

稻纵卷叶螟发生为害与寄主植物间关系的研究进展*

刘欢^{1**} 侯茂林^{1,2,3***}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 农业部桂林作物有害生物科学观测实验站, 桂林 541399; 3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要 稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) 是水稻上的重要害虫, 严重影响水稻产量和品质。明确稻纵卷叶螟发生为害与寄主植物间的关系是防治稻纵卷叶螟的基础。本文综述了稻纵卷叶螟的寄主植物种类、稻纵卷叶螟的寄主选择性及寄主对稻纵卷叶螟发育适合度的影响, 总结了稻纵卷叶螟的发生为害与水稻品种、水稻栽培制度间的关系, 以及非生物因素对稻纵卷叶螟的寄主适应性和为害的影响, 并对相关研究进行了展望, 旨在为稻纵卷叶螟与寄主互作关系的深入研究及其绿色防控提供理论依据。

关键词 稻纵卷叶螟; 寄主选择性; 寄主适应性; 栽培制度; 综合防控

Progress in research on the relationship between host plants and the occurrence of the rice leaf folder and the degree of crop damage caused by this pest

LIU Huan^{1**} HOU Mao-Lin^{1,2,3***}

(1. State Key Laboratory for Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Guilin, Ministry of Agriculture, Guilin 541399, China; 3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

Abstract The rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée), is a destructive insect pest of rice that seriously damages yield and quality. Understanding the relationship between host plants and the occurrence of this pest could improve its prevention and management. This paper reviews previous reports on host plant species, host selection, and the effects of these on the rice leaf folder, summarizes the relationship between rice varieties, rice cropping systems and the occurrence of this pest, and discusses the influence of abiotic factors on these relationships. Research perspectives on the relationship between host plants and the occurrence of the rice leaf folder, and the amount of crop damage caused by this pest, are provided. This review promotes further research on the interactions between the rice leaf folder and host plants, and on the environmentally friendly management of this pest.

Key words rice leaf folder; host selection; host adaptation; cropping system; integrated management

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée), 属鳞翅目螟蛾科, 是水稻上重要的“两迁性”害虫之一。在我国, 稻纵卷叶螟在除新疆以外的其他稻区均有发生为害(张孝羲等, 1981)。稻纵卷叶螟幼虫吐丝纵卷叶片结成虫苞, 幼虫藏匿于

苞内取食叶片上表皮和叶肉组织, 仅留下下表皮, 取食后形成白色条斑, 影响叶片光合作用, 导致稻谷空秕率增加, 千粒重下降(程家安, 1996)。虽然迁飞是引发稻纵卷叶螟种群数量同期突增及为害加重的关键因素(齐国君等,

*资助项目 Supported projects: 粮食丰产增效科技创新国家重点研发计划课题 (2016YFD0300701)

**第一作者 First author, E-mail: 1427292668@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: mlhou@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2018-09-26; 接受日期 Accepted: 2019-02-21

2011), 但稻纵卷叶螟大面积发生也与其对寄主植物的选择及适应密切相关。近年来, 由于大面积种植易感高产品种、不合理使用化肥农药、种植业结构调整和气候变化, 稻纵卷叶螟在亚洲许多国家暴发。如 2003-2010 年间, 稻纵卷叶螟在我国就有 6 年发生面积超过了 2 000 万 hm^2 (郭荣等, 2013)。了解稻纵卷叶螟的寄主植物种类及其发生为害与寄主植物间的关系, 将有助于 (1) 明确稻纵卷叶螟的食性机制; (2) 开发防治稻纵卷叶螟的功能性植物; (3) 为稻纵卷叶螟的综合防控提供新途径。本文综述了稻纵卷叶螟发生为害与寄主植物间的关系, 为稻纵卷叶螟与寄主互作关系的深入研究和稻纵卷叶螟的绿色防控提供理论依据。

1 稻纵卷叶螟的寄主植物种类

植食性昆虫和寄主植物间的关系是植食性昆虫与植物长期互作和自然进化的结果。植食性昆虫通过一系列行为和生理反应选择植物作为食料来源和发育场所 (钦俊德和王琛柱, 2001)。判断某种植物是否是植食性昆虫的寄主植物需要满足一定条件。Saxena 等 (1974) 认为一种植物只有满足以下所有条件时才能被判定为某种植食性昆虫的寄主植物: (1) 对植物存在定位和栖息选择; (2) 能正常取食; (3) 能代谢摄入的食物; (4) 可完成世代发育; (5) 能在植物上产卵; (6) 后代具有繁殖能力。Zalucki 等 (1986) 认为, 能在一种完整的活体植物上完成世代发育或者从田间采集的已在一种植物上完成幼期发育的成虫具有繁殖力, 即可判断这种植物为该植食性昆虫的寄主植物。钦俊德 (1985) 则认为适宜的寄主植物除了能为昆虫生长发育提供食料外, 还具有提供栖息和求偶场所的功能。可见, 真正的寄主植物能够保证植食性昆虫完成完整的世代发育, 仅能满足植食性昆虫完成部分发育阶段的植物, 只能作为昆虫的食料植物 (阮永明和吴坤君, 2001)。

据文献报道, 稻纵卷叶螟的寄主植物基本上都是禾本科植物 (表 1)。作物寄主主要有水稻 *Oryza sativa* L.、玉米 *Zea mays* L.、小麦 *Triticum*

aestivum L.、大麦 *Hordeum vulgare* L.等; 杂草寄主主要有稗草 *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.、狗尾草 *Setaria italica* (L.) Beauv.、双穗雀稗 *Paspalum paspaloides* L.、莎草 *Cyperus rotundus* L.。尽管文献记载的稻纵卷叶螟的寄主植物种类繁多, 但这些记载的植物是否确实是稻纵卷叶螟的寄主植物, 大多数并没有经过试验测定。与稻纵卷叶螟类似, 文献记载玉米和小麦是二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker) 的寄主植物, 但 Hou 等 (2010) 通过一系列测定, 确定玉米和小麦不是二化螟的寄主植物。在自然状态下, 稻纵卷叶螟仅严重为害水稻, 至少表明水稻是其最适宜的寄主植物 (Yadava *et al.*, 1972; Khan *et al.*, 1988; Liu *et al.*, 2012)。

2 寄主植物对稻纵卷叶螟选择性及幼期发育适合度的影响

稻纵卷叶螟成虫对不同寄主植物的选择性与植物挥发物有关。张凤嫻 (2009) 利用“H”嗅觉仪测定了稻纵卷叶螟成虫对水稻 (IR36、TKM6)、玉米、甘蔗、淡竹叶、游草、马唐、狗尾草、芒草、稗草 9 种植物挥发物的偏好性, 发现雌虫显著趋向水稻品种 IR36 的挥发物, 而不趋向其他供试植物挥发物, 雄虫对所有供试植物挥发物都没有明显趋性。稻纵卷叶螟雌成虫在寄主植物上的产卵趋性并不受其幼虫期取食经历的影响。例如, 采用水稻、玉米、稗草、狗尾草 4 种寄主植物单独饲养幼虫或者采用玉米和水稻混合饲养稻纵卷叶螟幼虫, 所获得的成虫均喜好在水稻上产卵 (李传明等, 2017)。其他研究也报道了稻纵卷叶螟对水稻的产卵偏好性 (张凤嫻, 2009; Liu *et al.*, 2012; Padmavathi *et al.*, 2015; 郑许松等, 2017)。因此, 推测稻纵卷叶螟的这种产卵喜好可能是造成稻纵卷叶螟仅对水稻严重为害的原因。进一步的研究揭示了稻纵卷叶螟雌虫产卵喜好性的化学生态学机制。程建军等 (2016) 测定了稻纵卷叶螟雌、雄蛾对禾本科植物 43 种挥发物的触角电位 (EAG) 反应, 发现成虫仅对反-2-己烯醛、正戊醛、苯甲醛、水杨酸甲酯表现出较高的 EAG 活性。鉴定不同

表 1 文献记载的稻纵卷叶螟寄主植物种类
Table 1 Recorded host plant species of *Cnaphalocrocis medinalis*

科名 Family name	种名 Species name	学名 Scientific name	参考文献 References
禾本科 Gramineae	水稻 Rice	<i>Oryza sativa</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 1988 ; 张左生和王功满, 1988 ; 张光华等, 2011
	玉米 Maize	<i>Zea mays</i> L.	
	小麦 Wheat	<i>Triticum aestivum</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 1988 ; 张左生和王功满, 1988 ; Murthy <i>et al.</i> , 2015
	大麦 Barely	<i>Hordeum vulgare</i> L.	张左生和王功满, 1988
	燕麦 Oat	<i>Avena sativa</i> L.	
	糜子 Glutinous millet	<i>Panicum miliaceum</i> L.	
	高粱 Sorghum	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	Khan <i>et al.</i> , 1988 ; 张左生和王功满, 1988
	甘蔗 Sugarcane	<i>Saccharum officinarum</i> L.	
	稗草 Barnyard grass	<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	Khan <i>et al.</i> , 1996 ; 张凤娴, 2009
	狗尾草 Green bristle grass	<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.	张凤娴, 2009 ; Padmavathi <i>et al.</i> , 2015
	千金子 Red sprangletop	<i>Leptochloa chinensis</i> (L.) Nees	Khan <i>et al.</i> , 1996 ; Liu <i>et al.</i> , 2012
	李氏禾 Common cutgrass	<i>Leersia hexandra</i> Swartz	Khan <i>et al.</i> , 1996 ; Liu <i>et al.</i> , 2012
	马唐 Common crabgrass	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.	Khan <i>et al.</i> , 1996 ; 张凤娴, 2009
	牛筋草 Goose grass	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	Khan <i>et al.</i> , 1996
	双穗雀稗 Thompson grass	<i>Paspalum paspaloides</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 1996 ; 张凤娴, 2009
	秕谷草 Japanese cutgrass	<i>Leersia sayanuka</i> Ohwi	郑许松等, 2017
	光头稗 Shama millet	<i>Echinochloa colonum</i> (L.) Link.	张左生和王功满, 1988 ; Khan <i>et al.</i> , 1996
	臂形草 Sweet singnalgrass	<i>Brachiaria eruciformis</i> (J. E. Smith) Griseb.	Khan <i>et al.</i> , 1996
	龙爪茅 Crowfoot grass	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Beauv.	Khan <i>et al.</i> , 1996
	硬稃稗 Palea paspalum	<i>Echinochloa glabrescens</i> Munro ex Hook f.	
	铺地黍 Torpedograss	<i>Panicum repens</i> L.	
	两耳草 Hilo grass	<i>Paspalum conjugatum</i> Bergius	
	淡竹叶 Common lophatherum herb	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.	张凤娴, 2009
莎草科 Cyperaceae	莎草 Sedge	<i>Cyperus rotundus</i> L.	Khan <i>et al.</i> , 1988

寄主植物中对稻纵卷叶螟成虫有活性的挥发物有助于研发稻纵卷叶螟成虫的诱捕剂, 也有助于筛选防治稻纵卷叶螟的功能性植物, 为实现利用生境管理 (Habitat management) 防治稻纵卷叶

螟提供依据。

相对于成虫, 稻纵卷叶螟幼虫对不同寄主植物选择性的研究较少。Khan 等 (1996) 发现稻纵卷叶螟 1 龄幼虫并不喜好选择杂草植株, 而 3

龄幼虫对杂草表现出较强选择趋性。李传明等 (2017) 发现稻纵卷叶螟低龄幼虫 (1 龄、2 龄) 对水稻、玉米、稗草、狗尾草这 4 种植物没有取食选择性, 而高龄幼虫 (3 龄、4 龄) 明显趋向取食狗尾草。这些结果表明, 不同种植物可能含有对稻纵卷叶螟幼虫起引诱或者排斥作用的物质, 而且在不同龄期间存在差异; 对稻纵卷叶螟幼虫产生吸引或者排斥作用的具体物质还有待于进一步确定。

稻纵卷叶螟幼虫在不同植物上的发育适合度存在差异。Padmavathi 等 (2015) 报道, 取食稗草的稻纵卷叶螟幼虫的发育历期显著短于取食水稻的, 但产卵量比取食水稻时要少; 与以往多数研究结果 (Khan *et al.*, 1988; 张凤娴, 2009; 廖怀建等, 2012; Bodlah *et al.*, 2016; 李传明等, 2017) 不同的是, 该研究发现稻纵卷叶螟在玉米上不能完成世代发育。李传明等 (2017) 发现, 在水稻、玉米、稗草、狗尾草 4 种植物中, 取食玉米苗的稻纵卷叶螟幼虫存活率最高、而取食水稻的蛹重最大。深入研究不同寄主植物对稻纵卷叶螟生长发育的影响, 不仅有助于确定稻纵卷叶螟的寄主植物种类, 还能为稻纵卷叶螟种群的监测及防控提供重要的基础价值。

3 稻纵卷叶螟发生为害与水稻品种间的关系

自 70 年代以来, 稻纵卷叶螟的为害呈加重趋势 (钱希, 1979; 陈忠孝等, 1995), 这与稻纵卷叶螟对水稻品种的适应性密切相关 (Khan *et al.*, 1989, 1996; 李霞等, 2013)。有研究表明, 在不同品种水稻上, 稻纵卷叶螟的成虫产卵量、寿命、卵孵化率、幼虫取食量、发育历期等都存在差异。李霞等 (2013) 测定了稻纵卷叶螟幼虫取食 6 个水稻品种后的发育历期、存活率及成虫的卵巢发育及飞行能力, 发现品种类型对上述生命指标均存在影响, 从大到小依次为: 杂交粳稻、常规粳稻、常规籼稻、杂交籼稻、超级杂交稻。稻纵卷叶螟为害造成的产量损失也因水稻品种而异, 具体表现为水稻剑叶和顶二叶受害时, 杂交稻的产量损失高于常规稻; 当顶三叶受

害时, 常规稻的产量损失大于杂交稻 (钱希, 1993)。

不同水稻品种对稻纵卷叶螟表现出不同的抗性, 充分利用不同品种水稻的抗虫性是从根本上控制其危害、降低经济损失、提升粮食安全的有效途径 (Shah *et al.*, 2008; 田卉等, 2015)。目前栽培的常规稻多由野生稻演变而来 (陈志强等, 1991), 而野生稻往往具有抗病虫的优良基因 (Heinrichs *et al.*, 1985)。Khan 等 (1989) 测定发现多年生野生稻 *Oryza perennis*、短粒野生稻 *Oryza punctata*、一年生普通野生稻 *Oryza nivara*、澳洲野生稻 *Oryza australiensis* 均对稻纵卷叶螟表现出不同程度的抗性; 与感虫品种 IR36 相比, 幼虫对除短粒野生稻以外的其他 3 种野生稻表现出极强的不选择性; 而与抗性品种 TKM6 相比, 幼虫趋向于取食澳洲野生稻; 与 IR36 和 TKM6 相比, 怀卵雌蛾对 4 种野生稻表现弱选择性。有研究表明, 抗稻纵卷叶螟的水稻品种在形态结构、组织学特征、生理生化特性等方面与感虫品种存在差异。就形态结构而言, 抗性品种往往植株高大、株型披散、叶片较窄 (< 0.8 cm) 或者较宽 (> 1.5 cm), 而感虫品种株型矮小、紧密, 叶片宽度为 0.8-1.5 cm (阮仁超等, 2000)。Dittrich (1987) 研究发现, 水稻叶片数和分蘖数与稻纵卷叶螟的危害呈负相关关系, 而第二叶片的长度和宽度、第二节的间距、植株高度与稻纵卷叶螟的为害呈正相关关系。王汧翔等 (2008) 报道了不太相同的结果, 水稻株高、叶片长度与抗虫性相关性低, 而叶片宽度与抗虫性具有较高相关性。在组织学特征方面, 硅细胞排列方式和硅含量对品种抗虫性有较大影响。抗性品种叶表皮二氧化硅排列紧密, 脉间区域二氧化硅大量沉积, 并呈单行或双行排列, 可阻碍幼虫取食; 而感虫品种叶表皮及叶脉间缺少二氧化硅沉积, 不会对幼虫取食造成机械屏障。野生稻叶表皮硅细胞排列更为紧密, 因此比杂交稻对稻纵卷叶螟抗性高 (Ramachandran and Khan, 1991)。还有研究发现硅含量在抗性和敏感性水稻品种间差异不显著 (Hanifa *et al.*, 1974), 但是王汧翔等 (2008) 报道感虫品种叶片硅含量显著低于抗虫

品种。最近也有很多研究表明,施硅能增加水稻组织中的硅沉积,使硅细胞数量增多或排列更为紧密,从而增强水稻对稻纵卷叶螟的抗性 (Han *et al.*, 2015, 2016, 2018; 韩永强等, 2017)。在水稻的生理生化特性方面,薛俊杰和刘芹轩 (1987) 发现抗性水稻品种的酪氨酸含量较低,而谷氨酸含量较高。抗虫水稻品种叶片的蜡质也显著高于感虫品种 (王元翔等, 2008)。此外,叶片保护酶的活性也是影响水稻抗虫性的因素之一 (许璐等, 2007)。Vanitha 等 (2015) 还测定了抗/感水稻叶片中部分化学物质的含量,发现抗虫水稻品种叶片内总酚含量高,而感虫品种叶片内的糖含量、粗蛋白和总游离氨基酸的含量比抗性品种高。

4 稻纵卷叶螟发生为害与水稻耕作栽培制度的关系

自 20 世纪 90 年代以来,我国水稻耕作制度发生显著变化,出现了以单季稻种植为主、单双季稻混栽的局面 (朱德峰等, 2007; 蒋春先等, 2011)。单季稻稻田作为稻纵卷叶螟的“桥梁田”,一定程度上维持了稻纵卷叶螟的种群数量。其次,水稻栽培方式也从手工移栽向直播转变,从而减少对稻纵卷叶螟活动的干扰。栽培密度也是影响稻纵卷叶螟种群动态的关键因素,主要影响迁入后虫量的再分配及幼虫的卷叶率 (张桂芬等, 1995)。偏施氮肥导致植株幼嫩和徒长,从而利于稻纵卷叶螟幼虫卷叶取食和成虫产卵,在一定程度上促进稻纵卷叶螟的种群增长和损害水平提高 (张桂芬等, 1995; Ge *et al.*, 2013)。田间寄主植物多样性为稻纵卷叶螟的成虫栖息和产卵提供了更多场所,填补了水稻收割后栖息地和食物的暂时短缺,有助于维持稻纵卷叶螟种群数量稳定;寄主植物多样性还会导致同一时间段内稻纵卷叶螟虫态组成呈现复杂化,增大预测预报和防治的难度 (Padmavathi *et al.*, 2015)。可见,水稻耕作栽培制度的变化影响水稻的空间布局和发育时序,从而直接或者间接造成稻纵卷叶螟生长繁殖、为害特点和为害程度的差异,往往为稻纵卷叶螟提供时间上连续和空间上不间

断的发育和繁殖的生态位,增大稻纵卷叶螟监测和防治的难度。

5 非生物因素对稻纵卷叶螟的寄主适应性和为害的影响

非生物因素,特别是温度,通过直接影响昆虫的行为和生理或间接改变寄主质量及丰富度等影响植食性昆虫对寄主植物的适应性及为害 (Hughes, 2000; Bale *et al.*, 2002)。自 19 世纪以来,地球表面温度以每年 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的速度上升,预测到 2100 年全球平均地表温度将上升 $1.4\text{--}5.8^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007)。在全球气候变化的背景下,明确植食性昆虫对寄主的适应性十分重要。廖怀建等 (2013) 比较了不同温度下水稻和玉米上饲养的稻纵卷叶螟的生长发育、存活和繁殖状况,发现水稻饲养的稻纵卷叶螟更耐高温。此外,高温影响不同龄期幼虫对寄主植物选择性。在 27°C 下,1-2 龄幼虫在水稻、玉米、小麦三者中更趋向于选择玉米,但是经 37°C 和 40°C 高温处理 4 h 后,1-2 龄幼虫更倾向于选择水稻;3 龄幼虫经 40°C 高温处理 4 h 后,找到寄主并栖息在叶片表面的能力显著降低,但同样的处理对 4 龄和 5 龄幼虫没有影响 (Bodlah *et al.*, 2016);由此说明高温对低龄幼虫 (≤ 3 龄) 的影响更大。同时,高温热击会使稻纵卷叶螟幼虫消耗额外的时间和能量选择寄主,因此会导致幼虫存活率下降。可见,温度会影响稻纵卷叶螟对寄主的选择性和适应性。气候变暖也将影响稻纵卷叶螟的越冬北界和存活,正如 Hu 等 (2015) 就褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 的研究进行的报道,随着气候变暖,迁入虫量和频次也可能增大,从而增大其危害性。

6 寄主植物在稻纵卷叶螟防控中的应用

植食性昆虫的某些寄主植物或食料植物能作为功能性植物,如指示植物、载体植物、诱集植物、护卫植物等来直接或者间接地控制害虫 (Parolin *et al.*, 2012; 陈学新等, 2014; 鲁艳辉等, 2017), 尤其是某些植物作为载体植物繁

殖植食性昆虫,为天敌等有益生物提供猎物,促进天敌种群的增长。这是目前的研究热点,也是未来田间防控害虫时需要优先考虑的策略(Gurr *et al.*, 2017)。针对稻纵卷叶螟功能性植物的研究,郑许松等(2017)结合室内和田间实验,比较了稻纵卷叶螟对稗草、秕谷草、马唐、牛筋草、千金子、双穗雀稗、游草 7 种稻田常见禾本科杂草取食、栖息和产卵的选择性,发现稻纵卷叶螟在 7 种杂草上都能完成世代发育,但秕谷草最有潜力成为防治稻纵卷叶螟的功能性植物:既能诱集部分稻纵卷叶螟成虫产卵,起到诱集植物的作用;还能通过杂草田赶蛾,预测稻田发蛾量,起到指示植物的作用;也能作为载体植物供稻纵卷叶螟产卵,促进寄生蜂繁殖,提高卵寄生率。然而,优化秕谷草和水稻搭配种植的合理方案,以保证经济和农艺操作的可行性,是实际应用中需要考虑的问题。

7 展望

综上所述,稻纵卷叶螟的发生为害受寄主植物、水稻品种、作物栽培制度、气候条件等的影响。虽然近年来国内外学者对稻纵卷叶螟的研究取得了较大进展,但在稻纵卷叶螟发生为害与寄主植物间的关系方面仍需要深入研究:(1) 稻纵卷叶螟在不同植物上取食、产卵选择的生理生化和行为学机制及不同植物对其种群增长的贡献;(2) 利用田埂上的禾本科杂草防控稻纵卷叶螟的经济生态学分析及应用技术;(3) 稻纵卷叶螟成虫的食源性诱杀技术;(4) 全球变暖背景下稻纵卷叶螟对寄主植物的适应性;(5) 在耕作栽培制度演变和气候变化背景下,稻纵卷叶螟发生为害的新格局及其防控新策略。

参考文献 (References)

- Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, Awmack C, Bezemer TM, Brown VK, Butterfield J, Buse A, Coulson JC, Farrar J, 2002. Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1): 1–16.
- Bodlah MA, Zhu AX, Liu XD, 2016. Host choice, settling and folding leaf behaviors of the larval rice leaf folder under heat stress. *Bulletin of Entomological Research*, 106(6): 809–817.
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plant-mediated support system for natural enemies. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1–12.]
- Chen ZQ, Huang CW, Zhang QC, 1991. Ultrastructural investigations on chloroplasts of the flag leaf of *Oryza sativa* L. f. *spontanea* and *O. sativa* L. *Journal of South China Agricultural University*, 12(1): 10–15. [陈志强, 黄超武, 章潜才, 1991. 普通野生稻和栽培稻叶片叶绿体性状超微结构比较研究. 华南农业大学学报, 12(1): 10–15.]
- Chen ZX, Feng MG, Hu GW, Pan QW, 1995. Response of early-season hybrid rice to foliar loss: a simulation to damage by the rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Chinese Journal of Rice Science*, 9(1): 53–56. [陈忠孝, 冯明光, 胡国文, 潘群威, 1995. 杂交早稻不同生育期对叶面损伤的反应: 稻纵卷叶螟危害的田间模拟试验. 中国水稻科学, 9(1): 53–56.]
- Cheng JA, 1996. Rice Pests. Beijing: China Agriculture Press. 58–79. [程家安, 1996. 水稻害虫. 北京: 中国农业出版社. 58–79.]
- Cheng JJ, Zhu J, Liu F, 2016. EAG response of *Cnaphalocrocis medinalis* to 43 graminaceous plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 472–481. [程建军, 朱均, 刘芳, 2016. 稻纵卷叶螟对 43 种禾本科植物挥发物的触角电位 (EAG) 反应. 应用昆虫学报, 53(3): 472–481.]
- Dittrich V, 1987. Resistance and hormologosis as a driving force behind pest outbreaks. Rational Pesticide Use: Proceeding of the Ninth Long Ashton Symposium. Cambridge: Cambridge University Press. 168–181.
- Ge LQ, Wan DJ, Xu J, Jiang LB, Wu JC, 2013. Effects of nitrogen fertilizer and magnesium manipulation on the *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 196–205.
- Guo R, Han M, Shu F, 2013. Green prevention and control measures for reducing pests and diseases in paddy fields. *China Plant Protection*, 33(10): 38–41. [郭荣, 韩梅, 束放, 2013. 减少稻田用药的病虫草害绿色防控策略与措施. 中国植保导刊, 33(10): 38–41.]
- Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You M, 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62(1): 91–109.
- Han YQ, Gong SX, Wen LZ, Hou ML, 2017. Effect of silicon addition to rice plants on *Cnaphalocrocis medinalis* feeding and oviposition preference. *Acta Ecologica Sinica*, 37(5): 1623–1629. [韩永强, 弓少龙, 文礼章, 侯茂林, 2017. 水稻施用硅肥对稻纵卷叶螟幼虫取食和成虫产卵选择性的影响. 生态学报, 37(5): 1623–1629.]
- Han YQ, Lei WB, Wen LZ, Hou ML, 2015. Silicon-mediated resistance in a susceptible rice variety to the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*, Guenee (Lepidoptera: Pyralidae). *PLoS ONE*, 10: e0120557.

- Han YQ, Li P, Gong SL, Yang L, Wen LZ, Hou ML, 2016. Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *PLoS ONE*, 11: e0153918.
- Han YQ, Wen JH, Peng ZP, Zhang DY, Hou ML, 2018. Effects of silicon amendment on the occurrence of rice insect pests and diseases in a field test. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10): 2172–2181.
- Hanifa AM, Subramaniam TR, Ponnaiya BWX, 1974. Role of silica in resistance to the leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in rice. *Indian Journal of Experimental Biology*, 12(5): 463–465.
- Heinrichs EA, Camanag E, Romena A, 1985. Evaluation of rice cultivars for resistance to *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology*, 78(1): 274–278.
- Hou ML, Hao LX, Han YQ, Liao XL, 2010. Host status of wheat and corn for *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Environmental Entomology*, 39(6): 1929–1935.
- Hu CX, Hou ML, Wei GS, Shi BK, Huang JL, 2015. Potential overwintering boundary and voltinism changes in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, in China in response to global warming. *Climatic Change*, 132(2): 337–352.
- Hughes II, 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2): 56.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press. 996.
- Jiang CX, Qi HH, Sun MY, Wu JJ, Zhang YH, Cheng DF, 2011. Occurrence dynamics and trajectory analysis of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 31(21): 6495–6504. [蒋春先, 齐会会, 孙明阳, 武俊杰, 张云慧, 程登发, 2011. 2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析. 生态学报, 31(21): 6495–6504.]
- Khan ZR, Barrion AT, Litsinger JA, Castilla NP, Joshi RC, 1988. A bibliography of rice leaffolders (Lepidoptera: Pyralidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 9(2): 129–174.
- Khan ZR, Mlp A, Fernandez NJ, 1996. Suitability of graminaceous weed species as host plants for rice leaffolders, *Cnaphalocrocis medinalis* and *Marasmia patnalis*. *Crop Protection*, 15(2): 121–127.
- Khan ZR, Rueda BP, Caballero P, 1989. Behavioural and physiological responses of rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* to selected wild rice. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 52(1): 7–13.
- Li CM, Han GJ, Yang YJ, Qi JH, Liu Q, Xu J, Lv ZX, 2017. Oviposition and feeding preference of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) for four different plants. *Chinese Journal of Rice Science*, 31(3): 315–319. [李传明, 韩光杰, 杨亚军, 祁建杭, 刘琴, 徐健, 吕仲贤, 2017. 稻纵卷叶螟对不同植物的产卵趋性与取食选择. 中国水稻科学, 31(3): 315–319.]
- Li X, Xu XX, Han LZ, Wang M, Hou ML, 2013. Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *Acta Ecologica Sinica*, 33(14): 4370–4376. [李霞, 徐秀秀, 韩兰芝, 王沫, 侯茂林, 2013. 不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响. 生态学报, 33(14): 4370–4376.]
- Liao HJ, Huang JR, Fang YS, Liu XD, 2013. Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) reared on rice and maize seedling to temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 33(2): 409–415. [廖怀建, 黄建荣, 方源松, 刘向东, 2013. 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应. 生态学报, 33(2): 409–415.]
- Liao HJ, Huang JR, Liu XD, 2012. The method for mass rearing of rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* using maize seedlings. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 1078–1082. [廖怀建, 黄建荣, 刘向东, 2012. 利用玉米苗饲养稻纵卷叶螟的方法. 应用昆虫学报, 49(4): 1078–1082.]
- Liu F, Cheng JJ, Jiang T, Su W, Xu S, 2012. Selectiveness of *Cnaphalocrocis medinalis* to host plants. *Rice Science*, 19(1): 49–54.
- Lu YH, Gao GC, Zheng XS, Lv ZX, 2017. The lethal mechanism of trap plant *Vetiveria zizanioides* against the larvae of *Chilo suppressalis*. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(3): 486–495. [鲁艳辉, 高广春, 郑许松, 吕仲贤, 2017. 诱集植物香根草对二化螟幼虫致死的作用机制. 中国农业科学, 50(3): 486–495.]
- Murthy MS, Nagaraj SK, Prabhuraj A, Kalleswaraswamy CM, 2015. Rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae) on wheat (*Triticum aestivum*; Poales: Poaceae) in India. *Florida Entomologist*, 98(4): 1269–1270.
- Padmavathi C, Katti G, Sailaja V, Prasad Y, 2015. Physiological age status of female adults and off-season survival of rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* in India. *Rice Science*, 22(5): 237–244.
- Parolin P, Bresch C, Desneux N, Brun N, Bout A, Boll R, Poncet C, 2012. Secondary plants used in biological control: A review. *International Journal of Pest Management*, 58(2): 91–100.
- Qi GJ, Lu F, Gao Y, Liang JL, Lan RQ, Zhang XX, Zhai BP, Lv LH, 2011. Analysis of a migration process and the source population of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) in 2010. *Acta Entomologica Sinica*, 54(10): 1194–1203. [齐国君, 芦芳, 高燕, 梁居林, 蓝日青, 张孝羲, 翟保平, 吕利华, 2011. 稻纵卷叶螟 2010 年的一次迁飞过程及其虫源分析. 昆虫学报, 54(10): 1194–1203.]
- Qian X, 1979. Occurrence and damage of rice leaf folder in the northern coastal reclamation area of Jiangsu province. *Entomological Knowledge*, 16(6): 241–242. [钱希, 1979. 苏北盐垦区稻纵卷叶螟的发生与为害. 昆虫知识, 16(6): 241–242.]
- Qian X, 1993. Ecological responses of rice caseworm to hybrid rices and traditional rices. *Chinese Journal of Ecology*, 12(6): 21–24. [钱希, 1993. 稻纵卷叶螟对杂交水稻及常规水稻的生态反应. 生态学杂志, 12(6): 21–24.]
- Qin JD, 1985. The relationship between insects and plants. *Bulletin of Biology*, 20(10): 18–20. [钦俊德, 1985. 昆虫与植物的关系. 生物学通报, 20(10): 18–20.]

- Qin JD, Wang CZ, 2001. The relation of interaction between insects and plants to evolution. *Acta Entomologica Sinica*, 44(3): 360–365. [钦俊德, 王琛柱, 2001. 论昆虫与植物的相互作用和进化的关系. *昆虫学报*, 44(3): 360–365.]
- Ramachandran R, Khan ZR, 1991. Mechanisms of resistance in wild rice *Oryza brachyantha* to rice leafroller *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Chemical Ecology*, 17(1): 41–65.
- Ruan RC, Chen HC, Zhang ZX, Yang YS, Jin TY, You JM, Zhu YQ, 2000. Progress and prospects of research and utilization on genetic diversity of rice germplasm resources in Guizhou. *Acta Botanica Yunnanica*, (Suppl.): 134–138. [阮仁超, 陈惠查, 张再兴, 杨玉顺, 金桃叶, 游俊梅, 朱玉琴, 2000. 贵州地方稻种资源遗传多样性研究和利用的现状与展望. *云南植物研究*, (增刊): 134–138.]
- Ruan YM, Wu KJ, 2001. Performances of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* on different food plants. *Acta Entomologica Sinica*, 44(2): 205–212. [阮永明, 吴坤君, 2001. 不同食料植物对棉铃虫生长发育和繁殖的影响. *昆虫学报*, 44(2): 205–212.]
- Saxena KN, Gandhi JR, Saxena RC, 1974. Patterns of relationship between certain leafhoppers and plants. I. Responses to plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 17(2): 303–318.
- Shah SMA, Rehman A, Abassi FM, Rehman A, Khalil IH, Ali A, 2008. Characterization of wild rice species in response to leafroller *Cnaphalocrocis medinalis*. *Sarhad Journal of Agriculture*, 24(1): 69–74.
- Tian H, Liu YH, Wan XW, 2015. Analysis of the preference and influencing factors of rice leaf folder on eight rice varieties. *Proceedings of China Society of Plant Protection in 2015*. Changchun. 113–120. [田卉, 刘映红, 万宣伍, 2015. 稻纵卷叶螟对 8 个水稻品种的趋性及影响因素分析. *中国植物保护学会 2015 年学术年会*. 长春. 113–120.]
- Vanitha BK, Kumar CTA, Kumar LV, Prashantha C, 2015. Association of biochemical factors in rice against infestation of rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Experimental Zoology*, 18(1): 373–376.
- Wang QX, Xu L, Wu JC, 2008. Physical and biochemical mechanisms of resistance of different rice varieties to the rice leafroller, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(12): 1265–1270. [王元翔, 许路, 吴进才, 2008. 水稻品种对稻纵卷叶螟抗性的物理及生化机制. *昆虫学报*, 51(12): 1265–1270.]
- Xu L, Wang F, Wu JC, Wang QX, 2007. Life-table parameters of a semi-natural population of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) on different rice varieties and changes in sugar content in rice plants after insect infestation. *Acta Ecologica Sinica*, 27(11): 4547–4554. [许璐, 王芳, 吴进才, 王元翔, 2007. 稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) 在水稻品种上的半自然种群生命表参数及对植株含糖量的影响. *生态学报*, 27(11): 4547–4554.]
- Xue JJ, Liu QX, 1987. Screening tests for the resistance of rice varieties to leafrollers (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée). *Acta Phytophylacica Sinica*, 14(1): 21–27. [薛俊杰, 刘芹轩, 1987. 水稻品种对稻纵卷叶螟的抗性鉴定. *植物保护学报*, 14(1): 21–27.]
- Yadava CP, Santaram G, Israel P, Kalode MB, 1972. Life-history of rice leaf-roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae) and its reaction to some rice varieties and grasses. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 6(6): 520–523.
- Zalucki MP, Daglish G, Firempong S, Twine P, 1986. The biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hubner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia-What do we know? *Australian Journal of Zoology*, 34(6): 779–814.
- Zhang FX, 2009. Selectivity of rice leafroller (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée) to several gramineous plants. Master thesis. Guangzhou: South China Agricultural University. [张凤嫻, 2009. 稻纵卷叶螟对几种禾本科植物的选择性. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]
- Zhang GF, Lu CT, Shen XC, Wang WX, 1995. The synthesized ecological effect of rice density and nitrogen fertilizer on the occurrence of main rice pests. *Journal of Plant Protection*, 22(1): 38–44. [张桂芬, 鲁传涛, 申效诚, 王文夕, 1995. 栽培密度、施氮量对水稻主要病虫害的综合生态效应. *植物保护学报*, 22(1): 38–44.]
- Zhang GH, Dai JG, Lai JC, 2011. Common Pests and Diseases of Corn and Their Control. Beijing: China Labor and Social Security Publishing House. 107–108. [张光华, 戴建国, 赖军臣, 2011. 玉米常见病虫害防治. 北京: 中国劳动社会保障出版社. 107–108.]
- Zhang XX, Geng JG, Zhou WJ, 1981. Study on the migration laws of rice leafroller (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée) in China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 4(3): 43–54. [张孝羲, 耿济国, 周威君, 1981. 我国稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée)迁飞规律的研究. *南京农业大学学报*, 4(3): 43–54.]
- Zhang ZS, Wang GM, 1988. Control of Rice Leafroller. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers. 1–2. [张左生, 王功满, 1988. 稻纵卷叶螟的防治. 上海: 上海科学技术出版社. 1–2.]
- Zheng XS, Tian JC, Yang YJ, Zhu PY, Li K, Xu HX, Lv ZX, 2017. The feasibility of using graminaceous weeds as a functional plant for controlling rice leafroller (*Cnaphalocrocis medinalis*). *Scientia Agricultura Sinica*, 50(21): 4129–4137. [郑许松, 田俊策, 杨亚军, 朱平阳, 李宽, 徐红星, 吕仲贤, 2017. 禾本科杂草作为防治稻纵卷叶螟的功能性植物的可行性. *中国农业科学*, 50(21): 4129–4137.]
- Zhu DF, Chen HZ, Zhang XF, Lin XQ, Zhang YP, 2007. Evolution of rice cropping system and planting zonation in Zhejiang province. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 19(6): 423–426. [朱德峰, 陈惠哲, 章秀福, 林贤青, 张玉屏, 2007. 浙江水稻种植制的变化与种植区划. *浙江农业学报*, 19(6): 423–426.]