

胡春梅,陈道劲,周国兵,等,2020. 基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气污染与天气分型的关系[J]. 气象,46(9):1222-1234. Hu C M, Chen D J, Zhou G B, et al, 2020. Relationship between air pollution events in autumn and winter in Chongqing and the classification of synoptic situation based on self-organizing maps[J]. Meteor Mon, 46(9):1222-1234 (in Chinese).

基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气 污染与天气分型的关系*

胡春梅 陈道劲 周国兵 邹倩

重庆市气象台,重庆 401147

提 要: 为了了解重庆秋冬季节空气污染天气的环流特征,利用 NCEP 再分析资料对污染天气过程地面气压场应用自组织神经网络算法(SOM)进行天气分型,并经过主观对比分析,总结出 3 类典型天气型:均压型、低压型、高压底部型;其中均压型分为 2 小类:两冷锋间的均压场、弱高压区的均压场;高压底部型按冷高压中心位置分为 3 小类:北方高压型、西北高压型、东北高压型。比较分析发现高压底部型大气污染物浓度最高,空气污染最为严重。应用常规观测资料和 L 波段探空资料分析发现:各类污染天气型表现为地面静风频率高,近地层水平风速小;逆温出现概率高,大气层结稳定,大气边界层高度低等特点。从大尺度环流背景、动力、热力气象条件及后向轨迹模拟分析了 3 类典型污染天气过程形成原因,为重庆地区空气污染潜势预报及浓度预报提供参考依据。

关键词: 天气分型,自组织神经网络算法(SOM),大气污染

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.009

Relationship Between Air Pollution Events in Autumn and Winter in Chongqing and the Classification of Synoptic Situation Based on Self-Organizing Maps

HU Chunmei CHEN Daojin ZHOU Guobing ZOU Qian

Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: In order to understand the circulation characteristics of air pollution events in autumn and winter in Chongqing, this paper uses NCEP reanalysis data to classify the surface sea level pressure fields of air pollution events by using the self-organizing map (SOM) algorithm. Then by means of subjective comparative analysis, three types of typical surface pressure fields are summarized: uniform pressure pattern, low pressure pattern and the bottom pattern of high pressure. Among them, the uniform pressure pattern is divided into two types: one is the uniform pressure pattern between two cold fronts and the other is in the weak high pressure. The bottom pattern of high pressure can be divided into three types according to the center position of cold high pressure, including north high pressure type, northwest high pressure type and northeast high pressure type. By comparative analysis, it is found that the concentration of air pollutants on the bottom pattern of high pressure is the highest, thus the air pollution is the most serious. The analysis by using conventional observation data and L-band radiosonde data shows that all kinds of pollution weather patterns are characterized by high static wind frequency on the surface, low horizontal wind speed

* 气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M51)和国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91644226)共同资助

2019 年 4 月 25 日收稿; 2019 年 10 月 12 日收修定稿

第一作者:胡春梅,主要从事灾害性天气预测与研究. E-mail:505287201@qq.com

near the surface, high probability of inversion, stable atmospheric stratification and low height of atmospheric boundary layer. Based on the large-scale synoptic circulation, dynamic and thermal conditions and backward trajectory simulation, the causes for the three types of typical pollution weather processes are investigated, and the results would provide a reference for air pollution potential forecast and concentration prediction in Chongqing.

Key words: synoptic classification, self-organizing map (SOM) algorithm, air pollution

引言

重庆城区位于长江与嘉陵江交汇处,三面环山,为典型的山区河谷地形,气候特征表现为平均风速小、静风频率高、逆温现象突出。这使重庆城区大气污染物难以迅速向外扩散,秋冬季节空气污染较为严重。天气形势对大气污染形成有显著影响,对重庆地区秋冬季典型大气污染过程的天气形势进行分型归类总结,有助于了解重庆地区空气污染的环流特征,为空气污染潜势预报提供参考依据。天气分型方法一般分为主观和客观两类。主观方法主要根据主观经验进行分类,针对我国大气污染天气形势的主观分型研究有:周亚军等(2005)根据天气系统的移动方向和站点位置,定义了6种天气型,并指出广州地区主要污染时段出现在脊内回流型天气形势下。周宁芳等(2008)对2006—2007年我国霾频发期环流形势分析,总结出霾主要发生在中阻塞、南支槽和纬向型3种不同的环流形势下。张国璁等(2010)将影响上海的地面形势分为11种,并指出L型高压和均压场易于形成上海秋冬季节PM₁₀污染。戴竹君等(2016)将江苏地区的重度霾天气分为3种天气形势(均压区型、冷锋前部型和低压倒槽型),并分别讨论每类天气形成霾的原因。王莉莉等(2010)将北京夏末秋初的天气分为使污染物累积的4种天气基本型和2种清洁天气型。王宏等(2008)将福州天气分为10种类型,讨论不同天气型与大气污染物的相关关系。陈朝晖等(2008)以华北地区一次大气污染过程中出现的不同天气型分析污染输送路径。但主观分类方法存在工作量大、较难定量使用等缺点。

近年来,多种客观分类方法应用于天气分型。许建明等(2016)采用T-mode斜交旋转分解方法(PCT)将上海秋冬季污染天气形势客观分型,得到易污染的4种天气环流类型:冷锋、高压后部弱气压场及2类高压前部弱气压场。杨旭等(2017)同样利

用PCT方法对京津冀地区冬半年的污染天气进行分型研究,总结出9种天气类型,包括高压前部和高压南部等不易污染天气类型,以及高压场、高压后部、鞍型场和冷锋前部等污染天气类型。陈龙等(2016)利用Lamb-Jenkinson客观环流分型法,将影响武汉地区空气污染的地面形势分为6种类型。而天气分型客观方法除了PCT方法、Lamb-Jenkinson客观环流分型法和K均值聚类法以外,自组织映射神经网络算法(self-organizing map, SOM)因其非线性、有效性、稳健型等优点,在天气分型中应用越来越广泛。陈豫英等(2008)应用SOM方法建立风预报模型;王彦磊等(2008)采用SOM建立副热带高压指数预测模型。代刊等(2013)利用SOM算法对华北区域夏季天气环流进行分型研究,总结出多种典型地面环流形势特征。目前该方法主要用于风场、副热带高压及大气环流等方面分析,但用于大气污染过程的天气类型分析较少。

诸多学者开展了关于重庆大气污染特点及污染气象成因方面的研究工作。刘德等(2004;2005)分析重庆大雾的形成原因并建立了重庆雾的天气预报模型。韩余等(2013)分析重庆大雾的气候特征并总结形成辐射雾和雨雾的不同天气形势。江文华等(2013)对影响重庆空气质量的重度霾天气过程进行诊断分析,讨论重度霾形成原因。胡春梅等(2016)通过两次连续污染天气过程对比总结出大气边界层的不同动力热力特点。王中和林娜(2013)分析重庆大气层结特征与空气质量之间的关系。胡春梅等(2009)通过对重庆空气污染扩散气象条件指标的研究,建立了大气污染扩散气象条件等级预报模型。以上研究工作多集中于重庆雾-霾天气过程的诊断分析和大气污染气象条件预报方法方面,但对重庆空气污染天气环流形势分型方面的研究(王雪梅和韩志伟,2000)相对较少。本文通过对重庆城区PM₁₀浓度的统计分析,确定11、12、1、2和3月为空气污染主要时间段,挑选出此5个月中达到轻度污染(日均空气污染指数超过100)的样本。应用

SOM 客观分型方法对地面气压场进行天气分型,并经过主观合成分析得到 3 大类(共 6 小类)主要天气型,进一步归纳总结各类污染天气型的出现频次、污染情况及气象要素特征。从大尺度环流背景、动力、热力气象条件及后向轨迹模拟分析等方面,讨论重庆几种典型空气污染天气过程形成原因,总结典型污染天气过程特点,以期对重庆地区空气污染潜势预报及浓度预报提供参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料

在 2013 年以前,重庆城区主要对 PM₁₀、SO₂、NO₂ 3 种污染物进行观测,而首要污染物以 PM₁₀ 为主。所以本文应用重庆市环境监测中心日均浓度资料分析 2008—2012 年 PM₁₀ 月变化规律,根据其变化规律,将 2008—2012 年 1—3 月、11—12 月日均空气污染指数(air pollution index, API)超过 100 的样本,定义为秋冬季空气污染天气;并利用相应时段的 NCEP/NCAR 再分析资料日均海平面气压场(空间分辨率:2.5°×2.5°)进行天气分型。在典型空气污染天气过程分析中,应用重庆城区沙坪坝站地面常规观测资料(风、温、压、湿、雨量、能见度等)、L 波段雷达探空资料和对应的 NCEP/NCAR 再分析资料(空间分辨率:1.0°×1.0°)。文中计算大气边界层高度和逆温层时均利用重庆城区沙坪坝高空观测站 L 波段雷达探空资料。

1.2 方法

1.2.1 SOM 方法简介

对海平面气压场分型时应用 SOM 算法。该算法最早由芬兰 Helsinki 大学的 Kohonen(1982)提出。SOM 方法能根据其学习规则对输入的模式自动进行分类,即在无监督的情况下,对输入模式进行自组织学习,通过反复调整连接输入和输出的权重系数,最终使得这些系数反映出输入样本之间的相互距离关系,并在竞争层中将分类结果表示出来。

文中所应用的 SOM 神经网络算法,将学习率初始值设为 0.4。具体地,假定输入层由 N 个神经元构成,竞争层有 M 个神经元。网络的连接权值为 ω_{ij} ($i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M$) 且满足约束条件

$\sum_{i=1}^N \omega_{ij} = 1$ 。在竞争层中,神经元之间相互竞争,最终只有一个神经元获胜,以适应当前的输入样本。竞争胜利的神经元就代表着当前输入样本的分类模式。竞争型网络的输入样本为二值向量,各元素取值 0 或者 1。竞争层神经元 j 的状态可按式(1)计算。

$$S_j = \sum_{i=1}^N \omega_{ij} \mathbf{X}_i \quad (1)$$

式中 \mathbf{X}_i 为输入样本向量的第 i 个元素。根据竞争机制,竞争层中具有最大加权值的神经元 k 赢得竞争胜利,输出为

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & S_k > S_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

竞争后的权值按照下式进行修正,对于所有的输入层神经元 i ,有

$$\omega_{ij} = \omega_{ij} + a \left(\frac{x_i}{m} - \omega_{ij} \right) \quad (2)$$

式中: a 为学习率; m 为输入层中输出为 1 的神经元个数,即 $m = \sum_{i=1}^N x_i$ 。根据调整公式中 x_i/m 项表示:当 $x_i=1$ 时,权值增加;当 $x_i=0$ 时,权值减小。也就是说,当 x_i 活跃时,对应的第 i 个权值就增加,否则就减小。由于所有权值的和为 1,所以当第 i 个权值增加或减小时,对应的其他权值就可能减小或增加。此外,式(2)还保证了权值的调整能够满足所有的权值调整量之和为 0。

1.2.2 位温法计算大气边界层高度

本文应用位温法(Liu and Liang, 2010)计算大气边界层高度(PBLH)。对 08 时和 20 时探空资料处理流程如下:

(1)将原始数据插值成垂直分辨率为 5 hPa 的数据。

(2)判断探空廓线当前的层结类型 $\theta_5 - \theta_2$:

当 $\theta_5 - \theta_2 < -\delta_s$ 时,为不稳定层结(CBL);

当 $\theta_5 - \theta_2 > +\delta_s$ 时,为稳定层结(SBL);

当 $-\delta_s \leq \theta_5 - \theta_2 \leq +\delta_s$ 时,为中性层结(NRL)

(3)

式中: θ 为位温,下标代表从地表 $l=1$ 往上的第 k 个 $l=k$ 垂直层; CBL 为对流边界层, SBL 为稳定边界层, NRL 为中性层结。 δ_s 为对流边界层顶逆温层的最小强度或稳定边界层顶的 θ 增量。根据地表特征 δ_s 取相应数值,文中将 CBL 与 NRL 的临界值 δ_s 设

为 0.5 K, NRL 与 SBL 的临界值 δ_c 设为 1.0 K。

(3) CBL 出现时 PBLH 的计算方法。对于 CBL, 浮力是驱动湍流的主要机制, 一般将气块沿干绝热上升直到浮力为中性的高度定义为 PBLH。具体方法: 从最低层 $l=k$ 处向上扫描, 直到满足条件 $\theta_k - \theta_1 \geq \delta_u$, δ_u 是不稳定层内上下层 θ 增量可接受的最大值。这一初始猜测层 k 随后进行订正, 继续向上扫描去搜索首次发现

$$\dot{\theta}_k \equiv \frac{\partial \theta_k}{\partial z} \geq \dot{\theta}_r \quad (4)$$

式中: $\dot{\theta}_k$ 为单位高度 z 上的 θ_k 的垂直梯度, $\dot{\theta}_r$ 为顶盖逆温层的最小强度, 此处的 $\dot{\theta}_r$ 可理解为上升气块的极限阈值。所以定义了 CBL 夹卷层的范围, NRL 采用同样的程序确定 PBLH。其中, 参数 δ_u 、 $\dot{\theta}_r$ 分别设定为 0.5 K 和 $4.0 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

(4) SBL 出现时 PBLH 的计算方法。相对于不稳定 CBL 的 PBLH, SBL 的 PBLH 很难准确地定量确定; SBL 内的湍流来源于两种机制: 浮力强迫和切变驱动。对于由浮力强迫的 SBL, 首先从 $\dot{\theta}_k$ 达到最小值的最底层向上扫描, 然后确定 PBLH 的位置。如果满足以下条件:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{k-1} < -\dot{\delta} & \text{或} \\ \dot{\theta}_{k+1} < \dot{\theta}_r, \quad \dot{\theta}_{k+2} < \dot{\theta}_r \end{cases} \quad (5)$$

第一个条件保证 $\dot{\theta}_k$ 是局地曲率参数 $\dot{\delta} = 40 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 的峰值。第二个条件则确定该层之上两层不是逆温层。PBLH 定义为从稳定层结向中性或不稳定层结的过渡。对于 SBL 产生主要由切变主导的情况, 低空急流定义为风速最大处, 通过以下方法识别: 该层比上下两层的风速至少大 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 且该层向下风速线性递减; 同时限定低空急流高度不超过 1500 m, 且风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后, PBLH 定义为热力 (θ 稳定度) 和动力 (风切变) 廓线两者诊断出

的高度中较低的一个。

2 天气分型

2.1 PM₁₀ 浓度的月变化特征

从 2008—2012 年的 PM₁₀ 质量浓度月变化 (图 1) 分析, 平均浓度最高出现在 12 月, 达 $145.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 1 月、2 月为次高, 为 $126 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右; 1、2、3、11 和 12 月浓度较高, 超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其余月份浓度较低, 最低值出现在 7 月, 为 $68.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。春夏季 PM₁₀ 浓度较低, 对应空气质量优良天数多; 秋冬季 PM₁₀ 浓度高, 空气质量较差。经统计, 1、2、3、11 和 12 月 5 个月对 PM₁₀ 年总浓度的贡献达到 52.7%, 对总污染日数的贡献达到 92.8%, 且多以轻度污染为主。所以本文对 2008—2012 年 PM₁₀ 浓度高的 5 个月出现空气污染时的气压场进行分型研究, 总结重庆城区空气污染的主要天气形势及环流特征, 并分析空气污染形成的气象因素。

2.2 地面气压场分型

挑选出 2008—2012 年 1—3 月和 11—12 月达到轻度污染 (API > 100) 的样本共 231 d, 利用 SOM 方法对 NCEP 再分析日均海平面气压场进行分类, 共得到 31 类天气形势, 但有的天气类型样本数较少, 并不典型, 通过主观比较分析, 总结出 3 大类地面气压场形势: 均压型 (UP)、低压型 (LP)、高压底部型 (HPB)。其中均压型分为 2 小类: 一类为两冷锋间的均压场 (TCU), 另一类为弱高压区内的均压场 (WHU); 高压底部型按冷高压的位置分为 3 小类: 北方高压型 (NHB)、西北高压型 (NWHB) 和东北高压型 (NEHB) (图 2)。

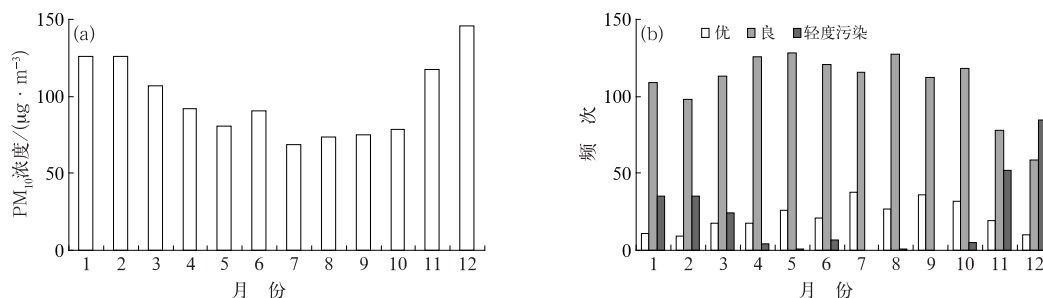


图 1 2008—2012 年重庆 PM₁₀ 月平均质量浓度 (a) 及空气质量等级出现频次 (b)
 Fig. 1 Monthly mean mass concentration of PM₁₀ (a) and the frequency (b) of different levels of air pollution in Chongqing during 2008—2012

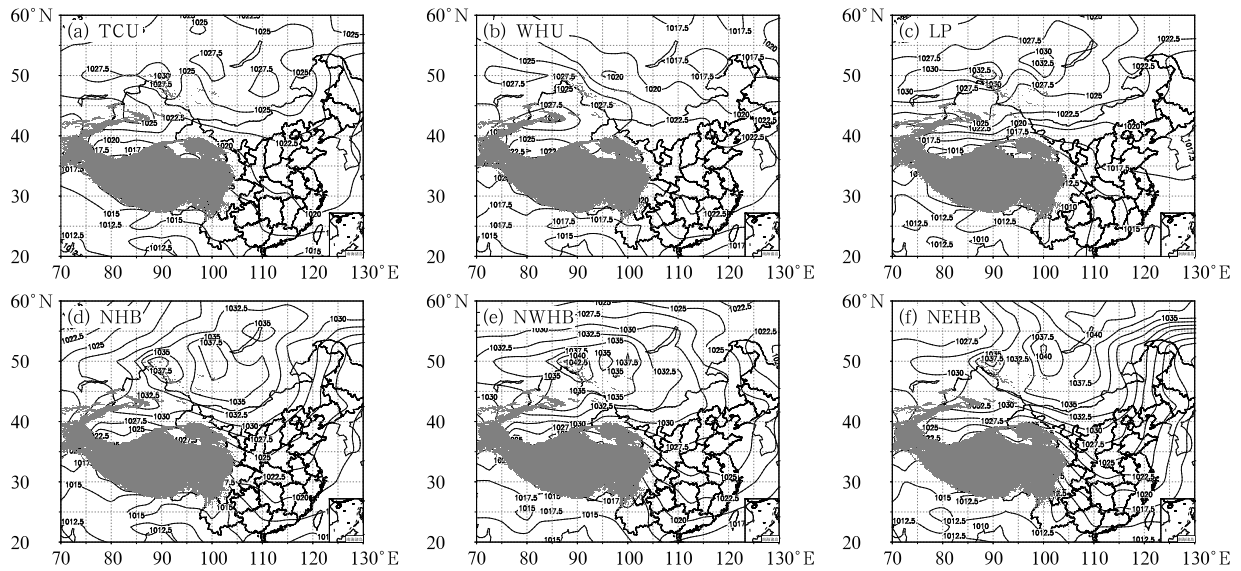


图 2 6 类地面海平面气压场形势(单位:hPa)

Fig. 2 Six types of surface sea level pressure fields (unit: hPa)

图 2 为每类天气形势所有样本合成的海平面气压场如。两冷锋间均压型(TCU)出现 22 d,其主要特征为:新疆北部及蒙古国境内为高压区,高压位置偏北,弱冷空气影响华北、东北地区;而前一次冷空气过程对我国南方地区影响已经基本结束,重庆正处于两次冷锋过程之间的均压场中(图 2a)。弱高压区内的均压型(WHU)出现 41 d,天气形势为:新疆地区有一弱高压中心,冷高压中心强度为 1030 hPa,我国中东部地区在高压区范围内,东北地区 and 贝加尔湖地区为一低压区,重庆地区为弱高压区内的均压场,等压线稀疏(图 2b)。低压型(LP)出现 24 d,主要特征:冷高压主体位于新疆北部和贝加尔湖以西地区,高压中心强度为 1032.5 hPa,冷锋前沿位于南疆到河西走廊,四川盆地南部有一低压中心,重庆地区为低压场(图 2c)。高压底部 I 型(北方高压型,NHB)出现 55 d,其形势特征为:冷高压主体在贝加尔湖附近,中心强度为 1037.5 hPa,冷空气从河套地区扩散南下,即将影响四川盆地,重庆位于高压底部(图 2d);高压底部 II 型(西北高压型,NWHB)出现 72 d,形势特征为:冷高压主体在新疆以北和贝加尔湖以西地区,强度为 1042.5 hPa,冷空气从河西走廊扩散南下,将从西路进入四川盆地,影响重庆地区,重庆处于高压底部(图 2e);高压底部 III 型(东北高压型,NEHB)出现 17 d,天气形势为:蒙古国境内和贝加尔湖地区为大片高压区,冷高压中心在贝加尔湖以东地区,强度为 1040 hPa,冷空气将从

东路华北地区南下影响四川盆地,重庆处于高压底部,等压线相对密集。高压底部型与前两种天气形势明显不同的是重庆地区等压线变得更为密集,冷空气已扩散南下,即将影响重庆(图 2f)。

2.3 不同污染天气型出现频率

不同地面天气型出现频率如图 3 所示,当秋冬季重庆出现空气污染时,地面形势多为高压底部型,所占百分比为 62.4%,其中 NHB 型为 23.8%,NWHB 型为 31.2%,NEHB 型为 7.4%;其次是均压型(27.2%),其中 TCU 型为 9.5%,WHU 型为 17.7%。出现频率最低的是 LP 天气型(10.4%)。高压底部型多出现在 12 月,除 12 月外,NWHB 型在 11 月和 2 月出现概率也较高,NEHB 型频率次多

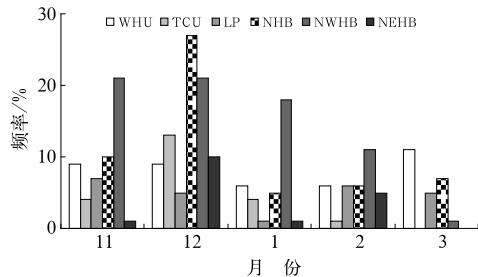


图 3 2008—2012 年不同月份不同地面天气型出现的频率

Fig. 3 The frequency of six types of surface pressure fields in November, December, January, February and March during 2008—2012

出现在2月;LP型多出现在11月;WHU型出现频率最高的是3月,其次是12月和11月;TCU型多出现在12月。可见,重庆地区12月的污染天气形势多为高压底部型和TCU型,11月多为NWHB、WHU和NHB型,1月多为NWHB型,3月多为WHU型。

2.4 不同污染天气型气象要素特征及PM₁₀浓度比较

不同污染天气形势下,气象要素特征也不尽相同。普遍认为,近地面水平风是影响大气污染物水平扩散的重要气象因子(张人禾等,2014),水平风速决定本地水平扩散条件,风向则决定上游输送的重要影响因子。另外,温度层结、相对湿度、降水对大气污染物的浓度也有重要影响。本小节比较不同污染天气形势及其他清洁样本对应平均风速、温度、湿度、雨量、气压及大气边界层高度(蔡子颖等,2018)和1000 m以下逆温出现概率等气象要素(表1)。此外,也列出PM₁₀平均质量浓度及API大小。

6类污染天气形势下的平均水平风速都较小,基本在1.2 m·s⁻¹以下,最小的两类是TCU和NWHB型,为1.10 m·s⁻¹;而秋冬季的清洁天气形势下平均风速为1.32 m·s⁻¹,大气水平扩散能力比污染天气形势下强;另外,污染天气形势下静风出现概率均达到5%以上,特别WHU、NWHB和TCU型污染天气型静风概率达到8%以上,而清洁天气形势下静风概率仅为4.2%。平均气温为10~14℃;相对湿度约为75%~84%,总体上相对湿度污染天气形势高于清洁天气,但LP型相对湿度低于清洁天气;平均气压约在982~992 hPa,LP型气压最低约为981.8 hPa。一定量的降水对大气污染物有湿沉降作用,据统计,重庆城区达到5 mm以上的降水量对污染物沉降作用较明显。通过对日平均

降水量的比较,污染天气型的日均降水量几乎都在0.5 mm以下,清洁天气为1.36 mm。从降水日数所占百分比看,污染天气形势下降水日数较少,在30%以下,特别LP型仅为16.7%,NHB和NEHB型降水日数占29%左右,但没有达到5 mm的有效降水;而清洁样本降水日数百分比超过了45%,湿沉降作用比污染天气显著。

利用L波段探空资料分析大气温度层结情况。TCU、WHU、LP和NHB型污染天气形势在1000 m以下出现逆温的概率超过90%,NWHB型超过80%,但NEHB型为71%,比清洁天气形势下逆温出现概率略低,因为NEHB天气型冷高压从华北地区南下影响重庆,冷空气从东路渗透,逆温层有所破坏。利用位温法计算出大气边界层高度,由表1所示,受逆温影响,重庆城区秋冬季大气边界层高度(PBLH)都较低,污染天气PBLH型都低于440 m,NEHB型仅为399 m;清洁天气PBLH型明显高于污染天气,为536 m。

通过对PM₁₀平均质量浓度比较,NEHB型平均浓度最高,达211.7 μg·m⁻³,对应平均API也最大131;WHU、NHB、NWHB及LP型平均浓度都超过190 μg·m⁻³,如表1所示,TCU型平均浓度为183.4 μg·m⁻³,清洁天气形势下,PM₁₀平均浓度远远低于污染天气,为93.4 μg·m⁻³。NEHB型污染物浓度最高的原因与输送型污染有关,将在后面典型污染天气过程分析中具体说明。

3 典型污染天气过程气象成因分析

挑选出3次较典型空气污染天气过程,从大尺度形势、动力及热力等方面分析形成污染的气象原因(雷正翠等,2019)。如表2所示,TCU型选取2010年1月1—3日,LP型选取2011年11月26—28日,

表1 不同天气型气象要素与PM₁₀平均质量浓度

Table 1 Meteorological elements and average PM₁₀ mass concentrations of six types of surface weather fields

天气型	TCU	WHU	LP	NHB	NWHB	NEHB	清洁天气
水平风速/(m·s ⁻¹)	1.10	1.13	1.16	1.21	1.10	1.19	1.32
静风概率/%	8.1	9.8	6.8	5.2	8.4	7.1	4.2
平均气温/℃	10.2	13.0	14.3	11.5	11.2	10.4	10.7
相对湿度/%	83.7	79.6	75.4	80.5	81.3	83.0	77.9
平均气压/hPa	991.8	987.4	981.8	988.7	991.1	987.4	990.5
日平均降水量/mm	0.50	0.19	0.30	0.49	0.64	0.45	1.36
降水日数所占百分比/%	22.7	19.5	16.7	29.1	25.0	29.4	45.6
逆温出现概率/%	91	95	92	91	81	71	73
大气边界层高度/m	422	434	417	437	438	399	536
平均API	125	117	122	122	121	131	72
PM ₁₀ 平均质量浓度/(μg·m ⁻³)	183.4	198.9	192.8	193.8	192.5	211.7	93.4

表 2 典型空气污染天气过程气象要素

Table 2 Meteorological elements from the typical air pollution events

天气型	TCU (2010年1月 1—3日)	LP (2011年11月 26—28日)	NEHB (2012年12月 7—9日)
平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	7.3	18.4	10.6
最小气温日较差/ $^{\circ}\text{C}$	4.2	3.1	0.6
最大气温日较差/ $^{\circ}\text{C}$	10.7	5.0	3.2
平均相对湿度/%	88	79	84
平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.1	1.0	1.1
最大风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.3	2.1	1.9
静风概率/%	20.7	9.7	2.8
平均能见度/km	1.5	2.7	2.1
累计雨量/mm	无	无	0.6
大气边界层高度/m	460	352	307

NEHB型选取2012年12月7—9日。对应3次天气过程的 PM_{10} 平均质量浓度分别为218.7、241.3、236.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

从3次天气过程的气象要素(表2)可以看出,由于天气过程出现时间的不同,平均气温相差较大,TCU型出现在1月,日平均气温为7.3 $^{\circ}\text{C}$,LP型出现在11月,平均气温为18.4 $^{\circ}\text{C}$,NEHB型出现在12月,气温为10.6 $^{\circ}\text{C}$;LP型和NEHB型气温日较差都在5 $^{\circ}\text{C}$ 以内,天空状况以阴天为主,其中,NEHB型在9日出现弱降水,气温日较差仅为0.6 $^{\circ}\text{C}$,而TCU型出现辐射降温、早上有雾,所以最大气温日较差达到10 $^{\circ}\text{C}$ 以上;另外,3次过程都没有明显冷空气影响。平均能见度(潘玮等,2017)TCU型最低为1.5 km,NEHB型为2.1 km,LP型为2.7 km。地面平均相对湿度在80%~90%。TCU和LP型没有出现降水,NEHB型出现弱降水。平均大气边界层高度NEHB型最低,大约为307 m,LP和TCU型分别为352和460 m,08时的PBLH型基本在300 m以下。地面风速小,平均风速在1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,最大风速在2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;静风出现概率,TCU型约为20.7%、LP型约为9.7%、NEHB型约为2.8%;风玫瑰图(图4)显示,3次过程的风向都以西北风为主,西北偏西及西北偏北风向出现频率也较高。

3.1 大尺度环流背景

3次天气过程的大尺度环流形势有较明显差异(图5)。TCU型(图5a,5b):重庆地区地面为均压场,等压线稀疏;500 hPa我国西部地区为高压脊控

制,重庆受脊前西北气流影响,700 hPa为偏西气流,相对湿度低于50%,850 hPa风速较小为西偏北气流,相对湿度在60%以下,天空状况以多云为主,早上有辐射雾出现,午后转为霾,影响能见度,使气溶胶颗粒悬浮于近地层,形成空气污染。LP型(图5c,5d):四川盆地为低压区,低压中心在川东南、重庆西部地区;500 hPa巴尔喀什湖附近有低槽,新疆到青藏高原西部为高压脊控制,高原低槽东移到川西地区,重庆受纬向波动气流影响,700 hPa为西南气流,850 hPa偏南气流从华南地区伸展到重庆受地形影响转为东南气流,700、850 hPa相对湿度均在80%以上,天空状况为阴天,气温日较差较小,大气边界层湍流活动弱,不利于大气污染物扩散。NEHB型(图5e,5f):冷高压中心在贝湖东北部,强度为1042.5 hPa,冷空气将从东路南下影响重庆,华北地区等压线密集(图略)。500 hPa我国东北地区为低涡控制,新疆到内蒙古为脊前西北气流,高原地区为短波槽脊,重庆受纬向偏西气流影响,700 hPa为西南气流,850 hPa偏南气流及偏东气流在重庆西部形成弱辐合。700、850 hPa相对湿度为70%~80%,重庆西部相对湿度在80%以上,受弱辐合影响,重庆城区以阴天为主,气温日较差很小,在12月9日出现弱降水,形成雨雾。

3.2 动力条件

在不利于大气污染物扩散的环流背景下,本节将进一步从大气的垂直运动及水平运动分析影响空气质量的动力条件(Wu et al,2017)。利用L波段探空资料(空间分辨率为100 m,时间间隔为12 h,分别为08时和20时)及再分析资料(空间分辨率为1.0 $^{\circ}\times$ 1.0 $^{\circ}$)分析3次天气过程的中低层动力条件(图6)。重庆城区经纬度为29.58 $^{\circ}\text{N}$ 、106.47 $^{\circ}\text{E}$,分析垂直运动时,沿30 $^{\circ}\text{N}$ 做垂直剖面。

TCU型(图6a)在100 m以下近地层风力很小,1月1日08时在200 m以下为静风,1日20时50 m以下为静风;1000 m以下基本为偏东风或东北风,在2日20时和3日20时的200~1000 m出现东北风下沉气流。垂直剖面图上(图6b)在850 hPa以下的低层105.5 $^{\circ}$ ~110 $^{\circ}\text{E}$ 为下沉气流。近地层的小风使大气水平扩散能力变差,而垂直方向的下沉气流将大气污染物压缩在近地层,无法向高层扩散,所以2日、3日的日均 PM_{10} 质量浓度分别达到265、210 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

LP 型(图 6c)从地面到 500 m 基本为偏东风, 11 月 26 日 20 时和 27 日 08 时在 1000 m 以下, 风速都小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大气边界层内水平扩散能力差, 所以 26 日 PM_{10} 日均质量浓度为 $265 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但在 27 日 20 时, 600 m 以下偏东风逐渐增大, 在 700 m 以上逐渐转为偏南风, 且风力增大, 27 日 PM_{10} 日均质量浓度有所下降, 为 $219 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

28 日 08 时, 500 m 以下风力再次减小, 污染物浓度再次增加($241 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。LP 型的垂直剖面图(图 6d)与 TCU 型有较明显的差异, TCU 型在 800 hPa 以下以下沉气流为主, 但 LP 型由于 500 hPa 有波动槽过境, 所以上升运动增强, 在 900 hPa 以下的低层 $105.5^\circ \sim 107^\circ \text{E}$ 有上升气流, 下沉气流出现在 $107^\circ \sim 109^\circ \text{E}$, 在重庆城区的东部。

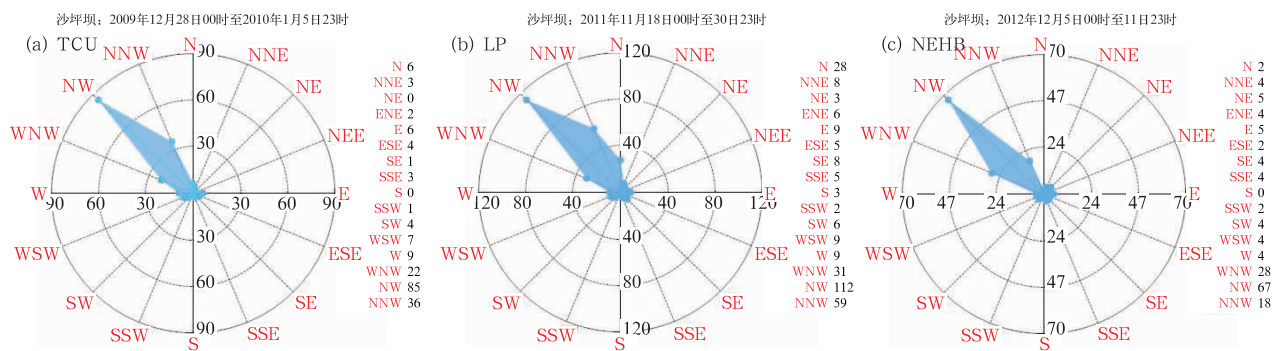


图 4 典型污染天气过程风玫瑰图
(a)TCU 型, (b)LP 型, (c)NEHB 型

Fig. 4 Wind rose diagrams of the typical air pollution events
(a) TCU type, (b) LP type, (c) NEHB type

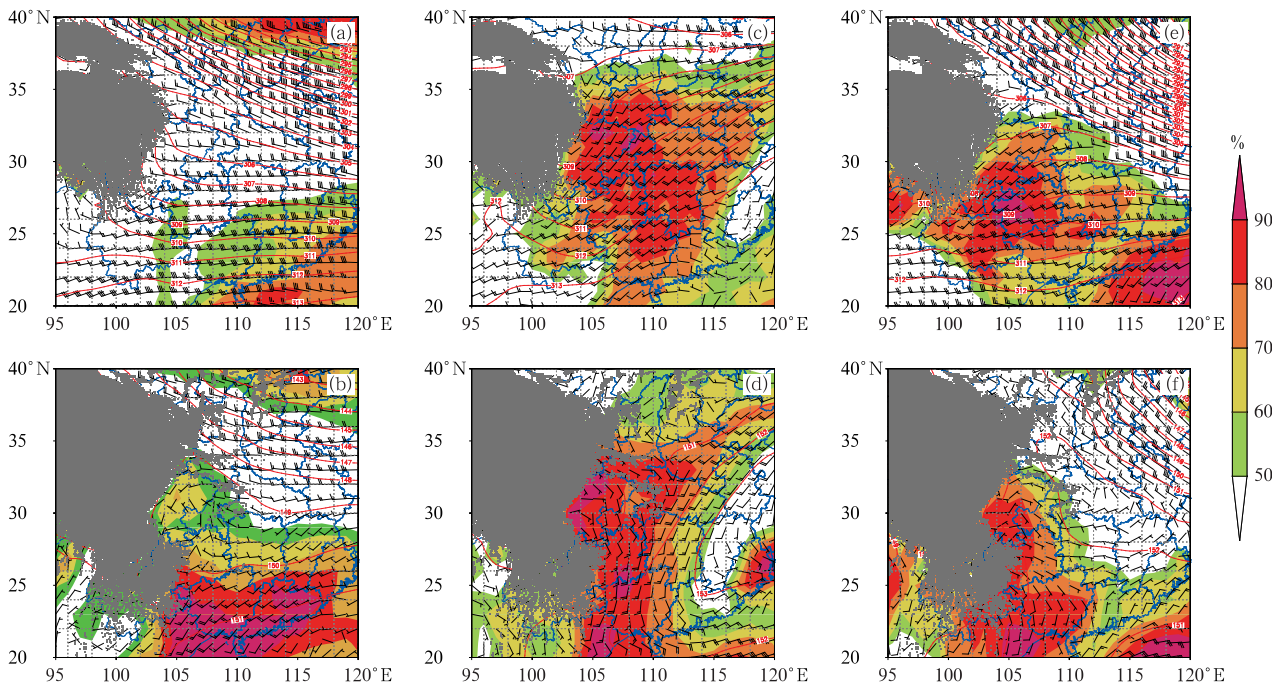


图 5 3 次典型天气过程 700 hPa(a, c, e)和 850 hPa(b, d, f)高度场(红色等高线, 单位: dagpm)、
风场(风羽, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及相对湿度(填色)
(a, b)TCU 型, (c, d)LP 型, (e, f)NEHB 型

Fig. 5 Relative humidity (colored), wind (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and height (red contour, unit: dagpm) fields at 700 hPa (a, c, e) and 850 hPa (b, d, f) during the air pollution process events
(a, b) TCU type, (c, d) LP type, (e, f) NEHB type

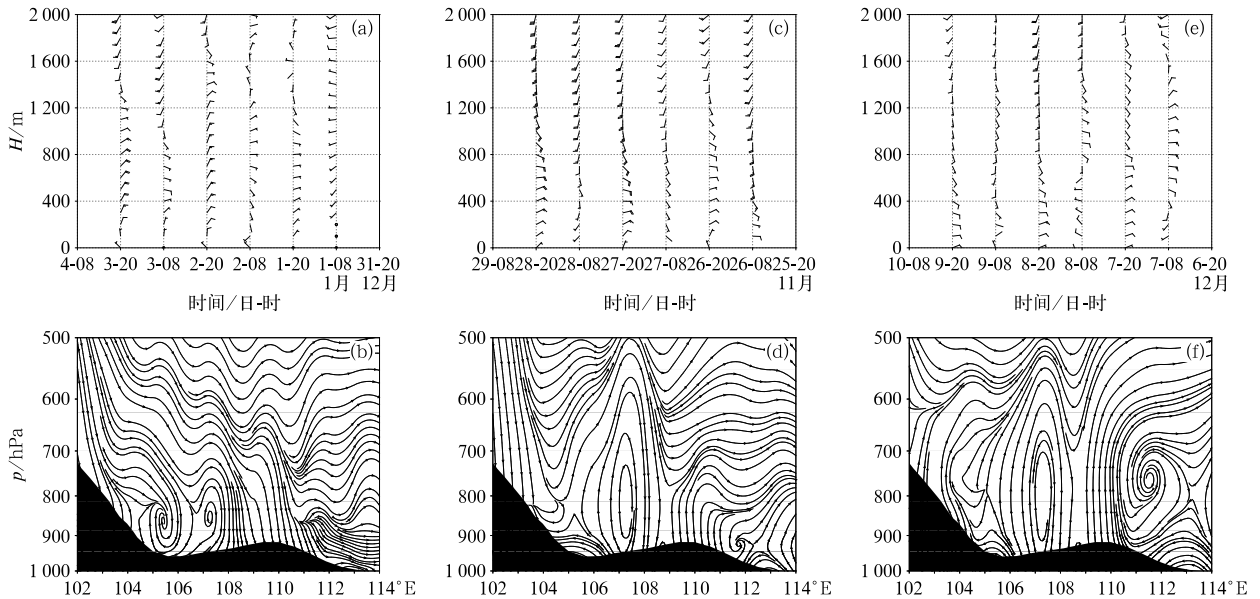


图 6 3 次典型污染天气过程 2000 m 以下风-时间-高度剖面(a,c,e)及 500 hPa 以下沿 30°N 垂直剖面(b,d,f)
(a,b)TCU 型,(c,d)LP 型,(e,f)NEHB 型

Fig. 6 Wind velocity (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) profiles (a, c, e) under 2000 m and vertical profile (b, d, f) along 30°N under 500 hPa during the three typical air pollution events
(a, b) TCU type, (c, d) LP type, (e, f) NEHB type

NEHB 型(图 6e),08 时地面到 500 m 为偏西风,20 时以偏东风为主,600 m 以下风速较小,在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。垂直剖面(图 6f)与 LP 型相似,在 900 hPa 以下的低层 $105.5^\circ \sim 107^\circ \text{E}$ 有弱上升气流, 105.5°E 以西有下沉气流, $107^\circ \sim 109^\circ \text{E}$ 有明显下沉气流。低层的小风环境使大气污染物维持较高浓度,12 月 8 日和 9 日 PM_{10} 质量浓度分别为 272、261 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,达到轻度污染等级。

从水平运动看,近地层的小风环境,不利于大气污染物的水平扩散。从垂直剖面分析,TCU 型在重庆城区附近大气边界层内为下沉运动,LP 型和 NEHB 型在重庆城区以东地区($107^\circ \sim 109^\circ \text{E}$)为明显下沉气流,下沉气流使 PBLH 型降低,限制水汽和大气污染物传输,相对湿度增加,气溶胶吸湿增长,能见度变差,形成霾,使空气污染持续加重(Zhang X Y et al,2018)。所以,近地面层的小风环境及大气边界层内的垂直运动对空气污染潜势预报有一定的指示意义。

3.3 热力条件

大气的温度层结是重要的空气污染气象条件之一,主要影响大气污染物的垂直扩散。由温度层结曲线可知(图 7),3 次天气过程有明显逆温现象;

TCU 和 LP 型 20 时逆温强度强于 08 时,且有较明显的贴地逆温现象,但 NEHB 型逆温层高度更高,贴地逆温不明显。

TCU 型(图 7a):2010 年 1 月 1 日 08 时没有出现逆温,20 时出现贴地逆温,逆温强度为 $8 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$;2 日 08 时和 20 时出现贴地逆温,最强逆温强度为 $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$;3 日 08 时无贴地逆温,但逆温厚度达 200 m,逆温强度为 $6.5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,20 时有贴地逆温,强度为 $18 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,在 1000 m 以下,出现两层逆温层。TCU 型天气对应高层为西北气流,夜间晴空辐射,易形成逆温,大气层结稳定度高,在 2 日和 3 日凌晨出现辐射雾,不利于大气污染物垂直方向扩散。

LP 型(图 7c):08 时和 20 时都出现贴地逆温,且在 1000 m 以下出现两层或三层逆温层,逆温强度比 TCU 型弱,最强逆温强度出现在 2011 年 11 月 27 日 08 时($12 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$),最厚逆温厚度为 150 m,出现在 28 日 20 时。LP 型天气对应高空为西偏南气流,有波动槽过境,天空状况为阴天,大气层结稳定,气温日较差较小,不利于近地层湍流活动,大气垂直扩散能力差,850 hPa 以下相对湿度在 $70\% \sim 80\%$,气溶胶颗粒堆积在逆温层以下,吸湿增长,形成霾。

NEHB 型(图 7e):此类污染天气过程逆温强度最弱,逆温强度最强为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,一般逆温强度为 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,无明显贴地逆温,仅 7 日 08 时出现贴地逆温,在 1000 m 以下多为一层逆温,逆温层厚度一般为 50 m,最厚为 100 m,出现在 7 日 08 时。NEHB 型高层为纬向偏西气流,波动槽脊快速过境,在 7—8 日,天空状况以阴天为主,气温日较差为 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,大气热力层结相对稳定,近地层相对湿度在 80% 左右,出现霾;9 日,受东路弱冷空气回流影响,逆温层破坏,出现弱降水,雨量为 0.6 mm,对大气污染物湿沉降作用不明显,使气溶胶颗粒物悬浮在近地层,能见度降低。另外,冷空气主体没有完全南下影响重庆,近地层风力较小,大气扩散能力差,污染物浓度没有明显下降,仍为轻度污染。

为了进一步了解大气的层结结构,本文计算出位温曲线(图 7b,7d,7f),3 次天气过程在 200 m 以下近地层位温随高度明显增大,大气层结稳定度高、垂直运动弱,不利于大气污染物垂直方向扩散。

综上所述,逆温强度 TCU 型强于 LP 型,LP 型

强于 NEHB 型;逆温厚度也是 TCU 型最厚,NEHB 型逆温层最浅薄;NEHB 型出现偏东气流影响时,逆温层被破坏。可见,近地层的逆温现象与空气污染天气有较好的对应关系,在空气污染潜势预报中有指示作用。

3.4 典型污染天气过程后向轨迹特征

对 3 次典型污染天气过程以上几方面的分析可知,气象条件对大气污染物的扩散稀释沉降有非常重要的影响。但另一方面,气溶胶颗粒的来源(Seo et al,2018;Zhang Z Y et al,2018;白永清等,2018)同样值得关注。应用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的 HYSPLIT 模式分析 3 次天气过程的后向轨迹。由位温法计算出的重庆城区的 PBLH 大约为 500 m,同时考虑地形的影响,所以垂直方向选择 100、500 和 1000 m 三层高度作为初始高度。TCU 型(图 8a),低层(100、500 m)气流输送显示,污染物主要以本地源为主,与戴竹君等(2016)的分析结果一致。TCU 型 1000 m 气流输送来自西北地

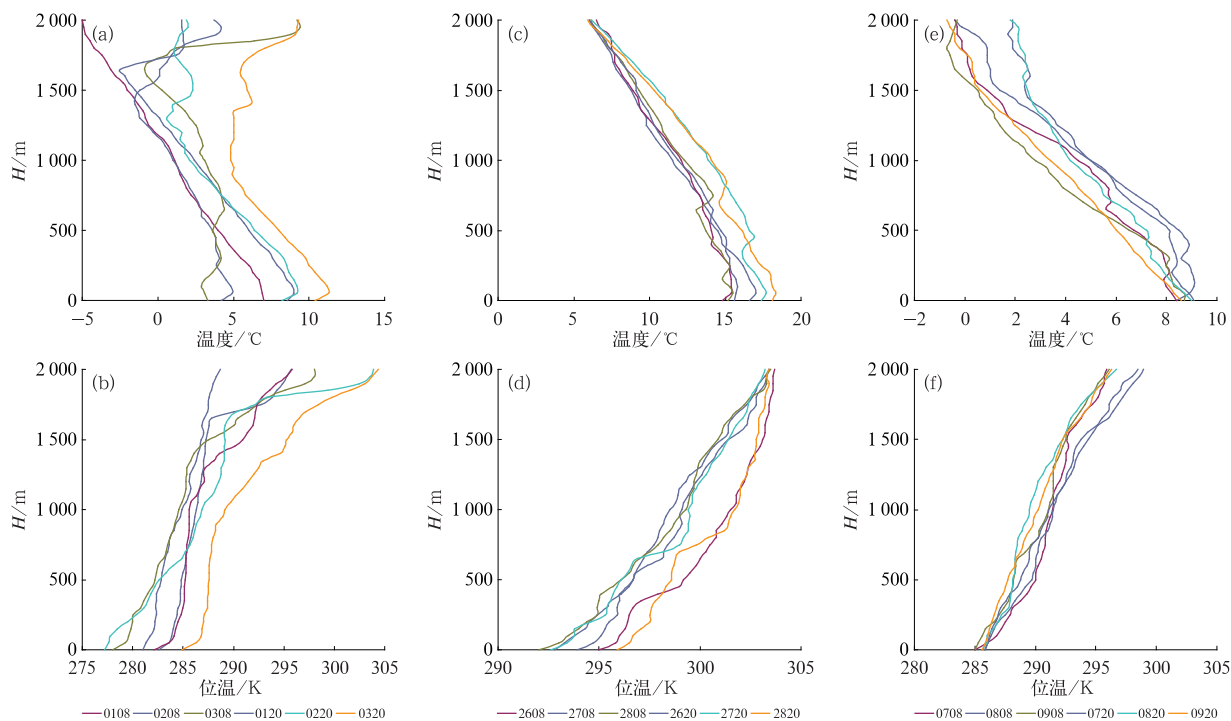


图 7 3 次典型天气过程 2000 m 以下温度层结曲线(a,c,e)和位温层结曲线(b,d,f)
(a,b)TCU 型,(c,d)LP 型,(e,f)NEHB 型

Fig. 7 Temperature curves (a, c, e) and potential temperature curves (b, d, f) under 2000 m during the three typical air pollution events
(a, b) TCU type, (c, d) LP type, (e, f) NEHB type

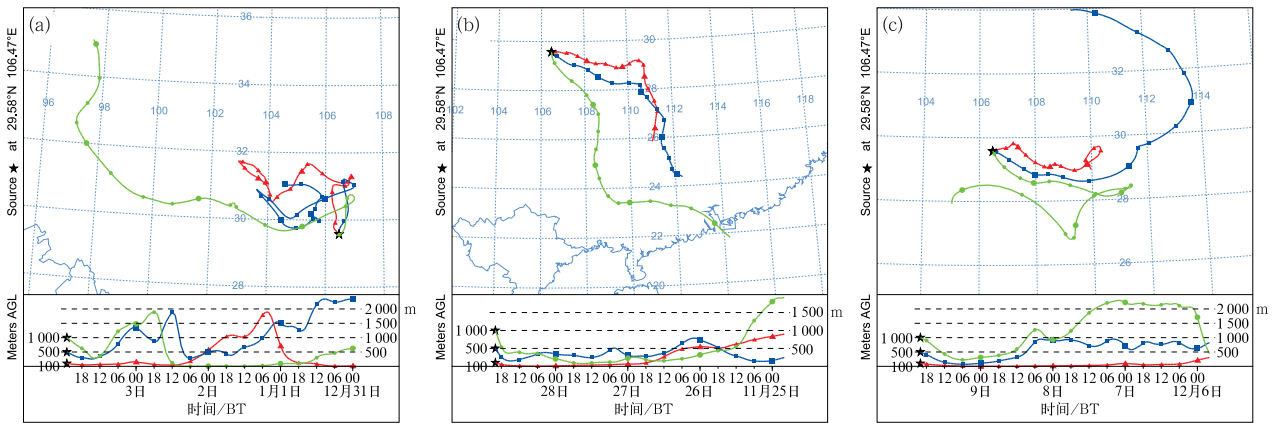


图 8 TCU 型(a)、LP 型(b)、NEHB 型(c)天气过程后向轨迹(★为重庆城区)

Fig. 8 Backward trajectory simulation results from TCU type (a), LP type (b) and NEHB type (c) during the air pollution events (★: Chongqing)

区,与 850 hPa 的西偏北气流方向吻合,但由于没有明显冷空气影响,风速小,西北地区的输入型气溶胶颗粒对四川盆地的影响相对较小,所以,TCU 型污染源主要来自本地。LP 型(图 8b)与 TCU 型的后向轨迹有明显的不同,LP 型是明显的输送型污染天气过程,各高度层气团都来自华南地区,与 850 hPa 从华南到重庆地区的东南气流输送一致,所以此类输入型污染,平均浓度相对较高。NEHB 型(图 8c),100 m 高度大气污染物主要为本地源;500 m 气流输送来自我国东部地区;1000 m 气流输送来自四川盆地以南地区。NEHB 型气流主要有两支,一支为偏南气流,另一支为东北气流,所以 NEHB 型污染过程既有本地污染源又有来自其他地区的污染源,所以在几类污染天气型中污染物浓度最高。

基于前面对典型污染天气过程的分析得到:TCU 型重庆地面为均压场,500 hPa 为脊前西北气流,中低层相对湿度低,在 700 hPa 以下为下沉气流,地面等压线稀疏,风力小,以多云天气为主,早上有辐射雾出现;近地层逆温现象明显,逆温层深厚,大气层结稳定度高,PBLH 型低,大气垂直输送和水平输送能力差,利于本地污染源静稳累积(刘晓咏等,2019)。LP 型重庆地面为低压场,500 hPa 为纬向波动气流,700 hPa 西南气流和 850 hPa 偏南气流使重庆地区中低层相对湿度增加,由于地面为低压,有弱辐合气流,但因高层为波动气流,动力抬升条件较差,没有明显降水,天气阴沉,气温日较差小,形成霾;1000 m 以下有多层逆温,大气层结稳定,气溶胶颗粒在低层下沉气流影响下,在近地层混合、堆积,使空气质量变差,此类天气型多为输送型污染天气,

污染源多来自南方地区。NEHB 型冷空气逐渐扩散南下,但地面风力较小,高空为纬向偏西气流,700 hPa 为西南气流、850 hPa 受偏南气流和偏东气流共同影响,重庆相对湿度开始增加,明显降水未出现,气溶胶颗粒在适宜的湿度条件下不断吸收大气中的水汽,爆发性增长,使大气污染物浓度维持在较高水平。此类天气型污染源既有本地源也有输入性污染源,大气污染最严重。

4 结论与讨论

综合上述分析得到以下主要结论:

(1)根据 2008—2012 年重庆污染物浓度数据,筛选出大气污染过程,再利用 SOM 方法将出现大气污染的地面气压场分为 31 类,经过主观比较合成,总结出 3 大类天气形势:均压(UP)型、低压(LP)型、高压底部(HPB)型。其中均压型分为 2 小类:两冷锋间的均压场(TCU)、弱高压区的均压场(WHU);高压底部型按冷高压的位置分为 3 小类:北方高压型(NHB)、西北高压型(NWHB)和东北高压型(NEHB)。HPB 和 TCU 型多出现在 12 月,LP 型多出现在 11 月,WHU 型多出现在 3 月。NEHB 型大气污染物浓度最高,空气污染最为严重。

(2)重庆不同天气型气象要素特征:污染天气形势下,近地层风速小,静风频率高,WHU、NWHB 和 TCU 型静风频率超过 8%;降水日数所占百分比低于 30%,日均降水量小于 0.5 mm。大气层结稳定,1000 m 以下出现逆温概率超过 80%,TCU、

WHU、LP 和 NHB 型超过 90%。大气边界层高度低,各类污染天气型低于 440 m。

(3)典型 TCU 型天气过程:天空状况为多云,早上有辐射雾出现,至午后转为霾。LP 型以阴天为主,气温日较差小,低层湿度大,形成霾。NEHB 型有弱降水产生,但湿沉降作用不明显,形成雨雾。典型污染天气过程动力条件:大气边界层内垂直运动和水平运动弱,在低层为下沉气流,200 m 以下近地层水平风速小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,TCU 型地面静风频率超过 20%。热力条件:大气层结稳定,1000 m 以下逆温现象明显,逆温强度 TCU 型强于 LP 型,强于 NEHB 型。

(4)后向轨迹分析显示:TCU 型主要为本地污染源;LP 型为输送型污染天气,污染源来自我国南方地区;NEHB 型为本地源和来自我国东部及南部的污染源共同影响,形成重污染天气。

(5)通过典型大气污染过程分析发现,重庆由于其特殊的山地城市特点,秋冬季节主要以本地累积污染为主,输送型污染相对较少。

另外,在空气污染潜势预报及浓度预报中值得关注的是:秋冬季地面为均压场或低压场时,重庆易出现雾或霾天气,大气污染物浓度增加,空气质量变差;当有冷空气南下,出现弱降水时,污染物浓度并不会马上下降,仍会维持较高浓度,直到冷空气主体完全影响四川盆地,逆温层破坏,大气边界层高度升高,风力明显增大时,重庆的空气质量才会明显好转。

由于 2013 年以后受到污染源减排的影响,难以区分气象条件与污染源对污染物浓度时空变化的贡献,讨论大气污染过程的天气类型分析存在不确定性,因此本文采用 SOM 方法仅分析了 2008—2012 年大气污染过程的天气类型,未来将采用数值模拟方法区分气象条件与污染源的贡献后,深入分析其气象影响机理。另外,本文仅对重庆大气污染过程的地面气压场进行天气分型,并没有对清洁天气时的气压场分型,进一步对清洁天气下地面形势场的归类总结研究,将能为重庆地区空气污染潜势预报提供更全面的参考依据。

致谢:中国气象科学研究院端义宏研究员在本文完成过程中提供了指导和帮助,谨此致谢!

参考文献

白永清,祁海霞,赵天良,等,2018.湖北 2015 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程的气象输送条件及日变化特征分析[J].气象学报,76(5):803-815. Bai Y Q, Qi H X, Zhao T L, et al, 2018. Analysis of

meteorological conditions and diurnal variation characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ heavy pollution episodes in the winter of 2015 in Hubei Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):803-815(in Chinese).

- 蔡子颖,张敏,韩素芹,等,2018.天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究[J].气象,44(7):911-920. Cai Z Y, Zhang M, Han S Q, et al, 2018. Research on threshold and regularity of mixed layer thickness in heavy pollution weather in Tianjin[J]. Meteor Mon, 44(7):911-920(in Chinese).
- 陈龙,智协飞,覃军,等,2016.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,42(7):819-826. Chen L, Zhi X F, Qin J, et al, 2016. Surface atmospheric circulation types of air pollution and its relationship with concentration of air pollutants in Wuhan[J]. Meteor Mon, 42(7):819-826(in Chinese).
- 陈豫英,刘还珠,陈楠,等,2008.基于聚类天气分型的 KNN 方法在风预报中的应用[J].应用气象学报,19(5):564-572. Chen Y Y, Liu H Z, Chen N, et al, 2008. Application of KNN to wind forecast based on clustering synoptic patterns[J]. J Appl Meteor Sci, 19(5):564-572(in Chinese).
- 陈朝晖,程水源,苏福庆,等,2008.华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J].环境科学研究,21(1):17-21. Chen Z H, Cheng S Y, Su F Q, et al, 2008. Analysis of synoptic patterns and transports during regional atmospheric pollution process in North China[J]. Res Environ Sci, 21(1):17-21(in Chinese).
- 代刊,金荣花,胡婷,2013.基于自组织神经网络算法的华北区域夏季天气气候学特征[J].气象,39(7):801-812. Dai K, Jin R H, Hu T, 2013. Using self-organizing maps to investigate summer synoptic climatology in North China Area[J]. Meteor Mon, 39(7):801-812(in Chinese).
- 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等,2016.江苏秋冬季重度霾的分型研究[J].气象学报,74(1):133-148. Dai Z J, Liu D Y, Wang H B, et al, 2016. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 74(1):133-148(in Chinese).
- 韩余,刘德,王欢,等,2013.重庆雾气候特征及天气成因分析[J].气象与环境学报,29(6):116-122. Han Y, Liu D, Wang H, et al, 2013. Climatic characteristics of fog and its forming reason in Chongqing[J]. J Meteor Environ, 29(6):116-122(in Chinese).
- 胡春梅,刘德,陈道劲,2009.重庆市空气污染扩散气象条件指标研究[J].气象科技,37(6):665-669. Hu C M, Liu D, Chen D J, 2009. Index of meteorological conditions for pollutant diffusion in Chongqing[J]. Meteor Sci Technol, 37(6):665-669(in Chinese).
- 胡春梅,刘德,陈道劲,2016.重庆地区两次连续空气污染天气过程对比分析[J].气象与环境学报,32(1):25-32. Hu C M, Liu D, Chen D J, 2016. Comparative analysis of two continuous air pollution events in Chongqing[J]. J Meteor Environ, 32(1):25-32(in Chinese).
- 江文华,陈道劲,胡春梅,2013.重庆主城区一次重度霾天气过程分析[J].气象科技,41(2):343-346. Jiang W H, Chen D J, Hu C M, 2013. Analysis of a severe haze event in downtown area of Chongqing[J]. Meteor Sci Technol, 41(2):343-346(in Chinese).
- 雷正翠,郑媛媛,刘银峰,等,2019.2018 年常州一次罕见持续性

- 雾-霾天气分析[J]. 气象, 45(8): 1123-1134. Lei Z C, Zheng Y Y, Liu Y F, et al, 2019. Causes analyses of a severe continuous fog-haze weather process in Changzhou in 2018 [J]. Meteor Mon, 45(8): 1123-1134(in Chinese).
- 刘德, 李永华, 喻桥, 等, 2005. 基于客观分析的重庆雾的 BP 神经网络预报模型研究[J]. 气象科学, 25(3): 293-298. Liu D, Li Y H, Yu Q, et al, 2005. Study on fog prediction model in Chongqing by the use of BP neural network based on objective analysis[J]. Sci Meteor Sin, 25(3): 293-298(in Chinese).
- 刘德, 周国兵, 向波, 等, 2004. 重庆雾的天气成因[J]. 气象科技, 32(6): 461-466. Liu D, Zhou G B, Xiang B, et al, 2004. Cause analysis of fog formation in Chongqing [J]. Meteor Sci Technol, 32(6): 461-466(in Chinese).
- 刘晓咏, 王自发, 王大玮, 等, 2019. 京津冀典型工业城市沙河市大气污染特征及来源分析[J]. 大气科学, 43(4): 864-877. Liu X Y, Wang Z F, Wang D W, et al, 2019. Characteristics and source identification of air pollution in Shahe, a typical industrial city in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Chin J Atmos Sci, 43(4): 864-877(in Chinese).
- 潘玮, 左志燕, 肖栋, 等, 2017. 近 50 年中国霾年代际特征及气象成因[J]. 应用气象学报, 28(3): 257-269. Pan W, Zuo Z Y, Xiao D, et al, 2017. Interdecadal variation of haze days over China with atmospheric causes in recent 50 years [J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 257-269(in Chinese).
- 王宏, 林长城, 隋平, 等, 2008. 福州天气形势分型与大气污染物相关分析[J]. 气象与环境学报, 24(6): 7-11. Wang H, Lin C C, Sui P, et al, 2008. Weather situation classification and its correlation with atmospheric pollutant in Fuzhou, Fujian Province [J]. J Meteor Environ, 24(6): 7-11(in Chinese).
- 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等, 2010. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学, 30(7): 924-930. Wang L L, Wang Y S, Wang Y H, et al, 2010. Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn [J]. China Environ Sci, 30(7): 924-930(in Chinese).
- 王雪梅, 韩志伟, 2000. 重庆市不同天气型下地面 SO₂ 浓度分布[J]. 中山大学学报(自然科学版), 39(5): 91-96. Wang X M, Han Z W, 2000. Surface SO₂ concentration distribution of Chongqing in different weather types [J]. Acta Sci Nat Univ Sunyat, 39(5): 91-96(in Chinese).
- 王彦磊, 滕军, 张韧, 等, 2008. 自组织网络与广义回归网络耦合的副热带高压指数预测[J]. 热带气象学报, 24(5): 475-482. Wang Y L, Teng J, Zhang R, et al, 2008. Predicting the subtropical high index by coupling self-organizing feature map and generalized regression neural network [J]. J Trop Meteor, 24(5): 475-482(in Chinese).
- 王中, 林娜, 2013. 重庆主城区大气层结特征及与空气质量关系分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 38(9): 128-133. Wang Z, Lin N, 2013. Analysis of atmospheric stratification feature and its relationship with air quality in the city of Chongqing [J]. J Southwest China Normal Univ (Nat Sci Ed), 38(9): 128-133(in Chinese).
- 许建明, 常炉予, 马井会, 等, 2016. 上海秋冬季 PM_{2.5} 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 36(12): 4303-4314. Xu J M, Chang L Y, Ma J H, et al, 2016. Objective synoptic weather classification on PM_{2.5} pollution during autumn and winter seasons in Shanghai [J]. Acta Sci Cirtum, 36(12): 4303-4314(in Chinese).
- 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等, 2017. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 37(9): 3201-3209. Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al, 2017. Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter [J]. China Environ Sci, 37(9): 3201-3209(in Chinese).
- 张国琏, 甄新蓉, 谈建国, 等, 2010. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析[J]. 热带气象学报, 26(1): 124-128. Zhang G L, Zhen X R, Tan J G, et al, 2010. The analysis of the relationship between the air quality in Shanghai and surface pressure patterns and meteorological factors [J]. J Trop Meteor, 26(1): 124-128(in Chinese).
- 张人禾, 李强, 张若楠, 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 44(1): 27-36. Zhang R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Sci China: Earth Sci, 57(1): 26-35(in Chinese).
- 周宁芳, 李峰, 饶晓琴, 等, 2008. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象, 34(6): 81-88. Zhou N F, Li F, Rao X Q, et al, 2008. Study on haze weather in China during winter-time of 2006 [J]. Meteor Mon, 34(6): 81-88(in Chinese).
- 周亚军, 熊亚丽, 肖伟军, 等, 2005. 广州空气污染指数特征及其与地面气压型的关系[J]. 热带气象学报, 21(1): 93-99. Zhou Y J, Xiong Y L, Xiao W J, et al, 2005. The characteristics of air pollution indices in Guangzhou and the relationships between indices and surface pressure patterns [J]. J Trop Meteor, 21(1): 93-99(in Chinese).
- Kohonen T, 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps [J]. Biol Cybern, 43(1): 59-69.
- Liu S Y, Liang X Z, 2010. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height [J]. J Climate, 23(21): 5790-5809.
- Seo J H, Park D S R, Kim J Y, et al, 2018. Effects of meteorology and emissions on urban air quality; a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea [J]. Atmos Chem Phys, 18(21): 16121-16137.
- Wu P, Ding Y H, Liu Y J, 2017. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Adv Atmos Sci, 34(4): 429-440.
- Zhang X Y, Zhong J T, Wang J Z, et al, 2018. The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing Area in relation to climate warming [J]. Atmos Chem Phys, 18(8): 5991-5999.
- Zhang Z Y, Ma Z Q, Kim S J, 2018. Significant decrease of PM_{2.5} in Beijing based on long-term records and Kolmogorov-Zurbenko filter approach [J]. Aerosol Air Qual Res, 18(3): 711-718.