

# 温湿度条件对单面白纸板霉变的影响研究

罗 丁<sup>1,2</sup>, 尹倩倩<sup>3,4</sup>, 吴梦宇<sup>3,4</sup>, 姜育恒<sup>1,2</sup>, 李忠庆<sup>3,4</sup>, 高天容<sup>1,2</sup>, 刘 强<sup>1,2</sup>, 李 科<sup>1,2</sup>,  
潘晓雅<sup>3,4</sup>, 宋海燕<sup>3,4</sup>

(1. 泸州老窖股份有限公司, 泸州 646000; 2. 国家固态酿造工程技术研究中心, 泸州 646000;  
3. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 4. 生物基纤维材料全国重点实验室, 天津  
300457)

**摘要:**单面白纸板作为酒盒等包装常用的基材,在温暖潮湿的地区储存过程中常出现霉变情况,为了研究温湿度对纸板霉变的影响,指导仓库存储环境控制,本文对导致纸质酒盒发生霉变的9种霉菌(即黑曲霉、匍枝根霉、极细枝孢、尖孢枝孢、草酸青霉、扩展青霉、绳状篮状菌、细疣篮状菌、链格孢)的生物学特性进行研究,探讨了温湿度对纸质酒盒用单面白纸板霉变进程、表面pH值及色差值的影响;研究了温度和pH对霉菌孢子萌发生长的影响;根据实验设计改变温湿度条件,观察了30 d内温湿度对纸板霉变的影响。结果表明:28 °C为9种霉菌孢子萌发的最适温度,4 °C和45 °C对9种霉菌菌丝的生长都有抑制作用;极端pH条件不仅抑制菌丝生长扩展,而且阻止孢子的萌发。在不同相对湿度下,纸板霉变时间有明显区别,97%、84%、75%、69%相对湿度下纸板出现微观霉变的时间分别为1、10、25、30 d;58%、33%相对湿度下纸板未出现微观霉变。不同温度下纸板霉变时间接近,20、25、30、35 °C条件下,纸板出现微观霉变的时间分别为24、18、18、24 h。总体上,湿度对纸板霉变的影响尤为严重,温度影响相对较小,在30 °C、97%相对湿度条件下纸板的霉变最严重,在储存过程中应避免高湿度环境。

**关键词:**温湿度;纸板;霉菌;纸板霉变

中国白酒历史悠久,深受国人喜爱。其销量增长带动了纸质酒盒包装需求上升,此类包装所用的单面白纸板是由涂布白纸板与灰纸板通过黏合剂黏合而成的。纸板表面的涂料、纸基的纤维素成分均含有霉菌生长需要的碳源、生长因子等营养物质<sup>[1]</sup>。当环境温湿度适宜时,霉菌孢子萌发生长会导致纸板霉变,不仅造成严重的经济损失,还会损坏品牌形象;同时,霉菌生长过程中分泌的代谢产物对人体健康存在潜在的威胁。

霉菌的生长分为孢子萌发、菌丝生长、菌丝体形成、分生繁殖四个阶段<sup>[2-3]</sup>。孢子萌发:孢子是霉菌的繁殖体,在适宜生长的环境下,孢子吸收水分和营养物质后开始膨胀,并对外生长出菌丝。菌丝生长:菌丝是霉菌的主要生长结构,孢子萌发后菌

丝不断延伸分支,通过促进养分的吸收运输来进行代谢活动。菌丝体形成:随着菌丝的生长分支,它们会相互交织形成复杂网络结构,这有助于霉菌在环境中生长繁殖,增强其环境适应性。分生繁殖阶段:菌丝体形成孢囊,孢囊中的新生孢子向环境中扩散。

环境温湿度变化会对霉菌生长产生较大影响<sup>[4]</sup>。在适宜温度下,霉菌体内酶活性高,可有效利用外界营养物质进行代谢;温度过低会使霉菌细胞内水分冻结、破坏细胞结构;温度过高则导致蛋白质变性、细胞膜破裂、酶失活,导致霉菌死亡。霉菌孢子萌发需要吸收大量水分,湿度是影响霉菌生长繁殖的关键环境因素之一<sup>[5]</sup>,过低的湿度会抑制霉菌生长。乔秀珍等<sup>[6]</sup>在对图书馆纸质图书文档最佳

基金项目:国家固态酿造工程技术研究中心资助项目(2023HX07)

作者简介:罗丁(1977—),工程师,本科;通信作者:宋海燕,教授,hyson@tust.edu.cn。

保存温湿度的分析研究中指出,当储存环境的相对湿度大于70%时,纸质图书文档容易发生霉变。张爱球<sup>[7]</sup>的研究表明,为延缓纸张老化及预防微生物等对纸张的侵蚀,最好将纸张存储在18~22℃、45%~55%相对湿度的环境下。

为研究单面白纸板的适宜贮存条件,抑制霉菌在纸板上的快速生长繁衍,在之前研究中对纸质酒盒上的霉菌进行分离鉴定,得到导致纸质酒盒发生霉变的9种霉菌<sup>[8]</sup>:黑曲霉(*Aspergillus niger*)、匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)、极细枝孢(*Cladosporium tenuissimum*)、尖孢枝孢(*Cladosporium oxysporum*)、草酸青霉(*Penicillium oxalicum*)、扩展青霉(*Penicillium expansum*)、绳状篮状菌(*Talaromyces funiculosus*)、细疣篮状菌(*Talaromyces verruculosus*)、链格孢(*Alternaria alternata*)。本文针对9种霉菌的生物学特性进行研究,重点分析了温度和pH对霉菌孢子萌发生长的影响。另外,通过设计不同的温湿度条件,探究了25℃下不同相对湿度对纸板霉变的影响以及97%相对湿度条件下不同温度对纸板霉变的影响,以期对纸板防霉工作提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 原料与试剂

700 g/m<sup>2</sup>单面白纸板,泸州祺欣伟创商贸有限公司。

黑曲霉、草酸青霉、扩展青霉、匍枝根霉、绳状篮状菌,北京生物制品研究所有限责任公司;细疣篮状菌、链格孢、极细枝孢、尖孢枝孢,上海保藏生物技术有限公司。

马铃薯葡萄糖培养基(PDA),上海博微生物科技有限公司;氯化镁、溴化钠、氯化钠、氯化钾、硫酸钾,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;碘化钾,分析纯,天津市众联化学试剂有限公司。

载玻片,湖南比克曼控股有限责任公司;培养皿,上海荣鹏信息科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

DY04-13-44-00型压力蒸汽灭菌锅,上海东亚压力容器制造有限公司;ETH-150-40-CP-AR型恒温恒湿箱,北京巨孚仪器有限公司;DF-101S型集热式恒温加热磁力搅拌器,上海豫康科教仪器设备有限公司;WSC-S型色差仪,上海精密仪器仪表有限公司;UB100i型显微镜,重庆澳普光电技术有限公

司;E-201-P型平面pH复合电极,上海仪电科学仪器股份有限公司;CL200型笔式pH计,上海三信沛瑞仪器科技有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 菌液制备

将9种霉菌分别接种于PDA平板,在28℃条件下培养7~10 d,使用无菌水清洗并收集霉菌孢子,过滤去除菌丝。采用稀释平板涂布法计数,将9种霉菌的孢子悬浮液浓度均配制为1×10<sup>7</sup> CFU/mL。

#### 1.3.2 温度对霉菌孢子萌发生长的影响

将浓度为1×10<sup>7</sup> CFU/mL左右的9种霉菌孢子的悬浮液,分别利用无菌毛刷刷在涂有PDA培养基的载玻片表面,随后将载玻片置于培养皿中。以单一霉菌、单一温度为一个处理组,每个处理设置3个重复,置于温度分别为4、15、28、35、45℃,98%相对湿度的恒温恒湿箱中培养。分别在12、24、36、48、72 h时,采用100倍显微镜对霉菌孢子萌发生长情况进行观察,记录霉菌孢子的萌发率及生长情况<sup>[9]</sup>。当孢子萌发率达到50%时,对应的培养时间定义为该霉菌的孢子萌发时间。

#### 1.3.3 温度对霉菌菌丝生长的影响

将9种霉菌接种于PDA平板,在28℃下培养3 d左右,采用无菌6 mm打孔器,于菌落边缘菌丝活跃区域打取菌饼,将菌饼置于灭菌后的PDA平板中央<sup>[10]</sup>,将平板分别置于4、15、28、35、45℃,98%相对湿度条件下培养3~5 d,培养结束后按十字交叉法测量菌落的直径,并计算菌落的净生长直径,每个处理设置3个生物学重复。菌落净生长直径=菌落平均直径-菌饼直径(6 mm)。

#### 1.3.4 pH值对霉菌孢子萌发生长的影响

将浓度为1×10<sup>7</sup> CFU/mL左右的9种霉菌孢子的悬浮液分别用无菌毛刷刷涂在带有不同pH值(2、4、6、7、8、10)的PDA培养基的载玻片上(pH值由1 mol/L HCl和1 mol/L NaOH调节),并放置到无菌培养皿中,用封口膜密封。每个处理设置3个重复,置于28℃、98%相对湿度的恒温恒湿箱中培养8~12 h,在100倍显微镜下对霉菌孢子萌发生长的情况进行观察。

#### 1.3.5 pH值对霉菌菌丝生长的影响

将9种霉菌接种于PDA平板,在28℃下培养3 d左右,采用无菌6 mm打孔器,于菌落边缘菌丝活跃区域打取菌饼,将菌饼置于经pH调节的灭菌PDA

平板中央<sup>[10]</sup>。pH梯度设置为2、4、6、7、8、10(pH值由1 mol/L HCl和1 mol/L NaOH调节),将平板置于28℃、98%相对湿度的恒温恒湿箱中培养8~12 h,培养结束后按十字交叉法测量菌落的直径,并计算菌落的净生长直径,每个处理组设置3个平行重复。

### 1.3.6 霉污纸板的制备

将1.3.1中制备的9种菌液等体积混合得到需要的混合菌液。将单面白纸板(700 g/m<sup>2</sup>)裁切成尺寸为5 cm×5 cm的试样,使用压力蒸汽灭菌锅(121℃、25 min)对纸板进行灭菌处理,纸板冷却后,将混合孢子悬浮液均匀地喷洒在纸板表面,放置到不同温湿度条件下培养。

### 1.3.7 相对湿度条件设置

根据《饱和盐溶液标准相对湿度表》配制饱和盐溶液平衡相对湿度调控装置<sup>[11]</sup>。将40 mL经过灭菌处理、有一定盐析出的过饱和盐溶液倒入密闭塑料盒(12 cm×12 cm)内,约1/5体积。将霉污纸板放置于隔板上,用封口膜对接口处进行密封处理,具体实现方式见图1。每个装置中放入3张霉污纸板(5 cm×5 cm)。不同饱和盐溶液控湿物质的选择及其具体的平衡相对湿度见表1<sup>[12]</sup>。

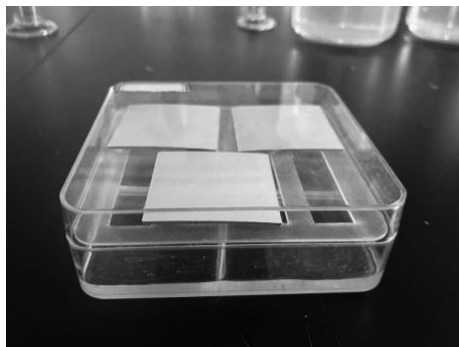


图1 饱和盐溶液平衡相对湿度调控装置

表1 不同饱和盐溶液及调控装置在25℃下的相对湿度值

试剂	相对湿度/%
氯化镁	32.8±0.2
溴化钠	57.6±0.40
碘化钾	68.9±0.3
氯化钠	75.3±0.2
氯化钾	84.2±0.3
硫酸钾	97.3±0.5

### 1.3.8 温度条件设置

在探究97%相对湿度条件下不同环境温度对纸板霉变影响时,利用硫酸钾饱和盐溶液平衡相对

湿度调控装置来进行湿度控制。将已放入霉污纸板的调控装置置于恒温恒湿箱中,分别在20、25、30、35℃下进行培养。

### 1.3.9 霉污纸板的霉变定级

利用显微镜下对纸板表面的霉变情况进行观察。为方便对纸板表面霉菌的生长状态进行描述,依据霉菌的生长特性及观察统计不同温湿度条件下纸板上霉菌的生长状态随时间的变化情况,将纸板表面的霉变情况分为两种:规定在显微镜视野下有明显菌丝生长时为微观霉变;在显微镜视野下有大量菌丝生长缠绕,肉眼观察到纸板表面有明显霉变时为纸板宏观霉变。

### 1.3.10 霉污纸板表面色差的测定

霉菌在纸板表面不断生长繁殖,会分泌色素,导致纸板表面颜色发生变化,通过测定纸板表面的色差( $\Delta E$ ),可以评估纸板表面霉菌的生长强度<sup>[13-15]</sup>。使用便携式色差计对未喷菌纸板与霉污纸板上中下三部分的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值进行测量,取平均值,然后利用式(1)进行计算,得出霉污纸样表面的色差值<sup>[16]</sup>。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

式中: $L^*$ 为明度指数,取值范围为0~100(0代表最暗的黑色,100代表最亮的白色); $a^*$ 为红色(正值)到绿色(负值)的色度指数; $b^*$ 为黄色(正值)到蓝色(负值)的色度指数。以未经喷菌处理的纸板为基准, $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 分别为霉污纸板与其 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 单值指标的差值。

### 1.3.11 霉污纸板表面pH值的测定

参考GB/T 13528—2015《纸和纸板表面pH的测定》<sup>[17]</sup>,对纸板表面的pH值进行测定。在纸板表面滴一滴0.5 mL的去离子水<sup>[18]</sup>,将校准好、具有温度补偿功能的平头电极浸入水滴中。使电极在试样上的压力保持恒定,读取浸泡5 min时pH计的测量值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 霉变纸质酒盒分离菌的生物学特性研究

#### 2.1.1 温度对霉菌孢子萌发生长的影响

采用显微镜观察不同温度下9种霉菌的孢子萌发情况,统计霉菌孢子开始萌发的时间,结果如表2所示。在28℃下,第12 h时,所有的霉菌孢子都已萌发,菌丝明显伸长,甚至有的已观察到宏观霉变。

28 °C是所有霉菌孢子萌发的最适宜温度。在4 °C下,黑曲霉、匍枝根霉、极细枝孢、尖孢枝孢、草酸青霉孢子的萌发受到抑制,在72 h内未萌发。在15 °C下,所有霉菌孢子的萌发均比28 °C时延缓。在35 °C下,尖孢枝孢孢子和扩展青霉孢子的萌发受到抑制,在72 h内未萌发。在45 °C下,除极细枝孢孢子外,其他霉菌孢子在72 h内均未萌发。

表2 不同温度下霉菌孢子的萌发时间

霉菌	萌发时间/h				
	4 °C	15 °C	28 °C	35 °C	45 °C
黑曲霉	/	48	12	12	/
匍枝根霉	/	24	12	48	/
极细枝孢	/	72	12	12	36
尖孢枝孢	/	24	12	/	/
草酸青霉	/	36	12	12	/
扩展青霉	48	24	12	/	/
绳状篮状菌	72	24	12	48	/
细疣篮状菌	72	24	12	36	/
链格孢	36	24	12	12	/

注:表中“/”代表未萌发。

### 2.1.2 温度对霉菌菌丝生长的影响

温度对9种霉菌菌丝生长的影响如图2所示。其中,菌落净生长直径越大,代表菌丝生长越快。从图2可以看出:霉菌菌丝生长对温度敏感,其最适生长温度因菌种而异,但整体上集中于中温范围(28~35 °C)。黑曲霉、极细枝孢菌、绳状篮状菌和细疣篮状菌在35 °C时的菌落净生长直径最大,表现出最佳生长状态;而匍枝根霉、尖孢枝孢菌、草酸青霉和链格孢菌在28 °C时的生长最佳;扩展青霉则偏好较低温度,最适生长温度为15 °C。在4 °C和45 °C条

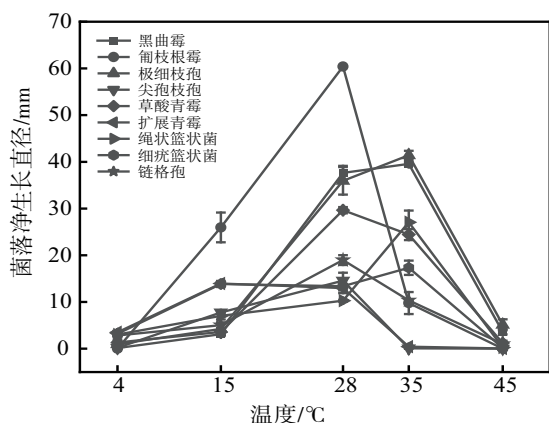


图2 温度对霉菌菌落直径及生长状况的影响

件下,所有霉菌的菌落直径均显著减小,菌丝生长受到明显抑制,这证实了极端温度对微生物生长的限制作用,即过高和过低的温度都不利于霉菌菌丝的生长。

在低温范围内(4~15 °C),大多数霉菌生长缓慢,菌落直径增长平缓;随着温度升高,菌丝生长速率加快,菌落直径显著增加,尤其在28~35 °C区间内,多数霉菌达到生长峰值。超过35 °C后,生长速率急剧下降,表明高温对菌丝生长产生了损伤。此外,菌落形态观察显示,在最适温度下,部分霉菌(如黑曲霉和极细枝孢菌)伴有孢子产生,菌落颜色变深、密度增加,而其他温度下菌落形态变化较小。

### 2.1.3 pH对霉菌孢子萌发的影响

pH是决定霉菌能否顺利繁殖与生长的关键环境条件,其对霉菌孢子萌发的影响如图3所示。从图3可以看出:除了黑曲霉与尖孢枝孢的孢子对pH值变化不敏感外,其他霉菌孢子在pH 2~10范围内均能萌发。然而,匍枝根霉和极细枝孢的孢子萌发在pH≥10时被显著抑制,草酸青霉、扩展青霉、绳状篮状菌和细疣篮状菌的孢子萌发在pH≤2和pH≥10时均受到显著抑制,这表明,对于多数菌种而言,极端pH条件能从根本上阻止了孢子的萌发。

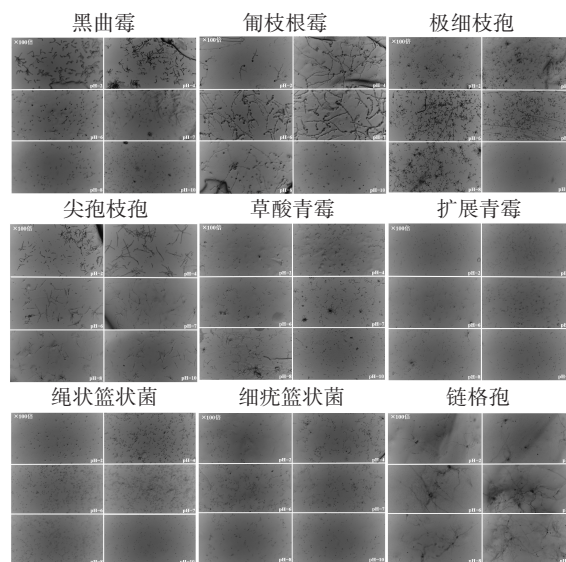


图3 pH对霉菌孢子萌发的影响

### 2.1.4 pH对霉菌菌丝生长的影响

pH对霉菌菌丝生长的影响如图4所示。从图4可以看出:霉菌菌丝生长的最适pH集中于4至8区间,黑曲霉菌丝在酸性环境中的生长更旺盛,在pH

2~4时的菌丝净生长直径最大;随着pH升高至6~10,菌丝长度显著缩短。匍枝根霉与极细枝孢的菌丝在最适pH(4~8)区间内生长良好,长度稳定;但在pH 2和10的条件下,匍枝根霉菌丝明显缩短。极细枝孢仅在pH 10时菌丝生长受阻。尖孢枝孢虽对pH的耐受范围较广,但其菌丝在pH 2的强酸环境下生长受到明显抑制。草酸青霉、扩展青霉、绳状篮状菌及细疣篮状菌表现出相似的规律:其菌丝在pH 2和pH 10的极端条件下被严重抑制,生长量极低;而在pH 4~8区间内生长恢复,其中细疣篮状菌在pH 4~6区间的菌丝长度优于pH 7~8。

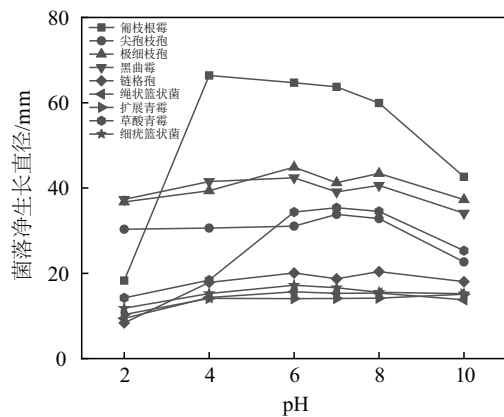


图4 pH对霉菌菌落直径及生长状况的影响

## 2.2 湿度对单面白纸板霉变的影响

### 2.2.1 纸板霉变时间

纸板作为一种吸湿性材料,随着环境湿度升高,纸板自身的水分含量不断上升,直到与周围环境达到湿度平衡,为霉菌在纸板上的萌芽生长提供了可利用的水分<sup>[19-21]</sup>。高湿环境既为霉菌孢子 in 纸板上萌发提供了条件,又保障了霉菌后续的生长繁殖。由于许多营养物质需要溶解在水中才能被霉菌孢子吸收利用,纸板含水量的增加促进了霉菌对营养成分的吸收和利用,加快了霉菌的生长<sup>[22]</sup>。

根据1.3.9所述的微观、宏观霉变判定方法,不同相对湿度条件下纸板的霉变时间如表3所示。35%和58%相对湿度下,纸板在30 d内均未发生霉变;69%相对湿度下,纸板在第30 d发生微观霉变,而30 d内未发生宏观霉变;75%相对湿度下,纸板在第25 d发生微观霉变,且30 d内未发生宏观霉变;84%相对湿度下,纸板在第10 d发生微观霉变,且第25 d发生了宏观霉变;97%相对湿度下,纸板

在第1 d发生微观霉变,第3 d发生宏观霉变。

30 d内,仅84%和97%相对湿度下纸板发生了宏观霉变,69%和75%相对湿度下纸板只发生了微观霉变,33%和58%相对湿度下纸板未发生霉变。由此可见,湿度对纸板霉变具有显著影响,湿度越高,纸板上霉菌的生长速度越快,纸板出现霉变的时间显著缩短,霉变进程也显著加快。因此,纸板储存的湿度条件宜控制在58%以下。

表3 不同相对湿度下纸板的霉变时间

相对湿度/%	微观霉变时间/d	宏观霉变时间/d
33	/	/
58	/	/
69	30	/
75	25	/
84	10	25
97	1	3

注:“/”代表30 d内未产生霉变。

### 2.2.2 纸板色差随时间的变化

在进行纸板色差分析中,当 $\Delta E > 1$ 时,可以认为纸板有明显的色差变化<sup>[22]</sup>。由图5分析可知,当相对湿度低于97%时,除84%相对湿度下的第25 d时纸板表面发生宏观霉变、纸板表面色差有明显变化外,其他湿度条件下的纸板表面颜色皆无明显变化,色差值都在1以内。在30 d内,84%和97%的相对湿度下的纸板色差变化较明显,这是由于高湿情况下,纸板吸湿不仅导致纸板结构破坏、加速老化,还会使霉菌在纸板上不断生长繁殖,进而形成一层生物膜<sup>[23-24]</sup>,对纸板造成不可逆转的生物劣化影响。在97%的相对湿度下,0~5 d的纸板色差变化最快,

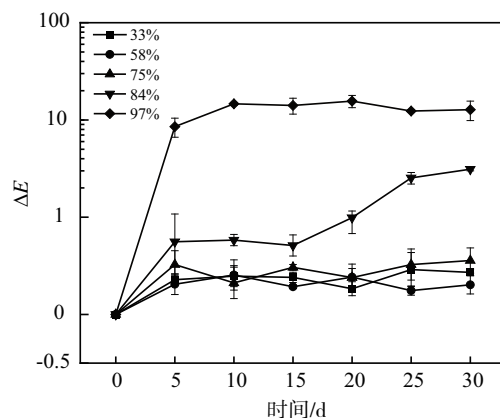


图5 25℃、不同相对湿度下纸板色差随时间的变化

5 d后色差变化趋缓,10 d后色差趋于平衡。这与霉菌的生长特性有关,当霉菌适应新环境后,会迅速繁殖生长,然后增长速度减慢,进入稳定期。

### 2.2.3 纸板pH随时间的变化

在25℃、不同相对湿度条件下纸板pH随时间的变化如图6所示。纸板初始pH值为7.78,在33%、58%、75%相对湿度下,纸板30 d内的pH值变化幅度并不大,甚至出现了部分重叠。在第25 d,84%相对湿度下的pH值开始出现比较明显的上升,这是因为纸板表面出现了明显的霉变,且霉菌为产碱霉菌。在33%相对湿度下,纸板表面pH值相较于其他湿度都低,这是因为在低湿环境中,纸张的含水量较低导致的。在高湿环境中,纸板吸湿后会加速碱性涂料的溶解与迁移,促进了霉菌不断地在纸板表面增长繁殖,因此在97%相对湿度下,纸板表面pH值出现明显升高。

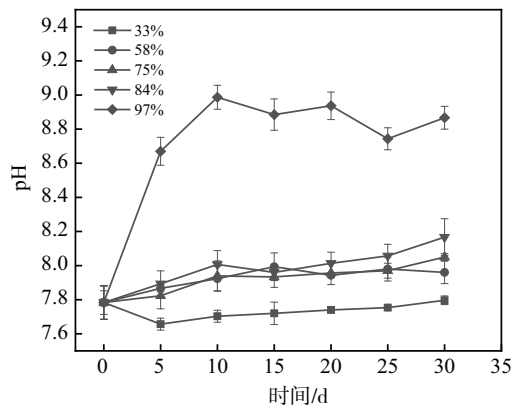


图6 25℃、不同相对湿度下纸板pH随时间的变化

## 2.3 高湿环境下,温度对单面白纸板霉变的影响

### 2.3.1 纸板霉变时间

高湿环境为纸板上霉菌的萌发生长提供了必要的水分。使用显微镜对97%相对湿度、不同温度条件下纸板上霉菌的生长状态进行观察,结果如表4所示。20℃下,纸板在24 h时达到微观霉变状态,在72 h时达到宏观霉变状态;25℃下,纸板在18 h时达到微观霉变状态,在66 h时达到宏观霉变状态;30℃下,纸板在18 h时达到微观霉变状态,在54 h时达到宏观霉变状态;35℃下,纸板在24 h时达到微观霉变状态,在96 h时达到宏观霉变状态。在6 h内,4个温度条件下纸板上的霉菌孢子都处于未萌发或少量萌发状态,说明孢子被接种在新的环境时需要一定的适应时间。24 h时,4个温度条

件下的纸板上的霉菌孢子都有萌发生长。在96 h内,30℃条件下的纸板最先出现宏观霉变,随后依次是25℃、20℃、35℃条件下的纸板。因此,相对湿度97%、温度30℃的条件最适宜霉菌生长,霉变出现时间最短。

表4 97%相对湿度下温度对纸板霉变的影响

温度/℃	微观霉变时间/h	宏观霉变时间/h
20	24	72
25	18	66
30	18	54
35	24	96

### 2.3.2 纸板表面色差的变化

在97%相对湿度条件下,4个温度条件下的纸板在96 h内都出现了宏观霉变,因霉菌在不同时间的生长情况存在差异,纸板的宏观霉变程度也随时间呈现不同特征。在96 h内对不同时间节点的20张霉变纸板进行色差测定,并计算其均值和方差,结果如图7所示。30℃条件下纸板表面的色差最先出现显著变化,其色差变化程度从大到小排列依次是30℃、25℃、20℃、35℃。可见,在第66 h时,25℃条件下纸板表面的宏观霉变程度最为显著。

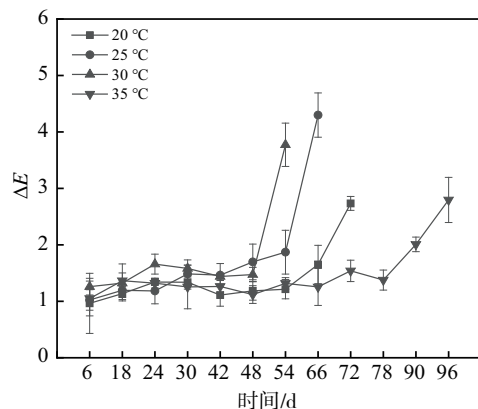


图7 不同温度下纸板表面色差随时间的变化

### 2.3.3 纸板表面pH的变化

霉菌生长情况的不同导致纸板pH值变化的差异,结果如图8所示。在4个温度条件下,纸板表面的pH值均在96 h内达到了8.0;其中,在30℃条件下纸板表面pH值最先达到8.0,各温度下达到该值的先后顺序依次是30℃、25℃、20℃、35℃。此外,在第66 h时,25℃纸板表面的pH最高,对应的宏观霉变程度最为显著。

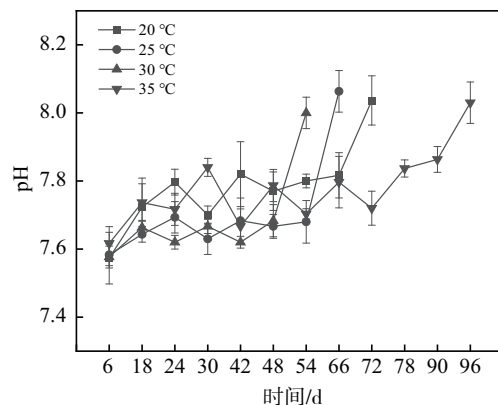


图8 不同温度下纸板表面pH随时间的变化

### 3 结论

实验探究了导致纸质酒盒发生霉变的9种霉菌(黑曲霉、匍枝根霉、极细枝孢、尖孢枝孢、草酸青霉、扩展青霉、绳状篮状菌、细疣篮状菌、链格孢)的生物学特性,分析了温度、pH值对其孢子萌发及菌丝生长的影响;同时探讨了温湿度对纸质酒盒用单面白纸板霉变进程、表面pH值和色差值的影响,得出以下结论:

(1) 28 °C是9种霉菌孢子萌发的最适温度,低于4 °C或高于45 °C均能显著抑制所有霉菌的菌丝生长。当pH值 $\leq 2$ 或pH值 $\geq 10$ 时,除黑曲霉、尖孢枝孢及链格孢外,其余霉菌的孢子萌发均受到显著抑制。

(2) 高湿环境会显著加速纸板的霉变进程,相对湿度低于58%时可有效抑制纸板霉变。25 °C和30 °C条件下纸板更易发生霉变。通过调控环境温度湿度以及pH值可有效抑制该单面白纸板的霉变发生。

#### 参考文献:

- [1] 陆晓娟,王玉龙,蔡丽娜,等. 酒盒包装的防霉与结构加固探讨[J]. 包装工程, 2010, 31(17): 74-76.
- [2] 路冰洁,杜晨秋,郭芯竹,等. 温湿度对建筑室内典型霉菌生长影响及其动力学模型[J]. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1368-1377.
- [3] 王丽雪,刘淞,刘力赫,等. 链霉菌次生代谢及产孢调控机制的研究进展[J]. 高师理科学刊, 2024, 44(7): 95-102.
- [4] 王琳. 温度、光照对秋葵褐腐病原菌菌丝生长、孢子萌发的影响及其田间药剂防治效果评价[J]. 蔬菜, 2024 (12): 52-58.
- [5] 赖求佳,冯驰. 建筑材料霉菌生长预测模型综述[J]. 建

筑科学, 2022, 38(6): 206-215, 282.

- [6] 乔秀珍. 图书馆纸质图书文档最佳保存温湿度分析研究[J]. 造纸科学与技术, 2022, 41(4): 72-75.
- [7] 张爱球. 高校图书馆纸质图书纸张耐久性影响因素及防老化措施研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 144-146.
- [8] 窦煜博, 罗丁, 高天容, 等. 酒包装用纸板的霉变特性研究[J]. 包装工程, 2024, 45(15): 59-67.
- [9] JI T, ALTIERI V, SALOTTI I, et al. Effects of temperature and moisture duration on spore germination of four fungi that cause grapevine trunk diseases[J]. Plant disease, 2023, 107(4): 1005-1008.
- [10] NORLIA M, JINAP S, NOR-KHAIZURA M A R, et al. Modelling the effect of temperature and water activity on the growth rate of *Aspergillus flavus* and aflatoxin production in peanut meal extract agar[J]. International Journal of food microbiology, 2020, 335(16): 108836.
- [11] 靳海斌. 饱和盐溶液静态湿度发生器法对湿度仪表校验的探讨[J]. 东方博物, 2010(4): 124-127.
- [12] 郝光宗, 邢丽缘, 梁强威. 饱和盐水溶液湿度固定点(2): 数据来源与盐溶液选择[J]. 传感器世界, 1999(12): 10-14.
- [13] REIS-MENEZES A A, GAMBALÉ W, GIUDICE M C, et al. Accelerated testing of mold growth on traditional and recycled book paper[J]. International biodeterioration & biodegradation, 2011, 65(3): 423-428.
- [14] ABDEL-MAKSOUUD G, ABDEL-NASSER M, SULTAN M H, et al. Fungal biodeterioration of a historical manuscript dating back to the 14th century: an insight into various fungal strains and their enzymatic activities[J]. Life, 2022, 12(11): 1821.
- [15] 黄倩. 纸质文物的保护包装技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [16] 全国造纸工业标准化技术委员会. 纸和纸板 表面pH的测定: GB/T 13528—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [17] 聂俊红, 林铭宽. 纸张表面pH值的测定[J]. 天津造纸, 1992(1): 46-51.
- [18] JOHANSSON S, WADSÖ L, SANDIN K. Estimation of mould growth levels on rendered facades based on surface relative humidity and surface temperature measurements [J]. Building and environment, 2010, 45(5): 1153-1160.
- [19] KOUL B, UPADHYAY H. Fungi-mediated biodeterioration of household materials, libraries, cultural heritage and its control[M]//GEHLOT P, SINGH J. Fungi and their role in sustainable development: current perspectives. Singapore: Springer Singapore, 2018: 597-615.

- [20] 宋倩. 预防性保护理念下古籍霉变防治进路研究[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2024(14): 56-59.
- [21] BORREGO S, GUIAMET P, VIVAR I, et al. Fungi involved in biodeterioration of documents in paper and effect on substrate[J]. Acta microscopica, 2018, 27(1): 37-44.
- [22] 王克华, 周新光, 吴来明, 等. 三种植物成分防霉活性及其对纸张、颜料影响的实验研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(3): 67-71.
- [23] 仵红. 影响纸张含水量的时间因素分析[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(15): 60-61.
- [24] ZHAN Y L, YU S R, AMIRFAZLI A, et al. Recent advances in antibacterial superhydrophobic coatings[J]. Advanced engineering materials, 2022, 24(4): 2101053.

## Effects of Temperature and Humidity Conditions on Mold Infestation of Single-side Coated White Paperboard

LUO Ding<sup>1,2</sup>, YIN Qianqian<sup>3,4</sup>, WU Mengyu<sup>3,4</sup>, JIANG Yuheng<sup>1,2</sup>, LI Zhongqing<sup>3,4</sup>, GAO Tianrong<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>, LI Ke<sup>1,2</sup>, PAN Xiaoya<sup>3,4</sup>, SONG Haiyan<sup>3,4</sup>

(1.Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou 646000, china; 2.National Engineering Research Center for Solid-State Brewing, Luzhou 646000, China; 3. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 4. State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, Tianjin 300457, china)

**Abstract:** Single-sided white cardboard is commonly used as a base material for packaging such as wine boxes. In warm and humid regions, mold growth often occurs during storage. To study the effects of temperature and humidity on cardboard mold growth and guide warehouse storage environment control, this paper investigates the biological characteristics of nine mold species that cause mold in paper wine boxes (*Aspergillus niger*, *Rhizopus stolonifer*, *Cladosporium tenuissimum*, *Cladosporium oxysporum*, *Penicillium oxalicum*, *Penicillium expansum*, *Talaromyces funiculosus*, *Talaromyces verruculosus*, and *Alternaria alternata*). It explores the effects of different temperature and humidity conditions on the mold growth process of single-sided white cardboard used for paper wine boxes, as well as on surface pH values and color differences. The study also examines how temperature and pH affect mold spore germination and growth. By altering temperature and humidity conditions according to the experimental design, the effects of temperature and humidity on cardboard mold growth within 30 days were observed. The results show that 28 °C is the optimal temperature for spore germination of the nine mold species, while 4 °C and 45 °C inhibit the growth of all nine mold mycelia. Extreme pH conditions not only inhibit mycelial growth but also prevent spore germination. At different relative humidity levels, the time for cardboard to show mold varies significantly. At relative humidity levels of 97%, 84%, 75%, and 69%, microscopic mold appears on cardboard in 1, 10, 25, and 30 days, respectively; at 58% and 33% relative humidity, no microscopic mold appears. Under different temperatures, the time for cardboard to show mold is similar. At 20 °C, 25 °C, 30 °C, and 35 °C, microscopic mold appears in 24, 18, 18, and 24 hours, respectively. Overall, humidity has a more severe impact on cardboard mold growth than temperature, and mold is most severe at 30 °C and 97% relative humidity. High-humidity environments should be avoided during storage.

**Key words:** temperature and humidity; cardboard; mould; cardboard moulding

(责任编辑:常涛)