

马宁, 任芝花, 王建英, 等. 2022. 银川市大气混合层高度变化特征及其与空气污染的关系 [J]. 气候与环境研究, 27(4): 495–503. MA Ning, REN Zhihua, WANG Jianying, et al. 2022. Variation Characteristics of the Atmospheric Mixed Layer Height and Their Relation to the Air Pollution in Yinchuan [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 27 (4): 495–503. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21010

银川市大气混合层高度变化特征及其与 空气污染的关系

马宁^{1,2,3} 任芝花⁴ 王建英^{1,2} 杨有林^{1,2} 卫建国^{1,2} 李新庆^{1,2}

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

3 宁夏气象信息中心, 银川 750002

4 国家气象信息中心, 北京 100081

摘 要 基于银川高空站 2008~2017 年的 L 波段秒级数据和地面观测数据, 利用干绝热法计算银川 2008~2017 年逐时大气混合层高度, 分析其变化特征, 同时利用银川 6 种污染物的质量浓度和 AQI 指数, 分析大气混合层高度与空气污染物的关系。结果表明: 银川市的大气混合层高度 (MLH) 大部分时间在 600 m 以下, 占比为 68%; 银川 MLH 具有明显的单峰型日变化特征, 07:00 (北京时间, 下同) 最低, 16:00 最高; 各月 MLH 值在 282~936 m, 4~6 月 MLH 值最高, 12 月 MLH 值最低; 季节变化方面, 春季最高, 夏季次之, 冬季最低; 年变化方面, 2012 年 MLH 平均值最高为 621 m, 2015 年最低为 566 m; 银川市 6 种污染物除 O₃ 外, 其余 5 种污染物的质量浓度与 MLH 值都为负相关, O₃ 与 MLH 值的相关性最好; 四季中, 冬季污染物浓度与 MLH 值的相关性最好, 夏季最差, 秋季好于春季; 银川 MLH 值与 AQI 指数呈负相关。

关键词 银川 大气混合层高度 空气污染

文章编号 1006-9585(2022)04-0495-09

中图分类号 P241

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21010

Variation Characteristics of the Atmospheric Mixed Layer Height and Their Relation to the Air Pollution in Yinchuan

MA Ning^{1,2,3}, REN Zhihua⁴, WANG Jianying^{1,2}, YANG Youlin^{1,2},
WEI Jianguo^{1,2}, and LI Xinqing^{1,2}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002

2 Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002

3 Ningxia Meteorological Information Center, Yinchuan 750002

4 National Meteorological Information Center, Beijing 100081

Abstract Based on the high L-band second-level and ground observation data from the Yinchuan high-altitude station from 2008 to 2017, the time-divided atmospheric mixed layer height (MLH) was calculated for that time period using the

收稿日期 2021-01-13; 网络预出版日期 2021-12-03

作者简介 马宁, 女, 1983 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象数据分析处理。E-mail: mn_2001@126.com

通讯作者 任芝花, E-mail: rzh@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91744209, 宁夏回族自治区重点研发计划项目 2019BFG02025、2021BEG03006

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 91744209), Key Research and Development Project of Ningxia Hui Autonomous Region (Grants 2019BFG02025 and 2021BEG03006)

dry adiabatic method, and its variation characteristics were analyzed. Simultaneously, the six pollutants in Yinchuan were used for the analysis. The mass concentration and air quality index (AQI) were used to determine the correlation between the atmospheric MLH and air pollutants. The results indicated that the majority of the MLH in Yinchuan was below 600 m, accounting for 68% of the total. Yinchuan MLH has a distinct single-peak diurnal variation, with the lowest at 0700 LST in the morning and the highest at 1600 LST in the evening. The monthly MLH values ranged from 282 m to 936 m; MLH values were the highest from April to June, with the lowest values in December. Furthermore, seasonal changes were the highest in spring, followed by summer and winter. Considering the annual changes, the highest average MLH was 621 m in 2012, and the lowest was 566 m in 2015. In addition to O_3 , the concentrations of the rest five pollutants in Yinchuan are negatively correlated with the MLH value, with the best correlation being between O_3 and MLH values. Moreover, the best correlation was found between the winter pollutant concentration, and the MLH value was the best in winter, followed by autumn, spring, and worst in summer. The Yinchuan MLH value was negatively correlated to the AQI index of the city.

Keywords Yinchuan, Atmospheric mixed layer height, Air pollution

1 引言

大气混合层高度 (MLH) 是反映污染物在铅垂方向扩散的重要参数, 也是影响大气污染物扩散的主要气象因子之一。近年来, 对于大气混合层高度的研究很多, 主要集中在大气混合层高度的计算方法 (程水源等, 1997)、大气混合层高度分布特征以及与大气污染物的关系等 (杨勇杰等, 2006; 叶堤等, 2008; 黄瑜等, 2015; 毛维薇和张甫仁, 2016; 贺园园等, 2019; 韩丽娜等, 2020; 王建英等, 2021)。比如, 叶堤等 (2008) 根据 2000~2005 年逐日 4 个时次的常规气象资料, 计算并分析了重庆主城区大气混合层厚度的频率分布、时间变化等基本特征以及与空气污染指数的关系, 指出大气混合层厚度是影响城市空气质量的重要因素。杨静等 (2011) 基于 1979~2008 年乌鲁木齐 4 个时次的地面常规气象观测资料, 计算得出了乌鲁木齐市近 30 年大气稳定性和大气混合层高度随时间序列的变化特征, 得出近 30 年乌鲁木齐大气混合层高度随时间基本呈现缓增的趋势。李梦等 (2015) 利用云高仪对 2014 年污染严重的 2 月京津冀区域北京、天津、石家庄和秦皇岛 4 个站点 MLH 进行了同步连续观测, 分析了其各自及区域总体变化特性, 指出混合层低于 800 m, 4 个站点细颗粒物浓度均会超过国家二级标准。李金堡等 (2014) 利用干绝热法计算出青岛地区大气混合层高度, 并分析其变化规律, 得出青岛在春夏季大气混合层高度低, 在秋冬高的结论。杜吴鹏等 (2017) 利用北京地区 2009~2014 年 20 个气象站观测资料, 计算分析了地表风速和大气混合层厚度的时空变化, 指出大气混合层厚度近年明显下降, 对污染扩散较为不利。陈磊等 (2017) 基于 2001~2014 年宁波市每日 4

个时次的常规气象观测资料和同期宁波市环保局空气污染物浓度的日监测数据, 采用最小二乘曲线拟合法计算了宁波市大气混合层厚度, 并分析了大气混合层厚度的时间变化特征及其与空气污染的关系, 指出春季和 7 月、8 月宁波市大气混合层厚度较大, 秋季和冬季大气混合层厚度较小, 而 6 月大气混合层厚度最小。

2013 年以来, 城市空气污染越来越受到重视, 空气污染物的监测由 3 种增加到 6 种, 空气污染的衡量指标由 API 改为 AQI, 标准更加严格。银川市作为宁夏回族自治区首府城市, 其环境空气质量状况倍受公众关注, 相关领域的专家对于银川市空气质量的研究也越来越多, 主要集中在污染物浓度变化特征、与地面气象条件的关系以及污染天气的分析方面 (纪晓玲等, 2013; 张智等, 2013; 张智和冯瑞萍, 2014; 刘玉兰等, 2014; 马宁等, 2015a; 马宁等, 2015b; 纛晓辉等, 2016; 邓敏君等, 2018; 王建英等, 2020a; 王建英等, 2021), 而对于污染物在垂直方向扩散的研究较少。本文将基于银川高空站 2008~2017 年 L 波段探空秒级数据和地面观测数据, 利用干绝热法计算大气混合层高度, 分析讨论银川市大气混合层高度的变化特征和空气污染物浓度以及 AQI 指数的关系, 找出污染物在垂直方向扩散的规律, 为空气污染防治提供参考依据。

2 数据来源及计算方法

本文计算大气混合层高度所用资料来源于银川市国家气候观象台 2008~2017 年的 L 波段探空秒级数据和地面观测数据, 均经过台站质量审核和省级数据中心的业务质控。其中探空秒级数据质量控

制方法包括气候学界限值检查、要素间内部一致性检查、时间一致性检查(数据突变或长时间不变检查)等(中国气象局, 2011); 本文中用到的小时气压、气温数据在业务上经过了气候学界限值检查、台站界限值检查、要素间内部一致性检查、上述时间一致性检查和空间一致性检查等(任芝花和熊安元, 2007; 任芝花等, 2015; 中国气象局, 2020); 银川六种污染物日平均质量浓度及 AQI 指数均来自银川市环保局网站发布的空气质量日报, 文中 O_3 日平均质量浓度为 O_3 日最大 8 h 平均浓度。

本文中四季的划分, 采用气象上常用划分方法: 春季为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 12 月和次年 1~2 月。

大气混合层高度利用干绝热法计算, 干绝热法是由美国 Holzworth 提出的(程水源等, 1997), 考虑在典型的大气条件下, 夜间由于地面辐射冷却接近地面空气而形成逆温, 呈稳定状态, 而白天由于太阳辐射而呈现不稳定状态, 忽略平流、下沉及机械湍流影响时, 平均混合层高度则由清晨探空温度廓线和地面最高、最低气温而定。孟庆珍等(孟庆珍和冯艺, 1996)利用每日 08:00(北京时间, 下同)探空温度廓线资料以及地面观测的最高、最低温度计算了日最大、日最低和日平均混合层高度并进行了分析。本文利用每日 08:00 L 波段探空秒级温度资料及地面观测的逐小时温度, 计算每日逐小时混合层高度, 具体求法: 利用清晨 08:00 气温探空资料, 在埃玛图上画出 08:00 气温廓线, 取每日逐小时气温作干绝热曲线, 廓线与曲线的交点, 读取下垫面和交点处的气压值, 采用图解等面积法, 求得该层平均气温 t , 用等温大气的压高公式, 由气压值计算混合层高度 H (单位: m):

$$H = \frac{R}{g} \bar{T} \ln \frac{p_0}{p_h} = 29.28 \bar{T} \ln \frac{p_0}{p_h} \quad (1)$$

其中, R 为干空气比气体常数, g 为重力加速度, p_0 为地面大气压(单位: hPa), p_h 为 h 高度的大气压(单位: hPa), $\bar{T}$ 为下垫面至 h 高度的层内平均气温(单位: K)。

3 结果分析

3.1 银川 2008~2017 年大气混合层高度变化特征

3.1.1 日变化特征

图 1 为银川市 2008~2017 年中各时次平均 MLH

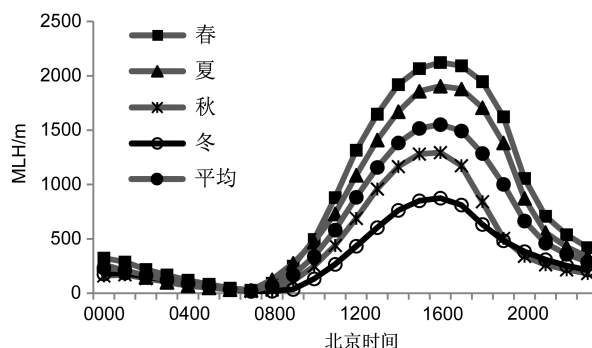


图 1 2008~2017 年银川市年平均和四季平均 MLH 日变化

Fig. 1 Annual and seasonal average daily changes the mixed layer height (MLH) in Yinchuan during 2008–2017

变化情况, 如图 1, MLH 年平均日变化具有明显的单峰型特征, 与气温日变化特征一致。夜间随着气温逐步降低, 近地层大气趋于静稳, 大气湍流活动减弱, 混合层高度也逐步降低, 清晨 07:00 达到最低, 平均为 23 m, 此时也是银川市最低气温出现时段; 白天随着太阳辐射的增强, 气温也逐步升高, 一般午后 15:00 至 16:00 达到最高, 大气湍流活动也增强, 随着午后气温的升高, 近地层上升气流增强, 混合层高度至 16:00 也达到了最高, 平均为 1552 m, 午后 17:00 之后, 随着太阳辐射的减弱, 气温降低, 大气湍流活动减弱, MLH 又呈快速下降趋势。大气混合层高度表征了大气在垂直方向的扩散能力, 高度越高, 表示扩散能力越强。夜间由于大气混合层高度较低, 因而扩散能力较弱, 白天则扩散能力较强。

四季 MLH 日变化特征与年平均日变化特征一致, 春季的日变化幅度最大, MLH 值最大达 2125 m, 夏季次之, MLH 最大值为 1908 m, 秋季 MLH 最大值为 1293 m, 冬季变化幅度最小, MLH 最大值为 881 m。四季的日最大值均出现在 16:00, 最小值出现在 07:00 至 08:00。银川大气混合层高度的季节性变化特征与杜吴鹏等(2017)对北京地区大气混合层厚度(高度)的研究结果相类似, 可能是由于同处于北方地区。由于春季影响银川市的冷暖空气活动频繁, 多大风天气, 降水少, 天气干燥, 昼夜温差大, 午后升温快, 大气湍流活动最强, MLH 日变化幅度最大; 夏季太阳辐射最强, 但昼夜温差比春季小, 影响银川市的冷空气活动次数少、强度弱, 风力小, 大气湍流活动弱于春季, MLH 日变化幅度比春季小, 午后 MLH 最大值也比春季小; 秋季影响银川市的冷空气活动次数逐渐增多, 气温

下降快, 大气湍流活动减弱, 大气混合层高度也明显降低; 冬季日照时间短, 太阳辐射弱, 是银川市气温最低的季节, 加之冬季供暖, 污染物排放强度大, 大气的透光性变差, 降低了到达地面的太阳辐射强度, 使地面升温慢, 近地层出现逆温, 大气湍流活动进一步减弱, 大气混合层高度进一步降低, 冬季 MLH 日变化幅度最小, MLH 最大值也最小。

3.1.2 月季年变化特征

图 2a 为银川 2008~2017 年 10 年中各月平均 MLH、各月白天 (08:00 至 20:00) 平均 MLH 和夜间 (20:00 至 08:00) 平均 MLH 高度的变化, 图 2b 为银川 2008~2017 年 10 年中各季节平均值 MLH、各月白天平均 MLH 和夜间平均 MLH 高度的变化, 图 2c 为银川 2008~2017 年 10 年中逐年平均 MLH 的变化情况。2008~2017 年各月平均 MLH 值在 282~936 m, 4~6 月 MLH 值在 800 m 以上, 5 月最高为 936 m, 11~12 月、1~2 月 MLH 值较低, 都在 450 m 以下, 12 月最低为 282 m。夜间, 各月平均 MLH 值为 117~286 m, 普遍在 300 m 以下, 且变化幅度不大; 白天, 各月平均 MLH 值在 441~1648 m, 变化幅度较大, 3~8 月在 1000 m 以上, 且 4~6 月最大, 均在 1500 m 以上, 12 月、1 月最小, 都在 500 m 以下。从各年 MLH 月均值看, 2008~2017 年, MLH 值的最大值都集中在 4~6 月, 其中 2008、2009 年最大值出现在 6 月, 2010~2013 年、2016 年最大值出现在 4 月, 2014~2015 年、2017 年最大值出现在 5 月; MLH

最小值一般出现在 11~12 月、1~2 月, 其中 2008 年、2012 年最小值出现在 1 月, 2009 年、2014 年最小值出现在 11 月, 2010 年出现在 2 月, 2011 年、2013 年、2015~2017 年出现在 12 月, 最小值出现在 12 月居多, 占 50%。总体看, MLH 值呈现 1-2 月较低, 3 月开始升高, 5 月达到最高, 之后逐渐下降的趋势。季节变化方面, MLH 平均值为春季最高 853 m, 夏季次之, 冬季最低为 332 m。四季夜间的 MLH 平均值在 300 m 以下, 且春季最高, 秋季最低, 变化幅度不大; 四季白天 MLH 平均值为春季、夏季高, 为 1453 m 和 1273 m, 秋、冬季低为 754 m 和 526 m, 四季白天的 MLH 高度较夜间明显升高。混合层高度的这种季节变化与太阳辐射、湍流强弱的季节变化是一致的。如图 2c 所示, 2008~2017 年逐年 MLH 平均值总体呈降低趋势, 在 566~621 m, 2015 年最低, 2012 年最高。银川市 2008~2017 年降水量呈增加趋势, 降水日数增多, 多云天气也相应增多, 另外, 近年来, 随着银川市城市化进程加快, 汽车保有量和人口密度增大, 加之冬季供暖污染物排放增多, 污染天气降低了到达地面的太阳辐射强度, 使得秋冬季多逆温, 大气湍流活动减弱, 混合层高度降低。

3.1.3 频率分析

对银川站 2008~2017 年逐时 MLH 值按高度区间分别统计出现频率, 2000 m 内按照 200 m 的间距统计, 2000 m 以上为一个统计区间。银川站 MLH 高度在 200 m 以下所占频率最大, 为 47%,

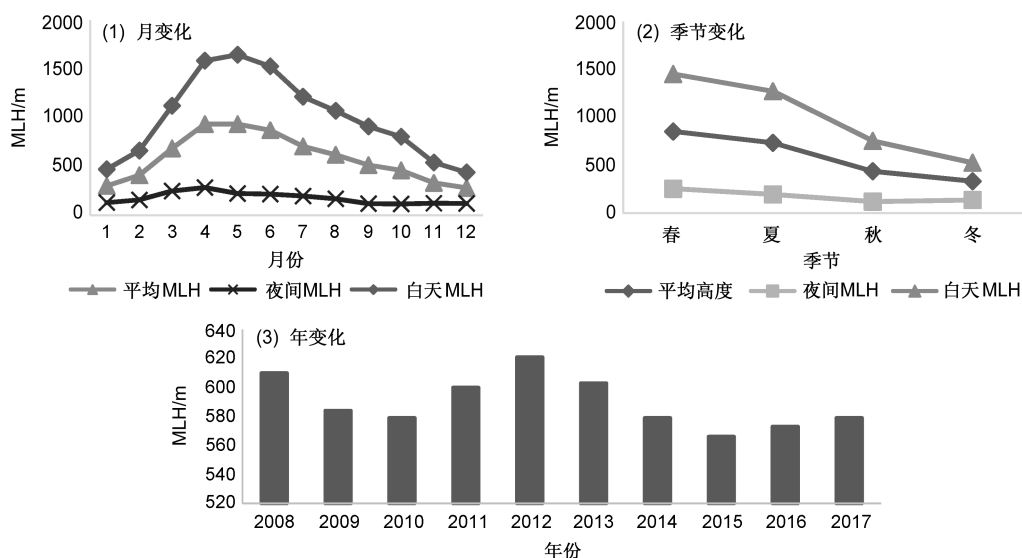


图 2 2008~2017 年银川市 MLH (a) 月平均、(b) 季节平均、(c) 年平均变化

Fig. 2 Variations in the (a) month, (b) season, and (c) year of MLH in Yinchuan during 2008–2017

表 1 银川市 2008~2017 年各月平均 MLH 值

Table 1 Monthly average of MLH in Yinchuan during 2008–2017

m

	月平均MLH									
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1月	234	338	319	372	278	289	283	264	345	297
2月	354	359	308	429	491	469	380	463	431	433
3月	759	680	653	733	723	698	690	672	614	648
4月	923	879	920	1005	1001	1090	842	831	878	992
5月	987	927	890	888	904	861	1093	959	824	1029
6月	1054	995	843	842	929	810	754	898	846	780
7月	720	692	674	770	639	605	803	745	742	692
8月	632	552	604	656	667	732	589	648	607	529
9月	458	483	470	532	631	564	476	500	534	512
10月	454	524	562	423	513	465	459	361	450	404
11月	394	272	357	291	361	395	270	256	375	359
12月	383	298	327	251	319	270	293	193	229	254

200~400 m 次之，为 13%，400~600 m 为 8%，之后随着高度的升高频率不断降低，在 1800~2000 m 的区间仅为 2%，2000 m 以上的频率为 7%。图 3 为 600 m 以下各高度在各时次出现频率，由图可知，00:00 至 08:00，600 m 以下高度频率达到 90% 以上，06:00 至 08:00 接近 100%，13:00 至 17:00，600 m 以下频率在 30% 以内，为一天中最小。分析结果表明，大气混合层高度夜间大部分在 600 m 以下，白天则随着太阳辐射的变化，MLH 值升高，在 13:00 至 17:00，600 m 以下出现频率最低。

3.2 银川大气混合层高度与空气污染的关系

3.2.1 大气混合层高度与 6 种污染物质量浓度相关性分析

收集整理了 2013~2015 年银川市 SO₂、NO₂、PM₁₀、CO、O₃、PM_{2.5} 6 种污染物的空气质量日平均浓度和 2013~2017 年银川市日 AQI 指数与大气混合层高度做相关性分析。结果如表 2、图 5，

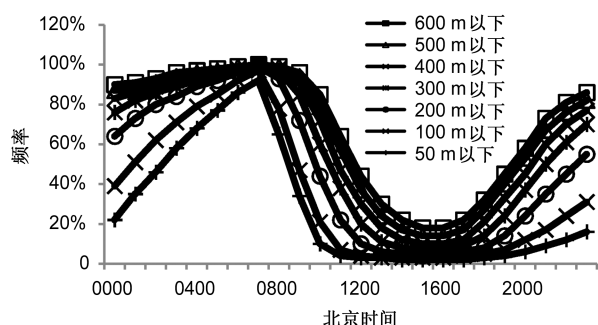


图 3 银川 2008~2017 年 600 m 以下高度区间在各时次出现频率

Fig. 3 Frequency of range of MLH in Yinchuan during 2008–2017

表 2 银川市 2013~2015 年日 MLH 平均值与污染物质量浓度相关系数

Table 2 Correlation coefficient of the average MLH and the mass concentration of pollutants in Yinchuan during 2013–2015

	MLH日平均值与污染物质量浓度相关系数					
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}
春季	-0.34	-0.04	-0.30	-0.25	0.43	-0.39
夏季	-0.07	-0.07	-0.03	-0.06	0.40	-0.13
秋季	-0.34	-0.34	-0.36	-0.50	0.49	-0.48
冬季	-0.45	-0.48	-0.43	-0.53	0.50	-0.51
全年	-0.49	-0.40	-0.25	-0.48	0.64	-0.47

银川市 6 种污染物除 O₃ 为正相关外，其余 5 种污染物的质量浓度与 MLH 值都为负相关，均通过 0.05 的显著性检验，O₃ 与 MLH 值的相关性最好。从四季看，四季污染物质量浓度与 MLH 值只有 O₃ 为正相关，其余均为负相关。冬季污染物质量浓度与 MLH 值相关性最好，相关系数均在 0.4 以上，夏季相关性最差，只有 O₃ 达到 0.4，秋季好于春季。

由严晓瑜等（2015）的研究可知，银川市区 SO₂、NO₂、PM_{2.5} 和 CO 质量浓度月变化均呈“U”型分布。银川市地处贺兰山东侧背风坡，多静小风，加之冬季采用燃煤供暖，污染物排放强度大在冬季最为严重，随着污染的加重，能见度降低污染天气使大气透光性降低，到达地面的太阳辐射减弱，近地面升温慢，有利于逆温维持和加强，导致大气垂直方向静稳度增加，湍流活动减弱，大

气混合层高度降低,两者相互作用,使污染物浓度进一步升高,因此,冬季污染物质量浓度与 MLH 值呈较明显负相关;春季银川市风速较大,大气垂直湍流活动强,混合层高度最高,本地污染易扩散,但大风天气易使上游沙尘向银川市输送,加之本地扬尘,造成 PM10 浓度明显升高,有时出现严重污染天气,所以 MLH 与 PM10 的相关性一般;夏季污染物排放量少,大气湍流活动强,混合层高度高,有利于污染物扩散,且夏季也是一年中降水量最多的季节,降水对污染物冲刷作用强,所以大气混合层高度与 SO₂、NO₂、PM10、CO、PM2.5 污染物

浓度的相关性最差。由严晓瑜等(2015)的研究可知 O₃ 质量浓度在一年中的最高值出现在 5 月,最低值出现在 12 月,这是与 MLH 值的月变化规律有相似性。研究表明(王建英等, 2020b):气温和太阳辐射强度是影响 O₃ 浓度变化的重要因素原因之一,在高温和强太阳辐射作用下,有利于 O₃ 前体物的二次转化,易造成 O₃ 出现高值,而此时也是大气湍流活动增强,大气混合层高度增高的情况,因而全年 O₃ 与 MLH 值呈正相关。

为了研究各污染物浓度随着大气混合层高度的变化,对于 6 种污染物质量浓度日均值超过二级标

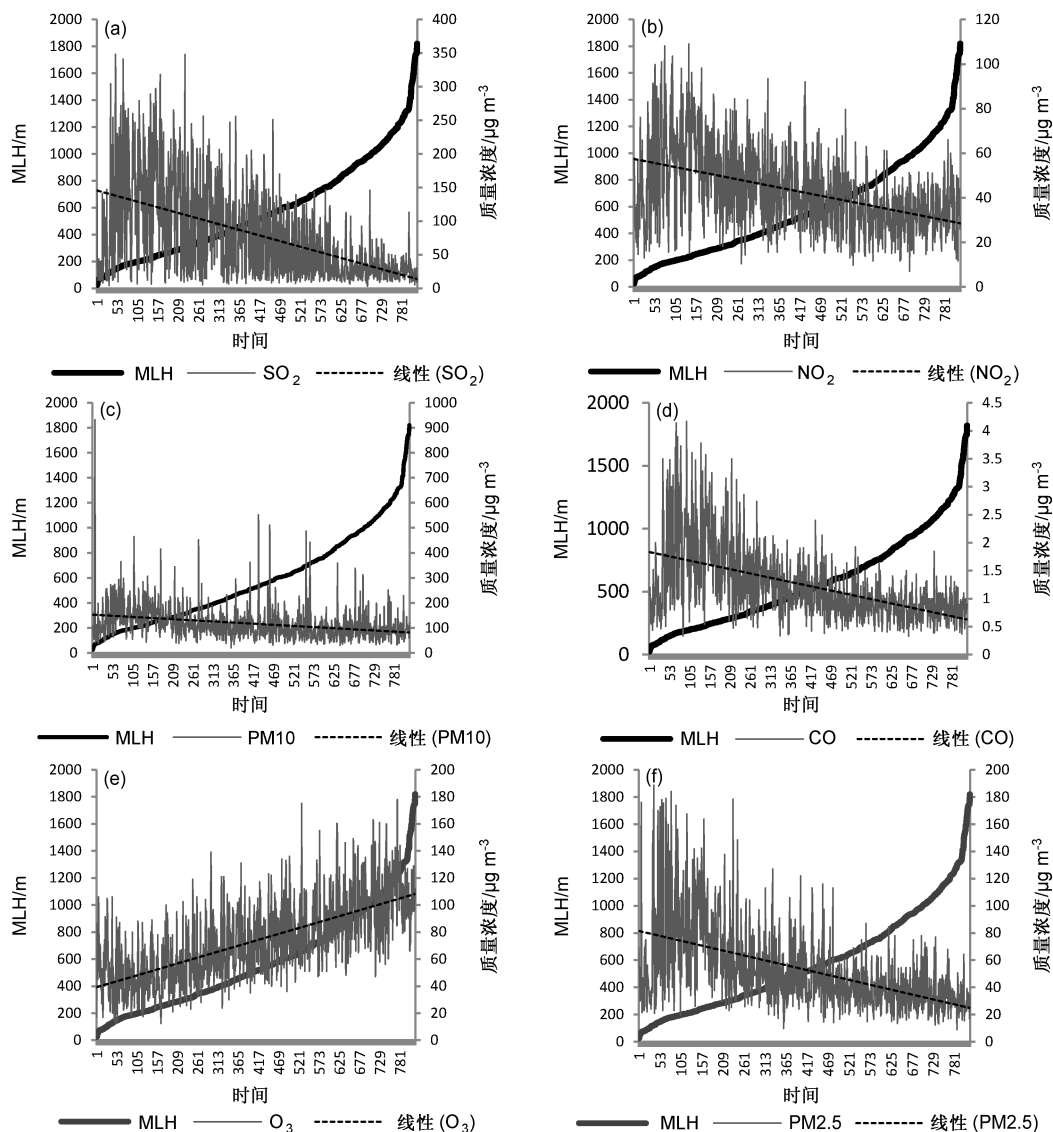


图 4 2013~2017 年银川市各污染物质量浓度变化与 MLH 变化比较: (a) SO₂; (b) NO₂; (c) PM10; (d) CO; (e) O₃; (f) PM2.5

Fig. 4 Comparison between the pollutant concentration and the mixed layer height in Yinchuan during 2013–2017: (a) SO₂; (b) NO₂; (c) PM10; (d) CO; (e) O₃; (f) PM2.5

表 3 污染物质量浓度二级标准与超标 MLH 最大值范围列表

Table 3 Pollutant concentration level two and list of maximal mixed layer height ranges

	污染物质量浓度二级标准	超标MLH最大值范围/m
SO ₂	150 $\mu\text{g m}^{-3}$	600
NO ₂	80 $\mu\text{g m}^{-3}$	600
PM10	150 $\mu\text{g m}^{-3}$	1200
CO	4 mg m^{-3}	200
O ₃	160 $\mu\text{g m}^{-3}$	1300
PM2.5	75 $\mu\text{g m}^{-3}$	1100

准阈值的浓度值与当日 MLH 值对比, 超标后的 MLH 值最大值如表 3 所示, SO₂、NO₂ 的日均浓度超过二级标准时, MLH 最大值均在 600 m 以下, PM10 的日均浓度超过二级标准时, MLH 值在 1200 m 以下, CO 的日均浓度超过二级标准时, MLH 值在 200 m 以下, O₃ 的日均浓度超过二级标准时, MLH 值在 1300 m 以下, PM2.5 的日均浓度超过二级标准时, MLH 值在 1100 m 以下。以 2014 年为例, 由图 4 可知, 当 MLH 值升高时, 除 O₃ 的浓度值是升高的, 其余 5 污染物浓度都是降低的。

3.2.2 大气混合层高度与 AQI 指数及不同空气质量级别的分析

对银川 2013~2017 年逐日 AQI 指数与大气混合层高度进行相关分析, 相关系数为 -0.17, 通过 0.05 的显著性检验, 表明逐日 AQI 指数与 MLH 为负相关, 当 MLH 升高时, 在污染源稳定的情况下, AQI 指数是降低的。对银川 2013~2017 年逐日空气质量级别与对应 MLH 平均值进行分析, 如图 5 所示, 一级的 MLH 平均值为 569 m, 二级的 MLH 平均值为 635 m, 从二级到五级 MLH 平均值为逐级下降的趋势, 六级的 MLH 平均值反而升高,

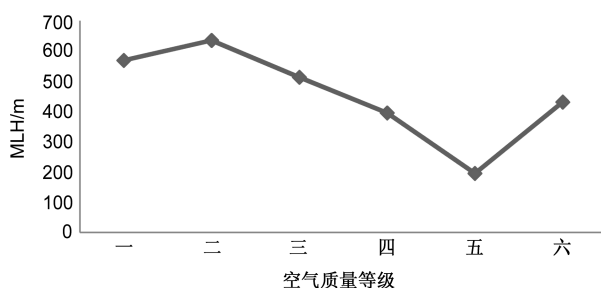


图 5 2013~2017 年银川市不同空气质量级别与 MLH 平均值的关系
Fig. 5 Annual average mixed layer height during the pollutant concentration level in Yinchuan during 2013-2017

高于四级。主要是因为空气质量级别为六级的时间大部集中在 3~5 月, 为大风沙尘天气多发季节, 导致 PM10 升高, 空气污染严重。

4 结论

(1) 银川 MLH 具有明显的单峰型日变化特征, 07:00 最低为 23 m, 16:00 最高为 1552 m。夜间变化幅度不大, 白天随着太阳辐射的增强, MLH 呈先升后降趋势; 月变化方面, 各月 MLH 值在 282~936 m, 4~6 月 MLH 值最高, 12 月 MLH 值最低。季节变化方面, 春季最高, 夏季次之, 冬季最低; 年变化方面, 2008~2017 年逐年 MLH 平均值为 566~610 m, 2015 年最低, 2012 年最高。

(2) 银川 MLH 高度在 200 m 以下所占频率最大, 为 47%, 200~400 m 次之, 为 13%, 400~600 m 为 8%, 之后随着高度的升高频率不断降低。2000 m 以上的频率为 7%。大气混合层高度在各时次出现频率也具有明显的日变化, 夜间大部分在 600 m 以下, 白天则随着太阳辐射的变化, MLH 值升高, 在 13:00 至 17:00, 600 m 以下占比最低, 为 30%。

(3) 银川市 6 种污染物除 O₃ 外, 其余 5 种污染物的质量浓度与 MLH 值都为负相关, 均通过 0.05 的显著性检验。O₃ 与 MLH 值的相关性最好。从四季看, 四季污染物质量浓度与 MLH 值只有 O₃ 为正相关, 其余均为负相关。冬季污染物质量浓度与 MLH 值相关性最好, 在 0.4 以上, 夏季相关性最差, 只有 O₃ 达到 0.4, 秋季好于春季。银川市逐日 AQI 指数与 MLH 为负相关, 银川市空气质量等级一级的 MLH 平均值为 569 m, 二级的 MLH 平均值为 635 m, 从二级到五级 MLH 平均值为逐级下降的趋势, 六级的 MLH 平均值反而升高, 高于四级。

参考文献 (References)

- 陈磊, 俞科爱, 林宏伟, 等. 2017. 宁波市大气混合层厚度变化特征及其与空气污染的关系 [J]. 气象与环境学报, 33(4): 40-47. Chen Lei, Yu Keai, Lin Hongwei, et al. 2017. Variations of atmospheric mixed layer thicknesses and their relationships with air pollution in Ningbo [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 33(4): 40-47. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2017.04.005
- 程水源, 席德立, 张宝宁, 等. 1997. 大气混合层高度的确定与计算方法研究 [J]. 中国环境科学, 17(6): 512-516. Cheng Shuiyuan, Xi

- Deli, Zhang Baoning, et al. 1997. Study on the determination and calculating method of atmospheric mixing layer height [J]. China Environmental Science (in Chinese), 17(6): 512–516. doi:10.3321/j.issn:1000-6923.1997.06.009
- 邓敏君, 郭建平, 黄峰, 等. 2018. 银川市低空逆温特征及其对雾、霾的影响 [J]. 宁夏大学学报 (自然科学版), 39(3): 257–264.
- Deng Minjun, Guo Jianping, Huang Feng, et al. 2018. Characteristics of low-altitude temperature inversion and the influence of inversion on fog and haze in Yinchuan [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition) (in Chinese), 39(3): 257–264. doi:10.3969/j.issn.0253-2328.2018.03.013
- 杜吴鹏, 房小怡, 黄宏涛, 等. 2017. 北京近年地表风速和大气混合层厚度变化特征研究 [J]. 环境科学与技术, 40(6): 149–156.
- Du Wupeng, Fang Xiaoyi, Huang Hongtao, et al. 2017. Variation characteristics of surface wind speed and atmospheric mixing layer height in recent years in Beijing [J]. Environmental Science and Technology (in Chinese), 40(6): 149–156. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.06.026
- 缙晓辉, 严晓瑜, 刘玉兰, 等. 2016. 银川地区大气颗粒物浓度变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 气象与环境学报, 32(6): 58–68.
- Gou Xiaohui, Yan Xiaoyu, Liu Yulan, et al. 2016. Characteristics of atmospheric particulate and their relationships with meteorological conditions in Yinchuan area [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 32(6): 58–68. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2016.06.008
- 韩丽娜, 唐晓, 陈科艺, 等. 2020. 北京地区一次空气重污染过程的气象条件模拟参数化敏感性试验 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 253–267.
- Han Li'na, Tang Xiao, Chen Keyi, et al. 2020. Sensitivity experiments of meteorological parameterization schemes for WRF model during a heavy air pollution episode in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(3): 253–267. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19053
- 贺园园, 胡非, 刘郁珏, 等. 2019. 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, 24(1): 61–72.
- He Yuanyuan, Hu Fei, Liu Yujue, et al. 2019. Boundary layer characteristics during a heavy PM_{2.5} pollution process in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(1): 61–72. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057
- 黄瑜, 夏俊荣, 韩永翔, 等. 2015. 无霾和有霾情况下大气混合层高度的日变化及其特征——基于河北香河站激光雷达的观测 [J]. 科学技术与工程, 15(24):126–131, : 137.
- Huang Yu, Xia Junrong, Han Yongxiang, et al. 2015. The diurnal variation and characteristics of the atmospheric mixed layer height in haze and non-haze days—based on LIDAR observation in Xianghe, Hebei [J]. Science Technology and Engineering, 15(24):126–131 (in Chinese), : 137. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2015.24.021
- 纪晓玲, 桑建人, 马锦艳, 等. 2013. 银川市灰霾天气环流分析及预报思路 [J]. 干旱气象, 31(4): 820–824.
- Ji Xiaoling, Sang Jianren, Ma Shaiyan, et al. 2013. Circulation analysis and forecast thoughts of haze weather in Yinchuan [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 31(4): 820–824. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0820
- 李金堡, 骆永军, 柴艺淳. 2014. 青岛地区混合层高度的季节性变化 [J]. 舰船电子工程, 34(11): 69–72.
- Li Jinbao, Luo Yongjun, Chai Yichun. 2014. Analysis of seasonal change of mixing height in Qingdao [J]. Ship Electronic Engineering (in Chinese), 34(11): 69–72. doi:10.3969/j.issn.1672-9730.2014.11.018
- 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 2015. 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, 36(6): 1935–1943.
- Li Meng, Tang Guqian, Huang Jun, et al. 2015. Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing–Tianjin–Hebei region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. Environmental Science (in Chinese), 36(6): 1935–1943. doi:10.13227/j.hjxx.2015.06.004
- 刘玉兰, 缙晓辉, 严晓瑜, 等. 2014. 银川市气溶胶变化特征及其与气象条件的关系分析 [J]. 环境科学与技术, 37(12): 123–128.
- Liu Yulan, Gou Xiaohui, Yan Xiaoyu, et al. 2014. Variation of aerosol and its relationship with meteorological conditions in Yinchuan city [J]. Environmental Science and Technology (in Chinese), 37(12): 123–128. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2014.12.024
- 马宁, 程雅茹, 武万里, 等. 2015a. 银川市 2013 年 PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度变化及空气质量分指数等级特征分析 [J]. 宁夏工程技术, 14(2): 189–192.
- Ma Ning, Cheng Yaru, Wu Wanli, et al. 2015a. The concentration changes of PM₁₀, PM_{2.5} and grade of air quality subindex in Yinchuan city in 2013 [J]. Ningxia Engineering Technology (in Chinese), 14(2): 189–192. doi:10.3969/j.issn.1671-7244.2015.02.023
- 马宁, 刘玉兰, 马蕾, 等. 2015b. 基于环保新国标和 CMAQ 模式的宁夏空气质量预报业务系统设计与实现 [J]. 宁夏工程技术, 14(3):229–231, : 235.
- Ma Ning, Liu Yulan, Ma Lei, et al. 2015b. Design and implementation of air quality forecasting system in Ningxia based on the new national standard of ambient air quality and CMAQ model [J]. Ningxia Engineering Technology, 14(3):229–231 (in Chinese), : 235. doi:10.3969/j.issn.1671-7244.2015.03.008
- 毛维薇, 张甫仁. 2016. 大气混合层高度对通风及污染物扩散的影响 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 33(6): 105–112.
- Mao Weiwei, Zhang Furen. 2016. Effect of atmospheric mixing layer height on ventilation and pollutant diffusion [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition) (in Chinese), 33(6): 105–112. doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2016.0006.021
- 孟庆珍, 冯艺. 1996. 成都大气混合层厚度的计算和分析 [J]. 成都气象学院学报, 11(1-2): 73–81.
- Meng Qingzhen, Feng Yi. 1996. Calculation and analysis of the thickness of atmospheric mixed layer above Chengdu [J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology (in Chinese), 11(1-2): 73–81.
- 任芝花, 熊安元. 2007. 地面自动站观测资料三级质量控制业务系统的研制 [J]. 气象, 33(1): 19–24.
- Ren Zhihua, Xiong Anyuan. 2007. Operational system development on three-step quality control of observations from AWS [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(1): 19–24. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.01.003
- 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制业务系统研制 [J]. 气象, 41(10): 1268–1277.
- Ren Zhihua,

- Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 41(10): 1268–1277. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.010
- 王建英, 崔洋, 史霖, 等. 2020a. 银川市冬季两次典型持续大气污染过程对比分析 [J]. *环境科学研究*, 33(3): 555–562. Wang Jianying, Cui Yang, Shi Lin, et al. 2020a. Comparative study of two typical continuous air pollution processes in Yinchuan city in winter [J]. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 33(3): 555–562. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2019.08.10
- 王建英, 崔洋, 杨亚丽, 等. 2020b. 银川市臭氧污染特征及其气象条件诊断分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 32(4): 24–28. Wang Jianying, Cui Yang, Yang Yali, et al. 2020b. Ozone pollution characteristic and its meteorological condition diagnosis in Yinchuan [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring* (in Chinese), 32(4): 24–28. doi:10.3969/j.issn.1006-2009.2020.04.006
- 王建英, 张肃诏, 雍佳, 等. 2021. 宁夏典型工业城市 2020 年 1 月重污染过程特征及成因 [J]. *环境科学研究*, 34(8): 1802–1811. Wang Jianying, Zhang Suzhao, Yong Jia, et al. 2021. Characteristics and causes of heavy pollution in typical industrial city in Ningxia in January 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 34(8): 1802–1811. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.26
- 严晓瑜, 缙晓辉, 刘玉兰, 等. 2015. 银川市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系 [J]. *气象与环境学报*, 31(2): 21–30. Yan Xiaoyu, Gou Xiaohui, Liu Yulan, et al. 2015. Characteristics of concentration of air pollutant and its relationship with meteorological conditions in Yinchuan [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 31(2): 21–30. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2015.02.004
- 杨静, 李霞, 李秦, 等. 2011. 乌鲁木齐近 30a 大气稳定性和混合层高度变化特征及与空气污染的关系 [J]. *干旱区地理*, 34(5): 747–752. Yang Jing, Li Xia, Li Qin, et al. 2011. Variation characteristics of atmospheric stability and mixed layer thickness and their relation to air pollution in recent 30 years in Urumqi [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 34(5): 747–752. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.05.003
- 杨勇杰, 谈建国, 郑有飞, 等. 2006. 上海市近 15 a 大气稳定性和混合层厚度的研究 [J]. *气象科学*, 26(5): 536–541. Yang Yongjie, Tan Jianguo, Zheng Youfei, et al. 2006. Study on the atmospheric stabilities and the thickness of atmospheric mixed layer during recent 15 years in Shanghai [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 26(5): 536–541. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2006.05.010
- 叶堤, 王飞, 陈德蓉. 2008. 重庆市多年大气混合层厚度变化特征及其对空气质量的影响分析 [J]. *气象与环境学报*, 24(4): 41–44. Ye Di, Wang Fei, Chen Derong. 2008. Multi-yearly changes of atmospheric mixed layer thickness and its effect on air quality above Chongqing [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 24(4): 41–44. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2008.04.009
- 张智, 冯瑞萍. 2014. 宁夏雾霾时间的气候变化趋势研究 [J]. *宁夏大学学报 (自然科学版)*, 35(2): 187–192. Zhang Zhi, Feng Ruiping. 2014. Analysis on the climate change trend of fog and haze days in Ningxia [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 35(2): 187–192.
- 张智, 陈玉华, 周红. 2013. 宁夏雾日和霾日的变化趋势分析 [J]. *干旱气象*, 31(4): 714–719. Zhang Zhi, Chen Yuhua, Zhou Hong. 2013. Tendency analysis of fog days and haze days in Ningxia [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 31(4): 714–719. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0714
- 中国气象局. 2011. QX/T 123–2011 无线电探空资料质量控制 [S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration. 2011. QX/T 123–2011.
- 中国气象局. 2020. QX-T 118–2020 气象观测资料质量控制地面 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2020. QX-T 118 –2020 Quality control of meteorological observation data—Surface (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press.