

贺丽媛,杨 柳,朱 瑶,等.四川盆地霾过程边界层逆温的演化特征及其污染效应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):11-18.

He L Y, Yang L, Zhu Y, et al. Evolution characteristics of boundary layer inversion and its pollution effects during haze events in the Sichuan Basin [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):11-18.

四川盆地霾过程边界层逆温的演化特征及其污染效应

贺丽媛^{1,2},杨 柳^{3*},朱 瑶^{1,2},倪长健^{1,2} (1.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225; 2.成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站,四川 成都 610225; 3.成都市气象局,四川 成都 611130)

摘要: 利用四川盆地 2014~2017 年冬季 4 个地区(成都、宜宾、达州和重庆)的秒级探空资料和常规环境气象监测数据,结合同期成都的 Mie 散射激光雷达探测资料,通过大气消光系数廓线识别边界层结构,探究了霾天气过程中大气边界层逆温演化特征及其污染效应.结果表明:贴地逆温(SLI)、混合层顶逆温(MLI)以及气溶胶分界层逆温(ABI)是边界层逆温的 3 种基本形态.三层逆温一致表现为自下而上逐渐减弱的形态特征,但在地区之间呈现出明显的空间分异性.随着霾从形成期向发展期和持续期的渐进演化,三层逆温的发生频率显著上升,SLI 的强度和厚度逐渐减小,MLI 的强度和厚度则不断增加,底高也随之降低,ABI 的强度和厚度呈波动变化.SLI 和 MLI 的共存及其协同演变不仅强烈地抑制了地面污染物的垂直扩散,而且有利于近地面湿度的增加,进而诱发地面颗粒物的积聚以及吸湿性的增强,从而导致地面能见度降低.上述成果从新的视角揭示了四川盆地霾过程边界层逆温的复杂演化形态及其影响,也为后续针对对流层低层逆温的一体化研究奠定了基础.

关键词: 霾过程; 边界层; 逆温; 污染效应; 四川盆地

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0011-18

Evolution characteristics of boundary layer inversion and its pollution effects during haze events in the Sichuan Basin. HE Li-yuan^{1,2}, YANG Liu^{3*}, ZHU Yao^{1,2}, NI Chang-jian^{1,2} (1.College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2.Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3.Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 11~18

Abstract: Based on the second level sounding data and routine environmental meteorological monitoring data from four regions (Chengdu, Yibin, Dazhou, and Chongqing) of the Sichuan Basin, during the winter of 2014~2017, combined with Mie scattering LiDAR detection data in Chengdu during the same period, the boundary layer structure was identified by atmospheric extinction coefficient profile, and the evolution characteristics and pollution effects of atmospheric boundary layer inversion during haze weather were investigated. The results indicated that: Surface Layer Inversion (SLI), Mixed Layer Inversion (MLI), and Aerosol Boundary Layer Inversion (ABI) represented the three fundamental forms of boundary layer inversion. They showed a gradually weakened trend from bottom up and mark spatial variation among different regions. With the evolution of haze events from the formation phase to the persistence phase, the frequency of the three-layer inversions significantly increased. In the process, the intensity and thickness of SLI gradually decreased. However, the intensity and thickness of MLI exhibited quite opposite trend. In the meantime, the base height of MLI also decreased. The intensity and thickness of ABI fluctuated all the time. The coexistence and co-evolution of SLI and MLI not only strongly inhibited the vertical dispersion of ground pollutants, but also contributed to the increased near-surface humidity, which in turn induced the accumulation of particulate matter at the surface and enhanced aerosol hygroscopic properties, thereby reducing ground-level visibility. The above results revealed complex evolutionary patterns of boundary layer inversion during haze episodes in the Sichuan Basin from a new perspective and lay the foundation for integrated studies on the tropospheric lower-level inversion.

Key words: haze event; boundary layer; inversion; pollution effect; the Sichuan Basin

作为一种特殊的热力结构形态,逆温直接影响动量、热量、水汽和气溶胶在大气中的垂直交换,是区域天气、气候和环境空气质量演化的重要影响因素^[1].

受天气系统、边界层过程以及地形等多因素的

影响,逆温的成因十分复杂,并呈现出显著的时空变

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3709301);四川省科技教育联合基金项目(2024NSFSC1983)

* 责任作者,高级工程师, 80172366@qq.com

化特征.周书华等^[2]将边界层逆温分为贴地逆温、脱地逆温和高悬逆温,并分析了成都地区边界层逆温的统计特征.贴地逆温一般在傍晚日落时形成,早晨日出后消散,并表现为冬季强,夏季弱等特点^[3-4].就逆温在我国的空间分布而言,华东、华南沿海地区逆温强度最大,厚度最厚,在盆地发生强逆温的频率更高.Anquetin 等^[5]通过模拟山谷逆温的演化过程,指出夜间逆温层的垂直范围更多受地面性质和山谷几何形状的影响.对霾过程的 WRF 模拟试验表明,地形作用可促进高空逆温形成及贴地逆温加强,是导致重霾发生的一个关键因素^[6-7].杜荣光等^[8]分析了逆温对污染物浓度的影响,发现污染物浓度与逆温的发生频率、强度、厚度呈正相关,与逆温层底高呈负相关.针对重霾的研究表明,相比于逆温频率与厚度,逆温强度与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的相关性更强^[9].Miao 等^[10]的研究发现,边界层上的暖平流会导致平流逆温形成,进而抑制边界层发展并导致污染的加重.由此可见,作为稳定的大气层结,逆温层像盖子一样阻碍污染物在垂直方向的扩散,导致污染物在边界层内大量累积,一直是区域环境空气质量预报的关键污染潜势.

四川盆地紧邻青藏高原,盆地外围与底部的最大高度差超过 2500m,深盆地地形是四川盆地独特的地形特征.Feng 等^[11]基于秒级探空资料的分析表明,出现在 2200~3500m 之间的对流层低层逆温(LTI)频发是四川盆地逆温的独特之处,LTI 的形成和演化是地形诱导的不同高度的层状流的协同作用和背风坡的地形遮蔽作用的结果.Ning 等^[12]分析了四川盆地西北部冬季 8 次大气重污染过程,指出高原干低值天气系统东移,下沉增温造成边界层顶以上形成强逆温层,从而导致区域大气重污染的形成.危诗敏等^[13]指出,四川盆地冬季普遍存在多层逆温现象,多层逆温进一步加大了中度及重度污染出现的可能性.其中,针对成都地区的研究表明,逆温层数对空气污染的指示意义要优于逆温厚度和逆温强度^[14].进一步研究指出,作为四川盆地多层逆温的重要组成部分,边界层逆温与气溶胶垂直分布之间存在显著的互馈作用^[15].朱育雷等^[16-17]研究了大气消光系数的垂直分布形态,提出了识别混合层和气溶胶分界层的新算法,并发现混合层顶以及气溶胶分界层和逆温之间均

存在很好的对应关系.虽然已经围绕四川盆地多层逆温及其影响开展了大量的研究,但现有的边界层逆温分层缺乏明确的物理意义,弱化了逆温统计结果对其污染效应的表征能力;另外,迄今为止,针对霾过程边界层逆温演化的细致结构及其配置关系尚不清晰.

着眼于典型霾天气过程的选取以及研究成果的比对,本文利用四川盆地 2014~2017 年冬季 4 个地区(成都、宜宾、达州和重庆)的秒级探空资料和常规环境气象监测数据,结合同期位于成都的 Mie 散射激光雷达探测资料,通过大气消光系数廓线识别边界层结构,探究了贴地逆温(SLI)、混合层顶逆温(MLI)以及气溶胶分界层逆温(ABI)在霾过程中的演化特征,从全新的视角阐明边界层逆温对灰霾演化的响应关系及其污染效应.

1 资料及方法

1.1 资料及资料处理

本文利用的资料包括四川盆地 2014~2017 年冬季(12 月~次年 2 月)4 个高空气象观测站(成都、宜宾、达州和重庆)每日两次(即北京时间 8 时、20 时)的秒级探空资料,以及该时段同时次大气能见度(V)、相对湿度(RH)、地面细颗粒物质量($PM_{2.5}$)浓度和位于西南交通大学九里堤校区的 Mie 散射激光雷达数据.四川盆地 4 个高空气象观测站具体位置为成都市温江站、宜宾市宜宾站、重庆市沙坪坝站和达州市达川站,分布情况如图 1 所示.

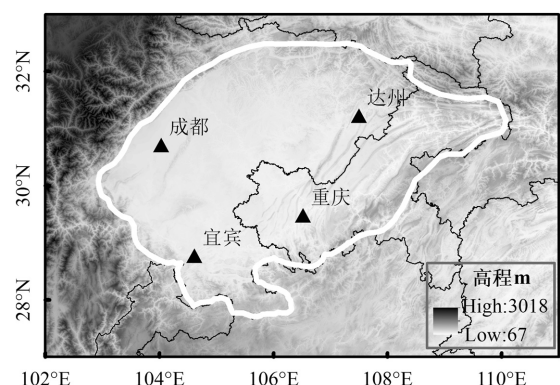


图 1 四川盆地 4 个探空站点地理位置

Fig.1 Location of the four radiosonde stations in the Sichuan Basin

首先,剔除出现降水、沙尘以及大风现象所在日

的全部数据;其次,剔除仪器烘干后相对湿度仍大于 40%的异常数据、超出界限值的数据、连续无变化的数据及缺测数据;最后,根据《霾的观测和预报等级》(QX/T113—2010)^[18],排除其它能导致低能见度事件的情况,将霾时判定为满足小时能见度数值低于 10km 且环境相对湿度低于 80%,或当环境相对湿度在 80%~95%之间时,PM_{2.5} 质量浓度高于 75 μg/m³ 的时次,将日界定为北京时 20 时,一日不低于 1/4 个定时观测时次判别为霾,该日记为霾日;当霾跨日界持续时长不低于 1/4 定时时次,但日界前(或后)持续时长不足 1/4 定时时次且大于 1/8 定时时次,则相应的上跨日(或下跨日)也记为霾日.基于上述判定原则,在研究时段内共筛选出四川盆地 4 个站点 36 次持续性霾过程.

本文中逆温层定义为逆温强度大于等于 0°C/100m 且逆温厚度大于 40m 的大气层结^[15].逆温发生频率定义为逆温出现的次数占总探空观测次数的百分比,即 $F = (n / N) \times 100\%$.逆温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 为逆温层底高度, H_2 为逆温层顶高度,单位:m.逆温强度定义为逆温层中每 100m 的温度变化值,即 $I = (t_2 - t_1) / D \times 100$,其中 t_1 为逆温层底温度(°C), t_2 为逆温层顶温度(°C),单位:°C/100m.

1.2 边界层逆温的分层

大气消光系数廓线直观反映大气消光能力随高度的变化,并与颗粒物粒径分布、化学组成、密度以及浓度参数密切相关.大气消光系数廓线是地气之间热力和动力综合作用的结果,其形态特征为边界层热力结构的诊断提供新途径.

混合层定义为湍流特征不连续界面以下的大气,表征污染物在垂直方向被热力湍流稀释的范围,即低层空气热力对流与动力湍流输送所能达到的高度.朱育雷等^[16]根据混合层顶上下大气消光系数分别表现为整体缓变区与显著下降区的形态特征,据此提出了混合层识别的 logistic 曲线算法,并指出混合层顶与逆温存在很好的伴生特征,且混合层高度对地面细颗粒物的演化具有很好的指示意义.边界层顶为气溶胶消光系数和分子消光系数之间的过渡区,朱育雷等^[17]基于根据大气消光系数在此过渡区 S 型型态特征,提出了气溶胶分界层 Sigmoid 函数的计算方案,并指出气溶胶分界层附近同样存在

逆温的伴生现象.混合层顶逆温和气溶胶分界层逆温与大气消光系数配置关系的概念模型分别如图 2 所示^[16-17].

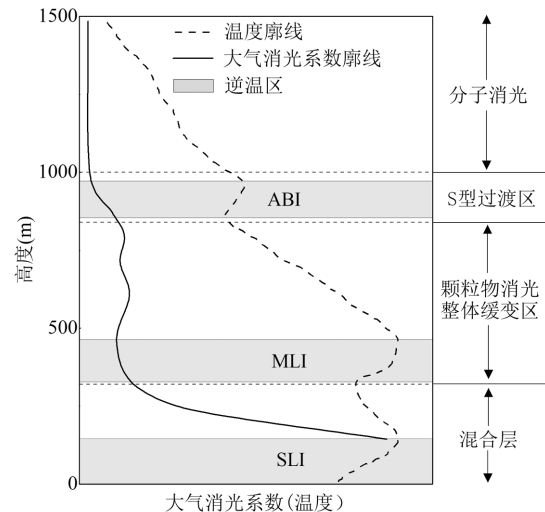


图2 边界层逆温与大气消光系数配置关系的概念模型
Fig.2 Conceptual model of the spatial relationship between boundary layer inversion and atmospheric extinction coefficient

为此,将边界层逆温自下而上分为贴地逆温(SLI)、混合层顶逆温(MLI)以及气溶胶分界层逆温(ABI),基于成都地区边界层逆温的识别结果,类比分析其它 3 个地区霾天气过程中大气边界层逆温演化特征及其污染效应.其中,MLI 和 ABI 的形成和演化主要与边界层湍流过程有关,SLI 的形成和演化主要与地气辐射过程有关.

2 结果与讨论

统计了四川盆地 2014~2017 年冬季 4 个地区霾过程边界层逆温的结构特征,如表 1 所示.由表 1 可见,SLI、MLI 以及 ABI 的发生频率分别为 47.0%、26.7%、22.9%,平均厚度分别为 104m、89m、86m,平均强度分别为 1.31°C/100m、0.54°C/100m、0.49°C/100m,其中 SLI 的频率、厚度均高于文献^[15]针对四川盆地冬季的对应统计结果.这一统计结果表明,SLI、MLI 以及 ABI 不仅具有明确的物理意义,也是霾过程边界层逆温的 3 种基本形态.为此,本文对霾过程 SLI、MLI 以及 ABI 时空演化特征进行了细致的诊断,以期进一步厘清边界层逆温的协同关系及其空气污染效应.

表 1 四川盆地 2014~2017 年冬季霾过程边界层逆温统计特征
Table 1 Statistical characteristics of boundary layer inversion during winter haze events in the Sichuan Basin from 2014 to 2017

逆温类型	强度(°C/100m)	厚度(m)	频率(%)
SLI	1.31	104	47.0
MLI	0.54	89	26.7
ABI	0.49	86	22.9

2.1 霾过程边界层逆温的空间分布特征

由表 1 还可发现,平均逆温强度表现为 SLI 最强,MLI 次之,ABI 最弱;平均逆温厚度表现为 SLI 最厚,MLI 次之,ABI 最薄;逆温发生频率表现为 SLI 最多,MLI 次之,ABI 最少.因此,三层逆温自下而上一致表现为强度逐渐减弱,厚度逐渐减小,频率逐渐下降.进一步统计了 SLI、MLI 以及 ABI 在 08:00 和 20:00 的特征,如表 2 所示.由表 2 可见,SLI、MLI 以及 ABI 强度自下而上同样呈现出为逐渐减弱的形态特征,这与表 1 的统

计结果一致.就 SLI 和 MLI 而言,其强度、厚度和频率均呈现出较为显著的日变化特征,其中 08:00 逆温的厚度和频率要显著大于 20:00,但强度略小;对 ABI 而言,其厚度和频率在 8:00 和 20:00 总体差异不大,但 8 时的强度要更强;进一步统计表明,08:00 和 20:00MLI 的平均高度分别为 236m、283m,即 08:00MLI 平均高度更低.

表 1 四川盆地 2014~2017 年冬季霾过程不同时段边界层逆温特征

Table 2 The boundary layer inversion characteristics during winter haze events in the Sichuan Basin at different time from 2014 to 2017

逆温类型	08:00			20:00		
	强度(°C/100m)	厚度(m)	频率(%)	强度(°C/100m)	厚度(m)	频率(%)
SLI	1.28	131	51.8	1.34	77	42.3
MLI	0.62	102	37.2	0.46	75	16.1
ABI	0.53	84	21.6	0.45	89	23.9

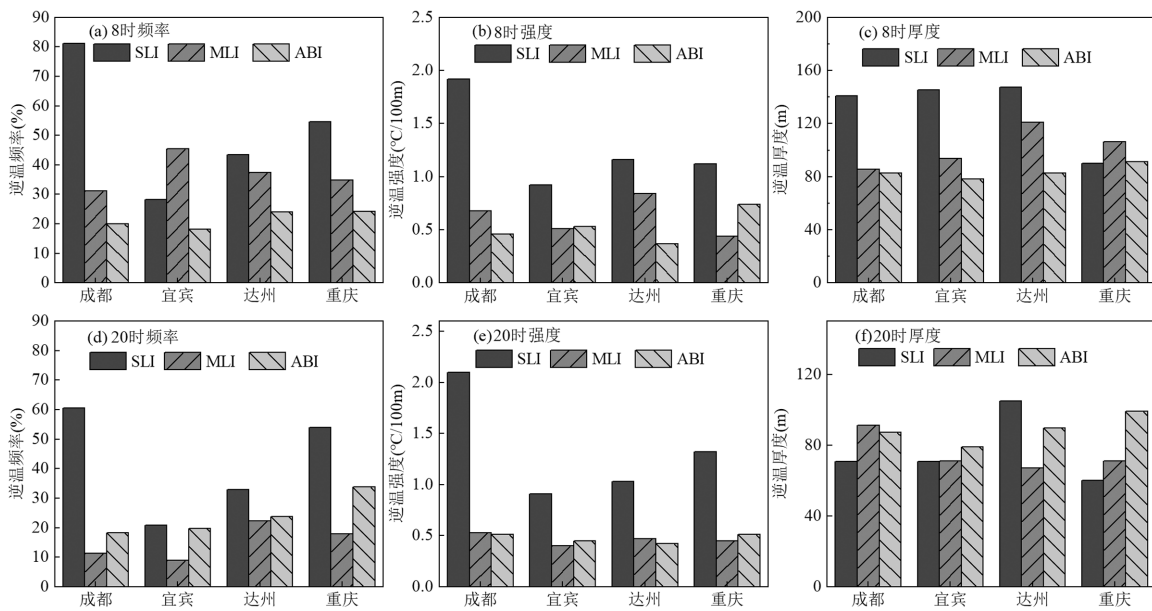


图 3 2014~2017 年四川盆地冬季霾过程不同地区的逆温统计特征

Fig.3 Statistical characteristics of inversions during winter haze events in different regions in the Sichuan Basin from 2014 to 2017

分别统计了四川盆地 4 个地区 2014~2017 年冬季霾过程边界层逆温结构特征,如图 3 所示.由图 3 可见,就 SLI 而言,成都地区 08:00 与 20:00SLI 的发生频率分别高达 81.1%、60.5%,强度分别为 1.92°C/100m、2.10°C/100m,在 4 个地区当中成都地区逆温发生频率最高、强度最强,重庆和达州次之,宜宾最弱;4 个地区 08:00 与 20:00SLI 的厚度总体相当,其中

达州地区偏大.成都地区这一统计结果与周书华等^[3]的研究结果一致,但其频率、强度与厚度均有显著提升,这体现了霾过程逆温配置关系的特殊性.其中,成都地区逆温强度高达 2°C/100m,远高于其他 3 个地区,与文献[18]的研究结果一致.就 MLI 而言,达州地区 08:00 与 20:00MLI 的发生频率分别为 37.4%、22.4%,强度分别为 0.84°C/100m、0.47°C/100m,厚度

分别为 121m、67m,在 4 个地区当中达州地区 MLI 日发生频率较高、平均强度较强、平均厚度较大,其余 3 个地区 08:00 与 20:00MLI 的平均发生频率、强度与厚度总体相当.这一空间分布与 Feng 等^[19]针对四川盆地脱地逆温的统计结果一致,但其发生频率总体略有增加.这可能与逆温层划分的方法存在差异有关.就 ABI 而言,重庆地区 8:00 与 20:00 ABI 的强度分别为 0.74°C/100m、0.51°C/100m,厚度分别为 91m、99m,在 4 个地区中强度更强、厚度更大.另外,除了重庆 20 时的 ABI 发生频率超过 30%外,其余 ABI 的发生频率都保持在 20%左右.相比于 SLI 和 MLI 而言,ABI 距离下垫面最高(均值在 1000m 左右),其频率、强度和厚度在 4 个地区中的变化幅度最小.这与文献[15,20]针对四川盆地低空逆温的研究结果一致.上述分析表明,四川盆地边界层逆温包括 SLI、MLI 以及 ABI 3 种基本的逆温形态,SLI、MLI 以及 ABI 的结构呈现出复杂的空间分布和日变化特征.这是地气之间热力和动力作用的结果,其成因这不仅与区域自然地理背景以及城市化进程有关,霾过程城市气溶胶的温度效应可能也是其中一个关键的影响因素^[21-23].

2.2 霾过程边界层逆温的时间变化特征

按文献[24]提供的方案,根据大气能见度的变化将四川盆地持续性霾过程分为形成期、发展期、持续期以及消亡期,分别统计了边界层逆温(频率、强度、厚度及高度)的时间演变特征.

2.2.1 逆温频率

统计了霾过程边界层逆温频率的时间演变特征,如表 3 所示.由表 3 可见,SLI 在霾过程形成期、发展期与持续期的发生频率分别为 21.2%、31.0%、38.4%,MLI 在霾过程形成期、发展期与持续期的发生频率分别为 15.5%、23.0%、46.0%,ABI 在霾过程形成期、发展期与持续期的发生频率分别为 22.6%、25.6%、34.3%.上述分析结果表明,随着霾过程从形成期到持续期的渐进演变,三层逆温的发生频率均呈显著上升的趋势,并在持续期达到峰值,后在消亡期急剧降低.

2.2.2 逆温强度

统计了霾过程边界层逆温平均强度的时间演变特征,如表 4 所示.由表 4 可见,在霾过程形成期、发展期与持续期,SLI 的平均逆温强度分别为 1.44°C/100m、1.40°C/100m、1.26°C/100m,MLI 的平均强度分别为 0.52°C/100m、0.57°C/100m、

0.61°C/100m,ABI 的平均强度分别为 0.63°C/100m、0.41°C/100m、0.47°C/100m.上述分析表明,随着霾过程从形成期到持续期的渐进演变,SLI 的平均强度在形成期达到峰值后呈不断减弱的趋势,MLI 的平均强度则呈不断上升的趋势并在持续期达到峰值,另外,ABI 的平均强度在霾过程中呈现波动特征.

表 3 霾过程边界层逆温发生频率的时间演变特征(%)

Table 3 The temporal evolution characteristics of the frequency of inversion of the boundary layer during haze events (%)

霾过程	SLI	MLI	ABI
形成期	21.2	15.5	22.6
发展期	31.0	23.0	25.6
持续期	38.4	46.0	34.3
消亡期	9.4	15.5	17.5

表 4 霾过程边界层逆温平均强度的时间演变特征(°C/100m)

Table 4 The temporal evolution characteristics of boundary layer Inversion mean strength during haze events (°C/100m)

霾过程	SLI	MLI	ABI
形成期	1.44	0.52	0.63
发展期	1.40	0.57	0.41
持续期	1.26	0.61	0.47
消亡期	1.04	0.48	0.41

2.2.3 逆温厚度

统计了霾过程边界层逆温平均厚度的时间演变特征,如表 5 所示.由表 5 可见,在霾过程形成期、发展期与持续期,SLI 的平均厚度分别为 115m、110m、103m,MLI 的平均厚度分别为 77m、85m、98m,ABI 的平均厚度分别为 99m、68m、91m.上述分析表明,随着霾过程从形成期到持续期的渐进演变,SLI 的平均厚度在形成期达到峰值后呈不断减弱的趋势,MLI 的平均厚度则呈持续上升趋势并同样在持续期达到峰值,另外,ABI 的平均厚度在霾过程中亦呈现波动特征.即霾过程边界层逆温的强度和厚度的演变呈现出总体一致的特征.

表 5 霾过程边界层逆温平均厚度的时间演变特征(m)

Table 5 The temporal evolution characteristics of boundary layer Inversion mean thickness during haze events (m)

霾过程	SLI	MLI	ABI
形成期	115	77	99
发展期	110	85	68
持续期	103	98	91
消亡期	79	92	79

2.2.4 逆温高度 统计了霾过程边界层逆温高度的时间演变特征,如表 6 所示.由表 6 可见,在霾过程形成期、发展期与持续期,MLI 的平均底高分别为 284m、258m、240m,顶高分别为 361m、343m、338m,ABI 的平均底高分别为 918m、978m、999m,顶高分别为 1017m、1046m、1090m.上述分析表明,随着霾过程从形成期到持续期的演变,MLI 的平均底高与顶高均呈现持续降低的趋势,ABI 的平均底高与顶高均呈现不断上升的趋势.消亡期 MLI 平均底高和顶高略有抬升,ABI 平均底高和顶高则有所降低.

表 6 霾过程边界层逆温平均高度的时间演变特征(m)

Table 6 The temporal evolution characteristics of boundary layer Inversion mean height during haze events (m)

霾过程	MLI 底高	ABI 底高	MLI 顶高	ABI 顶高
形成期	284	918	361	1017
发展期	258	978	343	1046
持续期	240	999	338	1090
消亡期	245	937	337	1016

综上所述,随着霾过程从形成期向发展期到持续期的渐进演变,三层逆温发生频率均显著上升,SLI 的强度和厚度逐渐减小,MLI 的强度和厚度则不断增加,底高也呈现出降低的趋势,ABI 的强度和厚度呈现波动变化.

2.3 边界层逆温对灰霾的影响分析

已有研究指出^[25],虽然污染物的过量排放是造成灰霾的内因,但低大气能见度事件的发生却主要归结为不利于污染物散布的多尺度气象条件.为厘清边界层逆温对灰霾的影响,分析了三层逆温的不同指标(强度、厚度和底高)与大气能见度之间的关系,见图 4.由图 4 可见,SLI、MLI 和 ABI 强度与大气能见度的相关系数分别为-0.19、-0.33、-0.01,SLI、MLI 和 ABI 厚度与大气能见度的相关系数分别为-0.46、-0.18、0.12,MLI 和 ABI 底高与大气能见度的相关系数分别为 0.35 和-0.10.其中,SLI 厚度和 MLI 底高与大气能见度的相关系数通过了 0.05 显著性检验,即 SLI 厚度和 MLI 底高是影响大气能见度最重要的两个边界层逆温指标.

研究发现^[26],大气能见度与颗粒物质量浓度及相对湿度的变化密切相关,低湿度条件下大气能见度的变化主要取决于颗粒物质量浓度的改变,而高

湿条件下气溶胶吸湿对大气能见度的影响则显著增加.为此,绘制了 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度在霾过程的变化图,见图 5.由图 5 可见,在霾过程形成期、发展期与持续期, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 $92\mu g/m^3$ 、 $127\mu g/m^3$ 、 $176\mu g/m^3$,平均相对湿度的大小分别为 76.8%、77.6%、80.2%.即随着霾过程从形成期到持续期的渐进演变, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度与平均相对湿度均呈现出增长的趋势.

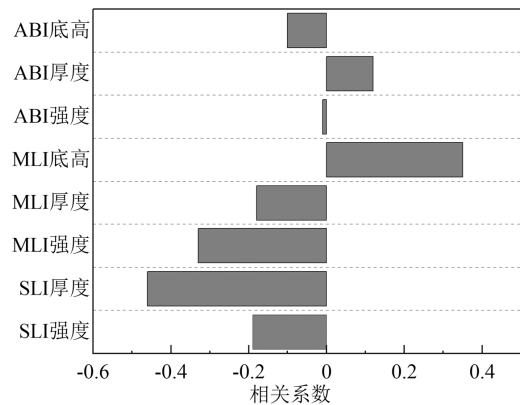


图 4 三层逆温指标与能见度之间的相关系数

Fig.4 The correlation coefficients between indices of three-layer inversions and visibility

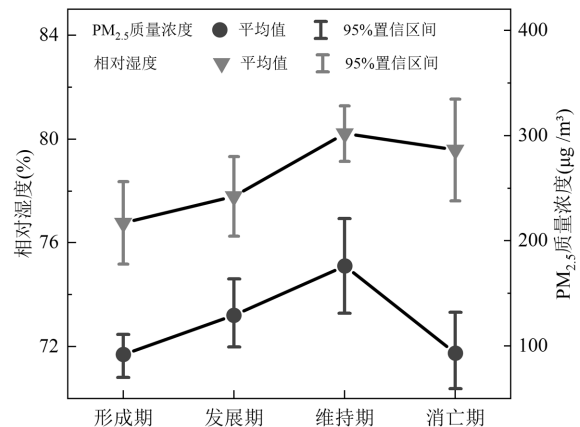


图 5 霾过程 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度的变化

Fig.5 Variations of $PM_{2.5}$ mass concentration and relative humidity during haze events

上述分析表明,随灰霾的渐进演变,边界层逆温强度、厚度和高度均有显著的变化,进而诱发颗粒物质量浓度和相对湿度的响应,由此导致大气能见度的相应改变.

在霾的形成期,夜间的辐射冷却导致地面大气迅速降温,形成强而厚的 SLI.作为贴地的一种稳定

的大气层结, SLI 的存在像“顶盖”一样阻止地面污染物向上扩散稀释, 颗粒物在近地面不断累积. 因此, SLI 是灰霾的关键诱发和启动因子. 在霾的发展期和持续期, 随着颗粒物浓度的渐进累积以及颗粒物廓线形态的改变, 气溶胶与边界层的相互作用加强, 颗粒物热力作用使得地面长波辐射冷却作用减弱, SLI 强度逐渐减小, MLI 强度与厚度则不断增加, 底高也随之大幅降低^[27]. 混合层为湍流特征不连续界面以下的大气, 代表了污染物在垂直方向上被湍流稀释的高度, 是表征区域大气环境容量三大污染潜势指标之一. 一般情况下, 混合层高度越低, 环境空气中的污染物浓度就越高. 因此, MLI 的增强和底高的下降及其与 SLI 共存进一步压缩了颗粒物的散布空间, 降低了近地面物质和能量的交换水平, 不仅强烈地抑制地面污染物的垂直扩散, 还有利于近地面湿度的增加. 刘凡等^[28]的研究指出, 相对湿度的增加能显著提升硫酸化率和氮氧化率, 导致二次颗粒物(硫酸盐、硝酸盐和铵盐)在细颗粒物中占比的明显上升, 由细颗粒物吸湿性诱发的大气消光效应也显著增强. 由此可见, 随着灰霾从发展期向持续期的渐进演变, MLI 与 SLI 共同导致地面细颗粒物质量浓度的上升和颗粒物吸湿的加强, 进而诱发低大气能见度的出现. 因此, MLI 与 SLI 的共存及其协同作用是灰霾演变的关键推动因子. 在霾的消亡期, 随着大气环流的调整, 前期逆温的形态和结构被破坏, 大气扩散能力显著增强, 细颗粒物质量浓度和相对湿度也随之降低, 大气能见度不断改善.

值得注意的是, ABI 也是边界层逆温的重要配置, 其底高表征气溶胶在大气铅直方向上散布的上限. 研究表明^[29], 受热力对流、机械力和风切变作用的影响, ABI 的形成发展较为复杂. 目前, 尚缺乏针对 ABI 形成机制及其污染效应的系统研究, 相关工作另文分析.

3 结论

3.1 四川盆地边界层逆温包括 SLI、MLI 以及 ABI 3 种基本的逆温形态, 三层逆温自下而上一致呈现出逐渐减弱的形态特征, 但在地区之间呈现出明显的空间分异性. 其中, SLI 在成都发生频率最高、强度最强, MLI 在达州发生频率最高、强度最强, ABI 在四个地区中整体变化幅度较小.

3.2 随着霾从形成期向发展期到持续期的渐进演变, 三层逆温发生频率均显著上升, SLI 的强度和厚度逐渐减小, MLI 的强度和厚度则不断增加, 底高也呈现出降低的趋势, ABI 的强度和厚度呈现波动变化.

3.3 SLI 是灰霾的关键诱发和启动因子, MLI 与 SLI 的共存及其协同作用是灰霾演变的关键推动因子.

参考文献:

- [1] Zhang J, Zheng Y, Li Z, et al. A 17-year climatology of temperature inversions above clouds over the ARM SGP site: The roles of cloud radiative effects [J]. *Atmospheric Research*, 2020,237:104810.
- [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 [J]. *气象与环境学报*, 2015,31(2):108-111.
Zhou S H, Ni C J, Liu P C. Characteristics of temperature inversion in atmospheric boundary layer in Chengdu area [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015,31(2):108-111.
- [3] 赵德山, 洪钟祥. 典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征 [J]. *大气科学*, 1981,(4):407-415.
Zhao D S, Hong Z X. Some burst characteristics during the process of occurring and dissipating of typical radiation inversion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981,(4):407-415.
- [4] 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等. 天津大气稳定性和逆温特征对 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 PM_{2.5} pollution [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8):2865-2872.
- [5] Anquetin S, Guilbaud C, Chollet J. Thermal valley inversion impact on the dispersion of a passive pollutant in a complex mountainous area [J]. *Atmospheric Environment*, 1999,33:3953-3959.
- [6] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其地形影响效应的观测模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
Guo X M. Observed and simulated research on climate characteristic of air quality and the topographic induced effects in Sichuan Basin [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [7] Zhang L, Guo X, Zhao T, et al. A modelling study of the terrain effects on haze pollution in the Sichuan Basin [J]. *Atmospheric Environment*, 2019,196:77-85.
- [8] 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠, 等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响 [J]. *气象与环境学报*, 2011,27(4):49-53.
Du R G, Qi B, Guo H H, et al. Characteristics of atmospheric inversion temperature and its influence on concentration of air pollutants in Hangzhou, Zhejiang province [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2011,27(4):49-53.
- [9] Xu T, Song Y, Liu M, et al. Temperature inversions in severe polluted days derived from radiosonde data in North China from 2011 to 2016 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,647:1011-1020.
- [10] Miao Y, Guo J, Liu S, et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,

- 2017,17(4):3097-3110.
- [11] Feng X, Wang S, Guo J. Temperature inversions in the lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Seasonal feature and relation with regional atmospheric circulations [J]. *Atmospheric Research*, 2022,271:106097.
- [12] Ning G, Yim SHL, Wang S, et al. Synergistic effects of synoptic weather patterns and topography on air quality: a case of the Sichuan Basin of China [J]. *Climate Dynamics*, 2019,53:6729-6744.
- [13] 危诗敏,冯鑫媛,王式功,等.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.
- Wei S M, Feng X Y, Wang S G, et al. Characteristics of multi-layer inversions in Sichuan Basin and their influences on air pollution [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(3):1005-1013.
- [14] 陈婷,冯鑫媛,李春艳,等.2013~2018年冬季成都市9次大气重污染过程的天气形势及逆温特征 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2021,57(1):82-91,98.
- Chen T, Feng X Y, Li C Y, et al. Study on the weather conditions and inversion characteristics of nine sessions of atmospheric heavy pollution in Chengdu in the winter from 2013 to 2018 [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021,57(1):82-91,98.
- [15] Yang Y, Ni C, Jiang M, et al. Effects of aerosols on the atmospheric boundary layer temperature inversion over the Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021,262:118647.
- [16] 朱育雷,倪长健,谭钦文,等.基于 logistic 曲线识别混合层高度的新方法 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1670-1676.
- Zhu Y L, Ni C J, Tan Q W, et al. A new method to identify mixing layer height based on logistic curve [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(5):1670-1676.
- [17] 朱育雷,倪长健,邓佩云.颗粒物分界层 Mie 散射激光雷达识别的 sigmoid 算法 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3654-3661.
- Zhu Y L, Ni C J, Deng P Y. Sigmoid algorithm for calculating particle boundary layer based on mie scattering lidar [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3654-3661.
- [18] QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级 [S].
QX/T 113-2010 Observation and forecasting levels of haze [S].
- [19] Feng X, Wei S, Wang S. 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.
- [20] 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.
- [21] 李子华,杨军,黄世鸿.考虑湿度影响的城市气溶胶粒子白天温度效应 [J]. *大气科学*, 2000,(1):87-94.
- Li Z H, Yang J, Huang S H. Influence of urban aerosols with humidity effect on temperature during daytime [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000,(1):87-94.
- [22] 李子华,涂晓萍.考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应 [J]. *大气科学*, 1996,(3):359-366.
- Li Z H, Tu X P. The influence of urban aerosols with humidity effect on temperature during night [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996,(3):359-366.
- [23] Ning G, Wang S, Yim SHL, et al. Impact of low-pressure systems on winter heavy air pollution in the northwest Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018,18:13601-13615.
- [24] Li X, Gao Z, Li Y, et al. Meteorological conditions for severe foggy haze episodes over north China in 2016-2017 winter [J]. *Atmospheric Environment*, 2019,199:284-298.
- [25] 权建农,徐祥德,贾星灿,等.影响我国霾天气的多尺度过程 [J]. *科学通报*, 2020,65(9):810-824.
- Quan J N, Xu X D, Jia X C. Multi-scale processes in severe haze events in China and their interactions with aerosols: Mechanisms and progresses [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020,65(9):810-824.
- [26] 王淑英,张小玲,徐晓峰.北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. *气象科技*, 2003,(2):109-114.
- Wang S Y, Zhang X L, Xu X F. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2003,(2):109-114.
- [27] Lu H, Xie M, Liu B, et al. Impact of atmospheric thermodynamic structures and aerosol radiation feedback on winter regional persistent heavy particulate pollution in the Sichuan-Chongqing region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,842:156575.
- [28] 刘凡,谭钦文,江霞,等.成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 [J]. *环境科学*, 2018,39(4):1466-1472.
- Liu F, Tan Q W, Jiang X, et al. Effect of relative humidity on particulate matter concentration and visibility during winter in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2018,39(4):1466-1472.
- [29] 明镇洋,侯梦琪,王文勇,等.成都市混合层高度与气溶胶层高度关系的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2021,44(7):76-83.
- Ming Z Y, Hou M Q, Wang W Y, et al. Research on the relationship between mixed layer height and aerosol layer height in Chengdu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021,44(7):76-83.

作者简介: 贺丽媛(2001-),女,贵州省毕节市人,硕士研究生,研究方向为大气物理与大气环境, heliyuan0914@163.com.