

## 石灰岩山地 4 种林分空气细菌动态变化及其影响因素分析

刘 畅, 赵家豪, 叶钰倩, 关庆伟\*

(南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

**摘 要:** 为探索石灰岩山地不同林分类型中空气细菌的动态变化规律及其影响因素, 筛选出抑菌效果较好的林分, 选取徐州石灰岩山地 4 种典型林分为试验材料, 采用自然沉降法研究林分中细菌含量的季节变化和日变化, 同步监测温湿度、风速、PM<sub>2.5</sub> 和空气负离子浓度, 分析空气细菌含量及其之间的关系。试验结果表明: (1) 细菌含量季节性变化表现为春季>秋季>夏季>冬季, 除冬季日变化呈现“早晚低, 中午高”的变化趋势, 其他季节表现为“早晚高, 中午低”; (2) 不同林分类型空气细菌含量存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 总体来看, 苦楝林对细菌的抑制效果最好; (3) 细菌含量与空气湿度和 PM<sub>2.5</sub> 呈极显著正相关关系, 与空气负离子呈极显著的负相关关系。综上, 苦楝林的抑菌效果最好, 湿度、PM<sub>2.5</sub> 和负离子是影响空气细菌含量的主要因素。本研究可为此地城市保健林的营建以及生态旅游规划提供科学依据。

**关键词:** 石灰岩山地; 空气细菌; 动态变化; 影响因素

中图分类号: S718.521.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)02-0211-08

### Dynamic change of air bacteria and analysis of its influencing factors in four stands in Xuzhou limestone mountains

LIU Chang, ZHAO Jiahao, YE Yuqian, GUAN Qingwei

(College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

**Abstract:** In order to clarify the dynamic change of air bacteria and its influencing factors in different forest types in limestone hills and their influence factors, we screened out those with good bacteriostatic effect, four typical stands in Xuzhou limestone mountain area were selected as experimental materials, the seasonal and daily changes of bacterial content in stands were studied by natural sedimentation method, temperature and humidity, wind speed, PM<sub>2.5</sub> and air negative ion concentration were monitored synchronously, analysed the relationship between the content of air bacteria and environmental factors. The results showed that: (1) Bacterial content in spring > autumn > summer > winter, the daily variation regularity in other seasons was ‘high in morning and evening and low in noon’ while ‘high in noon and low in morning and evening’ in winter; (2) There were significant differences in air bacterial content among different stand types in the same season ( $P < 0.05$ ). In general, *Melia azedarach* was the best in inhibiting bacteria; (3) The content of air bacteria had an extremely significant positive correlation with humidity and PM<sub>2.5</sub>, and an extremely significant negative correlation with air negative ions. In conclusion, *Melia azedarach* had the best bacteriostatic effect. Humidity, PM<sub>2.5</sub> and negative ions were the main factors influencing the air bacterial content. This study can provide a scientific basis for the construction of urban health forest and the planning of ecotourism in the area.

**Key words:** limestone mountains; air bacteria; dynamic change; influencing factors

空气细菌是指以气溶胶的形式存在于空气中的细菌<sup>[1-2]</sup>, 广泛来源于自然环境中的土壤、水体、动植物、人类及一些非自然活动。空气细菌大致有 1

200 种, 是空气中微生物的重要组成部分, 它的存在与分布主要以人类为中心, 空气中细菌浓度过高, 会增加人体的呼吸道感染、哮喘疾病、慢性肺部疾

收稿日期: 2019-05-30

基金项目: 江苏省林业三新工程 (LYSX[2016]06) 和 PAPD 项目共同资助。

作者简介: 刘 畅, 硕士研究生。E-mail: 354897158@qq.com

\* 通信作者: 关庆伟, 博士, 教授。E-mail: guan-japan999@163.com

病和心血管疾病的发病几率<sup>[3-4]</sup>。

国内外学者对森林的抑菌杀菌作用有一定的研究,森林植物可以通过滞尘、改善小气候、分泌挥发性有机物来抑制空气细菌,植物种类、植物群落和森林空间结构配置的不同对空气细菌的抑制作用也各不相同<sup>[5-6]</sup>。研究表明不同林分因挥发性有机物的差异而导致空气细菌含量不同<sup>[7-9]</sup>,针阔混交林、阔叶混交林等森林类型在抑菌效果上有显著差异<sup>[10]</sup>;密度大的林分中空气细菌含量比密度小的林分少<sup>[11]</sup>。林分中的空气细菌含量动态变化很大,在一年中表现为秋季最高,冬季最低,日变化表现为10:00出现最高值,4:00出现最低值<sup>[5]</sup>,但也有研究结果显示细菌含量在春季达到最大值<sup>[12-13]</sup>,时间变化特征并没有一致的结论。细菌含量动态变化差异性受诸多因素的影响,如NO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>浓度、空气颗粒物、温度、湿度、O<sub>3</sub>等<sup>[10,12-15]</sup>,孔德龙等研究发现细菌含量与CO<sub>2</sub>浓度和空气颗粒物呈正相关,相对湿度对细菌浓度没有显著影响<sup>[12]</sup>,而张琦等发现空气湿度与细菌浓度呈显著正相关关系<sup>[14]</sup>,姚文冲研究表明空气细菌含量与NO<sub>2</sub>浓度和PM<sub>2.5</sub>浓度呈显著正相关<sup>[15]</sup>,不同空气质量下空气细菌含量存在显著差异<sup>[16]</sup>。现阶段细菌含量受诸多因素影响变化较大,没有统一定论。

近年来徐州大力进行荒山植被恢复,营造城市保健林为人们提供游憩放松的森林公园,以吕梁山为代表的石灰岩山地绿化面积显著提高。目前已有学者在此调查了不同植被恢复下的碳储量<sup>[17]</sup>和植物

多样性<sup>[18]</sup>,开展了石灰岩山地植被恢复生态功能的研究<sup>[19]</sup>和美景度的评价<sup>[20]</sup>等,均显示荒山补植工程取得显著成效,但对不同恢复模式下的空气细菌含量少有研究。空气细菌含量作为一项重要指标,研究林分中的细菌含量不仅可以作为地区空气清洁度的依据,还可以评价恢复植被的抑菌效果。本研究以徐州市吕梁风景区的4种典型林分类型作为研究对象,探索空气中细菌含量的动态变化及其与环境因子的关系,以期筛选出抑菌效果较好的林分,为城市保健林的营建及生态旅游规划提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及样地选择

徐州市吕梁山风景区,位于徐州市铜山区东南部,34°01'~34°35'N, 116°48'~117°42'E,地处北温带,温带季风气候,四季分明,年平均气温14.5℃,年降水量869mm,其中6—9月份占全年降水量的58%,无霜期210d左右,年均日照时数2366h。研究区属石灰岩丘陵山地,该地区土层含石率达40%,土层7~10cm,土壤类型多为石灰岩发育而成的粗骨褐土和淋溶褐土,土层薄,土壤养分较差。吕梁山荒山植被恢复面积约625hm<sup>2</sup>,以30m×40m的方格为单位种植女贞(*Ligustrum lucidum*)、三角枫(*Acer buergerianum*)、五角枫(*A. mono*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、苦楝(*Melia azedarach*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、黄连木(*Pistacia chinensis Bunge*)等园林树种,每个方格

表1 试验地基本情况

Table 1 The basic information of experiment plot

样地 Sample plots	主要植物 Main plants	树高/m Tree height	胸径/cm Average DBH	林分密度/株·hm <sup>2</sup> Stand density	郁闭度/% Crown density
F1 女贞林 <i>Ligustrum lucidum</i>	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> 铁线莲 <i>Clematis florida</i> 地构叶 <i>Speranskia tuberculata</i> 麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	5.5±0.93	10.8±1.46	911	0.80
F2 三角枫五角枫混交林 <i>Acer buergerianum</i> × <i>A. mono</i>	三角枫 <i>Acer buergerianum</i> 五角枫 <i>A. mono</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 麦冬 <i>O. japonicus</i>	4.3±0.57	7.2±1.33	790	0.70
F3 臭椿林 <i>Ailanthus altissima</i>	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> 蛇莓 <i>Duchesnea indica</i> 茅莓 <i>Rubus parvifolius</i> 木防己 <i>Cocculus orbiculatus</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	4.5±0.64	8.3±2.43	760	0.65
F4 苦楝林 <i>Melia azedarach</i>	苦楝 <i>Melia azedarach</i> 木防己 <i>C. orbiculatus</i> 狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	5.0±1.29	8.5±1.18	848	0.80

内植被配置模式相同,不同植被恢复模式以 30 m×40 m 的单位交替,其中女贞林、三角枫五角枫混交林、臭椿林和苦楝林占恢复面积 70%以上,是该地典型林分。以步道为基准在步道两端选取这 4 种 10 a 林龄的典型林分,分别为女贞林(F1)、按 1:1 配置栽种的三角枫五角枫混交林(F2)、臭椿林(F3)和苦楝林(F4)作为研究样地如表 1,样地均在山体阳坡,坡度 13°~18°,为使试验结果更能代表样地空气细菌平均状况,在每个林分中心区域按照林木平均树高和胸径选择 3 棵标准木,标准木间隔距离 5 m 以上,每棵标准木下设置 1 个采样点,每个样地 3 个采样点作为重复,以林外裸露地带作为对照地(CK)。

### 1.2 空气细菌的采样及培养

培养细菌采用营养琼脂培养基,培养皿直径 9 cm。采样时间为冬季 2018 年 1 月上旬、春季 2018

年 4 月中旬、夏季 2018 年 7 月下旬和秋季 2018 年 10 月中旬,每次采样选取没有雨、雪、大风、大雾等特殊天气的 3 d 作为采样日,每天从 7:00 开始到 19:00 结束。采用自然沉降法,采样高度为 1.5 m,在采样点水平放置培养基使其充分暴露在空气中 10 min,每间隔 2 h 测定一次空气细菌含量,采样后用封口膜密封带回实验室放入培养箱中 37 °C 培养 48 h 检查菌落数。

### 1.3 环境因子的测量

NK5920 便携式气象仪同步监测温湿度、风速;日本产 KEC-900 空气负离子测试仪,每个监测点选取东西南北 4 个方向分别读数,每个方向待读数稳定后读取 3 组数据,取 4 个方向的数据均值作为测量值;Dustmate 8532 型便携式粉尘仪测定空气 PM<sub>2.5</sub> 浓度,每次监测时间为 2 min,每个观测点取 2 min 内的均值,测量结果如表 2 所示。

表 2 不同林分类型中的环境因子  
Table 2 Environmental factors in different forest types

季节 Season	样地 Plots	温度/°C Temperature		湿度/% Humidity		风速/m·s <sup>-1</sup> Wind speed		PM <sub>2.5</sub> /μg·m <sup>-3</sup>		负离子含量/个·cm <sup>-3</sup> Negative ion concn	
		日均值 Daily average	日变幅 Daily range	日均值 Daily average	日变幅 Daily range	日均值 Daily average	日变幅 Daily range	日均值 Daily average	日变幅 Daily range	日均值 Daily average	日变幅 Daily range
		春季 Spring	F1	18.12	7.48	49.26	18.39	1.28	0.55	110.36	43.23
	F2	18.83	7.21	52.78	25.22	1.62	0.44	114.28	41.79	1 012.66	623.33
	F3	19.24	7.44	56.33	15.46	1.33	0.37	128.61	52.28	970.49	422.37
	F4	17.64	7.39	47.42	20.49	1.18	0.64	100.76	37.69	1 240.66	472.33
夏季 Summer	F1	31.22	8.37	82.34	25.17	0.97	0.33	56.66	22.33	2 225.00	755.66
	F2	32.82	8.15	78.32	14.35	1.53	0.45	73.68	18.71	1 769.74	631.18
	F3	33.21	7.98	75.27	18.59	1.16	0.29	68.70	25.63	1 687.33	712.33
	F4	32.33	8.04	69.48	28.20	1.34	0.40	68.24	27.11	2 014.43	588.62
秋季 Autumn	F1	13.83	8.30	64.38	25.09	1.27	0.18	66.85	28.33	1 382.76	559.66
	F2	14.29	7.82	62.11	24.65	0.98	0.32	92.13	44.26	1 123.43	479.29
	F3	14.09	7.69	59.34	27.61	1.26	0.34	74.37	30.86	1 086.45	506.45
	F4	14.53	8.02	63.10	22.42	1.07	0.22	82.79	38.12	1 222.76	401.58
冬季 Winter	F1	3.51	4.22	58.12	18.78	1.73	0.26	108.66	50.33	845.23	323.12
	F2	3.92	4.08	52.79	13.65	1.92	0.42	139.67	70.0	667.44	228.17
	F3	3.69	4.12	47.39	14.91	1.44	0.41	123.69	48.29	777.86	302.25
	F4	3.73	4.33	63.74	16.46	1.80	0.30	118.26	40.63	956.27	435.23

### 1.4 数据处理

空气细菌含量根据奥梅梁斯基公式  $C=1\ 000\times 50\times N/(A\times T)$  计算得出,其中  $C$ : 空气中细菌数(CFU·m<sup>-3</sup>);  $A$ : 采集面积;  $N$ : 菌落数;  $T$ : 暴露时间; 抑菌率  $Y=(CK-M)/CK\times 100\%$ ,其中  $CK$ -对照地细菌含量,  $M$ : 林分内监测点细菌含量。采用 SPSS21.0 和 Origin9.0 软件进行数据处理和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 空气细菌含量的日变化规律

如图 1 所示,春季细菌含量的日变化总体呈现早晚高,中午低的趋势。早晨 7:00 细菌含量最高,后逐渐下降,女贞林在 11:00 时出现最低值,三角枫五角枫混交林和臭椿林则在中午 13:00 时达到最

低,其中臭椿林细菌含量最低仅为  $548.33 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ,然后逐渐升高,女贞林和三角枫五角枫混交林到 17:00 达到又一高峰后随之下落。4 种林分上午的细菌含量均较对照低,三角枫五角枫混交林的细菌含量在上午最高,下午女贞林最高,苦楝林在 4 种林分中总体表现较低,且一天中的变化趋势波动较大,在 17:00 时达到其最低峰  $651.23 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 。春季 9:00 林分抑菌效果最好,4 种林分抑菌率分别达到了 25.9%、8.3%、14.8%和 42.9%。全天多数时间林内细菌含量都低于对照地,苦楝林内细菌含量最低,对细菌的抑菌作用最好。

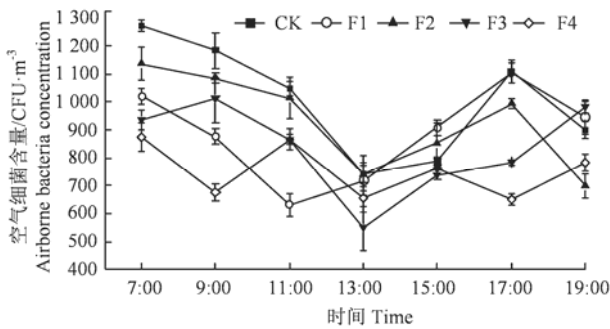


图 1 4 种林分春季细菌含量的日变化

Figure 1 Daily variation of bacterial concentration in 4 forest stands in spring

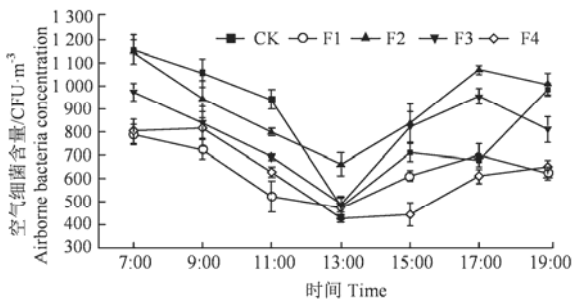


图 2 4 种林分夏季细菌含量的日变化

Figure 2 Daily variation of bacterial concentration in 4 forest stands in summer

夏季 4 种林分内空气细菌含量在 13:00 出现最小值,在 7:00 出现最大值,如图 2 所示。11:00 抑菌效果最佳,4 种林分内空气细菌含量均显著低于对照地,与对照相比分别消减了 44.7%、15.1%、26.6%和 33.4%。4 种林分类型中三角枫五角枫混交林细菌含量最高,女贞林细菌含量最低,日均值最大相差  $732.33 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ ,上午时段林分中的细菌含量均低于对照地,13:00 到 19:00 三角枫五角枫混交林和臭椿林中的细菌含量反而高于对照地,体现出对细菌的促进作用。总体来看早晨和晚上空气细菌含量较高,中午较低;女贞林和苦楝林内空气细菌

含量低于三角枫五角枫混交林和臭椿林。

秋季女贞林、三角枫五角枫混交林和苦楝林表现出相同的变化规律,如图 3。从 7:00 到 13:00 呈下降趋势,随后 15:00 到 19:00 先下降再上升,均呈现出单峰双谷的变化趋势,这 3 种林分均在 13:00 出现最小值,女贞林和苦楝林在 7:00 出现最大值,三角枫五角枫混交林在 15:00 出现最大值。臭椿林则表现出双峰单谷的变化趋势,在 9:00 出现最大值,11:00 出现最小值,一天之内的波动幅度较小。与对照相比,秋季林分抑菌效果最佳时间为上午 9:00,4 种林分内细菌含量均低于对照地,抑菌率分别达到了 30.4%、27.3%、30.7%和 41.3%。而 19:00 的抑菌效果最差,4 种林分细菌含量在不同时间段均出现了多于对照地的情况,苦楝林日均浓度最低,仅为  $523.33 \text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

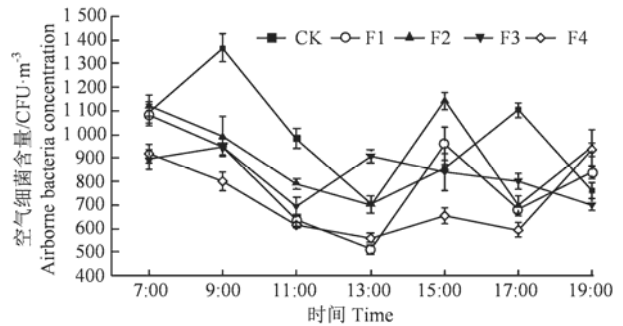


图 3 4 种林分秋季细菌含量的日变化

Figure 3 Daily variation of bacterial concentration in 4 forest stands in autumn

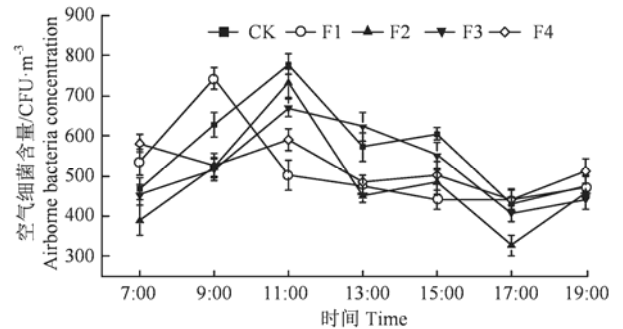
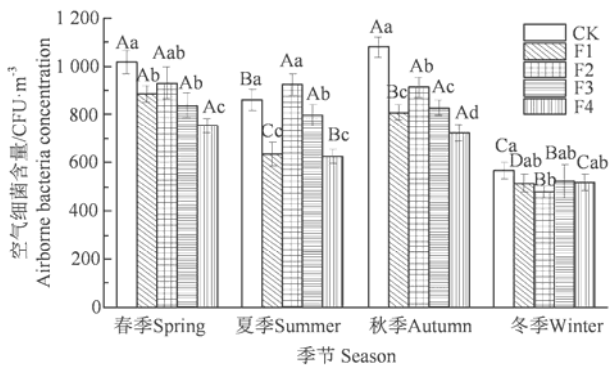


图 4 4 种林分冬季细菌含量的日变化

Figure 4 Daily variation of bacterial concentration in 4 forest stands in winter

冬季 4 种林分中细菌含量变化与春夏秋季明显不同,4 种林分日变化趋势相似,具体体现在上午细菌含量逐渐增多,然后呈现较缓的下降趋势,总体表现为上午高下午低的规律。如图 4 所示除女贞林外,其他林分在 11:00 和 15:00 分别出现一个峰值,其中最大值出现在 11:00,在 17:00 出现最小值,女贞林则在 9:00 达到最大值,之后细菌含量缓慢下降,



不同小写字母表示同一季节不同林分抑菌率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一林分不同季节抑菌率差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences in inhibition rate of different stands in the same season ( $P < 0.05$ ), different capitals indicate the difference of inhibition rate in the same stand in different seasons ( $P < 0.05$ )

图 5 空气细菌含量的季节变化

Figure 5 Seasonal variation of air bacterial concentration

但幅度维持在一定水平波动不大, 在 15:00 出现最小值, 11:00 时抑菌率最大达到 35.6%。从日均值来看, 臭椿林细菌含量最高达到 725.42 CFU·m<sup>-3</sup>, 三

角枫五角枫混交林细菌含量最低仅为 519.33 CFU·m<sup>-3</sup>。

### 2.2 空气细菌含量的季节变化规律

石灰岩山地 4 种林分类型空气细菌含量具有明显的季节变化特征, 季节变化规律大致相同, 均表现为春季最高, 秋季和夏季次之, 冬季含量最少, 各个林分类型细菌含量较对照地均有不同程度的降低, 如图 5 所示。

经方差分析和多重比较可知, 不同季节林内空气细菌含量差异显著。女贞林的变化差异最明显, 4 个季节之间林内的细菌含量差异均显著 ( $P < 0.05$ ), 冬季比另外 3 个季节分别低 36.1%、18.8%和 41.9%; 三角枫五角枫混交林和臭椿林内空气细菌含量在春、夏、秋季间差异不显著, 与冬季差异显著 ( $P < 0.05$ ); 苦楝林春季和秋季细菌含量差异不显著, 但与夏季和冬季差异显著 ( $P < 0.05$ )。同一季节 4 种林分的空气细菌含量也存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 春、夏、秋季苦楝林内的空气细菌含量最低, 且在春季和秋季均显著低于其他林分 ( $P < 0.05$ ), 夏季与女贞林差异不显著, 与另外两种林分差异显著 ( $P < 0.05$ ), 冬季 4 种林分间差异均不显著。

表 3 4 种林分抑菌率的比较

Table 3 Comparison of the bacteriostatic rates of 4 kinds of stands

季节 Season	F1	F2	F3	F4
春季 Spring	12.861±1.765 <sup>cB</sup>	8.436±0.439 <sup>dB</sup>	17.57±2.311 <sup>bB</sup>	25.989±1.817 <sup>aB</sup>
夏季 Summer	26.224±3.281 <sup>aA</sup>	-7.450±0.082 <sup>cC</sup>	9.261±0.112 <sup>bC</sup>	27.268±1.625 <sup>aB</sup>
秋季 Autumn	25.219±1.216 <sup>bA</sup>	15.486±1.667 <sup>cA</sup>	23.46±1.444 <sup>bA</sup>	32.845±1.202 <sup>aA</sup>
冬季 Winter	8.839±0.656 <sup>bC</sup>	15.051±0.862 <sup>aA</sup>	7.390±0.430 <sup>bD</sup>	8.098±0.418 <sup>bC</sup>
平均 Average	18.291	7.881	13.923	23.550

注: 不同小写字母表示同一季节不同林分抑菌率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一林分不同季节抑菌率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表中数据表示平均值±标准误

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in inhibition rate of different stands in the same season ( $P < 0.05$ ), Different capitals indicate the difference of inhibition rate in the same stand in different seasons ( $P < 0.05$ ), the data in the table indicate mean ± standard error

表 4 细菌含量与环境因子之间的相关性

Table 4 Analysis of the correlation between bacterial content and environmental factors

项目 Item	温度 Temperature	湿度 Humidity	风速 Wind speed	PM <sub>2.5</sub>	负离子含量 Negative ion concent
细菌含量 Bacteria concent	0.108	0.593**	-0.275	0.583**	-0.691**

\*表示在 0.05 水平显著相关; \*\*表示在 0.01 水平极显著相关

\*indicates significant correlation at 0.05 level, \*\*indicates an extremely significant correlation at 0.01 level

### 2.3 4 种林分抑菌作用的比较

与对照地相比, 除夏季三角枫五角枫混交林高于对照地外, 一年四季林内的空气细菌含量均低于对照地, 起到了抑菌杀菌的作用, 如表 3 所示。苦

楝林在春夏秋三季的抑菌率分别达到了 25.99%、27.27%和 32.85%, 除夏季与女贞林没有显著差异外, 苦楝林在春、夏、秋季的抑菌率与其余林分均表现出显著的差异 ( $P < 0.05$ ); 冬季抑菌效果最好

的林分是三角枫五角枫混交林, 抑菌率为 15.05%, 与其他 3 种林分有显著差异 ( $P < 0.05$ )。春季 4 种林分的抑菌率均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 夏季和秋季不同的林分的抑菌效果表现为苦楝林 > 女贞林 > 臭椿林 > 混交林, 冬季混交林与另外 3 种林分抑菌效果差异显著 ( $P < 0.05$ ), 女贞林、臭椿林和苦楝林间差异不显著。全年总体特征表现为苦楝林 > 女贞林 > 臭椿林 > 三角枫五角枫混交林。

#### 2.4 空气细菌含量与环境因子之间的相关性分析

通过 SPSS21.0 软件对空气细菌含量与环境因子进行相关性分析如表 4 所示。从表中可以看出, 空气细菌含量与空气湿度和  $PM_{2.5}$  浓度呈极显著正相关, Pearson 指数分别为 0.593、0.583, 与空气负离子含量呈极显著负相关, Pearson 指数为 -0.691, 与温度和风速没有显著相关性。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 空气细菌含量与环境因子的关系

环境因素能够影响空气中的细菌含量, 空气中的细菌群落组成和浓度不稳定, 其含量随着各种环境因子的变化而变化。本研究中空气细菌含量与湿度和  $PM_{2.5}$  呈极显著正相关关系, 与空气负离子呈极显著的负相关关系, 与董帅伟等<sup>[21]</sup>和任启文等<sup>[22]</sup>的研究结果相同。空气颗粒物在大气中多数以气溶胶的形式存在, 气溶胶的丁达尔现象可以降低紫外线强度, 且为细菌的存在和传播提供了载体, 从而提高空气细菌的含量<sup>[16]</sup>。空气负离子因其携带负电荷可以吸附空气细菌气溶胶, 同时也可以与空气颗粒物结合沉降<sup>[23]</sup>, 减少了空气细菌的载体从而降低空气细菌含量, 此外负离子还能够破坏细菌结构直接抑制细菌生长<sup>[24]</sup>, 因此空气负离子越多, 空气细菌含量越少。有学者发现风速和风向也是影响细菌含量的重要因子, 西北风增加了法国马赛空气细菌含量, 而东南风则消减空气细菌含量<sup>[25]</sup>, 但本研究中风速对细菌含量的影响并不显著且相关系数不高, 这可能与试验地的气象条件、受人类影响程度有关。此外, 采样的高度和海拔<sup>[21]</sup>、森林群落类型、距离道路的距离不同也会影响林分中空气细菌含量<sup>[26-27]</sup>。城市生态系统中的空气微生物数量与一些大气污染物也有很大的关系, 有研究表明空气细菌浓度与  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、CO 关联度很高<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 不同林分空气细菌含量的差异性

不同林分中空气细菌含量存在显著差异, 从全年总体特征来看, 空气细菌含量具体表现为三角枫五角枫混交林 > 臭椿林 > 女贞林 > 苦楝林, 这表明

不同林分对空气细菌的抑制作用不同。植物的种类、密度、叶表面微形态和叶片倾角不同导致滞尘效果不同<sup>[29]</sup>, 颗粒物作为载体对细菌含量有促进作用, 女贞、苦楝林郁闭度和林分密度较大, 在滞尘和维持林内环境方面效果较好, 且不易受到外界人类活动的干扰, 可以使林内细菌含量保持在较低水平, 臭椿林和三角枫五角枫混交林郁闭度较小, 一方面消减颗粒物能力有限, 另一方面受外界气流干扰吹起叶片上附着的颗粒物从而增加了细菌含量; 有研究表明不同植物群落释放空气负离子的能力不同<sup>[30]</sup>, 由于负离子能够抑制细菌生长因而对细菌含量有显著影响。对环境因子测量结果显示苦楝林中  $PM_{2.5}$  全年均值  $92.51 \mu g \cdot m^{-3}$  最低, 女贞林空气负离子含量年均值  $1413.24 \text{ 个} \cdot m^{-3}$  最高, 较少的颗粒物和较多的空气负离子均不利于细菌生存, 因此苦楝林和女贞林中的细菌含量少, 抑菌效果最明显。

植物生长过程会释放一些对微生物产生影响的挥发性物质, 而这些挥发性物质的成分与含量又与植物自身因素(植物种类、发育状态、自身结构特点等)密切相关<sup>[31-33]</sup>, 已有学者开展植物挥发性有机物抑菌试验, 植物挥发物对空气微生物具有一定的杀灭抑制作用, 无论空气细菌、真菌还是微生物总量均与林中挥发性有机物含量呈负相关<sup>[34]</sup>。

#### 3.3 林分中空气细菌含量动态变化差异性

4 种林分中空气细菌的季节变化规律大致相同, 表现为春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季, 这与郭二果等人的研究结果基本一致<sup>[34-35]</sup>。出现以上季节变化规律的主要原因是冬季气候寒冷, 较低的温度不利于细菌的生存; 夏季是植物生态功能最强的时期, 叶量最大, 在抑菌滞尘和营造空气负离子等方面具有显著作用<sup>[36]</sup>, 而植物抑菌一个有效方式就是通过消减细菌传播的载体空气颗粒物来实现, 且该地 58%降水主要集中在夏季, 长时间的雨水冲刷导致菌体掉落, 因此夏季的细菌含量也较低; 春秋两季气候温和, 日均气温  $14 \sim 22^\circ C$ , 温湿度水平较好, 光照强度、紫外线辐射不如夏季强烈, 林内温暖湿润的小环境为细菌生存提供了良好条件, 植物生理代谢也不在最旺盛的时候, 释放出的挥发性物质相对夏季较少<sup>[37]</sup>, 且春秋两季林内空气颗粒物较夏季多, 可以附着空气微生物, 为空气细菌生存提供了有利条件<sup>[16]</sup>, 因此春秋两季的空气细菌含量高于夏季。但也有研究和本研究结果不同, 已有学者对马赛及其附近地区的研究发现, 空气细菌含量随着季节有明显变化, 平均最高浓度出现在夏季, 其次是秋季, 冬季最低<sup>[25]</sup>, 可能是不同地区的温湿度、风

速、空气颗粒物含量等环境因子在不同季节的差异造成。

空气细菌在不同季节的日变化存在差异,除冬季早晚低中午高外,其余季节均早晚高中午低,这与韩丛聪的研究结果一致<sup>[38]</sup>。出现这种现象的原因是由于早晚间景区内人流、车流量相对较大,一系列的人为活动使得地上的尘土夹杂大量细菌,导致早晚细菌含量较高;同时细菌浓度受诸如林内温湿度、光照强度、植物自身的生理特性等的影响<sup>[5]</sup>,早上地表大气呈逆温状态不利于细菌的扩散,太阳辐射照度也较小,所以细菌含量形成高峰期;之后气温开始上升,紫外线增强,植物生理活动增强,释放出一些杀菌物质,同时植物的光合作用、蒸腾作用逐渐提升,不仅提高了林分空气负离子浓度,还可以吸附林分中的颗粒物达到降尘的效果,有效抑制了细菌的生长,所以 7:00—13:00 细菌含量逐渐减少;13:00 以后光照强度减弱,植物生理活动也变得缓慢,细菌浓度逐渐上升。这也基本符合植物杀菌素的形成与植物生长规律相关的假说<sup>[39]</sup>。冬季植物生理活性较低,午间温度相比较其他时间高,相对而言有利于细菌的生长,因此冬季中午细菌含量出现峰值。

不同的林分类型中细菌含量存在显著差异,这表明不同林分对细菌的抑制效果不同,从年均值来看 4 种林分类型中苦楝林的抑菌作用最好;空气细菌含量具有明显的动态变化规律,呈现出春季>秋季>夏季>冬季的季节变化规律,一天中的变化除冬季“早晚低,中午高”外,其余季节总体上来看均为“早晚高,中午低”;空气细菌含量与湿度和 PM<sub>2.5</sub> 呈极显著正相关关系,与空气负离子呈极显著的负相关关系,湿度、PM<sub>2.5</sub> 和空气负离子是影响空气细菌含量的主要因素。上述研究可从保健林营建的角度出发,选择出抑菌效果较好的树种,同时可进一步明确吕梁山景区环境效益,指导游人科学游憩,为荒山植被恢复、合理利用森林资源提供指导。

## 参考文献:

- [1] 王丹丹, 林青, 欧提库尔·玛合木提, 等. 塔克拉玛干沙尘暴源区空气细菌群落多样性[J]. 微生物学报, 2018, 58(8): 1420-1430.
- [2] AL-BADER D, ELIYAS M, RAYAN R, et al. Air-dust-borne associations of phototrophic and hydrocarbon-utilizing microorganisms: promising consortia in volatile hydrocarbon bioremediation[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2012, 19(9): 3997-4005.
- [3] GAÜZÈRE C, MOLETTA-DENAT M, BLANQUART H, et al. Stability of airborne microbes in the Louvre Museum over time[J]. Indoor Air, 2014, 24(1): 29-40.
- [4] SUN Y, XIE B Z, WANG M J, et al. Microbial community structure and succession of airborne microbes in closed artificial ecosystem[J]. Ecol Eng, 2016, 88: 165-176.
- [5] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 城市生态系统空气微生物群落研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 315-322.
- [6] LYMPEROPOULOU D S, ADAMS R I, LINDOW S E. Contribution of vegetation to the microbial composition of nearby outdoor air[J]. Appl Environ Microbiol, 2016, 82(13): 3822-3833.
- [7] 胡仁火, 任国祥, 徐辉, 等. 8 种植物挥发性物质的抑菌杀菌作用[J]. 咸宁学院学报, 2007, 27(3): 108-111.
- [8] 谢慧玲, 李树人, 袁秀云, 等. 植物挥发性分泌物对空气微生物杀灭作用的研究[J]. 河南农业大学学报, 1999, 33(2): 127-133.
- [9] 戚继忠, 由士江, 王洪俊, 等. 园林植物清除细菌能力的研究[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(4): 36-38.
- [10] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 室外空气细菌群落特征研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(1): 123-128.
- [11] 黄健屏, 吴楚才. 与城区比较的森林区微生物类群在空气中的分布状况[J]. 林业科学, 2002, 38(2): 173-176.
- [12] 孔德龙, 狄育慧, 陈希, 等. 西安市某高校春夏季空气颗粒物与微生物污染特性分析[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(2): 186-190.
- [13] 任启文. 北京市绿地空气微生物浓度的变化特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [14] 张琦, 张熙, 张旭辉, 等. 公共场所室内空气微生物粒径分布及其与环境因素相关性研究[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(4): 340-342.
- [15] 姚文冲. 基于高通量测序的南方典型旅游城市空气细菌群落特征研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- [16] 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 等. 西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4494-4500.
- [17] 董波, 万福绪, 严妍, 等. 徐州市石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 288-292.
- [18] 李萍萍, 戴锡联. 徐州石灰岩山地不同经营强度人工林群落的植物多样性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 81-86.
- [19] 董波. 徐州石灰岩山地不同植被恢复模式生态功能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [20] 曹冠婷. 石灰岩山地植被短期恢复后的美景度评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [21] 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.
- [22] 任启文, 王成, 郟光发, 等. 城市绿地空气颗粒物及其

- 与空气微生物的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(5): 22-25.
- [23] 赵怡宁, 史常青, 许荡飞, 等. 崇礼区典型林分空气负离子浓度及影响因素[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 127-135.
- [24] 蔡荟梅, 杨书运, 蔡敬民. 黄山森林景区空气微生物含量及变化规律[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(10): 877-880.
- [25] DI GIORGIO C, KREMPFF A, GUIRAUD H, et al. Atmospheric pollution by airborne microorganisms in the City of Marseilles[J]. Atmos Environ, 1996, 30(1): 155-160.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 吕爱华, 苏君, 杨永红, 等. 大气微生物与气象条件及大气污染物的灰色关联分析[J]. 干旱环境监测, 1995, 9(3): 143-146.
- [29] 孙晓丹, 李海梅, 周春玲, 等. 园林植物消减大气颗粒物研究进展[J]. 北方园艺, 2015(24): 184-188.
- [30] 闫俊文, 刘庭凤. 城市风景园林植物多样性及空气净化效应研究[J]. 北方园艺, 2018(17): 110-114.
- [31] KIRSTINE W V, GALBALLY I E. A simple model for estimating emissions of volatile organic compounds from grass and cut grass in urban airsheds and its application to two Australian cities[J]. J Air Waste Manag Assoc, 2004, 54(10): 1299-1311.
- [32] CAHILL T M, SEAMAN V Y, CHARLES M J, et al. Secondary organic aerosols formed from oxidation of biogenic volatile organic compounds in the Sierra Nevada Mountains of California[J]. J Geophys Res, 2006, 111(D16): D16312.
- [33] 廖建军, 齐增湘, 李涛, 等. 植物挥发性有机物研究进展[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(3): 119-123.
- [34] 郭二果. 北京西山典型游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [35] 周单红. 四种园林植物对空气微生物的影响[D]. 杭州: 浙江林学院, 2009.
- [36] 孙龙飞. 园林植物光合生理特征研究进展[J]. 南方农业, 2018, 12(23): 124-125.
- [37] 古琳. 无锡惠山三种游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [38] 韩丛聪. 山区村镇景观防护林抑菌效应的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [39] 郗光发, 王成, 彭镇华. 森林生物挥发性有机物释放速率研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1151-1155.