

# 尘卷风对沙尘气溶胶的贡献及其与太阳辐射的关系

段佳鹏,韩永翔\*,赵天良,宋昊冬 (南京信息工程大学大气物理学院,中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室,江苏 南京 210044)

**摘要:** 利用塔克拉玛干沙漠及周边地区观测资料,依据尘卷风热力学理论和方法,估算出在塔克拉玛干沙漠地区尘卷风对沙尘气溶胶贡献的年平均量为  $4.0 \times 10^6 \text{t}$ ,年最大量为  $5.0 \times 10^6 \text{t}$ ,与该地区沙尘暴的沙尘气溶胶年均贡献量相当.依赖于太阳辐射强度季节变化,尘卷风的起沙量具有与地面温度同步的季节变化规律.

**关键词:** 沙尘气溶胶起沙量; 对流边界层; 沙尘暴; 尘卷风; 太阳辐射

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)01-0043-06

**The contribution of dust devils to atmospheric dust aerosols and its relation with solar radiation.** DUAN Jia-peng, HAN Yong-xiang\*, ZHAO Tian-liang, SONG Hao-dong (Key Laboratory of Atmospheric Physics and Environment, China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2013,33(1): 43~48

**Abstract:** Based on the thermodynamic theory of convective plumes and vortices in the atmosphere boundary layer and by using the observational data in the Taklimakan desert and surroundings, the dust aerosol emissions from the convective plumes and vortices are estimated with annual average of  $4.0 \times 10^6 \text{t}$  and the maximum of  $5.0 \times 10^6 \text{t}$  with an equivalent contribution to dust aerosols from dust storms over the Taklimakan desert. Depending on the seasonal cycles of solar radiation intensity, the dust aerosol emissions from the convective plumes and vortices vary with the changes of surface temperature.

**Key words:** dust aerosol emission; convective boundary layer; dust storm; dust devil; solar radiation

沙尘气溶胶是大气气溶胶的主要组成部分,全球每年大约会有  $1000 \sim 3000 \text{Tg}^{[1]}$  的沙尘气溶胶排放量,至少相当于对流层气溶胶总量的 50%<sup>[2]</sup>,因其“阳伞效应”<sup>[3]</sup>、“冰核效应”<sup>[4]</sup>和“铁肥料效应”<sup>[5]</sup>,对全球变化和环境变化具有重要的影响.以前的研究认为大气中的沙尘气溶胶主要来源于沙漠地区的沙尘暴过程<sup>[6-7]</sup>.受大尺度强风天气系统控制,在近地面大风动力驱动下,沙尘暴将地面大量的沙尘粒子卷起并注入大气中,仅亚洲沙漠地区通过沙尘暴排放到大气中的沙尘气溶胶每年约有  $800 \text{Tg}^{[8]}$ . Han 等<sup>[9]</sup>提出热对流与尘卷风联合起沙机制与沙尘暴起沙机制互为补充,共同影响沙漠地区上空的沙尘气溶胶的含量.沙尘暴虽然在春季多发,并扬升大量的沙尘气溶胶到大气中,但是发生最严重的年份也仅 80 次左右,仍是相对小概率事件<sup>[10]</sup>.由于沙尘暴作为极端天气事件对大气环境和人类健康的危害严重及其

远距离传输特性,目前的沙尘观测及模拟研究主要针对沙尘暴起沙过程,却几乎忽略了尘卷风热对流等的大气边界层起沙过程.沙漠地区晴朗微风天气占绝对优势.在晴朗弱风的天气背景下,太阳辐射加大了地面感热通量,造成近地面空气温度升高,在对流边界层热浮力驱动下,热空气上升而形成热力对流<sup>[11-12]</sup>.在一定的角动量条件下,形成一种旋转上升的对流涡,能够卷起并携带地面沙尘和轻小物体上升到大气对流层中上部,称为尘卷风,其中部分热对流没有形成标准的尘卷风,称为沙尘羽.据野外观测:最大尘卷风直径超过 100m,其持续时间超过了 30 多 min<sup>[13]</sup>,形成尘卷

收稿日期: 2012-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41175093,41075113);南京信息工程大学引进人才启动资助项目(20110304);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

\* 责任作者, 教授, han-yx66@126.com

风的速度阈值范围是 1.5~7.5m/s<sup>[14]</sup>，一个较大的沙尘羽能够把大约 3000kg 的沙尘粒子带到高空，而一个直径大约 100m 的尘卷风能够把 15000kg 的沙尘注入到大气中<sup>[15]</sup>，炎热夏日的沙漠地区每百平方公里可扬起沙尘约 250kg<sup>[16]</sup>。研究认为沙尘羽和尘卷风贡献了大约 35% 的全球沙尘气溶胶<sup>[15]</sup>，美国大陆大约 65% 的沙尘释放来自于尘卷风和沙尘羽<sup>[17]</sup>，撒哈拉沙漠超过 30% 沙尘被尘卷风和干热对流带入到大气<sup>[18]</sup>。显然，尘卷风贡献的大气沙尘气溶胶含量不容忽视。

本文依据尘卷风热力学理论和方法<sup>[15]</sup>，利用中国北方沙漠地区地面及大气边界层的观测资料，计算尘卷风对大气沙尘气溶胶的贡献并分析了尘卷风与太阳辐射之间的关系。在此基础上，以我国最大的沙尘源区—塔克拉玛干沙漠为例，进一步估计该地区尘卷风与沙尘暴过程对大气沙尘气溶胶的贡献比例。

### 1 研究方法 with 资料获取

#### 1.1 研究方法

尘卷风热对流运动的热机理论<sup>[13]</sup>指出决定尘卷风强度的主要因素是热力学效率：

$$\eta = \frac{\Gamma_{ad} Z_{CBL}}{T_h} \tag{1}$$

式中： $Z_{CBL}$  为对流边界层的高度； $T_h$  为地面温度； $\Gamma_{ad}$  为绝热递减率( $\Gamma_{ad}=10K/km$ )。

尘卷风发生时的有效作用面积  $S=S_{总} \cdot \sigma$ ， $S_{总}$  为尘卷风发生区域的总面积， $\sigma$  为有效起沙面积比率<sup>[19]</sup>：

$$\sigma = \left(\frac{\mu}{\eta}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta p}{\rho_{air} g T_R}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{F_{in}}{\rho_{air}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

无量纲的机械能摩擦损耗系数  $\mu \approx 12\sim 24$ ，地面到对流边界层顶的压强差  $\Delta P = \rho_{air} g Z_{CBL}$ ，空气密度  $\rho_{air} = 1kg/m^3$ ，重力加速度  $g = 9.8g/m^2$ ，驱动尘卷风的热量流  $F_{in} \approx (11 \pm 5)kW/m^2$ ，对流边界层有效太阳辐射时间尺度  $T_R \approx 9 \times 10^5 s$ <sup>[15]</sup>。

#### 1.2 资料的获取

塔克拉玛干沙漠地表温度资料来自中国气象局。太阳辐射日变化和月均变化资料分别来自极端干旱荒漠区的野外观测试验资料和中

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。对流边界层高度来自塔克拉玛干沙漠周边地区对流边界层高度的观测资料<sup>[18,20-25]</sup>，其中缺少 2 月和 11 月的对流边界层高度资料(图 1)，其拟合函数为：

$$H = -100.7M^2 + 1316M - 536.4 \tag{3}$$

式中： $H$  表示对流边界层高度； $M$  表示月份。式(3)的拟合值与观测值相关系数  $R^2 = 0.908$ ，通过 SPSS 软件分析得  $Sig. = 0 < 0.05$ ，即拟合方程显著。

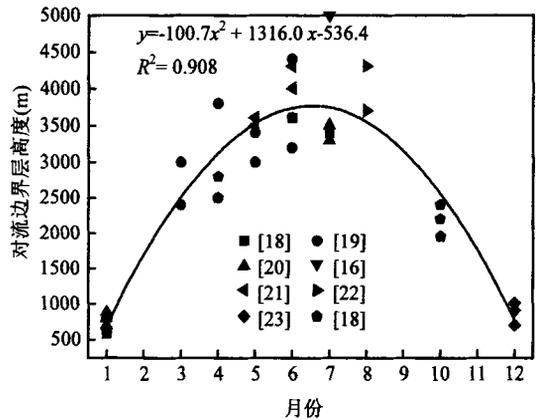


图 1 对流边界层高度的月变化

Fig.1 Monthly changes of convective boundary layer height

### 2 结果分析

#### 2.1 尘卷风热力学效率日变化

塔克拉玛干沙漠观测到的尘卷风日变化呈单峰型(表 1)，早上 9:00 开始出现，13:00~15:00 出现的最为频繁，然后开始下降，18:00 后基本没有观测到尘卷风的出现<sup>[26]</sup>。由公式(1)可知尘卷风热力学效率是对流边界层高度和地表温度的函数。对流边界层高度和地温资料来源于 2000 年 5 月 29 日至 6 月 9 日敦煌荒漠戈壁夏季晴天进行的陆气相互作用野外加强观测实验<sup>[27]</sup>，因此利用这两个参数可以计算出尘卷风热力学效率日变化(表 2)。

由图 2 可知，从 9:00~13:00 太阳辐射强度不断增大，在 13:00 达到最大值；从 13:00 之后太阳辐射强度开始逐渐减小。在太阳加热下，随着地面热量累积和释放，地面温度从 9:00~14:00 不断升

高,在 14:00 时达到了最大值,14:00 之后开始逐渐降低.热力学效率从 9:00~14:00 迅速增大,在 14:00 达到了最大值,14:00~17:00 迅速减小.对流边界层高度和地表温度是决定尘卷风热力学效率的主要因素,而对流边界层高度依赖于地表及太阳的加热的作用<sup>[27]</sup>,所以在 14:00 地表温度、对流边界层高度和热力学效率同时达到了最大值,但滞后太阳辐射强度 1h.另外,计算的尘卷风热力学效率同观测的尘卷风日变化基本一致,表明利用公式计算的尘卷风热力学效率可大体反映真实尘卷风的日变化.

表 1 尘卷风发生频率百分数(当地时间)

Table 1 The percentages of dust devil occurrences in the local time

发生时间	占总次数百分比(%)
9:00~10:00	0.5
10:00~11:00	5.6
11:00~12:00	10.9
12:00~13:00	16.1
13:00~14:00	24.4
14:00~15:00	24.4
15:00~16:00	12.4
16:00~17:00	5.2
17:00~18:00	0.5

表 2 尘卷风热力学效率日变化

Table 2 Diurnal changes of thermodynamic efficiency

时间	地表温度(°C)	对流边界层高度(m)	热力学效率(%)
9:00	31	200	0.6
10:00	38	600	1.93
11:00	44	1900	6.00
12:00	48	2800	8.72
13:00	49	3400	10.55
14:00	50	3500	10.83
15:00	48	3000	9.34
16:00	47	2200	6.87
17:00	45	1500	4.71

注:地表温度和对流边界层高度来源文献<sup>[27]</sup>;热力学效率由式(1)计算得出

### 2.2 尘卷风热力学效率季节变化

据 1964~1970 年南疆戈壁滩上尘卷风发生的统计资料(表 3)知:尘卷风主要出现在暖季,其

中 5~8 月次数最多,而 12 月到次年 1 月几乎绝迹<sup>[26]</sup>.塔克拉玛干沙漠尘卷风热力学效率见表 3,其中 4 月~6 月的尘卷风热力学效率分别为 11%、11.7%和 12.2%,美国亚利桑那州图森地区 4 月~6 月的尘卷风热力学效率分别为 10%、10%和 12%<sup>[15]</sup>,两地计算得出的热力学效率值非常接近,说明本文对流边界层高度的拟合数据具有一定有效性.

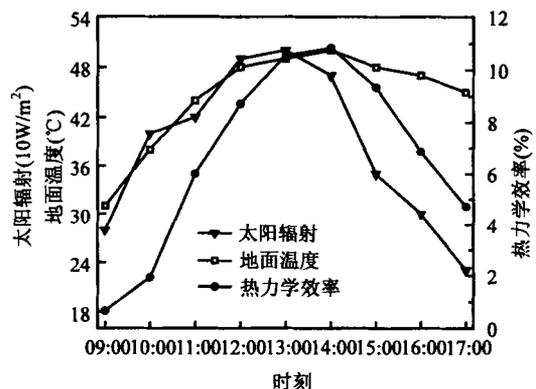


图 2 尘卷风热力学效率与地表温度、太阳辐射强度  
Fig.2 Diurnal changes of thermodynamic efficiency of dust devils, surface temperature and solar radiation

表 3 尘卷风热力学效率和发生次数的月变化

Table 3 Monthly changes of thermodynamic efficiency and number of dust devil

月份	对流边界层高度 (m)	地表温度 (°C)	热力学效率 (%)	发生次数
1	700	-10	2.7	0
2	1700	-4	6.3	3
3	2500	6	9.0	12
4	3200	18	11.0	9
5	3500	25	11.7	37
6	3700	30	12.2	44
7	3800	32	12.5	34
8	3600	29	12.0	28
9	3200	21	10.9	16
10	2500	12	8.8	7
11	1600	1	5.8	3
12	600	-6	2.2	0

注:对流边界层高度来自公式(3),热力学效率由公式(1)计算得出

由图 3 可知,太阳辐射强度从春季到夏季不断增大,在春末和夏初达到最大值,进入秋冬季节

后开始逐渐减小.尘卷风的热力学效率月变化紧密依赖于太阳辐射强度同样有显著的季节性变化规律:从冬季到夏季热力学效率逐月不断增大,并在夏季7月份达到最大值12.5%,进入秋季后逐月减小,在冬季12月份达到了最小值2.2%.尘卷风的热力学效率与太阳辐射强度变化<sup>[28]</sup>保持了较好的同步性.

### 2.3 尘卷风和沙尘暴起沙量的比较

一个标准的尘卷风和沙尘羽的平均垂直起沙通量分别为  $0.7\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和  $0.1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,最大起沙通量和最小起沙通量分别为  $1.13\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和  $0.47\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ <sup>[15]</sup>.因尘卷风主要出现在白天,所以本文用昼长代表尘卷风的起沙时间.尘卷风热力学效率由公式(1)计算得出,有效起沙面积比率由式(2)计算得出,有效起沙面积由塔克拉玛干沙漠总面积(大约  $33.76\times 10^{10}\text{m}^2$ )与有效起沙面积比率相乘得出,利用尘卷风的以上参数和垂直起沙通量进行估算尘卷风在塔克拉玛干沙漠起沙量的月变化(表4).在塔克拉玛干沙漠中尘卷风在不同季节的平均起沙量分别为:夏季  $0.4\times 10^8\text{t}$ 、春季  $0.3\times 10^8\text{t}$ 、秋季  $0.2\times 10^8\text{t}$ 、冬季  $0.1\times 10^8\text{t}$ .尘卷风的年均起沙量、最大起沙量和最小起沙量分别为

$1.1\times 10^8\text{t}$ ,  $1.5\times 10^8$ ,  $0.6\times 10^8\text{t}$ .

由图4可知,尘卷风的起沙量有明显的季节性变化规律,春季到夏季起沙量不断增大,并且在夏季7月达到了最大值,进入秋冬季节后起沙量显著减小.地面温度与尘卷风起沙量的月变化保持了显著的一致性关系,可以断定:依赖于太阳辐射强度,尘卷风起沙量有明显的季节性变化规律.

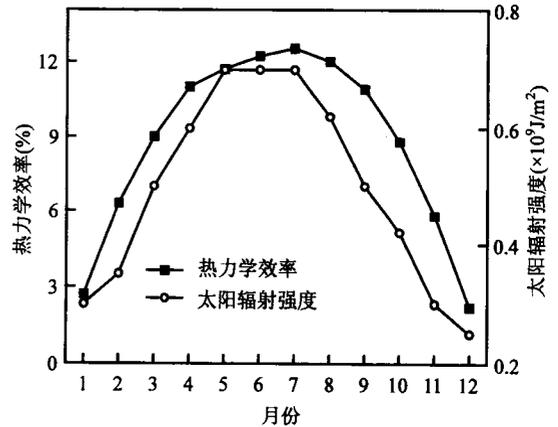


图3 热力学效率与太阳辐射强度月变化

Fig.3 Monthly changes of thermodynamic efficiency of dust devils and solar radiation

太阳辐射强度来源于文献[26]

表4 尘卷风月起沙量

Table 4 Monthly dust aerosol emissions estimated dust devils

月份	有效起沙面积 (km <sup>2</sup> )	平均昼长时间 ( $\times 10^4 \text{s}/\text{d}$ )	平均起沙通量 [ $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	平均起沙总量 ( $\times 10^6 \text{t}$ )	最大起沙通量 [ $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	最大起沙总量 ( $\times 10^6 \text{t}$ )	最小起沙通量 [ $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	最小起沙总量 ( $\times 10^6 \text{t}$ )
1	2.8	3.42	0.8	2.3	1.13	3.24	0.47	1.34
2	6.9	3.84	0.8	6.4	1.13	9.0	0.47	3.7
3	7.4	4.32	0.8	7.7	1.13	10.8	0.47	4.5
4	9.7	4.70	0.8	11.0	1.13	15.0	0.47	6.2
5	10.7	5.22	0.8	13.4	1.13	15.4	0.47	6.4
6	11.3	5.40	0.8	14.6	1.13	20.6	0.47	8.5
7	11.7	5.40	0.8	15.1	1.13	21.4	0.47	8.9
8	11.0	5.04	0.8	13.3	1.13	18.8	0.47	7.8
9	10.1	4.50	0.8	11.0	1.13	15.4	0.47	6.4
10	7.7	3.96	0.8	7.3	1.13	10.3	0.47	4.3
11	4.9	3.60	0.8	4.2	1.13	6.0	0.47	2.5
12	2.4	3.24	0.8	1.9	1.13	2.63	0.47	1.1

沙尘暴是沙漠地区特有的天气现象,在塔克拉玛干沙漠沙尘暴日数为 5~60d.在塔克拉玛干沙漠腹地,68%沙尘暴发生在 4~7 月份,20%左右发

生于夏季末和秋季,10%以下出现在冬季<sup>[29]</sup>,但其每次发生的持续时间不同.在 1997~2002 年这 6a 中,共发生沙尘暴 88 次,总持续时间为 306.61h,

年平均为  $51.10\text{h}^{[30]}$ . 沙漠中的平均垂直输沙通量的计算差异非常大, 从最大  $40.07 \times 10^{-7} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (塔克拉玛干沙漠腹地塔中, 2008 年 7 月 19 日)<sup>[31]</sup> 到最小  $9.95 \times 10^{-9} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (敦煌, 2002 年 4 月 8 日)<sup>[32]</sup>, 相差近 3 个数量级, 因无实际观测的垂直输沙通量, 所以无法断定哪个更符合实际, 但后者同其他地区在沙尘暴期间计算的输沙通量更接近, 如  $1.58 \times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (敦煌, 2002 年 4 月 13 日)<sup>[32]</sup>、 $7.52 \times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (朱日和, 2006 年 3 月 26 日) 和  $4.27 \times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (朱日和, 2006 年 4 月 6 日)<sup>[33]</sup>. 虽然无法确定塔克拉玛干沙漠沙尘暴期间平均垂直输沙通量的具体数值, 但根据以上文献, 可大体估算出塔克拉玛干沙漠中沙尘暴的垂直起沙量的变化范围(表 5).

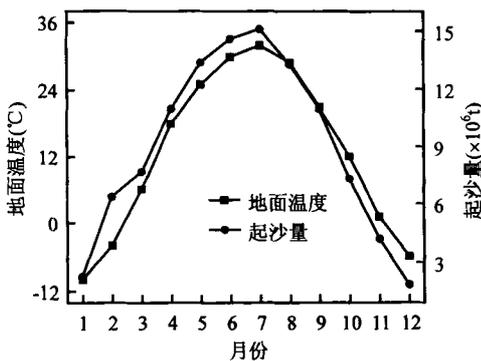


图 4 尘卷风起沙量和地面温度的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of dust emission from dust devils and surface temperature

表 5 塔克拉玛干沙漠沙尘暴的年起沙量

Table 5 Dust aerosol emissions from dust storms averaged over the Taklimakan desert

沙尘暴垂直起沙通量 [ $\times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	塔克拉玛干沙漠面积 ( $\times 10^{10} \text{m}^2$ )	年均作用时间 (s)	起沙量 ( $\times 10^6 \text{t}$ )
400.7	33.76	$51.10 \times 3600$	250
7.52	33.76	$51.10 \times 3600$	4.7
4.27	33.76	$51.10 \times 3600$	2.7
1.58	33.76	$51.10 \times 3600$	1.0
0.995	33.76	$51.10 \times 3600$	0.6

假定沙尘暴波及整个塔克拉玛干沙漠, 那么计算得出塔克拉玛干沙漠中沙尘暴可能的年最大起沙量为  $2.5 \times 10^8 \text{t}$ , 而最小的年起沙量为

$0.6 \times 10^6 \text{t}$ . 尘卷风的年最大起沙量为  $1.5 \times 10^8 \text{t}$ , 最小起沙量为  $0.6 \times 10^8 \text{t}$ , 尘卷风起沙量与沙尘暴最大垂直输沙通量计算的年起沙量相当, 但比其余垂直输沙通量计算的年起沙量大 2 个量级, 因此尘卷风对中国北方沙尘气溶胶总量的贡献具有非常重要的作用.

### 3 结论

3.1 依赖于太阳辐射强度变化, 尘卷风热力学效率有明显的日和季节性变化. 尘卷风热力学效率日变化: 热力学效率从 9:00~14:00 迅速增大, 14:00 达到最大值, 14:00~17:00 迅速减小, 有与地面温度同步的日变化规律, 且同观测的尘卷风日变化基本一致; 尘卷风热力学效率季节变化: 从冬季到夏季热力学效率逐月不断增大, 并在夏季 7 月份达到最大值, 然后进入秋季和冬季之后开始逐月减小, 在冬季 12 月份达到了最小值.

3.2 尘卷风对沙尘气溶胶总量的贡献具有明显的季节性变化规律: 尘卷风在夏季对大气沙尘气溶胶的贡献量最大, 其次是春季和秋季, 冬季贡献最小, 其与太阳辐射强度及地面温度保持了同步的季节变化.

3.3 塔克拉玛干沙漠中, 沙尘暴可能的年最大起沙量为  $2.5 \times 10^8 \text{t}$ , 最小的年起沙量为  $0.6 \times 10^6 \text{t}$ ; 尘卷风的年均起沙量为  $4.0 \times 10^6 \text{t}$ , 与沙尘暴的年起沙量大体相当, 因此尘卷风贡献的大气沙尘气溶胶不容忽视.

### 参考文献:

- [1] Zender C S, Miller R L, Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints and current estimates [J]. *Eos.*, 2004, 85, (45):522.
- [2] Cakmur R V, Miller R L, Periwitz J, et al. Constraining the magnitude of the global dust cycle by minimizing the different between a model and observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, doi:10.1029/2005JD005791.
- [3] 魏丽, 沈志宝. 大气沙尘气溶胶辐射特性的卫星观测 [J]. *高原气象*, 1998, 17(4):347-355.
- [4] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. *气候与环境研究*, 2001, 6(1):119-124.
- [5] Han yongxiang, Fang xiaomin, Xi xiaoxia, et al. Dust storm in asia continent and its bio-environmental effects in the north

- pacific: A case study of the strongest dust event in april, 2001 in central Asia [J]. Chinese Science Bulltin, 2006,51(6):723-730.
- [6] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Source and distributions of dust aerosols simulation with the GOCART model [J]. J. Geophys. Res., 2001,106,20,255-273.
- [7] 李嘉伟,韩志伟,张仁健.2010 年春季东亚地区沙尘气溶胶和 PM<sub>10</sub> 的模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2011,31(10):1600-1608.
- [8] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102,(D23):25041-28047.
- [9] 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(8):1476-1489.
- [10] 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.
- [11] 邓祖琴,韩永翔,白虎志,等.中国北方沙漠戈壁区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系 [J]. 中国环境科学, 2011,31(11):1761-1767.
- [12] 王民俊,韩永翔,邓祖琴,等.全球主要沙源区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系 [J]. 中国环境科学, 2012,32(4):577-583.
- [13] Snow J T, McClelland T M. Dust devils at White Sands Missile Range, New Mexico: 1. Temporal and spatial distributions [J]. Geophys. Res., 1990,95(13):707-13,721.
- [14] Oke A M C, Tapper N J, Dunkerley D. Willy-willies in the Australian landscape: The role of key meteorological variables and surface conditions in defining frequency and spatial characteristics [J]. Journal of the Arid Environments, 2007,71: 201-215.
- [15] Koch J, Renno N O. The role of convective plumes and vortices on the global aerosol budget [J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(18):L18806 (1-5).
- [16] Hall F F. Visibility reductions from so. 1 dust in the western united states [J]. Atmos. Environ., 1981,15:1929-1933.
- [17] Gillette D, Sinclair P C. Estimation of suspension of alkaline material by dust devils in the United States [J]. Atmos. Environ., 1990,24:1135-1142.
- [18] Marsham J H, Parker D J, Grams C M, et al. Observation of mesoscale and boundary-layer circulations affecting dust uplift and transport in the Saharan boundary layer [J]. ACPD, 2008,8:8817-8846.
- [19] Renno N O, Ingersoll A P. Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE [J]. J. Atmos. Sci. 1996,53:572-585.
- [20] 乔娟,张强,张杰,等.西北干旱区冬、夏大气边界层结构对比研究 [J]. 中国沙漠, 2010,(02):422-430.
- [21] 李岩瑛,张强,薛新玲,等.民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究 [J]. 中国沙漠, 2011,(03):757-764.
- [22] 张强,张杰,乔娟,等.我国干旱区深厚大气边界层与路面热力过程的关系研究 [J]. 中国科学, 2011,41(09):1365-1374.
- [23] 张强,卫国安,侯平.初夏敦煌荒漠戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究 [J]. 高原气象, 2004,(05):587-597.
- [24] 惠小英,高晓清,韦志刚,等.利用探空气球升速判定敦煌夏季白天边界层高度的分析 [J]. 高原气象, 2011,30(03):614-619.
- [25] 刘明星.戈壁下垫面夏冬季大气边界层结构及演变特征的对比研究 [D]. 北京:北京大学, 2008:35-47.
- [26] 乐之.新疆戈壁滩上的尘卷风 [J]. 气象, 1983,(4):33.
- [27] 张强,赵映东,王胜,等.极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析 [J]. 地球科学进展, 2007,22(11):1150-1157.
- [28] 邓祖琴,韩永翔,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.
- [29] 李虎,李霞,肖继东,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴的遥感监测 [J]. 新疆农业大学学报, 1999,22(3):219-223.
- [30] 李生宇,雷加强,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴特征——以塔中地区为例 [J]. 自然灾害学报, 2006,(02):14-19.
- [31] 杨兴华,何清,艾力·买买提明.塔中地区一次沙尘暴过程的输沙通量估算 [J]. 干旱区研究, 2010,(06):969-974.
- [32] 沈志宝,申彦波,杜明远,等.沙尘暴期间戈壁沙地起沙率的观测结果 [J]. 高原气象, 2003,22(6):545-550.
- [33] 沈建国,孙照渤,章秋英,等.干旱草原地区起沙通量的初步研究 [J]. 中国沙漠, 2008,28(6):1045-1049.

**致谢:** 在本文的撰写中杨磊和杭一纤同学给予了很多帮助,在此表示感谢.

**作者简介:** 段佳鹏(1986-),山东威海人,南京信息工程大学大气物理与大气环境学院硕士研究生,主要从事尘卷风的观测和模拟研究工作.发表论文 1 篇.