

# 沙漠腹地一次强沙尘暴起沙沙粒特征分析

赵聪敏<sup>1</sup>,何清<sup>2</sup>,杨兴华<sup>2</sup>

(1.新疆维吾尔自治区气象服务中心,新疆 乌鲁木齐 830002;  
2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**沙粒微观形貌的研究可以为沙尘天气的研究提供一些新的参考,对解析沙尘源地也有一定帮助,为了掌握沙尘暴起沙沙粒的特征,借助激光粒度仪和显微镜对塔克拉玛干沙漠腹地一次沙尘暴过程中所采集的梯度沙样进行分析,结果表明:沙尘暴过程中起沙沙粒粒径集中在 63~250  $\mu\text{m}$ ,多为细砂、极细砂、和粗粉砂。2 m 梯度集沙仪所采的沙样平均粒径在 10 cm 处达到最大值为 144.3  $\mu\text{m}$ 。不同高度沙粒的微观形貌特征变化明显,粒径大于 0.3 mm 的沙粒表面磨蚀最为突出,随着粒径的减小沙粒表面的磨蚀作用逐渐减弱。圆度值集中分布在 0.8~1.0 之间,并且随粒径的减小沙粒圆度有变好的趋势。

**关键词:**塔克拉玛干;沙尘暴;粒度;微观形貌;圆度

塔克拉玛干沙漠面积  $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是中国最大的沙漠,也是世界第二大流动沙。也是我国沙尘暴中心和黄土沉积的主要物源区之一<sup>[1]</sup>。塔中地区位于塔克拉玛干沙漠腹地,地表为流沙覆盖,沙丘地貌为主,高大复合型纵向沙垄与垄间地相间分布。塔克拉玛干沙漠沙尘暴日数为每年 5~60 d 不等,其中沙

基金项目:国家自然科学基金项目“41175017”西北沙漠地表沙粒运移特性及动力热力参数研究。

作者简介:赵聪敏(1979-),女,主要从事气象服务工作。E-mail:71295644@qq.com

漠腹地可达 60 d 以上,比一般绿洲多 2~10 倍。从分布上看是南多北少,西多东少,腹地多绿洲少,平原多山地高原少。沙漠腹地最多,沙尘暴日数在塔中站可达每年 65 d,为全疆之首<sup>[2]</sup>。

目前关于塔克拉玛干沙漠的研究已经比较深入全面,李江风、袁玉江、杨莲梅等<sup>[3-6]</sup>从塔克拉玛干地区气候方面进行了研究,以何清为核心的团队对塔克拉玛干沙漠土壤热通量、水热交换、涡动湍流、辐射、沙尘天气的时空分布、沙尘的粒度特征等方面的研究<sup>[7-9]</sup>,然而对塔克拉玛干沙漠沙粒微观形貌的分

之后,降水量相对增多,降水量的增多主要以夏季降水量为主。

## 参考文献:

- [1] 《气候变化国家评估报告》编写委员会.气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2007:1~422.
- [2] 张家诚.气候与人类 [M].郑州:河南科学技术出版社,1988.
- [3] 沈永平.IPCC WGI 第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点[J].冰川冻土,2007,29(1):212.
- [4] 施能,陈家其,屠其璞.中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J].气象学报,1995,53(4):431~439.
- [5] 何清,杨青,李红军.新疆近 40 年来气温、降水和沙尘天气变化[J].冰川冻土,2003,25(4):432~427.
- [6] 林日暖.高原农业气象研究[M].北京:气象出版社,2001:110~113.
- [7] 王振,郭翔,牛卫萍.沙湾县 1960—2010 年气候变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(8):31~34.
- [8] 史莲梅,王东.沙车县 1961—2009 年气温变化特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(8):41~43.
- [9] 阿布都克力木·阿巴司,秦榕,伊力达尔江·吐生,邢芝芳.喀什地区 1961—2010 年气候变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2012,6:34~40.
- [10] 张家宝,史玉光.新疆气候变化及短期气候预测研究[M].北京:气象出版社,2002:37~62.
- [11] 姜大膀.上新世中期中国气候的数值模拟分析.第四纪研究,2009,29(6):1033~1043.
- [12] 马建勇,潘婕,姜江,等.北疆地区 1955—2009 年气温、降水变化特征的时间序列分析 [J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(2):18~24.

析还没有开始,而国外对颗粒物的统计分析早在 20 世纪 70 年代就已经开始出现, Van Malderen、Puledda、Paoletti、Prospero、Wittmack、Martin 等<sup>[10-15]</sup>对单颗粒物及颗粒物显微形貌进行了很多研究。国内学者在 20 世纪 90 年代之后也开始对颗粒物进行研究,例如赵旭光、李长成等对高炉矿渣粉体的颗粒形貌研究,得出颗粒物球形度与颗粒物粒度的关系和颗粒物的长短径比与颗粒物形貌的关系<sup>[16]</sup>。结合国内外关于颗粒物的研究成果及前辈们对塔克拉玛干沙漠的研究现状,本文另辟蹊径借助显微镜对塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程起沙沙粒微观形貌进行分析,从沙粒的圆度及表面磨蚀特征入手,尝试获取一些新的资料,为沙漠地区防沙治沙工作提供理论依据。

## 1 资料与仪器

本文采用的是 2011 年 4 月 4 日至 4 月 5 日一次强沙尘暴过程塔中西站 2 m 梯度集沙仪所采沙样,塔中西站位于目前世界上唯一深入流动沙漠腹地 200 km 以上的气象站——塔中大气环境观测实验站的西侧约 2 km 处,该梯度集沙仪共 6 层,分别是 5、10、20、50、100、200 cm,架设在高大沙丘间平坦开阔的低地。该处地表被粗砂覆盖,西边有铺设的草方格,对沙尘有一定的抑制作用。

沙样粒径分析采用英国马尔文公司的 Malvern MS2000 型激光粒度分析仪(图 1)。沙粒微观形貌分析是通过人工筛选,然后将每一个粒级的沙粒通过 NIKONSMZ1500 型号显微镜进行图片采集,再用 DT2000 图像分析软件对图片进行分析,得出表征颗粒物形状大小的参数,如:周长、面积、feret 径、长短径、等效周长、面积径。



图 1 实验仪器

## 2 结果与分析

2011 年 4 月 4—5 日的沙尘暴强度较大,沙尘暴期间能见度大幅度降低。Williams<sup>[17]</sup>在风洞实验

中,研究了风沙流沙粒粒度分布沿垂直方向的变化,考察了风速大小、床面沙粒组成、沙粒形状等因素变化的影响。Williams 的实验结果表明以上三种变化因素对垂直方向上沙粒的平均粒径有一定的影响;2 m 高度范围内平均粒径 MZ( $\phi$  值)在 2.92~3.58 之间变化,10 cm 处最小,10 cm 以下随高度的上升而递增,沙样在 2 m 高度范围内的平均粒径在 10 cm 处达到最大为 144.378  $\mu\text{m}$ 。10 cm 高度以上随高度的上升而递减,2 m 处平均粒径最小为 83.169  $\mu\text{m}$ ,50 cm 以下平均粒径变化较大,50 cm 以上沙样的平均粒径变化减小。沙粒在气流的作用下发生碰撞,粗沙粒碰撞后的跳跃到 10 cm 高度处,使得在这个高度上采集的沙样平均粒径达到最大。随着高度的上升气流的携沙能力逐渐降低,粗沙粒由于重力作用较大无法被带至更高,尤其是表面比较光滑的沙颗粒,因为光滑的沙粒磨圆度较好,沙粒间的咬合作用越小,而细颗粒重力小并且颗粒表面磨蚀作用不明显,棱角较多,沙粒间的咬合互锁作用就会变大,从而可以被带至更高。所以越往高处粗颗粒比重越小,细颗粒比重越大<sup>[18]</sup>。从图 2 中可以看出垂直方向不同粒径范围沙粒比重的变化,越贴近地面粗颗粒比重越大,越远离地面细颗粒比重越大。但对于塔中腹地来说沙尘过程中起沙沙粒粒径集中在 63~250  $\mu\text{m}$ ,多为细砂、极细砂、和粗粉砂,贴地层 100 cm 和 200 cm 高度上 77% 的沙粒粒径分布在 63~250  $\mu\text{m}$ ,10 和 50 cm 上 80% 的沙粒粒径集中在 63~250  $\mu\text{m}$ ,5 cm 高度上 91% 的沙粒粒径集中在 63~250  $\mu\text{m}$ ,这和杨兴华<sup>[19]</sup>等对塔中沙尘天气过程所采沙样粒径分布特点的研究结果基本一致。

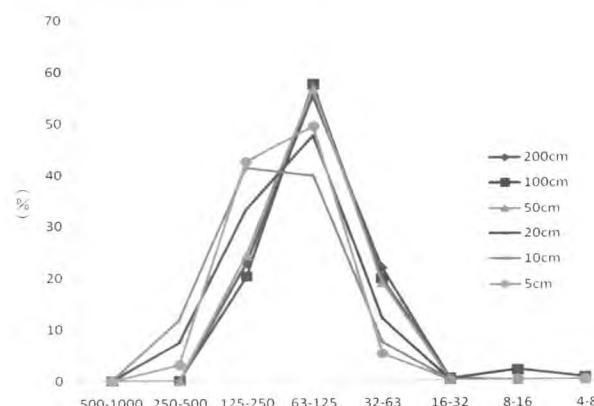


图 2 不同高度沙粒的粒径分布

## 3 沙粒微观形貌特征分析

沙尘暴过程中风沙流输沙沙粒表面形态在不同

高度上有一定的规律性。对于那些传输远近不同或时间长短不同的沙粒来说,它们的表面形态存在明显的差别,从沙粒形状方面,如圆度、磨蚀作用方面进行描述,得出一些结果,对研究沙尘暴沙源和防沙治沙提供参考。沙粒圆度是描述沙粒形貌特征的重要参数之一,圆度值的计算是用沙粒投影面等面积的圆周长除以沙粒投影面的周长得到的,比值越接近1说明沙粒越圆。在材料科学里也有被引用,但结果有所不同,材料科学中依靠机械破碎所得矿渣的圆度值随粒径的增大而减小,风沙流输沙沙粒在风力的作用下向前移动,由于搬运过程中颗粒间的摩擦碰撞导致沙粒的外表棱角被逐渐磨蚀,表面渐趋光滑。

有关沙粒粒径的范围界定标准不一,Bagnold(1941)指出粒径小于60 μm的颗粒为尘,粒径大于60 μm的颗粒常称为沙。根据风沙物理学对风蚀颗粒运动形式的划分标准 Shao 等,也指出粒径<60 μm 的为尘粒,粒径在 60~1 000 μm 间的为沙粒<sup>[20]</sup>。但是对这个问题,目前国内外分歧仍很大,有的人喜欢用十进制粒级,有的人喜欢用等比制粒级,有的人试图以沉积物的物理特征来划分粒级,有的人则主张用沉积速度分析来代替力度分析,砂粒和粉粒之间的界限在工程学分类是直径<74 μm,而土壤学分类是以 50 μm 或者 20 μm,不同部门的划分界限不一,根据需要可以存在稍许的浮动<sup>[21]</sup>。总之,各有各的理由,目前看来还无法迅速统一,现列出几个国家的粒组分界概况<sup>[22]</sup>见表 1。

表 1 常见的土壤粒级制

当量粒径/mm	中国制(1987)	前苏联卡庆斯基制(1957)	美国农业部制(1951)	国际制(1930)
3~2	石砾	石砾	石砾	石砾
2~1			极粗沙粒	粗砂粒
1~0.5	粗沙粒	粗沙粒	粗沙粒	
0.5~0.25		中沙粒	中沙粒	
0.25~0.2	细沙粒	细沙粒	细沙粒	
0.2~0.1				细砂粒
0.1~0.05			极细沙粒	
0.05~0.02	粗粉沙	粗粉沙	粉粒	
0.02~0.01				粉砂
0.01~0.005	中粉砂	中粉砂		
0.005~0.002	细粉沙	细粉沙		
0.002~0.001	粗黏粒		黏粒	黏粒
0.001~0.0005	细黏粒	粗黏粒		
0.0005~0.0001	黏粒	细黏粒		
<0.0001		胶质黏粒		

参考上文所述的划分标准,另外结合所采沙样情况及实验条件的限制,本文对大于 74 μm 的沙粒进行粒级筛分,然后放在显微镜下对其微观形貌进行分析。沉积物中的沙粒在沉积搬运过程中经过不同程度的碰撞、磨损从带有棱角状的不规则形状逐渐向圆球状过渡,不同矿物成分的沙粒因其晶形、硬度不同而磨损速度亦不同,表现出不同的圆度。相同成分的沙粒则因搬运力和距离的不同而表现出不同的圆度,因而沉积学家常将同类沙粒石英沙的圆度作为沉积环境和沉积搬运过程的重要指示参数,文章将通过沙粒微观形貌特征分析塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程起沙沙粒的磨蚀程度及沙粒的形状参数的分布比率。由于本区所采沙样粒径集中在分布在63~500 μm 之间,根据沙粒的这一特征,把沙样进行三级筛分,对筛分后的三个粒径范围沙样的微观形貌特征进行分析如下。

### 3.1 沙尘暴过程中风沙流输沙沙粒的微观形貌特征分析

#### 3.1.1 大于 0.3 mm 的沙粒微观形貌特征分析

图 3 中是粒径在 0.3 mm 以上的沙粒图片,a、b、c、d 四幅图分别是 5、10、20、50 cm 高度上所采的沙样图片。100 cm 和 200 cm 高度上没有采集到此粒径范围的沙粒。从图 3 可以看出大多数的沙粒透明度较好,也有少量的沙粒透明度较差,如红色和黑色的沙粒,沙粒的表面磨蚀较为明显,棱角较少,圆度较好。

该粒径范围沙粒的圆度值分布比率见表 2。从表中看出,大于 0.3 mm 沙粒圆度值分布相对集中,大都集中在 0.7~1.0 之间,并且圆度值在 0.8~0.9 之间的沙粒比例最大,只有 20 cm 高度所取沙粒的圆度值分布较为分散,有大约 4.17% 的沙粒圆度值在 0.7 以下,可能是因为沙尘暴过程中粗细沙粒在 20 cm 这个高度上都有分布,混杂较为明显,分选较差所致。

表 2 大于 0.3 mm 沙粒的圆度值分布比率

圆度值	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm
0.4~0.7				4.17
0.7~0.8	16.67	9.09	25	17.24
0.8~0.9	60	86.36	41.66	65.52
0.9~1.0	23.33	4.55	29.17	17.24

#### 3.1.2 粒径在 0.125~0.3 mm 之间沙粒的微观形貌特征分析

图 4 是 5、10、20、50 cm 4 个高度上采集的粒径

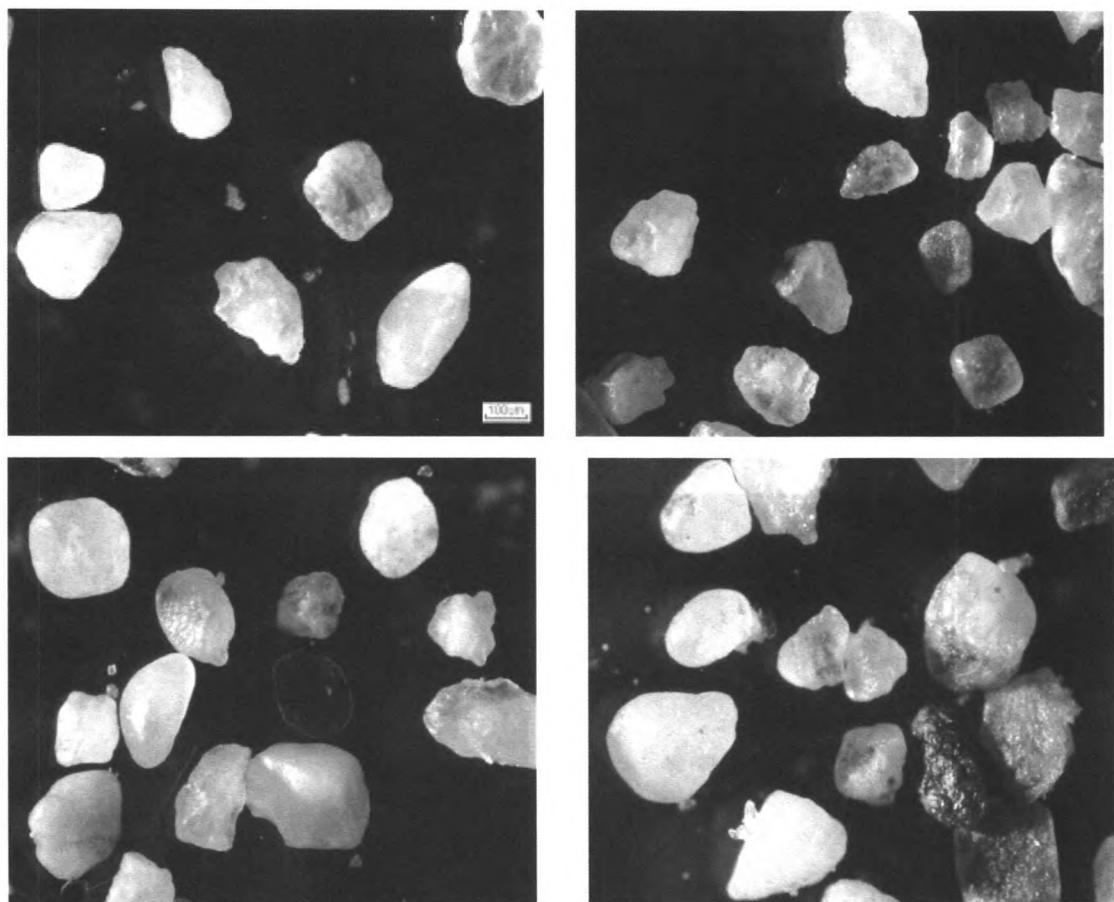


图 3 不同高度上粒径大于 0.3 mm 沙粒  
(a 为 5 cm 32 倍; b 为 10 cm 32 倍; c 为 20 cm 32 倍; d 为 50 cm 32 倍)

在 0.125~0.3 mm 之间的沙粒图片, 从图 4 可以看出, 和上文中大于 0.3 mm 的沙粒相比这一粒径范围的沙粒形状较为复杂, 沙粒表面的磨蚀作用明显减弱, 棱角较多, 透明度差的沙粒表面的磨蚀依然较为明显。但是大多数沙粒的透明度较好, 透明度差的颗粒比例较低。沙粒以分散颗粒为主, 只有 50cm 高度上收集的沙粒出现了粘连现象。

表 3 是粒径在 0.125~0.3 mm 之间沙粒的圆度分布比率, 表中显示四个高度上沙粒的圆度值集中分布在 0.7~1.0 之间, 只有 50 cm 高度上的沙粒由于粘连, 圆度值分布有所不同, 并且比其他明显变小, 圆度值小于 0.7 的沙粒占到了 41.49%。而 10 cm

表 3 粒径在 0.125~0.3 mm 之间的沙粒圆度值分布比率

圆度值	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm
0.4~0.7				41.49
0.7~0.8	11.76	10.34	7.69	38.71
0.8~0.9	67.65	34.49	76.93	16.57
0.9~1.0	20.59	55.17	15.38	3.23

高度上的沙粒圆度最好, 有大约 90% 的沙粒圆度值集中在 0.8~1.0 之间, 圆度值在 0.9~1.0 之间的就达到 55.17%。

### 3.1.3 粒径在 0.074~0.125 mm 之间沙粒的微观形貌特征分析

图 5 是粒径在 0.074~0.125 mm 之间的沙粒图片, 从图中看出该粒径范围的沙粒中条形沙粒增多, 沙粒的形状更加复杂, 表面的磨蚀也越来越轻, 棱角也更加尖锐, 这和沙粒的粒径大小密切相关, 由于沙粒越小, 在随风向前运输的过程中沙粒间的碰撞摩擦力越小, 所以表面的磨蚀不明显。不过该粒径沙粒中透明度好沙粒依然是主体, 零星分布有一些黑色、红色、黄色沙粒, 但由于沙粒较小, 表面的磨蚀不像大颗粒那样受透明度的影响那么明显。整体上这一粒径范围的沙粒表面磨蚀较差。

表 4 是粒径在 0.074~0.125 之间沙粒的分布比率, 从表中看出该粒径范围沙粒的圆度值分布情况是: 圆度值在 0.8~0.9 之间的沙粒所占比例最大, 尤其以 5、10 和 200 cm 高度上的沙粒最为明显。另外,

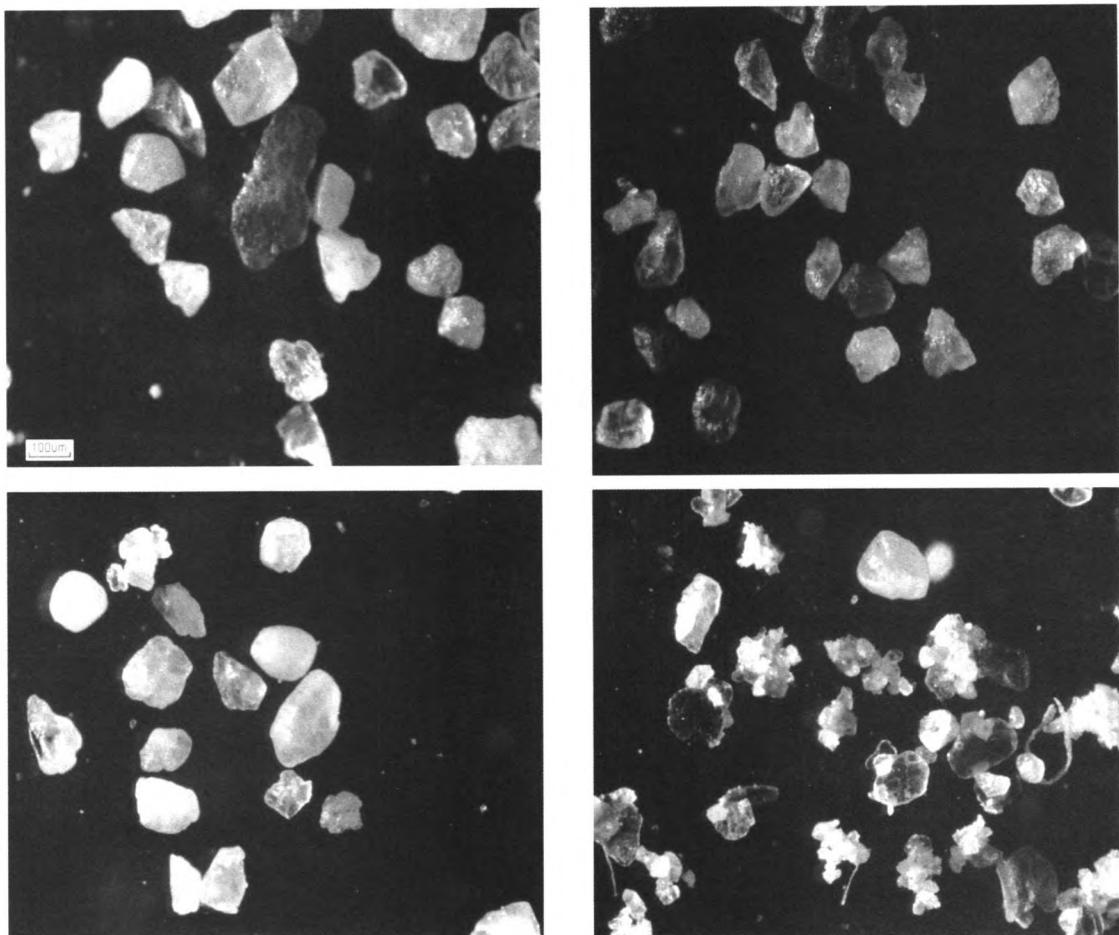


图4 不同高度粒径在0.125~0.3 mm之间的沙粒  
(a为5 cm 48倍;b为10 cm 48倍;c为20 cm 48倍;d为50 cm 48倍)

就圆度值的分布来看,5、50和100 cm高度上的沙粒形状相对多样。200 cm高度上沙粒的圆形度最好,这和沙粒的粒径有关,材料科学中窦竞等研究结果显示:矿渣是颗粒状粉体,用圆度-粒度分布来描述其形状特征具有较好的规律性,其细组分更接近于球体<sup>[23]</sup>,说明粒径越小,颗粒的圆度值越大。但这一点对于粒径大的沙粒来说没有可借鉴性,因为粗沙粒移动过程中颗粒间的碰撞摩擦使得表面磨蚀明显,这也会导致沙粒的圆度值变大,而细沙粒在移动的过程中由于自身重量较轻,在移动过程中沙粒间

的碰撞摩擦作用较小,所以外力的作用干扰不明显,和机械破碎的矿渣粉体的情况很相似。

#### 4 结论与讨论

(1)沙尘暴过程中起沙沙粒粒径集中在63~250  $\mu\text{m}$ ,多为细砂、极细砂、和粗粉砂。

离地2 m高度范围内所取沙样的平均粒径在10 cm处达到最大值144.378  $\mu\text{m}$ 。10 cm高度以上随高度的上升而递减,200 cm处平均粒径最小为83.169  $\mu\text{m}$ ,50 cm以下平均粒径变化较大,50 cm以上沙样的平均粒径变化减小。

(2)粒径大于0.3 mm的沙粒透明度较好,也有少量的沙粒透明度较差,如红色和黑色的沙粒,沙粒的表面磨蚀较为明显,棱角较少,圆度较好。圆度值大多在0.7~1.0之间,并且圆度值在0.8~0.9之间的沙粒比例最大,只有20 cm高度所取沙粒的圆度值分布较为分散,有约4.17%的沙粒圆度值在0.7以下,可能是因为沙尘暴过程中粗细沙粒在20 cm这

表4 粒径在0.074~0.125 mm之间沙粒的圆度分布比率

圆度值	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	200 cm
0.4~0.7	2.86			2.86	3.57	
0.7~0.8	14.29	12.9	20.83	11.43	21.43	6.9
0.8~0.9	71.42	77.42	62.5	54.28	60.71	72.41
0.9~1.0	11.43	9.68	16.67	31.43	14.29	20.69

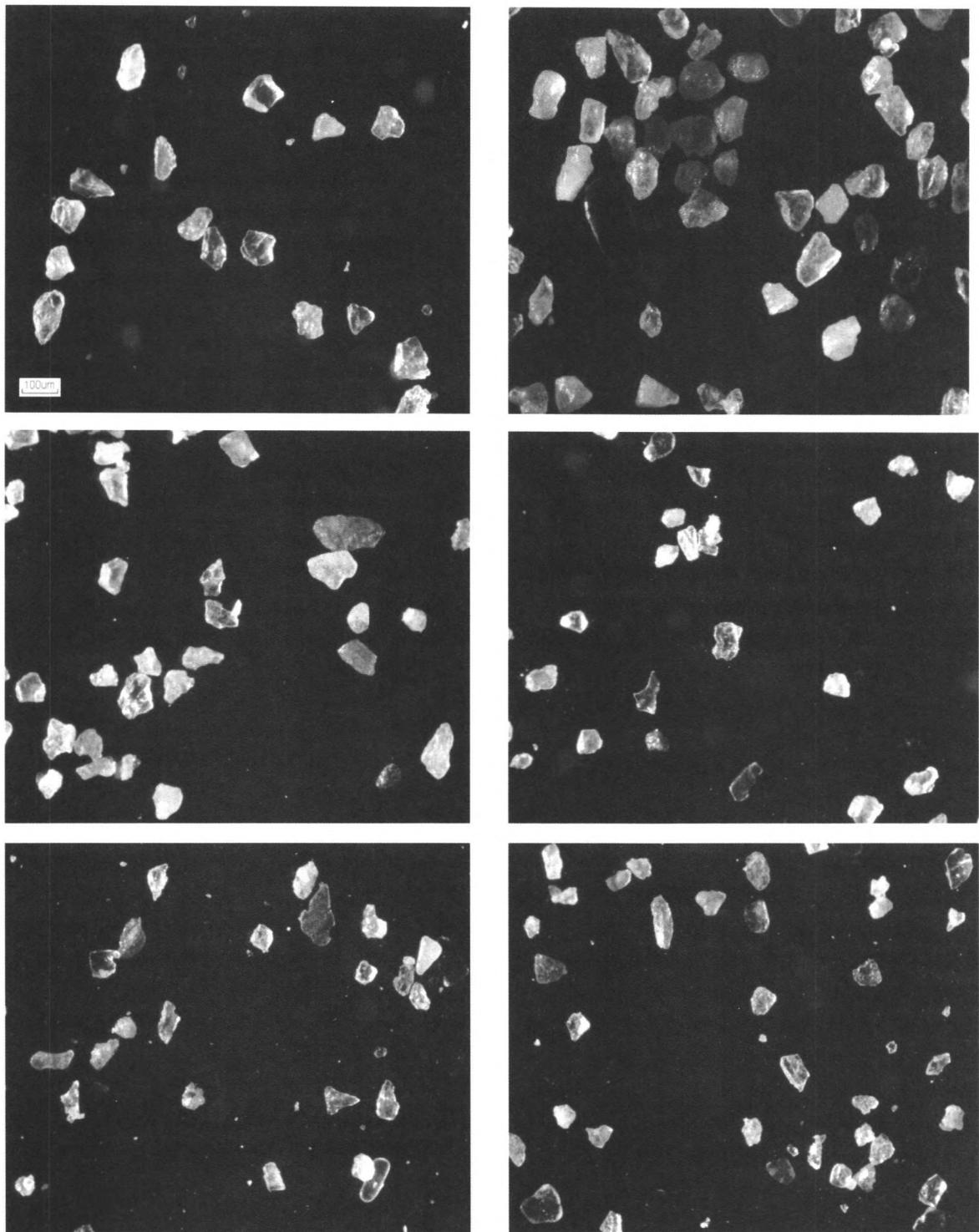


图 5 不同高度上粒径在 0.074~0.125 mm 之间的沙粒

(a 为 5 cm 48 倍; b 为 10 cm 48 倍; c 为 20 cm 48 倍; d 为 50 cm 48 倍; e 为 100 cm 48 倍; f 为 200 cm 48 倍)

个高度上都有分布,混杂较为明显,分选较差所致。

(3)粒径在 0.125~0.3 mm 之间的沙粒形状较为复杂,沙粒表面的磨蚀作用明显减弱,并且在 50 cm 高度上收集的沙粒出现了粘连现象。沙粒的圆度值集中在 0.7~1.0 之间,只有 50 cm 高度上的沙粒由于粘连,圆度值分布有所不同,并且比其他明显

变小,圆度值小于 0.7 的沙粒占到了 41.49%。而 10 cm 高度上的沙粒圆度最好,约 90%集中在 0.8~1.0 之间,圆度值在 0.9~1.0 之间的沙粒占 55.17%。

(4)粒径在 0.074~0.125 mm 之间的沙粒中条形沙粒增多,沙粒的形状更加复杂,表面的磨蚀也越来越轻,棱角也更加尖锐。圆度值在 0.8~0.9 之间的

沙粒所占比例最大,尤其以5、10和200 cm高度上的沙粒最为明显。另外,就圆度值的分布来看,5、50和100 cm高度上的沙粒形状相对多样。200 cm高度上沙粒的圆形度最好。

本文从微观的视角将沙尘暴起沙沙粒进行分析研究,借助图像分析软件得出沙粒的相关参数,为风沙研究开拓新的领域。然而由于实验条件及工作量较大的影响,文章仅对粒径和微观形貌这一块做了阐述,若能再结合沙粒成分解析沙尘源会有更好的效果。

#### 参考文献:

- [1] Zhang deer. A preliminary analysis to the dust climatology of China from historical period[J]. Chinese Sciences(series B),1984,(3):278-288.张德二.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J].中国科学(B辑),1984,(3):278-288.
- [2] 霍文.新疆沙尘暴天气演变特征与成因分析[D].乌鲁木齐,新疆师范大学地理科学与旅游学院,2011.
- [3] 李江风.塔克拉玛干沙漠和周边天气气候形成机理[M].北京:科学出版社,2003.
- [4] 袁玉江,李江风.塔克拉玛干地区近40年来的冷暖变化[J].中国沙漠,1998,19(6).
- [5] 袁玉江,何清.塔克拉玛干地区近40年来的干湿变化[J].干旱区地理,1998,21(1).
- [6] 杨莲梅.塔克拉玛干地区气候变化对全球气候变暖的响应[J].中国沙漠,2003,23(5).
- [7] 金莉莉.塔克拉玛干沙漠腹地紫外辐射特征研究[D].乌鲁木齐,新疆师范大学地理科学与旅游学院,2010.
- [8] 何清.塔克拉玛干沙漠塔中大气边界层结构及地—气相互作用观测研究[D].南京:南京信息工程大学,2009.
- [9] 艾力·买买提明,何清.塔克拉玛干沙漠近地层湍流热通量计算方法比较研究[J].中国沙漠,2008,28(5).
- [10] Paoletti L. diociaiuti M. Berardis B.etal Characterisation of aerosol individual particles in a controlled underground area Atmospheric Environment.1999,33:3603-3611.
- [11] Prospero J Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the south-eastern United States . Proceeding of National Academics Science USA. 1999,96:3396-3403.
- [12] Wittmack K..Impact and growth phenomena observed with sub micrometer atmospheric aerosol particles collected on polished sili-con at low coverage. Atmospheric environment 2002,36:3963-3971.
- [13] Martin S. Yu Han J. et al. 2000. An aerosol chemical reactor coat. In: metal oxide particles with  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – $\text{H}_2\text{SO}_4$ – $\text{H}_2\text{O}$ –Part 2: Manipulation of the metal oxide core. Journal of Aerosol Science: 31(11):1283–1298.
- [14] Puledda S. Paoletti L. F. erdiandi M. Airborne quartz concentration in an urban site Environmental Pollution. 1999,104:441-448.
- [15] Van Malderen H. Rojas C. Van Grieken R. Characterization of individual giant aerosol particles above the North Sea. Environmental Science & Technology 1992,26(4):750.
- [16] 赵旭光,李长城.高炉矿渣粉体的颗粒形貌研究建筑材料报[J].2005,8(5):558-561.
- [17] Williams G. Some aspects of the eolian sahation load[J]. Sedimentology, 1964, 3:257-287.
- [18] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:372-376.
- [19] 杨兴华,何清,艾力·买买提明,塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区风沙流输沙特征研究[J].干旱区地理,2011,34(3):481.
- [20] Shao Y P, Mikami M. Heterogeneous saltation: theory, observation and comparison[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 115:359-379.
- [21] 康奈尔大学农学系.美国土壤系统分类检索[M].龚子同译.北京:科学出版社,1985:54.
- [22] 王果.土壤学[M].北京:高等教育出版社,2009:70.
- [23] 窦亮,张雄.用图像分析仪研究矿粉的几何特征[J].建筑材料报,2002,5(4):320-352.