

## 6种稻谷物理性状与营养成分对米象生长发育的影响研究

贾小钰<sup>1</sup>, 崔康于<sup>1</sup>, 胡玉蝶<sup>1</sup>, 卢少华<sup>1</sup>  
(河南工业大学粮食和物资储备学院<sup>1</sup>, 郑州 450001)

**摘要:**为研究稻谷品种理化特性对米象生长发育的影响,以6种稻谷(TN1、Mudgo、XD15、ASD7、日本晴、秀水11)和米象为研究对象,比较其物理特性与营养成分及其对米象生物学特性与稻谷损伤率的影响。结果表明:米象在不同品种稻谷上的生物学特性和为害程度存在显著性差异( $P < 0.05$ )。6种稻谷对米象的抗性强弱顺序为:Mudgo > 秀水11  $\approx$  ASD7  $\approx$  XD15 > 日本晴 > TN1。其中,TN1较高的总淀粉和干物质含量促进了米象的生长发育,表现为最高的稻谷损伤率(27.37%)、米象产卵率(49.75%)和羽化率(89.17%),最短的平均发育历期(26.1 d)及最大成虫体重(1.94 mg)。相反,Mudgo较重的千粒重且较低的总淀粉和粗蛋白含量延长了米象的发育历期并降低了成虫体重,表现为最低的稻谷损伤率(8.57%)、米象产卵率(27.92%)和羽化率(42.50%),最长的平均发育历期(29.7 d)及最轻的成虫体重(1.51 mg)。

**关键词:**稻谷;米象;生长发育;损伤率;抗性;营养成分

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001303

中图分类号:TS201 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0013-07

网络首发时间:2026-01-05 11:35:49

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20260105.1118.002>

### Physicochemical properties and nutritional composition of six rice varieties effects on the growth and development of *Sitophilus oryzae*

Jia Xiaoyu<sup>1</sup>, Cui Kangyu<sup>1</sup>, Hu Yudie<sup>1</sup>, Lu Shaohua<sup>1</sup>

(School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001)

**Abstract:** To investigate the effects of the physical and chemical properties of rice varieties on the growth and development of *Sitophilus oryzae*, six rice varieties (TN1, Mudgo, XD15, ASD7, Nipponbare, XiuShui11) and *S. oryzae* were used as experimental materials. Their physical properties, nutritional components, and the effects of these properties on the biological characteristics of *S. oryzae* and rice damage rates were compared. The results showed that significant differences ( $P < 0.05$ ) were observed in the biological characteristics of *S. oryzae* and the severity of rice damage on different rice varieties. The order of resistance of the six rice varieties to *S. oryzae* was as follows: Mudgo > XiuShui11  $\approx$  ASD7  $\approx$  XD15 > Nipponbare > TN1. Among them, the growth and development of *S. oryzae* promoted by the higher contents of total starch and dry matter in TN1, resulting in the highest grain damage rate (27.37%), oviposition rate (49.75%), and emergence rate (89.17%) of *S. oryzae*, the shortest average developmental period (26.1 d), and the maximum adult weight (1.94 mg). In contrast, the developmental period of *S. oryzae* was prolonged and the adult weight was reduced by higher thousand-grain weight and lower contents of total starch and crude protein in Mudgo, resulting in the lowest damage rate (8.57%), oviposition rate (27.92%), and emergence rate (42.50%) of *S. oryzae*, the longest average developmental period (29.7 d), and the lightest a-

基金项目:河南省科技攻关计划项目(252102521055),郑州市研发专项资金补助项目(22ZZRDZX22)

收稿日期:2025-09-12

第一作者:贾小钰,女,2002年出生,硕士,储藏物害虫综合防治,2638376727@qq.com

通信作者:卢少华,男,1988年出生,讲师,储藏物害虫综合防治,shaohualu08@163.com

dult weight (1.51 mg). The impact of differences in the physicochemical properties of six rice varieties on the growth and development of *S. oryzae* was clarified in this study, providing a theoretical basis for the breeding of insect-resistant rice varieties and control in grain storage pests.

**Key words:** rice; *Sitophilus oryzae*; growth and development; insect resistance; damage rate; nutritional composition

稻谷作为三大主粮之一,其储藏安全是保障我国粮食安全的关键环节。然而,稻谷在储藏过程中易受温度、水分、氧气比例、杂质含量、微生物及害虫等十余种因素的影响。当粮堆温度超过 20 ℃、水分高于 14.5% 时,霉菌和害虫迅速繁殖,极易导致粮堆发热、霉变和黄变,引发品质劣变,甚至完全丧失食用价值<sup>[1]</sup>。在各类威胁稻谷安全储藏的生物因素中,储粮害虫造成的损失尤为严重<sup>[2]</sup>。据联合国粮农组织(FAO)统计,粮食产后总损失约占其总产量的 10%,其中约一半是由储粮害虫为害导致的重量与质量损失<sup>[3]</sup>。有研究发现,储藏 6 个月后,稻谷的虫蚀率为 8.24% ~ 16.68%<sup>[4]</sup>,会导致千粒重下降、脂肪酸值升高,严重时甚至使稻谷失去商品价值<sup>[5]</sup>。

米象(*Sitophilus oryzae*)隶属于鞘翅目象甲科,是一种世界性分布的重要蛀食性储粮害虫<sup>[6]</sup>。其成虫以喙在粮粒表面凿刻卵窝,产卵后分泌黏液封口;幼虫则潜伏于谷粒内部蛀食为害。成虫兼具假死性与趋光、趋温、趋湿特性,且繁殖能力极强<sup>[7]</sup>,严重威胁粮食的安全储藏。目前,储粮害虫防治主要依赖磷化氢熏蒸、储粮防护剂处理和低氧气调等技术,但长期不合理使用化学药剂可能会导致储粮害虫抗药性问题日益严重<sup>[8]</sup>。例如,米象、谷蠹(*Rhizopertha dominica*)和赤拟谷盗(*Tribolium castaneum*)等储粮害虫的抗药性发生率逐年显著上升<sup>[9]</sup>。其中,米象抗药性个体在种群中的出现频率已达 12% ~ 48%<sup>[10]</sup>,而其卵和蛹对磷化氢和硫酰氟等药剂表现出较强的耐受性<sup>[11]</sup>,并且对低氧环境也产生了较高的适应能力<sup>[12]</sup>。因此,探寻环境相容性佳、高效安全的害虫防治手段,已成为保障粮食安全储藏的重要研究方向。而植物抗性作为害虫综合管理(IPM)体系的关键组成部分,既能在不增加农户种粮成本的前提下,将害虫种群密度控制在经济损害阈值以内,又可与其他防治措施兼容<sup>[13]</sup>。

在长期进化过程中,谷物已逐渐形成一套以化学抗性为主,物理抗性为辅的天然抗虫防御系统,二者均通过谷物自身特性差异调控对害虫的抗性水平<sup>[14]</sup>。其中物理抗性主要与籽粒形态和重量相关,已有研究发现,体长较短,宽度较宽,体型较圆

的稻谷籽粒对玉米象的抗性更弱<sup>[15]</sup>。26 个早稻品种中 17 个高抗品系的谷粒重量指标也显著高于 3 个易感品系<sup>[16]</sup>。化学抗性则由籽粒含水量、营养成分及次生代谢物主导,这些因素直接决定害虫的取食偏好、消化效率及繁殖力<sup>[17]</sup>。具体表现为具有干物质、脂肪、纤维和灰分含量较高的稻谷品种对赤拟谷盗的抗性更强<sup>[18]</sup>,淀粉含量高的稻谷品种抗性较弱,而粗蛋白含量对抗虫性的影响存在物种特异性:玉米中蛋白质含量越高对大谷蠹(*Prostephanus truncatus*)的抗性越弱<sup>[19]</sup>;小麦中粗蛋白含量越高对玉米象的抗性越强<sup>[20]</sup>,但对锯谷盗(*Oryzaephilus surinamensis* Linne)的抗性无显著影响<sup>[21]</sup>,小麦的蛋白质含量这种不一致的结果可能是不同研究之间采用的实验品种不同导致的。

不同品种的稻谷在物理特性和化学成分等方面存在差异,这些差异可能通过改变储粮害虫的取食环境与营养供给,进而影响害虫的生长发育、繁殖能力。因此,研究稻谷理化性状对储粮害虫的抗性作用,对选育抗虫品种具有重要意义。目前,TN1、秀水 11 及日本晴是稻飞虱的常见感虫品种,Mudgo 和 ASD7 为稻飞虱抗性品种<sup>[22-24]</sup>,但这些品种对储粮害虫的抗性尚未明确,且不同稻谷品种理化特性对米象生长发育及储藏损耗的系统性关联研究仍较为匮乏。本研究为明确稻谷品种理化特性对米象生长发育及稻谷储藏损耗的影响,以 6 种稻谷(TN1、Mudgo、XD15、ASD7、日本晴、秀水 11)和米象为研究对象,系统比较其物理特性(粒长、粒宽、长宽比和千粒重)与营养成分(粗蛋白、粗脂肪、总淀粉等)的差异,分析这些因素对米象产卵率、羽化率、平均发育历期、成虫体重及稻谷损伤率的影响,为筛选抗虫性稻谷品种、制定精准化储粮害虫防治策略提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 供试昆虫

米象采自河南省郑州市,在河南工业大学储藏物害虫防治实验室培养多年。在温度 27 ~ 29 ℃、相

对湿度 65% ~ 75%、无光照的培养箱中培养。随机选用新羽化的米象成虫用于相关实验。

### 1.1.2 供试稻谷品种

稻谷品种包括 4 种籼稻(TN1、Mudgo、XD15 和 ASD7)和 2 种粳稻(日本晴和秀水 11)。实验所用稻谷均过筛筛去杂质后,用清水清洗干净,去除虫蚀粒、破损粒等不完善粒,在 50 °C 烘箱中烘干 6 h,以灭杀寄生虫及虫卵。将处理后的稻谷调节水质量分数为 13.5%,在 15 °C 条件下储藏备用。

### 1.2 实验设备与试剂

LHS-80 型电热恒温培养箱、JGMJ-8098 型砻谷机、BLH-560KL 型旋风磨粉机、塑料养虫盒、培养皿、毛笔、绢纱、分析天平、品红溶液等。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 6种稻谷的物理特性测定

使用砻谷机将稻谷脱壳后得到糙米样品,采用行业标准和国家标准方法分别测定糙米的粒长、粒宽、长宽比(GB/T 6116—2017)和千粒重(GB/T 5519—2018)。

#### 1.3.2 6种稻谷的营养成分测定

将糙米样品经旋风磨粉机粉碎后过 40 目筛,进行常规营养成分含量测定。采用国家标准方法分别测定粗蛋白含量(GB/T 6432—2018 中的凯氏定氮法)、粗脂肪含量(GB/T 6433—2006 中的索氏提取法)、灰分含量(GB/T 6438—2007 中的称重法)、总膳食纤维含量(GB 5009.88—2023)、总淀粉含量(GB 20194—2018)和干物质含量(GB/T 6435—2014 中的直接干燥法)。

#### 1.3.3 米象在 6 种稻谷上的产卵率测定

随机选取 50 对新羽化的米象成虫(雌雄比为 1:1)放入装有 10 g 洁净稻谷的养虫盒中(直径 6 cm,高 3 cm),放置在培养箱中,72 h 后使用 40 目筛子移除成虫,稻谷样品继续在原条件下培养,每组实验做 3 个重复。用酸性品红溶液对稻谷染色后,抽样检测并统计米象分别在 6 种稻谷上的产卵量<sup>[25]</sup>。

#### 1.3.4 米象在 6 种稻谷上的生物学指标测定

##### 1.3.4.1 羽化率测定

每天记录新羽化出的成虫数量并转移,直至无新羽化的成虫为止,计算羽化率,羽化率( $Y_1$ )计算见式(1)<sup>[26]</sup>。

$$Y_1 = \frac{n_1}{n_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $Y_1$  为羽化率/%; $n_1$  为羽化出的成虫数量/头; $n_2$  为卵期初始数量/头。

##### 1.3.4.2 羽化成虫体重测定

分别收集 6 种稻谷上新羽化的米象成虫 20 头进行称重,计算单头体重<sup>[29]</sup>。

##### 1.3.4.3 平均发育历期测定

每天观察记录新羽化的成虫,直至全部成虫羽化结束,计算平均发育历期。平均发育历期( $Y_2$ )计算见式(2)<sup>[14]</sup>。

$$Y_2 = \frac{\sum ij}{\sum j} \quad (2)$$

式中: $Y_2$  为平均发育历期/d; $i$  为个体发育周期/d; $j$  为同周期内的成虫数量/头。

##### 1.3.5 米象对 6 种稻谷的损伤率测定

每天记录每组稻谷中受米象侵害的数量,计算稻谷损伤率。稻谷损伤率( $Y_3$ )计算见式(3)<sup>[29]</sup>。

$$Y_3 = \frac{n_3}{n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $Y_3$  为稻谷损失率/%; $n_3$  为稻谷受损粒数/粒; $n$  为稻谷总粒数/粒。

### 1.4 数据处理

使用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析 6 种稻谷间的物理特性(粒长、粒宽、长宽比和千粒重)、营养成分(粗蛋白、粗脂肪、干物质、灰分、总膳食纤维和总淀粉)、稻谷损伤率及米象在 6 种稻谷上的产卵率、羽化率和平均发育历期,当方差差异显著时,用 Duncan's 新复极差法对平均值进行多重比较,差异性显著水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 6 种稻谷的物理特性分析

测定稻谷的物理特性发现,6 种稻谷的粒长、粒宽、长宽比和千粒重存在显著差异(表 1)。同时结合图 1 发现,XD15、Mudgo、日本晴的谷粒较为细长,ASD7、TN1、秀水 11 的谷粒则更趋于圆形;Mudgo 和秀水 11 的千粒重较高,其次为 ASD7 和 XD15,日本晴的千粒重最轻,TN1 次轻。

表 1 6 种稻谷的物理特性分析

稻谷品种	粒宽/cm	粒长/cm	长宽比	千粒重/g
TN1	2.53 ± 0.01c	4.87 ± 0.02e	1.92 ± 0.03c	15.87 ± 0.50c
Mudgo	2.73 ± 0.02b	6.36 ± 0.03b	2.33 ± 0.01b	24.23 ± 0.63a
日本晴	2.37 ± 0.01d	5.41 ± 0.01c	2.28 ± 0.01b	14.44 ± 0.57c
XD15	2.24 ± 0.05e	7.11 ± 0.07a	3.17 ± 0.05a	20.24 ± 0.25b
秀水 11	2.93 ± 0.01a	5.21 ± 0.02d	1.78 ± 0.03d	23.22 ± 0.43a
ASD7	2.44 ± 0.02d	4.77 ± 0.02e	1.96 ± 0.01c	21.27 ± 0.44b

注:表中同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。余同。

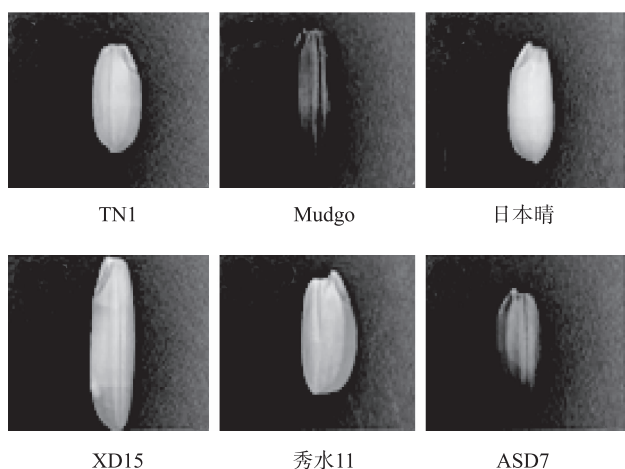


图1 6种品种稻谷的形态特征

## 2.2 6种稻谷的营养成分分析

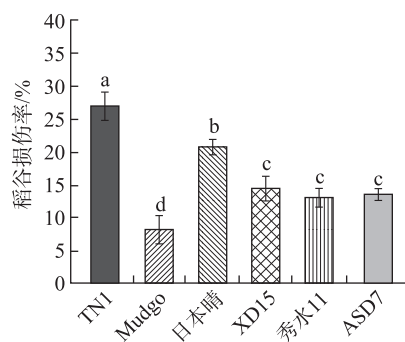
测定和分析6种稻谷品种(TN1、Mudgo、日本晴、XD15、秀水11和ASD7)的粗蛋白、干物质、粗脂肪等营养成分含量发现,6种稻谷在这些营养成分上存在显著差异(表2)。日本晴品种的粗蛋白含量最高,Mudgo的粗蛋白含量最低;TN1的干物质含量最高,ASD7的干物质含量最低;TN1的粗脂肪含量最高,秀水11的粗脂肪含量最低;ASD7的灰分含量最高,TN1的灰分含量最低;ASD7的总膳食纤维含量最高;日本晴的总膳食纤维含量最低;TN1的总淀粉含量最高,Mudgo的总淀粉含量最低( $P < 0.05$ )。

## 2.3 米象对6种稻谷的损伤率测定

6种稻谷受米象危害的损伤率存在显著差异(图2)。其中,TN1的稻谷损伤率最高可达27.37%,日本晴次之,Mudgo的稻谷损伤率最低为8.57%,其他品种的稻谷损伤率介于日本晴与Mudgo之间无显著差异( $P < 0.05$ )。TN1的高稻谷损伤率表明TN1与其他稻谷品种相比,其更易被米象取食,抗虫性较差;相反,Mudgo的低损伤率说明其可能具备更强的物理和化学防御能力,能有效抑制米象的取食,因而抗虫性较强<sup>[4]</sup>。

表2 6种稻谷品种的营养成分分析

稻谷品种	$w(\text{粗蛋白})/\%$	$w(\text{干物质})/\%$	$w(\text{粗脂肪})/\%$	$w(\text{灰分})/\%$	$w(\text{总膳食纤维})/\%$	$w(\text{总淀粉})/\%$
TN1	$9.21 \pm 0.05c$	$92.20 \pm 1.10a$	$2.74 \pm 0.01a$	$1.30 \pm 0.02c$	$2.96 \pm 0.02b$	$66.71 \pm 1.32a$
Mudgo	$8.03 \pm 0.08d$	$88.39 \pm 1.15b$	$2.49 \pm 0.05b$	$1.36 \pm 0.01bc$	$2.97 \pm 0.05b$	$51.37 \pm 2.40c$
日本晴	$13.24 \pm 0.35a$	$91.01 \pm 0.87ab$	$2.32 \pm 0.01c$	$1.31 \pm 0.02c$	$2.47 \pm 0.05c$	$64.16 \pm 1.06ab$
XD15	$10.08 \pm 0.28b$	$90.56 \pm 0.59ab$	$2.28 \pm 0.04c$	$1.41 \pm 0.02b$	$2.87 \pm 0.05c$	$61.26 \pm 0.78ab$
秀水11	$8.92 \pm 0.02c$	$91.01 \pm 0.05ab$	$1.97 \pm 0.05d$	$1.37 \pm 0.02bc$	$2.77 \pm 0.04c$	$59.10 \pm 3.10ab$
ASD7	$13.15 \pm 0.08a$	$89.06 \pm 0.67b$	$2.56 \pm 0.07b$	$1.52 \pm 0.05a$	$3.14 \pm 0.03a$	$56.43 \pm 0.04bc$



注:图中柱上不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。余同。

图2 稻谷损伤率

## 2.4 米象在6种稻谷上的产卵测定

米象在6种稻谷上的产卵率存在显著差异(图3)。其中,米象在TN1上的产卵率最高(49.75%);而在Mudgo上的产卵率最低(27.92%),在TN1上的产卵率显著高于XD15、秀水11和ASD7( $P < 0.05$ )。米象在Mudgo上的低产卵率与Mudgo的低稻谷损伤率表明,稻谷品种抗性对米象的产卵会产生抑制作用,抗性品种是降低害虫种群数量和品种受害程度的重要途径<sup>[29]</sup>。

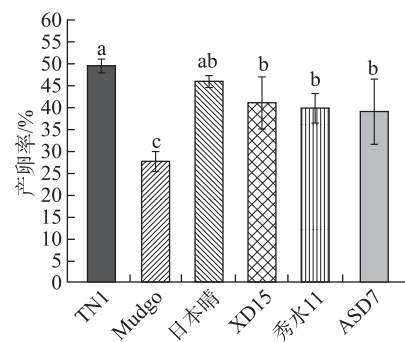


图3 米象在6种稻谷上的产卵率

## 2.5 米象在6种稻谷上的生长发育测定

米象在6种稻谷上的平均发育历期、羽化率和成虫体重存在显著差异(表3)。其中,米象在TN1

上的平均发育历期最短,在 Mudgo 上的最长,米象在 6 种稻谷上的平均发育历期与米象产卵率之间呈正相关。米象在 TN1 上的羽化率最高,在 Mudgo 上的羽化率最低 ( $P < 0.05$ )。米象在 TN1 上新羽化的成虫体重最高, Mudgo 上新羽化的成虫体重最低 ( $P < 0.05$ )。米象在秀水 11、ASD7 和 XD15 上新羽化的成虫体重显著高于在 Mudgo 上新羽化的成虫体重 ( $P < 0.05$ )。米象在 6 种稻谷上的产卵量、平均发育历期、羽化率和成虫体重及稻谷损伤量的差异,表明 6 种稻谷对米象的吸引力不同,即米象对 6 种稻谷的抗性不同,其中 Mudgo 对米象的抗性最强, TN1 对米象的抗性最弱,这与谷物抗性品种能够降低米象的产卵率和羽化率及延长米象的发育周期的结论相契合<sup>[30]</sup>。

表 3 米象在 6 种稻谷上的平均发育历期、羽化率、成虫体重

稻谷品种	平均发育历期/d	羽化率/%	成虫体重/mg
TN1	26.1 ± 0.5d	89.17 ± 1.20a	1.94 ± 0.02a
Mudgo	29.7 ± 0.6a	42.50 ± 2.08d	1.51 ± 0.05d
日本晴	27.2 ± 0.6c	56.00 ± 1.04c	1.77 ± 0.01b
XD15	28.2 ± 0.3b	74.17 ± 5.36b	1.65 ± 0.03c
秀水 11	28.3 ± 0.4b	57.83 ± 1.48c	1.72 ± 0.02bc
ASD7	28.4 ± 0.4b	63.83 ± 3.18c	1.73 ± 0.04bc

## 2.6 6 种稻谷理化特性对米象为害及生长发育的影响

Mudgo 谷粒形态相对细长,同时表现出较低的损伤率和米象产卵率;与之相反, TN1 谷粒偏圆,却具有最高的损伤率与米象产卵率(表 1、图 2、图 3),这与“籽粒表型性状影响仓储害虫抗性”观点一致<sup>[31]</sup>。米象成虫的喙部结构可能更有利于在特定粒形的稻谷上凿刻卵窝,这一发现为谷物与害虫协同进化提供了新视角。

然而,与高粱对玉米象的抗性机制不同,稻谷对米象的物理抗性似乎更依赖粒重,而非单纯由长宽比决定。例如, XD15 虽具有最长的粒长和最大的长宽比(表 1),但其损伤率仅处于中等水平(图 2),说明仅凭细长粒形并不足以形成有效抗性,这可能与该品种粒重低于 Mudgo 有关。Mudgo 同时具备最重的千粒重和最低的稻谷损伤率,可能是因为较大的粒重伴随更坚硬的籽粒结构或较厚的种皮,从而增加米象成虫凿刻卵窝的难度,并限制幼虫在籽粒内部的活动空间<sup>[32]</sup>,因此,粒重很可能是比形状更为关键的物理抗性指标。

营养物质的可获得性会直接影响米象的生存适宜性<sup>[33]</sup>。已有研究显示,米象在总淀粉含量较高的

谷物品种上发育历期更短且繁殖力更强<sup>[34]</sup>。在本研究中, TN1 的总淀粉含量最高,同时表现出最高的产卵率、羽化率和最短的发育历期,进一步印证了淀粉含量在米象生长发育与繁殖中的关键作用。然而,稻谷中蛋白质的含量与抗虫性的关系呈现复杂模式。尽管 ASD7 和日本晴中粗蛋白含量最高(表 2),但其米象危害指标显著低于 TN1(图 2)。这与小麦抗玉米象研究中一致,说明单个营养成分含量不足以完全解释稻谷对米象的抗性差异<sup>[35]</sup>。而灰分和膳食纤维含量与米象危害指标不存在显著关联 ( $P > 0.05$ ),表明二者并非本批品种抗性差异的主要因素,但在极端含量下仍可能通过影响昆虫消化而发挥潜在作用。Mudgo 的总淀粉含量最低且粗蛋白含量较低,这种“低营养”特性与其最长的米象发育历期和最低的成虫体重密切相关,表明营养成分的差异可能是该品种抗虫性强的另一重要原因<sup>[36]</sup>。这也与“寄主植物通过资源限制策略降低害虫适合度”的观点一致<sup>[37]</sup>。

## 3 结论

本研究通过比较 6 种稻谷的物理特性与营养成分及其对米象生物学特性及稻谷损伤率的影响,发现米象在 6 种稻谷上的产卵量、羽化率、新羽化的成虫体重和稻谷损伤率均存在显著性差异。谷物的物理性状和营养成分共同影响了稻谷对米象的抗性水平。具体而言,细长的形状和较高的粒重增加了米象成虫取食和产卵的难度,而较低的淀粉和蛋白质含量则通过营养限制延长米象发育周期、降低其繁殖能力,从而赋予品种更强的抗虫性;例如 TN1 为高感品种, Mudgo 为高抗品种; TN1 较高的淀粉与干物质含量显著提高了米象的产卵效率与成虫发育速率,导致损耗加剧;而 Mudgo 较重的千粒重等可能通过物理屏障阻碍米象侵染从而延长发育历期,并与营养抗性形成协同防御。研究结果明确了 6 种稻谷理化特性差异对米象生长发育的影响。未来可以进一步探究稻谷其他化学成分及其他特性对米象生长发育的影响分子机制,为储藏物害虫防治提供更全面、更有效的理论支持。

## 参考文献

- [1] 崔皓, 薛毅, 王小庆, 等. 稻谷品质变化及其影响因素研究探索[J]. 粮油仓储科技通讯, 2021, 37(6): 37-40  
Cui H, Xue Y, Wang X, et al. Exploration of changes in rice quality and its influencing factors[J]. LIANGYOU CANG-

- CHU KEIJT TONGXUN, 2021, 37(6):37-40
- [2] 王若兰, 宋永令, 付鹏程. 中国稻谷储藏技术及装备的现状与发展趋势[J]. 中国稻米, 2021(4):66-70  
Wang R, Song Y, Fu P. Present situation and development trend of rice storage technology and equipment in china[J]. China Rice, 2021(4):66-70
- [3] Teferra T F. The cost of postharvest losses in Ethiopia: economic and food security implications[J]. Heliyon, 2022, 8(3): e09077
- [4] Bhargude A R, Patil S K, Bhed B V. Susceptibility of selected cereal crops in storage to *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) [J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(1):570-575
- [5] 刘付英, 陈雪峰, 郭颖, 等. 云南不同储粮生态区稻谷质量控制研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(6):45-49  
Liu F, Chen X, Guo Y, et al. Study on the quality control of rice in different grain storage ecological zones of Yunnan[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(6):45-49
- [6] Nguyen T T, Collins P J, Duong T M, et al. Genetic conservation of phosphine resistance in the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.) [J]. Journal of Heredity, 2016, 107(3):228-237
- [7] Majd - Marani S, Naseri B, Hassanpour M, et al. Life history and life table parameters of the rice weevil, *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae) fed on 10 rice cultivars and lines in Iran [J]. Journal of Stored Products Research, 2023, 102:102118
- [8] Constantin M, Jagadeesan R, Chandra K, et al. Synergism between phosphine (PH<sub>3</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>): implications for managing PH<sub>3</sub> resistance in rusty grain beetle (Laemophloeidae: Coleoptera) [J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 113(4):1999-2006
- [9] Nayak M K, Daglish G J, Phillips T W, et al. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: a global perspective [J]. Annual Review of Entomology, 2020, 65:333-350
- [10] Machuca - Mesa L M, Turchen L M, Guedes R N C. Phosphine resistance among stored product insect pests: a global meta - analysis - based perspective [J]. Journal of Pest Science, 2024, 97(3):1485-1498
- [11] Kim B, Song J E, Park J S, et al. Insecticidal effects of fumigants (ef, MB, and PH<sub>3</sub>) towards Phosphine - susceptible and - resistant *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Insects, 2019, 10(10):327
- [12] 黄依林, 王殿轩, 朱毓斌, 等. 温度对高氮气调中米象各虫态致死时间和发育的影响 [J]. 中国粮油学报, 2020(6):98-104  
Huang Y, Wang D, Zhu Y, et al. Comparison on lethal time and development duration of different stages of *Sitophilus oryzae* (L.) influenced by temperature in controlled nitrogen atmosphere [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020(6):98-104
- [13] Golizadeh A, Abedi Z, Borzoui E, et al. Susceptibility of five sugar beet cultivars to the black bean aphid, *Aphis fabae scopoli* (Hemiptera: Aphididae) [J]. Neotropical Entomology, 2016, 45(4):427-432
- [14] 王子鹤, 张若俞, 赵国民, 等. 不同小麦品种对玉米象抗性的比较研究 [J]. 中国粮油学报, 2025, 40(3):1-8  
Wang Z, Zhang R, Zhao G, et al. Comparison about resistance of different wheat varieties to *Sitophilus zeamais* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(3):1-8
- [15] Antunes C, Mendes R, Lima A, et al. Resistance of rice varieties to the stored - product insect, *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2016, 109(1):445-453
- [16] Silva Botelho F B, Mendes M P, De Carvalho Botelho R T, et al. *Sitophilus* weevil reaction in upland rice elite lines [J]. American Journal of Plant Sciences, 2015, 6(12):1916-1919
- [17] 王召, 朱环, 黄近, 等. 草地贪夜蛾对水稻的取食选择性、适合度及其与叶片生化物质含量的关系 [J]. 植物保护, 2023, 49(4):21-28  
Wang Z, Zhu H, Huang J, et al. Feeding preference and fitness of *Spodoptera frugiperda* on rice and their relationships with biochemical substance contents of leaves [J]. Plant Protection, 2023, 49(4):21-28
- [18] 赵珍, 姜雪, 张洪清, 等. 稻谷品种和加工程度对赤拟谷盗的抗性 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4):8-14  
Zhao Z, Jiang X, Zhang H, et al. resistibility of different processing rice varieties to *Tribolium castaneum* Herbst [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(4):8-14
- [19] Ngom D, Fauconnier M L, Malumba P, et al. Varietal susceptibility of maize to larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera; Bostrichidae), based on grain physicochemical parameters [J]. PLoS One, 2020, 15(4): e0232164 [PubMed]
- [20] 王殿轩, 袁玉珂, 张志雄. 六个品种小麦对玉米象的抗性比较研究 [J]. 粮油食品科技, 2015, 23(1):89-93  
Wang D, Yuan Y, Zhang Z. Comparative study on resistance of six varieties of wheat to maize weevil [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015(1):89-93

- [21] Gharsan F N. Estimating the susceptibility of four wheat cultivars to the saw-toothed grain beetle *Oryzaephilus surinamensis* (L.) (Coleoptera: Silvanidae)[J]. International Journal of Food Science, 2022, 2022(1):8570732
- [22] 李波, 何佳春, 万品俊, 等. 我国褐飞虱若干地理种群致害性的研究[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(1):9-16  
Li B, He J, Wan P, et al. Studies on the virulence of different geographic populations of *Nilaparvata lugens* (Stal) collected from China[J]. Journal of Environmental Entomology, 2019, 41(1):9-16
- [23] 陈建明, 俞晓平, 程家安, 等. 不同水稻品种对褐飞虱为害的耐性和补偿作用评价[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(3):265-269  
Chen J, Yu X, Cheng J, et al. Evaluation for tolerance and compensation of rice varieties to infesting of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(3):265-269
- [24] Shi S, Zha W, Yu X, et al. Integrated transcriptomics and metabolomics analysis provide insight into the resistance response of rice against brown planthopper[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1213257
- [25] Holloway G J. The potency and effect of phytotoxins within yellow split-pea (*Pisum sativum*) and adzuki bean (*Vigna angularis*) on survival and reproductive potential of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Bulletin of Entomological Research, 1986, 76(2):287-295
- [26] Liu Y. Effects of long-term low oxygen storage treatment on survival of rice weevil (*Sitophilus oryzae*) and confused flour beetle (*Tribolium confusum*)[J]. Journal of Economic Entomology, 2022, 115(5):1712-1718
- [27] Okpile C, Zakka U, Nwosu L C. Susceptibility of ten rice brands to weevil, *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae), and their influence on the insect and infestation rate[J]. Bulletin of the National Research Centre, 2021, 45(1):2
- [28] Chaudhary R S, Pratap Dubey T, Regmi R. Varietal resistance of wheat to the rice weevil (*Sitophilous oryzae*) under stored condition[J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2021, 11(9):307-313
- [29] Saeedi Z, Ziaee M, Esfandiari M, et al. The biological characteristics and life table parameters of *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) reared on different maize varieties[J]. Journal of Insect Science, 2025, 25(3):8
- [30] Padmasri A, Srinivas C, Vijaya Lakshmi K, et al. Management of rice weevil (*Sitophilus oryzae* L.) in maize by botanical seed treatments[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6(12):3543-3555
- [31] Mwenda E T, Ringo J H, Mbega E R. The implication of kernel phenology in conveying resistance to storage weevil and varietal development in sorghum[J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 83:176-184
- [32] Gupta P. Susceptibility level of some nigerian hybrid and local rice varieties to *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae)[J]. International Journal of Entomology Research, 2016, 1:10-13
- [33] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Edible insects in sustainable food systems[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018, 85-87
- [34] Arya P S, Srivastava C, Rajna S, et al. Physicochemical grain properties of wheat cultivars and insect biology drive resistance to *Sitophilus oryzae* L. [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):35308
- [35] 韩宪琪, 李雪娇, 冯淑娟, 等. 小麦籽粒营养物质和次生物质含量与其对玉米象抗性的关系[J]. 植物保护学报, 2017, 44(5):721-728  
Han X, Li X, Feng S, et al. Relationships between the contents of nutrients and secondary metabolites in wheat seeds and their resistance to *Sitophilus zeamais*(Coleoptera: Curculionidae)[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(5):721-728
- [36] Gowda G B, Patil N B, Adak T, et al. Physico-chemical characteristics of rice (*Oryza Sativa* L.) grain imparting resistance and their association with development of rice weevil, *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Environmental Sustainability, 2019, 2(4):369-379
- [37] Li Z, Tan J, Yao N, et al. From trade-off to synergy: how nutrient status modulates plant resistance to herbivorous insects? [J]. Advanced Biotechnology, 2024, 2(4):37.