

# 锈赤扁谷盗对储藏小麦的危害和环境二氧化碳体积分数的影响

孙奂一<sup>1</sup>, 王殿轩<sup>1\*</sup>, 董永强<sup>1</sup>, 吴永贵<sup>1</sup>, 唐培安<sup>2</sup>

1. 河南工业大学 粮油食品学院, 粮食储藏与安全教育部工程研究中心, 粮食储运国家工程实验室, 河南 郑州 450001

2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023

**摘要:**探讨害虫感染对储粮环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数的影响以及检测储粮环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数对监测害虫发生的虫情和粮情具有重要意义。研究了 30 ℃ 下水分含量 12% 的小麦感染 0、5、10、30 头/kg 锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) 成虫后, 在 60 d 内环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数变化以及其对粮食破碎粒率、千粒重和容重的影响。感染初期的 20 d 内, 锈赤扁谷盗 0、5、10 和 30 头/kg 的小麦环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数平均日增加速率分别为 0.012%、0.037%、0.038% 和 0.068%, 相应虫口密度样品中 CO<sub>2</sub> 体积分数升至 0.283%、0.780%、0.800% 和 1.407%。第 21~35 天时相应虫口密度环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数平均日增长速率达 0.013%、0.105%、0.163% 和 0.267%, 第 35 天时 CO<sub>2</sub> 体积分数分别升高至 0.473%、2.357%、3.240% 和 5.407%。36~60 d 时相应密度下 CO<sub>2</sub> 体积分数平均日增长速率达 0.021%、0.204%、0.219% 和 0.268%, 60 d 时 CO<sub>2</sub> 体积分数升至 0.993%、7.447%、8.713% 和 12.107%。锈赤扁谷盗感染 60 d 后对小麦的破碎粒率增加影响具有显著性, 对千粒重和容重变化影响不显著。储存小麦发生锈赤扁谷盗 5 头/kg 以上的密度经过 9 d 可使环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数显著升高, 因此监测 CO<sub>2</sub> 体积分数变化可以在一定程度上反映锈赤扁谷盗发生的虫情和粮情。

**关键词:** 小麦; 锈赤扁谷盗; 虫口密度; CO<sub>2</sub>; 体积分数; 危害

中图分类号: S379.5

文献标志码: B

文章编号: 1673-2383(2020)02-0114-06

DOI: 10.16433/j.1673-2383.2020.02.018

## Damage to stored wheat and effect on ambient CO<sub>2</sub> volume fraction by *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens)

SUN Huanyi<sup>1</sup>, WANG Dianxuan<sup>1\*</sup>, DONG Yongqiang<sup>1</sup>, WU Yonggui<sup>1</sup>, TANG Peian<sup>2</sup>

1. Grain Storage and Logistics National Engineering Laboratory, Engineering Research Center of Grain Storage and Security of Ministry of Education, College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Knowing the influences of insect infestation on CO<sub>2</sub> volume fraction in grain storage environment and detecting the CO<sub>2</sub> volume fraction for monitoring pest occurrence are of great significance to pest and grain situation. The changes in ambient CO<sub>2</sub> volume fraction as well as its effects on kernel broken rate, thousand kernel weight and volume weight in 60 d were investigated after wheat samples with 12% moisture content were infested with four densities (0, 5, 10 and 30 adult/kg) of *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) adults at 30 ℃. In the initial 20 days of infection, the average increase rate per day (AIRPD) of

收稿日期: 2019-09-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目“食品腐败变质以及霉变环境影响因素的智能化实时监测预警技术研究”(2017YFC1600800)

作者简介: 孙奂一(1993—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为储藏物害虫综合治理。

\* 通信作者: 王殿轩, 教授, 博士, E-mail: wangdianxuan62@126.com

CO<sub>2</sub> volume fraction in wheat environment with 0, 5, 10 and 30 adult/kg of *Cryptolestes ferrugineus* were 0.012%, 0.037%, 0.038% and 0.068%, and corresponding CO<sub>2</sub> volume fraction rose to 0.283%, 0.780%, 0.800% and 1.407%. During the 21th to the 35th day, the AIRPD of CO<sub>2</sub> volume fraction in environment with corresponding insect densities were 0.013%, 0.105%, 0.163% and 0.267%, and the CO<sub>2</sub> volume fraction rose to 0.473%, 2.357%, 3.240% and 5.407% in the 35th day. During the 36th to the 60th day, the AIRPD of CO<sub>2</sub> volume fraction in environment with corresponding insect densities reached 0.021%, 0.204%, 0.219% and 0.268%, and the CO<sub>2</sub> volume fraction rose to 0.993%, 7.447%, 8.713% and 12.107% in the 60th day. After infection for 60 days, the kernel broken rate increased significantly, but thousand kernel weight and volume weight had no significant changes. CO<sub>2</sub> volume fraction increased significantly after 9-day infection with 5 adult/kg or higher densities of *Cryptolestes ferrugineus*. Therefore, CO<sub>2</sub> volume fraction could reflect the occurrence of *Cryptolestes ferrugineus* to a certain extent, thereby realizing insect and grain monitoring.

**Key words:** wheat; *Cryptolestes ferrugineus*; insect density; carbon dioxide; volume fraction; damage

气体成分或体积分数是储粮生态环境中重要的生态因子,粮堆内气体成分及其变化主要是生物因子吸进 O<sub>2</sub> 和呼出 CO<sub>2</sub> 的生理结果,呼吸商(生物体产生 CO<sub>2</sub> 与消耗 O<sub>2</sub> 的体积分数比)可表达生物因子产生 CO<sub>2</sub> 的程度,检测环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数也可说明生物代谢的程度。粮堆内 O<sub>2</sub> 消耗和 CO<sub>2</sub> 积累,伴随着粮食生理、质量或品质指标改变,报道显示在害虫引起粮食质量变化过程中,环境中产生的 CO<sub>2</sub> 体积分数变化与千粒重、虫蚀粒变化关系密切<sup>[1]</sup>,在一些情况下与虫霉活动有关,在 CO<sub>2</sub> 体积分数由 0.05%~0.50% 变化的 5 个月储藏期内,玉米的霉变数量上升至 25%<sup>[2]</sup>,CO<sub>2</sub> 体积分数变化可望反映粮情状况。正常储粮中 CO<sub>2</sub> 的主要贡献者为粮粒、微生物和害虫,其中微生物活动和害虫呼吸强度远大于粮食自身的呼吸强度。粮食水分较高时微生物活动剧烈,引发霉变,CO<sub>2</sub> 体积分数变化显著<sup>[3-6]</sup>。安全水分的储粮粮情相对稳定,微生物和粮粒呼吸微弱,CO<sub>2</sub> 产量较小<sup>[7-8]</sup>。因此控制在安全水分及以下的储粮环境中若有害虫发生,可引起 CO<sub>2</sub> 体积分数明显变化。实仓检测,39 个利用 CO<sub>2</sub> 体积分数变化监测谷物霉变研究的仓房中,在 CO<sub>2</sub> 体积分数明显升高的 34 个仓中有 30 个仓检测到害虫发生<sup>[9]</sup>。储存 6 个月的玉米仓中,CO<sub>2</sub> 体积分数为 0.04%~0.90%,其中达到 0.15%~0.40% 的仓内已严重感染霉菌或昆虫,仓内虫口密度从 0 头/kg 上升至 27 头/kg<sup>[10]</sup>。25℃时,以 10 头/kg 谷蠹感染水分含量 12% 的小麦 180 d,CO<sub>2</sub> 体积分数可达 20.894%,比未感染害虫的小麦中 CO<sub>2</sub> 体积分数(1.157%)明显增

高<sup>[11]</sup>。同样 25℃时,以 10 头/kg 玉米象感染水分含量 12% 的小麦 4 个月后,CO<sub>2</sub> 体积分数升高至 17.427%,是未感染试虫样品的 23.17 倍<sup>[12]</sup>。28℃时以 5 头/kg 赤拟谷盗和米象混合感染水分含量为 12% 的小麦,经 30 d CO<sub>2</sub> 体积分数升至 6.6%<sup>[13]</sup>,因此粮堆内 CO<sub>2</sub> 体积分数变化与害虫发生密切相关。相对封闭的粮仓或粮堆内,储粮害虫活动可导致 CO<sub>2</sub> 体积分数显著变化,借此可辅助用于害虫发生情况监测<sup>[14]</sup>。我国智能化粮库建设中,一些现代粮仓配置了多参数粮情因子检测技术,可以自动检测温度、害虫、气体等,其中,检测 CO<sub>2</sub> 传感器和技术也较为成熟,因此在实际应用中了解 CO<sub>2</sub> 体积分数检测结果与害虫发生的对应关系,可更好地掌握粮情和粮食品质变化情况。

锈赤扁谷盗为世界性普遍分布的储粮害虫,也是采用磷化氢熏蒸较难治理的害虫之一,其成虫和幼虫都能危害受破碎的禾谷类粮粒、豆类和油料等多种农产品和加工产品,成虫个体微小、扁平而易于隐藏,善于飞行且寿命长而易于感染等。锈赤扁谷盗尽管繁殖力强,磷化氢抗药性高,环境适应性强,耐干燥、低温强<sup>[15]</sup>,但是仍然属于第二食性储粮害虫<sup>[16]</sup>,与第一食性储粮害虫如谷蠹、玉米象等相比,其取食粮食造成的危害程度较小,大量增殖和严重发生时也会引发储粮热,诱发粮堆结露甚至霉变<sup>[17]</sup>。作者研究了储藏小麦环境中锈赤扁谷盗感染后不同时间内 CO<sub>2</sub> 体积分数变化及其对小麦的危害,以期阐明一些锈赤扁谷盗发生与其产生 CO<sub>2</sub> 体积分数的关系,为通过 CO<sub>2</sub> 监测害虫发生情况提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试虫

试验用锈赤扁谷盗采自浙江省萧山市某粮库,在河南工业大学储藏物昆虫研究室培养数代,培养条件为 $(32\pm 1)^\circ\text{C}$ 、 $RH(70\pm 5)\%$ ,取羽化后两周的成虫为试虫。

### 1.2 试验用粮

试验用小麦为西农 979,容重 745 g/L,水分含量 12%,清除杂质和害虫后取其部分粉碎过筛,选粒度 1~2 mm 的碎麦混入整粒小麦样品中,使其不完善粒率为 1%。

### 1.3 环境设置

储存小麦环境为 25 cm×15 cm×12 cm 的 PP 材质密封塑料箱体,顶部用厚度 0.2 mm 聚乙烯塑料薄膜热熔胶密封,在密封薄膜上设置直径 5 mm 的进出循环气体检测管,检测管的取气管开口置于粮面下 5 cm,检测管的回气管开口于粮堆上空间。将 2 kg 小麦装入箱体内,装满度为 60%,接入锈赤扁谷盗后密闭,装置如图 1 所示。装置使用状态:气密性为 500 Pa,正压半衰期 120 s。结合 GB/T 29890—2013 粮油储藏技术规范虫粮等级规定,接入锈赤扁谷盗成虫密度 0、5、10、30 头/kg,置于 $(30\pm 1)^\circ\text{C}$ 环境中每天检测其中  $\text{CO}_2$  体积分数,60 d 后检查试虫数量、破碎粒率、千粒重、容重。每个处理设 3 个平行。破碎粒率的测定为随机称 100 g 样品,挑出破碎粮粒并称其质量,计算比率。千粒重测定参照 GB/T 5519,容重测定参照 GB/T 5498 中的方法进行。

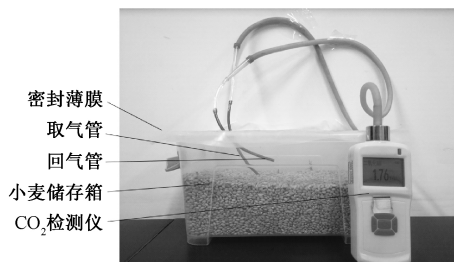


图 1 小麦储藏箱体及  $\text{CO}_2$  体积分数检测装置

Fig.1 Schematic diagram of the wheat storage and  $\text{CO}_2$  monitor

### 1.4 仪器

KP830 型  $\text{CO}_2$  体积分数检测仪:响应时间 60 s,检测量程 0~5%,检测精度 0.01%,河南中

安电子探测技术有限公司;GT903-LM 型  $\text{CO}_2$  体积分数检测仪:响应时间 90 s,检测量程 0~50%,检测精度 0.01%,深圳市科尔诺电子科技有限公司。

### 1.5 数据处理

数据采用 Excel 进行统计,并用 SPSS 软件进行多重比较分析。

## 2 结果与分析

小麦感染不同密度锈赤扁谷盗成虫后的 60 d 内环境中的  $\text{CO}_2$  体积分数变化见图 2。结合  $\text{CO}_2$  体积分数变化和感染时间,将  $\text{CO}_2$  检测结果分为感染初期(0~20 d)体积分数缓慢上升,中期(21~35 d)体积分数增速上升,后期(36~60 d)体积分数快速上升。未感染害虫的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数则一直处于较低水平且缓慢上升。

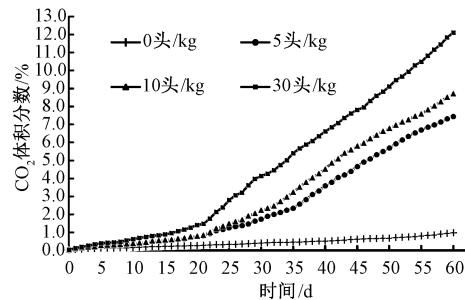


图 2 不同密度锈赤扁谷盗储藏小麦环境中不同时间内  $\text{CO}_2$  体积分数

Fig.2  $\text{CO}_2$  concentration atmospheres in stored wheat infected with different densities of *C. ferrugineus* at different time

### 2.1 感染初期的 $\text{CO}_2$ 体积分数变化

在初期的 20 d 内,未感染试虫的小麦环境中  $\text{CO}_2$  体积分数由 0.040% 升高至 0.283%,  $\text{CO}_2$  体积分数  $c$  随时间  $t$  变化的回归方程为  $c = -5 \times 10^{-6} t^4 + 0.000 2 t^3 - 0.004 t^2 + 0.037 3 t$  ( $R^2 = 0.996$ ), 体积分数日增长平均速率为 0.012%。试验小麦在密闭环境中  $\text{CO}_2$  体积分数增长幅度和速度都较小,主要是因小麦自身呼吸所致。感染害虫密度 5 头/kg 的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数随时间变化回归方程为  $c = 9 \times 10^{-5} t^3 - 0.002 7 t^2 + 0.052 9 t$  ( $R^2 = 0.993 4$ ), 体积分数日增长速率平均为 0.037%, 为无虫小麦环境中的 3.1 倍。第 9 天  $\text{CO}_2$  体积分数已达到 0.330%, 为无虫小麦环境中的 2.1 倍。 $\text{CO}_2$  体积分数增速和增幅加大的原因是初感染成

虫及其繁殖的下一代幼虫产出了更多的  $\text{CO}_2$ 。

锈赤扁谷盗成虫 10 头/kg 样品中感染初期的  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程为  $c = 8 \times 10^{-5} t^3 - 0.0025t^2 + 0.0543t$  ( $R^2 = 0.9966$ ), 体积分数日增长速率平均为 0.038%, 为无虫小麦环境中的 3.2 倍。 $\text{CO}_2$  体积分数的变化与害虫密度 5 头/kg 的样品相近, 害虫密度的倍增并未导致环境  $\text{CO}_2$  体积分数增幅和增速相应增加, 说明环境中锈赤扁谷盗成虫 10 头/kg 与 5 头/kg 感染产生  $\text{CO}_2$  的量差异不显著。

锈赤扁谷盗成虫 30 头/kg 的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程为  $c = 0.0001t^3 - 0.0037t^2 + 0.0784t$  ( $R^2 = 0.9963$ ), 体积分数日增长速率平均为 0.068%, 为无虫小麦环境中的 5.7 倍。30 头/kg 成虫感染密度的增大导致环境中  $\text{CO}_2$  产生量增加显著大于 10 头/kg 以下的感染密度, 主要原因是更多成虫的存在及其产生更多幼虫的联合作用。

鉴于试验用小麦水分条件和环境温度不适合霉菌活动, 样品中产生的  $\text{CO}_2$  应为粮食和害虫呼吸的结果。试验环境密闭后, 初期产生  $\text{CO}_2$  会有定量被粮食吸附, 害虫代谢产生  $\text{CO}_2$  的数量和积累量均较小, 初期体积分数增速缓慢。随后在粮食表面吸附饱和后,  $\text{CO}_2$  体积分数的增长原因是后续的产量加大和累积的结果。从回归方程的幂次看, 小麦感染 5 和 10 头/kg 害虫后样品中  $\text{CO}_2$  体积分数变化幅度和趋势相近, 感染成虫 30 头/kg 的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数增加显著, 30 头/kg 害虫密度的影响与 10 头/kg 以下的样品显著不同。

## 2.2 感染中期的 $\text{CO}_2$ 体积分数变化

试验中期的 21~35 d 中, 未感染害虫的样品环境中  $\text{CO}_2$  体积分数增加幅度和速率仍保持较小和平缓, 粮食的正常呼吸使  $\text{CO}_2$  积累和体积分数小幅升高。5 和 10 头/kg 的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程分别为  $c = 0.0017t^2 + 0.0789t + 0.7902$  ( $R^2 = 0.9951$ ) 和  $c = 0.003t^2 + 0.1124t + 0.8027$  ( $R^2 = 0.9946$ ), 第 21~35 天的  $\text{CO}_2$  体积分数日增长速率平均为 0.105% 和 0.163%, 期间增加幅度为 1.577% 和 2.440%。感染害虫 5 和 10 头/kg 的样品在第 21 天时体积分数比较接近, 在向第 35 天的发展过程中 10 头/kg 的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数增速和增幅均显著加快和加大。样

品中感染害虫的数量效应对气体体积分数增加的影响表现更加显著, 这里除前期的  $\text{CO}_2$  体积分数累积效应外, 更与感染较多成虫后产生了较多幼虫以及幼虫成长过程中增加了更多代谢活动有关。感染 30 头/kg 的环境中  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程为  $c = -0.004t^2 + 0.334t + 1.1549$  ( $R^2 = 0.9958$ ),  $\text{CO}_2$  日增长速率平均为 0.267%, 增加幅度达 4.000%。害虫感染数量的增多更大程度上较 10 头/kg 及以下密度的环境中  $\text{CO}_2$  体积分数增速加大、增加幅度更加显著, 这与更多害虫的感染程度、繁殖数量以及子代幼虫成长增加产生  $\text{CO}_2$  总体能力有关。

## 2.3 感染后期的 $\text{CO}_2$ 体积分数变化

在试验后期第 36~60 天内, 0 头/kg 样品中  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程为  $c = 0.0005t^2 + 0.0074t + 0.4862$  ( $R^2 = 0.9908$ ),  $\text{CO}_2$  体积分数日增长速率变化不显著。感染成虫 5 和 10 头/kg 样品中  $\text{CO}_2$  体积分数变化回归方程为  $c = 0.2045t + 2.5599$  ( $R^2 = 0.9955$ ) 和  $c = 0.2086t + 3.5572$  ( $R^2 = 0.9932$ ), 两个密度的样品中  $\text{CO}_2$  增加速率接近, 10 头/kg 样品中  $\text{CO}_2$  体积分数增加幅度较大。根据试验温度下锈赤扁谷盗的发育历期, 此期间样品中已共生有初感染的母代成虫、子代幼虫、子代成虫以及混合其间的其他虫态, 代谢产生  $\text{CO}_2$  的昆虫个体增多, 时间积累加长等使得环境中  $\text{CO}_2$  体积分数剧增。初感染成虫较多的样品中后代也较多, 样品感染 10 头/kg 成虫产生更多  $\text{CO}_2$  的效果表现较为显著。感染 30 头/kg 成虫的样品中相应回归方程为  $c = 0.267t + 5.2179$  ( $R^2 = 0.9969$ ),  $\text{CO}_2$  体积分数增速和增幅更为显著, 与样品感染成虫基数大、种群繁殖数量多、更多昆虫个体产生更多  $\text{CO}_2$  及其累积效应关系直接。

从 3 个感染虫口密度的样品中  $\text{CO}_2$  体积分数一直呈上升趋势看, 感染 30 头/kg 成虫的样品经过 60 d 其中害虫密度最大达到了 544 头/kg, 但环境中  $\text{CO}_2$  体积分数还处于上升趋势中, 说明如此多的锈赤扁谷盗个体处于试验环境中, 环境  $\text{CO}_2$  抑制效应还未表现出。

## 2.4 试虫存活发展与 $\text{CO}_2$ 体积分数的关系

小麦感染不同密度锈赤扁谷盗成虫 60 d 后样品中存在害虫数量及  $\text{CO}_2$  体积分数见图 3。5 头/kg 样品中锈赤扁谷盗成虫数量达 506 头, 存

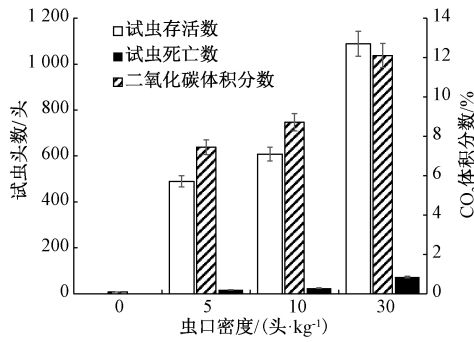


图3 不同密度锈赤扁谷盗感染小麦60 d后样品中存在成虫数量与CO<sub>2</sub>体积分数

Fig.3 CO<sub>2</sub> concentration atmospheres and adult population in wheat infected with different densities of *C. ferrugineus* for 60 days

活489头,死亡17头(不包括卵、幼虫和蛹),经过两个月成虫密度已达245头/kg,为严重虫粮等级。样品中初感染成虫总数10头,最后检查到死亡成虫17头,检查到的死亡成虫数大于初感染成虫总数。死亡的成虫可能基本包括了初感染的母代成虫,也包括有少数子代成虫。从最终害虫总数来看,锈赤扁谷盗在环境中的种群数量显著增加,环境条件有利于其种群发展。10头/kg样品中最后锈赤扁谷盗成虫数量达632头,存活608头,死亡24头(未统计非成虫虫态数量),该条件下害虫种群也处于发展中。比较感染母代成虫的数量,10头/kg样品中害虫增加的数量并非为5头/kg母代成虫样品中害虫总数的2倍,说明10头/kg的样品害虫种群增长受

到了一定程度的抑制。30头/kg样品中锈赤扁谷盗成虫2个月后数量达1161头,存活1088头,死亡73头,害虫个体数量增加倍数更小,30头/kg样品环境中害虫种群发展受抑制更明显。感染成虫数量多的样品,种群发展受抑制的原因与环境中CO<sub>2</sub>体积分数过高有关系。

比较3个感染害虫密度样品最终CO<sub>2</sub>体积分数可以看出,环境中CO<sub>2</sub>体积分数高低不仅与害虫数量关系密切,也与环境中CO<sub>2</sub>气体累积有关。对应每种环境中的害虫数量与气体体积分数,基本上呈现出害虫数量成倍增大,气体体积分数也几乎成倍增加。

## 2.5 锈赤扁谷盗对小麦的危害

不同锈赤扁谷盗成虫密度感染60 d后小麦的千粒重、容重、破碎粒率见表1。结果显示,与无感染样品相比,经过60 d后小麦的千粒重和容重变化差异不显著,在感染锈赤扁谷盗成虫5头/kg小麦的破碎粒率即出现显著增加,害虫感染密度增加为10和30头/kg后,小麦的破碎粒率则增加不显著。小麦感染锈赤扁谷盗成虫后,种群数量和产生大量CO<sub>2</sub>都需要消耗来自于小麦的营养物质,经过成虫感染、大量后代繁殖以及种群数量发展后小麦千粒重和容重均变化不显著,说明在储藏过程中小麦千粒重和容重对锈赤扁谷盗的感染变化不敏感。锈赤扁谷盗大量发生时小麦破碎粒率会升高,经过60 d发展繁殖,感染5和30头/kg之间差异不显著,说明锈赤扁谷盗个体对小麦的危害很小。

表1 不同密度锈赤扁谷盗成虫感染小麦60 d后样品的千粒重、容重和破碎粒率

Table 1 Thousand grain weight, unit weight and kernel broken rate of wheat infected with different densities of *C. ferrugineus* for 60 days

虫口密度/(头·kg <sup>-1</sup> )	0	5	10	30
千粒重/g	45.08±0.08 <sup>a</sup>	45.42±0.05 <sup>a</sup>	45.44±0.07 <sup>a</sup>	45.55±0.08 <sup>a</sup>
容重/(g·L <sup>-1</sup> )	733.13±4.81 <sup>a</sup>	724.70±7.07 <sup>a</sup>	732.50±3.45 <sup>a</sup>	731.33±4.63 <sup>a</sup>
破碎粒率/%	1.41±0.15 <sup>a</sup>	1.76±0.12 <sup>b</sup>	1.81±0.09 <sup>b</sup>	1.92±0.08 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值±标准差,同行字母不同表示在不同虫口密度下的差异显著( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

25℃时10头/kg的玉米象和谷蠹分别感染水分含量12%的小麦,经10 d CO<sub>2</sub>体积分数达0.581%和0.462%,30℃时感染谷蠹的样品中CO<sub>2</sub>体积分数高达0.841%<sup>[12,18]</sup>。本试验中相同虫口密度的锈赤扁谷盗感染小麦,第10天CO<sub>2</sub>

体积分数仅为0.380%,直至第20天才会有显著变化,同样感染程度的锈赤扁谷盗产生CO<sub>2</sub>的量远小于玉米象和谷蠹,也说明锈赤扁谷盗的取食代谢量远小于玉米象和谷蠹。

以谷蠹感染小麦后环境中CO<sub>2</sub>体积分数前期40 d平缓增长,之后至120 d呈迅速增长<sup>[11]</sup>。锈赤扁谷盗感染小麦60 d内CO<sub>2</sub>体积分数趋势与之相似,此阶段CO<sub>2</sub>环境容量未达饱和状态,CO<sub>2</sub>增

高的环境对生物呼吸的抑制还未表现出来。

谷蠹感染小麦 180 d,千粒重由 42.91 g 降至 33.20 g,虫蚀粒率由 0.3% 增加至 18.3%,这两个指标变化显著<sup>[1]</sup>。不同锈赤扁谷盗感染及繁殖后小麦千粒重和容重未出现显著差异,仅有破碎粒率出现显著性变化,说明千粒重和容重指标受锈赤扁谷盗危害后变化不敏感,锈赤扁谷盗感染小麦两个月后可影响到破碎粒率的变化。

在无虫粮环境中 CO<sub>2</sub> 变化慢的情况下,锈赤扁谷盗在基本无虫粮密度下感染即可在 20 d 内出现显著升高,虫密度增加后环境中 CO<sub>2</sub> 体积分数增加更快、更高。仓内 CO<sub>2</sub> 体积分数当达到 0.05%~0.12%,已有虫霉产生,当达到 0.15%~0.40% 时,谷物已被严重感染<sup>[10]</sup>。锈赤扁谷盗感染在一定条件下可很快影响 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化,因此可借此监测粮堆中害虫的存在和发生。在以 CO<sub>2</sub> 体积分数变化为粮堆害虫发生动态监测时,可以考虑以 CO<sub>2</sub> 体积分数的日增长量为参数,也可用一定时间内 CO<sub>2</sub> 体积分数的增加幅度为参数监测粮情和虫情。

**致谢:**研究得到河南工业大学储藏物昆虫研究室的黄依林、侯居东、王晨光、赵欣欣、刘浩星、肖正坤、李双宇、刘晓莉、陈卓、刘鑫宇、杨兴钧、肖惠惠、姜碧若、张瑞杰、冀乐、郭续等同学协助,特此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 王殿轩,彭娟,唐多,等.谷蠹致小麦千粒重和虫蚀粒变化及其与产生 CO<sub>2</sub> 对应性研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2014,35(1):11-15.
- [2] MAIER D E, HULASARE R, QIAN B, et al. Monitoring carbon dioxide levels for early detection of spoilage and pests in stored grain [C]//9<sup>th</sup> International Working Conference on Stored Product Protection, 2006:1174-1181.
- [3] 唐芳,程树峰,伍松陵.稻谷储藏危害真菌生长规律的研究[J].中国粮油学报,2009,24(6):98-101.
- [4] 郭立辉.储粮中昆虫和霉菌产生二氧化碳特性研究[D].郑州:河南工业大学,2015.
- [5] LLELEJI K E, MAIER D E, BHAT C, et al.

Detection of a developing hotspot in stored corn with a CO<sub>2</sub> sensor [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2):275-289.

- [6] BARTOSIK R, CARDOSO L, RODRIGUEZ J. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (Silo-bags) using CO<sub>2</sub> monitoring [C]//8<sup>th</sup> International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products: Chengdu, 2008:550-554.
- [7] 张燕燕.储粮中粮食自身呼吸与霉菌活动产生 CO<sub>2</sub> 的特点[D].郑州:河南工业大学,2014.
- [8] 梁微,蔡静平,高翔.CO<sub>2</sub> 检测法监测小麦储藏微生物活动的研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2009,30(2):55-58.
- [9] MUIR W E, WATERER D, SINHA R N. Carbon dioxide as an early indicator of stored cereal and oilseed spoilage [J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 1985, 28(5):1673-1675.
- [10] MAIER D E, CHANNAIAH L H, MARTINEZ-KAWAS A, et al. Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain [C]//10<sup>th</sup> International Working Conference on Stored Product Protection: Julius Kühn-Institut, 2010:505-509.
- [11] 王殿轩,唐多,朱广有.谷蠹感染的小麦储存环境中二氧化碳浓度变化研究[J].应用昆虫学报,2012,49(2):490-495.
- [12] 王殿轩,徐威,陆群.不同玉米象感染度的小麦储存环境中二氧化碳浓度变化研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2012,33(2):1-5.
- [13] 张育濮,吕建华,王殿轩,等.小麦储藏环境中赤拟谷盗和米象混合发生与 CO<sub>2</sub> 体积分数变化关系研究[J].河南大学学报(自然科学版),2019,40(6):681-689.
- [14] 王殿轩,万家鹏,张浩,等.储粮害虫在线监测及其结果的评价利用[J].中国粮油学报,2017,32(11):112-116.
- [15] PARDE S R, JAYAS D S, WHITE N D G. Movement of *Cryptolestes ferrugineus* (Coleop-
- (下转第 125 页)

- ges in a wheat storage bin regarding temperature. International symposia risk factors for environment and food safety [J]. Oradea, 2009(35): 276-285.
- [7] 李志民,孟淑娟,李宁,等.高大平房仓粮堆温度变化研究[J].粮油食品科技,2008,16(1):22-23.
- [8] 谢静杰,汪向刚,黄志俊,等.不同仓型仓温仓湿日变化规律探讨[J].粮食储藏,2009,38(1):52-56.
- [9] 张忠杰,李琼,杨德勇,等.准静态仓储粮堆温度场的 CFD 模拟[J].中国粮油学报,2010,25(4):46-50.
- [10] 蒋华伟,史磊.粮堆内发热局部温度场变化数学模型研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2007(2):11-14.
- [11] 闫艳霞,曹玲芝.粮仓谷物局部发热温度场数学模型研究与应用[J].粮食与食品工业,2008(4):40-42.
- [12] 金立兵,薛雅琪,梁新亚,等.地下储粮仓温度场的数值模拟与试验研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2019,40(5):120-125.
- [13] 钱永刚,杨晶,王立.钢板粮仓架空隔热层传热的数值模拟研究[J].工程设计,2006(5):13-17.
- [14] 许鹏.平房仓粮面冷气囊隔热系统的模拟研究[D].郑州:河南工业大学,2016.
- [15] 潘钰,张中涛,王远成,等.密闭粮堆中水分和温度变化的模拟研究[J].粮油食品科技,2015(增):24-27.

---

(上接第 119 页)

- tera: Cucujidae) in grain columns containing pockets of high moisture content wheat and carbon dioxide gradients [J]. Journal of Stored Products Research, 2004, 40(3): 299-316.
- [16] 张振军,曹阳,李建智,等.食品级惰性粉内环流施用研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2019,40(3):103-107.
- [17] 王效国,宋瑞成.浅谈锈赤扁谷盗的习性与防治[J].中国粮食经济,2009(7):40-41.
- [18] 唐多,王殿轩,姚剑锋.不同温度和水分小麦中不同谷蠹发生状时二氧化碳变化研究[J].植物保护,2011,37(5):67-71.