



과거 30년간 기온상승으로 인한 한반도 생물계절성 변화 연구

Xu, JinFeng^{*} · Zhu, Yongyan^{***} · Meng, Su Xin^{*} · Huang, Xiao^{*} · Piao, DongFan^{**} · Cui, Gui Shan^{**†}

^{*}연변대학교 지리해양과학대학 석사과정생, ^{**}연변대학교 지리해양과학대학 조교수, ^{***}고려대학교 환경생태공학과 박사수료

Responses of Phenology by Climate Warming on Korean Peninsular in the Past Three Decades

Xu, JinFeng^{*} · Zhu, Yongyan^{***} · Meng, Su Xin^{*} · Huang, Xiao^{*} · Piao, DongFan^{**} and Cui, Gui Shan^{**†}

^{*}Master, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ., Yanji, China

^{**}Assistant Professor, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ., Yanji, China

^{***}Ph.D, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Korea Univ., Seoul, Korea

ABSTRACT

Vegetation phenology changes play a key role in the carbon and nutrient cycle of terrestrial ecosystems. Phenology findings based on satellite observations have mainly concentrated on the northern hemisphere or Eurasia and the American continent, with few small-scale studies on special climate environments. In this study, we used five methods to extract the Start of Growing Season (SOS), End of Growing Season (EOS) and Length of Growing Season (GSL) dates from NDVI records for the Korean Peninsula from 1982 to 2015, and determined the time correlation between SOS, EOS and maximum temperature (Tmax) and minimum temperature (Tmin). In general, phenological changes in the Korean peninsula vary from the findings drawn from the northern hemisphere scale. The SOS advance rate on the Korean peninsula is about 0.01 days / year, the fall phenology delay rate is about 0.24 days per year ($p < 0.05$), and the growing season extension rate is about 0.23 days/year. By investigating the phenology of North Korea and South Korea separately using the 38-line boundary, we found no statistically significant changes in SOS and GSL in North Korea. At the same time, SOS, EOS, and GSL in South Korea have changed significantly over this period. The prolongation of the growing season on the Korean Peninsula is mainly due to the delayed phenology of autumn. Vegetation phenology in South Korea's marine climate is more strongly influenced by Tmin.

Key words: Climate Change, Vegetation Greening, NDVI, Korean peninsula

1. 서 론

제5차 IPCC 보고서에 의하면 산업혁명 이후, 과거 100년 간의 전 지구 기온은 매 10년 0.074°C씩 상승하였고 과거 50년 사이에는 전 지구 육지의 최저 기온의 상승률은 최고 기온의 1.4배로 추정되었다. 이와 같이 기후변화의 영향은 최저 기온과 최고 기온의 상승을 초래하며 이러한 변화는 식생의 광합성작용, 호흡작용 등 메커니즘에서 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 식생의 장기간의 변화를 추정하고 원인을 유명

하기 위해서는 기온의 변화가 식생의 활동에 미치는 영향에 대한 정량화가 필요한 시점이다.

생물계절은 식생이 기후와 기타 환경인자의 영향으로 인해 연도별의 주기성을 나타내는 자연현상이다 (Zhu, 1985). 생물계절성은 기후변화를 반영하는 가장 중요한 지표 중의 하나이며 (Zhu et al., 1972; Bradley et al., 1999) 주로 성장기 시작일 (Start of Growing Season; SOS), 성장기 종료일 (End of Growing Season; EOS)과 성장지속기간 (Length of Growing Season; GSL) 등이 포함된다. 생물계절성은 식물의

[†] **Corresponding author:** cuiyguishan@ybu.edu.cn (No.977 of Gongyuan road Yanji City, Jilin Prov., China 133002, Tel.+86-138-4338-1515)

Received November 29, 2019 / Revised December 13, 2019 / Accepted December 20, 2019

변화 시기를 반복적으로 나타내는 자연현상과 기후변화와의 관계를 논하므로, 생물계절성의 변화에 대한 분석을 통하여 기후변화로 인한 민감성을 정량화 할 수 있다 (Sparks and Menzel, 2002; Piao et al., 2006; Zhang et al., 2015). 예를 들면, 봄철의 온도가 상승하면 SOS가 앞당겨지고, 가을철의 기온이 증가되면 EOS가 연장된다. SOS가 앞당겨지고 EOS가 연장되면 GSL가 길어짐으로써 광합성작용을 통한 에너지 축적량이 증가한다. 따라서 생물계절성에 대한 주기적인 모니터링을 통하여 식생의 성장 상황을 추정하고, 기후변화에 대응하는 식생 활동의 변화를 파악할 수 있다.

생물계절성에 대한 추정 방법은 주로 현장조사 방법, 생물계절 카메라를 이용한 방법, 그리고 원격탐사를 이용한 방법 등이 있다. 컴퓨터 성능의 발전과 함께 원격탐사를 기반으로 대규모 지역에서 장기적인 모니터링 연구가 많이 수행되고 있다. 식생지수를 이용하는 방법이 가장 많으며, 주로 북반구의 고위도지역 (Piao et al., 2015), 유럽 (Stöckli and Vidale, 2004; Fu et al., 2013), 북미 (Zhou et al., 2001; de Beurs and Henebry, 2005)와 동아시아지역 (Chen et al., 2003; Piao et al., 2006)등 지역에서 다양하게 수행되었다. 연구 결과에 의하면, 생물계절성은 전 지구적으로 다양한 특징을 가지고 있으며 지역적으로 SOS, EOS, GSL의 변화 차이가 크게 나타났다. 중국의 건조/반건조 지역에서는 봄철의 SOS는 5월 초로 추정되며 개엽 시기는 앞당겨지는 추세를 나타내고 북아프리카의 건조/반건조지역의 봄철 생물계절성은 2월 말에서 7월 사이에 발생하기 시작하며, 남아프리카 봄철 생물계절성은 9월부터 11월 사이에 발생하기 시작한다고 나타났다.

기후변화로 인한 생장기 시작일과 종료일의 변화는 지역적 차이가 비교적 크다. 생물계절성 연구 결과에 따르면 북반구 지역에서는 SOS가 약 5.4 일/10 년 앞당겨지고, EOS는 약 4.2 일/10 년으로 연장된 것으로 보도되었다 (Piao et al., 2019). 한편 중국 온대지역에서는 과거 1982- 1999년 사이 SOS가 7.9일 앞당겨지고 (Piao et al., 2006), 동북아시아 지역에서는 1982-2000년 사이 SOS가 7일 앞당겨졌다고 보도된 바 있다 (Jeong, 2009). 이는 동북아 지역의 봄철 SOS가 앞당겨지는 속도가 선명하게 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 기존의 연구는 주로 북아메리카와 유럽, 그리고 아시아의 고위도지역에 집중되었고 봄철의 SOS와 최고기온에 대한 시·공간적 분석을 주로하였다. 그러나 한반도와 같이 지역적 규모에서의 여러 가지 기후인자로 인한 SOS, EOS, GSL 등에 대한 이해는 미흡한 실정이다.

2013년의 IPCC 보고서에 의하면 1850-1900년에 비하여

미래 2100년에는 기온이 약 1.5°C 이상 증가하고 강수량도 변화할 것으로 예상되고 있다. 지속적인 기후변화가 예상되는 가운데, 지역 규모에서의 생물계절성의 특징 파악과 기후변화로 인한 정량화 평가가 필요하다. 본 연구는 과거 34년간의 봄과 가을철의 생물계절성의 분석을 통하여 한반도의 SOS와 EOS, GSL의 변화추세를 파악하고 Preseason에서의 최고기온과 최저 기온이 생물계절성에 미치는 영향을 정량화하여 기후변화에 의한 한반도 생물계절성의 특징을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 대상지

대상지 경계는 남한과 북한을 포함한 경위도 124.14°E - 130.93 °E, 33.23 °N - 43.01 °N로 지정하였다. 남한지역은 산림 면적이 약 6.4×10^6 ha이며 국토면적의 64%를 차지한다. 산림은 침엽수림이 약 42%, 활엽수림이 약 25%, 혼효림이 약 29%로 구성되어 있다 (Korea Forest Service, 2010). 지형은 북쪽과 동쪽이 높고 서쪽과 남쪽으로 가면서 기울어지는 경향이 있고 연평균 기온은 약 10-16°C이고, 연 강수량은 약 1200 mm정도 된다. 주요 수종은 소나무가 57.4%로 가장 많고, 리기다소나무가 15.6%, 낙엽송이 15.3%로 모두 침엽수종인 것으로 나타났다 (Korea Forest Service, 2003). 2013년 기준 남한의 주요작물 재배면적은 미곡이 832,625 ha (논벼 831,355 ha, 밭벼 1,270 ha)로 가장 넓고, 콩이 80,031 ha, 고추가 45,360 ha, 마늘이 29,352 ha, 감자 24,728 ha 순으로 넓었다 (Statistics Korea, 2014).

북한지역의 산림은 침엽수림이 약 30%, 활엽수림이 약 51%, 혼효림이 19%를 차지하며 국토면적의 약 73.2%가 산림으로 구분되었다. 하지만 과도한 산림벌채 등으로 인해 산림 축적은 남한의 1/2 수준 ($48\text{m}^3/\text{ha}$)으로 추정된다 (Korea Forest Service, 2010). 북한은 평균해발고도가 약 440 m이고 1000 m 이상인 지역이 13%정도 되며 북부와 동부에 산맥들이 비교적 높다. 북한지역은 연평균 기온은 약 10°C 정도이고 연평균 강우량은 1000 mm 정도이다. 북한지역의 주요 산림지대는 북부지역의 산록이나 습지가 많은 고원지대인데, 이곳에는 이깔나무, 전나무, 분비나무, 가문비나무 등이 주요 수종이다. 북서부의 낮은 산악지대에는 피나무류, 단풍나무류, 전나무류 등이 상층을 구성하고, 잣나무, 전나무류 등이 하층에 분포한다 (Kong, 2002).북한의 주요작물은 쌀과 옥수수로 각각 2009년을 기준으로 전체 식량작물 생산량의

48.6%와 31.7%를 차지하며, 그 다음으로 서류 (root and tuber crops, 薯類)가 12.9%, 맥류가 4.9% 순이었다 (Statistics Korea, 2011).

한반도의 대부분 지역은 온대 계절풍 기후대에 분포되고, 남부는 아열대 계절풍 기후대에 분포되었다. 남한지역은 해양성 기후특징이 선명하게 보이지만, 북한지역은 대륙성기후로 변해가고 있다. 따라서 한반도는 여름철에는 온도가 높고 비가 많으며 겨울은 춥고 건조한 특징을 나타내고 있다. 한반도의 기후는 주요하게 아한대기후 특징을 보이고 있다. 그중 남한의 연해 일부 지역은 온난대의 기후특징을 보이기 있지만, 전체적으로는 겨울에 춥고 건조하고 여름철에는 무덥고 습도가 높다. 여름철에는 계절풍 영향으로 북태평양으로부터 대량의 수증기를 가져오며 대부분의 강수는 여름철에 집중된다.

2.2 생물계절성 데이터

이 연구에서 사용되는 GIMMS3g NDVI자료는 Global Agricultural Monitoring System (GIMMS)에서 배포하는 자료이다. 이 자료는 1982년부터 2015년 사이의 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)에서 발사한 선진 고분해능 복사계 (Advanced Very High Resolution Radiometer; AVHRR) 자료를 바탕으로 계산된 자료이다. 공간해상도는 8 × 8 Km이고 15일 주기로 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 GIMMS3g NDVI 자료를 이용하여 SOS와 EOS를 계산하였다. GIMMS NDVI자료는 기하보정과 정사보정 등 전 처리 과정이 수행된 자료로써 화산분출로 인한 센서 감지오류와 구름층, 그리고 Stratospheric aerosol로 인한 노이즈가 제거되었다 (Zhou et al., 2001). NDVI는 비록 식생활의 변화에 대한 장기적인 모니터링이 가능하지만 (Zhou et al., 2001), 식생이 분포밀도가 낮은 지역의 영향을 배제하기 위하여 NDVI값이 0.1보다 작은 지역은 배제하였다. 또한, SOS와 EOS를 계산하기 전에 Savitzky-Golay 여파를 이용하여 생물계절성의 주기가 발생하는 과정에서 발생한 소음이나 노이즈로 인한 영향을 최대한 줄일 수 있도록 전처리를 수행하였다.

현재, 여러 가지 방법으로 NDVI의 시계열변화로부터 식생의 SOS와 EOS를 파악할 수 있다. 그 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. (1) NDVI의 기울기 값의 변화를 통한 생물계절성 추정 방법과 (2) NDVI 역치 (threshold) 설정을 통한 생물계절성 추정 방법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 생물계절성의 SOS와 EOS를 추정하기 위해 2가지

(Piao 2006; Studer 2007)의 기울기 값의 변화를 통한 생물계절성을 추정하는 방법과 3가지의 NDVI값의 역치 (threshold) 설정을 통한 생물계절성 추정 방법 (White 1997; Piao 2006; Yu 2010)을 모두 이용하여 연구대상지 생물계절성의 SOS와 EOS를 각각 구하고 그 값들을 평균하여 최종적으로 한반도의 SOS와 EOS를 확정하였다 (Fig.1). 기울기 값의 변화를 통한 SOS와 EOS 추정 방법 (식 1; 식 2)과 NDVI 값의 역치를 설정하는 방법 (식 3; 식 4; 식 5)은 각각 다음과 같다.

Step 1: Double logistic 함수식 (식1)을 이용한 NDVI를 시

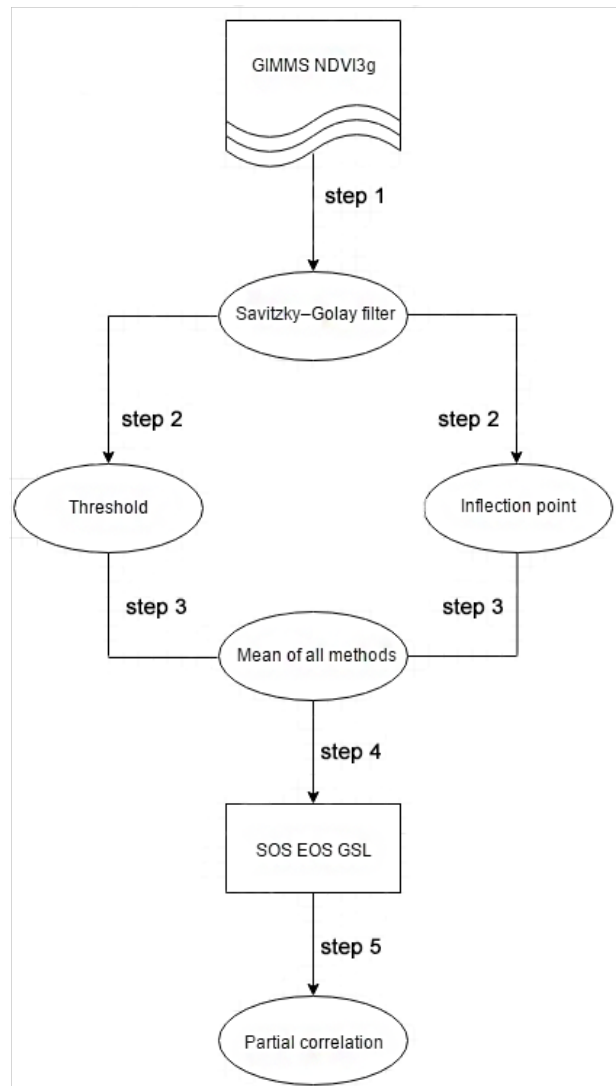


Fig. 1. Flowchart of procedures used to determine the SOS, EOS and GSL of phenological event from normalized difference vegetation index (NDVI) time series.

계열적으로 피팅 (fitting)하고, 곡선의 2차 도함수를 구했다. 상반기 (정규분포곡선 최대치의 좌측)의 함수곡선에서 확인할 수 있는 두개의 최대치에 해당하는 두개의 날짜가 바로 SOS이다. 하반기 (정규분포곡선의 최대치 우측)의 함수곡선에서 확인할 수 있는 두개 최대치에 해당하는 두개의 날짜가 바로 EOS이다.

$$y(t) = a + b\left(\frac{1}{1 + e^{c(t-d)}}\right) + \left(\frac{1}{1 + e^{e(t-f)}}\right) \quad (\text{식 1})$$

식 (1)에서 a는 NDVI의 raw data 값이고 a+b는 연중 NDVI값의 최대치를 나타내며 t는 시간의 변수 (1 day)이다. y (t)는 시간이 t일 때 NDVI 값 (Julien et al., 2009 ; Zhang et al., 2003)을 의미하고 있다. c, d, e와 b는 함수식의 계수이다.

Step 2: Double logistic 함수식 (식 1)으로 시계열 NDVI를 피팅 한 후 NDVI의 증가율 (혹은 감소율)이 가장 빠른 시점이 바로 SOS (혹은 EOS)라고 판단할 수 있다. 즉 피팅하고자 하는 1차 도함수의 곡선 위에서 최대치 혹은 최소치에 해당하는 날짜를 SOS와 EOS라고 정하였다 (Studer et al., 2007).

Step 3: 동적임계치 확정법을 사용하여 SOS와 EOS를 확인할 수 있다. Double logistic 함수로 피팅한 NDVI를 다음 아래의 수식을 이용하여 정규화 한다.

$$Ratio_{day} = (NDVI_{day} - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (\text{식 2})$$

식 (2)에서 NDVI_{day}는 날짜가 지정된 시기의 NDVI의 값을 나타내고 NDVI_{max}와 NDVI_{min}는 NDVI의 매년 최대치와 최소치의 값을 의미하고 있다. 본 연구에서 NDVI의 임계치를 0.2로 가정하여 SOS와 EOS를 계산하였다 (Yu, H et al., 2010).

Step 4: 이 방법은 세번째 방법에서 임계치를 0.5로 설정하여 SOS와 EOS를 계산하였다 (White et al., 1997).

Step 4: 임계치를 고정시키는 방법을 사용하여, 생물계절성 개엽 시기의 SOS와 EOS를 확정한다. 우선 장기간 NDVI 데이터를 기반으로 NDVI의 계절적 동적 변화를 파악하고, 아래의 함수식을 이용하여 장기간 NDVI의 변화율을 구축하였다.

$$NDVI_{RC} = \frac{NDVI(t+1) - NDVI(t)}{NDVI(t)} \quad (\text{식 3})$$

식 (3)에서 NDVI (t+1)과 NDVI (t)는 각각 NDVI가 t와 t+1일 때의 값을 나타내고 있고, NDVI_{RC}의 최대치와 최소치는 각각 봄철 SOS와 가을철 EOS의 임계치를 나타내고 있다. NDVI는 다음과 같은 함수식을 이용하여 피팅할 수 있다.

$$NDVI = a + a_1 \times t + a_2 \times t^2 + \dots + a_n \times t^n, n = 6 \quad (\text{식 4})$$

식 (4)에서 t는 연중 줄리안 데이 (Julian Day)를 의미하고 있고 a, a₁, a₂, ..., a₆는 피팅 계수를 의미한다. 매일 비교하고 NDVI와 임계치를 피팅하는 방법으로 SOS와 EOS를 확인할 수 있다 (Piao et al., 1997).

2.3 기상자료

본 연구에서는 CRU TS v.4.03에서 배포한 월 최고 온도, 월 최저 온도, 월 강수량과 월운량은 데이터를 사용하였다. 공간 해상도는 0.5°이며 시간 범위는 1982-2015년까지 약 34년간의 범위이다. 고해상도 Köppen 기후분류 데이터는 프린스턴 대학교 등이 구축한 결과를 사용하였다 (Hylke 등, 2018). Köppen 기후분류 자료는 RCP 8.5자료와 기후권역 시스템 모델을 이용하여 구축한 결과이며 1980-2016년까지 글로벌 기후 권역 분류데이터를 공간 해상도 1 km 단위로 구축을 한 결과이다.

2.4 선형회귀분석

본 연구는 SOS와 EOS, 그리고 GSL의 시공간적 변화를 추정하기 위하여 선형회귀 분석을 수행하였다. 2.3에서 계산된 매해의 생물계절성 값 (SOS, EOS, GSL)의 선형회귀분석을 통하여 픽셀마다의 경사값을 구하였다. 경사값의 방향은 생물계절성이 앞당기거나 연장하는 방향을 나타내고, 그 값의 크기는 변화하는 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 통계값의 유의수준은 95%로 설정하였다.

2.4 Preseason에서의 생물계절성과 온도와의 상관 분석

본 연구에서 편상관분석을 이용하여, 최고 기온과 최저 기온이 SOS와 EOS에 주는 영향을 분석하였다. 이러한 방법을 통해, 기타 변수가 기후인자에 주는 영향 및 노이즈를 제거하고 통제하였다 (Peng et al., 2013). 생장 주기가 시작되기 전의 온도는 식생의 생물계절성 개엽 시기에 영향을 미치는 가장 중요한 인자라고 할 수 있다. 본 연구는 비록 식생의 생물

계절성 개엽 시기 모형에 제일 적합한 온도변수를 확인하고자 하는 것이 목적이지만, 온도를 제외하고 또 다른 환경변수 (ex. 강수량)도 다양한 식생의 성장 시기가 시작하기 전에 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 온도가 개엽 시기에 미치는 영향을 분석할 때, 편상관분석을 통해 강수량과 구름양 (태양복사량) 등과 변수를 통제하였다.

SOS와 EOS의 변화는 성장 시기 시작되기 몇 개월 전의 온도와 높은 상관성을 나타내고 있다 (Menzel et al., 2006). 최고 온도와 최저 온도가 SOS와 EOS에 영향을 주는 최대의 Preseason을 확인하기 위해 SOS와 EOS 이전 0, 1, 2, 3개월의 평균 최고 기온과 최저 기온 사이의 편상관계수를 구하고 그에 해당하는 다른 변수 (강수량, 구름양 등)들을 제거하였다. 최대 상관계수 R을 구축할 시점의 시간은 SOS, EOS가 시작하는 시점과 서로 일치하다. 상세한 추정식은 Piao et al., (2015) 와 Fu et al., (2014)의 연구 결과를 참고하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 한반도 생물계절성의 시공간 분포

한반도의 생물계절성은 남북지역의 차이가 선명하게 나타나고, SOS는 3월과 4월에 성장기가 시작되고 EOS는 9월과 10월 사이로 성장기가 종료되며 GSL는 약 6-7개월이다. 남한지역의 경우 SOS는 좀 일찍 시작되며 90-100일 사이에 집

중되고 EOS는 주로 300 - 320일 사이로 늦게 끝나며, 성장 주기의 길이가 약 200-220일 정도인 것을 확인할 수 있다. 반면, 북한지역은 해발고가 높아 SOS가 일반적으로 120일-130일 사이로 성장기가 늦게 시작되고 EOS는 주로 280-300일 사이로 성장기가 일찍 종료된다. 성장지속기간이 약 170-175일 사이로 정도로 남한지역보다 짧은 것을 확인할 수가 있다 (Fig. 2).

과거 34년간의 한반도의 생물 계절성의 변화추세도 남북지역의 차이를 보인다. 약 62.3% 지역에서 SOS가 앞당겨지고, 18.8%에 해당하는 지역이 유의 수준을 보였다. 남한지역은 0.24 일/년의 변화속도로 SOS가 앞당겨졌고 ($p < 0.05$), 북한도 SOS가 앞당겨지는 경향을 보이지만 속도는 약 0.02 일/년으로 매우 낮다. 또한, 백두산 지역과 북한의 동북지역에서는 SOS가 미뤄지는 경향이다. 한반도 전 지역의 SOS는 앞당겨지는 경향을 보이고 속도는 약 0.01 일/년으로 북반구와 동아시아지역보다 늦다 (Fig. 3 (a), Fig. 4).

SOS와 달리 EOS는 한반도 전 지역에서 연장되는 추세를 나타내고 그중에서 약 48.6%의 지역이 EOS가 연장되는 현상이 뚜렷하게 나타났다. 특히 남한의 일부 지역에서는 EOS가 매년 약 0.6-0.8일 연장된 것으로 나타났다. 이 속도는 북반구 지역의 EOS 연장된 속도의 2배에 달한다. 한반도 전체지역은 EOS가 늦춰지는 속도가 약 0.24 day/year로 추정되었고, 남한의 경우 EOS가 연장되는 속도가 약 0.41 day/year로 비

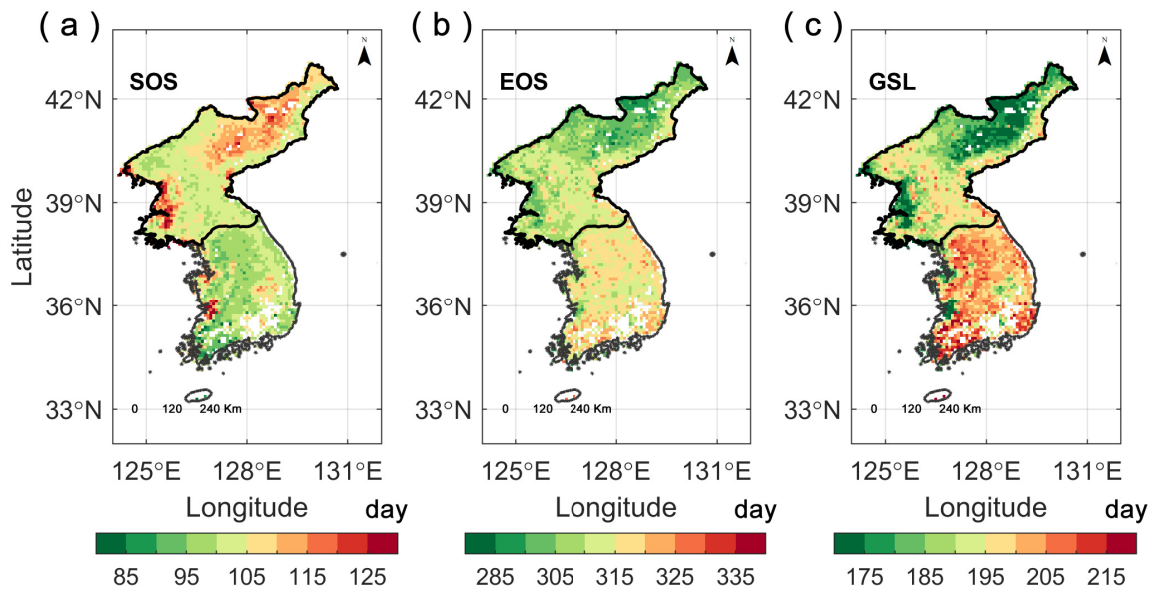


Fig. 2. Spatial distributions of SOS (a), EOS (b), GSL (c) over the Korean Peninsula during the 1982-2015.

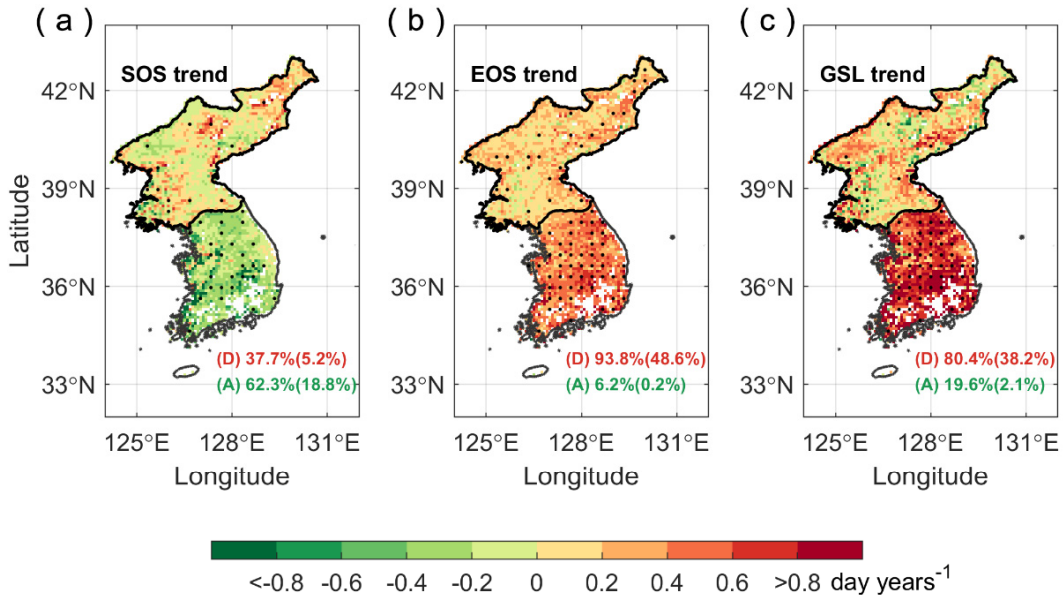


Fig. 3. Spatial distributions of SOS trend (a), EOS trend (b), GSL trend (c) over the Korean Peninsula during the 1982-2015. D and A represent delay and advance, respectively. The black dots show the pixels where phenology trends are statistically significant at $p < 0.05$.

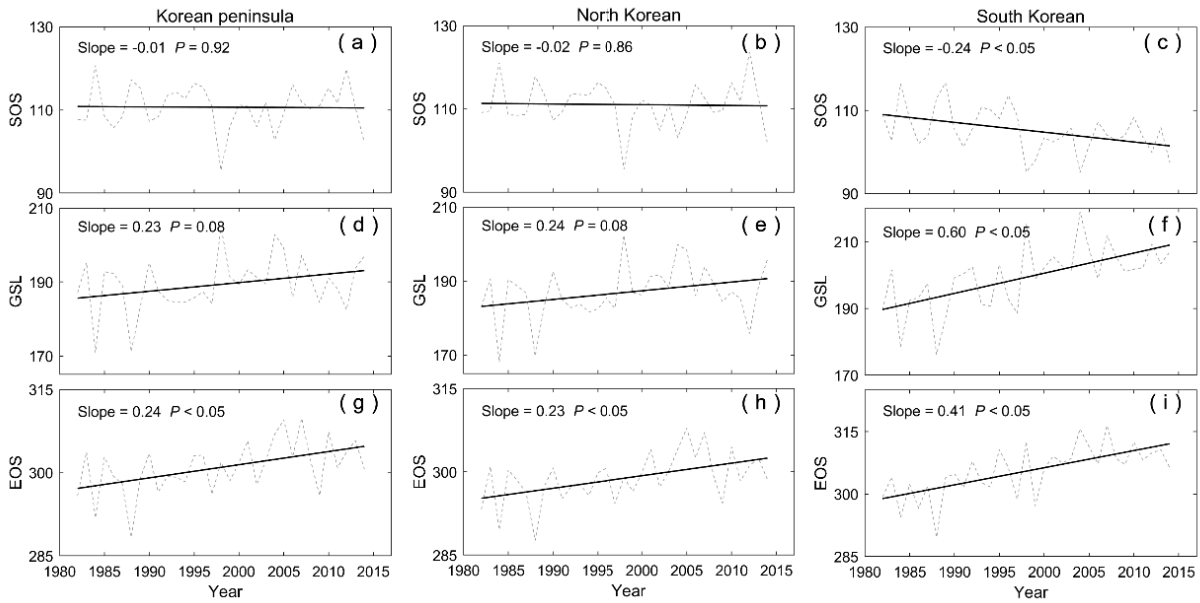


Fig. 4. Linear trend of SOS, EOS and GSL over the Korean Peninsula (first column), North Korean (second column), South Korean (third column) during the 1982-2015.

교적 크다. 북한은 0.23 day/year로 나타났으며 남한에 비하여 연장되는 속도가 늦게 나타났다 (Fig. 3 (b), Fig. 4).

공간적인 분포를 살펴보면, 한반도의 약 80.4%의 지역에서 GSL은 연장되는 추세를 보여주는데, 이는 EOS가 늦춰지

는 지역의 범위와 유사한 공간패턴을 가진 것을 확인할 수 있다 (Fig.3 (c), Fig. 4). 그 중에서 약 38.2% 지역에서 GSL의 연장이 뚜렷하게 나타났고 GSL의 변화 패턴도 남북차이가 비교적 크다. 남한의 대부분 지역에서 GLS는 약 0.6 day/year가 선명하게 연장된 것을 확인할 수 있었다. 반면, 북한의 GSL는 단축과 연장이 동시에 나타나고 있다. 전반적으로 보았을 때, 한반도의 GSL은 약 0.24 day/year의 증가추세를 보여주나 유의성이 높지 않다. 과거 30년간 한반도의 GSL은 매년 0.24 day의 속도로 지연되고 있는데, 이는 남한의 GSL이 연장으로 인한 현상으로 간주할 수 있다. 한반도의 생물 계절성의 변화는 북반구의 변화추세와 서로 다른 경향을 나타내고 있다. 북반구는 SOS가 앞당겨지고, EOS가 늦춰지면서 GSL이 연장되는 추세라면, 한반도의 GSL의 연장은 EOS의 연장으로 인한 것으로 판단되고 남북 두 지역의 차이가 매우 큰 경향을 보인다. 남한의 중부 대구, 광주, 대전, 세종, 및 서울 등 도시 지역의 봄철 SOS의 앞당겨지고 그 속도는 약 0.4-0.6 일/년이다. 이것은 도시화가 식생의 생물계절성에 영향을 미치기 때문이다 (Joeng, 2014). 이에 비하여 북한지역의 SOS의 변화가 선명하지 않으며 서부연해 지역과 량강도, 그리고 함경북도지역에서는 0.2-0.4 일/년의 속도로 늦춰진다. 남한지역에서는 EOS와 GSL의 변화 경향은 늦춰지는 추세를 보인다. 과거 30년간 남한의 EOS는 약 0.4-0.6 일/년의 속도로 지연되고 GSL은 0.8 일/년의 속도로 지연되고 있다. 북한지역에서의 EOS도 지연되는 경향이 보이지만 약 0-0.2 일/년의 속도로 남한보다 낮다. 하지만 GSL이 단축되는 지역과 SOS가 지연되는 지역이 공간패턴이 비슷하게 나타났다.

시간적인 변화경향을 살펴보면, 과거 30년간 한반도의 SOS (0.01 일/년, $p=0.92$)는 앞당기고, EOS (0.24 일/년, $p<0.05$)는 지연되어, 전체 GSL (0.23 일/년, $p=0.08$)는 연장되는 추세를 이루고 있다. SOS의 변화에서, 남한지역은 SOS가 0.24 일/년 ($p<0.05$)의 속도로 앞당기는 경향을 보이지만 북한지역은 0.02 일/년 ($p=0.86$)의 속도로 앞당겨졌다. 한반도의 SOS의 변화경향은 북반구 지역보다 앞당기는 경향이 낮다. EOS의 변화에서, 남한지역의 약 0.41 일/년 ($p<0.05$)의 속도로 지연되었고, 북한지역은 약 0.23 일/년 ($p<0.05$)의 비교적 낮은 속도로 지연된다. 한반도 지역의 EOS는 약 0.24 일/년 ($p<0.05$)의 속도로 지연된다. GSL의 변화를 살펴보면, 한반도의 GSL은 약 0.24 일/년 ($p=0.08$)의 속도로 지연되었다. 남한지역은 약 0.60 일/년 ($p<0.05$)의 속도로 지연되고 북한지역에서는 약 0.23 일/년 ($p=0.08$)의 속도로 지연되었다. 따라서 한반도의 GSL의 연장은 주로 남한지역의 EOS의 지연으로 인한 것으로 보인다. 이는 Joeng (2014년)의 남한지역대

대한 연구 결론과 일치하다.

전체적으로 보았을 때 한반도 지역의 GSL의 연장은 주로 EOS의 지연으로 인한 것으로 보였다. 이는 북반구 지역은 SOS가 앞당기고 EOS가 지연되어 GSL이 연장한 결과와 다르다. 1982-2015년의 한반도 GSL의 연장은 한국지역의 EOS의 지연으로 인한 것이다. 이 결과는 Joeng (2-14)연구결과와 유사하다. Joeng (2014)이 GIMMS NDVI와 야의 관측 자료를 기반으로 1982-2008년 사이의 EOS와 GSL의 변화추세를 연구하였다. 결과로는 남한지역이 연구 기간에 GSL이 0.45 일/년의 속도로 연장하며, 이러한 변화추세는 남한지역의 GSL의 연장으로 초래된 것이라고 밝혔다. Lee (2018)에 MODIS EVI 자료와 현장관측자료를 기반으로 남한지역의 SOS가 2003-2016년 사이에 0.16 일/년의 속도로 앞당김으로 분석하였다. 이는 본연구의 0.24 일/년의 변화추세의 결과와 비슷하다. 비록 사용된 자료와 추정방법이 다르지만, 과거 30년간 한반도 생물계절성의 변화추세를 일치하게 나타났다.

3.2 생물계절성과 온도와의 상관분석

한반도 SOS는 Preseason에서의 최고 기온과 최저 기온의 영향을 공동으로 받는다 (Fig.5). 그중에서도 최고 기온이 미치는 영향이 더 크게 나타났으며 Piao et al. (2015)의 연구결과와 같이 최고기온이 SOS의 변화에 영향을 미치는 주요한 영향인자인 것이다. 그러나, 북한지역은 SOS가 최고 기온과 부의 상관성을 나타내는 동시에, 최저 기온과도 양의 상관성을 가진다. 남한지역은 반대로 SOS와 최저 기온과 부의 상관성을 나타내고, 최고 기온과 낮은 양의 상관관계를 가진다. 한반도의 EOS의 연장은 최고 기온과 최저 기온의 공동영향을 받지만, 최저 기온이 미치는 영향이 조금 크게 나타났으며, 총 면적의 63.5%를 차지한다. 그중에서 34.5%의 지역이 통계적 유효성을 보여주고 있다.

남한의 EOS 지연 속도는 북반구 지역의 2배 정도이다. 남한지역과 북한지역은 식생의 유형과 기후조건 등 자연요소가 상대적인 차이가 존재한다. 하지만 식물의 생물계절성의 남북차이는 주로 최고 기온에 의한 영향이 더 크다. 본 연구에서 최저 기온의 영향을 받는 비중이 최고 기온보다 더 크게 나타났으며, 이는 최고기온이 생물계절성의 주요한 원인이라는 선행연구의 결과와 다르다 (Piao et al., 2015). 이런 현상이 나타나는 원인은 최저기온의 증가로 인해 저온이 식생의 생장에 일으키는 저항 작용을 감소시켜 남한 남부지역의 식생으로 하여금 겨울철에도 습윤한 기후환경 속에서 생장이 진행되었기 때문이라고 판단된다.

한반도의 봄철 SOS는 최고 기온의 영향을 많이 받는다고 나타났다. 최고기온과 SOS 사이의 편상관관계를 파악해본 결과, 약 40%의 지역이 부의 상관성을 보여주고 있다. 특히 북한지역에서 이런 상관성이 더욱 뚜렷하게 나타났으며 약 46%의 지역이 SOS와 최고 기온이 부의 상관성을 보인다. 하지만 남한지역의 경우, 봄철의 Preseason에서 최저 기온이 SOS에 대한 영향이 최고 기온보다 더 크게 나타났다. 이것은 남한지역이 처해있는 독특한 지리적환경으로 인한 것으로 판단된다. 남한지역은 동북아 지역의 기후와 마찬가지로 온대계절풍 지역에 속하지만, 동·서·남 세 방향이 바다에 둘러싸여 있어서 늘 강한 해양성기후의 영향을 받고 있다. 심지어

겨울철에도, 태평양으로부터 많은 습도가 기후 순환으로 인해 남한지역으로 이동할 수 있다. 따라서, 남한지역의 최저 기온만으로도 충분히 광합성작용을 진행할 수 있는 조건을 가지고 있다. 북한은 대륙성기후 특징이 더욱 뚜렷하기 때문에 최고 기온이 식생의 SOS 변화에 영향을 미치는 제일 중요한 인자이다. 이는 북반구를 대상으로 한 육상생태계의 선행 연구와 유사한 결과를 나타내고 있다.

한반도를 전체적으로 분석할 경우, 가을철의 EOS의 변화는 최고기온과 최저기온의 공동영향을 받는다. 하지만 남한지역과 북한지역을 단독으로 분석할 경우, 최고기온과 최저기온이 두 지역의 EOS에 대한 영향은 서로 반대된다. 북한의 EOS 변화는 주로 최고기온과 높은 상관성을 보여주고 있다. Preseason 기간의 더 높은 최고 기온은 강렬한 빛과 복사량을 나타내고, 더 높은 최저 기온은 겨울철이 더 늦게 시작된다는 것을 설명할 수 있다. 하지만, 가을철의 강렬한 태양 복사량은 강수량이 감소한다는 것을 의미하며, 복사량의 증가는 식생이 이용할 수 있는 수분함량을 감소시켜 광합성작

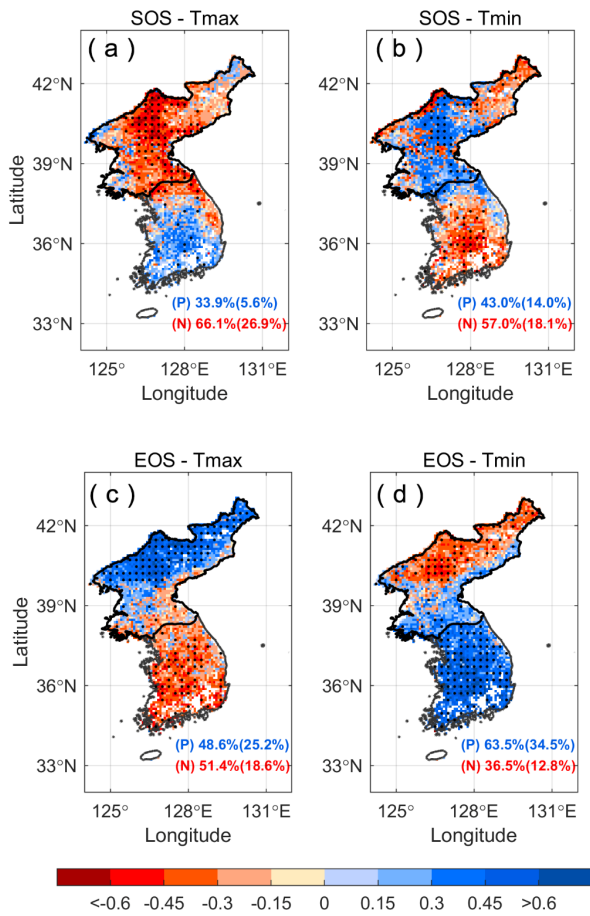


Fig. 5. Spatial distributions of the partial coefficients between Phenology and T_{max} (first column), T_{min} (second column). P and N represent positive and negative correlation between the SOS, EOS and T_{max}, T_{min}. The black dot show the pixels where phenology trends are statistically significant at $p < 0.05$.

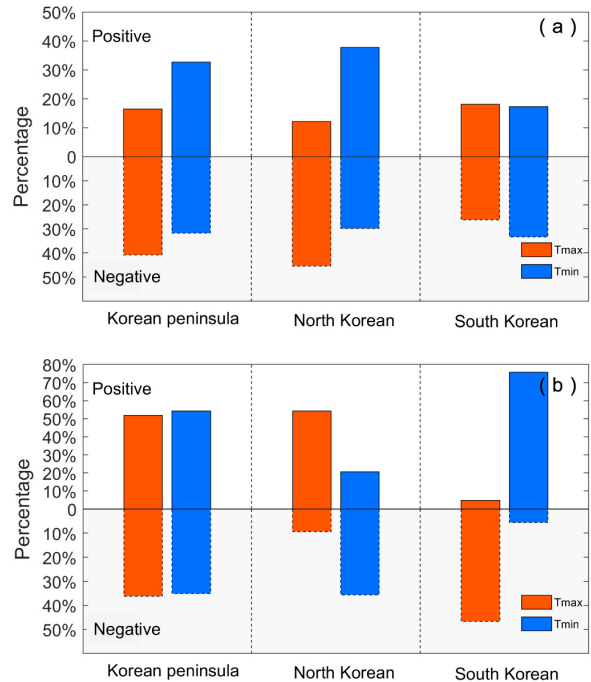


Fig. 7. Based on the statistics of the partial correlation between SOS (a), EOS (b) and the T_{max} and T_{min} on the different region, the percentage represents the percentage of the grid cells that are significantly related to all the grid cells that are positively or negatively correlated.

용을 제한할 수 있다. 일반적으로 고위도 지역의 활엽수림에서 녹지를 발견할 수 있지만, 이 지역은 더 이상 광합성을 하지 않거나, 거의 할 수 없는 상황에 이르는 경우가 있다. 최저 기온의 상승은 식생이 수분의 제한을 받지 않는 상태에서 더 긴 시간동안 서리피해를 받지 않을 수 있다. 이는 남한 산림지역의 EOS와 최저 기온이 의 상관성을 나타내는 주요한 원인이다.

4. 결론

원격탐사는 큰 범위에서 공간과 시간적인 제한을 적게 받고 생물의 생물계절성을 모니터링 할 수 있는 가장 유용한 수단으로 알려져 있다. 본 연구에서는 장기간의 위성영상을 이용하여 생물계절성을 분석하였다. 그 결과, 한반도의 GSL의 연장은 주로 가을철의 EOS의 연장으로 인한 것으로 나타났다. 38선을 중심으로 남·북 차이가 크게 나타났으며 남한지역의 EOS의 연장을 초래하는 기후인자는 최저기온의 상승으로 인한 것이고 북한지역의 EOS 연장은 주로 최고기온 상승으로 인한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 지역 규모에서의 생물계절성의 시·공간 변화와 기후변화에 대한 민감도를 나타냈으며 향후 식생의 바이오매스 추정, 탄소 모델링 등 연구에 대한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다. 또한 본 연구는 한반도 전체 지역을 대상으로 장시간의 생물계절성을 비교하였고, 기존의 연구에서 반영하지 못한 기후인자의 영향을 정량화 하였으며 남북지역의 차이를 규명하였다. 하지만 식생의 생물계절성은 기후변화와 환경변화의 다양한 영향을 받기 때문에, 보다 정확한 한반도의 생물계절성을 분석하기 위해서는 기온의 변화 외에 누적강수량, 토양수분함량 등 인자에 대한 고민도 필요하다.

사 사

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant 31500400; Grant 41977401).

REFERENCES

Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, Vergopolan N, Berg A, Wood EF. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data*. 5: 180214.

Bradley NL, Leopold AC, Ross J, Huffaker W. 1999. Phenological changes reflect climate change in wisconsin. *P Natl A Sci* 96 (17): 9701-9704.

Chen X, Zhang XS, Li BL. 2003. The possible response of life zones in china under global climate change. *Glob Planet Change* 38 (3): 327-337.

De Beurs KM, Henebry GM. 2005. Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects. *Global Change Biol*. 11 (5): 779-790.

Fu YH, Piao SL, Op de Beeck M, Cong N, Zhao HF, Zhang Y, Menzel A, Janssens IA. 2014. Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. *Global Ecol Biogeogr* 23 (11): 1255-1263.

Jeong SJ, Ho CH, Jeong JH. 2009. Increase in vegetation greenness and decrease in spring time warming over East Asia. *Geophys Res Lett* 36: L02710.

Julien Y, Sobrino JA. 2009. Global land surface phenology trends from GIMMS database. *Int J Remote Sens* 30 (13): 3495-3513.

Korea Forest Service. 2003. Statistics Archives on the home page of Korea Forest Service. Division of Forestry Policy. Kihwan Kim. Forest area by tree species.xls.

Korea Forest Service. 2010. Annual report on forest and forestry trends for 2010. Publication Number. 11-1400000-000196-10. p.4-5, p.655.

Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-küler K, Bissolli P, Braslavská O, Briede A, Chmielewski FM, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl Â, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatczak K, Mâge F, Mestre A, Nordli Ø, Peñuelas J, Pirinen P, Remišova V, Scheifinger H, Striz M, Susnik A, Van Vliet AJH, Wielgolaski F, Zach S, Züst A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biol*. 12: 1969-1976.

Peng SS, Piao SL, Ciais P, Myneni RB, Chen A, Chevallier F, Dolman AJ, Janssens IA, Peñuelas J, Zhang GX, Vicca S, Wan SQ, Wang SP, Zeng H. 2013. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature* 501 (7465): 88-92.

Piao SL, Liu Q, Chen AP, Janssens IA, Fu YS, Dai JH, Liu LL, Lian X, Shen MG, Zhu XL. 2019. Plant phenology

- and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biol* 25: 1922-1940.
- Piao SL, Tan JG, Chen AP, Fu YH, Ciais P, Liu Q, Janssens IA, Vicca S, Zeng ZZ, Jeong SJ, Li Y, Myneni RB, Peng SS, Shen MG, Peñuelas J. 2015. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nat Commun* 6: 6911.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Ciais P, Zhu B. 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biol* 12 (4).
- Piao SL, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang XH, Ahlström A, Anav A, Canadell JG, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy PE, Li JS, Lin X, Lomas MR, Lu M, Luo YQ, Ma YC, Myneni RB, Poulter B, Sun ZZ, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Zeng N. 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends. *Global Change Biol* 19 (7): 2117-2132.
- Statistics Korea, 2011. 2011. Key Statistics for North Korea. p.59.
- Sparks TH, Menzel A. 2002. Observed changes in seasons: an overview. *Int J Climatol* 22 (14): 1715-1725.
- Studer S, Stöckli R, Appenzeller C, Vidale PL. 2007. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *Int J Biometeorol* 51 (5): 405-414.
- White MA, Thornton PE, Running SW. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochem Cy* 11 (2): 217-234.
- Yu HY, Luedeling E, Xu JC. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *P Natl Acad Sci USA* 107 (51): 22151-22156.
- Zhang XY, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Reed BC, Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sens Environ* 84 (3): 471-475.
- Zhang XZ, Yang YP, Piao SL, Bao WK, Wang SP, Wang GX, Sun H, Luo TX, Zhang YJ, Shi PL, Liang EY, Shen MG, Wang JS, Gao QZ, Zhang YL, Ouyang H. 2015. Ecological change in the Tibetan plateau. *Chinese Sci Bull* 60 (32): 3048-3056.
- Zhou L, Tucker CJ, Kaufmann RK, Slayback D, Shabanov NV, Myneni RB. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J Geophys Res-Atmospheres* 106 (D17): 20069-20083.
- Zhu KZ. 1972. A preliminary study on climatic changes in China over the last 5000a. *Acta Archaeol Sin* 1: 15-38 (in Chinese with English abstract).
- Zhu ZH, Zhang FC. 1985. Solar energy utilization efficiency of the land plants in China. *Acta Ecol Sin* 5 (4): 55-68 (in Chinese with English abstract).