

台风登陆前珠三角地区近地面 O₃ 浓度升高的原因初探*

嵇萍 汪宇 陈多宏[#] 谢敏 沈劲 叶斯琪 潘月云

(广东省环境监测中心, 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室,
广东省环境保护大气二次污染研究重点实验室, 广东 广州 510308)

摘要 利用粤港澳珠三角地区空气质量监测网络的近地面大气污染物浓度观测数据, 风、气温、气压和相对湿度等气象观测数据及水平分辨率为 1°×1° 的由美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 FNL 全球分析资料中的再分析气象场数据, 从前体物和光化学生成、水平传输、垂直传输的角度, 对台风“妮妲”登陆前, 珠三角地区近地面出现的 O₃ 浓度高峰进行原因分析。结果表明: 台风登陆前, 珠三角地区云量较低, 气温升高, 相对湿度较大, 同时前体物浓度升高, 有利于本地 O₃ 光化学生成, 造成 O₃ 浓度升高; 但珠三角地区近地面风速很小, 且以辐散为主, 故水平传输不是造成 O₃ 浓度大幅升高的原因; 在台风靠近珠三角地区的过程中, 珠三角地区受台风外围下沉气流控制, 造成高层大气向近地面输送 O₃, 同时本地生成的 O₃ 等各类大气污染物无法向上扩散而逐渐累积。以上因素最终导致台风“妮妲”登陆前珠三角地区近地面 O₃ 浓度升高。

关键词 O₃ 前体物 光化学反应 台风

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.03.012

Causes for the surface O₃ increase before a typhoon landing in the Pearl River Delta region JI Ping, WANG Yu, CHEN Duohong, XIE Min, SHEN Jin, YE Siqi, PAN Yueyun. (Guangdong Environmental Monitoring Center, State Environmental Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Secondary Air Pollution Research, Guangzhou Guangdong 510308)

Abstract: Based on the air quality monitoring network of Guangdong-Hong Kong-Macao Pearl River Delta region, the causes of O₃ concentration peak in the Pearl River Delta region before the landing of typhoon “Nida” was analyzed using the observation data of near-surface air pollutant concentration, meteorological data (wind speed, wind direction, air temperature, pressure and relative humidity) and FNL re-analysis meteorological field from National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with horizontal resolution of 1°×1°. On the perspective of precursor, photochemical generation, horizontal transmission and vertical transmission, the results showed that the causes of the increasing O₃ concentration before the typhoon “Nida” landing were the low cloud cover, increased air temperature, relative humidity and the precursor concentration in the Pearl River Delta region. The above conditions were beneficial to the O₃ photochemical generation. Horizontal transmission did not increase the O₃ concentration significantly, due to the low near-surface wind speed and the divergence in the Pearl River Delta region before typhoon landing. Influenced by the typhoon peripheral sinking airflow, the high-level atmosphere delivered O₃ to the near-surface atmosphere before the landing of typhoon “Nida” which caused the rise of O₃ concentration in the Pearl River Delta region. On the other hand, the poor diffusion conditions and the consequent accumulation process of the local O₃ and other air pollutants during the typhoon landing were also the important causes for increasing O₃ concentration before the landing of typhoon “Nida”.

Keywords: O₃; precursors; photochemical reaction; typhoon

近年来,随着 PM_{2.5} 浓度逐年下降,珠三角地区 O₃ 污染问题日益凸显,夏秋季节近地面 O₃ 污染事件时有发生,并且污染过程中 O₃ 浓度升高速度快,峰值高,在短时能够达到重度污染甚至严重污染水平。珠三角地区南临南海,东临西太平洋,是我国受台风

影响最大和台风登陆次数最多的地区之一。在台风登陆前,珠三角地区近地面 O₃ 浓度会急剧攀升,造成区域性 O₃ 高污染事件。这一方面造成空气中聚集大量有毒有害的复杂污染物,对人体的健康危害极大;另一方面光化学烟雾会造成大气能见度下降,

第一作者:嵇萍,女,1989年生,硕士,助理工程师,主要从事空气质量与气象条件的关系研究。[#]通讯作者。

* 广东省科技发展专项(No.2017B020216007);国家科技支撑计划项目(No.2014BAC21B00)。

危害交通安全。

目前,针对台风登陆前珠三角地区近地面 O₃ 浓度升高的原因研究仍然较为薄弱,对 O₃ 污染事件发生的原因尚不明确。魏晓琳等^[1]采用大气化学模式 Models-3/CMAQ 模拟了中国香港地区的一次夏季高浓度 O₃ 污染事件,发现 O₃ 污染事件与台风的活动紧密相关。陈莉等^[2]利用 2001—2015 年东亚区域的气压场和对流层顶 O₃ 浓度资料,对东亚地域内季风运动及台风过程与 O₃ 浓度变化的相关性进行了分析,发现近地面 O₃ 浓度高的地区受到台风外围下沉气流影响。

本研究以 2016 年夏季台风“妮姐”为研究对象,利用近地面观测的 O₃、NO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等污染物浓度观测数据,风(包括风速和风向)、气温、气压和相对湿度等气象观测数据以及水平分辨率为 1°×1°的由美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 FNL 全球分析资料中的再分析气象场数据,从前体物浓度和光化学生成、水平传输和垂直传输等多个角度,对台风“妮姐”登陆前,珠三角地区近地面 O₃ 浓度升高进行原因分析。

1 珠三角地区情况介绍

珠三角地区位于我国华南沿海,广东中部,包含广东的 9 市及中国香港和澳门。珠三角城市群是我国经济最发达的城市群之一,人为大气污染源排放量大。受南海季风影响,夏季是珠三角地区全年空气质量最好的季节,各城市空气质量等级以优为主,但是在台风登陆华南沿海之前的 1~2 d,珠三角地区近地面 O₃ 浓度往往能够达到重度甚至严重污染水平。

2 数据和方法

本研究使用了粤港澳珠三角地区空气质量监测网络数据(包括地面观测的 O₃、NO₂ 和 CO 等污染物浓度)。珠三角地区共有 21 个空气质量监测站点,其中 16 个站点位于广东,4 个站点位于中国香港,1 个站点位于中国澳门。使用广州气象观测站(113.33°N,23.01°E)和此次 O₃ 浓度最高的江门鹤山气象观测站(112°N,22.78°E)的风速、风向、气温、气压和相对湿度等气象观测数据来分析近地面 O₃ 光化学反应的气象条件。空气质量监测站与气象观测站点见图 1。使用水平分辨率为 1°×1°的气象场数据用来描述台风“妮姐”登陆前后的近地面和垂直环流背景。

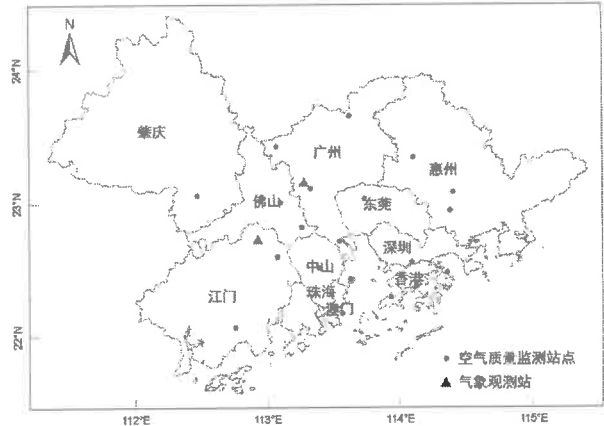


图 1 粤港澳珠三角地区空气质量监测站和气象观测站

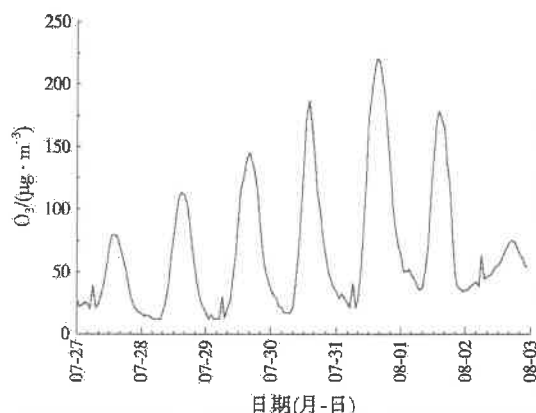
Fig.1 Locations of Guangdong-Hong Kong-Macao Pearl River Delta region air quality monitoring stations and meteorological stations

根据 Unisys 公司提供的台风“妮姐”的路径图,2016 年 7 月 27 日(东八区时间,下同),一个低压区在菲律宾棉兰老岛以东海面生成,之后持续向西北方向移动,并逐渐加强。7 月 30 日 18:15,日本气象厅将其升格为热带风暴,并命名为“妮姐”。7 月 31 日 14:00,热带风暴“妮姐”在菲律宾北部登陆,继续向西北方向移动,并逐渐加强。8 月 1 日 20:50,日本气象厅将其升格为台风。根据中国中央气象台,8 月 2 日 3:35,台风“妮姐”在深圳东部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力 14 级(42 m/s),中心最低气压 965 hPa,登陆后强度迅速减弱。台风“妮姐”继续向西北行进,穿过深圳、东莞、广州、佛山、肇庆,于 17:00 进入广西境内,夜间减弱为热带低压。

3 结果与讨论

在台风“妮姐”登陆前后几天,珠三角地区近地面 O₃ 浓度变化幅度较大(见图 2)。2016 年 7 月 27—31 日,随着台风“妮姐”向菲律宾东部太平洋逐渐靠近,珠三角地区近地面的每日 O₃ 小时浓度峰值逐渐攀升,到 31 日下午,台风“妮姐”穿过吕宋海峡时,当天珠三角地区近地面 O₃ 小时质量浓度峰值达到最高(222 μg/m³),且当天江门和佛山为重度污染,广州和肇庆为中度污染。之后,台风“妮姐”进入中国南海,到 8 月 1 日,珠三角地区近地面 O₃ 小时质量浓度峰值下降至 170 μg/m³。8 月 2 日,台风“妮姐”在深圳登陆,给珠三角地区带来大风和强降雨天气,近地面 O₃ 小时浓度峰值降至最低水平。

近地面 O₃ 的变化比较复杂,既包含光化学反应的过程又来自于不同尺度的动力传输影响^[3]。HUANG 等^[4]认为台风登陆前中国香港地面 O₃ 浓



注:横坐标中标注出的日期所对应的时间为当日 0:00,例如 07-27 对应 7 月 27 日 0:00,以此类推。图 3、图 4、图 6 至图 8 同。

图 2 珠三角地区 O_3 变化时间序列

Fig.2 Time series of O_3 in Pearl River Delta region

度升高主要归因于大陆地区的传输和本地 O_3 光化学生成;FAN 等^[5]认为台风外围下沉气流会造成珠三角地区大气污染物堆积;JIANG 等^[6]认为夏季台风外围近地面 O_3 浓度升高主要来源于高层 O_3 的垂直传输;叶绿荫等^[7]认为江门地区的高 O_3 浓度与生物源挥发性有机物(BVOCs)排放及珠三角地区中心城市污染物输送有关。所以,近地面的 O_3 浓度升高的成因可能是本地生成,也可能是周边地区的水平传输,或者高空平流层 O_3 的垂直传输。本研究将从前体物和光化学生成、水平传输和垂直传输的角度进行原因分析。

3.1 前体物及光化学生成

对流层 O_3 通常是由前体物 NO_x 和挥发性有机物(VOCs)经过一系列复杂的光化学反应生成。比较图 2 和图 3 发现,珠三角地区近地面 NO_2 与 O_3 的变化较为一致,峰值从 7 月 27 日起逐日攀升,至 31 日达到最大值,8 月 1 日轻微下降,2 日迅速下降至最低值。 NO_2

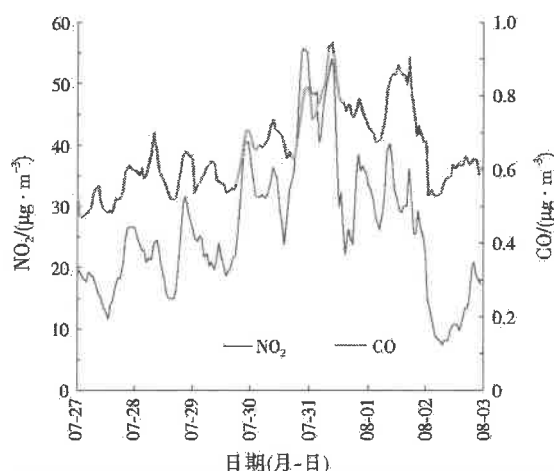
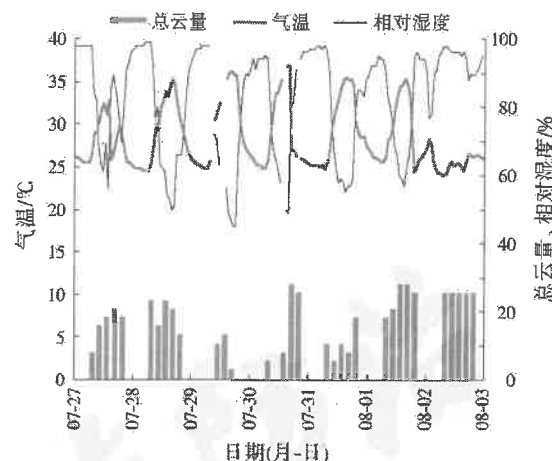


图 3 珠三角地区 NO_2 和 CO 浓度的时间变化序列

Fig.3 Time series of NO_2 and CO in Pearl River Delta region

小时浓度峰值均出现在夜间,比 O_3 早半天。7 月 30 日至 8 月 1 日,珠三角地区天气晴热,云量较低,气温升高,湿度较大,这些气象条件都有利于 O_3 光化学生成。以广州为例,其日均总云量低于 11%,太阳辐射强烈,日最高气温均大于 $35^\circ C$,相对湿度较大(见图 4)。



注:某些时段缺乏观测数据,图 6、图 7 同。

图 4 广州总云量、气温和相对湿度的时间序列

Fig.4 Time series of total cloud cover, temperature and relative humidity in Guangzhou

珠三角地区人为源 NO_x 和 VOCs 排放高值区主要在广州及珠江口东岸的深圳和东莞等城市^[8],夏季由于气温较高,燃料和溶剂会挥发更多的 VOCs。夏季珠三角地区植被茂盛,BVOCs 的排放量全年最高,是秋季的 3.2 倍,BVOCs 排放量最高的城市为江门^[9],郊区和农村地区的 O_3 浓度通常对 NO_x 的变化最敏感,因此江门近地面 O_3 污染较其他城市更为严重。

使用小时 O_3 数据,分析台风“妮姐”登陆前(7 月 30 日至 8 月 1 日)的 O_3 昼夜变化曲线,并与 7—8 月其余日(剔除 7 月 30 日至 8 月 1 日)进行对比,结果见图 5。除去 7 月 30 日至 8 月 1 日,珠三角地区 7—8 月近地面 O_3 在 $28 \sim 102 \mu g/m^3$ 波动,平均值

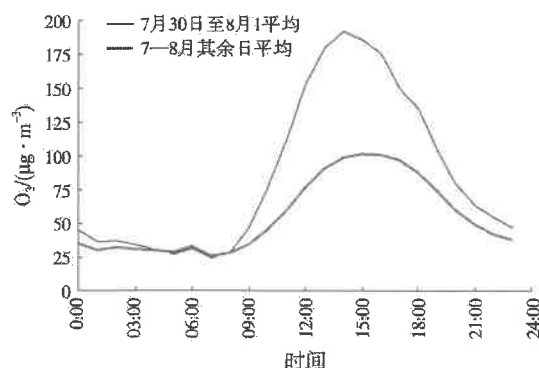


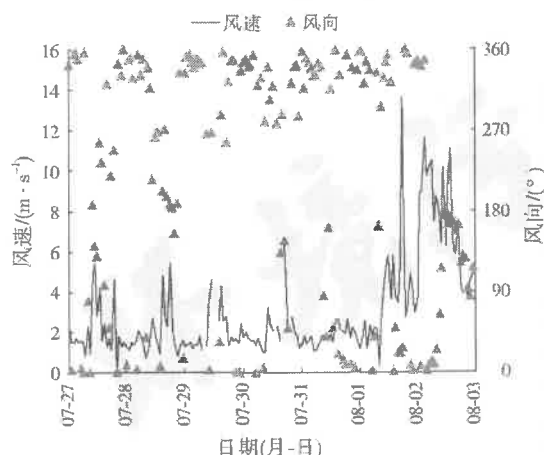
图 5 O_3 日变化

Fig.5 Diurnal variations of O_3

为 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。台风“妮姐”登陆前, O₃ 平均值为 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 较 7—8 月其余日上升 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 此外夜间最低值只上升了 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 而白天最高值上升了 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见, 台风“妮姐”登陆, O₃ 升高集中在白天。因此, 在前体物浓度升高, 辐射、气温、相对湿度等气象条件有利的情况, 白天 O₃ 的光化学生成加强可能是造成珠三角地区近地面 O₃ 浓度较高的原因之一。

3.2 水平传输

在 7 月 30 日至 8 月 1 日 O₃ 浓度升高期间, 广州近地面以偏北风为主, 风速较低(见图 6); 江门鹤山近地面以偏西风为主, 风速也较低(见图 7)。可见, 珠三角地区近地面风速较低, 不利于 O₃ 及其前体物的水平传输。在此期间, 广州近地面大气散度维持正值, 说明地表气团以辐散为主(见图 8), 也不利于汇集周边区域的污染物。而且, 广州的北面和



注: 风向 0°或 360°为北风, 90°为东风, 180°为南风, 270°为西风。
图 7 同。

图 6 广州风速风向时间序列
Fig.6 Time series of wind speed and wind direction in Guangzhou

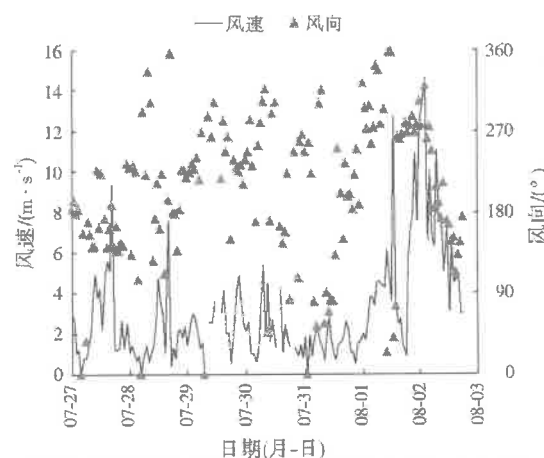


图 7 鹤山风速风向时间序列
Fig.7 Time series of wind speed and wind direction in Heshan

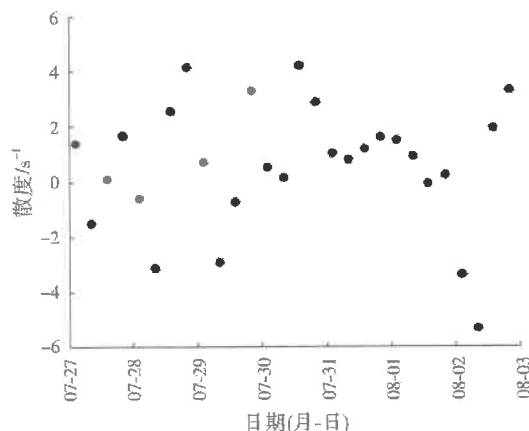


图 8 广州大气散度散点图

Fig.8 Scatter plot of atmospheric divergence in Guangzhou
江门的西面为山区, 植被茂盛, 人为源排放很少。近地面弱风和辐散的气象条件都不利于周边的大气污染物向珠三角地区水平传输。由此可见, 在台风“妮姐”登陆前, 周边地区对珠三角地区的 O₃ 及其前体物的近地面水平传输的贡献很小。

3.3 垂直传输

2016 年 7 月 30、31 日及 8 月 1 日 14:00 从台风中心到珠三角中心城市广州的垂直速度横截面表明, 台风“妮姐”中心附近产生剧烈的上升运动, 外围区域以轻微的下沉运动为主, 形成了较为典型的热带气旋垂直循环结构。台风外围垂直方向的下沉流动, 使得高层空气容易传输至近地面。在台风登陆之前, 随着台风中心的靠近, 外围下沉分支也逐渐靠近珠三角地区, 7 月 30、31 日 14:00 的下沉速度约为 0.1~0.2 Pa/s。8 月 1 日 14:00, 珠三角地区仍处于台风外围, 但是已没有从高空贯穿地面的下沉气流分支。随着台风“妮姐”的逼近, 广州近地面风速加大(见图 6), 水平扩散条件好转, 8 月 1 日较 7 月 31 日 14:00, O₃ 浓度有所下降。之后随着台风中心的靠近, 珠三角地区水平风速加大, 垂直方向以上升运动为主, 形成强对流天气, 扩散条件大幅好转, O₃ 浓度迅速回落(见图 2)。

CO 等一次污染物主要来源于本地污染源排放, 通常可以作为大气一次污染物的示踪物。台风“妮姐”登陆前后, 珠三角近地面 CO 与 NO₂ 浓度变化非常一致, 且均在 7 月 31 日达到最高值(见图 3)。7 月 30 日、7 月 31 日和 8 月 1 日, 珠三角地区 CO 与 O₃ 平均浓度的相关性分别为 -0.28、-0.33、0.77, 均通过 $p < 0.005$ 的显著性检验。由图 9 可以看出, 7 月 30、31 日, 珠三角地区 O₃ 与 CO 为负相关关系, 说明 O₃ 存在除了本地生成外, 还有其他来源, 而水平传输已排除, 近地面 O₃ 可能部分来源于平流

层富含 O_3 的气体随着下沉气流的输送;8月1日,珠三角地区下沉气流不明显,同时 O_3 与 CO 为显著的正相关关系,说明近地面 O_3 已无明显输送影响,主要来源于本地生成。因此,台风“妮姐”登陆前 2~3 天,外围下沉气流造成高层 O_3 向近地面垂直传输,是珠三角地区近地面 O_3 浓度升高的原因之一;在登陆前 1 天,珠三角地区已不受台风外围下沉气流影响,无明显垂直传输。

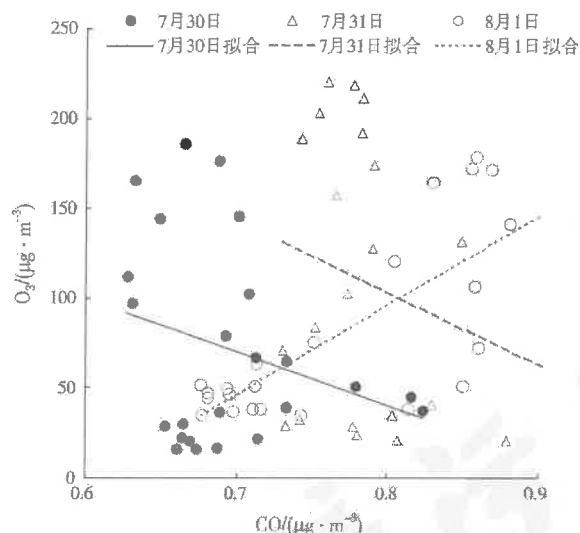


图9 珠三角地区 CO 与 O_3 相关性分析
Fig.9 Relationship between CO and O_3 in Pearl River Delta region

4 结论

台风“妮姐”登陆前,珠三角地区云量较低,气温升高,相对湿度较大,同时前体物浓度升高,均有利于本地 O_3 光化学生成,造成近地面 O_3 浓度升高。但近地面风速很小,且以辐散为主,故水平传输不是造成 O_3 浓度大幅升高的原因。此外,在台风“妮姐”登陆前 2~3 天,珠三角地区受台风外围下沉气流控制,存在高层大气对近地面的 O_3 垂直传输,也是珠三角地区近地面 O_3 浓度升高的原因之一。

参考文献:

- [1] 魏晓琳,林嘉仕,王韬.台风海棠引起的珠三角地区高臭氧污染的数值模拟及机理研究[R].深圳:深圳气象服务中心,2011.
- [2] 陈莉,高云峰,忽建永,等.东亚季风及台风过程与臭氧含量变化的关系分析[J].高原山地气象研究,2017,37(1):66-72.
- [3] JACOB D J.Introduction of atmospheric chemistry[M].Princeton:Princeton University Press,1999.
- [4] HUANG J P,FUNG J C H,LAU A K H,et al.Numerical simulation and process analysis of typhoon-related ozone episodes in Hong Kong[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2005,110(D5):D05301.
- [5] FAN S J,FAN Q,YU W,et al.Atmospheric boundary layer charac-

teristics over the Pearl River Delta, China, during the summer of 2006: measurement and model results[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2011,11(13):6297-6310.

- [6] JIANG Y C,ZHAO T L,LIU J,et al.Why does surface ozone peak before a typhoon landing in southeast China? [J].Atmospheric Chemistry and Physics,2015,15(23):13331-13338.
- [7] 叶绿萌,樊少芬,常鸣,等.珠三角地区秋季臭氧生成敏感性时空变化模拟研究[J].南京大学学报(自然科学版),2016,52(6):977-988.
- [8] 潘月云,李楠,郑君瑜,等.广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J].环境科学学报,2015,35(9):2655-2669.
- [9] SITUS, GUENTHER A, WANG X, et al. Impacts of seasonal and regional variability in biogenic VOC emissions on surface ozone in the Pearl River delta region, China[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2013,13(23):11803-11817.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2017-07-26)

(上接第 295 页)

- [12] 李力,刘娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J].环境化学,2011,30(8):1411-1421.
- [13] MARRIS E.Putting the carbon back; black is the new green [J].Nature,2006,442(713):624-626.
- [14] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2):395-419.
- [15] 杨基峰,应光国,赵建亮,等.黑碳对污染物环境地球化学过程的影响[J].生态环境,2008,17(4):1685-1689.
- [16] CHEN L, JI T, MU L, et al. Facile synthesis of mesoporous carbon nanocomposites from natural biomass for efficient dye adsorption and selective heavy metal removal [J]. RSC Advances, 2016, 6(3):2259-2269.
- [17] 陈再明,万还,徐义亮,等.水稻秸秆生物炭对重金属 Pb^{2+} 的吸附作用及影响因素[J].环境科学学报,2012,32(4):769-776.
- [18] CHEN B L, ZHOU D D, ZHU L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14):5137-5143.
- [19] NGUYEN B T, LEHMANN J, MASIELLO C A, et al. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(9):3324-3331.
- [20] 封继康.什么是“芳香性”? 芳香性的定义、判据和无机芳香性化合物[J].分子科学学报,2005,21(4):1-11.
- [21] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science and technology [M]. London: Earthscan, 2009.
- [22] RADOVIC L R. Carbon materials as adsorption in aqueous solutions [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [23] 常春,王胜利,郭景阳,等.不同热解条件下合成生物炭对铜离子的吸附动力学研究[J].环境科学学报,2016,36(7):2491-2502.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2017-08-23)

