

# 吴文福教授主持"智慧粮食基础探索"特约专栏文章之九/"新系统"分栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.009

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.

# 基于 NMR 的粮仓多场耦合 图形化探测系统研究

吴文福<sup>1,2</sup>,张 记<sup>2</sup>,徐 文<sup>1</sup>⊠,李 洁<sup>2</sup>,马昀钊<sup>1,2</sup>, 王玉铎<sup>1</sup>,刘 哲<sup>2</sup>,韩 峰<sup>2</sup>

(1. 吉林工商学院 粮食学院,吉林 长春 130507;
 2. 吉林大学 生物与农业工程学院,吉林 长春 130022)

**摘 要:**粮仓是一个复杂的生态系统,其内部生物、非生物以及环境的耦合关系复杂,且只能对温度 等少数参数进行探测,粮仓生态近乎"黑箱"。为了便于研究粮仓复杂的耦合关系、核实其中的基本 规律,研究提出了一种基于核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)的粮仓多场耦合图形化探 测系统。该系统由核磁共振成像分析仪、粮仓模拟装置和数据采集处理系统三部分组成,可同时实现 粮堆温度、湿度和水分三参数的真实精准探测,并能通过配套云图生成软件直观、形象地呈现粮堆温 度场、湿度场和水分场分布云图。该系统首次将低场核磁共振成像技术应用于粮堆多场耦合作用研究 领域,为探明粮仓生态复杂的耦合关系,进一步证实相关理论研究结论提供了一种新的技术手段。该 系统的提出有助于深化行业正在致力发展的粮堆多场耦合及生物场理论。

关键词:粮仓;多场耦合;粮情云图;探测系统;NMR

中图分类号: S-03; TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0066-08 网络首发时间: 2023-03-09 14:32:38

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.0949.008.html

# Research on Graphical Detection System for Multi-Filed Interaction in Grain Storage based on NMR

WU Wen-fu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji<sup>2</sup>, XU Wen<sup>1</sup>⊠, LI Jie<sup>2</sup>, MA Yun-zhao<sup>1,2</sup>, WANG Yu-duo<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>2</sup>, HAN Feng<sup>2</sup> (1. School of Grain Science and Technology, Jilin Business and Technology College, Changchun, Jilin 130507, China; 2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract:** The stored grain can be regarded as a complex ecosystem, which exist a complex multi-field coupling interaction among the abiotic factors, the biotic factors, and the surrounding environment. In this

收稿日期: 2022-12-18

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0401003-3; 2017YFD0401004-3; 2016YFD0401001))

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2017YFD0401003-3; No. 2017YFD0401004-3; No. 2016YFD0401001)

作者简介: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:wwfzlb@126.com. 通讯作者:徐文,男,1966年出生,博士,教授,研究方向为粮食机械制造及自动化、粮食安全以及高等教育教学。E-mail:1034338581@qq.com.



system, only a few parameters such as temperature can be accurately detected, which causes the system to operate like a "black box" to the outside world. To truly and accurately detect various grain pile parameters, and further study the multi-field coupling interaction in grain piles, a graphical detection system for multi-filed interaction in grain storage based on NMR has been developed. The system consists of an NMR imaging analyzer, a test grain bin, and a data acquisition and processing system, which can accurately detect the grain pile temperature, humidity, and moisture simultaneously, and intuitively and vividly present the cloud map of the temperature field, humidity field, and moisture field in the grain pile through the cloud map drawing software. In this system, the NMR imaging technology was applied to the research field of multi-field coupling interaction in grain piles for the first time, which can provide a new technical means to find out the complex coupling relationship of stored grain ecosystem and further confirm the correctness of relevant theoretical research. The development of this system will be helpful in deepening the theory of multi-field coupling and biological field of grain piles, developed by the industry.

Key words: granary; multi-field coupling interaction; grain condition cloud map; detection system; NMR

在粮食储藏过程中,仓内粮堆是一个复杂的生态系统。该系统由生物因子和非生物因子共同组成,其中生物因子包括粮食籽粒、微生物(真菌、霉菌等)、储粮害虫(昆虫、螨类等)、动物(啮齿动物、鸟类等)等,其构成了粮堆中的生物场;非生物因子包括温度、水分、相对湿度、气体成分、微气流等,其构成了粮堆中的温度场、水分场等物理场,这些场与场之间存在众多复杂的相互耦合作用和联系,共同影响着粮食的储藏稳定性<sup>[1-3]</sup>。这导致仅研究单一场的变化已无法准确掌握储粮状态变化,而需进一步结合多场耦合理论研究各个场的综合作用才能更准确的预测储粮状态,保障储粮安全。

粮堆多场耦合理论是由我国学者吴子丹<sup>[4]</sup>于 2014年首次提出,其提出要采用多场耦合理论,建 立多场耦合数学模型,对粮堆生物场和非生物场的 耦合作用进行定量分析和仿真。在此基础上,2015 年,尹君<sup>[5]</sup>以粮堆多场耦合理论为基础,构建了小 麦粮堆的温度场、湿度场和微气流场等多场耦合数 学模型,并对粮堆的结露过程进行了模拟和预测。 同年,尹君等<sup>[6]</sup>还根据温度拟合算法和WU模型, 重现了天津地区浅圆仓和平房仓内粮堆温度场、湿 度场分布云图,并分析了云图特征随季节更替的变 化规律。2016年,陈思羽<sup>[7]</sup>在粮堆静态储藏湿热迁 移规律和热力学定律的基础上,建立了谷物平衡水 分、相对湿度和温度之间的多场耦合数学模型,实 现了粮堆三参数间的相互推导和转换,该模型的建 立为粮仓通风作业管理提供了有力的依据。2018

年,王小萌等<sup>[8]</sup>研究了在人工干预条件下,小麦粮 堆内局部含水率偏高所引起的粮堆霉变与温、湿度 场的时空耦合关系,发现粮堆霉变不仅是时间的函 数,同时也是空间的函数。2019年,其还研究了静 态储藏状态下玉米粮堆霉变发热过程中粮堆温度场 和湿度场的变化规律,发现高温区和高湿区的面积 与温差存在正比关系<sup>[9]</sup>。同年,崔宏伟等<sup>[10]</sup>基于粮 堆多场耦合理论,提出了一种基于粮堆温度场云图 RGB 颜色特征的储粮监管方法,该方法能对储粮数 量和粮堆局部发热进行监管,为储粮数量监管提供 了新思路。2020年,吴子丹等[11]研究了粮堆内微生 物的时空分布规律,以及粮堆内温度场、湿度场、 生物场等多场之间的相互耦合作用关系,首次给出 了粮堆生物场的定义和建立了描述粮堆生物场时空 分布的数学模型,并通过实仓试验对该数学模型进行 了验证。粮堆生物场理论的提出丰富了粮堆多场耦合 理论体系,推动了粮堆多场耦合理论的发展<sup>[12]</sup>。 2021年,吴文福等[13-15]在粮堆场的时空连续性、周 期性和多场耦合的协调性三种特性的基础上,提出 了基于粮堆温度场特性的储备粮实物监管基本原理 和分析方法,并建立了储备粮数字监管云图系统。 综上所述,经过多年的发展,目前粮堆多场耦合及 生物场理论已成为粮食储运领域中一个重要的研究 方向。

本文提出了一种基于 NMR 的粮仓多场耦合图 形化探测系统,该系统首次将低场核磁共振成像技 术应用于粮堆的多场耦合研究领域,与现有技术相



比,可同时实现粮堆内温度、湿度和水分三个参数 的精准探测,并能通过配套的云图生成软件直观、 形象地呈现粮堆的温度场、湿度场和水分场的分布 云图。该系统的提出可以有效解决相关理论探讨难 以进行验证的问题,弥补部分基础研究的不足,揭 示部分现有技术难以探测的多场耦合现象,进一步 推动粮堆多场耦合及生物场理论的发展。

# 1 系统结构设计与工作原理

#### 1.1 系统总体结构与功能

本文基于核磁共振成像技术研发了一种粮仓 多场耦合图形化探测系统,已申请国家发明专利 (202211416719.4),该系统由核磁共振成像分析 仪、粮仓模拟装置和数据采集处理系统三部分组成, 系统结构简图如图1所示。在工作状态下,粮仓模 拟装置放置在核磁共振成像分析仪的大口径检测线 圈内;数据采集处理系统内置在核磁共振成像分析 仪的控制柜中,并通过线缆与粮仓模拟装置和大口 径检测线圈建立通信连接。

核磁共振成像分析仪包括 C 型大孔腔磁体、大 口径检测线圈、线圈支架、控制柜和显示器等部分, 具有核磁共振弛豫分析和核磁共振成像等功能,主 要用于获取粮堆内不同截面的原始<sup>1</sup>H 质子密度分 布数据。



图 1 基于 NMR 的粮仓多场耦合图形化探测系统结构简图 Fig.1 Schematic diagram of the graphical detection system for multi-filed interaction in grain storage based on NMR

粮仓模拟装置结构简图如图 2 所示,该装置由 储粮罐、第二检测线路板组、第一检测线路板、顶

盖和插接件组成。其中: 第二检测线路板组由 24 块结构相同的检测线路板组件组成,每块检测线路 板均包括5个温度传感器和1个发光二极管,其结 构简图如图 3a 所示;在第一检测线路板上设有 24 个定位孔,且在与圆心同心的3个圆周上均匀分布, 由内至外分别为4个、8个和12个,在线路板边缘 上还均匀分布有4个凸台,其结构简图如图3b所示; 顶盖为伞形,在其顶部固定连接有提柄、外表面一 侧边缘处设有螺纹孔、下端面设有4个滑槽和4个 凹槽,其结构简图如图 3c 所示;储粮罐为敞口圆筒 状,在其内表面上端设有均匀分布的4个凸台,其 结构简图如图 3d 所示。在工作状态下, 第二检测线 路板组的24块线路板位于储粮罐内;第一检测线路 板的4个凸台与储粮罐内壁接触,第一检测线路板 与插接件通过通信线缆连接;插接件与顶盖的螺纹 孔螺纹连接;顶盖通过凹槽和滑槽与储粮罐连接。 粮仓模拟装置的主要功能为模拟真实粮仓环境和采 集粮堆内的温度分布数据。



数据采集处理系统由工控机、核磁共振成像软件和云图生成软件组成,结构示意图如图4所示。 其中:工控机集成在核磁共振成像分析仪的控制柜 内,其功能为给核磁共振成像软件和云图生成软件 提供运行平台;云图生成软件包括温度数据采集模 块、数据处理模块、云图生成模块和数据存储模块, 使用 Python3 编程语言进行开发,其软件界面如图 5 所示;温度数据采集模块功能为采集粮堆内的温 度分布数据;数据处理模块功能为将采集的<sup>1</sup>H 质 子密度分布数据转换为实际含水率数据,将采集的 温度分布数据进行划分归类,以及生成含水率和温





图 3 粮仓模拟装置主要部件结构简图

Fig.3 Schematic diagram of the central component of the test grain bin







度数据插值矩阵;云图生成模块功能为重现粮堆的 温度场、水分场和相对湿度场分布云图;数据存储 模块功能为保存采集日期、采集时间、原始数据、 数据插值矩阵和云图等数据,方便后续查询和使用。

# 1.2 系统工作原理与数据处理

## 1.2.1 粮堆温度场的建立

选取采集的粮堆温度分布数据,并按照粮堆横截 面和纵截面进行划分;再运用数学插值算法拟合得到 粮堆各截面内不同空间位置处的温度数据,最后通过 Python3 编程语言重现粮堆的温度场分布云图。

本文选用的是径向基函数插值算法,由其定义 可知,对于已知的 *n* 个离散数据[(*x*<sub>1</sub>, *f*(*x*<sub>1</sub>)), (*x*<sub>2</sub>, *f*(*x*<sub>2</sub>)), … ,(*x*<sub>n</sub>, *n*-1, *f*(*x*<sub>n</sub>-1)), (*x*<sub>n</sub>, *f*(*x*<sub>n</sub>))], 给定一个径向基



图 5 云图生成软件界面示意图 Fig.5 The interface of the cloud map drawing software

函数 ø, 则有<sup>[16]</sup>:

$$S_{n}(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} \phi(||x - x_{i}||) + b^{T} x + a \qquad (1)$$

式中: x, n,  $b \in R^d$ ; a,  $\lambda_i \in R$ ;  $||x-x_i||$ 为x与中 心点  $x_i$ 之间的欧式距离;  $S_n(x)$ 为插值函数, 且  $S_n(x_i)=f(x_i)$ ;  $\phi$ 为径向基函数,本文选用的是三次径 向基函数。

1.2.2 粮堆水分场的建立

选取粮堆各截面的原始<sup>1</sup>H 质子密度分布数据, 首先对其进行中值滤波处理,去除图像内的噪声信 息;然后对其进行二值化阈值处理,提取出粮堆各 截面的轮廓数据;最后计算出粮堆各截面轮廓的最 小包围矩形框。

在核磁共振成像过程中,由于主磁场非均匀 性、梯度场涡流等因素的影响,会使图像在频率编 码方向(x轴)和相位编码方向(y轴)上发生几何 畸变。其中图像在频率编码方向上的几何畸变通常 很小,可以忽略不计,因此图像处理过程中只需考 虑图像在相位编码方向上的几何畸变<sup>[17-18]</sup>。粮堆横 截面和纵截面的图像处理过程如图 6 和图 7 所示。





粮堆各横截面图像的几何畸变系数,可按下述 公式计算:

$$S_c = \frac{w}{h} \tag{2}$$

式中:w为截面轮廓最小包围矩形框的宽度,h 为截面轮廓最小包围矩形框的高度。

粮堆各纵截面图像的几何畸变系数,可按下述 公式计算:

$$S_r = \frac{l}{d} \times \frac{w}{h} \tag{3}$$

式中: *l* 为粮堆的高度, *d* 为粮堆的直径。 粮堆各截面图像轮廓中像素的实际位置, 可按 下述公式计算:

$$y_i = (y_{i0} - y_{center}) \times S + y_{center}$$
(4)

式中: *y<sub>i</sub>*为像素 *i*校正后的 *y*坐标, *y<sub>i0</sub>*为像素 *i* 的初始 *y*坐标, *y<sub>center</sub>*为图像轮廓中心点的 *y*坐标, *S*为粮堆截面图像的几何畸变系数,为 *S<sub>c</sub>*或 *S<sub>r</sub>*。

校正后粮堆各截面图像轮廓范围内缺失像素 点的像素值,可按照以该像素点为中心,对周围 3×3 邻域内所有像素点按不同权重计算和的方式进行补 全,其邻域内各像素点的权重如下:

0.025	0.4	0.025
0.05	0	0.05
0.025	0.4	0.025



完成上述步骤后,还需将校正后的粮堆各截面的<sup>1</sup>H 质子密度分布数据转换为粮食实际含水率分 布数据,可按下述公式计算:

$$M_{i} = (kA_{all} + b) \times \frac{A_{i}n}{A_{.u}} \tag{5}$$

式中: *M<sub>i</sub>*为某粮堆截面轮廓中第*i*点的湿基含 水率, *k*为标定比例系数, *A<sub>all</sub>*为该粮堆截面轮廓中 所有点的像素值之和, *b*为标定常数, *A<sub>i</sub>*为第*i*点的 像素值, *n*为该粮堆截面轮廓中的像素点总数。

最后,从粮堆各截面轮廓的实际含水率分布数 据中提取测温点处对应的含水率数据,利用公式(1) 插值计算得到粮堆各截面内不同空间位置处的含水 率数据,并通过 Python3 编程语言重现粮堆的水分 场分布云图。

1.2.3 粮堆湿度场的建立

从粮堆各截面的温度场分布云图和水分场分 布云图中,提取测温点处对应的温度数据和含水率 数据,代入三参数 CAE 模型中计算得到测温处对应 的相对湿度数据,然后利用公式(1)插值计算得到 粮堆各截面内不同空间位置处的相对湿度数据,最 后通过 Python3 编程语言重现粮堆的相对湿度场分 布云图。三参数 CAE 模型方程如下<sup>[7,19]</sup>:

$$ERH = \frac{1}{[1 + \exp(A + B \times EMC + CT)]}$$
(6)

式中: *ERH* 为谷物相对湿度,%;*EMC* 为谷物 湿基含水率,%;*T* 为粮食温度,℃;*A*、*B*、*C* 为 方程参数,与粮食的种类有关。

# 2 系统应用与分析

#### 2.1 储藏模拟设置

在粮仓模拟装置内放入 2 种不同含水率的水 稻,形成高度为 120 mm、底面直径为 140 mm 的圆 柱形粮堆,其中含水率为 30.4% (w.b.)的水稻位于 粮堆的中心位置,形成高度为 50 mm、底面直径为 60 mm 的圆柱,其余部分填充含水率为 19.3%(w.b.) 的水稻。在含水率为 30.4%(w.b.)的水稻中心插入 发热功率为 1.5 W 的加热元件,用于模拟在人工干 预情况下粮堆内部局部含水率偏高所引起的粮堆内 部湿热迁移和多场耦合作用。整个实验过程中粮仓 模拟装置一直放置在温度为 18 ℃的恒温室内,其 内部测温点的布置如图 8 所示。





# 2.2 应用结果与分析

## 2.2.1 粮堆温度场云图分析

不同储藏时间后粮堆横截面和中垂面的温度 场分布云图如图 9 和图 10 所示。由图可知,在加 热元件的作用下,粮堆中心的温度逐渐升高,并向 四周传递扩散形成高温区域;储藏 17 h后粮堆高 温区的面积达到最大值,随着粮堆中心温度的继续 上升,高温区的面积略有减小。此外,从图 10 可 以看出,在热浮力的作用下,粮堆顶部的升温速率 明显高于粮堆底部,使得高温区域位于粮堆内靠上 位置。







# 2.2.2 粮堆水分场云图分析

不同储藏时间后粮堆横截面的水分分布云图如 图 11 所示。由图可知,在加热元件的作用下,粮堆 中心温度逐渐升高,使得中心高水分稻谷干燥,谷 粒内部水分受热扩散至周围孔隙中,造成高水分区 域面积和稻谷含水率逐渐降低。此外,由图还可以 看出,由于稻谷自身含水率分布的不均匀,导致在 两侧边缘处也出现部分面积较小的高水分区域。





## 2.2.3 粮堆湿度场云图分析

不同储藏时间后粮堆横截面的湿度分布云图 如图 12 所示。由图可知,在整个储藏过程中粮堆内 的湿度均维持在较高水平,但随着稻谷温度的升高 和含水率的降低,中心高湿区的湿度和面积在逐渐 减小。



图 12 不同储藏时间后粮堆横截面湿度分布云图

Fig.12 The humidity cloud maps of horizontal section in grain pile after different storage time

# 3 结论及展望

本文研发了一种基于 NMR 的粮仓多场耦合图 形化探测系统。该系统由核磁共振成像分析仪、粮 仓模拟装置和数据采集处理系统三部分组成,可以 同时实现粮堆内温度、湿度和水分三个参数的精准 探测,并能够通过配套的云图生成软件直观、形象 地呈现粮堆的温度场、湿度场和水分场的分布云图。 该系统首次将低场核磁共振技术用于粮堆多场耦合 研究领域,为探明粮仓生态复杂的耦合关系,进一 步证实相关理论研究的正确性,提供了一种新的技



术手段。该系统的提出有助于深化行业正在致力发 展的粮堆多场耦合及生物场理论。

# 参考文献:

- 《中国的粮食安全》白皮书[M]. 国务院新闻办公室, 2019.
   《Food Security in China》[M]. State Council Information Office of the People's Republic of China, 2019.
- [2] 王小萌.粮堆微生物场及多场耦合机制和模型的研究[D]. 吉林大学, 2019.
   WANG X M. Study on mechanism and model of microbial field

and multi-fields interaction in grain bulk[D]. Jilin University, 2019.

[3] 吴子丹,张强,吴文福,等.我国粮食产后领域人工智能技术的应用和展望[J].中国粮油学报,2019,34(11):133-139+146.

WU Z D, ZHANG Q, WU W F, et al. Current application and outlook prospect of AI technology in the field of post- harvested cereal[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(11): 133-139+146.

- [4] 吴子丹,赵会义,曹阳,等.粮食储藏生态系统的仿真技术应用研究进展[J].粮油食品科技,2014,22(1):1-6.
  WU Z D, ZHAO H Y, CAO Y, et al. Research progress on the applications of simulation technology in grain storage ecosystem[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(1): 1-6.
- [5] 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. Research on multi-fields coupling model of wheat grain and condensation prediction[D]. Jilin University, 2015.

- [6] 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.
- [7] 陈思羽. 基于绝对水势的储粮湿热迁移及通风管理的研究
   [D]. 吉林大学, 2016.
   CHEN S Y. Study on heat and humidity migration and granary aeration management based on absolute water potential[D]. Jilin
- University, 2016.
  [8] 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. Analysis of wheat bulk

mould and temperature-humidity coupling based on temperature and humidity field cloud map[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 260-266.

[9] 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 W 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.

- [10] 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.
- [11] WU Z D, ZHANG Q, YIN J, et al. Interactions of mutiple biological fields in stored grain ecosystems[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 9302.
- [12] 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, HANG F, ZHANG Y Q, et al. Research on the theory and method of grain drying and storage system -- Review of the development of grain storage and transportation research in Jilin university[J]. Grain Storage, 2021, 50(3): 1-10.

- [13] 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.
- [14] 崔宏伟. 储备粮实物数字云图监管方法和应用研究[D]. 吉林 大学, 2021.
  CUI H W. Research on supervision method and application of digital and cloud maps of grain reserves[D]. Jilin University, 2021.
- [15] 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.
- [16] REGIS R G, SHOEMAKER C A. Improved strategies for radial basis function methods for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 37(1): 113-135.
- [17] JEZZARD P, BALABAN R S. Correction for geometric distortion in echo planar images from B0 field Variations[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 1995, 34(1): 65-73.
- [18] ZENG H R, CONSTABLE R T. Image distortion correction in EPI: Comparison of field mapping with point spread function mapping[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2002, 48(1): 137-146.
- [19] 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(2): 47-55. <sup>1</sup>
- **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。