

北京地区 PM_{2.5} 浓度与气象要素的相关分析

周一敏 赵昕奕[†]

教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

摘要 利用美国驻中国大使馆 2009 年以来的 PM_{2.5} 浓度监测数据、MODIS 光学厚度数据和 NCEP 边界层气象要素数据, 对近年来北京地区 PM_{2.5} 和边界层内气象要素进行分析。结果表明: 2009—2011 年夏、秋季以及 2012 年夏、冬季北京地区 PM_{2.5} 污染情况较为严重, 2013 和 2014 年污染情况稍有转好; 北风为有利于 PM_{2.5} 扩散的气象条件, 且随着北风增强, 扩散效果更好; 南风为有利于 PM_{2.5} 堆积的气象条件, 且随着南风增大, 堆积效果略微增加; 边界层高度越高, 越有利于 PM_{2.5} 的扩散; 相对湿度越大, 越有利于 PM_{2.5} 的堆积; 降水对 PM_{2.5} 有明显的驱散作用。21 世纪以来, 北京地区的平均边界层高度有明显的降低趋势, 从 2500 m 降低到 1500 m 以下, 其他气象要素没有明显的年际变化。

关键词 北京; PM_{2.5}; 边界层内气象要素

中图分类号 X513

Correlation Analysis between PM_{2.5} Concentration and Meteorological Factors in Beijing Area

ZHOU Yimin, ZHAO Xinyi[†]

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871;

[†] Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

Abstract The concentration monitoring of the Embassy of the United States in China since 2009, the aerosol optical depth of MODIS and the planetary boundary layer data of NCEP were used to analyze the meteorological conditions in the planetary boundary layer of Beijing in recent years. The results show that from 2009 to the summer of 2011 and the summer and winter of 2012, the pollution status of Beijing is serious. In 2013 and 2014, pollution is slightly better. The north wind is benefit to the diffusion of pollutants, and the greater the north wind, the better the diffusion effect. The south wind is benefit to the accumulation of pollutants, and the greater the south wind, the better the accumulation effect. Higher planetary boundary layer results in better diffusion. Greater humidity results in more accumulation. Precipitation has obvious effect on the diffusion of pollutant. Since twenty-first century, these meteorological conditions of Beijing have no obvious interannual variation except the planetary boundary layer height, which is obviously reduced from 2500 m to 1500 m.

Key words Beijing; PM_{2.5}; the meteorological conditions in planetary boundary layer

中国近 30 年来经济高速发展, 导致大量的能源消耗和大气污染物排放。地面观测资料已经证实地面水平能见度降低以及接受到的太阳辐射减少^[1-6]。其中, 京津冀地区霾的情况尤为严重^[7-13], 并引起

广泛关注。

霾形成的原因主要是大气中的气溶胶。大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称。京津冀地区的大气气溶胶微粒主要来源于工业活

动、交通运输、化石燃料燃烧等人为源和沙尘等自然源。从长期或平均状态来看,城市污染程度取决于城市的能源结构、交通状况和工业排放污染物的多少,但从短期或实时状态而言,主要与当地当时的气象条件有关^[14]。大尺度环流形势和局地气象条件不仅可以影响污染物的生成、积累和清除,同时也是影响区域输送的重要外部条件^[15-18]。在北京地区,污染物浓度的变化在很大程度上取决于局地气象条件,如风速、边界层高度(HPBL)、相对湿度和降水等^[19-24]。

PM_{2.5} 作为霾的重要组成,受到广泛关注。目前的研究主要结合特定的污染过程,研究气象要素和环流对 PM_{2.5} 的作用,即对某次短时间内的霾事件过程进行研究^[25-27],但在长时间尺度上,有关气象要素对北京地区 PM_{2.5} 影响的研究较少。同时,较长时间的 PM_{2.5} 数据和边界层气象要素数据在研究中也很少使用,主要利用能见度和相对湿度等地面气象要素进行研究。本文利用美国驻中国大使馆(简称美国大使馆)公布的 PM_{2.5} 数据和再分析资料的边界层气象要素数据,对北京地区近年来的 PM_{2.5} 数值大小及其与边界层内的经向风、纬向风、相对湿度、边界层高度和降水的关系进行分析,研究 PM_{2.5} 与这些气象要素之间的关系。

1 数据与研究方法

1.1 数据

本研究使用的气象资料数据(包括风速、相对湿度和边界层高度)为 NCEP 全球气候再分析资料。美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和美国国家环境预报中心(National Centers Environmental Prediction, NCEP)通过四维同化分析,将各种观测和模式输出资料制成高质量的全球气象数据集(NCAR/NCEP 再分析资料, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>),数据年份为 2003 年 3 月至 2015 年 2 月,时间分辨率为 6 小时,分别为北京时间 8, 14, 20 时和次日 2 时,空间分辨率为 1° × 1°。降水数据采用中国气象科学数据共享网(<http://www.cma.gov.cn/2011qx/fw/2011qsjgx/>)北京站(54511)降水日值数据,时间同样为 2003 年 3 月至 2015 年 2 月。本文采用的 PM_{2.5} 数据为美国大使馆公布的 2009 年 3 月至 2015 年 2 月 PM_{2.5} 逐小时数据(www.stateair.net/web/historical/1/1.html)。使用卫星资料 MODIS (moderate-resolution

imaging spectroradiometer)的卫星气溶胶光学厚度产品 MOD04 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)与美国大使馆公布的 PM_{2.5} 值进行对比验证,分析其可靠性。

1.2 研究方法

使用美国大使馆公布的 PM_{2.5} 数据代表北京地区 PM_{2.5} 污染(简称污染)状态。该数据的起始时间为 2009 年,早于环境保护部公布的北京市空气质量指数(air quality index, AQI),后者的起始时间为 2014 年 4 月(<http://air.epmap.org/>)。美国大使馆的 PM_{2.5} 数据为逐小时数据,取日平均值作为当日值。北京市 AQI 为万寿西宫、定陵、东四和天坛等 13 个点逐小时数据,取所有点日平均值作为北京市 AQI 值。对两者共有的时段(2014 年 4 月至 2015 年 2 月)进行比较,同时,也使用 MODIS 卫星气溶胶光学厚度产品 MOD04 从 2009 年至 2015 年的数据,取北京地区(116.2°—116.55°E, 39.75°—40.05°N)范围内有数据日的所有点的平均值作为 AOD 光学厚度数据,与同日美国大使馆 PM_{2.5} 进行相关性分析(图 1),认为美国大使馆的 PM_{2.5} 数据可以代表北京地区的污染情况。

本文分析的气象要素包括边界层内纬向风(U)、经向风(V)、相对湿度(RH)、边界层高度(planetary boundary layer height, HPBL)和降水(PR)。将 NCEP 再分析数据(东经 116°和 117°,北纬 40°两点 14 时边界层高度的平均值)作为北京地区边界层高度。使用这两点边界层高度以下所有高度层的 U , V 和 RH 的平均值,再取一天 4 个时次的平均值作为当日北京边界层内的纬向风、经向风和相对湿度。使用北京站(54511) 20 时至次日 20 时降水数据作为日降水数据。

以当年 3 月到次年 2 月作为一年,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12、次年 1、2 月为冬季,统计 2009 年 3 月至 2015 年 2 月北京地区 PM_{2.5} 浓度逐日数据。参照环境保护部门的空气质量标准,取 PM_{2.5} 值 0~35 μg/m³ 为空气质量优,35~75 μg/m³ 为空气质量良,75~150 μg/m³ 为空气质量轻、中度污染,大于 150 μg/m³ 为空气质量重度污染。PM_{2.5} 小于 75 μg/m³ 为无污染,大于 75 μg/m³ 为有污染。用 PM_{2.5} 浓度与北京地区 U 、 V 、RH、边界层高度和降水进行比较,分析不同天气要素对 PM_{2.5} 的影响。

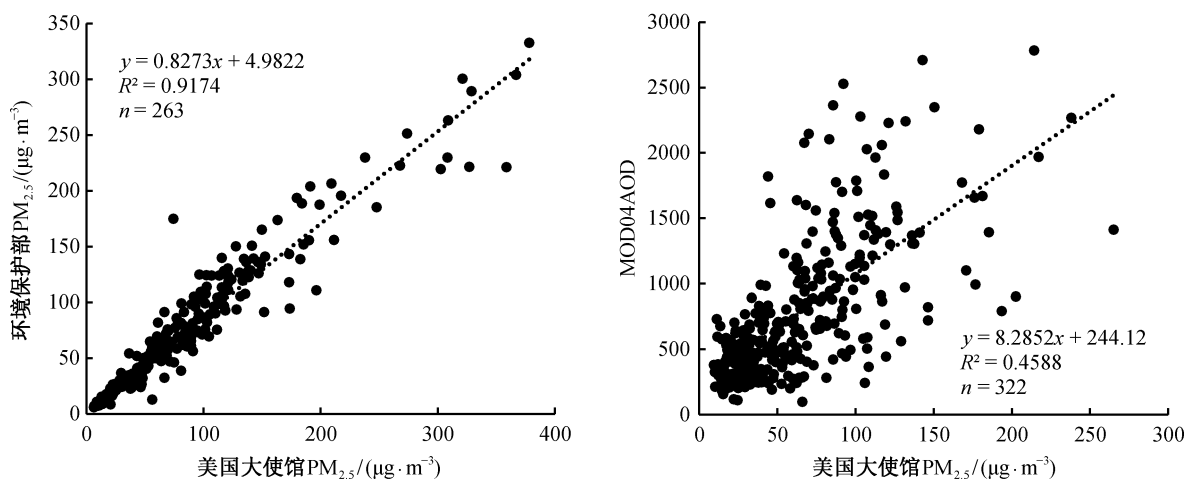


图 1 美国大使馆 PM_{2.5} 与北京市 AQI 和 MODIS 光学厚度关系
Fig. 1 Relationship between the Embassy PM_{2.5} and Beijing AQI/MOD04

2 分析结果

2.1 北京地区 2009—2014 年的 PM_{2.5} 概况

图 2 为根据美国大使馆 PM_{2.5} 数据计算得到的 2009—2014 年北京地区污染概况。2009—2012 年北京市污染日数相似, 均有 60% 左右的日数为污染日; 2013 和 2014 年无污染日数逐渐增加, 2014 年无污染日数约占 50%。从不同季节来看, 春季, 2012 年较其他年份更差; 夏季, 2009—2011 年极差, 2012—2014 年无污染日数大幅增长; 秋季, 2012 年略好于其他年份; 冬季, 2010 和 2011 年稍好。总体来看, 2009, 2010 和 2011 三年的污染情况类似, 均为夏季极差, 秋季其次, 春、冬两季较好。从 2012 年开始, 虽然总的污染日数与前几年相似, 但在季节分布上完全不同。夏季, 无污染日数大幅增加, 秋季, 无污染日数也有少量增加; 春季和冬季稍有减少。特别是 2012 年, 夏季和冬季污染情况极为严重, 但秋季的污染情况比其他所有年份都少。

2.2 PM_{2.5} 与不同气象要素之间的关系

2.2.1 PM_{2.5} 与边界层风

图 3 为 PM_{2.5} 与前一日纬向风的关系。可以看到当风速较小时, PM_{2.5} 容易出现较高值, 并且明显显示出以 $U=1$ 左右对称的分布情况。当 U 为 $-2\sim 3$ m/s 时, 污染出现频次相似, 均为 60% 左右, 当 U 为 $-4\sim -2$ 和 $4\sim 6$ m/s 时, 污染出现频次稍稍减少, 约在 50% 左右, 当 U 进一步增加时, 污染频次快速减少。其中, 从 3 m/s 开始, 随着 U 的增加, 污染频次呈线性趋势减少。

图 4 为 PM_{2.5} 与前一日经向风的关系。当 $V>0$ 时, 污染日出现频次较多, 当 $V<0$ 时, 污染出现频次减少, 并随着 V 的减小, 即北风的不断增强, 无污染出现频次快速增加; 当 $V>1$, 即南风大于 1 m/s 时, 约有 80% 左右的日数为污染日。当 V 为 $-4\sim 1$ 时, 污染日数呈随北风增大不断减少的趋势, 而当 $V<-4$ m/s 时, 污染日数小于 10%, 空气质量极佳。与 U 不同, 当 $V>0$ 时, 即使 V 较大, 污染情况也较严重。

取风向在 $337.5^\circ\sim 22.5^\circ$ 之间为正北风, 将风向分为 8 个方向, 计算在每个风向上的污染状况, 结果如图 5 所示。在 $V<0$ 的情况下, 无污染日数占绝大部分, 只有东北风较小的时候有稍多的污染日。 $V>0$ 的情况与北风刚好相反, 只有极少天数没有污染。东风和西风的情况介于上述两者之间, 且东风的情况略好于西风。总体来说, 经向风 V 对 PM_{2.5} 浓度影响极大, 北风对污染有较明显的驱散作用, 并且北风越大作用越明显; 南风则对污染起着明显的累积作用, 并且无论风速大小都有较强的累积作用。相对而言, 纬向风 U 对污染作用不如 V 明显, 东风对污染物的驱散作用比西风稍强, 但主要还是风速大时驱散作用强, 风速小时累积作用强。图 6 和 7 表明整个华北地区的风向、风速与霾的关系。当污染程度较小时以较大的偏北风为主, 而当污染程度较大时, 偏南风占据主导地位。PM_{2.5} 浓度与经向风 V 也表现出较明显的正相关关系。

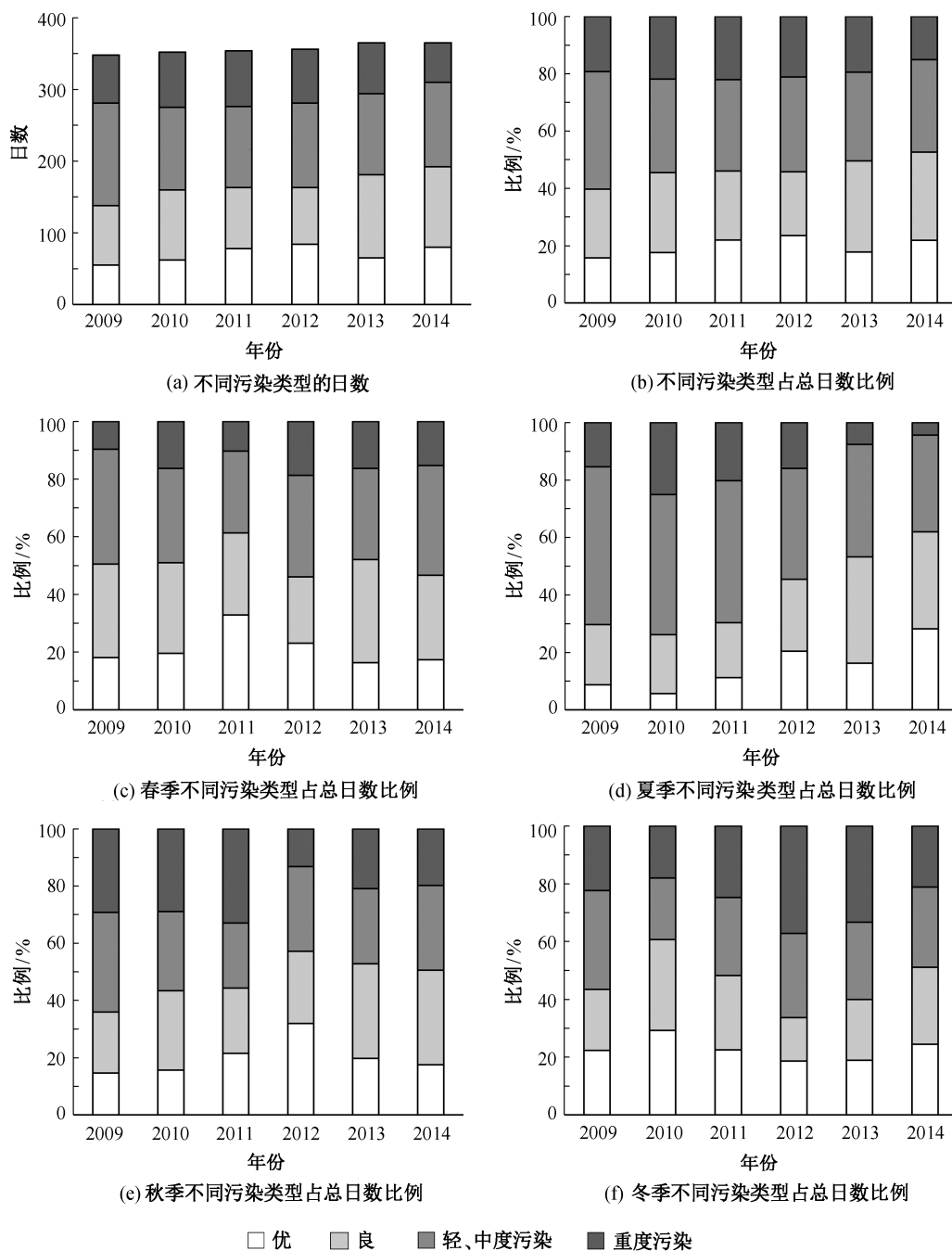


图 2 北京 2009—2014 年的 PM_{2.5} 概况
 Fig. 2 General situation of PM_{2.5} in Beijing from 2009 to 2014

2.2.2 PM_{2.5} 与边界层高度

图 8 为 PM_{2.5} 与当日边界层高度的关系。当边界层高度较低时, 更严重的污染情况出现; 边界层高度较高时, 污染情况稍轻。与风速不同的是, 当日的边界层高度与 PM_{2.5} 浓度的相关性高于前一日。随着边界层高度从低到高, 无污染日数比例几乎呈线性增加。图 9 为边界层高度与前

一日 V 的关系, 表明这两者没有明显相关性。

2.2.3 PM_{2.5} 与相对湿度

图 10 显示 PM_{2.5} 与相对湿度的关系。当相对湿度较低时, 无污染日数明显较多, 随着相对湿度的增加, 污染情况也逐渐严重。从图 11 可以看到, 相对湿度与前一日 V 和边界层高度都有一定的相关性, 但相关性均较小。北风越大, 相对湿度越小;

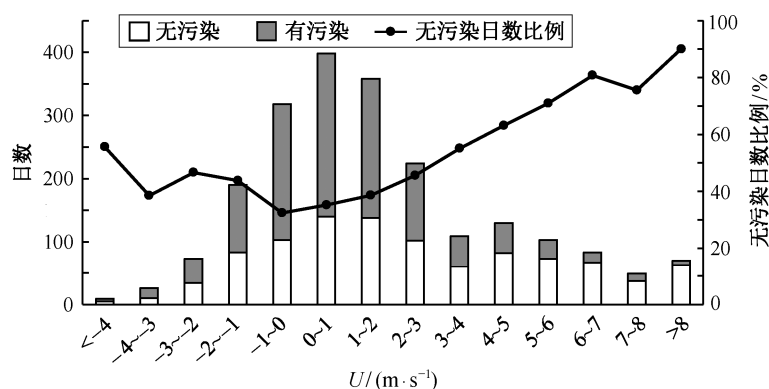


图3 污染状况与前一日纬向风的关系

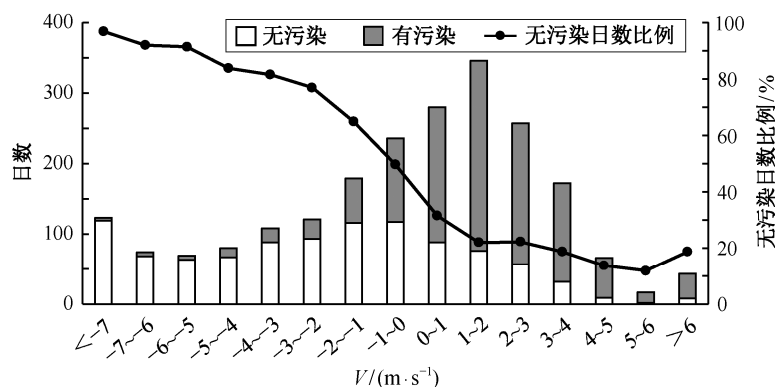
Fig. 3 Relationship between pollution status and U on the day before

图4 污染状况与前一日经向风的关系

Fig. 4 Relationship between pollution status and V on the day before

边界层高度越高,相对湿度越小。

2.2.4 PM_{2.5}与降水

图12为不同降水状况下PM_{2.5}浓度的分布情况。可以看到,在当日有降水时,对PM_{2.5}影响较小,只有在降水大于10 mm时,无污染日数才显著增加。降水对后一日污染驱散作用明显,当前一日有大于2 mm的降水时,无污染日数都显著增加,并且降水越大,无污染日数就越多,当前一日有5 mm以上降水时,无污染日数超过总日数的60%。

图13为前一日降水小于等于2 mm和前一日降水大于2 mm时,不同气象要素在不同降水级别的污染日数频次。可以发现,在相同的气象条件下,(b)图的无污染日数比例均高于(a)图,特别是在(a)图中无污染日数比例较低时,(b)图对应的无污染日数比例升高较为明显。

总的来说,PM_{2.5}与经向风的关系最为明显,北风越大对驱散污染物越有利,南风则有利于污染物

的累积。相对地,纬向风的方向与污染没有明显关系,只是风速越大越有利于驱散污染物。边界层高度越高,越有利于污染物的驱散;相对湿度越高,越有利于污染物的累积;前一日降水也对污染物的驱散有明显作用。

2.3 不同季节的PM_{2.5}与各气象要素之间的关系

图14为不同季节PM_{2.5}与前一日纬向风之间的关系。春季, U 的分布较为平均,并在不同风速情况下污染日数比例也较为相似,只有在西风大于7 m/s时稍高,但从图上可以看到,风速在0~5 m/s时才更易出现PM_{2.5}浓度大于200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的严重污染。夏季,纬向风明显较小, U 的绝对值基本上小于4 m/s。并且 $U < 0$ 时无污染日比例比春季更低, U 为0~4 m/s时与春季相似, $U > 5$ m/s时无污染日数明显上升,但样本量较少。秋季, U 的数值介于春季与夏季之间, U 在不同数值上均有分布,但更集

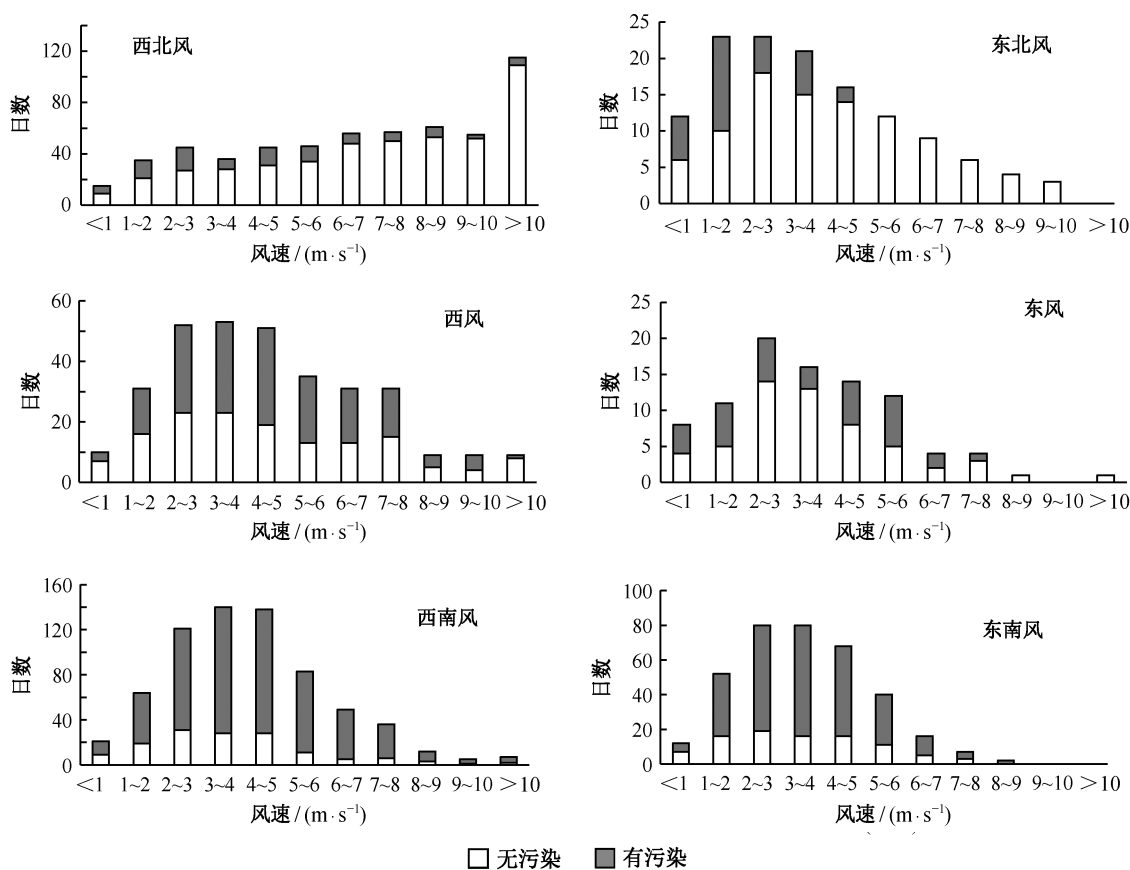


图 5 污染状况在不同风向、风速下的情况

Fig. 5 Different pollution status in different wind direction and speed

中在 1~4 m/s。在 $U>0$ 时与春季基本相似, 但 $U<0$ 时无污染日数明显上升。与夏季相反, 冬季 $U>5$ m/s 的无污染日数明显大于其他季节, 但 $U<0$ 的无污染日数大幅减少。 $U>5$ m/s 时, 无污染日数明显增加。

如图 15 所示, 春季 V 与 U 的情况相似, 数值分布较为平均, 只有在 2~5 m/s 上稍多。在所有风速上, 无污染日数的比例均稍高于年平均值 5%~10%。夏季, V 明显集中于 1~5 m/s。在 V 小于 2 m/s 时无污染日数比例明显高于其他季节, V 大于 2 m/s 时与年平均值相似, 但由于大量南风的出现, 所以总的污染情况较为严重。秋季, 风速的分布与春季类似, 但在 $U>1$ m/s 时, 污染日数出现更多。冬季, 南风出现更少, 北风(特别是大于 7 m/s 的北风)出现更多, 但在相同风速下, 污染日数明显高于年平均值 5%~10% (表面上, 冬季的气象条件更有利于污染的扩散, 但在与其他季节相同的气象条件下, 污染更为严重)。

春季, 边界层高于 3000 m 的情况极多(几乎所有高于 3000 m 的情况都集中于春季), 并且边界层高度大于 1500 m 的情况均远高于其他季节。如图 16 所示, 在边界层高度为 500~1500 m 的情况下, 无污染日数比例低于年平均值; 在大于 1500 m 时, 状况与年平均值类似; 在低于 500 m 时, 无污染日数比例突然增加, 但样本较少。夏季, 边界层高度集中于 1000~1500 m。在边界层高度为 500~2000 m 时, 污染日数较年平均值多 10% 左右; 大于 2000 m 时与年平均值类似。与春季类似, 当边界层高度小于 500 m 时, 无污染日数明显增加。秋季, 总体边界层高度均偏低, 甚至可以低至 0~1000 m。除小于 500 m 外, 其他情况下的无污染日数均多于年平均值 5%~10%。冬季, 总体边界层高度比秋季更低, 除 500 m 以下外, 相同边界层高度时无污染日数均多于其他所有季节, 但由于存在大量小于 500 m 边界层高度的情况, 所以污染日总量并不低。

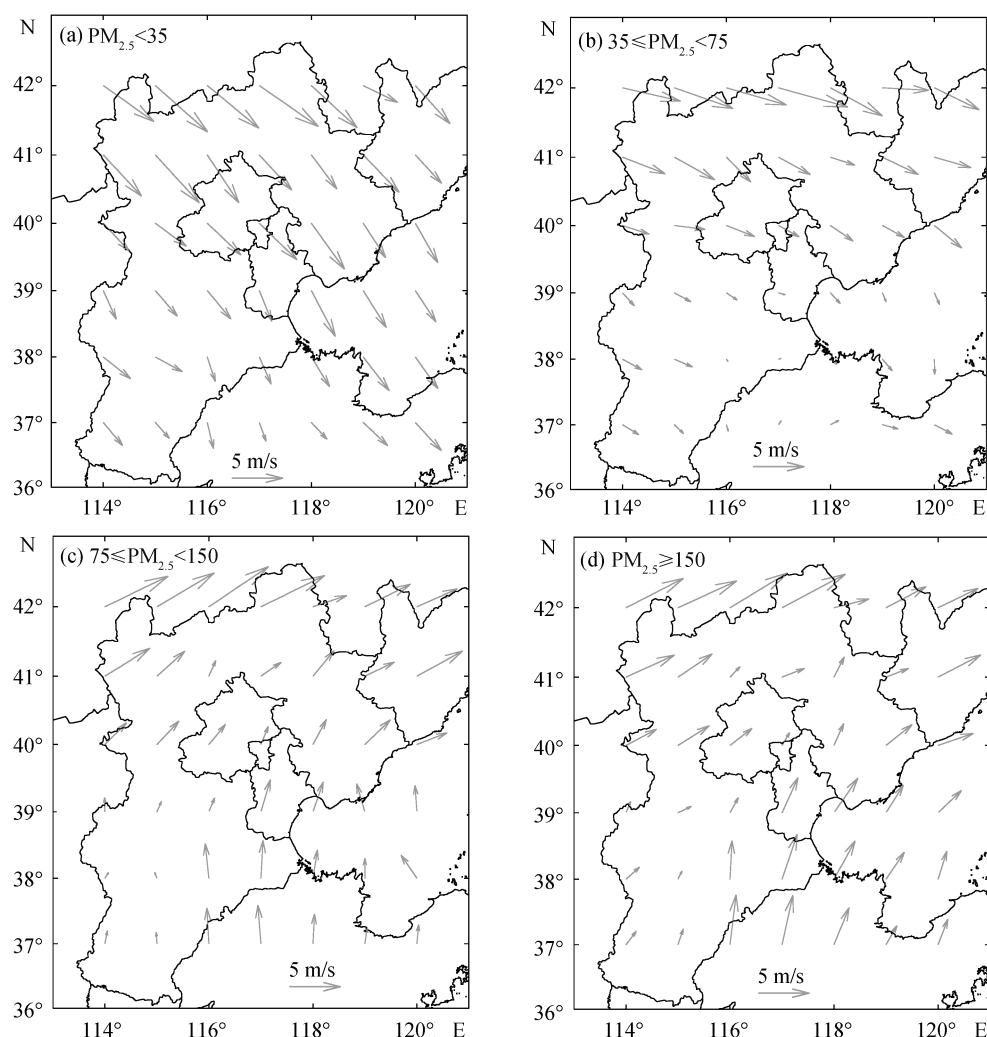


图 6 不同污染情况下的华北地区风向和风速

Fig. 6 Wind speed and direction in different pollution status

如图 17 所示, 春季, 相对湿度总体上较低, 且相同相对湿度相同的情况下, 污染日数比例略高于年平均。夏季, 总体上相对湿度偏高, 且相对湿度相同的情况下, 污染日数比例略低于年平均。秋季, 相对湿度介于春季与夏季之间, 与年平均相近。冬季, 相对湿度较低, 且相对湿度相同的情况下, 污染日数比例远高于其他季节。

2.4 PM_{2.5} 与各个气象要素之间关系的总结

表 1 列出在不同气象要素情况下的霾污染状况, 共分为 4 类。1) 符合空气质量以优为主的日数总计 240 日, 其中空气质量优秀 168 日, 良好 59 日, 中度污染 13 日, 重度污染无, 平均 PM_{2.5} 浓度为 32.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2) 符合空气质量以良为主的日数总计 215 日, 其中空气质量优秀 59 日, 良好 101

日, 中度污染 50 日, 重度污染 5 日, 平均 PM_{2.5} 浓度为 59.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3) 符合空气质量较差的日数总计 414 日, 其中空气质量优秀 13 日, 良好 121 日, 中度污染 199 日, 重度污染 81 日, 平均 PM_{2.5} 浓度为 106.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。4) 符合空气质量极差的日数总计 293 日, 其中空气质量优秀 2 日, 良好 18 日, 中度污染 88 日, 重度污染 185 日, 平均 PM_{2.5} 浓度为 190.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.5 各个气象要素的年际变化

图 18 为 4 个季节的边界层高度(HPBL)从 2003 到 2014 年的变化。按照无无污染日数的比例, 将边界层高度分为三类: HPBL ≥ 2000 m, 无污染日数出现最多; $1000 \leq \text{HPBL} < 2000$ m, 其次; HPBL < 1000 m, 最少。HPBL 小于 1000 m 的情况在近几

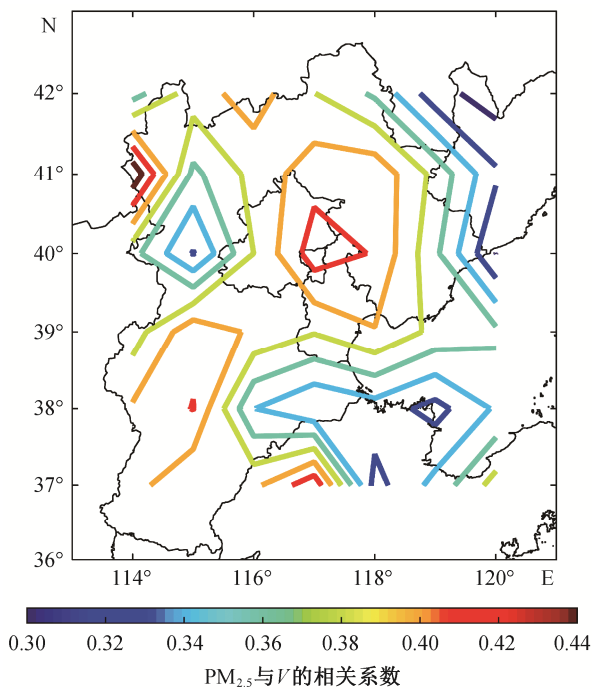


图 7 $PM_{2.5}$ 与经向风 V 的相关性
Fig. 7 Correlation coefficient between $PM_{2.5}$ and V

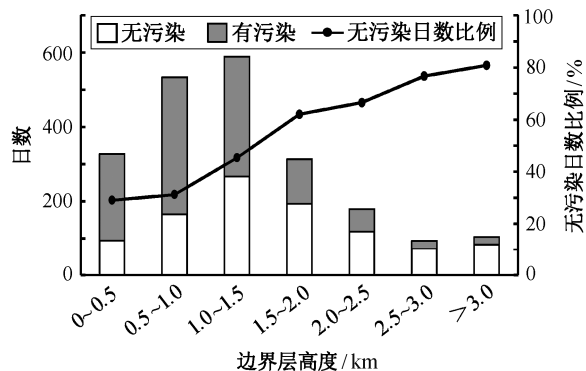


图 8 污染状况与边界层高度的关系
Fig. 8 Relationship between pollution status and planetary boundary layer height

年中出现频次显著增加,而大于 2000 m 的情况显著减少,平均边界层高度在除秋季外的季节都明显下降风速和相对湿度无显著年际变化。

3 结论

1) 2009—2012 年,北京市污染日数相似,均有 60% 左右的日数为污染日; 2013 和 2014 年无污染日数逐渐增加。其中,夏季无污染日数呈现增长的趋势,其他季节没有明显的变化趋势。2013 和 2014 年春季、冬季和夏季的无污染情况稍好于

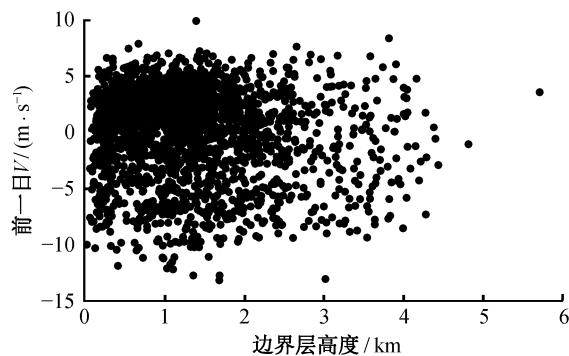


图 9 边界层高度与前一日经向风的关系
Fig. 9 Relationship between planetary boundary layer height and V on the day before

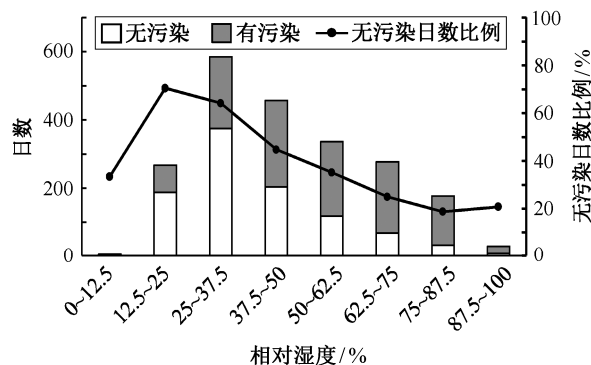


图 10 污染状况与相对湿度的关系
Fig. 10 Relationship between pollution status and relative humidity

2009—2012 年秋季和夏季。

2) $PM_{2.5}$ 浓度与前一日纬向风、前一日经向风、边界层高度、相对湿度和前一日降水有明显的相关性。纬向风 U 的绝对值越大,越有利于霾的驱散;经向风 V 的北风越大,越有利于霾的驱散,且相关性较高;边界层高度越高,越有利于霾的驱散;相对湿度越小,越有利于霾的驱散;降水对霾的驱散也有明显的作用。

3) 不同的季节虽然总的霾日数比例相似,但形成的原因截然不同。春季,边界层高度远高于其他季节,但其他气象要素并不利于霾驱散;冬季,北风明显多于其他季节,但边界层高度是 4 个季节中最低的。总体来说,春季与冬季的霾日数相似。秋季的情况介于春季和冬季之间,北风比冬季少,边界层高度比春季低。与其他季节不同,夏季南风较为明显,边界层高度也较低,但有更多的降水利于霾驱散,导致与其他季节的污染情况总体上相似。

表 1 不同天气情况下的污染状况
Table 1 Different pollution status in different weather conditions

空气质量以优为主	空气质量以良为主	空气质量较差	空气质量极差
V<-5 m/s 且 HPBL>1000 m	V<-5 m/s 且 HPBL<1000 m	V>0 且 1000 m<HPBL<3000 m	V>0 且 HPBL<1000 m 且
或	或	或	或
V<0 且 HPBL>3000 m	V>0 且 HPBL>3000 m	-5 m/s <V<0 且	-5 m/s <V<0 且
或	或	1000 m<HPBL<3000 m 且	HPBL<1000 m 且
-5 m/s <V<0 且	-5 m/s <V<0 且	RH>40%	RH>40%
2000 m<HPBL<3000 m 且	1000 m<HPBL<2000 m 且		
RH<40%	RH<40%		

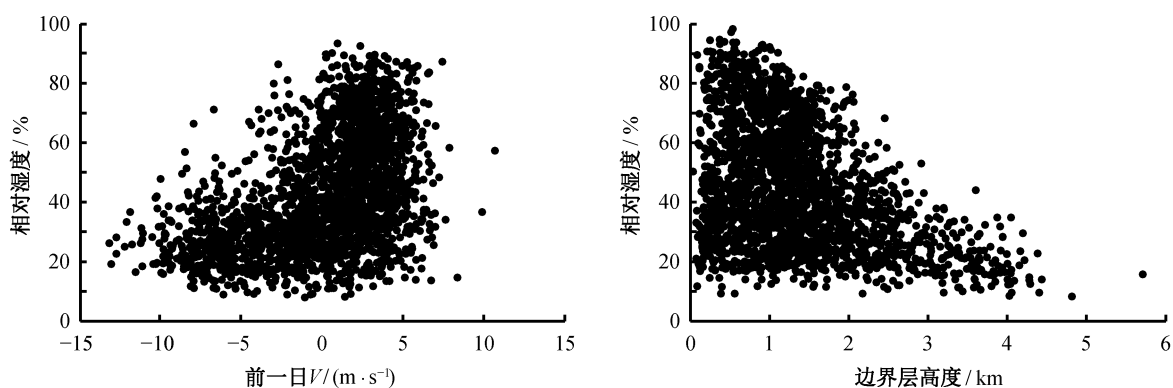


图 11 相对湿度与前一日经向风和边界层高度的关系

Fig. 11 Relationship between relative humidity and the V on the day before / planetary boundary layer height

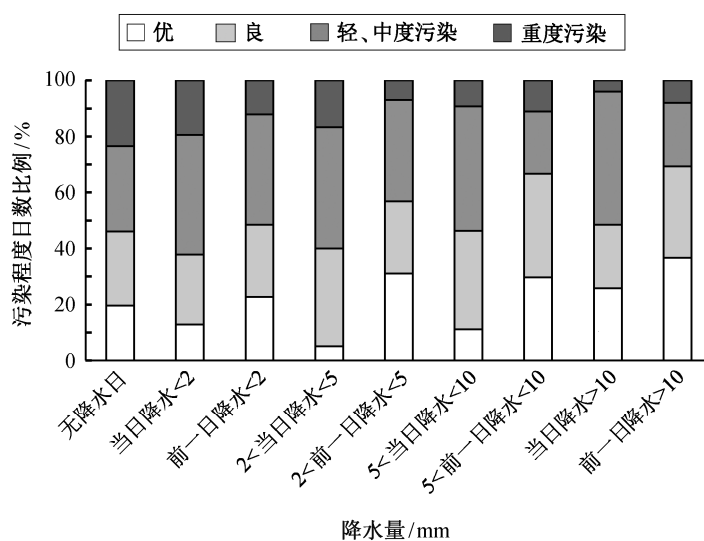
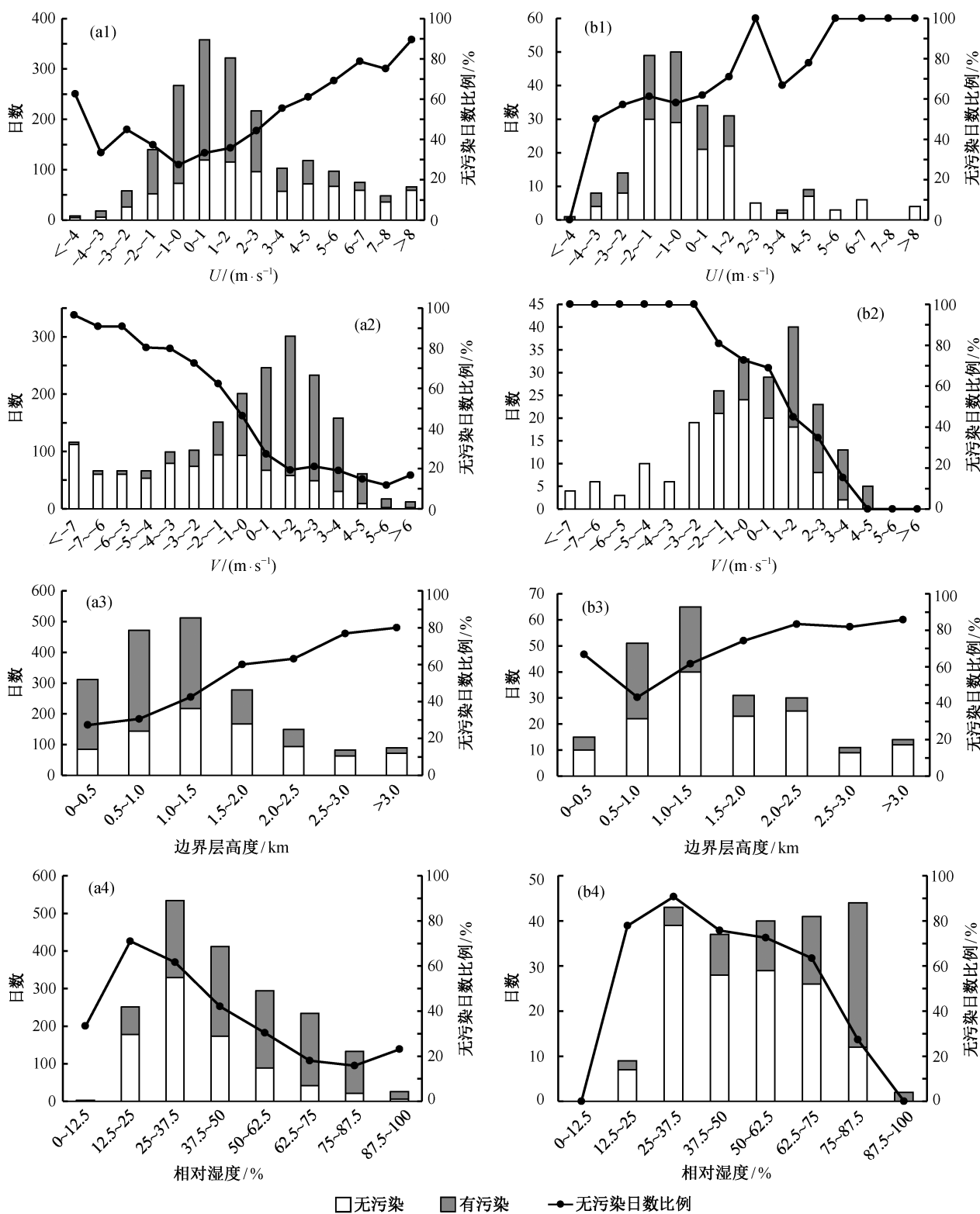


图 12 污染状况与降水的关系

Fig. 12 Relationship between pollution status and precipitation



(a)为前一日降水小于等于 2 mm 时(包括未发生降水)的情况, (b)为前一日发生 2 mm 以上降水时的情况; 1, 2, 3 和 4 图分别为前一日纬向风 U 、前一日经向风 V 、边界层高度、相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系

图 13 前一日降水小于等于 2 mm 与大于 2 mm 时污染状况与 4 个气象要素的关系
 Fig. 13 Relationship between the pollution status and 4 different meteorological elements when last day precipitation less than and more than 2 mm

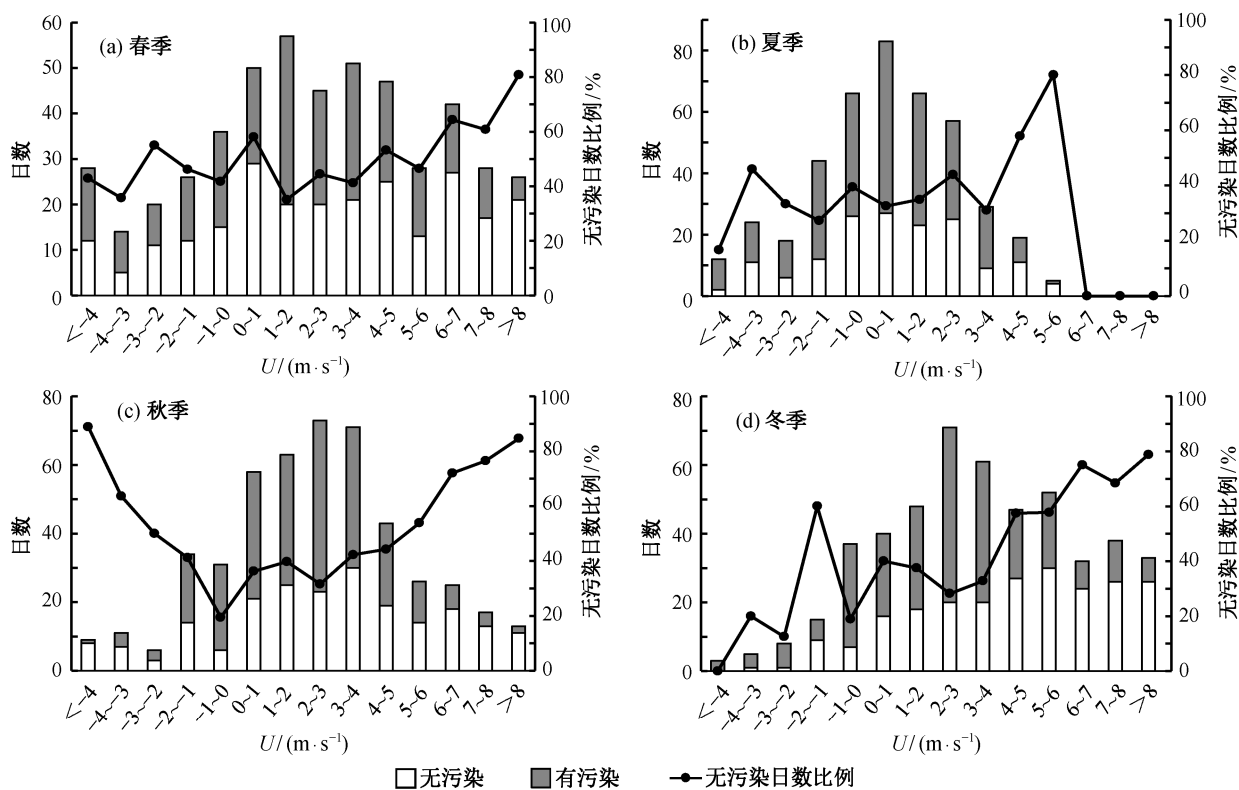


图 14 不同季节的污染状况与前一日纬向风的关系

Fig. 14 Relationship between pollution and the day before the zonal wind in different seasons

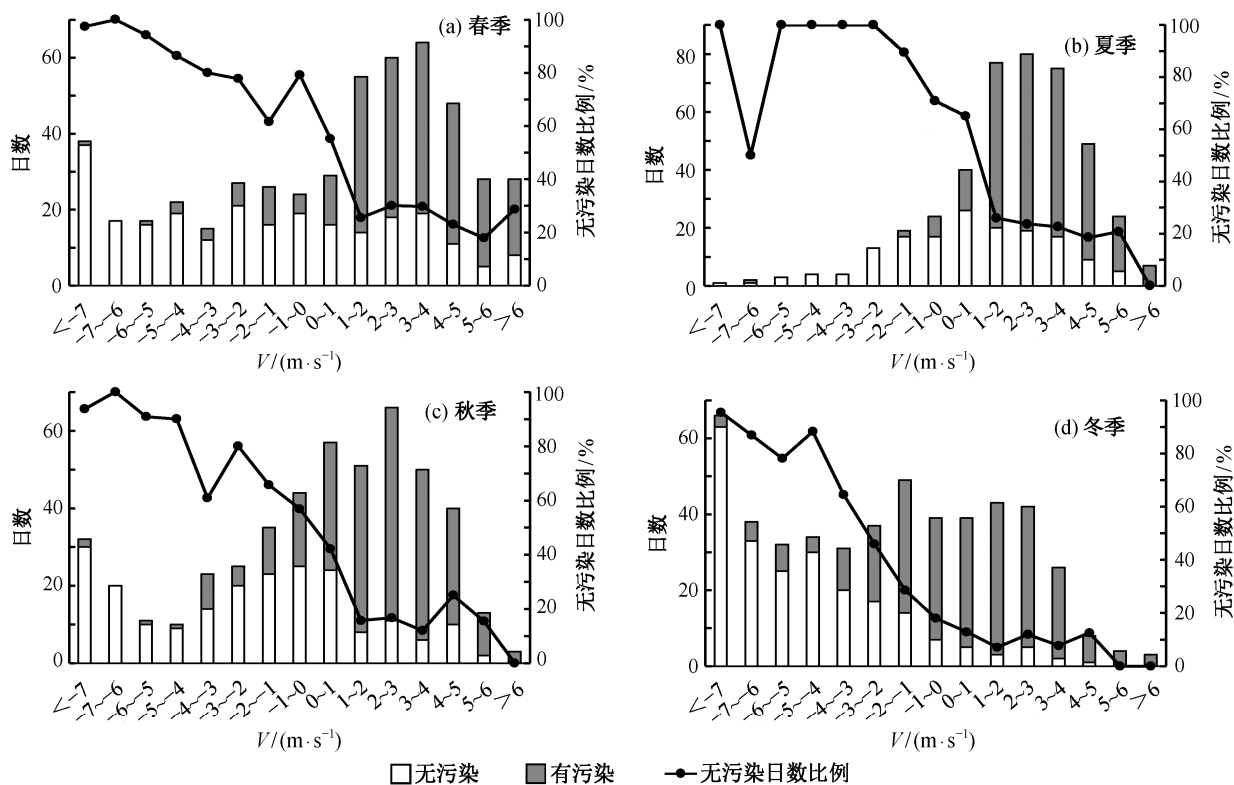


图 15 不同季节的污染状况与前一日经向风的关系

Fig. 15 Relationship between pollution and the day before the meridional wind in different seasons

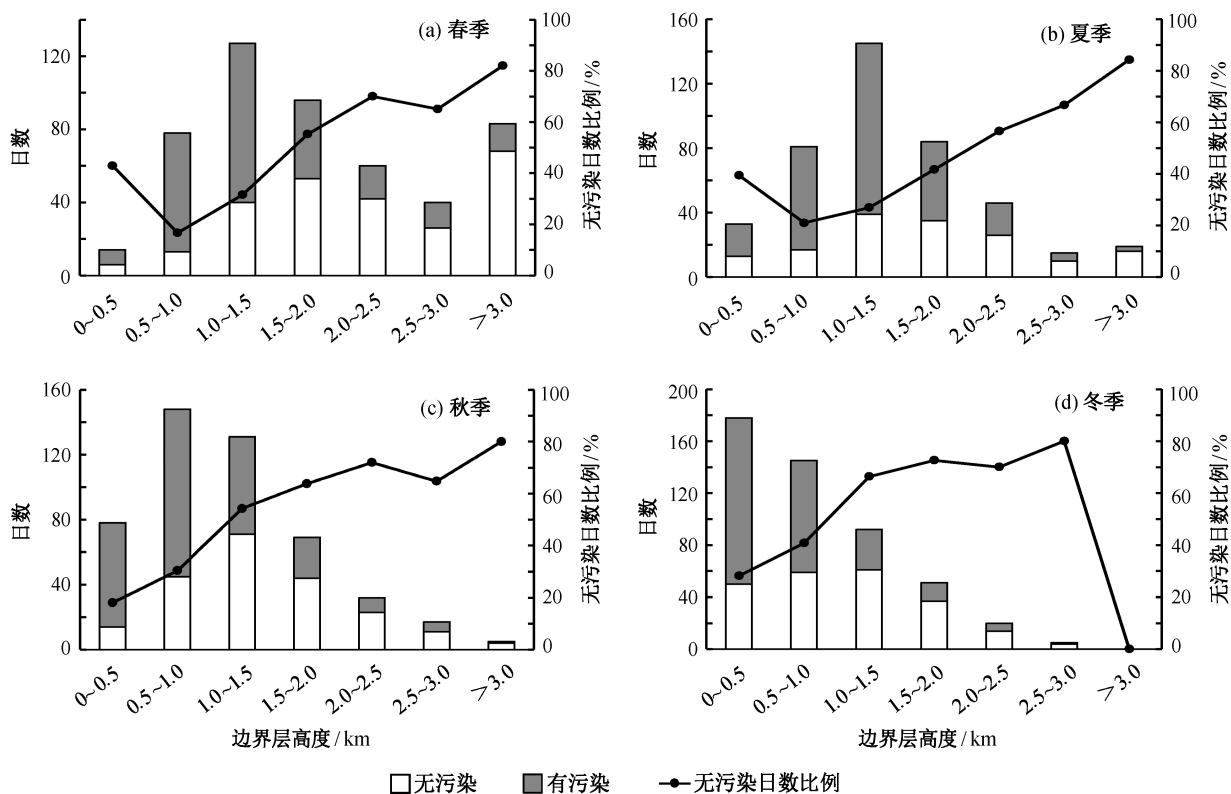


图 16 不同季节的污染状况与边界层高度的关系

Fig. 16 Relationship between pollution status and planetary boundary layer height in different season

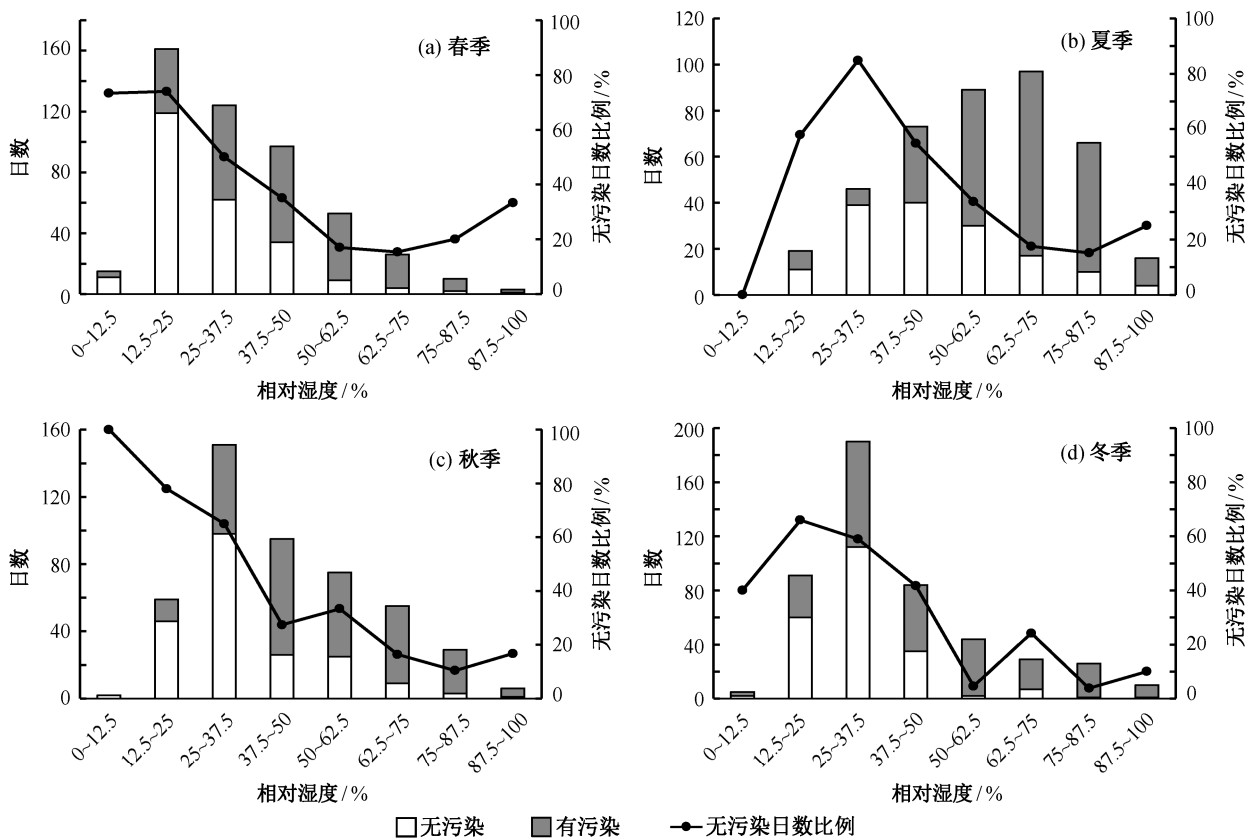


图 17 不同季节的污染状况与相对湿度的关系

Fig. 17 Relationship between pollution status and relative humidity in different season

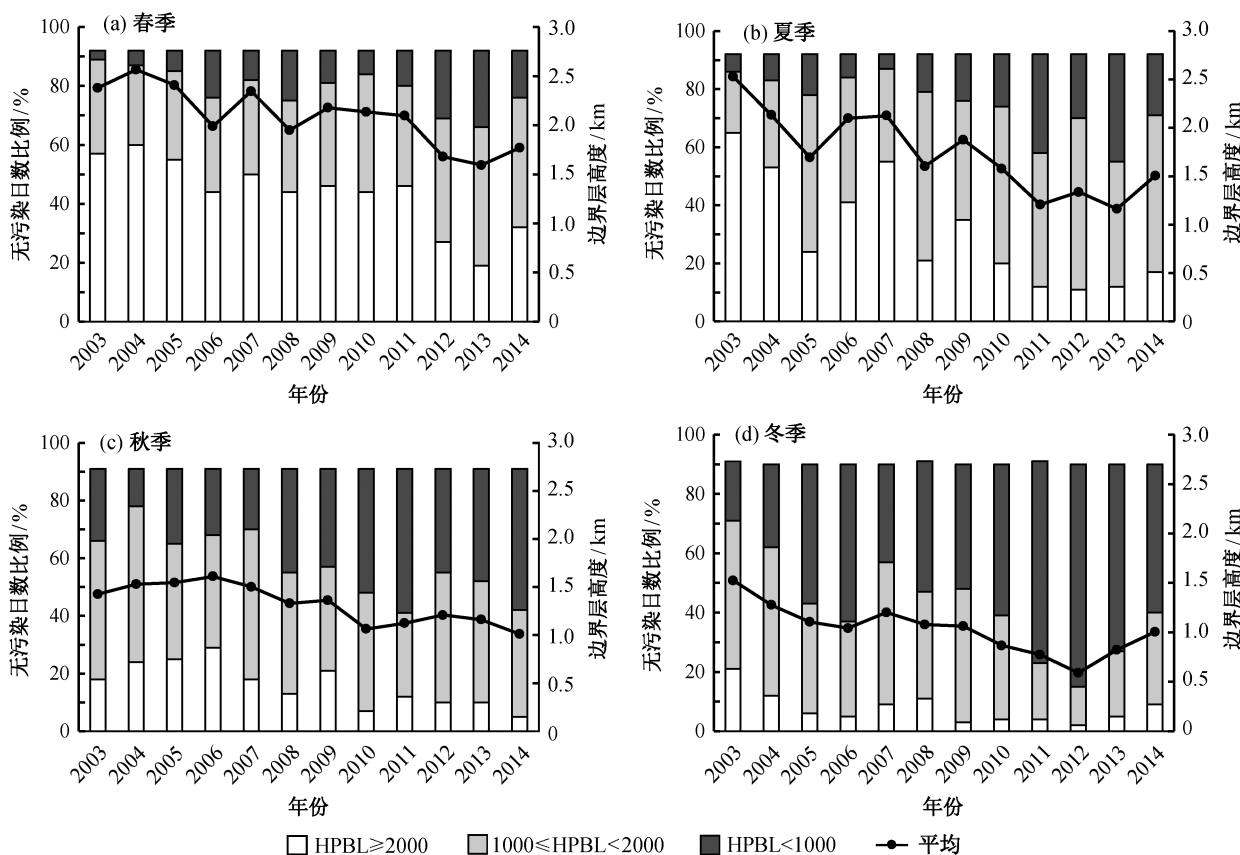


图 18 不同季节的边界层高度的年际变化
Fig. 18 Interannual variation of HPBL in different seasons

4) 从近十多年的变化情况来看, 边界层高度在所有的季节都呈现明显降低的趋势, 其他气象要素则没有明显变化。

参考文献

[1] Hu Z Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D19): 1703-1708

[2] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(7): 2425-2432

[3] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1): 311-330

[4] Song L, Gao R, Li Y, et al. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background

during 1961-2012. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2013, 9(5): 313-318

[5] Zhang H, Xie B, Zhao S Y, et al. PM_{2.5} and tropospheric O₃ in China and an analysis of the impact of pollutant emission control. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5(3): 136-141

[6] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. *气候与环境研究*, 2013, 8(3): 397-406

[7] Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D16): 17969-17980

[8] 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化. *气候与环境研究*, 2013, 18(2): 165-170

[9] 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等. 三种霾日统计方法的比较分析: 以环首都圈京津冀晋为例. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 545-554

- [10] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 2014, 34(1): 1-11
- [11] 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析. 资源科学, 2014, 36(1): 191-199
- [12] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征及其与 PM_{10} 、TSP 的关系. 中国环境科学, 2002, 22(6): 506-510
- [13] 缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望. 气候与环境研究, 2015, 20(3): 356-368
- [14] 李宗恺. 空气污染气象学原理及应用. 北京: 气象出版社, 1985
- [15] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(1): 2-27
- [16] Barnes W L, Pagano T S, Salomonson V V. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. IEEE Transactions on Geosciences & Remote Sensing, 1998, 36(4): 1088-1100
- [17] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析. 环境科学, 2015, 36(4): 1148-1153
- [18] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究. 环境科学, 2015, 36(3): 801-808
- [19] 苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 华北地区天气型对区域大气污染的影响. 环境科学研究, 2004, 17(3): 16-20
- [20] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM_{10} 质量浓度与边界层气象要素相关性分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 607-612
- [21] Greene J S, Kalkstein L S, Ye H, et al. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities. Theoretical & Applied Climatology, 1999, 62(3/4): 163-174
- [22] Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. Theoretical & Applied Climatology, 2009, 95(3/4): 265-277
- [23] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change. Atmospheric Environment, 2010, 44(32): 3976-3984
- [24] 任阵海, 万本太, 虞统, 等. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送. 环境科学研究, 2004, 17(1): 7-13
- [25] 王跃, 王莉莉, 王跃思, 等. 北京 $PM_{2.5}$ 重污染时段环流形势及边界层结构分析 // 创新驱动发展提高气象灾害防御能力: S10 大气物理学与大气环境. 南京, 2013: 1-11
- [26] 康娜, 辛金元, 蔺永耀, 等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析. 环境科学研究, 2009, 22(9): 1013-1020
- [27] 杨雨灵, 谭吉华, 孙家仁, 等. 华北地区一次强灰霾污染的天气学效应. 气候与环境研究, 2015, 20(5): 555-570