

广东省云勇森林公园 6 种林分保健功能差异比较

赵庆, 钱万惠, 唐洪辉, 杨清, 严俊

(广东省林业科学研究院 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

摘要: 针对不同林分保健功能的差异, 提出林分保健功能分析方法, 为今后森林保健和森林康养的建设规划与管理提供科学依据。选取广东省佛山市云勇森林公园中阴香 *Cinnamomum burmannii* 林, 灰木莲 *Magnolia blumei* 林, 湿地松 *Pinus elliotii* 林, 薰莢锥 *Castanopsis fissa* 林, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 林和阔叶混交林等 6 种林分, 在 10:00-16:00 森林保健旅游高峰期, 分析体感舒适程度等级、空气离子指数、空气颗粒物质量浓度和植物精气相对含量等 4 个指标, 开展林分保健功能的综合评价研究。结果显示: 6 种林分的体感舒适程度等级总体上均处在“舒适”及以上水平; 6 种林分的空气离子指数等级总体上处在Ⅲ级和Ⅳ级水平, 具有一定的保健作用; 6 种林分的细颗粒物(PM_{2.5})和总悬浮颗粒物(TSP)总体上处在一级质量浓度限值范围内, 湿地松林、薰莢锥林、尾叶桉林和阔叶混交林的可吸入颗粒物(PM₁₀)均超过了一级质量浓度限值; 6 种林分所释放的植物精气物质相对含量均较低, 其中阴香林释放 5 种(相对含量为 8.15%), 灰木莲林释放 3 种(3.01%), 湿地松林释放 4 种(3.92%), 尾叶桉林释放 3 种(2.91%), 薰莢锥林释放 4 种物质(7.99%), 阔叶混交林释放 3 种(1.91%); 综合评判, 阴香林和薰莢锥林的综合保健功能在 6 种林分中表现最佳。林分内的相对湿度对体感舒适度和空气颗粒物质量浓度均有影响, 发挥森林保健功能需充分关注林分内相对湿度的最优阈值。云勇森林公园旅游更适宜出行的时间为 10:00-14:00。通过模拟植物自然状态下释放到林分空气中的植物精气相对含量较低, 需考虑有利于植物精气类物质积累的森林小环境营建与林分结构配置。图 3 表 2 参 19

关键词: 森林生态学; 森林保健; 体感舒适度; 空气离子指数; 空气颗粒物; 植物精气; 云勇森林公园

中图分类号: S731.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)04-0750-07

Differences of health care functions of six forest stands in Yunyong Forest Park, Guangdong

ZHAO Qing, QIAN Wanhui, TANG Honghui, YANG Qing, YAN Jun

(Guangdong Academy of Forestry, Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture Protection and Utilization, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: In order to evaluate the differences of health care functions among different forest stands, a method for analyzing forest health function was put forward, which provides a scientific basis for the planning and management of forest health care and forest conservation in the future. The 6 forest stands were selected in Yunyong Forest Park, Foshan City, Guangdong Province, including *Cinnamomum burmannii*, *Magnolia blumei*, *Pinus elliotii*, *Eucalyptus urophylla*, *Castanopsis fissa* and broadleaf stands, to analyse human comfort index, air ion index, atmospheric particulate matter and the phytoncider between 10:00 and 16:00 for the forest health care function evaluation. The results showed the human comfort grade in the 6 forest stands were generally at the grade of Comfortable and Very Comfortable; the air ion index grade of the 6 forest stands were all at the level of grade III and IV, and had certain health effects; The PM_{2.5} and TSP of the 6 forest stands were in the range of the first concentration limit, and PM₁₀ of *P. elliotii*, *C. fissa*, *E. robusta* and broadleaf stands exceeded the

收稿日期: 2017-06-29; 修回日期: 2017-10-03

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404301)

作者简介: 赵庆, 高级工程师, 博士, 从事城市林业、风景园林研究。E-mail: zhaopingflzzq@qq.com。通信作者: 唐洪辉, 教授级高级工程师, 从事城市林业研究。E-mail: 787226271@qq.com

first-order concentration limit. Phytoncidere released from the 6 forest stands was low: the *C. burmannii* released of 5 kinds (8.15%), *M. blumei* released of 3 kinds (3.01%), *P. elliottii* released of 4 kinds (3.92%), *E. robusta* released of 3 kinds (2.91%), *C. fissa* released of 4 kinds (7.99%), and broadleaf stands released of 3 kinds (1.91%); Integrated with the human comfort grade, air ion index, PM_{2.5}, and the phytoncidere, *C. burmannii* and *C. fissa* stands were evaluated as the best health care function of all the 6 forest stands in Yunyong Forest Park. The relative humidity in the forest stand has an effect on both the human comfort index and the atmospheric particulate matter, which indicated that to play the function of forest health, close attention should be paid to the relative humidity of the forest stand. The suitable time to visit Yunyong Forest Park is between 10: 00–14: 00. Because of the low content of phytoncidere released into the air, more attention should be paid to small environmental construction and stand structure disposition that favor accumulating phytoncidere. [Ch, 3 fig. 2 tab. 19 ref.]

Key words: forest ecology; forest health; human comfort index; air ion index; atmospheric particulate matter; phytoncidere; Yunyong Forest Park

森林保健是指依托城市森林生态系统, 开展调节人类生理和心理状况的健康活动^[1]。众多研究已经表明, 森林环境对部分生理和心理疾病有着良好的疗效^[2-3]。不同森林在滞尘、释放负氧离子和挥发植物精气等功能上存在差异, 因此, 分析评价不同森林保健功能水平, 既是保健森林建设的核心, 也是基于保健功能的森林结构调整和功能提升的前提条件。以往关于森林保健的研究多重点围绕森林保健的概念、特征进行探讨^[4-5], 研究案例多选择单一指标来评价森林的保健功能水平^[6-11]。这些研究虽对森林保健功能评价、机制分析以及变化规律作了深入研究, 但该类方法未能从多个维度, 即对多种林分类型、多个保健因子以及多个时间段进行综合评价, 这恰是开展森林保健建设中筛选森林保健树种、优化森林结构所急需的。本研究以广东省佛山市云勇森林公园为例, 利用体感舒适度等级、空气离子、空气颗粒物质量浓度和植物精气相对含量等 4 个指标构建森林保健功能评价方法, 分析森林保健功能在不同时间段的差异, 为珠三角国家森林城市群建设筛选森林保健树种、优化森林的保健功能提供理论依据。

1 研究区概况

云勇森林公园位于广东省佛山市高明区(22°45′21″~22°46′43″N, 112°37′46″~112°39′34″E), 总面积为 2 007.8 hm², 是全国首批 17 家“中国森林体验基地”之一。该区南亚热带季风气候明显, 雨热同季, 干湿分明, 日照偏少, 年均气温为 22.6 ℃, 年均降水量为 1 800 mm。该区地势属丘陵地带, 沟谷幽深, 溪涧众多, 地形复杂多变, 土壤中大部分为花岗岩风化的赤红壤, 有机质含量较丰富。区内植被种类多, 以乡土阔叶树种为主, 主要包括湿地松 *Pinus elliottii*, 木荷 *Schima superba*, 樟树 *Cinnamomum camphora*, 灰木莲 *Magnolia blumei*, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 阴香 *Cinnamomum burmannii*, 黧蒴锥 *Castanopsis fissa* 等。

2 研究方法

2.1 样地选择

选择云勇森林公园阴香林、灰木莲林、湿地松林、黧蒴锥林、尾叶桉林和阔叶混交林这 6 种在珠三角城市近郊森林景观建设中常用的林分类型作为研究样本。每种林分设置 1 个样地, 共计 6 个样地。具体如下: ①阴香林。面积为 1.5 hm², 乔木层 95%以上为阴香, 林内伴有少量的木荷、火力楠 *Michelia macclurei*, 郁闭度为 0.9。②灰木莲林。面积为 1.7 hm², 乔木层 95%以上为灰木莲, 林内伴有少量的杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 火力楠, 郁闭度为 0.9。③湿地松林。面积为 2.0 hm², 乔木层 100%为湿地松, 郁闭度为 0.8。④黧蒴锥林。面积为 1.8 hm², 乔木层 95%以上为黧蒴锥, 林内伴有少量的木荷, 郁闭度为 0.9。⑤尾叶桉林。面积为 1.9 hm², 乔木层 100%为尾叶桉, 郁闭度为 0.7。⑥阔叶混交林。面积为 1.9 hm², 乔木层主要为细叶榕 *Ficus microcarpa*, 米老排 *Mytilaria laosensis*, 大叶紫薇 *Lagerstroemia speciosa*, 火焰木 *Spathodea campanulata*, 凤凰木 *Delonix regia* 等, 郁闭度为 0.9。

2.2 取样方法

选择在2017年5月上旬进行野外数据测定。本研究旨在分析不同林分的保健功能,因此,将取样时间确定在人群活动密集的时段,即10:00~16:00。采样时间段的天气状况相似,都为多云天气。试验期间气温为23.9~29.7℃,空气湿度为71.0%~96.7%,风力<1级。在试验日的10:00,12:00,14:00,15:00,16:00分别对6种林分进行小气象数据、空气离子、空气颗粒物等3种指标采样,对所选林分所在山地的上中下坡位各选取3个采样点,间距 ≥ 100 m,采样高度为距离地面1.5 m处(风速采样高度为2.0 m)。植物精气的测定采用动态顶空采集法,将仪器悬挂在林内1.5 m处,连续对林内空气采样6 h。

2.3 指标计算方法

2.3.1 体感舒适度等级 以气温、相对湿度和风速等3种气象数据综合评价体感舒适度^[12],气象数据的测定使用小型气象站Kestrel 4500。 $S=0.6 \times |T-24| + 0.07 \times |H_R-70| + 0.5 \times |V-2|$ 。其中: S 为综合舒适度指数, T 为气温(℃), H_R 为相对湿度(%), V 为2 m高处风速($m \cdot s^{-1}$)。体感舒适程度等级划分: $S \leq 4.55$ 为“很舒适”(very comfortable), $4.55 < S \leq 6.95$ 为“舒适”(comfortable), $6.95 < S \leq 9.00$ 为“不舒适”(uncomfortable), $S > 9.00$ 为“极不舒适”(very uncomfortable)。

2.3.2 空气离子评价指数 采用KEC-900+空气离子测试器监测,针对同一采样点的东南西北4个方向进行测量,待仪器读数稳定后每个方向取5个具代表性的波峰值,求得算术平均值,并用森林空气离子评价指数公式评价森林空气离子等级^[13]。 $P=n^-/(n^-+n^+)$, $I_{FC}=(n^-/1\ 000) \times P$ 。其中: I_{FC} 为森林空气离子评价指数; P 为空气负离子系数; n^+ 为正离子质量浓度; n^- 为负离子质量浓度。森林空气离子评价指数标准:I级($I_{FC} \geq 2.4$),II级($1.4 \leq I_{FC} < 2.4$),III级($0.9 \leq I_{FC} < 1.4$),IV级($0.5 \leq I_{FC} < 0.9$),V级($0.16 \leq I_{FC} < 0.5$),VI级($I_{FC} < 0.16$)。当森林空气离子等级为VI级时,表明空气已受到一定程度的污染,对健康不利;当森林空气离子等级为V级时,表明此时的空气对人体既无多大危害,亦无多大益处,属于允许质量浓度范围;当森林空气离子等级为IV级及以上时,空气对人体健康是有益的,属于保健质量浓度范围。

2.3.3 环境空气颗粒物 指标根据GB3095-2012《环境空气质量标准》对空气颗粒物一级质量浓度限值的规定以及HJ/T194-2005《环境空气质量手工监测技术规范》对间断采样的技术标准,选取了3种空气颗粒物指标:细颗粒物($PM_{2.5}$),可吸入颗粒物(PM_{10}),总悬浮颗粒物(TSP),进行间断采样测定。空气颗粒物指标采用美国Met One Instruments-Aerocet 531进行检测。该仪器为粒子计数和重量检测二合一仪器。选择重量模式测试森林中 $PM_{2.5}$, PM_{10} ,TSP质量浓度,每次采样3次重复取平均值,重复间的间距 ≥ 5 m。

2.3.4 植物精气指标 选用中国科学院华南植物园提供的有机挥发物吸附装置,林内空气经过取样器,取样器每分钟通过的空气体积一致,有机挥发物将吸附在玻璃管吸附层,采样完毕后,将吸附管妥善密封保存并及时用气象质谱联用技术(GC-MS)分析,对照标准谱库,兼顾保留时间并参考已有的文献资料进行筛选及确认,结合峰面积归一化法计算不同林分中各类植物精气的相对含量。

3 结果与分析

3.1 体感舒适度分析

根据体感舒适度评价差异特征可知(图1):阴香林的综合舒适指数为1.64~2.67,体感舒适等级均为“很舒适”;灰木莲林的综合舒适指数为1.25~3.12,体感舒适等级均为“很舒适”;湿地松林的综合舒适指数为3.71~4.73,10:00时的体感舒适等级处于“舒适”,其余4个时间点的体感舒适等级均为“很舒适”;黧蒴锥林的综合舒适指数为3.47~4.30,体感舒适等级均为“很舒适”;尾叶桉林的综合舒适指数为2.92~4.66,16:00时的体感舒适等级为“舒适”,其余4个时间点的体感舒适等级均为“很舒适”;阔叶混交林的综合舒适指数为3.38~5.07,15:00时的体感舒适等级处于“舒适”,其余4个时间点的体感舒适等级均为“很舒适”。6种林分的体感舒适度等级总体上均处在“舒适”及以上水平。随着时间推移,阴香林、灰木莲林、尾叶桉林以及黧蒴锥林的综合舒适指数呈现先上升后下降再上升的趋势,而湿地松林和阔叶混交林的综合舒适指数呈现先下降后上升再下降的趋势。

3.2 森林空气离子评价指数分析

根据空气离子指数差异特征可知(图2),阴香林的空气离子评价指数 I_{FC} 为0.63~1.26,10:00时的 I_{FC}

等级为Ⅲ级，其余4个时间点的 I_{FC} 等级均为Ⅳ级；灰木莲林的 I_{FC} 为0.16~0.95，12:00时的 I_{FC} 等级为Ⅴ级，15:00时的 I_{FC} 等级为Ⅲ级，其余3个时间点的 I_{FC} 等级均为Ⅳ级；湿地松林的 I_{FC} 为0.96~1.27， I_{FC} 等级均为Ⅲ级；黧蒴锥林的 I_{FC} 为0.68~0.99，14:00时的 I_{FC} 等级为Ⅲ级，其余4个时间点的 I_{FC} 等级均为Ⅳ级；尾叶桉林的 I_{FC} 为0.49~0.76，16:00时的 I_{FC} 等级为Ⅴ级，其余4个时间点的 I_{FC} 等级均为Ⅳ级；阔叶混交林的 I_{FC} 为0.40~1.49，14:00时的 I_{FC} 等级为Ⅴ级，10:00和15:00时的 I_{FC} 等级为Ⅱ级，而12:00和16:00时的 I_{FC} 等级为Ⅳ级。6种林分的空气离子指数等级总体上处在Ⅲ级和Ⅳ级水平，具有一定的保健作用。阴香林、阔叶混交林的 I_{FC} 峰值出现在10:00和15:00，尾叶桉林、黧蒴锥林、灰木莲林以及湿地松林的 I_{FC} 峰值出现在14:00~15:00。

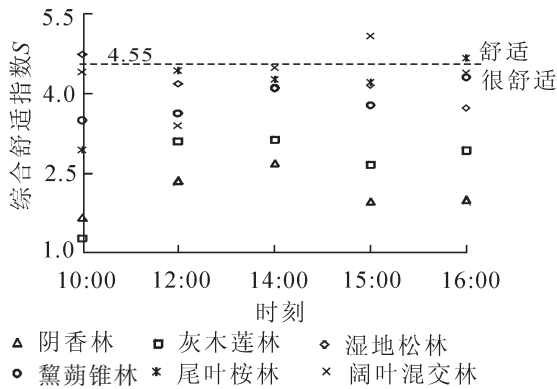


图1 体感舒适度评价
Figure 1 Evaluation of human comfort index

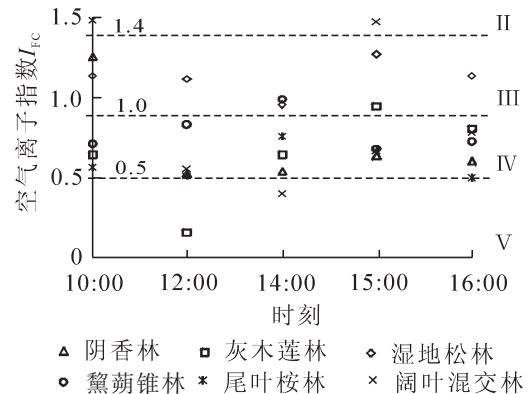


图2 空气离子指数评价
Figure 2 Evaluation of air ion index

3.3 空气颗粒物质量浓度指标分析

由图3可知：阴香林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为10.25~17.75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为27.15~48.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为32.45~82.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均在一级质量浓度限值范围内；灰木莲林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为11.75~14.60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为31.45~43.00 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为37.25~62.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均在一级质量浓度限值范围内；湿地松林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为20.10~56.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为49.40~103.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为57.20~112.10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $PM_{2.5}$ 在15:00和16:00超出一级质量浓度限值范围， PM_{10} 除了10:00外均超出一级质量浓度限值范围；黧蒴锥林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为21.50~43.05 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为47.55~76.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为52.20~85.00 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $PM_{2.5}$ 在15:00和16:00超出一级质量浓度限值范围， PM_{10} 除了10:00外均超出一级质量浓度限值范围；尾叶桉林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为18.80~34.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为53.85~75.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为66.25~83.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 超出一级质量浓度限值范围；阔叶混交林的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为18.10~29.75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 质量浓度为51.90~71.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，TSP质量浓度为59.45~78.60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， PM_{10} 超出一级质量浓度限值范围。6种林分的 $PM_{2.5}$ 和TSP总体上处在一级质量浓度限值范围内，湿地松林、黧蒴锥林、尾叶桉林和阔叶混交林的 PM_{10} 均超过了一级质量浓度限值。随着时间推移，阴香林、灰木莲林、尾叶桉林以及阔叶混交林的空气颗粒物质量浓度变化较为平稳，而湿地松林和黧蒴锥林的空气颗粒物质量浓度呈逐渐上升的趋势。

3.4 植物精气GC-MS分析

通过分离鉴定林分内部的空气，6种林分的植物挥发物样品中共检测植物精气类物质11种(表1)。6种林分所释放植物精气相对含量均较低，其中阴香林释放5种(相对含量为8.15%)，主要为醛类物质(6.74%)；灰木莲释放3种(3.01%)，主要为醛类物质(2.03%)；湿地松释放4种(3.92%)，主要为醛类(3.64%)物质；尾叶桉释放3种(2.91%)，主要为醛类物质(2.14%)；黧蒴锥释放4种物质(7.99%)，主要为醇类物质(7.45%)；阔叶林释放3种(1.91%)，主要为醛类物质(1.25%)。

3.5 森林保健功能综合分析

将每个时间点同时满足人体舒适度达到“很舒适”、空气负离子指数达到Ⅳ级以上、 $PM_{2.5}$ 在一级质量浓度限制范围内这3个条件的林分初步筛选为具有一定保健功能的林分。结果表明：5个不同时间点，保健功能表现较好的林分各有不同(表2)，具体表现为10:00时，阴香林、灰木莲林、尾叶桉林、

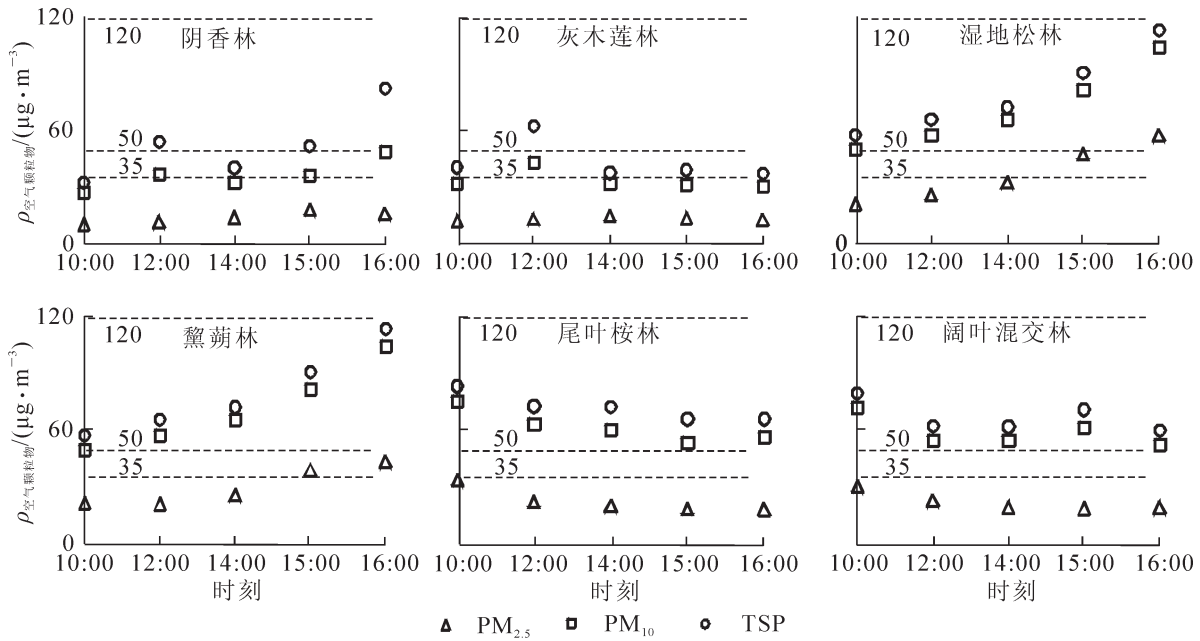


图3 空气颗粒物评价

Figure 3 Evaluation of atmospheric particulate matter

表1 植物精气相对含量

Table 1 Relative content of phytoncide

有机物	分子式	相对含量/%						有机物	分子式	相对含量/%					
		阴香林	灰木莲林	湿地松林	尾叶桉林	藜蒴锥林	阔叶混交林			阴香林	灰木莲林	湿地松林	尾叶桉林	藜蒴锥林	阔叶混交林
花生四烯酸甲酯	C ₂₁ H ₃₄ O ₂	0.05						芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O					0.29	
辛醛	C ₈ H ₁₆ O	0.95	0.48	1.12			0.46	香茅醇	C ₁₀ H ₂₀ O					6.14	
壬醛	C ₉ H ₁₈ O	2.82	1.55	1.33	1.22	0.54	0.79	异长叶烯酮	C ₁₅ H ₂₂ O					1.02	
癸醛	C ₁₀ H ₂₀ O	2.92		1.19	0.92			庚炔羧酸甲酯	C ₉ H ₁₄ O ₂				0.77		
长叶烯	C ₁₅ H ₂₄	1.41	0.98				0.66	合计		8.15	3.01	3.92	2.91	7.99	1.91
α-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆			0.28											

藜蒴锥林和阔叶混交林的保健功能表现较好；12:00时，阴香林、湿地松林、尾叶桉林、藜蒴锥林和阔叶混交林的保健功能表现较好；14:00时，阴香林、灰木莲林、湿地松林、尾叶桉林和藜蒴锥林的保健功能表现较好；15:00时，阴香林、灰木莲林和藜蒴锥林的保健功能表现较好；16:00时，阴香林、灰木莲林和阔叶混交林的保健功能表现较好。其中，阴香林5个时间点的保健功能均表现良好，灰木莲林和藜蒴锥林有4个时间点的保健功能表现良好，尾叶桉林和阔叶混交林有3个时间点的保健功能表现良好，湿地松林仅有2个时间点的保健功能表现良好。因此，通过体感舒适度等级、空气负离子指数、PM_{2.5}质量浓度和植物精气相对含量等4个指标进行评判，发现阴香林和藜蒴锥林的综合保健功能在6种林分中表现最为突出。

4 讨论

森林保健功能的发挥是一个复杂多因子综合作用的过程，加上各种研究采用的采样和分析方法不同，研究结果存在一定的差异。晏海等^[14]用THOM提出的不舒适指数(DI)对8个植物群落的体感舒适度进行评价，综合舒适指数均呈先上升后下降的趋势，并表现为差异不显著。这与本研究所得出的不同树种林分体感舒适度较为复杂的结果并不一致。2个研究同样包含了针叶树种和阔叶树种，但本研究所选用指标为陆鼎煌等^[12]建立的综合舒适度指标，除了温度、湿度这2个影响人体舒适程度的因子外，还包含了风速的因子，能够较真实地反映人的体感。因此，2个研究结果的差异可能是选择了不同指标引起的。

空气离子指数的研究表明: 6 种林分的空气离子指数出现的峰值时间不同, 不同林分的空气离子指数具有一定差异, 这与周斌等^[15]的研究结果一致。但本次试验尚未开展不同林分的不同密度、树高和胸径以及森林郁闭度等因子对空气离子指数的影响研究, 因此本试验只能说明样地所在林分的空气离子指数差异。

湿地松林和薰莨锥林的空气颗粒物指标变化趋势与其他 4 种林分类型不同, 这与傅伟聪等^[11]、吴志萍等^[16]研究结果不一致。本研究在试验过程中发现湿地松林和薰莨锥林的林内相对湿度较高, 其中湿地松林在 5 个时间点的相对湿度为 89.0%~96.7%, 平均相对湿度为 93.1%, 薰莨锥林在 5 个时间点的相对湿度为 85.6%~95.7%, 平均相对湿度为 89.8%。这与李灿等^[17]的研究结果相吻合。相对湿度增加导致空气颗粒物吸湿变大, 且可以促进直径 $\leq 1.0 \mu\text{m}$ 细颗粒物聚成较大颗粒物, 导致颗粒物粒径分布向大的方向偏移。这表明湿地松林和薰莨锥林空气颗粒物指标与其他 4 种森林类型的趋势不同可能是林内相对湿度差异较大造成的。

6 种林分的植物挥发物样品中共检测出 11 种植物精气成分, 每种林分植物精气总相对含量均小于 10%, 其中阴香林的相对含量最高为 8.15%, 阔叶混交林的相对含量最低为 1.91%, 湿地松林为针叶树林, 其植物精气相对含量仅为阴香林的二分之一, 这与马楠^[18]、邓小勇^[19]研究结果差异较大, 这可能与植物精气的收集方法有关。谢小洋等^[18]和马楠^[19]对植物精气的收集是采用活体植物动态顶空套袋法, 而邓小勇^[20]则选用固相微萃取收集法, 这 2 种方法直接完整地收集植物体内或者释放出的挥发性有机物, 但均借助一定的外力, 无法模拟自然状态下植物体内有机物挥发并被人体所吸收的过程。本研究所测定的是模拟植物自然状态下释放到林分空气中的植物精气, 对于森林保健功能的研究具有更好的直接指导意义。

5 结论

研究表明, 林分内的相对湿度对体感舒适度和空气颗粒物浓度均有影响。相对湿度增长至 70% 时, 最有利于人体获得最佳的体感舒适度; 随着相对湿度进一步增长, 综合舒适指数将逐步升高, 从而将会降低体感舒适度等级, 但此时直径 $\leq 1.0 \mu\text{m}$ 细颗粒物逐渐聚成直径 $> 2.5 \mu\text{m}$ 的较大颗粒物, 致使 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降。因此, 发挥森林保健功能需充分关注林分内相对湿度的最优阈值。

通过对不同林分保健功能的综合分析来看, 建群树种以及监测时间的不同, 导致森林所表现的保健功能具有一定差异。云勇森林公园内, 10:00–14:00 分别有 5 种林分的保健功能表现良好, 建议游客在此时间段选择在保健功能较强的林分内开展游憩活动。

从植物精气的相对含量来看, 通过模拟植物自然状态下释放到林分空气中的植物精气相对含量是较低的, 因此, 还需进一步研究有利于植物精气积累的森林小环境营建与林分结构配置。

6 参考文献

- [1] TZOULAS K, KORPELA K, VENN S, *et al.* Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: a literature review [J]. *Landscape Urban Plann*, 2007, **81**(3): 167 – 178.
- [2] KARJALAINEN E, SARJALA T, RAITIO H. Promoting human health through forests: overview and major challenges [J]. *Environ Health Preve Med*, 2010, **15**(1): 1 – 8.
- [3] LI Qing, OTSUKA T, KOBAYASHI M. Acute effects of walking in forest environments on cardiovascular and metabolic parameters [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2011, **111**(11): 2845 – 2853.
- [4] 胡译文, 杨军. 城市森林保健功能研究进展[J]. 中国城市林业, 2012, **10**(5): 18 – 20.
HU Yiwen, YANG Jun. Research progress in sanitarian function of urban forest [J]. *J Chin Urb For*, 2012, **10**(5): 18 – 20.
- [5] 王小婧, 贾黎明. 森林保健资源研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(12): 73 – 80.
WANG Xiaojing, JIA Liming. Review on forest healthcare resources [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26**(12): 73 – 80.
- [6] HILL L, GRIFFITH O W, FLACK M. The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, ra-

表 2 不同林分保健功能综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of forest health

时刻	在各项指标下表现较好的林分类型			
	体感舒适度	空气负离子指数	PM _{2.5}	综合
10: 00	ABDEF	ABCDEF	ABCDEF	ABDEF
12: 00	ABCDEF	ACDEF	ABCDEF	ACDEF
14: 00	ABCDEF	ABCDE	ABCDEF	ABCDE
15: 00	ABCDE	ABCDEF	ABEF	ABE
16: 00	ABCDF	ABCDEF	ABEF	ABF

说明: A. 阴香林; B. 灰木莲林; C. 湿地松林; D. 尾叶桉林; E. 薰莨锥林; F. 阔叶混交林

- diation and evaporation [J]. *Philos Trans Royal Soc London*, 1916, **207**(1): 183 – 220.
- [7] BLAZEJCZYK K, EPSTEIN Y, JENDRITZKY G, *et al.* Comparison of UTCI to selected thermal indices [J]. *Int J Biometeorol*, 2012, **56**(3): 515 – 535.
- [8] 王艳英, 王成, 郟光发, 等. 香樟枝叶挥发物对小白鼠自发行为影响[J]. *生态环境学报*, 2012, **12**(8): 1423 – 1428.
- WANG Yanying, WANG Cheng, QIE Guangfa, *et al.* Effect of VOCs from branch and leaf of *Cinnamomum camphora* on spontaneous of mice [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **12**(8): 1423 – 1428.
- [9] 王艳英, 王成, 董建华, 等. 福州市夏季绿植广场 VOCs 变化特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, **30**(4): 307 – 314.
- WANG Yanying, WANG Cheng, DONG Jianhua, *et al.* Dynamics of VOCs in green plant square in summer in Fuzhou [J]. *J Northwest For Univ*, 2015, **30**(4): 307 – 314.
- [10] 李娟, 王成, 彭镇华. 侧柏挥发物变化规律[J]. *东北林业大学学报*, 2010, **38**(3): 52 – 56.
- LI Juan, WANG Cheng, PENG Zhenhua. Variation of volatile organic compounds released by *Platycladus orientalis* [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(3): 52 – 56.
- [11] 傅伟聪, 郑宇, 董建文. 冬季校园内 3 种典型用地空气颗粒物浓度日变化[J]. *中国城市林业*, 2013, **11**(6): 15 – 18.
- FU Weicong, ZHENG Yu, DONG Jianwen. Diurnal change of air particulate concentration in 3 types of land in winter campus [J]. *J Chin Urban For*, 2013, **11**(6): 15 – 18.
- [12] 陆鼎煌, 崔森, 李重和. 北京城市绿化夏季小气候条件对人体的适宜度[C]//中国农学会农业气象研究会, 中国林学会. *林业气象论文集*. 北京: 气象出版社, 1984: 144 – 152.
- LU Dinghuang, CUI Sen, LI Chonghe. The influence of Beijing urban greening and summer microclimatic conditions on human fitness [C]//China Agricultural Meteorology Society, Chinese Society of Forestry. *Forestry and Metrology Papers*. Beijing: China Meteorological Press, 1984: 144 – 152.
- [13] 石强, 舒惠芳, 钟林生, 等. 森林游憩区空气负离子评价研究[J]. *林业科学*, 2004, **40**(1): 36 – 40.
- SHI Qiang, SHU Huifang, ZHONG Linsheng, *et al.* Research on evaluation of the aeroanion in forestry recreational areas [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(1): 36 – 40.
- [14] 晏海, 王雪, 董丽. 华北树木群落夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, **34**(5): 57 – 63.
- YAN Hai, WANG Xue, DONG Li. Microclimatic characteristics and human comfort conditions of tree communities in northern China during summer [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, **34**(5): 57 – 63.
- [15] 周斌, 余树全, 张超, 等. 不同树种林分对空气负离子浓度的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, **28**(2): 200 – 206.
- ZHOU Bin, YU Shuquan, ZHANG Chao, *et al.* Aero-anion ecological efficiency of 13 tree species in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(2): 200 – 206.
- [16] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 等. 6 种城市绿地空气 PM_{2.5} 浓度变化规律的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2008, **35**(4): 494 – 498.
- WU Zhiping, WANG Cheng, HOU Xiaojing, *et al.* Variation of air PM_{2.5} concentration in six urban greenlands [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2008, **35**(4): 494 – 498.
- [17] 李灿, 崔术祥, 杨维, 等. 相对湿度对室内细颗粒物粒径分布影响的试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, **14**(4): 254 – 258.
- LI Can, CUI Shuxiang, YANG Wei, *et al.* Experimental research on effects of the relative humidity on the size distributions of indoor fine particles [J]. *J Saf Environ*, 2014, **14**(4): 254 – 258.
- [18] 马桶. 16 种常用园林植物 VOCs 成分研究及 AHP 评价[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- MA Nan. *The Research on 16 Common Landscape Plants VOCs and AHP Evaluation* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2012.
- [19] 邓小勇. 深圳市常见芳香植物挥发性有机物释放特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- DENG Xiaoyong. *Study on the Dynamic Releasing Characteristics of Plant Volatile of the Common Fragrant Plant in Shenzhen* [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.