

### 3种常绿树挥发物成分对空气负离子及微生物的影响

赵亚红<sup>1</sup>, 徐翠霞<sup>2</sup>, 马 玲<sup>1</sup>, 王 彬<sup>1</sup>, 韦赛君<sup>1</sup>, 吕嘉欣<sup>1</sup>, 高 岩<sup>1</sup>, 张汝民<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江杭州 311300; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江杭州 310023)

**摘要:**【目的】研究3种常绿植物挥发性有机化合物(VOCs)抑制空气微生物和净化空气的作用。【方法】采用热脱附/气相色谱/质谱技术, 对杨梅 *Myrica rubra*、青梅 *Vatica mangachapoi*、茶 *Camellia sinensis* 单株以及空旷地 VOCs 组成和含量进行了分析, 采用自然沉降法研究了 VOCs 对空气微生物的影响, 同时测定了空气负离子数。【结果】杨梅 VOCs 主要成分有  $\alpha$ -草烯、香芹醇、罗勒烯、柠檬烯、壬醛等, 菲烯类化合物占总量的 78.5%; 青梅 VOCs 主要成分有乙酸叶醇酯、丁酸辛酯、顺式-3-己烯醇、松香芹酮、壬醛、癸醛、辛醛, 酯类化合物占总量的 54.1%; 茶 VOCs 主要成分有乙酸叶醇酯、丁酸辛酯、水杨酸甲酯、壬醛、癸醛、柠檬烯等, 酯类化合物占总量的 40.8%。空旷地主要成分为苯类物质, 占总量的 74.2%; 杨梅园内苯类占总量的 54.8%, 菲烯类占总量的 35.6%; 青梅园内苯类占总量的 35.4%, 菲烯类占总量的 52.2%; 茶园内苯类占总量的 50.1%, 菲烯类占总量的 36.5%。杨梅园、青梅园、茶园、空旷地空气负离子日平均数分别为 2 559.2、2 660.0、1 878.4、1 078.8 个·cm<sup>-3</sup>。杨梅园、青梅园和茶园细菌日平均抑制率分别为 45.5%、48.7% 和 39.3%; 真菌日平均抑制率分别为 39.0%、35.8% 和 34.6%; 放线菌日平均抑制率分别为 42.3%、42.2% 和 39.7%。【结论】植物 VOCs 对空气微生物的生长有抑制作用, 同时具有促进空气负离子形成和改善空气质量的作用。

图 5 表 2 参 38

关键词: 植物学; 杨梅; 青梅; 茶; 挥发性有机物; 空气负离子; 微生物

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)04-0654-10

### Effects of volatile components of three evergreen plants on air anion and microorganism

ZHAO Yahong<sup>1</sup>, XU Cuixia<sup>2</sup>, MA Ling<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WEI Saijun<sup>1</sup>, LÜ Jiaxin<sup>1</sup>, GAO Yan<sup>1</sup>, ZHANG Rumin<sup>1</sup>

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:**【Objective】The objective is to study the effects of volatile organic compounds (VOCs) from three evergreen plants on air microorganism inhibition and air purification.【Method】The composition and content of VOCs in *Myrica rubra*, *Vatica mangachapoi*, *Camellia sinensis* in single tree and open field were analyzed using thermal desorption system/gas chromatography/mass spectrometry (TDS-GC-MS) technique. The effect of VOCs on airborne microorganism was investigated by natural sedimentation method, and the number of air anion was measured.【Result】The main VOCs of *M. rubra* were  $\alpha$ -oxalene, parsley alcohol, rolene, limonene and nonaldehyde, in which terpenes accounted for 78.5% of the total. The main VOCs of *V. mangachapoi* were acetyl acetate, octyl butyrate, cis-3-hexenol, pinocarvone, nonanal, decanal, and octanal, in which ester compounds accounted for 54.1% of the total. Acetyl acetate, octyl butyrate, methyl salicylate, nonanal, decanal, limonene were the main VOCs of *C. sinensis*, and ester compounds accounted for 40.8% of the total. The VOCs

收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2020-01-14

基金项目: 浙江省省院合作资助项目(2018SY07); 国家自然科学基金资助项目(31470704)

作者简介: 赵亚红, 从事植物生理生态研究。E-mail: 764660184@qq.com。通信作者: 王彬, 高级实验师, 从事植物生理生态研究。E-mail: wangbin@zafu.edu.cn

in open space were benzene, accounting for 74.2% of the total. The VOCs in *M. rubra* garden were benzene and terpene, accounting for 54.8% and 35.6%, respectively. The VOCs in *V. mangachapoi* garden were benzene and terpene, accounting for 35.4% and 52.2%, respectively. The VOCs in *C. sinensis* garden were benzene and terpene, accounting for 50.1% and 36.5%, respectively. The daily average number of air anion in *M. rubra* garden, *V. mangachapoi* garden, *C. sinensis* garden, and the open space was 2 559.2, 2 660.0, 1 878.4, 1 078.8 per cubic centimeter, respectively. In *M. rubra* garden, *V. mangachapoi* garden, and *C. sinensis* garden, daily average bacterial inhibition rate was 45.5%, 48.7% and 39.3%, respectively, daily average inhibition rate of fungi was 39.0%, 35.8% and 34.6%, respectively, and that of actinomycetes was 42.3%, 42.2% and 39.7%, respectively. [Conclusion] Plant VOCs can inhibit the growth of airborne microorganism, promote the formation air anion and improve the air quality. [Ch, 5 fig. 2 tab. 38 ref.]

**Key words:** botany; *Myrica rubra*; *Vatica mangachapoi*; *Camellia sinensis*; volatile organic compounds(VOCs); air anion; microorganism

植物挥发性有机化合物(VOCs)是植物体通过次生代谢途径合成的低沸点、小分子一类化合物<sup>[1]</sup>, 在植物与环境因子、微生物和动物互作中起着重要作用<sup>[2]</sup>, 特别对改善空气质量提高人类身体健康有积极意义<sup>[3]</sup>。植物在生长过程中, 会产生大量的空气负离子。植物进行光合作用利用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)产生氧气(O<sub>2</sub>)过程中会形成空气负离子<sup>[4]</sup>; 树叶和树木尖端放电也能产生空气负离子, 针叶树比阔叶树更容易产生负离子<sup>[5]</sup>。空气负离子既能降低PM<sub>2.5</sub>浓度, 也能有效抑制细菌和真菌的生长<sup>[6]</sup>; 同时也是治疗多种慢性疾病的良药<sup>[7]</sup>, 不仅可以缓解人体心血管的舒张压和提高内分泌的稳定性, 还能有效降低情绪和血清素含量<sup>[8]</sup>。FATEMI等<sup>[9]</sup>在研究植物VOCs对猕猴桃 *Actinidia chinensis*防腐作用时发现: 黑香芹 *Petroselinum crispum* 和茴香 *Foeniculum vulgare* 精油能够完全抑制猕猴桃果实灰霉病 *Botrytis cinerea* 的生长; ZHENG等<sup>[10]</sup>研究发现: 反式肉桂醛对水稻 *Oryza sativa* 稻曲病病菌 *Ustilaginoidea virens* 感染具有较强的抑制作用。受害植物经(E)-2-己烯醛和(Z)-3-乙酸己酯处理后能释放更多的萜烯类化合物<sup>[11]</sup>; 萜烯类物质不仅具有增强植物的抗病能力<sup>[12]</sup>, 还能够抑制真菌生长<sup>[13]</sup>。同时萜烯类化合物具有重要的药用价值, 如紫杉醇具有抗肿瘤效果, 青蒿素具有抗疟疾特效<sup>[14]</sup>。植物释放的挥发物不仅是天然的“防腐剂”“保健品”, 也是天然的空气“清洁剂”。林富平等<sup>[15]</sup>研究金桂 *Osmanthus fragrans* ‘Thunbergii’ 挥发物对空气微生物的作用时发现: 金桂对空气中细菌、真菌和放线菌具有较强的抑制作用; 谢慧玲等<sup>[16]</sup>研究发现: 皂荚 *Gleditsia sinensis* 和五角枫 *Acer truncatum* 等8种植物挥发物单体对细菌和放线菌有明显的抑制效果。目前, 已有研究者在植物VOCs的抑菌活性<sup>[17]</sup>和林分空气负离子<sup>[18]</sup>的研究等方面取得了较大进展。但关于杨梅 *Myrica rubra*、青梅 *Vatica mangachapoi*、茶 *Camellia sinensis* 植物VOCs对环境的研究尚未见报道。本研究以杨梅、青梅和茶为对象, 测定了3种植物VOCs组分和含量、园内空气负离子和微生物含量, 探讨植物VOCs的抑菌和净化空气作用, 为选择良好的经济林环境提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地和供试树种

样地设在杭州市临安区浙江农林大学东湖校区杨梅园、青梅园和茶园(纯园无其他树种)教学实习基地(30°15'25"N, 119°43'39"E), 该研究区属中亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 雨热同期, 有梅雨季节, 空气湿润, 年日照时数为1 939.0 h。年均气温为16.4 °C, 1月最低, 平均为-0.4~5.5 °C, 极端最低为-13.1 °C; 7月最高, 平均为24.4~30.8 °C, 极端最高为41.2 °C。全年降水量为1 628.6 mm, 年平均相对湿度在70%以上。空旷地为园外环境(无树木的影响); 杨梅树高约6.0 m, 胸径15.0 cm; 青梅树高约5.0 m, 胸径10.0 cm; 茶树长势均匀, 高约0.5 m。无病虫害, 树木生长健康。2018年5月选择晴朗无风的天气, 气温约30 °C的条件下开展实验。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 VOCs的采集分析 采用QC-2型大气采样仪(北京市劳动保护科学研究所), 在距地面1.5 m(人正

常呼吸的平均身高)处,对空旷地(对照)、杨梅、青梅、茶的树木 VOCs 以及园内空气 VOCs 进行采集,采集时间为 9:00~11:00。气体循环流量为  $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,采气时间为 1 h,采样重复 5 次,采集后采摘 3 种树木叶片称量。3 种树木及空气 VOCs 分析参照 GAO 等<sup>[19]</sup>的方法,采用动态顶空气体循环热脱附/气相色谱/质谱联用分析技术(TDS-GC-MS)。通过 TDS-GC-MS 技术分析,获得 VOCs 的总离子流量色谱图,利用 NIST2008 谱库查询,色谱峰面积进行定量分析,并计算相对含量。

**1.2.2 空气负离子测定** 采用 ITC-201A 型(Andes 公司生产,日本)空气负离子测定仪,在高度为 1.5 m 处测定空旷地(对照)、杨梅、青梅和茶园内的空气负离子数。选择 5 个采样点,采样点的距离为 2 棵树之间距离取平均值,采样时间为 7:00、10:00、13:00、16:00 和 19:00。

**1.2.3 培养基的制备** 按照周德庆<sup>[20]</sup>的方法配制细菌培养基(牛肉膏蛋白胨培养基)、真菌培养基(马丁式培养基)和放线菌培养基(高式 1 号培养基)。按照 GAO 等<sup>[19]</sup>方法分别配制了体积分数为 0.1%、0.5%、1.0% 的罗勒烯、柠檬烯、壬醛和癸醛 4 种单体的培养基。

**1.2.4 微生物采集** 采用自然沉降法<sup>[16]</sup>,在空旷地(对照)、杨梅、青梅和茶园内均设 5 个采样点,采集微生物。将 3 种不同培养基的培养皿分别置于离地面 1.5 m 高的平板支架上,距树干水平距离 1.0 m,采集空气中自然漂浮的微生物(细菌、真菌和放线菌)。采样时间为 7:00、10:00、13:00、16:00 和 19:00,培养基在空气中暴露 10 min 后,用保鲜膜包好后带回实验室置于 25 ℃ 恒温培养箱中培养。接菌的培养皿在 25 ℃ 培养箱培养 24 h 后进行细菌菌落统计,培养 72 h 后进行真菌菌落统计,培养 96 h 后进行放线菌菌落统计。根据微生物计算公式处理微生物数<sup>[15]</sup>,计算公式为: 菌数(个· $\text{m}^{-3}$ )= $50\ 000N/(AT)$ 。其中:N 为培养皿中菌落平均数(个);A 为培养皿的面积( $\text{cm}^2$ );T 为打开培养皿皿盖的时间(min)。抑菌率=(对照菌数-处理菌数)/对照菌数×100%。

### 1.3 数据处理

所有数据均为 5 次重复的平均值±标准差,利用 Origin 9.0 进行统计分析和作图。统计方法采用 One-Way ANOVA,进行 Tukey 多重比较( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种常绿树 VOCs 成分分析

3 种常绿树 VOCs 总离子流图共有 41 种化合物(图 1 和表 1),主要有萜烯类、酯类、醛类、醇类、酮类和苯类。杨梅检测到 22 种化合物,其中:萜类有 15 种,占总量的 78.5%,主要有  $\alpha$ -草烯、香芹醇、罗勒烯、柠檬烯、石竹烯;4 种醇类占总量的 19.7%;1 种醛类占总量的 1.2%。青梅共检测到 17 种化合物,其中:3 种酯类占总量的 54.1%,主要有乙酸叶醇酯、丁酸辛酯;萜烯类有 5 种,占总量的 11.1%;4 种醛类占总量的 12.9%;2 种醇类占总量的 8.6%。茶检测到 26 种化合物,其中:5 种酯类占总量的 40.8%,主要有乙酸叶醇酯、丁酸辛酯、丁酸庚酯;萜类有 8 种,占总量的 17.9%;4 种醛类占总量的 13.0%;3 种醇类占总量的 5.2%;2 种酮类占总量的 5.1%。

比较 3 种常绿树释放的 VOCs 成分,杨梅释放 VOCs 总量最大,其次为茶、青梅。杨梅释放的 VOCs 主要是  $\alpha$ -草烯;青梅和茶释放 VOCs 均以乙酸叶醇酯为主,但是茶特有的醛类 VOCs 是庚醛,而

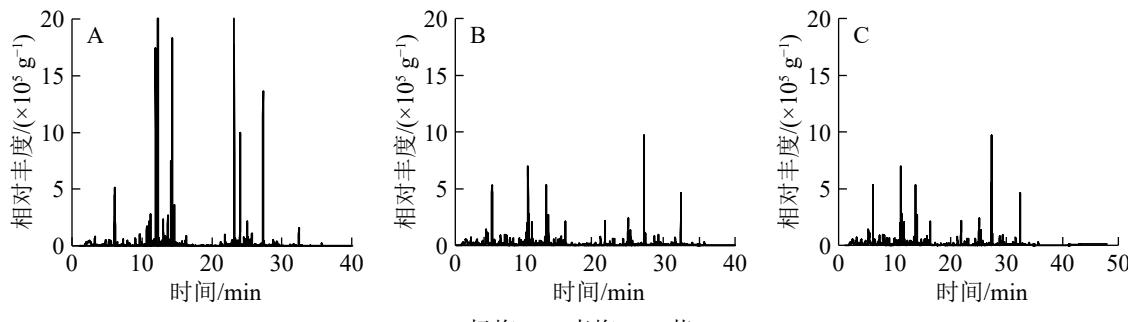


图 1 3 种常绿树单株 VOCs 总离子流图

Figure 1 Total ion flow diagrams of three evergreen single plant VOCs

表1 3种常绿树 VOCs 成分分析

Table 1 VOCs components of 3 evergreen plants

序号	保留时间/min	挥发性有机物	化学式	峰面积/( $\times 10^5 \text{ g}^{-1}$ )		
				杨梅	青梅	茶
1	6.941	己烯醛2-hexenal	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	—	2.24±0.52	—
2	7.113	顺式-3-己烯醇cis-hex-3-en-1-ol	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	—	14.03±3.02	—
3	7.913	壬烯nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	—	—	5.57±0.76
4	8.232	庚醛heptanal	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	—	—	2.68±0.45
5	8.652	苯甲醚anisole	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	—	—	21.64±3.38
6	8.655	茴香醚anisole	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	—	1.66±0.34	—
7	9.070	α-蒎烯α-pinene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	4.57±1.56	4.32±0.26	2.10±0.73
8	9.711	1,4-环己二烯1,4-cyclohexadiene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	0.47±0.07	—	5.96±0.66
9	10.708	月桂烯myrcene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	5.99±3.59	3.34±0.31	—
10	11.023	辛醛octyl aldehyde	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	—	3.39±0.88	5.76±0.37
11	11.150	乙酸叶醇酯cis-3-hexenyl acetate	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	—	90.40±8.80	59.16±4.67
12	11.230	对二氯苯para-dichlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> C <sub>12</sub>	0.49±0.01	13.98±1.44	9.94±0.55
13	11.586	邻伞花烃0-cymene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	—	—	2.15±0.76
14	11.693	柠檬烯limonene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	38.07±2.00	3.34±0.97	5.64±0.26
15	12.228	罗勒烯ocimene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	43.46±1.54	4.65±3.77	6.70±0.22
16	13.478	紫苏烯perillene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	2.86±0.86	—	2.07±0.24
17	13.596	里哪醇linalool	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	7.07±2.04	—	2.69±4.00
18	13.695	壬醛nonanal	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	4.02±0.89	12.90±4.36	11.34±0.18
19	13.999	松香芹酮pinocarvone	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	1.64±0.36	8.97±2.46	8.70±1.19
20	14.144	杜烯durene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	7.90±0.90	—	—
21	14.357	香芹醇(-)-carveol	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	55.35±4.55	1.70±0.37	—
22	14.652	别罗勒烯allo-ocimene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	4.01±1.49	—	—
23	14.754	莰酮cmaphenone	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	—	—	1.50±0.39
24	15.467	薄荷醇menthol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	—	—	2.17±0.57
25	15.744	甘氨酸肌氨酸glycinosinine	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	4.39±0.80
26	16.083	水杨酸甲酯methyl salicylate	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	—	2.82±0.28	6.17±1.02
27	16.353	癸醛decanal	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	—	5.09±1.58	6.18±1.03
28	21.249	丁酸庚酯heptyl butyrate	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	—	—	4.36±0.40
29	21.878	丁酸辛酯octyl butyrate	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	—	5.73±0.68	8.56±1.47
30	22.983	α-柏木烯α-cedrene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	4.64±0.34	2.35±1.35
31	23.183	石竹烯caryophyllene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	17.83±2.17	—	3.35±0.65
32	23.458	别香橙烯allo-aromadendrene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	5.73±0.23	—	—
33	24.085	α-草烯α-humulene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	98.08±1.92	—	—
34	25.074	花柏烯chamigrene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	13.86±1.14	—	—
35	25.093	β-瑟林烯β-selinene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	6.63±1.13	—	—
36	25.265	蛇床烯selinene	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	11.57±1.64	—	—
37	26.515	桉叶醇eudesmol	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	1.22±0.11	—	—
38	27.497	雪松醇cedar camphor	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	—	—	5.48±1.11
39	28.263	斯巴醇spathulenol	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O	4.35±0.72	—	—
40	28.675	石竹烯氧化物caryophyllene oxide	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O	9.72±0.33	—	—
41	31.655	肉豆蔻酸异丙酯isopropyl myristate	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	—	—	3.28±1.79

说明: “—”表示未测到化合物

青梅特有的醛类是己烯醛。

## 2.2 3种常绿树园空气 VOCs 分析

从图2和表2可以看出: 空气中的 VOCs 总量从高到低分别为青梅园、茶园、杨梅园、空旷地。空气中主要是以苯类为主, 也有少量的萜烯类, 这些萜烯类化合物在植物中也存在。空旷地检测出 12 种

物质，其中：5种苯类占总量的74.2%，2种萜烯类占总量的10.3%，3种烷烃类占总量的11.9%，2种醛类占总量的3.6%。杨梅园空气中 VOCs 共检测出10种物质，4种苯类占总量的54.8%，3种萜烯类占总量的35.6%。青梅园空气中 VOCs 共检测出9种物质，3种苯类占总量的35.4%，4种萜烯类占总量的52.2%，1种醛类占总量的3.1%。茶园空气中检测出13种化合物，包括4种苯类占总量的50.1%，5种萜烯类占总量的36.5%。

比较3种常绿树园和空旷地空气的 VOCs 发现：青梅园 VOCs 总量最高，其次为茶园、杨梅园。杨梅园、青梅园和茶园萜烯类化合物均高于35%。从萜烯类化合物总量从高到低依次为青梅园、茶园、杨梅园，苯类化合物总量从高到低依次为空旷地、杨梅园、茶园、青梅园。

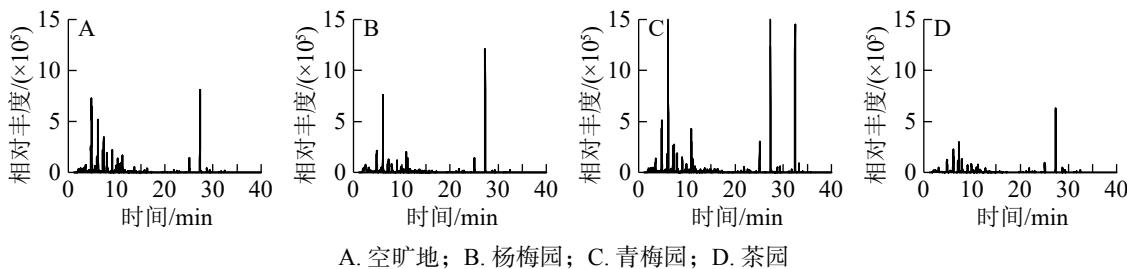


图 2 3 种常绿树园空气 VOCs 总离子流图

Figure 2 Total ion flow charts of air VOCs in 3 evergreen plants gardens

表 2 3 种常绿树园空气 VOCs 成分分析

Table 2 Air VOCs composition in three evergreen plants gardens

序号	保留时间/min	有机挥发物	化学式	峰面积/( $\times 10^5 \text{ g}^{-1}$ )			
				空旷地	杨梅园	青梅园	茶园
1	7.116	乙苯ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	13.98±5.26	59.43±7.27	—	57.85±1.59
2	7.326	对二甲苯p-xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	21.01±7.82	107.81±8.90	131.51±6.62	98.27±2.25
3	7.914	苯乙烯styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	11.32±6.19	125.71±4.70	58.61±2.11	128.58±2.48
4	8.125	壬烷nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	1.83±0.77	—	—	—
5	9.080	α-蒎烯pinene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	4.64±1.36	190.60±4.80	245.10±12.45	143.96±5.53
6	9.484	莰烯camphepane	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	19.33±6.35	25.54±8.06	18.48±2.82
7	9.875	3-乙基甲苯3-ethyltoluene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	4.68±1.32	—	—	—
8	9.916	枯烯cumene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	—	—	—	34.70±4.54
9	10.254	蒈烯3-carene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	—	48.49±4.29	—
10	10.265	桧烯sabinene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	3.11±2.20	—	—	17.35±3.25
11	10.625	2,6-二甲基辛烷dimethyloctane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	2.64±0.57	19.15±1.80	—	21.86±4.05
12	11.246	对二氯苯para-dichlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	4.90±1.08	47.35±1.06	40.95±5.09	30.52±0.93
13	11.580	间伞花烃m-cymene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	—	22.59±2.85	—	25.55±3.43
14	11.703	柠檬烯limonene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	11.00±7.78	21.68±1.07	15.11±2.16
15	13.695	壬醛nonanal	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	1.58±0.37	—	19.98±4.13	—
16	16.339	癸醛decanal	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	1.17±0.83	—	—	—
17	21.886	丁酸辛酯butyric acid, octyl ester	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	—	—	—	22.61±1.12
18	25.089	十五烷pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	4.49±2.62	17.66±3.33	61.14±3.69	14.03±9.92

说明：“—”表示未测到化合物

### 2.3 3 种常绿树园空气负离子的比较

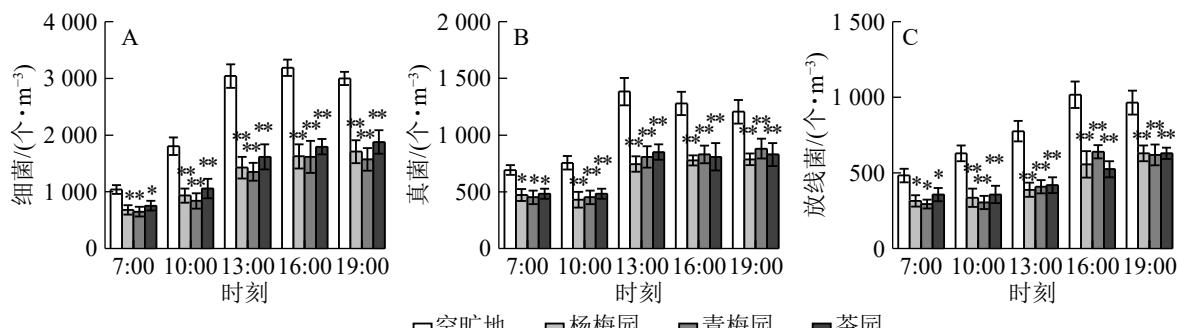
由图3可知：空气负离子数在13:00最低，在7:00和19:00最高。杨梅、青梅、茶园内、空旷地日平均值分别为2 559.2、2 660.0、1 878.4、1 078.8个·cm<sup>-3</sup>。杨梅园中在7:00空气负离子数最高，13:00比7:00减少了63.9%，19:00比13:00增加了44.0%；青梅园中的负离子数，13:00比7:00减少了47.8%，19:00比7:00减少了21.4%；茶园中的负离子数7:00比13:00多51.6%，比19:00多19.9%。

## 2.4 空气微生物分析

从图4A可以看出: 空旷地细菌数量明显高于杨梅园、青梅园和茶园。杨梅园、青梅园和茶园均在13:00降幅最大, 分别比空旷地降低了53.1%、55.5%和46.9%。茶园细菌数量高于杨梅园和青梅园。在7:00、10:00、13:00、16:00、19:00, 茶园细菌数量比空旷地明显下降, 分别下降了27.3%、41.3%、46.9%、43.8%和37.4%( $P<0.01$ ), 表明不同园子内随着时间的变化, 细菌数量明显不同。从图4B可以看出: 杨梅园、青梅园和茶园真菌的数量低于空旷地。各园真菌数量在13:00降幅最大, 杨梅园、青梅园和茶园比空旷地分别降低了46.2%、41.7%、38.6%。13:00~19:00空气中的微生物数量明显高于7:00~13:00。从图4C可以看出: 空旷地放线菌数量高于杨梅园、青梅园和茶园。杨梅园在13:00抑制率最大, 青梅园在10:00降幅最大, 茶园在16:00降幅最大, 分别降低了50.0%、51.7%、48.5%。各园放线菌降幅程度在16:00~19:00明显高于7:00~13:00。

## 2.5 单体对空气微生物的影响

在单体体积分数为0.1%~0.5%的水平下, 罗勒烯抑制细菌的生长效果比柠檬烯明显, 在体积百分比为1.0%的水平下, 罗勒烯抑制真菌生长的效果比柠檬烯更有效, 而柠檬烯抑制放线菌的作用比罗勒烯更强(图5)。2种单体醛对空气微生物具有明显的抑制作用, 体积分数为1.0%的壬醛对细菌、真菌和放线菌的抑制率分别为33.1%、43.4%和54.5%; 体积分数为1.0%的癸醛对细菌、真菌和放线菌的抑制率分别为48.6%、37.4%和56.1%。在4种单体中, 醛类比萜烯类抑制速率更大, 醛对细菌、真菌和放线菌生长有明显的抑制作用。



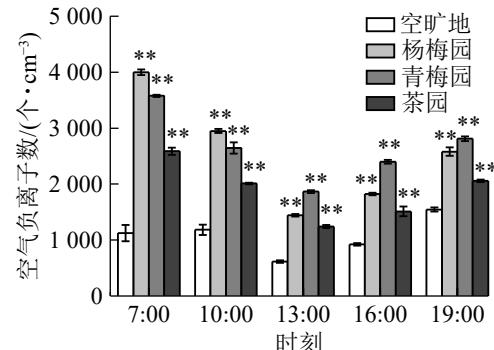
\*表示同一时间内空旷地与其他树园之间差异显著( $P<0.05$ ); \*\*表示同一时间内空旷地与其他树园之间差异极显著( $P<0.01$ )

图4 3种常绿树园微生物变化

Figure 4 Variation of microbial content in three evergreen plants gardens

## 3 讨论

植物基因型是决定VOCs种类和含量的重要因素, 植物种属间的差异导致释放出的VOCs物质种类与比例具有明显的差异<sup>[21]</sup>。吴章文等<sup>[22]</sup>研究发现: 8种柏科Cupressaceae(崖柏 *Thuja sutchuenensis*、日本扁柏 *Chamaecyparis obtusa*、干香柏 *Cupressus duclouxiana*、柏木 *Cupressus funebris*、西藏柏木 *Cupressus torulosa*、侧柏 *Platycladus orientalis*、圆柏 *Sabina chinensis*、叉子圆柏 *Sabina vulgaris*)植物释放的VOCs以萜烯类物质为主; 迷迭香 *Rosmarinus officinalis*<sup>[23]</sup>和雪松 *Cedrus deodara*<sup>[24]</sup>释放的VOCs虽然都是萜烯类物质, 但是种类和含量各不相同。本研究显示: 茶叶片VOCs是以乙酸叶醇酯为主, 与乔如颖等<sup>[25]</sup>的研究一致, 因为白茶叶片富有茸毛, 而茸毛是储存、合成VOCs的场所, 叶表面附着大量的己烯醛和己烯醇, 它们都是合成乙酸叶醇酯的前体, 所以乙酸叶醇酯最高。MIYAZAWA等<sup>[26]</sup>研究发现: 青



\*\*表示同一时间内空旷地与其他树园之间差异极显著( $P<0.01$ )

图3 3种常绿树园空气负离子日变化

Figure 3 Diurnal variations of negative air ions in 3 evergreen plants

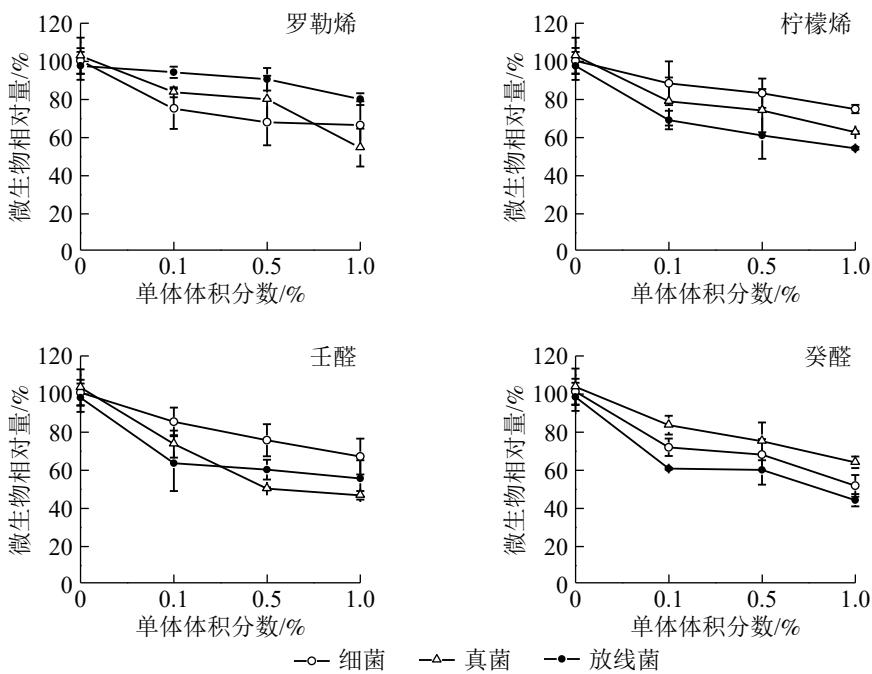


图 5 4 种单体对空气微生物的影响

Figure 5 Effect of 4 monomer concentrations on the micro-organisms

梅果实在未成熟时以醛类物质为主，而成熟期时以酯类物质为主，这与本研究结果相同。杨梅叶片 VOCs 以萜烯类物质为主，主要是  $\alpha$ -草烯，与尹洁等<sup>[27]</sup>发现杨梅叶中的 VOCs 主要是  $\alpha$ -葎草烯的研究结果一致。

植物能够产生大量的空气负离子是由于存在植物叶片“尖端放电”<sup>[28]</sup>和“光电效应”<sup>[9]</sup>的现象。白保勋等<sup>[29]</sup>研究发现：年均空气负离子数量从高到低依次为森林、果园、农田、绿地；王洪俊<sup>[30]</sup>发现：乔灌草复层结构、灌草结构、草坪空气负离子数量依次递减。本研究表明：杨梅园、茶园和青梅园的空气负离子日平均数量明显高于空旷地。植物 VOCs 能够促进空气电离，有助于形成空气负离子，从而增加空气负离子的数量，萜烯类化合物有重要促进作用。3 种树园中的空气负离子数量日变化呈早晚较高，中午低的趋势，可能原因是早晚湿度大、温度低影响了空气负离子数量，中午温度和光照强度逐渐增高，植物为了减少蒸腾作用，关闭气孔，植物 VOCs 释放的速率下降，从而空气负离子数量减少。

植物释放的 VOCs 具有重要的生态学功能，参与植物直接与间接防御反应，同时防止病菌及微生物的感染。SALEM 等<sup>[31]</sup>和 BEHBAHANI 等<sup>[32]</sup>分别研究发现：桉树 *Eucalyptus robusta* 油和橄榄 *Canarium album* 精油对细菌具有较强的抑菌作用。GAO 等<sup>[19]</sup>研究发现：醛类物质也具有抑菌作用。本研究显示：杨梅园、青梅园和茶园中都有  $\alpha$ -蒎烯、莰烯、柠檬烯和壬醛，且细菌、真菌和放线菌的相对含量明显低于空旷地，说明植物 VOCs 对微生物的生长有抑制作用。同时采用植物 VOCs 较高的罗勒烯、柠檬烯、壬醛和癸醛对空气微生物的抑制作用发现：随着单体体积分数的增加，抑制效果也逐渐增强，在高体积分数时抑菌效果最明显；醛类物质抑制细菌、真菌和放线菌的效果比萜烯类更明显。杨梅园、青梅园、茶园的空气微生物相对含量低于空旷地，说明罗勒烯、柠檬烯、壬醛和癸醛在植物中可能是抑菌的主要物质<sup>[19, 33]</sup>。

植物 VOCs 和空气负离子是森林康养的重要组成部分，森林康养是依托植物释放对人有益的 VOCs 和杀菌素，能够增加空气负离子<sup>[34]</sup>和提高人的免疫力<sup>[35]</sup>，是改善人类身心健康的一种疗养方式<sup>[36]</sup>。同时能够降低促炎细胞因子和应激激素的水平<sup>[36]</sup>，无论是生理上还是心理上都能得到放松<sup>[37]</sup>。空气负离子能够调节人的内循环系统，对气管炎、冠心病、脑血管等疾病具有一定的疗效<sup>[38]</sup>。杨梅园中存在对人有益的 VOCs，如  $\alpha$ -草烯、罗勒烯、柠檬烯、花柏烯和石竹烯；茶园存在对人有益的 VOCs 有  $\alpha$ -蒎烯、罗勒烯、柠檬烯，还有抑制微生物生长的庚醛、苯甲醛、辛醛、壬醛；青梅园中有对人有益的 VOCs 有  $\alpha$ -柏木烯、罗勒烯、柠檬烯，也存在壬醛、癸醛和辛醛。总的来说，3 种常绿树园在早晚时空气负离子达到最高状态，微生物的抑制效果亦是最强的。

综上所述, 杨梅释放的 VOCs 主要以萜烯类为主, 青梅和茶均以酯类为主; 3 种常绿树园都能释放出对人体有益的 VOCs 组分, 它能够抑制空气微生物的生长, 同时具有促进空气负离子形成和改善空气质量的作用。青梅园内的空气负离子比其他园林高, 3 种常绿树园内的空气质量在 7:00 和 19:00 较好, 中午最差; 园内微生物中细菌相对含量最高, 真菌次之, 放线菌最少。茶园的微生物(细菌、真菌、放线菌) 相对含量居首位, 从 7:00—19:00 呈逐渐增加的趋势。细菌抑制率最高的是青梅园, 真菌和放线菌抑制率最高的是杨梅园。

## 4 参考文献

- [1] 陈晓亚, 王凌健, 毛颖波, 等. 植物萜类生物合成与抗虫反应 [J]. 生命科学, 2015, 27(7): 813–818.  
CHEN Xiaoya, WANG Lingjian, MAO Yingbo, et al. Biosynthesis and insect resistance of plant mites [J]. *Life Sci*, 2015, 27(7): 813–818.
- [2] TURLINGS T C J, ERB M. Tri-trophic interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: mechanisms, ecological relevance, and application potential [J]. *Annu Rev Entomol*, 2018, 63(1): 433–452.
- [3] ILMBERGER J, HEUBERGER E, MAHRHOFER C, et al. The influence of essential oils on human attention. I: alertness [J]. *Chem Senses*, 2001, 26(3): 239–245.
- [4] 郭二果, 王成, 郡光发, 等. 城市森林生态保健功能表征因子之间的关系 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2893–2903.  
GUO Erguo, WANG Cheng, SHU Guangfa, et al. Relationship between urban forest ecological health function characterization factors [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32(11): 2893–2903.
- [5] WANG Jun, LI Shuhua. Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change [J]. *J Environ Manage*, 2009, 90(8): 2746–2754.
- [6] ZHAO Xinglei, LI Yuyao, HUA Ting, et al. Low-resistance dual-purpose air filter releasing negative ions and effectively capturing PM<sub>2.5</sub> [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(13): 12054–12063.
- [7] FLORY R, AMETEPE J, BOWERS B. A randomized, placebo-controlled trial of bright light and high-density negative air ions for treatment of Seasonal Affective Disorder [J]. *Psychiatry Res*, 2010, 177(1/2): 101–108.
- [8] JIANG Shuye, ALI M A, RAMACHANDRAN S. Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(10): 2966–2985.
- [9] FATEMI H, AMINIFARD M H, MOHAMMADI S. Efficacy of plant essential oils on post-harvest control of rot caused by *Botrytis cinerea* on kiwi fruits [J]. *Arch Phytopathol Plant Prot*, 2013, 46(5): 536–547.
- [10] ZHENG Jingge, LIU Tingting, GUO Zhixin, et al. Fumigation and contact activities of 18 plant essential oils on *Villosiclava virens*, the pathogenic fungus of rice false smut [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 2045–2322.
- [11] FROST C J, MESCHER M C, DERVINIS C, et al. Priming defense genes and metabolites in hybrid poplar by the green leaf volatile cis-3-hexenyl acetate [J]. *New Phytol*, 2008, 180(3): 722–734.
- [12] 付佳, 王洋, 阎秀峰. 萜类化合物的生理生态功能及经济价值 [J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(6): 59–61.  
FU Jia, WANG Yang, YAN Xiufeng. Physiological and ecological functions and economic value of terpenoids [J]. *J Northeast For Univ*, 2003, 31(6): 59–61.
- [13] BENNETT R N, WALLSGROVE R M. Secondary metabolites in plant defence mechanisms [J]. *New Phytol*, 2010, 127(4): 617–633.
- [14] 王凌健, 方欣, 杨长青, 等. 植物萜类次生代谢及其调控 [J]. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(12): 1030–1046.  
WANG Lingjian, FANG Xin, YANG Changqing, et al. Secondary metabolism and regulation of plant mites [J]. *Chin Sci Life Sci*, 2013, 43(12): 1030–1046.
- [15] 林富平, 周帅, 马楠, 等. 4个桂花品种叶片挥发物成分及其对空气微生物的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(1): 15–21.  
LI Fuping, ZHOU Shuai, MA Nan, et al. Volatile components in leaves of four *Osmanthus osmanthus* varieties and their effects on air microorganisms [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, 30(1): 15–21.
- [16] 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.  
XIE Huiling, LI Shuren, YUAN Xiuyun, et al. Study on the killing effect of plant volatile secretions on air microbes [J]. *J Henan Agric Univ*, 1999, 33(2): 127–133.

- Henan Agric Univ*, 1999, **33**(2): 127 – 133.
- [17] 杨敏, 梅馨月, 廖静静, 等. 3种葱属作物挥发物和提取液对植物病原真菌和卵菌的抑菌活性 [J]. 植物保护, 2013, **39**(3): 36 – 44.  
YANG Min, MEI Xinyue, LIAO Jingjing, et al. Antibacterial activity of volatiles and extracts from three *Allium* crops against phytopathogenic fungi and oomycetes [J]. *Plant Prot*, 2013, **39**(3): 36 – 44.
- [18] 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.  
ZHAO Yining, SHI Changqing, XU Dangfei, et al. Air anion concentration and influencing factors of typical stands in Chongli District [J]. *For Sci Res*, 2018, **31**(3): 127 – 135.
- [19] GAO Yan, JIN Youju, LI Haidong, et al. Volatile organic compounds and their roles in bacteriostasis in five conifer species [J]. *J Integrative Plant Biol*, 2005, **47**(4): 499 – 507.
- [20] 周德庆. 微生物学实验教程 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 372 – 374.
- [21] 郭阿君, 王志英, 邹丽. 檫子松挥发性有机物释放动态及其抑菌作用 [J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(4): 115 – 118.  
GUO Ajun, WANG Zhiying, ZOU Li. Volatile organic matter release dynamics and its antibacterial activity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(4): 115 – 118.
- [22] 吴章文, 吴楚材, 陈奕洪, 等. 8种柏科植物的精气成分及其生理功效分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, **30**(10): 1 – 9.  
WU Zhangwen, WU Chucai, CHEN Yihong, et al. Analysis of the essential components and physiological effects of eight species of Cypress plants [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2010, **30**(10): 1 – 9.
- [23] 刘芳, 左照江, 许改平, 等. 迷迭香对干旱胁迫的生理响应及其诱导挥发性有机化合物的释放 [J]. 植物生态学报, 2013, **37**(5): 454 – 463.  
LIU Fang, ZUO Zhaojiang, XU Gaiping, et al. Physiological response of rosemary to drought stress and its induction of release of volatile organic compounds [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37**(5): 454 – 463.
- [24] 宋秀华, 李传荣, 许景伟, 等. 元宝枫、雪松挥发物释放的昼夜节律 [J]. 林业科学, 2015, **51**(4): 141 – 147.  
SONG Xiuhua, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al. Circadian rhythm of the release of volatiles from *Acer truncatum* and *Cedrus deodara* [J]. *For Sci*, 2015, **51**(4): 141 – 147.
- [25] 乔如颖, 郑新强, 李清声, 等. 茶叶挥发性香气化合物研究进展 [J]. 茶叶, 2016, **42**(3): 135 – 142.  
QIAO Ruying, ZHENG Xinqiang, LI Qingsheng, et al. Research progress on volatile aroma compounds in tea [J]. *Tea*, 2016, **42**(3): 135 – 142.
- [26] MIYAZAWA M, SHIRAKAWA N, UTSUNOMIYA H, et al. Comparision of the volatile components of unripe and ripe Japanese apricot (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.) [J]. *Nat Prod Res*, 2009, **23**(17): 1567 – 1571.
- [27] 尹洁, 蒋健, 刘文静, 等. GC-O 和 GC-MS 结合鉴定杨梅叶精油中的关键香气成分 [J]. 中国南方果树, 2017, **46**(3): 64 – 71.  
YIN Jie, JIANG Jian, LIU Wenjing, et al. GC-O and GC-MS combined to identify the key aroma components in the essential oil of bayberry leaves [J]. *South China Fruit Tree*, 2017, **46**(3): 64 – 71.
- [28] TIKHONOV V P, TSVETKOV V D, LITVINOVA E G, et al. Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil [J]. *Russ J Plant Physiol*, 2004, **51**(3): 414 – 419.
- [29] 白保勋, 陈东海, 徐婷婷, 等. 河南中北部不同植被区空气负离子浓度变化分析 [J]. 生态环境学报, 2016, **25**(10): 1629 – 1637.  
BAI Baoxun, CHEN Donghai, XU Tingting, et al. Analysis of air anion concentration changes in different vegetation areas in central and northern Henan Province [J]. *J Eco-Environ*, 2016, **25**(10): 1629 – 1637.
- [30] 王洪俊. 城市森林结构对空气负离子水平的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28**(5): 96 – 98.  
WANG Hongjun. Influence of urban forest structure on air anion level [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2004, **28**(5): 96 – 98.
- [31] SALEM M Z M, ASHMAWY N A, ELANSARY H O, et al. Chemotyping of diverse *Eucalyptus* species grown in Egypt and antioxidant and antibacterial activities of its respective essential oils [J]. *Nat Prod Res*, 2015, **29**(7): 681 – 685.
- [32] BEHBAHANI B A, YAZDI F T, VASIEE A, et al. *Oliveria decumbens* essential oil: chemical compositions and antimicrobial activity against the growth of some clinical and standard strains causing infection [J]. *Microb Pathog*, 2018,

- 114(1): 449–452.
- [33] FARRÉ-ARMENGOL G, FILELLA I, LLUSIA J, et al. Bidirectional interaction between phyllospheric microbiotas and plant volatile emissions [J]. *Trends Plant Sci*, 2016, 21(10): 854–860.
- [34] 张清杉, 贺延梅, 赵建民, 等. 森林公园小气候空气负离子保健浓度分级评价[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(3): 48–49.
- ZHANG Qingshan, HE Yanmei, ZHAO Jianmin, et al. Evaluation of microclimate air anion health concentration in forest park [J]. *J Northwest For Univ*, 2006, 21(3): 48–49.
- [35] OCHIAI H, IKEI H, SONG C, et al. Physiological and psychological effects of a forest therapy program on middle-aged females [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(12): 15222–15232.
- [36] 赵庆, 钱万惠, 唐洪辉, 等. 广东省云勇森林公园6种林分保健功能差异比较[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(4): 750–756.
- ZHAO Qing, QIAN Wanhai, TANG Honghui, et al. Differences of health care functions of six forest stands in Yunyong Forest Park, Guangdong [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, 35(4): 750–756.
- [37] 蒋冬月, 李永红, 沈鑫. 芸香叶片和花瓣释放挥发性有机物成分及其变化规律[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 572–580.
- JIANG Dongyue, LI Yonghong, SHEN Xin. Components and variations of volatile organic compounds released from leaves and flowers of *Ruta graveolens* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, 35(3): 572–580.
- [38] 邵海荣, 贺庆棠. 森林与空气负离子[J]. 世界林业研究, 2000, 13(5): 19–23.
- SHAO Hairong, He Qingtang. Forest and air negative ions [J]. *World For Res*, 2000, 13(5): 19–23.