

成都地区大气混合层高度对霾强度的响应特征

毛世杰^{1*}, 冯晓宁², 朱瑶², 任至涵^{3#}, 倪长健²

¹龙泉驿区气象局, 四川 成都

²成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

³邛崃市气象局, 四川 邛崃

收稿日期: 2025年8月12日; 录用日期: 2025年9月10日; 发布日期: 2025年9月18日

摘要

基于成都地区2014~2018年冬季14个站点气象要素数据以及同期细颗粒物(PM_{2.5})质量浓度, 筛选了研究期间16次持续性霾天气过程, 利用罗氏法计算了成都地区大气混合层高度(MLH), 对该地区霾天气过程MLH的时空分布特征进行了分析。结果表明: (1) 成都地区霾天气过程平均MLH (441.89 m) 总体低于冬季平均MLH (501.83 m); (2) 基于霾天气过程MLH, 利用K-Means聚类方法将成都地区分为I区、II区和III区, 三个区域对应的平均MLH分别为480.31 m、419.70 m和394.89 m; (3) 随着霾强度由轻微霾到重度霾的渐进演化, MLH均呈现出递减的变化趋势, I区、II区和III区MLH与PM_{2.5}浓度的相关系数(R)分别为-0.24、-0.15和-0.14 (均通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)。

关键词

霾, 大气混合层高度, 罗氏法, K-Means, 成都

Response Characteristics of Atmospheric Mixing Layer Height to Haze Intensity in Chengdu Area

Shijie Mao^{1*}, Xiaoning Feng², Yao Zhu², Zhihan Ren^{3#}, Changjian Ni²

¹Meteorological Bureau of Longquanyi District, Chengdu Sichuan

²School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

³Qionglai Meteorological Bureau, Qionglai Sichuan

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 毛世杰, 冯晓宁, 朱瑶, 任至涵, 倪长健. 成都地区大气混合层高度对霾强度的响应特征[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 1042-1050. DOI: 10.12677/ccrl.2025.145104

Abstract

Based on data of multiple meteorological elements from 14 stations in Chengdu during the winters of 2014~2018 and the concurrent mass concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}), 16 regional haze events during the study period were screened out. The atmospheric mixing layer height (MLH) in Chengdu was calculated using Nozaki method, and the spatiotemporal distribution characteristics of MLH during haze events in this region were analyzed. The results showed that: (1) The average MLH during haze events in Chengdu (441.89 m) was generally lower than the average winter MLH (501.83 m); (2) Based on MLH during haze events, Chengdu was divided into zone I, zone II, and zone III using the K-Means clustering method, with the corresponding average MLH values of 480.31 m, 419.70 m, and 394.89 m for the three zones, respectively; (3) As the haze intensity gradually evolves from slight haze to severe haze, MLH shows a decreasing trend. The correlation coefficients (R) between MLH and PM_{2.5} concentration in Zone I, Zone II, and Zone III are -0.24, -0.15, and -0.14, respectively (all passing the significance test at $\alpha = 0.05$).

Keywords

Haze, MLH, Nozaki Method, K-Means, Chengdu

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气边界层通常指大气底部直接受地球表面影响的一层，距离地面约为 1 km~1.5 km [1]。它不仅是陆地与大气之间物质及能量交换的主要通道，也是地球各个圈层之间相互作用的关键区域[2]。大气边界层的结构及其演化表现出显著的昼夜变化特征[3]。日出后，太阳辐射加热地表，近地层感热通量增大，湍流混合作用因此显著增强。这一增强的湍流促使边界层垂直向上发展，并使层内热力与动力属性趋于均匀化，表现为风速、温度及比湿的垂直差异显著降低，此阶段形成的大气层为混合层(即对流边界层)。作为地表与自由大气间进行热量、动量及水汽交换的关键通道，混合层主导着边界层内的核心物理机制。大气混合层定义为湍流特征不连续界面以下湍流得以充分发展的大气层，其垂直厚度即为混合层高度 (MLH) [4]。MLH 具有重要的环境意义，它量化了污染物在垂直方向上受热力湍流扩散稀释的最大潜在范围，是反映污染物垂直扩散能力的关键气象因子之一[5]。因此，混合层高度不仅深刻影响大气环境质量评估、污染物的累积总量及其空间分布格局，更是确定污染物扩散空间范围、核算大气污染物环境容量的关键参数[6]。

成都地区近年来社会经济快速发展，大气污染物排放量持续高位，加之秋冬季频现静稳高湿的不利气象条件，使其成为四川盆地污染最严重的区域之一[7]。为揭示成都地区冬季大气混合层高度对霾强度的响应特征。本文利用成都地区 2014~2018 年冬季 14 个气象观测站的地面气象要素日均资料(包括温度、风速、相对湿度与大气能见度)以及同期细颗粒物(PM_{2.5})质量浓度日均数据，利用罗氏法计算了研究时段成都地区冬季各区(市)县的大气混合层高度，系统分析了该地区冬季霾天气过程大气混合层高度的空间

分布格局与演变规律。

2. 资料及方法

2.1. 资料及资料处理

利用的资料为成都地区 2014~2018 年冬季 14 个气象观测站的气象要素日均数据, 包括温度、风速、相对湿度和大气能见度, 以及同期成都市平均细颗粒物(PM_{2.5})质量浓度数据。

根据《霾的观测和预报等级》(QX/T 113-2010)和《霾的观测识别》(GB/T 36542-2018), 排除个别能导致低能见度事件的情况, 定义小时能见度数值低于 10 km 且环境相对湿度低于 80%, 或环境相对湿度在 80%~95%之间且 PM_{2.5} 质量浓度高于 75 μg/m³ 为霾天气。进一步依据大气能见度(V)对霾污染进行分级, 将霾天气过程分为轻微霾(5 km ≤ V < 10 km)、轻度霾(3 km ≤ V < 5 km)、中度霾(2 km ≤ V < 3 km)、重度霾(V < 2 km)。本文综合考虑霾天气过程的完整性、生命周期和强度变化等因素, 筛选出 2014~2018 年成都地区内 30%及以上站点出现霾天气且持续 5 d 及以上的持续性霾天气过程, 共 16 次, 如表 1 所示。

Table 1. Persistent haze episodes in winter in Chengdu area from 2014 to 2018

表 1. 2014~2018 年成都地区冬季持续性霾天气过程

霾天气过程	日期	霾天气过程	日期
1	2014.01.01~2014.01.07	9	2016.12.13~2016.12.24
2	2014.01.15~2014.02.03	10	2017.01.01~2017.01.08
3	2014.02.15~2014.02.26	11	2017.01.17~2017.01.27
4	2014.12.19~2014.12.31	12	2017.02.12~2017.02.18
5	2015.01.02~2015.01.16	13	2017.12.04~2017.12.12
6	2015.01.17~2015.01.27	14	2017.12.17~2018.01.01
7	2015.02.10~2015.02.17	15	2018.01.30~2018.02.07
8	2015.12.22~2016.01.02	16	2018.12.13~2018.12.23

2.2. 大气混合层高度计算方法

罗氏法是一种基于地面气象资料估算混合层高度的方法, 该方法的优势在于不需要高空观测资料, 只通过地面气象资料来计算, 且所需的气象资料容易获得[8]。Nozaki 等人(1973)指出[9], 混合层源于热力湍流与机械湍流的共同作用。边界层上层的大气运动与地面气象参数之间存在着动态的相互影响和反馈, 因此地面气象参数可用于估算混合层厚度, 并提出了计算公式:

$$H = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)} \quad (1)$$

式中: H 为混合层厚度(m), $T-T_d$ 为温度露点差(°C), U_z 为 z 高度处所测得的平均风速(m/s), z_0 为地面粗糙度, 其取值根据观测台位置及其周围地理环境和下垫面状况确定, f 为地转参数由纬度决定取值。本报告中成都地区 z_0 取为 0.45 m, 计算地转参数时纬度取 30°、 Ω 取 0.00007292 rad/s。 P 为大气帕斯奎尔稳定度级别, 它由太阳高度角、总云量、低云量和地面风速决定的[8], 稳定度级别取值如表 2 所示。成都地处盆地冬季, 太阳辐射较弱, 有日照少、云量多、风速小和雾日多的特点, 因而湍流较弱且不易发展[10][11], 统计分析研究时段云量, 根据太阳辐射等级和地面风速资料判断成都地区的大气稳定度情况, 结果表明研究时段成都地区大气稳定度出现 D (弱稳定) 的频率最高, 因此 P 取 4。

Table 2. P values specified by Pasquill stability categories
表 2. 帕斯奎尔稳定度级别取值

A	A~B	B	B~C	C	C~D	D	E	F
1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0

因为常规观测资料中没有温度露点差值，列入相对湿度 u 的值，根据湿度公式

$$\begin{cases} e = E_0 \times 10^{at_d/(b+t_d)} \\ E = E_0 \times 10^{at/(b+t)} \\ u = \frac{e}{E} = 10^{at_d/(b+t_d) - at/(b+t)} \\ \lg u = -\frac{ab(t-t_d)}{(b+t_d)(b+t)} \end{cases} \quad (2)$$

整理得：

$$t - t_d = -\frac{(b+t)\lg u}{\frac{ab}{b+t} - \lg u} \quad (3)$$

又 $T - T_d = t - t_d$ 。

所以罗氏法的混合层厚度公式可转化为：

$$t = -\frac{121(6-P)(b+t)\lg u}{6\left(\frac{ab}{b+t} - \lg u\right)} + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)} \quad (4)$$

式中， a 、 b 为水汽压参数，根据成都地区气温分布的特点，可取 $a = 7.5$ ， $b = 237.3^\circ\text{C}$ ， u 为相对湿度， t 为观测时地面气温($^\circ\text{C}$)，其他符号同前。

2.3. K-Means 聚类算法

K-Means 算法基于迭代优化质心位置实现无监督聚类，是数据挖掘与机器学习中的常用方法。该算法将数据集划分为 K 个簇，使每个数据点与其所在簇的质心(即簇内所有点的均值)之间距离最小。通过迭代调整簇质心的位置，不断优化簇内数据的紧凑度，直至标准测度函数达到收敛，是聚类分析中的经典算法之一[12] [13]。在 K-Means 聚类中，簇内误差平方和(Sum of Squared Errors) SSE 是最核心的标准测度函数，也称为“目标函数”或“损失函数”，用于量化聚类效果并指导算法迭代优化[14]。其数学表达式为：

$$\text{SSE} = \sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \|x - \mu_k\|^2 \quad (5)$$

式中： K 为预设的簇数量， C_k 表示第 k 个簇，包含所有分配到该簇的数据点， μ_k 是第 k 个簇的中心， x 是簇 C_k 中的某个数据点。

3. 结果与讨论

3.1. 霾天气过程与冬季 MLH 特征

统计了 2014~2018 年成都市 14 个站点霾天气过程以及冬季 MLH 并绘制了箱线图，如图 1 所示。成都地区冬季 MLH 处于 281.91 m~924.75 m 之间，平均 MLH 为 501.83 m；霾天气过程 MLH 处于 295.82 m~685.71 m 之间，平均 MLH 为 441.89 m，即成都地区霾天气过程 MLH 总体低于冬季 MLH。进一步统计了冬季 12 月、1 月和 2 月以及对应月份中霾天气过程的 MLH 并绘制了箱线图，如图 2 所示。成都地

区 12 月平均 MLH 最低(454.99 m)、1 月次之(502.32 m)、2 月最高(540.00 m)。12 月、1 月、2 月霾天气过程平均 MLH 分别为 440.82 m、434.50 m 和 456.50 m，分别较对应的月均 MLH 降低了 3.1%、13.5%和 15.4%。综上所述，成都地区霾天气过程 MLH 总体低于冬季，其中 12 月平均 MLH 最低，1 月次之，2 月最高。研究表明[5]，MLH 的降低会压缩污染物在垂直方向上的扩散空间，近地面污染物浓度得以积累，导致大气能见度进一步降低。因此，MLH 是促进区域灰霾形成和发展的重要气象因子。

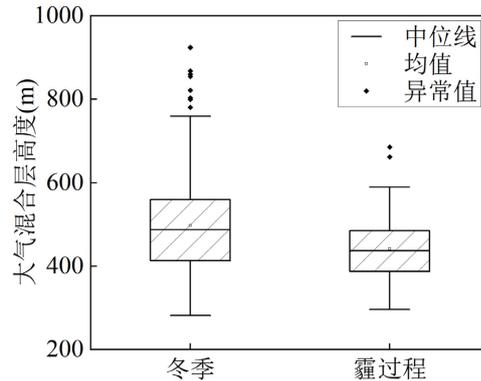


Figure 1. Boxplots of MLH in winter and haze events from 2014 to 2018
图 1. 2014~2018 年冬季以及霾天气过程 MLH 箱线图

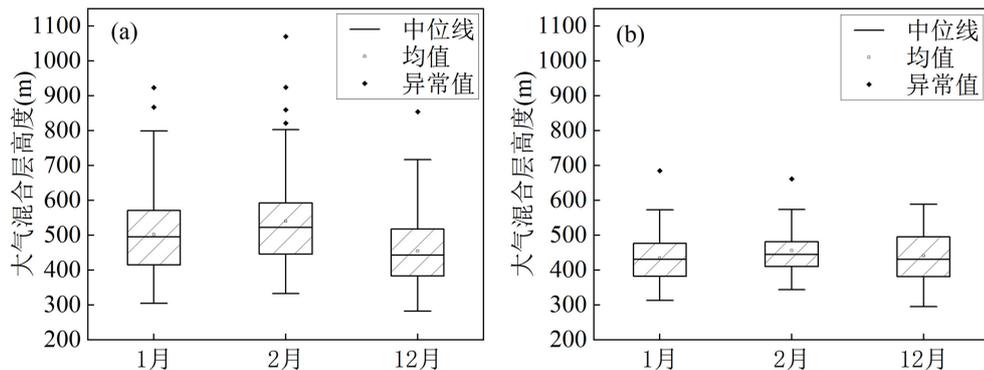


Figure 2. Boxplots of MLH in January, February and December 2014~2018 (a) and MLH in haze events of corresponding months (b)

图 2. 2014~2018 年 1 月、2 月和 12 月 MLH (a)以及对应月份霾天气过程 MLH (b)箱线图

3.2. 霾天气过程 MLH 空间分布特征

统计了 2014~2018 年成都地区 14 个站点冬季霾天气过程 MLH，并给出了相应的空间分布图，如图 3 所示。成都地区冬季霾天气过程平均 MLH 具有明显的空间分异性特征，总体呈现出“东部、北部地区较大，中部、西南部地区较小”的分布特征。成都地区各区(市)县霾天气过程平均 MLH 介于 372.91 m~517.84 m 之间，平均 MLH 最大的 3 个区(市)县分别是位于成都市东部的简阳市(514.84 m)、北部的彭州市(503.05 m)以及东北部的新都区(495.23 m)，最小的 3 个区(市)县分别是位于成都中部的郫都区(372.91 m)、西南部的蒲江县(377.11 m)和西部的崇州市(397.52 m)。

采用 K-Means 聚类方法，结合 MLH 与地理位置，对成都地区 14 个站点进行聚类分区，分区结果如图 4 所示。其中，I 区包括简阳市、金堂县、龙泉驿区、新都区、彭州市，II 区包括都江堰市、郫都区、温江区、双流区、崇州市、大邑县，III 区包括邛崃市、新津区、蒲江县。

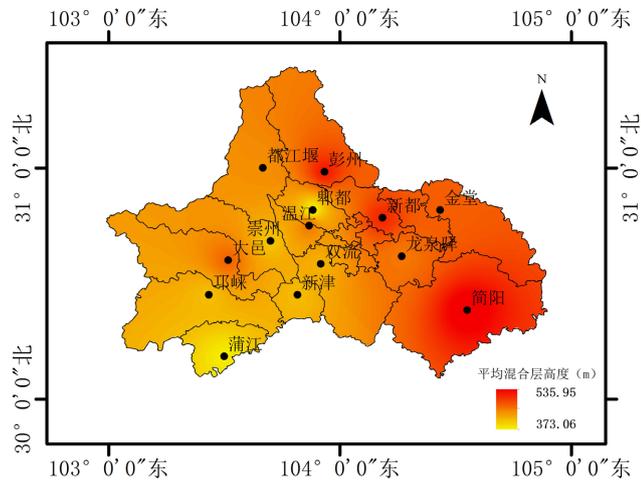


Figure 3. Spatial distribution map of average MLH in winter haze events from 2014 to 2018
图 3. 2014~2018 年冬季霾天气过程平均 MLH 空间分布图

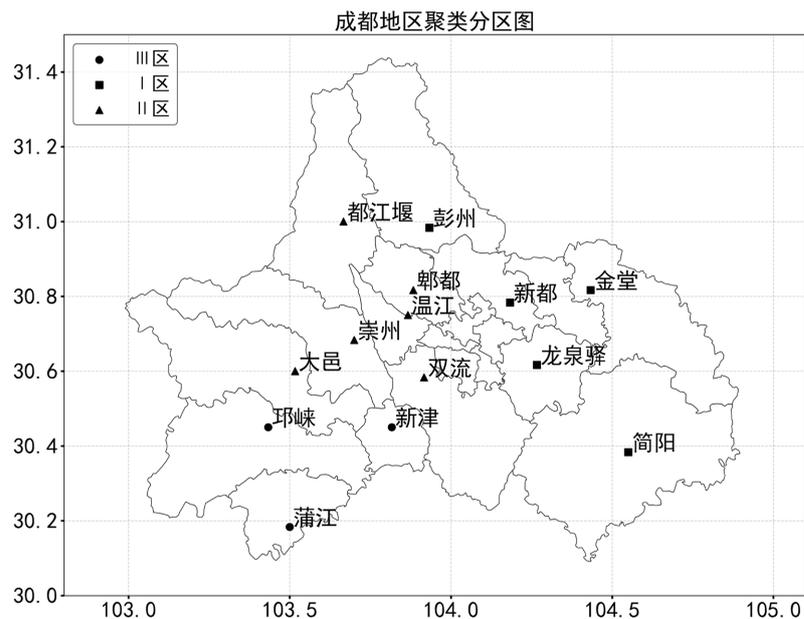


Figure 4. Cluster zoning map of Chengdu area
图 4. 成都地区聚类分区图

计算了各区域平均 MLH, 如表 3 所示。霾天气过程 I 区平均 MLH 最大(480.31 m), II 区平均 MLH 次之(423.73 m), III 区平均 MLH 最小(409.03 m), 这与地形特征有较好的对应关系。I 区地处成都东北部, 地形以平原、浅丘为主, 由于地形起伏小, 地表摩擦阻力低, 有利于气流的水平输送和垂直湍流发展, 从而促进混合层的发展, 这是导致 MLH 较高的重要原因[15]。同时, 从产业结构来看, I 区包含多个工业主导型区域, 如龙泉驿区(国家级经开区、汽车制造业)、新都区(航空动力、电子信息)、彭州市(石化、能源), 上述区域工业密度高, 人为热排放强, 地表感热通量大, 促进热力湍流发展, 有利于 MLH 的增大[16]。II 区主要集中在成都西部边缘以及中部, 靠近龙门山脉的都江堰、崇州、大邑等地海拔上升至 600~1000 m, 同时中心城市区域高楼密集, 局地环流复杂, 风速减小, 湍流抑制, MLH 相对较低[17][18]。III 区位于成都西南边缘, 邛崃、蒲江等地地势起伏较大, 靠近邛崃山脉, 地形阻挡作用更为显著。

综上所述,成都地区霾天气过程 MLH 具有明显的空间分异性特征,西部沿山地区以及中心城市平均 MLH 总体较低,东部地区平均 MLH 相对较高。

Table 3. Average atmospheric mixing layer height (MLH) in different regions of Chengdu area
表 3. 成都地区不同区域平均大气混合层高度

地区	I 区	II 区	III 区
MLH (m)	480.31	419.70	394.89

3.3. MLH 对霾强度变化的响应特征

依据大气能见度将霾分为轻微、轻度、中度和重度四种霾强度,统计了 I 区、II 区和 III 区的 MLH 对不同霾污染分级的响应特征,如图 5 所示。对应轻微、轻度、中度和重度霾强度条件,I 区平均 MLH 分别为 508.26 m、481.29 m、468.95 m 和 467.47 m; II 区平均 MLH 分别为 474.78 m、431.02 m、420.81 m、和 377.95 m; III 区平均 MLH 分别 441.20 m、406.00 m、390.99 m 和 361.00 m,即随着霾强度由轻微霾到重度霾的渐进演化,三个区域 MLH 均呈现出递减的趋势,其中 I 区、II 区和 III 区重度霾平均 MLH 较轻微霾分别降低了 8.0%、20.3%和 18.2%。

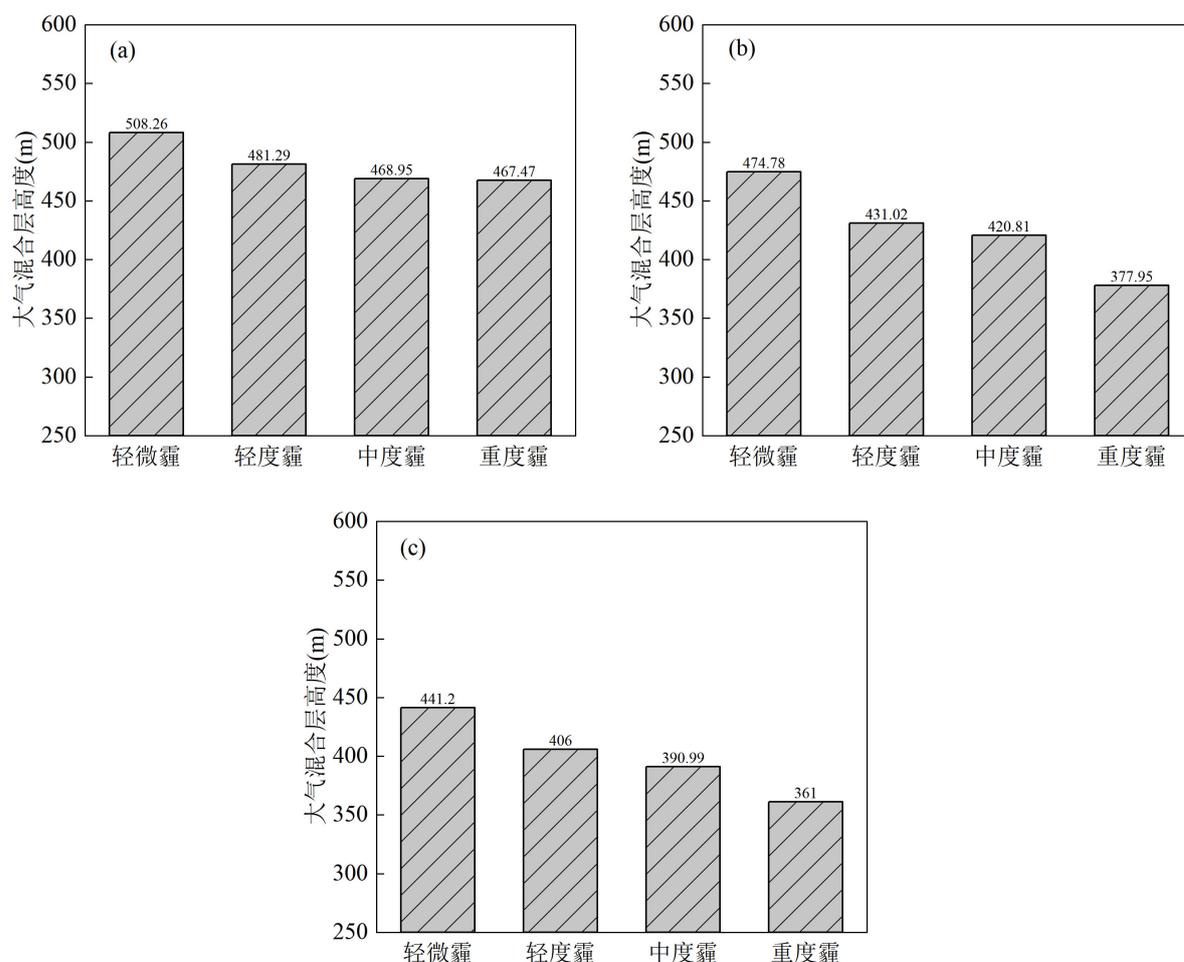


Figure 5. Response characteristics of MLH to haze intensity changes in Chengdu Zone I (a), Zone II (b) and Zone III (c)
图 5. 成都地区 I 区(a)、II 区(b)和 III 区(c) MLH 对霾强度变化的响应特征

MLH 是表征大气垂直扩散条件的重要参数, 因此研究它与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间的相关性对于开展污染潜势预报尤为重要[18]。李梦等[19]对京津冀地区 MLH 与空气污染的关系进行了分析, 发现 MLH 与空气污染物浓度和空气污染指数呈显著的负相关关系。因此进一步讨论成都地区 MLH 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间的相关性, 如图 6 所示, 成都地区冬季霾天气过程 MLH 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度总体呈现出负相关, 相关系数(R)为-0.48。进一步分析成都地区不同区域 MLH 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间的关系, 如图 7 所示, I 区、II 区和 III 区 MLH 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关系数(R)分别为-0.24、-0.15 和-0.14 (均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验)。综上所述, MLH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度总体表现为较弱的负相关, 其中 I 区 MLH 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性最大, II 区次之, III 区最小。

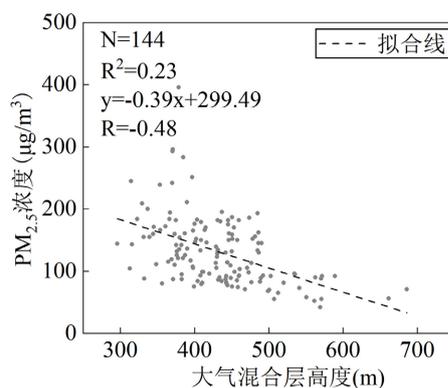


Figure 6. Correlation analysis chart of MLH and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in winter haze events from 2014 to 2018 in Chengdu
图 6. 成都地区 2014~2018 年冬季霾天气过程 MLH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关性分析图

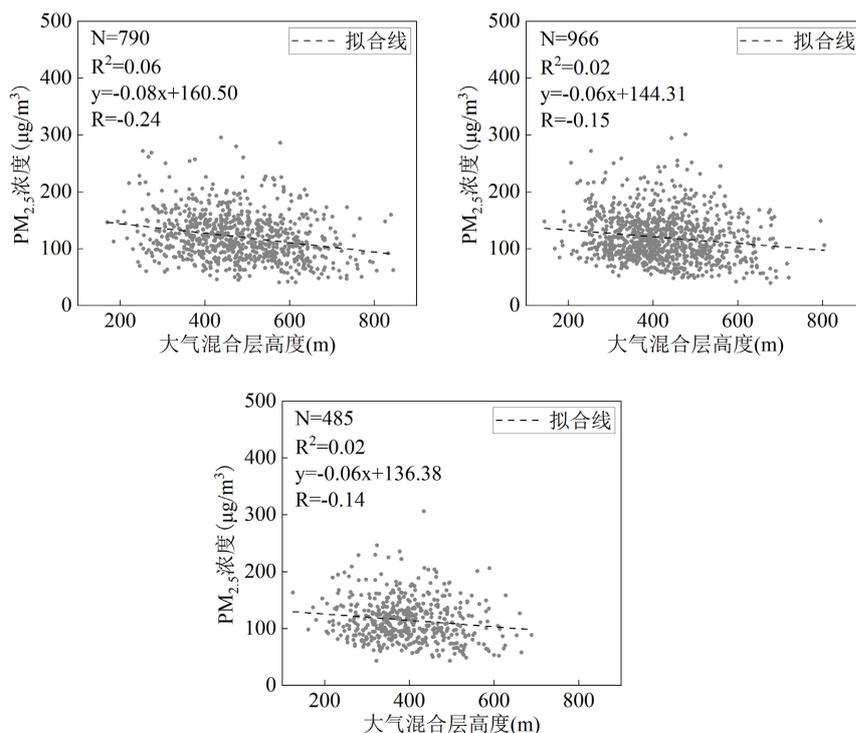


Figure 7. Correlation analysis chart of MLH and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Zone I (a), Zone II (b) and Zone III (c) during winter haze events in Chengdu

图 7. 成都地区冬季霾天气过程 I 区(a)、II 区(b)和 III 区(c) MLH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关性分析图

4. 结论

本文利用成都地区 2014~2018 年冬季 14 个气象观测站的地面气象要素日均资料以及同期细颗粒物 (PM_{2.5}) 质量浓度日均数据, 利用罗氏法计算了研究时段成都地区冬季各区(市)县的大气混合层高度, 系统分析了该地区冬季霾天气过程大气混合层高度的空间分布格局与演变规律, 得出以下结论:

(1) 成都地区霾天气过程平均大气混合层高度低于冬季平均值, 是促进区域灰霾形成和发展的重要气象因子。

(2) 成都地区霾天气过程大气混合层高度呈现出明显的空间分异性, I 区、II 区和 III 区的平均 MLH 分别为 480.31 m、419.70 m 和 394.89 m, 这与成都地区地形特征有较好的对应关系。

(3) 随着霾强度由轻微霾到重度霾的渐进演化, MLH 均呈现出递减的变化趋势, 其中 I 区 MLH 与 PM_{2.5} 质量浓度的相关性最大, II 区次之, III 区最小。

基金项目

2025 年度龙泉驿区哲学社会科学规划项目。

参考文献

- [1] Stull, R.B. (1988) An Introduction to Boundary Layer Meteorology. *Atmospheric Sciences Library*, **8**, Article 89.
- [2] 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 大气边界层物理研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 467-476.
- [3] 车军辉, 赵平, 史茜, 等. 大气边界层研究进展[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 735-751.
- [4] 张少锋, 赵遑, 计昕昊. 哈尔滨市污染天气混合层高度特征分析[J]. 黑龙江气象, 2025, 42(1): 38-40.
- [5] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1935-1943.
- [6] 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.
- [7] Liao, T., Gui, K., Jiang, W., Wang, S., Wang, B., Zeng, Z., *et al.* (2018) Air Stagnation and Its Impact on Air Quality during Winter in Sichuan and Chongqing, Southwestern China. *Science of The Total Environment*, **635**, 576-585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.122>
- [8] 刘慧, 张煦庭, 黄鑫, 等. 影响汾渭平原地区空气污染的地面环流形势及 PM_{2.5} 浓度预报研究[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1583-1598.
- [9] 程水源, 张宝宁, 白天雄, 等. 北京地区大气混合层高度的研究及气象特征[J]. 环境科学丛刊, 1992(4): 46-52.
- [10] 孟庆珍, 周建军, 陈敏. 成都近十年大气稳定度综合研究[J]. 成都气象学院学报, 1997(1): 46-52.
- [11] 孟庆珍, 黄永森. 成都大气稳定度频率近年变化及市、郊稳定度差异研究[J]. 成都气象学院学报, 1991(Z1): 96-102.
- [12] 黄海燕, 刘晓明, 孙华勇, 等. 聚类分析算法在不确定性决策中的应用[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 593-597.
- [13] 王梦仙, 李银锁, 钟石根, 等. 基于 K-Means 聚类的计算机网络信息安全风险评估方法[J]. 信息记录材料, 2025, 26(6): 36-38.
- [14] 张祺祺, 孙文义, 穆兴民, 等. 基于 K-Means 聚类的黄河流域气候-生态-水文综合分区[J]. 节水灌溉, 2025(7): 59-65.
- [15] Su, T., Li, Z. and Kahn, R. (2018) Relationships between the Planetary Boundary Layer Height and Surface Pollutants Derived from Lidar Observations over China: Regional Pattern and Influencing Factors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 15921-15935. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15921-2018>
- [16] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究[J]. 大气科学, 2007(1): 37-47.
- [17] 俞科爱, 陈磊, 张晶晶, 等. 浙江省大气混合层高度变化特征分析[J]. 气象科技, 2017, 45(4): 735-744.
- [18] 刘炜桦, 王寅钧, 赵晓莉, 等. 四川盆地大气混合层高度变化特征及其与 PM_{2.5} 浓度之间关系[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(2): 62-69.
- [19] 李梦. 京津冀大气混合层高度变化特征及其与细颗粒污染物的关系研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.