

文章编号: 2096-1618(2023)03-0340-09

# 四川盆地冷锋特征及其对逆温和大气污染的影响

李媛, 冯鑫媛, 马冰霞, 王式功

(成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**为进一步研究四川盆地冷锋特征及其影响,利用2015–2019年历史天气图、地面和高空气象观测以及大气环境监测数据,对四川盆地冷锋特征及其对逆温和大气污染的影响进行分析和讨论。结果表明,四川盆地冷锋过程年均9.6例,春秋季节最多、最强。偏北路径冷锋最多、平均强度最强,春秋季节最多;西北路径冷锋个例数和平均强度次之,夏多冬少;偏东路径冷锋最少、最弱。冷锋过境时逆温频率降低,过境外回升。冷锋过境对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO以清除为主,对颗粒物的影响高于气态污染物,而O<sub>3</sub>浓度随冷锋过境有增加趋势,强冷锋清除效果高于一般冷锋。过境时,西北路径冷锋的清除效果最好,PM<sub>2.5</sub>浓度降低近一半,而偏东路径冷锋清除能力最弱。冷锋过境外,偏北路径冷锋的清除作用依然显著,污染物浓度持续降低。

**关键词:**气象学;冷锋;移动路径;四川盆地;逆温;大气污染

**中图分类号:**P441

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.03.014

## 0 引言

随着现代化工业技术和经济的快速发展,大气污染问题得到了越来越广泛的关注。四川盆地人口稠密,工业发展迅速,加之特殊的地理位置和地形,使其上空极易产生逆温,影响污染物的扩散<sup>[1-3]</sup>。随着近几年大气综合治理力度的加大,气溶胶的排放得到了一定程度的控制,在此背景下气象条件对污染过程发生发展的影响程度加大,污染的区域性传输和跨界传输的问题引起了广泛关注<sup>[4]</sup>。天气发生污染时,气溶胶主要集中在大气边界层内,然而大气边界层会受到不同尺度天气系统和近地面气象要素的共同影响导致污染物的稀释扩散能力不同<sup>[5-9]</sup>。其中冷锋过程会导致污染物的上游输送和本地累积<sup>[10-13]</sup>。

天气过程是影响大气逆温和扩散传输条件的重要外强迫因素,冷锋天气过程对大气扩散能力有较大影响<sup>[14-15]</sup>,从而改变污染物浓度。中国北方城市冷锋过境前污染加重,过境时大风和降水使污染物浓度下降,冷锋过程也会减轻或消除日间逆温<sup>[16]</sup>。程念亮等<sup>[17]</sup>在对中国东部春季一次强冷锋活动的模拟中发现,强冷锋前后污染物浓度为先升后降又上升,锋前出现一条高浓度污染带,冷锋过境后污染物浓度迅速降低。陈燕玲等<sup>[18]</sup>研究发现冷空气南下由于西北风增加和强冷空气、降水的双重作用,会对污染物有一定的清除。锋面过境最明显的特征是气象要素突变,气象要素的变化势必引起气象参数和大气扩散能力的变化,

从而引起污染物浓度的变化<sup>[19]</sup>。Lin等<sup>[20]</sup>指出造成亚洲春季污染物输送的主要机制:污染物被向东南移动的冷锋锋面前部抬升,同时在冷锋后部的边界层内进行传输。因此,冷锋等移动的天气系统可能会对沿其移动路径的空气质量产生重大影响。

冷锋天气系统对颗粒物等污染物的清除作用明显<sup>[21-22]</sup>。冷锋过境前,常常会出现灰霾,形成逆温层,气压下降,阻碍污染物的扩散,使能见度降低,或小部分冷平流先到达,形成区域性的平流雾,更不利于污染物的扩散,加重污染。冷锋到达前,空气中污染物的浓度会持续升高,尤其是悬浮颗粒物的浓度,冷空气到达后,随之而来的大风和降水使污染物浓度下降,空气得到改善。冷锋过境后,大气中的污染物浓度开始累积<sup>[23]</sup>。

现阶段对于冷锋的研究多集中在中国北方和东部大气,对西南地区冷锋研究较少,尤其缺乏四川盆地这一复杂地形地区冷锋特征的认识。四川盆地因其背靠青藏高原的特殊地理位置以及独特的深盆地地形,逆温和大气污染过程频发。通过对2015–2019年四川盆地冷锋特征进行研究,分析冷锋天气过程对四川盆地逆温和污染的影响,以期为进一步改善四川盆地大气环境质量提供科学依据。

## 1 资料与方法

气象数据使用2015–2019年中央气象台历史天气图、地面气象观测数据(包括温度、露点、风向、风速等气象要素)和成都市温江站、达州市达川站2个高空气象观测站探空观测数据。数据来自国家生态环境

收稿日期:2022-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41775147、91644226)

通信作者:冯鑫媛, E-mail: fengxy@cuit.edu.cn

保护部网站发布的同期空气质量指数(AQI)日报和小时报以及 6 种主要污染物( $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、CO)浓度逐小时监测资料。

冷锋的识别采用历史天气图普查的方法。利用中央气象台 1 日 4 次的天气分析资料,普查出 2015–2019 年四川盆地出现的冷锋天气过程,筛选出 24 小时降温 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷锋过程。根据冷锋的来向以及在四川盆地的移动路径,将冷锋划分为西北路径冷锋、偏北路径冷锋和偏东路径冷锋。再根据代表站的 24 小时降温幅度将冷锋分为强冷锋和一般冷锋。在此基础上,分析 2015–2019 年四川盆地出现的冷锋的活动特征,以及冷锋对该地区逆温和大气污染的影响。

2 冷锋特征分析

2.1 冷锋路径

冷锋是指锋面移动过程中,冷气团起主导作用,推

动锋面向暖气团一侧移动的天气过程,且锋面两侧有明显的温差,冷锋后通常存在 24 小时负变温。2015–2019 年四川盆地共计 48 例冷锋。其中 2015–2019 年分别出现 14 例、11 例、10 例、6 例和 7 例冷锋。由于四川盆地被四周高大山地环抱和位于青藏高原背风坡的地理位置,四川盆地冷锋的移动特征有其独特之处。根据冷锋的来向、进入盆地的位置及其在盆地内的移动路径,可将四川盆地冷锋过程划分为西北路径(沿青藏高原东北缘进入)、偏北路径(翻越秦岭、大巴山进入)和偏东路径(东灌进入)(图 1)。西北路径冷锋从青藏高原东北缘进入四川盆地向东南方向移动,偏北路径冷锋翻越秦岭、大巴山进入四川盆地向南移动,偏东路径冷锋从巫山东北处东灌进入四川盆地并向西南方向移动,其中(图 2)偏北路径冷锋最多,占 64.6%,西北路径次之,占 20.8%,偏东路径最少,占 14.6%。此外,由于冷空气进入四川盆地时大多要翻越盆地四周高大山脉,受其阻挡造成四川盆地冷锋过程有时存在不连续性。

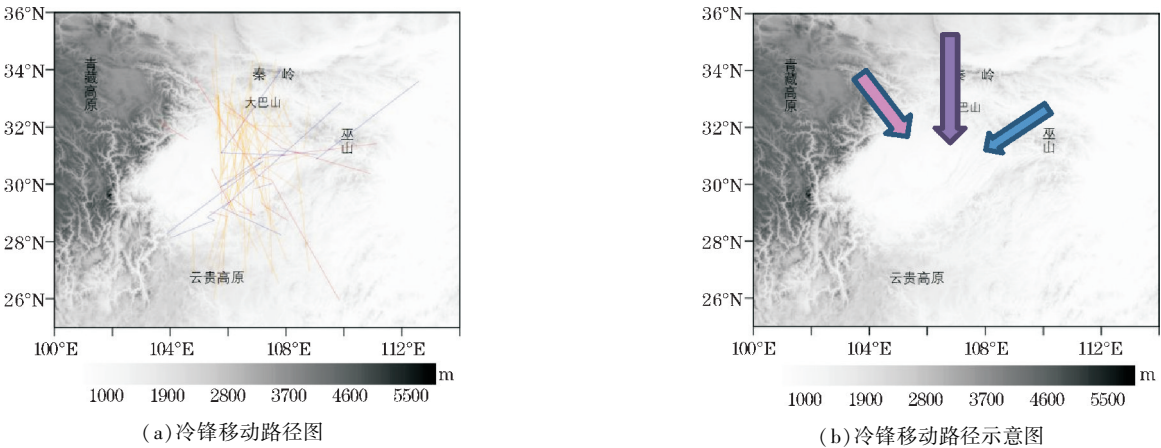


图 1 2015–2019 年四川盆地冷锋移动路径图及示意图

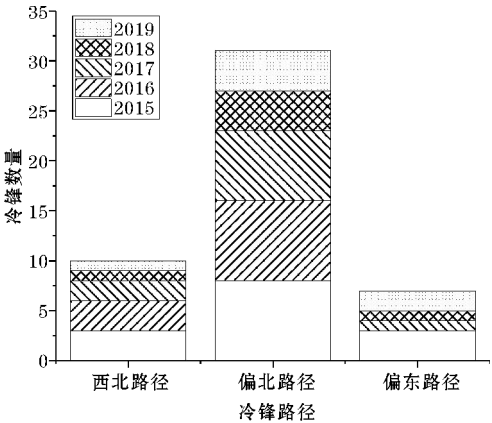


图 2 2015–2019 年不同路径冷锋数量图

冷锋的强度可用 24 小时变温衡量<sup>[5]</sup>,冷锋强度的确定选取冷锋过程中 24 小时变温最大的冷锋日,为方便统计,统一选取 08 时的变温进行判断。若该冷锋过程持续时间较短,不包含 08 时,则选择冷锋过境后的 08

时作为代表。根据冷锋移动路径和进入盆地的位置,选择四川盆地温江站、达川站和沙坪坝站 3 站的平均 24 小时的降温幅度作为冷锋强度的衡量标准。根据冷锋强度的频率分布(图 3),将四川盆地冷锋分为强冷锋( $|\Delta T_{24}| \geq 4$ )和一般冷锋( $1 \leq |\Delta T_{24}| < 4$ )两个等级。

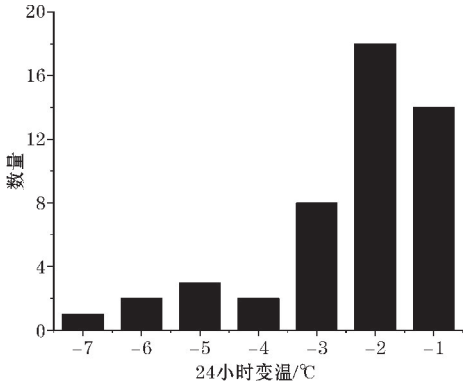


图 3 2015–2019 年四川盆地冷锋 24 小时变温的频率分布图

2.2 冷锋强度

研究期间强冷锋共计8次,占16.7%,一般冷锋共计40次,占83.3%。强冷锋平均24小时变压为5.7 hPa,冷锋日08时平均地面风速为1.6 m/s;一般冷锋平均24小时变压为3.7 hPa,平均地面风速为1.5 m/s(表1)。强冷锋的24小时变压明显强于一般冷锋,地面风速也较大,表明这种分类方法是可行的。

冷锋强度存在季节差异也与其移动路径有关(表1)。2015–2019年四川盆地出现的冷锋过程中,秋季冷锋强度最大,平均24小时变温为-2.7℃,其地面平均24小时变压为4.2 hPa,地面平均风速为

1.5 m/s。其次是春季,平均24小时变温为-2.4℃,春季平均24小时变压相对较大为5.2 hPa,地面风速1.6 m/s。夏季和冬季冷锋强度最小,平均24小时变温均为-2℃,且夏季平均24小时变压仅为1.8 hPa。

不同路径冷锋平均24小时变温也存在差异,其中,偏北路径冷锋最强,平均24小时变温为-2.5℃,平均24小时变压和08时地面风速也最大,分别为5.3 hPa、1.6 m/s。其次是西北路径冷锋,平均24小时变温为-2.2℃,平均24小时变压为1.7 hPa,地面08时平均风速为1.5 m/s。偏东路径冷锋的强度最弱,平均24小时变温为-2℃,平均24小时变压和地面平均风速也最小,分别为1.5 hPa、1.2 m/s。

表1 2015–2019年不同强度、不同季节、不同路径冷锋平均24小时变温、变压及地面平均风速

参数	强冷锋	一般冷锋	春季	夏季	秋季	冬季	西北路径	偏北路径	偏东路径
平均24小时变温/℃	-5.1	-1.8	-2.4	-2	-2.7	-2	-2.2	-2.5	-2
平均24小时变压/hPa	5.7	3.7	5.2	1.8	4.2	4.5	1.7	5.3	1.5
地面平均风速/(m/s)	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.3	1.5	1.6	1.2

2.3 冷锋活动频数

四川盆地不同强度的冷锋存在明显的月变化(图4a)。4月、5月和9月冷锋频数高于其他月份,3月最少。强冷锋过程仅出现在1月、4月、5月、8月、9月和10月,5月和9月最多。一般冷锋的月变化不如强冷

锋的明显,各月频数相差不大。不同路径冷锋(图4b)中,偏北路径冷锋是四川盆地出现频率最高的冷锋,除7月外其他月份均有出现,其中4月、5月最多。西北路径冷锋5月和7月最多。偏东路径冷锋仅出现在1月、2月、6月、9月和10月,其中2月和9月最多。

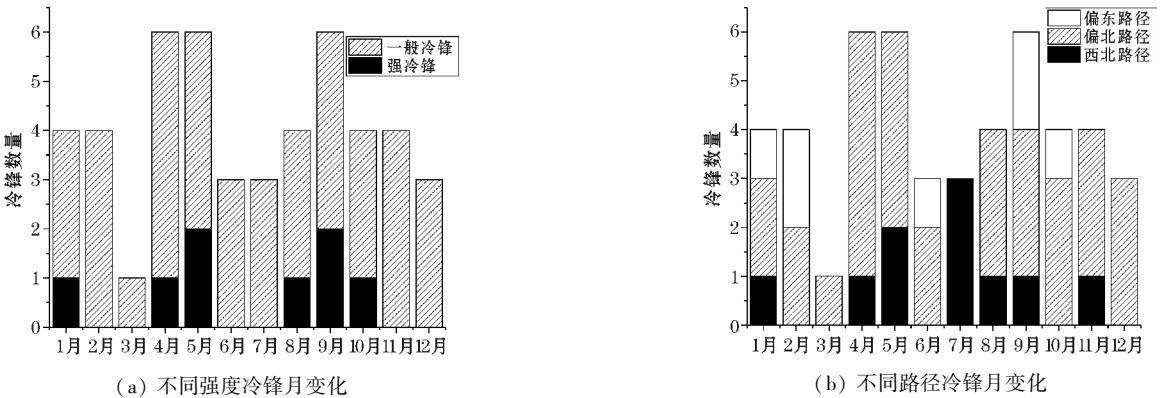


图4 2015–2019年四川盆地冷锋频数的月变化

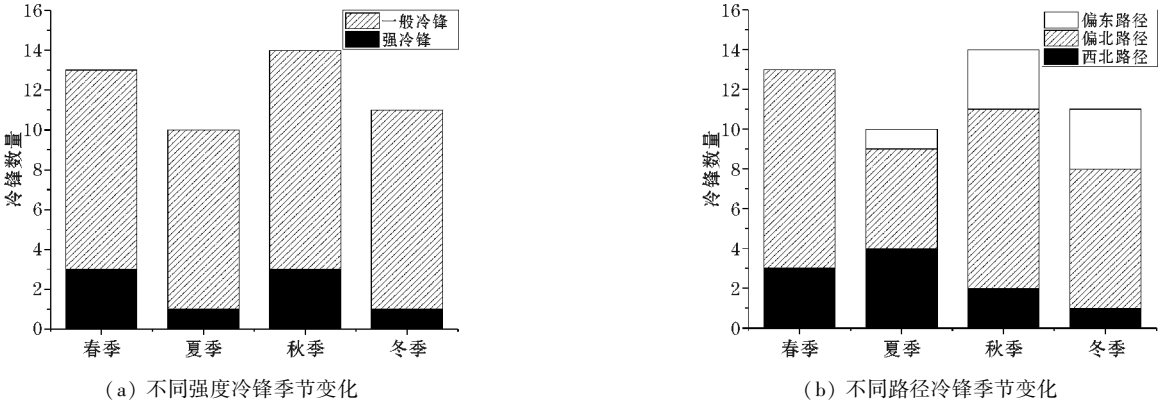


图5 2015–2019年四川盆地冷锋频数的季节变化



四川盆地的冷锋频数存在明显的季节变化,春、秋两季冷锋最多,夏季最少,不同强度冷锋季节变化存在差异(图 5a)。强冷锋的季节差异较大,春、秋两季最多,占强冷锋总数的75.0%,夏季和冬季较少,各占12.5%。一般冷锋频数的季节变化不如强冷锋明显。不同路径冷锋频数的季节变化存在明显的差异(图 5b)。其中,偏北路径冷锋春季和秋季最多,夏季最少;而西北路径冷锋夏季最多,冬季最少;偏东路径冷锋则是秋、冬季节最多,春季无偏东路径冷锋出现。

2.4 冷锋日数

四川盆地出现的冷锋过程中,不同冷锋过程影响四川盆地的持续时间(即冷锋日数)存在差异。2015–2019 年的 48 次冷锋过程总计 74 个冷锋日。持续 1 日和持续 2 日的冷锋过程频数相差不大,一个冷锋过程包含 3 个冷锋日的情况仅出现 1 次,发生在 2015 年

冬季,为偏北路径冷锋。

从图 6(a)可以看出,不同季节冷锋过程中冷锋日数存在一定差异。只有 1 个冷锋日的冷锋过程在春季和夏季最多。2 个冷锋日的冷锋过程的季节变化较 1 个冷锋日明显,秋季明显多于其他季节,夏季最少。不同季节的冷锋过程所包含的冷锋日数也有一定的差别,秋季冷锋过程以持续 2 个冷锋日的为主,而夏季则以 1 个冷锋日为主,春季和冬季 1 个冷锋日和 2 个冷锋日的情况各占约一半。不同强度冷锋过程的冷锋日数存在一定差异(图 6b),但差异较小。强冷锋过程中,1 个冷锋日的冷锋过程略多;而一般冷锋过程中,2 个冷锋日的冷锋过程略多。不同路径下冷锋的冷锋日数(图 6c)也存在一定差异。其中,西北路径冷锋影响时间较短,1 个冷锋日的冷锋过程较多,约占 2/3。而偏北或偏东路径的冷锋过程影响时间较长,2 个冷锋日的相对较多。

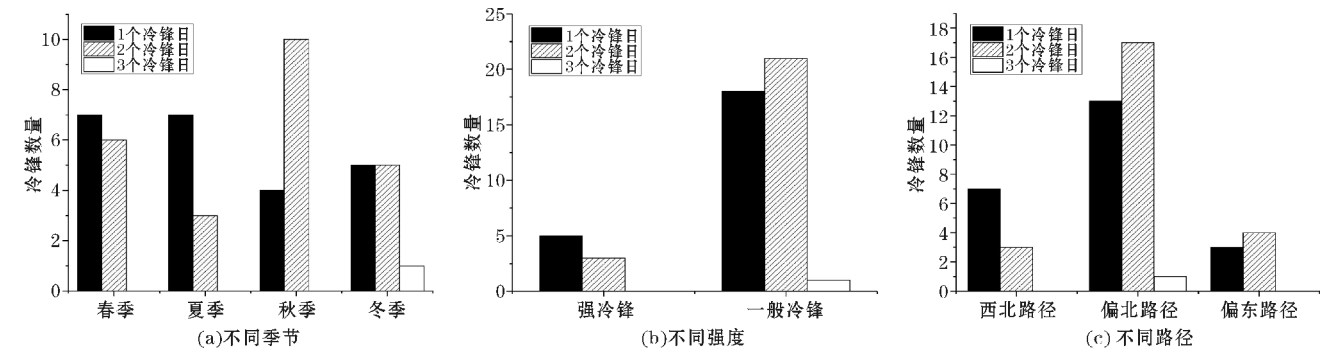


图6 2015–2019 年四川盆地不同冷锋日数的冷锋过程数

3 冷锋过程对逆温的影响

逆温是指温度随高度的增加不变甚至升高的一种现象,反映了大气层结的稳定程度。冷锋过程对大气扩散能力有很大影响,会对原有逆温层造成一定的影响<sup>[24]</sup>。根据冷锋在四川盆地的移动路径和探空站的地理位置选出两个探空代表站,其中西北路径以成都市温江站为代表,偏北或偏东路径以达州市达川站为代表。在 48 次冷锋过程中,成都市温江站为代表站的冷锋过程(西北路径)共计 10 次,达州市达川站为代表站的冷锋过程(偏北和偏东路径)共计 38 次。在 48 次冷锋过程中有 7 次探空数据缺失,均出现在 2019 年。因此文中分析冷锋过程对逆温和污染物浓度的影响时使用 2015–2018 年的冷锋过程,总计 41 个冷锋过程。

3.1 冷锋过境对逆温出现频数的影响

冷锋过境对四川盆地的逆温出现频数有明显的影 响。逆温频数以该冷锋过程 08 时和 20 时代表站的垂直探空资料为判断依据,若代表站在该时刻出现温度随高度的增加不变甚至升高则判定该站有逆温发生,从 2015–2018 年的四川盆地发生的 41 次冷锋过程可以看出(表 2),无论是 08 时还是 20 时,冷锋过境日均使四川盆地的逆温频数减少,在冷锋过境后,逆温的数量再次升高。这与李燕等<sup>[25]</sup>对大连春季强对流雨雪天气过程的研究类似。从探空观测结果可知,在冷锋过境前,当地上空出现逆温 17~18 次,而冷锋位于四川盆地时,当地出现逆温的频数减少。冷锋离开四川盆地后,逆温频数明显回升,08 时冷锋过境后逆温频数甚至高于过境前。

表2 2015–2018 年冷锋过境前后逆温频数的变化

参数	08 时			20 时		
	冷锋前	冷锋日	冷锋后	冷锋前	冷锋日	冷锋后
逆温频数	18	16	25	17	11	15

不同路径冷锋过境前后逆温频数的变化存在差异(图7)。08时西北路径冷锋过境前后,逆温频数持续增加,偏北路径冷锋过境逆温频数先减少再增加。20时西北路径冷锋的逆温频数先减少再增加,而偏北路径冷锋过境前后逆温频数持续降低。不论08时还是20时,偏东路径冷锋过境对逆温频数的影响很小,但过境后逆温频数略有升高。

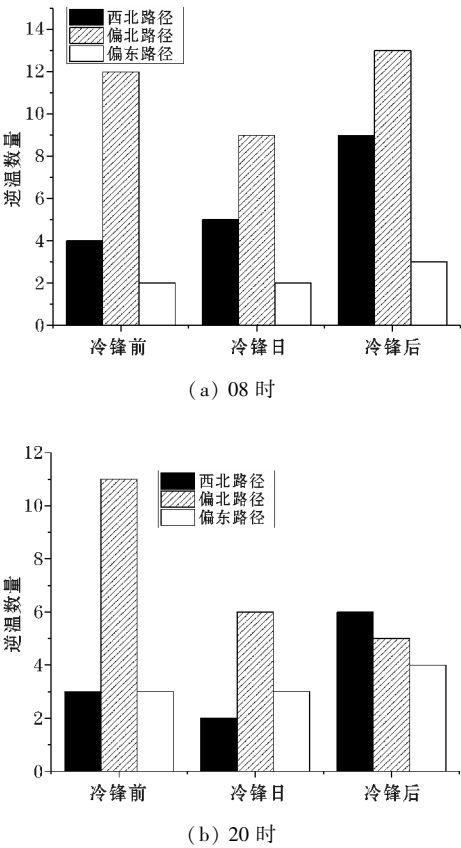


图7 四川盆地不同路径冷锋过境前后逆温频数的变化

3.2 冷锋过境前后的逆温类型

研究表明,四川盆地的逆温按其底高可分为三类:贴地逆温(底高 $\leq 0$  m的逆温)、脱地逆温( $1000\text{ m}\geq$ 底高 $\geq 0$  m的逆温)、对流层低层逆温( $5000\text{ m}\geq$ 底高 $\geq 1000$  m的逆温)<sup>[26]</sup>。不同类型逆温在冷锋过境前后的出现频率及其变化存在明显差异(表3)。总体而言,脱地逆温在冷锋过境时和过境后,出现频率持续降低,20时冷锋过境后脱地逆温频率降至0%;而对于贴地逆温和对流层低层逆温,冷锋过境后逆温频率均有不同程度的升高。此外,冷锋过程期间,08时在3种类型逆温中脱地逆温的出现频率最高。这与通常情况下四川盆地对流层低层逆温频率最高、贴地逆温频率最低<sup>[27]</sup>的特征存在明显差异。

表3指出,08时,冷锋过境前脱地逆温频率较高,约为31.7%,冷锋日的脱地逆温和对流层低层逆温相差不大且发生频率均高于贴地逆温,冷锋后对流层低层逆温发生频率明显高于其他两种类型逆温,贴地逆温和脱地逆温发生频率相差不大。08时的贴地逆温在冷锋过境前后发生频率先降低后升高,冷锋过境后贴地逆温发生频率明显升高由7.3%上升至14.6%;脱地逆温发生频率则为持续下降,冷锋过境前约为31.7%,冷锋过境时约为24.4%,冷锋过境后约为17.1%;对流层低层逆温发生频率与脱地逆温恰好相反,冷锋过境使其发生频率持续升高,至冷锋过境后由过境前的19.5%升高到46.3%,发生频率是冷锋过境前的两倍多。20时冷锋过境前后对流层低层逆温发生频率明显高于贴地逆温和脱地逆温,冷锋过境前后贴地逆温发生频率持续升高,脱地逆温发生频率持续下降,至冷锋过境后已无脱地逆温出现,冷锋过境前后对流层低层逆温发生频率则表现为先降低后升高,且冷锋过境后的发生频率低于冷锋过境前。

表3 2015~2018年冷锋过境前后不同类型逆温的发生频率 单位:%

逆温类型	08 时			20 时		
	冷锋前	冷锋日	冷锋后	冷锋前	冷锋日	冷锋后
贴地逆温	7.3	4.9	14.6	2.4	4.9	7.3
脱地逆温	31.7	24.4	17.1	7.3	2.4	0
对流层低层逆温	19.5	22.0	46.3	43.9	24.4	39.0

四川盆地的多层逆温是一种并不少见的现象。根据定义,多层逆温是指同时出现贴地逆温、脱地逆温和对流层低层逆温中的两类或三类逆温,而一般逆温则指仅出现一种类型逆温<sup>[26]</sup>。四川盆地冷锋过境前后一般逆温的出现频率高于多层逆温(图8)。08时一般逆温出现频率在冷锋日未变化、冷锋过境后升高,而

多层逆温出现频率在冷锋日降低、冷锋过境后又升高。20时冷锋过境前后对多层逆温和一般逆温出现频率的影响与08时多层逆温类似,出现频率均为在冷锋日降低、冷锋过境后又升高。其中,在冷锋日多层逆温的出现频率均会降低,表明冷锋过境对此时多层逆温的减弱和破坏作用显著。

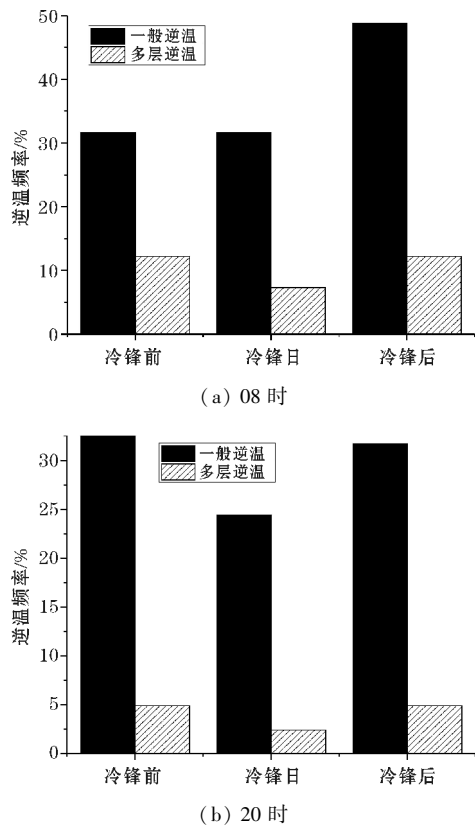


图8 冷锋过境前后一般逆温和多层逆温出现频率的变化

## 4 冷锋过程对 AQI 和大气污染物浓度的影响

为了得到冷锋过境对当地空气质量和大气污染物浓度的影响,选取冷锋前一日、当日和后一日进行污染物浓度进行对比。AQI 和污染物浓度变化可分为3种类型:直接降低型、先升高再降低型和升高型。多数情况下,冷锋过境会使 AQI 和污染物浓度降低,表现为直接降低或先升高后降低,但仍有少数情况下污染物浓度会呈现升高的情况。

### 4.1 冷锋过境前后 AQI 及 6 种污染物浓度的变化

冷锋过境对 AQI 和不同污染物的影响存在差异。总体而言,对颗粒物( $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ )的影响高于气态污染物,以清除作用为主,而对 $O_3$ 浓度的影响与其他污染物相反(图9),冷锋过境可能会造成 $O_3$ 浓度增加。冷锋前 AQI 平均值为77.2,冷锋过境当日 AQI 下降23.7%,至冷锋过境后有所回升,但均值仍低于冷锋过境前,相较冷锋过境前降低10.1%;冷锋过境前 $PM_{2.5}$ 浓度为 $52.9\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,冷锋到达四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度明显降低,下降35.9%,至冷锋过境后 $PM_{2.5}$ 浓度上升至 $43.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,低于冷锋过境前 $PM_{2.5}$ 浓度,浓度降

低18.1%; $PM_{10}$ 浓度冷锋过境前为 $79.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,冷锋过境时浓度下降28.3%,降为 $56.8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,冷锋过境后浓度上升至 $70.7\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,较冷锋过境前浓度下降10.7%;冷锋过境 $SO_2$ 浓度也表现为先降低后升高,至冷锋日 $SO_2$ 浓度下降11.2%,冷锋过境后 $SO_2$ 浓度相较冷锋过境前有些许降低,浓度下降1.7%; $NO_2$ 浓度冷锋过境前为 $38.8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,至冷锋日浓度变为 $31.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,浓度下降19.3%,冷锋后浓度变为 $35.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,较冷锋过境前浓度下降8.5%;CO浓度冷锋过境前为 $0.98\text{ mg}/\text{m}^3$ ,至冷锋日浓度为 $0.79\text{ mg}/\text{m}^3$ ,浓度下降19.4%,冷锋过境后 CO 浓度为 $0.82\text{ mg}/\text{m}^3$ ,较冷锋过境前下降16.3%; $O_3$ 浓度变化相较其他污染物明显不同,冷锋过境前 $O_3$ 浓度为 $47.7\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,至冷锋日 $O_3$ 浓度变为 $53.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ , $O_3$ 浓度上升12.1%,冷锋过境后 $O_3$ 浓度变为 $50.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,相比冷锋过境前浓度上升6.1%。从污染物的浓度变化可以看出冷锋过境对颗粒物的清除效果更为明显, $O_3$ 浓度变化与其他污染物浓度变化相差较大,冷锋过境 $O_3$ 浓度不降反增。

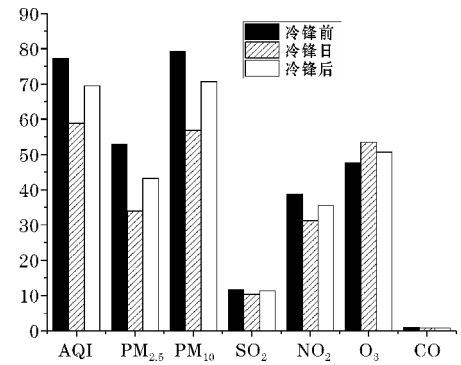


图9 冷锋过境前后 AQI 和污染物浓度平均值

### 4.2 冷锋移动路径对污染物浓度的影响

冷锋日 AQI 及 6 种污染物浓度相对前一日的变化率如表4所示。不同路径冷锋的影响存在差异,整体来看,除 $O_3$ 外,西北路径冷锋对四川盆地污染物的清除作用优于其他两种。其中西北路径冷锋日 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 和 $SO_2$ 浓度下降率明显高于其他两种路径,尤其是颗粒物的浓度下降率明显高于其他污染物,其中 $PM_{2.5}$ 浓度下降率高达49.4%。偏东路径冷锋日 $SO_2$ 浓度下降率为负值,即冷锋过境使其浓度不降反而小幅上升。对于 $NO_2$ 浓度和 CO 而言,西北路径和偏北路径冷锋引起的浓度下降率相差不大,但都大于偏东路径的浓度下降率。对于 $O_3$ 浓度,不同路径冷锋的影响差异较大,西北路径冷锋的浓度下降率为正值,即冷锋过境 $O_3$ 浓度降低,而偏北路径为较大的负值,即偏北路径冷锋过境造成臭氧浓度反而明显上升,原



因有待进一步研究。

表 4 2015–2018 年不同路径冷锋日 AQI 及 6 种污染物浓度下降率  
单位: %

AQI 及 污染物	西北路径	偏北路径	偏东路径
AQI	31.8	24.6	8.8
PM <sub>2.5</sub>	49.4	38.3	8.8
PM <sub>10</sub>	45.7	25.7	10.6
SO <sub>2</sub>	29.6	6.0	-3.9
NO <sub>2</sub>	22.0	21.7	4.4
O <sub>3</sub>	0.5	-23.9	8.9
CO	21.0	24.2	2.4

冷锋后 AQI 及 6 种污染物浓度相对冷锋日的变化率如表 5。整体而言,偏北路径冷锋对污染物的清除作用可持续到冷锋过境后,使污染物浓度持续降低;西北路径和偏东路径冷锋过境后,污染物浓度继续小幅下降或有所回升。其中,冷锋过境后偏北路径中 AQI、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 浓度变化率明显高于其他路径,这可能与偏北路径冷锋过程的持续时间较长、冷锋强度也较强有关。不同路径冷锋过境后 AQI 变化率存在一定的差异,偏北路径在冷锋过境后 AQI 指数仍有明显的下降,而在西北路径和偏东路径中 AQI 指数较冷锋过境前有些许升高;冷锋过境后西北路径和偏北路径 PM<sub>2.5</sub> 浓度较冷锋过境前仍有较大的降低,PM<sub>2.5</sub> 浓度变化率分别为 11.3% 和 27.4%,冷锋过境后偏东路径冷锋过程使当地 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高;冷锋过境后不同路径 PM<sub>10</sub> 浓度变化率有些许不同,但均为正值,冷锋过境当地 PM<sub>10</sub> 浓度持续下降,偏北路径作用更为明显,不同路径对 PM<sub>10</sub> 浓度的影响中偏北路径的持续时间更长;从不同路径冷锋对 SO<sub>2</sub> 浓度影响来看,偏北路径冷锋过境后 SO<sub>2</sub> 浓度持续下降,西北路径中 SO<sub>2</sub> 浓度变化率为-1.2%,相较冷锋过境前浓度有些许升高,偏东路径中 SO<sub>2</sub> 浓度至冷锋过境后有明显的升高,冷锋过境后 SO<sub>2</sub> 浓度由 10.3 μg/m<sup>3</sup> 上升至 13.2 μg/m<sup>3</sup>;冷锋过境后不同路径的 NO<sub>2</sub> 浓度和 CO 浓度变化类似,偏北和偏东路径的冷锋过程至冷锋过境后 NO<sub>2</sub> 浓度和 CO 浓度有较为明显的持续降低,西北路径中 NO<sub>2</sub> 浓度较冷锋过境前有些许上升,CO 浓度持续下降但不明显,浓度变化率仅为 2.6%;不同路径冷锋过程对 O<sub>3</sub> 浓度的影响与其他污染物有较大的差别,偏北路径和偏东路径冷锋过程至冷锋过境后 O<sub>3</sub> 浓度均有较为明显的升高,偏北路径 O<sub>3</sub> 平均浓度由 42.0 μg/m<sup>3</sup> 上升至 46.5 μg/m<sup>3</sup>,偏东路径 O<sub>3</sub> 平均浓度冷锋过境前为 37.2 μg/m<sup>3</sup>,至冷锋日变为

33.9 μg/m<sup>3</sup>,至冷锋后平均浓度变为 41.8 μg/m<sup>3</sup>,而西北路径则为 O<sub>3</sub> 平均浓度持续下降的趋势。

表 5 2015–2018 年不同路径冷锋至冷锋后 AQI 及 6 种污染物浓度变化率  
单位: %

AQI 及 污染物	西北路径	偏北路径	偏东路径
AQI	-2.4	18.7	-3.8
PM <sub>2.5</sub>	11.3	27.4	-6.7
PM <sub>10</sub>	2.4	16.8	0.5
SO <sub>2</sub>	-1.2	10.4	-28.1
NO <sub>2</sub>	-1.3	11.2	15.2
O <sub>3</sub>	3.4	-10.7	-12.3
CO	2.6	19.7	18.9

4.3 冷锋强度对污染物浓度的影响

冷锋强度对 AQI 及 6 种污染物浓度的影响也存在差异(表 6)。总体而言,无论是冷锋日还是冷锋过境后,强冷锋过程对 AQI 及 6 种污染物浓度的影响均高于一般冷锋,表现出明显更强的清除作用。此外,无论强冷锋过程还是一般冷锋过程,冷锋过境都会使 O<sub>3</sub> 浓度上升,一般冷锋过程 O<sub>3</sub> 浓度上升明显,但冷锋过境后的强冷锋过程中 O<sub>3</sub> 浓度下降明显,浓度下降率为 9.8%。

表 6 2015–2018 年不同强度冷锋 AQI 及 6 种污染物浓度变化率  
单位: %

AQI 及 污染物	冷锋日		冷锋后	
	强冷锋	一般冷锋	强冷锋	一般冷锋
AQI	33.2	21.9	26.1	7.0
PM <sub>2.5</sub>	56.6	31.9	38.7	14.3
PM <sub>10</sub>	48.4	24.1	27.5	7.3
SO <sub>2</sub>	28.2	7.2	28.0	-3.8
NO <sub>2</sub>	27.8	17.6	18.6	6.5
O <sub>3</sub>	-2.6	-14.9	9.8	-10.7
CO	25.7	18.2	17.4	15.7

5 结论

利用历史天气图普查四川盆地 2015–2019 年出现的冷锋过程,在此基础上,统计分析四川盆地冷锋特征及其对逆温和大气污染的影响。

(1)2015–2019 年四川盆地冷锋共计 48 例,年均 9.6 例。冷锋在春、秋两季最多,夏季最少。考虑到四川盆地被众多高大山脉围绕,根据冷锋来向、进入盆地的位置及移动路径,四川盆地冷锋可分为西北路径

(沿青藏高原东北缘进入)、偏北路径(翻越秦岭、大巴山进入)和偏东路径(东灌进入)冷锋。不同路径冷锋的强度、持续时间、季节变化特征存在明显差异。其中偏北路径冷锋最多,偏东路径冷锋最少。冷锋强度存在明显的季节变化,冷锋在秋季最强,其次是春季,夏季和冬季最弱。不同路径冷锋的强度存在差异,偏北路径冷锋最强,平均24小时变温为 $-2.5^{\circ}\text{C}$ ,平均24小时变压为 $5.3\text{ hPa}$ ,平均地面风速为 $1.6\text{ m/s}$ ;其次是西北路径冷锋,平均24小时变温为 $-2.2^{\circ}\text{C}$ ,平均24小时变压为 $1.7\text{ hPa}$ ,地面08时平均风速为 $1.5\text{ m/s}$ ;偏东路径冷锋的强度最小,平均24小时变温为 $-2^{\circ}\text{C}$ ,平均24小时变压为 $1.5\text{ hPa}$ ,地面08时平均风速为 $1.2\text{ m/s}$ 。

(2)冷锋过境对四川盆地的逆温出现频率有明显的影响,过境时四川盆地的逆温频数减少,而在冷锋过境后,逆温的频数回升。冷锋对不同类型逆温的影响存在差异,脱地逆温在冷锋过境时和过境后,出现频率持续降低;而对于贴地逆温和对流层低层逆温,冷锋过境后逆温频率均有不同程度的升高。冷锋过境前后对多层逆温和一般逆温出现频率的影响类似,通常会造成其出现频率在冷锋日降低、冷锋过境后又升高。其中,冷锋日20时多层逆温的出现频率降低最为明显,冷锋过境对此时多层逆温的破坏作用显著。

(3)冷锋过境对AQI和不同污染物浓度有明显的影响,对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、CO以清除作用为主,冷锋过境时浓度降低,过境后浓度回升,其中对颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ )的影响高于气态污染物;而对 $\text{O}_3$ 浓度的影响与其他污染物相反。不同路径冷锋的影响也存在差异。冷锋过境时,西北路径冷锋对四川盆地大气污染物的清除效果最好,对颗粒物的清除作用最好,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低近一半;而偏东路径冷锋过境时大气污染物浓度下降程度最低。冷锋过境后,偏北路径冷锋对污染物的清除作用可持续到冷锋过境后,使污染物浓度持续降低,这可能与偏北路径冷锋过程的持续时间较长、冷锋强度也较强有关;而西北路径和偏东路径冷锋过境后,污染物浓度继续小幅下降或有所回升。此外,强冷锋对大气污染物的清除效果明显高于一般冷锋。

## 参考文献:

- [1] 蒋婉婷,谢汶静,王碧菡. 2014–2016年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 180–188.
- [2] 封彩云,余莲,季承荔. 成都一次持续性污染天气过程的气象条件分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(4): 59–66.
- [3] 钱骏,冯小琼,陈军辉. 四川盆地典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程组分特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4366–4376.
- [4] 贾海鹰,程念亮,何友江. 2014年春季山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 跨界输送研究[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2353–2360.
- [5] 王式功,杨德保,李腊平. 兰州城区冬半年冷锋活动及其对空气污染的影响[J]. 高原气象, 1998(2): 33–40.
- [6] Ana Russo, Ricardo M Trigo, Helena Martins.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{O}_3$  urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal[J]. Atmospheric Environment, 2014, 89(2): 768–785.
- [7] 任阵海,万本太,虞统. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 7–13.
- [8] Z H. Chen, S. Y. Cheng, J. B. Li. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(24): 6078–6087.
- [9] Hanqing Kang, Bin Zhu, Jifeng Su. Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China[J]. Atmospheric Research, 2013, 120/121(8): 78–87.
- [10] Uri Dayan, Ilan Levy. The Influence of Meteorological Conditions and Atmospheric Circulation Types on  $\text{PM}_{10}$  and Visibility in Tel Aviv[J]. American Meteorological Society, 2005, 44(5): 606–619.
- [11] 岳岩裕,周悦,王晓玲. 武汉市霾天气过程冷锋和降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送和清除效应分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4612–4619.
- [12] 许建明,常炉予,马井会. 上海秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4303–4314.
- [13] 马志强,徐敬,张小玲. 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 背景值定值方法及其变化特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 7–12.
- [14] 周德荣. 冷锋对中国东部地区空气污染的影响研究[D]. 南京:南京大学, 2018.
- [15] 常清,杨复沫,李兴华. 北京冬季雾霾天气下颗粒物及其化学组分的粒径分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 363–370.
- [16] Qiang Zhang, Hongyu Li. A study of the relationship between air pollutants and inversion in the



- ABL over the city of Lanzhou [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4).
- [17] 程念亮, 孟凡, 徐峻. 中国东部春季一次强冷锋活动空气污染输送过程分析[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(1): 34–42.
- [18] 陈燕玲, 张根, 王欢. 江西省冬季大气典型污染过程的气象成因研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3021–3032.
- [19] 冯鑫媛, 王式功. 冷锋天气过程大气边界层特征与颗粒物污染[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 585–590.
- [20] Lin C Y, Wang Z, Chen W N. Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(5): 423–434.
- [21] 王丽娟, 刘晓慧, 卢文. 初冬一次冷锋输送过程对中国东部霾天气的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2004–2013.
- [22] 宋明昊, 张小玲, 袁亮. 成都冬季一次持续污染过程气象成因及气溶胶垂直结构和演变特征[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 408–417.
- [23] 刘晓环. 我国典型地区大气污染特征的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [24] 吴勇. 山地城镇空间结构演变研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [25] 李燕, 石小龙, 王树雄. 2009年大连春季强对流雨雪天气过程分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 961–968.
- [26] 危诗敏, 冯鑫媛, 王式功. 四川盆地多层逆温特征及其对大气污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(3): 1005–1013.
- [27] Xinyuan Feng, Shimin Wei, Shigong Wang. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138579.

## Characteristics of Cold Fronts in Sichuan Basin and its Influence on Temperature Inversion and Air Pollution

LI Yuan, FENG Xinyuan, MA Bingxia, WANG Shigong

(College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to further study the characteristics of cold front and its influence of Sichuan Basin, the historical weather map, surface and upper-air meteorological observations and atmospheric environment monitoring data from 2015 to 2019 are analyzed and discussed on the characteristics of cold front and its influence on temperature inversion and air pollution. The results show that the average number of cold front processes in Sichuan Basin is 9.6 cases annually, with the most and strongest in spring and autumn. The north path has the most cold fronts, the strongest average strength, and the most in spring and autumn; the northwest path has the second number and average intensity, more summer and less winter; the east path has the least and weakest. The cold front transit mainly removes  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , and CO, and the impact on particulate matter is higher than that of gaseous pollutants, while the concentration of  $O_3$  increases with the cold front transit, and the removal effect of strong cold front is higher than that of the general cold front. When the cold front passes, the removal effect of the northwest path cold front is the best, and the  $PM_{2.5}$  concentration is reduced by nearly half, the east path cold front clearance ability is the weakest. After the cold front passes through, the removal effect of the cold front in the north path is still significant, and the concentration of pollutants continues to decrease.

**Keywords:** meteorology; cold front; moving path; Sichuan Basin; temperature inversion; air pollution