

粮堆生物场与多场相互作用研究

——粮食安全与储藏科学研究最新进展

论文介绍

粮堆是有生命、高能量的堆积体。生物与非生物因子共同影响粮堆生态系统的稳定性。鉴于此，吉林大学吴子丹教授团队在 **SCIENTIFIC REPORTS** 期刊（nature 子刊）上发表了题为“Interactions of Mutiple Biological Fields in Stored Grain Ecosystems”的文章，研究了生物场理论框架和定义，用于阐述生物场的时空变化规律，以及与物理场的耦合效应。生物场的时空分布可用生物场场强加以量化。生物场场强是生物系统通过能量交换对内或对外施加影响的能力。本研究采用储粮生态系统的微生物生长试验验证了储粮生态系统微生物场存在的客观性，同时生物场场强可以通过指示性状态变量的增量进行计算。

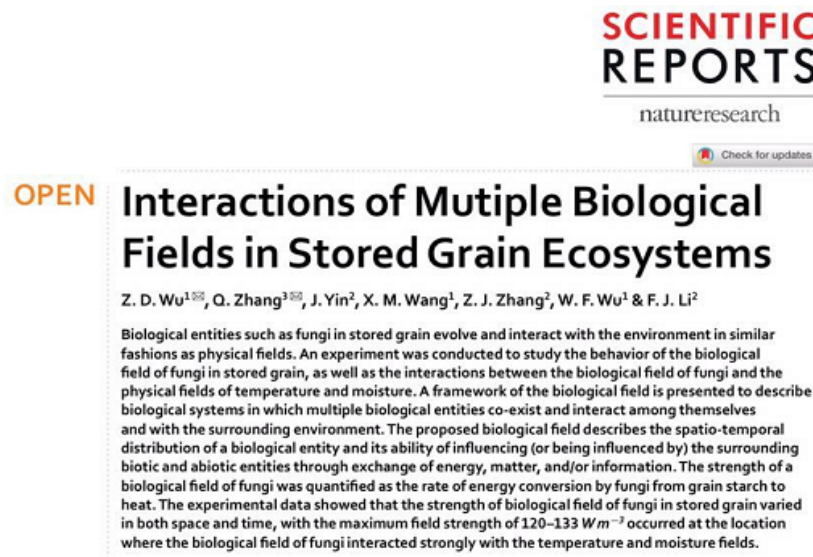


图 1 SCIENTIFIC REPORTS 上发表文章截图

本研究首先给出了生物场的定义：生物场是生物体的时空分布以及它与周围环境中的生物体、非生物体之间通过能量、物质、信息交换而相互影响（或被影响）的能力。

生物场场强表示为特定空间中的生物对能量利用/转化/耗散的速率。单位为： $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$ 或 $W \cdot m^{-3}$ 。在数学表达上，生物场的强度定义为能量的时空的函数：

$$P(x, y, z, t) = \frac{dQ(x, y, z, t)}{dt}$$

式中的总能量 Q 通常可以表示为：

$$Q = Q_H + Q_M + Q_E + Q_B + Q_R + \dots$$

Q_H 转换热能； Q_M 转换机械能； Q_E 转换化学能； Q_B 生物生长繁殖能； Q_R

其它转换能。

对生物场进行了试验论证：

为了模拟实仓储粮，本试验试制了一个 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 的小型不锈钢储粮方仓（图 2）。试验仓的仓壁进行隔热处理以模拟不良热导性粮堆的热传导。在典型的储粮设施中，仓壁的温度随外界环境的变化而变化，并形成了粮堆内温度梯度，该梯度是粮堆微生物生长的原因。为了模拟上述情况，本试验通过热泵来控制试验仓两侧（左右）壁的温度，则在粮堆中形成了温度梯度。即左（冷）壁温度是 10°C ，右（热）壁温度是 44°C ，换言之，粮堆中建立了一个 34°C 的温度梯度。预计在该温度梯度（在左右壁之间）影响下，在一定初始含水率的粮堆中会存在一个点（或区域）的温度适合微生物萌发。即这一点（或区域）是生物（微生物）场和物理（温度）场的耦合作用点（或区域）。

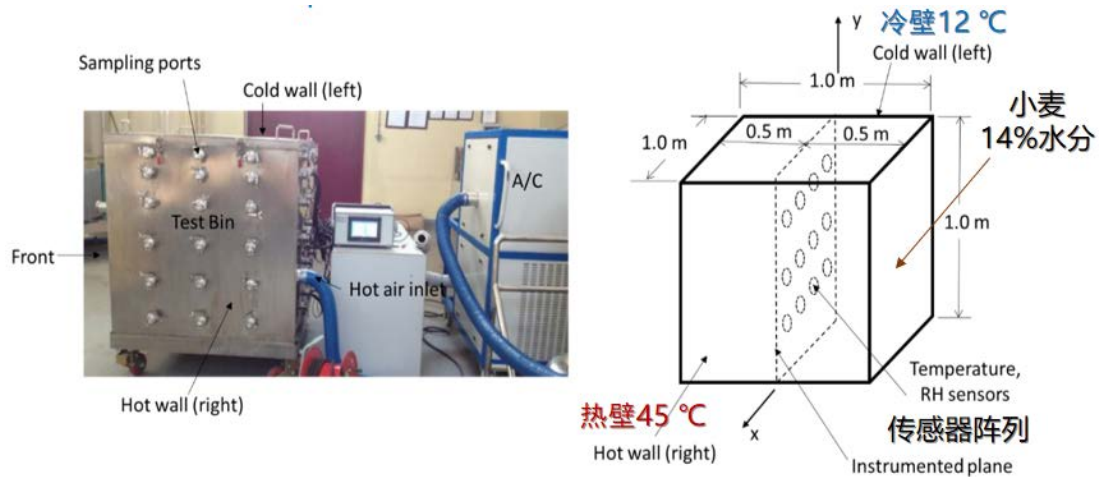


图 2 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 的小型不锈钢储粮方仓及示意图

结论与分析：

试验前 12 天，小麦温度（场）分布是由仓壁温度梯度差影响的（主要是热传导作用）（图 3）。随着试验的进行，B 点首先达到物理场（温度场和相对湿度场）的适宜状态，此时生物场和物理场之间发生了强烈的耦合作用，试验进行到 25 天时，B 点的温度开始升高，湿度也有增加，出现了微生物场，在第 38 天温度达到峰值 38°C 。第 36 天 B 处微生物生长显著（图 4、图 5）。在第 54 天，在 B 周围的一个小区域发现霉变（图 6）。

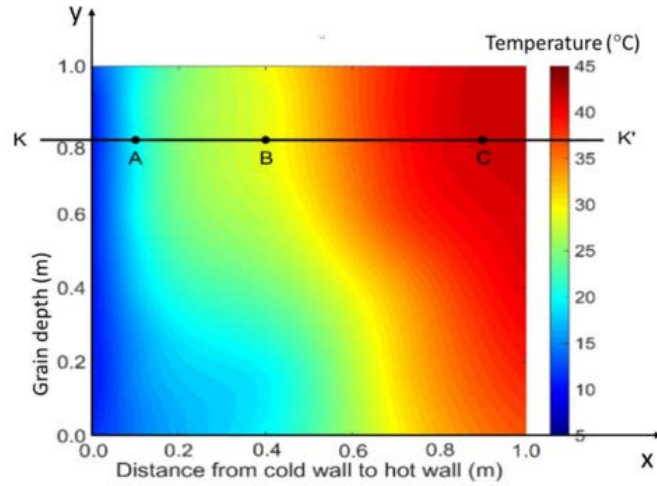


图3 第12天试验仓的温度场（分布）

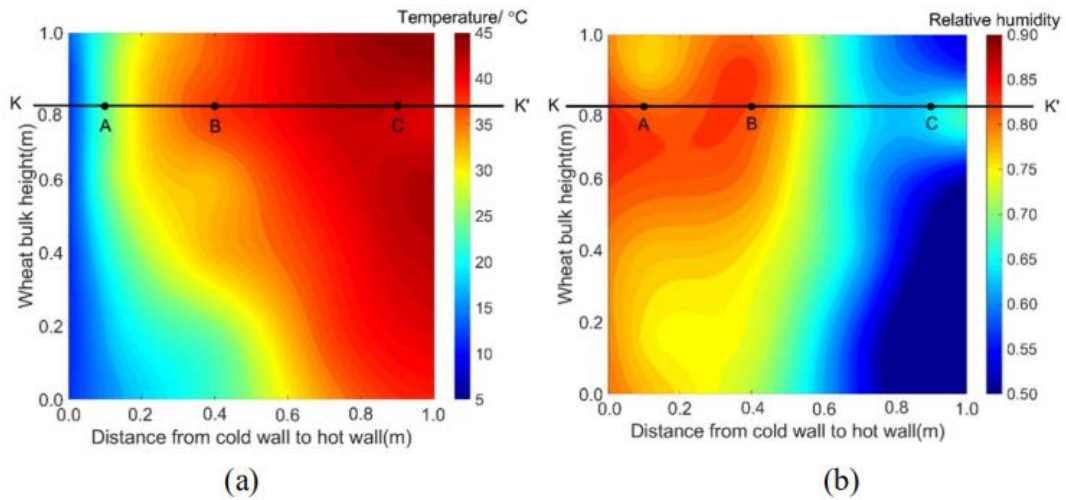


图4 第36天试验仓中面温度场和相对湿度场。(a) 温度 (b) 相对湿度
 (注：取样口接近 C，导致温度略有下降和相对湿度上升)。

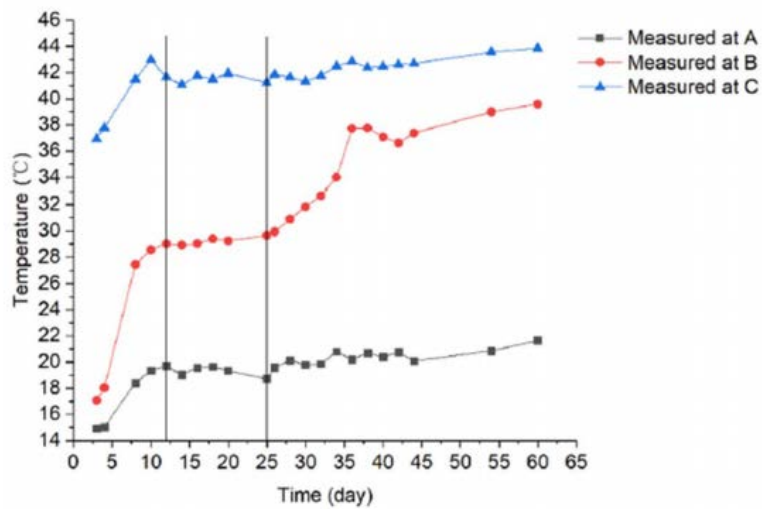


图5 试验期间，在试验仓的三个位置 A (0.1, 0.8)，B (0.4, 0.8) 和 C (0.9, 0.8) 处测得的温度变化。



图 6 第 60 天在位置 B（距仓底 0.8 m，距冷壁 0.4 m）发现的变质（发霉）谷物

微生物场场强：

采用温度增量计算得到储粮微生物场场强，如下式。

$$P_H = \frac{\Delta Q_H}{\Delta t} = \frac{E_T}{\Delta t} + \frac{E_C}{\Delta t} = S \rho \Delta T(x, y, z, t) + \frac{k \Delta t}{\Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{i=1}^6 \frac{A_i \Delta T_i}{l_i}$$

微生物场一直“潜伏”到第 25 天（即，在第 5 到第 25 天之间，场强几乎没有增加）（图 7）。从第 25 天到第 38 天，微生物场迅速发展（图 7）。在第 38 天，B 点测得的最大场强为 110 W/m^3 。第 38 天之后，微生物场场强开始下降，而热量继续积聚（图 7）。值得注意的是，在第 54 天到达低点（约 18 W/m^3 ）后，场强又开始增加，这表明可能出现另一个微生物场。

场强的时空分布如图 8 所示。在第 36 天，场强强度峰值在 B 点。在第 38 天时场强强度达到了最高水平，虽然曲线形状保持不变，但是峰值（约 120 W/m^3 ）从 B 点略微向左移动了。在第 38 天之后，场强强度开始降低，这是由于产热量过多，导致温度升高超过微生物的最适范围，或者由于氧气和养分的消耗使得微生物生存环境恶化，但是场强的空间分布（曲线形状）保持不变（图 8）。本试验结果表明，本研究中的生物体（微生物）的空间分布和时间演替行为与物理场的时空分布十分相似。

本实验中：生物发热场强可达 120 W m^{-3} 。过度自激使温度超过 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 导致微生物场强衰退。

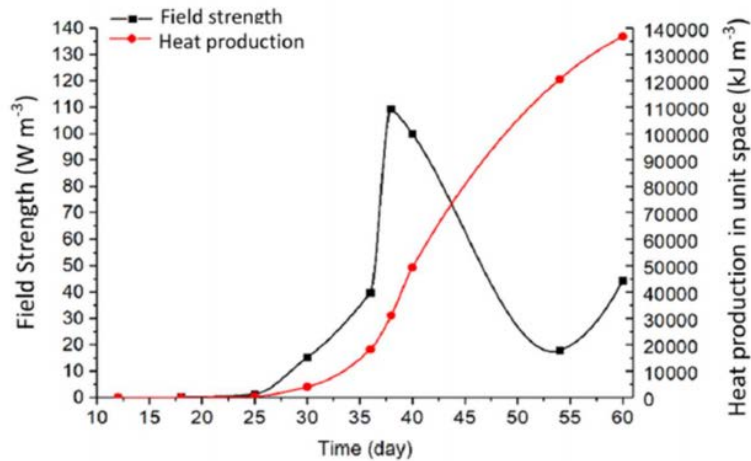


图 7 1×1×1m 试验仓中 B (0.4,0.8,0) 周围小区域的微生物产热及场强的变化

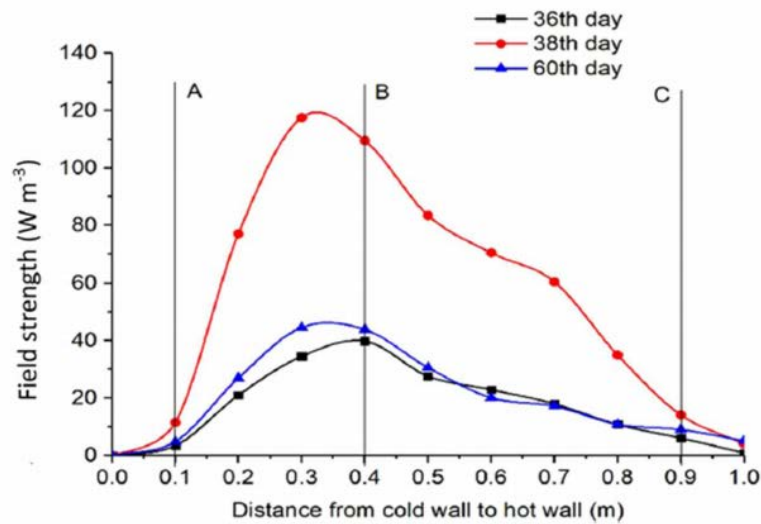


图 8 不同时间试验仓中 0.8 m 深度处冷壁到热壁的场强变化。

研究团队简介

作为粮食储运国家工程实验室成员单位，依托吉林大学农业工程一级学科和农业电气化与自动化二级学科，已经形成了以国家科技进步一等奖获得者吴子丹教授为核心研究团队，与国内外粮食收储运技术的研究机构和企业有广泛的联系和合作，是中加粮食生态储粮国际研究中心单位。拥有 24300 平方米的试验研究基地，有大型粮食试验装备 13 套。针对粮食储藏生物场及多场耦合理论、粮食智能监管、粮食智能干燥等方面研究成果，逐步得到国内外推广应用。代表成果有“粮食真 0.5% 循环干燥测控技术与装备”、“EAT 窗口粮食连续干燥智能测控系统”、“基于云图的储备粮区域 AI 监管技术与系统”、“优质稻谷收储运 5T+ 管理的标准和实施策略”等。承担国家科技项目 10 余项，获得各类科技奖励 6 项，省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 4 项、三等奖 1 项。其中，2017 年，“智能粮食干燥与储藏关键技术与装备”项目获吉林省技术发明一等奖；2014

年，“吉林省粮食安全储藏体系结构分析及新型产地储藏装备的开发与应用”项目获吉林省科技进步一等奖。先后举办“2017 粮食储运技术基础国际学术研讨会（ISTBGST）”和“2019 年度智慧粮食国际学术研讨会”，吸引了国内外行业科技工作者的关注和参与，对我国粮食储运科技进步以及国际间的学术交流产生了一定的推动。

主要作者简介：

吴子丹，吉林大学唐敖庆讲座教授，是我国粮食科技的领军学者。曾任粮科院副院长，国家粮食局副局长。创立了粮食储运国家工程实验室，任首任主任；因创建粮食储备“四合一”新技术，获得粮食行业唯一的国家科技进步一等奖。创建的 CAE 模型和工具化图表，形成了粮食储藏技术的基础，被纳入国家标准。提出的“粮堆生物场及多场耦合理论”推动了粮食储运学科的深刻变革，特别是粮食信息化和智能化学科的发展。

张强，加拿大曼尼托巴大学生物系统工程系教授，农业与食品科学学院常务副院长，吉林大学唐敖庆讲座教授。曾任加拿大社会生物工程副会长、加拿大农业作物委员会会长、加拿大国际生物系统工程副主席等职务。主要研究领域粮食储存生态系统、动物疾病中的空气传播疾病、动物生产环境和集约化牲畜作业造成的空气污染等，发表 SCI 论文 90 余篇。担任《国际农业与生物工程学报》、《美国生物工程学会会刊》、《加拿大国际生物系统工程》等杂志副主编或编委。

张忠杰，国家粮食和物资储备局科学研究院粮食储运研究所所长，粮食储运国家工程实验室副主任。主要从事粮油储藏、深加工、通风干燥、环境工程等领域理论研究、技术开发与应用工程，曾主持或参与完成科研项目 30 余项。主持完成工程设计与成果转化项目 70 余项；完成论文 40 余篇，参编著作 4 部、标准 6 项、专利 6 项，获省部级奖 6 项，是农业部农产品产地初加工惠民工程技术服务专家，国家自然科学基金、博士后基金、国家奖评审专家，吉林大学等兼职教授。

吴文福，吉林大学教授、博导，吉林工商学院特聘教授，粮食储运国家工程实验室理事、吉林省农业机械学会常务理事、第二批吉林省拔尖创新人才、第四批和第六批长春市有突出贡献专家。从事现代粮食收获、干燥及储藏的理论、技术与装备研究和教学工作，研究了“真 0.5%”稻谷循环干燥和 EAT 智能窗口连续干燥测控方法、基于水势的粮食仓储图形化智能控制方法以及粮食收储作业 5T 管理方法和规程，开发和推广了系列智能保质减损粮食干燥和储藏装备；带领团队使得吉林大学成为粮食储运国家工程实验室成员单位。先后获得各类科技奖励 6 项，其中 2 项省部级一等奖。