

温度对磷化氢熏蒸杀虫效果的影响*

贾小钰** 杨丽** 牛子文 卢少华***

(河南工业大学粮食和物资储备学院, 郑州 450001)

摘要 【目的】磷化氢是防治储粮害虫的主要熏蒸药剂, 其杀虫效果受多种环境因子的影响, 其中温度对磷化氢熏蒸杀虫效果有较大的影响。本研究旨在明确温度对磷化氢熏蒸杀虫效果的影响, 为指导开展储粮害虫防治工作提供理论依据。【方法】以赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 和锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 两种主要储粮害虫为研究对象, 分别测定在温度 20、25 和 30 °C 时, 赤拟谷盗和锈赤扁谷盗的卵、幼虫、蛹、成虫在 400 mL/m³ 磷化氢熏蒸 12、24、36 和 48 h 的死亡率。【结果】25 和 30 °C 条件下, 磷化氢熏蒸赤拟谷盗幼虫、蛹和成虫的死亡率及锈赤扁谷盗幼虫和成虫死亡率显著高于 20 °C 条件下的死亡率 ($P<0.05$), 25 °C 较 20 °C 下, 磷化氢致死锈赤扁谷盗各虫态的时间均显著缩短 ($P<0.05$)。30 °C 下, 磷化氢熏蒸赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率最高, 48 h 时死亡率均达到 100%。此外, 时间对磷化氢熏蒸赤拟谷盗和锈赤扁谷盗两种虫的各虫态死亡率均具有显著影响 ($P<0.05$), 在相同的温度条件下, 延长熏蒸时间能够显著提升磷化氢对赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的杀伤效果 ($P<0.05$), 熏蒸处理 48 h 后两种害虫的死亡率均达到 100%。【结论】温度、时间及其交互作用对磷化氢熏杀赤拟谷盗和锈赤扁谷盗的各虫态均具有显著影响, 其中随着温度的升高, 磷化氢熏杀这两种害虫各虫态的死亡率均会显著增加。

关键词 赤拟谷盗; 锈赤扁谷盗; 磷化氢; 温度; 熏蒸时间

The influence of temperature on the effectiveness of phosphine fumigation

JIA Xiao-Yu** YANG Li** NIU Zi-Wen LU Shao-Hua***

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

Abstract 【Aim】To clarify the influence of temperature on the effectiveness of phosphine (PH₃) fumigation for the control of stored grain pests. 【Methods】Two main stored grain pests, *Cryptolestes ferrugineus* and *Tribolium castaneum*, were chosen as the research subjects. The eggs, larvae, pupae and adults of these two species were exposed to 400 mL/m³ PH₃ for 12, 24, 36, and 48 h at 20, 25 and 30 °C, after which mortality was assessed. 【Results】Mortality of *T. castaneum* larvae, pupae and adults at 25 and 30 °C was significantly higher than at 20 °C ($P<0.05$). The duration of fumigation required to kill all developmental stages of *C. ferrugineus* was significantly less at 25 °C than at 20 °C ($P<0.05$). The highest mortality of all developmental stages of *C. ferrugineus* and *T. castaneum* was observed at 30 °C. At 30 °C, 100% mortality was achieved in 48 h. In addition, fumigation duration significantly affected the mortality rates of all instars of both *C. ferrugineus* and *T. castaneum* ($P<0.05$). Under the same temperature, extending the fumigation duration enhanced the killing effect of PH₃ on the both pests ($P<0.05$), achieving 100% mortality after 48 h. 【Conclusion】Temperature, duration, and their interaction significantly influenced the mortality rates of all instars of both *C. ferrugineus* and *T. castaneum*. The mortality rates of both pests increased significantly with rising temperature.

Key words *Tribolium castaneum*; *Cryptolestes ferrugineus*; phosphine; temperature; fumigation duration

*资助项目 Supported projects: 河南省科技攻关计划 (252102521055, 232102520028, 222103810074); 郑州市研发专项资金补助项目 (22ZZRDZX22)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 2638376727@qq.com; yangli139039@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: shaohualu08@163.com

收稿日期 Received: 2024-06-25; 接受日期 Accepted: 2025-02-10

我国是粮食生产大国,同时也是粮食储藏大国,粮食安全储藏是确保饭碗安全的重要环节。粮食在储藏过程会遇到发热、霉变、虫害等问题,其中虫害对粮食的损坏最为直接,发生虫害的粮食质量和品质均会降低,严重的甚至无法食用。在虫害导致的质变过程中,害虫代谢活动产生的热量与水分会进一步加剧粮食劣变,形成恶性循环(Rajendran, 2016)。据统计,全球每年因虫害造成的储粮损失占粮食总产量的10%-30%(郝倩, 2018)。赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 和锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 是储粮生态系统中常见的害虫,因其繁殖能力强、抗性发展快,对粮食安全构成严重威胁(金占宝, 2010; Nayak *et al.*, 2013; Campbell *et al.*, 2022)。赤拟谷盗和锈赤扁谷盗均为杂食性害虫,除了危害玉米、小麦和面粉等粮食作物及其制品还会对烟草、皮革和药材等产品造成损失(郝广凯等, 2015; 赵欣欣等, 2019; 吕建华等, 2022)。赤拟谷盗的幼虫和成虫均可受害谷物及其制品,且成虫体内的臭腺可以分泌含苯醌等致癌物质的臭液,使面粉等结块、变色和发臭而失去食用价值(Stevenson *et al.*, 2017)。锈赤扁谷盗成虫体型较小且繁殖能力强,在适宜温度条件下可快速飞行,在粮库内一旦发现此类害虫,必须引起重视并及时防治,如果防治不当,会大量繁殖并大面积暴发。此外,赤拟谷盗和锈赤扁谷盗均具有群集性,当其大量聚集时会使仓库内粮食出现局部发热、霉变、腐烂、干物质减少和重量下降等现象,甚至引发其他病虫害的发生与为害,严重危害储粮安全(苏青峰等, 2013; Sutar *et al.*, 2021)。因此,深入研究这两种害虫的防治策略,对于保障粮食安全具有重要意义。

磷化氢(Phosphine, PH_3)是目前世界范围内应用最多的储粮熏蒸剂(Afful *et al.*, 2018)。 PH_3 杀虫具有操作简单、扩散性强、药效好、无残留物等优点,在储粮害虫防治中被广泛应用(Lorini *et al.*, 2007)。我国每年有大约88.9%的储粮利用 PH_3 熏蒸来进行害虫防治,这其中包括对各种原粮、成品粮、油料和器材、空仓、加工厂的熏蒸杀虫(徐永安, 2022)。 PH_3 通过昆虫的体壁和气门进入体内,穿透表皮脂质层后,

经气管系统扩散至血淋巴,作用于体内的靶标部位。 PH_3 的杀虫机制包括抑制乙酰胆碱酯酶(Acetylcholinesterase, AChE)活性,干扰害虫神经信号传导(Chaudhry, 1997; 林忠莲和张立力, 2000);抑制线粒体复合体IV(细胞色素c氧化酶)干扰ATP合成(Kaur *et al.*, 2012);干扰体内氧化还原过程,使害虫体内的活性氧(Reactive oxygen species, ROS)大量积累,对细胞造成氧化损伤(Quistad *et al.*, 2000)。在实际生产中,由于环境因素或从业人员对 PH_3 特性的了解不足,导致实际熏蒸中的应用方法不科学、不合理,因此 PH_3 熏蒸杀虫效果往往不佳,甚至失败(张惠妍等, 2024)。

影响 PH_3 杀虫效果的因素包括害虫敏感性、虫期与虫口密度、害虫抗性、粮食的种类与品质、粮温、外界环境因素、温度和湿度以及人为因素。在这些因素中,温度对 PH_3 毒力影响最为关键(Nayak *et al.*, 2020)。已有研究表明,有机磷杀虫剂的温度效应表现为正的温度系数,即在一定的温度范围内,杀虫剂的毒力随着温度的升高而增强(马云华等, 2010)。温度升高可以加速 PH_3 气体在粮堆中的扩散速率,提高磷化氢气体在害虫呼吸系统上的渗透效率;温度还影响 PH_3 靶标酶的活性,干扰线粒体能量合成(Jagadeesan *et al.*, 2012)。低温环境下害虫因代谢减弱或停滞而降低 PH_3 的吸收量,导致熏蒸失败甚至诱导抗药性产生(刘波等, 2016)。因此,优化温度参数是提升 PH_3 防治效果的核心策略之一。

本研究以赤拟谷盗和锈赤扁谷盗两种害虫的卵、幼虫、蛹和成虫为研究对象,探究温度与熏蒸时间的交互作用,明确温度对赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态完全致死时间和不同虫态间 PH_3 耐受性的影响,为更好地防治储粮害虫和指导 PH_3 实仓熏蒸作业提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

赤拟谷盗采自广东省汕头市直属库,锈赤扁谷盗采自浙江萧山市国家粮食储备库,均在河南工业大学储藏物昆虫实验室培养数年。赤拟谷盗

饲喂全麦粉: 酵母=19:1 (w/w) 的混合饲料, 锈赤扁谷盗饲喂全麦粉: 燕麦: 碎麦: 酵母=5:3:1:1 的混合饲料, 在温度 (30±1) °C、相对湿度 70%±5%、无光照的培养箱中培养。分别随机选取赤拟谷盗和锈赤扁谷盗的卵 (2 d)、幼虫 (14 d)、蛹 (28 d) 和成虫 (羽化后 3 d) 用于试验。

1.2 主要仪器和试剂

试剂: 磷化铝片剂。

仪器: LHS-80 型电热恒温培养箱 (武汉恒苏净科学仪器有限公司), 玻璃培养瓶, 熏蒸瓶, 培养皿, 干燥器, 玻璃漏斗, 毛笔, HL-210-PH₃ 浓度测定仪 (北京佳粮科贸有限公司) 等。

1.3 实验方法

1.3.1 PH₃ 的制备 在通风橱中采用由集气瓶、漏斗、水槽、铁架台等组成的发生装置获取 PH₃ 气体。制备 PH₃ 前, 首先将集气瓶和漏斗倒扣进入水槽中, 用注射器从集气瓶顶部带橡胶垫的气密旋塞中插入, 抽出瓶内残存的空气, 使水充满气瓶; 小心取出适量磷化铝片剂, 用滤纸包裹并用皮筋扎紧 (防止残渣飞溅), 用镊子将包好的磷化铝药包快速放入水下倒扣的漏斗中, 瓶中出现 PH₃ 气泡上浮, 等待片刻 PH₃ 气体即可充满集气瓶, 用铁架台固定集气瓶, 即可用微量注射器抽取适量 PH₃ 气体用于试验。

1.3.2 PH₃ 杀虫效果测定 研究设定了 3 个温度 (20、25 和 30 °C) 和 4 个时间 (12、24、36 和 48 h) 的磷化氢熏蒸方案, 以实现赤拟谷盗和锈赤扁谷盗所有虫态的有效防治。所选温度范围覆盖了我国主要储粮区域的常温至中温区间 (Huang *et al.*, 2020), 且与这两种害虫的最适发育温度部分重叠 (Nayak *et al.*, 2013), 能够反映实际仓储中温度波动对熏蒸效果的影响。实验采用 400 mL/m³ 的高浓度磷化氢, 旨在通过加速暴露模拟长期低浓度熏蒸的毒理效应 (Kaur and Nayak, 2015)。此方法已广泛应用于实验室害虫 PH₃ 抗性筛选研究 (Nayak *et al.*, 2020)。

随机选取赤拟谷盗和锈赤扁谷盗的卵、幼虫、蛹和成虫, 分别放入体积为 1 L 的带有橡胶塞的

锥形瓶中, 使用微量注射器通过气密橡胶隔片注入 0.4 mL 的 PH₃ 气体 (终浓度为 400 mL/m³), 将锥形瓶分别置于 20、25 和 30 °C 的培养箱中培养观察, 分别经过熏蒸处理 12、24、36 和 48 h 后散气, 对照组不做处理, 每个温度条件和时间点设置 3 次重复, 每次重复 40 头虫。观察记录不同温度与不同熏蒸时间处理的卵、幼虫、蛹和成虫的存活情况, 记录赤拟谷盗与锈赤扁谷盗各虫态的死亡数据。卵熏蒸结束后继续观察 7 d, 未孵化且颜色变暗即判定为死亡 (Bell, 2020)。蛹熏蒸后转移至培养箱中, 10 d 内未羽化且体表塌陷即判定为死亡 (Rajendran and Muralidharan, 2005)。幼虫与成虫熏蒸后 24 h 内无自主运动 (触角或附肢对机械刺激无反应) 即判定为死亡 (Lorini *et al.*, 2007)。计算校正死亡率, 公式为: 校正死亡率 = $\frac{\text{处理死亡率} - \text{对照死亡率}}{100 - \text{对照死亡率}} \times 100\%$ (劳传忠等, 2012)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。首先检测数据方差齐性和正态性, 不符合正态分布的数据进行平方根反正弦转换。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 评价不同温度条件下同种昆虫相同虫态的死亡率, 采用双因素方差分析评价温度和时间对 PH₃ 熏蒸杀虫效果的影响, 采用多因素方差分析评价温度、时间和害虫种类对 PH₃ 熏蒸杀虫效果的影响, 当方差差异显著时再用 Duncan 氏新复极差法对平均值进行多重比较, 差异性显著水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 温度对 PH₃ 熏杀赤拟谷盗各虫态效果的影响

比较不同温度下 PH₃ 熏蒸对赤拟谷盗校正死亡率 (简称“死亡率”) 的影响, 发现温度升高、熏蒸时间增加均能提高 PH₃ 杀虫效果。然而, 在相同温度和熏蒸时间条件下, PH₃ 对各虫态的死亡率存在显著差异 ($P < 0.05$)。熏蒸时长为 12 h 时 (图 1: A), 各虫态的死亡率与温度升

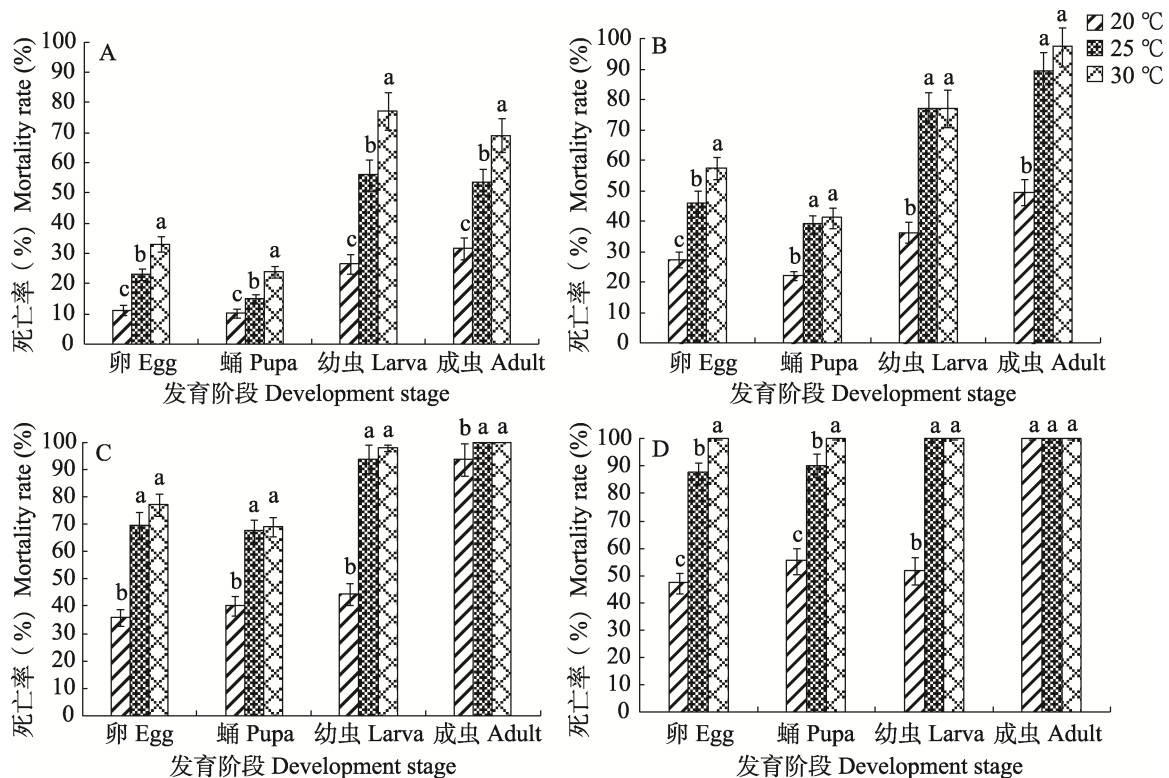


图 1 温度和时间对 PH_3 熏杀赤拟谷盗的校正死亡率影响

Fig. 1 Effects of temperature and duration on the mortality rate of *Tribolium castaneum* with phosphine fumigation

A. 温度对 PH_3 熏杀赤拟谷盗各虫态 12 h 效果的影响; B. 温度对 PH_3 熏杀赤拟谷盗各虫态 24 h 效果的影响; C. 温度对 PH_3 熏杀赤拟谷盗各虫态 36 h 效果的影响; D. 温度对 PH_3 熏杀赤拟谷盗各虫态 48 h 效果的影响。图中数据为平均值±标准误。柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏多重比较检验)。下同。

A. Effect of temperature on 12 h PH_3 fumigation efficacy against *T. castaneum* at different life stages; B. Effect of temperature on 24 h PH_3 fumigation efficacy against *T. castaneum* at different life stages; C. Effect of temperature on 36 h PH_3 fumigation efficacy against *T. castaneum* at different life stages; D. Effect of temperature on 48 h PH_3 fumigation efficacy against *T. castaneum* at different life stages. Data in the figure are mean±SE. Different lowercase letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

高呈显著正相关 ($P < 0.05$)。 PH_3 对各虫态的死亡率顺序在 20 °C 条件下为: 成虫>幼虫>卵>蛹; 在 25 °C 条件下为: 成虫≈幼虫>蛹>卵; 在 30 °C 条件下为: 成虫≈幼虫>卵>蛹。延长熏蒸时间至 24 h 后 (图 1: B), 幼虫、蛹和成虫在 25 和 30 °C 的死亡率显著高于其在 20 °C 时的死亡率 ($P < 0.05$)。 PH_3 对各虫态的死亡率排序在 20 °C 条件下为: 成虫>幼虫>卵>蛹; 在 25 和 30 °C 条件下为: 成虫>幼虫>卵>蛹。熏蒸时长为 36 h 时 (图 1: C), 卵和蛹的死亡率与温度升高呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且成虫在 25 和 30 °C 的死亡率达到 100%。 PH_3 对各虫态的死亡率顺序在 20 °C 条件下为: 成虫>幼虫≈蛹≈卵; 在 25 °C 条件下为: 成虫>幼虫>蛹≈卵; 在 30 °C

条件下为: 成虫≈幼虫>卵>蛹。熏蒸时长为 48 h 时 (图 1: D), 卵在 30 °C 条件下死亡率达到 100%, 蛹、幼虫和成虫在 20、25 和 30 °C 的死亡率均达到 100%。

2.2 温度对 PH_3 熏杀锈赤扁谷盗各虫态效果的影响

比较不同温度下 PH_3 熏蒸对锈赤扁谷盗死亡率的影响, 发现温度升高、熏蒸时间的延长均显著增强杀虫效果 ($P < 0.05$)。但在相同温度和熏蒸时间条件下, PH_3 对各虫态的死亡率存在显著差异 ($P < 0.05$)。熏蒸时长为 12 h 时 (图 2: A), 卵和蛹的死亡率与温度升高呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且幼虫和成虫在 25 和 30 °C 的死亡

亡率显著高于其在 20 °C 时的死亡率 ($P < 0.05$)。PH₃ 对各虫态的死亡率排序在 20、25 和 30 °C 条件下均为: 成虫 > 幼虫 > 卵 > 蛹。延长熏蒸时间至 24 h 后 (图 2: B), 卵、幼虫和成虫的死亡率与温度升高呈显著正相关 ($P < 0.05$), 蛹在 30 °C 的死亡率显著高于其在 20 和 25 °C 时的死亡率 ($P < 0.05$)。熏蒸时长为 36 h 时 (图 2: C), 卵和蛹的死亡率与温度升高呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且幼虫和成虫在 25 和 30 °C 的死亡率达到 100%。熏蒸时长为 48 h 时 (图 2: D), 卵在 30 °C 条件下死亡率达到 100%, 蛹、幼虫和成虫在 20、25 和 30 °C 的死亡率均达到 100%。

2.3 温度、时间和害虫种类的交互作用对 PH₃ 杀虫效果的影响

双因素方差分析比较温度和时间交互作用对 PH₃ 杀虫效果的影响发现 (表 1), 温度、时间及其交互作用对 PH₃ 熏杀赤拟谷盗的各虫态均具有显著影响 ($P < 0.05$); 温度和时间对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗的各虫态均具有显著影响 ($P < 0.05$); 温度和时间交互作用对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗的卵、蛹和成虫均具有显著影响 ($P < 0.05$), 而对锈赤扁谷盗的幼虫熏杀作用不显著 ($P > 0.05$)。

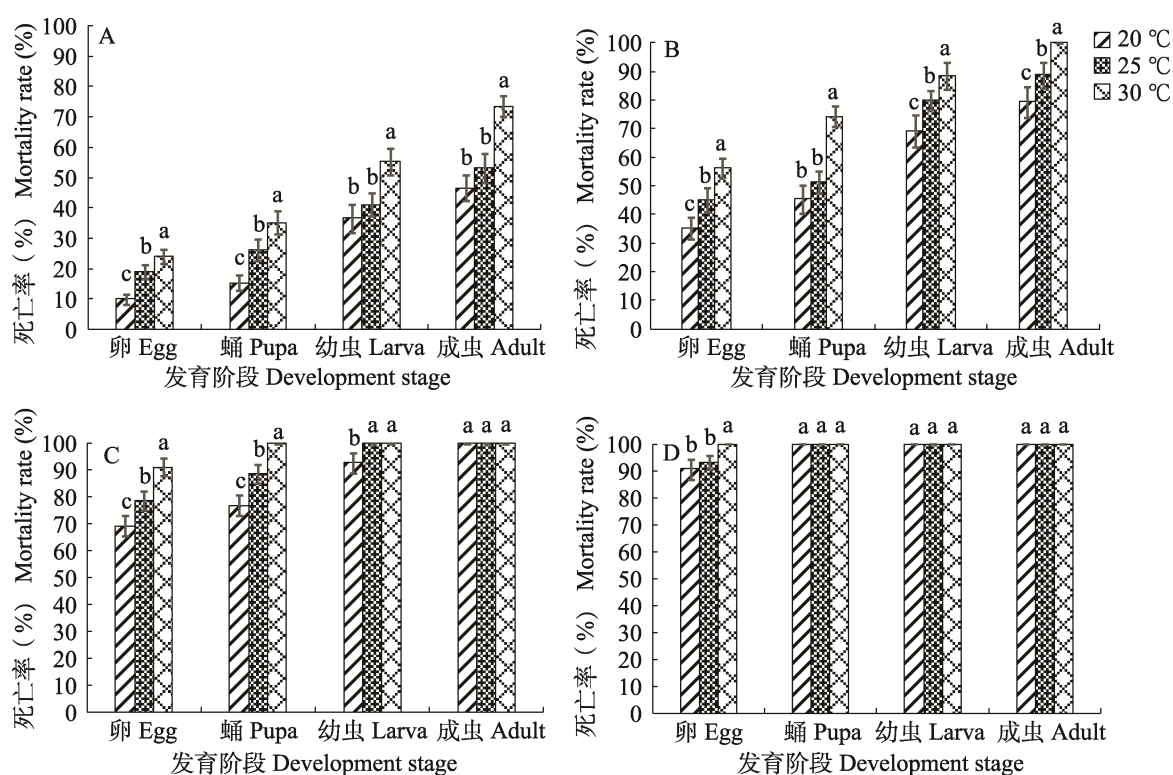


图 2 温度和时间对 PH₃ 熏蒸锈赤扁谷盗的校正死亡率影响

Fig. 2 Effects of temperature and duration on the mortality rate of *Cryptolestes ferrugineus* with phosphine fumigation

A. 温度对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗各虫态 12 h 效果的影响; B. 温度对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗各虫态 24 h 效果的影响; C. 温度对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗各虫态 36 h 效果的影响; D. 温度对 PH₃ 熏杀锈赤扁谷盗各虫态 48 h 效果的影响。

A. Effect of temperature on 12 h PH₃ fumigation efficacy against *C. ferrugineus* at different life stages; B. Effect of temperature on 24 h PH₃ fumigation efficacy against *C. ferrugineus* at different life stages;

C. Effect of temperature on 36 h PH₃ fumigation efficacy against *C. ferrugineus* at different life stages;

D. Effect of temperature on 48 h PH₃ fumigation efficacy against *C. ferrugineus* at different life stages.

多重比较分析温度、时间和害虫种类的交互作用对 PH₃ 杀虫效果的影响发现 (表 2), 温度和时间对 PH₃ 熏杀害虫的各虫态均具有显

著影响 ($P < 0.05$); 害虫种类对 PH₃ 熏杀害虫的蛹、幼虫和成虫具有显著影响 ($P < 0.05$), 对卵的影响不显著 ($P > 0.05$); 温度与时间、

表 1 双因素方差分析温度和时间的交互作用对 PH_3 杀虫效果的影响
Table 1 Interaction analysis the effects of temperature and duration on insecticidal effect of phosphine by two-way ANOVA analysis

发育阶段 Development stage	赤拟谷盗 <i>T. castaneum</i>			锈赤扁谷盗 <i>C. ferrugineus</i>		
	温度 Temperature	时间 Duration	温度×时间 Temperature × duration	温度 Temperature	时间 Duration	温度×时间 Temperature × duration
卵 Egg	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001
蛹 Pupa	<0.001	<0.001	0.019	<0.001	<0.001	<0.001
幼虫 Larva	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.387
成虫 Adult	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

加粗的 P 值表示差异显著 ($P<0.05$)，双因素方差分析 (Duncan 氏多重比较检验)。表 2 同。

Bolded P -values are significant difference ($P<0.05$), Two-way ANOVA (Duncan's multiple range test). The same for Table 2.

表 2 多重比较分析温度、时间和害虫种类的交互作用对 PH_3 杀虫效果的影响
Table 2 Interaction analysis the effects of temperature, duration and species on insecticidal effect of phosphine by multivariate analysis

发育阶段 Development stage	P 值 P -value						
	温度 Temperature	时间 Duration	害虫种类 Species	温度×时间 Temperature × duration	温度×害虫种类 Temperature × species	时间×害虫种类 Duration × species	温度×时间×害虫种类 Temperature × duration × species
卵 Egg	<0.001	<0.001	0.085	<0.001	<0.001	<0.001	0.570
蛹 Pupa	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.047
幼虫 Larva	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
成虫 Adult	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	<0.001	<0.001	<0.001

温度与害虫种类、时间与害虫种类这 3 对的交互作用对各虫态均具有显著影响 ($P<0.05$)；温度、时间和害虫种类的交互作用除对卵的影响不显著 ($P>0.05$)，对蛹、幼虫和成虫的影响均具有显著影响 ($P<0.05$)。这表明温度和时间对 PH_3 熏蒸杀虫效果的影响是相似的，而在相同的温度和时间条件下，害虫种类对 PH_3 熏蒸杀虫效果的影响较大。

3 讨论

PH_3 气体通过昆虫的气门进入其呼吸系统，并作用于特定的靶标位点 (Quistad *et al.*, 2000; 田耀加等, 2013)。提高昆虫的呼吸速率能够增加 PH_3 的吸入量，增强 PH_3 的杀虫效果。温度升高会加速昆虫的呼吸和代谢速率 (Chaudhry *et al.*, 2004; 肖正坤等, 2022)。因此，温度是影响 PH_3 杀虫效果的关键因素之一。本研究发现，在 25 和 30 °C 条件下， PH_3 熏蒸赤拟谷盗幼虫、

蛹和成虫的死亡率，以及锈赤扁谷盗幼虫和成虫的死亡率，均显著高于 20 °C 条件下的死亡率。此外，25 °C 下， PH_3 致死锈赤扁谷盗各虫态的时间相比 20 °C 显著缩短。在 30 °C 条件下， PH_3 熏蒸对赤拟谷盗和锈赤扁谷盗所有虫态的死亡率最高，且在 48 h 后，死亡率均达到 100%。此外，熏蒸时间对赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率有显著影响，不同害虫种类间也存在显著的 PH_3 熏蒸效果差异。

温度是影响 PH_3 熏蒸杀虫效果的关键因素之一 (Dhouibi *et al.*, 2015)。随着温度的升高，赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率显著增加，这可能是由于温度升高促进了 PH_3 的扩散和害虫对 PH_3 的吸收，同时增强了 PH_3 对靶标酶的抑制作用 (Jagadeesan *et al.*, 2018)。此外，温度显著影响昆虫的代谢活动，高温条件下昆虫代谢速率加快，对 PH_3 的吸收和反应更为敏感，有利于增强熏蒸效果 (Sakka *et al.*, 2022)。

因此, 优化 PH_3 杀虫的温度参数, 有助于提升熏蒸杀虫效果。

熏蒸时间对 PH_3 的杀虫效果具有显著影响。随着熏蒸时间的延长, 赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率逐渐升高。在相同的温度条件下, 熏蒸时间延长能显著提升 PH_3 的杀伤效果, 熏蒸处理 48 h 后害虫的死亡率甚至达到了 100%。延长熏蒸时间可以提高 PH_3 的杀虫效果, 确保害虫各虫态的完全死亡。各虫态的害虫对 PH_3 的敏感性不同, 例如赤拟谷盗成虫和幼虫对 PH_3 较为敏感, 而蛹和卵的耐药性较强 (Rajendran and Muralidharan, 2005)。在相同的温度和熏蒸时间条件下, 赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率存在显著差异, PH_3 对两种害虫各虫态的死亡率排序在 25 和 30 °C 条件下均为: 成虫>幼虫>卵>蛹。这可能是由于其成虫和幼虫的代谢活动较强, 吸入的 PH_3 量较大, 而蛹和卵的生理活动较弱, 吸入的 PH_3 量少 (Afful *et al.*, 2018)。此外, 温度与虫态的相互作用也显著影响熏蒸效果, 20 °C 条件下, 两种害虫的各虫态对 PH_3 的敏感性降低, 死亡率均显著低于 25 和 30 °C 条件下的死亡率, 随着温度的升高两种害虫各虫态对 PH_3 的敏感性显著提高, 尤其是成虫和幼虫的死亡率显著增加。30 °C 条件下, 两种害虫各虫态的死亡率均达到 100%, 表明温度升高可以增强 PH_3 的熏蒸效果。

本研究通过探讨温度、熏蒸时间和虫态对 PH_3 熏蒸杀虫效果的影响, 明确了温度升高和熏蒸时间延长均能显著提高赤拟谷盗和锈赤扁谷盗各虫态的死亡率, 但不同虫态的害虫对 PH_3 的敏感性存在差异。此外, 害虫的抗药性、粮食的种类与品质、环境湿度等因素也会对熏蒸效果产生影响。因此, 在实际储粮害虫防治中, 应综合考虑这些因素, 优化熏蒸参数, 以提高 PH_3 的防治水平。未来的研究可以进一步探讨不同温度条件下 PH_3 对害虫生理生化指标的影响, 深入揭示温度与 PH_3 作用机制的关系。此外, 还可以探索其他环境因素对 PH_3 熏蒸效果的影响, 为储粮害虫的综合防治提供更全面的理论依据和技术支持。

参考文献 (References)

- Afful E, Elliott B, Nayak MK, Phillips TW, 2018. Phosphine resistance in North American field populations of the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Economic Entomology*, 111(1): 463–469.
- Bell CH, 2020. Fumigation in the 21st century. *Crop Protection*, 19(8/10): 563–569.
- Campbell JF, Athanassiou CG, Hagstrum DW, Zhu KY, 2022. *Tribolium castaneum*: A model insect for fundamental and applied research. *Annual Review of Entomology*, 67: 347–365.
- Chaudhry MQ, Bell HA, Savvidou N, MacNicoll AD, 2004. Effect of low temperatures on the rate of respiration and uptake of phosphine in different life stages of the cigarette beetle *Lasioderma serricorne* (F.). *Journal of Stored Products Research*, 40: 125–134.
- Chaudhry MQ, 1997. A review of the mechanisms involved in the action of phosphine as an insecticide and phosphine resistance in stored-product insects. *Pesticide Science*, 49(3): 213–228.
- Dhouibi M, Lagha A, Bensalem A, Hammami Y, 2015. Palm dates fumigation in Tunisia: Efficiency of phosphine and CO_2 mixtures, at different temperatures, as an alternative to methyl bromide. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 3: 1697–1702.
- Hao Q, 2018. Study on the control methods of stored grain pests. *Technology Wind*, 2018(18): 203–204. [郝倩, 2018. 储粮害虫防治方法研究. 科技风, 2018(18): 203–204.]
- Huang YL, Wang DX, Jian FJ, Jayas DS, Chen CQ, Wang DY, 2020. Mortality of different stages of *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) at three temperatures in controlled atmosphere of high nitrogen. *Journal of Economic Entomology*, 113(3): 1105–1109.
- Jagadeesan R, Collins PJ, Daglish GJ, Ebert PR, Schlipalius DI, 2012. Phosphine resistance in the rust red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae): Inheritance, gene interactions and fitness costs. *PLoS ONE*, 7(2): e31582.
- Jagadeesan R, Singarayan VT, Chandra K, Ebert PR, Nayak MK, 2018. Potential of co-fumigation with phosphine (PH_3) and sulfuryl fluoride (SO_2F_2) for the management of strongly phosphine-resistant insect pests of stored grain. *Journal of Economic Entomology*, 111(6): 2956–2965.
- Jin ZB, 2010. Comparative study on differences among different geographic populations of *Tribolium castaneum*. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [金占宝, 2010. 赤拟谷盗不同地理种群差异性比较研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Kaur R, Nayak MK, 2015. Developing effective fumigation protocols to manage strongly phosphine-resistant *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae). *Pest Management Science*, 71: 1297–1302.
- Kaur R, Schlipalius DI, Collins PJ, Swain AJ, Ebert PR, 2012.

- Inheritance and relative dominance, expressed as toxicity response and delayed development, of phosphine resistance in immature stages of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*, 51: 74–80.
- Lao CZ, Zeng L, Guo C, 2012. Inhibitory effects of two low oxygen conditions on different stages of *Tribolium castaneum*. *Grain Storage*, 41(4): 27–29. [劳传忠, 曾伶, 郭超, 2012. 两种低氧条件对赤拟谷盗不同虫态的抑制作用. 粮食储藏, 41(4): 27–29.]
- Lin ZL, Zhang LL, 2000. Biochemical research progress of phosphine as insect respiratory poison. *Journal of Zhengzhou Institute of Engineering*, 21(4): 27–30. [林忠莲, 张立力, 2000. 磷化氢作为昆虫呼吸毒剂的生化研究进展. 郑州工程学院学报, 21(4): 27–30.]
- Liu B, Zhan GP, Ren LL, Li BS, Niu M, Wang YJ, 2016. Toxicity effect of pure phosphine fumigation on *Carposina niponensis* Walsingham. *Plant Protection*, 42(6): 191–196. [刘波, 詹国平, 任荔荔, 李柏树, 牛墨, 王跃进, 2016. 纯磷化氢熏蒸对桃小食心虫的毒力作用. 植物保护, 42(6): 191–196.]
- Lorini I, Collins PJ, Daglish GJ, Nayak MK, Pavic H, 2007. Detection and characterisation of strong resistance to phosphine in Brazilian *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae). *Pest Management Science*, 63(4): 358364.
- Lu JH, Huang ZW, Xu JY, 2022. Impact of adult *Tribolium destructor* on the volatile compounds of wheat. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 43(4): 106–111. [吕建华, 黄宗文, 许俊亚, 2022. 赤拟谷盗成虫为害对小麦挥发性物质的影响. 河南工业大学学报(自然科学版), 43(4): 106–111.]
- Ma YH, Gao ZL, Li YF, Dang ZH, Pan WL, 2010. Review on the effects of temperature on toxicity of insecticides. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 14(8): 12–18. [马云华, 高占林, 李耀发, 党志红, 潘文亮, 2010. 杀虫剂毒力与温度关系的研究进展. 河北农业科学, 14(8): 12–18.]
- Nayak MK, Holloway JC, Emery RN, Pavic H, Bartlet J, Collins PJ, 2013. Strong resistance to phosphine in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae): Its characterisation, a rapid assay for diagnosis and its distribution in Australia. *Pest Management Science*, 69(1): 48–53.
- Nayak MK, Daglish GJ, Phillips TW, Ebert PR, 2020. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, 65: 333–350.
- Quistad GB, Sparks SE, Casida JE, 2000. Chemical model for phosphine-induced lipid peroxidation. *Pest Management Science*, 56(9): 779–783.
- Rajendran S, Muralidharan N, 2005. Resistance to phosphine in stored grain insect pests in India. *Indian Journal of Entomology*, 67(3): 201–204.
- Rajendran S, 2016. Status of fumigation in stored grains in India. *Indian Journal of Entomology*, 78: 28.
- Stevenson BJ, Cai L, Faucher C, Michie M, Berna A, Ren Y, Anderson A, Chyb S, Xu W, 2017. Walking responses of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) to its aggregation pheromone and odors of wheat infestations. *Journal of Economic Entomology*, 110(3): 1351–1358.
- Sakka MK, Jagadeesan R, Nayak MK, Athanassiou CG, 2022. Insecticidal effect of heat treatment in commercial flour and rice mills for the control of phosphine-resistant insect pests. *Journal of Stored Products Research*, 99: 102023.
- Su QF, Wang DX, Zheng CJ, Zhou XJ, 2013. The technical strategy for *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) integrated management. *Grain Storage*, 42(4): 3–7. [苏青峰, 王殿轩, 郑超杰, 周晓军, 2013. 锈赤扁谷盗的综合治理技术对策. 粮食储藏, 42(4): 3–7.]
- Sutar S, Deshmukh SG, More AM, Bhosale AK, Latthe SS, 2021. Impact of temperature on the growth, development and population fluctuation of *Tribolium destructor*. *Journal of Stored Products Research*, 98: 101–108.
- Tian YJ, Zhao SG, Zhang J, Huang LH, Chen HD, Wang QY, 2013. Occurrence dynamics of fresh corn rust in Guangzhou. *Chinese Journal of Ecology*, 32(11): 3010–3014. [田耀加, 赵守光, 张晶, 黄亮华, 陈红弟, 王秋燕, 2013. 广州地区鲜食玉米锈病发生动态. 生态学杂志, 32(11): 3010–3014.]
- Xiao ZK, Wang DX, Liu HX, Liu XL, Li SY, Tang PA, 2022. Influence of low temperature on lethal time delay in phosphine fumigation of *Cryptolestes pusillus* Schoenherr. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 37(10): 1–6. [肖正坤, 王殿轩, 刘浩星, 刘晓莉, 李双宇, 唐培安, 2022. 低温对磷化氢熏蒸长角扁谷盗致死时间延迟影响的研究. 中国粮油学报, 37(10): 1–6.]
- Xu YA, 2022. Progress and prospect of control technology for stored grain pests: Fumigation insecticides. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 30(4): 95–104. [徐永安, 2022. 储粮害虫防治技术进展与展望(上): 熏蒸杀虫剂篇. 粮油食品科技, 30(4): 95–104.]
- Zhang HY, Chen X, Zhang HQ, Li YY, Tian XW, Zhou GM, Tao HH, Gong JM, 2024. Current status of resistance of stored grain pests to phosphine and their integrated management strategies. *Science and Technology of Cereals, Oils and Food*, 32(1): 161–167. [张惠妍, 陈鑫, 张洪清, 李燕羽, 田小卫, 周桂明, 陶海华, 巩建民. 储粮害虫对磷化氢的抗性现状及其综合管理策略. 粮油食品科技, 32(1): 161–167.]
- Zhao XX, Wang DX, Bai CQ, Li H, Yan L, Zhang H, Lü JH, Shao XL, He YP, 2019. Investigation on occurrence and distribution of three fungivore pests in stored grain. *Science and Technology of Cereals, Oils and Food*, 27(3): 83–89. [赵欣欣, 王殿轩, 白春启, 李慧, 阎磊, 张浩, 吕建华, 邵小龙, 贺艳萍, 2019. 锈赤扁谷盗等 3 种菌食性储粮害虫的发生分布调查. 粮油食品科技, 27(3): 83–89.]