

## 南通市臭氧污染与气象条件分析和预报<sup>①</sup>

张琪<sup>1</sup>, 彭小燕<sup>1</sup>, 顾沛澍<sup>1,2</sup>, 缪明榕<sup>1</sup>, 丁峥臻<sup>1</sup>

(1 江苏省南通市气象局, 江苏南通 226018; 2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210008)

**摘要:** 本文通过分析地处长江口北岸的南通市 2014—2017 年臭氧污染变化特征和气象要素以及天气形势对臭氧质量浓度的影响, 归纳了高浓度臭氧出现的天气形势, 使用多元逐步回归建立了不同月份臭氧质量浓度预报模型。结果表明: 春、夏季臭氧质量浓度较高, 冬季最小; 2014—2017 年臭氧超标日数呈明显增加的趋势, 臭氧超标日主要出现在 4—10 月, 夏季超标日数占 55%, 冬季没有出现超标情况。臭氧质量浓度变化与气象要素密切相关, 与气温、日照时数呈显著正相关, 与云量、相对湿度、风速呈负相关。气温高于 20 ℃, 相对湿度小于 60%, 日照时数大于 4 h, 平均低云量小于 4 成, 地面偏南风且风速低于 6 m/s, 容易出现高浓度臭氧。归纳出南通市臭氧超标事件出现的 6 种高空天气形势, 分别是副高边缘、副高内部、高空槽后、高空槽前、高空脊和低涡型。受副高影响时产生臭氧浓度超标的概率最大, 高压脊形势下的臭氧平均质量浓度最高。综合考虑各气象要素, 分别得到 4—5 月、6—8 月、9—10 月 3 个臭氧质量浓度预报方程。利用 2017 年资料对浓度预报方程进行检验, 预报值与观测值的相关系数分别达到 0.76、0.74 和 0.65, 通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验, 说明利用多元逐步回归建立的臭氧预报方程具有较好的拟合效果和可预报性。后向轨迹聚类分析表明, 2017 年 7 月 13—25 日南通市比率最大的气流经过臭氧污染相对严重的长三角地区到达南通, 有利于污染物的输送。

**关键词:** 臭氧质量浓度; 气象条件; 多元逐步回归; HYSPLIT 模型

**中图分类号:** X512      **文献标志码:** A

### Analysis and Prediction of Ozone Pollution and Meteorological Conditions in Nantong

ZHANG Qi<sup>1</sup>, PENG Xiaoyan<sup>1</sup>, GU Peishu<sup>1,2</sup>, MIAO Mingrong<sup>1</sup>, DING Zhengzhen<sup>1</sup>

(1 Nantong Meteorological Bureau, Nantong, Jiangsu 226018, China; 2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Through the analysis of the characteristics of ozone (O<sub>3</sub>) pollution and the meteorological influencing factors in Nantong from 2014 to 2017, a prediction model of O<sub>3</sub> concentration in different months was established, and the related high concentration O<sub>3</sub> synoptic situations were also summarized. The results showed that the day number of O<sub>3</sub> pollution in Nantong was increasing obviously from 2014 to 2017. O<sub>3</sub> concentration had a significant positive correlation with temperature, sunshine hours and other factors, but a negative correlation with relative humidity, total (low) cloud amount and wind speed. High O<sub>3</sub> concentration were likely to occur with the temperature higher than 20 ℃, the relative humidity less than 60%, the sunshine hours more than 4 hours, the average low cloud less than 40%, the wind speed less than 6 m/s. The synoptic systems affecting O<sub>3</sub> pollution were classified into 6 patterns, including edge of subtropical high, interior of subtropical high, back of upper-level trough, front of upper-level trough, upper-level ridge and vortex. Considering all meteorological factors, three O<sub>3</sub> concentration prediction equations were established respectively from April to May, June to August and September to October. Using the data of 2017 to test the prediction equation, it was found that the correlation coefficients between the predicted and the observed values were 0.76, 0.74 and 0.65 ( $P<0.01$ ), respectively, indicating the good fitting effect and predictability. Cluster analysis of backward trajectory showed that the largest ratio of air flow passed through the Yangtze River Delta region with relatively serious O<sub>3</sub> pollution, favoring the transportation of pollutants.

**Key words:** Ozone (O<sub>3</sub>) concentration; Meteorological conditions; Multiple stepwise regression; HYSPLIT model

①基金项目: 江苏省青年基金项目(KQ202206)和江苏省气象局预报员专项(JSYBY201912)资助。

作者简介: 张琪(1987—), 女, 江苏南通人, 本科, 工程师, 从事环境、农业气象研究。E-mail: 513055423@qq.com

我国区域性大气复合污染最严重的四大区域是长三角、京津冀、珠三角和成渝城市群<sup>[1-2]</sup>。近年来,高浓度臭氧污染问题日益凸显,受到公众和政府的广泛关注,这主要是因为经济发展、人口增长和能源结构不断转型,大气污染由气溶胶污染逐渐向光化学污染过渡<sup>[3]</sup>。臭氧已经成为我国仅次于颗粒物的重要环境空气污染物,2014—2016 年全国各主要分区中除华南和青藏高原臭氧日最大 8 h 的年均值和 90 百分位浓度有所下降外,其他区域均同比上升<sup>[4]</sup>。

大气中的挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物( $\text{NO}_x$ ),在适当的气象条件下加之太阳紫外线的照射,经过一系列复杂的化学反应生成臭氧<sup>[5]</sup>。国内外学者就臭氧的形成和变化开展了许多研究:邵平等<sup>[6]</sup>研究了长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系,表明没有对挥发性有机物和工业区氮氧化物进行有效调控时,颗粒物减排控制措施将会加重区域的臭氧污染。杨雅琴和高会旺<sup>[7]</sup>探讨了青岛大气中  $\text{O}_3$  及其主要前体物  $\text{NO}_x$ 、CO 间复杂的相互作用及相关关系,认为太阳辐射强度与汽车源排放对于城市大气污染特征具有重要的影响作用。Geng 等<sup>[8-9]</sup>研究表明,上海地区的臭氧浓度呈现中心城区低、郊区高的特点,区域差异非常显著。

虽然臭氧是一种二次污染物,但很多研究表明不同地区的臭氧和气象要素具有较强的相关性,如温度、水平风、云量、相对湿度等<sup>[10-14]</sup>。郑丽英等<sup>[15]</sup>、王磊等<sup>[16]</sup>分析发现高温、低湿、强太阳辐射有利于臭氧的形成。陈世俭等<sup>[17]</sup>和张爱东等<sup>[18]</sup>分析发现雾或者大风天气会造成部分时间臭氧质量浓度的增高,这是因为大风输送臭氧前体物,大雾内湍流有利于高层臭氧向低层输送。有模拟研究<sup>[19-20]</sup>指出,适当风场条件下,上海和浙江的污染源可以对其周边地区,甚至整个长三角的臭氧质量浓度造成较大影响。多元线性回归<sup>[21-22]</sup>、多元非线性回归<sup>[23]</sup>、人工神经网络<sup>[24]</sup>、Lamb-Jenkinson 客观环流分析方法<sup>[25]</sup>、广义线性模型<sup>[26]</sup>和模糊逻辑模型<sup>[27]</sup>等统计方法已被用于臭氧浓度和气象要素预报模型的建立,其中回归方法因为建模简单、计算量小,应用广泛<sup>[28]</sup>。

南通市地处长江口北岸,近年来臭氧污染问题也较为突出。本文整理分析了南通市 2014—2017 年臭氧浓度及气象观测数据,采用统计分析、逐步回归、HYSPLIT 后向轨迹聚类分析方法揭示气象要素对近地面臭氧质量浓度的影响,归纳臭氧高浓度事件的天气形势,并建立分季节的臭氧浓度预报模型,为控制臭氧质量浓度,预报、防治城市光化学污染提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据来源

臭氧观测数据来源于南通市环境监测站 2014—2017 年 5 个监测站点的日监测数据,监测站点分别为紫琅学院、虹桥、星湖花园、城中、南郊,站点分布相对均匀。同步气象资料采用南通国家基本气象站地面观测气象资料(气温、相对湿度、风向风速等)和宝山气象站 08:00 时高空观测资料。

$\text{O}_{3-8h}$  是指臭氧 8 h 滑动平均值, $\text{O}_{3-8max}$  为日滑动 8 h 平均最大值,文中使用的为全市环境监测点的  $\text{O}_{3-8max}$  平均值(以下简称臭氧质量浓度)。数据计算及评价方法参照 GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[29]</sup>和 HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI)技术规定》<sup>[30]</sup>。本研究根据 HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI)技术规定》<sup>[30]</sup>分级方法,AQI>100,即  $\text{O}_{3-8h}>160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  为超标日。根据 AQI 数值大小将环境空气质量分为 6 级,分别为:优(AQI≤50)、良(50<AQI≤100)、轻度污染(100<AQI≤150)、中度污染(150<AQI≤200)、重度污染(200<AQI≤300)、严重污染(AQI>300)。

### 1.2 HYSPLIT 轨迹模型及聚类分析

HYSPLIT 模型是由澳大利亚气象局和美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室(NOAA)合作研发的,集合了拉格朗日和欧拉两种方法。拉格朗日方法用于处理气团扩散和平流,欧拉方法用于计算浓度<sup>[31]</sup>。本文利用 HYSPLIT 后向轨迹模式和 NCEP 的 GDAS 气象数据,使用轨迹聚类分析方法,定性描述低层臭氧污染物的可能来源。

## 2 结果与分析

### 2.1 南通市臭氧污染特征

**2.1.1 南通市臭氧质量浓度基本特征** 从南通市 2014—2017 年臭氧质量浓度逐月变化来看(图 1A),每年的 1—5 月臭氧质量浓度逐月上升,9 月之后迅速下降。从季节变化来看(图 1B),春、夏季臭氧质量浓度均较高,秋季略有下降,冬季最小。臭氧月平均浓度最大值出现在 5 月份,为  $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。6 月前,臭氧质量浓度出现下降趋势,此时南通处于梅雨期,降水日数多,光照条件差,这样的气象条件不利于臭氧生成;梅雨期后 7—8 月,受副热带高压影响,天气晴热,气温和日照时数是一年中最高的月份,气象条件有利于高浓度臭氧的产生。秋季 9—10 月日照时数依然较长,臭氧质量浓度仍然较高;11 月随着气温以及日照时数的迅速减小,臭氧质量浓度也随之

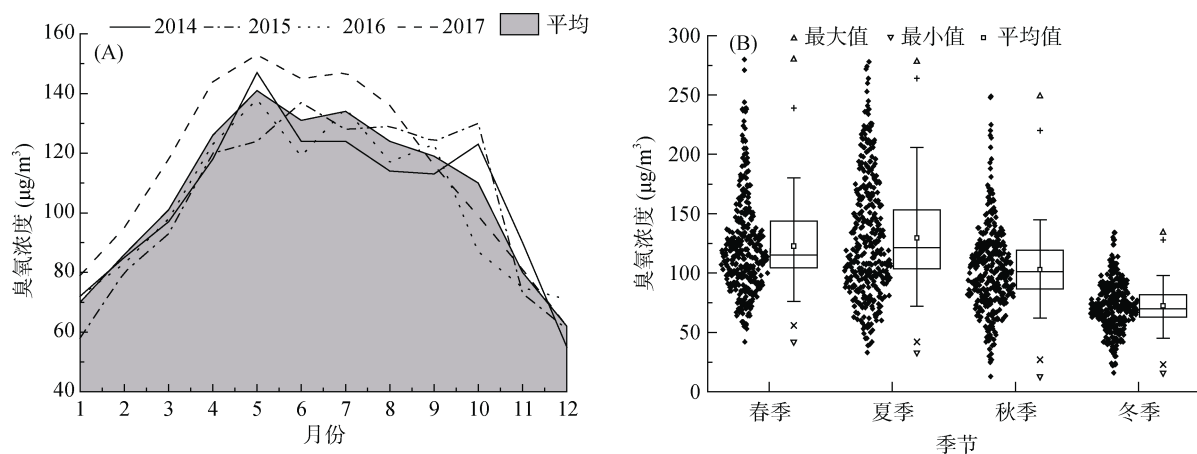


图 1 南通市 2014—2017 年臭氧质量浓度月变化(A)和季节分布(B)

Fig. 1 Monthly variation (A) and seasonal distribution (B) of O<sub>3</sub> mass concentration in Nantong from 2014 to 2017

减小。冬季气温较低，日照时数短，不利于光化学反应，即使前体物充足也不利于臭氧生成，因此冬季是臭氧质量浓度最低的季节。比较不同年份，2017 年 1—7 月臭氧质量浓度较往年有明显升高，是由于上述时间段的降水量较往年偏少，日照时数明显偏多(图略)。

2.1.2 南通市臭氧污染情况 2014—2017 年臭氧

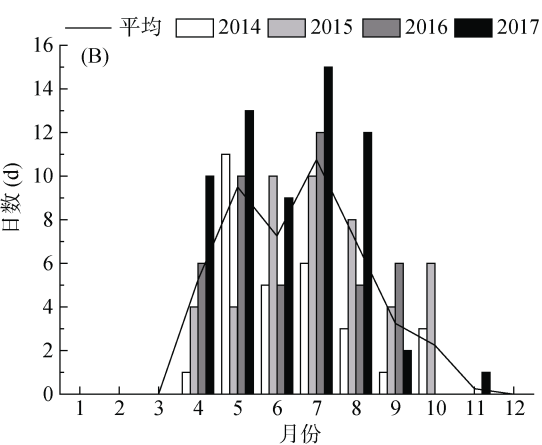
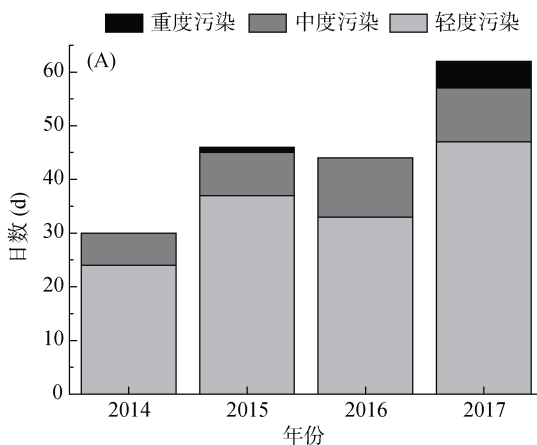


图 2 2014—2017 年臭氧污染日数(A)和臭氧超标日数月变化(B)

Fig. 2 Monthly variation of O<sub>3</sub> pollution days (A) and O<sub>3</sub> overstandard days (B) in Nantong from 2014 to 2017

2.2 气象要素对臭氧质量浓度的影响

臭氧作为二次污染物，一方面与其前体物密切相关，另一方面与气象条件也密切相关，气象条件在臭氧的形成和转化过程中发挥着重要作用。

2.2.1 气温对臭氧质量浓度的影响 表 1 列出了南通市 14:00 时气温与臭氧质量浓度的相关系数，发现臭氧质量浓度与气温呈正相关，相关系数为 0.63，通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验(临界值 0.081)。不同季节相关系数也有差异，春季最大，夏季和秋季次之，冬季最小，这说明气温在冬季时不是臭氧质量浓度的

主要影响因素，其他因素的作用(如污染输送等)较为重要<sup>[32]</sup>。

统计分析不同气温范围所对应的臭氧质量浓度和超标率，如图 3 所示，随着气温的升高，臭氧平均质量浓度由 77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  上升至 178  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，增加约 1.3 倍。气温小于 20  $^{\circ}\text{C}$  时，臭氧平均质量浓度在 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下，且没有出现超标情况；气温在 20~25  $^{\circ}\text{C}$  时，臭氧平均质量浓度高于 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，开始出现超标情况，超标率为 1%；气温高于 25  $^{\circ}\text{C}$ ，臭氧超标率开始大幅上升，气温在 25~30  $^{\circ}\text{C}$  和 30~35  $^{\circ}\text{C}$  时臭氧

表 1 南通市 14:00 时气温和相对湿度与臭氧质量浓度的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between O<sub>3</sub> mass concentration with atmospheric temperature and relative humidity at 14:00 in Nantong

气温					相对湿度				
春季	夏季	秋季	冬季	全年	春季	夏季	秋季	冬季	全年
0.64	0.53	0.63	0.007	0.63	-0.51	-0.68	-0.47	-0.17	-0.33

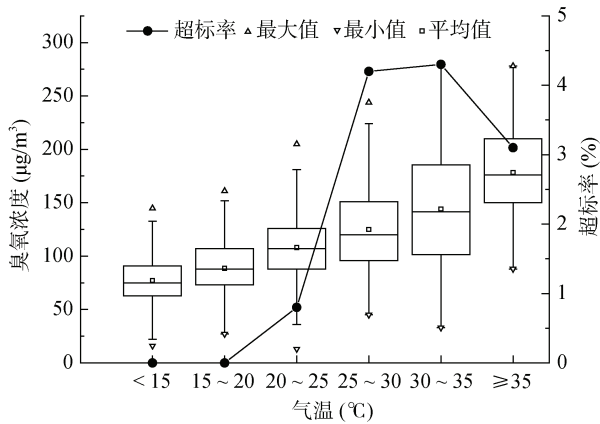


图 3 不同温度区间臭氧质量浓度和超标率变化

Fig. 3 Changes of O<sub>3</sub> mass concentrations and overstandard rates at different temperature intervals

超标率分别为 4.2% 和 4.3%；高于 35 °C 的样本数偏少，虽然超标率减小，但平均臭氧质量浓度明显增大，特别是臭氧质量浓度低百分位数也有明显升高。

臭氧是由前体物在太阳辐射下通过光化学反应生成的，太阳辐射强度对光化学反应具有重要影响。太阳辐射的增强往往会伴随气温的升高，在强辐射条件下，二次光化学反应增强，反应生成的臭氧增多<sup>[33]</sup>。

**2.2.2 相对湿度对臭氧质量浓度的影响** 相对湿度也是影响臭氧浓度的重要气象要素。表 1 也列出了南通市 14:00 时相对湿度与臭氧质量浓度的相关系数，可以看出，臭氧质量浓度与相对湿度呈负相关，相关系数为 -0.33，通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验(临界值 0.081)。相关系数夏季最大，春秋季次之，冬季最小，说明夏季气温较高，水汽充足，相对湿度对臭氧浓度的影响较为显著。

由图 4 可见，伴随相对湿度增加，臭氧平均质量浓度出现先上升后下降的趋势，而臭氧超标率逐渐减小。相对湿度低于 60% 时，臭氧平均质量浓度在 115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上，超标率最高，达 5.3%；相对湿度在 60% ~ 70% 时，臭氧平均质量浓度和超标率都明显下降；相对湿度高于 70% 时，臭氧平均质量浓度低于 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，仅有 2 d 出现臭氧超标情况，表明高相对湿度条件下不利于臭氧的形成。一方面，水汽会通过消光机制减弱太阳紫外辐射强度<sup>[34]</sup>；另一方面，在较高相对湿度的环境下，空气中水汽所含的自由基 H、OH 等迅速将臭氧分解为氧分子，降低臭氧浓度<sup>[33]</sup>，

也有研究指出，前体物 CO 和 NO<sub>x</sub> 存在光化学反应强度临界值，为相对湿度 60% 左右，之后随相对湿度的增加而减小<sup>[32]</sup>；另外，高相对湿度也会形成湿清除作用，使臭氧浓度降低。所以，较干燥的气象条件有利于臭氧的累积。

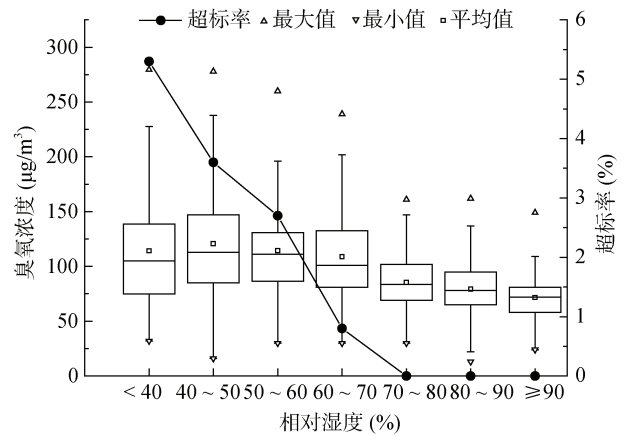


图 4 不同湿度区间臭氧质量浓度和超标率变化

Fig. 4 Changes of O<sub>3</sub> mass concentrations and overstandard rates at different humidity intervals

**2.2.3 云天状况对臭氧质量浓度的影响** 太阳辐射强度对大气光化学反应具有重要影响，因为南通站无辐射观测数据，而日照时数和云量变化能直接反映太阳辐射强度的变化。表 2 列出了日照时数和臭氧质量浓度的相关系数，臭氧质量浓度和日照时数呈正相关，相关系数为 0.12，通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验(临界值 0.081)。相关系数秋季最大，冬夏季次之，春季最小。统计分析不同日照时数范围所对应的臭氧超标率和质量浓度，如图 5A 所示，当日照小于 4 h 时，臭氧平均质量浓度在 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下，臭氧超标事件较少；随着日照时数增加，臭氧超标率明显增大，当日照大于 10 h 时，臭氧平均质量浓度为 152  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标率高达 6.4%。从 4—10 月日平均总云量和低云量与臭氧质量浓度的变化曲线来看(图 5B)，臭氧浓度随总云量的变化有两个峰值，当总云量为 10 成时，

表 2 日照时数与臭氧质量浓度的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between O<sub>3</sub> mass concentration and sunshine hours

春季	夏季	秋季	冬季	全年
0.21	0.47	0.51	0.24	0.12

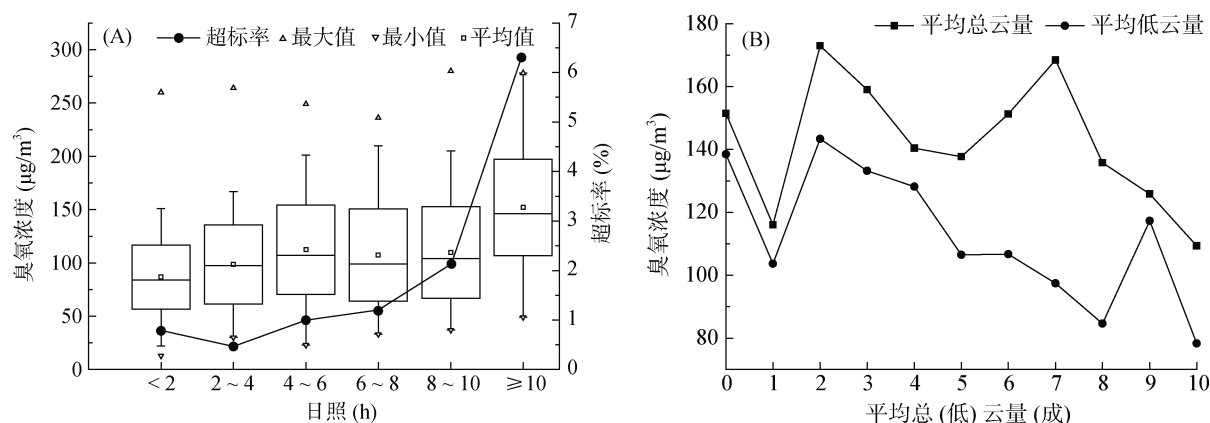


图 5 不同日照区间臭氧质量浓度和超标率变化(A)以及 4—10 月臭氧质量浓度随日平均总(低)云量变化特征(B)

Fig.5 Changes of O<sub>3</sub> mass concentrations and overstandard rates at different sunshine hours intervals (A) and variation of O<sub>3</sub> mass concentration with daily mean total (low) cloud amount from April to October (B)

臭氧浓度明显减小。日平均低云量对臭氧浓度的影响更加明显，低云量 0 ~ 4 成时，臭氧浓度大于 120 μg/m<sup>3</sup>，低云量为 5 成时臭氧浓度开始下降，低云量超过 5 成时，臭氧日平均浓度较低。日照为大气光化学反应提供了良好的反应条件，日照时数长，云量少，光化学反应速率越快，可以加快臭氧的生成，容易造成地面高浓度臭氧。

**2.2.4 风向、风速对臭氧质量浓度的影响** 风速的大小不仅能反映出清除过程和污染物输送的效率，一定程度上还反映了大气边界层内稳定度的强度，污染

过程中不同风向则反映了污染物的传输来向<sup>[35]</sup>。表 3 给出了不同季节地面到高空的风速与臭氧质量浓度的关系，夏季臭氧质量浓度与地面风速有显著的负相关关系，春秋类似，但是相关性不显著，冬季为显著正相关。这可能是由于夏季臭氧污染区在南方，盛行南风时，较大的风速会增加南方臭氧的输送，而冬季北方臭氧浓度较低，盛行北风时，有利于污染物的扩散<sup>[25]</sup>。臭氧质量浓度与 8:00 时 500、700、850、925 hPa 的风速呈负相关关系，可见高空风速越小，越有利于臭氧浓度的增高。

表 3 不同高度风速与臭氧质量浓度相关系数

Table 3 Correlation coefficients between O<sub>3</sub> mass concentrations and wind speeds at different heights

季节	地面风速	500 hPa 风速	700 hPa 风速	850 hPa 风速	925 hPa 风速
春季	-0.01	-0.26	-0.25	-0.21	-0.22
夏季	-0.29	-0.09	-0.32	-0.31	-0.31
秋季	-0.03	-0.31	-0.36	-0.21	-0.23
冬季	0.20	0.001	-0.05	-0.10	-0.02
全年	-0.06	-0.37	-0.36	-0.23	-0.22

注：地面风速为 14:00 时风速，高空风速为 8:00 时风速。

图 6A 给出了不同地面风速下的臭氧质量浓度和超标率，当地面风速 ≤ 3 m/s 时，臭氧平均质量浓度和超标率随着风速的增加而增加；当风速为 2 ~ 3 m/s 时，臭氧平均质量浓度为 112 μg/m<sup>3</sup>，超标率为 3.6%，之后随着风速的增大臭氧超标率呈显著的下降趋势。总体来说，随着风速增大，臭氧平均质量浓度和超标率先增大再减小。这是因为风速的增加对臭氧浓度的变化主要有两方面作用：一方面使大气边界层增高，垂直动量输送加强，促使对流层顶的高浓度臭氧向低层传输；另一方面增加了水平扩散，对稀释臭氧浓度有一定作用。风速较低时，向下输送作用强于水平扩

散作用，从而导致超标频率随着风速的增加而增大。当风速超过一定值时，水平扩散作用强于向下输送作用，超标频率将随着风速的增加明显下降<sup>[36]</sup>。

从臭氧超标日的质量浓度随地面风向风速变化来看(图 6B)，超标情况下，风速在 6 m/s 以内，地面偏南风对应臭氧质量浓度高值。而在东北至东南方位，臭氧质量浓度偏低，主要是由于海上的气团对本地污染物有一定的稀释减小作用。

为了探求臭氧质量浓度和高空风向的关系，分别统计了 8:00 时 925、850、700、500 hPa 不同风向下对应的臭氧平均质量浓度(图 7)，可以发现，高空

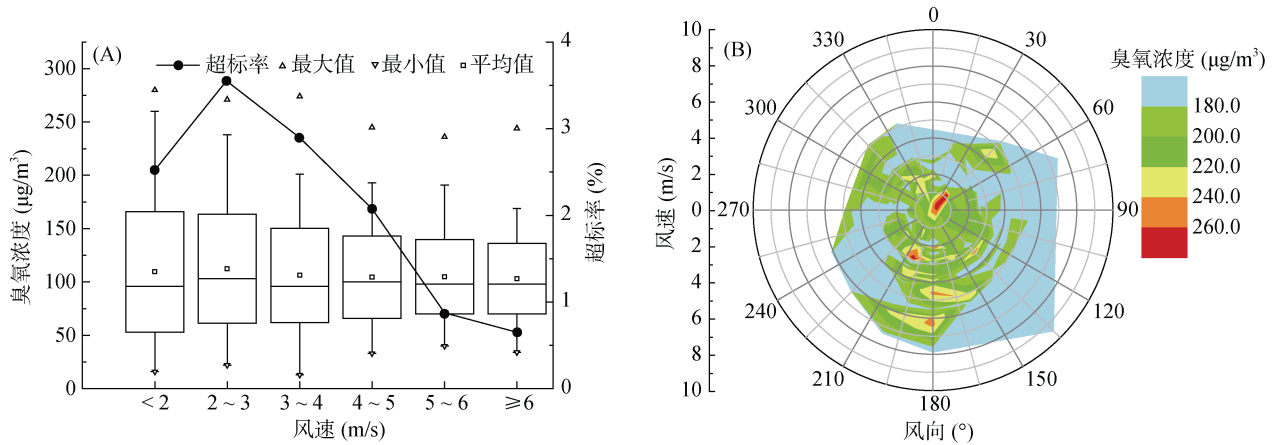


图 6 不同地面风速区间臭氧质量浓度和超标率变化(A)以及超标日臭氧质量浓度随地面风向风速的变化(B)  
Fig. 6 Changes of O<sub>3</sub> mass concentrations and overstandard rates at different ground wind speed intervals (A) and variation of O<sub>3</sub> mass concentration with ground wind direction and speed (B)

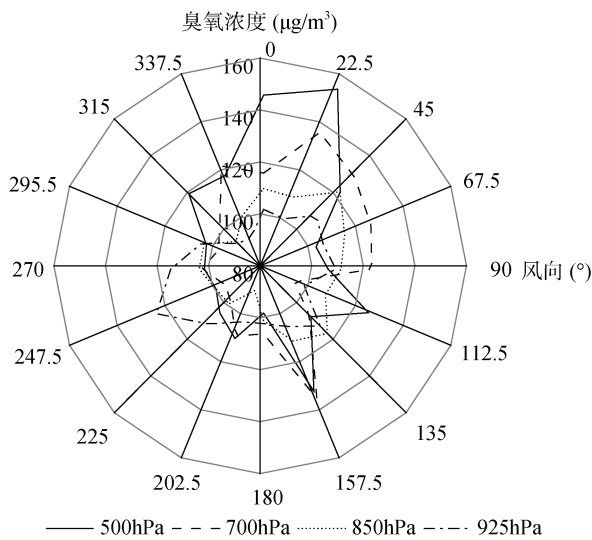


图 7 臭氧平均质量浓度与 8:00 时 925、850、700、500 hPa 风向的关系  
Fig. 7 Relationship between mean O<sub>3</sub> mass concentrations and wind directions at 925, 850, 700 and 500 hPa at 8:00

500 hPa 为北风到东北风或东南风到南风, 700 hPa 为东北风到东风或东南风到南风, 对应臭氧质量浓度较高; 低层 850 hPa 为东北风或东南风, 925 hPa 为西南风到偏西风时, 容易产生高质量浓度臭氧。

### 2.3 臭氧质量浓度与天气形势的关系

分析 2014—2017 年 4—10 月的 500 hPa 历史天气图, 归纳出 6 种影响南通市臭氧浓度的主要天气形势, 分别是副高边缘、副高内部、高空槽后、高空槽前、高空脊和低涡型。分析了 6 种天气形势下产生臭氧超标事件的发生概率及其对应的平均质量浓度(图 8)。统计发现, 本地受副高影响时(含副高边缘和副高内部)产生臭氧浓度超标的概率最大, 为 36.1%; 其次是高空槽后型, 为 35.2%; 当高空为高压脊控制

时, 产生臭氧浓度超标的概率最小, 仅为 3.8%。这 6 种天气形势对应的平均臭氧浓度均值均在 185.0 μg/m<sup>3</sup> 以上, 高压脊形势下的臭氧平均质量浓度最高, 达 220 μg/m<sup>3</sup>; 其次为高空槽后型, 为 205 μg/m<sup>3</sup>; 副高内部和低涡影响下臭氧平均质量浓度最低, 为 187 μg/m<sup>3</sup>。当本地受副高影响时, 晴热高温天气利于发生光化学反应, 同时副高产生的下沉运动也有利于高层的高质量浓度的臭氧向地面输送; 当本地处于高空槽后或者受高压脊影响时, 天气晴好, 日照充足, 有利于臭氧的生成和累积。

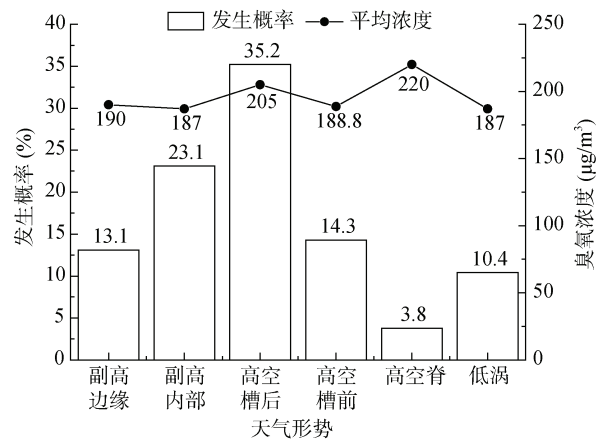


图 8 不同天气形势下臭氧质量浓度超标概率和平均浓度  
Fig. 8 Probabilities and mean O<sub>3</sub> mass concentrations overstandard under different weather conditions

### 2.4 臭氧质量浓度预报方程

2.4.1 建立臭氧质量浓度预报方程 在排除突发性污染事件和人为控制减排等因素影响下, 大气污染物浓度变化主要受气象条件的影响, 所以从气象条件影响的角度来建立臭氧质量浓度的预报方程<sup>[37]</sup>。

由上述分析可知, 臭氧质量浓度变化与气温、相

对湿度、日照时数、风速等气象要素及大气环流形势关系密切。为进一步了解各个气象因子与臭氧质量浓度的关系,采用多元逐步回归方程,因变量为当日臭氧质量浓度,引入自变量包括:14:00 时地面气温  $T_{14}$ 、相对湿度  $RH_{14}$ 、风速  $v_{14}$ ,日照时数  $h$ ,日平均气温  $T$ ,日最高气温  $T_{max}$ ,日最小相对湿度  $RH_{min}$ ,日平均相对湿度  $RH$ ,日平均风速  $v$ ,8:00 时各标准层(500、700、850、925 hPa)上的位势高度  $H$ 、气温  $T$ 、露点温度  $Td$ 、温度露点差  $T-Td$ 、风速  $v$  等气象要素,分别得到了 4—5 月、6—8 月、9—10 月 3 个臭氧质量浓度预报方程如下:

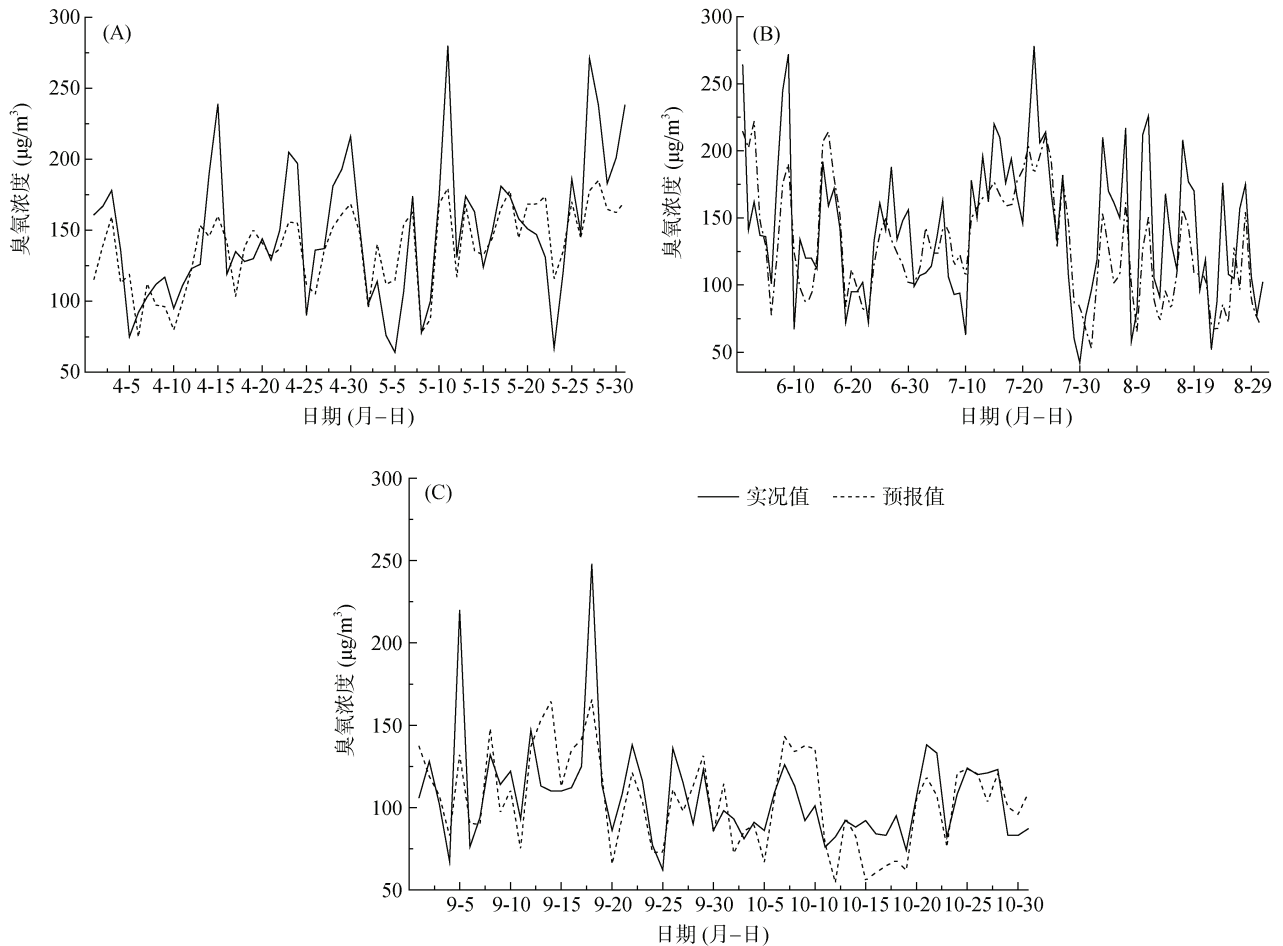
$$Y=41.673+6.836T_{14}-3.511T_{925}+0.025h-1.658v_{850} \quad (n=183, R^2=0.560, \alpha<0.01) \quad (1)$$

$$Y=1563.24-1.083RH_{min}-3.917v_{14}+6.813(T-Td)_{925}-2.084H_{500}+6.809Td_{925}-1.823v_{925}-1.737RH-9.15T+3.726T_{14} \quad (n=276, R^2=0.608, \alpha<0.01) \quad (2)$$

$$Y=57.956-0.888RH_{min}+2.67T_{14}-0.533Td_{500}+2.162T_{850}-0.405Td_{700} \quad (n=183, R^2=0.594, \alpha<0.01) \quad (3)$$

**2.4.2 臭氧质量浓度预报方程的检验** 使用没有参与回归统计的 2017 年数据资料进行臭氧质量浓度预报方程拟合效果检验,从图 9 可以看出,各个月份的预报值曲线与实况曲线的变化趋势基本一致,部分时段近似重合,特别是 6—8 月,预报效果较好,这与春季和夏季臭氧平均质量浓度高于秋季和冬季,多个指标反映效果更好有显著关系<sup>[16]</sup>。同时也发现,预报值偏低情况较多,并且实况中个别极值明显高于预报值。

为了进一步反映预报模型和观测实况的相关性,比较了预报方程计算值和臭氧观测值的相关性。4—5 月、6—8 月、9—10 月的预报值与观测值的相关系数分别达到 0.76、0.74 和 0.65,通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验(临界值分别为 0.33、0.27、0.33),因此可以认为,本研究建立的臭氧预报方程具有一定的预报意义,可应用于实际业务中预报臭氧质量浓度,但也发现,对于部分严重超标的极值预报也需要进一步改进。



(A. 4—5 月; B. 6—8 月; C. 9—10 月)

图 9 臭氧质量浓度预报值与实况值比较

Fig. 9 Comparison between predicted and observed O<sub>3</sub> mass concentrations

## 2.5 2017 年 7 月臭氧污染过程的后向轨迹聚类分析

2017 年 7 月 13—25 日南通市出现连续臭氧污染过程,其中重度污染 1 日,中度污染 1 日,其余为轻度污染。利用 HYSPLIT 模式计算 7 月 13—25 日南通市区(32.05°N,120.59°E)500 m 高度 72 h 后向轨迹,并将产生的 104 条后向轨迹进行聚类分析,得到 5 类轨迹类型。这 5 种气流轨迹分别为:来自福建省北部的中短距离气流(轨迹 1, 50%)、来自南海的长距离气流(轨迹 2, 13%)、来自台湾岛东部的长距离气流(轨迹 3, 15%)、来自菲律宾东部洋面的长距离气流(轨迹 4, 8%)、来自江西省北部的中短距离气流(轨迹 5, 13%)。其中,轨迹 1、2 占总轨迹数的 65%,并且都经过臭氧污染相对严重的长三角地区,是本次臭氧污染过程中气团的主要输送路径。

## 3 结论

1)南通市臭氧质量浓度 1—5 月逐渐上升,梅雨期前后相对较低,9 月之后迅速下降;春、夏季臭氧质量浓度均较高,冬季最小。2014—2017 年臭氧超标日数明显增加,主要出现在 4—10 月,7 月最多,5 月次之,夏季超标日数占总数的 55%,冬季没有出现超标情况。

2)臭氧质量浓度变化和气象要素密切相关,臭氧质量浓度与气温、日照时数呈显著正相关,与风速、相对湿度呈负相关。当气温高于 20 °C、相对湿度小于 60%、日照大于 4 h、风速小于 6 m/s、主导风向为偏南风时,臭氧超标率较高。

3)归纳出臭氧超标事件的 6 种高空天气形势,分别是副高边缘、副高内部、高空槽后、高空槽前、高空脊和低涡型。副高影响时臭氧浓度超标的概率最大,高压脊形势下臭氧平均质量浓度最高。

4)综合考虑各气象要素,分别得到了 4—5 月、6—8 月、9—10 月 3 个臭氧浓度预报方程。利用 2017 年资料对预报方程进行检验,发现预报值与观测值的相关系数分别达到 0.76、0.74 和 0.65,说明利用多元逐步回归建立的臭氧预报方程具有较好的拟合效果和可预报性。

5)后向轨迹聚类分析表明,2017 年 7 月 13—25 日南通市主要受 5 种类型的气流控制,其中,比率最大的气流经过臭氧污染相对严重的长三角地区到达南通,有利于污染物的输送。

## 参考文献:

[1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.

- [2] 张小娟, 李莉, 王红丽, 等. 2010—2016 年上海城区臭氧长时间序列变化特征初探[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 86-94.
- [3] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
- [4] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4003-4012.
- [5] Sillman S. The use of NO<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and HNO<sub>3</sub> as indicators for ozone-NO<sub>x</sub>-hydrocarbon sensitivity in urban locations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D7): 14175-14188.
- [6] 邵平, 辛金元, 安俊琳, 等. 长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系研究[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 618-628.
- [7] 杨雅琴, 高会旺. 青岛大气臭氧及其前体物时间变化与污染特征[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(2): 1-5.
- [8] Geng F H, Tie X X, Xu J M, et al. Characterizations of ozone, NO<sub>x</sub>, and VOCs measured in Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(29): 6873-6883.
- [9] Geng F H, Zhang Q, Tie X X, et al. Aircraft measurements of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, and SO<sub>2</sub> in the Yangtze River Delta region[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(3): 584-593.
- [10] 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.
- [11] 陆倩, 王国辉, 付娇, 等. 承德市臭氧污染气象条件预报方法研究[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(6): 67-76.
- [12] Kavassalis S C, Murphy J G. Understanding ozone-meteorology correlations: A role for dry deposition[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(6): 2922-2931.
- [13] 李顺姬, 李红, 陈妙, 等. 气象因素对西安市西南城区大气中臭氧及其前体物的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 59-67.
- [14] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 515-520.
- [15] 郑丽英, 许婷婷, 陈志安, 等. 成都市夏季臭氧污染特征及影响因素[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 78-84.
- [16] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [17] 陈世俭, 童俊超, Kazuhiko K, 等. 气象因子对近地面层臭氧浓度的影响[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(2): 273-277.
- [18] 张爱东, 王晓燕, 修光利. 上海市中心城区低空大气臭氧污染特征和变化状况[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(6): 21-26.
- [19] 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.
- [20] 朱帅, 马建中, 王堰, 等. 长江三角洲地区春季臭氧异常高值的数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 1-8.
- [21] Barrero M A, Grimalt J O, Cantón L. Prediction of daily ozone concentration maxima in the urban atmosphere[J].



- Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2006, 80(1): 67–76.
- [22] 安俊琳, 王跃思, 朱彬. 主成分和回归分析方法在大气臭氧预报的应用——以北京夏季为例[J]. 环境科学学报, 2010, 30(6): 1286–1294.
- [23] Cobourn W G. Accuracy and reliability of an automated air quality forecast system for ozone in seven Kentucky metropolitan areas[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(28): 5863–5875.
- [24] Hooyberghs J, Mensink C, Dumont G, et al. A neural network forecast for daily average PM<sub>10</sub> concentrations in Belgium[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(18): 3279–3289.
- [25] 梁卓然, 顾婷婷, 杨续超, 等. 基于环流分型法的地面臭氧预测模型[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4469–4479.
- [26] 张浩, 蒋艳斌, 孙巍, 等. 基于广义线性模型的地表臭氧浓度的预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(3): 336–339.
- [27] Cobourn W G, Dolcine L, French M, et al. A comparison of nonlinear regression and neural network models for ground-level ozone forecasting[J]. Journal of the Air & Waste Management Association (1995), 2000, 50(11): 1999–2009.
- [28] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 1997, 21(4): 530–548.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [30] 环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定: HJ 633—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [31] 杜朋, 李德平, 刘建国, 等. APEC 前后北京郊区大气颗粒物变化特征及其潜在源区分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3846–3855.
- [32] 严文莲, 刘端阳, 康志明, 等. 江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系[J]. 气象科学, 2019, 39(4): 477–487.
- [33] 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.
- [34] 齐冰, 牛彧文, 杜荣光, 等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 443–451.
- [35] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013—2016年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 143–153.
- [36] Liu S C, Trainer M, Fehsenfeld F C, et al. Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1987, 92(D4): 4191–4207.
- [37] 韩余, 周国兵, 陈道劲, 等. 重庆市臭氧污染及其气象因子预报方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(4): 59–66.