

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.1.001>
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Assessment on Damage Risk of Corn for High Temperature at Reproductive Stage in Summer Season Based on Climate Scenario RCP 8.5 and 4.5

Myung-Chul Seo,* Hyeon-Suk Cho, Jun-Hwan Kim, Wan-Gyu Sang, Pyeong Shin, and Geon Hwi Lee
National Institute of Crop Science, Wanju-Gun, 55365, Korea

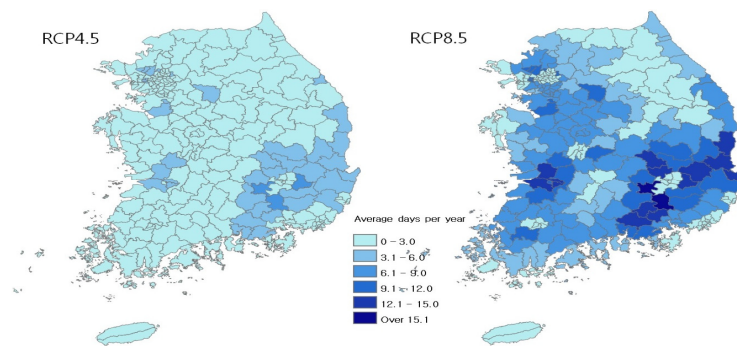
*Corresponding author: mcseo@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 24, 2016
Revised: November 30, 2016
Accepted: January 9, 2017

In order to assess risk of high temperature damages about corn during reproduction stages in the future, we carried out analysis of climate change scenarios RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 and RCP8.5 distributed by KMA (Korea Meteorological Administration) in 2012. We established two indexes such as average of annual risk days of high temperature damage which express frequency and strengthen index of high temperature damage. As results of producing maps for 157 cities and counties about average of annual risk days of high temperature damage during total periods of scenarios, the risk of high temperature in RCP8.5 was evaluated to increase at all over nation except inland area of Gangwon province, while RCP4.5 showed similar to present, or little higher. The maps of annual risk days of high temperature damage with 10 years interval in RCP8.5 prospect that the risk for damaging corn growth would increase rapidly from 2030's. The largest risk of high temperature damage in the future of RCP8.5 was analyzed at Changnyeong county located east-south inland area in Gyeongnam province, while the smallest of risk counties were Pyeongchang, Taebaek, Inje, and Jeongseon. The prospect at 12 counties which is large to produce corn at present and contains large plains have been showed that there will be only a little increase of risk of high temperature at Goesan, Yangpyeong, Hongcheon, Seosan, and Mooju until 2060's. But considering strengthen index of high temperature damage, most regions analyzed would be prospect to increase rapidly after 2030's. To cope with high temperature damage of corn in the future, we should develop various practical technologies including breeding adapted varieties and controlling cultivation periods.

Keywords: Maize, High temperature stress, Risk assessment, RCP8.5, RCP4.5, Climate change scenario



The map of the risk assessment on high temperature damage in reproductive periods of corn from 2011 to 2100 based on climate change scenario RCP4.5 and RCP8.5. As results of assessment on risk of high temperature damage of corn with RCP4.5 and 8.5 scenarios, it was prospect that high temperature damage of corn would be general phenomenon in natural disasters based on RCP8.5. But there will be a little increase of high temperature damage of corn based on RCP4.5.



Introduction

기상청에서 발표한 기후변화 시나리오에 의하면 기후변화를 완화하기 위한 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면 (RCP8.5) 20세기 말 한반도 평균기온은 6.0°C, 강수량은 20.4% 증가하고 어느 정도 저감 노력이 실현된다면 (RCP4.5) 3.4°C 기온상승과 17.2% 강수량 증가가 전망되었다. 폭염일은 현재 (1971~2000) 관측에서 연평균 8.5일인데 반하여 RCP8.5 시나리오에 의하면 65.9일로 현재보다 무려 57.4일 증가하여 대관령을 중심으로 일부 강원 지역을 제외하고 아열대 기후 지역에 포함될 것으로 전망되었다. 미래에서 주로 나타날 것으로 예상되는 이산화탄소 농도의 증가와 온도 상승은 식물의 광합성, 수정, 등숙 등 식물 생육 전반에 걸쳐 긍정적 혹은 부정적인 영향을 미칠 수 있어 이와 관련된 생육반응 등의 연구가 기후변화에 대응하여 중요하다.

작물이 고온에 노출되었을 때 생육 반응과 이에 따른 생산량에 미치는 영향에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다. 아열대 지역부터 온대까지 전세계적으로 널리 재배되고 있는 옥수수의 경우도 온도를 비롯한 기후 요인에 따른 생육반응 시험들이 과거부터 이루어져 왔다. Thompson et al. (1975)은 미국 옥수수 지대 (Corn Belt)에서 수년간 7월과 8월 온도가 정상적인 때보다는 낮았을 때 가장 많은 생산량을 나타내어 고온조건이 옥수수의 생산에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 고온에 따른 옥수수의 생육반응은 다양한 세포의 기능에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 옥수수의 알곡 (kernels)을 25, 30, 35°C에서 배양하였을 때 고온인 35°C에서 배양된 알곡세포에서 다양한 전달 유전자 발현이 감소하였고 17개 효소 가운데 5개의 효소의 활성이 감소하였으며 병해충 관련 단백질 유도를 억제하는 것으로 보고되었다 (Edwin et al., 1996). 또한 이 보고서는 옥수수를 2일간 고온에 노출하였을 때 유전자 발현을 활성화시킬 수 있는 폴리펩티드의 축적이 나타나는데 이것은 펩수 구성 요소의 유전자 발현을 활성화하는 폴리펩티드의 양보다 더욱 많은 양이라고 보고하였다. 이는 온도 스트레스에 따라 정상적인 생육을 위한 에너지보다는 온도 스트레스에 대응하기 위한 물질을 발현하기 위한 에너지를 많이 소모함으로써 생육에도 영향을 받을 수 있다는 것을 암시하고 있다. 고온에 노출된 옥수수의 경우 광합성 속도 및 양에도 영향을 미치는데 Crafts-Brandner and Salvucci (2002)는 잎의 온도가 급격히 증가하여 40°C에 도달하게 되면 순광합성 속도가 급격히 감소하는 것으로 보고하였으며 이는 루비스코 활성상태가 감소하기 때문이라고 보고한 바 있다. Veerana et al. (2004)는 25°C에서 자라던 옥수수를 35°C 이상의 고온에 노출하였을 때 잎에서 광합성과 관련된 파라미터가 감소하기 시작한다고 하였다.

옥수수 알곡의 발달이나 화수분의 수정과 관련된 시기는 고온 스트레스에 민감하여 이 시기에 고온이 발생하여 지속될 경우 생산성에 매우 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타난다. Nordine et al. (1994)는 옥수수의 수분 (pollination)을 거친 후 35°C에서 4일간 노출되었을 때 알곡 생육이 약 23% 감소하는 것으로 보고하였다. Maria et al. (1980)은 다양한 옥수수 유전자형을 대상으로 32°C에서 48시간 노출되었을 때 50% 이상이 화분의 발아가 감소하였고 38°C에 노출되었을 경우 대부분이 발아가 되지 않았다.

일반적으로 옥수수는 고온에서 생육이 좋은 것으로 알려져 있어 토양수분이 충분한 경우 생육적온은 35~38°C로 알려져 있다. 그러나 꽃가루가 날리는 시기에는 35°C이하로 유지하는 것이 좋으며 그 이상의 온도일 경우 수정률이 감소한다 (RDA, 2011). 옥수수는 4월 상순에서 4월 중순 파종하여 7월 하순에서 8월 상순에 수확하는 재배가 가장 일반적이며 일부 지역에서는 5월 중순까지 파종을 늦춰 재배하는 농가도 있다. 개화기는 파종시기에 따라 6월 말부터 7월 중순까지 이루어져 여름철 고온시기와 맞물려 있고 특히 고온과 가뭄이 함께 동반할 경우 쉽게 고온해의 위험성이 나타날 수 있다. 우리나라는 이 시기가 장마와 맞물려 아직까지 고온에 의한 대규모의 옥수수 수량감소 피해가 많지 않지만 국지적인 수량감소요인이 되고 있는 형편이다.

최근 이상기상 발생의 빈도 증가와 함께 지속적으로 진행되고 있는 온난화는 앞서 언급한 바와 같은 정도의 온도 상승이 이루어 질 경우 여름철 생식생장시기에 고온해 위험성이 나타날 확률이 높아질 것으로 예상된다. 미래 RCP8.5 시나리오에서는 강수량이 증가하지만 한발 패턴은 현재까지의 발생 양상과 비슷하게 나타나는 것으로 나타나고 있어 한발과 동반한 고온해가 발생할 위험도 확률도 증가할 것이다.

본 연구는 2011년에 배포된 우리나라 기후변화 시나리오 RCP8.4와 RCP4.5를 이용하여 미래 기후조건에서 옥수수의 여름철 생식생장기일 때 고온에 따른 생육피해 위험성에 대한 지수를 설정하여 미래 시기별, 시군별 평가를 통하여 미래 고온에 따른 수량감소를 저감하기 위한 대응책을 마련하기 위한 기초자료로 사용하고자 하였다.

Materials and Methods

옥수수의 경우 영양생장은 고온을 포함한 넓은 온도범위를 가지고 있지만 생식생장기 35°C에 장기간 노출되었을 경우 고온에 의한 수분의 발아 저해 등으로 인해 수량감소가 나타날 위험성이 높다. 미래 기후변화에 대한 농업과 작물에 대한 영향을 보고한 USDA (2013)에서도 생식생장이 실패할 수 있는 온도를 35°C로 설정하고 있다. 또한 국립식량과학원 (2011)에서 발행한 보고서에서도 꽃가루가 날리는 시기에는 온도를 35°C이하로 유지할 것으로 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서 여름철 생식생장기 고온에 의한 피해 위험성 평가를 하기 위한 온도를 35°C로 설정하여 고온해 위험성 평가를 수행하였다.

미래 옥수수 재배시 꽃가루가 형성되어 수정되는 생식생장기 고온해 위험성을 분석하기 위해 기상청에서 제공된 1 km의 해상도를 가지고 있는 기후변화 시나리오 RCP8.5와 RCP4.5의 2011년부터 2100년까지 시군별 일별 최고온도 자료를 사용하였다 (KMA, 2016). 옥수수 재배는 파종시기에 따라 수량의 차이가 있지만 빠르게는 3월 말부터 7월 초까지 이루어지고 있다 (Lee et al., 1979; Hur, 2001). 넓은 재배시기를 고려하였을 때 옥수수 재배시 생식생장기에 포함될 수 있는 시기는 크게 5월부터 9월 이내에 포함될 것으로 판단되지만 일반적으로 우리나라에서는 4월 초순부터 6월 초까지 파종하는 것이 일반적인 재배법이며 4월 중순 파종하여 재배하는 것이 수량이 가장 높은 것으로 평가되고 있다. 따라서 고온해 위험에 노출되는 생식생장기는 주로 6월과 7월에 해당되어 본 연구에서는 미래 기후자료 가운데 6월과 7월의 최고기온을 분석하였다.

생식생장기 옥수수의 고온해 위험성 평가를 위해 기본적으로 연간 6월과 7월에 최고 온도가 35°C 이상인 일수를 산정하고 ‘연간 고온해 위험 일수’ (Annual risk days of high temperature damage) 지표로 설정하여 미래 고온해 위험성을 분석하였다. 본 연구에서 수행한 미래 시나리오 자료는 2011년부터 2100년까지 총 90년에 대한 분석으로 전 기간을 시군별로 평균하여 평가한 경우 90년을 나누어 ‘평균 연간 고온해 위험일수’ (Average of annual risk days of high temperature damage)를 평가하였고 좀 더 세분하여 평균 10년 단위로 시군별 분석을 하여 10년간 전체 연간 고온해 일수에서 해당 연수 10년을 나누어 평균 연간 고온해 위험일수로 평가를 수행하였다. 옥수수 생식생장기 최고 온도가 35°C가 넘는다고 해서 고온해가 발생한다고 확실히 판단할 수 없지만 연간 고온해 일수가 많을수록 위험성이 높아지는 것은 앞서 언급한 문헌을 통해 입증된 사실이며 그만큼 고온해 위험에 노출될 수 있는 빈도가 증가하는 것으로 평가할 수 있다.

한편 옥수수의 고온해 위험은 생식생장기일 때 고온이 지속될수록 높아진다고 할 수 있다. Maria et al. (1980)이 언급한 바와 같이 온도가 다소 낮아도 고온에 노출된 기간이 높을 경우 화분의 발아가 감소하고 이로 인한 수량감소가 나타날 위험성이 매우 높아진다. 따라서 본 연구에서는 고온해 위험성의 강도를 나타내기 위하여 생식생장기인 6월

과 7월에 최고온도가 3일 이상 지속되는 일수를 35°C를 초과한 전체 일수로 나누어 ‘고온해 위험성 강도 지표’ (Strengthen index of high temperature damage)로 설정하여 분석을 하였다.

분석대상 자료인 RCP8.5와 RCP4.5 두 종의 시나리오 자료에서 1차적으로 6월에서 7월까지의 일별 최고기온을 추출하였다. 추출된 최고기온 자료에서 35°C 이상을 기록한 일수를 다시 추출하고 이 값을 이용하여 연간 고온해 위험 일수를 산정하였다. 미래에 대한 옥수수의 고온해 위험성 평가는 2010년대부터 2090년대까지 기간을 시군별 10년 단위로 구분하여 평균 연간 고온해 위험 일수 지표를 분석하여 평가하였다. 본 연구에서 분석한 시군은 제주도를 포함한 157개 시군을 대상으로 하였고 농업 생산활동이 많지 않은 서울, 부산 등 광역시는 평가 지역에서 제외하였다. 또한 3일 연속으로 고온이 나타난 일수를 추출하여 앞서 언급한 방법을 통해 고온해 위험성 강도 지표를 분석하였다.

미래 고온해 위험성이 어느 시군에 가장 영향을 많이 미칠 것인가에 대한 종합적인 전망을 위해 전 기간에 걸친 평균 고온해 위험성 일수 지표를 시군별로 분석한 결과를 Arc-GIS 프로그램을 이용하여 지도를 제작하였으며 10년 단위로 시군별로 분석한 평균 연간 고온해 위험 일수 지표에 대한 지도도 제작하였다.

대표적인 지역별 고온해 위험성의 추이를 살펴보기 위하여 옥수수 재배 면적이 2013년도 기준으로 가장 많은 지역을 기준으로 양평군, 홍천군, 괴산군, 서산시, 무주군, 여주시, 군위군 및 의령군과 식량생산이 많은 서부 평야지대로 수원시, 이천시, 전주시, 무안군 등 12개 지역에 대한 연대별 변동추이를 평가하였다.

Results and Discussion

옥수수의 고온해 위험성을 평가하기 위한 지표로 설정한 평균 연간 고온해 위험일수의 경우 10년 단위에서 매년 평균적으로 고온이 나타난 일수를 나타낸 것으로 10년단위에서 매년 고온해 위험이 나타날 수 있는 빈도를 의미하고 있다. 하지만 수량의 감소에 대한 부분은 고온의 지속기간, 토양 수분 함량 등 고온이 발생하였을 때의 다양한 조건에 따라 차이가 날 수 있다. 그러나 옥수수는 고온기간이 지속될수록 고온해 피해가 점차 커지는 것으로 보고되고 있어 고온해 피해에 대한 강도도 수량 측면에서 중요할 것으로 판단된다. 이에 따라 설정된 고온해 위험성 강도 지표는 지표의 수치가 높을수록 옥수수의 수량감소가 나타날 확률이 매우 높아진다고 할 수 있다.

고온해 위험성 강도 지표는 10년 단위 결과를 이용하여 분석을 하였기 때문에 매년의 발생하는 고온해 강도의 차이를 나타내기 어렵지만 10년 단위로 얼마나 고온해 위험이 집중될 수 있는지를 보여줄 수 있다. 고온해 위험성 강도 지표 값이 0인 경우에는 10년간 고온일수가 연평균 3일 이하이거나 10년간 3일 연속 고온이 없는 경우에 해당되며 고온에 따른 옥수수의 수량감소가 크게 나타나지 않을 수 있다고 볼 수 있다. 지표 값이 1인 경우 고온이 발생하는 날들이 3일 이상 연속하여 나타나기 때문에 옥수수의 수량 감소가 매우 클 확률이 높다는 것을 의미한다.

따라서 평균 연간 고온해 위험일수인 빈도 지표와 고온해 위험 강도 지표가 모두 높을 경우 옥수수에서 고온해 위험성이 더 높다는 것을 의미하며 10년대별로 시나리오에 따른 고온해 위험성 빈도 지표와 강도 지표를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 RCP8.5 시나리오에서는 미래로 갈수록 빈도 지표와 강도 지표가 증가하는 양상을 보이고 있으며 특히 빈도 지표가 3일을 초과하고 강도 지표가 30년대부터 0.3을 초과하고 있어 기후변화의 양상이 현재 추세로 계속하여 진행된다면 옥수수의 고온해 위험성이 본격적으로 나타날 확률이 높다는 것을 의미하며, 3년에 1번은 옥수수의 수량 감소에 대한 피해가 크게 발생할 것으로 예상된다. 2070년대 이후에는 매년 피해가 많이 발생하는 고온해 위험성이 나타날 확률이 높은 것으로 분석되었다. 반면, RCP4.5 시나리오에서는 고온해 위험성이 미래로 진

행되어도 크게 차이가 없을 것으로 전망된다. 단 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 지역별 고온해 위험성 지표의 편차가 매우 크기 때문에 고온해에 대비한 적응기술을 개발하고 적용할 때에는 지역별 전망이 반드시 고려되어야 한다.

Table 1. The average of annual frequency and intensity index for risk on high temperature damage of corn based on RCP8.5 and RCP4.5 scenario with 10 years interval.

		2010's	2020's	2030's	2040's	2050's	2060's	2070's	2080's	2090's
The frequency index (days per year)	RCP8.5	0.9	1.8	3.6	4.0	4.8	6.5	11.5	11.7	16.1
	RCP4.5	1.5	1.0	0.8	2.6	1.8	2.5	2.8	2.0	3.3
The intensity index (ratio)	RCP8.5	0.11	0.17	0.31	0.35	0.37	0.35	0.51	0.39	0.45
	RCP4.5	0.17	0.25	0.21	0.41	0.13	0.18	0.23	0.11	0.22

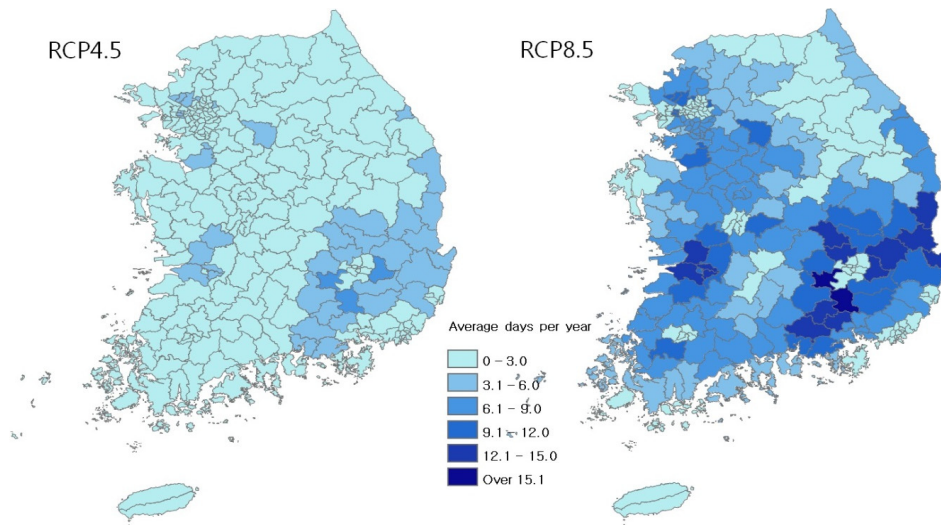


Fig. 1. The maps of the risk assessment on high temperature damage for reproduction periods of corn during 2011 to 2100 based on climate change scenario RCP4.5 and RCP8.5.

기상청에서 제공받은 기상자료를 기반으로 하여 옥수수 생식생장기 고온해 위험성을 평가하기 위하여 2011년부터 2100년까지 전 기간을 평균한 90년 평균 연간 고온해 위험일수 지표를 시군 단위로 분석을 수행하여 시군별 옥수수 고온해 위험성을 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대해 평가하고 시군별 지도를 구축한 결과는 Fig. 1과 같았다.

각 시군별로 미래 90년 평균 연간 고온해 위험성 위험일수 지표는 지도에서 보는 바와 같이 색깔의 명도로 표현하였다. 지표의 값을 표시하는 평균 연간 고온해 위험일수가 6일에서 9일 사이이나 그 이상에 포함된 경우에는 조사기간이 6월과 7월인 60일에서 10%가 넘기 때문에 옥수수 재배시기에 따라 생식생장기에 고온현상이 일치하면 고온에 의한 수량감소가 나타날 빈도가 높아졌다고 할 수 있다.

먼저 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우를 상정하여 만들어진 RCP4.5 시나리오와 현재 추세로 저감없이 온실가스가 배출되는 경우를 가정하여 만든 RCP8.5 시나리오에 따라 만들어진 지도를 비교하였다. RCP4.5의 경우 경상도와 전북 일부, 경기 일부 지역을 제외하고는 대부분이 평균 3일 이내로 분포하고 있어 고온해의 위험성이 높지 않은 것으로 평가되었다. 그러나 RCP8.5의 경우 강원도 내륙지역을 제외하고 대부분의 지역에서 평균 3일 이상의 고온해 위험성을 보여주고 있다. 특히 경북 남부, 남동부, 전북 전주지역에서는 고온해 위험성 일수가 매우 높게 나타나

고 있다. 이 지역들은 현재에도 여름철 최고 기온을 나타내는 지역으로 미래에도 계속적으로 더 고온을 유지할 확률이 높을 것으로 시나리오 기반하였을 때 추론할 수 있었다. 옥수수의 재배는 강원도 및 충북 내륙지역에서 재배가 많이 되고 있는데 미래에도 이 지역은 옥수수의 고온해의 위험성이 RCP8.5 시나리오에서도 다른 지역보다 낮은 것으로 평가되었다. RCP8.5 시나리오에서 평균 연간 고온해 위험일수 지표가 가장 높은 지역은 경상남도 창원군이 17.5일로 가장 높았으며 다음으로는 고령군, 경산시, 구미시 등 경상도 내륙에 분포하고 있는 시군이 다수를 차지하고 있었고 서부 평야지역에서는 전라북도 전주시가 가장 고온해 위험성이 높은 것으로 분석되었다. RCP4.5 시나리오에서도 창원군, 고령군이 각각 연평균 8.7, 7.2일로 가장 높았으며 지역별로 RCP8.5와 비슷한 양상의 고온해 위험성을 나타내었다.

RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 대상으로 10년 단위로 구분하여 옥수수의 생식생장기 고온해 위험성을 시군별로 분석하여 10년 평균 연간 고온해 위험일수 지표 지도를 Fig. 2와 같이 나타내었다. Fig. 1의 전 기간 평균 연간 고온해 위험일수 지표 지도와 같이 2010년대를 제외하고 전체적으로 RCP8.5 시나리오에서 고온해 위험성이 더 높은 것으로 평가되었다. RCP4.5 시나리오에서 연대별 고온해 위험성은 2040년대, 2070년대, 2090년대가 높은 것으로 분석되었

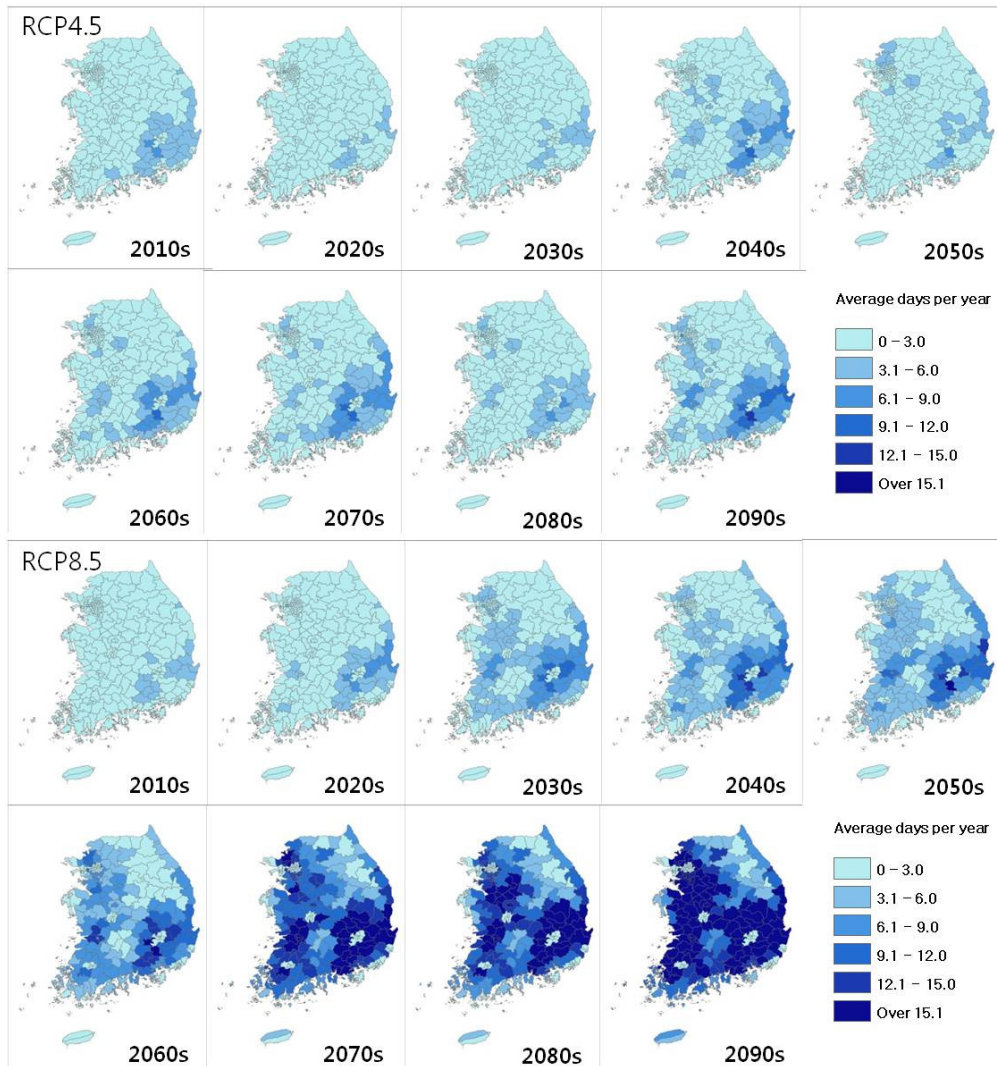


Fig. 2. The maps of the risk assessment on high temperature damage for reproduction periods of corn during 2011 to 2100 with 10 years interval based on climate change scenario RCP4.5 and RCP8.5.

다. 앞서 언급했던 경상도 내륙지역과 서부 평야지역에서 고온해 위험성이 높게 나타나고 경기도 서부지역에서 일부 고온해 위험성이 나타나는 것을 제외하면 다른 지역에서는 고온해 위험성이 전 기간에 걸쳐 높게 나타나지 않을 것으로 전망되었다.

그러나 RCP8.5 시나리오에서는 2030년대부터 경상도 내륙지역을 중심으로 본격적으로 고온해 위험성이 높아져서 2090년대에는 강원도 일부 지역과 제주도 지역을 제외하고 대부분의 지역이 고온해 위험성이 매우 높아지는 것으로 전망되었다. 지도에서는 서울, 부산 등 광역시는 분석대상에서 제외하였기 때문에 고온해 위험성 범례에서 가장 낮은 범주로 표시되었다. 조사된 157개 시군에서 2090년대 연 평균 10일 이상의 고온해 위험성 일수를 기록한 시군은 121개로 전체의 약 77%를 차지하고 있다. 반면 옥수수의 고온해 위험성이 거의 나타나지 않는 시군으로는 강원도 평창군, 태백시, 인제군, 정선군 등 대부분이 강원도 내륙에 위치하고 있다.

지역별 고온해 위험성의 추이를 살펴보기 위하여 옥수수 재배면적이 많은 지역인 양평군, 홍천군, 괴산군, 서산시, 무주군, 여수시, 군위군 의령군과 서부지역으로 수원시, 이천시, 전주시, 무안군 등 12개 지역에 대한 연대별 10년 평

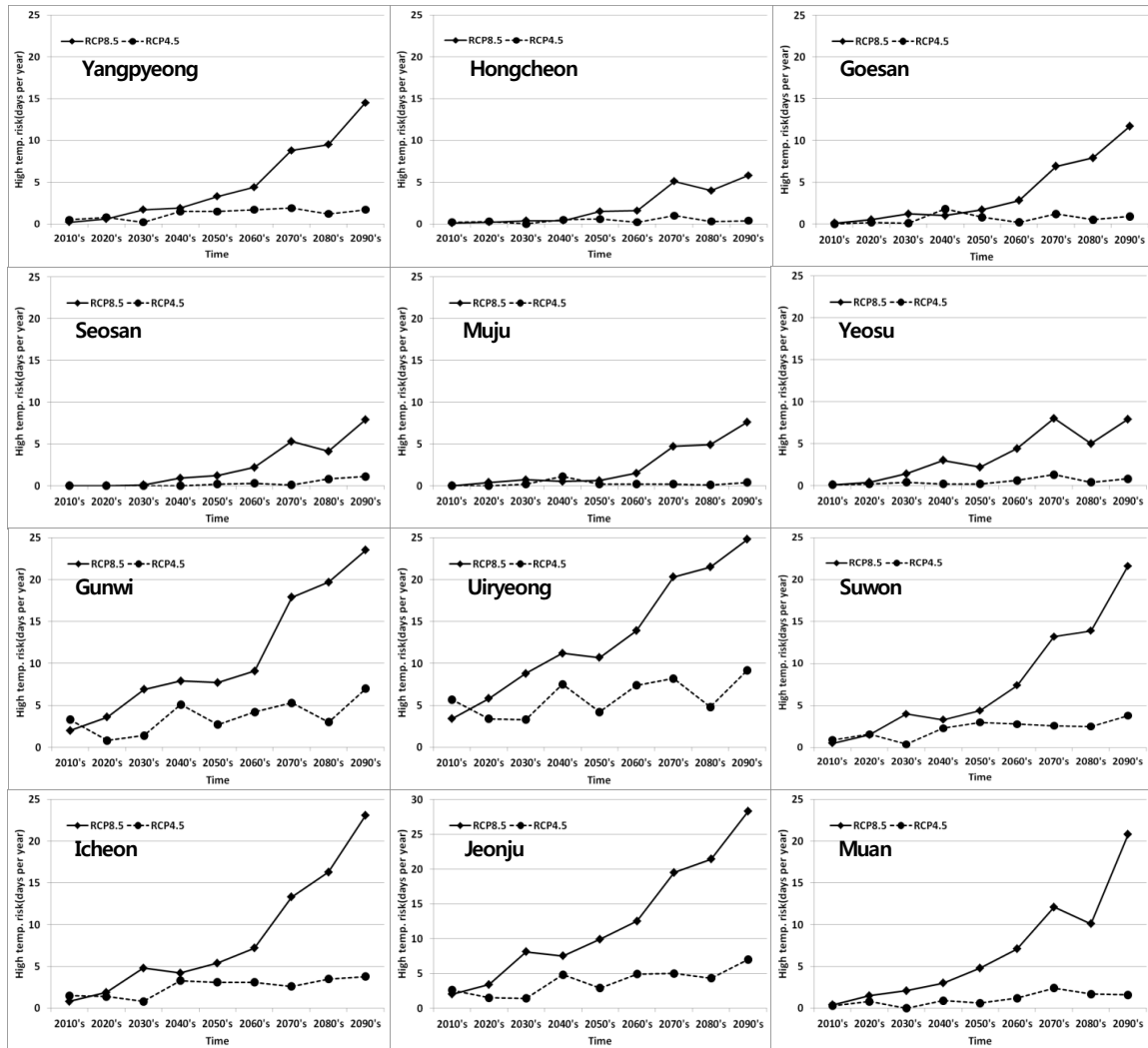


Fig. 3. Trends of the risk assessment on high temperature damage for reproduction periods of corn from 2011 to 2100 with 10 years interval based on climate change scenario RCP4.5 and RCP8.5 in 12 counties and cities.

균 고온해 위험일수 자료의 변동추이를 평가하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

옥수수 재배면적이 가장 많고 내륙지역에 위치한 충청북도 괴산군의 경우 2060년대까지는 RCP8.5 시나리오에도 크게 고온해 위험성을 보이지 않으나 2070년대부터는 고온해 위험성이 급격히 높아지는 양상을 나타내고 있다. 가장 옥수수를 많이 재배하는 강원도 홍천군의 경우 괴산군과 유사하게 2070년대부터 급격히 위험성이 높아지지만 평균 연간 고온해 위험일수는 대체로 5일정도 이었다. 고온해 위험성이 상대적으로 낮게 나타난 내륙 산간지역의 경우에도 2070년대를 전후로 위험성이 높아지는 추세가 나타나고 있으나 평균 연간 고온해 위험일수는 높은 편이 아니었다. 그러나 경기도, 전라도, 경상도에 속해있는 시군의 경우 2030년대부터 고온해 위험성이 급격히 증가하는 양상을 나타내었고 평균 연간 고온해 위험일수도 2090년대에서는 15일을 대부분 초과하게 되는 것으로 미래에는 고온해 위험을 피할 수 있는 재배기간 변화 등 대책이 필요할 것으로 판단되었다. 해안가에 인접해 위치한 여수시의 경우는 남부지방에 위치하고 있음에도 불구하고 2070년 이후에도 10일 이내의 위험성 평균일수를 나타내고 있다. RCP4.5 시나리오에서는 대부분의 지역이 평균 연간 고온해 위험일수가 10일을 넘지 않을 것으로 전망되었으며 급격한 증가 추세의 양

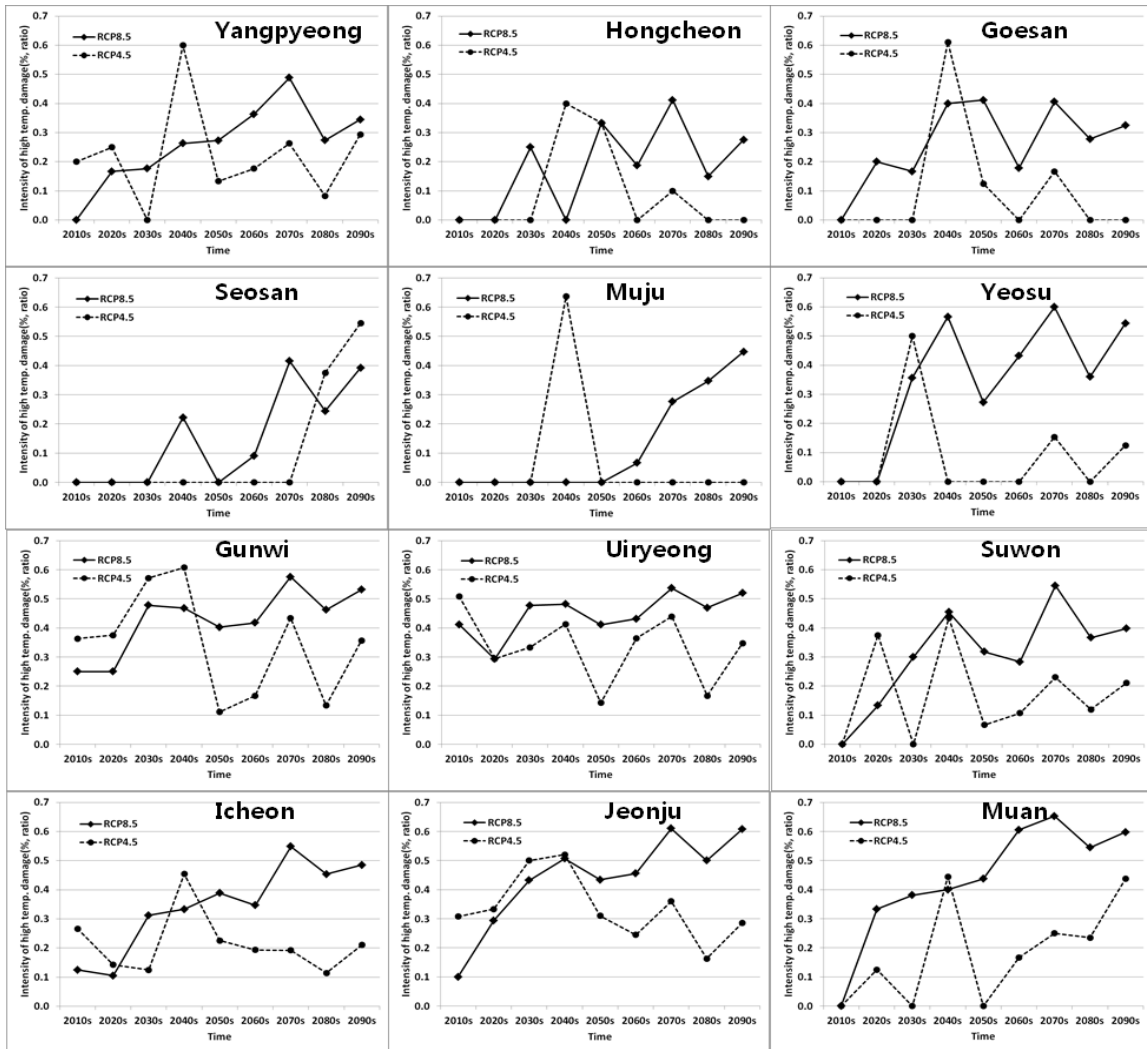


Fig. 4. Intensity of the risk assessment on high temperature damage for reproduction periods of corn from 2011 to 2100 with 10 years interval based on climate change scenario RCP4.5 and RCP8.5 in 12 counties and cities.

상도 나타나고 있지 않았다. RCP8.5 시나리오에서 의령군은 연평균 위험성 일수가 6일 이상이 2020년대로 가장 빨리 나타나고 있으며 2030년대에는 전주시, 2040년대에는 군위군, 2060년대에는 수원시, 이천시, 무안군이 나타나고 있다. 2090년대에는 12개 지역 가운데 강원도 홍천군을 제외하고 전 지역이 포함되고 있다.

고온해 위험성 강도 지표에 대한 지역별 전망을 살펴보기 위하여 앞서 빈도 지표에서 선정하였던 12개 지역에 대해 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 분석하였으며 10년간의 변동추세를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 RCP4.5를 근거로 하였을 때 전체적으로는 RCP8.5 시나리오보다는 강도 지표가 전체적으로 낮게 분포하고 있으나 지역이나 미래 시기에 따라 더 높은 고온해 위험성 강도가 나타나는 경우가 있다. 비록 RCP4.5 시나리오의 경우 온난화의 속도가 현저하게 줄어들어 옥수수의 고온해가 RCP8.5보다는 전체적으로 적게 영향을 미칠 것으로 전망되고 있지만 시기나 지역에 따라 고온해가 발생할 위험이 많이 있음을 의미하는 것으로 판단되었다. 예를 들어 서산시의 경우 RCP4.5에서는 2070년대까지는 고온해가 빈도 지표와 강도 지표가 다른 서부 지역에 비해 높지 않지만 2080년대부터는 강도지표가 급격히 상승하여 고온해 위험성이 매우 높아지고 있는 양상을 보이고 있다. 무주군의 경우도 2050년대까지 강도 지표 값이 매우 낮게 나타나고 있었으나 2060년대부터 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다. 따라서 미래에는 작물 재배시기가 적합하지 않을 경우 RCP4.5 시나리오의 기후조건 하에서도 옥수수의 고온해 위험성이 현재보다 높아질 것으로 전망되었다.

RCP8.5 시나리오에서 보면 현재 시기인 2010년대에는 경상북도 군위군과 경상남도 의령군을 제외하고는 대부분 지역이 0에서 0.1 이하의 강도 지표를 보이고 있어 고온에 의한 큰 피해는 많지 않을 것으로 예상되었다. 그러나 Table 1에서 나타난 결과와 함께 고찰을 하였을 경우 일반적으로 2030년대부터 고온해 위험성 강도 지표의 수치가 평균적으로 급격히 상승하는 것과는 달리 양평군, 괴산군, 군위군, 의령군, 수원시, 전주시, 무안군 등 일부 지역에서는 더 일찍 2020년대부터 위험성 강도 지표의 수치가 높아지는 양상이다. 고온해 위험성 빈도 지표가 낮은 내륙 산간지역인 홍천군, 무주군과 해안지역인 서산시, 여수시의 경우 2030년대 이후부터 상승을 하는 양상을 보이고 있고 옥수수 고온해 위험성이 지역간 편차가 매우 클 것으로 추정할 수 있다. 또한 2020년대에는 경상도, 전라도, 경지 서부 등 여름철 온도가 높은 지역을 중심으로 고온해 피해가 수년에 1회 이상 크게 나타날 확률이 높을 것으로 전망되었다.

Kim et al. (2005)에 따르면 찰옥1호 품종을 대상으로 시기별로 편차가 약 10°C의 범주인 평균 27°C 고온을 7일간 처리하였을 때 평균 15°C와 21°C로 처리하였을 때 보다 개화기 전후인 출사전 15일, 출사기에서 이삭중과 종실중이 가장 낮았으며 출사후 15일 후 처리는 처리 온도간 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 보고는 고온이 지속되는 기간을 반영한 옥수수 고온해 위험성 강도 지표가 상당한 타당성이 있음을 보여주고 있다.

우리나라에서는 아직까지 옥수수의 고온해와 관련한 연구는 많이 진행되지 못하고 있으며 농가 등 현장에서 구체적인 고온 피해 사례가 많지 않다. 현재 고온해에 따른 피해가 침수피해 등 다른 자연재해와 달리 두드러지는 원인을 제공하고 수량감소를 보이지 않고 있기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 실제로는 옥수수가 생식생장기일 때 고온에 노출되었을 때 정상적인 생육으로 생산되는 수량보다 감소하는 것으로 추정되고 있다.

한편으로 옥수수의 고온해에 대한 보고가 적은 이유로는 고온의 시기가 장마시기와 중첩이 되고 있기 때문에 토양의 많은 수분은 실제 고온보다 작물이 증발산을 많이 하면서 온도를 낮추기 때문으로 생각할 수도 있다. 이와 같이 포장에서는 다양한 환경이 복합적으로 작용하기 때문에 고온피해의 한 가지 요인으로만 수량감소를 설명하기는 쉽지 않다.

그러나 옥수수가 생식생장기 영향을 받을 수 있는 고온에 노출되는 빈도가 높아지고 특히 고온의 지속기간이 길어질 경우 고온해에 의한 수량감소 요인의 비중은 점차 커질 수밖에 없다. 미래 RCP8.5 시나리오에서는 21세기 말에는

우리나라의 강수량이 15% 증가한다고 전망을 하고 있다. 그러나 Seo et al. (2014)에 따르면 RCP8.5 시나리오 따른 미래에는 강수량이 증가하지만 한발의 양상은 현재의 빈도와 강도가 비슷하게 나타날 것으로 전망하였다. 온도가 증가하는 미래에는 특히 2015년과 2016년과 같은 강수량이 적은 마른 장마 조건에서 고온에 노출되었을 경우 옥수수의 고온해 위험성이 매우 높아지고 자연재해로 볼릴 수 있을 정도의 피해도 나타날 수 있을 것으로 전망된다.

미래 옥수수의 생식생장기 고온해 위험성을 전망한 결과 현재 고온해에 의한 수량 감소 요인 비율보다는 2030년대 이후로 지역별로 차이는 있지만 급격히 증가할 것으로 예상된다. 따라서 이러한 고온해에 의한 수량감소 비율을 줄이기 위해서는 작물재배적지, 재배시기 등 기초적인 재배기술의 개발과 고온적응 품종개발 등 다양한 분야의 적응기술 개발이 필요할 것이다.

Conclusions

미래 옥수수의 생식생장기 고온에 따른 피해 위험성을 평가하고자 2011년 기상청에서 배포한 RCP4.5, RCP8.5 기후변화 시나리오를 대상으로 고온해 위험을 분석하였다. 위험성의 빈도를 나타내는 평균 연간 고온해 위험일수와 위험 강도를 나타내는 고온해 위험성 강도지표를 설정하여 157개 시군에 대한 고온해 위험성 지도를 제작하였으며 대표적인 12개 지역에 대해 세부적인 분석을 수행하였다. RCP 4.5 시나리오를 분석하였을 때 경상도 내륙지역과 전북, 경기 서부지역 일부가 2040년대부터 평균 연간 고온해 위험일수 지표가 6일 이상으로 나타나고 그 이외 지역은 6일 이하의 낮은 값을 나타내었다. 그러나 RCP8.5 시나리오를 분석한 결과, 90년 평균 연간 고온해 위험일수 지표를 지도로 확인하였을 때 경상도 내륙지역이 가장 높았고 다음으로 전북과 경기 서부 지역이 높은 것으로 나타났으며 강원도 내륙지역은 높지 않았다. 10년 단위 평균 연간 고온해 위험일수 지표를 평가한 지도를 보았을 때 2030년대부터 옥수수의 고온해 위험성이 일반화되어 가는 것으로 평가되어 2070년대부터는 일부 강원지역 등 중북부 내륙지역을 제외하고 전국 대부분이 고온해 위험성이 높게 나타나는 것으로 전망되었다. 조사된 12개 지역에서 10년 평균 연간 고온해 위험일수 지표는 내륙지역과 해안가 지역은 높지 않거나 다소 늦게 높아지는 양상을 나타내었으나 고온해 위험성 강도지표에서는 양평, 괴산, 군위, 의령, 수원, 전주, 무안 등 상당수의 지역이 2020년대부터 급격히 상승하는 양상을 나타내고 빈도 지표가 낮은 내륙 산간지역인 홍천, 무주와 해안지역인 서산, 여수의 경우 2030년대가 지나서 상승하는 양상을 보이는 등 위험성이 더 높아지는 것을 알 수 있었다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ011425)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Crafts-Brandner, S. J. and M. E. Salvucci. 2002. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiol.* 129:1773-1780.
- Edwin, R. D. and C. D. Douglas. 1996. Effects on heat stress on enzyme activities and transcript levels in developing

- maize kernels grown in culture. *Environ. Exp. Bot.* 36(2):199-208.
- Hur, C. S. 2001. Experiment on improvement of cultivation method and disaster reduction for edible corn at southern area. Annual report of Kyeongbuk experimental institution. 117-123.
- Kim, S. K., H. G. Moon, T. W. Jung, N.-K. Park, and Y. H. Ryu. 2005. Effect of temperature on plant growth and yield in waxy corn. Annual report of National Crop Experiment Station, RDA, Korea. REM0067538.
- KMA. 2016. <http://www.climate.go.kr/index.html> Data by administrative districts. Korea Meteorological Administration, Portal of climate change information.
- Kwon, W. T. et al. 2011. Report of climate change scenario for coping with 5th IPCC report. National Institute of Meteorological Sciences in Korea. 7-10.
- Lee, D. K., J. S. Ra, and S. K. Jin. 1979. Studies on the cultural practice system establishment of sweet corn in southern plain area. *J. Korean Soc. Crop Sci.* 24(4):45-52.
- Maria, P. H. and R. R. Johnson. 1980. High temperature stress and pollen viability of maize. *Crop Sci.* 20:798-800.
- Nordine, C. and J. J. Robert. 1994. Disruption of maize kernel growth and development by heat stress. *Plant Physiol.* 106:45-51.
- RDA. 2011. The information for scientific practice of corn. Rural Development Administration, National Institute of Crop science. Official registration No. 11-1390803-000105-12.
- Seo, M. C., H. S. Cho, K. Y. Seong, M. T. Kim, T. S. Park, H. W. Kang, and K. S. Shin. 2013. Risk assessment of drought for regional upland soil according to RCP8.5 scenario using soil moisture evaluation model (AFKE 0.5). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(6):434-444.
- Thompson, L. M. 1975. Weather variability, climate change, and grain production. *Science* 188:535-541.
- USDA ARS. 2013. Climate change and agriculture in the United States: effects and adaptation. USDA. Technical bulletin 1935. PP.61.
- Veerama, S., L. Jorg, S. Peter, and F. Yvan. 2004. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature. *Environ. Exp. Bot.* 52:123-129.