

我国小麦抗蚜机理研究进展*

胡想顺** 赵惠燕***

(西北农林科技大学 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 农业部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 杨陵 712100)

摘 要 小麦蚜虫是我国重要的害虫类群, 应用麦类作物品种抗虫性能有效减少化学杀虫剂的使用, 减少天敌杀伤, 保护农田生态环境。本文从经典的抗蚜三机制, 物理抗性、化学抗性、诱导抗性, 蚜虫地理种群(或生物型)与抗蚜性的关系, 抗性遗传, 抗蚜小麦品种和非寄主抗性的合理应用等方面综述了我国小麦抗蚜机理的研究成果, 提出了研究的重点方向。

关键词 小麦, 麦蚜, 抗性机理, 抗性遗传

The reviews of wheat resistant mechanism to cereal aphid in China

HU Xiang-Shun** ZHAO Hui-Yan***

(State Key Laboratory for Crop Stress Biology in Arid Areas, Key Laboratory of Crop Pest Management on the Northwest Loess Plateau of Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract Wheat aphids are important pests of wheat in China and the planting of resistant wheat crop varieties is an efficient and environmentally friendly means of controlling aphids that can reduce pesticide use, protect natural enemies, and improve the ecological environment of wheat fields. This paper introduces progress in research on three classical mechanisms by which wheat is made resistant to aphids; physical resistance, chemical resistance and induced resistance. The relationship between aphids' geological population (or biotype) to varietal resistance, the inheritance of resistance, and the application of non-host resistance are also reviewed and directions for future research discussed.

Key words wheat, aphid, resistance mechanism, resistance inheritance

麦蚜是重要的小麦害虫类群, 世界范围内危害小麦的蚜虫有 30 多种(叶炳元和郝纪华, 1992), 其中造成严重危害的有麦双尾蚜 *Diuraphis noxia* Mordv, 麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* Rondani, 禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* L., 麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fab.) 和无网长管蚜 *Acyrtosiphon dirhodum* (Walker)。据全国农技推广中心历年公布的数据(<http://www.natesc.moa.gov.cn/>), 我国麦蚜常年发生面积约 0.1~0.17 亿 hm^2 , 造成小麦减产 10% 左右。我国目前麦蚜防治依然主要依靠化学

农药, 但化防容易造成环境污染, 杀伤麦田天敌(刘爱芝和李世功, 1999), 特别是乳熟期施药容易导致籽粒农药残留超标(来有鹏等, 2011), 威胁人类健康。Kogan (1982) 从生态学的观点出发, 列出了植物抗虫性最明显的几个特点: 专一性、累积效应、持久性、与环境的协调一致性、易于采用性和与其它害虫治理措施的相容性。选育利用抗蚜品种符合生态学规律和经济学的原则, 符合有害生物可持续治理和农业可持续发展的要求, 有利于环境保护(Dogimont *et al.*, 2010)。如在美国, 农民向小麦抗蚜育种投资 1

* 资助项目: 西北农林科技大学科技创新与成果转化项目(Z222021316); 中德农业部合作项目(02/03)

**E-mail: huxiangshun@163.com; xiangshun@nwsuaf.edu.cn

***通讯作者, E-mail: zhaohy@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2014-10-13, 接受日期: 2014-10-28

美元可获得 600 美元的回报,但使用杀虫剂的回报仅有 5 美元 (Michael *et al.*, 1999)。

1952 年,我国晋南麦区蚜虫大发生,王辅成观察到碧玉麦与蚂蚱麦的杂交后代碧蚂一号除抗条锈病以外,对蚜虫也有较好的抗性。碧蚂系列品种的推广在当时对缓解蚜虫(郑王义等, 1999)和锈病为害起到了重要的作用。我国抗蚜种质资源的鉴定工作始于上世纪 50—60 年代(丁蕙淑, 1958;朱弘复等, 1961;丁蕙淑和余芸英, 1966)。经过 50 多年的努力,已经筛选出了一大批抗蚜小麦材料(屈会选等, 2004;于洋等, 2006;李贤庆等, 2006;刘新伦等, 2006, 2014;段灿星等, 2006;屈非等, 2012;李峰奇等, 2013;路子云, 2014;许兰杰等, 2014)、多抗、兼抗的小麦族野生材料(马盾, 1994;李庆和叶华智, 2002;谢纳等, 2014),引进了一些国外的抗蚜品种(胡想顺等, 2004;刘新伦等, 2006, 2014;段灿星等, 2006;屈非等, 2012)。

1 麦蚜侵害过程与抗性三机制

在长期协同进化过程中,寄主植物和昆虫进化出了复杂的相互适应和防御机制。麦蚜的危害主要由三方面造成:直接吸取小麦汁液;传播多种病毒病;分泌的蜜露诱发病害,降低光合效率,导致黑胚种子,影响小麦品质及种子活力(杨益众等, 1991, 1995)。经典的植物抗虫三机制为不选择性、抗生性和耐害性(Painter, 1951)。寄主植物的抗性机制有多样性。不同小麦品种(系)对麦蚜的抗性机理不同,反映到蚜虫生物学特性和生态学特性上有不同表现。具有迁飞性或靠翅膀飞行扩散的蚜虫发现并在寄主上定殖要经过以下阶段:定向、着陆、评价和接受寄主。不选择性是小麦的第一道防线。春季有翅蚜对小麦的第一步识别是视觉上的定向识别,寄主植物的颜色在这一步起着关键的作用。研究表明,黄色大麦上的玉米蚜密度显著大于绿色大麦(Moharramipour, 1997),我国北方春小麦穗部和茎秆颜色越绿,田间抗蚜性越强(叶树辉等, 2012),小麦穗部颖壳颜色灰色,田间蚜虫种群

数量大,蓝色反之(刘新伦等, 2006),这可能跟蚜虫的视觉定向选择相关。对着陆起作用的还有麦叶挥发的气味物质(刘勇等, 2001)和麦叶面积(刘绍友等, 1993;郑王义等, 1999)。麦叶挥发性物质还对麦田天敌种群产生影响,从而间接影响麦田蚜虫种群(李川等, 2011)。当有翅蚜降落后,对寄主的第二步识别是味觉上的识别与评判,有翅蚜可以选择继续取食,也可以选择离开,这时候起作用的是叶面化学物质(刘勇等, 2007)和麦株的生理特性(杜利峰等, 1999),如叶面蜡质,麦叶角度,茸毛密度等。我们的试验证明,有翅麦长管蚜会在 1~8 h 内完成这一过程(Hu *et al.*, 未发表)。接下来,如果蚜虫在该株小麦上定居,以后起作用的是寄主的第二道防线——抗生性防线。麦株物理性状,体内的次生代谢物质和蚜虫取食后对麦株的诱导反应能影响蚜虫的生长、发育、繁殖以及有翅蚜的比例。如果蚜虫攻破了这两条防线,小麦就只能通过补偿作用(耐害性)补偿自身的损失。

2 物理抗性

小麦株高、叶色、叶面积、叶面蜡质、叶上绒毛、芒长、小穗密度等外部形态与抗蚜性的关系存在争议(Dreyer *et al.*, 1981; Weibull, 1991; 夏云龙等, 1991;刘绍友等, 1993;周福才等, 1998;杜利峰等, 1999;张志勇等, 2000;刘新伦等, 2006;李昌盛等, 2007;师桂英等, 2008;胥苡等, 2011;王雨等, 2014)。可能还受其他因素,如生育期,内部结构和生化因素的影响。但一般认为,抗蚜材料的表皮腊质层厚,茸毛多、长且直硬,叶表皮细胞壁厚、叶脉细胞紧凑、机械组织厚、细胞层多、体积小,气腔小、护鞘细胞周围较空,韧皮部筛管细小,木质部导管细小的抗蚜材料(马盾等, 1994)。这些因素能影响蚜虫的口针顺利进入韧皮部取食(胡想顺等, 2007; Hu *et al.*, 2008)。

3 化学抗性

寄主植物的化学成分与蚜虫的生长、发育、

繁殖以及有翅蚜的形成等有密切的关系,因此,化学物质是小麦抗蚜性产生的主要原因。与抗蚜性相关的化学物质包括如糖类、氨基酸以及无机盐等营养物质,生物碱、酚类、类黄酮、氧肟酸、非蛋白质氨基酸、丹宁化合物、脂类等次生代谢物,以及蛋白酶抑制剂等。

糖类和氨基酸是蚜虫必须的营养物质,但其含量与抗蚜性的关系也无定论。一般抗麦长管蚜的小麦、燕麦品种体内(或受害后)可溶性糖含量高(谢永寿和杨奇华,1987;陈建新等,1997;周福才等,1997;朱永峰等,2011),但山羊草等小麦近缘野生种中糖含量与抗禾谷缢管蚜无关或负相关(马盾等,1994;Havlickova,1996;周福才等,1999;李庆和叶华智,2002;李庆等,2004a,2004b)。邹运鼎和孟庆雷(1994)的结果表明糖含量仅与麦二叉蚜的种群消长有关,与麦长管蚜无关。

小麦品种抗蚜性与植株所含低浓度游离氨基酸呈正相关(Havlickova,1996),非蛋白质氨基酸,如二羟基苯丙氨、磺基丙氨酸、L-3,4-二羟基苯丙氨酸(多巴)、鸟氨酸、 α -氨基己二酸和 γ -氨基丁酸等与小麦品种对麦长管蚜的抗性相关(Ciepiela,1989;Kazemi and van Emden,1992;Ciepiela and Sempruch,1996,1999;何敏和向志民,1998)。对不同的氨基酸种类及含量与小麦品种抗蚜性的关系如表1所示。不同研究者得出的结果并不一致,看起来几乎所有的氨基酸都和抗蚜性相关。究其原因,是因为在生物体内氨基酸参与的代谢很复杂,以20种氨基酸的碳架为基础,可以转化出丙酮酸、乙酰辅酶A、 α -酮戊二酸、琥珀酸辅酶A、延胡索酸以及草酸乙酰等中间产物,这些产物进入三羧酸循环,经过特殊的代谢途径生成各种含氮物质。因此,通过研究氨基酸含量与蚜量的相关性来判断氨基酸与抗蚜性的相关性,可能会由于中间代谢环节太多而得出假相关性。

研究表明钾元素和硅元素与小麦抗蚜性相关(Havlickova and Smetankova,1998;Keeping and Meyer,2002;Goussain *et al.*,2005)。硅在植物组织中沉积,能增加蚜虫取食的难度

(Hayward and Parry,1973;Peterson *et al.*,1988),可诱导次生物质产生(Goussain *et al.*,2005),增加小麦叶部和穗部可溶性糖、叶部单宁含量(王祎等,2013),从而增加小麦抗蚜性。充足供钾,小麦受到蚜虫为害后体内茉莉酸含量增加,激活茉莉酮酸(JA)信号传导途径,从而提高防御酶活性,增强对蚜虫的抗性(王祎等,2014)。

小麦植株中的次生物质氧肟酸(丁布)含量与抗蚜性密切相关(阎凤鸣,1995;杜利锋,1999;李庆和叶华智,2003;李庆等,2004a,2004b;吴艳兵等,2014)。总酚含量与抗蚜的关系尚有争议(Leszczynski *et al.*,1996;陈建新等,1997;陈巨莲等,1997;陈巨莲和倪汉祥,2000;李庆和叶华智,2003;李庆等,2004a,2004b),可能不同种类的蚜虫对不同的酚类物质的敏感性不同。小麦植株中黄酮类化合物与小麦品种对麦蚜的抗性有关(刘保川和陈巨莲,2003;Ninkovic and Aimer,2003)。生物碱与抗麦长管蚜密切相关性(蔡青年等,2003;Cai *et al.*,2009a)。

4 诱导抗性

防御反应机制可以分为主动防御机制和被动防御机制。被动防御机制中,不管蚜虫是否危害,麦株内的有毒次生代谢物和物理机械障碍是组成的,是预存在的。主动防御是在有蚜虫取食危害诱导时,麦株通过启动一系列信号途径,来抵御蚜虫危害。蚜虫口针危害麦株的刺探过程既涉及到机械穿刺作用,也会分泌含有诱导信号物质产生的酶类的水溶性唾液。因此蚜虫的诱导反应既涉及到机械诱导反应,也涉及病程相关蛋白(PR蛋白)。在某种程度上,蚜虫为害和一些病原菌的侵染过程很相似(祝传书和赵惠燕,2006)。目前研究较多的诱导抗性信号分子有茉莉酮酸(JA)、乙烯(Ethylene)、水杨酸(SA)和活性氧。一般认为茉莉酸介导的信号传导途径对防御咀嚼式口器昆虫起重要作用。内源茉莉酸水平增加诱导了多酚氧化酶PPO、过氧化物酶POD、几丁质酶等防御相关蛋白表达(Maffei *et al.*,2007);SA途径对防御刺吸式昆虫起重要作用,SA含量增加能激活植物抗性基因的表达

表 1 小麦植株中氨基酸含量与抗蚜性的关系
Table 1 The relationship between amino acid content and the resistance to aphid in wheat plant

生长期	鉴别指标 (蚜虫种类)	文献
Growing stages	The index used to evaluate resistance (aphid species)	References
拔节期 Elongation stage	蚜量 Aphid number (Sa)	刘绍友等, 1993
旗叶期 Flag leaf stage	蚜量 Aphid number (Sa)	刘绍友等, 1993
旗叶期 Flag leaf stage	发育历期 Development time (Sa)	刘绍友等, 1993
	内禀增长率 r_m (Sa)	刘绍友等, 1993
	单雌产仔量 Reproduction amount (Sa)	刘绍友等, 1993
	产仔速率 The rate reproduction (Sa)	刘绍友等, 1993
旗叶期 Flag leaf stage	蚜量 Aphid number (Sa)	高崇省等, 1998
	内禀增长率 r_m (Sa)	高崇省等, 1998
	蚜量 Aphid number (Sa)	张志勇等, 2000
	蚜量 Aphid number (Rp)	Kazemi and van Emden, 1992
	蚜量和内禀增长率 Aphid number and r_m (Rp)	周福才等, 1997
	繁殖率 Fecundity (Rp)	李素娟和韩世平, 2001
	种群动态 Population dynamics (Sa on SV)	郭萧等, 2010
	种群动态 Population dynamics (Sa on RV)	郭萧等, 2010
	蚜量 Aphid number (Sa 和 Sg)	邹运鼎和孟庆雷, 1994

Sa 为麦长管蚜, Rp 为禾谷缢管蚜, Sg 为麦二叉蚜。His 为组氨酸; Ser 为丝氨酸; Phe 为苯丙氨酸; Arg 为精氨酸; Met 为蛋氨酸; Gly 为甘氨酸; Cys 为胱氨酸; Lys 为氨酸; Glu 为谷氨酸; Thr 为苏氨酸; Leu 为亮氨酸; Ala 为丙氨酸; Pro 为脯氨酸; Ileu 为异亮氨酸; Tyr 为酪氨酸; Asp 为天冬氨酸; Val 为缬氨酸。+ 为与判别指标正相关, - 为与判别指标负相关。SV 是感蚜品种, RV 是抗蚜品种。

Sa represents *Sitobion avenae*, Rp represents *Rhopalosiphum padi*, Sg represents *Schizaphis graminum*. r_m is the intrinsic rate of increase. + means the amino acid content positive correlation with the index used to evaluate resistance, - means the amino acid content negative correlation with the index used to evaluate resistance. SV is susceptible variety, RV is resistant variety.

(Jayasekara *et al.*, 2002)。蚜虫取食小麦既能激活了茉莉酸途径,也能激活水杨酸途径(赵丽艳, 2006)。(充足供钾)小麦受蚜虫为害后体内茉莉酸含量增加,诱导麦株中脂氧合酶 LOX (JA 合成关键酶)、PPO、苯丙氨酸解氨酶 PAL 和 POD 等防御酶活性提高,从而增强小麦对蚜虫的抗性(王伟等, 2014)。禾谷缢管蚜危害山羊草后(*Aegilops*)植株内 PPO、POD 及 PAL 酶活增加,从而诱导抗性增强(吴龙火等, 2008)。

室内麦叶上喷施 MeJA 和 SA 能影响麦长管蚜的取食行为(Cao *et al.*, 2014),而田间喷施 MeSA 能够趋避小麦蚜虫,降低禾谷缢管蚜、麦长管蚜和麦双尾蚜等害虫的种群数量(Ninkovic, 2003; Prinsloo *et al.*, 2007)。诱导抗性也能影响田间天敌种群(董洁等, 2012)。

5 耐害性研究

由于费时费工,试验周期长,因此耐害性研究相对滞后。小麦受麦长管蚜危害后的产量损失率和蚜量并不是简单的直线关系,不仅与蚜量,为害历期相关(杨效文和丁文山, 1991; 徐利敏等, 1998; Larsson, 2005),还和小麦品种自身的遗传特性及是否携带 BYDV 病毒相关(Liu *et al.*, 2014)。

在新疆,耐麦双尾蚜危害的品种有一粒小麦、墨玉稻穗、爱因亢、小偃 95、Mg8349、短芒黑边红、伊春 4 号、小黑麦 12、浮纳尔、毛大头和 T1008(张润志等, 1999)。XZ 系列杂交小麦对蚜虫的抗性较弱,但以强耐害性获得高产(赵惠燕等, 2002)。河南主要小麦品种百农 64、偃展 1 号的耐蚜性最强,温麦 6 号的耐蚜性最弱(欧行奇等, 2005)。笔者发现,Amigo、小偃 22 生育关键期田间单株虫口数量很高,但产量损失不大,是比较耐害的品种。西农 1376(千斤早)一般被当作感蚜对照品种(杜利锋等, 1999; 张志勇等, 2000; 李素娟和韩世平, 2001; 李军等, 2007)。麦长管蚜在西农 1376 上发育历期较短,日均产子和 r_m 高,田间蚜量有时并

不高,抗性分级在中抗至低感之间(刘新伦等, 2014; 胡想顺, 未发表资料)。但产量损失较高(李军等, 2007),表明其耐害性弱。

6 麦蚜的生物型(地理种群)与抗性

已经报道的麦二叉蚜生物型超过了 11 个(Clua *et al.*, 2004; Nuessly *et al.*, 2008)。由于 Amigo 对我国麦二叉蚜高抗,因此我国麦二叉蚜的生物型可能是 B 型或 C 型(Graybosch *et al.*, 1999)。

不同于欧洲(Llewellyn *et al.*, 2003, 2004; Jensen *et al.*, 2008),我国不同地区的麦长管蚜种群有很高的遗传分化(蔡凤环和赵惠燕, 2004),甚至可以区分为不同的生物型(Xu *et al.*, 2011)。不同地区甚至是同一地区的麦长管蚜种群遗传组成的多样性,是导致抗蚜性田间鉴定结果不稳定的主要原因。

7 抗性遗传

1987 年, Du Toit 发现了第一个抗麦双尾蚜基因 *Dn1*。目前发现并命名的抗麦双尾蚜和抗麦二叉蚜的单显性或隐性基因超过 20 个(Zhu *et al.*, 2005; Ricciardi *et al.*, 2011)。一些小麦材料对麦长管蚜的抗性为单基因控制的不完全显性遗传(郑王义等, 1999; 尹青云等, 2003)或显性遗传(段灿星等, 2006; 刘新伦等, 2006, 2014; 付晶等, 2008; 胡秉芬等, 2009; Luo *et al.*, 2014)。Liu 等(2012)将一个抗麦长管蚜的 RA-1 基因定位在四配体硬粒小麦 C273 的 6AL 染色体上。Luo 等(2014)将 98-10-35 上的抗蚜基因定位在 7DL 上。Li 和 Peng(2014)在 222 个面包小麦中发现了 8 个与耐麦长管蚜危害相关的 RRS 标记位点,分别位于 5 个染色体的 8 条臂上。有意思的是这些位点和一些抗病基因位点也紧密连锁。应该注意到大多数中、低抗蚜小麦材料可能是由微效多基因控制的数量遗传性状(QTL),且其表现受环境因素及蚜虫本身适应性的影响较大,其遗传规律和抗蚜机制还需深入研究。

8 抗蚜小麦品种和非寄主抗性的合理应用

如果一个物种所有个体对某一种有害生物的所有个体均不感染,则称该物种为这种有害生物的非寄主。非寄主对有害生物完全免疫,或具有高度抗性。非寄主抗性可能的利用途径有以下三个方面:

8.1 田间间作套种

对农作物害虫有趋避效应的寄主植物将害虫驱赶出农田,地头种植对农作物害虫有吸引作用的寄主植物诱杀害虫,从而达到控制害虫和田间减少杀虫剂施用的目的,这种拒避-诱集组合技术就是 Push-pull 理论在实践中的成功应用 (Cook *et al.*, 2007; Hassanali *et al.*, 2008)。利用农田生态系统中景观组成的生物多样化对保护生物多样性和控制维持害虫种群数量具有很大的潜能 (沈君辉等, 2007; 欧阳芳和戈峰, 2011)。小麦间作玉米、油菜、黄豆能显著降低麦田蚜虫种群 (刘乾等, 2010)。坡地种植紫穗槐等能显著抑制了麦蚜种群的发生, 菖草可以显著抑制麦蚜种群数量, 苜蓿和菖草能推迟麦蚜种群发生高峰期。菖草挥发物对麦长管蚜和禾谷缢管蚜有驱避作用, 但能显著引诱猫蛛科的一种蜘蛛; 苜蓿挥发物对麦长管蚜具有引诱作用。这些植物篱坡地种植, 不仅能防护水土流失, 而且有助于调控害虫及其天敌种群 (石国庆等, 2011)。但非寄主作物利用不合理, 也可能导致麦蚜危害加重 (王锁牢等, 2014)。

8.2 远缘杂交

种间一般很难杂交, 因此, 非寄主抗性的应用受到很大的限制。但小麦可以和一些小麦属的近缘种杂交, 从而将抗性基因导入到小麦中。在 20 世纪 50 年代, 美国就通过远缘杂交育成了抗二叉蚜的小麦品种 Amigo 和 Largo。普通小麦和长穗偃麦草 (*Agropyron elongatum* (Host) Beauv) 远源杂交育成的普通小麦小偃 22 是目前陕西关中灌区的主栽品种。麦长管蚜在小偃 22 麦苗上

取食时口针在细胞间的穿刺时间, 穿透细胞壁需要的时间以及分泌水溶性唾液的时间均较长 (Hu *et al.*, 2008)。取食小偃 22 幼苗的麦长管蚜发育历期比较长 (胡想顺等, 2011), 体重明显比取食西农 979 和矮抗 58 幼苗的蚜虫轻, 产子数量少, 幼苗受害后干物质损失率也最小 (曹贺贺, 未发表)。通过普通小麦与硬粒小麦杂交获得的材料 98-10-35 抗蚜性状表现良好, 在其上取食的蚜虫发育历期延长、内禀增长率降低、繁殖率下降 (胡想顺等, 2011)。

8.3 转基因

我国在转基因抗蚜小麦育种方面也有很大的进展。目前已经获得有转雪花莲凝集素 (GNA) 基因和转半凝集素 (PTA) 基因的抗蚜虫转基因小麦 (梁辉等, 2004; 徐琼芳等, 2005; Yu and Wei, 2008), 但距离生产应用还有一定的距离。

9 存在的问题及展望

我国大面积推广种植的高产、优质小麦品种或苗头新品系的抗蚜能力普遍较低 (王美芳等, 2010), 远远不能满足生产实际需要。抗蚜种质的精细抗性机制及遗传机理研究滞后是主要原因。大多数学者用蚜虫种群数量或种群增长参数如内禀增长率来判定小麦品种的抗蚜与否。但种群参数是一个综合性的高阶参数, 其受个体的发育历期、成虫寿命、繁殖力等多个低阶参数的影响。而繁殖力相似的群体, 在不同的品种上的体重也有很明显的差异, 表明其取食量或危害程度也不相同。大多数抗蚜材料, 特别是中、低抗材料, 可能仅对蚜虫的某一个低阶参数有影响, 因此, 以抗性三机制为基础, 全面精细评价已有的抗蚜品种和主栽品种的抗性机制, 是将来抗蚜性研究方向。在此基础上, 进一步研究品种抗性与蚜虫胞内共生菌的互作机制, 与蚜传毒的互作机制 (Liu *et al.*, 2014), 与各种天敌的互作机制及协同利用 (Cai *et al.*, 2009b) 以及抗性品种与高产品种农田生态系统中的作用与合理利用方案, 是将来抗蚜小麦品种田间应用的重要研究方向。

小麦是六倍体植物, 有三组不同的染色体组, 遗传背景复杂, 这是制约抗蚜小麦遗传机理研究进展较慢的原因之一。随着分子生物学的飞速发展, 获取抗蚜基因的手段越来越成熟, 对抗蚜种质抗蚜性分子遗传机理的研究是另一个重要的研究方向。

参考文献 (References)

- Cai QN, Han Y, Cao YZ, Hu Y, Zhao X, Bi JL, 2009a. Detoxification of gramine by the cereal aphid, *Sitobion avenae*. *Journal of Chemical Ecology*, 35(3): 320–325.
- Cai QN, Ma XM, Zhao X, Cao YZ, Yang XQ, 2009b. Effects of host plant resistance on insect pests and its parasitoid: A case study of wheat-aphid-parasitoid system. *Biological Control*, 49(2): 134–138.
- Cao HH, Wang SH, Liu TX, 2014. Jasmonate- and salicylate-induced defenses in wheat affect host preference and probing behavior but not performance of the grain aphid, *Sitobion avenae*. *Insect Science*, 21(1): 47–55.
- Ciepiela AP, 1989. Biochemical basis of winter wheat resistance to the grain aphid *Sitobion avenae*. *Entomological Experimentalis at Applicata*, 51(3): 269–275.
- Ciepiela AP, Sempruch C, 1996. Influence of some non-protein amino acids on biology of grain aphid *Sitobion avenae*(F). *Plant Breeding*, 49(1/2): 93–99.
- Ciepiela AP, Sempruch C, Chrzanowski G, 1999. Evaluation of natural resistance of winter triticale cultivars to grain aphid using food coefficients. *Applied Entomology*, 123(8): 491–494.
- Clua A, Castro AM, Ramos S, Gimez DO, Vasicek A, Chidichimo HO, Dixon AFG, 2004. The biological characteristics and distribution of the greenbug, *Schizaphis graminum*, and Russian wheat aphid, *Diuraphis noxia* (Homoptera: Aphididae), in Argentina and Chile. *European Journal of Entomology*, 101(1): 193–198.
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52(2): 375–400.
- Dogimont C, Bendahmane A, Chovelon V, Boissot N, 2010. Host plant resistance to aphids in cultivated crops: genetic and molecular bases, and interactions with aphid populations. *Comptes Rendus Biologies*, 333(6/7): 566–573.
- Dreyer DJ, Reese JC, Jones KC, 1981. Aphid feeding deterrents in sorghum bioassay, isolation, and characterization. *Journal of Chemical Ecology*, 7(2): 273–283.
- Du Toit F, 1987. Resistance in wheat (*Triticum aestivum*) to *Diuraphis noxia* (Homoptera: Aphididae). *Cereal Research Communications*, 15(2/3): 175–179.
- Goussain MM, Prado E, Moraes JC, 2005. Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behaviour of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Homoptera: Aphididae). *Neotropical Entomology*, 34(5): 807–813.
- Graybosch RA, Lee JH, Peterson CJ, Porter DR, Chung OK, 1999. Genetic, agronomic and quality comparisons of two 1AL.1RS. wheat-rye chromosomal translocations. *Plant Breeding*, 118: 125–130.
- Hassanali A, Herren H, Khan ZR, Pickett JA, Woodcock CM, 2008. Integrated pest management: the push-pull approach for controlling insect pests and weeds of cereals, and its potential for other agricultural systems including animal husbandry. *Philosophical Transactions of the Royal Society Lond B Biological Science*, 363(1491): 611–621.
- Havlickova H, 1996. Phenolic acids in wheat cultivars in relation to plant suitability for and response to cereal aphids. *Zeitschrift fuer Pflanzenkrankheiten and Pflanzenschutz*, 103(5): 535–542.
- Havlickova H, Smetankova M, 1998. Effect of potassium and magnesium fertilization on barley preference by the bird cherry-oat aphid (*Rhopalosiphum padi*). *Rostlinna Vyroba-UZPI*, 44(8): 379–383.
- Hayward DM, Parry DW, 1973. Electron-probe microanalysis studies of silica distribution in barley (*Hordeum sativum* L.). *Annals Botany*, 37(3): 579–591.
- Hu XS, Zhao HY, Hu ZQ, Li DH, Zhang YH, 2008. EPG comparison of *Sitobion avenae* (Fab.) feeding behavior on three wheat varieties. *Agricultural Science in China*, (7)2: 186–180.
- Jayasekara TK, Stevenson PC, Belmain SR, Farman DI, Hall DR, 2002. Identification of methyl salicylate as the principal volatile component in the methanol extract of root bark of *Securidaca longepedunculata* Fers. *Journal of Mass Spectrometry*, 37(6): 577–580.
- Jensen AB, Hansen LM, Eilenberg J, 2008. Grain aphid population structure: no effect of fungal infections in a 2-year field study in Denmark. *Agricultural and Forest Entomology*, 10(3): 279–290.
- Kogan M, 1982. Plant resistance in pest management // Metcalf RL, Luckmann WH (eds.). *Introduction to Insect Pest Management*. New York: John Wiley and Sons. 93–134.
- Kazemi MH, van Emden HF, 1992. Partial antibiosis to *Rhopalosiphum padi* in wheat and some phytochemical

- correlations. *Annals Applied Biology*, 12(1): 1–9.
- Keeping MG, Meyer JH, 2002. Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 4(4): 265–274.
- Larsson H, 2005. A crop loss model and economic thresholds for the grain aphid, *Sitobion avenae* (F.), in winter wheat in southern Sweden. *Crop Protection*, 24: 397–405.
- Leszczynski B, Bakowski T, Rozbicka B, Matok H, Urbanska A, Dixon AFG, 1996. Interaction between cereal phenolics and grain aphid *Sitobion avenae*. *Bulletin OIB/SROR*, 19(5): 100–105.
- Li FQ, Peng JH, 2014. Identification of associations between SSR markers and *Sitobion avenae* tolerance trait in bread wheat. *Cereal Research Communications*, 42(1): 111–118.
- Liu XF, Hu XS, Keller M, Zhao HY, Wu YF, Liu TX, 2014. Tripartite interactions of Barley yellow dwarf virus, *Sitobion avenae* and wheat varieties. *PLoS ONE*, 9(9): e106639.
- Liu XL, Yang XF, Wang CY, Wang YJ, Zhang H, Ji WQ, 2012. Molecular mapping of resistance gene to English grain aphid (*Sitobion avenae* F.) in *Triticum durum* wheat line C273. *Theoretical and Applied Genetics*, 124(2): 287–293.
- Llewellyn KS, Loxdale HD, Harrington R, Brookes CP, Clark SJ, Sunnucks P, 2003. Migration and genetic structure of the grain aphid (*Sitobion avenae*) in Britain related to climate and clonal fluctuation as revealed using microsatellites. *Molecular Ecology*, 12(1): 21–34.
- Llewellyn KS, Loxdale HD, Harrington R, Clark SJ, Sunnucks P, 2004. Evidence for gene flow and local clonal selection in field populations of the grain aphid (*Sitobion avenae*) in Britain revealed using microsatellites. *Heredity*, 93(2): 143–153.
- Luo K, Zhang GS, Wang CP, Ouellet T, Wu JJ, Zhu QD, Zhao HY, 2014. Candidate genes expressed in tolerant common wheat with resistant to English grain aphid. *Journal of Economic Entomology*, 107(5): 1977–1984.
- Maffei ME, Mithöfer A, Boland W, 2007. Insects feeding on plants: Rapid signals and responses preceding the induction of phytochemical release. *Phytochemis*, 68(22/24): 2946–2959.
- Michael SC, Sharron SQ, Francois DT, 1999. The value conserved wheat germplasm evaluated for arthropod resistance // Stephen LC, Sharron SQ (eds.). *Global genetic plant resources for insect-resistant crops*. Boca Raton Boston London New York Washington, DC. CRC Press. 25–49.
- Moharramipour S, 1997. Effect of leaf colour, epicuticular wax amount and gramine content in barley hybrids on cereal aphid populations. *Applied Entomology and Zoology*, 32(1): 1–8.
- Ninkovic V, 2003. Volatile communication between barley plants affects biomass allocation. *Journal of Experimental Botany*, 54(389): 1931–1939.
- Ninkovic V, Aïmed E, 2003. Effect of tow types semiochemical on population development of the bird cherry oat aphid *Rhopalosiphum padi* in a barley crop. *Agricultural and Forest Entomology*, 5(1): 27–33.
- Nuessly GS, Nagata T, Burd JD, Hentz G, Carroll AS, Halbert SE, 2008. Biology and biotype determination of greenbug, *Schizaphis graminum* (Hemiptera: Aphididae), on seashore paspalum turfgrass (*Paspalum vaginatum*). *Environmental Entomology*, 37(2): 586–591.
- Painter RH, 1951. *Insect resistance in crop plants*. New York: The Mcmillan Company. 1–520.
- Peterson SS, Scriber JM, Coors JG, 1988. Silica, cellulose and their interactive effects on the feeding performance of the southern armyworm *Spodoptera eridania* (Cramer) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Kansas Entomological Society*, 61(2): 169–177.
- Prinsloo G, Ninkovic V, Van der Linde TC, Van Der Westhuizen AJ, Pettersson J, Glinwood R, 2007. Test of semiochemicals and a resistant wheat variety for Russian wheat aphid management in South Africa. *Journal of Applied Entomology*, 131(9/10): 637–644.
- Ricciardi M, Tocho E, Tacaliti MS, Vasicek A, Gimenez DO, Paglione A, Simmonds J, Snape JW, Cakir M, Castro AM, 2011. Mapping quantitative trait loci for resistance against Russian wheat aphid (*Diuraphis noxia*) in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Pasture Science*, 61(12): 970–977.
- Weibull J, 1991. Resistance breeding in barley against the bird cherry oat aphid using *Hordcum spontaneum*. *Barley Genetics*, 6(4): 642–643.
- Xu ZH, Chen JL, Cheng DF, Sun JR, Liu Y, Francis F, 2011. Discovery of English grain aphid (Hemiptera: Aphididae) biotypes in China. *Journal of Economic Entomology*, 104(3): 1080–1086.
- Yu Y, Wei ZM, 2008. Increased oriental armyworm and aphid resistance in transgenic wheat stably expressing *Bacillus thuringiensis* (Bt) endotoxin and Pinellia Ternate Agglutinin (PTA). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 94(1): 33–44.
- Zhu LC, Smith CM, Fritz A, Boyko E, Voothuluru P, Gill BS, 2005. Inheritance and molecular mapping of new greenbug resistance

- genes in wheat germplasms derived from *Aegilops tauschii*. *Theoretical and Applied Genetics*, 111(5): 831–837.
- 蔡凤环, 赵惠燕, 2004. 麦长管蚜自然群体的遗传变异研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 32 (2): 21–24. [Cai FH, Zhao HY, 2004. Genetic polymorphism in natural populations of *Macrosiphum avenae*. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 32 (2): 21–24.]
- 蔡青年, 张青文, 高希武, 王宇, 周明群, 2003. 小麦体内次生物质对麦蚜的抗性作用研究. 中国农业科学, 36(8): 910–915. [Cai QN, Zhang QW, Gao XW, Wang Y, Zhou MZ, 2003. Effects of the secondary substances on wheat resistance to *Sitobion avenae* (F.). *Scientia Agricultura Sinica*, 36(8): 910–915.]
- 陈建新, 宋敦伦, 采长群, 1997. 小麦抗禾谷缢管蚜的生化研究. 昆虫学报, 40(增刊): 186–189. [Chen JX, Song DL, Cai CQ, 1997. Physiological mechanism of wheat seedlings resistance to *Rhopalosiphum padi* L. *Acta Entomologica Sinica*, 40(Supplement): 186–189.]
- 陈巨莲, 倪汉祥, 2000. 麦长管蚜全纯人工饲料的研究. 中国农业科学, 33(3): 54–49. [Chen JL, Ni HX, 2000. Studies on a chemically defined diet of English grain aphid. *Scientia Agricultura Sinica*, 33(3): 54–49.]
- 陈巨莲, 孙京瑞, 丁红建, 1997. 主要抗蚜品种(系)的抗性类型及其生化抗性机制. 昆虫学报, 40(增刊): 190–195. [Chen JL, Sun JR, Ding HJ, 1997. The resistant patterns and mechanism of biochemical resistance in various wheat cultivars (lines). *Acta Entomologica Sinica*, 40(Suppl): 190–195.]
- 丁蕙淑, 余芸英, 1966. 麦蚜研究初报. 昆虫知识, 11(1): 10–13. [Ding SH, Yu YY, 1996. The primary research of wheat aphids, *Insect Knowledge*, 11(1): 10–13]
- 丁蕙淑, 1958. 贵州小麦蚜虫调查. 昆虫知识, 3(2): 70–74. [Ding SH, 1958. The investigation of wheat aphid in Guizhou, *Insect Knowledge*, 3(2): 70–74]
- 董洁, 刘英杰, 李佩玲, 林芳静, 陈巨莲, 刘勇, 2012. 间作与 MeSA 释放对麦长管蚜及其优势天敌的生态效应. 应用生态学报, 23(10): 2843–2848. [Dong J, Liu YJ, Li PL, Lin FJ, Chen JL, Liu Y, 2012. Ecological effects of wheat-oilseed rape intercropping combined with methyl salicylate release on *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(10): 2843–2848.]
- 杜利锋, 赵惠燕, 袁锋, 孙群, 张改生, 姚建秀, 李燕, 刘宏伟, 王军卫, 1999. 小麦抗蚜品种(系)或材料的抗性遗传测定及筛选. 西北植物学报, 19(6): 68–73. [Du LF, Zhao HY, Yuan F, Sun Q, Zhang GS, Yao JX, Li Y, Liu HW, Wang JW, 1999. Resistance to aphid determining and screening in wheat species (lines) or sources. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 19(6): 68–73.]
- 段灿星, 王晓鸣, 朱振东, 2006. 小麦种质对麦长管蚜的抗性鉴定与评价. 植物遗传资源学报, 7(3): 297–300. [Duan CX, Wang XM, Zhu ZD, 2006. Screening and evaluation of wheat germplasm for resistance to the aphid (*Sitobion avenae*). *Journal of Plant Genetic Resources*, 7(3): 297–300.]
- 付晶, 张树华, 温树敏, 杨学举, 2008. 用 SSR 分子标记定位普通小麦品种正科 1 号中的抗麦蚜基因. 河北农业大学学报, 31(5): 1–4. [Fu J, Zhang SH, Wen SM, Yang XJ, 2008. SSR markers linked to a wheat aphid resistance gene. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 31(5): 1–4.]
- 高崇省, 刘绍友, 侯有明, 1998. 冬小麦品种中的游离氨基酸种类及其与抗麦长管蚜的关系. 植物保护学报, 25(1): 1–5. [Gao CS, Liu SY, Hou YM, 1998. The relation between amino acids and the resistance of wheat varieties to the English grain. *Journal of Plant Protection*, 25(1): 1–5]
- 郭萧, 李克斌, 尹姣, 曹雅忠, 2010. 麦长管蚜种群消长与小麦植株游离氨基酸的关系. 中国植保导刊, 30(4): 5–9. [Guo X, Li KB, Yin J, Cao YZ, 2010. Relationship between *Macrosiphum avenae* (Fabricius) population dynamics and free amino acid in wheat. *China Plant Protection*, 30(4): 5–9.]
- 何敏, 向志民, 1998. 小麦植株化学成分与麦长管蚜和二叉蚜种群消长关联度分析. 甘肃农业科技, 4: 41–44. [He M, Xiang ZM, 1998. The relationship between chemical components and population of *Sitobion avenae* (Fabricius) and *Schizaphis graminum*. *Gansu Agricultural Technology*, 4: 41–44]
- 胡秉芬, 马小乐, 师桂英, 李葆春, 孟亚雄, 尚勋武, 王化俊, 2009. 春小麦抗蚜品系 ‘J-31’ 和 ‘J-48’ 的抗性遗传分析. 甘肃农业大学学报, 44(3): 58–64. [Hu BF, Ma XL, Shi GY, Li BC, Meng YX, Shang XW, Wang HJ, 2009. Genetic analysis of aphid (*Macrosiphum avenae*) resistant in spring wheat line ‘J-3’ and ‘J-48’. *Journal of Gansu Agricultural University*, 44(3): 58–64.]
- 胡想顺, 刘小凤, 胡祖庆, 张宇红, 赵惠燕, 张改生, 2011. 10 个小麦品种(材料)对麦长管蚜的室内苗期抗蚜性. 植物保护, 37(5): 81–85. [Hu XS, Liu XF, Hu ZQ, Zhang YH, Zhao HY, Zhang GS, 2011. Resistance of 10 wheat varieties to *Sitobion avenae* at wheat seedling stage. *Plant Protection*, 37(5): 81–85.]
- 胡想顺, 赵惠燕, 胡祖庆, 李东鸿, 张宇红, 2007. 禾谷缢管蚜在 3 个小麦品种上取食行为的 EPG 比较. 昆虫学报, (50)11: 1105–1110. [Hu XS, Zhao HY, Hu ZQ, Li DH, Zhang YH, 2007. Comparison of *Rhopalosiphum padi* feeding behavior on seedling

- gs of three wheat varieties. *Acta Entomologica Sinica*, (50)11: 1105-1110.]
- 胡想顺, 赵惠燕, 李军, 张宇红, 刘佰明, 李东鸿, 2004. 3 个新引进小麦品种对麦长管蚜抗性的初步研究. *西北植物学报*, 24(7): 1221-1226. [Hu XS, Zhao HY, Li J, Zhang YH, Liu BM, Li DH, 2004. Study on cereal aphid resistance on three winter wheat cultivars introduced into China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24(7): 1221-1226.]
- 来有鹏, 张登峰, 尹姣, 武予清, 段云, 蒋月丽, 曹雅忠, 2011. 五种类型农药不同剂量与施药时期对麦蚜防治效果及麦粒农药残留的影响. *应用昆虫学报*, 48(6): 1688-1698. [Lai YP, Zhang DF, Yin J, Wu YQ, Duan Y, Jiang YL, Cao YZ, 2011. Evaluation of the toxicity of five types of pesticides to wheat aphids and pesticide residue on seeds. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1688-1698.]
- 李昌盛, 尚勋武, 师桂英, 孙多鑫, 袁俊秀, 2007. 北方春小麦抗蚜水平与形态特征的相关性研究. *甘肃农业大学学报*, 42(6): 80-83. [Li CS, Shang XW, Shi GY, Sun DX, Yuan JX, 2007. Effect of northern spring wheat some morphological characters on the resistance level to wheat aphide. *Journal of Gansu Agricultural University*, 42(6): 80-83.]
- 李川, 武文卿, 朱亮, 张青文, 刘小侠, 2011. 小麦-油菜邻作对麦田主要害虫和天敌的影响. *应用生态学报*, 22(2): 3372-3376. [Li C, Wu WQ, Zhu L, Zhang QW, Liu XX, 2011. Effects of wheat planted adjacent to rape on the major pests and their natural enemies in wheat field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(2): 3372-3376.]
- 李峰奇, 孔令让, 刘玉升, 王和洲, 彭俊华, 2013. 用 TOPSIS 综合评价小麦种质资源对麦长管蚜的抗性. *植物科学学报*, 31(3): 228-241. [Li FQ, Kong LR, Liu YS, Wang HZ, Peng JH, 2013. TOPSIS based comprehensive evaluation of the resistance in wheat germplasm to English grain aphid. *Plant Science Journal*, 31(3): 228-241.]
- 李军, 赵惠燕, 李志冈, 韩诗晴, 安新城, 2007. 不同小麦品种对麦长管蚜的抗性. *昆虫知识*, 44(4): 509-512. [Li J, Zhao HY, Li ZG, Han SC, An XC, 2007. Resistance of different wheat varieties to macrosiphum avenae. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 509-512.]
- 李庆, 叶华智, 2002. 小麦近缘野生植物对禾谷缢管蚜的抗性研究. *中国农业科学*, 35(6): 719-723. [Li Q, Ye HZ, 2002. Studies on resistance of wild relatives in triticeae to oat bird-cherry aphids (Homoptera: Aphididae). *Scientia Agricultura Sinica*, 35(6): 719-723.]
- 李庆, 叶华智, 2003. 若干生化指标与山羊草对禾谷缢管蚜抗性的关系. *中国农业科学*, 36(9): 1038-1043. [Li Q, Ye HZ, 2003. Relationship between several biochemical indexes and resistance of aegilops species to oat-bird cherry aphids (Homoptera: Aphididae). *Scientia Agricultura Sinica*, 36(9): 1038-1043.]
- 李庆, 叶华智, 杨群芳, 蒋素蓉, 2004a. 小麦近缘野生植物营养水平与抗禾谷缢管蚜的关系. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 26(3): 348-351. [Li Q, Ye HZ, Yang QF, Jiang SR, 2004a. Relationship between nutritional level and rhopalosiphum padi resistance in seven wild relatives in triticeae. *Journal of Southwest Agricultural University*, 26(3): 348-351.]
- 李庆, 叶华智, 杨群芳, 蒋素蓉, 2004b. 七种与小麦近缘的野生植物对禾谷缢管蚜抗性的生化机制. *植物保护学报*, 31(1): 1-5. [Li Q, Ye HZ, Yang QF, Jiang SR, 2004b. The biochemical mechanism of resistance of the perennial wild relatives in Triticeae to oat-bird cherry aphids. *Acta Phytophylacica Sinica*, 31(1): 1-5.]
- 李素娟, 韩世平, 2001. 小麦灌浆期抗禾谷缢管蚜的生化机制. *植物保护学报*, 28(4): 331-334. [Li SJ, Han SP, 2001. Studies on biochemical mechanism of resistance to rhopalosiphum padi on wheat in milking stage. *Acta Phytophylacica Sinica*, 28(4): 331-334.]
- 李贤庆, 郭线茹, 李克斌, 尹姣, 曹雅忠, 2006. 不同小麦品种(系)对麦长管蚜的抗性. *昆虫学报*, 49(6): 963-968. [Li XQ, Guo XR, Li KB, Yin J, Cao YZ, 2006. Resistance of wheat varieties (lines) to Sitobion miscanthi (Takahashi) (Aphidoidea: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(6): 963-968.]
- 梁辉, 朱银峰, 朱祯, 孙东发, 贾旭, 2004. 雪花莲凝集素基因转化小麦及转基因小麦抗蚜性的研究. *遗传学报*, 31(2): 189-194. [Liang H, Zhu YF, Zhu Z, Sun DF, Jia X, 2004. Obtainment of transgenic wheat with the insecticidal lectin from snowdrop (*Galanthus nivalis* agglutinin; GNA) gene and analysis of resistance to aphid. *Journal of Genetics and Genomics*, 31(2): 189-194.]
- 刘爱芝, 李世功, 1999. 四种农药对麦蚜的防治效果及其对天敌的影响. *农药*, 38(5): 29-30. [Liu AZ, Li SG, 1999. The control effect of 4 pesticides on wheat aphids and natural enemies. *Pesticide*, 38(5): 29-30]
- 刘保川, 陈巨莲, 2003. 小麦中黄酮化合物对麦长管蚜生长发育的影响. *植物保护学报*, 30(1): 8-12. [Liu BC, Chen JL, 2003. Effects of secondary flavonoids in wheat on the growth and development of *Sitobion avenar* (Fabricius). *Journal of Plant Protection*, 30(1): 8-12]
- 刘乾, 张廷伟, 刘长仲, 2010. 小麦与不同作物间作对麦蚜发生量的影响. *贵州农业科学*, 38(6): 148-149. [Liu Q, Zhang TW,

- Liu CZ, 2010. Effect of inter-cropping of wheat with different crops on occurrence quantity of wheat aphid. *Guizhou Agricultural Sciences*, 38(6): 148-149.]
- 刘绍友, 侯有明, 李定旭, 高崇省, 1993. 小麦品种对麦长管蚜抗性机制的研究. *西北农业学报*, 2(3): 76-80. [Liu SY, Hou YM, Li DX, Gao CS, 1993. The resistance mechanism of winter wheat to *Sitobion avenae* and genetic research. *Acta Agriculturae Boreali-Ooidentalis Sinica*, 2(3): 76-80]
- 刘新伦, 王长有, 王亚娟, 张宏, 吉万全, 2014. 不同小麦品种资源苗期和成株期麦长管蚜抗性鉴定和分析. *植物保护学报*, 41(2): 216-224. [Liu XL, Wang CY, Wang YJ, Zhang H, Ji WQ, 2014. Screening and evaluation of different wheat varieties for resistance to English grain aphid *sitobion avenae* at seedling and adult-plant stages. *Acta Phytophylacica Sinica*, 41(2): 216-224.]
- 刘新伦, 王亚娟, 桑利群, 相建业, 吉万全, 2006. 小麦种质资源的抗蚜性及其与表型性状的关系. *麦类作物学报*, 26(6): 24-28. [Liu XL, Wang YJ, Sang LQ, Xiang JY, Ji WQ, 2006. Relationship between morphological characters of wheat germplasm and their resistance to *sitobion avenae* (F.). *Journal of Triticeae Crops*, 26(6): 24-28.]
- 刘勇, 倪汉祥, 孙京瑞, 胡萃, 2001. 麦蚜对不同抗性小麦挥发物的嗅觉反应及其变异. *中国农业科学*, 34(4): 391-395. [Liu Y, Ni HX, Sun JR, Hu C, 2001. Different olfactory responses of wheat aphids to the volatiles of wheat plant with different resistant levels. *Scientia Agricultura Sinica*, 34(4): 391-395.]
- 刘勇, 陈巨莲, 程登发, 2007. 不同小麦品种(系)叶片表面蜡质对两种麦蚜取食的影响. *应用生态学报*, 18(8): 1785-1788. [Liu Y, Chen JL, Cheng DF, 2007. Effects of wheat leaf surface waxes on the feeding of two wheat aphid species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(8): 1785-1788.]
- 路子云, 高占林, 党志红, 李耀发, 李建成, 刘文旭, 冉红凡, 屈振刚, 2014. 小麦品种(系)对麦蚜的抗性鉴定及评价. *河北农业科学*, 18 (3): 24-26. [Lu ZY, Gao ZL, Dang ZH, Li YF, Li JC, Liu WX, Ran HF, Qu ZG, 2014. Idenitfy and evaluation of resistance of wheat varieties to aphids. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 18 (3): 24-26.]
- 马盾, 陆峻山君, 范兆田, 1994. 新疆小麦族野生资源的抗蚜性鉴定. *西北农业学报*, 3(3): 7-10. [Ma D, Lu JJ, Fan ZT, 1994. Evaluation on the aphid-resistance of triticeae resources ibn Xinjiang. *Acta Agriculturae Boreali-Ooidentalis Sinica*, 3(3): 7-10]
- 欧行奇, 茹振钢, 胡铁柱, 石明旺, 2005. 河南省主要小麦品种耐蚜性研究. *麦类作物学报*, 25 (2): 125-127. [Ou XQ, Ru ZG, Hu TZ, Shi MW, 2005. Tolerance of the main wheat cultivars in Henan province to wheat aphids. *Journal of Triticeae Crops*, 25 (2): 125-127.]
- 欧阳芳, 戈峰, 2011. 农田景观格局变化对昆虫的生态学效应. *应用昆虫学报*, 48(5): 1177-1183. [Ou YF, Ge F, 2011. Effects of agricultural landscape patterns on insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1177-1183.]
- 屈非, 党建友, 程麦风, 连晋, 谢成升, 2012. 小麦新品种(系)对麦长管蚜抗性的鉴定. *山西农业科学*, 40(4): 386-388, 392. [Qu F, Dang JY, Cheng MF, Lian J, Xie CS, 2012. Resistance identification of new variety wheat to *macrosiphum avenae*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 40(4): 386-388, 392.]
- 屈会选, 党建友, 程麦风, 谢成升, 2004. 小麦种质资源对麦长管蚜抗性的鉴定. *华北农学报*, 19(4): 102-104. [Qu HX, Dang JY, Cheng MF, Xie XS, 2004. Resistance identification of wheat germplasm resources to *macrosiphum avenae*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 19(4): 102-104.]
- 沈君辉, 聂勤, 黄得润, 刘光杰, 陶龙兴, 2007. 作物混植和间作控制病虫害研究的新进展. *植物保护学报*, 32(2): 209-216. [Shen JH, Nie Q, Huang DR, Liu GJ, Tao LX, 2007. Recent advances in controlling plant diseases and insect pests by mixture planting and inter-planting of crops. *Acta Phytophylacica Sinica*, 32(2): 209-216.]
- 师桂英, 尚勋武, 王化俊, 马小乐, 2008. 春小麦种质对麦长管蚜的抗蚜性鉴定. *兰州大学学报(自然科学版)*, 44(5): 40-43. [Shi GY, Shang XW, Wang HJ, Ma XL, 2008. Screening the resistance to aphid of spring wheat germplasm. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 44(5): 40-43.]
- 石国庆, 林超文, 刘章勇, 李传仁, 陈一兵, 马涛, 王启锋, 刘志龙, 蔡青年, 2011. 植物篱对小麦蚜虫及其天敌种群的影响. *应用生态学报*, 22(12): 3265-3271. [Shi GQ, Lin CW, Liu ZY, Li CR, Chen YB, Ma T, Wang QF, Liu ZL, Cai QN, 2011. Effects of plant hedgerow on population dynamics of wheat aphid and its natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(12): 3265-3271.]
- 王美芳, 杨会民, 刘进前, 雷振生, 吴政卿, 原国辉, 陈巨莲, 2010. 黄淮冬麦区小麦品种抗蚜性鉴定及蚜虫对小麦产量和品质的影响. *河南农业科学*, 37(4): 16-20. [Wang MF, Yang HM, Liu JQ, Lei ZS, Wu ZQ, Yuan GH, Chen JL, 2010. Effect of aphid damage on wheat yield and quality in Yellow and Huai valleys winter wheat region. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 37(4): 16-20.]
- 王锁牢, 李广阔, 高海峰, 高永红, 张宏芝, 2014. 果麦间作模式下麦田麦长管蚜种群动态研究. *新疆农业科学*, 51(8): 1463-1467. [Wang SL, Li GK, Gao HF, Gao YH, Zhang HZ,

2014. Effects of walnut-wheat or jujube-wheat intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae*. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 51(8): 1463-1467.]
- 王祎, 张月玲, 苏建伟, 李慧, 王宜伦, 苗玉红, 谭金芳, 韩燕来, 2014. 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性. *生态学报*, 34(10): 2539-2547. [Wang W, Zhang YL, Su JW, Li H, Wang YL, Miao YH, Tan JF, Han YL, 2014. Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids. *Acta Ecologica Sinica*, 34(10): 2539-2547.]
- 王祎, 张月玲, 苏建伟, 王宜伦, 谭金芳, 韩燕来, 2013. 氮硅配施对冬小麦生育后期蚜虫密度及抗虫生化物质含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 19(4): 832-839. [Wang W, Zhang YL, Su JW, Wang YL, Tan JF, Han YL, 2013. Effect of nitrogen application combined with silicon on density of *Sitobion avenae* and contents of biochemical materials of winter wheat at the late growth stage. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19(4): 832-839.]
- 王雨, 王舰, 吴问其, 赵惠燕, 胡想顺, 张改生, 2014. 扫描电镜下的小麦叶毛性状与麦长管蚜生物学参数相关性分析. *植物保护学报*, 41(4): 474-481. [Wang Y, Wang J, Wu WQ, Zhao HY, Hu XS, Zhang GS, 2014. Correlations between physical characters of wheat leaf hairs in SEM and the biological parameters of grain aphid *Sitobion avenae*. *Acta Phytopylacica Sinica*, 41(4): 474-481.]
- 吴龙火, 李庆, 杨群芳, 王海建, 2008. 禾谷缢管蚜取食 5 种山羊草的诱导抗性. *中国农业科学*, 41(1): 102-107. [Wu LH, Li Q, Yang QF, Wang HJ, 2008. Resistance induced by feeding *rhopalosiphum padi* with 5 *aegilops* species. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(1): 102-107.]
- 吴仁杰, 杨建国, 高懿尧, 1996. 小麦品种耐蚜害性的测定. *植保技术与推广*, 13(1): 3-5. [Wu RJ, Yang JG, Gao ZR, 1996. The determination of aphid-resistance of wheat varieties. *Plant Protection Technology and Extending*, 13(1): 3-5]
- 吴艳兵, 田发军, 赵欢欢, 赵俊俊, 2014. 环境因子对丁布的诱导效应研究进展. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 42(1): 7-11. [Wu YB, Tian FJ, Zhao HH, Zhao JJ, 2014. Research progress on induced effect of DIMBOA by environmental factors. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, 42(1): 7-11.]
- 夏云龙, 杨奇华, 萧红, 1991. 冬小麦形态特征与抗麦长管蚜的关系研究. *植物保护学报*, 18(3): 5-10. [Xia YL, Yang QH, Xiao H, 1991. Study on the relationships between morphological characters of winter wheat and its resistance to *Sitobion avenae* (F.). *Acta Phytopylacica Sinica*, 18(3): 5-10]
- 谢纳, 王雷, 齐珊珊, 刘文轩, 武予清, 2014. 小麦近缘种属对麦长管蚜抗性分析. *河南科学*, 3(6): 1020-1023. [Xie N, Wang L, Qi SS, Liu WX, Wu YQ, 2014. Resistance analysis of wheat relatives to *sitobion avenae*. *Henan Science*, 3(6): 1020-1023.]
- 谢永寿, 扬奇华, 1987. 冬小麦品种中糖及氨基酸含量与抗麦长管蚜的关系. *植物保护学报*, 14(1): 37-38. [Xie YS, Yang QH, 1987. Studies on the role of carbohydrate and amino acid in resistance of winter varieties to English grain aphid (*Sitobion avenae* L.). *Acta Phytopylacica Sinica*, 14(1): 37-38]
- 胥苒, 张素勤, 郑会敏, 周海鹏, 耿广东, 张庆勤, 2011. 小麦抗蚜性与形态特征的相关性研究. *陕西农业科学*, 57(6): 3-4, 10. [Xu Y, Zhang SQ, Zheng HM, Zhou HP, Geng GD, Zhang QQ, 2011. The relationship between aphid-resistance and morphology. *Shanxi Journal of Agriculture Science*, 57(6): 3-4]
- 徐利敏, 齐凤鸣, 张建平, 张建忠, 曹春梅, 陈景莲, 1998. 麦长管蚜危害小麦产量损失的初步研究. *内蒙古农业科技*, 25(5): 27, 40. [Xu LM, Qi FM, Zhang JP, Zhang JZ, Cao CM, Chen JL, 1998. The research of yield loss caused by wheat aphid damage. *Mongolia Agricultural Technology*, 25(5): 27, 40.]
- 徐琼芳, 田芳, 陈孝, 李连城, 林志姗, 莫英, 徐惠君, 刘燕, 许为钢, 杜丽璞, 辛志勇, 2005. 转 GNA 基因小麦新株系的分子检测和抗蚜虫性鉴定. *麦类作物学报*, 25(3): 7-10. [Xu QF, Tian F, Chen X, Li LC, Lin ZS, Mo Y, Xu HJ, Liu Y, Xu WG, Du LP, Xin ZY, 2005. Molecular test and aphid's resistance identification of new transgenic wheat lines with GNA gene. *Journal of Triticeae Crops*, 25(3): 7-10.]
- 许兰杰, 吕延华, 段晓亮, 张小华, 梁荣奇, 2014. 孕穗期和灌浆期小麦品种(系)的抗蚜性评价. *中国农业大学学报*, 19(1): 21-28. [Xu LJ, Lv YH, Duan XL, Zhang XH, Liang RQ, 2014. Evaluation of wheat cultivars/lines for resistance to aphid at booting and filling stages. *Journal of China Agricultural University*, 25(3): 7-10.]
- 阎凤鸣, 1995. 丁布研究进展. *昆虫知识*, 32(3): 178-180. [Yan FM, 1995. Research advance on DIMBOA. *Chinese Bulletin of Entomology*, 32(3): 178-180.]
- 杨效文, 丁文山, 19(1): 21-28. 1991. 麦蚜最优动态生防指标研究. *河南农业大学学报*, 25(2): 155-160. [Yang XW, Ding WS, 1991. The biocontrol indicis research of wheat aphid population. *Journal of Henan Agricultural University*, 25(2): 155-160]
- 杨益众, 戴志一, 黄东林, 1995. 麦蚜的阶段性及对小麦产量和品质影响的研究. *昆虫知识*, 32(1): 10-13. [Yang YZ, Dai ZY, Huang DL, 1995. The effects of wheat aphid damage on production and quality. *Insect Knowledge*, 32(1): 10-13]
- 杨益众, 林冠伦, 胡长富, 1991. 麦蚜危害后对小麦品质影响的

- 研究. 昆虫知识, 28(2): 70–72. [Yang YZ, Lin GL, Hu CF, 1991. The wheat quality change after damage of wheat aphid. Insect Knowledge, 28(2): 70–72]
- 叶炳元, 郝纪华, 1992. 世界小麦蚜虫种类与鉴定. 植物检疫, 6(1): 63–73. [Ye BY, Hao JH, 1992. The species and identification all over the world. Plant Quarantine, 6(1): 63–73]
- 叶树辉, 陈爱娟, 师桂英, 2012. 北方春小麦形态特征与抗麦长管蚜的关系研究. 草原与草坪, 32(3): 78–80, 8. [Ye SH, Chen AJ, Shi GY, 2012. Roles of spring wheat physical features in the resistance to sitobion avenae F. Grassland and Turf, 32(3): 78–80, 8.]
- 尹青云, 郑王义, 刘铃铃, 2003. 小麦对麦长管蚜抗性机制及相关种质资源研究进展. 小麦研究, 24(3): 30–36. [Yi YQ, Zheng WY, Liu LL, 2003. The aphid-resistance mechanism to *Sitobion avenae* and related resources research review. Wheat Research, 24(3): 30–36]
- 于洋, 庞保平, 高书晶, 夏春颖, 2006. 春小麦品种对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响. 应用生态学报, 17(2): 354–356. [Yu Y, Pang BP, Gao SJ, Xia CY, 2006. Effects of spring wheat varieties on growth, development and fecundity of sitobion a venae (F.) (Homoptera: Aphididae). Chinese Journal of Applied Ecology, 17(2): 354–356.]
- 张润志, 刘晏良, 耿守光, 买买提江·麻木提, 卫国, 1999. 麦类品种对麦双尾蚜的耐害性及产量损失率. 昆虫学报, 42 (增刊): 120–124. [Zhang RZ, Liu YL, Geng SG, Maimaitijiang MMT Wei G, 1999. Tolerance and yield loss rates of wheat varieties to Russian wheat aphid, *Duraphids*. 42 (Supplement): 120–124]
- 张志勇, 李素娟, 张屹东, 王兴运, 李世功, 2000. 小麦不同生育期抗蚜机制研究. 华北农学报, 15(1): 57–61. [Zhang ZY, Li SJ, Zhang YD, Wang XY, Li SG, 2000. Comparative study on winter wheat resistance to aphids in different developmental stage. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 15(1): 57–61.]
- 赵惠燕, 李东鸿, 张改生, 张莉, 胡祖庆, 胡想顺, 韩春霞, 2002. XZ系列杂种小麦对麦长管蚜抗性机制的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 30(1): 73–75. [Zhao HY, Li DH, Zhang GS, Zhang L, Hu ZQ, Hu XS, Han CX, 2002. The study on the resistance of hybrid wheat varieties XZ and its series to Macrosiphum avenae. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 30(1): 73–75.]
- 赵丽艳, 2006. 麦长管蚜取食诱导小麦防御反应的生化及分子机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院. [Zhao Y L, 2006. Research on the biochemical and molecular mechanism of induced defense responses of wheat infested by *Sitobion avenae*. Doctoral Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences]
- 郑王义, 尹青云, 史忠良, 马爱萍, 1999. 冬小麦品种对麦长管蚜抗性机制与抗性遗传研究进展. 小麦研究, 20(1): 1–5. [Zheng WY, Yi QY, Shi ZL, Ma AP, 1999. The resistance mechanism of winter wheat to *Sitobion avenae* and genetic research. Wheat Research, 20(1): 1–5]
- 周福才, 陆自强, 陈丽芳, 徐勇惠, 谢恺舟, 吴剑, 1997. 小麦品种对禾谷缢管蚜的抗性机理研究. 江苏农学院学报, 18(4): 53–56. [Zhou FC, Lu ZQ, Chen LF, Xu YH, Xie KZ, Hao J, 1997. The resistance mechanism of winter wheat to *Rhopalosiphum padi*. Journal of Jiangsu Agricultural College, 18(4): 53–56]
- 周福才, 陆自强, 陈丽芳, 祝树德, 陈国庆, 徐勇惠, 李祥, 肖维香, 1999. 小麦麦株内可溶性糖与抗禾谷缢管蚜的关系. 江苏农业研究, 20(2): 60–63. [Zhou FC, Lu ZQ, Chen LF, Zhu SD, Chjen GQ, Xu YH, Li X, Xiao WX, 1999. The relationship between sugar composition in wheat plant and *Rhopalosiphum padi*. Jiangsu Agricultural Research, 20(2): 60–63]
- 周福才, 陆自强, 陈丽芳, 祝树德, 李祥, 徐勇惠, 1998. 小麦形态特征与抗禾谷缢管蚜的关系. 江苏农学院学报, 19(4): 39–42. [Zhou FC, Lu ZQ, Chen LF Zhu SD, Li X, Xu YH, 1998. The relationship between morphology of wheat plant and *Rhopalosiphum padi*. Journal of Jiangsu Agricultural College, 19(4): 39–42]
- 朱弘复, 韩运发, 王林瑶, 1961. 不同栽培条件下小麦害虫的发生动态. 昆虫学报, 10(4/6): 411–424. [Zhu HF, Han YF, Wang LY, 1961. The population dynamics of wheat aphid in different planting condition. Acta Entomologia Sinica, 10(4/6): 411–424]
- 朱永峰, 陈明, 刘长仲, 2011. 蚜虫为害对五个燕麦品种苗期体内几种物质的影响. 植物保护, 37(2): 55–58. [Zhu YF, Chen M, Liu CZ, 2011. Variations of several substances in the seedlings of five oat varieties infested by aphids. Plant Protection, 37(2): 55–58.]
- 祝传书, 赵惠燕, 2006. 麦二叉蚜取食两种不同抗性小麦所引起的基因表达差异. 植物保护学报, 33(2): 157–162. [Zhu CS, Zhao HY, 2006. Gene expression of two resistant wheat varieties after schizaphis graminum feeding. Acta Phytophylacica Sinica, 33(2): 157–162.]
- 邹运鼎, 孟庆雷, 1994. “8455”小麦植株化学成分与麦蚜(长管蚜、二叉蚜)种群消长的关系. 应用生态学报, 5(3): 276–280. [Zou YD, Meng QL, 1994. Relationship between chemical composition of ‘8455’ wheat plant and population dynamics of *Schizaphis graminum* and *Macrosiphum avenae*. Chinese Journal of Applied Ecology, 5(3): 276–280].

