

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.023

尹国彬. 一种利用空气比焓及绝对湿度选择粮食降水通风时机的方法[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 196-202.

YIN G B. A method for choosing the opportunity of reducing grain moisture ventilation by specific enthalpy and absolute humidity of air[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 196-202.

# 一种利用空气比焓及绝对湿度选择粮食降水通风时机的方法

尹国彬

(中国华粮物流集团北良有限公司, 辽宁 大连 116001)

**摘要:** 提出了一种利用空气比焓及绝对湿度选择粮食降水通风时机的新方法, 即以空气比焓为 X 轴, 以空气比焓对应的绝对湿度为 Y 轴, 通过添加粮食解吸平衡绝对湿度线、允许降水通风区间线等绘制降水通风时机选择图, 并用该图选择粮食降水通风时机。与常见空气焓湿图相比, 所绘制粮食降水通风时机选择图融入了行业标准规定的允许粮食降水通风条件参数, 直观呈现出不同温度、水分的粮食在不同温度、相对湿度和比焓空气中的允许降水通风区间分布等, 方便使用者选择粮食降水通风时机和开展相关研究, 对确保储粮安全、改善粮食降水通风效果和节约能耗成本等有很好的辅助作用。

**关键词:** 粮食; 空气; 比焓; 绝对湿度; 降水通风

中图分类号: TS210.7; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0196-07

网络首发时间: 2024-11-07 15:55:39

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241107.1500.022>

## A Method for Choosing the Opportunity of Reducing Grain Moisture Ventilation by Specific Enthalpy and Absolute Humidity of Air

YIN Guo-bin

(China Grains & Logistics Coporation Beiliang Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116001, China)

**Abstract:** In this paper, a new method has been proposed to determine the timing of reducing grain moisture ventilation by specific enthalpy and absolute humidity of air. Specifically, a chart for selecting the timing of aeration for grain drying has been plotted with the air specific enthalpy as the x-axis and the corresponding absolute humidity as the y-axis, by adding lines representing the equilibrium absolute humidity for grain desorption and the allowable range for aeration. This chart can then be used to select the timing of aeration for grain drying. Compared with the commonly used air enthalpy-humidity chart, the proposed chart incorporated the parameters for allowable conditions for grain aeration specified in national industry standards. It visually presented the allowable range for aeration at different grain temperatures, moisture

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 全国粮食和物资储备技能大师工作室项目(国粮办人[2023]269号)

Supported by: National Food and Strategic Reserves Administration Skills Master Studio Project (Guoliang-BanRen[2023] No.269)

第一作者: 尹国彬, 男, 1979 年出生, 学士, 正高级工程师, 研究方向为粮食仓储物流, E-mail: yinguobin@126.com

contents, air temperatures, relative humidities, and specific enthalpies, facilitating users in selecting the timing of aeration and conducting related research. This method could effectively assist in ensuring grain storage safety, improving the efficiency of aeration for grain drying, and reducing energy consumption costs.

**Key words:** grain; air; specific enthalpy; absolute humidity; reducing grain moisture ventilation

目前,选择粮食降水通风时机时主要参考《储粮机械通风技术规程》<sup>[1]</sup>、《粮油储藏 谷物冷却机应用技术规程》<sup>[2]</sup>、《平房仓横向通风技术规程》<sup>[3]</sup>、《粮库智能通风控制系统》<sup>[4]</sup>等相关标准,通过查阅《粮食储藏学》<sup>[5]</sup>、《储粮新技术教程》<sup>[6]</sup>、《储粮机械通风技术》<sup>[7]</sup>、《(粮油)仓储管理员》<sup>[8-9]</sup>等专业教材及《粮食平衡水分理论与实践》<sup>[10]</sup>等相关研究成果<sup>[11-15]</sup>。通过查阅上述资料和测算相关数据的方法选择粮食降水通风时机固然可行,但需要非常全面和深入的专业知识做保障,且当粮食温度、水分或空气温度、相对湿度等发生变化时需要反复查阅相关资料和测算相关数据,过程非常复杂费时,选择粮食降水通风时机很不方便,因此,研究更方便广大一线粮食储藏技术人员和管理人员使用的粮食降水通风时机选择新方法,对他们更好的开展安全储粮和节粮减损工作很有意义。

从《储粮机械通风技术规程》<sup>[1]</sup>、《粮库智能通风控制系统》<sup>[4]</sup>、《粮食储藏学》<sup>[5]</sup>可知,允许粮食降水通风的条件参数为粮堆温度、解吸平衡绝对湿度和空气露点温度、绝对湿度;另从空气热力学相关知识可知,空气比焓可以理解为包含 1 kg 干空气的湿空气具有的热含量,是空气的一个重要热力学状态参数,与空气温度、相对湿度和绝对湿度有关。不同焓值的空气对粮食降水通风的影响不同,本文以选择粮温分别为 25 °C 和 5 °C,水分为 15% 的玉米在不同比焓空气中的降水通风时机为例,通过查定或计算的这两种温度的玉米解吸平衡绝对湿度 ( $ARH_{\text{解吸}-1\%}$ ) 值和空气绝对湿度 ( $P_{\text{气湿}}$ )、温度、相对湿度、比焓等数据绘制了它们的降水通风时机选择图,并分析了它们在不同温湿度空气中的降水通风区间分布和玉米  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  值、空气  $P_{\text{气湿}}$  及二者差值随空气温湿度、比焓的变化情况,提出了一种利用空气比焓及绝对湿度选择粮食降水通风时机的新方法,供参考。

## 1 方法建立

### 1.1 收集和整理数据

根据拟开展粮食降水通风的作业方式、时间、地点,结合天气预报数据预测拟开展粮食降水通风期间空气的最低、最高温度和最低、最高相对湿度,收集和整理不同温度、相对湿度空气的比焓和绝对湿度数据。研究本方法所用的空气温度、相对湿度、比焓、绝对湿度等数值取自空气为 1 个标准大气压时的 VAISALA 计算器计算结果。研究本方法所用的  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  数据依据《主要粮种不同温度和含水率(%,湿基)下粮堆解吸平衡绝对湿度对照表》<sup>[3]</sup>和《玉米平衡绝对湿度曲线图》<sup>[5]</sup>查定,允许降水通风条件依据《机械降水通风的操作条件》<sup>[1,4]</sup>设定。

### 1.2 绘制降水通风时机选择图

根据收集和整理的拟开展粮食降水通风期间空气的最低、最高温度和最低、最高相对湿度,设定需要绘制的降水通风时机选择图的空气温度、相对湿度范围和精度。降水通风时机选择图的大气温度、相对湿度范围等于或大于预测空气最低、最高温度和相对湿度即可,精度视拟开展的粮食降水通风作业需要(分析降水通风区间趋势、选择降水通风条件等)而定;再按照设定的降水通风时机选择图空气温度、相对湿度范围和精度,以不同温湿度的空气比焓为 X 轴,以不同温湿度空气比焓对应的绝对湿度值为 Y 轴绘制降水通风时机选择图。

### 1.3 添加粮食 $ARH_{\text{解吸}-1\%}$ 线

根据查定的粮食  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  值,在降水通风时机选择图中添加粮食  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  线。因粮食  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  在粮食水分和粮温(或粮食所在的空气温度)确定时为定值,与空气比焓无关,故在某气温下的粮食  $ARH_{\text{解吸}-1\%}$  线在降水通风选择图中为一条平行于空气比焓(X轴)的线段。

### 1.4 添加允许通风降水区间线

在降水通风时机选择图中，绘出等温线（斜向上的线段）相对湿度为 0% 的垂线，并从该垂线与  $ARH_{解吸-1\%}$  的交点，至  $ARH_{解吸-1\%}$  与  $P_{气湿}$  交点间划出允许降水通风的区间线。因允许进行降水通风的区间需满足空气绝对湿度小于粮堆解吸平衡绝对湿度（ $P_{气湿} < ARH_{解吸-1\%}$ ，气温大于粮温时

用粮温查定  $ARH_{解吸-1\%}$  值，气温小于等于粮温时用气温查定  $ARH_{解吸-1\%}$  值），且当气温大于粮温时需满足粮温大于空气露点温度（ $t_{粮} > t_{气露}$ ）<sup>[1,4]</sup>，故当气温大于粮温时应注意先测得空气温度、相对湿度和粮温并据此查定空气露点温度，将  $t_{粮} \leq t_{气露}$  时的  $P_{气湿} < ARH_{解吸-1\%}$  区间排除。

粮食降水通风时机选择图绘制流程如图 1。

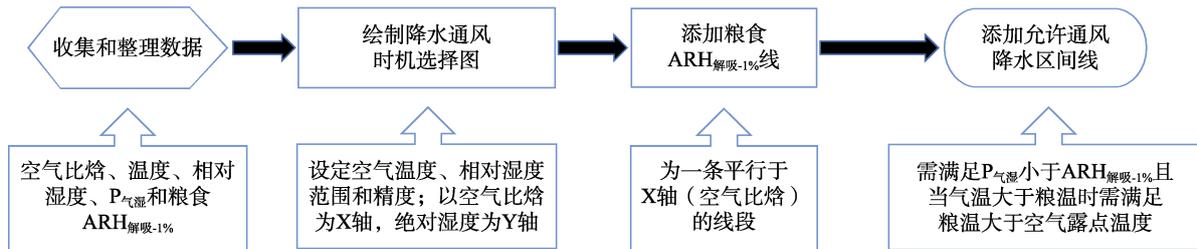


图 1 降水通风时机选择图绘制流程

Fig.1 The drawing process for selecting the timing of reducing grain moisture ventilation

## 2 算例与分析

### 2.1 粮温为 25 °C，水分为 15% 玉米的降水通风时机选择简图

#### 2.1.1 绘制降水通风时机选择图

拟定对粮温为 25 °C，水分为 15% 的玉米进行间歇式降水通风（即从春季到夏季时间里选择多个空气温湿度、比焓适宜的时间进行短时降水通风），期间可能出现的空气最低气温为 10 °C，最高气温为 35 °C，最低相对湿度为 0%，最高相对湿度为 100%，基于大气温度、相对湿度范围较大等考虑，设定所需的降水通风时机选择图大气温度、相对湿度范围分别为 10 °C~35 °C、0%~100%，精度为 5 °C、20%，绘制的降水通风时

机选择图如图 2。

#### 2.1.2 添加 $ARH_{解吸-1\%}$ 线和允许降水通风区间线

依据《主要粮种不同温度和含水率（%，湿基）下粮堆解吸平衡绝对湿度对照表》<sup>[3]</sup>查定图 1 中各气温下玉米  $ARH_{解吸-1\%}$  值，如表 1。

在图 2 中添加  $ARH_{解吸-1\%}$  线，找出各温度空气  $P_{气湿}$  线与  $ARH_{解吸-1\%}$  线的交点，并在该交点到该温度空气相对湿度为 0% 的比焓线（X 轴）之间添加允许降水通风区间线如图 3。

#### 2.1.3 查询或计算交点处空气比焓、相对湿度及气温高于粮温时交点处空气的露点温度

用交点处的空气  $P_{气湿}$  值（气温低于粮温时为 25 °C、水分为 15% 玉米该气温的  $ARH_{解吸-1\%}$ ；气

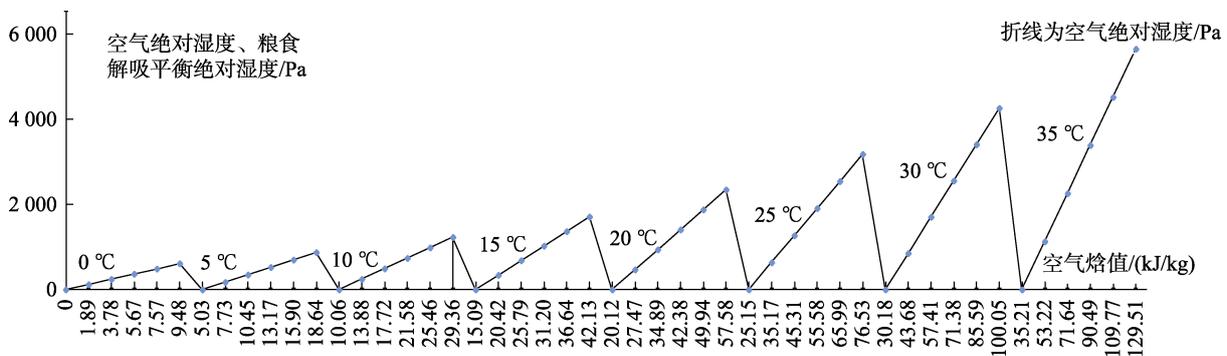


图 2 降水通风时机选择简图

Fig.2 The simple chart for selecting the timing of reducing grain moisture ventilation

表 1 粮温为 25 °C、水分为 15%玉米 ARH<sub>解吸-1%</sub>值表

Table 1 Maize ARH<sub>desorption-1%</sub> value table with grain temperature 25 °C and moisture 15%

查定条件 1 (气温/°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
查定条件 2 (粮食水分/%)	14							
查定结果 (ARH <sub>解吸-1%</sub> 值/mmHg)	2.8	4.1	5.9	8.5	13.3	16.8	23.2	31.7
换算结果 (ARH <sub>解吸-1%</sub> 值/Pa)	373.24	546.53	786.47	1 133.05	1 772.89	2 239.44	3 092.56	4 225.61

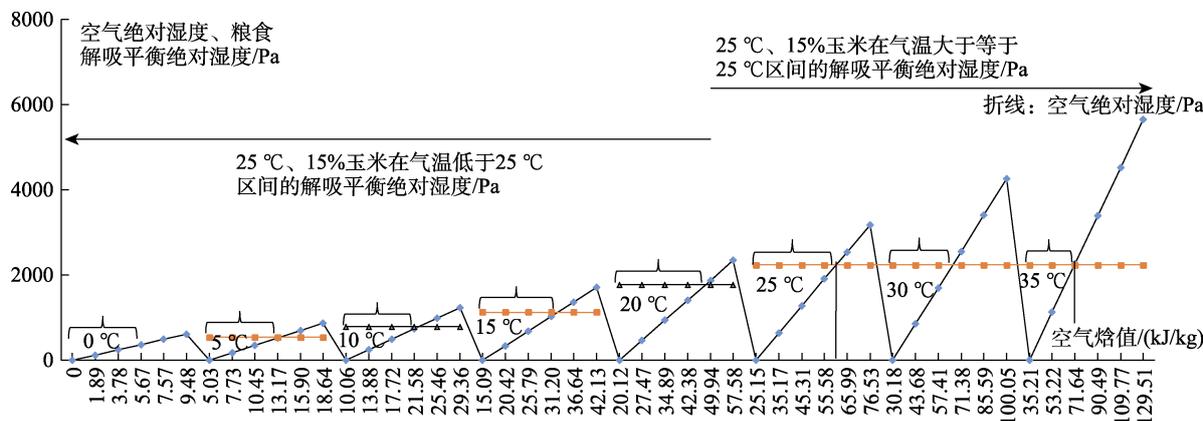


图 3 降水通风时机选择简图 (添加 ARH<sub>解吸-1%</sub>线和允许降水通风区间线)

Fig.3 The simple chart for selecting the timing of reducing grain moisture ventilation (Add ARH<sub>desorption-1%</sub> line and allowed educing grain moisture ventilation line)

温高于粮温时为 25 °C、水分为 15%玉米在气温为 25 °C 的 ARH<sub>解吸-1%</sub>)及气温,通过查定或计算

得出交点处空气比焓、相对湿度和气温高于粮温时交点处空气露点温度如表 2。

表 2 玉米与空气绝对湿度线交点值表

Table 2 Intersection value table of maize ARH<sub>desorption-1%</sub> line and Air P<sub>气湿</sub> line

计算条件 1 (气温/°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
计算条件 2 (空气 P <sub>气湿</sub> 值/Pa)	373.24	546.53	786.47	1 133.05	1 772.89	2 239.44	2 239.44	2 239.44
计算结果 1 (空气比焓/(kJ/kg))	5.75	13.50	22.32	32.88	45.44	60.95	66.11	71.27
计算结果 2 (相对湿度/%)	60.83	62.20	63.79	66.17	68.11	70.36	52.51	39.61
计算结果 3 (空气露点温度/°C, 气温高于粮温时)	-	-	-	-	-	19.23	19.23	19.23

### 2.1.4 检验降水通风时机选择图的准确性

从图 3 可见,各气温对应的允许降水通风区间内(交点之前)空气的 P<sub>气湿</sub>值、比焓值、相对湿度值均小于交点处空气的 P<sub>气湿</sub>值、比焓值、相对湿度值,交点处空气的 P<sub>气湿</sub>值、比焓值、相对湿度值均最大;空气在 25 °C 及以上的交点处空气露点温度均小于玉米粮温 25 °C,本方法绘制的降水通风区间符合《机械降水通风的操作条件》<sup>[1,4]</sup>中的允许降水通风条件。

### 2.1.5 添加 0 °C 以上任意粮温和任意水分玉米在 0 °C 以上任意气温的允许通风降水区间线

因我国现行的降水通风相关标准<sup>[1-4]</sup>暂未给出 0 °C 以下的粮食解吸绝对湿度的查定方法,故

本方法所绘制的降水通风时机选择图目前适用范围为粮食和气温均高于 0 °C 时的降水通风时机选择。用本方法添加适用范围内的任意粮温、任意水分和任意气温的允许通风降水区间线,时需先计算或查定出该温度空气的对应精度比焓值、绝对湿度值并在降水通风时机选择图中添加空气 P<sub>气湿</sub>线,再结合粮温、气温的高低并依据《主要粮种不同温度和含水率(%,湿基)下粮堆解吸平衡绝对湿度对照表》<sup>[3]</sup>、《玉米平衡绝对湿度曲线图》<sup>[5]</sup>等查定或测算出粮食在该温度下的 ARH<sub>解吸-1%</sub>值并将 ARH<sub>解吸-1%</sub>值添加到降水通风时机选择图中。以添加粮温为 15.3 °C、水分 14.8%玉米在气温为 27.1 °C 时的允许通风降水区间线为例,需先计算

或查定出 27.1 °C 空气的对应精度(本例精度设定为相对湿度 10%)比焓、绝对湿度(表 3)并将其比焓值、绝对湿度绘制到降水通风时机选择图中,再查定粮温为 15.3 °C、水分 14.8% 玉米在气温为 27.1 °C 时的 ARH<sub>解吸-1%</sub> 值(粮温低于气温,取粮温为 ARH<sub>解吸-1%</sub> 值,水分取 13.8%,测量查定结果为 8.3 mmHg)并在降水通风时机选择图添加 ARH<sub>解吸-1%</sub> 线,如图 4。

查定粮温为 15.3 °C、水分 14.8% 玉米在气温为 27.1 °C 时的 ARH<sub>解吸-1%</sub> 值如表 3。

## 2.2 粮温为 5 °C, 水分为 15% 玉米的降水通风时机选择精细图

### 2.2.1 绘制降水通风时机选择精细图

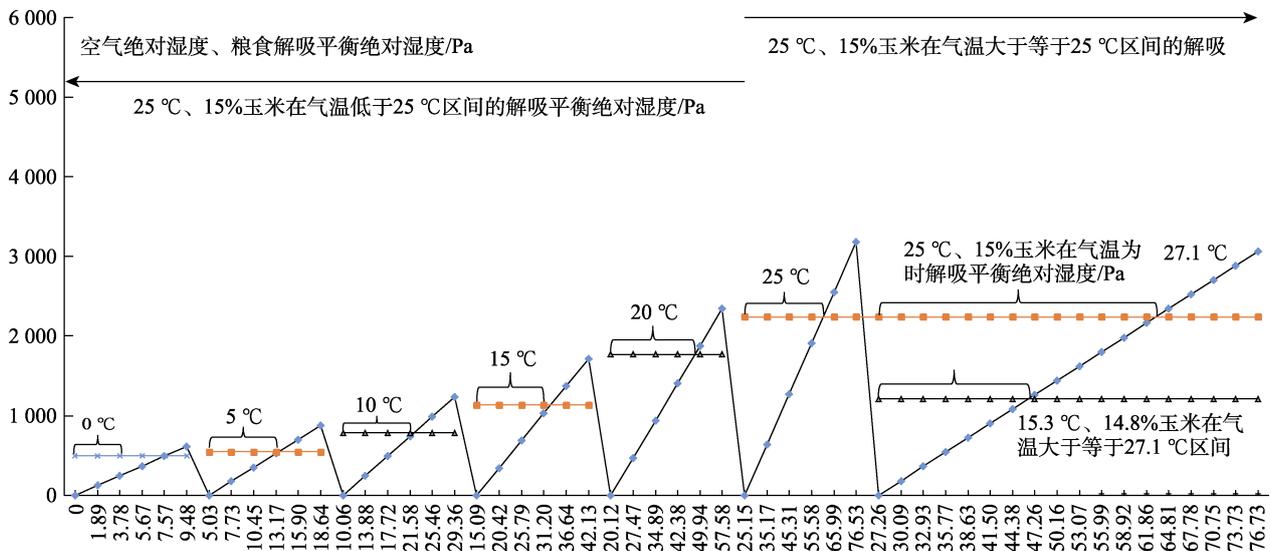
拟定对粮温为 5 °C, 水分为 15% 的玉米进行连续式降水通风(即在空气温度变化不大的几天内进行连续式降水通风), 期间可能出现的空气最低气温为 3 °C, 最高气温为 7 °C, 最低相对湿度

为 0%, 最高相对湿度为 100%, 按照 2.1 方法将精度提高到空气温度为 1 °C、相对湿度为 5% 绘制的降水通风时机选择精细图, 并添加 ARH<sub>解吸-1%</sub> 线和允许降水通风区间线, 如图 5。

2.2.2 查定交点处空气比焓值、相对湿度和 P<sub>气湿</sub> 值  
通过降水通风时机选择精细图, 可直接查定交点处的空气比焓、相对湿度和 P<sub>气湿</sub> 等近似值如表 4。

### 2.2.3 检验降水通风时机选择图的准确性

从图 5 可见, 各气温对应的允许降水通风区间内(交点之前)空气的 P<sub>气湿</sub> 值、比焓值、相对湿度值均小于交点处空气的 P<sub>气湿</sub> 值、比焓值、相对湿度值, 交点处空气的 P<sub>气湿</sub> 值、比焓值、相对湿度值均最大。另查定空气在 5 °C 及以上的交点处空气露点温度均小于玉米粮温 5 °C, 本方法绘制的降水通风区间符合《机械降水通风的操作条件》<sup>[1,4]</sup> 中的允许降水通风条件。



注: 添加 0 °C 以上任意粮温和任意水分玉米在 0 °C 以上任意气温的允许通风降水区间线。

Note: Add T allowed educing grain moisture ventilation line of arbitrary temperature of air and corn and arbitrary moisture of maize above 0 °C.

图 4 降水通风时机选择简图

Fig.4 The simple chart for selecting the timing of reducing grain moisture ventilation

表 3 气温为 27.1 °C 时的空气比焓值、P<sub>气湿</sub> 值表

Table 3 The moist air specific enthalpy and P<sub>psychrometric</sub> value table with air temperature 27.1 °C

27.1 °C 空气相对湿度/%	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
27.1 °C 空气上述相对湿度对应的比焓值/(kJ/kg)	27.26	30.09	32.93	35.77	38.63	41.50	44.38	47.26	50.16	53.07	55.99
27.1 °C 空气上述相对湿度对应的 P <sub>气湿</sub> 值/Pa	0	180	360	541	721	901	1 081	1 261	1 442	1 622	1 802
27.1 °C 空气相对湿度/%	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
27.1 °C 空气上述相对湿度对应的比焓值/(kJ/kg)	58.92	61.86	64.81	67.78	70.75	73.73	76.73	79.73	82.75	85.78	
27.1 °C 空气上述相对湿度对应的 P <sub>气湿</sub> 值/Pa	1 982	2 162	2 343	2 523	2 703	2 883	3 063	3 244	3 424	3 604	

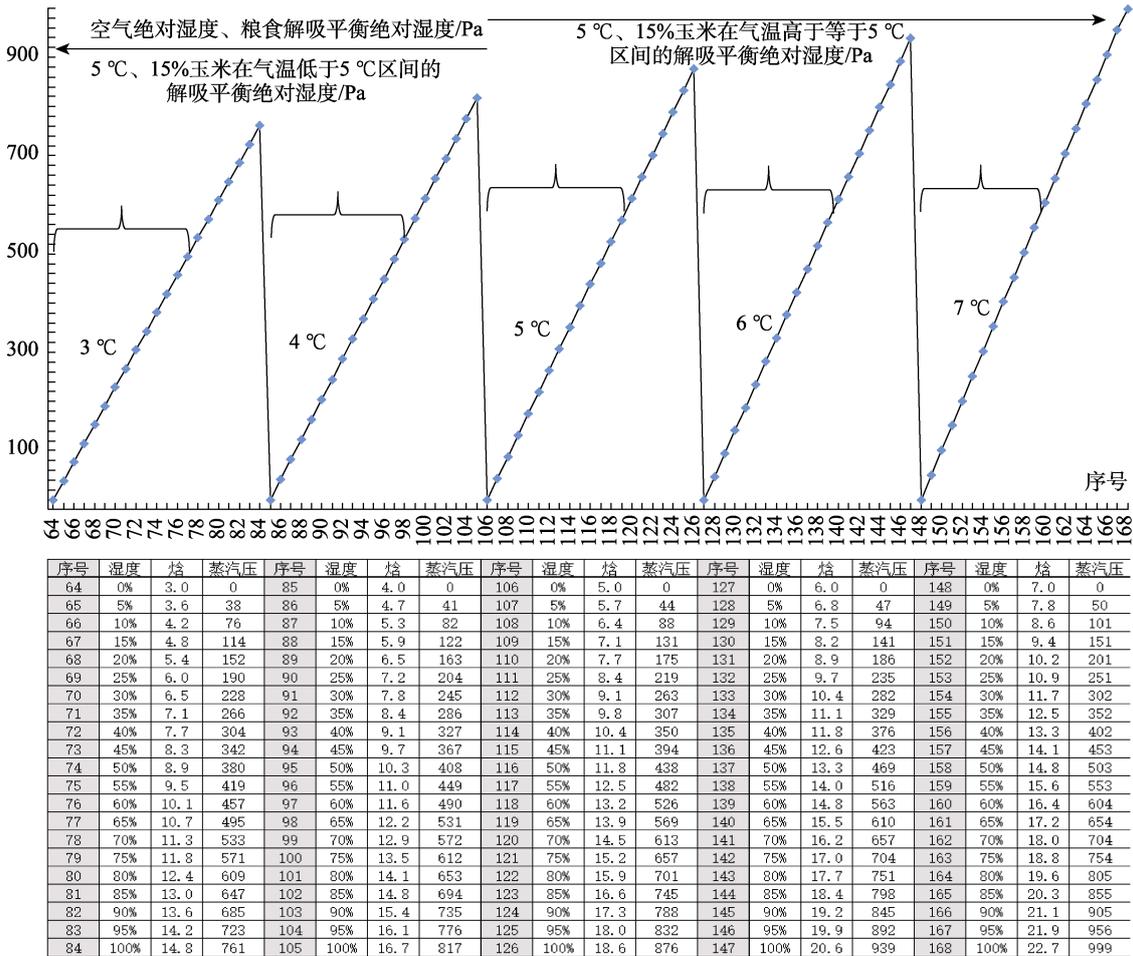


图 5 降水通风时机选择精细图

Fig.5 The detailed chart for selecting the timing of reducing grain moisture ventilation

表 4 粮温为 5 °C、水分为 15%玉米在气温为 3 ~ 7 °C 区间的允许降水通风条件表

Table 4 Permission conditions table of reduce grain moisture ventilation with maize temperature 5 °C and moisture 15% in the air temperature range of 3 ~ 7 °C

查定条件 1 (气温/°C)	3	4	5	6	7
查定结果 1 (空气比焓值/(kJ/kg))	10.7	12.2	14.1	15.2	16.0
查定结果 2 (相对湿度/%)	65	65	67	62	58
查定结果 3 (空气 P <sub>气湿</sub> 值/Pa)	495	531	586	586	586

### 3 结论

本方法所绘制粮食降水通风时机选择图为笔者原创,既融入了常见空气焓湿图的比焓、温度、相对湿度、绝对湿度等数据,又融入了行业标准规定的允许粮食降水通风条件数据,与通过查常见空气焓湿图、空气绝对湿度图或有关数据表、公式计算等选择粮食降水通风时机的方法相比,呈现数据更多,数据间关系更直观易懂,对确保储粮安全、改善粮食降水通风效果和节约能

耗成本等有很好的辅助作用。此外,图中的空气相关数据一经确定,可重复使用(高原等气压较低地区需结合当地实际气压情况修订好数据再绘制和使用),有利于提高选择粮食降水通风时机的效率和避免用传统方法时容易出现的测不准、算不对或测算时间长等常见问题;图中还直观呈现出粮食 ARH<sub>解吸-1%</sub>、空气 P<sub>气湿</sub> 及二者压差大小,从交点做 X 轴垂线亦可得到对应温度和相对湿度空气的比焓,有助于粮食降水通风强度、速率和粮堆焓变等定量研究。使用者用本方法绘制粮食降水通风时机选择图需依据行业标准规定的允许粮食降水通风条件,可根据需要绘制不同精度的粮食降水通风时机选择图,如本文第二算例,以空气温度 1 °C、相对湿度 5%为精度绘成的精细图,在选择降水通风时机、分析降水通风强度和速度时可直接从图中查询数据与用所测的即时粮温和空气温度、相对湿度比对;因目前行业标准

暂未明确气温或粮温低于 0 °C 时对应的粮食 ARH<sub>解吸-1%</sub> 数据, 故用本方法绘制的粮食降水通风时机选择图仅适用于在粮温和气温均大于等于 0 °C 时选择粮食降水通风时机。

### 参考文献:

- [1] 国家粮食局. 储粮机械通风技术规程: LS/T 1202—2002[S]. 北京: 国家粮食局, 2002.  
State Administration of Grain. Technical regulation of aeration for grain storage: LS/T1202—2002[S]. Beijing: State Administration of Grain, 2002.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 粮油储藏谷物冷却机应用技术规程: GB/T 29374—2022[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2022.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Grain and oils storage-code of practice for applicative technology of grain chiller: GB/T 29374—2022[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2022.
- [3] 国家粮食和物资储备局. 平房仓横向通风技术规程: LS/T 1220—2020[S]. 北京: 国家粮食和物资储备局, 2020.  
National Food and Strategic Reserves Administration. Technical regulation of transverse ventilation for stored grain in warehouses: LS/T 1220—2020[S]. Beijing: National Food and Strategic Reserves Administration, 2020.
- [4] 国家粮食和物资储备局. 粮库智能通风控制系统: LS/T 1226—2022[S]. 北京: 国家粮食和物资储备局, 2022.  
National Food and Strategic Reserves Administration. Intelligent ventilation system for grain storage facility: LS/T 1226—2022[S]. Beijing: National Food and Strategic Reserves Administration, 2022.
- [5] 王若兰. 粮食储藏学[M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2019.  
WANG R L. Grain and oil storage[M]. 2nd edition. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2019.
- [6] 国家粮食局粮食行政管理司. 储粮新技术教程[M]. 北京: 中国商业出版社, 2001.  
State Administration of Grain-Department of Grain Administration. A course in new grain storage technology[M]. Beijing: China Commercial Press Ltd, 2001.
- [7] 张来林. 储粮机械通风技术[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2014.  
ZHANG L L. Mechanical ventilation technology for grain storage[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press Ltd, 2014.
- [8] 国家粮食和物资储备局职业技能鉴定指导中心. (粮油)仓储管理员(初级 中级 高级)[M]. 2 版. 中国轻工业出版社, 2020.  
National Food and Strategic Reserves Administration Vocational Skills Appraisal Guidance Center. (Grain and oil) Storekeeper (Junior, Intermediate, Senior)[M]. 2nd edition. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2020.
- [9] 中国粮食研究培训中心, 国家粮食和物资储备局职业技能鉴定指导中心. (粮油)仓储管理员(技师 高级技师)[M]. 中国轻工业出版社, 2023.  
China Food Research and Training Center, National Food and Strategic Reserves Administration Vocational Skills Appraisal Guidance Center. (Grain and oil) Storekeeper (Technician, Senior technician)[M]. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2023.
- [10] 李兴军, 吴子丹. 粮食平衡水分理论与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022.  
LI X J, WU Z D. Grain equilibrium moisture theory and practices[M]. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2022.
- [11] 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 temperature[J]. Journal of Grain Processing, 2011, 36(4): 34-37.
- [12] 李兴军. 谷物粮堆通风的理论依据与目标[J]. 粮食加工, 2017, 42(1): 28-38.  
LI X J. Theory basis and objectives of aeration for cereal grain bulk[J]. Journal of Grain Processing, 2017, 42(1): 28-38.
- [13] 王剑萍, 王成芝. 谷物内部水分扩散系数的确定[J]. 东北农业大学学报, 1996, 27(1): 63-67.  
WANG J P, WANG C Z. Determination of diffusion coefficient for grain kernels[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1996, 27(1): 63-67.
- [14] 王双林, 郭道林, 李兴军, 等. 玉米平衡水分测定及等温线方程确定[J]. 中国粮油学报, 2021, 25(11): 33-36.  
WANG S L, GUO D L, LI X J, et al. Fitted parameters of EMC/ERH model for Chinese shelled corn[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 25(11): 33-36.
- [15] 王双林, 郭红. 通风干燥过程中的粮食水分转移规律研究[J]. 粮食储藏, 2009, 38(2): 20-22.  
WANG S L, GUO H. Regulation of cereal moisture transfer during ventilation and drying[J]. Journal of Grain Storage, 2009, 38(2): 20-22. 