

中国北方沙漠戈壁区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系

邓祖琴¹, 韩永翔^{1,2*}, 白虎志¹, 赵天良³ (1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏南京 210044; 3. 加拿大环境署空气质量研究部, Toronto, Ontario M3H 5T4, 加拿大)

摘要: 利用中国大陆气溶胶指数(TOMS AI)、天文总辐射、地面太阳总辐射和沙尘能见度等观测和理论计算资料, 对中国北方沙漠戈壁区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系进行了分析. 结果表明: 沙漠地区太阳辐射和沙尘气溶胶指数有非常高的相关性, 且变化趋势一致. 表明由太阳辐射触发的热对流是影响沙漠地区沙尘气溶胶最主要的因子; 沙尘气溶胶进入大气中, 必然也会对太阳辐射产生重大的影响. 晴日时沙尘气溶胶吸收和散射辐射可达沙尘暴(含扬沙)天气时的60%以上.

关键词: 沙尘气溶胶; 太阳辐射; 热对流; 吸收和散射辐射

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2011)11-1761-07

Relationship between dust aerosol and solar radiation in gebi desert in North China. DENG Zu-qin¹, HAN Yong-xiang^{1,2*}, BAI Hu-zhi¹, ZHAO Tian-liang³ (1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou Arid Meteorological Institute of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Air Quality Research Branch, Meteorological Service of Canada, Toronto, Ontario M3H 5T4, Canada). *China Environmental Science*, 2011,31(11): 1761~1767

Abstract: Relationship between dust aerosol and solar radiation in gebi desert in North China was analyzed based on observational and calculative data, such as TOMS aerosol index (AI), total astronomical radiation, total solar radiation and dust visibility, in China mainland. It turns out that there were perfect correlation and same trend between the total solar radiation and AI, suggesting that the thermal convection triggered by solar radiation was the most important factor for dust aerosol. It also shows that the input of dust aerosol in atmosphere would affect solar radiation significantly and persistently. Besides these, the ratio of absorption and scattering of solar radiation by dust aerosol between fine days and sandstorm was above 60%.

Key words: dust aerosol; solar radiation; thermal convection; absorption and scattering of solar radiation

太阳辐射是地球上最重要的热源, 是驱动大气运动的主要动力. 太阳辐射进入地球大气后, 会受到臭氧的吸收、云的吸收、水气的吸收、空气分子的吸收和散射以及气溶胶的吸收和散射等作用, 共同使入射光的强度减弱^[1]. 大气气溶胶可以散射和吸收太阳短波辐射以及地球长波辐射, 进而影响地气系统的辐射平衡^[2]; 另外, 还可以作为凝结核影响云的辐射特性^[3-4]及作为反应表面影响大量化学反应的速度^[5], 因此, 大气气溶胶在大气辐射和气候以及环境变化研究中占有重要地位^[6-7]. 沙尘气溶胶是最主要和分布最广的自

然气溶胶, 大量研究表明, 中国西北部沙漠是全球沙尘气溶胶主要源地之一^[8-13], 大量沙尘从源区输送到其他地方^[14]. 因此, 研究沙漠戈壁区的沙尘气溶胶对大气辐射的影响, 具有十分重要的科学意义. 以前对沙漠戈壁区沙尘气溶胶的辐射强迫研究, 主要集中在沙尘暴的研究^[15-19]. 然而, 多年的观测结果表明, 中国北方沙漠区单站沙尘暴

收稿日期: 2011-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41075113); 国家科技支撑计划(2008BAC40B04); 甘肃省自然科学基金项目(2008GS01964)

* 责任作者, 教授, han-yx66@126.com

(含扬沙)发生最频繁的年份,其发生次数也仅在120次左右,这表明由沙尘暴所贡献给大气的沙尘气溶胶总量是有限的.Han等^[20]认为,中国北方沙漠戈壁区存在另外一种完全不同于沙尘暴起沙机制的热对流与尘卷风联合起沙机制,它与沙尘暴起沙机制互为补充,并推论由太阳辐射触发的热对流是影响沙漠地区沙尘气溶胶最主要的因子之一.本课题组^[21]利用1998~2005年中国大陆沙漠地区臭氧总量制图光谱仪气溶胶指数(TOMS AI)和太阳辐射的资料,初步证明在晴朗无风的天气背景下,由太阳辐射触发的热对流与尘卷风联合起沙对大气沙尘气溶胶含量的贡献远大于沙尘暴起沙的贡献,沙漠地区上空的沙尘气溶胶含量是它们共同作用的结果.TOMS观测自1978年11月开始,2005年结束,共有24a的观测资料.本文作者之前的研究只用了8a的资料,而本文利用中国大陆沙漠地区22a TOMS AI资料、更长时间的太阳辐射、沙尘能见度等观测资料,试图对由太阳辐射引发的尘卷风与干热对流所贡献给大气中的沙尘气溶胶含量和沙尘暴所贡献的沙尘气溶胶含量进行更进一步的分析,并结合其他研究结果,探讨沙漠地区沙尘气溶胶对该区太阳辐射的影响.

1 研究区域、数据来源及计算方法

研究区域为中国塔里木盆地-北方沙漠戈壁区(图1),其沙漠面积占我国沙漠面积的70%以上^[22].这一区域不但是我国沙尘暴高发区^[23-25],而且区域内太阳辐射非常强烈,热对流活动异常剧烈^[26],尘卷风活动非常频繁^[27].

TOMS观测不受云的影响,能够反演不同下垫面条件下沙尘气溶胶的特性^[28],在大气沙尘研究中得到广泛应用^[29].本研究使用的TOMS气溶胶指数(AI)数据来自美国Goddard航天中心1.25°×1°(经纬度)的气溶胶指数资料.TOMS观测的时间段为1978年11月~2005年12月,由于卫星故障及观测轨道高度的调整,TOMS资料分为2个时间段:1978年11月~1993年5月和1996年7月~2005年12月.为保证资料的稳定与连续,本研究使用1979年1月~1992年12月、1998

年1月~2005年12月的AI日值资料.在研究区域中有AI观测格点133个.

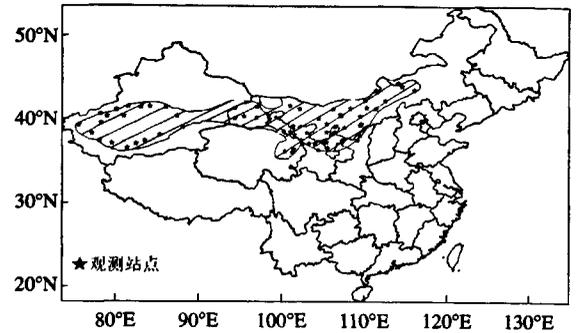


图1 研究区域和地面观测站点

Fig.1 Studying regions and the stations of surface observations

太阳辐射、沙尘能见度等地面观测资料均来自中国国家气象中心归档的原始气象记录报表及其信息化产品,考虑到观测资料年代的一致性,沙尘能见度的计算使用了其中44个站点的资料,辐射计算使用了17个站点资料,地面观测资料的年代为1979年1月~1992年12月、1998年1月~2005年12月共22a.

沙尘天气过程的等级依据成片出现沙尘天气的国家基本(准)站的数目和沙尘天气的等级划分^[30].若某次沙尘天气过程同时达到两种以上等级时,以最强的沙尘天气过程等级为准.其中扬沙天气过程的定义为:在同一次天气过程中,相邻5个或5个以上国家基本(准)站在同一观测时次出现了扬沙或更强的沙尘天气^[30].本文以区域内5个以上站点出现了扬沙或更强的沙尘天气代表区域内出现了沙尘暴(含扬沙)天气过程.

大气上界天文日总辐射量的计算,采用以下公式^[31],此公式在辐射计算中得到广泛应用^[18,32]:

$$Q_0 = \frac{TI_0}{\pi\rho^2} (\omega_0 \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_0) \quad (1)$$

$$\text{式中: } \rho = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.033 \cos(2\pi d_n / 365)}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos\theta_0 + \\ & 0.070257 \sin\theta_0 - 0.006758 \cos 2\theta_0 + \\ & 0.000907 \sin 2\theta_0 - 0.002697 \cos 3\theta_0 + \\ & 0.001480 \sin 3\theta_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_0 = 2\pi d_n / 365 \quad (4)$$

$$\omega_0 = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (5)$$

式中： Q_0 为日天文总辐射； I_0 为太阳常数； T 为周期； ρ 为日地相对距离； δ 为太阳赤纬； ω_0 为日落时角； ϕ 为地理纬度； θ_0 为地球角位移； d_n 为年内天数。

对区域内 17 个辐射站由以上公式计算各站的天文日总辐射，进而得到区域上的天文日总辐射均值(简称为天文辐射)，它在理论上代表了该研究区接收的最大的太阳辐射。同时，根据地面 17 个站点的观测资料，计算了该研究区同期的地面太阳总辐射(简称观测辐射)，它是天文辐射到达地面后的太阳散射辐射和太阳直接辐射之和。二者的差值则代表了天文辐射进入地球大气后，受到各种因子吸收和散射(如大气的分子、气溶胶、水汽等吸收、散射和反射)没有到达地面的能量(简称大气吸收和散射总辐射)。

2 结果与分析

2.1 中国沙漠戈壁区 22 年 AI 日均值与太阳辐射的关系

本文作者^[21]利用 1998~2005 年中国大陆沙漠地区的 TOMS AI 和太阳辐射进行对比分析，结果表明除 2001 年外，发现尽管年际间有微小的差异，但二者仍表现出明显的规律性：从 1 月开始，中国北方沙源区太阳辐射值逐渐增大，到 6、7 月份达到最大值，然后逐渐降低；太阳辐射

和 AI 有较为一致的变化趋势^[21]。本研究在此基础上增加了 1979~1992 年连续、稳定的 14a 资料，以便在更长时间内验证这种关系是否存在。由图 2 可清楚地看见，除 1979~1981 年及 2001 年外，其余年份太阳辐射和 AI 有较为一致的变化趋势($R=0.648, P<0.001$)。但是 2 者在个别时间出现不匹配现象，如 AI 常在 4~5 月达到最高峰值，但太阳辐射最高的峰值出现在 6 月，这种不匹配现象可能是年内月平均沙尘暴发生的高峰期间为 4~5 月。由图 3 可见，AI 和沙尘暴发生次数的变化有着很好的一致性，在 4 月沙尘发生日数和 AI 同时达到全年最大值，5 月以后，随沙尘的发生逐渐减少，AI 逐渐降低，表明 AI 的变化与沙尘暴发生密切相关。为了得到由太阳辐射触发的热对流与尘卷风联合起沙供给大气的沙尘气溶胶 AI 与太阳辐射的关系，按是否发生沙尘暴(含扬沙)将 AI 日资料分为有沙尘暴发生时的 AI(AI_{沙尘暴})和没有沙尘暴(AI_{非沙尘暴})发生时两部分，对 22a 的资料求多年月平均，剔除沙尘暴对 AI 的影响，结果表明，AI_{非沙尘暴}与太阳辐射有显著的一致变化性(图 3)($R=0.93, P<0.001$)。这些进一步表明沙尘暴起沙模型和尘卷风与干热对流的联合起沙模型互为补充，沙漠地区上空的沙尘气溶胶含量是它们共同作用的结果。同时，从更长的时间序列证明，太阳辐射是影响北方沙漠戈壁区 AI 的重要因素。

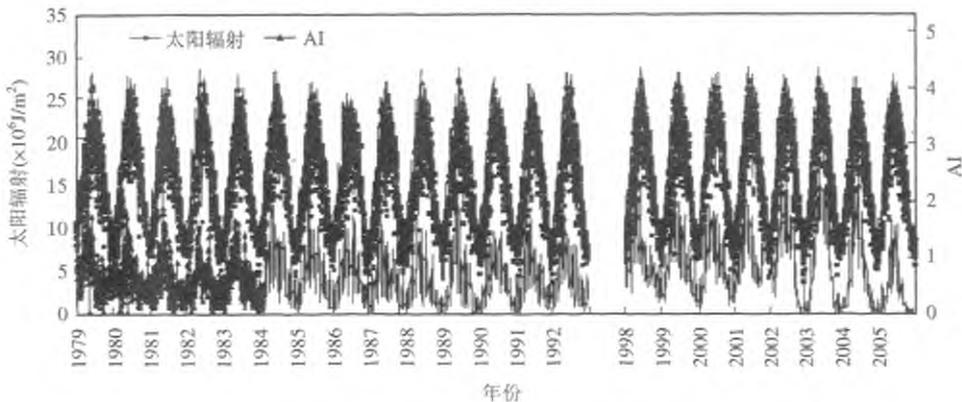


图 2 日均 AI 和太阳辐射随时间的变化

Fig.2 Temporal changes of daily AI and solar radiation

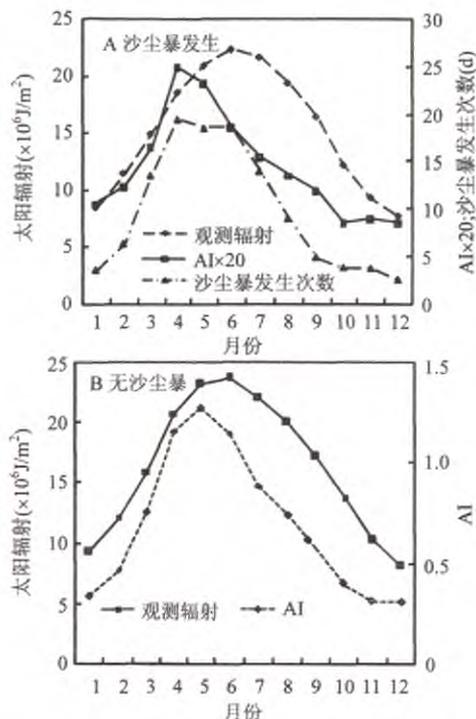


图3 沙尘暴(含扬沙)发生时和无沙尘暴发生时的AI和观测辐射的22a月平均

Fig.3 Monthly averages for 22 years of AI and solar radiation when dust storm occurred and did not occur

图A次坐标轴中AI值 $\times 20$,以便在图中更清晰的反映AI的变化趋势

2.2 中国沙漠戈壁区沙尘气溶胶对太阳辐射的影响

2.2.1 沙尘暴和非沙尘暴发生的天文辐射和观测辐射的分析

对研究区天文辐射和观测辐射首先进行相关分析(图4),结果表明不论研究区有无沙尘暴发生,观测辐射和天文辐射都有非常好的线性关系($P < 0.001$).但有沙尘暴发生时,观测辐射和天文辐射的线性回归方程为 $y_{\text{观测}} = 0.518x_{\text{天文}} + 57.584$ ($R = 0.84$) (样本数 2594, $P < 0.001$).而没有沙尘暴发生时,其线性回归方程为 $y_{\text{观测}} = 0.5349x_{\text{天文}} + 115.54$ ($R = 0.92$) (样本数 5442, $P < 0.001$).显然,没有沙尘暴发生时的观测辐射和天文辐射的相关性更显著.这暗示在其他没有太阳辐射地面观测站的沙漠地区,可以通过计算该地区的天文辐射,进而得到地面总辐射.如果能够知道该区域出现沙尘暴的时间,则可更精确地推算出其地面总辐射,并进而推算出大气气溶胶的光学指数.

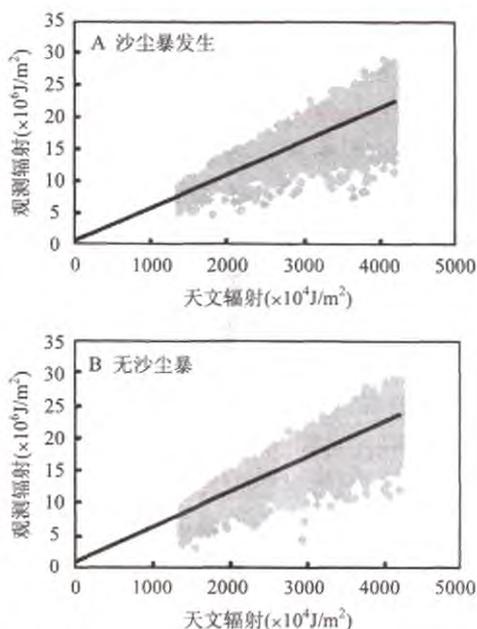


图4 沙尘暴和无沙尘暴发生时观测辐射与天文辐射的散点图
Fig.4 Scatter charts of solar radiation and astronomical radiation when dust storm occurred and did not occur

对研究区沙尘暴发生时天文辐射与观测辐射进行对比(图5A),发现只有53.5%的天文辐射到达地面,变化幅度在20%~72%之间,但是晴朗天气时(图5B),到达地面的天文辐射被削弱的部分也超过了42%,变化幅度在15%~74%之间.从具体每日天文辐射与观测辐射的差值曲线,可以明显地看出,其差值(大气吸收和散射总辐射)与天文辐射和地面观测辐射均具有非常高的一致性变化, R 分别为0.898和0.654(样本数5442, $P < 0.001$).但二者具有不同的物理意义,大气吸收和散射总辐射与观测辐射的高相关和同步性,表明地面接收的能量越大,热对流越强,由太阳辐射触发的热对流与尘卷风联合起沙供给大气的沙尘气溶胶含量也越大,因此导致沙尘气溶胶反射和散射造成的大气吸收和散射总辐射也越多,它代表了太阳辐射对大气沙尘气溶胶的作用;大气吸收和散射总辐射与天文辐射的高相关和同步性,表明天文辐射越多,到达地面的辐射也越多,进而使大气中的沙尘气溶胶含量增加,由于沙尘气溶胶的反射和散射,大气中的吸收和散射总辐射也越大,它代表了大气沙尘气溶胶对太阳辐射的影响.

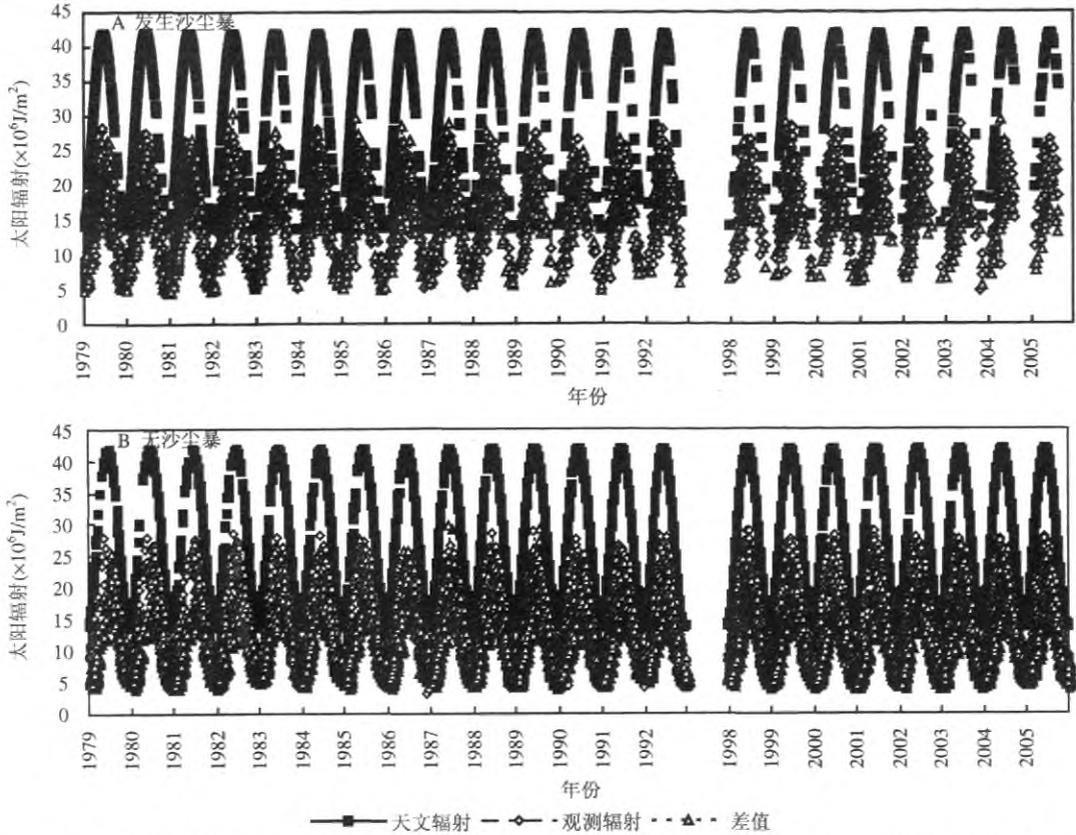


图 5 发生沙尘暴(含扬尘)时及没有发生沙尘暴(含扬尘)时的天文辐射、观测辐射及两者的差值

Fig.5 Solar radiation、astronomical radiation and their difference when dust storm occurred and non-dust storm occurred

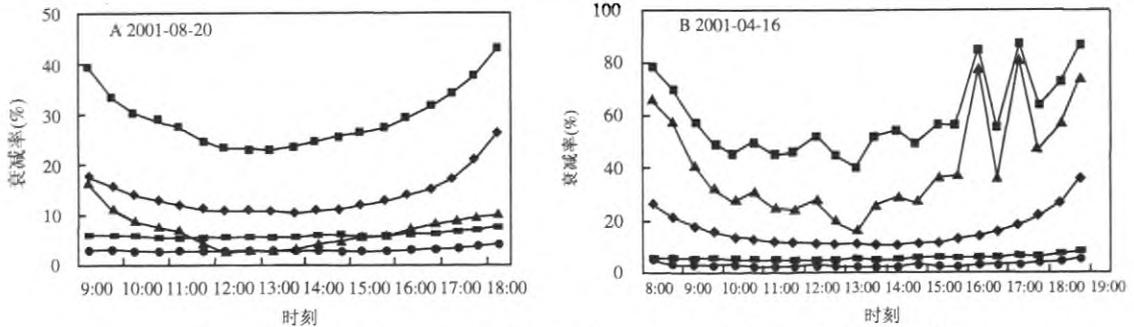


图 6 晴日(2001-08-20)和沙尘天气(2001-04-16)太阳直接辐射衰减状况^[33]

Fig.6 The attenuations of direct solar radiation in sunny day(2001-08-20) and dust weather(2001-04-16)^[33]

—■— 总衰减 —◆— 瑞利散射 —▲— 气溶胶粒子散射 —●— 水汽吸收 —●— 臭氧吸收

大气吸收和散射总辐射中包含了臭氧的吸收、云的吸收、水汽的吸收、空气分子的吸收和散射以及气溶胶的吸收和散射等作用。根据文献^[33](图 6),无论是晴天还是沙尘暴天气里,沙漠地区大气水汽含量非常小,水汽的吸收相对来说微弱且恒定^[34],水汽的平均吸收率为 5.6%,臭氧的

吸收量最小且相对恒定,平均吸收率为 2.7%。在晴日里,气溶胶粒子对太阳直接辐射的衰减平均约为 16.9%^[33](图 6A),而在沙尘暴天气里,气溶胶粒子对太阳直接辐射的衰减平均约为 38%^[33](图 6B)。而晴空天气和沙尘暴天气时的大气吸收和散射总辐射(即天文辐射和观测辐射的差值)22

年累计值分别为 $5.9 \times 10^{10} \text{J/m}^2$ 和 $4.1 \times 10^{10} \text{J/m}^2$, 则晴空时气溶胶粒子造成的太阳辐射的衰减约为沙尘暴天气时的 60%(图 7), 这些事实表明中国北

方沙漠戈壁区晴空时太阳辐射触发的热对流和尘卷风联合起沙所产生的沙尘气溶胶对太阳辐射的影响非常显著.

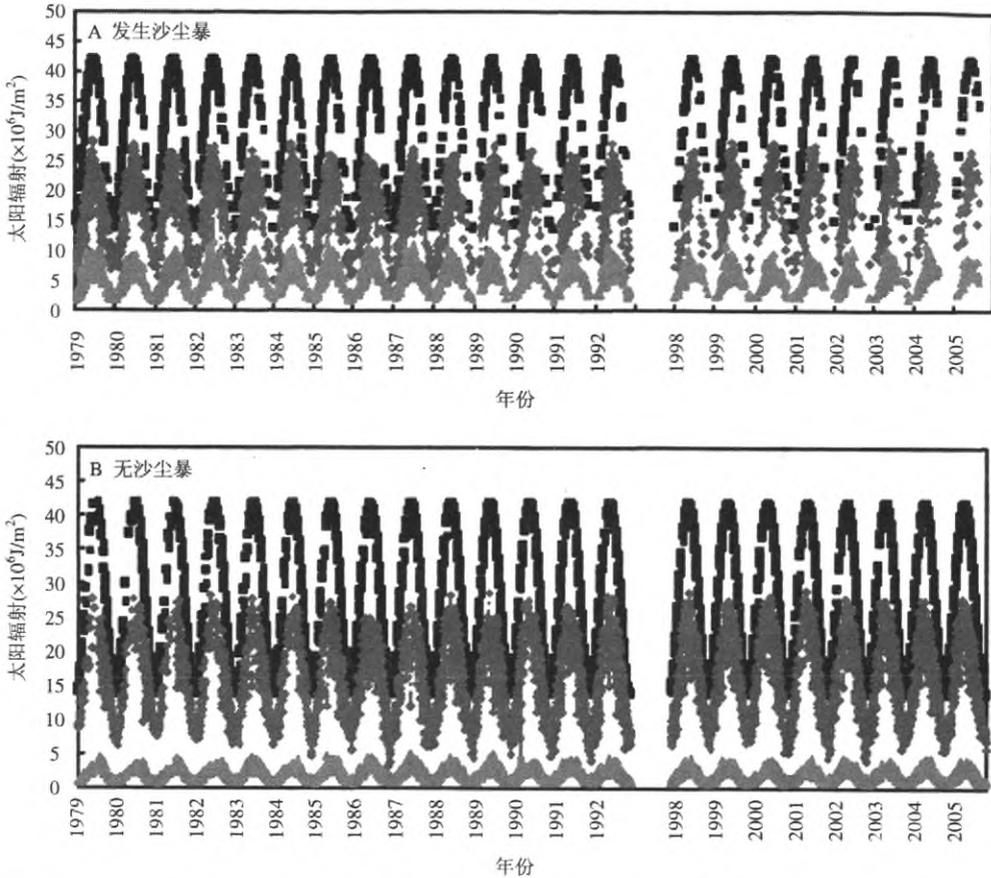


图 7 发生沙尘暴(含扬沙)时及没有发生沙尘暴(含扬沙)时的天文辐射、观测辐射及沙尘气溶胶的吸收和散射辐射
Fig.7 Solar radiation、astronomical radiation and the absorption and scattering of solar radiation of dust aerosol when dust storm occurred and non-dust storm occurred

—●— 天文辐射 -●- 观测辐射 —●— 沙尘气溶胶的吸收和散射辐射

3 结论

3.1 沙漠地区太阳辐射和沙尘气溶胶指数有非常高的相关性,且变化趋势一致.表明由太阳辐射触发的热对流是影响沙漠地区沙尘气溶胶含量最主要的因子.

3.2 沙尘气溶胶进入大气中,必然也会对太阳辐射产生重大的影响.大气吸收和散射总辐射与天文辐射和地面的辐射具有非常一致的变化和

高相关.

3.3 中国北方沙漠戈壁区晴日时沙尘气溶胶的吸收和散射总辐射可达沙尘暴(含扬沙)天气时的 60%以上,晴日里沙尘气溶胶对太阳辐射的削弱也很显著.

参考文献:

[1] 石广玉.大气辐射学 [M]. 北京:科学出版社, 2007.
[2] Charlson R J, Langner J, Rodhe H, et al. Perturbation of the

- northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols [J]. *Tellus*, 1991,43AB, 152-163.
- [3] Twomey S, Piepgrass M, Wolfe T L. An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo [J]. *Tellus*, 1984,36B(5), 356-366.
- [4] Ackerman A S, Toon O B, Stenvens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. *Science*, 2000,288(5468): 1042-1047.
- [5] Stephen E, Schwartz S E, Andreae M O. Uncertainty in climate change caused by aerosols [J]. *Science*, 1996, 272(5265):1121.
- [6] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000,38(4):513-543.
- [7] 石广玉,王 标,张 华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008,32(4): 826-840.
- [8] Washington R, Todd M, Middleto N J, et al. Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003,93(2):297-313.
- [9] 成天涛,吕达仁,陈洪滨,等.浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征 [J]. *大气科学*, 2005,29:147-153.
- [10] 张德二.我国历史时期以来降尘的天气气候学分析 [J]. *中国科学*, 1984,(3):278-288.
- [11] 张小曳,沈志宝,张光宇,等.青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1996,26(2):147-153.
- [12] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003,30(24):2272-2275.
- [13] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (toms) absorbing aerosol product [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002,40(3):1002-1032.
- [14] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability [J]. *Science*, 1980,209(4464):1522-1524.
- [15] 赵 伟,刘红年,吴 润.中国春季沙尘气溶胶的辐射效应及对气候影响的研究 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2008,44(6): 598-607.
- [16] 沈志宝,魏 丽.我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应[J].*大气科学*, 2000,24(4):541-548.
- [17] 李 韧,季国良.敦煌地区大气气溶胶的辐射效应 [J]. *太阳能学报*, 2004,25(3):320-324.
- [18] 陈 霞,魏文寿,刘明哲.塔里木盆地沙尘气溶胶对短波辐射的影响—以塔中为例 [J]. *中国沙漠*, 2008,28(5):920-926.
- [19] 胡 波,王跃思,何新星,等.北京 2004 年一次强沙尘暴过程的辐射特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 2005,10(2):265-274.
- [20] Han Y, Dai X, Fang X, et al. Dust aerosol: A possible accelerant for an increasingly arid climate in North China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008,72:1476-1489.
- [21] 邓祖琴,韩永祥,白虎志,等.沙漠地区沙尘气溶胶含量变化的原因分析 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(12):1233-1238.
- [22] 吴 正.中国沙漠与治理研究 50 年 [J]. *干旱区研究*, 2009,26(1): 1-7.
- [23] 周自江,王锡稳,牛若芸.近 47 年中国沙尘暴气候特征研究 [J]. *应用气象学报*, 2002,13(2):193-200.
- [24] 韩永翔,赵天良,宋连春,等.北太平洋地区春季粉尘的空间分布特征——观测及模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 2005,25(3): 257-201.
- [25] 钱正安,宋敏红,李万元.近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析 [J]. *中国沙漠*, 2002,22(2):106-111.
- [26] 徐祥瑞,周明煜,陈家宜,等.青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图象 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2001,31(5):428-440.
- [27] 顾兆林,赵永志,郁永章,等.尘卷风的形成、结构和卷起沙尘过程的数值研究 [J]. *气象学报*, 2003,61(6):751-760.
- [28] Herman J R, Bhartia P K, Torres O, et al. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997,102(D14):16911-16922.
- [29] Washington R, Todd M, Middleto N J, et al. Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003,93(2):297-313.
- [30] GB/T20480-2006 沙尘暴天气等级 [S].
- [31] 康德拉捷夫.太阳辐射能 [M]. 李怀瑾译,北京:科学出版社, 1962:68-550.
- [32] Thorsten Pohlert. Use of empirical global radiation models for maize growth simulation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(1/2):47-58.
- [33] 辛金元,张文煜,袁九毅,等.沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究 [J]. *中国沙漠*, 2003,23(3):311-315.
- [34] 孔琴心,熊效振,刘广仁.荒漠地区直接太阳光谱的测量 [J]. *高原气象*, 1992,11(4):353-360.

致谢: TOMS AI 数据来自 Goddard Space Flight Center, 在此表示感谢。

作者简介: 邓祖琴(1981-),女,四川开县人,助理研究员,硕士,主要从事沙尘气溶胶和气候变化方面的研究.发表论文 3 篇。