

易小龙, 王小云, 郑霞林, 陆温. 昆虫繁殖适度研究进展 [J]. 广东农业科学, 2021, 48(4): 84–92.

昆虫繁殖适度研究进展

易小龙, 王小云, 郑霞林, 陆温

(广西大学农学院 / 广西农业环境与农产品安全重点实验室培育基地, 广西 南宁 530004)

摘要: 昆虫已成为动物界种类最多、分布最广的一个类群。繁殖是昆虫保证种群延续以及繁荣的重要手段。因为其极强的繁殖能力和特殊的繁殖体系, 雌性昆虫可以通过受精囊储存交配中从雄虫处获得的精子延迟卵的受精, 控制其受精时间, 以此避免不利于其后代生存的时间和环境, 待寻找合适的环境以及寄主后, 再控制精液流出使卵受精, 保证其卵的孵化率和幼虫的存活率。繁殖适度是衡量昆虫适应自然的一个重要指标。在自然界, 昆虫通常通过改变其繁殖适度的方式调节和适应外部不利的环境因素和自身因素的变化。基于近年来国内外学者对于昆虫繁殖行为的大量研究, 从环境因素和昆虫自身因素两个方面对昆虫繁殖适度进行综述。分别讨论了温度、湿度、光照、食物和密度 5 个外部环境因素, 以及体型或体重、多次交配、交配经历和延迟交配 4 个昆虫自身因素, 对昆虫繁殖适度的影响以及相应研究结果在实际生产中的应用, 并指出当前研究的存在问题, 以期为相关的进一步研究提供方向, 为田间寻找新的害虫防治措施提供思路。

关键词: 昆虫繁殖适度; 环境因素; 多次交配; 交配经历; 延迟交配

中图分类号: S186

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2021) 04-0084-09

Advance in Insects Reproductive Fitness

YI Xiaolong, WANG Xiaoyun, ZHENG Xialin, LU Wen

(College of Agriculture, Guangxi University/Guangxi Key Laboratory of Agric-Environment
and Agric-Products Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: Insect has become the most diverse and widely distributed group in the animal kingdom. Reproduction is an important way for insects to ensure the continuation and prosperity of the population. Due to its strong reproductive ability and special reproductive system, female insects can store sperm obtained from males during mating through the organ of spermatheca. The females can delay the fertilization of eggs and control their fertilization time so as to avoid time and environment that are not conducive to the survival of their offspring. After finding a suitable environment and host, the flow of semen will be controlled to fertilize the eggs to ensure the hatching rate of the eggs and the survival rate of the larvae. Reproductive fitness is an important index to measure insect adaptation to nature. In nature, insects usually adjust and adapt to the changes of external adverse environmental factors and their own factors by changing the way of reproductive fitness. Based on the results of a large number of studies on insect reproduction behavior by domestic and foreign scholars in recent years, this article reviews the reproductive fitness of insects from two aspects: environmental factors and insects' own factors. This paper discusses the influences of external environmental factors in aspects of temperature, humidity, light, food and density, and the change of insects' own factors in aspects of body size, multiple mating, mating experience and delayed mating on its reproductive fitness and the application of the corresponding research results in practical production. In addition, it also points out the problems of the current researches in order to provide directions for related further researches and provide ideas for finding new pest control measures in the field.

Key words: insect reproductive fitness; environmental factor; multiple mating; mating experience; delayed mating

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 广西创新驱动发展专项 (桂科 AA17202017); 国家现代农业产业技术体系广西柑橘创新团队建设项目 (nycytxgxextd-05-03)

作者简介: 易小龙 (1996—), 男, 在读硕士生, 研究方向为昆虫行为生态, E-mail: 15080999109@163.com

通信作者: 陆温 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为昆虫行为与化学生态, E-mail: luwenlwen@163.com

昆虫属于无脊椎动物中的节肢动物，是世界上数量最多的动物群体。到 21 世纪初，人类已知的昆虫种类已有 100 多万种，无论是个体数量、生物量、种数与基因数，它们在生物多样性中都占有十分重要的地位^[1]。昆虫与人类的关系密切而复杂，有些昆虫对人类是有害的，它们会给农业生产与人类健康带来重大危害。例如，蝗虫、蓟马、飞虱、蚜虫等农业害虫，一直制约着人类的作物生产，常导致其产量下降，品质降低，甚至出现绝收现象。而蚊、蝇、虱、蚤等医学昆虫不仅能侵袭人体，骚扰吸血；还可以作为病媒昆虫，携带病原体，并通过各种方式，在人群中传播疾病，危害人类健康。

也有一些昆虫对于人类而言是有益的，如访花昆虫是虫媒植物授粉的必要条件，对一些作物的产量起着至关重要的作用。根据相关统计，2007 年 10 种水果、11 种蔬菜和 4 种大田作物的总经济价值为 12 562.70 亿元，其中昆虫传粉功能的总经济价值为 6 790.30 亿元，占当年农作物总经济价值 54.05%^[2]。家蚕、柞蚕等工业原料昆虫，蚕蛹、蚕蛾等药用昆虫，以及食用昆虫和饲料用昆虫等，作为可以被人类利用的生物资源，具备重大的经济价值。此外，自然界还存在着大量的捕食性及寄生性昆虫，以一种或一类生物抑制另一种或另一类生物，通过食物链的形式调控农业有害生物种群数量，并以子代延续和自然繁殖长久在农田生态系统中驻留，发挥着持续控制农业有害生物的功效生态，在维持农业生态系统功能和稳定农业生产中发挥重要的作用^[3]。

如何减少害虫的为害，使益虫更益，甚至变害为益是昆虫学当前的主要研究方向。繁殖是昆虫最基本的行为活动之一，是昆虫保证种群延续以及繁荣的重要手段。无论是农业害虫的防治，还是经济、生防等昆虫的养殖与利用，都不能缺少对于昆虫繁殖行为的研究。作为衡量昆虫繁殖能力强弱与改变的指标，昆虫繁殖适度研究必不可少。昆虫繁殖适度是一个群体概念，指昆虫在自然环境中留下能够适应其所处环境的后代的能力，包括亲代的生存能力、繁殖能力以及后代的存活能力^[4]。昆虫繁殖适度通常会受到温度、湿度、光照等环境因素以及昆虫自身因素的影响。本文基于近年来昆虫繁殖适度的相关研究，从环境因素和昆虫自身因素两个方面进行了综述。

1 环境因素对昆虫繁殖适度的影响

1.1 温度对昆虫繁殖适度的影响

在自然界中，温度是限制昆虫种群增长、分布范围的主要因素之一。昆虫是变温动物，保持和调节体内温度的能力不强，其体内的生理代谢过程会受到环境温度的强烈影响。外界温度过高或过低，都会影响到昆虫正常的生命活动，其中，昆虫生长发育和繁殖行为受温度的影响最为直接。在适宜的温度区间内，温度的升高会加快动物新陈代谢的速率，温度越高，昆虫的发育速率越快，其交配前期、产卵期与寿命也会随之缩短。而当温度的改变过大偏离其适宜区间时，昆虫的繁殖适度就会受到温度严重的限制（表 1）。一方面是温度对于亲代的影响，昆虫在提高体内 Hps70 蛋白含量获得耐胁迫能力的同时，也会伴随生殖力降低、寿命缩短等负面影响^[13]；另一方面则是温度对于卵的直接作用，崔旭红等对 B 型烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的研究表明，将 B 型烟粉虱的卵短时间暴露在高温下，便会使卵孵化率显著下降^[14]。

然而，昆虫对于环境温度的改变也有着其相应的对策，除了提高体内耐热酶系以抵抗不适当的温度变化外^[13]，其还可以通过迁飞和滞育等途径度过不适合其生存的空间和时间，以获得最大化的繁殖利益。虽然迁飞和滞育通常意味着昆虫繁殖适度的降低^[15~16]，但是相较于在不合适的空间或时间下繁衍后代，迁飞和滞育无疑是更好的选择。

1.2 湿度对昆虫繁殖适度的影响

昆虫对湿度的要求本质就是其对水的需求。昆虫体型小，储水能力一般很弱，同时其相对表面积大，日常的行为活动时容易损失水分。湿度对昆虫繁殖适度的影响本质上是对其体内水分平衡的影响，从而调控其生长发育，限制其繁殖行为，表现在多个具体方面。首先是成虫生产能力，湿度的改变可以影响昆虫卵巢的发育，限制其生殖潜能。研究表明大黑腮金龟 *Holotrichia oblita* 产卵的最适土壤含水量范围为 11%~25%，土壤含水量过高会抑制它产卵，过低则会限制其卵巢的发育^[17]。湿度还可以与其他环境因子联合作用影响成虫的产卵。例如在 25~35 °C 范围内，埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 其产卵量随着温度的增加而降

表 1 温度对昆虫繁殖适度的影响
Table 1 Effect of temperature on insect reproductive fitness

昆虫 Insect	温度范围 Temperature range (°C)	产卵量 Fecundity			孵化率 Hatching rate (%)			雌成虫寿命 Female life span (d)			参考文献 Reference
		变化趋势 Variation trend	最大值 Max.	最小值 Min.	变化趋势 Variation trend	最大值 Max.	最小值 Min.	变化趋势 Variation trend	最大值 Max.	最小值 Min.	
<i>Ephestia kuhniella</i> (Zeller)	15~25	↑	351.75	192.71	—	—	—	↓	15.41	9.54	[5]
番茄潜叶蛾 <i>Tuta absoluta</i> (Meyrick)	15~25	↑	158.10	37.30	↑	93.00	91.00	↓	13.85	9.24	[6]
米蛾	25~35	↓	158.10	0	↓	93.00	11.0	↓	9.24	0	
<i>Corcyra cephalonica</i> (Stainton)	15	—	—	—	0	—	—	—	—	—	[7]
	20~25	↑	347.25	241.65	↑	76.33	71.00	↓	7.42	5.87	
	25~35	↓	347.25	202.02	↓	76.33	52.67	↓	5.87	3.35	
黄胸蓟马 <i>Thrips hawaiiensis</i> (Morgan)	18~27	↑	95.80	75.36	—	—	—	↓	29.68	21.04	[8]
	27~30	↓	95.80	84.32	—	—	—	↓	21.0	20.68	
大豆蚜	13~23	↑	15.87	9.14	—	—	—	↓	17.50	7.03	
<i>Aphis glycines</i> (Matsumura)	23~28	↓	15.87	11.81	—	—	—	↓	7.03	5.42	
	33	—	0	—	—	—	—	—	6.96	—	
斯氏侧沟茧蜂 <i>Microplytis similis</i> (Lyle)	18~27	↑	19.07	2.20	↑	94.94	81.91	↓	25.00	9.80	[10]
	27~33	↓	19.07	7.81	↓	94.94	84.07	↓	9.80	5.07	
橘小实蝇	13.5	—	0	—	—	—	—	—	94.1	—	[11]
<i>Bactrocera dorsalis</i> (Hendel)	18.8~28.1	↑	1684	922	—	—	—	↓	116.8	43.3	
	28.1~34.9	↓	1684	138	—	—	—	↓	43.3	22.4	
斑翅果蝇 <i>Drosophila suzukii</i> (Matsumura)	25~31	↓	25.7	3.35	↓	83.0	0	—	—	—	[12]
	33	—	—	—	0	—	—	—	—	—	

注：“↑”表示随温度增加而增加，“↓”表示随温度增加而下降，“—”表示没有记载。

Note: “↑” represents that the trend increases with increasing temperature, “↓” represents that the trend decreases with increasing temperature, and “—” represents no record.

低，其降低的强度则受到湿度影响，在高湿度条件下，温度的增加对埃及伊蚊产卵量的影响更为强烈^[18]。湿度的变化也会影响卵的发育和孵化，稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée^[19]、黄芪根瘤象甲 *Sitona simillimus*^[20]、铜绿丽金龟 *Coelophora saucia* (Mulsant)^[21]等昆虫的研究表明，不合适的湿度条件会明显减少其卵的孵化率，显著延长其卵的发育周期。

1.3 光照对昆虫繁殖适度的影响

光是自然界的主要能量来源，所有生命体都会直接或间接的受到光的影响。光对昆虫的生长发育、繁殖能力以及呼吸代谢等方面存在着重要影响，其影响程度与光周期、强度和波长有关。光周期通过对昆虫的交配、产卵、滞育、休眠等行为活动的调节，而显著影响昆虫的繁殖适度。相较于短光照 (8 h : 16 h)，赤星瓢虫 *Coelophora saucia* 在长光照 (14 h : 10 h) 条件下雌成虫产卵前期更短，产卵量和孵化率显著提高^[22]。光

周期还是诱导和解除昆虫滞育的主要环境因素之一，通常滞育会给昆虫的繁殖适度带来负面影响。如滞育明显降低了豆螟 *Ostrinia scapularis* 成虫的交配成功率、繁殖力以及雌虫的寿命^[23]。光照强度与波长的改变也会影响昆虫繁殖适度。异迟眼蕈蚊 *Bradysia difformis* 在 588、1 275、1 575、2 072、3 323 lx 5 种光照强度下，其寿命及雌虫的产卵量随光照强度的增加而下降，588 lx 时，成虫的寿命及产卵量显著高于其他光强处理^[24]。段云等^[25]发现不同波长影响棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的明适应状态、交配及产卵，在夜间给予 590、540、505 nm 波长的光照可以保持其明适应状态，干扰其夜间的活动习性，而夜间给予光波长为 590、505 nm 的光照时，会显著减少卵的孵化率。

光照影响昆虫的繁殖适度，可用于害虫综合治理策略的制定。灯诱法等即基于夜间灯光能够影响夜行性昆虫的节律，干扰其取食、产卵、交

配等行为活动，降低其繁殖适度这一原理^[26]。日本在蔬菜田间使用黄灯来防治夜行性蛾类，取得了显著防效，并减少了农药在蔬菜栽培过程中的使用量^[27-28]。

1.4 食物对昆虫繁殖适度的影响

食物的种类、成分及质量影响和改变昆虫的繁殖适度。食物与昆虫繁殖适度的关系在植食性昆虫的寄主适应性研究、经济昆虫和生防昆虫的养殖等方面，已有大量报道。取食不同寄主植物对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 幼虫的存活率、发育历期和繁殖能力均有显著影响。其中，苍耳和酸模叶蓼是室内饲养玉米螟的最适宜寄主，取食这两种寄主时幼虫发育历期最短，成虫寿命较长，幼虫成活率较高^[29]。目前的观点认为这可能是由于昆虫取食寄主时营养成分以及有害成分的不同^[30]。食物质量的不同也会对繁殖适度造成影响，如 Chen 等^[31]在以糖和酵母膏饲养橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel 成虫时发现，饲料中酵母的含量会显著影响其寿命与产卵量，在不添加酵母膏的情况下，成虫不能产卵，而当酵母膏浓度增加到 25% 时，成虫的寿命会显著缩短。骆丹^[32]对马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* 的研究表明，取食马尾松老叶的雌虫的产卵量显著高于取食新叶的雌虫，说明对于马尾松毛虫而言，马尾松老叶是一种比新叶质量更高的食物。

昆虫寄主适应性对繁殖的影响研究，可以帮助农业工作者更好地预测害虫在田间的发生趋势，从而可以对害虫采取针对性的防治措施。此外，对其取食不同成分配比食物的研究，还可以帮助研究者找出更合适的饲料配方，降低大规模养殖昆虫所需的经济成本。

1.5 密度对昆虫繁殖适度的影响

昆虫的密度对其存活率、食物利用率、防御能力、迁飞行为、昆虫体色、个体大小、产卵量等指标均有重要的调控作用，是影响昆虫生长发育和种群动态规律的重要因子。在自然界，昆虫一般通过释放信息素吸引或趋避同类，以便维持其交配、产卵等各种行为所需的密度^[33-34]。研究表明，幼虫和成虫的密度都可以对昆虫的繁殖行为产生一定的影响，进而改变其繁殖适度。幼虫密度主要通过食物竞争、自相残杀或是接触损伤等几种方式，影响幼虫的生长发育、化蛹，从而影响繁殖适度。在二点委夜蛾 *Athetis lepigone*^[35]、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*^[36] 和

草地螟 *Loxostege sticticalis*^[37] 中，过高的密度不仅影响幼虫发育历期和存活率，还会显著影响成虫的体重及其产卵量和寿命，降低种群增长率。成虫密度除了通过限制空间和食物的方式外，还可以通过影响昆虫的交配行为来改变昆虫的繁殖适度。不同饲养密度对井上蛀果斑螟 *Assara inouei* 的繁殖适度有显著影响，其成虫只有在特定的饲养密度下才有最大的寿命与繁殖力，饲养密度过高或过低都显著降低成虫的繁殖力，该密度下，成虫既不会过于拥挤、相互干扰，又有利干雌雄虫交配^[38]。

2 昆虫自身因素对昆虫繁殖适度的影响

2.1 体型或体重对昆虫繁殖适度的影响

昆虫个体的体型、体重是影响两性交配成功率的主要因素之一。大部分进行两性交配的昆虫都对配偶的体型或体重具有偏好，有些种类则更偏爱与某些体型的个体交配。如雌性昆士兰果蝇 *Bactrocera tryoni* 对体型较大的雄性个体更加偏爱^[39]；雄性温带臭虫 *Cimex lectularius* 更喜欢与体型较大的雌性交配^[40]。一般而言，雌虫的个体越大，其繁殖能力也就越强。通常，昆虫对配偶大小的偏好会增加其繁殖适度。Honek^[41]对 10 目 57 种昆虫体型与产卵量之间的相关性做出了分析，发现雌性个体的大小是制约昆虫繁殖潜力的主要因素，大部分昆虫的产卵量均随着雌性个体体型的增大而增加，仅有少数种类例外。除了数量，雌成虫的大小还影响子代的发育历期和存活率。例如，白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* 较大雌虫所产下的后代，其完成一个世代所需的时间明显缩短，存活率显著增加^[42]。相较于雌虫，雄虫的体型或体重的改变通常只会对子代卵的孵化率造成影响。张诗语^[43]对马尾松毛虫 *D. punctatus* 的研究表明，雌虫与体型较大的雄虫交配能显著提高其卵的孵化率。此外，雄虫体型的增加有时还会对其繁殖适度造成负面影响，在一些昆虫中，随着雄虫体型的增大，其在交配中对雌虫的伤害也会随之增加。因此，较大的雄性反而会使其繁殖适度降低。如与较大雄虫交配的雌性黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*，其寿命和产卵量都会显著降低^[44]。

2.2 多次交配对昆虫繁殖适度的影响

多次交配是昆虫交配行为中的一种典型策

略，广泛存在于双翅目、鳞翅目、膜翅目、鞘翅目等各类昆虫中^[45]。目前，昆虫多次交配的发生机制尚不明确。但是大量研究表明昆虫发生多次交配时，其繁殖适会随之改变。

一般而言，多次交配对繁殖适度的改变是有利的，能够给雌虫提供其所需的营养和精子等物质利益，从而提高雌虫的产卵量、孵化率、延长其寿命。例如，红棕象甲 *Rhyncophorus ferrugineuss* 的多次交配能够显著提高雌虫的产卵量与孵化率，延长其寿命^[46]。然而，对于交配中没有伴随营养补给的昆虫种类，增加交配时间、延长产卵活动需要加需要更多的能量，通常不能延长雌虫的寿命，有时甚至会缩短其寿命。异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 的多次交配虽然提高了其雌虫的产卵量和孵化率，但是却显著缩短了它的寿命^[47]。

多次交配还可以给昆虫带来一定的基因利益，在多次交配的过程中雌虫可以与更多具有优质基因的雄虫交配，它可以接受多个雄虫的精子，其子代的基因多样性因此增加，子代对环境的适应能力随之增强。一雌多雄配对模式下，赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 的多次交配可以提高其子代的交配成功率^[48]。多次交配可以增加捕食性瓢虫 *Anegleis cardoni* 后代的存活率，缩短发育时间^[49]。雌虫还可以通过多次交配来避免由于近亲交配所带来的基因不相容。例如，在蟋蟀 *Gryllus bimaculatus* 中，与近亲交配的雌性可以通过继续与非近亲雄虫交配的方式，避免近亲交配带来的低孵化率^[50]。

然而，一些种类的昆虫无法从多次交配中获益。这类昆虫中，雌雄虫交配策略不对等，通常是雄虫渴望更多次的交配，而雌虫只需少数的几次交配便可满足其终生产卵需求。因此，雌虫选择接受多次交配仅仅是为了躲避其它雄虫的骚扰，这只是雌虫的一种顺从行为，而不能从雄虫处获得任何利益。相反，由于多次交配花费的时间与能量，以及增加的感染疾病和被天敌捕食的风险，或造成雌虫生殖道的伤害，多次交配反而会对其繁殖适度造成负面影响^[51]。

2.3 交配经历对昆虫繁殖适度的影响

雄虫的交配经历也会对昆虫的繁殖适度造成一定影响，因雄虫所采取的交配策略的不同而异。通常，雄虫会在第一次交配时，会投入较多

的精子与营养物质，以确保初次交配的成功。然而由于雄虫在交配后不能完全恢复其体内的精子与营养物质，因此，在之后的交配中雄虫投入的精子量与营养物质会少于其初次交配时所投入的量，对应的与之交配的雌虫的繁殖适度便会降低。Marcotte 等^[52]研究发现，在蔷薇斜条卷夜蛾 *Choristoneura rosaceana* 中，与有交配经历雄虫交配的雌虫的繁殖适度显著低于与处女雄虫交配的雌虫。还有一些种类的雄虫，其在第一次交配时并不会投入最大的精子量与营养物质，反而会在之后的某次交配中进行更多的投资，以确保该次交配的成功。因此，在该类昆虫中，与非处女雄虫交配的雌虫反而会获得更大的繁殖适度^[53-54]。而对于雄虫交配能力极强的昆虫种类，因其在交配后能快速恢复其所消耗的精子与营养物质，所以交配次数的增加并不会显著影响雌虫的繁殖适度。例如，对二化螟 *Chilo suppressalis* 雄虫的交配次数并不会对其雌虫的繁殖适度造成显著影响^[55]。

2.4 延迟交配对昆虫繁殖适度的影响

成虫交配日龄对于昆虫繁殖适度的影响是多方面的，不同日龄下昆虫的交配成功率不同。在不同的种类间，昆虫对配偶日龄的偏好也有差异，而这种偏好通常意味着与该日龄的成虫交配能够获得更大的繁殖利益。如朱红毛斑蛾 *Phauda flammans* 雌虫与年轻雄虫的交配成功率更高，且与年轻的雄性交配可以获得更高的产卵量与卵孵化率^[56]。而大猿叶甲 *Colaphellus bowringi* 则更喜欢与龄期适中的配偶交配^[57]，而获得更高的繁殖适度^[58]。

昆虫延迟交配与成虫的交配日龄有关。延迟交配（Delay mating）是指动物的交配行为在自然界中受到各种因素的影响，不能在正常时间进行交配而延迟。研究发现，延迟交配对昆虫的交配成功率、产卵量、孵化率、寿命等方面都存在显著的影响，且其影响因昆虫种类不同而有所差异。张诗语等^[59]对鳞翅目 11 科 39 种蛾类昆虫的延迟交配进行 Meta 分析发现，在不同科的蛾类昆虫间，延迟交配对繁殖适度的影响存在差异。如延迟交配会降低麦蛾科、尺蛾科、夜蛾科等 10 科昆虫的产卵量，但对巢蛾科昆虫的产卵量没有显著影响；延迟交配可以显著降低蛀果蛾科昆虫的孵化率，而对于潜蛾科昆虫，其不会导致孵化率发

生明显变化。虽然，昆虫延迟交配对繁殖适度的影响存在性别差异。但是通常雌性是繁殖的主体，雌虫交配日龄的变化对昆虫繁殖适度的影响往往更为显著。例如，烟草甲 *Lasioderma serricorn* 延迟雌虫或雄虫的交配日龄会对其繁殖适度造成负面影响，而雌虫交配的延迟对其繁殖适度的影响更为强烈^[60]。

基于延迟交配能降低昆虫繁殖适度这一原理，利用性信息素在野外干扰昆虫交配已在梨小食心虫 *Grapholita molesta*^[61-62]、苹小卷叶蛾 *Adoxophyes orana beijingensis*^[63] 和苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*^[64-65] 等害虫的防治上得到应用，并取得了显著功效。

3 展望

由于国内农业生产中农药、化肥污染事件的频繁发生和农产品质量安全问题的日益凸显，近年来，兼顾资源节约和环境友好的绿色防控技术在农业生产中逐渐受到了更多的使用与重视，在害虫综合治理中的地位日益提升^[66]。昆虫繁殖适度是衡量昆虫繁殖能力强弱以及变化的一个重要指标。因此，通过对不同因素与昆虫繁殖适度关系的研究，可以帮助人们发现削弱昆虫繁殖能力、降低其繁殖适度的因素或方法，进而寻找到更多绿色无公害的防治方法，或改进原有的防治方法。例如，在培育不育雄虫时，通过研究雌雄交配能力的差异以及雌性对不同大小雄虫的性偏好，培育出交配竞争力更强的不育雄虫，在野外大批量的释放不育雄虫来占据雌虫的交配机会，以此提高昆虫不育技术对害虫的防治效果。另外，有关昆虫繁殖适度的研究，还可以帮助研究者们对一些防治方法的有效性进行验证。例如，雄性诱剂的有效性可以通过对雌雄虫交配能力的研究，以及在不同交配次序下与雄虫交配的雌虫的繁殖适度的情况，来判断雄虫数量的减少对害虫种群的繁殖及增长有无影响，从而避免无效的、以雄虫为靶标的防治措施的投入。

虽然昆虫繁殖适度研究已有一定基础，但当前的研究仍存在以下几个问题，需要进行更深入、系统的研究。首先是在研究不同环境因素对昆虫繁殖适度的改变时，研究者们通常只会对单一的某种因素进行研究。然而，在实际生产中，温度、湿度、光照条件等因素往往会同时作用到某一昆虫上，不同的环境因素之间是否会存在互作作用

这一点并不明确。因此，只针对某一因素对昆虫繁殖适度影响的研究结果，往往不能精确的推断出昆虫种群在自然环境下的变化规律，对其的发生规律做出准确的预测预报。其次，昆虫繁殖适度缺乏可衡量其改变强弱的综合指标。昆虫繁殖适度与亲代寿命、亲代繁殖能力及子代的生存能力等多种能力相关，而各种能力之间又或多或少的存在正面或负面的互作或影响。因此，当某一因素对与昆虫繁殖适度相关的能力同时存在正面和负面的影响时，在研究中很难用一个指标或标准去定义昆虫繁殖适度改变的强弱。最后，是新一代技术在昆虫繁殖适度研究中应用相对缓慢的问题。如利用微卫星新一代分子标记为手段的亲子鉴定技术，可以很好的确定多次交配中雄性父权值的问题，结果有助于探究昆虫多次交配的行为机制，明确多次交配使昆虫繁殖适度产生变化的原因；响应面分析、多元线性回归分析等相关实验、统计分析方法可以很好的对不同因素间的互作作用做出准确的分析，帮助植保工作者更好的预测害虫在田间的发生规律，但是相关的研究结果依旧鲜有报道。相信随着研究的深入和新一代技术在昆虫繁殖适度研究中的应用，将会有更多绿色防控方法被发现，让更多的无公害防治方法在实际生产中得到应用。

参考文献 (References) :

- [1] 彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦. 普通昆虫学 [M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
 - CAI W Z, PANG X F, HUA B Z, LIANG G W, SONG D L. General entomology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
 - [2] 欧阳芳, 吕飞, 门兴元, 赵紫华, 曾菊平, 肖云丽, 戈峰. 中国农业昆虫生态调节服务价值估算 [J]. 生态学报, 2015, 35 (12): 4000-4006.
 - OU Y F, LYU F, MEN X Y, ZHAO Z H, ZENG J P, XIAO Y L, GE F. The economic value of ecological regulating services provided by agricultural insects in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4000-4006.
 - [3] 张礼生, 陈红印. 我国天敌昆虫与生防微生物资源引种三十年成就与展望 [J]. 植物保护, 2016, 42 (5): 24-32.
 - ZHANG L S, CHEN H Y. Achievements and prospects in introduction of natural enemy insects and biocontrol microbial agents in China over the last three decades [J]. *Plant Protection*, 2016, 42 (5): 24-32.
 - [4] SPIELMAN D, FRANKHAM R. Modeling problems in conservation genetics using captive *Drosophila* populations: Improvement of reproductive fitness due to immigration of one individual into small partially inbred populations [J]. *Zoo Biology*, 1992, 11: 333-342.
- DOI: 10.1002/zoo.1430110505.

- [5] MOGHADAMFAR Z, PAKAR H, AMIR-MAAFI M. Age-stage, two-sex life table of *Epeorus kuheniella* (Lep: Pyralidae) at different constant temperatures [J]. *Crop Protection*, 2020, 137: 1–6. DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105200.
- [6] 李栋, 李晓维, 马琳, 付开赟, 丁新华, 郭文超, 吕要斌. 温度对番茄潜叶蛾生长发育和繁殖的影响[J]. 昆虫学报, 2019, 62(12): 1417–1426. DOI: 10.16380/j.kexb.2019.12.008.
- LI D, LI X W, MA L, FU K Y, DING X H, GUO W C, LYU Y B. Effects of temperature on the growth, development and reproduction of the tomato leaf miner, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2019, 62 (12): 1417–1426. DOI: 10.16380/j.kexb.2019.12.008.
- [7] 于玲, 崔娟, 阮长春, 藏连生, 张文芳, 史树森. 米蛾成虫产卵及卵发育对温度的响应[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 128–132.
- YU L, CUI J, RUAN C C, ZANG L S, ZHANG W F, SHI S S. Effects of temperature on fecundity of *Corcyra cephalonica* Adult and its egg development[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(35): 128–132.
- [8] YU C, CAN L, WEN J Y, MENG Y L, WANG L J, SHANG B Z, GAO Y L. Effects of temperature on the development and reproduction of *Thrips hawaiiensis* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111 (2): 755–760. DOI: 10.1093/jee/tox359.
- [9] TIAN Z Q, WANG S J, BAI B, GAO B, LIU J. Effects of temperature on survival, development, and reproduction of *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) autumnal morphs[J]. *Florida Entomologist*, 2020, 103(2): 236–242. DOI: 10.1653/024.103.0213.
- [10] YI S J, HOPKINS R J, CHEN X Y, CHEN Z M, WANG X, HUANG G H. Effects of temperature on the development and fecundity of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Physiological Entomology*, 2020, 45 (2–3): 95–102. DOI: 10.1111/phen.12321.
- [11] KYUANG S C, ANA C S, SHAW Y H, HUANG Y B, AHN J J. Thermal effect on the fecundity and longevity of *Bactrocera dorsalis* adults and their improved oviposition model [J]. *Plos One*, 2020, 15 (7). DOI: 10.1371/journal.pone.0235910.
- [12] HIROTOSHI K, YASUHISA K, MADOKA N. Effects of temperature on the reproduction and development of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2014, 49 (2): 297–304. DOI: 10.1007/s13355-014-0249-z.
- [13] 崔旭红, 谢明, 万方浩. 高温胁迫下B型烟粉虱热激蛋白基因hsp70表达量的变化[J]. 昆虫学报, 2007, 50 (11): 1087–1091. DOI: 10.16380/j.kexb.2007.11.017.
- CUI X H, XIE M, WAN F H. Changes in expression level of heat shock protein 70 gene in *Bemisia tabaci* B–biotype(Homoptera:Aleyrodidae) under high temperature stress [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2007, 50 (11): 1087–1091. DOI: 10.16380/j.kexb.2007.11.017.
- [14] 崔旭红, 谢明, 万方浩. 短时高温暴露对B型烟粉虱和温室白粉虱存活以及生殖适应性的影响[J]. 中国农业科学, 2008 (2): 424–430.
- CUI X H, XIE M, WAN F H. Effects of brief exposure to high temperature on survival and fecundity of two whitefly species: *Bemisia tabaci* B–biotype and *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (2): 424–430.
- [15] 程丽媛, 张艳, 陈珍珍, 许永玉. 光周期和温度对大草蛉滞育解除及滞育后发育和繁殖的影响[J]. 昆虫学报, 2017, 60 (3): 318–327. DOI: 10.16380/j.kexb.2017.03.009.
- CHENG L Y, ZHANG Y, CHEN Z Z, XU Y Y. Effects of photoperiod and temperature on diapause termination and postdiapause development and reproduction of the green lacewing, *Chrysopa pallens* (Neuroptera:Chrysopidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2017, 60 (3): 318–327. DOI: 10.16380/j.kexb.2017.03.009.
- [16] 康乙玲. 长颤斗蟋蟀二型雌虫飞行与繁殖权衡的代谢基础及激素调控[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- KANG Y L. The metabolic basis and hormonal regulation for flight and reproduction trade off in a female wing dimorphism cricket, *Velarifictorus asperses* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.
- [17] 郑方强, 范永贵, 冯居贤. 土壤含水量对大黑鳃金龟生殖的影响[J]. 昆虫知识, 1996, 33 (3): 160–162.
- ZHENG F Q, FAN Y G, FENG J X. Effects of soil moisture on reproduction of *Holotrichia oblita* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 1996, 33 (3): 160–162.
- [18] COSTA E A P D A, SANTOS E M D M, CORREIA J C, ACMR D. Impact of small variations in temperature and humidity on thereproductive activityand survival of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) [J]. *Revista Brasileira de Entomologia*, 2010, 54 (3): 488–493. DOI: 10.1590/S0085-56262010000300021.
- [19] 方源松, 廖怀建, 钱秋, 刘向东. 湿湿度对稻纵卷叶螟卵的联合作用[J]. 昆虫学报, 2013, 56 (7): 786–791. DOI: 10.16380/j.kexb.2013.07.007.
- FANG Y S, LIAO H J, QIAN Q, LIU X D. Combined effects of temperature and relative humidity on eggs of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 56 (7): 786–791. DOI: 10.16380/j.kexb.2013.07.007.
- [20] 刘月英, 罗进仓, 张大为, 魏玉红, 周昭旭. 湿湿度对黄芪根瘤象甲卵发育历期及孵化率的影响[J]. 植物保护学报, 2019, 46 (6): 1381–1382. DOI: 10.13802/j.cnki.zwhxb.2019.2019080.
- LIU Y Y, LUO J C, ZHANG D W, WEI Y H, ZHOU Z X. Effects of temperature and humidity on the developmental duration and hatching rate of *Sitona simillimus* eggs [J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46 (6): 1381–1382. DOI: 10.13802/j.cnki.zwhxb.2019.2019080.
- [21] 段爱菊, 王淑枝, 王利霞, 韩瑞华, 吴建梅, 刘顺通. 湿湿度对铜绿丽金龟卵生长发育的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65 (10): 71–74.
- DUAN A J, WANG S Z, WANG L X, HAN R H, WU J M, LIU S T. Effect of temperature and humidity on growth and development of patina gold tortoise eggs [J]. *Shanxi Journal of Agriculture Sciences*, 2019, 65 (10): 71–74.
- [22] OMKAR, PATHAK S. Effects of different photoperiods and wavelengths of light on the life-history traits of an aphidophagous ladybird, *Coelophora saucia* (Mulsant) [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2006, 130 (1): 45–50. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2005.01016.x.
- [23] WIN A T, ISHIKAWA Y. Effects of diapause on post-diapause reproductive investment in the moth, *Ostrinia scapularis* [J].

- Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2015, 157 (3) : 346–353.
DOI: 10.1111/eea.12373.
- [24] 刘倩. 温度和光照对异迟眼蕈蚊生长发育及繁殖的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
LIU Q. Effects of different temperatures and light conditions on the growth, development and fecundity of *Bradyia difformis* Frey [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [25] 段云, 武予清, 蒋月丽, 吴仁海, 赵明茜. LED 光照对棉铃虫成虫明适应状态和交尾的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29 (9) : 4727–4731.
DUAN Y, WU Y Q, JIANG Y L, WU R H, ZHAO M Q. Effects of LED (light emitting diode) illumination on light adaptation and mating of *Helicoverpa armigera* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (9) : 4727–4731.
- [26] 靖湘峰, 雷朝亮. 昆虫趋光性及其机理的研究进展 [J]. 昆虫知识, 2004 (3) : 198–203.
JING X F, LEI C L. Advances in research on phototaxis of insects and the mechanism [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2004 (3) : 198–203.
- [27] SHIMODA M, HONDA K I. Insect reactions to light and its applications to pest management [J]. *Applied Entomology Zoology*, 2013, 48:413–421. DOI: 10.1007/s13355-013-0219-x.
- [28] 蒋月丽, 张建周, 袁水霞. 黄色灯防治害虫的研究与应用进展 [J]. 植物保护, 2018, 44 (3) : 6–10. DOI: 10.16688/j.zwhb.2017238.
JIANG Y L, ZHANG J Z, YUAN S X. Progresses in the research and application of yellow light for pest control [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (3) : 6–10. DOI: 10.16688/j.zwhb.2017238.
- [29] 魏鑫, 陈日翌. 寄主植物对亚洲玉米螟生长发育及雄蛾保护酶活性的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (2) : 355–362.
WEI X, CHEN R M. Effects of host plants on the development and protective enzyme activity of *Ostrinia furnacalis* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (2) : 335–362.
- [30] AWMACK C S, LEATHER S R. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2001, 47 (1) : 817–844. DOI: 10.1146/annurev.Ento.47.091201.145300.
- [31] CHEN E H, WEI D, WEI D D, YUAN G R, WANG J J. The effect of dietary restriction on longevity, fecundity, and antioxidant responses in the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2013, 59 (10) : 1008–1016. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2013.07.006.
- [32] 骆丹. 马尾松毛虫交配行为与生殖适合度的研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
LUO D. Mating behavior and reproductive fitness in pine caterpillar, *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidoptera: Lasiocampidae) [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [33] MCQUATE G T, COSSE A, SYLVA C D, MACKAY J A. Field evaluation of a binary sex pheromone for sweetpotato vine borer (Lepidoptera: Crambidae) in Hawaii [J]. *Journal of Insect Science*, 2019, 19 (1) : 1–9. DOI: 10.1093/jisesa/iez008.
- [34] GUO X, YU Q, CHEN D, WEI JN, YANG PC, YU J, WANG X H, KANG L. 4-Vinylanisole is an aggregation pheromone in locusts [J]. *Nature*, 2020, 584 (7822) : 1–5. DOI: 1038/s41586–020–2610–4.
- [35] 李艳, 江幸福, 张蕾, 程云霞, 刘彦群, 罗礼智. 幼虫密度对二点委夜蛾生长发育及繁殖的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (3) : 623–629.
LI Y, JIANG X F, ZHANG L, CENG Y X, LIU Y Q, LUO L Z. Effects of larval density on the development and reproduction of *Athetis lepigone* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (3) : 623–629.
- [36] 王娟, 江幸福, 吴德龙, 罗礼智. 幼虫密度对甜菜夜蛾生长发育与繁殖的影响 [J]. 昆虫学报, 2008, 51 (8) : 889–894. DOI: 10.16380/j.kxcb.2008.08.013.
WANG J, JIANG X F, WU D L, LUO L Z. Effect of larval rearing density on development and fecundity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2008, 51 (8) : 889–894. DOI: 10.16380/j.kxcb.2008.08.013.
- [37] 孔海龙, 罗礼智, 江幸福, 张蕾, 胡毅. 幼虫密度对草地螟生长发育及繁殖的影响 [J]. 昆虫学报, 2011, 54 (12) : 1384–1390. DOI: 10.16380/j.kxcb.2011.12.006.
KONG H L, LUO L Z, JIANG X F, ZHANG L, HU Y. Effects of larval density on growth, development and reproduction of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54 (12) : 1384–1390. DOI: 10.16380/j.kxcb.2011.12.006.
- [38] 何超, 沈登荣, 尹立红, 李锡良, 袁盛勇, 田学军. 井上蛀果斑螟成虫饲养密度对其寿命及繁殖力的影响 [J]. 西北农业学报, 2017, 26 (6) : 950–955.
HE C, SHEN D R, YIN L H, LI X L, YUAN S Y, TIAN X J. Effects of adult rearing density on longevity and fecundity of *Assara inouei* Yamanaka (Lepidoptera: Pyrali –dae) [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinic*, 2017, 26 (6) : 950–955.
- [39] EKANAYAKE E W M T D, CLARKE A R, SCHUTZE M K. Effect of body size, age, and premating experience on male mating success in *Bactrocera tryoni* (Diptera: Tephritidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (5) : 2278–2281. DOI: 10.1093/jee/tox186.
- [40] KAUFMANN E, OTTI O. Males increase their fitness by choosing large females in the common bedbug *Cimex lectularius* [J]. *Animal Biology*, 2018, 69 (1) : 17–32. DOI: 10.1163/15707563–20181033.
- [41] HONEK A. Intraspecific variation in body size and fecundity in insects: a general relationship [J]. *Oikos*, 1993, 66 (3) : 483–492.
- [42] GAO S, TANG Y, WEI K, WANG X, YANG Z, ZHANG Y. Relationships between body size and parasitic fitness and offspring performance of *sclerodermus pupariae* yang et yao (hymenoptera: bethylidae) [J]. *Plos One*, 2016, 11 (7) : e0156831. DOI: 10.1371/journal.pone.0156831.
- [43] 张诗语. 马尾松毛虫配偶选择和生殖适度的研究—成虫日龄、交配经历和大小的影响 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
ZHANG S Y. Mate preference and reproductive fitness in Pine Caterpillar, *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidopter: Lasiocampidae): effect of adult age, mating history and body size [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [44] PITNICK S, GARCIA G F. Harm to females increases with male body size in *Drosophila melanogaster* [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2002, 269 (1502) : 1821–1828. DOI: 10.1098/rspb.2002.2090.
- [45] ARNQVIST G, NILSSON T. The evolution of polyandry: multiple mating and female fitness in insects [J]. *Animal Behaviour*, 2000, 60

- (2) : 145–164. DOI: 10.1006/anbe.2000.1446.
- [46] 纪田亮. 红棕象甲的交配行为研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- JI T L. The mating behavior of *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliver) [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture And Forestry University, 2018.
- [47] 杨洪, 申智慧, 张帆, 廖启荣. 异色瓢虫雌虫多次交配的利益[J]. 贵州科学, 2012, 30 (2) : 40–44.
- YANG H, SHEN Z H, ZHANG F, LIAO Q R. Benefit of female of *Harmonia axyridis* (Pallas) from multiple mating [J]. *Guizhou Science*, 2012, 30 (2) : 40–44.
- [48] BERNASCONI G, KELLER L. Female polyandry affects their sons' reproductive success in the red flour beetle *Tribolium castaneum* [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2001, 14 (1) : 186–193. DOI: 10.1046/j.1420-9101.2001.00247.x.
- [49] OMARK, JYOTSNA S. Costs and benefits of reproduction in predaceous ladybird: Effect of multiple matings on reproduction and offspring development [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2012, 15 (2) : 219–224. DOI: 10.1016/j.aspen.2011.12.002.
- [50] WEDELL N, TREGENZA T. Polyandrous females avoid costs of inbreeding [J]. *Nature*, 2002, 415 (6867) : 71–73. DOI: 10.1038/415071a.
- [51] 唐荣, 董子舒, 张玉静, 郑霞林, 陆温. 昆虫性冲突行为研究进展[J]. 生物学杂志, 2019, 36 (1) : 87–91.
- TANG R, DONG Z S, ZHANG Y J, ZHENG X L, LU W. Research progress on insect sexual conflict behaviors [J]. *Journal of Biology*, 2019, 36 (1) : 87–91..
- [52] MARCOTTE M, DELISLEA J, MCNEIL J N. Impact of male mating history on the postmating resumption of sexual receptivity and lifetime reproductive success in *Choristoneura rosaceana* females [J]. *Physiological Entomology*, 2006, 31 (3) : 227–233. DOI: 10.1111/j.1365-3032.2006.00510.x.
- [53] CLUTTON B T H. Reproductive effort and terminal investment in iteroparous animals [J]. *American Naturalist*, 1984, 123 (2) : 212–229.
- [54] SIMMONS L W. Sperm competition and its evolutionary consequences in the insects [J]. *Quarterly Review of Biology*, 2002, 77 (3) : 346–346. DOI: 10.1038/417122a.
- [55] JIAO X, XUAN W, SHENG C. Effects of delayed mating and male mating history on longevity and reproductive performance of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lep. Pyralidae) [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2010, 130 (2) : 108–112. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2006.01036.x.
- [56] ZHENG X L, LIU J Y, LU W, HE X Z, WANG Q. Mating delay reduces reproductive performance but not longevity in a Monandrous Moth [J]. *Journal of Insect Science*, 2020, 20 (2) : 1–5. DOI: 10.1093/jisesa/ieaa009.
- [57] LIU X P, XU J, HE H M, KUANG X J, XUE F S. Male age affects female mate preference and reproductive performance in the cabbage beetle, *Colaphellus bowringi* [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2011, 24 (2) : 83–93. DOI: 10.1007/s10905-011-9255-y.
- [58] LIU X P, HE H M, XUE F S. The influence of female age on male mating preference and reproductive success in cabbage beetle, *Colaphellus bowringi* [J]. *Insect Science*, 2014, 21 (4) : 515–522.
- DOI: 10.1111/1744-7917.12051.
- [59] 张诗语, 曾菊平, 吴先福, 彭龙慧, 刘兴平. 延迟交配对蛾类生殖适合度影响的 Meta 分析 [J]. 江西农业大学学报, 2016, 38 (1) : 113–123. DOI: 10.13836/j.jjau.2016016.
- ZHANG S Y, ZENG J P, WU X F, PENG L H, LIU X P. A meta analysis of the effect of delayed mating on female reproductive fitness in moths [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38 (1) : 113–123. DOI: 10.13836/j.jjau.2016016.
- [60] BARBARA A A, RIZANA M M, ALISON R G, CAMPBELL J F. Effect of delayed mating on longevity and reproductive performance of *Lasioderma serricorne* (Coleoptera: Anobiidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112 (1) : 475–484. DOI: 10.1093/jee/toy336.
- [61] 郑鹏华, 俞波, 沈卫新. 梨小食心虫性信息素迷向丝在浙北桃园中的应用效果初探 [J]. 中国南方果树, 2020, 49 (1) : 110–111,114. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20190548.
- ZHENG P H, YU B, SHEN W X. A preliminary study on the application effect of *Grapholita molesta* sex pheromone wire in peach gardens in north Zhejiang [J]. *South China Fruit*, 2020, 49 (1) : 110–111,114. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20190548.
- [62] 郑燕, 徐德坤, 胡海燕, 陆丽华, 陈军. 不同果园梨小食心虫性信息素微胶囊迷向效果初探 [J]. 中国植保导刊, 2020, 40 (6) : 62–64,73.
- ZHENG Y, XU D K, HU H Y, LU L H, CHEN J. Preliminary study on the misdirection effect of sex pheromone microcapsules of pear from different orchards [J]. *China Plant Protection*, 2020, 40 (6) : 62–64,73.
- [63] 涂洪涛, 张金勇, 张蒙, 陈汉杰. 不同剂量信息素缓释迷向剂防治苹小卷叶蛾的比较 [J]. 应用昆虫学报, 2018, 55 (3) : 489–496.
- TU H T, ZHANG J Y, ZHANG M, CHEN H J. Comparison of different dosages of sex pheromone for disrupting the mating of *Adoxophyes orana* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2018, 55 (3) : 489–496.
- [64] 张煜, 马诗科, 李晶. 库尔勒香梨上苹果蠹蛾发生规律及其性信息素迷向防控效果 [J]. 生物安全学报, 2017, 26 (1) : 47–51.
- ZHANG Y, MA S K, LI J. Occurrence dynamics and control effect of the mating disruption technology of sex pheromone of *Cydia pomonella* a (L.) from pear in Korla, Xinjiang [J]. *Journal of Biosafety*, 2017, 26 (1) : 47–51.
- [65] 崔笑雄, 熊仁次, 陈汉杰, 韩旭, 姚永生. 复合式性信息素迷向剂对苹果蠹蛾和梨小食心虫的防控效果 [J]. 北方园艺, 2020 (13) : 42–46.
- CUI X X, XIONG R C, CHEN H J, HAN X, YAO Y S. Control effect of dual sex pheromone for disrupting the mating of *Cydia pomonella* and *Grapholitha molesta* in apple orchard [J]. *Northern Horticulture*, 2020 (13) : 42–46.
- [66] 陈德来, 刘长仲, 张挺峰. 近 10 年来绿色防控技术在我国植物保护中的应用 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (5) : 29–32.
- CHEN D L, LIU C Z, ZHANG T F. Applications of green prevention and control techniques in plant protection in China in recent 10 years [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (5) : 29–32.