

刘慧,王建鹏,黄鑫,等. 影响汾渭平原地区臭氧污染的地面环流形势研究[J]. 陕西气象,2022(4):42-49.

文章编号:1006-4354(2022)04-0042-08

影响汾渭平原地区臭氧污染的地面环流形势研究

刘 慧^{1,2},王建鹏^{2,3},黄 鑫^{2,4},祁春娟^{1,2},李培荣^{1,2}

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 西安市气象局,西安 710016;

4. 陕西省气象信息中心,西安 710014)

摘 要:基于2014—2018年4—10月汾渭平原空气质量监测数据及同步气象要素数据分析臭氧时空分布特征,利用Lamb-Jenkinson客观环流分型方法分析影响汾渭平原地区臭氧污染的主要环流形势,探讨环流型与臭氧质量浓度及气象要素之间的关系。结果表明:2014—2018年4—10月臭氧最大8h滑动平均质量浓度(用 $C_{8h}(O_3)$ 表示)呈波动增长,2017年污染最重;不同环流型出现的频率不同,且各环流型控制下 $C_{8h}(O_3)$ 有所差异,其中气旋型(C)、东北气流型(NE)、偏北气流型(N)及东北气旋型(CNE)控制时时易出现臭氧污染日,且对应的环流型出现频率和污染日数的乘积较大;C型及与C型混合的环流型控制时 $C_{8h}(O_3)$ 值均较高,A型及与A型混合的环流型控制时 $C_{8h}(O_3)$ 值均较低;风速与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关性较差,日最高气温、日平均气温、相对湿度、风速及云量与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关系数分别为0.94、0.87、-0.82、-0.33、-0.70。

关键词:臭氧污染;时空分布;环流分型;气象要素;汾渭平原

中图分类号:X16

文献标识码:A

臭氧(O_3)是大气光化学污染的产物,具有强氧化性,对人体健康和生态系统有重要影响^[1-2]。近年来城市化进程不断加速, O_3 污染问题日益凸显^[3-5]。对流层中的 O_3 主要由氮氧化物和挥发性有机物等前体物在光照条件下生成^[6-8]。除了受排放源影响外,气象条件也影响 O_3 的时空分布,大气环流对云量、降水、风、气温、湿度等气象条件有直接影响^[9],不同的大气环流背景可导致不同的光化学反应效率及 O_3 和其前体物的区域输送过程^[10]。目前国内分别针对北京、福州、上海、杭州、宁波、武汉等地在天气型与 O_3 污染方面已经进行了一系列研究^[11-15]。大气环流分型包括主观分型和客观分型。主观分型主要依据预报

经验来分类,主观性明显,不利于推广应用。客观分型方法基于数学方法进行分类,具有可重复性,适用于长时段、数据量大的情况。Jenkinson等通过定义指数及分类标准将Lamb分类方法客观化^[16-17],该方法操作性强,天气气候学意义明确,已被广泛应用于研究大气环流分型。Santurtún等基于Lamb-Jenkinson(L-J)环流分型方法研究了西班牙2001—2010年 O_3 的变化趋势及与环流型的关系^[18],结果表明反气旋环流下 O_3 质量浓度的中位数值较低;Liao等基于L-J分型方法分析了长三角地区大气环流形势及其与 O_3 的关系并指出,西风直流形势对应较高的 O_3 质量浓度^[19]。

收稿日期:2021-09-09

作者简介:刘慧(1989—),女,汉族,山西运城人,博士,工程师,从事环境气象预报及评估工作。

通信作者:王建鹏(1972—),男,汉族,陕西户县人,硕士,正研级高工,主要从事天气气候研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2019M-11,2021G-15,2021Y-1);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-965,2022JQ-294)

汾渭平原地形狭长且周边山脉众多,这种相对封闭的地形条件使得污染物不易扩散。2018年汾渭平原被列为国务院《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(国发〔2018〕22号),成为持续开展大气污染防治行动的三大重点区域之一。近年来该区域大气污染防治方面的相关研究主要侧重于颗粒物方面^[20-23],围绕O₃的研究主要局限在部分重点城市^[24-25],针对汾渭平原城市群的研究较少。本研究基于L-J分型方法探讨汾渭平原大气环流形势及不同环流形势下气象要素的分布特点,剖析O₃质量浓度对不同环流类型的响应,为研究污染形成机理、评估政府减排措施及O₃预报业务提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 站点及数据介绍

汾渭平原包括山西省吕梁、晋中、临汾、运城,河南省洛阳、三门峡,陕西省西安、宝鸡、渭南、咸阳、铜川等11个城市(图1)。所用O₃和气象要素观测数据为2014—2018年O₃污染季(4—10月)资料。O₃数据来源于全国城市空气质量实时发布平台,每个城市至少有3个观测站点,汾渭平原区域共62个站(图1中的三角形)。参照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),一日内(08—24时)O₃最大8h滑动平均质量浓度(用C_{8h}(O₃)表示),超过160 μg/m³即为超标,该日即为O₃污染日^[26]。气温、相对湿度、风速、风向、露点温度等数据来自于中国气象局国家气象观测站逐小时地面常规观测资料,汾渭平原区域共113个站(图1中十字),日值由小时值求平均获得。用于进行客观分型的

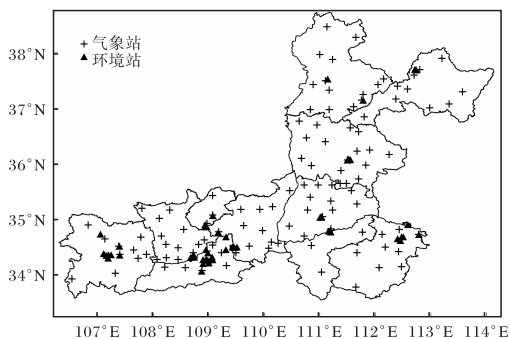


图1 汾渭平原环境观测站和气象观测站的地理位置分布
(审图号为GS(2018)1432号)

海平面气压数据来自欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料,时间间隔 6 h,空间分辨率为 1.0°×1.0°,海平面气压场日值由 ERA-Interim 逐 6 h 值求日平均获得。地转风和地转涡度由邻近格点的海平面气压值计算获得。

1.2 L-J 环流分型方法

L-J 环流分型法由 Lamb 提出,后经 Jenkinson 等发展成为一种比较成熟的环流分型方法。具体方法是在设定的计算范围内,在每隔 10 个经度、5 个纬度的网格上取一个差分格点,共计 16 个点(图 2)。以西安(34.45°N,108.98°E)为区域中心点,以 25°N~45°N、94°E~124°E 的范围为研究区域,根据公式(1)~(6)计算区域中心点的地转风及地转涡度,并根据表 1 把环流类型分为平直气流型、旋转型和混合型 3 大类。平直型分为 8 小类,分别为偏北气流、东北气流、偏东气流、东南气流、偏南气流、西南气流、偏西气流、西北气流;旋转型分为反气旋型和气旋型;混合型由平直型和旋转型组合而成,共 16 小类。基于该方法得到的分型结果具有物理意义,例如 A 型表示区域被反气旋控制,C 型表示区域被气旋控制,N 型表示区域被偏北地转风控制,AN 型表示区域被高压系统下的偏北地转风控制,即高压前部,其他型的物理意义以此类推。

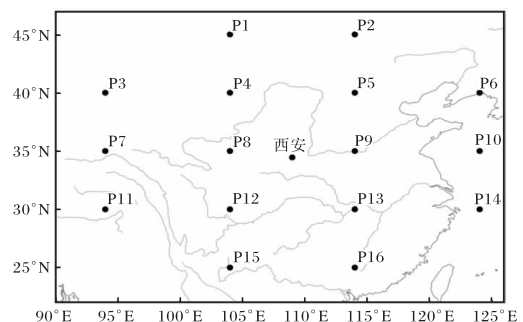


图2 L-J 环流分型方法 16 个差分格点分布图

$$F_s = 1.305[0.25(P_5 + 2P_9 + P_{13}) - 0.25(P_4 + 2P_8 + P_{12})], \quad (1)$$

$$F_w = 0.5(P_{12} + P_{13}) - 0.5(P_4 + P_5), \quad (2)$$

$$Z_s = 0.85[0.25(P_6 + 2P_{10} + P_{14}) - 0.25(P_5 + 2P_9 + P_{13}) - 0.25(P_4 + 2P_8 + P_{12}) + 0.25(P_3 + 2P_7 + P_{11})], \quad (3)$$

表1 L-J环流分型表

$ Z \leq F$ 平直气流型	$ Z \geq 2F$ 旋转型	$F \leq Z \leq 2F$ 混合型
北(N); 东北(NE); 东(E); 东南(SE); 南(S); 西南(SW); 西(W); 西北(NW)	反气旋(A); 气旋(C)	AN; ANE; AE; ASE; AS; ASW; AW; ANW CN; CNE; CE; CSE; CS; CSW; CW; CNW

$$Z_w = 1.12[0.5(P_{15} + P_{16}) - 0.5(P_8 + P_9)] - 0.91[0.5(P_8 + P_9) - 0.5(P_1 + P_2)], \quad (4)$$

$$F = (F_s^2 + F_w^2)^{1/2}, \quad (5)$$

$$Z = Z_s + Z_w. \quad (6)$$

式中, F 为地转风, F_s 为地转风经向分量, F_w 为地转风纬向分量, Z 为地转涡度, Z_s 为地转涡度的纬向梯度, Z_w 为地转涡度的经向梯度。以上 6 个量的单位均为 $0.1 \text{ hPa}/(^{\circ})$, $P_1 \sim P_{16}$ 为 16 个格点上的海平面气压日值, 单位为 hPa 。

2 汾渭平原臭氧分布特点

从 2014—2018 年 4—10 月汾渭平原 $C_{8h}(O_3)$ 平均值的空间分布看(图 3), 处在三省交界的运城、三门峡及河南与山西交界处的洛阳 O_3 污染较重, 三市 $C_{8h}(O_3)$ 平均值分别为 $122.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $118.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $121.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 主要与人口分布和地理位置有关^[27]。铜川地区 O_3 污染程度仅次于这三个城市, 主要由于铜川第二产业较高, 前体物排放较其他区域突出, 而处于汾渭平原城市群边界区域的吕梁和宝鸡 O_3 污染程度最轻^[27]。 $C_{8h}(O_3)$ 值超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时定义为一个超标日, O_3 超标率的分布与其质量浓度分布基本一致, 运城和洛阳的超标率均达到 20% 以上。

从 2014—2018 年 4—10 月 $C_{8h}(O_3)$ 的逐日变化来看(图 4), O_3 污染程度呈波动增加趋势, 2017 年污染最为严重, 临汾、运城、洛阳的超标日数达到 90 d 以上, 其中运城超标日为 116 d, 临汾重度以上日数达 8 d。西安泾河站 4—10 月 2017 年 35°C 以上的高温日数达 42 d, 高于其他年份, 其中 O_3 污染最重的 6—7 月日最高气温平均值为 34.2°C , 高于其他年份, 这也是导致 2017 年污染最重的一个原因。

3 汾渭平原环流型特点及与污染物质量浓度和气象要素的关系

3.1 汾渭平原环流型特点

在 O_3 前体物排放量变化不大的情况下, O_3 质量浓度的变化主要受气象条件制约, 而区域 O_3 污染的发生与环流形势密切相关, 因此对环流分型的研究有重要意义。基于 2014—2018 年 4—10 月 ERA-Interim 海平面气压再分析资料, 对汾渭平原的环流形势进行分类。环流型频率为某环流型出现日数与总日数的比值, 频率超过 5% 的环流型为 NE 型(15%)、C 型(13%)、A 型(12%)、E 型(10%)、S 型(7%)、SE 型(6%)、N 型(6%), 这七种环流型即为影响汾渭平原地区的主要环流背景。

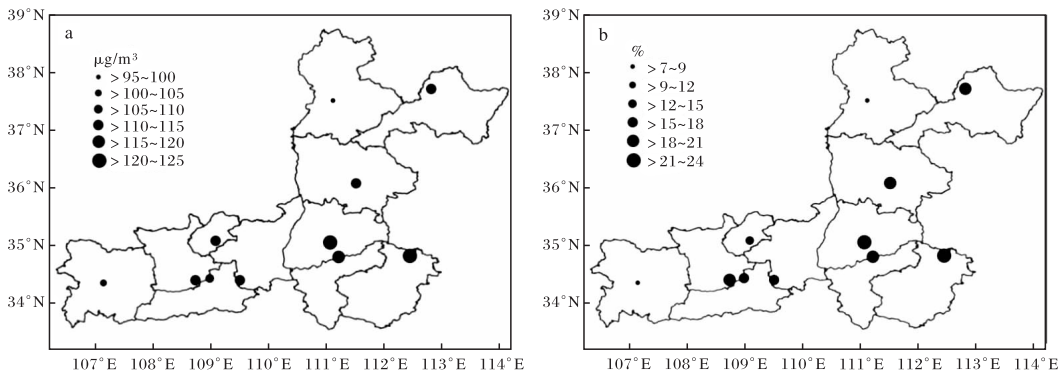


图3 2014—2018年4—10月汾渭平原 $C_{8h}(O_3)$ 平均值(a)及超标率(b)空间分布(审图号为GS(2018)1432号)

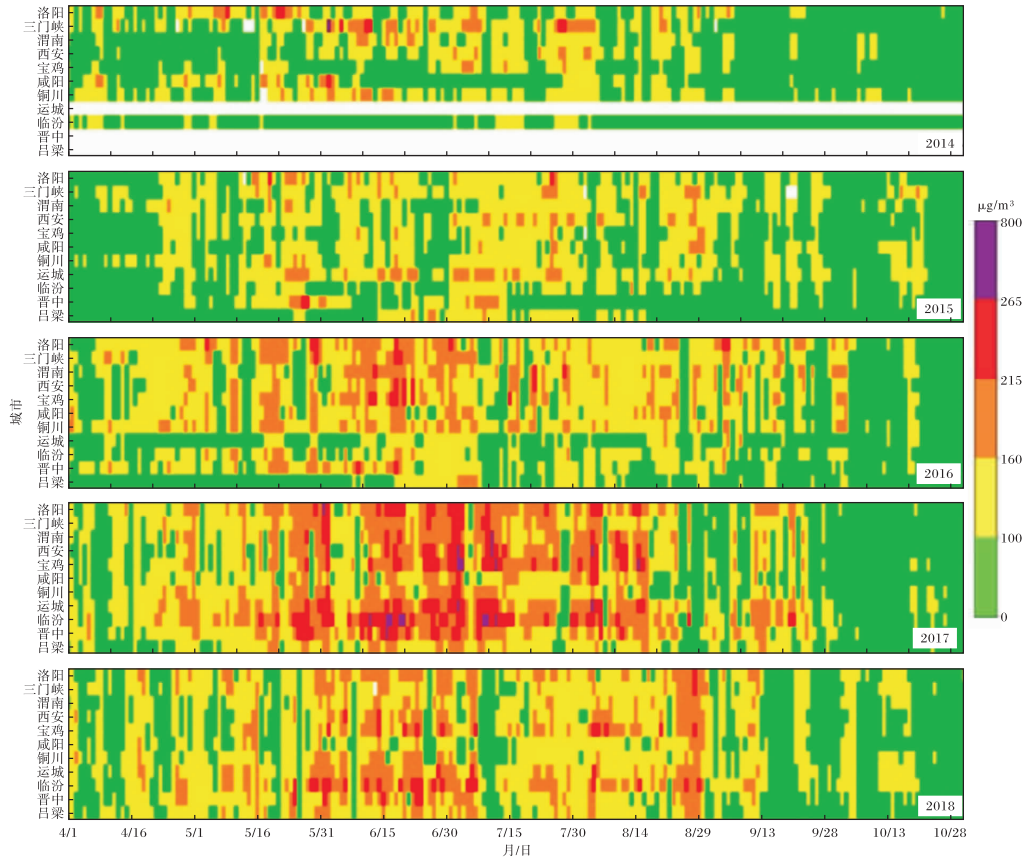


图4 2014—2018年4—10月份汾渭平原各地市C_{8h}(O₃)逐日变化图

3.2 环流型与污染物质量浓度的关系

为了更好地研究环流型对C_{8h}(O₃)的影响,以西安为例,用某环流型下O₃污染日所占比例(R₁)与所有环流型下O₃污染日所占比例(R₂)的比值来分析。当比值大于1时,表示某环流型出现时,易造成O₃污染;当比值小于1时,不易造成污染^[28]。C_{8h}(O₃)值超过160 μg/m³时,即对应的空气质量分指数超过100时记为一个O₃污染日。R₁/R₂大于1时从大到小对应的环流型依次为CNW型、CW型、C型、CNE型、CN型、ANW型、CE型、NW型、W型、N型、NE型(图5),表明这些环流型出现时较易造成O₃污染事件。其中CNW型和CW型虽然极易造成O₃污染,但2014—2018年的O₃污染季出现次数很少;A型虽然不是最易造成O₃污染的天气型,但出现次数达132次。由于不同环流型出现的频率不同,且各环流型控制下的C_{8h}(O₃)值有所差异;因此,以各环流型出现的频率与对应的污染日数的乘积来分析影响汾渭平原区域O₃污染

的主要环流型,从大到小依次为C型、NE型、E型、N型、A型、S型及CNE型(图5)。其中C型出现的频率较高,且对应的C_{8h}(O₃)值较高;NE型、E型、A型、S型出现的频率较高,但对应的C_{8h}(O₃)值较低;CNE型出现的频率较少,但对应的C_{8h}(O₃)值最高。综上分析,R₁/R₂大于1且环流型出现频率与对应的污染日数的乘积较大的环流型为C型、NE型、N型及CNE型。

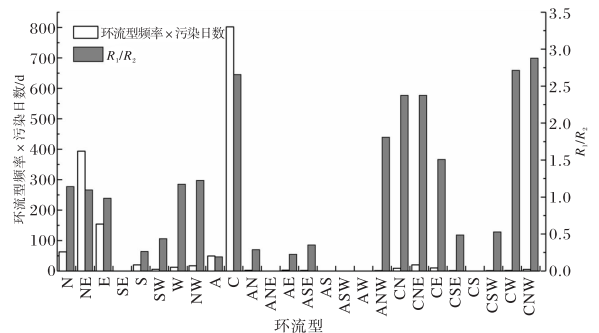


图5 2014—2018年4—10月份汾渭平原不同环流型下R₁/R₂及环流型出现频率与污染日数的乘积

将 R_1/R_2 大于 1 且环流型出现频率与对应的污染日数的乘积较大的四种流型下的海平面气压场和 $C_{8h}(O_3)$ 分别进行平均,即得到不同环流型下海平面气压场(图 6)和 $C_{8h}(O_3)$ (图 7)分

布图。CNE 型和 C 型对应的 $C_{8h}(O_3)$ 值较高,这是由于低压辐合运动容易导致周边 O_3 向汾渭平原区域输送,同时气压梯度力较弱,静稳小风天气不利于污染物的水平扩散,易造成 O_3 积累。

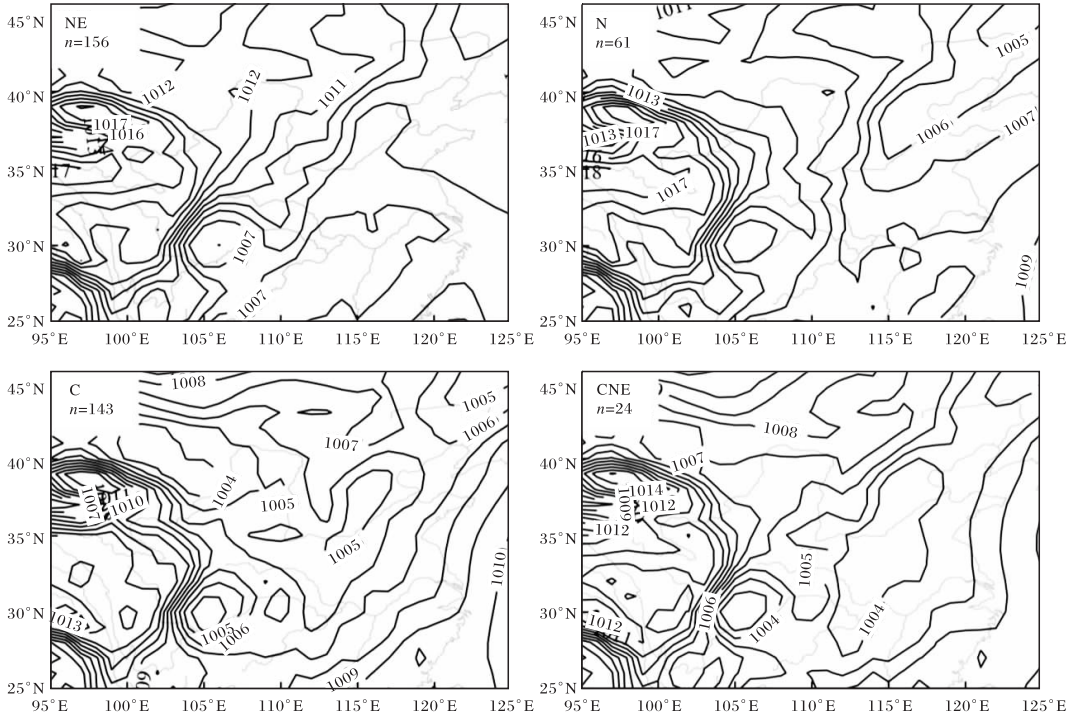


图 6 2014—2018 年 4—10 月份渭平原四种环流型下海平面气压合成场 (n 为样本数)

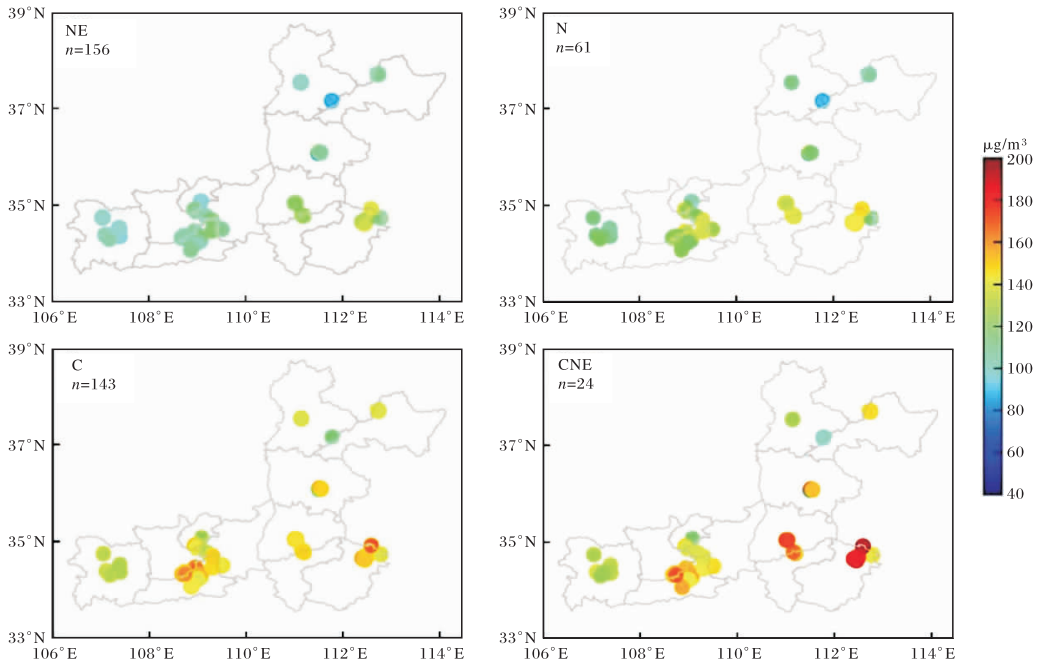


图 7 2014—2018 年 4—10 月份渭平原四种环流型下 $C_{8h}(O_3)$ 分布图 (n 为样本数;审图号为 GS(2018)1432 号)

3.3 环流型与气象要素的关系

污染过程与环流型密切相关,但各环流型控制下的气象要素有所差异。太阳辐射为 O_3 光化学过程提供了能量来源,而气温的高低能够反映太阳辐射的强弱,云量会散射或者吸收太阳辐射,从而影响近地面太阳辐射强弱;湿度较高时利于 O_3 干沉降,同时湿度较高时光化学反应中消耗 O_3 的反应过程占主导,水汽中所含的 OH 和 HO_2 等自由基迅速将 O_3 分解为 O_2 ,降低大气中的 O_3 质量浓度^[29];风速对 O_3 生成的作用比较复杂,当风速较小时利于 O_3 及其前体物的光化学生成和积聚,随着风速的增大,一方面会对 O_3 前体物及 O_3 产生扩散和稀释,降低 O_3 质量浓度,另一方面利于边界层高度的抬升,促进上

层大气中的 O_3 向近地层输送^[5]。以西安为例,探讨不同环流型下 O_3 和气象要素的特征(图 8)。C 型及与 C 型混合的环流型控制时 $C_{8h}(O_3)$ 值均较高,这几种环流型控制时利于 O_3 及其前体物的辐合,同时对应的日平均气温和日最高气温均较高,利于光化学反应的发生,促进 O_3 生成。A 型及与 A 型混合的环流型控制时 $C_{8h}(O_3)$ 值均较低,对应的日平均气温和日最高气温也较低,不利于光化学反应的发生,同时对应的相对湿度及云量均较高,减弱太阳辐射强度,不利于 O_3 的累积。风速与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关性较差。日最高气温、日平均气温、相对湿度、风速及云量与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关系数分别为 0.94、0.87、-0.82、-0.33、-0.70。

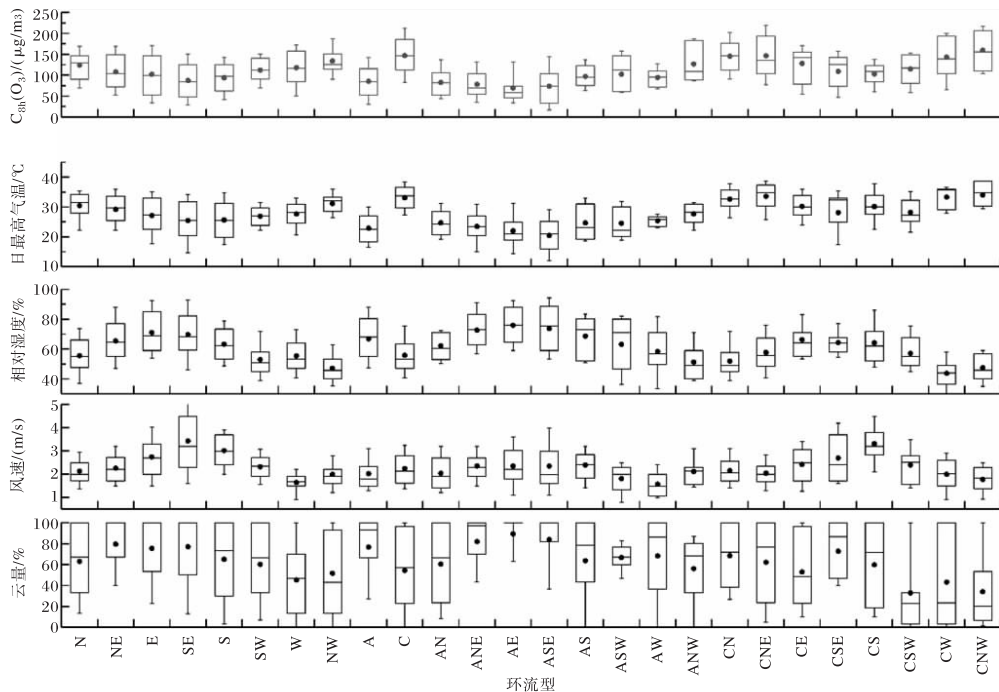


图 8 2014—2018 年 4—10 月西安不同环流型下 $C_{8h}(O_3)$ 及日最高气温、日平均气温、相对湿度、风速、云量的箱线图

4 结论

(1) 2014—2018 年 4—10 月运城、三门峡、洛阳 O_3 污染较重, $C_{8h}(O_3)$ 值分别为 122.8、118.6、121.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 吕梁和宝鸡 O_3 污染程度最轻。运城和洛阳的超标率均达到 20% 以上。2014—2018 年 4—10 月 O_3 污染程度呈波动增加趋势, 2017 年污染最为严重。

(2) 频率超过 5% 的环流型为 NE 型 (15%)、C 型 (13%)、A 型 (12%)、E 型 (10%)、S 型 (7%)、SE 型 (6%)、N 型 (6%), 其中 CN 型、CNE 型、CE 型、CW 型及 CNW 型对应的 $C_{8h}(O_3)$ 值较高。不同环流型出现的频率不同, 且各环流型控制下的 $C_{8h}(O_3)$ 有所差异, R_1/R_2 大于 1 且环流型出现频率与对应的污染日数的

乘积较大的环流型为 C 型、NE 型、N 型及 CNE 型,这四个环流型是影响汾渭平原地区 O_3 污染的主要环流形势。

(3)C 型及与 C 型混合的环流型控制时西安 $C_{8h}(O_3)$ 值较高,对应的日平均气温和日最高气温均较高。A 型及与 A 型混合的环流型控制时 $C_{8h}(O_3)$ 值较低,对应的日平均气温和日最高气温也较低,同时对应的相对湿度及云量均较高。日最高气温、日平均气温、相对湿度、风速及云量与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关系数分别为 0.94、0.87、-0.82、-0.33、-0.70。

参考文献:

- [1] TIE X X, BRASSEUR G P, ZHAO G S, et al. Chemical characterization of air pollution in eastern China and the eastern United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(14): 2607-2625.
- [2] GENG F H, ZHAO C S, TANG X, et al. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: a case study[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(5): 989-1001.
- [3] ZHANG Y N, XING 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.
- [4] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(12): 3001-3008.
- [5] 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.
- [6] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 976-986.
- [7] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(1): 10-16.
- [8] ZHOU Y, DENG X J, ZHU D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NOx and O_3 at a suburban site in Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(12): 6625-6636.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2000: 474-484.
- [10] 柳草, 王晓玲, 李德俊, 等. 环流型对武汉臭氧浓度的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1210-1218.
- [11] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 573-578.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 602-611.
- [15] 蒋璐璐, 钱燕珍, 杜坤, 等. 宁波市近地层臭氧浓度变化及预测[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(1): 53-59.
- [16] JENKINSON A F, COLLISON F P. An initial climatology of gales over the North Sea[C]// Synoptic Climatology Branch Memorandum, No 62. Bracknell: Meteorological Office, 1977: 18.
- [17] LAMB H H. TYPES and spells of weather around the year in the British Isles: Annual trends, seasonal structure of the year, singularities[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76(330): 393-429.
- [18] SANTURTUN A, GONZALEZ-HIDALGO J C, SANCHEZ-LORENZO A, et al. Surface ozone concentration trends and its relationship with weather types in Spain (2001-2010)[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 101: 10-22.
- [19] LIAO Z H, GAO M, SUN J R, et al. The impact of synoptic circulation on air quality and pollution-related human health in the Yangtze River Delta region[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 838-846.
- [20] 刘瑞芳, 贺瑶, 刘慧, 等. 陕西关中大气污染时空分布特征及天气学分型[J]. *陕西气象*, 2021(5): 23-29.
- [21] 张向荣, 乔丹杨. 2020 年西安一次持续重污染过

- 程承运及输送特征分析[J]. 陕西气象, 2021(5): 30-35.
- [22] 吉庆, 武麦凤, 何琳, 等. 渭南市 2015—2017 年典型霾天气过程气象特征分析[J]. 陕西气象, 2019(6):12-17.
- [23] 蔡惠文, 吕恩奇, 陈欣昊, 等. 高陵区 PM_{2.5} 污染特征及其与气象要素的关系研究[J]. 陕西气象, 2021(5):42-46.
- [24] 刘松, 程燕, 李博伟, 等. 2013—2016 年西安市臭氧时空变化特性及影响因素[J]. 地球环境学报, 2017, 8(6):541-551.
- [25] 卢娣, 董自鹏, 曹慧萍, 等. 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.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准:GB 3095—2012 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [27] 郑小华, 李明星, 娄盼星. 不同时间尺度下汾渭平原臭氧浓度变化及气象环境影响[J]. 高原气象, 2021, 40(4):954-964.
- [28] 陈龙, 智协飞, 覃军, 等. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象, 2016, 42(7):819-826.
- [29] 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.