

不同沙尘天气微气象和沙尘演变规律的对比研究

朱好¹ 张宏升^{1,†} 彭艳^{1,2} 陈家宜¹ 朴淳雄³

¹北京大学物理学院大气科学系,中韩大气研究中心,北京 100871; ²陕西省气象局气象预报中心,西安 710015;

³韩国首尔国立大学大气科学系,中韩大气研究中心,首尔 151-742; [†]通讯作者,E-mail: hsdq@pku.edu.cn

摘要 利用内蒙古浑善达克沙地沙尘暴实验探测资料,给出 2004 年春季多次沙尘天气过程近地面微气象学要素、湍流通量及沙尘浓度的极值对比,重点分析了 3 月 27—28 日强沙尘暴过境时近地面微气象学要素和辐射分量的变化特征。结果表明:沙尘天气过程中,白天近地层温差均有不同程度的降低,夜间逆温强度减弱;净辐射与感热通量较晴空值均有不同程度的削弱。沙尘天气过境时,动量通量显著增加,动力湍流与热力湍流配合,有利于加强沙尘源区的局地起沙和沙尘的垂直输送过程。3 月 27—28 日强沙尘暴过境时,伴随地面水平风向的转变,沙尘浓度迅速增加,风速及其垂直梯度增大;在沙尘暴增强阶段,近地层降温达 7℃,比湿出现极大值,净辐射和感热通量降为负值。当沙尘浓度达到最大值后,净辐射上升至零,反映了夜间沙尘气溶胶对低层大气和地表的保温作用。

关键词 沙尘暴; 微气象学; 湍流通量; 浑善达克沙地; 观测法

中图分类号 P412

Dust Concentration and Micrometeorological Elements in Different Dust Storm Events

ZHU Hao¹, ZHANG Hongsheng^{1,†}, PENG Yan^{1,2}, CHEN Jiayi¹, Soon-Ung Park³

¹Department of Atmospheric Science, Peking University, Center of Sino-Korean Atmospheric Sciences, Beijing 100871;

²Center of Weather Forecast, Shanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710015; ³Department of Atmospheric Science, Seoul National University, Center of Sino-Korean Atmospheric Sciences, Seoul 151-742;

[†]Corresponding Author, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

Abstract Based on data from the dust storm monitoring station over Hunshandake Desert Area, Inner Mongolia, the maximum values of micrometeorological variables, turbulent fluxes and dust concentration in the surface layer are compared for eight dust events in the spring of 2004, and the characteristics of micrometeorology and radiation components in the strongest dust storm event in March 27-28 are analyzed. The results show that temperature differences in the surface layer, net radiation and sensible heat fluxes all decrease during daytime, and the strength of temperature inversion weakens at night. When dust events occur, momentum fluxes increase. It is found that both mechanical turbulence and thermodynamic turbulence play important roles in local dust rising and vertical dust transport over source regions. During the passage of the strongest dust storm event in March 27-28, dust concentration, wind speed and vertical shear of wind velocity increase rapidly, together with changes of wind direction. At the strengthening stage of the dust storm, temperature falls by about 7℃, and there is a peak value of specific humidity. Both the net radiation and sensible heat fluxes become negative. When dust concentration reaches its maximum, the net radiation rises to zero, which reflects the heating effect of dust aerosol during nighttime.

Key words sand-dust storm; micrometeorology; turbulent fluxes; Hunshandake desert area; observation methods

国家自然科学基金(40775013),科技部公益专项经费(2008416018),高等学校博士学科点专项科研基金(20060001025)和国家高技术研究发展计划专项经费(2006AA06A306)资助

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-10-16

气象学将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴 3 个等级。目前,国内外对沙尘暴的研究主要集中在沙尘暴时空分布^[1-3]、沙尘暴过程的天气形势及卫星云图特征^[4-8]、沙尘气溶胶物理化学性质以及起沙机制、沙尘长距离输送的数值模拟研究^[9-14]等方面,并取得了一系列的研究成果。但由于资料的限制,对沙尘天气过程微气象学特征及湍流输送方面的研究相对较少。胡隐樵等^[15]利用 1993 年 5 月 5 日强沙尘暴的微气象要素和各辐射分量,分析了黑风暴的发生和发展机理,建立了一个干飑线发展的物理模型;胡泽勇等^[16]给出了敦煌地区沙尘暴过境时地面气象要素的变化特征;孙继明等^[17]分析了沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送的特征。

2004 年我国共发生了 18 次沙尘天气过程。其中,3 月 9—11 日的沙尘暴沙尘影响范围最广,沙尘天气涉及我国北方大部分地区以及长江中下游的部分地区;3 月 26—28 日出现了 2004 年最强一次的沙尘暴过程,造成全国 1200 多架次航班延误,内蒙古锡林郭勒盟 5000 多只牲畜走失或死亡。本文利用 2004 年春季浑善达克沙地地区沙尘暴实验观测资料,给出 8 次沙尘天气过程近地层微气象学要素、湍流输送和沙尘浓度的极值对比,并重点分析了 3 月 27—28 日强沙尘暴过境时的微气象学要素变化特征,为深入理解沙尘天气发生机理提供参考。

1 资料获取与处理

浑善达克沙地位于内蒙古自治区中东部,是我国四大沙地之一,也是沙尘暴北方路径上的一个重要沙源,主要影响我国华北和东北地区,有时可以向南影响到黄淮地区。沙尘暴实验站位于内蒙古自治区浑善达克沙地南缘,平均海拔 1250 m,东部约 10 km 处为农田。沙尘暴实验观测平台为 20 m 高的气象观测塔,主要观测项目包括:风向、4 层风速、温度和湿度廓线、辐射和沙尘质量浓度等。所有观测均为连续、自动探测,采样间隔为 10 分钟,本文对观测数据进行 30 分钟滑动平均。动量通量(τ)、感热通量(H)和潜热通量(LE)采用空气动力学方法计算,即

$$\tau = \rho u_*^2, \quad (1)$$

$$H = -\rho C_p u_* \theta_*, \quad (2)$$

$$LE = -\rho L_s u_* q_*. \quad (3)$$

其中 ρ 为大气密度, C_p 为空气的定压比热容, L_s 是水的汽化潜热, u_* 是摩擦速度, θ_* 是温度特征尺度,

q_* 是比湿特征,分别计算如下:

$$u_* = k \bar{u}_2 / \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) - \Psi_M \left(\frac{z_2}{L} \right) \right], \quad (4)$$

$$\theta_* = k (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1) / \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \Psi_H \left(\frac{z_2}{L} \right) + \Psi_H \left(\frac{z_1}{L} \right) \right], \quad (5)$$

$$q_* = k (\bar{q}_2 - \bar{q}_1) / \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \Psi_q \left(\frac{z_2}{L} \right) + \Psi_q \left(\frac{z_1}{L} \right) \right]. \quad (6)$$

其中 $k = 0.4$, 为 Von Kármán 常数; z_0 为地表粗糙度;

$L = \frac{\bar{\theta} u_*^2}{kg\theta_*}$ 为 Obukhov 长度; 考虑 2004 年 3 月实验站地表基本无植被,零平面位移数值取为零; Ψ_M , Ψ_H 和 Ψ_q 分别是风速、温度和湿度稳定度修正函数的积分形式,这里采用 Dyer-Businger^[18] 形式:

$$\begin{cases} \Psi_M = \begin{cases} 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \\ \quad - 2 \arctg x + \frac{\pi}{2} & \frac{z}{L} < 0, \\ -5 \frac{z}{L} & \frac{z}{L} \geq 0; \end{cases} \\ \Psi_H = \Psi_q = \begin{cases} 2 \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) & \frac{z}{L} < 0, \\ -5 \frac{z}{L} & \frac{z}{L} \geq 0; \end{cases} \\ x = \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{1/4}. \end{cases} \quad (7)$$

2 结果分析

2.1 沙尘天气过程近地层沙尘浓度及气象要素的演变

表 1 给出 2004 年春季浑善达克沙地 8 次沙尘天气过程近地面沙尘浓度及气象要素的极值对比。8 次沙尘天气过程的主要影响系统均为蒙古气旋和冷锋。2004 年春季,我国北方气温回升迅速,地表层解冻早,同时降水偏少,土壤墒情下降,土质疏松,为初春沙尘天气的频繁发生提供了丰富的沙尘源。浑善达克沙地 2 月份至 4 月中上旬,没有一次有效的降水过程,地表干燥,由表 1 可见,近地层相对湿度均在 20% 以下。另一方面,2004 年 3 月影响我国北方的冷空气活动频繁,但大部分冷空气过程的势力并不强,移动速度较快,所造成的沙尘天气过程也相应较弱而且持续时间短。即使是 3 月 27—28 日的强沙尘暴过程,近地面最大风速也仅为 14.2 m/s。4 月中上旬,影响我国北方的冷空气活动势力明显

表 1 2004 年春季浑善达克沙地沙尘天气爆发气象要素统计

Table 1 Statistics of meteorological variables in dust events in spring of 2004 over the Hunshandake desert area

时间	过程类型	最大沙尘浓度 $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	风向	4 m 高最大风速 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	相对湿度/%	2 m 高最高 温度/℃
3月9—10日	沙尘暴	380	WNW	16.4	18	15.5
3月15—16日	扬沙	200	W	13.8	20	10.0
3月27—28日	强沙尘暴	>1000	W	14.2	17	15.9
3月29—30日	沙尘暴	350	WNW	13.1	15	2.4
3月30—31日	扬沙	180	W	12.7	11	-5.6
4月15—16日	沙尘暴	420	NW	11.6	15	14.7
4月25—26日	沙尘暴	600	SES	9.0	35	12.7
4月28—29日	扬沙	220	NEN	10.0	20	28.5

偏弱,尽管当时仍持续气温偏高、干旱少雨的气候条件,但由于激发沙尘天气的动力条件(持久的风力)不足,导致出现的沙尘天气过程偏少偏弱。由表1可见,4月份的3次沙尘天气过程近地层最大风速明显小于3月份。4月25—26日出现了一次降水过程,旱情缓和,加上气温回升,对植被生长有利,抑制了沙尘天气的发生。

图1给出2004年3月27—28日强沙尘暴过程前后近地层沙尘浓度的时间演变。晴空条件下,浑善达克沙地的背景沙尘浓度小于 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3月27日16时左右沙尘浓度开始迅速增加,18时超过 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$,并持续至20时左右;22:30出现第2个峰值为 $810 \mu\text{g}/\text{m}^3$,之后,沙尘浓度逐渐下降。3月28日的沙尘浓度变化也为双峰型,11:30沙尘浓度开始迅速增加,12:30达到极大值为 $940 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。第2个峰值出现在16时,为 $508 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图2和图3分别给出2004年3月27—28日强沙尘暴过程前后近地层水平风场、温度和比湿随时间的变化。3月27日强沙尘暴过境前,地面风向经历了两次调整:第1次在上午9时左右,风向由东南偏南转为西南偏南;第2次调整发生在16时的起

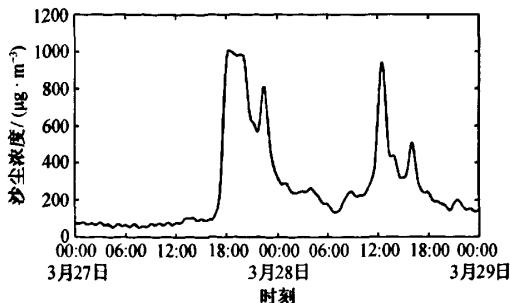


图1 近地层沙尘浓度的时间演变
Fig.1 Time series of dust concentration

沙阶段,由西南偏南转为西风。随着天气系统的过境,风向突变,风速增大,近地层沙尘浓度迅速增加,一方面与来流路径上沙尘源区的沙尘气溶胶平流输送有关,另一方面,局地起沙也是沙尘浓度的重要贡献之一。3月28日的沙尘天气过程中,风向基本维持在偏西风,最大风速为 14.2 m/s ,出现在12时左右,与沙尘浓度峰值出现时间较为一致。3月27日强沙尘暴过后,地表土壤更加疏松,在大风的作用

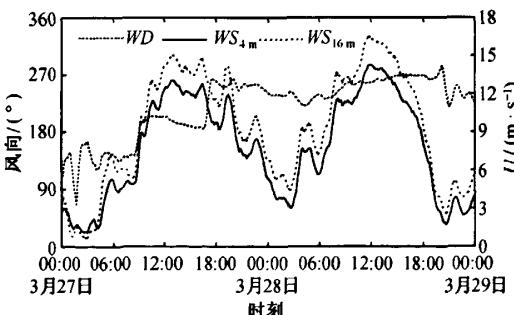


图2 近地层水平风场的时间演变

Fig.2 Time Series of horizontal wind speed and wind direction

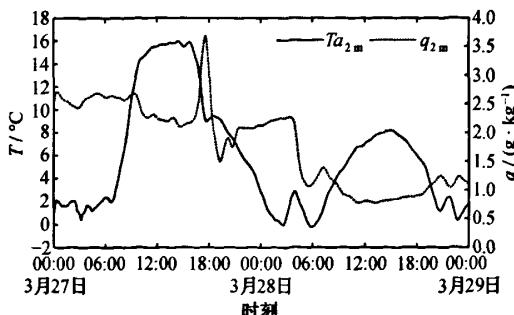


图3 近地层气温和比湿的时间演变
Fig.3 Time Series of temperature and specific humidity

下,有利于再次起沙。近地面风速的显著增强以及较长的持续时间是沙尘天气过境的天气特点之一。

图 2 同时给出强沙尘暴过境时近地层不同高度的风速变化特征。可见,沙尘天气过境前风速较小时,风速垂直梯度也较小;沙尘天气过境时,随着近地层风速的增大,风速垂直梯度亦显著增大。较大的风速梯度有利于加强沙尘的上扬过程。

由图 3 可见,强沙尘暴发生前,3月 27 日近地层增温显著,最高气温达 15.9℃,为 3 月份的最高值,比湿为 2.1 g/kg,相对湿度 17%,地面空气处于暖干状态,对起沙极为有利。16 时随着天气系统过境,气温急剧下降,空气湿度迅速增加。从起沙到沙尘浓度达到峰值的两小时内,气温下降了 7.0℃,相对湿度增加了 28%(图略),比湿增加了 1.6 g/kg,这与冷锋后的水汽输送有关。之后,气温持续下降,但下降速率变缓,相对湿度和比湿逐渐回落。由于受前一天地面降温的影响以及当天沙尘粒子对太阳辐射的削弱作用,28 日最高气温仅为 8.2℃,比湿数值较小,沙尘暴过程沙尘浓度与近地层温、湿度变化的关系不明显。27—28 日的沙尘暴强度大,持续时间较长,且强沙尘暴过后 29—31 日又有两次冷锋过境,分别出现了沙尘暴和扬沙天气,持续 4 天的沙尘天气使得 27—30 日的降温特别显著,30 日的最高气温仅为 -5.6℃,较 27 日的最高气温下降了 21.5℃。

2.2 沙尘天气过程近地层稳定性变化

表 2 给出 2004 年春季浑善达克沙地沙尘天气过程近地面层 2 m 和 4 m 间温度差的极值统计。晴空条件下白天近地层 2 m 和 4 m 之间最大温差达 0.7℃,夜间温差最低值为 -1.5℃。沙尘天气过程中,白天近地层温差均有不同程度的降低,夜间逆温强度减弱。近地层稳定性变化与当时的云天状况及沙尘气溶胶的辐射强迫均有关。如 3 月 15—16 日扬沙过程白天近地层的温度梯度最小,与冷锋过境后的多云天气有关;3 月 27—28 日的温差峰值均为 0.4℃,起沙后,27 日 16 时温差迅速降至零摄氏度以下。成天涛等^[19]利用 CCM3 的辐射模式 CRM 研究了大气沙尘的辐射强迫特性,指出大气沙尘的辐射强迫是冷却地面增暖大气。对大气的加热仅出现在沙尘层内,最大加热率出现在沙尘层上部和近地面层。近地层温度差反映了近地层大气的热力稳定状况。浑善达克沙地晴天条件下,日间近地层温差较大,近地层空气经常处于超绝热不稳定状态,配合沙尘天气发生前地表的剧烈增温,形成很强的热

力强迫作用。此时若伴有大尺度天气系统过境,大量沙尘由锋区附近强烈的抬升作用向上输送并随锋面系统移动,造成锋面和气旋移动路径上大范围的沙尘天气。

表 2 2004 年春季浑善达克沙地沙尘天气过程近地层 2 m 与 4 m 之间气温差

Table 2 Temperature differences between 2 m and 4 m high in dust events in the spring of 2004 over the Hunshandake desert area

时间	ΔT_{\max} (白天)/℃	ΔT_{\min} (夜间)/℃
3月 9—10 日	0.24	-0.30
3月 15—16 日	0.17	-0.09
3月 27—28 日	0.40	-0.40
3月 29—30 日	0.61	-0.76
3月 30—31 日	0.60	-1.50
4月 15—16 日	0.65	-0.23
4月 25—26 日	0.34	-0.10
4月 28—29 日	0.36	-0.15

2.3 沙尘天气过程中辐射及湍流通量的变化

表 3 给出 2004 年春季浑善达克沙地 8 次沙尘天气过程近地层净辐射、感热通量和动量通量的峰值对比。春季,净辐射随着太阳高度角的增大而增大。晴空条件下,3 月份的平均净辐射和感热通量峰值分别为 395 和 290 W/m²;4 月份的平均净辐射和感热通量峰值分别为 470 和 400 W/m² 左右。3 月份至 4 月中上旬无降水、地表干燥,潜热通量可以忽略不计。沙尘天气过程,净辐射和感热通量均有不同程度的削弱。3 月 15—16 日及 4 月 28—29 日两次扬沙过程的净辐射和感热通量削弱较沙尘暴和强沙尘暴过程明显,主要与当时的云天状况有关,这两

表 3 2004 年春季浑善达克沙地沙尘天气过程近地层净辐射及湍流通量极值对比

Table 3 Comparison of net radiation and turbulent fluxes in dust events in the spring of 2004 over the Hunshandake desert area

时间	净辐射/ (W·m ⁻²)	感热通量/ (W·m ⁻²)	动量通量/ (N·m ⁻²)
3月 9—10 日	309	112	1.2
3月 15—16 日	162	97	0.8
3月 27—28 日	330	240	0.9
3月 29—30 日	403	347	0.8
3月 30—31 日	410	400	0.8
4月 15—16 日	440	350	0.6
4月 25—26 日	360	144	0.4
4月 28—29 日	244	127	0.3

次扬沙过程天空均多云,4月28—29日出现少量降水。4月25—26日出现了大范围的降水过程,感热通量和潜热通量数值相当。沙尘天气发生时,由于净辐射的削弱,使近地面的湍流发展受到限制,影响地气间热量输送。3月下旬和4月中旬的4次沙尘天气过境前,感热通量削弱较小,热力湍流较强,有利于对流的发展和沙尘垂直输送的加强,从而加强沙尘天气过程。

图4给出2004年3月27日强沙尘暴过境时短波入射辐射、净辐射和感热通量的变化曲线。15时高空沙尘粒子先平流输送到达本站,由于沙尘粒子散射和反射太阳辐射,导致入射短波辐射减少,地面降温,辐射分量和感热通量均有所降低。16时随着近地层沙尘浓度的增加,短波入射辐射迅速降为零,净辐射降为负值,反映了地表向上长波辐射大于沙尘气溶胶向下长波逆辐射,地面净损失能量。沙尘层及其以下大气因吸收短波和长波辐射而出现增温^[20],近地层形成逆温,此时感热通量亦降为负值。18时沙尘浓度达到极大值,净辐射上升至零附近,即沙尘逆辐射与地面长波辐射相当,与胡隐樵等^[15]在1993年5月5日强沙尘暴过境期间的观测结果类似,反映了夜间沙尘气溶胶对低层大气和地表的保温作用。

表3同时给出2004年春季浑善达克沙地8次沙尘天气过程近地层动量通量的峰值对比。浑善达克沙地晴空条件下,近地层动量通量数值较小,峰值小于0.3 N/m²。3月份冷空气活动较4月份强,3月份的5次沙尘天气过程近地层动量通量峰值均在0.8 N/m²以上,动力湍流与热力湍流配合,有利于加强沙尘源区的局地起沙和沙尘的垂直输送过程。由

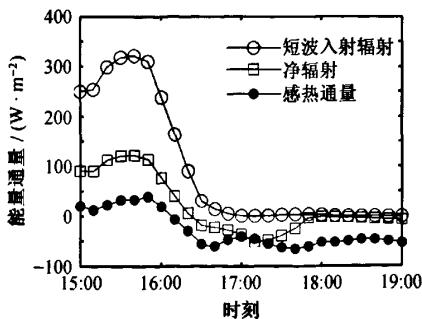


图4 2004年3月27日浑善达克沙地强沙尘暴过境时近地层能量通量随时间的变化

Fig.4 Temporal variations of energy fluxes during the passage of the strongest dust storm on March 27, 2004, over the Hunshandake desert area

于动力条件不足,4月份的3次沙尘天气过程强度较弱,且持续时间较短。

湍流输送对于局地起沙和沙尘的垂直输运有重要的作用,8次不同类型沙尘天气过程,湍流通量峰值与沙尘浓度峰值的出现时间一致性较好,说明局地起沙是沙尘气溶胶的重要贡献之一,即浑善达克沙地是重要的沙尘源之一。

3 结论

本文利用浑善达克沙地地区沙尘暴实验观测资料,给出2004年春季8次不同类型沙尘天气过程近地面微气象学要素、湍流输送和沙尘浓度的极值对比,重点分析了2004年3月27—28日强沙尘暴过境时近地面微气象要素和辐射分量的变化特征,得到以下认识。

1) 2004年春季降水偏少、气温偏高,冷空气活动频繁但强度较弱,所造成的沙尘天气过程也相应较弱而且持续时间短。2004年发生的一次强沙尘暴过程,出现在3月27—28日。4月份沙尘天气过程在数量和强度上均较3月份偏少、偏弱。

2) 沙尘天气过程中,白天近地层温差均有不同程度的降低,夜间逆温强度减弱。受云天状况和沙尘气溶胶辐射强迫的影响,沙尘天气过程中净辐射与感热通量较晴空值均有不同程度的削弱。3月下旬和4月中旬的4次沙尘天气过境前,感热通量削弱较小,热力湍流较强,有利于对流的发展和沙尘垂直输送的加强。沙尘天气过境时,动量通量显著增加,动力湍流与热力湍流配合,有利于加强沙尘源区的局地起沙过程。

3) 3月27—28日强沙尘暴过境时,伴随地面水平风向的转变,风速及其垂直梯度增大,沙尘浓度迅速增加。在沙尘暴增强阶段,近地层降温达7℃,比湿出现极大值,净辐射和感热通量降为负值,近地层提前形成逆温层结。当沙尘浓度达到最大值后,沙尘层大气逆辐射增强,净辐射上升至零,反映了夜间沙尘气溶胶对低层大气和地表的保温作用。

参考文献

- [1] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策.地理学报,2000,55(5): 513-521
- [2] Wang S G, Wang J Y, Zhou Z J, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China. Atmospheric Environment, 2005, 39: 509-520

- [3] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Modern dust storms in China: An overview. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 559-574
- [4] McTainsh G H. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Australia. *Arid Environments*, 1998; 457-466
- [5] Qian W H, Tang X, Quan L S. Regional characteristics of dust storms in China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4895-4907
- [6] Qian W H, Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *Journal of Climate*, 2002, 15: 1216-1229
- [7] Chung Y S, Yoon M B. On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(13): 2387-2397
- [8] 魏丽, 沈志宝. 大气沙尘辐射特性的卫星观测. *高原气象*, 1998, 17(4): 347-355
- [9] Wang G X, Tuo W Q, Du M Y. Flux and composition of wind-eroded dust from different landscapes of an arid inland river basin in north-western China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 373-385
- [10] Guo J H, Rahn K A, Zhuang G S. A mechanism for the increase of pollution elements in dust storms in Beijing. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 855-862
- [11] Goudie A S, Middleton N J. Saharan dust storms: Nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 2001, 56: 179-204
- [12] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16: 233-249
- [13] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. *大气科学*, 2003, 27(4): 591-606
- [14] 朱福康, 江吉喜, 郑新江, 等. 沙尘暴天气研究现状和未来. *气象科技*, 1999, 4: 1-8
- [15] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. *大气科学*, 1997, 21(5): 581-589
- [16] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 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
- [17] 孙继明, 肖稳安, 牛生杰, 等. 沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析. *南京气象学院学报*, 2002, 25(4): 489-495
- [18] Dyer A J. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology*, 1974, 7: 363-372
- [19] 成天涛, 沈志宝. 中国西北大气沙尘的辐射强迫. *高原气象*, 2002, 21(5): 473-478
- [20] 成天涛, 吕达仁, 徐永福. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的辐射强迫. *高原气象*, 2005, 24(6): 920-926