

成都平原夏季臭氧浓度特征分析

张智倬¹, 曾胜兰²

¹邯郸市气象局, 河北 邯郸

²成都信息工程大学, 四川 成都

Email: zhangz813z@foxmail.com, Zengsl@cuit.edu.cn

收稿日期: 2020年9月30日; 录用日期: 2020年10月22日; 发布日期: 2020年10月29日

摘要

为了定量分析成都平原地面臭氧浓度特征及其气象成因, 利用多个国控监测站点污染物浓度实时数据和中国气象地面观测数据, 对2017~2019年夏季成都平原六市的臭氧浓度进行分析。结果表明: 1) 夏季成都平原各市的臭氧浓度分布有明显差异, 成都市部分地区呈重度污染, 雅安市臭氧水平为良。2) 根据月份分析可知, 7月臭氧浓度逐年下降, 8月臭氧浓度逐年上升。3) O₃浓度日变化呈“单峰型”, 8:00左右处于一天中的最低值, 16:00左右达峰值。4) O₃为成都平原夏季首要污染物。5) 臭氧浓度与温度呈明显正相关性, 与相对湿度呈明显负相关性, 与能见度有较好正相关性, 与3小时变压有较好负相关性; 温度大于25℃、相对湿度小于70%、风速为0~2 m/s时, 出现臭氧污染的概率增加。

关键词

成都平原, 臭氧, 时空分布, 相关性分析, 气象成因

Analysis on the Characteristics of Summer Ozone Concentration in Chengdu Plain

Zhizhuo Zhang¹, Shenglan Zeng²

¹Handan Meteorological Service, Handan Hebei

²Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: zhangz813z@foxmail.com, Zengsl@cuit.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2020; accepted: Oct. 22nd, 2020; published: Oct. 29th, 2020

Abstract

In order to quantitatively analyze the characteristics and meteorological causes of the ground

文章引用: 张智倬, 曾胜兰. 成都平原夏季臭氧浓度特征分析[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(5): 722-735.

DOI: 10.12677/aep.2020.105088

ozone concentration in the Chengdu Plain, and the real-time data of pollutant concentration at multiple national control monitoring sites and the observation data of the Chinese meteorological ground were used to analyze the ozone concentration in 6 cities in the Chengdu Plain in the summer of 2017-2019. The results show that: 1) There are significant differences in the distribution of ozone concentration in the cities of Chengdu Plain in summer. Some areas in Chengdu are heavily polluted, and the ozone level in Ya'an is good. 2) According to monthly analysis, the ozone concentration decreased year by year in July, and the ozone concentration increased year by year in August. 3) O₃ concentration is "single peak", which is at the lowest value of the day around 8:00, reaching around 16:00 Peak; 4) O₃ is the main pollutant in the Chengdu Plain in summer; 5) The ozone concentration is significantly positively correlated with temperature and negatively correlated with relative humidity. It has a good positive correlation with visibility and a good negative correlation with the 3-hour pressure change; when the temperature is greater than 25°C, the relative humidity is less than 70%, and the wind speed is 0 - 2 m·s⁻¹, the probability of ozone pollution increases.

Keywords

Chengdu Plain, Ozone, Spatial and Temporal Distribution, Correlation Analysis, Weather Causes

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

臭氧(O₃)是大气中的重要微量成分,氧气的同素异形体,是一种具有特殊气味的淡蓝色气体。约 90% 的臭氧分布于平流层中,约 10% 分布在对流层中[1]。平流层大气中的臭氧具有阻碍紫外线的作用,具有保护人类与环境免遭伤害的作用。分布在对流层中的臭氧浓度升高将对人类、动植物以及周遭环境会造成巨大影响[2]。大气臭氧污染会加重呼吸道疾病、损害肺功能、甚至引发心脑血管疾病等危害[3],加强臭氧防治具有重要的现实意义[4]。臭氧也是带起复合型污染最重要的特征污染物[5],其污染的形成受到前体物和气象条件的影响[6] [7] [8] [9],城市低层臭氧主要是由人类活动排放的挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)经过光化学反应生成的[10]。

自从 20 世纪 50 年代,国际上时有光化学烟雾事件发生以来[11] [12] [13] [14],我国 O₃ 污染范围不断扩大,也已经形成区域性污染[15]。目前已知,臭氧对温度变化敏感性较大,且风速对臭氧的扩散和稀释也存在很重要的作用[16];臭氧浓度随地形变化明显[17];臭氧柱浓度整体呈现中部分散、南北聚集、差异显著的分布格局[18];郊区臭氧浓度高于市区,夏季臭氧污染最为严重[19] [20] [21]。总之,臭氧浓度受多种因素影响,学者普遍认为在温度高、辐射强、相对湿度小的气象条件下更易出现臭氧污染[22] [23],且气象条件和 NO_x、CO 等污染物的浓度对臭氧浓度的影响具有季节特征和日变化特征[24] [25]。

成都平原位于四川盆地西部,是中国最富饶的平原之一,同时也是四川省人口密度最高、发展最快的区域。近年来,由于经济发展持续加快,城市面积不断扩大,机动车保有量快速增长,由此产生的工业废气、机动车尾气和施工扬尘使得污染日趋严重,区域性大气复合污染严重,又由于地形因素不利于污染物的稀释扩散,成都平原成为四川省内污染最为严重的区域之一[26]。颗粒物超标状况在四川省内得到有效控制,臭氧污染问题突出[27]。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域与数据来源

本研究所使用的地面污染物浓度来源于成都平原 6 个城市(成都、绵阳、德阳、乐山、眉山、雅安)共 25 个国控监测站点(图 1)日 O_{3-8H} (为臭氧最大 8 h 平均浓度)以及臭氧污染严重天数的逐小时臭氧浓度, 每个城市的站点数为 2~8 之间不等, 数据来源于中国环境监测总站, 严格参照《环境空气质量标准》(GB3095-2012)进行质量控制, 同时剔除部分时段由于停电、仪器校准等原因出现的缺测数据。

气象数据采用中国气象数据共享网的中国地面气象站逐日观测资料, 在充分考虑数据完整性和代表性等因素后, 选取 6 个台站(图 1)数据包括总云量(层)、风向($^{\circ}$)、风速(m/s)、海平面气压(hpa)、3 小时变压(hpa)、6 小时降水(mm)、露点($^{\circ}C$)、能见度(km)、温度($^{\circ}C$)、24 小时变温($^{\circ}C$)、24 小时变压(hpa)、相对湿度等气象要素, 数据集原始文件已经过严格的质量控制和检查。

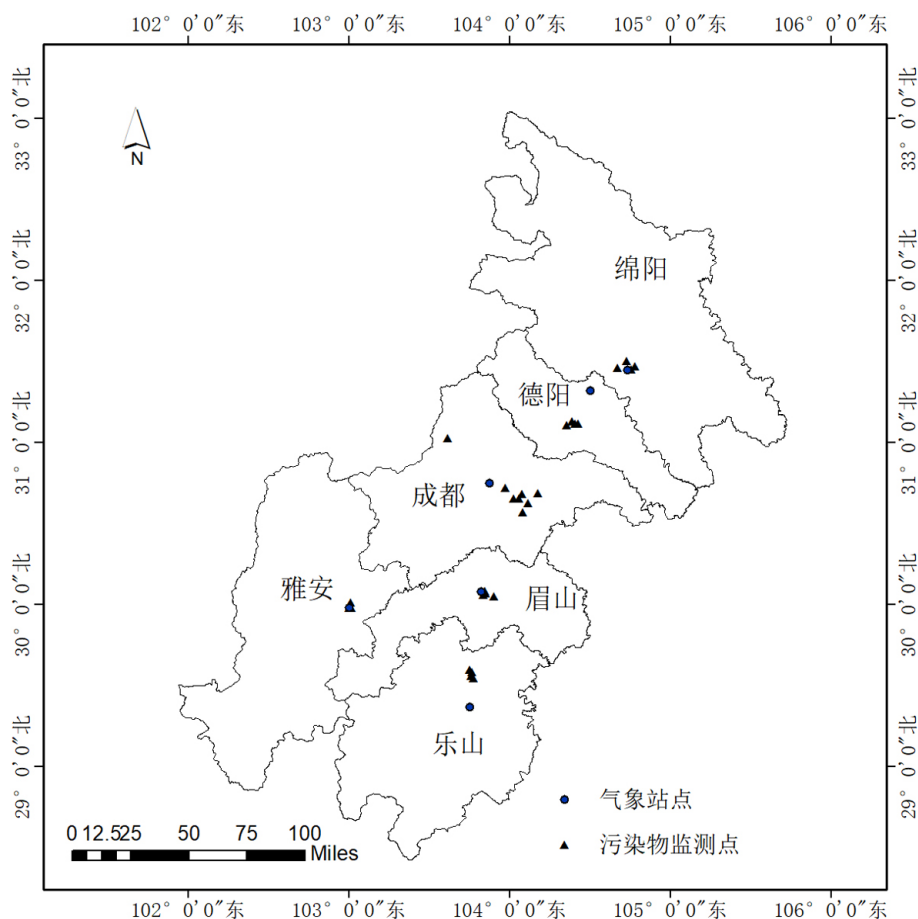


Figure 1. Spatial distribution map of ozone and weather monitoring stations in the Chengdu Plain

图 1. 成都平原臭氧与气象监测站点空间分布

2.2. 评价方法

臭氧的评价方法依据国家环保部颁发的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ663-2013)规定[28] [29], 以日历年内城市 $O_{3-8H-90}$ (臭氧浓度 8 h 滑动平均的第 90 百

分位浓度)限值 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 判定臭氧当天是否超标, 以二级标准小时平均浓度限值 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 判定臭氧小时是否超标, 见表 1。通常以日 $\text{O}_{3-8\text{H}}$ 代表一天臭氧污染水平, 又根据具体 $\text{O}_{3-8\text{H}}$ 和空气质量指数判定污染强度, 见表 2。

根据四川省城市环境空气质量综合评价方法中的环境空气质量综合指数评价各城市空气质量。各污染物的环境空气质量指数的月评价方法: 污染物 i 的单项指数 I_i 按($I_i = C_i/S_i$)计算, 其中 C_i 为污染物 i 的月均浓度值; i 为 SO_2 时 S_i 为 60、 NO_2 时 S_i 为 40、 PM_{10} 时 S_i 为 70、 $\text{PM}_{2.5}$ 时 S_i 为 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 i 为 CO 时 S_i 为日均浓度的第 95 百分位数、 i 为 O_3 时 S_i 为日最大 8 小时平均浓度的第 90 百分位数。计算每一项污染物的单项指数, 然后将六项污染物的单项指数相加, 即得到综合指数。

Table 1. The limit standard of Ozone concentration

表 1. 臭氧的浓度限值

污染物项目	平均时间	浓度限值/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	
		一级	二级
臭氧	日最大 8 h 平均第 90 百分位	100	160
	日最大 8 h 平均	100	160
	1 h 平均	160	200

Table 2. $\text{O}_{3-8\text{H}}$ concentration and its corresponding air quality index and air quality index category

表 2. $\text{O}_{3-8\text{H}}$ 浓度及其对应的空气质量指数和空气质量指数类别

$\text{O}_{3-8\text{H}}/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	≤ 100	101~160	161~215	216~265	> 265
IAQI	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300
空气质量指数类别	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染

2.3. 分析过程

1) ArcGIS 中的反距离加权插值法(IDW)得出 2017~2019 年成都平原夏季臭氧浓度分布图。2) 以 $\text{O}_{3-8\text{H}}$ 为标准统计 2017~2019 年夏季成都平原各市每月的超标天数。3) Origin 折线图绘制各市 2017~2019 年夏季逐小时臭氧浓度的月平均值, 气泡图绘制气象要素与臭氧浓度的。4) SPSS 中的皮尔逊(N)相关性分析计算 2017~2019 年夏季各城市监测点其他污染物浓度和气象要素与臭氧浓度的相关系数。

3. 臭氧浓度的时空分布特征

3.1. 臭氧浓度的空间分布特征

如图 2 所示。可知 2017 年 O_3 浓度较 2018 年和 2019 年整体偏高, 且位于成都市中部的高值区域相较于后两年更广泛。根据监测点资料显示成都平原 2017 年夏季只有成都市大石西路监测点为中度臭氧污染, $\text{O}_{3-8\text{H}-90}$ 为 $228.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2018 年夏季 $\text{O}_{3-8\text{H}-90}$ 均未达到中度污染程度; 2019 年夏季只有成都市十里店监测点中度臭氧污染, $\text{O}_{3-8\text{H}-90}$ 为 $219 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。臭氧夏季轻度污染区域范围在 2019 年最大, 2017 年次之, 2018 年最小。雅安市三年间夏季臭氧浓度指数整体为良, 仅有与成都市接壤的边界地带为轻度臭氧污染。乐山市夏季在 2017 年和 2019 年均呈现臭氧轻度污染现象。

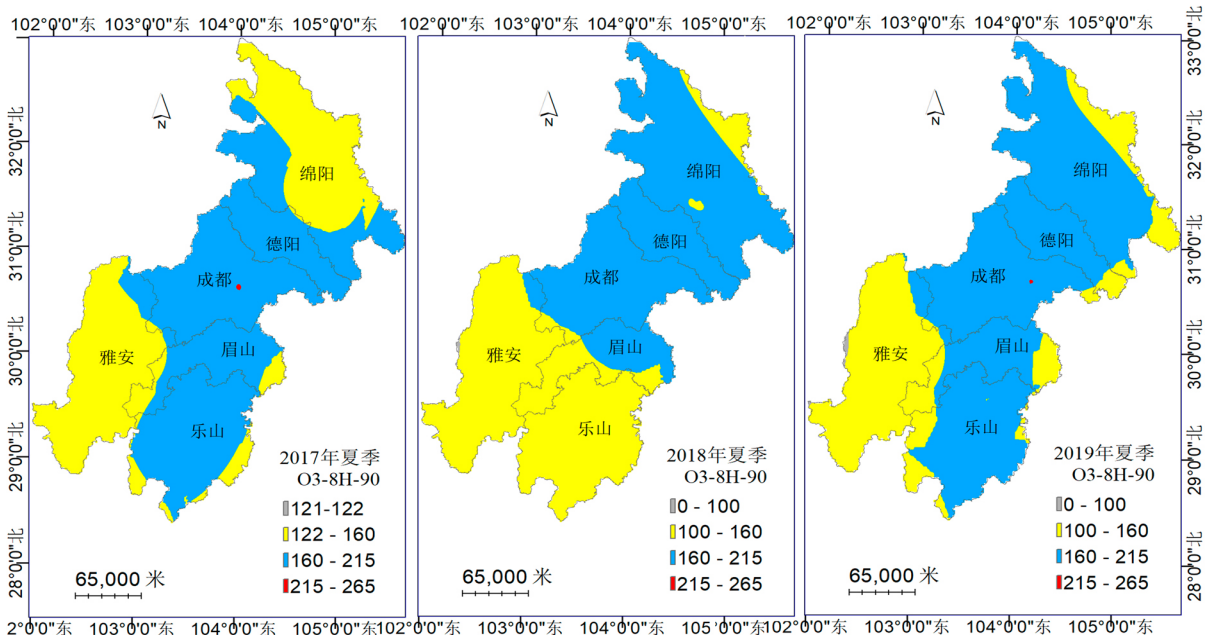


Figure 2. Distribution map of ozone concentration in the Chengdu Plain in summer
图 2. 成都平原夏季臭氧浓度分布图

3.2. 臭氧浓度的时间分布特征

3.2.1. 臭氧月季变化特征

Table 3. The number of days with ozone concentration exceeding the standard in Chengdu Plain
表 3. 成都平原臭氧浓度超标天数

月份		2017	2017	2017	2018	2018	2018	2019	2019	2019	合计
城市		06	07	08	06	07	08	06	07	08	
成都	轻度污染	3	16	8	6	4	10	1	1	10	68
	中度污染	0	2	0	1	1	2	2	0	2	10
	重度污染	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
绵阳	轻度污染	0	2	0	6	0	6	4	0	6	24
	中度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	重度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
德阳	轻度污染	8	9	5	5	0	10	5	1	4	47
	中度污染	1	2	0	1	0	2	0	0	2	8
	重度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
乐山	轻度污染	4	12	0	1	0	0	4	0	7	28
	中度污染	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	重度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
眉山	轻度污染	3	11	6	5	5	8	6	3	6	53
	中度污染	0	2	0	0	1	0	2	0	2	7
	重度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
雅安	轻度污染	0	6	0	0	0	0	4	0	3	13
	中度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	重度污染	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3统计了2017~2019年成都平原各市夏季轻度污染、中度污染、重度污染的天数,综合来看臭氧污染程度:成都 > 眉山 > 德阳 > 乐山 > 绵阳 > 雅安。成都市和雅安市的月季变化趋势基本一致,夏季8月最易出现臭氧浓度高值。绵阳市、德阳市和眉山市相似,臭氧浓度在2017年7月为本年夏季最

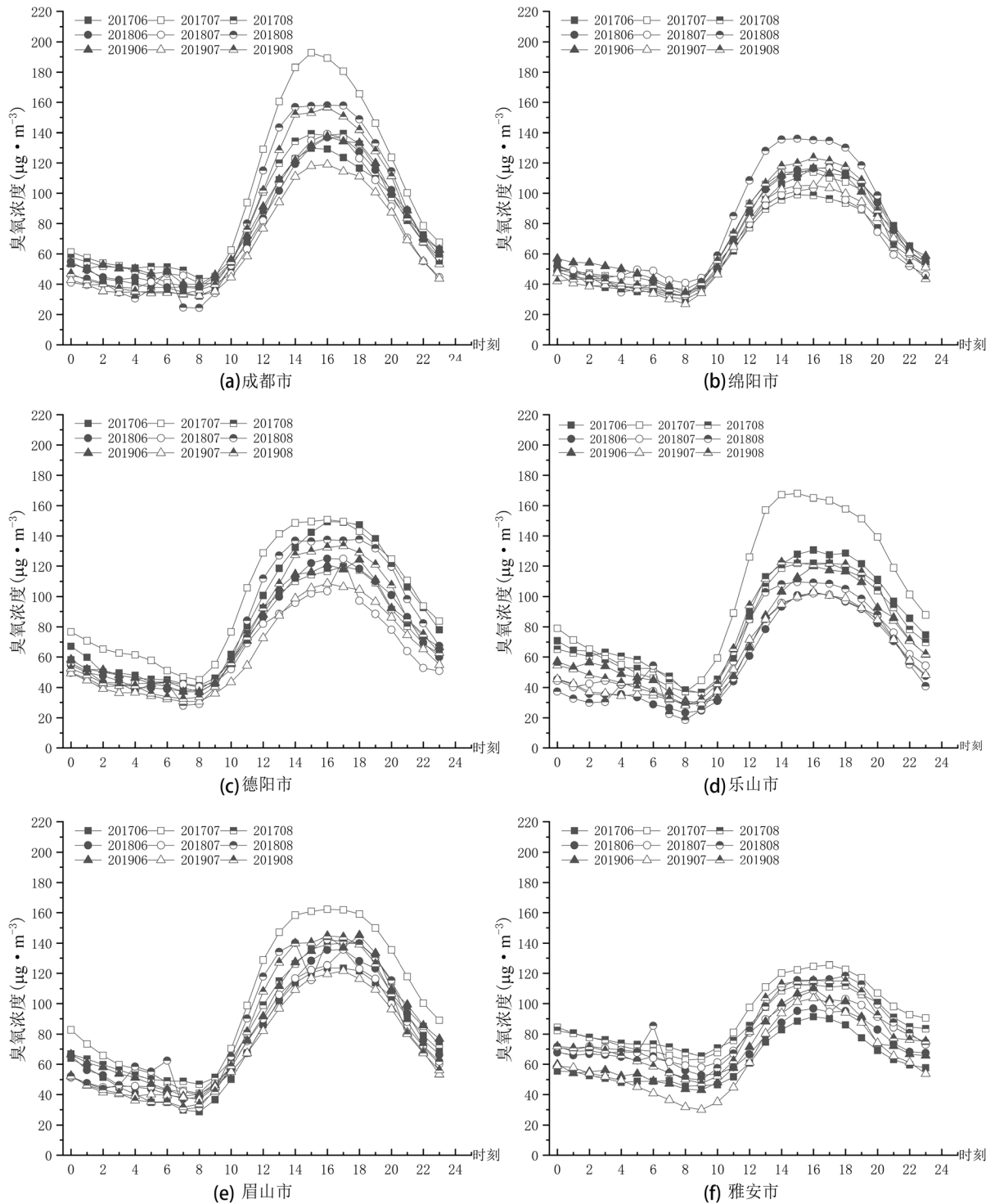


Figure 3. Diurnal variation of hourly ozone concentration in summer in Chengdu Plain

图3. 成都平原夏季臭氧小时浓度日变化图

高值,但在2018年和2019年7月为本年夏季最低值;眉山市在2018年6月为本年夏季最高值,但德阳市和绵阳市在2018年8月为本年夏季最高值。雅安市在2017年夏季与2019年夏季趋势反向,2017年与其他市相同在7月达到本年夏季最高值,2018年呈逐渐上升趋势。

3.2.2. 臭氧的日变化特征

由图3可知,成都平原各市夏季O₃小时浓度日变化规律大致相同,均呈“单峰型”分布特征。峰值过后至第二日7:00~8:00臭氧浓度一直降低,主要原因为生成臭氧的光化学反应所需的光照和太阳辐射逐渐减弱,且NO_x[30]不断消耗O₃,导致臭氧浓度不断降低,故而一天之内在8:00左右臭氧浓度最低。因9:00以后光照逐渐增强、太阳辐射随之增大以及温度的不断升高,光化学反应加强,臭氧浓度开始积累升高,又由于午后湍流旺盛,使得O₃向下输送,故臭氧浓度在16:00左右达到峰值。但2018年的8月在成都市、德阳市、乐山市、雅安市、眉山市6:00均出现异常升高,引起这种变化的原因可能是湿度、辐射以及风速对臭氧浓度产生一定的影响。观察一天中的峰值,看出在成都市、德阳市、乐山市、雅安市、眉山市,2017年7月的臭氧浓度明显高出其他年份夏季臭氧浓度,绵阳市则为2018年8月的臭氧浓度明显高于其他年份夏季臭氧浓度。

3.3. 臭氧污染特征

3.3.1. 臭氧作为首要污染物的特征

由图4可知,成都平原夏季2017~2019年间,6月各地主要污染物为臭氧的比例为60%,7月和8月各地主要污染物均为臭氧,即臭氧污染问题在成都平原整体呈加重的趋势。2017年6月成都市、绵阳市、雅安市的主要污染物为PM₁₀;2018年6月乐山市的主要污染物为PM₁₀;2019年6月成都市、眉山市的主要污染物为NO₂。

成都平原各市夏季空气质量在2017~2019年间的6月为明显逐年变好的趋势;7月空气质量只有成都市仍明显有变好的趋势,其余5市在2018年和2019年间虽明显较于2017年有明显改善,但未呈现明显的逐年变好态势,而是2019年较2018年略有变差的趋势;8月空气质量只有雅安市呈变好趋势,成都市、绵阳市、德阳市、乐山市、眉山市在2018~2019年间空气质量变化幅度不大,相较于2017年有一定幅度的改善。

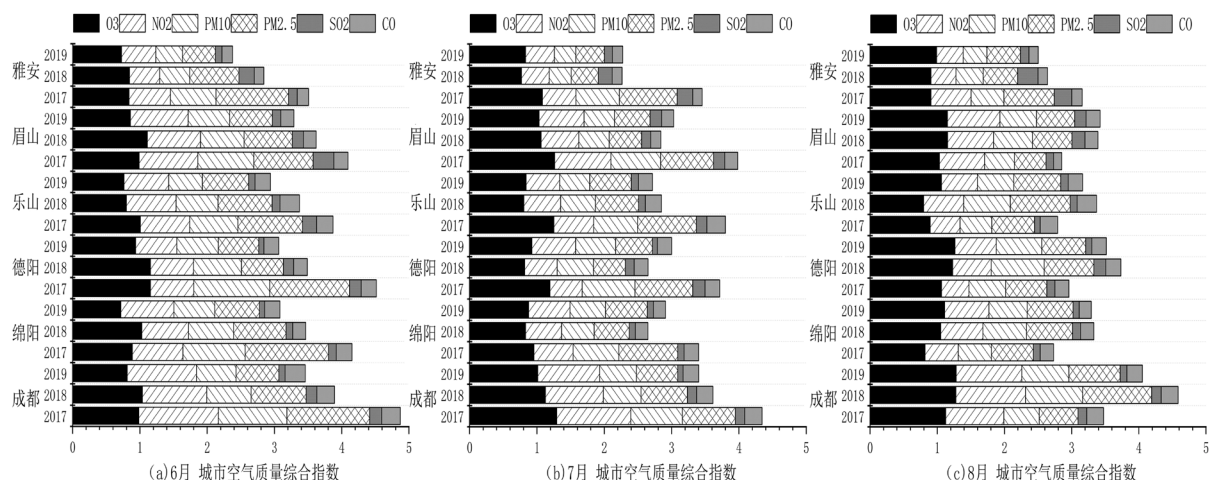


Figure 4. The monthly air quality index composition map of summer pollutants in the Chengdu Plain

图4. 成都平原夏季污染物逐月空气质量综合指数组成图

3.3.2. 臭氧与其他污染物的关系

由表4可得,成都市和眉山市的NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}和CO的逐小时浓度与O₃的逐小时浓度具有明

Table 4. Hourly correlation coefficients of other pollutants and ozone
表 4. 其他污染物与臭氧的逐小时相关系数

污染物	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO
成都	-0.835**	-0.647**	-0.548**	-0.332	-0.754**
绵阳	-0.687**	-0.831**	-0.846**	-0.667**	-0.880**
德阳	-0.920**	-0.773**	-0.813**	-0.693**	-0.847**
乐山	-0.713**	-0.774**	-0.767**	-0.424*	-0.837**
眉山	-0.909**	-0.745**	-0.816**	-0.370	-0.579**
雅安	-0.096	0.384	0.402	-0.574**	0.065

注: **为通过 0.01 相关性检验; *为通过 0.05 相关性检验。

显的负相关性, 且通过 t 检验的验证。绵阳市、德阳市和乐山市的各项污染物的逐小时浓度均与 O₃ 的逐小时浓度具有明显的负相关性, 且通过 t 检验的验证。雅安市的各污染物与 O₃ 的相关性均不大, 只 SO₂ 浓度与 O₃ 浓度的相关系数通过了 t 检验, 出现这种不同于其他市污染物之间相关性的原因, 可能是因为雅安市的地形地貌造成的多雨湿润的气候使得污染物利于沉降, 不利于近地面污染物的积累。

由表 5 得, 在 2017~2019 年夏季成都平原六市各污染物与臭氧浓度的季节相关性明显低于逐小时相关性。雅安市在 2019 年夏季与 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂ 相关性较好, 2017~2018 年夏季各污染物与臭氧浓度的相关性均较差。成都市、绵阳市、德阳市、乐山市、眉山市在 2017~2019 年夏 NO₂ 和 CO 浓度与臭氧浓度相关性较好。

Table 5. Correlation coefficients of other pollutants and ozone concentration
表 5. 其他污染物与臭氧浓度的相关系数

城市	污染物	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO
成都	2017 夏季	-0.533**	-0.123**	-0.117**	-0.099**	-0.416**
	2018 夏季	-0.491**	0.046*	0.047*	-0.024	-0.396**
	2019 夏季	-0.478**	0.063**	0.044**	-0.122**	-0.356**
绵阳	2017 夏季	-0.423**	0.011	0.030	-0.161**	-0.345*
	2018 夏季	-0.347**	0.015	0.067**	-0.054*	-0.440**
	2019 夏季	-0.419**	0.031	-0.018	-0.083**	-0.497**
德阳	2017 夏季	-0.399**	0.060**	-0.077**	-0.070**	-0.275**
	2018 夏季	-0.334**	0.157**	0.156**	-0.027	-0.328**
	2019 夏季	-0.373**	-0.206**	0.160**	0.043*	-0.366**
乐山	2017 夏季	-0.533**	-0.128**	-0.066**	-0.120**	-0.414**
	2018 夏季	-0.594**	0.165**	-0.115**	-0.124**	-0.442**
	2019 夏季	-0.511**	0.057**	0.005	-0.033**	-0.340**
眉山	2017 夏季	-0.639**	0.188**	-0.195**	-0.144**	-0.244**
	2018 夏季	-0.609**	0.132**	-0.137**	-0.065**	-0.269**
	2019 夏季	-0.524**	0.002	-0.061**	-0.132**	-0.240**
雅安	2017 夏季	-0.274**	-0.033	-0.013**	0.228**	-0.099**
	2018 夏季	-0.054*	0.351**	0.225**	-0.038	0.015
	2019 夏季	-0.159**	0.390**	0.404**	0.341**	0.092**

注: **为通过 0.01 相关性检验; *为通过 0.05 相关性检验。

4. 臭氧的气象成因

4.1. 臭氧浓度与气象要素的相关性分析

Table 6. Correlation coefficient between meteorological factors and ozone concentration

表 6. 气象因子与臭氧浓度的相关系数

城市	气象因子 相关系数	总云量	风速	本站气压	3 h 变压	6 h 降水	露点	能见度	温度	24 h 变温	24 h 变压	相对湿度
成都	2017 夏季	-0.308**	0.224**	-0.273**	-0.559**	-0.166*	0.093	0.393**	0.814**	0.205**	-0.068	-0.738**
	2018 夏季	-0.220**	0.245**	0.006	-0.551**	-0.134*	-0.167**	0.382**	0.743**	0.204**	0.022	-0.735**
	2019 夏季	-0.328**	0.235**	-0.288**	-0.604**	-0.115	-0.348**	0.383**	0.769**	0.123	-0.113	-0.784**
绵阳	2017 夏季	-0.290**	0.304**	-0.190**	-0.513**	-0.138*	-0.177**	0.294**	0.641**	0.193**	0.003	-0.710**
	2018 夏季	-0.272**	0.249**	0.039	-0.567**	-0.051	-0.369**	0.385**	0.625**	0.103	-0.039	-0.758**
	2019 夏季	-0.283**	0.160*	-0.299**	-0.594**	-0.106	-0.365**	0.374**	0.731**	0.157*	-0.270**	-0.733**
德阳	2017 夏季	a	0.182**	-0.283**	-0.492**	-0.194**	-0.054	0.300**	0.686**	0.212**	-0.031	-0.773**
	2018 夏季	a	0.254**	0.077	-0.481**	-0.118	-0.246**	0.356**	0.595**	0.098	-0.035	-0.728**
	2019 夏季	a	-0.186**	-0.313**	-0.552**	-0.093	-0.355**	0.486**	0.738**	0.191**	-0.222*	-0.801**
乐山	2017 夏季	-0.334**	0.285**	-0.337**	-0.526**	-0.169*	-0.184**	0.447**	0.775**	0.153*	-0.106	-0.794**
	2018 夏季	-0.287**	0.260**	-0.115	-0.593**	-0.138*	-0.235**	0.554**	0.750**	0.203**	-0.109	-0.811**
	2019 夏季	-0.364**	0.410**	-0.342**	-0.537**	-0.117	-0.239**	0.487**	0.740**	0.134	-0.202*	-0.742**
眉山	2017 夏季	a	0.314**	-0.317**	-0.520**	-0.152*	-0.131*	0.526**	0.803**	0.218**	-0.069	-0.784**
	2018 夏季	a	0.291**	-0.018	-0.599**	-0.120	-0.166**	0.514**	0.750**	0.167**	-0.089	-0.811**
	2019 夏季	a	0.319**	-0.336**	-0.614**	-0.156*	-0.185*	0.491**	0.742**	0.116	-0.098	-0.768**
雅安	2017 夏季	-0.378**	-0.032	-0.459**	-0.327**	-0.006	0.404**	0.230**	0.764**	0.099	-0.042	-0.503**
	2018 夏季	-0.308**	-0.109	-0.069	-0.356**	0.004	0.076	0.008	0.562**	0.101	-0.061	-0.516**
	2019 夏季	-0.416**	-0.141	-0.434**	-0.464**	-0.087	0.089	0.063	0.726**	0.084	-0.138	-0.660**

注: **为通过 0.01 相关性检验; *为通过 0.05 相关性检验; a 为由于变量为常量, 因此无法进行计算。

O₃ 浓度受众多气象要素的影响, 现选取总云量、风速、本站气压、3 小时变压、6 小时降水、露点、能见度、温度、24 小时变压、24 小时变温、相对湿度做相关分析。由表 6 可知, 成都平原 O₃ 浓度与总云量、本站气压、3 h 变压、6 h 降水、相对湿度呈负相关, 与温度呈正相关, 且 O₃ 浓度与温度相关性最好, 相对湿度次之。其中雅安市的相对湿度与臭氧浓度的相关系数相比于其他城市较小, 可能与独特地形造成的“雅安天漏”有关, 夏季降水量多[31], 空气湿度大且变化幅度小, 则表现为相对湿度与臭氧浓度相关性较弱。

4.2. 气象要素对臭氧浓度的影响

风速对 O₃ 浓度有水平扩散稀释作用和对流引起上层 O₃ 向下层输送混合作用, 两种作用可叠加[32]。由图 5 可得, 成都平原各市风向分布均匀, 地面风速主要集中于 0~2 m/s。当臭氧浓度大于等于 200 μg/m³ 时, 风速一般为小于等于 3 m/s, 且风速为 0 m/s 时臭氧浓度超标的概率小于风速为 1~2 m/s 时臭氧浓度超标的概率。成都市地面风速大于 3 m/s 时, 主要起扩散作用。绵阳市地面风向为偏南风时出现臭氧污染的概率较大。德阳市地面风向为东南时, 臭氧超标概率较高。乐山市地面风向为偏北时, 臭氧浓度较小。眉山市较易出现地面风的第二种作用, 使臭氧自上向下输送。雅安市地面风速为成都平原各市中最小。

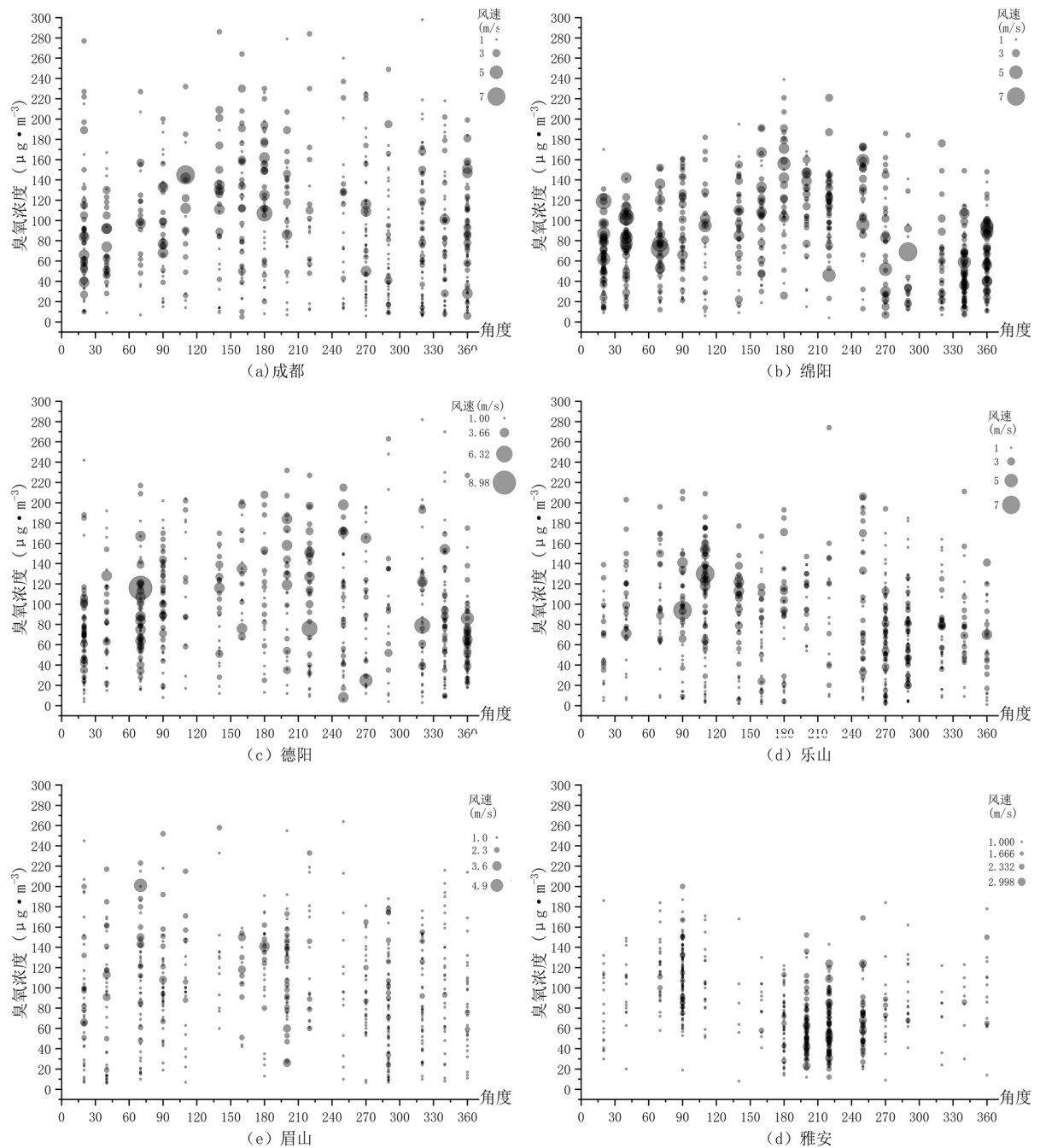


Figure 5. The relationship between wind direction and speed and ozone concentration in each city in the Chengdu Plain
图 5. 成都平原各市风向风速与臭氧浓度的关系

由图 6 可以出, 成都平原各市臭氧浓度受温度影响最大, 具有明显正相关性, 当温度为 $20^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于 70% 时, 臭氧浓度偏低; 当温度大于 25°C 、3 小时变压小于 1.5 hpa、相对湿度小于 70% 时, 臭氧浓度偏高。绵阳市、乐山市、雅安市在相对湿度大于 70% 时, 臭氧浓度均低于污染限值。成都市、眉山市臭氧浓度超标时, 相对湿度小于 70% 的频率较高, 即相对湿度小于 70% 时易出现臭氧污染。眉山市在 2017~2019 夏季中相对湿度达 100% 的天数最多, 共 128 天。德阳市在温度为 $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、3 小时变压时小于 2 hpa、相对湿度高达 70% 以上时, 出现臭氧污染的几率仍较高。

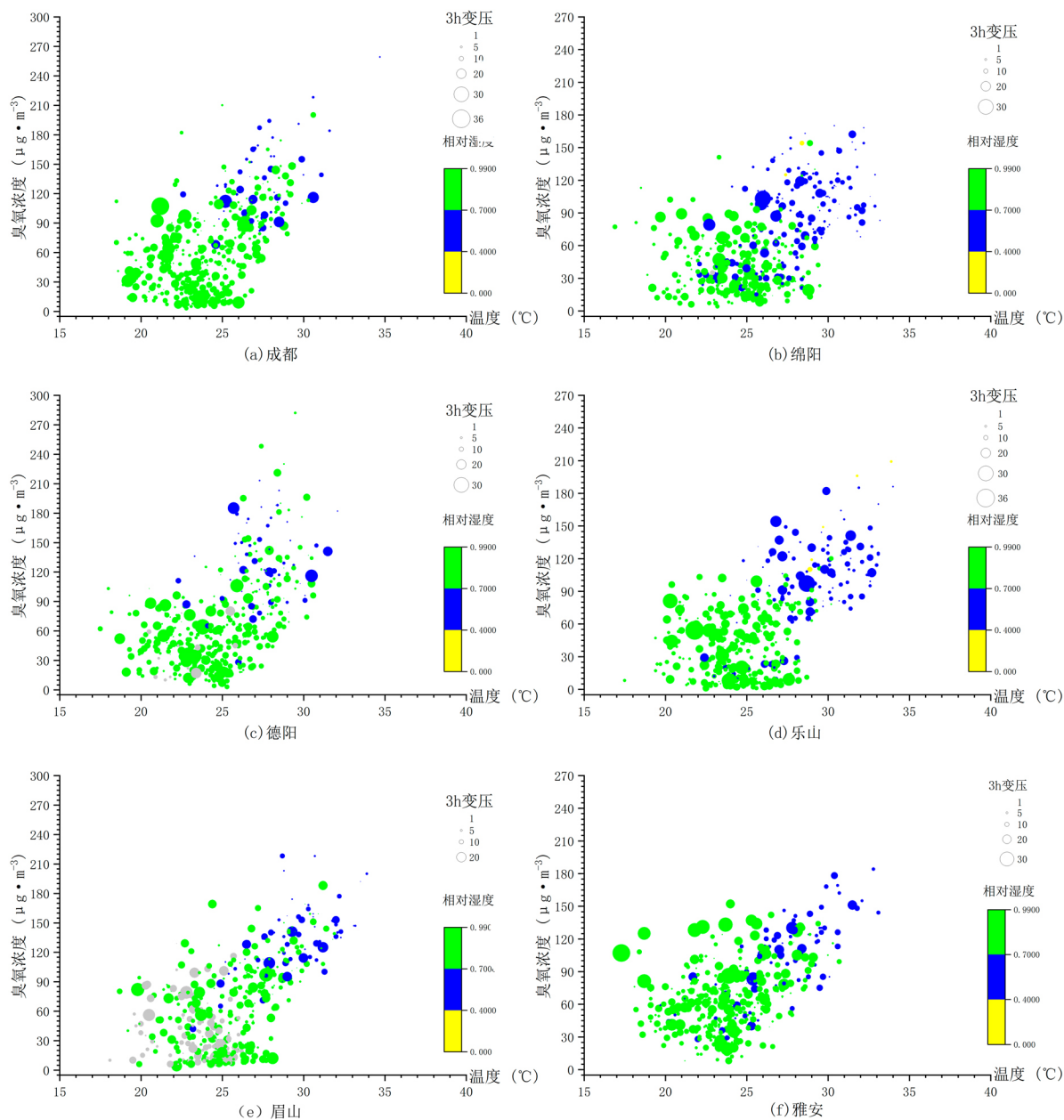


Figure 6. The relationship between 3-hour variable pressure, relative humidity, temperature and ozone concentration in Chengdu Plain

图 6. 成都平原各市 3 小时变压、相对湿度、温度与臭氧浓度的关系

4.3. 臭氧与气象要素的回归分析

由上述分析相关分析可得, 近地层 O_3 浓度受多个基本气象要素制约, 又因各个基本参数对 O_3 浓度产生的相关影响的显著程度不同, 现选取对成都平原各市相关性均较好(相关系数 > 0.3)的 3 小时变压、能见度、温度和相对湿度这 4 个参数对 O_3 浓度进行线性回归分析。

由于 4 参数对成都平原各城市 O_3 浓度线性回归分析时, 虽回归模型通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验, 但某个参数显著性不明显, 故需要对城市进一步分析敏感型参数, 再逐个引入标准化回归方程。如表 7 所示, 每个回归模型均需进行联合假设检验(F-test), 成都市 O_3 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X_1 、相对湿

Table 7. Linear stepwise regression model optimal parameters
表 7. 线性逐步回归模型最优参数

城市	模型入选参数	非标准化系数		标准系数 B ₀	t	sig	R
		B	标准误差				
成都	常量	73.149	28.963	—	2.526	0.012	0.840
	温度	7.030	0.683	0.411	10.290	0.000	
	相对湿度	-193.197	15.835	-0.542	-12.200	0.000	
	能见度	-0.871	0.234	-0.116	-3.730	0.000	
绵阳	常量	154.689	20.557	—	7.525	0.000	0.774
	温度	1.549	0.512	-0.561	-13.406	0.000	
	相对湿度	-154.825	11.549	-0.561	-13.406	0.000	
	能见度	-0.416	0.150	-0.082	-2.769	0.006	
德阳	3 h 变压	-0.953	0.109	-0.249	-8.711	0.000	0.779
	常量	214.912	24.180	—	8.888	0.000	
	温度	2.379	0.571	0.172	4.166	0.000	
	相对湿度	-226.934	13.512	-0.714	-16.794	0.000	
乐山	能见度	-0.876	0.168	-0.155	-5.197	0.000	0.805
	常量	82.123	21.385	—	30840	0.000	
	温度	3.607	0.519	0.282	6.948	0.000	
	相对湿度	-147.976	12.448	0.486	-11.888	0.000	
眉山	3 h 变压	-0.426	0.105	-0.112	-4.058	0.000	0.824
	常量	40.130	21.180	—	1.895	0.059	
	温度	5.657	0.523	0.382	10.822	0.000	
	相对湿度	-127.388	11.104	-0.409	-11.473	0.000	
雅安	3 h 变压	-0.519	0.118	-0.119	-4.3931	0.000	0.723
	常量	-1.392	19.224	—	-0.072	0.942	
	温度	5.461	0.407	0.598	13.426	0.000	
	相对湿度	-53.784	11.620	-0.235	-4.628	0.000	
	能见度	-0.956	0.126	-0.259	-7.823	0.942	

度 X₂、能见度 X₃，建立的最优回归方程为式 1；绵阳市 O₃ 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X₁、相对湿度 X₂、3 h 变压 X₃、能见度 X₄，建立的最优回归方程为式 2；德阳市 O₃ 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X₁、相对湿度 X₂、能见度 X₃，建立的最优回归方程为式 3；乐山市 O₃ 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X₁、相对湿度 X₂、3 h 变压 X₃，建立的最优回归方程为式 4；眉山市 O₃ 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X₁、相对湿度 X₂、3 h 变压 X₃，建立的最优回归方程为式 5；绵阳市 O₃ 浓度 Y 的最优参数分别为温度 X₁、相对湿度 X₂、能见度 X₃，建立的最优回归方程为式 6。

$$Y = 73.149 + 7.03X_1 - 193.197X_2 - 0.871X_3 \quad (1)$$

$$Y = 154.689 + 1.549X_1 - 154.825X_2 - 0.416X_3 - 0.953X_4 \quad (2)$$

$$Y = 214.912 + 2.379X_1 - 226.934X_2 - 0.876X_3 \quad (3)$$

$$Y = 82.123 + 3.607X_1 - 147.976X_2 - 0.426X_3 \quad (4)$$

$$Y = 40.13 + 5.657X_1 - 127.388X_2 - 0.519X_3 \quad (5)$$

$$Y = -1.392 + 5.461X_1 - 53.784X_2 - 0.956X_3 \quad (6)$$

5. 结论

1) 成都平原夏季臭氧浓度从空间上来看, 成都市最高、雅安市最低, 成都市和雅安市臭氧浓度趋势不明显, 绵阳市和眉山市臭氧浓度有逐年增加的趋势, 德阳市和乐山市臭氧浓度有逐年递减的趋势。

2) 成都平原各市夏季 7 月的臭氧浓度有逐年下降的趋势, 8 月臭氧浓度呈逐年递增趋势, 且成都市和眉山市中度污染加重。各市 O₃ 小时浓度日变化均呈“单峰形”特征, 白天浓度整体高于夜间, 在 8:00 左右为一天中的最低值, 16:00 左右达峰值。

3) 成都平原夏季主要污染物为臭氧, 其次为颗粒物。除雅安市外的 5 市臭氧浓度均 NO₂ 浓度有很好的负相关性。雅安市空气质量最好, 臭氧浓度最低, 且与其他污染物相关性较差。

4) 成都平原各市臭氧浓度在温度超过 25℃ 时, 与臭氧浓度的正相关性更加显著; 湿度低于 70% 时, 呈现臭氧污染的概率较大; 风速在 0~2 m/s 时, 易出现臭氧污染, 风速为 0 时呈臭氧污染的概率低于风速为 1~2 m/s 时的概率。

5) 构建回归方程时, 除温度和相对湿度这两固定参数外, 成都市、德阳市、雅安市还需加入能见度, 眉山市和乐山市需加入 3 小时变压, 绵阳市的最优回归方程需要 4 个参数。

致 谢

感谢成都信息工程大学提供的气象数据, 并由衷感谢曾胜兰老师的细心指导。

基金项目

四川省重大科技专项(No. 2018SZDZX0023); 国家重点研发计划课题(No. 2018YFC0214002)。

参考文献

- [1] 唐孝炎, 李金龙, 等. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 60-70.
- [2] 徐锴, 刘志红, 何沐全, 张娟. 成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]. 中国环境监测, 2018, 34(5): 36-45.
- [3] Lehman, J., Swinton, K., Bortnick, S., et al. (2004) Spatio-Temporal Characterization of Tropospheric Ozone across the Eastern United States. *Atmospheric Environment*, **38**, 4357-4369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.069>
- [4] 王启勇. 大气臭氧污染机制分析[J]. 低碳世界, 2019, 9(6): 28-29.
- [5] 李名升, 任晓霞, 于洋, 周磊. 中国大陆城市 PM_{2.5} 污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 641-650.
- [6] 卢娣, 董自鹏, 曹慧萍, 李星敏. 西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 陕西气象, 2020(1): 14-19.
- [7] 胡成媛, 康平, 吴锴, 张小玲, 王式功, 王紫潇, 欧阳正午, 曾胜兰, 向卫国. 基于 GAM 模型的四川盆地臭氧时空分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 809-820.
- [8] 马秉吉, 马玉霞, 虞志昂, 焦浩然, 张艺凡. 气象条件对兰州市近地面臭氧质量浓度的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 775-780.
- [9] 郑丽英, 许婷婷, 陈志安, 王欢博. 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.
- [10] 唐文苑, 赵春生, 耿福海, 等. 上海地区臭氧周末效应研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(1): 99-105.
- [11] Haagen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. *Industrial & Engineering Chemistry*, **44**, 1342-1346. <https://doi.org/10.1021/ie50510a045>
- [12] Wakamatsu, S., Uno, I., Ohara, T. and Schere, K.L. (1999) A Study of the Relationship between Photochemical Ozone

- and Its Precursor Emissions of Nitrogen Oxides and Hydrocarbons in Tokyo and Surrounding Areas. *Atmospheric Environment*, **33**, 3097-3108. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00493-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00493-7)
- [13] Moussiopoulos, N., Sahm, P. and Kessler, Ch. (1995) Numerical Simulation of Photochemical Smog Formation in Athens, Greece—A Case Study. *Atmospheric Environment*, **29**, 3619-3632. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(95\)00199-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(95)00199-9)
- [14] Vingarzan, R. and Taylor, B. (2003) Trend Analysis of Ground Level Ozone in the Greater Vancouver/Fraser Valley Area of British Columbia. *Atmospheric Environment*, **37**, 2159-2171. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00158-4)
- [15] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 604-619.
- [16] 史之浩. 全国大气中臭氧及颗粒物污染对气象条件的敏感性分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [17] 陈楠, 刘长焕, 许可, 祝波, 沈学勇. 基于 EOF/SVD 的 2018 年湖北省臭氧特征及其高值与气象要素关系研究[J]. 中国环境监测, 2020, 36(2): 88-95.
- [18] 姜恒, 黄夏. 针对臭氧污染特征的环境保护措施研究[J]. 环境与发展, 2017, 29(10): 83, 85.
- [19] 严晓瑜, 缙晓辉, 杨婧, 赵蔚, 徐青, 刘玉兰. 中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 416-430.
- [20] Yang, J.B., Liu, J.L., Han, S.Q., et al. (2019) Study of the Meteorological Influence on Ozone in Urban Areas and Their Use in Assessing Ozone Trends in All Seasons from 2009 to 2015 in Tianjin, China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **131**, 1661-1675. <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00664-x>
- [21] 李波兰, 罗彬, 张巍, 赵鹏国. 四川省臭氧时空分布特征及污染特征分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S1): 293-298.
- [22] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 廖志恒, 邓涛. 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.
- [23] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 郇宁, 陈晨, 孟凡. 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.
- [24] 杜娟, 宋鹏程, 彭同江. 2016~2018 年绵阳市臭氧与颗粒物变化特征及相关性分析[J]. 西南科技大学学报, 2020, 35(1): 31-38.
- [25] Fu, Y., Liao, H. and Yang, Y. (2019) Interannual and Decadal Changes in Tropospheric Ozone in China and the Associated Chemistry-Climate Interactions: A Review. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 975-993. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8216-9>
- [26] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1275-1284.
- [27] 曹攀, 罗彬, 张巍, 李波兰, 李瑞桢. 四川省城市环境空气质量状况分析[J]. 四川环境, 2017, 36(1): 72-76.
- [28] 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.
- [29] HJ633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [30] 段欲晓, 徐晓峰, 张小玲. 北京地面 O₃ 污染特征及气象条件分析[J]. 气象科技, 2001(4): 15-18.
- [31] 周秋雪, 李跃清, 蒋兴文, 张静. “雅安天漏”降水变化气候特征的分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(2): 343-353.
- [32] 严茹莎, 陈敏东, 高庆先, 刘婷, 胡顺星, 高文康. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 43-49.