

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.028



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



岭南农宅围护结构表面优势霉菌的生长特性 实验研究

金玲¹, 张洪玲¹, 刘胜宇¹, ZHANG Hui², EDWARD Arens², 丛沛桐¹,
刘高源³, 高伟³

(1. 华南农业大学 水利与土木工程学院, 广州 510642; 2. 加州大学伯克利分校 建筑环境中心,
伯克利 94720; 3. 广东美的环境电器制造有限公司, 广州 528311)

摘要:为降低岭南地区农宅围护结构霉变带来的安全和健康危害,在实地取样和正交实验的基础上研究温度和湿度对该地区优势菌生长的影响,并对培养基上霉菌的生长特性进行拟合优选分析,以期扩充建筑中优势霉菌生长特性数据库,为预测霉菌在波动温湿度条件下的生长风险提供理论支持。用刮擦法在岭南典型农宅获取霉斑样品,采用高通量测序法鉴定优势菌种类;在恒温培养箱中设置 22、26、30 ℃ 和 60%、70%、85% 的温湿度组合,研究优势菌在马铃薯葡萄糖琼脂(Potato Dextrose Agar, 简称 PDA)培养基上的生长特性,并建立其随时间和温湿度变化的动力学模型;在人工气候室中设置 26、30、34 ℃ 和 50%、90% 的环境温湿度组合,研究优势菌在常用建材上的生长特性。结果表明:岭南地区以大白灰为内饰面材料的农村住宅围护结构表面的优势菌属为枝孢霉 *Cladosporium*、*Neoderriesia* 和枝顶孢霉 *Acremonium*;26 ℃ 是枝孢霉最容易生长繁殖的环境温度;木材和 PDA 上环境相对湿度越高,枝孢霉生长越快;Gompertz 模型和响应面模型能较好地表征枝孢霉在培养基上的生长特性。

关键词:农村住宅;围护结构;优势霉菌;生长特性;动力学模型

中图分类号:X502 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)03-0229-13

Experimental study on the growth characteristics of dominant mold on the surface of farmhouse envelope in Lingnan

JIN Ling¹, ZHANG Hongling¹, LIU Shengyu¹, ZHANG Hui², EDWARD Arens²,
CONG Peitong¹, LIU Gaoyuan³, GAO Wei³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642,
P. R. China; 2. Center for Built Environment, University of California Berkeley, Berkeley 94720, USA;
3. GD Midea Environment Appliances MFG. Co., Ltd., Guangzhou 528311, P. R. China)

Abstract: In order to reduce the safety and health hazards of the enclosure, on the basis of the field sampling

收稿日期:2024-01-27

基金项目:国家自然科学基金(51708228);广东美的环境电器制造有限公司技术开发合作项目(GL0122102000799);省级大学生创新创业训练计划(S202210564127)

作者简介:金玲(1980-),女,博士,副教授,主要从事人体热舒适与建筑环境优化设计研究,E-mail:jinling@scau.edu.cn。

Received: 2024-01-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51708228); Guangdong Midea Environmental Electric Appliance Manufacturing Co., Ltd. Technology Development Cooperation Project (No. GL0122102000799); Provincial College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. S202210564127)

Author brief: JIN Ling (1980-), PhD, associate professor, main research interests: thermal comfort and building environment optimization design, E-mail: jinling@scau.edu.cn.

and the orthogonal experiment, the influence of the growth characteristics of the dominant bacteria in order to expand the database of the dominant mold in the building and provide reasonable support for predicting the growth risk of mold under fluctuating temperature and humidity. First, mildew samples were obtained in Lingnan typical farmhouses by scraping, and high-throughput sequencing was used to identify the dominant bacterial species; then 22 °C, 26 °C, 30 °C and 60%, 70%, 85% temperature and humidity combinations were used to study the growth characteristics of the dominant bacteria on Potato Dextrose Agar (PDA) and establish a kinetic model with time and temperature and humidity. Finally, 26 °C, 30 °C, 34 °C and 50%, 90% ambient temperature and humidity combinations in the artificial climate chamber to study the growth characteristics of the dominant bacteria on common building materials. The results show that in Lingnan area, the dominant fungus on the surface of rural residential envelope structure with large white ash as the interior surface material are *Cladosporium*, *Neoderiesia* and *Acremonium*; 26 °C is the environmental temperature for the spore to grow and reproduce; the higher the relative humidity, the faster the growth; Gompertz model and response surface model can show the growth characteristics of spores on the culture medium.

Keywords: rural residences; building envelope; dominant mold; growth characteristics; dynamic model

高温高湿是岭南地区显著的气候特点,春季“回南天”和夏季高温多雨均易引起围护结构表面结露,进而引起霉菌等有害微生物的滋生。霉菌在生长繁殖过程中会主动或被动向空气中释放过敏原、霉菌毒素^[1-2]。近年来,诸多研究表明长期居住于有霉菌滋生的室内环境的人易出现呼吸和心血管疾病、过敏和哮喘^[3-8],尤其以儿童、孕妇和老年人为中高风险感染人群^[9]。围护结构滋生霉菌带来健康隐患的同时,也会破坏建筑本身的美观和安全性能^[10-11]。

围护结构表面和室内空气中的真菌种类繁多,已被检测出的有青霉属、曲霉属、枝孢霉属、链球菌属以及葡萄球菌属等。其中,曲霉属、青霉属和枝孢霉^[12-15]是临床常见致病真菌,可引起皮肤过敏、过敏性肺真菌病等疾病^[16-17]。青霉属和曲霉属主要存在于空气中,枝孢霉在建筑表面和空气中含量均较高^[18]。枝孢霉被报道与各类建筑材料(石头、砂浆、玻璃、大理石等)的生物降解有关^[19-20]。枝孢霉菌体定植在墙体后,其菌丝体在孔内产生的机械力引起的物理生物劣化易导致材料分解,同时它的代谢产物会直接导致墙体化学生物劣化。然而,由于曲霉属的强致病性,已有与建筑物围护结构霉变相关的研究常选用曲霉属为实验菌种进行相关霉菌生长测试^[21-23]。

霉菌的生长繁殖受温度、湿度、营养基质、光照等诸多因素的影响^[24],其中温度和湿度是关键影响因素。霉菌生长的最适温度范围为 22~35 °C,实验中,利用控制变量法可以得出特定菌种的最适生长温度。如黑曲霉在 28 °C 时生长速率最快^[25];草酸青霉最适宜的菌丝生长及产孢温度为 30 °C^[26]。不同霉菌的最低生长相对湿度也存在不同,Grant 等^[13]评估了室内空气样本中出现的 19 种霉菌在不同水活

度水平下的生长能力,结果显示,在麦芽糖琼脂培养基上,曲霉菌最低生长相对湿度为 76%,杂色曲霉和青霉菌最低生长相对湿度为 79%。Hoang 等^[23]利用自然接种方法评估黑曲霉孢子悬液在建筑材料上的生长繁殖能力,发现有机基材料的平衡水分含量与材料样品总表面积的 50% 被真菌覆盖的时间之间存在很强的相关性。

为更方便地预防建筑围护结构霉变,诸多学者致力于开发霉菌滋生风险预测模型。其中,目前最常用的是 Sedlbauer^[27]开发的生物热湿模型,该模型被应用于 WUFI 软件中,使用者可通过输入特定的时间以及环境温湿度数据得到对应的霉菌孢子含水率,以评判室内霉菌生长风险。但该模型也存在一些弊端,如没有菌丝生长的文献数据,将孢子萌发和菌丝生长时间等同;忽略了材料表面粗糙程度、霉菌产孢等情况;仅作为风险评估,不是对生长过程的现实模拟等^[28]。这些不足均会导致该模型的过度预测,加上室内环境微气候和霉菌种类类型的影响,霉菌的实际生长与理论存在一定差异。

现有的霉菌生长定量评估模型(Logistic 模型、Gompertz 模型等)是基于食品和农业中的典型霉菌,在特定培养基上描述一定温度和水分活度(Water Activity,简称 A_w)内的生长特性建立起来的^[2, 29-30]。但 A_w 与建筑环境中的相对湿度(Relative Humidity,简称 RH)存在差异^[31],基于此,路冰洁等^[22]以培养基为基质探究空气相对湿度对黑曲霉生长的影响并建立了相关预测模型,在一定程度上为模型的优化提供了特定霉菌的具体生长过程数据。因此,完善室内典型霉菌在不同环境温湿度下的生长特性显得尤为重要。

相对于城市建筑霉菌生长研究而言,农村住宅中霉菌的相关性研究还十分匮乏。农村地区住宅

大都以自建房为主,围护结构防潮构造和室内的通风效果不尽如人意,这使得室内微生物及其毒素通常高于城市地区^[32]。Moullarat等^[33]对94所房屋(城市和农村各47所)进行了霉菌污染调查,发现农村环境的霉菌污染水平高于城市环境,城市可见霉菌的比例为11%,而农村高达27.8%。中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021—2025年)》中提出,改善农村人居环境,是实施乡村振兴战略的重点任务。针对农村地区现有住宅进行优势菌种的筛选及其生长特性的基础研究有助于加快农村人居环境整治提升,事关广大农民根本福祉,事关农民群众健康,事关美丽中国建设。

为了降低岭南农宅围护结构霉菌滋生风险,减小室内霉菌带来的健康威胁,需要确定优势菌的种类并通过实验观测描述建筑围护结构中优势菌的生长特性。笔者选择岭南地区受霉菌污染的农村住宅,实施采样并获取优势菌信息,通过对优势菌在不同的温湿度工况的培养,分析优势菌的生长特性,进而建立适合该菌生长的动力学模型,并以此为基础,提出温度和湿度相关联的二级模型,从而为相关霉菌预测模型数据库的完善和优化提供数

据支持。此外,霉菌在培养基上的生长不能等同于建材上的生长,培养基有适合霉菌生长的营养条件和水分活度,而建筑材料的表面粗糙情况、毛细管特征以及营养物质等都会影响霉菌的生长繁殖,并且建材的毛细管作用会显著影响其内部含水量,因此,基于培养基试验结果进一步探究了霉菌在建材上的生长特性,以期打破建筑防霉研究壁垒。

1 研究方法

1.1 取样方法

为充分获取围护结构上的霉斑,选用刮擦法^[34]行采样。完成采样后,盖好盖子并用封口膜将离心管口密封,放入冷藏箱中运回实验室,于-80℃保存。

取样工作于2022年5—6月进行,在粤西、粤东、粤北和珠三角等4个区域各选2户典型农宅进行取样。图1为8户取样点的平面布局,红点代表霉斑取样点的位置(多靠近窗户)。

8户取样农宅中有2户为多层建筑(图1(a)、(d)),其余为低层住宅。取样住房均存在屋顶、窗户防水防潮措施不足的问题,取样的同时调查了8

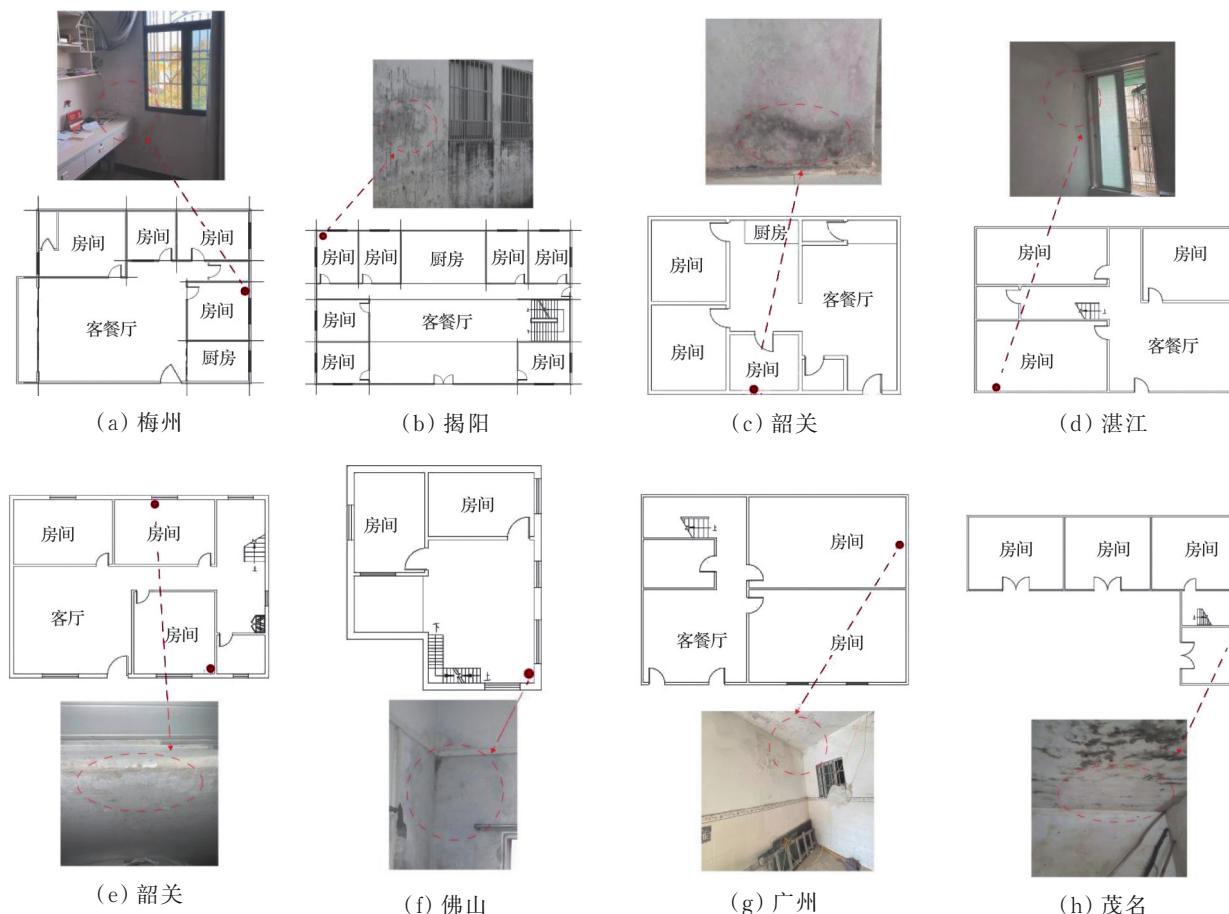


图1 取样点平面图

Fig. 1 Sampling points plan

户住宅围护结构材料的使用情况,其中 75% 的取样点建筑使用黏土砖作为墙体填充材料,其余 25% 为加气混凝土砌块,内表面装饰材料均为大白灰。

1.2 高通量测序

高通量测序是通过特异性引物扩增样本中真核生物 ITS rDNA 的可变区,构建高通量测序文库并对 ITS rDNA 可变区序列进行分析,从而鉴定环境中真核微生物的组成与丰度的方法。测序步骤为:总 DNA 提取和 PCR 扩增;PCR 扩增;序列测定。

在岭南 4 个地区共检测出真菌属 200 余种,其中枝孢霉(*Cladosporium*)、*Neoderriesia* 属和枝顶孢属(*Acremonium*)占比较大(图 2),为岭南地区以大白灰为内饰面材料的农村住宅围护结构表面的优势菌属。根据文献调查,枝孢霉(*Cladosporium*)为致病菌^[35-36],对人体和建筑均有严重的危害,而 *Neoderriesia* 属和枝顶孢属(*Acremonium*)危害相对较小,故以枝孢属为研究的试验菌。

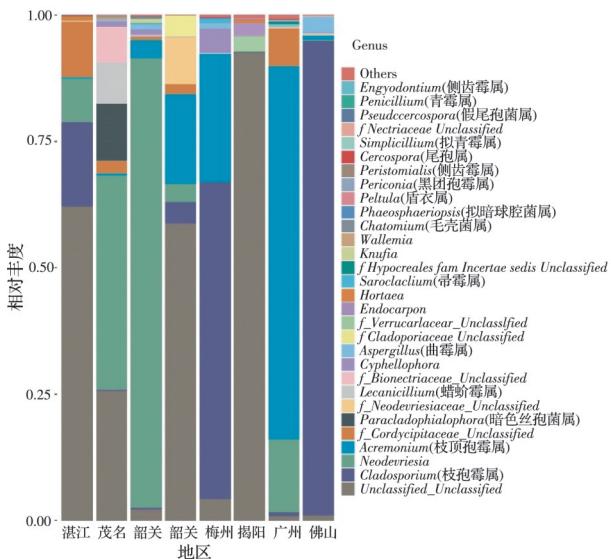


图 2 真菌属分类水平相对丰度图

Fig. 2 Taxonomic level relative abundance plots of fungal genera

1.3 优势菌提纯

根据高通量测序结果,采用平板交叉划线结合显微镜观察对优势菌进行提纯。优势菌提纯过程如图 3(a)所示,获取样品的微生物组成信息后,取 1 g 样品于 10 mL 无菌水中制成菌液,逐步稀释后涂布于 PDA 平板,将平板倒置于 28 °C 恒温培养箱中,48 h 后观察菌落形态并选取菌落形成单位(Colony forming unit,简称 cfu)为 30~300 浓度的培养基。挑取形态不同的菌落于 PDA 培养基,利用平板交叉划线法提纯,重复 3 次得到纯种,结合电子显微镜观察确定优势菌种。经分离纯化,共分离出 2 种数量

较多的枝孢菌,两种枝孢菌的菌落形态如图 3(b)所示。

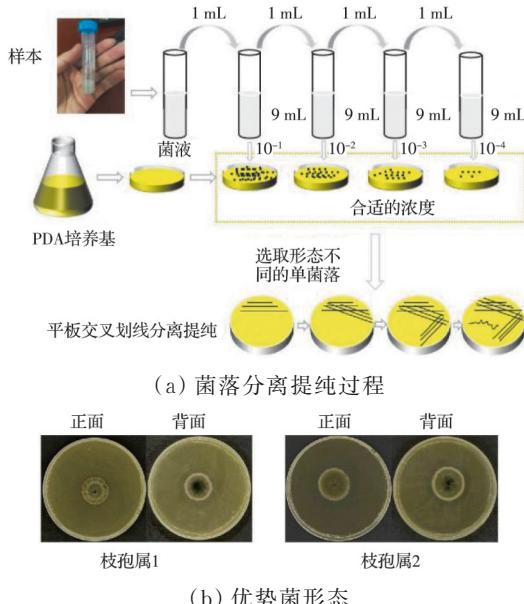


图 3 优势菌的分离纯化

Fig. 3 Isolation and purification of the dominant fungi

1.4 培养基正交试验

为了解环境温度和湿度对优势菌生长繁殖的影响程度,设计了空气温度为 22、26、30 °C 和相对湿度为 60%、70%、85% 的正交实验,以探究优势菌在马铃薯葡萄糖琼脂(Potato Dextrose Agar,简称 PDA)培养基基质上的生长特性。为营造恒温恒湿环境,温度采用恒温箱(温度范围 0~50.0 °C,精度:±1 °C)控制,湿度采用饱和盐溶液控制,根据《饱和盐溶液标准相对湿度表》,温度在 20~30 °C 时,60%、70%、85% 的相对湿度分别使用 NaBr、SrCl₂、KCl 的饱和溶液控制。实验时,将配置好的饱和盐溶液于 121 °C 灭菌 20 min,冷却后适量注入无菌透明塑料容器,随后将接种枝孢霉的 PDA 培养基置于其中,再放入恒温箱培养,实验装置如图 4 所示。

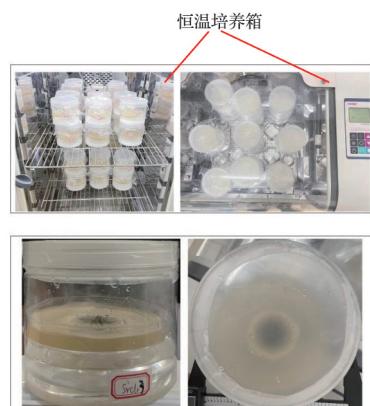


图 4 正交实验装置

Fig. 4 Orthogonal experimental setup

1.5 建材正交试验

研究表明^[37-39],当建筑围护结构因防水失效、局部水管破裂或风驱雨的压力作用导致多孔建筑材料孔隙内液态水处于饱和或半饱和状态时,围护结构霉变的风险将大大增加。为探究霉菌在水损状态下围护结构表面的生长情况,根据岭南地区高温高湿的气候特点,设计了空气温度为26、30、34℃(对应温度适中及室外高温)和相对湿度为50%、90%(对应湿度适中及高湿)的正交实验,实验在可控制环境温湿度的人工气候室进行(如图5所示)。实验以5种常用建材(夹板、木材、抹灰、石膏、瓷砖,尺寸均为10 cm×10 cm)为基质。实验过程:将建材(各3块)放置于盛有少量水的托盘中,令其通过毛细作用吸收水分,然后提前制备浓度为 2×10^6 cfu/mL的菌悬液,用移液枪取1 mL涂抹于建材表面,调节气候室环境参数到设定的温度和湿度。72 h时移除托盘中的水,建材表面的湿度主要受环境参数和毛细现象共同作用,模拟建筑围护结构在雨后或地下水作用下的吸湿受潮。实验继续进行5 d,每个工况共持续8 d,每24 h拍照记录并统计试件表面霉菌生长情况。

1.6 霉斑测量方法

培养基正交试验和建材正交试验结果采用相机拍照,然后用ImageJ软件测量菌落直径和霉斑面积。在培养基实验中,当菌落直径趋于不变或布满培养基时停止观察,每组工况重复3次,菌落直径取平均值;在建材实验中,当霉斑面积不明显扩大时



图5 建材实验布置

Fig. 5 Layout of building materials experiment

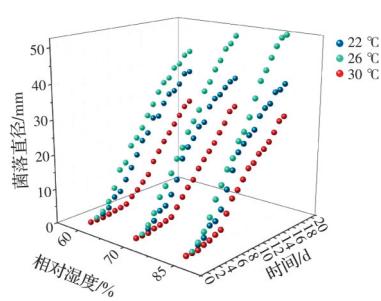
停止测量,面积取3个样本平均值。

2 测试结果与分析

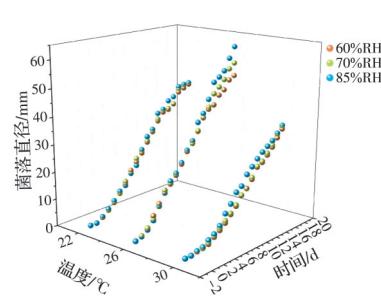
2.1 培养基PDA上优势菌的生长

各温湿度组合下霉菌菌落直径随时间变化如图6所示,曲线的斜率代表菌落的生长速率,由图6可知,环境温度(t_a)对优势菌生长的影响显著大于环境的相对湿度(RH)。

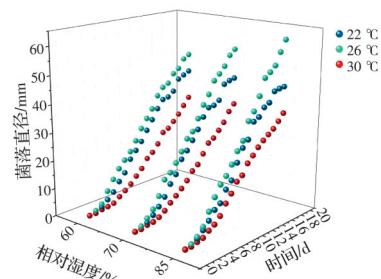
由图6(a)、(c)可见,在相同湿度、不同温度下,枝孢霉的菌落最大生长直径存在较大差异。以枝孢霉1为例,在22、26、30℃时,枝孢霉1的最大菌落直径(到达生长最大值的时间)分别为44.12 mm(16 d)、62.09 mm(18 d)和34.60 mm(18 d)。26℃时的生长曲线斜率大于22、30℃,且菌斑大小显著大于另外两个温度水平。枝孢霉2也是相同的规律,说明在培养基PDA上,26℃最适合枝孢霉生长。



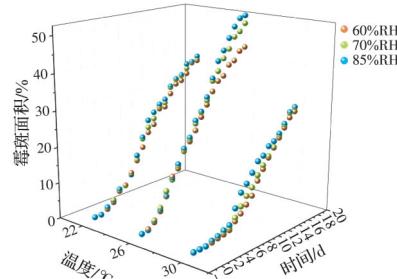
(a) 恒定湿度下枝孢属1的生长对比



(b) 恒定温度下枝孢属1的生长对比



(c) 恒定湿度下枝孢属2的生长对比



(d) 恒定温度下枝孢属2的生长对比

图6 各工况下两种枝孢霉生长曲线

Fig. 6 Growth curves of two *Cladosporiums* under each condition

图 6(b)、(d)所示为在相同环境温度 t_a 条件下不同湿度 RH 对枝孢霉生长的影响规律,与环境温度相比,相对湿度对霉菌生长的影响较小,影响规律为 $85\% > 70\% > 60\%$ 。已有研究表明,湿度是影响霉菌生长的重要因素,实验中 RH 对 PDA 上霉菌生长影响不大的原因在于,可用水分是影响霉菌孢子萌发繁殖的重要因素,培养基 PDA 中含有充足的水分,足以支持孢子的萌发与生长,因此,环境中的湿度水平对霉菌的萌发生长影响不大。

表 1 各工况下夹板和木材表面初始霉菌生长情况对比
Table 1 Comparison of growth of mold on the splint and wood surfaces under each condition

工况	夹板		木材	
	第 1 天	一周	第 1 天	一周
26 °C+50%RH				
30 °C+50%RH				
34 °C+50%RH				
26 °C+90%RH				
30 °C+90%RH				
34 °C+90%RH				

2.2.1 木材

各温湿度组合下木材表面霉斑面积统计随时间的变化如图 7 所示。

1) 3 种温度条件下, RH 为 90% 时的菌斑面积均显著大于 RH 为 50%, 即在木材上, 枝孢霉在高湿条件下更容易生长, 岭南地区 RH 常年接近 90%, 优势菌枝孢霉令围护结构霉变的风险很高。

2) RH 为 90% 时, 出现可见霉斑的时间依次为:

2.2 优势菌在建材上的生长特性

建材实验每个工况持续 8 d, 结束时, 木材和夹板表面大多有可视霉斑出现, 石膏、抹灰和石膏表面均无肉眼可见的霉斑。不同材料的孔隙结构、营养物质和 pH 值也会影响霉菌的萌发与繁殖, 因人工气候室运行能耗较大, 不宜持续过久, 因此, 以木材和夹板为例, 就不同温湿度组合下岭南农宅优势菌——枝孢菌在建材上的生长规律进行探究。表 1 所示为各温湿度组合下木材和夹板表面霉斑生长情况的对比。

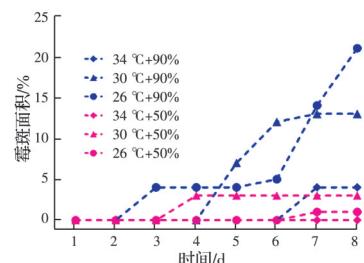


图 7 木材表面霉斑面积

Fig. 7 Mold area of wood surface

$26^{\circ}\text{C}(3\text{ d}) > 30^{\circ}\text{C}(5\text{ d}) > 34^{\circ}\text{C}(7\text{ d})$; 第8天时, 26°C 的霉斑面积超过 20%, 30°C 工况下霉斑面积约占 15%, 34°C 工况下霉斑面积约为 5%, t_a 对霉斑面积与出现时间规律一致, $26^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C} > 34^{\circ}\text{C}$ 。

3) RH 为 90% 时, 26°C 出现可见霉斑的时间最早, 持续生长后的霉斑面积最大, 26°C 比高温(30°C 、 34°C)更适宜枝孢霉的萌发与繁殖, 这与在培养基 PDA 上 26°C 最适合枝孢霉生长的规律一致。

2.2.2 夹板

各温湿度组合下夹板表面霉斑面积随时间的变化如图 8 所示。

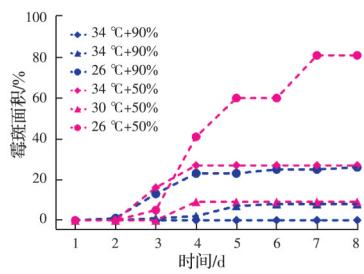


图 8 夹板表面霉斑面积
Fig. 8 Mold area of splint surface

1) 26°C 条件下, 不论高湿(90%)还是低湿(50%), 枝孢霉比高温更容易生长, t_a 的影响具体排序为 $26^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C} > 34^{\circ}\text{C}$ 。

2) 夹板上, $34^{\circ}\text{C}+50\%$ 、 $26^{\circ}\text{C}+90\%$ 和 $26^{\circ}\text{C}+50\%$ 三种工况在 3 d 时出现可见霉斑; $30^{\circ}\text{C}+50\%$ 和 $30^{\circ}\text{C}+90\%$ 在 4 d 时出现霉斑, $34^{\circ}\text{C}+90\%$ 到 8 d 仍未出现霉斑。

3) $26^{\circ}\text{C}+50\%$ 条件下, 8 d 时菌斑面积超过 80%, 远大于其他工况; $26^{\circ}\text{C}+90\%$ 和 $34^{\circ}\text{C}+50\%$ 条件下, 8 d 霉斑面积超过 20%; $30^{\circ}\text{C}+50\%$ 和 $30^{\circ}\text{C}+90\%$ 条件下, 8 d 霉斑面积约为 10%。

4) RH 对霉菌在夹板表面上的生长没有明显的影响规律, 霉菌生长是温湿度共同作用的结果。

5) 综合 2) 和 3) 的规律可知, 当夹板受潮时, 对人体而言舒适的温湿度组合($26^{\circ}\text{C}+50\%$)也很利于枝孢菌的萌发与生长; 环境高温与高湿取其一时, 夹板霉变情况受到抑制; 高温与高湿同时出现时, 枝孢霉在夹板上的生长与繁殖反而得到了抑制。

3 优势菌生长预测模型

由于不同菌种对于温湿度等环境因素的反应不同, 不能用一个普适性模型来预测所有霉菌的生长程度。在实测的基础上, 利用数学建模的方法定量评估特定霉菌的生长特性, 扩充建筑中优势霉菌

生长特性数据库, 为预测和防范霉菌在波动的温湿度条件下的生长风险提供理论支持。

通过 PDA 和常用建材上的正交实验可知, 温度对枝孢霉在夹板、木材和 PDA 上的影响规律趋于一致, 采用 PDA 上的生长规律预测温度对枝孢霉生长的影响规律或是可行的。选用常规的霉菌初级预测模型^[40], 即 Gompertz 模型和 Logistic 模型对霉菌在培养基上的生长进行曲线拟合。两种拟合模型均能得到描述岭南地区农宅围护结构优势菌生长特性的拟合参数 A 、 U_m 、 V 。 A 为微生物数量达到最大时的值(本研究中指菌落直径); U_m 为最大比生长速率, 是指特定微生物每小时每克细胞物质最多可产生的新细胞物质的克数; V 为生长迟滞期, 处于这个时期的微生物生长较慢。根据拟合结果进一步选优, 得到枝孢霉的二级生长模型。

经参数转换后, Gompertz 模型写为

$$D_t = A \exp \left(-\exp \left(\frac{U_m e}{A} (V - t) + 1 \right) \right) \quad (1)$$

Logistic 模型写为

$$D_t = \frac{A}{1 + \exp \left[\frac{4U_m}{A} (V - t) + 2 \right]} \quad (2)$$

式中: D_t 为菌落直径, mm; A 为菌落直径最大值, mm; U_m 为最大生长速率, mm/d; V 为生长延迟期, d; e 为自然对数的底数, 取值 2.718; t 为时间, h。

模型准确性用 Adj. R^2 (调整决定系数, 反映拟合结果的好坏, 越接近 1, 说明拟合结果越好)、RSME(均方根误差, 反映预测值与真实值间的差距, RMSE 越接近 0, 预测越准确) 和 $A(f)$ (准确因子, $A(f)$ 值越接近 1, 误差百分比越低, 模型越准确) 3 个指标来衡量。

3.1 Gompertz 模型

图 9 为 9 组工况下 Gompertz 模型对枝孢霉的生长拟合曲线。由图 9 可见, Gompertz 模型的拟合程度较好, 所有工况的 Adj. R^2 值均大于 0.99, RMSE 值均介于 0~1.5 之间, $A(f)$ 均接近 1(见表 2)说明预测值和真实值之间的差异很小。根据拟合结果, 将参数代入式(1)可得出各工况的初级模型。

3.2 Logistic 模型

图 10 为 9 组工况下 Logistic 模型对枝孢霉的生长拟合曲线。由图 10 可见, Logistic 模型的拟合程度也较好, 所有工况的 Adj. R^2 值均大于 0.99, RMSE 值均介于 0.6~1.7 之间, $A(f)$ 均接近 1(见表 3), 说明预测值和真实值之间的差异较小, 根据拟合结果, 将参数代入式(2)可得出各工况的初级模型。

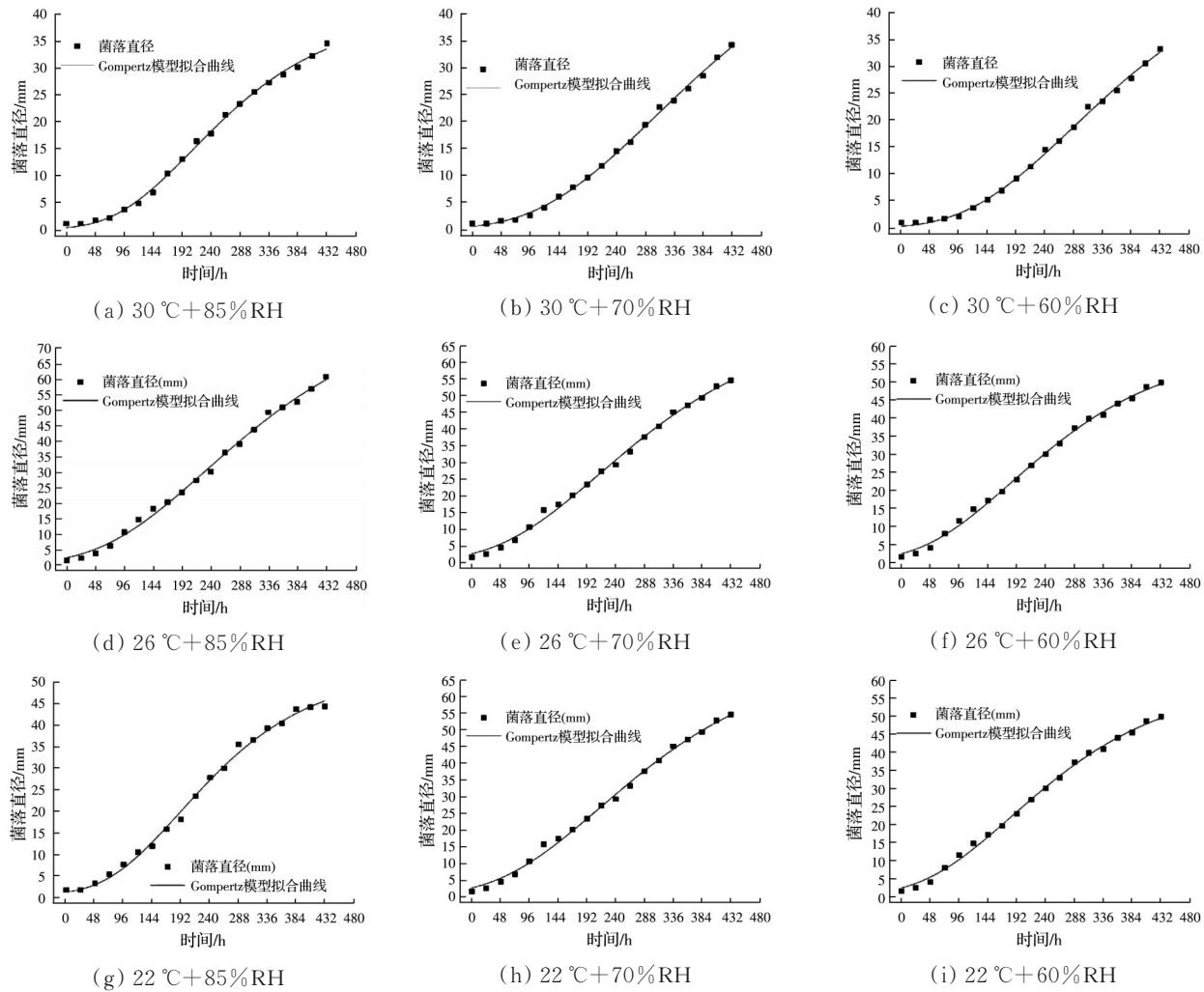


图 9 各工况下霉菌的初级 Gompertz 模型拟合曲线

Fig. 9 Primary Gompertz model fit curves under each conditions

表 2 Gompertz 模型参数与准确性指标

Table 2 Gompertz model parameters and accuracy indicators

温度/°C	湿度/%RH	模型参数			准确性指标		
		A	U_m	V	Adj. R^2	RMSE	$A(f)$
22	60	51.105 54	0.114 62	59.175 35	0.998 07	0.374	0.936 5
	70	51.359 54	0.147 26	60.348 85	0.996 94	0.617	0.936 7
	85	52.418 77	0.155 87	66.236 53	0.996 2	0.821	0.917 1
26	60	59.702 63	0.148 69	35.139 61	0.992 12	0.665	0.925 4
	70	71.920 03	0.155 96	44.026 18	0.996 33	1.003	0.915 9
	85	82.098 41	0.172 73	56.275 55	0.995 95	1.346	0.906 1
30	60	50.468 11	0.105 53	109.205 6	0.997 71	0.236	0.896 0
	70	57.110 4	0.108 08	110.473 9	0.998 1	0.204	0.915 2
	85	40.150 23	0.114 62	80.531 5	0.997 61	0.284	0.897 8

3.3 基于温湿度耦合的霉菌生长二级模型

根据拟合结果,在 Gompertz 模型中, RMSE 均值为 0.617, $A(f)$ 均值为 0.916; Logistic 模型中, RMSE 均值为 1.11, $A(f)$ 均值为 1.177。因此, Gompertz 模型拟合准确度大于 Logistic 模型。

由于 Gompertz 模型对霉菌生长具有更好的模

拟效果,因此进一步以其参数为依据,建立与温度、相对湿度相关的二级模型。目前的二级模型中,响应面模型可建立温度和相对湿度间的关联,因此,以 Gompertz 模型参数为基础建立响应面模型。

响应面模型写为 $U_m \times 100 = m_0 + m_1 \times T + m_2 \times RH + m_3 \times T^2 + m_4 \times RH^2 + m_5 \times T \times RH$ (3)

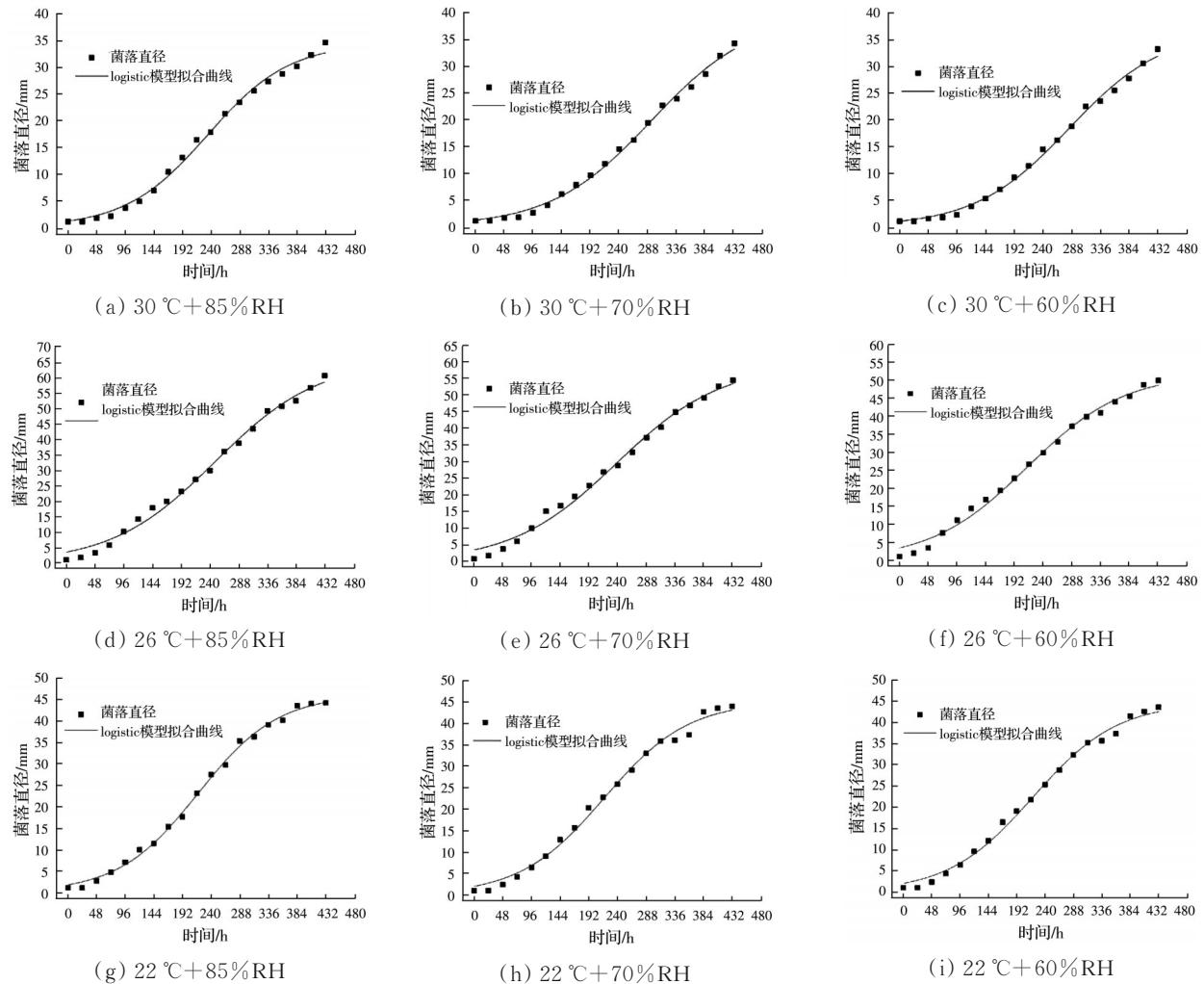


图 10 各工况下 Logistic 模型拟合曲线

Fig. 10 Primary Logistic model fit curves under each conditions

表 3 Logistic 模型参数与准确性指标

Table 3 Logistic model parameters and accuracy indicators

温度/°C	湿度/%RH	模型参数			准确性指标		
		A	U_m	V	Adj. R^2	RMSE	$A(f)$
22	60	44.655 36	0.013 93	219.364 7	0.994 44	1.066	1.163
	70	45.143 3	0.014 15	217.711 04	0.992 93	1.226	1.165
	85	46.077 62	0.014 91	218.034	0.997 07	0.818	1.123
26	60	51.779 28	0.012 38	213.499 21	0.992 23	1.376	1.394
	70	59.323 17	0.011 43	237.393 04	0.991 41	1.574	1.204
	85	65.686 63	0.011 53	248.809 37	0.991 69	1.707	1.220
30	60	36.848 65	0.012 63	284.013 1	0.997 71	0.686	1.090
	70	39.605 24	0.011 91	193.409 13	0.995 68	0.702	1.122
	85	34.550 7	0.014 51	234.389 96	0.994 42	0.837	1.114

$$V = n_0 + n_1 \times T + n_2 \times RH + n_3 \times T^2 + n_4 \times RH^2 + n_5 \times T \times RH \quad (4)$$

模拟的自变量因素有两项,分别为温度 T 和相对湿度 RH ,故 n_0 和 n_1 为常数项; n_2 、 n_3 为一次回归系数; n_3 、 n_4 、 n_5 为二次回归系数; n_5 、 n_6 为交互回归系数。

响应面模型对 U_m 和 V 的拟合效果分别如图 11、图 12 所示,根据拟合结果, U_m 拟合准确度较高, Adj. R^2 为 0.964 92, V 的拟合度为 0.790 5。代入拟合参数(见表 4),得到响应面模型拟合方程。

基于此,由初级模型的 9 组不同温湿度工况下获得的二级模型 $[m, n]$ 数据,可推广到一定范围内

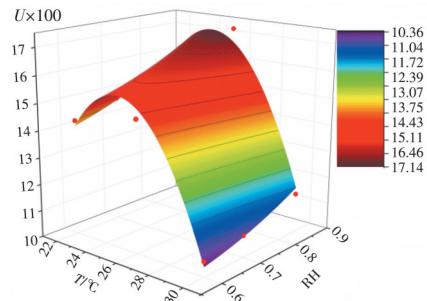
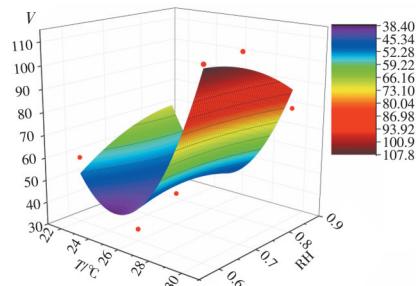
图 11 $U \times 100$ 响应面拟合效果Fig. 11 The fitting effect of the response surface of $U \times 100$ 图 12 V 值响应面拟合效果Fig. 12 The fitting effect of the response surface of V

表 4 响应面模型参数及准确性指标

Table 4 Response surface model parameters and accuracy indicators

参数下标	m	n
0	-101.383 2	954.246 77
1	9.418 25	-98.224 12
2	-2.793 36	857.451 41
3	-0.187 94	2.239 82
4	9.573 33	-254.503 38
5	-0.190 46	-18.809 9
Adj. R^2	0.964 92	0.790 5

任意温度和相对湿度下的霉菌生长预测。这可为霉菌在波动的温湿度环境条件、常见建材上的生长和预测软件的开发等研究提供理论支撑,从而更精准地预测霉菌在不同环境下的生长情况。

4 讨论

现代人类一天中有 90% 以上的时间在室内工作或生活,室内环境污染对健康的不利影响比户外更为严重。建筑墙体结露或回南天时围护结构表面泛潮会给围护结构中的霉菌孢子提供萌发、生长与繁殖的水分。有害霉菌在短时间内可以快速繁殖多个周期,对人体健康和建筑的安全、美观均有显著危害。

霉菌在建材上的生长规律和防治措施一直是建筑领域关注的话题。然而由于建筑领域和微生物领域存在专业壁垒,相关工作推进十分缓慢。在

以往的研究中,由于黑曲霉的强致病性,常被用作霉菌相关研究的试验菌^[21-23],而笔者的取样和测序结果表明,枝孢霉 *Cladosporium*、*Neoderriesia* 和枝顶孢霉 *Acremonium* 才是岭南地区以大白灰为内饰面材料的农村住宅围护结构表面的优势菌属。不同霉菌的生长特性不尽相同,黑曲霉在 30 °C 时生长最迅速,笔者发现枝孢霉最适生长温度在 26 °C 左右。因此,精准识别不同地区的优势霉菌,在了解其生长特性的基础上采取有针对性的措施方可有效抑制围护结构霉变。

在综合考量微生物领域常用方法和建筑材料特点的基础上,选择用刮擦法获取围护结构霉斑样品,采用高通量测序法鉴定优势菌种类,结合平板交叉划线法和显微镜观察分离提纯获取岭南地区农宅优势霉菌。该研究方法简便易行、准确度高,可以推广到建筑防霉领域相关工作中,获取不同地区不同类型建筑的优势菌,针对性地研究其生长特性,扩充霉菌生长特性数据库,可以更有效地预测霉菌生长风险并提出围护结构防霉措施。

对岭南农宅优势菌——枝孢菌在培养基 PDA 和木材、夹板上的生长特性做了初步探究,对岭南地区以大白灰为内饰面材料的农村住宅表面霉菌生长抑制研究具有推动作用。不足之处在于,因在石膏、抹灰和瓷砖上的实验周期过长,在大型气候室进行相关实验不利于节能,综合权衡后终止了上述 3 种建材表面的气候室实验,后续将考虑定制小型气候箱进行实验,以充实和完善枝孢菌在各类建材上的生长特性。

5 结论

建筑围护结构的霉菌污染对于室内环境、人体健康和建筑安全都有负面影响。农村建筑被霉菌污染的情况比城市更加严重,而农村地区相关优势菌种的鉴别及其生长特性的基础研究却十分匮乏。对中国岭南地区农村住宅进行分区取样,通过高通量测序筛选出当地主要的优势菌并对其生长规律进行探究,主要结论如下:

1) 枝孢霉 *Cladosporium*、*Neoderriesia* 和枝顶孢霉 *Acremonium* 是岭南地区以大白灰为内饰面材料的农村住宅围护结构表面的优势菌属。其中,枝孢霉 *Cladosporium* 因其对人体和建筑危害较大,是岭南地区农宅重点防范的霉菌。

2) 环境温度 t_a 对培养基 PDA 上枝孢霉 *Cladosporium* 生长的影响规律为 $26\text{ }^\circ\text{C} > 22\text{ }^\circ\text{C} > 30\text{ }^\circ\text{C}$, 对受潮的木材和夹板表面影响规律为 $26\text{ }^\circ\text{C} >$

30 °C>34 °C。26 °C是枝孢霉最容易生长繁殖的环境温度。

3)环境湿度 RH 对于枝孢霉生长的影响规律为:培养基 PDA 上 85%>70%>60%,木材上 90%>50%,夹板上环境湿度影响规律不显著。

4)评估 Gompertz 模型和 Logistic 模型利用环境温湿度和时间数据对枝孢霉 *Cladosporium* 生长曲线的预测效果,结果显示两个预测模型均可以进行较为准确的预测,具有较高的决定系数,并且 Gompertz 模型对枝孢霉生长曲线的拟合度优于 Logistic 模型,表明 Gompertz 模型可在一定温湿度范围内提供准确可靠的枝孢霉生长预测。在实际应用中,可根据 Gompertz 模型预测值,利用家用电器如空调、除湿器等对环境温湿度进行调节,为岭南地区农宅围护结构表面枝孢霉的生长提供数据参考。

参考文献

- [1] BEGUIN H, NOLARD N. Mould biodiversity in homes I. Air and surface analysis of 130 dwellings [J]. *Aerobiologia*, 1994, 10(2): 157-166.
- [2] YOGENDRARAJAH P, VERMEULEN A, JACKSENS L, et al. Mycotoxin production and predictive modelling kinetics on the growth of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* isolates in whole black peppercorns (*Piper nigrum L*) [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 228: 44-57.
- [3] HOLME J A, ØYA E, AFANOU A K J, et al. Characterization and pro-inflammatory potential of indoor mold particles [J]. *Indoor Air*, 2020, 30(4): 662-681.
- [4] LU C, NORBÄCK D, ZHANG Y P, et al. Furry pet-related wheeze and rhinitis in pre-school children across China: Associations with early life dampness and mould, furry pet keeping, outdoor temperature, PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. *Environment International*, 2020, 144: 106033.
- [5] PIRHONEN I, NEVALAINEN A, HUSMAN T, et al. Home dampness, moulds and their influence on respiratory infections and symptoms in adults in Finland [J]. *The European Respiratory Journal*, 1996, 9(12): 2618-2622.
- [6] NORBÄCK D, ZHANG X, FAN Q N, et al. Home environment and health: Domestic risk factors for rhinitis, throat symptoms and non-respiratory symptoms among adults across China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 681: 320-330.
- [7] LU C, XIAO F, NORBÄCK D, et al. Long-term exposure to mould/damp stains and mouldy odour increases low birth weight [J]. *Building and Environment*, 2022, 222: 109418.
- [8] DU C Q, LI B Z, YU W. Indoor mould exposure: Characteristics, influences and corresponding associations with built environment—A review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 101983.
- [9] GORDON S B, BRUCE N G, GRIGG J, et al. Respiratory risks from household air pollution in low and middle income countries [J]. *The Lancet Respiratory Medicine*, 2014, 2(10): 823-860.
- [10] KÜHNEL R A. Cause and consequence: Volume changes behind building material deterioration [J]. *Materials Characterization*, 2004, 53(2/3/4): 171-180.
- [11] KIURSKI J S, RANOGLAJEC J G, UJHELJI A L, et al. Evaluation of the effect of lichens on ceramic roofing tiles by scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy analyses [J]. *Scanning*, 2005, 27(3): 113-119.
- [12] HYVARINEN A, MEKLIN T, VEPSALAINEN A, et al. Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials—Concentrations and diversity [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2002, 49(1): 27-37.
- [13] GRANT C, HUNTER C A, FLANNIGAN B, et al. The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings [J]. *International Biodeterioration*, 1989, 25(4): 259-284.
- [14] GINESTET S, ASCHAN-LEYGONIE C, BAYEUX T, et al. Mould in indoor environments: The role of heating, ventilation and fuel poverty. A French perspective [J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106577.
- [15] 方治国, 黄闯, 楼秀芹, 等. 南方典型旅游城市空气微生物特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 2840-2847.
- [16] FANG Z G, HUANG C, LOU X Q, et al. Characteristics of airborne microbes in typical tourist city in south-east China [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(8): 2840-2847. (in Chinese)
- [17] VELÁZQUEZ-JIMÉNEZ Y, HERNÁNDEZ-CASTRO R, ROMERO-ROMERO L, et al. Feline phaeohyphomycotic cerebellitis caused by cladosporium cladosporioides-complex: Case report and review of literature [J]. *Journal of Comparative Pathology*, 2019, 170: 78-85.
- [18] SISCAR-LEWIN S, HUBE B, BRUNKE S. Emergence and evolution of virulence in human pathogenic fungi [J]. *Trends in Microbiology*, 2022, 30(7): 693-704.
- [19] DUCHAINE C, MÉRIAUX A. The importance of

- combining air sampling and surface analysis when studying problematic houses for mold biodiversity determination [J]. *Aerobiologia*, 2001, 17(2): 121-125.
- [19] CWALINA B. Biodeterioration of concrete, brick and other mineral-based building materials [M]//Understanding Biocorrosion. Amsterdam: Elsevier, 2014: 281-312.
- [20] GUERRA F L, LOPEZ W, CAZAROLLI J C, et al. Biodeterioration of mortar coating in historical buildings: Microclimatic characterization, material, and fungal community [J]. *Building and Environment*, 2019, 155: 195-209.
- [21] WU H X, WONG J W C. Mechanisms of indoor mold survival under moisture dynamics, a special water treatment approach within the indoor context [J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134748.
- [22] 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.
LU B J, DU C Q, GUO X Z, et al. Effect of temperature and humidity on the growth of typical molds in buildings and its kinetics modeling [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(3): 1368-1377. (in Chinese)
- [23] HOANG C P, KINNEY K A, CORSI R L, et al. Resistance of green building materials to fungal growth [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, 64(2): 104-113.
- [24] 曹国庆, 李劲松, 钱华. 建筑室内微生物污染与控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
CAO G Q. Indoor microbial pollution and control in buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese)
- [25] 刘鑫燕, 李占峰, 彭帮柱. 大球盖菇腐败真菌的分离、鉴定及生长特性研究[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(9): 131-139.
LIU X Y, LI Z F, PENG B Z. Isolation, identification and growth characteristics of spoilage fungi from *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(9): 131-139. (in Chinese)
- [26] 兰淑慧, 温晓蕾, 冯丽娜, 等. 栗果草酸青霉菌的室内最适培养条件[J]. *河北科技师范学院学报*, 2022, 36(1): 27-31.
LAN S H, WEN X L, FENG L N, et al. The optimum culture conditions of *Penicillium oxalate* in laboratory causing chestnut decay [J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2022, 36(1): 27-31. (in Chinese)
- [27] SEDLBAUER K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components [J]. Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001: 75-141.
- [28] 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.
- [29] LAI Q J, FENG C. Review of mould prediction models for building materials [J]. *Building Science*, 2022, 38(6): 206-215, 282. (in Chinese)
- [30] ABELLANA M, BENEDÍ J, SANCHIS V, et al. Water activity and temperature effects on germination and growth of *Eurotium amstelodami*, *E. chevalieri* and *E. herbariorum* isolates from bakery products [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 1999, 87(3): 371-380.
- [31] 李寿星. 水活度与相对湿度关系辩证[J]. *微生物学杂志*, 1998, 18(1): 64.
LI S X. Dialectical relationship between water activity and relative humidity [J]. *Journal of Microbiology*, 1998, 18(1): 64. (in Chinese)
- [32] HULIN M, MOULARAT S, KIRCHNER S, et al. Positive associations between respiratory outcomes and fungal index in rural inhabitants of a representative sample of French dwellings [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2013, 216(2): 155-162.
- [33] MOULARAT S, HULIN M, ROBINE E, et al. Airborne fungal volatile organic compounds in rural and urban dwellings: Detection of mould contamination in 94 homes determined by visual inspection and airborne fungal volatile organic compounds method [J]. *The Science of the Total Environment*, 2011, 409(11): 2005-2009.
- [34] VERDIER T, COUTAND M, BERTRON A, et al. A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods [J]. *Building and Environment*, 2014, 80: 136-149.
- [35] 桑红, 邓德权, 何威. 枝孢样枝孢霉的研究概况[J]. *中国真菌学杂志*, 2010, 5(1): 57-60, 64.
SANG H, DENG D Q, HE W. General situation of research on *Cladosporium cladosporium* [J]. *Chinese Journal of Mycology*, 2010, 5(1): 57-60, 64. (in Chinese)
- [36] VIEIRA M R, MILHEIRO A, PACHECO F A. Phaeohyphomycosis due to *Cladosporium cladosporioides* [J]. *Medical Mycology*, 2001, 39(1): 135-137.
- [37] BORNEHAG C G, BLOMQUIST G, GYNTELBERG F, et al. Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to “dampness” in buildings and health effects (NORDDAMP) [J]. *Indoor Air*,

- 2001, 11(2): 72-86.
- [38] ANDERSSON M A, NIKULIN M, KÖLJALG U, et al. Bacteria, molds, and toxins in water-damaged building materials [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(2): 387-393.
- [39] SANGIORGIO A B A A. Moisture and buildings: Durability issues, health implications and strategies to mitigate the risks [M]. Woodhead Publishing, 2021
- [40] XIONG R, XIE G, EDMONDSON A S, et al. Comparison of the Baranyi model with the modified Gompertz equation for modelling thermal inactivation of Listeria monocytogenes Scott A [J]. Food Microbiology, 1999, 16(3): 269-279.

(编辑 胡玲)