

Article

중국 동북3성에서의 옥수수 수확량과 위성기반의 식생 지수 및 농업기후요소와의 상관성 연구

박혜진*, 안중배*[†], 정명표**

*부산대학교 지구환경시스템학부, **국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Correlation between the Maize Yield and Satellite-based Vegetation Index and Agricultural Climate Factors in the Three Provinces of Northeast China

Hye-Jin Park*, Joong-Bae Ahn*[†] and Myung-Pyo Jung*

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University

**Climate Change and Agroecology Division, Department of Agricultural Environment,
National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration

Abstract : In this study, we tried to analyze the correlation between corn yield and, satellite-based vegetation index, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and various climatic factors in the three provinces of Northeast China during the past 20 years (1996-2015). The corn yields in the corn cultivation area of all three provinces showed a statistically significant positive correlation with the NDVI of the harvest period. Also, these have significant negative correlation with the daily maximum temperature in August and September and the occurrence frequency of above 30°C for the summer season. The correlation between the corn yields and the precipitation showed a significant positive coefficient in only Liaoning Province in July, but the correlation was not found in Jilin and Heilongjiang Provinces. In this study, the NDVI and the daily maximum temperature data are suitable to be used as predictors of corn yield in the three provinces of Northeast China provinces.

Key Words : Northeast China, Corn Yield, NDVI, Climate factors

요약 : 본 연구에서는 지난 20년간(1996~2015) 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량과 위성기반 식생지수인 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 그리고 여러 기후요소들간의 월별 상관성을 분석하고자 하였다. 중국 동북 3성의 옥수수 재배지역에서 옥수수 수확량은 작황시기의 NDVI와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였고, 8월과 9월의 최고기온 및 여름철 30°C 이상의 고온 발생빈도와 음의 상관관계를 가졌다. 옥수수 수확량과 강수량간의 상관관계는 7월에 요녕성에서만 유의한 양의 계수를 나타내었고 길림성과 흑룡강성에서는 상관성이 나타나지 않았다. 본 연구를 통해 중국 동북 3성의 옥수수 수확량을 추정하기 위해서는 NDVI와 최고기온 자료를 예측인자로 사용하는 것이 적합할 것으로 생각된다.

Received August 25, 2017; Revised September 15, 2017; Accepted October 14, 2017; Published online October 31, 2017.

[†] Corresponding Author: Joong-Bae Ahn (jbahn@pusan.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

농림축산식품부의 통계에 따르면(<http://www.mafra.go.kr>), 우리나라 곡물자급률은 2009년 이후로 잇따라 20%대에 머물고 있으며 쌀을 제외한 다른 주요 곡물인 옥수수 및 밀은 1% 이하의 매우 낮은 자급률로 대부분 수입에 의존하고 있다. 따라서 해외 주요 곡물생산국에서 곡물 수확량의 변동은 곡물 수급 조절 및 곡물 가격에 영향을 미치고 나아가서는 경제 전반에 파급효과를 가져올 수 있다(Hong *et al.*, 2012). 최근 세계적인 이상기후의 증가는 곡물의 작황 및 수확량에 영향을 미치는 주요 요소 중 하나로 떠오르며 국제 곡물 시장을 불안정하게 만든다. 2012년 미국에서의 대규모 가뭄으로 인한 옥수수 수확량의 감소와 중국 동북 및 화북 지역에서의 여름 이상기후의 영향으로 인한 대규모 병충해 발생은 곡물가격의 상승을 초래하였다(Kim *et al.*, 2014; Jhun, 2016). 따라서 우리나라의 안정적인 식량수급에 대비하기 위해서는 지속적으로 주요곡물생산국의 곡물 수확량에 영향을 미치는 요소들을 파악하고 이를 감시할 필요가 있다.

곡물의 수확량은 생육시기 동안의 기후요소와 밀접한 관련이 있어, 기온이 기준값보다 낮을 경우 작물은 성장을 멈추게 되고 온도가 너무 높아도 잘 자랄 수 없다(Asseng and Turner, 2011; Iannucci *et al.*, 2008; McMaster and Wilhelm, 1997; Shim *et al.*, 2008; Tannura *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2015). 또한, 가뭄이나 과우도 작물의 성장을 방해하여 수확량을 감소시킬 수 있다(Chen *et al.*, 2016; Smith, 1914; Wallace, 1920).

곡물의 수확량을 추정하는 데에 사용되는 예측인자는 기후요소뿐만 아니라 위성원격탐사자료도 많이 활용되고 있다(Hong *et al.*, 2012). 위성원격탐사는 여러 위성관측을 통해 국외 지역 및 비접근 지역에 대한 지속적이고 다양한 자료를 얻을 수 있기 때문에 그 활용도가 높아지고 있다(Kim *et al.*, 2014). 곡물의 수확량을 추정하는데 있어 가장 널리 사용되는 위성원격탐사 자료로는 식생지수인 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)가 있다. NDVI는 식생의 활력도 및 작황을 나타내고 극적외선 영역에서의 반사율과 적색광 영역에서의 반사율의 변화를 통해 계산된다(Tucker and Sellers, 1986). NDVI를 활용하여 곡물의 수확량을 추정한 선형

연구들을 살펴보면, Shi and Xingguo(2011)은 MODIS의 누적 NDVI를 이용하여 밀의 생산량을 추정하였고 누적 NDVI가 밀의 수확량과 높은 상관관계를 가지는 것을 보였다. Kasterns *et al.*(2005)는 AVHRR(advanced Very High Resolution Radiometer) NDVI 자료를 이용하여 미국의 주요 곡물생산지역에서의 작물 생육 지역에서의 옥수수 및 콩의 수확량을 추정하였고, Ren *et al.*(2008)은 MODIS NDVI를 이용하여 중국 산둥반도의 겨울 및 수확량을 추정하였다. 또한, Prasad *et al.*(2008)은 NDVI 뿐만 아니라 토양 수분과 지표면 온도, 강수량을 예측인자로 사용하여 미국 Iowa 주의 옥수수와 콩 수확량을 예측하였고, Kim *et al.*(2014)는 미국 중서부 옥수수와 콩의 수확량을 추정하기 위해 NDVI를 비롯한 여러 위성영상 자료와 기후자료를 활용하여 선형회귀모형을 구축하고 그 성능을 평가하였다.

중국은 미국에 이어 옥수수 수확량이 세계에서 두 번째로 많은 국가이고 중국 내에서도 동북 지역에서의 옥수수 수확량이 가장 많다(Jung *et al.*, 2016). 그럼에도 불구하고 중국의 옥수수 수확량 추정에 대한 연구는 미국에 비해 상대적으로 적은 편이다. 우리나라의 안정적인 식량 수급을 위해서는 중국 동북지역에서의 옥수수 수확량을 사전에 추정할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량을 추정하기에 앞서 사전연구로, 상관성 분석을 통해 옥수수 수확량이 생육 시기 중 어떤 시기의 어떤 요소와 밀접한 상관성을 보이는지 살펴보고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

1) 연구지역

중국 동북지대는 중국 내 최대 옥수수 생산 지역으로 중국 전체 재배면적의 80%와 전세계 재배면적의 17%를 차지하고 중국 전체 옥수수 수확량의 82%와 전세계 옥수수 수확량의 15.2%를 차지한다(Jung *et al.*, 2016). 옥수수 수확량이 성(省) 별로 집계가 되기 때문에, 본 연구에서는 중국 동북지대에 포함된 3개의 성(요녕성, Liaoning; 길림성, Jilin; 흑룡강성, Heilongjiang)을 중심으로 연구를 수행하였다. 그리고 중국 동북 3성에서 옥수수 재배지

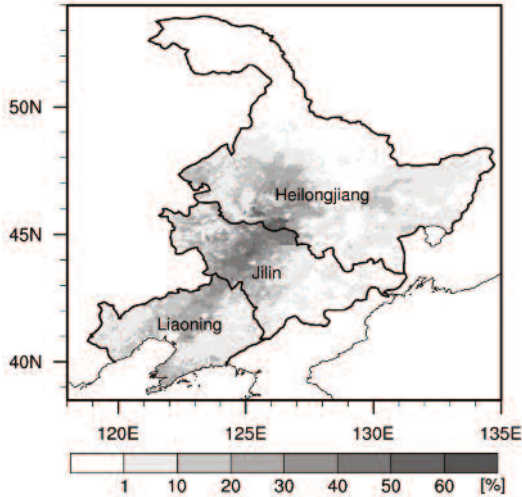


Fig. 1. The cropland of corn from EarthStat and the study area.

역을 분리하기 위하여 University of Minnesota 와 Mc-Gill University의 환경연구소의 협력프로젝트인 EarthStat에서 제공하는 전세계 옥수수 재배지 자료를 사용하였다 (<http://www.earthstat.org/>). Monfreda *et al.*(2008) 에 의해 만들어진 전세계 옥수수 재배지는 Ramankutty *et al.*(2008) 에 의해 만들어진 전세계 농경지 자료를 바탕으로 만들어진 자료로 1997년부터 2003년의 자료를 평균하여 2000년의 옥수수 재배지 자료를 산출한 것이다. 전세계 옥수수 재배지도는 5분의 공간해상도를 가지며, 단위 격자당 농지면적의 비율을 나타내고 0~1 사이의 값을 가진다. 본 연구에서는 농경비율이 0.01이상인 지역을 옥수수 재배지로 설정하였다(Fig. 1). 중국 동북 3성에서의 옥수수 재배지는 주로 지대가 상대적으로 낮은 남서쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 연구기간은 1996년부터 2015년(20년간) 으로 옥수수의 주요 생육시기인 4월부터 10월까지로 한정하였다.

2) 옥수수 수확량 통계자료

중국 통계청(National Bureau of statistics of China) 에서는 중국에서 생산되는 곡물의 통계자료를 연도별, 성별로 제공하고 있다(<http://data.stats.gov.cn>). 본 연구에서는 동북 3성에 대하여 1996년부터 2015년까지의 성별 옥수수 수확량과 옥수수 파종 면적을 수집하였다.

3) 기후자료

중국 동북지역에 대한 위성 기반의 식생지수 자료는 인터넷을 통하여 쉽게 접할 수 있으나, 기상관측자료의 경우 미국 해양기상청(National Centers for Environmental Information, NOAA)의 GHCN(Global Historical Climatology Network)에서 일부 지점에 대해서만 제공하고 있기 때문에(<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/>), 분석에 사용하기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 미국 NASA에서 제공하는 MERRA-2(Modern-era retrospective analysis for research and application, version2)의 일평균 기온 및 일 최고/최저 기온, 강수량을 사용하였다. MERRA-2 자료는 GEOS(Goddard Earth Observing System) 대기 모델과 자료 동화 기법을 통해 생산된 고해상도 재분석 자료(Rienecker *et al.*, 2011)로, MERRA-1 자료보다 더 다양한 위성 관측 자료들이 자료동화의 입력자료로 사용되었다(Gelaro, 2017). MERRA-2의 수평격자 간격은 위도 $0.5^\circ \times$ 경도 0.625° 이다. 본 연구에서는 4개의 기후자료를 일별 자료로 수집한 후, 강수량은 월누적값으로 변환하였고 기온은 월평균값으로 변환하여 사용하였다.

4) 위성영상 기반 식생지수

본 연구에서 사용된 식생 지수는 AVHRR GIMMS(Global Inventory Monitoring and Modeling Studies)에 의해 생산된 NDVI 3세대 자료(GIMMS NDVI3g)로 15일 주기로 자료가 제공되고 공간해상도는 $1/12$ -degree (0.083°)이다(Tucker *et al.*, 2005). GIMMS NDVI3g는 1981년부터 2015년까지 자료가 생성되어 있어 장기간 동안의 식생지수의 변화를 파악하는데 유용하다(Choi *et al.*, 2016). 본 연구에서는 GIMMS NDVI3g의 월별 자료를 생산하기 위해 15일주기 자료를 각 월별로 평균하였고, 공간해상도도의 경우에도 기후자료의 격자 정보와 동일하게 변환하였다.

5) 연구 방법

본 연구에서는 먼저 옥수수 수확량 및 재배 면적의 선형적인 변화 추세(trend)를 살펴보기 위하여 비모수적 방법인 Mann-kendall 검정을 사용하였다(Neeti and Eastman, 2011). Mann-Kendall 검정은 식물의 추세 분석에 많이 사용된다(Dong *et al.*, 2016).

두 번째로 중국 동북지대에서의 옥수수 수확량과 위

성기반 식생지수, 기상요소간의 상관성을 알아보기 위해, 옥수수 수확량과 NDVI와 기후자료를 옥수수 재배지에 대해 공간평균한 값과 각 격자값 간의 Pearson linear correlation coefficient를 각각 구하였고 two-tailed student's t-test를 통해 그 유의성의 평가하였다. 본 연구에서는 경년변동에 의한 옥수수 수확량과 식생 지수, 기후자료와의 상관성을 분석하기 위해, 옥수수 수확량 및 월별 NDVI, 기후자료로부터 선형 추세를 제거한 후 상관계수를 계산하였다.

3. 연구결과

1) 중국 동북 3성의 옥수수 수확량 및 재배면적의 추세

중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량의 추세를 보기

위해 1996년부터 2015년까지 옥수수 수확량과 옥수수 재배면적의 시계열 및 선형 추세를 살펴보았다(Fig. 2). 요녕성과 길림성, 흑룡강성에서 옥수수 수확량의 증가율은 각각 $35.13 \times 1000 \text{ ton/year}$, $81.97 \times 1000 \text{ ton/year}$, $139.68 \times 1000 \text{ ton/year}$ 로 모두 99% 이상의 유의수준을 보여 각 성에서의 옥수수 생산량이 뚜렷하게 증가하는 추세를 알 수 있다. 특히, 흑룡강성에서의 옥수수 수확량의 증가추세가 가장 크게 나타나는데, 2005년 이후로 급격히 증가하였다. 이러한 옥수수 수확량의 증가추세는 옥수수 재배면적의 변화와 관련이 있다. 중국 동북 3성에서의 옥수수 재배면적은 해를 거듭할수록 점차 증가하고 그 변화가 옥수수 수확량의 변화 패턴과 유사하다. 점차적인 옥수수 재배면적의 증가로 인한 옥수수 수확량의 증가추세가 옥수수 수확량과 식생지수, 기후요소간의 상관성 분석에 영향을 미칠 수 있기 때문에,

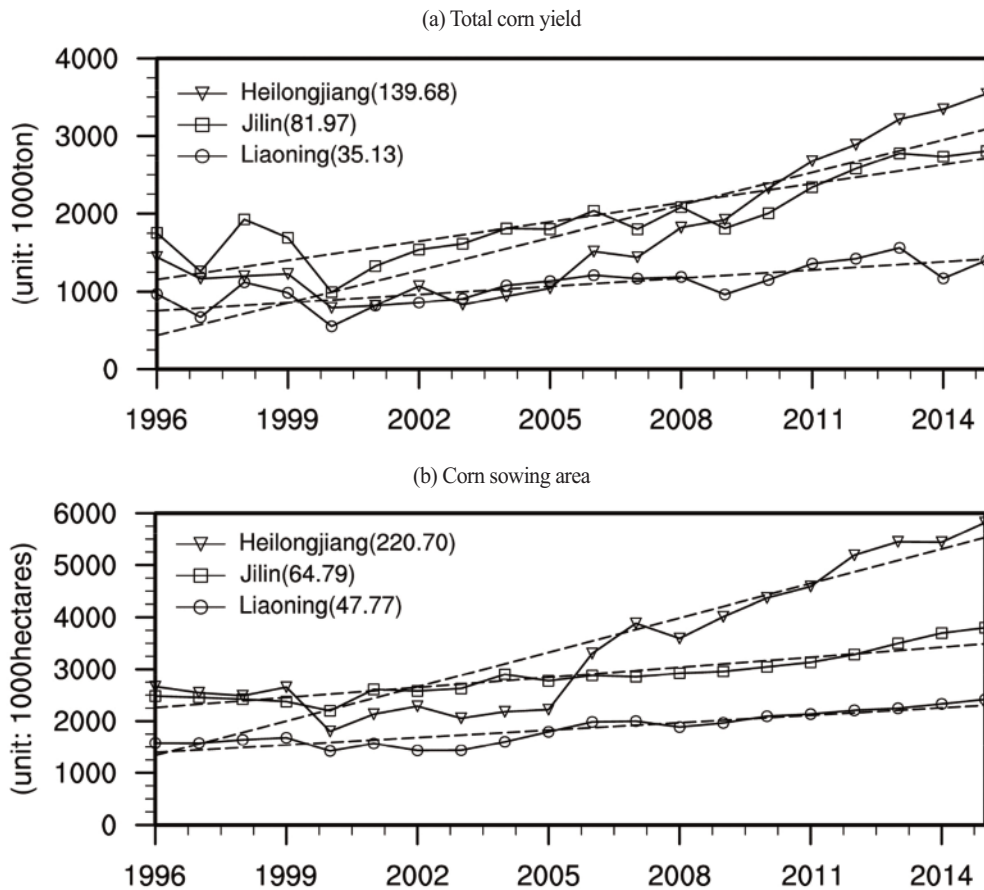


Fig. 2. Time series of annual corn yield and corn sowing area in three provinces of Northeast China and its temporal trends during 1996-2015.

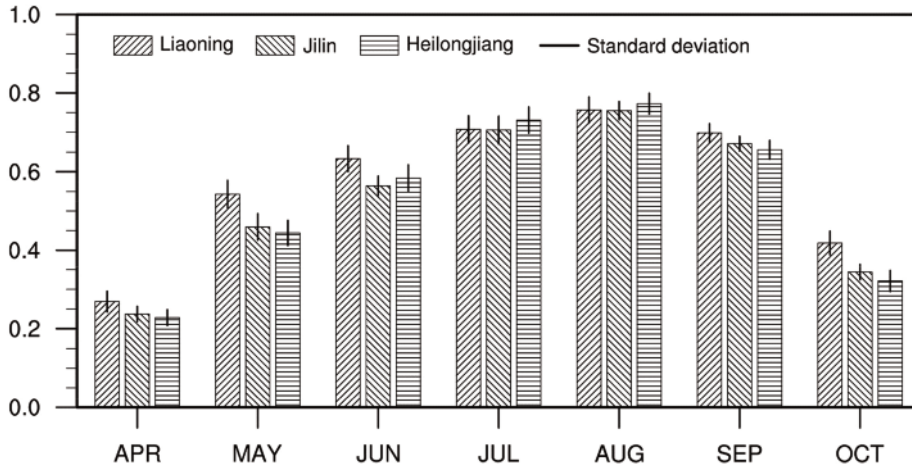


Fig. 3. Climatology of monthly NDVI in the three provinces of Northeast China during 1996-2015.

본 연구에서는 옥수수 수확량의 선형 추세를 제거 한 후 상관계수 분석을 실행하였다.

2) 위성기반 식생 지수와 옥수수 수확량과의 상관성

중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량과 식생지수간의 상관성을 살펴보기에 앞서, 중국 동북 3성에서의 각 NDVI의 지난 20년간 평년값을 살펴보았다(Fig. 3). 중국 동북 3성의 옥수수 재배지에서 NDVI는 4월부터 점차 증가하여 8월에 가장 높은 값이 되고 그 이후인 9월과 10월에 차츰 감소하였다. 지역간의 NDVI를 비교하면, 흑룡강성의 NDVI 평년값은 4월~6월까지 요녕성과 길림성에서 NDVI 평년값보다 낮았으나, 7월과 8월에는 더 높게 나타났다. 중국 동북 3성에서의 NDVI의 표준편차는 0.02~0.04 사이로 지역간의 차이는 크지 않았다.

Table 1은 중국 동북 3성의 옥수수 수확량과 월별 NDVI와의 상관계수이다. 요녕성에서 옥수수 수확량은 9월과 10월의 NDVI와 각각 0.53과 0.73로 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였고 길림성과 흑룡강성에서의 옥수수 수확량은 9월의 NDVI와 각각 0.39와 0.50로 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였다. 중

국 동북 3성에서의 옥수수 수확량은 대체적으로 수확기간의 NDVI와 높은 상관관계를 보였다. 또한, 본 연구에서는 월별 NDVI뿐만 아니라 생육 기간 동안 평균된 NDVI와 옥수수 수확량간의 상관계수도 계산하였을 때(Table 1), 요녕성과 길림성, 흑룡강성에서의 상관계수는 각각 0.52와 0.69, 0.67로, 10월 요녕성에서의 NDVI를 제외하고는 월별의 NDVI보다 높은 상관계수를 나타내어 전반적인 옥수수 생육기간의 NDVI가 옥수수 수확량과 유의한 상관성이 있음을 알 수 있다.

중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량과 NDVI간의 상관관계를 공간적 분포로 보면(Fig. 4), 6월에서 9월까지 옥수수 주요 재배지에서 NDVI가 옥수수 수확량과 양의 상관관계를 보이며, 통계적으로 유의한 상관계수를 나타내는 영역이 월별로 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 흑룡강성과 길림성의 경우, 서쪽 지역에서 NDVI와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였으나, 요녕성은 9월과 10월의 NDVI와 전반적으로 양의 상관관계를 나타냈다. 또한, 생육기간 동안 평균된 NDVI와 옥수수 수확량간의 상관분포는 옥수수 주요 재배지역인 남서쪽 지역에서 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다.

Table1. Correlation coefficients between corn yields in tree provinces of Northeast China and NDVI during 1996-2015

Region	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	Growing season
Liaoning	0.22	0.16	0.22	-0.14	0.06	0.53**	0.73**	0.52**
Jilin	0.32	0.25	0.39*	0.22	0.25	0.39*	0.33	0.69**
Heilongjiang	0.18	0.23	0.37	0.38*	-0.07	0.50**	0.03	0.67**

**(*) denotes 95%(90%) confidence level.

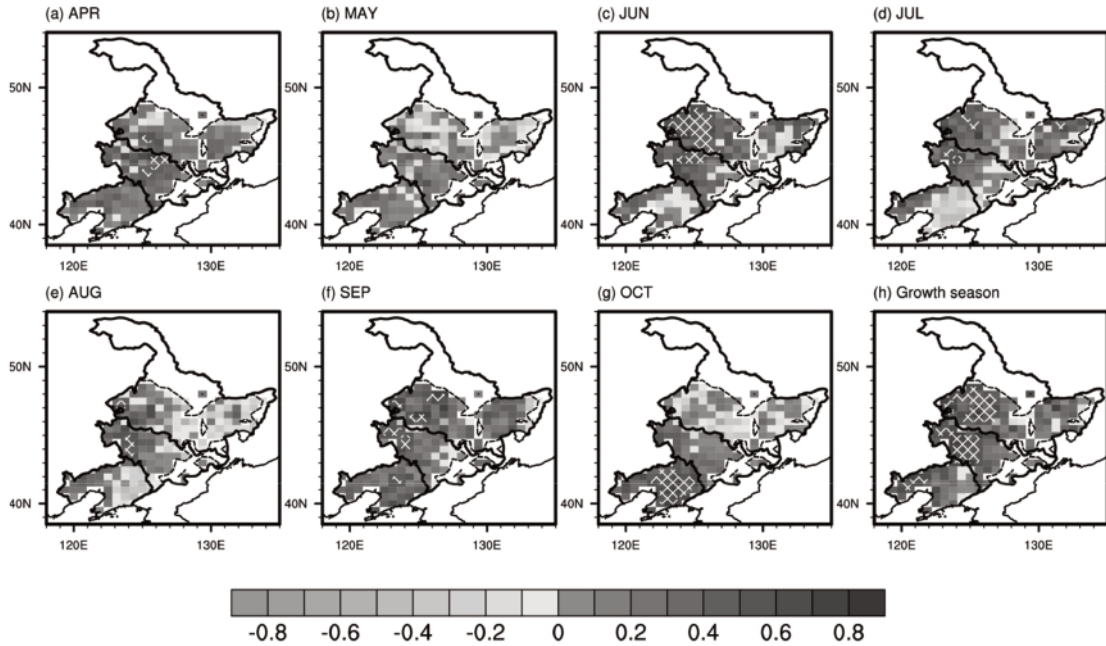


Fig. 4. Correlation maps between corn yields in three provinces of Northeast China and NDVI during 1996-2015. Cross patterns denote 90% confidence level and dashed line denotes the cropland of corn.

6월과 7월에 옥수수 재배 지역에서 공간 평균된 NDVI와 옥수수 수확량간의 상관계수는 통계적으로 유의한 상관계수가 나타나지 않았으나, 공간분포로 보았을 때에는 통계적으로 유의한 지역이 나타났다. 이는 실제 옥수수 재배 면적은 증가하나 본 연구에서는 재배 면적 변화의 간 분포 정보를 얻을 수 없어, 고정된 옥수수 재배 면적을 사용하여기 때문에 생각된다. 옥수수 재배 면적 분포의 변화를 알 수 없다면, 옥수수 수확량 추정을 위한 식생 지수 및 기후자료를 감시할 때에는 지역평균된 자료보다 공간분포 자료를 이용하는 것이 더 유용할 것으로 생각된다.

3) 기후요소와 옥수수 수확량과의 상관성

중국 동북 3성에서의 기후는 따뜻하고 습한 여름과 길고 추운 겨울이 특징이다(Meng *et al.*, 2006). Fig. 5는 1996년부터 2015년까지 중국 동북 3성 옥수수 재배 지역에서의 월별 최저/최고, 평균 기온 및 강수량의 평년 값이다. 중국 동북 3성의 지역 평균된 최고 기온의 평년 값 범위는 10.8°C~29.9°C 이고, 7월의 최고기온이 가장 높았다(Fig. 5(a)). 위도와 고도가 낮은 요녕성에서의 최고기온은 길림성과 흑룡강성보다 높았다. 지역 간의 온

도 차이는 7월이 적은 편이고 4월과 10월은 상대적으로 컸다. 중국 동북 3성의 지역평균된 최저기온의 평년값 범위는 -0.9°C~19.1°C이고, 평균기온의 평년값 범위는 4.2°C~24.2°C이다(Fig. 5(b, c)). 월별 최고기온의 범위와 마찬가지로 최저온도와 평균기온도 모두 7월이 가장 높았다. 또한, 최고 및 최저, 평균기온의 표준편차를 살펴해보았을 때, 4월이 다른 월보다 큰 표준편차를 가져서 4월의 기온의 변동성에 따라 옥수수의 생육 기간의 시작 시기가 변할 것으로 생각된다.

중국 동북 3성의 지역 평균된 월강수량의 평년값 범위는 25.6 mm~158.8 mm이고 중국동북지역이 여름철 동아시아 몬순의 영향으로 7월과 8월에 강수량이 집중되어 나타났다. 월별 강수량 중 7월이 가장 많고 9월의 강수량은 8월에 비해 급격히 감소하였다. 성별간의 강수량을 비교하면, 생육 기간 중 여름철을 제외한 강수량은 성별로 차이가 적었지만, 여름철의 강수량은 성별 차이가 상대적으로 컸다. 여름철의 강수량은 중국 동북 3성 중 요녕성의 강수량이 가장 많았고 흑룡강성에서의 강수량이 가장 적었다. 또한 월별 강수량의 표준편차는 7월과 8월이 다른 월들보다 큰 값을 가져서 중국 동북 3성에서 여름철 강수량의 경년변동성이 다른 월

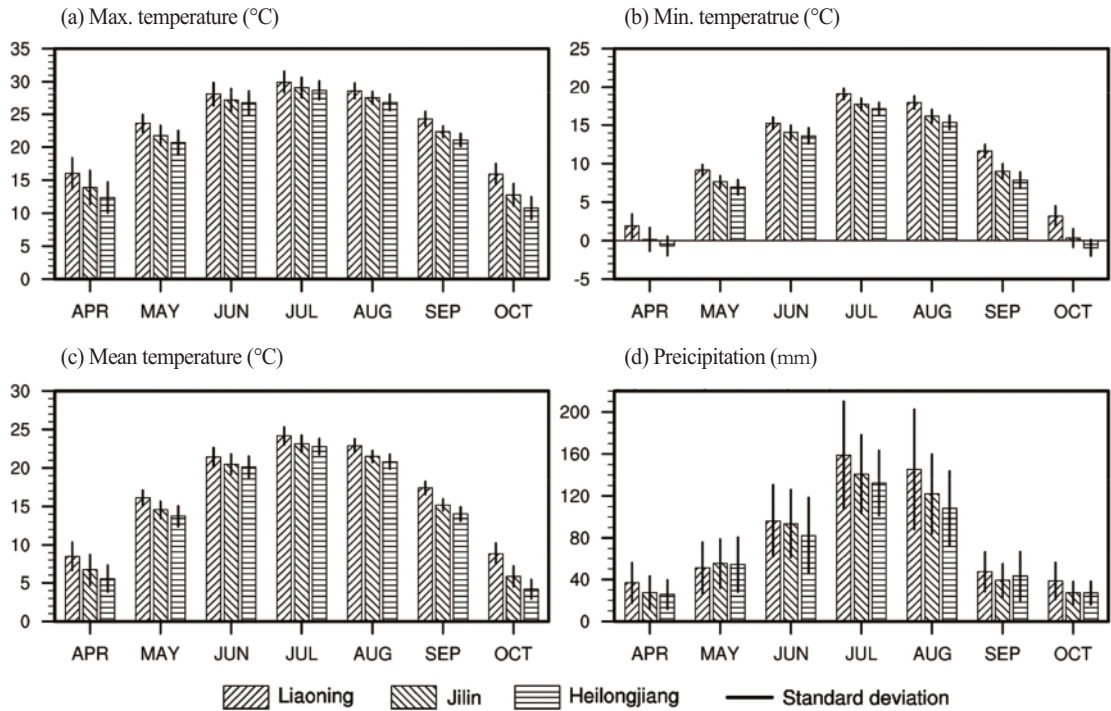


Fig. 5. Climatology of monthly (a) Maximum temperature (°C), (b) Minimum temperature (°C), (c) Mean temperature (°C) and (d) Precipitation in the three provinces of Northeast China during 1996-2015.

들에 비해 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서 중국 동북 3성의 월별 기후요소를 살펴보았을 때, 3성 모두에서 7월이 가장 따뜻하고 습한 월임을 알 수 있다.

Table 2는 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량과 4가지 기후요소들간의 상관계수이다. 요녕성에서의 옥수

수 수확량과 기후요소들간의 상관계수를 보면, 옥수수 수확량은 6월에서 8월의 최고기온 및 평균기온과 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였고 10월의 최저기온과 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이를 통해 위도 및 고도가 상대적으로 낮은 요녕성의 옥수수

Table 2. Correlation coefficients between corn yields in three provinces on Northeast China and Climate factors during 1996-2005

Climate factor	Region	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	Growing season
Max. Temperature	Liaoning	-0.21	-0.19	-0.43*	-0.53**	-0.60**	-0.31	0.24	-0.52**
	Jilin	0.1	-0.09	-0.33	-0.29	-0.55**	-0.50**	0.11	-0.36
	Heilongjiang	-0.03	-0.01	-0.22	0.22	-0.38*	-0.61**	-0.37	-0.44*
Min. Temperature	Liaoning	-0.09	-0.27	-0.3	-0.21	-0.12	0.03	0.39*	-0.10
	Jilin	0.2	-0.19	-0.2	0.02	-0.17	-0.17	0.21	-0.3
	Heilongjiang	0.05	0.15	-0.08	0.41*	0.12	-0.43*	-0.34	-0.08
Mean Temperature	Liaoning	-0.18	-0.21	-0.44**	-0.45**	-0.46**	-0.16	0.32	-0.41*
	Jilin	0.14	-0.11	-0.29	-0.20	-0.44*	-0.36	0.17	-0.25
	Heilongjiang	0.02	0.04	-0.17	0.33	-0.21	-0.56**	-0.35	-0.30
Precipitation	Liaoning	0.01	0.0	0.29	0.61**	0.22	0.35	0.09	0.52**
	Jilin	-0.19	0.05	0.37	0.11	0.28	0.2	-0.04	0.33
	Heilongjiang	-0.36	0.22	0.25	-0.05	0.39*	0.13	0.22	0.36

**(*) denotes 95%(90%) confidence level.

수확량은 여름철의 고온에 부정적인 영향을 받고, 작황 시기의 마지막 월의 최저기온이 높을수록 증가함을 알 수 있다. 또한, 요녕성의 옥수수 수확량과 7월의 강수량 간의 상관계수는 0.61로 99% 유의수준을 넘는 높은 양의 상관관계를 나타낸다. 요녕성에서의 옥수수 수확량은 작물의 주요 성장기간인 여름철의 기후와 높은 상관관계를 가지는데, 여름철의 평년보다 많은 강수량과 적은 고온이 옥수수 수확량의 증가에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보인다. Tannural *et al.*(2008)은 미국 주요 옥수수 생산지대에서의 옥수수 수확량과 강수량 및 기온 간의 관련성을 살펴보았는데, 6월과 7월의 강수량과 7월과 8월의 기온이 옥수수 수확량에 영향을 주는 주요 요소이고 주요 작물 생육 시기 동안의 평년보다 많은 강수량과 평년 보다 낮은 기온이 옥수수 수확량의 증가를 초래할 수 있다고 하였다. 본 연구에서 분석된 요녕성에서의 옥수수 수확량과 기후간의 상관성은 선행연구의 분석과 일치하는 것을 알 수 있다.

길림성에서의 옥수수 수확량은 8월과 9월의 최고기온과 8월의 평균기온과 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 가지지만, 최저기온 및 강수량과는 유의한 상관관계를 보이지 않는다(Table 2). 또한, 흑룡강에서의 옥수수 수확량은 8월과 9월의 최고기온 및 9월의 최저/평균기온과 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 가지고, 8월의 강수량과 양의 상관관계를 가진다.

Yin *et al.*(2015)는 옥수수 생육시기 동안의 열스트레

스가 옥수수 수확량에 부정적인 영향을 미친다고 하였다. 이러한 특징이 본 연구에서도 나타나는지를 살펴보기 위해, 각 격자에서 6월부터 8월까지 각 월별 최고기온이 30°C 이상인 날의 빈도(TMAX30)을 계산하여 옥수수 수확량과의 상관계수를 구하였다(Fig 6). 여름철의 TMAX30과 옥수수 수확량간의 상관계수는 대부분의 지역에서 음의 상관관계를 가지고 최고기온과의 상관관계의 패턴과도 유사하였다. 특히 8월의 TMAX30은 요녕성 전체와, 길림성과 흑룡강성 서쪽에서의 옥수수 수확량과 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였다. 또한, 요녕성의 경우 길림성과 흑룡강성보다 더 낮은 위도와 지대에 위치하고 있기 때문에, 여름철 내내 고온에 대한 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이 분석을 통해 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량은 여름철 고온 발생률에 유의한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Smith(1914)와 Wallace(1920)은 7월의 강수량이 다른 기후요소들보다 미국의 옥수수 생산량에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 그러나 본 연구에서 살펴본 각성의 옥수수 재배지에서 지역평균된 강수량과 옥수수 수확량간의 상관계수는 요녕성에서만 뚜렷한 양의 상관관계를 나타냈고 길림성과 흑룡강성에서는 상관성이 나타나지 않았다. 각 지역에서의 옥수수 수확량과 그 지역에서 격자화된 강수량간의 상관관계 분포를 살펴보았다(Fig. 7). 중국 동북 3성의 대부분 격자지점에서의 여름철 강수량은 옥수수 수확량과 양의 상관관계를 가

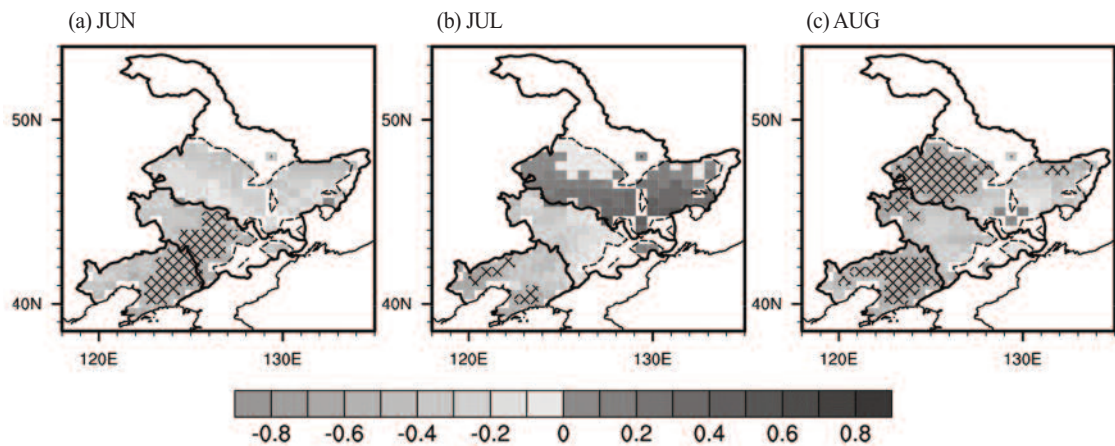


Fig. 6. Correlation maps between corn yields in three provinces of Northeast China and the ratio of the number of days when the maximum temperature is more than 30(°C) in each month during 1996-2015. Cross patterns denote 90% confidence level and dashed line denotes the cropland of corn.

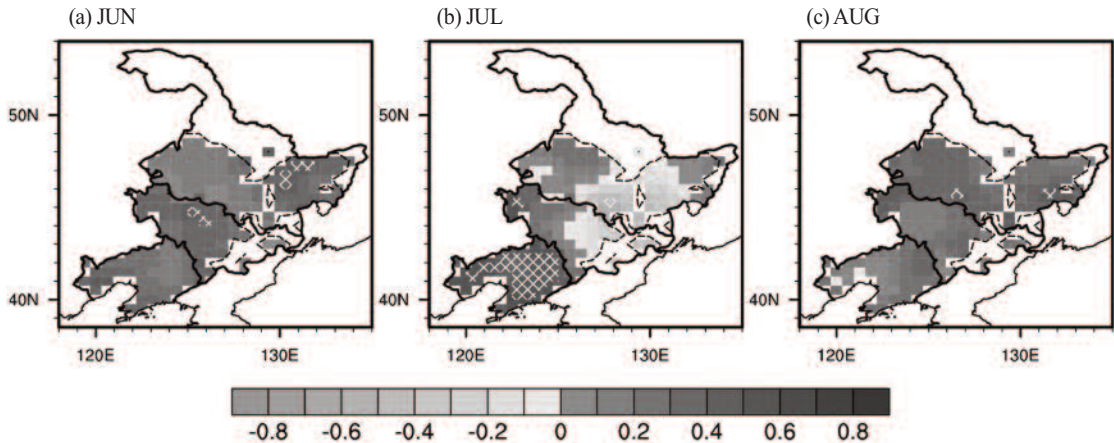


Fig. 7. Correlation maps between corn yields in three provinces of Northeast China and the precipitation during 1996-2015. Cross patterns denote 90% confidence level and dashed line denotes the cropland of corn.

지고 있으나, 통계적으로 유의하게 나타나는 지역은 7월의 요녕성 전체와 길림성 서쪽 끝 일부 지역에서에서만 나타났다.

본 연구를 통해 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량은 최고기온 및 고온 발생 빈도가 높을수록 감소하는 것을 알 수 있고, 강수량의 경우 7월 요녕성에서만 뚜렷한 상관성을 나타냈다. 옥수수 수확량과 길림성 및 흑룡강성에서의 강수량간의 낮은 상관성에 대한 논의는 결론 및 토의 부분에서 이루어질 것이다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 지난 20년간(1996~2015년) 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량과 위성 기반 식생 지수인 NDVI 그리고 기후요소들(최고/최저/평균기온 및 강수량)간의 월별 상관성을 분석하였다. 옥수수 수확량과 NDVI간의 유의한 상관성은 옥수수 주요 재배지역에서 나타났다. 옥수수 수확량은 작황 시기의 NDVI와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였고, 옥수수 생육 시기 동안 평균된 NDVI와도 99% 유의수준을 넘는 양의 상관관계를 나타냈다. 중국 동북 3성에서의 옥수수 수확량은 기후요소들 중 최고기온과 가장 유의한 상관성을 보였고, 여름철 옥수수 재배지에서 30°C 이상의 고온 발생 빈도가 높을수록 옥수수 수확량은 줄어들 수 있음을 보였다. 옥수수 수확량과 강수량간의 상관성은

7월의 요녕성에서만 통계적으로 유의하게 나타났다. 따라서, 중국 동북 3성의 옥수수 수확량을 추정하는데 있어 작황 시기 및 생육시기 동안 평균된 NDVI와 생육 기간의 최고기온 자료가 유용할 것으로 사료된다.

이전 연구들에서 옥수수의 수확량은 여름철 강수량과 유의한 양의 상관관계를 보였음에도 불구하고 (Adamgbe and Ujoh, 2013; Huang *et al.*, 2015), 본 연구에서는 요녕성에서만 이러한 특성이 잘 나타나고 길림성과 흑룡강에서는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 이유에 대해 생각해 보았을 때, 작물의 수확량은 기후요소 뿐만 아니라, 토양의 종류나 특성, 관개에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 중국통계청(<http://data.stats.gov.cn>)에서 제공하는 연도별 농경지 관개 면적 정보에 따르면, 2015년의 요녕성 및 길림성, 흑룡강성에서의 농경지 관개 면적은 1996년대비 각각 약 1.2배와 1.9배, 4배로 증가한 것으로 나타났다. 요녕성 및 길림성에서의 옥수수 재배 면적이 약 1.5배이고 흑룡강성에서 2.2배 증가한 것에 비하면, 길림성과 흑룡강성에서의 관개 면적 비율의 증가는 상당하다. 중국 동북 3성에서의 작물 재배 면적 중 옥수수 재배 면적이 가장 크기 때문에, 농경지 관개 면적의 증가가 옥수수 재배지역에서의 관개 면적 증가를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서, 중국 동북 3성의 옥수수 재배지역에서의 관개 면적 및 관개량 정보를 추가할 경우, 옥수수 수확량과 기후요소간의 정확한 상관성을 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 기후요소는 MERRA-2 자료는

기후학적으로는 고해상도의 자료이나 농업적으로 활용하기에는 저해상도의 자료이다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 이전 연구들에서 보인 옥수수 수확량과 최고기온과의 선형적인 상관성이 잘 나타났음을 알 수 있다.

본 연구에서 분석된 영향 요소들 외에도 옥수수 수확량에 영향을 줄 수 있는 요소들 중에는 기본 기후요소들을 이용하여 계산한 농업기후지수(생장도일, 작물생육기간, 가뭄지수) 등이 있다. 정확한 옥수수 수확량의 감시 및 추정하기 위해서는 지형기후 모형을 통해 상세화된 기후자료를 바탕으로 한 농업기후지수 및 다양한 위성기반 영상 자료들과 옥수수 수확량간의 상관성에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(과제번호: PJ009953)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

Adamgbe, E. M and F. Ujoh, 2013. Effect of Variability in Rainfall Characteristics on Maize Yield in Gboko, Nigeria, *Journal of Environmental Protection*, 4(9): 881-887.

Asseng, S., I. Foster, and N. C. Turner, 2011. The impact of temperature variability on wheat yields, *Global Change Biology*, 17(2): 997-1012.

Chen, T., G. Xia, T. Liu, W. Chen, and D. Chi, 2016. Assessment of Drought Impact on Main Cereal Crops Using a Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Liaoning Province, China, *Sustainability*, 8(10): 1069.

Choi, C.-H., S.-G. Jung, and K.-H Park, 2016. Analyzing Relationship between Satellite-Based Plant Phenology and Temperature, *Journal of the Korean Association of Geographic Information*

Studies, 19(1): 30-42(in Korean with English abstract).

Dong, T., J. Liu, J. Shang, B. Qian, T. Huffman, Y. Zhang, C. Champagne and B. Daneshfar, 2016. Assessing the Impact of Climate Variability on Cropland Productivity in the Canadian Prairies Using Times Series MODIS FAPAR, *Remote Sensing*, 8(4): 281.

Gelaro, R., W. McCarty, M. J. Suarez, R. Todling, A. Molod, L. Takacs, C. A. Randles, A. Darmenov, M. G. Bosilovich, R. Reichle, K. Wargan, L. Coy, R. Cullather, C Draper, S. Akella, V. Buchard, A. Conaty, A. M. Da Silva, W. Gu, G.-K. Kim, R. Koster, R. Juchesi, D. Merkova, J. E. Nielsen, G. Partyka, S. Pawson, W. Putman, M. Rienecker, S. D. Schubert, M. Sienkiewicz, and B. Zaho, 2017. The Modern-Era Retrospective Analysis for Resaerch and Application, Version 2 (MERRA-2), *Journal of Climate*, 30(22): 5419-5454.

Hong, S. Y., J. Hur, J.-B. Ahn, J.-M. Lee, B.-K. Min, C.-K. Lee, Y. Kim, K.-D. Lee, S.-H. Kim, G. Y. Kim, and K. M. Shim, 2012. Estimating Rice Yield Using MODIS NDVI and MEteorological Data in Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(5): 509-520(in Korean with English abstract).

Huang, C., S. W. Duiker, L. Deng, C. Fang, and W. Zeng, 2015. Influence of Precipitation of Maize Yield in the Eastern United States, *Sustainability*, 7(5): 5996-6010.

Iannucci, A., M. R. Terribile, and P. Martiniello, 2008. Effects of temperature and photoperiod on flowering time of forage legumes in a Mediterranean environment, *Field Crops Research*, 106(2): 156-162.

Jhun, H. J., 2016. *China Agricultural Outlook (2016~2025)*, Korea Rural Economic Institute, Bitgaram-ro, Naju-si, Jeollanam-do, Republic of Korea (in Korean).

Jung, M.-P., H.-J. Park, K.-M. Shim and J.-B. Ahn,

2016. Temporal and Spatial Distribution of Growing Degree Days for Maize in Northeast District of China, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 35(4): 302-305 (in Korean with English abstract).
- Kasterns, J. J., T. L. Kasterns, D. L. A. Kasterns, K. P. Price, E. A. Martinko and R. Y. Lee, 2005. Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery, *Remote Sensing of Environment*, 99(3): 341-356.
- Kim, N., J. Cho, R. Shibasaki, and Y.-W. Lee, 2014. Estimation of Corn and Soybeans Yields of the US Midwest using Satellite Imagery and Climate Dataset, *Climate Research*, 9(4): 315-329 (in Korean with English abstract).
- McMaster, G. S. and W. W. Wilhelm, 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(1): 291-300.
- Meng, E. C. H., R. Hu, X. Shi, and S. Zhang, 2006. *Maize in China: Production systems, constraints, and research priorities*, CIMMYT, El Batan, Mexico.
- Monfreda, C., N. Ramankutty, and J. A. Foley, 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000, *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1): GB1022.
- Neeti, N. and J. R. Eastman, 2011. A contextual mann-kendall approach for the assessment of trend significance in image time series, *Transactions in GIS*, 15(5): 599-611.
- Prasad A. K., L. Chai, R. P. Singh, and M. Kafatos, 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 81(1): 26-33.
- Ramankutty, N., A. T. Evan, C. Monfreda, and J. A. Foley, 2008. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000, *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1): GB1003.
- Ren, J. Q., Z. X. Chen, Q. B. Zhou, and H. J. Tang, 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVO data in Shandong, China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(4): 403-413.
- Rienecher, M. M., M. J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M. G. Bosilovich, S. D. Schubert, L. Takacs, G-K Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Siva, W. Gu, J. Joiner, R. D. Koster, R. Juchesi, A. Molod, T. Owens, S. Pawson, P. Pegion, C. R. Redder, R. Reichle, F. R. Robertson, A. G. Ruddick, M. Sienkiewicz, and J. Woollen, 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications, *Journal of Climate*, 24(14): 3624-3648.
- Shi, H. and M. Xingguo, 2011. Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a process model and remote sensing, *Ecological Modeling*, 222(14): 2530-2541.
- Shim, K.-M., G.-Y. Kim, K.-A. Roh, H.-C. Jeong, and D.-B. Lee, 2008. Evaluation of agro-climatic indices under climate change, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 10(4): 113-120 (in Korean with English abstract).
- Smith, W. J., 1914. The Effect of Weather Upon the Yield of Corn, *Monthly Weather Review*, 42(2): 78-92.
- Tannura, M. A., S. H. Irwin, and D. L. Good, 2008. *Weather, Technology and Corn and Soybean Yields in the U.S. Corn Belt*, Marketing and Outlook Research Report 2008-01. Department of Agricultural and consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA.
- Tucker, C. J. and P. J., Sellers, 1986. Satellite remote sensing of primary production, Satellite remote sensing of primary production, *International*

- Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1395-1416.
- Tucker, C. J., J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. Slayback, E. W. Pak, R. Mahoney, E. Vermote, and N. El Saleous, 2005. An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data, *International Journal of Remote Sensing*, 26(20): 4485-4498.
- Wallace, H. A., 1920. Mathematical Inquiry Into the Effect of Weather On Corn Yield In the Eight Corn Belt States, *Monthly Weather Review*, 48(8): 439-446.
- Yin, Xiaogang, M. Wang, and H. Zhang, 2015. Impact of high temperature on maize production and adaptation measures in Northeast China, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(1): 186-198(in Chinese with English abstract).