

大气边界层阵风扬尘机理

曾庆存 胡非 程雪玲

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 东亚春季冷锋后的强风及其伴随的系统下沉气流和叠加其上的阵风, 都对当地起沙十分有利。但此系统的下沉气流却压制着沙尘, 使之不能上扬到大气边界层内。经过仔细计算和分析发现, 正是阵风的三维相干结构, 使得积聚在风沙边界层的沙尘可以持续地克服系统的下沉气流, 而不断上扬到大气边界层的中上层。再藉中上层和其上系统的上升气流, 将沙尘带到对流层, 扩散到更大范围和传送到远方。这是东亚春季强风起沙扬尘最常见和最有效的机理。

关键词 边界层急流 阵风 相干结构 起沙 扬尘

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0251-05 **中图分类号** X169 **文献标识码** A

The Mechanism of Dust Entrainment by Gustwind

ZENG Qing-Cun, HU Fei, and CHENG Xue-Ling

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The strong wind (boundary level jet) with descending motion and the superimposed gustwind after the passage of spring cold front in northern China are very favorable for the dust emission. However, the systematic descending air motion keeps the dust particles emitted from soil surface within the bottom levels and suppresses their entrainment into the atmospheric boundary layer. By carefully analyses and calculations we revealed that owing to the 3-dimensional coherent structure of the gustwind dust particles can effectively overcome the systematic descending air motion and penetrate from the bottom levels into the atmospheric boundary layer in impulsive form one after another, and then propagate into and diffuse in the upper levels of atmospheric boundary layer and troposphere where the ascending air motion is prevailing. This is a very effective mechanism of soil erosion and dust entrainment.

Key words soil erosion, dust entrainment, gustwind, coherent structure, boundary layer jet

1 引言

在一定长度时间内只要 $u_* \geq u_{*c}$, 就会在贴近地表的大气中形成风沙边界层, 其为空气和沙尘粒子运动组成的二相流, 或称风沙流。在风沙边界层内, 粒子的运动形态比较复杂。较大较重的粒子(沙土, 粒径 d 为 $70 \sim 500 \mu\text{m}$) 做蠕动

(Screep) 和跃移 (Saltation) 运动, 并造成连锁反应, 粒子还可能破碎; 而较小较轻的粒子(尘土或粉尘, $d < 70 \mu\text{m}$) 可在空气中悬浮 (Suspension), 做布朗运动 (Brownian motion)。这些粒子一般处于统计平衡状态, 于是有统计平衡意义上的沙尘浓度 (Dust density), 即每单位体积的沙尘质量。如果各种粒径共存, 此浓度称为总悬浮颗粒物 (Total Suspension Particulate, TSP) 浓

收稿日期 2007-04-05 收到, 2007-05-15 收到修定稿

资助项目 国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目 (Y0101)

作者简介 曾庆存, 男, 1935 年出生, 研究员, 主要从事大气科学、地球流体力学研究。E-mail: zengqc@mail.iap.ac.cn

度。浓度可按粒径算谱分布。或定义沙尘的数浓度 (Dust number density), 即每单位体积的沙尘粒子个数。各种尺度粒径共存时, 也可算其谱分布^[1, 2]。

沙尘粒子在空气中受到自身的重力, 流体力学阻力 (包括粘性阻力), 因在流体中自旋而有的 Magnus 力和 Saffman 力, 以及粒子间和粒子与空气分子微团相碰撞的作用力 (甚至还有与别的液态粒子的碰撞)。理论分析表明, 沙尘从地表起跳或起飞的初速不大, 一般是 $d > 70 \mu\text{m}$ 的粒子 (尘) 只能到达 1.5 m 高度。由此得到风沙边界层的厚度约为 1.5 m 或稍高一些^[1, 3~6], 总结见图 1^[3]。必须指出的是, 如果在大气边界层底层没有足够的上升气流, 当地的起沙只能积聚在很薄的一层空气中, 并做布朗扩散 (Brownian diffusion) 或湍流扩散 (Turbulent diffusion), 不可能上达大气边界层中上层。可见, 图 1 并未说清楚 $d < 70 \mu\text{m}$ 的尘是如何进入大气边界层及其上的对流层中的。

2 风沙边界层外大气中沙尘粒子的运动

粒子在大气中的运动主要由自身的重力和气流的阻力所决定 (过轻粒子除外), 二者平衡决定了其相对于气流的速度 (常称为末端速度), 记其垂直分量为 w_p , 则按流体力学可导出它与粒子粒

径 d 、质量密度 ρ_p 及空气阻力系数 C_D 的关系。再通过实验, 做一些修正, 例如取

$$w_p(d) = \left(\frac{4\rho_p g d}{3\rho_a C_D} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度, ρ_a 为空气密度, C_D 为雷诺数 Re 的函数, 一般取作

$$C_D(Re) = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \quad (2)$$

而 $Re = (w_p \cdot d) / \nu$, ν 为粘性系数。由于 Re 依赖于 w_p , 只能用迭代法解公式 (1) 而求出 w_p , w_p 是 d 的增函数 (参见文献 [7, 8])。

取不同密度的粒子 [$\rho_p = 1.5$ (土), 1.7 (沙土) 和 2.65 (沙)], 单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以及 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 计算 $w_p(d)$ 。由图 2 可见, 对于 $d \leq 20 \mu\text{m}$ 的尘, 很小的上升气流速度 w (大于 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 即可使粒子的 (相对于地面的) 垂直速度为正, 即 $w - w_p > 0$, 粒子可悬浮于空气中; $20 \mu\text{m} < d < 70 \mu\text{m}$, 需 $w > 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 粒子才能悬浮或再做向上的运动, 否则会下落; 对于尘土和泥土, $d = 120 \mu\text{m}$ 则要求 $w > 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 对于沙土和沙, $w \approx 0.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 才能使粒子不下落。

湍流脉动的均方垂直速度虽在大风时段可大于上述阈值, 但时而上升, 时而下沉, 平均垂直速度为 0。粒子不可能靠湍流脉动上传至风沙边界层之上; 即使偶然传上, 湍流作用也只能使之做布朗运动, 而沿水平风向传送。

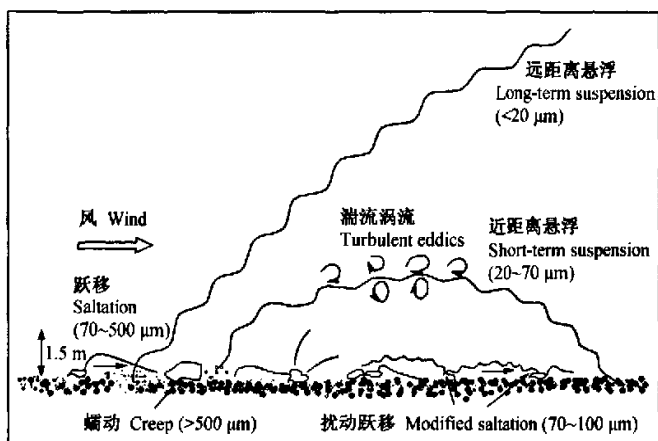


图 1 沙尘的运动和传输过程^[3]

Fig. 1 The motion and transport of dust particles^[3]

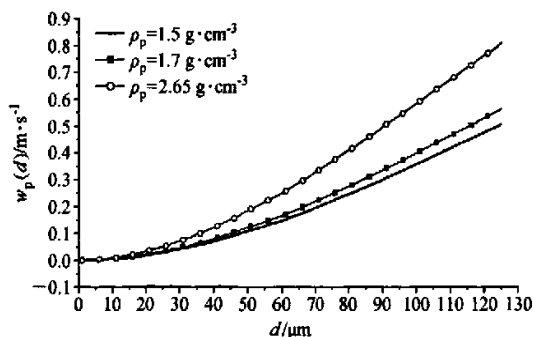


图2 不同密度粒子的末速度

Fig. 2 The end speed of various particles

粒子大量向上传送, 必须有足够大的平均气流(基流)的上升速度 $\bar{w}$, 或阵风的上升气流阶段的上升流 w_g (注: w_g 的平均也几近于 0)。由此可见基流的上升运动和阵风对扬尘过程的重要性。

3 大气边界层的下沉急流和阵风扬尘机理

从曾庆存等^[1]和程雪玲等^[2]的资料分析可知, 北京 2002 年 3 月 20 日的强风期间, 47 和 120 m 高度处的基流长时间(自 10:00 (北京时间, 下同)起)有较强的下沉气流, $-\bar{w}$ 平均约为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最强时甚至达到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (参见文献[2] 图 3)。大气边界层低层有这样厚而下沉很强的气流覆盖在风沙边界层之上, 当地产生的沙尘甚至不可能进入大气边界层的低层, 而只能积聚于风沙边界层内及其顶上附近。由文献[2]的图 9 又可知, 在强风期间, 3 层均有振幅颇大频率为 3~5 min 的阵风, 波峰期有下沉速度, $-w_g$ 可达 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而波谷期有上升速度, w_g 也可达 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。于是每分钟平均的气流垂直速度 $\bar{w}_{1 \text{ min}}$ 有

$$\bar{w}_{1 \text{ min}} = \bar{w} + w_g, \quad (3)$$

其中, $\bar{w}$ 为 20 min 平均的即大中尺度运动的垂直速度, w_g 是周期为 1~20 min 的扰动(定义为阵风)每分钟的平均垂直速度。阵风波峰期, 在 47 和 120 m 处, $-\bar{w}_{1 \text{ min}} > -\bar{w}$, 其值甚至可达 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由动量下传所导致的当地起沙量虽很大, 但此时沙尘是不可能进入 47 m 以上的; 而在阵风谷期, $\bar{w}_{1 \text{ min}}$ 可以为正, 甚至超过 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 使进入风沙边界层顶上的沙尘可以继续上升至 47 和

120 m 以上。可见, 正是阵风使沙尘克服系统的下沉气流, 从风沙边界层不断地扬起, 并向上传至大气边界层低层。

其次, 由文献[2]还可见, 在强风期间, 280 m 处, 9:00~14:00 有系统的上升气流, $\bar{w}$ 平均为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 甚至可达 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与 w_g 叠加可知, 在此层, 大部分时间 $\bar{w}_{1 \text{ min}}$ 为正, 有时甚至很大; 而当 $-w_g > \bar{w}$ 时则有 $\bar{w}_{1 \text{ min}} < 0$, 故沙尘在此层上扬也采取一股股地上扬的形式, 但有更多的上扬时间。

此外, 由 280 与 120 m 处的 $\bar{w}$ 反号, 说明有一高度 h^* ($120 \text{ m} < h^* < 280 \text{ m}$) 的 $\bar{w} = 0$ 。故由低于 h^* 处上扬来的沙尘仍可在 h^* 处通过阵风继续上扬到至少 280 m 处。

应用连续方程由大中尺度气流场间接计算垂直速度场可知, 在北京东边大气边界层以上和对流层中下层, 也都有系统的上升气流。故吹送到此的较轻的沙尘可以继续上扬, 结果是可弥漫于较大的空间和高度范围内。

4 冷锋后强风阵性扬尘的图像

将 3 层每分钟平均的沿顺风向风速 $\bar{u}_{1 \text{ min}}$ 和 $\bar{w}_{1 \text{ min}}$ (以下简称 u 和 w), 按常规方法画速度合成矢量的时间-高度剖面图, 可以鲜明地看到阵性扬尘和沙尘三维传播的图景(如图 3)。其中为凸显垂直速度, u 缩小一半, w 放大 10 倍。按上节分析, 在任一层只有当 $w_p > 0$ 时沙尘方可上扬, 这样就有一股股沙尘由下向上倾斜地上扬。图 3 虽是按计算结果合成, 但与实况相符。

5 小结和讨论

东亚春季冷锋后的强风和所伴随的系统性下沉气流, 以及叠加其上的阵风, 对当地起沙尘十分有利^[9]。但这系统的下沉气流却压制着沙尘, 使之不能上扬到大气边界层内。正是阵风的三维相干结构, 使得积聚在当地风沙边界层的沙尘可以一阵阵地克服系统的下沉气流而一股股地上扬到大气边界层的中上层。再藉那里和其上附近的系统上升气流, 将沙尘带到对流层, 弥散到更大范围, 传送到远方。可见阵风的相干结构是阵性

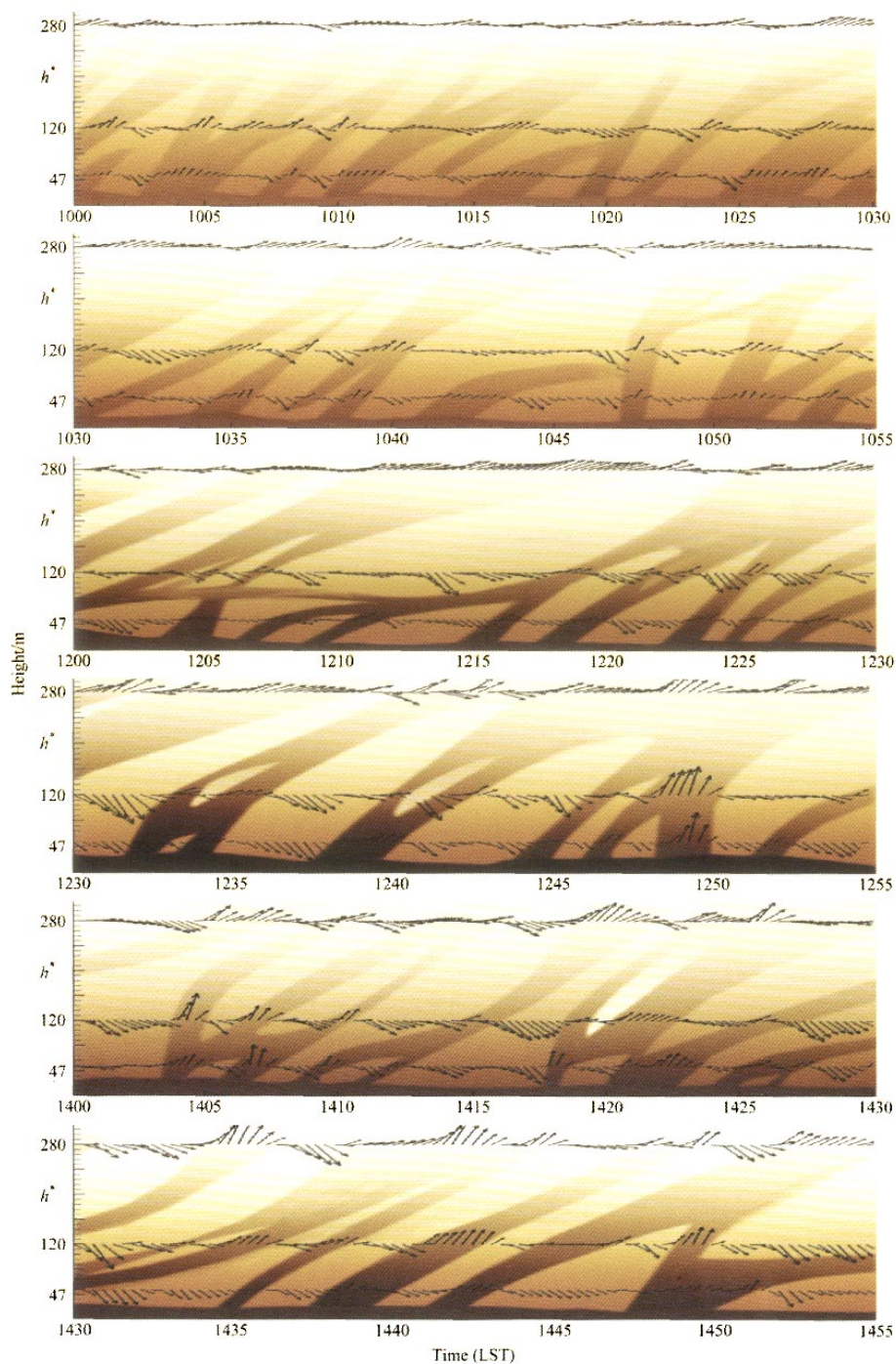


图 3 3 月 20 日 10:00~15:00 的气流 (u, w) 和扬尘时间-高度剖面

Fig. 3 The time-height section plane of air velocity and dust entrainment on 1200—1500 LST 20 Mar 2002

扬尘的最有效机理。

边界层内的湍流和小尺度对流缺乏相干结构, 不是扬尘的有效机理。要使沙尘从风沙边界层再往上扬, 必须有相干结构的扰动, 这只能是有组织的扰动。或者是有明显完好结构的涡旋, 如陆龙卷(或沙龙卷), 或是与不连续线(如飚线)相联系的环流, 或是阵风这类的波动。尽管强风所伴随的阵风是最常见和最有效的扬沙机理, 但只有对边界层超声风温仪的资料做仔细的分析, 我们才能将这机理揭露出来。

致 谢 本文由徐小云打字并协助排版, 特此致谢。

参考文献 (References)

- [1] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云——东亚典型沙尘暴. 北京: 科学出版社, 2006
Zeng Qingcun, Dong Chao-hua, Peng Gongbing, et al. *Gigantic Yellow Cloud—the Dust Storm in Eastern Asia* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006
- [2] 程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 大气边界层强风的阵性和相干结构. 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 227~243
Cheng Xunling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, 12 (3): 227~243
- [3] Shao Yaping. *Physics and Modeling of Wind Erosion*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [4] 贺大良, 高有广. 沙粒跃迁运动的高速摄影研究. 中国沙漠, 1988, 8 (1): 18~29
He Daliang, Gao Youguang. The study of sand saltation movement by high speed photograph. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1988, 8 (1): 18~29
- [5] Zheng Xiaojing, Xie Li, Zou Xueyong. Theoretical prediction of liftoff angular velocity distributions of sand particles in windblown sand flux. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: D11109, doi:10.1029/2005JD006164
- [6] 郑晓静, 王萍. 风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究. 中国沙漠, 2006, 26 (2): 184~188
Zheng Xiaojing, Wang Ping. Numerical simulation on stochastic movement of sands in wind-blown sand. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2006, 26 (2): 184~188
- [7] Lu Hua, Shao Yaping. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environmental Modeling and Software*, 2001, 16: 233~249
- [8] Durst F, Milojevic D, Schönung B. Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase flows: a numerical study. *Applied Mathematical Modelling*, 1984, 8: 101~115
- [9] 程雪玲, 曾庆存, 胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理. 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 244~250
Zeng Qingcun, Cheng Xueling, Hu Fei. The mechanism of soil erosion and dust emission under the action of nonsteady strong wind with descending motion and gust wind. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, 12 (3): 244~250