

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.025

褚春燕, 孙桂玉, 孙洪伟, 等. 气象站、粮仓和粮堆的温湿度相关性分析[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 207-213.

CHU C Y, SUN G Y, SUN H W, et al. Correlation analysis of temperature and humidity of meteorological station, granary and grain pile[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 207-213.

气象站、粮仓和粮堆的温湿度相关性分析

褚春燕¹, 孙桂玉¹, 孙洪伟¹, 姜丽霞², 王晓明³✉

- (1. 佳木斯市气象局, 黑龙江 佳木斯 154004;
2. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150000;
3. 黑龙江省气象数据中心, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 为提供精准的粮食仓储气象服务, 保障粮食仓储安全, 基于2017—2020年佳木斯地区三个粮库和当地气象台站的观测资料, 利用数理统计方法, 探索分析了台站和粮仓内外的温度、相对湿度及其相关性。结果表明: 气象台站实时温度大多低于粮库仓外温度, 二者呈同步震荡变化, 差异较小, R 在0.996以上, 气象台站相对湿度高于粮库仓外相对湿度, 二者基本呈一致变化, 粮库的仓内相对湿度一般控制在70%以下; 气象台站日最高温度与粮库仓内温度、表层最高粮温相关性较好, R 达到0.90以上, 仓温变化和表层最高粮温滞后于日最高气温变化分别约为1和30 d, 气象台站日最高气温与仓温、表层最高粮温的回归方程均为正相关, 随日最高气温的升高而升高, 其他各层最高粮温受温度影响较小, 根据回归方程预测仓温和各层最高粮温并得出高大平房仓仓储气象服务高温指标为28℃, 通风降温服务指标为低于70%。

关键词: 粮食仓储; 粮堆; 气象台站; 温度; 相对湿度; 相关性

中图分类号: P49 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)02-0207-08

Correlation Analysis of Temperature and Humidity of Meteorological Station, Granary and Grain Pile

CHU Chun-yan¹ SUN Gui-yu¹, SUN Hong-wei¹, JIANG Li-xia², WANG Xiao-ming³✉

- (1. Meteorological Bureau of Jiamusi, Jiamusi, Heilongjiang 154004, China;
2. Heilongjiang Provincial Institute of Meteorological Sciences, Harbin, Heilongjiang 150030, China;
3. Heilongjiang Provincial Meteorological Data Centre, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: In order to provide accurate meteorological services for grain storage and ensure the safety of grain storage, based on the grain situation data of three grain depot in Jiamusi and the observation data of local meteorological stations from 2017 to 2020, the temperature, relative humidity and their correlation inside and outside the station and the granary were explored and analyzed by using mathematical statistics method. The results showed that the real-time temperature of meteorological stations was mostly lower than

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 黑龙江省气象局科研项目(HQZC2020017)

Supported by: Scientific Research Project of Heilongjiang Provincial Meteorological Bureau (No.HQZC2020017)

作者简介: 褚春燕, 女, 1976年出生, 高级工程师, 研究方向为应用气象和综合观测。E-mail: 448995087@qq.com.

通讯作者: 王晓明, 女, 1966年出生, 高级工程师, 研究方向为农业气象。E-mail: sitang2000@126.com.

that outside the granary, and the two showed synchronous oscillation changes with little difference. R was above 0.996. The relative humidity of meteorological stations was higher than that outside the granary, and the two basically showed consistent changes. The relative humidity inside the granary was generally controlled below 70%. The daily maximum temperature of meteorological stations had a good correlation with the temperature in the warehouse and the maximum grain temperature in the surface layer, and R reached above 0.90. The change of warehouse temperature and the maximum grain temperature in the surface layer lagged behind the change of daily maximum temperature for about 1 d and 30 d, respectively. The regression equations of the daily maximum temperature of meteorological stations with the warehouse temperature and the maximum grain temperature in the surface layer were all positively correlated, and increased with the increase of the daily maximum temperature. The maximum grain temperature in other layers was less affected by temperature. According to the regression equation, the warehouse temperature and the maximum grain temperature in each layer were predicted, and the high temperature index of meteorological service in large warehouses was 28 °C, and the ventilation and humidity service index was less than 70%.

Key words: grain storage; grain pile; meteorological station; temperature; relative humidity; correlation

黑龙江省现有耕地超过 2 亿亩, 粮食存储量居全国第一, 粮食的安全储存可以通过控制两个重要的物理因素来实现: 温度和水分含量^[1]。粮食仓储过程中, 气象因子温湿度的变化直接影响粮食的生理变化——呼吸、后熟、发芽、陈化等, 进而改变粮食品质, 甚至出现霉变、虫害等造成粮食损失。粮食安全贮藏对环境条件要求较高, 如空气相对湿度需小于 75%、粮温需低于 20 °C, 粮食水分需在安全水分下等^[2]。刘慧^[3]研究发现在温度为 25 °C, 相对湿度为 85%的环境下稻谷储藏第 10 周, 即进入轻微霉变状态; 在温度 20 °C 及以下的储藏条件中, 霉菌数量增长缓慢, 稻谷处于安全状态。正常情况下, 气温影响仓温, 仓温影响粮温, 仓温滞后于气温, 粮温滞后于仓温^[4]。粮温与环境气温的年度变化规律基本一致, 粮温变化滞后于气温 1~2 个月左右, 采用粮温滞后气温一个月进行拟合, 两者具有很好的相关性^[5]。

目前粮食仓储提倡准低温储藏和低温储藏两种方式, 准低温储粮要求局部最高粮温不高于 25 °C, 低温储粮局部最高粮温不高于 20 °C^[6]。张前^[7]提出在粮食储藏过程中, 粮堆发生虫害的主要部位集中在粮堆表层(即粮面以下 30~50 cm)等粮温变化活跃区域, 外界气温对仓温影响很大, 对粮堆表层区域温度影响也非常明显, 粮堆表层平均温度和气象因素中的气温呈现较强的正相关关系, 粮堆表层平均温度随气温的变化而变化,

有一定的延迟。卢献礼^[8]通过高温高湿生态区高水分玉米降水保质储藏试验得出在 6~10 月雨季, 平均粮温应控制在 20 °C 以内, 最高粮温在 25 °C 以内; 仓内相对湿度一般应在 75% 以下, 7~10 月雨季仓内湿度应控制在 65% 以下。李兴军^[9-10]研究表明粮食在相对湿度 20%~65% 范围内储粮是安全的, 既不发霉也不发生脂肪过氧化作用。前人研究多集中在粮仓内温、湿度变化规律^[11]、建立粮堆温、湿度预测模型^[12]等, 但是在气象台站与粮库的温、湿度数据分析及粮食仓储气象服务温、湿度指标方面研究比较少。

本文利用大数据分析技术, 对三个粮库高大平房仓 2017—2020 年观测的温、湿度资料与气象台站观测的数据进行分析, 得出粮食仓储气象要素变化特征和相关拟合关系, 确定高大平房仓粮食仓储的温、湿度气象服务指标, 从而为粮库提供精准的粮食仓储气象服务, 保障粮食仓储安全。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 粮库数据

根据三江平原粮库主要粮仓类型及气候条件, 以 2017—2020 年三个粮库(简称甲库、乙库、丙库)高大平房仓测量的仓外温度(外温)、仓内温度(仓温)、粮堆温度(粮温), 粮仓外部相对湿度(外湿)、仓内相对湿度(仓湿)与对

应气象台站采集的温、湿度为数据来源。甲库地处桦川县，以桦川国家气象站数据进行分析；甲库粮食轮转出库周期短，粮情数据不连续，数据延续到 2020 年 11 月 26 日；粮库在粮食存储期间

测量仓湿和粮食水分含量，不进行大气湿度与粮湿的分析。粮库信息及粮情测量情况如表 1。粮情数据为每周测查 1 次，高温期及特殊时期增加测查次数。

表 1 粮库与粮情测量情况
 Table 1 The measurement of grain depot and grain situation

类别	粮库		
	甲库	乙库	丙库
仓号	03-1	05-1	01-2
地理位置	佳木斯市	桦川县	汤原县
粮情数据时段	20170101—20201126	20171029—2190409	20170326—20190808
高大平房仓构造 (长×宽×高)/m	60×21×11.5 廩间高 5.5	90×36×9.5 廩间高 3.5	41.75×23.18×12 廩间高 5.5
隔热保温措施	混凝土处理	彩钢板+超细玻璃棉处理	彩钢板+岩棉处理
粮情检测系统	JHOPI-II 粮情检测系统	JHOPI-II 粮情检测系统	JHOPI-粮情检测系统
粮温	检温点设置 13 组，每组 5 根测温电缆，每根电缆分五层，每根电缆上层和底层检温点距粮面和仓底均为 0.3 m，其余检温点均匀分布，间距为 1.5 m。	检温点设置 5 组，每组 12 根测温电缆，每根电缆分四层，每根电缆上层和底层检温点距粮面和仓底均为 0.5 m，其余检温点均匀分布，间距为 1.5 m。	检温点设置 10 组，每组 8 根测温电缆，每根电缆分四层，每根电缆上层和底层检温点距粮面和仓底均为 0.5 m，其余检温点均匀分布，间距为 1.5 m。
仓内温、湿度	廩间布置温湿度传感器，距粮面 1.5 m。	廩间布置温湿度传感器，距粮面 1.5 m。	廩间布置温湿度传感器，距粮面 1.5 m。
仓外温、湿度	温湿度传感器布置于距离仓房 4.0 m 外的百叶箱内，距地面高度 1.5 m。	温湿度传感器置于仓房的阳面外墙 1.0 m 处，距地面高度 1.5 m。	温湿度传感器布置于距离仓房 4.0 m 外的百叶箱内，距地面高度 1.5 m。

1.1.2 气象台站数据

气象站数据包含实时数据和日最高温度数据，实时数据是指进行粮情检测同一时间的气象台站数据，日最高气温是指粮情检测当日的气象台站最高气温。由于高大平房仓采取保温措施以及粮堆的导热系数小，导致仓温、粮温日变化较小，因此本文采用气象台站日最高温度与粮温检测时间的仓温和每层最高粮温进行数据分析。

1.2 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 整理数据，Minitab 进行数据相关性分析。

2 结果与分析

2.1 气象台站实时温度与粮库外温数据分析

2.1.1 气象台站实时温度与粮库外温数据的对比分析

三个粮库的温度对比如图 1 所示，台站温度与粮库温度变化规律相同，图 c 重合度最高，图 b 最低，台站温度多低于粮库外温，桦川台站 93.4% 的温度低于乙库外温，汤原台站 90% 的温度低于丙库外温，佳木斯台站只有 58.1% 的温度低于甲

库外温；台站温度与粮库外温的差值峰值为 $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，差值谷值为 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大差值平均值出现在乙库，为 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可能是因为外温传感器安装或维护不规范，造成测量外温数据偏大。

2.1.2 气象台站实时温度数据与粮库外温的相关分析

气象台站实时温度与粮库外温的相关性见表 2。气象台站实时温度与粮库外温均呈极显著正相关关系，相关系数达到 0.996 以上，回归方程回归系数均为正且接近 1，截距均为正，乙库截距最大；可见，台站温度可替代粮库外温进行温度预报和粮库三温分析。

2.2 气象台站实时温度与粮库仓温、平均粮温的对比分析

仓储部门利用三温曲线图法分析粮温的时间变化规律，其中三温为粮库外温、仓温和平均粮温。图 2 以台站实时温度代替粮库外温，与仓温、粮温进行三温分析。从图 2 来看，三个粮库仓温、平均粮温与台站实时温度变化规律基本相同，10 月至次年 3 月平均粮温、仓温高于台站温度，平

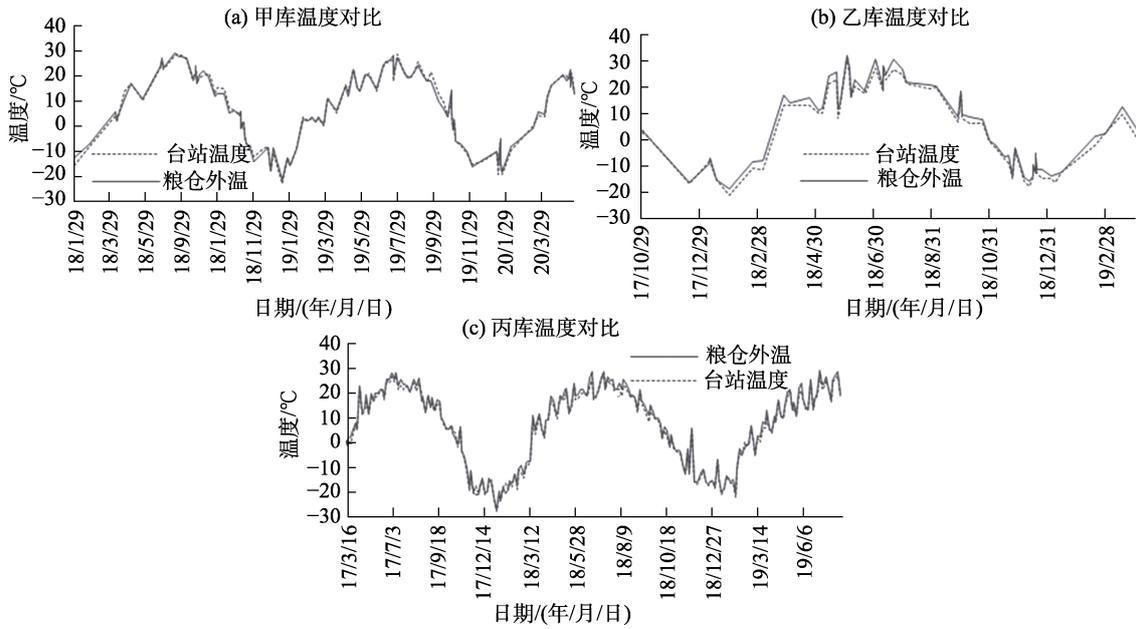


图 1 气象台站实时温度与粮库外温对比分析图

Fig.1 Comparative analysis diagram of real-time temperature of meteorological stations and external temperature of grain depot

表 2 气象台站实时温度与粮库外温相关分析

Table 2 Correlation analysis between real-time temperature of meteorological stations and external temperature of grain depot

粮库	相关系数	回归方程	样本数
甲库	0.996**	$Y=0.133+0.982*X$	105
乙库	0.996**	$Y=1.51+1.02*X$	61
丙库	0.997**	$Y=0.74+1.02*X$	219

注：表中变量 X 为气象台站数据，变量 Y 为粮库数据；

**表示通过 0.01 显著性水平检验。

Note: Variable X in the table is meteorological station data, variable Y is grain depot data. ** means through 0.01 significance level test.

均粮温>仓温>台站温度，夏季平均粮温、仓温低于台站温度，平均粮温<仓温<台站温度，仓温大多低于 25 °C，且滞后台站温度 1 d，平均粮温在±10 °C 之间，年变化幅度较小，且有滞后性，三个粮库平均粮温极值出现时间滞后于台站温度极值约 30 d。

2.3 气象台站日最高气温与粮库仓温、各层最高粮温的相关分析

根据低温、准低温储粮要求，粮堆平均温度

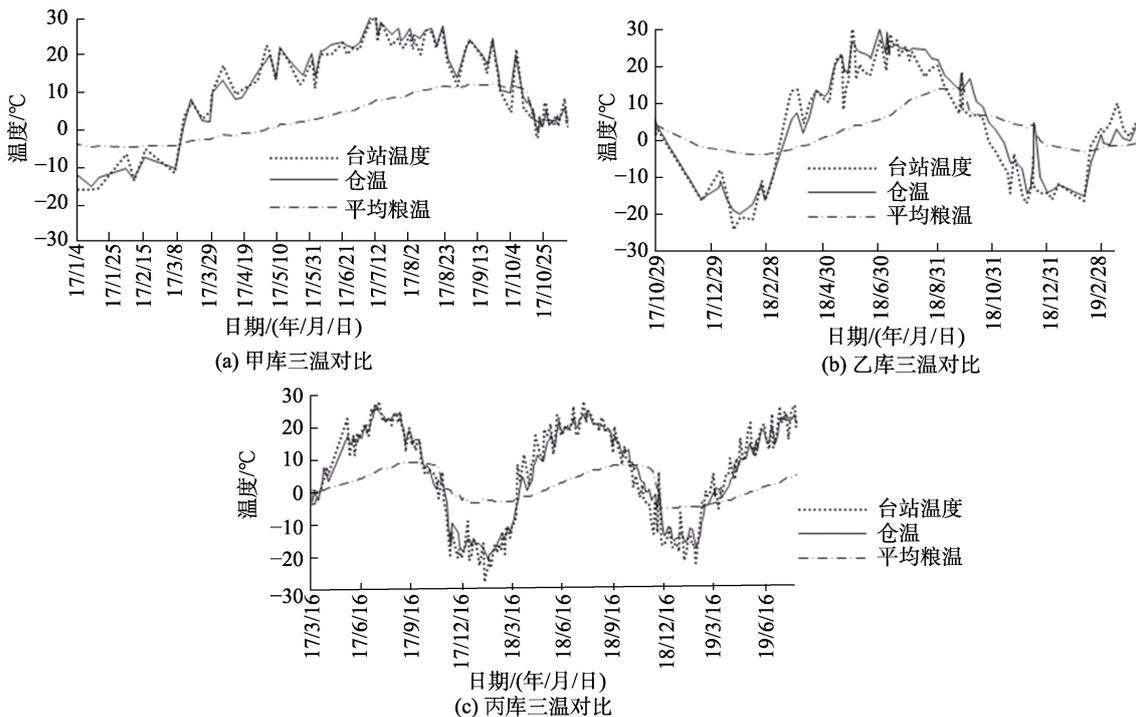


图 2 台站实时温度与粮库仓温、平均粮温对比分析图

Fig.2 Comparative analysis diagram of real-time temperature of station, warehouse temperature and average grain temperature

表 3 气象台站日最高气温与粮库仓温、粮温相关性

Table 3 Correlation between the daily maximum temperature at meteorological stations and grain depot temperature and grain temperature

粮库	相关因子	仓温	表层最高粮温	二层最高粮温	三层最高粮温	四层最高粮温	五层最高粮温	样本数
甲库	滞后天数/d	1	11	35	45	75	74	
	相关系数	0.961*	0.912	0.833	0.783	0.733	0.608	84
	回归方程	$Y = -4.73 + 1.04 * X$	$Y = 1.61 + 0.876 * X$	$Y = 2.25 + 0.728 * X$	$Y = -1.19 + 0.539 * X$	$Y = 0.10 + 0.24 * X$	$Y = 2.79 + 0.113 * X$	
乙库	滞后天数/d	1	28	64	35	35		
	相关系数	0.970*	0.934	0.801	0.887	0.878		61
	回归方程	$Y = -2.51 + 0.958 * X$	$Y = 4.94 + 0.64 * X$	$Y = 5.64 + 0.341 * X$	$Y = 6.84 + 0.422 * X$	$Y = 6.59 + 0.435 * X$		
丙库	滞后天数/d	1	32	71	70	46		
	相关系数	0.971*	0.935	0.801	0.742	0.807		219
	回归方程	$Y = -4.57 + 0.923 * X$	$Y = 2.98 + 0.597 * X$	$Y = 2.38 + 0.325 * X$	$Y = 0.633 + 0.2 * X$	$Y = 2.78 + 0.202 * X$		

注：表中变量 X 为气象台站数据，变量 Y 为粮库数据；*表示通过 0.05 显著性水平检验。

Note: Variable X in the table is meteorological station data, variable Y is grain depot data. * means through 0.05 significance level test.

常年保持在 20 ℃ 及以下，局部最高粮温不高于 25 ℃，黑龙江省夏季 6~8 月气温升高，外界气温超过 25 ℃ 会影响仓温变化，从而影响到粮温，仓温的变化滞后于外温变化，粮温的变化滞后于仓温变化。为保证夏季粮食存储安全，以气象台站日最高气温与粮库仓温、各层最高粮温进行相关分析，建立回归方程，预测仓温和最高粮温变化。

表 3 中可以看出，三个粮库仓温与气象台站日最高气温的相关系数均达到 0.96 以上，仓温均滞后气象台站日最高气温 1 d，回归方程的截距均为负，回归系数均为正，仓温与日最高温呈正相关且随日最高气温的升高而升高。根据回归方程得出，当佳木斯台站日最高气温达到 29 ℃，汤原台站达到 32 ℃，桦川台站达到 30 ℃，相应的粮库仓温达到 25 ℃。

甲库表层粮温检温线铺设深度与其他粮库不同，导致其表层粮温变化与其他粮库规律略有不同。粮库表层最高粮温与气象台站日最高气温相关性最好，相关系数均在 0.9 以上；甲库表层最高粮温滞后于佳木斯台站日最高气温 11 d，丙库和乙库分别滞后于气象台站日最高气温约 30 d；三个粮库回归方程的截距和回归系数均为正，表层最高粮温与日最高气温呈正相关，随日最高气温的升高而升高；根据回归方程得出，佳木斯台站日最高气温达到 27 ℃，汤原台站达到 37 ℃，桦川台站达到 31 ℃，对应粮库表层最高粮温达到 25 ℃。

甲库第二至五层最高粮温与台站日最高气温相关系数均小于 0.9，且逐层降低，滞后天数逐层

增加，四层和五层最高粮温滞后天数相近，由于第二层粮温检测线铺设深度浅，根据回归方程计算得出，台站日最高气温达到 29 ℃，对应的第二层最高粮温达到 25 ℃，气温对三至五层最高粮温影响较小，台站日最高气温达到 40 ℃ 以上，对应的各层最高粮温达到 25 ℃；丙库和乙库第二层最高粮温规律相同，相关系数一致，滞后天数、回归方程相近，根据回归方程计算得出，气温对第二至四层粮温影响较小，日最高气温达到 40 ℃ 以上，对应的各层最高粮温达到 25 ℃。

2.4 气象台站相对湿度与粮库外湿、仓湿的对比分析

在粮食仓储过程中根据大气湿度条件开展通风降湿、提湿增质等生产活动。对气象台站相对湿度与粮库外湿、仓湿进行对比分析，如图 3 所示，佳木斯、汤原、桦川气象台站相对湿度略高于粮库外湿，年变化规律相同，极小值出现在春季，极大值出现在夏季，台站相对湿度与粮库外湿差值较小，三个粮库仓湿冬、春季升高，高于粮库外湿和气象台站相对湿度，夏季降低，低于外湿和台站相对湿度，三个粮库仓湿均在夏季达到最低值，冬季达到最高值。为防止高温高湿导致粮食霉变，三个粮库仓湿均控制在 70% 以下，丙库部分仓湿数据高于 70%，可能是由于粮库提湿增质等生产活动造成的。

由于粮食仓储对仓湿有标准规范，仓内均有自动控湿设备，可人为调控仓湿，不受仓外相对湿度影响，因此不做相关性分析。

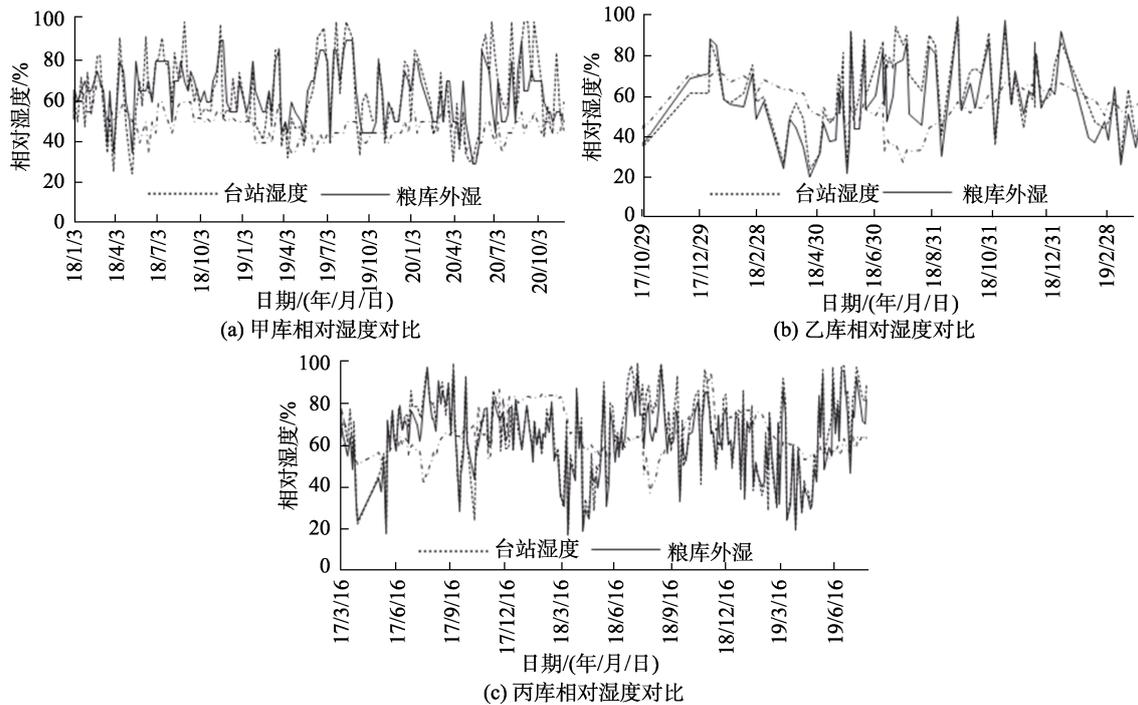


图3 气象台站相对湿度与粮库外湿、仓湿的对比分析

Fig.3 Comparative analysis of relative humidity between meteorological stations and external humidity and warehouse humidity of grain depot

3 讨论

黑龙江省位于储粮生态第三区,属于低温高湿储粮区,在粮食仓储过程中主要关注夏季高温和通风期大气相对湿度。目前粮食仓储中一般采用控温、控湿储粮技术,控制仓温、粮温、仓湿和粮食水分,Deepak Kumar^[13]认为大多数储粮生物体在70%以上的相对湿度、20~40℃的温度下生长迅速,产生大量的热量和水分,导致在粮堆内部形成发热点,对整仓粮食造成危害;王士臣^[14]研究表明,在7~8月控温期内,仓温控制在16~20℃,可延缓粮食品质劣变;祁智慧^[15]提出仓库内粮堆表层40cm深处的平均粮温在5~6月处于20℃左右,6~9月采取空调控温,平均粮温控制在20~25℃;梁兆岷^[16]等开展了高大平房仓内环流控温技术准低温储藏试验,研究表明应用了内环流控温技术的试验仓仓温和表层粮温均保持在25℃以下,平均粮温控制在20℃以下,符合准低温储粮要求,宋峰^[17]等研究表明仓温控制在25.0℃以内,表层粮温控制在22.0℃以内,有利于粮食安全度夏;余昆^[18]等提出仓湿超过允许上限85%时,必须采取措施降湿;李兴军^[19]等研究发现秋、冬季通风时期大气相对湿度北方储粮区为52.0%~68.5%。

本研究通过对气象台站与粮库的温、湿度进行对比和相关分析,发现气象台站温湿度数据与粮库外部温湿度变化规律相同,相关系数达0.996,通过回归方程计算出气象台站温度超过28℃会影响粮食安全,应及时采取措施降温。黑龙江省夏季气温极值超过40℃的高温天气出现概率极小,佳木斯地区气象台站建站以来历史气温最高极值为38.9℃,综合高大平房仓不同通风降温措施、粮食种类、粮食热容率、粮库储粮现代化发展因素等,结合气象服务高温指标的通用性、可行性,粮食仓储气象服务高温指标确定为28℃,开仓通风降湿的条件为空气湿度低于70%。气象服务指标可为服务部门制作针对性、精细化、量化粮食仓储气象服务产品奠定基础,为粮食存储部门规避不利气象条件或提前采取有效的预防措施避免经济损失或利用有利的气象条件节省成本,保证粮食储藏安全提供依据。

4 结论

本研究通过对气象台站温、湿度与粮库温、湿度进行对比和相关分析,结果表明:

(1)气象台站实时温、湿度数据与粮库外温、外湿变化规律相同,台站温度大多低于粮库外温,台站相对湿度高于粮库外湿,数据差值较小,温

度相关系数在 0.996 以上。

(2) 气象台站日最高温度与粮库仓温、表层最高粮温相关性较好, 相关系数达到 0.90 以上, 仓温变化滞后于台站日最高气温变化 1 d, 表层最高粮温滞后约 30 d, 气象台站日最高气温与仓温回归方程的截距均为负, 各层最高粮温为正, 通过回归方程根据台站日最高气温预测仓温和各层最高粮温, 满足低温、准低温储粮要求, 回归方程计算气象台站日最高气温低于 28 °C。

(3) 气象台站相对湿度略高于粮库外湿, 极小值出现在春季, 极大值出现在夏季, 三个粮库仓湿冬、春季高, 夏季低, 三个粮库仓湿均控制在 70% 以下。

(4) 粮食仓储气象服务高温指标确定为 28 °C, 开仓通风降湿的条件为空气湿度低于 70%。

参考文献:

- [1] JAYAS D S. Storing grains for food security and sustainability[J]. *Agricultural Research*, 2012, 1(1): 21-24.
- [2] 胡士义, 胡小康, 杜志国. 浅析辽阳地区粮食贮藏、晾晒与气象[J]. *科技风*, 2015, (4):219.
HU S Y, HU X K, DU Z G. Analysis on grain storage, drying and meteorology in Liaoyang area[J]. *Science and Technology Wind*, 2015, (4):219.
- [3] 刘慧, 周建新, 方勇, 等. 不同储藏温、湿度对稻谷霉菌生长的影响及生长预测模型的建立[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 110-122.
LIU H, ZHOU J X, FANG Y, et al. Optimization of microwave treatment conditions for rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(2): 110-122.
- [4] 钟天华, 吴建河, 刘平, 等. 储粮平房仓的“三温”年变化规律研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 378-382.
ZHONG T H, WU J H, LIU P, et al. A study of the annual temperature changing law in the grain warehouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 378-382.
- [5] 于宏敏, 马旭清. 粮食贮藏综合气象指标的初步研究[J]. *黑龙江气象*, 1994, (1): 32-33.
YU H M, MA X Q. Preliminary study on comprehensive meteorological indexes of grain storage[J]. *Heilongjiang Meteorology*, 1994, (1): 32-33.
- [6] 粮油储藏技术规范: GB/T 29890—2013[S].
Technical specification for grain and oil storage: GB/T 29890—2013 [S].
- [7] 张前, 周永杰, 辛立勇, 等. 高大平房仓储粮温度变化规律及数学模型研究[J]. *粮食储藏*, 2003, 32(6): 25-30.
ZHANG Q, ZHOU Y J, XIN L Y, et al. Chang law and maths model of temperature of stored grain in large warehouse[J]. *Grain Storage*, 2003, 32(6): 25-30.
- [8] 卢献礼, 杨卫华, 杨世集, 等. 高温高湿生态区高水分玉米降水保质储藏试验[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2016(3): 27-29.
LU X L, YANG W H, YANG S J, et al. Experiment on precipitation and quality preservation of high moisture Maize in high temperature and high humidity ecological area[J]. *Grain and Oil Storage Technology Communication*, 2016(3): 27-29.
- [9] 李兴军, 吴子丹. 粮堆平衡绝对湿度和露点温度的查定方法[J]. *粮食加工*, 2011, 36(4): 34-37.
LI X J, WU Z D. Determination of grain stack's equilibrium absolute humidity and dewpoint tempertaure[J]. *Grain Processing*, 2011, 36(4): 34-37.
- [10] 李兴军, 张元娣, 王双林, 等. 谷物安全水分估算[J]. *粮食加工*, 2011, 36(3): 41-45.
LI X J, ZHANG Y D, WANG S L, et al. Calculation of safe storage moisture content of cereal grains in China with the fitted MCPE model[J]. *Grain Processing*, 2011, 36(3): 41-45.
- [11] 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(1): 52-56.
XIE J J, WANG X G, HUANG Z J, et al. Discussion on diurnal variation law of temperature and humidity in different warehouse types[J]. *Grain Storage*, 2009(1): 52-56.
- [12] 段珊珊, 杨卫东, 肖乐, 等. 一种基于气象数据的仓储粮堆表层温度预测方法[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 110-122.
DUAN S S, YANG W D, XIAO L, et al. A method for predicting surface temperature of storage grain depot based on meteorological data[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(2): 110-122.
- [13] DEEPAK K, PRASANTA K. Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries[J]. *Foods*, 2017, 1(6): 8.
- [14] 王士臣, 李树欢. 高寒地区控温储粮技术探讨[J]. *粮食储藏*, 2019, 46(5): 52-54.
WANG S C, LI S H. Discussion on temperature control and grain storage technology in Alpine Area[J]. *Grain Storage*, 2019, 46(5): 52-54.
- [15] 祁智慧, 高玉树, 唐芳, 等. 北京地区粮堆表层温度、水分、气体监测数据分析[J]. *粮食储藏*, 2017, 46(2): 9-14.
QI Z H, GAO Y S, TANG F, et al. Analysis of temperature, water content and CO₂ concentration monitoring data in grain bulk[J]. *Grain Storage*, 2017, 46(2): 9-14.
- [16] 梁兆岷, 沈松, 王旭峰, 等. 高大平房仓内环流控温技术准低温储粮试验 [J]. *农业工程技术*, 2019, 39(2): 25-26.
LIANG Z M, SHENG S, WANG X F, et al. Quasi low temperature grain storage test of inner loop flow temperature control technology in large bungalow warehouse [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2019, 39(2): 25-26.
- [17] 宋锋, 雷彬, 莫魏林, 等. 高大平房仓控温储粮技术应用研究 [J]. *现代食品*, 2015(22): 30-37.
SONG F, LEI B, MO W L, et al. Application research for the temperature control technology of grain storage in large warehouse [J]. *Modern Food*, 2015(22): 30-37.
- [18] 余昆, 马述蓉, 郭长征. 粮食平衡水分计算法在储粮机械通风技术中的应用[J]. *粮食加工*, 2007, 32(6): 73-91.
YU K, MA S R, GUO C Z. Study on the characteristic of texture of breakfast cereals—crispness changes in ingredients of materials during extrusion[J]. *Grain Processing*, 2007, 32(6): 73-91.
- [19] 李兴军, 吴晓明, 殷树德, 等. 平衡水分理论和通风窗口指导谷物降温通风[J]. *粮油食品科技*, 2014, 22(3): 98-101.
LI X J, WU X M, MA Z Y, et al. Lowering paddy temperature by equilibrium moisture theory and ventilation window[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2014, 22(3): 98-101. 完