吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之八/“新技术”分栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.008
刘哲, 陈凯, 吴文福, 等. 多功能储粮安全现场快速检测分析仪的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 56-65.
LIU Z, CHEN K, WU W F, et al. Study on multifunctional analyzer for rapid detection of grain storage safety[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 56-65.

多功能储粮安全现场快速检测分析仪的研究

刘　哲[1]，陈　凯[1]，吴文福[1]，刘玉娟[2]，韩　峰[1]，徐　岩[1]✉，
孙凤阳[3]，石井峰[4]，丰　博[4]，许启铿[5]

（1. 吉林大学 生物与农业工程学院，吉林 长春 130022；
2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院，吉林 长春 130022；
3. 中国储备粮管理集团有限公司吉林分公司，吉林 长春 130033；
4. 中央储备粮龙嘉直属库有限公司，吉林 长春 130504；
5. 河南工业大学 土木工程学院，河南 郑州 450001）

摘　要：粮食在仓储过程中会受到生物场和非生物场等诸多方面影响，从而导致易出现发热、霉变、结露以及虫害等现象，迫切需要研发便捷、快速、多功能和高精度的现场检测工具。多功能储粮安全现场快速检测分析仪针对实际储粮管理的需求，在多点高精度检测温度、湿度和 CO_2 浓度的基础上，以模型和算法推算储粮水分、水分活度、绝对湿度、积温、积湿、J/Q 值和绝对水势，对推算结果进行图形化表达，辅助判定安全、结露、发热、霉变等储粮状态、选择机械通风作业参数，并进行智能控制。初步应用结果表明，该仪器对粮仓管理能够提供有效技术支撑，具有良好的应用前景。

关键词：储粮；生物安全；多参数检测；水势；云图
中图分类号：S-03；TS205　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1007-7561(2023)02-0056-10
网络首发时间：2023-03-09 14:31:57
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.1012.012.html

Study on Multifunctional Analyzer for Rapid Detection of Grain Storage Safety

LIU Zhe[1], CHEN Kai[1], WU Wen-fu[1], LIU Yu-juan[2], HAN Feng[1], XU Yan[1]✉,
SUN Feng-yang[3], SHI Jing-feng[4], FENG Bo[4], XU Qi-keng[5]

(1.College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
2. College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
3. Jilin Branch of China Grain Reserve Management Group Co., Ltd, Changchun, Jilin 130033, China;
4. Sinograin Longjia Depot Ltd. Company, Changchun, Jilin 130504, China; 5. College of Civil Engineering

收稿日期：2022-12-19
基金项目：吉林省科技发展计划项目（2019102003JH）；“科技助力经济 2020”重点专项（SQ2020YFF0421071）
Supported by: Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (No. 2019102003JH); Key special project of “Science and Technology Assisting the Economy 2020” (No. SQ2020YFF0421071)
作者简介：刘哲，女，1987 年出生，博士，讲师，研究方向为智能化检测与控制技术。E-mail: liuzhe22430@163.com.
通讯作者：徐岩，女，1974 年出生，博士，讲师，研究方向为粮食储藏技术。E-mail: xuyan@jlu.edu.cn.

and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The grain storage process could be affected by many aspects such as biological field and non biological field, which will lead to the phenomenon of heating, mildew, dewing and pest damage in the grain storage process. It is urgent to develop convenient, fast, multi-functional and high-precision on-site detection tools. According to the requirements of actual grain storage management, the multi-functional grain storage safety on-site rapid detection analyzer could calculate the stored grain moisture, water activity, absolute humidity, accumulated temperature, accumulated humidity, J/Q value and absolute water potential with models and algorithms on the basis of multi-point high-precision detection of temperature, humidity and CO_2 concentration, and could graphically expresse the calculated results to assist in the determination of stored grain conditions such as safety, condensation, heat, mildew, etc, which will have mechanical ventilation operation parameter selection and intelligent control. The preliminary application of the instrument shows that it can provide effective technical support for granary management and has a good application prospect.

Key words: grain storage; biosafety; multi parameter detection; water potential; cloud map

粮食在储藏过程中会受到诸多方面的影响，如仓内温度、湿度、粮食含水率、仓外环境温湿度等，这些因素会导致粮食在仓储过程中易出现发热、结露、霉变以及虫害等现象[1-4]。此外，这些因素单独对储粮安全影响的同时，又相互作用形成生物场与非生物场，从而使粮仓内部变成极为复杂的系统[4-7]。早期，粮食储藏生物安全多以经验判断为主，对工作人员技术水平要求高且误差大，往往会造成巨大损失。随着科技的发展，传感器技术在农业领域的应用也越加广泛。

2000 年美国农业部已将 CO_2 浓度检测作为储粮生物危害的早期检测方法，在研究人员的不断努力下，针对 CO_2 浓度与粮仓真菌生长相关性的研究取得突破性进展。Ricardo Bartosik[8]通过实验证明利用 CO_2 传感器可监测粮堆水分变化，当 CO_2 浓度在 4%以下时，粮食处于安全水分；而当 CO_2 浓度超过 4%时，粮食将可能出现发霉。Zagrebenyev D 等[9]利用简桶仓实验得出，虫害活动会导致粮仓内 CO_2 浓度快速升高，且浓度变化与虫害规模呈正相关性，而此项研究为虫害早期预警提供了新的思路。2010 年，Maier 等[10]通过实验发现，使用 CO_2 浓度检测方法可有效弥补在使用温度检测时因粮食导热的滞后性而未能及时预报虫害霉变等问题。在国内，唐芳等[11-12]研制了储粮生物危害早期检测仪，可对粮堆内的温度和 CO_2 浓度进行快速检测，并结合检测结果智能判断粮食所处危害等级。李德燕等[13]研制了小型粮仓手持式粮情检测系统，可通过将其直接插入粮堆内来检测温度和湿度。还可在系统界面设置阈值和报警功能，并且具有控制风机启停和紧急通风处理功能。该检测系统虽然体积小、成本低且操作方便，但未考虑到虫霉呼吸作用的影响，也未能对储粮状况做出判断与预测。沈文豪[2]研制了便携式储粮生物危害检测仪，其将温度检测、湿度检测以及 CO_2 浓度检测功能集于一体，可对粮仓某一点进行随时随地检测。该检测仪可对检测参数进行分析，智能判断粮食所处危害等级，并筛查高水分区，有效做出指导工作。但该检测仪对于储粮安全状况的分析功能较少，且检测参数及检测手段也较为单一。

本研究针对实际储粮管理的需求，在多点高精度检测温度、湿度和 CO_2 浓度的基础上，以模型和算法推算储粮水分、水分活度、绝对湿度、积温、积湿、J/Q 值和绝对水势，进一步对推算结果进行图形化表达，辅助对安全、结露、发热、霉变等储粮状态进行判定、机械通风作业参数进行选择，并进行智能控制。

1 检测系统设计

1.1 系统功能设计

多功能储粮安全现场快速检测分析仪设置了如下功能：包括基本参数检测、粮仓相关参数设

置、数据存储、串口通信、粮堆生物安全判断、远程数据传输、阵列式按钮生成及检测、多参数云图生成以及水势图显示与通风指导等功能，系统功能设计示意图如图 1 所示。

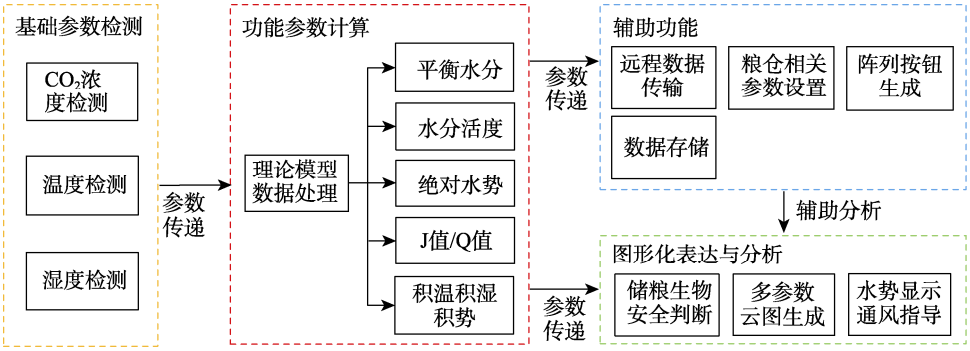


图 1　系统功能设计示意图

Fig.1　Schematic diagram of system function design

1.2　系统软件开发

1.2.1　参数设置

系统在使用前需要设置一些基本参数包括粮库号、粮仓号、预抽气时间、粮食品种、粮食储藏时间、温度基点以及数据存储路径。设置界面如图 2 所示。该系统在检测 CO_2 浓度时需将待测点气体通过采样钎抽入检测传感器，根据待测点深度不同，抽取气体的时间不同，设定抽气时间可通过上位机发送给下位机执行。由于不同粮食品种的霉菌生长情况、生物活动有所不同，导致在相同时间内所产生的 CO_2、霉菌数量以及热量等也会有所不同。因此在对粮食安全状况进行检测时，应该根据粮食品种和储藏时间进行相应的参数设置。

图 2　参数设置操作界面

Fig.2　The operation interface of parameter

1.2.2　参数检测

系统对粮仓待测点的 CO_2 浓度进行精准且快速检测，还可对粮仓温度及湿度进行检测，利用相关计算模型及数据处理方法，实现对粮仓平衡水分、水分活度等的多参数检测。操作人员通过点击检测按钮向下位机发送工作指令，此时界面自动弹出进度条，当进度条满后，上位机将接收到的数据进行处理，根据检测结果，对当前粮食进行生物安全等级判断，并以弹窗形式显示。基础参数检测界面如图 3 所示。

图 3　基础参数检测界面

Fig.3　The detection interface of basic parameter

1.2.3　功能参数云图表达分析

云图是分析粮堆生物场、观察粮堆数据变化的一种直观表现形式，通过云图来表示粮堆内 CO_2 浓度、温度、湿度和平衡水分等检测数据，能够方便粮仓保管员直观准确的判断储粮状态，分析粮堆整体生物安全状况，预测粮堆变化趋势，如图 4 所示。

1.2.4　功能参数绝对水势图表达和分析设计

在通风管理中，为了弥补现有方法的不足，

图 4 功能参数云图表达分析界面

Fig.4 Expression analysis interface of the function parameter cloud map

将能量判断法引入到通风管理中，绘制粮食–空气绝对水势图，粮食的绝对水势实际耦合了温度和平衡湿度的综合参数在绝对水势图中，即使多个不同粮食状态点的解吸线与吸附线同时绘出，也能清晰的反映仓内粮堆的当前状态及通风过程中粮堆内部的能量迁移，并可通过比较粮食和空气绝对水势所在的窗口位置直接进行通风管理[14]。水势通风界面如图 5 所示。

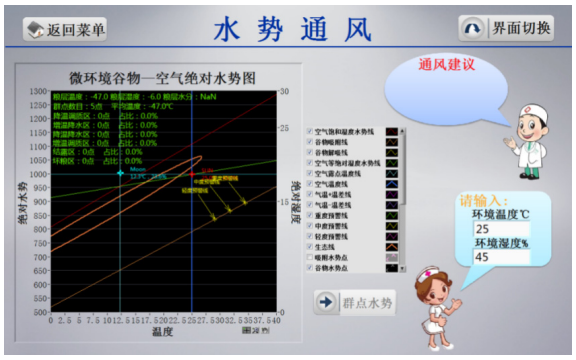


图 5 功能参数绝对水势图表达和分析界面

Fig.5 Expression and analysis interface of the functional parameter absolute water potential diagram

在系统绝对水势图中，粮情数据在图中的映射点分别为太阳点（通风过程中大气映射点），月亮点（粮仓中特定或选定粮食点平均参数在图中的映射），星星点（粮仓中特定或选定粮食各点分别在图中的映射），图中通风规则判定边界线主要包括空气饱和水势线、空气温度等温线、空气±通风温差等温线、粮食等效水势线、空气结露温度线、坏粮线，通过边界线将绝对水势图分为降温降水区、增温降水区、降温调质区、增温调质区、结露区、坏粮预警区，可根据空气点和粮食点在水势图中不同区域的相对映射关系，进行相应的通风管理。

1.2.5 系统构建

根据上述系统功能构建了储粮生物安全多参数检测系统，该系统以手提箱为外形结构，便于携带和存放；微机控制软件实现对整个采集过程的控制和结果分析；软件的升级方便灵活，硬件上可以和相关设备进行配合使用；操作简单，可在线修改参数。检测系统实物图如图 6 所示。

图 6 检测系统实物图

Fig.6 Physical picture of detection system

2 材料与方法

2.1 实验目的

验证储粮生物安全多参数检测系统在实仓工作环境中的检测性能，以及检测系统的实用性与人机交互功能的友好性。

2.2 实验材料及设备

（1）实验对象：中储粮龙嘉直属库平方仓，包括 1 个玉米平房仓、1 个水稻平房仓。

（2）实验设备：储粮生物安全多参数检测装置 1 台、DL331100B 型激光测距仪 1 个。

2.3 实验方案

（1）选取 2021 年 12 月 2 日和 2022 年 1 月 14 日对中储粮龙嘉直属库 1 个玉米平房仓和 1 个水稻平房仓进行实仓实验，每次实验为期一天。

（2）根据储粮平房仓内部的长和宽，在每个粮仓内选取均匀分布的 16 个检测点，检测点分布如图 7 所示。

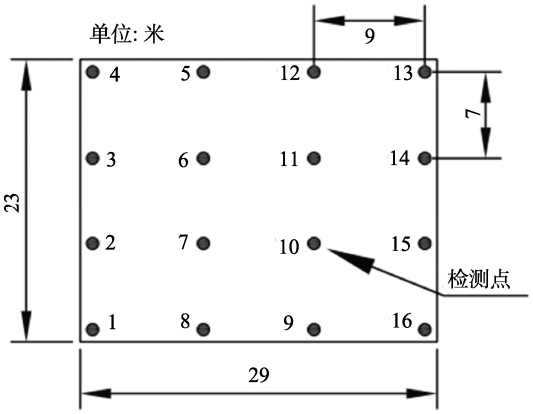


图 7　仓内检测点分布图

Fig.7　Distribution of warehouse detection points

（3）利用激光测距仪确定检测点位置，对每个检测点重复检测 3 次，检测深度为 1 m，同时对仓内环境进行 3 次连续检测，由于检测系统具有数据存储功能，因此无需人为记录检测数据；

（4）在检测过程中，操作并查看人机交互界面的水势分析等功能，而在检测结束后，查看对应粮仓的多参数云图；

（5）对实验数据进行处理分析。

2.4　实验现场

实验现场照片如图 8 所示。

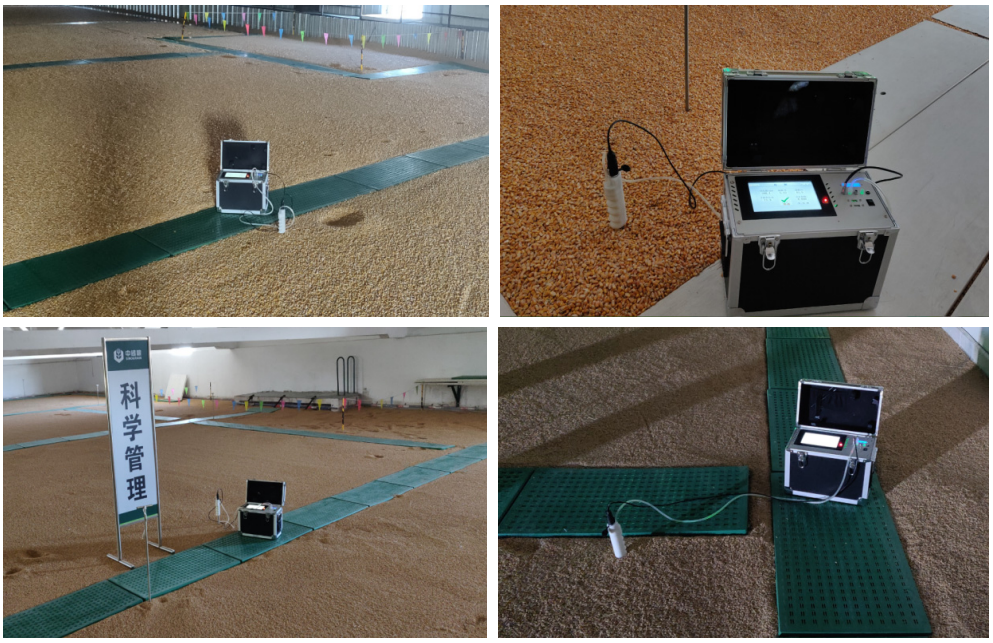


图 8　中储粮龙嘉直属库实验工作图

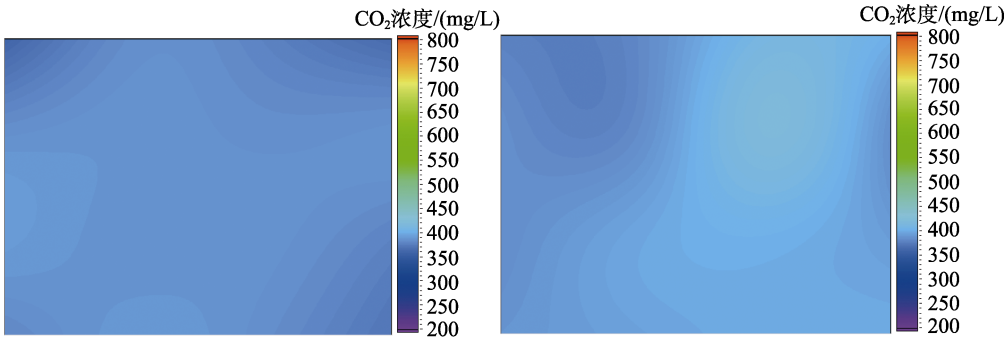
Fig.8　Experimental working pictures of Longjia warehouse

3　结果与分析

3.1　水稻仓检测结果分析

如图 9~13 所示，为储藏水稻仓各参数分布图。图 9 中可以看出，在两次实验中，CO_2 浓度分布大致相同，浓度值均波动在 360~420 mg/L 之间，粮食储藏状态均为安全储藏。在 2021 年 11 月 24 日，该仓进行过一次机械通风，在第二次实验中，粮仓 CO_2 浓度值较第一次实验有所降低，其主要原因是由于在机械通风过程中，粮堆内部温度下降，而低温环境能够有效抑制生物呼吸，从而降低 CO_2 浓度。如图 10 为水稻仓温度分布图，从图中能够看出，第一次实验所测得的上层粮堆温度在 9~15 ℃范围内波动，粮仓温度分布不均匀，局部区域温度较高，但都处于低温安全储藏条件，检测系统判定粮仓储藏为安全储藏。观察第二次实验所得温度云图能够看出，粮温已到零下，在短短一个多月，粮温变化幅度较大，而这主要是粮仓后期进行机械通风和自然通风所致。图 11 为水稻仓湿度变化情况，图 11a 中，粮仓中部和左部区域湿度较高，表明其冷热气流相遇现象较为明显，而从图 11b 能够看出，粮仓右侧区域的空气相对湿度明显降低。谷物在一定的温度和湿度条件下，经过一段时间后，水分不再发生变化，而此时的水分为谷物的平衡水分[15]。图 12 为水稻仓平衡水分变化情况，图中

可以看出粮仓通风后随着温度和湿度的迁移，平衡水分降低，并且高水分区域向仓外迁移。粮堆内微生物的生长和繁殖由多种因素相互作用所引发，而这些因素中包括水分活度（Aw）。粮食所含水分中，一部分水分与溶质结合力小或处于游离态，能够被微生物利用，因此用水分活度来表示其大小。在储粮过程中，水分活度与温度之间的相互作用能够决定微生物的生长和繁殖速率，当温度适宜的情况下，真菌生长的最小水分活度为 0.6，而当水分活度值高于 0.65 时，亮白曲霉和局限曲霉开始缓慢生长[16]，因此水分活度既能反映谷物中水分的存在状态，也能表示谷物的质量变化和微生物对水分的利用程度[17]。水稻仓水分活度分布图如图 13 所示。

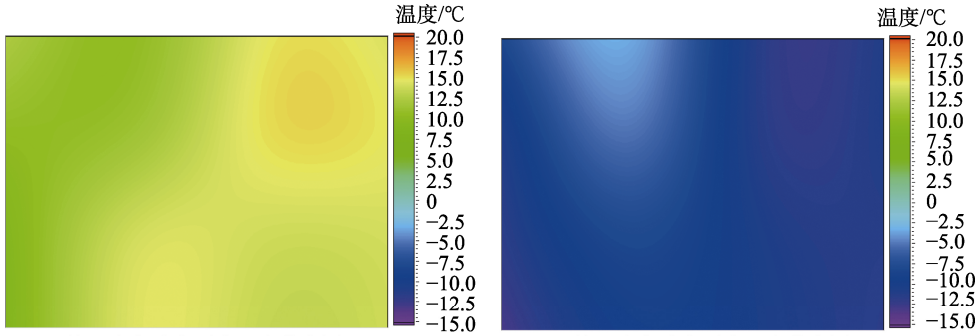


a 第一次实验水稻仓 CO_2 浓度分布图
a CO_2 concentration distribution map of the rice storehouse in the first experiment

b 第二次实验水稻仓 CO_2 浓度分布图
b CO_2 concentration distribution map of rice storehouse in the second experiment

图 9　水稻仓 CO_2 浓度分布图

Fig.9　CO_2 concentration distribution map of rice storehouse

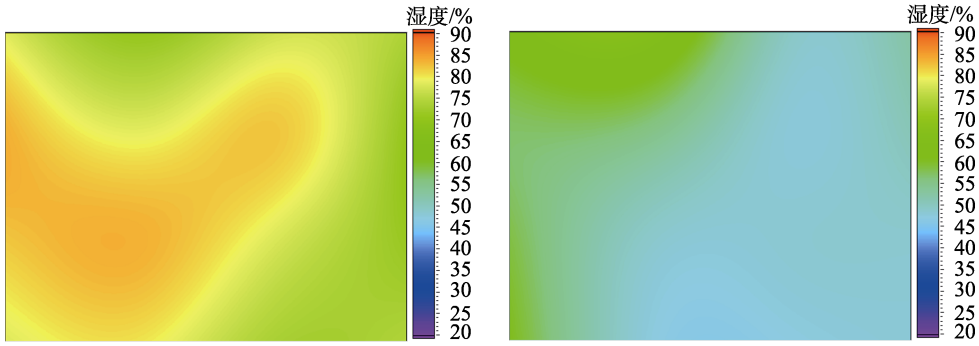


a 第一次实验水稻仓温度分布图
a Temperature distribution map of the rice storehouse in the first experiment

b 第二次实验水稻仓温度分布图
b Temperature distribution map of rice storehouse in the second experiment

图 10　水稻仓温度分布图

Fig.10　Temperature distribution map of rice storehouse

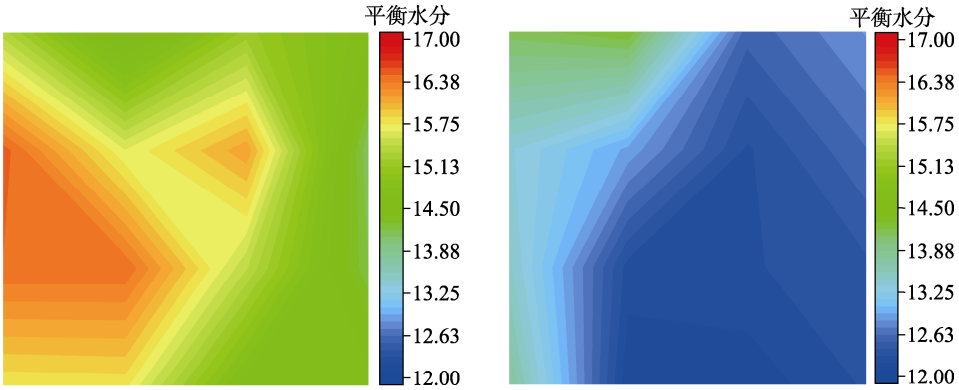


a 第一次实验水稻仓湿度分布图
a Moisture distribution map of rice storehouse in the first experiment

b 第二次实验水稻仓湿度分布图
b Moisture distribution map of rice storehouse in the second experiment

图 11　水稻仓湿度分布图

Fig.11　Humidity distribution map of rice storehouse

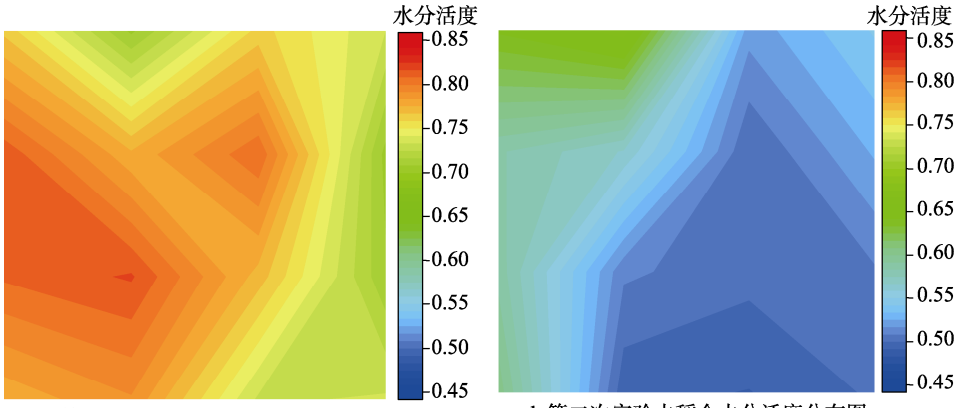


a 第一次实验水稻仓平衡水分分布图
a Equilibrium water distribution map of rice storehouse in the first experiment

b 第二次实验水稻仓平衡水分分布图
b Equilibrium water distribution map of rice storehouse in the second experiment

图 12　水稻仓平衡水分分布图

Fig.12　Distribution map of balanced water in rice storehouse



a 第一次实验水稻仓水分活度分布图
a Water activity distribution map of rice storehouse in the first experiment

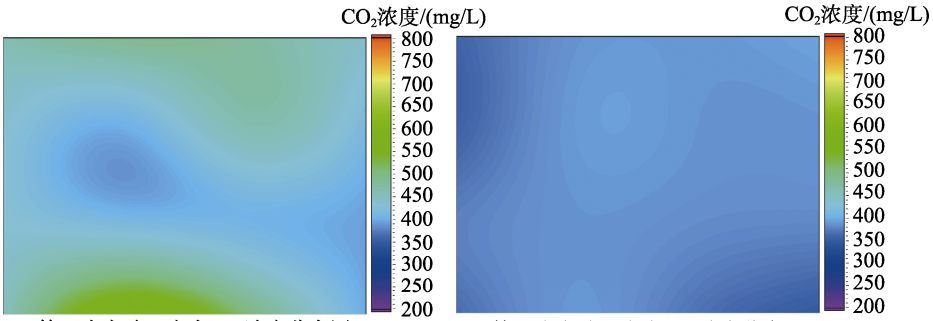
b 第二次实验水稻仓水分活度分布图
b Water activity distribution map of rice storehouse in the second experiment

图 13　水稻仓水分活度分布图

Fig.13　Distribution map of water activity in rice storehouse

3.2　玉米仓检测结果分析

如图 14~18 所示，为储藏玉米仓各参数分布图。图 14 中可以看出，在第一次实验所测得的 CO_2 浓度虽然在安全储藏状态内，但整体 CO_2 浓度高于水稻仓，局部区域（如检测点 8）的 CO_2 浓度值接近 600 mg/L，从温度角度分析，图 15 玉米仓的温度分布图可知，该仓整体温度较高，温度范围在 15 ℃左右，局部区域（检测点 11）

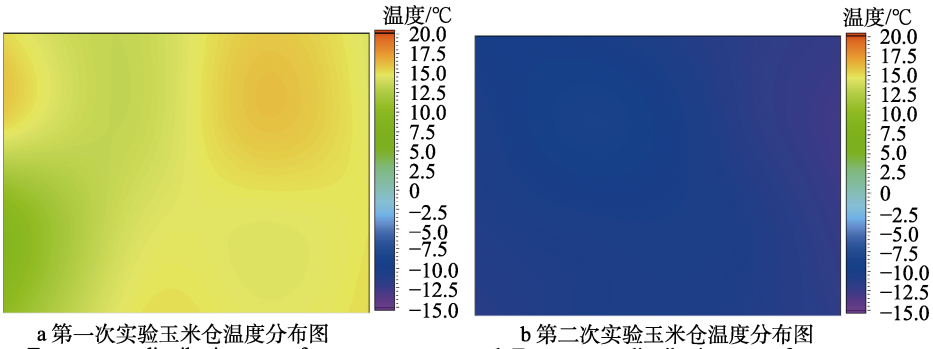


a 第一次实验玉米仓CO_2浓度分布图
a CO_2 concentration distribution map of corn storehouse in the first experiment

b 第二次实验玉米仓CO_2浓度分布图
b CO_2 concentration distribution map of corn storehouse in the second experiment

图 14　玉米仓 CO_2 浓度分布图

Fig.14　CO_2 concentration distribution map of corn storehouse

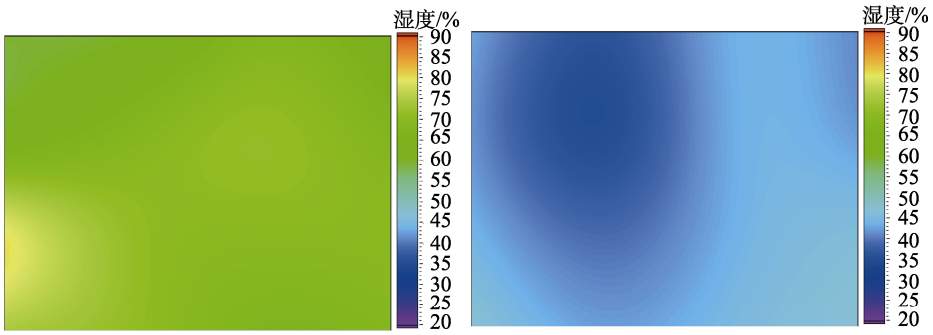


a 第一次实验玉米仓温度分布图
a Temperature distribution map of corn storehouse in the first experiment

b 第二次实验玉米仓温度分布图
b Temperature distribution map of corn storehouse in the second experiment

图 15　玉米仓温度分布图

Fig.15　Temperature distribution map of corn storehouse

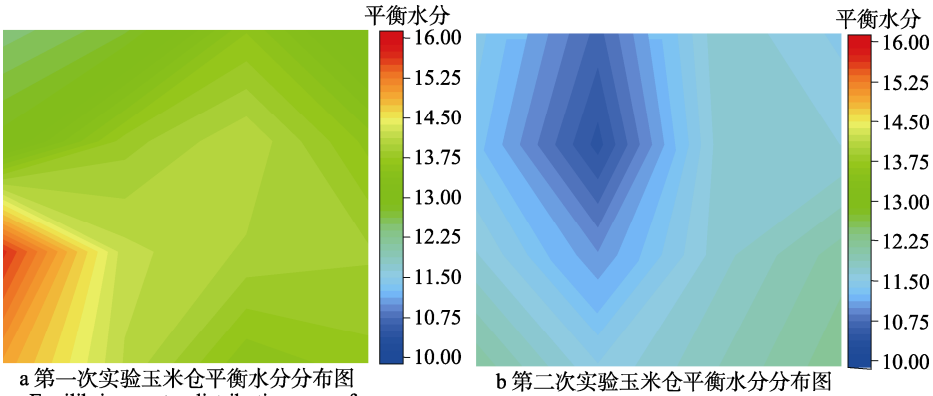


a 第一次实验玉米仓湿度分布图
a Humidity distribution map of corn storehouse in the first experiment

b 第二次实验玉米仓湿度分布图
b Humidity distribution map of corn storehouse in the second experiment

图 16　玉米仓湿度分布图

Fig.16　Humidity distribution map of corn storehouse



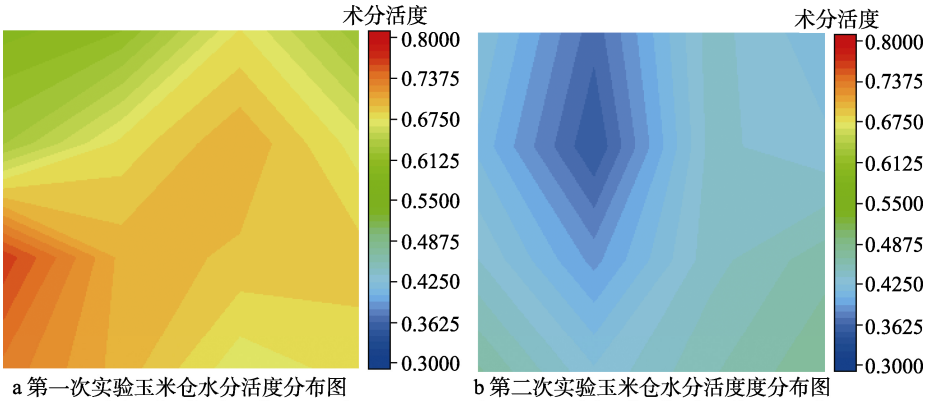
a 第一次实验玉米仓平衡水分分布图
a Equilibrium water distribution map of corn storehouse in the first experiment

b 第二次实验玉米仓平衡水分分布图
b Equilibrium water distribution map of corn storehouse in the second experiment

图 17　玉米仓平衡水分分布图

Fig.17　Distribution map of balanced water in corn storehouse

温度可达 15.9 ℃，而对于空气相对湿度而言，图 16a 可知，湿度整体分布在 70%左右，这对于仓外环境温度处于 0 ℃以下来讲，极易出现结露现象。在实验过程中，向粮仓保管员询问情况后得知，玉米仓在此之前基本未进行机械通风，但将在近期对该仓进行蓄冷通风（即形成粮仓“大冷芯”）。因此，从第二次实验也很容易看出，粮仓内的 CO_2 浓度、温度以及湿度均有所下降，与上述水稻仓现象一致，证明在第一次实验之后，粮库对该仓采取通风措施。



a 第一次实验玉米仓水分活度分布图
a Water activity distribution diagram of corn storehouse in the first experiment

b 第二次实验玉米仓水分活度度分布图
b Water activity distribution diagram of corn storehouse in the second experiment

图 18　玉米仓水分活度分布图

Fig.18　Distribution map of water activity in corn storehouse

4　结论

本文针对实际储粮管理的需求研究了多功能储粮安全现场快速检测分析仪，主要结论如下：

（1）对该系统的功能进行了设计，该系统在多点高精度检测温度、湿度和 CO_2 浓度的基础上，利用相关计算模型及数据处理方法，实现对粮仓平衡水分、水分活度、绝对湿度、积温、积湿、J/Q 值和绝对水势的多参数检测。通过对检测参数进行分析处理，智能判断储粮生物安全等级，生成粮仓多参数云图，并结合水势图分析给予通风指导建议，从而对储粮生物安全状况做出有效检测与指导。

（2）在中储粮龙嘉直属库对该系统进行了初步应用，分别检测了 1 个玉米平房仓、1 个水稻平房仓，验证了该系统在实仓工作环境中的检测性能、检测系统的实用性与人机交互功能的友好性，表明可作为粮仓管理有效助手，应用前景良好。

参考文献：

[1] 赵阳. 基于 TDLAS 技术的储粮生物安全多参数检测系统的研究[D]. 吉林大学, 2022.
ZHAO Y. Research on multi parameter detection system for stored grain biosafety based on TDLAS technique[D]. Jilin University, 2022.

[2] 沈文豪. 便携式储粮生物危害检测仪的研究[D]. 吉林大学, 2020.
SHEN W H. Study on portable biohazard detector for stored grain[D]. Jilin University, 2020.

[3] 吴文福, 王雨佳, 李姝峣, 等. 粮仓哲学—对储粮科技走向智慧化的哲学思考[J]. 粮油食品科技, 2023, 32(2): 1-10.
WU W F, WANG Y J, LI S Y, et al. Granary philosophy—philosophical thinking on the intelligence of grain storage science and technology[J] Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023(2): 1-10.

[4] 《粮食收储供应安全保障工程建设规划(2015—2020 年)》发布实施[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(4): 116.
The released and implemented of the Construction Plan for the Safety Guarantee Project of Grain Collection, Storage and Supply (2015-2020)[J] Cereals, Oils and Food Science and Technology, 2015, 23 (4): 116.

[5] 吴文福, 张记, 徐文, 等. 基于 NMR 的粮仓多场耦合图形化探测系统研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 66-73.
WU W F, ZHANG J, XU W, et al. Research on graphical detection system for multi-filed interaction in grain storage based on NMR[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 66-73.

[6] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266.
WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Coupling analysis of wheat grain pile mildew and temperature and humidity based on temperature and humidity field cloud chart[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34 (10): 260-266.

[7] 尹君. 小麦粮堆多场耦合模型及结露预测研究[D]. 吉林大学, 2015.
YIN J. Study on the multi field coupling model of wheat grain pile and prediction of dewing[D]. Jilin University, 2015.

[8] RICARDO B, LEANDRO C, JUAN R. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags(silo-bags) using CO_2 monitoring[J]. 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products-Chengdu, China. 2008.

[9] ZAGREBENYEV D, MAIER D E, WOLOSHUK C P. Simulation of grain deterioration using CO_2 injection[M]. ASAE American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA. Paper No.01-6028.

[10] MAIER D E, CHANNAIAH L H, CHAVES E V, et al. Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain[C]. 10th International Working Conference on Stored Product Protection. Julius K ü hn-Institut, 2010.

[11] 唐芳, 程树峰, 伍松陵. 储粮生物危害检测仪的研制[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(6): 114-117+128.
TANG F, CHENG S F, WU S L. Development of stored grain biohazard detector[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2011, 26 (6): 114-117+128.

[12] 唐芳, 程树峰, 伍松陵. 稻谷储藏危害真菌生长与 CO_2 浓度的相关性[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(3): 71-74.
TANG F, CHENG S F, WU S L. Correlation between the growth of fungi harmful to rice storage and CO2 concentration[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2011, 26 (3): 71-74

[13] 李德燕, 商晓东, 张聪. 小型粮仓手持式粮情检测系统研究[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(4): 73-76.
LI D Y, SHANG X D, ZHANG C. Study on hand-held grain condition detection system for small granary[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26 (4): 73-76.

[14] 吴文福, 陈思羽, 韩峰. 基于绝对水势图的储粮通风作业管理初探[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 100-107.
WU W F, CHEN S Y, HAN F. Preliminary study on management of grain storage ventilation operation based on absolute water potential diagram[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32 (11): 100-107.

[15] 陈思羽, 吴文福, 李兴军, 等. 谷物湿热平衡新模型及热力学特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 110-114.
CHEN S Y, WU W F, LI X J. Study on the new model of grain moisture heat balance and its thermodynamic characteristics[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2016, 31 (3): 110-114.

[16] 李兴军. 谷物粮堆通风的理论依据与目标[J]. 粮食加工, 2017, 42(1): 28-38.
LI X J.Theoretical basis and objective of grain stack ventilation[J]. Grain Processing, 2017, 42 (1): 28-38.

[17] 文友先, 张家年, 倪开基, 等. 谷物的水分和水分活度[J]. 湖北农机化, 1998(1): 20-21.
WEN Y X, ZHANG J N, NI K J, et al. Moisture and water activity of cereals[J]. Hubei Agricultural Mechanization, 1998 (1): 20-21.

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（http//lyspkj.ijournal.cn）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。