王天舒，牛生杰. 2017. 内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与 PM10、能见度相关性分析 [J]. 大气科学, 41 (1): 121−131. Wang Tianshu, Niu Shengjie. 2017. Dust aerosol scattering coefficient under three types of sand storm in eastern Inner Mongolia in the spring and its correlations with PM10 and visibility [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 121−131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15289.

内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与 PM10、能见度相关性分析

王天舒[1] 牛生杰[1,2]

1 南京信息工程大学大气物理学院，南京 210044
2 江苏省大气环境与气象装备协同创新中心，南京 210044

摘 要 利用内蒙古东胜、锡林浩特两站 2004～2006 年春季（3～5 月）积分浊度计的观测资料，结合同期 PM10 质量浓度、大气能见度等资料，分析了背景、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴等不同强度沙尘天气气溶胶散射系数的分布特征，讨论了不同强度沙尘天气过程中散射系数、PM10、能见度的日变化规律，以及不同强度沙尘天气过程中散射系数与 PM10 质量浓度、散射系数与能见度的相关关系。结果表明：散射系数能够很好地反映沙尘天气强度；随沙尘天气强度增强，散射系数日变化从双峰型向单峰型转变；沙尘天气强度较弱时，PM10 与散射系数的日变化不相似，强沙尘暴过程中 PM10 与散射系数的日变化有一定的相似性；能见度与散射系数日变化趋势相反；散射系数与 PM10 质量浓度呈正相关性，沙尘天气越强，相关性越好，背景、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴相关系数分别为 0.201、0.809、0.898 和 0.953；散射系数与能见度有指数相关关系，随沙尘天气强度增强二者相关性逐渐增强，背景、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴相关系数分别为−0.773、−0.870、−0.918 和−0.940。

关键词 沙尘天气强度 散射系数 PM10 质量浓度 能见度
文章编号 1006-9895(2017)01-0121-11 **中图分类号** P427.2 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15289

Dust Aerosol Scattering Coefficient under Three Types of Sand Storm in Eastern Inner Mongolia in the Spring and Its Correlations with PM10 and Visibility

WANG Tianshu[1] and NIU Shengjie[1,2]

1 *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044
2 *Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing* 210044

Abstract Dust aerosol scattering coefficient was measured using an integrating nephelometer deployed at the Xilinhot observatory and Dongsheng observatory in the spring (March to May) of 2004 to 2006. The mass concentration of PM10 and the visibility were also measured at the same time. We analyzed the variation features of the dust aerosol scattering coefficient in terms of atmospheric background, sand-blowing, dust storm, and strong dust storm. We discussed the

收稿日期 2015-10-19；**网络预出版日期** 2016-03-15
作者简介 王天舒，女，1992 年出生，硕士研究生，主要从事云雾降水物理学研究。E-mail: wangts14@nuist.edu.cn
通讯作者 牛生杰，E-mail: niusj@nuist.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41375138，江苏高校优势学科建设工程 PAPD
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375138), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

万方数据

diurnal variation of the dust aerosol scattering coefficient, the mass concentration of PM10 and the visibility under different intensities of sand storm. We also analyzed the correlation coefficient between the scattering coefficient and the mass concentration of PM10, and the correlation coefficient between the scattering coefficient and the visibility under different intensities of sand storm. Results show that the scattering coefficient can well reflect the intensity of sand and dust weathers. With the increase in dust storm intensity, the diurnal variation of the scattering coefficient varies from a bimodal distribution to a unimodal distribution. When the dust weather intensity is relatively weak, diurnal variations of the scattering coefficient and PM10 concentration are different. However, there exist certain similarities between their diurnal variations when a strong dust storm occurs. The diurnal variations of the scattering coefficient and the visibility are opposite to each other. There is a positive correlation between the scattering coefficient and the mass concentration of PM10, and the correlation enhances with increases in the dust weather intensity. The correlation coefficients under conditions of atmospheric background, sand-blowing, dust storm, and strong dust storm are 0.201, 0.809, 0.898, and 0.953, respectively. There is an exponential relation between the scattering coefficient and the visibility and the correlation between them enhances with increases in the dust weather intensity. Their correlation coefficients under conditions of atmospheric background, sand-blowing, dust storm, and strong dust storm are −0.773, −0.870, −0.918 and −0.940, respectively.

Keywords Intensity of dust weather, Scattering coefficient, Mass concentration of PM10, Visibility

1 引言

沙尘天气按照不同强度可分为强沙尘暴、沙尘暴、扬沙和浮尘，不同类型沙尘天气光学特征有较大差别。章秋英等（2008）研究指出浮尘、扬沙、沙尘暴天气下散射系数平均值分别为 452.50 Mm^{-1}、628.77 Mm^{-1}、1640.64 Mm^{-1}。杨莲梅等（2006）研究表明晴空、扬沙和浮尘、弱沙尘暴、强沙尘暴天气下散射系数平均值分别为 44.0 Mm^{-1}、353.9 Mm^{-1}、2215.8 Mm^{-1}、6097.1 Mm^{-1}。刘晓云和岳平（2007）利用敦煌地区 2001 年春季 CE-38 太阳光度计资料，反演了晴空、浮尘、扬沙、沙尘暴天气下大气气溶胶光学厚度，结果表明，浮尘天气下大气气溶胶光学厚度约为晴空天气下的 2～3 倍，扬沙天气下大气气溶胶光学厚度又是浮尘天气下的 2～3 倍。李霞等（2005）研究表明，晴空、浮尘、扬沙、沙尘暴天气下，气溶胶光学厚度依次增加，并提出了两种划分沙尘天气强度的标准。我国沙尘暴 4～6 月主要发生在北方干旱半干旱地区（宋连春等，2004），内蒙古自治区是影响我国沙尘天气的主要沙源地之一。沈建国等（2007）研究了内蒙古境内额济纳旗等 5 个站的大气气溶胶光学厚度，结果表明其时空分布与沙尘天气本身有很好的一致性。韩晶晶等（2006）的研究指出，内蒙古中西部地区是中国内陆地区气溶胶光学厚度分布的 4 个高值区之一，内蒙古中东部地区气溶胶光学厚度值随季节变化明显。

散射系数是描述气溶胶光学特征的参量之一，目前已有许多文献关注散射系数（孙金辉等，1986；关虹等，1992；Eidels-Dubovoi，2002；刘金涛等，2003；Shendrikar and Steinmetz，2003；柯宗建和汤洁，2007；陈宇等，2009；苏晨等，2009；陈景华等，2011；Zhao et al.，2011；范学花等，2013），并对沙尘源区气溶胶散射系数进行了观测研究，得出了许多重要的研究结果。如陆辉等（2010）利用 2004 年塔中气象站积分浊度计资料，研究了塔克拉玛干沙漠腹地气溶胶散射系数变化特征；章秋英等（2008）利用锡林浩特 2005 年 1 月至 9 月积分浊度计资料，分析了半干旱地区气溶胶散射系数的变化规律；Yan（2007）利用 2004 年敦煌和东胜两站气溶胶散射系数资料，研究了散射系数季节变化特征；延昊等（2008）研究了 2005 年张北、民勤散射系数、PM10、质量散射效率的季节分布特征及各季散射系数与 PM10 的相关性；彭艳梅等（2014）利用 2010 年乌鲁木齐和塔中散射系数资料对比了沙漠和城市气溶胶散射系数变化特征。

不同强度沙尘天气散射系数有较大不同（杨莲梅等，2006），但是已有的关于沙尘气溶胶散射系数的研究尚存在不足之处：一是所用样本量较少，有的研究只用了一个月的资料；二是没有对不同强度的沙尘资料进行分类，研究其散射特性。本文利用位于内蒙古东部的东胜与锡林浩特 2004～2006 年春季（3～5 月）散射系数资料，结合同期 PM10 质量浓度、大气能见度等观测资料，研究了内蒙古东部春季背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程中沙尘气溶胶散射系数变化特征，并对比了四种天

万方数据

气下散射系数、PM10、能见度的日变化规律，研究了四种天气下 PM10、能见度与散射系数之间的相关关系。本研究工作对大气环境质量预报具有指示意义，为进一步研究沙尘气溶胶光学特性和气候效应积累了资料。

2 观测地点及仪器

观测地点分别为位于郊区的内蒙古鄂尔多斯气象局和锡林浩特观象台。东胜位于鄂尔多斯高原，属于温带大陆性气候，四季分明。降水多集中于 7 月至 8 月，干旱问题严重（周悦等，2011）。锡林浩特主要受季风和蒙古气压的影响，具有风多、风大的气候特征，特别是春季，由于极地干冷空气侵袭频繁，导致沙尘天气多发（章秋英等，2009）。

本文所用散射系数、PM10 及能见度资料分别由中国气象局沙尘暴监测预报系统布设的 M9003 积分浊度计、TEOM1400a 型大气粒子自动检测仪、FD12 型能见度仪观测得到，经过统一定标，性能稳定，所得资料连续可靠。三种仪器的采样频率均为 5 min，M9003 型积分式浊度计的测量波长为 525 nm，检测范围为 0～2000 Mm^{-1}，数据记录保留两位小数（章秋英等，2008；陆辉等，2010），观测时段为 2004～2006 年 3～5 月。

3 2004～2006 年春季散射系数、总悬浮颗粒物（TSP）、干沉降逐日变化

图 1 为东胜与锡林浩特 2004～2006 年春季（3～5 月）散射系数日平均值分布。2004 年 3 月 26～28 日、2005 年 4 月 27～28 日、2006 年 4 月 16～18 日的强沙尘暴过程等都在图 1 上有所体现，强沙尘暴过程发生时散射系数明显增大。东胜、锡林浩特三年春季最大值均出现在 2004 年，分别为 782.5 Mm^{-1}（3 月 9 日）、898.0 Mm^{-1}（3 月 27 日）。东胜 2004～2006 年春季散射系数的平均值分别为 197.9 Mm^{-1}、56.4 Mm^{-1}、163.8 Mm^{-1}，标准差分别为 209.6 Mm^{-1}、64.9 Mm^{-1}、173.7 Mm^{-1}，中值分别为 145.2 Mm^{-1}、38.7 Mm^{-1}、115.7 Mm^{-1}。锡林浩特三年春季散射系数的平均值分别为 92.9 Mm^{-1}、130.2 Mm^{-1}、135.8 Mm^{-1}，标准差分别为 225.3 Mm^{-1}、153.6 Mm^{-1}、195.1 Mm^{-1}，中值分别为 53.7 Mm^{-1}、88.3 Mm^{-1}、83.6 Mm^{-1}。

图 2 为东胜 2006 年春季（3～5 月）PM10 日均值、总悬浮颗粒物（TSP）日均值、干沉降（每 10 日测一次沉降总量）分布，PM10 与 TSP 同步增大或减小，二者呈正相关性，这与延昊等（2006）的研究结果一致。3 月 9～12 日、26～28 日和 4 月 5～7 日、9～11 日、16～18 日都出现了强沙尘暴过程，在此期间 PM10、TSP、干沉降有明显的高值：3 月 9 日、26 日和 4 月 6 日、10 日、16 日 TSP 日平均值分别为 6831.8 μg m^{-3}、1657.3 μg m^{-3}、1506.2 μg m^{-3}、3287.2 μg m^{-3}、9134.9 μg m^{-3}；对应 PM10 日平均值分别为 3541.3 μg m^{-3}、481.0 μg m^{-3}、468.0 μg m^{-3}、1795.0 μg m^{-3}、2097.6 μg m^{-3}；3 月 1 日至 11 日的降尘量为 101.7 g m^{-2}，4 月 11 日至 21 日的降尘量为 189.9 g m^{-2}。扬沙、沙尘暴和强沙尘暴天气过程 TSP 均值分别为 793.3 μg m^{-3}、811.8 μg m^{-3}、2451.5 μg m^{-3}，与已有研究结果中各强度沙尘天气 TSP 量级一致（牛生杰等, 2001a, 2001b, 2001c; 刘立超等, 2005）。

4 不同强度沙尘天气散射系数、PM10、能见度日变化

2004～2006 年中国北方沙尘天气频繁，2004 年全国共出现 18 次沙尘天气过程（扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程分别出现 12 次、5 次、1 次）。其中强度最强的是 3 月 26～28 日的强沙尘暴天气过程（矫梅燕，2005）。此次过程中，锡林浩特 3 月 27 日 15:00（北京时，下同）出现扬沙，15:15 转为沙尘暴，3 月 28 日 20:00 出现了沙尘暴，21:10 转为扬沙；东胜 3 月 27、28 日均出现了扬沙。2005 年的 11 次沙尘天气过程中（扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程分别出现 6 次、4 次、1 次），强度最强的是 4 月 27～28 日的强沙尘暴天气过程（矫梅燕，2007）。此次过程中，锡林浩特 4 月 27 日 13:47 出现了扬沙，15:57 转为沙尘暴，4 月 28 日 20:00 出现沙尘暴，20:35 转为扬沙。2006 年的 17 次沙尘天气过程中（扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程分别出现 6 次、6 次、5 次），范围最大的是 3 月 9～12 日的强沙尘暴天气过程（矫梅燕，2008）。此次过程中锡林浩特 3 月 9 日 15:56 出现扬沙，19:53 转为沙尘暴，3 月 10 日 20:00 出现沙尘暴，3 月 11 日 01:43 转为扬沙；东胜 3 月 9 日 12:12 出现扬沙，16:13 转为沙尘暴，17:53 再分转为扬沙。

为研究不同强度沙尘天气散射系数、PM10 质量浓度、能见度的日变化规律，在讨论中将 2004～2006 年春季（3～5 月）背景大气、扬沙、沙尘暴、

万方数据

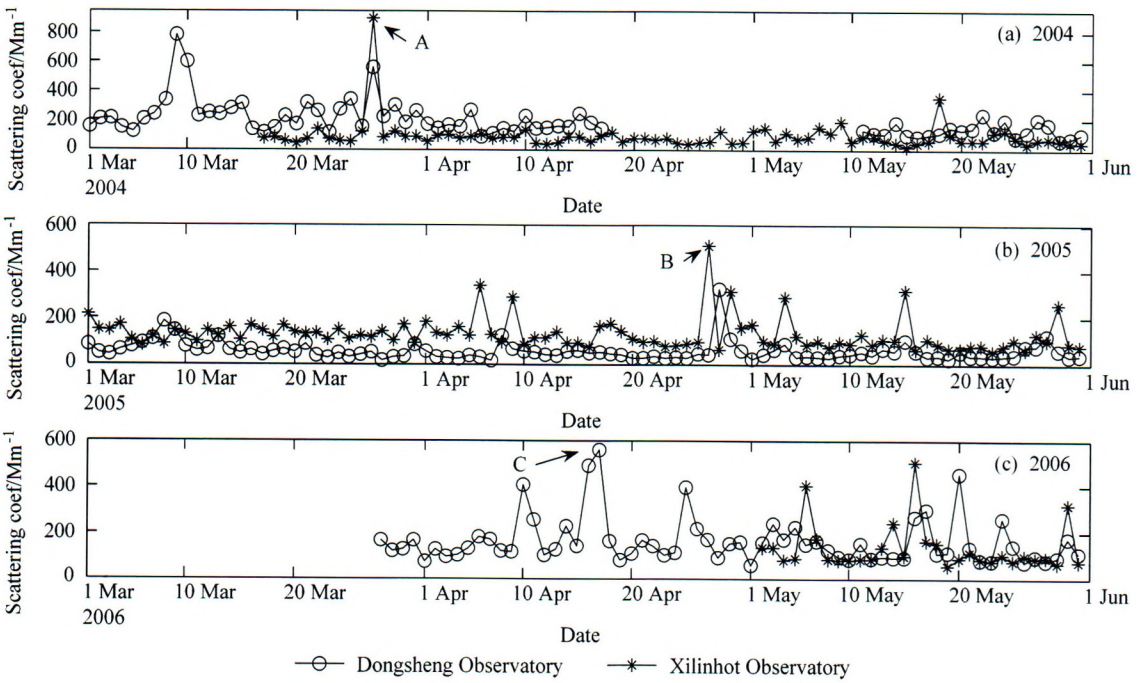

图 1 （a）2004 年、（b）2005 年和（c）2006 年春季散射系数逐日变化。图中 A、B、C 分别表示 2004 年 3 月 26～28 日、2005 年 4 月 27～28 日和 2006 年 4 月 16～18 日强沙尘暴

Fig. 1 Daily variations of the aerosol scattering coefficient in the springs of (a) 2004, (b) 2005, and (c) 2006. A, B, C represent strong dust storm during 26–28 March, 2004, 27–28 April, 2005, and 16–18 April, 2006, respectively

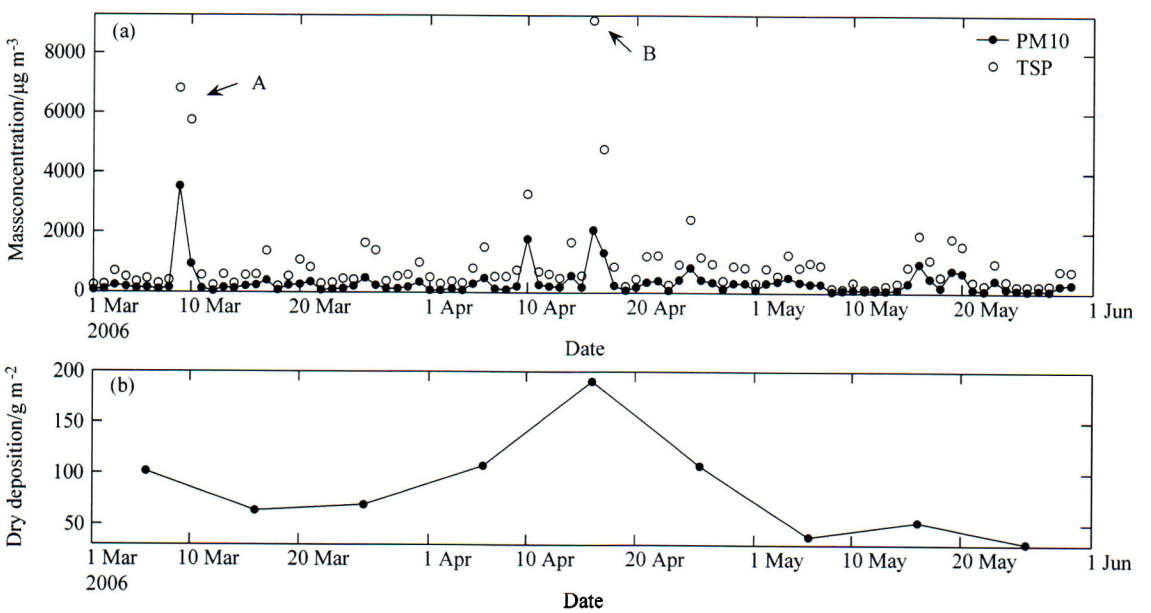

图 2 东胜站 2006 年春季（a）PM10 质量浓度、总悬浮颗粒物（TSP）和（b）干沉降变化规律。（a）中 A、B 分别表示 2006 年 3 月 9～12 日、2006 年 4 月 16～18 日强沙尘暴

Fig. 2 Temporal variations of the mass concentration of (a) PM10, total suspended particle (TSP), and (b) dry deposition during the spring of 2006 at Dongsheng observatory. A and B represent strong dust storm during 9–12 March, 2006, and 16–18 April, 2006, respectively

强沙尘暴天气过程的样本进行分类，并取逐时平均值。强沙尘暴样本峰值较大，为便于与其他几类样本比较，图 3、图 4 采用对数坐标。

4.1 锡林浩特不同强度沙尘天气散射系数、PM10、能见度日变化

图 3a 为锡林浩特背景大气、扬沙、沙尘

万方数据

暴、强沙尘暴过程中散射系数日变化。背景大气散射系数日变化呈双峰分布，峰值分别为 07:30 的 190.5 Mm^{-1} 和 19:30 的 154.9 Mm^{-1}。双峰型日变化与章秋英等（2008）的研究结果一致。锡林浩特地区昼夜温差大，清晨日出后，太阳辐射加热大气，此时地面还没有开始加热，近地面层形成逆温层，不利于气溶胶粒子的扩散，散射系数出现峰值。午后太阳辐射强，近地层湍流交换作用强，有利于气溶胶粒子扩散，散射系数出现谷值。入夜后，地面开始冷却，近地面层形成逆温层，散射系数再次出现峰值。此外，人类活动也影响着散射系数的变化，峰值出现的时间正是上下班高峰期，汽车尾气排放、烹饪废气排放等因素也促进了散射系数峰值的产生。扬沙天气过程中，散射系数日变化幅度与背景大气相比较小，近似双峰分布，峰值为 07:30 的 162.1 Mm^{-1} 和 18:30 的 175.7 Mm^{-1}。沙尘暴天气过程中，散射系数早晨的峰值减弱，趋向于单峰分布，峰值出现在 20:30，为 253.6 Mm^{-1}。强沙尘暴天气过程中，散射系数早晨的峰值进一步减弱，午后到傍晚之间峰值大幅加强，达到 1300.7 Mm^{-1}，趋向单峰分布。沙尘暴发生的优势频率在午后到傍晚时间段内（牛生杰等，2000），因此强沙尘暴过程中午后到傍晚时段内散射系数有加强的单峰。

图 3b 为锡林浩特背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程中 PM10 质量浓度日变化。背景大气 PM10 在 16:30 取得最大值，为 233.5 $\mu g\ m^{-3}$，与散射系数相比 PM10 在午后没有谷值。散射系数为单位体积中气溶胶粒子的散射截面之和，PM10 为单位体积中粒径大于 10 μm 的气溶胶粒子质量之和。假设气溶胶为典型的球状体，单个粒子的散射系数和质量应分别与气溶胶粒径的平方、3 次方成正比，即 PM10 更依赖大粒子的数量变化。半干旱区午后湍流较强，地面易起沙造成大粒子增多，PM10 质量浓度无明显下降。但此时粒径小的气溶胶易被湍流垂直输送，气溶胶总量减少造成地面散射系数的低值。扬沙天气过程中，PM10 质量浓度在 15:30 取得最大值，为 472.9 $\mu g\ m^{-3}$。沙尘暴天气过程中，PM10 质量浓度峰值在 14:30 取得，为 835.9 $\mu g\ m^{-3}$。强沙尘暴天气过程中，PM10 质量浓度与散射系数的日变化相似，傍晚（17:30）峰值大幅加强，达到 1924.0 $\mu g\ m^{-3}$。由于强沙尘暴过程中，散射系数与 PM10 质量浓度的相关性较强（见 5.1 节），二者日变化相似；沙尘强度较弱时，散射系数与 PM10 质量浓度的相关性较弱（见 5.1 节），二者的日变化不相似。

图 3c 能见度与散射系数的变化相反，散射系数出现峰值的时间段内，能见度有相应的谷值，出现谷值的时间点与韩永等（2008）的研究结果一致。由柯喜密什能见度（Koschmieder）公式（盛裴轩等，2003），能见度与大气消光系数呈负相关性，大气消光系数为大气散射系数与吸收系数之和，因此能见度与散射系数呈反向变化。如受蒙古气旋和冷锋影响，锡林浩特 2006 年 5 月 16 日 16:25 至 17:40 出现沙尘暴。日最大风速 15.0 $m\ s^{-1}$，强风将地面大量沙尘吹起，散射系数在 17:00 增至 2583.3 Mm^{-1}，相反能见度在 16:54 减小至 982 m。

4.2 东胜不同强度沙尘天气散射系数、PM10 日变化

图 4 为东胜站不同强度沙尘天气散射系数、PM10 质量浓度日变化（东胜站无能见度数据）。与锡林浩特类似，随沙尘强度增强，东胜站散射系数日变化由双峰型向单峰型转变，傍晚日落后的峰值逐渐增强（图 4a）。但锡林浩特散射系数日变化早晨的峰值随沙尘天气强度增强而减弱，而东胜站早晨的峰值随沙尘天气强度增强而增强（除背景大气大于扬沙外）。锡林浩特位于锡林郭勒草原中部，属于典型的草原地貌（周悦等，2011）；而东胜站位于毛乌素沙地的延伸地带，风蚀沙化严重。风蚀起沙的临界摩擦速度与植被覆盖度和土壤水分含量有关（申彦波等，2005），两地下垫面的不同导致起沙的时间和强度不同，从而导致散射系数变化规律不同。锡林浩特早晨散射系数峰值的变化规律说明当地早晨主要受污染性气溶胶的影响，沙尘气溶胶的影响小：背景大气早晨污染性气溶胶总量大，散射系数峰值较高；随沙尘天气强度增强，湍流强度增强（沈建国等，2008），粒径小的污染性粒子易被湍流垂直输送，早晨散射系数峰值下降。而东胜站早晨的散射系数峰值随沙尘天气强度增强而增大，明显受沙尘天气影响，说明东胜站早晨也有沙尘气溶胶产生。

PM10 质量浓度随沙尘天气强度增强而增大，与锡林浩特类似，四种天气 PM10 最大值都出现在午后到傍晚时段内（图 4b）。但与锡林浩特相比，东胜站 PM10 在一天内变化幅度较小。下垫面是影响内蒙古 PM10 质量浓度的重要因素（邱玉珺等，2009），两地下垫面不同造成 PM10 质量浓度日变化的差异。同样，沙尘强度较弱时，PM10 与

万方数据

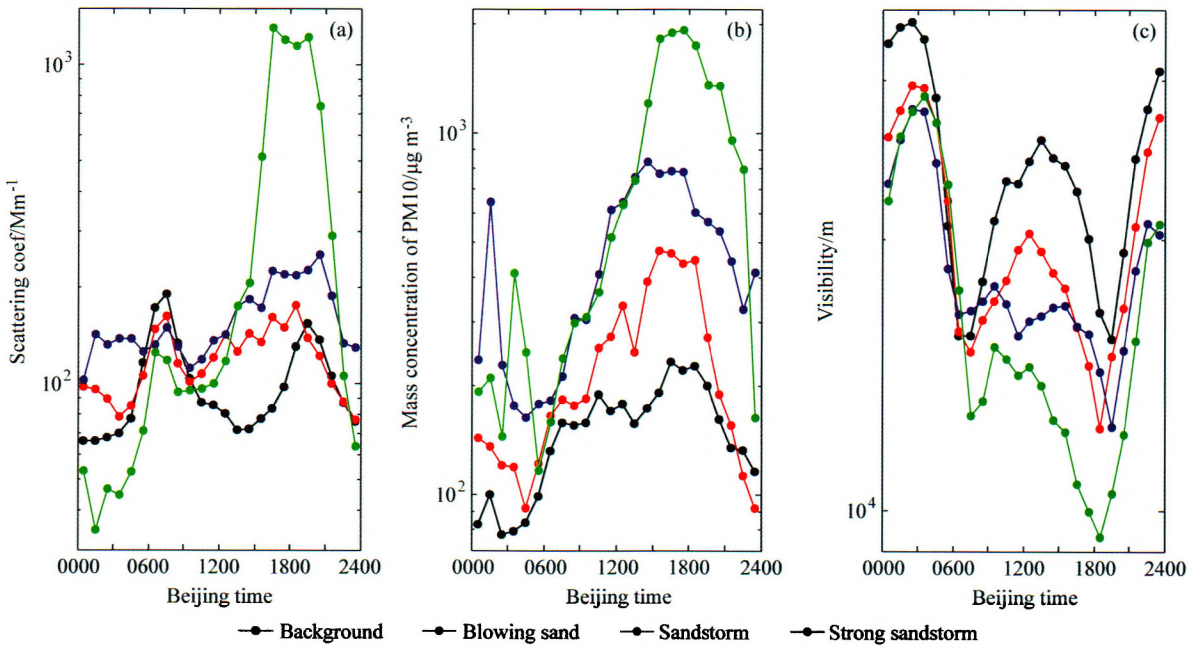

图 3 锡林浩特站（a）散射系数、（b）PM10 质量浓度和（c）能见度的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of (a) the aerosol scattering coefficient, (b) the mass concentration of PM10, and (c) the visibility at Xilinhot observatory

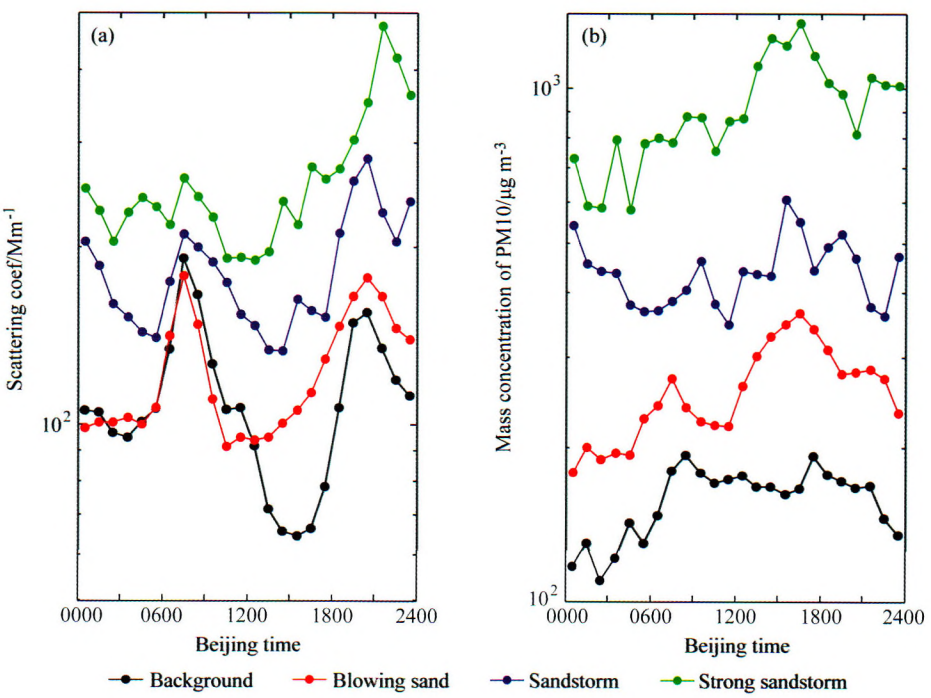

图 4 东胜站（a）散射系数、（b）PM10 质量浓度的日变化

Fig. 4 Diurnal variations of (a) the aerosol scattering coefficient and (b) the mass concentration of PM10 at Dongsheng observatory

散射系数的日变化不相似，背景大气 PM10 在午后没有谷值；强沙尘暴天气过程中，二者的日变化才有一定的相似性。

综上所述，随着沙尘天气强度加强，散射系数日变化从双峰型向单峰型转变，午后到傍晚峰值逐渐加强，PM10 日变化峰值不断增加。沙尘天气强度较弱时，PM10 与散射系数的日变化不相似，如背景大气 PM10 没有在午后取得相应的谷值，强沙尘暴过程中 PM10 与散射系数的日变化有一定相似性。能见度与散射系数日变化趋势相

万方数据

反，散射系数出现峰值的时间段内能见度有相应的谷值。

5 散射系数与 PM10、能见度的相关关系

5.1 散射系数与 PM10 的相关关系

图 5 为东胜与锡林浩特 2004～2006 年春季（3～5 月）PM10 质量浓度与散射系数小时平均值散点图，本文用线性函数来拟合它们之间的关系。四种天气下 PM10 与散射系数均呈正相关性，并通过显著性检验，这与已有研究结果一致（柯宗建等，2004；章秋英等，2008；陆辉等，2010）。

东胜沙尘暴过程中 PM10 与散射系数的相关系数、拟合函数斜率均最大，分别为 0.823、0.306。扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程中 PM10 与散射系数的相关性均大于背景大气（相关系数 0.419）。相关系数在一定程度上能够反映气溶胶类型（延昊等，2008），影响当地大气环境的主要有沙尘性气溶胶和污染性气溶胶，背景大气中两种类型气溶胶的影响并重。由 Mie 散射理论，粒径在 0.05～1.5 μm 的粒子对散射的贡献最大，而粒径大于 1.5 μm 的粒子对质量浓度贡献较大（陆辉等，2010）。当粗粒子

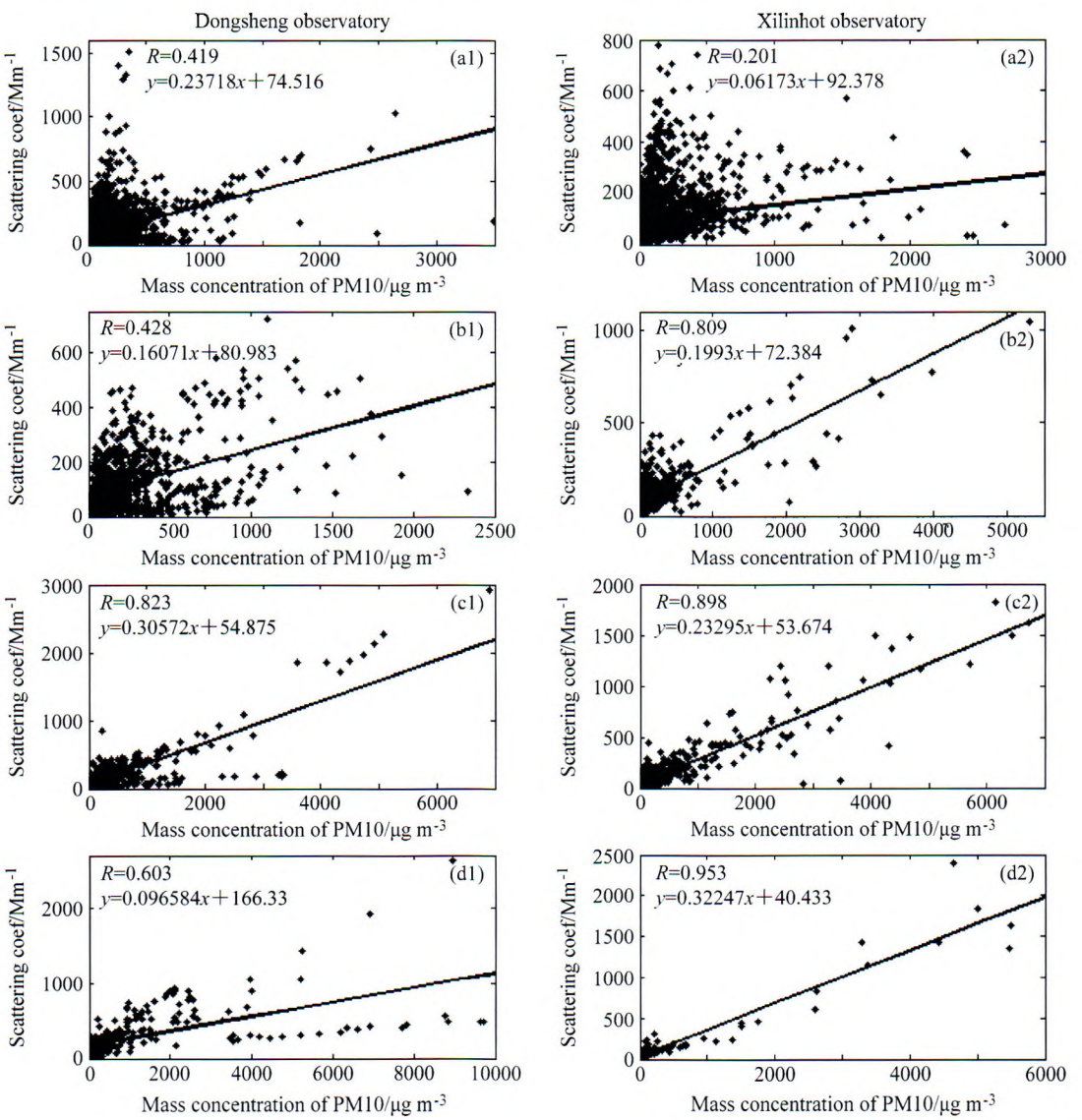

图 5 四种天气下东胜站（左列）、锡林浩特站（右列）气溶胶散射系数与 PM10 质量浓度的相关关系：（a1、a2）背景大气；（b1、b2）扬沙天气过程；（c1、c2）沙尘暴天气过程；（d1、d2）强沙尘暴天气过程

Fig. 5 The relationship between the aerosol scattering coefficient and the mass concentration of PM10 at Dongsheng observatory (left column) and Xilinhot observatory (right column): (a1, a2) Background atmosphere, (b1, b2) sand blowing weather process, (c1, c2) dust storm weather process, (d1, d2) strong dust storm weather process

万方数据

增多时，质量浓度变化较大，散射系数的变化相对不剧烈；反之，当细粒子增多时，散射系数随之增大，而质量浓度的变化相对不剧烈（柯宗建等，2004）。沙尘性和污染性两种类型气溶胶共同作用时，气溶胶粒径分布更为复杂，散射系数与 PM10 质量浓度在一定情况下变化不同步，相关系数较低。沙尘天气出现时，沙尘性气溶胶的影响占主要地位，影响类型比较单一，PM10 与散射系数的相关性较好。

锡林浩特背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴天气过程中相关系数分别为 0.201、0.809、0.898、0.953，不仅显示出沙尘天气过程中 PM10 与散射系数的相关性大于背景大气，而且表现出明显的规律性：随着沙尘天气强度增强，相关系数逐渐增大。沙尘天气出现时，沙尘气溶胶的影响占主要地位，影响类型较单一，并且沙尘强度越强，沙尘性气溶胶的影响越显著，PM10 质量浓度与散射系数的相关性越好。

5.2 散射系数与能见度的相关关系

浊度计的工作原理是控制一定的温度、湿度等条件，测量大气气溶胶的散射系数。前向散射式能见度仪测量的是前向某个角度上的散射系数，再根据此角度上的散射系数和气溶胶散射系数的比值算出大气气溶胶散射系数，加上空气分子的散射，再转化为能见度，因此测得的能见度和散射系数有一定的相关性（陆辉等，2010）。能见度受大气散射和吸收作用影响，沙尘天气出现时，主要以沙尘性气溶胶为主，水汽以及其他粒子相对较少，沙尘粒子的散射作用是影响能见度的主要因素（章秋英等，2008）；非沙尘天气时，能见度受沙尘粒子和其他污染性气溶胶的多重影响。

图 6 为锡林浩特 2004～2006 年春季（3～5 月）散射系数与能见度小时平均值的散点图，通常用指数函数来拟合二者之间的关系（杨莲梅，2006；章秋英等，2008；陆辉等，2010）。背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴天气过程中相关系数分别为 −0.773、−0.870、−0.918、−0.940。各个等级的沙尘天气中二者均呈负相关性，并通过显著性检验，随沙尘天气过程强度增强，散射系数与能见度的相关性逐渐增强。沙尘天气强度越强，沙尘粒子散射作用对能见度的影响越显著，散射系数与能见度的相关性也越强。

6 结论

（1）不同强度沙尘天气散射系数有较大差异。

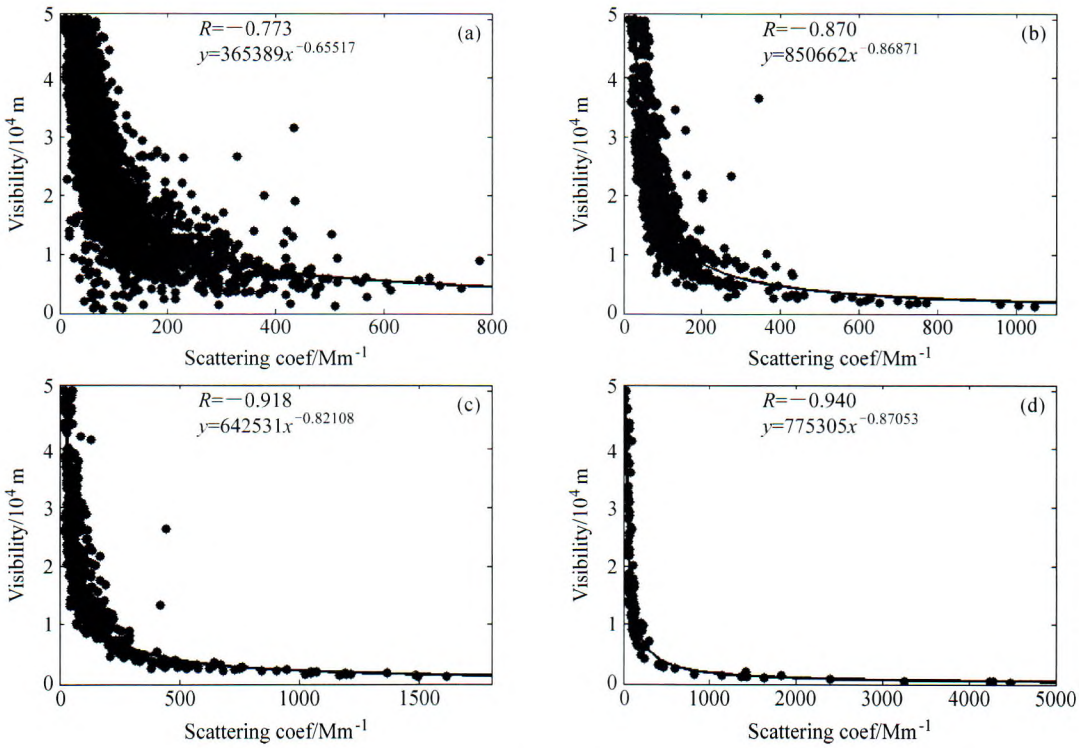

图 6 锡林浩特散射系数与能见度的相关关系：（a）背景大气；（b）扬沙天气过程；（c）沙尘暴天气过程；（d）强沙尘暴天气过程

Fig. 6 The relationship between the aerosol scattering coefficient and visibility at Xilinhot observatory: (a) Background atmosphere, (b) sand blowing weather process, (c) dust storm weather process, (d) strong dust storm weather process

万方数据

东胜背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴过程中散射系数平均值分别为 110.8 Mm^{-1}、122.7 Mm^{-1}、183.1 Mm^{-1}、262.5 Mm^{-1}；锡林浩特四种天气下散射系数均值分别为 100.8 Mm^{-1}、119.8 Mm^{-1}、160.0 Mm^{-1}、335.5 Mm^{-1}。

（2）随着沙尘天气过程强度增强，散射系数日变化从双峰型向单峰型转变，午后到傍晚的峰值逐渐加强，PM10 日变化峰值不断增加；沙尘强度较弱时，PM10 与散射系数的日变化不相似，强沙尘暴过程中 PM10 与散射系数的日变化有一定的相似性；能见度与散射系数的日变化趋势相反，散射系数出现峰值的时间段内，能见度有相应的谷值。

（3）散射系数与 PM10 质量浓度呈正相关性，沙尘天气过程中二者相关系数大于背景大气，其中锡林浩特散射系数与 PM10 质量浓度之间的相关性随沙尘强度增加而增强。东胜背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴天气过程中相关系数分别为 0.419、0.428、0.823、0.603。锡林浩特背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴天气过程中相关系数分别为 0.201、0.809、0.898、0.953。

（4）散射系数与能见度有指数相关关系，二者的相关性随沙尘天气强度增加而逐渐增强。背景大气、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴天气过程中相关系数分别为−0.773、−0.870、−0.918、−0.940。

参考文献（References）

陈景华, 银燕, 林振毅, 等. 2011. 黄山顶大气气溶胶吸收和散射特性观测分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 641–648. Chen Jinghua, Yin Yan, Lin Zhenyi, et al. 2011. An observational study of aerosol optical properties at the top of Huangshan mountains [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 641–648, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.10.

陈宇, 银燕, 钱凌, 等. 2009. 南京北郊 2007 年 10～12 月大气气溶胶吸收和散射特性的观测 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 613–620. Chen Yu, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2009. Observation of the absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols in the north suburb of Nanjing from October to December 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 613–620, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.06.04.

Eidels-Dubovoi S. 2002. Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City [J]. Sci. Total Environ., 287 (3): 213- 220, doi:10.1016/S0048-9697(01)00983-4.

范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 2013. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 477–498. Fan Xuehua, Chen Hongbin, Xia Xiang'ao. 2013. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 477–498, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12316.

关虹, 吕达仁, 吴北婴. 1992. 用曙暮光时的天光光强反演平流层气溶胶散射系数廓线 [J]. 大气科学, 16 (2): 216–227. Guan Hong, Lü Daren, Wu Beiying. 1992. Retrieval of the profile of stratospheric aerosols from the intensity of skylight during twilight periods [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (2): 216–227, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.02.10.

韩晶晶, 王式功, 祈斌, 等. 2006. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系 [J]. 中国沙漠, 26 (3): 362–369. Han Jingjing, Wang Shigong, Qi Bin, et al. 2006. Distribution of aerosol optical thickness and its relation with dusty weather in China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (3): 362–369, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2006.03.008.

韩永, 饶瑞中, 王英俭. 2008. 基于散射法原理的能见度及气溶胶消光特性测量分析 [J]. 红外与激光工程, 37 (4): 663–666. Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian. 2008. Measurement and analysis of atmospheric visibility and aerosol extinction characteristics based on scattering statistical [J]. Infrared and Laser Engineering (in Chinese), 37 (4): 663–666, doi:10.3969/j.issn.1007-2276.2008.04.024.

矫梅燕. 2005. 沙尘天气年鉴 2004 年 [M]. 北京: 气象出版社. Jiao Meiyan. 2005. Sand–Dust Weather Almanac 2004 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

矫梅燕. 2007. 沙尘天气年鉴 2005 年 [M]. 北京: 气象出版社. Jiao Meiyan. 2007. Sand–Dust Weather Almanac 2005 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

矫梅燕. 2008. 沙尘天气年鉴 2006 年 [M]. 北京: 气象出版社. Jiao Meiyan. 2008. Sand–Dust Weather Almanac 2006 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

柯宗建, 汤洁, 王炳忠, 等. 2004. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析 [J]. 气象科技, 32 (4): 258–262. Ke Zongjian, Tang Jie, Wang Bingzhong, et al. 2004. Primary analysis of application results of integrating nephelometers in dust storm monitoring network experiment [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 32 (4): 258–262, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2004.04.013.

柯宗建, 汤洁. 2007. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征 [J]. 大气科学, 31 (3): 553–559. Ke Zongjian, Tang Jie. 2007. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 553–559, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.03.19.

李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 2005. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究 [J]. 中国沙漠, 25 (4): 488–495. Li Xia, Hu Xiuqing, Cui Caixia, et al. 2005. Research on dust aerosol optical properties in south Tarim Basin and classification of different dusty weather in China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 25 (4): 488–495, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2005.04.006.

刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 2003. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 115–122. Liu Jintao, Chen Weibiao, Liu Zhishen. 2003. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 115–122, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.11.

万方数据

刘立超, 沈志宝, 王涛, 等. 2005. 敦煌地区沙尘气溶胶质量浓度的观测研究 [J]. 高原气象, 24 (5): 765–771. Liu Lichao, Shen Zhibao, Wang Tao, et al. 2005. Observation study on mass concentration of dust aerosols in Dunhuang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 765–771, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.05.016.

刘晓云, 岳平. 2007. 敦煌地区2001年春季气溶胶光学厚度反演 [J]. 干旱区研究, 24 (6): 790–795. Liu Xiaoyun, Yue Ping. 2007. Inversion of the optical depth of aerosol over the Dunhuang region in spring [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 24 (6): 790–795.

陆辉, 魏文寿, 刘明哲, 等. 2010. 塔克拉玛干沙漠腹地大气气溶胶散射特征研究 [J]. 中国沙漠, 30 (3): 660–667. Lu Hui, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. 2010. Aerosol scattering properties in the hinterland of Taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 30 (3): 660–667.

牛生杰, 孙继明, 桑建人. 2000. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势 [J]. 中国沙漠, 20 (1): 55–58. Niu Shengjie, Sun Jiming, Sang Jianren. 2000. Trend of sandstorm occurrence in Helan mountain area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 20 (1): 55–58, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2000.01.011.

牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 2001a. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析 [J]. 高原气象, 20 (1): 82–87. Niu Shengjie, Sun Jiming, Chen Yao, et al. 2001a. 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, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.014.

牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 2001b. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究 [J]. 大气科学, 25 (2): 243–252. Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. 2001b. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan mountain area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (2): 243–252, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.02.10.

牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 2001c. 贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究 [J]. 气象学报, 59 (2): 196–205. Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. 2001c. Observational studies on sandstorm in Helan mountainous area [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 59 (2): 196–205, doi:10.11676/qxxb2001.020.

彭艳梅, 何清, 刘新春, 等. 2014. 沙漠与城市气溶胶散射系数变化比较 [J]. 中国沙漠, 34 (5): 1363–1368. Peng Yanmei, He Qing, Liu Xinchun, et al. 2014. Comparison of aerosol scattering coefficients between desert and city [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 34 (5): 1363–1368, doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00361.

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.11.

沈建国, 李嘉鹏, 牛生杰, 等. 2007. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征 [J]. 中国沙漠, 27 (3): 495–501. Shen Jianguo, Li Jiapeng, Niu Shengjie, et al. 2007. Spatial–temporal distribution of aerosol optical properties during sand-dust weather processes [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 27 (3): 495–501, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2007.03.026.

沈建国, 孙照渤, 章秋英, 等. 2008. 干旱草原地区起沙通量的初步研究 [J]. 中国沙漠, 28 (6): 1045–1049. Shen Jianguo, Sun Zhaobo, Zhang Qiuying, et al. 2008. Preliminary study on dust emission rate over arid steppe area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28 (6): 1045–1049.

申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 2005. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征 [J]. 高原气象, 24 (4): 611–616. Shen Yanbo, Shen Zhibao, Du Mingyuan, et al. 2005. Factors affecting on dust emission by wind erosion and their variational characteristics [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 611–616, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.04.022.

Shendrikar A D, Steinmetz W K. 2003. Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate matter ($PM_{2.5}$) mass concentrations [J]. Atmos. Environ., 37 (9–10): 1383–1392, doi:10.1016/S1352-2310(02)01019-1.

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 451–452. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 451–452.

宋连春, 韩永翔, 张强, 等. 2004. 中国沙尘暴时空变化特征及日本、韩国黄沙的源地研究 [J]. 大气科学, 28 (6): 820–827. Song Lianchun, Han Yongxiang, Zhang Qiang, et al. 2004. Monthly temporal–spatial distribution of sandstorms in China as well as the origin of Kosa in Japan and Korea [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 820–827, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.02.

苏晨, 张小玲, 刘强, 等. 2009. 上甸子本底站气溶胶散射系数变化特征的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 537–545. Su Chen, Zhang Xiaoling, Liu Qiang, et al. 2009. Analysis of the characteristics of aerosol scattering coefficient at Shangdianzi background station [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 537–545, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.05.09.

孙金辉, 邱金桓, 夏其林, 等. 1986. 激光探测平流层气溶胶层后向散射系数分布 [J]. 大气科学, 10 (4): 431–436. Sun Jinhui, Qiu Jinhuan, Xia Qilin, et al. 1986. Vertical distribution of stratospheric aerosol backscattering ratio measured by lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 10 (4): 431–436, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1986.04.11.

Yan H. 2007. Aerosol scattering properties in northern China [J]. Atmos. Environ., 41 (32): 6916–6922, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.04.052.

延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 2006. 塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究 [J]. 中国沙漠, 26 (3): 389–393. Yan Hao, Jiao Meiyan, Bi Baogui, et al. 2006. Observation on sand-dust aerosol in center of Taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (3): 389–393, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2006.03.013.

延昊, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 2008. 中国北方气溶胶散射和 PM_{10} 浓度特征 [J]. 高原气象, 27 (4): 852–858. Yan Hao, Jiao Meiyan, Zhao Linna, et al. 2008. Characteristics of aerosol light-scattering and PM_{10} concentration in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 852–858.

杨莲梅, 张广兴, 魏文寿, 等. 2006. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析 [J]. 中国沙漠, 26 (3): 380–383. Yang Lianmei, Zhang

万方数据

Guangxing, Wei Wenshou, et al. 2006. Primary analysis on particle scattering coefficient in classification of sand-dust weather observation [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (3): 380–383, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2006.03.011.

章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2008. 半干旱区气溶胶散射特性研究 [J]. 中国沙漠, 28 (4): 755–761. Zhang Qiuying, Niu Shengjie, Shen Jianguo, et al. 2008. Observational study on aerosol scattering properties in semiarid area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28 (4): 755–761.

章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2009. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究 [J]. 中国沙漠, 29 (1): 183–188. Zhang Qiuying, Niu Shengjie, Shen Jianguo, et al. 2009. Observational study on aerosol absorption properties in winter and spring in semiarid area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 29 (1): 183–188.

Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, et al. 2011. Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. Atmos. Res., 101 (3): 799–808, doi:10.1016/j.atmosres.2011.05.010.

周悦, 牛生杰, 王存忠, 等. 2011. 半干旱区 PM10 质量浓度时空分布特征研究 [J]. 中国沙漠, 31 (3): 741–749. Zhou Yue, NIU Shengjie, Wang Cunzhong, et al. 2011. Spatio–temporal distribution of mass concentration of PM10 in semiarid area of China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 31 (3): 741–749.

万方数据