

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.06.031

# 不同横向通风方式降温保水效果对比研究

许建双<sup>1</sup>, 王学正<sup>2</sup>, 安超楠<sup>3</sup>, 白国伟<sup>2</sup>, 彭超远<sup>1</sup>, 李喜洋<sup>1</sup>, 陈峰<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>

- (1. 中央储备粮南阳直属库有限公司, 河南 南阳 473000;  
2. 中国储备粮管理集团有限公司河南分公司, 河南 郑州 450000;  
3. 中国储备粮管理集团有限公司河南分公司质检中心, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 为了解不同横向通风方式的降温效果和水分损失情况, 在2个30 m跨度小麦仓分别实施覆膜式横向通风和揭膜式横向通风。通过检测2个仓通风前后粮温、水分变化和通风时间及能耗等参数, 对降温效果、单位能耗、水分损失、温度和水分均匀性进行了评价。结果表明, 覆膜式通风降温与揭膜式通风降温相比, 通风均匀性和降温效果较好, 虽然通风时间、单位能耗分别增加140 h、600 Kw·h, 但降温幅度提高0.5 °C, 粮食水分损失较小, 整仓平均水分仅减少0.1%, 为合理选择横向通风方式提供了依据。

**关键词:** 横向通风; 通风均匀性; 降温效果; 通风能耗; 水分损失

中图分类号: TS210.2; TU834.25 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)06-0223-06

## Comparative Study on the Effect of Different Horizontal Ventilation Ways to Cooling and Keeping Water

XU Jian-shuang<sup>1</sup>, WANG Xue-zheng<sup>2</sup>, AN Chao-nan<sup>3</sup>, BAI Guo-wei<sup>2</sup>,  
PENG Chao-yuan<sup>1</sup>, LI Xi -yang<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, ZHANG jie<sup>1</sup>

- (1. State Grain Reserves Nan yang Depot Co., Ltd., Nanyang, Henan 473000, China;  
2. The henan branch of china grain reserves group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China;  
3. Quality inspection center of China grain Henan branch, Zhengzhou, Henan 450000, China)

**Abstract:** To understand the cooling effect and water loss of different transverse ventilation modes, Cover the grain stack with film and step by step unwinding grain stack film both in the transverse ventilation were used in the two wheat stored warehouses which the wide is 30 m. The temperature and moisture of the grain in the two warehouses before and after ventilation were tested, the uniformity of grain temperature was measured. The cooling effect, unit energy consumption, water loss, temperature and water uniformity were evaluated. The result indicate that: compared with the step by step unwinding grain stack film in the transverse ventilation, although the ventilation time and unit energy consumption of covering the grain stack with film increased by 140 h and 600 kW.h respectively. However, the uniformity of ventilation was better, the cooling effect was slightly better, the cooling range was 0.5 °C higher, the grain water loss was small, the average water of the whole barn was 0.1% smaller. So it provides a basis for the reasonable selection of transverse ventilation.

**Key words:** transverse ventilation; uniformity of ventilation; cooling effect; the consumption of ventilation; water loss

收稿日期: 2020-03-11

作者简介: 许建双, 男, 1982年出生, 工程师, 研究方向为粮食储藏技术。E-mail: xujianshaung2001@163.com.

目前，横向通风是一种新型的平房仓储粮通风技术<sup>[1-2]</sup>，主要由固定于平房仓檐墙两侧的通风口、主风道、竖向支风道及其他附件组成。作业时，在粮面覆膜形成的密闭粮堆，气流由一侧通风口吸入并横向穿过粮堆后从另一侧通风口排出，从而对粮堆进行通风作业，实现通风目的。

近年，横向通风技术应用的粮食品种主要是小麦<sup>[3]</sup>和稻谷<sup>[4]</sup>，而玉米和大豆鲜见报道。多数研究者对横向通风技术从理论和实仓做了大量的探索研究，Thorpe G R<sup>[5]</sup>、王远成<sup>[6]</sup>等假设粮堆是连续性、均匀分布的多孔介质，粮堆内部满足局部热湿平衡原理，建立了储粮通风过程中粮堆内部流动及热湿耦合传递的数学模型，张波<sup>[7]</sup>等采用计算流体动力学方法对房式仓粮堆建立了描述粮堆内部热湿传递的数学模型并对横向谷冷通风过程进行三维数值模拟，得到平房仓横向谷冷通风过程中温度和水分变化的规律，均为横向通风奠定了理论依据。许多研究者对谷物冷却、环流熏蒸、通风效果、充氮气调、惰性粉杀虫在实仓横向通风系统应用中做了探索研究，祝祥坤<sup>[8]</sup>等在储藏稻谷的高大平房仓中应用横向通风系统，发现横向通风具有风量分配均匀，通风均匀性好，单位粮层阻力小于竖向通风；沈邦灶，王飞<sup>[9]</sup>研究环流熏蒸在横向通风系统中的应用，发现横向通风系统可使磷化氢气体在粮堆内快速而均匀地形成有效浓度；沈波<sup>[10]</sup>等用移动式膜分离制氮机对具有横向通风系统的粮堆进行富氮低氧实验，

结果表明，横向通风系统适合富氮低氧工艺。目前，关于不同横向通风方式的对比分析的研究文献鲜见报道，本文采用两种不同横向通风方式进行实仓实验，对比分析通风降温效果、均匀性，为实仓更好的应用横向通风技术提供一些参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验仓房和粮食

根据粮食入库时间、产地、品质、粮温、仓房等条件，选择号 11 仓和 15 号仓为试验仓房，均为双 T 板高大平房仓，双侧通风，仓库跨度 30 m，长 36 m，装粮高度 6 m，全部储存小麦。具体数量和质量情况见表 1。

表 1 供试粮食情况

仓号	品种	数量/t	水分/%	容重/(g/L)	杂质/%	色泽气味
11	小麦	4 900	12.3	786	0.6	正常
15	小麦	4 834	12.2	787	0.7	正常

### 1.2 横向通风系统

风道口：双侧各 2 个风口，设置在仓房双侧檐墙底部，长宽 50\*50 cm；主风道：分置于仓房双侧檐墙内壁底部，横截面为斜面梯形，宽 40 cm；支风道：固定于双侧檐墙内壁，仓门两侧支风道间距为 480 cm，仓门中间支风道间距为 240 cm，均匀分布，两端支风道离墙 70 cm 左右，通风途径比 1.11~1.16，支风道开竖向桥式孔，开孔率不大于 30%，见图 1。

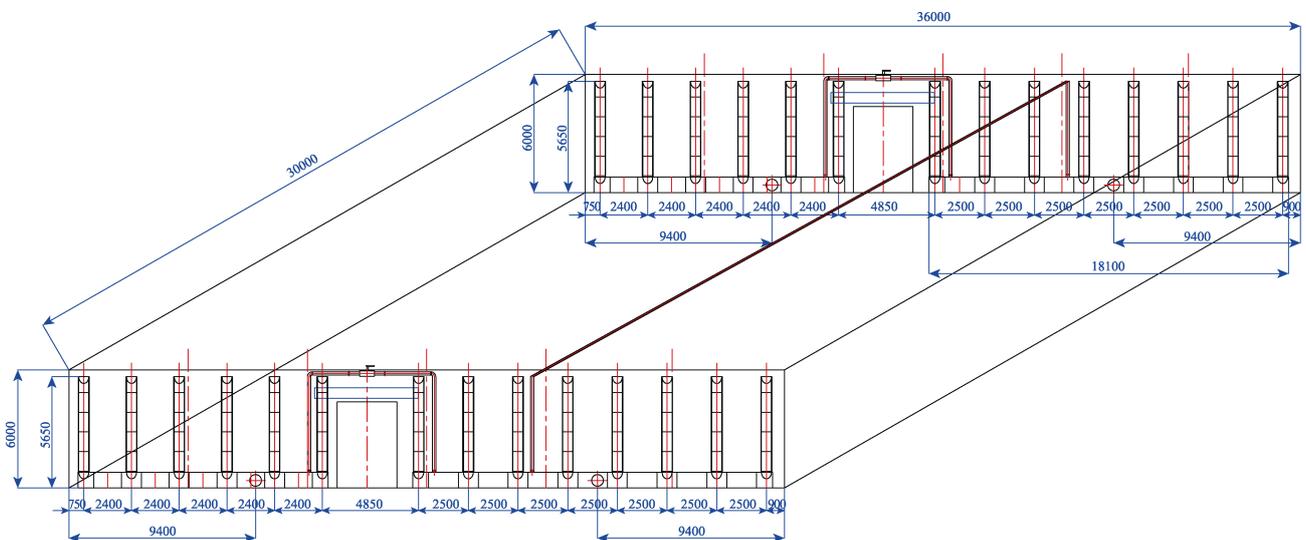


图 1 横向通风装置示意图

### 1.3 主要设备

横向通风专用离心风机，型号 CFLH-7.5A：河南未来机电有限公司；粮情电子测温系统，主机型号 XS-CIII：郑州鑫胜电子科技有限公司；电热烘箱，型号 FXB-101-1：上海树立仪器仪表有限公司；聚氯乙烯薄膜，厚度 12 mm：郑州粮好仓储设备有限公司。

### 1.4 方法

#### 1.4.1 覆膜式横向通风工艺方法

冬季通风期间，严格按照机械通风技术规范的要求（LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程），选择适合通风的温湿度条件，在 11 号仓东侧两个通风口对接 11 Kw 专用离心风机，西侧两个通风口全部打开，粮面用聚氯乙烯薄膜全部覆盖并密封严实，进行横向通风降温作业，见图 2。

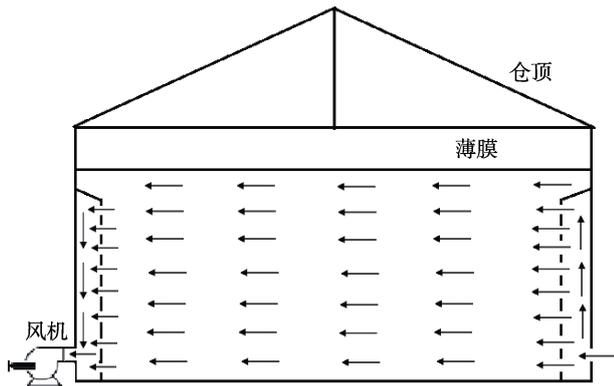


图 2 覆膜式横向通风示意图

#### 1.4.2 揭膜式横向通风工艺方法

冬季通风期间，严格按照机械通风技术规范的要求（LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程），选择适合通风的温湿度条件，在 15 号仓东西两侧 4 个通风口对接 11 Kw 专用离心风机，粮面采用分段揭膜方法，将粮温由仓房中央向东西两侧分步实施通风降温。第一阶段仓房中段粮堆宽度 10 m，每次揭膜宽度 1 m，东西两段粮堆各宽 10 m 用聚氯乙烯薄膜密封严实，直至仓房中段粮温降至目标粮温；第二阶段仓房东西两段粮堆各宽 10 m 粮堆每次均保持揭膜宽度 1 m，仓房中段粮堆用聚氯乙烯薄膜密封严实，直至仓房两侧粮温降至目标粮温，见图 3。

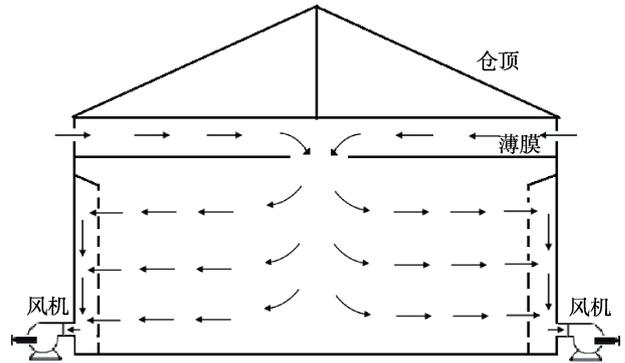


图 3 揭膜式横向通风示意图

#### 1.4.3 检测方法

在通风作业前后，按照扦样规定要求，定点定层对 11、15#仓进行扦样，每仓 5 个样品，混仓 1 份，分层样品 4 份，全仓分 4 层，每层距离粮面 0.5、1.5、3.0、4.5 m、混仓样品一份，水分按照 GB/T 5497—1985 的方法进行测定。

### 1.5 数据处理

用粮温均匀度来衡量通风均匀性，即用 100% 减去粮堆所有温度检测点实测温度变异系数的百分数。

$$J_t = 100\% - C_t = 100\% - \frac{S_t^2}{50 + t}$$

式中  $J_t$ —粮温均匀度，其值越接近 100%，均匀度越好； $C_t$ —粮堆温度的方差变异系数，即结束通风后所有测温点的温度标准方差与粮温平均值加上 50 °C 的比值，反映了各检测点粮温与平均粮温离散程度的相对大小，值越小均匀性越好；

$S_t$ —称为样本标准差，反映了样本离散程度的相对大小，在此为所有检测点温度的标准差：

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

$t_i$ —任一检测点的温度实测值； $i$ —检测点的序号， $i=1,2,3,\dots,n$ ； $\bar{t}$ —所有检测点粮温的平均值  $n$ —检测点总数量。

用粮食平衡水分均匀度来衡量粮堆全部水分检测点水分分布均匀程度，即用 100% 减去粮堆所有水分检测点实测水分变异系数的百分数。

$$J_m = 100\% - C_m = 100\% - \frac{S_m}{\bar{m}}$$

式中  $J_m$ —粮堆平衡水分均匀度，其值越接近 100%，均匀度越好； $C_m$ —粮堆水分变异系数，即

结束通风后所有检测点的水分标准差与平均水分的比值，反映了各检测点粮食平衡水分与平均水分的离散程度的相对大小，值越小则均匀性越好。

$S_m$ —称为样本标准差，反映了样本离散程度的相对大小，在此为所有检测点温度的标准差：

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$$

表 2 两种横向通风方式下整仓平均粮温变化及能耗情况表

仓号	通风状态	整仓平均粮温/°C	降温幅度/°C	通风时间/d	通风总时长/h	总耗电量/(Kw·h)	单位能耗/[(Kw·h)/(°C·t)]
11 (覆膜)	通风前	14.3	8.1	18	240	3 600	0.091
	通风后	6.2					
15 (揭膜)	通风前	14.9	7.6	10	100	3 000	0.082
	通风后	7.3					

上表可知，在相同的通风条件下，覆膜式和揭膜式横向通风分别通过 240 h 和 100 h 通风降温，平均粮温均降至 8 °C 左右，基本实现了通风降温目的。通过比对两种横向的通风时长、单位能耗，降温幅度，发现揭膜式通风时长少于覆膜式通风 140 h，单位能耗少了 0.009 Kw·h/(°C·t)，降温幅度高了 0.5 °C，均表明揭膜式通风降温效果稍好于覆膜式通风。这主要与覆膜式通风 2 个进风口进风量小，风机数量比揭膜式通风少 2 台，导致通风时进风量与单位通风量偏小，通风时间增加了 1.8 倍有关，同时覆膜式比揭膜式通风气流路程长约 2 倍，通风总阻力大于揭膜式通风，导致通风单位能耗偏高。

### 2.2 两种横向通风方式下粮温均匀性的比较

在通风降温作业结束 24 h 后，用电子测温系统检测两仓粮温。用粮堆温度检测点的均匀度来评价通风降温的均匀度。具体情况见表 3。

表 3 两种横向通风方式下粮温变化及粮温均匀度情况表

仓号	通风状态	平均粮温/°C					降温幅度/°C	粮温均匀度/%
		上层	中上层	中下层	下层	整仓		
11 (覆膜)	通风前	12.8	13.1	13.4	14.6	14.3	8.1	85.4
	通风后	4.8	7.1	6.2	6.8	6.2		
15 (揭膜)	通风前	13.2	15.9	14.4	14.8	14.9	7.6	75.5
	通风后	5.5	4.3	7.4	11.8	7.3		

由表 3，图 4 可知，冬季通风降温季节，在

式中  $m_i$ —任一检测点的粮食水分实测值； $i$ —检测点的序号， $i=1,2,3,\dots,n$ ； $\bar{m}$ —所有检测点粮食水分的平均值  $n$ —检测点总数量。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种横向通风方式降温效果和能耗比较

在冬季通风降温期间，11 号仓采用覆膜式横向通风，15 号仓采用揭膜式横向通风，两个仓的通风粮温变化情况见表 2。

相同的通风条件下，覆膜通风仓的上层、中上层、中下层平均粮温与下层平均粮温相差较小，揭膜通风仓的上层、中上层、中下层平均粮温与下层平均粮温相差较大，同时覆膜通风仓的粮温均匀度明显高于揭膜通风，均表明覆膜通风均匀性明显好于揭膜通风。覆膜通风仓下层平均粮温明显低于揭膜通风 5 °C，这可能主要是揭膜通风时容易形成通风短路，风量大多经过粮堆的中下层以上部位，而经过粮堆底层量的较少，造成底层粮温下降缓慢，甚至出现通风死角现象。

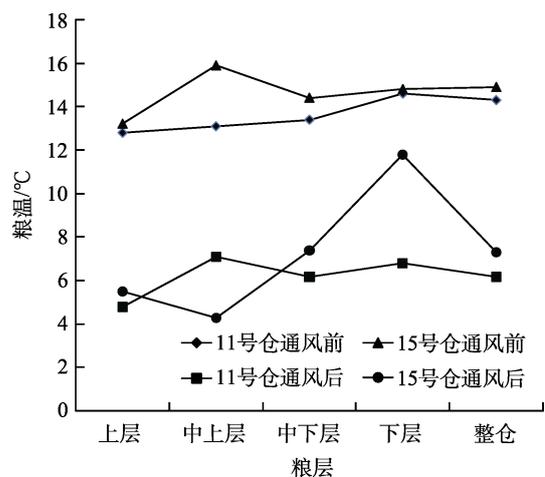


图 4 两种横向通风方式下粮堆各层平均粮温变化

### 2.3 两种横向通风方式下通风水分损失和均匀性的比较

两仓在通风前后，按照扦样规定要求进行分

层和混仓取样, 采用 105 °C 恒质法测定粮食水分, 具体情况如表 4。

表 4 两种横向通风方式下粮食水分变化情况 %

仓号	通风状态	上层水分	中上层水分	中下层水分	下层水分	整仓水分	水分降幅	水分均匀度
11 (覆膜)	通风前	12.2	12.2	12.4	12.2	12.3	0.1	97.51
	通风后	12.1	12.2	12.4	12.3	12.2		
15 (揭膜)	通风前	12.1	12.6	12.7	12.3	12.5	0.2	93.91
	通风后	12.0	12.3	12.5	12.4	12.3		

通过冬季通风降温, 覆膜通风仓和揭膜通风整仓粮食水分均有所下降, 表明机械通风降温会引起粮食水分下降, 这可能是冬季大气绝对湿度小于粮堆内气体绝对湿度造成的。通过测算水分均匀度, 覆膜式通风水分均匀度为 97.51, 揭膜式通风水分均匀度为 93.91, 覆膜式通风水分均匀性明显高于揭膜式通风; 由表 4 和图 5 可知, 覆膜式通风: 通风前后粮堆各层水分变化小, 揭膜式通风: 通风前后粮堆各层水分变化大, 覆膜式通风粮堆水分损失小于揭膜式通风, 这可能与揭膜通风的通风量大, 通风容易引起短路, 底层通风不彻底有关。

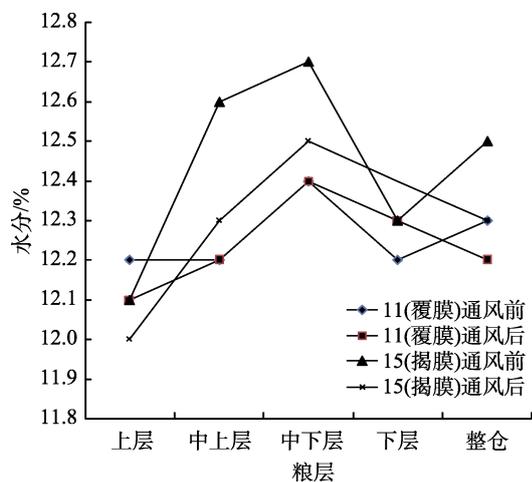


图 5 两种横向通风方式下粮堆各层和整仓平均水分变化

## 2.4 分析讨论

### 2.4.1 覆膜式通风降温均匀性好

本文通过测算覆膜式通风与揭膜式通风降温均匀度, 发现覆膜式降温均匀度高于揭膜式 9.9%, 同时发现揭膜式通风存在通风死角, 可能造成粮堆内部湿热转移, 会影响粮食安全储存。

### 2.4.2 覆膜式通风保水效果好

通过检测比较覆膜式通风和揭膜式通风粮堆各层水分、整仓通风前后水分, 发现覆膜式通风粮食水分损失小, 整仓平均水分小了 0.1%, 同时粮堆水分分层变化小, 水分均匀度好, 粮堆水分梯度小, 减少了水分分层的可能性, 有利于粮食安全储存。

## 3 结论

### 3.1 不同横向通风方式对降温时间和能耗的影响

不同通风方式对通风降温时间和通风降温能耗有不同的影响, 通常采用小功率的风机进行通风降温时, 通风时间会延长, 但通风用电少, 能耗低, 水分损失小。本文覆膜式通风所用风机数量少, 通风风程长, 冷空气湿热交换充分, 造成通风时间比揭膜式通风时间长了 140 h, 但总耗电量和单位能耗均较低, 总体上, 可以得出覆膜式通风通风能耗低, 有利于通风成本的控制。这对不同地区根据冬季通风有利时间长短不一, 选择合理有效的横向通风方式提供了参考。

### 3.2 不同横向通风方式下降温均匀性的对比分析

近年来, 冬季通风降温作业可采用竖向通风包括轴流风机通风、离心风机通风、混流风机通风、横向通风等多种方式, 均可实现降低粮温, 储备冷源的目的, 但不同通风方式下降温均匀性有所不同, 总体上横向通风均匀性要好于竖向通风。本文通过测算通风后粮温均匀度, 覆膜式通风的粮温均匀度为 85.4, 揭膜式通风的粮温均匀度为 75.5, 表明覆膜式通风降温均匀性明显好于揭膜式通风均匀性。

### 3.3 不同横向通风降温方式对粮食水分损失和均匀性的影响

大量实践研究表明, 在冬季粮食通风降温过程中, 无论何种通风方式和通风风机均会引起粮食水分不同程度下降, 这是由于在冬季通风时, 天气干燥, 大部分时间大气绝对湿度小于粮堆内气体绝对湿度所引起的。已有研究发现竖向通风系统使用小风量风机可以减少储粮通风水分损失<sup>[11-12]</sup>, 沈波<sup>[13]</sup>通过对比平房仓竖向和横向通风系统降温能效, 发现冬季降温通风过程中横向风网系统的通风失水率, 优于竖向风网系统, 保水作用明

显。本文通过测定两种不同横向通风降温粮食水分变化,表明覆膜横向通风方式由于通风路程长,通风量小,粮堆风速低,通风时间增加,粮堆内湿热交换充分,粮食水分损失低于揭膜式通风 0.1%。通过测算两种不同横向通风粮食水分均匀度,对比通风前后粮堆各层水分变化,均表明覆膜式横向通风水分均匀度好,粮堆水分梯度小,减少了水分分层的可能性,这一结果对于通风降温过程中保持粮堆水分,减少储粮损失,减少粮堆水分梯度,提高粮堆安全稳定性,合理选择不同横向通风方式具有重要实际应用意义和参考价值。

### 参考文献:

- [1] 曹阳,魏雷,赵小津,等. 粮仓横向通风方法及其系统[P]. 中国专利: 200910085093, 2009.
- [2] 王平,周焰,曹阳,等. 平房仓横向通风降温技术研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2011(2): 19-23.
- [3] 石天玉,赵会义,祝祥坤,等. 横向通风技术在高大平房仓小麦储藏上的应用[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 28-32.
- [4] 祝祥坤,石天玉,沈波,等. 稻谷平房仓储藏的横向通风技术工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 33-37.
- [5] THORPE G R, WHITAKER S. Local mass and thermal equilateral in ventilated rain bulks. Part I: The development of heat and mass conservation equations[J]. Journal of Stored Products Research. 1992, 28: 15-27.
- [6] 王远成,高帅,邱化禹,等. 横向谷冷通风过程的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 103-106.
- [7] 张波,王远成,高帅. 平房仓横向谷冷通风仓内粮堆热湿传递的数值模拟研究[J]. 粮食储藏, 2015, 44(3): 10-13.
- [8] 祝祥坤,石天玉,沈波,等. 稻谷平房仓储藏的横向通风技术工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 33-37.
- [9] 沈邦灶,王飞. 环流熏蒸在横向通风系统中的应用研究[J]. 粮食储藏, 2016, 45(4): 31-34.
- [10] 沈波,应玲红,余永红,等. 膜下富氮低氧环流工艺在横向通风系统中的应用[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 61-63.
- [11] 夏晓波,王玉明,孟宪兵. 下行式轴流风机缓速保水降温应用试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 2011(6): 21-22.
- [12] 吕秉霖,汪福友,张海涛. 高大平房仓三种机型通风机负压通风降温对比试验[J]. 粮食流通技术, 2013, (5): 23-25.
- [13] 沈波,刘益云,王建民,等. 平房仓竖向和横向通风系统降温能效对比研究[J]. 粮食储藏, 2018, 47(3): 12-16. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。

· 公益宣传 ·

## 欢迎订阅 2021 年《中国稻米》杂志

《中国稻米》是由农业农村部主管,中国水稻研究所主办,全国农业技术推广服务中心等单位协办的全国性水稻科学技术期刊,兼具学术性、技术性、知识性、信息性等特点。为国家新闻出版广电总局认定的首批学术类期刊,为中国科技核心期刊,还荣获全国农业期刊金犁奖技术类一等奖、浙江省优秀科技期刊一等奖等奖项。适合我国水稻产区各级技术人员及农业与粮食行政管理人员、科研教学人员和稻农阅读。本刊为双月刊,标准大 16 开本,单月 20 日出版。每期定价 10.00 元,全年 60.00 元,全国公开发行,邮发代码: 32-31,国内刊号: CN33-1201/S,国际统一刊号: ISSN 1006-8082。欢迎新老读者到当地邮局订阅,也可直接汇款到本刊编辑部订阅。E-mail: zgdm@163.com,网址: www.zgdm.net;地址:浙江省杭州市富阳区新桥水稻所路 28 号;邮政编码: 311400;电话(传真): 0571-63370271, 63370368。



 微信搜一搜

Q 中国稻米 |