

王坚, 蔡旭晖, 宋宇. 2016. 北京地区日最大边界层高度的气候统计特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 525–532. Wang Jian, Cai Xuhui, Song Yu. 2016. Daily maximum height of atmospheric boundary layer in Beijing: Climatology and environmental meaning [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 525–532, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15178.

北京地区日最大边界层高度的气候统计特征¹

王坚 蔡旭晖 宋宇

北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871

摘要 使用北京气象站探空观测数据和地面气温观测数据, 以干绝热曲线法估算 1984~2013 年逐日最大边界层高度, 同时计算对应的边界层平均风速和通风量。统计分析这 3 个边界层参量的平均特征, 并利用 2001~2012 年的空气污染指数 (API), 探讨大气污染与边界层参量的关系。结果表明: (1) 日最大边界层高度的 30 年月均值以春季和夏初 (3~6 月) 最高, 约 1600 m; 夏季和秋初 (7~10 月) 次之, 约 1300 m; 冬季 (11 月、12 月和 1 月) 最低, 约 1000~1200 m。(2) 夏季, 日最大边界层高度不同数值的频率大致为对称分布, 峰值处于 1000~1600 m 范围; 秋、冬季, 频率分布系统性地向低值一方偏斜, 600~800 m 的出现频率大大增加; 春季边界层高度的变化极大。(3) 各季边界层平均风速以夏季为最小。(4) 一年中春季通风量最大, 秋季次之, 冬季较低, 夏季最小。(5) 秋、冬季, 北京中度和重污染个例 (API>200) 集中分布于弱风、低边界层和小通风量条件, 反映污染物局地累积的作用; 春季污染个例半数以上以高风速、高通风量为特征, 反映沙尘类外部输入性污染的作用。

关键词 日最大边界层高度 边界层平均风速 通风量 API (空气污染指数) 气候特征

文章编号 1006-9585 (2016) 05-0525-08

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15178

Daily Maximum Height of Atmospheric Boundary Layer in Beijing: Climatology and Environmental Meaning

WANG Jian, CAI Xuhui, and SONG Yu

College of Environmental Sciences and Engineering, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Peking University, Beijing 100871

Abstract The dry adiabatic method was applied to analyze sounding data and normal maximum surface temperatures collected at Beijing observatory during 1984–2013 and calculate daily maximum height of atmospheric boundary layer (MABL) in Beijing area. The mean wind speed and ventilation were obtained simultaneously. Characteristics of the three boundary layer variables and the air pollution index (API) were analyzed to investigate the relationship between the boundary layer variables and air pollution. The results showed that: (1) Monthly mean MABL of about 1600 m is the highest in the spring and early summer (March to June), following by that in the summer and early autumn (July to October), which is about 1300 m; the monthly mean MABL is low in the winter (November, December, and January) with

收稿日期 2015-07-27; 网络预出版日期 2016-01-19

作者简介 王坚, 男, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事环境科学研究。E-mail: wangjian92@pku.edu.cn

通讯作者 蔡旭晖, 男, 1962 年出生, 教授, 主要从事大气环境与污染气象学研究。E-mail: xhcai@pku.edu.cn

资助项目 环保部公益性行业科研专项 201509001、201409001、201309009, 国家自然科学基金项目 41121004、41575007, 国家科技支撑计划项目 2014BAC06B02

Funded by National Special Fund for Environmental Protection Research in the Public Interest (Grants 201509001, 201409001, and 201309009), National Natural Science Foundation of China (Grants 41121004 and 41575007), National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2014BAC06B02)

a value of about 1000-1200 m; (2) in the summer, the frequency distribution of the MABL is roughly symmetric with the peak value within the range of 1000-1600 m; in the autumn and winter, the frequency distribution is skewed to the lower side with the largest frequency for the MABL within the range of 600-800 m; the MABL frequency varies greatly in the spring; (3) the mean wind speed in the boundary layer is lowest in the summer; (4) ventilation reaches maximum in the spring, followed by that in the autumn and summer, and it is minimum in the winter; (5) in the autumn and winter, heavy pollution ($API > 200$) is often accompanied with weak winds, low boundary layer height and low ventilation, reflecting the cumulative effect of local pollutants. In the spring, more than half of the pollution events are characterized by high wind speeds and high ventilation, reflecting the dust pollution by external inputs.

Keywords Daily maximum height of the atmospheric boundary layer, Mean wind speed, Ventilation, Air pollution index, Climatology

1 引言

污染扩散等大气环境过程深受大气边界层特性的影响,如大气边界层流动、湍流、稳定度、边界层高度及日变化等。其中边界层高度参量尤为重要,它指示了污染物在垂直方向上的扩散和稀释能力 (Seibert et al., 2000)。

边界层高度不是常规气象观测项目,现有有关边界层的研究结果往往依赖于特定的观测项目,如北京地区冬夏和秋季的探空观测等 (张霁琛等, 1990; 张鑫等, 2006)。这些观测时间一般较短,难以获得具有长期气候统计意义的结果。早年 Holzworth (1964) 开创了一种以常规气象探空资料估算边界层参量的方法。这种方法可获得对大气污染潜势分析 (Holzworth, 1967) 特别有意义的 3 个参量,即日最大边界层高度、对应的通风量和平均风速。由于可以充分利用长期累积的观测资料,这种方法为边界层长期平均和变化特性的研究提供了一种可能途径。

国内研究者已利用 Holzworth 方法对全国范围以及不同地点开展了这方面的研究工作。如,潘云仙和蒋维楣 (1982) 对最大边界层高度全国分布的早期分析;程水源等 (1992) 对北京地区边界层特性的探讨;王式功等 (2000) 提出了改进方案,通过逐步逼近法优化边界层高度值,并对兰州地区的实际边界层高度进行统计分析;叶堤等 (2008) 计算分析了重庆城区大气边界层高度的时间变化和频率分布特征。近来,尤焕苓等 (2010) 进一步将边界层高度和空气污染数据相结合,试图揭示二者间的关联。

早年工作限于计算处理能力,往往采用月平均温度廓线估算最大边界层高度 (Holzworth, 1964; 潘云仙和蒋维楣, 1982), 显然会引入一定的误差。

这种方法应用于特定地点,所得结果与实际情况的符合程度或偏差大小,也较少进行系统的评估。另外,长期气候统计意义的分析工作仍然较少。鉴于此,本文利用北京气象站的探空观测数据,计算 1984~2013 年的逐日最大边界层高度,系统分析其长期统计平均特征和时间变化规律,并初步探讨 2001~2012 年北京地区空气污染指数 (API) 与边界层参量之间的关系。此外,对大气环境研究关心的其他两个参数 (日最大边界层通风量和平均风速) 也进行简要讨论。

2 资料和方法

本文使用北京气象站 (台站编号 54511) 的探空观测和地面气温观测数据进行分析。探空和地面气温数据分别取自美国 Wyoming 大学和美国国家气候数据中心 (National Climatic Data Center, NCDC)。原始观测数据源自中国气象局。数据的时间范围是 1984 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日。探空观测数据为每日 2 次,分别对应北京时间约 08:00 (北京时间,下同) 和 20:00。地面气温数据为每 3 h 一次。

采用 Holzworth 的干绝热曲线法估算日最大边界层高度。即利用早上 08:00 的探空温度廓线和地面日最高气温确定当日最大边界层高度。具体做法: (1) 从地面气温数据中找出每日 09:00 至 18:00 时段的最大值; (2) 在温度—高度图上,从每日地面最高气温所在点沿干绝热线上升,与当日 08:00 的探空温度廓线相交,所得交点距地面的高度即日最大边界层高度。由于探空资料的垂直层数和各层高度每天都不同,在估算日最大边界层高度时需对探空廓线的各层数据进行线性内插。这些过程全部通过编制计算机程序而自动完成。由于数据质量等原因往往造成部分时段无法用该方法确定最大边

界层高度值，或者获得异常小的值（如小于 50 m），在进行统计平均计算时这些情况都当做缺测处理。

本文引用的北京空气污染指数 API 取自中国环境保护部网站数据中心。

3 结果与分析

3.1 结果可靠性评估

虽然现在已有其他方法可用于探测边界层高度，如激光雷达、微波辐射计、GPS 卫星掩星技术（GPS radio occultation）等（Seidel et al., 2012），气球探空观测仍然是获得边界层高度信息的最直接可靠方法。常规气象探空观测资料用于边界层研究的缺点是时间分辨率较低（1 天 2 次），另外垂直分辨率也较粗（ $10^1 \sim 10^2$ m 不等）。尽管如此，现有研究表明，用常规气象探空资料确定白天边界层高度仍然是十分有效的（Seidel et al., 2012）。为评估所用资料和方法确定北京地区日最大边界层高度的可靠性和合理性，我们收集并重新整理前人的有关研究结果，结合本文结果进行对比，见图 1。图中一类是观测结果，包括贺千山和毛节泰（2005）的微脉冲激光雷达观测、张霭琛等（1990）和张鑫等（2006）的低空风、温探测结果。激光雷达观测的结果较大，最大边界层高度在 5 月可达 2 km，春、夏、秋各季平均在 1.5 km 以上。低空探测结果在夏、秋、冬季分别约为 1.2 km、1 km 和 0.6 km，相比平均偏小约 500 m。另一类是用本文相同或类似方法计算的最大边界层高度，包括早年潘云仙和蒋维楣（1982），后来程水源等（1997）、吴祖常和董保群（1998）以及近年尤焕苓等（2010）的结果。除了

潘云仙和蒋维楣（1982）的结果明显偏低以外，吴祖常和董保群（1998）、程水源等（1997）和尤焕苓等（2010）的结果较为接近。本文结果与程水源等（1997）的接近，数值相对偏高，但总体仍在观测结果的较高值（激光雷达观测）和较低值（低空探空观测）之间。考虑到程水源等（1997）的方法与本文方法最接近，同时参考观测结果的变化范围，可以认为本文结果总体是合理、可靠的。

3.2 日最大边界层高度结果与统计

从图 1 已经看到，本文统计的 30 年平均日最大边界层高度值以春季最大，春夏秋冬 4 季呈逐季减小趋势。以下进一步分析日最大边界层高度的其他特征。

图 2 为北京地区日最大边界层高度月均值。可见多年结果呈明显的周期性变化，数值大致变化于

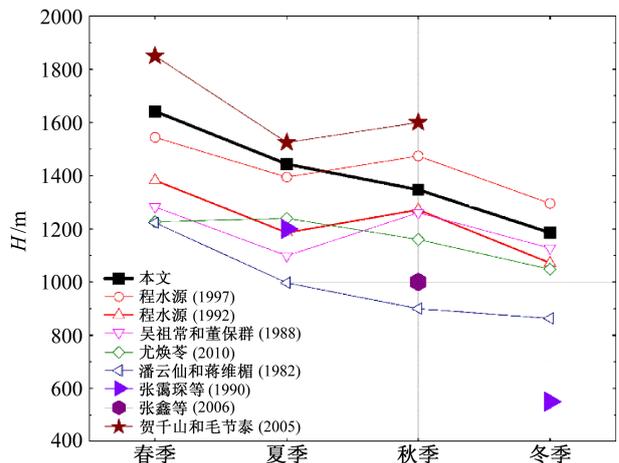


图 1 日最大边界层高度 H 的季节变化及与前人结果的比较
Fig. 1 Seasonal variation of daily maximum height of atmospheric boundary layer and comparison with results of previous studies

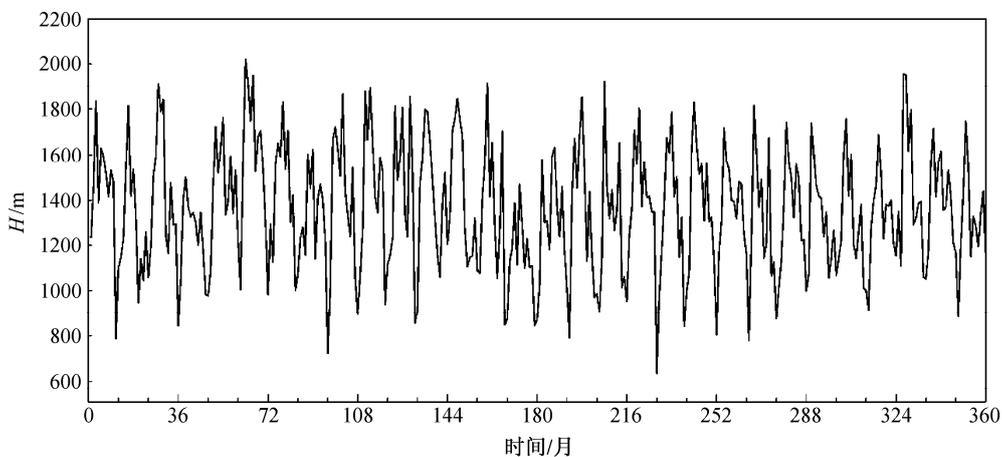


图 2 1984~2013 年日最大边界层高度 (H) 月均值时间序列
Fig. 2 Time series of monthly mean daily maximum height (H) of atmospheric boundary layer during 1984-2013

600~2000 m; 30 年平均值约 1400 m, 总离散度(标准差)约为 650 m。图 3 为最大边界层高度年均值的逐年变化及其年内变幅。可见最大边界层各年内的变化幅度较为接近。年均值大致以 1998 年为界, 此前的略偏高, 此后则略偏低。这可能与探空数据点前期较稀疏、后期较密有关(因此在讨论最大边界层高度长期变化趋势时, 应进一步仔细考察这方面的影响)。30 年中, 年均最小值出现在 1998 年, 为 1152 m; 最大值出现在 1989 年, 为 1579 m。尤焕苓等(2010)认为在年度尺度上最大边界层高度与当年的降水日数之间存在显著的负相关关系, 并提及北京 1998 年降水日偏多, 1989 年偏少。这与此处的结果相呼应。有关各年均值、离散度等具体统计性质见表 1。

图 4 显示 30 年平均最大边界层高度的逐月变化。可以看出, 一年中 3~6 月的月均值维持较高, 约 1600 m; 7~10 月维持在 1300 m 左右; 11、12 和 1 月最低, 约 1000~1200 m; 2 月的最大边界层高度迅速增加, 与夏季的数值接近。边界层高度的逐月变化反映了北京地区风速、地表加热和云量等因素的影响。春季干燥、多风、太阳辐射增强, 对应较大的边界层高度, 同时一个月内的变化幅度也最大; 这种情况可持续到 6 月。夏季 7~8 月是北京地区的主要降水季节, 云的作用和地面蒸发的增加都会在一定程度上减弱边界层的发展。注意到 7~8 月边界层高度的变化幅度是全年最小的, 这也可能与云的作用有关。秋季 9~10 月, 降水和云量减少, 但太阳辐射也开始减弱, 最大边界层高度维持与夏

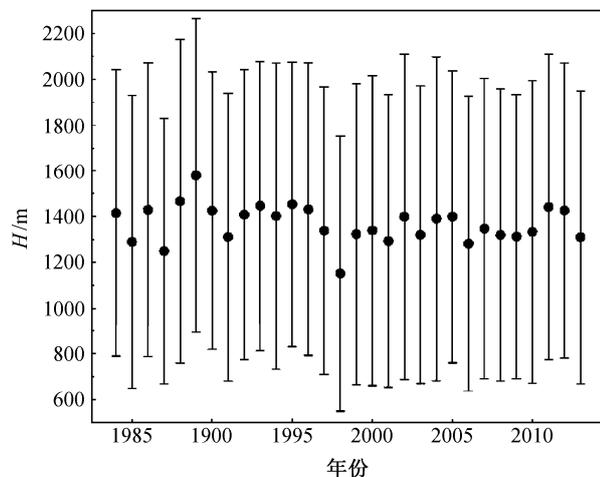


图 3 1984~2013 年日最大边界层高度 H 的际变化
Fig. 3 Interannual variation of daily maximum height of atmospheric boundary layer during 1984-2013

季 7~8 月相同。冬季太阳辐射最弱, 最不利于边界层的发展。

表 1 日最大边界层高度逐年平均统计

Table 1 Statistics of annual average daily maximum height of atmospheric boundary layer

年份	平均 值/m	标准 差/m	资料 份数	年份	平均 值/m	标准 差/m	资料 份数
1984 年	1415	626	308	1999 年	1324	659	339
1985 年	1290	642	290	2000 年	1339	679	326
1986 年	1429	641	288	2001 年	1293	640	330
1987 年	1249	582	336	2002 年	1399	711	335
1988 年	1466	707	332	2003 年	1320	651	340
1989 年	1579	686	314	2004 年	1390	708	339
1990 年	1425	608	320	2005 年	1399	639	334
1991 年	1310	630	335	2006 年	1282	644	338
1992 年	1408	634	334	2007 年	1347	657	338
1993 年	1446	634	326	2008 年	1320	640	344
1994 年	1402	671	328	2009 年	1313	623	325
1995 年	1453	623	325	2010 年	1333	662	332
1996 年	1431	639	335	2011 年	1441	668	326
1997 年	1338	628	327	2012 年	1426	645	341
1998 年	1153	601	349	2013 年	1310	642	344

将最大边界层高度按等间隔分组, 然后计算出每个组的出现频数及与数据总数的比值, 可获其出现频率。图 5 是最大边界层高度出现频率对应各高度值的分布情况。图中 30 年的数据按月统计, 以考察全年的平均变化。可以看出, 全年频率分布主要呈 3 种形态。其一为夏季型, 以 7~8 月最为典型, 频率大致为对称分布, 频率峰值处于 1000~1600 m。9 月也基本维持这一形态。其二为秋冬型,

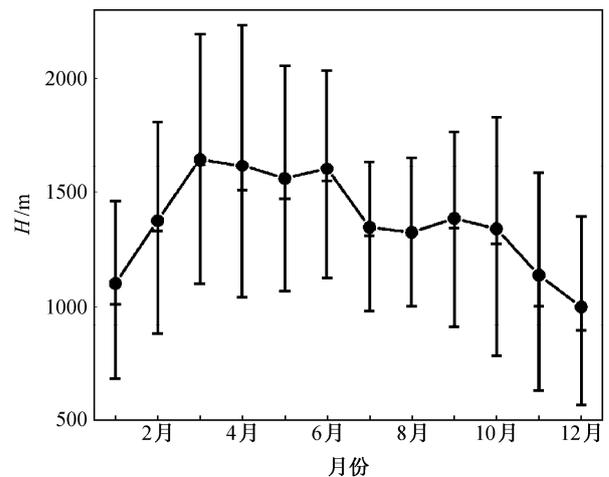


图 4 1984~2013 年平均最大边界层高度 H 的逐月变化 (误差棒为 25%、50%和 75%分位数)

Fig. 4 Variation of monthly mean daily maximum height of atmospheric boundary layer during 1984-2013 (the error bars indicate the 25th, 50th, and 75th percentiles)

从 10 月开始至次年 2 月, 频率分布系统性地向低值一方偏斜, 频率峰值处于 1000 m 以下。其中 11~12 月, 频率峰值甚至出现于 600~800 m 区段。其三为春季型, 以 3~4 月最为典型, 最重要的特点是频率较均匀地分布在 600 m 以上的各个高度层。这充分反映了春季天气变化不定的特点, 在此背景下, 边界层高度的变化也极大。值得一提的是, 3~4 月最大边界层高度超过 2000 m 的情况也有相当大的出现频率。5~6 月的频率分布延续了春季的部分特征, 但逐渐向夏季型过渡。

最大边界层高度偏低的情况对大气环境过程有着特别的意义。从图 5 的全年频率分布变化情况来看, 如果考察低于 600 m 的最大边界层高度, 显然其出现频率在秋冬季是增加的, 如 12 月的出现频率为 27.8%。春夏季的出现频率则很低, 如 7~8 月这类情况的出现频率不到 9%。由此可见, 单纯从边界层高度的情况来看, 秋冬季出现较重污染的概率会高于其他季节。

3.3 通风量和边界层平均风速

正如 Holzworth (1967) 指出的, 除了边界层高

度以外, 边界层平均风速和通风量也对大气环境过程有重要意义。边界层平均风速即边界层高度以下各(等厚度)层风速的算术平均值。通风量则等于边界层高度与平均风速的乘积。本文先将探空廓线各层值线性插值到各等厚度层, 然后统计最大边界层高度以下的平均风速和通风量。

图 6 是 1984~2013 年平均风速的逐月变化。明显看出, 春、秋和冬季平均风速处于高值, 夏季则明显低于其余季节。最低值出现在 8 月, 最高值出现在 3 月。春、秋和冬季边界层平均风速的离散度较大, 夏季离散度较小。对逐月平均风速作频率分布图(图略), 考察四季代表月的情况发现: 1 月平均风速低于 5 m/s、5~10 m/s 和大于 10 m/s 的比例分别为 36%、38%和 26%; 4 月这 3 个风速档的比例分别为 35%、45%和 20%; 7 月则为 67%、29%和 4%; 11 月为 40%、40%和 20%。可见除了夏季频率分布集中在较小风速段以外, 春、秋和冬季的频率分布都较为分散。

图 7 是 1984~2013 年平均通风量的逐月变化。因为通风量完全由边界层高度和平均风速决定, 所

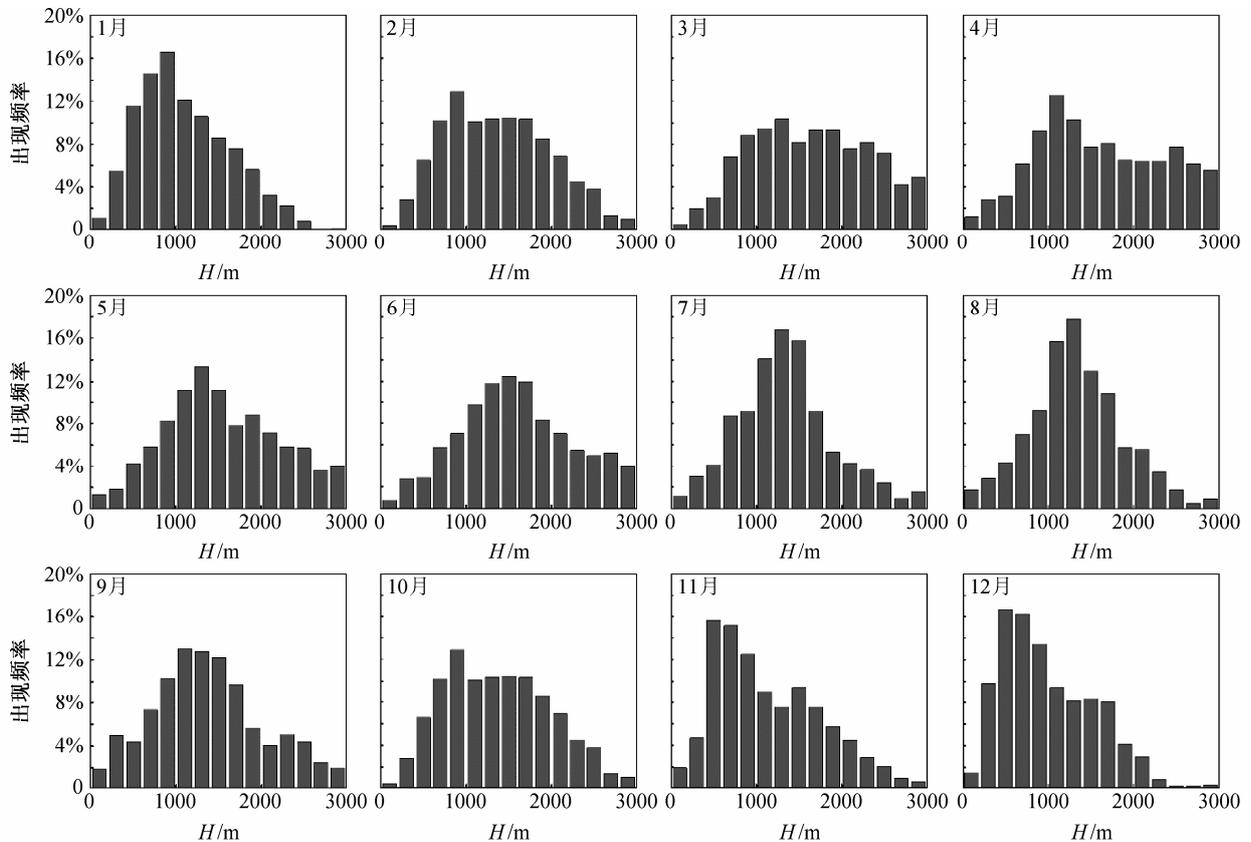


图 5 最大边界层高度频率分布的逐月变化

Fig. 5 Monthly changes in the frequency distribution of daily maximum height of atmospheric boundary layer

以通风量的变化情况反映了这两者的综合影响。从图中看出，一年中通风量有两个极大值，分别是春季的3月和秋季的10月；两个极小值，分别是夏季的8月和冬季的12月。各季通风量以春季最大，秋季次之，冬季略低于秋季，夏季最小。统计逐月通风量的频率分布可知（图略），夏、秋和冬季小于6000 m²/s的低通风量情况所占比例较大，春季低通风量情况则相对较少。夏季则很少出现大于20000 m²/s的高通风量情况。

3.4 边界层参量与空气质量的关系

将各边界层参量与北京市2001~2012年的空气污染指数API相比较，考察它们之间的相互关系。从月平均结果来看，北京地区夏、秋和冬季API指数与最大边界层高度之间存在着较好的负相关。夏季边界层较高，API值较低；秋冬季随着边界层高度降低，API值也随之增大。不过，春季边界层高度和API值之间却不存在负相关关系。这与中国北方春季沙尘天气频发有关。春季虽然边界层是全年最高的，但外来沙尘污染物经常输送到北京，使API值也增高（图8）。

北京地区API值与边界层平均风速和通风量也都呈负相关关系，但数据都较离散。这也说明污染过程的复杂性，单项边界层参数各自与API值的关联是有限的。为此，我们考察边界层高度、平均风速和通风量这3项指标与API值的联合效果。图9显示了2001~2012这12年中API值大于200的中度和重污染天气个例在以边界层高度、平均风速和通风量为3个维度的空间中的分布情况。可以看出，

秋季和冬季的中度和重污染天气绝大部分集中于图中左下角（图9b、9c），即边界层高度小于1000 m、平均风速小于5 m/s、通风量小于6000 m²/s的范围。这显然是不利于大气扩散的典型条件。在此弱风、低边界层和小通风量条件下，污染物的局地累积作用易导致重污染。秋冬季只有少数几个中度和重污染个例出现在较高风速、较大通风量、或是较大边界层的条件下。

与秋冬季情况形成鲜明对照的是，春季的中度和重污染个例可分为2组。第一组与秋冬季的主体情况类似，仍然分布在平均风速较低、通风量较小的区域，只是边界层高度普遍高于秋冬季的值，多数在1000 m上下。其他个例则明显向高风速、高通风量方向延伸，构成第二组群（图9a）。显然这

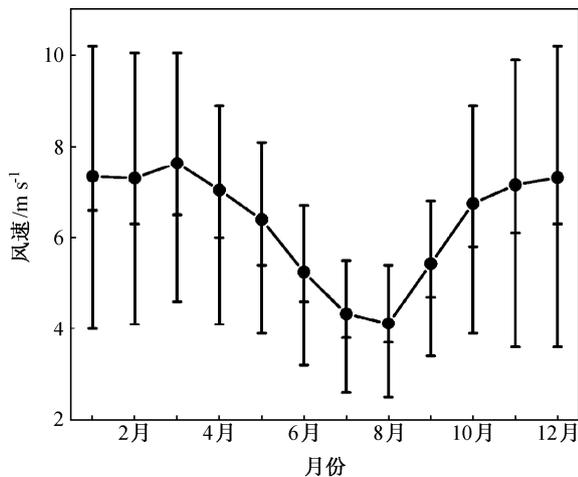


图6 1984~2013年平均风速逐月变化（误差棒为25%、50%和75%分位数）
Fig. 6 Variation of monthly mean wind speed during 1984~2013 (the error bars are for the 25th, 50th, and 75th percentiles)

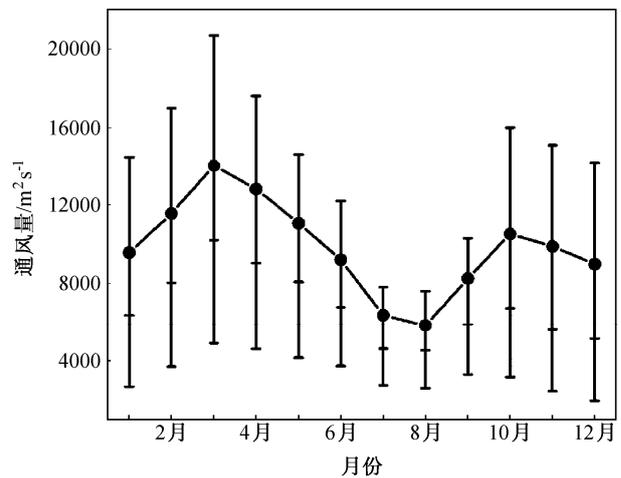


图7 1984~2013年平均通风量逐月变化（误差棒为25%、50%和75%分位数）
Fig. 7 Variation of monthly ventilation during 1984~2013 (the error bars are for the 25th, 50th, and 75th percentiles)

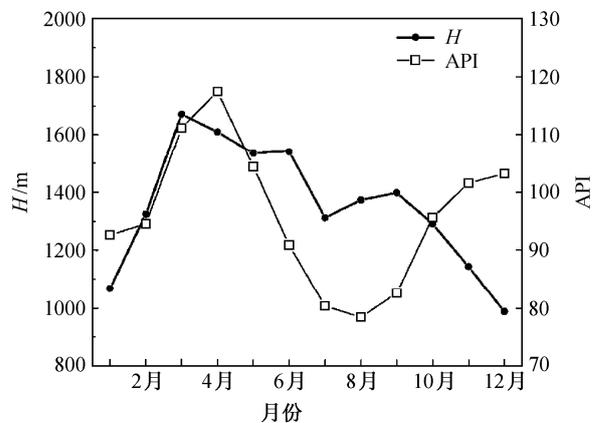


图8 2001~2012年边界层高度与API的逐月变化
Fig. 8 Monthly variation of daily maximum height of atmospheric boundary layer and API (Air Pollution Index) during 2001~2012

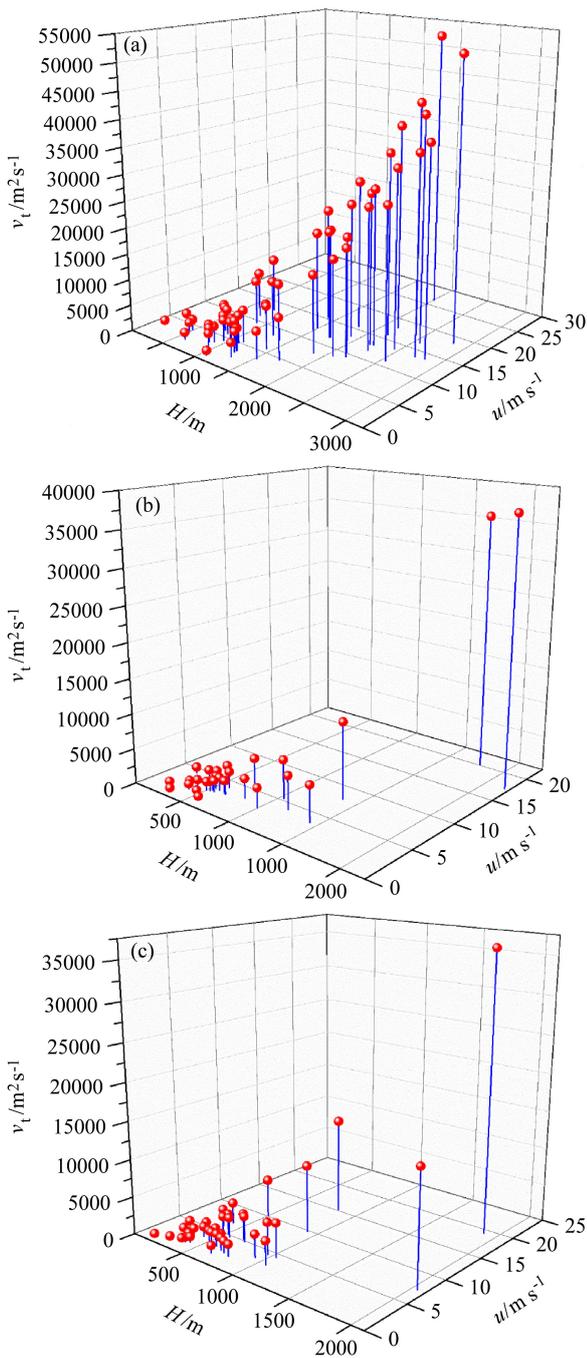


图 9 中度和重污染个例的最大边界层高度 H 、平均风速 u 和通风量 v_t : (a) 春季; (b) 秋季; (c) 冬季

Fig. 9 Daily maximum height of atmospheric boundary layer, average wind speed u , and ventilation v_t under moderate and severe polluted conditions: (a) Spring; (b) autumn; (c) winter

些个例的中度和重污染不是局地累积的结果，而与外部污染物的输入有关。春季沙尘型中度和重污染的条件（李令军等，2012）正与这种情况相符。由全国《沙尘天气年鉴》（中国气象局，2004–2014）统计发现，图 9a 中边界层高度大于 1000 m、平均

风速大于 5 m/s、通风量大于 6000 m²/s 的污染日共 28 天，其中北京受沙尘影响的是 23 天，约占 82%。另外，在秋季和冬季（图 9b、9c）各 3 次高风速、高通风量的污染日个例中，也各有 1 次是受沙尘天气影响的情况（中国气象局，2004–2014）。由此可见，将不同边界层参量以及污染来源情况联合起来分析有助于深入了解大气污染过程。

4 结论

本文计算北京市 1984~2013 年的日最大边界层高度、平均风速和通风量，并进行统计分析，探讨边界层参量与空气质量的关系，获主要结果如下：

(1) 日最大边界层高度的 30 年月均值情况是：春季和夏初的 3~6 月较高，约 1600 m；夏季和秋初的 7~10 月维持在 1300 m 左右；冬季 11 月、12 月和 1 月最低，约 1000~1200 m；从 2 月开始，最大边界层高度迅速增加。

(2) 日最大边界层高度在不同数值上出现的频率呈 3 种分布形态。夏季 7~8 月，频率大致为对称分布，频率峰值处于 1000~1600 m 范围。从 10 月开始至次年 2 月的秋冬季，频率分布系统性地向低值一方偏斜，峰值处于 1000 m 以下。其中 11~12 月，频率峰值出现于 600~800 m 区段；12 月最大边界层高度低于 600 m 的出现频率高达 27.8%。春季 3~4 月，频率较均匀地分布在 600 m 以上的各个高度层，反映春季边界层高度的变化极大。

(3) 春、秋和冬 3 季，日最大边界层内的平均风速较大，数值变化也较大；夏季，平均风速明显较小，数值变化幅度也较小。月均通风量一年中有两个极大值，分别在春季的 3 月和秋季的 10 月；两个极小值分别在夏季的 8 月和冬季的 12 月。各季通风量以春季最大，秋季次之，冬季略低于秋季，夏季最小。

(4) 北京空气污染指数 API 与日最大边界层高度、平均风速和通风量这 3 个参量的联合作用有关。2001~2012 年的中度和重污染个例 (API>200) 显示，秋冬季集中分布于弱风、低边界层和小通风量条件，反映污染物局地累积的作用。春季则有另一组个例明显向高风速、高通风量方向延伸，反映沙尘类外部输入性污染的作用。

致谢：本文使用的探空数据和地面气象数据分别由美国 Wyoming 大学和美国国家气候数据中心（National Climatic Data Center, NCDC）提供。原始观测数据源自中国气象局。

参考文献 (References)

- 程水源, 张宝宁, 李现丽. 1992. 用清晨探空曲线确定混合层高度的研究 [J]. 环境科学丛刊, 13 (3): 76–80. Cheng Shuiyuan, Zhang Baoning, Li Xianli. 1992. Estimation of atmospheric mixing heights using sounding curve in the early morning [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering (in Chinese), 13 (3): 76–80.
- 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.
- 贺千山, 毛节泰. 2005. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究 [J]. 气象学报, 63 (3): 374–384. He Qianshan, Mao Jietai. 2005. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (3): 374–384, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2005.03.013.
- Holzworth G C. 1964. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States [J]. Mon. Wea. Rev., 92 (5): 235–242, doi: 10.1175/1520-0493(1964)092<0235:EOMMMD>2.3.CO;2.
- Holzworth G C. 1967. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States [J]. J. Appl. Meteor., 6 (6): 1039–1044, doi: 10.1175/1520-0450(1967)006<1039:MDWSAA>2.0.CO;2.
- 李令军, 王英, 李金香, 等. 2012. 2000~2010 北京大气重污染研究 [J]. 中国环境科学, 32 (1): 23–30. Li Lingjun, Wang Ying, Li Jinxiang, et al. 2012. The analysis of heavy air pollution in Beijing during 2000–2010 [J]. China Environmental Science (in Chinese), 32 (1): 23–30, doi: 10.3969/j.issn.1000-6923.2012.01.004.
- 潘云仙, 蒋维楣. 1982. 我国大陆大气的平均最大混合深度 [J]. 中国环境科学, 2 (5): 51–56. Pan Yunxian, Jiang Weimei. 1982. The average maximum mixing depth in Chinese mainland [J]. China Environmental Science (in Chinese), (5): 51–56.
- Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height [J]. Atmos. Environ., 34 (7): 1001–1027, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00349-0.
- Seidel D J, Zhang Y H, Beljaars A, et al. 2012. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe [J]. J. Geophys. Res., 117 (D17), doi: 10.1029/2012JD018143.
- 王式功, 姜大膀, 杨德保, 等. 2000. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析 [J]. 高原气象, 19 (3): 363–370. Wang Shigong, Jiang Dabang, Yang Debao, et al. 2000. A study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (3): 363–370, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2000.03.011.
- 吴祖常, 董保群. 1998. 我国陆域大气最大混合层厚度的地理分布与季节变化 [J]. 科技通报, 14 (3): 158–163. Wu Zuchang, Dong Baoqun. 1998. Geographical distribution and seasonal variation of atmospheric maximum mixing depth over China [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 14 (3): 158–163.
- 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.
- 尤焕苓, 刘伟东, 谭江瑞. 2010. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征 [J]. 气象, 36 (5): 51–55. You Huangling, Liu Weidong, Tan Jiangrui. 2010. Temporal characteristics of atmospheric maximum mixing depth of Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (5): 51–55.
- 张霁琛, 孙成国, 田毅. 1990. 北京地区大气混合层的探测与预测模式的检验 [J]. 气象学报, 48 (3): 345–354. Zhang Aichen, Sun Chengguo, Tian Yi. 1990. The observing results of atmospheric mixed layer in Beijing district and the assessment of theoretical models [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 48 (3): 345–354, doi: 10.11676/qxxb1990.042.
- 张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 2006. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 42 (2): 220–225. Zhang Xin, Cai Xuhui, Chai Fahe. 2006. Structures and characteristics of the atmospheric boundary layer over Beijing Area in Autumn [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 42 (2): 220–225, doi: 10.3321/j.issn:0479-8023.2006.02.014.
- 中国气象局. 2004–2014. 沙尘天气年鉴 (2001–2011) [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2004–2014. Sand-Dust Weather Yearbook (2001–2011) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.