

大气悬浮颗粒物污染对厦门市行道树芒果 光合生理指标的影响^{*}

于裕贤^{1,2} 陈进生¹ 任引¹ 李方一^{1,2} 崔胜辉^{1**}

(¹中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 福建厦门 361021; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 随着城市的迅速发展,大气中总悬浮颗粒物(TSP)污染日益严重.城市植被在吸附和净化TSP的同时,其正常生理生态过程也受到了深刻的影响.2009年4、5月,对厦门市汀溪清洁对照区、厦大文教区、仙岳商贸区和海沧工业区大气TSP浓度及研究区内行道树芒果(*Mangifera indica*)的光合生理参数进行监测.结果表明:汀溪、厦大、仙岳和海沧的日均大气TSP浓度分别为0.061、0.113、0.120和0.205 mg·m⁻³;不同功能区行道树芒果受到的胁迫作用为工业区>商贸区>文教区>清洁对照区.大气TSP污染导致芒果叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著下降,相关系数均在0.98以上,同时也是胞间CO₂浓度变化的重要因素;高浓度的TSP污染通过限制气孔导致芒果的光合强度显著降低.

关键词 城市行道树 大气TSP污染 光合生理参数 气孔限制 芒果

文章编号 1001-9332(2010)05-1231-07 **中图分类号** Q4 Q45 X22 **文献标识码** A

Impact of atmospheric total suspended particulate pollution on photosynthetic parameters of street mango trees in Xiamen City YU Yu-xian², CHEN Jin-sheng¹, REN Yin¹, LI Fang-yi², CUI Sheng-hui¹ (¹Key Laboratory of Urban Environment and Health Institute of Urban Environment Chinese Academy of Sciences Xiamen 361021, Fujian, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China). *Chin J Appl Ecol*, 2010 21(5): 1231-1237.

Abstract With the development of urbanization, total suspended particulate (TSP) pollution is getting serious and the normal physiological processes of urban vegetation are profoundly affected while adsorbing and purifying the particulates. In this study, four areas were selected, i.e., Tingxi reservoir (clean control area), Xiamen University (cultural and educational area), Xianyue (business area), and Haicang (industrial area), with their atmospheric TSP concentrations and the photosynthetic parameters of street Mango (*Mangifera indica*) trees monitored in April and May 2009. The daily average concentration of TSP in Tingxi, Xiamen University, Xianyue, and Haicang was 0.061, 0.113, 0.120 and 0.205 mg·m⁻³, respectively, and the impact of TSP stress on *M. indica* was in the sequence of Haicang > Xianyue > Xiamen University > Tingxi. TSP pollution negatively affected the net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of *M. indica*, and induced intercellular CO₂ concentration changed significantly. High TSP concentration could cause the decline of net photosynthetic rate via stomatal limitation.

Key words urban street tree, air TSP pollution, photosynthetic parameters, stomatal limitation, Mango (*Mangifera indica*).

在城市化过程中,城市工业、交通和建筑等向城市大气环境中排放出大量的颗粒污染物.由于建筑物高耸林立,下垫面不规则等因素,城市上空的空气流通不畅,加上城市热岛效应,使大气颗粒物不能很

好地通过大气环流扩散,而长时间滞留在城市的上空,导致城市大气污染日益加剧^[1].城市行道树在净化城市大气环境、减缓颗粒物污染方面发挥着巨大的作用,同时也受到颗粒污染物的胁迫影响.

目前,国内外对城市植被的滞尘机制和滞尘能力等做了大量的研究^[2],但对大气颗粒物污染环境、下城市绿化树种的各项光合生理指标(如净光合速

^{*}中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-422)和科技部国际科技合作项目(2009DFB0120)资助.

^{**}通讯作者, E-mail: shcu@iue.ac.cn

2009-10-26 收稿, 2010-03-01 接受.

率、气孔导度、蒸腾速率等)变化的研究还较少^[3]。研究表明,水泥灰、煤灰、石灰石粉尘等工业颗粒物沉降于植物叶片表面后,会降低植物的各项生长指标^[4],叶片气孔导度及叶绿素含量^[5-7]、光反应II的量子产率及电子传输速率^[8-9]下降,叶温升高,植物的光合、呼吸、蒸腾速率等均受到影响^[7,10]。而城市大气中总悬浮颗粒物(total suspended particles, TSP)的理化组成更加复杂,开展TSP污染对城市中绿化树种的影响研究具有重要的现实意义,但目前这类研究还非常少见。为此,本文以厦门市主要行道树——芒果(*Mangifera indica*)作为研究对象,通过监测4个研究区的大气TSP污染现状及芒果树的多项光合生理指标的变化,研究大气TSP污染对厦门市行道树芒果的光合生理胁迫作用,旨在为城市绿化树种的选择提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

厦门市地处福建省东南部,地理坐标在 $117^{\circ}52'53.8''$ — $118^{\circ}26'1.2''$ E $24^{\circ}23'12.7''$ — $24^{\circ}54'29.3''$ N之间。该地属亚热带气候,温和多雨,年均气温在 21°C 左右,年平均降雨量约1200 mm,降雨多集中于每年的5—8月,风力一般3~4级,常向主导风力为东北风。受太平洋温差气流的影响,每年7—9月有4~5次台风影响该市。厦门市的行道树种主要有芒果、凤凰木(*Delonix regia*)、洋紫荆(*Bauhinia blakeana*)、高山榕(*Ficus altissima*)等60多种,其中芒果的分布范围广,常用系数高达26.13%,发挥着遮阳、滞尘等生态功能^[11]。该市土壤属于典型的地带性红壤,保水、保肥性能较差,自然肥力较低^[12]。

近年来,厦门市大气颗粒物污染日趋严重,据厦门市环境质量状况公报监测数据显示,大气总悬浮颗粒物(TSP)日平均浓度已多年超过国家一级标准 $0.08\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;而可吸入颗粒物 PM_{10} 自1999年超过国家一级标准($0.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)之后,基本呈现逐年升高的趋势^[13](图1),可吸入颗粒物 PM_{10} 已成为影响厦门市空气质量的首要污染物。

本研究在厦门市选取了4个典型的功能区:海沧工业区(位于海沧鹭联宾馆及附近海发路; $24^{\circ}29'49''$ N $118^{\circ}02'03''$ E)、湖里仙岳商贸区(位于仙岳小区及仙岳路; $24^{\circ}29'35''$ N $118^{\circ}06'44''$ E)、厦大文教区(厦大校园; $24^{\circ}26'20''$ N $118^{\circ}05'50''$ E)以及同安汀溪清洁对照区(汀溪水库; $24^{\circ}47'43''$ N $118^{\circ}08'32''$ E)(图2)。各采样点和试验区的选择遵

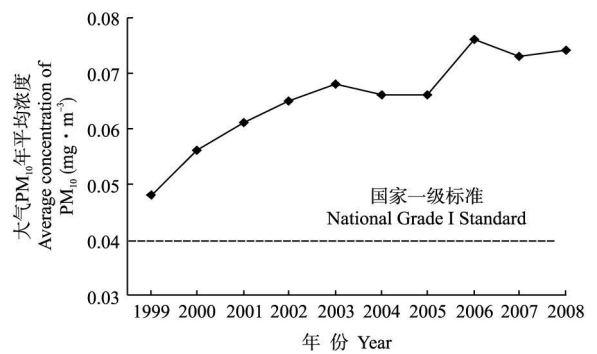


图1 厦门市大气 PM_{10} 年平均浓度变化

Fig 1 Annual variation of mean concentration of PM_{10} in Xiamen City

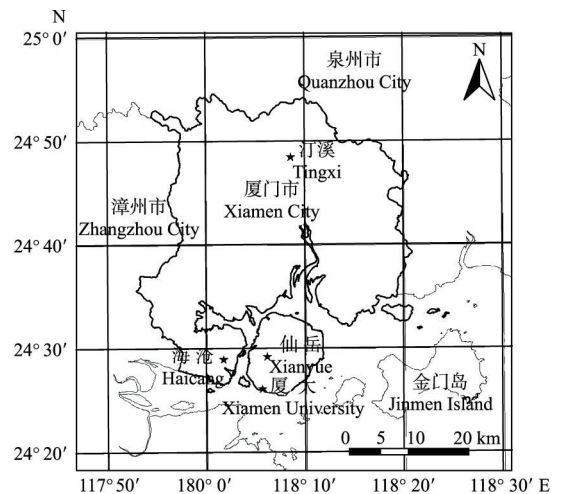


图2 研究区分布

Fig 2 Distribution of study areas

循如下原则:1)普遍性与典型性;2)具备大气TSP采样条件;3)行道树芒果与大气采样点距离在1 km以内;4)无明显的点状污染源。本研究中各功能区行道树芒果所处的土壤环境基本一致。

1.2 供试样株选择

调查发现,芒果作为厦门市的主要行道树之一,在厦大校园、仙岳商贸区和海沧工业区3个研究区的主要干道两侧均有种植,且多为成龄、长势基本一致的植株。现场测定时所选择植株的胸径在18~22 cm,树高4~6 m,冠幅3~5 m;汀溪清洁对照区由于保护良好,区内多为原生灌木和高大乔木,芒果植株稀少,研究时选定的对照样本植株树龄相对较大,胸径40~50 cm,树高6~7 m,冠幅5~6 m,但叶片表面有不同程度的黑色颗粒状虫卵出现。

1.3 研究方法

1.3.1 大气TSP浓度测定 在2009年4月17日至5月1日的无雨天,采用TH-1000C型大容量TSP采样器(武汉市天虹仪表有限责任公司)对4个研究

表 1 各研究区大气 TSP 采样时的气象条件

Table 1 Weather conditions in four study areas when sampling

研究区 Study area	平均气温 Average temperature (°C)	平均湿度 Average humidity (%)	海平面气压 Sea level air pressure (hPa)	风速 Wind speed (km·h ⁻¹)	能见度 Visibility (km)
汀溪 Tingxi	21.5	57	1013.34	13.5	14.1
厦大 Xiamen University	25.0	63	1005.18	10.0	10.5
仙岳 Xianyue	18.5	53	1011.85	13.0	11.5
海沧 Haicang	19.5	66	1015.00	15.0	8.4

区进行大气 TSP 样品采集, 采样高度距屋面 100 cm 左右, 采样流量为 1000 L·min⁻¹, 24 h 为 1 个样品, 每个试验区采集 2 个样品. 采样前将玻璃纤维滤膜 (Whatman 20 3 cm×25.4 cm) 用铝箔纸包裹成信封状, 置于马弗炉中 450 °C 下焙烧 5 h 之后置于干燥器中采样后的滤膜同样进行干燥处理, 以降低测定误差. 同时记录采样时的气象条件: 气温、大气压、风向和风速等. 每个试验区两次采样的天气状况基本一致 (表 1). 采用国家标准 GB/T15432—1995 测定大气 TSP 浓度, 每个研究区 2 次采样测得的 TSP 浓度平均值作为 4—5 月大气 TSP 浓度日均值.

根据测量采样前、后滤膜的质量差和气体体积, 计算出大气 TSP 浓度, 最低检出限为 0.001 mg·m⁻³. 计算公式如下:

$$C_{TSP} = M/Q_0 \cdot t$$

式中: C_{TSP} 为标准状态下空气 TSP 浓度 (mg·m⁻³); M 为滤膜上总悬浮颗粒物的质量 (mg); Q_0 为标准状态下的采样流量 (m³·min⁻¹); t 为采样时间 (min).

1.3.2 芒果光合生理参数的测定 在 2009 年 5 月 7 日至 5 月 15 日连续晴朗天气的 9:00—11:00 采用 Li6400XT 便携式光合作用测定系统 (美国 LI-COR 公司) 对芒果的光合生理参数进行原位测定. 每一研究区内选择成龄芒果植株至少 3 株, 随机选取向阳面中上部生长方向及长势基本一致的全展成熟叶片 (每株取 3~5 片), 测定叶片的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 等指标; 同时记录光合作用有效辐射 (PAR)、空气温度 (T_a)、叶片与空气间的水汽压亏损 (VPD)、大气 CO₂ 浓度 (C_a)、相对空气湿度 (RH) 等环境因子.

1.4 数据处理

采用 Excel2003 和 SPSS16.0 统计软件对所有数据进行整理和分析. 通过一元线性回归和 Pearson 相关分析考察不同参数间的相关关系; 采用两独立样本 t 检验比较不同研究区各光合参数间的差异显

著性; 采用主成分分析不同环境因子对芒果光合参数变化的影响.

2 结果与分析

2.1 厦门市大气总悬浮颗粒物污染现状

由图 3 可以看出, 不同研究区大气 TSP 浓度为汀溪 < 厦大 < 仙岳 < 海沧. 其中, 汀溪为厦门市重要的水源地保护区, 植被茂盛, 空气清新, 人为活动较少, 大气 TSP 浓度最低, 仅 0.061 mg·m⁻³, 达到国家一级标准 (大气 TSP 年均浓度 ≤ 0.08 mg·m⁻³); 厦大文教中心区, 校区绿化较好, 且依山傍水, 环境优雅, 但较汀溪人为活动频繁和强烈, 大气环境也相对稍差, TSP 浓度在 0.113 mg·m⁻³, 略超出国家一级标准; 仙岳商贸区和海沧工业区, 人为活动强烈, 且研究区周围交通流量大, 大气环境相对较差, 尤其是海沧工业区大气 TSP 浓度高达 0.205 mg·m⁻³, 已超出国家二级标准 (大气 TSP 年均浓度 ≤ 0.2 mg·m⁻³).

2.2 大气 TSP 污染对不同功能区芒果光合生理参数的影响

芒果作为厦门市一种主要的行道树, 长期受到大气颗粒物的污染. 由图 4 可以看出, 汀溪清洁区内

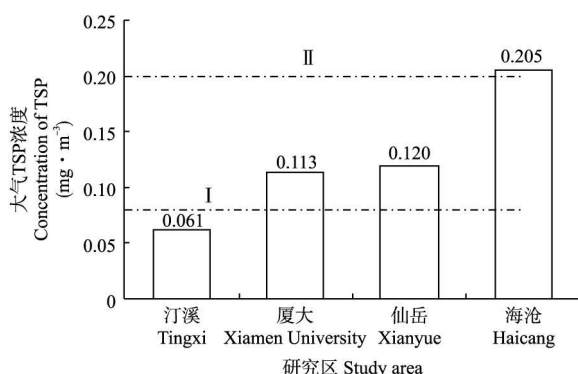


图 3 厦门市 4 个研究区 2009 年 4—5 月大气 TSP 浓度
Fig. 3 Atmospheric TSP concentration in four study areas in April and May 2009 Xiamen City

I: 国家一级标准 National Grade I Standard II: 国家二级标准 National Grade II Standard

表 2 各研究区实验现场微环境因子状况

Tab 2 Micro environmental factors at the four study sites (mean±SD)

试验地点 Experimental site	空气温度 T_a (°C)	大气 CO ₂ 浓度 C_a (nmol CO ₂ · mol ⁻¹)	空气相对湿度 RH (%)	光合有效辐射 PAR (μ mol · m ⁻² · s ⁻¹)	水汽压亏缺 VPD (kPa)
汀溪 Tingxi	35.39±0.14	394.64±1.08	28.79±0.38	1401.77±50.37	3.78±0.25
厦大 Xiamen University	29.87±0.24	393.97±1.43	22.10±0.45	1437.70±84.53	3.10±0.11
仙岳 Xianyue	34.65±0.25	414.56±11.95	39.88±0.68	1486.86±62.86	3.29±0.14
海沧 Haicang	30.07±0.37	400.91±2.15	30.78±0.76	1198.27±36.53	3.08±0.11

汀溪、仙岳、海沧 n=10 厦大 n=11 Tingxi Xianyue Haicang n=10 Xiamen University n=11

芒果树龄较大,且有虫害发生,但其生长状况良好。随着大气 TSP浓度的增加,4个研究区芒果的 P_n 、 G_s 和 T_r 均呈下降趋势;而 C_i 在汀溪、厦大和仙岳区呈微弱的上升趋势,海沧工业区则明显下降。大气 TSP 污染严重的海沧工业区各项光合生理参数均较汀溪清洁区、厦大文教区和仙岳商贸区呈显著或极显著下降。

4个研究区芒果各光合参数与大气 TSP浓度值的线性拟合结果显示,4个研究区芒果的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均与大气 TSP浓度呈极显著的负相关关系,决定系数 (R^2)分别达到 0.9777、0.9708和 0.9973;而胞间 CO₂浓度与大气 TSP浓度间的相关性则相对较差, R^2 仅为 0.6131。

2.3 芒果光合生理参数与微环境因子间的相关分析

光合作用是植物正常生长发育的基础,CO₂浓度、光照强度、温度等外界因素均会对植物的光合强度产生影响^[14]。同时,植物气孔又是一个对内部和外部因子敏感性极高、具有调节作用的阀门^[15]。本研究采用开放式试验,在尽量选择外界环境基本一致的情况下,各试验区的微环境因子间仍存在差异(表 2)。

空气温度、相对湿度、有效光辐射等因子主要由现场试验时的天气状况决定;由于实验现场位于交通干道两侧,大气 CO₂浓度除受自然环境约束外,还受到交通车辆排放的影响。由表 2可以看出,4个研究区中,仙岳商贸区的道路交通繁忙,车流量大,大气 CO₂浓度最高,明显受车流量变化的影响;海沧工业区在工业和交通的双重作用下,大气 CO₂浓度也相对较高。将 4个研究区芒果光合生理参数和对应的环境因子进行 Pearson相关分析,结果见表 3。

由表 3可以看出,芒果的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率均与大气 TSP浓度存在极显著的负相关关系,胞间 CO₂浓度与其相关程度相对稍弱。与此同时,光合有效辐射与气孔导度、胞间 CO₂浓度及蒸腾速率均有较显著的相关性;空气温度与气孔导度及蒸腾速率呈一定的正相关;而大气 CO₂浓度、空气相对湿度及气温下蒸气压亏缺则与芒果各项光合生理参数间未表现出显著的相关关系。

考虑到各光合参数的变化趋势存在一致性且相互关联,将其看作反映芒果生长状况的一个综合变量。对上述 6类环境因子进行主成分分析,判断各因子对芒果光合作用变化的贡献程度(表 4 表 5)。

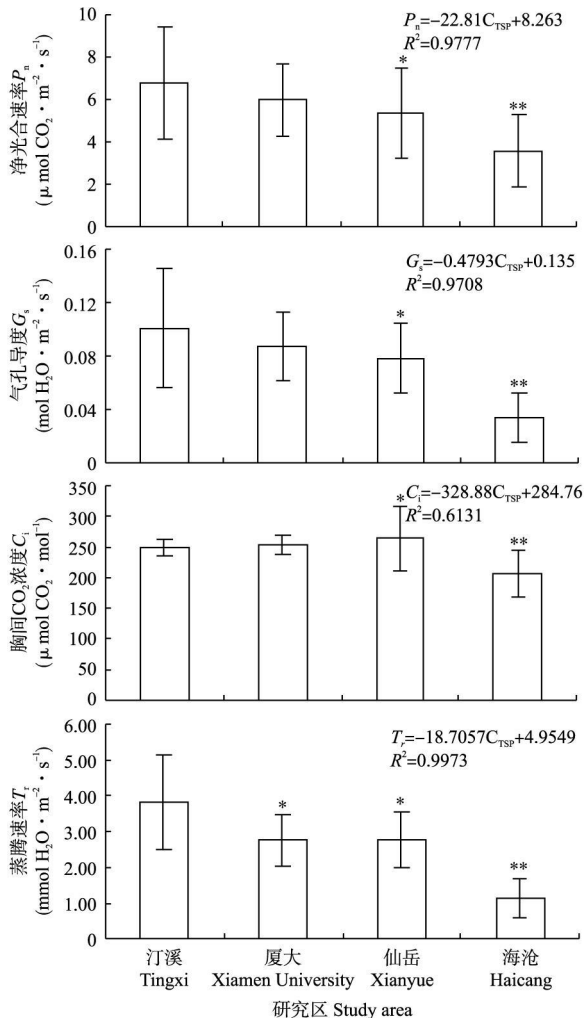


图 4 不同研究区芒果的光合生理参数

Fig 4 Photosynthetic Parameters in four study areas

汀溪、仙岳、海沧 Tingxi/Xianyue/Haicang n=10 厦大 Xiamen University n=11 * P<0.05 ** P<0.01

表 3 芒果光合生理参数与环境因子间的 Pearson 相关系数

Tab 3 Pearson correlations of Photosynthetic Parameters in leaves of Mango trees with micro-environmental factors (n=41)

光合生理参数 Photosynthetic parameter	环境因子 Environment factor					
	大气 TSP 浓度 C_{TSP}	空气温度 T_a	大气 CO_2 浓度 C_a	光合有效辐射 PAR	空气相对湿度 RH	水汽压亏缺 VPD
净光合速率 P_n	-0.507**	0.283	-0.032	0.258	-0.143	-0.019
气孔导度 G_s	-0.643**	0.378*	-0.211	0.421**	-0.150	0.045
胞间 CO_2 浓度 C_i	-0.437**	0.298	-0.191	0.485**	0.059	0.044
蒸腾速率 T_r	-0.750**	0.542**	-0.214	0.467**	-0.085	0.251

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

表 4 芒果光合作用影响因子主成分分析

Tab 4 Eigenvalues of components for Photosynthesis of Mango in Xiamen

主成分 Principle component	特征值 Eigenvalues	贡献率 Contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	2.855	47.58	47.58
2	1.964	32.74	80.31
3	0.781	13.02	93.33
4	0.228	3.81	97.14
5	0.163	2.72	99.85
6	0.009	0.15	100.00

1) 第一特征向量 First eigenvector; 2) 第二特征向量 Second eigenvector; 3) 第三特征向量 Third eigenvector; 依次类推 And so on

表 5 芒果光合作用影响因子成分矩阵

Tab 5 Component matrix of affecting factors on Photosynthesis of Mango tree

变量 Variable	特征向量 Eigenvector	
	1	2
大气 TSP 浓度 C_{TSP}	-0.83	0.47
空气温度 T_a	0.93	0.19
大气 CO_2 浓度 C_a	0.18	0.91
光合有效辐射 PAR	0.68	-0.14
空气相对湿度 RH	0.36	0.89
水汽压亏缺 VPD	0.80	-0.26

由表 4 可以看出, 前 2 个主成分的特征值均大于 1, 累积贡献率达 80.31%。这 2 个主成分基本可以反映原来 6 个环境变量的大部分信息。

旋转后因子成分矩阵 (表 5) 显示, 大气 TSP 浓度、空气温度和气温下蒸汽压亏缺在第一主成分上有较高载荷, 大气 TSP 浓度和空气相对湿度在第二主成分上有较高载荷, 说明大气 TSP 对芒果光合参数的变化具有一定的影响, 而其他环境因子也起到一定的作用。

3 讨论

植物在净化颗粒物污染的同时, 其生理生态过程也会受到深刻的影响。研究表明, 空气中的 TSP 沉降或粘附到植物叶片表面后, 会降低气孔传导性,

使叶片出现坏死斑点, 叶绿素含量和光合作用强度降低^[16-19]。温达志等^[20-21]研究认为, 生长在工业区和交通繁忙区的多种园林植物和木本植物的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率均较清洁对照区有一定程度的下降。本研究中, 与汀溪清洁对照区相比, 厦大文教区、仙岳商贸区和海沧工业区行道树芒果的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生长指标也均表现出一定程度的下降, 且下降幅度为工业区 > 商贸区 > 文教区。颗粒污染物作为厦门市大气污染的首要因子已对行道树芒果产生了较为明显的胁迫效应, 工业区尤为突出。

气孔导度是反映植物进行光合、呼吸、蒸腾作用时气体 (CO_2 和水汽等) 交换能力的一个极其重要的参数^[22]。本研究中, 随着大气 TSP 污染的加重, 4 个研究区芒果叶片的气孔导度、光合速率和蒸腾速率都呈下降趋势, 且均与大气 TSP 浓度间表现出极显著的负相关关系, 主成分分析结果也显示, 大气 TSP 污染在芒果光合参数变化中发挥重要作用。

植物叶片胞间 CO_2 浓度常常会受叶片周围大气 CO_2 浓度、气孔导度和叶肉细胞的光合活性 3 个因素的影响。本研究结果显示, 芒果胞间 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度无显著相关关系; 气孔导度对胞间 CO_2 浓度有促进作用, 但影响极弱; 而有效光辐射则与其呈极显著的正相关关系。有效光辐射主要受到自然光强的影响, 但大气颗粒物也会在一定程度上阻挡太阳光射到植物叶面, 从而导致有效光辐射的下降。陈华蕊^[23]认为, 芒果的光饱和点在 $1069 \sim 1318 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 本研究中汀溪、厦大和仙岳 3 个试验区的有效光辐射均超过 $1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可能在一定程度上抑制了芒果叶肉细胞光合活性, 从而导致叶片胞间 CO_2 浓度上升。另外, 大气 TSP 浓度与胞间 CO_2 浓度间呈显著负相关, 表明大气 TSP 污染对胞间 CO_2 浓度的升高起到了一定的抑制作用。由此可见, 芒果胞间 CO_2 浓度的变化是大气 TSP 污染和自然光合辐射共同作用的结果。

叶片胞间 CO_2 浓度降低是判定光合作用受气孔限制的不可缺少的条件, 而其增加则是光合作用非气孔限制的最可靠的判断^[24]. 汀溪、厦大和仙岳3个研究区芒果的胞间 CO_2 浓度随大气 TSP 污染的增加呈现出微弱的上升趋势, 芒果净光合速率的降低可能并非气孔受限制的直接结果; 而对于大气 TSP 浓度高达 $0.205 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的海沧工业区来说, 其芒果的 C_i 值却明显低于其他各区 C_i 的测定值, 各项气体交换参数均为4个试验区最低, 气孔限制可能是芒果净光合速率降低的主要因素. 虽然 Pearson 相关分析的结果显示, 芒果净光合速率仅与大气 TSP 浓度呈显著的负相关, 但各研究区芒果净光合速率的差异是多种环境因子共同作用的结果, 而大气 TSP 污染是尤为重要的因素之一.

本研究通过野外开放式无控制试验, 真实客观地反映了厦门市不同功能区大气 TSP 污染现状下成龄行道芒果树的光合生理参数的变化特征. 但是, 在现场试验过程中, 由于城市中的环境因子具有自身的多变性及交互作用的复合性^[25], 给研究结果带来很大的不确定性. 此外, 城市行道树所受到的大气颗粒物污染主要来源于铺装路面扬尘及机动车尾气的排放^[26]. 这些颗粒污染物不仅成分复杂, 在构成上不同区域间也可能存在很大差异, 需要结合颗粒污染物的来源、粒径大小与成分等进行深入的研究.

颗粒物附着在植物表面, 除对植物的生长产生直接胁迫外, 还会引发二次逆境^[16-27-28], 如增加植物对高温和干旱的敏感性, 促进植株体病虫害发生或有毒金属盐、毒性气体的侵入, 植物群落结构简化等. 因此, 今后还需要从机理上开展大气 TSP 对植物体的胁迫效应研究.

参考文献

- [1] Wu Y (吴杨). Regression Calculating and Total Amount Control Analysis in TSP Source Apportionment. Master Thesis Lanzhou Lanzhou University 2006 (in Chinese)
- [2] Qiu Y (邱媛), Guan D-S (管东生), Song W-W (宋巍巍), et al. The dust retention effect of urban vegetation in Huizhou Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2008, **28**: 2455-2462 (in Chinese)
- [3] Huang H-J (黄慧娟), Yuan Y-X (袁玉欣), Du B-X (杜炳新), et al. Effect of the airborne dust detainment on gas exchange with in five major landscape plants in Baoding. *Journal of Northwest Forestry University*
- [4] Mandre M, Kask R, Pikk J, et al. Assessment of growth and stemwood quality of Scots pine on territory influenced by alkaline industrial dust. *Environmental Monitoring and Assessment* 2008, **138**: 51-63
- [5] Prasad MSV, Inamdar JA. Effect of cement kiln dust pollution on black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper). *Proceedings of the Indian Academy of Sciences* 1990, **100**: 435-443
- [6] Van Heerden PDR, Kruger GHJ, Louw MK. Dynamic responses of Photosystem II in the Namib Desert shrub *Zygophyllum prismocarpum* during and after foliar deposition of limestone dust. *Environmental Pollution* 2007, **146**: 34-45
- [7] Nanos GD, Ilias IF. Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf Physiological parameters. *Environmental Science and Pollution Research* 2007, **14**: 212-214
- [8] Naidoo G, Chirkoot D. The effects of coal dust on Photosynthetic Performance of the mangrove *Avicennia marina* in Richards Bay South Africa. *Environmental Pollution* 2004, **127**: 359-366
- [9] Naidoo G, Naidoo Y. Coal dust pollution effects on wetland tree species in Richards Bay South Africa. *Wetlands Ecology and Management* 2005, **13**: 509-515
- [10] Neves NR, Oliva MA, Centeno DDC, et al. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition. Potential use in environmental risk assessment. *Science of the Total Environment* 2009, **407**: 3740-3745
- [11] Xu W-D (许卫东), Peng G-L (彭国良), Liu Z-Y (柳振誉), et al. Investigation and analysis about the application actualities of street trees in Xiamen City. *Fujian Agricultural Science and Technology (福建农业科技)*, 2006(2): 81-83 (in Chinese)
- [12] Luo Q (罗颀). A study on the structure characteristics of roadside trees in Xiamen City. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology (福建林业科技)*, 2007, **34**(1): 224-227 (in Chinese)
- [13] Xiamen Environment Protection Bureau (厦门市环境保护局). Public Report of Environmental Status for Xiamen City in 1999-2008 [EB/OL]. (2008-06-18 2009-06-05) [2009-10-26]. <http://www.xmepb.gov.cn/ContentList.aspx?CmsList=102>
- [14] Yang M-S (杨茂生), Jiang Z-M (姜在民), Mei X-Y (梅秀英), et al. Effect of the dust pollution on some Physiological indexes and growth of *Platanus orientalis* in Huangdi Tomb. *Agricultural Research in the Arid Area*
- [15] Si Y (西北林学院学报), 2008, **23**(6): 50-53 (in Chinese)

- as(干旱地区农业研究), 1994 12(4): 99—104 (in Chinese)
- [15] Luan J-H (栾金花). The diurnal variation of Photosynthesis of *Carex lasiocarpa* under drought stress in the Sanjiang Plain. *Wetland Science(湿地科学)*, 2008 6(2): 223—228 (in Chinese)
- [16] Meng F-P (孟范平), Fu L-S (傅柳松). Effects of dust on ecological environment in soil. *Advances in Environmental Science(环境科学进展)*, 1996 4(4): 21—27 (in Chinese)
- [17] Arnbrust DV. Effect of particulates (dust) on cotton growth, photosynthesis and respiration. *Agronomy Journal* 1986 78: 1078—1081
- [18] Prajapati SK, Tripathi BD. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *Journal of Environmental Quality* 2008 37: 865—870
- [19] Raj A, Kushreshtha K, Srivastava PK, et al. Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. *The Environmentalist* 2010 30: 18—23
- [20] Wen D-Z (温达志), Kong G-H (孔国辉), Zhang D-Q (张德强), et al. Ecophysiological responses of 30 garden plant species exposed to short time air pollution. *Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报)*, 2003 27(3): 311—317 (in Chinese)
- [21] Wen D-Z (温达志), Lu Y-D (陆耀东), Kuang Y-W (旷远文), et al. Ecophysiological responses and sensitivity of 39 woody species exposed to air pollution. *Journal of Tropical and Subtropical Botany(热带亚热带植物学报)*, 2003 11(4): 341—347 (in Chinese)
- [22] Zhang X-Q (张小全), Xu D-Y (徐德应), Zhao M-S (赵茂盛), et al. The responses of 17-years-old Chinese fir shoots to elevated CO₂. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2000 20(3): 390—396 (in Chinese)
- [23] Chen H-R (陈华蕊). Studies on Photosynthetic Characteristics of Young Trees of Mango. Master Thesis Hainan University 2008 (in Chinese)
- [24] Xu D-Q (许大全). Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. *Plant Physiology Communications(植物生理学通讯)*, 1997 33(4): 241—244 (in Chinese)
- [25] Feng Q (冯强), Hu D (胡聃), Li N (李娜). Comparative analysis of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Euonymus japonicus* Thunb. by field experiment in the typical urban and suburban areas in Beijing. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2009 29(7): 3477—3484 (in Chinese)
- [26] Sabiri H, Lin JH, Venezia MT, et al. Dust deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles. *Atmospheric Environment* 2006 40: 7528—7538
- [27] Farmer AM. The effects of dust on vegetation. A review. *Environmental Pollution* 1993 79: 63—75
- [28] Vardaka E, Cook CM, Lanaras T, et al. Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of *Quercus coccifera*, an evergreen sclerophyllous shrub. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 1995 54: 414—419

作者简介 于裕贤,女,1984年生,硕士研究生.主要从事城市生态学相关研究. Email: yuyuxian_2@163.com

责任编辑 李凤琴
