

基于 COMSOL 仓储稻谷籽粒黄变规律的数值模拟研究

王远成, 余海, 杨开敏, 董晓倩, 褚风娇
(山东建筑大学热能工程学院, 济南 250101)

摘要: 稻谷籽粒在储藏过程中温度和水分受仓外大气环境影响而改变, 并可能导致其颜色由白色变为黄色(黄变), 形成黄粒米。该研究基于 COMSOL 模拟的方法, 分析了浅圆仓仓储稻谷籽粒自然密闭储藏期间稻谷黄变规律。研究发现, 当稻谷全年自然密闭储藏时, 由于稻谷籽粒的呼吸放热, 粮堆内部大部分区域温度都非常高, 超过了 35°C; 同时, 在粮堆内部形成空气的自然对流, 引起粮堆内部水分向上部粮面迁移, 并加剧该区域稻谷籽粒黄变的速度。另外, 还对密闭储藏时不同高径比条件下浅圆仓南内部稻谷籽粒黄变规律进行了探究。研究结果可为粮食仓储企业安全储粮提供参考和理论依据。

关键词: 浅圆仓; 自然储藏; 热湿迁移; 稻谷黄变; 数值模拟

1 引言

粮食在储藏过程中, 温度和水分是影响其安全储藏的主要因素, 如果不能保证合适的温度和水分, 很容易诱发粮食霉变、发热和虫害^[1-2], 而在高温高湿环境中, 稻谷还容易黄变。刚收获的稻谷含水率高于 20%, 在这种含水率下稻谷不能长期保存, 通常情况下, 对稻谷进行机械干燥或者晾晒使其含水率降到 12%~15%, 方能保证稻谷安全储藏。粮堆是由粮粒堆积而成的散粒体, 是吸湿性多孔介质。仓外大气温湿度随季节的更替而变化, 最终通过粮仓围护结构与粮堆发生热湿传递^[3]。由于外界环境与粮堆内部粮食颗粒呼吸作用的共同影响, 会导致粮堆局部区域温度和水分升高, 导致粮堆内部虫霉滋生和繁衍以及稻谷的黄变, 不利于粮食的安全储藏。

为了保证粮食安全储藏, 近年来, 国内外学者对粮食储藏进行了大量研究^[4]。Yue 等^[5]建立了粮堆颗粒间气流阻力的孔隙尺度模型, 得到通风条件下粮堆内部气流速度数量级为 10^{-2}m/s 。Jia 等^[6]采用数值模拟的方法对袋装储粮粮堆内部的温度变化进行研究, 但忽略了自然对流和含水率的影响。Wang 等^[7]基于最小二乘法的傅立叶级数建立了一种新型预测粮堆温度的模型(滞后循环模型)。刘新涛等^[8]、张祥祥等^[9]、陈桂香等^[10]、Shubham 等^[11]运用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法, 分别研究了储粮过程中热湿传递的规律, 发

现粮堆内部温度和含水率是互相影响的, 但没有考虑太阳辐射和谷物呼吸对温湿度的影响。李林杰等^[12]通过对实仓机械通风时粮堆内部含水率的监测, 发现通风时粮堆中下层含水率有所升高, 在通风和自然对流的作用下, 粮堆中上层含水率降低较明显, 但粮堆的平均含水率还是降低的。谢静杰等^[13]通过对不同仓型结构的实仓进行监测, 发现不同仓型结构的粮堆温湿度变化不尽相同。刘进吉等^[14]对高粮堆浅圆仓储粮进行研究, 发现粮堆温度变化较大的位置只在粮堆表层附近。戚禹康等^[15]使用 COMSOL 软件模拟了稻谷在自然储藏时的温度和含水率变化, 但没有考虑谷物呼吸作用的影响。张燕君等^[16]、王若兰等^[17]使用 CFD 方法模拟了自然储藏和机械通风过程中仓内粮堆温度场随外界环境温度的变化, 但只研究了温度分布而忽略了粮堆内部含水率的变化。Hammamia 等^[18]通过数值模拟和试验结合的方法研究通风对筒装粮堆温度的影响, 发现通风温度对粮温的控制具有重要作用。Roberta 等^[19]使用 CFD 方法研究温度对谷物干物质的损耗, 发现谷物平均温度低于 35°C 时干物质损失最少。

综上所述, 国内外对安全储粮都进行过大量的实仓测试和模拟研究, 并获得了较多成果, 研究主要聚焦于储粮温度或含水率变化对储粮安全影响的研究。实践发现, 不利的储藏条件, 如高温高湿条件, 会加速稻谷变黄, 形成黄粒米, 从而导致品质下降而无法食用; 黄变米带有黄曲霉等多种毒素, 可引起肝脏病变, 有些还能引起肾脏和神经损害, 具有强烈的致癌作用^[20], 因此, 研究稻谷的黄变是

非常有必要的。

本文采用数值模拟与试验相结合的方法，基于南昌地区的气候条件，对稻谷在自然密闭储藏期（1a）内的温度、含水率和黄变等随外界温湿度的改变而变化的规律进行了研究，为稻谷安全储藏提供了理论依据。本文采用的数值模拟与试验相结合的方法，相对于传统的实验室小试和现场观测方法而言，该研究是一种普遍性基础性的研究方法，具体研究内容为稻谷自然（密闭）储藏，也即没有通风的情况下，粮堆的温度场、水分场和黄变规律的模拟研究。

2 模型的建立及仿真条件

2.1 物理模型

数值模拟的研究对象为国内常见的用于粮食储藏的钢筋混凝土式浅圆仓，混凝土导热系数为 $1.54\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，仓高 32m，内径 25m，装粮高度 25m，檐高 27m，仓壁厚 0.27m，仓顶厚 0.14m。此时浅圆仓装粮高度与直径之比 (L/D) 为 1.0。由于浅圆仓为轴对称结构，充分考虑了浅圆仓仓房结构尺寸、材料及其导热性能，并选择局地环境

温湿度、太阳辐照度作为边界条件的前提下，采用二维方法的模拟结果基本能够反映实际情况，因此为简化计算选取沿筒仓直径的截面作为研究对象，为获得粮堆内部某个位置的参数变化情况，模拟过程中设置了 9 个监测点来观察粮堆内部的参数变化，位置分别为 A (-12, 24.5)，B (-12, 12.5)，C (-12, 0.5)，D (0, 24.5)，E (0, 12.5)，F (0, 0.5)，G (12, 24.5)，H (12, 12.5)，I (12, 0.5)，具体位置如图 1(a)所示，其中左侧墙壁为南墙，右侧墙壁为北墙。粮仓的网格划分如图 1(b)所示，共有 11930 个网格单元，平均单元质量 0.93，经网格无关性验证得到本研究模拟结果准确可靠，满足计算精度要求。

另外，考核浅圆仓结构参数 L/D 分别为 2.0 和 0.5 时对其内传热传质及黄变过程的影响， $L/D=2.0$ 时，浅圆仓装粮高度为 24m，直径为 12m，檐高 26m，仓高 29m，壁厚 0.3m，仓顶厚 0.15m； $L/D=0.5$ 时，浅圆仓装粮高度为 10m，直径为 20m，檐高 12m，仓高 15m，壁厚 0.3m，仓顶厚 0.1m；模拟计算过程中在粮堆内部同样各设置了 9 个监测点，具体位置如图 1(c)-(d)所示。

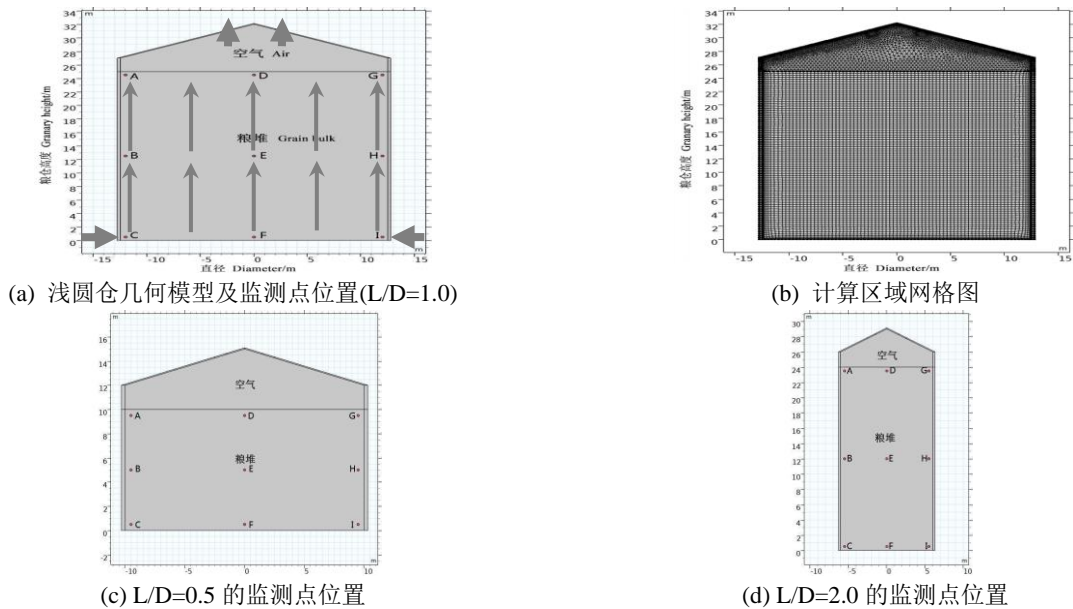


图 1 浅圆仓几何模型及网格划分图

2.2 数学模型

2.2.1 热湿传递模型

稻谷籽粒堆积体在浅圆仓内密闭储藏时，粮仓内部产生微气流运动、热量传递以及水分的迁移。粮仓内部微气流运动的连续性方程、自然对流流动方程、

热量传递方程和水分迁移方程参见文献[3]。

2.2.2 稻谷黄变模型

在储粮过程中，粮堆内部的环境条件，即温度和相对湿度条件下，稻谷的颜色由白色变为黄色，颜色的变化由 b 值衡量^[21]，由式 (1) 表示为

$$\frac{db}{dt} = k \quad (1)$$

式中 k 为稻谷的黄变率，由式 (2) 表示为

$$k = \exp\left(\frac{71.87 - 25.32r - \frac{25919.3}{T}}{+\frac{10712.78r}{T}}\right) \quad (2)$$

式中 T 为温度，K； r 为相对湿度，%。

2.2.3 稻谷粮堆的相对湿度

颗粒间空气的相对湿度与粮堆温度和水分有关^[22]，由式 (3) 表示为

$$r = \exp\left(-\frac{A}{T+C} \exp(-BW)\right) \quad (3)$$

式中 W 为粮堆的湿基水分， $W = W_g / (1 + W_g) \times 100\%$ ，% (w.b.)； A 、 B 和 C 为取决于谷物品种的等温常数，对于稻谷， $A=0.303$ ， $B=6.316$ ， $C=-25.804$ ^[22]。

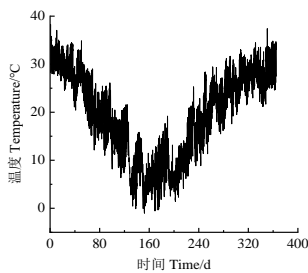
2.3 数值模拟参数设置

模拟的时间跨度为 2018 年 8 月 1 日~2019 年 7 月 31 日，储藏周期的时间分布见表 1。粮堆的孔隙率 ε 为 0.48，密度 ρ_s 为 600 kg/m^3 ，渗透率 K 为 $7.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ；

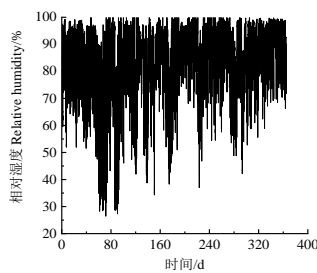
稻谷比热容 C_s 为 $(1269+34.89M) \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ^[31]， M 为稻谷颗粒水分湿基百分数。粮堆初始温度为 30°C ，初始含水率为 14% (w.b.)，初始黄度值为 11.50。仓外大气逐时温湿度和太阳辐射照度如图 2 所示，数据来源于局地粮情监测系统。经测试，浅圆仓北墙壁面温度和仓外大气温度非常接近，而南墙壁面温度等效于在大气温度的基础上加上太阳辐射引起的等效温度。数值计算时，为了更接近真实工况，将仓外大气逐时温度趋势用分段函数 $pw1(t)$ 表示，设置为北墙和仓顶北侧的边界条件；将考虑了太阳辐射的温度变化趋势用分段函数 $pw2(t)$ 表示，设置为南墙和仓顶南侧的边界条件。各边界设置为无滑移边界条件，且不可渗透。在自然储藏阶段，仓底设为绝热边界条件，通风阶段，仓底为进风口；机械通风采用的是“梳状”地上笼系统进行垂直通风，单位(吨粮)通风量为 $10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ ，模拟条件设定仓底与粮堆交界面为进风口，其中谷冷通风阶段进风空气为恒温恒湿空气，进风温度设为 22°C ，进风相对湿度设为 77.3%，自然通风阶段，进风空气温湿度为外界空气的温湿度，这一阶段空气平均温度为 6°C ，相对湿度为 71.6%。屋顶与空气交界面设有两个出风口，出口压力为大气压力。

表 1 整个储藏周期的时间分布

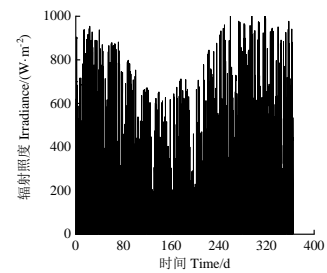
工况	起始时间	终止时间	状态
Working condition	Start time	Termination time	State
自然储藏	2018 年 8 月 1 日	2019 年 7 月 31 日	密闭储藏阶段 (365 d)
Natural storage			



(a) 气温



(b) 相对湿度



(c) 辐射照度

图 2 南昌地区气象参数 (2018.8.1~2019.7.31)

3 模拟结果与分析

3.1 全年自然储藏模拟结果分析

3.1.1 温度、含水率和黄度分布

以仓外大气温湿度及太阳辐射为边界条件，在不通风情况下对整个储藏周期进行模拟，得到储藏 365 d

时粮堆内部温度、含水率和黄度分布规律。

图 3 为自然储藏 365 d 时的仓内温度场、自然对流微气流、粮堆含水率、黄度分布情况。从图 3(a) 可看出，粮堆内部大部分为高温区域，温度超过 35.0°C ，为高温储粮状态，其次在南墙与粮堆的交界面附近，

这是因为南墙受太阳辐射影响，所以南墙附近的稻谷比北墙附近的稻谷温度高，而粮堆内部由于谷物呼吸放热，所以粮堆内部温度非常高，最高温度为 39.1℃，这些高温区也是稻谷极易黄变的区域。仓内低温区则在空气与粮食的交界面上方，由于粮堆以上的空气区域热容较小，而且经过上一个冬天的冷却，空气区域温度较低，转到下一年春夏季时，受到春夏季气温上升的加热作用，粮面上方出现的急剧变化的低温区。同时，由于空气的热惯性较小，粮堆上部空气区域更易受仓外大气温度的影响。图 3(b)为全年自然储藏时第 365 d 时的自然对流微气流分布，此时仓外大气处于夏季，尽管外界气温大幅升高至 30℃左右，但此时粮堆中心温度经过一年储藏及粮堆呼吸产热的作用，其温度升高到 35℃左右，此时粮堆处于“热芯”“冷

皮”状态，并在自然对流微气流作用下形成图 3(b)所示的流场。自然对流的微气流速度的数量级为 $10^{-5}\text{m/s}\sim 10^{-4}\text{m/s}$ ，与文献^[5]报道的结果一致。由于太阳辐射的影响，仓内气流的分布是不对称的。图 3(c)是 365 d 时的含水率分布图，在微气流的作用下，粮堆内部水分向粮面附近迁移，导致粮面附近的稻谷含水率升高，局部含水率甚至高于 17% (w.b.)，超过了稻谷储藏的安全水分，粮堆内部的含水率有所降低，仓底附近含水率最低。图 3(d)是 365 d 时的黄度分布图，可以看出，粮堆内部大部分区域稻谷的黄度值较高，黄度值已经上升至 13.0 以上，靠近北墙附近的稻谷黄度值较低，稻谷的黄度分布与温度场相似，说明稻谷黄变受温度的影响更大。

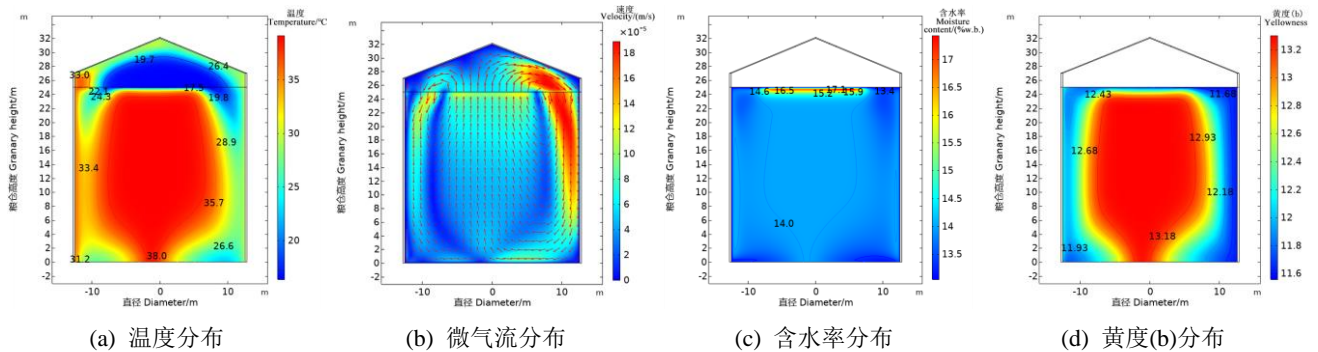


图 3 自然储藏模拟温度、微气流、含水率和黄度分布

3.1.2 各监测点参数变化

图 4 为全年自然储藏时各监测点记录的温度、水分和黄度的变化情况。从图 4(a)可知，靠近仓壁附近的 A、B、C 和 G、H、I 监测点的温度变化趋势与仓外大气温度的变化趋势大致是一致的，粮堆中心监测点 E 和仓底中间附近位置的监测点 F 的温度则持续升高，最终温度接近 40℃，较初始温度上升了近 10℃，这是因为仓壁与大气接触，热量透过仓壁传递至粮堆，所以仓壁附近的粮食易受外界环境温度的影响，随外界环境温度的改变而变化，但由于谷物是一种不良的热导体，存在着较大的热惯性，虽然浅圆仓中稻谷与局地大气之间不断的进行热量传递，但由于中心区域粮堆距离壁面较远，该区域粮堆温度变化存在一定的衰减和迟滞，加之稻谷自身还进行呼吸作用，产热产湿并放出热量，从而导致粮堆中心区域的 E 和 F 粮温不断上升。这表明粮堆中心区域和仓底中心附近区域是粮食储藏时的温度危险点，在粮食实际储藏过程中，应注意这些区域因温度过高而引发的虫害问题。图 4(b)为各监测点含水率变化情况，全年自然储藏情况下，位于粮面中心附近的监测点 D 的含水率变化很大。在

微气流的作用下，整个储藏周期结束后，监测点 D 的含水率接近 17% (w.b.)，超过粮食的安全水分，这表明 D 监测点附近是粮食储藏时的水分危险点。因此，这部分区域需要格外注意，防止含水率过高而引起的储粮发热霉变等问题。除了监测点 D 外，其余监测点的含水率变化并不大，含水率最大变化在 0.5% 以内，且都位于安全水分之内。图 4(c)为各监测点记录的黄度变化情况，由图可知，南侧仓壁附近监测点 A、B、C，北侧仓壁附近监测点 G、H、I，以及粮面中心附近监测点 D 的黄度值呈现先升高，后基本不变，然后再升高的趋势，最终这些监测点的黄度值基本是在 12.0 以内。这是因为这些监测点靠近仓壁和粮面，这些区域受环境温度影响较大，而环境温度在秋冬季是下降，春夏季上升趋势，这些监测点的温度在秋冬季也是下降，春夏季呈上升的趋势，并且在冬季的温度较低，所以这些监测点的黄度在温度较高的时候上升，温度较低的时候基本不变。由图还可知，靠近南墙的监测点黄度值高于北墙附近的监测点，这是由于太阳辐射作用，南墙附近的监测点温度高于北墙附近的监测点导致，另外，由于监测点 D 的含水率较高，这也

使得 D 点附近稻谷的黄度升高。粮堆中心监测点 E 和仓底中心附近监测点 F 的黄度值一直上升，最终接近 13.4，这表明监测点 E 和监测点 F 是稻谷储藏过程中

黄变最严重的位置，因为谷物呼吸放热的缘故，这两个监测点的温度一直升高，并且一直维持高温，所以和其他监测点相比，E 和 F 的黄变更严重。

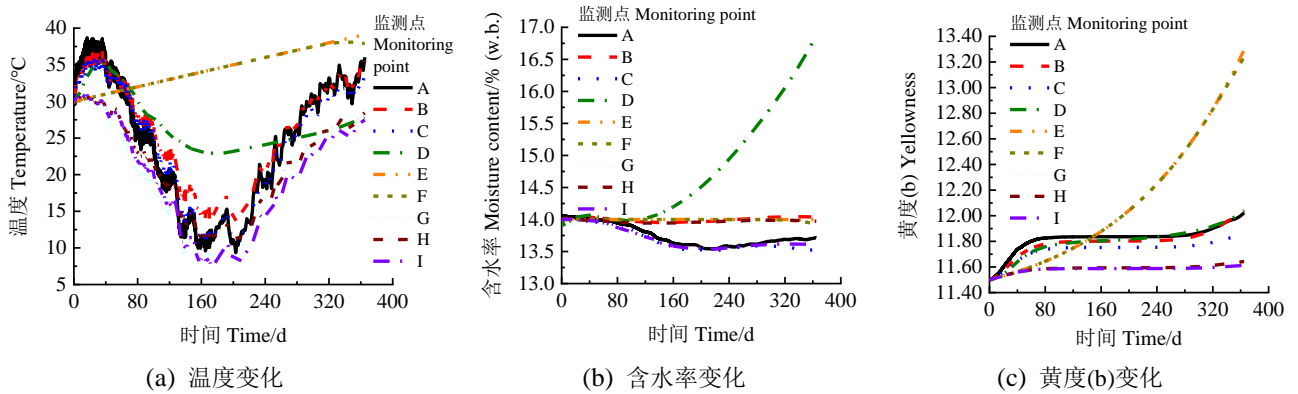


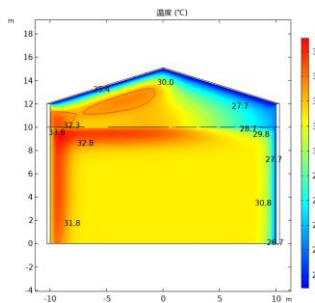
图 4 自然储藏各监测点参数随时间变化曲线（2018.8.1~2019.7.31）

3.2 不同浅圆仓仓型结构下粮库模拟结果与分析

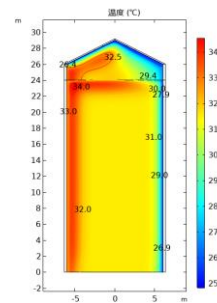
3.2.1 第一阶段自然储藏内粮情变化

稻谷入仓后开始自然储藏，模拟通风前自然储藏阶段，即第一阶段自然储藏为期 55d，时间为 2018 年 8 月 1 日~2018 年 9 月 24 日。以大气温湿度为边界条件，得到第 55d 时粮堆内部温度、水分和黄度分布规律。图 5 给出了 L/D=0.5 和 L/D=2.0 时稻谷储藏至 55d 时的仓内温度分布，第 55d 时，结合

L/D=1.0 时的温度云图可知，同一储粮区不同高宽比的浅圆仓仓储稻谷温度的分布是类似的，在浅圆仓仓壁南边和粮面靠南方向因辐射的缘故温度较高，从云图可知，L/D=2.0 时粮堆中出现的温度最高，为 34℃，其次是 L/D=1.0 时，最高温度为 33.9℃，最后是 L/D=2.0 的时候，最高温度为 33.8℃。第 55 天时，不同仓型结构储粮时稻谷的平均温度均为 31.5℃，升幅 1.5℃。



(a) L/D=0.5 时第 55 天温度

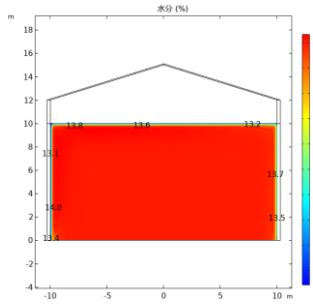


(b) L/D=2.0 时第 55 天温度

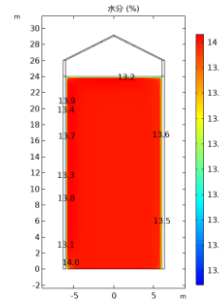
图 5 第一阶段自然储藏粮堆温度云图

图 6 为不同仓型结构下粮堆的水分分布云图，不同仓型结构时，第 55d，稻谷的水分分布也是类似的，都是在壁面和粮面附近水分有所变化，粮堆内部水分几乎没变，平均水分为 14%。图 7 为不同仓型结构下粮堆的黄度分布情况，因为温度和水分是影响稻谷黄变的关键，而自然储藏阶段水分基本维持不变，因此温度在自然储藏过程中是影响稻谷黄变的主要原因，稻谷黄度的分布与温度分布类似，在高温区域，稻谷的黄度也高，由黄度分布云图可

知，在浅圆仓仓壁南边和粮面靠南方向稻谷温度高的地方，也是稻谷黄度值高的区域，所以在储藏过程中，浅圆仓仓壁南边和粮面靠南方向的稻谷容易发生黄变。第 55d 时，L/D=2.0 时的浅圆仓稻谷平均黄度为 11.603，L/D=0.5 时的浅圆仓平均黄度为 11.604，在第一阶段密闭储藏情况下，不同仓型结构的浅圆仓储存稻谷时，稻谷的平均黄度在 10^{-3} 的数量级内变化。

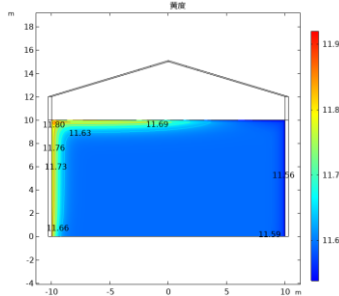


(a) L/D=0.5 时第 55 天水分

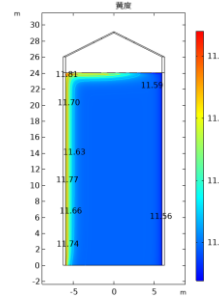


(b) L/D=2.0 时第 55 天水分

图 6 第一阶段自然储藏粮堆水分云图



(a) L/D=0.5 时第 55 天黄度



(b) L/D=2.0 时第 55 天黄度

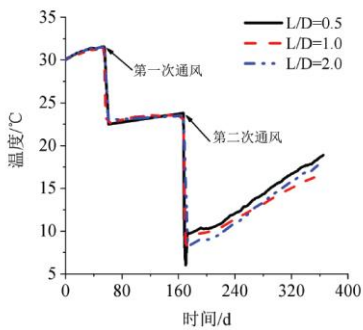
图 7 第一阶段自然储藏粮堆黄度云图

3.2.2 进行通风处理的一年储藏周期内粮情变化

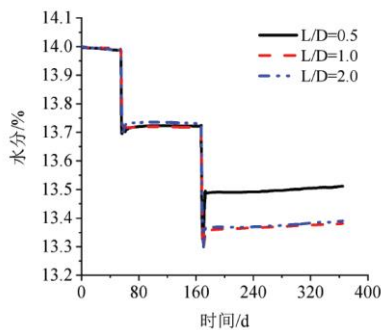
图 8(a)为三种仓型结构的稻谷平均温度，在第二次通风之前，三种仓型的平均温度基本一样，第二次通风结束时，L/D=2.0 的浅圆仓稻谷平均温度降至 8.3℃，降幅为 15.2℃，L/D=1.0 的浅圆仓稻谷平均温度降至 9.1℃，降幅为 14.5℃，L/D=0.5 的浅圆仓稻谷平均温度降至 9.7℃，降幅为 14.1℃，表明装粮高度与直径比越大，通风降温效果更好，但是第五阶段自然储藏后，L/D=2.0 的浅圆仓稻谷平均温度升至 18.2℃，L/D=1.0 的浅圆仓稻谷平均温度升至 16.9℃，L/D=0.5 的浅圆仓稻谷平均温度升至 18.9℃，说明在一年的储藏周期内，L/D=1.0 的浅圆仓储存稻谷时稻谷的平均温度可以维持在更低的水准，因此

L/D=1.0 的浅圆仓更有利于稻谷储藏。

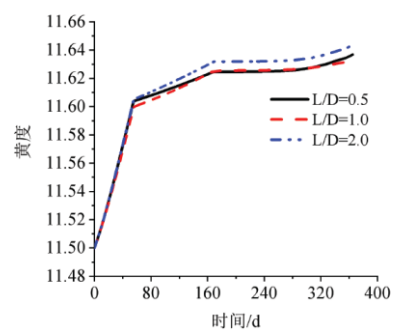
如图 8(b)所示为稻谷的平均水分对比情况，L/D=2.0 和 L/D=1.0 的浅圆仓稻谷平均水分变化类似，两次通风后平均水分降至 13.4%，平均水分丢失 0.6%，L/D=0.5 的浅圆仓两次通风后稻谷平均水分降至 13.5%，水分丢失 0.5%。从图 8(c)平均黄度变化情况可知，一年的储藏周期之后，L/D=2.0 的浅圆仓稻谷平均黄度最大，L/D=1.0 和 L/D=0.5 的稻谷平均黄度差不多，但严格来说 L/D=1.0 的浅圆仓稻谷平均黄度最小，说明浅圆仓装粮高度与直径比为 1.0 时稻谷的整体黄变情况比浅圆仓装粮高度与直径比为 2.0 和 0.5 时稍轻。



(a)不同仓型结构粮堆平均温度



(b)不同仓型结构粮堆平均水分



(c)不同仓型结构粮堆平均黄度

图 8 具有通风过程的一年储藏周期内粮堆状态变化

4 结论

以稻谷粮堆温度为 30℃, 含水率为 14% (w.b.), 黄度值为 11.50 作为初始条件, 在局地气候条件下 (大气温湿度和太阳辐射), 分别对自然储藏和进行通风处理的一年储藏周期内浅圆仓内稻谷温度、含水率和黄度值进行数值模拟, 得出以下结论:

1) 稻谷全年自然储藏时, 由于环境温度、太阳辐射和谷物呼吸的共同影响, 粮堆内部大片区域温度超过了 35℃, 为高温储粮状态, 并且这部分区域的稻谷极易黄变, 稻谷的黄度值超过了 13.0; 在微气流的作用下, 粮堆内部水分向粮面迁移, 粮面附近成为高水分区域, 局部含水率高达 17% (w.b.)。

2) 自然储藏和机械通风交替进行的情况下, 粮堆内部整体温度较低, 粮堆内部的稻谷黄变较低, 但由于太阳辐射的影响, 粮堆高温区在南墙壁附近和靠近南侧的粮面附近, 这部分区域的稻谷黄变较严重, 黄度值在 12.0 左右; 在微气流的作用下, 粮堆内部水分向仓底附近迁移, 仓底附近的稻谷含水率相对略高; 通风降温可以有效降低的粮温, 同时也降低了粮堆的含水率, 从而有效抑制仓储稻谷黄变速度。

3) 浅圆仓装粮高度与直径比为 1.0 时稻谷的平均温度最低, 平均黄度最低, 平均水分丢失不多, 说明装粮高度与直径比为 1.0 的浅圆仓储存稻谷时, 稻谷粮堆的整体温度更低, 黄变程度也更轻, 表明装粮高度与直径比为 1.0 的浅圆仓更适合稻谷储存。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 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, 2021, 35(3): 268-273.

[3] 王远成, 白忠权, 张中涛, 等. 仓储粮堆内热湿耦合传递的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 97-102.

[4] 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.

[5] Yue R, Zhang Q. A pore-scale model for predicting resistance to airflow in bulk grain[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 142-151.

[6] Jia C, Sun D, Cao C. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin[J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(2): 165-177.

[7] Wang Q Y, Feng J C, Han F, et al. Analysis and prediction of grain temperature from air temperature to ensure the safety of grain storage[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1200-1213.

[8] 刘新涛, 王健刚, 王运坤. 浅圆仓储存进口大豆温度传导规律[J]. 现代食品, 2018(18): 166-171.

[9] 张祥祥, 张昊, 王振清, 等. 内衬塑料地下粮食筒仓粮堆温度场研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 8-14.

[10] 陈桂香, 张宏伟, 王海涛, 等. 基于 COMSOL 的平房仓冷却通风过程中粮堆热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 79-85.

[11] Shubham S P, Chandra B S, John F, et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: A review[J]. Drying Technology, 2020, 38 (13): 1677-1697.

[12] 李林杰, 王大枚, 庄泽敏. 浅圆仓谷冷前后水分变化分析[J]. 粮食储藏, 2008, 37(1): 20-23.

[13] 谢静杰, 汪向刚, 黄志俊, 等. 不同仓型仓温仓湿日变化规律探讨[J]. 粮食储藏, 2009, 38(1): 52-56.

[14] 刘进吉, 王殿轩, 谢维治, 等. 高粮堆浅圆仓储存小麦的粮温变化研究[J]. 粮食储藏, 2019, 48(1): 4-10.

[15] 戚禹康, 王远成, 鲁子枫, 等. 稻谷自然储藏多尺度热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 109-113.

[16] 张燕君, 谢晓伟, 黄宝凯, 等. 大型粮仓温度分布反演数学模型的研究[J]. 光学技术, 2012, 38(3): 288-294.

[17] 王若兰, 刘胜强, 李换, 等. 小麦粮堆降温冷却过程中温度变化研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(5): 23-27.

[18] Hammamia F, Ben Mabrouk S, Mamia A. Modelling and simulation of heat exchange and moisture content in a cereal storage silo[J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2016, 22(3): 1-14.

[19] Roberta M N, Bruna B H, Solenir R, et al. Simulation and validation of a mathematical model for temperature profile of corn stored in silo bag[J]. Jaboticabal, 2014, 42(4): 330-337.

[20] Phillips S, Widjaja S, Wallbridge A, et al. Rice yellowing during post-harvest drying by aeration and during storage[J]. Journal of Stored Products Research, 1988, 24(3): 173-181.

[21] Soponronnarit S, Srisubati N, Yoovidhya T. Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy[J]. Journal of Stored Products Research, 1998, 34(4): 323-330.

[22] Thorpe G R, Tapia J, Whitaker S. The diffusion of moisture in food grains—I. The development of a mass transport equation[J]. Journal of Stored Products Research, 1991, 27(1): 1-9.