沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第15卷 第6期
2021年12月

刘娅楠,钟昕洁,马凯,等.塔克拉玛干沙漠腹地风蚀起沙特征观测研究[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(6):26-30.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

塔克拉玛干沙漠腹地风蚀起沙特征观测研究

刘娅楠,钟昕洁,马　凯,杨芳芳,仇会民
(巴音郭楞蒙古自治州气象局,新疆　库尔勒 841000)

摘　要:利用塔克拉玛干沙漠腹地塔中气象站2009—2018年的地面观测资料,分析塔中地区的风蚀起沙特征,结果表明:(1)塔中地区临界起沙风速呈明显的季节变化特征,夏季>春季>秋季>冬季,临界起沙风速介于4.47~4.92 m/s;(2)春、夏季是风蚀事件的多发季节,春、夏季沙尘水平通量的平均值分别为2 638.9、3 298.9 kg/m^2,起沙持续时间的平均值分别为291.5、336.7 h,且春、夏季风蚀事件的年际变化比秋、冬季更稳定,波动更小;(3)风蚀事件更容易发生在白天,沙尘水平通量的最大值出现在10:00—11:00,起沙持续时间的最大值出现在10:00—13:00;(4)风蚀事件在春季主要集中在偏东方向,夏季主要集中在偏北方向。

关键词:临界起沙风速;沙尘水平通量;沙尘持续时间;塔克拉玛干沙漠
中图分类号:P458.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002-0799(2021)06-0026-05

土壤风蚀活动在干旱和半干旱地区时有发生[1],它所产生的沙尘气溶胶是目前大气中气溶胶的主要来源[2],并对全球物理、化学和生物循环有重要影响[3]。沙尘气溶胶及沙尘暴的研究作为一个全球变化及其环境问题的重要前沿性领域引起了广泛关注。塔克拉玛干沙漠是中国最大的流动性沙漠,也是亚洲主要的沙尘源区之一,严重影响着下游地区的气候环境[4]。因此,塔克拉玛干地区的沙尘研究在我国沙尘天气和大气环境研究中占有重要地位。

通常基于临界起沙风速和风速2个参数,进而获取沙尘持续时间和沙尘水平通量来描述风蚀起沙特征[5-7]。近年来,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所沙漠边界层气象研究团队开展了大量相关方面的研究工作[8-16]。周成龙等[14-16]对比分析不同临界起沙风速的参数化方案,筛选出了适合塔中地区临界起沙风速的参数方案,并给出Shao参数化方案适合估算总沙尘水平通量及非沙尘和扬沙天气的沙尘水平通量,Marticorena参数化方案适合估算沙尘暴天气的沙尘水平通量。但目前,对塔克拉玛干沙漠腹地风蚀起沙研究依然缺乏长时间序列且更为细致的解析。

塔克拉玛干沙漠植被覆盖度极低,物种贫乏,群落结构简单。地表沙粒主要以细沙和极细沙为主。塔中气象站位于塔克拉玛干沙漠腹地,是国内唯一深入沙漠腹地的基准气象站,常年的连续观测为本研究提供了非常宝贵的第一手观测资料。基于塔中气象站多年的观测资料,发现塔中地区年平均蒸发量>3 800 mm,但年平均降水量仅有26 mm[17],年平均沙尘暴日数为16 d,沙尘是塔中地区的主要天气现象[18]。鉴于此,本研究利用塔中气象站2009—2018年的地面观测资料细致解析塔克拉玛干沙漠腹地的风蚀起沙特征,以期为该地区防沙治沙以及沙尘暴预警提供一定的科学依据。

1　数据与方法

本研究选取塔中气象站2009—2018年的小时

收稿日期:2021-02-20;**修回日期**:2021-04-21
基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2019002、IDM2018005);国家自然科学基金青年基金(41905009);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2018019)
作者简介:刘娅楠(1991—),女,助理工程师,主要从事地面综合气象观测。E-mail:357168618@qq.com
通信作者:钟昕洁(1989—),女,工程师,主要从事地面综合气象观测。E-mail:zxj890522@163.com

地面观测资料,包括风速,风向等。获得的长期连续观测数据每年由专人进行质量控制,保证了数据的真实性和可信度。

1.1 临界起沙风速

$$u_{*t}(d,\lambda,w)=u_{*ts}(d)f_{\lambda}(\lambda)f_{w}(w), \quad (1)$$

$$u_{*ts}(d)=\begin{cases}\dfrac{0.129\,K}{\sqrt{1.928\,B^{0.092}-1}}, & 0.03<B<10\\ 0.129\,K(1-0.085\,8\exp[-0.061\,7(B-10)]), & B>10,\end{cases} \quad (2)$$

$$f_{\lambda}=\left\{1-\left[\frac{\ln(z_0/z_{0s})}{\ln\left[0.7(12\ 255\mathrm{cm}/z_{0s})^{0.8}\right]}\right]\right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$f_{w}=\begin{cases}1 & (w<w')\\ (1+1.21(w-w')^{0.68})^{0.5}, & w>w',\end{cases} \quad (4)$$

$$u_{t}=\frac{u_{*t}}{k}\ln\frac{z}{z_0}. \quad (5)$$

式(1)中,$u_{*t}(d)$是光滑地表的临界摩擦风速[19-20],$f_{\lambda}(\lambda)$是粗糙度的修正方程[21-22],$f_{w}(w)$是土壤湿度的修正方程[23-24]。式(2)中,B 是摩擦雷诺数($B = ad^{x}+b$,其中 $a= 1\ 331\ \mathrm{cm}^{-x}$,$b= 0.38$,$x= 1.56$),$K=[(\sigma gd/\rho)^{0.5}(1+0.006/\sigma g(d)^{2.5})]^{0.5}$,g 是重力加速度,$\sigma$ 是沙粒密度,ρ 是空气密度,d 是沙粒粒径。式(4)中,w 是土壤的重量含水率,w′是临界土壤的重量含水率($w'=0.001\ 4(\%\ \mathrm{clay})^2+0.17(\%\ \mathrm{clay})$)。临界风速($u_t$)与临界摩擦风速($u_{*t}$)可以通过公式(5)相互转换,其中,k 是卡曼常数(0.4),z 是高度,z_0 是空气动力粗糙度。

1.2 沙尘水平通量

$$Q=\frac{Ec\rho u_{*}^{3}}{g}\left[1-\left(\frac{u_{*t}}{u_{*}}\right)^{2}\right]. \quad (6)$$

其中,Q 是沙尘水平通量,ρ 是空气密度,g 是重力加速度,u_* 是摩擦风速,u_{*t} 是临界摩擦风速,E 是地表土壤风蚀率,c 是常数。

1.3 起沙持续时间

当风速大于或等于临界起沙风速时,记作一次风蚀起沙事件,否则,则没有发生风蚀起沙事件[22]。

1.4 变异系数

$$C_V=\frac{\sigma}{\mu}. \quad (7)$$

其中,C_V 为变异系数,σ 为标准差,μ 为平均值。

2 结果与分析

2.1 临界起沙风速

当风速大于等于临界起沙风速时,地表会发生风蚀现象,因此准确获取临界起沙风速是分析风蚀起沙的首个重要环节。图 1 给出塔中地区临界起沙风速在不同季节的日变化情况,最大值均出现在 09:00—10:00(北京时,下同),最小值出现在 00:00 和 23:00。临界起沙风速在春季,为 4.67~4.82 m/s,夏季增大至 4.80~4.92 m/s,秋季为 4.62~4.78 m/s,冬季最小,为 4.47~4.62 m/s,因此临界起沙风速表现出明显的季节变化特征,夏季>春季>秋季>冬季。周成龙等[11, 15-16]综合考虑地表土壤粒径、土壤湿度、空气密度等因素的基础上,利用经验公式给出了塔中地区的临界起沙风速,二者结果基本一致。

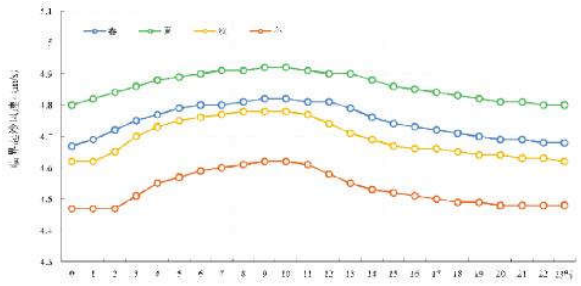

图 1 塔中地区临界起沙风速的日变化

2.2 年际变化

图 2a 给出了塔中地区 2009—2018 年沙尘水平通量不同季节的年际变化,春、夏季沙尘水平通量占全年总量的 88.7%。春、夏、秋和冬季的沙尘水平通量的平均值为分别为 2 638.9、3 298.9、641.2 和 118.8 kg/m^2。图 2b 给出了塔中地区 2009—2018 年起沙持续时间不同季节的年际变化。春、夏、秋和冬季的起沙持续时间的平均值为分别为 291.5、336.7、122.3 和 33.2 h,春、夏季起沙持续时间站全年总时长的 80.2%。因此,塔中地区的风蚀事件主要出现在春、夏季,很少出现在秋、冬季,尤其是冬季。且夏季的沙尘水平通量和起沙持续时间要明显高于春季。陶健红[25]利用 1960—2005 年西北地区 135 个台站的沙尘日数资料分析给出了沙尘天气主要发生在春季。这主要是因为塔中特殊下垫面在夏季给沙尘天气的发生提供了足够的热力条件。同时也解释了尽管冬季的临界起沙风速最小,但由于地表的温度较低,在同样动力条件下,风蚀事件难以发生。

变异系数可以准确的表示样本之间的差异,Wilding 表示当 C_V 值<0.35 时,样品之间的变化很小。沙尘水平通量春、夏、秋和冬季的 C_V 值分别为 0.26、0.26、0.51 和 0.50。结果表明沙尘水平通量在春夏季,年际波动较小,相对较稳定。相反在沙尘的少发季节,年际变化波动大,相对不稳定。例如,2016 年冬季的沙尘水平通量为 260.4 kg/m^2,但 2015 年冬

季的沙尘水平通量仅为 4.7 kg/m²,二者相差 54 倍。起沙持续时间，春、夏、秋和冬季的 C_V 值分别为 0.16、0.14、0.21 和 0.35。结果表明,起沙持续时间的年际变化较沙尘水平通量相对较稳定,尤其是春、夏季的起沙持续时间,差异性最小,即使是冬季,起沙持续时间表现也相对较稳定。

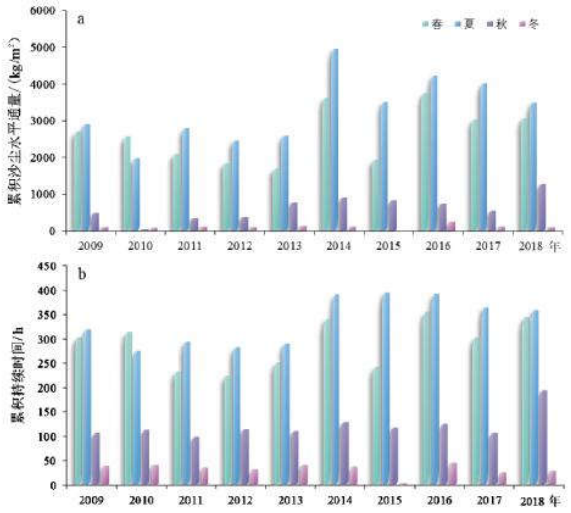

图 2　塔中地区沙尘水平通量(a)与起沙持续时间(b)的年际变化

2.3　时次变化

图 3a 给出了塔中地区沙尘水平通量不同季节的日变化，春季和夏季在 11:00 出现的沙尘水平通量最大,分别占日总量的 9.1%和 8.5%;秋季和冬季在 10:00 出现的沙尘水平通量最大，分别占日总量的 13.8%和 20.5%。从发生时段上,春季,64.2%的沙尘水平通量发生在 05:00—13:00;夏季 07:00—15:00 是出现沙尘水平通量最多时段,占日总量的 61.5%。秋季 75.2%的沙尘水平通量出现 04:00—12:00,冬季沙尘水平通量发生最集中,74.6%的沙尘水平通量出现 06:00—11:00。图 3b 给出了塔中地区起沙持续时间不同季节的日变化。春季在10:00 出现的起沙持续时间最大，占日总持续时间的 8.5%;夏季在 12:00 最大,占日总持续时间的 6.8%;秋季和冬季在 10:00 出现最大值，分别占日总持续时间的 11.8%和 18.1%。从发生时间段上,春、夏季 03:00—13:00 最易出现起沙现象，分别占日总起沙持续时间的 75.7%和 65.5%。秋季,75.0%的起沙现象出现在 04:00—11:00；冬季 75.3%的起沙现象出现在 06:00—11:00。

图 3 表明风蚀事件更容易发生在白天，夜间由于近地层大气层结稳定,阻止了沙尘的释放。同时沙尘水平通量与起沙持续时间并未表现出一一对应关系。沙尘水平通量的大小除了取决于持续时间,同时也与风速大小相关。周成龙等[18]通过天气现象统计出塔中的沙尘天气最容易出现在午后和傍晚阶段。事实上,出现沙尘天气并不一定会出现风蚀事件。例如,静稳条件下的浮尘天气,或者尽管起沙持续时间很长但风速较小，同样沙尘水平通量的值可能会很小。因此二者的结果是不矛盾的。

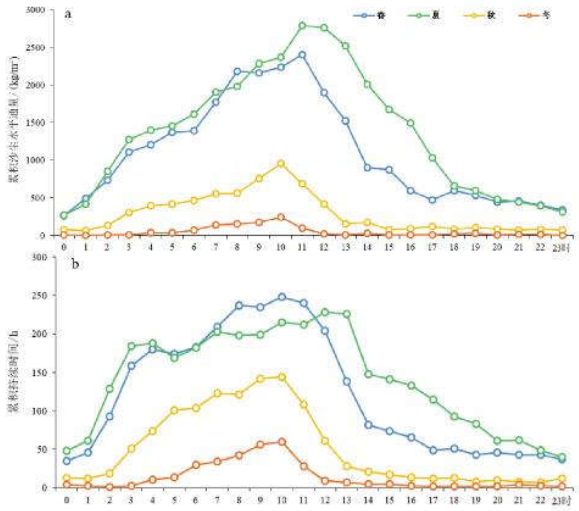

图 3　塔中地区沙尘水平通量(a)及起沙持续时间(b)的日变化

2.4　方向分布

图 4 给出了塔中地区沙尘水平通量和起沙持续时间在不同季节的方向分布。从整体来看,它们具有较好的一致性,主要分布在偏东和偏北方向上。

从季节分布来看，春季沙尘水平通量和起沙持续时间主要集中在 NE、ENE 和 E 3 个方向(偏东方向)，其沙尘水平通量分别为 21.7%、26.2%和 13.9%，起沙持续时间分别为 18.4%、32.3%和 16.3%。其次为偏北方向,15.5%的沙尘水平通量和 9.9%的起沙持续时间出现在 N 和 NNE 上。夏季沙尘水平通量和起沙持续时间主要集中在 NNW、N、NNE 和 NE 4 个方向(偏北方向),其沙尘水平通量分别占11.6%、23.3%、19.4%和 19.8%，起沙持续时间分别占 7.6%、15.8%、14.7%和 19.8%。其次为偏东方向,15.5%的沙尘水平通量和 23.5%的起沙持续时间出现在 ENE 和 E 上。秋、冬季沙尘水平通量和起沙持续时间分布较集中,主要出现在 NE、ENE 和 E 3 个方向上,尤其是冬季,83.19%的沙尘水平通量和 80.42%的起沙持续时间都出现在这 3 个方向上。

图 4 的结果与塔中观测的沙尘天气的方向分布

是一致的,塔中常年主导风向以 E、ENE、N 和 NNE 4 个方向为主[18]。由于影响塔里木盆地的主要大气环流有 2 支,东部主要受大陆和极地反气旋"东风倒灌"控制,而西部受弱西风环流控制。这种环流形式决定了在整个沙漠中,东部盛行偏东风,而西部盛行偏西风,二者在克里雅河一带汇合形成一个辐合区,因此,塔中地区的风蚀主要集中在偏东和偏北方向[26]。

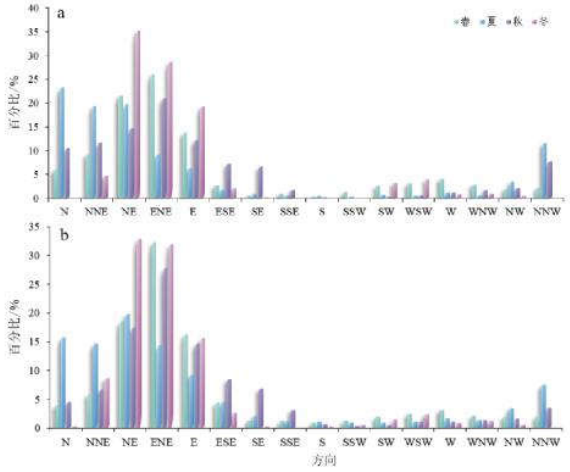

图 4 塔中地区沙尘水平通量(a)及起沙持续时间(b)的方向分布

3 结论

基于塔中气象站 2009—2018 年的地面观测资料,分析塔克拉玛干腹地的风蚀起沙特征,得出以下结论:

(1)塔中地区临界起沙风速具有明显的季节性差异。最大值出现在夏季,为 4.80~4.92 m/s;最小值出现在冬季,为 4.47~4.62 m/s;临界起沙风速的日变化呈单峰分布,最大值出现在 09:00—10:00。

(2)春、夏季是风蚀的多发季节。春、夏季沙尘水平通量的平均值分别为 2 638.9、3 298.9 kg/m^2,起沙持续时间的平均值分别为 291.5、336.7 h。春、夏季风蚀事件的年际变化比秋、冬季节更稳定,波动更小。

(3) 沙尘水平通量和起沙持续时间更容易出现在白天。春季的风蚀主要发生在偏东方向上,61.8%的沙尘水平通量和 67.0%的起沙持续时间集中在 NE、ENE 和 E 3 个方向上; 夏季的风蚀主要发生在偏北方向,74.1%的沙尘水平通量和 57.9%的起沙持续时间出现在 NNW、N、NNE 和 NE 4 个方向。秋、冬季相比春、夏季,沙尘水平通量和起沙持续时间出现的更集中, 尤其是冬季,83.19%的沙尘水平通量和 80.42%的起沙持续时间都出现在 NE、ENE 和 E 三个方向上。

参考文献:

[1] HOFFMANN C, FUNK R, WIELAND R,et al. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments,2008,72(5):792-807.

[2] SHAO Y. Physics and Modelling of Wind Erosion [J]. Springer Netherlands,2000:23.

[3] SHAO Y, WYRWOLL K, CHAPPELLA A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science[J]. Aeolian Research,2011,2(4):181-204.

[4] CHEN S Y, HUANG J P, LI J X, et al. Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011 [J]. Sci China Earth Sci,2017,60:1338-1355.

[5] FARRELL E J, SHERMAN D J, ELLIS J T, et al. Vertical distribution of grain size for windblown sand[J]. Aeolian Res, 2012,7:51-61.

[6] GILLIES J A, NICKLING W G, TILSON M. Frequency, magnitude, and characteristics of aeolian sediment transport: McMurdo Dry Valleys. Antarctica [J]. J Geophys Res,2013,118:461-479.

[7] YURK B P, HANSEN E C, Hazle D. A deadtime model for the calibration of impact sensors with an application to a modified miniphone sensor [J]. Aeolian Res,2013, 11:43-54.

[8] ZHOU C L, YANG F, HUO W, et al. Evaluation of wind erosion in the Tarim Basin based on parameter localization [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020,140(3):1071-1080.

[9] ZHOU C L, YANG F, MAMTIMIN A, et al. Wind erosion events at different wind speed levels in the Tarim Basin[J]. Geomorphology,2020:1073.

[10] 杨兴华, 何清, 霍文, 等. 沙漠地区不同下垫面近地表沙尘水平通量研究[J]. 干旱区研究, 2014,31(3):564-569.

[11] 周成龙,何清,张爱强,等. 塔克拉玛干沙漠腹地起沙阈值计算解析[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(5):53-57.

[12] 何清,杨兴华,艾力·买买提明,等. 西北沙漠风蚀起沙观测试验及其研究进展 [J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(3):1-7.

[13] 杨兴华,何清,丁国锋,等. 塔克拉玛干沙漠腹地风蚀起沙观测试验[J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(5):67-72.

[14] ZHOU C L, HE Q,HUO W,et al. Comparison of approaches for calculating the threshold velocity for sand movement based on field experiments in Xinjiang,China [J]. Arabian Journal of Geosciences,2018,11(15):402.

[15] 周成龙,杨兴华,杨帆,等.基于模式参数化方案的塔中地区临界起沙阈值分析 [J]. 干旱区地理,2018,41(5):

930-936.

[16] 周成龙,杨兴华,杨帆,等.基于野外试验对临界起沙风速的计算解析[J].干旱气象,2018,36(1):90-96.

[17] 周成龙,杨兴华,霍文,等.塔克拉玛干沙漠腹地降水特征[J].中国沙漠,2017,32(2):343-348.

[18] 周成龙,杨兴华,钟昕洁,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气特征[J].干旱区研究,2017,34(2):324-329.

[19] MATICORENA B, BERGAMETTI G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1.Design of a soil-derived dust emission scheme [J].J Geophys Res,1995,100 (D8): 16415-16430

[20] SHAO Y P,LU H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity [J].J Geophys Res,2000,105 (D17):22437-22443.

[21] DARMENOVA K, SOKOLIK IN, SHAO Y, et al. Development of a physically based dust emission module within the weather research and forecasting (WRF) model: assessment of dust emission parameterizations and input parameters for source regions in central and East Asia [J].J Geophys Res,2009:114.

[22] RAUPACH M R. Drag and drag partition on rough surfaces [J].BoundLayer Meteorol,1992,60:375-395.

[23] SHAO Y, RAUPACH M R, Leys JF. A model for predicting Aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region [J].Aust J Soil Res, 1996,34:309-342.

[24] FECAN F,Marticorena B,Bergametti G.Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas [J].Ann Geophys,1999,17(1):149-157.

[25] 陶建红.西北地区沙尘天气的时空特征及影响因素分析[J].中国沙漠,2009,29(2):327-334.

[26] 李江风.塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候[M].北京:科学出版社,2003: 174-189,564-573.

Observational Study on the Characteristics of Wind Erosion and Dust Emission in the Hinterland of Taklimakan Desert

LIU Yanan[1], ZHONG Xinjie[1], MA Kai[1], YANG Fangfang[1], QIU Huimin[1]

(Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Korla 841000, China)

Abstract Based on the surface observation data of Tazhong meteorological station in the hinterland of Taklimakan desert from 2009 to 2018, the characteristics of wind erosion events and dust emission in Tazhong area are analyzed in detail. The conclusions are as follows:(1)The critical wind speed of dust emission in Tazhong area shows obvious seasonal variation, summer > spring > autumn > winter, with the critical wind speed ranging from 4.47 to 4.92 m/s.(2)Spring and summer are the most frequent seasons for wind erosion events, and the mean values of sand horizontal flux are 2 638.9 kg/m^2 and 32 98.9 kg/m^2 in spring and summer, respectively, and the mean values of dust emission duration are 291.5 h and 336.7 h, respectively, and the annual variations of wind erosion events are more stable and less volatile in spring and summer than that in autumn and winter.(3)Wind erosion events are more likely to occur during daytime, with the maximum values of sand horizontal flux occurring between 10:00 and 11:00 and the maximum values of dust emission duration occurring between 10:00 and 13:00.(4) The wind erosion events are mainly concentrated in the east during the spring and in the north during the summer.

Key words critical dust emission wind speed; horizontal dust flux; duration of wind erosion events; Taklimakan desert