

邱玉珺, 牛生杰, 沈建国. 2009. 内蒙古沙地和草地环境下近地面 PM10 分布特征及其与相关气象要素的关系 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 97-104. Qiu Yujun, Niu Shengjie, Shen Jianguo. 2009. Characteristics of PM10 mass concentration and the influence from meteorological factors in different underlying surface conditions in Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 97-104.

内蒙古沙地和草地环境下近地面 PM10 分布特征及其与相关气象要素的关系

邱玉珺¹ 牛生杰¹ 沈建国²

1 南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044

2 内蒙古自治区气象局, 呼和浩特 010051

摘要 利用内蒙古锡林浩特和朱日和 2005 年的 PM10 质量浓度 (M_{PM}) 和相关气象要素资料, 分析了沙地和草地环境下 M_{PM} 的分布特征, 发现 M_{PM} 受沙尘天气的影响较大, 非沙尘日 M_{PM} 在不同下垫面条件下差别不大。进一步分析发现, 气象要素对 M_{PM} 有较大的影响, 在选取相关气象要素参量的基础上, 将各参量相乘建立了气象影响指数 I_{PM} , 表示气象条件对 M_{PM} 的综合作用, 经检验发现锡林浩特和朱日和 I_{PM} 值与 M_{PM} 日均值的相关系数都大于 0.70, 高于 M_{PM} 与其他单气象要素, 月均值的线性相关性更显著。对同一气候带不同下垫面条件下不同季节 I_{PM} 值与 M_{PM} 的对比分析发现, 气象条件对近地面 M_{PM} 的影响比下垫面条件更显著。

关键词 沙尘气溶胶 质量浓度 气象要素 PM10

文章编号 1006-9585 (2009) 01-0097-08 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

Characteristics of PM10 Mass Concentration and the Influence from Meteorological Factors in Different Underlying Surface Conditions in Inner Mongolia

QIU Yujun¹, NIU Shengjie¹, and SHEN Jianguo²

1 *Key Laboratory of Atmospheric Physics and Environment of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051*

Abstract There is increasing attention focused on the influence of aerosol to the climate change and the environment. What extent and relationship on the meteorological factors to the aerosol mass concentrations (M_{PM}) is a challenging subject. Studying the relationships is beneficial to improve the aerosol model and better understand the climate change. By analyzing the M_{PM} and corresponding meteorological data of Xilinhot and Jurh in 2005, which locate in semi-arid area in Inner Mongolia, representing sandy land and grassland, the results show great influence on M_{PM} from dust events. There are little difference in non-dust events. Further analysis implies there are interaction between the M_{PM} and the meteorological conditions, that is the wind speed and air temperature increase with larger

收稿日期 2007-12-20 收到, 2008-09-28 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403706 和国家自然科学基金资助项目 40705005、40765001

作者简介 邱玉珺, 女, 1975 年出生, 博士, 讲师, 主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: qyj@nuist.edu.cn

M_{PM} , relative humidity, air pressure and visibility decrease with larger M_{PM} , respectively. On the base of correlation analysis between the M_{PM} and the meteorological factors, which the wind, air temperature and air pressure are significantly positive correlation and relative humidity is significantly negative correlation with M_{PM} , and the climate condition index I_{PM} expression taking account of the above meteorological factors is given as a comprehensive effect on M_{PM} . The results show that the correlation coefficient of the two stations between the I_{PM} value and M_{PM} are larger than 0.70, more significant than only considering single meteorological factor. And it also indicates that there is obvious linear relation between monthly I_{PM} and M_{PM} . By analyzing different seasonal correlation relationship of I_{PM} values and M_{PM} , it shows the latter is the main factor influence on M_{PM} between the different underlying surface conditions and meteorological condition.

Key words dust aerosol, mass concentration, meteorological factor, PM10

1 引言

气溶胶是研究气候变化过程中的一个重要环节 (Penner et al., 2001; 王明星等, 2001), 特别是矿物气溶胶对气候强迫的关键作用已成为科学界的共识 (Tegan et al., 1996; Sokolik et al., 1996; 肖辉等, 1998; Penner et al., 2001; 王宏等, 2007), 但对气溶胶气候强迫作用, 目前还存在很大的不确定性 (Ramanathan et al., 2001)。分析相关气象要素与气溶胶浓度分布之间的关系, 可对深入了解气候强迫提供必要的证据 (Gong, et al., 2007)。与其他地区相比, 我国干旱、半干旱区受人为污染较小, 矿物气溶胶 (沙尘) 是大气中的主要成分, 其浓度分布受沙尘天气的影响较大。气象条件对沙尘天气有着较大的影响 (王小玲等, 2004; 张莉等, 2005; Zhao et al., 2004; 李国翠等, 2007), 不同气象条件下的近地面气溶胶浓度分布特征也有所不同 (Luo et al., 2003; Zhang et al., 2003)。不同沙尘天气下气象要素分布不同, 沙尘浓度也有较大的变化 (牛生杰等, 2001)。笔者对方修琦等 (2003) 2000 年 4 月 1~15 日北京 PM10 与风速、相对湿度和气温对比分析发现, PM10 与各气象要素有很好的相关性。研究气象要素对气溶胶浓度分布的影响, 关键在如何将各气象要素综合建立一个量化的气象信息指标, 以此评价气象要素对气溶胶浓度分布的影响。基于此, 本文对处于同一纬度带但不同下垫面条件下的内蒙古锡林浩特和朱日和近地面 PM10 质量浓度 (M_{PM}) 及其与气象要素的关系进行了研究, 发现用各相关气象要素的乘

积 f 综合表达气象信息后, 能找到 f 与 M_{PM} 具有显著的相关关系, 二者的相关性表明了气象条件对 M_{PM} 的较大影响。

2 研究区和资料来源

气象要素和下垫面条件都影响着近地面 M_{PM} 的分布特征, 为了研究气象要素对 M_{PM} 的影响, 需要同时考虑不同下垫面特征对 M_{PM} 的影响。本研究选取气候条件类似但下垫面特征不同的内蒙古锡林浩特国家气候观象台 (43°57'N, 116°07'E) 和朱日和国家基准气候站 (42°24'N, 112°54'E) 作为研究区。两者都位于内蒙古半干旱草原区, 锡林浩特观测站位于锡林浩特的东南方, 处于内蒙古锡林郭勒盟草原腹地, 将其作为草地环境区; 朱日和观测站位于内蒙古中部沙地西侧, 其作为沙地环境区。两测站周围污染源较少, 近地面层大气中的 PM10 主要来自于地表的矿物气溶胶, 沙尘天气对 M_{PM} 的影响较大。

资料包括两站的 M_{PM} 和相关气象要素 (主要包括风速、最大风速、气温、相对湿度、水汽压、气压和能见度)。 M_{PM} 利用美国 Rupprecht & Patashick 公司的 TEOM1400a 型大气粒子监测仪进行观测, 能见度用 Vaisala 公司的 FD12 仪对大气光学能见度进行观测, 采样频率均为 5 min, 日均资料在对观测资料进行质量控制后平均获得。同期常规气象资料来自锡林浩特和朱日和自动气象站, 除 M_{PM} 其他资料时间分辨率为日, 同时还有天气现象详细记录。文中把有沙尘暴、浮尘和扬沙天气现象纪录的日子称为沙尘天气日, 没有以上现象纪录的称为非沙尘天气日。

3 结果与分析

尽管锡林浩特和朱日和的下垫面特征不同,但在非沙尘日的 M_{PM} 相差不大,锡林浩特为 $86.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,朱日和为 $90.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。两站非沙尘日的空气污染指数 API 均值(根据中国国家环保局公布的 API 的计算)分别为 68 和 70,空气质量状况均为良,说明内蒙半干旱区的整体空气质量水平较好。但沙尘日则不然,锡林浩特 M_{PM} 均值达到 $449.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是非沙尘日的 5.2 倍;朱日和高达 $752.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是非沙尘日的 8.4 倍。它们所对应的 API 都大于 300,为重污染。可见沙尘是影响内蒙地区的主要污染物。

另外,从两站 2005 年沙尘日 M_{PM} 均值的较大差别看到(图 1),在沙尘日,沙地环境沙源较丰富,比草地更容易向大气中输送大量的气溶胶。但两站沙尘天气过程的持续时间有所不同,锡林浩特 2005 年 17 个沙尘日中有 12 次的持续时间大于 1 h;朱日和 12 个沙尘日中只有 4 次持续时间较长,另有 4 次的持续时间在 10 min 左右。与锡林浩特相比,朱日和的沙尘持续时间较短,这与两站的下垫面特征有密切的关系。影响沙尘起动的下垫面条件主要有地表土壤粒度分布、植被覆盖度及土壤水分含量等。沙地地表遭遇强风时,沙尘迅速被卷入气流,小颗粒被吹扬到空中,但粗砂粒扬起的高度、搬运的距离有限,当风力稍稍减弱,粗颗粒沉降,因而沙尘天气短促而强烈。草地下垫面土壤粒子结合得较紧密,颗粒受到的黏性力较大,不易被吹扬,但草地又是沙尘气溶胶的一个重要储藏器,其中沉淀有大量的易被再次吹起的细粒子,由于草地的土壤持水性高于沙地,所以又不似沙地那样短时间内被大量吹起,所以沙尘过程持续时间较长。

考察两站 M_{PM} 的季节性分布规律(见图 2),发现较大值均出现在沙尘天气频繁发生的 3~6 月(4 个月中锡林浩特沙尘天气频率占总频率的 88%,朱日和占 75%),最高值出现在 4 月。显然 M_{PM} 的分布特征受气象因素的影响较大,内蒙古春季昼夜温差大,干旱,风大且频繁,气温回暖解冻,地表裸露,容易起沙。气象因素是沙尘天

气发生的必要条件,沙尘日和非沙尘日 M_{PM} 的较大变化与相关气象要素的变化密切相关。从表 1 可见,两站在沙尘日和非沙尘日的气象要素变化较一致,沙尘日的风速、最大风速、气温都高于非沙尘日,而相对湿度、水汽压和气压则正好相反。另外,通过对比发现,锡林浩特沙尘日和非沙尘日的风速、最大风速和气温均低于朱日和,相对湿度和气压正好相反,说明气象要素在不同下垫面环境下也有较大变化。图 2 中两站 M_{PM} 在植被条件较好的夏秋季差别较明显于冬春季节,也表明了局地气候环境与 M_{PM} 有着内在的联系。

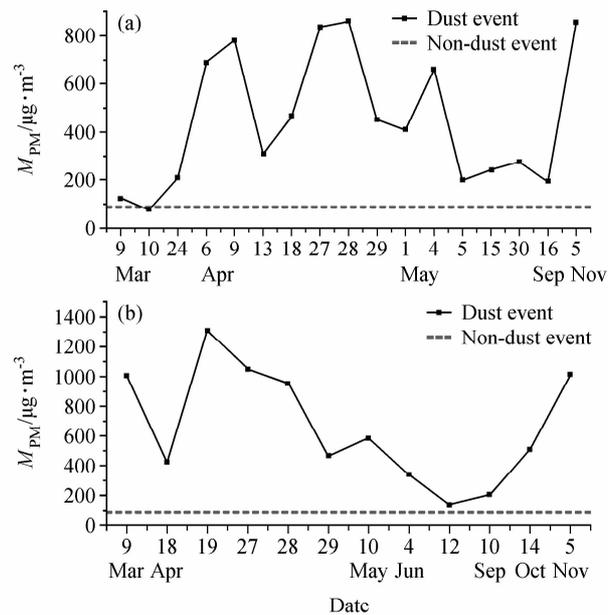


图 1 (a) 锡林浩特和 (b) 朱日和 2005 年沙尘天气日和非沙尘日 M_{PM} 均值

Fig. 1 M_{PM} of dust events days in 2005 and mean M_{PM} of non-dust events days in (a) Xilinhot and (b) Jurh

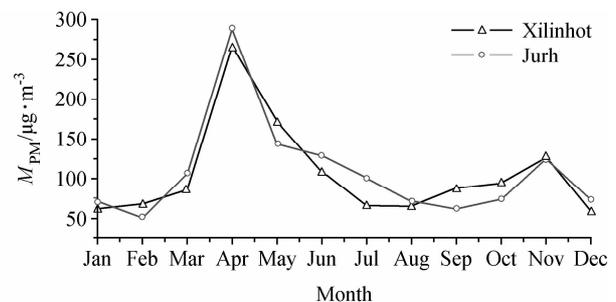


图 2 锡林浩特和朱日和 M_{PM} 月均值

Fig. 2 Monthly M_{PM} in Xilinhot and Jurh

表 1 锡林浩特和朱日和 2005 年沙尘日和非沙尘日气象要素均值
Table 1 Mean value of climatical factors of Xilinhot and Jurh

		风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最大风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	水汽压/hPa	气压/hPa	能见度/km
锡林浩特	沙尘日	5.8	12.0	7.4	37.1	4.1	893.7	119.4
	非沙尘日	3.0	6.8	2.6	52.6	5.4	900.6	286.0
朱日和	沙尘日	7.7	15.1	11.4	24.6	3.4	878.1	259.5
	非沙尘日	4.4	8.4	5.7	42.5	4.9	885.3	362.4

表 2 锡林浩特和朱日和 2005 年 M_{PM} 与各气象要素的相关系数
Table 2 Daily correlation Coefficient of M_{PM} and climatical factors of Xilinhot and Jurh

	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最大风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	水汽压/hPa	气压/hPa	能见度/km
锡林浩特	0.45*	0.50*	0.17*	-0.39*	-0.08	-0.35*	-0.53*
朱日和	0.45*	0.54*	0.15*	-0.27*	-0.04	-0.36*	-0.38*

* 表示通过了 0.01 的显著性检验

强风是产生沙尘天气的动力, 所以风速与 M_{PM} 密不可分。表 2 是 M_{PM} 和各气象要素相关分析结果, 从表中看到, 风速与 M_{PM} 的相关系数达到 0.01 的显著性水平。另外, 不稳定的热力条件也是沙尘天气产生的必要条件之一, 不同的热力条件下对应的气温、气压、相对湿度等条件也有所不同。表 2 中各气象要素与 M_{PM} 的相关关系有所体现, 除了水汽压, 其他气象要素与 M_{PM} 的相关性都达到了 0.01 的显著性水平。风速、气温与 M_{PM} 呈正相关, 相对湿度、气压、能见度与 M_{PM} 呈负相关。

各气象要素与 M_{PM} 的显著相关性是否说明他们之间存在一定的量化关系? 如果有, 这种数量关系如何确定? 考虑到各气象要素间的交错作用, 表示为

$$f(\omega, t, h, p, V_{\text{is}}), \quad (1)$$

其中, ω 表示风速, t 表示温度, h 表示相对湿度, p 表示气压, V_{is} 表示能见度。

从表 2 中看到, 风速日均值、日最大风速与 M_{PM} 的相关性都很好。这里的风速日均值由每日 4 个定时风速平均得到, 显然该值弱化了大风对 M_{PM} 的影响, 与日最大风速值相比, 日均风速值与 M_{PM} 的相关系数较小。考虑到风速日均值某种程度上隐含有大风持续时间的信息, 所以取其与其日最大风速的乘积作为风速参量。从该参量的单位看, 风速参量具有动能的量纲, 从某种程度上能反映 M_{PM} 的强度, 所以 (1) 式的计算结果称为强度指数, 用 I_{PM} 表示。考虑到其他气象因子对 M_{PM} 的影响处于辅助地位, 对其进行标准化取无

量纲量。相对湿度本身是一个没有单位的百分数, 考虑到其与 M_{PM} 呈负相关关系, 所以将 $(1-h)$ 作为湿度参量。从相关分析中发现, 虽然气温与 M_{PM} 相关性较显著, 但相关系数低于气温与风速、气压、相对湿度等相关系数。锡林浩特和朱日和气温与水汽压的相关系数分别高达 0.81 和 0.69, 约为气温与 M_{PM} 相关系数的 4 倍。另外, 根据 Hoff 定律, 大气对气溶胶的渗透压与气温成正比, 为了避免气象信息的重复性, 这里将气温参量取为 1。气压与 M_{PM} 的相关性也比较显著, 由于气压与 M_{PM} 是负相关关系, 类似于湿度参量, 不妨取 1 与本站气压标准化值的差值。能见度与 M_{PM} 的相关系数较高, 同时还与风速参量有着较显著的相关关系, 但与其他气象要素的相关性较差, 说明能见度也是反映沙尘气溶胶的一个较好参数。与其他气象要素相比, 能见度并没有对沙尘气溶胶浓度的分布产生影响, 只是在 (1) 式的计算中起到修正作用。考虑到能见度与 M_{PM} 的负相关关系, 用 1 与能见度的标准化值的差值作为能见度参量。另外, 选取的各气象参量与 M_{PM} 的相关系数相差不大, 说明他们在 f 中的作用相当, 这里直接取各参量的乘积, 即

$$\begin{cases} I_{\text{PM}} = \omega \cdot \omega_{\text{max}} \cdot (1-h) \cdot f_1(p) \cdot f_2(V_{\text{is}}), \\ f_1(p) = [\max(p) - p] / [\max(p) - \min(p)], \\ f_2(V_{\text{is}}) = [\max(V_{\text{is}}) - V_{\text{is}}] / [\max(V_{\text{is}}) - \min(V_{\text{is}})]. \end{cases} \quad (2)$$

为了保证 (2) 式中气压和能见度标准化的稳定性, 相应的最大最小值从 1970~2000 年时间序列中选取。由 (2) 式计算出锡林浩特和朱日和

2005 年的 I_{PM} 月均值 (见图 3), 两站 I_{PM} 与 M_{PM} 的相关系数分别为 0.72 和 0.76, 达到 0.01 的显著性水平, 此相关系数明显高于表 2 中其他单气象要素。另外, 计算出锡林浩特全年的 I_{PM} 均值为 3.86, 非沙尘日和沙尘日分别为 2.82 和 25.13, 后者为前者的近 9 倍; 朱日和全年平均为 6.07, 其中非沙尘日为 4.96, 沙尘日则高达 38.65, 沙尘日是非沙尘日的近 8 倍。为了检验沙尘日和非沙尘日 I_{PM} 的稳定性, 计算了朱日和 1971~2000 年的日 I_{PM} , 沙尘日和非沙尘日分别为 30.79 和 6.13, 与前面计算的 2005 年的值相差不大。另外, 由两站沙尘日与非沙尘日 I_{PM} 较接近的倍数说明, 该指数能有效地区别沙尘日和非沙尘日。另一方面, 由锡林浩特与朱日和不同的 I_{PM} 说明, 沙地下垫面对 M_{PM} 的影响大于草地环境。

分析两站 I_{PM} 的季节性分布发现 (图 4), I_{PM} 与 M_{PM} 分布较一致, I_{PM} 也在 4 月达到最大, 夏季最小。进一步考察发现, I_{PM} 与 M_{PM} 的季节相关性很显著 (图 5), 反应了 PM10 随气象要素的变率。目前由于 PM10 观测仪器的难维护性使得观测资料常常出现偏差和缺值, 且 2000 年前的观测还是空白, 甚至到现在观测 PM10 的站点依然有限。与之相比, I_{PM} 中涉及到的各气象要素都是气象观测中的常规要素, 观测技术成熟, 资料在空间和时间上较完备, I_{PM} 为量化评价 M_{PM} 提供了便利。

尽管前面分析指出两站 I_{PM} 与 M_{PM} 日均值的相关性高达 0.70 以上, 但 M_{PM} 除了受到气象条件的影响。还受到不同下垫面条件的影响。内蒙古地区下垫面条件具有四季分明的变化规律, 对植被覆盖较少的 3~6 月和植被覆盖较好的 7~10 月的 M_{PM} 与 I_{PM} 值进行相关分析发现, 两种情况下的相关性都达到了 0.01 的显著性水平。锡林浩特和朱

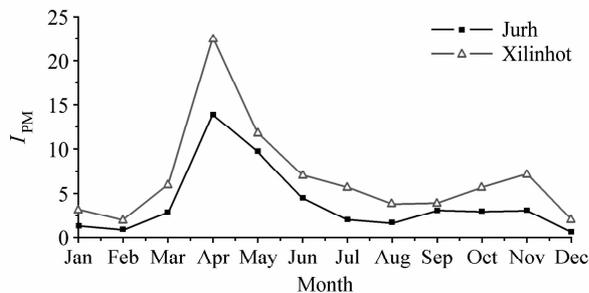


图 3 2005 年锡林浩特和朱日和 I_{PM} 月均值
Fig. 3 Monthly I_{PM} of Xilinhot and Jurh in 2005

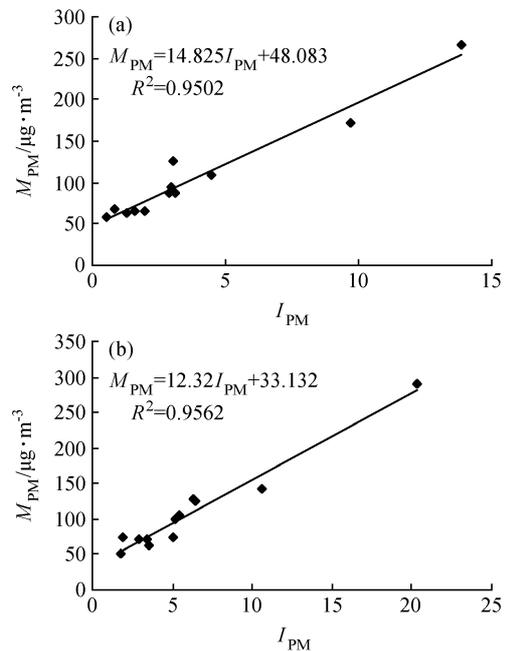


图 4 (a) 锡林浩特和 (b) 朱日和 M_{PM} 和 I_{PM} 月均值关系
Fig. 4 Monthly I_{PM} value in Xilinhot and Jurh

日和两站的相关性较一致, 3~6 月的相关系数分别为 0.70、0.75, 7~10 月分别为 0.48、0.50, 不同季节下的两站相关系数都达到了显著性水平。从两站相近的相关系数说明, 同样的气象条件下, 下垫面条件对 I_{PM} 与 M_{PM} 的关系影响不大, 与之相比, 气象条件是影响 I_{PM} 与 M_{PM} 关系的主要因素, 这与 Zhang et al (2003) 的研究结果相同。

进一步选取太原、银川、呼和浩特和北京进行验证, 4 个站点均位于我国北方, 春季多沙尘天气。虽然 2000 年前各站点没有 PM_{10} 的观测资料, 但从锡林浩特和朱日和的 M_{PM} 分布特征仍可以看到, 沙尘天气日的 M_{PM} 远高于非沙尘天气日。由 4 个站点 1971~2000 年的相应气象要素资料 (来源于中国气象局), 计算出相应的 I_{PM} 日值, 由于 30 年的时间序列较长, 4 站以及朱日和的 I_{PM} 分辨率取月, 从图 6 中可以看出, 沙尘日的 I_{PM} 月均值远高于非沙尘日, 且在沙尘天气日数较多的春季, 对应的 I_{PM} 月均值也较高。相关分析结果显示二者有着很好的相关关系, 太原、银川、呼和浩特和北京的相关系数依次为 0.70、0.69、0.67 和 0.78, 达到了 0.01 的显著性水平。春季的非沙尘日 I_{PM} 月均值也高于其他季节, 但仍远小于沙尘天气日, 说明 I_{PM} 能较好地反映 M_{PM} 的强度。

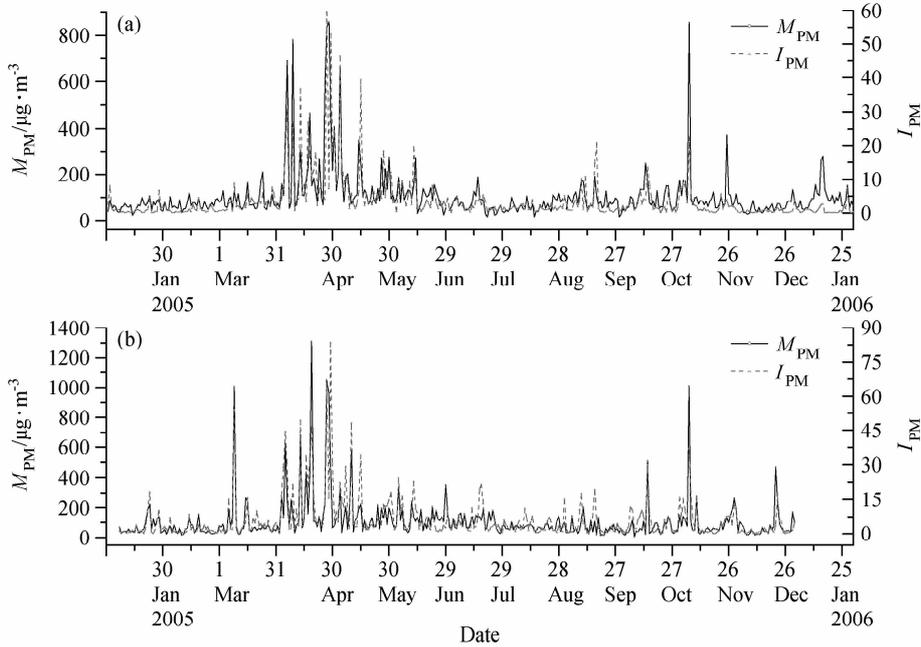


图 5 (a) 锡林浩特和 (b) 朱日和 2005 年 M_{PM} 与 I_{PM} 的对比

Fig. 5 Comparison of daily M_{PM} and I_{PM} of Xilinhot and Jurh in 2005

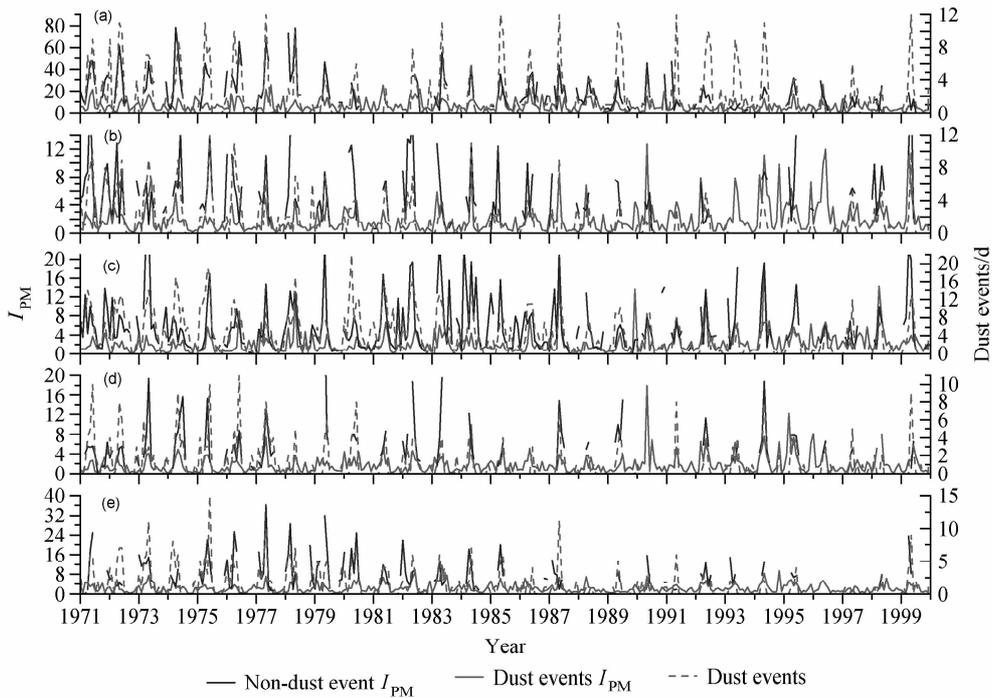


图 6 我国北方 5 个站点 1971~2000 年沙尘强度指数与非沙尘天气日的对比: (a) 朱日和; (b) 太原; (c) 银川; (d) 呼和浩特; (e) 北京

Fig. 6 Comparison of I_{PM} in dust events and non-dust events of five stations from 1971 to 2000: (a) Jurh; (b) Taiyuan; (c) Yinchuan; (d) Hohhot; (e) Beijing

4 结论与讨论

影响内蒙古近地面层 M_{PM} 的因素有许多, 其中下垫面特征和气象因素占主要地位。文中选取的锡林浩特与朱日和均位于内蒙古半干旱区同一纬度带, 气候条件相似, 锡林浩特代表草地环境下垫面, 朱日和代表沙地环境下垫面。对两站观测资料的分析结果显示, M_{PM} 受沙尘天气的影响较大, 两站全年的 M_{PM} 均值比较接近, 但沙尘日均值相差较大。对沙源较丰富的朱日和来说, 在气象条件满足的情况下, 其 M_{PM} 向近地面层的瞬时注入量远大于草地环境下的锡林浩特, 但前者的持续时间没有后者长。

M_{PM} 的不同分布特征与气象因素有密切的关系。 M_{PM} 分布在沙尘日和非沙尘日明显不同, 其对应的温、压、湿、风以及能见度也有一定的规律, 沙尘日的风速、日最大风速大于非沙尘日, 相对湿度、压强、能见度都小于非沙尘日。进一步对两站 M_{PM} 与各气象要素进行相关分析发现, 风速、相对湿度、气压、能见度与 M_{PM} 均有显著的相关性。

各气象要素对 M_{PM} 分布的影响很大, 最终影响效果并不是各要素影响的简单线形叠加, 如何将各要素综合起来量化研究气象条件对 M_{PM} 的影响成为问题的关键, 建立一个综合指数 I_{PM} 成为必要。在尽可能减少各气象信息重复性的基础上, 考虑到实际中各气象要素的相互交错作用, I_{PM} 表达式取各气象参量的乘积。经检验发现, 锡林浩特和朱日和 I_{PM} 值与 M_{PM} 日均值的相关性都很显著, 相关系数高于其他各单气象要素与 M_{PM} 的相关性。另外, 由 I_{PM} 与 M_{PM} 的季节性关系还发现, 气象条件对 M_{PM} 的影响大于下垫面条件的影响, 气象因素是影响 M_{PM} 的主要因素。

与常规气象资料相比, PM10 对观测仪器的要求较高, 该观测项目还没有在各气象站普及开展, 资料也较难获取。 I_{PM} 中的各常规气象要素观测技术较成熟和完善, 资料在空间和时间尺度上也更完备。用常规气象要素综合计算出的 I_{PM} 为量化评价 M_{PM} 带来较大便利, 该值在半干旱区的应用效果较好, 至于能否同样用于湿润地区还需要进一步的验证和完善。

参考文献 (References)

- 方修琦, 李令军, 谢云. 2003. 沙尘天气过境前后北京大气污染质量浓度的变化. 北京师范大学学报 (自然科学版), 39 (3): 407 - 411. Fang Xiuqi, Li Lingjun, Xie Yun. 2003. Difference of air pollution during the duststorm process in Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), (in Chinese), 39 (3): 407 - 411.
- Gong Daoyi, Ho C-H, Chen D, et al. 2007. Weekly cycle of aerosol-meteorology interaction over China [J]. J. Geophys. Res., 112, D22202, doi:10.1029/2007JD008888.
- 李国翠, 王建国, 连志鸾. 2007. 石家庄大气污染与沙尘天气的关系分析. 气象与环境学报, 23 (2): 1 - 5. Li Guocui, Wang Jianguo, Lian Zhiluan. Relationship between atmospheric pollution and sandy weather in Shijiazhuang [J]. Journal of Meteorology and Environment, (in Chinese), 23 (2): 1 - 5.
- Luo C, Mahowald N M, Corral J. 2003. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution [J]. J. Geophys. Res., 108 (15): 4447, doi: 10.1029/2003JD003483.
- 牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 2001. 贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的观测分析. 高原气象, 20 (1): 82 - 87. Niu Shengjie, Sun Jiming, Chen Yue, et al. 2001. Observation and analysis of mass concentration of dust and sand aerosol in spring in Helanshan area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (1): 82 - 87.
- Penner J E, Andreae M, Annegarn M. 2001. Aerosol, their direct and indirect effects [M]// Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Eds. New York: Cambridge University Press. 291 - 336.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294: 2119 - 2124.
- Sokolik I, Toom O B. 1996. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols [J]. Nature, 381: 681 - 683.
- Tegan I, Laci A, Fung I. 1996. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. Nature, 380: 419 - 422.
- 王宏, 石广玉, 王标, 等. 2007. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加热的影响 [J]. 大气科学, 31 (3): 515 - 525. Wang Hong, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2007. The impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the North Pacific Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 515 - 525.
- 王明星, 张仁健. 2001. 大气气溶胶研究的前沿问题. 气候与环境

- 研究, 6 (1): 119-124. Wang Mingxing, Zhang Renjian. 2001. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (1): 119-124.
- 王小玲, 翟盘茂. 2004. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. 气象学报, 62 (1): 96-103. Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2004. The spatial and temporal variations of spring dust storms in china and its associations with surface winds and sea level pressures [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (1): 96-103.
- 肖辉, Gregory R C. 1998. 东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估 [J]. 大气科学, 22 (3): 343-353. Xiao Hui, Gregory R C. 1998. A modeling evaluation of the impact of mineral aerosols on the particulate sulfate formation in East Asia [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (3): 343-353.
- 张莉, 丁一汇, 任国玉. 2005. 我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析. 应用气象学报, 16 (5): 583-592. Zhang Li, Ding Yihui, Ren Guoyu. 2005. Variation of dust weather and its climatic attribution analysis in Northern part of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 16 (5): 583-592.
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (24), 2272, doi: 10.1029/2003GL018206.
- Zhao Chunsheng, Dabu X, Li Ying. 2004. Relationship between climatic factors and dust storm frequency in Inner Mongolia of China [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L01103, doi:10.1029/2003GL018351.