

平房仓横向与竖向通风降温失水率研究

张云峰¹, 石天玉², 王建民¹, 姜玉星¹, 赵会义²

(1. 浙江省粮食局直属粮油储备库, 浙江 杭州 310006; 2. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘要:选择两栋分别配置有横向和竖向通风系统以及温湿水一体化多参数粮情测控系统的平房仓, 分别存放早籼稻和小麦, 在相同的自然环境条件下进行通风作业。研究装有竖向通风系统的小麦仓和安装有横向通风系统的稻谷仓在不同单位通风量、相同降温范围内的通风水分损失、能耗和通风后水分均匀性情况。试验证明装有横向通风系统的稻谷平房仓, 单位通风量为装有竖向通风系统的小麦平房仓的0.8倍、降温幅度为小麦平房仓的1.19倍时, 降低每度粮温的通风单位水分损耗仅为小麦平房仓的0.283倍, 即单位水分损耗降低了71.7%, 单位通风能耗、通风后的水分均匀度基本相同。

关键词:横向通风; 失水率; 单位能耗; 水分均匀度

中图分类号: TU 267⁺.1

文献标识码: A **文章编号:** 1007-7561(2015)S-0051-05

横向通风技术是指将主风道布置在檐墙两侧, 支风道按照设计通风途径比要求, 以开口向上的立式梳状固定在墙上, 作业时在粮面覆膜, 通过在一侧利用风机从另一侧环境吸风或环流吸风, 在膜下粮堆形成负压并产生穿过整个粮堆的横向气流, 从而完成冷却降温、均温均湿、气调储藏、环流熏蒸等功能。主要技术特征为风道上墙、全程覆膜、负压吸风及穿过粮堆的气流由竖变横。浙江粮食局直属粮油储备库于2013年至2015年间, 在本库开展了系统性的实仓试验研究, 试验内容包括横向通风系统空载阻力及实仓装粮后阻力分布规律、环流熏蒸、通风降温、充氮气调、多参数粮情测控、降温丢水、实仓气密性分布规律等项目。在实仓应用中发现横向通风技术的主要优点为: 一、通风死角少, 通风路径长, 均匀性好, 降低了能耗; 二、实现粮食保水通风, 减少水分损耗; 三、出入库作业时机械化程度高; 四、作业时无需装拆地上笼, 降低保管员劳动强度; 五、无需在粮食出库时将地上笼拉回器材库, 节省存放空间; 六、由于地上笼固定安装在檐墙上, 有利于消除人、机同时作业的安全隐患; 七、在冬季通风时, 无需揭膜, 降低工作强度及减少薄膜损耗; 八、由于膜套保护较好, 能提高仓房气密性, 提高熏蒸和气调能效。

收稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家粮食公益性行业科研专项(201313001-06, 201313004); 十二五国家科技支撑计划项目(2013BAD17B00)

作者简介: 张云峰, 1972年出生, 高级技师。

利用分别安装有横向通风系统的散装早籼谷 P21 号仓和竖向通风系统的散装小麦 P22 号仓, 进行通风期间水分损失对比试验, 探讨横向通风与常规竖向通风系统在降温通风时的水分损失及水分均匀性分布情况。

1 材料与方法

1.1 仓房

选取 P21、P22 作为本次试验的仓房, 仓房基本情况详见表 1。

表 1 仓房情况

仓房	长 /m	宽 /m	檐高 /m	堆粮高度 /m	通风系统
P21	49.5	18.0	7.0	5.0	横向通风
P22	54.0	18.0	7.0	5.0	竖向通风

1.2 风道

P21 号仓为横向风网系统, 在仓房檐墙(南北两侧)各开四个通风孔, 在仓内沿墙(南北)地坪上各铺设一条四分之一圆主风道, 并相隔一定尺寸开支风道口, 在支风道口自下而上安装铺设支风道, 并紧贴、固定在檐墙上, 支风道长为 4 m, 整仓共铺设支风道 36 条, 开成通风时冷风北进南出的横向路径体系。途径比为 1.15, 详见图 1~图 2。

P22 号仓为竖向风网系统, 东、西各两个通风口, 为一机三道地上笼通风道, 支风道开孔率 30%, 支风道长 25 m, 粮堆高度 5.0 m, 风道间距 2.4 m, 途径比 1.25。

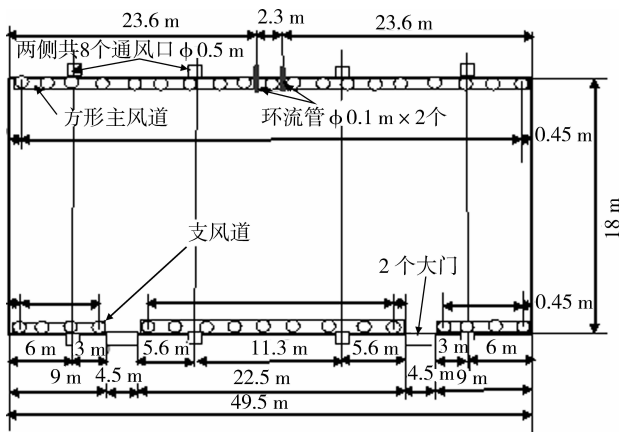


图1 P21号仓横向风网系统平面图

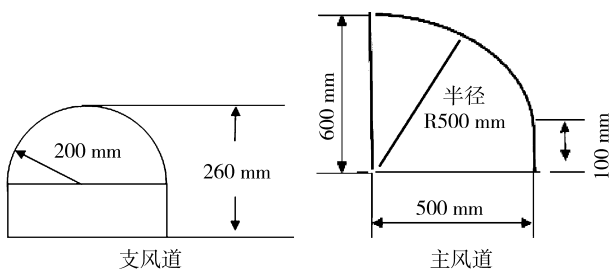


图2 横向风网系统支风道和主风道截面图

1.3 储粮基本情况

P21、P22号仓分别储存2014年入库的早籼谷2 210 t、小麦3 558 t,详见表2。

表2 储粮情况

仓号	品种	数量 /t	水分 /%	杂质 /%	出糙 /%	脂肪酸值 / (KOH mg/100 g)	容重 / (g/L)	不完善粒 /%	面筋吸水量 /%
P21 (横向)	早籼谷	2 210	11.3	1.0	76	20.8	-	-	-
P22 (竖向)	小麦	3 558	10.3	0.4	-	-	806	3.8	219

1.4 风机

P21仓南侧檐墙4个风道口连接4台3 kW的混流风机,风压486~670 Pa,风量7 136~11 993 m³/h。

P22仓东面和西山墙两个风道口各安装2台2.2 kW的轴流风机,共4台风机,风压460 Pa,风量6 600 m³/h。

1.5 粮情检测系统

每仓各安装一套符合LS/1203—2002的温度检测系统和温湿水一体化检测系统。

1.5.1 温度检测系统

按LS/T1203—2002粮情测控系统布点要求进行布置,上下、四周传感器距粮面、仓壁、仓底均0.3 m。其中P21东西向布置12排,南北向布置5排,分四层布置,粮堆内共计布置传感器240个;P22东

西向布置13排,南北向布置5排,分四层布置,粮堆内共计布置传感器260个。

1.5.2 温湿水一体化检测系统

在粮面取13个点,每点深度方向分4层,共52个检测点。P21号仓布点如图3所示,P22号仓布点如图4所示。

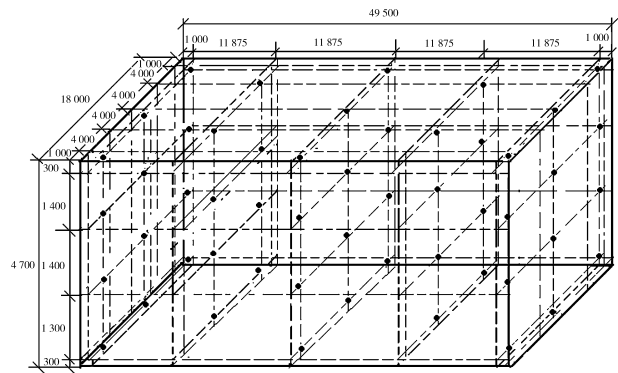


图3 P21仓温湿水一体化检测系统检测点分布立体图

注:单位为mm。

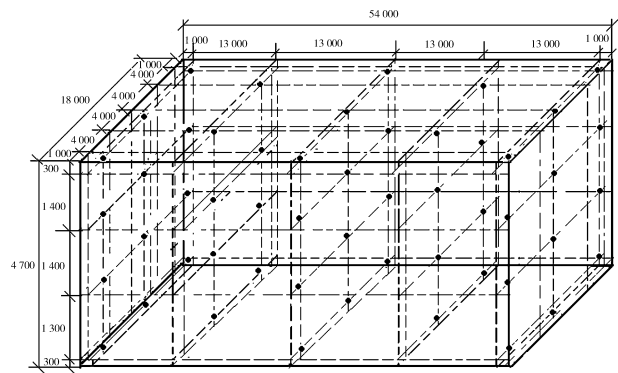


图4 P22仓温湿水一体化检测系统检测点分布立体图

注:单位为mm。

1.6 器材和仪器

智能热线风速计2台,毕托管2根,手持式压力仪2台,U型压力计2个,手持温湿度测定仪1台,锥形集风筒2个,标准测试管4根,电表2个。

1.7 测试内容和参数

1.7.1 参数测定

当粮堆和外界环境符合通风条件时,同时对两个试验仓进行通风作业,通风时长也尽量一致,记录通风开始、结束的时间和能耗情况。

用温湿水一体化检测系统每小时定时检测每个通风口、两侧窗户通风时的温湿度。

1.7.2 系统总风量和总阻力测定

根据有关公式计算出系统总风量和总阻力。

1.7.3 粮面表观风速测定

用风速仪和放大50倍的锥形集风筒测定P22

通风时粮面各点的表观风速,测点间距 1.5 m,离墙 0.5 m,按网状部署。

1.7.4 粮堆温湿度和平衡水分检测

利用粮堆温度检测系统和温湿水一体化检测系统,通风期间每小时定时检测粮堆温湿度和粮食平衡水分;粮食储存期间每 6 h 检测一次粮堆温湿度和粮食平衡水分。

2 结果与分析

按照储粮机械通风技术规程 (LS/T1202—2002) 中 7.1 条款的规范性要求执行。

每次通风开始时: $t_2 - t_1 \geq 8 \text{ }^\circ\text{C}$;每次通风进行时: $t_2 - t_1 > 4 \text{ }^\circ\text{C}$;每次通风结束时: $t_2 - t_1 \leq 4 \text{ }^\circ\text{C}$;P21

仓最终结束通风时要求 $t_{\text{出口}} \leq t_{\text{粮}} + 3 \text{ }^\circ\text{C}$;P22 仓最终结束通风时要求粮堆粮温梯度 $\leq 1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ 粮层厚度,粮堆上层与下层的温度差 $\leq 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (其中 t_2 为粮堆平均粮温, $^\circ\text{C}$; t_1 为仓外大气温度, $^\circ\text{C}$)。因试验仓粮食水分均在安全水分以内,所以不再考虑湿度条件。

2.1 累计通风时间和能耗测试数据

P21、P22 号仓通风降温时间及通风总时长、单位通风量、降温幅度、能耗等情况,详见表 3。

2.2 两个试验仓通风期间水分变化

P21、P22 号仓粮食的 4 个水平切面、5 个垂直切面在通风期间的水分检测值见表 4~表 5。

表 3 通风降温时间及能耗统计

仓号/d	通风时间/d	通风总时长/h	单位通风量/ $[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})]$	起始平均粮温/ $^\circ\text{C}$	结束平均粮温/ $^\circ\text{C}$	降温幅度/ $^\circ\text{C}$	总耗电量/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$	单位能耗/ $[\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{t})]$
P21(横向)	15	250	10.1	18.3	5.7	12.6	1 425.9	0.051 0
P22(竖向)	8	140	12.61	18.4	7.8	10.6	1 800.6	0.049 6

表 4 P21 仓粮食水分检测值

%

时间	平均水分	4 个水平切面				5 个垂直切面				
		上层	中上	中下	下层	南 1	南 2	中间	北 2	北 1
第 1 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 2 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 7 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 8 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 9 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.7	10.7	12.5
第 10 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 14 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 22 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 23 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 27 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 28 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 29 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.7	10.7	12.5
第 30 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 31 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 32 d	11.3	11.1	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 33 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.5
第 38 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 39 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 40 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 43 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 44 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 47 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 48 d	11.2	11.0	11.1	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 49 d	11.2	11.0	11.0	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 58 d	11.2	11.0	11.0	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 59 d	11.2	11.0	11.0	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
第 60 d	11.2	11.0	11.0	11.0	11.7	11.0	10.7	10.8	10.7	12.4
总丢水	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1

表5 P22 仓粮食水分检测值

%

时间	平均水分	4个水平切面				5个垂直切面				
		上层	中上	中下	下层	南1	南2	中间	北2	北1
第1 d	10.3	10.0	10.4	10.2	10.3	9.8	10.7	10.2	10.1	10.4
第5 d	10.3	10.0	10.4	10.2	10.3	9.8	10.7	10.2	10.1	10.4
第6 d	10.3	10.0	10.4	10.2	10.3	9.8	10.7	10.2	10.1	10.4
第7 d	10.3	10.0	10.4	10.2	10.3	9.8	10.7	10.2	10.1	10.4
第8 d	10.3	10.0	10.4	10.2	10.3	9.8	10.7	10.2	10.1	10.4
第9 d	10.2	10.0	10.3	10.2	10.3	9.8	10.6	10.2	10.1	10.4
第10 d	10.2	10.0	10.3	10.1	10.3	9.8	10.6	10.2	10.1	10.3
第11 d	10.2	9.9	10.3	10.1	10.3	9.8	10.6	10.2	10.1	10.3
第16 d	10.2	9.9	10.3	10.1	10.3	9.8	10.6	10.2	10.1	10.3
第17 d	10.2	9.9	10.3	10.1	10.3	9.8	10.6	10.2	10.1	10.3
第18 d	10.2	9.9	10.2	10.0	10.3	9.8	10.6	10.2	10.2	10.3
第21 d	10.2	9.9	10.2	10.0	10.3	9.8	10.5	10.1	10.1	10.3
第22 d	10.2	9.9	10.2	10.0	10.3	9.8	10.5	10.1	10.1	10.0
第25 d	10.1	9.8	10.2	10.0	10.3	9.8	10.4	10.1	10.1	10.0
第26 d	10.1	9.8	10.2	9.9	10.3	9.8	10.4	10.1	10.0	10.0
第27 d	10.1	9.8	10.1	9.9	10.2	9.8	10.4	10.0	10.0	10.0
第36 d	10.1	9.8	10.1	9.9	10.2	9.8	10.4	10.1	10.0	10.0
第37 d	10.0	9.7	10.1	9.8	10.2	9.7	10.4	10.1	9.9	9.9
第38 d	10.0	9.7	10.1	9.8	10.2	9.7	10.3	10.0	9.9	10.0
总丢水	0.3	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2	0.4

2.3 两个试验仓通风后水分均匀性检测数据

P21、P22 号仓通风 24 h 后各个检测点的粮食水分见表 6~表 7。

表6 P21 仓通风 24 h 后各个测点粮食水分 %

测点位置	第一层	第二层	第三层	第四层
1	11.2	11.5	10.9	11.9
2	11.0	10.9	10.6	11.5
3	10.5	10.2	10.1	11.5
4	10.4	10.4	10.3	11.0
5	10.6	10.6	10.4	11.8
6	10.0	10.1	10.7	11.4
7	10.7	10.5	10.5	11.5
8	10.4	10.7	11.0	11.8
9	10.4	10.8	10.9	10.8
10	10.8	10.3	10.4	11.3
11	12.6	12.5	12.4	12.3
12	12.4	12.4	12.3	12.3
13	12.5	12.8	12.7	12.5
层平均水分	11.0	11.0	11.0	11.7
总平均水分	11.2			

表7 P22 仓通风 24 h 后各个测点粮食水分 %

测点位置	第一层	第二层	第三层	第四层
1	9.4	8.8	10.0	9.6
2	10.2	9.7	10.0	9.7
3	10.4	9.2	9.9	9.9
4	10.2	9.6	10.4	10.1
5	11.4	9.4	10.2	9.7
6	9.6	9.2	10.0	9.7
7	9.8	9.7	10.1	9.7
8	10.0	9.8	10.2	9.6
9	9.7	11.0	10.7	9.9
10	11.5	10.8	10.2	9.8
11	9.9	10.3	10.2	9.7
12	9.9	9.9	10.0	9.7
13	10.1	10.2	10.0	9.6
层平均水分	10.2	9.8	10.1	9.7
总平均水分	10.0			

2.4 各项参数的计算

2.4.1 失水率的计算

粮堆在通风过程中单位质量粮食的水分损失称为通风失水率，用符号 M_s 表示，定义式为：

$$M_s = \frac{\sum M}{G} \times 100\% = \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} \times 100\%$$

M_s —通风失水率, kg/kg 或 % ; $\sum M$ —通风实际累计水分损失量, kg; G —粮堆初始总质量, kg; w_1 、 w_2 —分别为粮堆通风前、通风后的平均水分, %。

P21 仓失水率为： $M_{P21} = \frac{11.3\% - 11.2\%}{1 - 11.2\%} \times 100\% = 0.1126\%$ ；

P22 仓失水率为： $M_{P22} = \frac{10.3\% - 10.0\%}{1 - 10.0\%} \times 100\% = 0.3333\%$ 。

2.4.2 通风单位水耗的计算

粮堆在通风过程中单位质量粮食温度降低 1℃ 所损失的水分称为通风单位水耗，用符号 M_l 表示，定义式为： $M_l / (\% / ^\circ\text{C}) = \frac{M_s}{t_1 - t_2}$ ，式中： M_l —通风单位水耗, (kg/kg)/℃ 或 %/℃ ; t_1 —通风前粮堆平均温度,℃ ; t_2 —通风结束 24 h 后粮堆平均温度,℃。

P21 仓通风单位水耗为： $M_{lP21} = \frac{0.1126}{18.3 - 5.7} = 0.0089\% / ^\circ\text{C}$ ；

P22 仓通风单位水耗为： $M_{lP22} = \frac{0.3333}{18.4 - 7.8} = 0.0314\% / ^\circ\text{C}$ 。

2.4.3 通风失水速率计算

粮堆在通风过程中,单位质量粮食每小时所损失的水分称为通风失水速率,用符号 ω 表示,定义为:
$$\omega = \frac{\sum M}{G \cdot \tau} \times 100\% = \frac{M_s}{\tau}$$
 式中: ω —通风失水速率,%/h; $\sum M$ —通风实际累计水分损失量,kg; G —粮堆初始总质量,kg; τ —累计通风时间,h; M_s —通风失水率,%。

P21 仓通风失水速率为:
$$\omega_{P21} = \frac{0.1126}{250} = 0.0005\%/h;$$

P22 仓通风失水速率为:
$$\omega_{P22} = \frac{0.3333}{140} = 0.0024\%/h。$$

2.4.4 通风后平衡水分均匀性计算

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。计算公式为:

$$Jm = 100\% - Cm = 100\% - \frac{Sm}{\bar{m}} \times 100\% = 100\% - \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \times 100\%。$$

式中: Jm —粮堆平衡水分均匀度(%),其值越

接近 100%,均匀度越好; Cm —粮堆水分的变异系数,等于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的离散程度的相对大小,值越小则均匀性越好; Sm —为样本标准差(Standard deviation),与样本均值量纲相同,反映了样本离散程度,在此为所有检测点粮食平衡水分的标准差,即 $S_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$; m_i —任一检测点的粮食平衡水分实测值(%); i —检测点的序号, $i=1,2,3,\dots,n$; m —所有测点粮食平衡水分的平均值(%); n —检测点总数量。

P21 仓通风后平衡水分均匀度:

$$Jm = 100\% - \frac{\sqrt{\frac{1}{52-1} \sum_{i=1}^{52} (m_i - 11.2)^2}}{11.2} = 92.60\%;$$

P22 仓通风后平衡水分均匀度:

$$Jm = 100\% - \frac{\sqrt{\frac{1}{52-1} \sum_{i=1}^{52} (m_i - 10.0)^2}}{10} = 93.30\%。$$

2.5 分析

2.5.1 通风降温失水情况汇总

P21、P22 号仓通风后单位通风量、粮温降幅和水分损耗等效果,详见表 8。

表 8 两个试验仓通风降温失水汇总表

仓号	累计通风时间/h	单位通风量 /[(m ³)/(h·t)]	粮温降幅 /℃	通风失水率 /%	通风单位水耗 /(%/℃)	通风失水速率 /(%/h)	通风降水均匀度/%	通风单位能耗 /[kW·h/(℃·t)]
P21(横向)	250	10.1	12.6	0.1126	0.0089	0.0005	92.46	0.0510
P22(竖向)	140	12.61	10.6	0.3333	0.0314	0.0024	93.30	0.0496
比值	1.786	0.8	1.19	0.338	0.283	0.21	0.99	1.03

2.5.2 通风降温和失水效果及能耗评价

从表 8 可知,装有横向通风系统的稻谷平房仓 P21 与装有竖向通风系统的小麦平房仓 P22 相比,当单位通风量为 0.8 倍、降温幅度为 1.19 倍时,降低每度粮温的通风水分损耗为 0.283 倍,即通风单位水分损耗降低了 71.7%,通风失水速率为 0.21 倍,通风单位能耗基本相同。说明横向通风系统具有比竖向通风系统更好的降温保水通风效果。

2.5.3 通风后水分均匀性评价

从表 8 可知,横向和竖向通风后平衡水分均匀性无明显差异。这说明横向通风与常规竖向通风在

通风降温结束后,都能取得较为均匀的水分分布。从通风降温结束后粮堆内存在的水分梯度分析,横向通风和竖向通风都符合储粮技术规程 LS/T1202—2002 中 7.1.2 结束降温通风条件 c 款规定:粮堆水分梯度 $\leq 0.3\%/m$ 粮层厚度,粮堆上与下层温度差 $\leq 1.5\%$ 。

3 结论

试验证明,采用横向通风系统可以以较低的单位通风量达到较好的降温保水效果,通风失水率、单位水耗低于竖向通风,通风能耗和通风后水分均匀性与竖向通风系统无明显差异。☉