

격자형 한반도 최저극값온도 예측 및 Proto3를 활용한 별나팔꽃 (*Ipomoea triloba*)의 서식적합지 예측

이용호, 최태양, 이가은, 나채선¹, 홍선희, 이도훈², 오영주^{3,*}

국립한경대학교 식물생명환경과학과, ¹국립백두대간수목원 종자보전연구실, ²국립생태원, ³(주)미래환경생태연구소

Estimation of mean annual extreme minimum temperature raster and predicting the potential distribution for *Ipomoea triloba* using Proto3 model in the Korean peninsula

Yong Ho Lee, Tae Yang Choi, Ga Eun Lee, Chea Sun Na¹, Sun Hee Hong, Do-Hun Lee² and Young Ju Oh^{3,*}

Department of Plant & Environmental Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

¹Seed Conservation Division, Baekdudaegan National Arboretum, Bonghwa 35208, Republic of Korea

²Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

³Institute for Future Environmental Ecology Co., Ltd, Jeonju 54883, Republic of Korea

*Corresponding author

Young Ju Oh

Tel. 063-211-7122

E-mail. cave50joo@gmail.com

Received: 9 December 2019

Revised: 19 December 2019

Revision accepted: 20 December 2019

Abstract: This study was conducted to estimate the mean annual extreme minimum temperature raster and predict the potential distribution of the invasive plant, *Ipomoea triloba*, on the Korean peninsula. We collected annual extreme minimum temperature and mean coldest month minimum temperature data from 129 weather stations on the Korean peninsula from 1990–2019 and used this data to create a linear regression model. The min temperature of the coldest month raster from Worldclim V2 were used to estimate a 30 second spatial resolution, mean annual extreme minimum temperature raster of the Korean peninsula using a regression model. We created three climatic rasters of the Korean peninsula for use with the Proto3 species distribution model and input the estimated mean annual extreme minimum temperature raster, a Köppen-Geiger climate class raster from Beck *et al.* (2018), and we also used the mean annual precipitation from Worldclim V2. The potential distribution of *I. triloba* was estimated using the Proto3 model with 117 occurrence points. As a result, the estimated area for a potential distribution of *I. triloba* was found to be 50.7% (111,969 km²) of the Korean peninsula.

Keywords: Invasive plant, Proto3, *Ipomoea triloba*, Annual extreme minimum temperature, Risk assessment

서 론

외래식물의 도입 및 정착, 확산은 생물다양성 감소, 농업 피해, 인축에 대한 보건적 피해 등 경제·사회적 손실을 발생시킬 수 있다(CBD 2009). 물자이동, 인간의 활동 등은 외래식물의 유입 및 확산을 촉진하고 있으며, 기후변화, 환경 파괴 등 환경변화로 인한 생태계 교란은 외래식물의 정착 가능지역을 증가시키고 있다. 이에 그 피해와 대책에 대한 다양한 연구들이 보고되고 있다(Pimentel *et al.* 2000; Pimentel 2002).

도입 이전 또는 확산 이전에 정착과 확산이 예상되는 서식 적합지에 대한 정확한 예측은 외래식물의 관리에 매우 중요하다(Beaumont *et al.* 2014; Qin *et al.* 2014). 이를 위하여 다양한 종분포모형(species distribution model; SDM)이 개발되었으며, The Global Biodiversity Information Facility와 같은 전 세계적인 정보 습득 및 통합 체계의 개발로 인한 종 정보와 분포자료의 양과 질의 증가, 기후모형의 발달로 인한 정밀한 격자형 기후, 토양 정보와 같은 환경인자 정보의 구축으로 인하여 다양한 외래식물에 대한 서식 적합지 예측에 대한 연구가 보고되었다(Guisan and Thuiller 2005; Elith and Leathwick 2009; Smolik *et al.* 2010; Terera and Wood 2014; GBIF 2019).

외래식물 위해성 평가는 증거들에 기반하여 외래식물의 도입, 정착, 확산, 피해 등을 예측 평가하기 위한 체계화된 과정이다. 미국, 호주, 유럽 등 많은 나라에서 정부 주도 하에 위해성 평가를 수행하고 있다(IPPC 2009). 대한민국도 국립생태원과 국립검역소에서 관련 업무를 수행하고 있으며(지정검역물의 수입위험평가 세부지침 2016, 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률 시행규칙 2019), Proto3 모형은 식물의 정착과 확산에 적합한 서식지역을 탐색하기 위한 간단한 GIS 중첩 기법에 기반한 모형으로 미국의 USDA, Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS), Plant Protection and Quarantine (PPQ)의 Weed Risk Assessment에서 Geographic potential 예측에 활용되고 있다(USDA-APHIS-PPQ 2016).

종분포모형 중 기계학습 기반의 MaxEnt (Phillips and Dudik 2008; Elith *et al.* 2011)와 기후연관 방식의 CLIMEX (Sutherst *et al.* 1999)는 외래 동식물의 종분포를 예측하기 위하여 광범위하게 사용되고 있는 모형이다. 복잡한 모형들은 간단한 종분포모형보다 정확한 예측 결과를 제공

하나(Elith *et al.* 2006) 간단한 모형이 외래식물 위해성 평가에 적합한 결과를 제공한다는 보고가 있었다(Jiménez-Valverde *et al.* 2011).

나팔꽃속(Genus *Ipomoea*) 식물은 메꽃과의 가장 큰 속으로 가장 중요한 식량작물인 고구마(*Ipomoea batatas*)를 포함하여 전 세계적으로 500여 종이 분포하고 있으며 국내 분포하고 있는 나팔꽃속 식물은 모두 외래식물이며 주요 발잡초로 분류된다(Kim *et al.* 2016). 별나팔꽃(*Ipomoea triloba*)은 열대 아메리카 원산으로 전국의 농경지, 농경지 주변, 하천변, 나출지, 도로변 등에 분포하고 있다. 별나팔꽃은 일년생 초본으로 덩굴성이며 꽃은 7~9월에 피고 취산 화서가 달리는 특징이 있다(Park 2009).

다양한 종 모형의 하모니 모형을 활용하여 모형들이 지닌 약점을 상쇄하고, 확산 예측에 대한 정확도를 향상시키기 위한 시도 등 종분포모형을 활용한 식물 종의 분포를 예측하기 위한 다양한 연구들이 보고되었다(Phillips *et al.* 2006; Youngah *et al.* 2011). 국내에서는 MaxEnt를 활용하여 희귀 특산, 자생 식물의 기후 변화에 의한 서식지 축소 가능성에 대하여 잣나무, 눈잣나무, 신갈나무, 소나무, 미선나무와 같은 목본류와 초본류인 모데미풀의 잠재서식지 등이 보고되었다(Lee *et al.* 2011, 2012; Chun and Lee 2013; Lee *et al.* 2014; Park *et al.* 2014; Choi *et al.* 2015). 외래식물은 현재 또는 기후변화 등과 연관된 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 물참새피, 실망초, 청비름, 가는털비름의 잠재 서식지 및 확산 예측이 보고되었다(Lee *et al.* 2015, 2016a, b, 2018), Lee *et al.* (2018)은 종분포모형과 외래식물이 피해를 입힐 수 있는 지역을 결합하여 위험도 평가를 보고하기도 하였다. 하지만 Proto 3를 활용한 연구는 보고된 바 없다.

본 연구는 식물 정착 적합지 예측 모형인 Proto3를 수행하기 위하여 3가지 기후인자로서 식물 내한성 구역 지도, 쾨펜-가이거 기후구 지도, 평균 연누적강수량 구분대 지도를 한반도 크기로 개발하고, 이를 활용하여 국내 유입되어 분포하고 있는 별나팔꽃의 현재 분포를 기반으로 정착 적합지를 예측하는 것을 목표로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 격자형 한반도 최저극값온도 예측

격자형 한반도 최저극값온도를 예측, 제작하기 위하여

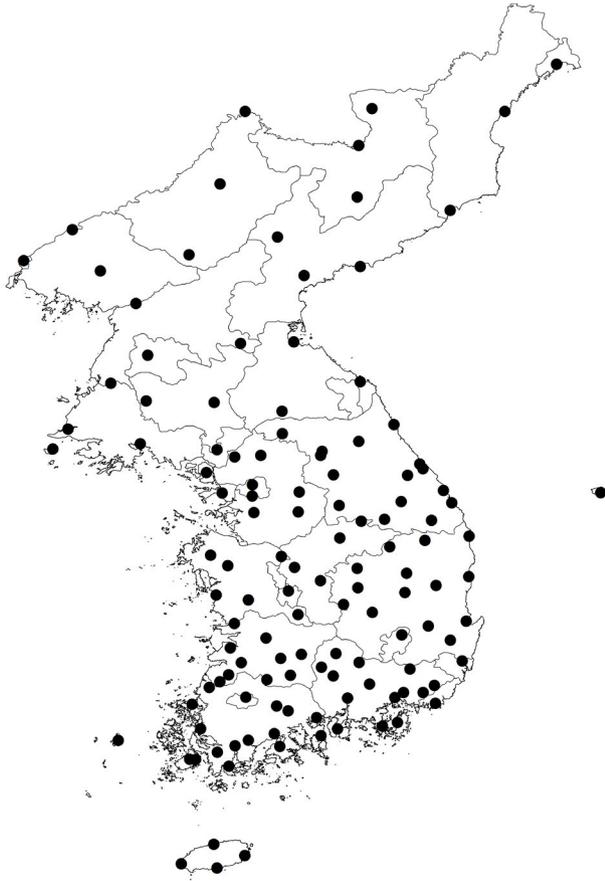


Fig. 1. Locations of weather stations for estimation of mean annual extreme minimum temperature of the Korean peninsula.

Daly *et al.* (2012)의 방법을 활용하였다. 기상청의 기상자료개방포털에서 남한과 북한의 129지점의 기상대로부터 1990년부터 2019년까지의 30년 동안의 최저온도에 대한 일자료를 제공받아서 기상대별 최저극값온도를 분석하였다(Fig. 1). 분석된 평균 최저극값온도는 각 지점별 가장 추운 달의 최저온도의 30년 평균과 회귀분석을 수행하여 선형 회귀 모형을 구축하였다. 한반도 가장 추운 달의 최저온도에 대한 정밀 지도는 WorldClim Version2의 Bioclimatic variables 중 Bio6 (Min Temperature of Coldest Month)를 활용하였다. 이후 한반도 가장 추운 달의 최저온도에 대한 격자 정보에 한반도 기상정보에 기반하여 구축한 회귀모형을 곱하여 한반도 최저극값온도 격자를 제작하였다.

2. 한반도 Proto3 모형 기후 인자 구축

Proto3 모형은 3가지의 기후 인자 1. 내한성 구역(Plant

hardiness zones), 2. 쾨펜-가이거 기후구(Köppen-Geiger climate classes), 3. 평균누적강수량 영역(10-inch mean annual precipitation bands)을 사용한다(Table 1). 미국 USDA-APHIS PPQ는 Proto3 모형에 활용되는 기후인자를 10 km 정밀도로 30년 평균의 세계 지도를 기후 정보 회사(ZedX inc., Bellefonte, USA)의 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)로부터 확보하여 활용하고 있다(Magarey *et al.* 2018).

본 연구에서는 한반도 지역 1 km 해상도로 30년 평균의 기후 정밀 지도를 구축하기 위하여 기후모형 WorldClim Version2을 활용하였다(Fick and Hijmans 2017). WorldClim Version2는 1970~2000년까지의 전 세계 9000~60000개의 기상대 데이터와 고도, 바다와의 거리, MODIS 인공위성 플랫폼의 공변량을 결합시켜서 제작된 모형으로 무료로 배포되어 많은 연구에 활용되고 있으며, 온도는 0.99 이상, 강수량은 0.86의 교차검증 상관관을 보이는 정확한 기후모형이다.

Proto3에서 활용하는 평균누적강수량 영역 지도는 10인치 간격의 누적강수량으로 구분한 USDA의 Precipitation 등급에 기반하여 작성되었다. 하지만 USDA 지도의 13개의 등급과 달리 Proto3 모형은 가장 높은 강수량의 3개 등급을 1개로 합쳐서 총 11개의 등급으로 수행된다. 한반도 평균누적강수량 영역 지도는 Proto3 모형에 맞추어 WorldClim Version2 연누적강수량 지도에서 한반도 영역을 추출하여 등급을 나누어 작성하였다.

미국 USDA-APHIS PPQ Weed Risk Assessment에서 활용하는 쾨펜-가이거 기후구 지도는 Peel *et al.* (2007)이 제작한 격자 지도를 활용하고 있으나 본 연구에서는 Beck *et al.* (2018)이 제작한 쾨펜-가이거 기후구 지도를 활용하였다. Beck *et al.* (2018) 지도는 기후모형 WorldClim V1 and V2, CHELSA V1.2, CHPclim V1의 데이터를 통합하여 제작한 1 km 해상도의 기후구 지도로 Peel *et al.* (2007)의 쾨펜-가이거 기후구 등급을 활용하였다. 미국 USDA-APHIS PPQ Weed Risk Assessment의 Proto3 모형은 12개의 등급으로 기후구 등급을 구분하여 활용하고 있으나, 12개 기후구 등급을 적용 시 한반도는 5개의 등급이 존재하며, 그중 Humid continental warm summers 등급이 전 국토의 62%를 차지하여, 식물 정착 확산 모델에 적용하기에는 분별력이 떨어진다고 판단하여 Beck *et al.* (2018)이 제시한 30개의 기후구 등급을 적용하였다.

Table 1. Classes and definitions of three climatic variables for Proto3 model in this study

Plant hardiness zones/Extreme minimum temperature			
Zone1	-51.1 - -45.6°C	Zone8	-12.2 - -6.7°C
Zone2	-45.6 - -40°C	Zone9	-6.7 - -1.1°C
Zone3	-40.0 - -34.4°C	Zone10	-1.1 - 4.4°C
Zone4	-34.4 - -28.9°C	Zone11	4.4 - 10°C
Zone5	-28.9 - -23.3°C	Zone12	10.0 - 15.6°C
Zone6	-23.3 - -17.8°C	Zone13	15.6 - 21.1°C
Zone7	-17.8 - -12.2°C		
Köppen-Geiger climate classes/Definition*			
Tropical rainforest (Tr)/Af, Am		Marine west coast (Mwc) / Cwb, Cwc, Cfb, Cfc	
Tropical savanna (Ts)/Aw		Humid continental warm summers (Hcws)/Dsa, Dwa, Dfa	
Steppe (St) / Bsh, Bsk		Humid continental cool summers (Hccs)/Dsb, Dwb, Dfb	
Desert (De) / Bwh, Bwk		Subarctic (Su)/Dsc, Dsd, Dwc, Dwd, Dfc, Dfd	
Mediterranean (Me)/Csa, Csb, Csc		Tundra (Tu)/ET	
Humid subtropical (Hs)/Cwa, Cfa		Icecap (Ic)/EF	
Mean annual precipitation bands/cm			
0 - 10 inches	0 - 25 cm	60 - 70 inches	152 - 178 cm
10 - 20 inches	21 - 51 cm	70 - 80 inches	178 - 203 cm
20 - 30 inches	51 - 76 cm	80 - 90 inches	203 - 229 cm
30 - 40 inches	76 - 102 cm	90 - 100 inches	229 - 254 cm
40 - 50 inches	102 - 127 cm	100+ inches	254+ cm
50 - 60 inches	127 - 178 cm		

*aggregated from Beck *et al.* (2018)

미국 USDA-APHIS PPQ Weed Risk Assessment의 Proto3의 내한성 구역은 USDA의 내한성 구역 등급의 1a부터 13b까지의 총 26등급을 13등급으로 단순화하여 활용하고 있다. 일반적으로 내한성등급은 연평균최저온도에 기반하여 개발되어 원예 분야에서 광범위하게 활용하고 있으나, Daly *et al.* (2012)는 새로운 USDA 식물 내한성 등급 지도를 최저기온극값에 기반하여 제작하였으며 미국 USDA-APHIS PPQ 또한 그 지도를 활용하고 있다. 하지만 WorldClim Version2에는 최저기온극값에 대한 격자 정보가 존재하지 않았다. 본 연구에서는 한반도 최저기온극값에 대한 정밀 지도를 제작하고 이를 이용하여 USDA 등급에 기반한 내한성 구역 지도를 제작, 활용하였다. 제작된 한반도 최저기온극값 지도는 USDA 등급 체계로 변환하여 한반도 식물 내한성 구역 지도를 개발하였다.

3. 별나팔꽃 위치자료 수집

별나팔꽃의 분포자료는 직접 현지 조사를 통한 자료와 기존에 발표된 자료를 통합하여 사용하였다. 현지조사는 2017년부터 2019년까지 전국을 대상으로 수행하였으며 조사지의 GPS 좌표를 기록하였다. 기존의 자료는 국립농

업과학원의 외래식물 분포자료(미발표)와 전국 외래식물 전국 서식실태조사(Song *et al.* 2018)에서 제공하는 표본자료를 참고하여 발생 위치 자료를 구축하였다.

4. Proto3 모형을 활용한 별나팔꽃의 정착 확산 가능 지역 예측

제작된 한반도 식물 내한성 구역 지도, 쾨펜-가이거 기후구 지도, 평균누적강수량 영역 지도는 외래식물 별나팔꽃의 정착 확산 가능 서식지역 예측을 위해 Proto3 모형에 활용되었다. 본 연구에서 수행한 Proto3 모형은 미국 USDA-APHIS PPQ Weed Risk Assessment에서 활용하는 등급체계 중 한반도에 적합하도록 쾨펜-가이거 기후구 등급을 수정하여 사용하였다. 한반도 3가지 기후인자 지도는 각 등급별로 격자의 개수를 조사하여 각 등급별로 한반도 내 면적 비율, 순위 등을 분석하였다.

이후 각 기후 지도 등에서 별나팔꽃 분포 지점별 정보를 추출하고, 별나팔꽃이 존재하는 각 지도별 등급들을 중첩하여 중첩된 지역을 정착 확산 가능 서식지역으로 예측하였다. 예측된 지도는 격자의 개수를 조사하여 정착 확산 가능 서식지역의 면적비를 조사하였다.

5. GIS 정보 처리

GIS 격자 정보, 별나팔꽃 분포 지점에 대한 추출, 계산, 분석, 지도화는 ArcGIS 10.1의 ArcMap을 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 격자형 한반도 최저극값온도 제작

격자형 한반도 최저극값온도를 예측 제작하기 위하여 남한과 북한의 129지점의 기상대의 1990년부터 2019년까지의 30년 평균 최저극값온도는 각 지점별 가장 추운 달의 최저온도의 30년 평균과 회귀분석을 수행하였다(Fig. 2). 그 결과 $R^2=0.98$ 의 높은 결정계수를 지닌 회귀모형이 예측되었으며 그 모형은 다음과 같다.

$$\text{최저극값기온} = 1.1724 \times \text{가장 추운 달의 최저온도} - 6.3285$$

예측된 회귀 모형은 Worldclim 2.0의 가장 추운 달의 최저온도 격자에 적용하여 최저극값온도 격자를 제작하였다. 1km 해상도의 한반도 최저극값온도 격자는 총 328,474개의 격자로 이루어져 있었다. 격자를 Korea 2000 Korea central Belt 2010 좌표계로 투영한 후 측정된 격자의 면적은 220,793.1km²로, 실제 한반도 면적인 220,847km²와 비교하였을 때 0.06%의 오차가 나타나 높은 정확성을 보였으며, 각 격자별 평균면적은 0.673km²로 계산되었다.

회귀 모형으로 예측된 한반도 최저극값온도는 최고

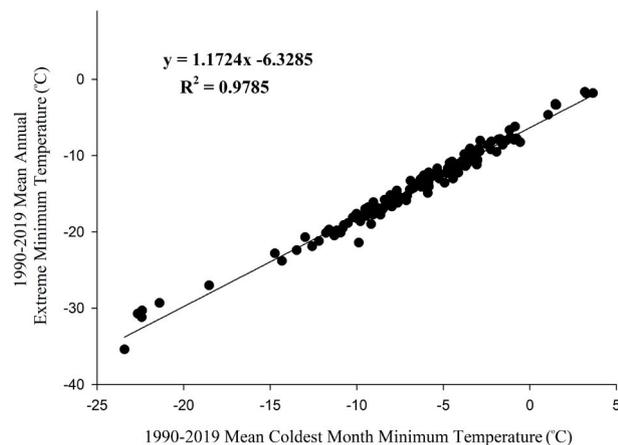


Fig. 2. Linear relationship of mean coldest month minimum temperature observed between 1990–2019 and of mean annual extreme minimum temperature observed between 1990–2019 from weather stations on the Korean peninsula.

-2.1부터 -36.7°C의 범위를 지니고 있었으며, 평균 -17.3°C, 표준편차 6.1이었다. 이는 실제 기상대 30년 평균자료가 최고값으로 가장 따뜻한 지역인 남한 제주 기상대의 최저극값온도 평균 -1.6°C이고, 최저값으로 가장 추운 지역인 북한 삼지연 기상대의 최저극값온도 평균이 -35.4°C이며, 한반도 기상대 128개의 평균 최저극값온도가 -14.3°C, 표준편차 6.0인 것을 비교하였을 때 전체 평균을 제외한 모든 수치에서 1.3°C 이내의 상당히 높은 유사성을 보였다. 단 격자 평균이 기상대 평균보다 낮은 것은 남한 기상대 개수가 101개, 북한 기상대 개수가 27개로 상대적으로 따뜻한 남쪽과 추운 북쪽의 기상대 개수의 불균일성에서 기인한 것으로 판단된다. 예측, 제작된 Worldclim V2 기반의 격자형 한반도 최저극값온도는 향후 다양한 기후 인자 모형 제작과 생물의 분포 및 행동예측에 활용가능할 것으로 예상된다(Fig. 3).

2. 한반도 Proto3 모형 기후 인자 특성

제작된 한반도 30년 평균 최저극값온도 격자는 Proto3 모형에 사용하기 위하여 USDA 기준 등급에 기반한 내한성 구역 지도로 변환하였다. USDA 기준의 각 온도 범위에 맞추어 1부터 13 사이의 값으로 변환하여 지도를 제작한 결과, 한반도는 -40.0~-34.4°C의 Zone3부터 -6.7~-1.1°C의 Zone9까지 7개의 지역으로 나타났다. 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 지역은 Zone7로 전체 한반도의 42.7%를 차지하고 있었다. 또한 상위 3지역인 Zone 7, 6, 8이 전체의 80.9%를 차지하고 있어 한반도 전체에서 비교적 온난한 내한성 지역이 남동부터 북서까지 이어지는 평야지방을 중심으로 넓고 균일하게 존재하며, Zone3부터 Zone6까지 4지역이 전체의 19.1%로 북쪽의 개마고원, 백두대간과 같은 고지대와 함경북도 등에 분포하였다(Fig. 3, Table 2).

Beck *et al.* (2018)의 쾨펜-가이거 기후구 지도는 Proto3 등급에 따라 재조정되었다. 그 결과 총 5개의 기후구가 나타났으며, 한반도에서 가장 넓은 기후구는 전체 격자의 61.95%인 “습윤 대륙성 기후-따뜻한 여름(Humid continental warm summers)”기후구였다. 다음은 전체 격자의 24.3%의 “습윤 대륙성 기후-시원한 여름(Humid continental cool summers)”기후구였으며, 나머지 3개 기후구가 전체의 13.53%를 차지하고 있었다. 습윤 대륙성 기후-따뜻한 여름 기후구는 남부해안지대, 제주도, 소백산맥 일

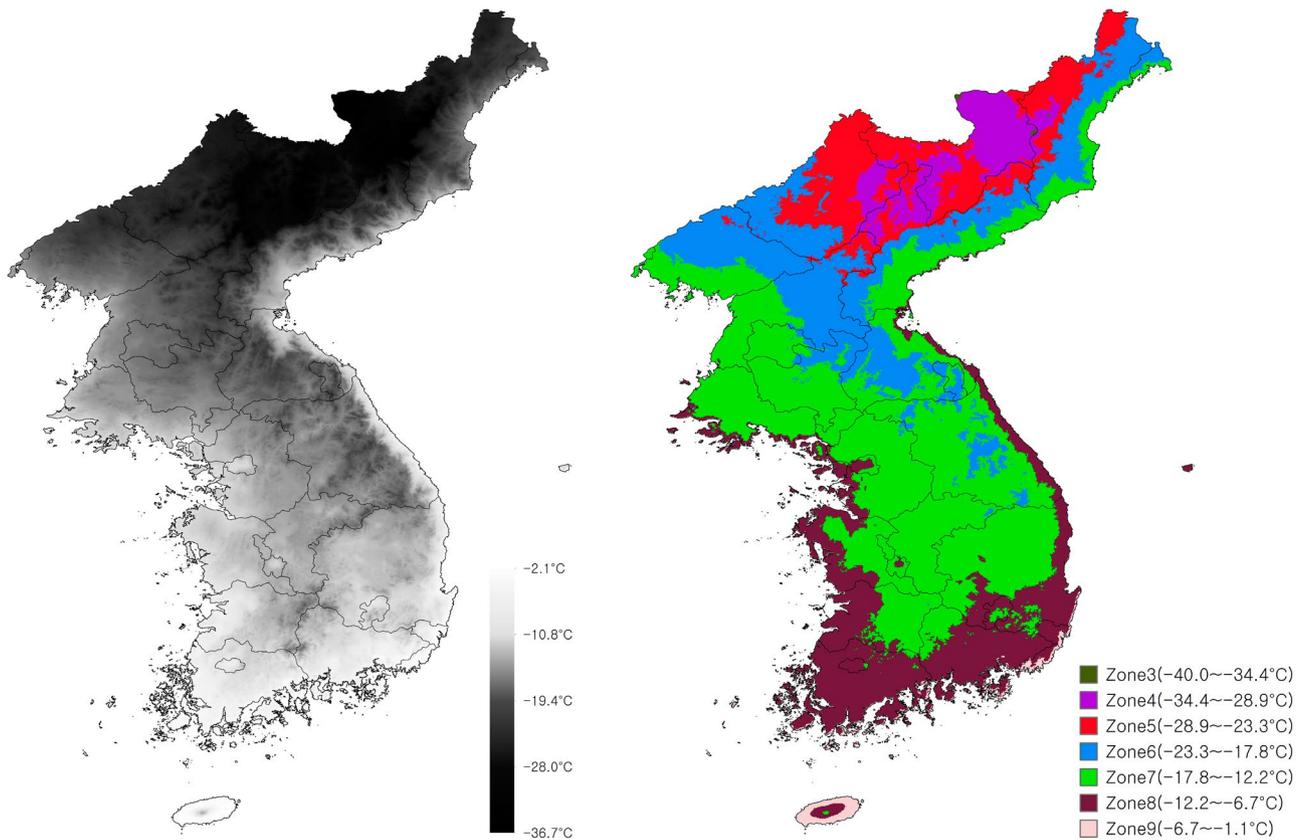


Fig. 3. Estimated mean annual extreme minimum temperature (left) and plant hardiness zone map (right) of the Korean peninsula.

Table 2. Number of cells and percentage of plant hardiness zone Köppen-Geiger climate class and mean annual precipitation bands rasters of the Korean peninsula

Plant hardiness zone			Köppen-Geiger climate class			Mean annual precipitation bands		
Class	No. of Cells	%	Class*	No. of Cells	%	Class	No. of Cells	%
Zone3	130	0.04	Hs	20,471	6.23	51 - 76 cm	27,068	8.24
Zone4	20,468	6.23	Mwc	41	0.01	76 - 102 cm	85,825	26.13
Zone5	38,379	11.68	Hcws	203,485	61.95	102 - 127 cm	131,509	40.04
Zone6	66,544	20.26	Hccs	79,810	24.30	127 - 152 cm	79,693	24.26
Zone7	140,200	42.68	Su	24,667	7.51	152 - 178 cm	2,430	0.74
Zone8	59,009	17.96				178 - 203 cm	1,847	0.56
Zone9	3,744	1.14				203 - 254 cm	102	0.03

*Hs, Humid subtropical; Mwc, Marine west coast; Hcws, Humid continental warm summers; Hccs, Humid continental cool summers; Su, Subarctic.

부, 경상북도 이북의 태백산맥, 개마고원, 함경북도를 제외한 대부분의 지역이 포함되어 있었다. 이렇게 한 기후구가 높은 비율을 차지하고 있으면, 식물의 정착 가능성 평가를 발생하고 있는 기후구에 기반하여 평가하는 Proto3의 원리상 한반도에 대한 확산 가능 면적을 결정하는 데 있어서 Proto3의 쿼펜-가이저 기후구가 매우 크게 영향을 줄 수 있다(Fig. 4, Table 2).

한반도 평균누적강수량 영역 지도가 Proto3 모형에 맞추어 WorldClim Version2 연누적강수량에 기반하여 작성되었다. 그 결과 7개의 영역이 한반도에서 나타났으며, 그중 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 영역은 102~127 cm 영역으로 전체의 40.04%였으며 남한의 서해안 지방, 경상북도, 경기도 북부, 강원도 북부, 북한의 남쪽지방 전반이 포함되어 있었다(Fig. 4, Table 2).

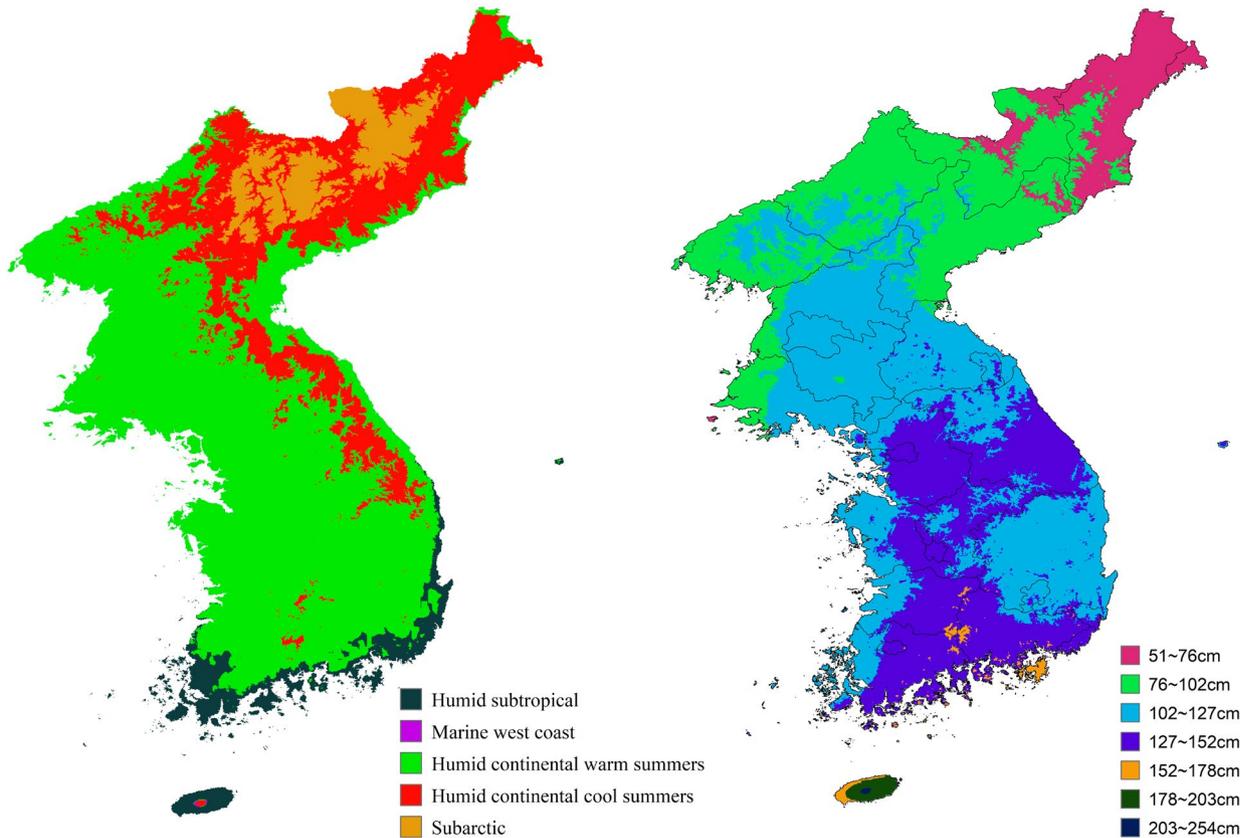


Fig. 4. Two climate variable maps of Korean peninsula for Proto3 model; left: Köppen-Geiger climate classes, right: Mean annual precipitation bands map.

Table 3. Rank, number of cells and percentages of combinations with three climatic variables rasters of the Korean peninsula

Rank	Plant hardiness zone	Köppen-Geiger climate class*	Mean annual precipitation bands	No. of Cells	%
1	Zone7	Hcws	102 - 127 cm	58,396	17.8
2	Zone7	Hcws	127 - 152 cm	36,537	11.1
3	Zone7	Hcws	76 - 102 cm	20,056	6.1
4	Zone6	Hcws	102 - 127 cm	17,146	5.2
5	Zone5	Hccs	76 - 102 cm	16,977	5.2
6	Zone4	Su	76 - 102 cm	14,476	4.4
7	Zone6	Hcws	76 - 102 cm	12,589	3.8
8	Zone6	Hccs	102 - 127 cm	11,903	3.6
9	Zone8	Hcws	102 - 127 cm	11,719	3.6
10	Zone8	Hcws	127 - 152 cm	11,374	3.5
		Sum		211,173	64.3
		Total		328,474	100.0

*Hs, Humid subtropical; Mwc, Marine west coast; Hcws, Humid continental warm summers; Hccs, Humid continental cool summers; Su, Subarctic.

Proto3에서 식물의 서식 가능 지역으로 평가되는 3가지 기후 인자 조합은 한반도에 총 56개의 조합이 나타났다. 이 중 한반도에서 가장 넓은 면적으로 나타난 조합은 내한성 Zone7, 습윤 대륙성 기후-따뜻한 여름 기후구, 연누적강수

량 102~207 cm로 전체의 17.8%였으며 상위 10개 조합의 합은 한반도 전체 격자의 64%로 면적으로 환산 시 142,062 km²였다(Table 3).

3. 외래잡초 별나팔꽃의 Proto3 모형을 활용한 정착 확산 가능 지역

Worldclim V2와 한반도 30년 평균 기상대 데이터 Beck et al. (2018)의 쾨펜-가이거 기후구 지도에 기반하여 제작된 3가지 한반도 Proto3 기후 등급 지도들을 활용하여 외래잡초 별나팔꽃의 정착, 확산 가능지역을 예측하였다. 외래잡초 별나팔꽃은 남한지역에서 총 117개의 발생 지점을 확보하였으며, 발생 지점들을 각 기후 등급별로 나누어 분석한 결과 식물 내한성 지역은 Zone7, Zone8, Zone9에서, 쾨펜-가이거 기후구는 습윤 아열대 기후, 습윤 대륙성 기후, 따뜻한 여름 기후구에서, 연누적강수량은 102~127 cm, 127~178 cm 영역에서 발생이 확인되었다(Table 4).

확인된 정착, 확산 가능 기후구를 서로 중첩하여 정착, 확산 가능지역을 확인한 결과 한라산 꼭대기, 소백산맥 일부, 경상북도 이북의 태백산맥 고지대를 제외한 대부분의 남한지역이 정착 확산 가능지역으로 평가되었다. 그리고 북한의 개성시, 황해남도 동부, 황해북도 서부, 평양시, 강원도 동부 또한 정착, 확산 가능지역으로 예측되었다. Proto3 모형으로 예측된 한반도 내 별나팔꽃의 정착, 확산 가능 지역은 전체 한반도 격자의 50.7%로 면적으로 확산하면 111,969 km²로 나타났다(Fig. 5).

Proto3 모형으로 예측된 별나팔꽃 정착 확산 지역은 기존 연구에서 보고된 Maxent, Climax와 같은 종분포모형과 달리 예측 결과가 확률과 같은 연속값과 Binary 모형을 만들기 위한 Threshold 값으로 제시되지 않고, 처음부터 정착 가능, 불가능의 Binary 값으로 도출되며, 예측 모형의 정확도 또한 AUC 값과 같은 지표가 아닌 평가자가 수행한 불확실성 평가에 기반하여 제시되는 차이가 있다. 그리고 Proto3

Table 4. Number of occurrence points of *Ipomoea triloba* in climate classes of the Korean peninsula

Class	Number of occurrence points
1. Plant Hardiness zone	
Zone7 (-17.8 - -12.2°C)	21
Zone8 (-12.2 - -6.7°C)	9
Zone9 (-6.7 - -1.1°C)	14
2. Köppen-Geiger climate class	
Humid subtropical (Cwa, Cfa)	15
Humid continental warm summers (Dsa, Dwa, Dfa)	29
3. Mean annual precipitation bands	
102 - 127 cm (40 - 50 inches)	11
127 - 178 cm (50 - 60 inches)	18

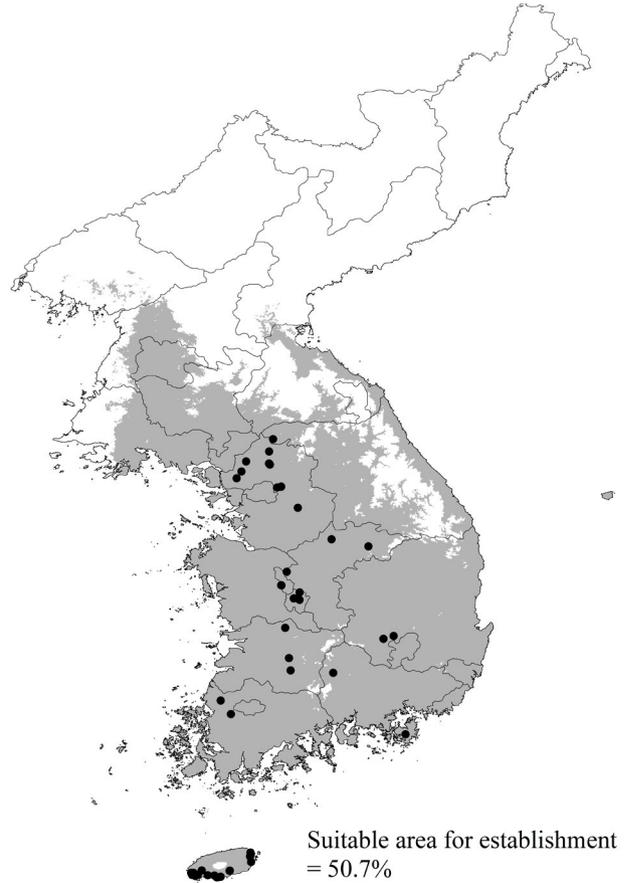


Fig. 5. Occurrence points (black dots) and estimated suitable area for establishment (gray color) of *Ipomoea triloba* on the Korean peninsula using Proto3 model.

는 비교적 수행과정이 쉬우며, 다른 종분포모형에 비하여 상대적으로 모델링 수행자가 개입할 수 있는 선택지의 수가 적기 때문에 평가결과의 재현성이 높고, 결과의 높은 직관성 때문에 예측 결과의 해석 및 활용에 장점이 있다. 하지만 평가 인자가 단순하고, 모형의 정확도에 대한 정량 평가의 어려움, 도출되는 정보량이 타 모형에 비하여 적음 등의 단점 또한 존재한다. 이러한 Proto3의 장단점을 종합하였을 때, Proto3 모형은 분포 예측의 정확성 향상, 정착 확산 원리 고찰 등의 연구목적보다는 외래식물 위해성평가와 이를 통한 관리 체계 수립 등에 활용하기에 적합한 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 한반도에서 Proto3 모형을 수행하기 위하여

필요한 3가지 기후인자 지도, 1. 식물 내한성 구역, 2. 쿠피엔-가이저 기후구, 3. 연누적강수량 영역에 대한 한반도 지도를 1 km 해상도로 제작하였다. Worldclim V2와 한반도 30년 평균 기상대 데이터를 이용하여 한반도 최저극값온도 격자를 제작하였으며, 이를 활용하여 한반도 식물 내한성 구역 격자지도도를 제작하여 Proto3에 이용하였다. 쿠피엔-가이저 기후구 지도는 Beck *et al.* (2018)의 쿠피엔-가이저 기후구 지도를 Proto3에 적합하게 변형하였으며, 연누적강수량 영역은 Worldclim V2를 활용하여 제작하였다. 제작된 Proto3 기후 인자 지도를 활용하여 외래잡초 별나팔꽃의 정착 확산 가능 지역을 예측한 결과, 남한 대부분의 지역과 북한의 황해도를 포함한 남쪽 지방까지 전체 한반도 격자의 50.7%가 정착, 확산 가능지역으로 예측되었다. 본 결과는 별나팔꽃의 위해성 평가 및 관리 체계 수립 등에 활용가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청의 생물다양성 위협 외래생물 관리 기술개발 사업(과제번호: PJ0138552019)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Beaumont LJ, RV Gallagher, MR Leishman, L Hughes and PO Downey. 2014. How can knowledge of the climate niche inform the weed risk assessment process? A case study of *Chrysanthemoides monilifera* in Australia. *Divers. Distrib.* 20:613-625.
- Beck HE, NE Zimmermann, TR McVicar, N Vergopolan, A Berg and EF Wood. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data* 5:180214.
- CBD. 2009. Invasive Alien Species. Convention on Biological Diversity. Montreal, Canada. pp. 6-9.
- Chun JH and CB Lee. 2013. Assessing the effects of climate change on the geographic distribution of *Pinus densiflora* in Korea using ecological niche model. *Korean J. Agri. For. Met.* 15:219-233
- Daly C, MP Widrlechner, MD Halbleib, JI Smith and WP Gibson. 2012. Development of a new USDA plant hardiness zone map for the United States. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51:242-264.
- Elith J and JR Leathwick. 2009. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40:677-697.
- Elith J, CH Graham, RP Anderson, M Dudík, S Ferrier, A Guisan, RJ Hijmans, F Huettmann, JR Leathwick, A Lehmann, J Li, LG Lohmann, BA Loiselle, G Manion, C Moritz, M Nakamura, Y Nakazawa, JMM Overton, AT Peterson, SJ Phillips, K Richardson, R Scachetti-Pereira, RE Schapire, J Soberón, S Williams, MS Wisz and NE Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151.
- Elith J, SJ Phillips, T Hastie, M Dudík, YE Chee and CJ Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17:43-57.
- Fick SE and RJ Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37:4302-4315.
- GBIF. 2019. GBIF Home Page. Global Biodiversity Information Facility. Available from: <https://www.gbif.org> Accessed 13 August 2018.
- Guisan A and W Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol. Lett.* 8:993-1009.
- IPPC. 2009. International Standards for Phytosanitary Measures. International Plant Protection Convention (IPPC) and the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. pp 1-32. <https://www.ippc.int/index.php?id=13399&L=0>. Accessed 4 Oct 2010
- Jiménez-Valverde A, AT Peterson, J Soberón, JM Overton, P Aragon and JM Lobo. 2011. Use of niche models in invasive species risk assessments. *Biol. Invasions* 13:2785-2797.
- Kim MH, KJ Cho, YJ Oh, D Yang, WJ Lee, S Park, SK Choi, J Eo, MK Kim and YE Na. 2016. Life form and naturalization characteristics of naturalized plants in upland fields of South Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 34:63-72.
- Lee SH, HC Jung and JY Choi. 2012. Projecting climate change impact on the potential distribution of endemic plants (*Megaleranthis saniculifolia*) in Korea. *J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol.* 15:75-83.
- Lee SH, JY Choi and YM Lee. 2011. Projection of climate change effects on the potential distribution of *Abeliophyllum distichum* in Korea. *J. Agri. Sci.* 38:219-225.
- Lee SH, KH Cho and WJ Lee. 2016. Prediction of potential distributions of two invasive alien plants, *Paspalum distichum* and *Ambrosia artemisiifolia*, using species distribution model in Korean peninsula. *Ecol. Resil. Infrastruct.* 3:189-200.
- Lee YG, JH Sung, JH Chun and MY Shin. 2014. Effect of climate changes on the distribution of productive areas for *Quercus*

- mongolica* in Korea. J. Korean For. Soc. 103:605–612.
- Lee YH, SH Hong, CS Na, IS Sohn, MH Kim, CS Kim and YJ Oh. 2016. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. Korean J. Environ. Biol. 34:240–245.
- Lee YH, YJ Oh, SH Hong, CS Na, YE Na, CS Kim and IS Sohn. 2015. Predicting the suitable habitat of invasive alien plant *Conyza bonariensis* based on climate change scenarios. J. Climate Change Res. 6:243–248.
- Lee YH, CS Na, SH Hong, SI Sohn, CS Kim, IY Lee and YJ Oh. 2018. Predicting the potential habitat and risk assessment of *Amaranthus patulus* using MaxEnt. Korean J. Environ. Biol. 36:672–679.
- Magarey R, L Newton, SC Hong, Y Takeuchi, D Christie, CS Jarnevich, L Kohl, M Damus, SI Higgins, L Millar, K Castro, A West, J Hastings, G Cook, J Kartesz and AL Koop. 2018. Comparison of four modeling tools for the prediction of potential distribution for non-indigenous weeds in the United States. Biol. Invasions 20:679–694.
- Park HC, JH Lee and GG Lee. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. J. Environ. Impact Assess. 23:379–392.
- Park SH. 2009. New Illustration and Photographs of Naturalized Plants of Korea. Ilchokak Publishing, Seoul.
- Peel MC, BL Finlayson and TA McMahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 4:439–473.
- Phillips SJ and M Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography 31:161–175.
- Phillips SJ, RP Anderson and RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecol. Model. 190:231–259.
- Pimentel D, L Lach, R Zuniga and D Morrison. 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. Bioscience 50:53–65.
- Pimentel D. 2002. Biological Invasions: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal, and Microbe Species. CRC press. Boca Raton, FL. p. 369.
- Qin Z, A DiTommaso, RS Wu and HY Huang. 2014. Potential distribution of two *Ambrosia* species in China under projected climate change. Weed Res. 54:520–531.
- Smolik MG, S Dullinger, F Essl, I Kleinbauer, M Leitner, J Peterseil, LM Stadler and G Vog. 2010. Integrating species distribution models and interacting particle systems to predict the spread of an invasive alien plant. J. Biogeogr. 37:411–422.
- Song HR, DE Kim, DH Lee and NY Kim. 2017 Nationwide Survey of Non-Native Species in Korea (III). National Institute of Ecology. Seochon, Korea.
- Sutherst RW, GF Maywald, T Yonow and PM Stevens. 1999. CLIMEX: predicting the effects of climate on plants and animals. CSIRO Publishing. Collingwood, Australia.
- Tererai F and AR Wood. 2014. On the present and potential distribution of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in South Africa. S. Afr. J. Bot. 95:152–158.
- USDA-APHIS-PPQ. 2016. Guidelines for the USDA-APHIS-PPQ Weed Risk Assessment Process. US Department of Agriculture (USDA), Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS), Plant Protection and Quarantine (PPQ). Raleigh, NC.
- Youngah L, G Munisamy, C Samuel and H Michael. 2011. Predicting potential invasive species distribution: An application to New Zealand mudsnails in the Pacific Northwest. Agri. Appl. Econ. 2011:24–26.