

韩超信,韩永翔,李嘉欣.弱风背景下阵风起沙对大气沙尘气溶胶总量的贡献[J].中国沙漠,2025,45(1):259-265.

弱风背景下阵风起沙对大气沙尘 气溶胶总量的贡献

韩超信^{1,2}, 韩永翔², 李嘉欣²

(1.兰州市气象局,甘肃 兰州 730030; 2.南京信息工程大学,江苏 南京 210044)

摘要: 沙尘气溶胶排放量是研究气候和环境变化的核心参量。利用2021年腾格里沙漠1 min风速数据,基于通用的起沙方案,计算了强风背景下沙尘暴和弱风背景下阵风的起沙量。结果显示:(1)阵风具有明显的湍流结构和随机性,年内大于临界起沙风速的频率约占总数的6%,10 min和1 h的平均风速难以捕捉弱风背景下的阵风起沙。(2)强风背景下沙尘暴起沙量是弱风背景下阵风起沙量的5~100倍,但阵风起沙量的累积效应不容忽视。(3)非沙尘期,阵风起沙机制起支配作用,而沙尘期,沙尘暴起支配作用;沙尘暴和阵风对年度起沙总量的贡献分别为45%和55%,表明阵风起沙机制在沙尘排放中占据重要地位。弱风背景下阵风导致的巨量沙尘气溶胶对气候和环境变化的影响亟须进行重新评估。

关键词: 阵风起沙; 沙尘气溶胶; 沙尘通量; 沙尘暴; 贡献率

文章编号: 1000-694X(2025)01-259-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00178

中图分类号: P425.6

文献标志码: A

0 引言

沙尘气溶胶约占气溶胶总量的一半^[1],它通过直接、间接效应和铁肥料效应对全球气候和环境产生重大影响^[2-3]。以动力起沙为主的沙尘暴是沙尘气溶胶最主要的排放机制,全球每年向大气排放的沙尘气溶胶为1 514~4 313 Tg^[4-7],但它只能解释沙尘暴时段的起沙量,无法解释非沙尘暴时段内大量沙尘气溶胶存在的事实^[8-9],也不能解释沙尘暴模式模拟全球年起沙量远低于观测总量的事实^[10],暗示除了沙尘天气起沙外还可能存在另外的起沙机制^[11]。

考虑沙尘湍流脉动输送所需的时间以及稳态的起沙通量,曾庆存等^[12-13]将阵风起沙定义为1~10 min内的风扰动扬起的沙尘。在强风背景下阵风起沙量不可忽视。如学者利用ERA-40提供的阵风参数场,发现阵风在解释全球沙尘起沙高值区的年度周期方面具有绝对的优势^[1];考虑阵风后,沙尘暴模型明显改善沙特阿拉伯-印度-中国北部的沙

尘分布数据质量,使沙尘暴起沙量增加了约20%^[14]。这些研究初步揭示阵风起沙可能对沙尘气溶胶中有重要作用,但这些研究关注的是冷锋、雷暴等天气动量下传引发的强阵风及其起沙量。在野外观测中发现在弱风背景下,有一些时间尺度非常小、风速较大的阵风也可起沙,出现极其频繁,其累积的年沙尘总量粗略估计是巨大的,但因缺乏高时间分辨率的风速观测资料,目前这方面的研究是空白。

根据曾庆存等^[12]阐述的阵风起沙机制,无论是强风还是弱风背景下的阵风起沙,其本质仍是动力起沙,地表阵风只有大于临界摩擦速度时,才能使地表沙粒跃移或飞起至空中。因此,强风情形下的沙尘气溶胶排放方案如Shao等^[15]、Bagnold^[16]、Owen^[17]方案以及Gillette方案^[18]仍可应用于弱风背景下阵风起沙通量的计算。由于不同方案之间计算的起沙通量存在明显的差异^[19-21],为了在同一起沙方案下对比阵风和沙尘暴起沙量的贡献,综合考虑Gillette方案计算的简便性,本文拟采用Gillette方

收稿日期:2024-10-11; 改回日期:2024-12-14

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42275077)

作者简介:韩超信(1995—),男,甘肃兰州人,工程师,主要从事气象与环境研究。E-mail: 691358223@qq.com

通信作者:韩永翔(E-mail: han-yx66@126.com)

案,利用观测点1 min的1 a风速资料,分析了弱风背景下1 min阵风相对于10 min和1 h的变化特征,分别计算了阵风和沙尘暴的垂直起沙量,进而估算了弱风背景下阵风起沙量在月和年时间尺度内的相对贡献。该研究对阵风起沙是否是一个重要的大气沙尘排放机制给出定性的回答,有助于进一步完善现有的起沙机制。

1 资料与方法

1.1 研究区域与数据资料来源

观测点位于腾格里沙漠西南边缘的东沙窝(37.55°N, 102.56°E),年降雨量小于100 mm,而蒸发量高达2 400 mm,下垫面以沙漠为主。观测仪器为美国NK公司的Kestrel 5500风速气象仪,时间分辨率最高可达2 s,风速测量范围为0.6~40 m·s⁻¹,精度在±3%以内。本文时间分辨率设为1 min,观测时间为2021年1月1日到12月31日。沙尘天气数据来源于2021年沙尘天气年鉴和Micaps (Meteorology Information Comprehensive Analysis Process System)数据集。

1.2 阵风与沙尘暴起沙通量的计算

利用Gillette方案^[18]计算垂直起沙通量的公式为:

$$F = \begin{cases} C_2 u_*^4 \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right), & u_* > u_{*c} \\ 0, & u_* \leq u_{*c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为垂直起沙通量,为单位时间内地表向大气中排放的尘粒质量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); C_2 为经验常数,近似取值为 1.4×10^{-15} ; u_* 为摩擦速度; u_{*c} 为临界摩擦速度。

摩擦速度 u_* 可由常规观测风速计算获得:

$$u_* = \frac{u_z}{5.75 \lg(z/z_0)} \quad (2)$$

式中: u_z 为高度 z 处的观测风速,本文 $z=10$ m; z_0 为空气动力学粗糙度,根据沙漠和戈壁的野外观测^[22],取 $z_0=4.54 \times 10^{-3}$ 。计算的 u_* 随10 m风速的变化而变化。

根据丁国栋等^[23]的研究,10 m高度处的临界起沙风速为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,代入式(2),可得到10 m高度的临界摩擦速度 u_{*c} 为 $0.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 $u_* > u_{*c}$ 时,即可起沙。

阵风总起沙通量的计算:当某一时段 $\Delta T(\text{min})$ 内,存在 n 个超过 u_{*c} 的 u_* ,可利用式(1)获得不同 u_*

下的单次起沙通量 F_i ,则该时段内总阵风起沙通量即为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

定义观测点1 h内1 min风速均大于临界起沙风速时为系统性强风时段,常伴随沙尘天气;相反,1 h平均风速小于临界起沙风速,定义为弱风条件下的阵风时段,它排除了强风引发的阵风影响。

2 结果与分析

2.1 弱风背景下1 min阵风相对于10 min和1 h的变化特征

因一年内1 min风速过于密集,图1仅显示了弱风背景下夏季10 d内白天1 min风速随时间的变化。从图1可知,风速在 $[0, 10]$ (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)剧烈波动,阵风具有明显的湍流结构和随机性,大部分时间的风速低于临界起沙风速 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但每天均有大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速出现,也即出现了阵风起沙。对该序列分别进行了10 min、1 h和10 h的滤波,发现随着时间分辨率的降低,大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速出现次数越来越少。在10 min分辨率下,大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速出现的次数虽远低于1 min分辨率下出现的次数,但几乎每天仍有大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时段出现,但当时间分辨率下降到1 h,则仅有3 d出现大于临界起沙风速的时段;当时间分辨率下降到10 h,其趋势虽然变得更有规律,失去了随机性,但几乎没有出现大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时段。

为了量化1 min风速在10 min和1 h平均风速下的风速扰动损失,采用了阵风系数GF(Gust Factor)的概念,定义为瞬时风与持续风力的比值,然后分别计算了1 min风速与10 min和1 h平均风速的GF,它代表了1 min瞬时风速相较10 min和1 h平均风速的放大系数。从图2可以看出,1 min/10 min的GF变化非常剧烈,围绕着平均值1.5在1~10波动,除了早晨和傍晚GF有时波动到10之外,白天大部分时间在1~3波动。同理,1 min/1 h的GF变化围绕着平均值3.1在1~12波动,早晚的波动比较剧烈,而白天大部分时间在2~4波动。它意味着用10 min和1 h的平均风速则会分别低估1.5倍和3.1倍以上的1 min瞬时风速,尤其是早晚的低估更加严重。

10 d的分析仍带有偶然性,为了研究1 a内阵风

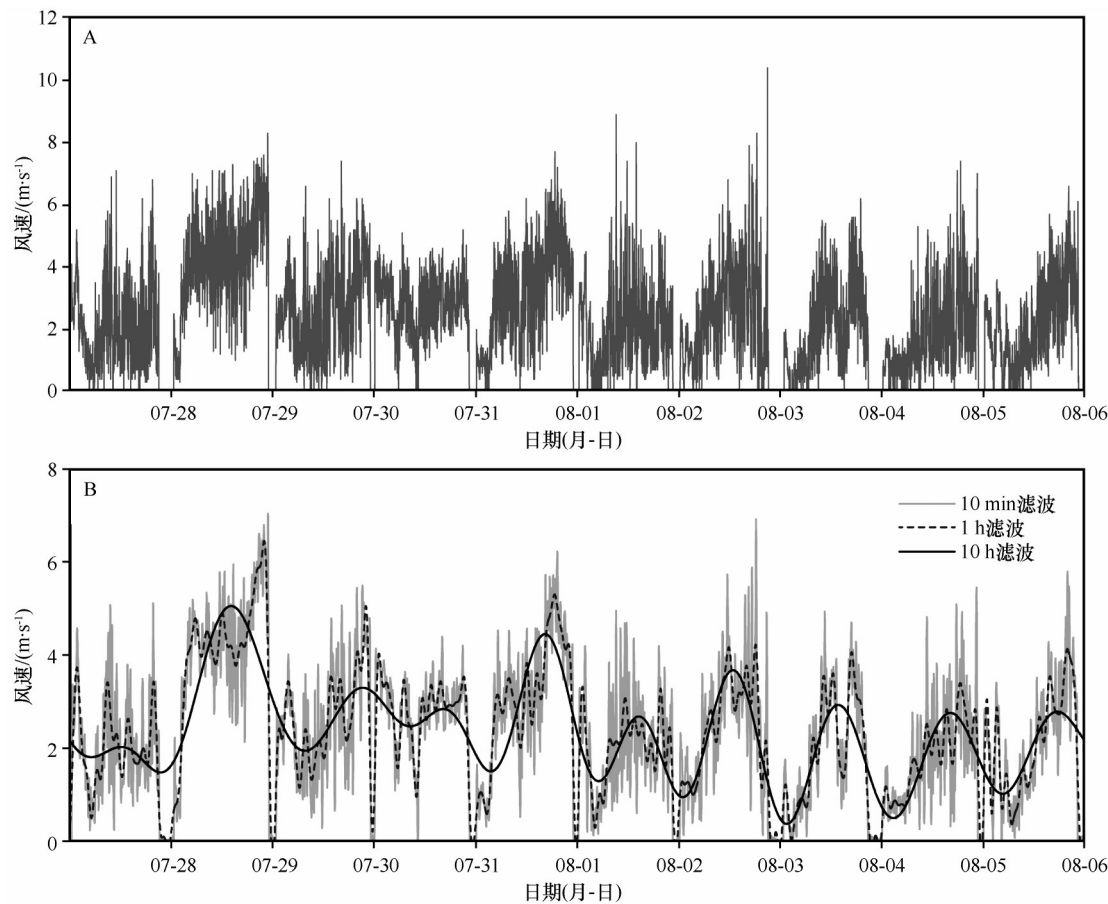


图1 弱风背景下夏季10 d内白天1 min风速随时间的变化(A)及其滤波(B)

Fig.1 Variation of daytime 1 min wind speed (A) and its filtering (B) during 10-day in summer with weak wind background

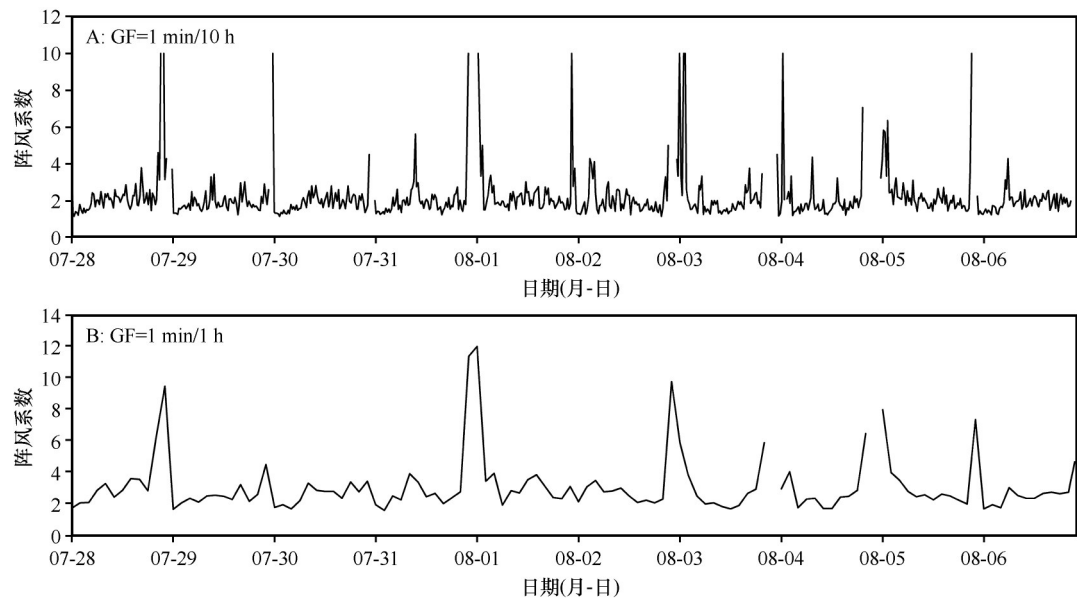


图2 弱风背景下1 min风速与10 min(A)和1 h(B)的阵风系数随时间的变化

Fig.2 Variation of gust coefficient with time for 1 min wind speed versus 10 min (A) and 1 h (B) with weak wind background

的变化,我们采用1 min的年风频谱进行研究,它表示了一年内每一风速段出现的概率。

在剔除了沙尘暴、扬沙、冷锋等系统性大风时段,以 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为风速段间隔,在弱风条件下,比较了1 a内1 min、10 min和1 h的风频谱。从图3可以看出,1 min、10 min和1 h风频谱的谱型基本相同,

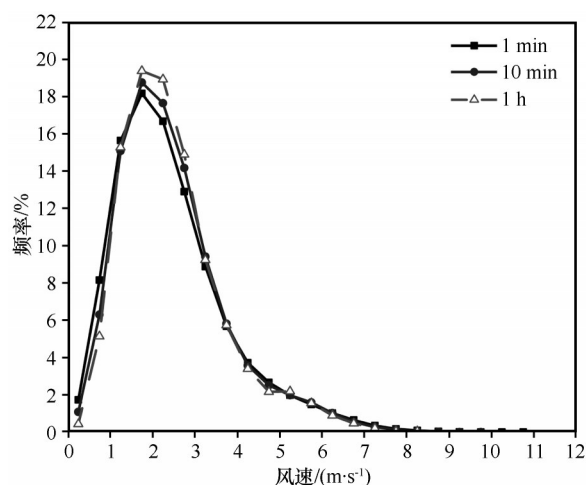
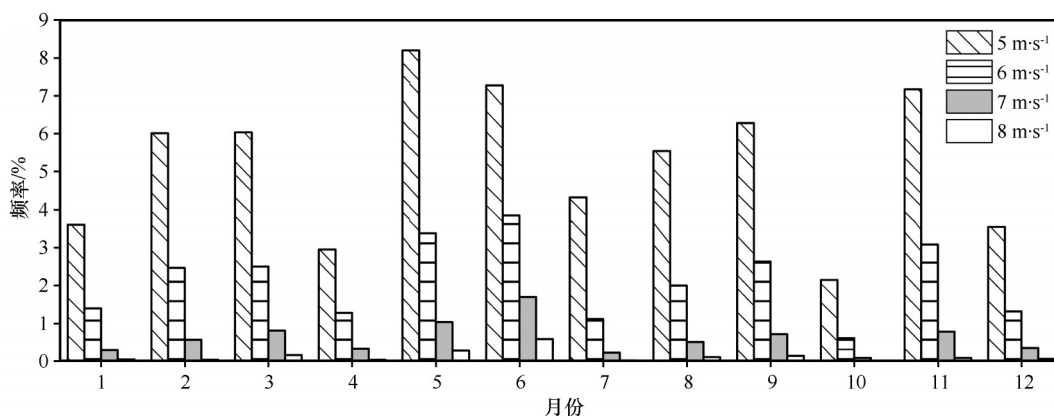


图3 1 min、10 min 和 1 h 风速的风频谱年分布

Fig.3 Annual wind spectrum for 1 min, 10 min and 1 h

均呈单峰分布,谱峰值风速均为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,峰值频率 $1 \text{ min} < 10 \text{ min} < 1 \text{ h}$,小于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小风占总频率的 94%,也即大于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 临界起沙风速的频率在 6% 左右。风频谱谱宽随时间分辨率的降低而变小,如 1 min 的谱宽为 11,10 min 为 10,1 h 为 8.5,频谱右侧长尾部分大风出现的频率则为 $1 \text{ min} > 10 \text{ min} > 1 \text{ h}$ 。10 min 和 1 h 分辨率的风速由于对风速平均造成风速扰动变化的损失,大风出现的频率大大降低。

在月际时间尺度上,大于临界起沙风速频次的月际变化大体呈现出双峰分布,从 12 月起,出现频次越来越大,在 5 月和 6 月达到最大,7 月降低后再次缓慢上升,11 月出现第二个峰值,而 4 月和 10 月并没有遵从这一规律(图 4)。

图4 观测点大于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 各风速出现频次的月际变化Fig.4 Monthly frequency of each wind speed greater than $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at observation site

综上所述,大于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 临界起沙风速的频率约为 6%,小于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小风的频率为 94%,10 min 和 1 h 的平均风速平滑掉了 1 min 大风的扰动,导致它低估了 1 min 瞬时风速。因此,利用 10 min 和 1 h 的平均风速很难捕捉到弱风背景下的阵性起沙,它可解释目前弱风背景下阵风起沙研究近乎空白的原因,因为常规和模式的气象资料只提供 1 h 风速,而只有时间分辨率更高的 1 min 风速资料,才能捕捉弱风背景下的阵风起沙。

2.2 弱风背景下阵风起沙量及其相对贡献

沙尘暴和阵风的临界起沙风速均设为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,利用站点观测 1 min 风速结合 Gillette 起沙通量公式,分别计算了 2021 年 1 min 沙尘暴和阵风的垂直起沙通量。由于 1 min 的垂直起沙通量过于密集且随机性较大,不利于分析,故而利用公式(3)计算了 2021 年 1 h 沙尘暴和阵风的垂直起沙通量(图 5)。

沙尘暴属于偶发性事件,沙尘暴起沙量全年分布较稀疏且不连续,主要发生在 4—6 月的个别天,但一旦发生,起沙量较大且波动范围很大,且随沙尘暴过程的强弱而变化,离散系数达到了 1.3,在 $0.1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 波动,这一结果与不同起沙方法计算的沙尘暴过程起沙量量级基本相同^[4-6]。相对沙尘暴起沙量的偶发性,阵风起沙量在全年大部分时段内的任一时刻均可发生,起沙量在 $0.001 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化,大部分时间的起沙量很小,小部分时间出现脉冲式的高起沙量,离散系数达到了 2.12,超过了沙尘暴起沙量的离散系数,表明其波动性较沙尘暴更加剧烈。值得注意的是,在沙尘暴暴发期间,阵风起沙量不参与计算,这是因为这一区间已经定义为系统性大风阶段,非弱风背景。

不管怎么样,沙尘暴的起沙量要远大于阵风起沙量,是阵风起沙的 5~100 倍,故而阵风起沙量只能

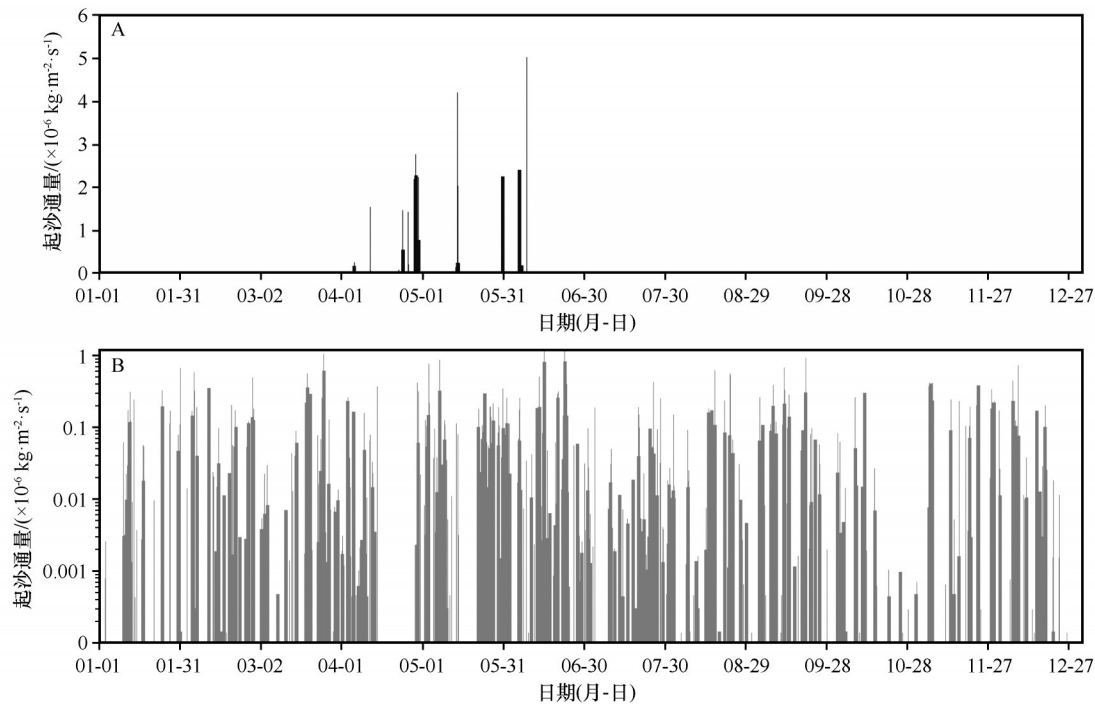


图5 2021年逐小时沙尘暴(A)和阵风(B)起沙通量

Fig.5 Hourly dust emissions from dust storms (A) and gusts (B) during 2021

构成背景大气沙尘气溶胶,欲想评估阵风对大气沙尘气溶胶的贡献,只能对更长时间尺度内的累积起沙量进行评估。

假定沙尘气溶胶总起沙量仅包括沙尘暴和阵风起沙量,则阵风起沙量贡献=阵风起沙量/沙尘气溶胶总量。

在月时间尺度内,图6显示了阵风和沙尘暴月起沙量的贡献分布,在非沙尘天气的1—3月和7—

12月,沙尘暴月起沙量的贡献率为0,阵风月起沙量贡献率则为100%;在沙尘天气期间,其中4月沙尘天气频发,4月沙尘暴起沙量的贡献率约90%,而阵风不到10%;5—6月沙尘暴起沙量的贡献率在46%~48%,两种起沙机制相近。显然,在月时间尺度内,弱风背景下的阵风起沙机制非常重要。

在年时间尺度内,计算了民勤单位格点区域2021年沙尘暴起沙总量为490 t,阵风起沙总量为600 t,则沙尘暴对年起沙总量的贡献率为45%,而阵风的贡献率为55%,这表明了弱风背景下的阵风起沙在区域沙尘气溶胶年排放中也占据重要地位。

3 结论

本文利用2021年腾格里沙漠1 min风速资料,在分析了弱风背景下1 min阵风相对10 min和1 h的变化特征的基础上,基于Gillette的起沙方案,计算了强风背景下沙尘暴和弱风背景下的阵风起沙量,重新探讨了阵风起沙尘量和沙尘暴起沙量对月和年总起沙量的贡献情况。

弱风背景下的阵风具有明显的湍流结构和随机性,年内大于5 m·s⁻¹临界起沙风速的频率约占总数的6%,月际变化大体呈现出双峰分布,从12月起,出现频次越来越大,在5月和6月达到最大,然后缓慢下降,次峰值出现在11月。10 min和1 h的

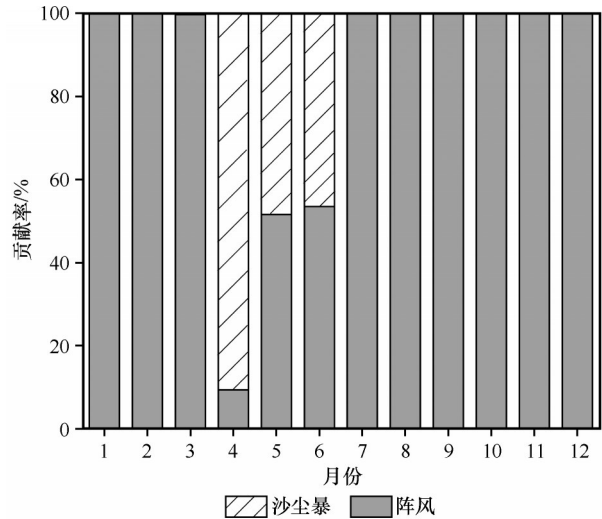


图6 观测点阵风和沙尘暴起沙量的月贡献分布

Fig.6 Distribution of monthly dust emission contribution of gusts and dust storms at the observation site

平均风速会低估 1.5~3.1 倍的 1 min 瞬时风速,很难捕捉到弱风背景下的阵性起沙。

阵风起沙可在任一时刻出现,起沙量 $0.001 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大部分时间的起沙量很小,偶尔出现脉冲式的高起沙量,波动非常剧烈,阵风起沙量只能构成背景大气沙尘气溶胶。沙尘暴属于偶发性事件,分布稀疏且不连续,主要发生在 4—6 月,但其一旦发生,起沙量 $0.1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,是阵风起沙的 5~100 倍。

假定沙尘气溶胶总起沙量仅包括沙尘暴和阵风起沙量,从月度贡献来看,在非沙尘期间,阵风是绝对性的起沙机制;在沙尘期间,沙尘暴起沙机制起支配作用。从年度贡献来看,沙尘暴起沙总量为 490 t,阵风起沙总量为 600 t,则沙尘暴对年起沙总量的贡献率为 45%,而阵风的贡献率为 55%,这表明弱风背景下的阵风起沙的累积效应在沙尘气溶胶排放中占据重要地位。

值得注意的是,本研究采用临界摩擦速度获取的垂直起沙通量是基于沙尘暴、扬沙等沙尘天气的强风过程的起沙参数化方案,其临界摩擦速度常要求沙尘浓度超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[24]。对于弱风背景下的阵风起沙,单次能够形成阵风起沙量的浓度远小于 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,现有的临界摩擦速度的计算方法和指标明显不适用于弱风背景下的阵风起沙量计算,阈值可能偏大,导致模拟的阵风起沙量偏小。同时,临界摩擦速度受粒子粒径、土壤水分含量、植被覆盖度以及土壤硬度等多重因素影响^[19-21],而本文采用的临界摩擦速度是一个定值,计算的阵风和沙尘暴起沙量有一定的误差。此外,本研究仅选取腾格里沙漠中一个观测点,证实了阵风起沙机制的重要性,但阵风起沙量在区域的贡献仍然未知,特别是人为气溶胶出现时,情况将变得更加复杂,这些均有待未来进一步研究及完善补充。

参考文献:

- [1] Engelstaedter S, Tegen I, Washington R. North African dust emissions and transport[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 79: 73-100.
- [2] Marcotte A R, Anbar A D, Majestic B J, et al. Mineral dust and iron solubility: effects of composition, particle size, and surface area[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 533.
- [3] Liang L, Han Z, Li J, et al. Emission, transport, deposition, chemical and radiative impacts of mineral dust during severe dust storm periods in March 2021 over East Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158459.
- [4] Zhao A, Ryder C L, Wilcox L J. How well do the CMIP6 models simulate dust aerosols? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22(3): 2095-2119.
- [5] 柳本立, 彭婉月, 刘树林, 等. 2021 年 3 月中旬东亚中部沙尘天气地面起尘量及源区贡献率估算[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(1): 79-86.
- [6] 李岩瑛, 张爱萍, 李红英, 等. 河西走廊边界层高度与风沙强度的关系[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 11-20.
- [7] 朱从祯, 罗继成, 王敏仲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夏季夜间稳定边界层特征及其对沙尘气溶胶浓度的影响[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(5): 1-12.
- [8] 刘莹, 韩永翔, 杨文清, 等. 沙尘天气、尘卷风对沙漠地区起沙量的贡献[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1175-1179.
- [9] Pan L, Han Y X, Lu Z Q, et al. Integrative investigation of dust emissions by dust storms and dust devils in North Africa[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 144128.
- [10] Maher B A, Dennis P E. Evidence against dust-mediated control of glacial-interglacial changes in atmospheric CO_2 [J]. *Nature*, 2001, 44(2020): 100579.
- [11] 陈思宇, 杜世康, 毕鸿儒, 等. 沙尘天气识别和预报方法研究综述[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(1): 11-21.
- [12] 曾庆存, 程雪玲, 胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 244-250.
- [13] 曾庆存, 胡非, 程雪玲. 大气边界层阵风扬尘机理[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 251-255.
- [14] Morcrette J J, Beljaars A, Benedetti A, et al. Sea-salt and dust aerosols in the ECMWF IFS model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L24813.
- [15] Shao Y, Zhang J, Ishizuka M, et al. Dependency of particle size distribution at dust emission on friction velocity and atmospheric boundary-layer stability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(21): 12939-12953.
- [16] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* [M]. Netherlands: Springer, 1941.
- [17] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20(2): 225-242.
- [18] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 93(D11): 14233-14242.
- [19] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提明. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季风蚀起沙研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 770-776.
- [20] 胡光印, 董治宝, 张正偲, 等. 若尔盖盆地起沙风况与输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 20-24.
- [21] 肖雨婷, 张国明, 洪畅, 等. 巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 104-113.
- [22] 王永胜. 库姆塔格沙漠东缘风沙活动及羽毛状沙丘剖面特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [23] 丁国栋, 赵廷宁, 董智, 等. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 226.
- [24] 张宏升, 朱好, 彭艳, 等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 744-752.

Contribution of dust emission from gust to total dust aerosol under weak wind conditions

Han Chaoxin^{1,2}, Han Yongxiang², Li Jiaxin²

(1.Lanzhou Meteorological Bureau, Lanzhou 730030, China; 2.Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Total dust aerosol emission is one of the most critical factors in the study of climate and environmental change. The dust emission mechanism of power-dominated dust storms can only explain the amount of dust aerosols during dust storms, but not the presence of large amounts of dust aerosols during non-dust storms, implying that there may be other dust emission mechanisms in addition to the dust storm emission mechanism. Using the 1-min high-resolution wind speed observation data of Tengger Desert in 2021, we calculate the dust emissions from gusts in a weak wind background and from dust storms in a strong wind background based on the generalized Gillette dust emission scheme. The results show that: (1) Gusts have obvious turbulence structure and randomness, and the frequency of wind speeds greater than the critical dust-raising speed accounts for about 8% of the total annual wind speeds, and the wind speed of 10-min and 1-h average is difficult to capture gusts dust emission in the context of weak winds. (2) Dust emission from dust storm is 5–100 times that of gusts, but the cumulative effect of gust should not be ignored, which is one of the main sources of dust aerosols in the atmospheric background. (3) The gust emissions are absolutely dominant in the non-dusty months, while the dust storm emissions are dominant in dusty months. In terms of the contribution to the total annual dust emissions, the contribution of dust storms is 45% while that of gusts is 55%, which suggests that the cumulative effect of dust emissions from gusts plays an important role in further refining the existing dust emission mechanism, and that the impacts of its huge amount of dust aerosols on the climate and environmental changes are in need of urgent re-assessment.

Key words: gusty dust emission; dust aerosol; dust flux; dust storm; contribution rate