



한반도 식생의 녹색화에 대한 시계열적 분석

Lv, Guan Ting* · Zhu, Yongyan*** · Liu, Wei Qi* · Huang, Xiao* · Li, Cheng Lei* · Cui, Gui Shan**†

*연변대학교 지리해양과학대학 석사과정생, **연변대학교 지리해양과학대학 조교수, ***고려대학교 환경생태공학과 박사수로

Analysis of Multi-time Series Vegetation Greening in the Korean Peninsula

Lv, Guan Ting* · Zhu, Yongyan*** · Liu, Wei Qi* · Huang, Xiao* · Li, Cheng Lei* 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

The vegetation is feedback on environmental change due to global warming. Also, the growth status of vegetation and the coverage area of vegetation are greatly affected by the environmental changes. The quantitative change of vegetation growth status is the primary task of vegetation response to environmental changes. In this study, the Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) based Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and CRU climate data are used to analyze the spatio-temporal characteristics of vegetation greening evolution and its response to climate change from 1982 to 2015 in the Korean Peninsula by applying the partial correlation and trend analysis. The results show that the average NDVI value of the Korean Peninsula in the period 1982-2015 was 0.68, among which the average NDVI in North Korea and South Korea was 0.69 and 0.67, respectively. The NDVI of the Korean Peninsula between 1982 and 2015 increased by 0.6×10^{-3} year⁻¹. The increasing trend prior to and after 1998 was 2.5×10^{-3} year⁻¹ and 0.9×10^{-3} year⁻¹, respectively. During the 1982-2015 years, the NDVI of DPRK and South Korea have grown mainly with the trend of 0.2×10^{-3} year⁻¹ and 1.1×10^{-3} year⁻¹, respectively. According to the analysis of NDVI and climatic factors, the distribution of NDVI in the three-time series of Korean Peninsula is consistent in spatial distribution. According to the results of partial correlation analysis of climate factor and NDVI distribution in Korean Peninsula, the region has significant partial correlation with temperature change. The climate factor of temperature is the main driver of NDVI change, which plays a key role in controlling NDVI change accumulation.

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

1. 서 론

1998년부터 2012년의 온난화의 휴지기 (Hiatus)와 함께 전 지구 규모의 식생 녹색화 (Vegetation Greening)는 정지된 상태였다 (Piao et al., 2018). 식생의 성장과 생리는 온도와 강수 등의 변화에 민감하며 기후변화에 의한 식생의 변화는 육상생태계의 동태와 탄소순환에 영향을 준다. 식생의 변화를 추정하는 방법에는 주로 에디 플럭스타워 네트워크 방법 (Restrepo-Coupe et al., 2013), 위성영상을 이용한 방법 (Zhou

et al., 2014), 산림 바이오매스 측량방법 (Pan et al., 2011)과 생태계 모델링 방법 (Cox et al., 2013) 등이 있다. 위성영상을 이용한 식생지수 모니터링 방법은 식생의 광합성 이용률, 엽록소 밀도, 엽면적지수와 증발산량과 같은 식생의 성장과 생리의 변화를 추정할 수 있다. 따라서 식생지수 모니터링 방법은 대규모 지역에 대한 식생 변화의 시공간 분석 연구에 가장 많이 활용되고 있다 (DeFries et al., 1995; Piao et al., 2013; Ding et al., 2013).

온도와 강수량의 상승으로 인해 식생의 NDVI가 증가하지

† Corresponding author: cuiquishan@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 24, 2019

만, 환경의 끊임없는 변화와 서로 다른 서식지의 차이로 인해 기후인자에 대한 민감성은 지역적인 차이가 매우 큰 것으로 보고된바 있다 (Park and Sohn, 2010; Jiang et al., 2011; Hilker et al., 2014). 가뭄 지역에서는 주로 수분이 중요한 기후요인이고, 습윤한 지역에서는 기온의 영향을 가장 많이 받는 것으로 연구된 바 있다. 하지만, 선행연구는 대부분 열대 아마존과 아프리카 등과 같은 지역에 집중되었다. 한반도와 같이 계절적 변화가 뚜렷하고 여름철의 고온다습한 기후특징을 가진 지역에 대한 식생 활동의 민감도 분석이 많이 이루어지지 않았고 그에 대한 이해도 많이 부족한 실정이다.

식생의 유형과 해발고도 및 위도 등의 차이로 인해 수분이 습윤한 지역의 식생의 녹색화에 영향을 미치는 지역도 있다 (Wang et al., 2017). 그것은 빛의 양과 CO₂의 농도 등 여러 가지 환경 요인이 광합성에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 빛과 CO₂의 양이 너무 많거나 부족하거나, 혹은 양지와 음지 등은 식물의 광합성 작용을 조절할 수 있다. 뿐만아니라, 식생은 높은 수분스트레스와 낮은 수분스트레스에 대한 정도도 한계가 있고 차이가 크게 나타난다. 따라서 식생의 성장에 영향을 미치는 기후인자를 고려할 때, 강수량과 기온뿐만 아니라 복사량과 수증기압포차 (Vapor pressure deficit, VPD) 등의 여러 가지 요인에 대한 분석도 중요하다 (Maselli, 2004; Walker et al., 2014; Mainali et al., 2015). 따라서, 이 연구에서는 위성영상을 이용한 기법으로 1982년부터 2015년까지의 한반도 식생의 변화를 분석하고 기후인자가 식생의 녹색화에 미치는 잠재적인 영향을 정량화하고자 한다. 본 연구의 결과는 미래기후변화에 대응하는 한반도 육상생태계의 관리와 보호에 기초자료를 제공할 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 원격 탐사 자료

이 연구에서는 미국항공우주국 (NASA)에서 제공한 Global Inventor Modeling Mapping Studies에서 개발된 NDVI 자료를 사용하였다. GIMMS-NDVI3g는 위성궤도와 화산폭발 등으로 인한 오차를 교정한 자료로써 시간 범위는 1981년부터 2015년이다. 공간 해상도는 1/12°이고 촬영주기는 15일이다 (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1>). 또한 식생의 성장 주기 내에서의 변화를 분석하기 위하여 1982년부터 2015년까지의 전 지구 규모의 생물계절 자료인 VIPPHEN_EVI2 를 사용하였다 (Web site : https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/measures/measures_products_table/

[vipphen_evi2_v004](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/measures/measures_products_table/)). VIPPHEN_EVI2는 식물의 매년의 생장기 시작일, 생장기 종료일을 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 VIPPHEN_EVI2와 GIMMS-NDVI3g를 이용하여 생장기의 시작일과 종료일 사이의 NDVI 연평균을 계산하여 당해 연도의 NDVI 연평균으로 사용하였다. 자료의 공간적 분포특징을 유지하기 위하여 본 연구에서는 픽셀 단위를 가장 작은 공간적 범위로 간주하고 자료를 처리하였다.

2.2 기상자료

기상자료는 영국의 University of East Anglia (UEA) 기후 연구소에서 제공한 자료를 사용하였다 (CRU TS3.2). CRU 기상자료는 기후데이터를 종합한 대표적인 자료로써 전 지구 규모를 커버할 수 있는 가장 안정된 기후자료이다. CRU 자료는 관측자료를 이용한 공간화된 자료이므로 공간화 과정에서 오차가 존재할 수 있지만, 관측 수치를 기반으로 하여 정확도가 비교적 높다. 본 연구에서는 기온, 강수량, VPD, 복사량 4가지의 기후요인에 대하여 분석하였다. 사용된 기상자료는 공간 해상도는 0.5°×0.5°이며, 시간적 범위는 1901년에서 2015년 사이의 월별 자료이다. NDVI와의 연간단위의 상관관계를 분석하기 위하여 본 연구에서는 기상자료의 연평균을 계산하였다. 또한 공간해상도는 NDVI와 같이 1/12°×1/12°로 리샘플링 하였다.

2.3 연구 방법

본 연구에서는 t 검정의 방법으로 95%의 유의수준에서 NDVI 연평균의 변화를 추정하였다. 시간적 범위는 1998년을 기준으로 전과 후의 변화 차이를 비교하기 위하여 식생의 변화를 1982년부터 1998년까지, 1999년부터 2015년까지, 1982년부터 2015년까지 총 3가지로 나누어서 분석을 진행하였다. 기후인자가 식생의 변화패턴에 미치는 잠재적인 영향을 정량화하기 위하여 편상관방법을 이용하여 기온, 강수량, VPD와 복사량 등 기후인자와 NDVI 변화에 대한 기여도를 추정하였다.

2.3.1 일차 회귀분석

일차 선형회귀 분석은 한 픽셀의 시계열적인 변화패턴으로부터 전체 공간변화의 분포를 반영할 수 있다 (Ma, 2006). 본 연구는 1982년부터 2015년 사이의 생장기에서의 식생 연간 변화를 추정하기 위하여 픽셀을 최소 단위로 34년간의 선형 회귀식의 경사도를 통하여 시계열적 변화를 분석하였다. 경사값 (Slope)이 “+”를 나타낼 경우, 해당 픽셀의 NDVI는

증가되는 추세를 나타내고, 값이 클수록 녹색화의 속도가 큰 것을 설명한다. 반면 경사값이 “-”를 나타낼 경우, 해당 픽셀의 NDVI는 감소하는 추세를 나타내고, 절대값이 클수록 식생은 녹색화가 아닌 황폐화를 의미한다. 관계식은 다음과 같다 (식 (1)).

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times p_i) - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n p_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad \text{식 (1)}$$

위에서 Slope은 회귀식의 경사도로 각 픽셀에 해당하는 식생의 녹색화의 방향과 크기를 나타내고 p_i 는 당해 i 년도에 해당하는 식생의 녹색화 혹은 황폐화의 속도를 나타내고, n 은 분석하는 시간대의 년도수를 나타낸다. 변수 i 는 1부터 시작하여 제 n 번째 년도에서 해당하는 연도의 순서를 의미한다.

2.3.2 편상관분석 (Partial correlation analysis)

생태계는 다양한 변수의 영향을 받는 복잡한 시스템이다. 복잡한 생태계의 변화에 영향을 미치는 다양한 변수 중에서, 하나의 변수의 변화가 기타 변수에 영향을 미칠 수 있으므로 변수 간에 내적 상관성이 존재한다. 본 연구에서는 이와 같은

내적 상관성을 감소하기 위하여 편상관방법을 이용하여 기후 변화가 NDVI의 변화에 미치는 영향을 정량화하였다 (식 (2)). 기후인자로는 기온, 강수량, VPD와 복사량을 이용하였다. 4가지 인자의 기여도를 평가하기 위하여 하나의 변수의 영향을 분석할 때 기타 3가지 변수를 통제하였다. 예를 들면, 기온이 NDVI의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 강수량과 VPD, 그리고 복사량을 통제하였다. 이와 같이 강수량, VPD와 복사량도 각각 기타 3가지 변수를 통제하여 그 영향을 정량화하였다.

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

식 (2)에서, $r_{xy.z}$ 는 변수 z 를 고정하였을 때, 변수 x 와 y 사이의 상관계수를 나타내고, r_{xy} 는 변수 x 와 변수 y 의 상관계수를 나타내며, r_{yz} 는 변수 y 와 변수 z 와의 상관계수를 나타내고, r_{xz} 는 변수 x 와 변수 z 와의 상관계수를 나타낸다. 또한, 본 연구에서는 t 검증 방법을 이용하여 상관관계의 유의성에 대해 검증하였다. 식은 다음과 같다 (식 (3)).

$$t = \frac{r_{1,2,3,4,\dots,m} \sqrt{n-m-1}}{\sqrt{1-r_{1,2,3,4,\dots,m}^2}} \quad \text{식 (3)}$$

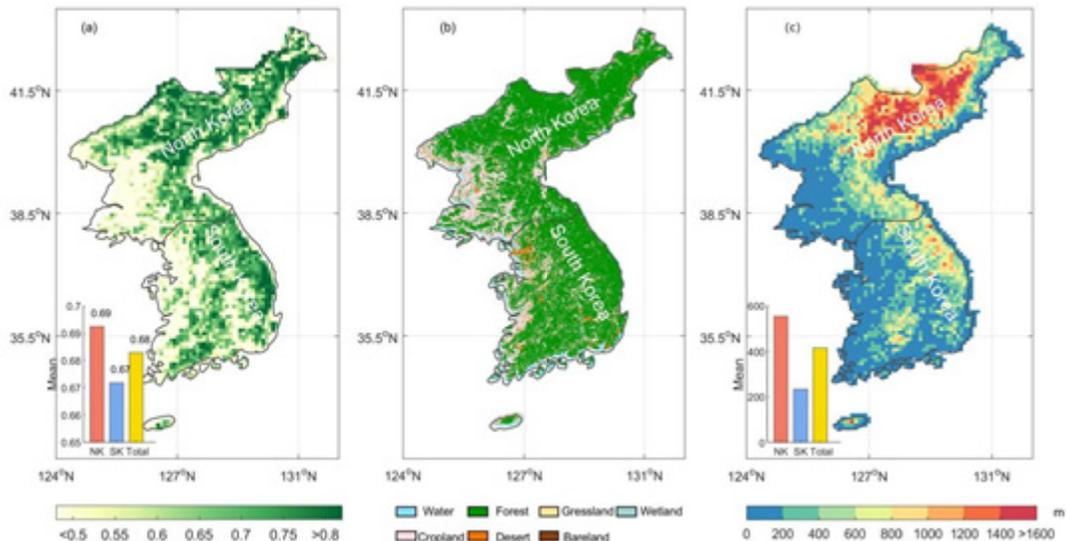


Fig. 1. Spatial distribution of annual average coverage, land cover types, digital elevation model in the Korean Peninsula. (a) Spatial distribution of the average annual coverage of the Korean Peninsula based on GIMMS data. (b) Land Cover Map 2009 (Ministry of Environment). (c) Digital Elevation Model (GTOPO30 global DEM data <https://code.earthengine.google.com/>).

식 (3)에서, $r_{12,34...m}$ 는 상관계수를 나타내고, n 은 샘플개수를 나타내고, m 은 독립변수의 개수를 의미한다. t 검증을 통해 서로 다른 유의수준의 임계값 t_α 를 구축할 수 있다. 만약에 $t > t_\alpha$ 경우 상관성의 통계적 유의성이 높다는 것을 의미하고, 반면, $t < t_\alpha$ 일 때, 상관성의 통계적 유의성이 낮다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 t_α 를 0.05로 설정하여 95%의 유의수준을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 한반도 과거 34년간의 NDVI의 연간 변화

1982년부터 2015년 사이의 34년간 한반도의 NDVI 평균 값은 약 0.68로 나타났다 (Fig. 1 (a)). 북한은 과거 34년간 연평균 NDVI 값은 약 0.69로 나타났고, 남한은 약 0.67로 나타났

다. 한반도의 평균 NDVI 값은 중위도권의 기타 지역 (NDVI: 0.4-0.5)에 비하여 높게 나타났다. 그 이유는 한반도 지역의 높은 산림 피복률로 인한 것으로 추정된다 (Fig. 1 (b)).

과거 34년간의 연평균 변화량은 한반도 지역의 NDVI는 약 0.66×10^{-3} 의 비교적 낮은 속도로 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 2 (a)). 하지만 기후변화 휴지기 (1998년) 전과 후의 NDVI 변화속도는 약 3배의 차이를 보이며 1999-2015년의 NDVI의 증가속도는 2.5×10^{-3} 에서 약 0.9×10^{-3} 로 감소하였다 (Fig. 2 (b)). 남북지역의 변화를 비교해서 살펴보면, 북한지역의 경우 1998년 이전은 약 2.5×10^{-3} 의 속도로 증가추세를 보였지만 1998년 이후 약 0.1×10^{-3} 의 변화량으로 NDVI의 변화가 정체 상태에 가까웠다. 비록 1998년 전후로 NDVI의 변화추세의 값의 감소가 비교적 크지만, 북한지역의 식생은 과거 34년간 여전히 약 0.2×10^{-3} 의 녹화증가 추세를 나타내고 있

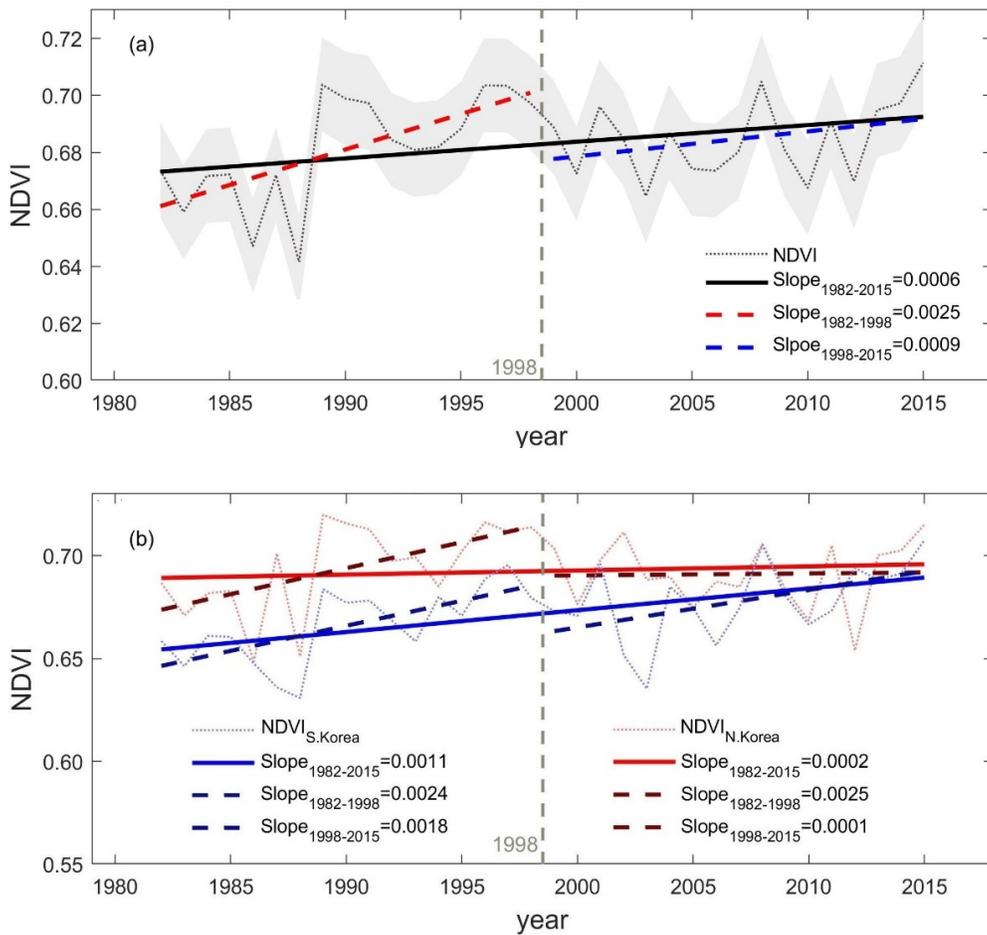


Fig. 2. Annual average change trend of NDVI from 1982 to 2015 (a) Annual average change trend of NDVI on the Korean Peninsula (b) Annual average change trend of NDVI in South Korea and North Korea.

다. 반면 남한지역의 경우 1998년 이전 (2.4×10^3)과 이후 (1.8×10^3) 모두 상승추세를 나타내며 북한과 달리 1998년 이후에도 여전히 비교적 높은 속도로 식생의 NDVI가 증가하고 있었다. 따라서 한반도의 1998년 이후의 NDVI의 감소는 주로 북한지역의 감소로 인한 것으로 사료된다.

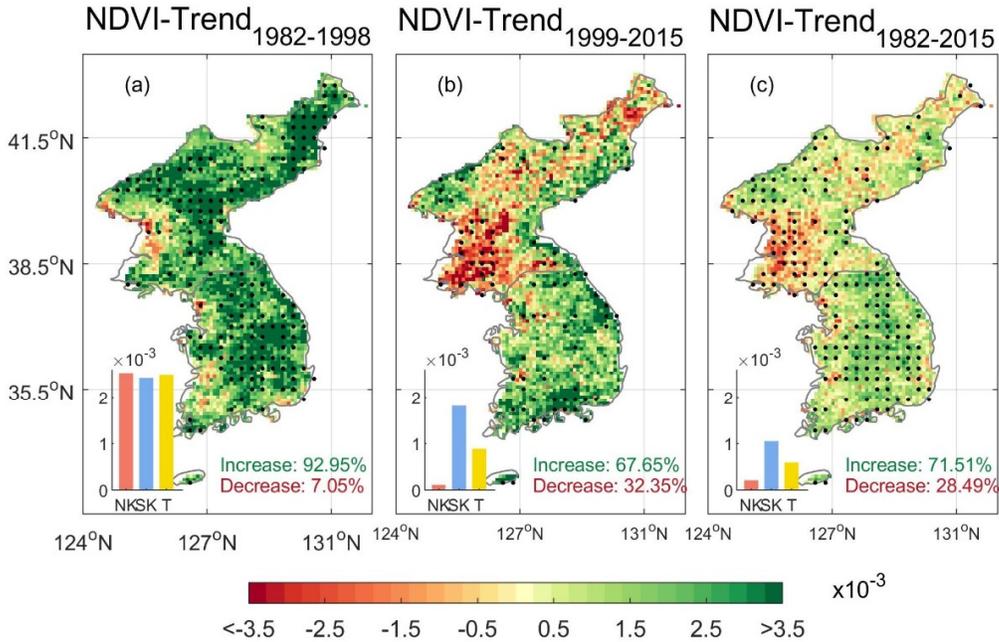
3.2 식생 변화의 시공간분포

1982년부터 2015년 사이 한반도의 NDVI의 변화 경향은 남북지역 차이의 시공간적인 패턴을 이루고 있다 (Fig. 3). 시기별로 보았을 때, 1982~1998년 (Fig. 3 (a))과 1999~2015년 (Fig. 3 (b)), 그리고 1982-2015년 (Fig. 3 (c)) 사이의 변화에서 NDVI는 증가하는 속도가 각각 2.5 ± 1.7 , 0.9 ± 1.7 , 0.6 ± 1.7 ($\times 10^3 \text{year}^{-1}$)로 나타났다. 1998년 이전 한반도의 92.95% 지역이 NDVI가 상승을 보였지만, 1998년 이후 감소하는 지역이 나타나면서 전 지역의 상승추세도 감소하였다. 따라서 34년의 전체적인 변화는 1998년 이후의 NDVI 감소가 1998년 이전의 NDVI의 증가를 상쇄하면서 34년 전년도에서는 상승추세가 선명하지 않다. 그림3에서의 검은 점 지역은 통계적으로 유의한 화소를 나타내며 유의수준이 95% 이상인 지역이다.

공간적으로 보았을 때, 1998년 이전 북한지역과 남한지역의 NDVI 상승 속도는 각각 2.5 ± 1.5 , 2.4 ± 1.5 ($\times 10^3 \text{year}^{-1}$)로 비슷한 경향이 나타났다. 하지만 1998년 이후 NDVI 상승하는 경향이 나타난 지역은 약 67.65%로 높은 비율을 차지하였지만, 1998년 이전과 비교하였을 약 25% 정도의 지역이 NDVI가 감소된 지역으로 전환되었다. 1998년 이후의 NDVI 변화속도를 보면, 북한과 남한이 각각 0.01 ± 1.7 , 1.8 ± 1.7 ($\times 10^3 \text{year}^{-1}$)로 북한지역이 현저히 낮게 나타났다. 이와 같이 1998년 이후 북한지역은 대부분 NDVI가 증가가 선명하지 않거나 감소하는 지역이 많은 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3 (b)). 특히 북한의 황해남도과 황해북도 등 서부 지역과 함경북도의 일부 지역의 NDVI의 감소추세는 가장 뚜렷하게 나타났다.

3.3 기후변화로 인한 식생 녹색화

한반도 과거 34년간 기후인자의 평균분포 (Fig. 4)와 변화 경향 (Fig. 5)을 분석한 결과, 북한지역은 남한지역보다 4가지 기후인자의 값이 낮게 나타났다. 시기별로의 기후인자 변동성은 비교적 크며, 1998년 이전과 이후 두 시점의 시계열적 차이가 보였다.



(a)NDVI change trend chart of the Korean Peninsula from 1982 to 1998.
 (b)NDVI change trend chart of the Korean Peninsula from 1999 to 2015.
 (c)NDVI change trend chart of the Korean Peninsula from 1982 to 2015.

Fig. 3. NDVI change trend chart of the Korean Peninsula.

특히 강수량의 변이가 가장 크게 보였다. 1998년 이후 강수량은 북한지역이 증가하였고, 자강도 강수량의 증가가 가장 뚜렷하다. 남한지역은 1998년 이후 강수량이 감소하였으며, 강원도와 경상남도가 감소가 가장 크다. 한반도 강수량 분포를 살펴보면, 강수량이 적게 분포 (Fig. 4)한 북한지역이 과거 34년간의 강수량은 감소하는 추세 (Fig. 5)이다. 반대로 강수량의 분포가 많은 남한지역 강수량이 증가하는 추세이다.

기온의 변화도 강수량과 비슷하게 나타났다. 즉 기온이 낮은 북한지역은 과거 34년간 감소하는 경향성을 보이고 감소

가 뚜렷한 지역은 평안북도지역이다. 기온이 상대적으로 높은 남한지역은 기온이 상승하는 추세이고 경상도 지역이 기온 상승이 가장 뚜렷하다. 시대별로 보면, 1998년 이전과 이후 모두 북한지역의 평안북도와 자강도 일대가 기온의 감소가 비교적 크고, 남한지역의 동부와 경상도가 기온의 증가가 가장 크다. 특히 1998년 이후 남한지역의 선명한 기온이 증가하는 추세이다.

VPD의 변동성은 기온과 강수량보다 비교적 작다. 1998년 이전 북한의 자강도 지역이 감소추세가 뚜렷하고, 1998년 이후 황해남도 지역이 감소추세가 뚜렷하다. 복사량의 경우 함경북도 지역이 가장 낮은 값을 가지며 한반도 서부지역이 높게 나타났다. 34년간의 복사량 변화는 한반도 전체지역이 감소추세를 나타내며, 1998년 이전의 감소추세가 가장 크다.

한반도의 기후인자 변화를 살펴보면 강수량과 기온의 경우 북한지역이 낮고 남한지역이 높으며 선명한 남북차이를 보이며 변동성이 비교적 크다. 북한지역은 감소하는 추세이고 남한지역은 증가하는 추세를 나타내며 가뭄 지역은 더 가물고, 고온 지역은 기온의 상승이 더 선명한 양극화 특성을 이루었다. 4가지 기후인자 중에서 기온의 공간 분포와 변화 경향의 시공간 패턴이 NDVI와 가장 비교적 일치하게 나타났다.

편상관분석 결과 (Fig. 6), 한반도 지역의 과거 34년간의 NDVI 변화는 기온과 복사량과 양 (+)의 상관관계를 가지고, 강수량과 VPD와 부 (-)의 상관관계를 나타낸다 (Fig. 6). 한반도 식생의 변화에 영향을 미치는 4가지 (기온, 복사량, 강수량, VPD) 기후인자의 기여도는 각각 47%, 23%, 16%, 14%이다. 기온은 과거 34년간 3가지 시기에서 모두 NDVI에 미치는 영향은 양의 상관관계를 이루고 있다. 이는 기온이 높아지면서 토양온도가 증가하고 식생 내부의 화학반응 속도를 촉진하면서 NDVI가 증가하기 때문이다. 과거 한반도 지역에서는 기온의 상승으로 식생의 녹색화가 진행되었고 기온의 기여도는 약 40% 이상인 것으로 분석되었다.

시기별로 살펴보면, 1998년 이전 기온의 증가하면서 한반도 전 지역의 NDVI가 상승하였지만, 1998년 이후, 양의 상관관계를 가지고 있는 지역이 북쪽으로 이동하고 상관성이 더 크게 되었다. 이런 변화로 인해 1998년 이후의 기온의 기여도가 평안도와 황해도, 경기도와 강원도 등 지역으로부터 평안북도와 자강도 일부 지역을 제외한 북한지역으로 이동하였다 (Fig. 6 (m), Fig. 6 (o)). 이는 1998년 이후 한반도 강수량의 변화 경향의 변화로 인한 것으로 추정된다. 강수량은 토양수분함량에 직접적인 영향을 미치므로 식생의 성장을 촉진할 수 있다. 하지만 반면 강수량의 증가로 인해 토양온도가 내려

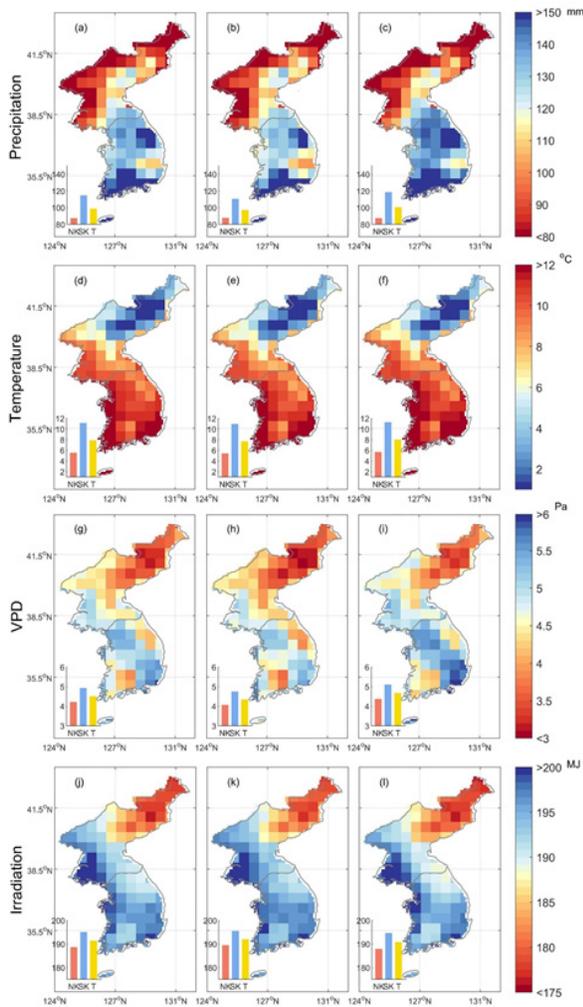
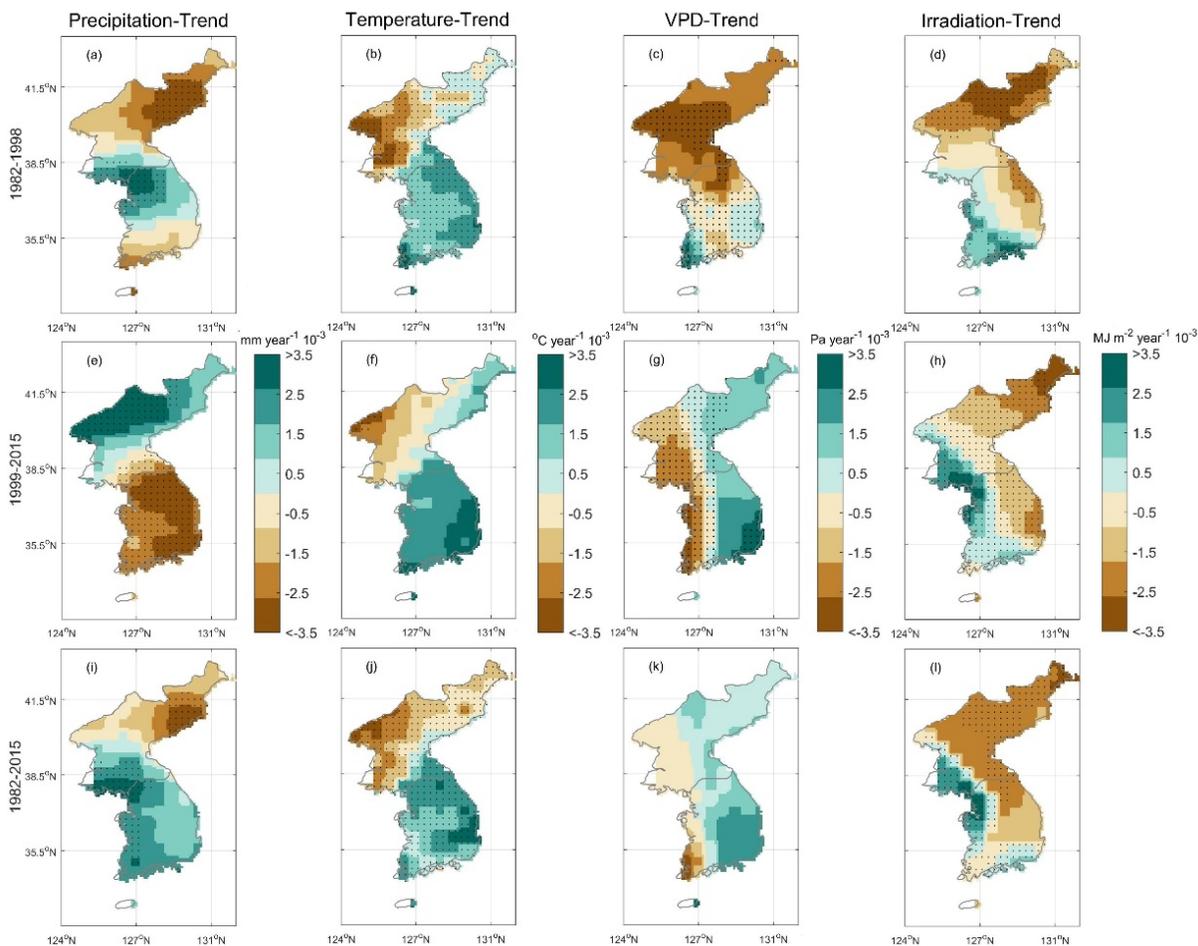


Fig. 4. The four different climate factors of Korean peninsula, precipitation (row 1), temperature (row 2), vapor pressure difference (row 3), radiation (column 4), mean value spatial distribution, in 1982-1998 (a.b.c.d), 1998-2015 (e.f.g.h), 1982-2015 (i.j.k.l).



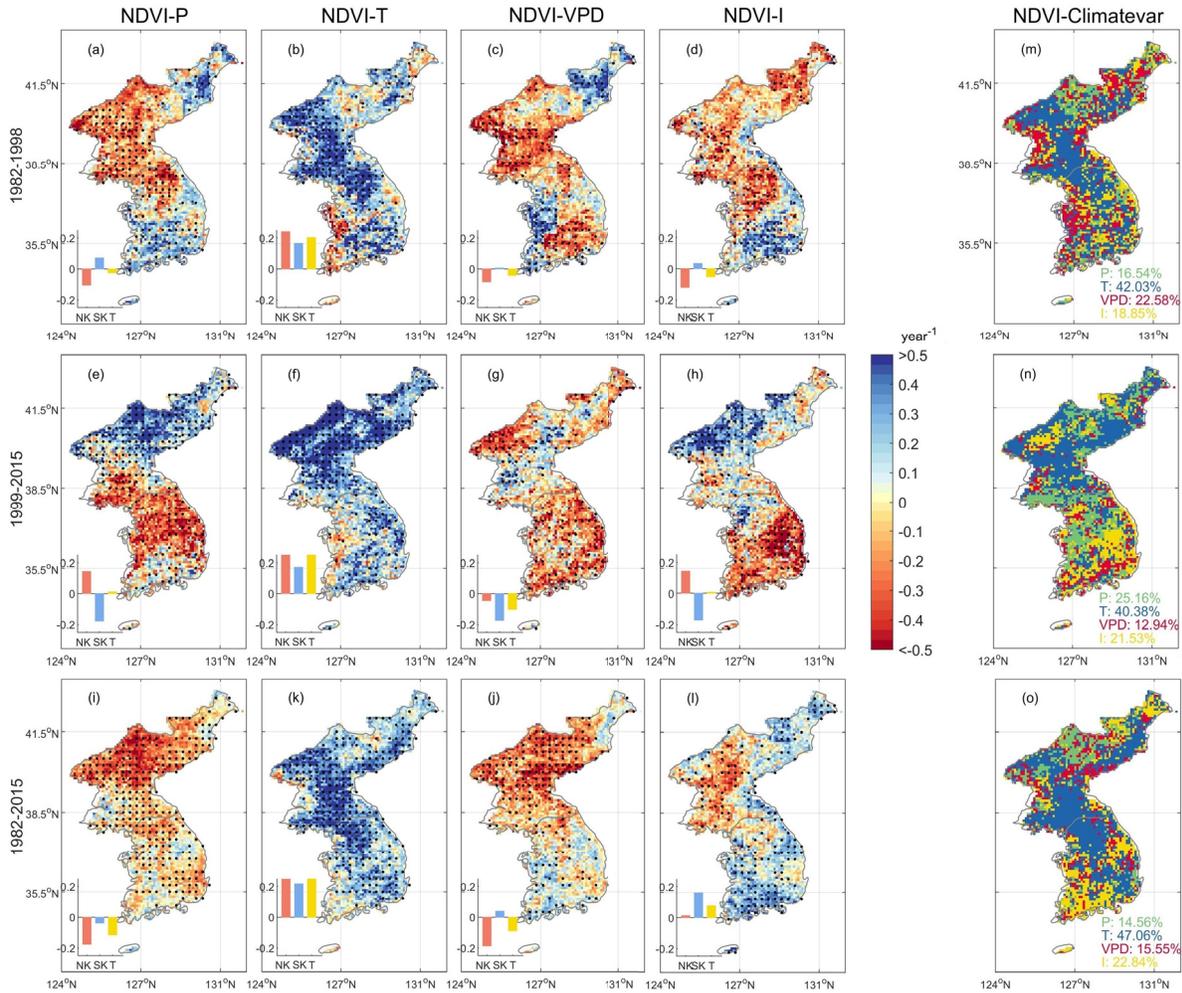
(a) Spatial distribution of precipitation trends from 1982 to 1998 (b) Spatial distribution of temperature trends from 1982 to 1998 (c) Spatial distribution of VPD trends from 1982 to 1998 (d) Spatial distribution of SW trends from 1982 to 1998 (e) Spatial distribution of precipitation trends from 1999 to 2015 (f) Spatial distribution of temperature trends from 1999 to 2015 (g) Spatial distribution of VPD trends from 1999 to 2015 (h) Spatial distribution of SW trends from 1998 to 2015 (i) Spatial distribution of precipitation trends from 1982 to 2015 (j) Spatial distribution of temperature trends from 1982 to 2015 (k) Spatial distribution of VPD trends from 1982 to 2015 (l) Spatial distribution of SW trends from 1982 to 2015

Fig. 5. The spatial distribution of the trend of annual mean climate variables (precipitation, temperature, vapor pressure deficit and irradiation) in the three periods of the Korean Peninsula 1982-1998 (a.b.c.d), 1998-2015 (e.f.g.h), 1982-2015 (i.j.k.l).

갈 수 있으며 이로 인해 오히려 식생의 성장을 억제할 수 있다. 따라서 강수량은 식생의 성장을 촉진할 수도 있고 억제할 수도 있다.

한반도의 강수량 분포를 살펴보면 선명한 남북지역의 차이가 나타나며 북부지역이 낮고 남부지역이 높다 (Fig. 4). 북부지역은 1998년 이전의 강수량은 감소추세를 보였으나 1998년 이후로는 증가추세로 변화되었다 (Fig. 5). 상대적으로

로 가뭄 북부지역에 대한 급증한 수분공급이 식생의 성장을 추진하고, 식생 NDVI와 약 70% 양의 상관관계를 나타낸다 (Fig. 6a와 Fig. 6b, Table 1). 1998년 이후 강수량의 증가로 인해 북한지역은 1998년 이전의 상대적 가뭄 환경으로부터 1998년 이후의 상대적인 습윤 지역으로 변화한다. 상대적 가뭄 지역은 식생의 성장에 있어서 수분에 대한 의존이 더 크므로 1998년 이전 북부지역은 강수량과 VPD의 높은 기여도를



(a) Partial correlation spatial distribution of NDVI and precipitation from 1982 to 1998 (b) Partial correlation spatial distribution of NDVI and temperature from 1982 to 1998 (c) Partial correlation spatial distribution of NDVI and VPD from 1982 to 1998 (d) Partial correlation spatial distribution of NDVI and SW from 1982 to 1998 (e) Partially correlated spatial distribution of NDVI and precipitation from 1999 to 2015 (f) Partially correlated spatial distribution of NDVI and temperature from 1999 to 2015 (g) Partially correlated spatial distribution of NDVI and VPD from 1999 to 2015 (h) Partial correlation spatial distribution of NDVI and SW from 1999 to 2015 (i) Partial correlation spatial distribution of NDVI and precipitation from 1982 to 2015 (j) Partial correlation spatial distribution of NDVI and temperature from 1982 to 2015 (k) Partial correlation spatial distribution of NDVI and VPD from 1982 to 2015 (l) Partial correlation spatial distribution of NDVI and SW from 1982 to 2015 (m) Spatial distribution of partial correlation of major climate conditions to NDVI from 1982 to 1998 (n) Spatial distribution of partial correlation of major climate conditions to NDVI from 1999 to 2015 (o) Spatial distribution of partial correlation of major climate conditions to NDVI from 1982 to 2015 distributed.

Fig. 6. 1982-1998 (a.b.c.d), 1998-2015 (e.f.g.h), 1982-2015 (i.j.k.l) Three periods: GIMMS NDVI on the Korean Peninsula and precipitation (column 1), temperature (column 2), VPD (column 3), SW (fourth column), and the spatial distribution of NDVI for major climatic conditions (fifth column).

가졌다. 하지만 상대적 습윤한 지역에서의 식생 변화는 기온에 대한 영향을 많이 받으므로 1998년 이후의 북한지역에서는 대부분 기온과 복사량의 기여도가 크게 나타났다. 남한지

역은 1998년 이전까지 강수량의 증가추세를 보였지만 1998년 이후 강수량이 전체적으로 감소하였다. 이와 같은 강수량 변화는 식생의 생장에 있어서 수분에 대한 수요가 더 크고 민

Table. 1. The correlation ratio of precipitation, temperature, VPD, irradiation and other climate factors in north Korea, South Korea and the Korean peninsula at different time periods.

		P	T	VPD	I	
1982-1998	N.Korea	positive	29.66	83.85	35.22	28.34
		negative	70.34	16.16	64.78	71.66
	S.Korea	positive	63.15	72.02	47.77	55.82
		negative	36.85	27.99	52.23	44.18
	Total	positive	44.58	78.30	41.13	40.59
		negative	55.42	21.71	58.87	59.41
1999-2015	N.Korea	positive	70.02	96.72	43.22	71.66
		negative	29.98	3.28	56.78	28.34
	S.Korea	positive	24.54	79.12	21.32	24.25
		negative	75.46	20.88	78.68	75.75
	Total	positive	51.52	89.25	33.74	51.67
		negative	48.48	10.75	66.26	48.33
1982-2015	N.Korea	positive	17.56	92.65	16.66	53.46
		negative	82.44	7.35	83.34	46.54
	S.Korea	positive	39.23	87.70	60.19	80.79
		negative	60.77	12.30	39.81	19.21
	Total	positive	26.82	90.22	35.28	65.50
		negative	73.18	9.78	64.72	34.50

감성이 증가하게 된다. 따라서 1998년 이후의 남한지역 NDVI 변화를 초래한 기후인자 중에서 강수량의 기여도가 증가하였다.

복사량의 변화도 한반도 식생의 변화에 영향을 미친다. 특히 식생의 NDVI와 부의 상관성을 가지고 있다. 이는 양지에서는 복사량은 증발산량을 촉진하여 식생 피복율이 감소하거나, 음지에서는 복사량이 비교적 낮아서 가물고 저온 환경을 초래하여 식생의 생장에 유리하지 않기 때문이다. 한반도의 해발고도는 동서와 남북의 차이가 선명하다. 동서 분포는 북한지역의 높고 남한지역은 낮게 분포되었다. 특히 북한지역의 자강도, 량강도와 함경북도는 한반도의 가장 높은 해발에 처해있고, 기온과 VPD, 그리고 복사량의 분포도 해발고도의 증가에 따라 낮다. 백두산맥을 중심으로 해발고도는 동쪽이 높고 서쪽이 낮은 분포특징을 가지고 있다. 해발고도의 동서 차이의 특징으로 인해 VPD와 복사량의 변화 경향도 동서 차이의 분포특징을 가지고 있다.

또한, 토지 피복 유형의 변화 혹은 산림 황폐화, 혹은 농업 실패 등 인위적인 요인도 NDVI가 변화하는 중요한 원인 중

의 하나이다. 비록 북한의 산림면적에 관한 자료는 출처와 연도에 따라 큰 차이가 있지만, 산림면적이 점차 줄어드는 현상을 나타내는 것은 일치하다 (Woo, 2007). 환경부의 대분류 결과에 따르면 북한지역은 2009년의 농경지 면적은 1999년 보다 현저히 증가하였고, 증가한 지역은 황해도 일대가 가장 뚜렷하다. 따라서 황해도 지역의 NDVI 감소는 농경지의 확장 및 산림지역의 감소로 인한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구 결과에 따르면 전 지구 규모의 온난화 휴지기와 함께 한반도의 식생 녹색화는 감소하는 추세를 보였고 식생의 녹색화는 1998년 증가와 1998년 이후의 감소가 서로 상쇄되어 34년간의 식생 변화는 뚜렷하지 않았다. 또한, 연구기간 동안 한반도의 식생 변화에 영향을 미치는 주요한 기후인자는 기온이고 기여도는 40% 이상이다. 기온의 영향 범위는 1998년 이후 강수량의 변화로 인해 북쪽으로 이동하면서 NDVI의 변화가 기후인자에 대한 민감성은 변화한다. 가물

지역인 북한지역의 영향 인자는 기온이고 습윤한 남한지역의 영향 인자는 강수량이 주요요인이다. 본 연구 결과를 활용하여 기온의 증가와 강수량의 변화가 예상되는 미래기후변화에 의한 식생 녹색화 변화추세를 파악할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 이는 단순히 기후변화 영향에 대한 정량적인 평가를 위주로 수행된 연구로, 식생의 변화와 자연 및 인위적인 요소에 대한 종합적인 분석이 이루어지지 않았다. 특히 황해도와 같은 농경지 확장 등으로 인한 빈번한 인간 활동이 발생하는 지역에 대한 기후변화 노출 정도에 대한 정량화가 필요하다. 뿐만 아니라, 한반도와 같은 산지 유형의 집중된 지역에 대한 해발고도의 영향도 비교적 크며 음식물과 양지 식물 구분을 통한 분석도 필요하다. 따라서, 후속적인 연구에서 식생의 유형 변화, 자연 및 인위적인 요소에 대한 추가적인 분석이 이루어진다면 보다 정확한 정량적인 결과가 도출될 것으로 예상된다.

사 사

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

REFERENCES

- Cox PM, Pearson D, Booth BB, Friedlingstein P, Luke CM. 2013. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature* 494 (7437): 341-344.
- Defries R, Hansen M, Townshend J. 1995. Global discrimination of land cover types from metrics derived from avhrr pathfinder data. *Remote Sens Environ* 54 (3): 209-222.
- Ding H, Shi W. 2013. Land-use/land-cover change and its influence on surface temperature: a case study in beijing city. *Int J Remote Sens* 34 (15): 5503-5517.
- Hilker T, Lyapustin AI, Tucker CJ, Hall FG, Myneni RB, Wang Y, BJ, Mendes de Moura Y, Sellers PJ. 2014. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the amazon. *Proc Natl Acad Sci USA* 111 (45): 16041-16046.
- Jiang M, Zhang X, Sun Q, Tong Q. 2011. Vegetation coverage retrieval scale effect analysis using multi-sensor data. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ* 36 (3): 311-315.
- Mang M, Wang J, Wang X. 2006. Research Progress on Interannual Vegetation Change and Its Relationship with Climate Based on Remote Sensing. *J Remote Sens* 10 (03): 421-431.
- Mainali J, All J, Jha PK, Bhuju DR. 2015. Responses of montane forest to climate variability in the central Himalayas of Nepal. *Mt Res Dev* 35 (1): 66-78.
- Maselli F. 2004. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Remote Sens Environ* 89 (4): 423-433.
- Park, HS, Sohn BJ. 2010. Recent trends in changes of vegetation over east asia coupled with temperature and rainfall variations. *J Geophys Res Atmos* 115 (D14).
- Piao S, Huang M, Liu Z, Wang X, Ciais P, Canadell JG, Wang K, Bastos A, Friedlingstein P, Houghton RA, Le Quere C, Liu Y, Myneni RB, Peng S, Pongratz J, Sitch S, Yan T, Wang Y, Zhu Z, Wu D, Wang T. 2018. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period. *Nat Geosci* 11: 739-743.
- Piao S, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X, Ahlstrom A, Anav A, Canadell JG, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy PE, Li J, Lin X, Lomas MR, Lu M, Luo Y, Ma Y, Myneni RB, Poulter B, Sun Z, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Huntingford C. 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO2 trends. *Global Change Biol* 19 (7): 2117-2132.
- Restrepo-Coupe N, Da Rocha HR, Hutyrá LR et al. 2013. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. *Agr Forest Meteorol* 182: 128-144.
- Walker JJ, De Beurs KM, Wynne RH. 2014. Dryland vegetation phenology across an elevation gradient in arizona, usa, investigated with fused modis and landsat data. *Remote Sens Environ* 144: 85-97.
- Zhou L, Tian Y, Myneni RB, Ciais P, Saatchi S, Liu YY, Piao SL, Chen HS, Vermote EF, Song CH, Hwang TH. 2014. Widespread decline of congo rainforest greenness in the past decade. *Nature* 509 (7498): 86-90.
- Yun, SH, Lee, GH, Park, H. (2012). A Case Study on development of low-carbon city against to the climate change - with a focus on Pyeongtaek sosabul-district CDM project. *Clim Change Res* 3 (2): 143-151. (in

Korean with English abstract)

Woo, IH. (2007). Developmental process of forest policy direction in korea and present status of forest desolation in north korea. *Journal of Forest Science* 23 (1): 14.