

# 惠州市夏秋季臭氧污染特征和典型污染过程\*

李明华<sup>1</sup>, 姜帅<sup>1</sup>, 甘泉<sup>1</sup>, 陈芳丽<sup>1</sup>, 曾丹丹<sup>1</sup>, 李娇娇<sup>1</sup>, 范绍佳<sup>2</sup>, 祝薇<sup>2</sup>  
(1. 惠州市气象局//惠州市气象台, 广东 惠州 516001;  
2. 中山大学大气科学学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 利用广东省惠州市 2013–2016 年逐日和逐时的大气环境和气象观测资料, 统计分析了惠州市夏秋季臭氧污染天气特征并分析了 2013 年 7 月 12–13 日臭氧污染过程。结果表明: ① 惠州市臭氧污染在一年四季均有出现, 夏秋季(7–10 月)年平均出现日数为 12.5d 占年臭氧污染日的 73.5%, 夏秋季臭氧污染日和臭氧中度污染日偏西风(WSW-W-WNW-NW)出现频率合计分别为 44.9% 和 74.4%; 气象条件分析表明惠州市夏秋季臭氧污染日大多出现在天气晴朗、日照充足、气温较高且为偏西风的天气下, 夏秋季的天气气候特征使其成为臭氧污染的高发时段。② 分析 2013 年 7 月 12–13 日惠州市臭氧中度污染过程发现, 此次臭氧污染过程主要是受“苏力”外围下沉和偏西气流的共同影响, 天气晴朗、日照充足、天气炎热非常有利于臭氧生成, 地面和低空吹偏西风使惠州市处于珠三角城市群的下风向存在区域污染输送, 同时垂直方向的下沉气流不利于污染物输送与扩散。

**关键词:** 臭氧污染; 夏秋季; 气象条件; 惠州市

**中图分类号:** X515   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0529–6579 (2018) 05–0029–09

## Characteristics of ozone pollution and analysis of typical pollution processes in summer and autumn in Huizhou

LI Minghua<sup>1</sup>, JIANG Shuai<sup>1</sup>, GAN Quan<sup>1</sup>, CHEN Fangli<sup>1</sup>,  
ZENG Dandan<sup>1</sup>, LI Jiaojiao<sup>1</sup>, FAN Shaojia<sup>2</sup>, ZHU Wei<sup>2</sup>

(1. Huizhou Meteorological Bureau // Huizhou Meteorological Observatory, Huizhou 516001, China;  
2. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Daily and hourly environmental and meteorological observation data in Huizhou of Guangdong Province during 2013–2016 were used to analyze the characteristics of ozone pollution in summer and autumn, and the ozone pollution process on July 12–13, 2013 was analyzed. The results show that: ① Ozone pollution appeared in all seasons with the average number of days of 12.5 in summer and autumn accounting for 73.5% of the annual ozone pollution days. The frequency of occurrence of westerly wind (WSW–W–WNW–NW) in summer and autumn during ozone pollution days and ozone moderate pollution days were 44.9% and 74.4%, respectively. In summer and autumn, most of the ozone pollution days occurred in weather conditions with hot and sunny weather, abundant sunshine and westerly wind. The climate characteristics in summer and autumn make a high-risk period for ozone pollution. ② The ozone pollution process on July 12–13, 2013 was mainly affected by the sinking of the “Su Li” and the

\* 收稿日期: 2017–07–06

**基金项目:** 国家重点研发计划大气专项课题(2016YFC0203305); 国家自然科学基金重点项目(41630422); 惠州市科技计划项目(2016G0412027); 广东省气象局科研项目(GRMC2017M38)

**作者简介:** 李明华(1980年生), 男; 研究方向: 天气预报和环境气象; E-mail: hzqxlmh@qq.com

**通信作者:** 范绍佳(1962年生), 男; 研究方向: 大气边界层与空气污染; E-mail: eesfsj@mail.sysu.edu.cn

westerly airflow. Hot and sunny weather and abundant sunshine were beneficial to ozone generation, the westerly winds on the ground and low - altitude make Huizhou in the downwind direction of the Pearl River Delta urban group, which led to regional pollution transport, while the vertical downdraft was not beneficial to pollutant transport and diffusion.

**Key words:** ozone pollution; summer and autumn; meteorological conditions; Huizhou

近年来国内外特别是我国京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等地区<sup>[1-8]</sup>和北京、上海、深圳等城市<sup>[9-14]</sup>臭氧污染日益严重,臭氧已超越 PM<sub>2.5</sub> 成为珠江三角洲地区的首要污染物<sup>[15]</sup>。臭氧污染与气象条件密切相关,臭氧浓度的升高是多气象要素共同作用的结果,且呈现一定的区域差异。北京市臭氧超标日臭氧浓度与气压、湿度、能见度呈负相关,与风速、温度呈正相关;且当北京盛行东南、偏南和偏西气流时,臭氧浓度会很高<sup>[11]</sup>。上海市在晴天少云,相对湿度较低,气温较高,地面和高空吹偏北风,且风速较小的情形时容易产生高浓度臭氧污染<sup>[12]</sup>。深圳市较高的温度、充足的日照、干燥、无雨及弱风有利于臭氧浓度的升高<sup>[13]</sup>。沈阳市臭氧浓度受温度、风速、湿度、能见度、天气情况的共同影响<sup>[14]</sup>。臭氧污染与天气型也有较好相关,北京市处于低压前部(主要是蒙古气旋)时臭氧浓度较高,此时高温、低湿以及山谷风造成区域臭氧累积;而处于高压前部控制时,低温、高湿以及系统性北风造成区域臭氧低值<sup>[10]</sup>。上海市在高压系统的影响下臭氧浓度显著升高<sup>[12]</sup>。通过分析天气型结构以及多种气象要素对逐日最大臭氧浓度具有较好的可预报性<sup>[10,12]</sup>。

惠州市位于广东省东南部,珠江三角洲城市群东侧,属亚热带季风气候,季风气候特征明显,汛期受夏季风影响地面盛行东南风天气湿热多雨,非汛期受东北季风影响地面盛行东北风天气干燥少雨,近年来臭氧已成为首要污染物<sup>[16]</sup>。本文利用大气环境和气象观测资料统计分析惠州市夏秋季臭氧污染特征,并对典型污染过程进行个例分析,以期惠州市持续改善空气质量和臭氧污染防治提供依据。

## 1 资料和方法

惠州市区的国家基本气象观测站惠阳观测站 2013 年 1 月 1 日 - 2016 年 12 月 31 日逐日逐时的地面气象观测资料;惠州市区的惠城区江北云山西路子站、惠城区下埔横江三路子站、惠城区河南岸金山湖子站、大亚湾区管委会子站、惠阳区承修路船湖子站 5 个国控点 2013 年 1 月 1 日 - 2016 年 12

月 31 日平均逐日 O<sub>3</sub> - 8h 质量浓度和逐时 O<sub>3</sub> 质量浓度资料。

参照《环境空气质量标准》(GB3095 - 2012)<sup>[17]</sup>中臭氧日最大 8 h 平均质量浓度超过 160 μg/m<sup>3</sup> 时空气质量就不达标。参照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633 - 2012)<sup>[18]</sup>,污染日首要污染物为臭氧时定义为臭氧污染日,当 AQI ≤ 100 时定义为无污染日,当 AQI > 100 时定义为污染日,当 AQI = 101 ~ 150 时定义为轻度污染日,当 AQI = 151 ~ 200 时定义为中度污染日,当 AQI = 201 ~ 300 时定义为重度污染日,当 AQI 大于 300 时定义为严重污染日,本文中全部则包含无污染日和污染日。根据华南气候特征,4 - 9 月为汛期(雨季),10 月 - 次年 3 月为非汛期(旱季),本文以 7 - 10 月为研究时段代表夏秋季。本文资料的统计分析利用统计分析软件 SPSS23.0<sup>[19]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 臭氧污染日逐月变化特征

图 1 给出了 2013 - 2016 年惠州市累计臭氧污染日和平均质量浓度的逐月变化。由图 1 可知,惠州市臭氧污染日除 2 月和 12 月外各月均有出现,夏秋季(7 - 10 月)是臭氧污染日的高发期年平均为 12.5 d,占全年臭氧污染日的 73.5%,其中 7 月、8 月和 10 月累计出现日数均在 10 d 以上,值得提出的是 10 月最多但都为轻度污染日;惠州市臭氧污染的最高程度为中度,中度臭氧污染日在春季的 3 月、4 月和夏秋季的 7 月和 8 月都有出现,其中夏秋季占全年的 77.8%;从臭氧质量浓度来看夏秋季也是较高的月份,10 月和 9 月分别位居第一和第二,O<sub>3</sub> - 8 h 多年平均质量浓度分别为 115.1 和 102.3 μg/m<sup>3</sup>。根据惠州市天气气候特征<sup>[20-21]</sup>可知,7 - 9 月为华南后汛期常受副热带高压控制,主要气候特征为若无热带天气系统影响大多天气晴朗、云量较少、日照充足、气温较高;10 月为非汛期的初始月份,天气大多晴朗干燥、降雨概率低。

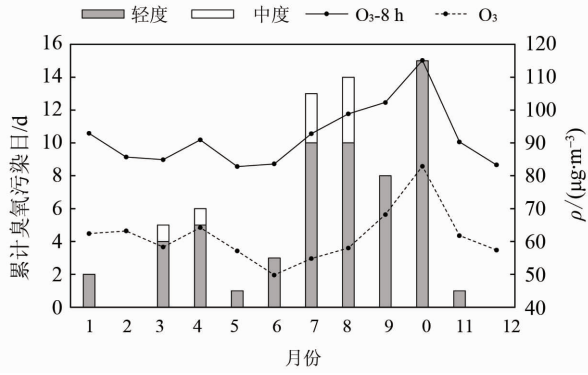


图 1 2013 - 2016 年惠州市累计臭氧污染日和平均质量浓度的月变化

Fig. 1 Monthly distribution of O<sub>3</sub> pollution days and O<sub>3</sub> concentrations in Huizhou during 2013 - 2016

## 2.2 夏秋季臭氧污染日污染物质量浓度变化特征

表 1 给出了 2013 - 2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时其它污染物平均质量浓度。由表 1 可知，惠州市夏秋季臭氧污染时其它污染物的质量浓度均会明显增加，臭氧污染日 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 CO 平均质量浓度与无污染日相比分别上升了 73.3%、82.0%、55.0%、60.0% 和 16.9%；其中 O<sub>3</sub> - 8 h、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 和 CO 质量浓度均随污染的强度增加而增加，而 SO<sub>2</sub> 的质量浓度臭氧中度污染时反而低于轻度污染时，臭氧中度污染时 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的平均质量浓度仍维持在优水平。惠州市夏秋季臭氧污染时其它污染物的质量浓度均会明显增加这除与区域污染输送有关外，也可能与夏秋季光化学反应<sup>[22-23]</sup> 活跃有关，这还有待于利用更多的样本进行统计分析或利用环境气象模式验证。

表 1 2013 - 2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时其它污染物平均质量浓度

Table 1 The mean mass concentration of other pollutants under different O<sub>3</sub> grades in the summer and autumn in Huizhou during 2013 - 2016

类别	$\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$					$\rho(\text{CO})/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	AQI
	O <sub>3</sub> - 8 h	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>		
无污染日	92.5	44.5	25.6	10.9	21.0	0.676	52.9
污染日	188.4	77.1	46.6	16.9	33.6	0.79	126.5
轻度污染日	181.1	76.6	46.0	17.1	32.7	0.784	119.7
中度污染日	233.1	80.0	50.0	15.7	39.1	0.814	168.1
全部	102.2	47.9	27.8	11.5	22.3	0.687	60.4

为了更进一步分析惠州市夏秋季臭氧污染时臭氧和其它污染物质量浓度的变化特征，图 2 给出了夏秋季臭氧污染不同程度时污染物质量浓度的逐时变化特征。由图 2 可知，惠州市夏秋季 O<sub>3</sub> 小时质量浓度在臭氧无污染日、轻度污染日和中度污染日的逐时变化都是呈单峰变化，夜间较低，06 - 08 时最低，10 时起随着气温升高和紫外线辐射的增强开始大幅上升，最大值都出现在午后 14 - 16 时，随着日落和紫外线辐射减弱又逐渐降低；O<sub>3</sub> 小时质量浓度在臭氧无污染日、轻度污染日和中度污染日夜间相差不大，甚至出现了 06 - 08 时中度污染日最低的现象，但轻度和中度污染日午后显著高于无污染日，以 15 时为例平均质量浓度分别为 191.6, 247.8 和 97.3 μg/m<sup>3</sup>，轻度和中度污染日与无污染日相比分别高了 96.9% 和 154.7%。臭氧污染日尤其是在臭氧中度污染日 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度 14 - 18 时呈上升趋势，而无污染日和轻度污染日该时段却为低谷期，这可能与臭氧中度污染日

光化学反应<sup>[22-23]</sup> 非常活跃生成大量细颗粒物所致；臭氧中度污染日 NO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的质量浓度在 14 时之前高于轻度污染日，14 时之后两者逐渐接近甚至低于轻度污染日；而 SO<sub>2</sub> 的质量浓度呈现 8 - 9 时最高，此时中度污染日显著高于轻度污染日，而 10 时之后中度污染日质量浓度明显低于轻度污染日。这可能臭氧中度污染日光化学反应非常活跃消耗掉大量的氮氧化物和硫氧化物，生成大量细颗粒物有关。

## 2.3 夏秋季臭氧污染日气象条件分析

表 2 给出了 2013 - 2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时气象条件平均统计特征值。由表 2 可知，惠州市夏秋季臭氧污染日多年平均质量浓度为 188.4 μg/m<sup>3</sup>，多年平均风速为 2.0 m/s，多年平均降雨概率为 14.0%，多年平均总云量和低云量分别为 3.9 和 2.7，多年平均日照时数为 8.3 h，多年平均相对湿度为 70.8%；夏秋季臭氧污染日与无污染日相比，多年平均质量浓度高了 95.9 μg/m<sup>3</sup>，

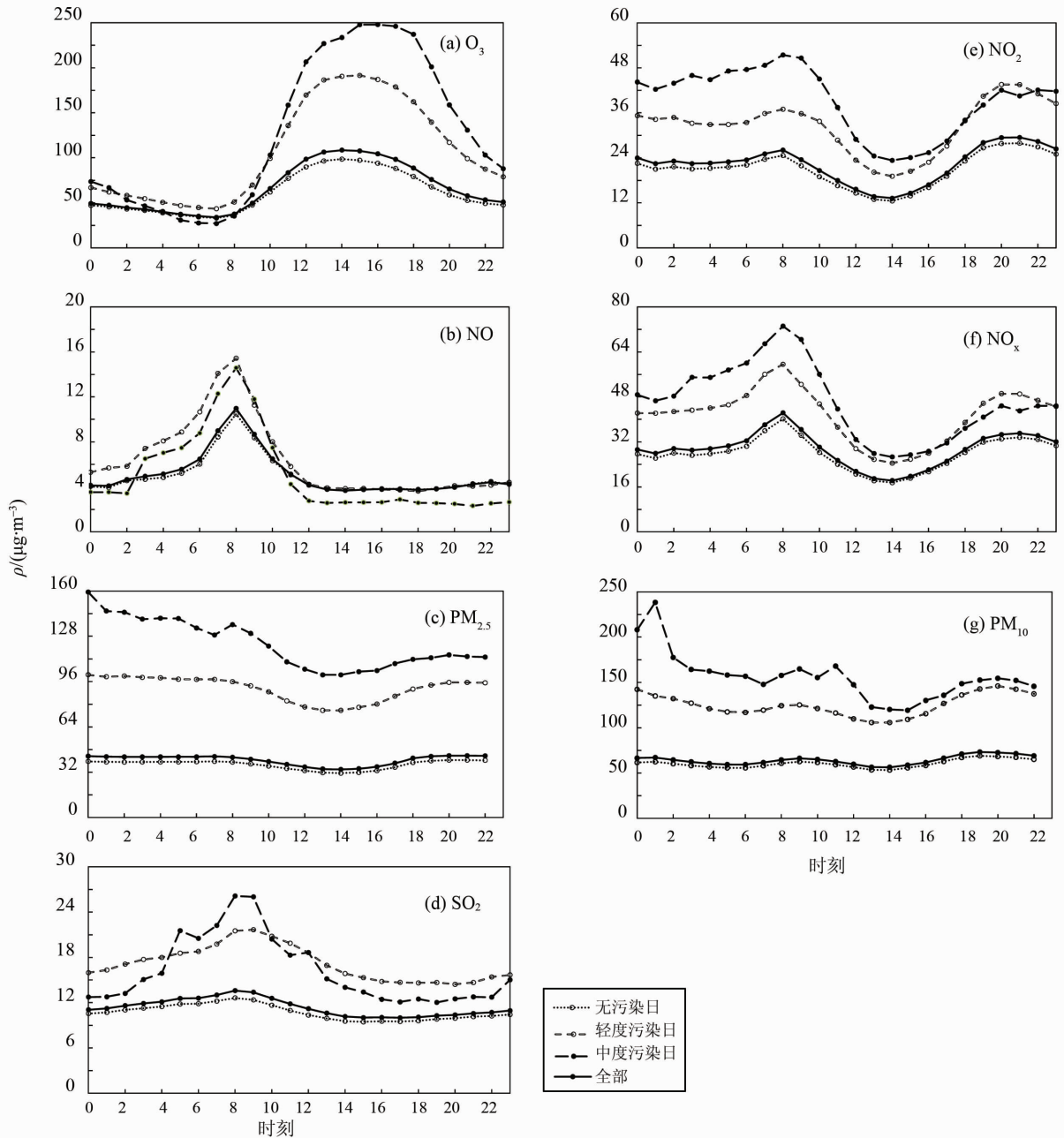


图 2 2013 - 2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时各种污染物平均质量浓度逐时变化图

Fig. 2 Hourly mean distribution of pollutant concentrations on  $O_3$  pollution days in the summer and autumn of Huizhou during 2013 - 2016

多年平均风速相差不大, 多年平均降雨概率明显偏低了 34.4%, 多年平均总云量和低云量明显偏少分别少了 3.2 和 2.6, 多年平均日照时数多了 1.7 h, 多年平均相对湿度低了 8.2%; 这说明惠州市夏秋季臭氧污染日大多出现在气温较高、日照充足、晴朗干燥的天气下, 而 10 月惠州市大多是这类天气, 这也是 10 月臭氧污染日较多的原因。

#### 2.4 夏秋季臭氧污染日地面风向特征

表 3 给出了 2013 - 2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时风向频率统计特征。由表 3 分析可知, 惠州市夏秋季臭氧无污染日与污染日的风向频率从多年平均来看有较大差异, 臭氧无污染日风向频率超过 10% 的分别是 NNE (10.4%)、NE (12.9%) 和 SE (16.3%), 臭氧污染日时风向频率超过 10% 的则分别是 SE (10.8%)、W

(10.0%)、WNW (10.4%) 和 NW (15.3%)，其中 WSW-W-WNW-NW 合计出现频率为 44.9%，臭氧中度污染日时 WSW-W-WNW-NW 合计出现频率更是高达 74.4%。为进一步分析夏秋季臭氧中度污染日时的风向特征，统计分析了惠州市 2013-2016 年臭氧中度污染日时的日最大风速风向，发现臭氧中度污染日时日最大风速风向都有偏西分

量 (W) 的存在，出现次数 NW 和 WSW 分别为 3 次、SSW 为 2 次、W 为 1 次。通过上面的分析发现惠州市夏秋季臭氧污染日尤其是中度污染日易出现在偏西风下，当为偏西风时惠州市位于广州市等珠三角城市群的下风向，这表明偏西风时珠三角城市群污染物排放对惠州市臭氧污染有重要影响，存在明显的区域污染输送影响<sup>[24-25]</sup>。

表 2 2013-2016 年惠州市夏秋季污染不同程度时气象条件平均统计特征值

Table 2 Statistical characteristics of meteorological conditions on pollution days in the summer and autumn of Huizhou during 2013-2016

项目	出现日数 d	气温 ℃	风速 (m · s <sup>-1</sup> )	降水量 mm	降雨概率 %	总云量 成	低云量 成	日照时数 h	相对湿度 %
无污染日	442	27.2	2.1	7.0	48.4	7.1	5.3	5.6	79.0
污染日	50	28.0	2.0	2.8	14.0	3.9	2.7	8.3	70.8
轻度污染日	43	27.7	1.9	3.1	14.0	3.6	2.4	8.4	70.0
中度污染日	7	30.2	2.5	0.4	14.3	6.1	4.4	7.0	75.9
全部	492	27.3	2.1	6.6	45.2	6.7	5.0	5.9	78.2

表 3 2013-2016 年惠州市夏秋季臭氧污染不同程度时风向频率统计特征

Table 3 Statistical characteristics of wind direction frequency on O<sub>3</sub> pollution days in the summer and autumn of Huizhou during 2013-2016

夏秋季风向频率	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	C
无污染日	4.7	10.4	12.9	9.0	6.0	7.9	16.3	5.9	3.6	3.3	1.6	2.6	2.7	3.2	5.8	3.2	0.9
污染日	3.6	6.8	6.7	3.9	1.7	3.3	10.8	4.0	2.9	2.8	2.5	9.2	10.0	10.4	15.3	4.9	1.3
轻度污染日	4.0	7.9	7.7	4.4	1.8	3.7	11.6	4.3	2.9	2.9	2.4	6.9	7.9	9.5	15.7	5.1	1.3
中度污染日	1.2	0.0	0.6	1.2	0.6	0.6	6.0	2.4	3.0	2.4	3.0	23.2	22.6	16.1	12.5	3.6	1.2
全部	4.6	10.0	12.3	8.5	5.6	7.4	15.8	5.8	3.5	3.3	1.7	3.3	3.5	3.9	6.8	3.4	0.9

为了更进一步分析惠州市夏秋季臭氧污染日的风向频率特征，图 3 给出了臭氧污染日风向频率的逐时变化。由图 3 可知，惠州市夏秋季臭氧污染日的风向频率具有明显的日变化特征，东南风 ESE、SE 和 SSE 主要出现在 00-08 时和 19-23 时，其中 SE 出现频率都在 10% 以上，最高为 21 时的 26.0%，其它时刻 SE 出现频率均在 5% 以下；东北风 NNE、NE 和 ENE 在各时刻都有出现，但高值出现在 07-11 时合计出现频率在 20% 以上；偏西风 WSW、W、WNW 和 NW 各时刻合计出现频率都比较高，其中 11-18 时合计出现频率均在 50% 以上平均为 59.0% 且 16 时高达 72.0%，与此对应的是东南风 11-18 时 ESE、SE 和 SSE 合计出现频率平均仅有 6.0%。这说明惠州市夏秋季臭氧污染日臭氧质量浓度高时都是以偏西风为主，其它风向的出现频率较低。

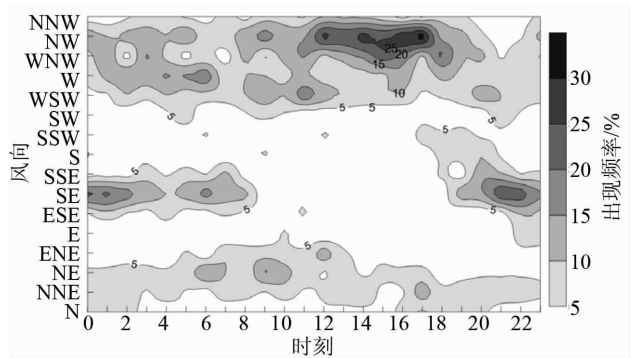


图 3 2013-2016 年惠州市夏秋季臭氧污染日风向频率逐时变化

Fig. 3 Hourly mean distribution of wind direction frequency on O<sub>3</sub> pollution days in the summer and autumn of Huizhou during 2013-2016

## 2.5 夏秋季臭氧污染典型个例分析

惠州市夏季受副热带高压和台风外围下沉气流的共同影响, 极易出现高温炎热天气<sup>[26]</sup>, 此时地面和低空经常为偏西风, 受区域污染输送的影响极易出现臭氧污染尤其是中度污染天气。2013 年 7 月 12 - 13 日惠州市连续两天出现了臭氧污染, AQI 分别为 141 (轻度污染) 和 190 (中度污染, 2013 - 2016 年第 2 高), 此次臭氧污染与 1307 号超强台风“苏力”密切相关。1307 号超强台风“苏力”7 月 8 日 08:00 生成于西太平洋, 生成后西北行, 13 日凌晨于台湾宜兰北部沿岸登陆, 随后出台湾岛进入台湾海峡, 13 日下午近 17:00 在福建省福州市附近再次登陆, 登陆后继续偏西北行进入江西境内减弱消失。从“苏力”由西太平洋靠近台湾岛时, 惠州市臭氧污染开始加重, 从其进入台湾海峡到进入福建境内, 距惠州市最近的距离约 500 ~ 700 km。表 4 给出了 2013 年 7 月 10 - 14 日惠州市逐日空气质量和地面气象条件, 图 4 给出了 2013 年 7 月 12 - 14 日大气环流形势场。由表 4 和图 4 可知此次臭氧污染过程中的天气形势为:

500 hPa: 前期副热带高压呈东西带状分布, 脊线位于 30°N 附近, 控制我国中南部大部地区, 热带气旋“苏力”生成于其南侧, 随着“苏力”西北行逐渐靠近大陆, 副高呈东退态势, 13 日副高呈方头状东退至台湾东北部, 此时华南地区高度场变低, 惠州市上空为 584 hgpm 线控制。850 hPa: 前期强盛的西南急流轴位于广西附近, 粤东为弱的偏南气流, 随着热带气旋的靠近, 粤东渐转东北风, 风向逆时针旋转, 12 - 13 日粤东及珠江口附近地区上空为偏北 - 西北气流, 即受热带气

旋外围下沉气流影响 (图 4a 和图 4d)。925 hPa: 随“苏力”的逐渐靠近, 12 - 13 日白天风向逐渐转为偏西风 (图 4b 和图 4d), 13 日夜间接逐渐转为西南风且风速明显增大。垂直上升速度: 受台风外围下沉气流影响, 前期是下沉不利于污染物扩散和输送, 13 日下午起转为上升且风速逐渐增大利于污染物扩散和输送 (图 4d)。地面气象条件: 惠州市 12 日和 13 日中午前主要为天气晴朗干燥、日照充足, 气温显著上升 13 日最高气温升至 36.7 °C, 风向主要为 NW 和 W 等偏西风 (图 4c); 13 日下午起受台风环流影响, 天空云量明显增多, 日照时数明显减小, 风速增大。从空气质量和污染物质量浓度来看, 空气质量由 10 - 11 日的优转为 12 日臭氧轻度污染和 13 日臭氧中度污染, 其中 O<sub>3</sub> - 8 h 质量浓度由 11 日的 98 μg/m<sup>3</sup> 升到 13 日的 255 μg/m<sup>3</sup>, 其它污染物的质量浓度也明显上升。综上所述, 2013 年 7 月 12 - 13 日惠州市臭氧中度污染过程主要是受“苏力”外围下沉和偏西气流的共同影响, 天气晴朗干燥、日照充足、天气炎热非常有利于臭氧生成, 地面和低空吹偏西风使惠州市处于珠三角城市群的下风向存在区域污染输送, 同时垂直方向的下沉气流不利于污染物输送与扩散, 此次臭氧污染过程中也发现其它污染物质量浓度明显升高; 12 日下午起受“苏力”环流影响, 地面和低空逐渐转为西南风且风速增大, 天空云量增多日照减少, 臭氧生成条件趋于不利且污染物输送和扩散条件趋于有利, 20 时起臭氧和其它污染物质量浓度均快速减小, 14 日空气质量转为优。

表 4 2013 年 7 月 10 - 14 日惠州市逐日空气质量和地面气象条件

Table 4 Daily AQI and ground meteorological conditions in Huizhou during 10 - 14 July, 2013

日期	$\rho / (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$				$\rho (\text{CO})$		AQI	风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	日最大 风速 风向	日平均 气温 °C	日最高 气温 °C	日照 时数 h	降雨量 mm	相对 湿度 %	总云量低云量	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub> -8 h	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	( $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ )									成	成
10 日	10	18	75	24	12	0.6	38	1.8	NW	28.1	32.9	9.6	0.2	77	8.3	4.3
11 日	15	22	98	36	16	0.6	49	1.2	SSW	29	35.2	8.4	0	77	3.8	3.3
12 日	15	41	205	76	48	0.8	141	1.4	NW	29.9	36.3	11.3	0	76	3.5	2.5
13 日	23	49	255	95	59	0.9	190	3.6	WSW	31.6	36.7	6.5	0	71	4	1
14 日	24	22	75	32	19	0.6	38	2.3	WSW	28.9	32.2	0	1.2	78	9.5	9.5

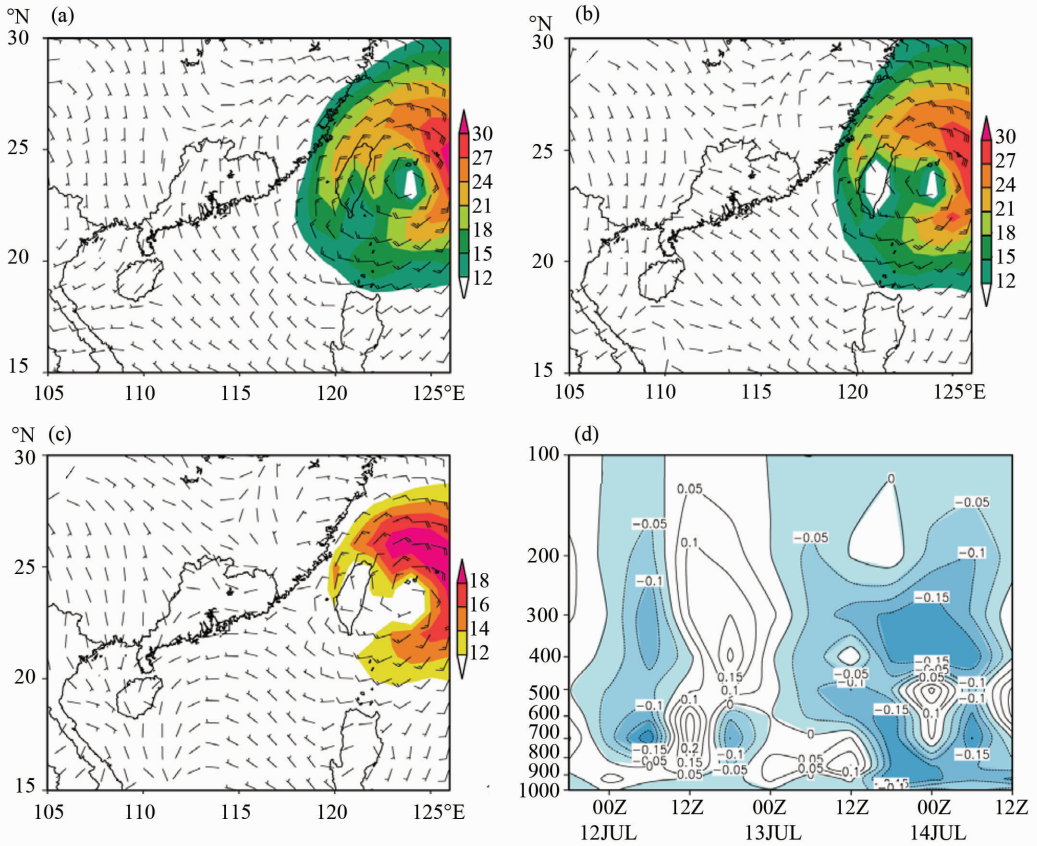


图 4 2013 年 7 月 12 - 14 日大气环流形势场 (a)12 日 20:00 850 hPa 风场;(b)12 日 20:00 925 hPa 风场; (c)12 日 20:00 10 m 风场;(d)12 - 14 日惠州附近(23.0°N,114.0°E)垂直速度场的时间 - 垂直剖面图

Fig. 4 Wind filed at 20:00, 12th July, 2013 (a) 850 hPa, (b) 925 hPa, (c) surface, and the time series of vertical velocity field on vertical profile at 23°N,114°E on 12 - 14 July, 2013

### 3 结 论

1) 惠州市臭氧污染在一年四季均有出现,夏秋季(7 - 10 月)的天气气候特征使其成为臭氧污染的高发时段,夏秋季年平均出现日数为 12.5 d 占年臭氧污染日和年臭氧中度污染日的 73.5% 和 77.8%;夏秋季臭氧污染日时偏西风(W-SW-W-WNW-NW)出现频率非常高合计为 44.9%,臭氧中度污染日时合计出现频率更是高达 74.4%,气象条件分析表明惠州市夏秋季臭氧污染日大多出现在天气晴朗、日照充足、气温较高且地面为偏西风的天气下。惠州市夏秋季臭氧污染日其它污染物的质量浓度也会明显增加,同时随污染强度的增加 PM<sub>2.5</sub> 等污染物的日变化特征会发生明显变化。

2) 分析 2013 年 7 月 12 - 13 日惠州市臭氧中

度污染过程发现,此次臭氧污染过程主要是受“苏力”外围下沉和偏西气流的共同影响,天气晴朗、日照充足、天气炎热非常有利于臭氧生成,地面和低空吹偏西风使惠州市处于珠三角城市群的下风向存在区域污染输送,同时垂直方向的下沉气流不利于污染物输送与扩散;臭氧污染过程结束是受“苏力”环流影响,地面和低空逐渐转为西南风且风速增大,天空云量增多日照减少,臭氧生成条件趋于不利且污染物输送和扩散条件趋于有利。惠州市夏秋季受副热带高压和台风外围下沉气流的共同影响,极易出现高温炎热天气,此时地面和低空经常为偏西风,受有利气象条件和珠三角城市群区域污染输送的影响,易出现臭氧污染尤其是中度污染天气;臭氧污染的结束主要取决于本地气温、日照、云量、降水等地面气象条件和地面、高空风向的变化。

## 参考文献:

- [1] 程麟钧,王帅官,宫正宇. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 中国环境监测,2017,33(1):14-21.  
CHEN L J, WANG S G, GONG Z Y. Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Monitoring in China, 2017,33(1):14-21.
- [2] 易睿,王亚林,张殷俊,等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 环境科学学报,2015,35(8):2370-2377.  
RI R, WANG Y L, ZHANG Y J, et al. Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(8): 2370-2377.
- [3] LAL S, NAJA M, SUBBARAYA B H. Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(17): 2713-2724.
- [4] 陆克定,张远航,苏杭,等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学(化学),2010,40(4):407-420.  
LU D K, ZHANG Y H, SU H, et al. Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delt during summer time[J]. Science China(Chemistry), 2010,40(4):407-420.
- [5] RADDATZ R L, CUMMINE J D. Temporal Surface Ozone Patterns in Urban Manitoba, Canada[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(3):411-428.
- [6] 刘建,吴兑,范绍佳,等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学,2017,37(3):813-820.  
LIU J, WU D, FAN S J, et al. Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 813-820.
- [7] 马志强,王跃思,张小玲,等. 北京城区与下游地区臭氧对比研究[J]. 环境科学,2011,32(4):924-929.  
MA Z Q, WANG Y S, ZHANG X L, et al. Comparison of ozone between Beijing and downstream area[J]. Environmental Science, 2011,32(4):924-929.
- [8] 王占山,李云婷,陈添,等. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学,2015,36(11):4446-4453.  
WANG Z S, LI Y T, CHEN T, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing[J]. Environmental Science, 2015,36(11):4446-4453.
- [9] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学,2016,37(6):2041-2051.  
CHENG N L, LI Y T, ZHANG D W, et al. Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014[J]. Environmental Science, 2016,37(6):2041-2051.
- [10] 唐贵谦,李昕,王效科,等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. 环境科学,2010,31(3):573-578.  
TANG G Q, LI X, WANG X K, et al. Effects of synoptic type on surface ozone pollution in Beijing[J]. Environmental Science, 2010,31(3):573-578.
- [11] 安俊琳,王跃思,孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(3):944-951.  
AN J L, WANG Y S, SUN Y. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing[J]. Ecology and Environment, 2009, 18(3): 944-951.
- [12] 谈建国,陆国良,耿福海,等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其与相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报,2007,23(5):515-520.  
TAN J G, LU G L, GENG F H, et al. Analysis and prediction of surface O<sub>3</sub> concentration and related meteorological factors in summertime in urban area of Shanghai[J]. Journal of Tropical of tropical Meteorology, 2007, 23(5):515-520.
- [13] 梁碧玲,张丽,赖鑫,等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报,2017,33(1):66-71.  
LIANG B L, ZHANG L, LAI X, et al. Analysis of the characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological conditions in Shenzhen[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017,33(1):66-71.
- [14] 王闯,王帅,杨碧波,等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. 中国环境监测,2015,31(3):32-37.  
WANG C, WANG S, YANG B B, et al. Study of the effect of meteorological conditions on the ambient air ozone concentrations in Shenyang[J]. Environmental Monitoring in China, 2015,31(3):32-37.

- [15] 广东省环境保护厅. 广东省城市环境空气质量状况 [EB/OL]. [http://www.gdep.gov.cn/news/xwfb/201701/t20170120\\_219238.html](http://www.gdep.gov.cn/news/xwfb/201701/t20170120_219238.html), 2016.
- [16] 李明华, 陈超, 曾丹丹, 等. 惠州市空气质量特征分析 [J]. 广东气象, 2018, 40(2): 31-35.  
LI M H, CHEN C, ZENG D D, et al. Analysis on air quality characteristics of Huizhou city [J]. Guangdong Meteorology, 2018, 40(2): 31-35.
- [17] 环境保护部. 环境空气质量标准 GB3095-2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [18] 环境保护部. 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 HJ633-2012 (试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 张文彤, 邱春伟. SPSS 统计分析基础教程 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 144-165.
- [20] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 1-262.
- [21] 李明华, 崔少萍, 杜小松, 等. 2010 年惠州市运会开幕日期选定的气候背景分析 [J]. 广东气象, 2009, 31(3): 19-21.  
LI M H, CUI S P, DU X S, et al. Climate background analysis for the date selection of the opening ceremony of the 2010 Guangdong Provincial Games in Huizhou [J]. Guangdong Meteorology, 2015, 51(4): 620-630.
- [22] 中国气象局. 光化学烟雾判识 QX/T240-2014 [S]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [23] 中国气象局. 光化学烟雾等级 QX/T241-2014 [S]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [24] 陈皓, 王雪松, 沈劲, 等. 珠江三角洲秋季典型光化学污染过程中的臭氧来源分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2015, 51(4): 620-630.  
CHEN H, WANG X S, SHEN J, et al. Ozone source apportionment of typical photochemical pollution episodes in the Pearl River Delta in autumn [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(4): 620-630.
- [25] 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), 2016, 52(6): 977-988.  
YE L M, FAN S F, CHANG M, et al. Spatial and temporal distribution of ozone sensitive district in the Pearl River Delta region during autumn [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, 52(6): 977-988.
- [26] 杜小松, 陈芳丽, 李明华, 等. 惠州高温天气的气候特征与天气形势分析 [J]. 广东气象, 2015, 37(2): 23-27.  
DU X S, CHEN F L, LI M H, et al. Analysis of the climatological characteristics and weather patterns of high-temperature weather in Huizhou city [J]. Guangdong Meteorology, 2015, 37(2): 23-27.