石浩柯,赵金鹏,李彦鹏.大气生物气溶胶典型菌种的氧化潜势及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1655-1662.
Shi H K, Zhao J P, Li Y P. Study on oxidative potential of typical species in atmospheric bioaerosol and its influencing factors [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1655-1662.

大气生物气溶胶典型菌种的氧化潜势及其影响因素研究

石浩柯[1],赵金鹏[1],李彦鹏[1,2*] (1.长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710054；2.长安大学,旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,水利部旱区生态水文与水安全重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要: 采用二硫苏糖醇(DTT)方法评估大气环境中常见细菌和真菌气溶胶的氧化潜势及其关键影响因素.结果显示,生物气溶胶诱导活性氧(ROS)的生成能力随微生物类型、种类和浓度而变化.真菌的氧化潜势整体高于细菌,约为其 2~3 倍.在最高测试浓度(10^5CFU/mL)下,金黄色葡萄球菌[(0.41 ± 0.06) nmol/(min·mL)]和青霉菌[(1.32 ± 0.11) nmol/(min·mL)]的氧化能力最强,平均高出其他细菌和真菌约 1.5 倍.生物气溶胶的氧化潜势还受其活性和化学组分的显著影响.微生物活性是调控其氧化潜势的关键因素,失活处理可使其氧化潜势最高降低 40%.生物组分(金黄色葡萄球菌/青霉菌)与化学组分(Cu/1,4-萘醌)在混合体系中的 DTT 消耗速率低于单一组分加和值,这表明组分之间存在相互作用抑制了 DTT 消耗反应.

关键词： 生物气溶胶；氧化潜势；二硫苏糖醇(DTT)；环境健康
中图分类号： X513 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-6923(2026)03-1655-08

Study on oxidative potential of typical species in atmospheric bioaerosol and its influencing factors. SHI Hao-ke[1], ZHAO Jin-peng[1], LI Yan-peng[1,2*] (1.School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China；2.Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China). *China Environmental Science,* 2026,46(3)：1655~1662

Abstract：The oxidation potential of common bacterial and fungal aerosols in the atmosphere as well as their key influential factors was evaluated using the dithiothreitol (DTT) method. The results showed that bioaerosols induced reactive oxygen species (ROS) production, varying along the microorganism type, species, and concentration. The oxidative potential of fungi was approximately 2 to 3 times higher than that of bacteria. When the test bioaerosl concentrations were set highest (10^5CFU/mL), *Staphylococcus aureus* [(0.41 ± 0.06) nmol/(min·mL)] and *Penicillium* [(1.32 ± 0.11) nmol/(min·mL)] exhibited the strongest oxidative potential, averaging about 1.5times higher than other bacteria and fungi. The oxidation potential of bioaerosols was also significantly associated with their activity and chemical components. Microbial activity was a key factor regulating oxidative potential, with inactivation treatment reducing it by up to 40%. The consumption rate of DTT when biological components (Staphylococcus aureus/Penicillium) and chemical components (Cu/1, 4-NQ) were simultaneously present in the system was lower than that of the single component. It indicated that there was an interaction between the two components that inhibited the DTT consumption reaction.

Key words：bioaerosols；oxidative potential；dithiothreitol (DTT)；environmental health

毒理学研究表明,人体吸入的大气颗粒物可通过氧化还原反应或生物过程诱导活性氧(ROS)的生成[1-3],从而引发机体的氧化应激效应并导致炎症反应.目前,国内外研究学者通常使用脱细胞法测定的氧化潜势(OP)指标来评价颗粒物的氧化性能[4],其测定方法包括二硫苏糖醇(DTT)法,抗坏血酸(AA)法,二氯荧光素(DCFH)测定法和电子顺磁共振(EPR)法等,其中 DTT 法操作相对简单,成本较低,适用于大批量样品的分析测试,且对各组分的累积测量更为全面,具有良好的重现性和较高的灵敏度,已被广泛应用在氧化潜势的研究中[5-8].相较于传统的质量浓度指标,氧化潜势与急性心血管及呼吸系统疾病的关联更为密切,且具有较高氧化潜势的颗粒物通常会导致更为严重的健康效应[9-10].因此,氧化潜势作为一个具有更强生物学相关性的暴露评估指标,能够更准确地预测其潜在健康风险.

目前关于氧化潜势的研究多聚焦于化学组分及其环境水平[11-12].然而,作为大气颗粒物的重要组

收稿日期： 2025-08-06
基金项目： 国家重点研发计划项目(2023YFC3708203);西安市科技局社会发展科技创新示范项目(24SFSF0007)
* 责任作者, 教授, liyanp01@chd.edu.cn

成成分,生物气溶胶(包含细菌、真菌、病毒及微生物片段、内毒素、花粉等)约占其总质量的 15%~25%[13-14],其对氧化潜势的影响尚未得到系统研究.研究表明,气溶胶中的微生物对颗粒物氧化潜势具有显著的影响.例如,生物气溶胶的生物活性可以诱导继发性细菌感染,导致严重的氧化应激和炎症反应[15],可能会增强颗粒物的氧化潜势;相关研究对来自全球 19 个城市的汽车空调过滤器中收集的颗粒物样本进行研究,并通过相关性分析指出,细菌和真菌的存在能够显著影响颗粒物的氧化潜势[16].还有报告指出,颗粒物携带的细菌和真菌还可能通过与其所含物质的相互作用来改变颗粒物的氧化潜势[17].进一步的研究表明,云水中的微生物群落对云中氧化剂前体(H_2O_2)有生物降解作用,强调云水中的微生物群落也可以与氧化应激相关的 H_2O_2 氧化剂(或其他类型的 ROS)相互作用[18].另外,通过评估生物气溶胶对环境颗粒物氧化潜势的贡献,表明在评估环境颗粒物的氧化潜势时考虑生物气溶胶的贡献的重要性[19].这些研究结果暗示微生物可能通过其氧化还原代谢过程影响环境化学过程和人类的健康.

当前关于大气生物气溶胶氧化潜势的研究刚刚起步,多是生物气溶胶氧化潜势的定性或统计分析,缺乏其影响因素的定量评估,尤其在大气生物的种类、浓度、代谢活性及大气中其他化学物质等关键因素对其氧化潜势的影响方面,尚未有清晰的认识.综上,本研究考虑到微生物在自然和室内环境中的代表性、健康相关性以及方法可行性,选择大气环境中常见的细菌和真菌物种作为实验对象:探究不同细菌和真菌气溶胶的氧化潜势差异,以及微生物活性、微生物与大气化学组分之间的相互作用对其氧化潜势的影响,旨在揭示以往研究相对薄弱的生物气溶胶氧化潜势及其影响因素.

1 材料与方法

1.1 生物气溶胶实验菌种的选择

选取大气环境中一些常见的细菌和真菌物种作为实验模型并测定其氧化潜势.对于细菌,选择了 2 种革兰氏阳性菌(枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* 和金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus*)和 1 种革兰氏阴性菌(大肠杆菌 *Escherichia coli*);对于真菌,选择了青霉菌 *Penicillium* sp 和黑曲霉 *Aspergillus niger* 作为实验模型.其中,金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和黑曲霉均为 ATCC 标准菌株,由广州市益满生物科技有限公司提供;枯草芽孢杆菌和青霉菌则是从生物气溶胶中分离得到的优势菌株.

选择以上 5 种微生物作为实验模型主要基于以下考虑:首先,这些微生物在自然环境和室内环境中广泛分布,具有较强的代表性[20-25];其次,它们均为潜在致病微生物,金黄色葡萄球菌可诱发多种感染性疾病,大肠杆菌是环境中重要的肠道条件致病菌,与人体健康密切相关[26-27];另外,这些微生物的培养条件成熟、生长特性明确,便于实验操作和结果重复.

1.2 生物气溶胶典型菌种的培养

为获得不同浓度的实验菌液,首先将储存的菌株分别接种至相应的液体培养基中进行活化.细菌于 37℃恒温震荡培养 16~18h,真菌于 28℃恒温震荡培养 48h.活化后的菌液放入离心机(Eppendorf 5804R, 德国)以 3000r/min 离心 5min,倒去上清液并加入无菌 PBS 缓冲液(pH 7.4)重复离心 2 次以去除培养基残留,减小培养基中某些成分对实验结果的影响,最终重悬于无菌 PBS 制备原始菌悬液.

采用平板计数法进行定量分析.将梯度稀释后的菌液各取 100μL 均匀涂布于营养琼脂培养基(细菌)或沙氏琼脂培养基(真菌)平板上.细菌在 37℃条件下培养 24h,真菌在 28℃条件下培养 48~72h.培养结束后,选取菌落数在 30~300 个范围内的平板进行计数,结合稀释倍数计算原始菌液的实际菌落浓度(CFU/mL).根据计数结果,使用无菌 PBS 缓冲液将各菌液调整至 10^2,10^3,10^4,10^5CFU/mL 4 个浓度梯度,此类浓度可对应于目前在室内外或职业背景(例如堆肥设施)中观察到的暴露水平[28-29].

1.3 生物气溶胶氧化潜势的测定

采用 DTT 法测定生物气溶胶典型菌种的氧化潜势水平,由于 DTT 具有光敏感性,相关实验在避光环境中进行.首先配制一系列浓度梯度(0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10mmol/L)的 DTT 标准溶液,用于建立吸光度标准曲线,确保曲线相关系数大于 0.99(图 1).取 2mL 菌悬液转移至棕色容量瓶,依次添加磷酸钾

缓冲液(0.1mol/L,pH=7.4)和 DTT 溶液(0.1mmol/L)各 5mL,混匀后放入恒温振荡器中反应.在 0,15,30 和 45min 时,分别取出 2mL 反应混合物,转移至含有 0.5mL 10%三氯乙酸(TCA)的反应瓶中终止反应,随后加入 0.5mL 1mmol/L 的二硝基苯甲酸(DTNB)与剩余 DTT 反应,最后加入 2mL Tris−EDTA 缓冲液作为固定剂.室温孵育 5min 后于 412nm 波长下测定吸光度.根据标准曲线将测得的吸光度转换为相应 DTT 浓度,以反应时间为横坐标、DTT 消耗量为纵坐标绘制线性回归图,结合空白对照进行校正,所得斜率即为 DTT 消耗速率,该速率反映微生物诱导氧化应激的潜在能力.

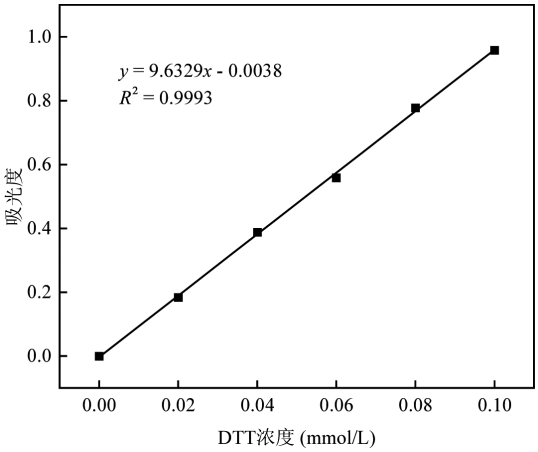


图 1　DTT 浓度的标准曲线

Fig.1　Standard curve of DTT concentration

表 1　测定氧化潜势所用试剂及其配制方法

Table 1　Reagents and preparation methods for oxidative potential measurement

试剂名称	浓度	配制方法	保存条件
DTT 溶液	10mmol/L	15.4×10^{-2}g DTT 溶解在 100mL 纯水中	低温避光保存,现用现配,使用前稀释到 0.1mmol/L
磷酸钾缓冲液	0.1mol/L pH=7.4	2.659g KH_2PO_4 和 13.97g K_2HPO_4 溶解在 1L 纯水中	常温保存
TCA 溶液	10% *w/v*	5g TCA 溶解在 45mL 纯水中然后定容到 50mL	低温避光保存
DTNB 溶液	1mmol/L	0.1982g DTNB 溶解于 500mL 磷酸钾缓冲液中	低温避光保存
Tris−EDTA 缓冲液	0.4mol/L Tris + 20mmol/L EDTA	9.691g Tris 和 1.169g EDTA 溶解于 200mL 纯水中,调 pH 值至 8.9	低温保存

1.4　质量控制与保证

所有实验均设置 3 个平行样品;所有实验用具在接触样品前经 121℃高压蒸汽灭菌 20min;实验环境严格消毒,实验台面使用 75%酒精擦拭并保证有效消毒作用时间;所有关键操作在超净工作台内进行,以减少空气中微生物的污染;同时,实验人员严格遵守个人防护规范,全程正确佩戴一次性医用口罩和无菌手套,并穿着专用实验服,以防止外界污染物的干扰.

2　结果与讨论

2.1　生物气溶胶的氧化潜势特征

以不同浓度微生物悬液(10^2~10^5CFU/mL)诱导的 DTT 消耗速率反映微生物诱导氧化应激的潜在能力.图 2 表明,所有测试浓度下的微生物悬液均表现出显著的内在氧化能力.在细菌中,金黄色葡萄球菌表现出最强的氧化能力,其 DTT 消耗速率在所有浓度下均居首位,其次是枯草芽孢杆菌,而大肠杆菌的氧化能力相对较弱.3 种细菌在最高测试浓度(10^5CFU/mL)下的 DTT 消耗速率分别为(0.41±0.06),(0.30±0.04)和(0.24±0.04) nmol/(min·mL).这种差异可能与菌种的细胞结构和代谢特征密切相关.金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌均为革兰氏阳性菌,相较于革兰氏阴性菌如大肠杆菌,其细胞壁结构更为简单,缺乏脂多糖(LPS)等复杂的细胞壁成分,这可能使其更容易释放具有氧化活性的胞内物质以及细胞代谢过程中产生活性分子[30-31].此外,不同菌种在代谢过程中产生的氧化还原活性物质在种类和数量上的差异,也可能是导致氧化潜势差异的重要原因.

值得注意的是,微生物的氧化潜势随浓度的增加均呈现上升趋势.当浓度从 10^2CFU/mL 升高至 10^3CFU/mL 时,所有测试微生物的氧化潜势增长幅度均在 90%以上;而当浓度继续升高至 10^5CFU/mL 时,各微生物氧化潜势虽仍保持上升,但其增幅明显减缓.此外,不同类型微生物的氧化潜势对浓度

变化的响应也存在显著差异:真菌(青霉菌和黑曲霉)的氧化潜势随浓度升高表现出更为明显的增强趋势,平均增幅分别达到 79%和 88%;而细菌(枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌)的氧化潜势的变化幅度较为平缓,增幅依次为 56%、50%和 71%.另外,当微生物浓度从 10^4CFU/mL 提升至 10^5CFU/mL 时,金黄色葡萄球菌 DTT 消耗速率的上升幅度低于大肠杆菌.这表明在高浓度条件下,金黄色葡萄球菌的 DTT 氧化反应可能受到了一定限制.可能由于高浓度细菌悬液中存在自抑机制,或者由于细菌聚集导致活性位点暴露不足,从而影响了其氧化活性.这一现象揭示了微生物氧化过程在高浓度条件下的复杂性,亟需开展后续研究并从机制层面进一步剖析.

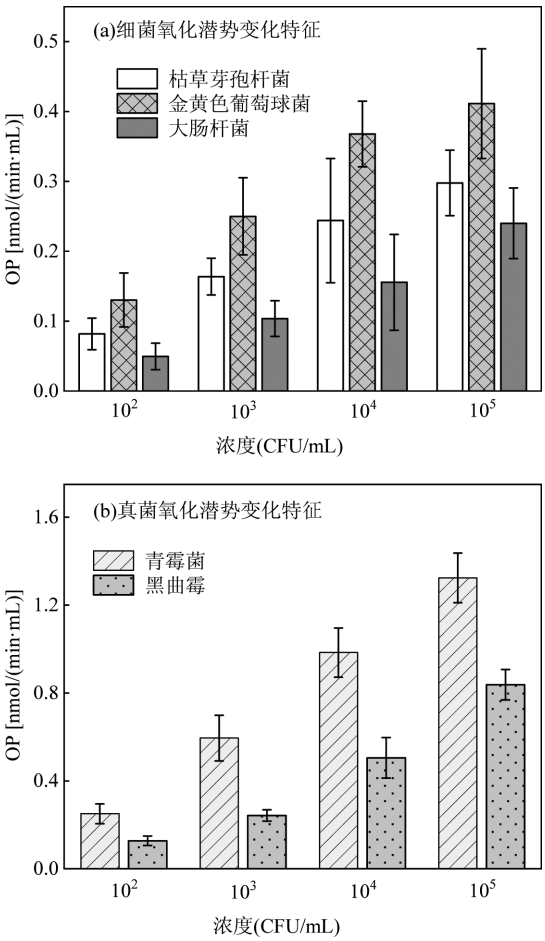


图 2 不同种类和不同浓度微生物的氧化潜势

Fig.2 Oxidation potential across different microbial types and concentrations

在真菌中,青霉菌在各个浓度下的氧化潜势均显著高于黑曲霉.在最高浓度(10^5CFU/mL)下,青霉菌和黑曲霉的氧化潜势分别可以达到(1.32±0.11)和(0.84±0.07) nmol/(min·mL).整体来说,真菌的氧化潜势高于细菌,在最低测试浓度下(10^2CFU/mL),真菌的平均氧化潜势约为细菌的 2.16 倍.随着浓度的增加,真菌和细菌氧化潜势的差异不断增大,在最高浓度(10^5CFU/mL)下达到 3.42 倍.这种差异可能源于真菌与细菌在细胞壁化学成分上的不同.研究表明,来源于真菌细胞壁主要成分的 β-葡聚糖能够较快诱导 ROS 的生成,细菌源性的脂多糖虽然也可引发 ROS 产生,但其诱导速率相对较慢[32].此外,Timm 等[33]通过多元回归分析发现,真菌孢子的炎症潜能与生物气溶胶总体炎症潜能之间存在更显著的相关性,并指出 β-(1-3)-D-葡聚糖是模型中引起细胞 ROS 生成的重要因子.另一方面,真菌在生长过程中还可能释放胞外氧化物质[34],进一步说明细菌与真菌在抗氧化物质损耗方面存在的显著差异.这一现象反应了真菌在氧化活性方面对人体健康的影响要比细菌更严重,值得进一步关注.

2.2 生物气溶胶活性对氧化潜势的影响

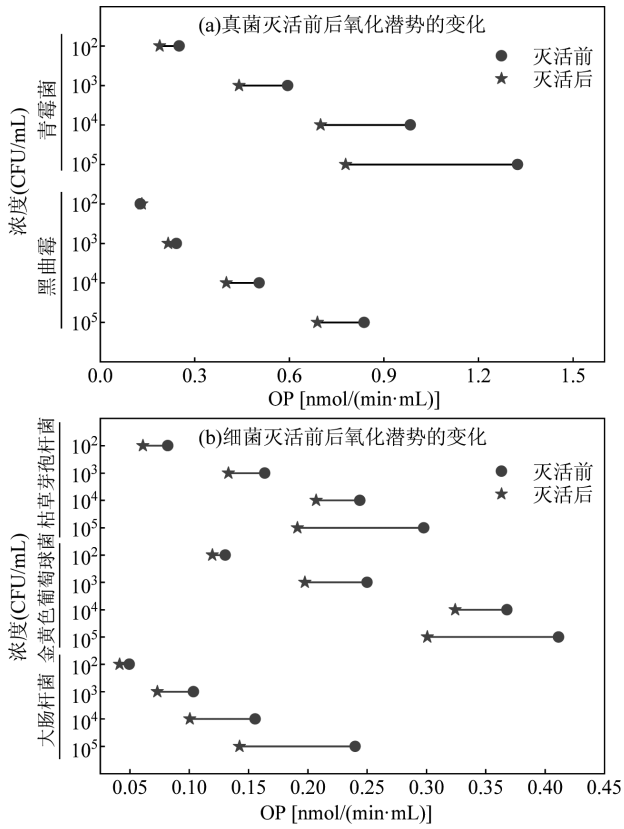


图 3 微生物灭活前后氧化潜势的变化

Fig.3 Changes in oxidative potential following microbial inactivation

研究微生物的活死状态对其氧化反应活性的影响尤为重要.图 3 表明,经过失活处理后,所有测试微生物的氧化能力均出现不同程度的下降,尤其是在微生物浓度最高的样品中,DTT 消耗速率的下降幅度最为明显.这一现象表明,微生物的氧化反应活性可能部分依赖于其内在的活性机制.例如,具有活性的微生物可能通过其自身的代谢活动(如呼吸作用、酶促反应等)持续产生或释放具有氧化还原活性的物质,从而贡献于整体的氧化潜势,而当微生物失活后,这些代谢活动停止,氧化还原活性物质的生成速率降低,进而导致氧化潜势下降[30].在评估大气颗粒物中生物气溶胶的健康风险时,不仅要关注微生物的总浓度,还需充分考虑其活性状态.值得注意的是,大气中具有活性的菌种约占微生物总数的 25%~40%[35],由于其表现出更高的氧化活性,对人体健康的潜在威胁也更为严重.

2.3　微生物与化学成分氧化潜势的相互作用

研究表明,颗粒物的不同化学组分在氧化反应活性方面存在相互作用.例如,Cu 与醌类化合物在 DTT 氧化反应中表现出拮抗作用,而 Mn 与醌类化合物在 DTT 氧化反应中则表现出协同作用[11].目前关于生物气溶胶与化学组分之间是否存在类似的相互作用尚不明确.选取了 Cu 以及一种醌类(1,4-萘醌(1,4-NQ))作为代表来研究生物气溶胶和化学组分的相互作用是否会对其氧化反应活性产生影响.选择这两种物质的原因在于已有研究证明了金属元素和醌类化合物对颗粒物氧化潜势有着重要贡献[36].在吸入性颗粒物直接诱导的氧化应激中,铜是其产生活性氧能力的重要贡献者[37]. Charrier 等[38]的一项调查研究也发现,在加州圣华金河谷采集的环境 PM 样品中,约 80%的 DTT 消耗是源自于过渡金属(主要是 Cu 和 Mn).除此之外,多环芳烃(PAHs)也被认为是颗粒物氧化潜势的重要贡献者,但在本研究中并未选择.主要是由于考虑到先前研究揭示 PAHs 在大气环境中通常作为醌类物质的前体存在,自身氧化还原能力相对较弱;PAHs 主要通过与大气中的氧化剂(如 O_3 和·OH)发生光化学反应以及在颗粒物表面发生多相反应转化为醌类,从而与氧化潜势表现出较强的关联性[39].而醌类化合物可以在氧气存在的情况下催化生物系统中 ROS 的产生,从而引发氧化应激[40].

为探究生物组分与化学组分之间的相互作用及其对氧化潜势的影响,选取 DTT 消耗速率最高的细菌(金黄色葡萄球菌)和真菌(青霉菌)作为代表性微生物,分别与 Cu(1μmol/L)、1,4-NQ (1μmol/L)混合,并测定各混合体系的 DTT 消耗速率.随后,将实验测得的混合物 DTT 消耗速率与相同浓度下各单一组分(即单独的微生物或化学物质)DTT 消耗速率之和进行比较.结果显示,2 种方法获得的 DTT 消耗速率测量结果之间存在差异(图 4).混合体系的 DTT 消耗速率低于各单一组分速率的加和值,生物组分与化学组分间可能存在相互作用,导致体系整体氧化潜势降低.

这种作用可能源于以下机制:首先,微生物可通过多种方式降低化学物质的有效浓度.微生物细胞壁上的多糖、蛋白质和脂质含有许多羧酸盐、羟基和硫酸盐基团等官能团,这些基团能够吸附金属离子;例如,有研究指出真菌对 Pb(II)的吸附效率最高可以达到 85.41%[41];而醌类物质可以自由扩散进入细胞壁的脂质双层并被捕获,从而减弱其直接诱导 DTT 氧化的能力[42-43].其次,微生物可能通过代谢活动改变化学物质的氧化还原状态,使其氧化活性降低.例如,有研究指出蜡样芽孢杆菌可以将 Cr(VI)还原为 Cr(III),从而改变其氧化活性[44].值得注意的是,微生物与 Cu 混合后的 DTT 消耗速率下降幅度显著大于与 1,4-NQ 混合后的下降幅度,表明 Cu 与微生物的相互作用强于 1,4-NQ 的作用效果.这可能是因为微生物与重金属之间的静电相互作用更强,倾向于与重金属结合,也可能与不同化学物质与微生物细胞表面的结合位点不同有关[45].

上述研究结果表明,生物气溶胶是评估环境颗粒物总体氧化潜势时一个不可或缺的因素.目前研究主要在实验室条件下针对生物气溶胶典型菌种的氧化潜势进行了测量,尚未与实际大气环境建立有效关联.因此,未来研究需进一步考虑空气传播微生物群落(细菌细胞、真菌孢子、病毒等)及其副产物(内毒素、霉菌毒素等)、花粉、植物碎片等的复杂性,在更多混合条件下揭示生物组分与化学组分之间的相互作用机制;同时,应建立实验室数据与大气实际状况之间的可靠关联,从而深入评估其对氧化潜势的贡献.

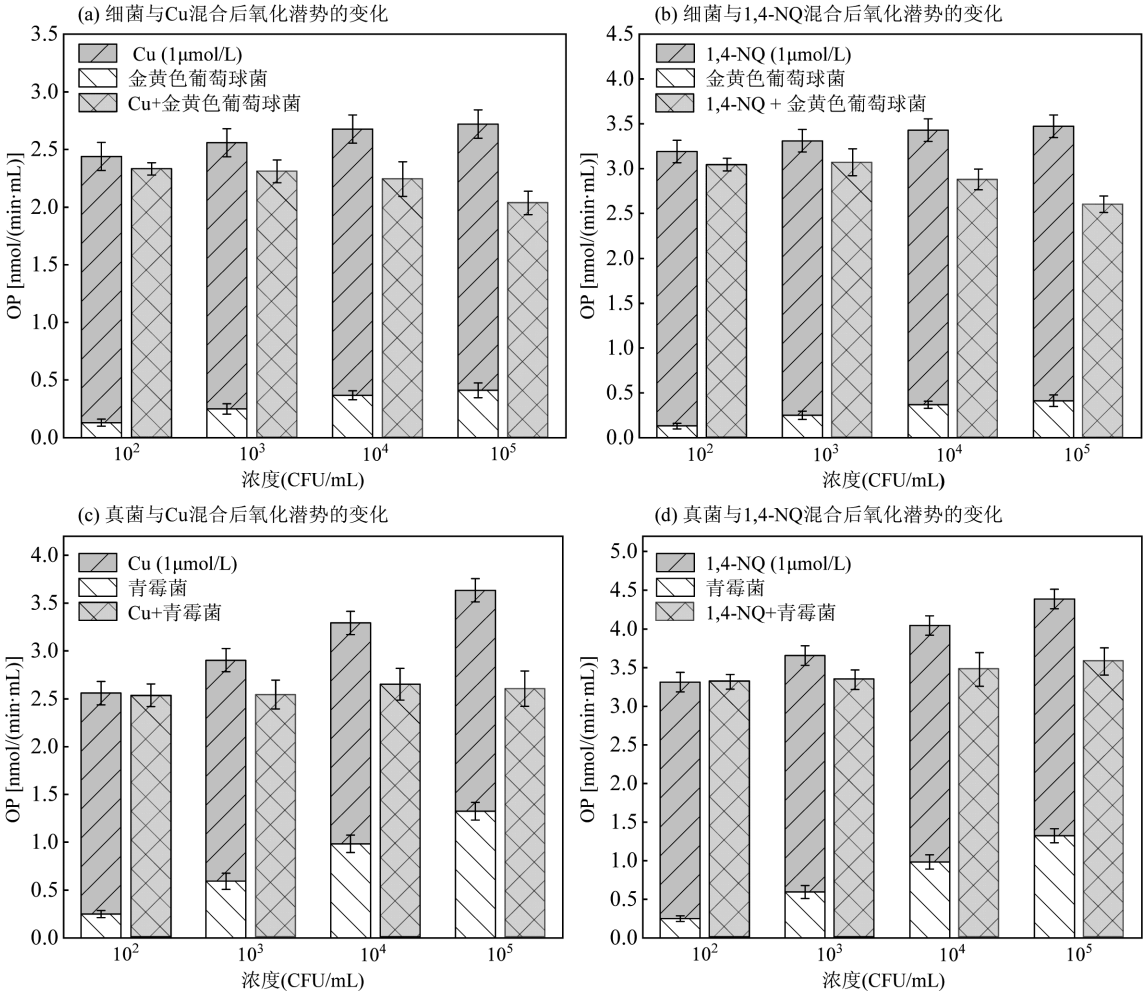


图 4 细菌、真菌与化学物质混合后的氧化潜势以及单独计算的各个组分氧化潜势加和

Fig.4 Oxidative potential of mixtures (bacteria, fungi, and chemicals) and the sum of individual components

3 结论

3.1 测试微生物均表现出内在氧化反应性,不同种类的细菌和真菌在氧化潜势方面表现出明显的差异.金黄色葡萄球菌和青霉菌的氧化能力较强,在最高测试浓度(10^5CFU/mL)下的DDT消耗速率分别达到(0.41±0.06)和(1.32±0.11)nmol/(min·mL);真菌的氧化能力强于细菌,表明不同类型的微生物对氧化应激的影响程度不同.

3.2 微生物活性是调控生物气溶胶氧化潜势的关键因素,失活处理可显著降低其氧化潜势,且在高浓度微生物样品中 DTT 消耗速率降幅更为突出.这表明微生物的活性代谢过程是其贡献氧化潜势的重要机制,在评估生物气溶胶的健康风险时,应充分考虑其活性状态.

3.3 生物组分与具有氧化还原活性的化学组分之间存在相互作用效应:将微生物(金黄色葡萄球菌和青霉菌)与代表性的氧化还原活性化学物质(Cu 和1,4-萘醌)混合后,测得的混合物 DTT 消耗速率低于各单一组分 DTT 消耗速率的加和值.

参考文献:

[1] Feng S L, Gao D, Liao F, et al. The health effects of ambient $PM_{2.5}$ and potential mechanisms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016,128:67−74.

[2] Valavanidis A, Vlachogianni T, Fiotakis K, et al. Pulmonary oxidative stress, inflammation and cancer: respirable particulate matter, fibrous dusts and ozone as major causes of lung carcinogenesis through reactive oxygen species mechanisms [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013,10(9):3886−3907.

[3] Kelly F J, Fussell J C. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter [J]. Atmospheric Environment, 2012,60:504−526.

[4] Borlaza L, Cosep E, Kim S, et al. Oxidative potential of fine ambient particles in various environments [J]. Environmental Pollution,

2018,243:1679−1688.

[5] Vreeland H, Weber R, Bergin M, et al. Oxidative potential of $PM_{2.5}$ during Atlanta rush hour: measurements of in−vehicle dithiothreitol (DTT) activity [J]. Atmospheric Environment, 2017,165:169−178.

[6] 张曼曼,李慧蓉,杨闻达,等.基于 DTT 法测量广州市区 $PM_{2.5}$的氧化潜势 [J]. 中国环境科学, 2019,39(6):2258−2266.
Zhang M M, Li H R, Yang W D et al. Measurement based on DTT method of the $PM_{2.5}$ oxidative potential in Guangzhou urban area. China Environmental Science, 2019,39(6):2258−2266.

[7] Genitsaris S, Stefanidou N, Katsiapi M, et al. Variability of airborne bacteria in an urban Mediterranean area (Thessaloniki, Greece) [J]. Atmospheric Environment, 2017,157:101−110.

[8] Li R Y, Yan C Q, Tian Y Z, et al. Insights into relationship of oxidative potential of particles in the atmosphere and entering the human respiratory system with particle size, composition and source: A case study in a coastal area in Northern China [J]. Journal Hazardous Materials, 2025,485:136842.

[9] Bates J T, Weber R J, Abrams J, et al. Reactive oxygen species generation linked to sources of atmospheric particulate matter and cardiorespiratory effects [J]. Environmental science & technology, 2015,49(22):13605−13612.

[10] Abrams J Y, Weber R J, Klein M, et al. Associations between ambient fine particulate oxidative potential and cardiorespiratory emergency department visits [J]. Environmental health perspectives, 2017,125 (10):107008.

[11] Yu H R, Wei J L, Cheng Y L, et al. Synergistic and antagonistic interactions among the particulate matter components in generating reactive oxygen species based on the dithiothreitol Assay [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(4):2261−2270.

[12] 彭　勤,李　丹,罗　玉,等.$PM_{2.5}$粉末样品中不同组分的氧化潜势及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1957−1965.
Peng Q, Li D, Luo Y, et al. The contribution and influencing factors of different components to oxidation potential in $PM_{2.5}$ powder samples [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1957−1965.

[13] Fröhlich J N, Kampf C J, Weber B, et al. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions [J]. Atmospheric Research, 2016,182:346−376.

[14] Morris C E, Sands D C, Bardin M, et al. Microbiology and atmospheric processes: research challenges concerning the impact of airborne micro−organisms on the atmosphere and climate [J]. Biogeoences, 2011,8(1):17−25.

[15] Reinmuth S, Kathrin, Kampf, et al. Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants [J]. Environmental Science & Technolog, 2017,51(8):4119−4141.

[16] Li J, Chen H X, Li X Y, et al. Differing toxicity of ambient particulate matter (PM) in global cities [J]. Atmospheric Environment, 2019,212: 305−315.

[17] Vaïtilingom M, Charbouillot T, Deguillaume L, et al. Atmospheric chemistry of carboxylic acids: microbial implication versus photochemistry [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(16): 8721−8733.

[18] Vaïtilingom M, Deguillaume L, Vinatier V, et al. Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(2):559−564.

[19] Samake A, Uzu G, Martins J M F, et al. The unexpected role of bioaerosols in the oxidative potential of PM [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):10978.

[20] 王炳鹏,杨文雨,王文雨,等.渗滤液处理过程中微生物气溶胶污染分布特征及健康风险 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5367−5377.
Wang B P, Yang W Y, Wang W Y, et al. Characterization of microbial aerosol pollution distribution and health risk during leachate treatment process [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5367−5377.

[21] Feng X Y, Xu X H, Yao X W, et al. Sources, compositions, spatio−temporal distributions, and human health risks of bioaerosols: A review [J]. Atmospheric Research, 2024,305:107453.

[22] Ni J S, Huang S M, Liang Z S, et al. Concentration, pathogenic composition, and exposure risks of bioaerosol in large indoor public environments: A comparative study of urban and suburban areas [J]. Science of The Total Environment, 2024,957:177790.

[23] Li Y P, Fu H L, Wang W, et al. Characteristics of bacterial and fungal aerosols during the autumn haze days in Xi'an, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,122:439−447.

[24] Lu R, Li Y P, Li W X, et al. Bacterial community structure in atmospheric particulate matters of different sizes during the haze days in Xi'an, China [J]. Science of The Total Environment, 2018,637−638:244−252.

[25] Singh N K, Sanghvi G, Yadav M, et al. A state−of−the−art review on WWTP associated bioaerosols: Microbial diversity, potential emission stages, dispersion factors, and control strategies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,410:124686.

[26] Atena, Amirsoleimani, Gail M, et al. Prevalence and characterization of Staphylococcus aureus in wastewater treatment plants by whole genomic sequencing [J]. Water Research, 2019,158:193−202.

[27] Nag R, Monahan C, Whyte P, et al. Risk assessment of Escherichia coli in bioaerosols generated following land application of farmyard slurry [J]. Science of The Total Environment, 2021,791:148189.

[28] Pearson C, Littlewood E, Douglas P, et al. Exposures and health outcomes in relation to bioaerosol emissions from composting facilities: a systematic review of occupational and community studies [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 2015, 18(1):43−69.

[29] Reinthaler F F, Marth E, Eibel U, et al. The assessment of airborne microorganisms in large−scale composting facilities and their immediate surroundings [J]. Aerobiologia, 1997,13:167−175.

[30] Mayer H, Tharanathan R, Weckesser J. 6analysis of lipopolysaccharides of gram−negative bacteria [J]. Methods in Microbiology, 1985,18:157−207.

[31] Schieber M, Chandel N. ROS function in redox signaling and oxidative stress [J]. Current Biology, 2014,24(10):453−462.

[32] Timm M, Hansen E W, Moesby L, et al. Utilization of the human cell line HL−60for chemiluminescence based detection of microorganisms and related substances [J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2006,27(2):252−258.

[33] Timm M, Madsen A M, Hansen J V, et al. Assessment of the total

inflammatory potential of bioaerosols by using a granulocyte assay [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009,75(24):7655−7662.

[34] Hansel C M, Zeiner C A, Santelli C M, et al. Mn(II) oxidation by an ascomycete fungus is linked to superoxide production during asexual reproduction [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(31):12621−12625.

[35] Li Z, Zhang G S, Li Y P. Exposure characteristics and health risk differences of airborne viable microorganisms across different climate zones: Insights from eight typical cities in China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,496:139440.

[36] 王嘉琦,赵时真,田乐乐,等.基于 DTT 法评估大气颗粒物氧化潜势的研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2022,17(2):20−32.
Wang J Q, Zhao S Z, Tian L L, et al. Research advance in use of dithiothreitol assay to evaluate particulate matter oxidative potential [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022,17(2):20−32.

[37] Charrier J G, Anastasio C. Rates of hydroxyl radical production from transition metals and quinones in a surrogate lung fluid [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(15):9317−9325.

[38] Charrier J G, Anastasio C. On dithiothreitol (DTT) as a measure of oxidative potential for ambient particles: evidence for the importance of soluble transition metals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(19):9321−9333.

[39] Alam M S, Delgado J M, Stark C, et al. Using atmospheric measurements of PAH and quinone compounds at roadside and urban background sites to assess sources and reactivity [J]. Atmospheric Environment, 2013,77:24−35.

[40] Valavanidis A, Fiotakis K, Vlahogianni T, et al Determination of Selective Quinones and Quinoid Radicals in Airborne particulate matter and vehicular exhaust particles [J]. Environmental Chemistry, 2006,3(2):118−123.

[41] Kumar R R, Congeevaram S, Thamaraiselvi K. Evaluation of isolated fungal strain from e−waste recycling facility for effective sorption of toxic heavy metal Pb (II) ions and fungal protein molecular characterization—a mycoremediation approach [J]. Asian Journal of Biological Sciences, 2011,2:342−347.

[42] Vullo D L, Ceretti H M, Daniel M A, et al. Cadmium, zinc and copper biosorption mediated by Pseudomonas veronii 2E [J]. Bioresource Technology, 2008,99(13):5574−5581.

[43] Fein J B, Daughney C J, Yee N, et al. A chemical equilibrium model for metal adsorption onto bacterial surfaces [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997,61(16):3319−3328.

[44] Dong G W, Wang Y P, Gong L B, et al. Formation of soluble Cr(III) end−products and nanoparticles during Cr(VI) reduction by Bacillus cereus strain XMCr−6 [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013,70: 166−172.

[45] Kondakindi V R, Pabbati R, Erukulla P, et al. Bioremediation of heavy metals−contaminated sites by microbial extracellular polymeric substances−A critical view [J]. Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2024,6:408−421.

作者简介：石浩柯(2001−),男,河北邢台人,长安大学博士研究生,主要从事生物气溶胶及其环境效应.发表论文 1 篇.2023129055@chd.edu.cn.