

环境试验与观测

## 海南西沙试验站大气霉菌群落初步调查

戈帆<sup>1,2,3</sup>, 肖建军<sup>1,2,3</sup>, 刘剑<sup>1,2,3</sup>, 杨玉萍<sup>1,2,3</sup>, 王冲文<sup>1,2,3</sup>, 刘艳芳<sup>1,2,3</sup>,  
赵远荣<sup>1,2,3</sup>, 杨品杰<sup>1,2,3</sup>, 刘云红<sup>1,2,3</sup>, 李叶涵<sup>1,2,3</sup>

(1. 云南北方光电仪器有限公司, 昆明 650114; 2. 云南西双版纳大气环境材料腐蚀国家野外科学观测  
研究站, 昆明 650114; 3. 西双版纳大气环境材料腐蚀云南省野外科学观测研究站, 昆明 650114)

**摘要:** **目的** 筛选西沙试验站大气环境优势菌种, 进行西沙试验站装备敏感菌研究。**方法** 采用撞击法进行大气霉菌采样, 用统计学法计算出不同试验场地真菌数量, 结合形态学法与 ITS1-5.8S-TIS2 或 26S rDNA D1/D2 区序列分析法鉴定菌种, 并用 SPSS 初步探讨大气真菌与环境因素的关系, 分析西沙试验站装备敏感菌。**结果** 西沙试验站优势种为 *Aspergillus aculeatus*、*Penicillium citrinum*、*Pithomyces sacchar*、变红镰孢霉 *Fusarium incarnatum*、*Cladosporium oxysporum* 和 *Cladosporium oryzae*, 影响西沙试验站大气霉菌群落结构的重要环境因素是相对湿度和风速, 贮存在西沙试验站的装备容易长霉, 多种材料有不同的敏感菌, 尤其是涂层样件和橡胶类材料。**结论** 西沙试验站大气环境中存在种类繁多的霉菌。

**关键词:** 西沙试验站; 大气霉菌; 优势种群; 环境因素; 装备; 敏感菌

中图分类号: TJ06 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)03-0121-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.016

### Preliminary Investigation of Atmospheric Fungal Community in Xisha Experimental Station

GE Fan<sup>1,2,3</sup>, XIAO Jianjun<sup>1,2,3</sup>, LIU Jian<sup>1,2,3</sup>, YANG Yuping<sup>1,2,3</sup>, WANG Chongwen<sup>1,2,3</sup>, LIU Yanfang<sup>1,2,3</sup>,  
ZHAO Yuanrong<sup>1,2,3</sup>, YANG Pinjie<sup>1,2,3</sup>, LIU Yunhong<sup>1,2,3</sup>, LI Yehan<sup>1,2,3</sup>

(1. Yunnan North Optical & Electronic Instrument Co., Ltd., Kunming 650114, China; 2. Yunnan Xishuangbanna National  
Observation and Research Station for Materials Corrosion in Atmospheric Environment, Kunming 650114, China;  
3. Yunnan Xishuangbanna Observation and Research Station for Materials Corrosion in Atmospheric  
Environment, Kunming 650114, China)

**ABSTRACT:** The work aims to screen dominant fungal species in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station and conduct research on sensitive fungal in Xisha Experimental Station equipment. The impact method was used for sampling atmospheric fungi, and statistical methods were used to calculate the number of fungi in different experimental sites. Morphological methods were used, the species were identified in combination with ITS1-5.8S-TIS2 or 26S rDNA D1/D2 region sequence analysis. SPSS was used to preliminarily explore the relationship between atmospheric fungi and environmental factors, and to analyze the sensitive fungi in Xisha Experimental Station equipment. The dominant species at the Xisha Experimental

收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2024-01-10

Received: 2023-10-11; Revised: 2024-01-10

基金项目: 国防技术基础科研项目 (JSHS2019610B001-2)

Fund: Basic Research Project of National Defense Technology (JSHS2019610B001-2)

引文格式: 戈帆, 肖建军, 刘剑, 等. 海南西沙试验站大气霉菌群落初步调查[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 121-128.

GE Fan, XIAO Jianjun, LIU Jian, et al. Preliminary Investigation of Atmospheric Fungal Community in Xisha Experimental Station[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 121-128.

Station were *Aspergillus aculatus*, *Penicillium citrinum*, *Pithomyces sacchar*, *Fusarium incarnatum*, *Cladosporium oxysporum*, and *Cladosporium oryzae*. The important environmental factors affecting the structure of the atmospheric mold community at Xisha Experimental Station were relative humidity and wind speed. Equipment stored in Xisha Experimental Station was prone to mold growth, and various materials had different sensitive fungi, especially for coating samples and rubber materials. There are various types of fungi in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station.

**KEY WORDS:** Xisha Experimental Station; atmospheric fungi; dominant populations; environmental factors; equipment, sensitive fungi

霉菌是一类较低等而又比较特殊的异养真核生物<sup>[1]</sup>，它通过吸附在有机物质上进行渗透营养生长，霉菌个体较小，结构较单一，生命力旺盛，分布在地球的任何一个角落，霉菌在生态系统中是极为重要的生命体之一<sup>[2-3]</sup>。根据现有的文献得知，世界上霉菌的种类大约有 150 万种，仅有 5% 的霉菌被描述和发现，它分布广泛，种类繁多，它在生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。大气霉菌主要来源于植物、动物、土壤等<sup>[2]</sup>，同时也存在人为因素，如食品加工、药物制剂和农业生产等都能传播霉菌孢子<sup>[3]</sup>。

西沙试验站所在地区由于其独特的气候条件，大气中富含细菌、真菌等海洋微生物<sup>[4-6]</sup>。部署在该区域内的舰船、飞机以及电子设备等装备，其涂层防护体系容易被海洋微生物附着，从而引发涂层的微生物腐蚀现象<sup>[7-9]</sup>。霉菌能以材料表面的防护涂层为碳源，在表面生长繁殖，其代谢产生的有机酸等可直接破坏涂层，继而腐蚀基体材料<sup>[10-12]</sup>。霉菌对涂层和材料的腐蚀效果取决于腐蚀过程，而腐蚀过程是霉菌生长繁殖、新陈代谢、生物膜形成、金属材料表面电学变化等一系列过程的综合结果<sup>[13-14]</sup>。

西沙试验站具有典型的高温高湿海洋环境特点，霉菌易生长繁殖，暴露在霉菌生长环境中的典型防护涂层体系装备不可避免地会受到霉菌的腐蚀。因此，大气霉菌组成和多样性的可靠性检测是开展西沙试验站大气环境霉菌防护的基础<sup>[3]</sup>。本研究通过对西沙试验站的大气霉菌进行研究，了解大气霉菌数量和优势种群，初步探讨大气霉菌与环境因素的关系。开展西沙试验站自然环境防霉技术研究，为典型防护涂层体系装备制定适宜的霉菌试验方法和防霉措施提供数据支撑。

## 1 试验

### 1.1 具体步骤

霉菌采集步骤和方法如图 1 所示。大气霉菌采集方法<sup>[15]</sup>参考 GB/T 18204.3—2013《公共场所卫生检验方法第 3 部分：空气微生物》(见附件 A)，菌种鉴定以传统的鉴定方法为主，辅助 ITS1-5.8S-ITS2 或 26S rDNA D1/D2 区序列分析。

在 2021 年 3 月 10 日、2022 年 7 月 9 日对西沙试验站进行了 2 次大气霉菌样品采集，以西沙试验站

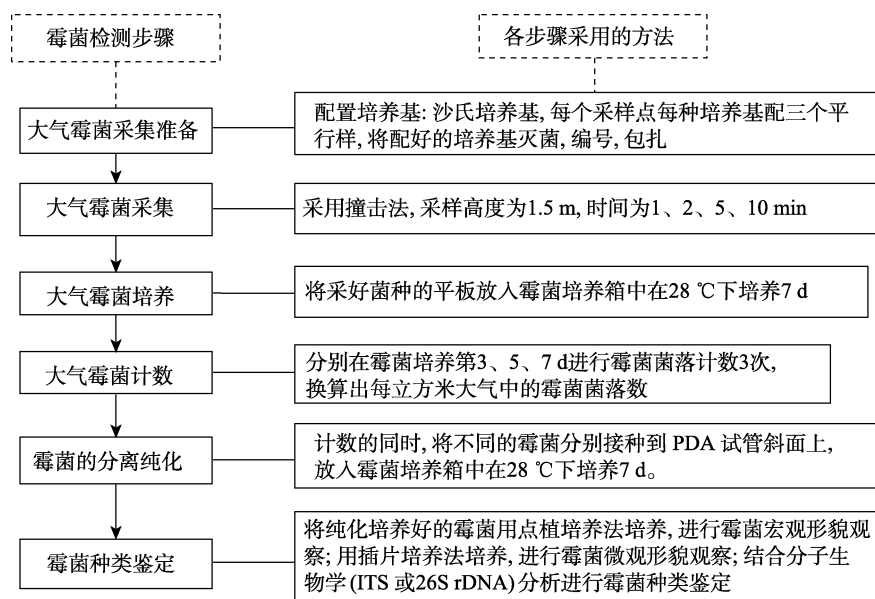


图 1 霉菌鉴定步骤和方法

Fig.1 Steps and methods for fungi identification

的试验场(完全暴露的自然环境)、试验棚(半封闭暴露的自然环境)、试验库(全封闭暴露的自然环境)为霉菌采集地,使用撞击法进行采集。按 GB/T 18204.3—2013 中撞击法对布点的要求,在试验场布 5 个采样点,试验棚和试验库各布 1 个采样点,采样点分布如图 2 和图 3 所示。采样时间是 13 点,用撞击法<sup>[16-18]</sup>将样品采集到沙氏培养基上,每个采样点 3 个平行样。采样器采用六级筛孔微生物撞击器,采样高度为 1.5 m。西沙试验站第一次采样时间为 1、2、5、10 min,第二次采样时间为 1 min。采样大气流量均为 28.3 L/min。将沙氏培养基放入 28 °C 培养箱中培养,分别在第 3、5、7 d 进行菌落计数和霉菌挑取,用 PDA 培养基进行霉菌纯化。计数过程中,将每个单一菌落转接到 PDA 试管上,放入霉菌培养箱中在 28 °C 下培养 7 d,观察菌株的形貌特征,合并同类菌,合并后菌株数多的即为该采样地优势菌种。用灭菌的棉签直接蘸取材料或者产品表面生长的霉菌菌落,将蘸取霉菌的一端朝下,放入 PDA 斜面培养基上,在实验室用涂皿的方式进行分离纯化菌株。

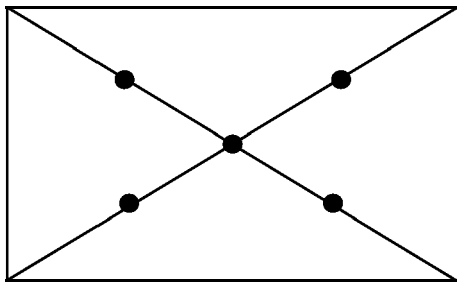


图 2 试验场采样点示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling points in the testing ground

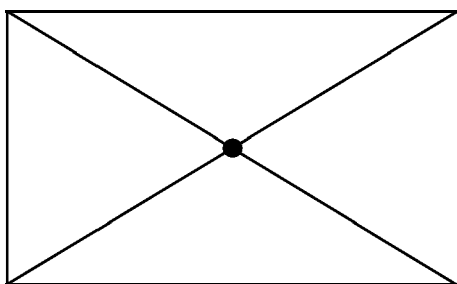


图 3 试验棚、库采样点示意图

Fig.3 Schematic diagram of sampling points in the testing shed and warehouse

霉菌传统的鉴定主要以菌落形态和显微形态为主<sup>[19-24]</sup>。菌落形态采用 3 种培养基(CYA、PDA、MEA)进行点植培养,观察 4、7、11 d 菌落的生长速度,形态、质地、颜色等;显微形态主要采用 PDA 和促孢培养基进行插片培养,分别于 4、7、15、30、45、60 d 进行抽片观察菌丝的颜色、粗细、有无隔膜和锁状联合等,以及孢子、孢子器、孢子盘、孢子座、

胞囊、担子、担孢子的颜色、大小、形态、着生方式等,并对其大小进行测量。运用改良的 CTAB 法<sup>[25]</sup>对霉菌基因组 DNA 进行提取,DNA 的 ITS 基因序列 PCR 扩增反应体系(25 μL): Mix 为 12.5 μL,引物 ITS1、ITS4(或 NL1、NL4)和 DNA 模板各为 1 μL,水为 9.5 μL。PCR 扩增条件:94 °C 预变性 5 min,94 °C 变性 1 min,56 °C 退火 45 s,72 °C 延伸 1 min,35 个循环,72 °C 延伸 10 min。电泳为 25 min,120 V,1% 的琼脂糖凝胶。将扩增好的 PCR 产物送上海生工生物有限公司进行序列测定。ITS1-5.8S-ITS2 或 26S rDNA D1/D2 区测序结果采用 DNASTAR 软件进行人工校正,然后在 NCBI 的 GenBank 核酸序列数据试验库中搜索同源序列,采用 Clustal 和 MEGA 软件进行分子系统学分析。之后查阅《霉菌鉴定手册》《半知菌属图解》《霉菌分类学》《霉菌的形态和分类》《Dictionary of the Fungi: 10<sup>th</sup> Edition》等霉菌鉴定工具书,结合形态学和 ITS1-5.8S-TIS2 或 26S rDNA D1/D2 的结果进行鉴定到种,对霉菌种类、特性进行分析,确定优势菌种的生物学分类地位。对比 5 个周期优势菌种鉴定结果,确定出采样地数量多、分布广、生存周期长的优势菌种。

## 1.2 数据处理

每个采样点的 3 个平行样用格鲁布斯检验法进行检验,按式(1)求出  $G_i$ 。再置信区间 99%,临界值  $G_{99}(3)=1.15$ 。若  $G_i > 1.15$ ,则判定为离群值,应舍去;若  $G_i < 1.15$ ,则判定为正常值,再用正常值求出平行样霉菌菌落数的平均值,即为该采样点平板菌落总数。数据的修约按照 GB/T 8170—2008《数据修约规则与极限数值的表示和判定》执行。

$$G_i = |X_i - \bar{X}| / S \quad (1)$$

式中:  $X_i$  为可疑值;  $\bar{X}$  为样本平均值;  $S$  为标准差。

用撞击法采样的平板计数结果,按式(2)计算出各采样点每立方米大气霉菌菌落数。

$$\text{空气中霉菌菌落数} = (N \times 1000) / (28.3t) \quad (2)$$

式中:  $N$  为经培养后平板上生长的菌落数;  $t$  为平板暴露时间, min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气环境霉菌数量分析

由表 1 知,不同的采样时间得到的霉菌数量不同,总体上 1 min 采集到的霉菌数量最多,10 min 的最少。按场地来说,试验场的霉菌数量最多,约为 2 700~6 000 cfu/m<sup>3</sup>,其次是试验库,约为 2 100 cfu/m<sup>3</sup>,最少是试验棚,约为 1 200 cfu/m<sup>3</sup>。通过试验可知,西沙试验站环境大气霉菌最佳采集时间为 1 min。由表 2 知,第二次在西沙试验站采样得到的霉菌数量比

表1 2021年西沙试验站大气环境霉菌菌落计数结果

Tab.1 Results of fungal colony count in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station in 2021

场地	1 min		2 min		5 min		10 min	
	计数结果	菌落数/(cfu·m <sup>-3</sup> )	计数结果	菌落数/(cfu·m <sup>-3</sup> )	计数结果	菌落数/(cfu·m <sup>-3</sup> )	计数结果	菌落数/(cfu·m <sup>-3</sup> )
试验场 1	127	4 488	192	3 392	118	834	205	724
试验场 2	172	6 078	216	3 816	249	1 760	388	1 371
试验场 3	222	7 845	192	3 392	340	2403	350	1 250
试验场 4	76	2 686	275	4 859	129	912	125	442
试验场 5	405	14 311	309	5 459	373	2 636	328	1 159
试验棚	39	1 378	65	1 148	153	1 081	152	537
试验库	62	2 191	100	1 767	194	1 371	172	608

表2 2022年西沙试验站大气环境霉菌菌落计数结果

Tab.2 Results of fungal colony count in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station in 2022

结果	试验场 1	试验场 2	试验场 3	试验场 4	试验场 5	试验棚	试验库
计数结果	34	29	32	29	78	27	89
菌落数/(cfu·m <sup>-3</sup> )	1 201	1 025	1 131	1 025	2 756	954	3 145

第一次少很多,可能因为采样前几天持续降水,导致空气中的霉菌孢子浓度降低,试验库的数量最多,试验棚最少。

## 2.2 西沙试验站大气霉菌群落结构

2021年从试验场、试验棚、试验库的3个平行样中挑取并纯化了1 585株菌种,进行插片、点植和结合分子生物学方法,共鉴定为5属17个种,结果

见表3。西沙试验站中大气霉菌数量较多的是 *Aspergillus aculeatus*、*Cladosporium oryzae* 和 *Cladosporium oxysporum*, 分别有402、336、283株, 占总菌株数的25.36%、21.20%、17.85%。试验场分离得到13种霉菌,数量较多的是 *Aspergillus aculeatus*、*Cladosporium oryzae* 和 *Cladosporium oxysporum*, 分别有334、309、214株,占试验场菌株数(1 286)的25.80%、24.02%、16.64%。试验棚有

表3 2021年西沙试验站大气环境菌种鉴定结果

Tab.3 Identification results of fungal species in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station in 2021

序号	菌种数量							合计	鉴定结果	占比/%
	场 1	场 2	场 3	场 4	场 5	棚	库			
1	195	16	25	26	72	10	58	402	<i>Aspergillus aculeatus</i>	25.36
2	264			45			27	336	<i>Cladosporium oryzae</i>	21.20
3	47	76	37	37	17	32	37	283	<i>Cladosporium oxysporum</i>	17.85
4	53	55	10	29	32	19	13	211	变红镰孢霉 <i>Fusarium incarnatum</i>	13.31
5			58		41	30	23	152	<i>Pithomyces sacchari</i>	9.59
6	65				21	5		91	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	5.74
7	10	1			17	12		40	桔青霉 <i>Penicillium citrinum</i>	2.52
8				10				10	<i>Aspergillus terreus</i>	0.63
9		1		5	3			9	黄曲霉 <i>Aspergillus flavus</i>	0.57
10						9		9	<i>Penicillium sclerotiorum</i>	0.57
11							9	9	<i>Penicillium chrysogenum</i>	0.57
12		3	5					8	<i>Aspergillus stromatoides</i>	0.50
13						7		7	<i>Fusarium proliferatum</i>	0.44
14	3						3	6	歧皱青霉 <i>Penicillium steckii</i>	0.38
15							5	5	<i>Aspergillus europaeus</i>	0.32
16	5							5	厚垣镰孢霉 <i>Fusarium chlamyosporum</i>	0.32
17					2			2	黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	0.13
合计			1286			124	175	1585		100.0

8 种霉菌, 数量较多的是 *Cladosporium oxysporum*、*Pithomyces sacchari* 和变红镰孢霉 (*Fusarium incarnatum*), 分别有 32、30、19 株, 占试验棚菌株数 (124) 的 25.81%、24.19%、15.32%。试验库有 8 种霉菌, 数量较多的是 *Aspergillus aculeatus*、*Cladosporium oxysporum* 和 *Cladosporium oryzae*, 分别有 58、37、27 株, 占试验库总菌株数 (175) 的 33.14%、21.14%、15.43%。

2022 年从试验场、试验棚、试验库的 3 个平行样中挑取并纯化了 536 株菌种, 进行插片、点植和结合分子生物学方法, 共鉴定为 7 属 14 个种, 结果见

表 4。西沙试验站中大气霉菌数量较多的是 *Penicillium citrinum* 和 *Aspergillus versicolor*, 分别有 111、87 株, 占总菌株数的 20.71%、16.23%。试验场分离得到 11 种霉菌, 数量较多的是 *Talaromyces xishaensis* 和 *Talaromyces allahabadensis*, 分别有 63、48 株, 占试验场菌株数 (252) 的 25.0%、19.04%。试验棚有 5 种霉菌, 数量最多的是 *Curvularia hawaiiensis*, 有 33 株, 占试验棚菌株数 (85) 的 38.82%; 试验库有 4 种霉菌, 数量较多的是 *Aspergillus versicolor* 和 *Penicillium citrinum*, 分别有 87、65 株, 占试验库总菌株数 (199) 的 43.72% 和 32.66%。

表 4 2022 年西沙试验站大气环境菌种鉴定结果

Tab.4 Identification results of fungal species in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station in 2022

序号	菌种数量							合计	鉴定结果	占比/%
	场 1	场 2	场 3	场 4	场 5	棚	库			
1	16	11				19	65	111	<i>Penicillium citrinum</i>	20.71
2							87	87	<i>Aspergillus versicolor</i>	16.23
3			3	5	55			63	<i>Talaromyces xishaensis</i>	11.75
4			10	6		33		49	<i>Curvularia hawaiiensis</i>	9.14
5	27				21			48	<i>Talaromyces allahabadensis</i>	8.96
6	13					14	15	42	<i>Aspergillus stromatoides</i>	7.84
7			34					34	<i>Aspergillus nomius</i>	6.34
8							32	32	<i>Penicillium citreosulfuratum</i>	5.97
9	10			3			8	21	<i>Aspergillus aculeatus</i>	3.92
10		15						15	<i>Nigrospora sphaerica</i>	2.80
11						11		11	<i>Pithomyces sacchari</i>	2.05
12			10					10	<i>Penicillium spinulosum</i>	1.87
13				8				8	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	1.49
14				5				5	<i>Penicillium sclerotiorum</i>	0.93
合计			252			85	199	536		100.0

由以上结果分析, 不同时期采样得到不同种类的霉菌种类。试验场属于开放的环境, 更利于霉菌孢子在空中散布和传播, 霉菌的多样性较丰富, 试验棚和试验库霉菌数量和种类较少。以上结果表明, 3 个试验场地不同季节之间真菌的群落结果差异大, 真菌群落和浓度随季节性变化, 西沙试验站大气环境中存在种类繁多的霉菌。

### 2.3 西沙试验站大气环境优势霉菌

根据以上结果, 从数量优势、分布优势和周期分布来确定西沙试验站大气霉菌优势种群。周期分布指在不同时间采样都出现的菌种被视为周期优势物种; 分布优势指采样时, 在试验场、试验棚、试验库 3 个采样点中, 在 2 个及以上样点出现的菌种被视为分布优势物种。综合 3 种优势情况, 确定了西沙试验站优势种群有 6 种 (见表 5), 其中 3 种菌在数量、分布

和周期上都是优势种, 分别是 *Aspergillus aculeatus*、*Penicillium citrinum*、*Pithomyces sacchari*、变红镰孢霉 *Fusarium incarnatum*、*Cladosporium oxysporum* 和 *Cladosporium oryzae*。

表 5 西沙试验站大气环境优势菌种

Tab.5 Dominant fungal species in the atmospheric environment of Xisha Experimental Station

编号	菌种名称	数量优势	分布优势	周期分布
1	<i>Aspergillus aculeatus</i>	√	√	√
2	<i>Penicillium citrinum</i>	√	√	√
3	<i>Pithomyces sacchari</i>	√	√	√
4	变红镰孢霉 <i>Fusarium incarnatum</i>	√	√	
5	<i>Cladosporium oryzae</i>	√	√	
6	<i>Cladosporium oxysporum</i>	√	√	

## 2.4 霉菌群落的多样性指数和相似性指数

由多样性分析结果（见表 6）可知，试验棚的 Shannon-wiener 指数和 Simpson 指数均是最高，试验库的最低，各个场地之间的多样性差异性较小。通过 Pielou 指数结果可知，试验库的 J 指数最大，试验场的最小。通过计算 Sorenson (CS) 和 Jaccard (CJ) 相似性指数，结果 CS 指数和 CJ 指数均大于 0.3（见表 7），说明不同周期之间霉菌的群落结构差异小，相似性高。这表明西沙试验站的试验场地之间大气霉菌的群落结构差异较小。

表 6 西沙试验站霉菌多样性指数

Tab.6 Fungal diversity index of Xisha Experimental Station

场地	Shannon-wiener 指数 (H)	Simpson 指数 (D)	Pielou 指数 (J)
试验场	1.62	0.78	0.23
试验棚	1.53	0.69	0.31
试验库	1.45	0.63	0.39

表 7 西沙试验站不同场地霉菌相似性指数

Tab.7 Fungal similarity index in different sites of Xisha Experimental Station

场地	Sorenson(CS)	Jaccard(CJ)
试验场与试验棚	0.56	0.42
试验场与试验库	0.58	0.43
试验棚与试验库	0.49	0.31

## 2.5 西沙试验站环境霉菌群落与环境因素的关系

由西沙试验站的环境因素数据（见表 8）看出，西沙试验站属于高温高湿环境，试验场的温度最高，湿度最小，而试验库的温度最低，湿度最大，风速在 2.5 m/s。运用 SPSS 软件对环境因素进行方差分析（见表 9），3 个场地的温度和相对湿度、试验场和试验棚的风速 P 值均小于 0.01，差异极显著。由此可知，西沙试验站的温度、相对湿度和风速差异较大。根据

表 8 西沙试验站大气环境因素

Tab.8 Atmospheric environmental factors of Xisha Experimental Station

场地类型	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )
试验场 1	28.12	70.02	2.328
试验场 2	28.72	69.21	2.341
试验场 3	28.21	70.98	2.650
试验场 4	28.02	72.34	2.349
试验场 5	27.46	74.79	2.402
试验棚	28.2	72.8	1.892
试验库	26.2	88.6	/

方差分析的结果，对西沙试验站的大气霉菌数量与环境因素进行 Spearman 相关性分析（见表 10）。显著性检验（双侧）显示，试验场的霉菌数量与风速呈极显著负相关，与相对湿度呈显著负相关；试验棚的霉菌数量与相对湿度呈极显著负相关，与风速呈显著负相关，与温度呈显著正相关；试验库的霉菌数量与相对湿度呈显著负相关，影响试验场大气霉菌数量最重要的因素是风速和相对湿度，试验棚的是风速、相对湿度和温度，试验库的是相对湿度。

表 9 西沙试验站环境因素方差分析结果

Tab.9 Analysis on variance results of environmental factors of Xisha Experimental Station

场地类型	环境因素	F 值	P 值
试验场	温度	7.654	0.010
	相对湿度	7.702	0.010
	风速	41.356	0.000
试验棚	温度	35.866	0.000
	相对湿度	9.990	0.004
	风速	19.492	0.000
试验库	温度	55.063	0.000
	相对湿度	28.867	0.000

注：P<0.05，差异显著；P<0.01，差异极显著。

表 10 西沙试验站大气霉菌数量与环境因子的相关性分析

Tab.10 Correlation analysis between atmospheric fungi count and environmental factors of Xisha Experimental Station

场地类型	环境因素	大气霉菌数量/(cfu·m <sup>-3</sup> )
试验场	温度	0.371
	相对湿度	-0.766*
	风速	-0.809**
试验棚	温度	0.655*
	相对湿度	-0.785**
	风速	-0.80*
试验库	温度	0.148
	相对湿度	-0.410

注：\*\*表示在 0.01 水平（双侧）上极显著相关；\*表示在 0.05 水平（双侧）上显著。

## 2.6 西沙试验站装备霉菌

对贮存在西沙试验站试验场、试验棚、试验库的材料表面微生物进行采集、培养及鉴定，从 15 种材料上共获得 20 种霉菌。由表 11 可知，大部分贮存在西沙试验站的产品容易长霉，多种材料有不同的敏感菌，尤其是涂层样件和橡胶类材料在西沙试验站环境容易长霉。

表 11 西沙试验站装备上的霉菌  
Tab.11 Fungi on Xisha Experimental Station equipment

序号	材料名称	敏感菌
1	机翼底部	<i>Pestalotiopsis microspora</i> , <i>Curvularia geniculata</i>
2	镀层	<i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Periconia igniaria</i> , <i>Curvularia geniculata</i>
3	裸件(铜)	<i>Fusarium incarnatum</i> , <i>Curvularia tuberculata</i>
4	棚布	<i>Fusarium equiseti</i>
5	铜片	<i>Trichoderma atroviride</i>
6	橡胶把手	<i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Curvularia tuberculata</i> , <i>Curvularia geniculata</i>
7	涂层样件	<i>Cladosporium cladosporioides</i> , <i>Periconia igniaria</i>
8	飞机机翼挂架	<i>Pithomyces sacchari</i> , <i>Curvularia geniculata</i>
9	电子装备(基件)	<i>Curvularia geniculata</i>
10	醇酸面漆涂层样品	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus aculeatus</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Curvularia hawaiiensis</i>
11	环氧铁红漆样品	<i>Aspergillus versicolor</i>
12	氟碳涂层样品	<i>Chaetomium globosum</i> , <i>Aspergillus aculeatus</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Curvularia hawaiiensis</i> , <i>Aspergillus stromatoides</i>
13	聚氨酯涂层样品	<i>Trichoderma longibrachiatum</i> , <i>Penicillium sclerotiorum</i> , <i>Aspergillus aculeatus</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Curvularia hawaiiensis</i> , <i>Aspergillus stromatoides</i>
14	丙烯酸涂层样品	<i>Penicillium spinulosum</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Curvularia hawaiiensis</i>
15	环氧面漆涂层样品	<i>Penicillium brocae</i> , <i>Aspergillus aculeatus</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i>

### 3 结语

1) 西沙试验站霉菌浓度为 2 700~6 000 cfu/m<sup>3</sup>, 优势种为 6 种, 与 GJB 150.10A—2009 霉菌试验菌种并不相同。因此, 装备在西沙试验站环境进行霉菌试验时应选取合适的试验菌种, 以保证霉菌试验评价的真实性, 本次研究对选取合适的试验菌种进行霉菌试验有重要意义。

2) 通过西沙试验站典型防护涂层体系敏感菌研究, 这些数据为下一步展开西沙试验站典型防护涂层体系霉菌效应研究奠定基础, 为提高军用装备西沙试验站环境服役寿命提供数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] CHANDRA MOULI P. Assessment of Microbial (B Acteria) Concentrations of Ambient Air at semi-Arid Urban Region: Influence of Meteorological Factors[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2005, 3(2): 139-149.
- [2] LI C S, KUO Y M. Characteristics of Airborne Microfungi in Subtropical Homes[J]. The Science of the Total Environment, 1994, 155(3): 267-271.
- [3] 刘剑, 戈帆, 赵宏坤, 等. 云南西双版纳试验站大气真菌群落的调查[J]. 菌物学报, 2019, 38(1): 74-89.  
LIU J, GE F, ZHAO H K, et al. The Investigation of Airborne Fungal Community in Xishuangbanna Atmospheric Experiment Station[J]. Mycosystema, 2019, 38(1): 74-89.
- [4] 陈丹明, 李金国, 苏兴荣, 等. 军用电子装备的防霉[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 78-81.  
CHEN D M, LI J G, SU X R, et al. Anti-Mildew of Military Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 78-81.
- [5] 刘士栋, 孔维轩, 王佳. 典型海洋霉菌腐蚀环境调查—以“东方红 2”为例[J]. 广州化工, 2016, 44(21): 141-143.  
LIU S D, KONG W X, WANG J. Investigation of Typical Marine Mould Corrosion Environment—a Case Study of “DONG FANG HONG 2”[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(21): 141-143.
- [6] 杨玉萍, 字正华, 钟辉, 等. 霉菌对 Ge、ZnS 和 ZnSe 膜层的影响[J]. 红外技术, 2016, 38(12): 1078-1081.  
YANG Y P, ZI Z H, ZHONG H, et al. Impact of Fungus on Films on Ge, ZnS and ZnSe[J]. Infrared Technology, 2016, 38(12): 1078-1081.
- [7] 王蕾. 两株典型真菌对 AZ31B 镁合金的腐蚀行为影响研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.  
WANG L. Effect of Two Typical Fungi on Corrosion Behavior of AZ31B Magnesium Alloy[D]. Kunming: Yunnan University, 2015.
- [8] 熊福平. 湿热海洋环境中铝合金 7075-T6 霉菌腐蚀机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
XIONG F P. Research on Fungus Corrosion Mechanism of Aluminum Alloy 7075-T6 in Humid and Hot Marine Environment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [9] DAI X Y, WANG H, JU L K, et al. Corrosion of Aluminum Alloy 2024 Caused by Aspergillus Niger[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 115: 1-10.
- [10] PROCÓPIO L. The Role of Biofilms in the Corrosion of Steel in Marine Environments[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2019, 35(5): 73.
- [11] 王竹, 冯喆, 张雷, 等. 电化学方法在不锈钢腐蚀研究中的应用现状及发展趋势[J]. 工程科学学报, 2020, 42(5): 549-556.

- WANG Z, FENG Z, ZHANG L, et al. Current Application and Development Trend in Electrochemical Measurement Methods for the Corrosion Study of Stainless Steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(5): 549-556.
- [12] PLAZA G, ACHAL V. Biosurfactants: Eco-Friendly and Innovative Biocides Against Biocorrosion[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(6): 2152.
- [13] LITTLE B J, LEE J S. Microbiologically Influenced Corrosion: An Update[J]. Int Mater Rev, 2014, 59(7): 384
- [14] LI H B, YANG C T, ZHOU E Z, et al. Microbiologically Influenced Corrosion Behavior of S32654 Super Austenitic Stainless Steel in the Presence of Marine *Pseudomonas Aeruginosa* Biofilm[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(12): 1596-1603.
- [15] GB/T 18204.3—2013, 公共场所卫生检验方法 第3部分: 空气微生物[S].  
GB/T 18204.3—2013, Examination Methods for Public Places Part 3: Airborne Microorganism[S].
- [16] 邱方, 张丽. 撞击法和沉降法采样对医院病房空气细菌总数检测结果比较[J]. 预防医学论坛, 2006, 12(5): 581-582.  
QIU F, ZHANG L. Comparison Study of Impacting Method and Precipitation Method for Sampling of Bacterial Counts of Air in the Ward of Hospital[J]. Preventive Medicine Tribune, 2006, 12(5): 581-582.
- [17] 阎传海, 葛嘉妮, 尹群. 撞击法测定空气中落菌数的不确定度评估[J]. 广东化工, 2012, 39(13): 135-136.  
YAN C H, GE J N, YIN Q. Uncertainty Evaluation of the Determination of Air Bacterial Count with the Impacting Method[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(13): 135-136.
- [18] 胡庆轩, 李军保. 日光辐射对大气真菌粒子的影响[J]. 上海环境科学, 1994, 13(2): 19-21.  
HU Q X, LI J B. Effects of Solar Radiation on Atmospheric Fungal Particles[J]. Shanghai Environmental Science, 1994, 13(2): 19-21.
- [19] 贺新生. 现代菌物分类系统[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
HE X S. Modern Classification System of Fungi[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [20] BARNETT H L, HUNTER B B. 半知菌属图解[M]. 第三版. 沈崇尧译. 北京: 科学出版社, 1977.  
BARNETT H L, HUNTER B B. Illustrated Genera of Imperfect Fungi[M]. Third Edition. SHEN C Y Translated. Beijing: Science Press, 1977.
- [21] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.  
WEI J C. Handbook of Fungal Identification[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979.
- [22] 邵力平. 真菌分类学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.  
SHAO L P. Fungal Taxonomy[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1984.
- [23] 戴芳澜. 真菌的形态和分类[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
DAI F L. Morphology and Classification of Fungi[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [24] KIRK P M, CANNON P F, MINTER D W, et al. Dictionary of the Fungi[M]. 10th ed. Wallingford: CABI Publishing, 2008: 1-784.
- [25] NISIOTOU A A, SPIROPOULOS A E, NYCHAS G J E. Yeast Community Structures and Dynamics in Healthy and *Botrytis*-Affected Grape must Fermentations[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(21): 6705-6713.