

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.036

# 基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法研究

崔宏伟 吴文福 吴子丹 韩峰 朱浩天 秦晓

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对我国储备粮人工稽核费时、费工等问题,提出了基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法。首先,分析粮堆测温平面的自相关性与互相关性,检测粮堆异常发生的日期与平面;然后,分析粮堆异常日期内异常平面上测温线的自相关性,检测发生异常的测温线;接着分析异常测温线上测温点的自相关性,检测并统计异常点的个数;最后,根据异常点个数判定异常种类,进而实现储粮数量监管。在3个储粮区(低温区、中温区、高温区)中分别选取粮仓粮温进行相关性分析,根据分析结果设定测温平面自相关系数阈值为0.8,互相关系数变化率阈值区间为 $[-0.15\text{ d}^{-1}, 0.15\text{ d}^{-1}]$ ;测温线的自相关系数阈值为0.8;测温点的自相关系数阈值为0.8;同时分析结果显示,短周期内测温线与点的互相关性无法作为异常判定依据。进行了储量监管试验,试验结果表明,基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法不仅能够实现储粮数量监管,同时能够检测出粮堆发热等异常变化。

**关键词:** 粮温; 储粮; 数量监管; 时空相关性

中图分类号: S379 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0321-10

## Reserves Monitoring Method for Grain Storage Based on Temporal and Spatial Correlation of Grain Temperature

CUI Hongwei WU Wenfu WU Zidan HAN Feng ZHU Haotian QIN Xiao  
(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The supervision and verification of grain bulks is an important segment during storage. Reliable reserves monitoring method for grain storage can effectively guarantee national grain quantity security. To solve the problems such as time consuming, labor cost and other problems in the manual audit of reserves, a monitoring method for grain storage quantity based on correlation analysis was proposed. Firstly, the autocorrelation and intercorrelation of the temperature measurement planes in the grain bulks were analyzed, so that the abnormal date and planes were detected. Secondly, the autocorrelation and the intercorrelation of temperature measurement lines in the abnormal date were analyzed, and the abnormal lines were detected in the abnormal date. Then the autocorrelation and intercorrelation of the temperature measurement points in the abnormal temperature line were analyzed. The number of abnormal points was counted, and the type of abnormal occurrence and the abnormal proportion were determined according to the number. At the same time, the granaries were selected in three storage grain areas: low temperature zone, medium temperature zone and high temperature zone for correlation analysis. According to the analysis results, the threshold of autocorrelation coefficient of temperature measurement plane was set to be 0.8, the threshold of change rate of intercorrelation coefficient was  $[-0.15\text{ d}^{-1}, 0.15\text{ d}^{-1}]$ ; the threshold of autocorrelation coefficient of temperature measurement line was 0.8; and the autocorrelation coefficient of temperature measurement point was 0.8. Meanwhile, the analysis results showed that the correlation between temperature measurement lines and points in short period can not be used as an anomaly criterion. The supervision test of grain storage was carried out. The test results showed that the grain storage supervision method based on the correlation analysis can not only realize the reserves monitoring, but also detect the local heating and other anomalies of grain bulk. The purpose was to analyze the correlation coefficient of grain temperature data in the granaries of several different grain storage areas, monitor the quantity of grain and provide a theoretical basis for the analysis of grain data in different regions.

**Key words:** grain temperature; grain storage; reserves monitoring; temporal and spatial correlation

收稿日期: 2018-07-30 修回日期: 2018-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0401003-3)

作者简介: 崔宏伟(1991—),男,博士生,主要从事粮食信息化与自动化研究, E-mail: chw19900405@126.com

通信作者: 吴文福(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食储藏与运输研究, E-mail: wwfzlb@126.com

## 0 引言

我国粮仓储量大、分布广。在我国每次大规模清仓查库过程中,分散的粮库使得国家对储粮数量稽核的工作量较大。由于储备粮数量较大,若个别粮库发生虚报库存、以差换好等违规违法行为,将会造成较大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。因此储粮数量监管方法具有一定的研究价值。

目前有关储粮数量的检测方法有视频监控法、称量法、主动测量法等<sup>[1]</sup>。视频监控系统能够实时监测粮食数量,但监控系统易受供电影响,且监管的视频采用文件方式管理,安全性不足<sup>[1]</sup>。称量法在美国等发达国家的大型粮库以及我国少量的国家级大型储备库中采用<sup>[4-5]</sup>,但该方法对设备要求较高、维护成本较高<sup>[6]</sup>。主动测量法包括激光扫描<sup>[7-8]</sup>等,宋立明等<sup>[9]</sup>提出了一种借助于激光技术摄像机标定的三维重构法,通过激光测距传感器测得的距离信息对摄像机进行标定,利用距离信息和激光光斑的二维图像进行三维坐标计算,从而获得粮面高度信息。但激光扫描仪价格偏高,大量采购成本高,精度调试也比较困难<sup>[10]</sup>。除上述方法外,目前本领域学者研究的技术还包括基于压力传感器的检测技术<sup>[11-12]</sup>、电磁波检测技术<sup>[13]</sup>等。张德贤等<sup>[14]</sup>针对仓内压强分布随机性和侧面摩擦力的影响,提出一种基于一定分布的粮仓底面和侧面压力传感器检测法,其通过引入粮仓数量检测模型解决了底面压力传感器压强测量值的随机性的问题,使得系统更加通用,但应用该方法需在粮仓安装压力传感器,增加了检测成本。秦瑶等<sup>[15]</sup>提出,利用扦插在粮堆中的电磁波发射天线和接收天线,采用波速层析和衰减层析算法,反演得到粮堆的介电质常数,同时采用速度和衰减联合层析成像技术,对储粮高度进行成像,得到实际储粮体积,从而实现粮仓储量的估算,但该方法易受粮堆温度、杂质等因素影响。

针对上述研究存在的问题,本文利用大部分粮库基本配备的粮情监控系统采集的粮温数据,通过分析实仓粮温数据时空序列的相关特征,提出一种基于粮温时空相关性的粮仓储量监管方法。根据实仓测温传感器分布,提出测温面、线、点的粮温自相关与互相关分析方法;对3个不同区域的实仓测温平面、测温线、测温点的粮温进行自相关与互相关分析,设定异常判定的相关系数阈值;进行储粮监管试验验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 粮情数据

根据文献<sup>[16]</sup>,低温储藏为平均粮温常年保持在15℃及以下,局部最高粮温不超过20℃的储藏方式;准低温储藏为平均粮温常年保持在20℃及以下,局部最高粮温不超过25℃的储藏方式。文献<sup>[17]</sup>定义温控储藏包括低温储藏、准低温储藏和控温储藏3种模式(温控储藏<sup>[18]</sup>是指在粮油储藏期间,采用自然通风、机械通风和制冷通风的降温技术与仓房气密压盖保温技术相结合的绿色储粮工艺),其中控温储藏为平均粮温不超过25℃,局部最高粮温不超过30℃的储藏方式,主要适用于我国南方高温高湿地区。依据储藏模式可将我国储粮区域划分为:低温区、中温区和高温区<sup>[17]</sup>。低温区的冬季时间较长,温度一般都在0℃以下,每年有5个月(11月—次年3月)平均温度均在5℃以下;中温区的冬季时间较短,温度一般在0℃以上,全年有3个月(12月—次年2月)平均温度在0~10℃之间;高温区全年几乎没有冬季,平均温度都在10℃以上,12月—次年1—2月平均温度在10℃以上。在3个温度区各选择一个粮仓近一年的粮温数据用于方法分析,分别为黑龙江省绥化市某粮仓(简称绥化仓)、四川省绵阳市某粮仓(简称绵阳仓)、广东省广州市花都区某粮仓(简称花都仓)。

绥化仓为高大平方仓,尺寸(长×宽×高)为47.5 m×26 m×6 m。仓内装有78条测温电缆,共计312个测温点,测温点排布为13×6×4,储藏粮食为玉米,选择储粮数据为入仓开始2014-05-06至储藏中期2015-05-05。花都仓为高大平方仓,尺寸(长×宽×高)为48 m×26.5 m×6 m。仓内装有77条测温电缆,共计308个测温点,测温点排布为11×7×4,储藏粮食为玉米,储藏时间为2010-01-06至2011-01-31。绵阳仓为小型平方仓,为两个相邻廋间,选取其中一个,尺寸(长×宽×高)为24 m×24 m×6 m。仓内设有36条温度电缆,共计144个测温点,测温点排布为6×6×4,储藏粮食为玉米,储藏时间为2015-01-15至2016-01-01。粮仓结构与测温点布置如图1所示。

以粮仓底边顶点作为坐标原点,竖直向上为Z轴正向,粮仓长度方向为X轴正向,宽度方向为Y轴正向,粮仓测温点坐标系如图2所示。

根据上述坐标系,建立测温点三维矩阵,矩阵X、Y、Z方向分别有n、m、l个测温点,则仓内各测温点坐标(x,y,z)表示为(i,j,k),其中0<i≤n,0<j≤m,0<k≤l(i,j,k取整数)。将粮仓测温点所在截面

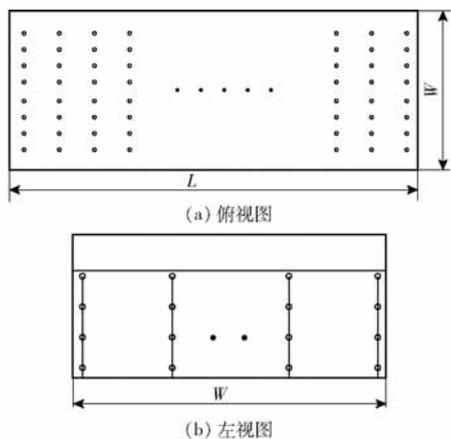


图 1 平房仓粮仓结构与测温点布置示意图

Fig. 1 Layout diagrams of temperature measuring points in bungalow

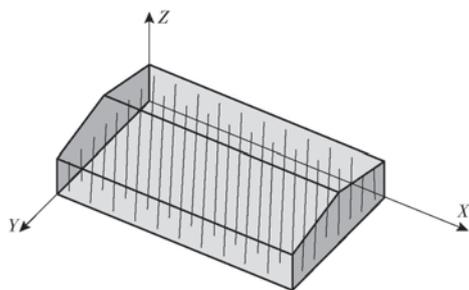


图 2 粮仓测温点坐标系示意图

Fig. 2 Diagram of temperature measurement point coordinate system in granary

分为 3 类平面,分别为平行于  $XOY$  的平面,平行于  $XOZ$  的平面和平行于  $YOZ$  的平面。

### 1.2 粮堆异常判定理论基础与方法

粮堆孔隙小,导热性能不佳,各测温点日均温升较小,因此粮堆中同一位置不同时刻的温湿度信息存在一定的相关性<sup>[19-21]</sup>;而粮堆中湿热信息沿着孔隙传导,相邻测温位置的湿热信息相互影响,因此粮堆中同一时刻的温湿度信息也应存在一定的相关性,这种时间与空间的相关性特征称为粮堆的物理印记,粮仓中传感器采集的粮堆湿热信息称为粮堆的信息印记。结合粮情数据的物理印记与信息印记进行储粮监管,可使监管方法具有容断性、容缺性和容错性。容断性是指储备粮的信息印记可以被中断记录,但物理印记不会被轻易消除,例如同一批储备粮的粮温趋势保持连贯性,作业会导致粮温趋势发生跳跃。容缺性是指储备粮的信息印记因硬件故障而缺失,可通过插值方法补充。容错性是指储备粮的信息印记因硬件或通讯故障而导致错误,可以通过插值方法进行修正。根据粮仓湿热信息物理印记的三大特征,分析粮情湿热信息在时间与空间序列上的相关性,监测异常的时间与空间位置,即实现储粮监管。

根据上述相关性原理,本文提出基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法,具体步骤为:确定粮库所属区域,设置异常判定阈值;计算  $XOY$  测温平面粮温的自相关系数与互相关系数,根据阈值判断异常发生的日期及平面;计算异常平面测温线的自相关系数或互相关系数,根据阈值判断异常测温线;计算异常线上测温点粮温的自相关系数或互相关系数,根据阈值判断测温点是否异常;对异常点位进行统计分析,判定异常种类与异常的比例范围。

参考皮尔逊相关系数计算公式<sup>[22]</sup>, $XOY$  平面粮温的互相关系数为

$$R_{ss} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ijk} - \bar{T}_k)(T_{ij(k+1)} - \bar{T}_{k+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ijk} - \bar{T}_k)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ij(k+1)} - \bar{T}_{k+1})^2}} \quad (k=1, 2, \dots, l-1) \quad (1)$$

式中  $T_{ijk}$ 、 $T_{ij(k+1)}$ ——第  $k$ 、 $k+1$  层  $XOY$  平面粮温,  $^{\circ}\text{C}$

$\bar{T}_k$ 、 $\bar{T}_{k+1}$ ——第  $k$ 、 $k+1$  层  $XOY$  平面粮温均值,  $^{\circ}\text{C}$

$XOY$  平面粮温的自相关系数为

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ijk1} - \bar{T}_{kt1})(T_{ijk2} - \bar{T}_{kt2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ijk1} - \bar{T}_{kt1})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ijk2} - \bar{T}_{kt2})^2}} \quad (k=1, 2, \dots, l) \quad (2)$$

式中  $T_{ijk1}$ 、 $T_{ijk2}$ ——第  $k$  层  $XOY$  平面  $t_1$ 、 $t_2$  时刻粮温,  $^{\circ}\text{C}$

$\bar{T}_{kt1}$ 、 $\bar{T}_{kt2}$ ——第  $k$  层  $XOY$  平面  $t_1$ 、 $t_2$  时刻的粮温均值,  $^{\circ}\text{C}$

$XOY$  平面测温线粮温的互相关系数为

$$R_{ll} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{ijk} - \bar{T}_{jk})(T_{i(j+1)k} - \bar{T}_{(j+1)k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ijk} - \bar{T}_{jk})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{i(j+1)k} - \bar{T}_{(j+1)k})^2}} \quad (k=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, m-1) \quad (3)$$

式中  $T_{i(j+1)k}$ ——第  $k$  层  $XOY$  平面内第  $j+1$  条测温线的粮温,  $^{\circ}\text{C}$

$\bar{T}_{jk}$ 、 $\bar{T}_{(j+1)k}$ ——第  $k$  层  $XOY$  平面内第  $j$  条、第  $j+1$  条测温线上的温度均值,  $^{\circ}\text{C}$

测温线粮温的自相关系数为

$$R_l = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{ijk1} - \bar{T}_{jkt1})(T_{ijk2} - \bar{T}_{jkt2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ijk1} - \bar{T}_{jkt1})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ijk2} - \bar{T}_{jkt2})^2}} \quad (k=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中  $\bar{T}_{jkt1}$ 、 $\bar{T}_{jkt2}$ ——第  $k$  层  $XOY$  平面  $t_1$ 、 $t_2$  时刻第  $j$  测温点粮温的互相关系数为

$$R_{pp} = \frac{\sum_{t=1}^d (T_{1t} - \bar{T}_{1t})(T_{2t} - \bar{T}_{2t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^d (T_{1t} - \bar{T}_{1t})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^d (T_{2t} - \bar{T}_{2t})^2}} \quad (5)$$

式中  $T_{1t}$ 、 $T_{2t}$ ——相邻测温点  $t$  时段的粮温,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\bar{T}_{1t}$ 、 $\bar{T}_{2t}$ ——相邻测温点  $t$  时段温度均值,  $^{\circ}\text{C}$   
 $t$ ——时间序列序号  
 $d$ ——储粮周期内时间序列的个数  
 测温点粮温的自相关系数为

$$R_p = \frac{\sum_{t=1}^{d-1} (T_t - \bar{T}_t)(T_{t+1} - \bar{T}_{t+1})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{d-1} (T_t - \bar{T}_t)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{d-1} (T_{t+1} - \bar{T}_{t+1})^2}} \quad (6)$$

式中  $T_t$ 、 $T_{t+1}$ ——测温点在相邻时间序列  $t$ 、 $t+1$  上的粮温,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\bar{T}_t$ 、 $\bar{T}_{t+1}$ ——测温点在相邻时间序列  $t$ 、 $t+1$  上的温度均值,  $^{\circ}\text{C}$

## 2 相关性分析与阈值设定

### 2.1 传感器截面粮温相关性

#### 2.1.1 $XOY$ 平面粮温自相关性

粮堆中平行于  $XOY$  平面的测温平面,由上至下分别记为第 1、2、3、4 层,分别计算粮仓第 1、2、3、4 层的相邻两天粮温的自相关性。3 个粮仓  $XOY$  截面粮温自相关系数变化曲线如图 3a~3c 所示。

将图 3a~3c 中 3 个粮仓  $XOY$  平面粮温自相关系数在纵坐标轴方向进行投影,得到自相关系数的分布直方图,如图 3d 所示。由直方图分析结果统计发现,设置  $XOY$  平面自相关系数处于 0.8~1 区间的

的个数占自相关系数总数的比例大于 97.5%,由此设置  $XOY$  平面自相关系数阈值为 0.8。

为验证设置阈值 0.8 时检测出异常的准确率,以查准率、查全率对检测结果进行分析,查全率、查准率计算公式分别为<sup>[23-24]</sup>

$$R = \frac{w}{W} \times 100\% \quad (7)$$

$$P = \frac{v}{V} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $w$ ——被准确检测出的异常平面数  
 $W$ ——异常平面数  
 $V$ ——被检测出的平面数  
 $v$ ——总的被准确检测出的异常平面数

分析结果显示绥化仓、花都仓、绵阳仓的查全率分别为 100%、100%、91.8%,查准率分别为 94.7%、97.3%、97.1%。由分析结果可知,阈值为 0.8 时绥化仓、花都仓异常的查全率为 100%,算法将所有异常检测出。阈值为 0.8 时算法的查准率并未达到 100%,表明存在误检测的异常平面,查询检测结果发现被误检测的异常平面为靠近粮堆表面,这是因为该层接近粮面,其温度受仓温变化影响较大,从而影响该层粮温前后时间的相关性。综上所述,设置  $XOY$  平面自相关系数阈值为 0.8 较为合适。

#### 2.1.2 $XOY$ 平面粮温互相关性

选取粮堆中平行于  $XOY$  平面的测温平面进行互相关性分析。计算第 1 层与第 2 层、第 2 层与第 3 层、第 3 层与第 4 层粮温的互相关性,但因各层粮温的互相关系数波动较大,不利于阈值设定,因此分析当天各平面互相关系数变化率(平面的互相关系数与前一天对应平面互相关系数差值与间隔时间(1 d)的比值)。 $XOY$  平面粮温互相关系数变化率

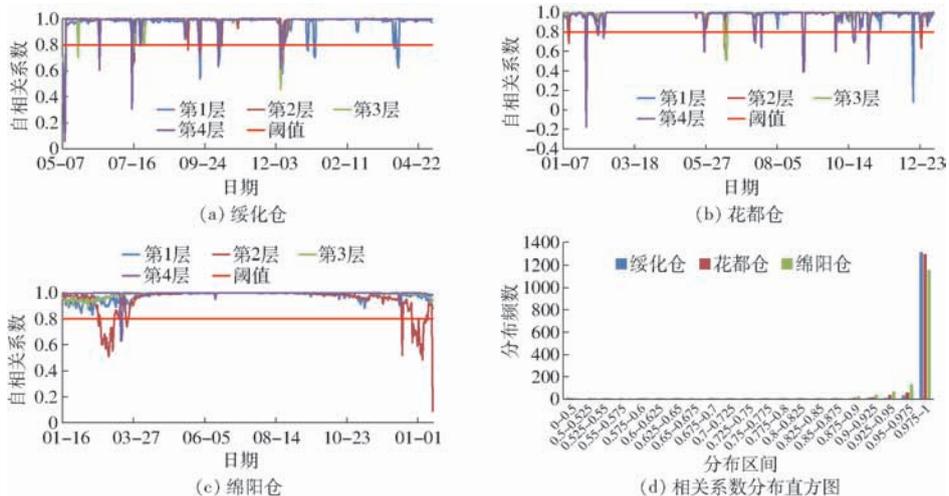


图 3 粮仓  $XOY$  平面粮温自相关系数

Fig. 3 Graphs of autocorrelation coefficient about grain temperature in  $XOY$  planes

如图 4 所示。

将图 4 中 4 层粮温互相关系数变化率在纵坐标轴方向进行投影,得到互相关系数变化率的分布直方图。由直方图统计分析发现,设置阈值区间为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$  时,三粮仓检测出异常的个数分别为 34、35、31,三粮仓的实际异常个数分别为 32、35、27,对比检测异常与实际异常分析发现,此时算法的查全率分别为 100%、97.1%、100%,查准率分别为 94.1%、97.1%、87.1%。又经统计分析发现,阈值区间为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$  时,查全率最高,查准率较高,因此将  $XOY$  平面互相关系数变化率阈值区间设为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$ 。

### 2.1.3 纵截面粮温互相关性

由上文分析可知,第 1 层粮温受仓温影响较大,不利于测温平面的互相关性分析,因此选择分析纵

截面( $XOZ$  平面与  $YOZ$  平面)粮温的相关性。本文选择分析  $XOZ$  测温平面粮温的互相关性。绥化仓  $XOZ$  平面共有 6 层,分析第 1 与纵中截面(纵中截面粮温为第 3 层与第 4 层粮温均值),以及第 6 与纵中截面的互相关系数。花都仓  $XOZ$  平面共有 7 层,分析第 1 与第 4 截面,以及第 4 与第 7 截面的互相关系数。绵阳仓  $XOZ$  平面共有 6 层,分析第 1 与纵中截面,以及第 6 与纵中截面的互相关系数。纵中截面的粮温为相邻两截面粮温均值。粮仓  $XOZ$  平面粮温的互相关系数变化率如图 5 所示。

将图 5 中 3 个粮仓  $XOZ$  平面互相关系数变化率在纵坐标轴方向进行投影,得到互相关系数的分布直方图。由直方图统计分析发现,设置阈值区间为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$  时,三粮仓检测出异常的个数分别为 15、14、16,三粮仓的实际异常

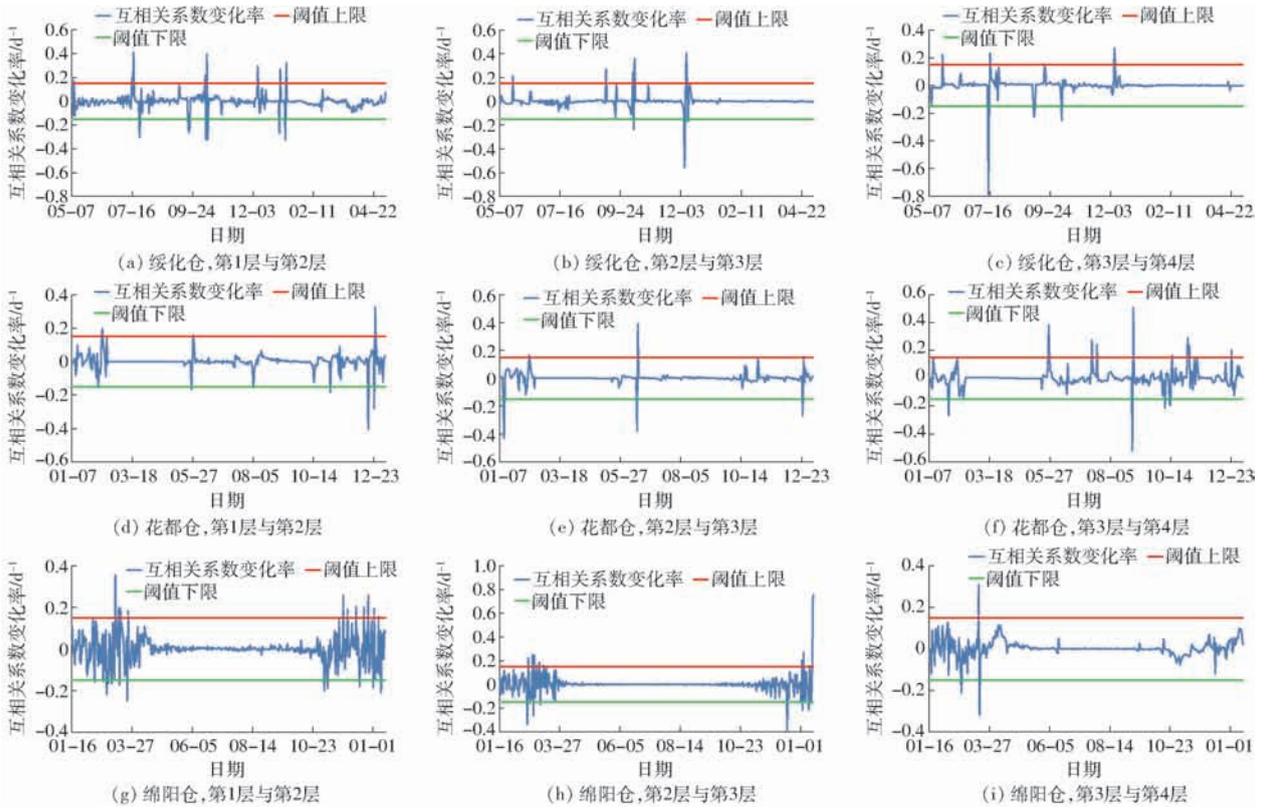


图 4 粮仓  $XOY$  平面粮温互相关系数变化率

Fig. 4 Graphs of correlation coefficient changing value about grain temperature in  $XOY$  planes

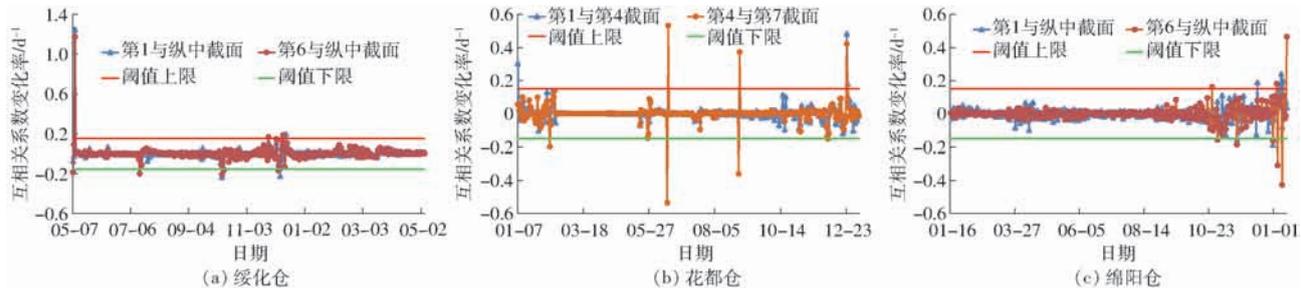


图 5 粮仓  $XOZ$  平面粮温互相关系数变化率

Fig. 5 Graphs of correlation coefficient changing value about grain temperature in  $XOZ$  planes

个数分别为 13、12、13,对比检测异常与实际异常分析发现,此时算法的查全率为 100%,查准率分别为 86.7%、85.7%、81.3%。后经统计发现,阈值区间为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$  时,查全率最高,查准率较高,因此将  $XOZ$  平面互相关系数变化率阈值区间设为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$ 。

### 2.2 测温线上粮温的相关性

根据 2.1.3 节纵截面互相关系数变化率检测的粮温异常日期,从中选择绥化仓 2014-12-10,花都仓 2010-06-16,绵阳仓 2015-10-26 的粮温进行测温线的自相关性分析与互相关性分析。分析各截面平行于  $X$  轴的测温线(测温点形成的线)自相关性,结果如图 6a~6c 所示。

绥化仓平行于  $X$  轴的测温线共 24 条,花都仓共 28 条,绵阳仓共 24 条,由图 6a~6c 可以看出,绥化仓相关系数明显较低的测温线有两条,花都

仓有一条,绵阳仓有两条,设置阈值为 0.8 时可将系数较低的测温线检测为异常,因此设置阈值为 0.8。经查询原始粮温数据发现这几条线上少部分测温点前后两天温度变化超过  $4^\circ\text{C}$ ,属于粮温发热异常<sup>[25]</sup>,而其他测温线两天粮温变化正常,由此可见测温线异常检测结果与实际异常一致。为验证测温线自相关系数阈值为 0.8 的准确性,根据 2.1.1 节中的检测结果,在 3 个粮仓中分别选择 5 个异常日期,对日期内所有平行于  $X$  轴的测温线进行自相关系数分析,分布直方图如图 7 所示。查询原始粮温数据发现粮温异常的测温线相关系数均小于 0.8,共约 98% 无异常测温线的相关系数分布于区间  $[0.8, 1]$  之内(粮温异常为相同位置相邻两天温度变化超过  $4^\circ\text{C}$  或当天粮温局部高于其他位置  $4^\circ\text{C}$ <sup>[25]</sup>)。因此,测温线自相关系数阈值 0.8 较为准确。

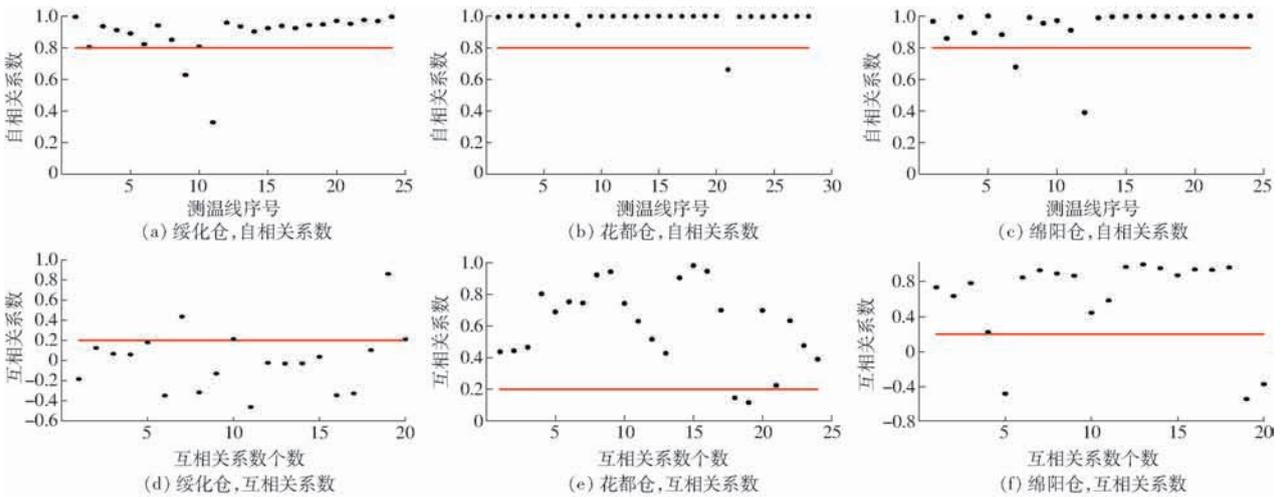


图 6 粮仓异常日期测温线粮温的自相关系数与互相关系数

Fig. 6 Autocorrelation coefficient and intercorrelation coefficient about grain temperature in temperature measuring lines of abnormal date

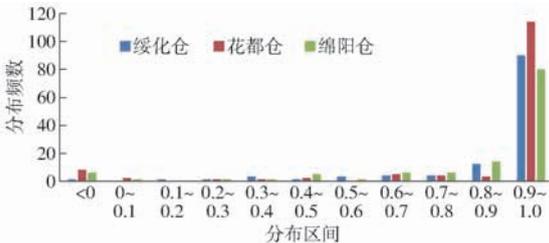


图 7 粮仓异常日期测温线粮温的自相关系数分布直方图  
Fig. 7 Distribution histogram of autocorrelation coefficient about grain temperature in temperature measuring lines of abnormal date

同时分析平行于  $X$  轴的相邻两条测温线之间的互相关性,结果如图 6d~6f 所示。由图 6d~6f 可以看出,3 个粮仓测温线间的互相关系数分布无规律,无法反映粮温的变化规律,因此测温线的互相关性不作为异常检测依据。

### 2.3 测温点粮温的相关性

根据 2.2 节中检测的异常测温线,选择其上的测温点进行自相关与互相关性分析。单个测温点选择以 7 d 为周期的粮温数据进行自相关分析,因此绥化仓选择 12-03 至 12-09 以及 12-10 至 12-16 之间的粮温数据,花都仓选择 06-09 至 06-15 以及 06-16 至 06-22 之间的粮温数据,绵阳仓选择 10-19 至 10-25 以及 10-26 至 11-01 之间的粮温数据,测温点自相关分析结果如图 8a~8c 所示。

查询原始粮温数据发现,绥化仓该测温线所有测温点粮温均异常,花都仓测温线起始测温点粮温异常,绵阳仓除起始位置外其他测温点粮温异常。对比异常测温点与无异常测温点相关系数,将自相关阈值设为 0.8 时,由图 8a~8c 可以看出,检测结

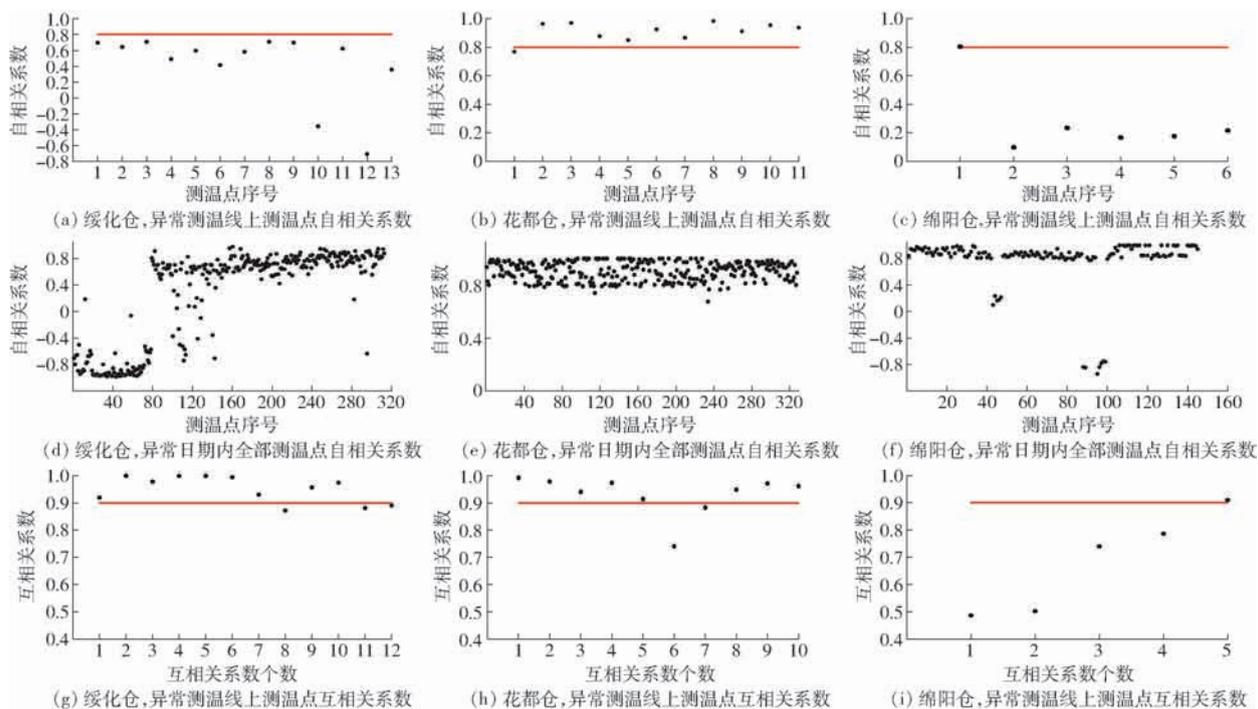


图 8 粮仓测温点的自相关系数与互相关系数

Fig. 8 Autocorrelation coefficient and intercorrelation coefficient about grain temperature of temperature measurement points

果与实际异常测温点相符合。为进一步验证阈值 0.8 的准确性, 计算上述时间段 3 个粮仓全部测温点的自相关系数, 如图 8d~8f 所示。由图 8d~8f 可以看出自相关系数存在负值, 查询绥化仓自相关系数为负值的测温点, 因 12-10 进行通风使粮温变化超过  $4^{\circ}\text{C}$ , 属于粮温异常, 同时查询自相关系数低于 0.8 的测温点粮温数据, 发现其均受到通风影响, 因此测温点粮温异常检测结果与实际异常一致; 绵阳仓自相关系数为负值的测温点属于异常的测温线, 查询原始粮温数据发现, 检测结果与实际异常测温点一致; 同样地, 经查询原始粮温数据发现, 检测结果与实际异常测温点一致。综上所述, 测温点的自相关系数阈值可设为 0.8。

分析单个测温点粮温与同一条线上相邻测温点粮温的互相关性, 同样以 7 d 为周期, 粮温数据范围同上。互相关分析结果如图 8g~8i 所示, 可以看出, 测温点互相关系数无法反映粮温变化, 这是因为线上测温点距离较远, 短期内相互之间的影响较弱, 因此测温点的互相关系数不作为异常检测的依据。

按照上述测温线与点相关性分析方法, 检测出异常日期内所有异常测温点。统计当天异常测温点的总数为  $e$ , 若  $e > 0.8E$  (其中  $E$  为粮仓总的测温点数), 则判定为通风、环流熏蒸或粮堆数量异常等; 若  $0.1E \leq e \leq 0.8E$ , 则判定粮堆发热; 若  $e < 0.1E$ , 且异常点离散分布, 则判定为粮堆正常。

### 3 储粮监管试验

#### 3.1 粮堆数量变化对温度的影响分析

粮食储藏进入稳定状态后, 粮堆内部温度变化与环境温度变化相比较为滞后, 粮堆内部以及表层温度均与环境温度存在一定差异, 这种差异在稳定储藏的过程中基本存在, 而且由 2.1 节分析可知稳定的储藏过程中粮堆各测温平面在相邻时间点上的相关性较高。若某时刻粮堆局部粮食被替换, 使得局部粮食温度与外界温度差异较小, 与更换前的粮温差异较大, 则破坏了稳定储藏过程中测温平面在相邻时间点较高的相关性。为证明粮食更换会对粮温造成影响, 选择绥化仓第 1 层 2014-11-01 至 2014-11-30 之间的粮温, 模拟第 1 层粮堆被更换一半。绥化仓地处黑龙江省, 此时处于冬季, 冬季粮堆内部温度偏高, 更换进入的粮食温度偏低, 因此选择将 2014-12-15 至 2014-12-30 第 1 层的粮温更换到 11-15 至 11-30 之间。检测得到粮温自相关系数如图 9 所示, 由图 9 可以看出, 粮食更换时粮温相关性较低, 由此可见更换粮食会影响粮堆温度。

#### 3.2 储粮监管试验与分析

为验证基于粮温时空相关性检测方法进行储粮监管的可行性, 进行了储粮监管试验。在吉林省长春市朝阳区大岭试验基地建立小型粮仓, 尺寸为  $3.8\text{ m} \times 3.8\text{ m} \times 6\text{ m}$ , 仓内粮面高  $4.5\text{ m}$ , 于 2017-

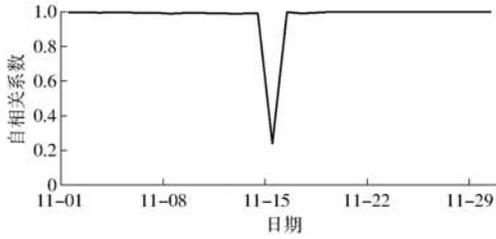


图9 粮食数量异常前后自相关系数变化曲线

Fig.9 Changing curve of correlation coefficient before and after abnormal reserves

05-11入仓完毕,至2017-08-15储藏结束,储藏粮食为玉米,品种为先玉33,入仓时含水率为14%。仓内布置25条测温电缆,横、纵方向各5条,测温电缆间距0.8m,距仓壁0.3m,每条电缆上布置4个测温点,第1层距粮面0.3m,第4层距仓底0.5m

(靠近仓底),中间两层测温点均匀布置。试验仓如图10所示。同时设计了基于粮温时空相关性的储粮数量监管系统,界面如图11所示。大岭粮仓面面自相关系数如图12所示。



图10 试验仓

Fig.10 Granary



(a) 主界面

(b) 面面分析界面

(c) 点线分析界面

图11 储粮数量监管系统

Fig.11 Reserves supervision system for grain storage

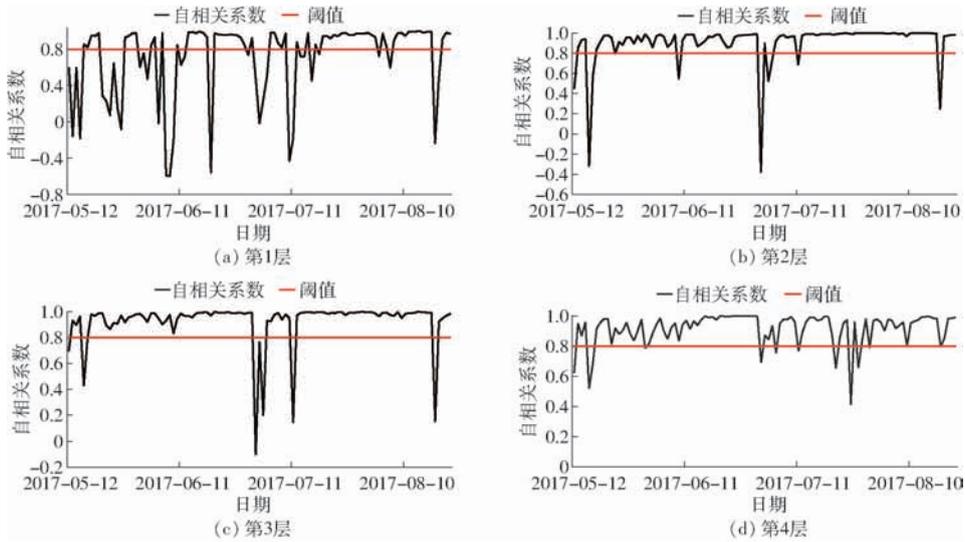


图12 大岭粮仓 XOY 平面自相关系数曲线

Fig.12 Graphs of autocorrelation coefficient about XOY plane in Daling granary

如图12所示,第1层因靠近粮面,受外温影响较大,自相关系数波动较大;第2、3、4层在储藏开始粮堆进入稳定状态前自相关系数较低,稳定后自相关系数基本大于阈值0.8,在07-01左右相关系数降低,而后07-11左右相关系数再次降低。选择分析07-01和07-11的测温线粮温的自相关性。07-01自相关系数如图13所示。

由图13可以看出,07-01共有11条线的自相关系数低于阈值,因此存在11条粮温线异常。采用

测温点自相关性分析检测出的异常的粮温线,统计粮温异常点的个数  $e$  为35个,  $0.1E \leq e \leq 0.8E$  ( $E = 100$ ),因此判定07-01为粮堆发热异常。采用同样的方法分析07-11的粮温异常点个数为37,因此判定为粮堆发热异常。经查询粮仓操作记录手册发现,粮仓于06-30通风,外界的热风进入到粮仓内部,导致粮仓内部温度升高,因此06-30也可称为粮堆发热。粮仓于07-11进行2h的通风,同样影响了粮堆温度信息的相关性。由3.1节分析可知,

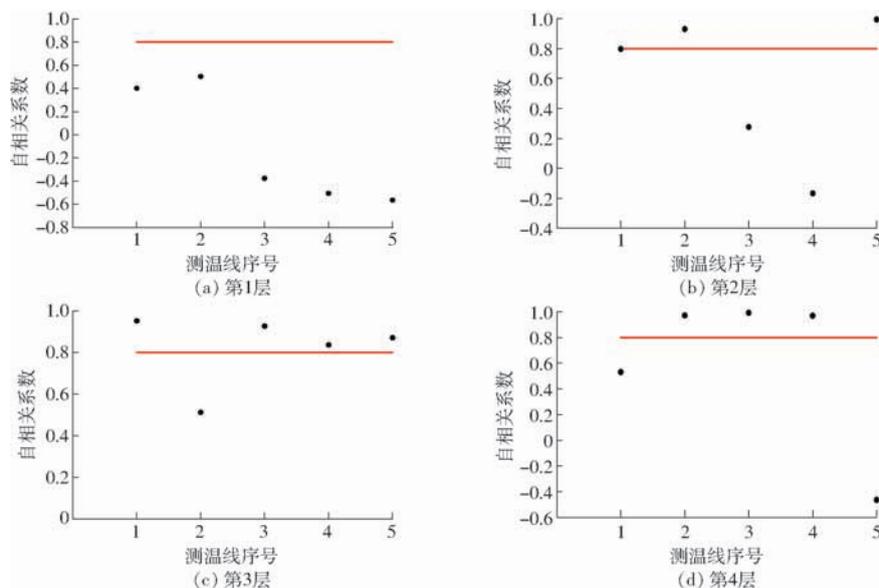


图 13 大岭粮仓 2017-07-01 测温线自相关系数

Fig. 13 Autocorrelation coefficient of temperature line in Daling granary on July 1st, 2017

粮食数量变化影响粮堆温度,粮温温度变化对相关性的检测方法同本节,因此基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法能够检测出粮堆温度信息突变的异常(粮仓通风、环流熏蒸、粮堆异动),可满足储粮监管的技术需求。

## 4 结论

(1)提出了基于粮温时空相关性的粮仓储量监管方法。首先,分析粮堆测温截面粮温的自相关性,确定异常发生的日期与平面;然后,利用测温线的自相关特性确定发生异常的测温线;最后,根据检测到的异常测温线,使用测温点的自相关特性确定异常的测温点,实现粮温异常的定点检测。

(2)设定了基于粮温时空相关性检测方法的粮堆异常判定阈值。在 3 个温控储粮区域(低温区、中温区、高温区)内各选择一个粮仓进行相关性分析,根据分析结果设定阈值,测温平面自相关系数阈值为 0.8,互相关系数变化率阈值为  $[-0.15 \text{ d}^{-1}, 0.15 \text{ d}^{-1}]$ ;测温线的自相关系数阈值为 0.8;测温点的自相关系数阈值为 0.8;分析结果表明,短周期内测温线与测温点的互相关系数无法作为异常判定依据。

(3)设计了储粮数量监管系统,并进行了储粮监管试验,试验结果表明,基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法能够检测出粮堆温度信息在时间或空间上突变的异常,可满足储粮监管的技术需求。

## 参 考 文 献

- [1] 林鹰. 储备粮智能监管与稽核系统关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2008.  
LIN Ying. Research on the key technologies of reserved grain intelligent supervision and audit system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [2] 吕平原,姜洪,樊庆风,等. 粮食质量安全监测方式及其有效性、时效性探讨[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(4): 18-20.  
LÜ Pingyuan, JIANG Hong, FAN Qingfeng, et al. Discussion on the monitoring method of grain quality and safety and its effectiveness and timeliness[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2017, 42(4): 18-20. (in Chinese)
- [3] 刘凌. 对完善我国储备粮监督管理机制的立法建议[J]. 河南工业大学学报(社会科学版), 2015, 11(2): 49-52.  
LIU Ling. Legislative proposals on improving the supervision & management mechanism of China grain reserves[J]. Journal of Henan University of Technology (Social Science Edition), 2015, 11(2): 49-52. (in Chinese)
- [4] 张昌彩. 国外粮食储备管理及其对我国的启示[J]. 经济研究参考, 2004(24): 33-43.  
ZHANG Changcai. The management of foreign grain reserve and its enlightenment to China[J]. Review of Economic Research, 2004(24): 33-43. (in Chinese)
- [5] 唐为明. 加拿大的粮食流通技术[J]. 粮油科技, 2003(3): 2-7.  
TANG Weiming. Food circulation technology in Canada[J]. Science and Technology of Grain and Oil, 2003(3): 2-7. (in Chinese)
- [6] 王铁滨,苏建民,白玲,等. 数字林业智能地衡管理系统设计[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(1): 34-36.  
WANG Tiebin, SU Jianmin, BAI Ling, et al. Design of digital forestry intelligent land balance management system[J]. Forestry

- Machinery & Woodworking Equipment, 2007, 35(1): 34-36. (in Chinese)
- [7] 朱铁军, 施艳舞, 孟凡刚, 等. 激光扫描技术测量粮堆体积试验[J]. 粮食科技与经济, 2012, 37(4): 30-31.  
ZHU Tiejun, SHI Yanwu, MENG Fan'gang, et al. Study on measuring grain bulk by laser scanning[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2012, 37(4): 30-31. (in Chinese)
- [8] WANG Y T, FENG H Y. Effects of scanning orientation on outlier formation in 3D laser scanning of reflective surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 81: 31-45.
- [9] 宋立明, 李秀华, 李万龙. 基于计算机视觉的储粮智能稽核方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2013, 31(1): 109-111.  
SONG Liming, LI Xiuhua, LI Wanlong. Survey on reserved grain intelligent audit methods based on computer vision[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2013, 31(1): 109-111. (in Chinese)
- [10] 祝玉华, 陈军涛, 甄彤, 等. 储粮数量检测技术研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 116-122.  
ZHU Yuhua, CHEN Juntao, ZHEN Tong, et al. Present situation and prospect of grain storage quantity detection technology [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 116-122. (in Chinese)
- [11] 陈得民, 张元. 基于压力传感器网络的粮仓储粮数量监测系统[J]. 微计算机信息, 2009, 25(5): 142-143.  
CHEN Demin, ZHANG Yuan. The system of monitoring the number of grain storage based on the pressure sensor network[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(5): 142-143. (in Chinese)
- [12] CHAUDHURY A R, PANTAZIS A K, CHRONIS N. An image contrast-based pressure sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 245: 63-67.
- [13] 张新新, 张元, 廉飞宇. 储粮数量的电磁波探测技术研究[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(10): 2453-2454.  
ZHANG Xinxin, ZHANG Yuan, LIAN Feiyu. A study on electromagnetic wave detection technology for grain storage amount [J]. Computer Knowledge and Technology, 2014, 10(10): 2453-2454. (in Chinese)
- [14] 张德贤, 杨铁军, 傅洪亮, 等. 基于压力传感器的粮仓储粮数量在线检测方法[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 98-100.  
ZHANG Dexian, YANG Tiejun, FU Hongliang, et al. An on-line detection method of granary storage quantity based on pressure sensor[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(4): 98-100. (in Chinese)
- [15] 秦瑶, 陈洁, 方广有, 等. 雷达层析成像技术对粮仓储量信息的探测[J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 66-72, 201.  
QING Yao, CHEN Jie, FANG Guangyou, et al. Radar tomography technology to detect reserves of barn[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(1): 66-72, 201. (in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 粮油储藏技术规范: GB/T 29890—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [17] 吴子丹. 绿色生态低碳储粮新技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
- [18] 王明洁. 绿色储粮与食品安全[J]. 食品科学, 2003(8): 153-154.  
WANG Mingjie. Green grain storage and food safety[J]. Food Science, 2003(8): 153-154. (in Chinese)
- [19] 赫振方, 赵玉霞, 曹阳, 等. 平房仓粮堆温度时空分布的基本统计特征分析[J]. 粮食储藏, 2010, 39(4): 15-20.  
HAO Zhenfang, ZHAO Yuxia, CAO Yang, et al. Statistical character on temporal and spatial distributing of grain temperature in warehouse[J]. Grain Storage, 2010, 39(4): 15-20. (in Chinese)
- [20] 王振清, 田栋杰, 刘海燕. 钢筋混凝土圆形地下粮仓温度场试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 99-102, 126.  
WANG Zhenqing, TIAN Dongjie, LIU Haiyan. Experimental study on temperature field of underground reinforced concrete circular granary [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 99-102, 126. (in Chinese)
- [21] 安西友. 鲁西南地区均温型谷物冷却机控温储藏稻谷生产应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [22] 吴瑞林, 王建中, 袁克海. 多分格相关与皮尔逊相关的蒙特卡罗仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(12): 1507-1510, 1515.  
WU Ruilin, WANG Jianzhong, YUAN Kehai. Monte Carlo simulation of polychoric correlation and Pearson correlation coefficient [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(12): 1507-1510, 1515. (in Chinese)
- [23] 余永维, 杜柳青, 闫哲, 等. 基于深度学习特征的铸件缺陷射线图像动态检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 407-412. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160755&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160755&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.055.  
YU Yongwei, DU Liqing, YAN Zhe, et al. Dynamic detection of casting defects radiographic image based on deep learning feature [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 407-412. (in Chinese)
- [24] 温皓杰, 周婧, 傅泽田, 等. 面向语义挖掘的蔬菜病害知识视频场景检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 386-391. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s059&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s059&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.059.  
WEN Haojie, ZHOU Jing, FU Zetian, et al. Semantic mining oriented scene detection of vegetable disease videos [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 386-391. (in Chinese)
- [25] 李兴岩, 王卫华, 王昆, 等. 浅谈储粮发热及处理办法[C]//中国粮油学会学术年会, 2010.