

# WUFI-Bio 在墙面霉菌污染研究中的应用

刘显茜, 赵振超, 邹三全, 张雪波

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:**为简单、高效地分析室内墙面霉菌污染成因,首先利用数值方法获得室内墙面温湿度数据,然后利用WUFI-Bio软件预测室内墙面霉菌孢子的生长特性。结果表明,霉菌孢子初始水分含量高低只会影响孢子萌发前的吸水速率,对孢子萌发的临界水分含量并无影响,且对萌发时间的影响也很小。在秋冬两季,由于室外环境温度对室内温度的影响,导致孢子萌发的临界水分含量较高,孢子不易萌发。因春夏两季温度高于秋冬两季,促进了孢子萌发及菌丝生长,基质所含营养物质越多,孢子萌发的临界水分含量越低。在春夏两季,通过降低室内温湿度、减少墙面污染物,可以有效降低孢子萌发机率。

**关键词:**热湿耦合传递;生物热湿模型;霉菌污染

**DOI:** 10.11907/rj.dk.211009

**中图分类号:** TP319

**文献标识码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:** 1672-7800(2022)001-0200-05



## Application of WUFI-Bio in the Study of Wall Mold Pollution

LIU Xian-xi, ZHAO Zhen-chao, ZOU San-quan, ZHANG Xue-bo

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to analyze the cause of indoor mold pollution simply and effectively, numerical methods can be used to obtain the temperature and humidity data of indoor walls, and then use WUFI-Bio to predict the growth characteristics of mold spores on indoor walls. Result showed that the initial moisture content of mold spores only affected the water absorption rate before spore germination, the initial moisture content had no effect on the critical moisture content for spore germination, and had little effect on germination time. In autumn and winter, due to the influence of outdoor environment temperature on indoor temperature, the critical moisture content for spore germination is high, and spores are not easy to germinate. Because the temperature in spring and summer is higher than that in autumn and winter, it promotes the germination of spores and the growth of hyphae. The more nutrients the substrate contains, the lower the critical moisture content required for spore germination. In spring and summer, by lowering indoor temperature and humidity, reducing wall pollution can effectively reduce the chance of spore germination.

**Key Words:** coupled heat and moisture transfer; biological heat and moisture model; mold contamination

## 0 引言

霉菌对人体与建筑材料都有一定危害<sup>[1-5]</sup>。霉菌孢子会通过气流以及人和动物活动等方式传播到室内,并慢慢沉积或附着在建筑墙体及建材表面<sup>[6]</sup>。此时孢子没有萌发,处于休眠状态。当孢子吸收够萌发所需的水分和营养物质后,便开始萌发。孢子萌发需要的营养物质较少,且其来源可能是建材本身附带的污染物,或空气中的粉尘及油脂性物质等<sup>[7]</sup>。适宜孢子萌发的温度和相对湿度是由室

内外环境共同决定的。

国内外学者针对影响霉菌生长的主要因素(温度、相对湿度、营养物质)进行研究,并提出一些霉菌生长预测模型<sup>[8]</sup>。如苏向辉等<sup>[9]</sup>对建筑墙体内热湿耦合传递过程进行研究,通过分析热流和湿分迁移过程,确定湿分迁移方式和迁移量,提出控制湿分传递的方法,并分析了霉菌污染产生的原因;Hukk等<sup>[10]</sup>以木材为基质进行霉菌萌发实验,提出一个预测霉菌生长繁殖临界条件及生长速率的数学模型;Moon等<sup>[11]</sup>提出在各种不确定因素下霉菌生长的概率性指数,并提出建筑物霉菌生长控制策略;Sedlbauer<sup>[12]</sup>提

收稿日期: 2021-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51566006)

作者简介: 刘显茜(1972-),男,博士,昆明理工大学机电工程学院副教授、硕士生导师,研究方向为多孔介质热湿耦合传递理论。

出用于预测霉菌萌发与生长的生物热湿模型及等值线模型,并开发出霉菌预测软件 WUFI-Bio;于水等<sup>[13-14]</sup>利用 WUFI-Bio 软件研究空调系统内的霉菌生长情况,发现环境清洁程度、温湿度都会对霉菌生长产生影响,提示人们在使用空调时应注意空调的清洁和干燥;李念平等<sup>[15]</sup>通过对建筑墙体霉菌生长特性进行实验分析,得出霉菌孢子初始含水量对孢子萌发的影响小于环境相对湿度,在 5 月中旬—6 月中旬以及 8 月初—9 月中旬两个时段需采取有效措施降低霉菌生长概率;曾思景<sup>[16]</sup>、陈国杰等<sup>[17]</sup>利用数值方法预测不同构造墙体的霉菌滋生风险,并基于层次分析法,以建筑能耗、霉菌滋生情况及经济性 3 个因素作为优选指标,选择出最优构造的墙体;He 等<sup>[18-19]</sup>结合 WUFI-Bio 与多物理场仿真软件对室内墙壁的霉菌生长情况进行预测,发现室内温湿度存在季节性变化,霉菌生长预测模型结果与实验结果较为吻合,且大大降低了实验所需成本。

国内外学者通常采用实验方法研究墙面霉菌污染原因,但实验研究存在成本高、时间长、易受不可控因素影响等缺点。鉴于此,本文通过数值方法获取室内墙面的温湿度数据,再使用 WUFI-Bio 软件预测霉菌生长情况,从而得到霉菌一年中的生长特性,提出控制霉菌萌发的对策。

## 1 热湿耦合传递模型

### 1.1 数学模型

因建筑墙体表面湿度与空气湿度并不相等,其是由建筑墙体两侧温湿度以及墙体的热湿性能共同决定的。为获得墙面的温湿度数据,需要对墙体内部的热湿传递过程进行模拟。目前使用的建筑材料基本属于多孔介质,因此对墙体内部热湿传递过程进行数值计算时可使用多孔介质内部热湿耦合传递模型。

为模拟建筑墙体的热湿传递过程,本文提出以下假设:①所有材料均为各向同性,且分布均匀、连续,无形变及化学反应;②不考虑湿分相变,湿空气被视为理想气体;③始终存在局部水分平衡;④忽略不同材料之间的热湿接触阻力;⑤温度对蒸汽扩散系数和物料平衡含水率的影响可以忽略;⑥材料性能不随时间变化。

在考虑空气相对湿度和温度等关键因素的前提下,基于 Fourier 定律、Fick 定律、Darcy 定律及能量守恒定律,建立墙体热湿耦合传递的数学模型:

$$(c_{p,m}\rho_m + \omega c_{p,i}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( \left( \lambda + h_{lv} \delta_p \varphi \frac{dp_s}{dt} \right) \nabla T + h_{lv} \delta_p p_s \nabla \varphi \right) \quad (1)$$

$$\xi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( \left( \delta_p \varphi \frac{dp_s}{dT} + K_i \rho_i R_d \ln(\varphi) \right) \nabla T + \left( \delta_p + K_i \rho_i R_d \frac{T}{\varphi} \right) \nabla \varphi \right) \quad (2)$$

其中, $c_{p,m}$ 、 $c_{p,i}$ 是干材料和液态水的比热容,单位为  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\rho_m$ 是干材料密度,单位为  $kg/m^3$ ;  $w$ 是含水量函数,单位为  $kg/m^3$ ;  $\lambda$ 是导热系数,单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $h_{lv}$ 是水的汽

化潜热,单位为  $kJ/kg$ ;  $\delta_p$ 、 $K_i$ 是水蒸气与液态水传导系数,单位为  $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ;  $p_s$ 是饱和蒸汽分压,单位为  $Pa$ ;  $\xi$ 是材料的等温吸附曲线;  $R_d$ 是气体常数,单位为  $J/(kg \cdot K)$ 。

边界条件表示为:

$$q_{n,i} = h_i (T_i - T_{s,i}) + h_{lv} g_{n,i} \quad (3)$$

$$q_{n,e} = h_e (T_e - T_{s,e}) + h_{lv} g_{n,e} + \alpha I \quad (4)$$

$$g_{n,i} = h_{m,i} (p_{s,i} \varphi_i - p_{s,s,i} \varphi_{s,i}) \quad (5)$$

$$g_{n,e} = h_{m,e} (p_{s,e} \varphi_e - p_{s,s,e} \varphi_{s,e}) \quad (6)$$

其中, $q_n$ 是热通量,单位为  $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $g_n$ 是水分通量,单位为  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $h$ 是对流传热系数,单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_m$ 是对流传质系数,单位为  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $T$ 、 $T_s$ 是空气温度与墙面温度,单位为  $K$ ;  $\varphi$ 、 $\varphi_s$ 是空气与墙面相对湿度;  $p_s$ 、 $p_{s,s}$ 是饱和蒸汽分压,单位为  $Pa$ ;  $I$ 是太阳辐射强度,单位为  $W/m^2$ ;  $\alpha$ 是外墙面的太阳辐射吸收系数。两个下标  $i$  与  $e$  分别代表内部边界条件及外部边界条件。

### 1.2 模型有效性验证

为保证模型的有效性及准确性,将热湿耦合传递模型的模拟结果与 HAMSTAD 平台实验得出的数据进行对比,该模型验证方法是国际公认的用于验证模型是否科学的方法。HAMSTAD 包含 5 个验证实例,其中实例 2 是均质墙体的验证实例。

HAMSTAD 验证实例 2 对 200 mm 厚的单层各向同性墙体的等温干燥过程进行分析。墙体的初始温度与相对湿度分别为 293.15 K、95%,模拟过程中因受外界环境影响,室外边界条件为 293.15 K、45%,室内边界条件为 293.15 K、65%。其室内外对流传热系数均为  $25 W/(m^2 \cdot K)$ ,对流传质系数为  $1 \times 10^{-3} s/m$ 。墙体材料的热湿参数如表 1 所示,吸附等温曲线如式 (7) 所示。

$$w = \frac{116}{\left( 1 - \frac{1}{0.118} \ln(\varphi) \right)^{0.869}} \quad (7)$$

Table 1 Thermal and moisture parameters of isotropic wall

表 1 各向同性墙体热湿参数

水蒸汽渗透率/ ( $kg/(m \cdot Pa \cdot s)$ )	湿扩散系数/ ( $m^2/s$ )	导热系数/ ( $W/(m \cdot K)$ )	比热容/ ( $kJ/kg \cdot K$ )	密度 ( $kg/m^3$ )
1e-15	6e-10	0.15	800	525

计算步长为 1,计算时间分别为 100 h、300 h 和 1 000 h 时,墙体内部水分含量如图 1 所示(彩图扫 OSID 码可见,下同)。通过对比可知,该热湿耦合传递模型模拟结果与 HAMSTAD 验证实例 2 中的测量数据较为吻合。

## 2 霉菌生长预测模型

霉菌生长预测模型采用生物热湿模型,也即 WUFI-Bio 使用的预测模型,通过孢子的水分储存函数和扩散阻力值计算孢子内部水分含量,利用等值线模型计算不同温湿度环境下孢子萌发的临界水分含量。基于瞬态气候环境数据,通过对比孢子内含水量与当前临界含水量大小,以确定霉菌孢子是否可以萌发。当孢子内部含水量超过临界

含水量时,孢子开始萌发。生物热湿模型按照墙面所含营养物质分为3类: class 0为最适合霉菌生长的材料,如污染较严重的墙面; class 1为含有一些生物可利用基质的墙面,如墙纸、石膏等生物降解材料,或污染不严重的墙面; class 2为含有少量生物可利用基质的墙面,如矿物建筑材料、木制品以及不属于第二类的保温材料。class K为预测有害霉菌生长情况的墙面模型。在不同基质类别的墙体材料中,只需测出墙体表面温湿度数据,即可计算出霉菌孢子萌发的大概时间。对于已发霉的墙体,可通过模拟计算推测出霉菌生长时间段;对于可能发霉的墙体,则可预测其霉变的大概时间及菌丝生长长度,从而采取相应措施抑制霉变。

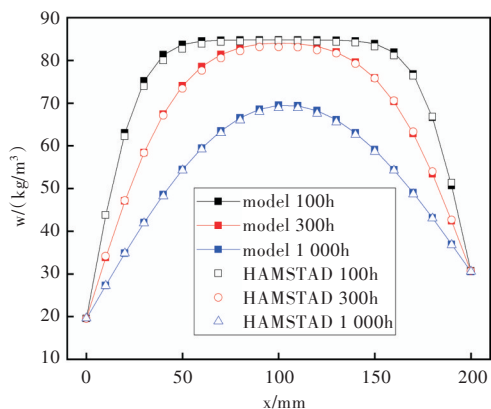


Fig. 1 Distribution of water content inside the wall at 100h, 300h and 1000h

图1 100h、300h、1000h时墙体内部水分含量分布

### 3 模拟结果及分析

本文以长沙地区一间民用建筑为仿真对象,对房间室内墙体表面的霉菌生长特性进行模拟预测与分析。房间墙体为加气混凝土砖墙,其墙体材料依次为水泥砂浆(20mm)一加气混凝土(240mm)一水泥砂浆(20mm)。模拟的墙体处于阴面,常年无法受到太阳光直射,因此暂不考虑太阳辐射对霉菌生长的影响。利用COMSOL Multiphysics<sup>[20]</sup>软件对墙体进行仿真,从而获得室内墙面温湿度。对于物理模型的网格划分,采用软件内置的网格划分模块将墙体网格划分为自由三角形网格。根据GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》<sup>[21]</sup>,设置墙体内外表面的对流换热系数分别为 $8.7W/(m^2 \cdot K)$ 和 $23W/(m^2 \cdot K)$ ,以及内外表面的对流传质系数分别为 $3 \times 10^{-8}s/m$ 和 $2 \times 10^{-7}s/m$ 。室外边界条件取中国标准气象数据(CSWD)中长沙地区的气候数据,室内边界条件根据GB 50176-2016规定,空气温度平均值应取室外空气温度平均值+1.5K,温度波幅应取室外空气温度波幅-1.5K,并将其逐时化。长沙地区室外气候数据如图2所示,模拟时间为两年。为避免墙体初始温湿度对仿真结果的影响,只采用第二年的仿真结果进行预测分析。

通过图2可看出长沙地区室外天气情况,长沙地区整年温度很少在0℃以下,且雨水十分充足,平均空气相对湿

度保持在80%以上。由此可知,长沙地区的天气有利于室外墙壁霉菌生长,但不知道其对室内墙面霉菌生长的影响。通过对墙体内部的热湿耦合传递进行仿真模拟,得出室内墙壁的温湿度数据。计算结果如图3所示,可看出室内温度受室外环境温度的影响,其变化趋势与室外温度相同,但室内平均温度比室外高约2K,而室内相对湿度维持在80%左右。

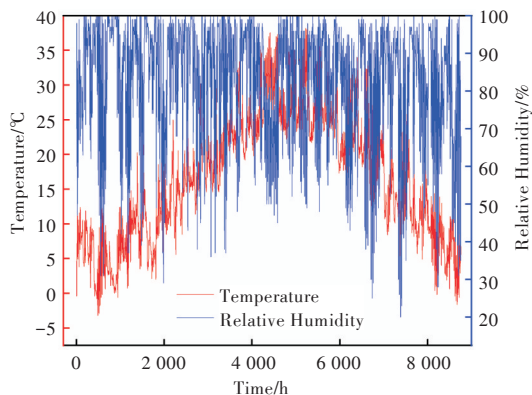


Fig. 2 Outdoor temperature and relative humidity in Changsha

图2 长沙地区室外温度与相对湿度

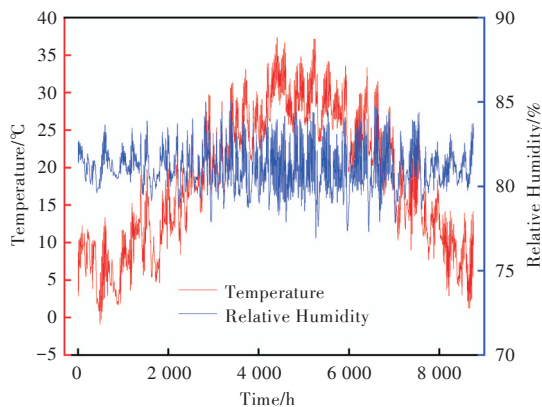


Fig. 3 Indoor wall temperature and relative humidity

图3 室内墙面温度与相对湿度

由于模拟墙体墙面为砂浆抹面,按照建筑材料提供霉菌生长所需的营养物质水平划分,其属于class 2基质类。假设墙面上霉菌孢子的初始相对湿度<sup>[10]</sup>为40%~80%,分别计算5种情况下孢子内部水分含量随室内墙面温湿度变化的过程,如图4、图5所示。在室内墙面温湿度相同的条件下,不管霉菌孢子内的初始水分含量是否相同,其萌发所需临界水分含量都是一样的。经过预测模型计算得出,对于初始水分含量不同的霉菌孢子,在孢子萌发前3个月的吸水速率不同,初始水分含量越低,其水分含量增长速率越快。孢子内部初始水分含量与环境水分含量均为80%时,其吸水速率最低。初始含水量不同的霉菌孢子在前3个月的吸水过程中,孢子内部的水分含量存在一定差别,但随着对水分的不断吸收,差别逐渐缩小。在霉菌孢子吸收水分3个月后,初始水分含量不同的孢子水分含量已基本相同。

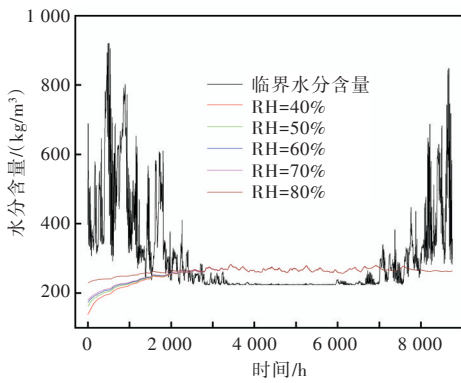


Fig. 4 Spore moisture content and critical moisture content of indoor wall

图 4 室内墙面孢子水分含量与临界水分含量

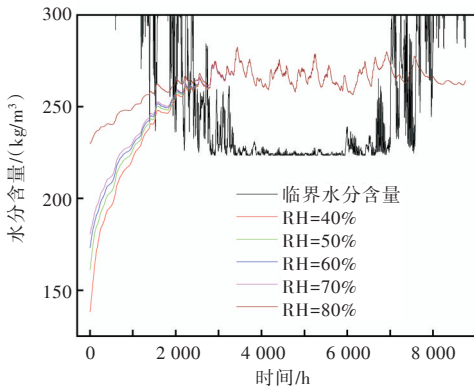


Fig. 5 Partial diagram of indoor wall spore moisture content and critical moisture content

图 5 室内墙面孢子水分含量与临界水分含量局部图

室内墙面菌丝生长长度如图 6 所示。由图 4、图 6 可以看出,当霉菌孢子内部水分含量高于萌发所需的临界水分含量,即在 2 月中旬时,孢子萌发,菌丝开始生长。3 月初至 10 月末,菌丝生长速率保持一定,呈线性关系。当菌丝开始生长后,不同初始含水量对菌丝最终的生长长度影响很小,最终菌丝生长长度均约为 64 mm。

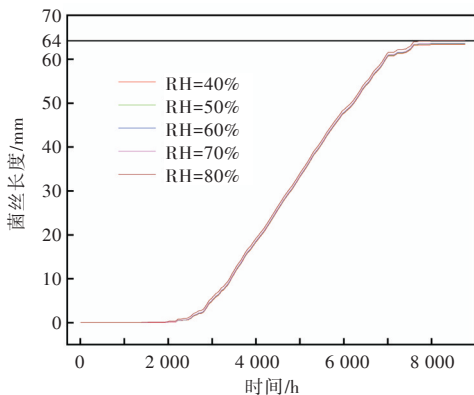


Fig. 6 Indoor wall hypha growth length

图 6 室内墙面菌丝生长长度

霉菌孢子的萌发与室内环境温湿度有直接关系,而墙体墙面可为孢子萌发提供营养基质,因此墙面材料会对孢子萌发产生巨大影响。由于空气流通以及人或动物活动

会污染墙面,有可能产生 class 1 基质类,甚至有可能因长期没有清理墙面而产生 class 0 基质类。假定孢子内部初始相对湿度为 80%,在室内温湿度相同的条件下,计算生长在不同基质类中孢子萌发的临界水分含量。如图 7 所示,霉菌孢子在不同的生长基质中,其萌发所需的临界水分含量也有所不同。class 0、class 1、class 2 基质类随着营养基质的减少,孢子萌发所需的临界水分含量逐渐增加,时间也逐渐延长。在春夏两季,当墙面材料属于 class 0 基质类时,霉菌孢子内部水分含量达到 180kg/m³ 即可萌发,而当墙面材料属于 class 2 基质类时,墙面含有孢子萌发所需的营养物质较少,因此需要孢子内部水分含量达到 224kg/m³ 才能萌发。因为本文模拟的房间没有空调及供暖设备,所以在秋冬两季室外环境温度较低,会影响到室内环境温度。因此,从 10 月份至来年 3 月份的秋冬两季,孢子萌发所需的临界水分含量高于 3-10 月份春夏两季孢子萌发的临界水分含量。

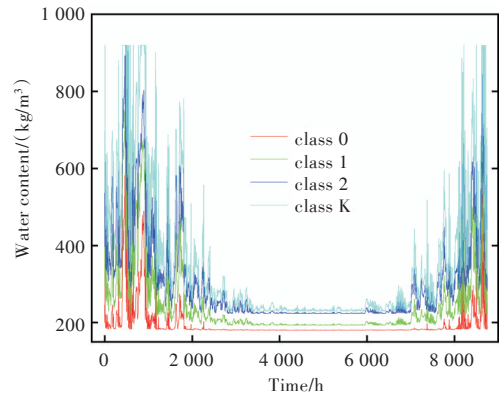


Fig. 7 Critical moisture content of spore germination on indoor wall under different substrates

图 7 不同基质条件下室内墙面孢子萌发临界水分含量

室内环境作为人们日常生活的主要场所,墙体内墙面经常会生长出对人体健康不利的霉菌,如烟曲霉、黄曲霉、纸葡萄穗霉等。基质类别 class K 可预测有害霉菌孢子萌发所需的临界水分含量,由图 7 中的 class K 曲线可看出,在 class K 基质类墙面上生长的有害霉菌孢子萌发的临界水分含量为 230.4kg/m³,而生长在 class 0、class 1、class 2 基质类墙面上的孢子萌发临界水分含量分别为 180.4kg/m³、193.3kg/m³、223.6kg/m³。因此,生长在 class K 基质中的霉菌孢子萌发所需临界水分含量高于 class 0、class 1 与 class 2。

### 4 结语

本文首先利用 COMSOL Multiphysics 软件对处于夏热冬冷气候区的民用建筑墙体进行热湿耦合传递仿真分析,然后通过 WUFI-Bio 软件分析生长在内墙面的霉菌一年时间内的生长特性。通过研究得出了孢子内初始水分含量、环境温湿度、霉菌生长基质等因素对霉菌孢子萌发的影响程度:孢子内初始水分含量对孢子萌发的影响小于环境温湿度,并且随着孢子内部水分含量的增加,其影响力逐渐

减弱;室内墙壁在秋冬季两个温度较低的季节不容易发霉;墙面含有的有机物质增多会导致孢子萌发时间缩短;在春夏两季,有害霉菌孢子更容易萌发。因此,要注意保持墙面洁净,降低室内相对湿度,有利于抑制孢子萌发。同时,本研究存在一定误差,如外边界条件的取值为长沙市典型的气象数据,与墙体外表面的实际温湿度数据相比存在一定误差。因此,在后续研究中将使用墙体外表面的实际温湿度数据,进一步减少仿真误差,从而对墙体霉菌滋生原因进行更深入的研究。

参考文献:

[1] MORALES M T, HEMANDEZ C E, CARVAJAL M M, et al. Human health risk associated with the consumption of aflatoxins in popcorn [J]. Risk Management and Healthcare Policy, 2020, 13: 2583-2591.

[2] ZHUGE Y. Study on the airborne microbial pollution and influencing factors in residences and public buildings [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.  
诸葛阳. 典型建筑室内微生物污染现状及影响因素分析 [D]. 南京: 东南大学, 2019.

[3] JIANG L. Brief analysis of oilfield building waterproof problems and prevention measures [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019 (6): 183-184, 152.  
姜雷. 浅析油田建筑防水存在问题及防治措施 [J]. 化学装备与工程, 2019(6): 183-184, 152.

[4] MA J C. A simulation study on the condensation problem of the enclosure structure of the radiant air conditioning room in the hot summer and cold winter area [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.  
麻建超. 夏热冬冷地区辐射空调房间围护结构结露问题的模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.

[5] ARAKI A, KANAZAWA A, KAWAI T, et al. The relationship between exposure to microbial volatile organic compound and allergy prevalence in single-family homes [J]. Science of the Total Environment, 2012, 423: 18-26.

[6] LI B H. Analysis about the influence of thermal and humidity environment on mould growth in multi-layer wall [D]. Changsha: Hunan University, 2011.  
李炳华. 多层组合墙体内部热湿环境对霉菌生长的影响分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

[7] MA Y, LI Y H, LIU Z J. Environmental factors of indoor mold contamination and healthy living [J]. New Architecture, 2019(5): 28-31.  
马琰, 李永辉, 刘志军. 室内霉菌污染的环境成因与健康人居 [J]. 新建筑, 2019(5): 28-31.

[8] LIU X Y, LI Z, CHEN J B. Influencing factors and control analysis of mold growth in building indoor environment [J]. Energy and Environment, 2019(3): 71-72, 74.  
刘晓宇, 李钊, 陈剑波. 建筑室内环境霉菌生长影响因素与控制分析 [J]. 能源与环境, 2019(3): 71-72, 74.

[9] SU X H, ANG H S. Causes of mould and mildew pollution to indoor environment and its control measure [J]. Environmental Pollution and Control, 2003, 25(3): 150-153.  
苏向辉, 昂海松. 室内霉菌污染原因及其控制对策 [J]. 环境污染与防治, 2003, 25(3): 150-153.

[10] HUKK A A, VIITANEN H A. A mathematical model of mould growth on wooden material [J]. Wood Science and Technology, 1999, 33(6): 457-485.

[11] MOON H J, AUGENBROE G. Evaluation of hygrothermal models for mould growth avoidance prediction [C] // Eighth International IBPSA Conference, 2003: 895-902.

[12] SEDLBAUER K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components [D]. Holzkirchen: Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.

[13] YU S, ZHENG S, LI K R, et al. To simulate the mold growth in air condition of public building [J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(5): 1-5.  
于水, 郑淑, 李克冉, 等. 公共建筑空调内部霉菌生长模拟研究分析 [J]. 建筑节能, 2016, 44(5): 1-5.

[14] YU S, WANG W, ZHENG S, et al. Experimental analysis based on the mold harming in northeast residential building [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(4): 751-758.  
于水, 王伟, 郑淑, 等. 严寒地区居民建筑室内微生物滋生状况研究分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 751-758.

[15] LIN P, LI B H, HU J H. Simulation of mold growth on building walls [J]. Science and Technology Review, 2010, 28(15): 41-44.  
李念平, 李炳华, 胡锦涛. 建筑墙体霉菌生长特性模拟分析 [J]. 科技导报, 2010, 28(15): 41-44.

[16] ZENG S J. The analyses of heat and moisture transfer and the risk of mould growth in the underground buildings [D]. Changsha: Hunan University, 2013.  
曾思景. 地下建筑热湿传递与霉菌生长风险分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.

[17] CHEN G J, CHEN Y M, LIU X W, et al. On the mould germination risk evaluation inside the hygroscopic wall in south of China [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 730-734.  
陈国杰, 陈友明, 刘向伟, 等. 我国南方地区吸湿性墙体内部霉菌滋生风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 730-734.

[18] HE Y Y, CHEN G J, LUO Q H, et al. Evaluation of mould growth on wall surface in south China [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 4135-4141.

[19] HE Y Y, LUO Q H, TU M, et al. Mould risk analysis on interior surface of residential wall in hot summer and cold winter zone [J]. Building Energy and Environment, 2019, 38(4): 21-26.  
贺宇彦, 罗清海, 涂敏, 等. 夏热冬冷地区住宅墙体内部霉菌风险分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(4): 21-26.

[20] GU X W, LIU B, XU X M, et al. The simulation of argon discharge in hollow fiber based on COMSOL Multiphysics [J]. Software Guide, 2020, 19(6): 155-159.  
顾小卫, 刘彬, 许雪梅, 等. 基于COMSOL Multiphysics的空芯光纤中氩气放电模拟仿真 [J]. 软件导刊, 2020, 19(6): 155-159.

[21] China Academy of Building Research. GB 50176-2016. Code for thermal design of civil building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018.  
中国建筑科学研究院. GB 50176-2016. 民用建筑热设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.