

北京2004年一次强沙尘暴 过程的辐射特征研究

胡波^{1,2} 王跃思¹ 何新星^{1,2} 刘广仁¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用2004年3月27~29日北京沙尘暴期间观测的辐射、气象以及气溶胶质量浓度的资料, 分析了该过程的地面辐射、气象要素以及气溶胶与辐射相互作用的变化特征。结果表明, 沙尘暴期间紫外辐射的衰减与可见光辐射强度衰减规律不一致。紫外衰减主要受到细粒子浓度影响, 同时紫外辐射占总辐射的比重与气溶胶中细粒子含量成负相关; 而可见光辐射强度衰减与总辐射衰减同步。辐射变化和气溶胶质量浓度观测结果均表明, 此次沙尘暴过程分为3个阶段, 即, 细粒子累积期、外地沙尘输入期和清除期。在沙尘暴期间地面一直维持一个低压、干冷的状态; 当过程结束后, 气压急剧增高, 并在一段时间内处于高压控制之下。

关键词 沙尘暴 太阳辐射 PM_{2.5} PM₁₀

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0265-10 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

Variation Properties of Earth's Surface Solar Radiation During a Strong Dust Storm in Beijing 2004

HU Bo, WANG Yue-Si, HE Xin-Xing, and LIU Guang-Ren

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract An intensive experiment on dust storm was carried out in Beijing from 27 to 29 March 2004. Based on the measured dataset, the characteristics of solar radiation, the variation trend of atmospheric aerosol concentration (PM₁₀ and PM_{2.5}), the variation characteristic of meteorological factors, and, the relations between aerosol and solar radiation in the dust storm period were analyzed. The results showed that the ratio of ultraviolet radiation to global radiation was different from the ratio of photosynthetically active radiation to global radiation. The ratio of ultraviolet radiation to global radiation is influenced by the concentration of fine aerosol. There is a negative correlation between fine aerosol concentration and the ratio of ultraviolet radiation to global radiation in the dust storm period. But the photosynthetically active radiation has the same variable trend as the global radiation during the dust storm period. The dust storm can be divided into three stages, namely, accumulation of local fine particle pollutants, arrival of external particle, and clear-out of dust. In the second stage the ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ decreased significantly. The air was cold and dry with low pressure during the dust storm. When the dust was cleared out the pressure increased rapidly.

Key words dust storm, solar radiation, PM_{2.5}, PM₁₀

收稿日期 2004-07-14 收到, 2005-03-21 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40222202

作者简介 胡波, 男, 1974 出生, 博士研究生, 主要从事大气辐射与大气气溶胶的研究。E-mail: hb@dq.cern.ac.cn

1 引言

沙尘暴是指强风从地面卷起大量沙尘,使水平能见度小于 1 km 的灾害性天气现象。对于瞬间风速大于 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、能见度小于 50 m 的强沙尘暴过程称为黑风暴^[1,2]。产生沙尘暴的原因除自然因素外,与近几十年来人类乱砍乱罚森林、过度开垦草地引起土地荒漠化直接有关。沙尘暴通过沙埋、大风袭击、污染大气等方式给农牧业和工矿业造成巨大损失,并严重破坏水电、交通、通讯等基础设施甚至还危害到人的生命。沙尘还是细菌传播的载体,中国及中亚地区的沙尘,可以长距离传输到东亚的韩国、日本,甚至远及太平洋西岸的美国和加拿大。因此,沙尘暴已成为区域性和全球性的环境问题^[3~6]。

沙尘暴不仅是一种严重的气象灾害,而且还是一个不容忽视的生态环境问题之一。近年来,沙尘暴问题已经逐渐成为国内外天气与气象学、大气物理与大气化学以及资源与环境生态学等领域的研究热点。许多学者对历史上发生的强沙尘暴个例进行了大量研究分析^[7~9],其内容包括沙尘源区、沙尘暴发生规律及其与天气过程的关系,沙尘气溶胶的粒度谱分布、光学特征、化学成分以及沙尘的长距离传输^[10,11]。张高英等^[12]研究了沙尘暴爆发的大尺度天气环流形势,提出强风、强热力不稳定和沙源是形成沙尘暴的主要条件,并指出了沙尘暴移动的主要路径。周秀骥等^[13]对 2000 年春季影响北京地区的沙尘暴过程进行了综合分析研究,揭示了沙尘暴天气的起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中的关键动力学问题。同时,王自发等^[11]对沙尘的起沙、输送等过程进行了数值模拟研究。但至今,沙尘暴的观测和研究仍有大量的问题有待解决。沙尘粒子的气候效应、环境效应等问题,直到最近才开始受到重视。

沙尘暴通过对太阳辐射的散射和吸收产生直接的气候效应,同时,沙尘粒子还作为云凝结核(CCN)影响云的形成、微物理特征、辐射特性以及降水,产生间接气候效应。这些辐射强迫存在很大的不确定性^[14],给沙尘气溶胶的辐射强迫研究带来了极大的困难。因此,需要大量地面观测研究来支持沙尘暴辐射效应的研究,但目前沙尘

暴期间地面辐射特征的观测研究还较少。

本文利用地面气象、辐射以及气溶胶质量观测资料,对 2004 年北京强沙尘暴过程的地表气象要素和太阳辐射的各分量特征进行分析,初步研究了沙尘暴期间地表太阳辐射的变化规律及地面气象要素的变化。这对沙尘暴的气候效应、环境效应及沙尘辐射强迫的研究无疑是有益的。

2 观测方法与资料处理

2.1 天气背景

2004 年 3 月 27 日北京发生了一次强沙尘天气过程,这次沙尘暴从 3 月 27 日傍晚开始,一直持续到 3 月 29 日。该沙尘暴是受东移蒙古气旋的影响,使我国西北中东部、华北北部、东北西部先后出现了沙尘天气,其中甘肃河西地区、内蒙古中西部出现了大范围区域性沙尘暴,内蒙古锡林浩特市甚至还出现了黑风暴。27 日晚 15 时(北京时间,下同)沙尘暴从内蒙古移入北京上空;29 日中午 12 时北京开始出现 6~7 级大风,产生局地扬沙,其与内蒙古输送来的沙尘粒子相混合,在北京上空形成更强的沙尘暴;29 日 17 时左右这次沙尘暴过程结束。

2.2 辐射观测方法与数据处理

为了捕捉沙尘暴爆发时以及整个沙尘暴过程的地面辐射变化特征,在地处北京的中国科学院大气物理研究所铁塔分部,对该过程进行了连续监测。采样点设在大气化学试验楼楼顶(相对高度 20 m)。气象要素使用 Milos520 (Vaisala, 芬兰)自动气象站观测,其中温度精度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度精度为 $\pm 2\%$ 。自动站辐射观测使用的仪器为 Kipp&zionne (荷兰)生产的辐射表,辐射表的各项指标见表 1。而直接辐射与散射辐射表(锦州 322 厂产品)安装在太阳自动跟踪器上。气象要素和辐射数据由 DM520 数据采集器每分钟采集一次。可见光辐射是由光合有效辐射观测值通过换算得到,在换算时采用 4.57 的换算因子^[15]。直接辐射与散射辐射数据由研华(台湾)数据采集器采集,采集频率为 1 min。选取正点时刻的瞬时值进行分析。

2.3 气溶胶观测方法与数据处理

气溶胶 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 质量浓度采用

表 1 辐射表参数
Table 1 The prams of Pyranometers

辐射类型 Radiation type	表型 Pyranometer model	准确度 Sensitivity
总辐射 (0.3~3 μm) Global radiation	CM21	±1%
紫外辐射 (0.29~0.4 μm) Ultraviolet radiation	CUV3	±5%
可见光辐射 (0.4~0.7 μm) Photosynthetically active radiation	Par _ Lite	±2%
净辐射 (0.2~100 μm) Net radiation	NR _ Lite	±2%
直接辐射 (0.3~3 μm) Direct radiation	TBS-2	±1%
散射辐射 (0.3~3 μm) Scatter radiation	TBQ-2	±3%

RP1400 颗粒物分析仪实时测量 (Ampletechnology 公司、美国), 仪器基于微振荡天平 (TEOM) 的工作原理。2 台分析仪分别采用不同的采样切割头, 即用 PM10、PM2.5 切割头对气溶胶按照粒径进行分离, 分别采集粒径小于 10 μm 和 2.5 μm 的气溶胶粒子。采样滤膜为锥型 Teflon 膜, 采样流量为 16.7 L·min⁻¹。为消除湿度影响, 样品及测量单元恒温在 50℃。通过 TEOM 获得气溶胶 PM10、PM2.5 的质量浓度。采样点与辐射观测点设在同一位置, 两者水平相距 10 m。采样精度为 1 ng·m⁻³。选用与辐射同时刻的观测数据进行分析。

3 结果与讨论

2000 年 5 月 25 日~6 月 17 日在敦煌发生一

次强沙尘暴过程, 胡泽勇等^[9]利用该次沙尘暴的观测资料, 分析了沙尘暴期间敦煌地面气象要素以及地表能量平衡的变化特征。但在沙尘暴发生期, 有关城市辐射变化的观测研究几乎没有, 为了对其研究, 本文利用自动辐射观测站监测得到的 2004 年 3 月 27~29 日北京沙尘暴期间的总辐射、紫外辐射、净辐射量、可见光辐射、直接辐射和散射辐射, 分析了沙尘暴过程的辐射变化特征。同时利用自动气象站的观测资料, 对地面气象要素以及气溶胶 PM10 和 PM2.5 质量浓度的变化规律和变化特征进行了分析, 并进一步分析了它们与辐射变化的相互关系。

3.1 地面辐射

图 1、图 2 表明, 沙尘暴到来时大气中的大量沙尘粒子使得太阳短波辐射大量被散射和反射回太空, 致使到达地面的太阳短波辐射明显减少,

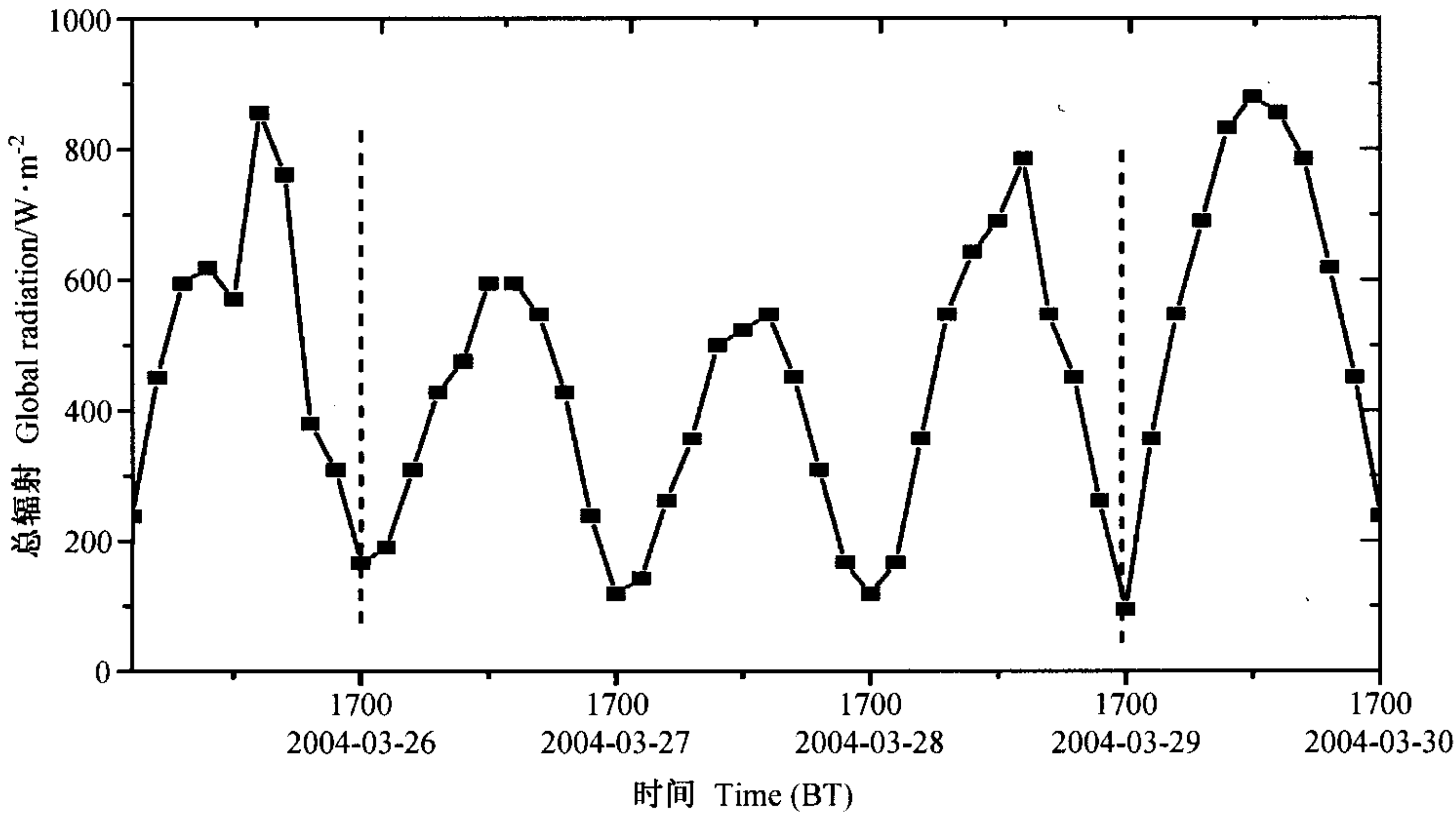


图 1 总辐射日变化 (图中两条虚线间为沙尘暴期, 下同)
Fig. 1 The daily change of global radiation during the experiment (dash line for dust storm period, the fellows figures are same as this)

从而使总辐射以及净辐射大幅度减少。沙尘暴爆发期间总辐射的最大值在 $595 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而沙尘暴发生前后总辐射的最大值可达到 $880.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，总辐射衰减了 37.8%。沙尘暴来临与结束时北京城市的净辐射在 $-112\sim 451 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而在沙尘暴期间净辐射变化范围为 $-94\sim 376 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可见沙尘暴对总辐射和净辐射散射衰减作用是明显的，沙尘暴通过改变到达地面的太阳辐射能量收支平衡进一步影响气候变化。

从图 3 中可以明显看出，沙尘暴期间紫外辐射和可见光辐射都有了明显的下降，但 27 日紫外

辐射下降幅度远大于可见光辐射的下降幅度（降幅公式： $S_d = [(R_{n-1} - R_n) / R_{n-1}] \times 100\%$ ，其中 R 代表太阳辐射组分， n 代表观测的日期），前者为 44%，后者为 29%。同样当沙尘暴结束后两种辐射都逐渐增大，但紫外辐射直到 30 日才开始有明显的增加，其增幅为 48%（增幅公式与降幅公式相似，为 $I_{inc} = [(R_n - R_{n-1}) / R_n] \times 100\%$ ；而可见光辐射则在 29 日就开始有了小幅度回升，其增幅为 20%，到 30 日可见光辐射与总辐射的比值回升到了沙尘暴发生前的水平。造成这种差异的主要原因是由于在沙尘暴发生前，大气气溶胶细

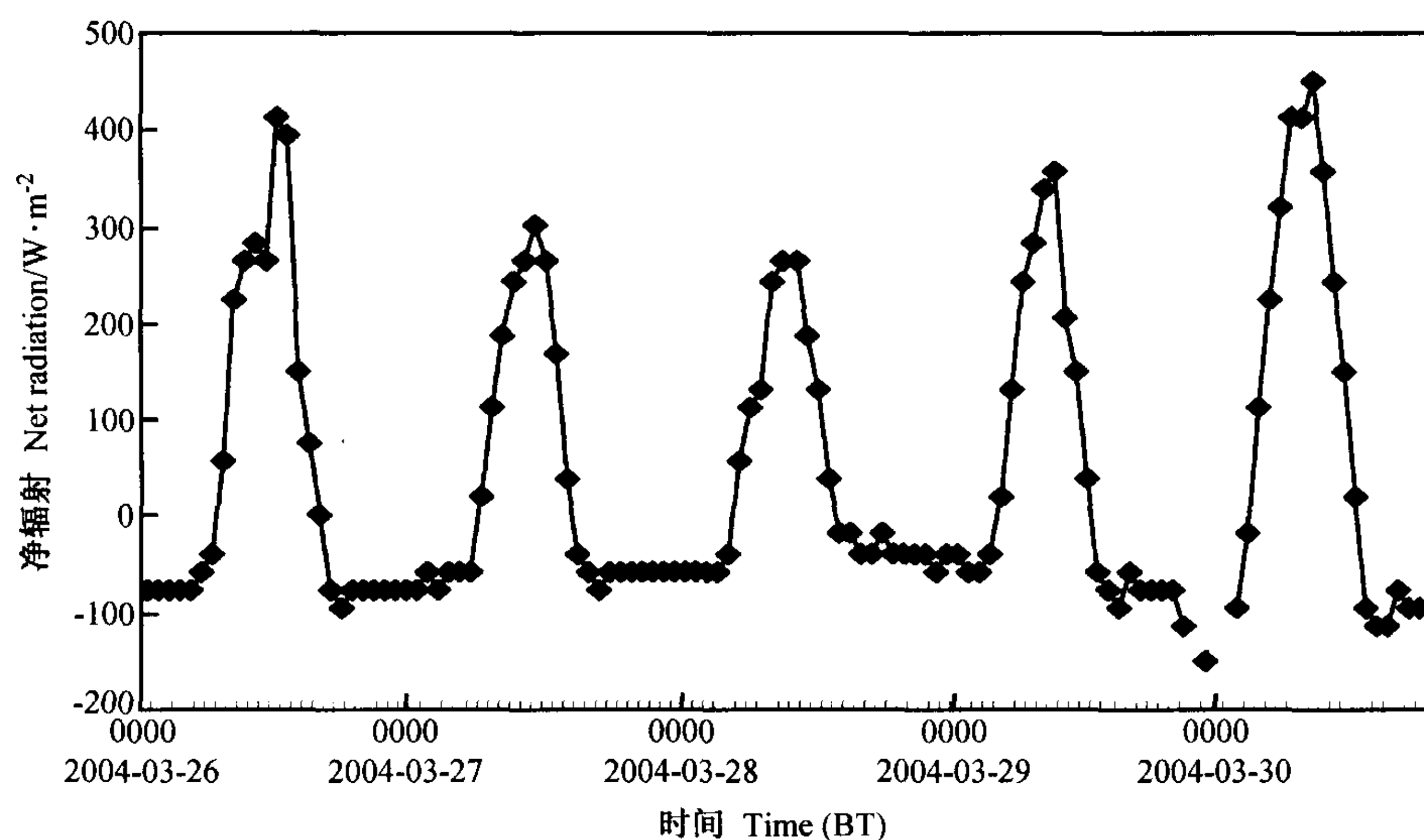


图 2 净辐射日变化

Fig. 2 The daily change of Net radiation during the experiment

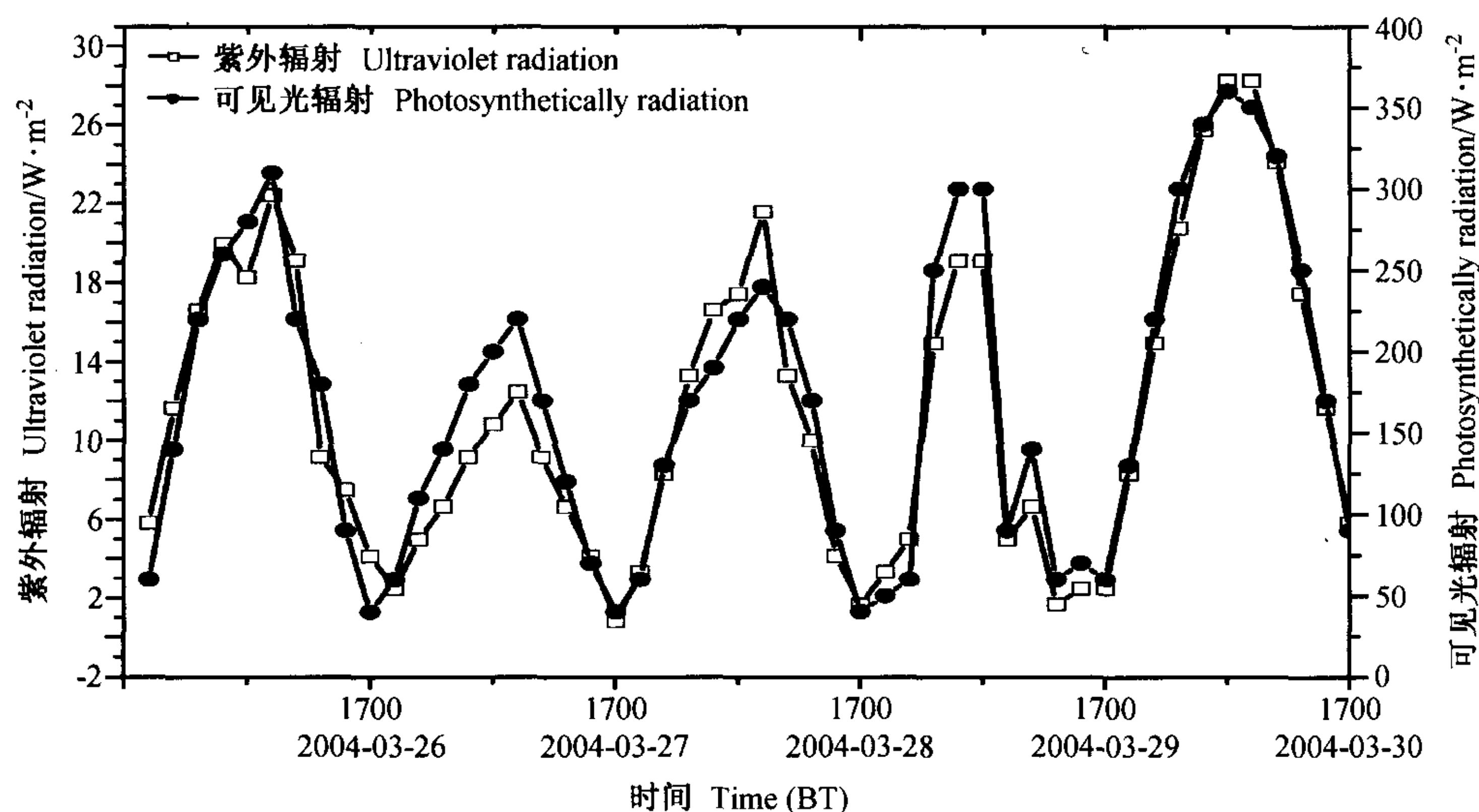


图 3 紫外辐射与可见光辐射日变化

Fig. 3 The daily changes of ultraviolet radiation and photosynthetically active radiation during the experiment

粒子累积（主要从气溶胶 PM2.5 与 PM10 质量浓度日变化中推断得到），细粒子对紫外辐射的衰减作用比对可见光辐射的衰减作用大，从而造成紫外辐射在沙尘暴期衰减率大于可见光辐射的衰减率。当沙尘暴结束后大气气溶胶中细粒子的清除比大颗粒物慢，因而细粒子对紫外辐射的衰减作用仍然维持到 30 日，从而造成紫外辐射增加的起始时间落后于可见光辐射，而且其增幅小于可见光辐射。

从图 4、5 中可以看到，在沙尘暴期间，直接辐照度的衰减十分明显。在沙尘暴最强时，直接辐照度只有 $200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而在沙尘暴结束后直接辐射高达 $901\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。散射辐射变化趋势与直接辐射的变化趋势相反，在沙尘暴期间散射辐射明显增强，它与总辐射的比值在沙尘暴过程中平均为 0.76，最大值为 0.97。而在沙尘暴结束后，散射辐射与总辐射比值的平均为 0.20，最大值仅为 0.38。这表明在沙尘暴过程中散射辐射占了很大

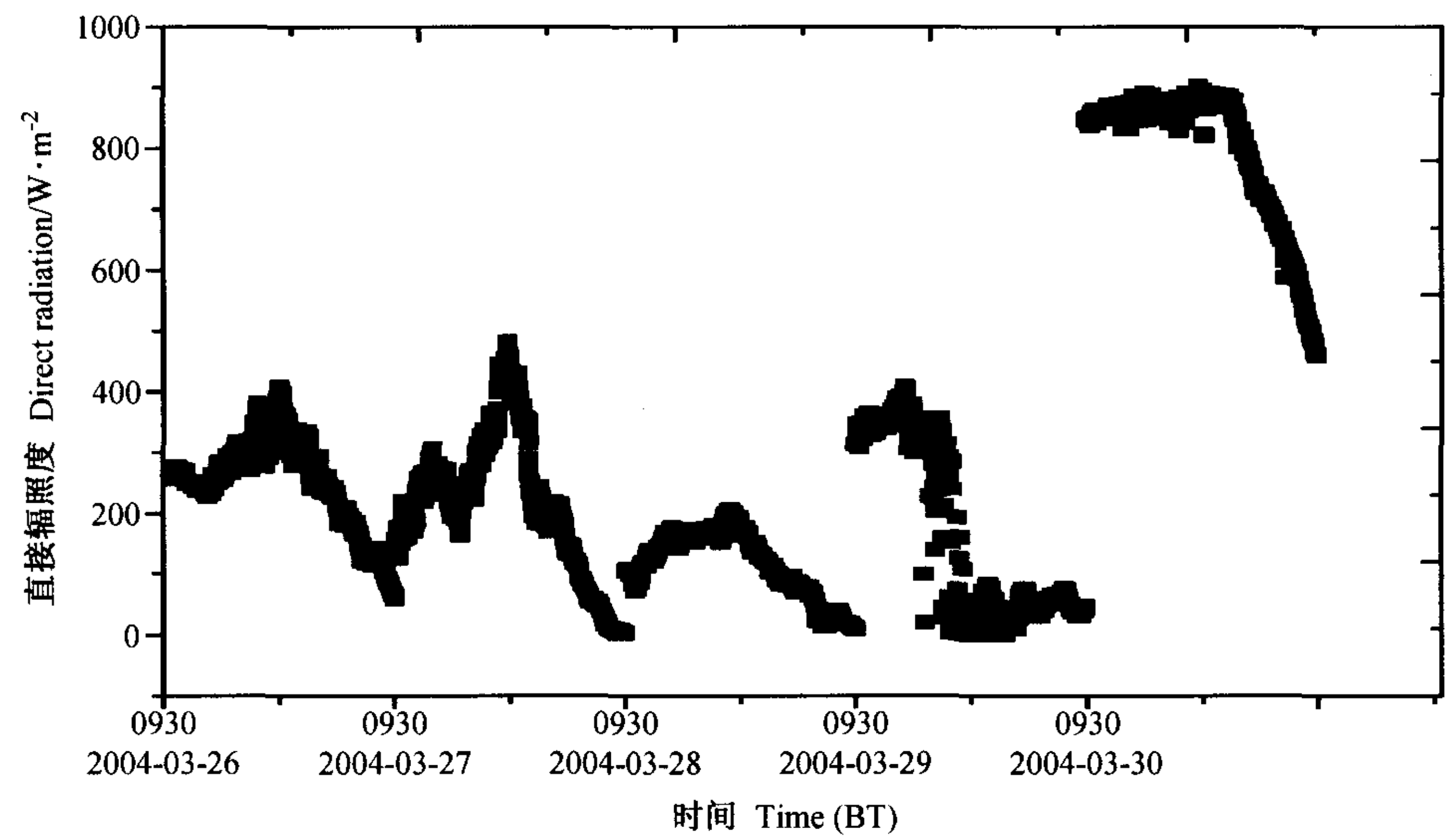


图 4 直接辐照度日变化
Fig. 4 The daily change of Direct irradiance

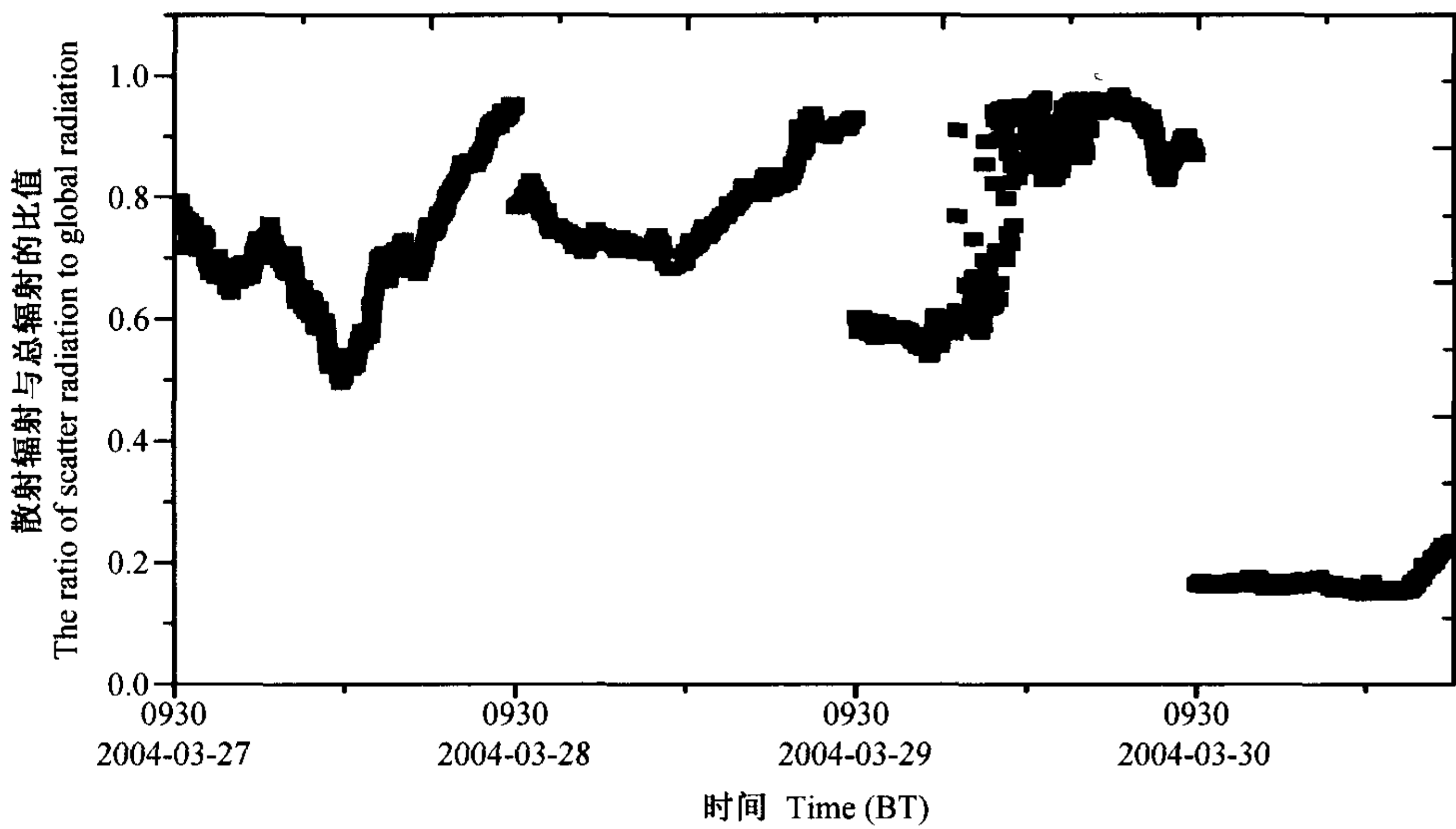


图 5 散射辐射与总辐射比值日变化
Fig. 5 The daily change of the ratio of scatter radiation to global radiation

的比重, 沙尘对太阳辐射的散射作用是显著的。

3.2 气溶胶质量浓度的变化特征

从图 6 可以发现, 气溶胶细粒子 PM_{2.5} 在 27 日有明显的累积, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的比值不断上升($(c_{PM_{2.5}}/c_{PM_{10}}) \times 100\%$, 其中 c 代表气溶胶粒子的质量浓度), 最大高达 72% (平均 54.2%), 在平均状态下该比值大约为 37%~51% (平均 41%); 而且细粒子的绝对浓度也同样增大。27 日 23 时气溶胶中细粒子有一个明显的清除过程, 绝对浓度下降到 27 日的 50% 左右, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 比值下降到 10% 左右。随着风力的增大, 卷入了大量的外地沙尘粒子, 细粒子的浓度回升到平常浓度水平, 但 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的比值降到最低, 到 28 日 12 时, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 比值仅为 5.7%。到 30 日凌晨随着沙尘暴过程的结束, 大气中的沙尘粒子由于重力沉降和大气扩散的作用迅速清除, 使得大气气溶胶中细粒子 PM_{2.5} 的比重逐步回升, 直到 30 日 23 时后 PM_{2.5} 才回升到平常的比重水平。

从气溶胶质量浓度的变化中可以得出, 沙尘暴的发生发展过程可以分为 3 个相对独立的过程: 细粒子气溶胶累积以及清除, 外地粗粒子输入, 沙尘粒子和本地污染物的清除。

3.3 地面辐射组分变化特征

在沙尘暴过程中, 紫外辐射所占总辐射的比例有较大的变化 (图 7), 造成这种变化的规律性

可能是由于在沙尘暴开始时期, 27 日大量的细颗粒污染物累积, 导致对紫外辐射的衰减作用比总辐射的作用要大得多, 致使地面观测到的紫外辐射与总辐射的比值下降, 出现整个沙尘暴过程的低值期。28 日, 由于外地的粗 (沙尘) 粒子在气溶胶中占主导地位, 从而使得气溶胶对紫外波段的衰减作用减弱, 造成紫外辐射占总辐射的比重上升 (最大达到 4.0%)。随着沙尘粒子的不断清除, 细粒子比重又逐步回升, 使得紫外辐射的比重又有所下降。整个过程结束后, 紫外辐射占总辐射的比重维持在平均状态上 (平均为 2.5%~3%)。

从可见光辐射占总辐射的比重可见, 其在沙尘暴期间没有明显的日变化规律, 比值均稳定在 31%~43% 的范围内 (平均为 40%)。因此, 可以认为在整个沙尘暴过程中污染物对总辐射和可见光辐射的衰减作用规律一致, 从而导致它们的衰减程度相同。

3.4 地面气象要素对沙尘暴的响应

图 8 是该次沙尘暴过程地面气压 (自动气象站观测结果) 的时间演变。从图中可以看出: 沙尘暴到来前, 地面气压开始逐步下降, 27 日晚 20:40 左右, 地面气压达到整个过程的最低值 1001.8 hPa, 这有利于将沙尘带入高空; 之后, 地面气压有小幅增加。但整个沙尘暴过程, 地面都被低气压控制; 到 29 日晚 16:00 时气压开始迅速增加, 29 日 23:40 气压增大趋势基本停止,

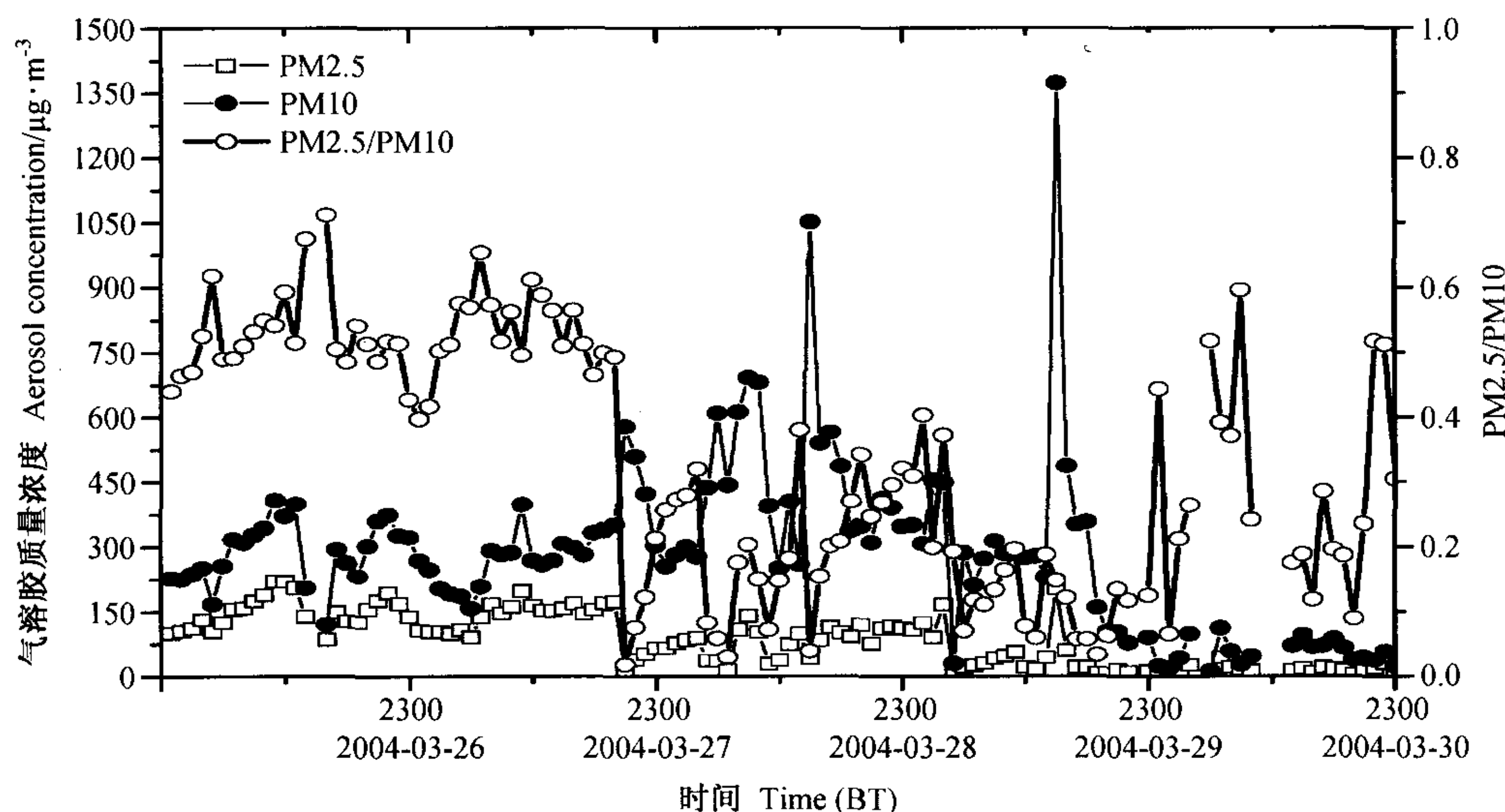


图 6 气溶胶质量浓度在沙尘暴过程前后随时间的演变

Fig. 6 The diurnal variation of concentration of atmospheric aerosol during the period of dust storm

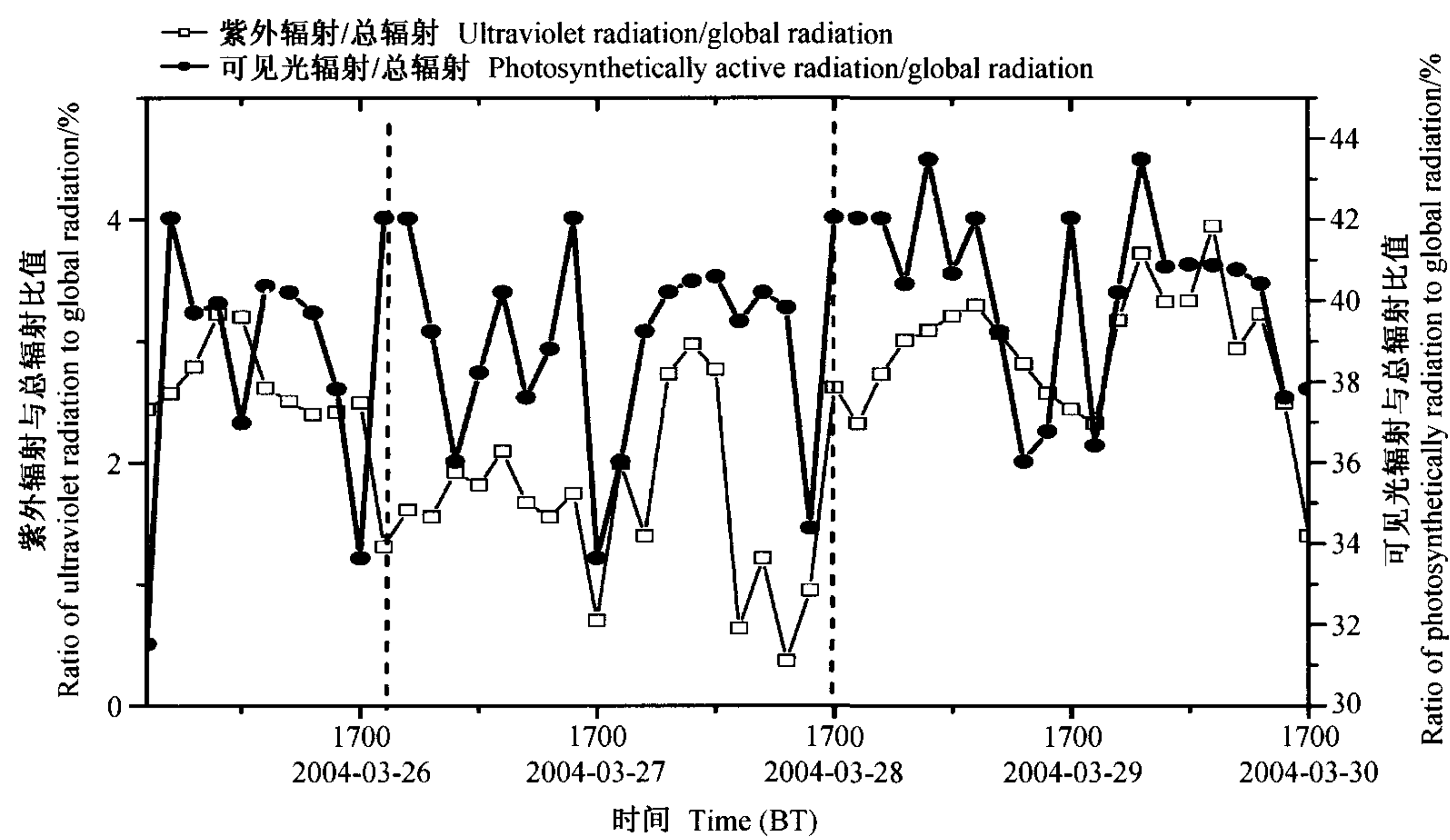


图 7 太阳辐射组分与总辐射比值的日变化
Fig. 7 The ratio daily change of solar component to global radiation

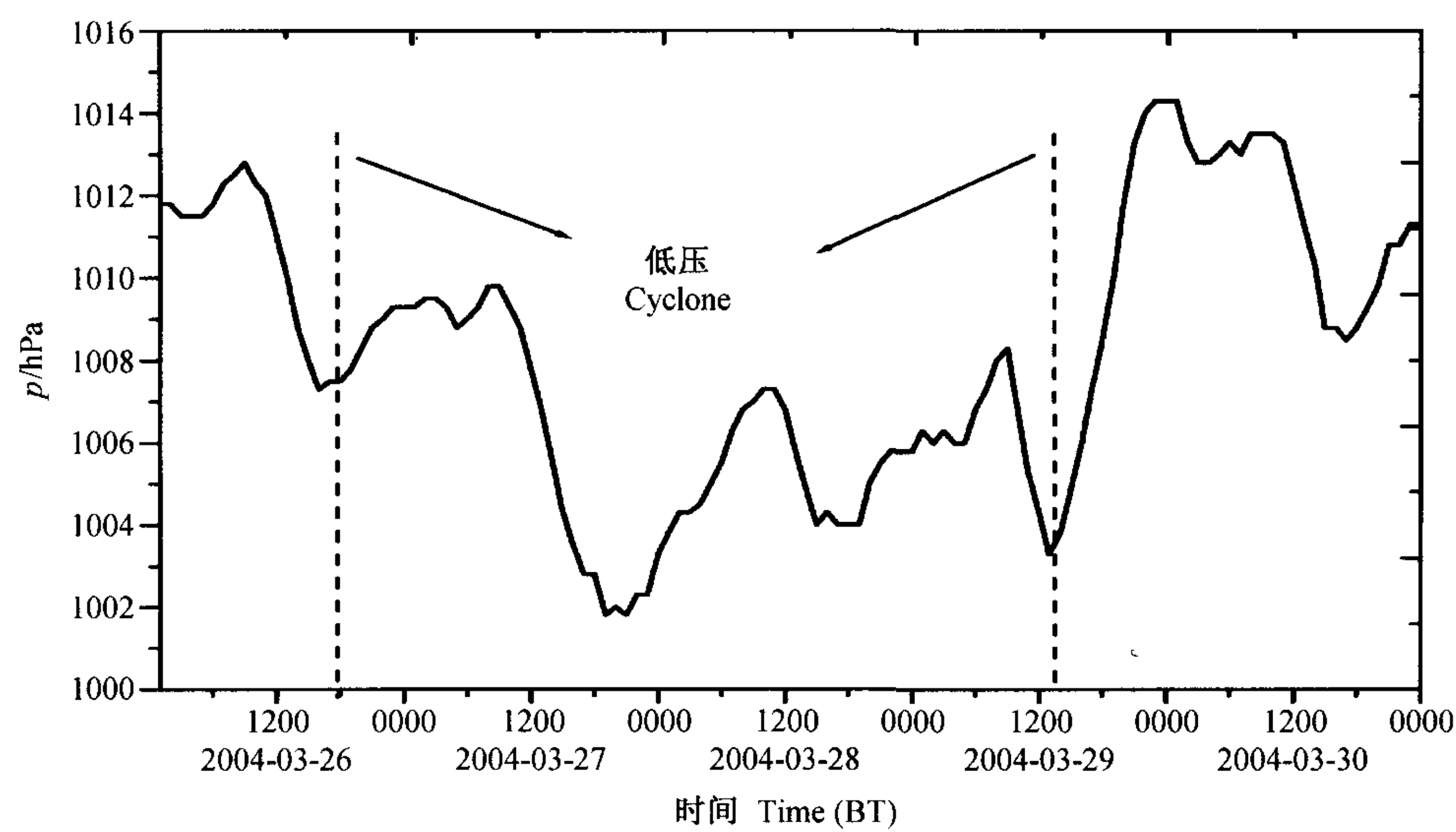


图 8 地面气压在沙尘暴过程前后的时间演变
Fig. 8 The diurnal variation of atmospheric pressure during the period of dust storm

变得稳定少变，地面开始受高压控制。因此、伴随着沙尘暴过境，地面从受低气压控制转变为受高压控制，气压增大了 12.5 hPa 左右。地面气压最大值达到 1 014.9 hPa。

从图 9 中可以看到，沙尘暴到达之前，地面被高温、高湿气团控制，到 29 日，随着外地沙尘的输入以及蒙古的干冷反气旋的移入，北京的地面温度和湿度都有明显下降。而且在整个沙尘暴

期间地面都维持在一个相对干冷的状态。沙尘暴结束后，地面气温和相对湿度就开始逐渐回升，直到 24 h 后气温和相对湿度对沙尘暴过程的响应才基本结束。

3.4 太阳辐射与气溶胶质量浓度的相互关系

在沙尘暴过程中，细粒子比重的变化与紫外辐射的衰减成明显的负相关（相关系数 $R^2 = -0.47$ ，显著性检验 $P < 0.01$ ），见图 10。在图 11

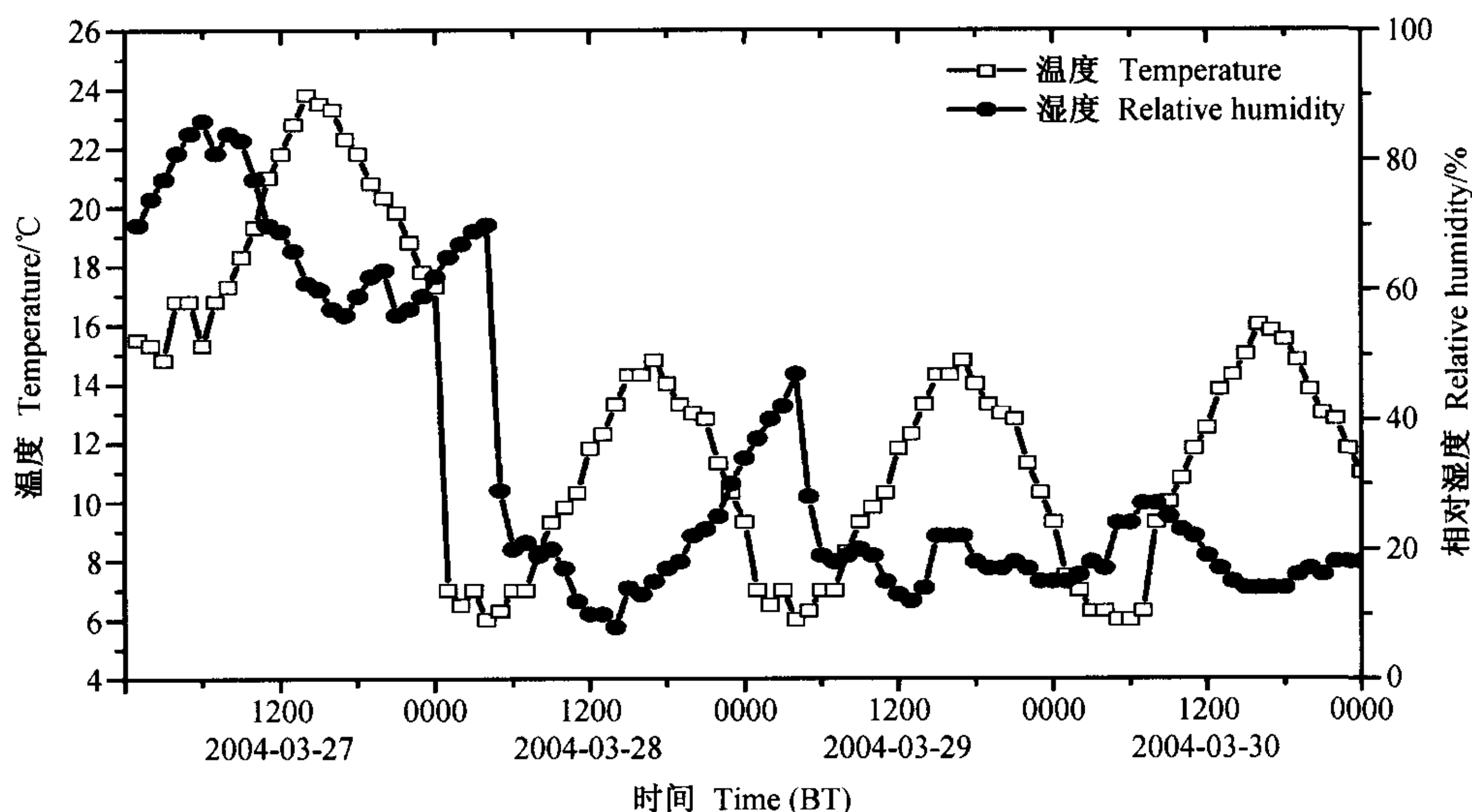


图9 温度、湿度随时间的演变

Fig. 9 The diurnal variation of temperature and humidity during the period of dust storm

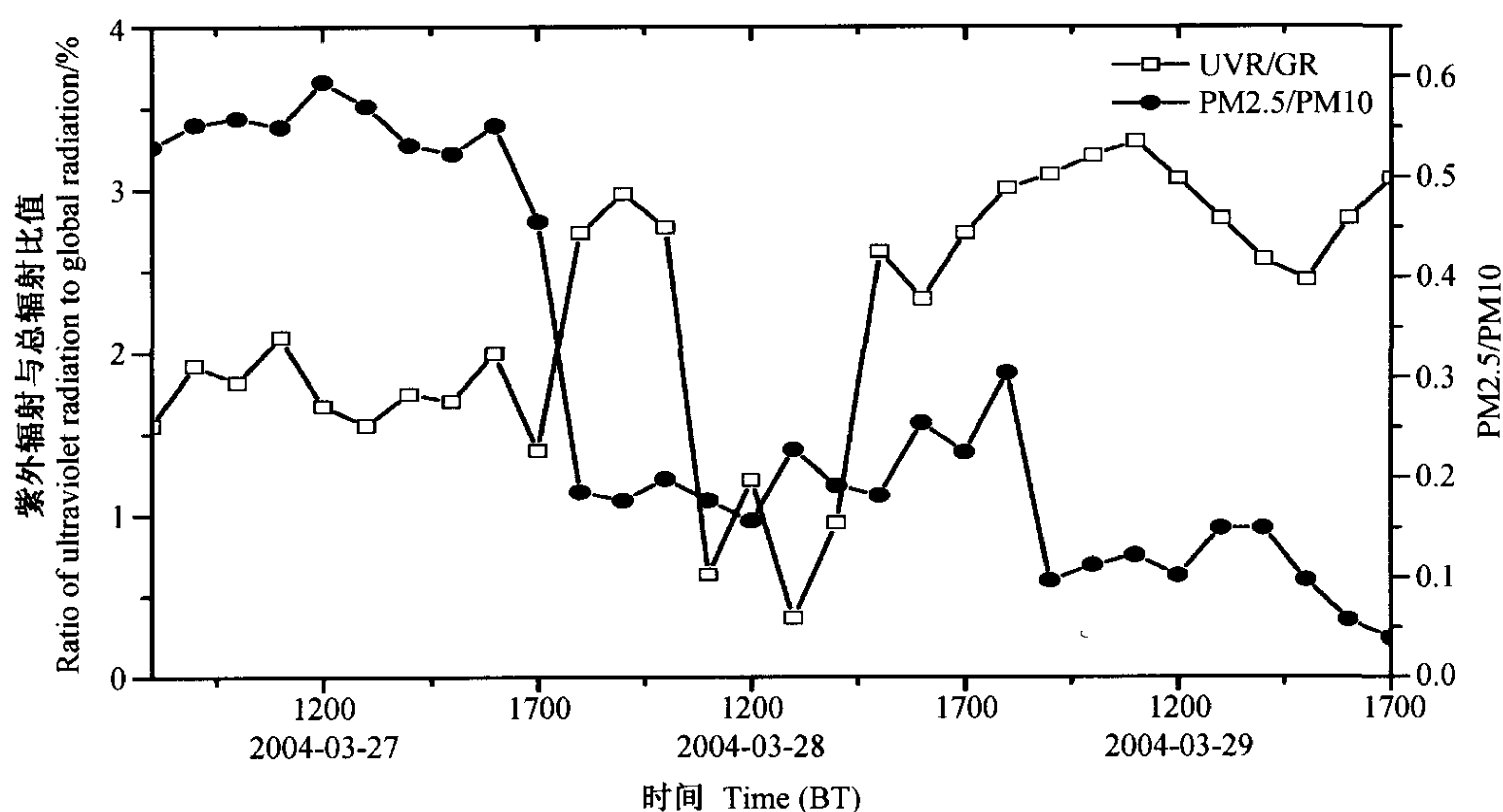


图10 PM2.5与PM10比值以及紫外辐射(UVR)与总辐射比值(GR)

Fig. 10 The diurnal variation of PM2.5/PM10 vs. the ratio of ultraviolet radiation (UVR) to global radiation (GR)

中, 臭氧的浓度随沙尘的输入而略有下降, 但是在整个沙尘暴过程中臭氧浓度没有较大的变化(臭氧最大变幅仅在5%左右), 由于臭氧浓度变化造成的紫外变化幅度仅在1%范围内, 因此认为它对紫外辐射的吸收作用很小, 可以忽略其吸收作用对紫外辐射的衰减。从上述两方面看, 沙尘期间紫外辐射的衰减主要取决于气溶胶中细粒子的含量。

4 结论

通过对沙尘暴过程分析, 得到如下结论:

(1) 在沙尘暴过程中, 总辐射、紫外辐射、光 and 有效辐射以及净辐射都大幅度减少。沙尘暴对紫外辐射的衰减主要取决于气溶胶中的细粒子的含量。在外地大量沙尘粒子输入期间, 紫外辐射与总辐射的比值较沙尘暴初期的比重有所增大。

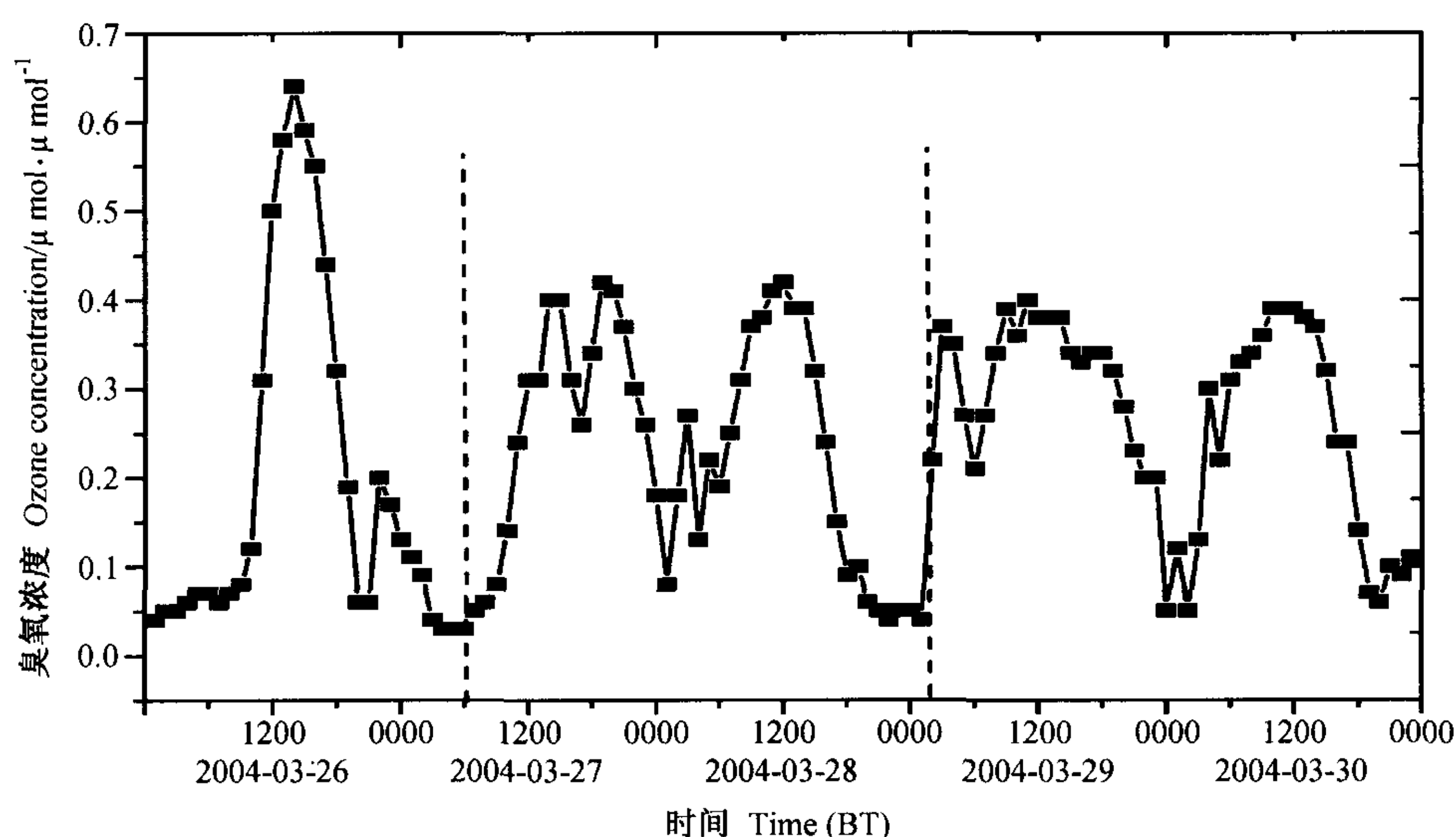


图 11 臭氧浓度日变化

Fig. 11 The diurnal variation of ozone

光合有效辐射与总辐射的比率在沙尘暴期间没有明显增加或者减小, 由此可见沙尘暴对可见光辐射和总辐射的衰减幅度一致。

(2) 沙尘暴期间, 地面处于低气压控制之下; 而在沙尘暴过境时和过境后、地面空气显得相对湿冷, 地面气压急剧上升, 沙尘暴过境后地面处于高压控制下。

(3) 沙尘暴过程由 3 个相对独立的时期组成: 细粒子累积及清除, 外地粗粒子大量输入和所有粒子清除。

从以上观测结果可看到, 沙尘天气过程中, 沙尘对辐射的衰减作用很大。紫外辐射的衰减规律与可见光辐射不同, 沙尘暴过程中的大气气溶胶细粒子浓度差异是造成这种差异的主要因素。这些结果对研究紫外辐射的变化规律是有益的。

参考文献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003
China meteorology origination. *Observation Criterion on Ground Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [2] Chuo H. *Gust Fronts in Niger*. Niger: Tenki, 1994. 41
- [3] Arimoto R, Ray B J, Lewis N F, Tomza U. Mass-particle size distribution of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean. *J. Geophys. Res*, 1997, **102** (D13): 15867~15874
- [4] 全浩. 关于黄沙研究与进展. 环境科学研究. 1994, **75** (6): 1~12
Quan Hao. KOSA study in last 3000 years. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese). 1994, **75** (6): 1~12
- [5] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, **5**: 193~259
- [6] 陈立奇. 中国沙漠尘土向北太平洋的长距离大气传输. 海洋学报, 1985, **7** (5): 554~559
Chen Liqi. A study on long-range transport of china dust and sand over the north Pacific. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1985, **7** (5): 554~559
- [7] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章, 陈敏连. 我国西北地区沙尘暴的分组标准和个例以及其统计特征研究. 北京: 气象出版社, 1997. 1~10
Qian Zhengan, He Huixia, Qu Zhang, Chen Minlian. *Classify of Dust Storm in Northwest China and Case Example and the Statically Properties Research* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1997. 1~10
- [8] Zhang Xiaoye, Arimoto R, An Zhisheng. Dust emission from Chinese deserts linked to variation in atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 28 041~28 047
- [9] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 高洪春. 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化. 大气科学, 2002, **26** (1): 1~8
Hu Zeyong, Huang Ronghui, Wei Guoan, Gao Hongchun. Variation of surface atmospheric variables and ener-

- gy budget during a sandstorm passing dunhuang on June 6 of 2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (1): 1~8
- [10] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计. 大气科学, 1998, **22**: 625~637
Huang Meiyuan, Wang Zifa. A model for long-range transport of Yellow-sand in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22**: 625~637
- [11] Wang Zifa, Ueda H, Huang Meiyuan. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D22): 26 947~26 960
- [12] 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究. 气候与环境研究, 2004, **9**: 101~115
Zhang Gaoying, Zhao Sixiong, Sun Jianghua. Analyses of Climatological characteristics of severe dust storms in recent years in the northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 2004, **9**, 101~115
- [13] 周秀骥, 徐详德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学 (D 辑), 2002, **32**, 327~334
Zhou Xiuji, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. Dynamic characteristic of dust storm in 2000 spring (in Chinese). *Science in China Series* (Ser. D): 2002, **32**, 327~334
- [14] Ra Amaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. Radiative forcing of climate change. In: *IPCC 2001: Climate Change, The Scientific Basis*, Houghton J T, et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001
- [15] Dye D G. Spectral composition and quanta-to-energy ratio of diffuse photosynthetically active radiation under diverse cloud conditions. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D10203, doi: 10.1029/2003JD004251