

# 石门国家森林公园空气颗粒物动态变化及评价\*

Dynamic Change and Evaluation of Ambient Particulate Matter in Shimen National Forest Park

高瑶瑶 潘勇军\* 张华

GAO Yao-yao, PAN Yong-jun\*, ZHANG Hua

**摘要:** 为揭示斑块型城市森林公园空气颗粒物浓度的时空变化规律, 于2018年旱季和2019年雨季, 通过长期连续固定监测方法, 对石门国家森林公园花海、湖心岛、竹林、国际森林浴场4种生境颗粒物进行了监测和评价。结果表明, 空气颗粒物各项指标均为旱季>雨季, TSP、PM<sub>10</sub>平均浓度在各监测点排序为花海>竹林>湖心岛>森林浴场, PM<sub>2.5</sub>平均浓度排序为花海>湖心岛>竹林>森林浴场。各监测点TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>等级均在“Ⅱ”以上, 未达到污染水平, 因此, 空气颗粒物指标对森林康养、森林旅游等活动的时间和地点均无限制。

**关键词:** 森林公园; 森林游憩; 森林康养; 颗粒物; 评价

**中图分类号:** TU986

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2641(2020)03-0032-06

**收稿日期:** 2019-12-12

**修回日期:** 2020-03-19; 2020-05-06

**Abstract:** In order to reveal the temporal and spatial variation of particulate concentration in patch urban forest park, in dry season of 2018 and rainy season of 2019, the particulate matter in four habitats of Shimen National Forest Park, namely flower sea, lake island, bamboo forest and international forest bathing place, was monitored and evaluated by means of long-term and continuous monitoring. The results showed that all the indexes of air particulate matter in dry season were higher than that in rainy season. The average concentrations of TSP, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were ranked as the highest in the flower sea and the lowest in the forest bathing area. TSP, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> levels of the monitoring in “Ⅱ” above, has yet to reach pollution level. Therefore, the air particulate index on forest health, forest tourism and other activities of time and place are unlimited.

**Key words:** Forest park; Forest recreation; Forest healthcare; Air particulate matter; Assessment

随着工业化和城市化进程的加快, 我国空气质量状况令人堪忧, 并且空气污染物中的颗粒物(PM)对人体产生较大危害<sup>[1-3]</sup>。直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物为可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>), 这是人体上呼吸道感染的罪魁祸首; 直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的为细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>), 可能对人体支气管末端造成损伤, 干扰肺部气体交换<sup>[4]</sup>。因此, 空气颗粒物浓度的时空变化是评价大气质量一个重要标准。

根据广州市环境保护局2019公布的数据<sup>[5]</sup>, 广州市全年空气质量略有下降, 与2018年相比, 空气质

量达标天数减少5.2%; PM<sub>10</sub>年均值上升6.0%, 其中南沙区、白云区PM<sub>10</sub>浓度增幅最大; 从化区、南沙区PM<sub>2.5</sub>浓度增幅也较大。空气质量的下降使市民对清新、干净的空气需求越来越强烈, 故寻找大气环境舒适的游憩场所, 满足市民生理及心理上的需求至关重要。因此, 在广州市石门国家森林公园进行空气颗粒物时空变化规律及空气质量评价研究, 将为掌握城市森林公园对空气污染物的调控能力提供基础<sup>[6-7]</sup>, 为城市森林公园合理开发森林游憩功能提供科学理论依据<sup>[8]</sup>。

## 1 研究区概况

石门国家森林公园(113°45'E, 23°27'N)位于从化区东北部, 距广州市区86 km, 总面积2 636 hm<sup>2</sup>, 森林覆盖率达98.9%, 次生林面积1 067 hm<sup>2</sup>。其属于南亚热带湿润季风气候区, 雨量充沛, 年平均降雨量约2 000 mm, 80%以上的降水量集中在4—9月; 冬暖夏凉, 具有明显的山地气候特征, 年均气温为21℃, 夏季比广州中心城区的温度低6~8℃, 年气候舒适日达200 d以上<sup>[9]</sup>。公园植被类型多, 物种丰富

\* 基金项目: 欧盟地平线2020计划“中欧城市可持续发展的城市森林应对方案研究、分享与管理”项目CLEARING HOUSE(SC5-13-2018-2019); 广州市财政专项“广州城市园林绿地生态监测”(2061600000271); 广州市财政专项“城市公园生物多样性本底调查及评价”(2061710000112); 广州市财政专项“广州森林公园康养功能评估及提升手段研究”(2061800000129)资助。

度极高, 已知有维管束植物 1 090 种, 其中蕨类植物 106 种, 种子植物 976 种<sup>[10]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 观测点选择

1995 年经国家林业部批准, 在石门国家森林公园建立了第一家国际森林浴场, 目前在此基础上规划了森林康养基地(图 1)。为了解不同生境类型的空气质量, 在规划的基地内建立标准气象观测场, 并且采用典型抽样法, 根据试验需要结合实地踏查筛选后, 确定花海(草本植物群落)、湖心岛(靠近水体森林)、竹林、国际森林浴场(常

绿阔叶林) 4 种典型生境类型的群落作为试验样地(图 2), 各样地面积为  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ , 且坡度较缓, 适合开展森林游憩活动。每块试验样地采用“S”型取样法设置 3 个观测点, 作为 3 个重复。

### 2.2 观测方法

通过研究广州市近 5 年气象数据, 根据降雨量与降雨频率, 划分旱季和雨季作为广州市的典型天气。跟踪记录气象数据并在试验日监测记录气象实况, 筛选气象数据与要选择的气象条件相符的观测数据作为典型天气的代表数据。旱季和雨季的观测时间分别为 2018 年 11—12 月、2019 年 6—7 月, 各选择 5 天典型天气, 旱季选择“连续晴天”,

雨季选择“雨后晴天”。

观测期间, 每天监测 4 种生境的空气颗粒物。采用美国 Metone Aerocet 531S 便携式 PM 值/粒子计数器, 测试粒径包括  $\text{PM}_1$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_4$ 、 $\text{PM}_7$ 、 $\text{PM}_{10}$  和 TSP (总悬浮颗粒物), PM 值浓度模式量程为  $0 \sim 1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 分辨率为  $0.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 取样时间为 1 min, 数据输出采用配套软件远程控制保存数据。每天 8:00—18:00 整点测定各监测点的  $\text{PM}_1$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_4$ 、 $\text{PM}_7$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、TSP 浓度, 测定时将仪器平放在高度 1.3~1.5 m 的三脚架上, 每个监测点在东西南北 4 个方向各测量 1 次。

### 2.3 评价方法

根据《环境空气质量标准 (GB3095-2012)》<sup>[11]</sup> 中 TSP、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度等级来评价空气质量(表 1)。鉴于我国还未将颗粒物小时平均质量浓度值纳入空气环境质量标准, 故采用日平均颗粒物质量浓度进行评价。

## 3 结果与分析

### 3.1 空气颗粒物时空动态变化

#### 3.1.1 不同监测点空气颗粒物时间动态变化

由监测结果(表 2)可知, 石门国家森林公园 TSP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度分别为  $76\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $72\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $44\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 小粒径占比  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  为 94.73%,  $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$  为 57.89%。空气颗粒物每项指标均为旱季 > 雨季, 其存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。旱季小粒径占比  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  为 96.20%,  $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$  为 68.35%, 雨季小粒径占比  $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$  为 93.15%,  $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$  为 47.94%, 雨季小粒径占比远小于旱季, 说明降雨不仅能降低颗粒物浓度, 更重要的是还能降低可吸入颗粒物的占比, 从而起到保护人体健康、净化大气环境的作用。主要原因是雨季空气相对湿度较高, 其与空气污染物呈负相关: 空气中



图 1 石门国家森林公园康养基地区位图



图 2 空气颗粒物监测样点区位图

表 1 空气颗粒物质量浓度评价标准

指标	年均值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	日均值 / 小时均值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	评价等级	清洁度
TSP	$\leq 80$	$\leq 120$	I	清洁
	80~200	120~300	II	中等
	$> 200$	$> 300$	III	污染
PM <sub>10</sub>	$\leq 40$	$\leq 50$	I	清洁
	40~70	50~150	II	中等
	$> 70$	$> 150$	III	污染
PM <sub>2.5</sub>	$\leq 15$	$\leq 35$	I	清洁
	15~30	35~75	II	中等
	$> 30$	$> 75$	III	污染

表 2 石门国家森林公园空气颗粒物

空气颗粒物	旱季 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	雨季 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
PM <sub>2.5</sub>	54 ± 12a	35 ± 6b
PM <sub>10</sub>	76 ± 17a	68 ± 11b
TSP	79 ± 9a	73 ± 14b

注：不同字母表示差异显著 (  $P < 0.05$  )。

水分含量较多时，空气污染物扩散速度减弱，并溶于水中，在重力作用下沉降，特别是在降雨时，空气中的污染物、植物叶片滞纳污染物都随雨水落入土壤中，净化空气；降雨后温度升高，空气负离子含量增多，与污染物结合后沉降<sup>[12]</sup>。

在旱季，各监测点日变化趋势存在明显差异，同一监测点的 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 日变化规律基本一致，且各时间点 TSP 和 PM<sub>10</sub> 浓度最为接近 (图 3~6)。1) 森林浴场的 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—11:00 呈下降趋势，最大值在 8:00 为 77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，11:00 出现最小值为 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，11:00—13:00 浓度均增高，14:00—15:00 浓度急剧增高，15:00—16:00 浓度急剧下降，16:00 之后呈上升趋势，日较差为 31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2) 湖心岛 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—11:00 开始下降，11:00—15:00 平缓波动，15:00—16:00 浓度均急剧下降，16:00 出现最小值为 69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、67

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，16:00—18:00 浓度急剧增加，最大值在 18:00 为 103  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、101  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日较差为 34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3) 竹林 TSP、PM<sub>10</sub> 浓度均在 8:00—10:00 开始下降，10:00—12:00 急剧上升，12:00 出现最大值为 169  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、116  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，12:00—15:00 下降趋势，15:00 出现最小值为 66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，之后处于上升趋势；PM<sub>2.5</sub> 浓度 8:00—16:00 平缓波动，最小值在 12:00 为 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最大值在 13:00 为 63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，之后处于上升趋势。竹林 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度日较差为 103  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。4) 花海 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度 8:00—10:00 开始下降，10:00 出现最小值为 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，10:00—16:00 波动增长，16:00 之后急剧上升，最大值在 18:00 为 114  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、113  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日较差为 54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

在雨季，由监测结果 (图 7~10) 可知：1) 森林浴场 TSP、

PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—9:00、11:00—13:00、14:00—16:00 呈下降趋势，16:00 出现最小值为 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其余监测时段浓度均增高，14:00 出现最大值为 57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日较差为 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；2) 湖心岛 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—9:00、11:00—13:00、14:00—16:00 呈下降趋势，16:00 出现最小值为 42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其余监测时段浓度均增高，14:00 出现最大值为 77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日较差为 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；3) 竹林 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—13:00、14:00—15:00、16:00—18:00 呈上升趋势，13:00 出现最大值为 112  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、108  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，13:00—14:00、15:00—16:00 浓度均减小，8:00 出现最小值为 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日较差为 83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；4) 花海 TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 浓度均在 8:00—13:00 趋势平缓，最小值在 9:00 为 59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，13:00—15:00 浓度急剧增加，15:00 出现最大值为 342  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、325  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、142  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，15:00—16:00 浓度急剧下降，之后平缓增加，日较差为 283  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、269  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

### 3.1.2 不同监测点空气颗粒物空间动态变化

由统计结果 (图 11~13) 可知，石门国家森林公园 TSP、PM<sub>10</sub> 平均浓度在各监测点排序为花海 > 竹林 > 湖心岛 > 森林浴场，PM<sub>2.5</sub> 平均浓度排序为花海 > 湖心岛 > 竹林 > 森林浴场。TSP 浓度在旱季和雨季均表现为花海 > 竹林 > 湖心岛 > 森林浴场，且存在极显著差异 (  $P < 0.01$  )。雨季花海 TSP 浓度是森林浴场的 2.86 倍、湖心岛的 1.92 倍、竹林的 1.71 倍，旱季花海 TSP 浓度是森林浴场的 1.93 倍、湖心岛的 1.36 倍、竹林的 1.20 倍。PM<sub>10</sub> 浓度在雨季表现为

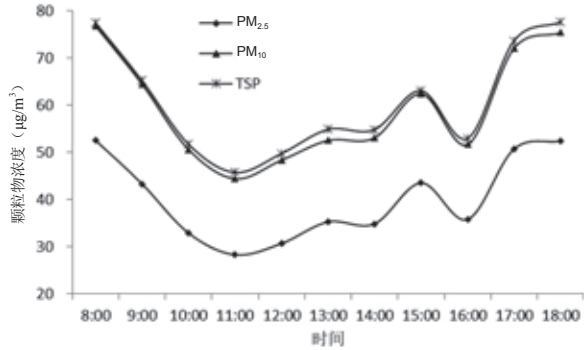


图3 旱季森林浴场空气颗粒物日变化

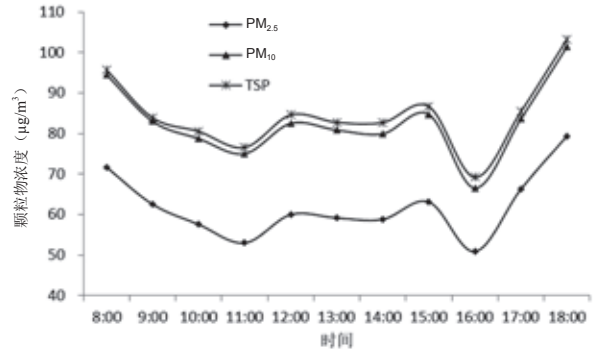


图4 旱季湖心岛空气颗粒物日变化

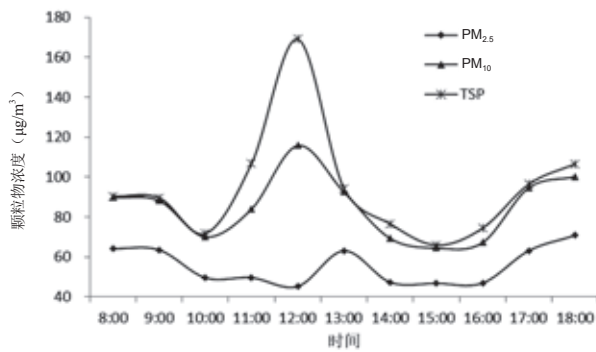


图5 旱季竹林空气颗粒物日变化

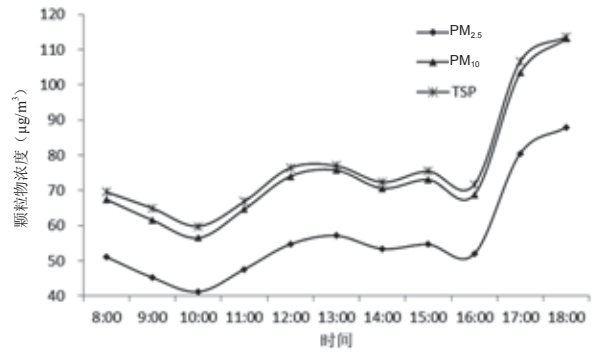


图6 旱季花海空气颗粒物日变化

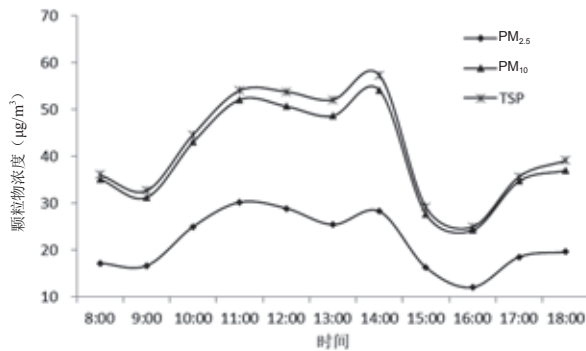


图7 雨季森林浴场空气颗粒物日变化

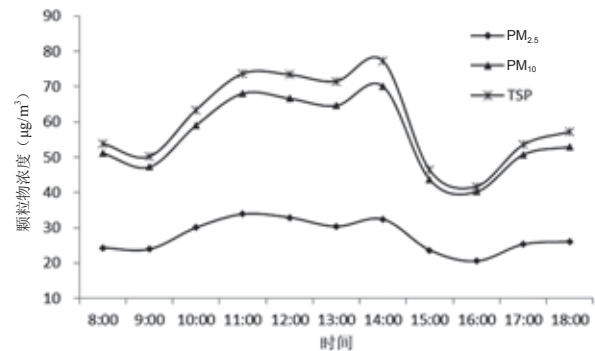


图8 雨季湖心岛空气颗粒物日变化

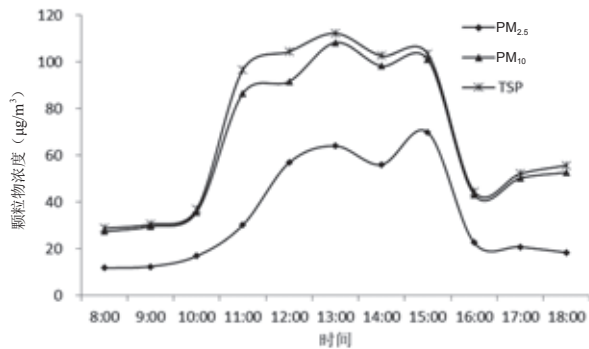


图9 雨季竹林空气颗粒物日变化

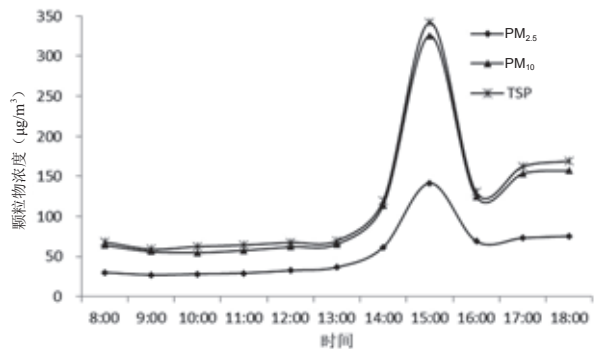


图10 雨季花海空气颗粒物日变化



花海>竹林>湖心岛>森林浴场, 旱季竹林>湖心岛>花海>森林浴场, 且存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。雨季花海  $PM_{10}$  浓度是森林浴场的 2.82 倍、湖心岛的 2.01 倍、竹林的 1.71 倍, 旱季竹林  $PM_{10}$  浓度是森林浴场的 1.45 倍、花海 1.13 倍、湖心岛的 1.03 倍。 $PM_{2.5}$  浓度在雨季表现为花海>竹林>湖心岛>森林浴场, 旱季湖心岛>花海>竹林>森林浴场, 且存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。雨季花海  $PM_{2.5}$  浓度是森林浴场的 2.54 倍、湖心岛的 1.99 倍、竹林的 1.59 倍, 旱季湖心岛  $PM_{2.5}$  浓度是森林浴场的 1.55 倍、竹林的 1.12 倍、花海的 1.09 倍。

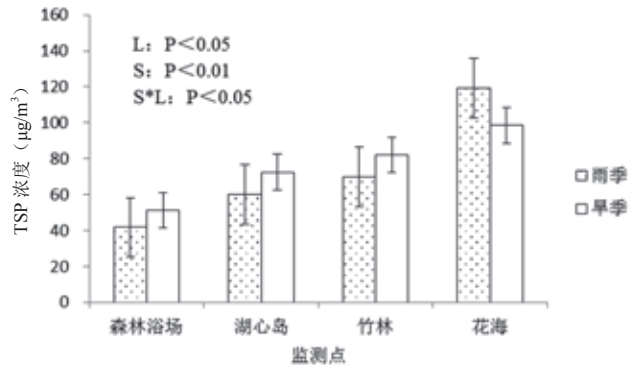
综上所述, 森林浴场在旱季和雨季发挥净化颗粒物的作用最大。其主要原因是浴场“乔-灌-草”结构完善, 在颗粒物进入后每一层植物的叶、茎、枝都起到阻隔、滞纳、吸收的作用, 降低了颗粒物含量。而花海的植被“破碎化”严重, 裸露的土地面积大, 对颗粒物的削弱作用微弱, 且花粉进入空气后会二次增加 TSP; 再者花海的游客量大, 活动频繁, 易形成粉尘飞扬现象, 因此花海的空气颗粒物含量较高。

### 3.2 石门国家森林公园空气保健功能评估

根据监测到的不同粒径空气颗粒物日平均水平(表 3)可知, 石门国家森林公园各监测点的空气质量等级均在“II”及其以上, 未达到污染水平, 且 4 个监测点的 TSP 浓度全部达到“I”, 说明石门国家森林公园规划的康养基地在大气颗粒物指标上完全符合国家标准, 且空气颗粒物指标对其森林康养、森林旅游等活动的时间和地点均无限制。

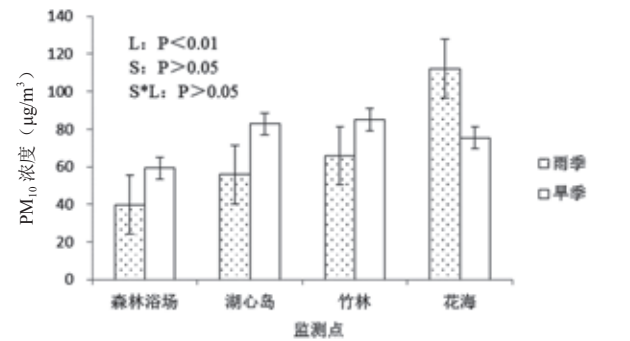
## 4 小结

石门国家森林公园 TSP、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  浓度在旱季和雨季表现出较大差异, 影响其浓度原因有两方面, 一是旱季和雨季气象因子不同, 比如降雨、风速等; 二是游客



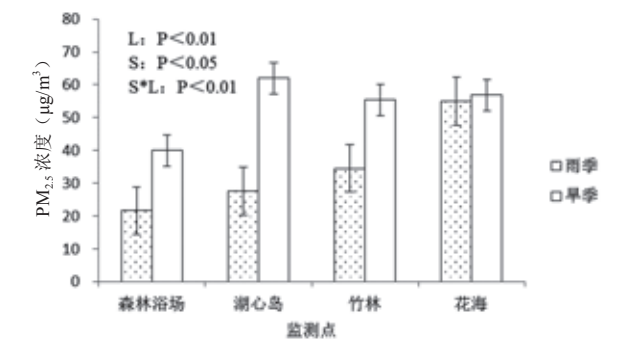
注: S 代表不同监测点; L 代表试验区组(不同地点)。

图 11 不同监测点 TSP 浓度



注: S 代表不同监测点; L 代表试验区组(不同地点)。

图 12 不同监测点  $PM_{10}$  浓度



注: S 代表不同监测点; L 代表试验区组(不同地点)。

图 13 不同监测点  $PM_{2.5}$  浓度

表 3 石门国家森林公园不同粒径空气颗粒物日平均水平评价

监测点	典型天气	$PM_{2.5}$ 日均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / 空气 质量等级	$PM_{10}$ 日均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / 空气 质量等级	TSP 日均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / 空气 质量等级
森林浴场	旱季	40.00/ II	59.19/ II	60.57/ I
	雨季	21.65/ I	39.83/ I	41.72/ I
湖心岛	旱季	62.02/ II	82.81/ II	84.66/ I
	雨季	27.61/ I	55.83/ II	60.20/ I
竹林	旱季	55.42/ II	85.03/ II	94.65/ I
	雨季	34.50/ I	65.77/ II	69.72/ I
花海	旱季	56.83/ II	75.34/ II	77.64/ I
	雨季	54.96/ II	112.23/ II	119.42/ I

人为影响,比如游人的活动使土壤破碎,在风的作用下形成颗粒物。石门国家森林公园监测点不同粒径颗粒物等级均在“Ⅱ”及其以上,尚未达到污染水平,其中森林浴场的平均TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>都达到“Ⅰ”,湖心岛的平均TSP和PM<sub>2.5</sub>也达到“Ⅰ”。因此,从空气颗粒物对身体影响考虑,石门国家森林公园的建议最佳康养时间为6—7月,地点选择以森林浴场为主。

根据监测结果,建议石门国家森林公园在后期建设上可以加强对森林浴场和湖心岛的开发利用,尤其是在森林浴场进行森林康养基地建设,康养理疗效果更佳。

注:图1~2底图来自Google地图(<http://www.ugucci.com>),其余图片为作者自绘。

#### 参考文献:

- [1] 索丹凤,曾三武.空气细颗粒物PM<sub>2.5</sub>对人体各系统危害的研究[J].医学信息,2019,32(18):32-34.
- [2] 咸平,闫梦璠,李耀妍,等.PM<sub>10</sub>长期暴露与中国北方城市居民慢性支气管炎发病风险的回顾性队列研究[J].环境与职业医学,2020,37(2):95-102.
- [3] 于浩,冯利红,侯常春,等.中国空气颗粒物污染改善背景下的人群健康收益研究进展[J].公共卫生与预防医学,2018,29(5):81-84.
- [4] 刘杰.北京大气污染物时空变化规律及评价预测模型研究[D].北京:北京科技大学,2015.
- [5] 广州市生态环境局.广州市生态环境局环境公报[EB/OL].<http://sthjj.gz.gov.cn/zwgk/hjgb/>.
- [6] LEUNG Y F, MARION J L, FARRELL T A. The Role of Recreation Ecology in Sustainable Tourism and Ecotourism[M]//MCCOOL S F, MODISEY R N. Tourism, Recreation and Sustainability: Linking Culture and the Environment. Wallingford: CABI Publishing, 2001.
- [7] 陈泽良.厦门城郊森林公园不同林分风景游憩林健康评价及保健功能研究[D].福州:福建农林大学,2015.
- [8] 包红光.城市公园绿地内空气颗粒物浓度时空变化规律——以海淀公园为例[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
- [9] 高瑶瑶,熊咏梅,潘勇军.石门国家森林公园负离子浓度动态变化及评价[J].广东园林,2019,41(5):37-41.
- [10] 侯碧清,赖树雄.石门国家级森林公园植物区系研究[J].中国城市林业,2015,13(6):32-35.
- [11] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.环境空气质量标准:GB 3095-2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [12] 高瑶瑶.江西大岗山林区小气候和空气质量变化特征及影响因子研究[D].南昌:江西农业大学,2019.

#### 作者简介:

高瑶瑶/1993年生/女/陕西咸阳市/硕士/广州市林业和园林科学研究院、广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/专业方向为森林生态学、水土保持与荒漠化防治

(\*通信作者)潘勇军/1971年生/男/湖南张家界人/博士/广州市林业和园林科学研究院、广东广州城市生态系统国家定位观测研究站(广州510405)/高级工程师/主要从事城市生态系统观测研究/E-mail:270639784@qq.com

张华/1979年生/男/山东莱芜人/硕士/广州市石门国家森林公园(广州510405)/高级工程师/主要从事园林工程设计、施工、管护、森林保护开发