Korean Journal Of Agricultural Science

pISSN : 2466-2402
eISSN : 2466-2410

PLANT&FOREST

Insecticide resistance monitoring in Korean local populations of diamondback moth (*Plutella xylostella*) (I)

Hee-Ji Kim[1,*], Hyun Ko[2], Young-Nam Youn[1]

[1]Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[2]Kyung Nong Co., R&D Center, Gyeongju 38175, Korea

[*]Corresponding author: kimheeji914@naver.com

Abstract

Various chemical pesticides are used to control diamondback moths, *Plutella xylostella*, which are agricultural pests that occur in cruciferous crops worldwide and cause economic losses. However, due to pesticide misuse, resistance to *P. xylostella* is consistently reported domestically and internationally. Therefore, we aimed to monitor and map regional resistance to devise efficient and economical control methods for *P. xylostella* in Korea. This study selected eight highly used insecticides among those registered against *P. xylostella*. *P. xylostella* were collected from three cities in the Gyeonggi and Yeongnam Provinces to evaluate insecticide resistance. As a result of experiments with populations collected from Yeoju, Gyeonggi Province, resistance ratios were 114.88, 54.75, 119.00, and 64.00 times higher than the susceptible population with methoxyfenozide, indoxacarb, cyantraniliprole, and fluxametamide, respectively. The resistance ratios of the Yongin population in Gyeonggi Province were 166.33 times with cyantraniliprole and 195.25 times with fluxametamide higher than the susceptible population. The Pocheon population in Gyeonggi Province showed a resistance ratio 283.23 times higher than methoxyfenozide. As a result of experiments with populations collected from Gimhae and Sangju, Yeongnam Province, the resistance ratios of the Gimhae population were 80.97, 138.00, and 89.50 times higher than the susceptible population with methoxyfenozide, cyantraniliprole, and fluxametamide, respectively. Meanwhile, the resistance ratios of the Sangju population were 85.83, 224.67, and 303.25 times higher than the susceptible population with methoxyfenozide, cyantraniliprole, and fluxametamide, respectively. The Yeongnam Province Tongyeong population showed a resistance ratio 367.28 times higher to methoxyfenozide.

Keywords: chemical pesticides, diamondback moth, insecticides resistance monitoring, *Plutella xylostella*

Check for updates

OPEN ACCESS

Citation: Kim HJ, Ko H, Youn YN. Insecticide resistance monitoring in Korean local populations of diamondback moth (*Plutella xylostella*) (I). Korean Journal of Agricultural Science 50:829-840. https://doi.org/10.7744/kjoas.500420

Received: October 27, 2023
Revised: November 12, 2023
Accepted: November 17, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

배추좀나방(*Plutella xylostella*, diamondback moth)은 배추(kimchi cabbage), 무(radish), 케일(kale), 브로콜리(broccoli) 등의 십자화과 작물을 가해하는 농업 해충이다(Couty et al., 2006). 전세계적으로 영국, 캐나다, 인도, 중국, 호주 등 아열대 지역에서 발생하며(Dosdall, 1994; Chapman et al., 2002; Uthamasamy et al., 2011; Wei et al., 2013; Perry et al., 2019), 세계 경제에 연간 40 - 50억 달러의 경제적 손실을 입히는 것으로 보고되고 있다(Furlong et al., 2013). 국내에서 배추좀나방은 이른 봄철과 가을에 발생하는 것으로 보고되고 있다(Kim and Lee, 1991). 배추좀나방의 가해는 유충 단계에서 발생하며 령기에 따라 1령충은 주로 잎의 해면엽육조직을 가해하며 노령유충은 아래 잎표면을 가해하여 잎에 구멍을 내어 작물의 성장을 더디게 하면서, 피해 작물의 상품적 가치를 하락시키고 수량 손실을 초래하여 경제적인 피해를 끼친다(Kim et al., 2000; Jeon et al., 2005).

배추좀나방을 방제하기 위하여 많은 종류의 화학합성 살충제들이 등록되어 있는데, 유기인계(Wang and Wu, 2012; Kim et al., 2017), 피레스로이드계, 곤충성장저해제(insect growth regulator, IGR) 계통(Douris et al., 2016; dos Santos Stecca et al., 2017), 스피노신계(Zhao et al., 2006; Lima Neto et al., 2016), 디아마이드계(Wang and Wu, 2012; Ribeiro et al., 2017) 등과 같이 여러 종류의 작용기작을 가지고 있는 살충제가 사용되고 있다. 또한 *Bacillus thuringiensis* (B.t) 균주를 사용한 살충제(Tabashnik et al., 1990; Zago et al., 2014)와 식물성 기름 성분을 사용한 살충제(Pavela, 2012; Filomeno et al., 2017)가 사용되고 있다.

하지만 살충제의 오남용에 따른 배추좀나방의 살충제에 대한 저항성이 전세계적으로 발달되고 있다고 보고되고 있다. 중국의 양쯔강 지역의 배추좀나방에서는 abamectin과 chrolfenapyr에서 높은 수준의 저항성이 보고되었다(Jiang et al., 2015). 호주에서는 피레스로이드계 살충제의 사용이 증가함에 따라 저항성이 발달하였다는 연구 보고가 있다(Endersby et al., 2008). 또한 dimide 계열의 살충제는 배추좀나방을 포함한 남미토마토나방(*Tuta absoluta*), 파밤나방(*Spodoptera exigua*), 이화명나방(*Chilo suppressalis*), 차애모무늬잎말이나방(*Adoxophyes honmai*)과 같은 나비목 해충에서 저항성이 나타나고 있다는 보고도 있다(Wang and Wu, 2012; Uchiyama and Ozawa, 2014; Roditakis et al., 2015; Kang et al., 2017; Yao et al., 2017; Zuo et al., 2017).

국내에서는 1991년 대관령 지역 개체군에서 B.t계 약제에 대한 저항성 발달(41.3배)이 보고되었고(Song, 1991), 유기인계, 피레스로이드계, 유기염소계 살충제에서 각각 3.3 - 61.1, 7.5 - 141.7, 10.5 - 33.3배 저항성이 발달한 것으로 조사되었다(Lee et al., 1993). 이후 카바메이트계(Cho et al., 2001)와 B.t계(Kim et al., 2010) 약제들에 저항성 발달이 보고되고 있다.

배추좀나방의 저항성 발달에 관한 연구가 늘어남에 따라 국내에서도 인도와 중국과 같이 살충제 저항성 및 감수성을 모니터링하고 대책을 수립할 필요성이 제기되고 있다(Jiang et al., 2015; Kwon et al., 2015; Tamilselvan et al., 2021). 따라서 본 논문에서는 국내 5개의 권역 중 경기도와 영남 권역의 3개의 시·군의 배추 재배지에서 채집된 각 시군의 배추좀나방 개체군에 대하여 배추좀나방에 등록된 살충제 가운데 단제로 된 8개 살충제에 대하여 감수성을 모니터링하고 경제적이고 지역별 저항성 개체의 발생을 지도화하여 효과적인 방제법을 모색하고자 한다.

Materials and Methods

대상곤충 채집 및 사육방법

본 실험에 사용된 배추좀나방(*P. xylostella*) 지역 개체군은 경기도와 영남 권역 각 3개의 시군에서 채집하였다. 2023년 3월부터 5월까지 경기도 여주(YJ), 경기도 용인(YI), 경기도 포천(PC), 경상남도 김해(GH), 경상북도 상주

(SJ), 경상남도 통영(TY)의 배추 재배지에서 채집하였다(Table 1). 지역 개체군의 유지 및 증식은 지역별 개체군의 오염을 방지하기 위하여 각각의 아크릴케이지(30 cm × 30 cm × 60 cm)에 배추 유묘를 정기적으로 공급하여 온도 25 ± 2℃, 상대 습도 50 - 60%, 광조건 16L : 8D 조건에서 누대 사육하였다. 실험에 사용할 감수성 개체군을 평가하고자 충남대학교 곤충생리학실험실에서 10년이상 살충제에 노출시키지 않고 누대 사육한 개체군(S1)과 ㈜동방아그로에서 15년이상 살충제에 노출시키지 않고 누대 사육한 개체군(S2)을 분양받아 실험하였다.

Table 1. Sites of *Plutella xylostella* collection.

Collection sites		Coordinate	Population	Collection date
Laboratory susceptible strain		-	SUS	-
Gyeonggi	Yeoju	37.2523, 127.637	YJ	23.05.26
	Yongin	37.22101, 127.2229	YI	23.04.01
	Pocheon	37.82164, 127.1584	PC	23.05.03
Yeongnam	Gimhae	35.2198, 128.92	GH	23.03.23
	Sangju	36.3543, 128.136	SJ	23.03.31
	Tongyeong	34.86666, 128.4374	TY	23.04.07

SUS, susceptible population; YJ, Yeoju; YI, Yongin; PC, Pocheon; GH, Gimhae, SJ, Sangju; TY, Tongyeong.

실험약제

실험에서 사용된 약제는 2023년 현재 배추좀나방에 등록되어 있는 살충제 중 Insecticide Resistance Action Committee (IRAC)에서 제시한 살충제의 계열 구분법에 따라서 14개의 단제를 우선 선발하였다. 그 중 사용량이 많은 살충제 8종, etofenprox (20% EC, Sebero, Kyung Nong, Korea), spinetoram (5% WG, Delegate, FarmHannong, Korea), emamectin benzoate (2.15% EC, Eipam, Syngenta, Korea), chlorfenapyr (10% SC, Sekkueo, FarmHannong, Korea), methoxyfenozide (21% SC, Runner, FarmHannong, Korea), indoxacarb (5% SC, Jonggyeolja, Hanearl Science, Korea), cyantraniliprole (5% EC, Prokyueo, Kyung Nong, Korea), fluxametamide (9% EC, Captain, Kyung Nong, Korea)를 선발하여 사용하였다(Table 2).

Table 2. Characteristics of the used insecticide against *P. xylostella* in this study.

IRAC classification	Insecticide	Chemical group	Formulation & active ingredient (%)	Recommended concentration (ppm)
3a	Etofenprox	Pyrethroids	EC, 20%	100
5	Spinetoram	Spinosyns	WG, 5%	25
6	Emamectin benzoate	Avermectins	EC, 2.15%	10.8
13a	Chlorfenapyr	Pyrroles	SC, 10%	50
18	Methoxyfenozide	Diacylhydrazines	SC, 21%	105
22a	Indoxacarb	Oxadiazines	SC, 5%	50
28	Cyantraniliprole	Diamides	EC, 5%	25
30	Fluxametamide	Meta-diamides	EC, 9%	45

IRAC, Insecticide Resistance Action Committee.

생물검정

배추좀나방의 생물검정 방법은 IRAC에서 제안한 'IRAC SUSCEPTIBILITY TEST METHOD 018'에 따른 엽침지법(leaf dipping method)으로 수행하였다. 배춧잎 절편(6 cm)을 각 농도의 살충제 용액에 30초간 침지 후 3시간동안 음건하였다.

약제 처리된 배추 절편을 여과지(Filter-paper No.1, ADVANTEC Group, Japan)를 깐 petri dish (Cat. No. 10090, SPL

Life Sciences, Korea)에 옮기고 실내 증식한 배추좀나방 2 - 3령 유충을 10마리씩 6반복으로 접종하였다. 사충수 조사는 접종 72시간 후에 수행하였으며, methoxyfenozide는 IRAC에서 IGR로 분류하여 지효성 살충제 효력 확인 기준인 120시간 후에 사충수를 조사하여 약효를 판단하였다. 약제별 반수치사농도(LC_{50}) 산출은 Abbott의 공식을 따른 보정사충률을 산출 후(Abbott, 1925), SPSS (version 13.0, SPSS, USA)를 이용한 probit분석을 수행하였다(Finney, 1971).

Results and Discussion

감수성 개체군 평가 및 선발

저항성 수준을 비교하기 위해 감수성 평가가 필요하여 감수성 개체로 사용된 S1 개체군과 S2 개체군의 살충제에 대한 감수성 실험 결과, S2 개체군의 LC_{50}값은 etofenprox 0.224 ppm, spinetoram 0.006 ppm, emamectin benzoate 0.010 ppm, chlorfenapyr 0.831 ppm, methoxyfenozide 0.060 ppm, indoxacarb 0.012 ppm, cyantraniliprole 0.003 ppm, fluxametamide 0.004 ppm으로 S1 개체군에 비하여 현저하게 낮게 나타났다. S1 개체군의 경우 대부분의 살충제에 대해 지역별 개체군보다 높은 LC_{50}값이 나오는 것도 있어서 S2를 실험실 개체군(Laboratory population, LAB)으로 선발하였고 이를 감수성 개체로 하여 저항성 발달 정도를 검토하였다(Table 3).

Table 3. Compare of LC_{50} (ppm) values to each insecticide after treatment for 3 or 5 days with susceptible *P. xylostella* S1 and S2 population.

Insecticide	S1	S2
	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{50} (ppm) (95% CL)
Etofenprox	102.592 (71.993 - 126.818)	0.224 (0.113 - 0.378)
Spinetoram	0.224 (0.158 - 0.314)	0.006 (0.0006 - 0.015)
Emamectin benzoate	0.312 (0.263 - 0.382)	0.010 (0.004 - 0.017)
Chlorfenapyr	2.758 (2.043 - 3.642)	0.831 (0.543 - 1.237)
Methoxyfenozide	9.372 (6.943 - 12.549)	0.060 (0.011 - 0.157)
Indoxacarb	0.230 (0.149 - 0.341)	0.012 (0.001 - 0.030)
Cyantraniliprole	0.317 (0.216 - 0.455)	0.003 (0.0001 - 0.011)
Fluxametamide	2.491 (1.852 - 3.294)	0.004 (0.00007 - 0.16)

CL, confidential limits.

국내 지역별 저항성 수준 비교

국내 5개 권역 중 경기도와 영남 2개 권역 3개의 시·군 배추 재배지에서 배추좀나방을 채집하여 증식한 후 엽침지법으로 생물검정을 진행하였다. 지역 개체군 LC_{50}값을 구하고 S2 개체군의 LC_{50}값과 비교한 값(resistance ratio, 이하 저항성비)을 산출하였다. 경기도 여주에서 채집한 개체군으로 실험 결과, 여주 개체군의 저항성비는 etofenprox 34.00배, spinetoram 40.50배, emamectin benzoate 5.00배, chlorfenapyr 2.04배, methoxyfenozide 114.88배, indoxacarb 54.75배, cyantraniliprole 119.00배, fluxametamide 64.00배로 나왔으며(Table 4), methoxyfenozide와 cyantraniliprole은 높은 저항성비를 보였다. 경기도 용인 개체군의 저항성비는 etofenprox 34.67배, spinetoram 23.50배, emamectin benzoate 7.30배, chlorfenapyr 2.84배, methoxyfenozide 37.90배, indoxacarb 42.92배, cyantraniliprole 166.33배, fluxametamide 195.25배로 나왔다(Table 5). Cyantraniliprole와 fluxametamide 약제가 높은 저항성비를 나타냈다. 경기도 포천 개체군의 저항성비는 etofenprox 40.05배, spinetoram 0.08배, emamectin benzoate 38.42배, chlorfenapyr 0.02배, methoxyfenozide 283.23배, indoxacarb 0.09배, cyantraniliprole 3.51배, fluxametamide 0.21배로 비교적 methoxyfenozide 저항성비가 높았다(Table 6).

Table 4. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Yeoju population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	7.615 (4.623 - 13.299)	256.252 (104.245 -1036.930)	240	22	0.839 ± 0.103	13.605	34.00
Spinetoram	0.243 (0.148 - 0.380)	4.828 (2.632 - 11.343)	240	22	0.986 ± 0.109	19.094	40.50
Emamectin benzoate	0.050 (0.029 - 0.079)	0.887 (0.499 - 1.990)	240	22	1.027 ± 0.119	11.918	5.00
Chlorfenapyr	1.699 (1.167 - 2.460)	16.052 (9.753 -31.793)	240	22	1.313 ± 0.135	17.826	2.04
Methoxyfenozide	6.893 (3.582 - 14.905)	942.908 (233.861 -11213.612)	240	22	0.599 ± 0.091	18.693	114.88
Indoxacarb	0.657 (0.439 - 0.959)	6.510 (4.008 - 12.540)	240	22	1.286 ± 0.133	17.716	54.75
Cyantraniliprole	0.357 (0.244 - 0.513)	2.997 (1.888 - 5.603)	240	22	1.387 ± 0.144	17.286	119.00
Fluxametamide	0.256 (0.178 - 0.364)	1.685 (1.064 - 3.236)	240	22	1.565 ± 0.181	11.956	64.00

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} of a laboratory population.

Table 5. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Yongin population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	7.767 (4.576 - 14.122)	345.642 (127.744 -1709.054)	240	22	0.777 ± 0.102	16.685	34.67
Spinetoram	0.141 (0.087 - 0.217)	2.025 (1.173 - 4.328)	240	22	1.108 ± 0.125	14.596	23.50
Emamectin benzoate	0.073 (0.053 - 0.102)	0.373 (0.244 - 0.680)	240	22	1.817 ± 0.215	11.690	7.30
Chlorfenapyr	2.358 (1.544 - 3.608)	37.298 (20.039 - 90.717)	240	22	1.069 ± 0.117	10.754	2.84
Methoxyfenozide	2.274 (1.471 - 3.465)	36.626 (20.259 - 83.725)	240	22	1.062 ± 0.112	16.107	37.90
Indoxacarb	0.515 (0.351 - 0.742)	4.249 (2.663 - 8.015)	240	22	1.398 ± 0.147	8.786	42.92
Cyantraniliprole	0.499 (0.206 - 0.724)	4.941 (3.019 - 9.694)	240	22	1.287 ± 0.134	16.256	166.33
Fluxametamide	0.781 (0.559 - 1.077)	4.086 (2.735 - 7.109)	240	22	1.784 ± 0.199	8.101	195.25

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} a laboratory population.

Table 6. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Pocheon population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	8.972 (5.724 - 14.719)	188.349 (86.842 - 616.151)	240	22	0.969 ± 0.117	19.872	40.05
Spinetoram	0.281 (0.194 - 0.399)	1.992 (1.283 - 3.618)	240	22	1.507 ± 0.160	14.284	0.08
Emamectin benzoate	1.268 (1.131 - 1.607)	2.437 (1.809 - 7.039)	240	22	4.521 ± 1.324	31.726	38.42
Chlorfenapyr	2.186 (1.543 - 3.078)	15.569 (9.909 - 29.018)	240	22	1.503 ± 0.159	23.965	0.02
Methoxyfenozide	5.894 (3.786 - 9.486)	118.314 (57.126 - 347.556)	240	22	0.983 ± 0.112	16.254	283.23
Indoxacarb	1.034 (0.698 - 1.512)	10.850 (6.533 - 21.688)	240	22	1.255 ± 0.128	15.224	0.09
Cyantraniliprole	0.468 (0.318 - 0.678)	4.420 (2.714 - 8.565)	240	22	1.314 ± 0.134	16.697	3.51
Fluxametamide	0.354 (0.246 - 0.503)	2.389 (1.522 - 4.457)	240	22	1.545 ± 0.169	6.234	0.21

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} a laboratory population.

영남권역 김해와 상주에서 채집한 개체군으로 실험 결과, 김해 개체군의 저항성비는 etofenprox 44.65배, spinetoram 27.17배, emamectin benzoate 3.60배, chlorfenapyr 1.90배, methoxyfenozide 80.97배, indoxacarb 61.67배, cyantraniliprole 138.00배, fluxametamide 89.50배로 나왔으며(Table 7), 상주 개체군의 저항성비는 etofenprox 36.11배, spinetoram 24.50배, emamectin benzoate 3.70배, chlorfenapyr 2.81배, methoxyfenozide 85.83배, indoxacarb 57.00배, cyantraniliprole 224.67배, fluxametamide 303.25배로 나왔다(Table 8). 영남 권역 통영 개체군의 저항성비는 etofenprox 23.34배, spinetoram 0.11배, emamectin benzoate 12.33배, chlorfenapyr 0.03배, methoxyfenozide 367.28배, indoxacarb 0.08배, cyantraniliprole 2.57배, fluxametamide 0.25배로 나왔다(Table 9).

Table 7. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Gimhae population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	10.002 (6.110 - 17.760)	310.728 (123.686 - 1335.096)	240	22	0.859 ± 0.109	9.525	44.65
Spinetoram	0.163 (0.102 - 0.249)	2.334 (1.348 - 5.004)	240	22	1.110 ± 0.123	11.696	27.17
Emamectin benzoate	0.036 (0.023 - 0.054)	0.370 (0.222 - 0.762)	240	22	1.272 ± 0.154	10.011	3.60
Chlorfenapyr	1.577 (1.085 - 2.267)	14.120 (8.726 - 27.237)	240	22	1.346 ± 0.139	15.073	1.90
Methoxyfenozide	4.858 (2.556 - 9.804)	580.888 (162.263 - 5241.093)	240	22	0.617 ± 0.091	9.823	80.97
Indoxacarb	0.740 (0.509 - 1.056)	5.774 (3.673 - 10.656)	240	22	1.437 ± 0.150	12.435	61.67
Cyantraniliprole	0.414 (0.234 - 0.696)	4.034 (2.321 - 10.917)	240	22	1.296 ± 0.136	37.707	138.00
Fluxametamide	0.358 (0.255 - 0.504)	2.051 (1.322 - 3.810)	240	22	1.692 ± 0.192	17.559	89.50

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} of a laboratory population.

Table 8. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Sangju population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	8.088 (4.838 - 14.536)	312.156 (119.135 - 1450.061)	240	22	0.807 ± 0.104	20.686	36.11
Spinetoram	0.147 (0.106 - 0.206)	0.756 (0.491 - 1.417)	240	22	1.805 ± 0.218	13.515	24.50
Emamectin benzoate	0.037 (0.022 - 0.058)	0.583 (0.331 - 1.308)	240	22	1.071 ± 0.130	15.165	3.70
Chlorfenapyr	2.334 (1.574 - 3.491)	28.355 (15.996 - 63.493)	240	22	1.181 ± 0.125	31.573	2.81
Methoxyfenozide	5.150 (3.028 - 9.104)	234.922 (91.478 - 1025.985)	240	22	0.772 ± 0.096	14.971	85.83
Indoxacarb	0.684 (0.354 - 0.797)	5.986 (3.621 - 11.875)	240	22	1.226 ± 0.129	31.615	57.00
Cyantraniliprole	0.674 (0.448 - 1.012)	9.013 (5.106 - 19.789)	240	22	1.137 ± 0.117	21.807	224.67
Fluxametamide	1.213 (0.807 - 1.822)	16.223 (9.191 - 35.619)	240	22	1.137 ± 0.117	21.807	303.25

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} of a laboratory population.

Table 9. LC_{50} and LC_{90} values to each insecticide with Tongyeong population *P. xylostella* after treatment for 3 or 5 days.

Insecticide	LC_{50} (ppm) (95% CL)	LC_{90} (ppm) (95% CL)	N	df	Slope ± SE	x^2	RR
Etofenprox	5.229 (3.549 - 7.682)	57.112 (33.272 - 122.560)	240	22	1.234 ± 0.133	16.356	23.34
Spinetoram	0.363 (0.248 - 0.521)	3.049 (1.915 - 5.722)	240	22	1.386 ± 0.143	11.270	0.11
Emamectin benzoate	0.407 (0.253 - 0.599)	4.481 (2.823 - 8.594)	240	22	1.230 ± 0.147	27.438	12.33
Chlorfenapyr	2.997 (1.979 - 4.591)	44.698 (23.847 - 110.863)	240	22	1.092 ± 0.121	12.829	0.03
Methoxyfenozide	7.643 (3.901 - 17.599)	1189.509 (269.021 - 17408.499)	240	22	0.584 ± 0.091	26.350	367.28
Indoxacarb	0.926 (0.615 - 1.363)	10.672 (6.360 - 21.768)	240	22	1.207 ± 0.127	32.050	0.08
Cyantraniliprole	0.343 (0.226 - 0.647)	3.933 (2.356 - 7.926)	240	22	1.209 ± 0.126	23.445	2.57
Fluxametamide	0.416 (0.286 - 0.594)	3.040 (1.930 - 5.656)	240	22	1.483 ± 0.158	9.979	0.25

CL, confidential limits; N, number of larvae tested; df, fiducial limit; SE, standard error; RR, resistance ratio = LC_{50} of a field population/ LC_{50} of a laboratory population.

약제별 저항성 수준 비교

Etofenprox는 pyrethroid계 살충제로 1987년에 최초로 개발되었으며, 체내에 침투하여 신경계의 나트륨 채널을 조절하여 신경조절을 방해하는 속효성 살충제이다(Hemingway, 1995). Etofenprox의 저항성 개체 보고는 상용화 이후 1년이 경과한 1988년, 바퀴(*Blatella germanica*)에서 최초로 발견되었다(Umeda et al., 1988). 국내 배추좀나방의 etofenprox 저항성에 관한 연구에서 지역 개체군 LC_{50}값이 1.1 - 2.3 ppm으로 중간 수준의 저항성이 발달되었다 보고했으나(Jeong et al., 2017), 본 실험에서는 Etofenprox의 경기와 영남 권역 지역 개체군 LC_{50}값은 5.229 - 10.002 ppm으로 높은 값을 나타내지만 저항성비를 비교하였을 때는 비교적 높지 않은 값을 나타낸다,

Spinetoram은 spinosyn계 살충제로 주로 신경전달물질에서 억제 작용하는 gamma-aminobutyric acid (GABA)의 전달을 막아 신경 교란을 유발하는 살충제이다(DeAmicis et al., 2011; Zhao et al., 2015; Yin et al., 2017) 인도 배추좀나

방의 spinetoram 저항성에 관한 연구에서 지역 개체군의 LC_{50}값이 최대 1.57 ppm로 나왔으며 이를 중간 정도의 저항성으로 평가했다(Tamilselvan et al., 2021). 본 실험에서 spinetoram LC_{50}값은 0.141 - 0.363 ppm으로 높은 저항성이 발생한 지역은 없었다.

Emamectin benzoate은 avamectin계 살충제로 토양 방선균 *Streptomyces avermitilis*의 발효과정에서 생성되는 물질로 신경근육연접(neuromuscular junction) 부위의 마비 유발을 통하여 해충을 치사에 이르게 하는 작용기작을 가졌다(Jansson et al., 1997). 인도와 하와이 배추좀나방의 emamectin benzoate 저항성 연구에서 지역개체군의 LC_{50}값이 각각 최대 31.77, 39.07 ppm을 보여 저항성 개체로 보고하였다(Mau and Gusukuma-Minuto, 2001; Biradar et al., 2020). 본 실험에서 emamectin benzoate LC_{50}값은 0.036 - 1.268 ppm으로 높은 저항성이 발생한 지역은 없었다.

Chlorfenapyr의 작용기작은 세포 내 미토콘드리아의 ATP (adenosine triphosphate) 생산 과정 중 산화적 인산화 단계를 방해하여 에너지를 생성을 차단하여 치사를 유발하는 살충제로(Raghavendra et al., 2011), 대만에서 chlorfenapyr 저항성 연구에서 지역개체군의 LC_{50}값이 20.56 - 167.05 ppm으로 높은 저항성 개체가 발생하였다 보고했다(Kao and Cheng, 2001). 본 실험에서 chlorfenapyr의 LC_{50}값은 1.577 - 2.997 ppm으로 나오고 저항성 비도 0.02 - 2.84배로 나왔으나, 감수성 개체군의 LC_{50}값이 0.831 ppm으로 비교적 높게 나왔으므로 저항성을 가지고 있다고 생각된다.

Methoxyfenozide는 나방류 해충에 특이적 살충효과를 갖는 diacylhydrazine계 살충제로 기존 살충제와는 다른 작용기작으로 타 살충제에 저항성이 생긴 해충에도 교차저항성이 발생하기 힘든 특성을 가졌다(Schneider et al., 2003; Rehan and Freed, 2014). 해충의 탈피호르몬을 유도하여 비정상적으로 빠른 탈피를 촉진하여 치사에 이르게 하는 작용기작을 가진 지효성 살충제로(Smagghe et al., 2003), 하와이 배추좀나방의 methoxyfenozide 저항성 연구에서 LC_{50}값이 최대 235.00 ppm으로 저항성 개체 발생으로 보고되었다(Ellison, 2007). 본 실험에서 methoxyfenozide의 LC_{50}값은 2.274 - 7.643 ppm이고, 저항성비는 37.90 - 367.28배로 나왔다. 경기도에서는 여주와 포천에서 저항성비 114.88배와 283.23배로 2지역에서 저항성비가 높게 나타났다. 영남 권역에서는 통영에서 367.28배로 높은 저항성비를 보였다.

Indoxacarb는 oxadiazine계 살충제로 sodium channels을 차단하여 화학 신호 전달을 방해, 운동신경계를 교란하여 해충을 치사에 이르게 하는 작용기작을 가졌다(Wing et al., 2000). 국내 배추좀나방의 indoxacarb 저항성 연구에서 지역 개체군 LC_{50}값이 0.8 - 1.4 ppm으로 나와 조사 지역에서 저항성이 발달하지 않은 것으로 보고되었다(Jeong et al., 2017). 본 실험에서 LC_{50}값은 0.515 - 1.034 ppm으로 유사한 결과를 보였으나, 저항성비는 경기도 여주와 용인에서 54.75, 42.92배이고, 영남 권역 김해와 상주에서 61.67, 57.00배로 중간 정도 저항성이 발달하였음을 확인하였다. 저항성이 발생했다고 보긴 어렵지만 지속적인 모니터링을 필요로 한다.

Cyantraniliprole은 diamide계 살충제로 해충의 근육 세포 내 칼슘채널을 저해하여 섭식 억제를 통해 치사에 이르게 하는 작용기작을 가졌다(Selby et al., 2013). 국내 배추좀나방의 Cyantraniliprole 저항성 연구에서 지역 개체군에 LC_{50}값이 0.02 - 0.95 ppm으로 낮은 저항성을 보인다 보고했다(Cho et al., 2018). 본 실험에서 Cyantraniliprole은 0.343 - 0.674 ppm으로 유사한 LC_{50}값을 보였으나, 경기도 여주와 용인에서 119.00, 166.33배로 높은 저항성비를 보였으며, 영남 권역 김해와 상주에서 138.00, 224.67배의 높은 저항성비를 보여 저항성이 발달한 것으로 보인다.

Fluxametamide는 기존 diamide계에서 개량된 meta-diamide계 살충제로, GABA의 전달을 차단하고 신경 교란을 유발하여 해충의 성장, 섭식, 번식력 및 다양한 생리학적 및 생화학적 과정에 장애를 주어 치사에 이르게 하는 작용기작을 가졌다(Quan et al., 2016; Umetsu and Shirai, 2020; Jeschke, 2021; Gope et al., 2022). 국내에서 배추좀나방의 살충제로 효력이 뛰어나다는 연구 결과가 있으나(Kim et al., 2019) 저항성에 관한 구체적인 연구는 아직까지 진행되지 않았다. 본 실험에서는 0.256 - 1.213 ppm의 LC_{50}값을 보였으며, 저항성비는 경기도 여주에서는 64.00배로 중간 정도의 저항성비를 보였으며, 경기도 용인에서는 195.25배로 높은 저항성비를 나타냈다. 영남 권역 김해와 상

주에서는 89.50배와 303.25배로 높은 저항성 발달을 보였다.

현재 국내에 등록된 대다수 배추좀나방 살충제는 추천 희석 배수가 배추좀나방뿐만 아니라 배추흰나비, 담배거세미나방, 파밤나방 등과 같이 몸집이 더 크고 살충 효력을 보기 위해 더 많은 성분을 투여해야 하는 해충들과 같은 배수로 희석해서 방제하도록 등록되어있다(RDA, 2023). 이는 배추좀나방의 살충제 감수성 실험 결과 높은 살충률을 나타내는 이유이다.

Etofenprox, chlorfenapyr, methoxyfenozide는 다른 살충제들에 비하여 LC_{50}값이 높게 나왔으나 etofenprox, chlorfenapyr와 mehoxyfenozide의 저항성비는 낮게 나왔다. 이는 본 실험에 사용한 감수성 개체군(S2)이 2007년부터 누대사육을 개시하였기에 2007년 이전에 사용 개시한 살충제 etofenprox (1996), chlorfenapyr (1997), methoxyfenozide (2000), indoxacarb (2000) 중에서 etofenprox, chlorfenapyr, methoxyfenozide에 대하여 저항성을 가진 개체로 사육을 시작하여 생긴 결과로 보인다. 2007년 이후에 사용 개시한 살충제들인 spinetoram (2009), emamectin benzoate (2007), cyantraniliprole (2012), fluxametamide (2018)는 모두 높은 살충 효력과 낮은 LC_{50}값을 보였으나 cyantraniliprole과 fluxametamide에서 높은 저항성비를 보였다. 이는 경기도와 영남 권역 지역 개체군이 아직 spinetoram과 emamectin benzoate에 저항성을 가지고 있지 않고 cyantraniliprole과 fluxametamide에서는 저항성이 발달하고 있는 과정으로 보인다.

Endersby 등(2008)은 주로 사용되는 살충제에 대해 저항성 개체만 생존하는 연구 결과를 보고했으며, 해당 지역에서 저항성이 높은 살충제는 사용량이 높은 살충제임을 알 수 있음을 제시하였다. 따라서 현재 등록된 농약 개체군에 대해 지역별로 약제 저항성 수준을 파악하고 지속적인 모니터링을 통해 농약 연용에 의해 저항성 병해충 출현 속도 가속화를 줄이고, 지역에 따른 저항성 정보를 토대로 최선의 약제 선발 기준 제공에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 “농촌진흥청 농작물 주요 해충에 대한 농약 저항성 조사(RS-2022-RD010420)” 과제를 통해 지원받았습니다.

Authors Information

Hee Ji Kim, https://orcid.org/0009-0009-6100-6418

Hyun Ko, https://orcid.org/0009-0000-1140-2775

Young Nam Youn, https://orcid.org/0000-0002-4956-1904

References

Abbott WS. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology 18:265-267.

Biradar R, Bheemanna M, Hosamani A, Naik H, Naik N, Kandpal K. 2020. Emamectin benzoate resistance in diamondback moth in different locations of Karnataka. Journal of Entomology and Zoology Studies 8:712-714.

Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, Riley JR, Pedgley DE, Woiwod IP. 2002. High-altitude migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* to the U.K.: A study using radar, aerial netting, and ground trapping. Ecological Entomology 27:641-650.

Cho JM, Kim KJ, Kim S, Hur JH, Han DS. 2001. Diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) resistance to organophosphorus and carbamate insecticides in Kangwon alpine vegetable croplands. The Korean Journal of Pesticide Science 5:30-35. [in Korean]

Cho SR, Kyung Y, Shin S, Kang WJ, Jeong DH, Lee SJ, Park GH, Kim SI, Cho SW, Kim HK, et al. 2018. Susceptibility of field populations of *Plutella xylostella* and *Spodoptera exigua* to four diamide insecticides. Korean Journal of Applied Entomology 57:43-50.

Couty A, Van Emden H, Perry JN, Hardie J, Pickett JA, Wadhams LJ. 2006. The roles of olfaction and vision in host-plant finding by the diamondback moth, *Plutella xylostella*. Physiological Entomology 31:134-145.

DeAmicis C, Edwards NA, Giles MB, Harris GH, Hewitson P, Janaway L, Ignatova S. 2011. Comparison of preparative reversed phase liquid chromatography and countercurrent chromatography for the kilogram scale purification of crude spinetoram insecticide. Journal of Chromatography A 1218:6122-6127.

dos Santos Stecca C, da Silva DM, de Freitas Bueno A, Pasini A, Denez MD, Andrade K. 2017. Seletividade de inseticidas utilizados na cultura da soja ao predador *Podisus nigrispinus* (Hemiptera: Pentatomidae). Semina: Ciências Agrárias 38:3469-3480.

Dosdall LM. 1994. Evidence for successful overwintering of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae), in Alberta. The Canadian Entomologist 126:183-185.

Douris V, Steinbach D, Panteleri R, Livadaras I, Pickett JA, Van Leeuwen T, Nauen R, Vontas J. 2016. Resistance mutation conserved between insects and mites unravels the benzoylurea insecticide mode of action on chitin biosynthesis. Proceedings of the National Academy of Sciences 113:14692-14697.

Ellison FV. 2007. Characterization of fitness costs associated with insecticide resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from Hawaii. p. 42. University of Delaware, Newark, USA.

Endersby NM, Ridland PM, Hoffmann AA. 2008. The effects of local selection versus dispersal on insecticide resistance patterns: Longitudinal evidence from diamondback moth (*Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)) in Australia evolving resistance to pyrethroids. Bulletin of Entomological Research 98:145-157.

Filomeno CA, Barbosa LCA, Teixeira RR, Pinheiro AL, de Sá Farias E, de Paula Silva EM, Picanço MC. 2017. *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. essential oils have insecticidal activity against *Plutella xylostella*. Industrial Crops and Products 109:374-383.

Finney DJ. 1971. Statistical logic in the monitoring of reactions to therapeutic drugs. Methods of Information in Medicine 10:237-245.

Furlong MJ, Wright DJ, Dosdall LM. 2013. Diamondback moth ecology and management: Problems, progress, and prospects. Annual Review of Entomology 58:517-541.

Gope A, Chakraborty G, Ghosh SM, Sau S, Mondal K, Biswas A, Sarkar S, Sarkar PK, Roy D. 2022. Toxicity and sublethal effects of fluxametamide on the key biological parameters and life history traits of diamondback moth *Plutella xylostella* (L.). Agronomy 12:1656.

Hemingway J. 1995. Efficacy of etofenprox against insecticide susceptible and resistant mosquito strains containing characterized resistance mechanisms. Medical and Veterinary Entomology 9:423-426.

Jansson RK, Brown R, Cartwright B, Cox D, Dunbar DM, Dybas RA, Eckel C, Lasota JA, Mookerjee PK, Norton JA, et al. 1997. Emamectin benzoate: A novel avermectin derivative for control of lepidopterous pests. pp. 1-7. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests. MARDI, Kuala Lumpur, Malaysia. Vegetable Pest Management.

Jeon HY, Kim HH, Yang CY, Jang HI, Mok IG, Yiem MS. 2005. Damage and control threshold of the diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) in Chinese cabbage. Korean Journal of Horticultural Science & Technology 23:333-336. [in Korean]

Jeong IH, Lee SK, Gao Y, Jeon SW, Park B, Lee SB, Jeong JK, Lee SW, Lee SH, Kwon DH. 2017. Assessment of resistance levels of *Plutella xylostella* field populations to 11 pesticides and concept establishment for pesticide efficacy index. The Korean Journal of Pesticide Science 21:214-223. [in Korean]

Jeschke P. 2021. Status and outlook for acaricide and insecticide discovery. Pest Management Science 77:64-76.

Jiang T, Wu S, Yang T, Zhu C, Gao C. 2015. Monitoring field populations of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) for resistance to eight insecticides in China. Florida Entomologist 98:65-73.

Kang WJ, Koo HN, Jeong DH, Kim HK, Kim J, Kim GH. 2017. Functional and genetic characteristics of Chlorantraniliprole resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Entomological Research 47:394-403.

Kao CH, Cheng EY. 2001. Insecticide resistance in *Plutella xylostella* L. XI. Resistance to newly introduced insecticides in Taiwan (1990-2001). Journal of Taiwan Agricultural Research 50:80-89.

Kim J, Nam HY, Kwon M, Kim GH. 2019. Diamides resistance status and management strategy of Spodoptera exigua (Lepidoptera: Noctuidae) in South Korea. pp. 125-132. In Proceeding of VIII International Conference on Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests.

Kim JI, Joo YR, Kwon M, Kim GH, Lee SH. 2017. Mutations in ace1 associated with an organophosphate insecticide resistant population of *Plutella xylostella*. Mysore Journal of Agricultural Sciences 51:69-76.

Kim JY, Lee EJ, Park SK, Choi GW, Baek NK. 2000. Physicochemical quality characteristics of several Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* RuPR) cultivars. Korean Journal of Horticultural Science & Technology 18:348-352. [in Korean]

Kim MH, Lee SC. 1991. Bionomics of diamond-back moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in southern region of Korea. Korean Journal of Applied Entomology 30:169-173. [in Korean]

Kim YR, Cho MS, Oh SM, Kim SW, Youn YN, Yu YM. 2010. Resistance and susceptibility of diamondback moth, *Plutella xylostella* strains collected from different region in Korea to *Bacillus thuringiensis*. The Korean Journal of Pesticide Science 14:123-132. [in Korean]

Kwon DH, Kim K, Kang TJ, Kim SJ, Choi BR, Kim JI, Lee SH. 2015. Establishment of an insecticide resistance monitoring protocol based on the residual contact vial bioassay for *Frankliniella occidentalis*. Journal of Asia-Pacific Entomology 18:311-314.

Lee SC, Cho YS, Kim DI. 1993. Comparative study of toxicological methods and field resistance to insecticides in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). Korean Journal of Applied Entomology 32:323-329. [in Korean]

Lima Neto JE, Amaral MHP, Siqueira HAA, Barros R, Silva PAF. 2016. Resistance monitoring of *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae) to risk-reduced insecticides and cross resistance to spinetoram. Phytoparasitica 44:631-640.

Mau RFL, Gusukuma-Minuto L. 2001. Diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), resistance management in Hawaii. pp. 26-29. In Proceeding of The Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests 4th Intl Work.

Pavela R. 2012. Efficacy of three newly developed botanical insecticides based on pongam oil against *Plutella xylostella* L. larvae. Journal of Biopesticides 5:62-70.

Perry KD, Baxter SW, Keller MA. 2019. Unveiling diamondback moth, *Plutella xylostella*, movement at landscape and regional scales. pp. 33-41. In Proceeding of VIII International Conference on Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests.

Quan LF, Zhang HJ, Sun L, Li YY, Yan WT, Yue Q, Qiu GS. 2016. Research advances in sublethal effect of pesticide. Journal of Agricultural 6:33-38.

Raghavendra K, Barik TK, Sharma P, Bhatt RM, Srivastava HC, Sreehari U, Dash AP. 2011. Chlorfenapyr: A new insecticide with novel mode of action can control pyrethroid resistant malaria vectors. Malaria Journal 10:16.

RDA. 2023. List of pesticide products. Pesticide Safety Information System. Accessed in https://psis.rda.go.kr/psis/agc/res/agchmRegistStusLst.ps on 27 October 2023.

Rehan A, Freed S. 2014. Resistance selection, mechanism and stability of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) to methoxyfenozide. Pesticide Biochemistry and Physiology 110:7-12.

Ribeiro LMS, Siqueira HAA, Wanderley-Teixeira V, Ferreira HN, Silva WM, Silva JE, Teixeira AAC. 2017. Field resistance of Brazilian *Plutella xylostella* to diamides is not metabolism-mediated. Crop Protection 93:82-88.

Roditakis E, Vasakis E, Grispou M, Stavrakaki M, Nauen R, Gravouil M, Bassi A. 2015. First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. Journal of Pest Science 88:9-16.

Schneider MI, Smagghe G, Gobbi A, Viñuela E. 2003. Toxicity and pharmacokinetics of insect growth regulators and other novel insecticides on pupae of *Hyposoter didymator* (Hymenoptera: Ichneumonidae), a parasitoid of early larval instars of lepidopteran pests. Journal of Economic Entomology 96:1054-1065.

Selby TP, Lahm GP, Stevenson TM, Hughes KA, Cordova D, Annan IB, Barry JD, Benner EA, Currie MJ, Pahutski TF. 2013. Discovery of cyantraniliprole, a potent and selective anthranilic diamide ryanodine receptor activator with cross-spectrum insecticidal activity. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 23:6341-6345.

Smagghe G, Pineda S, Carton B, Estal PD, Budia F, Viñuela E. 2003. Toxicity and kinetics of methoxyfenozide in greenhouse-selected *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). Pest Management Science 59:1203-1209.

Song SS. 1991. Resistance of diamondback moth (*Plutella xylostella* L.: Yponomeutidae: Lepidoptera) against *Bacillus thuringiensis* Berliner. Korean Journal of Applied Entomology 30:291-293.

Tabashnik BE, Cushing NL, Finson N, Johnson MW. 1990. Field development of resistance to *Bacillus thuringiensis* in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). Journal of Economic Entomology 83:1671-1676.

Tamilselvan R, Kennedy JS, Suganthi A. 2021. Monitoring the resistance and baseline susceptibility of *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae) against spinetoram in Tamil Nadu, India. Crop Protection 142:105491.

Uchiyama T, Ozawa A. 2014. Rapid development of resistance to diamide insecticides in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Lepidoptera: Tortricidae), in the tea fields of Shizuoka Prefecture, Japan. Applied Entomology and Zoology 49:529-534.

Umeda K, Yano T, Hirano M. 1988. Pyrethroid-resistance mechanism in German cockroach, *Blattella germanica* (Orthoptera: Blattellidae). Applied Entomology and Zoology 23:373-380.

Umetsu N. Shirai Y. 2020. Development of novel pesticides in the 21st century. Journal of Pesticide Science 45:54-74.

Uthamasamy S, Kannan M, Senguttuvan K, Jayaprakash SA. 2011. Status, damage potential and management of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) in Tamil Nadu, India. pp. 270-279. In Proceeding of The Sixth International Workshop on Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests, AVRDC-The World Vegetable Centre, Taiwan.

Wang X, Wu Y. 2012. High levels of resistance to chlorantraniliprole evolved in field populations of *Plutella xylostella*. Journal of Economic Entomology 105:1019-1023.

Wei SJ, Shi BC, Gong YJ, Jin GH, Chen XX, Meng XF. 2013. Genetic structure and demographic history reveal migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) from the southern to northern regions of China. PloS One 8:e59654.

Wing KD, Sacher M, Kagaya Y, Tsurubuchi Y, Mulderig L, Connair M, Schnee M. 2000. Bioactivation and mode of action of the oxadiazine indoxacarb in insects. Crop Protection 19:537-545.

Yao R, Zhao DD, Zhang S, Zhou LQ, Wang X, Gao CF, Wu SF. 2017. Monitoring and mechanisms of insecticide resistance in *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae), with special reference to diamides. Pest Management Science 73:1169-1178.

Yin F, Lin QS, Feng X, Chen HY, Li ZY, Hu ZD. 2017. Analysis of differentially expressed proteins between the spinetoram-susceptible and-resistant strains of *Plutella xylostella* (L.). Journal of Asia-Pacific Entomology 20:119-124.

Zago HB, Siqueira HAA, Pereira EJG, Picanço MC, Barros R. 2014. Resistance and behavioural response of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) populations to *Bacillus thuringiensis* formulations. Pest Management Science 70:488-495.

Zhao JZ, Collins HL, Li YX, Mau RFL, Thompson GD, Hertlein M, Andaloro JT, Boykin R, Shelton AM. 2006. Monitoring of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to spinosad, indoxacarb, and emamectin benzoate. Journal of Economic Entomology 99:176-181.

Zhao L, Chen G, Zhao J, Zhang Y, Zhu Y, Yang T, Wu YL. 2015. Degradation kinetics of the insecticide spinetoram in a rice field ecosystem. Chemosphere 119:1185-1191.

Zuo Y, Wang H, Xu Y, Huang J, Wu S, Wu Y, Yang Y. 2017. CRISPR/Cas9 mediated G4946E substitution in the ryanodine receptor of *Spodoptera exigua* confers high levels of resistance to diamide insecticides. Insect Biochemistry and Molecular Biology 89:79-85.