

기후적합도 모형을 활용한 북한지역 내 감자의 여름재배 적지 탐색

강민주¹, 현신우², 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농림생물자원학부
(2022년 3월 7일 접수; 2022년 3월 28일 수정; 2022년 3월 29일 수락)

Spatial Assessment of Climate Suitability for Summer Cultivation of Potato in North Korea

Minju Kang¹, Shinwoo Hyun², Kwang Soo Kim^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

(Received March 7, 2022; Revised March 28, 2022; Accepted March 29, 2022)

ABSTRACT

Expansion of potato production areas can improve the food security in North Korea because the given crop has less requirements for agricultural materials and facilities. The Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model, which was developed to evaluate climate suitability under different cultivation conditions, was used to identify potential areas for the potato production. The spatial estimates of crop suitability under low and high input management conditions were downloaded from the GAEZ data portal. The values of suitability were obtained at the potato occurrence sites retrieved from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) database. The suitable areas for the potato production were identified using a threshold value derived from the suitability estimates at the occurrence sites. It was found that 90% of the occurrence sites had the suitability index value >3,333, which was set to be the threshold value. The suitable areas in North Korea were summarized by province and county. Rice cultivation areas were excluded from the analysis. The reported relative acreage of potato production was better represented by the suitable areas under the low input management options than the high input conditions. The suitable areas also had a similar distribution to the reported acreage of potato production by county. These results indicated that the GAEZ model would be useful to identify the candidate production areas, which would facilitate the increases in potato production especially under future climate conditions. Furthermore, monthly maps of crop suitability can be used to design cropping systems that would improve crop production under the limited use of agricultural materials and facilities.

Key words: Suitable area, Spatial assessment, Low input management, Climate change, Uncertainty



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 론

기상재해와 경제제재로 인해 북한의 식량 위기 상황이 지속되고 있다(Smith, 2020; Rhie *et al.*, 2017). 지난 100년간 북한의 연평균 기온은 1.9°C 상승하여 전 세계 평균보다 빠르게 상승하는 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2010). 이러한 기후변화의 영향으로 북한 지역에서 식량난을 심화시키는 기상재해의 빈도와 강도가 커지고 있으며, 특히 작물이 재배되는 기간에 가뭄과 홍수가 빈번하게 발생하는 것으로 보고되었다(Rhie *et al.*, 2017). 북한의 식량작물 생산량은 연간 곡물 수요량의 80%에 불과하여 자국의 식량작물 생산만으로 식량 수요를 충족할 수 없고(FAO and WHO, 2019), 국제사회의 대북 경제제재로 북한의 식량 수입마저 어려운 실정이다. 예를 들어, 2010년에서 2018년까지 기간 동안 북한의 곡물 수입량과 원조량의 변이계수는 각각 45.8% 및 67.0%으로 변동폭이 큰 것으로 분석되었다(USDA, 2020). Kim and Lim (2019)은 북한의 식량부족에 따라 배급 체계가 붕괴되었고, 현재에는 성인 필요 열량의 절반 정도에 해당되는 식량만이 주민들에게 배급되고 있는 것으로 보고하였다.

관개시설과 비료 등의 농업기반시설 및 농자재의 부족은 북한에서 안정적인 식량 생산을 어렵게 한다(Park and Cho, 2018). 북한의 관개시설은 규모가 크고 개수가 적어서 농경지까지 물을 공급하기 위한 수로가 길고 누수량이 많아 관개효율이 낮다(Kim, 2020). 산지가 많은 지형적 특성으로 에너지를 소비하여 물을 공급하는 양수장들이 개발되었으나, United Nations (UN) 제재 이후 전력난으로 가동률이 저조한 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 북한지역에서 연간 농업용수 사용량은 국내 농업용수 사용량의 절반 수준에 불과하였다(Oh and Nam, 2021). 또한, 대북 경제제재로 원유 수입이 제한되어 비료와 작물보호제의 생산량이 감소하였다(USDA, 2020). 이에 따라, 작물의 생산성을 향상시킬 수 있는 관개시설과 농자재를 적극적으로 활용한 고투입 농업을 수행하기 어렵다(Rhie *et al.*, 2017).

감자는 수분과 양분 요구량이 낮아 농업기반시설과 농자재가 부족하더라도 기후자원을 적극적으로 활용한다면 타 작물에 비해 높은 생산성을 기대할 수 있다(Yoon, 2020). 특히, 고랭지대에서 감자를 재배할 경우, 평년지 봄재배보다 평균 수량이 30~40% 가량 높다(Kim *et al.*, 2019). 감자의 생육기간은 짧은 반면,

단위면적당 생산량은 높다(Kim *et al.*, 2020b). 이러한 특성을 고려하여 감자 재배지역을 확대할 경우, 최소한의 투입으로도 높은 작물 생산성을 기대할 수 있어 북한의 식량안보 위함을 완화할 수 있다. Han and Kim(2017)은 북한에서 다비성 작물인 옥수수를 대체하여 감자 재배면적이 증가하고 있음을 보고하였다.

기후요인에 따른 감자의 생산성을 평가하기 위해 작물모형이 활용될 수 있다. 특히, 특정 지역에서 기상 조건에 따른 작물 생산성을 파악하기 위해 과정기반 작물모형을 사용할 수 있다(Ban *et al.*, 2017; Yoo *et al.*, 2018; Ojeda *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020b). 과정기반 작물모형은 생물리학적 이론에 기반한 수식을 사용하여 작물의 생육 과정 및 성장량을 예측한다(Kim *et al.*, 2012). 지역별로 상세한 재배관리와 품종 자료를 사용할 수 있을 경우, 과정기반 모형을 사용하여 작부체계나 재배관리에 따른 생산성의 변화를 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2018b). 반면, 폐쇄적인 대외정책을 시행하는 북한은 재배관련 자료들이 공개되어 있는 경우가 적어 과정기반 작물모형의 필수 입력자료를 준비하기 어렵다. 이로 인해, 북한지역을 대상으로 과정기반 작물모형을 사용하여 공간적인 생산성을 추정하기 어렵다.

기후적합도 모형은 과정기반 작물모형과 달리 지역별로 상세한 재배관리나 품종분포 자료없이 기후자료만을 이용하여 작물의 재배적합도를 추정할 수 있다(Hyun and Kim, 2017). Hijmans *et al.*(2001)은 작물의 생장에 영향을 미치는 온도와 강수조건을 평가하여 작물의 기후적합도를 예측하는 EcoCrop 모형을 개발하였다. Kim *et al.*(2018a)은 기후적합도를 계산하기 위해 퍼지 로직(Fuzzy logic)을 적용한 모형을 개발하였다. 퍼지 로직 모델은 최소량의 법칙에 따라 환경조건을 평가하는 t-norm 방식의 EcoCrop 모형과 달리, t-conorm 방식으로 작물 생육과 관련된 조건들의 논리합 연산(Logical union operation)을 수행하여 작물 성장 조건의 적합도를 계산하였다. 또한, Fischer *et al.*(2021)은 작물의 생장에 미치는 요소별로 적합도의 범주를 종합하여 지수 형태의 기후적합도를 계산하는 Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 GAEZ 모형을 활용하여 북한 지역을 대상으로 감자의 재배 적합도를 공간적으로 분석하는 것을 목표로 하였다. 특히, GAEZ 모형에서 얻어지는 적합도 지수값을 사용하여 재배적지를 구분하기 위

Table 1. Suitability class of Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model

Class Code	<i>VS</i>	<i>S</i>	<i>MS</i>	<i>mS</i>	<i>VmS</i>	<i>NS</i>
Degree of suitability	Very suitable	Suitable	Moderately suitable	Marginally suitable	Very marginally suitable	Not suitable

한 알고리즘을 개발하고 감자 재배적지의 공간분포를 분석하고자 하였다. 이전에 보고된 실제 감자 재배지역과 기후적합도에 따른 재배적지를 비교하여 적지 판별 기준을 설정할 수 있다. 이러한 기준들은 북한에서 감자의 재배면적을 확대하고자 할 때, 해당 정책의 수립과 시행을 위한 과학적인 근거를 제공할 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 모델

북한지역의 여름감자 재배 적지를 탐색하기 위해 GAEZ (version 4) 모형으로 추정된 감자 적합도 지수를 공간적으로 분석하였다. GAEZ 모형은 Food and Agriculture Organization (FAO)와 International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)가 공동개발하였다(Fischer *et al.*, 2021). 관심 지역의 재배적합도를 계산하기 위해 GAEZ 모형은 작물 생장에 영향을 주는 환경 및 재배관리 조건들을 고려한다. 또한, 이러한 조건들을 공간적으로 평가하기 위해 30 arc-sec (1 km) 단위의 격자별로 잠재 수량을 추정하여 6가지 적합도 범주(Suitability Class)를 결정한다(Table 1).

적합도 범주값을 계산하기 위해 기후 및 토양 공간 자료들이 입력자료로 사용된다(Table 2). 기후 자료로는 Climatic Research Unit Time-Series (CRU TS; version 3.21) 자료와 Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) 자료가 사용된다. CRU TS는 1901년부터 2012년까지 4,000개 이상의 관측소로부터 얻은 일별 기상자료를 월별로 평균하여 30 arc-min (55 km) 공간해상도로 생산된 격자자료이다(Harris *et al.*, 2014). 이들 자료에는 GAEZ 모형의 입력변수로 사용되는 일평균 온도, 일교차, 운량, 증기압, 풍속 및 습일 빈도가 포함되어 있다. GPCC 자료는 동일 기간 동안 10년 이상 강수량 관측자료가 가용한 67,200개의 지점에서 수집된 관측값들을 30 arc-min의 공간해상도로 생산한 격자자료이다(Schneider *et al.*, 2011). GAEZ 모형에서는 CRU TS와 GPCC의 30 arc-min 기

후자료를 이중선형 보간법(bilinear interpolation)으로 5 arc-min (10 km) 공간해상도로 상세화된 자료가 사용되었다. 토양 입력 자료로는 Harmonized World Soil (HWSO; version 1.2) 자료가 사용된다(Nachtergaele *et al.*, 2014). 이 자료는 30 arc-sec 해상도의 격자자료로, 0~30 cm와 30~100 cm 등 두 개의 토양층별로 17종의 토양 특성이 포함되어 있다.

작물의 재배 조건을 평가하기 위해 관개, 지형, 토지 이용 등의 공간자료들이 GAEZ 모형의 추가적인 입력 자료로 사용된다(Table 2). 관개 가능 지역을 구분하기 위해 Global Map of Irrigated Areas (GMIA)가 사용된다(Siebert *et al.*, 2013). GMIA는 전 세계 국가의 관개 조사 통계자료와 관개 분야 연구자료를 수집하여 5 arc-min 해상도로 재생산된 공간 자료로, 각 격자 내 관개 면적 비율이 포함되어 있다. 지형적 특성에 따른 적합도를 계산하기 위해 3 arc-sec (90 m)의 공간해상도를 가진 경사도 자료가 사용된다. 이 자료는 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 자료를 사용하여 생산되었으며 경사도가 8가지 범주로 구분되어 있다(Gorokhovich and Voustianiouk, 2006). 격자별 토지 이용을 나타내기 위해 30 arc-sec의 공간해상도를 가진 Global Land Cover(GLC)-SHARE 자료가 사용된다(Latham *et al.*, 2014). 이 자료에는 12개의 범주로 토지 이용이 구분되어 있다. 이외에도 정책이나 환경 조건에 의해 작물 재배가 어려운 지역을 제외하기 위해 World Database of Protected Areas (WDPA), Key Biodiversity Areas (KBA), Global Lakes and Wetlands Database (GLWD) 등의 공간정보 데이터베이스들이 사용된다(UNEP-WCMC, 2019; KBA Standards and Appeals Committee, 2019; Lehner and Döl, 2004).

GAEZ 모형은 5 arc-min의 공간해상도에서 적합도 지수(Suitability Index; *SI*)값을 계산한다. GAEZ 모형에서 계산되는 적합도 범주값은 공간 입력자료의 최소 단위인 30 arc-sec 격자별로 출력된다. *SI*값은 이들 범주값이 5 arc-min 격자를 차지하고 있는 면적 비중과 개별 범주값의 가중치를 합산하는 방식으로 다음과 같

Table 2. Spatial data used as inputs to the Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model.

Variable	Data (version)	Resolution	Units
Mean monthly minimum temperature	CRU TS ^a (v3.21)	5 arc-minutes	°C
Mean monthly maximum temperature	CRU TS (v3.21)	5 arc-minutes	°C
Sunshine fraction	CRU TS (v3.21)	5 arc-minutes	%
Relative humidity	CRU TS (v3.21)	5 arc-minutes	%
Wind speed	CRU TS (v3.21)	5 arc-minutes	m/s
Precipitation	GPCC ^a (v6)	5 arc-minutes	mm
Soil type and soil phase information	HWSD ^b (v1.2)	30 arc-seconds	class
Land cover	GLC-SHARE ^b	30 arc-seconds	class
Elevation	SRTM ^b	3 arc-seconds	class
Water source of irrigation and irrigated areas	GMIA ^c (v5.0)	5 arc-minutes	class
Lakes and wetlands	GLWD ³	30 arc-seconds	class
Protected areas	WDPA ^c	polygon	class
Key biodiversity areas	KBA ^c	polygon	class

^a CRU TS(Harris *et al.*, 2014) and GPCC(Schneider *et al.*, 2011) represent Climatic Research Unit Time-Series and Global Precipitation Climatology Centre, respectively.

^b HWSD(Nachtergaele *et al.*, 2014), GLC-SHARE(Latham *et al.*, 2014), and SRTM(Gorokhovich and Voustianiouk, 2006) indicate Harmonized World Soil, Global Land Cover SHARE, and Shuttle Radar Topography Mission, respectively.

^c GMIA(Siebert *et al.*, 2013), GLWD(Lehner and Döl, 2004), WDPA(UNEP-WCMC, 2019), and KBA(IUCN, 2019) represent Global Map of Irrigated Areas, Global Lakes and Wetlands Database, Database of Protected Areas, and Key Biodiversity Areas, respectively.

이 계산된다(Fischer *et al.*, 2021):

$$SI = \frac{100 \cdot (90 \cdot VS + 70 \cdot S + 50 \cdot MS + 30 \cdot mS + 15 \cdot VmS + 0 \cdot NS)}{0.9} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 *VS*, *S*, *MS*, *mS*, *VmS* 및 *NS*는 격자에 포함된 적합도 범주별 면적 비율을 나타낸다.

2.2. 재배 적지 구분

GAEZ Data Portal을 사용하여 북한지역의 적합도 지수 자료를 수집하였다(<https://gaez.fao.org/>; accessed on 1/7/2022). 이 웹사이트에서는 작물과 관개조건 및 비료 투입 조건별로 계산된 적합도 지수 자료가 제공되고 있다. 해당 자료에는 전체 격자와 경작지(cropland)로 분류된 격자에 대한 지수값이 포함되어 있다. 본 연구에서는 1981년부터 2010년까지 기간 동안의 기후조건에서 계산된 감자 적합도 지수 자료를 수집하였다. GAEZ 모형에서 사용되는 white potato가 북한에서 재배되고 있는 감자의 특성을 반영하는 것으로 가정하였다. 북한에서 벼와 옥수수과 같은 주

곡작물들이 관개조건이 충분한 지역에서 우선하여 재배되고, 감자는 무관개(Rainfed All Phases)조건에서 재배될 것으로 가정하여 적합도 지수 자료를 수집하였다. 또한, 비료 조건에 따른 적합도의 차이를 분석하기 위해 투입 수준(Input level)이 높은(*SI_H*) 조건과 낮은(*SI_L*) 조건에서 계산된 적합도 공간자료를 수집하였다.

감자의 재배적지를 구분하기 위해 적합도 지수의 임계값을 설정하였다. *SI*값은 0부터 10,000까지의 범위를 가지고 있으나 재배 적합도를 나타내기 위해 8개의 범주로 분류된다(Table 3). 본 연구에서는 이러한 범주들을 대신하여 재배적지를 구분할 수 있는 *SI*의 최소값을 결정하였다. 이를 위해, Global Biodiversity Information Facility (GBIF)에 수록되어 있는 감자 공간 분포 자료를 수집하였다(<https://www.gbif.org>, accessed on 12/16/2021). GBIF는 개별 생물종이 발견된 위치 정보를 제공하고 있다. 이들 자료는 개인, 공공기관, 기업 등에 의해 수집된 자료들로 구성되어 있다. 본 연구에서는 자료의 품질관리를 위해 감자가 발견된 지점의 위경도 값을 약 1 km 단위에서 반올림하고 중복된 값을 제거하였다.

Table 3. classes Identified by the Suitability Index (*SI*) values

<i>SI</i>	$SI = 0$	$0 < SI \leq 1000$	$1000 < SI \leq 2500$	$2500 < SI \leq 4000$	$4000 < SI \leq 5500$	$5500 < SI \leq 7000$	$7000 < SI \leq 8500$	$8500 < SI$
class	Not suitable	Very marginal	Marginal	Moderate	Medium	Good	High	Very high

적합도 지수 임계값을 설정하기 위해 감자 공간분포 자료를 이용하여 개별 지점에서 얻어진 적합도 지수들의 분포를 분석하였다. 우선, GBIF에 기록되어 있는 감자 재배 지점의 좌표로부터 적합도 지수값을 추출하였다. 추출된 적합도 지수값의 분포를 확인하기 위해 히스토그램을 생성하였다. 또한, 재배조건별로 적합도 지수값 분포의 특성을 비교하기 위해 분포의 비대칭도를 나타내는 왜도(skewness, *S*)를 계산하였다. 왜도는 다음과 같이 결정된다(Doane and Seward, 2011):

$$S = \frac{E[(SI - \bar{SI})^3]}{E[(SI - \bar{SI})^2]^{3/2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 *SI*는 감자 재배 지점의 좌표로부터 추출한 적합도 지수값이고, \bar{SI} 는 *SI*의 평균값이다. 왜도가 양수이면 평균이 중앙값보다 크고 분포가 왼쪽으로 치우쳐 꼬리가 오른쪽에 위치한 정적편포(Skewed right)이고, 음수이면 평균이 중앙값보다 작고 분포가 오른쪽에 치우쳐 꼬리가 왼쪽에 위치한 부적편포(Skewed

left)이다. 이러한 분석을 고투입과 저투입 조건별로 수행하였다.

본 연구에서 수집된 감자 재배 지점의 90%를 포함하는 적합도 지수값을 재배적지를 판단하기 위한 임계값으로 설정하였다. 재배적지의 임계값을 결정하기 위해 감자 공간분포 자료와 기후 자료의 공간적 오차로 인해 발생할 수 있는 값을 제거하는 방식으로 품질관리를 수행하였다. 예를 들어, 감자가 재배되는 지역으로 알려졌으나 격자형 기후자료의 공간 해상도가 낮아 해당 지역의 복잡한 지형 특성을 반영하기 어려울 수 있다. 또한, GBIF에 수록된 위치 자료에 오차가 있을 수 있다. 이러한 공간적 자료의 불확도로 인해 적합도 지수값이 0으로 될 수 있다. 재배적지를 구분할 때 비교적 기후조건이 적합한 지역들을 우선하여 판별하기 위해 감자 재배 지점에서 적합도 지수가 0으로 나타난 지점들을 제외하고 임계값을 계산하였다.

벼의 앞그루로 이모작하여 재배하는 봄감자는 제외하고 고랭지대에서 재배되는 여름감자를 중심으로 분석하기 위해, 벼 재배지를 감자 재배적지 분석에서 제외하였다(FAO and WFP, 2013). 또한, 작물이 재배되

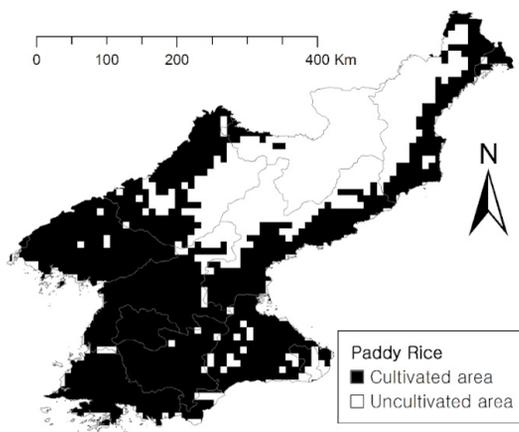


Fig. 1. Cultivated areas of paddy rice in North Korea. Data were downloaded from Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) Data Portal.

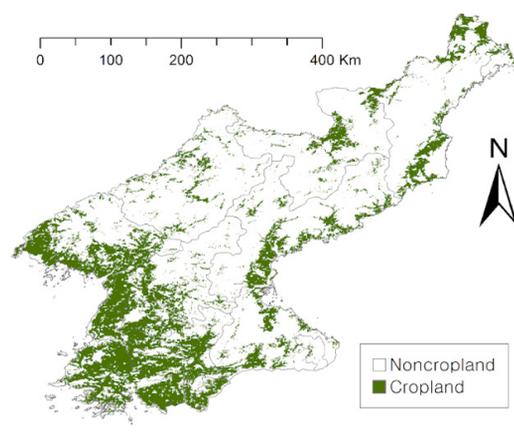


Fig. 2. Cropland in North Korea. Data were prepared using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) product.

고 있는 경작지를 대상으로 감자의 적합도를 분석하였다. 벼 재배 여부에 대한 공간 자료는 GAEZ Data Portal에서 제공하는 벼 수량 자료를 이용하여(<https://gaez.fao.org/>; accessed on 12/27/2021), 논벼(wetland rice)의 수량이 기록된 지역을 벼 재배지로 가정하였다(Fig. 1). 경작지 자료는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)의 International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) 토지이용자료(Loveland and Belward, 1997)를 수집한 후(<https://lpdaac.usgs.gov/>; accessed on 1/8/2021), 작물 재배지(cropland)로 분류된 격자자료를 이용하였다(Fig. 2). 작물 재배지로 분류된 지점 중 벼의 수확량이 0인 격자들을 대상으로 임계값을 적용하여 재배적지를 구분하였다.

2.3. 재배적지 예측값의 비교

SI의 신뢰도를 평가하기 위해 Kim *et al.*(2015)이 보고한 북한의 행정구역별 여름감자 재배 면적 추정치와 SI의 임계값으로 구분된 재배적지 면적을 비교하였다. Kim *et al.*(2015)이 보고한 여름감자의 재배면적을 이용하여 도별 면적 비율 RA_0 를 계산하였다(Fig. 3). 북한 내 도별 감자 재배 면적비율은 양강도가 57%로 가장 높았고, 함경도가 27%, 자강도가 15%로 그 뒤를 이었다. 재배 면적이 2,000 ha 이상인 군은 보천, 운흥, 평서, 김형권, 삼수, 대홍단 등 대부분 양강도에 있었으며, 함경남도 장진도 포함되었다. 주요 감자 재배지인 양강도, 함경도, 자강도 외에도 평안북도와 평안남도, 강원도의 일부 군에서도 소규모로 여름감자가 재

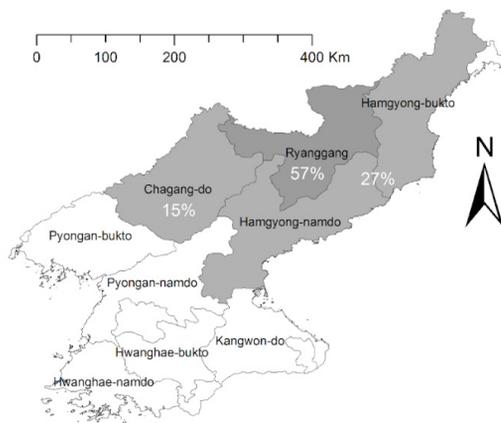


Fig. 3. Cultivated area of potato by provinces reported by Kim *et al.*(2015).

배되는 것으로 보고되었다.

GAEZ 모형으로 예측한 감자 재배적지의 면적 비율을 도별로 계산하고, 보고된 감자 재배면적 비율과 비교하였다. 재배적지의 비율 RA_P 는 다음과 같이 계산하였다:

$$RA_P = \frac{Est_P}{\sum Est_P} * 100(\%) \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 Est_P 는 도 P 의 재배적지 면적을 나타내며, 다음과 같이 계산하였다:

$$Est_P = A_P * \frac{NS_P}{N_P} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서 NS_P 와 N_P 는 각각 P 의 재배적지와 전체 격자 개수이다. A_P 는 해당 도의 전체 면적을 나타낸다. 투입수준에 따른 기후적합도 지수값인 SI_L 와 SI_H 에 대해 임계값을 적용하여, 각각 재배적지 면적 Est_L 과 Est_H 를 계산하고 이로부터 북한 내 재배적지 비율인 RA_L 과 RA_H 를 도별로 계산하였다.

상세한 공간 규모에서 감자의 재배적지와 실제 재배면적을 비교하기 위해, 시군의 감자 재배규모별 재배적지 면적의 분포를 분석하였다. 이를 위해, 군 단위의 감자 재배규모를 5가지 범주로 구분한 자료를 활용하였다(Table 4). 각 범주별로 재배적지 면적을 구하여 비교하기 위해 특정 군 C 의 재배적지 면적 Est_C 는 다음과 같이 계산하였다:

$$Est_C = A_C * \frac{NS_C}{N_C} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 NS_C 와 N_C 는 각각 C 의 재배적지와 전체 격자 개수 및 면적을 나타낸다.

III. 결 과

3.1. 재배적지 구분

전 세계 감자 재배 지점의 SI값 분포 특성은 투입수준에 따라 다르게 나타났다(Fig. 4). 감자의 공간분포 자료에서 추출된 SI_L 값의 분포는 비교적 대칭적인 분포를 보였다. 반면, SI_H 값은 상대적으로 비대칭적인 분

Table 4. Counties classified by potato acreage reported by Kim *et al.*(2015)

Cultivated area (ha)	Province	Counties
greater than 2,000	Ryganggang-do	Bochon, Unhung, Phungso, Kimhyongwon, Samsu, Taehongdan
	Hamgyong-namdo	Jangjin
between 1,000 and 2,000	Ryganggang-do	Baekam, Kapsan
	Hamgyong-namdo	Bujon
	Hamgyong-bukto	Yonsa
	Chagang-do	Rangrim
between 500 and 1,000	Ryganggang-do	Kimjongsuk, Samjiyon
	Hamgyong-bukto	Rajin, Musan
	Pyongan-namdo	Daenghung
less than 500	Ryganggang-do	Hyesan
	Hamgyong-namdo	Hochon
	Hamgyong-bukto	Orang, Hoiryong, Sonbong
	Chagang-do	Usi, Songwon, Songgan, Huichon, Tongsin, Ryongrim
	Pyongan-namdo	Sinyang, Yangdok, Nyongwon
	Pyongan-bukto	Unsan, Changsong, Tongchang, Byokdong
	Kangwon-do	Kumgangsán, Hoiyang, Sepo, Bopdong

포를 가졌다. 예를 들어, SI_L 분포의 왜도는 0.33으로 정적 편포가 나타났으나, SI_H 의 왜도는 -0.62로 부정적 편포를 가졌다. 이러한 분포상의 차이에도 불구하고 두 재배조건 모두 SI 값이 3,333 이상이었을 때 감자 재배 좌표의 90%가 포함되었다.

3.2. 재배적지의 공간적 분포

북한 지역에서 경작지이면서 벼가 재배되지 않는 지역을 대상으로 임계값을 적용하였을 때, 투입수준이 낮은 조건에서 높은 조건에 비해 상대적으로 넓은 재배적지가 추정되었다(Fig. 5). 북한 전체의 Est_L 값은 Est_H 값의 1.9배였으며, 북한의 감자 주산지인 양강도에서는 Est_L 값이 Est_H 값의 2.6배였다. Est_L 값은 도별로

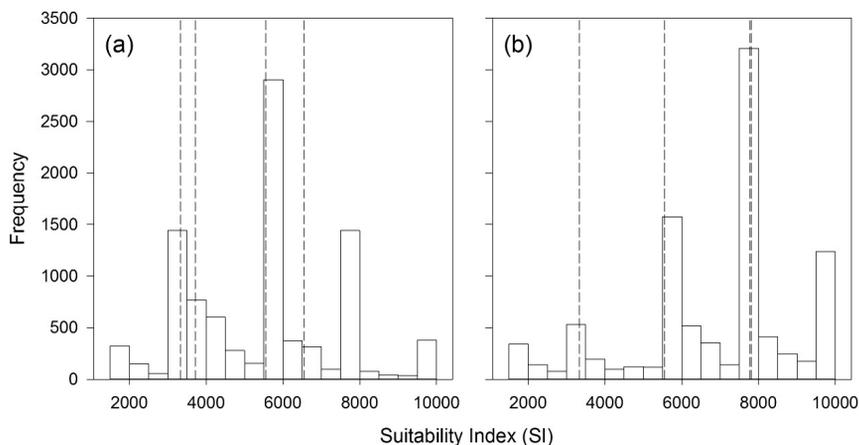


Fig. 4. Histogram of climate suitability index for potatoes derived under (a) low and (b) high input management conditions using the GAEZ model. Dashed lines represent cumulative probability density at 10, 25, 50, and 75% percentiles, respectively.

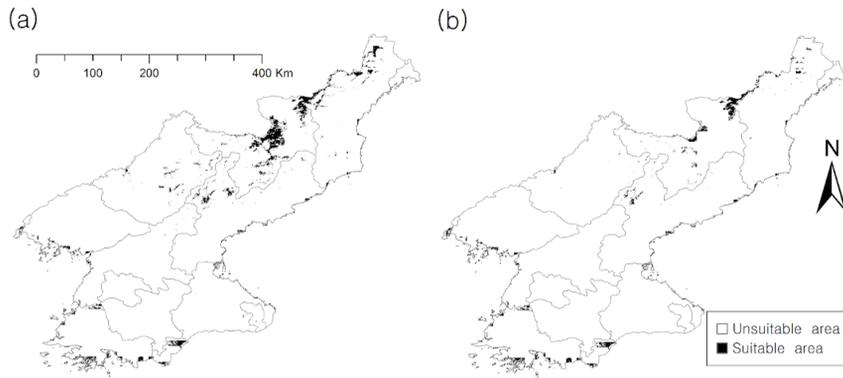


Fig. 5. Suitable areas of potato under (a) low and (b) high input management conditions in North Korea. No rice was assumed to be grown in these areas.

뚜렷한 차이가 나타났으나, Est_H 값은 상대적으로 균일한 분포를 보였다.

재배적지의 도별 면적 비율과 보고된 재배면적 비율 사이의 차이는 재배조건에 따라 다른 양상을 보였다(Fig. 6). 투입수준이 낮은 조건에서 계산된 RA_L 값은 보고된 재배면적 비율인 RA_0 값과 유사하였다. 예를 들어, RA_0 값이 57%이었던 양강도의 경우, RA_L 과 RA_H 값이 각각 48.8%와 32.1%이었다. 두 번째로 재배면적 비율이 높았던 함경도에서도 RA_L 값(27.6%)은 RA_H 값(26.1%)에 비해 RA_0 값과 차이가 적었다. 다른 지역에서도 재배조건에 따라 이러한 경향이 나타났다. 예를 들어, 자강도에서는 RA_0 값에 비해 RA_L 값이 작았으나 (3.9%), RA_H 값은 이보다 더 작은 값(0.0%)이 얻어졌

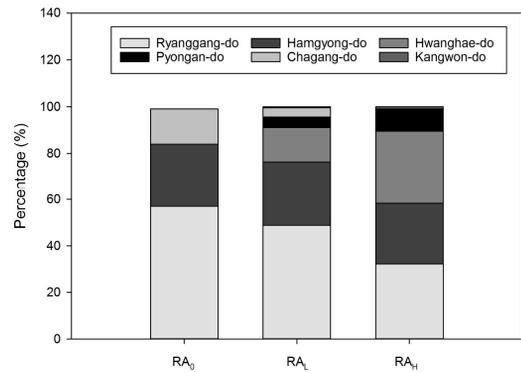


Fig. 6. Percentage of cultivated (RA_0) and suitable area of potato under low (RA_L) and high (RA_H) input management conditions by province in North Korea.

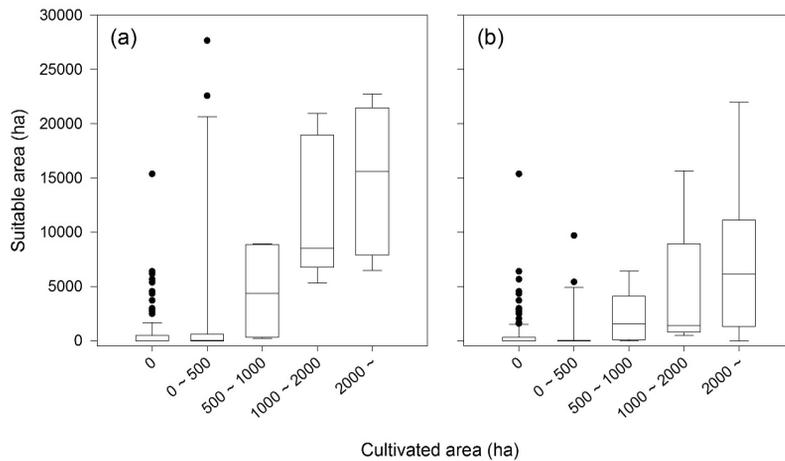


Fig. 7. The distribution of suitable area for potato production by county under (a) low input and (b) high input management conditions.

다. 황해도에서는 RA_L 와 RA_H 값이 각각 14.9% 및 31.3%로 추정되어 저투입 조건에서 RA_0 값과 상대적으로 유사한 값이 얻어졌다.

시군 단위로 구분된 감자 재배적지 면적의 분포를 확인한 결과, 투입수준이 낮을 때의 재배적지 면적 규모가 보고된 재배 면적 규모와 일치하는 경향이 있었다(Fig. 7). Est_L 값은 대개 보고된 재배면적 보다 7-10 배 수준이었으나, 시군별 재배규모가 클 수록 재배적지의 면적 추정값 역시 큰 것으로 나타났다. 반면, 투입수준이 높을 때는 감자 재배규모가 2,000 ha 미만인 지역에서는 시군별 재배적지 면적의 규모 차이가 크지 않았고, 2,000 ha 이상인 지역에서만 뚜렷한 차이가 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 GAEZ 모형을 활용하여 북한의 감자 재배적지 분포를 신뢰도 높게 추정할 수 있음을 보여주었다. GAEZ 모형은 작부체계를 고려하지 않고, 기후가 최적인 시기의 적합도 자료를 제공한다. 벼의 앞그루로 이모작하여 재배되는 봄감자와 달리, 여름감자는 뒷그루로 재배되는 작물의 파종기를 고려하지 않고 재배될 수 있어 적합도가 최고인 시점에서 재배될 개연성이 높다. 본 연구에서도 낮은 투입수준에서 추정된 재배적지 비율이 행정구역별 여름감자 재배면적 비율과 유사한 경향을 보였다.

GAEZ 모형을 활용하여 북한의 낮은 농자재 투입수준을 반영한 재배적합도 예측이 가능함을 보여주었다. 관개시설이 부족하고 비료의 생산이 충분하지 않은 지역과 이들이 원활한 지역을 구분한 적합도 예측을 위해 재배관리 수준이 입력값으로 사용되어야 한다. GAEZ를 사용하여 투입수준에 따라 계산된 감자의 기후적합도 지수는 재배지에 따라 상당한 차이를 보였다. 전 세계를 대상으로 감자 재배적지의 투입수준에 따른 기후적합도 지수 분포를 확인한 결과, 투입수준이 낮은 조건 보다는 높은 조건에서 상대적으로 높은 기후적합도 값이 얻어졌다. 반면, 북한에서는 투입수준이 낮은 조건에서 높은 조건보다 적지 면적이 2배 가량 넓었으며 적지의 행정구역별 면적비율이 실제 보고된 것과 유사하였다. 이는 북한 지역에서 고투입 농업을 하기 어려운 상황이 반영되어 적합도가 계산되었기 때문으로 보인다.

재배적지를 파악하기 위해 기후적합도 지수의 임계

값을 설정하여 적합도가 높은 지역을 구분하는 것이 유리하다. 이러한 방식으로 지역별 재배면적 비율을 계산할 경우, 현재의 재배면적과 비교하여 추후 감자 재배지를 확대할 수 있는 공간적 범위를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 GBIF 데이터베이스에 수록된 감자 재배지점의 90%가 포함되도록 임계값을 설정하여 북한의 실제 감자 재배와 유사한 재배적지 분포를 추정하였다. 특히, 적합도 값이 0으로 계산된 작물 재배지점들을 제외하여 격자형 기상자료에 의해 발생할 수 있는 불확도의 영향을 최소화하였다. Estes *et al.*(2013)은 생산성이 높은 지역에서 경험적으로 얻어진 기후적합도값이 지점별 생산성의 변이를 높은 수준으로 설명하였음을 보고하였다. 이는 작물의 생물리학적 생육양상을 반영할 수 있는 GAEZ 모형의 경우 상대적으로 높은 적합도값을 가진 지역의 경우, 생산성 전망이 수반된 적지 판정이 가능함을 시사한다.

GAEZ 모형의 출력자료는 5 arc-min의 비교적 낮은 공간해상도를 가지고 있어 현실적인 정책 수립을 지원하는 것에 한계가 있다. 행정구역별로 재배 적지를 탐색하기 위해 고해상도에서 적합도 지수를 산출하는 것이 의사결정에 효과적이다. 북한 여름감자 재배면적은 2019년 기준으로 450 km²에 불과한 것으로 보고되었으며(FAO and WFP, 2019), 이는 산술적으로 5 arc-min 공간해상도에서 단 5개의 격자에 포함될 수 있는 면적이다. Fick *et al.*(2017)은 전구를 대상으로 생산된 격자형 기후자료인 WorldClim 자료를 보고하였다. 특히, WorldClim 자료는 30 arc-sec 해상도를 가지고 있어 북한과 같이 지형이 복잡한 지역에 적용 가능하다. 다만, GAEZ 모형은 WorldClim 자료에 포함되지 않은 운량과 강우빈도(wet day frequency) 등을 요구하기 때문에 이러한 자료를 GAEZ 모형의 입력자료로 사용하기 어렵다.

작물의 기후적 적합도를 평가하기 위해 특정 생물종의 서식지 적합도를 분석하는 종분포모형이 GAEZ 모형을 대신하여 사용될 수 있다(Qin *et al.*, 2015). 종분포모형은 생물 개체가 발견된 지역에서 나타나는 공통적인 환경 특성을 분석하여 종의 공간적 분포를 추정한다(Ray *et al.*, 2018). GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production)와 MaxEnt (Maximum Entropy Model)와 같은 경험적인 분석방식들이 종분포모형을 개발하기 위해 사용되어 왔다(Chhogyel *et al.*, 2020; Kogo *et al.*, 2019; Dang *et al.*, 2020). 특히, 종분포모형으로 추정된 기후적합도 지수를 활용하여 작물들을

대상으로 재배적지 탐색을 위한 연구가 진행되어 왔다 (Kang *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Ramirez-Villegas *et al.*, 2013). 예를 들어, Evans *et al.*(2010)은 MaxEnt 모델로 예측한 기후적합도와 생산량의 상관 계수가 0.7 이상으로 높은 상관관계를 가졌음을 보고 하였다. Khalil *et al.*(2021)은 MaxEnt 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 작물의 적합지 면적변화를 분석하였다. 본 연구에서는 GAEZ 모형으로 예측한 적합도 지수만을 분석하였으나, 이러한 기후적합도 모형들을 사용하여 얻어진 적합도 지수들을 비교하고 모형들의 불확도를 줄여나가기 위한 기법들이 개발되어야 할 것이다.

고해상도 기후 예측자료를 기후적합도 모형의 입력 자료로 사용하여 현재뿐만 아니라 미래 기간까지 작물의 재배적합도를 평가하기 위해 사용될 수 있다. GAEZ Data Portal을 통해 기후변화 시나리오 조건 (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따른 미래(2011~2040, 2041~2070, 2071~2100) 기후적합도 자료가 제공되고 있다. 본 연구에서는 GAEZ 모형을 사용하여 현재기간을 대상으로 예측한 적합도 지수만을 분석했으나, 미래 조건에서의 적합도 지수의 변화가 추가적으로 분석되어야 할 것이다. 현재 기후조건에서 추정된 재배적지의 공간적 분포에 대한 신뢰도를 검증하고 미래 조건에서 감자 재배적지를 전망한다면, 남북한의 교류가 활성화되는 시점에 기후변화 조건을 반영한 식량 증산 대책 수립을 지원할 수 있다.

초고해상도 기후자료를 북한 지역에서 생산하여 농가 단위의 재배적지 분석이 필요하다. 남한에서는 농촌진흥청에서 40개의 시군을 대상으로 농업기상재해 조기경보서비스를 시범운영하고 있다(<https://agmet.kr/>). 일정 지역 내에서 고도나 지형에 따라 기상조건의 변화가 크기 때문에 본 연구에서 얻어진 결과보다 필지 단위별 기상자료를 활용하여 생산된 기상 위험 정보가 개별 농가에 유용하다(Shim *et al.*, 2017). 조기경보시스템에는 30 m 단위로 생산된 초고해상도의 격자형 기상자료가 제공되고 있으며 무인기상관측망을 통해 검증이 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 2020a). 특히, 작물의 재배적합도를 필지별로 분석하기 위해 조기경보시스템에서 제공되는 기상자료가 사용될 수 있다. 남한 일부 지역을 대상으로 서비스가 제공되는 조기경보시스템이 북한 지역으로 확대된다면 농가 단위의 기후적합도를 분석하여 효과적인 작부체계를 구성하고 이를 통해 식량안보를 향상시킬 것으로 기대된다. 특히,

재배적합도 분석을 통해 가을밀, 가을보리, 봄보리, 완두, 봄감자 등 논앞그루 작물들의 생산성과 벼 생산성을 동시에 높일 수 있는 작부체계를 설계하여 북한의 식량 문제를 완화시킬 수 있을 것이다.

적 요

북한의 식량 안보 위기를 개선하기 위해 농자재와 관개시설의 요구도가 적은 감자 재배 면적을 확대하는 것이 유리하다. 특히, 저투입 조건에서 감자의 생산성을 높일 수 있는 적지를 공간적으로 파악하기 위해 재배 조건과 기후적합도를 동시에 평가할 수 있는 Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 모형을 사용하였다. 본 연구에서는 Global Biodiversity Information Facility (GBIF) 데이터베이스에 수록된 감자 위치 자료를 사용하여 10 km 공간해상도를 가진 GAEZ 모형의 적합도 추정값의 분포를 분석하였다. 그 결과 중간 정도에 해당하는 적합도 값인 3,333 이상에서 적합도가 0인 지점을 제외한 감자 위치 지점의 90%가 포함되었다. MODIS-IGBP 토지이용자료와 GAEZ Data Portal에서 제공하는 벼 수량 자료를 사용하여 추정된 감자 재배 후보 지역 중에서 적합도가 임계값 이상을 가진 재배적지를 구분한 결과 저투입 조건에서 추정된 재배적지는 실제 북한의 감자 재배지 공간 분포와 유사한 경향이 있었다. 특히, 군 단위의 재배 면적과 재배적지 면적을 비교하여, 재배규모가 큰 지역에서 재배적지의 면적도 넓은 경향을 보임을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 적합도의 임계값을 바탕으로 미래 기후조건에서 추정된 값에 적용하여, 기후변화에 따른 재배지 변동 연구에 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 여러 작물의 기후적합도를 함께 고려하여 작부체계를 구성한다면 전반적인 작물 생산성을 높일 수 있을 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ015045032022)의 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 자료 정리에 도움을 준 신다연 학사과정 학생에게 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ban, H. Y., D. H. Choi, J. B. Ahn, and B. W. Lee, 2017: Predicting regional soybean yield using crop growth simulation model. *Korean Journal of Remote Sensing* **33**(5_2), 699-708.
- Chhogyel, N., L. Kumar, Y. Bajgai, and L. S. Jayasinghe, 2020: Prediction of Bhutan's ecological distribution of rice (*Oryza sativa* L.) under the impact of climate change through maximum entropy modelling. *The Journal of Agricultural Science* **158**(1-2), 25-37.
- Dang, A. T., L. Kumar, and M. Reid, 2020: Modelling the potential impacts of climate change on rice cultivation in Mekong Delta, Vietnam. *Sustainability* **12**(22), 9608.
- Doane, D. P., and L. E. Seward, 2011: Measuring skewness: a forgotten statistic? *Journal of statistics education* **19**(2).
- Estes, L., B. Bradley, H. Beukes, D. Hole, M. Lau, M. Oppenheimer, R. Schulze, M. Tadross, and W. Turner, 2013: Comparing mechanistic and empirical model projections of crop suitability and productivity: implications for ecological forecasting. *Global Ecology and Biogeography* **22**(8), 1007-1018.
- Evans, J. M., R. J. Fletcher Jr, and J. Alavalapati, 2010: Using species distribution models to identify suitable areas for biofuel feedstock production. *Gcb Bioenergy* **2**(2), 63-78.
- FAO and WFP, 2013: FAO/WFP Crop And Food Security Assessment Mission to the Democratic People's Republic of Korea. FAO/WFP Bangkok, Thailand.
- FAO and WFP, 2019: FAO/WFP Joint Rapid Food Security Assessment, Democratic People's Republic of Korea. FAO/WFP Bangkok, Thailand.
- Fick, S. E., and R. J. Hijmans, 2017: WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* **37**(12), 4302-4315.
- Fischer, G., F. Nachtergaele, H. Van Velthuizen, F. Chiozza, G. Franceschini, M. Henry, D. Muchoney, and S. Tramberend, 2021: *Global Agro-Ecological Zones v4-Model documentation*, Food & Agriculture Org.
- Gorokhovich, Y., and A. Voustianouk, 2006: Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment* **104**(4), 409-415.
- Han, S. H., and K. H. Kim, 2017: A Study on Livestock and Fisheries Products of North Korea represented in 『New Year's Address』: from 2013 through 2017. *THE JOURNAL OF PEACE STUDIES* **18**(1), 109-130.
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister, 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* **34**(3), 623-642.
- Hijmans, R. J., L. Guarino, M. Cruz and E. Rojas, 2001: Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 15-19.
- Hyun, S. and K. S. Kim, 2017: R Based Parallelization of a Climate Suitability Model to Predict Suitable Area of Maize in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **19**(3), 164-173.
- Kang, W., J. Kim, C. R. Park and J. H. Sung, 2014: Comparing connectivity in forest networks of seven metropolitan cities of South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(2), 93-102.
- KBA Standards and Appeals Committee, 2019: Guidelines for using a Global Standard for the Identification of Key Biodiversity Areas. IUCN Gland, Switzerland.
- Khalil, T., S. A. Asad, N. Khubaib, A. Baig, S. Atif, M. Umar, J. P. Kropp, P. Pradhan and S. Baig, 2021: Climate change and potential distribution of potato (*Solanum tuberosum*) crop cultivation in Pakistan using Maxent. *AIMS Agriculture and Food* **6**(2), 663-676.
- Kim, D. J., J. H. Park, S. O. Kim, J. H. Kim, Y. Kim, and K. M. Shim, 2020a: A system displaying real-time meteorological data obtained from the automated observation network for verifying the early warning system for agrometeorological hazard. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 117-127.
- Kim, G., 2020: Cooperation plan between South-North Korea in the water environment sector. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater* **34**(1), 23-33.
- Kim, H., S. W. Hyun, G. Hoogenboom, C. H. Porter, and K. S. Kim, 2018a: Fuzzy union to assess climate suitability of annual ryegrass (*Lolium multiflorum*), alfalfa (*Medicago sativa*)

- and sorghum (*Sorghum bicolor*). *Scientific Reports* **8**(1), 10220.
- Kim, J., C. K. Lee, J. Shon, K. J. Choi, and Y. Yoon, 2012: Comparison of statistic methods for evaluating crop model performance. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(4), 269-276.
- Kim, K. S., S. O. Kim, J. H. Kim, K. H. Moon, J. H. Shin, and J. Cho, 2018b: Development and application of crop models in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(2), 145-148.
- Kim, S. Y., J. G. Kim, and D. C. Chang, 2019: Production techniques of seed potatoes by the hydroponics of Korea provided to North Korea. *Journal of Northern Agriculture Research* **42**(1), 35-49.
- Kim, S. Y., J. K. Kim, and J. H. Cho, 2015: Potato industry status, problems and development plan in North Korea. *Journal of Northern Agriculture Research* **38**(1), 72-84.
- Kim, Y., and C. Lim, 2019: The food supply and demand of North Korea and food assistance. *KREI Quarterly Agricultural Trends in North Korea* **21**(1), 3-16.
- Kim, Y. U., B. W. Lee, S. Heu, K. B. Shim, and D. S. Kim, 2020b: Potato yield gaps in North Korea and strategies to close the gaps. *Agronomy* **10**(10), 1605.
- Kogo, B. K., L. Kumar, R. Koech, and C. S. Kariyawasam, 2019: Modelling climate suitability for rainfed Maize cultivation in Kenya using a Maximum Entropy (MaxENT) approach. *Agronomy* **9**(11), 727.
- Latham, J., R. Cumani, I. Rosati, and M. Bloise, 2014: Global land cover share (GLC-SHARE) database beta-release version 1.0-2014. *FAO: Rome, Italy* **29**.
- Lehner, B., and P. Döll, 2004: Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of hydrology* **296**(1-4), 1-22.
- Loveland, T. R., and A. S. Belward, 1997: The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: first results. *International Journal of Remote Sensing* **18**(15), 3289-3295.
- Nachtergaele, F. O., H. V. Velthuisen, D. Wiberg, N. H. Batjes, J. A. Dijkshoorn, V. W. P. v. Engelen, G. Fischer, A. Jones, L. Montanarella, M. Petri, S. Prieler, E. Teixeira, and X. Shi, 2014: Harmonized World Soil Database (HWSD). ISRIC - World Soil Information.
- Oh, S. H., and S. W. Nam, 2021: Improvement plan on North Korea's water management system and Inter-Korean water resource cooperation. *Legislation and Policy Studies* **13**(2), 59-92.
- Ojeda, J. J., E. E. Rezaei, T. A. Remenyi, M. A. Webb, H. A. Webber, B. Kamali, R. M. Harris, J. N. Brown, D. B. Kidd, and C. L. Mohammed, 2020: Effects of soil-and climate data aggregation on simulated potato yield and irrigation water requirement. *Science of the Total Environment* **710**, 135589.
- Park, S. Y., B. J. Kim, and S. H. Ahn, 2010: Characteristics of natural disaster in North Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* **10**(3), 21-29.
- Park, Y. H., and S. Y. Cho, 2018: Importance of chemical fertilizer for food self-sufficiency in North Korea. *Journal of Northern Agriculture Research* **41**(1), 107-132.
- Qin, Z., J. E. Zhang, A. DiTommaso, R. L. Wang, and R. S. Wu, 2015: Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with Maxent and GARP models. *Journal of Plant Research* **128**(5), 763-775.
- Ramirez-Villegas, J., A. Jarvis, and P. Läderach, 2013: Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology* **170**, 67-78.
- Ray, D., M. D. Behera, and J. Jacob, 2018: Evaluating ecological niche models: A comparison between Maxent and GARP for predicting distribution of *Hevea brasiliensis* in India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* **88**(4), 1337-1343.
- Rhie, J. H., K. S. Lee, I. H. Seo, S. W. Min, and D. Y. Chung, 2017: Assessing the Limits of Agricultural Situation for the Food Security in North Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **50**(4), 275-284.
- Schneider, U., A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, and M. Ziese, 2011: GPCC full data reanalysis version 6.0 at 0.5: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historic data. *GPCC Data Rep.*, doi **10**.
- Shim, K. M., H. K. Jeong, Y. A. Lim, Y. S. Shin, Y. S. Kim, I. t. Choi, M. P. Jung, and H. Kim, 2017: Cost-benefit analysis of a farmstead-specific early warning service for agrometeorological disaster risk management. *Korean Journal of*

- Agricultural and Forest Meteorology* **19**(3), 195-202.
- Siebert, S., V. Henrich, K. Frenken, and J. Burke, 2013: Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. *Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy*.
- Smith, H., 2020: The ethics of United Nations sanctions on North Korea: effectiveness, necessity and proportionality. *Critical Asian Studies* **52**(2), 182-203.
- UNEP-WCMC, 2019: User Manual for the World Database on Protected Areas and world database on other effective area-based conservation measures: 1.6. UNEP-WCMC Cambridge, UK.
- USDA, 2020: DPRK Food Grains Situation Update in MY 2018-19. USDA.
- Yoo, B. H., K. S. Kim, and H. Y. Ban, 2018: Development of a gridded crop growth simulation system for the DSSAT model using script languages. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(3), 243-251.
- Yoon, M., 2020: A Study on the Development Process and Characteristics of North Korean Organic Agriculture. *North Korean Studies Review* **24**(1), 207-238.
- Zhang, J., Y. Su, J. Wu, and H. Liang, 2015: GIS based land suitability assessment for tobacco production using AHP and fuzzy set in Shandong province of China. *Computers and Electronics in Agriculture* **114**, 202-211.