

四川盆地多层逆温特征及其对大气污染的影响

危诗敏^{1,2},冯鑫媛^{1*},王式功¹,张峥子¹ (1.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; 2.安徽省黄山市气象局,安徽 黄山 245021)

摘要: 利用 2015~2018 年探空观测资料以及国家生态环境部发布的环境空气质量监测数据,对四川盆地多层逆温这一特殊的、尚未见详细报道的逆温结构进行了研究,并评估不同逆温类型及垂直结构对大气污染的影响.结果表明:四川盆地多层逆温实际上是一种并不少见的现象,年平均出现频率为 20.1%.冬季最为频发,成都冬季高达 51.6%.以边界层逆温叠加对流层低层逆温(LTI)的配置为主要特征.依据其垂直结构,划分为四种配置类型,即贴地逆温(SI)叠加脱地逆温(EI)、SI+LTI、EI+LTI、SI+EI+LTI,分别对应第 I、II、III、IV 类多层逆温.其中以第 II、III 类多层逆温为主.逆温的叠加作用对大气污染的影响更大,多层逆温(特别是第 II、IV 类多层逆温)尤其加大了中度及重度污染出现的可能性.第 I、IV 类多层逆温对污染物扩散的抑制作用最为明显,其次是第 II 类多层逆温和仅 SI(即只出现 SI).第 II 类多层逆温在污染最重的冬季出现频率高、强且厚,叠加抑制作用明显,应是重点关注对象.

关键词: 多层逆温; 垂直结构; 大气污染; 叠加效应; 四川盆地

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1005-09

Characteristics of multi-layer inversions in Sichuan Basin and their influences on air pollution. WEI Shi-min^{1,2}, FENG Xin-yuan^{1*}, WANG Shi-gong¹, ZHANG Zheng-zi¹ (1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Huangshan Meteorology Bureau of Anhui Province, Huangshan 245021, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1005~1013

Abstract: The radiosonde data and the ambient air quality data, released by Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, in the Sichuan Basin from 2015 to 2018 were used in this study. The aim was to document the special multi-layer inversion structure in the Sichuan Basin, which has not been reported in detail, as well as to evaluate the effects of different inversion types and vertical structures on air pollution. The result showed that the multi-layer inversion in the Sichuan Basin was actually a common phenomenon, with an average annual frequency of 20.1%. It occurred most frequently in winter and the wintertime frequency in Chengdu reaches 51.6%. The multi-layer inversions were mainly characterized by the boundary layer inversion overlaid with the lower troposphere inversion (LTI). They are divided into four types according to the vertical structure. That is, the surface-based inversion (SI) overlaid with the elevated inversion (EI), SI+LTI, EI+LTI, and SI+EI+LTI, correspond to type I, II, III, and IV multi-layer inversions, respectively. Most were type II and III. The superimposing effect of the inversions had more serious impact on air pollution than non-multi-layer inversions. The multi-layer inversions, especially type II and IV, made more important contribution to increasing the possibility of moderate and heavy pollution. Among the four types, type I and IV multi-layer inversions had the most obvious inhibitory effect on diffusion of air pollutants, with type II multi-layer inversion and only-SI followed. In winter, the most polluted season of a year, the type II multi-layer inversions were frequent, deep, and strong, and had an obvious superimposing effect on air pollution. Thus, it should be the focus of attention.

Key words: multi-layer inversions; vertical structure; air pollution; superimposing effect; Sichuan Basin

逆温是气温随高度的升高而增加的一种现象^[1].逆温层的存在抑制了污染物在垂直方向上的扩散,导致近地面污染物浓度升高,空气质量比预期变差^[2-5].在欧洲城市,有研究指出贴地逆温和脱地逆温都与颗粒物浓度超标的时期相吻合^[6].Rendón 等^[7]指出河谷内逆温层的存在、演化及其与城市热岛的相互作用强烈地影响着城市河谷外污染物浓度.姚青等^[5]在一次天津重污染过程中发现,PM_{2.5} 质量浓度出现峰值时伴随有强逆温出现,逆温强度甚至高达 7.69℃/100m.吴蒙等^[8]指出珠三角地区污染日情

况下逆温层的高度主要集中在 0~1000m,其中贴地逆温出现的频率多在 20%~35%之间.张敏等^[9]研究表明,下半夜有逆温出现时,全天的 PM_{2.5} 浓度要明显高于无逆温时,尤其是在逆温消散比较晚的情况下,PM_{2.5} 日均浓度将快速增长.对地中海东岸 Haifa 湾的加密观测试验表明,地形陡峭地区有时会出现

收稿日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41775147,91644226);国家重点研发计划(2018YFC1505702)

* 责任作者,副教授, fengxy@cuit.edu.cn

多层逆温现象,并且逆温强度与其内部精细结构有关^[10]。Wolf 对卑尔根河谷地区的研究指出存在两种类型的逆温,即近地面逆温和高空逆温,它们由不同的物理机制产生^[11]。国内城市有时也会出现多个逆温层。乌鲁木齐 5000m 以下的大气存在多个逆温层的特征^[12];天津夜间温度层结复杂,也常出现多个逆温层的结构,并对大气污染物的扩散有重要影响^[9];广州地区在多个逆温层出现时,容易形成灰霾天气^[13];京津冀一次污染过程中有双重逆温层的现象出现,强度逐渐增加,最高达到 $3.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长的原因之一^[14]。

四川盆地 SO_2 、 NO_x 和烟(粉)尘排放总量占全国总排放量的 7.3%、5.3%和 3.9%^[15]。高污染物排放量以及盆地地形造成的不利于大气扩散的条件,使四川盆地被列为中国第四大污染最严重的地区^[16]。四川盆地空气质量季节变化明显,冬季最差^[17],且具有明显的二次污染的污染特征^[18]。首要污染物以 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 PM_{10} 为主^[19]。其中, $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为严重,尤其是盆地西部和南部地区^[20]。同时,盆地西北部城市群受到高原东移低值系统影响,也常常发生空气污染事件^[21]。

逆温作为重要的污染气象条件之一,是四川盆地大气污染研究中重点关注的方面之一^[22-23]。四川盆地边界层到对流层中低层的逆温有 91.4% 出现在 5500m 以下^[24]。Feng 等^[24]的研究表明,四川盆地逆温可按其底高分为 3 类:贴地逆温(SI-底高为 0m 的逆温)、脱地逆温(EI-底高大于 0m 且小于等于 1000m 的逆温)、对流层低层逆温(LTI-底高大于 1000m 且小于等于 5500m 的逆温)。其中 SI 和 EI 合称边界层逆温。四川盆地因其特殊的地形和气候条件,以及紧邻青藏高原东缘的特殊位置(尤其是盆沿—盆底海拔高度差最大处超过 2500m——远高于盆底区域边界层的顶部),使得这一地区的逆温特征具有独特性。表现为边界层到对流层中低层的逆温最容易出现在两个高度,即距地面 600m 高度以下和 2200~3500m; LTI 年平均频率(63.0%)和厚度(264.7m)最大, SI 的强度($1.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)最大;而对流层低层逆温频发是四川盆地逆温特征有别于国内其他三大重污染区(即京津冀、长三角、珠三角地区)的独特之处^[24]。值得注意的是,若将同一统计时段内(例如 1 月份),四川盆地 SI、EI 和 LTI 的发生频率相加,三者之和有可能明显超过百分之百,暗示了多个逆温层现象可能会阶段

性呈现。关于重污染个例的零星研究也证明了多个逆温层现象的存在^[25]。然而,对于四川盆地这一特殊的逆温结构尚未见详细报道,缺少多层逆温的结构特征及其季节性差异的研究,尤其缺乏多个逆温层的配置关系与协同作用对大气污染综合影响的研究。因此,本文将深入研究四川盆地多层逆温的结构特征,搞清不同类型和结构的逆温对盆地大气污染的影响,以期对四川盆地环境空气质量预报和大气污染防治提供重要的科学依据。

1 资料与方法

四川盆地共有 4 个高空气象观测站——成都市温江站、达州市达川站、宜宾市宜宾站和重庆市沙坪坝站(图 1)。本文利用 4 站 2015 年 1 月 1 日~2018 年 12 月 31 日每日两次(即北京时 08:00 和 20:00)的规定等压面和特性层探空观测数据。从国家生态环境部的全国城市空气质量实时发布平台获取成都、达州、宜宾、重庆 4 个城市同期逐日空气质量指数(AQI)以及大气污染物质量浓度的逐时监测资料,其中包括 6 种大气污染物: $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO 。

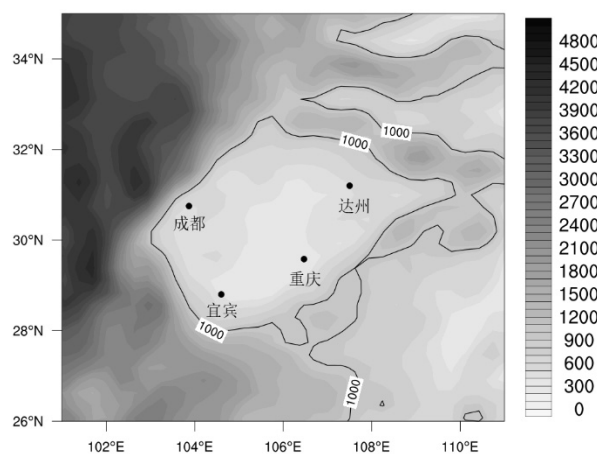


图 1 四川盆地探空站点地理位置分布及地形(m)

Fig.1 Geographical distribution of radiosonde sites and topography of Sichuan Basin

逆温层定义为温度随高度的升高而增加的气层^[1]。逆温出现频率定义为出现逆温的时次数占总有效观测时次数的百分比。逆温层厚度定义为逆温层顶高度与逆温层底高度之差,即 $D=H_2-H_1$,其中 H_1 逆温层底的高度, H_2 逆温层顶的高度。逆温强度则定义为高度每上升 100m 时温度的增量,即 $I=(t_2-t_1)/D \times$

100.其中 t_1 逆温层底的温度($^{\circ}\text{C}$), t_2 逆温层顶的温度($^{\circ}\text{C}$).鉴于 SI、EI 和 LTI 层数均以 1 层为主(见下文),本文将多层逆温定义为同时出现两类或三类逆温,而一般逆温则指仅出现一种类型逆温.根据多层逆温中不同类型逆温的配置情况,将其垂直结构划分为 4 种亚型,分别为第 I 类多层逆温(SI+ EI),第 II 类多层逆温(SI+LTI),第 III 类多层逆温(EI+ LTI)以及第 IV 类多层逆温(SI+EI+LTI).

2 结果与讨论

2.1 逆温层数频率分布

四川盆地逆温层数的频率分布如表 1 所示.绝大多数为 1~3 层,占总数的 96.7%(08:00)和 98.2%(20:00).其中,同一时刻仅出现一个逆温层的情况最常见,占 47.4%(08:00)和 58.7%(20:00);出现 2 层逆温

的分别占 36.6%和 30.9%;同时出现 4 层及以上逆温层的概率很低,仅占 3.3%(08:00)和 1.7% (20:00).08:00 最多为 8 层,出现在夏季;20 是最多为 6 层,出现在春季.从季节分布来看,单层逆温夏季最多,冬季最少.而 2~4 层逆温均为冬季最多,夏季最少.逆温层数的日变化也较为明显,20:00 单层逆温明显多于 08:00,而 2~4 层逆温则表现为 08:00 多于 20:00,这与南京^[1]的逆温层数变化特征较为一致.

进一步统计了不同类型逆温的层数.根据定义,SI 仅有 1 层. EI 若出现几乎只有 1 层(表 2),极少出现 2 层及以上(仅占 1.2%~3.0%).

LTI 则以 1~2 层占绝大多数(表 3), 08:00 和 20:00 只出现 1 层 LTI 分别占 65.0%和 65.6%,只出现 2 层的分别占 28.3%和 28.7%. 08:00LTI 最多可达 6 层, 20:00 可达 4 层.

表 1 2015~2018 年四川盆地逆温层数的频率分布(%)
Table 1 Frequency distribution of the number of inversion layers in the Sichuan Basin during 2015~2018 (%)

分层	08:00					20:00				
	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬	年
1 层	50.6	61.4	49.6	33.6	47.4	68.4	78.9	56.7	43.9	58.7
2 层	36.3	30.8	35.4	41.7	36.6	26.4	17.9	31.6	39.9	30.9
3 层	11.2	6.8	12.5	18.3	12.7	4.5	2.8	10.3	13	8.6
4 层	1.7	1	2.2	5.7	2.9	0.5	0.3	1.3	3.1	1.6
5 层	0.2	-	0.4	0.6	0.3	0	0.2	0.1	0.1	0.1
6 层	-	-	-	0.1	0.04	0.1	-	-	-	0.03
8 层	-	0.1	-	-	0.02	-	-	-	-	-

注:“-”表示未出现.

表 2 2015~2018 年四川盆地 EI 层数的频率分布(%)
Table 2 Frequency distribution of the number of EI layers in the Sichuan Basin during 2015~2018 (%)

分层	08:00					20:00				
	成都	重庆	达州	宜宾	盆地	成都	重庆	达州	宜宾	盆地
1 层	96.4	97.8	97.1	96.4	97	100	99	97.5	100	98.8
2 层	3.6	2.2	2.9	3.6	3	--	1	2.5	--	1.2

注:“-”表示未出现.

表 3 2015~2018 年四川盆地 LTI 层数的频率分布(%)
Table 3 Frequency distribution of the number of LTI layers in the Sichuan Basin during 2015~2018 (%)

分层	08:00					20:00				
	成都	重庆	达州	宜宾	盆地	成都	重庆	达州	宜宾	盆地
1 层	66.7	62.2	68.8	62.4	65	65.9	64.1	69.4	63.4	65.6
2 层	27.6	29.3	24.9	31.2	28.3	28.3	29.2	27.1	30.1	28.7
3 层	4.7	7.2	6	5.6	5.9	5.2	5.8	2.9	5.5	4.9
4 层	0.9	1.3	0.2	0.5	0.7	0.5	0.9	0.5	0.9	0.7
5 层	-	-	-	0.2	0.1	-	-	-	-	-
6 层	0.1	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-

注:“-”表示未出现.

2.2 多层逆温出现频率

上述分析表明,四川盆地存在同时出现多个逆温层的现象.其中,SI(底高为0m的逆温)若出现则仅有1层,而EI和LTI均以1层为主.基于此,本文在前述“资料与方法”部分中根据是否同时出现两类或以上的逆温作为标准,将逆温划分为多层逆温和一般逆温,此划分依据是合理的.

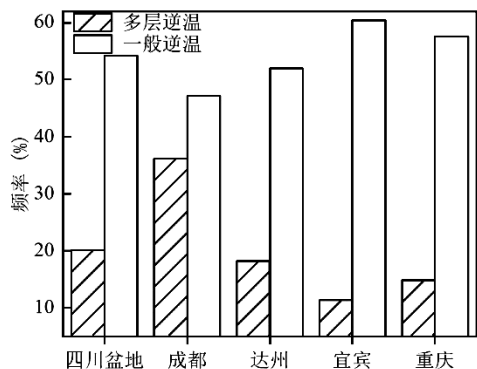


图2 2015~2018年四川盆地多层逆温和一般逆温出现频率

Fig.2 Frequency of multi-layer inversion and general inversion in the Sichuan Basin during 2015~2018

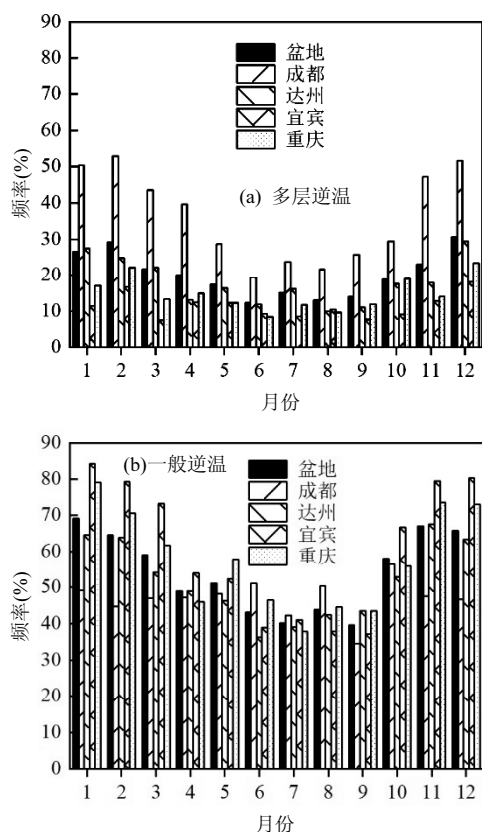


图3 2015~2018年四川盆地多层逆温和一般逆温出现频率的月变化

Fig.3 Monthly frequency of multi-layer inversion and general inversion in the Sichuan Basin during 2015~2018

2015~2018年四川盆地多层逆温和一般逆温的出现频率分别为20.1%和54.2%,表明四川盆地的多层逆温是一种并不少见的现象(图2).其中,多层逆温出现频率成都最高(36.1%),宜宾最低.盆地多层逆温08:00出现频率(28.9%)高于20:00(11.4%),而一般逆温则刚好相反,20:00出现频率(58.6%)高于08:00(49.9%).

四川盆地多层逆温和一般逆温逐月出现频率的变化曲线均呈“U”型分布(图3),与四川盆地AQI的月变化较为一致⁰.其中,多层逆温冬季最频发,尤其是12月,频率达30.6%;夏季频率最低,最小值出现在6月,为12.3%(图3(a)).其中,成都冬季多层逆温频率为51.6%,甚至高于一般逆温出现频率.四川盆地一般逆温出现频率的季节变化也表现为冬季最频发,其中1月出现频率最高,夏季频率最低(42.4%),但最小值出现在9月(图3(b)).此外,成都一般逆温出现频率夏季高、秋季低,季节变化与其他城市存在差异.

2.3 多层逆温的垂直结构特征

按逆温垂直结构将多层逆温分为4类亚型,分别统计它们的特征并与一般逆温的3类亚型进行比较.

2015~2018年四川盆地仅LTI出现频率(43.2%)明显高于其他逆温,四城市中宜宾的出现频率最高、成都最低.其次是第II类多层逆温,出现频率为12.2%,其中成都的出现频率(31.1%)明显高于其他城市.第III类多层逆温再次之,频率为7.1%,达州出现频率最高(15.1%).仅SI和仅EI出现频率相近,分别为5.7%和5.4%,其中仅SI的出现频率成都最高(12.5%),而仅EI的出现频率达州最高(9.5%).第I、IV类多层逆温出现频率最低,仅为0.3%和0.5%(图4).

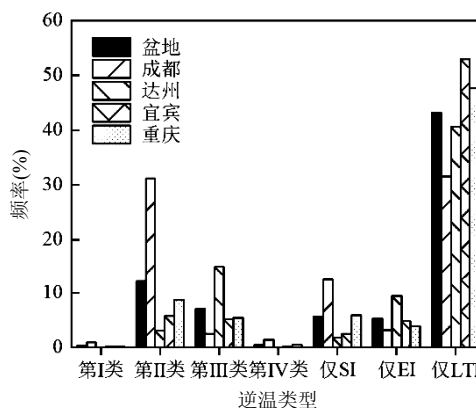


图4 2015~2018年四川盆地不同结构逆温的出现频率

Fig.4 Frequency of the inversions with different structures in the Sichuan Basin during 2015~2018

四川盆地的多层逆温之中,以第Ⅱ类多层逆温为主,占多层逆温总数的 60.5%;其次是第Ⅲ类多层逆温,占 35.2%;第Ⅳ类、第Ⅰ类多层逆温很少,分别占 2.7%和 1.6%.

不同多层逆温结构出现频率的季节变化(图 5)存在明显差异.第Ⅰ类多层逆温出现频率夏季最高、秋

冬两季最低(图 5(a)).而第Ⅱ类多层逆温出现频率的季节变化则相反,表现为冬季最高、夏季最低,月变化曲线呈“U”型分布(图 5(b)),其中,出现频率最大值在 2 月(22.3%),最小值在 7 月(4.7%).相比而言,第Ⅲ、Ⅳ类多层逆温的季节变化不明显,除 12 月出现频率最大(12.6%和 1.3%)外,其余月份变化不大(图 5(c)和(d)).

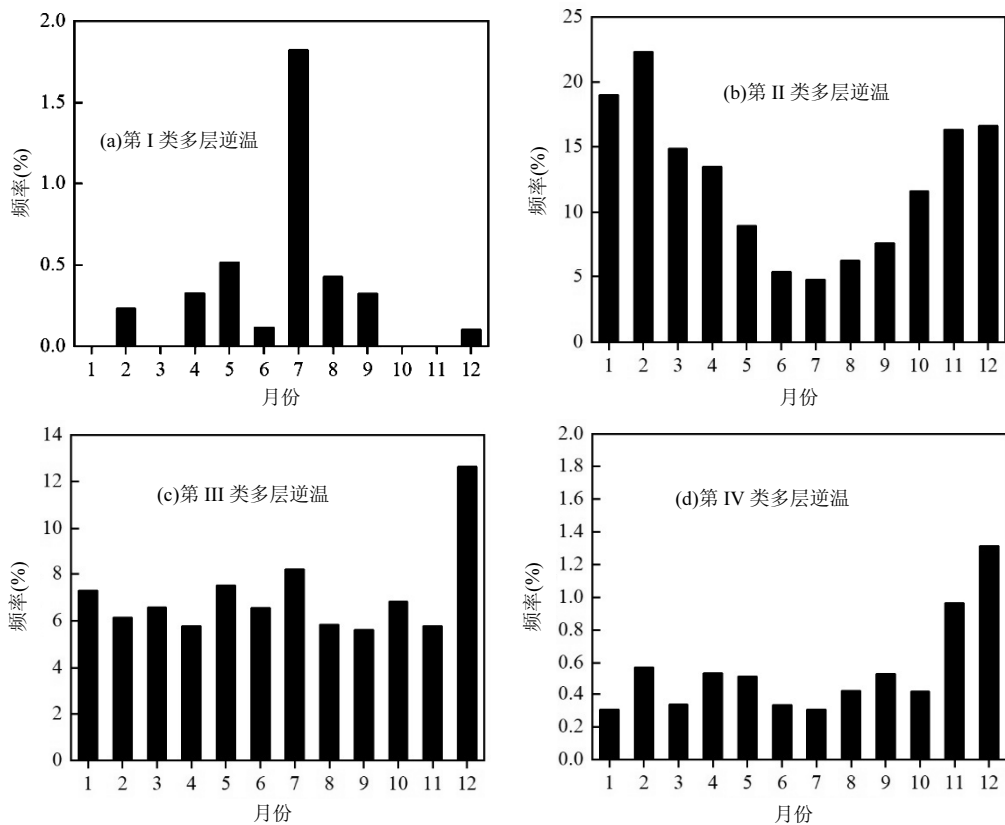
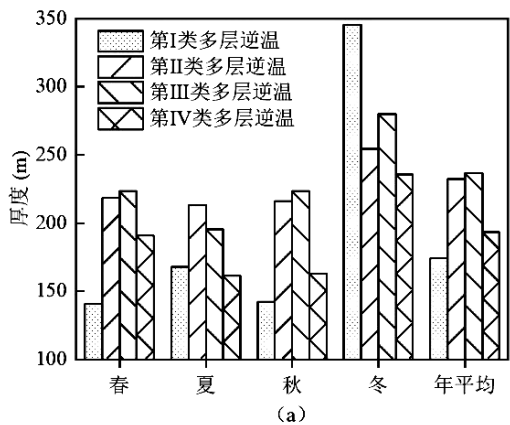


图 5 2015~2018 年四川盆地不同结构多层逆温出现频率的月变化
Fig.5 Monthly variation of frequency of multi-layer inversion with different structures in Sichuan Basin during 2015~2018

不同多层逆温的平均厚度和强度也存在差异,如图 6 所示.第Ⅱ、Ⅲ类多层逆温的较厚(图 6(a)),平均厚度分别为 232.4m 和 236.7m,其次是第Ⅳ类多层逆温(193.6m),第Ⅰ类多层逆温最薄(174.3m). 4 类多层逆温均为冬季最厚,夏/春季最薄.就平均强度而言,第Ⅰ类多层逆温最强,为 1.7℃/100m(图 6(b)),但出现频率低(0.3%);第Ⅱ、Ⅳ类多层逆温次之,分别为 1.5℃/100m 和 1.4℃/100m;第Ⅲ类多层逆温强度最弱,为 1.0℃/100m.从季节变化来看,除第Ⅰ类多层逆温外,其它 3 类多层逆温均为冬季最强、夏季最弱.其中,第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类多层逆温冬季平均强度分别为 1.8℃/100m、1.1℃/100m 和 1.6℃/100m.而第Ⅰ类多层逆温夏季最强 (1.8℃/100m),春季最弱

(1.4℃/100m),这与其逆温出现频率的季节变化较为一致.



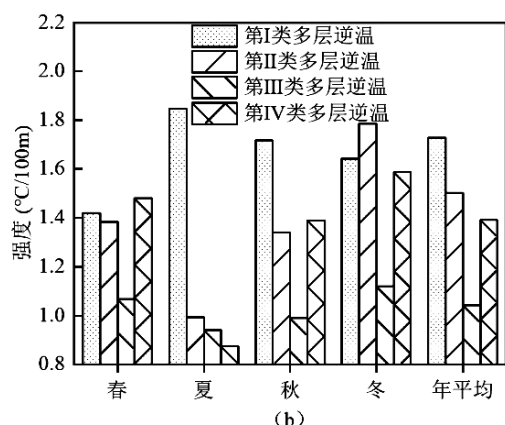


图6 2015~2018年四川盆地不同结构多层逆温平均厚度(a)及平均强度(b)的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of (a) the average thickness and (b) the average intensity of multi-layer inversion with different structures in the Sichuan Basin during 2015~2018

2.4 不同逆温条件对四川盆地空气质量的影响

逆温对四川盆地大气污染有重要影响.这里以各空气质量等级所占的百分比来衡量某种逆温条件下大气污染发生的可能性.有逆温时,四川盆地大气污染(即空气质量Ⅲ级及以上)发生率远高于无逆温时(图7).无逆温时,空气质量优良率高达95.4%,污染率仅4.6%.而多层逆温时大气污染发生率(39.1%)明显高于一般逆温(25.0%),表明逆温的叠加作用对大气污染的影响更大.各类逆温结构对大气污染水平的影响存在一定的差异.第I、II类多层逆温时大气污染发生的可能性最高(分别为59.6%和46.8%),其次是第III、IV类多层逆温以及仅SI,污染发生率分别为30.1%、30.6%和33.5%,而仅EI、仅LTI的大气污染发生率最低(分别为14.5%和25.3%).此外,就中度污染及重度污染而言,多层逆温时中度和重度污染发生率均高于一般逆温,其中,第II、IV类多层逆温的中度和重度污染发生率最高,分别为15.9%和15.6%;而仅LTI和仅EI出现时,中度和重度污染发生的可能性最小,分别占6.7%和2.3%.四川盆地极少出现严重污染,只在仅LTI和第II类多层逆温条件下出现过(发生率仅0.12%和0.04%),并且均发生在1月.

总而言之,四川盆地的多层逆温是一种并不少见的现象,且逆温叠加作用对四川盆地大气污染的影响更大.研究表明,国内其它污染较重的地区或城市(例如京津冀、长三角、珠三角地区)也存在多个

逆温层同时出现的现象.然而,这种现象大多发生在边界层内,即本文中的第I类多层逆温,边界层逆温与对流层低层逆温的多层逆温配置很少出现,与四川盆地的多层逆温特征具有明显的差异.这些研究通常将多层逆温定义为出现两层或两层以上的逆温.北京地区多个逆温层大多出现在500m高度内⁰,600~800m高度以及1200~1400m高度也有出现,明显抑制大气垂直方向上的扩散,使大气污染物不断地累积⁰.南京08:00郊区近地层的湍流发展稳定,会出现多个逆温层⁰.广州地区同时存在的多个逆温层主要出现在1000m内,当贴地逆温与脱地逆温同时存在时,容易出现灰霾天气⁰.兰州边界层内也经常会出现多个逆温层的情况,出现高度分别为300m和800m⁰.

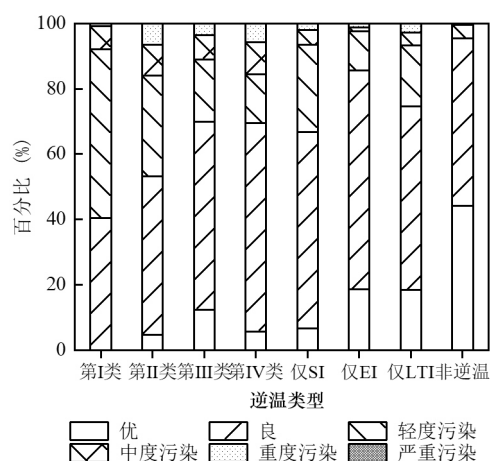


图7 2015~2018年四川盆地不同逆温条件下各空气质量等级所占比例

Fig.7 Proportion of air quality grades under different temperature inversion conditions in Sichuan Basin during 2015~2018

优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染对应的空气质量等级分别为I、II、III、IV、V和VI级

相比而言,四川盆地多层逆温以边界层逆温叠加对流层低层逆温的配置为主要特征.这与四川盆地LTI频发这一有别于其他三大重污染区(京津冀、长三角、珠三角)逆温特征的独特之处⁰有关.边界层逆温由于贴近地面,对于近地面污染物扩散的抑制作用十分明显.这不仅对于四川盆地,对于其它很多城市和地区也是如此^[0-0].然而,四川盆地多层逆温的独特之处在于边界层逆温之上常叠加LTI.当SI之上叠加LTI时,重度污染发生率分别是仅SI的3.3

倍(第 II 型多层逆温)和 2.8 倍(第 IV 型多层逆温)(图 7)。边界层内逆温层(尤其是 SI)的存在抑制了近地面污染物向上扩散和运移,而边界层之上常出现在 2200~3500m 高度的 LTI 则好似覆盖在四川盆地盆周山地上空的盖子,抑制其下方次级环流的向上发展,进一步加剧了对污染物扩散的抑制作用。未来很有必要对四川盆地多层逆温的形成机制及对空气污染的影响机制开展深入研究。

2.5 不同逆温条件下 6 种大气污染物浓度特征

大气污染物浓度存在明显的季节变化^[31],引入去除季节差异的污染物浓度^[32],深入分析不同逆温条件对各种污染物的影响程度及其差异。四川盆地多层逆温以及仅 SI 对当地大气污染物的扩散有明显地抑制作用;而仅 EI 和仅 LTI 对污染物的抑制作用不明显(图 8),但发生中度和重度污染的可能仍有 2.3% 和 6.7%(图 7)。这可能与冷锋过境期间出现的锋面逆温有关。通常而言,冷锋有利于当地大气污染物的清除^[33]。此外,降水对大气污染物具有明显的清除作用^[34]。剔除前期明显降水后,其结果与上述结果基本一致。

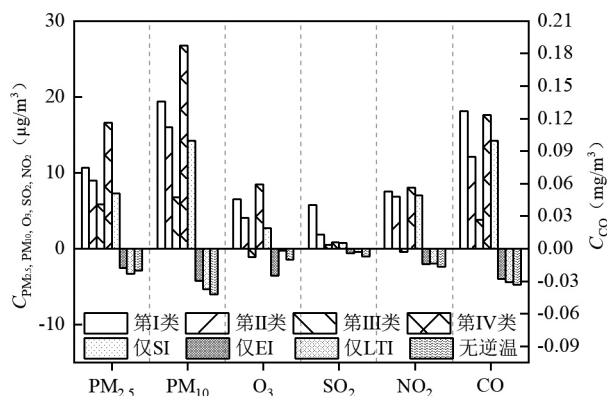


图 8 2015~2018 年四川盆地不同逆温条件下 6 种大气污染物剔除季节差异的平均浓度

Fig.8 The average concentration of six air pollutants under different temperature inversion conditions in the Sichuan Basin during 2015~2018 (in the removal seasonal differences)

逆温对各种污染物的作用及影响程度还存在差异。其中,对于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ,抑制作用最明显的是第 IV 类多层逆温,剔除季节性差异后的浓度分别为 $16.6\mu g/m^3$ 和 $26.8\mu g/m^3$,其次是第 I、II 类多层逆温以及仅 SI,而第 III 类多层逆温的抑制作用相对较弱。对于 O_3 ,抑制作用最明显的也是第 IV 类多层逆温,剔

除季节性差异后的浓度为 $8.5\mu g/m^3$,其次是第 I、II 类多层逆温。对 SO_2 抑制作用最明显的是第 I 类多层逆温,剔除季节性差异后的浓度为 $5.8\mu g/m^3$,其余逆温条件的影响程度均较小。对于 NO_2 和 CO ,抑制作用最明显的分别为第 IV 类多层逆温和第 I 类多层逆温。逆温对不同污染物浓度影响差异的具体原因尚不清楚,有可能与污染物本身的特性以及逆温所在的高度有关,还有待研究。

3 结论

3.1 四川盆地存在同时出现多个逆温层的特点,以 1~3 层为主。其中, EI 以 1 层为主,而 LTI 以 1~2 层居多。

3.2 四川盆地多层逆温是一种并不少见的现象,2015~2018 年多层逆温年平均出现频率达到 20.1%。以边界层逆温叠加对流层低层逆温的配置为主要特征,这是四川盆地相比与国内其他三大重污染区(京津冀、长三角、珠三角)逆温特征的独特之处。季节变化明显,冬季多、夏季少,第 II、III 类多层逆温占绝大多数,分别占多层逆温总数的 60.5% 和 35.2%。

3.3 逆温的叠加作用对四川盆地大气污染的影响更大。多层逆温出现时,大气污染发生的概率高于一般逆温,多层逆温尤其加大了中度及重度污染出现的可能性。当 SI 之上叠加 LTI 时,重度污染发生率分别是仅 SI 的 3.3 倍(第 II 型多层逆温)和 2.8 倍(第 IV 型多层逆温)。

3.4 不同逆温条件对 6 种大气污染物浓度的作用及其影响程度存在明显差异。第 I、IV 类多层逆温对污染物扩散的抑制作用最为明显。第 II 类多层逆温(即 SI+LTI 的配置)在冬季(污染最重的季节)出现频率高、强且厚,叠加抑制作用明显,应是逆温对四川盆地大气污染影响预报和研究的重点关注对象。

参考文献:

- [1] Malek E, Davis T, Martin R S, et al. Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA [J]. Atmospheric Research, 2006,79:108-122.
- [2] Olofson K F G, Andersson P U, Hallquist M, et al. Urban aerosol evolution and particle formation during wintertime temperature inversions [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(2):340-346.
- [3] 桂海林,江琪,康志明,等.2016 年冬季北京地区一次重污染天气过程边界层特征 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2739-2747.

- Gui H L, Jiang Q, Kang Z M, et al. Analysis of boundary layer characteristics of a heavily polluted weather process in Beijing in winter 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(7):2739–2747.
- [4] 吴 蒙,范绍佳,吴 兑.台风过程珠江三角洲边界层特征及其对空气质量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(9):1569–1576.
- Wu M, Fan S J, Wu D. The characteristics of atmospheric boundary layer during tropical cyclone process and its influence on air quality over Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(9):1569–1576.
- [5] 姚 青,刘敬乐,蔡子颖,等.天津大气稳定性和逆温特征对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2865–2872.
- Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al. Atmospheric stability and inverse temperature characteristics of Tianjin and its effect on $\text{PM}_{2.5}$ pollution [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8):2865–2872.
- [6] Kukkonen J, Pohjola M, Sokhi R S, et al. Analysis and evaluation of selected local-scale PM_{10} air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo [J]. *Atmospheric Environment*, 2005,39(15):2759–2773.
- [7] Rendón Angela M, Salazar J F, Palacio C A, et al. Temperature inversion breakup with impacts on air quality in urban valleys influenced by topographic shading [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2015,54(2):302–321.
- [8] 吴 蒙,罗 云,吴 兑,等.珠三角干季边界层垂直温度结构对空气质量的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2019,42(5):189–195.
- Wu M, Luo Y, Wu D, et al. Influence of vertical temperature structure on air quality over Pearl River Delta Region during dry season [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,54(2):302–321.
- [9] 张 敏,蔡子颖,韩素芹,等.天津污染天气边界层温度层结变化特征及预报阈值确定 [J]. *环境科学学报*, 2018,38(6):2270–2278.
- Zhang M, Cai Z Y, Han S Q, et al. The research on threshold and regularity of temperature stratification in heavy pollution weather in Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(6):2270–2278.
- [10] Haikin N, Galanti E, reisn T G, et al. Inner structure of atmospheric inversion layers over Haifa Bay in the Eastern Mediterranean [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015,156(3):471–487.
- [11] Tobias W, Igor E, Joachim R. Analysis of the vertical temperature structure in the Bergen valley, Norway, and its connection to pollution episodes [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,119(18):10,645–10,662.
- [12] 姚作新,吕 鸣,贺晓东.2008~2009 乌鲁木齐近地空间逆温层特征分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2011,5(3):33–36.
- YAO Zuo-xin, LÜ Ming, HE Xiao-dong. Inversion Layer characteristics of near-earth space in Urumqi, from June 2008 to May 2009 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2011,5(3):33–36.
- [13] 廖碧婷,黄 俊,王春林,等.广州地区灰霾过程和清洁过程的边界层特征对比分析 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(12):4432–4443.
- Liao B T, Huang J, Wang C L, et al. Comparative analysis on the boundary layer features of haze processes and cleaning process in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(12):4432–4443.
- [14] 张晗宇,温 维,程水源,等.京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(4):1209–1220.
- Zhang H Y, Wei W, Cheng S Y, et al. Study on typical heavy pollution process and feedback effect in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(4):1209–1220.
- [15] 国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook* [M]. China Statistics Press, 2019.
- [16] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2012b,12:6273–6273.
- [17] 孙欢欢,倪长健,崔 蕾,等.成都市大气颗粒物污染特征及与气象因子的关联性分析 [J]. *环境污染与防治*, 2016,38(5):55–60.
- Sui H H, Ni C J, Cui L, et al. Pollution characteristics of atmospheric particles and their correlation with meteorological factors in Chengdu City [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016,38(5):55–60.
- [18] 王淑兰,柴发合,张远航,等.成都市大气颗粒物污染特征及其来源分析 [J]. *地理科学*, 2004,(4):488–492.
- Wang S L, Chai F H, Zhang Y H, et al. Analysis on the sources and characters of particles in Chengdu [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004,(4):488–492.
- [19] 常美玉,向卫国.川西地区空气污染特征及气象影响因素分析 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2019,34(1):92–99.
- Chang M Y, Xiang W G. Characteristics of air pollution in Western Sichuan and analysis of meteorological factors [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2019,34(1):92–99.
- [20] 刘培川,罗 彬,张 巍,等.四川盆地城市细颗粒物污染特征分类研究 [J]. *四川环境*, 2019,38(2):57–61.
- Liu B C, Luo B, Zhang W, et al. Analysis and research on classification of pollution characteristics of fine particulate matter in Sichuan Basin [J]. *Sichuan Environment*, 2019,38(2):57–61.
- [21] Ning G, Wang S G, Yin S H L, et al. Impact of low-pressure systems on winter heavy air pollution in the northwest Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018,18(18):13601–13615.
- [22] 刘建西,周和生,魏袁立.四川盆地大气边界层风温场特征 [J]. *四川气象*, 1999,19(3):39–45.
- Liu J X, Zhou H S, Wei Y L. Characteristics of wind temperature field in atmospheric boundary layer in Sichuan Basin [J]. *Sichuan Meteorology*, 1999,19(3):39–45.
- [23] 李培荣,向卫国.四川盆地逆温层特征对空气污染的影响 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2018,33(2):220–226.
- Li P R, Xiang W G. Influence of inversion layer characteristics in Sichuan Basin on air pollution [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2018,33(2):220–226.
- [24] 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.
- [25] 刘 敏,许丽萍,余家燕,等.重庆主城区秋冬季逆温对空气质量影响的观测分析 [J]. *环境工程学报*, 2014,8(8):3367–3372.
- Liu M, Xu L P, Yu J Y, et al. Analysis of the influence of inversion on air quality in Chongqing urban area during autumn and winter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014,8(8):3367–3372.
- [26] 危诗敏,冯鑫媛,张铮子.四川盆地城市群环境空气质量时空分布特

- 征 [J]. 成都信息工程大学学报, 2020:35.
- Wei S M, Feng X Y, Zhang Z Z. Temporal and spatial distribution characteristics of air quality in urban agglomeration of Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020:35.
- [27] 徐宏辉,王跃思,温天雪,等.北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布 [J]. 中国环境科学, 2008,(1):2-6.
- Xu H H, Wang Y S, Wen T X, et al. Vertical distributions of atmospheric aerosol mass concentrations in autumn, Beijing City [J]. China Environmental Science, 2008,28(1):2-6.
- [28] 贺园园,胡 非,刘郁珏,等.北京地区一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程的边界层特征分析 [J]. 气候与环境研究, 2019,24(1):61-72.
- He Y Y, Hu F, Liu Y J, et al. Boundary layer characteristics during a heavy $PM_{2.5}$ pollution process in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2019,24(1):61-72.
- [29] 张礼春,朱 彬,牛生杰,等.南京市冬季市区和郊区晴天大气边界层结构对比分析 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2009, 1(4):329-337.
- Zhang L C, Zhu B, Niu S J, et al. Contrastive analysis of atmospheric boundary layer structures in fair weather of winter between urban and suburban areas of Nanjing [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 1(4):329-337.
- [30] 安兴琴,吕世华.兰州市冬季大气边界层结构特征的观测和数值模拟研究 [J]. 气象科学, 2007,(4):374-380.
- An X Q, Lü S H. Observation and simulation study on structure characteristics of atmospheric boundary layers over Lanzhou in winter. [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2007,(4):374-380.
- [31] 冯鑫媛,张 莹.川渝地区大气污染物质量浓度时空分布特征 [J]. 中国科技论文, 2018,13(15):1708-1715.
- Feng X Y, Zhang Y. Temporal and spatial distribution characteristics of air pollutant concentrations in Sichuan and Chongqing area [J]. China Sciencepaper, 2018,13(15):1708-1715.
- [32] He J, Gong S, Yu Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2017,223:484-496.
- [33] Xinyuan Feng, Shigong Wang. Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012,24(4):665-674.
- [34] 杨 茜,高阳华,陈贵川.降水对重庆市大气污染物浓度的影响分析 [J]. 气象与环境科学, 2019,42(2):68-73.
- Yang Q, Gao Y H, Chen G C. Influence analysis of the precipitation on atmospheric pollutant concentration in Chongqing [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019,42(2):68-73.
- 作者简介：**危诗敏(1994-),女,广西柳州人,成都信息工程大学硕士研究生,主要从事环境气象方面研究.发表论文 1 篇.

《中国环境科学》再次获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”,位列学科榜首

《中国环境科学》在武汉大学中国科学评价研究中心发布的第四届中国学术期刊评价中获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”.中国学术期刊评价按照各期刊的期刊学术质量和影响力指标综合得分排名,将排序期刊分为 A+、A、A-、B+、B、C 6 个等级,评价的 6201 种中文学术期刊中有 316 种学术期刊获评权威期刊(A+),A+为得分排名前 5%的期刊.此次获得“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”称号的环境类期刊有 3 种,《中国环境科学》在环境科学技术与资源科学技术学科内荣登榜首.