

文章编号: 2096-1618(2018)05-0562-10

# 四川盆地大气混合层高度特征及其与 AQI 的相关性分析

周 颖, 向卫国

(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对不同气象条件和天气过程对污染物扩散条件的影响,利用2011–2017年4月四川盆地6个城市每天8个时次的地面观测资料,运用国标法、罗氏法和联合频率法计算了大气混合层的高度,并分析了混合层高度的变化特征;同时结合国家环保部数据中心2014–2017年4月的AQI日平均资料,对混合层高度与AQI做了相关性分析。研究结果如下:混合层高度的3种计算方法中联合频率法具有更好的精确性和代表性,更能反映实际情况;四川盆地的混合层年平均高度为587.2 m,变化范围在530~660 m,并呈抬高趋势;月平均高度为591.26 m,变化范围在440~770 m,最低值出现在秋、冬两季,最高值出现在春、夏两季,说明春、夏两季大气的扩散条件比秋、冬两季要好;近年来冬季的混合层高度大致上也呈现抬高的趋势,表明冬季的扩散条件有所转好;一天之中混合层高度在午后14时达到最高,夜间02时最低。混合层高度与AQI总体来说表现为负相关,其中达州混合层高度与AQI的相关性最好,相关系数为-0.22,但其相关性根据季节的变化而存在波动,一般在冬季混合层高度与AQI为显著的负相关,而在春、夏两季则出现正相关。

**关键词:**大气科学;大气环境;混合层高度;变化特征;上升趋势;AQI;相关性

**中图分类号:**P404

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.05.014

## 0 引言

混合层高度作为一个参量来描述大气边界层的物理结构特征,表征的是污染物在垂直方向上被湍流稀释的程度,并随着时间和地点变化。20世纪80年代以来,学者们通过研究中国大陆不同月份不同站点的大气混合层平均高度,初步揭示了中国境内的空气污染潜势气候特征。

从大气混合层高度的计算方法看,通常利用气象探空与地面常规观测资料进行计算。刘北平<sup>[1]</sup>根据温度、位温、风、混合比等ADAS探空资料在混合层内与混合层以上的变化差异直接确定混合层的高度。该方法与马福建等<sup>[2-3]</sup>用地面气象要素资料计算的混合层高度结果较一致,方法也简便易行;周颖<sup>[4]</sup>则根据温度和风速的低空探测资料估算了混合层的高度,发现地面温度和风速与大气混合层的高度表现为较好的正相关;程水源等<sup>[5]</sup>首次通过利用多个飞机场的气象探空资料和地面常规气象观测资料确定混合层高度。

从大气混合层高度的变化特征看,因温度露点差季节的平均值与观测到风速的季节的平均值可以决定大气混合层季节的平均值。沈鹰<sup>[6]</sup>对云南省17个地

州的相对湿度和平均风速做了多年观测的平均值分析发现对于大部分地区,大气混合层的最大平均高度出现在春季,冬季次之,最小则为夏季和秋季。徐芙蓉等<sup>[7]</sup>对长江下游区域的大气混合层高度的时刻、月份以及季节的变化规律进行了探讨。发现一天中02时、08时、14时和20时的气象资料在对于年日的平均上具有很好的代表性,一年之中的4月、7月、10月和12月分别对于春、夏、秋、冬4个季节也具有很好的代表性。杨勇杰等<sup>[8]</sup>利用1990–2004年上海市近15年每天4个时次的气象资料分析了混合层厚度和大气稳定度逐年、月 and 不同时次的变化趋势。得到的结果表明该地区的大气稳定度受云量的影响较大,而混合层高度受风速的影响较大。杨静等<sup>[9]</sup>对1979–2008近30年来乌鲁木齐市一天4个时次的地面气象资料,运用经过气象条件修正的罗氏法和帕斯奎尔稳定度分类法计算得到,近30年乌鲁木齐市的大气混合层高度随着时间的增长基本呈现为缓慢增长的趋势,而混合层的高度最低出现在冬季的夜晚,这说明在冬季夜间大气垂直方向的平均稀释能力最差,并且30年大气稳定度的等级以D类出现频率最高,F类次之。日变化表现为傍晚和清晨由中性层结占主导,中午多为弱不稳定层结,而夜间多为稳定层结。

从大气混合层高度的变化与污染物的浓度和相关性看,大气污染物浓度的分布受到大气混合层高度变化的影响。叶堤等<sup>[10]</sup>进一步分析了大气混合层高度

与空气质量的相关性。通过对混合层高度和空气污染指数的相关性分析显示,月平均的混合层高度与月平均的 API 呈现显著性的负相关,表明混合层高度是影响城市中空气质量的重要因素,揭示城市中空气污染的典型气象特征,奠定了城市空气污染潜势预报的基础。张建忠等<sup>[11]</sup>对北京 2013 年 1-2 月的空气质量指数 AQI 的时空分布特征以及 AQI 与混合层高度的相关性进行了分析。研究结果表明,AQI 与混合层高度成明显的负相关关系,在混合层高度持续低于459 m 时有利于污染物的堆积,在 AQI 的预报中,大气混合层高度将是一个非常好的参考数据。大气混合层的高度作为影响大气扩散的重要因子之一,其对于污染物的储存量和分布与大气质量评估有重要作用。李梦等<sup>[12]</sup>利用云高仪对京津冀区域 4 个站点 2014 年污染最严重的 2 月大气混合层的高度进行同步连续观测,分析其各自区域的总体变化特征。结合气象数据分析发现,影响混合层高度的主要因素是辐射和风速,而近地面维持长时间的高污染浓度其主要原因是不利的大气垂直扩散条件。并且京津冀的混合层高度变化与大气细颗粒物的浓度成高度的负相关。毛维薇等<sup>[13]</sup>通过对比分析在气象条件下的日变化与季节变化对于建筑群的通风能力与污染物扩散分别在水平和垂直方向上的影响,得到大气混合层的高度与建筑群的通风能力、污染物的扩散速率表现为高度的正相关,而与污染物浓度具有负相关。

文中采用国标法、罗氏法和联合频率法 3 种方法在大气混合层高度计算分析其变化特征的基础上,对大气混合层高度与空气质量指数 AQI 的相关性做了进一步的对比研究。

# 1 资料与研究内容

选用了 2011-2017 年 4 月四川盆地 6 个城市:宜宾、成都(温江)、达州、重庆(沙坪坝)、内江(东兴区)、乐山每天 8 个时次的地面气象要素观测资料以及国家环保部数据中心 2014-2017 年 4 月的空气质量指数 AQI 日平均资料。

其中地面气象要素中的总云量、低云量和风速等

观测资料,采用国家标准 GB/T13201 附录 B 和附录 E 规定的方法来计算大气混合层高度;温度、露点温度和平均风速等资料采用罗氏法来计算大气混合层高度;在罗氏法的基础上增加风速和稳定度等级的联合频率则利用联合频率法来计算混合层的高度。

分别对以上 3 种方法得到的大气混合层高度进行比较分析,对大气混合层高度的年变化、月变化和冬季的年变化特征进行分析,并对大气混合层高度与 AQI 的日相关性、月相关性特征进行了分析研究。

# 2 混合层高度计算方法

## 2.1 国标法(国标推荐法)

国标法是国家标准 GB/T13201<sup>[14]</sup>附录 B 和附录 E 规定的方法。该方法利用每天观测时刻的太阳高度角与总云量/低云量来确定太阳辐射等级,再由太阳辐射等级与风速确定大气稳定度等级,最后由不同稳定度条件下应用不同的公式求得大气混合层的高度。

此方法实质上是认为地面加热和冷却的程度在很大程度上决定了近地面层大气的热状况。这种方法直接利用了中国地面的常规气象观测资料,并综合考虑了热力因子和动力因子。分级定量化了一系列的参数,包括太阳高度角、云量和风速。并对大气稳定度进行分类,最后计算出混合层的高度,计算方法如下:

首先,由观测时刻计算出太阳高度角

$$h_0 = \arcsin[\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos(15t + \lambda - 300)] \tag{1}$$

式中, $h_0$  是太阳高度角, $\phi$  是观测点纬度, $t$  是进行观测时的北京时间, $\lambda$  是观测点经度,而  $\delta$  是太阳赤纬, $\delta$  的计算公式如下:

$$\delta = [0.006918 - 0.39912 \cos \theta_0 + 0.70257 \sin \theta_0 - 0.006758 \cos \theta_0 + 0.000907 \sin 2\theta_0 - 0.002697 \cos 3\theta_0 + 0.001480 \sin 3\theta_0] \times 180 / \pi \tag{2}$$

式中, $\theta_0 = 360d_0/365$ ,其中  $d_0$  是一年之中的日期序数,依次分别为 0,1,2,⋯,364。

其次,由计算出的太阳高度角  $h_0$  和总云量/低云量,根据表 1 确定太阳辐射的等级。

表 1 太阳辐射等级数

| 总云量或低云量             | $h_0 \leq 0$ (夜间) | $0 < h_0 \leq 15^\circ$ | $15^\circ < h_0 \leq 35^\circ$ | $35^\circ < h_0 \leq 65^\circ$ | $h_0 > 65^\circ$ |
|---------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
| $\leq 4$ 或 $\leq 4$ | -2                | -1                      | +1                             | +2                             | +3               |
| 5~7 或 $\leq 4$      | -1                | 0                       | +1                             | +2                             | +3               |
| $\geq 8$ 或 $\leq 4$ | -1                | 0                       | 0                              | +1                             | +1               |
| $\geq 5$ 或 5~7      | 0                 | 0                       | 0                              | 0                              | +1               |
| $\geq 8$ 或 $\geq 8$ | 0                 | 0                       | 0                              | 0                              | 0                |

注:将云量分为 10 份, $h_0$  为太阳高度角

然后,根据太阳辐射等级以及地面风速值,再由表 2 得到大气稳定度等级。

表 2 大气稳定度等级

| 地面风速/(m/s) | 太阳辐射等级 |     |    |   |    |    |
|------------|--------|-----|----|---|----|----|
|            | +3     | +2  | +1 | 0 | -1 | -2 |
| ≤1.9       | A      | A~B | B  | D | E  | F  |
| 2~2.9      | A~B    | B   | C  | D | E  | F  |
| 3~4.9      | B      | B~C | C  | D | D  | E  |
| 5~5.9      | C      | C~D | D  | D | D  | D  |
| ≥6         | D      | D   | D  | D | D  | D  |

最后,计算混合层高度。

当气象条件处于中性和不稳定时,也就是在大气稳定度等级为 A、B、C、D 时,应用公式(3);当气象条件处于稳定时,也就是在大气稳定度等级为 E、F 时应用公式(4)。

$$H=a_0u_{10}/f \tag{3}$$

$$H=b_0\sqrt{u_{10}/f} \tag{4}$$

式(3)和式(4)中, $H$ 为大气混合层高度(m); $u_{10}$ 代表高度为10 m的平均风速,如果风速>6 m/s就取为6 m/s; $f$ 是地转参数, $f=2\Omega\sin\varphi$ , $\Omega$ 是地转角速度,取值 $7.29\times10^{-5}/\text{s}$ , $\varphi$ 为观测纬度; $a_0$ 、 $b_0$ 为混合层系数,取值由稳定度等级决定,当稳定度等级为 A 时, $a_0$ 取值0.073;当稳定度等级为 B 时, $a_0$ 取值0.048;当稳定度等级为 C 时, $a_0$ 取值0.031;当稳定度等级为 D 时, $a_0$ 取值0.022;当稳定度等级为 E 时, $b_0$ 取值1.66;当稳定度等级为 F 时, $b_0$ 取值0.70。

2.2 罗氏法

罗氏法又称经验数值计算方法,是由 Nozaki 等 1973 年提出的计算大气混合层高度的方法,该方法利用地面气象观测资料,综合大气稳定度、地面温度、地面风速以及地面粗糙度来估计混合层高度。

因为大气混合层是热力湍流和机械湍流一同作用的结果,并且地面气象参数与边界层上部大气的运动状况相互之间存在着联系和反馈作用,所有地面气象参数可以用以估算大气混合层的高度,该计算方法的具体公式为:

$$H=\frac{121}{6}(6-P)(T-T_d)+\frac{0.169P(U_z+0.257)}{12f\ln(Z/Z_0)} \tag{5}$$

式中, $H$ 是平均混合层高度(m); $P$ 是 P-Pasquill 大气稳定度等级(等级分别为 A~F,A:极不稳定, $P=1$ ;A~B: $P=1.5$ ;B:中等不稳定, $P=2$ ;B~C: $P=2.5$ ;C: $P=3.0$ ;C~D: $P=3.5$ ;D:中性, $P=4$ ;E: $P=5$ ;F:中等稳定, $P=6$ ); $U_z$ 代表了  $Z$  高度处观测到的平均风速(一般取  $Z=10\text{ m}$ ); $T-T_d$  是温度露点差, $^{\circ}\text{C}$ ;  $f$  是地转

参数, $f=2\Omega\sin\varphi$ , $\varphi$ 为观测点的地理纬度, $\Omega$ 是地转角速度; $Z_0$ 是地面粗糙度(m)(由不同区域下垫面平坦粗糙的程度和城市大小来决定取值,一般在乡村地区取值为0.03~0.2 m,在城市区域取值为0.8~2.0 m。文中的地面粗糙度取为0.45 m)

2.3 联合频率法

联合频率法本质上仍然属于罗氏法,是经过气象条件修正后的罗氏法,是在罗氏法的基础上引入了风速和大气稳定度联合频率。这种方法考虑了各种气象条件与静风对于大气混合层高度的贡献和影响,由此得到的结果更能够反映出实际的情况。

联合频率法取每日 4 个时次观测的地面气象资料,按在各个风速段各类的大气稳定度出现频率来计算,一般将风速段分为 6 个等级:0~0.9、1~1.4、1.5~1.9、2.0~2.9、3.0~3.9、 $\geq 4.0$ (m/s)。具体的计算公式为:

$$H=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^m\left[\frac{121}{6}(6-P)_j(T-T_d)_j+\frac{0.169P_j(U_z+0.257)}{12f\ln(z/z_0)}\right]\times f(i,j) \tag{6}$$

式中, $H$ 是平均混合层高度(m); $P$ 是 P-Pasquill 大气稳定度等级; $T-T_d$ 是温度露点差, $^{\circ}\text{C}$ ;  $f$ 是地转参数, $f=2\Omega\sin\varphi$ , $\varphi$ 为观测点的地理纬度, $\Omega$ 是地转角速度; $U_z$ 是  $Z$  高度处观测到的平均风速(一般取  $Z=10\text{ m}$ ); $Z_0$ 是地面粗糙度(m); $f(i,j)$ 是各个风速段各类大气稳定度的频率, $i,j$ 分别是风速段与稳定度分级; $n,m$ 是各风速段和大气稳定度分级个数。

3 四川盆地混合层高度特征分析

3.1 混合层高度的年变化特征

由于乐山 2013 年的数据缺失,以下运用国标法、罗氏法、联合频率法这 3 种方法分别统计了 2011 年至 2017 年 4 月四川盆地 5 个城市(成都、达州、宜宾、内江、重庆)大气混合层高度逐年平均变化的特征,以及四川盆地总年平均值的变化特征,如图 2 所示。



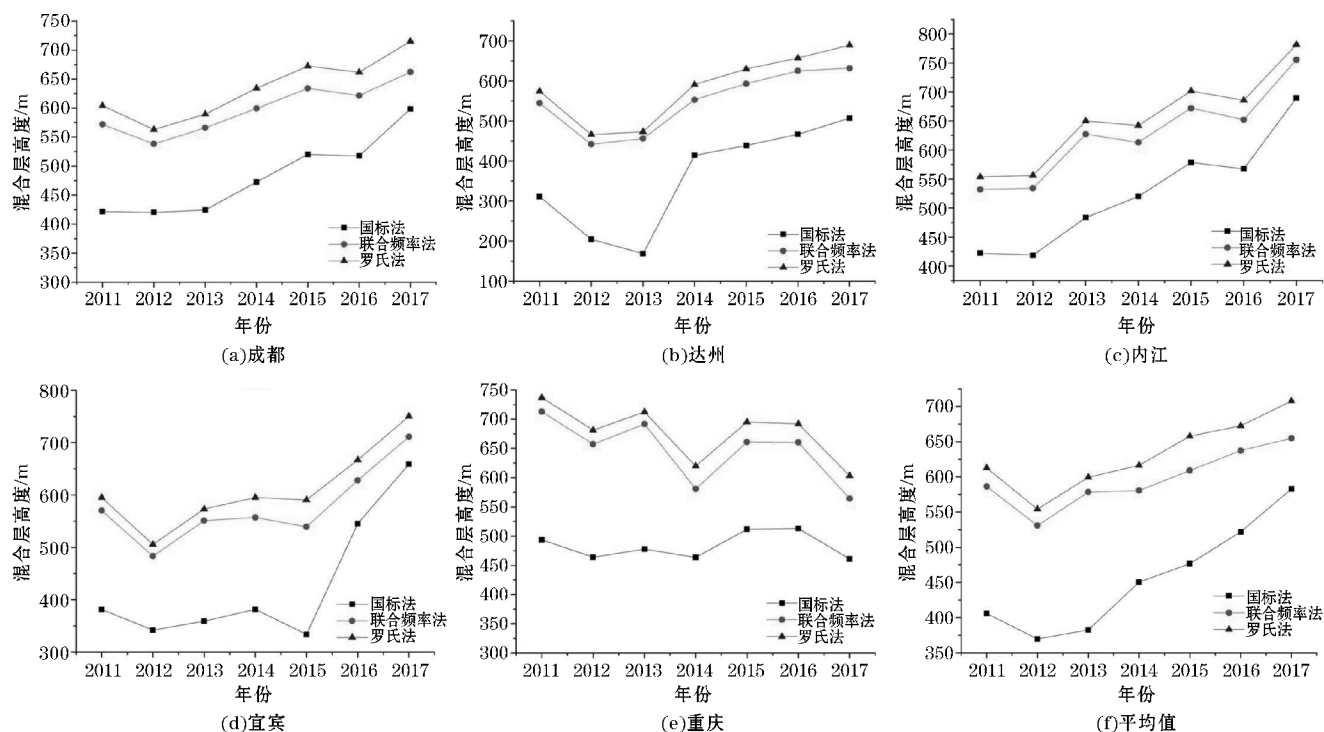


图2 混合层高度的年平均变化

从图2可以看出,3种计算方法得到的结果曲线年变化趋势基本一致,表现为2011–2016年混合层高度大体呈现上升趋势。比对曲线得到,罗氏法的计算结果偏高,国标法的计算结果最低,联合频率法计算结果在两者之间。从3种方法的计算原理上来看,国标法受风速的影响较大,而四川盆地常年处于小风或静风的状态,故可能造成结果偏低;而罗氏法的经验性较大,可能估计的结果会系统偏高;联合频率法是在罗氏法的基础上添加了风速和稳定度的联合频率,原理上可以修正罗氏法结果的系统偏高,比罗氏法更具有精确性和代表性。由于3种方法得到的结果变化趋势较为一致,以下由联合频率法具体分析四川盆地各城市大气混合层高度的年变化趋势。

整个四川盆地的混合层高度在2011–2016年的平均高度为587.2 m,变化范围总体介于530~660 m,最低值出现在2012年,为530.92 m,之后呈明显上升趋势,表明近年四川盆地的空气质量有所好转。分区域看,2011–2016年成都大气混合层的高度值介于500~700 m,整体为上升趋势,2012年相对2011年有所下降,并出现一个低值,为538 m,之后平缓的上升,到2015年混合层高度较高,达到634 m,2015–2016年则变化不大;相对于成都位置偏东的达州,混合层高度的变化范围在400~700 m,总体变化趋势相近,也是在2011–2012年混合层高度有所下降,与成都相比下降幅度偏大,2012–2013年混合层高度维持在400 m左右,2013年开始逐年上升;宜宾比成都位置偏南,混合

层高度的变化范围在400~600 m,比较来看,宜宾在2012年也出现了一个低值,比成都的混合层高度更低,为483 m,之后几年也呈上升趋势,但与成都的上升趋势不同的是,在2015年宜宾的混合层高度有所下降;相对其他几个城市的平缓上升趋势不同,内江的大气混合层高度从2011–2016年表现为有规律的隔年上升趋势,总体范围位于500~800 m,2012–2013年和2014–2015年呈现为幅度较大的上升趋势,而2011–2012年,2013–2014年,2015–2016年则无太大的变化;重庆的大气混合层高度显示出较为无规律的变化,总体范围大致位于500~800 m,2011年开始下降到2012年开始有较小幅度的上升,2013年较大幅度的下降,在2014年出现了一个低值,为580 m,但相对于其他几个城市的低值来说相对较高,之后开始上升到2015年,2015–2016年则没有太大的变化。

### 3.2 混合层高度的月变化特征

应用联合频率法计算得到的结果对四川盆地6个城市(成都、乐山、宜宾、达州、内江、重庆)的大气混合层高度做了多年月平均变化的曲线图,由图3可以看出,大气混合层的高度存在着很明显的季节变化。

平均看,四川盆地总体表现为春夏季的混合层高度较高,而秋冬季较低,平均高度为591.26 m,变化范围在440~770 m。最低值出现在秋季的11月,为448.91 m,最高值出现在春季的5月,为767.15 m。一般来说,春夏季的大气混合层高度较高秋冬季较低,这

种大气混合层高度的季节变化跟湍流的强弱有关,与湍流强弱的季节变化较为一致<sup>[15]</sup>。秋、冬季,太阳辐射减小,湍流也相应减弱,大气的混合层高度降低。而春、夏季四川盆地的太阳辐射增强,进而导致湍流活动旺盛,相应的大气混合层高度上升。夏季是四川盆地多雨的季节,这个季节多为低压辐合的天气系统所控制,天空中存在着较多的云层覆盖,从而抑制了太阳辐射的接收,致使热力湍流活动减弱,与此同时对流活动与降水的发生使得大气中能量的迅速释放,引起大气混合层高度的降低,这可能是 6 月和 7 月混合层高度出现小低谷的原因之一。

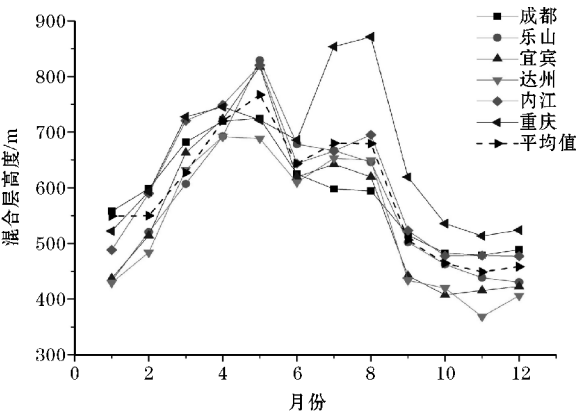


图 3 混合层高度的季节变化

分区域看,6 个城市在秋、冬季的大气混合层高度最低,且两季的高度差值不大,最低值范围在 300 ~ 400 m。而最高值出现的季节则随区域的差异有所不同,重庆的大气混合层的高度在夏季 8 月达到最高值,重庆夏季混合层最高值为 871 m,而成都、乐山、内江、达州和宜宾这 5 个城市大气混合层的高度则是在春季的 5 月达到最高值,成都春季大气混合层最高值为 725 m,乐山春季大气混合层最高值为 829 m,内江春季大气混合层最高值为 820 m,达州春季大气混合层最高值为 692 m,宜宾春季大气混合层最高值为 817 m。

总体来看,这 6 个城市都表现为春、夏季的大气混合层高度明显高于秋、冬两季节。由此可见,在春、夏两季大气的扩散条件比秋、冬两季要强。

表 3 给出了各个城市 2011–2017 年 4 月多年季节平均变化值。由表 3 可以看出,参与统计的这 6 个城市,重庆的大气混合层高度多年平均值最高,为 656 m,依次往下为内江 612 m,成都 589 m,乐山 576 m,宜宾 561 m,最低为达州 549 m。同时,春、夏两季大气混合层的高度高于年平均值,而秋、冬两季大气混合层的高度低于年平均值。

表 3 2011–2017 年 4 月混合层高度季节变化值/m

|    | 平均  | 春季  | 夏季  | 秋季  | 冬季  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 重庆 | 656 | 718 | 803 | 556 | 546 |
| 内江 | 612 | 763 | 668 | 493 | 524 |
| 成都 | 589 | 708 | 605 | 492 | 552 |
| 乐山 | 576 | 709 | 663 | 467 | 466 |
| 宜宾 | 561 | 734 | 627 | 421 | 463 |
| 达州 | 549 | 671 | 637 | 407 | 443 |

3.3 冬季混合层高度的年变化

由于冬季易形成逆温且扩散条件较差,为污染的高发期。而大气混合层的高度在一定程度上表征了污染物在垂直方向稀释扩散的范围,为了解冬季混合层高度的逐年变化趋势,现利用联合频率法计算得到的结果对 2011–2017 年四川盆地 5 个城市(成都、重庆、宜宾、内江、达州)的冬季大气混合层高度值的变化作曲线图(图 4)。

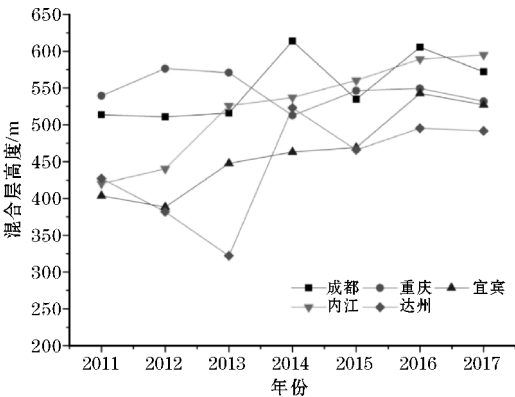


图 4 冬季混合层高度的逐年变化

从图 4 可以看出,四川盆地参与统计的这 5 个城市冬季大气混合层高度的变化范围在 310 ~ 620 m,且各城市混合层高度的变化起伏都在 300 m 以下。宜宾跟内江这两个偏南的城市冬季混合层高度的逐年变化趋势较为一致,都表现为逐年递增,但内江总体来说比宜宾的混合层高度偏高,表明内江的大气扩散条件比宜宾好且近几年来冬季大气的扩散条件逐年有转好的趋势;成都在 2011–2013 年冬季的混合层高度维持在 510 m 左右,之后开始升高,到 2014 年达到这 7 年来的最高值,为 613 m,说明这一年的大气扩散条件好,污染程度较小,到了 2015 年混合层高度下降,至 2016 年有所上升,之后变化趋于平缓;达州冬季的大气混合成高度变化趋势与成都比较相似,但总体值偏低,且变化幅度偏大,2011–2013 年有明显的下降趋势,到 2013 年达到最低,为 343 m,到 2014 年有一大幅度上升,达到 523 m,至 2015 年稍许下降,之后则无太大的变化;

重庆冬季的大气混合层高度逐年变化没有太大的起伏,除在 2014 年有小幅度的降低,其他年份都趋于平缓,高度范围在 520 m 上下波动,没有明显的上升或者下降的趋势,说明了重庆的混合层较为稳定且对流扩散能力较弱。

3.4 混合层高度的日变化

在描述了混合层高度的年变化、月变化后,对四川盆地混合层高度的日变化也做了简单的分析,图 5 给出了混合层高度的日变化特征。从图 5 可以看出,混合层高度具有明显的日变化特征,呈现为夜间低白天高的特点,尤其在午后 14 时最高,达到 854 m,夜间 02 时最低,为 447 m。这可能是由于在一天中,空气在日出之后因

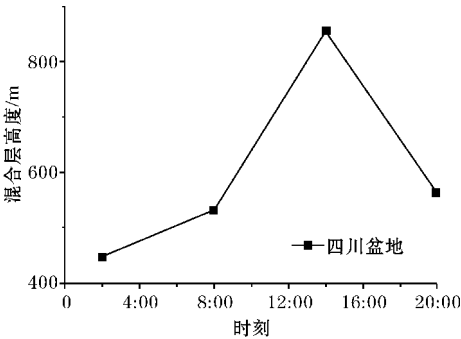


图 5 混合层高度的日变化

地面的加热而开始增厚并上升,到了午后就达到最高,之后气温开始下降,混合层高度随之降低。

4 混合层高度与 AQI 的相关性

空气质量指数 AQI 可以定量的描述空气质量状况,反映空气污染的程 度,其包含的主要污染物有细颗粒物、可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、臭氧和一氧化碳。大气混合层高度是在垂直方向影响污染物的主要气象要素,代表了在垂直方向污染物被扩散的范围。当大气混合层的高度较低时,空气中的污染物在垂直方向不能很好地扩散。从而导致污染物的浓度增大,空气质量指数 AQI 越高,能见度也越低<sup>[16]</sup>。所以混合层高度对于 AQI 的预报来说是一个很好的参考数据,两者之间存在一定的相关性。

4.1 混合层高度与 AQI 的日相关性

以下利用 2014–2017 年 4 月四川盆地 6 个城市(达州、乐山、重庆、宜宾、成都、内江)大气混合层高度的日平均资料和 2014–2017 年 4 月的 AQI 逐日数据作相关性分析,图 6 为混合层高度与 AQI 逐日数据的相关性散点图。

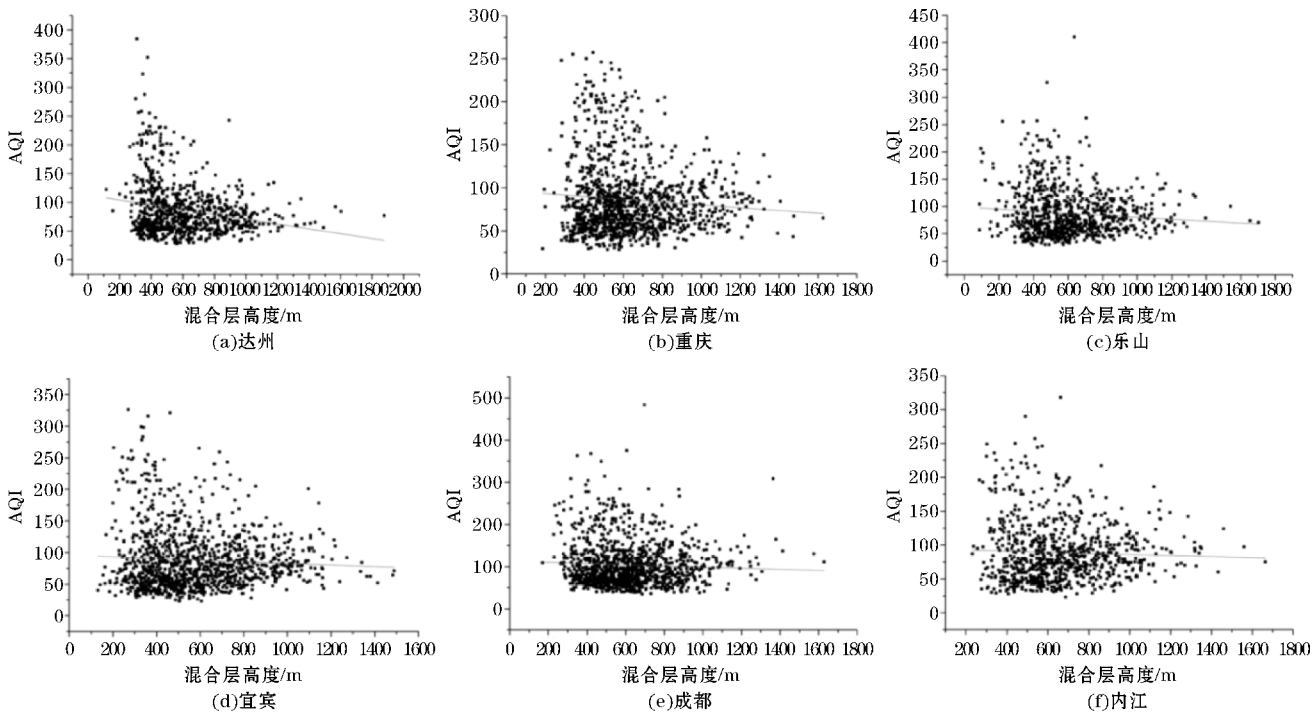


图 6 混合层高度与当日 AQI 的相关性

从图 6 可以看出,一般情况下大气的混合层高度与 AQI 表现为负相关,也就是说,大气混合层高度越

高,大气的扩散条件越好,污染程度越小,则 AQI 越小。四川盆地参与计算统计的这 6 个城市中,达州的



混合层高度与 AQI 相关性最好,相关系数为-0.22,在  $\alpha=0.01$  的水平上显著。重庆和乐山也相对较好,宜

宾、成都和内江次之,但相差不大。表 4 给出了这 6 个城市大气混合层高度与当日 AQI 的相关系数。

表 4 混合层高度与当日 AQI 的相关系数

|      | 达州    | 重庆    | 乐山    | 宜宾    | 成都    | 内江    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 相关系数 | -0.22 | -0.09 | -0.09 | -0.06 | -0.05 | -0.04 |

同时,利用以上的资料作前一天混合层高度与第二天 AQI 的相关系数,见表 5,由此可见达州、重庆、乐山、内江和成都这 5 个城市的混合层高度与 AQI 依然

表现为负相关,而宜宾则表现为弱的正相关,这可能跟污染的程度和持续性与否有关。

表 5 混合层高度与次日 AQI 的相关系数

|      | 达州    | 重庆    | 乐山    | 内江    | 成都    | 宜宾   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 相关系数 | -0.18 | -0.12 | -0.06 | -0.06 | -0.06 | 0.02 |

为研究大气混合层高度与空气质量指数 AQI 的相关性随季节的变化关系,现利用 2014-2017 年 4 月混合层高度与 AQI 的日数据资料作逐日的季节相关性分析。

如图 7 所示,对于四川盆地的这 6 个城市,在春夏秋冬 4 个季节中,大气混合层高度与 AQI 都在冬季表现出了显著性的负相关,相关系数在-0.29 ~ -0.12,通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验,其中成都和重庆这两个城市在秋季也出现了负相关,成都在秋季的负相关则比冬季更为明显。同时这 6 个城市也都在夏季表现出了明显的正相关,相关系数在0.14 ~ 0.56,也在  $\alpha=0.01$  的水平上显著。因为空气质量指数 AQI 包含了 6 种污染物,而 AQI 的日指数是由每天的首要污染物决定的。有研究表明,大气混合层的变化与大气中的细颗粒物浓度成高度的负相关。所以在颗粒物污染高发的秋、冬季大气混合层高度与 AQI 成负相关。而由于夏季太阳辐射的增强,从而温度升高,大气的热浮升力相应的增大,将有利于混合层高度的发展和上升。同时,气温与臭氧的浓度也成一定的正相关<sup>[17]</sup>。夏季的首要污染物为臭氧,臭氧的浓度远远大于全年的其他时间<sup>[18]</sup>,因此夏季的大气混合层高度与 AQI 成正相关。

4.2 混合层高度与 AQI 的月相关性

由大气混合高度与 AQI 的逐日资料分析得到混合层高度与 AQI 有着较好的相关性,下面进一步对 2014-2017 年 4 月混合层高度与 AQI 的逐日资料做多

年月平均进行相关性分析,如图 8 所示。

由图 8 可知,总的来说大气混合层高度与 AQI 有着较好的相关性,大部分情况下表现为负相关,随季节的不同有较小波动。一般在秋、冬季表现良好的负相关,而春、夏季的相关性则不是那么好,个别的月份甚至表现为正相关。

对于四川盆地参与统计的这 6 个城市,由于地理位置的差异,在不同的季节当地大气混合层高度与 AQI 的相关性也不同。均位于四川盆地东部的重庆、达州和位于四川盆地西部的乐山这 3 个城市的大气混合层高度与 AQI 的相关性最好,这跟混合层高度与 AQI 逐日相关性得到结果一致。除重庆和达州在 6-8 月表现为弱的正相关,乐山在 5-6 月,8-9 月表现为弱的正相关,这 3 个城市在其他月份均表现为很好的负相关;成都和内江情况相似,大气的混合层高度与 AQI 的相关性表现为,成都 5-9 月有一弱的正相关,内江 5-10 月存在弱的正相关,而其他月份都呈现出明显的负相关;宜宾跟其他几个城市有所不同,宜宾的大气混合层高度与 AQI 的相关性在 1-4 月成显著的负相关,4-6 月出现正相关,6-9 月相关性较弱,9-12 月又表现为正相关,比之前 4-6 月的相关性偏弱。

结合混合层高度与 AQI 逐日季节的相关性分析来看,由于样本数量较少,而多年月平均则平滑了一些数据,所以得到的结论有所不同,但混合层高度与 AQI 的相关性大致上都表现为在冬季为显著的负相关,在春、夏季则为明显的负相关。

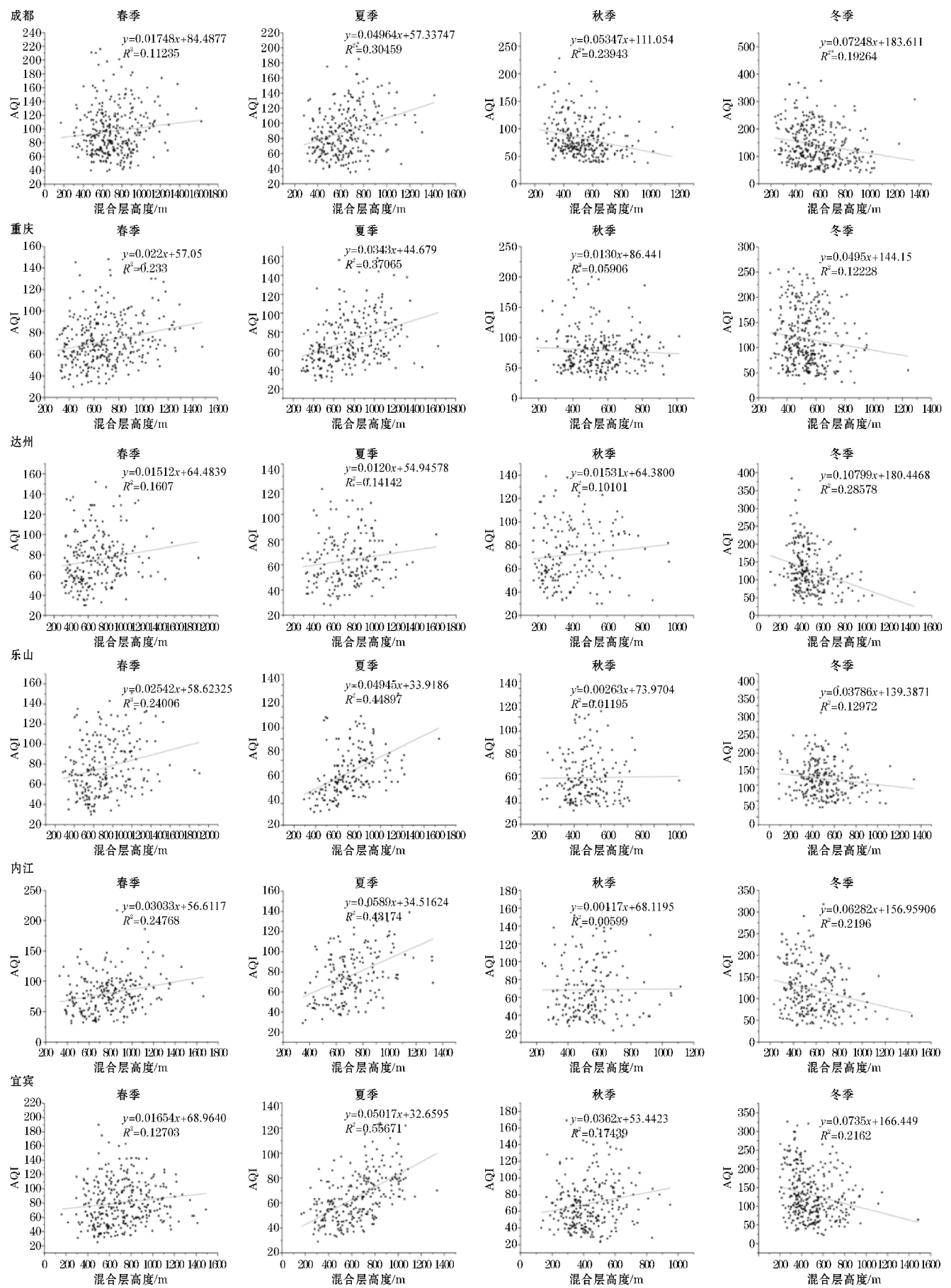


图 7 混合层高度与 AQI 的季节相关性



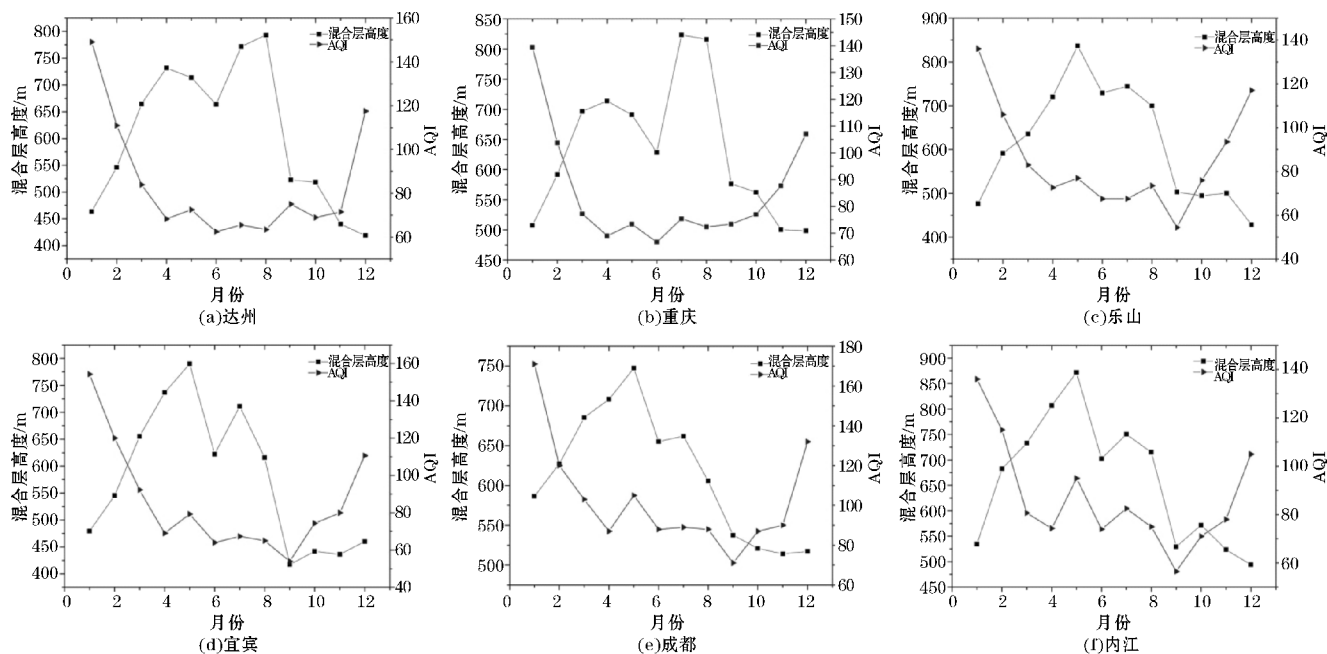


图8 混合层高度与AQI的月相关性

## 5 结论

利用2011–2017年4月四川盆地6个城市:宜宾、成都(温江)、达州、重庆(沙坪坝)、内江(东兴区)、乐山每天8个时次的地面气象要素观测资料运用国标法、罗氏法和联合频率法这3种方法分别计算四川盆地6个测站的大气混合层高度,对比3种方法的差异,并运用联合频率法分析了大气混合层高度的年、月、日以及冬季年变化特征,再结合2014–2017年4月的日平均AQI指数资料对大气混合层高度与AQI指数的相关性做了分析,得出如下结论:

(1)大气混合层高度的3种计算方法中,国标法由于受到风速的影响较大,其计算结果偏低;罗氏法的经验性较大,会引起结果的系统偏高;联合频率法其在罗氏法的基础上添加了风速和稳定度的联合频率,可以修正罗氏法结果的系统偏高,比罗氏法更具有精确性和代表性。

(2)四川盆地的大气混合层高度在2011–2016年的变化大致表现为上升的趋势,总体范围在400~800 m。混合层高度的最低值出现在秋、冬两季,最高值出现在春、夏两季,说明春、夏两季大气的扩散条件比秋、冬两季要好,但由于夏季多雨,在6、7月出现一个小低谷。对于污染多发的冬季,其大气混合层高度的年变化特征除一些小的波动,大致上也呈现为上升

的趋势,表明冬季的扩散条件有所转好。而在一天之中,午后14时的混合层高度最高,夜间02时最低,这与白天地面加热有关。

(3)大气混合层高度与AQI总体来说表现为明显的负相关。四川盆地这6个城市中达州的混合层高度与AQI的相关性最好,相关系数为-0.22。但混合层高度与AQI的相关性根据季节的变化而存在少许的波动,一般在冬季混合层高度与AQI为显著的负相关,而在春、夏两季则出现明显的正相关。

由于空气质量指数(AQI)在2013年1月1日开始正式发布,时间较短,文中的数据样本存在着一定的局限性,所以对于AQI的有关结论仍然需要不断地积累和检验。

## 参考文献:

- [1] 刘北平. 确定大气混合层高度方法的研究[J]. 环境科学研究, 1990, 3(1): 8–12.
- [2] 马福建. 用常规地面气象资料估算大气混合层深度的一种方法[J]. 环境科学, 1990, 5(1): 11–14.
- [3] 童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 29–32.
- [4] 周颖. 贵阳市混合层高度的研究[J]. 贵州环保科技, 1997, 3(4): 37–40.
- [5] 程水源, 席德立, 张宝宁, 等. 大气混合层高度的

- 确定与计算方法研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6):512-516.
- [6] 沈鹰. 混合层高度的季节变化[J]. 环境科学导刊, 1990(1):30-33.
- [7] 徐芙蓉, 施介宽. 混合层高度变化趋势及其代表值的探讨[J]. 东华大学学报, 2003, 29(4):99-102.
- [8] 杨勇杰, 谈建国, 郑有飞, 等. 上海市近15a大气稳定性和混合层厚度的研究[J]. 气象科学, 2006, 26(5):536-541.
- [9] 杨静, 李霞, 李秦, 等. 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, 2011, 34(5):747-752.
- [10] 叶堤, 王飞, 陈德蓉. 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. 2008, 24(4):41-44.
- [11] 张建忠, 孙瑾, 王冠岚, 安林昌, 王维和. 北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(1):33-38.
- [12] 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.
- [13] 毛维薇, 张甫仁. 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, 2016, 33(6):105-112.
- [14] GB/T13201-91, 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. 北京:标准出版社, 1992.
- [15] 尤焕苓, 刘伟东, 潭江瑞. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征[J]. 气象, 2010, 36(5):51-55.
- [16] 于庚康, 王博妮, 陈鹏, 等. 2013年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析[J]. 气象, 2015, 41(5):622-629.
- [17] 朱宽广, 谢旻, 霍云怡, 等. 南京城市下垫面变化对夏季臭氧浓度的影响研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11):3217-3226.
- [18] 安俊琳, 王跃思, 李昕. 北京大气中NO、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>浓度变化的相关分析[J]. 环境科学, 2007, 28(4):706-711.

## Analysis of the Characteristics of the Height of Atmospheric Mixed Layers in Sichuan Basin and its Correlation with AQI

ZHOU Ying, XIANG Wei-guo

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In view of the impact of different meteorological conditions and weather processes on the diffusion conditions of pollutants, the ground observation data of 8 times per day in 6 cities in the Sichuan Basin from April 2011 to April 2017 were used to calculate the atmosphere by using the national standard method, the Roche method and the joint frequency method. The height of the mixed layer was analyzed and the characteristics of the height of the mixed layer were analyzed by combining with the AQI daily average data from the data center of the Ministry of Environmental Protection from April 2014 to April 2017. The correlation between the height of the mixed layer and the AQI was analyzed. The results are as follows: The joint frequency method has better accuracy and representativeness in the three calculation methods of mixed layer height, and it can reflect the actual situation more effectively; The annual average height of the mixed layer in the Sichuan Basin is 587.2 m, and the change range is between 530 and 660 m. There is a trend of elevation; The monthly average height is 591.26 m, and the change range is between 440 and 770 m. The lowest value occurs in autumn and winter, and the highest value occurs in spring and summer. This shows that the diffusion conditions of the atmosphere in spring and summer are better than those in autumn and winter. In recent years, the height of the mixed layer in winter has also shown a tendency of elevation. This indicates that the diffusion conditions in winter have improved. In one day, the height of the mixing layer reaches the highest at 14:00 and the lowest at 02:00. The mixed layer height is negatively correlated with the overall AQI. The correlation between the height of the mixed layer in Dazhou and the AQI is the best, and the correlation coefficient is -0.22, but the correlation fluctuates according to the seasons, generally in the mixed layer height in winter. There was a significant negative correlation with AQI and a positive correlation in the spring and summer.

**Keywords:** atmospheric science; atmospheric environment; mixed layer height; change characteristics; upward trend; AQI; correlation