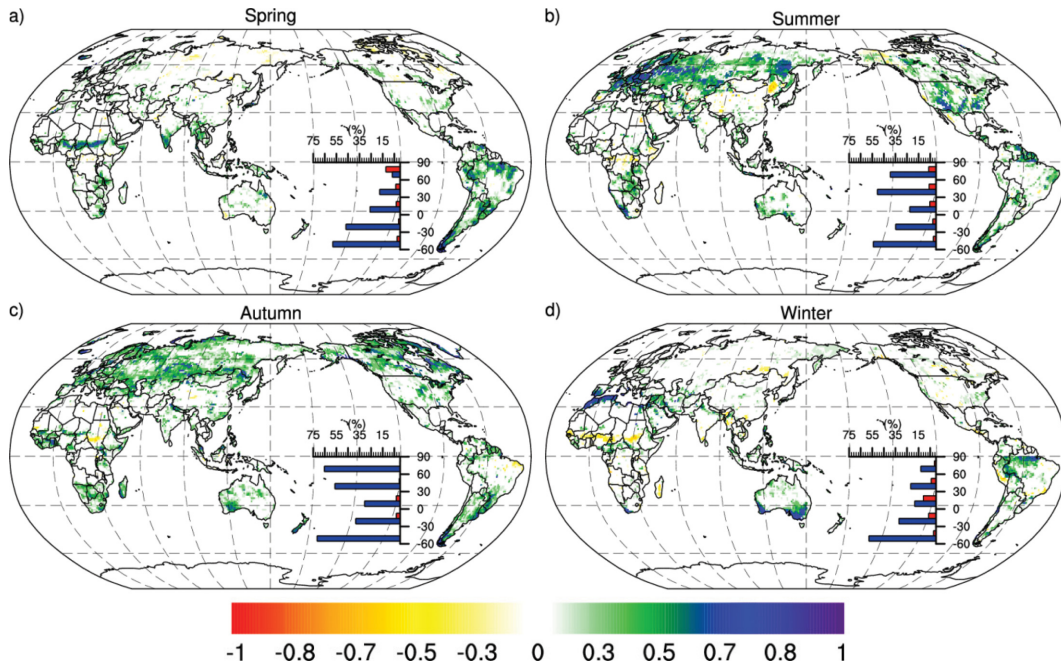


Fig. 8. Same as Fig. 6 but for using surface net solar radiation downwards.

일부 지역에서는 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다. 가을철 열대 지방에서는 강수와 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 다른 계절에 비해 높게 나타났다(Fig. 7c). 이는 건기가 시작되면서 이 시기의 강수가 호흡보다 광합성에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 겨울철에는 대부분 위도대에서 양의 상관관계 비율이 감소하고 있으며, 이러한 특징은 열대 지역에서 뚜렷하게 나타났다(Fig. 7d).

Figure 8은 각 계절에 대해 일사량과 육상 생물권 탄소 흡수의 상관관계를 나타낸 것이다. 일사량은 북반구 고위도를 제외하고 탄소 흡수와 양의 상관관계 비율이 음의 상관관계 비율보다 훨씬 높았으며, 남반구가 북반구에 비해 양의 상관관계 비율이 더 크게 나타났다(Fig. 8a). 여름철과 가을철의 경우 모든 위도대에서 탄소흡수와 양의 상관관계 비율이 높게 나타났다(Figs. 8b, c). 또한 열대 지역은 다른 위도대에 비해서 양의 상관관계 비율이 상대적으로 낮게 나타났다. 겨울철 역시 이와 같은 특징들이 나타났지만, 북반구 중위도 이상의 지역들에 대해서는 일사량과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 가을철에 비해 낮게 나타났다(Fig. 8d).

기후 요소들에 의해 영향을 받는 탄소 흡수의 변동성은 식생의 유형에 따라 다르게 나타나기 때문에, 육상 탄소 플럭스와 기후 요소들 사이의 관계를 식생 유형별로 나누어 분석하였다. Figure 9는 기온, 강수,

일사량과 육상 생태계 탄소 사이의 편 상관관계 결과를 이용하여 각 식생 유형별 양의 상관과 음의 상관 이 차지하는 비율을 나타낸 것이다. 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 분포 비율은 혼합림(MF), 침엽수림(CF), 농작지(CR) 등의 중위도 지역과 북부 타이가(NT)의 고위도 지역에서 높게 나타났다(Fig. 9a). 하지만 활엽수림(BF), 열대림(TF), 사바나(Sa) 등의 열대 지역에서는 음의 상관관계 분포 비율이 높게 나타났다. 강수의 경우 침엽수림, 혼합림, 북부 타이가 지역을 제외한 대부분 식생 지역들에서 양의 상관관계 분포 비율이 낮게 나타났다(Fig. 9b). 반면 활엽수림, 관목, 농작지의 열대 지역에서는 강수와 탄소 흡수의 음의 상관관계 분포 비율이 높게 나타났다. 일사량은 모든 식생 유형에 대해서 탄소 흡수와 양의 상관관계 분포 비율이 음의 상관관계 분포 비율 보다 높게 나타났다(Fig. 9c). 또한 열대 지역의 활엽수림, 사바나 등의 식생 유형에서는 상대적으로 양의 상관관계 분포 비율이 낮게 나타났다.

인간의 식량 생산에 있어 중요한 역할을 하고 있는 농작지는 대부분 북반구 중위도와 인도, 남 아메리카 일부 지역의 열대 지방에 위치하고 있다(Fig. 1). 이러한 농작지에서는 기온과 일사량의 변화에 따라 탄소를 흡수하는 지역의 비율이 배출하는 지역의 비율보다 높게 나타났다(Figs. 9a, c). 반면 강수의 변화에 따라 탄소를 흡수하는 지역의 비율이 배출하는 지역의

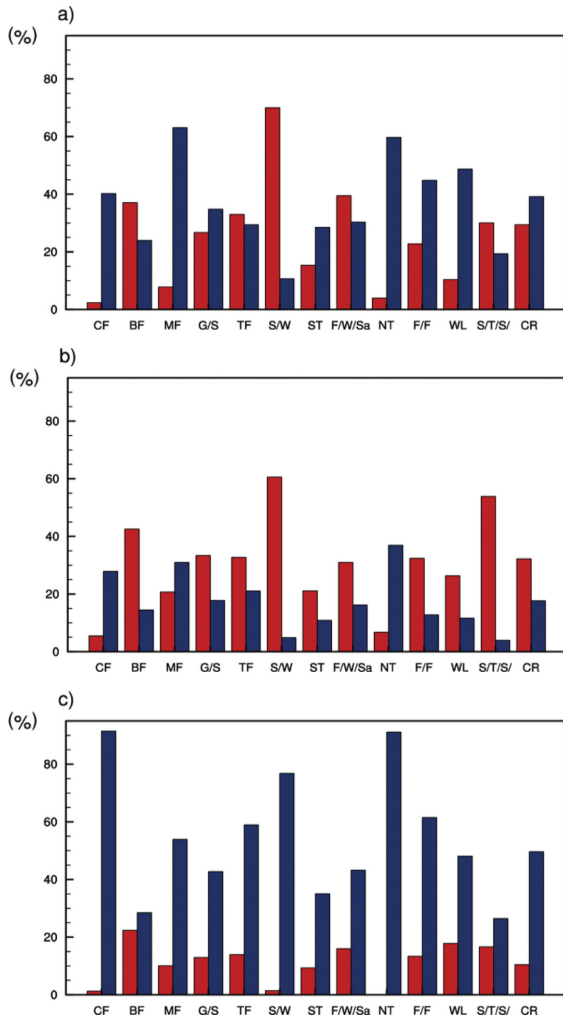


Fig. 9. Percentage of positive (blue bars) and negative (red bars) correlation accounted for each vegetation types that using the partial correlation analysis data between net ecosystem productions and temperatures at 2 m (a), precipitation (b) and surface net shortwave radiations (c). Here CF = Conifer Forest, BF = Broadleaf, MF = Mixed Forest, G/S = Grass/Shrub, TF = Tropical Forest, S/W = Scrub/Woods, ST = Semi-Tundra, F/W/Sa = Fields/Woods/Savanna, NT = Northern Taiga, F/F = Forest/Field, WL = Wet Land, S/T/S/ = Shrub/Tree/Suc, and CR = Crop.

비율보다 낮게 나타났다(Fig. 9b). Figure 10에서는 각 위도대별로 기온, 강수, 일사량의 변화에 따른 농작지의 탄소 흡수와 배출 비율을 나타내었다. 북반구 중 위도에서는 기온, 강수와 탄소 흡수의 양의 상관관계 분포 비율이 음의 상관관계 분포 비율보다 높게 나타났지만, 열대 지역에서는 음의 상관성 비율이 더 높

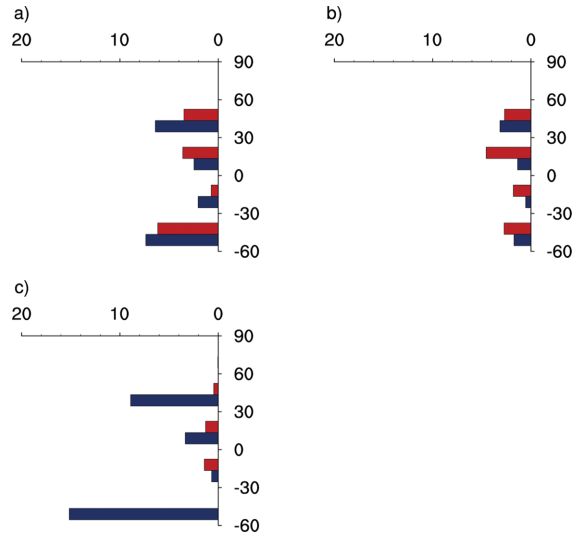


Fig. 10. Percentage (%) distribution of positive (blue bars) and negative (red bars) correlation at 30° latitude intervals in crop regions.

게 나타났다(Figs. 10a, b). 일사량은 대부분 위도대에서 탄소 흡수와 양의 상관관계 분포 비율이 높게 나타났다(Fig. 10c). 이는 앞으로 인간에 의한 직·간접적인 영향과 지구 온난화가 식량 생산의 변화에 미치는 영향을 생각해 볼 수 있는 부분이다. 북반구 중위도 농작지에서는 기온이 상승하고 강수가 증가함에 따라 질소 시비 효과와 함께 식량 생산 증가에 영향을 줄 수 있지만 열대 지역에서는 반대의 영향을 줄 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2001년부터 2012년까지 기온, 강수, 일사량 변화에 따른 육상 생물권 이산화탄소 플럭스의 반응을 분석하였다. 탄소추적시스템으로 산출한 전 지구 NEP는 해마다 변동성 폭이 컸지만 전체적으로 탄소 흡수가 증가하는 추세를 보였다. 이는 GCP (Global Carbon Project) 추정치와 모델 자료를 이용하여 육상 탄소 흡수의 변동성을 나타낸 Anav et al. (2013)의 결과와도 유사하였다. 이러한 탄소 흡수의 공간 분포는 북반구 아한대 지역을 중심으로 탄소 흡수가 크게 나타났다. 또한 탄소 흡수가 적었던 해와 컸던 해는 ENSO의 영향이 컸던 해들로 IPCC AR5 (Jung et al., 2010)에서 보고된 바와 같은 결과를 나타냈다.

NEP가 각각 기후 요소들에 의해 나타나는 반응을 독립적으로 분석하기 위해 편 상관관계를 적용하였다.

기온과 강수는 북반구 중위도 이상의 대부분 지역에 대해 식생 활동의 증가에 영향을 미쳐 양의 상관관계 분포 비율이 높게 나타났지만, 북위 30° 이하의 지역에서는 양의 상관성 비율이 낮게 나타났다. 일사량은 모든 위도대에서 탄소 흡수와 양의 상관관계를 나타냈고, 저위도에서는 상대적으로 양의 상관성 비율이 다른 위도대에 비해 낮게 나타났다. 이는 열대 지역에서 일사량의 증가가 물 수지의 균형에 영향을 미쳐 가뭄이 발생하는 지역이 생기는 등 결국 GPP를 감소시켰기 때문이다. 이러한 결과들은 Beer et al. (2010) 이나 Jung et al. (2011) 등에서 북반구의 탄소 흡수는 기온, 강수, 일사량과 상관관계가 높으나 열대 지방과 온대 지방에선 강수에 더 민감하게 반응한다는 결과와 유사하였다.

계절별로 각 기후 변수들의 변화에 따른 NEP의 반응을 살펴봤을 때, 기온은 봄철 북반구 중위도 이상에서 양의 상관관계가 나타나는 지역의 비율이 높게 나타났다. 여름철에는 특히 북반구 고위도에서 기온이 식생 활동에 미치는 영향이 커져 NEP와 매우 높은 양의 상관성을 나타냈다. 하지만 가을과 겨울철에는 기온이 낙엽 분해 등에 영향을 미침으로 인해 북반구에서 음의 상관관계 비율이 높게 나타났다. 강수는 우기가 시작되는 시기인 봄철 열대와 아열대 지방에서 토양 호흡의 증가에 영향을 미쳐 탄소 흡수와 뚜렷한 음의 상관관계를 나타냈다. 여름철에는 북반구 중위도 이상의 지역에서 식생 활동의 증가로 인하여 양의 상관관계 비율이 높게 나타났다. 가을철에는 열대 지방에서 강수와 NEP의 양의 상관관계 비율이 다른 계절보다 높게 나타났다. 이는 가을철 열대 지방에서는 건기가 시작되면서, 이 시기 강수가 증가하면 광합성이 커지기 때문이다. 그리고 일사량은 모든 계절에 대해 대부분 지역에서 NEP와 양의 상관관계를 나타냈다.

육상 탄소 흡수의 변화는 식생 유형에 따라서도 다르게 나타났다. 기온과 탄소 흡수의 양의 상관성은 혼합림, 침엽수림, 농작지, 북부 타이가 지역들에서 비율이 높게 나타났으나, 열대나 아열대 활엽수림, 열대림, 사바나와 같은 지역에서는 낮게 나타났다. 이러한 식생들은 각 위도대를 대표하고 있으며 이들의 분포와 특징에 따라서 탄소 흡수의 변화가 다르게 나타났다. 강수와 탄소 흡수는 침엽수림, 혼합림, 북부 타이가와 같은 북반구 고위도 지역에서 높은 양의 상관관계를 나타냈지만, 다른 대부분 지역에서는 낮은 비율을 나타냈다. 이 중 농작지의 경우 기온과 탄소 흡수는 양의 상관관계 비율이 높은 반면, 강수와는 높은 음의 상관관계 비율을 나타냈다.

본 연구 결과에서는 기온, 강수가 북반구에서 육상 탄소 흡수와 서로 강한 양의 상관관계를 나타냈으며, 열대와 아열대 지역에서는 음의 상관관계를 나타냈다.

또한 일사량은 모든 위도대에서 양의 상관관계를 나타냈다. 이러한 육상 탄소의 공간 변동성은 기후 요소뿐만 아니라 변동성을 조절하는 토지 이용 변화, 이산화탄소 시비효과, 질소 침적 등과 같은 다른 요소들로부터도 나타난다. 해마다 기후 변화로 인한 극한 현상의 빈도가 증가할수록 지역 및 국지 규모에서 탄소 흡수의 변화는 더 복잡한 메커니즘으로 설명될 것이다. 향후 육상과 대기 사이의 생지화학적, 생물학적 순환에 대해 다양한 제한 인자들의 상호작용을 고려하여 미래 기후 변화에 대한 육상 탄소 반응을 이해하는 과정이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 “기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)”의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 심사를 해주신 두 분 심사위원께 감사를 전합니다.

REFERENCES

- Anav, A., and Coauthors, 2013: Evaluating the land ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models. *J. Climate*, **26**, 6801-6843, doi:10.1175/JCLI-D-12-00417.1.
- Anderegg, W. R. L., and Coauthors, 2015: Tropical nighttime warming as a dominant driver of variability in the terrestrial carbon sink. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **112**, 15591-15596, doi:10.1073/pnas.1521479112.
- Ballantyne, A. P., C. B. Alden, J. B. Miller, P. P. Tans, and J. W. C. White, 2012: Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, **488**, 70-72, doi:10.1038/nature11299.
- Bastos, A., S. W. Running, C. Gouveia, and R. M. Trigo, 2013: The global NPP dependence on ENSO: La Nina and the extraordinary year of 2011. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1247-1255, doi:10.1002/jgrg.20100.
- Basu, S., and Coauthors, 2011: The seasonal cycle amplitude of total column CO₂: Factors behind the model-observation mismatch. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23306, doi:10.1029/2011JD016124.
- Beer, C., and Coauthors, 2010: Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, **329**, 834-838, doi:10.1126/science.1184984.
- Bradford, M. A., and T. W. Crowther, 2013: Carbon use efficiency and storage in terrestrial ecosystems. *New Phytol.*, **199**, 7-9, doi:10.1111/nph.12334.
- _____, A. D. Keiser, C. A. Davies, C. A. Mersmann, and M. S. Strickland, 2013: Empirical evidence that soil

- carbon formation from plant inputs is positively related to microbial growth. *Biogeochemistry*, **113**, 271-281, doi:10.1007/s10533-012-9822-0.
- Chapin III, F. S., and Coauthors, 2005: Role of land-surface changes in arctic summer warming. *Science*, **310**, 657, doi:10.1126/science.1117368.
- Churkina, G., and S. W. Running, 1998: Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems*, **1**, 206-215.
- Cleveland, C. C., S. C. Reed, and A. R. Townsend, 2006: Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest. *Ecology*, **87**, 492-503.
- _____, W. R. Wieder, S. C. Reed, and A. R. Townsend, 2010: Experimental drought in a tropical rain forest increases soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Ecology*, **91**, 2313-2323, doi:10.1890/09-1582.1.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**, 184-187.
- Deng, F., and J. M. Chen, 2011: Recent global CO₂ flux inferred from atmospheric CO₂ observations and its regional analyses. *Biogeosci.*, **8**, 3263-3281, doi:10.5194/bg-8-3263-2011.
- Fitzhugh, R. D., C. T. Driscoll, P. M. Groffman, G. L. Tierney, T. J. Fahey, and J. P. Hardy, 2001: Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, **56**, 215-238, doi:10.1023/A:1013076609950.
- Friedlingstein, P., and I. Prentice, 2010: Carbon-climate feedbacks: A review of model and observation based estimates. *Curr. Opin. Environ. Sustainability*, **2**, 251-257, doi:10.1016/j.cosust.2010.06.002.
- Gurney, K. R., and Coauthors, 2002: Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, **415**, 626-630.
- Halpert, M. S., and C. F. Ropelewski, 1992: Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J. Climate*, **5**, 577-593, doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0577:STPAWT>2.0.CO;2.
- Heimann, M., and M. Reichstein, 2008: Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, **451**, 289-292.
- Hobbie, S. E. and F. S. Chapin III, 1996: Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics. *Biogeochemistry*, **35**, 327-338, doi:10.1007/BF02179958.
- House, J. I., I. C. Prentice, N. Ramankutty, R. A. Houghton, and M. Heimann, 2003: Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO₂ sources and sinks. *Tellus*, **55**, 345-363.
- Huijnen, V., and Coauthors, 2010: The global chemistry transport model TM5: Description and evaluation of the tropospheric chemistry version 3.0. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 445-473, doi:10.5194/gmd-3-445-2010.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- Ise, T., C. M. Litton, C. P. Giardina, and A. Ito, 2010: Comparison of modeling approaches for carbon partitioning: Impact on estimates of global net primary production and equilibrium biomass of woody vegetation from MODIS GPP. *J. Geophys. Res.*, **115**, G040205, doi:10.1029/2010JG001326.
- Ito, A., and T. Oikawa, 2000: A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970-1997. *Climate Res.*, **15**, 161-183, doi:10.3354/cr015161.
- Jung, M., and Coauthors, 2010: Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, **467**, 951-954, doi:10.1038/nature09396.
- _____, and Coauthors, 2011: Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J. Geophys. Res.*, **116**, G00J07, doi:10.1029/2010JG001566.
- Kato, T., and Y. H. Tang, 2008: Spatial variability and major controlling factors of CO₂ sink strength in Asian terrestrial ecosystems: evidence from eddy covariance data. *Glob. Change Biol.*, **14**, 2333-2348.
- Kim, J. S., J. S. Kug, J. H. Yoon, and S. J. Jeong, 2016: Increased atmospheric CO₂ growth rate during El Niño driven by reduced terrestrial productivity in the CMIP5 ESMs. *J. Climate*, **29**, 8783-8805, doi:10.1175/JCLI-D-14-00672.1.
- Kim, J., H. M. Kim, C.-H. Cho, K.-O. Boo, A. R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev, 2017: Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 2881-2899, doi:10.5194/acp-17-2881-2017.
- Krol, M., S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peters, F. Dentener, and P. Bergamaschi, 2005: The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: Algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 417-

- 432, doi:10.5194/acp-5-417-2005.
- Kulawik, S., and Coauthors, 2016: Consistent evaluation of ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 683-709, doi:10.5194/amt-9-683-2016.
- Law, B. E., and Coauthors, 2002: Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agric. Forest Meteorol.*, **113**, 97-120.
- Le Quééré, C., and Coauthors, 2009: Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci.*, **2**, 831-836.
- Malhi, Y., 2002: Carbon in the atmosphere and terrestrial biosphere in the 21st century. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, **360**, 2925-2945.
- Masarie, K. A., W. Peters, A. R. Jacobson, and P. P. Tans, 2014: ObsPack: A framework for the preparation, delivery, and attribution of atmospheric greenhouse gas measurements. *Earth Syst. Sci. Data*, **6**, 375-384, doi:10.5194/essd-6-375-2014.
- Nemani, R. R., C. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, C. J. Tucker, R. B. Myneni, and S. W. Running, 2003: Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, **300**, 1560-1563, doi:10.1126/science.1082750.
- Niu, S., M. Wu, Y. Han, J. Xia, L. Li, and S. Wan, 2008: Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytol.*, **177**, 209-219.
- Olson, J. S., J. A. Watts, and L. J. Allsion, 1985: Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation. Numeric Data Package (NDP)-017, doi:10.3334/CDIAC/lue.ndp017.
- Patra, P. K., S. Maksyutov, and T. Nakazawa, 2005: Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using CO₂ fluxes derived from an inverse model. *Tellus*, **57**, 357-365, doi:10.3402/tellusb.v57i5.16560.
- Peters, W., J. B. Miller, J. Whitaker, A. S. Denning, A. Hirsch, M. C. Krol, D. Zupanski, L. Bruhwiler, and P. P. Tans, 2005: An ensemble data assimilation system to estimate CO₂ surface fluxes from atmospheric trace gas observations. *J. Geophys. Res.*, **110**, D24304, doi:10.1029/2005JD006157.
- _____, and Coauthors, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **104**, 18925-18930, doi:10.1073/pnas.0708986104.
- Piao, S., and Coauthors, 2008: Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, **451**, 49-52, doi:10.1038/nature06444.
- _____, P. Ciais, P. Friedlingstein, N. Noblet-Ducoudre, P. Cadule, N. Viovy, and T. Wang, 2009: Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. *Global Biogeochemical*, **23**, GB4026, doi:10.1029/2008GB003339.
- Potter, C., S. Klooster, R. Myneni, V. Genovese, P.-N. Tan, and V. Kumer, 2003: Continental scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling. *Global Planet. Change*, **39**, 201-213.
- Raupach, M. R., 2011: Carbon cycle: Pinning down the land carbon sink. *Nat. Clim. Change*, **1**, 148-149.
- Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1606-1626, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2.
- Schneising, O., and Coauthors, 2012: Atmospheric greenhouse gases retrieved from SCIAMACHY: Comparison to ground-based FTS measurements and model results. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 1527-1540, doi:10.5194/acp-12-1527-2012.
- _____, M. Reuter, M. Buchwitz, J. Heymann, H. Bovensmann, and J. P. Burrows, 2014: Terrestrial carbon sink observed from space: variation of growth rates and seasonal cycle amplitudes in response to interannual surface temperature variability. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 133-141, doi:10.5194/acp-14-133-2014.
- Wieder, W. R., C. C. Cleveland, and A. R. Townsend, 2009: Controls over leaf litter decomposition in wet tropical forests. *Ecology*, **90**, 3333-3341.
- Xia, J., J. Chen, S. Piao, P. Ciais, Y. Luo, and S. Wan, 2014: Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nature*, **7**, 173-180, doi:10.1038/ngeo2093.
- Yu, G. R., and Coauthors, 2013: Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Glob. Change Biol.*, **19**, 798-810, doi:10.1111/gcb.12079.
- Zeng, N., A. Mariotti, and P. Wetzel, 2005: Terrestrial mechanisms of interannual CO₂ variability. *Global biogeochemical*, **19**, GB1016, doi:10.1029/2004GB002273.
- Zeng, Z. C., and Coauthors, 2017: Global land mapping of satellite-observed CO₂ total columns using spatiotemporal geostatistics. *Int. J. Digital Earth*, **10**, 426-456, doi:10.1080/17538947.2016.1156777.
- Zhao, M., and S. W. Running, 2010: Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, **329**, 940-943, doi:10.1126/science.1192666.