

李娜,周涛,刘小雪,等.廊坊市臭氧污染特征及其与气象因素的关系[J].环境工程技术学报,2021,11(2):217-225.

LI N, ZHOU T, LIU X X, et al. Characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Langfang City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 217-225.

# 廊坊市臭氧污染特征及其与气象因素的关系

李娜<sup>1</sup>,周涛<sup>1</sup>,刘小雪<sup>1</sup>,许敏<sup>1\*</sup>,李红星<sup>2</sup>

1. 廊坊市气象局

2. 廊坊大厂回族自治县气象局

**摘要** 利用2014—2019年廊坊市区4个环境监测站臭氧(O<sub>3</sub>)逐时监测数据和国家气象站观测资料,采用统计学方法,探讨廊坊市近地面O<sub>3</sub>超标特征及其与气象因素的关系。结果表明:廊坊市O<sub>3</sub>超标现象主要集中在5—9月,具有明显的季节分布特征;O<sub>3</sub>超标率日变化呈单峰型,O<sub>3</sub> 1 h超标率峰值出现在16:00前后,O<sub>3</sub> 8 h峰值出现在19:00前后;O<sub>3</sub> 8 h浓度与日平均气温呈正相关,与日平均海平面气压呈负相关,与日平均相对湿度和日平均风速呈非线性关系;当廊坊市日平均气温大于25℃,日平均相对湿度为40%~80%,主导风向为偏南和偏东风,日平均风速为0.5~2.5 m/s,日平均海平面气压低于1 010 hPa时,易出现O<sub>3</sub>超标现象;利用多元线性回归方法,建立了5—9月O<sub>3</sub> 8 h浓度预报方程,经检验该预报模型具有较好的拟合度和可预报性。

**关键词** 臭氧超标;特征;气象因素;多元线性回归

中图分类号:X16 文章编号:1674-991X(2021)02-0217-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200147

## Characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Langfang City

LI Na<sup>1</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, LIU Xiaoxue<sup>1</sup>, XU Min<sup>1\*</sup>, LI Hongxing<sup>2</sup>

1. Langfang Meteorological Bureau

2. Dachang Hui Autonomous County Meteorological Bureau of Langfang City

**Abstract** The over-standard characteristics of the surface O<sub>3</sub> in Langfang City and its relationship with meteorological factors were discussed by using the hourly data of 4 environmental monitoring stations and the continuous observation data of the national meteorological station in Langfang City from 2014 to 2019 with statistical methods. The results showed that the phenomenon of O<sub>3</sub> exceeding the standard mainly appeared from May to September and had obvious seasonal characteristics. The diurnal distribution of the over-standard rate of O<sub>3</sub> presented a clear unimodal pattern with its peak appearing around 16:00 for O<sub>3</sub> 1 h concentration and 19:00 for O<sub>3</sub> 8 h concentration. The O<sub>3</sub> 8 h concentration was positively correlated with daily average temperature, and was negative correlated with daily mean sea level pressure, and was nonlinear correlated with daily average relative humidity and wind speed. The concentration of ozone was easy to exceed the standard in Langfang City with the daily mean temperature higher than 25℃, daily mean relative humidity was 40%-80%, wind direction were south and east, daily mean wind speed was 0.5-2.5 m/s and daily mean sea level pressure less than 1 010 hPa. The prediction equation of O<sub>3</sub> 8 h concentration from May to September was established by multiple linear regression method, and the results showed that the prediction model had good fitting degree and accurate predictability.

**Key words** ozone over standard; characteristics; meteorological factors; multiple linear regression

廊坊市地处京津冀腹地,北靠燕山,南接华北平原,东西距渤海和太行山余脉均为100 km左右,人

收稿日期:2020-06-09

基金项目:廊坊市科技局项目(2018013028,2019013074)

作者简介:李娜(1992—),女,助理工程师,主要从事短期天气预报和大气环境预报研究,lina\_nuist2011@163.com

\* 责任作者:许敏(1983—),女,高级工程师,主要从事短期天气预报研究,hblfxm@163.com

口密度大,经济聚集度高,随着“京津冀一体化”协同发展的不断推进,廊坊市的地理优势日益凸显。廊坊市作为疏解北京非首都功能的核心城市,近年来承办了众多的国际会议和赛事,同时以生态、智能、休闲、商务为发展方向的新型定位也对大气环境质量提出了高标准和高要求。

大气污染一度成为困扰廊坊市人民生产生活的大问题,随着近几年政府对大气环境的重视,通过相关部门共同努力,廊坊市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  污染的治理卓有成效。但是,  $O_3$  浓度却不降反升,且超标现象越来越频繁,严重影响了廊坊市大气污染治理的成效。

近年来,随着城市工业化进程加快,经济快速增长,全国各地  $O_3$  污染日益严重,  $O_3$  逐渐成为仅次于  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  的大气污染物。2013 年 1 月 1 日起,74 个城市正式实施了 GB 3095—2012《环境空气质量标准》,除  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$ 、 $NO_2$  常规 4 项污染物以外,新标准增加了  $O_3$  8 h 和  $PM_{2.5}$  浓度限值监测指标。为应对日益严重的  $O_3$  污染问题,国内外众多学者已开展研究<sup>[1-8]</sup>,结果表明  $O_3$  污染实质上是多重空间和时间的积累,是多种作用的共同结果,而作为其中关键影响因素的气象条件又因地而异<sup>[9-13]</sup>。田溢等<sup>[14]</sup>利用 2009 年 7 月—2010 年 6 月的监测数据进行分析,发现廊坊市夏季受东南气流影响时,容易导致  $O_3$  超标;周贺玲等<sup>[15]</sup>对 2013—2015 年廊坊市  $O_3$  浓度与气象要素进行了相关性分析,结果表明,  $O_3$  浓度与相对湿度呈负相关,与温度、日照时数呈正相关;李磊等<sup>[16]</sup>基于廊坊市夏季近地面  $O_3$  浓度及其前体物 VOCs 数据进行研究,结果表明,廊坊市夏季  $O_3$  生成速率与太阳辐射强度、气温呈正相关,与总云量呈负相关。以上研究大多是针对某一时段或某个观测点,且多侧重于定性分析,而对  $O_3$  浓度与气象要素的定量关系讨论较少。笔者利用 2014—2019 年廊坊市 4 个国控环境监测站点的连续  $O_3$  逐时监测数据及国家站逐日气象资料,探讨廊坊市  $O_3$  超标现象的变化特征及其气象成因,并建立了廊坊  $O_3$  超标高发季节(5—9 月)的  $O_3$  浓度预报模型,以期为廊坊市乃至京津冀地区的  $O_3$  污染防治提供科学的理论依据和决策参考。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 资料来源

$O_3$  地面观测数据来源于廊坊市 4 个环境监测站,分别是环境监测监理中心、药材公司、开发区管委会和北华航天学院,其中环境监测监理中心于

2016 年 6 月 1 日迁至河北工业大学,两地直线距离为 540 m,周边环境相同,观测数据经过对比监测,确保连续性。廊坊市环境监测站点分布见图 1。资料时段为 2014—2019 年。 $O_3$  监测仪器采用美国 Thermo 环境设备公司生产的 49i 紫外光度法  $O_3$  分析仪,在观测过程中严格按照 HJ/T 193—2005《环境空气质量自动监测技术规范》,利用配套校准系统对仪器进行定期标定和校准,保证监测数据的准确性和有效性。

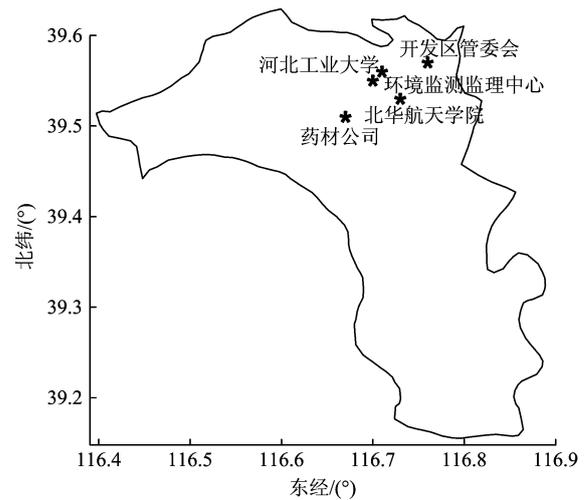


图 1 廊坊市环境监测站点分布  
Fig. 1 Distribution map of Langfang environmental monitoring stations

同期气象资料为廊坊国家气象站(116.7°E, 39.5°N)观测数据,来自河北省气象信息共享平台,包括气温、气压、相对湿度、风速、风向等气象要素数据。

### 1.2 分析方法

HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI)技术规范》分级方法规定:当  $O_3$  日最大 8 h 滑动平均浓度( $O_3$  8 h)大于  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,超标;或当  $O_3$  日最大 1 h 平均浓度( $O_3$  1 h)大于  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,超标;当  $PM_{2.5}$  24 h 浓度大于  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,超标。超标时次与总时次的比值为对应时次的超标率。

利用廊坊市近地面  $O_3$  连续观测资料和同期气象要素,对  $O_3$  污染变化特征及其与气象要素的关系进行统计分析。其中,  $O_3$  浓度与气象要素的相关关系采用 Spearman 相关性分析完成;采用多元线性回归中的逐步回归方法建立  $O_3$  浓度预报方程,逐步回归是气象统计中最普遍的方法,从第一个自变量开始,按照自变量对因变量作用的显著程度从大到小

逐个引入回归方程,当先引入的变量由于后面变量的引入作用变得不显著时则将其剔除,最后得到近似最优回归方程<sup>[17]</sup>。

## 2 O<sub>3</sub>超标现象的时间变化特征

### 2.1 O<sub>3</sub>超标年变化

对2014—2019年廊坊市O<sub>3</sub>数据进行分析,结果见表1。从表1可以看出,2014—2019年廊坊市O<sub>3</sub> 1 h超标共计278 d, O<sub>3</sub> 8 h超标共计375 d,二者均超标的天数为126 d。另外,2019年O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h超标天数最多,分别为61和79 d,2014年超标天数最少,分别为20和46 d,总体而言,O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h超标天数除2018年略有减少外,其余年份是逐年增加的。O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h超标率的变化趋势与超标天数一致,2014年最低,分别为5.59%和12.60%,2019年最高,分别为16.81%和22.01%;2014—2017年逐年上升,2018年略有下降,2019年又有所上升;值得注意的是,2017年之前超标率增长幅度明显,2017—2019年增长幅度有所放缓。

表1 2014—2019年O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h超标天数和超标率

Table 1 Over standard days and rates of O<sub>3</sub> 1 h and O<sub>3</sub> 8 h from 2014 to 2019

年份	O <sub>3</sub> 1 h		O <sub>3</sub> 8 h	
	超标天数/d	超标率/%	超标天数/d	超标率/%
2014	20	5.95	46	12.60
2015	35	9.97	47	12.88
2016	47	12.84	62	16.94
2017	60	16.44	73	21.79
2018	55	16.34	68	21.05
2019	61	16.81	79	22.01

2014—2019年各首要污染物出现天数占比见图2。从图2可以看出,首要污染物是PM<sub>2.5</sub>的天数占比在逐年下降,2014年为60.28%,2019年降至22.7%;首要污染物是O<sub>3</sub>的天数占比逐年上升,由2014年的10.42%增至2019年的38.1%,2017年为31.8%,超过了PM<sub>2.5</sub>(28.8%),成为出现频率最高的首要污染物。PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>超标率变化曲线同样表明,二者随时间的变化趋势相反,PM<sub>2.5</sub>超标率随着时间在逐渐减小,其中,2014年为49.7%,2019年为14.6%;O<sub>3</sub>超标率在逐年上升,其中,2014年为12.6%,2019年为22.0%;2018年,O<sub>3</sub>超标率超过PM<sub>2.5</sub>。这说明经过节能减排,廊坊市以PM<sub>2.5</sub>为代表的重污染天气的防治取得了显著成效,而以O<sub>3</sub>为

代表的光化学污染却日趋严重<sup>[18]</sup>。根据统计的O<sub>3</sub>超标现象高发月份(5—9月)廊坊市的气象要素年变化特征发现,整体呈气温升高,日平均气温大于20℃的天数增加,小风天数明显增多,弱偏南风(风速小于2.5 m/s)频率增加,静稳指数增大,而平均风速显著减小的特点。气温升高,尤其是日平均气温高于20℃的天数增加有利于O<sub>3</sub>的生成;小风天数增多,平均风速减小,弱偏南风频率增加,静稳指数增大,均不利于O<sub>3</sub>的水平稀释与扩散,加剧了O<sub>3</sub>的污染程度。此外,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>等浓度的下降在一定程度上对O<sub>3</sub>的生成形成了正反馈效应,即颗粒物浓度的降低,增加了大气透明度,使大气对光的吸收、散射、折射减少,大气消光能力减弱,太阳辐射同比增强,从而对O<sub>3</sub>的生成起到了促进作用。

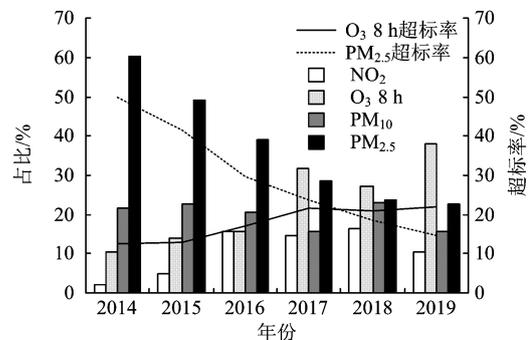


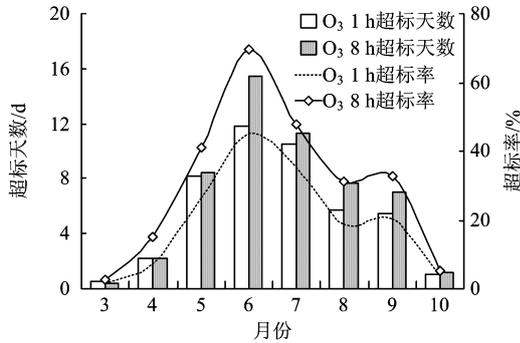
图2 2014—2019年各首要污染物出现天数占比和O<sub>3</sub> 8 h、PM<sub>2.5</sub>超标率

Fig. 2 Percentage of major pollutant days and the over standard rates of O<sub>3</sub> 8 h, PM<sub>2.5</sub> from 2014 to 2019

### 2.2 O<sub>3</sub>超标月份、季节变化

O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h各月超标天数和超标率见图3。由图3可知,超标天数和超标率具有明显的月变化特征,其中O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h超标天数呈单峰型分布,峰值均出现在6月,分别为11.8和15.5 d,而其超标率呈双峰型分布,一个峰值出现在6月,分别是45.2%和69.4%,另一个峰值出现在9月,分别为18.8%和32.8%。另外,O<sub>3</sub>超标只出现在3—10月,冬季没有O<sub>3</sub>超标现象,且主要集中在5—9月,此时O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h的超标天数均超过了全年的90%。这可能是由于廊坊市属于典型温带季风性气候,5—9月太阳辐射强度大、光照时间长、气温高,这些都利于加快大气光化学反应速率,促进O<sub>3</sub>生成,并且廊坊市夏季盛行偏南风,偏南风可以将河北南部城市的O<sub>3</sub>和前体物向廊坊市输送,综合作用下使得廊坊本地的O<sub>3</sub>浓度升高。而冬季太阳辐射相

对较弱,平均气温较低,不利于光化学反应的进行,并且冬季冷空气活动频繁,廊坊市多盛行西北风或偏北风,平均风力较大,利于 O<sub>3</sub> 的稀释扩散,从而在冬季维持较低的 O<sub>3</sub> 浓度。

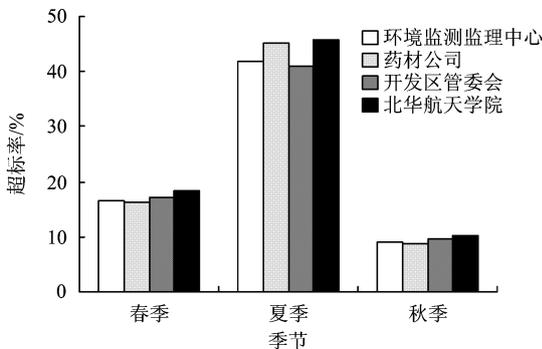


注:11—次年2月无 O<sub>3</sub> 超标现象。

图 3 2014—2019 年 O<sub>3</sub> 1 h 和 O<sub>3</sub> 8 h 超标天数、超标率月分布

Fig. 3 Monthly distribution of the over standard days and rates of O<sub>3</sub> 1 h and O<sub>3</sub> 8 h from 2014 to 2019

各监测点不同季节的 O<sub>3</sub> 8 h 超标率见图 4。从季节分布来看,O<sub>3</sub> 8 h 超标率呈夏季 > 春季 > 秋季的特征,夏季各监测点的超标率达到 40%~45%,较其他污染季节高出 27~37 个百分点;北华航天学院监测点的超标率在各季节中均为最高,夏季药材公司监测点超标率次之,而该监测点在春秋季节则为各国控点最低。可见,O<sub>3</sub> 污染现象有着显著的季节特征,夏季的超标率明显高于其他季节,且存在着一定的空间差异,北华航天学院监测点在不同季节中均为 O<sub>3</sub> 污染最重的地区,初步分析,可能是因为北华航天学院紧邻市区交通主干道,周边有一个火力发电厂且距离京滨工业园区较近,以上排放源排放的 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 都会对 O<sub>3</sub> 浓度产生影响,导致 O<sub>3</sub> 超标频率高于其他监测点。



注:冬季无超标现象。

图 4 廊坊市区不同监测点 O<sub>3</sub> 8 h 超标率季节分布

Fig. 4 Seasonal distribution of the over standard rates of O<sub>3</sub> 8 h at different stations in Langfang

### 2.3 O<sub>3</sub> 超标日变化

O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h 超标率的日变化特征如图 5 所示。由图 5 可见,O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h 超标率的日变化特征均呈单峰型分布,从持续时间来看,O<sub>3</sub> 8 h 超标持续时间较 O<sub>3</sub> 1 h 要长。O<sub>3</sub> 1 h 在每天 10:00 前后开始出现超标,超标率逐渐上升,于 16:00 前后达到峰值,为 9.3%,而 O<sub>3</sub> 8 h 超标率的峰值则出现在 19:00 前后,为 23.8%,较 O<sub>3</sub> 1 h 滞后 3 h,之后超标率逐渐下降。夜间超标率降低明显,这是因为夜间光照减弱,气温降低,光化学反应速率减小,并且 NO 对 O<sub>3</sub> 的滴定作用不断消耗 O<sub>3</sub>,再加上沉积作用导致 O<sub>3</sub> 浓度不断下降。日出之后,随着太阳辐射强度的加强,气温升高,人类活动排放的 NO<sub>2</sub> 等前体物增加,光化学反应加强,O<sub>3</sub> 浓度上升,再次达到超标浓度。

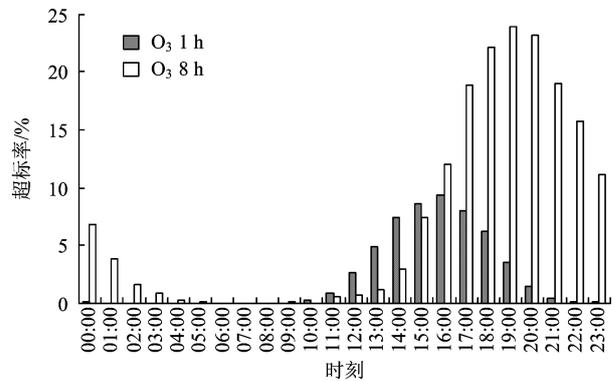


图 5 2014—2019 年 O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h 超标率日变化

Fig. 5 Diurnal variation of the over standard rate of O<sub>3</sub> 1 h and O<sub>3</sub> 8 h from 2014 to 2019

### 3 O<sub>3</sub> 浓度与气象要素的关系

研究表明,近地面层 O<sub>3</sub> 主要来自于大气的光化学反应,少量来自于平流层的输送,O<sub>3</sub> 的形成、沉降、传输和稀释受到气象条件的制约<sup>[19-21]</sup>。陆倩等<sup>[22]</sup>在研究承德市的 O<sub>3</sub> 污染时提出,气象要素主要从 3 个方面影响 O<sub>3</sub> 浓度,分别是促进 O<sub>3</sub> 的生成、抑制 O<sub>3</sub> 的扩散和加速 O<sub>3</sub> 区域间的输送,这说明气象要素并不直接影响 O<sub>3</sub> 浓度的高低,而是通过影响生成 O<sub>3</sub> 的光化学反应和污染物的气象扩散条件进而影响 O<sub>3</sub> 浓度。由此可见,不同地区的 O<sub>3</sub> 浓度与局地的气象环境条件有着密不可分的关系,而与 O<sub>3</sub> 浓度相关性较好的气温、气压、相对湿度、风向和风速、天空云量和降水量等气象要素,对 O<sub>3</sub> 浓度的影响方式也不尽相同<sup>[23]</sup>。结合本地情况,挑选了对廊坊市

$O_3$ 浓度影响较大的气温、相对湿度、风向和风速、海平面气压等气象要素,分析其对 $O_3$ 浓度的影响。

### 3.1 日平均气温

气温主要是通过加强大气光化学反应的进程和大气的湍流运动强度,来提高 $O_3$ 的生成速率。将 $O_3$  8 h浓度与日平均气温数据进行拟合,结果见图6。从图6可见, $O_3$  8 h浓度随着日平均气温的升高而升高,且温度越高,增长率越明显。计算得知,日平均气温与 $O_3$  8 h浓度的相关系数为0.763,并通过了双侧0.01的显著性检验。图7统计了不同日平均气温所对应的 $O_3$  8 h浓度和超标率。从图7可以看出,当日平均气温低于16℃时, $O_3$  8 h未出现超标现象,浓度为 $(56.28 \pm 19.81) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,且随日平均气温的升高变化并不明显;当日平均气温高于16℃时,开始出现 $O_3$  8 h超标现象,且超标率随着日平均气温的升高迅速跃增。不同的日平均气温区间对应不同的 $O_3$  8 h浓度和超标率,主要可以分以下几个区间:16~20℃时, $O_3$  8 h超标率低于20%,浓度为 $(104.31 \pm 15.92) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;21~24℃时, $O_3$  8 h超标率为20%~50%,浓度为 $(142.56 \pm 14.26) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;25~28℃时, $O_3$  8 h超标率为40%~70%,浓度为 $(164.23 \pm 9.34) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;超过28℃时, $O_3$  8 h超标率超过70%,浓度为 $(188.27 \pm 12.36) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

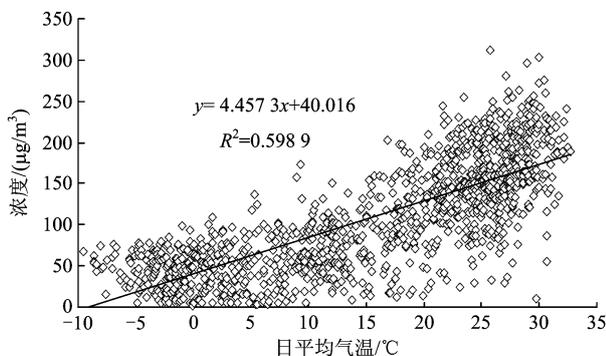


图6 日平均气温与 $O_3$  8 h浓度拟合结果

Fig. 6 Fitting results of daily  $O_3$  8 h concentration and daily average temperature

### 3.2 日平均相对湿度

水汽在大气光化学反应中扮演着重要角色,高相对湿度的大气主要从3个方面抑制高浓度 $O_3$ 的生成:1)水汽会通过散射和吸收产生消光机制,进而削弱紫外辐射,不利于 $O_3$ 的生成;2)高相对湿度是形成污染物湿清除的重要指标,会促进 $O_3$ 的沉降作用,不利于 $O_3$ 的积累;3)大气中的水汽可直接通

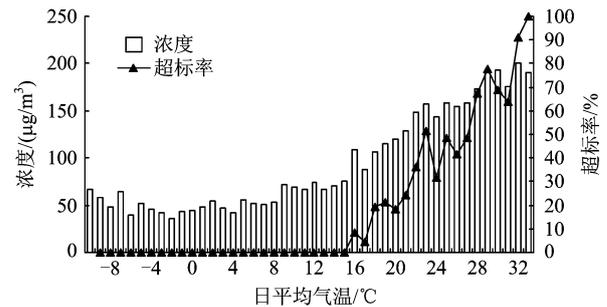


图7 不同日平均气温下 $O_3$  8 h浓度和超标率

Fig. 7 Average concentration and over-standard rate of  $O_3$  8 h under different daily average temperature

过化学反应消耗 $O_3$  [24-25]。

日平均相对湿度与 $O_3$  8 h浓度拟合结果见图8。从图8可以看出, $O_3$  8 h浓度随着日平均相对湿度的升高呈先上升再下降趋势,说明日平均相对湿度与 $O_3$  8 h浓度不是单纯的线性关系。不同日平均相对湿度范围所对应的 $O_3$  8 h浓度和超标率见图9。从图9可以看出, $O_3$  8 h超标率和浓度同样是随日平均相对湿度的增加先增大再减小。当日平均相对湿度小于70%时, $O_3$  8 h浓度和超标率随着日平均相对湿度的增大而增大;当日平均相对湿度大于70%时, $O_3$  8 h浓度和超标率随着日平均相对湿度的增大而急剧减小;当日平均相对湿度为60%~70%时, $O_3$  8 h超标率最高,为38.3%,因此该范围是廊坊市出现 $O_3$ 光化学污染的关键,并且说明相对湿度70%左右存在 $O_3$ 光化学反应的临界值。计算了日平均相对湿度低于70%和高于70%时与 $O_3$  8 h浓度的相关系数,分别为0.243和-0.359,且均通过了双侧0.01的显著性检验,说明当日平均相对湿度低于70%时,与 $O_3$ 浓度呈正相关;当日平均相对湿度高于70%时,与 $O_3$ 浓度呈负相关。即高相对湿度不利于 $O_3$ 浓度的升高,这一结论与其他地区的研究结果一致 [26-27]。

### 3.3 风向和风速

边界层风对 $O_3$ 的影响是复杂的,风速不仅在一定程度上反映了边界层湍流的强度,还能体现出大气边界层稳定度以及大气扩散条件,较高的风速还可以抬高大气边界层高度 [28]。风向则影响了 $O_3$ 及其前体物的传输扩散,反映了污染物输送的不同来向 [29]。

#### 3.3.1 风向

图10给出了各风向对应的 $O_3$  8 h浓度和超标

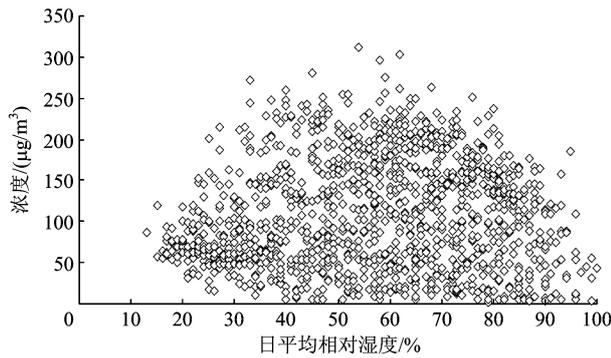


图 8 日平均相对湿度与 O<sub>3</sub> 8 h 浓度拟合结果

Fig. 8 Fitting result of O<sub>3</sub> 8 h concentration and daily average relative humidity

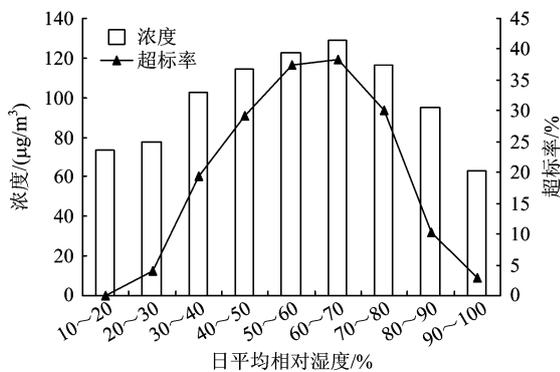


图 9 不同日平均相对湿度范围内 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率  
Fig. 9 Average concentration and over-standard rate of O<sub>3</sub> 8 h under different daily average relative humidity

率,当廊坊城区主导风向为 SW、SSW、S、SSE、SE 时, O<sub>3</sub> 8 h 浓度较高,当主导风向为 SSW、S、SSE、SE、ENE 时, O<sub>3</sub> 8 h 超标率较高。廊坊市的西南方向为保定市、石家庄市,正南方向为沧州市,东南、东北方向则分别为天津市和唐山市,这些城市工业发达,工业园区密集,工业生产排放大量的 VOCs,且数量大、种类多,有助于 O<sub>3</sub> 前体物和生成物向廊坊市的输送,从而促进 O<sub>3</sub> 光化学反应的进行和积聚,田溢等<sup>[14,30]</sup>的研究同样证实廊坊市 O<sub>3</sub> 前体物的输送受天津市、河北南部区域的影响较大。另外,主导风向为 ESE、E 时, O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率明显小于其两侧的主导风向,这是因为该主导风向携带来自渤海湾的水汽,易造成天空云量增多,甚至产生降水,对光化学反应有一定的影响。而当主导风向为 NW、NNE、NNW、N 时, O<sub>3</sub> 8 h 的浓度较低,超标率也较低,廊坊市西北、偏北方向为张家口市、承德市,气流相对较为清洁,并且每年 11—次年 3 月廊坊市盛行

西北风或偏北风<sup>[31]</sup>,此时一般为深秋到初春时节,冷空气活动频繁,平均气温较低,而平均风速较大,风速越大,大气扩散条件越好,越利于污染物的清除和消散,不利于 O<sub>3</sub> 的生成与积聚。

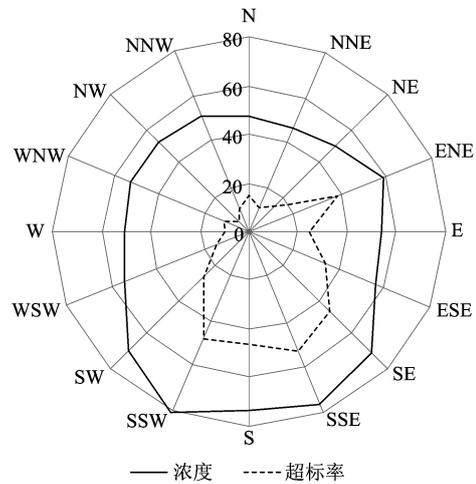


图 10 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率风玫瑰

Fig. 10 Rose maps of average concentration and over-standard rate of O<sub>3</sub> 8 h

### 3.3.2 日平均风速

近地面风速可以在一定程度上反映大气边界层湍流的强度,代表了污染物的输送或清除效率,其对 O<sub>3</sub> 浓度的影响是复杂的<sup>[32]</sup>。图 11 给出了不同日平均风速下的 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率。由图 11 可见,超标率随日平均风速的增大呈先上升后下降趋势,当日平均风速为 0.5~2.5 m/s 时,廊坊市区的 O<sub>3</sub> 8 h 超标率和浓度均较高;当日平均风速小于 1.5 m/s 时, O<sub>3</sub> 8 h 超标率和浓度随着风速的增大而增加;当日平均风速为 1.5~2.5 m/s 时, O<sub>3</sub> 8 h 超标率和浓度无明显变化;当日平均风速大于 2.5 m/s 时, O<sub>3</sub> 8 h 超标率随着风速的增大而减小。这是因为风速的增大主要从 2 个方面影响 O<sub>3</sub> 浓度:1) 较高的风速利于边界层高度的抬升,使得上下层物理量交换加强,利于对流层顶的 O<sub>3</sub> 向边界层输送;2) 较高的风速利于 O<sub>3</sub> 的水平稀释和扩散。当风速较小时,垂直输送作用大于水平扩散稀释, O<sub>3</sub> 及其前体物得以不断累积;随着风速的增大, O<sub>3</sub> 浓度增大,当风速超过一定范围时,水平的扩散稀释作用强于垂直输送, O<sub>3</sub> 浓度则随风速的增大而减小<sup>[33]</sup>。

### 3.4 日平均海平面气压

海平面气压主要通过影响大气运动及天气状况而间接影响生成 O<sub>3</sub> 的光化学反应和 O<sub>3</sub> 区域间的传输扩散,因此其分布和变化能在一定程度上影响 O<sub>3</sub>

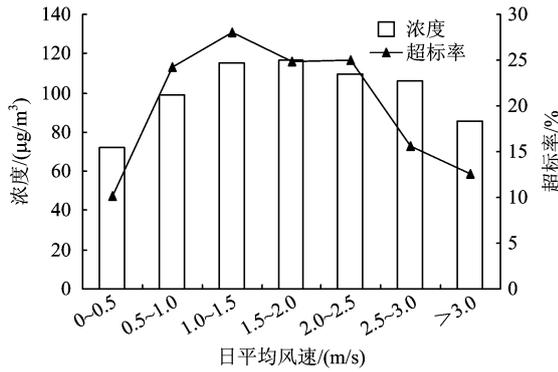


图 11 不同日平均风速下 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率

Fig. 11 Average concentration and over standard rate of O<sub>3</sub> 8 h under different daily average wind speed

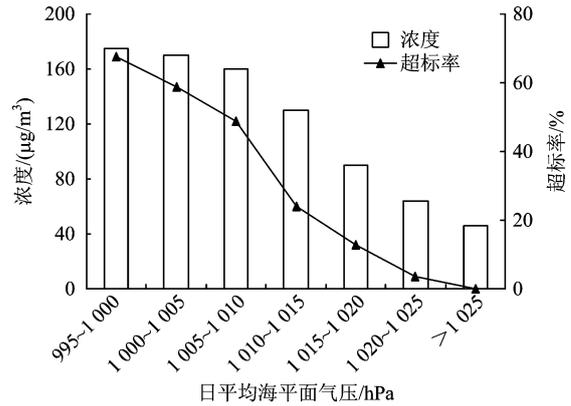


图 13 不同日平均海平面气压范围下 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率

Fig. 13 Average concentration and over standard rate of O<sub>3</sub> 8 h under different daily average sea level pressure

浓度。对日平均海平面气压与 O<sub>3</sub> 8 h 浓度的拟合结果见图 12,不同日平均海平面气压范围下 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率见图 13。从图 12 和图 13 可以看出,随着日平均海平面气压的升高,O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率都在逐渐减小,当日平均海平面气压为 995 ~ 1 010 hPa 时,超标率较高,超过 50%,浓度在 120 µg/m<sup>3</sup> 以上;当日平均海平面气压高于 1 025 hPa 时,则不再出现 O<sub>3</sub> 8 h 浓度超标现象。计算二者的相关系数,为 -0.714,且通过了 0.01 的显著性检验,说明二者呈显著负相关,其相关性仅次于日平均气温。这可能是因为当日平均海平面气压较低时,地面天气形势多以低压、均压场为主,大气层结较为稳定,近地面风速小,扩散条件差,易造成污染物的积聚,导致 O<sub>3</sub> 浓度升高<sup>[34]</sup>。

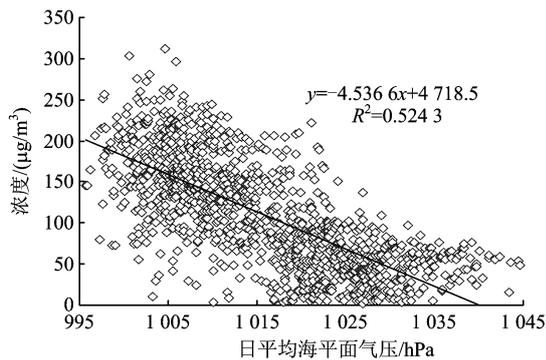


图 12 日平均海平面气压与 O<sub>3</sub> 8 h 浓度拟合结果

Fig. 12 Fitting result of O<sub>3</sub> 8 h concentration and daily average sea level pressure

廊坊市近地面 O<sub>3</sub> 浓度超标现象主要出现在每年的 5—9 月,O<sub>3</sub> 8 h 超标天数占到了全年的 90% 以上,为更好地研究上述期间各项气象要素与 O<sub>3</sub> 8 h

浓度的定量关系,对 5—9 月 O<sub>3</sub> 8 h 浓度和气象因子建立多元线性回归方程,采用逐步回归方法,以 O<sub>3</sub> 8 h 浓度为因变量,引入的自变量包括日平均气温( $\bar{T}$ )、日最高气温( $T_{max}$ )、日最低气温( $T_{min}$ )、日降水量( $R$ )、日平均海平面气压( $\bar{P}$ )、日最高气压( $P_{max}$ )、日最低气压( $P_{min}$ )、日平均相对湿度( $\overline{RH}$ )、日最小相对湿度( $RH_{min}$ )、日平均风速( $\bar{V}$ )、日最大风速( $V_{max}$ )、日照时数( $H$ )等气象要素。根据显著性水平(表 2),最终选定了  $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 、 $R$ 、 $\overline{RH}$ 、 $RH_{min}$ 、 $P_{min}$  6 个气象要素为变量,剔除了其他显著性较差的因子,样本数为 610 个,其复相关系数为 0.61,拟合优度较好,建立的多元回归模型的  $F$  为 59.41,  $F > F_{0.001}$ ,说明回归模型具有显著意义,最终得到的回归方程如下:

$$Y = 805.4 + 9.394T_{max} - 0.654R - 3.55T_{min} + 0.921RH_{min} - 0.533\overline{RH} - 0.867P_{min}$$

由回归方程可知,在 5—9 月,当廊坊市日最高气温越高、日降水量越少、日最低气温越低、日最小相对湿度越大、日平均相对湿度越小、日最低气压越低时,越利于促进 O<sub>3</sub> 光化学反应速率,O<sub>3</sub> 8 h 浓度越高,越容易出现 O<sub>3</sub> 超标现象。为检验预报方程的可预报性,计算了 5—9 月 O<sub>3</sub> 8 h 浓度的观测值与拟合值的相关系数,为 0.635,且通过了双侧 0.001 的置信度水平。图 14 给出了 5—9 月逐日 O<sub>3</sub> 8 h 观测值与回归方程预报模型拟合值的对比。由图 14 可见,离散点主要集中分布在  $y = x$  两侧,表明预报值与观测值基本一致,回归方程的预报结果较为理想,可预报性较好。

表 2 自变量显著性水平

Table 2 Significance level of independent variables

$\bar{T}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$R$	$\bar{P}$	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$\overline{RH}$	$RH_{\min}$	$\bar{V}$	$V_{\max}$	$H$
0.596	0.000*	0.000*	0.000*	0.456	0.836	0.033*	0.019*	0.000*	0.063	0.319	0.349

注: \* 表示该自变量通过了显著性检验 (Sig < 0.05)。

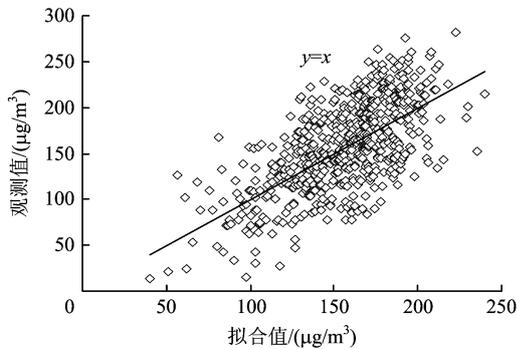
图 14 逐日 O<sub>3</sub> 8 h 浓度观测值与预报方程拟合值

Fig. 14 Comparison between daily O<sub>3</sub> 8 h concentration observed and calculated by forecasting-equation

## 4 结论

(1) 2014—2019 年廊坊市 O<sub>3</sub> 超标天数、超标率呈上升趋势, O<sub>3</sub> 已超过 PM<sub>2.5</sub> 成为最主要的大气污染物。

(2) 廊坊市 O<sub>3</sub> 超标现象具有明显的季节特征, 11—次年 2 月 O<sub>3</sub> 超标, 主要集中在 5—9 月; O<sub>3</sub> 1 h、O<sub>3</sub> 8 h 超标率日变化均呈单峰型, O<sub>3</sub> 1 h 超标率峰值出现在 16:00 前后, O<sub>3</sub> 8 h 超标率比 O<sub>3</sub> 1 h 滞后 3 h, 峰值出现在 19:00 前后。

(3) O<sub>3</sub> 超标是多项因子综合作用的结果, 与气象因素关系密切。廊坊市 O<sub>3</sub> 8 h 浓度与日平均气温呈正相关, 与日平均海平面气压呈负相关, 与日平均相对湿度和日平均风速为非线性关系, 当日平均气温高于 25 °C, 日平均海平面气压低于 1 010 hPa, 日平均相对湿度为 40%~80%, 日平均风速为 0.5~2.5 m/s 时, O<sub>3</sub> 超标率较高, 以上气象条件可作为初步判定发生 O<sub>3</sub> 超标的预报指标。

(4) 当主导风向为偏南风 and 偏东风时, O<sub>3</sub> 8 h 浓度和超标率较高, 廊坊市 O<sub>3</sub> 前体物及生成物受河北省南部、天津市、唐山市输送影响较大。

(5) 综合考虑气温、气压、降水、相对湿度、风速、日照时数等气象要素, 建立了廊坊市 O<sub>3</sub> 超标高发季节 (5—9 月) 的 O<sub>3</sub> 8 h 浓度预报方程, 经检验方程可预报性较好, 当廊坊市日最高气温越高、日降水量越少、日最低气温越低、日最小相对湿度越大、日平均

相对湿度越小、日最低气压越低时, O<sub>3</sub> 8 h 浓度越高。

根据现有数值预报模式产品与技术, 天气预报按照时效可分为长期 (> 10 d)、中期 (3~10 d) 和短期 (< 3 d) 预报, 预报时效越长, 各气象要素的准确性和可靠性越低, 因此, O<sub>3</sub> 浓度的预报方程还需要根据未来天气预报的发展, 来不断检验和优化, 才能实现准确率的提升。

## 参考文献

- [1] 张良, 王晓利, 王占山, 等. 2014 年石家庄市 O<sub>3</sub> 污染特征 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 1-8.  
ZHANG L, WANG X L, WANG Z S, et al. Ozone pollution characteristics of Shijiazhuang in 2014 [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 1-8.
- [2] 佟霖坤, 陈海婴, 刘晶晶. 保定市夏季臭氧及其前体物浓度变化特征分析 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(6): 116-118.  
TONG J K, CHEN H Y, LIU J J. Characteristic analysis of concentration change of summer ozone and its precursor in Baoding City [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2016, 44(6): 116-118.
- [3] 刘献辉, 周兵利. 洛阳市老城区环境空气中臭氧污染特征及相关气象要素分析 [J]. 环境研究与监测, 2014, 27(2): 14-17.
- [4] ZYCHOWSKI K E, LUCAS S N, SANCHEZ B, et al. Hypoxia-induced pulmonary arterial hypertension augments lung injury and airway reactivity caused by ozone exposure [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2016, 305: 40-45.
- [5] HU H, HA S D, XU X H. Ozone and hypertensive disorders of pregnancy in Florida; identifying critical windows of exposure [J]. Environmental Research, 2017, 153: 120-125.
- [6] 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 福州近地层臭氧分布及其与气象要素的相关性 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 175-181.  
WANG H, CHEN X Q, YU Y J, et al. Distribution of ozone in land surface layer in Fuzhou and its relationship with meteorological factors [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4): 175-181.
- [7] WU R R, XIE S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(5): 2574-2583.
- [8] 蒋维楣, 蔡晨霞, 李昕. 城市低层大气臭氧生成的模拟研究 [J]. 气象科学, 2001, 21(2): 154-161.  
JIANG W M, CAI C X, LI X. Simulation of the forming of ozone in the low layer air of urban area [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2001, 21(2): 154-161.
- [9] PONT V, FONTAN J. Comparison between weekend and weekday ozone concentration in large cities in France [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(8): 1527-1535.
- [10] 张奇磊, 吴礼裕, 朱晨阳. 常州地区近地面 O<sub>3</sub> 及其前体物相关性研究 [J]. 环境科学与管理, 2015, 40(2): 123-125.  
ZHANG Q L, WU L Y, ZHU C Y. Relevance of surface ozone and

- its precursor in Changzhou [J]. *Environmental Science and management*, 2015, 40(2): 123-125.
- [11] 王宇骏, 黄新雨, 裴成磊, 等. 广州市近地面臭氧时空变化及其生成对前体物的敏感性初步分析[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(3): 83-88.  
WANG Y J, HUANG X Y, PEI C L, et al. Spatial-temporal variations of ground-level ozone and preliminary analysis on the sensitivity of ozone formation to precursors in Guangzhou City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(3): 83-88.
- [12] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区 O<sub>3</sub> 输送的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(11): 1140-1146.  
XU J, ZHANG X L, ZHAO X J, et al. Influence of summer local circulation on the transportation of ozone from urban to the downwind area in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(11): 1140-1146.
- [13] GENG F, ZHANG Q, TIE 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.
- [14] 田谧, 吉东生, 王跃思, 等. 河北廊坊地区大气污染物变化特征与来源追踪[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(12): 4895-4903.  
TIAN M, JI D S, WANG Y S, et al. Characteristics of atmospheric pollutants and their sources in Langfang of Hebei [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(12): 4895-4903.
- [15] 周贺玲, 周玉都, 闻静. 河北廊坊近地面层 O<sub>3</sub> 特征及其影响因素[J]. *干旱气象*, 2017, 35(3): 405-411.  
ZHOU H L, ZHOU Y D, WEN J. Characteristics of ozone over surface layer of Langfang City and its influencing meteorological factors [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(3): 405-411.
- [16] 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 等. 廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4100-4107.  
LI L, ZHAO Y M, WANG X G, et al. Influence factors and sensitivity of ozone formation in Langfang in the summer [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4100-4107.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 213-214.
- [18] HAN S Q, ZHANG M, ZHAO C S, et al. Differences in ozone photochemical characteristics between the megacity Tianjin and its rural surroundings [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(11): 209-216.
- [19] 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.  
YAN W L, LIU D Y, KANG Z M, et al. The characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Jiangsu [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, 39(4): 477-487.
- [20] ZHANG Y N, XIANG Y R, CHAN L Y, et al. Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(28): 4898-4906.
- [21] LIU T, LI T T, ZHANG Y H, et al. The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76: 59-67.
- [22] 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.  
LU Q, WANG G H, FU J, et al. Study on the prediction method of meteorological conditions for ozone pollution in Chengde [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 35(6): 67-76.
- [23] 王开燕, 邓雪娇, 张剑, 等. 广州南沙区 O<sub>3</sub> 浓度变化及其与气象因子的关系[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(6): 23-26.  
WANG K Y, DENG X J, ZHANG J, et al. Analysis on the change of ozone concentration in Nansha District of Guangzhou and its relationship with meteorological factors [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(6): 23-26.
- [24] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO, NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度变化的相关性分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 706-711.  
AN J L, WANG Y S, LI X, et al. Analysis of the relationship between NO, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 706-711.
- [25] 姚青, 孙玫玲, 刘爱霞. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2206-2210.  
YAO Q, SUN M L, LIU A X. Analysis and prediction of surface ozone concentration and related meteorological factors in summer in Tianjin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2206-2210.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京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.
- [29] 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.
- [30] 宋从波, 李瑞芑, 何建军, 等. 河北廊坊市区大气中 NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 2903-2912.  
SONG C B, LI R P, HE J J, et al. Analysis of pollution characteristics of NO, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> at urban area of Langfang, Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 2903-2912.
- [31] 杜海涛, 郭立平, 王清川, 等. 廊坊市灾害性天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 123-125.
- [32] 吴镔, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(11): 4241-4252.  
WU K, KANG P, WANG Z S, et al. Ozone temporal variation and its meteorological factors over Chengdu City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4241-4252.
- [33] 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.  
WANG L, LIU D Y, HAN G R, et al. Study on the relationship between surface ozone concentrations and meteorological conditions in Nanjing, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [34] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧时空分布特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4446-4453.  
WANG Z S, LI Y T, CHEN T, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12): 4446-4453. □