

# 温度和相对湿度对室内空气微生物存活的影响

张 为

(广州康大职业技术学院, 广东 广州 511363)

**摘 要** 室内空气微生物不容忽视, 因为现代人大部分时间都在室内度过。论文总结了室内常见的空气微生物, 分析了温度和相对湿度对它们的影响及其潜在机制。一般来说, 当温度升高至 20.5℃ 或更高时, 由于核酸和蛋白质在升高的温度水平下发生变性, 存活在空气中的病毒减少。相比于高相对湿度 (>80%) 和低相对湿度 (<30%~40%) 的条件, 空气传播的病毒在中等相对湿度 (50%~60%) 的条件下存活得更好, 这是因为溶质的累积剂量在中等相对湿度的条件下达到峰值, 从而提高了空气传播病毒的渗透压。而对于空气传播的细菌来说, 温度和相对湿度对它们的影响及其潜在机制更为复杂。在低相对湿度的条件下, 空气中的细菌会遭遇氧化应激、脱水和高渗应激, 分别造成蛋白质和 DNA 的损伤、水分流失和机械变形。研究结果有助于预防空气传播疾病。

**关键词** 空气微生物; 温度; 相对湿度; 灭活机制

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)04-0052-03

现代人大部分时间都在室内度过, 因此, 室内空气微生物与人类健康和公共卫生问题密切相关。病毒、细菌和真菌是室内常见的空气微生物, 但大多数真菌及其孢子可以承受极端的湿度、温度、紫外线, 环境参数对它们的影响相对较小, 不做讨论。室内空气微生物有以下主要来源。人类是室内空气微生物的主要来源之一。人类通过咳嗽、打喷嚏和说话将唾液和呼吸道中的各种细菌和病毒排放到空气中, 这些细菌和病毒已被证明是雾化的, 例如结核分枝杆菌。管道系统是室内空气微生物的另一个重要来源。细菌占粪便中全部固体的一半以上, 当马桶冲水时, 它们可以被雾化。供热通风与空气调节系统可能成为空气微生物的来源, 维护不善且不定期清洁的系统可以支持大量真菌和细菌的生长<sup>[1]</sup>。一些人类疾病通过吸入空气传播的颗粒进行人际传播, 包括水痘、麻疹、结核病和肺炎<sup>[2]</sup>。此外, 室内空气微生物可能与“病态建筑综合症”有关, 常见的非特异性症状是头痛、皮疹、疲劳和上呼吸道症状, 这种症状在离开建筑物时通常会减轻, 并且很难确定具体的原因或疾病<sup>[3]</sup>。因此, 为了公共卫生和职业安全, 研究和室内空气微生物是必不可少的。

论文旨在综述空气微生物的主要发现, 以促进空气传播疾病的预防, 总结了室内常见的空气微生物;

讨论了温度和相对湿度对空气微生物的影响及其潜在机制; 比较了空气微生物在结构、存活和机制方面的差异; 最后建议通过环境控制来抑制病原微生物的传播。

## 1 室内常见的空气微生物

### 1.1 病毒

由于室内空气传播的病毒会导致传染病的传播, 越来越多的研究人员开始收集和分析它们。在全球大流行的背景下, 人们也开始担忧流感等病毒的潜在空气传播。室内常见的空气传播的病毒包括中东呼吸综合征冠状病毒、甲型 H1N1 流感病毒、麻疹病毒和水痘带状疱疹病毒等<sup>[4]</sup>。La Rosa 等人<sup>[5]</sup>报告了空气传播的呼吸道病毒病原体: 人类腺病毒、SARS-CoV-1、埃博拉病毒、人类呼吸道合胞病毒。空气传播的病毒特别容易在通风不良、拥挤的室内进行传播。

### 1.2 细菌

尽管空气中缺乏营养成分, 室内仍然存在空气传播的细菌, 这些细菌可以通过人类打喷嚏、咳嗽、说话等方式在人际间传播。室内空气传播的细菌包括结核分枝杆菌、肺炎链球菌、溶血性链球菌、枯草芽孢杆菌、肺炎克雷伯菌、脑膜炎奈瑟菌、大肠杆菌等<sup>[6]</sup>。这些细菌在室内空气中常见的原因可能与室内的温湿

度条件适宜它们生存有关。

## 2 影响室内空气微生物生存的因素

### 2.1 温度对空气传播病毒存活的影响及其机制

温度影响病毒基因组和病毒蛋白的状态,使其成为影响病毒存活的重要因素之一。一般来说,随着温度的升高,病毒的存活率会降低。然而,周围的一些物质(如唾液、粘液、粪便和血液)会影响病毒的存活。在极端环境变化中,它们将病毒包裹保护。

Prussin 等人<sup>[7]</sup>设计了一项研究来探索温度与包膜病毒 Phi6 之间的关系。他们将相对湿度保持在 75%,因为气溶胶在较低的湿度下蒸发了液滴,病毒可能处于“干燥”状态,不受温度变化的影响。

实验结果表明,在 14℃至 34℃之间,病毒的传染性随温度的降低呈指数增加。包膜病毒 Phi6 的感染性在最低温度 14℃时最高,当温度调节到 34℃时,感染性显著降低。

温度对空气传播病毒的影响机制与核酸和蛋白质有关。Marr 等人<sup>[8]</sup>认为,由于核酸和蛋白质在高温水平下变性,病毒在空气中的存活率随着温度升高到 20.5℃或更高而降低。Dombrovsky 等人<sup>[9]</sup>认为温度会影响病毒的稳定性,核酸和蛋白质的失活随着温度的升高而增加。这些研究表明,流感病毒在分子水平上受到温度的影响。

### 2.2 湿度对空气传播病毒存活的影响及其机制

相对湿度是影响病毒存活的最关键因素之一。研究发现,噬菌体 MS2 和噬菌体 Φ6 在不同相对湿度下的活力呈一个明显的 U 形图案。在中等相对湿度下发生显著的衰减,而在 100%和低于 33%时几乎没有衰减。噬菌体 MS2 的最小活力发生在 55%相对湿度下,其中气溶胶中的衰减率为 0.9 log<sub>10</sub> 单位,液滴中的衰减率为 2 log<sub>10</sub> 单位。

包膜病毒 Φ6 和无包膜病毒 MS2 在抗相对湿度的活力方面具有相似的 U 形模式,并推测可能存在共同的灭活机制。高相对湿度下病毒气溶胶的累积剂量增加缓慢,对病毒存活没有太大影响;病毒气溶胶在低相对湿度(<43%)下迅速蒸发,液滴变干以提高病毒的存活率;累积剂量在中等相对湿度水平迅速增长,因为溶质浓度在较长时间内迅速增加。MS2 的衰变和累积剂量均在 55%相对湿度时达到峰值,因此他们假设病毒灭活受累积剂量控制,高累积剂量会提高病毒的渗透压,并导致病毒结构的损伤积累和最终灭活<sup>[10]</sup>。

### 2.3 温度对空气传播细菌存活的影响及其机制

温度对空气传播细菌的影响很复杂,即使是同一结构内的细菌也可能对温度做出不同的反应。最近的一项研究使用比较转录组来分析不同温度和相对湿度对肺炎克雷伯菌存活的影响。研究发现肺炎克雷伯菌在 20℃和 80%RH 下存活得最好,在 30℃和 50%RH 下测试空气传播细菌的死亡率最高。这证明肺炎克雷伯菌喜欢较低的温度和较高的相对湿度。这项研究发现,雾化细菌可以感知空气中的刺激,影响基因的差异化表达,这可能与空气中细菌的存活有关。比如,在雾化过程中,菌毛蛋白下调。菌毛对于建立感染至关重要,因为它与病原体粘附在宿主细胞上的过程有关,菌毛蛋白的下调表明它们正在为在空气中延长生存和长距离传播做准备。与抗生素耐药性相关的 MBL 基因上调,这对暴露于赋予抗生素耐药性的细菌的治疗构成了巨大挑战<sup>[11]</sup>。然而,关于温度和细菌的潜在机制仍然未知。

### 2.4 湿度对空气传播细菌存活的影响及其机制

相对湿度是影响细菌生存的重要因素之一。某一项实验研究测量了革兰氏阴性大肠杆菌、革兰氏阳性枯草芽孢杆菌和耻垢分枝杆菌在不同相对湿度条件下的生存能力。三种细菌的活力随着相对湿度的增加而增加。当 RH 高于 80%时,三种细菌菌株的损失很小。细菌可能会受到液滴蒸发引起的盐含量增加的伤害,高盐浓度可以通过引起限制细菌生长的渗透压导致细菌灭活。细菌气溶胶在低相对湿度下比在高相对湿度下失去更多的水分,增加的盐浓度对细菌有害。

研究人员提出了各种灭活机制。空气中的细菌遭遇高渗应激时会导致机械变形,影响细菌的存活。细胞死亡的主要原因与低相对湿度的条件下,氧气扩散到细菌中增加氧化应激造成对 DNA 和蛋白质的损害有关,而不仅仅是因为单独的脱水导致水分流失<sup>[12]</sup>。基于这些研究,可以设计更多的实验来探索细菌与相对湿度之间的关系。

## 3 细菌内与病毒内的对比

不同结构分类的细菌对环境具有不同的抵抗力。某一项实验观察到大肠杆菌的半衰期短于蒙氏肠球菌。革兰氏阳性菌通常比革兰氏阴性菌更能应对环境的变化,因为存在较厚的肽聚糖层,从而具有对高渗应激的耐受性。然而,滑膜分枝杆菌半衰期长,对环境有抵抗力,但它没有细胞壁。这种现象有两种解释:一种解释是结构简单的微生物可能比它们的配对物更具

抵抗力,而另一种解释在于微生物的大小。滑膜分枝杆菌是最小的细菌,直径仅为0.5微米,雾化后相比于较大的细菌它们可以更好地吸附在湿气溶胶上;此外,湿气溶胶保护滑膜分枝杆菌并减少环境对它们的损害,因为它们暴露于环境的表面积减少。温度和湿度对不同结构的病毒的影响存在一些差异。温度会影响病毒基因组和病毒蛋白的状态,含有DNA的病毒往往比含有RNA的病毒更稳定。一些研究者认为,没有脂质结构的病毒在高相对湿度下更稳定,而具有脂质结构的病毒在低相对湿度下更稳定<sup>[13]</sup>。

#### 4 总结

研究室内空气微生物对人体健康和公共卫生事业具有重要意义。温度和相对湿度是影响病毒和细菌存活的重要环境因素。病毒和细菌在不同温度和相对湿度条件下的存活机制不同。

1. 病毒在空气中的存活率随着温度升高到20.5℃或更高而降低,因为核酸和蛋白质在高温水平下会发生变性。

2. 病毒与湿度的灭活机制由累积剂量控制。高累积剂量会提高病毒的渗透压,并导致病毒结构的损伤积累和最终失活。

3. 空气中的细菌在低相对湿度水平下遇到氧化应激、脱水和高渗应激,分别导致蛋白质和DNA损伤、水分流失和机械变形。

论文总结了温度和湿度对室内空气微生物的影响,但并未最终确定灭活的机制。未来还需要更多的研究来证明病毒的灭活与溶液中有毒物质的累积剂量有关。未来也需要更多的研究来证明不同基因在保护细胞免受外部环境压力方面的作用。调整室内温度和相对湿度条件可能会降低某些病原微生物的存活率。流感病毒在凉爽干燥的环境中存活得更好。我们可以通过将室温调节到18℃,将相对湿度调节到50%来阻止流感病毒的传播。虽然将温度调节到7℃,将相对湿度调节到30%会更不利于流感病毒的存活,但我们还需要考虑人类的舒适度。未来的研究需要找到最佳的环境条件,共同满足减少病原微生物的存活和人类的舒适度。

#### 参考文献:

- [1] Prussin,A.J.,& Marr,L.C.Sources of airborne microorganisms in the built environment[J].Microbiome,2015,03(01):1-10.
- [2] Piecková,E.Indoor microbial aerosol and its health

effects:Microbial exposure in public buildings—viruses, bacteria,and fungi[J].Exposure to Microbiological Agents in Indoor and Occupational Environments,2017:237-252.

[3] Fernstrom,A.,& Goldblatt,M.Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases[J].Journal of Pathogens,2013:1-13.

[4] Cox,J.,Mbareche,H.,Lindsley,W.G.,& Duchaine,C. Field sampling of indoor bioaerosols[J].Aerosol Science and Technology,2019,54(05):572-584.

[5] La Rosa,G.,Fratini,M.,Libera,S.D.,Iaconelli,M.,& Muscillo,M.Viral infections acquired indoors through airborne,droplet or contact transmission[J].Annali dell'Istituto superiore di sanita,2013(49):124-132.

[6] Tang,J.W.The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents[J].Journal of the Royal Society Interface,2009(6Suppl):S737-S746.

[7] Prussin,A.J.,Schwake,D.O.,Lin,K.,Gallagher,D.L.,Buttling,L.,& Marr,L.C.Survival of the enveloped virus Phi6 in droplets as a function of relative humidity, absolute humidity,and temperature[J].Applied and environmental micro biology,2018,84(12):e00551-18.

[8] Marr,L.C.,Tang,J.W.,Van Mullekom,J.,& Lakdawala,S.S.Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence[J].Journal of The Royal Society Interface,2019,16(150):20180298.

[9] Dombrovsky,L.,Fedorets,A.,Levashov,V.,Kryukov,A.,Bormashenko,E.,& Nosonovsky,M.Modeling evaporation of water droplets as applied to survival of airborne viruses[J].Atmosphere,2020,11(09):965.

[10] Lin,K.,& Marr,L.C.Humidity-dependent decay of viruses,but not bacteria,in aerosols and droplets follows disinfection kinetics[J].Environmental Science & Technology,2019,54(02):1024-1032.

[11] Barnes,N.M.,& Wu,H.Mechanisms regulating the airborne survival of klebsiella pneumoniae under different relative humidity and temperature levels[J].Indoor Air,2022,32(02):e12991.

[12] Ng,T.W.,Chan,W.L.,& Lai,K.M.Importance of stress-response genes to the survival of airborne escherichia coli under different levels of relative humidity[J].AMB Express,2017,07(01):1-6.

[13] Hoeksma,P.,Aarnink,A.J.A.,& Ogink,N.W.M.Effect of temperature and relative humidity on the survival of airborne bacteria=Effect van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid op de overleving van bacteriën in de lucht(No.864)[D].Wageningen UR Livestock Research,2015.