

内蒙古科尔沁沙地临界起沙阈值的范围确定^{* 1}

李晓岚^{1,2} 张宏升²LI Xiaolan^{1,2} ZHANG Hongsheng²

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳, 110166

2. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京, 100871

1. *Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166, China*2. *Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

2015-11-03 收稿, 2015-12-03 改回.

李晓岚, 张宏升. 2016. 内蒙古科尔沁沙地临界起沙阈值的范围确定. 气象学报, 74(1):76-88

Li Xiaolan, Zhang Hongsheng. 2016. A study of determining dust emission thresholds over the Horqin Sandy Land area in Inner Mongolia. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(1):76-88

Abstract Threshold for dust emission represents soil erodibility and becomes one of the important parameters in wind-erosion research. From the view of micrometeorology, the dust emission threshold friction velocity (u_{*t}) and dust emission threshold wind speed (U_t) are defined as the value of friction velocity and wind speed when both of dust concentration and vertical dust flux begin to increase with friction velocity and last for half an hour at least. Using the observational data of sand-dust events in 2010–2013 spring over the Horqin Sandy Land area in Inner Mongolia, the evolution of dust concentration and vertical dust emission flux with friction velocity during the different dust emission period of sand-dust events (e. g. blowing dust events, sand-dust storm events, and severe sand-dust storm events) is analyzed. According to the definition, the values u_{*t} and U_t over the Horqin Sandy Land area are determined to be 0.45 ± 0.20 and 6.5 ± 3.0 m/s, respectively. Meanwhile, the effects of different dust-emission criteria to the determination of dust emission thresholds are discussed. Comparing with the previous dust-emission criteria, the one used in this study can effectively exclude the influence of dust advection and deposition and reduce the simplicity and subjectivity of the criteria. This study can provide references to set up uniform dust-emission criteria in the future.

Key words Sand-dust event, Dust emission criteria, Dust emission threshold friction velocity, Dust emission threshold wind speed, Horqin Sandy Land area

摘要 临界起沙阈值可表征地表土壤的可蚀性, 是风蚀起沙研究中非常重要的物理量之一。基于微气象学方法, 将沙尘浓度和垂直沙尘通量均开始增加且至少持续 0.5 h 所对应的摩擦速度(或风速)确定为临界起沙摩擦速度 u_{*t} (或临界起沙风速 U_t)。利用内蒙古科尔沁沙地地区 2010—2013 年春季大气环境综合观测资料, 分析了不同沙尘天气过程(扬沙、沙尘暴和强沙尘暴)起沙阶段沙尘浓度和垂直沙尘通量随摩擦速度的演变特征, 精细确定了该地区临界起沙摩擦速度(u_{*t})和临界起沙风速(U_t)的范围分别为 0.45 ± 0.20 和 6.5 ± 3.0 m/s, 同时讨论了不同起沙判据对确定临界起沙阈值产生的影响。相比而言, 采用的起沙判据尽可能地排除了沙尘输送和沉降过程的影响, 适用于不同的沙尘天气类型, 使沙尘粒子进入大气的起沙结果更趋于合理, 其结果可为建立统一、合理的起沙判据提供参考。

* 资助课题: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014IAE-CMA-D)、财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY20150601)、国家自然科学基金(41475007)。

作者简介: 李晓岚, 主要从事大气边界层与大气湍流、大气环境研究。E-mail: leexl.ouc@163.com

通讯作者: 张宏升, 主要从事大气边界层与大气湍流、大气环境研究。E-mail: hsdq@pku.edu.cn

关键词 沙尘天气, 起沙判据, 临界起沙摩擦速度, 临界起沙风速, 科尔沁沙地
中图法分类号 P404

1 引言

地表土壤的风蚀过程在全球干旱、半干旱和农耕区时有发生, 释放进入大气中的沙尘气溶胶对全球物理、化学和生物循环有重要影响(Shao, et al, 2011)。临界起沙阈值, 包括临界起沙摩擦速度(u_{*t})和临界起沙风速(U_t), 是度量土壤可蚀性的重要指标, 是沙尘模式中起沙参数化方案所涉及的关键参数(朱好等, 2010a), 是区分对流起沙和跃移起沙过程的前提和关键(Li, et al, 2014a)。根据风沙物理学的定义, 临界起沙阈值通常指地表沙粒在风力作用下开始运动时所需要s的最小摩擦速度(u_*)或最小风速(U), 多用 u_{*t} 表示(Bagnold, 1941)。其中, u_{*t} 和 u_* 分别表征风蚀起沙发生的动力因子和阻力因子(申彦波等, 2004)。

数值模拟和卫星遥感是获取区域甚至全球范围内起沙阈值时空分布的两种有效途径(Xi, et al, 2015; Kurosaki, et al, 2007)。其中, 沙尘模式中获取 u_{*t} 多采用参数化的方法, 通常将 u_{*t} 作为土壤粒径、土壤水分、地表粗糙度、土壤含盐量等影响因子的函数(Marticorena, et al, 1995; Shao, 2001, 2004)。Xi 等(2015)利用中尺度沙尘模式研究了2001年3—10月中亚地区不同环境因子(包括风速、土壤湿度、地表粗糙度的非均一性和地表植被)对 u_{*t} 季节变化的影响, 并指出春季植被生长旺盛和土壤水分增加是导致 u_{*t} 数值增大的主要原因。野外观测可以获取真实自然条件下某一特定地区的临界起沙阈值, 可为研究不同影响因子(如气象、土壤、植被等)对临界起沙阈值的影响提供观测依据, 亦可为校验和改进临界起沙阈值的模式模拟和卫星反演结果提供有效参考。不同学者通过野外实验获取的不同沙源地区的临界起沙阈值反映了不同下垫面的特征, 如戈壁沙漠地区(Ishizuka, et al, 2005, 2009; Li, et al, 2011)、黄土高原(朱好等, 2010b)、草原下垫面(沈建国等, 2008; Shinoda, et al, 2010)和农田地区(申彦波等, 2003)等。然而, 由于影响 u_{*t} 的因素众多, 沙粒跃移活动的间歇性、地表状况的复杂性以及土壤粒径不均一等原因造成 u_{*t} 的准确获取仍然存在一定困难; 此外, 也与临界起沙

阈值的定义、仪器架设高度、数据时间分辨率以及所涉及的关键参数(包括地表粗糙度 z_0 、零平面位移 d 和摩擦速度 u_*)的计算方法有关(Stout, 1998; Ishizuka, et al, 2009)。

不同学者对起沙的理解不同, 野外观测中判定临界起沙阈值的标准也存在差异。有学者采用跃移撞击法, 同步观测风速和沙粒的跃移活动, 通常将首次或持续观测到沙粒跃移活动的 u_* 最小值定义为 u_{*t} (Belly, 1964; Stout, et al, 1996; Gillette, et al, 2004; Sow, et al, 2009; Ishizuka, et al, 2009)。何清等(2012)利用内蒙古巴丹吉林沙漠北缘拐子湖风沙观测场2011年3—5月的观测资料发现, 当 $u_* < 0.30$ m/s 时, 5和10 cm高度处的风蚀传感器(H11-LIN型)没有探测到沙粒的跃移运动; 当 $u_* > 0.30$ m/s 时, 跃移运动开始发生; 当 $u_* > 0.40$ m/s 时, 地表跃移沙粒数迅速增多。这表明该地区在观测期间 u_{*t} 数值应为 0.30—0.40 m/s。由于沙粒的跃移活动多集中发生在距离地面30 cm高度范围内(可达90%), 且跃移沙粒数随高度增加而明显减少(Butterfield, 1999; Dong, et al, 2004), 利用上述方法确定的 u_{*t} 数值对风蚀传感器的安装高度和位置较为敏感。基于微气象学方法, 有学者利用近地面层沙尘浓度或者大气能见度作为判断起沙的指标, 将沙尘浓度增加或能见度降低至一定程度时所对应的 u_* 定义为 u_{*t} , 更能够反映真正向上输送沙尘粒子的作用(沈志宝等, 2003; 申彦波等, 2003; 张宏升等, 2007; Jugder, et al, 2014)。王金艳(2006)利用2000—2005年春季多个气象站常规观测资料和气溶胶观测资料, 建立了气溶胶浓度与大气能见度的关系, 以能见度反算出的气溶胶浓度为指标对东亚地区沙尘天气进行了量化分级。申彦波等(2003)认为, 敦煌沙漠地区2 m高度的沙尘浓度指数(DCI, 与大气能见度有关)等于0.2时为起沙的临界条件, 得到该地区2002年春季两次沙尘天气过程中 u_{*t} 和 U_t 的平均值分别为0.50和7.0 m/s。朱好等(2010b)定义了沙尘暴天气过程中, 当3 m高度的沙尘浓度大于 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时为一次起沙过程, 得到浑善达克沙地、黄土高原和戈壁沙漠地区的 u_{*t} 分别为0.60、0.35和0.45 m/s。Jug-

der 等(2014)利用统计方法将蒙古国戈壁沙漠和草地地区不同观测站 2009 年 1 月—2013 年 5 月的沙尘浓度(C)和风速资料,根据 $C = aU^4$ 进行拟合,确定常数 a 的取值;定义沙尘浓度超过 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为起沙标准,则可由 $U_c = (C/a)^{1/4}$ 反推临界起沙阈值。有学者指出,跃移撞击法虽然从微物理角度记录了土壤颗粒开始运动的最小风速,但发生跃移的颗粒粒径通常较大,垂直和水平方向的扩散范围均有限,对沙尘天气实际进入大气的贡献值得怀疑;微气象学法反映了能使沙尘进入近地面层的临界起沙阈值,但沙尘天气过程经常与上风向的沙尘输送同步存在(朱好等,2010b;张宏升等,2014)。

综上所述,不同学者通过野外观测采用不同手段和定义获取临界起沙阈值,丰富了对不同沙源地区临界起沙阈值分布和变化的了解,同时也加深了对自然条件下起沙过程的理解。然而,由于以往多数研究中采用起沙判据较为单一,仅将沙尘浓度或能见度超过某一特定值作为起沙的临界条件主观性较强,较难真实合理地反映自然环境中较为复杂的起沙过程,而起沙判据涉及的某一参量的特定临界取值在不同下垫面地区以及不同类型的沙尘天气条件下应有所不同;同时以往获取的临界起沙阈值多为某一定值,对其变化范围的估计存在不足。此外,野外实验中获取 u_{*c} 还应考虑沙尘水平输送和沉降过程的影响。Li 等(2011)指出,沙尘的水平输送和沉降过程会导致对 u_{*c} 的低估,并提出利用单层沙尘浓度和风速的时间滞后相关系数判断局地起沙的方法。而多数学者则利用沙尘通量作为判定局地起沙的指标,即当沙尘通量数值为正时,沙尘粒子的垂直运动以向上输送为主,属局地起沙;反之亦然(Sow, et al, 2009; Li, et al, 2014b)。如何在有效区分局地和非局地起沙的基础上采用较为综合和合理的起沙标准确定不同沙尘源区的临界起沙阈值非常重要,同时需要更多的观测事实对其支撑。

本研究利用科尔沁沙地地区沙尘天气监测与观测实验站 2010—2013 年春季微气象要素和沙尘浓度梯度观测资料,分析不同沙尘天气过程(扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)起沙阶段沙尘浓度和垂直沙尘通量随摩擦速度的演变特征,改进以往仅利用沙尘浓度

作为单一指标的起沙判据,引入沙尘通量作为共同指标确定临界起沙阈值。融合了沙尘浓度和沙尘通量的起沙判据,考虑了起沙过程对实际大气中沙尘浓度和沙尘通量的贡献,能够有效排除沙尘输送和沉降过程的影响,适用于不同的沙尘天气类型,可为建立统一的临界起沙阈值标准提供参考。

2 资料与方法

2.1 观测资料

沙尘天气监测与观测实验站位于内蒙古自治区奈曼旗($42^{\circ}56'N$, $120^{\circ}42'E$),地处科尔沁沙地的东南边缘。实验站所在地区多年平均降水量为 200—300 mm,属于典型的半干旱地区。周围地面略有起伏,分布着半流动沙丘,以沙丘链为主,呈带状分布。地面植被主要为沙蓬,并生长有半灌木植被差巴嘎蒿、冷蒿等(Zhao, et al, 2007)。自 2003 年当地政府推行禁牧政策以来,实验站周围植被逐年增多;至今距实验站 500 m 内的植被覆盖率约为 50%,更远距离处植被覆盖率有所降低。测站周围地表土壤含有 90.61% 的沙土($63 < d \leq 2000 \mu\text{m}$)、9.02% 的泥土($4 < d \leq 63 \mu\text{m}$)和 0.36% 的粘土($d \leq 4 \mu\text{m}$),属于偏壤质沙土^①(Loamy Sand)(Li, et al, 2014a)。

实验平台为高 20 m 的气象观测塔,观测项目有:(1)微气象学要素,包括 4 层高度(2、4、16、20 m)的风速和风向;4 层高度(2、4、8、16 m)的空气温度和相对湿度、地表温度;2 m 高度的太阳辐射、地面反射辐射和净辐射、地面气压;0.65 m 高度的降水量;8 m 高度的风速和温度脉动量;(2)土壤环境观测,包括 3 层深度(5、20、50 cm)的土壤温度和土壤(体积)含水量;25 cm 深度的土壤热通量观测;(3)沙尘参量观测,包括 2 层高度(3、18 m)的沙尘(PM_{10})质量浓度观测;3 层高度(0.20、0.50、0.75 m)的沙粒(直径 $d > 50 \mu\text{m}$)跃移运动观测;3 m 高度的分粒径(10 级)沙尘(PM_{20})质量浓度观测,各级粒径范围分别为 0.1—0.2、0.2—0.3、0.3—0.45、0.45—0.7、0.7—1.4、1.4—2.5、2.5—4.0、4.0—7.0、7.0—10.0、10.0—20.0 μm ;以及 8 m 高度的沙尘浓度快速涨落测量。

^①美国农业部(USDA, United States Department of Agriculture)根据土壤中沙粒、粉粒和粘粒所占质量百分比制定的土壤类型划分。

以上观测多为自动、连续进行,观测的时间分辨率为 10 min;风速、温度和沙尘脉动量的观测频率为 10 Hz。粒子分级采样仪的观测不连续,人工操作逐日观测 1—2 次,加强观测试验期间则逐时进行观测。科尔沁沙地实验站所有观测项目、使用的观测仪器及其技术指标等详见 Li 等(2012)。

2.2 研究方法

基于空气动力学方法,利用风速和温度廓线资料可计算摩擦速度 u_* 、温度特征尺度 θ_* 和奥布霍夫长度 L

$$u_* = \kappa \bar{U}(z) \left[\ln \left(\frac{z_u}{z_0} \right) - \Psi_M \left(\frac{z_u}{L} \right) + \Psi_M \left(\frac{z_0}{L} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\theta_* = \kappa (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1) \left[\ln \frac{z_{\theta_2}}{z_{\theta_1}} - \Psi_H \left(\frac{z_{\theta_2}}{L} \right) + \Psi_H \left(\frac{z_{\theta_1}}{L} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$L = \frac{-\bar{\theta} u_*^3}{\kappa g (\overline{w'\theta'})_s} = \frac{1}{2} \frac{(\bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2) u_*^2}{\kappa g \theta_*} \quad (3)$$

式中, $\kappa = 0.40$ 为冯卡曼常数, \bar{U} 为风速平均值(单位: m/s), $\bar{\theta}$ 为空气温度的平均值(单位: K), $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, $(\overline{w'\theta'})_s$ 为地表处的垂直运动学热通量, Ψ_M 和 Ψ_H 分别为动力和热力的稳定度修正函数, z 为观测高度(单位: m), $z_u = 10 \text{ m}$ (4 和 16 m 的平均值), $z_{\theta_1} = 4 \text{ m}$, $z_{\theta_2} = 16 \text{ m}$, z_0 为空气动力学地表粗糙度。利用近中性层结下的风速廓线拟合得到科尔沁沙地地区 2011 年春季南风条件下 $z_0 = 0.103 \text{ m}$, 北风条件下 $z_0 = 0.034 \text{ m}$ (Li, et al, 2012)。

对于直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的细尘粒子, 因其所受重力较小, 通常认为其能够较好地跟随空气运动 (Gillette, et al, 1972; Sow, et al, 2009)。因此, 利用空气动力学法可获取垂直沙尘通量 F (单位: $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

$$F = \kappa u_* (\bar{C}_2 - \bar{C}_1) \left[\ln \frac{z_{c_2}}{Z_{c_2}} - \Psi_C \left(\frac{z_{c_2}}{L} \right) + \Psi_C \left(\frac{z_{c_1}}{L} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, C 为沙尘质量浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$); Ψ_C 为沙尘的稳定度修正函数, 且认为 $\Psi_C = \Psi_H$; 本研究中沙尘质量浓度的观测高度分别为 $z_{c_1} = 3 \text{ m}$, $z_{c_2} = 18 \text{ m}$ 。

3 结果与分析

3.1 强沙尘暴天气过程起沙阈值确定

根据沙尘浓度和能见度对东亚地区的沙尘天气

等级划分(宋振鑫等, 2005), 以及韩国气象厅对沙尘天气等级划分的标准, 认为近地面高度处 1 h 平均 PM_{10} 浓度达到 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时为一次沙尘天气过程, 文中采用相同的沙尘天气标准, 且认为垂直沙尘通量数值基本大于 0 时属局地起沙过程。选取 2011 年 3 月 18 日强沙尘暴、3 月 24 日扬沙和 5 月 13 日沙尘暴 3 次不同强度的沙尘天气过程重点分析。

图 1 给出了 2011 年 3 月 18 日科尔沁沙地地区强沙尘暴天气过程中 3、18 m 高度的沙尘 (PM_{10}) 质量浓度 (C_1 和 C_2) 和风向, 以及摩擦速度 (u_*) 和垂直沙尘通量 (F) 的时间演变。由图 1a 可见, 3 月 18 日风向较稳定, 白天至夜间西南风逐渐转为西北风。沙尘天气过程中 (07—22 时, 北京时, 下同) 不同高度的沙尘浓度明显增大, 13 时 40 分—14 时, C_1 和 C_2 出现最大值, 分别为 941.5 和 $791.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 次峰值出现在 21 时许, 分别为 683.0 和 $552.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘天气爆发后, F 迅速增大, 11 时许出现最大值为 $35.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 21 时的峰值为 $20.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (图 1b)。沙尘天气过程中沙尘浓度和垂直沙尘通量的变化较为一致, 均与 u_* 密切相关, 符合局地起沙过程的基本特征 (Li, et al, 2011)。

综合考虑沙尘浓度和垂直沙尘通量随摩擦速度的演变特征, 将沙尘浓度和沙尘通量均开始持续增大且至最大值的时段确定为起沙阶段, 并认为沙尘浓度和垂直沙尘通量均开始增大且至少持续 30 min 时所对应的摩擦速度(或风速)为临界起沙摩擦速度 u_{*c} (或临界起沙风速 U_{1c})。由图 2 可见, 这次强沙尘暴天气过程 05—13 时(含起沙阶段为 07 时 20 分—13 时), 3 m 高度沙尘浓度和垂直沙尘通量随 u_* 的演变规律非常一致。当 $u_* < 0.40 \text{ m/s}$ 时, C_1 较小, 随着 u_* 增大, C_1 迅速增大; 当 $u_* > 0.6 \text{ m/s}$ 时, C_1 接近 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 2a)。类似地, 当 $u_* < 0.40 \text{ m/s}$ 时, F 基本为 0; 随着 u_* 增大, F 呈近似线性增长的趋势 (图 2b)。根据上述定义, 得到 2011 年 3 月 18 日强沙尘暴天气过程中 $u_{*c} = 0.40 \text{ m/s}$, $U_{1c} = 5.0 \text{ m/s}$ (与图 2 类似, 图略)。

3.2 扬沙天气过程起沙阈值确定

图 3 给出了 2011 年 3 月 24 日科尔沁沙地地区扬沙天气过程中 3 和 18 m 高度的沙尘浓度和风向、摩擦速度和垂直沙尘通量的时间演变。3 月 24 日 12—20 时风向频繁变化, 其余时间以西北风为主 (图 3a)。扬沙天气发生前 $u_* < 0.30 \text{ m/s}$, C_1 和 C_2

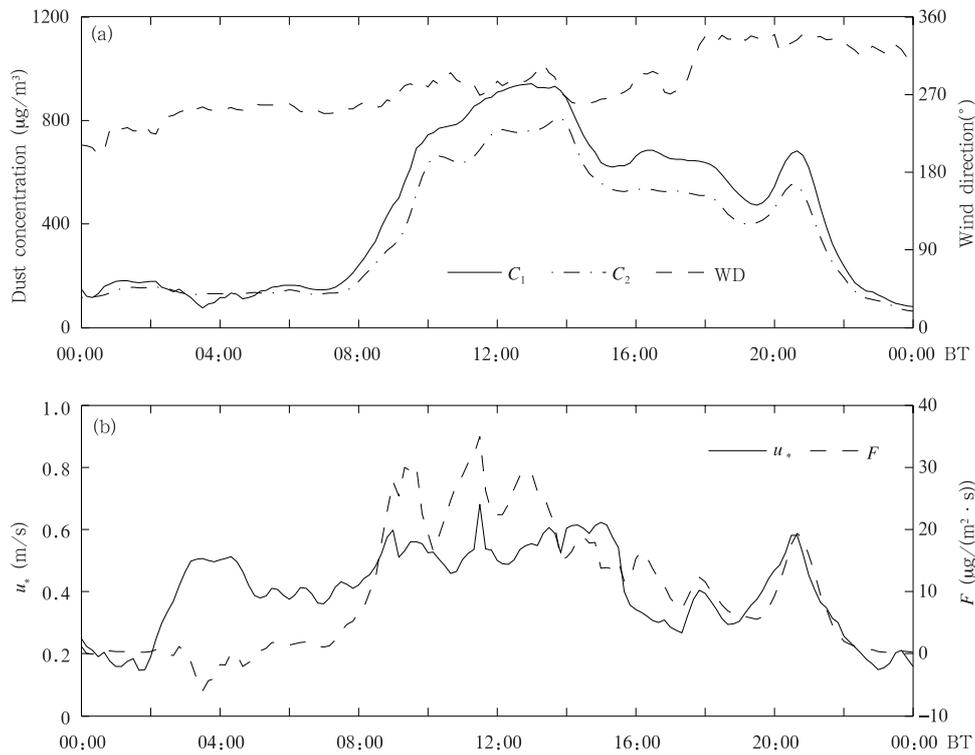


图 1 2011 年 3 月 18 日科尔沁沙地地区强沙尘暴天气过程(a)3 和 18 m 高度的沙尘浓度 C_1 和 C_2 与风向(WD), (b)摩擦速度 u_* 和垂直沙尘通量(F)的时间变化

Fig.1 Variations of (a) dust concentration at heights of 3 and 18 m and wind direction(WD), and (b) friction velocity u_* and vertical dust flux F during the severe sand storm event on 18 March 2011 over the Horqin Sandy Land area

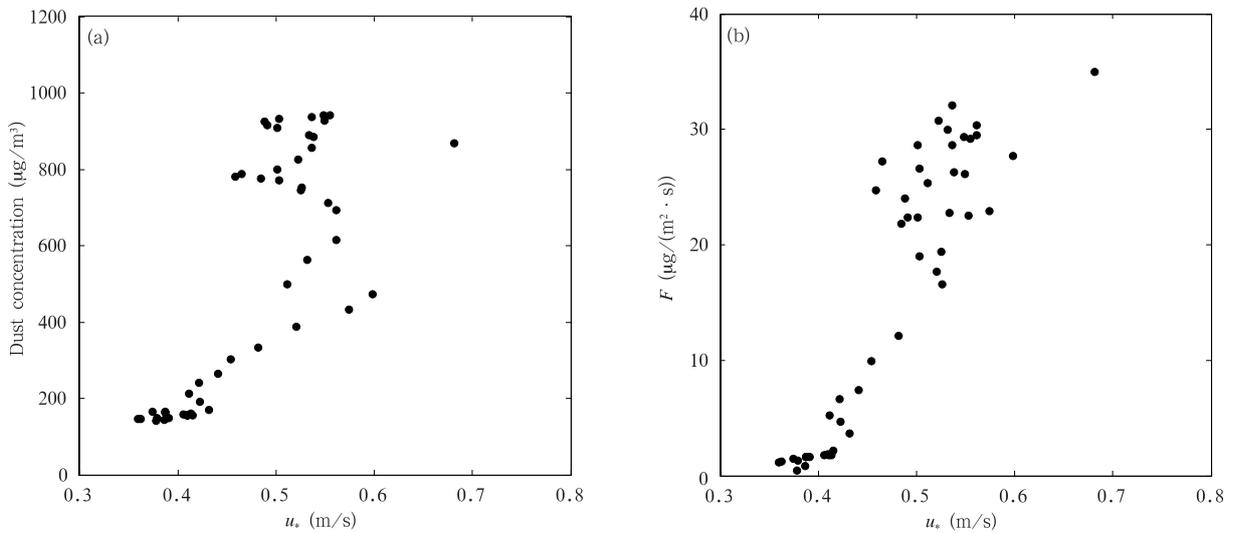


图 2 2011 年 3 月 18 日科尔沁沙地地区强沙尘暴天气过程 05—13 时(a)3 m 高度沙尘浓度和(b)垂直沙尘通量(F)随摩擦速度(u_*)的演变

Fig.2 Scatter plots of the friction velocity (u_*) against (a) dust concentration at the 3 m height and (b) vertical dust flux (F) during 05:00 – 13:00 BT 18 March 2011 over the Horqin Sandy Land area

小于 $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, F 数值接近 0。08 时许 u_* 增大至 0.57 m/s , C_1 仍然较小。此后 u_* 持续增大, C_1 、 C_2 和 F 均明显增大。13 时 u_* 最大值为 0.98 m/s , C_1 、 C_2 和 F 也相应出现最大值, 分别为 251.9 、 $196.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $16.7 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (图 3b)。

图 4 给出了 2011 年 3 月 24 日扬沙天气过程

06—13 时 10 分(含起沙阶段 08 时—13 时 10 分) C_1 和 F 随 u_* 演变的散点分布。起沙前, u_* 持续增大, 但 C_1 始终较小, 当 u_* 继续增大至 0.60 m/s 时, C_1 开始增大(图 4a); F 随 u_* 的演变也存在类似的规律(图 4b)。根据文中的标准得到这次扬沙天气过程 $u_{*t} = 0.60 \text{ m/s}$, $U_t = 8.0 \text{ m/s}$ (图略)。

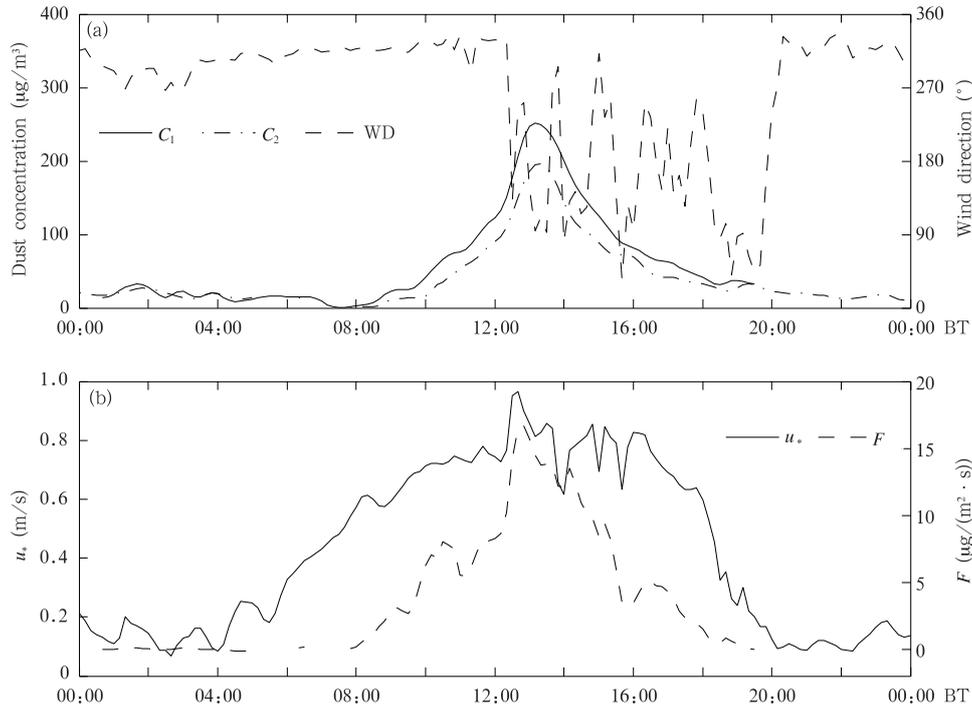


图 3 同图 1, 但为 2011 年 3 月 24 日扬沙天气过程

Fig. 3 As in Fig. 1 but for the blowing dust event on 24 March 2011

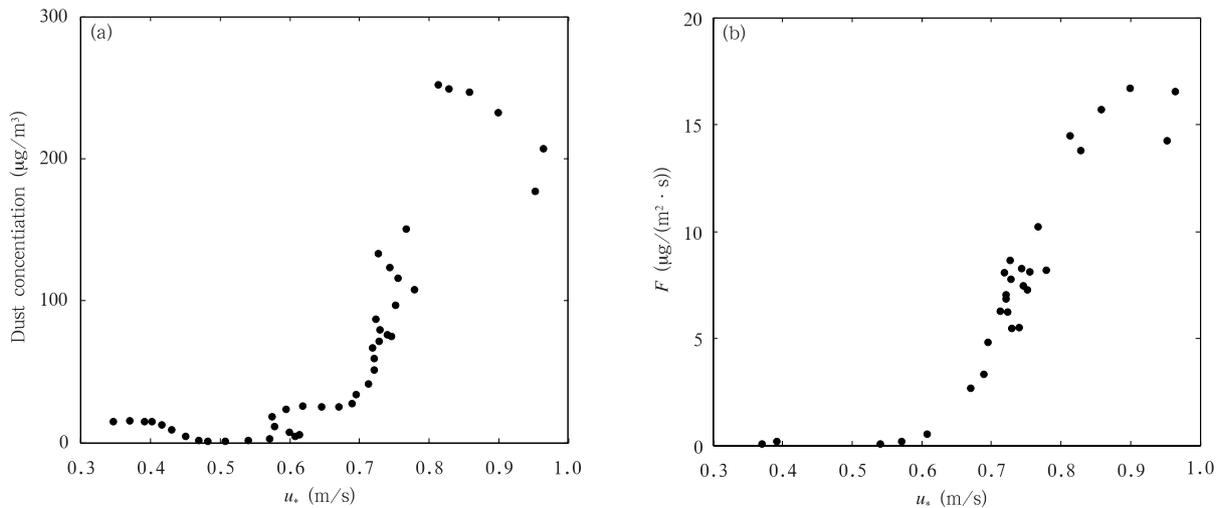


图 4 同图 2, 但为 2011 年 3 月 24 日 06 时—13 时 10 分扬沙天气过程

Fig. 4 As in Fig. 2 but for the blowing dust event during 06:00 – 13:00 BT 24 March 2011

3.3 沙尘暴天气过程起沙阈值确定

2011年5月13日科尔沁沙地地区出现沙尘暴天气,06时开始,20时许结束;当日风向较稳定,以西北风为主(图5a)。沙尘暴天气发生前, C_1 和 C_2 约为 $100.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, u_* 约为 0.40 m/s , F 基本为0;

沙尘天气爆发后, C_1 、 C_2 和 F 均随 u_* 增大而明显增大, C_1 的最大值为 $493.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, F 最大值为 $67.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。12—14时 F 出现负值(最大为 $-9.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),应与沙尘水平输送和沉降过程有关,但不影响对起沙阈值的确定(图5b)。

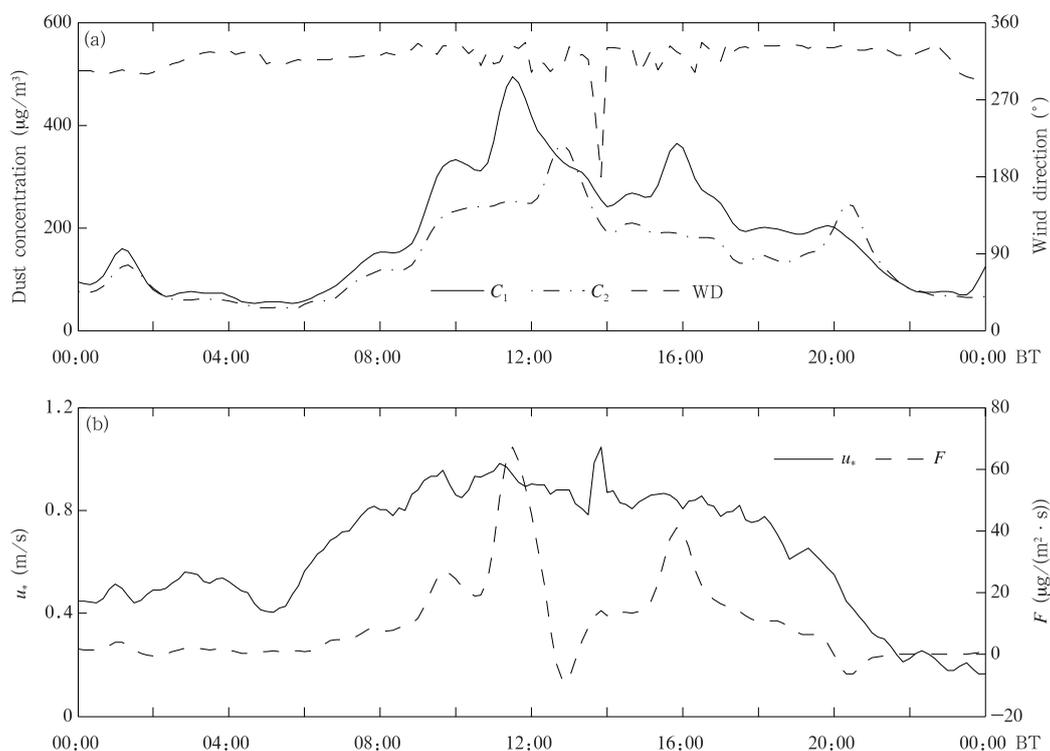


图5 同图1,但为2011年5月13日沙尘暴天气过程

Fig. 5 As in Fig. 1 but for the sand-dust storm event on 13 May 2011

图6给出了2011年5月13日沙尘暴天气过程04时—11时40分(含起沙阶段06时—11时40分) C_1 和 F 随 u_* 的演变。当 u_* 增大至能够克服地表沙粒的自身重力和所受粒子间粘性力的阻力合力时,沙尘粒子脱离地表并在湍流的作用下实现向上输送,使近地面层的沙尘浓度和垂直沙尘通量明显增大。根据定义得到这次沙尘暴天气过程 $u_{*t} = 0.55 \text{ m/s}$ (图6), $U_t = 7.0 \text{ m/s}$ (图略)。针对沙尘暴天气,朱好等(2010b)认为,沙尘浓度超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时为一次起沙过程,同时将沙尘浓度首次达到 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时对应的 u_* 确定为 u_{*t} 。采用这一定义得到的 u_{*t} 为 0.85 m/s ,对应的 F 为 $15.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,这一结果明显高估了真实的起沙阈值。

3.4 临界起沙阈值的范围确定

综上所述,以沙尘浓度超过某一定值作为起沙判据,不能完全反映真实的临界起沙阈值,而引入沙尘通量,不仅有效排除了非局地起沙过程的影响,同时以二者开始持续增大作为起沙的临界条件降低了判据的主观性,更为客观合理。表1列出了科尔沁沙地地区2011年春季共11次(包含上述3次)局地沙尘天气过程的主要气象、土壤和沙尘参量信息,以及根据上述方法确定的临界起沙阈值,得到科尔沁沙地地区2011年春季不同沙尘天气过程 u_{*t} 的范围为 $0.38\text{--}0.65 \text{ m/s}$, U_t 的范围为 $4.0\text{--}9.5 \text{ m/s}$ 。

此外,为研究近几年不同强度的沙尘天气过程临界起沙阈值是否存在明显差异,选取2010年4月

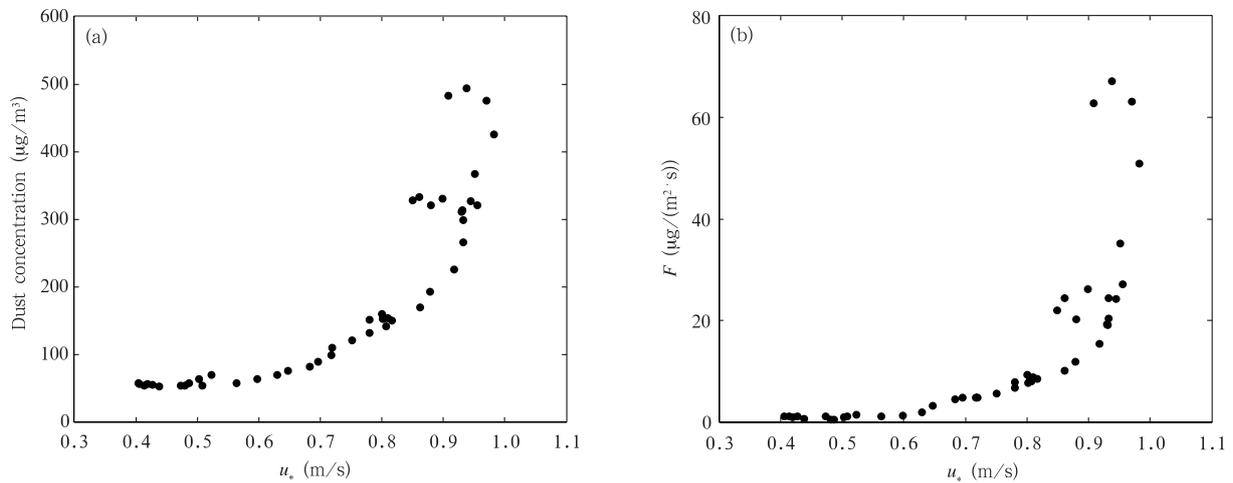


图6 同图2,但为2011年5月13日04时—11时40分沙尘暴天气过程

Fig. 6 As in Fig. 2 but for the sand-dust storm event during 04:00–11:40 BT 24 March 2011

表1 科尔沁沙地地区2011年春季11次局地起沙事件不同气象、土壤和沙尘参量的详细信息*
Table 1 The information of the various meteorological, soil and dust parameters in the 11 local dust emission events in spring 2011 over the Horqin Sandy Land area*

持续时间	沙尘天气类型*	C_{Dmax} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	U_{max} (m/s)	T_{amax} ($^{\circ}\text{C}$)	q_{max} (g/kg)	T_{smax} ($^{\circ}\text{C}$)	C_{SMmax} (v/v)	F_{max} ($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	u_{*max} (m/s)	u_{*t} (m/s)	U_t (m/s)
3月13日00时—14日00时	强沙尘暴	561.40	9.89	5.90	2.44	-1.1	3.40	46.50	1.21	0.38	4.70
3月18日00时—19日00时	强沙尘暴	931.30	6.68	8.60	1.71	-1.0	3.50	34.00	0.81	0.40	5.00
3月24日10时—25日00时	扬沙	232.60	9.25	1.90	1.09	-1.0	3.60	13.80	1.13	0.60	8.00
3月29日15时—16日00时	扬沙	230.80	7.00	17.30	0.82	1.60	7.40	12.20	0.86	0.59	7.80
4月9日07—12时	沙尘暴	416.50	6.40	7.90	1.82	6.10	7.10	24.40	0.80	0.43	5.80
4月14日22时—15日06时	强沙尘暴	1282.40	7.10	13.30	2.50	11.90	10.0	36.40	0.86	0.51	6.00
4月16日17时—17日05时	强沙尘暴	843.60	8.70	21.70	4.80	13.40	7.50	74.30	1.06	0.55	8.00
4月18日00—08时	沙尘暴	406.80	11.30	5.20	3.70	8.60	6.80	36.30	1.37	0.65	9.50
5月11日13时—12日00时	强沙尘暴	1654.10	8.70	23.90	4.80	19.50	10.0	98.20	1.76	0.52	7.00
5月13日09时—14日00时	沙尘暴	434.10	11.80	20.00	2.70	17.90	7.50	59.00	1.44	0.55	7.00
5月21日08—14时	强沙尘暴	683.60	7.90	16.60	3.80	16.60	7.40	48.30	0.97	0.41	5.00

*注: C_{Dmax} :3 m高沙尘最大浓度, U_{max} :10 m高最大风速, T_{amax} :4 m高最高气温, q_{max} :4 m高最高比湿, T_{smax} :5 cm深土壤温度, C_{SMmax} :5 cm深土壤最大含水量, F_{max} :最大垂直沙尘通量, u_{*max} :最大摩擦速度, u_{*t} :临界起沙摩擦速度, U_t :临界起沙风速。

参考韩国气象厅对黄沙天气的划分标准,小时平均的 PM_{10} 浓度200—300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为扬沙(弱黄沙)天气,300—500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为沙尘暴(一般黄沙)天气,>500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超过2 h或者>1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超过1 h为强沙尘暴(强黄沙)天气。

21日和2012年5月22日扬沙天气、2010年5月2日强沙尘暴和2013年5月11日沙尘暴天气过程进行分析。由图7a和b可知,2010年4月21日扬沙天气过程起沙阶段为20时—23时30分,3 m高度的沙尘浓度最大值为261.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, F 最大值为11.7 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。2010年5月2日强沙尘暴天气始于08时,约持续10 h,3和18 m高度的沙尘浓度最大值分别为915.1和832.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, F 最大值为32.7 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,强沙尘暴起沙阶段(07—10时)沙尘浓度和垂直沙尘通量均随 u_* 的增大迅速增大(图7c、d)。根据前文相同的方法,由图8a、b可知,

2010年4月21日扬沙天气过程中 $u_{*t} = 0.60$ m/s, $U_t = 7.2$ m/s(图略);同样,得到2010年5月2日强沙尘暴天气过程 $u_{*t} = 0.40$ m/s(图8c、d), $U_t = 4.0$ m/s(图略)。

2012年5月22日扬沙天气包括两次起沙过程,第1个起沙阶段(00—02时) u_* 数值从0.33增大至0.61 m/s,沙尘浓度持续增大至239.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,但 F 增大不明显;第2个起沙阶段(06—11时) u_* 继续加大,沙尘浓度和 F 均明显增大(图9a、b)。2013年5月11日沙尘暴天气过程沙尘浓度和垂直沙尘通量最大值分别约为500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和22 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

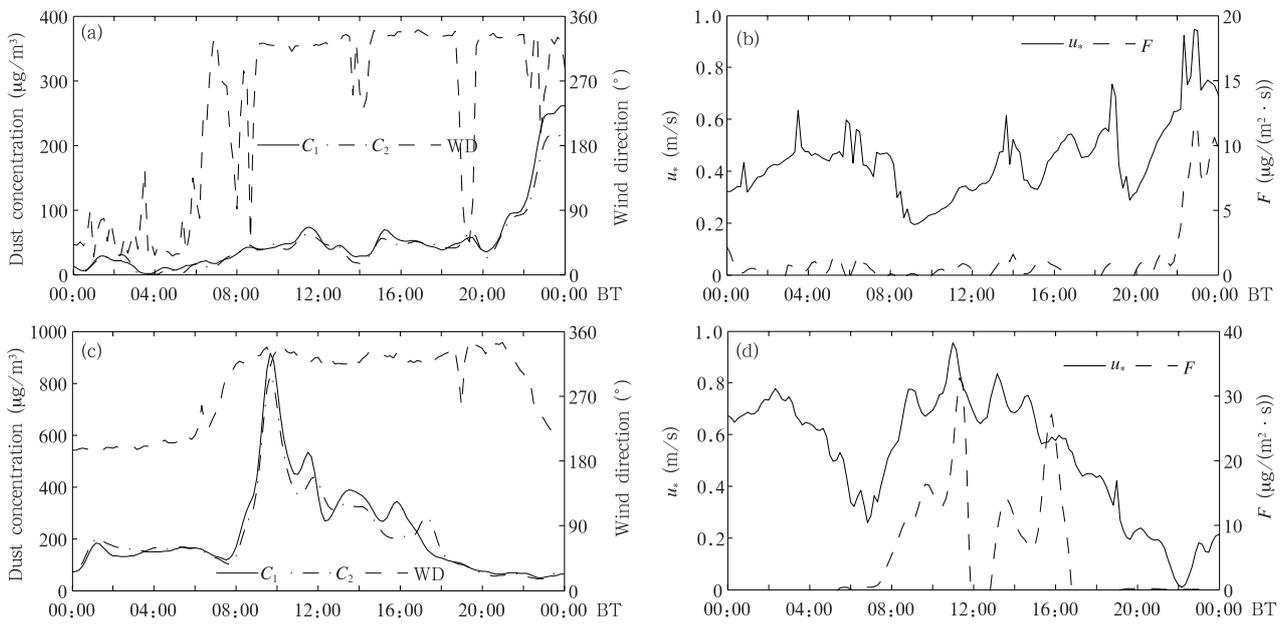


图7 同图1,但为科尔沁沙地地区2010年4月21日扬沙天气过程(a—b)和2010年5月2日强沙尘暴天气过程(c—d)
 Fig. 7 As in Fig. 1 but for the blowing dust event on 21 April 2010 (a - b) and the severe dust storm event on 2 May 2010 (c - d)

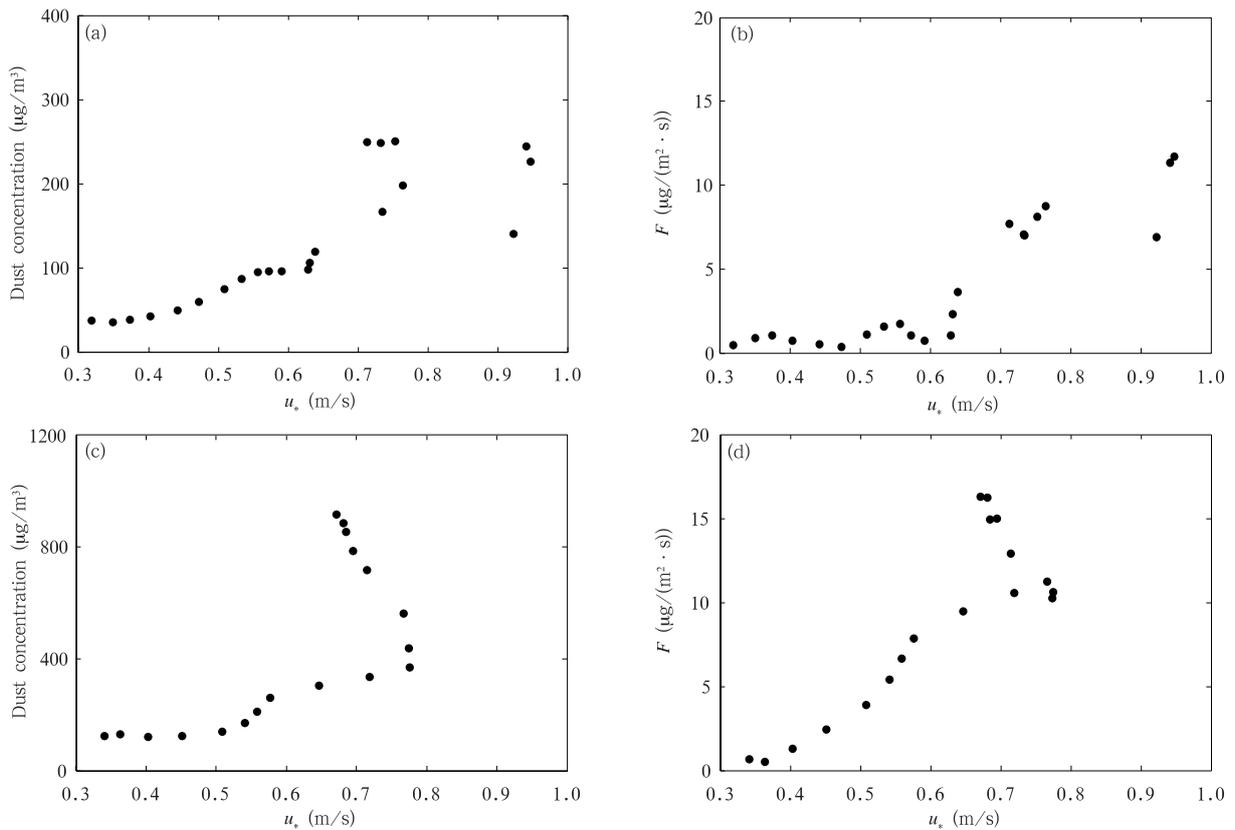


图8 同图2,但为科尔沁沙地地区2010年4月21日20—23时30分扬沙(a—b)和2010年5月2日07—10时强沙尘暴天气过程(c—d)

Fig. 8 As in Fig. 2 but for the blowing dust event during 20:00 - 23:30 BT 21 April 2010 (a - b) and the severe dust storm event during 07:00 - 10:00 BT 2 May 2010 (c - d)

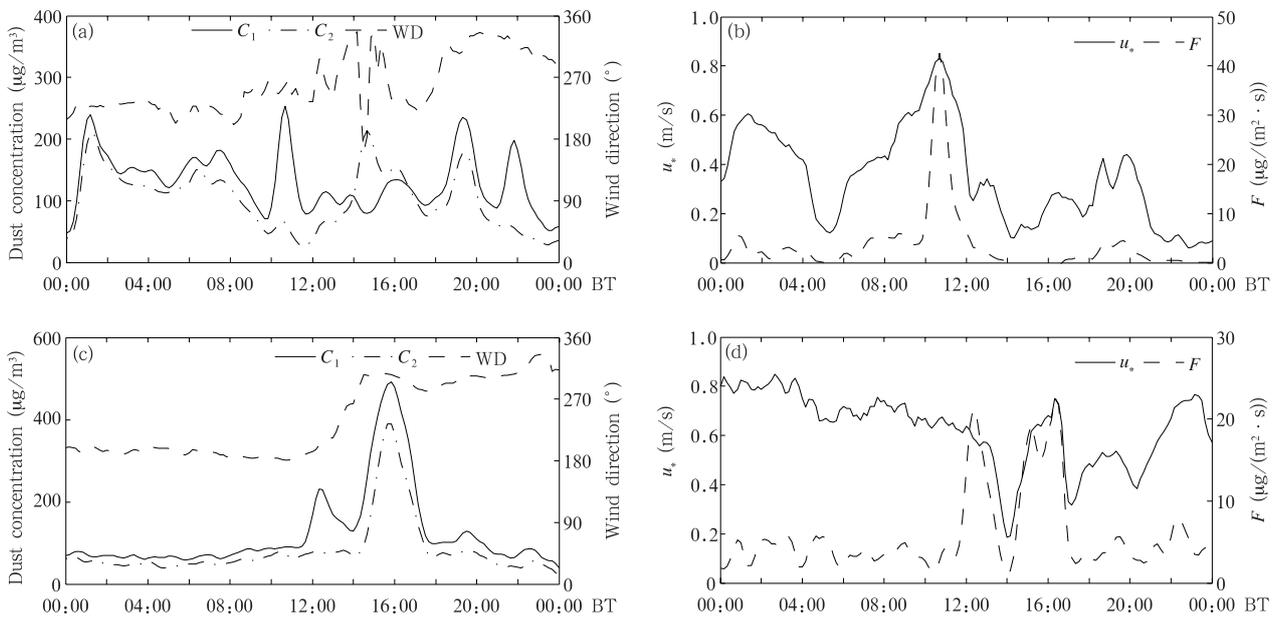


图9 同图1,但为科尔沁沙地地区2012年5月22日扬沙天气过程(a—b)和2013年5月11日沙尘暴天气过程(c—d)

Fig. 9 As in Fig. 1 but for the blowing dust event on 22 May 2012 (a—b) and the severe dust storm event on 11 May 2013 (c—d)

(图9c、d)。针对2012年5月22日扬沙天气两次起沙过程,图10a、b给出了沙尘浓度和 F 与 u_* 的关系,可见同一沙尘事件中起沙阈值随时间的推移会发生改变。有学者认为这是因为随着沙尘天气的发生,地表可提供的用于跃移撞击的土壤粒子或聚合体的数量减少导致的(Gillette, et al, 2008)。根据第2次起沙过程得到这次扬沙天气过程 $u_{*t} = 0.60 \text{ m/s}$, $U_t = 6.1 \text{ m/s}$ (图略)。类似地,得到2013年5月11日沙尘暴天气过程中 $u_{*t} = 0.38 \text{ m/s}$ (图10c、d), $U_t = 4.2 \text{ m/s}$ (图略)。

综上所述,2010—2013年春季科尔沁沙地地区临界起沙摩擦速度变化范围为 $0.45 \pm 0.20 \text{ m/s}$,临界起沙风速 U_t 的变化范围为 $6.5 \pm 3.0 \text{ m/s}$,期间不同年份的临界起沙阈值没有明显差异。

4 结论与讨论

从微气象学角度出发,定义沙尘天气过程中3 m高度的沙尘浓度和垂直沙尘通量均开始增大且持续时间超过30 min时对应的摩擦速度 u_* (或风速 U)为临界起沙摩擦速度 u_{*t} (或临界起沙风速 U_t)。利用内蒙古科尔沁沙地地区2010—2013年春季沙尘天气观测资料,通过分析不同沙尘天气过程

沙尘浓度和沙尘通量与摩擦速度的演变关系,确定了科尔沁沙地地区临界起沙摩擦速度和临界起沙风速的数值及变化范围。结果表明,科尔沁沙地地区2010—2013年春季临界起沙摩擦速度 u_{*t} 的变化范围为 $0.45 \pm 0.20 \text{ m/s}$,多集中在 $0.45—0.55 \text{ m/s}$,临界起沙风速 U_t 的变化范围为 $6.5 \pm 3.0 \text{ m/s}$,多集中在 $6.0—8.0 \text{ m/s}$ 。观测期间不同年份的临界起沙阈值没有明显差异,且临界起沙阈值与沙尘天气类型之间没有明显的相关关系。

李晓岚等(2012)采用3 m高度的沙尘浓度首次超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时对应的摩擦速度为 u_{*t} ,得到科尔沁沙地地区2008—2009年春季临界起沙阈值范围为 $0.55 < u_{*t} < 0.70 \text{ m/s}$ 和 $6.9 < U_t < 11.5 \text{ m/s}$ 。文中得到的临界起沙阈值范围相对偏低,应与采用的起沙判据不同有关。仅以某一沙尘浓度为指标定义起沙阈值,主观性较强且无法区分沙尘源,针对不同的沙尘天气类型其适用性有待考察;而仅以沙尘通量为指标可以反映沙尘源,但不能反映沙尘天气的强弱。相比而言,文中采用的起沙标准综合了沙尘浓度和垂直沙尘通量,不仅考虑了起沙过程对实际大气中沙尘浓度和沙尘通量的贡献,也有效排除非局地沙尘过程的影响。同时,沙尘

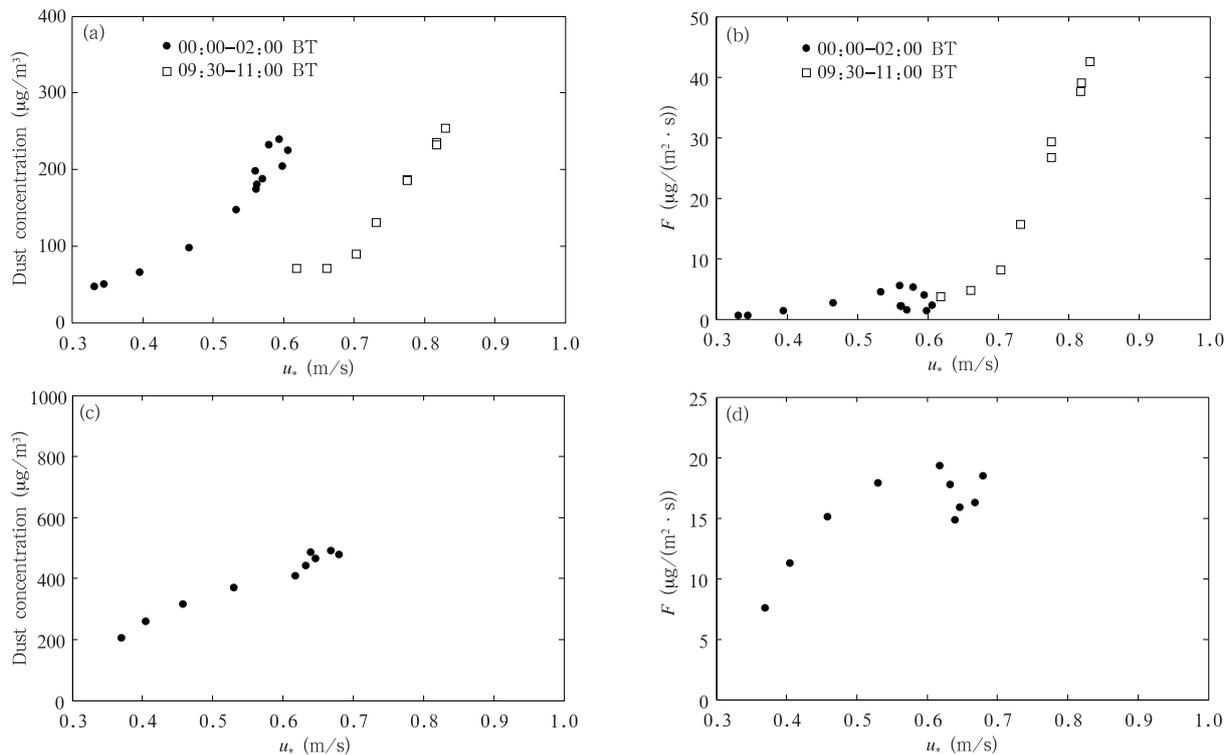


图 10 同图 2, 但为科尔沁沙地地区 2012 年 5 月 22 日 00—02 时和 09 时 30 分—11 时扬沙(a—b),
2013 年 5 月 11 日 14—16 时沙尘暴天气过程(c—d)

Fig. 10 As in Fig. 2 but for the blowing dust event during 00:00–02:00 BT and 09:30–11:00 BT on 22 May 2012 (a–b) and the dust storm event during 14:00–16:00 BT on 11 May 2013 (c–d)

天气过程起沙阶段, 沙尘浓度和垂直沙尘通量均随摩擦速度的增加开始持续增加, 这一特征作为判断起沙发生的临界条件, 更加符合实际的起沙情况。综合二者给出的起沙阈值指标虽在理论上改进不大, 但对比由单一沙尘浓度为指标得到的起沙阈值, 文中给出的综合指标更加合理和科学, 结果更加严谨, 可为建立合理、统一的起沙判据提供参考。

此外, 由于受众多因素的影响, 临界起沙阈值并非定值, 而应有一定的变化范围。然而, 某一典型沙源地区的临界起沙阈值范围在相对较短的时间尺度内(如几年内)不应有明显变化, 因其下垫面特征、地表土壤粒径分布等起沙影响因子很难发生显著改变。Li 等(2011)利用野外实验资料得到中国甘肃张掖戈壁地区 2006 年春季 u_{*t} 变化范围为 0.34—0.42 m/s, 2008 年春季 u_{*t} 为 0.40—0.44 m/s, 并指出 2008 年春季土壤湿度偏大很可能是导致该年份 u_{*t} 增加的原因。尽管不同的气象、土壤等因素的差异会导致临界起沙阈值发生变化, 但该变化仍在合理的起沙阈值范围之内。因此, 利用长期观测

资料确定不同沙源地区的具有代表性的临界起沙阈值的合理范围仍需要开展进一步的研究。

参考文献

- 何清, 胡文峰, 杨兴华等. 2012. 内蒙古拐子湖地区风沙运动若干参数计算. 干旱区地理, 35(2): 187-192. He Q, Hu W F, Yang X H, et al. 2012. Several calculations of parameters of wind-sand movement at Guaizi Lake area of Inner Mongolia. Arid Land Geogr, 35(2): 187-192 (in Chinese)
- 李晓岚, 张宏升. 2012. 内蒙古科尔沁沙地起沙近地层动力学阈值的实验研究. 高原气象, 31(1): 38-46. Li X L, Zhang H S. 2012. Study on the threshold friction velocity of dust emission in Horqin Sand Land area in the Inner Mongolia. Plat Meteorol, 31(1): 38-46 (in Chinese)
- 申彦波, 沈志宝, 杜明远等. 2003. 敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征. 高原气象, 22(4): 378-384. Shen Y B, Shen Z B, Du M Y, et al. 2003. Variational characteristics of some parameters and factors during dusty weather in spring of Dunhuang. Plat Meteorol, 22(4): 378-384 (in Chinese)
- 沈建国, 孙照渤, 章秋英等. 2008. 干旱草原地区起沙通量的初步研究. 中国沙漠, 28(6): 1045-1049. Shen J G, Sun Z B,

- Zhang Q Y, et al. 2008. Preliminary study on dust emission rate over arid steppe area. *J Desert Res*, 28(6): 1045-1049 (in Chinese)
- 申彦波, 沈志宝, 杜明远等. 2004. 西北地区戈壁和绿洲风蚀起沙(尘)的研究. *中国环境科学*, 24(4): 390-394. Shen Y B, Shen Z B, Du M Y, et al. 2004. Studies on dust emission in Gobi and oasis of northwest China. *China Environ Sci*, 24(4): 390-394 (in Chinese)
- 沈志宝, 申彦波, 杜明远等. 2003. 沙尘暴期间戈壁沙地起沙率的观测结果. *高原气象*, 22(6): 545-550. Shen Z B, Shen Y B, Du M Y, et al. 2003. Observational result of dust emission rate over sand surface of Gobi Desert during dust storm. *Plat Meteorol*, 22(6): 545-550 (in Chinese)
- 宋振鑫, 王金艳. 2005. 东亚地区沙尘天气的分级量化//中国气象学会 2005 年年会——气象科技与社会经济可持续发展. 北京: 气象出版社, 6414-6430. Song Z X, Wang J Y. 2005. Quantitative classification of northeast Asian dust events// The 2005 Anniversary of Chinese Meteorological Society—Meteorological Science and Technology and Social Economic Continuable Development. Beijing: China Meteorological Press, 6414-6430 (in Chinese)
- 王金艳. 2006. 沙尘模式优化与东亚沙尘天气气象量化分级研究[D]. 兰州: 兰州大学, 80-126. Wang J Y. 2006. Study on optimization of the dust model system and quantitative classification of dust events in East Asia [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 80-126 (in Chinese)
- 张宏升, 朱好, 彭艳等. 2007. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究. *气象学报*, 65(5): 744-752. Zhang H S, Zhu H, Peng Y, et al. 2007. Experiment on dust flux during dust storm periods over sand desert area. *Acta Meteor Sinica*, 65(5): 744-752 (in Chinese)
- 张宏升, 李晓岚. 2014. 沙尘天气过程起沙特征的观测试验和参数化研究进展. *气象学报*, 72(5): 987-1000. Zhang H S, Li X L. 2014. Review of the field measurements and parameterization for dust emission during sand-dust events. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 987-1000 (in Chinese)
- 朱好, 张宏升. 2010a. 沙尘天气过程临界起沙因子的研究进展. *地球科学进展*, 26(1): 30-38. Zhu H, Zhang H S. 2010a. Review of the threshold for dust emission during dust events. *Adv Earth Sci*, 26(1): 30-38 (in Chinese)
- 朱好, 张宏升. 2010b. 中国西北不同沙源地区起沙阈值的对比分析与研究. *气象学报*, 68(6): 977-984. Zhu H, Zhang H S. 2010b. An estimation of the threshold friction velocities over the three different dust storm source areas in northwest China. *Acta Meteor Sinica*, 68(6): 977-984 (in Chinese)
- Bagnold R A. 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 2
- Belly P Y. 1964. *Sand Movement by Wind*. Washington: US Army CERC, Tech Memo, 1: 1-38
- Butterfield G R. 1999. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport: high-resolution measurements in a wind tunnel. *Earth Surf Proc Land*, 24(5): 393-412
- Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. 2004. The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect. *Geomorphology*, 57(1-2): 117-127
- Gillette D A, Blifford Jr I H, Fenster C R. 1972. Measurements of aerosol size distributions and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion. *J Appl Meteor*, 11(6): 977-987
- Gillette D A, Ono D, Richmond K. 2004. A combined modeling and measurement technique for estimating windblown dust emissions at Owens (dry) Lake, California. *J Geophys Res*, 109(F1): F01003, doi: 10.1029/2003JF000025
- Gillette D A, Ono D. 2008. Expressing sand supply limitation using a modified Owen saltation equation. *Earth Surf Process Landforms*, 33(12): 1806-1813
- Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. 2005. An observational study of soil moisture effects on wind erosion at a Gobi site in the Taklimakan Desert. *J Geophys Res*, 110(D18): D18S03, doi: 10.1029/2004JD004709
- Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. 2009. Threshold friction velocities of saltation sand particles for different soil moisture conditions in the Taklimakan Desert. *SOLA*, 5: 184-187
- Jugder D, Shinoda M, Kimura R, et al. 2014. Quantitative analysis on windblown dust concentrations of PM₁₀(PM_{2.5}) during dust events in Mongolia. *Aeolian Res*, 14: 3-13, doi: 10.1016/j.aeolia.2014.04.005
- Kurosaki Y, Mikami M. 2007. Threshold wind speed for dust emission in East Asia and its seasonal variations. *J Geophys Res*, 112(D17), doi: 10.1029/2006JD007988
- Li X L, Zhang H S. 2011. Research on threshold friction velocities during dust events over the Gobi Desert in northwest China. *J Geophys Res*, 116(D20): D20210, doi: 10.1029/2010JD015572
- Li X L, Zhang H S. 2012. Temporal variations in dust concentration and dust emission observed over Horqin Sandy Land area from December 2010 to November 2011. *Atmos Environ*, 61: 56-65
- Li X L, Klose M, Shao Y P, et al. 2014a. Convective Turbulent Dust Emission (CTDE) observed over Horqin Sandy Land area and validation of a CTDE scheme. *J Geophys Res*, 119(16): 9980-9992
- Li X L, Zhang H S. 2014b. Soil moisture effects on sand saltation and dust emission observed over the Horqin Sandy Land area in China. *J Meteor Res*, 28(3): 444-452
- Marticorena B, Bergametti G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J Geophys Res*, 100(D8): 16415-16430
- Shao Y P. 2001. A model for mineral dust emission. *J Geophys Res*, 106(D17): 20239-20254, doi: 10.1029/2001JD900171
- Shao Y P. 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *J Geophys Res*, 109(D10): D10202, doi:

10. 1029/2003JD004372
- Shao Y P, Wyrwoll K, Chappell A, et al. 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Res*, 2(4): 181-204
- Shinoda M, Kimura R, Mikami M, et al. 2010. Characteristics of dust emission in the Mongolian steppe during the 2008 DUVEX intensive observational period. *SOLA*, 6: 9-12
- Sow M, Alfaro S C, Rajot J L, et al. 2009. Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AM-MA experiment. *Atmos Chem Phys*, 9(12): 3881-3891
- Stout J E, Zobeck T M. 1996. The Wolfforth field experiment: A wind erosion study. *Soil Sci*, 161(9): 616-632
- Stout J E. 1998. Effect of averaging time on the apparent threshold for aeolian transport. *J Arid Environ*, 39(3): 395-401
- Xi X, Sokolik I N. 2015. Seasonal dynamics of threshold friction velocity and dust emission in Central Asia. *J Geophys Res*, 120(4): 1536-1564
- Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. 2007. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin sand land of Inner Mongolia. *Ecolog Eng*, 31(1): 1-8
-

勘误:

勘误声明

因作者疏忽,本刊 2015 年第 6 期《中国降水集中期之特征》资助课题:国家重点基础研究发展计划项目编号 2013CB430206 应为 2013CB430203,特此更正。

汪卫平