

# 塔克拉玛干沙漠腹地 春季一次沙尘暴沙尘气溶胶的辐射特征

孔 丹<sup>1,2,3</sup>, 何 清<sup>1,2</sup>, 张瑞军<sup>1,2,3</sup>, 黄向春<sup>4</sup>

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆师范大学, 新疆 乌鲁木齐 830054; 4. 新疆巴州气象局, 新疆 库尔勒 841000)

**摘 要:** 利用塔中气象站地面辐射等气象资料结合 PM10 (空气动力学当量  $10 \mu\text{m}$  的悬浮颗粒) 质量浓度资料, 以 2007 年 4 月 15 日晴天辐射特征为背景对 4 月 22 日塔克拉玛干沙漠腹地发生的沙尘暴天气进行局地辐射特征和沙尘气溶胶与净辐射作相关分析。结果表明白天沙尘的辐射强迫对地表有冷却作用, 夜间起保温作用。观测期间, 总辐射日峰值减少量为  $507 \text{ W}/\text{m}^2$ , 地面长波日峰值增加量为  $185 \text{ W}/\text{m}^2$ , 地面净辐射能量收支表现为白天的日峰值减少量为  $198 \text{ W}/\text{m}^2$ , 夜间的日峰值增加量为  $40 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

**关键词:** 塔克拉玛干沙漠; 沙尘气溶胶; 辐射强迫

中图分类号: P422.9

文献标识码: A

## 引 言

沙尘暴已经成为人们关注的焦点, 沙尘气溶胶的气候效应越来越受到科学家的关注。因为沙尘气溶胶是地球—大气—海洋系统的一个重要组分, 它主要通过直接辐射强迫、间接辐射强迫和间接化学影响 3 种方式影响气候变化<sup>[1]</sup>。气溶胶对辐射的影响取决于其时间和空间的分布、自身的物理化学性质以及下垫面的光学性质。直接辐射强迫取决于沙尘气溶胶光学特性、时空分布、大气状况以及地表反照率等因素<sup>[2]</sup>。气溶胶对地表辐射强迫 > 对大气层顶辐射强迫, 对太阳辐射的削减会导致地面降温, 而对长波辐射的吸收则导致沙尘层以下的大气增温, 沙尘层上的大气冷却, 大气温度垂直分布则引起大气动力结构、大气热力结构的变化<sup>[3-4]</sup>。作为凝结核的沙尘气溶胶对云滴浓度、云滴增长、云量及云寿命有重要影响, 最终通过改变云的短波反照率及红外吸收影响地—气辐射能收支<sup>[5]</sup>。

塔克拉玛干沙漠是我国第一大沙漠, 位于新疆塔里木盆地, 是我国西北地区沙尘暴和沙尘气溶胶

的主要源地。2007 年 4 月共发生 2 次沙尘暴、10 次扬沙、26 次浮尘天气。本文利用塔中气象站地面观测资料, 结合 PM10 质量浓度数据, 对该地区沙尘暴时期沙尘气溶胶的辐射特性和局地地表辐射通量与 PM10 质量浓度相关关系进行分析。

## 1 资料与方法

选择位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中大气环境观测试验站 (83°39'E, 38°58'N, 海拔 1 099.3 m) 为研究对象, 利用该站的 2007 年 4 月 15 日 (晴天) 以及 4 月 22 日 (沙尘暴) 的地面观测记录和辐射数据分析 PM10 对净辐射通量的干扰情况。塔中大气环境观测试验站辐射观测架上, 安装从荷兰 Kipp & Zonen 引进的 CM21 型短波辐射仪、CM121B 型散射辐射仪、CG4 型长波辐射仪和 UV-S-AB 型紫外辐射仪, 可以获取短波辐射、长波辐射、紫外辐射和散射辐射数据, 数据精度为  $1 \text{ W}/\text{m}^2$ 。应用美国 TEOM 1400 型大气粒子检测仪, 获取 PM10 质量浓度数据, 数据精度为  $0.01 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。通过 4 月晴天与沙尘天地面辐射资料的对比, 分析估算沙尘气溶

收稿日期: 2008 - 02 - 27; 改回日期: 2008 - 05 - 23

基金项目: 国家自然科学基金 (40775019)、中国沙漠气象科学研究基金 (SQJ2005001)、中国气象局多轨道业务建设项目 (QY20070201) 共同资助

作者简介: 孔丹 (1982 - ), 女, 汉族, 在读硕士, 主要从事资源开发环境保护研究。E-mail: shirly - 921@163.com

胶的地面辐射强迫,并利用 PM10 质量浓度数据拟合粒径  $10\ \mu\text{m}$  以下沙尘气溶胶对地面净辐射强迫强度。地表反射率按实测资料选取范围  $0.25 \sim 0.4$ ,太阳常数  $1\ 367\ \text{W}/\text{m}^2$ ,本文仅以晴天条件为背景分析沙尘的辐射强迫,暂不考虑水汽和云的影响。

地面气象观测应用北京时,以每日 20:00 为日界;PM10 质量浓度采集应用北京时,以每日 0:00 为日界;而辐射数据由于受太阳位置影响,应用地方时,以每日地方时 0:00 点为日界。为说明方便,在做相关分析时,人为把地面气象观测资料 PM10 质量浓度数据根据塔中站经度时差为  $2\ 423\ \text{h}$  调整为 4 月 22 日地方时的数据进行分析描述。

## 2 天气过程描述

国家标准规定,沙尘天气的等级主要根据沙尘天气当时的地面水平能见度划分,依次分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴<sup>[6]</sup>:

浮尘——能见度  $< 10\ \text{km}$ ;

扬沙—— $1\ \text{km} < \text{能见度} < 10\ \text{km}$ ;

沙尘暴——能见度  $< 1\ \text{km}$ 。

通过对塔克拉玛干沙漠起沙风速进行研究,11.4 m 高度上瞬时流体起动风速为  $7.8\ \text{m}/\text{s}$ ,冲击起动风速为  $6.63\ \text{m}/\text{s}$ ,10 m in 时距流体起动与冲击起动风速分别为  $7.4\ \text{m}/\text{s}$  与  $6\ \text{m}/\text{s}$ <sup>[7-8]</sup>。我们选取 11.4 m 高度、10 m in 时距流体起动风速  $7.4\ \text{m}/\text{s}$  为标准,分析沙尘天气状况。

受蒙古高压底部偏东风的影响,2007 年 4 月 22 日塔克拉玛干沙漠发生 1 次沙尘暴天气过程,塔克拉玛干腹地塔中站在 4 月 22 日(北京时)3 时 17 分至 14 时 09 分出现沙尘暴天气,14 时 09 分至 17 时出现扬沙天气,17 时之后随浮尘天气结束整个沙尘暴天气过程。

从图 1 可以看出,在 2007 年 4 月 22 日 3 时沙尘暴初始阶段除气压外其他地面气象要素曲线出现拐点;之后 4 时至 14 时沙尘暴发生阶段,风速、气温和能见度变化不明显,气压呈逐渐增高趋势,相对湿度呈正态分布;之后随沙尘天气结束各地面气象要素恢复常态。

4 月 22 日 3 时风速为  $6.6\ \text{m}/\text{s}$  并持续增加,在 4 时达到最大值  $8.9\ \text{m}/\text{s}$ ,沙尘天气开始,之后至 14 时平均风速  $> 7.4\ \text{m}/\text{s}$  共持续了 11 h,在 15 时风速降到  $6.4\ \text{m}/\text{s}$ ,天气为扬沙,随后逐渐减小沙尘天气结束。由于日出前沙尘使地面长波辐射增加地表气

温在 3 时至 4 时之间为升温,在 4 时气温为  $20.8$ ,而日出后,沙尘削弱了总辐射使气温逐渐降低,在 9 时降到沙尘暴发生阶段的最低值  $13.9$ ,14 时沙尘暴天气结束后气温恢复正常。能见度在 3 时至 4 时之间,从  $3\ \text{km}$  降到  $0.4\ \text{km}$ ,并从 4 时至 14 时一直  $< 1\ \text{km}$ ,15 时为  $1.5\ \text{km}$ ,到 22 时能见度恢复到  $6\ \text{km}$ 。相对湿度表现为正态分布,受温度影响,3 时到 4 时减小随后增大,在 8 时增大到最大值  $42\%$ ,随后减小。沙尘暴期间气压为线性增加,在 13 时增大到最大值  $891\ \text{hPa}$ ,随后气压降低。可以看出沙尘暴期间,风速增加,气温在日出前升温、日出后降温,相对湿度正态分布,能见度  $< 1\ \text{km}$ ,气压增加。

2007 年 4 月 22 日当日由于沙尘影响,天气为浮尘时段总云量和低云量为 0,但是从数据分析,地面水汽含量较少,而且水汽吸收主要位于太阳短波辐射的近红外波段,气溶胶对太阳辐射的衰减位于整个太阳短波辐射光谱波段。因此研究该时段辐射强迫时,重点分析 PM10 对地表辐射收支的影响。暂不判断水汽对辐射强迫值的影响。

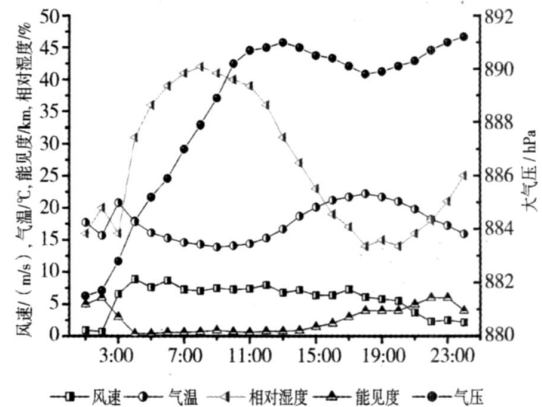


图 1 2007 年 4 月 22 日风速、气温、相对湿度、能见度、大气压日变化曲线

Fig 1 The daily variation of wind speed, temperature, relative humidity, visibility and pressure on April 22, 2007

## 3 辐射通量变化特征

### 3.1 辐射收支日变化

图 2 为沙尘天气与晴天各辐射通量日变化的对比。可以看出沙尘天气与晴天对比短波辐射通量减少,长波辐射通量增加,沙尘对地面净辐射的影响主要受短波辐射效应控制,因此总体表现为减少。总辐射差额最大出现在地方时 11 时,达到  $507\ \text{W}/\text{m}^2$ ,

减少了 59%。反射辐射差额最大出现在地方时 11 时,达到  $123 \text{ W/m}^2$ ,减少 52%。大气长波辐射总体表现为增加,0 时至 14 时为增加,最大增量出现在凌晨 2 时,达到  $84 \text{ W/m}^2$ ,增加了 27%,14 时后随沙尘暴强度减弱辐射通量减少。地面长波则表现为 0 时至 7 时增加,7 时之后减少,辐射差额最大出现在 12 时,达到  $185 \text{ W/m}^2$ ,减少 28%。净辐射则表现为白天(日出至日落)辐射通量减小(短波作用),夜间增加(长波作用),白天最大减少量出现在 11 时,达

到  $198 \text{ W/m}^2$ ,减少 54%。夜间最大增加量出现 2 时和 19 时,数值在  $40 \text{ W/m}^2$  左右,增加 40% 左右。结果表明塔克拉玛干沙漠的沙尘辐射强迫在 50% 左右,要高于北京地区的辐射通量减少量 40%<sup>[9]</sup>。结合图 1 沙尘暴天气判断,从地方时 1 时发生沙尘暴开始,地面长波和大气长波辐射通量发生变化,5 时 40 分日出后短波辐射通量开始变化,12 时沙尘暴天气结束至日落结束,其结果为白天沙尘暴期间净辐射减少,气温降低,夜间净辐射增加,气温升高。

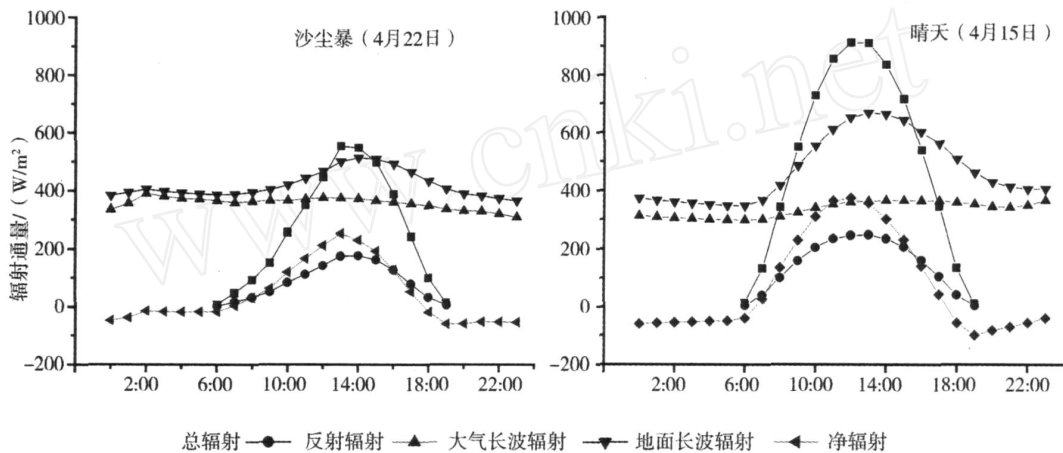


图 2 辐射收支日变化

Fig 2 Daily average variations of radiation budget

### 3.2 反射率日变化

到达地面的太阳总辐射不会被地面完全吸收,其中被地面反射回大气的辐射量称为反射辐射或地面短波辐射,下垫面反射率就是表征下垫面反射能力的特征系数,是地面辐射平衡的一项重要参数,受下垫面的物理性质(温度、颜色和粗糙度等)、太阳高度角、天空状况等因素影响。塔中位于南疆盆地,下垫面干燥,沙漠呈浅黄色。反射率在 0.25 ~ 0.35 之间。

从图 3 中可以看出,晴天(4.15)的反射率曲线表现为明显的“U 型分布,随太阳高度角增大而减小,最高值为日出时到达 0.35。沙尘暴(4.22)天气反射率明显增大,随强度和时间的变化有所不同,在曲线上表现不出晴天的典型曲线而出现峰值和谷值。沙尘暴天气比晴天反射率最大增量在 12 时,达到 0.05 增加 18.5%,沙尘使地表反射率明显增加。

### 3.3 散射与直接辐射日变化

太阳辐射进入大气后,受到其中物质的削弱,到

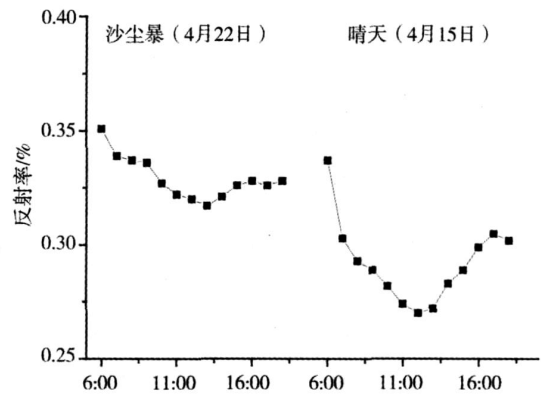


图 3 地表反射率日变化

Fig 3 Daily variations of surface albedo

达地面的部分为直接辐射,投影到水平面的直接辐射通量变化可以反馈天气过程中物质对太阳辐射的影响。沙尘气溶胶最直接影响太阳辐射的效应表现

在直接辐射的锐减。从图 4 可以看出,晴天的

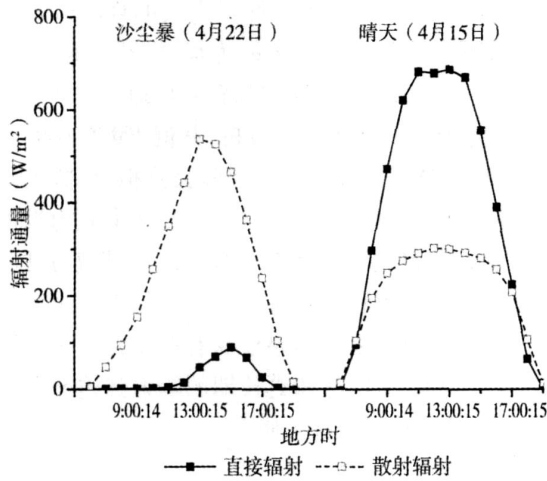


图 4 直接辐射与散射辐射日变化

Fig 4 Daily variations of direct radiation and scattering radiation

直接辐射极值出现在 13 时,达到  $686 \text{ W/m}^2$ ,而沙尘暴天气同一时间的直接辐射极值降到  $47 \text{ W/m}^2$ ,减少 93%,结果与辛金元等在腾格里沙漠观测研究结果一致<sup>[10]</sup>。相对于直接辐射的锐减,散射同步增加,沙尘暴散射辐射极值出现在 13 时,达到  $536 \text{ W/m}^2$ ,而晴天同一时间的散射辐射值只有  $300 \text{ W/m}^2$ ,增加 79%。

### 4 PM10质量浓度特征及与辐射分量相关关系

图 5 为沙尘暴天气的总辐射通量、反射辐射通量、大气长波辐射通量、地面长波辐射通量和净辐射通量与当日 PM10 数据所绘制的散点图以及利用二次函数拟合出的曲线分布图。辐射分量与 PM10 质量浓度进行相关分析及函数曲线拟合,其中各曲线特性显示利用平方曲线拟合效果较好,相关系数均在 0.6 以上。得出以下经验方程 (表 1):

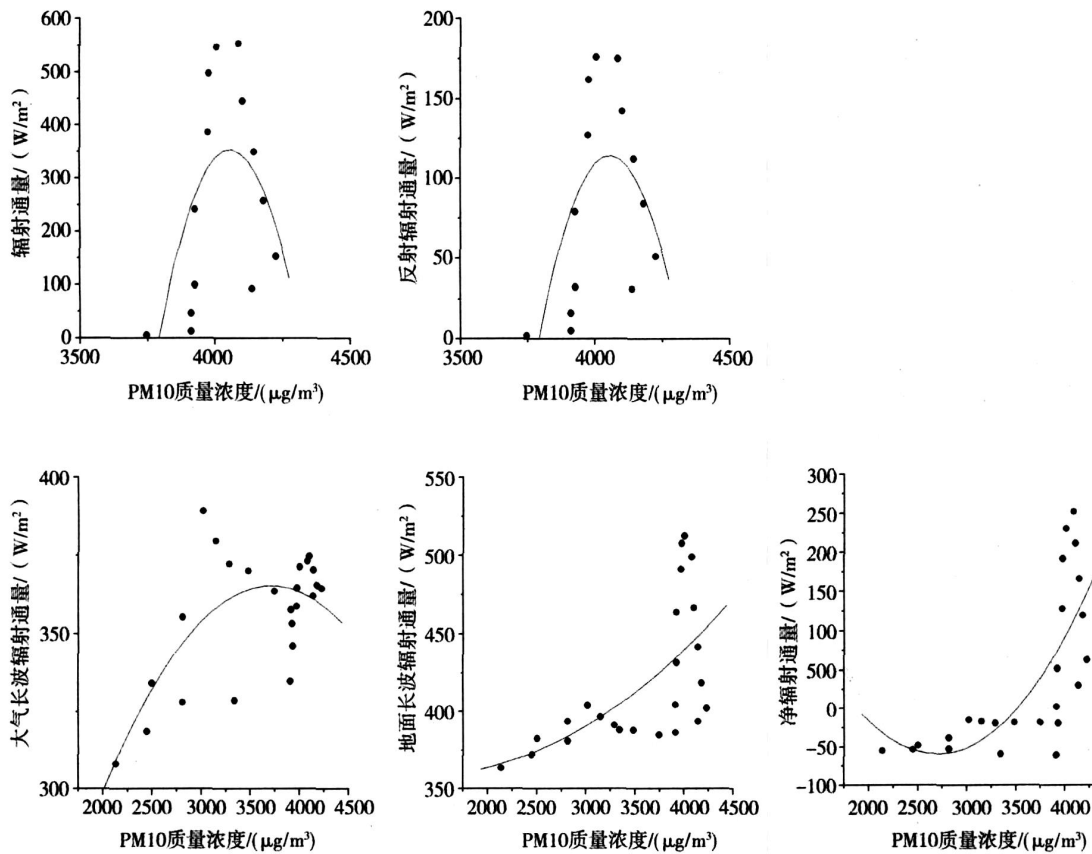


图 5 沙尘暴天气各辐射通量与当日 PM10 质量浓度相关散点图及二次函数拟合曲线

Fig 5 The correlation between all kinds of radiation and mass concentration of PM10

表 1 各辐射分量与 PM10质量浓度拟合经验方程

变量	方程	相关系数
总辐射	$y = -82759.25 + 40.98x - 0.005x^2$	$R = 0.607$
反射辐射	$y = -26552.77 + 13.15x - 0.002x^2$	$R = 0.609$
大气长波	$y = 54.46 + 0.17x - 2.26E - 5x^2$	$R = 0.672$
地面长波	$y = 374.53 - 0.03x + 1.09E - 5x^2$	$R = 0.672$
净辐射	$y = 587.67 - 0.48x + 8.92E - 5x^2$	$R = 0.721$

其中,  $y$  为辐射通量, 自变量  $x$  为 PM10 质量浓度, 定义域为  $[2000, 4500]$ 。从结果输出看总辐射和反射辐射变化曲线呈开口向下抛物线, 辐射通量随 PM10 质量浓度增加而先增后减。大气长波辐射的变化曲线呈开口向下抛物线的左翼形式, 辐射通量随 PM10 质量浓度增加而增加。地面长波辐射的变化曲线呈开口向上抛物线的右翼形式, 辐射通量随 PM10 质量浓度增加而增加。净辐射的变化曲线呈开口向上抛物线的右翼形式, 辐射通量随 PM10 质量浓度增加而增加。

由图中曲线的变化趋势可以看出, 沙尘天气的短波辐射总体变化趋势是减小的, 在 PM10 质量浓度  $>4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时, 短波辐射通量随 PM10 质量浓度增加而减小。沙尘天气长波辐射总体变化趋势是增加的, 在 PM10 质量浓度增加时, 大气长波辐射和地面长波辐射通量都呈增加趋势。从图中看出总辐射和大气长波辐射的增量要大于反射辐射和地面长波辐射, 因此净辐射值在 PM10 质量浓度增加时, 也表现为增加趋势。

## 5 结果与讨论

(1) 以 2007 年 4 月 15 日晴天为背景, 得到了 4 月 22 日沙尘暴天气辐射平衡各分量的增量。总辐射减少。反射辐射减少。大气长波辐射总体表现为增加, 14 时后随沙尘暴强度减弱表现为辐射通量的减少, 但减少量小于增加量。地面长波辐射则表现为 0 时到 7 时增加, 7 时之后减少。净辐射则表现为白天 (日出至日落) 辐射通量减小 (短波作用), 夜间增加 (长波作用)。

(2) 沙尘天气的短波辐射总体变化趋势是减小的, 在 PM10 质量浓度  $>4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时, 短波辐射通量随 PM10 质量浓度增加而减小。沙尘天气长波辐射总体变化趋势是增加的, 在 PM10 质量浓度增加时, 大气长波辐射和地面长波辐射通量都呈增加趋

势。净辐射值在 PM10 质量浓度增加时, 也表现为增加趋势。

20 世纪 90 年代以来, 许多重大的环境气候问题的出现使大气气溶胶称为学术界的研究热点<sup>[11-13]</sup>。本文以晴天为背景, 针对局地 1 次沙尘暴天气中各个辐射分量进行分析, 并就 PM10 质量浓度对净辐射通量的强迫进行经验公式拟合, 数据均以仪器测量和客观计算所得值为准, 并未人为添加或修改数据, 因此仅供参考, 待以后丰富研究方法和手段, 数据资料累积后再进一步订正修改。由于仅限单站天气过程, 因此结果仅具有典型性而不具有代表性。目前, 更广泛和更长期的辐射强迫研究及其气候效应有待于更深入研究。

### 参考文献:

- [1] Schwartza S E, Coauthors Group report Connection between aerosol and properties and forcing of climate [A]. In: Charlson R J, J Heintzenberg eds Aerosol Forcing of Climate[M]. 1995. 251 - 280.
- [2] 马鹏里, 张强, 杨兴国, 等. 大气化学研究进展—臭氧、气溶胶研究综述 [J]. 干旱气象, 2003, 12(21): 66 - 70.
- [3] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟 [J]. 大气科学, 1998, 22(4): 418 - 427.
- [4] Alpert P, Ganor E. Sahara mineral dust measurements from TOMS: Comparison to surface observations over the MiddleEast for the extreme dust storm, March 14 - 17 1998 [J]. J Geophys Res, 2001, 106(D16): 18132 - 18146.
- [5] Levin Z, Ganor E, Gladstein V. The effects of desert particles coated with sulfates on rain formation in the eastern Mediterranean [J]. J Appl Meteor, 1996, 35: 1511 - 1523.
- [6] 沙尘暴天气监测规范. 中华人民共和国国家标准 GB/T 20479 - 2006.
- [7] 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速 [J]. 地理学报, 1995(50): 360 - 367.
- [8] 董治宝, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠石油公路风沙危害 [J]. 环境科学, 1997, 1(18): 4 - 9.
- [9] 刘强, 王明星, 李磊. 大气气溶胶研究现状和发展趋势 [J]. 中国粉体技术, 1999, 6(5): 17 - 23.
- [10] 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(5): 311 - 315.
- [11] S 图梅著, 王明星, 王庚辰, 等译. 大气气溶胶 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. 174 - 177.
- [12] 成天涛, 沈志宝. 中国西北大气沙尘的辐射强迫 [J]. 高原气象, 2002(10): 473 - 479.
- [13] 王娜, 张镭. 沙尘气溶胶辐射特征及其观测方法初步评述 [J]. 干旱气象, 2007, 12(25): 68 - 73.

(下转第 62 页)

## Characteristics of Temperature Variation in Shijiazhuang in Recent 46 Years

B AN Tao, L IAN Zhiluan

(*Shijiazhuang Meteorological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China*)

**Abstract:** Based on the daily temperature observation data of 5 stations in Shijiazhuang during 1961 - 2006, the trends and characteristics of the daily mean temperature, the maximum and minimum daily temperature, the temperature daily range, as well as the hot and cool days were analyzed. The results show that the climate in Shijiazhuang had obviously warming trends in the recent 46 years, with the strongest warming trends in winter. Monthly temperature changes show that the most obvious amplitude was in February and the weakest was in May. Similar to the mean temperature, both the maximum and minimum temperature were in a rising trend as well. The rising trend of minimum temperature was clearer than the maximum and mean temperature. The strongest warming trend occur in the middle and the eastern part of Shijiazhuang. Temperature daily range was remarkably getting narrower in the recent 46 years. This was probably due to the greater increase in minimum temperature than maximum temperature. The cool days were decreasing but the change of hot days was not obvious. Hot days in the western, northern and southern part of Shijiazhuang show weak decreasing trend.

**Key words:** temperature variation; daily temperature range; hot days; cool days

(上接第 40页)

## Analysis on Radiation Forcing of Dust Aerosol in a Spring Typical Dust Storm Event in the Centre of Takla Makan Desert

KONG Dan<sup>1,2,3</sup>, HE Qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Ruijun<sup>1,2,3</sup>, HUANG Xiangchun<sup>4</sup>

(1. *Institute of Desert and Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;*

2. *Key Laboratory of Tree-ring Physiochemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;*

3. *Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 4. Bazhou Meteorological Bureau, Kuerle 841000, China)*

**Abstract:** Based on the meteorological data and PM10 data from the weather station in the centre of the Takla Makan desert, the local radiation characteristics over there on April 22, 2007, on which the sandstorm weather event occurred, and the correlation of dust aerosol and the net radiation were analyzed and compared with the sunshine day's radiation characteristics on April 15. The results indicate that the radiation forcing of dust aerosol caused surface temperature decreasing in daytime and increasing at night. During the observation period, the peak value of the total radiation decreased by  $507 \text{ W/m}^2$ , and the peak value of long-wave radiation increased by  $185 \text{ W/m}^2$ . The maximum of the net radiation decreased by  $198 \text{ W/m}^2$  in day time and increased by  $40 \text{ W/m}^2$  at night.

**Key words:** Takla Makan desert; dust aerosol; radiation forcing