

MaxEnt를 활용한 기후변화와 토지 피복 변화에 따른 멸강나방 및 흑명나방의 한국 내 분포 변화 분석과 예측

박태철^{1,†}, 장호중^{2,†}, 엄소은¹, 손기문¹, 박정준^{1,3,*}

¹경상대학교 식물외과, ²(주)분석기술과미래 중앙연구소, ³경상대학교 농업생명과학연구원

Analysis and estimation of species distribution of *Mythimna seperata* and *Cnaphalocrocis medinalis* with land-cover data under climate change scenario using MaxEnt

Taechul Park^{1,†}, Hojung Jang^{2,†}, SoEun Eom¹, Kimoon Son¹ and Jung-Joon Park^{1,3,*}

¹Department of Plant Medicine, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

²Analysis Technology and Tomorrow (ATNT), Gimcheon 39510, Republic of Korea

³Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

*Corresponding author

Jung-Joon Park

Tel. 055-772-1928

E-mail. jungpark@gnu.ac.kr

[†]Authors equally contributed to this manuscript.

Received: 3 June 2022

First Revised: 17 June 2022

Second Revised: 20 June 2022

Third Revised: 21 June 2022

Revision accepted: 21 June 2022

Abstract: Among migratory insect pests, *Mythimna seperata* and *Cnaphalocrocis medinalis* are invasive pests introduced into South Korea through westerlies from southern China. *M. seperata* and *C. medinalis* are insect pests that use rice as a host. They injure rice leaves and inhibit rice growth. To understand the distribution of *M. seperata* and *C. medinalis*, it is important to understand environmental factors such as temperature and humidity of their habitat. This study predicted current and future habitat suitability models for understanding the distribution of *M. seperata* and *C. medinalis*. Occurrence data, SSPs (Shared Socio-economic Pathways) scenario, and RCP (Representative Concentration Pathway) were applied to MaxEnt (Maximum Entropy), a machine learning model among SDM (Species Distribution Model). As a result, *M. seperata* and *C. medinalis* are aggregated on the west and south coasts where they have a host after migration from China. As a result of MaxEnt analysis, the contribution was high in the order of Land-cover data and DEM (Digital Elevation Model). In bioclimatic variables, BIO_4 (Temperature seasonality) was high in *M. seperata* and BIO_2 (Mean Diurnal Range) was found in *C. medinalis*. The habitat suitability model predicted that *M. seperata* and *C. medinalis* could inhabit most rice paddies.

Keywords: Migratory insect pests, Species Distribution Model, Maximum Entropy, Representative Concentration Pathway scenario, Shared Socio-economic Pathways scenario

서 론

비래 해충(Migratory insect pests)은 5월에서 7월 사이 중국 양쯔강 유역에서 편서풍을 타고 국내 및 일본으로 유입되는 해충을 말하며, 기후변화로 인해 월동 및 토착화 가능성이 있다(Kisimoto 1971; Oku and Kobayashi 1974; IPCC 2021). 멸강나방(*Mythimna seperata*)은 기주 범위가 넓은 다식성 해충으로 벼, 조, 옥수수, 맥류 및 화분과 초지에 가해하며, 1월 평균온도가 0°C 이상일 때 유충 형태로 월동하기에 국내에선 불가능하다(Li *et al.* 1964; Choi and Cho 1975; Salama *et al.* 1992). 유충 시기에 주로 기주 식물을 가해하며, 4령충부터 낮에는 숨어 있다가 밤에 활동한다(Kim *et al.* 2012). 흑명나방(*Cnaphalocrocis medinalis*)은 벼, 맥류, 사초과 등을 가해하며, 일 평균기온이 11°C 이하가 지속되면 사충률이 증가하여 월동을 할 수 없다고 알려져 있다(Kisimoto 1971; Choi 1973; Fuse 1978; Sato and Kishino 1978; Wada *et al.* 1980; Khan *et al.* 1996; Chintalapati *et al.* 2013). 유충 시기에 기주의 잎을 세로로 말아서 고정된 뒤 그 안에 들어가서 섭식한다(Park 2006). 비래 후 국내에서 연 2~3세대 출현하며, 남부지방에선 7월 말에서 8월 초에 1세대 성충의 최성기가, 9월 초에서 9월 말에 2세대 성충의 최성기가 나타난다(Choi 1973; Kim and Choi 1984).

해충의 생태 및 주변 환경을 조사하는 것은 해충의 분포 파악 및 방제를 위한 기초자료로 매우 중요하다. 특히 주변환경은 해충의 서식처 및 기주와 긴밀하게 연관되어 있다(Southwood and Henderson 2000). 곤충은 변온동물로 서식지 환경에 따라 발육, 밀도 변동 및 생존이 결정되며, 장기간에 걸쳐 개체군에 유리한 지역으로 이동하기도 한다(Parmesan *et al.* 1999; Bale *et al.* 2002; Deutsch *et al.* 2008). 곤충 개체군이 새로운 서식처로 이동하여 정착하는 것은 질병, 경쟁, 포식 등 생물적 영향과 기후나 환경 같은 비생물적 제한을 극복할 때에 가능하다.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 6차 보고서(AR6)에 의하면 21세기 중반까지 현 수준의 온실가스 배출량을 유지한다면, 2040년까지 지구 평균 온도가 산업화 이전 대비 1.5°C 상승할 것으로 전망되며, 21세기 후반 전 지구 지표면 온도는 4.4°C 상승할 것으로 전망된다(IPCC 2021). 지속적인 기후변화는 개체수, 이주 패턴, 계절 활동, 종의 지리적 범위 및 상호 작용에 변화가 나타난다.

Park *et al.* (2014)은 다양한 기주를 가진 오이총채벌레(*Thrips palmi*)의 잠재 서식지를 예측하기 위해 온도와 습도, 지역의 해수면을 기반으로 개체군 특이적 생리변수를 이용하여 기후변화 대응 오이총채벌레의 국내 분포 가능성을 예측하였으며, 이와 비슷하게 Kim *et al.* (2020)은 검역해충인 오리엔탈과실파리(*Bactrocera dorsalis*)의 국내 분포 가능성을 연구하였으나, 이는 생물기후와 종 특이적 생리변수만을 이용하였다. 하지만, 곤충의 지리적 분포는 기후변수 외에 서식지 및 기주가 필수적으로 요구되고 있으며, Hong *et al.* (2019)은 *T. palmi*의 잠재서식지 예측에 생물기후변수와 더불어 RCPs-SSPs 시나리오에 따른 미래 농업 지역 자료를 이용하여 개선된 모형을 도출하였다. Park *et al.* (2018)의 전라도 지역에서 비래 해충의 공간분포분석에 따르면, 비래 후 국내로 분산할 때 충청도 및 경상도로 분산하지 않고 전남 내륙 쪽으로 밀도가 분산하는 이유는 전라도에 기주인 벼가 많고, 충청도 및 경상도 방향에는 노령산맥 및 소백산맥 등 지리적 영향을 받는 것으로 추정된다고 하였다. 따라서 곤충 개체군 분포 변화 예측은 대상 개체군의 기주 범위, 기후에 따른 유연성, 지리적 이동 가능성 및 월동 가능성이 우선적으로 고려되어야 하며(Skendzić *et al.* 2021), 대상 생물종의 출현 예측을 위한 종 분포모형은 단순히 생물기후변수만을 이용하기에는 실제 출현 및 분산에 관한 예측에서 오류가 있을 가능성이 있으므로, 이를 뒷받침할 비기후변수를 이용한 예측이 이루어져야 한다(Pearson *et al.* 2004; Hong *et al.* 2019).

기후변화에 따른 해충의 분포 및 출현을 예측하기 위해 종의 출현 자료(Occurrence data) 및 서식지 주변 환경 자료를 결합하는 SDM (Species Distribution Model)을 이용하였다(Franklin 2009). 다양한 알고리즘을 활용한 SDM이 개발되었으며, 그중 MaxEnt는 현재 가장 활발히 활용되고 있는 SDM이다(Philips *et al.* 2006). MaxEnt는 Maximum Entropy 알고리즘을 활용한 기계학습모형으로, 종의 출현 자료를 이용하여 모형이 종의 출현 지역 환경적 특성을 학습하여, 아직 출현하지 않은 곳에서의 출현 확률을 추정할 수 있다(Philips *et al.* 2006).

본 연구는 오랜 기간 국내에서 문제가 되는 멸강나방과 흑명나방에 대해 국내 서식지 적합성을 RCP 기후변화 시나리오에 따른 생물기후변수와 비기후자료를 사용하여 MaxEnt를 이용한 모형으로 예측하고 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 범위 및 출현 자료

본 연구의 공간적 범위는 한반도의 남한으로 설정하였으며, 시간의 연구 범위는 현재(1970~2000년 평균)와 2030년(2026~2035년 평균), 2050년(2046~2055년 평균), 2080년(2076~2085년 평균)으로 설정하였다. 두 나방의 출현 자료는 2016~2018년 야외 조사를 통해 얻은 출현 자료(Park *et al.* 2018), 국가농작물병해충관리시스템(<https://ncpms.rda.go.kr/npms/Main.np>)에서 얻은 자료를 이용하였으며, 멸강나방의 경우 Jung *et al.* (2013)의 자료도 이용하였다(Appendix Figs. 1 and 2, Appendix Table 1-4, Supplementary data to this article can be found online at www.ebr.or.kr). 출현 자료는 실제 자료를 획득한 지역의 읍, 면, 리의 GPS자료를 이용하여 그 위치를 특정하였다. 출현 자료 중 야외 조사를 통해 얻은 자료는 Training data, 국가농작물병해충관리시스템 및 논문에서 얻은 자료는 Test data로 구분하였으며, Training data는 모형 보정에, Test data는 모형 검증에 사용하였다. SDM에 사용하기 위한 출현 자료가 한 위치에 집중되면 공간적 자기상관(Spatial autocorrelation)이 발생할 수 있으므로(Franklin 2009), 이를 해결하기 위해 arctoolbox의 'Average Nearest Neighbor'을 사용하여 출현 자료 간 균일 분포가 되기 위한 거리를 구하여 모든 자료를 균일분포가 되도록 하였다(Brown 2014; Hong *et al.* 2019).

2. 환경 변수

1) 생물기후변수(Bioclimatic variables)

본 연구에서 사용된 기후 자료는 30 arc-seconds (~1 km²) 해상도를 가진 30년 평균(1970~2000년) 월별 최고 및 최저기온, 강수량 자료를 나타내며, Worldclim에서 제공하는 raster 파일이다(Fick and Hijmans 2017). RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 보고서의 RCP 온실가스 시나리오를 사용해 전 지구 기후모형(HadGEM-AO) 및 지역 기후모형(HadGEM3-RA)으로 산출된 한반도 지역 내 기후변화 시나리오이며, 향후 온실가스 배출량과 대기 중 농도 변화에 따라 미래 기온 및 강수량을 추정한 시나리오이다. 이 중 온실가스 저감 정책이 실행된 RCP 4.5 및 온실가스 저감 정책이 실행되지 않은

RCP 8.5 시나리오를 사용하였다.

생물 기후 변수는 생물학에서 의미를 가지는 변수를 생성하기 위하여 만든 지수로 강수량, 온도 및 생물에게 유의미한 영향을 미치는 변수 총 19개의 지수로 이루어져 있다. 19개의 생물 기후 변수를 모형화 과정에서 모두 사용하게 되면 다중공선성(multicollinearity)이 발생할 수 있기 때문에 모형화 이전에 Pearson correlation coefficient를 통해 ± 0.7 이상의 높은 상관관계를 가지는 변수들을 제외하였다. 그 결과 BIO_1(연평균온도), BIO_2(평균일교차), BIO_4(온도계절성), BIO_12(연강수량), BIO_13(최습월 강수량), BIO_14(최건월 강수량), 총 6개의 변수가 선정되었다(Table 1).

2) 비기후변수(non-meteorological variables)

본 연구는 토지피복 자료(land-cover data)와 수치표고 모형(Digital Elevation Model, DEM)을 비기후 변수로 활용했다. 토지피복 자료는 SSPs (Shared Socio-economic Pathways) 시나리오를 사용하였으며, 온실가스 배출 시나리오와 함께 미래 사회 경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구별되며, 인구통계, 경제발달, 기술발달, 생태계 요소, 정책, 사회적 인자, 제도 등의 요소를 고려한 시나리오이다. 모형화에서 자주 사용되는 SSPs 1~3을 사용하였다(Song *et al.* 2018). 토지피복 자료는 도시(1), 농지(2), 산림(3), 초지(4), 습지(5), 나지(6), 수계(7), 기타(8)의 하위요인들로 구성되어있다.

Park *et al.* (2018)에서 두 나방의 분포 변화가 높은 산맥의 영향을 받는다고 하였다. 따라서 생태적인 측면에 있어 고도 또한 중요하다고 판단하여 SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>)에서 제공하는 DEM(수치표고모형)을 적용하였다(Table 1).

3. MaxEnt Modeling

본 연구에선 MaxEnt (version 3.4.1k, http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)를 이용하였으며, ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선의 AUC (Area Under Cover) 값을 이용하여 정확도를 측정하였다. AUC는 0.5~1.0을 나타내며, 0.5가 나오면 유의미하지 않음을 나타내고, 0.7 미만이면 적절하지 않고, 0.7~0.9이면 적절하고, 0.9~1.0에 근접할수록 모형 예측력이 우수한 것으로 판단한다(Hanley and McNeil 1982; Muller *et al.*

Table 1. Selected variable using the Pearson's coefficient of ArcGIS

Variable type	Variable name	Description (unit)	Variable character
Bioclimatic variables	BIO_1	Annual mean temperature (°C)	Continuous variable
	BIO_2	Mean Diurnal Range (°C) (Mean of monthly (Max temp-min temp))	
	BIO_4	Temperature seasonality (°C)	
	BIO_12	Annual precipitation (mm)	
	BIO_13	Precipitation of wettest period (mm)	
	BIO_14	Precipitation of driest period (mm)	
Non-meteorological variables	DEM	Digital Elevation Model (meters)	Categorical variable
	Land-cover	Land-cover (8 category)	

2005; Fan *et al.* 2006).

MaxEnt는 logistic output으로 출력하면 서식지 적합성을 0~1로 표현하며, 1 (붉은색)은 높은 적합성, 0 (초록색)은 낮은 적합성을 나타낸다. 서식지 분포 변화를 확인하기 위해 maximum training sensitivity plus specificity에 의해 계산된 logistic threshold를 사용해 적합한 서식처(1)과 적합하지 않은 서식처(0) 값을 나타내는 Binary map을 생성하였다. Binary map은 서식지 적합성 모형에서 사용된 maximum training sensitivity plus specificity에서 도출된 logistic threshold 이상인 지역만 잠재적 서식지로 표현되며, Training data에 대한 출현 및 비출현 정확도 (Specificity) 지수를 산출하여, 서식지 분포를 직관적으로 확인할 수 있다. 종 보존 및 유입 종의 최대 서식지 범위를 파악할 때 주로 사용된다(Liu *et al.* 2013).

MaxEnt 내 설정값은 iteration 5,000, logistic value을 설정해주었으며, 나머지는 default value으로 설정해주었다. 모든 자료의 사전 및 사후 처리는 QGIS (version 3.8.3, <http://www.qgis.org/ko/site/>), ArcGIS (version 10.2.2), R (version 3.6.1)을 사용하였다.

결 과

1. 멸강나방 서식지 적합성 및 Binary map

모형화 결과, Training AUC 값은 0.911, Test AUC 값은 0.673이며, 서식지 적합성 지도를 살펴보면 전라북도, 충청북도, 인천, 경기도의 해안가 인근, 경북 상주, 문경, 구미

인근, 부산 일부 지역을 제외한 남해안 전반에 걸쳐 서식지 적합성이 높게 나타났고, 섬 지역인 제주도, 울릉도, 독도에서는 출현할 수 없는 것으로 나타났다(Fig. 1).

각 변수들의 기여도는 현재 토지피복(39.3%)이 가장 높은 비율을 차지하였으며, DEM (28.1%), BIO_4 (25.4%) 순으로 뒤를 이었다(Table 2). 현재 토지피복에서 농지(2)에서 출현 확률이 가장 높으며(Fig. 3), DEM은 고도에 따라 출현 확률이 0에 가까워졌고(Fig. 3), BIO_4는 31.9°C보다 상승하면 출현 확률이 감소했다. RCP 시나리오에 따른 서식지 적합성 모형은 SSP 1, 2 시나리오에서 현재보다 출현 가능 면적이 늘어나고 줄어드는 것이 반복적으로 보였으며, SSP 3 시나리오에서 출현 가능 면적이 증가하였다. 또한, RCP 8.5 대비 RCP 4.5에서의 출현 가능 면적이 조금 더 넓은 걸 볼 수 있었다(Appendix Figs. 3 and 4).

Maximum training sensitivity plus specificity에 의해 산출된 logistic threshold는 0.256이며, Binary map을 작성하였다(Liu *et al.* 2013). 이를 기준으로 기후변화 시나리오에 따른 출현 가능 면적에 대한 변화는 Table 3에 나타내었다.

2. 혹명나방 서식지 적합성 및 Binary map

모형화 결과 Training AUC 값은 0.912, Test AUC 값은 0.831이며, 서식지 적합성 지도를 살펴보면 전라북도, 충청북도, 인천, 경기도의 해안가 인근, 경북 상주, 문경, 구미 인근, 전라남도 남해안, 부산 남해안에 걸쳐 서식지로서의 적합성이 높게 나타났고, 섬 지역인 제주도, 울릉도, 독도에서는 출현할 수 없는 것으로 나타났다(Fig. 2).

각 변수들의 기여도는 현재 토지피복(57%)이 가장 높

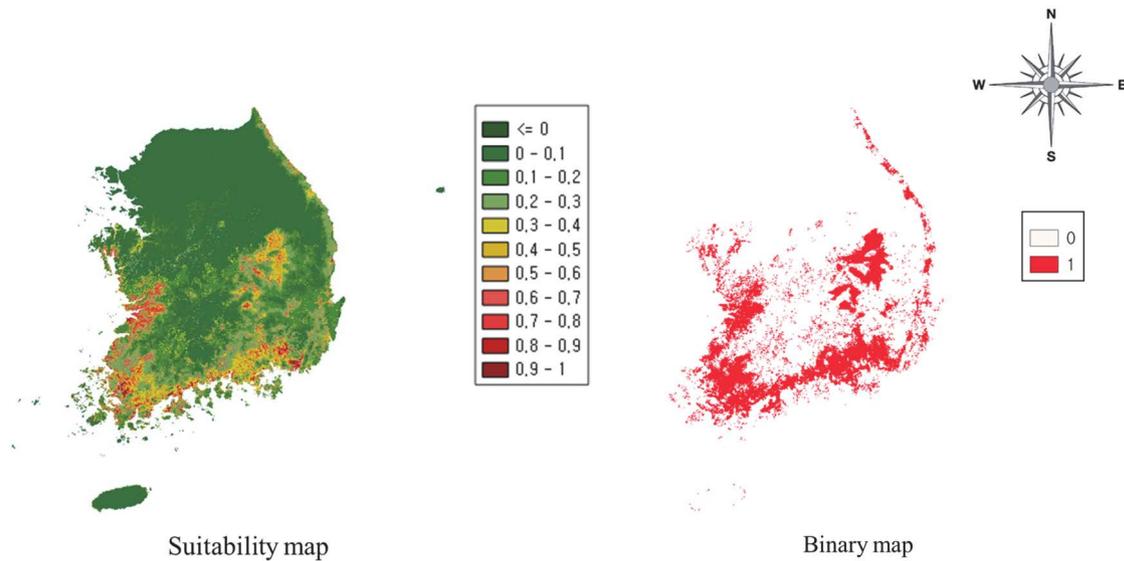


Fig. 1. Suitability map and binary map of habitat for *Mythimna separata* in current weather conditions.

Table 2. Percent contribution of environment variable calculated after MaxEnt simulation in current weather conditions

Environmental variables	<i>Mythimna separata</i>		<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>	
	Percent contribution	Rank	Percent contribution	Rank
Land-cover data	39.3	1	57.0	1
DEM	28.1	2	35.4	2
BIO_1	0.0	7	0.0	7
BIO_2	6.0	4	4.6	3
BIO_4	25.4	3	0.1	6
BIO_12	0.2	6	2.0	4
BIO_13	0.8	5	0.0	7
BIO_14	0.2	6	0.9	5

은 비율을 차지하였으며, DEM (35.4%), BIO_2 (4.6%) 순으로 뒤를 이었다(Table 2). 현재 토지피복에서 농지(2)에서 출현 확률이 가장 높으며(Fig. 3), DEM는 고도 상승에 따라 출현 확률이 0에 가까워졌고(Fig. 3), BIO_2는 10.8보다 높아지면 출현 확률이 급격하게 증가했다. RCP 시나리오에 따른 서식지 적합성 모형은 SSP 1, 2, 3 시나리오에서 현재보다 출현 가능 면적이 약간 늘어났다가 대부분 줄어들었다(Appendix Figs. 5 and 6).

Maximum training sensitivity plus specificity에 의해 산출된 logistic threshold는 0.207이며, Binary map을 작성하였다(Liu *et al.* 2013). 이를 기준으로 기후변화 시나리오에 따른 출현 가능 면적에 대한 변화는 Table 3에 나타내었다.

고찰

멸강나방(*M. separata*), 흑명나방(*C. medinalis*)의 출현 자료를 수집하여 생물기후변수와 비기후변수를 MaxEnt에 적용해 현재 서식지 분포와 기후 및 환경이 변하는 복합적인 시나리오를 적용할 경우의 서식지 분포가 어떻게 변화하는지에 대해 예측하였다(Figs. 1 and 2; Appendix Figs. 3-6).

두 나방은 내륙에 비해 중국과 가까운 남해안 및 서해안에 서식지 분포가 넓은 것으로 나타났으며, 최대 벼 생산지이면서 간척지 부근인 호남지역(재배면적: 293,498 ha, 35.37%), 충청남도(재배면적: 145,785 ha, 17.57%), 경기도

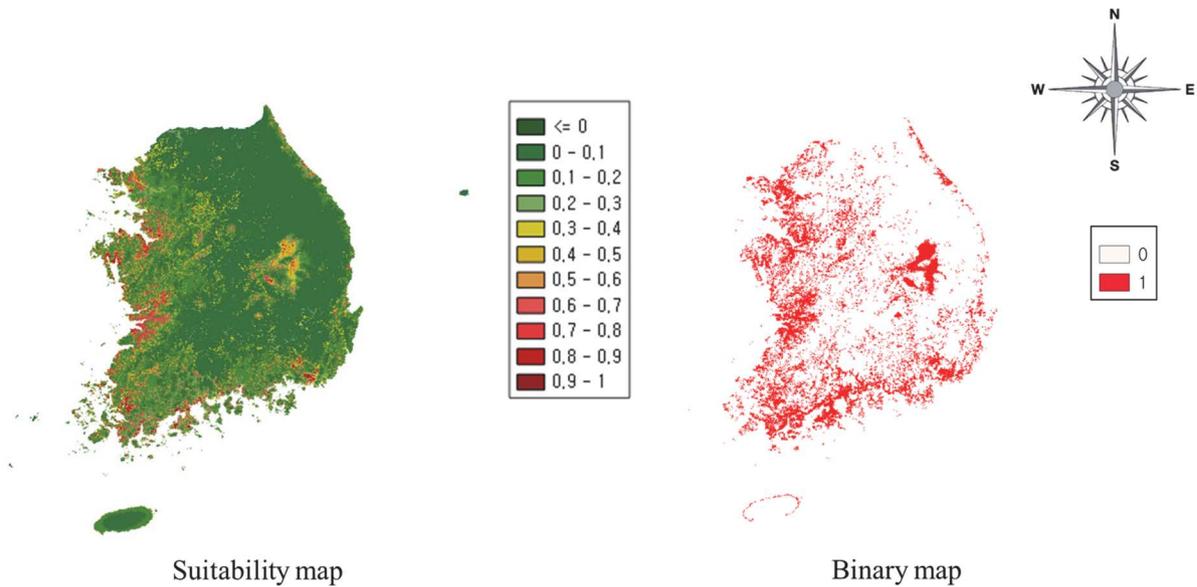


Fig. 2. Suitability map and binary map of habitat for *Cnaphalocrocis medinalis* in current weather conditions.

Table 3. The extent of occurrence by scenario expressed using the threshold value

SSP scenario	RCP scenario	Year	<i>M. separata</i>	<i>C. medinalis</i>
SSP1	RCP 4.5	2030s	22,859 (107.8%)	20,263 (100.2%)
		2050s	20,012 (94.4%)	15,813 (78.2%)
		2080s	23,703 (111.8%)	20,034 (99.0%)
	RCP 8.5	2030s	20,276 (95.7%)	20,211 (99.9%)
		2050s	20,081 (94.7%)	17,869 (88.3%)
		2080s	25,465 (120.1%)	24,049 (118.9%)
SSP 2	RCP 4.5	2030s	22,521 (106.2%)	20,266 (100.2%)
		2050s	21,168 (99.9%)	18,750 (92.7%)
		2080s	20,216 (95.4%)	18,304 (90.5%)
	RCP 8.5	2030s	19,178 (90.5%)	18,352 (90.7%)
		2050s	21,005 (99.1%)	18,961 (93.7%)
		2080s	21,481 (101.3%)	19,420 (96.0%)
SSP 3	RCP 4.5	2030s	26,561 (125.3%)	18,192 (89.9%)
		2050s	22,176 (104.6%)	14,250 (70.4%)
		2080s	26,393 (124.5%)	20,154 (99.6%)
	RCP 8.5	2030s	22,128 (104.4%)	18,054 (89.2%)
		2050s	23,246 (109.7%)	16,564 (82.0%)
		2080s	28,581 (134.8%)	21,910 (108.3%)
		Current	21,197 (100%)	20,231 (100%)
Threshold value (maximum training sensitivity plus specificity)			0.256	0.207

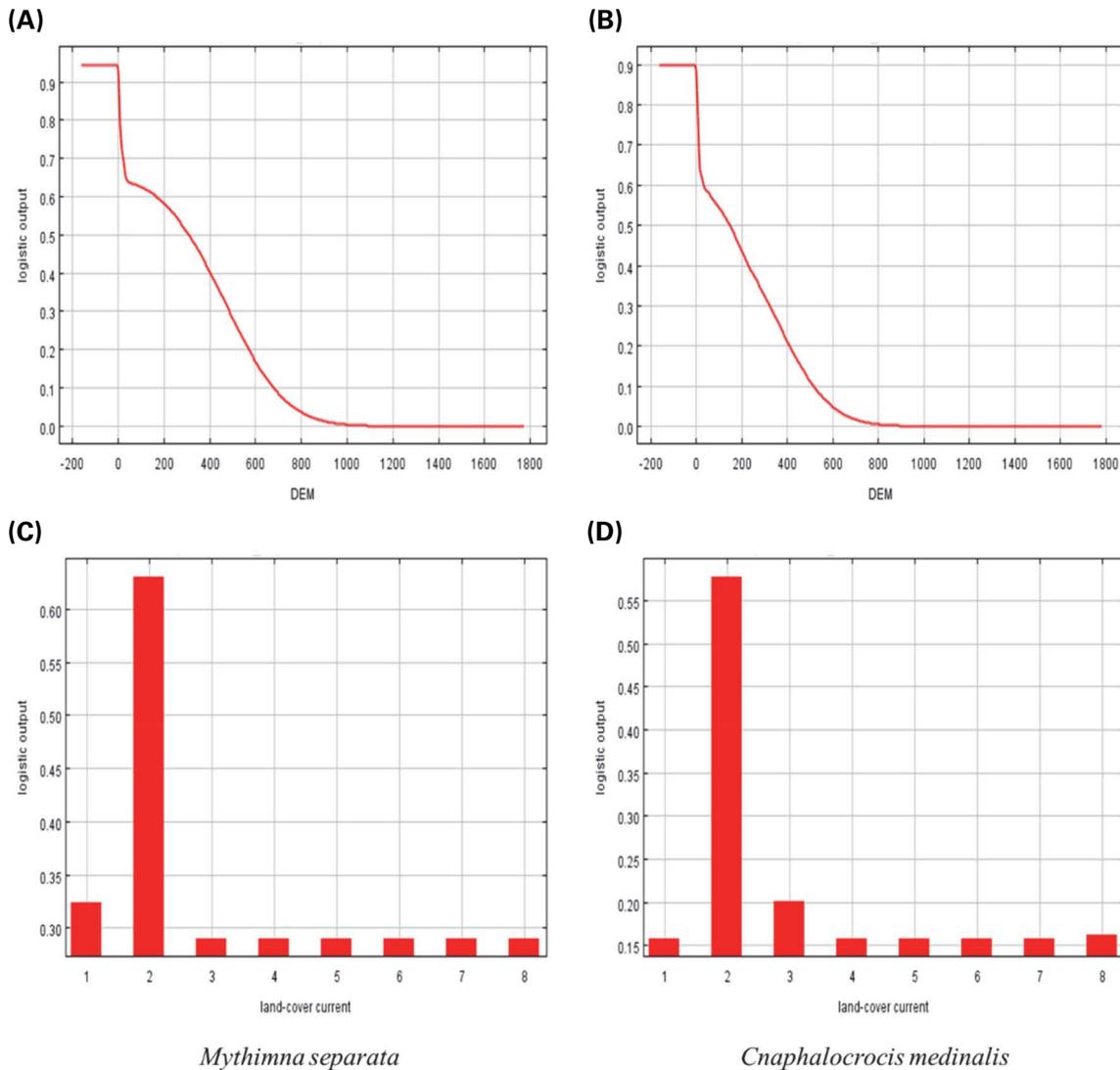


Fig. 3. Response curves for Digital Elevation Model (DEM) and land-cover current variable of MaxEnt simulation for *Mythimna separata* (A and C) and *Cnaphalocrocis medinalis* (B and D) in current weather conditions.

(재배면적: 84,125 ha, 10.14%)가 생존 최적의 환경으로 나타났다(KOSIS 2020, Appendix table 5). 대부분의 MaxEnt 결과, 제주도를 비롯한 한반도 인근 섬 지역의 서식지 적합성이 0 또는 그에 가깝게 나타났다(Figs. 1 and 2). 2019년 기준, 제주도의 벼 재배 지역은 17 ha (0.0%)로 육지와 비교해 지형 특성상 재배지가 매우 적으므로 생존이 사실상 불가능에 가깝다고 판단되며, 주요 기주인 벼가 없을 시 맥류 또는 화본과에서 서식한다는 기록이 있지만 극히 드물어 대부분 논에 서식하는 것으로 사료된다(Appendix Table 5, Chung 1974).

RCP 시나리오를 적용한 결과, 앞으로 제주도 해안가에

서 두 나방의 서식이 가능할 것으로 예측되었으며, 지형 및 기후변화로 인해 생태적 특성에 적합한 주변 환경이 형성되어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다. 멸강나방의 기주로 벼 이외에 옥수수를 더 선호한다는 선행 연구가 있으며(Ko 2002), 멸강나방의 서식지 적합성 모형은 남해안 내륙으로 치우친 경향을 보이고 흑명나방과 다른 경향을 보였다(Appendix Figs. 3-6). 정밀한 결과를 위해서는 기주에 옥수수를 추가하여 출현 자료 수집이 필요하다고 판단된다.

모형 예측 결과에서 나타난 것과 같이, 두 나방이 출현을 결정하는 가장 주요한 요인은 토지피복 자료, 다음으로

DEM, 멸강나방에선 BIO_4, 흑명나방에선 BIO_2 순으로 나타났다. 이는 두 나방이 제트기류를 타고 비래하여 지표로 하강한 이후, 먹이자원을 찾아 농경지로 이동하기 때문으로 사료된다. 그렇기에 생물기후변수만 사용한 MaxEnt 선행 연구와 달리 서식지를 나타내는 토지피복 자료 및 DEM 같은 비기후변수가 출현 예측에 중요한 역할을 한다.

두 나방의 생태적 특성상 벼를 포함한 화본과 식물들만 섭식 가능하기에 농지에서만 생존이 가능한 것으로 판단된다. 토지피복 자료가 1km 해상도로 작성되어 있어 세분화된 해상도의 한 개 cell 안에 농지, 도시, 산림이 섞여 있는 것이 도시로 분류되거나, 산림으로 분류된 경우가 종종 있다. 따라서 보다 상세한 토지피복 자료를 적용한다면 보다 정확한 모형이 생성될 것으로 사료된다.

DEM 반응 곡선 그래프에서 고도 10~20m가 되면 출현 확률이 급격히 감소했다(Fig. 3). 이는 산림에서 벼 재배를 적게 하고, 환경 조건이 평야와 차이가 나기에 상대적으로 생존할 수 없어 이런 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 국내에 유입 후 활동 시기인 6~9월의 국내 시공간 분포를 파악한 결과, 전북 내륙 노령산맥과 전라도 동쪽 소백산맥에 의해 유입 초기 서해안에서 상대적으로 높은 밀도를 보였으며 시간이 경과함에 따라 전남 내륙이 상대적으로 높은 밀도가 되었다(Park et al. 2018). MaxEnt 결과에 따르면 동해안에서 서식이 가능하다고 나타났다. 생존 및 번식을 위해 유입 초기에 내륙 쪽으로 확산하지만, 태백산맥으로 인해 더 확산하기 어려워 유입 후 국내에서 월동이 불가하여 출현이 어려운 것으로 추정된다. 2020년 7월 1일에 흑명나방의 피해 발생을 시작으로 피해 면적이 점차적으로 확산하면서 동해안을 따라 강원도 삼척시까지 피해가 발생하였다(Jung et al. 2020). 이런 사례는 일반적이지 않은 비래량 및 태풍과 같은 변수를 고려하였을 때 충분히 가능한 결과라고 여겨진다. 흑명나방은 BIO_2 (Mean Diurnal Range)가 중요한 변수이며, 일교차가 높은 지역일수록 서식지 적합성이 커지고, 서식지 선택에 있어 중요한 변수로서 작용하였다. 멸강나방은 BIO_4 (Temperature seasonality)가 중요한 변수이며, 계절에 따른 기온 차이가 31.9°C 이상이면 서식지 적합성이 낮아지고 기후변화로 인한 대기 온도 편차가 심해질 경우 멸강나방의 서식지 선택 가능성이 줄어들을 의미한다. 게다가 멸강나방은 1월 평균 대기 온도가 0~2°C 이상 되는 남쪽 지역에서만 월동이 가능하다는 선행 연구 결과를 고려했을 때, 본 연구 결과와 유사한 것으로 사료된다(Table 2; Li et al. 1964;

Hirai and Santa 1983; Hirai 1988). 본 연구 결과와 실제 출현 자료와 비교 시 유사한 것을 확인할 수 있었다(Table 2, Appendix Figs. 3-6).

두 종의 Training ACU는 0.9 이상의 높은 정확도를 보였지만, 멸강나방의 Test ACU는 0.7보다 낮게 예측되었다. 이는 먼저 멸강나방 Test data의 출현 자료의 수가 상대적으로 적어 일부 출현 자료의 영향으로 사료되고(Appendix Table 2, Appendix Fig. 1), Worldclim에서 제공되는 자료가 2000년 이전의 기후이며, 본 연구에서 사용된 자료의 경우 2000년 이후에 획득된 자료를 포함하고 있기에, 낮은 Test AUC가 예측되었다고 판단된다.

본 연구 결과 두 비래나방 종의 종 분포모형 개발 및 서식지 적합도 예측은 생물기후변수에 의한 생리적 영향보다 비기후변수인 토지피복 자료와 DEM에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 비래 해충 종이 국내 유입 후 확산할 때, 종 특이적 생태, 행동적 습성에 직접적인 영향을 주는 기주와 서식지 고도에 많은 영향을 받는 것으로 사료된다(Table 2; Park et al. 2018). 따라서, 비래 해충을 포함한 외래 해충의 검역 및 방제를 위한 종분포모형 개발 시 대상 종의 생태적, 행동적 습성의 파악 선행되어야 할 것이다.

적 요

멸강나방(*Mythimna seperata*)과 흑명나방(*Cnaphalocrocis medinalis*)은 중국 남부 양쯔강 유역에서 봄철 편서풍을 타고 국내로 유입되는 비래 해충(Migratory insect pests)으로 벼를 기주로 삼아 벼 잎을 가해하여 생육을 저해시킨다. 두 나방의 분포를 파악하기 위해서는 서식처의 온습도 뿐만 아니라 주변 환경 요소를 파악하는 것이 중요하다.

본 연구는 두 나방의 분포를 파악하기 위해서 SDM (Species Distribution Model) 중 Machine learning model인 MaxEnt (Maximum Entropy)에 출현 자료, SSPs (Shared Socio-economic Pathways) 시나리오, RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 적용하여 현재와 미래의 서식지 적합성 모형을 예측했다.

결과로 시기에 따른 서식처 면적이 큰 차이가 없었으며, SSPs 시나리오가 나빠짐에 따라 분포 면적이 넓어졌다. 두 나방은 중국으로부터 비래 후 생존하기 위한 최적의 장소가 기주가 있는 서해안과 남해안에 집중되어 있

다. MaxEnt 결과 토지피복 자료, DEM (Digital Elevation Model) 순으로 기여도가 높게 나타났다. 이는 논문에서의 출현 확률 높고 고도가 높아지면서 출현 확률이 낮아졌기 때문이다. 기후 변수에서 멸강나방은 BIO_4 (Temperature seasonality), 흑명나방은 BIO_2 (Mean Diurnal Range)가 높게 나타났다. 멸강나방은 계절에 의한 기온 차가 31.9°C 이상일 때 서식처가 줄어들고, 흑명나방은 일교차 클수록 서식처가 넓어질 것으로 나타났다. 서식지 적합성 모형에서 두 나방은 대부분의 논에서 서식이 가능할 것이라 예측되었다. 하지만, 두 나방의 출현 위치를 정확하게 예측하는데 한계가 있으므로, 서식지 적합성 지도를 기초로 조기에 대응하는 것이 중요하다고 판단된다.

사 사

이 연구는 본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01230703)의 지원 및 2019년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- Bale JS, GJ Masters, ID Hodkinson. 2002. Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Chang. Biol.* 8:1-16.
- Brown JL. 2014. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods Ecol. Evol.* 5:694-700.
- Chintalapati P, K Gururaj, V Sailaja, AP Padmakumari, V Jhansilakshmi, M Prabhakar and YG Prasad. 2013. Temperature thresholds and thermal requirements for the development of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*. *J. Insect Sci.* 2013:1-14.
- Choi KM and EH Cho. 1975. On the seasonal fluctuation of the oriental rice armyworm, *Pseudaletia separata* Walker. *Kor. J. Pl. Prot.* 14:1-7.
- Choi KM. 1973. *Cnaphalocrocis medinalis* G. Rice Leaf Folder. Literature Review of Korea Rice Pests. *Ins. Agr. Sci. O.R.D.* pp. 17-18.
- Chung BJ. 1974. Studies on the occurrence, host plants, transmission, and control of rice stripe disease in Korea. *Kor. J. Plant Prot.* 13:181-204.
- Deutsch CA, JJ Tewksbury, RB Huey, KS Sheldon, CK Ghalambor, DC Haak and PR Martin. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:6668-6672.
- Fan J, S Upadhye and A Worster. 2006. Understanding receiver operating characteristic (ROC) curves. *Can. J. Emerg. Med.* 8:19-20.
- Fick SE and RJ Hijmans. 2017. WorldClim2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37:4302-4315.
- Franklin J. 2009. Mapping Species Distribution: Spatial Inference and Prediction. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp. 1-320.
- Fuse H. 1978. *Susumia exigua* Butler and *Cnaphalocrocis medinalis* G. in shonai district Tamagata prefectural. *Agr. Exp. Sta. Kenkyushiry* 52:1-22.
- Hanley JA and BJ McNeil. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology* 143:29-36.
- Hirai K. 1988. Sudden outbreaks of the armyworm, *Pseudaletia separata* Walker and its monitoring systems in Japan. *Jpn. Agric. Res. Q.* 22:166-174.
- Hirai K and H Santa. 1983. Comparative physioecological studies on the armyworms, *Pseudaletia separata* Walker and *Leucania loreyi* Duponchel (Lepidoptera: Noctuidae). *Bull. Chugoku Nat. Agr. Exp. Sta.* 21:55-101.
- Hong JS, GS Lee, JJ Park, HH Mo and K Cho. 2019. Risk map for the range expansion of *Thrips palmi* in Korea under climate change: Combining species distribution models with land-use change. *J. Asia Pac. Entomol.* 22:666-674.
- IPCC. 2021. Summary for policymakers. pp. 3-32. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte V, P Zhai, A Pirani, SL Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, MI Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, JBR Matthews, TK Maycock, T Waterfield, O Yelekci, R Yu and B Zhou, eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Jung CS, SJ Seo, CE Suk, HY Lee, SJ Hong, GJ Lee, UI Lee, JH Park and YI Park. 2020. Information on the Occurrence of Crop Pests in 2020 (No. 11). Rural Development Administration. Jeonju, Korea. pp. 1-32.
- Jung JK, BY Seo, JR Cho and Y Kim. 2013. Monitoring of *Mythimna seperata* adults by using a remote-sensing sex pheromone trap. *Korean J. Appl. Entomol.* 52:341-348.
- Khan ZR, MLP Abenes and NJ Fernandez. 1996. Suitability of graminaceous weed species as host plants for rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* and *Marasmia patnalis*. *Crop Prot.* 15:121-127.

- Kim KC and CS Choi. 1984. Studies on the bionomies and analysis of damage of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* G. in South region of Korea. Rural Dev. Rev. 19:25–32.
- Kim KH, DS Kim, CG Park, SW Cho, YN Yoon and KY Lee. 2012. Principles and Application in Insect Pest Management. Hyang Moon Sa. Seoul. p. 340.
- Kim SB, JJ Park and DS Kim. 2020. CLIMEX simulated predictions of the potential distribution of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) considering the northern boundary: With special emphasis on Jeju, Korea. J. Asia Pac. Entomol. 23:797–808.
- Kisimoto R. 1971. Long distance migration of planthoppers *Sogatalla furcifera* and *Nilaparvata lugens*. Trop. Agr. Res. Ser. 5:201–206.
- Ko HR. 2002. Effect of hosts and temperatures on development and reproduction of rice armyworm, *Pseudaletia separata* (Lepidoptera: Noctuidae). MS thesis, Chungbuk National University, Cheongju, Korea.
- KOSIS. 2020. Korean Statistical Information Service. Statistics Korea. Daejeon, Korea. <https://kosis.kr/index/index.do>. (accessed on 05 May, 2022)
- Li GB, HX Wang and WX Hu. 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three-year result of releasing and recapturing of marked moths. Acta Phytophylacica Sin. 3:101–110.
- Liu C, M White and G Newell. 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. J. Biogeogr. 40:778–789.
- Muller MP, G Tomlinson, TJ Marrie, P Tang, A McGeer, DE Low and WL Gold. 2005. Can routine laboratory tests discriminate between severe acute respiratory syndrome and other causes of community-acquired pneumonia? Clin. Infect Dis. 40:1079–1086.
- Park JJ, HH Mo, GS Lee, SE Lee, JH Lee and K Cho. 2014. Predicting the potential geographic distribution of *Thrips palmi* in Korea, using the CLIMEX model. Entomol. Res. 44:47–57.
- Park TC, HJ Choe, HJ Jeong, HJ Jang, KH Kim and JJ Park. 2018. Spatial pattern analysis for distribution of migratory insect pests at paddy field in Jeolla-province. Korean J. Appl. Entomol. 57:361–372.
- Parnesan C, N Ryrholm, C Stefanescu, JK Hill, Thomas CD, H Descimon, B Huntley, L Kaila, J Kullberg, T Tammaru, WJ Tennent, JA Thomas and M Warren. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. Nature 399:579–583.
- Pearson RG, TP Dawson and C Liu. 2004. Modelling species distributions in Britain: a hierarchical integration of climate and land-cover data. Ecography 27:285–298.
- Philips ST, RP Anderson and RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecol. Model. 190:231–259.
- Salama MS, LP Schouest Jr and TA Miller. 1992. Effect of diet on the esterase patterns in the hemolymph of the corn earworm and the tobacco budworm (Lepidoptera: Noctuidae). J. Econ. Entomol. 85:1079–1087.
- Sato T and K Kishino. 1978. Ecological studies on the occurrence of the paddy leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* G. Bull. Tohoku Nat'l. Agric. Exp. Stan. 58:47–80.
- Skendžić S, M Zovko, IP Živković, V Lešić and D Lemić. 2021. The impact of climate change on agricultural insect pests. Insects 12:440.
- Song CH, SM Yoo, MI Kim, CH Lim, JW Kim, SJ Kim, GS Kim and WK Lee. 2018. Estimation of future land cover considering shared socioeconomic pathways using scenario generators. J. Climate Change Res. 9:223–234.
- Wada T, M Kobayashi and M Shimazu. 1980. Seasonal changes of the proportion of mated female in the field population of the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). Appl. Entomol. Zool. 15:81–89.