

陈京平,余子莹,杨帆,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴和地表沙物质粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):150-158.

塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴和 地表沙物质粒度特征

陈京平¹,余子莹¹,杨帆²,王蜜¹,胡涵¹,
倪观忠¹,高鑫³,王鑫¹

(1.兰州大学 资源环境学院,甘肃 兰州 730000; 2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 新疆塔克拉玛干沙漠气象
国家野外科学观测研究站,新疆 乌鲁木齐 830002; 3.中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 围绕塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴及沙尘暴前后地表沙物质的粒度特征,对塔中地区的沙尘样品开展了粒度参数计算、粒度组分离和函数模型拟合分析。结果表明:(1)表沙样品的平均粒径为143 μm ,细沙和极细沙含量占87.02%;沙尘暴过后表沙样品的平均粒径为97 μm ,极细沙和细沙含量占79.44%。(2)沙尘暴样品的平均粒径为82 μm ,粉沙和极细沙含量占80.89%。(3)沙尘暴过后表沙样品的平均粒径减小46 μm ,黏粒、粉沙和极细沙含量增加,表明沙尘暴携带的大量细粒物质对表沙的粒度特征有重要影响。(4)沙尘暴样品粒度随高度的变化主要受控于风速,风速阈值7.7~8.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,不同高度平均粒径与平均风速的函数关系,在三维空间中采用二阶多项式曲面模型能够很好地拟合。

关键词: 塔克拉玛干沙漠; 沙尘暴; 粒度; 函数拟合

文章编号: 1000-694X(2023)02-150-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00112

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

近年来,中国北方地区频现特大沙尘暴天气,对气候、社会经济、人体健康、生态环境等产生了很大影响^[1-3],沙尘暴由此成为当前全球变化研究领域的热点问题。塔克拉玛干沙漠既是粉尘源区,又是粉尘沉降区,沙漠腹地粉尘物质的迁移循环过程对揭示北半球粉尘循环及其气候环境效应具有重要意义^[4]。沙尘暴时粉尘大规模集中释放,是理解粉尘来源、起动、搬运路径、传输和沉降过程的典型事件^[1-4],而粒度分析也是粉尘研究的重要手段^[5]。因此,沙尘暴及沙尘暴前后地表沙物质(简称表沙)粒度的变化研究就显得很有必要。

围绕塔克拉玛干沙漠地表沙物质的粒度特征已开展较多研究^[5-19],但对不同粒径组分的相对含量存在不同认识。一种观点认为表沙中细粒物质的含量相对较少,如在塔克拉玛干沙漠沿84°E线采

集的各类沙样中不含粉沙或含量极小,无黏粒组分^[6];另一种观点认为塔克拉玛干沙漠腹地及周边地区的表沙含有大量细粒物质,风沙流输沙以细沙、极细沙和粉沙为主^[7-11]。此外,对风沙流中沙粒粒径随高度的变化也存在一定认识差异。理论上,沙尘受自身重力等因素的影响随高度升高粒径变小,但实际观测发现沙尘粒径在垂向上会出现不同的变化趋势^[20]:一是沙粒粒径随高度无明显变化^[21],二是沙粒粒径随高度增加不断变大^[22-25],三是沙粒粒径随高度增加先减小后增大^[26],四是沙粒粒径随高度增加而减小^[18,20,27-28]。因此,本文采集地表沙物质样品,主要研究沙尘暴前后表沙的粒度特征及其变化,同时采集沙尘暴0~6 m高度的样品分析粒径随高度的变化,以期揭示塔克拉玛干沙漠腹地沙物质的迁移循环过程及环境意义提供新证据,为风沙治理中直立式网格沙障的设计提供数据支撑。

收稿日期:2022-07-14; 改回日期:2022-09-05

资助项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0302)

作者简介:陈京平(1998—),男,甘肃临夏人,硕士研究生,研究方向为全球变化与应对。E-mail: chenjp21@lzu.edu.cn

通信作者:王鑫(E-mail: xinw@lzu.edu.cn)

1 研究区概况

塔中地区(39°00'N、83°40'E)位于塔克拉玛干沙漠腹地(图1A),年平均气温13.6℃,年降水量25.9 mm,年潜在蒸发量则达3 798.5 mm^[29]。塔中地区分布有高大纵向复合型沙垄,沙垄一般长2~5 km,垄间地宽1~2 km,沙垄相对高度40~50 m,沙垄多为东北-西南走向^[7,10,29],研究区位于垄间地(图1B)。

塔中地区植被覆盖区域主要在沙漠公路旁及石油基地生活区,植被种类少,群落结构简单,植株低矮,原生植物一般生活在地下水较浅的区域^[7,10,29]。塔里木盆地绝大部分地区的盛行风向为东北风,西南部多为西北风^[19],塔中地区6—8月盛行风为东北风(图1C)。塔中地区沙尘暴天气集中在春夏两季,且夏季沙尘暴发生频率高于春季,塔中1井临时气象站观测的沙尘暴日数全年可达68~88 d^[7,10,29]。

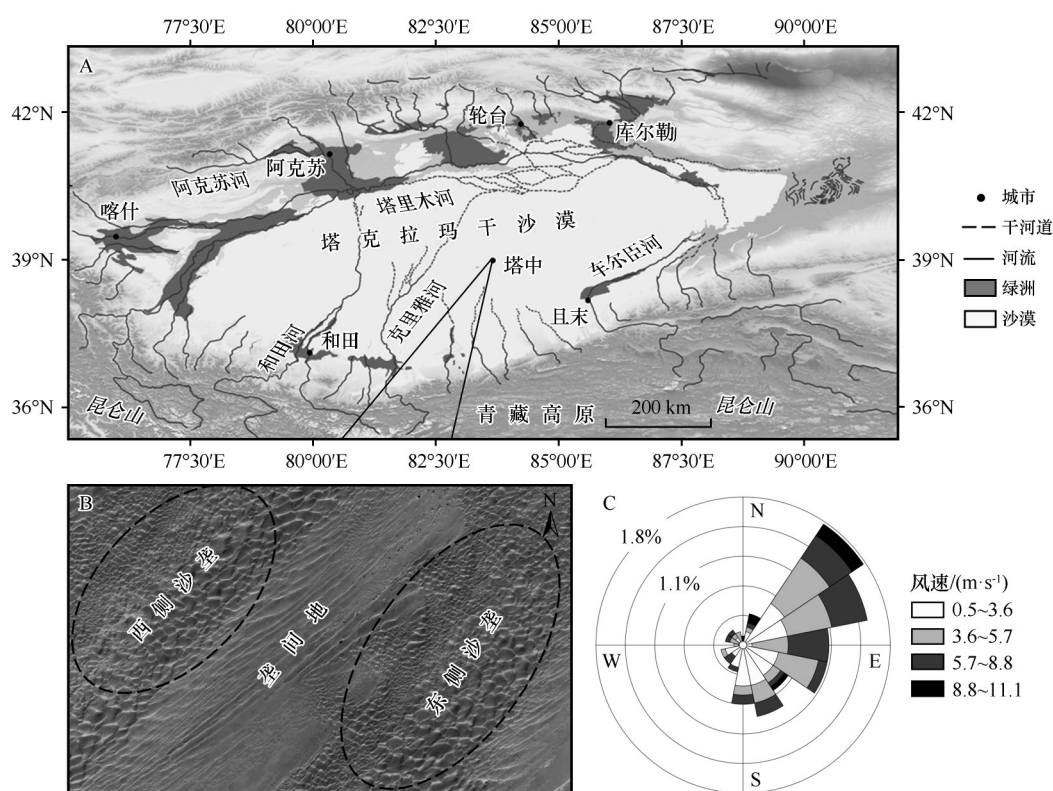


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

2 样品与方法

2.1 样品与气象数据

采样点位于塔中气象站附近,表沙样品采集地表2 cm以上沙物质,使用钢铲平行于沙面取样。沙尘暴样品使用圆柱状矿泉水瓶制作的简易降尘缸收集,瓶深12.8 cm,瓶底放置清洗干净的砾石以防止瓶内沙尘风蚀。样品收集器离沙面0.5 m高度开始放置,最高采样高度为6 m。样品信息见表1。风速风向数据由塔中气象站提供,该数据由芬兰VAISALA公司的WAA151型传感器测量,数据分辨率为分钟级,风速量程为0.4~75 m·s⁻¹,测量精度(风

速范围0.4~60 m·s⁻¹)为±0.17 m·s⁻¹;风向测量范围为0°~360°,测量精度为±3°。风玫瑰图由WRPLOT View软件绘制。

2.2 实验测量与数据分析

样品在兰州大学西部环境教育部重点实验室做前处理,使用Mastersizer 2000激光粒度仪测量样品粒度。使用中国科学院地球环境研究所开发的沉积物粒度综合分析软件QGrain对样品进行组分分离,用以分析沙尘暴前后表沙组分占比的变化。使用Excel 2016处理粒度数据,使用MATLAB的软件工具Curve Fitting拟合平均粒径与平均风速的函数关系。常用的粒度参数有众数粒径、平均粒径

表1 样品信息
Table 1 Samples information

样品	采样时间	样品数	平均风速/(m·s ⁻¹)	沙尘暴持续时间/h	主风向
表沙样品	2021-06-25	10	3.1	—	东北风
第1次沙尘暴样品	2021-07-18	12	7.7	12	东北风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—
第2次沙尘暴样品	2021-07-19	12	8.5	5	东北风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—
第3次沙尘暴样品	2021-07-31	12	7.1	10	北风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—
第4次沙尘暴样品	2021-08-06	12	6.8	6	东风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—
第5次沙尘暴样品	2021-08-14	12	8.4	16	东北风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—
第6次沙尘暴样品	2021-08-16	12	8.5	3	西北风
沙尘暴过后表沙样品		1	—	—	—

M_z 、分选系数 σ 、偏度 SK 及峰度 K_g 等^[8,30-31],其中众数粒径为颗粒出现频率最多的分级所对应的粒径,平均粒径能够代表粒度分布的集中趋势^[8]。沙粒粒级的界定标准并不统一^[10],本文采用Folk-Ward公式计算粒度参数^[30-32]:

$$\varphi = -\log_2 d \quad (1)$$

$$M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \quad (3)$$

$$SK = \frac{\varphi_{84} + \varphi_{16} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (5)$$

式中: φ 为粒度频率累计曲线各百分位对应的粒径值; d 为沙粒直径。粒度参数可以反映沉积物的搬运动力和沉积环境信息,有助于了解风沙环境^[33-34]。

颗粒粒级根据研究需要的不同,划分出的标准也不同^[10]。粒级划分采用Udden-Wentworth粒级划分标准,即粒径小于5.5 μm 为黏粒,粒径5.5~63 μm 为粉沙,63~125 μm 为极细沙,125~250 μm 为细沙,250~500 μm 为中沙,粒径大于500 μm 为粗沙^[20,35]。

3 结果

3.1 粒度特征

沙粒样品的粒度频率曲线为双峰形态,表沙的

平均粒径为143 μm ,众数粒径为138 μm ,中值粒径为135 μm (图2A)。沙尘暴过后表沙的平均粒径为97 μm ,众数粒径为96 μm ,中值粒径为93 μm (图2B)。沙尘暴不同高度样品的众数粒径基本上小于100 μm ,整体粒径比表沙更小(图2C)。从粒度组分离的结果看,表沙样品的主峰组分占比98.1%,次峰组分占比1.9%;沙尘暴过后表沙样品的主峰组分占比87.5%,次峰组分占比12.5%;沙尘暴不同高度样品的主峰组分占比88.9%,次峰组分占比11.1%(图2D~F)。沙尘暴过后表沙的粒度频率曲线向左偏移(图2A、图2B),主峰组分的占比减少,次峰组分的占比增加(图2D、图2E),说明沙尘暴过后表沙中细粒物质的增多。前人在塔中地区测量的表沙平均粒径为136 μm ^[7,9,15-16],与本文测量结果相差7 μm ,测量结果基本一致。从沙尘暴前后表沙的粒度变化来看,沙尘暴过后表沙的平均粒径减小46 μm ,沙尘暴过后表沙整体变细,表明沙尘暴携带的大量细粒物质对改变表沙的粒度有重要影响。

3.2 粒度参数

表沙的平均粒径值为1.38 Φ ,说明样品整体偏细;分选系数为-0.65,说明样品分选极好;偏度为-0.07,偏度近对称;峰度为1.07,峰度中等。沙尘暴过后表沙的平均粒径大于3.40 Φ ,说明样品整体偏细;分选系数都小于0.35,说明样品的分选极好;粒径偏度数值-1~0.1,近对称至极负偏;粒径峰度数值

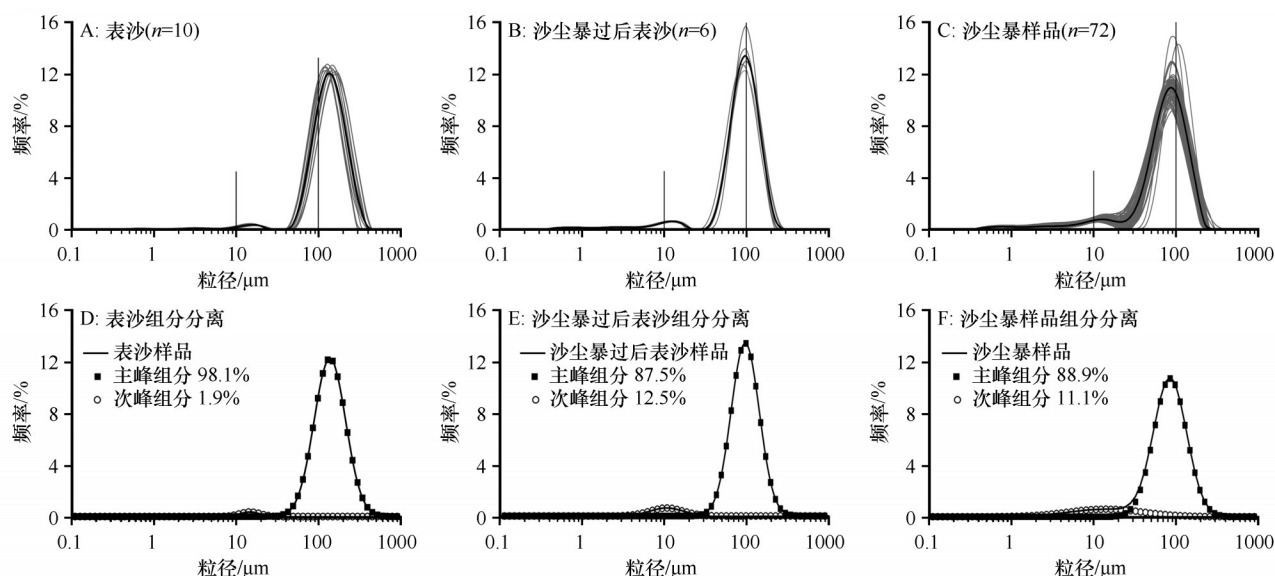


图2 样品粒度与组分分离频率曲线

Fig. 2 Diagram of samples particle size and component separation frequency

都大于1.81,峰态很尖锐。不同高度沙尘暴样品的平均粒径 3.34Φ ,分选系数都为负值,偏度值都小于-0.1,峰度数值都大于1.11,说明样品的分选极好(表2)。样品粒度参数的数值特征基本一致,表明沙源的均一性较好^[13]。

从图3来看,表沙均以细沙和极细沙为主,二者平均占比分别为48.88%、38.14%,合计为87.02%;沙尘暴过后表沙以极细沙和细沙为主,二者平均占比分别为57.29%、22.15%,合计为79.44%;沙尘暴样品以极细沙和粉沙为主,二者平均占比分别为48.78%、32.11%,合计为80.89%,未出现中沙。沙尘暴过后,表沙中细沙占比下降55%,中沙占比下降97%,粉沙占比增加243%。沙尘暴前后表沙中黏粒的平均含量分别为0.85%、2.57%,沙尘暴不同高度样品中黏粒的平均含量为3.26%,相较表沙样品黏粒含量多了2.41%。粒度在一定程度上可以反映采样点附近地表物质的可蚀性^[36],黏粒含量增多表明采样点附近的沙源对沙尘暴样品中的黏粒含量贡献有限,沙尘暴样品中的部分黏粒可能是远距离大范围搬运而来。

3.3 沙粒粒径垂向特征

塔中地区沙尘暴期间的风向与盛行风向相同或者接近(8月16日除外);风速廓线的拟合最符合指数型函数,在0~4 m高度风速随高度升高增速较

快,4~10 m高度风速的增幅在逐渐放缓;单次沙尘暴的沙粒粒径随高度升高变化幅度较小(图4)。6次沙尘暴期间,不同高度上样品的最小平均粒径为68 μm ,出现在8月6日3 m高度,最大平均粒径为96 μm ,出现在8月16日5 m高度。

从沙粒粒径垂向变化的整体趋势看,7月18日、7月31日与8月6日3次沙尘暴的平均风速较低,风速6.8~7.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向与盛行风向相同或接近,沙粒的平均粒径随高度增加整体呈减小趋势(图4A)。7月19日、8月14日与8月16日3次沙尘暴的平均风速较高,风速8.4~8.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,除8月16日外风向与盛行风向相同或接近,沙粒的平均粒径随高度增加表现出的变化规律不明显(图4B)。7月19日沙粒的平均粒径在2.5~4.5 m高度有连续减小趋势,8月14日沙粒的平均粒径整体上随高度增加而增大,8月16日沙粒的平均粒径在0.5~4.5 m高度变化幅度较小,在4.5~5 m高度变化幅度较大。由此来看,在沙源一致、风向大致相近的情况下,风速是影响沙粒粒径垂向变化的主控因素,临界风速阈值7.7~8.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风速低于阈值时沙粒的平均粒径整体上随高度升高而减小,风速高于阈值范围时沙粒的平均粒径随高度升高整体的变化趋势不明显。

3.4 平均粒径与平均风速的函数关系

沙粒粒径与风速结合才能对其变化有更加精

表 2 样品粒度参数
Table 2 Particle size parameters of the samples

沙尘暴 日期	粒度 参数	沙尘暴 过后表沙	高 度											
			0.5 m	1 m	1.5 m	2 m	2.5 m	3 m	3.5 m	4 m	4.5 m	5 m	5.5 m	6 m
7月18日	平均粒径	3.41	3.66	3.66	3.80	3.78	3.88	3.73	3.72	3.74	3.82	3.67	3.79	3.81
	分选系数	-0.81	-0.78	-0.79	-0.91	-0.82	-1.03	-0.66	-0.67	-0.84	-0.78	-0.65	-0.85	-0.85
	偏度	-0.31	-0.42	-0.43	-0.38	-0.34	-0.45	-0.34	-0.32	-0.41	-0.34	-0.33	-0.38	-0.35
	峰度	2.11	1.93	2.04	1.67	1.44	1.75	1.81	1.66	1.73	1.51	1.78	1.65	1.51
7月19日	平均粒径	3.47	3.65	3.66	3.67	3.83	3.82	3.64	3.67	3.73	3.82	3.62	3.68	3.66
	分选系数	-0.86	-0.66	-0.69	-0.63	-1.02	-0.72	-0.63	-0.66	-0.73	-0.79	-0.68	-0.74	-0.63
	偏度	-0.30	-0.27	-0.33	-0.31	-0.51	-0.27	-0.32	-0.31	-0.34	-0.32	-0.36	-0.33	-0.30
	峰度	1.94	1.51	1.61	1.77	1.98	1.53	1.74	1.71	1.65	1.51	1.99	1.50	1.68
7月31日	平均粒径	3.43	3.63	3.72	3.83	3.73	3.80	3.92	3.79	3.80	3.81	3.82	3.87	3.91
	分选系数	-0.89	-0.63	-0.65	-0.67	-0.64	-0.68	-0.71	-0.68	-0.65	-0.67	-0.69	-0.67	-0.73
	偏度	-0.28	-0.22	-0.25	-0.27	-0.26	-0.27	-0.29	-0.26	-0.28	-0.28	-0.27	-0.27	-0.29
	峰度	1.82	1.44	1.47	1.50	1.55	1.50	1.51	1.49	1.57	1.55	1.48	1.48	1.48
8月6日	平均粒径	3.61	3.67	3.82	3.90	3.97	3.83	4.06	4.02	4.02	4.04	4.04	3.77	3.88
	分选系数	-0.93	-0.67	-0.67	-0.73	-0.78	-0.68	-0.81	-0.79	-0.81	-0.83	-0.85	-0.69	-0.74
	偏度	-0.31	-0.25	-0.28	-0.31	-0.33	-0.28	-0.33	-0.32	-0.35	-0.34	-0.35	-0.25	-0.31
	峰度	1.89	1.50	1.51	1.53	1.48	1.50	1.48	1.49	1.54	1.56	1.43	1.51	1.52
8月14日	平均粒径	3.40	3.76	3.81	3.76	3.84	3.87	3.80	3.85	3.88	3.78	3.89	3.67	3.67
	分选系数	-0.89	-0.63	-0.66	-0.63	-0.69	-0.68	-0.71	-0.68	-0.69	-0.70	-0.71	-0.62	-0.63
	偏度	-0.28	-0.28	-0.27	-0.25	-0.31	-0.29	-0.28	-0.29	-0.28	-0.29	-0.29	-0.25	-0.25
	峰度	1.81	1.59	1.51	1.46	1.58	1.51	1.47	1.51	1.48	1.47	1.50	1.49	1.47
8月16日	平均粒径	3.40	3.63	3.63	3.60	3.65	3.58	3.57	3.64	3.58	3.34	3.58	3.58	3.64
	分选系数	-1.09	-0.69	-0.63	-0.56	-0.68	-0.56	-0.57	-0.62	-0.55	-0.51	-0.51	-0.61	-0.52
	偏度	0.01	-0.23	-0.28	-0.27	-0.36	-0.27	-0.28	-0.28	-0.26	-0.34	-0.38	-0.28	-0.28
	峰度	2.24	1.60	1.58	1.66	1.93	1.67	1.70	1.61	1.62	2.19	2.42	1.64	1.81

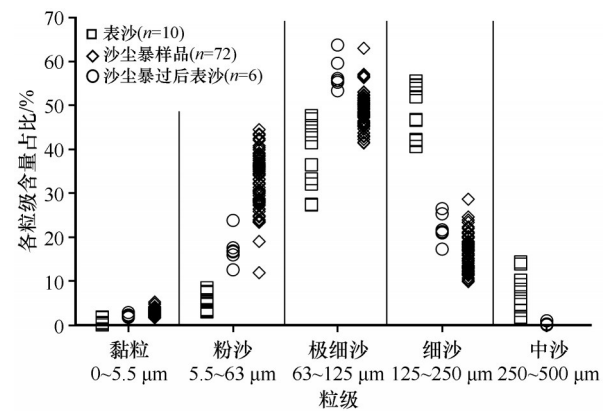


图3 沙尘暴前后表沙粒级变化
Fig. 3 Changes in surface sand particle size before and after sandstorms

细的认识^[7],沙尘暴不同高度平均粒径与平均风速存在函数关系,本文使用MATLAB中的Curve Fitting软件进行函数拟合。函数拟合中二阶多项式曲面模型的拟合效果最优(图5),函数模型为:
$$f(x,y)=p_{00}+p_{10}\cdot x+p_{01}\cdot y+p_{20}\cdot x^2+p_{11}\cdot x\cdot y \quad (6)$$

式中: p_{00} 、 p_{10} 、 p_{01} 、 p_{20} 、 p_{11} 为函数系数; x 为平均粒径; y 为平均风速。模型拟合的相关参数见表3。
表3中, SSE 为残差平方和,值越接近0表示模型误差越小; R^2 为可决系数,修正 R^2 为调整自由度后的可决系数,值越接近1表示拟合优度越好; $RMSE$ 为均方根误差,值越接近0表示拟合结果对后续预测更有用。从拟合效果看,二阶多项式曲面模

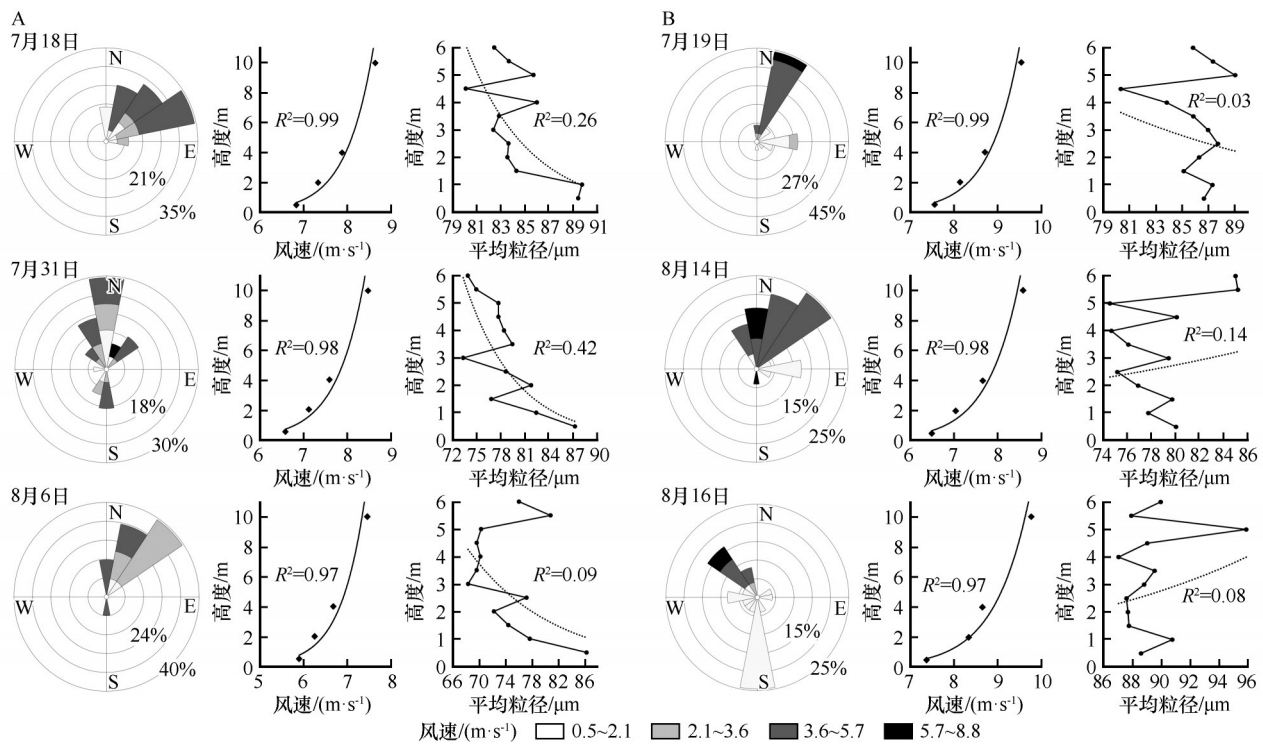


Fig. 4 Variation of particle size vertical distribution of sandstorm samples

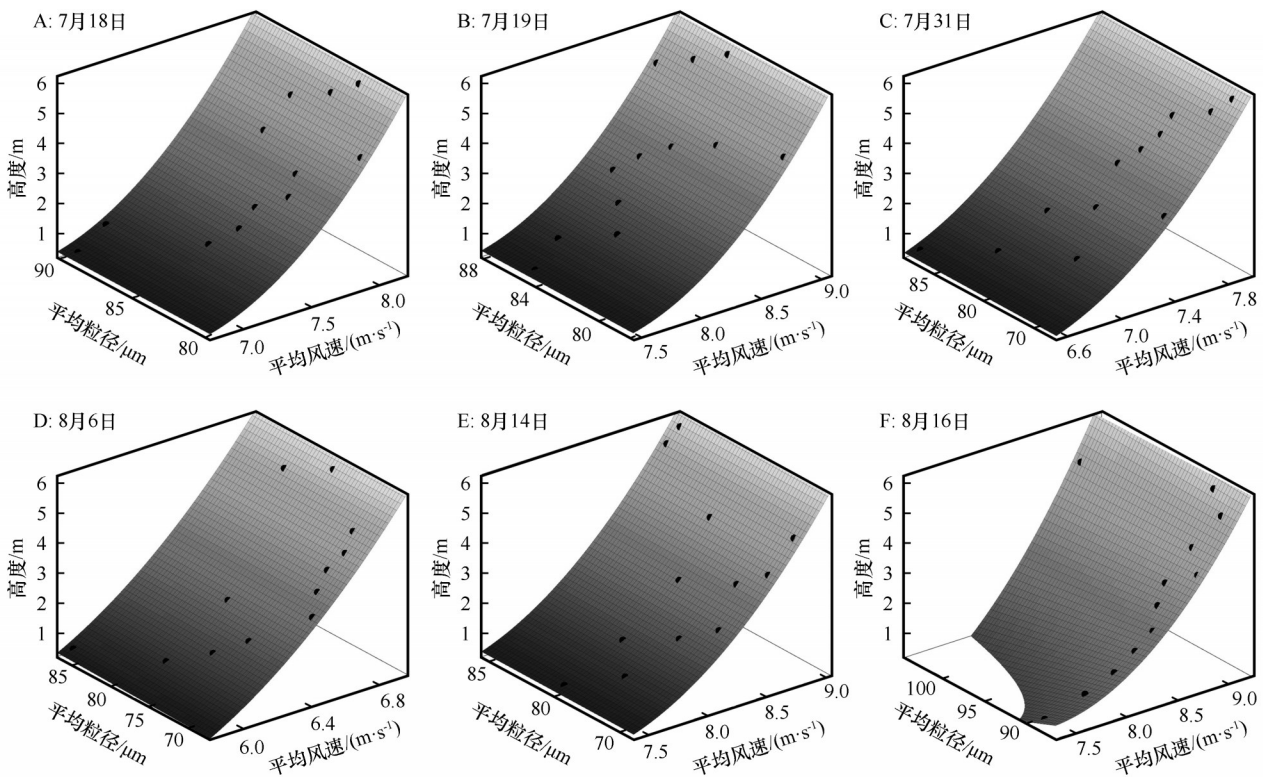


Fig. 5 Fitting surfaces of mean particle size and mean wind speed in six dust storm events

型的拟合优度高,因此该模型能够很好地拟合塔中地区沙尘暴期间不同高度沙粒平均粒径与平均风速之间的函数关系,但模型参数所代表的实际机理还有待进一步研究。

表3 二阶多项式曲面模型拟合参数

Table 3 Second-order polynomial surface model fitting parameters

沙尘暴日期	P_{00}	P_{10}	P_{01}	P_{20}	P_{11}	SSE	R^2	修正 R^2	$RMSE$
7月18日	2.92	1.93	-0.001	0.35	0.003	0.0009	1.00	1.00	0.011
7月19日	2.92	1.95	0.001	0.36	0.003	0.0017	1.00	0.99	0.016
7月31日	2.97	1.91	-0.001	0.31	0.001	0.000004	1.00	1.00	0.001
8月6日	3.04	1.87	0.005	0.22	-0.012	0.0002	1.00	1.00	0.006
8月14日	2.96	1.91	-0.001	0.32	0.002	0.00002	1.00	1.00	0.002
8月16日	2.81	2.05	-0.155	0.42	0.171	0.0042	0.99	0.99	0.025

4 讨论

4.1 沙尘暴前后表沙粒度的变化及其环境意义

表沙的粒度参数特征表明沙粒粒径整体较细、沙粒大小均匀程度很高、粒径分布较为集中,沙粒物质组成较为一致,是以易被风力搬运的细粒组分为主(表2)。沙粒的粒度频率曲线形态相似(图2),表明沙尘源地和搬运动力具有同一性^[13,36]。沙尘暴过后沙漠表沙的粒度变小,主要在于沙尘暴携沙量大,侵蚀搬运了大量细粒物质,并通过沉积作用使沙漠表面粗糙度变小。塔中地区既是粉尘源区,也是粉尘沉积区,其角色转换由风力大小和风的来源所决定。作为粉尘源区,风的吹蚀作用使细粒物质被侵蚀搬运,使得沙漠表面粗糙度逐渐变大;作为粉尘沉积区,风从其他地方携带的沙粒在塔中沉降,使得沙漠表面粗糙度逐渐变小。沙尘暴期间,风沙流携带的沙粒相较于非沙尘暴期间表沙的沙粒粒径整体更细。因此,直立式网格沙障孔隙大小的设计对此变化应加以考虑^[37-39],设计的网格沙障可能更有助于精准防沙阻沙。

8月16日沙尘暴收集的样品比前5次沙尘暴不同高度的样品粒径较大,本文认为风与沙漠中微地貌的结合对粒度产生了一定影响。微地貌可以通过改变风场特性对降尘进行再分配^[13,17],在沙丘顶部沉积物的沉积速率较高,沉积颗粒的粒径较大,沙丘中部位置与沙丘顶部却恰好相反^[40]。塔中地区高大沙垄迎风坡、背风坡和垄间地的沙粒粒度存在差异,沙粒从沙垄迎风坡到背风坡一侧逐渐变细,垄间地相间分布各粒级沙粒^[17]。风向不同时,风搬运的沙源会存在不同,8月16日沙尘暴期间强劲的风力从沙垄背风坡吹来,与前5次沙尘暴的风向差异显著,风从沙垄背风坡携带了较粗的沙粒,

从而影响到沉积物的粒径。

4.2 沙粒粒度沿高度的变化及影响因素

沙粒粒度沿高度升高出现的变化可能主要受风速的影响,风速高于阈值时,沙粒粒径随高度增加整体变化趋势的规律性变差。首先,风速越大,风携带的沙粒初始粒径也越大。有研究表明,三维空间中风速和沙尘的粒径增大时沙尘在垂向的速度也会增大,塔中地区沙尘暴期间纯沙下垫面上平均风速随高度增加不断增大,这增大了大颗粒沙尘出现在高处的概率^[41]。其次受湍流影响,风速增大,湍流运动也会随之增强。湍流输运的能量和质量大于层流,因此沙尘可以获得更多的能量,促进其跃移到更高高度^[42]。湍流进一步增强时粗颗粒有可能发生悬移运动,从而也会让更多的粗颗粒进入到空气中^[42]。沙尘暴使不同高度的沙粒相互发生碰撞,沙粒携带较强的能量有助于改变其运动轨迹,使得沙粒能够到达高处或低处。然后是受空气阻力的影响,风力一定时,一定粒径阈值内较小的沙粒比较大的沙粒受到的空气阻力较大,因此粗颗粒沙尘在空气中的减速相对较少,更容易到达较高位置处^[20]。

沙粒粒径随高度出现不同的变化,在于不同研究点之间存在较大的环境差异。相关研究还受集沙器集沙率的影响,目前国内外使用的各类集沙缸规格不一^[43],受材质、规格、取样介质等影响,会造成粉尘收集量的差异^[43]。本文利用圆柱状矿泉水瓶制作的简易集沙器规格一致,其收集原理类似于传统的集沙缸,对所收集样品的粒度组成影响较小。

5 结论

塔克拉玛干沙漠表沙样品的粒度频率曲线为双峰形态,沙粒整体偏细,分选极好。表沙的平均

粒径为 $143\ \mu\text{m}$, 以细沙和极细沙为主, 二者含量占比分别为 48.88%、38.14%, 合计为 87.02%; 沙尘暴过后表沙的平均粒径为 $97\ \mu\text{m}$, 以极细沙和细沙为主, 二者含量占比分别为 57.29%、22.15%, 合计为 79.44%。沙尘暴样品的平均粒径为 $82\ \mu\text{m}$, 以极细沙和粉沙为主, 二者平均占比分别为 48.78%、32.11%, 合计为 80.89%。沙尘暴过后表沙的平均粒径减小 $46\ \mu\text{m}$, 样品中黏粒、粉沙和极细沙含量增加, 细沙和中沙含量下降。沙尘暴前后表沙的粒度变化表明, 沙尘暴携带的大量细粒物质对沙漠地表沙物质的粒度特征有重要影响。

沙粒粒径在垂向上的变化主要受风速的影响, 临界风速阈值可能为 $7.7\sim 8.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风速低于阈值时沙粒的平均粒径整体上随高度升高而减小, 风速高于阈值范围时沙粒的平均粒径随高度升高整体的变化趋势不明显。对沙尘暴不同高度平均粒径与平均风速的函数关系进行拟合发现, 二次多项式曲面模型能够很好地拟合三维空间中平均粒径与平均风速的函数关系。

参考文献:

- [1] Yang X P, Liang P, Zhang D G, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(8): 1302–1315.
- [2] Li Y, Song Y G, Kaskaoutis D G, et al. Atmospheric dust dynamics over Central Asia: a perspective view from loess deposits [J]. *Gondwana Research*, 2022, 109: 150–165.
- [3] 买买提艾力·买买提依明, 霍文, 杨兴华, 等. 新疆沙尘暴研究进展 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(2): 1–7.
- [4] Han Y, Wang T H, Tang J G, et al. New insights into the Asian dust cycle derived from CALIPSO lidar measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 272: 112906.
- [5] 孔丹, 何清, 张瑞军, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程贴地层梯度输沙样粒度特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(1): 49–53.
- [6] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠 84°E 沿线沙物质的粒度特征 [J]. *地理学报*, 1993(1): 33–46.
- [7] 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.
- [8] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 6–11.
- [9] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究: 试验介绍与观测结果初报 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 315–322.
- [10] 赵聪敏. 塔克拉玛干沙漠沙粒形貌特征分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2012.
- [11] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏. 塔克拉玛干沙漠地区沙尘暴研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1646–1652.
- [12] 杨兴华, 康永德, 周成龙, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 167–174.
- [13] 代亚亚, 何清, 陆辉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄区近地层沙尘水平通量及粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 918–924.
- [14] 王翠, 雷加强, 李生宇, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异 [J]. *干旱区地理*, 2014, 37(2): 230–238.
- [15] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提明, 等. 1996–2008 年塔中地区的风沙环境特征 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(2): 21–25.
- [16] 杨兴华. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季沙粒运移及动力参数研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2009.
- [17] 李振山, 陈广庭, 冯起, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地纵向沙垄表面沙物质粒度特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 1998, 12(1): 22–29.
- [18] Chen W N, Yang Z T, Dong Z B. Vertical distribution of particle size parameters of drifting grains during sand storms in the Taklamakan Desert, Central Asia [J]. *Physical Geography*, 1995, 16(6): 503–523.
- [19] 樊自立, 季方, 赵贵海, 等. 塔克拉玛干沙漠地区土壤和土地资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–5.
- [20] 张正德, 董治宝. 人工卵石床面风沙流粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 639–644.
- [21] Arens S M, Boxel J H, Abuodha J O Z. Changes in grain size of sand in transport over a foredune [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(11): 1163–1175.
- [22] Greeley R, Blumberg D G, Williams S H. Field measurements of the flux and speed on wind blown sand [J]. *Sedimentology*, 1996, 43(1): 41–52.
- [23] Van der Wal D. Grain size selective aeolian sand transport on a nourished beach [J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(3): 896–908.
- [24] Chepil W S, Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel [J]. *Science Agriculture*, 1939, 19: 249–257.
- [25] Sharp R P. Wind driven sand in Coachella valley, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1964, 75(9): 785–804.
- [26] Farrell E J, Sherman D J, Ellis J T, et al. Vertical distribution of particle size for wind blown sand [J]. *Aeolian Research*, 2012, 7: 51–61.
- [27] 屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 戈壁风沙流结构特性及其意义 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 19–23.
- [28] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中沙粒粒度的垂直和水平分布特征 [J]. *泥沙研究*, 2008, 28(5): 22–30.
- [29] 杨阳, 杨帆, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠塔中与巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射特征对比 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 1068–1077.
- [30] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析 [J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 54–60.

- [31] 张正偲,董治宝.腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J].中国环境科学,2011,31(11):1789-1794.
- [32] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [33] Stout J E, Zobeck T M. The Wolfforth field experiment: a wind erosion study[J]. Soil Science, 1996, 161(9): 616-632.
- [34] 陈冬梅,穆桂金.不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J].干旱区地理,2004,27(1):47-51.
- [35] Krumbein W C. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1938, 8(3): 84-90.
- [36] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003, 49(3/4): 219-230.
- [37] 黎小娟,李宁,周智彬,等.尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征[J].水土保持学报,2016,30(5):128-134.
- [38] 陈晓国.直立式芦苇栅栏阻沙机理的数值模拟研究[D].兰州:兰州大学,2021.
- [39] 韩庆杰,郝才元,张宏杰,等.临哈铁路典型防沙工程区阻风效率与积沙量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):37-46.
- [40] 肖洪浪,张继贤,李金贵.腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J].中国沙漠,1997,17(2):23-28.
- [41] Yang B, Wang Y, Zhang Y. The 3-D spread of saltation sand over a flat bed surface in aeolian sand transport[J]. Advanced Powder Technology, 2009, 20(4): 303-309.
- [42] 李晖.风沙流的实验研究和蠕移动的非线性动力分析[D].兰州:兰州大学,2009.
- [43] 霍俊澎,郭浩,郭翠萍.沙尘观测仪器研发进展[J].中国沙漠,2017,37(5):848-858.

Particle size characteristics of sandstorm and surface sand at Tazhong area of Taklimakan Desert, China

Chen Jingping¹, Yu Ziyang¹, Yang Fan², Wang Mi¹, Hu Han¹, Ni Guanzhong¹, Gao Xin³, Wang Xin¹

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. National Observation and Research Station of Taklimakan Desert Meteorology of Xinjiang, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Focused on the variation of particle size characteristics of surface sand before and after sandstorms in the Taklamakan Desert hinterland, we conducted a systematic particle size analysis of surface sand, including parameter calculation, particle size component separation and function fitting. The results show that: (1) The average particle size of the surface sand sample is 143 μm , dominated by fine and very fine sand, which together accounted for 87.02%; after the sandstorm, dominated by very fine sand and fine sand, which together accounted for 79.44%. (2) The average particle size of the sandstorm sample is 82 μm , dominated by powdery sand and very fine sand, which together accounted for 80.89%. (3) After the sandstorm, the average particle size of the surface sand decreased by 46 μm , and the content of clay, powder and very fine sand increased, indicating that the large amount of fine-grained material carried by the dust storm had an important influence on the particle size characteristics of the surface sand. (4) The variation of sand particle size with height is mainly controlled by wind speed, with wind speed thresholds ranging from 7.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ to 8.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. In three-dimensional space, the second-order polynomial surface model can well fit the function relationship between the average sand particle size and the average wind speed.

Key words: Taklimakan Desert; sandstorm; particle size; function fitting