

校园不同绿地冬春季空气微生物特征及影响要素研究

冯思宁¹, 童开林², 李梦园³, 弓弼^{1*}

(1. 西北农林科技大学 风景园林艺术学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨陵 712100;
3. 中国计量科学研究院 实验基地综合管理部, 北京 100000)

摘要:空气微生物浓度与人类健康和公共卫生安全息息相关。为探明绿地通过植被类型、垂直结构、环境因子和土壤微生物对空气微生物分布的影响, 选择了8块具有典型植被特征的绿地, 采用自然沉降法取样并观测空气微生物冬春季的分布情况。结果表明, 校园不同绿地空气微生物浓度春季显著高于冬季。受季节、植物种类和垂直结构影响, 不同绿地空气减菌作用彼此间显著差异, 所有绿地均能有效抑制空气细菌, 且在春季表现出更好的减菌效果, 对空气真菌基本无抑制作用, 针叶林和乔草结构分别为减菌作用最佳的植被类型和垂直结构。环境因素和绿地垂直结构与空气微生物浓度存在显著线性回归关系, 空气细菌浓度受温度影响最大, 空气真菌浓度受湿度影响最大。土壤细菌多样性和丰富度与空气细菌浓度显著正相关, 土壤真菌多样性与空气真菌浓度显著负相关。

关键词:空气微生物; 抑菌作用; 植被类型; 绿地垂直结构; 土壤微生物多样性

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2023)03-0235-07

Characteristics and Influencing Factors of Air Microorganism of Different Green Spaces on University Campus in Winter and Spring

FENG Si-ning¹, TONG Kai-lin², LI Meng-yuan³, GONG Bi^{1*}

(1. College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. Experimental Base Comprehensive Management Department, National Institute of Metrology, Beijing 100000, China)

Abstract: Airborne microorganism (AM) concentration is closely related to human health and public health safety. In order to ascertain the influences of vegetation types, vertical structures, environmental factors and soil microorganism on the distribution of AM, 8 green spaces with typical vegetation types were selected in the south campus of Northwest A&F University, using the natural sedimentation method to observe the distribution of AM in winter and spring. The results showed that the concentration of AM in different green spaces of the campus was significantly higher in spring than that in winter. Influenced by seasons, plant species and vertical structures, there was significant difference in air bacteria-reducing effect among different green-spaces. All green spaces could effectively inhibit air bacteria, and showed better bacteria-reducing effect in spring, but could not inhibit air fungi. Evergreen coniferous forest had the best bacteria-reducing effect in all vegetation types, and arbor-grass structure had the best bacteria-reducing effect in all vertical structures. There was a significant linear regression relationship between environmental factors and green space structure and air microbial concentration. The concentration of airborne bacteria was mostly affected by temperature, while that of airborne fungi was mostly affected by humidity. Soil bacterial diversity

收稿日期: 2022-03-27 修回日期: 2022-10-29

基金项目: 陕西千渭之会国家湿地公园生物多样性及环境监测研究(K4030217090)。

第一作者: 冯思宁。研究方向: 风景园林规划与设计。E-mail: 519319710@qq.com

* 通信作者: 弓弼, 教授, 博士生导师。研究方向: 风景园林规划与设计。E-mail: 544635562@qq.com

and richness were positively correlated with airborne bacterial concentration, while soil fungal diversity was negatively correlated with airborne fungal concentration.

Key words: airborne microorganism; antimicrobial capacity; vegetation types; vertical structure; soil microbial diversity

空气微生物是大气生物气溶胶的重要组成部分,影响全球气候变化,同时也与人类健康密切相关^[1]。微生物浓度过高的空气,可能会引发呼吸系统疾病,严重时会导致传染性疾病的爆发^[2]。

空气微生物含量和组成受到人类活动、城市化水平、生态环境等多方因素的影响。国内外大量研究显示,空气微生物分布存在显著时空差异^[3-4],春、夏季更适宜微生物生长繁殖^[5];空气微生物浓度还与温度、相对湿度、颗粒物浓度和植物群落有关^[6-8]。特殊天气会影响土壤释放微生物的过程,有研究指出,一滴雨下落可致土表 0.01% 的细菌释放至空气^[9-10]。

目前对绿地空气微生物的研究多为分布特性的观测和影响因子分析,但多数研究聚焦城市绿地,难以规避复杂人群和城市交通对空气微生物分布的干扰,且影响因子中极少涉及土壤微生物。土壤作为近地表大气中微生物的主要来源^[11],其丰缺程度如何影响空气微生物浓度尚不清楚。本研究聚焦干扰因素较少的校园绿地,以西北农林科技大学为例,于冬春 2 季观测南校区 8 块具有典型植被特征绿地的空气微生物浓度变化情况,并分析了气候环境、绿地垂直结构和土壤微生物多样性对空气微生物分布差异的影响,为空气微生物分布特性的研究提供基础数据,并为城市绿地的植物配置提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西北农林科技大学位于陕西省咸阳市杨凌示范区(108°~108°07'E, 34°12'~34°20'N),海拔 435~563 m。属大陆性季风型半湿润气候,春暖多风、夏热多雨、秋季多连阴雨、冬季寒冷干燥。年均气温 12.9℃,最热月(8 月)日均最高温度 35℃,最冷月(1 月)日均最低温度-6℃,极端最高温 41.7℃,极端最低温-19℃,无霜期 211 d。年降水量 635.1~663.9 mm,多集中在 7 月和 9 月。冬季以西风或西北风居多,其余季节盛行东风或东南风。区域内土壤以瘠土为主,植被为常见中国北方城市园林绿化树种。

1.2 样地设置

在西北农林科技大学南校区选取 8 块具有典型植被特征的绿地和南绣山活动中心前铺装广场(作为对照),每块样地划取 10 m×10 m 的样方作为试验场地,依据园林生态系统的空间结构划分标准,对样地植物的垂直结构进行分类,样地分类与植被信息见表 1。为避免过大的人流量差异对绿地空气微生物含量的影响,所有样地均设置在远离主教学区和宿舍的区域。

表 1 样地概况

Table 1 Basic information of sample sites

编号	样地名称	植被类型	垂直结构	主要植物种类	采样地点
0	CG				南校绣山活动中心广场
1	ES	常绿灌木	灌木	南天竹(<i>Nandina domestica</i>)	南校绣山活动中心南侧
2	BL	落叶阔叶林	乔草	乔:二乔玉兰(<i>Yulania × soulangeana</i>),二球悬铃木(<i>Platanus acerifolia</i>);草:德国鸢尾(<i>Iris tectorum</i>),沿阶草(<i>Ophiopogon bodinieri</i>)	南校乔木园
3	HGC	草本地被	单层	德国鸢尾,滨菊(<i>Leucanthemum vulgare</i>),百日草(<i>Zinnia elegans</i>),松果菊(<i>Echinacea purpurea</i>)	南校花卉园
4	C	常绿针叶林	乔草	乔:油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>);草:绣球小冠花(<i>Coronilla varia</i>),二月兰(<i>Orychophragmus violaceus</i>)	南校小南山
5	CBL	针阔混交林	乔草	乔:白皮松(<i>P. bungeana</i>),雪松(<i>Cedrus deodara</i>),五角枫(<i>Acer pictum</i>);草:沿阶草,早熟禾(<i>Poa annua</i>)	南校东门南侧绿地
6	ASH	针阔混交林	乔灌木	乔:雪松,茶条槭(<i>Acer ginnala</i>),桂花(<i>Osmanthus fragrans</i>);灌:大叶黄杨(<i>Buxus megistophylla</i>),红叶石楠(<i>Photinia × fraseri</i>);草:早熟禾	南校区小西湖东侧
7	DS	落叶灌木	灌木	月季(<i>Rosa chinensis</i>)	南校月季园
8	L	草坪	单层	早熟禾,黑麦草(<i>Lolium perenne</i>)	南校草业学院东侧

1.3 采样方法

1.3.1 空气微生物采样与培养方法 在1月(冬季)和4月(春季)分别选择3个无风的晴天(2020-12-30、2021-01-02、2021-01-04、2021-04-08、2021-04-09、2021-04-15),于10:00—12:00按自然沉降法^[6]进行取样,为避免降水对空气微生物浓度的影响,采样期间若遇降水则保证至少3个连续晴天后再次采样。在每块样方对角线上3个4等分点距离地面1.5 m高度处分别放置细菌和真菌培养皿各3个,暴露时间5 min,同时在样方中心点放置移动气象站,测定采样高度处的温度、湿度、风速和气压,每隔1 min记录1次数据。

细菌培养基为牛肉膏蛋白胨,真菌培养基为孟加拉红,分装于直径90 mm的培养皿中,121 ℃高温高压蒸汽灭菌20 min后冷却备用^[6]。

1.3.2 土壤样本采集方法 土壤样本采集于3月16日10:00—12:00。每块样方按照S形取样路线布置15个采样点,采集5~20 cm深度的表层土壤,每5个样点取1个混合样,用于微生物检测,其余土样装入无菌袋带回实验室,存放于-80 ℃冰箱中备用。

1.4 测定项目与方法

使用16S rDNA扩增子测序技术检测土壤微生物^[12];采用恒温培养法和菌落计数法测定空气微生物

物浓度,细菌培养皿在37 ℃下培养48 h,真菌培养皿在28 ℃下培养72 h,分别进行菌落计数,并带入奥梅梁斯基公式(式1)^[6]计算空气微生物浓度,带入式(2)计算绿地抑菌率。

$$E = 50\,000N / (A \cdot T) \quad (1)$$

$$\text{绿地抑菌率} = (E_{\text{对照}} - E_{\text{样地}}) / E_{\text{对照}} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中: E 为空气微生物浓度($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$); N 为菌落数(个); A 为培养皿面积(cm^2); T 为培养基暴露时间(min)。以0号样地(南绣山广场)作为对照样地。

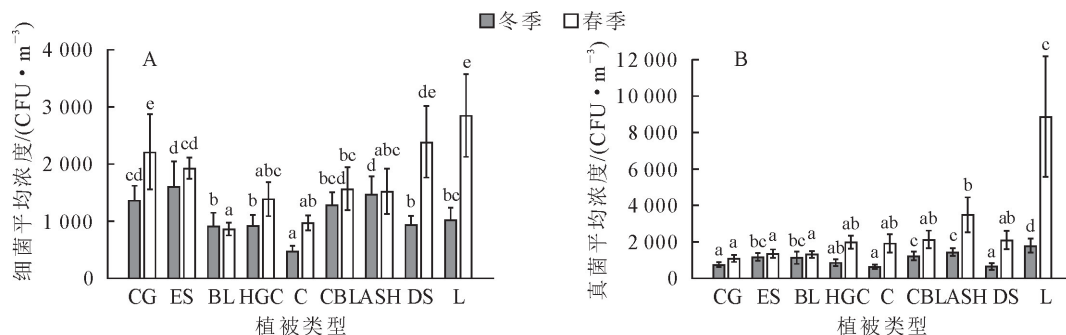
1.5 数据处理与分析

使用FLASH软件(Version 1.2.7)对土壤样本测序所得原始数据进行拼接、过滤得到有效数据,并以97%的一致性将序列聚类成为OTUs,使用Qiime软件(Version 1.9.1)计算微生物群落的Alpha多样性指数。使用Excel 2010进行数据统计与分析,用IBM SPSS 26.0软件包制图进行相关性分析和一般线性回归模型构建。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型绿地的空气微生物浓度差异

冬、春两季针对不同类型校园绿地,调查了空气真菌和细菌浓度,测试结果见图1。



注:CG:对照样地,ES:常绿灌木,BL:落叶阔叶林,HGC:草本地被,C:常绿针叶林,CBL:针阔混交林,ASH:针阔混交林(乔灌木),DS:落叶灌木,L:草坪。图中小写字母代表差异显著($P < 0.05$)。下同。

图1 不同植被类型校园绿地冬春季空气细菌浓度(A)和空气真菌浓度(B)

Fig. 1 Airborne bacteria (A) and fungi (B) contents in campus green spaces with different vegetation types in winter and spring

由图1A可知,冬季,常绿针叶林(C)空气细菌浓度最低,常绿灌木(ES)浓度最高,其他6块绿地间差异不显著;春季,落叶阔叶林(BL)和常绿针叶林(C)空气细菌浓度分别为最低和次低,差异不显著,草坪(L)浓度最高,是浓度最低绿地的3倍多,与对照广场(CG)浓度相近,落叶灌木(DS)浓度为次高,其他4块绿地彼此差异不显著。可能说明草坪和落叶灌木类绿地的绿量低、分泌的杀菌物质有限。结果还表明,校园绿地空气细菌浓度存在明显季节差异,除落叶阔叶林(BL)冬春季节细菌浓度基

本相同,其余绿地春季空气细菌浓度较冬季显著升高,落叶灌木(DS)和草坪(L)升高幅度最大。说明以草本和灌木为主的开阔绿地气温回升较快,为细菌繁殖提供了适宜条件。

由图1B可知,冬季常绿针叶林(C)和落叶灌木(DS)绿地的空气真菌浓度最低,草坪(L)的空气真菌浓度最高,其余样地彼此间差异不显著;春季,常绿灌木(ES)和落叶阔叶林(BL)绿地的空气真菌浓度最低,可能与春季初生嫩叶的杀菌抑菌作用较强有一定关系。草坪(L)空气真菌浓度最高,乔灌木

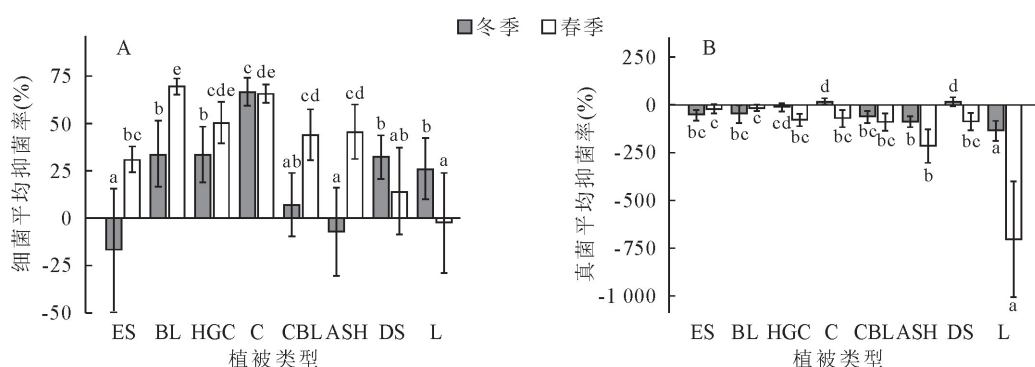
结构的针阔混交林(ASH)次高,其余绿地彼此间差异不显著,为次低。说明通风条件差的绿地和完全开敞的绿地均会增加空气中的真菌含量,前者因为形成了阴湿小环境,后者因为绿量较低。结果还表明,校园绿地空气真菌浓度存在明显季节差异,除常绿灌木(ES)和落叶阔叶林(BL)季节差异不显著,其余绿地春季空气真菌浓度较冬季显著升高,草坪(L)升高幅度最大。

8 块绿地中除落叶阔叶林(BL)春季空气细菌浓度低于冬季,其余绿地春季细菌和真菌浓度都高于冬季,主要是因为春季温度与湿度都较冬季升高,植物进入生长期,部分植物开花授粉,空气中花粉、孢

子等生物颗粒浓度上升,为空气微生物提供了附着物,加上植物叶片生长,冠层叶片阻挡大量紫外线辐射,减少了阳光对微生物的灭杀作用。草坪(L)春季的空气细菌和真菌浓度都较高,主要因为草坪绿地绿量显著低于其他绿地,滞尘效果较差且有机物挥发量低,此外,春季草坪生长速度快,人工修剪频繁,机器的震动加速表层土壤向空气释放微生物,扬尘更为空气微生物提供了附着物,施肥、翻土等园林养护活动也会影响空气微生物的含量^[13]。

2.2 不同植被类型绿地对空气微生物的抑制作用

根据绿地抑菌率公式计算了不同植被类型的抑菌率(图 2)。



注:ES:常绿灌木,BL:落叶阔叶林,HGC:草本地被,C:常绿针叶林,CBL:针阔混交林,ASH:针阔混交林(乔灌木),DS:落叶灌木,L:草坪。

图 2 不同植被类型校园绿地冬春季空气细菌抑菌率(A)和空气真菌抑菌率(B)

Fig. 2 Antibacterial rate (A) and antifungal rate (B) of campus green spaces with different vegetation types in winter and spring

由图 2A 可知,冬季,常绿灌木(ES)和乔灌木结构针阔混交林(ASH)细菌抑菌率为负,乔灌木结构针阔混交林(CBL)对空气细菌有轻微抑制效果,常绿针叶林(C)细菌抑菌率最高,其余绿地差异不显著;春季,草坪(L)细菌平均抑菌率为负,落叶阔叶林(BL)抑菌率显著高于其他绿地,常绿针叶林(C)抑菌率次高。主要因为针叶林能分泌大量萜烯类物质,对细菌有较强抑制作用^[6],阔叶林叶片滞尘效果较强,能有效减少空气中适宜细菌生存的悬浮颗粒^[14]。常绿针叶林(C)在冬、春两季均表现出良好的抑菌效果,落叶灌木(DS)和草坪(L)冬季抑菌效果要高于春季,其余绿地均在春季表现出更好的抑菌效果。绿地细菌抑菌率的季节差异主要受绿地植被的物候影响,因此植被长势更好的春季抑制细菌效果更强,而针叶林抑菌效果季节差异不大。

由图 2B 可知,冬季仅常绿针叶林(C)与落叶灌木(DS)对空气真菌有轻微抑制作用,草坪(L)空气真菌增殖率最大,其余绿地增殖率差异不显著;春季草坪(L)空气真菌增殖率最大,乔灌木结构针阔混交林(ASH)次之,常绿灌木(ES)和落叶阔叶林(BL)最小,其余绿地增殖率差异不显著。常绿灌木(ES)和落叶阔叶林(BL)进入春季后增菌效果减弱,

其余绿地春季均表现出更明显的增菌效果,草坪(L)增菌效果季节差异最大。叶原基是真菌的天然培养基^[15],春季植物叶片生长所分泌的物质为真菌的生长繁殖提供了养分,造成春季绿地真菌增殖更高。前人研究表明,真菌和嗜热细菌是较为常见的致病源,是导致肺炎及肺内肉芽肿的重要因素^[16],过高的空气真菌浓度会严重威胁人类健康。

综合来看,不同植被类型绿地基本对空气细菌有明显抑制作用,但会滋生空气真菌,常绿针叶林(C)抑菌效果最理想,草坪(L)抑菌效益最差。

2.3 不同垂直结构绿地对空气微生物的抑制作用

将绿地类型按照植被垂直结构划分为单层结构、灌木结构、乔灌木结构和乔灌木结构 4 类,比较其对空气微生物的抑制作用(图 3)。

由图 3A 可知,冬季,单层和乔灌木结构细菌抑菌率显著高于灌木和乔灌木结构;春季乔灌木结构和乔灌木结构细菌抑菌率显著高于单层和灌木结构。除单层结构绿地,其余结构绿地均在春季表现出更好的细菌抑菌效果,乔灌木结构抑菌效果季节差异最显著,乔灌木结构在冬春 2 季都表现出较好的抑制细菌效果。由此可见,乔灌木结构的细菌抑菌效果最佳。

由图 3B 可知,冬季,乔灌木和单层结构真菌增

殖率显著高于灌木和乔草结构;春季单层结构真菌增殖率最高,乔灌木次高,灌木与乔草结构差异不显著,均最低。所有结构绿地在冬、春两季均表现出滋生真菌的效果,春季增菌程度大于冬季,其中,灌木

和乔草结构的季节差异明显小于单层和乔灌木结构,单层结构增菌效果季节差异最显著。由此可见,密实的乔灌木结构和绝对开敞的单层结构均会大量滋生真菌。

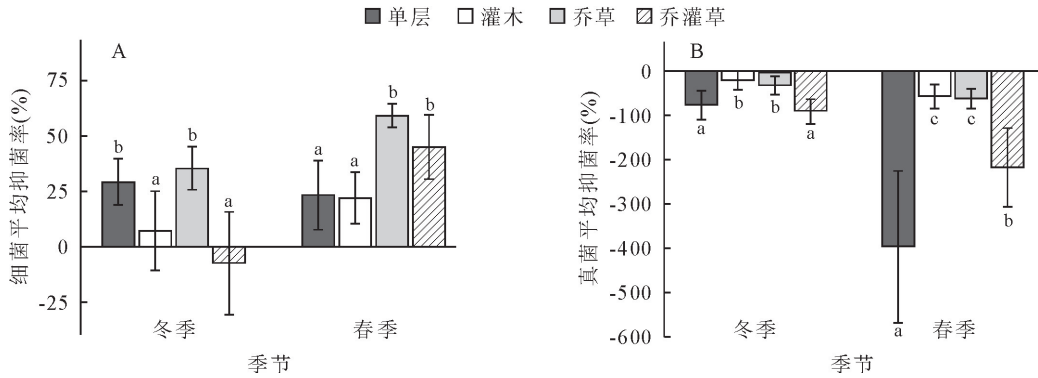


图 3 不同垂直结构校园绿地冬春季空气细菌抑菌率(A)和空气真菌抑菌率(B)

Fig. 3 Antibacterial rate (A) and antifungal rate (B) of campus green spaces with different vertical structures in winter and spring

综上可知,完全开敞和结构密实的垂直结构均非抑菌效果最佳的植被种植方式,完全开敞的绿地绿量较低,分泌的杀菌物质有限,而密实的枝叶容易形成空气湍流,不利于微生物的沉降,并形成阴湿环境滋生微生物。通风良好且绿量较大的乔草结构,抑菌效果在各个季节均具优势。

2.4 环境因素和绿地垂直结构与空气微生物浓度的关系

用步进法构建环境因素(温度、湿度、风速、气压)和绿地垂直结构(单层=1,灌木=2,乔草=3,乔灌木=4)与空气微生物浓度之间的解释性线性回归模型,排除无统计学意义的自变量后,模型参数见表2。温度对空气细菌浓度和真菌浓度都有显著正效应,且对细菌浓度的正效应大于对真菌浓度,绿地垂直结构对细菌和真菌浓度都有显著负效应,湿度对细菌浓度有显著负效应,但对真菌浓度有显著正效应,风速对真菌浓度有显著正效应,但对细菌浓度无明显效应。因此,在-5~20℃,气温升高会显著增加绿地细菌和真菌浓度;在35%~65%的湿度内,湿度增加会显著降低细菌浓度,但增加了真菌浓度;从乔灌木、乔草、灌木到草结构绿地,细菌和真菌浓度逐渐升高;在<3 m·s⁻¹的风速环境下,风速增加会显著降低真菌浓度,对细菌浓度无明显影响。

2.5 土壤微生物多样性指数与空气微生物浓度的相关关系

α多样性指数用于分析样本内的微生物群落多样性,其中,Shannon和Simpson指数表征群落内物种分布的多样性和均匀度,数值越大说明物种多样性越高、分布越均匀;Chao1和ACE指数分别用于估计群落中包含的物种总数和OTU数目,数值越大说明群落物种丰富度越高;Goods_coverage为

测序覆盖度,表示测序深度指数,数值越大说明测序深度合理^[17-18]。由表3可见,本次测序各样本的Goods_coverage指数均高于0.99,能很好反映不同绿地间土壤细菌和土壤真菌多样性的真实情况。

表 2 环境因素和绿地垂直结构与空气微生物浓度的关系

Table 2 Correlations between environmental factors, vertical structures and air microbial concentration

因变量	模型	未标准化系数	标准化系数
细菌浓度 $F=23.420$, $R^2=0.141$	温度/℃	64.634	0.501**
	湿度(%)	-19.737	-0.221**
	垂直结构	-133.260	-0.127**
真菌浓度 $F=18.082$, $R^2=0.145$	温度/℃	28.490	0.189**
	风速/(m·s ⁻¹)	1124.713	0.198**
	湿度(%)	57.900	0.228**
	垂直结构	-391.588	-0.132**

注: **表示 $P<0.01$, *表示 $P<0.05$ 。表4同。

使用Spearman相关性分析法研究了土壤微生物多样性与空气微生物浓度的相关关系,结果见表4可知,土壤细菌多样性和丰度指数与空气细菌浓度均呈极显著正相关,相关性较弱(0.2~0.4),土壤真菌多样性指数与空气真菌浓度呈显著负相关,相关性极弱(0~0.2)。由此可知,绿地土壤中细菌分布越均匀、种类越丰富,空气微生物含量越高,而土壤中真菌分布越均匀,空气真菌浓度越低,土壤真菌种类的多寡与空气真菌分布无显著关联。说明土壤微生物分布是影响空气微生物分布的因素之一,且对空气细菌的影响大于真菌。这可能是因为与细菌相比,真菌的菌丝结构使其群落更具黏性,代表微生物多样性和均匀度的Shannon指数和Simpson指数越高,土壤真菌的分布越均匀,真菌群落结构相对更稳定,较细菌更不易被外力释放至空气中。

表 3 不同绿地土壤微生物 α 多样性指数统计

Table 3 αDiversity indices of bacteria in different campus green spaces

微生物	样地名称	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	ACE 指数	覆盖度(GC)
土壤细菌	ES	9.452	0.996	2 898.503	2 894.671	0.992
	BL	9.326	0.995	2 732.028	2 739.540	0.995
	HGC	9.427	0.995	3 108.223	3 126.108	0.994
	C	9.307	0.993	2 851.510	2 856.147	0.995
	CBL	9.668	0.996	3 368.296	3 382.523	0.992
	ASH	9.479	0.995	3 432.506	3 470.659	0.991
	DS	9.836	0.997	3 584.397	3 635.579	0.992
	L	9.773	0.996	3 685.895	3 719.881	0.991
土壤真菌	ES	4.857	0.895	729.629	741.061	0.998
	BL	5.498	0.923	742.783	755.561	0.998
	HGC	4.330	0.873	434.721	440.804	0.999
	C	5.389	0.944	621.021	633.577	0.999
	CBL	4.893	0.887	816.509	826.925	0.998
	ASH	5.715	0.955	742.591	749.372	0.998
	DS	5.216	0.943	483.889	485.681	0.999
	L	4.303	0.833	538.800	544.438	0.999

表 4 土壤微生物多样性指数与空气微生物浓度的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil microbial diversity index and air microbial concentration

空气微生物	系数类型	香浓多样性指数	辛普森多样性指数	Chao1 指数	ACE 指数
细菌浓度	相关系数	0.298**	0.302**	0.260**	0.260**
	Sig.(双尾)	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	432	432	432	432
真菌浓度	相关系数	-0.104*	-0.131**	0.034	0.034
	Sig.(双尾)	0.030	0.006	0.485	0.485
	N	432	432	432	432

注: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$ 。

3 结论与讨论

校园绿地均具有抑制空气细菌的功能,除少数绿地外均对真菌起到滋养作用。不同植被类型绿地中,常绿针叶林(C)冬季抑制细菌的能力最强,并具备抑制真菌的作用,落叶阔叶林(BL)春季抑制细菌的能力最强,草坪(L)春季对真菌的增殖率最高。植物释放的 VOCs 有抑菌和杀菌作用^[19],但多数树种主要抑制空气细菌而对空气真菌抑制率低或无明显作用^[20],且绿地的滞尘作用减少了空气中细菌可附着的颗粒物量^[14],而植物的叶原基是真菌的天然培养基^[15],绿量较大的绿地极易滋生真菌。褚泓阳等^[21]、冯俊涛等^[22]研究均证实了油松、雪松、白皮松、石楠、悬铃木、侧柏、槭树等植物具有较强的杀菌能力,本研究中大量种植这些植物的针叶林和阔叶林具有更出色的抑菌效果,与前人研究结果一致。

环境因素和绿地垂直结构与空气微生物浓度存在显著线性回归关系,空气细菌浓度受温度影响最大,空气真菌浓度受湿度影响最大,温度与空气微生物浓度显著正相关,湿度与细菌浓度负相关而与真菌浓度正相关,风速与真菌浓度负相关而对细菌无显著影响,绿地垂直结构影响空气微生物浓度。本

研究中温度对空气微生物浓度的影响结果与大多数空气微生物分布特征的研究结论一致^[3,6,23]。也有学者认为,较低的温度有利于细菌被释放到空气中^[24],当温度过高,超过了微生物适宜生存的温度范围,会导致微生物中的蛋白质失活^[25]。大部分的研究表明,微生物浓度与相对湿度负相关,当湿度较大时,花粉和孢子等微生物更容易附着在湿润表面,从源头上减少微生物释放到空气中的概率^[26],高湿度环境还会增加空气颗粒物沉积到地面的效率,减少微生物的载体,这与本研究空气细菌的结论一致,但与湿度对真菌浓度的影响情况相反,主要因为本研究中空气湿度在 35%~65%,并无高湿度环境,因此,湿沉降作用并未大过阴湿环境对真菌的滋养作用。O’Gorman 等^[8]的研究则显示湿度与空气真菌浓度呈正相关,与本文空气真菌结论一致。风是生物气溶胶释放和传输的原动力,当风速在微生物来源表面超过 $3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,生物活性颗粒会被带到空气中^[27],风速过大对气溶胶有稀释作用^[26],但起稀释作用的风速阈值尚无定论。本试验中风速均控制在 $3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,未达到增加来源的效果,因此仅对真菌存在一定稀释作用。

空气细菌浓度与土壤细菌多样性和丰富度呈显

著正相关,空气真菌浓度与土壤真菌多样性呈显著负相关,与土壤真菌丰富度相关性不显著。关于土壤微生物对空气微生物分布的影响研究案例尚少,本研究仅初步发现土壤微生物的均匀度和丰富度与空气微生物浓度之间存在一定相关性,具体的影响抑制仍有待相关从业者进一步探寻。

参考文献:

- [1] 吴志丰,邱月,任引,等.城市景观格局视角下空气微生物研究进展[J].生态学报,2022,42(6):2489-2500.
WU Z F, QIU Y, REN Y, *et al.* Review of current progress on studies of airborne microbial communities from the perspective of urban landscape pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6):2489-2500. (in Chinese)
- [2] 楼秀芹,郭卫俊,姚文冲,等.杭州市西湖景区春季空气细菌多样性特征[J].生态学报,2019,39(8):2946-2953.
- [3] 方治国,黄闻,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.
- [4] 郑芷青,谢小保,欧阳友生,等.珠江三角洲城市群大气微生物优势种群及时空分异特征[J].地理研究,2009,28(3):625-633.
- [5] SUN X Z, LI D M, LI B, *et al.* Exploring the disparity of inhalable bacterial communities and antibiotic resistance genes between hazy days and non-hazy days in a cold megacity in Northeast China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398:122984-122992.
- [6] 辜夕容,王昕彤,李春明,等.重庆缙云山3种典型森林群落春季空气微生物特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(2):432-439.
GU X R, WANG X T, LI C M, *et al.* Airborne microbial content and antimicrobial capacity in three typical forest communities in Jinyun Mountain, Chongqing, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, 27(2):432-439. (in Chinese)
- [7] UETAKE J, TOBO Y, UJI Y, *et al.* Seasonal changes of airborne bacterial communities over Tokyo and influence of local meteorology[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:1572-1583.
- [8] OGORMAN C M, FULLER H T. Prevalence of culturable airborne spores of selected allergenic and pathogenic fungi in outdoor air[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(18):4355-4368.
- [9] JOUNG Y S, GE Z F, BUIE C R. Bioaerosol generation by raindrops on soil[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1):14668-14677.
- [10] 贾丹,王琪瑶,肖宇飞,等.天然东北红豆杉林土壤细菌多样性研究[J].森林工程,2022,38(3):26-31,39.
- [11] BOWERS R M, CLEMENTS N, EMERSON J B, *et al.* Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(21):12097-106.
- [12] 杜臻,耿增超.秦岭2种林分土壤性质的季节性变化对细菌群落多样性和组成的影响[J].西北林学院学报,2021,36(1):54-61.
DU C, GENG Z C. Effects of seasonal changes of soil properties on soil bacterial diversity and community structure of two forest types in Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(1):54-61. (in Chinese)
- [13] HAMEED A A, KHODR M I. Suspended particulates and bio-aerosols emitted from an agricultural non-point source[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, 3(2):206-209.
- [14] 董帅伟,吴琳杰,余洁,等.太行山地区典型森林类型空气细菌含量变化研究[J].气象与环境科学,2018,41(1):62-68.
- [15] 田旭朝,翟美珠.城市绿化带对空气微生物污染的屏障作用[J].江苏农业科学,2018,46(15):248-253.
- [16] 范春兰.西安市大气真菌群落分布特性及其影响因素研究[D].西安:长安大学,2019.
- [17] 赵国慧,李哲哲,胡少军,等.雍城湖湿地土壤理化性质与微生物及植物群落的关系[J].西北林学院学报,2020,35(5):240-248.
ZHAO G H, LI Z Z, HU S J, *et al.* The relationship among soil physicochemical properties & microorganisms and phyto-community in Yongcheng Lake wetland[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5):240-248. (in Chinese)
- [18] 李琳,杜倩,刘铁男,等.松嫩平原植被演替对土壤微生物的影响[J].森林工程,2022,38(4):45-52,81.
- [19] 陈其兵,江明艳,吕兵洋,等.竹林康养研究现状及发展趋势[J].世界竹藤通讯,2019,17(5):1-8.
- [20] 任启文,徐振华,党磊,等.城市道路防护绿地对空气微生物污染的屏障作用[J].生态环境学报,2015,24(5):825-830.
REN Q W, XU Z H, DANG L, *et al.* Barrier effect of urban road protection green space on air microbial pollution[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5):825-830. (in Chinese)
- [21] 褚泓阳,弓弼,马梅,等.园林树木杀菌作用的研究[J].西北林学院学报,1995(4):64-67.
- [22] 冯俊涛,石勇强,张兴.56种植物抑菌活性筛选试验[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(2):65-68.
FENG J T, SHI Y Q, ZHANG X. Screening studies on fungistasis of 56 plant extracts[J]. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2001, 29(2):65-68. (in Chinese)
- [23] 周连玉,乔枫,米琴,等.校园绿地空气微生物的含量及抑菌效应[J].江苏农业科学,2012,40(7):160-162.
- [24] ZHEN Q, DENG Y, WANG Y Q, *et al.* Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants[J]. *Science of the Total Environment*, 2017 (601/602):703-712.
- [25] TANG J W. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, 6(Suppl. 6):737-746.
- [26] SOUSA S, MARTINS F G, PEREIRA M C, *et al.* Influence of atmospheric ozone, PM10 and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(32):7452-7464.
- [27] JONES A M, HARRESON R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1/3):151-180.