

文章编号:1000-694X(2008)03-0509-05

夏季强沙尘暴内部热力动力特征的个例研究

岳 平^{1,2,3}, 牛生杰³, 张 强¹, 沈建国⁴

(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. 张掖国家气候观象台, 甘肃 张掖 734000; 3. 南京信息工程大学气象灾害国家重点实验室培育点, 江苏 南京 210044; 4. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 根据对流体在热低压条件下激发强沙尘暴的机理, 并应用 Rennó 和 Ingersoll 于 1996 年提出的热机自然对流理论, 对 2004 年 7 月 12 日甘肃省酒泉基准站发生的强沙尘暴内部动力热力结构进行了探讨。结果表明: ①在沙尘暴发生前的一小时大气底层处于干热状态, 垂直方向巨大的温度梯度有利于干对流发展。②激发强沙尘暴的对流体的切向旋转速度和垂直运动速度的大小, 很大程度上决定了沙尘暴的强弱。③利用酒泉站探空资料计算出的沙尘暴对流体的最大切向旋转速度为 $11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直运动速度为 $14.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 地面沙尘暴观测系统记录的平均环境风速仅为 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 瞬间最大风速只 $9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 沙尘暴; 动力热力结构; 自然对流; 切向速度; 垂直速度

中图分类号: P445.4 文献标识码: A

沙尘暴是我国北方地区经常发生的一种灾害性天气, 其危害程度不亚于东部及沿海地区发生的暴雨、台风等自然灾害。我国在沙尘暴方面的研究论文, 最早见于徐国昌等^[1]对甘肃省 1977 年 4 月 22 日的一次特强沙尘暴的分析。之后, 国内诸多学者在沙尘暴的统计分析、天气气候特征和形成机理等方面做了大量工作^[2-8], 尤其是最近几年, 运用数值模拟和遥感监测方法, 在该领域取得了显著成果^[9-10]。沙尘暴的发生、发展及其消亡过程是地-气系统相互作用下的复杂过程, 强或特强沙尘暴的物理特征及其环境气候效应、生态健康效应和社会经济问题已经成为国内外学者普遍关注的焦点问题之一^[11-12]。从对 20 世纪 80—90 年代发生在我国西北地区的几次强沙尘暴天气的分析来看, 与之相伴的特强沙尘暴中心区总是与中小尺度强对流相联系^[13], 这表明中小尺度对流系统在局部强或特强沙尘暴的形成中起着至关重要的作用。但是强沙尘暴的发生源地多为沙漠地区以及干旱、半干旱地区, 由于地面测站分布稀疏, 观测资料奇缺, 用常见的方法对常规资料进行处理比较难以达到分析沙尘暴内部动力热力结构的目的。以 2004 年 7 月 12 日 21 时 09 分发生在甘肃酒泉的沙尘暴为例, 揭示由“抽吸效应”激发的强对流在强沙尘暴形成当中的作用。对此类强沙尘暴内部动力热力结构的研究, 有助于

进一步揭示其形成机理, 进而提高对沙尘暴的预报预警能力。

1 激发强沙尘暴的一种机制——对流体

关于强沙尘暴的发生机制, 一般认为强风是其发生的主要动力因子, 大气热力不稳定是其发生的主要热力因子, 丰富的沙源是其发生的物质基础。强低压在地形作用下的“抽吸效应”有时能够激发强烈的对流, 对流体内强大的垂直上升气流可能是卷举地面沙尘的主要动力^[11]。从拍摄到的 2004 年 7 月 12 日 21 时 09 分发生在甘肃酒泉的沙尘暴实况(图 1A, 见图版 I)可以看出, 沙尘暴内部存在垂直环流特征非常明显的多个对流单体, 1993 年 5 月 5 日发生在甘肃省金昌市的黑风暴(图 1B, 见图版 I)内部也同样存在类似的垂直结构。Sinclair^[14] 和 Roland^[15] 先后给出了理想的沙尘暴的结构图(图 2), 其特点是, 当近地层的气块从地表获得热量后, 被卷入向前移动的沙尘暴对流体之中并且做螺旋式上升运动。由于水平方向有明显的气压梯度、垂直方向存在巨大的温度梯度, 必然导致近地层的辐合上升。强的水平旋转和旺盛的垂直环流有利于沙尘粒子的垂直输送, 从而使沙尘天气发生或向沙尘暴、强沙尘暴发展。

收稿日期: 2007-02-13; 改回日期: 2007-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40705005, 40765001); 教育部博士点基金(20050300002); 科技部公益专项(2005DIB3J108)共同资助
作者简介: 岳平(1974—), 男(汉), 甘肃静宁人, 工程师, 博士生, 主要从事沙尘天气及沙尘气溶胶研究。Email: jqyueping@126.com

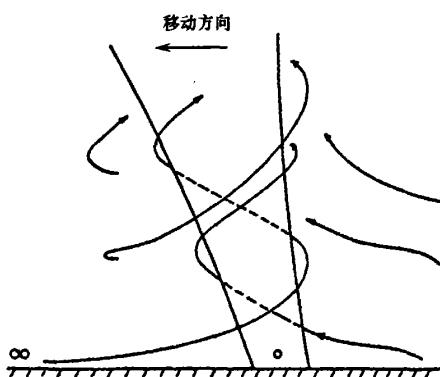


图 2 沙尘暴结构图(摘自文献[14])

Fig. 2 Sketch of dust storm (after Sinclair, 1996)

2 沙尘暴对流体速度的计算和分析

为了分析沙尘暴中类似雷暴结构的中小尺度强对流系统,采用 Rennó 和 Ingersoll 于 1996 年提出的热机自然对流理论^[16],对低压在地形强迫和地面强烈加热条件下导致的垂直方向的“抽吸效应”所激发的对流体的水平旋转和垂直运动速度进行计算。把任何一种能够将热能转换为机械能的装置都可以定义为一部热机,因此 Rennó 和 Ingersoll 认为大气对流可看做是一部热机。据文献[17]提出的观点:在诸多行星上,既有恒星不断向地面供给热量,同时通过行星大气不断向太空释放红外辐射;如果一气块在热力学上不平衡,则将膨胀或缩小,对环境做功。作为一级近似,在不考虑机械耗散的情况下,大气系统中膨胀做功是要考虑的唯一的一类功。在对流区域,近地层气块受热膨胀并携带热量上升,对环境做功,其中一部分能量消耗在将较冷空气以及饱和空气压缩混合过程中,一部分能量(热量)以长波辐射的形式废弃在环境中。因此,上述对流循环的结果是,来自地表层的热量(热源),除一部分耗散到未受扰动的对流层(热汇)外,其余的转换为机械能。这些机械能用于克服机械耗散来保持对流运动。

由于我国北方特殊的地理和气候条件决定了在该地区发生沙尘暴前夕,大气尤其是低层相对湿度一般很小。因此可以认为从大气底层流入沙尘暴热机的能量为感热,热量的流出是通过高层的热汇辐射出去的。在沙尘暴天气水汽很少这个前提下,可以忽略大气中水物质及其热容量对空气密度的影响。文献[16]认为,在统计意义上全球大气对流是平衡的,即对流气块围绕一条闭合的、定常的流线转动过程中摩擦力与静输入热量平衡;另外,假设气块

是绝热运动,能量为可逆循环。根据热力学第一定律、理想气体状态方程以及牛顿第二定律等关系,可以得到沙尘暴对流体的切向旋转速度和垂直运动速度。表达式如下:

切向旋转风速^[18]:

$$v = \sqrt{RT_s \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{\gamma\eta}{\gamma\eta - 1}\right)\left(\frac{T_h}{\chi}\right)\right]\right)} \quad (1)$$

式中: R 为比气体常数; T_s 为周围环境平均气温; γ 为热源附近的机械能耗散率(本文取 0.5); η 、 η_h 分别表示热机垂直和水平方向的热力效率,其表达式分别为:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (2)$$

$$\eta_h = \frac{T_o - T_s}{T_s} \quad (3)$$

T_h 和 T_c 分别是对流体的热源和热汇的温度,可以近似的认为沙尘暴对流体热机的热源的温度与下垫面地表平均温度相等,即 $T_h = T_s$, T_o 为沙尘暴对流体中心地表附近温度。对于干绝热大气,作为一级近似,并根据热力学第一定律,温度廓线与气压满足下面的关系:

$$T = T_s \left(\frac{p}{p_s}\right)^\chi \quad (4)$$

因此, η 可以表示为:

$$\eta = 1 - \frac{(p_s^{x+1} - p_{top}^{x+1})}{(p_s - p_{top})(\chi + 1)p_s^x} \quad (5)$$

式中: p_s 为地表层环境大气的气压; p_{top} 为沙尘暴对流体顶部的气压,而 $\chi = R/C_p = 0.286$ 。

公式(1)表明,沙尘暴对流体的切向旋转速度的大小与其自身的水平尺度不是通过显式表示出来,而是表示为气压梯度的函数,而气压梯度也可以看作是温度的函数。但沙尘暴对流体的旋转速度与其尺度的关系可以通过水平方向的热力效率反应出来,热力效率越大,沙尘暴对流体的水平尺度也就越大。

垂直风速^[16]:

$$w = \sqrt{\left(\frac{C_p}{8\sigma_R T_c^3}\right) \frac{\eta F_{in}}{\mu}} \quad (6)$$

公式(6)给出了沙尘暴对流体的对流速度,也就是垂直速度。其中 C_p 是单位质量定压比热; $\epsilon = 0.7$, 是大气边界层的发射率; σ_R 是 Stefan-Blotzmann 常数; T_c 是射出红外辐射层熵加权平均温度,对非降水边界层对流大多混合发生在对流气旋顶部,这里取我们计算的沙尘暴对流体顶部的温度值; $\mu = 25$, 是湍流机械能耗散系数; η 与前面相同; F_{in} 是

输入沙尘暴对流体的感热通量。

根据上述结论,切向速度的大小不仅与沙尘暴对流体的水平温度升度(气压梯度)有关,而且与垂直方向的气压梯度有关;垂直运动速度与垂直方向的气压梯度和输入系统内部的感热有关。对2004年7月12日09时发生在甘肃酒泉地区的一次强沙尘暴天气事件,根据公式(1)和公式(6)可以计算沙尘暴对流体经酒泉测站时的最大切向速度为 $11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直运动速度为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 沙尘暴发生的动力因子分析

根据酒泉自动气象站记录的沙尘暴过境前后,每分钟的风速演变情况(图3)可以看出,在沙尘暴经过测站前,测站的瞬时最大水平风速为 $9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;在沙尘暴过测站的前半期,水平平均风速约 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;到中后期,即22时10分以后,地面风速迅速减小到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。文献[19]给出了

内蒙古吉兰泰站和宁夏盐池站出现沙尘暴的水平阈值风速分别为 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (酒泉站与上述两测站的气候条件和下垫面性质比较相似),与之相比,虽然地表环境风速在前期能够满足起沙的水平阈值风速,但在环境风速为 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下要形成强沙尘暴,必然要求垂直方向的对流十分强盛,否则,难以出现酒泉历史同期罕见的沙尘墙。

另外,将计算得到的切向速度和垂直速度与自动站探测到的环境风速相比,不难发现,水平环境风速明显小于计算得到的沙尘暴内部气旋自身的切向旋转风速,计算得到的沙尘暴内部气旋在经过酒泉测站时的垂直运动速度是三种速度中的最大的一项。上述情况说明,此类强沙尘暴的形成与发展,不仅与环境风速有关,更为重要的是沙尘暴内部中小尺度气旋自身的强度,特别是切向旋转速度和垂直运动速度的大小对沙尘粒子的垂直输送起到至关重要的作用。

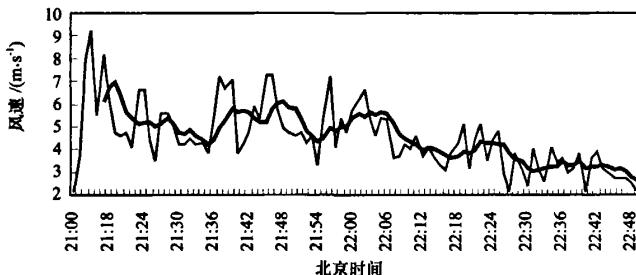


图3 酒泉基准站自动气象站记录到的2004年7月12日风速的变化

Fig. 3 Variation of wind velocity recorded by automatic weather station of Jiuquan base station on July 12, 2004

4 沙尘暴发生的热力因子分析

利用2004年7月12日20时的探空资料计算了“3θ”。由图4可以看出,当天20时酒泉站的地面温度非常高,饱和相当位温超过400 K,同时 θ^* 随气压降迅速减小表明垂直方向的温度递减率非常大; θ 和 θ^* 线在500 hPa高度层以下距离接近,表明低层大气干燥;此外,500 hPa等压面高度层以下 θ^* 线几乎垂直于横坐标轴,表明大气混合层厚度非常高,而深厚的混合层非常有利于沙尘暴的发生^[20]。在200—300 hPa高度存在“3θ”线向低温方向弯曲的现象,表明该高度层温度极低。因此在垂直方向存在非常大的温度梯度,必然导致垂直方向干对流的强烈发展。另外,由风廓线及风向可以看到,500 hPa以上为偏西风,风速向下递减;500 hPa以下为东风,从高层到低层风速增大。综上分析,当天20时背景大气的垂直方向具有非常完整的环流结构,

在沙尘暴移动方向的前部为上升气流区,后部为下沉气流区,这种结构非常有利于干对流单体或对流复合体的发展。

5 小结

1)从对背景大气的诊断分析来看,大气底层干热,200—300 hPa高度存在“3θ”线向整体向低温方向弯曲的现象,表明该层的温度极低。因此,垂直方向温度梯度非常大,有利于对流运动发展。

2)热机自然对流理论能够很好地用来研究沙尘暴内部热力动力结构,特别是其内部中小尺度强对流系统的分析和研究,可以更进一步的加深对沙尘暴强度变化和形成机理的认识。

3)地面感热的输送也是影响沙尘暴强度的重要因素之一,在沙尘暴热力动力结构研究当中,应当予以足够重视,因为垂直运动速度与垂直方向的温度梯度和输入系统内部的感热有关。

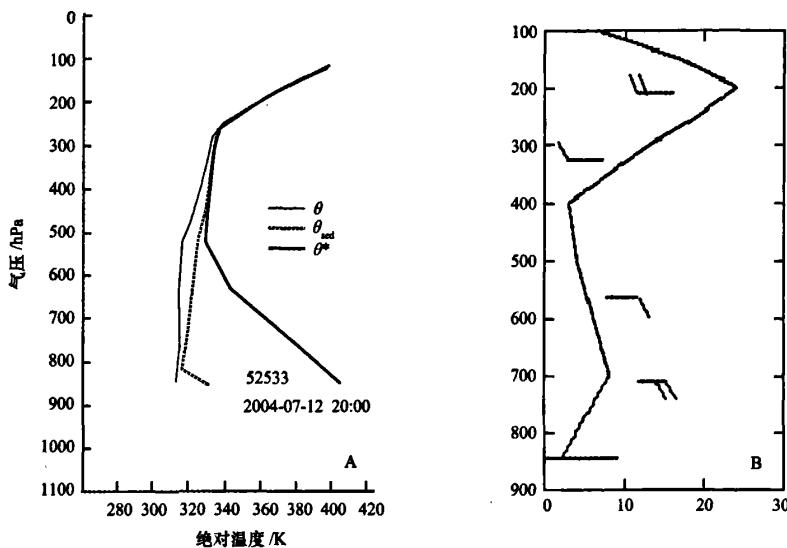


图4 2004年7月12日20:00酒泉站的位温(θ)、假相当位温(θ_{eq})和饱和相当位温(θ^*)以及风速垂直廓线

Fig. 4 Profiles of potential temperature(θ), potential equivalent temperature(θ_{eq}) and saturation potential equivalent temperature(θ^*), and wind velocity at Jiuquan station at 20:00 on July 12, 2004

4)沙尘暴经过酒泉测站时沙尘暴内部气旋的最大切向速度为 $11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直运动速度为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;地面沙尘暴观测系统记录的环境风速仅为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,瞬间最大也仅为 $9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明强沙尘暴的形成与发展,不仅与环境风速有关,而且与沙尘内部中小尺度气旋自身的强度,特别是切向旋转速度和垂直运动速度的大小密切相关。

参考文献(References):

- [1] 徐国昌,陈敏莲,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26—35.
- [2] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年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.
- [3] 牛生杰,孙继明,桑建人.贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J].中国沙漠,2000,20(1):55—58.
- [4] 周秀骥,徐祥德,颜鹏,等.2000年春季沙尘暴动力学特征[J].中国科学:D辑,2002,32(4):327—334.
- [5] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J].大气科学,1996,21(5):1582—1589.
- [6] 王式功,杨得宝,金炯,等.我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠,1995,15(1):19—20.
- [7] 胡隐樵,光田宁.沙尘暴发展与干飑线——黑风暴形成机理的分析[J].高原气象,1996,15(2):178—185.
- [8] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513—521.
- [9] 陶健红,王劲松,冯建英.螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用[J].中国沙漠,2004,24(1):83—87.
- [10] 郑新江,陆文杰,罗敬宁.春季沙尘暴的NOAA-14气象卫星监测研究[J].遥感技术与应用,2002(5):300—305.
- [11] 张强,王胜.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,2005,25(5):675—681.
- [12] Cyranski D. China plans clean sweep on dust storm[J]. Nature,2003,421:101.
- [13] 王式功,董光荣,陈惠忠,等.沙尘暴研究的进展[J].中国沙漠,2000,20(4):349—356.
- [14] Sinclair P C. A Quantitative analysis of the dust devil[D]. The University of Arizona,1966:292.
- [15] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers,1988:448—449.
- [16] Rennó N O, Ingersoll A P. Natural convection as a heat engine, A theory for CAPE[J]. Atmos Sci, 1996, 53(4): 572—585.
- [17] Emanuel K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. J Atmos Sci, 1988, 45: 1143—1155.
- [18] Renn N O. A simple thermodynamic theory for dust devils [J]. J A S, 1998, 55: 3244—3252.
- [19] Niu Shengjie, Sun J M, Zhang C C, et al. Statistical and observational researches on sandstorms in Helan Mountainous area [C] // The First International Symposium on Sand and Dust Storm, NOV1-7, 1997, Syria, 1998, WMO/TD-NO. 864: 39—52.
- [20] 姜学恭,沈建国,刘景涛,等.导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究[J].气象学报,2003,61(5):606—620.

Case Study of Dynamical and Thermo-dynamical Structure of Serve Dust-storm in Summer

YUE Ping^{1,2,3}, NIU Sheng-jie³, ZHANG Qiang¹, SHEN Jian-guo⁴

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorology Administration; Opening Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of China Meteorology Administration; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 2. Zhangye National Climatological Observatory, Zhangye 734000, Gansu, China; 3. KLME, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Bureau, Hohhot 010051, China)

Abstract: According to the formation mechanism of dust-storm stimulated by serve convection system under hot-low, the thermodynamical structure of a dust-storm which occurred in the Jiuquan area of Gansu Province at 20:00 on July 12, 2004 was analyzed based on the theory of hot-engine natural convection proposed by Renn and Ingersoll in 1996. Findings are as follows: ① The atmospheric bottom layer was dry and heat in an hour before dust-storm occurrence, and there was extreme temperature grade between 200 hPa and 300 hPa, which was advantageous to the development of dry convection. ② The intensity of the dust-storm was closely related to the tangential and vertical velocity of micro-scale and meso-scale convective. Being computed by the sounding data from Jiuquan station the tangential velocity of dust-storm was $11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the vertical velocity was $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; the maximal surrounding velocity recorded by the surface dust-storm observational system was only $9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the average was $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Keywords: dust-storm; thermodynamic structure; natural convection; tangential velocity; vertical velocity

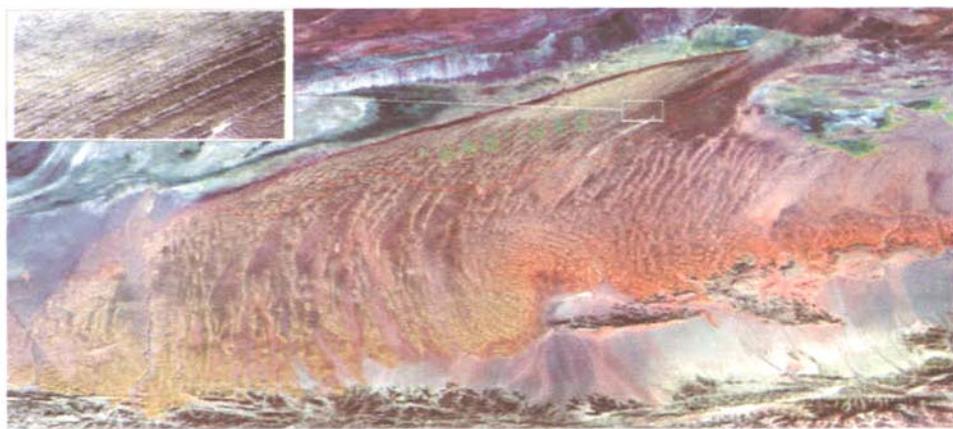


图 1 库姆塔格沙漠 TM 影像及羽毛状沙垄分布区域
Fig.1 TM image of Kumtag Desert and distribution of feather-shaped sand ridge



图 2 沙漠东北部的羽毛状沙垄
Fig.2 Feather-shaped sand ridge in northeast Kumtag Desert

岳 平等: 夏季强沙尘暴内部热力动力特征的个例研究

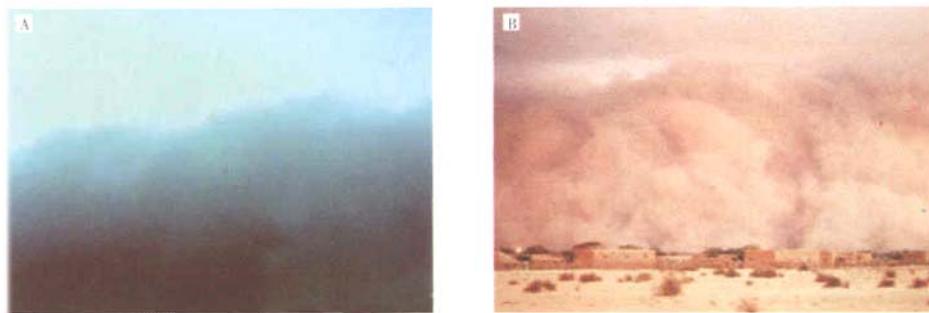


图 1 2004 年 “7. 12” 酒泉市肃州沙尘墙(A)和 1993 年 “5. 5” 金昌沙尘墙(B)
Fig.1 Dust wall in Suzhou district of Jiuquan City on July 12, 2004 (A) and dust wall in Jinchang on May 5, 1993 (B)