非通风状态新型地下粮仓储粮温度场的 CFD 数值模拟

王振清，殷鹏，郑家欢
（河南工业大学土木建筑学院，河南郑州 450001）

摘要：地下粮仓储粮温度场是保证储粮品质和绿色生态储粮的重要影响因素。针对地下粮仓试验仓，该文利用 Gambit 软件建立了地下粮仓的三维立体模型，并对模型进行了网格划分，采用 CFD 数值模拟方法研究了非通风状态地下粮仓粮食储存过程中粮堆温度场的变化规律。通过编写和导入 UDF 函数，改进 CFD 软件中的质量控制方程、动量控制方程和壁面热量传递控制方程，通过迭代计算和基于 CFD 软件模拟得到了地下粮仓非通风状态条件下温度场的变化规律，研究结果表明，随着地下仓储粮时间的变长，仓内粮堆温度与周围维护结构之间、粮堆之间不停的进行着热质交换，最终温度逐渐趋于当地地下恒温温度值附近，地下仓可以作为一种经济适用的仓型来推广；同时，本文的研究可以为地下粮仓的温度场控制提供参考和依据，为粮堆机械通风手段作为参考。

关键词：地下粮仓；准静态；温度场；CFD
文章篇号：1673-9078(2016)1-170-174 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.1.027

Computational Fluid Dynamics Simulation of Storage Temperature Field in a Non-ventilated Underground Granary

WANG Zheng-qing, YING Peng, ZHENG Jia-huan
(College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The storage temperature field of an underground granary is an important factor affecting the quality of stored grain and the surrounding environment. In this study, Gambit software was used to build a 3-dimensional model of an underground granary. The model was meshed and variations of the grain heap temperature field under non-ventilated conditions during the storage process were studied using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation method. The mass conservation equation, momentum equations, and wall heat transfer equations in CFD software were optimized by writing and importing the user-defined function (UDF). Variations in the temperature field at a non-ventilated underground granary were obtained by iterative calculation and CFD software simulation. The results demonstrated a continuous heat and mass transfer between grain heaps and surrounding building structures, as well as between the grain heaps, with an increase in grain storage time in the underground granary. Additionally, the final temperature drew close to the constant local underground temperature. The results show that an underground granary is an economically feasible alternative for grain storage as well as provide a reference for the control of temperature of underground granaries and mechanical ventilation for grain heaps.

Keyword: underground granary; quasistatic; temperature field; computational fluid dynamics

地下储粮在我国具有悠久的历史，远在五六千年前我国原始社会的仰韶文化时期，人们就采用了地下挖窖储粮的方法[1]。局限于当时的技术水平，地下储粮形式上比较简单和单一，发展到今天，我国大部分地区都兴建了一批地下仓，新型地下仓的出现，不同于以往，在构造形式上异于以往，同时引进新的工艺技术和粮情监控技术；地下粮仓具有绿色、温湿度受外界影响小、低温、节能、占地少等优点，地下粮仓（钢筋混凝土仓）作为一种节能环保的新仓型日益得到人们的关注。地下储粮的原理是利用了地下低温效应，由于土层的隔热作用，大气温度变化对地温的影响，随着地下深度的增加而很快减弱，当地深达16 m左右时，地下常年温度差0.1 ℃左右，即恒温层，地温不变层[2]；地下粮仓正是利用了地下土体和岩体常年恒温的特征，仓内温度、湿度、气体成分等储粮条件几乎不受外界的影响，形成了一个相对独立的仓内小气候环境[3]，这对粮食储藏过程中温度控制有益。粮堆内的温度和水分是造成粮食在储藏过程中损失的主要因素，因此研究地下粮仓温度场的变化规律对保证粮食的安全储藏具有重要意义。在粮食储藏生态系统中，温度主要涉及大气温度、粮仓温度和粮堆温度。

收稿日期：2015-03-24
基金项目："十二五"国家科技支撑项目（2011BAD03B01）；国家 863 计划（2012AA101608）
作者简介：王振清（1956-），男，教授，博士生导师，主要从事仓储结构和绿色储粮研究

温度变化会影响粮堆内部的热量传递和粮仓与外部环境以及围护结构之间的热量交换，进而影响粮仓内部的温湿环境。

近年来，国内外学者们采用了多种研究方法对粮仓的储藏环境进行了大量研究，加拿大学者Jayas D S[4]等在粮食储藏和干燥技术中运用了数值模拟的方法研究了储粮内部生态系统；Thorpe G[5]应用计算机流体动态代码对粮食储藏过程传热传湿进行了计算模拟；国内学者梁醒培[6]等采用有限元法对平房仓内的粮堆温度进行了瞬态模拟；李飞[7]等利用ANSYS软件研究了粮仓渗流场与温度场之间的相似性；闫艳霞[8]等根据热力学定律、传热学以及能量守恒等理论，建立了粮堆局部温度场变化数学模型；陈桂香[9]等采用CFD数值模拟方法，研究了高大平房仓通风系统不同风道的性能。地下粮仓一般作为长期储粮的仓型，粮食储藏时间一般相比其他平房仓、立筒仓、浅圆仓等仓型储粮时间长，这种情况下，决定了地下仓储粮在不通风情况下的储藏过程就相对较长，几乎占整个储藏过程中的大部分时间。地下土体环境、仓体围护结构以及粮堆之间的温度场变化是影响储粮品质和储粮环境稳定性的主要三个外部因素，本文将根据已建成并投入使用的某小型试验地下粮仓为研究对象，采用CFD方法研究地下粮仓的温度场变化规律。

1 试验地下粮仓的物理模型

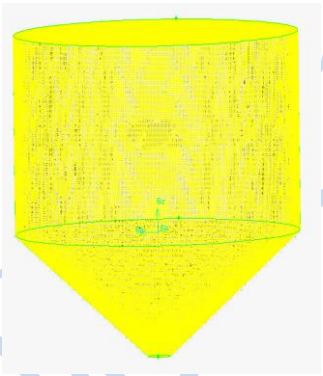


图 1 试验仓模型网格划分

Fig.1 Meshing the test granary model

本研究以试验地下粮仓为研究对象。该地下粮仓位于郑州地区（北纬34.7度，东经113.7度，海拔110米），是一个小直径混凝土单筒试验仓。粮仓内径为5 m，仓体总高度为9 m，粮仓内放置了80 t小麦，粮堆高度为7 m，斜坡垂直高度为1 m；粮仓壁为0.35 m的钢筋混凝土，粮仓顶板为0.25 m的钢筋混凝土梁板结构。粮仓顶板距地面的高度为2 m，即覆土厚度为2 m，图1给出了试验地下粮仓结构图和网格划分情况。

本研究采用GMBIT软件建立试验地下粮仓的三维模型，并采用Cooper方法对试验地下粮仓模型进行了非结构网格划分。数值模拟区域为粮仓内部粮堆及粮仓上部空气层。因本文研究前提环境是在非通风状态下，故在研究和模拟过程中不考虑机械通风操作过程，只对地下仓仓顶板、周围维护结构的仓壁、仓底板等钢筋混凝土结构以及储藏粮堆之间的温度变化和热质传导情况进行研究。

2 数值模拟的控制方程和参数设置

2.1 粮仓温度场数值模拟的控制方程

2.1.1 质量方程

根据质量守恒原理，控制体质量增量等于控制体流入质量与流出质量之差。由此可导出粮仓内温度场三维流动模拟连续性方程的微分形式[10,11]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \quad (1)$$

ρ 为密度，t 为时间。

2.1.2 动量守恒方程

对于地下粮仓的数值模拟区域，多孔介质内空气动量的时间变化率等于作用于其上的外力总和，即遵守动量守恒方程，也称 Navier-Stokes 方程[12]。地下粮仓温度场模拟的动量守恒方程的微分形式表达如下：

$$\begin{cases}\rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\rho F_{bx}+\dfrac{\partial p_{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial p_{yx}}{\partial y}+\dfrac{\partial p_{zx}}{\partial z}\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F_{by}+\dfrac{\partial p_{xy}}{\partial x}+\dfrac{\partial p_{yy}}{\partial y}+\dfrac{\partial p_{zy}}{\partial z}\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=\rho F_{bz}+\dfrac{\partial p_{xz}}{\partial x}+\dfrac{\partial p_{yz}}{\partial y}+\dfrac{\partial p_{zz}}{\partial z}\end{cases} \quad (2)$$

其中，F_{bx}、F_{by}、F_{bz} 分别是单位质量流体上的质量力在三个方向上的分量；p_{yx} 是粮堆多孔介质内流体内应力张量的分量。

动量守恒方程的矢量形式可以表示为：

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p+\frac{\mu}{3}\mathrm{grad}(\mathrm{div}v)+\mu\nabla^2 v \quad (3)$$

方程（2）阐述了各个方向量上的动量守恒微分方程，应用于粮仓温度场不同方向的温度梯度变化的微分方程，方程（3）是温度场三维流量的动量守恒方程微分总方程。

2.1.3 能量守恒方程

粮仓内部系统总能量的变化率是由外界对粮仓内部系统本身的作功功率和通过热传递向系统传热功

率之和所决定的;将热力学第一定律应用于地下粮仓，可以得到地下粮仓温度场数值模拟的能量守恒方法。式（4）是能量守恒方程的微分形式[13]。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_{j'}h_{j'}J_{j'}+u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right]+S_h \quad (4)$$

其中，$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u_i^2}{2}$；$k_{\text{eff}}$ 是有效热传导系数，$k_{\text{eff}}=k+k_t$，其中 k_t 是湍流热传导系数，根据所使用的湍流模型来定义；$J_{j'}$ 是组分 j 的扩散流量；S_h 是体积热源项，即粮食的自呼吸热。

2.1.4 标准 k-ε 模型

多孔介质内空气流动穿过整个散粮堆积区域时，气体流动具有典型的湍流特性，因此在温度场数值模拟时采用最为广泛的模型，即标准 $k-\varepsilon$ 模型。标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程为如下形式：

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \quad (5)$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中，G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生，G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。

湍流粘性系数 $\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$。在 Fluent 中，其中的经验常数分别为：C1ε=1.44，C2ε=1.92，C3ε=0.09，σk=1.0，σε=1.3[14~16]。

2.1.5 粮仓壁面热量传递方程

地下粮仓壁面热量传递方程如下：

$$q=h_f\left(T_w-T_f\right)+q_{rad} \quad (7)$$

式中：hf为换热系数，Tw为粮仓仓壁初始温度，Tf为粮仓仓壁内表面的气体温度，qrad为粮仓仓壁外表面的辐射热流量[17]。

2.2 粮仓温度场数值模拟的参数设置

在利用CFD软件进行地下粮仓温度场数值模拟时，数值模拟参数的正确设置十分关键。数值模拟时间为5~8月份，表1给出了地下粮仓平均温度的测量值。对粮仓平均温度进行线性拟合可以得到地下粮仓环境温度随时间变化的函数为：

$$T=0.056\left(\frac{t}{185620}+31.15\right)^2+74.34 \quad (8)$$

其中，T为温度，K；t为时间，s。

表 1 第 5-8 月地下粮仓平均温度试验值

Table 1 Average temperatures of the underground granary from May to August

月份	5月	6月	7月	8月
平均温度	17.8 ℃	18.1 ℃	17.9 ℃	19.2 ℃

采用C语言编程，通过编写和导入UDF函数，把地下粮仓环境温度输入到CFD软件。在利用CFD软件进行地下粮仓温度场数值模拟时，需要确定边界条件及粮堆多孔介质的性质。其中，壁面热边界条件主要包括外界辐射、对流与外界辐射综合换热、固定热流密度、固定壁面温度和固定对流换热密度五种边界条件。

对流与外界辐射换热、壁面温度、壁外辐射换热和固定热通量等。粮堆中空隙空气与粮堆介质之间可以运用多孔介质对流换热模型。各边界条件设定值见表2。

表 2 数值模拟边界条件设定值及具体参数

Table 2 Value and specific parameters set for boundary conditions with numerical simulation

条件类型	相关参数
壁面(钢筋混凝土)边界	壁面厚度350 mm，密度ρ_s=2500 kg/m^3，比热容 C_s=0.97 kJ/kg k；热传导系数 λ_s=1.74 W/m k[18]
粮堆(小麦)多孔介质	密度ρ_g=639 kg/m^3，比热容C_s=1.78 kJ/kg k 热传导系数$\boldsymbol{\lambda}_s$=0.13 W/m^2 k，渗透性1/α=39632317.4，惯性阻力因数 C_2=7102，粮堆孔隙率 φ=0.48[19~22]

3 数值模拟结果与分析

由于地下土壤温度常年波动范围很小，基本保持恒定不变，这就决定了地下粮仓外部周围环境温度基本保持不变，根据美国太空总署NASA气象资料查询网站可获得郑州地区（北纬34.7度，东经113.7度，海拔110米）5~8月份基本平均温度在22.4 ℃~26.5 ℃之间，最高月平均温度（7月份）在26.5 ℃[23]，小麦入仓时间为5月下旬，5月份月平均温度为22.4 ℃，即定为仓储过程中初始温度。

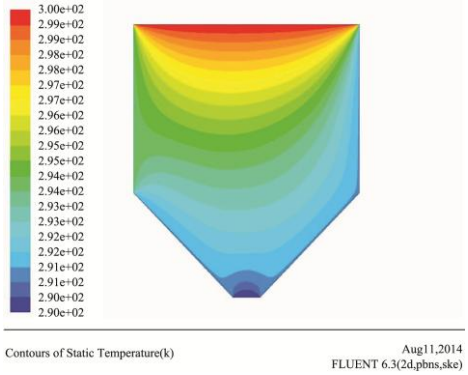


图 2 非通风状态条件下地下粮仓温度云图

Fig.2 Temperature contour map for the non-ventilated underground granary

图 2 给出了地下仓储粮非通风状态温度云图，2d 精度，XY 轴面。试验粮仓所在地区的地下恒温带温度约为 15 ℃。试验地下粮仓主要处于地表浅层低温土壤层中，因此粮食将长年处于低温恒定状态，地下粮仓中的粮食将处于低温准静态的储藏过程中，粮食储藏温度环境主要受到所处恒温带温度变化的影响[24]。假定小麦刚入仓时候与地面外界环境温度一致（22.4 ℃），经过 5 月~7 月份之间的时间粮仓内部小麦与周围环境进行着热质交换，8 月中旬，对试验仓进行试验模拟，试验模拟温度云图见图 2，地下粮仓数值模拟区域的温度呈现分层现象，粮仓底部的温度最低，粮仓顶部的温度较高，自下而上温度呈现梯度分层现象；粮堆内部温度场冷却前沿移动速度由下到上逐渐减缓，粮堆与粮仓周围维护结构接触面冷却前沿由外到内、由边到中心的移动速度基本保持一致，随着储藏时间的增加，粮堆内部温度场温度逐渐趋向于等温温度场。

图 3 给出了数值模拟粮仓内部各层平均温度数值结果与实测粮仓内部各层平均温度数值结果的对比曲线图。数值模拟预测粮仓内部各层平均温度数据与实测数据接近，且两者的变化规律和趋势相同，数值模拟预测数据与实测数据吻合。在 5~8 月份地下粮仓温度数值模拟过程中，地下粮仓的外界环境通过改变粮仓边壁温度，与粮仓内部进行着热质交换，进而影响地下粮仓内部的粮食生态系统。通过图 3 可得知，试验模拟温度变化与实测温度数值变化曲率比较接近，温度变化在 15 ℃~19 ℃之间，符合粮食储藏准低温状态要求；粮仓常年处于低温的土壤温度场，可使粮堆处于低温、准低温储藏状态，自然低温储藏有效的减少了人为机械通风的投入，节省了成本；同时，低温、准低温状态有效的抑制了粮食作物的呼吸作用，减缓了粮食作物的陈化速率，能够长期保持粮食食用品质和种用品质，可以抑制虫变发生，减少化学熏蒸，符合节能环保、绿色储粮的要求。

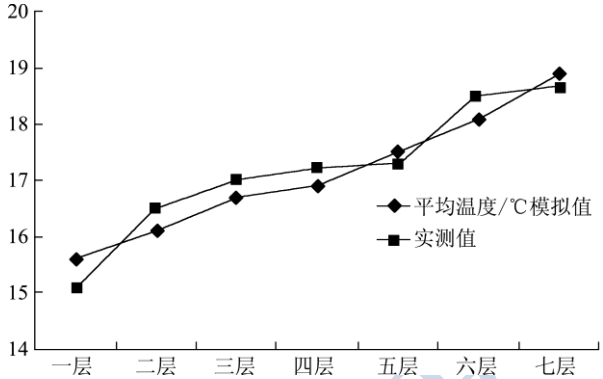


图 3 地下粮仓平均温度预测值与实测值的对比

Fig.3 Comparison of predicted and measured values of the average temperature of the underground granary

4 结论

4.1 本文以试验地下粮仓为研究对象，通过建立物理模型和数值模拟，进行了地下仓非通风状态下储粮温度场 5~8 月份的数值模拟。数值模拟结果与实测结果接近，表明计算流体力学（CFD）软件可以用于模拟地下粮仓的储粮温度场变化规律；地下粮仓的储藏环境接近于低温、准低温状态，具有低温、节能的储粮优势。

4.2 地下粮仓克服了修建对地形的依赖等缺点，是一种很有应用前景的新型浅层恒温地下储粮结构；地下仓建在地下，除节省了用地以外，同时，还能起到防风、防雨、防火、防鼠的效果，是一种经济适用值得推广的仓型。

4.3 可以考虑在建实际仓中设立机械通风管道，能够在粮食作物（夏粮）进仓初期，加快粮堆的降温速率，同时在粮食作物初入仓时，通过机械通风人为控制结露温差，避免造成粮食作物结露现象的发生。

参考文献

[1] 王若兰,白旭光.粮食储运安全与技术管理[M].北京:化学工业出版社,2005
WANG Ruo-lan, BAI Xu-guang. Grain storage and transportation safety and technical management [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005

[2] 吴健美,王红军,宋国华.地下窖洞仓储粮特性及管理措施探讨[J].粮食储藏,2014,6:53-56
WU Jian-mei, WANG Hong-jun, SONG Guo-hua. Cellaring hole storage grain characteristics and management measures to explore [J]. Journal of Food Storage, 2014, 6: 53-56

[3] 吴子丹,曹阳.绿色生态低碳储粮新技术[M].北京:中国科学技术出版社,2011

WU Zi-dan, CAO Yang. Green ecological low carbon storage new technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011

[4] Jayas D S, White N G. Storage and drying of grain in Canada: low cost approaches [J]. Food Control, 2003, 14: 255-261

[5] Thorpe G. The application of computational fluid dynamices codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains [J]. Journal of Stored Products Research, 2008, 44: 21-31

[6] 梁醒培,吴锐.平房仓储藏小麦粮堆温度场的数学模拟[J].粮油食品科技,2008,18(5):1转6
LIANG Xing-pei, WU Rui. The warehouse storage wheat grain bulk temperature field of the mathematical simulation [J]. Journal of Grain and Oil Food Science And Technology, 2008, 17(5): 1 turn 6

[7] 李飞,袁梅.多孔介质渗流场数值模拟分析[J].矿业研究与开发,2012,32(1):100-102
LI Fei, YUAN Mei. Porous media seepage field numerical simulation analysis [J]. Journal of Mining Research and Development, 2012, 32(1): 100-102

[8] 闫艳霞,曹玲芝.粮仓谷物局部发热温度场数学模型研究与应用[J].粮食与食品工业,2008,15(14):42-44
YAN Yan-xia, CAO Ling-zhi. Granary grain local heating temperature field mathematical model [J]. Journal of Research and Application of Grain and Food Industry, 2008, 15(14): 42-44

[9] 陈桂香,岳龙飞,林淼达.基于计算流体力学的平房仓通风系统数值模拟[J].河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 5:87-90
CHEN Gui-xiang, YUE Long-fei, LIN Miao-da. Storability and ventilation system based on computational fluid dynamics numerical simulation [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 5: 87-90

[10] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣.传热学(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007
ZHANG Xi-min, REN Ze-pei, MEI Fei-ming. Heat transfer (fifth edition) [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007

[11] 禹华谦.工程流体力学-2版[M].成都:西南交通大学出版社,2007
YU Hua-qian. Engineering fluid mechanics - 2 edition [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007

[12] 张鸣远,景思睿,李国君.高等工程流体力学[M]北京:高等教育出版社,2012
ZHANG Ming-yuan, JING Si-rui, LI Guo-jun. Higher engineering fluid mechanics [M] Beijing: Higher Education Press, 2012

[13] 王瑞金,张凯,王刚.Fluent技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007
WANG Rui-jin, ZHANG Kai, WANG Gang. Fluent software technology foundation and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007

[14] ANSYS Incorporated. ANSYS Fluent12.0 Theory Guide [M]. Pittsburgh: FLUENT Incorporated, 2009

[15] Fluent Incorporated. Fluent5 user's guide [M]. Pittsburgh: FLUENT Incorporated, 1998

[16] Fluent Incorporated. Fluent5 user's guide [M]. Pittsburgh: FLUENT Incorporated, 1998

[17] 王福军.计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004
WANG Fu-jun, Computational fluid dynamics analysis - CFD software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004

[18] 百度文库,常用建筑材料的导热系数及密度:http://wenku.baidu.com/view/6df4e208bb68a98271fefa0e.html

[19] 彭威,张忠杰,任广跃,等.仓储粮堆温度场CFD模拟应用研究[J].粮油食品科技,2011,19(6):5-8
PWNG Wei, ZHANG Zhong-jie, REN Guang-yue, et al. Storage of grain heap of CFD to simulate temperature field application study [J]. Journal of Grain and Oil Food Science and Technology, 2011, 19(6): 5-8

[20] Wang Yuancheng, Duan Haifeng, Zhang Hao, et al. Modeling on heat and mass transfer in stored wheat during forced cooling ventilation [J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(2): 167-172

[21] 王若兰,卞科.粮食储藏学[M].北京:中国轻工业出版社,2009
WANG Ruo-lan, BWAN Ke. Food storage learning [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009

[22] 马庆芳,方荣生,项力成.实用热物理性质手册[M].北京:中国农业机械出版社,1986
MA Qing-fang, FANG Rong-sheng, XIANG Li-chen. Practical thermophysical properties handbook [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Publishing House, 1986

[23] 美国太空总署NASA气象资料查询网站:https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=294125&lat=34.7&submit=Submit&hgt=100&veg=17&sitelev=&email=zhenhuawan@gmail.com&p=grid_id&p=cos_zmt&p=T10M&p=DLYRANGE&p=TSKIN&p=TSKIN_MN&p

=DFP10M&p=RH10M&p=Q10M&step=2&lon=113.7

[24] 赵云章,闫震鹏,刘新号等.河南省城市浅层地热能[M].北京:地质出版社,2010

ZHAO Yun-zhang, YAN Zhen-peng, LIU Xin-haoetc. In henan province city of shallow geothermal energy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010

现代食品科技