

小麦吸浆虫的生物学、生态学及防治研究进展*

武予清** 苗进 巩中军 段云 蒋月丽 李彤

(河南省农业科学院植物保护研究所, 农业部华北南部有害生物治理重点实验室, 河南省农作物病虫害防治重点实验室, 郑州 450002)

摘要 本文回顾了近期小麦吸浆虫的发生分布变化、扩散方式、生物学特性的遗传和生理基础、监测技术、抗性品种、生物防治和化学防治策略的主要进展, 并展望了小麦吸浆虫研究未来的发展方向。

关键词 小麦吸浆虫, 生物学, 生态学, 防治

Progress in research on the biology, ecology and control of the wheat blossom midge

WU Yu-Qing** MIAO Jin GONG Zhong-Jun DUAN Yun JIANG Yue-Li LI Tong

(Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Pests Control of Henan Province, Key Laboratory of Pest Management in South of North-China, Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, China)

Abstract This article reviews the main advances in research on the distribution, genetics, natural history, monitoring, and biological and chemical control of the wheat blossom wheat midge, and the resistance of cultivars to this pest. Prospects for future research are also discussed.

Key words wheat blossom midge, biology, ecology, control

我国小麦吸浆虫主要包括瘿蚊科的麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* Géhin 和麦黄吸浆虫 *Contarinia tritici* (Kirby)。自 20 世纪 80 年代以来主要发生的是麦红吸浆虫, 麦黄吸浆虫鲜有发生。

麦红吸浆虫是一种世界性的小麦害虫, 主要分布在北美、欧洲、俄罗斯和中国(武予清等, 2011; 段云等, 2013), 以幼虫潜伏在颖壳内吸食正在灌浆的汁液, 造成麦粒瘪疮、空壳或霉烂而减产, 具有很大的危害性, 一般减产 10%~20%, 重者减产 30%~50%, 甚至颗粒无收, 全球每年因麦红吸浆虫的危害而造成的经济损失高达数亿美元(Doane and Olfert, 2008)。农业部农业技术推广中心的资料表明, 2013 年全

国小麦吸浆虫发生面积为 240 万 hm^2 , 是我国小麦安全生产的严重威胁。如河北省作为新发生区, 2013 年发生面积高达 86.7 万 hm^2 。当年河北省小麦平均单产每 389.9 $\text{kg}/667\text{m}^2$, 按防治后 1% 的损失率保守估计, 河北省小麦产量损失也超过了 0.5 亿 kg , 折合 1 亿多人民币。

1 小麦吸浆虫的发生与扩散

1.1 小麦吸浆虫发生分布的变化

20 世纪 50 年代麦红吸浆虫主发区包括浙江、江西、江苏、安徽、河南、河北、山西、陕西等北纬 $32^\circ\sim 36^\circ$ 之间的区域, 成为由西北到东南的一条带状, 横亘在我国东部大平原的中部,

* 资助项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-03); 国家自然科学基金(31201513)

**通讯作者, E-mail: yuqingwu36@hotmail.com

收稿日期: 2014-10-11, 接受日期: 2014-10-28

华北地区最北界为河南与河北交界处的磁县的北纬 36°线(杨平澜, 1959)。自 20 世纪 50 年代后期六六六大规模用于土壤处理开始, 直到 1983 年六六六停止使用, 这个期间麦红吸浆虫不再是小麦生产问题。1985 年以后, 麦红吸浆虫在我国冬小麦主产区黄淮和华北麦区再度发生, 东部平原以河南、安徽、山东、河北、天津、北京最为严重, 2007 年发生区已经向北推移至天津蓟县和北京密云的北纬 40°地区, 50 多年间发生北界向北推移超过 400 km。与 20 世纪 50 年代发生分布相比, 河北、北京、天津和鲁西北、鲁西南及鲁南临沂成为新发生区, 呈现“北扩东移”的态势。

在欧洲, 麦红吸浆虫主要发生在欧洲中部地区, 近年来在比利时、德国等地开始回升(Gaafar and Volkmar, 2010; Jacquemin *et al.*, 2014), 并向北扩展到波罗的海沿岸的立陶宛(Zilvinas *et al.*, 2009)。

在北美, 1826 年在新英格兰地区发现麦红吸浆虫, 被认为从欧洲“偶然”传入, 20 世纪上半叶在北美曼尼托巴省时有发生, 到 1980 年初在萨斯喀彻温省大面积发生, 1995 年向西向南已经扩展到艾伯塔省、北达科塔州、蒙大拿州、明尼苏达州等地(Olfert *et al.*, 2009)。2011 年向西扩散至华盛顿州(WSU Spokane County Extension, 2013), 在北美大平原春小麦种植区呈现“南扩西移”的态势。

1.2 华北新发生区的虫源

为了解华北新发生区虫源来自何处, 段云等(2011, 2013a)自 2010 年起开始对我国小麦吸浆虫发生区的河南、河北、北京、天津、山东、山西、安徽、陕西、宁夏、甘肃等 16 个地理种群开展了微卫星和线粒体 DNA 的种群遗传结构分析, 发现太行山以东地区(中国第一台阶的江淮和黄淮海地区)和以西地区(中国第二台阶的西北地区)之间麦红吸浆虫存在着严重的地理隔离, 江淮和黄淮海地区内的 10 个地理种群之间有很高的基因流($N_m=4.91$)和较低的遗传分化($F_{st}=0.049$), 而西北地区 6 个种群之间存在着

较低基因流水平($N_m=1.89$)和较高的遗传分化($F_{st}=0.116$)。

江淮和黄淮海地区的山东、安徽、河北、北京、天津和河南等地理种群之间基因流值极高, N_m 值均大于 4, 存在着频繁的基因交流, 没有遗传分化的发生, 这意味着华北北部新发生区的吸浆虫来自江淮和黄淮南部的老发生区。

1.3 麦红吸浆虫远距离传播扩散方式

在 20 世纪 50 年代, 吸浆虫被认为是水流传播扩散的, 因为吸浆虫发生严重的地区主要集中在江河两岸地区, 如甘肃和宁夏的黄河地区、渭河、伊洛河、沁河、卫河、淮河、汉水、嘉陵江、长江下游、赣江等。

自 1985 年以来麦红吸浆虫迅速在华北地区扩散, 而这个地区的河流大部分已经干枯, 因此应该有其他扩散方式。

2010 年和 2011 年 4 月中下旬, 苗进等在河南洛宁和河北徐水 70~100 m 的高空系留气球上捕获了大量的麦红吸浆虫成虫(苗进等, 2011; Miao *et al.*, 2013)。作者采用美国动力学实验室的 HYSPLIT 模型模拟结果表明, 麦红吸浆虫可以自黄淮南部随西南气流向华北和东北地区扩散, 扩散方向与 Duan 等(2013a)利用分子标记测得的基因流方向是一致的。室内吊飞试验表明, 麦红吸浆虫雌成虫具有一次飞行 500 m 以上的能力, 能够随上升气流升空并进行风载远距离扩散(Hao *et al.*, 2013)。

20 世纪 90 年代中期, 我国开始了小麦收割的自南向北跨区作业, 河北、山东等地跨区作业的联合收割机的不同部位发现有麦红吸浆虫幼虫, 表明农事操作也是麦红吸浆虫的传播途径之一(高军等, 2011)。

节节麦作为一种麦田恶性杂草, 自 20 世纪 90 年代至今, 随着麦种的调运迅速扩散到整个华北地区。调查表明节节麦是麦红吸浆虫重要的寄主之一(武予清等, 2010), 麦红吸浆虫幼虫由于节节麦颖壳紧致不易脱落, 同时麦红吸浆虫幼虫在干燥的颖壳内可存活 10 个月, 因此不能排除幼虫随种子的传播。

1.4 田间分布和扩散

与传统的空间分布模型模拟相比(伏召辉等, 2011), 将地学统计学引入麦红吸浆虫种群的空间动态和分布, 与 GIS 结合, 可以直观了解田间及区域的岛屿状分布、麦株不同高度的分布状态以及麦红吸浆虫不同虫态之间及其寄生蜂的相互关系, 并服务于麦红吸浆虫的预测预报(夏鹏亮等, 2010; 郁振兴等, 2011; 苗进等, 2011)。

1.5 不同分布区麦红吸浆虫的耐寒性

河南南阳、河南辉县、陕西西安、河北保定和天津等 5 个不同地区的麦红吸浆虫圆茧的过冷却点测定结果表明, 麦红吸浆虫圆茧的过冷却点均随着纬度升高而显著下降, 河南辉县种群圆茧过冷却点平均值最高, 为 -18.46°C ; 天津种群圆茧过冷却点最低, 为 -25.34°C , 个体过冷却点最低, 为 -28.50°C 。这表明就麦红吸浆虫本身耐寒性来说, 越冬北界可以抵达我国东北的沈阳一线(武予清等, 2010; 陈华爽等, 2012)。

2 小麦吸浆虫重要生物学特性的遗传和生理基础

麦红吸浆虫的许多生物学特性具有普遍的生物学意义, 如专性滞育、寄主专化性(段云等, 2010; 武予清等, 2010)、保留有水生昆虫的特征、成虫阶段不取食而完成其生命过程、产雄孤雌生殖(陈华爽等, 2010)、趋光性(陈华爽等, 2011a)等。

2.1 麦红吸浆虫滞育的遗传和生理基础

Gong 等(2013)通过麦红吸浆虫转录组测序及对滞育、非滞育吸浆虫表达谱分析, 共得到 45 713 个高质量的 Unigene, 经生物信息学比对, 发现有 20 802 个 Unigene 可以在数据库中找到最佳匹配序列。差异表达基因结果显示, 非滞育虫态相对于滞育虫态有 1 893 个基因上调, 1 112 个基因下调。找到多个与吸浆虫滞育相关的酶基因, 如山梨醇脱氢酶、海藻糖酶、糖原磷酸化酶

等参与不同的代谢循环途径。该研究产生了大量的序列和功能数据, 为深入研究吸浆虫滞育及解除滞育过程中的基因表达和调控机理提供了重要的基础。

马康生等(2013)利用 RT-PCR 和 RACE 技术克隆得到了麦红吸浆虫蜕皮激素受体基因 cDNA 全长, 并通过 Real-time quantitative PCR 研究了其表达情况。该 cDNA 全长序列被命名为 SmEcR, 其开放阅读框长 1 386 bp, 编码 461 个氨基酸残基, 其蛋白预测分子量 52.90 ku, 理论等电点 6.24。该蛋白与其他已报道的昆虫 EcR 蛋白具有很高的同源性, 其中与迟眼蕈蚊 *Bradysia coprophila* 中相应蛋白的氨基酸序列一致性高达 92%。SmEcR 在麦红吸浆虫不同滞育时期、不同虫态中的表达量差异很大。在不同滞育时期以 11 月表达量最高, 12 月表达量最低; 在不同虫态以麦穗幼虫中的表达量较低, 而成虫中的表达水平很高。

成卫宁等(2009a, 2009b)和李丹等(2014)测定了麦红吸浆虫滞育不同时期幼虫的糖代谢酶活力、蜕皮激素、总脂和甘油三酯含量存在明显差异, 其滞育与这类物质的含量密切相关。李怡萍等(Li *et al.*, 2012)通过电镜和光镜观察了滞育与非滞育吸浆虫幼虫唾液腺的超微结构。发现丝腺由念珠状排列的 156 个细胞组成。滞育与非滞育吸浆虫幼虫丝腺细胞中都有发育的细胞器, 包括内质网、高尔基体、线粒体和脂滴, 但这些细胞器在非滞育幼虫中的发育状态高于滞育幼虫。

2.2 麦红吸浆虫的嗅觉蛋白基因

气味结合蛋白(分子)在昆虫的嗅觉系统和在嗅觉识别中发挥着重要的作用, 有助于阐明麦红吸浆虫寄主专化性的机制。麦红吸浆虫利用信息素和寄主的气味为线索完成交配和选择寄主产卵。Gong 等(2014)基于麦红吸浆虫测序的转录组数据分析, 鉴定出了 26 个 OBP 基因, 这些基因与黑森瘿蚊 *Mayetiola destructor* 更为接近。多数的 OBP 基因属于触角特化基因, 但是雌雄触角表达存在差异。有 3 个 OBP 基因(*obp9*,

obp19 和 *obp23*) 是腿部特化基因。OBP 基因在成虫阶段有更高表达水平, 只有一个 OBP 基因 (*obp10*) 在幼虫阶段具有较高的表达水平。

2.3 麦红吸浆虫的进化生物学

段云等 (2013b) 从麦红吸浆虫中克隆出 5 个线粒体蛋白编码基因片段 COX1, COX2, CytB, ND4 和 ND5, 然后将这些基因序列与另外 3 种瘿蚊科昆虫 (黑森瘿蚊 *Rhopalomyia pomum* 和 *Asphondylia rosetta*) 的相应序列进行比较分析。结果表明, 这些基因序列具有相似的 AT 含量 (74.0%~80.1%), 碱基替换中转换 (68.87%~79.72%) 明显地高于颠换 (20.28%~37.04%)。5 个基因片段的进化速率为 ND4 = CytB > COX2 = ND5 > COX1。结果还表明, COX2 和 ND5 可作为分子标记, 用于瘿蚊科属间及近缘种间的系统发育分析, ND4 可作为研究麦红吸浆虫及其他瘿蚊科昆虫种内各种群间进化关系的分子标记。

3 小麦品种抗虫性及其应用

3.1 抗性品种的鉴定分级方法简化

为了简化小麦品种对麦红吸浆虫抗性的鉴定方法, 武予清等 (2013) 于 2008—2013 年在河南洛阳田间连续调查鉴定麦红吸浆虫对我国小麦主栽品种的虫穗率 (Percentages of infested spike, ISP) 与损失率, 分析其相关性。结果表明 ISP 和损失率存在显著的相关性。在田间吸浆虫高密度下, ISP 定级方法比相对定级方法更能表现品种的抗性和敏感程度, 各抗级的指标依次为 0 (免疫)、 $0 < \text{ISP} < 20$ (高抗)、 $20 \leq \text{ISP} < 40$ (中抗)、 $40 \leq \text{ISP} < 60$ (中级)、 $60 \leq \text{ISP} < 80$ (感) 和 $\text{ISP} \geq 80$ (高感)。我国冬小麦的主要生产品种对吸浆虫均为感虫或高感, 仅荆麦 66 表现为高抗。我国小麦生产中极度缺乏抗虫品种。

我国传统上抗性分级是基于损失率比值的, 抗性分级标准是国标 GB/T 24501《小麦条锈病、吸浆虫防治技术规范》所规定的标准。该标准在受害严重的年份每人每天只能检查 5~10 个小

区。利用 ISP 定级法, 每人每天可检查 100~200 个小区, 效率大幅度提高。

3.2 小麦品种的抗性遗传

2011 年, 美国蒙大拿州立大学 Blake 等科学家在 Creston MT 地区应用杂交方法, 选取抗虫品种 Reeder 和感虫品种 Conan, 建立重组自交系 (Recombinant inbred line, RIL), RIL 群体表现出显著的变异, 2008 年遗传力为 0.78, 2009 年遗传力为 0.28, 遗传图谱鉴定出 1 个主要的数量遗传基因位点, 位于染色体 1A (QSm.mst-1A) 上, 在 2008 年和 2009 年各控制 17% 和 34% 的变异。在近等基因系抗虫品种 Reeder 的 QCL 显示出显著的位点效应, Reeder 的等位基因表现出可以减少吸浆虫侵染 42%; QTL QSm.mst-1A 导致的不同侵染水平可以补偿先前鉴定的抗生性 (Antibiosis, 属于可以遗传的抗性) 机制产生的抗性。

另外一种遗传抗性是排异性 (Antixenosis, 或不选择性 Non-preference), 即某些春小麦品种的穗部气味可以减少吸浆虫的产卵 (Gharalari *et al.*, 2011)。运用杂交试验表明, 这种可以成倍减少吸浆虫产卵的性状主要是多基因控制的。大田试验表明气味排异性可以运用到吸浆虫的防治中, 因此 (排异性/不选择性) 多基因在育种中的利用存在着挑战。

3.3 小麦种子的快速、高通量的 SNP-DNA 指纹图谱检测多代种植后品种抗虫稳定性

目前在加拿大商业化应用的实时指纹图谱是用于吸浆虫抗性的两个不同小麦品种的指纹图谱。敏感品种 (作为庇护所, 10% 的比例) 散布或者分布在麦红吸浆虫抗性品种 (*Sm1* 抗性, 90% 比例) 周围, 能有效阻止或者延缓昆虫抗性的发生。由于基因漂移, 连续多代种植之后要对混合的比率进行检测, 以保证抗性: 感性的比率为 90:10。由此作者开发了一个能够短时间内同时检测几千个样品/种子的平台, 该平台应用了单个种子分析及单核苷酸多态性 (SNP) 标记。该平台通过微孔板, 能够在 5 h 之内得到超过

1 000 粒种子的指纹图谱。通过连续 3~4 代多代种植,对 4 个不同的遗传组合、8 个地点、超过 50 000 个单个种子的检测表明其没有明显偏离 90:10 的比率 (Prashar *et al.*, 2012)。

在加拿大西北春麦区,种植 *Sml* 吸浆虫抗性基因品种及 10%感虫品种在农业生产中是可行的。一般来讲,组合品种产量高于敏感品种产量,特别是在高损失地块(种子受害率在 12.8%)。在低损失田块(0.9%),组合品种产量增加少,但仍有明显变化。表明产量增加除组合品种原因外,还有其他因素,而和抗性基因无关 (Vera *et al.*, 2013)

3.4 茉莉酸诱导的植物抗性

德国学者 El-Wakeil 和 Volkmar (2012) 研究报道了茉莉酸 (Jasmonic acid, JA) 对植物的诱导抗性。试验的春小麦品种为 Triso 和 Kadrij。通过在 6 月 5 号 (生育期 49~51 d) 和 6 月 19 日两次喷施不同浓度的 JA, 同时以溶剂丙酮 Acetone 为对照。小麦害虫及天敌通过直接计数、网捕及剥取麦穗的方法调查。结果表明昆虫害虫及天敌数量在两个品种不同处理间差异明显,对照组的蚜虫、蓟马、吸浆虫数量远高于处理组,品种 Triso 上的虫量多于 Kadrij。同时相对于对照,JA 的喷施提高了处理组小麦的产量。表明 JA 能够提高小麦对害虫如蚜虫、蓟马、吸浆虫的抗性。由此通过 JA 处理提高小麦的害虫抗性有助于减少杀虫剂的使用。

4 寄生蜂的保护利用

稀毛大眼金小蜂 *Macroglanes penetrans* (Kirby) 是麦红吸浆虫在欧洲和加拿大的重要天敌。1991—2000 年新羽化的成蜂在 Saskatchewan 的 12 个点释放情况进行了评价 (Elliott 等, 2011)。羽化情况按照释放的天数在 5 个不同阈值上积温进行。雄蜂比雌蜂早 1~2 d, 7 月 16 日、7 月 21 日、7 月 30 日的性比分别是 10%、50% 和 90%, 与 3 月 1 日—7 月 31 日的积温相关标准差变异显示羽化的时间是 2~7.7 d。成蜂羽化比最高积温的地点的期望值早 2~12 d, 而比最低

积温的地点的期望值晚 2~17 d。发育起点 9℃ 以上羽化 10% 和 90% 所需要的积温分别为 450 日·度和 579 日·度, 发育起点 5℃ 和 9℃ 以上羽化 10% 和 90% 所需要的积温分别为 823 日·度和 503 日·度, 在 5 月份 20~40 mm 的降雨可使羽化期比期望值早 1~8 d, 超过 145 mm 的降雨将推迟 1~11 d。2008—2009 年重新评价起点温度 9 日·度以上积温, 羽化 10%、50%、90% 预测的偏差在 1~2.2 d, 因此这个发育起点温度是合理的。种植者可以根据这个预测选择喷药日期以最大限度保护和利用寄生蜂 (Elliott *et al.*, 2011)。

5 化学防治

5.1 化学防治的策略

“穗期化学保护”的防治措施即在小麦抽穗 70% 到齐穗喷洒杀虫剂防治小麦吸浆虫, 其特点是以小麦生育期为标志进行防治, 而不是以吸浆虫发育期 (倪汉祥等, 2008)。武予清等 (2015, 在线发表) 在小麦穗期用套袋的方法进行小麦受害的敏感期试验, 结果表明, 在孕穗期套袋可以避免受害; 在抽穗 1/4、1/2、3/4 和抽齐穗分别套袋, 比扬花期套袋显著减轻; 扬花以后套袋受害极重, 已不能减轻小麦受害。结果表明小麦整个抽穗期是小麦吸浆虫侵害的敏感期。

2012—2013 年在小麦品种抗性鉴定谱中连续 2 年调查超过 200 份感虫品种的抽穗时间和受害程度, 以及相对应的小麦吸浆虫成虫发生期和发生量, 结果表明, 品种抽穗期与小麦吸浆虫成虫活动期的同步性越高, 产量损失率越高, 受害越重, 相关性达到极显著水平。同时小麦抽穗期吸浆虫成虫发生量与小麦产量损失率极显著相关。因此成虫发生期与抽穗期同步或吻合导致小麦受害而不是扬花期, 所以在缺乏抗虫品种的情况下采取抽穗期化学保护的方法是科学的。

5.2 新型化学杀虫剂

德国的 El-Wakeil 等 (2013) 调查了冬小麦田不同杀虫剂 Karate (拟除虫菊酯类)、Biscaya

(新烟碱类)和 NeemAzal T/S (植物源类杀虫剂)等对吸浆虫的防治效果。结果表明,吸浆虫的诱捕量与天气情况有高度相关性,信息素诱捕吸浆虫量与敏感期(小麦抽穗至扬花前)小麦感染量有很好一致性。同时杀虫剂在冬小麦田的应用能明显降低吸浆虫危害,吸浆虫数量在处理田和对照田数量明显不同。Karate 和 Biscaya 对吸浆虫效果好于 NeemAzal T/S。

5.3 施药器械的改进

穗期保护防治是以化学杀虫剂保护麦穗为目的,适用于大面积集中连片防治,在施药器械上大型机械喷雾和无人机是最重要的选择。高圆圆等(2013)研究了小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果,结果表明小型无人机低空喷洒,雾滴在小麦植株的沉积分布密度为穗部>中部(倒三叶)>下部(倒二叶);采用离心式转盘喷头喷雾,雾滴在小麦穗部的平均沉积密度达到 12.4 个/cm,是液力式喷头的 1.5 倍,满足穗期保护的要求。小型无人机采用离心式转盘喷头喷洒 2.5%联苯菊酯超低容量剂 1 500 mL/hm² 兑水 6 000 mL/hm² 喷雾,对小麦吸浆虫的防治效果达到 81.6%。离心式转盘喷头小型无人机进行低空喷洒优于液力式喷头。

6 监测和预测预报

6.1 监测工具的改进

我国 2002 年发布的小麦吸浆虫测报调查规范(NY/T 616-2002),采用淘土监测土壤中幼虫、网捕和目测监测成虫以及蛹的发育进度预测成虫羽化期的方法(中华人民共和国农业部,2003)。2009 年起,我国小麦吸浆虫主要发生区开始采用粘板监测成虫的方法(武予清等,2009;李怡萍等,2011;黎丹等,2012),相对于网捕和目测定量更准确,同时不受时间限制(网捕和目测需要在早上和傍晚进行),使得成虫监测效率大大提高。英国和加拿大合成的麦红吸浆虫性信息素 2,7-壬二醇二丁酸

(2,7-nonadiyl dibutyrate)及其对映体(2S, 7R)-2,7-壬二醇二丁酸制作的诱捕器在田间开始应用(Bruce *et al.*, 2007),但是在我国使用 Bruce 公司提供的性信息素对雄成虫诱集效果较差,因此我国麦红吸浆虫性信息素成分结构需要进一步鉴定。

6.2 成虫羽化期的预测

过去近 30 年间,中国、欧洲和北美均利用幼虫越冬后到羽化期的发育起点温度对成虫的羽化期进行预测,多数年份多个地点存在较大的偏差,使用的发育起点温度从 3~9℃不等,比利时 Jacquemin 等(2014)借用麦黄吸浆虫的发育参数,利用分段预测法,即麦红吸浆虫越冬后从脱茧到活动幼虫在 3℃以上满足 250 日·度的积温后,当温度达到 13℃(化蛹的起点温度)并且土壤湿度满足的情况下,在 7℃以上 160 日·度积温后为羽化高峰期,误差只有 1 d。

7 展 望

7.1 预测预报

预测预报技术的提升取决于取样方法的进步和对吸浆虫发生规律认识的不断加深。粘板监测技术的应用促进了吸浆虫成虫时空动态的研究。由于吸浆虫发生的隐蔽性,性信息素的应用对于新发生区吸浆虫的普查具有更为积极的意义。

土壤淘土调查是小麦吸浆虫测报的基础之一。目前我国采取的大田调查每样方 10 cm×10 cm×20 cm 的取土量(中华人民共和国农业部,2003),对于淘土来说工作量过大。而加拿大吸浆虫的样方取土器是直径 2.57 cm 圆柱状,取 15 cm 深的土壤,不足我国的 1/20。取土量的大幅度降低,将会促进我国的吸浆虫测报工作。

由于小麦吸浆虫成虫期和小麦抽穗期的同步性决定了小麦吸浆虫发生程度,因此,与其他害虫发生趋势预测有所差别:不仅要进行小麦吸浆虫的发生期预测,还要进行小麦发育期预测。通过建立吸浆虫-小麦互作模型进行发生趋势的

预测模型,提升小麦吸浆虫发生程度预测的效率。

7.2 防治策略

传统上我国一直采取“蛹期和成虫期防治并重,蛹期防治为主”的指导方针。由于蛹期的撒毒土防治费工、费时、费力,蛹期防治面积逐年减少,成虫出土盛期预测的困难,防治效果难以保证,造成田间虫源积累、虫情出现反复。穗期保护作为面向专业化大面积的防治策略取代蛹期防治,可以避免上述现象。但是化学防治只是作为一种应急技术,今后应该逐步走向“抗虫品种、生物防治和生态调控”措施为主的可持续防治的道路。

早在 20 世纪 50 年代,抗虫品种“西农 6028”和“南大 2419”在我国吸浆虫防治中作用十分突出,由于这类“颖壳紧密”类型品种抗虫性状导致脱粒困难而难以继续利用。近年来我国也在持续不断地开展筛选抗虫材料和抗虫育种工作(仇松英等,2011;屈振刚等,2011;王小龙等,2013;武予清等,2013),同时我国具有丰富的天敌资源(李修炼等,1997),一些早期的农业防治措施如水旱轮作也曾在吸浆虫防治工作中发挥过重要作用。加快小麦吸浆虫可持续防治技术体系的研究将对我国小麦生产具有现实的意义。

7.3 小麦吸浆虫研究中的科学问题

小麦吸浆虫许多生物学特性如滞育、寄主专化性等等,具有普遍的生物学意义,有必要开展这些生物学特性的遗传调控研究。但是这些工作的开展依赖于小麦吸浆虫室内继代饲养和微量 DNA 测序技术的提升。

气候变化和耕作制度对病虫害发生规律的影响是植物保护学科研究的重要领域(吴孔明和陈万权,2012)。已有研究表明耕作方式对小麦吸浆虫种群动态存在影响(张智等,2012)。然而,吸浆虫 50 多年来发生区的大幅度北移,与同时期华北地区冬春气温攀升(张一弛等,2011)是否具有联系?寻找它们之间联系的证据,以及气候变化下发生区北移的生态机制,不仅有助于

小麦吸浆虫发生趋势的预测,也有助于气候变化生物学学科的发展。

致谢: 全国农技推广与服务中心曾娟同志提供近期小麦吸浆虫发生资料,特此致谢!

参考文献 (References)

- Blake NK, Stougaard RN, Weaver DK, Sherman JD, Lanning SP, Naruoka Y, Xue Q, Martin JM, Talbert LE, 2011. Identification of a quantitative trait locus for resistance to *Sitodiplosis mosellana* (Gehin), the orange wheat blossom midge, in spring wheat. *Plant Breeding*, 30(1): 25–30.
- Bruce TJ, Hooper AM, Ireland L, Jones OT, Martin JL, Smart LE, Oakley J, Wadhams LJ, 2007. Development of a pheromone trap monitoring system for orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*, in the UK. *Pest Management Science*, 63(1): 49–56.
- Doane JF, Olfert O, 2008. Seasonal development of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae), in Saskatchewan, Canada. *Crop Protection*, 27: 951–958.
- Duan Y, Wu YQ, Luo LZ, Miao J, Gong ZJ, Jiang YL, Li T, 2013a. Genetic diversity and population structure of *Sitodiplosis mosellana* in Northern China. *PLoS ONE*, 8(11): e71564.
- Duan Y, Wu RH, Jiang YL, Li T, Wu YQ, Luo LZ, 2013b. Substitution bias and evolutionary rate of mitochondrial protein encoding genes in four species of Cecidomyiidae. *Russian Journal of Genetics*, 49(12): 1183–1189.
- Elliott RH, Mann L, Olfert O, 2011. Calendar and degree-day requirements for emergence of adult *Macroglenes penetrans* (Kirby), an egg-larval parasitoid of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin). *Crop protection*, 30(4): 405–411.
- El-Wakeil NE, Volkmar C, 2012. Effect of jasmonic application on economically insect pests and yield in spring wheat. *Gesunde Pflanzen*, 64(3): 107–116.
- El-Wakeil NE, Abdel-Moniem ASH, Gaafar N, Volkmar C, 2013. Effectiveness of some insecticides on wheat blossom midges in winter wheat. *Gesunde Pflanzen*, 65(1): 7–13.
- Gaafar N, Volkmar C, 2010. Evaluation of wheat ear insects in large scale field in central Germany. *Agricultural Sciences*, 1(2): 68–75.
- Gharalari AH, Smith MAH, Fox SL, Lamb RJ, 2011. Volatile compounds from non-preferred wheat spikes reduce oviposition by *Sitodiplosis mosellana*. *The Canadian Entomologist*, 143(4): 388–391.
- Gong ZJ, Miao J, Duan Y, Jiang YL, Li T, Wu YQ, 2014. Identification and expression profile analysis of putative

- odorant-binding proteins in *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 444(2): 164–170.
- Gong ZJ, Wu YQ, Miao J, Duan Y, Jiang YL, Li T, 2013. Global transcriptome analysis of orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae) to identify candidate transcripts regulating diapause. *PLoS ONE*, 8(8): e71564.
- Hao YN, Miao J, Wu YQ, Gong ZJ, Jiang YL, Duan Y, Li T, Cheng WN, Cui JX, 2013. Flight performance of the orange wheat blossom midge (Diptera: Cecidomyiidae). *J. Econ. Entomol.*, 106(5): 2043–2047.
- Jacquemin G, Chavalle S, De Profit M, 2014. Forecasting the emergence of the adult orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Belgium. *Crop Protection*, 58(1): 6–13.
- Li Y, Wu J, Cheng W, Song W, Yuan X, 2012. Comparison of silk glands of diapause and non-diapause larval *Sitodiplosis mosellana*. *Journal of Insect Science*, 12(1): 81.
- Miao J, Wu YQ, Gong ZJ, He YZ, Dun Y, Jiang YL, 2013. Long-distance wind-borne dispersal of *Sitodiplosis mosellana* Gehin (Diptera: Cecidomyiidae) in Northern China. *Journal of Insect Behavior*, 26(1): 120–129.
- Olfert O, Elliott R H, Hartley S, 2009. Non-native insects in agriculture: strategies to manage the economic and environmental impact of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, in Saskatchewan. *Biological Invasions*, 11(1): 127–133.
- Prashar S, Wolfe D, KING M, Vera C, Fox S, Depauw R, Chen G, Smith M, Wise I, Clarke F, Lukow O, Procunier J, 2012. Stability of midge tolerant varietal blends over 3- 4 successive generations: high-speed / high-throughput, SNP-DNA fingerprinting in grain seeds. *Plant Mol. Biol. Biotechnol.*, 3(2): 1–10.
- Vera CL, Fox SL, DePauw RM, Smith MAH, Wise IL, Clarke FR, Procunier JD, Lukow OM, 2013. Relative performance of resistant wheat varietal blends and susceptible wheat cultivars exposed to wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Canadian Journal of Plant Science*, 2013, 93(1): 59–66.
- WSU Spokane County Extension, 2013. Wheat midge a possible new wheat pest in Washington State. <http://smallgrains.wsu.edu/wp-content/uploads/2013/10/OWBM-possible-pest-in-WA.pdf>.
- Zilvinas L, Vytaitas R, Remigijus S, 2009. *Sitodiplosis mosellana* - a new winter wheat pest in Lithuania. *Ekologija*, 55(3/4): 215–219.
- 陈华爽, 雷朝亮, 武予清, 都振宝, 苗进, 段云, 蒋月丽, 2012. 不同地区麦红吸浆虫圆茧过冷却点的测定. 华中农业大学学报, 31(2): 212–215. [Chen HS, Lei CL, Wu YQ, Du ZB, Miao J, Duan Y, Jiang YL, 2012. Detection on supercooling points of *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) round cocoons in different geographical districts. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 31(2): 212–215.]
- 陈华爽, 武予清, 苗进, 郁振兴, 段云, 蒋月丽, 都振宝, 2011. 黑光灯诱集麦红吸浆虫的数量及性比的变化. 应用昆虫学报, 48(6): 1770–1774. [Chen HS, Wu YQ, Miao J, Yu ZX, Duan Y, Jiang YL, Du ZB, 2011. The amount and sex-ratios of trapped wheat orange midge *sitodiplosis mosellana* adults by black-light lamp. *Chinese Bulletin of Entomology*, 48(6): 1770–1774.]
- 陈华爽, 武予清, 2010. 瘿蚊科细胞生物学研究进展. 河南农业科学, (10): 149 – 152. [Chen HS, Wu YQ, 2010. Progress in cellular biology of cecidomyiidae. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, (12): 149–152.]
- 成卫宁, 李建军, 李怡萍, 李修炼, 仵均祥, 王洪亮, 2009a. 麦红吸浆虫成虫和幼虫滞育过程中蜕皮激素的定量分析. 植物保护学报, 36(2): 163–167. [Cheng WN, Li JJ, Li YP, Li XL, Wu JX, Wang HL, 2009a. Quantitative analysis of ecdysteroid in adults and the pre-diapause, diapause and post-diapause larvae of wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* Gehin. *Acta Phytolacica Sinica*, 36(2): 163–167.]
- 成卫宁, 李修炼, 李怡萍, 李建军, 仵均祥, 2009b. 麦红吸浆虫不同滞育期四种糖代谢酶活力分析. 昆虫学报, 52(2): 133–139. [Cheng WN, Li XL, Li YP, Li JJ, Wu JX, 2009b. Activities of four sugar metabolic enzymes in *sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae) larvae at different diapause stages. *Acta Entomologica Sinica*, 52(2): 133–139.]
- 仇松英, 史晓芳, 史忠良, 张松令, 谢福来, 高炜, 逯腊虎, 2011. 小麦抗麦红吸浆虫品种遗传多样性的表型和 SSR 标记分析. 麦类作物学报, 31(6): 1050–1056. [Qiu SY, Shi XF, Shi ZL, Zhang SL, Xie FL, Gao W, Lu LH, 2011. Genetic diversity of wheat midge resistant varieties by phenotype and simple sequence repeat (SSR) markers analysis. *Journal of Triticeae Crops*, 31(6): 1050–1056.]
- 段云, 武予清, 吴仁海, 蒋月丽, 2010. 小麦吸浆虫几种主要禾本科寄主的生物生态学特征调查. 河南农业科学, 39(2): 61–63. [Duan Y, Wu YQ, Wu RH, Jiang YL, 2010. The biological and ecological characteristics of several host plants of wheat blossom midge. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 39(2): 61–63.]
- 段云, 蒋月丽, 苗进, 巩中军, 李彤, 武予清, 罗礼智, 2013. 麦红吸浆虫在我国的发生、危害及防治. 昆虫学报, 56(11): 1359–1366. [Duan Y, Jiang YL, Miao J, Gong ZJ, Li T, Wu YQ, Luo LZ, 2013. Occurrence, damage and control of the wheat midge, *sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae), in China. *Acta Entomologica Sinica*, 56(11): 1359–1366.]
- 段云, 吴仁海, 罗礼智, 武予清, 蒋月丽, 苗进, 巩中军, 2011.

- 麦红吸浆虫唾腺 EST-SSR s 的信息分析及分子标记筛选. 昆虫学报, 54(10): 1147–1154. [Duan Y, Wu RH, Luo LZ, Wu YQ, Jiang YL, Miao J, Gong ZJ, 2011. Characterization of SSRs from the ESTs in the wheat midge, sitodiplosis mosellana (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(10): 1147–1154.]
- 伏召辉, 郑余良, 张宝强, 张亚, 仵均祥, 2011. 小麦吸浆虫幼虫在麦穗上的危害特点及空间分布型研究. 麦类作物学报, 31(1): 181–185. [Fu ZH, Zheng YL, Zhang BG, Zhang Y, Wu JX, 2011. Damage character and spatial distribution pattern of the larvae of wheat midge, sitodiplosis mosellana (Géhin) in the ears of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 31(1): 181–185.]
- 高军, 王贺军, 王朝华, 2009. 河北省小麦吸浆虫随联合收割机跨区作业传播的调查分析. 中国植保导刊, 27(3): 13–14. [Gao J, Wang HJ, Wang CH, 2009. Investigation and analysis on the transmission of wheat blossom midge by cross-operating of combine harvester in Hebei province. *China Plant Protection*, 27(3): 13–14.]
- 高圆圆, 张玉涛, 张宁, 牛亮, 郑万文, 袁会珠, 2013. 小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果初探. 作物杂志, (2): 139–142. [Gao YY, Zhang YT, Niu L, Zheng WW, Yuan HZ, 2013. Primary studies on spray droplets distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against wheat midge. *Crops*, (2): 139–142.]
- 黎丹, 马晨, 刘顺, 武予清, 何运转, 2012. 不同色彩粘板对麦红吸浆虫成虫的诱集效果比较. 植物保护学报, 39(5): 390–394. [Li D, Ma C, Liu S, Wu YQ, He YZ, 2012. Trapping effects of sticky cards in different colors on adults of red wheat blossom midge, Sitodiplosis mosellana (Géhin). *Acta Phytophylacica Sinica*, 39(5): 390–394.]
- 李丹, 龙治任, 王越, 仵均祥, 许烨, 成卫宁, 2014. 麦红吸浆虫滞育发生和解除过程中总脂和甘油三酯含量变化. 昆虫学报, 57(5): 509–514. [Li D, Long ZR, Wang Y, Wu JX, Xu Y, Cheng WN, 2014. Changes of total lipid and triglyceride contents in pre-diapause, diapause and post-diapause larvae and pupae of Sitodiplosis mosellana (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(5): 509–514.]
- 李修炼, 吴兴元, 成卫宁, 1997. 小麦吸浆虫寄生蜂混合种群发生与数量消长研究. 西北农业学报, 6(2): 13–16. [Li XL, Wu XY, Cheng WN, 1997. Studies on the population occurrence and dynamics of parasitic wasp of wheat blossom midges. *Northwest Agricultural Journal*, 6(2): 13–16]
- 李怡萍, 程爱红, 于海利, 成卫宁, 仵均祥, 2011. 粘板对小麦吸浆虫成虫的诱捕效果. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 39(3): 92–96. [Li YP, Cheng AH, Yu HL, Cheng WN, Wu JX, 2011. Trapping efficiencies of sticky-plates to adults of the wheat blossom midge, Sitodiplosis mosellana (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 39(3): 92–96.]
- 马康生, 李伯辽, 陈浩, 仵均祥, 2013. 麦红吸浆虫蜕皮激素受体 (EcR) 基因的克隆与表达分析. 昆虫学报, 56(6): 605–611. [Ma KS, Li BL, Chen H, Wu JX, 2013. Molecular cloning and expression analysis of an ecdysone receptor (EcR) gene in the wheat midge, sitodiplosis mosellana (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 56(6): 605–611.]
- 苗进, 武予清, 巩中军, 朱昆, 段云, 蒋月丽, 李彤, 2012. 麦红吸浆虫成虫田间垂直分布及扩散. 生态学杂志, 31(11): 2855–2858. [Miao J, Wu YQ, Gong ZJ, Zhu K, Duan Y, Jiang YL, Li T, 2012. Vertical distribution and dispersal of adult sitodiplosis mosellana (Géhin) in wheat field. *Chinese Journal of Ecology*, 31(11): 2855–2858.]
- 苗进, 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 蒋月丽, 段云, 2011. 麦红吸浆虫及其卵寄生蜂混合种群空间格局. 应用生态学报, 22(3): 779–784. [Miao J, Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Jiang YL, Duan Y, 2011. Spatial pattern of Sitodiplosis mosellana and its egg parasitoids mixed population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(3): 779–784.]
- 苗进, 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 刘顺通, 蒋月丽, 段云, 2011. 麦红吸浆虫随气流远距离扩散的轨迹分析. 昆虫学报, 54(4): 432–436. [Miao J, Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Liu ST, Jiang YL, Duan Y, 2011. Trajectory analysis of long-distance dispersal of the wheat midge, sitodiplosis mosellana (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), with air current. *Acta Entomologica Sinica*, 54(4): 432–436.]
- 倪汉祥, 丁红建, 郭予元, 2008. 小麦红吸浆虫种群动态及综合治理技术体系成果研究回顾与展望 // 成卓敏主编. 植物保护科技创新与发展. 北京: 中国农业科学技术出版社. 37–44. [Ni HX, Ding HJ, Guo YY, 2008. Review of population dynamics of wheat midge and integrated management. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 37–44]
- 屈振刚, 温树敏, 屈赞, 刘桂茹, 2011. 小麦品种抗麦红吸浆虫鉴定与抗性分析. 植物遗传资源学报, 12(1): 121–124. [Qu ZG, Wen SM, Qu Y, Liu GR, 2011. Evaluation and identification of wheat varieties resistant to sitodiplosis mosellana. *Journal of Plant Genetic Resources*, 12(1): 121–124.]
- 王小龙, 武海娜, 赵艳红, 屈振刚, 刘桂茹, 温树敏, 2013. 小麦品种(系)抗麦红吸浆虫种植方式与评价方法的研究. 河北农业大学学报, 36(2): 7–11. [Wang XL, Wu HN, Zhao YH, Qu ZG, Liu GR, Wen SM, 2013. Study on planting modes and medge (Sitodiplosis mosellana Géhin) resistance evaluation methods with 75 wheat varieties (lines). *Journal of Agricultural University of*

- Hebei, 36(2): 7-11.]
- 吴孔明, 陈万权, 2012. 应全面发展植保科技. 中国科学报, 4月12日. [Wu KM, Chen WQ, 2012. The whole development of plant protection technology. China Science News, 12nd April]
- 武予清, 段爱菊, 张自启, 刘长营, 刘顺通, 蒋月丽, 苗进, 段云, 巩中军, 李彤, 2013. 小麦品种的麦红吸浆虫抗性分级方法及抗性评价. 作物学报, 39(12): 2171-2176. [Wu YQ, Duan AJ, Zhang ZQ, Liu CY, Liu ST, Jiang YL, Miao J, Duan Y, Gong ZJ, Li T, 2013. Resistance grading method and evaluation in wheat varieties to orange wheat blossom midge, *sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) in China. *Acta Agronomica Sinica*, 39(12): 2171-2176.]
- 武予清, 段爱菊, 张自启, 刘长营, 刘顺通, 苗进, 巩中军, 李彤, 蒋月丽, 段云, 2015. 小麦抽穗期与麦红吸浆虫成虫发生期的同步性及其受害程度. 生态学报, 35(11)(在线发表 <http://dx.doi.org/10.5846/stxb201308112060>). [Wu YQ, Duan AJ, Zhang ZQ, Liu CY, Liu ST, Miao J, Gong ZJ, Li T, Jiang YL, Duan Y, 2015. The synchronization of ear emerging stages of winter wheat with occurrent periods of orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae) adults and its damaged Level. *Acta Ecologica Sinica*, 35(11)]
- 武予清, 刘顺通, 段爱菊, 刘长营, 张子启, 蒋月丽, 段云, 2010. 河南西部小麦红吸浆虫禾本科寄主植物的记述. 植物保护, 36(5): 138-140. [Wu YQ, Liu ST, Duan AJ, Liu CY, Zhang ZQ, Jiang YL, Duan Y, 2010. A note of natural host cereals of *Sitodiplosismosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) in western Henan province, China. *Plant Protection*, 36(5): 138-140.]
- 武予清, 苗进, 段云, 蒋月丽, 巩中军, 2011. 麦红吸浆虫的研究与防治. 北京: 科学出版社. 1-10. [Wu YQ, Miao J, Duan Y, Jiang YL, Gong ZJ, 2011. Research and control of orange wheat blossom midge. Beijing: Science Press, 1-10.]
- 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 苗进, 蒋月丽, 段云, 2010. 应用 MAXENT 模型评价我国麦红吸浆虫分布初报. 公共植保与绿色防控. 北京: 中国农业科学技术出版社. 314-317. [Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Miao J, Jiang YL, Duan Y, 2010. The estimation of wheat midge by using MAXENT model in China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 314-317]
- 武予清, 赵文新, 蒋月丽, 段云, 2009. 小麦红吸浆虫成虫的黄色粘板监测. 植物保护学报, 36(4): 381-385. [Wu YQ, Zhao WX, Jiang YL, Duan Y, 2009. Monitoring on adults of *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) with yellow sticky traps. *Acta Phytophylacica Sinica*, 36(4): 381-385.]
- 夏鹏亮, 武予清, 尚素琴, 魏永平, 刘顺通, 段爱菊, 张自启, 2010. 小麦红吸浆虫大尺度空间格局的初步分析. 河南农业科学, 39(4): 62-65. [Xia PL, Wu YQ, Shang SQ, Wei YP, Liu ST, Duan AJ, Zhang ZQ, 2010. Geostatistical analysis on the spatial pattern of large scale for the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 39(4): 62-65.]
- 杨平澜, 1959. 小麦吸浆虫的研究与防治 //昆虫学集刊. 北京: 科学出版社. 193-211. [Yang PL, 1959. The research and management of wheat midge. Beijing: Science Press. 193-211]
- 郁振兴, 吴乾坤, 李迎刚, 蔡朋飞, 武予清, 2011. 麦红吸浆虫空间分布的 GIS 分析. 河南农业科学, 40(5): 124-127. [Yu ZX, Wu QK, Li YG, Cai MF, Wu YQ, 2011. Analysis of regional distribution of *sitodiplosis mosellana* based on GIS. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 40(5): 124-127.]
- 张一驰, 吴凯, 于静洁, 夏军, 2011. 华北地区 1951-2009 年气温、降水变化特征. 自然资源学报, 26 (11): 1931-1940. [Zhang YC, Wu K, Yu JJ, Xia J, 2011. Characteristics of precipitation and air temperature variation during 1951-2009 in north China. *Journal of Natural Resources*, 26 (11): 1931-1940.]
- 张智, 张云慧, 程登发, 2012. 耕作方式对麦红吸浆虫种群动态的影响. 昆虫学报, 55(5): 612-617. [Zhang Z, Zhang YH, Cheng DF, 2012. Impacts of different tillage practices on population dynamics of the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(5): 612-617.]
- 中华人民共和国农业部, 2003. 小麦吸浆虫测报调查规范(NY/T 616-2002). 北京: 中国标准出版社. 1-9. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2003. Rules for the investigation and forecast of wheat blossom midge (NY/T 616-2002). Beijing: Standards Press of China. 1-9.]