

DOI: 10.5846/stxb201709201687

王立景, 胡彦婷, 张德强, 刘世忠, 孟泽, OTIENO Dennis, 李跃林. 鼎湖山南亚热带天然针阔叶混交林臭氧吸收特征. 生态学报, 2018, 38(17): - .

Wang L J, Hu Y T, Zhang D Q, Liu S Z, Meng Z, Otieno Dennis^{1,3}, Li Y L. Ozone uptake by the dominant canopy tree species in a natural mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province, south China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

鼎湖山南亚热带天然针阔叶混交林臭氧吸收特征

王立景^{1,2}, 胡彦婷^{1,2}, 张德强¹, 刘世忠¹, 孟泽¹, OTIENO Dennis^{1,3}, 李跃林^{1,*}

1 中国科学院华南植物园, 广州 510650

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 JaramogiOgingaOdinga University of Sc.& Tech, Bondo, Kenya 210-40601

摘要: 针阔叶混交林是我国南亚热带针叶林向地带性常绿阔叶林演替的中间林分类型, 为我国南亚地区主要森林类型, 发挥着重要的生态系统服务功能。基于树干液流技术和对臭氧浓度的连续监测, 评价该森林类型的臭氧吸收特征和能力有着重要的环境生态学意义。对鼎湖山天然针阔叶混交林优势种马尾松 (*Pinus manssoniana*)、锥栗 (*Castanopsis chinensis*)、木荷 (*Schima superba*) 和华润楠 (*Machilus chinensis*) 在自然环境条件下的臭氧吸收能力进行了分析研究。结果表明: 在日尺度上, 4 个优势树种的冠层气孔对臭氧导度 (GO_3) 和臭氧吸收通量 (FO_3) 均呈单峰型曲线, 其最大值的时间在干季 (10 月至翌年 3 月) 比湿季 (4 月至 9 月) 滞后; 季节尺度上, 臭氧浓度在湿季达到最大值 48.94 nL/L, 湿季 GO_3 、 FO_3 和年臭氧吸收累积量 (accumulative stomatal O_3 flux, AF_{st}) 均显著高于干季 ($P < 0.01$), 华润楠的臭氧吸收能力最强, 在干季和湿季可分别达 $1.11 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.71 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。随着水汽压亏缺 (VPD) 增大, 优势种 GO_3 降低。光合有效辐射 (PAR) 超过 $1500 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 优势树种 GO_3 和 FO_3 呈下降趋势。针阔叶混交林的年臭氧吸收累积量超过了保护森林树木所采用的临界阈值, 可认为鼎湖山针阔叶混交林受臭氧危害的潜在风险较高。

关键词: 树干液流; 冠层气孔导度; 臭氧吸收; 针阔叶混交林

Ozone uptake by the dominant canopy tree species in a natural mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province, south China

WANG Lijing^{1,2}, HU Yanting^{1,2}, ZHANG Deqiang¹, LIU Shizhong¹, MENG Ze¹, OTIENO Dennis^{1,3}, LI Yuelin^{1,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 JaramogiOgingaOdinga University of Sc.& Tech, 210-40601 Bondo, Kenya

Abstract: We determined ozone (O_3) uptake rates of the dominant tree species (*Pinus manssoniana*, *Castanopsis chinensis*, *Schima superba*, and *Machilus chinensis*) in a natural mixed conifer-broadleaf forest based on sap flow measurements and environmental monitoring. On a diurnal scale, the ozone uptake flux (FO_3) by the dominant tree species had a unimodal pattern, and that the maximum flux appeared earlier in the wet season (April-September) than in the dry season (October-March). Compared to the wet season, the time of the maximum flux in the dry season was delayed. Seasonally, the maximum O_3 concentration occurred in the wet season (48.94 nL/L). Canopy stomatal conductance for O_3 (GO_3), FO_3 , and annual accumulative stomatal O_3 uptake (AF_{st}) in the wet season were significantly higher than in the dry season ($P < 0.01$). *Machilus chinensis* had the highest O_3 uptake capacity among the four species considered. The

基金项目: 广东省自然科学基金 (2014A030313746); 国家自然科学基金 (31670453)

收稿日期: 2017-09-20; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuelin@scib.ac.cn

maximum FO_3 was $1.11 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the dry season and $1.71 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the wet season. GO_3 decreased with increasing vapour pressure deficit (VPD) in all the studied species. At photosynthetically active radiation (PAR) > $1500 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, GO_3 and FO_3 for all species declined at higher PAR. Annual AF_{st} exceeded the threshold that could be tolerated by forest trees, suggesting a potential O_3 risk for mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan.

Key Words: Sap flow; canopy stomatal conductance; ozone flux; mixed conifer-broadleaf forest

全球城市化的快速发展,造成了严重的大气污染^[1-2]。臭氧作为一种温室气体,直接产生温室效应^[3],同时近地层臭氧浓度变化对人类和动植物的健康有重要影响。森林在减弱臭氧危害上有重要作用,森林可以吸附、吸收污染物或阻碍污染物扩散。林木主要通过气孔吸收达到减少大气臭氧浓度的目的^[4],臭氧浓度的升高会损害树木的气孔功能^[5],进而影响光合作用与呼吸作用,最终会影响植物的生长^[6]和森林的碳汇作用^[7-8]。

树干液流技术已经广泛应用于森林水分利用研究^[9-10],它克服了涡度相关技术难以区分气孔吸收臭氧与树木表面吸收臭氧的缺点和气体交换法忽略边界层影响的缺点^[11-12],适用于异质性景观和山地景观,利用水分蒸腾和吸收臭氧通过气孔行为耦合,可估测森林冠层吸收臭氧量^[12]。目前国外利用该方法研究监测了欧洲白桦、挪威云杉等欧美天然林和城市树木臭氧吸收的生理影响机制^[3,11,13];国内的研究目前集中于城市树木的臭氧吸收的环境影响机制及净化功能^[12,14-15],但尚未涉及天然林。

近几十年来,随着华南地区的城市化发展迅猛^[16],以臭氧为代表的痕量气体浓度上升,对森林生态系统服务功能的需求突出。针阔叶混交林是我国亚热带针叶林向地带性常绿阔叶林演替的中间林分类型,为我国南亚地区主要林分类型,其中马尾松(*Pinus massoniana*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、木荷(*Schima superba*)及华润楠(*Machilus chinensis*)等为该林分优势种。本文以我国亚热带鼎湖山针阔叶混交林为研究对象,利用树干液流技术及臭氧测定技术,结合环境因子,定量分析针阔叶混交林的臭氧吸收特征,探讨鼎湖山优势树种冠层尺度上吸收特征及其与环境因子之间的关系,试图为评价森林吸收臭氧功能提供实验依据和数据支撑,为我国亚热带空气质量的改善提供一定的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 样地与样树概况

研究地点设在广东省肇庆市鼎湖山自然保护区($112^{\circ}30'39''$ — $112^{\circ}33'41''\text{E}$, $23^{\circ}09'21''$ — $23^{\circ}11'30''\text{N}$)内,总面积 1155 hm^2 ,最高峰海拔 1000.3 m ,属于典型亚热带湿润季风气候区,年平均均温 20.9°C ,最热月(7月)与最冷月(12月)均温为 28°C 和 12°C ,年均降水量 1956 mm ,干湿季明显,全年降水量的 80%集中在湿季的 4—9 月,年均相对湿度 80.8%。针阔叶混交林为鼎湖山主要森林类型之一,为马尾松群落被先锋阔叶树种入侵后自然发展演变而成的,是演替系列中间过渡阶段。群落垂直结构分明,有明显的乔冠层,乔木树种优势种有马尾松(*Pinus massoniana*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、木荷(*Schima superba*)及华润楠(*Machilus chinensis*),林下灌木主要有九节(*Psychotria rubra*)、锈叶新木姜子(*Neolitsea cambodiana*)等;草本植物有芒萁(*Dicranopteris pedata*)、凤尾蕨(*Pteris multifida*)等^[8-10]。在针阔叶混交林内选取 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 样地,从样地中选取树干圆满通直、生长状况良好且无病虫害的主要优势树种马尾松、锥栗、木荷、华润楠各 3 棵为测定对象,样树基本特征见表 1。

1.2 树干液流密度测定

采用 Granier 热扩散探针法于 2010 年 7 月至 2011 年 6 月对 12 株样树液流密度进行连续测定。关于探针的安装,考虑到鼎湖山样地郁闭度较大,参考国内外已有研究方法,将一对 20 mm 长的热消散探针安装于树干北面 1.3 m 胸径高度处^[9],以北向的液流代表树干平均液流密度^[17],每组探针上下相距 10 — 15 cm ,对于径

级较大的个体,设置 0—20 mm 深度边材探针的同时,同时也设置 20—40 mm 边材深度的探针。为防止雨水接触探针,在探针外覆盖泡沫盒,并包裹防辐射薄膜。上探针供以 12 V 直流电压持续加热(0.2 W),下探针作为参照不加热。两探针之间的温差电势应用数据采集器 DL2e(Delta-T Devices, 英国)自动记录和存储(每 10 s 测读 1 次,存储每 60 min 的平均值)。根据 Granier 建立的经验公式将温差电势转化为液流密度^[12]:

$$J_s = 119 \times [(\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$$

(1)

式中, ΔT_m 为上、下探针之间的大昼夜温差, ΔT 为瞬时温差, J_s 为瞬时液流密度($\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)转换为液流密度值。该公式是 Granier 经过多年在多种树木进行研究总结出的经验公式^[18]。

表 1 树干液流监测样树的特征

Table 1 Characteristics of the trees selected for sap flow measurements

树种 Tree Species	序号 Number	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	冠层投影面积 Ac/m ²	边材厚度 Sapwood depth/cm	边材面积 As/cm ²
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1	17.3	11	12.56	0.7	73.5
	2	27.5	17	23.56	2.9	167.7
	3	21.5	14	7.07	2.2	106.8
锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i>	1	14.6	7	23.56	1.3	61.5
	2	21.7	10	8.25	1.9	101.7
	3	26.7	13	31.42	2.1	147.6
木荷 <i>Schima superba</i>	1	18.2	9	19.63	2.22	77.2
	2	20.3	16	37.70	3.1	98.0
	3	19	13	21.20	2.15	93.0
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	1	35	17	32.99	1.53	205.4
	2	9.8	7.5	19.63	0.91	41.4
	3	20	13	23.56	1.2	125.6

DBH: diameter at breast height, Ac: projected canopy area, As: sapwood area

1.3 边材面积的确定

为避免对样树造成伤害,对于每种树种,各选取除样树以外的 8—10 棵树木,采取生长锥钻取木芯,测量边材厚度,同时量取胸径,建立边材面积与胸径之间关系式:

$$A_s = m(\text{DBH})^n$$

(2)

式中, A_s 代表边材面积,DBH 为胸径, m 、 n 为参数。

根据在同一地区所测 4 种树的边材面积与胸径关系如表 2 所示:

表 2 优势树种边材面积与胸径关系^[19]

Table 2 Relationship between sapwood area and diameter at breast height of four dominant tree specie

树种 Species	回归方程 Regression equation	R^2	树种 Species	回归方程 Regression equation	R^2
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$y = 0.84x^{2.29}$	0.99	木荷 <i>Schima superba</i>	$y = 0.82x^{2.16}$	0.96
锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i>	$y = 1.4x^{2.55}$	0.93	华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	$y = 0.49x^{2.08}$	0.81

1.4 环境因子的测定

微型气象观测仪安装于样地内高约 10m 的空旷地铁架上,以避免树木等障碍物影响数据准确性。其中,无线电子测量记录器(Derelektronische Funk-MessloggerFunky_Clima,德国)用于测量气温(T)和空气相对湿度(RH)。Li-cor 光合有效辐射传感器(LI-COR Environmental,美国)用于对光合有效辐射进行连续监测。

为综合表达温度和空气相对湿度的协同效应采用 VPD(vapor pressure deficiency)这一指标,计算公式如下^[20]:

$$e_s(T) = a \times \exp[bT(T+C)]$$

(3)

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T)(1 - RH) \quad (4)$$

式中, $e_s(T)$ 代表 T 温度下的饱和水汽压 (kPa), a 、 b 、 c 为参数, 分别取值为: 0.611 kPa、17.502、240.97℃, T 为温度 (℃), e_a 为实际水汽压 (kPa), RH 为相对湿度, VPD 为叶片和空气之间的水汽压亏缺 (kPa)。

在靠近树干液流监测样地约 30 m 的地方, 林分冠层高度处, 连续监测大气臭氧浓度, 大气臭氧浓度采用 TEI Model 49i 气体分析仪 (Thermo Environmental Instruments Inc. Franklin, MA, USA) 监测。以 10 Hz 频率采集数据, 每小时记录一个浓度均值。

1.5 冠层蒸腾速率

植物冠层的蒸腾速率的计算, 采用如下公式^[18]:

$$E_c = A_s \times J_s / A_c \quad (5)$$

式中, E_c 是冠层蒸腾速率 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), J_s 是液流密度 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), A_s 是边材面积, A_c 为冠层投影面积 (m^2)。

考虑到液流密度的径向变化, 马尾松、锥栗和华润楠的边材厚度均小于 3.5 cm, 采用 0—20 mm 深度的探针测量的液流能较为准确地反映液流的平均水平。对于荷木, 需要考虑边材液流密度的径向变化, 大于 4 cm 内部边材的液流密度约为外部边材 (0—4 cm) 的 45%^[19,21], 荷木整树蒸腾 ($E_c, \text{g/s}$) 的计算采用如下公式^[22]:

$$E_c = J_s \times A_{4\text{cm}} + J_s \times (A_s - A_{4\text{cm}}) \times 45\%$$

式中: $A_{4\text{cm}}$ 为外部边材 (0—4 cm) 的面积。

1.6 冠层平均气孔导度的计算

冠层平均气孔导度是植物冠层与大气之间的二氧化碳、水蒸气或热量的传导度, 本研究采用下式计算^[23]:

$$G_s = (E_c) \rho G_v T_a / D \quad (6)$$

式中, G_s 是冠层平均气孔导度 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ρ 是水汽密度 (Kg/m^3), G_v 是水蒸气通用气体常数 $0.462 \text{m}^3 \text{kPa K}^{-1} \text{kg}^{-1}$, T_a 是大气温度, D 是水汽压亏缺 (kPa)。

1.7 臭氧吸收通量

冠层气孔对臭氧的气孔导度 ($GO_3, \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 和冠层气孔对臭氧的吸收通量 ($FO_3, \text{n m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 可由下式进行计算:

$$GO_3 = 0.613 G_s \quad (7)$$

$$FO_3 = GO_3 [O_3] \quad (8)$$

式中, G_s 是冠层导度 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $[O_3]$ 为大气臭氧浓度, 0.613 是转换系数, 代表大气中臭氧和水蒸气扩散系数比^[24]。

2 结果与分析

2.1 针阔叶混交林优势树种臭氧吸收的日变化特征

湿季 (7 月) 臭氧浓度的日变化均呈现的单峰曲线, 在 12:00 达到峰值; 冠层气孔对臭氧的导度呈现单峰型, 马尾松、锥栗、华润楠变化趋势相接近, 均在中午 10:00 达到最大值 ((155.30 ± 9.21) , (159.62 ± 15.86) , $(279.76 \pm 35.76) \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 木荷在 11:00 达到最大值 ($(152.27 \pm 13.88) \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); 臭氧的吸收通量由臭氧浓度和冠层气孔对臭氧导度共同决定, 马尾松和锥栗在中午 12:00 达到最大值, 木荷和华润楠在 11:00 达到最大值, 其中, 华润楠最大 ($4.82 \text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 木荷最小 ($2.77 \text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (图 1)。

在干季 (12 月) 臭氧浓度、冠层气孔对臭氧的导度、臭氧吸收通量最大值均比湿季低。臭氧浓度的变化趋势与湿季相同; 冠层气孔对臭氧的导度呈现的单峰型曲线, 马尾松、锥栗、木荷在 15:00 达到峰值 ((62.33 ± 4.33) , (38.70 ± 4.30) , $(37.71 \pm 2.78) \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 华润楠在 13:00 达到峰值 ($(88.43 \pm 5.95) \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); 对臭氧的吸收通量上, 马尾松、锥栗和木荷在下午 15:00 达到最大峰值 ($2.16, 1.12, 1.40 \text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 华润楠在 14:00 达到最大峰值 ($3.10 \text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。单日臭氧累计吸收量在湿季 (7 月) 和干季 (12 月) 均表现为白天

吸收多且中午增加最多,但湿季高于干季(图 1)。

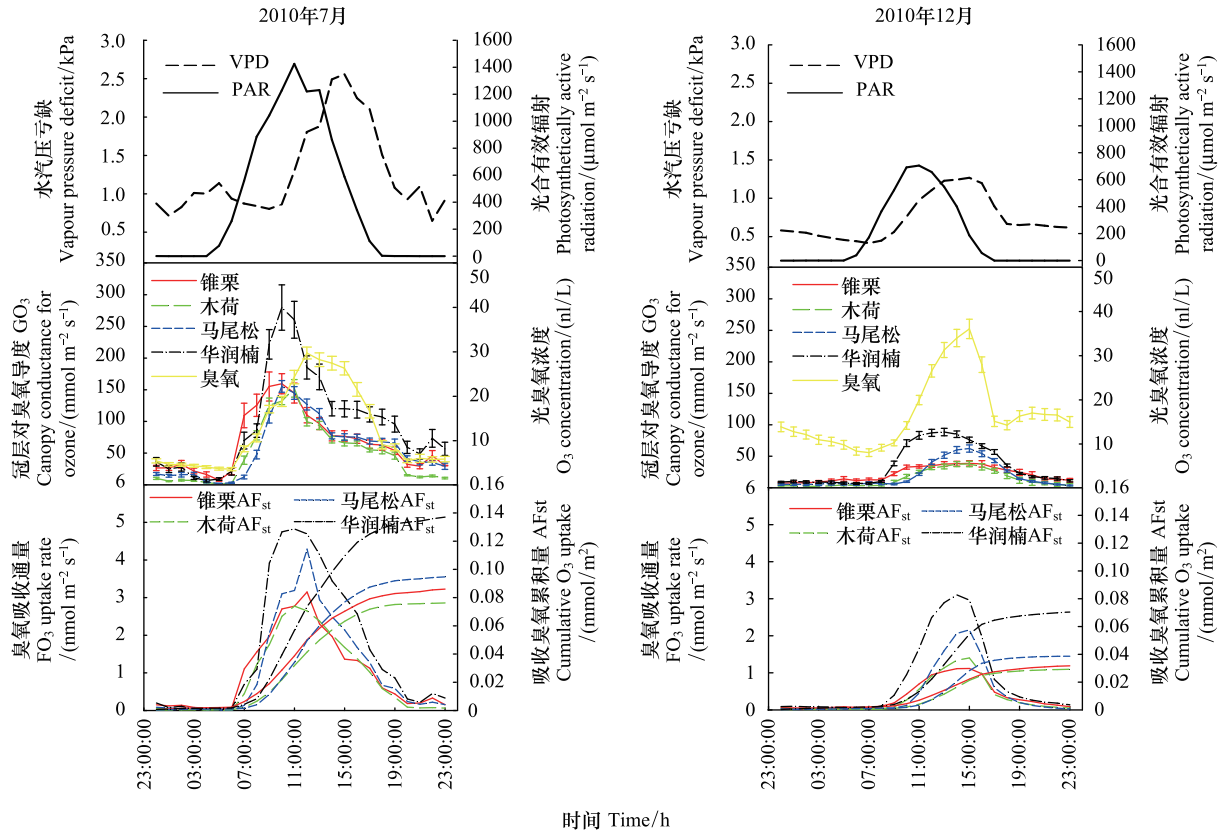


图 1 湿季(2010 年 7 月)干季(2010 年 12 月)单日光合有效辐射(PAR)、水汽压亏缺(VPD)、大气臭氧浓度(O_3)、冠层气孔对臭氧的导度(GO_3)、吸收臭氧通量(FO_3)以及吸收臭氧累积量(AF_{st})

Fig.1 Monthly mean diurnal trends of vapour pressure deficit (VPD) and photosynthetically active radiation (PAR), canopy stomatal conductance for ozone (GO_3), canopy O_3 uptake flux (FO_3 , $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) and ambient O_3 concentration; accumulative stomatal O_3 flux (AF_{st}) in the four species in the dry (July 2010, left) and wet (December 2010, right) seasons

2.2 针阔叶混交林优势树种吸收臭氧的季节变化

2010 年 7 月至 2011 年 6 月,臭氧浓度在 0.9 nL/L 与 49 nL/L 之间波动,平均值为 16.85 nL/L,有 81.2% 的臭氧浓度集中在 0.9—25 nL/L 之间,5.8% 的臭氧浓度超过 35 nL/L(图 2)。锥栗和华润楠冠层气孔对臭氧的导度显著高于马尾松与木荷($P<0.001$);马尾松与锥栗的臭氧吸收通量均显著高于木荷与华润楠($P<0.001$)。华润楠臭氧吸收通量最高,达到了 $1.36\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$,木荷臭氧吸收通量最低,为 $0.67\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ 。4 个树种的臭氧累计吸收量(AF_{st0})大小顺序为华润楠>锥栗>马尾松>木荷,但臭氧吸收通量超过 $1.6\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ 的吸收通量累积量($AF_{st1.6}$)的大小顺序为锥栗>华润楠>马尾松>木荷。四个指标中,均是湿季高于干季,湿季冠层气孔对臭氧的导度是干季的 2.0—2.7 倍,湿季臭氧吸收通量是干季的 1.4—2.6 倍,湿季臭氧累计吸收量(AF_{st0} 和 $AF_{st1.6}$)是干季的 1.1—1.8 倍(除木荷外)(表 3)。

2.3 针阔叶混交林臭氧吸收通量对水汽压亏缺和光合有效辐射的响应

随着水汽压亏缺升高,臭氧浓度先增后减;冠层气孔对臭氧的导度先骤降后趋于平缓;锥栗臭氧吸收通量逐步降低,马尾松、华润楠、木荷先增后减(图 3)。树种冠层气孔对臭氧的导度受水汽压亏缺的影响,利用多元统计分析建立水汽压亏缺和冠层气孔对臭氧的导度的回归方程,水汽压亏缺与冠层气孔对臭氧的导度呈成幂函数关系,如表 4 所示,4 个优势树种的 R^2 分别为 0.92、0.96、0.95、0.94。

随 PAR 增加,臭氧浓度先略增后减少;优势树种冠层气孔对臭氧的导度整体呈不规则波动地下降趋势;

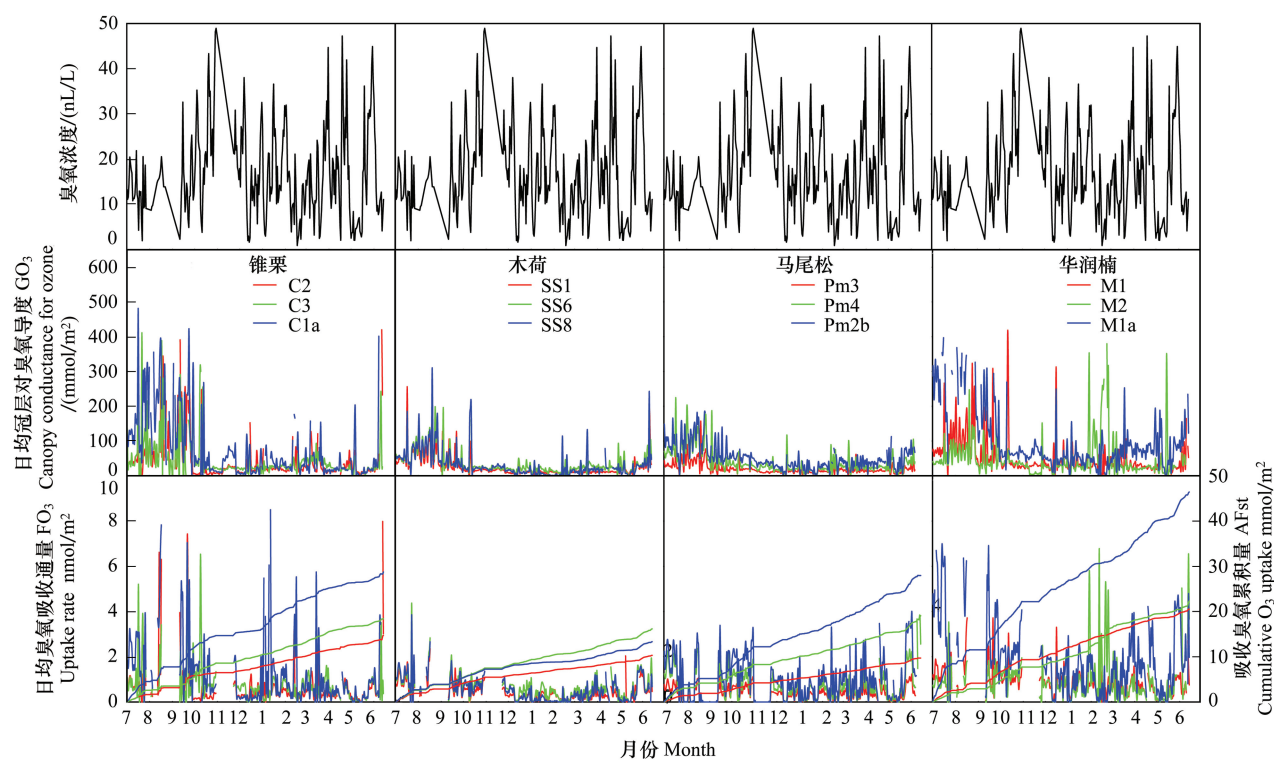


图2 针阔叶混交林年内日均臭氧浓度、冠层气孔对臭氧的导度 GO_3 、臭氧吸收通量 FO_3 和臭氧吸收的累积量 AF_{st}

Fig.2 Seasonal course of daily mean ambient ozone concentration (O_3), canopy stomatal conductance for ozone (GO_3), canopy O_3 uptake flux (FO_3), and accumulated stomatal ozone flux (AF_{st}) of conifer-broadleaf forest

马尾松、木荷臭氧吸收通量略有增加,锥栗、华润楠呈波动变化;但均在 PAR 大于 $1500\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 时,优势树种的冠层气孔对臭氧导度和臭氧吸收通量均呈下降趋势。

表3 干湿季冠层气孔对臭氧的导度、臭氧吸收通量、臭氧累积吸收量及浓度累积量

Table 3 Average canopy stomatal conductance for O_3 (GO_3 , $\text{mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$), canopy O_3 uptake flux (FO_3 , $\text{nmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$), accumulated stomatal ozone flux over thresholds (AF_{st} , mmol/m^2) and accumulated exposure (AOT, nL/L) in the wet and dry seasons

优势树种 Dominant tree species	季节 Season	GO_3 / ($\text{mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	FO_3 / ($\text{nmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	$AF_{st} 0$ / (mmol/m^2)	$AF_{st} 1.6$ / (mmol/m^2)	AOT40/ (ppm h)
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	湿季	70.92	0.96	11.20	6.09	3.01
	干季	31.86	0.60	8.77	3.43	2.45
	全年	49.42	0.76	19.96	9.53	5.46
木荷 <i>Schima superba</i>	湿季	43.65	1.04	9.26	4.55	3.01
	干季	19.22	0.41	5.07	0.76	2.45
	全年	24.17	0.67	14.34	5.31	5.46
锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i>	湿季	210.06	1.58	13.91	8.99	3.01
	干季	178.92	1.07	13.45	7.09	2.45
	全年	192.51	1.29	27.37	16.07	5.46
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	湿季	130.28	1.71	15.68	9.78	3.01
	干季	60.26	1.11	13.87	6.12	2.45
	全年	91.71	1.36	29.55	12.41	5.46

GO_3 :冠层气孔对臭氧的导度,canopy conductance for O_3 ; FO_3 :臭氧吸收通量,canopy O_3 uptake rate; $AF_{st} 0$:臭氧累积吸收量 accumulated stomatal ozone flux over thresholds of $0\text{ }\text{nmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$; $AF_{st} 1.6$:臭氧浓度超过 $1.6\text{ }\text{nmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 累积吸收量,accumulated stomatal ozone flux over thresholds of $1.6\text{ }\text{nmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$; AOT40:臭氧浓度超过 $40\text{ }\text{nL/L}$ 的浓度累积量,accumulated exposure (O_3 accumulated over a threshold of $40\text{ }\text{nL/L}$)

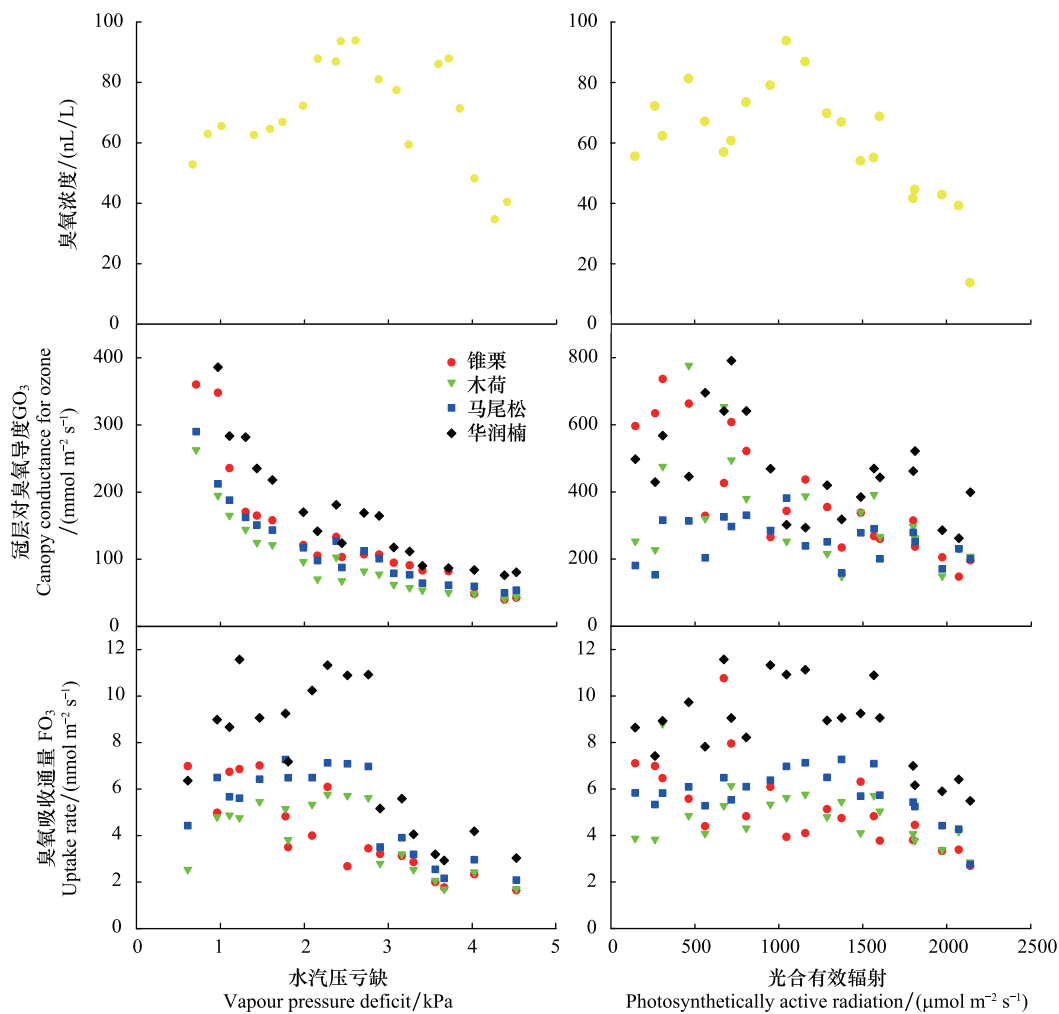


图3 大气臭氧浓度 (O_3)、冠层气孔对臭氧的导度 (GO_3)、吸收臭氧通量 (FO_3) 对水汽压亏缺 (VPD) 和光合有效辐射 (PAR) 的响应规律

Fig.3 Means of ambient air ozone concentration (O_3), canopy stomatal conductance for ozone (GO_3), and canopy O_3 uptake flux (FO_3) in relation to vapour pressure deficit (VPD) and photosynthetically active radiation (PAR)

图中符号表示在不同的 VPD 和 PAR 下四种乔木冠层气孔对臭氧的导度最大值进行边界线分析的结果

表4 冠层气孔对臭氧的导度与水汽压亏缺之间的回归方程

Table 4 Multivariable regression models of canopy stomatal conductance to O_3 and vapor pressure deficit			
树种 Species	回归方程 Regression equation	R^2	P
锥栗 <i>Castanopsis chinensis</i>	$y = 273.81e^{-1.082x}$	0.92	<0.01
木荷 <i>Schima superba</i>	$y = 186.57e^{-0.973x}$	0.96	<0.01
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$y = 215.19e^{-0.896x}$	0.95	<0.01
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	$y = 374.28e^{-1.049x}$	0.94	<0.01

3 结论与讨论

臭氧浓度的峰值出现在 12:00—15:00 时之间,下午臭氧浓度降低,这与对广州小青山^[15]和密歇根大学生物站^[25]的研究结果相似。4 个树种冠层气孔对臭氧的导度 GO_3 的峰值,湿季出现在 9:00—11:00 之间,与 Niu 等对木荷^[15]、Matyssek^[3]等对冷杉与山毛榉的研究(9:00—11:00)相同,但在干季,马尾松、锥栗、木荷峰值出现在 13:00—15:00 之间,华润楠出现在 11:00—14:00 之间,相对滞后。不论在湿季还是干季,马尾松、

锥栗、木荷、华润楠对臭氧的吸收通量 FO_3 的峰值与臭氧浓度峰值同步。

对四种优势树种冠层气孔对臭氧的导度最大值进行边界线分析的结果上,发现 4 个树种的水汽压亏缺均与冠层气孔对臭氧的导度有较好的幂函数关系,表明水汽压亏缺与臭氧吸收在一定范围内密切相关。该结果可为利用水汽压亏缺预测冠层气孔对臭氧的导度,并为最终评价臭氧对森林的危害提供一定的参考。

冠层气孔对臭氧的导度和臭氧吸收通量随环境因子的变化可能是由于以下原因造成:低的水汽压亏缺,气孔开放度高,所以臭氧浓度虽然低,但仍有较高的冠层气孔对臭氧的导度,这与 Fernandez^[26] 和 Wang^[27] 等人的结果相同。水汽压亏缺较高时,气孔关闭,臭氧浓度虽有升高,冠层气孔对臭氧导度仍呈降低趋势。光合有效辐射高于 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时,4 个树种的冠层气孔对臭氧导度和臭氧吸收通量均下降,可能由于在这一点达到了光饱和状态^[28]。

Hu^[22,28]、Niu^[15] 对广州市木荷臭氧吸收通量结果分别为 $2.05 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $4.26 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,高于本研究的 $0.66 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。主要原因是城市环境中的臭氧浓度高于鼎湖山天然林,本地区臭氧浓度为 16.85 nL/L (即 $36.11 \mu\text{g/m}^3$),Hu 和 Niu 在广州所测的臭氧浓度分别为 $42.4 \mu\text{g/m}^3$ 和 $53.83\text{—}62.38 \mu\text{g/m}^3$;其研究的森林为 20 世纪 80 年代的人工林,林分密度相对鼎湖山地区较小^[22,29],其研究样地林分密度为 1246 株/hm^2 ,本研究样地的林分密度为 3725 株/hm^2 ,对土壤水分和光照等条件的竞争强度相对较低;此外该地区较高的温度、水汽压亏缺、辐射等,都对此有影响^[30]。

根据现有的研究,判定 O_3 是否对植被产生伤害的方法目前主要有臭氧浓度法 ATOX 指标法(大气浓度超过 $X \text{ nL/L}$ 的浓度累积量)和气孔吸收通量法 $AF_{st}Y$ 指标法(气体吸收通量超过 $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的吸收通量累积量)^[26] 两种方法。本研究采用 AOT40 和 $AF_{st}1.6$ 两项标准,如表 3, AOT40 的年际值为 5.46 ppm h ,超过欧洲临界标准 5 ppm h ^[31]; $AF_{st}1.6$ 年际值超过了欧洲标准 4 mmol/m^2 。近年来,越来越多的研究认为气孔吸收通量法 $AF_{st}Y$ 比臭氧浓度法 AOTX 更适合评价臭氧对植被的影响^[32-33]。ATOX 指标法虽然已经被应用于北美空气质量标准,但其仅能反映冠层附近空气中的臭氧浓度,而不能反映臭氧对植物内部组织的危害^[34-35]。 $AF_{st}Y$ 指标法综合生理和气象因素考虑了进入叶片和氧化质外体的实际浓度^[15,36]。Wang 等人认为, $AF_{st}Y$ 指标法比 ATOX 可更为精确地预测臭氧对叶表面可见性危害^[28,37]。因此认为鼎湖山针阔叶混交林受臭氧危害的潜在风险较高。

参考文献 (References):

- [1] Li Q, Wang E R, Zhang T T, Hu H. Spatial and temporal patterns of air pollution in Chinese cities. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(3): 92.
- [2] Chen B H, Kan H D. Air pollution and population health: a global challenge. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2008, 13(2): 94-101.
- [3] Matyssek R, Baumgarten M, Hummel U, Häberle K H, Kitao M, Wieser G. Canopy-level stomatal narrowing in adult *Fagus sylvatica* under O_3 stress-means of preventing enhanced O_3 uptake under high O_3 exposure? *Environmental Pollution*, 2015, 196: 518-526.
- [4] Wieser G, Hässler R, Cötze B, Koch W, Havranek W M. Role of climate, crown position, tree age and altitude in calculated ozone flux into needles of *Picea abies* and *Pinus cembra*: a synthesis. *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 415-422.
- [5] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 马占相思 (*Acacia mangium*) 树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006(12): 4050-4058.
- [6] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424(6945): 183-187.
- [7] Sitch S, Cox P M, Collins W J, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 2007, 448(7155): 791-794.
- [8] Nowak D J, Dwyer J F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems//Kuser J E, ed. *Handbook of Urban and Community Forestry in the Northeast*. New York: Springer, 2007: 25-46.
- [9] Čermák J, Kučera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 2004, 18(5): 529-546.
- [10] Nunn A J, Wieser G, Metzger U, Löw M, Wipfler P, Häberle K H, Matyssek R. Exemplifying whole-plant ozone uptake in adult forest trees of contrasting species and site conditions. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3): 629-639.
- [11] Wieser G, Matyssek R, Köstner B, Oberhuber W. Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine

- timberline: an approach based on sap flow measurement. *Environmental Pollution*, 2003, 126(1): 5-8.
- [12] 王华, 欧阳志云, 任玉芬, 张红星, 王效科, 郜世奇, 关云飞, 高付元. 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究. *生态学报*, 2013, 33(23): 7323-7331.
- [13] Luis V C, Jiménez M S, Morales D, Kucera J, Wieser G. Canopy transpiration of a Canary Islands pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1/4): 117-123.
- [14] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 不同优势等级杨树人工林吸收臭氧特征. *北京林业大学学报*, 2015, 37(7): 29-36.
- [15] Niu J F, Zhao P, Sun Z W, Zhu L W, Ni G Y, Zeng X P, Zhang Z Z, Zhao X H, Zhao P Q, Gao J G, Hu Y T, Zeng X M, Ouyang L. Stomatal uptake of O₃ in a *Schima superba* plantation in subtropical China derived from sap flow measurements. *Science of the Total Environment*, 2016, 545-546: 465-475.
- [16] Zhang Y N, Xiang Y R, Chan L Y, Sang X F, Wang R, Fu H X. Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(28): 4898-4906.
- [17] 梅婷婷, 王传宽, 赵平, 蔡锡安, 刘晓静, 张全智. 木荷树干液流的密度特征. *林业科学*, 2010, 46(01): 40-47.
- [18] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [19] 程静, 欧阳旭, 黄德卫, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山针阔叶混交林 4 种优势树种树干液流特征. *生态学报*, 2015, 35(12): 4097-4104.
- [20] Hodáňová D. An introduction to environmental biophysics, Campbell, G. S.: Heidelberg Science Library.-Springer-Verlag, New York-Heidelberg-Berling 1977. 159 pp. US \$ 8.90. *Biologia Plantarum*, 1979, 21(2): 104-104.
- [21] Zhu L W, Zhao P, Cai X A, Zeng X P, Ni G Y, Zhang J Y, Zou L L, Mei T T, Yu M H. Effects of sap velocity on the daytime increase of stem CO₂ efflux from stems of *Schima superba* trees. *Trees*, 2012, 26(2): 535-542.
- [22] 胡彦婷. 基于树干液流的城市植被冠层对大气痕量气体 SO₂, NO_x 和 O₃ 的气孔吸收和影响因子[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [23] Köstner B, Matyssek R, Heilmeyer H, Clausnitzer F, Nunn A J, Wieser G. Sap flow measurements as a basis for assessing trace-gas exchange of trees. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2008, 203(1): 14-33.
- [24] Wieser G, Havranek W M. Environmental control of ozone uptake in *Larix decidua* Mill.: a comparison between different altitudes. *Tree Physiology*, 1995, 15(4): 253-258.
- [25] Seok B, Helmig D, Ganzeveld L, Williams M W, Vogel C S. Dynamics of nitrogen oxides and ozone above and within a mixed hardwood forest in Northern Michigan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 13(15): 7301-7320.
- [26] Fernández M E, Gyenge J, Schlichter T. Water flux and canopy conductance of natural versus planted forests in Patagonia, South America. *Trees*, 2009, 23(2): 415-427.
- [27] Wang H, Zhou W Q, Wang X K, Gao F Y, Zheng H, Tong L, Ouyang Z Y. Ozone uptake by adult urban trees based on sap flow measurement. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 275-286.
- [28] Hu Y T, Zhao P, Niu J F, Sun Z W, Zhu L W, Ni G Y. Canopy stomatal uptake of NO_x, SO₂ and O₃ by mature urban plantations based on sap flow measurement. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 165-177.
- [29] 程静. 鼎湖山两种主要林型水分利用特征及其影响因子研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [30] 朱丽薇, 赵平, 蔡锡安, 曾小平, 邹绿柳. 荷木树干 CO₂ 释放通量与木质部液流和 CO₂ 浓度的关系. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2227-2232.
- [31] UNECE. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risk and Trends. Berlin: Federal Environmental Agency, 2004.
- [32] Wieser G, Emberson L D. Evaluation of the stomatal conductance formulation in the EMEP ozone deposition model for *Picea abies*. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(15): 2339-2348.
- [33] Simpson D, Ashmore M R, Emberson L, Tuovinen J P. A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3): 715-725.
- [34] Paoletti E, Manning W J. Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1): 85-95.
- [35] Matyssek R, Sandermann H, Wieser G, Wieser G, Booker F, Cieslik S, Musselman R, Ernst D. The challenge of making ozone risk assessment for forest trees more mechanistic. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3): 567-582.
- [36] Mills G, Pleijel H, Büker, P, Braun S, Emberson L D, Harmens H, Hayes F, Simpson D, Grünhage L, Karlsson P E, Danielsson H, Bermejo V, Gonzalez Fernandez I. (2010). Mapping critical levels for vegetation. Revision undertaken in Summer 2010 to include new flux-based critical levels and response functions for ozone. In: Mapping Manual 2004. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, CLRTAP, 2015.
- [37] Gerosa G, Marzuoli R, Desotgiu R, Bussotti F, Ballarin-Denti A. Visible leaf injury in young trees of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in relation to ozone uptake and ozone exposure. An Open-Top Chambers experiment in South Alpine environmental conditions. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 274-284.