

文章编号: 2096-1618(2021)04-0425-09

夏季川渝地区臭氧污染的气象成因研究

阮虞清, 李林岑, 黄梓芸, 曾胜兰
(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:为研究川渝地区夏季臭氧污染特征及气象成因,利用2015–2018年川渝地区臭氧数据和气象数据并主要采用相关分析方法着重对各气象因子与臭氧浓度关系进行了讨论和研究。结果表明:2015–2018年川渝地区臭氧年平均浓度呈现西高东低的分布规律,且空间分布基本不变;而夏季臭氧浓度的空间变化显著,浓度高值区从川渝地区西北方逐渐转移到东南方,且盆底较边坡臭氧浓度更高。臭氧浓度与相对湿度、降水量呈负相关,而与温度呈正相关。各气象因子中,相对湿度与臭氧浓度的相关性程度最高;气温、降水量的相关性程度一般;而气压仅在50%的城市表现出有相关性且相关性程度一般;风速常年为静小风。臭氧浓度与混合层高度呈正相关。在气温28℃左右,相对湿度约为65%,气压约为1002 hPa,日降水量小于或接近0.98 mm,地面风速小于1.5 m/s的气象条件下,发生臭氧污染的可能性较大。

关键词:应用气象学;污染气象;川渝地区;臭氧污染;臭氧变化特征;气象成因

中图分类号:P402

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.012

0 引言

随着城市工业化进程不断加快,随之而来的环境问题也愈发严重。近几年来臭氧浓度明显上升,臭氧已成为第二大污染因子,仅次于PM_{2.5}。同时研究发现,近地面臭氧浓度过高不仅会损害人体健康^[1–5],而且会影响农作物的正常生长,导致农作物产量的下降^[6–7]。臭氧浓度的变化规律与VOC_s基本一致;与NO_x等前置物浓度呈负相关关系^[8–10]。

气象因子在臭氧的形成、扩散等过程中也发挥了较大的作用。任丽红等^[11]通过建立多元回归分析,探讨了臭氧与风速、风向、温度及相对湿度的关系。在不同地区相同的气象因子对于臭氧的生成又有着不同的影响。吴锴等^[12]通过对成都市臭氧污染的研究表明臭氧浓度与紫外辐射、气温呈正相关关系,与相对湿度、风速呈负相关关系,并且当辐射、温度等气象因子各自达到一定数值时,将会导致高浓度臭氧污染的出现。杨丽蓉等^[13]关于银川市臭氧影响因素研究显示臭氧夏季浓度与相对湿度呈显著的负相关性,与气温、风速呈显著正相关性。中国臭氧污染严重地区具有明显的区域特征,除华北平原、长三角、珠三角三大区域外^[14–17],四川盆地城市群也是臭氧污染的重灾区。川渝地区地形特殊,盆地下沉气流强烈,盆地内大气层结稳定,常年表现为高热、静风天气,对于臭氧的扩散具有较强的抑制作用。对比以往的研究可以看出,对于盆地地区定性的气象成因的研究很少且时间尺度较短,因此研究川渝地区臭氧浓度的时空变化、气象成因有助于川渝地区大气臭氧污染防治工作,并为

其提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究收集的2015–2018年气象数据包括风速、气压、温度、相对湿度、辐射和降水量等参数,主要来自于MICAPS系统的SURF地面观测历史数据、UPAR高空观测历史数据和RADI辐射数据;从中国空气质量在线监测分析平台上获取包括成都、重庆、雅安、宜宾、广元等18个城市2015–2018的臭氧历史数据(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)。

1.2 分析方法

研究根据城市海拔高度的不同,将研究区域内的18个城市分为两个部分^[17],分别是盆地底部(海拔高度低于500 m):成都、达州、德阳、广安、乐山、泸州、眉山、绵阳、南充、内江、遂宁、宜宾、重庆、资阳和自贡;盆地边坡(海拔高度低于1000 m):雅安、巴中和广元。采用ArcGIS软件分析臭氧年平均浓度和夏季浓度分布情况;采用罗氏法来计算大气混合层高度;采用Origin软件作图分析臭氧浓度随相关因子的变化趋势;采用SPSS中Spearman相关性分析臭氧与各气象因子和混合层高度的相关性。

2 结果与讨论

2.1 川渝地区臭氧基本特征

2.1.1 空间特征

监测数据表明,2015–2018年臭氧的年平均浓度

收稿日期:2020-08-18

基金项目:国家自然科学基金委青年科学基金资助项目(41505122);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0214003);国家重点研发计划课题资助项目(2018YFC0214002);四川省科技支撑资助项目(2015GZ0238);四川省重大科技专项资助项目(2018SZDX0023)

呈西高东低的分布规律,以成都市为重污染中心向四周散开,且4年间高值区和低值区地域分布基本一致(图1),最低年均浓度低至 $49\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,最高年均浓度为 $101\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。总体而言,臭氧年均浓度逐年上升。夏季平均浓度普遍高于年平均浓度,统计期间夏季臭氧最低平均浓度为 $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,最高平均浓度为 $147\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (图2)。川渝地区夏季臭氧浓度空间变化特征明显,2018年前,夏季平均浓度高值常出现在以成都为中心

的小部分区域,包括资阳、遂宁、德阳;而广元、巴中、南充的夏季臭氧浓度则一直保持较低的水准。盆地北部、西南部夏季臭氧浓度呈逐年降低的趋势且臭氧的夏季高浓度区从盆地西北部转移到东南部。根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中臭氧日最大8小时二级标准限值对18个城市2015-2018年夏季臭氧超标情况进行统计,发现在所研究的区域内,成都的臭氧浓度超标最高,其次是重庆和德阳。

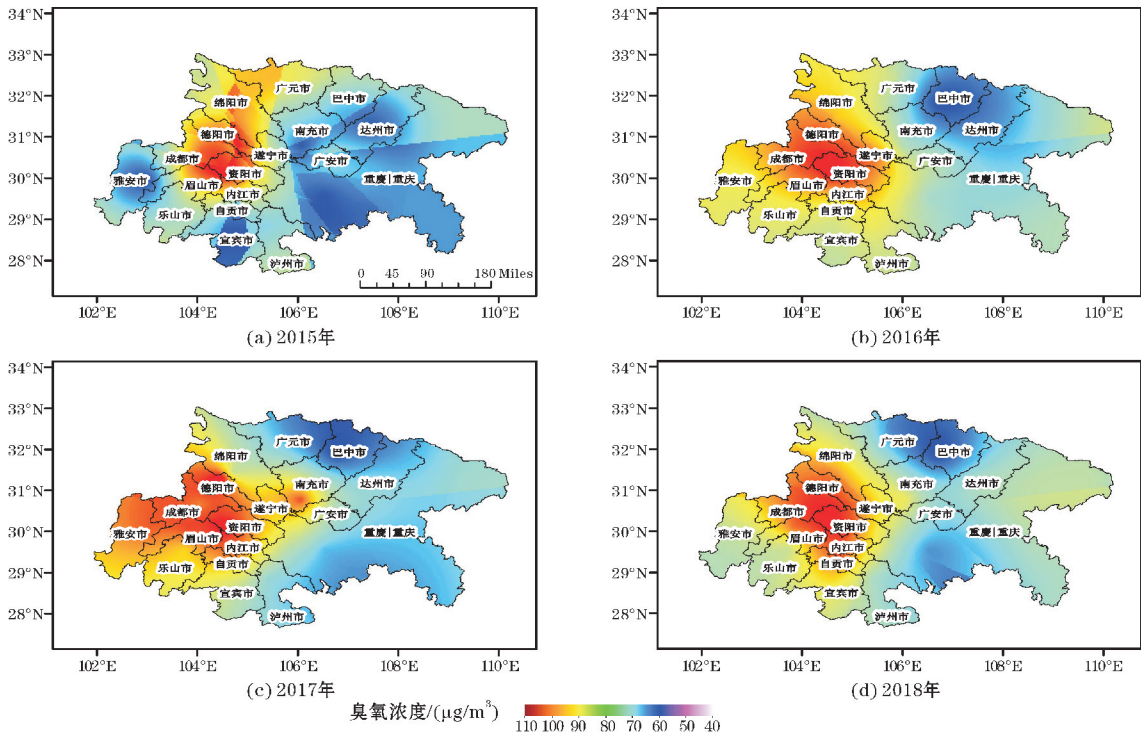


图1 2015-2018年四川盆地臭氧年平均浓度空间分布特征

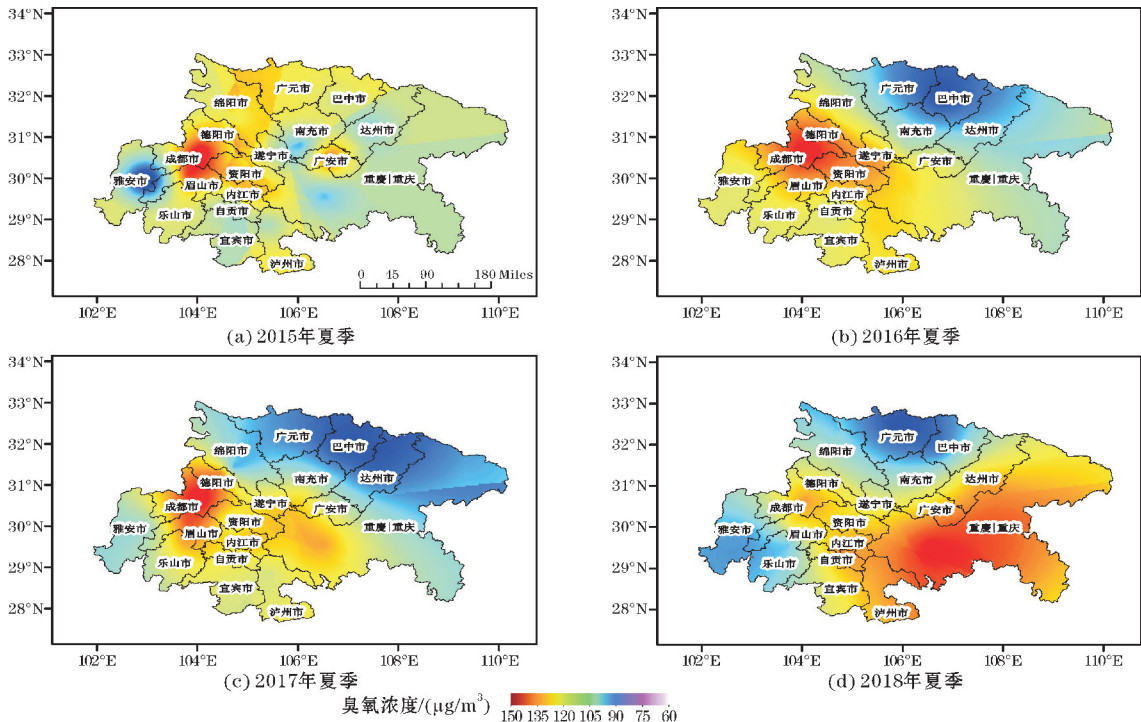


图2 2015-2018年四川盆地臭氧夏季平均浓度空间分布特征

2.1.2 时间特征

图 3 给出了从 2015–2018 年盆地底部和盆地边坡臭氧小时浓度变化特征。相同海拔区间城市臭氧日浓度变化特征基本保持一致。盆地底部地区臭氧日最高浓度相对更高,日变化较大,从 11 时起浓度陡增,直至 20 时仍维持在相对较高的浓度水平。清晨臭氧浓度的持续升高可能是早高峰汽车尾气与太阳辐射共同作用

所致,在接近傍晚时浓度持久不降可能是下班晚高峰汽车尾气所致。另外,盆边地区日最高浓度相对较低,日变化较小,整体变化特征并不显著。但是,从 2015–2017 年,雅安、的臭氧浓度明显升高,且与巴中和广元两地的整体变化趋势相近。分析显示,海拔高度不同地区受污染情况也有所不同。盆地底部较盆地边坡风速更小,逆温更强,臭氧易堆积而无法扩散,从而形成严重污染。

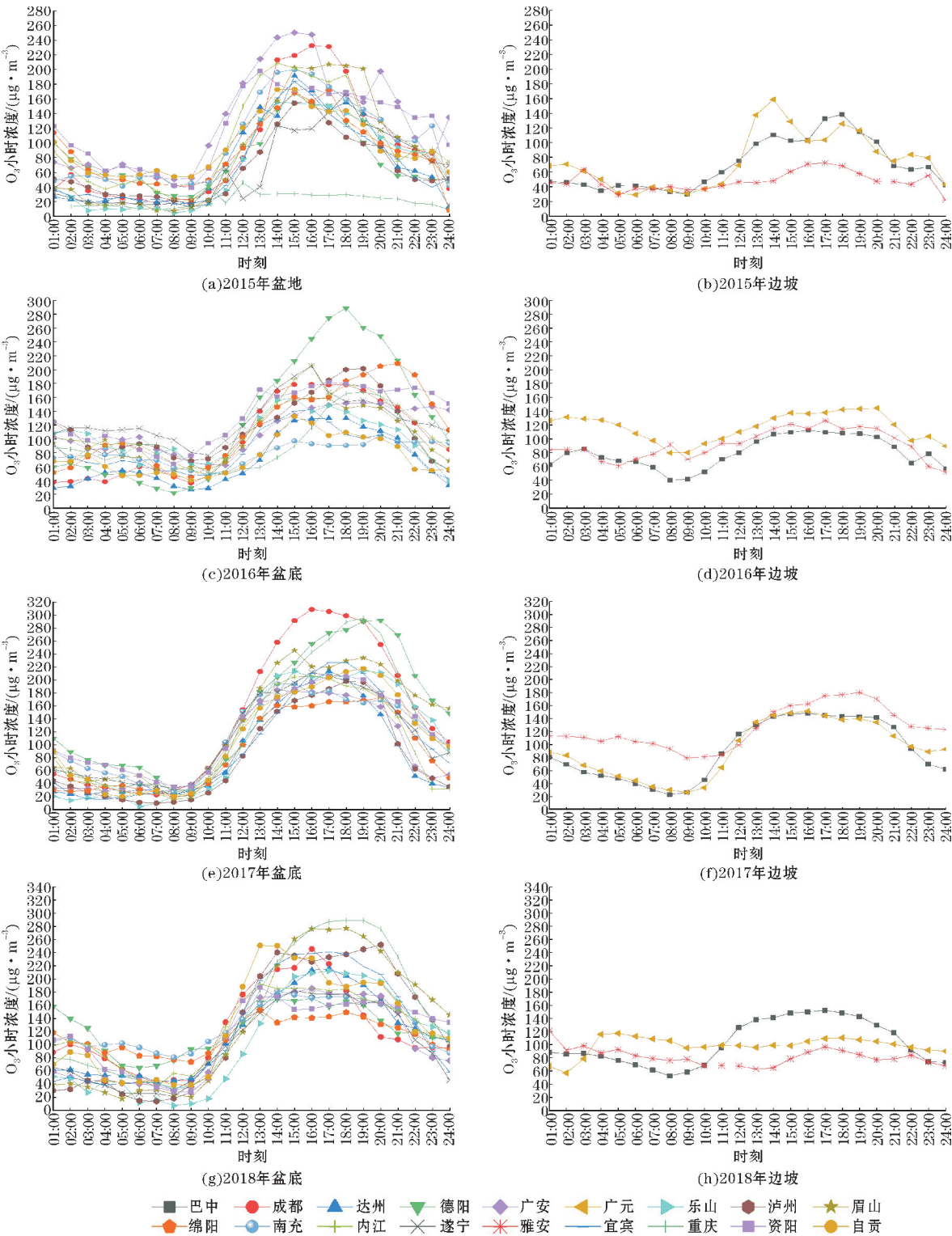


图 3 2015–2018 年盆地底部和盆地边坡臭氧小时浓度变化特征

除此之外,为观察每个城市夏季的臭氧日平均浓度,分析城市的臭氧浓度超标持续时间。选取了从 2015–2018 年夏季臭氧浓度变化显著的 4 个城市,分别是重庆、成都、雅安、广元(表 1),分析这些地区每周的臭氧和其前体物的浓度变化情况是否出现“周末效应”。

计算方法: $U=(\bar{C}_{\text{周末}}-\bar{C}_{\text{月}})/\bar{C}_{\text{月}}$
式中: U 表示周末效应百分比($U>0$ 表示工作日臭氧浓度比周末低,简称“低周末效应”; $U<0$ 表示工作日臭氧浓度比周末高,下简称“高周末效应”); $\bar{C}_{\text{周末}}$ 表示当月所有周末的臭氧平均浓度; $\bar{C}_{\text{月}}$ 表示当月(除周末以外)臭氧的月平均浓度。

表 1 统计结果表明:自 2015–2016 年,重庆、成都、雅安及广安地区主要呈现低周末效应;但在 2017–2018 年,除重庆外,其他 3 个地区主要呈现高周末效应;2015–2016 年与 2017–2018 年整体上周末效应发生转变,这与当地排放、气象条件和人类活动规律等因素有关。整体而言,2015–2018 年重庆、成都、广元地区 4 年间主要以低周末效应为主,而雅安地区 4 年间的低周末效应与高周末效应出现的概率相近。

表 1 不同城市臭氧浓度“周末效应”百分比 单位: %

| 年份 | 月份 | 重庆 | 成都 | 雅安 | 广元 |
|------|----|--------|--------|--------|--------|
| 2015 | 6 | -2.25 | 4.94 | 18.62 | -15.97 |
| 2015 | 7 | 13.37 | 9.36 | 18.47 | 12.10 |
| 2015 | 8 | 13.96 | 20.06 | -6.49 | 6.30 |
| 2016 | 6 | -3.60 | 8.77 | 2.88 | 13.44 |
| 2016 | 7 | 20.18 | 21.38 | 2.03 | 3.91 |
| 2016 | 8 | -5.38 | 22.41 | -15.40 | 20.42 |
| 2017 | 6 | -30.51 | -21.18 | -20.69 | -5.47 |
| 2017 | 7 | 0.71 | -3.30 | -12.63 | 11.95 |
| 2017 | 8 | 6.48 | 8.27 | -2.52 | -14.89 |
| 2018 | 6 | 3.88 | -17.72 | 8.02 | -24.93 |
| 2018 | 7 | 14.42 | 15.59 | 8.98 | 12.92 |
| 2018 | 8 | 14.02 | -2.71 | -2.61 | -0.26 |

2.2 臭氧浓度与气象因子的关系

2.2.1 基本气象因子

计算臭氧浓度与基本气象因子的相关系数得出表 2。分析得出,臭氧浓度与相对湿度、降水量均呈负

相关,这与上海等城市的研究结果一致^[18]。高温是臭氧污染发生的必要条件,气温与臭氧浓度呈现出一定的正相关,夏季的臭氧浓度又普遍大于全年的其他时间^[19–20]。有研究表明,若臭氧与各类气象因子的相关系数小于 0.3,就可认为两者之间没有相关性^[21]。因此,表 3 将相关性程度分为 3 个等级:<0.3(不相关)、0.3~0.5(相关性一般)、0.5~0.8(相关性良好),可以看出在所研究的 5 个气象要素中,相对湿度与臭氧浓度的相关性程度最高,相关性一般率达 66.67%、相关性良好率达 33.33%;气温、降水量与臭氧浓度的相关性程度一般;而气压在所研究的 18 个城市中仅有 9 个城市表现出有相关性且相关性程度一般;风速普遍表现为不相关是由于川渝地区受地形影响常年为静小风,风速小于 1.5 m/s。鉴于以上结论,本文计算了各要素在 18 个城市普遍相关性程度下的臭氧污染等级为轻度污染及其以上的平均值,发现在气温为 28 ℃左右,相对湿度约为 65%,气压约为 1002 hPa,日降水量小于或接近 0.98 mm,地面风速小于 1.5 m/s 的气象条件下,发生臭氧污染的可能性较大。

表 2 18 城市臭氧浓度与气象因子的相关性

| 城市 | 气压 | 气温 | 相对湿度 | 降水量 | 风速 |
|----|--------|-------|--------|--------|--------|
| 巴中 | 0.368 | 0.536 | -0.806 | -0.397 | 0.249 |
| 成都 | -0.338 | 0.591 | -0.760 | -0.335 | -0.247 |
| 达州 | -0.352 | 0.526 | -0.634 | -0.385 | 0.038 |
| 德阳 | -0.285 | 0.544 | -0.781 | -0.462 | -0.240 |
| 广安 | -0.393 | 0.694 | -0.766 | -0.505 | -0.123 |
| 广元 | -0.144 | 0.623 | -0.790 | -0.445 | 0.357 |
| 乐山 | -0.260 | 0.558 | -0.798 | -0.449 | -0.121 |
| 泸州 | -0.408 | 0.666 | -0.717 | -0.394 | 0.019 |
| 眉山 | -0.327 | 0.810 | -0.792 | -0.250 | 0.050 |
| 绵阳 | 0.231 | 0.530 | -0.803 | -0.404 | 0.017 |
| 南充 | 0.394 | 0.402 | -0.799 | -0.371 | -0.228 |
| 内江 | 0.020 | 0.659 | -0.801 | -0.439 | -0.210 |
| 遂宁 | 0.271 | 0.643 | -0.854 | -0.385 | -0.094 |
| 雅安 | -0.392 | 0.789 | -0.704 | -0.090 | 0.538 |
| 宜宾 | -0.292 | 0.779 | -0.798 | -0.324 | -0.179 |
| 重庆 | 0.174 | 0.490 | -0.688 | -0.465 | -0.031 |
| 资阳 | 0.210 | 0.667 | -0.866 | -0.438 | -0.042 |
| 自贡 | -0.364 | 0.778 | -0.819 | -0.334 | 0.161 |

表 3 臭氧浓度与气象因子的相关性程度

| 相关性程度 | 气压 | 气温 | 相对湿度 | 降水量 | 风速 |
|----------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| <0.3(不相关) | 9(50.00%) | 2(11.11%) | 0 | 2(11.11%) | 16(88.89%) |
| 0.3~0.5(相关性一般) | 9(50.00%) | 15(83.33%) | 12(66.67%) | 15(83.33%) | 1(5.56%) |
| 0.5~0.8(相关性良好) | 0 | 1(5.56%) | 6(33.33%) | 1(5.56%) | 1(5.56%) |

注: $m(n)$ 中 m 表示所研究的 18 个城市中某气象因子符合该相关性程度的地区个数, n 表示该气象因子符合该相关性程度所占地区的百分比即 $N=\frac{M}{18}\times 100\%$

以资阳(图4、表4)为例来分析臭氧与5大气象因子的关系,并展示了5个气象因子彼此之间的相关性,相对湿度、降水量与气温间均呈现出显著负相关,而相对湿度与降水量两者之间呈正相关,其余因子两两之间并不存在相关性。研究表明,高温可促进前体物转

化,从而使臭氧浓度升高。当相对湿度较大时,发生降水的概率也增大,臭氧前体物浓度则随着相对湿度的增加先上升后下降^[22];而降水发生时,湿沉降作用又使得臭氧浓度降低。

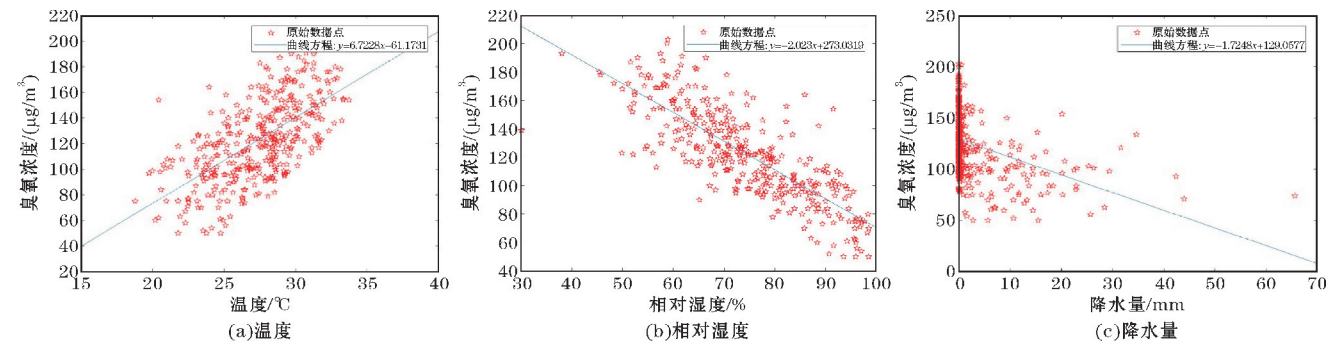


图4 资阳市臭氧与温度、相对湿度和降水量的相关性

表4 资阳市臭氧浓度与各气象因子的相关性矩阵

| | 臭氧 | 气压 | 气温 | 相对湿度 | 降水量 | 风速 |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 臭氧 | 1.000 | 0.210 | 0.667 | -0.866 | -0.438 | 0.042 |
| 气压 | | 1.000 | -0.100 | -0.223 | -0.250 | -0.033 |
| 气温 | | | 1.000 | -0.675 | -0.438 | 0.019 |
| 相对湿度 | | | | 1.000 | 0.548 | -0.060 |
| 降水量 | | | | | 1.000 | 0.285 |
| 风速 | | | | | | 1.000 |

2.2.2 辐射

臭氧作为二次污染物,是光化学反应的产物。太阳活动引起的太阳辐射强度变化,是影响臭氧浓度的原因之一。川渝地区地形特殊,太阳辐射分布不均匀,日变化明显。从重庆沙坪坝2018年夏季臭氧浓度和辐射数据中随机抽取4日分析其日变化得出:随着太阳辐射的增强,臭氧浓度逐渐变大,但臭氧浓度并不总

是时刻随着总辐射的变化而变化,相比较之下,滞后2~4 h的臭氧浓度变化趋势与辐射强度的相关性更强(图5)。这是由于光化学反应和其他化学反应的发生需要一定的驰豫时间^[23],在发生能量变化时,虽然电子跃迁所使用的时间较短,但是由此引发的化学反应过程消耗的时间不容忽视。

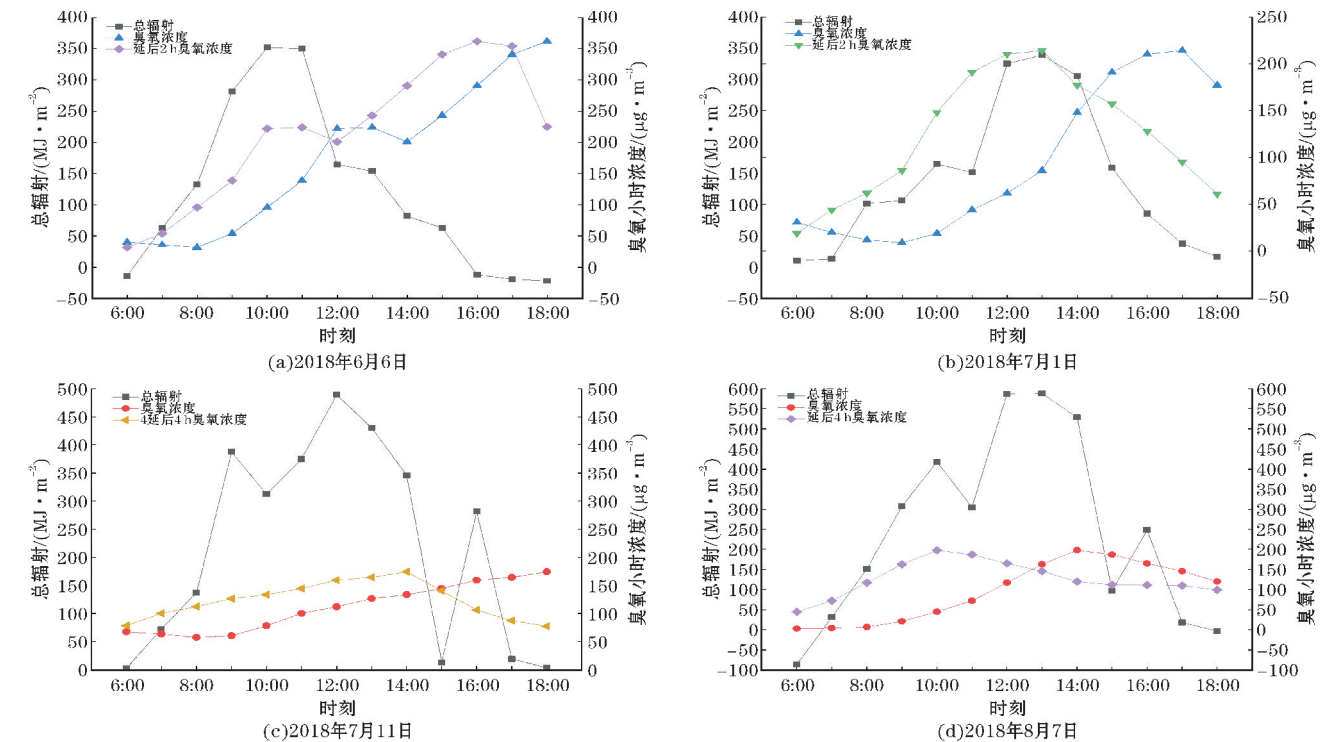


图5 重庆市沙坪坝2018年6月6日、7月1日、7月11日和8月7日臭氧浓度与总辐射量小时变化曲线

2.3 臭氧浓度与混合层高度的关系

混合层高度是研究地表向大气排放污染物状况的重要参数,是影响地面污染程度的重要因子。混合层高度越高,越有利于污染物垂直方向的输送。一般而言,混合层高度越低,造成污染的可能性越大。但是,在所研究的18个城市中绝大多数城市混合层高度与臭氧浓度呈正相关关系(图略),这是由于夏季太阳辐射增强、温度升高、大气的热浮力相应增大,再加上四川盆地地形的局地风场作用,将有利于混合层的发展和抬升。

3 典型污染过程分析

3.1 污染过程简要介绍

2018年6月4-9日,川渝地区出现了一次长时

间、高浓度的臭氧污染过程。本文以成都站点为例,简要介绍此过程中的天气状况。表5是6月4-9日气象条件及污染情况,可以发现污染日具有温度高,风速小,降水量少的特征。本次污染的主导风向为西风和西北风。6月4-5日气压场为槽后,风向为西北风,地面受弱高压控制,风速小,不利于污染物扩散,轻度污染;6月6日,气压场转为平直,温度升高,风速减弱,臭氧8小时浓度(以下简称“臭氧浓度”)达 $231\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,中度污染;6月7日,温度持续上升,白天风向转为西南风,夜间气压场变为槽前,有少量降水,使得臭氧浓度有所下降,臭氧浓度为 $204\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,轻度污染;6月8日,有冷锋入境,温度降低,风速增大,有利于污染物的扩散,臭氧浓度下降至 $123\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;6月9日,温度有所回升,气压场转为槽后,地面受高压控制,不利于污染物扩散,臭氧浓度达 $156\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表5 成都市典型污染过程期间逐日气象条件与臭氧浓度的变化

| 日期 | O ₃ -8h/($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 温度/℃ | 相对湿度/% | 降水量/mm | 风速/(m/s) | 风向 | 高空形式 | 地面气压场 |
|----------|---|-------|--------|--------|----------|------|------|-------|
| 2018-6-4 | 161 | 20~29 | 40~84 | 0.12 | 1.50 | 西-西北 | 浅槽后 | 弱高压 |
| 2018-6-5 | 183 | 22~30 | 40~76 | 0 | 1.55 | 西北-北 | 槽后 | 高压后 |
| 2018-6-6 | 231 | 23~31 | 40~77 | 0 | 1.27 | 西北-西 | 平直 | 均压 |
| 2018-6-7 | 204 | 25~32 | 44~76 | 0.67 | 1.51 | 西南 | 槽前 | 弱低压 |
| 2018-6-8 | 123 | 19~24 | 62~94 | 34.01 | 2.36 | 西-西北 | 浅槽 | 高压 |
| 2018-6-9 | 156 | 20~28 | 43~88 | 0.25 | 1.93 | 西北-西 | 槽后 | 高压 |

3.2 重要气象要素分析

图6为2018年6月4-9日温度、相对湿度、风速、气压、总云量的6小时变化曲线。分析本次污染过程可得,气压呈先下降后上升的趋势,6月7日20时达

到最低值,随着气压升高,臭氧污染有所缓解。相对湿度在40%~90%波动,逐日变化不大。温度4-7日呈上升趋势,最高气温达 $32.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,且臭氧浓度随着温度的升高而升高;6月8日由于冷空气影响,温度下降,减轻了臭氧污染。风速介于 $1\sim3\text{ m/s}$,在18个时间段的监测中,静小风次数为11次,频率为61.1%,不利于污染物扩散。

3.3 高低空配置

本文利用MICAPS分析了2018年6月4-7日500hPa高度场和风场以及海平面气压场和地面风场。图7(a)从高空环流来看,成都市6月4-7日都处于槽后脊前的位置,盛行偏西气流,冷空气势力弱,这种稳定的大气环流有利于污染物的积累;图7(b)显示6月7日夜间成都市位于槽前,受到冷平流影响,温度下降并产生降水,有利于污染物的扩散。图7(c)从地面形势来看,成都市6月4-6日均处于高压控制,以西北风为主,不利于臭氧的扩散;图7(d)显示6月7日夜间至8日,地面处于低压控制,形成降水,使臭氧浓度降低,本次臭氧污染得到缓解。

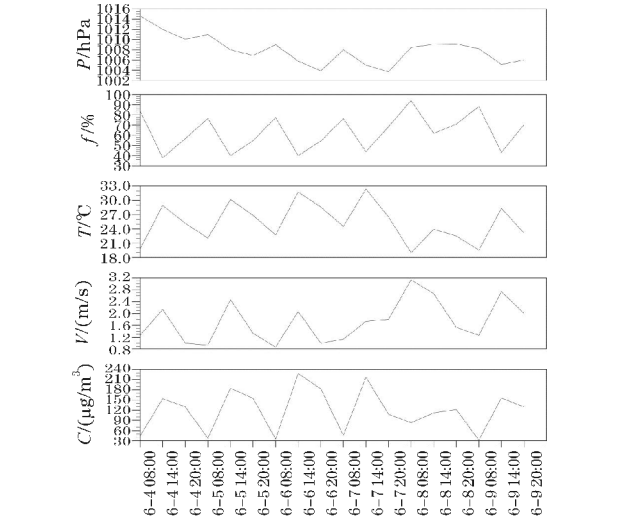


图6 2018年6月4-9日成都市气象要素小时变化曲线

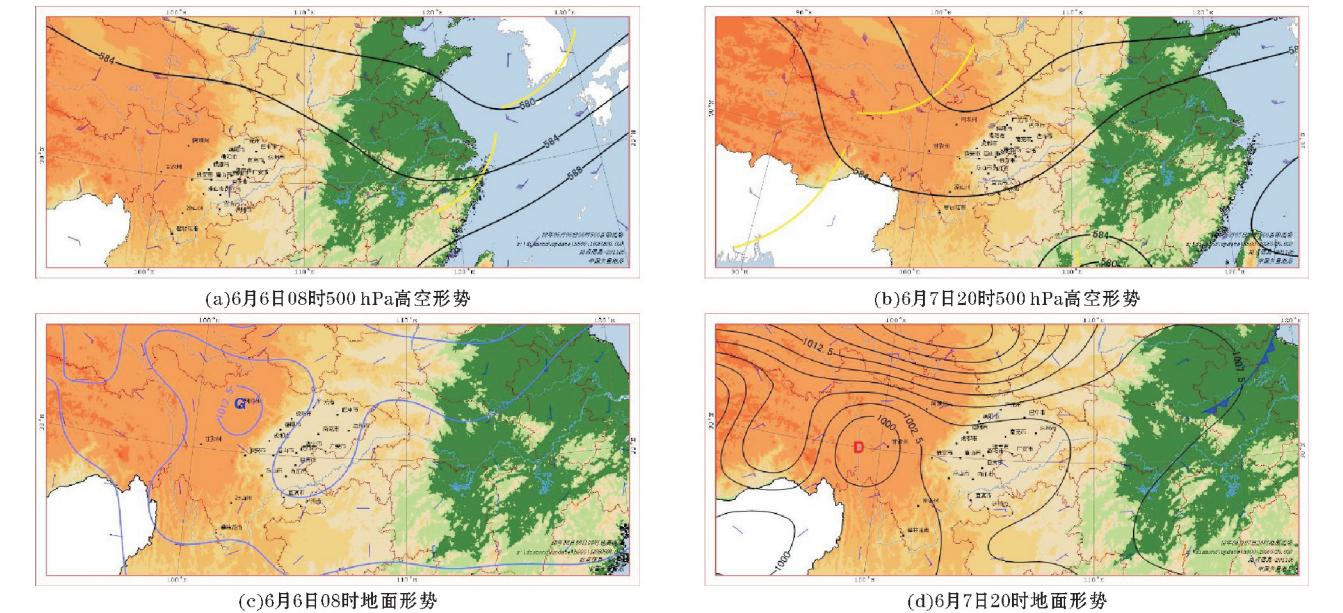


图7 2018年6月6日08时、6月7日20时500 hPa高度场和风场、海平面气压场和风场

3.4 大气层结特征

表6根据MICAPS中2018年6月4-9日共12个时次探空资料(每天2次)统计得出,成都出现6次贴地逆温,贴地逆温频率达50%,逆温层厚度最高达521.63 m,不利于污染物的垂直扩散。6月8日由于冷锋过境,降水影响,无贴地逆温出现。正是由于成都市区近地面存在不同程度的贴地逆温、高层逆温,持续

逆温引起的下冷上暖的温度层结不利于大气垂直运动,使臭氧在逆温层内不断积累。6月4日8时至5日20时混合层高度由475 m上升至758 m,根据前文分析结论臭氧浓度与混合层高度的呈正相关,即随着混合层高度上升臭氧浓度也在持续增加。6月6日20时至8日8时混合层高度始终维持在较高高度,最大值达870 m。6月8日20时混合层高度明显下降,污染有所缓解。

表6 2018年6月4-9日成都逆温层和混合层特征值

| 时间 | 贴地逆温 | 非贴地逆温数 | 逆温层相对湿度/% | 逆温层底/m | 逆温强度/(℃/100 m) | 逆温层厚度/m | 混合层厚度/m |
|----------------|------|--------|-----------|---------|----------------|---------|---------|
| 2018-6-4 08:00 | 有 | 4 | 50~53 | 11.63 | 2.02 | 246.33 | 475 |
| 2018-6-4 20:00 | 无 | 5 | / | 2140.95 | 0 | 185.88 | 690 |
| 2018-6-5 08:00 | 有 | 6 | 35~64 | 38.67 | 0.76 | 521.63 | 456 |
| 2018-6-5 20:00 | 无 | 4 | 62~82 | 2014.64 | 0.53 | 373.94 | 758 |
| 2018-6-6 08:00 | 有 | 2 | 54~61 | 47.72 | 2.36 | 211.72 | 437 |
| 2018-6-6 20:00 | 无 | 5 | 14~94 | 92.83 | 0 | 170.36 | 710 |
| 2018-6-7 08:00 | 有 | 4 | 17~23 | 56.74 | 1.95 | 204.34 | 516 |
| 2018-6-7 20:00 | 有 | 3 | 18~22 | 119.90 | 1.43 | 139.84 | 758 |
| 2018-6-8 08:00 | 无 | 1 | 12~14 | 607.12 | 0.49 | 203.26 | 870 |
| 2018-6-8 20:00 | 无 | 4 | 81~93 | 931.93 | 0 | 9.99 | 660 |
| 2018-6-9 08:00 | 有 | 4 | 64~95 | 65.77 | 0.64 | 463.33 | 475 |
| 2018-6-9 20:00 | 无 | 5 | 53~73 | 255.24 | 0.59 | 169.40 | 784 |

4 结论

(1) 2015-2018年川渝地区臭氧年平均浓度高值、低值区域分布基本不变,盆地西部及周边地区臭氧浓度始终维持在较高范围,但盆地北部、东部、东南部

地区臭氧浓度较低;而夏季臭氧浓度空间变化特征十分明显,臭氧的夏季高浓度区从川渝地区的西北方转移到东南方,且2018年臭氧夏季污染最为严重。

(2)相同海拔区间城市浓度变化特征基本一致,在盆地内部,海拔高度越低,风速越小,逆温越强,臭氧越易堆积而无法扩散,从而造成高浓度污染。其中,盆

底地区日最高浓度相对更高,日变化较大;但盆边地区日最高浓度相对较低,日变化较小,整体变化特征性不显著。

(3)2015–2016年,重庆、成都、雅安及广安地区主要呈现出低周末效应,2017–2018年除重庆外,其他3个地区随着臭氧浓度的上升,主要呈现出高周末效应;整体上2015–2018年重庆、成都、广元地区4年间主要以低周末效应为主,而雅安地区4年间低周末效应与高周末效应出现的概率相近。

(4)相关性分析得臭氧浓度与相对湿度、降水量呈负相关,与温度、混合层高度呈正相关;相对湿度与臭氧浓度的相关性程度最高,相关性一般率达66.67%、相关性良好率达33.33%;气温、降水量与臭氧浓度的相关性程度一般;而气压在所研究的18个城市中仅有9个城市表现出有相关性且相关性程度一般;风速普遍表现为不相关是由于川渝地区受地形影响常年为静小风,风速小于1.5 m/s。研究显示,滞后2~4 h的臭氧浓度和辐射强度的相关性更强。

(5)综合分析得,在气温达28℃,相对湿度达65%,气压约为1002 hPa,日降水量小于或接近0.98 mm,地面风速小于1.5 m/s的气象条件下,发生臭氧污染的可能性较大。

(6)对2018年6月4–9日成都市重污染天气过程分析得知,川渝盆地地区盛行偏西气流,冷空气势力弱的大气环流形势有利于污染物的积累;成都贴地逆温频率达50%,持续逆温引起的下冷上暖的温度层结不利于大气垂直运动,因而使臭氧在逆温层内不断积累,浓度维持在较高的数值。

致谢:感谢成都信息工程大学引进人才启动项目(KYTZ201429)对本文的资助

参考文献:

- [1] H Liu, S Liu, B Xue, et al. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 173: 223–230.
- [2] Z Maigeng, H Guojun, F Maoyong, et al. Smog episodes, fine particulate pollution and mortality in China[J]. *Environmental research*, 2015, 136: 396–404.
- [3] Kelishadi Roya, Poursafa Parinaz. Air pollution and non-respiratory health hazards for children[J]. *Archives of medical science: AMS*, 2010, 6(4): 483–495.
- [4] 霍书浩, 丁桑岚. 大气污染对城市人体健康影响的经济损失分析[J]. *广州化工*, 2009, 37(4): 158–159.
- [5] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 603–608.
- [6] 金明红, 黄益宗. 臭氧污染胁迫对农作物生长与产量的影响[J]. *生态环境*, 2003(4): 482–486.
- [7] 李全胜. 近地层臭氧浓度升高对稻麦轮作农田土壤氮素循环及其相关功能微生物的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [8] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源VOCs排放清单及其对大气环境的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4535–4542.
- [9] 刘姣姣, 蒋昌潭, 宋丹, 等. 重庆夏季近地面臭氧变化规律及影响因素分析[J]. *重庆大学学报*, 2014, 37(8): 91–98.
- [10] 刘萍, 翟崇治, 余家燕, 等. 重庆大气中臭氧浓度变化及其前体物的相关性分析[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(1): 40–43.
- [11] 任丽红, 胡非, 王玮. 北京夏季O₃垂直分布与气象因子的相关研究[J]. *气候与环境研究*, 2005(2): 166–174.
- [12] 吴锴, 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.
- [13] 杨丽蓉, 郭英茹, 张俊生, 等. 银川市臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(2): 55–59.
- [14] Zhang X Y. Corrigendum to "Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols" published in *Atmos. Chem. Phys*[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(274): 6273–6273.
- [15] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178–1187.
- [16] 符传博, 丹利. 重污染下我国中东部地区1960–2010年霾日数的时空变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(2): 219–226.
- [17] 宁贵财. 四川盆地西北部城市群冬季大气污染气象成因及其数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [18] 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(5): 515–520.
- [19] 朱宽广, 谢旻, 霍云怡, 等. 南京城市下垫面变

- 化对夏季臭氧浓度的影响研究[J]. 中国环境科学,2015,35(11):3217-3226.
- [20] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学,2007(4):4706-4711.
- [21] 胡成媛,康平,吴锴,等. 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.
- [22] 安俊琳,王跃思,孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(3):944-951.
- [23] 白建辉,王明星. 地面臭氧光化学过程规律的初步研究[J]. 气候与环境研究,2001(1):91-102.

Meteorological Causes of Ozone Pollution in Sichuan and Chongqing in Summer

RUAN Yuqing, LI Lincen, HUANG Ziyun, ZENG Shenglan

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the characteristics and meteorological causes of ozone pollution in Sichuan-Chongqing urban agglomeration in summer, the relationship between meteorological factors and ozone concentration was discussed and studied by using ozone data and meteorological data from 2015 to 2018 in Sichuan-Chongqing area and mainly using correlation analysis method. The results show that from 2015 to 2018, the annual average concentration of ozone in Sichuan and Chongqing presents a distribution law of high in the west and low in the east, and the spatial distribution is basically unchanged; However, the spatial variation of ozone concentration in summer is significant, and the high concentration area gradually shifts from northwest to southeast in Sichuan and Chongqing, and the ozone concentration in basin bottom is higher than that in slope. Ozone concentration is negatively correlated with relative humidity and precipitation, but positively correlated with temperature. Among all meteorological factors, the correlation between relative humidity and ozone concentration is the highest, while the correlation between temperature and precipitation is average. However, the air pressure is only correlated in 50% of cities and the correlation degree is general; Wind speed is quiet and small all the year round. The ozone concentration positively correlated with the height of the mixed layer. Under the meteorological conditions of air temperature about $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, relative humidity about 65%, air pressure about 1002 hPa, daily precipitation less than or close to 0.98 mm, and surface wind speed less than 1.5 m/s, ozone pollution is likely to occur.

Keywords: applied meteorology; pollution meteorology; Sichuan-Chongqing region; ozone pollution; ozone variation characteristics; meteorological factors