

郑凤魁<sup>1,2</sup> 袁铁<sup>1</sup> 吉东生<sup>2</sup> 刘子锐<sup>2</sup> 王跃思<sup>1,2</sup> 胡波<sup>2</sup>

# 三亚地区冬春季大气污染特征观测研究

## 摘要

为了研究海南省三亚地区冬春季大气污染状况,于2011年12月—2013年4月的冬春季节在三亚鹿回头村(监测点位于三亚市郊,三面临海,周围没有工业污染源)开展了大气主要污染物( $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ )的连续监测,利用观测数据对三亚地区冬春季大气污染变化特征进行分析.结果表明:三亚地区大气污染物浓度均低于国家一级标准的浓度值, $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的日平均值(平均值 $\pm$ 标准差)分别为(2.1 $\pm$ 2.2)、(5.2 $\pm$ 3.4)、(7.3 $\pm$ 3.8)、(59.8 $\pm$ 28.4)和(17.5 $\pm$ 14.3) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .在污染物的日变化方面, $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现典型的双峰型,其峰值分别出现在08:00和17:00,峰谷在13:00; $\text{O}_3$ 的日变化为单峰型,峰值出现在13:00.通过后向轨迹分析发现,三亚地区大气污染物受局地源排放和外源输送的共同影响,来自陆地的气流易造成污染物的积累,而来自海上的气流则有利于污染物的清除.

## 关键词

三亚地区;大气污染;臭氧; $\text{PM}_{2.5}$ ;氮氧化物

中图分类号 P425.6

文献标志码 A

收稿日期 2015-01-05

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05020000, XDA05100100);国家自然科学基金(41230642, 41321064)

## 作者简介

郑凤魁,男,硕士生,主要研究方向为大气物理与大气环境.zhengfengkui2006@163.com

胡波(通信作者),男,博士,研究员,主要研究方向为大气辐射与大气环境.

hb@dq.cern.ac.cn

1 兰州大学 大气科学学院,兰州,730000

2 中国科学院大气物理研究所,北京,100029

## 0 引言

随着我国经济的快速增长和城市化进程的加快,能源的大量消耗导致了大气污染物的排放量大增,使得大范围的污染事件不断发生.比如2013年1月在我国东部发生了持续近1个月的连续严重污染,研究表明这次强雾霾是不利扩散的气象条件与高强度人为排放共同造成的区域性环境问题<sup>[1]</sup>.大气污染的观测研究不仅对人体健康,而且对气候变化也具有重要意义<sup>[2]</sup>.高浓度的细颗粒物以及臭氧所形成的区域复合污染已成为我国城市群面临的重大问题之一<sup>[3]</sup>.京津冀、长三角、珠三角以及四川盆地地区是我国由于人为排放而引起的大气污染较严重的地区<sup>[4-6]</sup>.王莉莉等<sup>[7]</sup>研究了天津滨海新区秋冬季大气污染特征,认为滨海新区大气污染受局地排放和外源输送共同影响,并与气象要素密切相关;黄成等<sup>[8]</sup>研究了长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征,发现长三角高排放地区主要集中在长江下游沿江一带及杭州湾地区.在大气污染与人体健康方面,谢鹏等<sup>[9]</sup>利用Meta方法分析评价认为我国珠三角地区大气污染物暴露对死亡率的影响较大.以往的研究主要在人口密集的发达地区进行,区域背景主要在瓦里关<sup>[10]</sup>、上甸子<sup>[11]</sup>、临安<sup>[12]</sup>及兴隆<sup>[13]</sup>等地开展,而对我国热带区域的大气污染状况,特别是受海洋气候影响的海南岛地区大气污染的观测研究较少.

三亚位于海南岛最南端,地处低纬度,属热带海洋性季风气候区,是中国最南部的热带滨海旅游城市,也是海南省南部的中心城市和交通通信枢纽.为了揭示三亚地区的大气污染状况,本文利用中国科学院大气物理研究所大气环境监测网三亚站2011年12月—2013年4月的2个冬春季的大气污染在线监测数据,分析了三亚大气污染物的变化规律,并结合气象参数分析了冬春季污染物变化与气象参数的关系.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测站点

三亚大气环境监测站(109.47°E, 18.22°N)(图1中红点,彩图来源于google earth)位于海南省三亚市鹿回头村中国科学院南海海洋生物研究所院内二层观测实验楼内,采样点距地面约12 m.该站点地处三亚市郊,三面临海,周围没有工业源.观测时间为2011年12月—

2012年4月与2012年12月—2013年4月的2个冬春季节,观测要素有 $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$ )、 $\text{O}_3$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ ,气象资料来自中国科学院陆地生态系统研究网络三亚气象站.

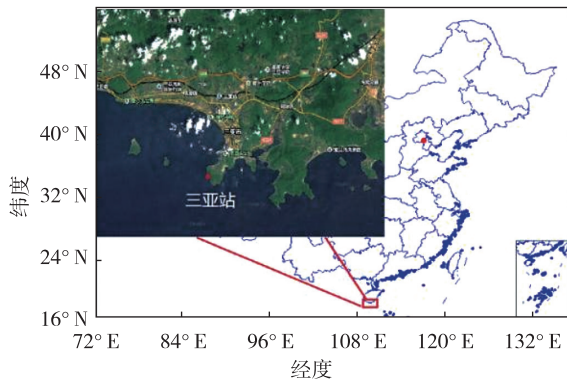


图1 三亚站位置

Fig. 1 Location of Sanya station, marked with red point

## 1.2 监测仪器

利用美国R&P公司生产的RP1400对气溶胶细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行在线监测,采集频率为每5 min采1个数据,测量范围是(0~5)  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . RP1400的最低检测限为 $0.06 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ ,质量分辨率为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,精度 $\pm 1.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ .通过美国热电公司生产的TE42i化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪在线监测 $\text{NO}_x$ ,该仪器的最低检测限为 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,零漂 $< 0.5 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ ,跨漂 $\pm 1\% \cdot \text{d}^{-1}$ . $\text{O}_3$ 使用TE49i紫外光度法分析仪进行观测,其最低检测限为 $4.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,零漂 $< 2 \mu\text{g} \cdot \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ ,跨漂 $\pm 1\% \cdot (7 \text{d})^{-1}$ .气溶胶细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测仪器和污染气体监测仪器,均放在 $25^\circ\text{C}$ 恒温观测室内,每周更换一次 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 仪器进样滤膜,每月更换一次采样管线.观测期间每月进行一次RP1400流量校准,当天平滤膜负载率接近40%时更换膜,气体监测仪器每月标定一次.通过采

集模块采集传感器的电压信号,通过转换获得观测要素的数据文档并存储在本地采集的工控机中,然后无线网络将获得的观测数据传输到北京大气物理研究所数据管理中心.经过质量控制后,计算获得小时平均值,数据获取率为97%,利用小时均值进行相关分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物质量浓度及其总体变化

图2是观测期间(2011-12-01—2012-04-30与2012-12-01—2013-04-30)污染物质量浓度的逐日变化.可以看出三亚地区污染物质量浓度较低, $\text{NO}$ 的主要来源是机动车尾气的排放、工业和生物质燃烧<sup>[14-15]</sup>.由图2a—2c可看出:2013年冬春季 $\text{NO}$ 的平均质量浓度较2012年冬春季增多了50%,逐日平均质量浓度与 $\text{NO}_x$ 有相同的变化趋势,一个可能原因是2013年人为因素对 $\text{NO}$ 的影响大于2012年;而 $\text{NO}_2$ 质量浓度比2012年冬春季的有所降低,平均质量浓度降低了19%,表明2013年大气光化学反应激烈, $\text{NO}_2$ 消耗较多,因而产生了更多的 $\text{O}_3$ ;2012年冬春季的 $\text{NO}_2$ 跟 $\text{NO}_x$ 的质量浓度变化趋势一致,且数值相差不大,而 $\text{NO}$ 的质量浓度观测值很小,说明 $\text{NO}_2$ 是 $\text{NO}_x$ 的主要贡献.由图2d可知,2013年冬春季的 $\text{O}_3$ 质量浓度较2012年冬春季的有所升高,平均质量浓度升高了28%.三亚地区 $\text{NO}_2$ 质量浓度比较低,而且变化不太明显,所以 $\text{O}_3$ 在大气氧化剂 $\text{O}_x$  ( $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ )中占的比例大,从图2d、2e中也可以看出 $\text{O}_3$ 与 $\text{O}_x$ 有相同的变化趋势.

表1列出了观测期间各种污染物质量浓度的日均值以及小时均值最大值. $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 在观测期间质量浓度的日平均值分别是( $2.1 \pm 2.2$ )、( $5.2 \pm 3.4$ )、( $7.3 \pm 3.7$ )、( $59.8 \pm 28.4$ )和( $17.5 \pm 14.3$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,对照国家最新颁布的《环境空气质量标准》GB 3095—2012<sup>[16]</sup>,各污染物质量浓

表1 污染物质量浓度统计

Table 1 Atmospheric pollutants concentrations during observation period

参数	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$				
	日均值		国家标准(一级)	小时均值	
	平均值	最大值		最大值	国家标准(一级)
$\rho(\text{NO})$	$2.1 \pm 2.2$	12.1(2013-04-20)		34.7(2011-12-08)	
$\rho(\text{NO}_2)$	$5.2 \pm 3.4$	25.5(2011-12-16)	80	24.3(2012-02-29)	200
$\rho(\text{NO}_x)$	$7.3 \pm 3.7$	25.9(2011-12-26)	100	90.5(2011-12-21)	250
$\rho(\text{O}_3)$	$59.8 \pm 28.4$	130.5(2013-01-18)		184.4(2013-01-25)	160
$\rho(\text{PM}_{2.5})$	$17.5 \pm 14.3$	86.4(2011-12-14)	35	99.6(2011-12-24)	

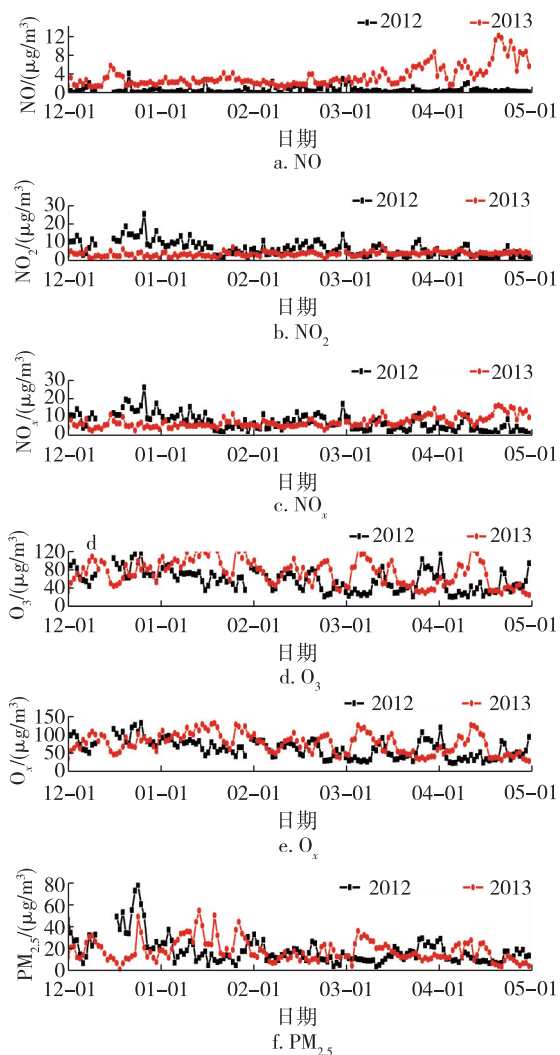


图2 污染物逐日平均质量浓度变化  
Fig. 2 Daily variation of atmospheric pollutants

度的日均值均低于国家一级浓度限值.观测期间  $\text{NO}_x$  质量浓度日均值和小时均值的最大值都出现在冬季,分别是  $25.9$  和  $90.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\text{O}_3$  质量浓度的日均值和小时均值的最大值出现在1月,分别是  $130.5$  和  $184.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度日均值和小时均值的最大值都出现在12月,分别为  $86.4$  和  $99.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;各污染物质量浓度的日均值的平均值均未超过国家标准(一级);除了  $\text{PM}_{2.5}$ ,其他污染物质量浓度的日均值最大值都低于国家标准(一级)限值,  $\text{PM}_{2.5}$  日均值超标率为  $6.9\%$ .

## 2.2 污染物质量浓度的月变化规律

图3是2个冬春季季节污染物平均质量浓度的逐月变化,  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{O}_x$  和  $\text{PM}_{2.5}$  在观测期间质量浓度的月平均值分别是  $(2.1 \pm 2.0)$ 、 $(5.4 \pm 2.7)$ 、 $(7.4 \pm 2.6)$ 、 $(67.1 \pm 16.6)$ 、 $(74.0 \pm 17.4)$  和  $(18.5 \pm$

$7.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .从图3可看出,冬季污染物质量浓度均高于春季,这主要是因为冬季气温较低、湿度较小、大气较稳定,不利于污染物的扩散,同时也与冬季三亚游人活动的增加有关.1月臭氧质量浓度的月平均值最高,达到  $77.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,4月平均值最低,为  $52.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .从图3c可以看出  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) 质量浓度变化比较平缓,而且数值比较低,所以  $\text{O}_x$  与  $\text{O}_3$  的变化相似.从图3b可以看出12月  $\text{PM}_{2.5}$  浓度值最高,为  $27.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,4月  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度值最低,为  $12.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . $\text{NO}_x$  质量浓度的最高值 ( $9.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和最低值 ( $7.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 也分别出现在12月与4月.

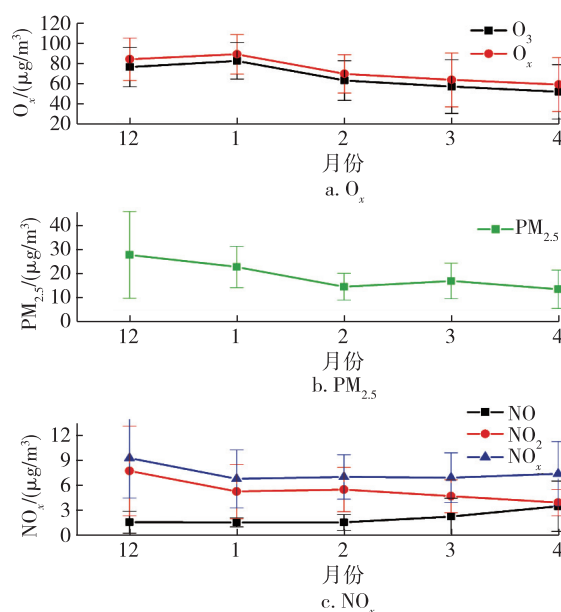


图3 两年污染物质量浓度的月平均变化  
Fig. 3 Monthly variation of air pollutants during observation period

## 2.3 冬春季污染物质量浓度平均日变化

图4为2个冬春季污染物浓度日变化特征,与城市站相似,三亚的  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  质量浓度的日变化呈典型的双峰型,峰值分别在早上  $08:00$  与下午  $17:00$  出现,均与交通高峰源排放和边界层的发展生消相关.夜晚大气混合层高度比较低,而且很容易形成大气逆温层,使地面污染物很难扩散,早上  $06:00$  以后,随着人类活动加剧等因素所产生的  $\text{NO}$  质量浓度不断积累,在  $08:00$  达到最大值,随后,随着太阳辐射的加剧,大气混合层高度抬升,加强了污染物的垂直扩散,加之交通排放源的减弱,  $\text{NO}$  质量浓度逐渐降低.由于三亚地区受人类活动影响较小,

NO 占  $\text{NO}_x$  的比值很小,所以三亚的  $\text{NO}_x$  主要由  $\text{NO}_2$  组成。 $\text{NO}_x$  和  $\text{NO}_2$  的日变化趋势较为相似,早上 8:00  $\text{NO}_x$  达到最高值,之后随着太阳辐射的增加,  $\text{NO}_2$  所参与的光化学反应增强,  $\text{NO}_x$  的质量浓度逐渐降低,13:00 达到了最低点;随后,由于  $\text{NO}_2$  消耗速率的降低、污染物的输送以及下午人类活动的加剧,  $\text{NO}_x$  质量浓度又逐渐上升,17:00 达到另一个峰值;到了晚上,由于大气层结稳定,气流传输较弱,人类活动也减弱,所以  $\text{NO}_x$  夜间浓度值变化比较平缓。

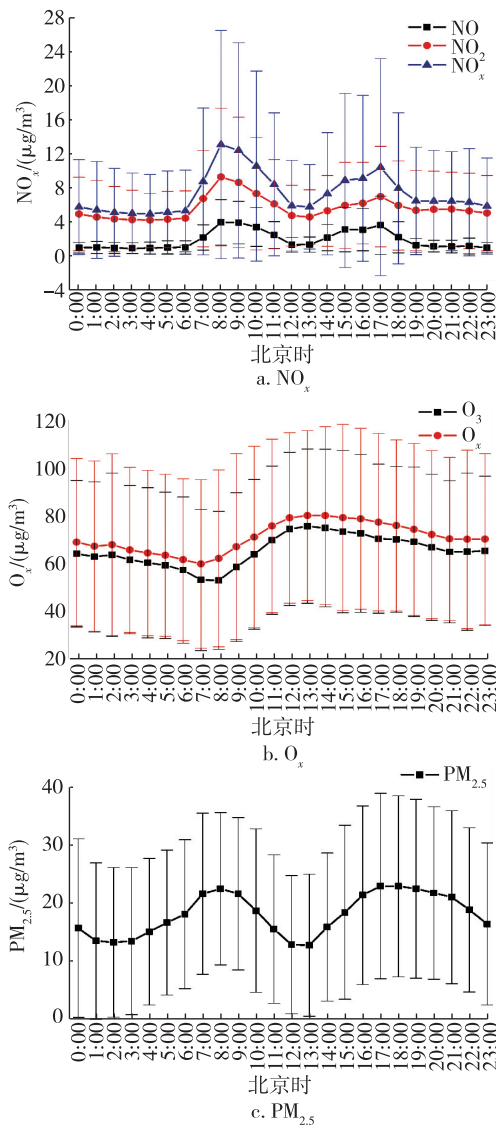


图4 污染物质量浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variations of atmospheric pollutants during observation period

对流层臭氧的产生除平流层注入外主要来自于光化学反应<sup>[17]</sup>,光化学反应产生  $\text{O}_3$  的速率与太阳紫外辐射的强度和  $\text{NO}_x$  等物质的质量浓度密切相

关<sup>[18-19]</sup>.三亚  $\text{O}_3$  的质量浓度日变化呈单峰分布,早上 08:00 以后,随着温度的升高以及太阳辐照强度增加,  $\text{O}_3$  生成速率增加,在 13:00 左右达到了最大值,为  $86.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而在此时,  $\text{NO}_x$  对应为最小值,充分说明了大气光化学反应 ( $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O} (\lambda \leq 420 \text{ nm}); \text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ , M 为空气中的介质)过程中  $\text{NO}_x$  的消耗,13:00—16:00,大气光化学反应速率逐渐降低,但是  $\text{O}_3$  的质量浓度一直在不断积累,高值稳定了较长一段时间,16:00 以后,由于紫外辐射强度减小,大气光化学反应速率降低,  $\text{O}_3$  的质量浓度开始逐渐降低,由于在夜间大气化学反应 ( $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ) 对  $\text{O}_3$  的影响以及近地面  $\text{O}_3$  的沉降作用,导致  $\text{O}_3$  质量浓度持续降低并在凌晨 8:00 达到最低值,为  $59.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .由图 4b 看出,三亚地区  $\text{O}_x$  跟  $\text{O}_3$  的质量浓度日变化趋势基本相同,而且数值相差不大,可见冬季  $\text{O}_x$  主要是  $\text{O}_3$  占主导,另一方面也说明三亚地区  $\text{NO}_x$  质量浓度较低.07:00  $\text{O}_x$  达到了最低值,这与图 4a 中  $\text{NO}_2$  最高值所对应,07:00 之后,  $\text{O}_3$  质量浓度持续降低且持续到 08:00,而  $\text{O}_x$  质量浓度开始增加,这是由于这段时间内  $\text{NO}_x$  质量浓度大幅度升高的结果;其他时间段内,  $\text{O}_x$  与  $\text{O}_3$  的质量浓度变化基本保持一致。

从图 4c 可以看出,三亚地区的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度水平较低,但浓度日变化幅度较大,呈现双峰型,08:00 出现第 1 个峰值,为  $25.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,主要是由上班期间机动车尾气排放,加上日出前后大气层稳定,不利于污染物的扩散导致污染物在边界层累积使得浓度较大造成的.之后随着太阳辐射加强和温度上升,空气垂直对流活动加强,污染物浓度扩散降低,并于中午 12:00 达到最低值  $15.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;下午随着光化学反应及传输产生的  $\text{O}_3$  的大幅度升高以及  $\text{O}_x$  的升高,大气氧化性加强,使得二次粒子生成加强,加上下班期间机动车等的贡献,  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度也逐渐升高并在 17:00 达到最大值,为  $26.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .冬季三亚地区的  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{NO}_x$  质量浓度变化的 2 个峰值出现的时间一致,说明 2 种物质形成有相同的机制。

影响大气中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的因素很多,除了风速(颗粒物的动力清除)、相对湿度(吸湿增长以及非均相反应),还和空气温度以及大气氧化剂  $\text{O}_x$  存在一定的关系<sup>[20]</sup>.由图 5 可以看出,三亚地区冬季  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{O}_x$  质量浓度成正比的相关性,说明大气氧化性加强使得当地气粒转换加速,使  $\text{PM}_{2.5}$  浓度升高;

三亚地区污染程度轻、湿度大、辐射强,有助于氮氧化物向硝酸盐转化,以及晚上大气混合层稳定,细粒子扩散微弱,所以夜间  $PM_{2.5}$  与  $O_x$  质量浓度的相关性比白天的高.由图 4c 也可以看出,  $PM_{2.5}$  日变化中,下午 17:00 以后,  $PM_{2.5}$  有一段时间持续高值,三亚地区夜晚的  $PM_{2.5}$  高于白天的,一方面是因为外界的传输,另一方面是因为稳定边界层不利于细粒子的扩散.

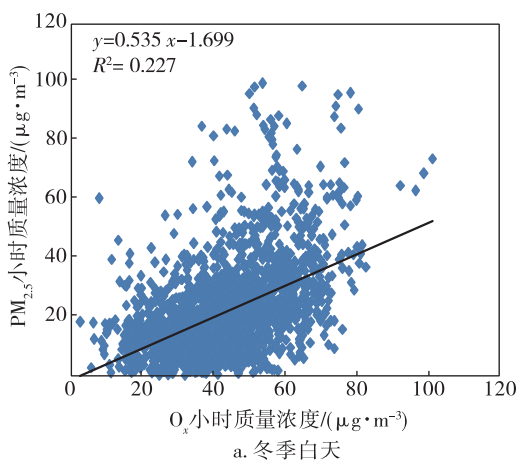


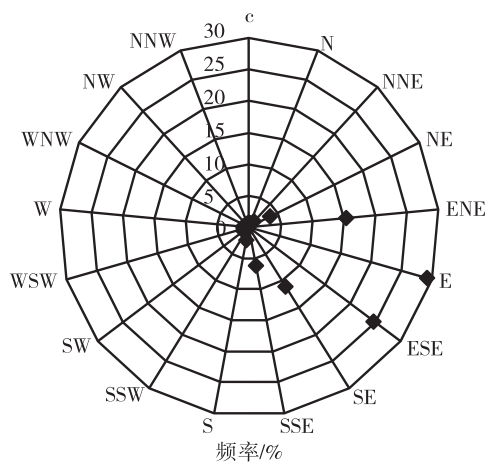
图 5 冬季  $PM_{2.5}$  与  $O_x$  小时质量浓度的相关性

Fig. 5 Correlation coefficients between hourly concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $O_x$  in winter

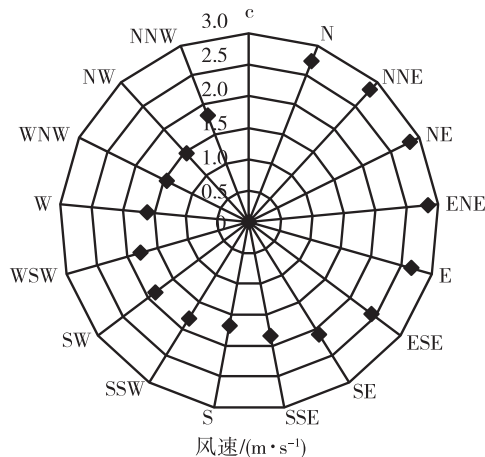
### 2.5 污染物质量浓度与风向的关系

图 6 给出了冬季各个风向的发生频率以及对应风速的大小.由图 6 可知,三亚冬季主要以东北偏东、东风、东南偏东、东南风为主导,发生频率分别占总风向的 15%、30%、25% 和 10%,同时这几种风向上的平均风速也较大.

为了进一步了解三亚地区污染物与风速、风向的关系,图 7a—7e 分别给出了冬春季期间污染物



a. 各个风向上风出现的频率



b. 各个风向上平均风速的大小

图 6 冬季各个方向的风速及频率

Fig. 6 Wind frequency and average wind speed during observation period

$NO$ 、 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、 $O_3$ 、 $PM_{2.5}$  的质量浓度在不同风速、风向上的分布.总体来看,  $NO$ 、 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  等高污染浓度主要出现在  $0^\circ$  到  $180^\circ$  的风向区间,同时高污染浓度值主要出现在风速大于  $4\text{ m/s}$  时,  $0^\circ \sim 180^\circ$  区间的风大都来自陆地,说明来自陆地的传输对站点污染物浓度影响较大,来自海洋的气流则对三亚站的污染物具有较好的清除作用.由图 7a 可知,  $NO$  质量浓度的高值出现在东北、西南 2 个风向,再对照  $NO$  质量浓度出现高值的时间,均在早上 8:00 到 9:00 之间以及晚上 18:00,由此可判断高值出现的一个原因是这 2 个方向上机动车等产生的  $NO$  的排放对站点的影响.东风的时候,出现  $NO$  质量浓度的低值群,尤其是风速  $\geq 6\text{ m/s}$  时,出现大片的极低值浓度的  $NO$ ,此外,  $2 \sim 4\text{ m/s}$  的西北风与南风发生时,对应的  $NO$  的质量浓度也很低,表明东风和西北风

对  $\text{NO}$  质量浓度具有清除作用。 $\text{NO}_2$  质量浓度的最高值出现在北风控制的区域,而且比较集中,表明北风对  $\text{NO}_2$  具有传输作用;静风或者风速很小时, $\text{NO}_2$  质量浓度也相对较高,对照  $\text{NO}_2$  质量浓度高值的出现时间,在午夜 01:00—02:00 以及早上 08:00—09:00,午夜高值可能因为  $\text{NO}$  对  $\text{O}_3$  质量浓度滴定,产生的  $\text{NO}_2$  质量浓度的积累,早上高值与早高峰有关;其次在东南到西南这个方向区, $\text{NO}_2$  的平均质量浓度也比较高,而东北风控制区, $\text{NO}_2$  质量浓度比较低,表明这个方向的风对  $\text{NO}_2$  有着动力清除的作用。 $\text{NO}_x$  质量浓度随风向、风速的分布与  $\text{NO}_2$  的分布极为相似,这也对应了图 2、图 4a 中所反映出两者有相同的变化规律:三亚地区  $\text{NO}_x$  主要由  $\text{NO}_2$  主导,两者浓度的长期变化与日变化都极为相似。 $\text{O}_3$  质量浓度的高值区出现在西风、西南风、东南风、东北风的

控制区,说明海陆都对  $\text{O}_3$  有所贡献,对比图 7b 与图 7d 可发现,北风或者风速较小时的  $\text{NO}_2$  质量浓度最高,而在相应的风向上  $\text{O}_3$  质量浓度很低,对照  $\text{O}_3$  质量浓度出现极低值的时刻,大都出现在凌晨,这是因为  $\text{NO}$  对  $\text{O}_3$  的滴定反应造成  $\text{O}_3$  质量浓度降低而使  $\text{NO}_2$  质量浓度进一步增加; $\text{O}_3$  的质量浓度除了在北风、大东风和静风出现的时候浓度低以外,其他风向均比较高,说明北风、较大风速东风的出现对  $\text{O}_3$  有着较强的动力清除作用,而其他方向的风对  $\text{O}_3$  是传输作用。 $\text{PM}_{2.5}$  的浓度在静风、北风、东北偏北风、东北风、东北偏东风这几个风向上比较高,在其他风向上浓度值均比较低;最高值区域是风速大于  $6 \text{ m/s}$  的东北风和东风出现的时候,对照最高值出现的时间,均是早上 08:00—09:00 或者 17:00—18:00,因此, $\text{PM}_{2.5}$  高值的出现是早晚高峰的影响以及外界传输

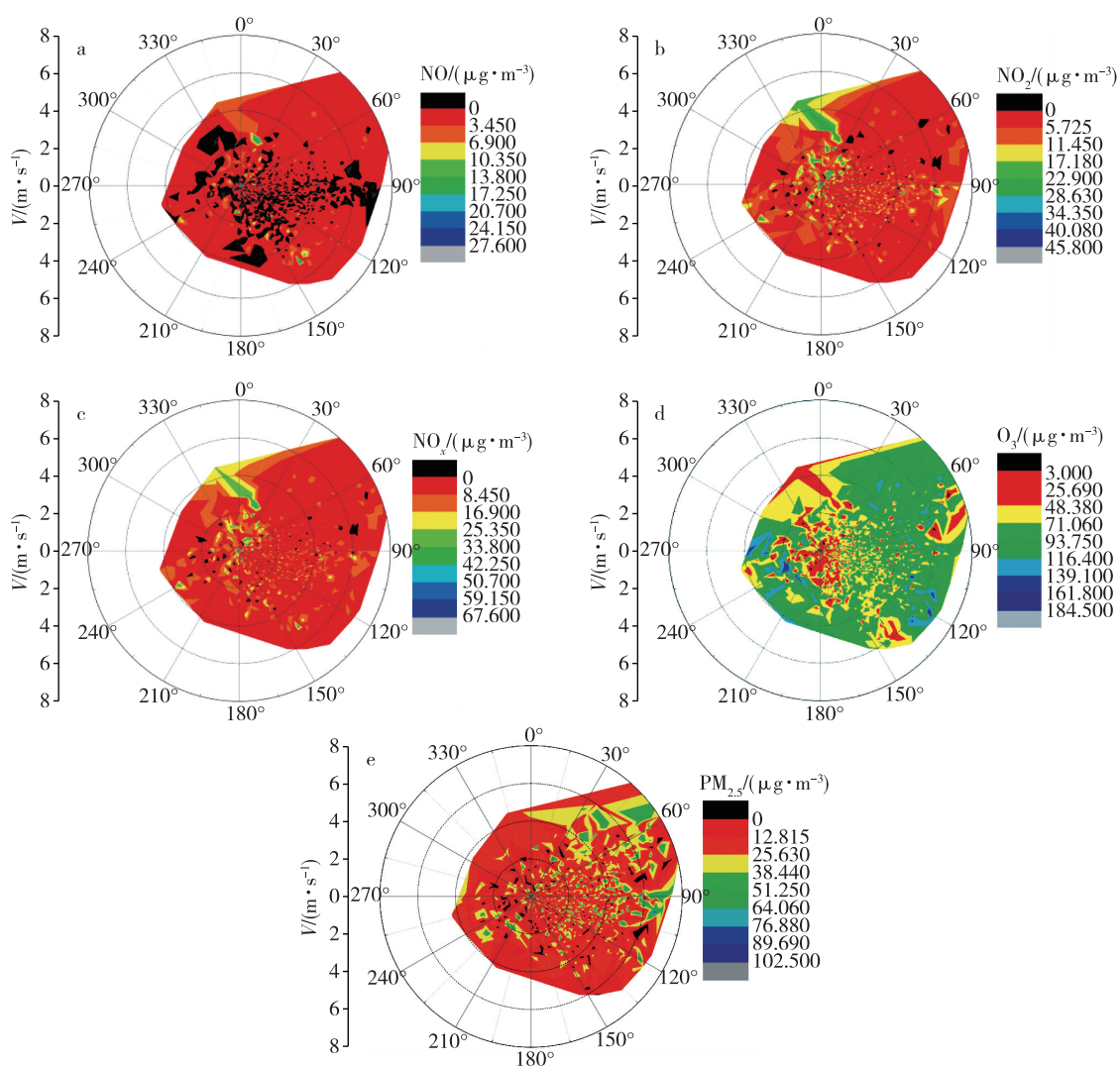


图 7 污染物在不同风速风向上的分布

Fig. 7 Atmospheric pollutant distributions on different wind speed and direction

共同的结果。

静风和不同风向污染物的浓度值可在一定程度上反映污染物局地排放和区域输送的相对贡献<sup>[15]</sup>。北风出现时  $\text{NO}_x$  质量浓度最高,东风与东南风出现时, $\text{NO}_x$  的质量浓度随风速的增大而增加,说明北风、东风和东南风对  $\text{NO}_x$  浓度有输送的作用,西南风较强时, $\text{NO}_x$  浓度也比较大,可能是海上油轮尾气使  $\text{NO}_x$  质量浓度增加的原因;除此之外,静风时的  $\text{NO}_x$  质量浓度均高于其他风向的浓度,表明其他气流对  $\text{NO}_x$  有动力清除的效果。除了北风清洁使  $\text{O}_3$  浓度很低之外,风速小于  $2 \text{ m/s}$  时  $\text{O}_3$  的质量浓度最低,所以  $\text{O}_3$  受区域输送的影响比较大;在来自内陆气流控制时  $\text{PM}_{2.5}$  与静风时的大小相当,而在其他风向时的浓度均低于静风时的浓度,这表明三亚地区  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度主要受局地源控制。

## 2.6 后向轨迹气流来源分析

后向轨迹可以分析气团的来源,以往很多研究中用后向轨迹分析气团的不同来源对区域污染的作用<sup>[21-22]</sup>。聚类分析是将单个轨迹按照空间相似程度聚类,得到一段时间内具有代表性的轨迹簇,判断气团来源和途径区域<sup>[23]</sup>。为了更好地了解输送对三亚地区污染物的影响,利用美国 NOAA 提供的 HYSPLIT 在线模式,选取  $500$ 、 $1\ 000$  和  $1\ 500 \text{ m}$  这三个高度层对三亚地区冬春季的气流来源进行了  $72 \text{ h}$  的后向分析,聚类结果如图 8 所示。图 8a 给出了冬季三亚地区气流来源轨迹,可知占比例最大的是

偏北气流的 1 类气团,达到  $41\%$ ,这类气流源于我国内陆,途径珠三角等污染严重的地区,而且移动速度缓慢,容易造成污染物的累积,所以 1 类气流会使观测站点污染物浓度上升;第 2 类气流源于山东半岛,途径我国东南沿海地区,穿过台湾海峡到达三亚地区,这类气流移速比较快,但是高度比较低,也会使三亚地区污染物升高;3、4 类气流均来自海上的清洁气流,对三亚地区污染物有稀释作用。图 8b 给出了春季三亚地区的气流来源轨迹,可知,只有占  $22\%$  的第 3 类气流是来自我国沿海大陆,途径台湾岛,这类气流高度高、移速快,又与海上清洁空气混合,所以对三亚地区污染物贡献不会很大;其余两类气流均来自海上的干净空气,对三亚地区污染物浓度有着稀释作用。因此,三亚地区冬季气流主要来自大陆,对污染物有累积作用,春季气流主要来自海上,对三亚地区污染物有着稀释作用。

## 3 结论

利用三亚站 2 个冬春季的大气污染物观测数据及气象要素分析了大气污染变化规律,其结果可以为了解我国不同地区大气污染物变化规律提供科学依据。主要结论如下:

- 1) 观测期间,各个污染物浓度的日均值比较低,均低于国家标准(一级)。
- 2) 大气污染物日变化特征各不相同, $\text{NO}_x$  日变化呈早晚双峰型, $\text{NO}_2$  日变化幅度比  $\text{NO}$  大, $\text{NO}_x$  的

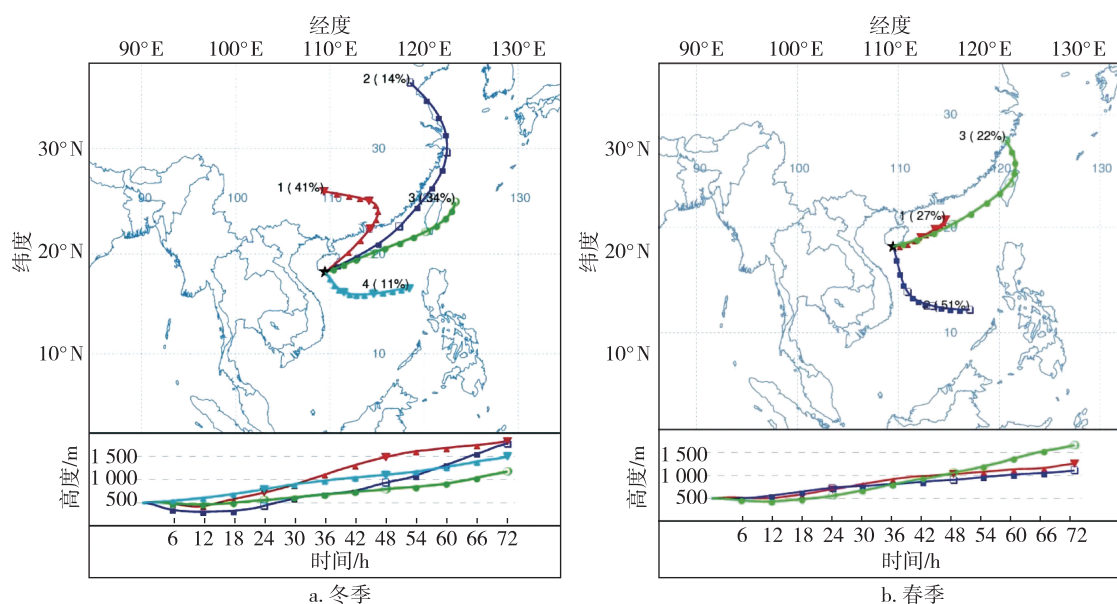


图 8 污染物质量浓度冬春季后向轨迹聚类分析

Fig. 8 Backward trajectory analysis of air pollutants during spring and winter in Sanya

浓度主要由  $\text{NO}_2$  主导; $\text{O}_3$  和  $\text{O}_x$  为午后单峰型,峰值出现在 15:00; $\text{PM}_{2.5}$  呈现早晚双峰型,峰值分别出现在 8:00 与 17:00,并在 17:00 出现一天中的最高值。

3) 风向与污染物的关系表明:三亚地区污染物受本地源和外来源共同影响,陆地风对污染物浓度影响较大; $\text{NO}_x$  与  $\text{O}_3$  质量浓度主要受外地输送影响, $\text{PM}_{2.5}$  的浓度主要受局地源的控制。

4) 后向轨迹分析结果表明:三亚地区冬季气流主要来自大陆,对污染物有着传输作用;春季气流主要来自海面,对污染物浓度有稀释作用。

**致谢:**感谢中国生态系统研究网络大气分中心观测网络运行与维护团队的工作,感谢中国科学院海南热带海洋生物试验站陈永福老师对仪器的维护。

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 孟晓艳,余予,张志富,等.2013年1月京津冀地区强雾霾频发成因初探[J].环境科学与技术,2014,37(1):190-194  
MENG Xiaoyan, YU Yu, ZHANG Zhifu, et al. Preliminary study of the dense fog and haze events' formation over Beijing-Tianjin-and-Hebei region in January of 2013[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(1): 190-194
- [ 2 ] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42
- [ 3 ] 辛金元,王跃思,唐贵谦,等.2008年奥运期间北京及周边地区大气污染物消减变化[J].科学通报,2010,55(15):1510-1519  
XIN Jinyuan, WANG Yuesi, TANG Guiqian, et al. Variability and reduction of atmospheric pollutants in Beijing and its surrounding area during the Beijing 2008 Olympic Games [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3216-2
- [ 4 ] 余纬,罗栩羽,范绍佳,等.珠三角一次重空气污染过程特征分析及数值模拟[J].环境科学研究,2011,24(6):645-653  
YU Wei, LUO Xuyu, FAN Shaojia, et al. Characteristics analysis and numerical simulation study of a severe air pollution episode over the Pearl River Delta [J]. Research of Environmental Science, 2011, 24(6): 645-653
- [ 5 ] Wang Y H, Hu B, Ji D S, et al. Ozone weekend effects in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(5): 2419-2429
- [ 6 ] 王跃思,姚利,王莉莉,等.2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J].中国科学(地球科学),2014,44(1):15-26  
WANG Yuesi, YAO Li, WANG Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 44(1): 15-26
- [ 7 ] 王莉莉,王跃思,吉东生,等.天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J].中国环境科学,2011,31(7):1077-1086  
WANG Lili, WANG Yuesi, JI Dongsheng, et al. Characteristics of atmospheric pollutants in Tianjin Binhai New Area during Autumn and Winter [J]. China Environmental Science, 2011, 31(7): 1077-1086
- [ 8 ] 黄成,陈长虹,李莉,等.长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J].环境科学学报,2011,31(9):1858-1871  
HUANG Cheng, CHEN Changhong, LI Li, et al. Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 1858-1871
- [ 9 ] 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,等.珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J].中国环境科学,2010,30(7):997-1003  
XIE Peng, LIU Xiaoyun, LIU Zhaorong, et al. Impact of exposure to air pollutants on human health effects in Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2010, 30(7): 997-1003
- [ 10 ] 金赛花,樊曙先,王自发,等.青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J].中国环境科学,2008,28(3):198-202  
JIN Saihua, FAN Shuxian, WANG Zifa, et al. The variation characteristics of surface ozone concentration at Waliguan in Qinghai [J]. China Environmental Science, 2008, 28(3): 198-202
- [ 11 ] 刘洁,张小玲,张晓春,等.上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素[J].环境科学研究,2006,19(4):19-25  
LIU Jie, ZHANG Xiaoling, ZHANG Xiaochun, et al. Surface ozone characteristics and the correlated factors at Shangdianzi atmospheric background monitoring station [J]. Research of Environmental Science, 2006, 19(4): 19-25
- [ 12 ] 杨关盈,樊曙先,汤洁,等.临安近地面臭氧变化特征分析[J].环境科学研究,2008,21(3):31-35  
YANG Guanying, FAN Shuxian, TANG Jie, et al. Characteristic of surface ozone concentrations at Lin'an [J]. Research of Environmental Science, 2008, 21(3): 31-35
- [ 13 ] 杨俊益,辛金元,吉东生,等.2008—2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析[J].环境科学,2012,33(11):3693-3704  
YANG Junyi, XIN Jinyuan, JI Dongsheng, et al. Variation analysis of background atmospheric pollutants in North China during the summer of 2008 to 2011 [J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3693-3704
- [ 14 ] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(3): 363-374
- [ 15 ] 刘洁,张小玲,许晓峰,等.北京地区  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{2.5}$  变化特征的城郊对比分析[J].环境科学,2008,29(4):1059-1065  
LIU Jie, ZHANG Xiaoling, XU Xiaofeng, et al. Comparison analysis of variation characteristics of  $\text{SO}_2$ ,



- NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> between rural and urban areas, Beijing [J]. Environmental Science, 2008, 29 (4): 1059-1065
- [16] 中华人民共和国环境保护部.GB 3095—2012 环境空气质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2012  
Ministry of Environmental Protection of the P R C.GB 3095—2012 Ambient air quality standards [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012
- [17] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].2版.北京:高等教育出版社,2006:58-59  
TANG Xiaoyan, ZHANG Yuanhang, SHAO Min. Atmospheric environment chemistry [M]. 2nd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2006:58-59
- [18] 王明星.大气化学[M].2版.北京:气象出版社,1999:360-365  
WANG Mingxing. Atmospheric chemistry [M]. 2nd Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1999:360-365
- [19] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京地面紫外辐射与空气污染的关系研究[J].环境科学,2008,29(4):1053-1058  
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Relationship between surface UV radiation and air pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1053-1058
- [20] Lin W, Xu X, Ge B, et al. Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural city southwest of Beijing [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114, D00G14, doi:10.1029/2008JD010339
- [21] 王莹,吉东生,宋涛,等.夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究[J].环境科学,2010,32(9):2741-2749  
WANG Ying, JI Dongsheng, SONG Tao, et al. Characteristics of atmospheric pollutants in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang during the period of summer and autumn [J]. Environmental Science, 2010, 32(9): 2741-2749
- [22] 徐晓斌,刘希文,林伟立.输送对区域本底站痕量气体浓度的影响[J].应用气象学报,2009,20(6):656-664  
XU Xiaobin, LIU Xiwen, LIN Weili. Impacts of air parcel transport on the concentrations of trace gases at regional background stations [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(6): 656-664
- [23] 苏彬彬.华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素[J].环境科学,2013,34(7):2519-2524  
SU Binbin. Characteristics and impact factors of O<sub>3</sub> concentrations in mountain background region of East China [J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2519-2524

## Characteristics of air pollutants in Sanya during winter and spring

ZHENG Fengkui<sup>1,2</sup> YUAN Tie<sup>1</sup> JI Dongsheng<sup>2</sup> LIU Zirui<sup>2</sup> WANG Yuesi<sup>1,2</sup> HU Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Atmospheric pollutants including NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub>, along with meteorological factors were intensively monitored in Luhuitou village of Sanya, which is the southernmost tip of Hainan Island, in order to study the characteristics of air pollution in Sanya. Located in the outskirts of Sanya, the monitoring station is surrounded by sea in three directions and without industrial pollution sources. From December of 2011 to April of 2013, the variation properties of NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> in winter and spring were analyzed and the sources of pollutants were investigated using backward trajectory method. The results show that, the concentrations of air pollutants in Sanya were under the values listed as first level in national standard, with the daily average value of NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, and PM<sub>2.5</sub> being (2.1 ± 2.2), (5.2 ± 3.4), (7.3 ± 3.8), (59.8 ± 28.4), and (17.5 ± 14.3) μg · m<sup>-3</sup>, respectively. The diurnal variations of NO<sub>x</sub> and PM<sub>2.5</sub> showed double-peak patterns, with the maximum concentrations appeared at 08:00 BJ (Beijing time) and 17:00 BJ; while the diurnal variation of O<sub>3</sub> exhibited a single peak which occurred at 13:00 BJ. Based on backward trajectory method, it was found that pollutants in Sanya came from local and regional sources, and the continental air mass usually led to accumulation of air pollutants, whereas the marine air masses usually diluted the air pollution.

**Key words** Sanya; air pollution; O<sub>3</sub>; PM<sub>2.5</sub>; NO<sub>x</sub>