

成都市夏季臭氧污染的环流分型与来源分析

史文彬 屈坤 严宇 邱培培 王雪松[†] 董华斌

环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: xswang@pku.edu.cn

摘要 为探究大尺度环流对成都市O₃污染的影响, 基于四川盆地700 hPa位势高度场, 采用T-PCA方法, 将2015—2019年夏季(6—8月)各日的大气环流归纳为5类环流型, 并对不同环流型下的成都市O₃污染特征与污染来源进行分析。5类环流型中, 东北高压型(NEH)和高压底部型(UNF)条件下, 四川盆地气温较高, 湿度和云量相对较低; 对比过去24小时的变温, UNF下四川盆地增温显著, NEH下变化不明显, 另外三类环流型(即东南高压型、西北低压型和西北高压型)下则出现不同程度的降温。NEH和UNF下的气象条件更有利于四川盆地O₃的光化学生成。研究时段内, NEH和UNF下成都市O₃浓度水平和O₃超标日比例明显高于另外三类环流型, 是夏季发生O₃污染的主要环流型。成都市O₃污染较重的月份具有较高的NEH和UNF环流型占比。通过对成都市夏季O₃来源的模拟分析, 发现O₃污染主要来自四川盆地内的污染源排放(占55.0%), 以成都本地贡献为主(31.6%), 其他重要贡献城市包括德阳(5.4%)、重庆(4.0%)、资阳(3.9%)和眉山(2.2%)。然而, 不同环流型下成都市的O₃来源具有不同特点, NEH下成都平原内部污染传输影响较强, 德阳市O₃贡献显著增加(占14.9%); UNF下成都市O₃污染呈现很强的局地性污染特征, 成都市排放的O₃贡献占比接近一半(46.8%)。

关键词 成都市; 臭氧; 环流型; 源解析

Circulation Classification and Source Analysis of Summer Ozone Pollution in Chengdu

SHI Wenbin, QU Kun, YAN Yu, QIU Peipei, WANG Xuesong[†], DONG Huabin

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: xswang@pku.edu.cn

Abstract In order to explore the impact of large-scale circulations on O₃ pollution in Chengdu, based on the 700 hPa geopotential height field in the Sichuan Basin (SCB) and using the T-PCA method, the atmospheric circulations in the summer of 2015–2019 (June–August) were classified into five circulation patterns, and the characteristics of O₃ pollution and O₃ sources in Chengdu under different circulation patterns were identified. Among the five types of circulation patterns, the northeast-high pressure (NEH) pattern and the under-high pressure field (UNF) pattern generally led to higher air temperature, and lower humidity and cloud cover in the SCB. Air temperature change compared to the previous days showed an obvious increasing trend in the SCB under the UNF pattern, kept stable under the NEH pattern, and indicated cooling effects with varying intensities under the other three circulation patterns (the southeast-high pressure pattern, the northwest-low pressure pattern and the northwest-high pressure pattern). The meteorological conditions under NEH and UNF were more conducive to the photochemical production of O₃ in the SCB. During the study period, O₃ concentrations and the percentages of over-standard days of O₃ in Chengdu under NEH and UNF were significantly higher than those under the other three circulation patterns, and thus NEH and UNF were the main circulation patterns that were related to O₃ pollution in summer. Months with more severe O₃ pollution in Chengdu tended to have higher proportion of days

under the NEH and UNF patterns. The simulation studies of O₃ sources in Chengdu in summer suggested that O₃ was mainly derived from the SCB (55.0%), with local contribution of Chengdu (31.6%), and other important contributing cities including Deyang (5.4%), Chongqing (4.0%), Ziyang (3.9%) and Meishan (2.2%). However, O₃ sources in Chengdu under different circulation patterns showed different characteristics. Under the NEH pattern, O₃ transport within the Chengdu Plain had notable impact on O₃ pollution in Chengdu, with a significant increasing contribution from Deyang (14.9%). By contrast, under the UNF pattern, O₃ pollution in Chengdu became more localized, with nearly half (46.8%) of O₃ contributed by local emissions.

Key words Chengdu; ozone; circulation pattern; source analysis

成都市是四川盆地的中心城市之一。近年来,随着“大气十条”的实施,细颗粒物(PM_{2.5})污染问题得到改善。但是,臭氧(O₃)浓度却呈现增长态势,O₃污染事件多发,已成为影响成都市空气质量的主要污染物^①。

大气环流型影响 O₃ 污染的发生和演变,研究者关注到两者之间的联系^[1]。四川盆地易受特殊地形和天气系统影响^[2],发生 O₃ 污染时往往伴随不利的气象条件。蒋婉婷等^[3]对 2014—2016 年 O₃ 污染过程进行分析,发现四川盆地为弱高压控制时,850 hPa 高度处气压梯度较低,污染物不易扩散,容易发生 O₃ 重污染。Yang 等^[4]通过污染个例研究发现,当四川盆地上空出现持续性高压系统时,东北风作用下导致四川盆地北部地区 O₃ 输送增强,加重 O₃ 污染程度。曾胜兰等^[5]对 2013—2014 年 O₃ 污染成因进行分析,发现成都市受高压型、高压后部型和高压底部型控制时易发生 O₃ 污染。雷雨等^[6]对 2019 年世界警察和消防员运动会期间 O₃ 污染成因的分析结果表明,成都平原地面受弱高压或均压场控制时,温度较高,易发生 O₃ 污染。

成都市地处四川盆地西部的成都平原,特殊的地形与大气运动相互作用,加上成都平原城市群高强度的人为源污染物排放影响,使得成都市 O₃ 污染成因具有复杂性。当前的研究报道较多地关注大气环流型及其影响下的气象特征与成都市 O₃ 污染的关系,对成都市不同环流型下的 O₃ 污染特征以及污染来源规律的研究尚待加强,对不同环流型影响下 O₃ 污染成因的差异性认识存在不足。

本文在对 2015—2019 年夏季四川盆地大气环流型进行分类及主要气象特征进行对比分析的基础上,探讨不同环流型影响下成都市的 O₃ 污染特征,结合空气质量模式,对代表年份的 O₃ 污染来源进行解析,分析不同环流条件下成都市 O₃ 污染来源

规律,总结污染成因特点,以期为成都市夏季 O₃ 污染的防控与治理提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文采用的气象数据包括美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 1°×1°全球再分析资料(FNL)以及全球数据同化系统 GDAS 数据^[7]。选用成都市 7 个国控监测站点(金泉两河(30.72°N, 103.97°E)、十里店(30.69°N, 104.18°E)、三瓦窑(30.57°N, 104.08°E)、沙河铺(30.63°N, 104.11°E)、梁家湾(30.69°N, 104.07°E)、君平街(30.66°N, 104.05°E)和灵岩寺(31.03°N, 103.61°E))的臭氧日最大 8 小时平均浓度(MDA8 O₃),国控站点数据来自中国环境监测站的实时空气质量发布平台(<http://www.cnemc.cn/sss/>)。

1.2 大气环流分型计算方法

采用 T-PCA 方法对大气环流进行分类^[8]。该方法根据位势高度的相似度和最大方差对数据进行分类,不依赖主观经验,通过奇异值分解计算输入数据集的特征向量,并通过计算结果找到数类共性的典型模式。由于较少依赖预先设置的参数^[9],该分型方法得到较为广泛的应用^[9-11]。成都平原大气环流分型的相关研究中,基于 700 hPa 位势高度分类较为常见^[12]。大气环流分型计算采用欧盟 COST733 项目开发的天气分型软件(<http://cost733.met.no/>),将 NCEP-FNL 再分析资料中 700 hPa 位势高度数据用于四川盆地 2015—2019 年 6—8 月逐日的环流分型计算,范围为 90°—115°E, 20°—40°N,覆盖四川盆地及其周边地区。

1.3 空气质量模拟系统及其模拟效果评估

使用空气质量模式 CMAQ^[13],对 2017 年夏季(6—8 月)四川盆地的 O₃ 污染进行模拟,所用气相化学机理为 SPARC07。模式采用二重网格嵌套,水平

① “气十条”评估项目组. 四川省大气污染防治行动计划(2018)

分辨率分别为 36 km 和 12 km, 垂直方向为 13 层。模型的气象场输入由中尺度气象模式 WRF^[14] 模拟获得。人为源排放清单来自清华大学建立的 MEIC-2017 排放数据 (<http://meicmodel.org/>), 使用 BEIS3 模型, 结合模拟区域内植被分布数据和同期气温、辐射数据, 计算生物源排放^[15], 并利用 SMOKE 模型^[16] 处理污染源排放输入数据。

用相关性系数(COR)、标准化平均偏差(NMB)和标准化平均误差(NME)评估模式模拟结果与成都市国控站点 O₃ 观测浓度的吻合程度。CMAQ 模式对成都市 2017 年夏季各月(6—8 月)O₃ 和 NO₂ 小时浓度的模拟效果统计指标值如表 1 所示。总体而言, 数值模式能够合理地再现模拟期间成都市 O₃ 和 NO₂ 的浓度水平和变化趋势, O₃ 模拟的 COR 约为 0.7, NO₂ 模拟的平均 COR 约为 0.53; MDA8 O₃ 的 COR 在 0.70~0.77 之间, NMB 在 0.15~0.26 之间。模式对部分 O₃ 峰值和谷值的模拟与观测相比仍然有一些偏差, 对 NO₂ 的模拟在夜间有所低估, 这与清单的不确定性以及模型自身的偏差有一定的关系^[17-18], 也与 NO₂ 夜间复杂的化学过程有关^[19]。

1.4 O₃ 源贡献计算方法

本文采用强力法(Brute-Force 法), 利用 CMAQ 模式第二重网格的模拟结果, 计算成都市 O₃ 的来源构成, 即在关闭四川盆地某一城市人为源和生物源排放条件下, 运用 CMAQ 模式模拟成都市的 O₃ 浓度, 将其与基准情形(未关闭源排放的情景)的 O₃ 模拟浓度的差值用于量化该城市排放对成都市 O₃ 浓度的贡献。假设成都市国控站点在基准情景下模拟得到的 MDA8 O₃ 为 C_a, 关闭城市 *i* 排放源情景下

站点 MDA8 O₃ 模拟浓度为 C_b, 则城市 *i* 对该站点的 MDA8 O₃ 贡献 C_i 按照下式计算:

$$C_i = C_a - C_b \quad (1)$$

用城市 *i* 对成都市 7 个国控站点浓度贡献的平均值代表其对成都市 MDA8 O₃ 的贡献。

对四川盆地不同地区的城市划分如下: 1) 成都平原, 包括成都、德阳、眉山、绵阳、资阳、乐山、雅安和遂宁 8 个城市; 2) 川南, 包括内江、自贡、宜宾和泸州 4 个城市; 3) 川东北, 包括广安、广元、巴中、南充和达州 5 个城市; 4) 重庆市。四川盆地内各城市分布以及空气质量模式第二重模拟区域范围如图 1 所示。本文采用强力法分别计算上述 18 个城市源排放对成都市 O₃ 浓度的贡献。

1.5 大气扩散能力计算方法

一般而言, 边界层高度越高且边界层内水平风速越大, 所关注地区边界层内的污染物越易于扩散。Zhang 等^[20] 将边界层高度与边界层内平均风速的乘积定义为通风系数 V_H (m²/s), 用来表示大气边界层内的扩散条件。本文利用下式计算 V_H :

$$V_H = \sum_{i=1}^n U_i(Z_i) \times \Delta Z_i,$$

其中, n 代表边界层内 CMAQ 模型的垂直层数, $U_i(Z_i)$ 代表第 i 层的水平风速, ΔZ_i 代表模式第 i 层垂直方向的厚度。研究表明, 成都平原夏季正午的边界层高度可达 1000 m 以上^[21]。本文选取 WRF 模式模拟的边界层以下各层风速和高度的结果, 计算 2017 年 6—8 月的大气扩散能力。

2 结果与讨论

2.1 各环流型气象特征

本文使用 T-PCA 方法, 将四川盆地 2015—2019 年夏季(6—8 月)各日的大气环流归纳为 5 类, 图 2 展示这 5 类环流型下的 700 hPa 平均位势高度场, 并根据不同环流型的高低压位置分布特征进行环流型命名^[8]: 1) 东北高压(NEH)型; 2) 高压底部(UNF)型; 3) 东南高压(SEH)型; 4) 西北低压(NWL)型; 5) 西北高压(NWH)型。

根据出现频率由高到低, 5 类环流型依次为 NWL 型(37.1%)、SEH(27.8%)、NEH 型(14.8%)、NWH 型(12.4%)和 UNF 型(8.2%)。成都市受低压控制(NWL)的环流型占比为 37.1%, 受高压控制(包括 SEH, NWH, NEH 和 UNF)的环流型占比为 62.9%。

表 1 成都市模拟效果评估

Table 1 Evaluation of simulation performance in Chengdu

月份	污染物	COR	NMB	NME
6 月	O ₃	0.72	0.30	0.42
	MDA8 O ₃	0.70	0.26	0.28
	NO ₂	0.54	-0.21	0.43
7 月	O ₃	0.70	-0.15	0.42
	MDA8 O ₃	0.77	0.15	0.17
	NO ₂	0.58	-0.15	0.50
8 月	O ₃	0.69	0.12	0.41
	MDA8 O ₃	0.71	0.19	0.23
	NO ₂	0.48	-0.07	0.47

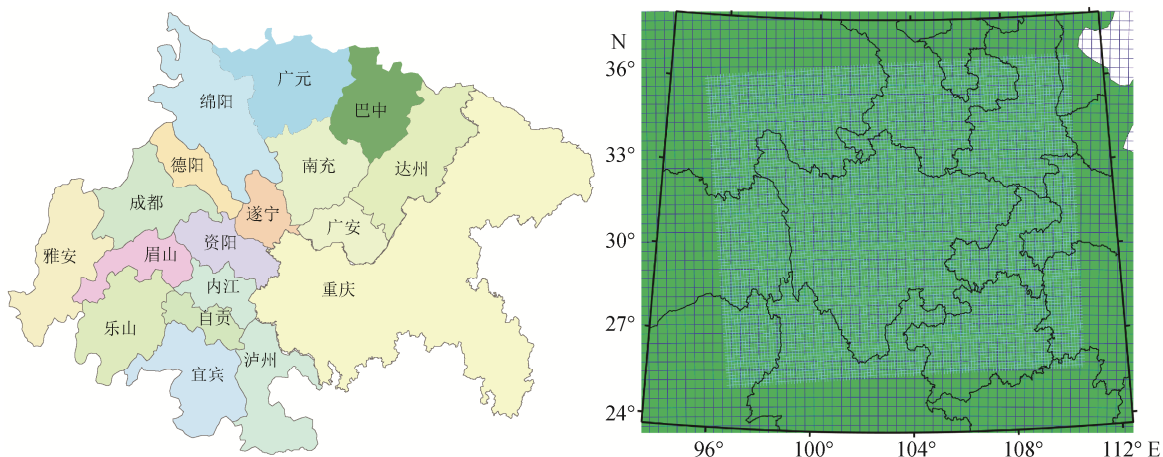
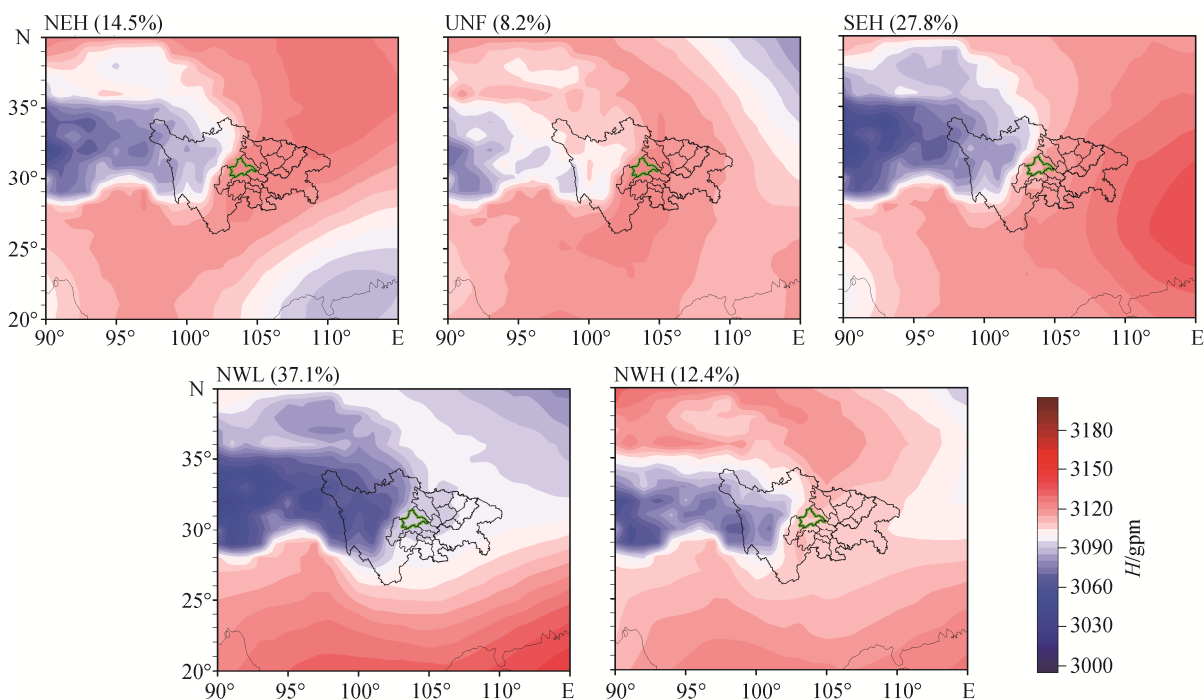


图 1 四川盆地内部 18 个城市(左)和 CMAQ 模式的第二重模拟区域(右)
 Fig. 1 Distribution of 18 cities in the SCB (left) and the second simulation area of the CMAQ model (right)



绿线为成都市行政边界, 下同

图 2 各环流型下四川盆地 700 hPa 位势高度分布

Fig. 2 Distribution of 700 hPa geopotential height in the SCB under different circulation patterns

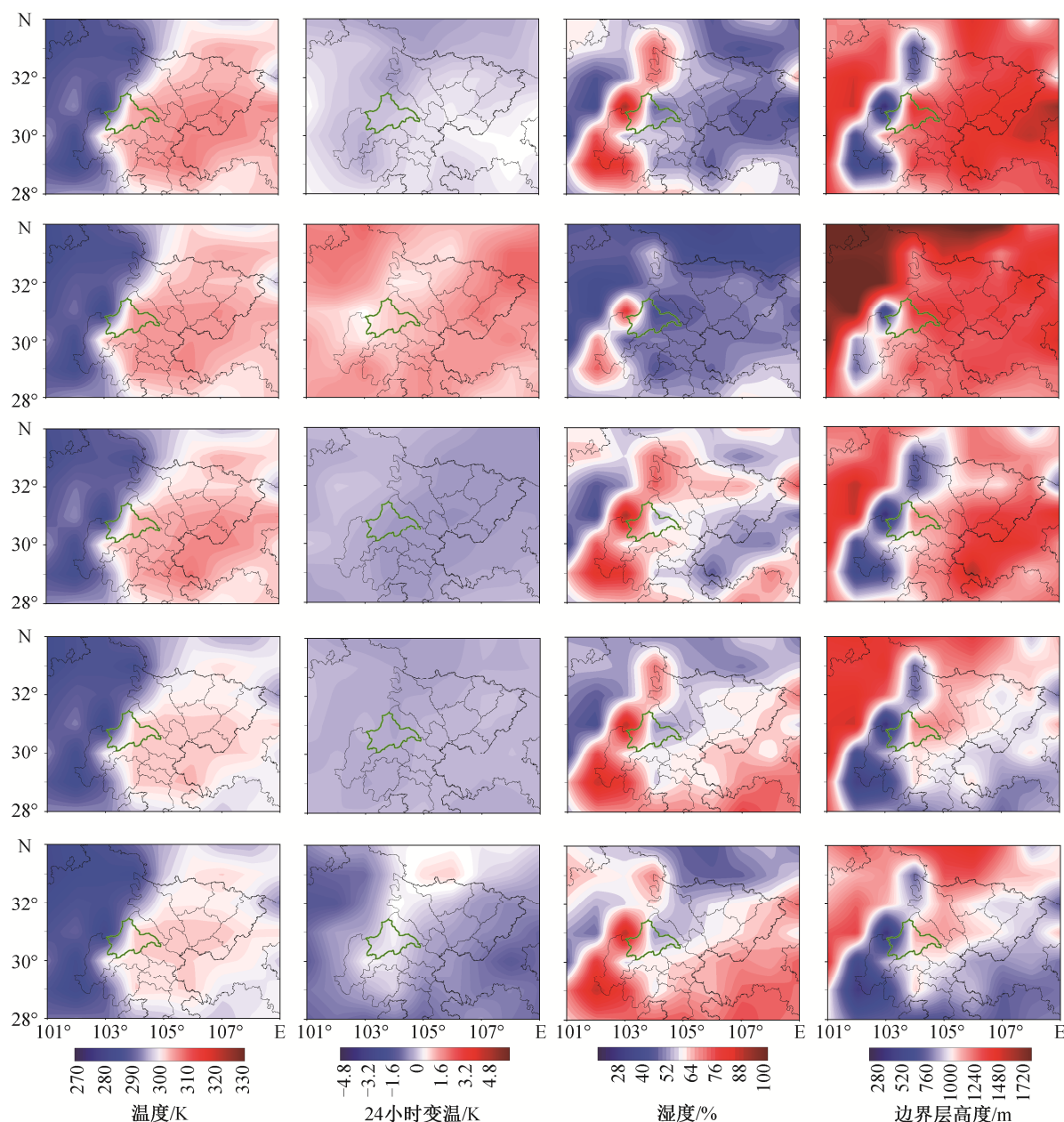
O_3 是由前体物 NO_x 和 VOCs 发生复杂的光化学反应而生成的二次污染物, 转化过程受气象条件影响显著, 通常气温越高, 越有利于 O_3 生成^[18]。水汽影响光化学反应过程, 风速和风向主要影响扩散, 因此 O_3 污染一般发生在太阳辐射强、气温高、湿度低、风速小的气象条件下^[22]。下面利用 NCEP-FNL 再分析资料, 着重分析不同环流型下与 O_3 生成密切相关的气象要素特征。

图 3 展示四川盆地在各环流型下近地面温度及其 24 小时变温、湿度和边界层高度的空间分布情况。在 NEH 型下, 成都市呈现高温(平均 304.5 K)、弱增温(+0.2°C)、低湿(46.1%)、边界层高(1150 m)的气象特征; 在 UNF 型下, 成都市具有高温(304.8 K)、增温(+1.3°C)、低湿(45.4%)、边界层高(1196 m)的特征; 在 SEH 型下, 气象特征为温度较高(302.5 K)、减温(-0.6°C)、高湿(58.4%)、边界

层较高(1036 m); 在NWL和NWH型下, 则表现为低温(平均气温分别为298.7 K和298.4 K)、弱减温(-0.2°C和-0.1°C)、高湿(56.2%和56.6%)、边界层低(分别为863和795 m)的气象特征。云量影响辐射强度, 进而影响O₃的生成。成都市各环流型作用下的云水混合比如图4所示, 成都市在NEH和UNF型下的云水含量低于其他3种类型, 而NWH和NWL型下的云水含量是5类中最高的。

如图5所示, 成都市各环流型下14时的近地面风速都比较小, 均值在2.5~2.7 m/s之间; 不同环流型下的近地面主导风向存在一定的差异, NEH型下主导风向为东南风和南风, UNF下南风主导, SEH下主要为偏东风, NWL和NWH型下均以偏东风和偏南风为主。

综合上述气象要素特征, 成都市乃至四川盆地在NEH和UNF环流型下具有更利于O₃生成的气象



从上到下分别为 NEH, UNF, SHE, NWL 和 NWH

图3 各环流型下四川盆地14时近地面温度、24小时变温、相对湿度和边界层高度

Fig. 3 Temperature, 24-hour temperature change, relative humidity near the surface and boundary layer height under each circulation pattern in the SCB at 14:00

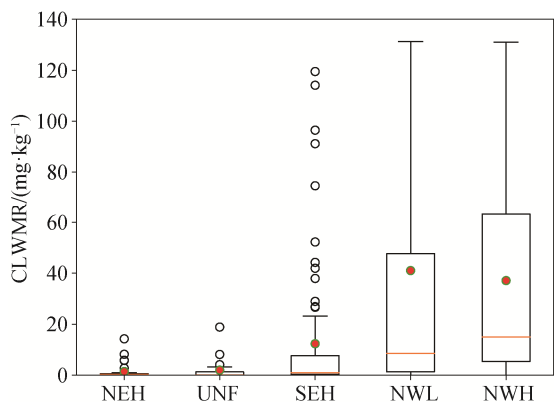


图 4 各环流型下成都市 14 时云水混合比
Fig. 4 Cloud water mixing ratio under each circulation pattern in Chengdu at 14:00

条件。

2.2 各环流型 O₃ 污染特征

根据 2015—2019 年夏季国控站点的观测数据, 成都市在 NEH 和 UNF 型下的 O₃ 浓度水平较高 (MDA8 O₃ 浓度分别为 163 和 168 μg/m³), 而 SEH, NWL 和 NWH 这 3 类环流条件下的 O₃ 浓度水平相差不大 (MDA8 O₃ 浓度分别为 132, 134 和 126 μg/m³)。如图 6 所示, 在 NEH 和 UNF 型影响下, 成都市出现 O₃ 超标日 (即 MDA8 O₃ 达到或超过 160

μg/m³) 的比例较高, 分别达到 49.3% 和 52.6%; 在 SEH, NWL 和 NWH 型下, 成都市的 O₃ 超标日比例分别为 28.9%, 27.1% 和 22.8%。在 NEH 和 UNF 环流型下, 成都市较高的 O₃ 浓度水平和超标日比例与其利于 O₃ 生成的气象条件吻合, 因此, 这两类环流型是成都市 O₃ 污染发生的主要环流型, 其余 3 类环流型则是次要的 O₃ 污染环流型。

根据成都市研究时段内各月份的 MDA8 O₃ 观测数据, 2017 年 6 月是这期间成都市 O₃ 水平最低的月份 (O₃ 污染天数仅为 2 天), 选为典型的清洁月份; 2015 年 7 月、2016 年 8 月、2017 年 7 月、2018 年 8 月和 2019 年 8 月分别为各年夏季 MDA8 O₃ 月均水平最高的月份 (O₃ 污染天数分别达到 18 天、16 天、18 天、15 天和 14 天), 作为典型的 O₃ 污染月。对这 6 个典型月份的环流型构成进行统计, 结果如图 7 所示。O₃ 主要污染环流型 (即 NEH 和 UNF) 在 2017 年 6 月仅出现 1 天, 在 5 个典型污染月份的占比则分别为 39% (2015 年 7 月, 12 天)、58% (2016 年 8 月, 18 天)、19% (2017 年 7 月, 6 天)、61% (2018 年 8 月, 19 天)、42% (2019 年 8 月, 13 天)。由此可见, 较高的 NEH 和 UNF 环流型占比一般对应高 O₃ 水平和较多超标天数, 反映出环流型变化对成都市夏季

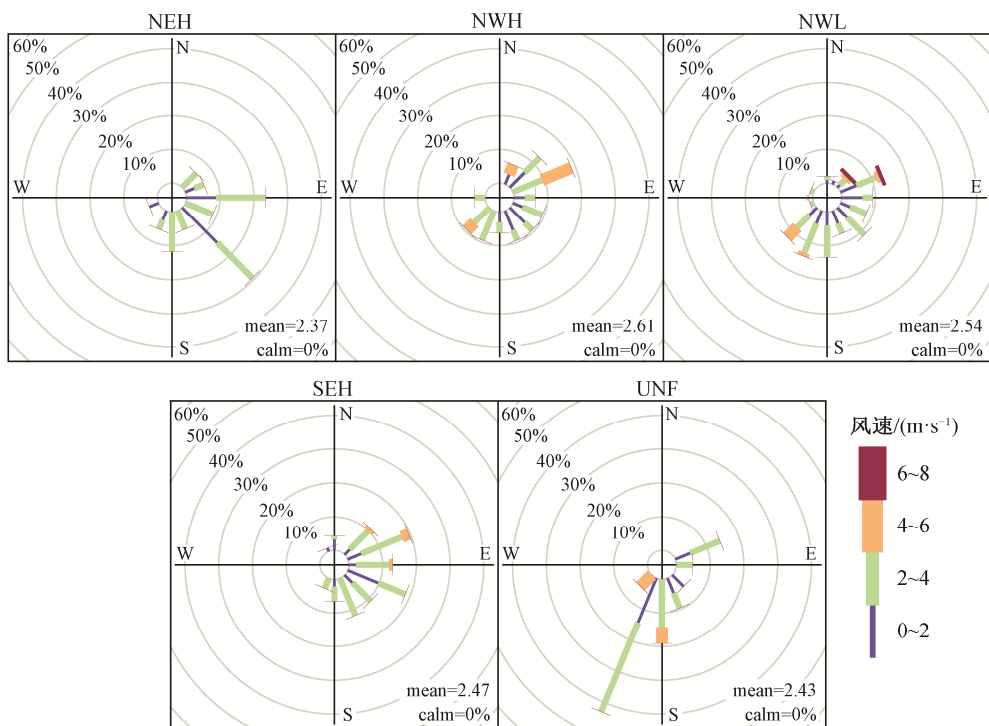


图 5 各环流型下成都市 14 时近地面风玫瑰图
Fig. 5 Windrose plot near the surface under each circulation pattern in Chengdu at 14:00

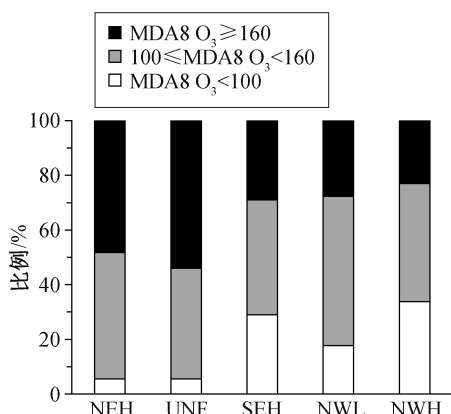


图 6 各环流型下成都市 MDA8 O₃ 不同污染程度出现频率
Fig. 6 Frequency of each pollution degree of MDA8 O₃ in Chengdu under different circulation patterns

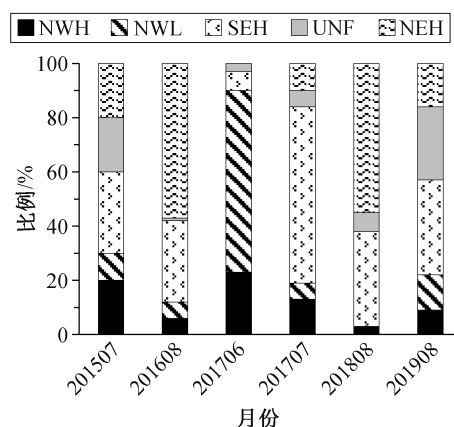


图 7 各典型月份下不同环流型的出现频率
Fig. 7 Frequency of different circulation patterns in each typical month

O₃ 污染的重要影响。

2017年6—8月成都市O₃主要污染环流型共出现17天,包括NEH型6天(其中有2个O₃污染日)、UNF型11天(含8个O₃污染日)。整体而言,2017年夏季主要污染环流型下O₃超标日比例(58.8%)略高于其在2015—2019年夏季的平均水平(50.5%),O₃次要污染环流型下O₃超标频率在2017年夏季(21.3%)略低于2015—2019年夏季的平均水平(27.0%)。2017年夏季成都市的O₃污染水平和环流

型构成具有代表性,本文利用CMAQ模式对这段时间成都市的O₃污染进行模拟分析。

2017年夏季各环流型下近地面14时O₃模拟浓度的空间分布如图8所示。四川盆地的O₃高值一般出现在成都平原、重庆市西南部以及川南地区,其中NEH和UNF型下四川盆地O₃浓度水平显著高于其他3类环流型。NEH型下四川盆地的主导风向是偏东风,O₃峰值集中在成都市;UNF型下四川盆地的O₃污染最为严重,盆地内以偏南风为主导,整

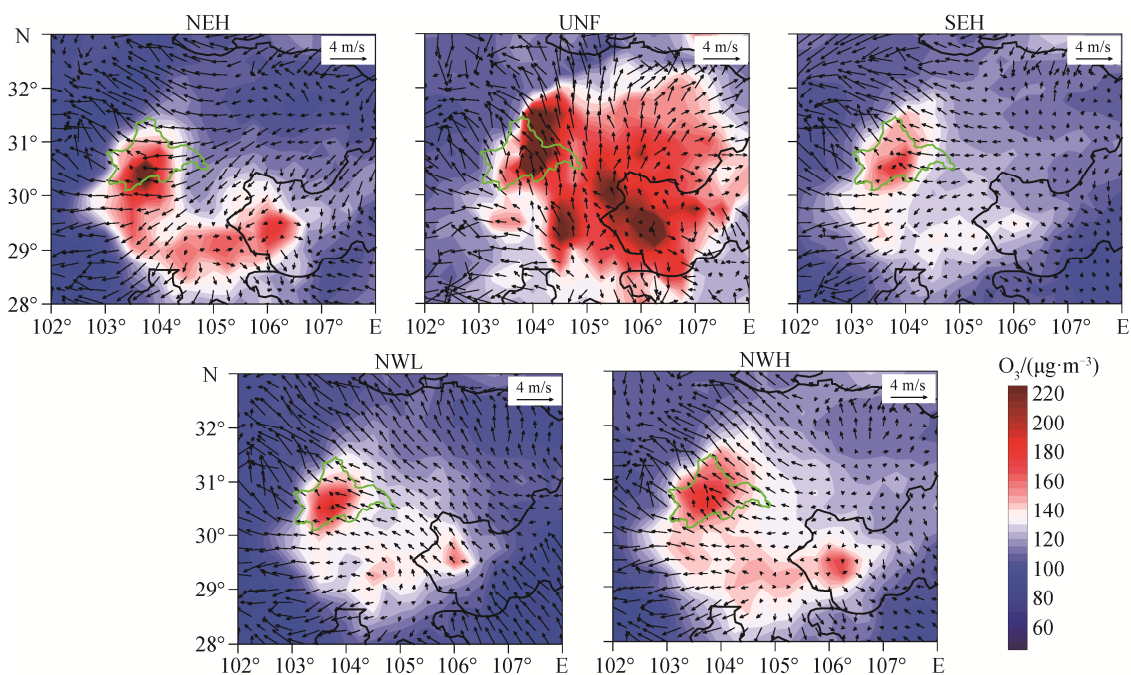


图 8 2017年夏季四川盆地各环流型下11—18时近地面平均O₃浓度以及风场模拟空间分布
Fig. 8 Simulated average O₃ concentration and spatial distribution of wind field in the SCB during the summer of 2017 under different circulation patterns from 11:00 to 18:00

个四川盆地都有高浓度 O₃ 分布。在 5 类环流型下,成都市均为四川盆地 O₃ 浓度高值地区,在 NEH 和 UNF 型下,其高值水平尤为凸显,能够看到不同环流类型对成都市 O₃ 污染影响的差异性。

2.3 各环流型 O₃ 来源解析

使用强力法对 2017 年 6—8 月成都市各环流型下的 O₃ 来源进行解析,量化四川盆地内不同城市排放对成都市 O₃ 污染的影响大小,表 2 列出不同地区对成都市各环流型下 MDA8 O₃ 的平均贡献。就 2017 年夏季的平均情况而言,来自盆地以外地区及大气背景贡献的 O₃ 占成都市 MDA8 O₃ 的 45.0%,四川盆地内的源排放贡献达到 55.0%。成都平原城市群排放主导了来自盆地内部的 O₃ 贡献,其中,成都市本地贡献 31.6%,成都平原其他城市占 13.3%,主要包括德阳(5.4%)、资阳(3.9%)和眉山(2.2%)等成都邻近城市的贡献,而川南、川东北以及重庆市的贡献分别占 2%~4%。这反映出成都市 O₃ 污染主要由本地排放主导、同时受到成都平原污染传输影响的特征,与成都市乃至四川盆地的大气传输扩散条件总体偏差的情况相吻合。

然而,不同环流型下成都市 O₃ 污染的来源构成呈现不同的特点。成都平原的 O₃ 贡献在两类主要污染环流型下(贡献占比>50%)明显高于其他 3 类环流型下的影响(贡献占比<30%);同时,主要污染环流型下来自四川盆地以外的 O₃ 贡献比例显著下降。尽管如此,成都平原内部城市的排放影响在

NEH 与 UNF 之间仍存在着较大的差异性。

在 NEH 型下,成都市、德阳市、资阳市和眉山市排放对成都市 O₃ 的贡献占比分别为 33.5%, 14.9%, 3.0%和 1.0%, NEH 是 5 类环流型中成都市受到成都平原其他城市传输贡献最大的环流类型,其中来自德阳市的传输影响最为突出。根据对模拟期间四川盆地大气扩散能力的计算结果(图 9), NEH 型下四川盆地边界层内大气扩散能力总体上明显高于 UNF 型,高值区域分布在成都市西北部,成都市西北部地区的通风系数 V_H 均在 2000 m²/s 以上,大气扩散条件良好,有利于 O₃ 传输扩散。NEH 下四川盆地内主导风向是偏东风(图 8),成都市的东北部与德阳市相邻,处于其下风向,造成德阳市排放对成都市 O₃ 具有较高的贡献占比。

在 UNF 型下,成都市、德阳市、资阳市和眉山市排放对成都市 O₃ 的贡献占比分别为 46.8%, 3.6%, 2.7%和 3.0%,成都市本地排放源约贡献近一半的 O₃ 浓度,本地排放影响显著高于其他环流型。四川盆地在 UNF 环流型下边界层内的大气扩散能力较差,成都市乃至整个四川盆地的通风系数 V_H 在 1400 m²/s 以下,加上 UNF 型具有高温、低湿和低云水含量等有利于 O₃ 生成的气象条件,促进了 O₃ 的化学生成和本地累积。虽然 UNF 型下整个盆地内部的 O₃ 水平明显高于其他环流型(图 8),但除来自眉山的 O₃ 贡献在南风作用下有所增加外,周边其他城市对成都市的 O₃ 贡献未明显增大,成都市

表 2 2017 年夏季四川盆地不同区域对成都市各环流型下 MDA8 O₃ 的平均贡献(μg/m³)和贡献占比(%)
Table 2 Average MDA8 O₃ contribution (μg/m³) and contribution proportion (%) of different regions in the SCB under different circulation patterns in Chengdu in the summer of 2017

源排放地区	NEH	UNF	SEH	NWL	NWH	平均	
成都平原	成都市	61.0 (33.5)	102 (46.8)	41.5 (27.7)	38.6 (25.9)	36.2 (24.7)	49.0 (31.6)
	德阳市	27.2 (14.9)	7.9 (3.6)	9.0 (6.0)	5.2 (3.5)	9.8 (6.7)	8.3 (5.4)
	资阳市	5.5 (3.0)	5.8 (2.7)	6.2 (4.1)	6.1 (4.1)	3.1 (2.1)	6.0 (3.9)
	眉山市	1.9 (1.0)	6.6 (3.0)	2.3 (1.5)	4.4 (3.0)	1.9 (1.3)	3.4 (2.2)
	遂宁市	0.8 (0.4)	0.8 (0.4)	1.5 (1.0)	0.9 (0.6)	1.5 (1.0)	1.2 (0.8)
	乐山市	0.6 (0.3)	2.5 (1.1)	0.7 (0.5)	1.1 (0.7)	0.6 (0.4)	1.1 (0.8)
	雅安市	0.2 (0.1)	1.4 (0.6)	0.2 (0.1)	0.3 (0.2)	0.2 (0.1)	0.4 (0.3)
	绵阳市	0.1 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
川南地区	3.8 (2.1)	7.6 (3.5)	7.0 (4.7)	4.7 (3.2)	3.1 (2.1)	5.9 (3.8)	
川东北地区	5.1 (2.8)	0.9 (0.4)	3.6 (2.4)	3.6 (2.4)	5.9 (4.0)	3.7 (2.4)	
重庆市	4.1 (2.2)	3.3 (1.5)	8.5 (5.7)	6.3 (4.2)	4.2 (2.9)	6.2 (4.0)	
其他地区	72.1 (39.5)	79 (36.3)	69.3 (46.3)	77.8 (52.2)	79.9 (54.6)	69.7 (45.0)	

说明: 括号内为贡献占比。

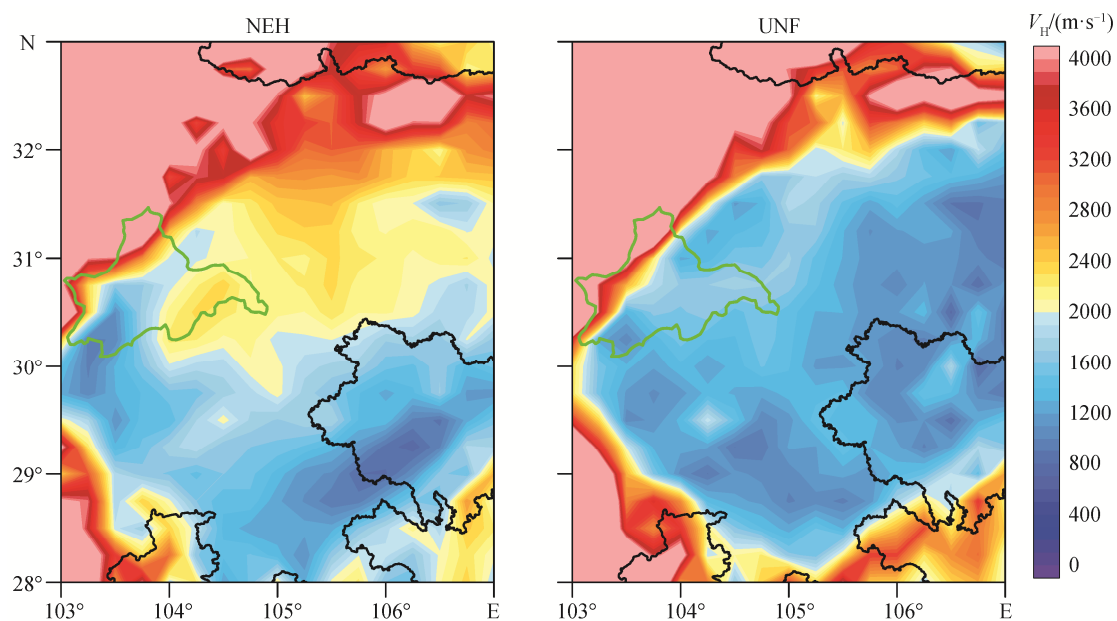


图9 2017年夏季NEH和UNF型下四川盆地大气扩散能力分布

Fig. 9 Distribution of atmospheric diffusion capacity in the SCB under NEH and UNF in the summer of 2017

O₃污染呈现很强的局地性污染特征。

此外,在3类次要污染环流型下,虽然成都平原地区对成都市的O₃贡献显著,但由于四川盆地传输条件的变化,使得盆地内部不同地区的传输影响存在差异。在SEH型下,川南地区对成都市的O₃贡献占比(4.7%)高于其他环流型;来自重庆市的贡献占比(4.2%)在NWL型下最大;在NWH型条件下,川东北地区对成都市的O₃贡献,不论是绝对浓度(5.9 μg/m³)还是贡献占比(4.0%),均高于其他环流型下的影响,说明NWH环流型有利于川东北地区的污染物向成都市传输。

3 结论

将四川盆地2015—2019年6—8月期间的大气环流归纳为5类,包括东北高压型NEH、高压底部型UNF、东南高压型SHE、西北低压型NWL和西北高压型NWH。5类环流型中,NEH和UNF下四川盆地气温高,湿度与云量相对较低。对比过去24小时的变温,UNF型下四川盆地增温显著,NEH型下变化不明显,另外3类环流型下则出现不同程度的降温。NEH和UNF型下的气象条件更有利于四川盆地O₃的光化学生成。

研究时段内,NEH和UNF下成都市O₃浓度水平和O₃超标日比例明显高于另外3类环流型,是夏

季发生O₃污染的主要环流型。成都市O₃污染较重的月份往往具有较高的NEH和UNF环流型占比,反映出大气环流条件与O₃污染的紧密关联。四川盆地的O₃高值一般分布在成都平原、重庆市西南部以及川南地区,在UNF下四川盆地边界层内大气扩散能力差,夏季O₃污染最为严重。

成都市夏季O₃污染主要来自四川盆地内的污染源排放(占55.0%),以成都本地贡献为主(31.6%),其他重要贡献城市包括德阳(5.4%)、重庆(4.0%)、资阳(3.9%)和眉山(2.2%)。

虽然各环流型下成都市O₃均以本地贡献为主,但不同环流型下的O₃来源具有不同特点。NEH下成都平原内部具有较强的污染传输影响,德阳市O₃贡献显著增加(占14.9%);UNF下成都市O₃污染呈现出最显著的局地性污染特征,本地排放的O₃贡献接近一半(46.8%);SHE,NWL和NWH条件下来自川南地区、重庆市和川东北地区的O₃贡献分别高于其他环流型下的影响。

参考文献

- [1] Jacobeit J. Classifications in climate research. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, 35(9): 411–421
- [2] 周书华,倪长健,刘培川.成都地区大气边界层逆温特征分析. *气象与环境学报*, 2015, 31(2): 108–111

- [3] 蒋婉婷, 谢汶静, 王碧菡, 等. 2014—2016 年四川盆地重污染大气环流形势特征分析. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 180–188
- [4] Yang Xianyu, Wu Kai, Lu Yaqiong, et al. Origin of regional springtime ozone episodes in the Sichuan Basin, China: role of synoptic forcing and regional transport. *Environmental Pollution*, 2021, 278: 116845
- [5] 曾胜兰, 王雅芳. 成都地区污染天气分型及其污染气象特征研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(S1): 59–67
- [6] 雷雨, 欧奕含, 张小玲, 等. 2019 年 8 月世警会期间成都平原臭氧污染及其气象成因分析. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 747–760
- [7] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–472
- [8] Ning Guicai, Yim S, Wang Shigong, et al. Synergistic effects of synoptic weather patterns and topography on air quality: a case of the Sichuan Basin of China. *Climate Dynamics*, 2019, 53(11): 6729–6744
- [9] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 169–179
- [10] Miao Yucong, Guo Jianping, Liu Shuhua, et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 3097–3110
- [11] Huth R, Beck C, Philipp A, et al. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1146(1): 105–152
- [12] Miao Y, Guo J P, Liu S H, et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 3097–3110
- [13] Byun D, Schere K L. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews*, 2006, 59(2): 51–77
- [14] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research, 2008: 1–96
- [15] Pierce T, Geron C, Pouliot G, et al. Integration of the biogenic emissions inventory system (BEIS3) into the community multiscale air quality modelling system // *Proceedings of the 25th Agricultural and Forest Meteorology Conference*. Norfolk: American Meteorological Society, 2002: 1–3
- [16] Houyoux M R, Vukovich J M. Emissions inventory development and processing for the seasonal model for regional air quality. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D7): 9079–9090
- [17] Song Mengdi, Liu Xingang, Tan Qinwen, et al. Characteristics and formation mechanism of persistent extreme haze pollution events in Chengdu, southwestern China. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 1–12
- [18] Zeng P, Lyu X P, Guo H, et al. Causes of ozone pollution in summer in Wuhan, Central China. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 852–861
- [19] Wang Haichao, Lu Keding, Tan Zhaofeng, et al. Model simulation of NO₃, N₂O₅ and ClNO₂ at a rural site in Beijing during CAREBeijing-2006. *Atmospheric Research*, 2017, 196: 97–107
- [20] Zhang Ying, Liu Zhihong, Lv Xiaotong, et al. Characteristics of the transport of a typical pollution event in the Chengdu area based on remote sensing data and numerical simulations. *Atmosphere*, 2016, 7: 127
- [21] 卢萍, 李跃清. 9 年夏季连续加密探空观测的九龙站边界层特征分析. *高原气象*, 2020, 39(5): 1058–1069
- [22] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1128–1136