麦长管蚜为害损失及动态防治指标

石 祥[1] 赵子怡[1] 黄 冲[2] 罗 晨[1] 胡祖庆[1*]

（1. 西北农林科技大学植物保护学院，农业农村部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室，植保资源与病虫害治理教育部重点实验室，作物抗逆与高效生产全国重点实验室，陕西 杨凌 712100；
2. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘要：为明确麦长管蚜*Sitobion avenae*种群密度与小麦产量损失的关系并制订动态防治指标，以西农511、稷麦336和农大753三种主栽小麦品种为材料，采用人工接蚜与笼罩法将田间小麦灌浆期麦长管蚜种群密度控制为0、1 000、2 000和3 000头/百茎，系统测定千粒重损失率与产量损失率，构建小麦灌浆期麦长管蚜种群密度与损失率的回归模型，在此基础上参照行业标准分别以小麦千粒重损失率和产量损失率为标准测算发生级别为1~5级时的麦长管蚜密度，并基于经济生态学原理计算不同产量水平下麦长管蚜的经济损害水平与动态防治指标。结果表明：小麦灌浆期为麦长管蚜发生高峰期和造成损失的关键时期；小麦品种、调查时间和接蚜密度对小麦灌浆期麦长管蚜密度有极显著影响；3种小麦的千粒重损失率和产量损失率均与小麦灌浆期麦长管蚜密度呈显著正相关，模型拟合度良好；小麦灌浆期麦长管蚜密度和小麦品种均是影响小麦产量的关键因素；随着麦长管蚜发生级别增加，其密度范围显著扩宽；当预期小麦产量为4 500 kg/hm^{2}和6 000 kg/hm^{2}时，麦长管蚜的经济允许产量损失率分别为8.89%和6.67%；以小麦产量损失率为标准时，小麦灌浆期（为害高峰期）麦长管蚜的经济损害水平分别为1 322.9头/百茎和1 056.7头/百茎。表明所建立的麦长管蚜动态防治指标体系兼顾时效性与操作性，可为我国主要麦区蚜虫的精准监测与科学防控提供依据。

关键词：麦长管蚜；为害损失；防治指标；动态模型；产量

Yield loss caused by English grain aphid *Sitobion avenae* and dynamic economic thresholds

Shi Xiang[1] Zhao Ziyi[1] Huang Chong[2] Luo Chen[1] Hu Zuqing[1*]

（1. State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production; Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management of the Ministry of Education; Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northwestern Loess Plateau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs; College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China）

Abstract: To clarify the relationship between the population density of English grain aphid *Sitobion avenae* and wheat yield loss and to establish dynamic control thresholds, three main wheat cultivars (Xinong 511, Jimai 336, and Nongda 753) were used as materials. A combination of artificial aphid inoculation and cage enclosure was employed to precisely control aphid population densities at 0, 1 000, 2 000, and 3 000 aphids per 100 stems during the grain-filling stage. Thousand-kernel weight loss rate and yield loss rate were systematically measured, and regression models between population density of *S. avenae* during the grain-filling stage and the loss rates were constructed. According to industry stan-

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFD0200500），全国农业技术推广服务中心委托项目（HT2023-0113）

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：huzuqing@nwsuaf.edu.cn

收稿日期：2025-12-09

dards, the densities of *S. avenae* corresponding to grades 1−5 were calculated using thousand-kernel weight loss rate and yield loss rate as criteria, and the economic injury level and dynamic control threshold under different wheat yield levels were calculated in accordance with economic ecological principles. The results indicated that the grain-filling stage was the peak occurrence period of *S. avenae* and the critical period for yield loss. Wheat cultivar, survey time, and aphid inoculation density exhibited extremely significant effects on the population density of *S. avenae* during the grain-filling stage; the thousand-kernel weight loss rate and yield loss rate of the three tested wheat varieties both showed significant positive correlations with the density of *S. avenae* during the grain-filling stage, and the regression models showed good fit. The density of *S. avenae* during the grain-filling stage and wheat variety were both key factors influencing wheat yield. As the occurrence grade of *S. avenae* increased, its density range expanded significantly. When the expected wheat yields were 4 500 kg/hm^2 and 6 000 kg/hm^2, the economically acceptable yield loss rates caused by *S. avenae* were 8.89% and 6.67%, respectively. Using wheat yield loss rate as the criterion, the economic injury levels of *S. avenae* during the wheat grain-filling stage, the peak damage period, were 1 322.9 and 1 056.7 individuals per 100 stems, respectively. These rsults indicate that the dynamic control threshold system for *S. avenae* established in this study balances timeliness and operability and can provide a theoretical basis and technical support for precise monitoring and scientific control of aphids in major wheat-producing regions of China.

Key words: *Sitobion avenae*; yield loss; control threshold; dynamic model; yield

小麦是全球仅次于玉米的第二大粮食作物，全球约40%的人口以小麦为主要粮食（刘志勇等，2018）。我国是全球最大的小麦生产国和消费国，小麦安全生产对保障国家粮食安全具有重要意义（蒋赟等，2021）。麦长管蚜*Sitobion avenae*作为各小麦产区的常发性害虫，不仅通过直接吸食韧皮部汁液摄取营养，导致小麦光合作用受阻，千粒重下降，而且传播多种麦类病毒病，间接为害小麦植株，严重影响小麦产量和品质。此外，其分泌的蜜露还会诱发煤污病，进一步影响作物的光合效率（胡想顺等，2022；王超等，2022）。一般年份可导致10%~15%的产量损失，大发生年份造成的损失可达60%以上，甚至绝收（冯露之等，2018）。因此，开展麦长管蚜为害损失与防治指标的研究对于保障小麦安全生产具有重要的意义。

在害虫综合治理中，科学防治决策的核心在于平衡化学防治的即时效益与生态系统的长期稳定。在此过程中经济损害水平与防治指标（也称经济阈值）构成了不可或缺的理论基石（Jaramillo-Barrios et al.，2020；da Silva et al.，2021；兰英等，2025）。经济损害水平指农作物受有害生物为害导致的经济损失与防治费用相等时的有害生物最低密度，为害虫管理的经济效益临界点。然而当害虫种群达到经济损害水平时再采取行动往往为时已晚。防治指标指为防止害虫种群增长至经济损害水平而必须采取防治措施时的害虫密度（Higley & Pedigo，1993；仵均祥，2016），较经济损害水平更具实践指导意义。经济损害水平和防治指标在理论上构成一种动态的、前瞻性的预警与决策体系，前者是决策的终极目标与计算依据，而后者则是直接触发防治行动的信号（Pedigo & Rice，2014；Rincon et al.，2019）。因此，建立并应用基于本地化数据的经济损害水平/防治指标模型，不仅能有效避免盲目施药，降低生产成本与环境污染风险，更是实现害虫精准监测与科学防控、推动农业可持续发展的关键所在。

国内关于麦长管蚜防治指标的研究多集中在20世纪80—90年代。例如，刘绍友等（1986）对陕西省关中麦区的研究结果显示产量为3 750 kg/hm^{2}左右麦田的麦长管蚜防治指标应为400~500头/百茎。王念慈等（1986）研究结果显示当小麦产量为3 750、4 500和5 250 kg/hm^{2}时山东省麦长管蚜的防治指标分别为600、500和400头/百茎。杨益众和林冠伦（1990）研究结果表明当小麦产量为3 000 kg/hm^{2}时，灌浆期之前麦蚜防治指标为27.8头/茎，灌浆期之后麦蚜防治指标为10.2头/茎，整个生育期麦蚜防治指标为9.2头/茎；当小麦产量为4 500 kg/hm^{2}时，灌浆期之后麦蚜防治指标为11.5头/茎，整个生育期麦蚜防治指标为6.3头/茎。峁庆才等（1995）也对不同生育期小麦上麦蚜的防治指标进行了研究，确定拔节期时麦蚜的防治指标为51.5头/株，抽穗–扬花

期麦蚜的防治指标为4.4头/茎，灌浆期麦蚜的防治指标为7.8头/茎。任春光等(1998)确定穗期麦蚜的防治指标为2 000头/百茎。白莉等(2006)认为当小麦产量为5 250~6 750 kg/hm²时麦长管蚜的防治指标为500头/百茎。以上研究方法多依赖田间自然种群调查，缺乏对蚜虫密度的精准控制，且选用的品种、栽培模式和农药种类与当前生产实际有较大差异。此外，近年来各麦区麦长管蚜发生仍呈中等偏重态势，因此，重新评估并制订适用于当前生产体系的麦长管蚜防治指标显得尤为迫切。

西农511、稷麦336和农大753均为国审小麦品种，是华北和黄淮海麦区农业农村部主推的大面积种植品种，因此本研究以这3种具有代表性的主栽小麦品种作为研究对象，在田间采用人工接虫与笼罩法来精准控制灌浆期小麦上麦长管蚜种群密度，系统测定这3种小麦上麦长管蚜种群密度与小麦千粒重和产量损失的关系；为进一步增强研究结果的代表性和适用性，本研究分别设置4 500 kg/hm²(参考陕西省2024年平均水平)和6 000 kg/hm²(参考全国2024年平均水平)两种预期小麦产量，基于经济生态学原理，计算经济损害水平，并测定适用于不同防治窗口期的防治指标，以期构建更精准、更具操作性的麦长管蚜防控技术体系。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源和植物：2023年自西北农林科技大学曹新庄试验农场农作一站基地西农511小麦上采集麦长管蚜成蚜，置于温度(23±1) ℃、相对湿度(60±5)%、光周期16 L∶8 D的人工气候箱中饲养。供试小麦品种为农业农村部发布的国家农作物优良品种推广目录中的西农511、稷麦336和农大753，种子均购于陕西杨凌登峰种业有限公司，抗蚜性均未知；将小麦种子种植于直径10 cm、高8 cm的塑料花盆中，每盆30株，待小麦生长至2叶1心期时接种麦长管蚜成蚜，罩上笼罩，连续饲养6代以上，待达到一定数量后挑选成蚜作为田间前期虫源。

仪器：PRX-450C智能人工气候箱，宁波普朗特仪器有限公司；40 cm×40 cm×100 cm笼罩，塑钢支架，孔径125 μm的尼龙纱网，自制。

1.2 方法

1.2.1 田间试验

2023—2024年在西北农林科技大学曹新庄试验农场农作一站基地进行试验，试验地肥力中等，有灌溉条件。2023年10月20日种植西农511小麦，2024年10月19日种植稷麦336和农大753小麦。每种小麦种植约0.13 hm²，行距20 cm，株距2 cm。次年每种小麦选取长势和密度基本一致的12个小区，每个小区长40 cm，宽40 cm，覆盖笼罩，并记录笼罩内小麦茎数。4月13日(小麦拔节期)每种小麦随机选取覆盖笼罩的3个小区，每100茎小麦接入2头麦长管蚜成蚜，控制小麦灌浆期麦长管蚜密度为1 000头/百茎；随机选取覆盖笼罩的3个小区，每100茎小麦接入4头麦长管蚜成蚜，控制小麦灌浆期麦长管蚜密度为2 000头/百茎；随机选取覆盖笼罩的3个小区，每100茎小麦接入10头麦长管蚜成蚜，控制小麦灌浆期麦长管蚜密度为3 000头/百茎；剩余的3个小区则清除所有麦长管蚜，并以在整个小麦生育期内不接麦长管蚜作为对照。4月20日(孕穗期)、4月27日(抽穗期)、5月4日(扬花期)、5月11日(灌浆期)、5月18日(乳熟期)和5月25日(蜡熟期)，每种小麦每个小区随机选取100茎小麦调查麦长管蚜数量；小麦成熟后(6月1日)，每种小麦每个小区随机选取100穗麦穗，统计穗粒数、千粒重，并统计每个小区的小麦产量，计算千粒重损失率和产量损失率。千粒重损失率=(对照组千粒重−处理组千粒重)/对照组千粒重×100%；产量损失率=(对照组产量−处理组产量)/对照组产量×100%。

1.2.2 麦长管蚜密度与小麦损失率的关系

每种小麦以高峰期(灌浆期)麦长管蚜密度为自变量x，分别以相应密度下小麦的千粒重损失率和产量损失率为因变量y，构建线性、二次、三次和指数模型，根据决定系数大小选择最优模型。决定系数越大，则模型的拟合效果越好。

1.2.3 麦长管蚜发生级别分级标准确定

根据《农作物主要病虫自然危害损失率测算准则》(NY/T 3301—2018)，麦长管蚜的为害损失率为$S_{zn}=S_{z5}\times2^{n-5}$，式中，$S_{zn}$为麦长管蚜发生级别为$n$级时的为害损失率，$n$=1, 2, 3, 4；$S_{z5}$为麦长管蚜发生级别为5级的为害损失率，取值为26.5%。根据上述公式计算麦长管蚜发生级别为1~4级的为害损失率，将其分别代入1.2.2构建的最优千粒重损失率和产量损失率的模型中，计算麦长管蚜发生高峰期不同发生级别时的平均百茎麦长管蚜密度。

1.2.4 麦长管蚜经济损害水平的确定

根据公式计算经济允许产量损失率L(郭良珍等，2000；白莉等，2006；徐蕾等，2020)。$L=(C\times F)/(Y\times P\times E)\times100\%$，式中，$C$为防治费用，包括药剂费、

植保无人机作业费和机械折旧费；F为经济系数，Y为单位面积小麦产量；P为小麦平均价格；E为防治效果。参照近年植保市场情况并适度前瞻，药剂费为30元/hm^2，植保无人机作业费和机械折旧费共195元/hm^2，因此防治费用C为225元/hm^2。对所有农药来说，每投资1元，经济效益为4元，因此经济系数F设置为4（郭良珍等，2000；白莉等，2006）。根据2024年国家统计局统计数据，全国小麦平均产量为6 000 kg/hm^2，陕西省小麦平均产量为4 500 kg/hm^2，因此本研究单位面积小麦产量分别设置为4 500 kg/hm^{2}和6 000 kg/hm^2；根据全国小麦主产区市场监测信息，将小麦平均价格P设定为2.5元/kg；同时根据农业农村部防控方案要求及田间实测结果，将防治效果设定E为90%。将L代入1.2.2构建的最优千粒重损失率和产量损失率回归方程中得到麦长管蚜密度x，即经济损害水平。

1.2.5 *麦长管蚜动态防治指标的确定*

将麦长管蚜种群动态增长曲线方程$N_t=N_0e^{rt}$（Zhou et al.，2024）两边取自然对数，得到种群内禀增长率r的计算公式，$r=(\ln(N_t)-\ln(N_0))/t$，式中，N_0为田间调查的初始麦长管蚜密度，取4月20日（小麦孕穗期）的种群密度；N_t为距离麦长管蚜高峰期t时间后田间调查的麦长管蚜密度，依次为4月27日（抽穗期）的种群密度N_7、5月4日（扬花期）的N_{14}以及5月11日（灌浆期）的N_{21}。根据拟合得到的种群内禀增长率r及麦长管蚜高峰期（小麦灌浆期）经济损害水平，建立动态防治指标（economic threshold，ET）的计算公式$ET_t=EIL/e^{rt}$，式中，EIL为经济损害水平。根据公式可分别求得高峰期前14 d（小麦抽穗期）的防治指标$ET_{抽穗期}$（t=14）、前10 d（小麦抽穗–扬花期）的防治指标$ET_{抽穗–扬花期}$（t=10）以及前7 d（小麦扬花期）的防治指标$ET_{扬花期}$（t=7）。

1.3 数据分析

利用SPSS 19.0软件对试验数据进行统计分析。其中对不同品种、不同预设蚜虫密度处理和不同调查时间的蚜虫密度进行三因素方差分析，对不同品种和不同预设蚜虫密度处理的小麦千粒重损失和小麦产量损失进行双因素方差分析。应用Tukey法对数据进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 3种小麦上麦长管蚜密度及方差分析

2.1.1 *3种小麦上麦长管蚜密度*

随时间推移3种小麦上麦长管蚜密度均呈现典型的单峰型变化，即麦长管蚜密度自小麦孕穗期后开始累积，至灌浆期达到峰值，随后在乳熟期与蜡熟期大幅回落（表1），表明小麦抽穗期和小麦扬花期是麦长管蚜种群快速发展期，而小麦灌浆期是麦长管蚜种群发展的高峰期，也是为害造成损失的关键时期。小麦灌浆期，3种小麦上麦长管蚜密度均差异显著（P<0.05），其中在0、1 000、2 000和3 000头/百茎接蚜密度下西农511上麦长管蚜密度分别为173.33、1 413.33、2 346.67和3 166.67头/百茎；稷麦336分别为303.33、1 320.00、2 093.33和3 203.34头/百茎；农大753分别为293.33、1 180.00、2 146.67和3 200.00头/百茎（表1）；不同小麦品种上麦长管蚜密度与接蚜密度相近，表明蚜虫密度设置合理，可用于构建麦长管蚜密度与产量损失的关系模型。

2.1.2 *3种小麦上麦长管蚜种群密度的方差分析*

小麦品种、调查时间和接蚜密度3个主效因子均对小麦上麦长管蚜密度有极显著影响（小麦品种：$F_{(2,144)}$=11.81，P<0.001；调查时间：$F_{(5,144)}$=132.43，P<0.001；接蚜密度：$F_{(3,144)}$=243.15，P<0.001）；调查时间与小麦品种的交互作用对麦长管蚜密度有极显著影响（$F_{(10,144)}$=7.11，P<0.001），调查时间与接蚜密度处理的交互作用对麦长管蚜密度也有极显著影响（$F_{(15,144)}$=16.99，P<0.001）；其他因素间的交互作用对麦长管蚜密度均无显著影响（表2）。表明小麦品种、调查时间和接蚜密度均是影响麦长管蚜密度的关键因素。

2.2 麦长管蚜密度对两种损失率影响及其方差分析

2.2.1 *麦长管蚜密度对两种损失率的影响*

随着小麦灌浆期麦长管蚜密度的增加，3种小麦的千粒重与产量均呈逐步下降的趋势，相应的损失率则不断升高（表3）。表明3种小麦的千粒重损失率及产量损失率均与小麦灌浆期麦长管蚜密度呈正相关。在相同的麦长管蚜胁迫水平下，3种小麦的千粒重之间均无显著差异；除2 000头/百茎处理下西农511的产量显著低于稷麦336和农大753（P<0.05）外，3种小麦的产量之间均无显著差异（表3）。

2.2.2 *麦长管蚜密度对千粒重和产量影响的方差分析*

主效因子小麦灌浆期麦长管蚜密度对小麦千粒重和产量均有极显著影响（千粒重：$F_{(3,24)}$=24.01，P<0.001；产量：$F_{(3,24)}$=33.96，P<0.001），主效因子小麦品种仅对小麦产量有极显著的影响（$F_{(2,24)}$=19.29，P<0.001），而对小麦千粒重无显著影响。小麦灌浆期麦长管蚜密度与小麦品种的交互作用对小麦千粒重

和小麦产量均无显著影响(表4)。表明小麦灌浆期麦长管蚜密度和小麦品种均是影响小麦产量的关键因素,而影响千粒重的关键因素仅为小麦灌浆期麦长管蚜密度,供试的3种小麦均为生产主栽品种,在本试验条件下,品种因素对千粒重无显著影响。

2.3 麦长管蚜密度与小麦两种损失率的关系

在构建的线性、二次、三次和指数模型中,线性回归模型效果最优(表5)。除灌浆期西农511上麦长管蚜密度与千粒重损失率的回归模型达到显著水平(P<0.05)外,其他回归模型均达到极显著水平(P<0.01),表明模型的拟合效果较好,可用于麦长管蚜经济损害水平的测算。

2.4 麦长管蚜发生级别分级标准

根据2.3建立的麦长管蚜虫密度与千粒重损失率和产量损失率的拟合方程,结合麦长管蚜的为害损失率测算公式,得到以小麦千粒重损失率和产量损失率为标准时麦长管蚜发生级别为1~5级的密度范围。随着麦长管蚜发生级别的增加,其密度范围显著扩宽。当麦长管蚜发生级别为1~3级时两种损失率标准下麦长管蚜密度阈值较接近,但当麦长管蚜发生级别较高时(4级和5级),以产量损失率为标准的密度阈值略高于以千粒重损失率为标准的阈值(表6)。

表1 不同接蚜密度时3种小麦上麦长管蚜的密度

Table 1 Density of *Sitobion avenae* on three wheat varieties under varying aphid inoculation densities

小麦品种 Wheat variety	接蚜密度/(头/百茎) Aphid inoculation density/(individuals/100 stems)	不同调查时间的麦长管蚜密度/(头/百茎) *Sitobion avenae* density at different growth period/ (individuals/100 stems)					
		孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	扬花期 Anthesis stage	灌浆期 Grain-filling stage	乳熟期 Milk stage	蜡熟期 Dough stage
西农511 Xinong 511	0	0.00± 0.00 Bb	280.00± 36.06 Bb	686.67± 102.69 Ca	173.33± 118.51 Db	100.00± 52.92 Bb	21.00± 11.59 Ab
	1 000	173.33± 67.41 ABc	683.33± 102.69 ABbc	1 410.00± 45.09 BCa	1 413.33± 317.98 Ca	970.00± 78.10 ABab	366.67± 101.71 Abc
	2 000	220.00± 130.13 ABc	903.33± 295.37 ABbc	2 046.67± 310.18 ABa	2 346.67± 85.11 Ba	1 816.00± 205.13 Aab	526.67± 112.60 Ac
	3 000	506.67± 146.21 Ac	1 536.67± 368.89 Abc	2 593.33± 310.12 Aab	3 166.67± 52.39 Aa	2 270.00± 530.79 Aab	456.67± 217.36 Ac
稷麦336 Jimai 336	0	0.00± 0.00 Cb	113.33± 58.40 Bab	273.33± 129.91 Bab	303.33± 43.33 Dab	403.33± 68.39 Cb	313.33± 107.13 Bab
	1 000	26.67± 3.33 Cd	180.00± 61.10 Bcd	656.67± 227.03 Bbcd	1 320.00± 112.69 Ca	1 213.33± 190.29 BCab	676.67± 83.73 Babc
	2 000	240.00± 78.10 Bc	673.33± 93.33 ABbc	1 633.33± 484.19 ABab	2 093.33± 131.19 Ba	1 960.00± 280.06 Ba	656.67± 113.48 Bbc
	3 000	526.67± 14.53 Ac	1 226.67± 395.02 Abc	2 616.67± 560.01 Aab	3 203.34± 132.96 Aa	3 046.67± 133.46 Aa	1 413. 33± 218.81 Abc
农大753 Nongda 753	0	0.00± 0.00 Cb	6.67± 6.67 Bb	76.67± 20.28 Bb	293.33± 43.33 Da	190.00± 87.37 Cab	110.13± 26.46 Bab
	1 000	43.33± 6.67 BCb	96.67± 24.04 ABb	346.67± 98.21 Bb	1 180.00± 189.30Ca	930.00± 96.09 Ca	310.00± 158.22 Bb
	2 000	163.33± 53.64 ABc	546.67± 206.10 Ac	1 006.67± 188.53 Abc	2 146.67± 251.48 Ba	1 916.67± 238.21 Bab	563.33± 165.76 ABc
	3 000	230.00± 43.59 Ad	553.33± 26.03 Acd	1 356.67± 92.44 Ab	3 200.00± 51.32 Aa	3 090.00± 256.97 Aa	940.00± 141.54 Abc

表中数据为平均数±标准误。不同大小写字母分别表示同一品种同一生长期不同处理之间和同一品种相同处理不同生长期之间经Tukey法检验差异显著(P<0.05)。Data in the table are presented as mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among aphid inoculation treatments within the same cultivar and growth stage, whereas different lowercase letters indicate significant differences among growth stages within the same cultivar and aphid inoculation density treatment, according to Tukey's test (P<0.05).

表2 3种小麦上麦长管蚜密度的三因素方差分析

Table 2 Three-way ANOVA of the density of *Sitobion avenae* on three wheat varieties

变异来源 Source of variation	*df*	*F*	*P*
修正模型 Corrected model	71	25.00	<0.001
截距 Intercept	1	1 896.58	<0.001
小麦品种 Wheat variety	2	11.81	<0.001
调查时间 Survey time	5	132.43	<0.001
接蚜密度 Aphid inoculation density	3	243.15	<0.001
小麦品种×调查时间 Wheat variety × survey time	10	7.11	<0.001
小麦品种×接蚜密度 Wheat variety × aphid inoculation density	6	1.90	0.085
调查时间×接蚜密度 Survey time × aphid inoculation density	15	16.99	<0.001
小麦品种×调查时间×接蚜密度 Wheat variety × survey time × aphid inoculation density	30	0.76	0.809

表3 麦长管蚜不同密度下小麦的千粒重损失率和产量损失率

Table 3 Loss rates of thousand-kernel weight and yield of wheat under different *Sitobion avenae* densities

小麦品种 Wheat variety	接蚜密度/(头/百茎) Aphid density (individuals/100 stems)	千粒重 Thousand-kernel weight/g	千粒重损失率 Loss rate of thousand-kernel weight/%	产量 Yield/(kg/hm^2)	产量损失率 Yield loss rate/%
西农511 Xinong 511	0	44.26±2.86 Aa	0.00	4 958.1±104.4 Aa	0.00
	1 000	41.19±1.45 ABa	6.94	4 473.1±102.5 ABa	9.78
	2 000	36.16±2.12 ABa	18.30	3 983.8±123.8 BCb	19.65
	3 000	32.29±1.16 Ba	27.04	3 726.3±126.3 Ca	24.85
稷麦336 Jimai 336	0	45.90±0.65 Aa	0.00	5 248.1±283.8 Aa	0.00
	1 000	41.65±1.49 ABa	9.26	4 808.1±176.3 Aa	8.38
	2 000	37.34±1.13 BCa	18.65	4 493.8±107.5 ABa	14.37
	3 000	32.65±1.39 Ca	28.87	3 835.6±106.9 Ba	26.91
农大753 Nongda 753	0	45.56±0.53 Aa	0.00	5 643.8±127.5 Aa	0.00
	1 000	42.69±1.04 ABa	6.30	5 201.9±249.4 ABa	7.83
	2 000	38.91±2.47 ABa	14.60	4 770.0±109.4 ABa	15.48
	3 000	33.77±3.68 Ba	26.01	4 409.4±217.5 Ba	21.87

表中数据为平均数±标准误。不同大小写字母分别表示同一品种不同处理之间和相同处理不同品种之间经Tukey法检验差异显著（P<0.05）。Data in the table are presented as mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among different treatments for the same cultivar, whereas different lowercase letters indicate significant differences among wheat cultivars within the same treatment according to Tukey's test (P<0.05).

表4 小麦千粒重和产量的二因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA testing of thousand-kernel weight and yield of wheat

变异来源 Source of variation	小麦千粒重 Thousand-kernel weight of wheat			小麦产量 Yield of wheat		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
修正模型 Corrected model	11	6.74	<0.001	11	12.92	<0.001
截距 Intercept	1	5 191.39	<0.001	1	9 479.67	<0.001
小麦品种 Wheat variety	2	0.86	0.434	2	19.29	<0.001
小麦灌浆期麦长管蚜密度 Density of *Sitobion avenae* during the grain-filling stage	3	24.01	<0.001	3	33.96	<0.001
小麦品种×小麦灌浆期麦长管蚜密度 Wheat variety × density of *Sitobion avenae* during the grain-filling stage	6	0.07	0.998	6	0.274	0.944

表5 灌浆期3种小麦上麦长管蚜密度(x)与千粒重损失率(y_1)和产量损失率(y_2)的拟合方程

Table 5 Regression equations describing the relationships between *Sitobion avenae* density (x) and thousand-kernel weight loss rate (y_1) and yield loss rate (y_2) in three wheat varieties during the grain-filling stage

小麦品种 Wheat variety	损失率类型 Type of loss rate	线性方程 Linear equation	R^2	F	P
西农511 Xinong 511	千粒重损失率 Thousand-kernel weight loss rate	y_1=0.009x−3.243	0.979	69.88	0.014
	产量损失率 Yield loss rate	y_2=0.009x−1.561	0.995	312.95	0.003
稷麦336 Jimai 336	千粒重损失率 Thousand-kernel weight loss rate	y_1=0.010x−3.279	0.990	688.46	0.001
	产量损失率 Yield loss rate	y_2=0.009x−3.492	0.983	225.20	0.004
农大573 Nongda 753	千粒重损失率 Thousand-kernel weight loss rate	y_1=0.009x−3.523	0.981	225.43	0.004
	产量损失率 Yield loss rat	y_2=0.008x−1.559	0.994	283.46	0.004

表6 根据自然为害损失率计算的麦长管蚜不同发生级别

Table 6 Occurrence grades of *Sitobion avenae* calculated based on natural yield loss rate

麦长管蚜发生级别 Occurrence grade of *Sitobion avenae*	自然为害损失率 Natural yield loss rate/%	麦长管蚜密度x/(头/百茎) *Sitobion avenae* density x (individual per hundred stems)	
		以千粒重损失率为标准 Based on thousand-kernel weight loss rate	以产量损失率为标准 Based on yield loss rate
1	1.66	535<x≤711	456<x≤654
2	3.31	711<x≤1 065	654<x≤1 052
3	6.63	1 065<x≤1 771	1 052<x≤1 846
4	13.25	1 771<x≤3 185	1 846<x≤3 434
5	26.50	x>3 185	x>3 434

2.5 不同小麦品种的麦长管蚜经济损害水平

根据1.2.4公式和参数设定，当预期小麦产量分别为4 500 kg/hm^{2}和6 000 kg/hm^{2}时，经济允许产量损失率分别为8.89%和6.67%。将经济允许产量损失率代入小麦灌浆期麦长管蚜密度与小麦千粒重率和产量损失率的回归方程，得到不同产量下3种小麦上麦长管蚜经济损害水平(表7)。以千粒重损失率为标准时，稷麦336的经济损害水平最小；以产量损失率为标准时，西农511的经济损害水平最小(表7)。当预期小麦产量分别为4 500 kg/hm^{2}和6 000 kg/hm^{2}时，以产量损失率为标准时，3种小麦上麦长管蚜的经济损害水平平均分别为1 322.9、1 056.7头/百茎(表7)。

表7 3种小麦不同产量下麦长管蚜的经济损害水平

Table 7 Economic injury levels of *Sitobion avenae* at different yield levels for three wheat varieties

小麦品种 Wheat variety	预期小麦产量 Expected wheat yield/(kg/hm^2)	经济允许产量损失率 Economic allowable yield loss rate/%	经济损害水平/(头/百茎) Economic injury level /(individuals/100 stems)	
			以千粒重损失率为标准 Based on thousand-kernel weight loss	以产量损失率为标准 Based on yield loss rate
西农511 Xinong 511	4 500	8.89	1 318.8	1 229.5
	6 000	6.67	1 077.5	968.4
稷麦336 Jimai 336	4 500	8.89	1 204.9	1 345.9
	6 000	6.67	985.0	1 104.6
农大753 Nongda 753	4 500	8.89	1 394.7	1 393.2
	6 000	6.67	1 145.3	1 097.2
平均 Average	4 500	8.89	1 306.1	1 322.9
	6 000	6.67	1 069.3	1 056.7

2.6 不同小麦品种上麦长管蚜种群的增长曲线方程

西农511、稷麦336和农大573的增长曲线方程的P均小于0.050，表明所建的指数增长方程能较好拟合田间3种小麦上麦长管蚜的增长动态，利用该方程结合经济损害水平可推测动态的防治指标(表8)。

表8 不同小麦品种上麦长管蚜种群的增长曲线方程

Table 8 Growth curve equations of *Sitobion avenae* populations on different wheat varieties

小麦品种 Wheat variety	增长曲线方程 Growth curve equation	R^2	F	P
西农511 Xinong 511	$x=345.11e^{0.105t}$	0.905	24.36	0.039
稷麦336 Jimai 336	$x=275.34e^{0.103t}$	0.911	43.17	0.022
农大573 Nongda 753	$x=134.00e^{0.128t}$	0.999	1 084.44	0.001

t：时间；x：麦长管蚜密度。t: Time; x: *Sitobion avenae* density.

2.7 不同小麦品种上麦长管蚜的防治指标

将经济损害水平代入增长曲线方程中，得到小麦抽穗期、抽穗–扬花期和扬花期麦长管蚜的防治指标（表9）。无论以千粒重损失率为标准还是以产量损失率为标准，无论小麦产量是4 500 kg/hm^{2}还是6 000 kg/hm^2，抽穗期、抽穗–扬花期和扬花期农大753的防治指标普遍低于西农511和稷麦336，表明农大753对麦长管蚜更敏感，需要更早采取防治措施；当小麦产量从4 500 kg/hm^{2}增加到6 000 kg/ hm^2，抽穗期、抽穗–扬花期和扬花期3种小麦的防治指标均呈现下降趋势，表明在高产条件下，麦长管蚜造成的潜在经济损失会增大，因此防治指标会较低；此外，同生育期同一小麦品种以千粒重损失率为标准的防治指标和以产量损失率为标准的防治指标相近，但存在一定差异（表9）。

表9 3种小麦上麦长管蚜的防治指标

Table 9 Control threshold for *Sitobion avenae* in three wheat cultivars

小麦品种 Wheat variety	预期小麦产量 Expected wheat yield/(kg/hm^2)	以千粒重损失率为标准的防治指标/（头/百茎） Control threshold based on thousand-kernel weight loss /(individuals/100 stems)			以产量损失率为标准的防治指标/（头/百茎） Control threshold based on yield loss/ (individuals/100 stems)		
		抽穗期 Heading stage	抽穗–扬花期 Heading stage–anthesis stage	扬花期 Anthesis stage	抽穗期 Heading stage	抽穗–扬花期 Heading stage–anthesis stage	扬花期 Anthesis stage
西农511 Xinong 511	4 500	305.4	463.8	634.6	284.7	432.4	591.6
	6 000	249.5	378.9	518.5	224.2	340.6	466.0
稷麦336 Jimai 336	4 500	284.1	429.3	585.1	317.4	479.5	653.5
	6 000	232.3	350.9	478.3	260.5	393.6	536.4
农大753 Nongda 753	4 500	233.7	389.3	570.9	233.4	388.9	570.3
	6 000	191.9	319.7	468.8	183.8	306.3	449.1
平均 Average	4 500	274.4	427.5	578.4	278.5	433.6	605.2
	6 000	224.6	349.9	474.1	222.8	346.8	483.8

3 讨论

麦长管蚜的防治指标存在较大差异。例如，王宗曹（1980）提出穗期小麦以每百茎1 000头麦长管蚜作为防治指标；郭予元等（1988）提出小麦以每茎4.4头麦长管蚜作为防治指标；赵惠燕等（1988）和李鹊鸣和林昌善（1993）提出小麦以每百茎500头和480头麦长管蚜作为防治指标。综合来看，早期研究结果以每百茎400~500头的防治指标最常见。本研究结果表明，当预期小麦产量为4 500 kg/hm^{2}与6 000 kg/hm^{2}时，抽穗–扬花期小麦以每百茎433.6头和346.8头麦长管蚜作为防治指标。与40年前普遍采用的指标相比，本研究的防治指标数值略有下降，这可能与小麦品种单产水平普遍提高以及农药与施用工成本相对下降等因素有关，反映了农业生产条件变化对经济阈值产生的动态影响。

目前生产实践中麦蚜防治主要针对麦长管蚜，因此本研究也针对麦长管蚜进行研究。但近些年，随着全球气候变暖，禾谷缢管蚜*Rhopalosiphum padi*进化出了更强的适应性，发生范围逐渐向北方地区扩散，可能会逐渐削弱麦长管蚜的优势地位（Zhu et al.，2021；姜亚楠等，2024），今后需更深入研究。前期研究在制订害虫防治指标时，未将其与经济损害水平明确区分，直接以经济损害水平代替防治指标使用（陈浩梁等，2022；李妍颖等，2022；罗泉等，2023）。然而，二者在概念上存在本质差异，经济损害水平是指导致经济损失所允许的害虫最小种群密度，而防治指标则指在实施防治措施时所允许的最

大种群密度(Pedigo & Rice,2014)。若防治关键期与害虫引致经济损失的关键期不完全重合,两者数值不等。例如,麦长管蚜导致经济损失的关键期为小麦灌浆期,据此所计算的经济损害水平对应于该时期的麦长管蚜种群密度;然而实际防治常集中在抽穗–扬花期,即一喷三防的关键阶段。因此,更合理的防治指标是根据经济损害水平并结合抽穗–扬花期至灌浆期麦长管蚜的种群增长动态,推算出该时期的防治指标。本研究正是采用这一方法科学确定了麦长管蚜的防治指标。Zhou et al.(2024)亦采用类似思路研究蚕豆上豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum* 的经济损害水平与防治指标,当豌豆蚜的经济损害水平为96~142头/茎时,防治关键期早于为害关键期约7 d,结合该阶段内豌豆蚜的种群增长速率最终确定防治指标为34~50头/茎。

在前期关于小麦蚜虫经济损害水平的研究中,评估标准不同。一种观点主张以千粒重作为损失衡量指标(王念慈等,1986;郭良珍等,2000),认为蚜虫主要为害集中于灌浆期,导致籽粒灌浆不足,进而降低千粒重,而对单位面积穗数和穗粒数等产量构成要素影响不显著;另一种观点则倾向于采用产量损失作为综合评估标准(郭予元等,1988;白莉等,2006),认为蚜虫对小麦的影响具有系统性,使用最终产量能更全面反映其实际为害程度。目前无相关机理研究明确其具体影响路径,本研究分别依据上述两种标准计算了经济损害水平,在其他条件一致的情况下这两种标准所得到的经济损害水平差异不大,因此千粒重与产量均可以作为损失评估依据。

尽管本研究在构建动态防治指标方面取得了一定进展,但仍存在若干局限。首先,试验在笼罩条件下进行,虽能精准控制蚜虫密度,但与开放田间的生态条件存在差异,尤其是忽略了天敌的自然控制作用。其次,本研究主要关注麦长管蚜,而田间常为多种蚜虫混合发生,其复合危害效应可能不同于单一物种。此外,麦长管蚜年龄结构、有翅蚜比例及气候波动对种群增长和危害程度的影响也需进一步量化。未来应结合分子生态学、遥感监测等技术,建立多因子协同作用的动态阈值模型,推动麦长管蚜防控向精准化、智能化方向发展。

参 考 文 献 (References)

Bai L, Zheng WY, Ren DZ, Qu YQ, Li XP, Wang SB. 2006. Study on the damage and control threshold of *Sitobion avenae*. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 34(1): 61−64 (in Chinese) [白莉, 郑王义, 任东植, 曲运琴, 李喜平, 王随保. 2006. 麦长管蚜为害损失估计及防治阈值研究. 山西农业科学, 34(1): 61−64]

Chen HL, Lin LL, Zhong YZ, Zhang F, Xie MH, Zhang GL, Su WH. 2022. Effects of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* on corn yield at different growth stages and the control threshold. Journal of Plant Protection, 49(6): 1705−1711 (in Chinese) [陈浩梁, 林璐璐, 钟永志, 张峰, 谢明惠, 张光玲, 苏卫华. 2022. 草地贪夜蛾对不同生育期玉米产量的影响及防治指标. 植物保护学报, 49(6): 1705−1711]

da Silva PR, Istchuk AN, Foresti J, Hunt TE, Alves de Araújo T, Fernandes FL, Rodrigues de Alencar E, Bastos CS. 2021. Economic injury levels and economic thresholds for *Diceraeus* (*Dichelops*) *melacanthus* (Hemiptera: Pentatomidae) in vegetative maize. Crop Protection, 143: 105476

Feng LZ, Li Y, Li Z, Zhao HY. 2018. Cusp catastrophe model for aphid population dynamic based on the predator and wheat growth. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 41(4): 839−844 (in Chinese) [冯露之, 李媛, 李祯, 赵惠燕. 2018. 基于天敌和植物生长状况的麦蚜数量动态的突变分析. 山西大学学报(自然科学版), 41(4): 839−844]

Guo LZ, Liu SY, Su L. 2000. Studies on the damage loss and the economic threshold of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) in wheat. Plant Protection, 26(6): 12−14 (in Chinese) [郭良珍, 刘绍友, 苏丽. 2000. 小麦禾谷缢管蚜的危害损失和防治指标研究. 植物保护, 26(6): 12−14]

Guo YY, Cao YZ, Li SG, Wu YQ, Liu AZ, Hu Y. 1988. Preliminary study on the harm of wheat aphid mixed population to wheat heading stage and its dynamic control index. Plant Protection, 14(3): 2−5 (in Chinese) [郭予元, 曹雅忠, 李世功, 武予清, 刘爱芝, 胡毅. 1988. 麦蚜混合种群对小麦穗期的危害和动态防治指标初步研究. 植物保护, 14(3): 2−5]

Higley LG, Pedigo LP. 1993. Economic injury level concepts and their use in sustaining environmental quality. Agriculture, Ecosystems & Environment, 46(1/2/3/4): 233−243

Hu XS, Li JW, Peng JF, Zhao HY, Liu TX. 2022. Grain aphid *Sitobion miscanthi*: damage on wheat yield components and its ecological control. Chinese Agricultural Science Bulletin, 38(12): 110−118 (in Chinese) [胡想顺, 李靖文, 彭静凤, 赵惠燕, 刘同先. 2022. 麦长管蚜对小麦产量成分的影响与生态防控. 中国农学通报, 38(12): 110−118]

Jaramillo-Barrios CI, Varón-Devia EH, Monje-Andrade B. 2020. Economic injury level and action thresholds for *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize crops. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 73(1): 9065−9076

Jiang Y, Zhang LL, Xue P, Wang XD. 2021. Development status of wheat industry in China and international experience for reference. Journal of Agricultural Science and Technology, 23(7): 1−10 (in Chinese) [蒋赟, 张丽丽, 薛平, 王秀东. 2021. 我国小麦产业发展情况及国际经验借鉴. 中国农业科技导报, 23(7): 1−10]

Jiang YN, Qi FJ, Li WW, Chen JL, Tan XL. 2024. The increasing temperature accelerated the population growth of *Rhopalosiphum*

padi and *Sitobion avenae* by wheat rhizosphere microorganisms. Scientia Agricultura Sinica, 57(20): 4045−4056 (in Chinese) [姜亚楠, 亓方剑, 李维维, 陈巨莲, 谭晓玲. 2024. 温度升高通过小麦根际微生物加快禾谷缢管蚜和麦长管蚜的种群增长. 中国农业科学, 57(20): 4045−4056]

Lan Y, Zhao XM, Song XD, Wang CR, Si ZS, Liu Y, Li QC, Li ZH, Liu Y, Dong CJ. 2025. Determination of yield loss of *Loxostege sticticalis* L. to soybean and study of economic threshold. China Plant Protection, 45(6): 52−56 (in Chinese) [兰英, 赵秀梅, 宋显东, 王春荣, 司兆胜, 刘悦, 李青超, 李子豪, 刘洋, 董丛杰. 2025. 草地螟对大豆危害损失的测定及防治指标研究. 中国植保导刊, 45(6): 52−56]

Li HM, Lin CS. 1993. Study on economic threshold of wheat damaged by wheat aphid. Entomological Knowledge, (2): 74−78 (in Chinese) [李鹊鸣, 林昌善. 1993. 麦长管蚜为害小麦经济阈值研究. 昆虫知识, (2): 74−78]

Li YY, Li MM, Yang Q, Chen LH, Li BL, Fang AS, He KH, Dong JG, Zhao YW, Yu ZH, et al. 2022. Effects of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) on maize yield and treatment threshold. Plant Protection, 48(1): 82−89 (in Chinese) [李妍颖, 李梅梅, 杨琪, 陈丽慧, 李伯辽, 房爱省, 何柯杭, 董继广, 赵玉婉, 于志浩, 等. 2022. 亚洲玉米螟为害对玉米产量的影响与防治指标研究. 植物保护, 48(1): 82−89]

Liu SY, Ni XZ, Han LJ, Liu XB. 1986. A study of the feeding damage and economic threshold of English grain aphids (Homoptera Aphididae). Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 14(2): 33−40 (in Chinese) [刘绍友, 倪新智, 韩丽娟, 刘小宝. 1986. 麦长管蚜为害损失及防治指标的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 14(2): 33−40]

Liu ZY, Wang DW, Zhang AM, Liang HW, Lü HY, Deng XD, Ge YQ, Wei X, Yang WC. 2018. Current status and perspective of wheat genomics, genetics and breeding. Journal of Plant Genetic Resources, 19(3): 430−434 (in Chinese) [刘志勇, 王道文, 张爱民, 梁翰文, 吕慧颖, 邓向东, 葛毅强, 魏珣, 杨维才. 2018. 小麦育种行业创新现状与发展趋势. 植物遗传资源学报, 19(3): 430−434]

Luo Q, Xing HS, Zhao M, Zhang LJ, Li WZ, Guo XR. 2023. Studies on the control index of *Spodoptera frugiperda* at different growth stages of summer maize. Journal of Henan Agricultural University, 57(6): 1008−1017 (in Chinese) [罗泉, 邢怀森, 赵曼, 张利娟, 李为争, 郭线茹. 2023. 夏玉米不同生育时期草地贪夜蛾防治指标研究. 河南农业大学学报, 57(6): 1008−1017]

Pedigo LP, Rice ME. 2014. Entomology and pest management. 6th edition. Illinois: Waveland Press, pp. 742

Ren CG, Chen FQ, Ma LK, Wang SL, Xie JY, Wang ZQ, Liu GL. 1998. Study on wheat yield loss caused by wheat aphid and its control index. Entomological Knowledge, (2): 67−68 (in Chinese) [任春光, 陈福强, 马立凯, 王顺良, 解金勇, 王志强, 刘根龙. 1998. 小麦蚜虫为害小麦产量损失及防治指标研究. 昆虫知识, (2): 67−68]

Rincon DF, Vasquez DF, Rivera-Trujillo HF, Beltrán C, Borrero-Echeverry F. 2019. Economic injury levels for the potato yellow vein disease and its vector, *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae), affecting potato crops in the Andes. Crop Protection, 119: 52−58

Wang C, Li XA, Liu EL, Gao HF, Zhang YH, Li XR, Zhu X. 2022. Research status of wheat aphid resistance to insecticides in China. Journal of Environmental Entomology, 44(3): 626−635 (in Chinese) [王超, 李新安, 刘恩良, 高海峰, 张云慧, 李祥瑞, 朱勋. 2022. 我国麦蚜抗药性及研究现状. 环境昆虫学报, 44(3): 626−635]

Wang NC, Li ZH, Zhang DQ, Liu GL. 1986. Study on the economical control index of English grain aphids. Journal of Shandong Agricultural University, 17(3): 83−87 (in Chinese) [王念慈, 李照会, 张德清, 刘桂林. 1986. 麦长管蚜防治指标的研究. 山东农业大学学报, 17(3): 83−87]

Wang ZC. 1980. Damage of aphids and yield loss at late wheat heading stage. Bulletin of Agricultural Science and Technology, (4): 32 (in Chinese) [王宗曹. 1980. 晚麦穗期蚜虫为害与产量损失. 农业科技通讯, (4): 32]

Wei QC, Wu SY, Mao YB, Wang KH. 1995. Studies on the destructive characteristics and preventive indexes of wheat aphids. Journal of Southwest Agricultural University, 17(1): 35−38 (in Chinese) [皖庆才, 吴仕源, 毛永斌, 王开洪. 1995. 小麦蚜虫为害特性及防治指标研究. 西南农业大学学报(自然科学版), 17(1): 35−38]

Wu JX. 2016. Agricultural entomology. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, pp. 19, 81−85 (in Chinese) [仵均祥. 2016. 农业昆虫学. 第3版. 北京: 中国农业出版社, pp. 19, 81−85]

Xu L, Zhao TH, Xing X, Xu GQ, Zhao JQ. 2020. Stage-specific economic thresholds for *Aphis glycines* (Matsumura) (Hemiptera: Aphididae). Journal of Plant Protection, 47(3): 517−527 (in Chinese) [徐蕾, 赵彤华, 邢星, 许国庆, 赵季秋. 2020. 大豆蚜阶段特异性经济阈值的制定. 植物保护学报, 47(3): 517−527]

Yang YZ, Lin GL. 1990. Response of wheat at different growth stages to feeding by wheat aphid and its control index. Jiangsu Agricultural Sciences, 18(2): 30−32 (in Chinese) [杨益众, 林冠伦. 1990. 小麦不同生育期对麦蚜取食的反应及麦蚜防治指标的研究. 江苏农业科学, 18(2): 30−32]

Zhao HY, Wang SZ, Dong YC. 1988. Study on a catastrophe model of wheat aphid control strategy. Plant Protection, 14(4): 2−4 (in Chinese) [赵惠燕, 汪世泽, 董应才. 1988. 麦蚜防治策略的一个突变模型研究. 植物保护, 14(4): 2−4]

Zhou NX, Wist T, Prager SM. 2024. Economic thresholds and economic injury level for pea aphid in tannin and low tannin faba bean. Crop Protection, 186: 106919

Zhu L, Hoffmann AA, Li SM, Ma CS. 2021. Extreme climate shifts pest dominance hierarchy through thermal evolution and transgenerational plasticity. Functional Ecology, 35(7): 1524−1537

(责任编辑:张俊芳)