



黄淮海麦区小麦品种苗期与成株期对蚜虫抗性综合鉴定

刘晓蓓^{1,2} 张雨濛¹ Francis Frédéric² 程雨蒙¹ 张勇^{1*} 陈巨莲^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193;

2. 比利时列日大学让布鲁农业生物技术学院, 功能与进化昆虫学系, 让布鲁 5030)

摘要: 为调查黄淮海麦区主栽小麦品种对蚜虫的抗性水平, 对黄淮海麦区 154 份主栽小麦品种进行连续 2 年的田间成株期抗蚜鉴定以及室内苗期抗蚜鉴定, 并对不同小麦品种抗蚜性进行综合评价, 通过不同抗蚜小麦品种上获草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* 年龄-龄期两性生命表的构建初步判定抗蚜品种的抗性类型。结果表明: 连续 2 年田间抗蚜性评价鉴定出抗性稳定的小麦品种有 5 份, 分别为邯麦 6172、济麦 21、舜麦 1718、众麦 2 号和丰舞 981, 仅占供试材料的 3.759%; 筛选出具有稳定感蚜特性的小麦品种有 87 份, 占供试材料的 65.414%。苗期抗蚜性评价共鉴定出抗蚜品种有 39 份, 占供试材料的 25.325%, 其中邯麦 6172 为高抗, 邯麦 13、济麦 13 和洛早 6 号等 9 份小麦品种表现为中抗; 舜麦 1718、豫麦 21 和京冬 12 号等 29 份小麦品种表现为低抗。田间成株期和室内苗期抗蚜性综合分析结果显示, 舜麦 1718 和邯麦 6172 表现为稳定的抗性水平。蚜虫在抗性小麦品种邯麦 6172 和舜麦 1718 上的内禀增长率、周限增长率、净增殖率和平均世代周期均显著低于在农大 399 上的, 表明蚜虫在邯麦 6172 和舜麦 1718 上表现出较低的存活率与繁殖力。表明黄淮海麦区小麦生产中以感蚜品种为主, 抗蚜小麦品种占比极低, 抗蚜品种邯麦 6172 对麦蚜的抗性类型为抗生性。

关键词: 黄淮海麦区; 种质资源; 小麦; 麦蚜; 抗蚜性; 年龄-龄期两性生命表

Comprehensive aphid resistance evaluation of wheat varieties at seedling and adult stages in Huang-Huai-Hai region of China

Liu Xiaobei^{1,2} Zhang Yumeng¹ Francis Frédéric² Cheng Yumeng¹ Zhang Yong^{1*} Chen Julian^{1*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Functional and Evolutionary Entomology, Gembloux Agro-BioTech, University of Liège, Gembloux 5030, Belgium)

Abstract: To assess the level of aphid resistance in wheat varieties from the Huang-Huai-Hai wheat region, 154 primary wheat varieties were evaluated over two consecutive years in both field trials at the adult stage and laboratory bioassays at the seedling stage. A comprehensive evaluation of aphid resistance were carried out, and the resistance type of aphid-resistant wheat varieties was preliminarily identified through the construction of *Sitobion miscanthi* age-stage two-sex life tables on resistant wheat varieties. The results of the two-year field evaluation identified five wheat varieties with stable aphid resistance: Hanmai 6172, Jimai 21, Shunmai 1718, Zhongmai 2 and Fengwu 981, counting for 3.759% of the total materials. No immune or highly resistant wheat varieties were identified. Additionally, 87 wheat varieties were classified as consistently aphid-susceptible, accounting for 65.414% of the tested materials. At

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1400801, 2023YFD1700304)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhangyong02@caas.cn, chenjulian@caas.cn

收稿日期: 2024-04-16

the seedling stage, 39 aphid-resistant wheat varieties were identified, accounting for 25.325% of the total materials. Among these, Hanmai 6172 exhibited high resistance, nine wheat varieties (e.g., Hanmai 13, Jimai 13, Luomai 6) showed moderate resistance, and 29 wheat varieties (e.g., Fengwu 1718, Yumai 21, Jingdong 12) showed low resistance. Comprehensive analyses of field trials and laboratory bioassays showed that Shunmai 1718 and Hanmai 6172 consistently displayed stable resistance to aphids. Aphids feeding on Hanmai 6172 and Shunmai 1718 exhibited significantly lower intrinsic and finite rates of increase, net reproductive rates and mean generation time compared to those feeding on Nongda 399. This suggests reduced survival rate and fecundity of aphids on these resistant varieties. Overall, the results demonstrate that wheat production in the Huang-Huai-Hai region remains predominantly reliant on aphid-susceptible varieties, with a minimal proportion of aphid-resistant wheat cultivars. The resistant varieties Hanmai 6172 was shown to possess antibiosis resistance to aphids.

Key words: Huang-Huai-Hai wheat region; germplasm resources; wheat; wheat aphid; resistance to aphid; age-stage two-sex life table

小麦是我国重要的口粮作物,近10年全国小麦播种面积年均在2 130万 hm^2 以上。小麦在生长过程中会受到多种病虫害的侵害,其中主要害虫为麦蚜,该害虫具有繁殖快、迁飞性和适应性强等特点,种群可在短时间内迅速扩张,被列入我国农业农村部2023年发布的《一类农作物病虫害名录》中(http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm)。麦蚜取食为害对小麦产量和品质造成严重影响,1987—2018年间麦蚜平均每年对小麦造成的实际产量损失高达75.94万t,占小麦总损失的21.89%(黄冲等,2020),严重威胁我国口粮作物安全生产。我国麦蚜种类主要有荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* (张广学,1999; Jiang et al., 2019)、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum*,其中荻草谷网蚜是我国小麦主产区的麦蚜优势种,致害性最强(陈巨莲,2014)。培育和利用抗蚜小麦品种是实现麦蚜可持续防控的重要途径,但目前可大面积推广种植的品种稀缺。建立高效、稳定的抗蚜品种筛选平台,经连续多年多地的抗性监测以获得抗蚜优质小麦资源,对麦蚜有效防控具有重要意义。

从20世纪50年代起,我国就已开展了抗蚜小麦品种的鉴定筛选工作(丁蕙淑,1958;朱弘复等,1961)。目前,鉴定筛选方法体系主要包括田间成株期抗性鉴定与室内苗期抗性鉴定2大部分(胡想顺和赵惠燕,2014;胡想顺等,2022)。田间抗性鉴定主要有模糊识别法、蚜量比值法和蚜情指数法(李素娟等,1998;胡想顺等,2014),其中以农业行业标准《小

麦抗蚜虫评价技术规范(NYT 1443.7—2007)》中使用的模糊识别法最为常用,前期研究学者利用此方法成功鉴定出中四无芒、KOK1679、JP2、临选6214、豫麦68、陕优225、KOKIPPCOS、中杨12-24、周麦16和周麦18等抗蚜小麦品种(陈巨莲等,1997;屈非等,2012;白金峰,2021)。室内抗性鉴定方法主要有蚜量比值法、生命表参数法以及蚜虫取食行为的刺吸电位图谱(electrical penetration graph, EPG)参数法,如刘新伦等(2014)利用室内蚜量比值法鉴定出2个对荻草谷网蚜高抗的小麦品种C273和兰麦(陕西柞水);徐昭焕(2011)通过此方法鉴定出中四无芒、KOK1679的抗蚜性。

生命表是一种全面直观展现种群发育、繁殖、存活的生物统计方法,目前已成功应用到小麦抗蚜性研究中(Gebretsadik et al., 2022)。李鸿雁等(2020)利用生命表参数法筛选出抗蚜小麦品种永良15。不同抗蚜水平的小麦品种是影响麦蚜种群动态的重要因素,抗蚜品种可以减缓蚜虫种群的增长(Van Emden et al., 1996),并能反映不同小麦品种抗生性的强弱(韩秀楠等,2012;赵亮等,2014)。

近年来,麦蚜在我国连年呈偏重至大发生,特别是以荻草谷网蚜为优势种的小麦穗期蚜虫在黄淮海麦区发生尤为严重(http://www.moa.gov.cn/ztl/2023cg/jszd_29356/202302/t20230209_6420225.htm)。黄淮海麦区是我国小麦4大产区的主产区之一(李明辉等,2015),小麦种植面积占全国种植面积的一半以上,小麦产量占全国总产量的60%以上(李媛等,2019),是我国口粮安全的重要保障。麦蚜的发生成为威胁黄淮海麦区小麦安全生产最主要的因素

之一,平均每年造成6.62%的小麦产量损失,近年来仍有加重态势(Zhang et al., 2022)。目前黄淮海麦区小麦种植呈现多样化,主栽小麦品种抗蚜性水平并不明确,且小麦品种种植结构不合理(李媛等, 2019)。本研究采用田间成株期抗性鉴定与室内苗期抗性鉴定2种方法对黄淮海麦区小麦品种抗蚜性进行综合评价,并通过不同抗蚜小麦品种上荻草谷网蚜年龄-龄期两性生命表的构建初步判定抗蚜品种的抗性类型,筛选优良抗蚜小麦品种,以期对麦蚜绿色防控技术集成提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试作物:2019—2020年供试小麦品种共133份,均为黄淮海地区的主栽小麦品种,均为冬小麦,其中123份小麦品种由中国农业科学院作物科学研究所李洪杰研究员惠赠,其余10份为自石家庄鹿泉区种子经销店购买的当地主栽小麦品种。2020—2021年度供试小麦品种共154份,同比增加21份小麦品种,均购自石家庄鹿泉区种子经销店。对照品种为KOK1679,保护行品种为农大399,其中对照品种为本实验室长期保存并提供,保护行品种购自石家庄鹿泉区种子经销店。供试小麦品种均种植在长9 cm、宽9 cm、7 cm的花盆中,在相对湿度(65±5)%、温度(20±1)℃、光周期L 16 h:D 8 h条件下培养12 d后于2叶期供试。

供试虫源:荻草谷网蚜采自中国农业科学院廊坊科研中试基地小麦田中,常年饲养于温室盆栽的中麦175品种上,饲养10代以上,选取2龄若蚜和无翅成蚜供试。饲养条件为相对湿度(65±5)%、温度(20±1)℃、光周期为L 16 h:D 8 h。

1.2 方法

1.2.1 田间成株期抗蚜鉴定

2019—2020年133份小麦品种和2020—2021年154份小麦品种的田间成株期抗蚜评价鉴定圃均位于河北省石家庄市鹿泉区同阁村农户田中(38°10'N, 114°20'E),鉴定圃面积为1 000 m²。依据农业行业标准《小麦抗蚜虫评价技术规范(NY/T 1443.7—2007)》,采用一米双行法进行播种,共设有3个生物学重复,在鉴定圃周边设有2行保护行,保护行小麦品种为农大399。小麦播种后统一进行田间管理,期间不喷洒农药。田间自然感蚜,在麦蚜发生高峰期(每年5月份)时采用模糊识别法进行抗性鉴定,观察供试小麦品种麦株上蚜虫发生数量,选取蚜量

最多的一株麦苗进行全株麦蚜数量统计,记录蚜量并判定蚜害级别。蚜害级别按照蚜量共分为7级:0级,全株无蚜虫;1级,全株有10头以下蚜虫;2级,全株有10~20头蚜虫,穗部无蚜虫或仅有1~5头;3级,全株有21~50头蚜虫,穗部有6~10头蚜虫;4级,全株有50头以上蚜虫,穗部有片状的蚜虫聚集,蚜虫占穗部的1/4左右;5级,穗部有1/4~3/4的小穗有蚜虫;6级,全部小穗均密布蚜虫。以麦蚜发生高峰期各供试小麦品种的蚜害级别与所有供试小麦品种蚜害级别平均值的比值(抗性评价指数) R 作为抗性定级的评价标准,抗性定级以及相应的抗性评价具体划分标准为:0级,0≤ R <0.01,为免疫;1级,0.01≤ R ≤0.30,为高抗;2级,0.30< R ≤0.60,为中抗;3级,0.61< R ≤0.90,为低抗;4级,0.91< R ≤1.20,为低感;5级,1.21< R ≤1.50,为中感;6级, R >1.50,为高感。

1.2.2 室内苗期抗蚜鉴定

2020年采用蚜量比值法对154份小麦品种进行室内苗期抗蚜鉴定(徐昭焕, 2011;刘新伦等, 2014)。供试小麦品种采用盆栽方式种植,每盆种植10株苗,每盆1个品种,每36个品种放置在1个长118 cm、宽58 cm、高50 cm的尼龙网养虫笼中,共设有3个生物学重复。在小麦2叶期时,每株麦苗上接2头2龄若蚜,接虫10 d后调查统计各供试小麦品种的蚜虫数量,参考Painter(1958)分级标准,以各供试小麦品种蚜量最高值与所有供试小麦品种蚜量平均值的比值作为抗性定级的依据。抗蚜级别的划分及抗性评价指标同田间成株期抗性评价标准。

1.2.3 构建荻草谷网蚜的年龄-龄期两性生命表

将抗蚜品种邯麦6172、舜麦1718和高感品种农大399的种子用30%次氯酸钠溶液消毒后洗净,分别放入直径为15 cm的玻璃培养皿中进行催芽处理,并在培养皿上方盖一层纱布保湿,待麦苗萌芽后将纱布取出。在此期间每天对麦苗进行换水和冲根处理。麦苗长出后8 d时,将单株麦苗取出,冲根处理后放入装有1.5 mL自来水的2 mL剪盖离心管中,管口放入棉花进行保湿处理,将装有麦苗的离心管放入直径为9 cm的培养皿中。每个培养皿中接入1头荻草谷网蚜无翅雌成蚜,24 h后将成蚜和其余初产若蚜移除,每皿中只留1头初产若蚜。每天定时观察并记录该若蚜的存活及蜕皮情况,自若蚜发育至成蚜起,每日记录其产蚜数量并及时将其移除培养皿,直至试虫死亡。试验期间,每5 d更换1次麦苗。每个小麦品种上均观察60头试虫。本试验均在相对湿度(65±5)%、温度(20±1)℃、光

周期 L 16 h:D 8 h 的条件下进行。

荻草谷网蚜生长发育参数基于年龄-龄期两性生命表原理,使用 TWO-SEX MS Chart 软件对荻草谷网蚜在 3 个小麦品种上的种群参数进行统计分析 (Huang & Chi, 2012),种群参数包括平均世代周期 T 、内禀增长率 r_m 、净增值率 R_0 、周限增长率 λ 。 $T =$

$$\frac{\ln(R_0)}{r}, \quad l_x = \sum_{j=1}^{\beta} s_{xj}, \quad m_x = \frac{\sum_{j=1}^{\beta} s_{xj} f_{xj}}{\sum_{j=1}^{\beta} s_{xj}}, \quad R_0 = \sum_{i=0}^{\infty} l_x m_x =$$

$$\sum_{x=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\beta} s_{xj} f_{xj}, \quad \sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1, \quad \lambda = e^r, \text{ 式中, } s_{xj} \text{ 代表特}$$

定年龄-龄期存活率,表示初产若蚜存活到 x 年龄 j 龄期的可能性; f_{xj} 代表特定年龄-龄期繁殖力,表示昆虫 x 年龄 j 龄期雌蚜产蚜量; l_x 代表特定年龄存活率, m_x 代表特定年龄繁殖力, β 为龄期数。

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 和 Twosex-MSChart 软件进行统计分析,以 Bootstrap 为基础的 t 测验法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 田间成株期抗蚜性评价

2019—2020 年于麦蚜发生高峰期采用模糊识别法对 133 份供试小麦品种进行田间成株期抗蚜鉴定,结果显示,共有 26 份小麦品种在成株期表现出抗性,占全部供试材料的 19.549%,其中有 6 份小麦

品种表现为中抗,分别为邯麦 6172、京冬 12 号、济麦 13、河农 326、JP1、小白冬麦;济麦 21、邯麦 13、亿麦 6 号、众麦 2 号、丰舞 981 等 20 份小麦品种表现为低抗,未鉴定到免疫和高抗的小麦品种。有 107 份小麦品种在成株期表现为感蚜,占全部供试材料的 80.451%,其中低感小麦品种 20 份,中感小麦品种 25 份,高感小麦品种 62 份(表 1)。

2020—2021 年度于麦蚜发生高峰期对 154 份供试小麦品种进行抗蚜鉴定,结果显示,有 32 份小麦品种在成株期表现出抗性,占全部供试小麦品种的 20.779%,其中有 7 份小麦品种表现为中抗,分别为衡 5229、轮选 199、众麦 2 号、平麦 998、周麦 11、泰农 18、中四无芒;烟农 15 号、济麦 21、豫麦 70 号、洛麦 26 号、新麦 11 号、西农 979、邯麦 6172 等 25 份小麦品种表现为低抗,未鉴定到免疫和高抗的小麦品种。有 122 份小麦品种在成株期表现为感蚜,占全部供试小麦品种的 79.221%,其中低感小麦品种 29 份,中感小麦品种 32 份,高感小麦品种 61 份(表 1)。

综合连续 2 年田间抗蚜性评价鉴定结果,92 份小麦品种抗感性表现稳定。其中共鉴定出抗性稳定的小麦品种有 5 份,分别为邯麦 6172、济麦 21、舜麦 1718、众麦 2 号和丰舞 981,占全部供试材料的 3.759%;筛选出如济麦 22、鲁麦 21 等具有稳定感蚜特性的小麦品种 87 份,占供试材料的 65.414%,未鉴定出免疫或高抗小麦品种。

表 1 不同小麦品种对麦蚜的抗性评价

Table 1 Evaluation of resistance of different wheat varieties to wheat aphids

小麦品种 Wheat variety	田间成株期抗性鉴定 Aphid resistance at adult stage in field				苗期抗性鉴定 Aphid resistance at seeding stage (indoor)	
	2019—2020		2020—2021			
	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level
石 4185 Shi 4185	1.019	LS	1.929	HS	2.296	HS
烟农 15 号 Yannong 15	2.039	HS	0.882	LR	2.874	HS
鲁麦 21 号 Lumai 21	1.583	HS	0.975	LS	1.685	HS
藁城 9415 Gaocheng 9415	1.989	HS	1.201	MS	1.255	MS
济麦 21 Jimai 21	0.742	LR	0.724	LR	1.850	HS
豫麦 18 号 Yumai 18	1.860	HS	1.307	MS	0.892	LR
邢麦 4 号 Xingmai 4	1.583	HS	1.371	MS	0.842	LR
豫麦 70 号 Yumai 70	1.168	LS	0.809	LR	1.288	MS
冀麦 26 Jimai 26	2.177	HS	1.509	HS	2.213	HS
泛麦 8 号 Fanmai 8	1.138	LS	1.019	LS	1.833	HS
农大 3432 Nongda 3432	1.286	MS	2.156	HS	2.841	HS
轮选 987 Lunxuan 987	1.059	LS	4.041	HS	1.222	MS

续表 1 Continued

小麦品种 Wheat variety	田间成株期抗性鉴定 Aphid resistance at adult stage in field				苗期抗性鉴定 Aphid resistance at seeding stage (indoor)	
	2019—2020		2020—2021			
	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance
	index	level	index	level	index	level
淮麦 20 号 Huanmai 20	1.336	MS	2.577	HS	1.255	MS
开麦 18 号 Kaimai 18	1.168	LS	1.634	HS	2.048	HS
鲁麦 15 Lumai 15	1.979	HS	1.456	MS	2.428	HS
石麦 12 Shimai 12	1.247	MS	2.322	HS	1.850	HS
邯麦 13 Hanmai 13	0.792	LR	1.165	LS	0.545	MR
京冬 22 Jingdong 22	1.712	HS	1.238	MS	0.941	LS
开麦 21 Kaimai 21	1.732	HS	1.598	HS	0.826	LR
洛麦 26 号 Luomai 26	2.890	HS	0.841	LR	1.288	MS
良星 66 Liangxing 66	2.375	HS	1.355	MS	1.404	MS
衡 5229 Heng 5229	0.970	LR	0.506	MR	0.677	LR
新冬 20 号 Xindong 20	1.880	HS	1.569	HS	1.767	HS
石麦 14 号 Shimai 14	2.276	HS	1.387	MS	1.272	MS
开麦 20 号 Kaimai 20	1.118	LS	1.938	HS	0.958	LS
新麦 11 号 Xinmai 11	1.920	HS	0.748	LR	1.668	HS
新麦 9 Xinmai 9	0.940	LS	1.764	HS	2.064	HS
西农 979 Xinong 979	1.930	HS	0.898	LR	1.404	MS
亿麦 6 号 Yimai 6	0.732	LR	3.952	HS	1.321	MS
豫麦 2 号 Yumai 2	1.039	LS	1.545	HS	1.569	HS
冀麦 38 Jimai 38	1.979	HS	2.949	HS	1.206	MS
舜麦 1718 Shunmai 1718	0.614	LR	0.728	LR	0.628	LR
周麦 22 号 Zhoumai 22	1.267	MS	0.995	LS	2.015	HS
漯麦 4 号 Luomai 4	1.593	HS	1.347	MS	1.288	MS
石新 733 Shixin 733	1.930	HS	0.781	LR	1.107	LS
烟农 836 Yannong 836	1.880	HS	1.238	MS	0.842	LR
轮选 199 Lunxuan 199	1.484	MS	0.566	MR	1.024	LS
众麦 2 号 Zhongmai 2	0.841	LR	0.368	MR	1.041	LS
豫麦 21 Yumai 21	1.237	MS	1.205	MS	0.628	LR
济麦 22 Jimai 22	3.068	HS	2.140	HS	0.908	LS
邯麦 6172 Hanmai 6172	0.445	MR	0.623	LR	0.281	HR
鲁麦 23 号 Lumai 23	2.771	HS	1.068	LS	0.710	LR
烟农 19 号 Yannong 19	1.930	HS	0.704	LR	0.892	LS
京冬 12 号 Jingdong 12	0.435	MR	0.829	LR	0.793	LR
石家庄 8 号 Shijiazhuang 8	0.930	LS	0.882	LR	0.710	LR
京冬 17 号 Jingdong 17	1.682	HS	1.598	HS	2.031	HS
淄麦 12 号 Zimai 12	1.445	MS	0.934	LS	1.453	MS
山农 20 Shannong 20	1.633	HS	0.712	LR	0.677	LR
河农 326 Henong 326	0.594	MR	0.926	LS	0.859	LR
济南 17 号 Jinan 17	0.614	LR	1.036	LS	1.140	MS
众麦 998 Zhongmai 998	1.019	LS	1.751	HS	0.842	LR
石麦 15 Shimai 15	1.841	HS	0.744	LR	1.420	MS
济麦 13 Jimai 13	0.544	MR	1.574	HS	0.512	MR
金丰 3 号 Jinfeng 3	1.385	MS	1.294	MS	1.817	HS
丰舞 981 Fengwu 981	0.811	LR	0.708	LR	1.453	HS
豫麦 49 Yumai 49	1.207	MS	1.412	MS	1.701	HS
中麦 175 Zhongmai 175	2.969	HS	1.068	LS	1.239	MS

续表1 Continued

小麦品种 Wheat variety	田间成株期抗性鉴定 Aphid resistance at adult stage in field				苗期抗性鉴定 Aphid resistance at seeding stage (indoor)	
	2019—2020		2020—2021			
	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance
	index	level	index	level	index	level
洛旱6号 Luohan 6	2.276	HS	0.732	LR	0.562	MR
周麦32 Zhoumai 32	0.693	LR	1.703	HS	1.718	HS
徐州25 Xuzhou 25	1.732	HS	4.065	HS	1.173	MS
兰考198 Lankao 198	2.524	HS	1.096	LS	0.842	LR
冀麦30 Jimai 30	1.188	LS	1.638	HS	0.760	LR
尧麦16 Yaomai 16	0.871	LR	1.076	LS	0.512	MR
冀5265 Ji 5265	0.881	LR	2.718	HS	0.413	MR
鲁原502 Luyuan 502	1.217	MS	0.809	LR	1.189	MS
平麦998 Pingmai 998	1.385	MS	0.582	MR	1.140	MS
郑麦9962 Zhengmai 9962	2.078	HS	1.286	MS	1.057	LS
藁2018 Gao 2018	2.276	HS	0.635	LR	1.156	MS
河农822 Henong 822	2.474	HS	1.193	LS	1.288	MS
皖麦52 Wanmai 52	0.940	LS	1.307	MS	0.446	MR
周麦11 Zhoumai 11	2.622	HS	0.538	MR	1.354	MS
洛麦22 Luomai 22	1.682	HS	0.930	LS	2.560	HS
泰农18 Tainong 18	1.385	MS	0.591	MR	1.718	HS
郑麦9023 Zhengmai 9023	1.385	MS	0.942	LS	1.619	HS
泛麦5号 Fanmai 5	1.415	MS	1.861	HS	0.809	LR
衡观35 Hengguan 35	1.880	HS	1.602	HS	0.677	LR
邯麦11号 Hanmai 11	1.781	HS	1.743	MS	1.041	LS
周麦18号 Zhoumai 18	1.583	HS	0.619	LR	0.661	LR
新麦19 Xinmai 19	0.940	LS	1.315	MS	1.255	MS
京冬8号 Jingdong 8	1.039	LS	1.654	HS	1.272	MS
济麦20号 Jimai 20	3.958	HS	1.525	HS	2.279	HS
藁城8901 Gaocheng 8901	1.583	HS	1.120	LS	0.991	LS
鲁麦14号 Lumai 14	0.792	LR	1.699	HS	1.437	MS
烟辐188 Yanfu 188	2.177	HS	1.209	MS	1.206	MS
师栾02-1 Shiluan 02-1	1.930	HS	1.598	HS	0.578	MR
科农199 Kenong 199	2.385	HS	1.594	HS	1.222	MS
鲁麦7号 Lumai 7	0.742	LR	1.294	MS	0.644	LR
高优503 Gaoyou 503	1.286	MS	3.847	HS	0.462	MR
济麦19号 Jimai 19	1.395	MS	2.759	HS	1.652	HS
京411 Jing 411	1.504	HS	1.003	LS	1.338	MS
豫麦10号 Yumai 10	1.435	MS	0.862	LR	1.652	HS
豫麦54号 Yumai 54	0.861	LR	1.861	HS	0.826	LR
衡4399 Heng 4399	1.979	HS	1.177	LS	1.123	LS
百农160 Bainong 160	0.831	LR	1.165	LS	0.892	LR
烟农999 Yannong 999	1.286	MS	3.135	HS	0.793	LR
郑麦7698 Zhengmai 7698	2.177	HS	3.766	HS	1.321	MS
豫麦52 Yumai 52	1.979	HS	3.264	HS	1.767	HS
轮选103 Lunxuan 103	1.257	MS	1.800	HS	1.090	LS
石新828 Shixin 828	2.296	HS	2.164	HS	0.479	MR
花培3号 Huapei 3	0.940	LS	2.953	HS	0.859	LR
花培8号 Huapei 8	1.009	LS	1.072	LS	0.760	LR
皖麦19 Wanmai 19	1.603	HS	1.015	LS	0.991	LS

续表 1 Continued

小麦品种 Wheat variety	田间成株期抗性鉴定 Aphid resistance at adult stage in field				苗期抗性鉴定 Aphid resistance at seeding stage (indoor)	
	2019—2020		2020—2021			
	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance	抗性评价指数 Evaluation	抗性水平 Resistance
	index	level	index	level	index	level
晋麦 47 Jinmai 47	2.553	HS	1.092	LS	1.239	MS
豫麦 47 Yumai 47	1.069	LS	2.031	HS	0.974	LS
烟农 21 Yannong 21	1.188	LS	1.209	MS	0.644	LR
郑麦 98 Tanmai 98	1.425	MS	1.044	LS	1.090	LS
漯麦 8 号 Luomai 8	0.643	LR	3.968	HS	1.090	LS
石优 20 Shiyou 20	1.672	HS	1.598	HS	1.338	MS
豫麦 7 号 Yumai 7	0.742	LR	1.800	HS	1.107	LS
郑麦 366 Zhengmai 366	1.148	LS	2.168	HS	0.644	LR
花培 5 号 Huapei 5	0.841	LR	1.072	LS	1.569	HS
金禾 9123 Jinhe 9123	2.335	HS	1.011	LS	1.949	HS
小偃 22 Xiaoyan 22	1.534	HS	1.201	MS	1.123	LS
周麦 27 号 Zhoumai 27	1.742	HS	1.594	HS	1.007	LS
济南 16 Jinan 16	1.573	HS	1.598	HS	0.644	LR
泰山 21 Taishan 21	1.385	MS	1.626	HS	1.734	HS
洛旱 11 Luohan 11	1.425	MS	1.412	MS	1.041	LS
偃展 1 号 Yanzhan 1	1.138	LS	1.456	MS	3.155	HS
周麦 16 号 Zhoumai 16	0.841	LR	1.307	MS	1.239	MS
良星 99 Liangxing 99	2.969	HS	1.428	MS	1.107	LS
河农 6049 Henong 6049	3.859	HS	1.497	MS	1.024	LS
泰山 23 号 Taishan 23	2.177	HS	3.519	HS	0.958	LS
京花 9 号 Jinghua 9	1.326	MS	1.456	MS	1.585	HS
山农优麦 2 号 Shannongyoumai 2	2.968	HS	3.628	HS	1.305	MS
邯麦 16 号 Hanmai 16	4.948	HS	1.222	MS	0.743	LR
轮选 266 Luanxuan 266	2.157	HS	1.315	MS	1.437	MS
金禾 12399 Jinghe 12399	0.861	LR	1.072	LS	0.941	LS
农大 399 Nongda 399	1.514	MS	2.265	HS	1.586	HS
JP1	0.445	MR	1.448	MS	2.444	HS
北京 837 Beijing 837	1.406	MS	2.116	HS	1.074	LS
铭贤 169 Mingxian 169	1.564	HS	0.696	LR	2.428	HS
小白冬麦 Xiaobaidongmai	0.396	MR	1.885	HS	2.395	HS
中四无芒 Zhongsiwumang	1.514	HS	0.372	MR	4.344	HS
KOK	—	—	1.416	MS	2.230	HS
淮麦 33 Huaimai 33	—	—	2.160	HS	2.362	HS
淮麦 40 Huaimai 40	—	—	4.057	HS	1.586	HS
淮麦 45 Huaimai 45	—	—	2.107	HS	1.998	HS
淮麦 47 Huaimai 47	—	—	1.476	MS	1.222	MS
淮麦 920 Huaimai 920	—	—	2.318	HS	2.296	HS
淮麦 1033 Huaimai 1033	—	—	1.569	HS	2.378	HS
西农 20 Xinnong 20	—	—	0.971	LS	1.899	HS
西农 235 Xinong 235	—	—	1.537	HS	2.626	HS
西农 822 Xinong 822	—	—	1.743	HS	1.652	HS
烟农 1212 Yannong 1212	—	—	0.817	LR	1.437	MS
存麦 11 Cunmai 11	—	—	0.858	LR	2.593	HS
存麦 12 Cunmai 12	—	—	1.812	HS	2.510	HS
存麦 20 Cunmai 20	—	—	1.315	MS	2.081	HS

续表 1 Continued

小麦品种 Wheat variety	田间成株期抗性鉴定 Aphid resistance at adult stage in field				苗期抗性鉴定 Aphid resistance at seeding stage (indoor)	
	2019—2020		2020—2021			
	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level	抗性评价指数 Evaluation index	抗性水平 Resistance level
百农 207 Bainong 207	—	—	1.634	HS	1.420	MS
百农 4199 Bainong 4199	—	—	0.692	LR	1.453	MS
轮选 99 Lunxuan 99	—	—	0.696	LR	1.321	MS
徐麦 818 Xumai 818	—	—	1.505	HS	0.628	LR
济麦 17 Jiami 17	—	—	0.955	LS	1.453	HS
6218	—	—	1.076	LS	2.444	HS
小偃 6 号 Xiaoyan 6	—	—	1.056	LS	2.015	HS

HR: 高抗; MR: 中抗; LR: 低抗; LS: 低感; MS: 中感; HS: 高感。—: 未鉴定数据。HR: Highly resistant; MR: moderately resistant; LR: lowly resistant; LS: lowly susceptible; MS: moderately susceptible; HS: highly susceptible. —: Unidentified data.

2.2 小麦品种室内苗期抗蚜性评价

154 份供试小麦品种的室内苗期抗蚜鉴定结果表明,共鉴定到抗蚜小麦品种 39 份,占全部小麦品种的 25.325%,其中邯麦 6172 表现为高抗;邯麦 13、济麦 13、洛旱 6 号、尧麦 16、冀 5265、皖麦 52、师栾 02-1、高优 503、石新 828 共 9 个小麦品种表现为中抗;豫麦 18 号、邢麦 4 号、开麦 21、舜麦 1718 等 29 份小麦品种表现为低抗。共有 115 份小麦品种苗期表现为感蚜,占全部小麦品种的 74.675%,其中包括 25 份低感小麦品种,38 份中感小麦品种,52 份高感小麦品种(表 1)。

2.3 荻草谷网蚜在不同抗蚜小麦品种上的生命表参数

本研究构建了不同抗蚜小麦上荻草谷网蚜的年龄-龄期两性生命表,结果表明不同抗蚜小麦对蚜虫的种群参数具有显著影响(表 2)。与高感品种农大 399 相比,荻草谷网蚜取食抗蚜品种邯麦 6172 和舜麦 1718 时,其内禀增长率、周限增长率、净增值率和平均世代周期均显著降低($P<0.05$),而邯麦 6172 上蚜虫净增值率和平均世代周期显著低于舜麦 1718 ($P<0.05$),邯麦 6172 净增殖率为农大 399 的 49.916%,表明邯麦 6172 能显著抑制荻草谷网蚜繁殖能力。

表 2 荻草谷网蚜在抗蚜、感蚜小麦品种上的种群参数

Table 2 Population parameters of *Sitobion miscanthi* on aphid-resistant and aphid-susceptible wheat cultivars

小麦品种 Wheat variety	内禀增长率 Intrinsic rate of increase	周限增长率 Finite rate of increase	净增殖率 Net reproductive rate	平均世代周期 Mean generation time
邯麦 6172 Hanmai 6172	0.254±0.007 b	1.289±0.009 b	20.159±1.216 c	11.850±0.251 c
舜麦 1718 Shunmai 1718	0.257±0.006 b	1.293±0.008 b	24.983±1.615 b	12.524±0.171 b
农大 399 Nongda 399	0.280±0.005 a	1.323±0.006 a	40.386±2.114 a	13.224±0.148 a

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示不同处理间经以 Bootstrap 为基础的 t 测验法检验差异显著 ($P<0.05$)。Data are mean ± SE. Different letters indicate significant difference among different treatments by Paired Bootstrap t test ($P<0.05$).

2.4 不同小麦对荻草谷网蚜特定年龄-龄期存活率影响

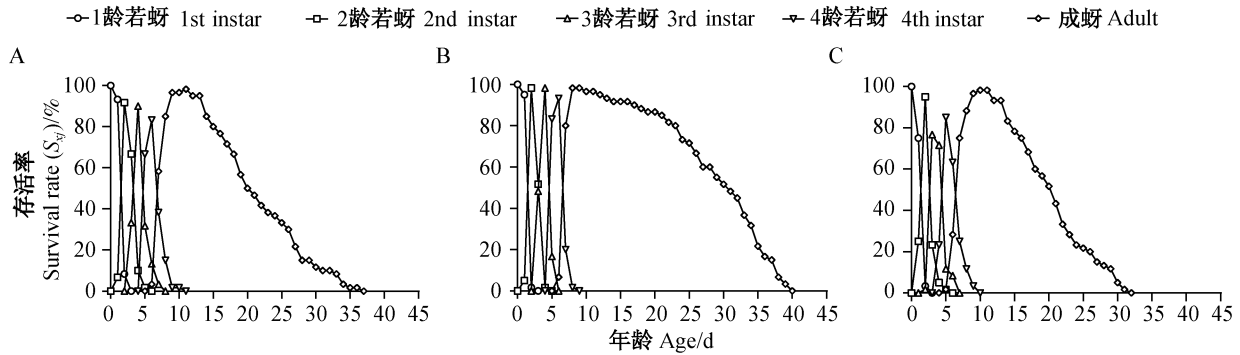
不同抗蚜小麦品种对荻草谷网蚜特定年龄-龄期存活率影响较大。与高感品种农大 399 相比,抗蚜品种邯麦 6172 和舜麦 1718 显著降低蚜虫各个龄期存活率,3、4 龄若蚜在邯麦 6172 上的存活率分别为 76.67% 和 85.00%;而在农大 399 上分别为 98.00% 和 93.33%。荻草谷网蚜取食农大 399 时全部发育至成蚜需 8 d,到 40 d 全部死亡;而取食舜麦 1718 时全部发育至成蚜需 9 d,到 36 d 全部死亡;而在邯麦 6172 上

取食发育长成蚜需 10 d,到 32 d 全部死亡(图 1)。

2.5 不同小麦对荻草谷网蚜种群存活率和繁殖力的影响

不同抗蚜小麦品种对荻草谷网蚜种群存活率和繁殖力也有显著影响。与农大 399 相比,邯麦 6172 和舜麦 1718 上种群存活率在第 13~32 天快速下降。邯麦 6172、舜麦 1718、农大 399 上蚜虫特定年龄繁殖力峰值出现时间分别为第 11 天、第 10 天和第 10 天;繁殖力峰值分别为 2.25、3.20 和 3.33 头;产蚜历期分别为 24、27 和 30 d。表明荻草谷网蚜在邯麦 6172 上

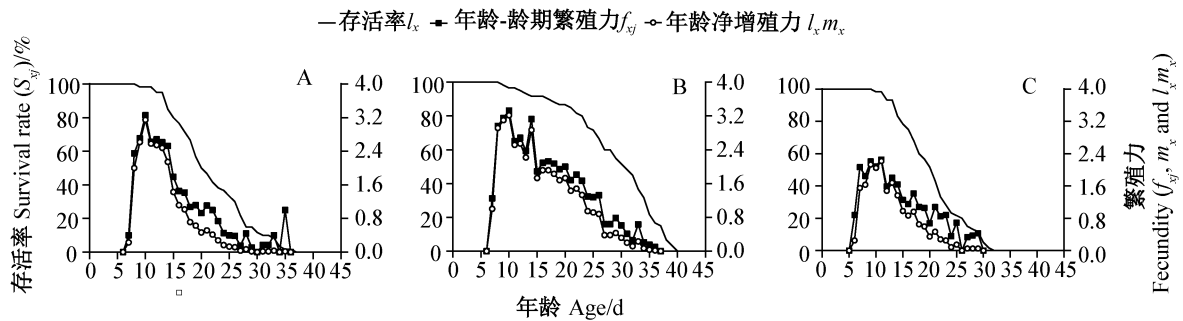
的繁殖力峰值低、产蚜历期短、繁殖力低(图2)。说明邯麦 6172 对荻草谷网蚜具有很强的抗生性。



A: 舜麦 1718; B: 农大 399; C: 邯麦 6172。A: Shunmai 1718; B: Nongda 399; C: Hanmai 6172.

图1 荻草谷网蚜在不同抗性水平小麦上的特定年龄-龄期存活率

Fig. 1 Age-stage survival rate (s_{xy}) of *Sitobion miscanthi* on wheat varieties with different resistance levels



A: 舜麦 1718; B: 农大 399; C: 邯麦 6172。A: Shunmai 1718; B: Nongda 399; C: Hanmai 6172.

图2 荻草谷网蚜在不同抗性水平小麦上的特定年龄存活率、特定年龄-龄期繁殖力、特定年龄净增值力

Fig. 2 Age-specific survival rate, female age-specific fecundity, age-specific maternity of *Sitobion miscanthi* on wheat varieties with different resistance levels

3 讨论

在连续2年的田间成株期抗蚜鉴定中,筛选出5个对麦蚜具有抗性的小麦品种,未鉴定出免疫和高抗小麦品种,这与曹文文(2021)和李靖文(2023)未鉴定出免疫和高抗小麦品种的研究结果一致。邯麦 6172 在田间成株期抗蚜鉴定中表现出中抗麦蚜水平,与许兰杰(2013)、曹文文(2021)分别于北京市和西安市对邯麦 6172 的抗性鉴定结果一致,表明邯麦 6172 具有稳定抗蚜水平。我国种植面积最大的小麦品种济麦 22 被鉴定为高感小麦品种,黄淮海麦区推广种植面积较大的鲁麦 21 也表现出高感蚜虫,且目前黄淮海麦区主栽小麦品种多为感蚜品种,具有稳定抗蚜性且可大面积推广种植的抗蚜小麦品种稀缺,这可能成为黄淮海麦区麦蚜连年大发生的主要原因之一(路子云等,2014)。在2年田间成株期抗蚜评价中有41个小麦品种出现抗性分离,表明不同小麦品种的抗蚜性水平在不同年份具有一定差异,可能受到田间麦蚜分布不均、气象条件

变化等因素的影响(李贤庆,2006),所以,抗蚜品种的鉴定筛选工作需要长时间、多地点进行。

生命表中昆虫的内禀增长率即在最理想条件下种群的最大增长率。Cai et al.(2009)研究表明麦蚜的内禀增长率可反映麦蚜对寄主植物的适应性及寄主植物对麦蚜的抗生性强弱,是小麦抗蚜鉴定的重要指标。本研究发现荻草谷网蚜在抗蚜小麦品种邯麦 6172 和舜麦 1718 上的内禀增长率显著低于在高感品种农大 399 上的,表明邯麦 6172 和舜麦 1718 具有抗生性。且蚜虫在邯麦 6172 上的净增殖率显著低于在舜麦 1718 和农大 399 上的。并结合邯麦 6172 能降低荻草谷网蚜的存活率、繁殖力等结果,表明所收集小麦品种中邯麦 6172 对荻草谷网蚜的抗生性最强。

近年来,我国小麦抗蚜性研究取得了一些进展,筛选出一批抗蚜小麦种质资源,但鉴定的抗蚜小麦品种多为中抗、低抗小麦品种,高抗小麦品种占比小。目前小麦抗性育种主要以高产、优质、广适为目标(李媛等,2019),抗蚜遗传育种研究相对薄弱(刘

晓蓓等, 2023), 致使大面积推广种植的小麦品种稀缺。针对目前存在的问题, 首先, 应大量收集小麦品种资源与抗性鉴定, 以期筛选出具有稳定抗性的抗蚜小麦种质资源, 为后续抗蚜性研究提供可靠材料支撑; 其次, 利用分子生物学与遗传操作等技术研究抗蚜种质的抗性机制、解析小麦抗蚜调控网络, 发现主要抗虫基因; 同时, 借助小麦基因组信息 (Rudi et al., 2018) 与全基因组关联分析技术, 并结合传统育种技术, 实现抗蚜基因的快速分离, 进行小麦抗蚜品种改良, 从而提高主栽小麦品种的抗蚜水平。为加快农业现代化, 打好种业翻身仗, 推进优质小麦抗蚜改良与育种进程。本研究仅初步证明了抗蚜小麦品种邯麦 6172 的抗性类型, 后续仍需通过转录组和代谢组联合分析、抗蚜基因挖掘等技术进一步研究邯麦 6172 的抗蚜机理。

参 考 文 献 (References)

- Bai JF. 2021. Resistance identification of wheat germplasm resources to *Aphis avenae*. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [白金峰. 2021. 小麦种质资源的麦长管蚜抗性鉴定. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Cai QN, Ma XM, Zhao X, Cao YZ, Yang XQ. 2009. 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 WW. 2021. Identification of aphid resistance of 30 wheat varieties in different ages and its correlation with agronomic traits. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [曹文文. 2021. 30个不同年代小麦品种抗蚜性鉴定及其与农艺性状相关性分析. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Chen JL. 2014. Wheat aphids and its control. Beijing: Jindun Press, pp. 11–12 (in Chinese) [陈巨莲. 2014. 小麦蚜虫及其防治. 北京: 金盾出版社, pp. 11–12]
- Chen JL, Sun JR, Ding HJ, Ni HX, Li XF. 1997. The resistance patterns and mechanism of biochemical resistance in various wheat cultivars (lines). *Acta Entomologica Sinica*, 40(–1): 190–195 (in Chinese) [陈巨莲, 孙京瑞, 丁红建, 倪汉祥, 李晓飞. 1997. 主要抗蚜小麦品种(系)的抗性类型及其生化抗性机制. 昆虫学报, 40(–1): 190–195]
- Ding HS. 1958. Investigation on wheat aphids in Guizhou. *Entomological Knowledge*, 3(2): 70–74 (in Chinese) [丁蕙淑. 1958. 贵州小麦蚜虫调查. 昆虫知识, 3(2): 70–74]
- Gebretsadik KG, Zhang Y, Chen JL. 2022. Screening and evaluation for antibiosis resistance of the spring wheat accessions to the grain aphid, *Sitobion miscanthi* (Takahashi) (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Integrative Agriculture*, 21(8): 2329–2344
- Han XN, Wang XQ, Zhao LP, Liu CZ. 2012. Effects of host plants on the growth, development and fecundity of *Acyrtosiphon pisum*. *Plant Protection*, 38(1): 40–43 (in Chinese) [韩秀楠, 王小强, 赵林平, 刘长仲. 2012. 不同寄主植物对豌豆蚜生长发育和繁殖的影响. 植物保护, 38(1): 40–43]
- Hu XS, Li GK, Zhang ZF, Zhao HY, Liu TX. 2022. Tolerance of wheat to the grain aphid *Sitobion avenae* and evaluation method: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(4): 983–993 (in Chinese) [胡想顺, 李广阔, 张战凤, 赵惠燕, 刘同先. 2022. 小麦对麦长管蚜的耐受性及评估方法. 植物保护学报, 49(4): 983–993]
- Hu XS, Liu XF, Zhao HY, Wu YF, Liu TX. 2014. Identification of resistant wheat germplasms to *Sitobion avenae* and *Barley yellow dwarf virus* in the field. *Journal of Plant Protection*, 41(6): 723–729 (in Chinese) [胡想顺, 刘小凤, 赵惠燕, 吴云锋, 刘同先. 2014. 兼抗麦长管蚜和大麦黄矮病毒的小麦种质田间鉴定筛选. 植物保护学报, 41(6): 723–729]
- Hu XS, Zhao HY. 2014. The reviews of wheat resistant mechanism to cereal aphid in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1459–1469 (in Chinese) [胡想顺, 赵惠燕. 2014. 我国小麦抗蚜机理研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1459–1469]
- Huang C, Jiang YY, Li CG. 2020. Occurrence, yield loss and dynamics of wheat diseases and insect pests in China from 1987 to 2018. *Plant Protection*, 46(6): 186–193 (in Chinese) [黄冲, 姜玉英, 李春广. 2020. 1987年—2018年我国小麦主要病虫害发生危害及演变分析. 植物保护, 46(6): 186–193]
- Huang YB, Chi H. 2012. Assessing the application of the jackknife and bootstrap techniques to the estimation of the variability of the net reproductive rate and gross reproductive rate: a case study in *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae). *Journal of Agriculture and Forestry*, 61(1): 37–45
- International Wheat Genome Sequencing Consortium (IWGSC), Rudi A, Kelly E, Catherine F, Beat K, Jane R, Nils S, Curtis JP, Nils S, Frédéri C, et al. 2018. Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*, 361(6403): eaar7191
- Jiang X, Zhang Q, Qin YG, Yin H, Zhang SY, Li Q, Zhang Y, Fan J, Chen JL. 2019. A chromosome-level draft genome of the grain aphid *Sitobion miscanthi*. *GigaScience*, 8(8): giz101
- Li HY, Li Y, Song WH, Liu CZ. 2020. Effects of different wheat cultivars on the growth and development of *Sitobion miscanthi*. *China Plant Protection*, 40(10): 16–22 (in Chinese) [李鸿雁, 李叶, 宋维虎, 刘长仲. 2020. 不同小麦品种对麦长管蚜生长发育的影响. 中国植保导刊, 40(10): 16–22]
- Li JW. 2023. Identification of resistant/tolerant wheat germplasms to *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) at wheat adult and genome-wide association study. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [李靖文. 2023. 小麦成株期抗/耐麦长管蚜种质资源鉴定及全基因组关联分析. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Li MH, Zhou YX, Zhou L, Yang J, Wang YH. 2015. Comparative advantage changes of regional wheat production in China and analysis of influencing factors. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 36(5): 7–15 (in Chinese) [李明辉, 周玉玺, 周林, 杨洁, 王盈桦. 2015. 中国小麦生产区域优势

- 度演变及驱动因素分析. 中国农业资源与区划, 36(5): 7-15]
- Li SJ, Zhang ZY, Wang XY, Ding HJ, Ni HX, Sun JR, Cheng DF, Chen JL. 1998. Identification of aphid resistance in wheat varieties (lines) using fuzzy recognition technology. Plant Protection, 24(5): 15-16 (in Chinese) [李素娟, 张志勇, 王兴运, 丁红建, 倪汉祥, 孙京瑞, 程登发, 陈巨莲. 1998. 用模糊识别技术鉴定小麦品种(系)抗蚜性研究. 植物保护, 24(5): 15-16]
- Li XQ. 2006. Resistance mechanism of wheat varieties to wheat aphid *Macrosiphum miscanthi*. Master thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University (in Chinese) [李贤庆. 2006. 不同小麦品种(系)对麦长管蚜 *Macrosiphum miscanthi* 抗性机制的研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学]
- Li Y, Wang XD, Yan Y, Han XR. 2019. Study on the development of wheat varieties in Huang-Huai-Hai region from the perspective of supply-side reform. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 40(11): 224-229 (in Chinese) [李媛, 王秀东, 闫琰, 韩昕儒. 2019. 供给侧改革视角下黄淮海地区小麦品种发展研究. 中国农业资源与区划, 40(11): 224-229]
- Liu XB, Zhang Y, Chen JL. 2023. Advances in the resistance mechanisms and genetics of wheat crops to aphids. Plant Protection, 49(5): 181-189 (in Chinese) [刘晓蓓, 张勇, 陈巨莲. 2023. 麦类作物对蚜虫抗性机制及抗性遗传研究进展. 植物保护, 49(5): 181-189]
- 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. Journal of Plant Protection, 41(2): 216-224 (in Chinese) [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]
- Lu ZY, Gao ZL, Dang ZH, Li YF, Li JC, Liu WX, Ran HF, Qu ZG. 2014. Identify and evaluation of resistance of wheat varieties to aphids. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 18(3): 24-26 (in Chinese) [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]
- Painter RH. 1958. Resistance of plants to insects. Annual Review of Entomology, 3: 267-290
- Qu F, Dang JY, Cheng MF, Lian J, Xie XS. 2012. Resistance identification of new variety wheat to *Macrosiphum avenae*. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 40(4): 386-388, 392 (in Chinese) [屈非, 党建友, 程麦风, 连晋, 谢咸升. 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]
- Van Emden HF, Sponagl B, Wagner E, Baker T, Ganguly S, Douloumpaka S. 1996. Hopkins host selection principle, another nail in its coffin. Physiological Entomology, 21(4): 325-328
- Xu LJ. 2013. Studies on biochemical mechanism of resistance to aphid and plant-mediated RNAi to control aphids. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [许兰杰. 2013. 小麦抗蚜机制研究及利用植物介导的RNAi创制小麦抗蚜新种质. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Xu ZH. 2011. Population differentiation of *Sitobion avenae* in China. PhD thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [徐昭焕. 2011. 中国麦长管蚜的种群分化. 博士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Zhang GX. 1999. Fauna of agricultural and forestry aphids of north-west, China. Beijing: China Environmental Science Press, pp. 429-433 (in Chinese) [张广学. 1999. 西北农林蚜虫志. 北京: 中国环境科学出版社, pp. 429-433]
- Zhang QQ, Men XY, Hui C, Ge F, Ouyang F. 2022. Wheat yield losses from pests and pathogens in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 326: 107821
- Zhao L, Zhu YL, Shi GY, Wang SS. 2014. Effects of eight wheat varieties on the experimental population parameters of wheat aphid (*Sitobion avenae* Fab.). Journal of Gansu Agricultural University, 49(5): 123-126 (in Chinese) [赵亮, 朱亚灵, 师桂英, 王森山. 2014. 8个小麦品种对麦长管蚜试验种群生命参数的影响. 甘肃农业大学学报, 49(5): 123-126]
- Zhu HF, Han YF, Wang LY. 1961. The population of wheat insects under different cultural conditions of wheat. Acta Entomologica Sinica, 4(S1): 411-424 (in Chinese) [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, 4(增刊1): 411-424]

(责任编辑:王璇)