

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之七/“新技术”分栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.007

卢延辉, 李欣泽, 吴文福, 等. 粮情智能分析基础数据手册的开发[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 47-55.

LU Y H, LI X Z, WU W F, et al. Development of basic data manual for intelligent analysis of grain condition[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 47-55.

# 粮情智能分析基础数据手册的开发

卢延辉<sup>1</sup>, 李欣泽<sup>1</sup>, 吴文福<sup>1</sup>✉, 崔宏伟<sup>1</sup>, 徐岩<sup>1</sup>, 韩峰<sup>1</sup>,  
李志民<sup>2</sup>, 丰博<sup>3</sup>, 石井峰<sup>3</sup>, 张记<sup>1</sup>

- (1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国储备粮管理集团有限公司吉林分公司, 吉林 长春 130033;
3. 中央储备粮龙嘉直属库有限公司, 吉林 长春 130504)

**摘要:** 十八大以来, 我国通过粮安工程等项目, 推动了储粮技术的数字化和智能化, 建成了世界上最大的粮食物联网。但由此产生的大量粮情数据, 以温度为主, 暂未有效支撑决策和管理。团队在前期研究了粮堆生态多场耦合理论的基础上, 进一步凝练出了储备粮数字监管的连续性、周期性及协调性原理, 以及AID、ABC、6R、SIN、O、CAE、U等系列智能策略, 但这些策略的应用直接面对原始数据, 存在效率低、误差大等问题。鉴于此, 基于我国不同储粮生态区域典型粮仓、主要粮食品种的储粮原始粮情数据进行了有针对性的挖掘, 开发了粮情智能分析基础数据手册, 以便智能策略的高效正确应用。以夯实粮情智能分析的基础, 助推储粮数量和质量数字监管, 实现由“人防”向“技防”的转变。

**关键词:** 粮食安全; 数据手册; 粮情分析; 储粮监管; 智能策略

中图分类号: S-03; TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0047-09

网络首发时间: 2023-03-09 14:30:53

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.0945.006.html>

## Development of Basic Data Manual for Intelligent Analysis of Grain Condition

LU Yan-hui<sup>1</sup>, LI Xin-ze<sup>1</sup>, WU Wen-fu<sup>1</sup>✉, CUI Hong-wei<sup>1</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, HAN Feng<sup>1</sup>,  
LI Zhi-min<sup>2</sup>, FENG Bo<sup>3</sup>, SHI Jing-feng<sup>3</sup>, ZHANG Ji<sup>1</sup>

- (1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
2. Jilin Branch of China Grain Reserve Management Group Co., Ltd, Changchun, Jilin 130033, China;
3. Sinograin Longjia Depot Ltd. Company, Changchun, Jilin 130504, China)

**Abstract:** Based on the implementing grain security projects and instituting other relevant grain security policies, China has promoted the process of digitalization and intelligence of grain storage and built the

收稿日期: 2022-12-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0401001; 2017YFD0401003-3; 2017YFD0401004-3); 粮食公益性行业科研专项(201313001-07)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFD0401001; No. 2017YFD0401003-3; No. 2017YFD0401004-3); Nonprofit Industry Research Subject (Gain) (No. 201313001-07)

作者简介: 卢延辉, 男, 1974年出生, 博士, 副教授, 研究方向为粮食储运系统分析与信息技术。E-mail: luyh@jlu.edu.cn.

通讯作者: 吴文福, 男, 1965年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食储运系统分析与信息技术。E-mail: wwzfzlb@126.com.

world's largest grain Internet of Things, since the 18th National Congress of the Communist Party of China. But, the resulting large amount of grain data, mainly based on temperature, can not effectively support decision-making and management on grain storage. Based on the study of the multi-field coupling theory of grain pile ecosystem, our research team further extracted the continuity principle, periodicity principle, and coordination principle of digital supervision of grain reserves, and proposed a series of intelligent strategies such as AID, ABC, 6R, SIN, CAE, O, and U. However, the application of these strategies directly faces the original data, which has some problems such as low efficiency and large error. To apply the intelligent strategies efficiently and correctly, the basic data manual of intelligent analysis of grain condition has been developed, according to the original grain condition data of typical granaries and main grain varieties in different grain storage ecological regions in China. The development of this manual is expected to consolidate the foundation of intelligent analysis of grain situation, which could promote the digital monitoring of grain storage quantity and quality, and realize the transformation from "manual defense" to "technical defense".

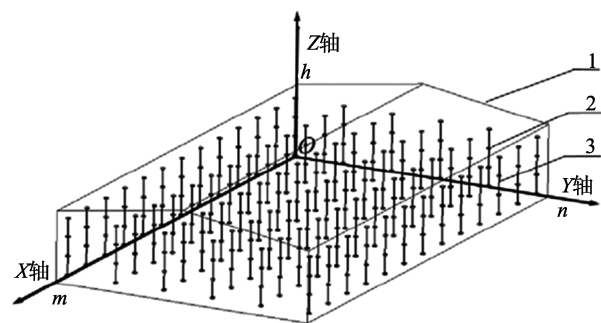
**Key words:** grain security; data manual; grain condition analysis; grain storage supervision; intelligent strategy

党的十八大以来,我国提出了“确保谷物基本自给、口粮绝对安全”的新粮食安全观,走出了一条中国特色粮食安全之路<sup>[1]</sup>。2010年启动实施了粮安工程等项目,推动储粮技术的数字化和智能化,建成了世界上最大的粮物联网,特别发展了储粮生态多场耦合理论及其智能策略<sup>[2-3]</sup>。但遗憾之处在于由此产生的大量粮情数据(以温度为主)还不能有效支撑储粮决策和管理。数据是农业生产管理的基础,也是实施精细作业的依据。然而在传统行业转型升级、探索自动化、智能化和智慧化中,硬件好建设,数据要靠积累。因此,吉林大学粮食储运团队在多年研究粮堆多场耦合理论基础上,进一步凝练了储备粮数字监管原理以及幅值、积分和微分策略(AID策略)、二次多项式模型策略(ABC策略)、空间互相关和时间自相关策略(6R策略)、气温模型策略(SIN策略)、云图等温线封闭性策略(O策略)、温湿水三元互动策略(CAE策略)以及云图等温线开放性策略(U策略)等一系列智能策略<sup>[4-6]</sup>。这些策略的应用离不开必要的基础数据,鉴于此,本文基于我国不同储粮生态区域典型粮仓、主要粮食品种的储粮原始粮情数据进行了有针对性的挖掘,旨在建构粮情智能分析基础数据手册。

## 1 粮情智能分析数据手册

### 1.1 数据来源

目前我国大部分粮库都安装了粮情测控系统,粮仓内粮情测控系统的传感器布置如图1所示。分别在三轴的方向上布局  $m \times n \times h$  个温度传感器。长期储藏期间获得了大量且存储完整的物理参数数据,可以为监管方法的研究提供充足的数据支撑。该粮情智能分析数据手册的数据来源主要为吉林省、河南省、贵州省等 28 个省份,涵盖我国所有储粮区的粮库所提供的历史气候数据。数据还包含 22 个城市的粮库所提供的仓温数据、层粮温数据、层温日差、周差、月差数据以及相邻



1. 粮仓 2. 温度传感器 3. 测温电缆  
Note: 1. Grain bin 2. Temperature sensors 3. Cable

图 1 粮仓测温电缆布局图

Fig.1 The layout of granary temperature measuring cable

层温差、层温标准差、层温标准差变化率、±1 °C 新异众比率数据。以及不同温度基点下的周积温、月积温、年积温数据和复杂度、线下比数据。考虑到粮食仓储的相关特性，数据来源还包括 22 个城市的粮库提供的时间相关性、层层互相关性、面面互相关性数据。结合粮食仓储数据的变化机理，对实仓数据进行分析，形成粮情智能分析数据手册。

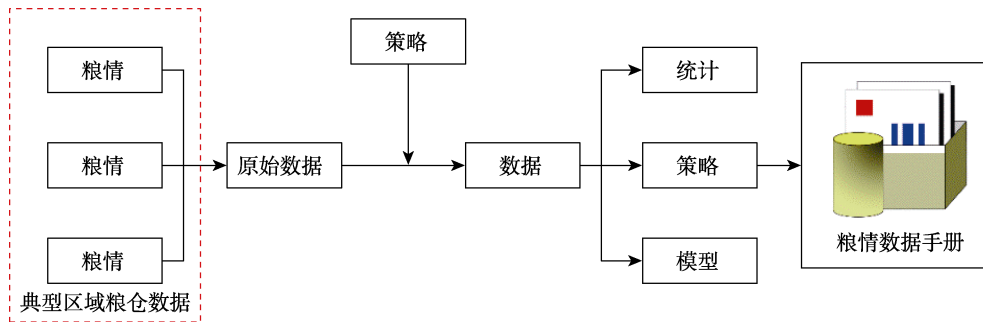


图 2 数据手册构建流程

Fig.2 The development process of the data manual

表 1 智能策略应用需要的基础数据及参数

Table 1 Basic data and parameters needed for intelligent strategies application

原理	策略	挖掘内容或者模型参数	备注
气候模型	SIN	气温	气温模型
周期性	AID	层粮温、积温、品质模型	幅值 A、积分 I、微分 D
连续性	ABC	纵中截面粮温	二次多项式模型
连续性	6R	层粮温、面粮温	空间互相关、时间自相关
平衡模型	CAE	温度、湿度和水分三元关系	平衡水分试验
协调性	O(斗)	云图等温线封闭性	等温线长度与云图周长的比值
协调性	U(箕)	云图等温线开放性	低于 T <sub>0</sub> 温度点的像素面积所占比例

### 1.3 粮情分析智能策略相关模型及算法

本文所提出的基于粮堆场变化“三性”的储粮数字监管方法主要依据了粮堆内单场在时空上的连续性<sup>[7-13]</sup>，在时间轴上的周期性<sup>[14-16]</sup>，以及多场耦合的协调性<sup>[17]</sup>。数据手册的编制策略主要包括 SIN、AID、ABC、6R、CAE、O 和 U 等。

#### 1.3.1 SIN 策略

根据各地市海拔、经度、纬度与当地气温曲线的关系，建立模型如下所示：

$$AT = C1 + C2 \times WD + C3 \times JD + C4 \times HB + (C5 + C6 \times WD + C7 \times JD + C8 \times HB) \times \text{SIN}(2 \times 3.14 / 12 \times \text{MOTH} + C9 + C10 \times WD + C11 \times JD + C12 \times HB) \quad (1)$$

### 1.2 粮情智能分析基础数据手册的构建

如图 2，数据手册的编制主要是通过挖掘 22 个省市粮情数据以及相关数据，形成不同区域储备粮数字监管原理及智能策略应用所需要的数据和参数，进一步编制成电子数据手册。编制数据手册过程中智能策略应用需要的数据及参数描述如表 1 所示。

其中，AT 为该地气温，°C；WD 为该地纬度，°；JD 为该地经度，°；HB 为该地海拔，m。

根据不同地域的生态气候模型可获取其年度气温周期，再与粮仓内部粮食温度的变化幅值进行比较判断即可确定粮仓内粮温是否异常。

#### 1.3.2 A 策略

A 策略主要是针对储粮因子的幅值特征，包括变化范围、均值、方差、趋势等，因不同储粮生态区、仓房结构而有差异，同时也受入仓时间、状态以及中间作业的影响。计算公式如下：

$$A = t_{max} - t_{min} \quad (2)$$

$$T_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - T_a)^2 \quad (4)$$

式中： $A$  为温度变化幅值， $^{\circ}\text{C}$ ； $t$  为粮食温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_a$  为平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $S$  为方差。

### 1.3.3 D 策略

D 策略主要是针对储粮因子的差分特性，差分特性分别从时间和空间两个角度考察粮温特性。将粮堆内布置的测温点按照从上到下的顺序排列。已知粮堆内测温点排布方式为  $n \times m \times 1$ ，某个测温点的温度以  $T_{ijk}$  表示，每层粮温均值  $\bar{T}_k$ 。

时间差分主要分析每一层平均温度随时间的变化规律；空间差分主要分析相邻层之间的温度差异。时间差分是指对粮仓所有测温点粮温均值在相邻两天的粮温差值，可以分析相邻 2 天、2 周和 2 月。根据粮温差值计算公式(5)进行计算，形成数据表，构建数据手册。

$$\Delta \bar{T}_{rt} = \bar{T}_{kt} - \bar{T}_{kt-n} \quad (5)$$

其中， $n$  为时间差，当  $n=2$  时变化阈值范围为  $[-0.5, 0.5]$ ，当  $n=6$  时变化阈值范围为  $[-1.5, 1.5]$ ，当  $n=29$  时变化阈值范围为  $[-2.5, 2.5]$ ，若历史储藏过程中粮温日变化率超出了该范围，则说明粮温异常变化，应及时分析原因。

层极值是指以横截面来说，每层粮温的最大值。气候曲线是指由粮温预测模型对粮仓所在地，外界温度变化进行预测的曲线。层极值与气候曲线差是指某时刻层粮温最大值与气候曲线预测的外温的差值。若气候曲线预测足够准确，正常储藏过程中，极值与气候曲线差和极值与粮仓外温差近乎一致。粮堆内部，层极值与气候曲线差  $T_{cq}$ ，那么每层粮温的最大值、最小值均因在该区间内，若历史储藏过程中粮温超出了该范围，则说明粮温异常变化，应及时分析原因。

某时刻第  $k$  层的最大值为  $T_{kmax}$ ，气候曲线预测此时的外温为  $T_{qw}$ ，那么层极值与气候曲线差  $T_{cq}$  计算公式为：

$$T_{cq} = T_{kmax} - T_{qw} \quad (6)$$

空间差分主要包含相邻层温差、层温标准差、层温标准差变化率、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$  新异众比率。四种参数的计算公式可在数据手册中进行查询。

### 1.3.4 I 策略

目前我国采用 1~3 年的储备粮轮换制度，若仓储条件不利则很容易造成粮食品质的下降。我国通过推广“四合一”储粮新技术，粮食的仓储设施得到大幅度改善，粮情监测技术也迅速发展。然而仍未能提出能够全面、全程反应粮食仓储经受湿热的实时、快速综合指标及监测方法，以实现仓储粮食的质量评价、仓储过程控制及延续后续流程的质量追溯。本手册通过检测仓储谷物积温，建立了以积温作为粮情判断和评价的方法。以积温作为谷物质量信息追溯指标、陈化度判断和预测指标，该指标能够反映谷物质量信息，解决了仓储谷物质量追溯指标缺失的问题，同时能够实时、快速地做出谷物陈化度、新鲜度判断和预测<sup>[18-19]</sup>。此外，通过建立积温品质模型，还可以对积温品质进行预测<sup>[20]</sup>。

**1.3.4.1 积温** 储粮谷物积温是指储藏粮温与间隔时间乘积的累加。周积温是指以周为周期，月积温是指以月为周期，将每天的粮温数据累加，表示储粮积温，形成数据表并组建数据手册。积温可以为储粮粮食品质判断提供参考，提供了一种仓储谷物的粮情实时、快速的判断指标，解决了粮情信息判断实时性弱、科学性不足的问题，保证了仓储谷物陈化度、新鲜度预测的实时性和准确性。

确定温度采集周期  $t_a$ 、温度均值计算周期  $t_d$ ；这里计算周期  $t_d$  选择为 1 天；设置温度基点  $T_e$  的数值，这里的温度基点分别选择为 0、7、15 和 25  $^{\circ}\text{C}$ 。采集谷物温度，并对谷物的平均温度  $T_{sij}$  进行计算；对平均温度  $T_{sij}$  的数值进行判断，当平均温度  $T_{sij}$  的数值高于温度基点  $T_e$  的数值时，进行等效积温计算。平均温度  $T_{sij}$  为：

$$T_{sij} = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S T_{ij}^r \quad (7)$$

其中， $T_{sij}$  表示第  $i$  个  $t_d$  周期采集的第  $j$  个温度测量元件采集的平均温度， $T_{ij}^r$  表示第  $i$  个  $t_d$  周期内第  $j$  个温度测量元件第  $r$  个  $t_a$  周期采集的粮食温度，每个  $t_d$  周期内可进行温度采集  $S$  次。

对平均温度  $T_{sij}$  和高于温度基点  $T_e$  的数值进行判断，若  $T_{sij} \leq T_e$ ，则对应  $T_{sij} - T_e = 0$ ；若  $T_{sij} > T_e$ ，

则对等效积温进行计算, 公式如下:

$$CT_j = \sum_{i=1}^n (T_{sij} - T_e) \times t_d \quad (8)$$

其中,  $CT_j$  表示第  $j$  个温度测量元件的谷物等效积温数值, 积温时间为 7 个  $t_d$  周期。

统计粮仓内等效积温  $CT_j$  大于理论积温  $CT_0$  的测温点个数  $g$ ; 若  $g/m \geq \delta$ , 则判断仓内粮食属于陈化粮; 若  $g/m < \delta$ , 则仓内粮食不属于陈化粮; 若  $0 < g/m < \delta$ , 则仓内粮食变为陈化粮的时间为  $t_0$ ; 若  $g/m = 0$  且  $CT_j \leq CT_0/n_e$ , 则仓内粮食变为陈化粮的时间为  $t_e$ ; 其中,  $m$  为测温点总数,  $\delta$  为陈化度临界值;  $n_e$  为正整数,  $t_0$  为粮食变为陈化粮的时间。

**1.3.4.2 QM 策略** QM 策略即积温品质模型策略, 积温品质模型是建立储藏过程中粮温的积累值与各储粮品质之间的关系。其中积温是以天为周期, 以微生物生长温度作为积温基点, 将入仓后每天的粮温数据进行累加。定期对粮食品质进行鉴定并记录, 利用统计学和数据分析软件建立积温和品质的关系。积温品质模型为储粮过程中粮食品质的优劣提供了一种实时、快速、直观的判断模型, 并可对后期仓储谷物的品质状况提供一种有效的预测监管手段。解决了品质检验过程缓慢, 粮情信息判断滞后等问题, 保证了在储藏过程中对谷物品质变化监测的实时性和准确性。

分别建立不同积温基点下的积温品质模型, 构建了积温品质模型表。所建立的积温品质模型主要包括: 储粮积温与脂肪酸值的模型、储粮积温与出糙率的模型、储粮积温与水分的模型、储粮积温与品尝分值模型。各积温基点对应的积温品质模型可在数据手册中进行查询。

将积温基点为  $0^\circ\text{C}$  时的储粮积温与脂肪酸值的模型作为范例。其计算公式为:

$$Y = \frac{A_2 + (A_1 - A_2)}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \quad (9)$$

其中,  $A_1=13.2$ ;  $A_2=23$ ;  $x_0=1\ 315.57$ ;  $p=3$ ;  $x$  为积温值, 单位为  $\text{d}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $Y$  为脂肪酸值, 单位为  $\text{KOH}/(\text{g}/100\ \text{g})$ 。

### 1.3.5 ABC 策略

平房仓储粮过程中出现的靠近仓壁和表层的粮温高于粮堆内部温度的现象称为“热皮冷心”, 反之就是“冷皮热心”。选取粮仓中间的纵截面作为粮温分析对象, 各个截面数据由上而下依次分为 4 个一维粮温数组 LY(i,1)、LY(i,2)、LY(i,3)、LY(i,4), 将  $y$  轴坐标作为自变量, 粮温值作为因变量进行基于最小二乘法的一元二次函数拟合。

粮温与传感器空间位置的拟合函数为:

$$F_x = ax^2 + bx + c \quad (10)$$

其中,  $F_x$  为拟合函数在横坐标为  $x$  处的粮温值。

拟合函数值与实际粮温值的偏差为:

$$\varepsilon_x = T_x - F_x \quad (11)$$

为了让拟合函数更准确的反映数据的变化趋势, 拟合函数与粮温的偏差平方和应当达到最小, 计算公式如下:

$$\sum_{x=1}^n \varepsilon_{x0}^2 = \sum_{x=1}^n (T_x - (ax^2 + bx + c))^2 \quad (12)$$

式 12 等号两边同时分别对  $a$ 、 $b$ 、 $c$  求偏导, 可将等式简化为:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{x=1}^n x & \sum_{x=1}^n x^2 \\ \sum_{x=1}^n x & \sum_{x=1}^n x^2 & \sum_{x=1}^n x^3 \\ \sum_{x=1}^n x^2 & \sum_{x=1}^n x^3 & \sum_{x=1}^n x^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{x=1}^n T_x \\ \sum_{x=1}^n x T_x \\ \sum_{x=1}^n x^2 T_x \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过解矩阵求得  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值。根据  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值按照式 (14)~(16) 计算  $F$ 、 $h$ 、 $N$ , 其中,  $F$  值为拟合函数的极值点,  $h$  值为极值点  $F$  与  $y$  轴交点  $C$  的差值, 可以用来表示拟合函数的深度,  $h$  值越大表示拟合函数的深度越深, 也即粮堆中部温度与外部温度差异越大;  $N$  表示以  $\Delta T^\circ\text{C}$  为间隔的等温线个数, 也即穿过该测温线的等温线的个数, 可以用来表示等温线的密集程度,  $N$  值越大表示等温线越密集。

$$F = \frac{4ac - b^2}{4a} \quad (14)$$

$$h = F - C \quad (15)$$

$$N = \frac{h}{\Delta T} \quad (16)$$

### 1.3.6 6R 策略

6R 策略利用的是数学上的统计学原理, 通过计算分析粮仓内各粮温截面层在时间轴上的相关性以及在空间上的互相关性来确定异常位置, 进而实现粮情监控<sup>[20-22]</sup>。

**1.3.6.1 时间相关性** 时间相关性是指粮仓平截面、横截面、纵截面中任意一类截面, 相邻两天对应平面的粮温矩阵的相关系数。正常储藏过程中, 除了靠近粮面或靠近仓壁的测温平面以外, 相邻两天的粮温矩阵的相关系数应较高。若相关系数值较低, 则表明这两天粮温出现异常。

以平行于粮仓 XOY 平面为例, 该平面的自相关系数计算公式为:

$$R = \frac{\sum_i \sum_j (T_{ijk1} - \bar{T}_{k1})(T_{ijk2} - \bar{T}_{k2})}{\sqrt{\sum_i \sum_j (T_{ijk1} - \bar{T}_{k1})^2} \sqrt{\sum_i \sum_j (T_{ijk2} - \bar{T}_{k2})^2}}, \quad k=1 \sim l \quad (17)$$

其中,  $T_{ijk1}$ 、 $T_{ijk2}$  分别为不同时间粮温面温度矩阵;  $\bar{T}_{k1}$ 、 $\bar{T}_{k2}$  分别为不同时间粮温面温度矩阵平均值;  $t_1$  与  $t_2$  选取不同的间隔时间, 即可获得日相关性、周相关性、月相关性和季相关性。

**1.3.6.2 空间互相关性** 粮堆内各层、各截面粮温彼此互相影响, 随着湿热的传递, 粮堆内温度场处于动态的平衡状态, 因此统计分析粮堆内不同位置处粮温集合的相关性系数能揭示温度场的动态变化特征和演变规律。相关系数分析方法在特征提取、状态判断等方面均有一定的应用, 分析粮堆内不同位置处的粮温点集的相关系数变化对于提取粮温变化特征, 判断粮堆状态具有一定的意义。

所述粮情检测粮温点表示为  $T_{ijkt}$ , 其中  $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别为粮仓长 (X)、宽 (Y)、高 (Z) 方向温度点数量和编号,  $t$  为时间序列。当  $t$  为常数时,  $T_{ijkt}$  表示某一时间的粮温数据, 当  $i$ 、 $j$ 、 $k$  其中一个参数为常数时,  $T_{ijkt}$  表示某一时间一个粮温面的温度, 如当  $k=1 \sim l$  时,  $T_{ij(1-l)t}$  表示平行于粮仓 XOY 平面的粮温; 两个参数为常数表示某一时间一个粮温线的温度, 三个参数为常数表示某一时间一个粮温点的温度。

所述面面间互相关为相邻粮温面在同一时间的相关性, 可对粮温点矩阵在三维空间中分别平

行于粮仓 XOY、XOZ 和 YOZ 平面的粮温面进行互相关, 如平行于粮仓 XOY 平面的相邻粮温面相关系数, 计算公式为:

$$R = \frac{\sum_i \sum_j (T_{ijk1} - \bar{T}_k)(T_{ij(k+1)} - \bar{T}_{k+1})}{\sqrt{\sum_i \sum_j (T_{ijk1} - \bar{T}_k)^2} \sqrt{\sum_i \sum_j (T_{ij(k+1)} - \bar{T}_{k+1})^2}}, \quad k=1 \sim l \quad (18)$$

式中,  $T_{ijk1}$ 、 $T_{ij(k+1)}$  为平行于粮仓 XOY 面的粮温面温度矩阵;  $\bar{T}_k$ 、 $\bar{T}_{k+1}$  分别为相邻粮温面温度矩阵平均值。若将式中的  $l$  换成  $n$  和  $m$ , 分别为行截面的面面相关性和列截面的面面相关性。

### 1.3.7 CAE 策略

根据粮仓内粮堆的平衡含水率、温度和相对湿度度的关系, 建立模型<sup>[23]</sup>如下所示:

$$ERH = 1 / [1 + \exp(A + B \times EMC + CT)] \quad (19)$$

$$EMC = [\ln(1 - ERH) - \ln ERH - A - CT] / B \quad (20)$$

其中,  $ERH$  为谷物相对湿度, %;  $EMC$  为谷物湿基含水率, %,  $T$  为环境温度, °C;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数, 与粮食种类有关。

利用此模型, 可以用三参数中已知的两个参数计算和推导出第三个参数, 实现了粮仓三参数之间的相互转换。

### 1.3.8 O 策略

随仓储时间的增加, 粮堆内部将形成稳定的温度场, 在未经人工作业时, 仓内温度场变化缓慢, 不存在突变, 因此分析温度场随时间的演变规律对分析仓储状态具有重要意义。粮温云图是温度场直观的表现形式之一, 其中等温线作为粮温云图的基础组成部分, 能直观的反映粮温云图的基本特征。可以从粮温云图等温线变化的角度来分析仓储过程中粮堆内温度场的演变规律并提取阈值以进行储粮状态监测<sup>[5]</sup>, 也可以利用云图的颜色特征分析进行存储异常的判断<sup>[24-25]</sup>。云图指纹策略参数主要包括复杂度和下限温度比例。复杂度是指定值等温线长度与云图周长的比值, 即 O 策略; 下限温度比例是指云图中小于定值温度的面积与云图面积的比例, 即 U 策略。

选取宝鸡某仓纵中截面的粮温数据, 针对未经人工作业的邻近时刻粮温云图等温线进行分析, 如图 3。图 3a 与图 3b 相差 5 天, 图 3b 与 3c 相差 185 天。

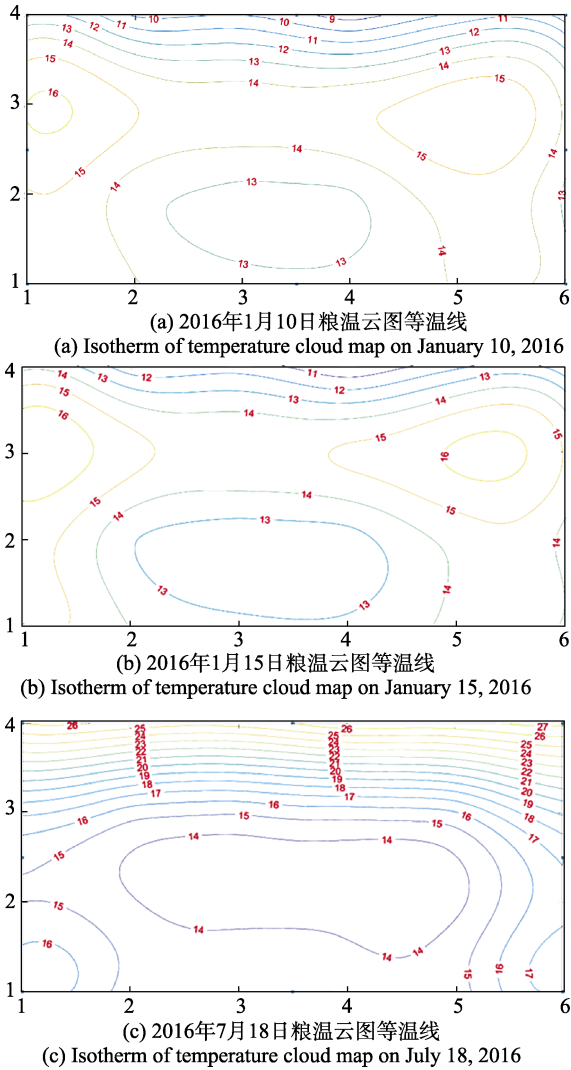


图 3 10 号仓粮温云图等温线

Fig.3 Isotherms of temperature cloud maps in No. 10 grain bin

比较图 3a 与 3b, 粮仓温度场在 1 月 10 号与 1 月 15 号基本未发生变化, 等温线分布情况基本一致。比较图 3a 与图 3c 发现, 在粮仓温度场演变 185 天后, 粮温云图等温线发生明显变化, 其靠近表层的粮温云图等温线变得密集同时温度上升, 符合随着气温上升导致的表层粮温上升现象。由图可得, 临近时间点的粮温云图等温线区别不大, 而时间间隔较长的粮温云图等温线具有明显的差别, 因此分析粮温云图等温线随时间演变规律对于探究粮温变化规律具有一定意义。为研究等温线随时间变化的演变规律, 参考圆度的基本概念 (圆度是指工件的横截面积接近理论圆的程度), 选取温度间隔为 1 °C 的一系列粮温等高线总长度与粮温云图边缘周长的比值作为复杂度, 进行分析。

选择某一平截面测温点平面, 然后利用插值的方式对粮温数据进行插值补全, 为  $m \times n$  的新数组。设定计算复杂度的温度  $T_0$ , 计算温度场云图中  $T_0$  温度的长度为  $L_z$ , 平截面云图的周长  $S_z$  为  $2(m+n)$ , 那么  $T_0$  等温线的复杂度计算公式为:

$$F_z = \frac{L_z}{S_z} \quad (21)$$

### 1.3.9 U 策略

U 策略通过计算温度云图的下限温度比例来提取云图特征, 下限温度比例是指某层的温度场云图中, 比温度值  $T_0$  低的区域面积在整个云图当中所占的比例。如图 4 所示为某仓的云图中的等高线, 以 13 °C 为例, 分析两张云图中低于 13 °C 的区域, 可以发现分为上下两部分, 其中上半部分的面积没有明显变化, 但下半部分图 b 相较于图 a 面积增大了一些。正常储藏过程中, 某时间段内, 低于温度  $T_0$  的面积应属于持续连续增大或减小的状态。

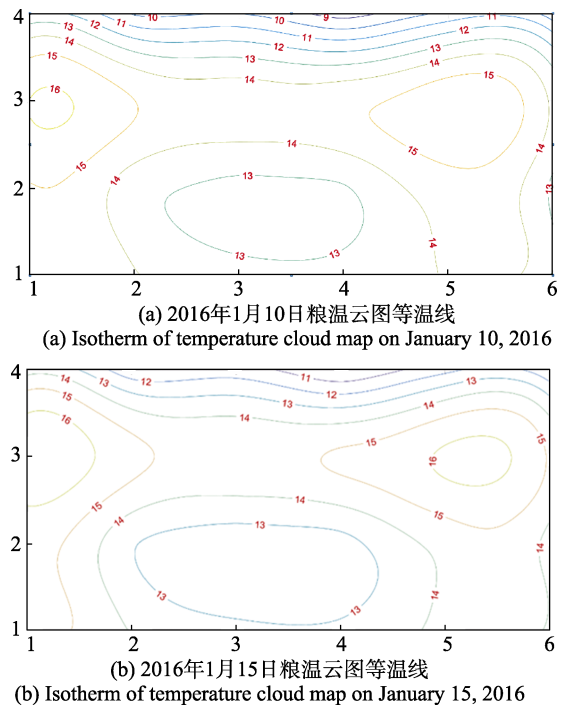


图 4 粮温云图等温线

Fig.4 Isotherms of temperature cloud maps

选定云图中存在的某一温度  $T_0$  为研究对象, 计算云图中低于  $T_0$  温度点的像素面积为  $S_{kpT_0}$ , 计算云图的像素面积为  $S_{kyp}$ 。那么下限温度比例计算公式为:

$$R_{kxT_0} = \frac{S_{kpT_0}}{S_{kyp}} \quad (22)$$

## 2 结果与讨论

本文开发的粮情智能分析数据手册共 3 册，分别是针对水稻、小麦和玉米仓储粮情的水稻数据手册；小麦数据手册和玉米数据手册。每一本数据手册都包含数据挖掘的原理说明和各类数据参数表，共计 42 万余条数据，600 多张参数表。

数据手册对储粮监管基本原理进行了介绍。储粮监管基本原理主要包括：粮堆内单场在时空上的连续性、在时间轴上的周期性、多场耦合的协调性。同时手册对全国 28 个省的气象数据进行了研究，分别建立了各个省份的气温模型。并根据时间连续性原理对仓温和层粮温数据进行了研究，分别建立了 22 个城市粮温预测模型。数据手册中根据空间连续性原理构建了二次模型，表述了模型的计算方法并详细列举了 22 个城市的模型参数。数据手册中根据空间差分特性，分别表述了相邻层温差、层温标准差、层温标准差变化率、±1 °C 新异众比率四种参数的计算方法，并对 22 个城市的数据进行了列举。数据手册中根据时间差分特性原理，分别表述了层温日差、周差、月差的计算方法和 22 个城市的具体数据表。手册中依据积分特性，分别介绍了日积温、月积温、年积温的概念和计算方法，分别建立不同积温基点下的积温品质模型，构建了积温品质模型表。所建立的积温品质模型主要包括：储粮积温与脂肪酸值的模型、储粮积温与出糙率的模型、储粮积温与水分的模型、储粮积温与品尝分值模型。各积温基点对应的积温品质模型可在数据手册中进行查询。数据手册中介绍了云图特性及其复杂度和线下比两大特征的概念及实现方法，同时包含了各温度基点下的复杂度和线下比数据。数据手册中最后对时间相关性和空间相关性的概念及参数表进行了阐述。

## 3 展望


作者团队在前期做了大量有关粮堆多场耦合理论方面的研究工作，在此基础上，进一步总结、提炼出了储备粮数字监管连续性、周期性和协调

性三原理，以及 SIN、AID、ABC、6R、CAE、O、CAE 和 U 等储粮智能策略。为了更正确高效的应用这些智能策略，本文对我国储粮生态区内典型粮仓和主要粮食品种的原始粮情数据进行了有针对性的挖掘和分析，形成了储粮粮情智能分析基础数据手册。该数据手册的开发不仅可以更合理高效的应用这些智能策略，解决面对以温度为主的原始粮情数据存在的效率低、误差大等问题，同时可以夯实粮食智能分析的基础、助推储粮数量和质量数字监管，使储粮管理由“人防”向“技防”转变，加速我国储粮数字化和智能化的建设过程。

## 参考文献：

- [1] 《中国的粮食安全》白皮书，国务院新闻办公室，2019。  
《China's Food Security》，The State Council Information Office, 2019.
- [2] 吴文福，王雨佳，李姝晓，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, 31(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, 31(2): 1-10.
- [3] 吴文福，韩峰，张亚秋，等. 粮食干燥和储藏系统理论与方法的研究——吉林大学粮食储运研究发展回顾[J]. 粮食储藏, 2021, 50(3): 1-10.  
WU W F, HAN F, ZHANG Y Q, et al. Research on the theory and method of grain drying and storage system—review on the development of grain storage and transportation research in jilin university[J]. Grain storage, 2021, 50(3): 1-10.
- [4] 吴文福，张娜，李姝晓，等. 事联管理方法及其智慧化在粮食围收储期的应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 18-26.  
WU W F, ZHANG N, LI S Y, et al. The application of the event-correlation management method and its wisdom in the period of grain peri-harvest and storage[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 18-26.
- [5] WU W, CUI H, HAN F, et al. Digital monitoring of grain conditions in large-scale bulk storage facilities based on spatiotemporal distributions of grain temperature[J]. Biosystems Engineering, 2021, 210: 247-260.
- [6] 吴文福，崔宏伟，张忠杰，等. 储备粮数字监管方法及应用[J]. 现代农业装备, 2020, 41(5): 2-7+47.  
WU W F, CUI H W, ZHANG Z J, et al. Digital supervision method and application of grain reserves[J]. Modern Agricultural Equipment 2020, 41(5): 2-7+47.
- [7] 崔宏伟，吴文福，吴子丹，等. 基于温度场云图的储粮数量



- 监控方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 290-298.
- CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Monitoring method of stored grain quantity based on temperature field cloud maps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 290-298.
- [8] 李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- LI D Y, DU J. Uncertain artificial intelligence[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [9] 武振锋, 朱黎. 空间曲面连续性的分类及其数学解释[J]. 机械设计, 2011, 28(2): 5-8.
- WU Z F, ZU L. Classifications of spatial surface continuity and their mathematic explanation[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(2): 5-8.
- [10] 张欣, 唐瑶瑶. 曲面连续性及其形态语义[J]. 包装工程, 2011, 32(20): 65-68+72.
- ZHANG X, TANG Y Y. Meaning and semantics of surface continuity[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(20): 65-68+72.
- [11] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 玉米粮堆霉变发热过程中的温湿度场变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 268-273.
- WANG X M, WU Z F, YIN J, et al. Research on temperature and humidity field change during corn bulk microbiological heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 268-273.
- [12] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 281-287.
- YIN J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Comparison and analysis of temperature field reappearance in stored grain of different warehouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 281-287.
- [13] GASTÓN A, ABALONE R, BARTOSIK R E, et al. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (Silobags)[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 72-85.
- [14] 吴文福, 乌云山丹, 陈凯, 等. 机理/数据联合驱动储备粮数字监管智能方法[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 11-17.
- WU W F, WU Y S D, CHEN K, et al. The digital intelligence method for stored grain supervision based on mechanism and data[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 11-17.
- [15] 王金奎, 丁团结, 杨全德. 平房仓粮堆温度变化规律研究与应用[J]. 粮食储藏, 2013, 42(4): 15-18.
- WANG J K, DING T J, YANG Q D. Research and application of grain temperature change in warehouse[J]. Grain storage, 2013, 42(4): 15-18.
- [16] 韩伟, 张永君, 董朋. 高大平房仓储粮温度变化规律研究[J]. 粮食与饲料工业, 2013(3): 10-13.
- HANG W, ZHANG Y J, DONG P. Study on grain temperature variation in tall flat warehouse[J]. Food and Feed Industry, 2013(3): 10-13.
- [17] 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 Z F, ZHAO Y X, CAO Y, et al. Statistical character on temporal and spatial distributing of grain temperature in warehouse[J]. Grain storage, 2010, 39(4): 15-20.
- [18] 吴子丹, 吴文福, 崔宏伟, 等. 一种仓储谷物积温计算方法: 中国, CN108519171A [P]. 2018-09-11.
- WU Z D, WU W F, CUI H W, et al. A method for calculating accumulated grain temperature in storage: China, CN108-519171A[P]. 2018-09-11.
- [19] 吴文福, 崔宏伟, 韩峰, 等. 一种适于储粮宜存评价的 3I 策略方法: 中国, CN108764749A[P]. 2018-11-06.
- WU W F, CUI H W, HAN F, et al. A 3I strategy method for grain storage suitability Evaluation: China, CN108764749A[P]. 2018-11-06.
- [20] 王启阳, 吴文福, 兰天忆. 东北地区稻谷储藏期间脂肪酸含量的预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 269-275.
- WANG Q Y, WU W F, LAN T Y, et al. Models for predicting the fatty acid contents of rice during storage in the northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6): 269-275.
- [21] 韩峰, 吴文福, 崔宏伟, 等. 一种基于相关性统计的粮仓储粮状态监管方法: 中国, CN108805501A[P]. 2018-11-13.
- HAN F, WU W F, CUI H W, et al. A method for monitoring grain storage status in granary based on correlation statistics: China, CN108805501A[P]. 2018-11-13.
- [22] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 321-330.
- CUI H, WU W, ZHANG Z, et al. Reserves monitoring method for grain storage based on temporal and spatial correlation of grain temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 321-330.
- [23] 吴文福, 吴子丹, 刘哲, 等. 一种基于温湿监测的粮仓内部点粮食水分检测方法: 中国, CN104237056B[P]. 2016-09-14.
- WU W F, WU Z D, LIU Z, et al. A method for detecting grain moisture in grain silo based on temperature and humidity monitoring: China. CN104237056B[P]. 2016-09-14.
- [24] HONGWEI C, WU W, WU Z, et al. A method for detecting abnormal changes in the temperature field of grain bulk based on hsv features of cloud maps[J]. Transactions of the Asabe, 2020, 63(5): 1181-1191.
- [25] CUI H, ZHANG Q, ZHANG J, et al. Classification of grain storage inventory modes based on temperature contour map of grain bulk using back propagation neural network: 5[J]. Agriculture, 2021, 11(5): 451. 
- 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。