

# 粮仓储粮霉变 CO<sub>2</sub> 法监测值主要影响因素

## Effect of CO<sub>2</sub> method on monitoring mildew of stored grain in warehouse and its main influencing factors

白静静 翟焕趁 张帅兵 吕扬勇 蔡静平

BEI Jing-jing ZHAI Huan-chen ZHANG Shuai-bing LU Yang-yong CAI Jing-ping

(河南工业大学生物工程学院, 河南 郑州 450001)

(College of Biological Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**摘要:**利用检测粮堆二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度变化的方法对储粮霉变进行监测,但该方法为间接测定,需对影响粮堆 CO<sub>2</sub> 检测值的粮堆相关因素及传感器相关参数进行全面分析。试验结果表明,不同温度下储粮中霉菌生长早期阶段的霉菌增长量均与 CO<sub>2</sub> 浓度变化同步,两者相关性系数 > 0.99;较低的温度可使霉菌生长产气量显著降低,在霉菌生长量相当的状态下,30 °C 比 20 °C 条件下测得的粮堆 CO<sub>2</sub> 浓度值高 4.7 倍。粮食颗粒间空隙度等多种因素均可显著影响 CO<sub>2</sub> 气体扩散,稻谷粮堆比小麦粮堆的孔隙度高约 30%,稻谷粮堆在相距 CO<sub>2</sub> 发生源 50 cm 的监测点比小麦粮堆测得的峰值浓度高 50%,峰值时间提前 4 d。对粮堆不同深度发生的霉变(距粮面 1, 2 m),监测点设在粮面下 3 m 可减少外界气体交换的影响,监测效果优于深度为 1 m 的监测点。CO<sub>2</sub> 气体检测过程中,高的取样气流速度可显著降低检测值;对于各种规格的输气管道,适宜的检测气体取样量为管道内部理论体积的 1.5 倍。通过合理设定参数,CO<sub>2</sub> 法可灵敏地监测储粮霉菌活动。

**关键词:**粮食;储藏;二氧化碳;霉菌;监测

**Abstract:** The mildew of stored grain will affect the safety of food, which can be monitored by the method of detecting the change of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration in grain bulk. As an indirect method, it is necessary to analyze comprehensively the related factors of grain bulk and the parameters of CO<sub>2</sub> sensor, which can significantly affect the detection value. The results showed that the mould count

in the initial stage of the stored grain fungi growth was synchronized with the change of CO<sub>2</sub> concentration at different temperatures, and the correlation coefficient was greater than 0.99. CO<sub>2</sub> production decreased significantly at low temperature, the CO<sub>2</sub> produced at 30 °C was 4.7 times higher than that at 20 °C in the grain bulk of similar mould count. CO<sub>2</sub> gas diffusion was significantly affected by grain porosity and other factors. The porosity of rice was 30% higher than that of wheat, but the peak concentration of grain pile at the monitoring point 50 cm from the source of CO<sub>2</sub> was 50% higher than that of wheat pile, with 4 days earlier of the peak time. The monitoring point of 3 m below surface of grain bulk could reduce the effect of external gas exchange, and the monitoring effectiveness was better than that of the monitoring point with depth of 1 m when mildew position at 1 m or 2 m from grain bulk surface. The gas flow velocity and sampling quantity should be determined in the process of gas detection, and the detection value could be significantly reduced when the gas flow velocity exceeded the specified flow rate, and the gas sampling volume should be 1.5 times of the theoretical volume in the pipeline. Therefore, the carbon dioxide detection method by setting parameters reasonably could sensitively monitor the activity of mould in stored grain, and this was practically valuable for high efficiency in preventing and controlling the damage of mould.

**Keywords:** grain; storage; carbon dioxide (CO<sub>2</sub>); mould; monitoring

**基金项目:**“十三五”国家重点研发项目(编号:2017YFC1600900, 2017YFD0401404);河南省科技厅资助项目(编号:162102210191, 182300410059)

**作者简介:**白静静,女,河南工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**翟焕趁(1975—),女,河南工业大学讲师,博士。

E-mail: haunchenzhai@126.com

蔡静平(1957—),男,河南工业大学教授,硕士。

E-mail: caijp163@163.com

**收稿日期:**2018-05-01

中国的储备粮仓数量和规模均非常庞大,粮食储藏的周期相对较长,在粮食储藏期间霉菌的生长活动是造成储粮数量损失及品质劣变的主因,许多真菌的代谢活动还会产生有毒代谢产物,从而危及食品安全性<sup>[1-4]</sup>。要避免霉菌对储粮的破坏,科学的监测手段和早期防控是最有效的措施<sup>[5-7]</sup>。现有技术通过对粮食样品的检测分析,可以准确判断粮食中霉菌的活动状况<sup>[8-10]</sup>,但大型粮仓中霉菌早期活动的区域很小,霉变发生部位具有不确定性,随机或定点的粮仓采样往

往难以被发现<sup>[11]</sup>。大型粮仓普遍使用的电子测温技术也只能对发生在测温点的早期霉菌活动做出响应,一旦偏离测温点,由于温度在粮堆中传导极慢,往往难以及时发现霉菌危害的迹象<sup>[12]</sup>。因此,人们一直致力于研发更加灵敏、快捷的霉菌监测技术,这对保障粮食储藏安全具有及其重要的意义。

霉菌生长活动产生的 CO<sub>2</sub> 气体是与热传导相似、可以在粮堆中扩散的因子,粮食籽粒间有 30%~50% 的孔隙度、大型粮仓的粮堆存在温差等因素也有利于气体在粮堆中扩散<sup>[13-14]</sup>,这是该方法能被用于储粮霉菌监测的基础。近年来国内外开展了较多的相关研究,结果已经显示,粮堆中霉菌的生长、繁殖与 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化具有显著的相关性,CO<sub>2</sub> 气体在粮堆中的扩散速率比温度的传导提高数十倍,有利于大幅度提升储粮霉菌活动监测的灵敏度<sup>[15-16]</sup>。但是,储粮中霉菌生长和 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化是间接关系,利用电子传感器检测粮堆中的 CO<sub>2</sub> 气体含量可受许多因素的影响,即使同一粮堆,在相同的储粮霉菌生长状态下也可能因为检测条件的变化或参数设置的差异而得到不同的检测值<sup>[11]</sup>。因此,只有全面阐明各种因素的影响才能使该技术具备实际应用的可能性。

前期国内外对储粮 CO<sub>2</sub> 监测研究的重点在于了解 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化与储粮霉菌生长的关系及 CO<sub>2</sub> 气体在粮堆中的扩散规律<sup>[13-17]</sup>,这些研究结果可直接应用到以气密性高、仓容储粮占比大的筒仓储粮中,根据粮仓空间或出风口的 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化,即可判断储粮中的霉菌活动状况<sup>[16]</sup>。中国储粮以平房仓为主,仓房气密性较差,仓容储粮占比小,在储粮霉变的初期粮堆上方空间的 CO<sub>2</sub> 气体浓度基本不变<sup>[11]</sup>,需要在粮堆中设点进行气体取样检测。由于平房仓区域面积广,粮堆温差大,设点进行气体取样检测涉及诸多影响 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测值的因素,因此,前期许多在实验室模拟储粮容器监测试验中获得的 CO<sub>2</sub> 检测参数及建立的 CO<sub>2</sub> 气体扩散规律很难在实仓中直接应用。为此,本研究选择在平房仓的储粮实仓中进行 CO<sub>2</sub> 气体检测效果试验,试图阐明环境温度、粮食品种等储粮关键因子改变,以及粮堆中霉变部位、气体取样点设置模式或气体取样量等检测参数变化对 CO<sub>2</sub> 检测结果的影响及其规律性,从而构建根据粮堆 CO<sub>2</sub> 气体检测值变化解析储粮霉变状态、判断储粮安全风险的方法,为粮食储藏霉变早期高效防控提供技术参数。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验粮仓及粮食

主要试验在河南工业大学试验粮仓中进行,廋间尺寸为 9 m×6 m,粮堆深度为 6 m,单仓储备容量约 260 t,试验粮为 2016 年河南产混合小麦,含水量 11.5%,堆粮深度 6 m;

稻谷粮堆检测试验在长沙储备粮库完成,规格为 41.5 m×33.5 m (长×宽),粮堆高度 6.22 m,平均水分含量 13.2%,总量 3 399 t,稻谷品质和粮温正常。

### 1.2 主要材料

CO<sub>2</sub> 传感器:Telaire T6615 型,美国通用电器公司;

微型气泵:FM1001 型,成都新为诚科技有限公司;

输气管道:硅胶材质圆管,内径 2~4 mm,市售;

微生物培养、检测所用材料:分析纯;

改良查氏培养基:蔗糖 3%,硝酸钠 0.2%,氯化钾 0.05%,硫酸镁 0.05%,磷酸二氢钾 0.1%,硫酸亚铁 0.001%,氯化钠 6%,琼脂 2%,121 °C 高压蒸汽灭菌。

### 1.3 方 法

1.3.1 粮食水分调节 根据试验所需粮食水分含量,按照 1.15~1.20 倍理论加水量喷雾粮食,在 4 °C 条件下平衡 48 h。

1.3.2 粮仓中模拟霉菌活动粮包的埋设 在粮堆表面挖出一定深度的粮坑,粮包埋设深度为粮包中心到粮面的距离,固定粮包后按照试验需要在一定的部位设置输气管道,然后将粮堆复原。

1.3.3 粮食水分测定 按照 GB 5009.3—2016 检测粮食样品水分含量。

1.3.4 粮食带菌量检测 采用 GB 4789.15—2016 霉菌计数方法,其中所用的培养基改为“改良察氏培养基”。

1.3.5 CO<sub>2</sub> 气体检测 采用 CO<sub>2</sub> 浓度检测传感器,记录一定检测时间点显示器中的检测值。

1.3.6 数据分析方法 使用 SPSS 16 和 Excel 2013 软件进行试验数据的统计分析,试验重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 粮堆温度及环境温度对监测的影响

温度是储粮发生霉变的决定性因素<sup>[18-20]</sup>。为了阐明 CO<sub>2</sub> 法对商业化粮食储藏霉变的检测效果,在粮堆中埋入高水分粮食,进行实仓储粮局部霉变的监测试验。结果(图 1、2)表明,温度是影响 CO<sub>2</sub> 监测结果的关键因子,30 °C 试验组霉菌活动初期(前 10 d)带菌量增加与 CO<sub>2</sub> 气体浓度升高具有高度的同步性,两者的相关性系数达到 0.99 以上,这在实际监测应用中有重要的价值,是 CO<sub>2</sub> 法对霉菌活动灵敏响应的关键属性。因为霉菌菌丝旺盛生长对粮食品质的破坏性和食品安全的危害性最大<sup>[21-22]</sup>,霉菌生长前 10 d 的 CO<sub>2</sub> 浓度显著变化是储粮安全性变化的重要信息,可作为储粮霉变高效防控的技术依据。10 d 后 CO<sub>2</sub> 浓度的回落是霉菌后期呼吸降速的反映,对于储粮监测和处理没有实质性的意义。

当局部高水分粮食处于较低的温度[(20±2) °C]条件下,试验粮带菌量和粮堆 CO<sub>2</sub> 气体浓度均以较缓慢的形式升高(图 1、2),在试验的第 10~25 天,粮食带菌量和 CO<sub>2</sub> 气体检测值开始出现显著升高,两者的相关性系数>0.99。这说明温度的差异导致储粮霉菌生长速率降低,改变 CO<sub>2</sub> 气体浓度的变化模式,但只要霉菌开始生长,CO<sub>2</sub> 气体检测值就会同步升高,这一特点是储粮霉变监测的基础。

比较图 1、2,还可发现一个值得关注的现象,当粮堆中 CO<sub>2</sub> 气体的小幅度升高时,较低温度下粮堆中对应的带菌量变化远高于较高温度粮堆中的。例如,相同水分粮食储藏在 20 °C 下第 35 天的带菌量变化与 30 °C 储藏第 15 天的相当(图 1),但其粮堆中 CO<sub>2</sub> 气体浓度则分别为 0.27% 和 1.28%

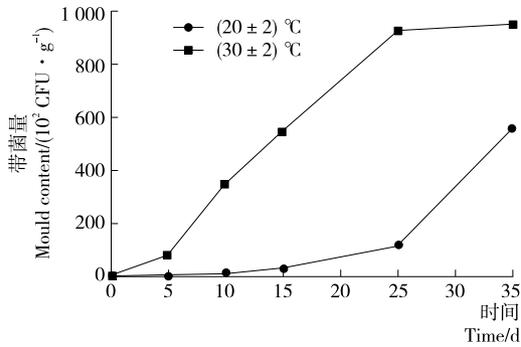


图 1 不同温度下霉变点粮食霉菌含量的变化

Figure 1 The mould content changes of mildew grain at different temperature

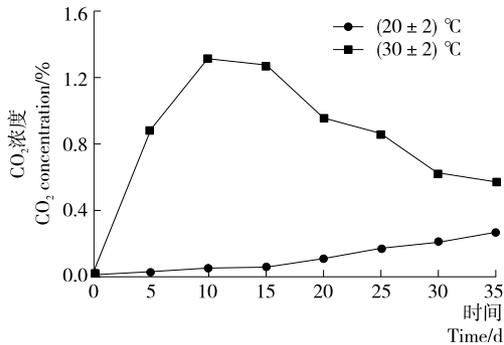


图 2 粮堆温度对 CO<sub>2</sub> 检测结果的影响

Figure 2 Effect of grain bulk temperature on carbon dioxide detection

(图 2), 两者相差达 4.7 倍。产生这一现象的本质除了低温使生物代谢强度降低, 产气量减少, 还与环境温度对远距离气体采样和 CO<sub>2</sub> 气体检测的影响有关<sup>[13,23]</sup>。

为了验证环境温度对 CO<sub>2</sub> 气体检测值的影响, 将 5 种浓度 CO<sub>2</sub> 气源通过 30 m 输气管道在 3 种温度下进行 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测试验, 结果表明, 虽然不同浓度下的检测值差异程度不同, 但总体而言, 较高温度下同一浓度的 CO<sub>2</sub> 气体检测值更高(图 3), 5 种浓度 CO<sub>2</sub> 检测的平均值, 30, 25 °C 的检测值分别比 20 °C 的高 22% 和 12%。因此, 环境温度越低, 相同的粮堆 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化对应的储粮霉变程度越高, 需要予以更多的关注。

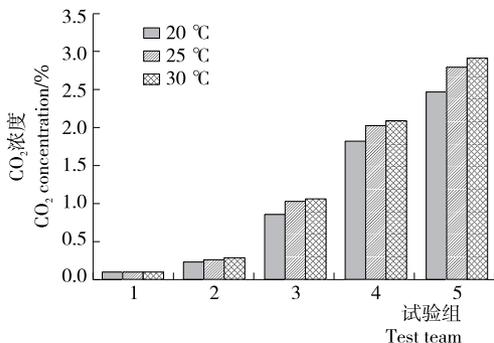


图 3 空间温度对 CO<sub>2</sub> 检测值的影响

Figure 3 Effect of air temperature on carbon dioxide detection

## 2.2 粮食品种对 CO<sub>2</sub> 监测结果的影响

中国储藏量最大的粮食品种分别为稻谷、小麦和玉米, 在大规模的散粮储藏期间, 相同的生物量活动与产生 CO<sub>2</sub> 量是一致的<sup>[5]</sup>, 但实际检测到的 CO<sub>2</sub> 气体浓度不仅与气体产生量有关, 还与粮堆的孔隙度(扩散特性)和粮食对 CO<sub>2</sub> 气体的吸附特性等参数有关。根据粮食的物理学特性, 稻谷粮堆的孔隙度一般比小麦高约 30%, 但对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力也比小麦高约 15%, 这 2 种特性对 CO<sub>2</sub> 气体扩散影响效果是相反的, 实际检测值是多种因素综合影响的结果。本试验在小麦和稻谷粮堆中埋设相同数量的霉变粮, 在相距 0.5 m 处进行检测, 结果(图 4)表明, 稻谷粮堆比小麦粮堆 CO<sub>2</sub> 气体的最高检测值高 50%, 峰值时间提前了 4 d, 说明在储粮中 CO<sub>2</sub> 气体快速产生的条件下, 粮堆的粮粒间孔隙度是影响 CO<sub>2</sub> 气体扩散的主要因素, 吸附作用的影响不明显。因此, 对于孔隙度较低的粮食品种或由于杂质含量较高而影响气体扩散的粮堆, 可以考虑降低监测点的间距, 以弥补对监测灵敏度的影响。

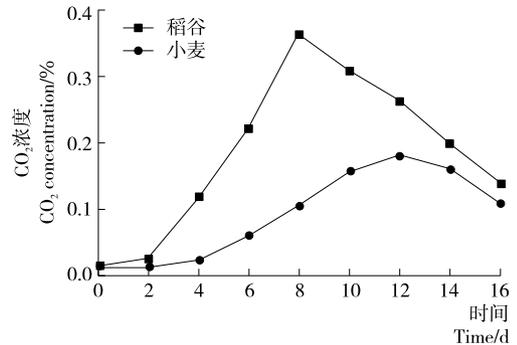


图 4 粮食品种对监测结果的影响

Figure 4 Effect of grain variety on carbon dioxide detection

## 2.3 粮堆中霉变点和监测点位置对检测值的影响

将 2 组各 40 kg 高水分粮食分别埋设到距粮堆表面 1, 2 m 的小麦仓中, 并在距粮面 1, 3 m 的部位分别设置气体监测点, 结果见图 5。当霉变活动部位靠近粮堆表面时[图 5(a), 距粮面 1 m], 产生的 CO<sub>2</sub> 气体与外界大气的交换比例较高, 即使监测点(粮面向下 1 m)与霉菌活动产气点重合, 其 CO<sub>2</sub> 气体检测值在初期升高后迅速以较高的速率下降, 第 10 天比第 4 天的 CO<sub>2</sub> 气体浓度值下降达 1.44%; 但在该模式下距粮面 3 m 的监测点 CO<sub>2</sub> 检测值相对较为平缓, 相同时间段的 CO<sub>2</sub> 气体浓度变化幅度为升高 0.38%[图 5(a)], 较深部位监测点的数值变化模式可更客观地反映霉菌的实际生长状态。当霉变活动部位处于粮堆较深部位时[距粮面 2 m, 图 5(b)], 粮堆深部的监测点检测到的 CO<sub>2</sub> 气体浓度峰值更高, 高浓度 CO<sub>2</sub> 维持的时间更长(与模拟粮包距粮面 1 m 相比), 这种变化特点是 CO<sub>2</sub> 气体在粮堆中具有一定沉降特性的表现。比较 1 m 和 3 m 监测点的 CO<sub>2</sub> 气体检测值变化, 可以看出, 3 m 深监测点监测效果更稳定, 因此, 实际应用时应优先在粮堆中部靠下的部位设置主要监测点, 在近表层的部位设辅助监测点, 根据各监测点检测到的 CO<sub>2</sub> 气体浓度差异和变化模式, 判断粮堆中霉变发生的规模和空间方位。

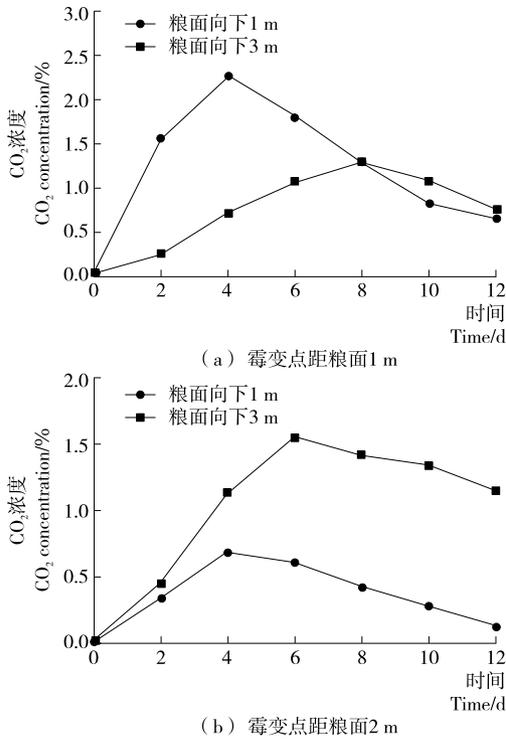


图 5 气体取样部位对检测结果的影响  
Figure 5 Effect of gas sampling location on detection results

2.4 气体取样流速对检测的影响

气体取样流速是 CO<sub>2</sub> 气体检测必须设定的参数,提高流速虽然可以减少检测耗时,但可能影响检测值。本试验通过检测粮仓中不同浓度 CO<sub>2</sub> 气体,研究气体取样流速对检测值的影响。结果(图 6)显示,当气体取样流速为 50~100 mL/min 时,不同浓度 CO<sub>2</sub> 气体均可获得稳定的检测结果。在 <50 mL/min 气体流速下,检测值均比较低,可能与管道内留存的空气有关。在 >100 mL/min 的较高检测气体流速下,对浓度超过 1% 的 CO<sub>2</sub> 气源检测结果影响不明显;当监测点 CO<sub>2</sub> 气体浓度 <1% 时,高气流速度对检测值的影响非常显著。例如,对于相同粮堆监测点,当气流速度为 200 mL/min 时,CO<sub>2</sub> 检测值的降幅可达 50% 左右。这种现象可能与传感器本身的性质有关。目前以输气通道方式检测

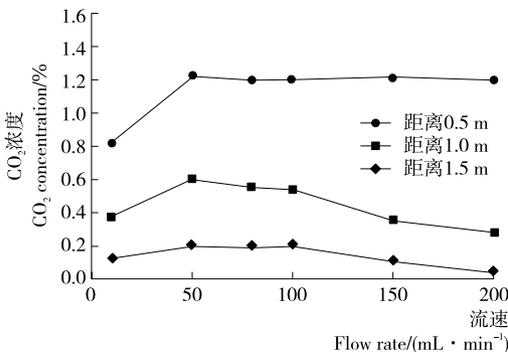


图 6 气体流速对 CO<sub>2</sub> 检测的影响  
Figure 6 Effect of sampling gas flow velocity on carbon dioxide detection

CO<sub>2</sub> 气体浓度的传感器一般采用红外吸收模块,其主要工作原理是 CO<sub>2</sub> 特异吸收红外辐射能量产生电位变化<sup>[24]</sup>。进入气体传感器的气流速度可影响红外吸收的能量,从而可改变传感器检测值。因此,为了监测储粮霉菌的早期生长,应该将进入检测传感器的 CO<sub>2</sub> 气体流速调节在 50~100 mL/min,确保检测的灵敏度和结果的准确性。

2.5 气体取样量对检测结果的影响

CO<sub>2</sub> 的检测方式不适合将传感器埋在粮堆中使用,而是通过气体取样整仓共用一个传感器。根据检测的需要,在同一粮仓中会采用不同材质、管径的输气管道,管道长度也会根据距离而改变。输气管道参数差异将导致输气阻力及换气效果发生相应变化,其综合影响很难进行理论计算。如果以常规控制时间的方法进行检测将会产生较大的误差,应该通过控制气体取样量检测才能获得稳定、准确的检测结果。图 7 是在 3 个 CO<sub>2</sub> 气体浓度监测点中用 20 m 长,5 mm×3 mm 规格输气管道进行检测的结果,试验表明,当气体取样量达到管道理论体积的 1.38 倍时,CO<sub>2</sub> 气体浓度检测值达到原位检测浓度的 95% 左右,当气体取样量提高至 3.22 倍时,其检测值与 1.38 倍取样量相比没有显著变化 (P<0.05)。进一步对不同长度和内径的输气管道以 1.5 倍管道内部空间理论体积气体取样量进行检测试验,结果也(表 1)表明,各种规格管道的实际检测值可达到原位 CO<sub>2</sub> 气体浓度的 90% 以上,达到监测方法判断储粮安全性的效果。如果气体取样量过大,霉变点产生的 CO<sub>2</sub> 气体可能不足以补充检测的消耗<sup>[25]</sup>,检测值就会降低。因此,在实际应用中不管仓内输气管道规格、尺寸如何变化,只要将气体取样量确定为 1.5 倍管道内部体积进行检测,即可满足监测粮堆中霉变活动的需要。

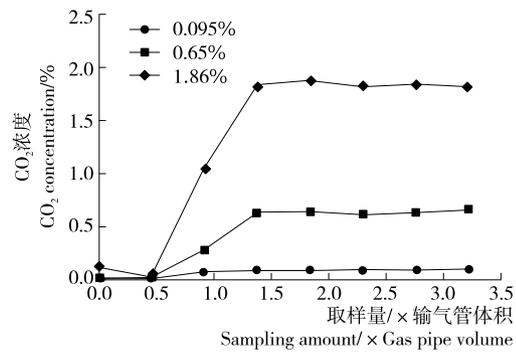


图 7 气体取样量对 CO<sub>2</sub> 检测的影响  
Figure 7 Effect of gas sampling volume on carbon dioxide detection

3 结论

本试验的研究表明,尽管粮堆温度和环境温度均可影响 CO<sub>2</sub> 气体检测结果,但在不同温度条件下粮堆 CO<sub>2</sub> 检测值均与储粮霉菌早期生长的数量变化关系完全对应,这一规律构建了 CO<sub>2</sub> 法实际应用的基础。不同的粮食品种、监测方法及检测参数设置也会不同程度地改变 CO<sub>2</sub> 气体检测值,通过正确设置监测模式和检测参数可以获得准确、稳定的检测值。

表 1 不同规格输气管道按 1.5 倍换气率的检测效果

Table 1 Testing effect of 1.5 times air exchange rate for different gas transmission pipeline

原位 CO <sub>2</sub> 浓度/%	管道长度(内径 3.0 mm)/m			管道内径(长度 20 m)/mm		
	10	20	30	2.0	2.5	3.0
0.45±0.01	0.43±0.02	0.44±0.03	0.43±0.01	0.42±0.01	0.44±0.03	0.45±0.02
1.32±0.02	1.29±0.11	1.31±0.08	1.28±0.03	1.32±0.09	1.30±0.10	1.31±0.09
2.21±0.04	2.19±0.10	2.22±0.12	2.16±0.09	2.18±0.11	2.20±0.07	2.21±0.12

本试验确定的 CO<sub>2</sub> 法检测参数及监测方式适用于对平房仓实仓常规储粮的霉菌危害活动监测;揭示的相关规律性,对分析、解读监测信息有较好的参考价值。但中国储粮规模大、仓型多、地域广,实际应用时还需根据具体的储粮状态进行必要的测试或验证,阐明各种影响因子的作用特点,制订出根据粮堆 CO<sub>2</sub> 检测值变化解析储粮霉菌生长活动状态的规则,从而对储粮局部霉变及安全风险进行灵敏的早期预警,为储粮霉菌精准、高效控制提供依据。

### 参考文献

- [1] MYLONA K, SULYOK M, MAGAN N. Relationship between environmental factors, dry matter loss and mycotoxin levels in stored wheat and maize infected with *Fusarium* species[J]. *Food Additives & Contaminants Part A: Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2012, 29(7): 1118-1128.
- [2] SADHASIVAM S, BRITZI M, ZAKIN V, et al. Rapid Detection and Identification of Mycotoxigenic Fungi and Mycotoxins in Stored Wheat Grain[J]. *Toxins*, 2017, 9(10): 302-318.
- [3] PITT J I, TANIWAKI M H, COLE M B. Mycotoxin production in major crops as influenced by growing, harvesting, storage and processing, with emphasis on the achievement of Food Safety Objectives[J]. *Food Control*, 2013, 32: 205-215.
- [4] 张耀磊, 翟焕趁, 张帅兵, 等. 基于监测过氧化氢酶活性对储藏玉米 AFB<sub>1</sub> 污染的早期预警[J]. *食品与机械*, 2017, 33(1): 110-113.
- [5] ZHAI Huan-chen, ZHANG Shuai-bing, HUANG Shu-xia, et al. Prevention of toxigenic fungal growth in stored grains by carbon dioxide detection[J]. *Food Additives & Contaminants Part A: Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2015, 32(4): 596-603.
- [6] 惠国华, 倪斌. 基于电子鼻系统的粮食霉变检测方法研究[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(5): 162-168.
- [7] MOHAPATRA D, KUMAR S, KOTWALI WALE N, et al. Critical factors responsible for fungi growth in stored food grains and non-Chemical approaches for their control[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 108: 162-182.
- [8] 刘伟龙, 李翠香, 王玉利, 等. 小麦储藏过程中温度对劣变起始位点及生理酶活性的影响[J]. *食品与机械*, 2015, 31(2): 183-186.
- [9] 张燕燕, 蔡静平, 蒋澎. 储粮微生物危害检测技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2013, 29(6): 267-270.
- [10] ZHANG Shuai-bing, ZHAI Huan-chen, HU Yuan-sen, et al. A rapid detection method for microbial spoilage of agro-products based on catalase activity[J]. *Food Control*, 2014, 42: 220-224.
- [11] ZHANG Shuai-bing, ZHAI Huan-chen, HUANG Shu-xia, et al. A site-directed CO<sub>2</sub> detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2014, 59: 146-151.
- [12] 蔡静平, 蒋澎, 张燕燕, 等. 储粮早期霉变监测方法测试研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 58-62.
- [13] 蔡静平, 王智, 黄淑霞. 储粮中 CO<sub>2</sub> 气体的扩散特性及霉菌活动监测研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(3): 1-4.
- [14] HUANG H, DANA O M G C, RAUSCH K D, et al. Diffusion and production of carbon dioxide in bulk corn at various temperatures and moisture contents[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2013, 55(4): 21-26.
- [15] NEETHIRAJAN S, FREUND M S, JAYAS D S, et al. Development of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) sensor for grain quality monitoring[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 395-404.
- [16] ILELEJI K E, MAIER D E, BHAT C, et al. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO<sub>2</sub> sensor[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, 22(2): 275-290.
- [17] RAUDIENE E, RUSINSKAS D, BALCIUNAS G, et al. Carbon dioxide respiration rates in wheat at various temperatures and moisture contents[J]. *Journal of Metrology Society of India*, 2017, 32(1): 51-58.
- [18] 岳晓禹, 陈威风, 邹健, 等. 温度对储藏玉米中霉菌生长影响的动力学模型构建[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 231-236.
- [19] 李听听, 陈伟, 李广富, 等. 不同储藏条件下玉米中霉菌对黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(6): 211-215.
- [20] 陈桂香, 王海涛, 张虎. 通风过程中粮堆内热湿传递及霉变预测 CFD 研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(7): 85-90.
- [21] 刘焱, 翟焕趁, 蔡静平. 利用监测 CO<sub>2</sub> 方法预警储藏玉米中黄曲霉菌产毒[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(5): 309-315.
- [22] GONZALES H B, ARMSTRONG P R, MAGHIRANG R G. Simultaneous monitoring of stored grain with relative humidity, temperature, and carbon dioxide sensors[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(4): 595-604.
- [23] ABALONE R, GASTÓN A, BARTOSIK R, et al. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag. Part II: Model sensitivity and effect of grain storage conditions [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2011, 47(4): 276-283.
- [24] 王莉, 陈小平. 基于红外传感器的 CO<sub>2</sub> 测量装置[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(11): 115-117.
- [25] SHUNMUGAM G, JAYAS D S, WHITE N D G, et al. Diffusion of carbon dioxide through grain bulks[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2005, 41: 131-144.