

分类号:

密 级:

学 号: 1076212009405

单位代码: 10762

新疆师范大学

2012 届硕士学位论文

塔克拉玛干沙漠沙粒形貌特征分析

**Research on morphology characteristic of sand particles in
Taklimakan Desert**

研究生姓名: 赵聪敏

学科、专业: 自然地理学

研 究 方 向: 干旱区环境演变与灾害防控

院系、年级: 地理科学与旅游学院 2009 级

指 导 老 师: 何清 研究员

新疆师范大学

2012 年 6 月 5 日

新疆师范大学学位论文原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解新疆师范大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属新疆师范大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在_____年解密后适用本授权书。

非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

学位论文全文电子版同意提交后可在校园网上发布，供校内师生浏览。

本人签名： _____ 日期： _____

导师签名： _____ 日期： _____

中文摘要

利用激光粒度仪和图像分析软件对塔克拉玛干沙漠的沙样进行分析, 得出塔克拉玛干沙漠沙丘表层 5cm 厚度范围沙粒的粒径集中分布在 63-500 μm 之间, 多是中沙、细沙和极细沙, 粗沙数量较少。就不同高度沙丘的表层沙粒粒径分布又有所不同, 沙丘越高, 沙粒粒径越小, 越往低处的沙丘表层沙粒的粒径越大。沙漠公路两边所取的沙样粒径集中在 63-250 μm 之间, 多是细沙和极细沙, 比例在 90% 以上。

肖塘气象站 2 号站 2011 年 3 月、4 月和 5 月三次沙尘暴期间, 梯度集沙仪收集的沙样粒径较小, 沙粒粒径大多在 63-250 μm , 多是细沙和极细沙。由于离塔里木河床较近, 沙样中含有粘土成分, 细沙粒比重较大, 自下而上所取的沙样粒径越来越小。塔中西站 2011 年 3 月和 4 月三次沙尘暴期间, 梯度集沙仪所收集的沙样粒径相对肖塘气象站要稍微大一点, 粒径多在 63-250 μm 之间, 细沙和极细沙比重较大。也有一定比例的中沙、粗沙、粉砂等分布, 但比例较小。

根据塔克拉玛干沙漠所采沙样的显微图像显示: 塔中低处沙丘表面粗沙较多, 并且粗沙粒表面的磨蚀作用比较明显。多数沙粒透明度较好, 透明度越好的沙粒表面磨蚀越不明显, 而透明差的沙粒表面的磨蚀较明显。沙丘表层尤其是迎风坡有很多黑色沙粒存在, 背风坡较少, 粒径在 0.3mm 以上的沙粒较多。粒径小于 0.3mm 的沙粒颜色多为无色透明状, 也有少数红色、黄色、褐色等沙粒存在。沙粒形状复杂多样, 多是不规则的多边形, 也有近似圆形、椭圆形、三角形的沙粒存在。沙粒圆度值集中分布在 0.8-1.0 之间, 圆度值在 0.8-0.9 之间的比例最高, 其次是圆度值在 0.9-1.0 之间的沙粒, 其他圆度值区间比例较小。肖塘和塔中站梯度沙样的粒径越大磨蚀越明显, 沙粒颜色、形状和地面沙丘的接近, 差别不大。沙粒圆度值和粒径的大小关系密切, 粒径大于 0.3mm 和粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒圆度较好, 而 0.125-0.3mm 之间的沙粒圆度稍差。

关键词: 塔克拉玛干沙漠; 显微形貌; 粒径; 磨蚀; 圆度

Abstract

Through analyzing the sand particles of Taklimakan Desert by using laser particle size analyzer and image analysis software. Obtained the sand particle sizes concentrated distribution between 63 to 500 μm , as far as the sand from dunes surface 5cm depth . Most is middle sand, fine sand and very fine sand. Coarse sediment is less . For different height of the sand dunes, the sand particle size is different .the higher the sand dunes, the sand particle size is smaller, the lower surface sand dunes , the sand particle size is larger.The sand from the both sides of desert highway,that's particle size between 63-250 μm ,most is fine sand and very fine sand,the proportion is more 90%.

The particle size most is between 63-250 μm ,For the sand from the sand collector in NO.2 Xiao tang weather station three times sandstorm March, April and may 2011.most is extremely fine sand and sand. Because the station is near the tarim river, sand samples contain clay composition, greater proportion and grit,the particle size is smaller and smaller from the bottom up .The sand particle size is smaller than Xiaotang station ,for sand from the three times sandstorm in west station Tazhong March and April 2011.most particle size between 63-250 μm .

According to the sand microscopic images show: The sand dunes surface have much coarse sediment in Tazhong, for low spot sand dunes. Surface coarse sediment erosion degree is obvious, most sand particles transparency is better, and that's surface erosion is obvious. Especially sand dunes windward slopes have much black sand particles, protected slope is less, the sand particle sizes above 0.3 mm is more. The roundness value concentration distribute between 0.8 and 1.0, the roundness value between 0.8 and 0.9 is the highest, followed by the roundness value between 0.9and 1.0, other roundness value proportion is smaller. Xiaotang and Tazhong station gradient sand particle size of the sample the more obvious abrasion, the bigger sand particle. Sand color, sand shapes are similar to the ground sand dunes. Sand particle roundness depends on sand particle size, the sand particle roundness is better with the size above 0.3mm and between 0.074 and 0.125mm, but the sand particle roundness is slightly inferior.

Key words: The Taklamakan Desert; Microscopic morphology; Particle size; Erosion; Roundness

目录

目录.....	V
文献综述.....	1
1 研究区概况.....	5
1.1 塔克拉玛干沙漠概况.....	5
1.2 塔中站概况.....	5
1.3 肖塘站概况.....	6
2 实验设备和数据.....	8
2.1 实验设备.....	8
2.1.1 梯度集沙仪.....	8
2.1.2 室内仪器介绍.....	9
2.1.3 南京 DT2000 粒度分析软件.....	10
2.2 数据.....	12
2.2.1 样品采集.....	12
2.2.2 数据处理.....	12
2.2.3 沙粒形貌数据.....	13
3. 沙漠公路两侧沙粒特征分析.....	15
3.1 沙粒的粒径分布特征.....	15
3.2 沙粒的微观形貌特征.....	16
3.2.1 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征.....	16
3.2.2 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌特征.....	18
4 沙漠腹地沙丘沙粒特征分析.....	20
4.1 塔中低处新月型沙丘沙粒特征分析.....	20
4.1.1 沙粒粒径分布特征.....	20
4.1.2 不同粒径沙粒微观形貌特征分析.....	21
4.2 塔中高处沙丘沙粒特征.....	24
4.2.1 沙粒粒径特征.....	25
4.2.2 不同粒径沙粒微观形貌特征.....	26
4.3 塔中西站高处沙丘沙粒特征.....	30
4.3.1 沙粒的粒径分布特征.....	30
4.3.2 不同粒径沙粒的微观形貌特征.....	31
4.4 塔中丁字路口以北沙丘沙粒特征.....	35
4.4.1 沙粒的粒径分布.....	35
4.4.2 沙粒的微观形貌特征.....	36
5.肖塘站风沙流输沙沙粒特征分析.....	41
5.1 肖塘区 2011 年 4 月 4 日至 5 日沙尘暴期间风沙流输沙沙粒特征.....	41

5.1.1 沙粒粒径分布特征	41
5.1.2 肖塘区沙尘暴期间风沙流输沙粒微观形貌特征	42
5.2 肖塘区 2011 年 4 月 29 日沙尘暴期间风沙流输沙粒特征	45
5.2.1 沙粒的粒径分布特征	45
5.2.2 沙粒的微观形貌特征	46
5.3 肖塘 2011 年 5 月 8 日沙尘暴沙粒特征	48
5.3.1 沙粒的粒径分布特征	49
5.3.2 沙粒的微观形貌特征	49
6 塔中西站风沙流输沙粒特征	52
6.1 塔中西站 2011 年 3 月 12 至 13 日沙尘暴过程中风沙流输沙粒特征 ..	52
6.1.1 沙粒粒径分布特征	52
6.1.2 沙粒微观形貌特征	53
6.2 塔中西站 2011 年 3 月 21-22 日沙尘暴过程中风沙流输沙粒特征分析	56
6.2.1 沙粒的粒径分布特征	56
6.2.2 沙粒的微观形貌特征	57
6.3 塔中西站 2011 年 4 月 4 日至 5 日沙尘暴集沙沙粒特征	60
6.3.1 沙粒的粒径特征	60
6.3.2 沙粒的微观形貌特征	62
7 结论与展望	67
7.1 结论	67
7.2 展望	68
参考文献	69
在读期间发表的论文	72
后记	73

文献综述

1.1 国外研究进展

在国外,利用单颗粒物分析手段进行颗粒物源解析较多,一般是通过对颗粒物大量统计分析(几千或几万个)得出定量或半定量的源解析结果。20世纪70年代及70年代以前,对样品的分析主要集中于全颗粒物化学分析、化学反应过程和化学反应产物。大气颗粒物的单颗粒分析最早是借助于光学显微镜对粗颗粒进行分析。McCrone and Delly(1973)用此方法得出了颗粒物图集^[1]。Russell and Ruud(1973)采用SEM—EDX对Denver市区大气颗粒物进行了研究,获得了粗颗粒组分的半定量信息^[2]。Ramsden and Shibaoka(1982)使用扫描电镜及透射电镜以及电子探针微区分析(EPMA)研究烟尘颗粒形态和化学成分^[3]。进入20世纪90年代后,单颗粒的矿物学、形态学、化学成分及与颗粒物各种效应的关系等方面的文献大量涌现。

20世纪90年代初,国外有关学者对可吸入颗粒物的矿物组分进行研究。1992年,日本名古屋大学水圈科学研究所对飘到日本的黄沙进行了详细的研究,发现组成黄沙的矿物主要是石英、长石、伊利石、绿泥石、高岭石、方解石、石膏、硫酸氨等,矿物颗粒的粒径范围在1.0~30 μm ,矿物颗粒之间相互凝聚^[4]。英国地质学会及英国矿物学会也专门从矿物学角度对大气颗粒物进行调查,认为颗粒物的矿物组成特征在大气颗粒物的研究中不容忽视。Dentener et al利用对流层三维模型模拟了对流层的光化学氧化物、氮化物、硫化物的循环过程,认为气溶胶中的矿物颗粒物在大气化学过程中作为非均相反应的界面,可以加速二氧化硫向硫酸盐的转化^[5];以上有代表性研究的成果说明,国际上非常重视可吸入颗粒物中矿物组分的研究工作,大气化学界正进行着矿物颗粒物研究的热潮。

Van Malderen et al(1996)用自动电子探针对每个大气颗粒物样品中400个单颗粒进行化学成分分析,总共分析了50000多个单颗粒,采用谱系聚类分析和非谱系聚类分析、主因子分析研究了中西伯利亚大气颗粒物长距离迁移对北极区的影响^[6]。在应用SEM—EDX分析颗粒物的文献中,Puleda et al(1999)分析了约1000个颗粒,得出颗粒物的组分,将不同的组分分为10种类型,分别探讨了它们的来源^[7];Paoletti et al(1999)研究了意大利一处地铁的颗粒物组分,应用因子分析方法将颗粒物分成四大类型,分别探讨了它们的来源^[11];Prospero(1999)以美国东南部受非洲沙尘暴影响为例,研究了全球大气中矿物沙尘长距离的传送,认为高岭石主要在西非低纬度区,伊利石主要在北部地区到地中海海岸,从而可以根据伊利石与高岭石比值的大小判断沙尘源^[9]。Wittmaack(2002)应用SEM—EDX时,尝试应用硅片收集颗粒物,发现要比用滤膜的效果好^[8]。Martin

etal (2000)通过模拟分析大气颗粒物的变化与形成过程,从颗粒物化学成分、粒度分布等方面进行评价,并与通过TEM取样分析研究每一个阶段矿物颗粒发生的变化进行对比^[10]。

1.2 国内研究进展

国内单颗粒物分析研究起步较晚,很多领域的研究不够深入、系统,应该加强对大气颗粒物区域性气候效应、环境变化、健康效应、大气化学以及大气颗粒物矿物学等方面的单颗粒物分析研究,不断改进全球气候系统模型,以便更可靠地对人为大气变化的气候影响进行预测。从技术手段来看,国内相关的仪器只是刚刚开始应用到大气单颗粒物分析上,所以研究者需要不断积累经验。

国内学者,90年代中后期开始研究PM₁₀的成分和来源。在90年代末期开始研究PM_{2.5}及其对能见度的影响并对大气颗粒物的有机化学习性作了研究,取得了大量有益的成果。但对气溶胶中单颗粒的研究并不多且主要集中在颗粒的物理化学性质等方面。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^[23]; 窦竞,张雄对矿渣微粉颗粒群几何特征的图像分析,矿渣是颗粒状粉体,用圆度粒度、长短Feret径之比-粒度;curve length-粒度和curve width-粒度分布来描述矿渣微粉颗粒群的形状特征具有较好的规律性。矿渣微粉颗粒群的细组分更接近于球体,而粗组分更接近于长方体^[24]。王赞红等对近地面大气颗粒物的粒度和粒形特征进行了分析^[34]。程旭等对沙漠的沙粒物理特性进行分析,得出沙丘不同部位的沙粒粒径的分布特点及造成这种分布的原因。另外分析了沙粒的圆度等物理特性^[18]。姚正毅等对塔克拉玛干沙漠腹地风沙土的力学性质的研究^[19]; 李杰、庄继德等对沙力学特性影响因素的试验研究^[20]; 刘咸德等对青岛大气颗粒物进行了研究,得出颗粒物的来源主要有土壤扬尘和燃煤飞灰、硫酸钙和其它硫酸盐类的二次颗粒物、有机质颗粒物、天然海盐、工业钡盐以及水泥工业、燃油和钢铁工业排放的污染物等;汪安璞等对北京大气气溶胶中粗粒中的物相进行了初步研究^[30]; 张代洲等对北京的沙尘粒子作了成分和形态分析^[29]; 时宗波和邵龙义等利用扫描电镜及能谱和X射线衍射对颗粒物的微观类型进行了初步分类,并尝试用X射线衍射鉴别气溶胶中的矿物颗粒^[31]; 杨书申、邵龙义等应用高分辨率场发射扫描电镜(FESEM)和图像分析技术研究了上海市区冬季大气可吸入颗粒物的形貌特征以及不同种类颗粒物的数量-粒度和等效体积-粒度分布,还对郑州市大气可吸入颗粒物单颗粒污染特征分析^[33,22],邵龙义,刘君霞等对奥运会及残奥会期间北京市区大气颗粒物污染特征及微观形貌类型的分析^[21]; 吕森林、邵龙义等用高分辨率环境扫描电镜和图像分析技术对北京PM₁₀中的矿物颗粒的微观形貌和粒度分布特征进行了研究^[32]; 李娟、张广兴、李霞、喻树龙等对乌鲁木齐市天山区大气颗粒物的特征分析^[35]; 崔中华、

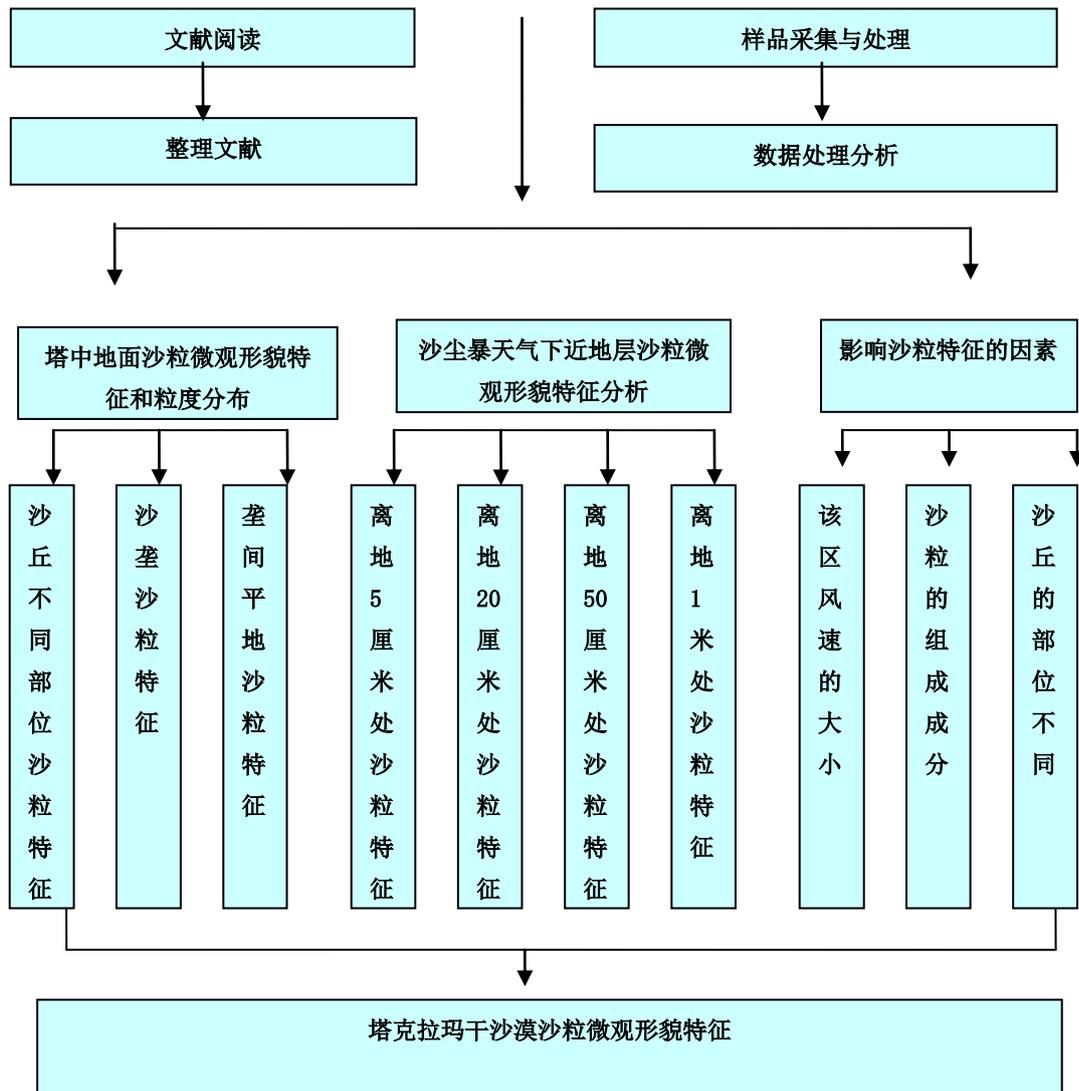
肖正辉、张强华、刘义、罗莹华分别对哈尔滨、兰州、南京、韶关这几个城市的大气颗粒物进行了研究与形貌特征分析^[13-16, 37]；蒋红梅和王定勇等得出元素碳对能见度降低的效率大约是硫酸盐、硝酸盐或其它有机质的3倍^[36]；朱岗篔等得出颗粒物的散射能造成60%~95%的能见度降低^[17]；王玮等得出在北京交通来源颗粒物与能见度密切相关，其粒径谱分布与能见度存在一定关系。祁士华等认为电子显微镜与能谱连用(SEM—EDX及TEM—EDX)是最为简便快捷的单颗粒表征技术^[26]。庄国顺等认为矿物颗粒物经过几千公里的搬运能够为大洋表层带去可供生物吸收的营养元素铁，使某些海区的生产力大幅上升^[12]。还有一些学者专门探讨如何利用XRD对大气颗粒物进行研究，并在大气颗粒物中识别出硅酸盐、硫酸盐、氧化物、硫化物等。由于PM_{2.5}和PM₁₀颗粒粒径较小，样品处理方法复杂和采样技术要求严格、仪器分辨率低等原因，总体上对可吸入颗粒物中矿物组分的成果还不多见。

1.3 选题依据和意义

本文由导师何清研究员主持的公益性气象行业专项“沙漠及周边地区灾害性天气监测预报报警技术(GYHY201006012)；新疆维吾尔自治区科技攻关项目(200833119)“新疆沙尘源区尘暴追踪监测与灾害预警技术开发”；国家科技支撑计划项目课题子专题(2008BAC40B05-01)“沙尘暴起沙机理强化观测试验研究”支持共同完成的。

颗粒物对气候和环境都有很大影响，但与颗粒物气候影响的单颗粒分析相比，颗粒物对环境影响的单颗粒分析进行得较少。虽然颗粒物对环境的影响不像对气候的影响那样波及整个地球，但局部的环境影响对人们的生产和生活的影响更大。我国西北地区每年春夏季节沙尘天气频发，华北地区春季也会有不同程度的沙尘天气，由于沙尘天气的影响，能见度变差，空气质量恶化，严重时甚至会影响了人们的出行和生活。通过对颗粒物微观形貌和粒度分布的研究，分析不同颗粒物对气候的影响，探索沙尘颗粒物的来源、输运过程的变化规律及物质成分等，从而探究不同的颗粒物对健康、环境、气候的影响。沙粒的抗剪切特性与沙粒形貌特征之间具有密切联系，方差和圆度决定了沙粒之间的咬合和连锁作用，是沙粒流动性能的主要影响因素。平均粒径在一定程度上改变沙粒的抗剪切性质，是沙粒流动性能的重要影响因素。

1.4 技术路线



1 研究区概况

1.1 塔克拉玛干沙漠概况

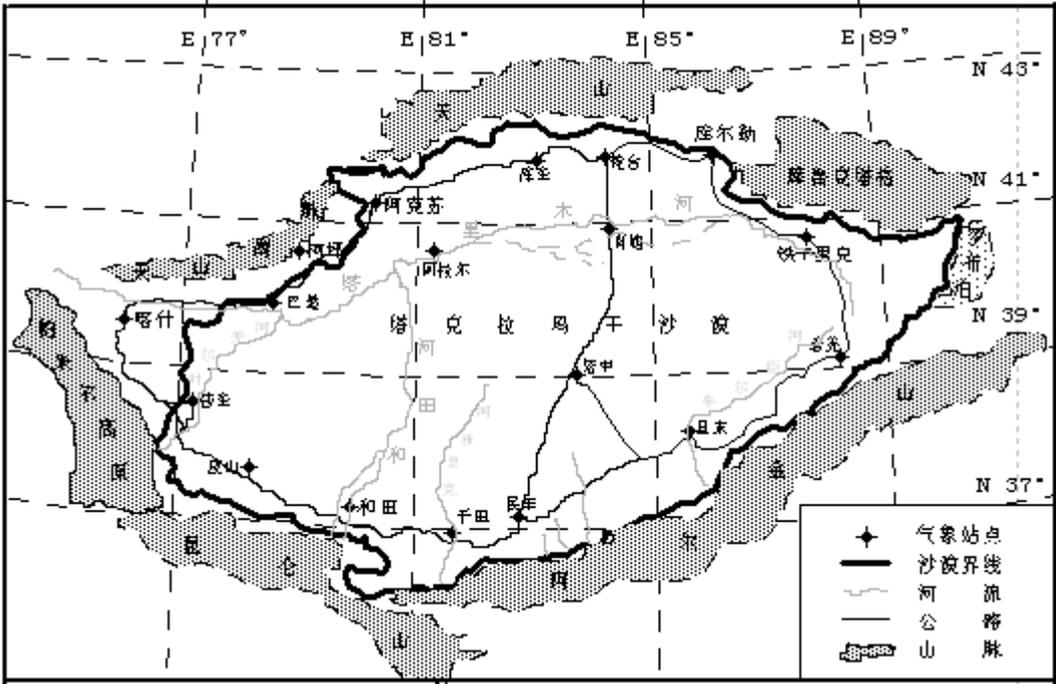


图 1-1 塔克拉玛干沙漠

塔克拉玛干沙漠位于塔里木盆地中部，是我国最大，沙丘类型最复杂的沙漠。面积占中国沙漠总面积的 47%。流动沙丘占 85%，是世界上面积占第二位的流动性沙漠。西部因受西北风的影响，沙丘向东南移动；东部因受东北风影响，沙丘向西南移动，一千多年来南移 30m。沙丘高一般高达 50m 以上，最高处达 250m。形态复杂，东部和西部麻扎塔格山南北地带，多为延伸很长的巨大复合型沙丘链，最长可达 30km；中部 82~85° E 之间和西南部，主要为复合型 10~20km，高 50~80m，宽 500~1000m；南部临近山岭地带发育有金字塔型沙丘；北部塔里木河老河床以南可见高大穹状沙丘。只在沙漠边缘和河岸边分布有以红柳沙堆为主的固定、半固定灌丛沙堆，成为“沙漠中的绿洲”。沙漠外围依次为冲积平原、山麓砾石戈壁。是中国最干旱的地区，无霜期 180~240d，年日照时数 3000~3500h，属暖温带沙漠。

1.2 塔中站概况

研究区塔中位于塔里木盆地中央，深入塔克拉玛干沙漠腹地 229km，下垫面为广袤的流动沙丘，风沙地貌主体为一系列线状的高大复合型纵向沙垄与垄间地相间分布，沙垄走向为 NNE-SSW 或 NE-SW 方向，相对高度为 40~50m。垄间平坦低地宽 1~3km，长 2~5km。高大沙垄的前缘分布有低矮的新月形沙丘和

沙丘链^[42-43]。试验观测区以沙漠腹地塔中气象站（39°00'N，83°40'E，海拔1099.3m）为中心的3.6km²大气环境观测试验研究基地（图2.2）。该地区年平均气温为12.1℃，平均气温年较差介于33.0~39.0℃，极端最高气温可达40.0~46.0℃，极端最低气温达-20.0~-32.6℃，1997年7月20日观测到45.6℃的极端最高气温，2008年1月30日9时（北京时间）观察到-32.6℃的极端最低气温。年平均降水量在25.9mm左右，且年内分配不均衡，春夏两季的降水量占全年降水量的90%以上。蒸发量极大，塔中气象站20cm蒸发皿测得的数据，年平均蒸发量达3812.3mm。年平均风速为2.3m·s⁻¹，常年盛行偏东风，年平均大风日数为11d左右，年平均浮尘、扬沙天气在157d以上，年平均沙尘暴为16d左右，1989年塔中1号井年沙尘暴高达60d。塔中地区除了塔中四油田作业区和生活区2km²范围及沙漠公路两旁人工种植了一些梭梭、红柳、沙拐枣及一些野生芦苇外，其余地区基本是裸露的流沙地表，土壤主要为风沙土，由于气候极端干旱，含水量极低。

1.3 肖塘站概况

肖塘地处塔克拉玛干沙漠北部边缘，距离塔里木河约40km，是典型的沙漠腹地-荒漠-绿洲过渡带。观测试验点位于距离沙漠公路肖塘1号井1000m的沙漠中。地处古河床的南岸，北距胡杨林约2km，是沙漠与荒漠的交汇处。下垫面为平坦沙地，部分地区有古河床裸露，周围有新月形沙丘和复合型新月形沙丘链，一般宽6~15m，高1~10m。地表土壤粒度组成以细砂（125~250μm）、极细砂（62.5~125μm）为主，占78.5%；中砂（250~500μm）占14.3%，粉砂（3.9~62.5μm）占6.1%，不含粗砂，黏土（0.02~3.9μm）含量在0.5%~0.8%。该地区年平均风速为2.5m·s⁻¹，春、夏季最大，冬季最小，秋季介于中间。气温变化与风速相似，以6~7月份最大，12~1月份最小，春季升温快，秋季降温快，风速与气温变化存在着明显的同步性。统计肖塘地区1992~2002年11年的沙尘天气资料发现，肖塘年均沙尘暴42d，最多年份出现在1994年，达71d之多，最少年份是1992年，全年仅为23d，最多年与最少年的值相差2倍多；沙尘暴集中分布在6、7月份，其中6月份最多平均为9d。从季节变化看，一年四季当中均有沙尘暴发生，春季平均为14d，占全年的33%，夏季平均为21d，占全年的50%，秋季平均为6d，占全年的14%。冬季平均为1d，占全年的3%。对比肖塘地区风速、气温的月变化，可以发现沙尘暴具有相似的分布趋势，风、温同步现象有助于风沙运动的发生。

1.4 沙漠公路概况

这条穿越塔克拉玛干沙漠的公路是目前世界上最长的沙漠公路，是世界流动大沙漠中修建的第一条等级公路。1995年通车，北起314国道轮台县东，经轮南油田、塔里木河、肖塘、塔中4油田。南至民丰县恰汗和315国道相连，南北贯穿塔里木盆地，全长522公里，其中穿越流动沙漠段446公里。肖塘-塔中：219km，塔中-民丰：227km，路面宽7米，林带总面积3000余公顷。公路两边是20米宽的防沙护路林工程，使用较高矿化度的地下水滴灌。植被：怪柳、梭梭和沙拐枣等。沿途设立“水井房”114个，每隔4km一个，雇请管理植被浇灌工作的人员都是夫妻，1年工作9个月，每日供电12小时，石油公司免费提供生活补给。

2 实验设备和数据

2.1 实验设备

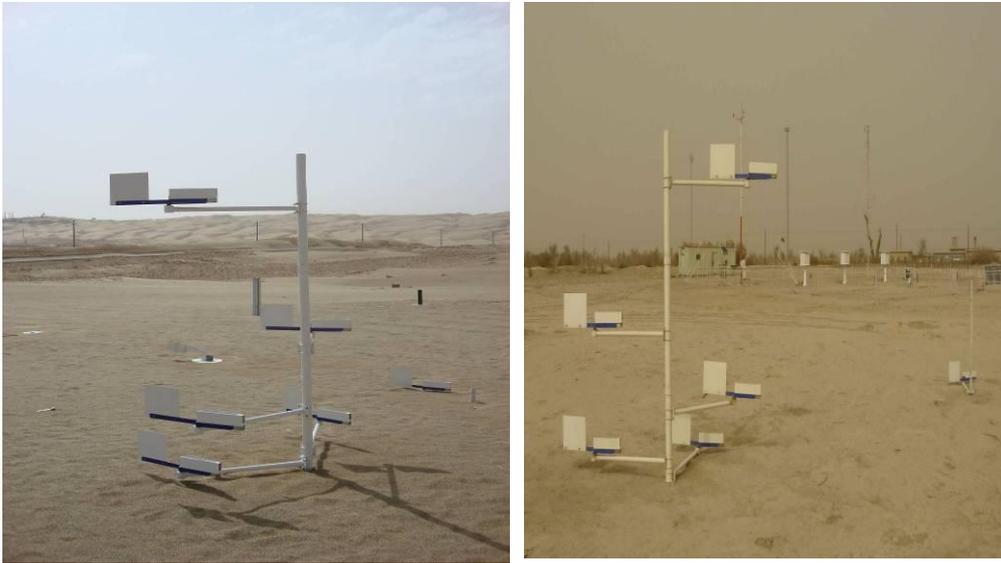


图 2.1 塔中西站梯度集沙仪 (左图)和肖塘站梯度集沙仪 (右图)

Fig.2-1 The sand traps of west station in Tazhong(left) and the sand traps of Xiaotang station(right)

2.1.1 梯度集沙仪

实验利用架设在沙地上的梯度集沙仪采集六个高度上的沙尘暴输沙沙样。图 2.1 左图和右图分别是塔中西站和肖塘站的梯度集沙仪，在距离地面 5cm、10cm、20cm、50cm、100cm、200cm 高度处分别由活动轴、尾翼、与集沙箱构成，尾翼随风向转动，使集沙箱的集沙口朝向风的来向，收集所有来向的沙尘暴沙样，采集的沙样用密封袋装好带回进行分析。

2.1.2 室内仪器介绍



图 2.2 激光粒度仪（左图）和尼康显微镜（右图）

Fig.2-2 Particle analyzers(left) and Nikon microscope(right)

图 2.2 左图是英国马尔文公司的 Mastersizer2000 型激光粒度仪是先进的激光衍射技术与高度实用的常规颗粒表征的完美结合，它已成为全球实验室粒度分析的最佳选择。该仪器采用全自动化操作，能够测量粉末、悬浮物质和乳状液，并根据标准化程序得出可靠的测量结果。粒度测量范围从 $0.02\sim 2000\mu\text{m}$ ，用于湿法和干法分析的样品分散器可用于所有的样品类型。模块化的系统设计使得湿法和干法测量模式之间可快速地互换，每个分散器均采用自动软件配置，确保操作简便易行，一体化的标准操作程序（SOP）有助于根据 ISO133201 国际标准设定测量方法和分散条件，Autosampler2000 全自动进样器，可进行无人操作。

激光衍射法测量粒度大小基于以下事实：即小粒子对激光的散射角大，大粒子对激光的散射角小。通过散射角的大小测量即可换算出粒子大小。其依据的光学理论为米氏理论和弗朗霍夫理论。其中弗朗霍夫理论为大颗粒米氏理论的近似，即忽略了米氏理论的虚数子集，并且假定颗粒不透明；并忽略光散射系数和吸收系数，即设定所有分散剂和分散质的光学参数均为 1，因此数学处理上要简单得多，对有色物质和小粒子误差也大得多。同样，近似的米氏理论对乳化液也不适用。

图 2.2 右图是尼康体视显微镜，型号是 SMZ1500，提供了全球最高的变倍比，可以从 $0.75\times$ 到 $11.25\times$ ，最大可放大 180 倍。此外还提供了多种附件，这样科学家可以对任何标本从大视野到高倍镜进行观察和拍照。照明附件种类丰富，包括塑料光纤双股照明器，6V-10W/20W 卤素灯照明等等，荧光环形照明器可以用来提供外部反射照明。

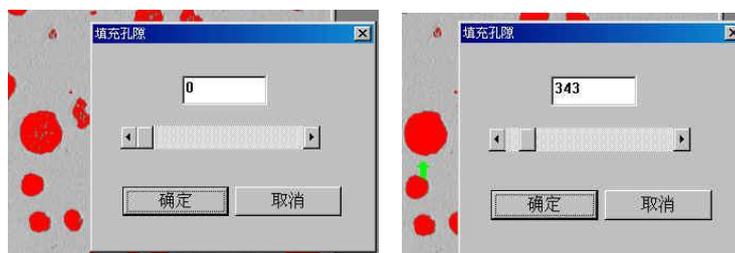
2.1.3 南京 DT2000 粒度分析软件

DT2000 图形分析软件 V1.0 可适用于 Windows98、Windows2000 和 WindowsXP, Vista, 能为您分析图像的工作提供有效帮助, 使测量更精确, 工作更轻松, 操作更自动化。DT2000 粒度分析软件可用于颗粒状目标的计数及各种粒径的测量与统计。主要测量参数有面积相当直径, 周长相当直径, 最大直径, 最小直径, 长短径比, 形态因子 (圆度), 0 度 Feret 径, 90 度 Feret 径, 个数长度平均径, 个数面积平均径, 个数体积平均径, 长度面积平均径, 长度体积平均径, 面积体积平均径, 并可根据累积曲线自动计算出 D10 (有效径), D30 (限定径), D50 (中间径), 不均匀系数, 曲率系数。也可以通过微分分布曲线查看颗粒是否为正态分布。如果单个视场颗粒个数不够, 系统可进行多个视场累加统计。该软件操作步骤如下: 第一步: 进行图像采集; 第二步: 对采集的图形进行处理, 点击菜单里的图像分割, 弹出对话框如下:



用鼠标拖动滑块, 可以将图像中要测量的部分提取出来。只有把目标提取出来, 才能对目标进行面积等参数的测量。这种方法是根据图像的灰度值提取目标的。即把在最小灰度和最大灰度这间的图像视为要测量的目标, 并用红色表示。

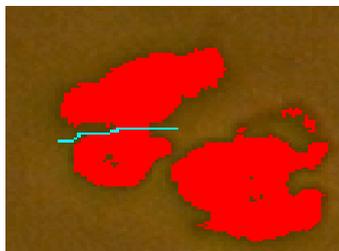
第三步: 点击菜单中的填充孔隙, 弹出对话框, 如下图, 滑动滑块, 可以将目标中的空隙填上为止, 然后确定。



填充前

填充后

第四步：点击菜单中的颗粒手动切分，根据沙粒的实际形状将粘边颗粒手动画开，尽量使颗粒接近实际形状，点击该菜单后，用鼠标在粘边颗粒要分开的地方按下鼠标左键画线，将其分开，如图所示：

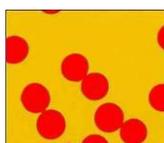


第五步：清除微粒：单击该菜单，弹出对话框，如下图：

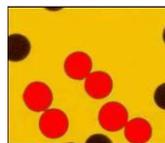


滑动滑块，改变清除微粒的面积，面积小于显示的像素个数的目标将在图像测量时不被计算在内。（图中黑色部分为被清除的微粒）。

第六步：清除边界目标：将边界的目标清除，在图像测量时将不在计数之内。如图：（图中黑色部分为被清除的目标）



清除前



清除后

对于一些没在边界线但形状和实际严重不符的颗粒，也可以进行手工清除：点击该菜单后，用鼠标点取图中要清除的红色目标，可以将该目标清除，以后计算时这个目标将不被计算在内。



第七步：图像处理好之后，点击测量，这时如果在测量设置中选中标号后，会在图像上对测量目标标号。在显示结果中单击某个编号，可以在图像上对这个目标追踪显示。如果操作系统中装有 Excel，单击分析报告，会将分析数据传到 EXCEL 中如下图所示，单击检测报告，在弹出的对话框中输入报告信息，会形成一个检测报告传到 EXCEL，如果要看统计图，可以在下拉框中选择要统计的参数，单击统计图就可以了。

2.2 数据

2.2.1 样品采集

沙丘沙和沙漠公路两侧沙是通过自行采样获得，塔中和肖塘气象站梯度沙样是梯度集沙仪在沙尘暴过程中采集的，然后人为收集，放入密封袋内带回实验室进行分析。

2.2.2 数据处理

对所采集的地表沉积物沙洋和沙尘暴输沙沙样的测量是在中国气象局乌鲁木齐树木年轮理化研究重点开放实验室进行，使用英国 MALVERN 公司的 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行分析，量程为 0.02~2000 μm ，重复性优于 0.5%，准确性优于 1%，测试采用湿法测量。具体步骤为：(1) 编号，对野外采

集沙样进行统一编号，登记样品的所有信息。(2) 干燥，将野外采集的样品放干燥器中干燥，以去除水分，块状样品变得较松散。(3) 分样，保证所取实验样本更具有代表性。(4) 取样，根据颗粒大小差异，选取相应量样品以保证测量时样品溶液浓度能达到仪器遮光度要求的范围，一般较细样品（粘土）样品取 0.5g，较粗（沙土）样品取 1.0g 左右，放入小烧杯（50~80ml）中。(5) 预处理，样品中先加入 10ml 浓度为 1:3（其中水为 3）比例配制的 H_2O_2 溶液，在加热过程当中再适当添加，烧杯放置电加热板上进行加热，加热煮沸直至没有气泡产生为止，完全去除有机质。再加入 10ml 同样浓度比例（1:3）的盐酸，再加热煮沸直至去除样品中的碳酸盐胶结物质。(6) 静置，在放有预处理样品的烧杯中加满蒸馏水，将烧杯静置 12h 以上，使样品颗粒物充分沉降于烧杯底部，然后轻轻倒掉上部液体，尽可能避免样品颗粒损失。(7) 加入 10ml 分散剂六偏磷酸钠（浓度为 30g/1L），使处理后的样品充分分散。将烧杯中处理好的样品加入到已经测量过蒸馏水背景值的测量烧杯中，利用粒度仪超声波震荡 10 分钟，以充分打碎大的团粒，防止颗粒胶结。(8) 最后测量得到数据。

2.2.3 沙粒形貌数据

有关沙粒粒径的范围界定标准不一，Bagnold(1941)指出粒径小于 $60\mu\text{m}$ 的颗粒为尘，粒径大于 $60\mu\text{m}$ 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 et al, (1996)也指出粒径 $<60\mu\text{m}$ 的为尘粒，粒径在 $60-1000\mu\text{m}$ 间的为沙粒^[44]。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粒度分析，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如表2-1所示：

表2-1 几个主要国家粒组分界概况

Tab 1 grain group demarcation general situation of some main countries				
国家	部门	砾-砂	砂-粉砂	粉砂-粘土
中	地质	2.00	0.05	0.005
	海洋地质	1.00	0.1	0.01
	土壤学会	3.00	0.01	0.005
美	试科协	4.76	0.074	0.002
	地质	2.00	0.063	0.004
	土壤	2.00	0.05	0.002
英	土壤学和地质学	2.00	0.063	0.002
	地质学	2.00	0.05	0.01
苏	地质学	2.00	0.05	0.005或
	海洋地质	1.00	0.1	0.001
	土壤学	3.00	0.05	0.01
日	地质学	2.00	0.063	0.004
	农业土壤	2	0.05 (微砂)	0.01
	工程	2	0.05	0.005
				(0.002)
	国际土壤学会	2.00	0.02	0.002

参考上文几个国家的划分标准，另外结合所采沙样的实际情况，本文采用 $74\mu\text{m}$ 作为分界，把粒径在 $74-1000\mu\text{m}$ 间的称之为沙粒，小于 $74\mu\text{m}$ 的叫做尘粒。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。相同成分沙粒则因搬运营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地区沙粒在搬运过程中的磨蚀程度及沙粒的形状参数的分布比率。由于本区沙粒较细，所采沙样粒径集中分布在 $63-250\mu\text{m}$ 之间，根据沙粒的这一特征本文选取了60目、120目和200目三级筛把沙样进行了筛分，对筛分后的三个粒径范围的沙样利用DT2000粒度分析软件进行沙粒的微观图像采集，每一个粒径范围的沙粒采集数量不少于30颗，将采集到的沙粒图像进行处理获得沙粒的一些相关数据，利用圆度计算公式算出沙粒的圆度值，将圆度值进行分类，计算出不同圆度值范围内沙粒所占比例。

3. 沙漠公路两侧沙粒特征分析

从塔克拉玛干沙漠公路两边选取 8 个点进行沙样采集，这几个点分别用 S1-S9 来表示是：S1 是北纬 37° 24' 50"、东经 82° 50' 45"，海拔 1333m、536km 处；S2 是北纬 38° 02' 09"、东经 83° 03' 30"，海拔 1243m、461km 处；S3 是北纬 39° 14' 20"、东经 83° 43' 48"，海拔 1052m、311km 处；S4 是北纬 39° 37' 37"、东经 84° 02' 45"，海拔 1034m、260km 处；S5 是北纬 39° 48' 40"、东经 84° 10' 12"，海拔 994m、235km 处；S6 是北纬 40° 40' 47"、东经 84° 17' 20"，海拔 959m、210km 处；S7 北纬 40° 27' 21"、东经 84° 17' 17"，海拔 921m、160km 处；S8 是北纬 40° 48' 10"、东经 84° 17' 48"，001 号水井处，海拔 928m、121km 处。

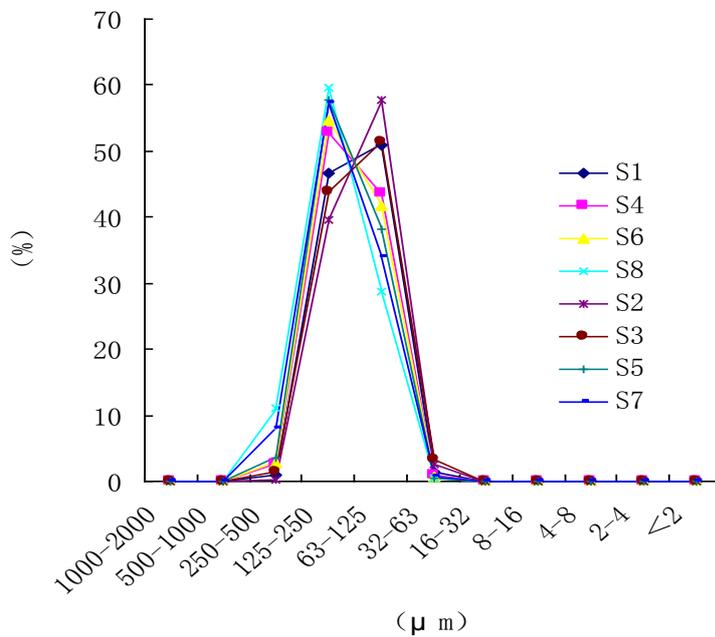


图 3-1 沙漠公路两侧采样点的沙粒粒径分布

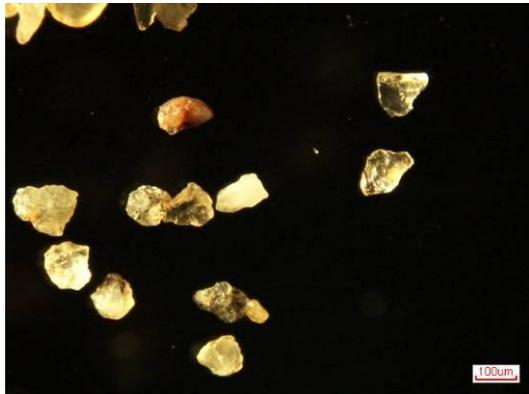
Fig.3-1 The particle size distribution of sand from the sampling point in either side Desert Road

3.1 沙粒的粒径分布特征

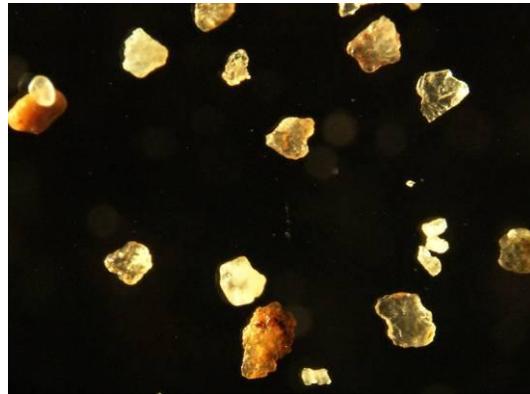
从沙漠公路两边所取的 8 个样品的沙粒粒径集中分布在 63-250 μm 之间，说明细沙和极细沙最多，但是不同地点取的沙样粒径具体情况不同，S8、S4、S5、S6、S7 处的沙粒占比例最高的是极细沙。S1、S2、S3 处所采的沙样比例最高是细沙，其中细沙占比例最高的是 S8 处的沙样，达到了 60% 以上。沙粒整体较细，比起沙丘沙和风沙输沙沙粒来说，粒径大的颗粒比例较小。

3.2 沙粒的微观形貌特征

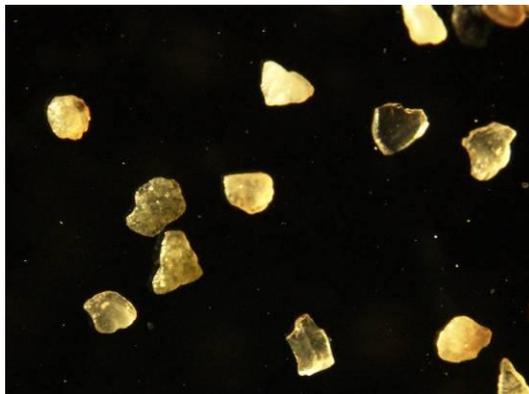
3.2.1 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征



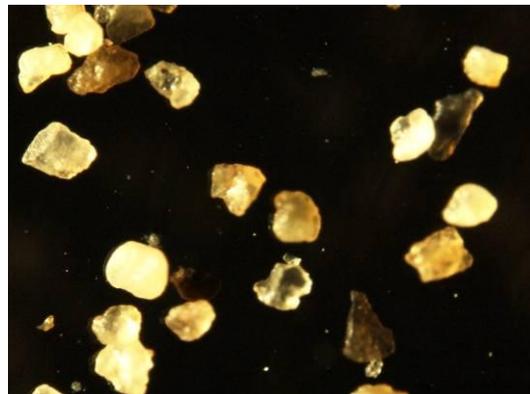
a S1 48 倍



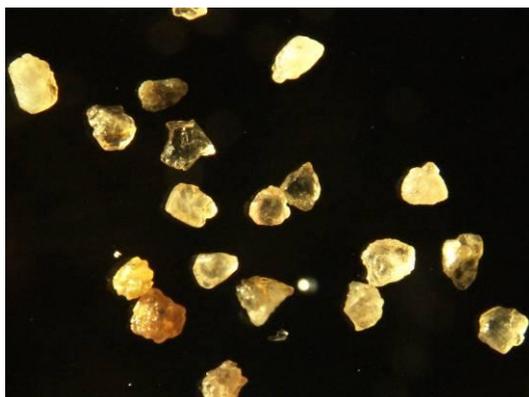
b S2 48 倍



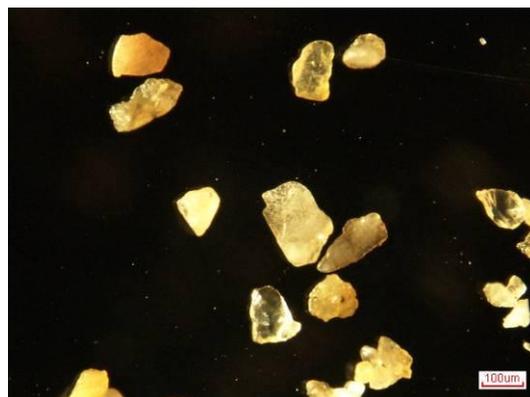
c S3 48 倍



d S4 48 倍



e S5 48 倍



f S6 48 倍

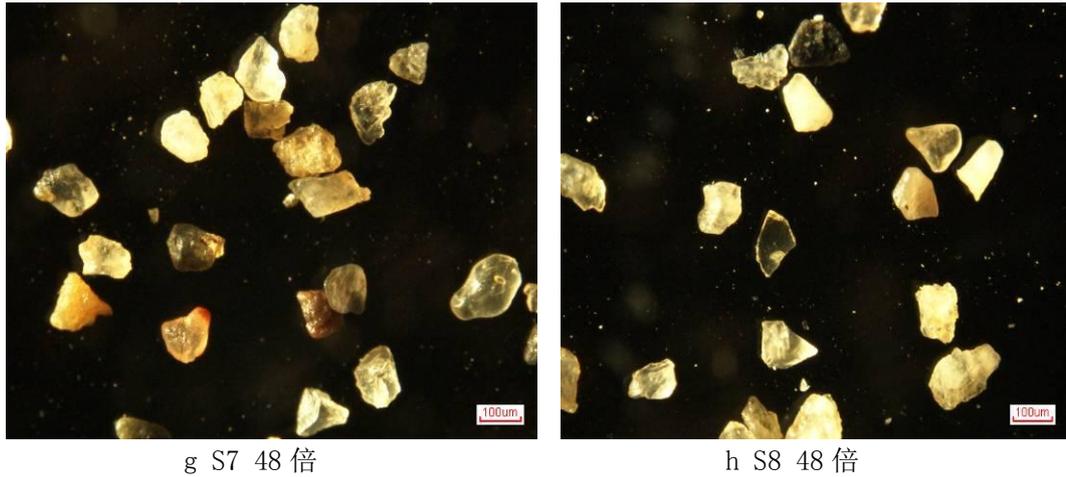


图 3-2 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig.3-2 The sand particle size is between 0.125-0.3mm

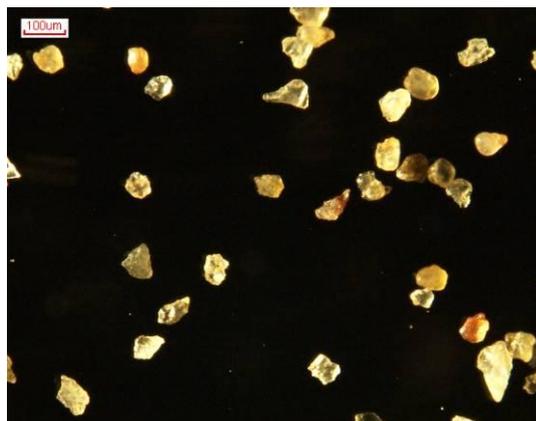
图 3-2 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍，大多数沙粒表面磨蚀痕迹不明显，表面凸凹不平，带有尖锐的棱角，只有少数沙粒表面光滑，磨蚀明显，这和沙粒传输距离远近及组成物质有很大关系。沙粒的颜色有无色透明状、黄色、红色、黑色、褐色等存在。沙粒形状复杂多样，多为不规则的多边形、圆形、椭圆形、条形等存在。沙粒圆度分布如表 3-1 所示，圆度值在 0.7-1.0 之间，比例最高的是圆度在 0.8-0.9 之间，各个采样点所占比例除了 526km 处的样品外其他都占了 70% 以上。最多的是 86.7%，最少的是 66.67%。圆度在 0.9-1.0 之间的比例是 526km 处的沙样最高达到 28.89%，最低的是 121km 处的沙样只占了 7.89%。整体上从圆度在 0.8-1.0 之间看，圆度除了 461km 处，其他都在 90% 以上，最好的是 311km 处的沙样，最差的是 461km 处的沙样。

表 3-1 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒圆度分布比率 (%)

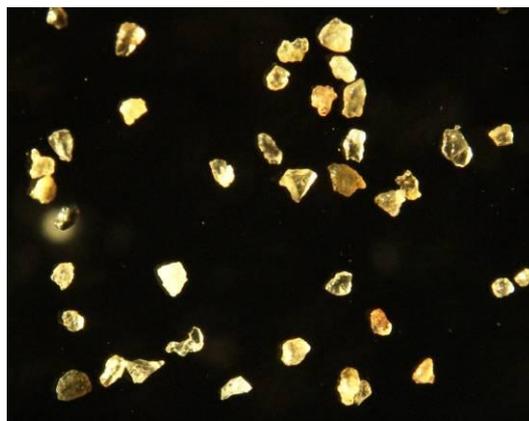
Tab. 3-1 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
0.7-0.8	4.44	11.11	3.33	4.88	7.89	15	9.68	5.41
0.8-0.9	66.67	72.22	73.34	75.61	73.69	72.5	80.64	86.7
0.9-1.0	28.89	16.67	23.33	19.51	18.42	12.5	9.68	7.89

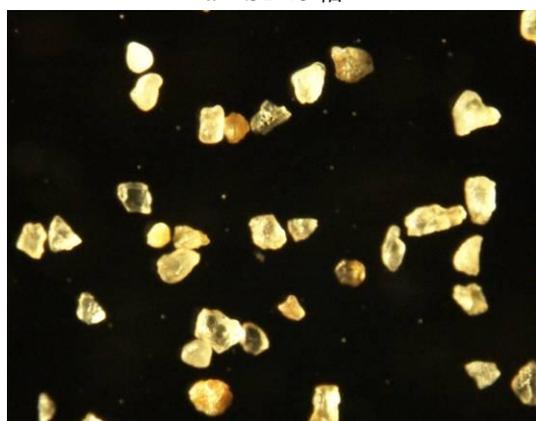
3.2.2 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌特征



a S1 48 倍



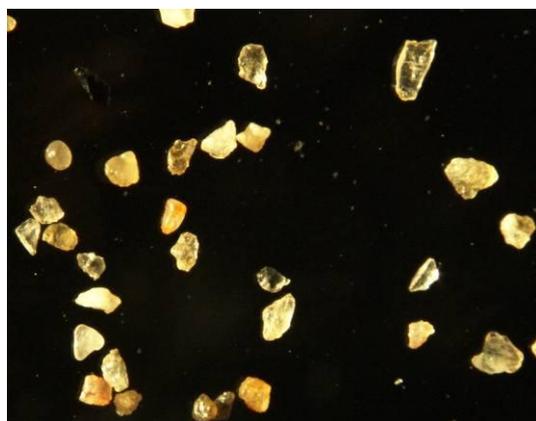
b S2 48 倍



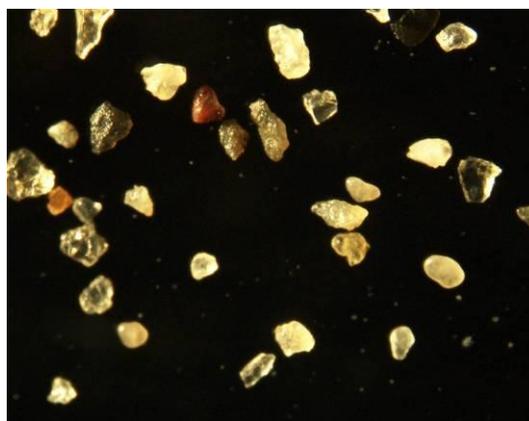
c S3 48 倍



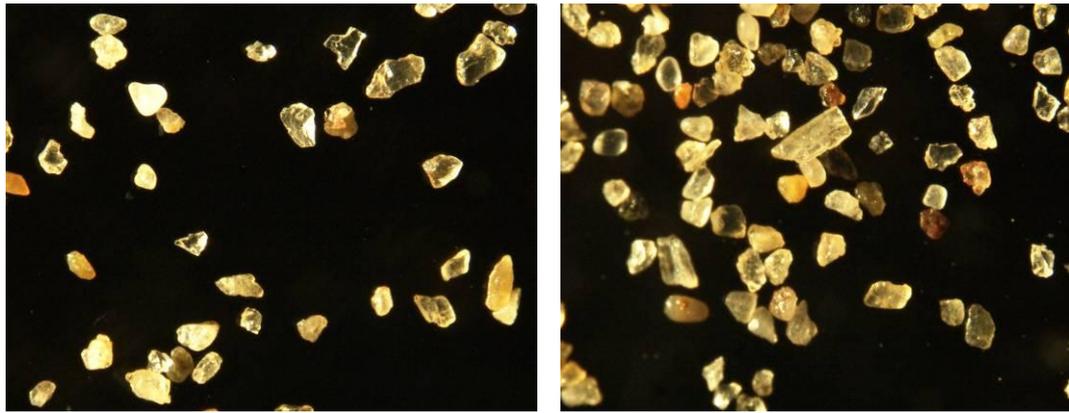
d S4 48 倍



e S5 48 倍



f S6 48 倍



g S7 48倍

h S8 48倍

图 3-3 粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig. 3-3 The sand particle size is between 0.15-0.3mm

图 3-3 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍，从图中看出，多数沙粒的表面磨蚀痕迹不明显，表面凸凹不平，尖锐棱角较多，由于沙粒较小，传输过程中颗粒间的碰撞摩擦力较小，所以表面的磨蚀不是很明显。沙粒颜色以无色透明状为主，间有黄色、红色、褐色等颜色沙粒存在。沙粒形状复杂多样，有不规则的圆形、椭圆形、条形、三角形等形状的沙粒存在。接近圆形的沙粒比例较高，如表 3-2 所示：圆度在 0.9-1.0 之间的沙粒比例稍高，最高达到 36.67%，是沙漠公路 160 公里处的沙样，还有几个点的沙样也是在 30%以上，分别是沙漠公路 526km、461km、210km 处，还有 235km、121km 处比例分别占了 26.83%和 28.21%。最差的是 311km、260km 处的沙样比例分别占到了 15.63%和 19.23%。这几个圆度值区间中 0.8-0.9 之间比例是最高的，全部在 50%以上，最高的是 260km 处的沙样比例占到了 76.92%，还有 311km 和 235km 处的沙样比例也在 70%以上，分别是 74.99%和 70.73%，再有就是 461km、210km 和 121km 公里处的沙样比例都在 60%以上，分别是 61.77%、64.45%和 61.53%。另外就是 0.5-0.8 之间的沙粒比例也有分布，但比例都比较小。

表 3-2 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布比率

Tab. 3-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
0.5-0.7	1.54			3.85				2.56
0.7-0.8	6.15	5.88	9.38		2.44	2.22	6.67	10.26
0.8-0.9	56.93	61.77	74.99	76.92	70.73	64.45	56.66	61.53
0.9-1.0	35.38	32.35	15.63	19.23	26.83	33.33	36.67	28.21

4 沙漠腹地沙丘沙粒特征分析

4.1 塔中电站低处新月型沙丘沙粒特征分析

4.1.1 沙粒粒径分布特征

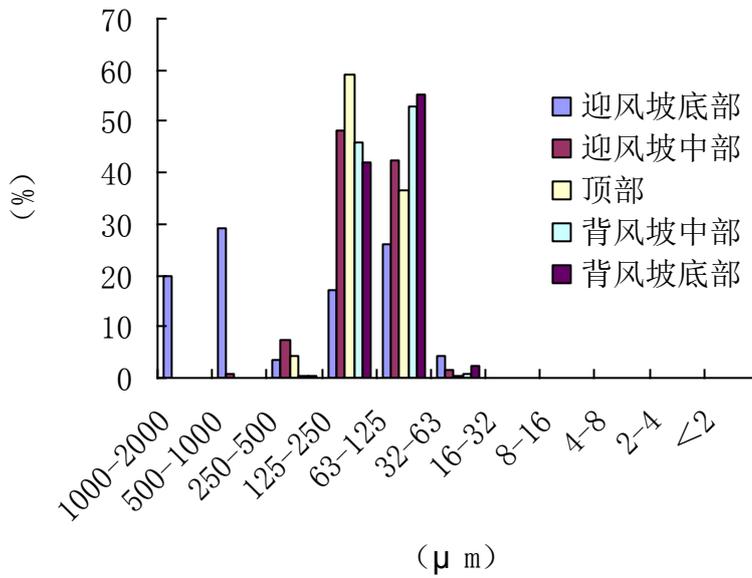


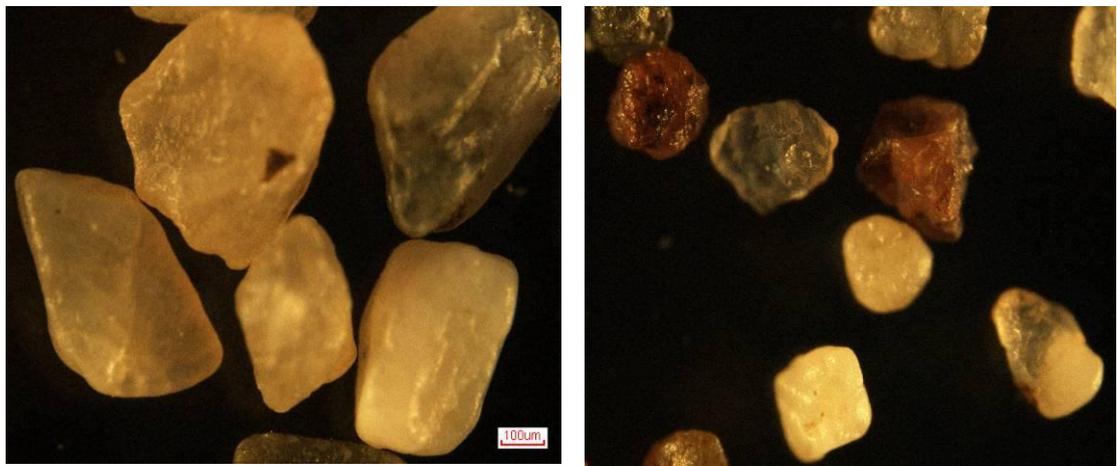
图 4-1 沙丘不同部位沙粒粒径分布

Fig. 4-1 The particle size distribution of san from different parts of sand dunes

从图中可以看出：沙丘不同部位沙粒粒径的分布特征不同，迎风坡底部的沙粒中粒径在 500-1000 μm 之间的粗沙和粒径在 63-125 μm 之间的极细沙比例最高，沙丘其它部位的沙粒粒径分布集中在 32-500 μm 之间，有粉砂、极细沙、细沙、中沙。迎风坡中部粒径在 125-250 μm 之间的细沙粒比例最高，背风坡底部和中部粒径在 63-125 μm 之间沙粒比例最高。

4.1.2 不同粒径沙粒微观形貌特征分析

(1) 粒径大于 0.3mm 沙粒微观形



a 迎风坡底部 48 倍

b 迎风坡中部 48 倍

图 4-2 粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig.4-2 The sand particle size is above 0.3mm

图 4-2 是沙丘表面粒径大于 0.3mm 的沙粒显微图像，放大倍数为 48 倍，从沙粒放大后的图像可以看出沙粒的表面比较光滑，没有尖锐的棱角，说明沙粒经历了外力的磨蚀作用。由于塔克拉玛干沙漠的沙丘属于流动沙丘，沙丘表面的沙粒也是流动的，尤其是风沙活动频繁的春夏季节。沙丘表面的沙粒在运动的过程中相互之间碰撞产生的摩擦力对沙粒表面的棱角形成磨蚀作用，长时间的磨蚀就使得沙粒表面越来越光滑。沙粒粒径越大，运动过程中产生的冲撞摩擦力越大，对沙粒表面的磨蚀越明显。

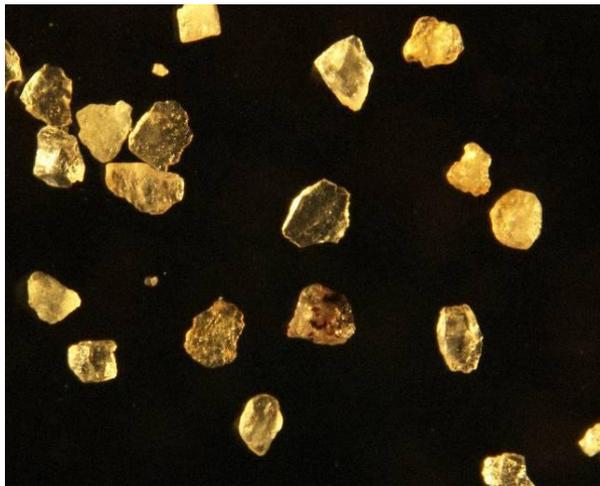
表 4-1 粒径大于 0.3mm 的沙粒圆度分布

Tab.4-1 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

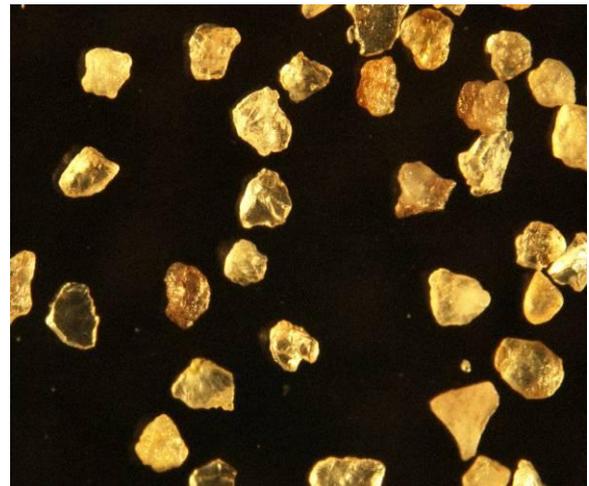
圆度值	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	5.88	25.71
0.8-0.9	85.3	71.43
0.9-1.0	8.82	2.86

表 4-1 是粒径大于 0.3mm 的沙粒圆度分布，在塔中车站低处沙丘所取的沙样中只有沙丘的迎风坡中部和底部存在粒径大于 0.3mm 的沙粒，从表中看出，迎风坡底部表面的沙粒圆度稍好一点，有 94.12% 的沙粒圆度值在 0.8-1.0 之间，而迎风坡中部沙粒圆度值稍差，25.71% 的沙粒圆度值在 0.7-0.8 之间，圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒占到了 74.29%。

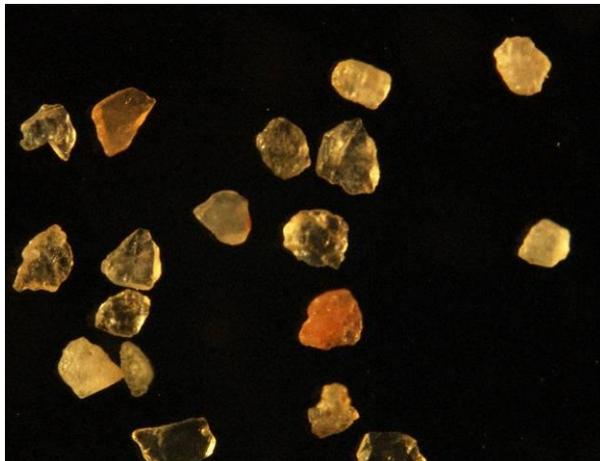
(2)粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒微观形貌



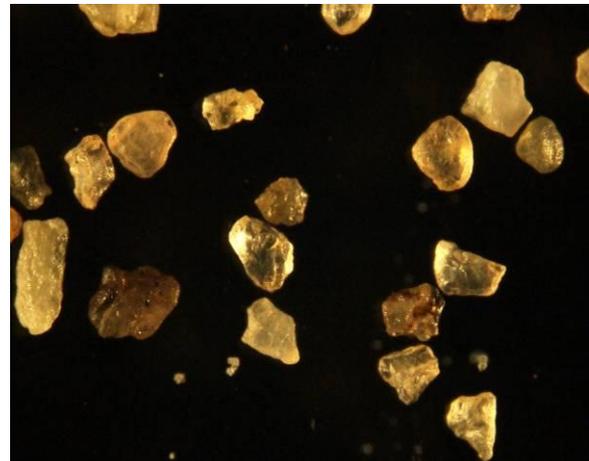
a 背风坡底部 48 倍



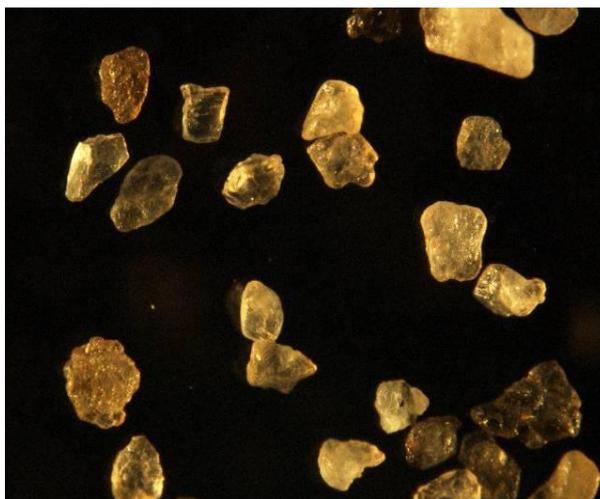
b 背风坡中部 48 倍



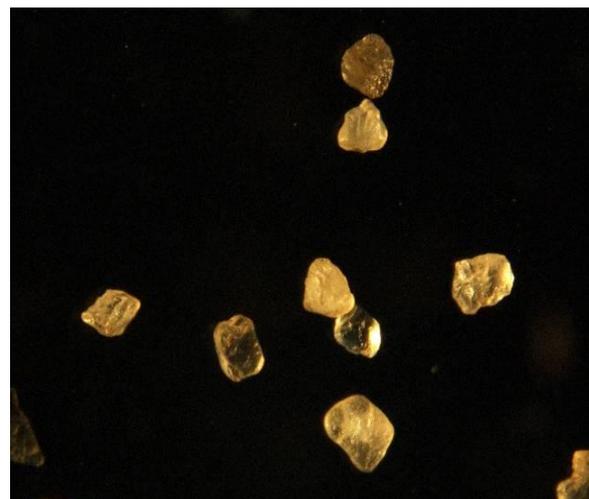
c 顶部 48 倍



d 迎风坡底部 48 倍



e 迎风坡中部 48 倍



f 迎风坡中部 48 倍

图 4-3 沙丘不同部位粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig.4-3 The sand particle size is between 0.125-0.3mm from different position of dune

图 4-3 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数是 48 倍，沙

粒分散，没有粘土物质。沙粒表面的磨蚀较轻，棱角比大于 0.3mm 的沙粒明显。颜色变化不大，基本还是透明的水晶色，黄色，红色，黑色等。沙粒还是一透明的为主，半透明和不透明的沙粒较少，沙粒形状复杂，多数沙粒接近于圆形，也有少数的沙粒是长条形的，还有个别的沙粒尖角特别明显，呈三角形。

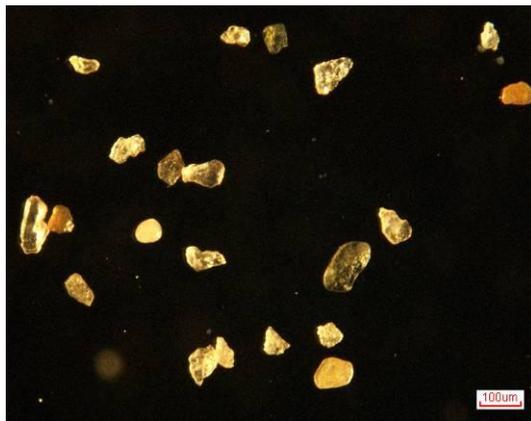
表 4-2 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

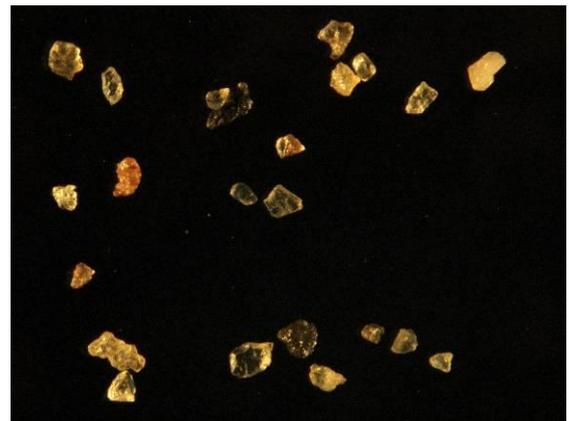
圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	5	10.26	6.67	3.03	6.06
0.8-0.9	80	69.23	70	75.76	84.85
0.9-1.0	15	20.51	23.33	21.21	9.09

表 4-2 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布情况，沙丘不同部位沙粒圆度分布有所差异，除了背风坡中部沙粒圆度在 0.7-0.8 之间的占到 10% 以上之外，其他都低于 10%，背风坡底部和迎风坡底部沙粒圆度较好，圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒分别占到了 95% 和 96.97%。背风坡中部、迎风坡底部和沙丘顶部的沙样圆度值在 0.9-1.0 之间的比例较高，都在 20% 以上。

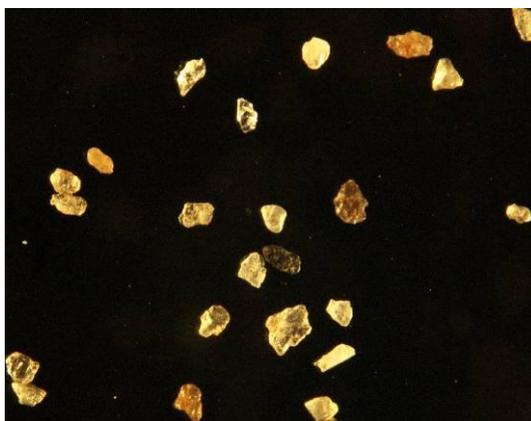
(3) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒微观形貌特征



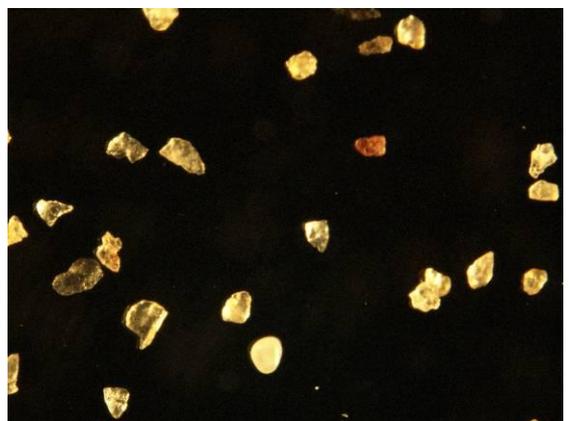
a 背风坡底部 48 倍



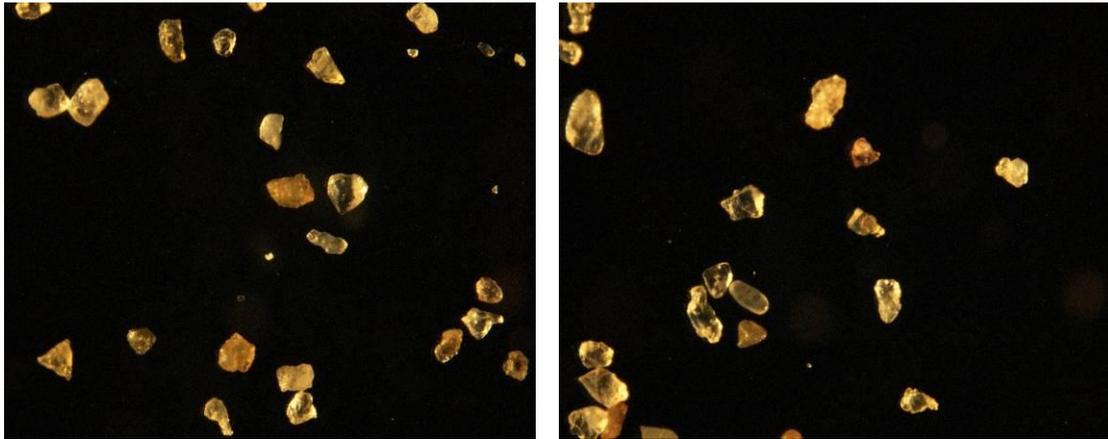
b 背风坡中部 48 倍



c 顶部 48 倍



d 迎风坡底部 48 倍



e 迎风坡中部 48 倍

f 迎风坡中部 48 倍

图 4-4 沙丘不同部位粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig.4-4 The sand particle size is between 0.074-0.125mm from different position of dune

图 4-4 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数是 48 倍，从图中看出带有尖锐棱角的沙粒较多，沙粒表面不够光滑，磨蚀作用不明显，形状复杂，有锥形、三角形、椭圆形、条形、多边形等，颜色基本还是以透明的水晶色、黄色、红色、黑色等为主。

表 4-3 显示的是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布情况，从表中看出沙粒圆度在 0.7-1.0 之间，0.8-0.9 之间所占比例最高。沙丘不同部位沙样的圆度不同，圆度较好的是背风坡底部，圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒占 90% 以上，其他四个部位的圆度分布相差不大，都在 80% 到 90% 之间。

表 4-3 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-3 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	4.88	12.5	14.63	10.26	12.12
0.8-0.9	78.05	50	68.3	61.53	69.7
0.9-1.0	17.07	37.5	17.07	28.21	18.18

4.2 塔中电站高远处沙丘沙粒特征

4.2.1 沙粒粒径特征

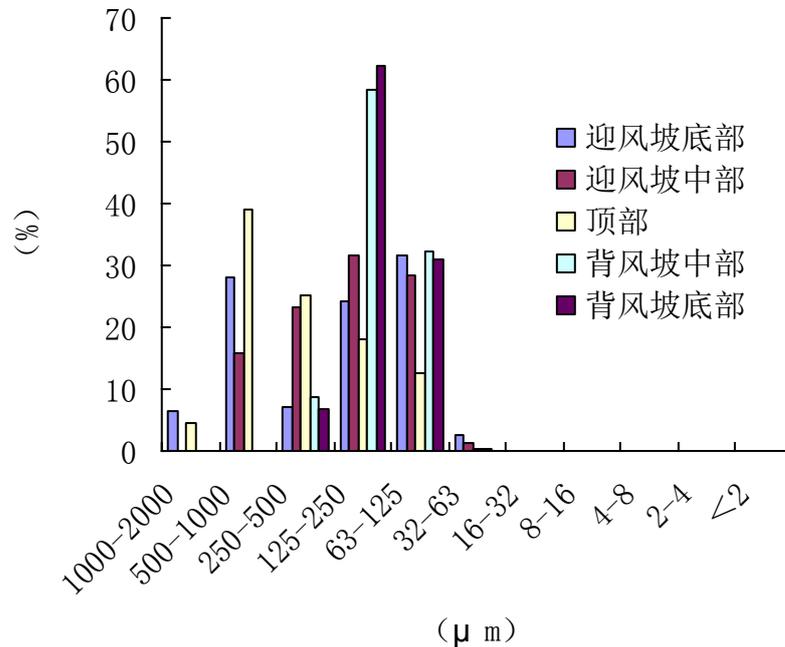


图 4-5 沙丘不同部位沙粒粒径分布特征

Fig.4-5 The particle size distribution of san from different parts of sand dunes

从图 4-5 中看出：沙丘迎风坡的沙粒粒径比背风坡偏粗，迎风坡底部沙粒中以 63-125 μm 之间的极细沙所占比例最高，500-1000 μm 之间的粗沙次之；沙丘顶部沙粒粒径在 500-1000 μm 之间的粗沙比例最高，250-500 之间的中沙次之；迎风坡中部、背风坡底部和中部沙粒粒径在 125-250 μm 之间的细沙比例最高。

图 4-6 粒径大于 0.3mm 沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。从图中看出沙粒表面有明显的磨蚀痕迹，说明沙粒在传输的过程中受到的外力作用比较明显，沙颗粒之间发生了碰撞摩擦使得沙粒的表面变得光滑。颗粒越大碰撞摩擦力越大，表面磨蚀越明显，另外还和沙粒的传输距离有关，传输距离越远沙粒表面的磨蚀也会越明显，再有就是沙粒的物质组成成分不同抗击外力的碰撞磨蚀的能力也不一样。沙粒的形状不一，圆形、条形、方形等都有，背风坡中部的沙粒里面接近圆形的较多。

4.2.2 不同粒径沙粒微观形貌特征

(1) 粒径在 0.3mm 以上沙粒的微观形貌特征

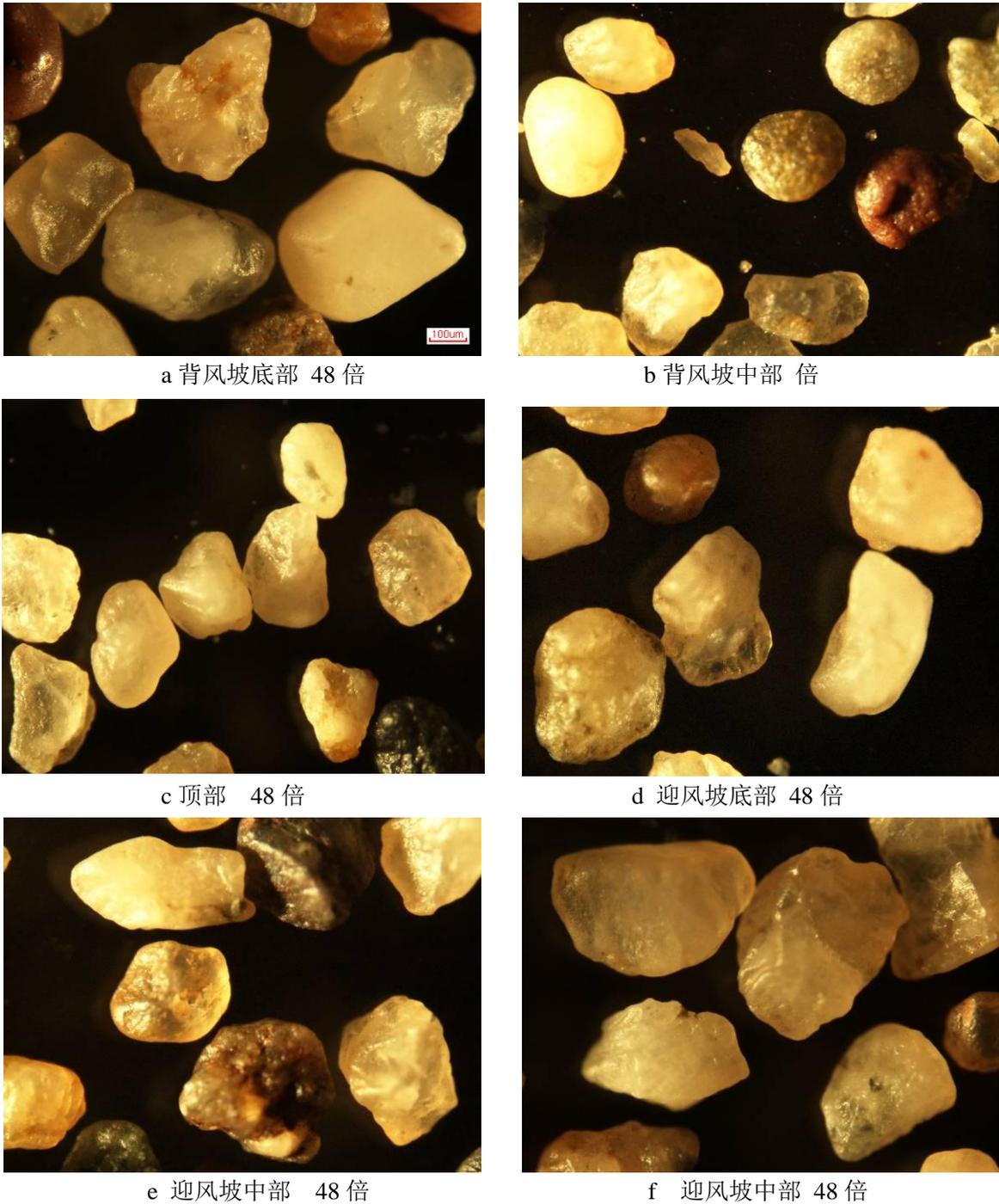


图 4-6 粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig.4-6 The sand particle size is above 0.3mm

从表 4-4 中可以看出，圆度值在 0.9-1.0 之间的沙粒占到了 23.53%。颜色有透明的白色、黄色、黑色等，也有褐色和灰色的沙粒存在，只是数量较少。粒径大于 0.3mm 的沙粒的圆度如下表所示，沙粒的圆度在 0.7-1.0 之间均有分布，

0.8-0.9 之间比例最高。就沙丘不同部位来说，圆度最好的是背风坡底部，迎风坡底部、迎风坡中部、顶部次之，背风坡中部最差。圆度在 0.8-0.9 之间分布情况是迎风坡底部比例最高，背风坡中部所占比例最低。圆度在 0.9-1.0 之间沙粒的分布情况是背风坡中部比例最高，沙粒圆度最好。这和上图中显微图像显示的一致，接近圆形的沙粒较多。其次是沙丘顶部占到 16.67%，背风坡底部占 11.76%，迎风坡中部占 6.67%，最差的是迎风坡底部只占到 3.45%。

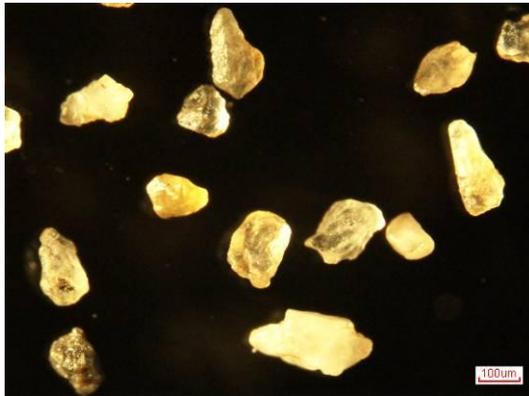
表 4-4 粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度分布

Tab.4-4 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

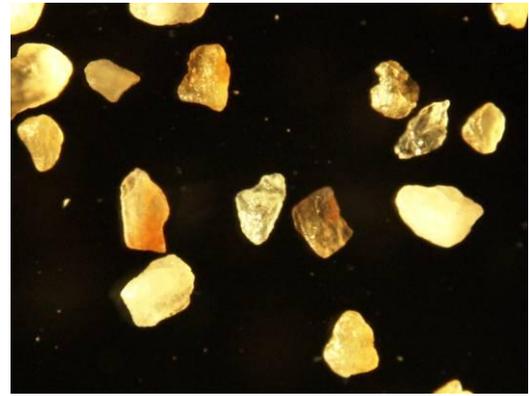
圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8		8.82	3.33	2.9	3.33
0.8-0.9	88.24	67.65	80	93.65	90
0.9-1.0	11.76	23.53	16.67	3.45	6.67

(2) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征

图 4-7 显示的是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数是 48 倍，沙粒的形状不一，有三角形，近似圆形，条形，椭圆形，多边形，还有一些不规则的形状等。透明度好的沙粒依然是主体，但还有少数不透明沙粒存在，颜色有透明的白色，半透明的黄色和不透明的黑色、灰色等。沙粒表面有轻微的磨蚀痕迹，不同的沙粒表面的磨蚀程度不同，透明度好的沙粒表面的磨蚀整体上稍差，而其他的沙粒表面磨蚀效果稍微明显。磨蚀强度和沙粒的质的、粒径的大小及沙粒的运输距离的远近等有密切的关系。



a 背风坡底部 48 倍



b 背风坡中部 48 倍

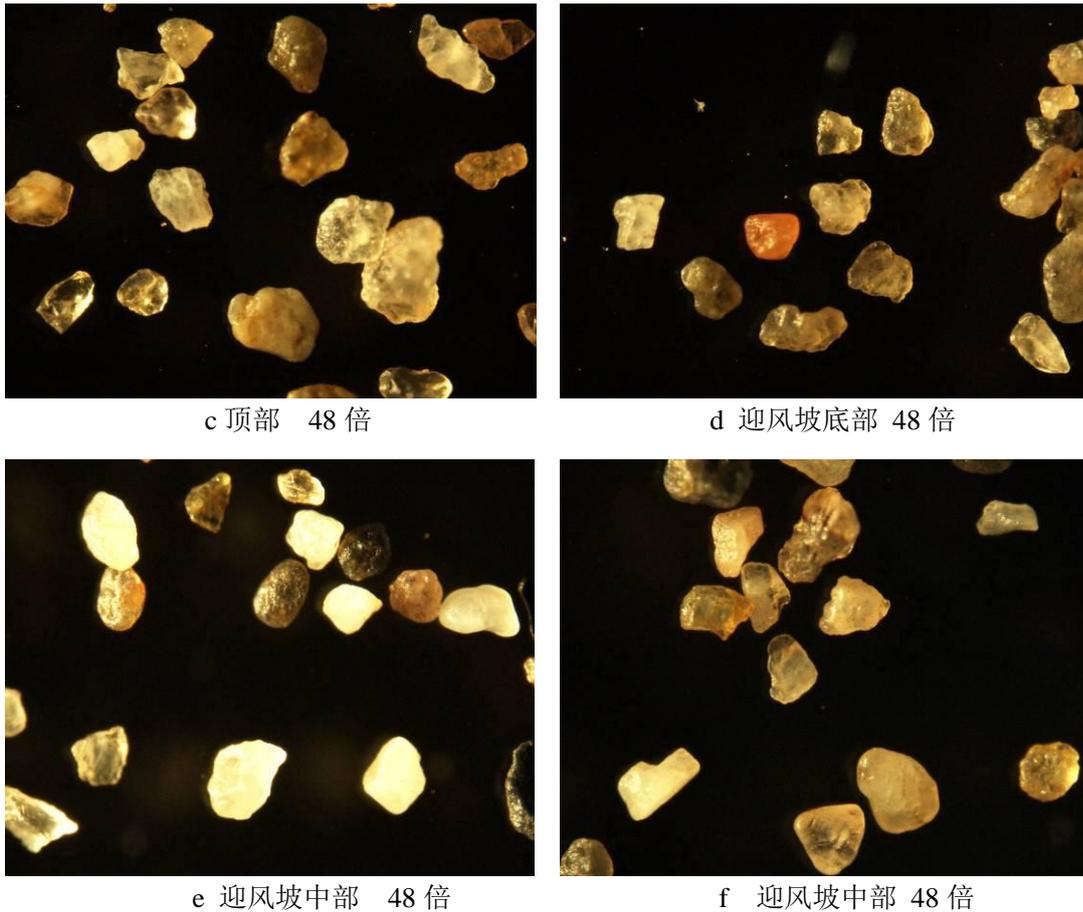


图 4-7 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig.4-7 The sand particle size between 0.125-0.3mm

表 4-5 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布情况，沙丘不同部位的沙粒的圆度分布不均。从表中看沙丘各部位中背风坡底部的圆度最好，沙粒圆度值全部在 0.8-1.0 之间，有 25%的沙粒圆度在 0.8-0.9 之间。另外 75%的沙粒圆度在 0.9-1.0 之间。迎风坡底部的沙粒圆度值分布最为分散，0.6-0.7 之间均有分布。沙丘其他三个部位的沙粒圆度都在 0.7-1.0 之间。但是不同圆度区间沙丘各个部位沙粒所占比例不同，迎风坡底部占 32.26%，其次是背风坡底部占 25%，背风坡中部最少，占 12.12%。而圆度在 0.8-0.9 之间的情况是背风坡中部最多，占 84.85%，其次是迎风坡中部，占 80%，最少的是迎风坡底部，占 61.28%。

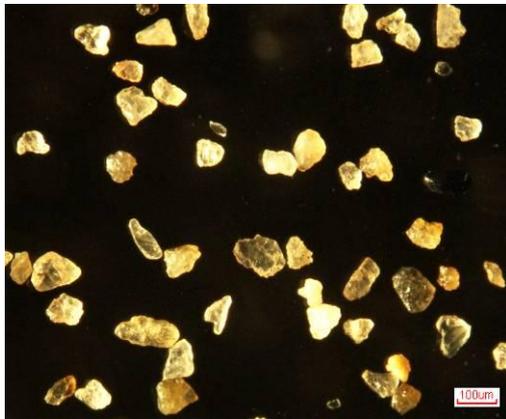
表 4-5 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

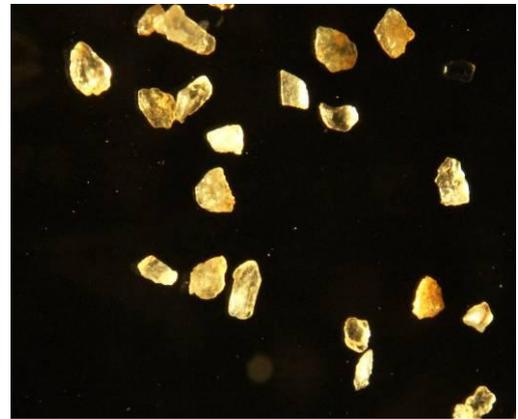
圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.6-0.7				3.23	
0.7-0.8		3.03	3.03	3.23	5
0.8-0.9	75	84.85	72.73	61.28	80
0.9-1.0	25	12.12	24.24	32.26	15

(3)粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌

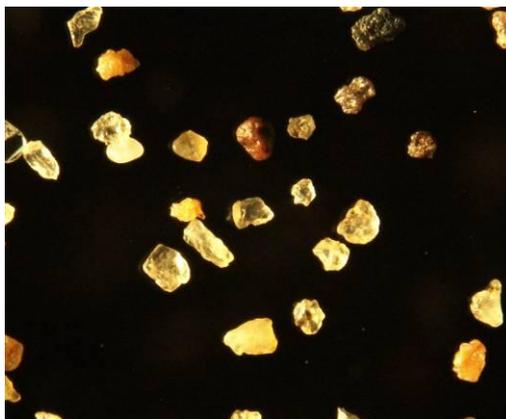
图 4-8 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。形状复杂，多为形状不规则的沙粒。表面磨蚀不明显，棱角较多。主要是透明度好的沙粒，也有少数的半透明和不透明沙粒存在。颜色有白色、黄色、红色、黑色等。表 4-6 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布情况，从表中看出沙粒的圆度值分布在 0.7-1.0 之间，但就不同圆度值区间的沙粒分布存在差异。圆度值在 0.7-0.8 区间范围情况是沙丘的迎风坡中部占的比例稍高，达到 6.82%，其他部位的比例都在 3% 左右，差别不大。圆度值在 0.8-0.9 区间范围的情况是背风坡中部和底部的比例较高，分别占到 82.93% 和 81.58%。其他三个部位的沙粒圆度在这一区间的比例都在 64% 左右，变化不大。圆度值在 0.9-1.0 区间范围的情况是迎风坡中部、底部和沙丘顶部沙粒的比例较高，大约在 30% 左右，而背风坡中部和底部沙粒所占比例偏低，占到约 15%。



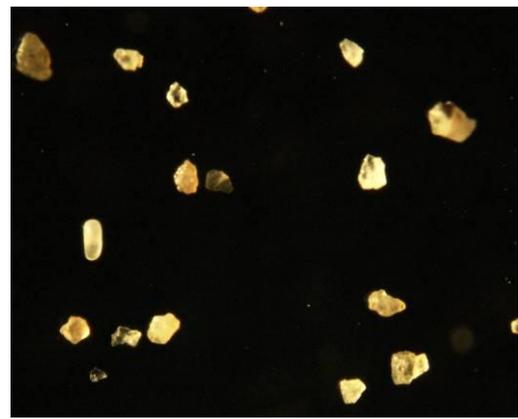
a 背风坡底部 48 倍



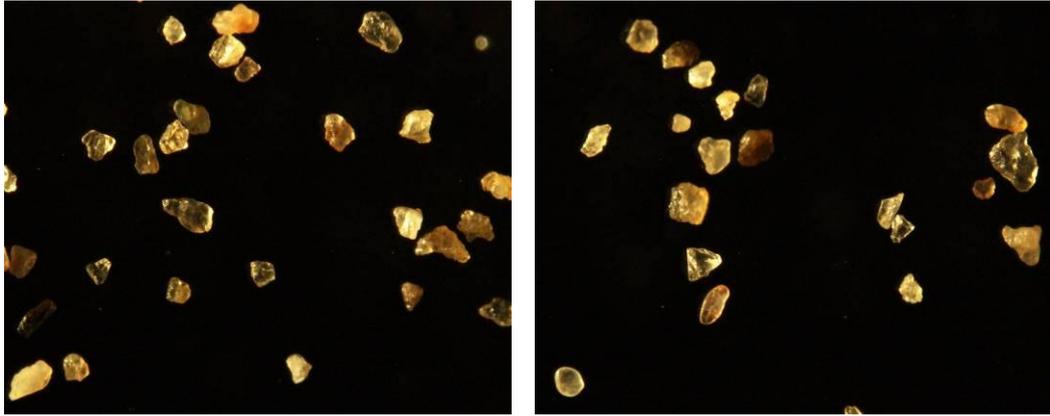
b 背风坡中部 48 倍



c 顶部 48 倍



d 迎风坡底部 48 倍



e 迎风坡中部 48倍 f 迎风坡中部 48倍

图 4-8 沙丘不同部位粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig.4-8 The sand particle size is between 0.074-0.125mm from different position of dune

表 4-6 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	2.44	2.63	3.23	3.23	6.82
0.8-0.9	82.93	81.58	64.51	64.51	63.63
0.9-1.0	14.63	15.79	32.26	32.26	29.55

4.3 塔中西站高处沙丘沙粒特征

4.3.1 沙粒的粒径分布特征

从图 4-9 中可以看出：粒径在 500-1000 μm 区间范围内只有背风坡底部和迎风坡底部存在这一粒径范围的沙粒，就粒径在 250-500 μm 区间范围来看，背风坡底部和迎风坡底部所占比例较大，分别占 32.76% 和 27.29%，沙丘其他部位沙粒相对较细，以细沙和极细沙为主，粗沙和中沙含量较少，粒径在 125-250 μm 之间的细沙比例最高的是沙丘顶部，占到了 65.04%，而粒径在 63-125 μm 之间的极细沙比例最高的是沙丘背风坡中部，占了 55.92%。

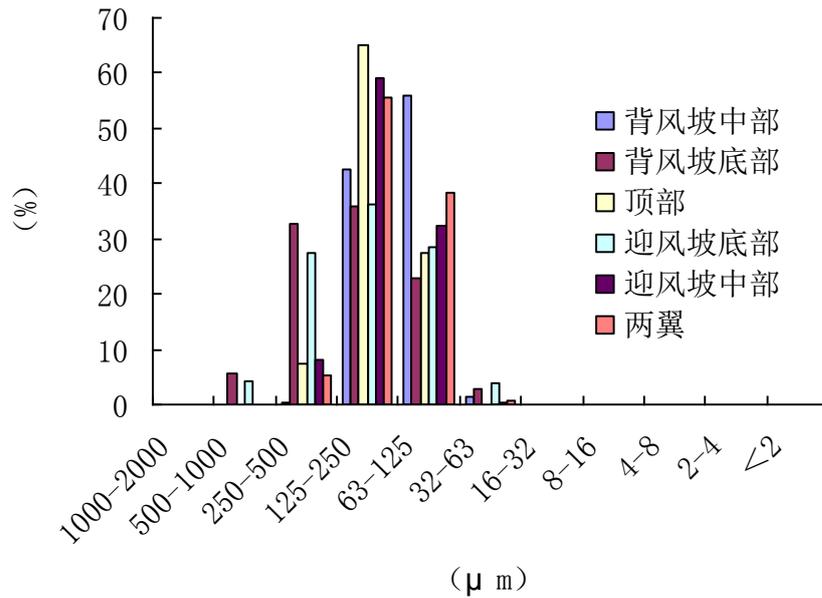


图 4-9 沙丘不同部位沙粒粒径特征

Fig.4-9 The particle size distribution of san from different parts of sand dunes

4.3.2 不同粒径沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径大于 0.3mm 沙粒的微观形貌特征

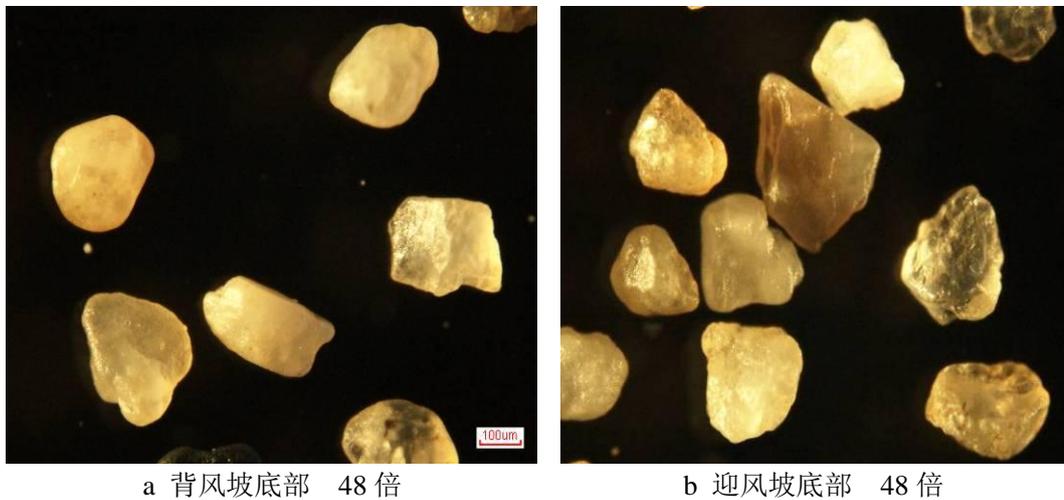


图 4-10 沙丘不同部位粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig.4-10 The sand particle size is above 0.3mm

图 4-10 是粒径大于 0.3mm 沙粒显微图像，放大倍数为 48 倍，沙粒表面尖锐棱角较少，有明显的磨蚀痕迹，形状多样，有近似圆形的，三角形的，四边形的，五边形的等不规则的形状。透明好的沙粒居多，也有少量的半透明和不透明沙粒存在。颜色有黄色、白色、褐色等，不过以白色和黄色为主。

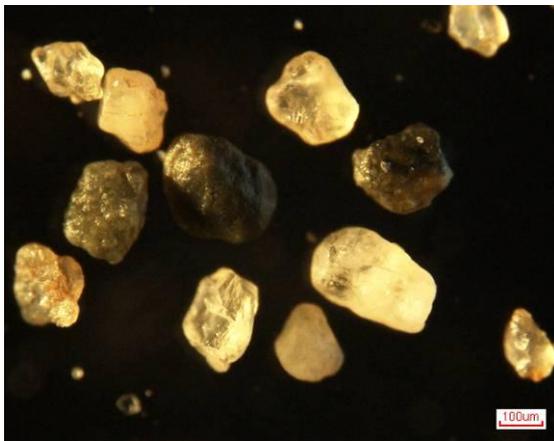
表 4-8 粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度值分布

Tab.4-8 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

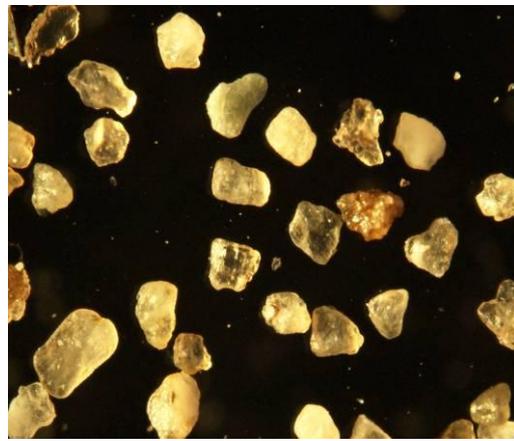
圆度值	背风坡底部	迎风坡底部
0.7-0.8	3.23	2.86
0.8-0.9	74.19	88.57
0.9-1.0	22.58	8.57

表 4-8 显示粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度分布，圆度值在 0.7-1.0 之间，圆度在 0.8-0.9 之间比例最高，但是迎风坡底部高于背风坡底部，占到 88.57%，而圆度在 0.9-1.0 之间的情况是背风坡底部高于迎风坡底部，占到了 22.58%，就 0.8-1.0 之间来说相差不大。

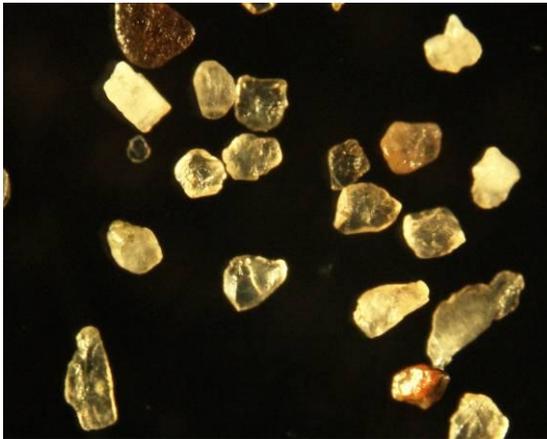
(2) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征



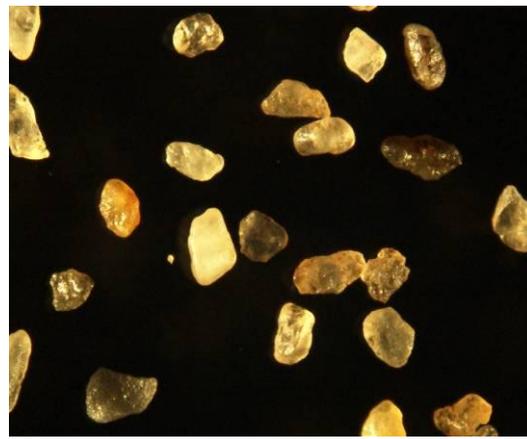
a 背风坡底部 48 倍



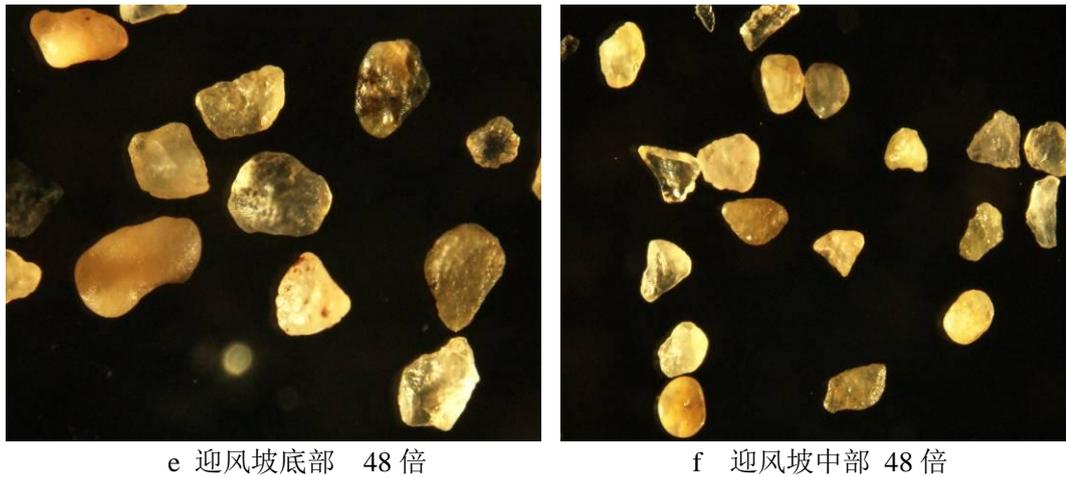
b 背风坡中部 48 倍



c 顶部 48 倍



d 两翼 48 倍



e 迎风坡底部 48 倍

f 迎风坡中部 48 倍

图 4-11 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig.4-11 The sand particle size between 0.125-0.3mm

图 4-11 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍，透明沙粒表面磨蚀作用不是很明显，其他的半透明和不透明沙粒表面的磨蚀作用较强，表面光滑，也有一些被磨蚀的近似圆形。沙粒颜色以无色透明、黄色居多，还有黑色、红色等颜色存在，沙粒形状复杂，有圆形，椭圆形、三角形、长条形、不规则多边形沙粒。表 4-9 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布，圆度值在 0.7-1.0 之间，沙丘不同部位的沙粒圆度值分布不同，就圆度值在 0.8-0.9 之间的情况来说，沙丘各部位的沙粒圆度在这一区间的比例最高，最高的是沙丘迎风坡底部，占到 83.34%，沙丘顶部最少，占 68.42%。圆度值在 0.9-1.0 之间的情况是沙丘迎风坡中部沙粒这一圆度区间所占比例最高达到 26.76%，迎风坡底部最低，占 14.58%，整体上来看背风坡底部的沙粒圆度最好，圆度值全部在 0.8-1.0 之间。迎风坡底部和迎风坡中部较好，大约有 98%左右的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间，背风坡中部、沙丘顶部和两翼沙粒圆度稍差，约 95%的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间。

表 4-9 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-9 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	两翼	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8		5.56	5.26	5.66	2.08	2.82
0.8-0.9	75.76	75	68.42	71.7	83.34	70.42
0.9-1.0	24.24	19.44	26.32	22.64	14.58	26.76

(3)粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌

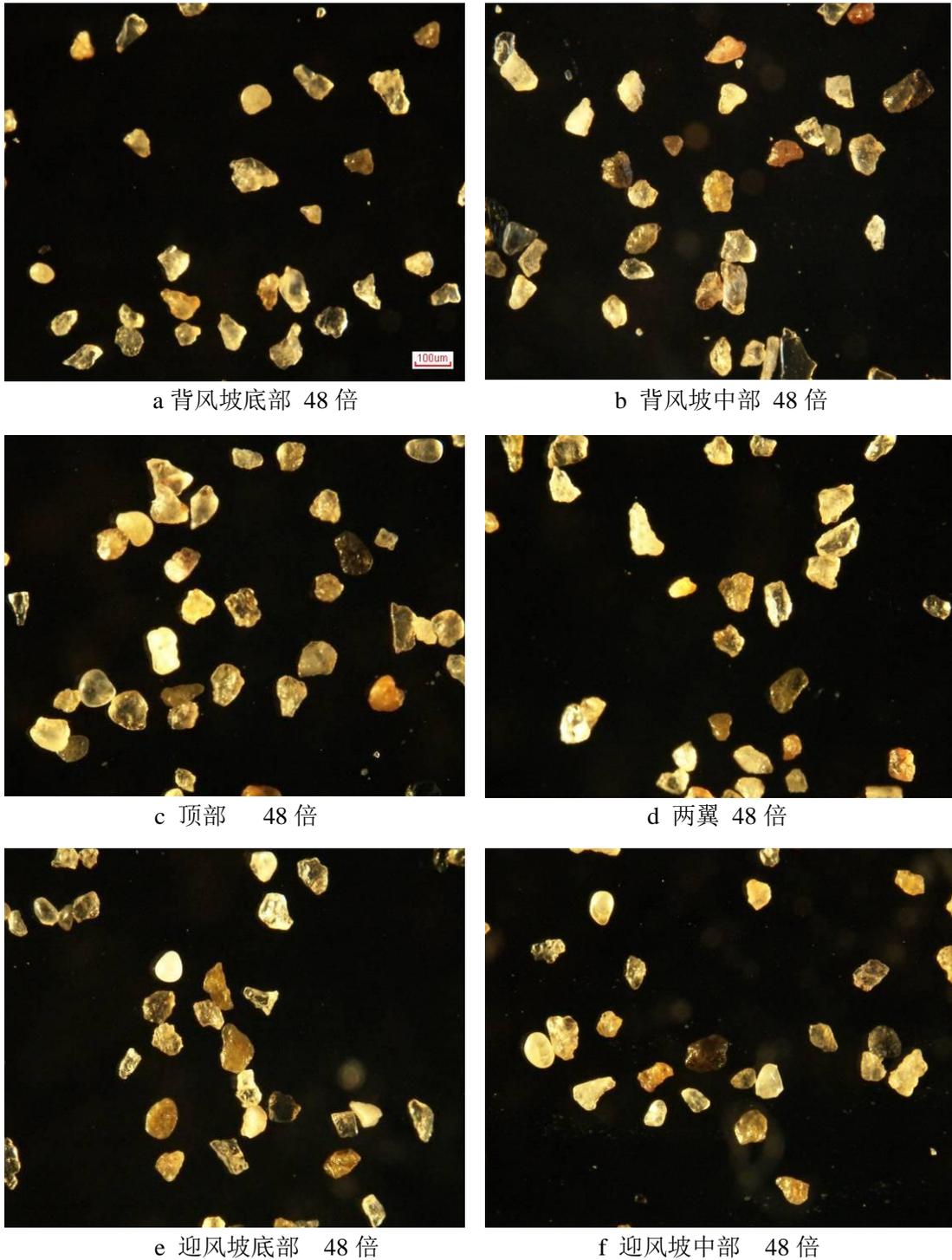


图 4-12 粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig.4-12 The sand particle size between 0.074-0.125mm

图 4-12 是粒径在 0.074-0.125mm 沙粒显微图像，放大倍数 48 倍，表面凸凹较多，磨蚀不明显，只有极个别沙粒的表面磨蚀显著。沙粒的颜色多为无色透明体，也有少量的黄色、黑色红色沙粒存在。图像显示沙丘顶部沙粒中条形沙粒较多，其次是背风坡中部也有一些条形沙粒存在，迎风坡中部和底部、背风

坡底部沙粒相对较圆，条形沙粒较少，这和表中显示的沙粒圆度值分布情况也是一致的。从表 4-10 中可以看出，无论是沙丘哪个部位的沙粒圆度值分布在 0.8-0.9 区间范围内的比例占的都是最多，其中比例占的最高的是沙丘的两翼沙粒圆度值在 0.8-0.9 之间的沙粒占到了 87.8%，比例最低的是沙丘迎风坡中部的沙粒圆度值在 0.8-0.9 之间的沙粒占了 62.16%。圆度值在 0.9-1.0 之间的情况是沙丘迎风坡中部占比最高达 29.73%，最低的是沙丘两翼沙粒占了仅仅 9.76%。整体上圆度较好的是沙丘两翼、背风坡底部、迎风坡底部和背风坡中部。圆度稍差的是沙丘的顶部和迎风坡中部。

表 4-10 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布比率

Tab.4-10 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	两翼	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	3.64	4.44	11.32	2.44	3.92	8.11
0.8-0.9	69.09	77.78	66.04	87.8	66.67	62.16
0.9-1.0	27.27	17.78	22.64	9.76	29.41	29.73

4.4 塔中丁字路口以北沙丘沙粒特征

4.4.1 沙粒的粒径分布

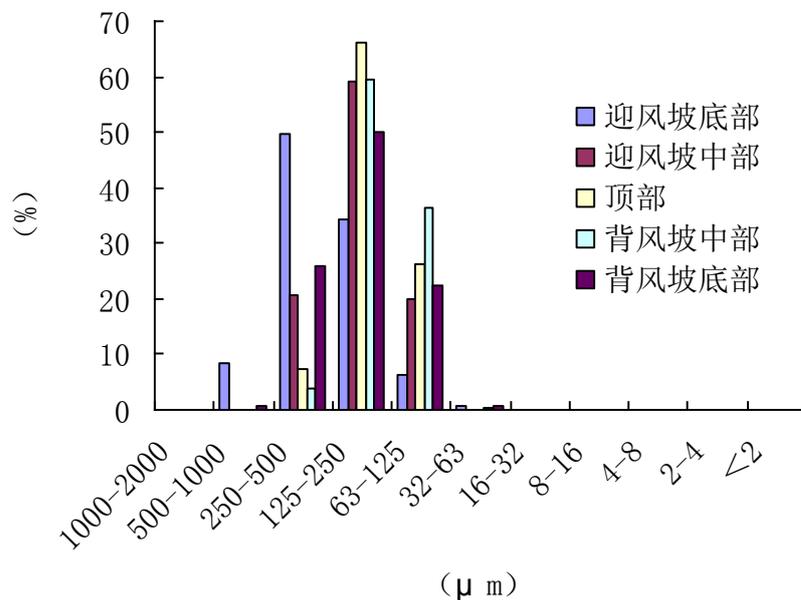


图 4-13 沙丘不同部位沙粒粒径分布

Fig.4-13 The particle size distribution of sand from different parts of sand dunes

从图 4-13 中可以看出：迎风坡沙粒与背风坡相比较粗，迎风坡底部沙粒中粒径在 250-500 μm 之间的中沙所占比例最高，沙丘其他部位的沙粒粒径在

125-250 μm 之间的细沙比例是最高的，沙丘顶部细沙比例是其中最高的，占到了 66.26%，其次是迎风坡中部和背风坡中部细沙占到近 60%。而背风坡底部细沙占了 50%。粒径在 63-125 μm 之间的极细沙沙丘个部位所占比例不同，背风坡中部的极细沙比例最高占了 36.36%，其次是沙丘顶部极细沙占 26.3%。63 μm 以下的沙粒很少，所以塔中丁字路口沙丘的沙粒多为中沙、细沙和极细沙。

4.4.2 沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径在 0.3mm 以上沙粒的微观形貌

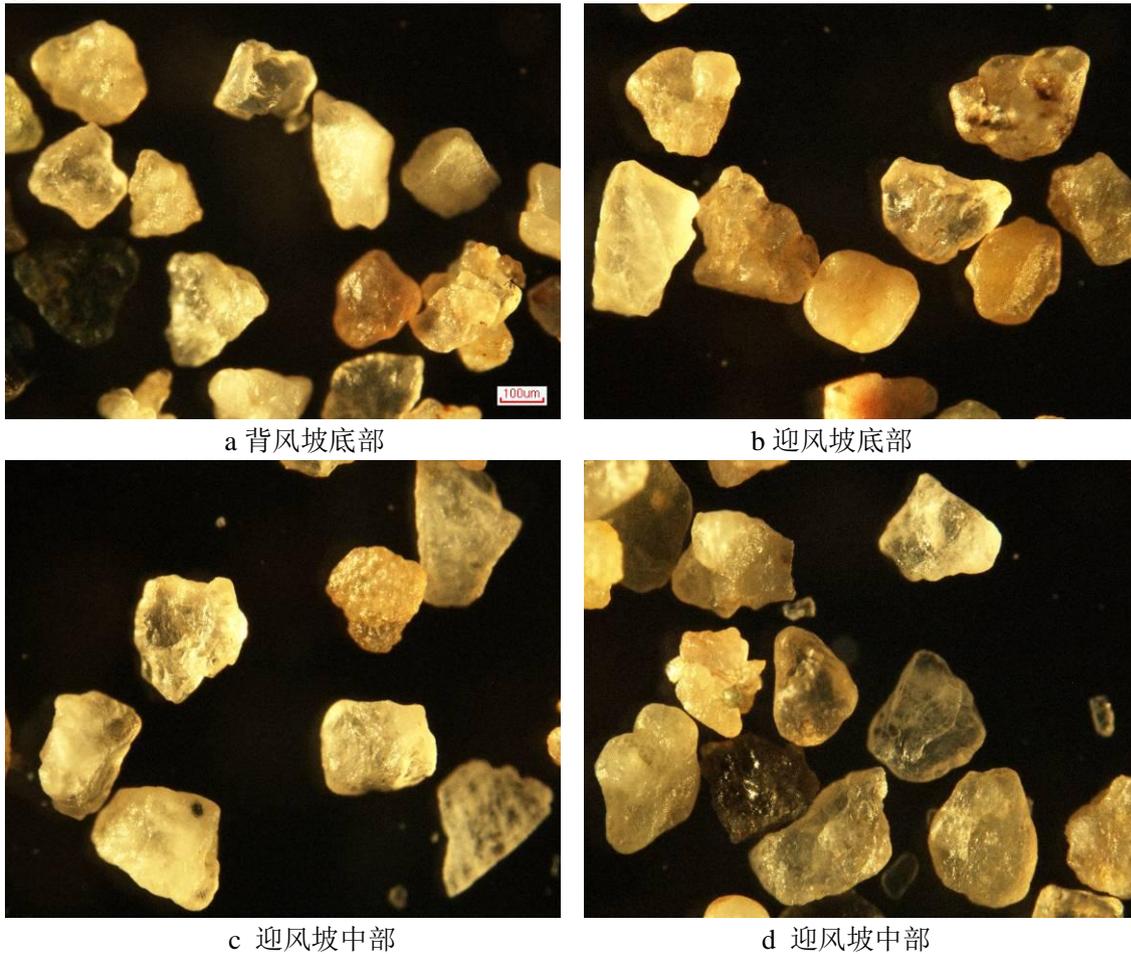


图 4-14 粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig.4-14 The sand particle size is above 0.3mm

图 4-14 是粒径大于 0.3mm 的沙粒显微图像，放大倍数为 48 数，从图中看出大多数沙粒表面比较粗糙，凸凹不平，磨蚀作用不明显。甚至个别沙粒存在尖锐棱角。沙粒颜色多为无色透明状，也有黄色、黑色、红色沙粒存在。沙粒形状复杂，不规则的多边形沙粒较多，有个别沙粒沿某一方向延伸的较多，出现尖锐棱角，只有少数沙粒的表面较为光滑，磨圆度较好。表 4-12 是粒径大于

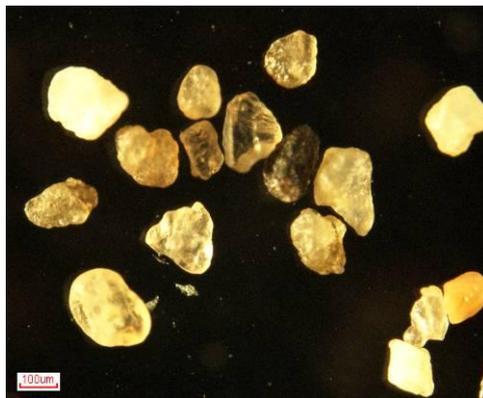
0.3mm 之间沙粒的圆度分布情况，塔中北部丁字路口的沙丘高出丘间低地约 50 米，整体上圆度较好的是迎风坡中部和背风坡底部约 90%的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间，而迎风坡底部沙粒圆度稍差，有 83.87%的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间，就圆度在 0.8-0.9 之间的情况看，背风坡底部沙粒所占比例最高，占到 86.67%，迎风坡底部所占比例最为 70.97%。圆度值在 0.9-1.0 之间的情况是沙丘迎风坡中部所占比例最高，达到 15.15%，沙丘背风坡底部所占比例最低为 3.33%。

表 4-12 粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度分布比率

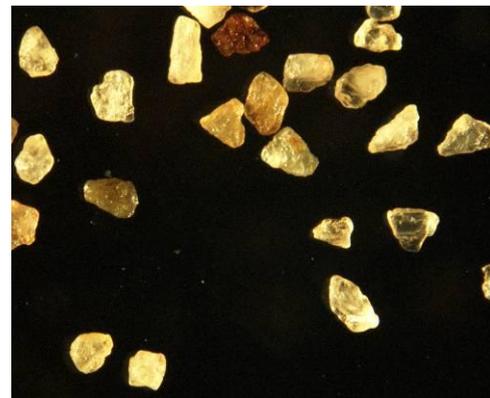
Tab.4-12 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

圆度值	背风坡底部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	10	16.13	9.09
0.8-0.9	86.67	70.97	75.76
0.9-1.0	3.33	12.9	15.15

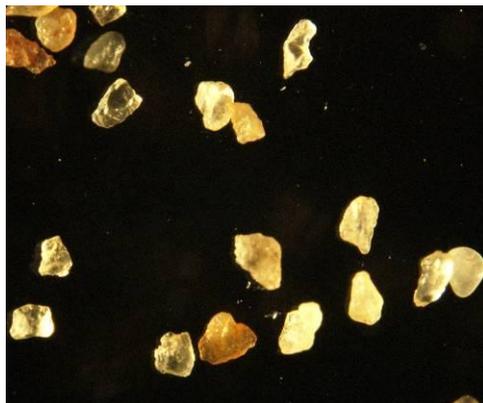
(2) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌



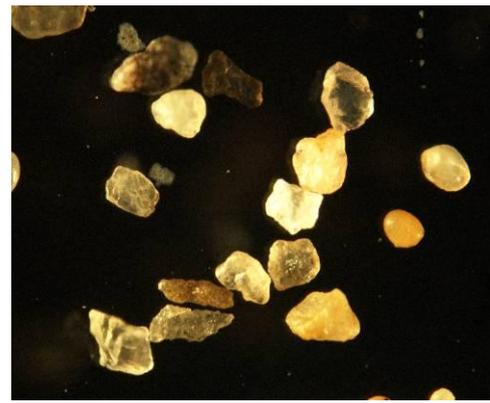
a 背风坡底部



b 背风坡中部



c 顶部



d 迎风坡底部

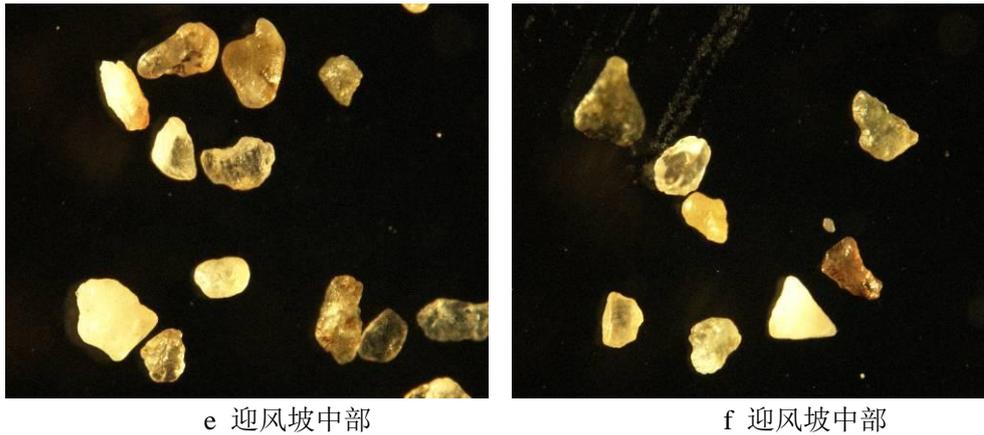


图 4-15 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒
Fig.4-7 The sand particle size between 0.125-0.3mm

图 4-15 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数是 48 倍，大多数沙粒表面有少许的磨蚀痕迹，棱角还是比较明显，极个别沙粒表面磨蚀明显，表面光滑，形状近似圆形。沙粒颜色有五色透明状，黄色、黑色、红色等，透明的沙粒较多，也有少量半透明和不透明沙粒存在，由于组成物质不同，沙粒在外力作用下磨蚀的程度也不尽相同。沙粒形状不一，复杂多样，尖锐棱角明显的沙粒增多，圆形、三角形、条形、不规则多边形沙粒均有存在。表 4-13 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布情况，沙粒的圆度值分布 0.6-1.0 之间。不同圆度区间范围内沙丘各个部位所占比例存在差异，从表中看出圆度值在 0.8-0.9 之间沙丘各部位沙粒所占比例最高，占比例最高的是沙丘背风坡底部，达到 78.11%，最低的是沙丘迎风坡中部占了 60.46%，而圆度值在 0.9-1.0 之间情况是沙丘顶部沙粒所占比例最高达到了 32.26%，说明沙丘顶部沙粒中接近圆形的沙粒最多。整体上看圆度较好的是沙丘背风坡底部的沙粒，圆度不好的是迎风坡中部的沙粒。

表 4-13 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布比率

Tab.4-13 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.6-0.7	3.13			2.7	2.33
0.7-0.8	3.13	8.33	6.45	10.81	13.95
0.8-0.9	78.11	72.23	61.29	72.98	60.46
0.9-1.0	15.63	19.44	32.26	13.51	23.26

(3) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌

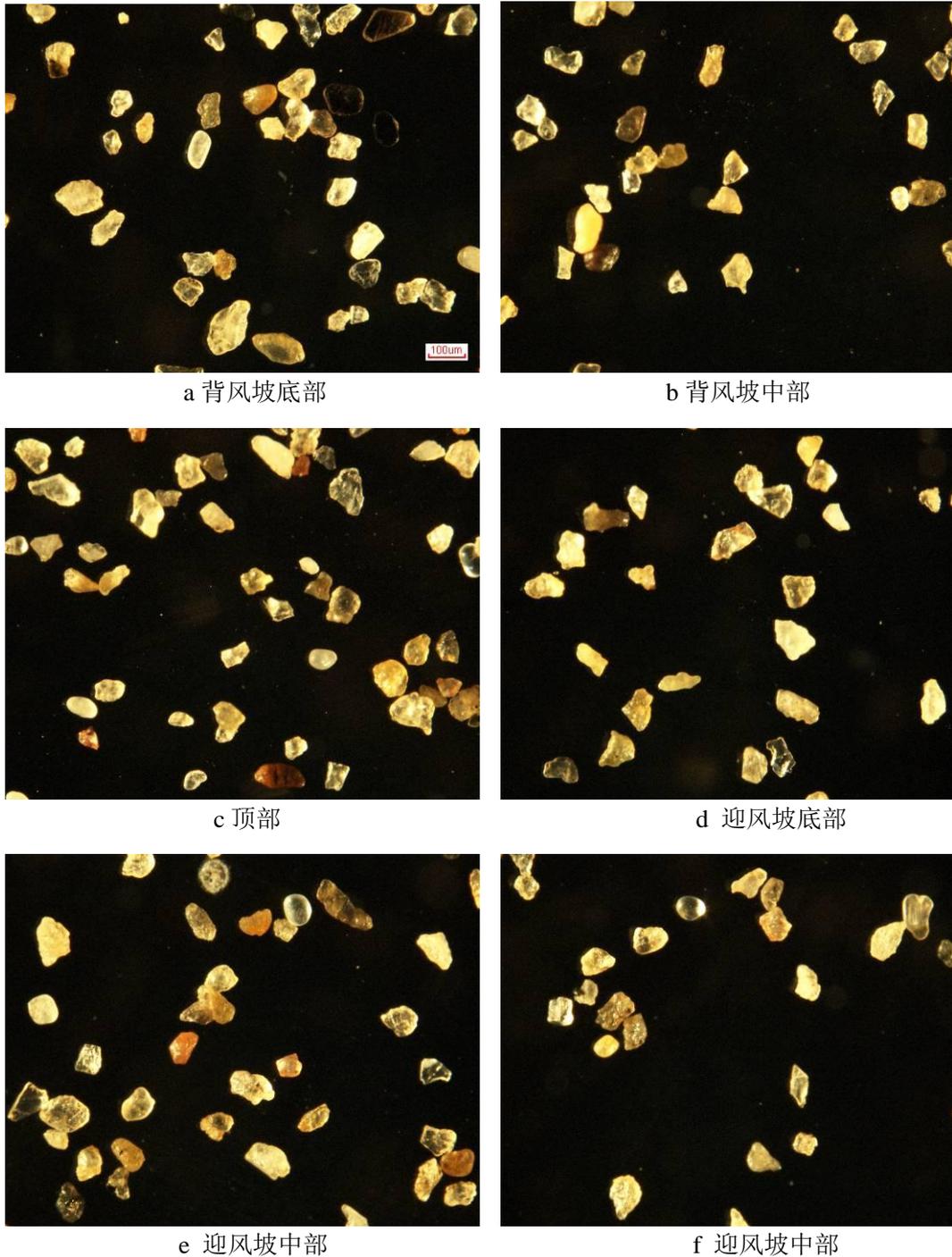


图 4-16 粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒
Fig.4-16 The sand particle size is between 0.074-0.125mm

图 4-16 是塔中丁字路口北沙丘各部位粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。多数沙粒表面磨蚀较轻，棱角明显。只有少数的沙粒表面光滑，近乎圆形。沙粒多为无色透明状，还有黄色、红色、黑色等颜色存在，沙粒形状复杂，圆形、椭圆形、长条形、不规则多边形等都有存在。表 4-14

显示的是该粒径范围沙粒的圆度分布比率，从表 4-14 中看出沙丘各个部位沙粒的圆度分布是不均匀的，圆度值在 0.9-1.0 之间圆形度较好是沙丘的顶部沙粒，有 30.56%的沙粒在这一圆度值范围内，其次是迎风坡中部沙粒占 25%，背风坡底部沙粒占 22.86%。占比例较少的是背风坡中部和迎风坡底部，各占 18.87%和 17.5%。圆度值在 0.8-0.9 区间范围的情况是沙丘各个部位所占比例均最高，迎风坡底部占最高，达到 75%。其次是背风坡底部，占 74.28%，沙丘顶部占的最少，是 61.11%。整体上圆度较好的是沙丘背风坡底部的沙粒，圆度值在 0.8-1.0 之间的占 97.14%，圆度不太好的是沙丘顶部的沙粒，圆度值在 0.8-1.0 之间的占 91.67%。

表 4-14 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.4-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	背风坡底部	背风坡中部	顶部	迎风坡底部	迎风坡中部
0.7-0.8	2.86	7.55	8.33	7.5	3.13
0.8-0.9	74.28	73.58	61.11	75	71.87
0.9-1.0	22.86	18.87	30.56	17.5	25

5.肖塘站风沙流输沙粒特征分析

塔克拉玛干沙漠北缘肖塘气象站（40°49'10"N，84°17'28"）建在古河床开阔的空地上，气象站向北距胡杨林 500-600m，林间有沙丘，属于塔里木河南冲积-淤积平原。向南距流动沙丘约 200-300m，以新月形沙丘和复合型新月形沙丘链为主，沙丘下伏地貌属古塔里木河冲积-泛滥平原。复合型沙丘单体走向为 NW—SE，其间广泛分布淤土平地、风蚀残丘等地貌类型。新月形沙丘多分布于淤土平地上，处于发育的初期或中期，一般宽 6~15 m。处于沙漠北部边缘的肖塘是一个沙尘暴多发地，沙尘暴天气多于沙漠腹地的中^[45]。粗沙粒不能在空气中悬浮搬运，只能在地面跳跃迁移；细沙可以进入地面以上 2m 高度，但不能做长途悬浮搬运；粉砂颗粒是易浮动的，易分散的，为风尘的基本粒组，可被带入 1500m 以上的高空，作较长距离的搬运；粘粒可悬浮于对流层中并被搬运到几千公里以外^[46-48]。0.1mm 的沙土在平均风速 15m/s 下，在空中悬浮所持续的时间为 0.3—3s，输送距离为 4.5—45m，高度在 0.78—7.75m。所以这种以细沙为主的粒度特征就是造成肖塘地区沙尘暴结束后出现短暂的浮尘天气或不出现浮尘天气的主要原因^[49]。为了研究沙尘暴期间起沙沙粒的粒径和微观形貌特征，本文选取肖塘梯度集沙仪所采沙样进行分析。

5.1 肖塘区 2011 年 4 月 4 日至 5 日沙尘暴期间风沙流输沙粒特征

5.1.1 沙粒粒径分布特征

通过激光粒度仪对沙样进行分析得出沙粒粒径的分布特征如图所示，从图中我们可以看出肖塘区 2011 年 4 月 4 日至 5 日沙尘暴过程中 2m 梯度集沙仪所采集沙样粒径集中分布在 32-500 μm 之间，主要是细沙（63-125 μm ）、极细沙（63-125 μm ）、和中沙（250-500 μm ）。根据粒级划分标准，以 0.002、0.005、0.01、0.05、0.1、0.25、0.5、2mm 作为胶粒、粘粒、细粉砂、粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂的分界线^[50]，只有很少的沙粒不在这个粒径范围。另外从图中还可以看出垂直方向上不同粒径范围沙粒比重的变化情况，所选沙样细沙的比例是最高的，但是不同高度上细沙的比重不同，5cm 高度上的细沙比例最低为 41.49%，200cm 高度上的细沙比例最高为 57.87%。所选沙样里边中沙所占的比例其次，极细沙所占比例第三。

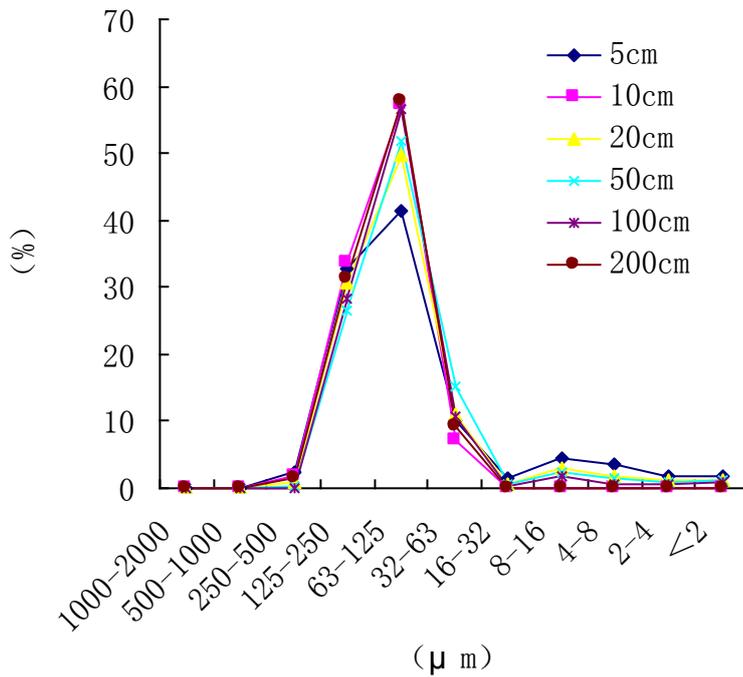


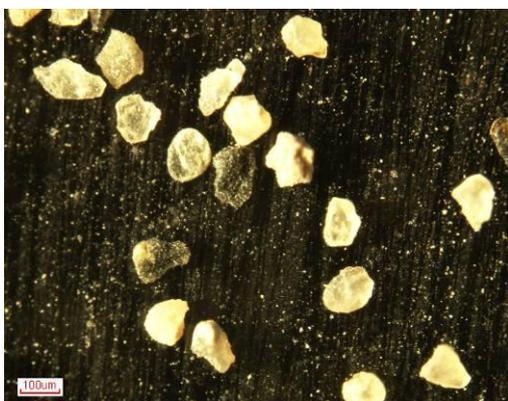
图 5-1 不同高度沙粒的粒径分布特征

Fig.5-1 The particle size distribution of sand from different height

5.1.2 肖塘区沙尘暴期间风沙流输沙粒微观形貌特征

(1) 粒径在 0.125mm-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征

图 5-2 是不同高度上粒径在 0.125mm-0.3mm 之间沙粒放大 48 倍的图片，从图中可以看出不同高度上所采沙粒的表面磨蚀作用强弱不同，越靠近地面所取的沙粒表面的磨蚀越明显，尖锐棱角越少，沙粒表面有被撞击产生的坑。在所有沙粒里边透明度越好的沙粒表面的磨蚀越差，透明度越差的沙粒表面的磨蚀越明显，表面尖锐棱角越多，形状越复杂，条形沙粒增多，这和沙粒的物质组成有很大关系。沙粒多为透明的石英沙，颜色多样，有黑色、红色、黄色等。



a 5cm



b 10cm

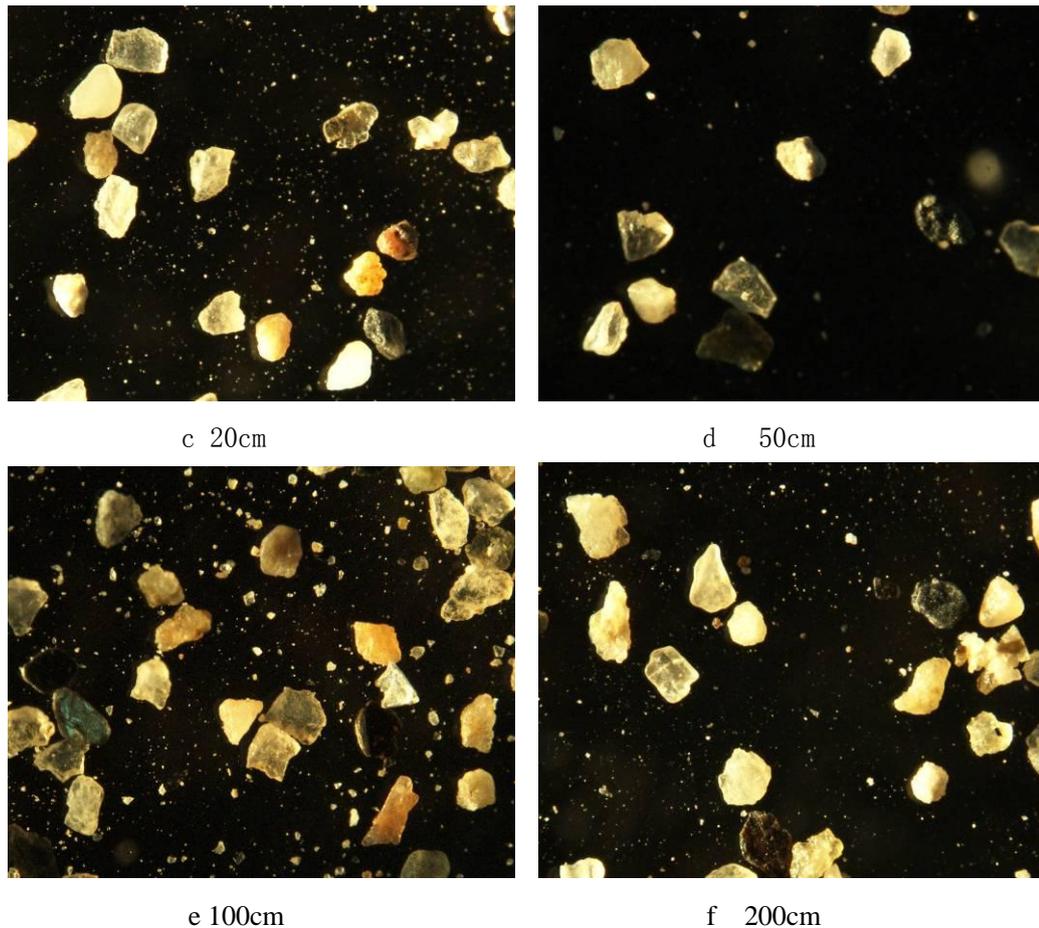


图 5-2 不同高度 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 5-2 The sand between 0.125-0.3mm on different height

表 5-1 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度值分布情况：从表中可以看出沙粒的圆度值集中分布在 0.7-1.0 之间。不同高度上所采沙样圆度分布比例不同，总体上所采沙样圆度值在 0.8-0.9 之间的比例最高。其中 50cm 高度上的沙粒圆度值在 0.8-0.9 之间的比例达到最高为 96.67%，不过圆度值在 0.9-1.0 之间的沙粒不存在。10cm 高度上的沙样沙粒圆度值分布最为分散，有 2.86%的沙粒圆度值小于 0.7，20%的沙粒圆度值在 0.7-0.8 之间，65.71%的沙粒圆度值在 0.8-0.9 之间，11.43%的沙粒圆度值在 0.9-1.0 之间。从表中看出圆度较好的就是 50cm 和 20cm 高度上所采的沙样，圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒达到 90% 以上。

表 5-1 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒圆度值分布比率

Tab.5-1 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
0.6-0.7		2.86				
0.7-0.8	20.59	20	8.57	3.33	28.56	24.24
0.8-0.9	70.59	65.71	88.57	96.67	67.87	63.64
0.9-1.0	8.82	11.43	2.86		3.57	12.12

(2) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌特征

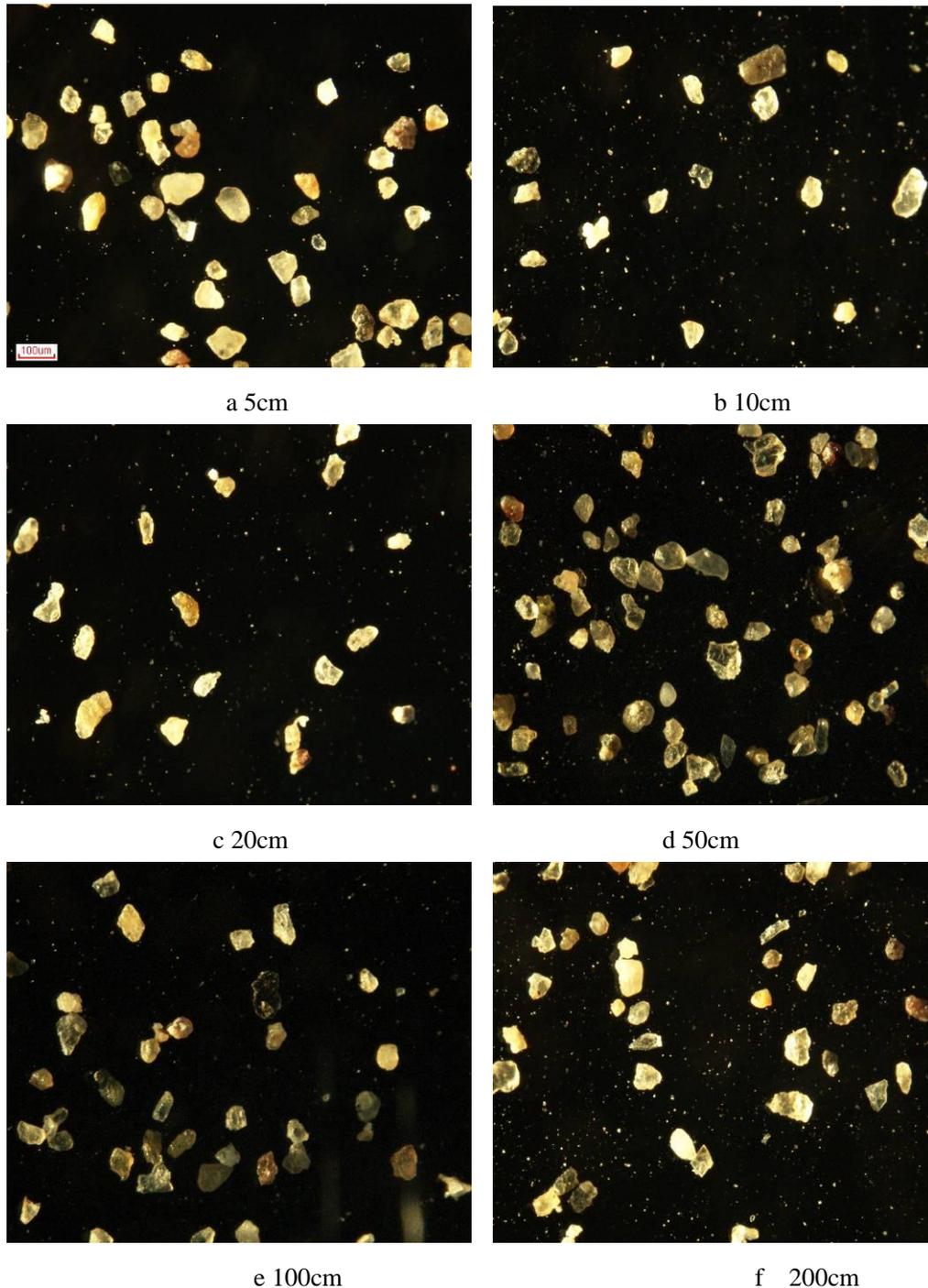


图 5-3 不同高度粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 5-3 The sand between 0.074- 0.125mm on different height

图 5-3 是不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像,放大倍数为 48 倍,从图中可以看到沙粒表面的一些特征,就沙粒颜色来看有黑色、红色、黄色等。多数沙粒透明度较好,也有少数沙粒是不透明的。沙粒形状较为复杂,长条形沙粒较多,棱角较多。多数沙粒表面磨蚀较弱,也有少数沙粒因组成物质硬度较小表面磨蚀较严重,表面相对光滑。

表 5-2 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度值分布

Tab.5-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
<0.7						1.85
0.7-0.8	1.61	2.86	11.9	19.57	14.04	14.81
0.8-0.9	70.97	82.85	66.67	58.69	66.66	70.38
0.9-1.0	27.42	14.29	21.43	21.74	19.3	12.96

表 5-2 是不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度值分布情况，从表中看出沙粒的圆度值分布集中 0.7-1.0 之间，只有 200cm 高度上有沙粒圆度值小于 0.7，圆形度较好的是 5cm 和 10cm 高度上所采的沙样，90% 以上在 0.8-1.0 之间。20cm、50cm、100cm、200cm 高度上的沙样圆度次之，圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒分别占 88.1%、80.43%、85.96%、83.34%。

5.2 肖塘区 2011 年 4 月 29 日沙尘暴期间风沙流输沙沙粒特征

5.2.1 沙粒的粒径分布特征

图 3-4 是肖塘 2 号站梯度集沙仪 2011 年 4 月 29 日沙尘暴过程中所采沙样

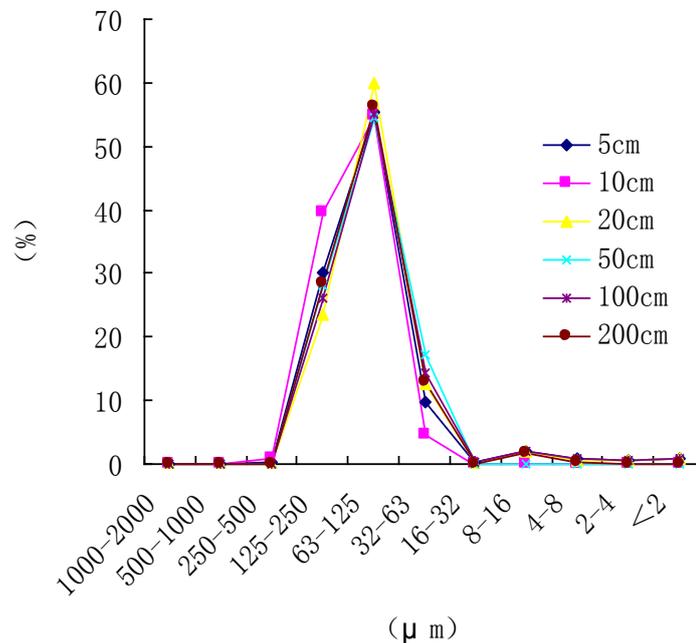


图 5-4 不同高度沙粒的粒径分布

Fig.5-4 The particle size distribution of sand from different height

的粒径分布特征，从图中可以看出，沙粒的粒径集中分布在 32-500 μm 之间，这一粒径范围之外的沙粒较少。其中 63-125 μm 之间的沙粒比重最大，5cm、10cm、20cm、50cm、100cm、200cm 高度上所采沙样中 63-125 μm 粒径范围沙粒所占比例分别是 55.44%、54.92%、59.82%、54.58%、54.96%、56.30%，20cm

高度沙样所占比例最高。125-250 μm 之间的沙粒比例其次，分别占到 30.20%、39.49%、23.54%、28.19%、26.06%、28.50%，10cm 高度上这一粒径沙粒比例最高。

5.2.2 沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径在 0.125-0.3mm 沙粒的微观形貌特征

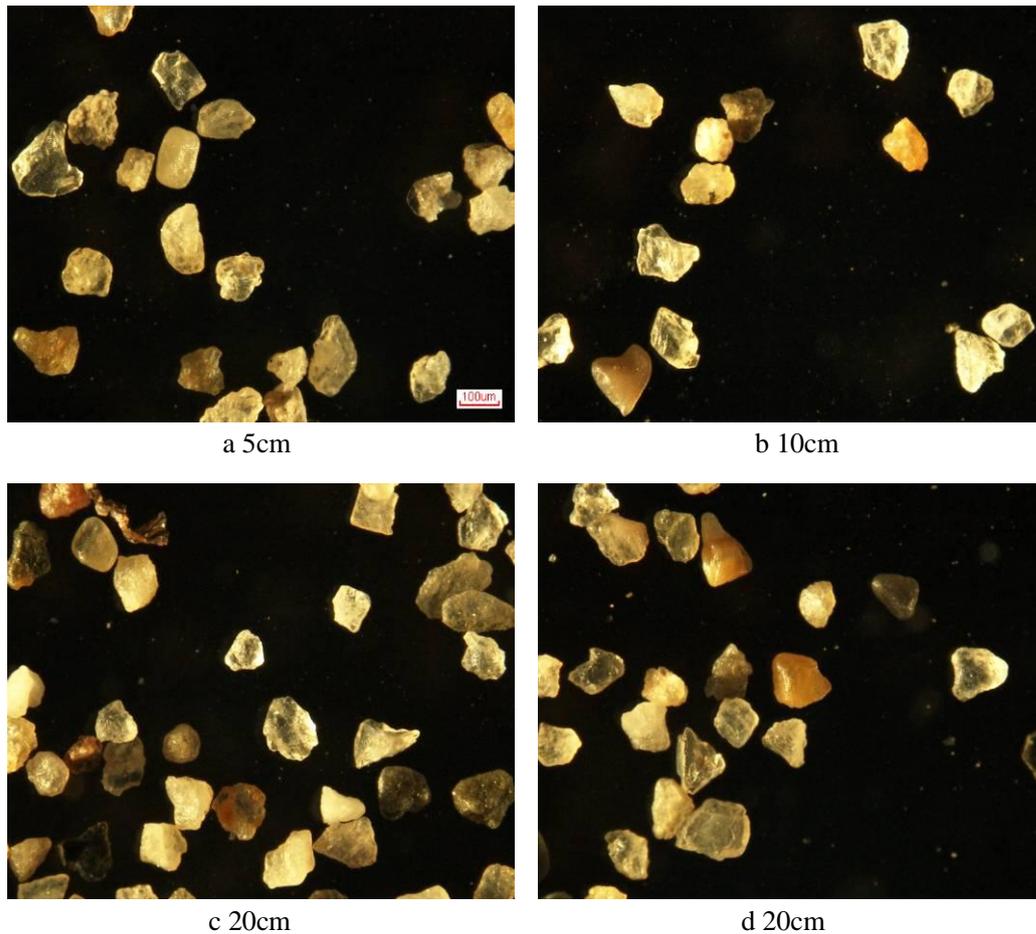


图 5-5 不同高度粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 5-5 The sand between 0.125-0.3mm on different height

图 5-5 是肖塘 2 号站 20110429 沙尘暴过程所采沙样中粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微照片，放大倍数为 48 倍。从图中看出沙粒多数透明度较好，少数为半透明和不透明的。表面磨蚀情况也有所不同，硬度越大表面磨蚀越轻，反之磨蚀越严重。沙粒表面尖锐棱角明显，沙粒形状有三角状，四边形，五边形圆形等多种。沙粒多为水晶透亮，也有黑色、黄色、红色等颜色。

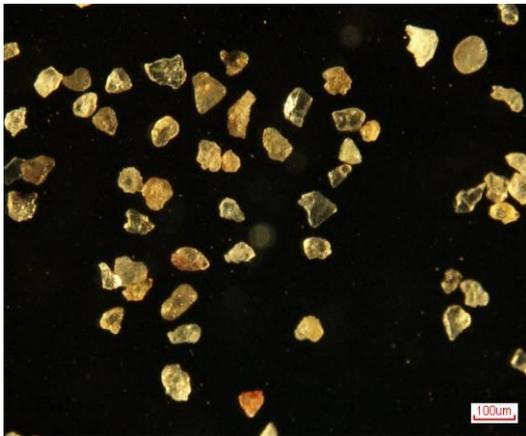
表 5-3 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.5-3 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

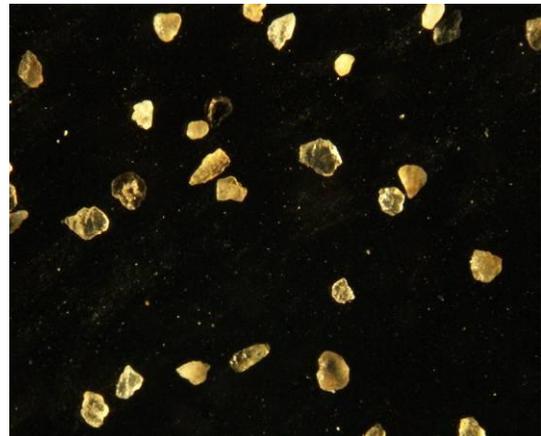
圆度值	5cm	10cm	20cm
0.6-0.7			2.5
0.7-0.8	3.22	10.81	10
0.8-0.9	87.1	75.68	70
0.9-1.0	9.68	13.51	17.5

表 5-3 中显示粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒圆度的分布情况，这一粒径范围的沙粒只存在于 5cm、10cm、20cm 三高度上，其他三个高度上没有。圆度最好的是 5cm 高度上的沙样，有 96.78% 的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间。其他两个圆度稍差，20cm 高度上的沙样圆度值最为分散，小于 0.7 的占了 2.5%，0.7-0.8 之间占了 10%，说明 20cm 高度上沙样的形状相对多样化。

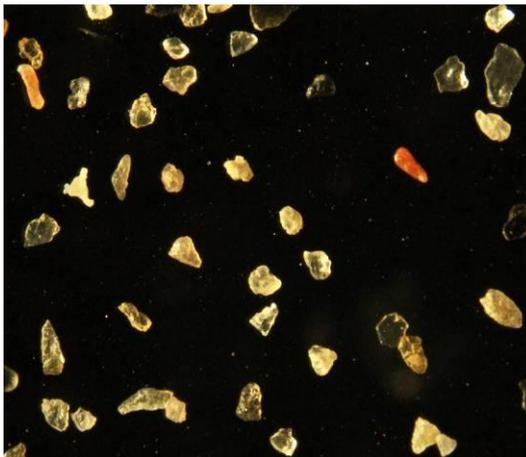
(2) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌特征



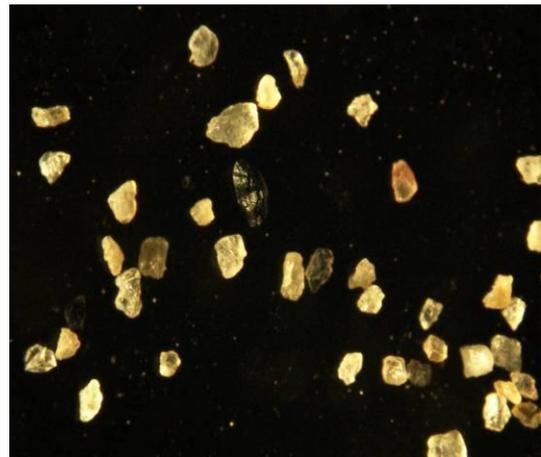
a 5cm 48倍



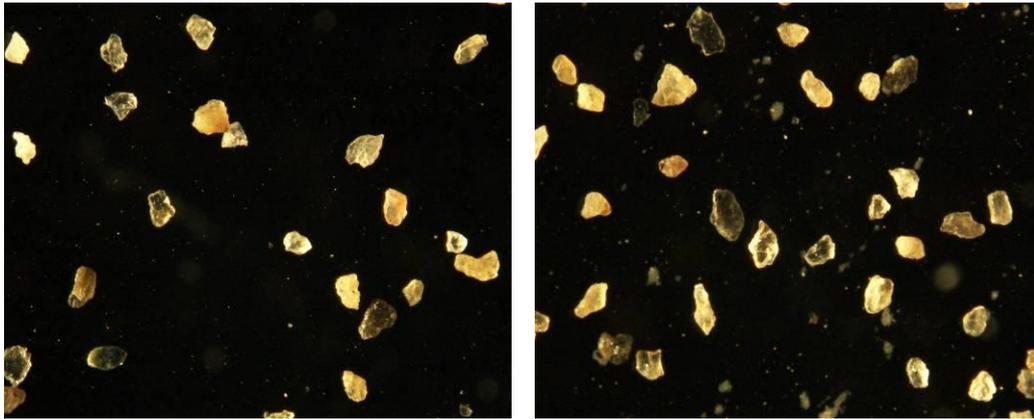
b 10cm 48倍



c 20cm 48倍



d 50cm 48倍



e 100cm 48 倍

f 200cm 48 倍

图 5-6 不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 5-6 The sand between 0.074-0.125mm on different height

图 5-6 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。从图中看六个高度上沙样的表面磨蚀作用不明显，形状有尖角状，条状，近似圆球状等，沙粒多数为透明状颗粒，也有极少数的半透明和不透明的沙粒存在。沙粒颜色有黄色、红色、黑色等。

表 5-4 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布

Tab.5-4 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
0.7-0.8	8.51	8.57		10.34	7.94	8.62
0.8-0.9	59.58	62.86	54.35	68.12	66.66	65.52
0.9-1.0	31.91	28.57	45.65	21.54	25.4	25.86

表 5-4 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布情况，20cm 高度上沙样圆度值全都在 0.8-1.0 之间，圆度最好。其他几个高度上圆度次之，不过整体上较好，圆度值没有小于 0.7 的，比 0.125-0.3, mm 之间沙粒的圆度好，尤其是圆度值在 0.9-1.0 之间的沙粒明显增多，全部占到了 20%以上，20cm 高度上最为明显，比例高达 45%。

5.3 肖塘 2011 年 5 月 8 日沙尘暴沙粒特征

5.3.1 沙粒的粒径分布特征

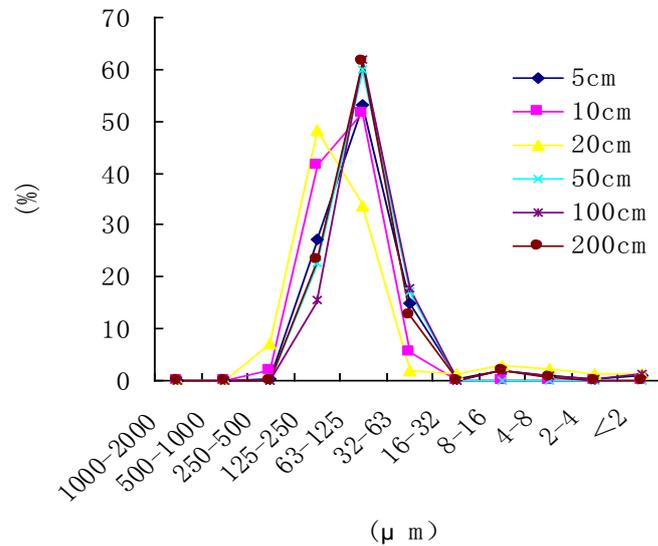


图 5-7 不同高度沙粒粒径分布

Fig.5-7 The particle size distribution of sand from different height

图 5-7 是肖塘 2 号站 2011 年 5 月 8 日沙尘暴过程中所采沙样的粒径分布情况，从图中看出，沙粒粒径集中分布在 32-250 μm 之间，范围之外很少分布，20cm 高度上所采沙样粒径偏粗，125-500 μm 之间的沙粒所占比例最高，大约占到了 55% 以上，这和沙尘暴过程中风沙流的结构有关，在空气动力作用下粗沙粒可以跳跃到了 20 厘米高度上，从而导致 20cm 高度上所采沙样中粗沙比例较高。

5.3.2 沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征

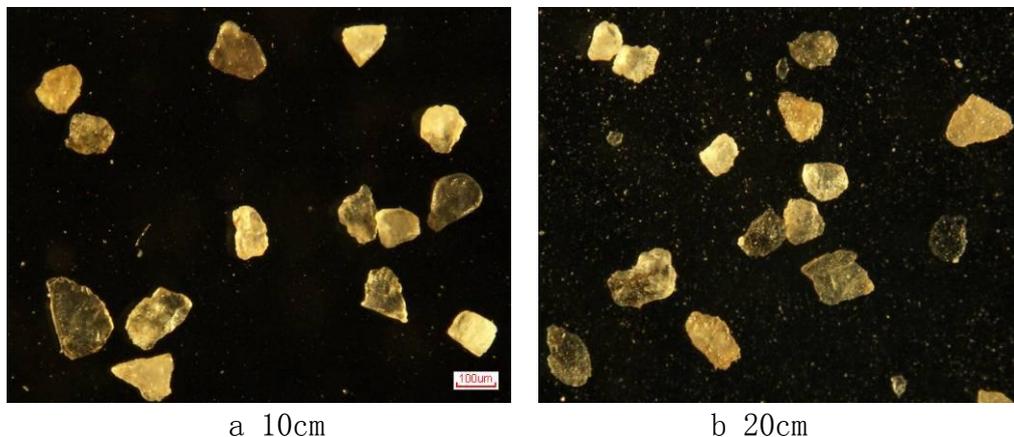


图 5-8 不同高度上粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 5-2 The sand between 0.125-0.3 mm on different height

图 5-8 显示的是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。从图中看出沙粒的表面粗糙，有因沙粒之间撞击而产生的小坑，表面的磨蚀作用不很明显。沙粒颜色依然以水晶色，黄色，黑色为主。有透明、半透明和不透明之分，另外沙粒表面有一些尘土附着，说明该地起沙的源物质较细，粘土成分较多，从前面所做沙样的粒径分布也可以看出。

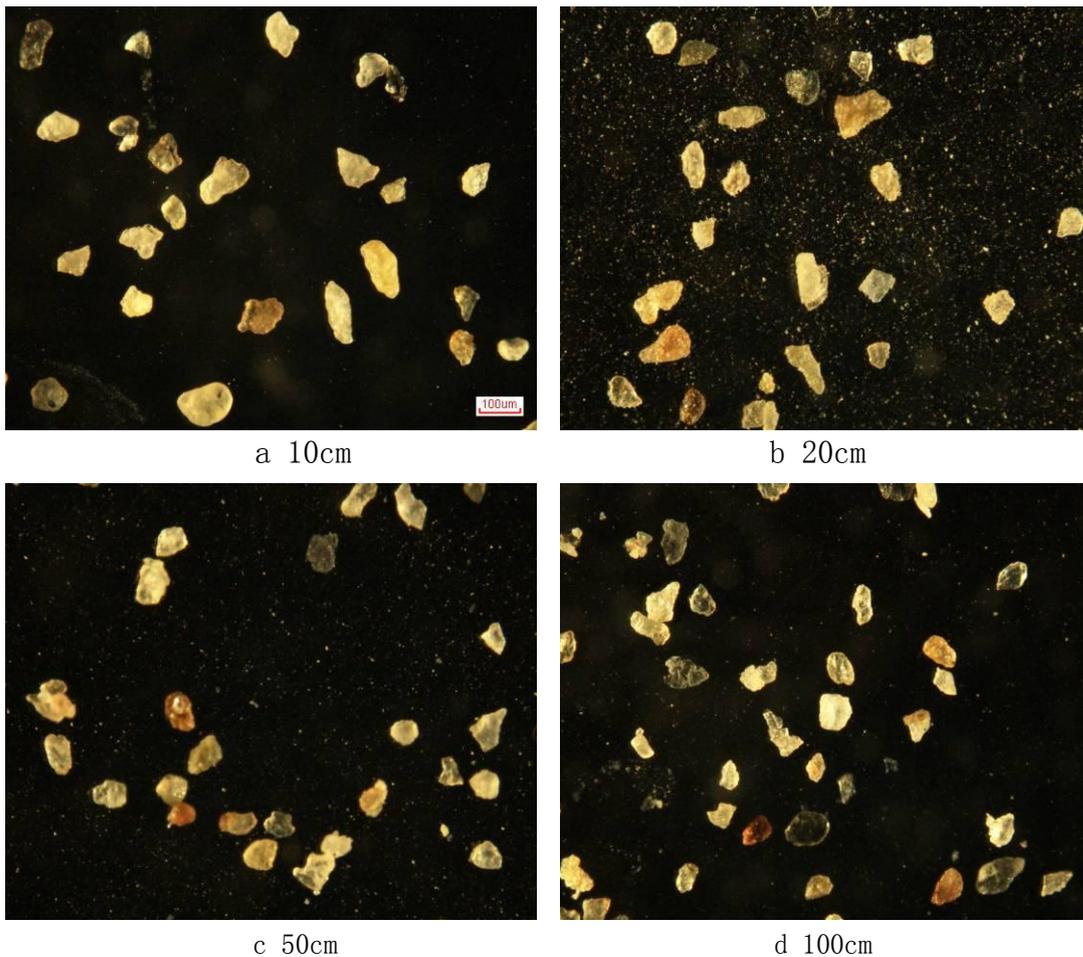
表 5-5 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒圆度值分布

Tab.5-5 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	10cm	20cm
0.7-0.8	2.08	15.15
0.8-0.9	85.42	84.85
0.9-1.0	12.5	

表 5-5 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒圆度的分布，10cm 和 20cm 高度上的沙样圆度值都在 0.7-1.0 之间，10cm 高度上的沙粒圆度要好于 20cm 上的，0.8-1.0 之间占到了 90%以上，而 20cm 上沙粒的圆度只存在于 0.7-0.9 之间，0.9-1.0 之间没有分布。

(2) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌



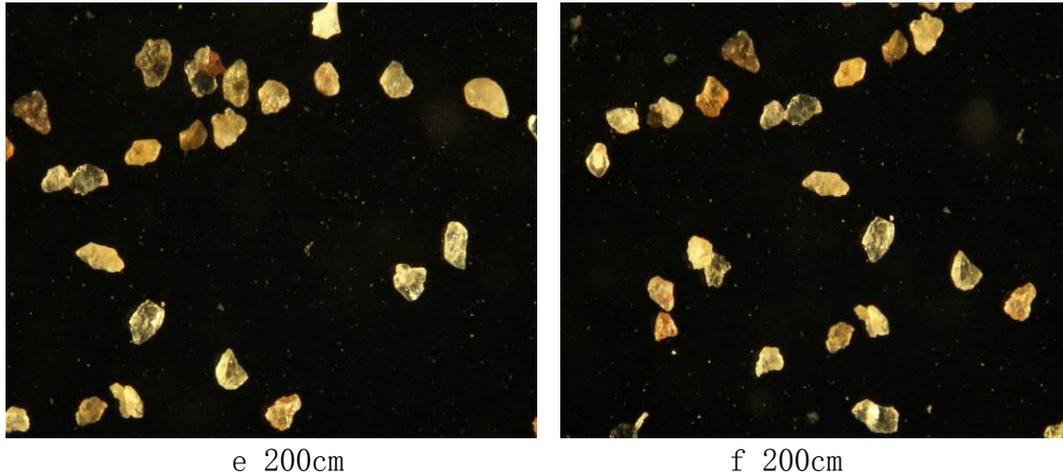


图 5-9 不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 5-9 The sand between 0.074-0.125mm on different height

图 5-9 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数是 48 倍，共有 5 个高度上的沙样，沙粒分散，形状各异，有尖锐棱角的、有长条形的、有圆球形的等等，颜色以水晶色为主，有黄色、黑色红色等，表面坑洼不平，有的沙粒边边如刀刃，说明磨蚀作用不强，也有一些颗粒表面光滑，可能是远距离传输过程中磨蚀所致，也可能是组成物质耐磨性差，磨蚀较为明显。

表 5-6 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒圆度值分布

Tab.5-6 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
<0.7					
0.7-0.8	10.34	26.83	11.54	21.57	2.33
0.8-0.9	67.25	68.29	71.15	54.9	83.72
0.9-1.0	22.41	4.88	17.31	23.53	13.95

表 5-6 中显示粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒圆度分布情况，五个高度上沙样的圆度都在 0.7-1.0 之间，从沙粒圆度的分布上看 200cm 高度上沙粒的圆度最好，有 97.67% 的沙样圆度在 0.8-1.0 之间，20cm 高度上的沙粒圆度最差，只有 73.17% 在 0.8-1.0 之间，100cm 较差，有 78.43% 的沙粒圆度在 0.8-1.0 之间。

6 塔中西站风沙流输沙沙粒特征

6.1 塔中西站 2011 年 3 月 12 至 13 日沙尘暴过程中风沙流输沙沙粒特征

6.1.1 沙粒粒径分布特征

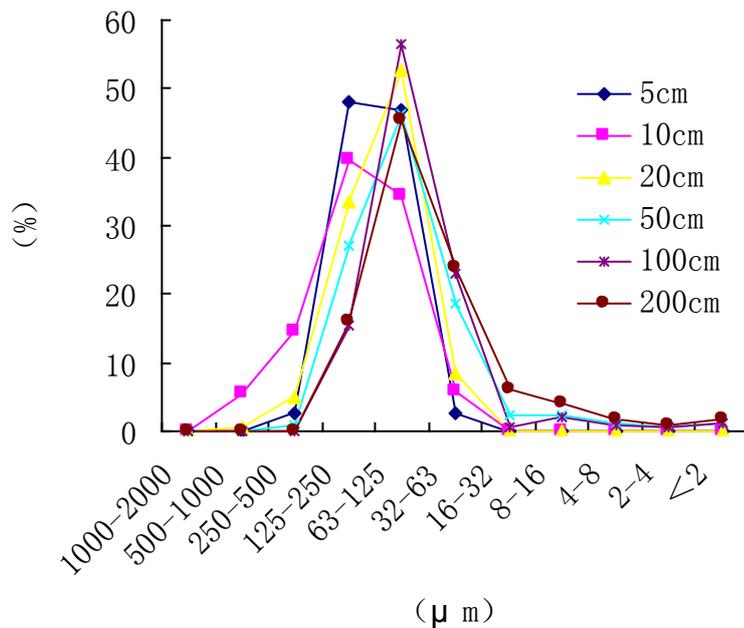


图 6-1 不同高度沙粒粒径分布

Fig.6-1 The particle size distribution of sand from different hight

图 6-1 是 2011 年 3 月 12 至 13 日塔中西站沙尘暴过程中梯度集沙仪采集的沙样粒径分布特征，从图看出本次沙尘暴过程所收集的沙样中无论是哪个高度上的沙样粒径都集中在了 63-250 μm 之间。但就不同高度上沙样的具体粒径分布又有所不同。5cm 和 10cm 高度上的沙样粒径在 125-250 μm 之间的细沙比例最高，其中 5cm 高度上所采沙样中细沙粒占了近 50%，10cm 高度所采沙样中细沙粒占了 40% 左右。其他高度上的沙样比例最高的是粒径在 63-125 μm 之间的极细沙，100cm 高度上极细沙比例最高占了近 60%，200cm 和 50cm 高度上所采集的沙粒中极细沙 45% 左右，20cm 高度上所采的沙样中极细沙占了 52.7%。从这六条曲线的偏度上看离地越高所采集的沙样粒径越小。

6.1.2 沙粒微观形貌特征

(1) 粒径大于 0.3mm 沙粒微观形貌特征

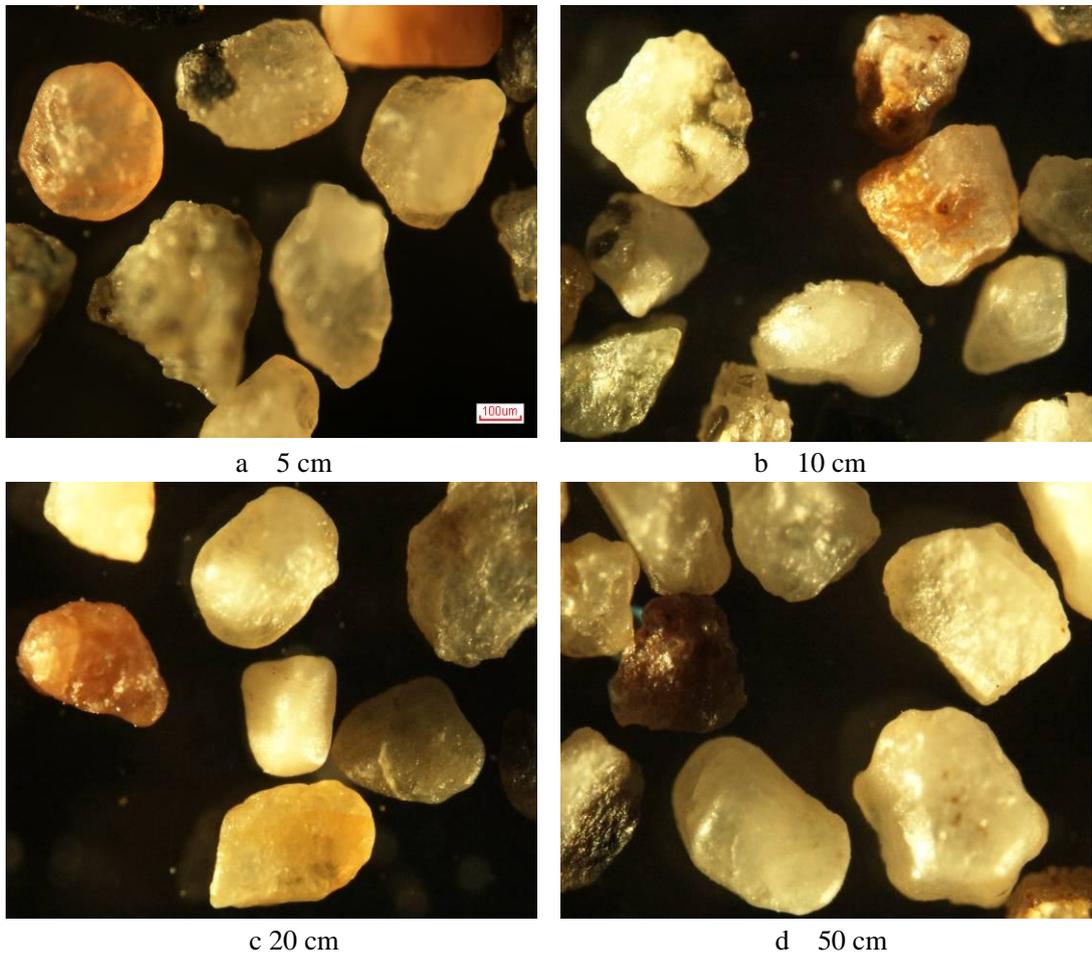


图 6-2 不同高度上粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig 6-2 The sand above 0.3mm on different height

图 6-2 是粒径大于 0.3mm 的沙粒显微图像，放大倍数为 48 倍，从图中可以看出沙粒表面有磨蚀的痕迹，只是不同沙粒的磨蚀程度不同，这和沙粒的传输远近及组成物质有关，不过沙粒越大，在传输过程中相互之间的撞击力越大，对沙粒表面的磨蚀越明显。沙粒颜色仍以无色透明状为主，也有少数的白色、红色、褐色、黄色等分布。沙粒形状复杂多样。多为不规则的多边形，也有少数的沙粒较圆，但是特别圆的沙粒含量不高。从表 6-1 中可以看出，圆度在 0.9-1.0 之间的沙粒比例最高的是 5cm 和 10cm 高度上所采的沙样，占到 15.15%。50cm 只占了 3.23%。而圆度值在 0.8-0.9 之间的比例最高，都在 80% 以上，10cm 高度上所采沙样所占比例最高达到 93.55%，从圆度值在 0.8-1.0 之间的比例看，沙样整体的圆形度较好。

表 6-1 粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-1 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
0.7-0.8	3.03			12.9
0.8-0.9	81.82	93.55	84.85	83.87
0.9-1.0	15.15	6.45	15.15	3.23

(2)粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征

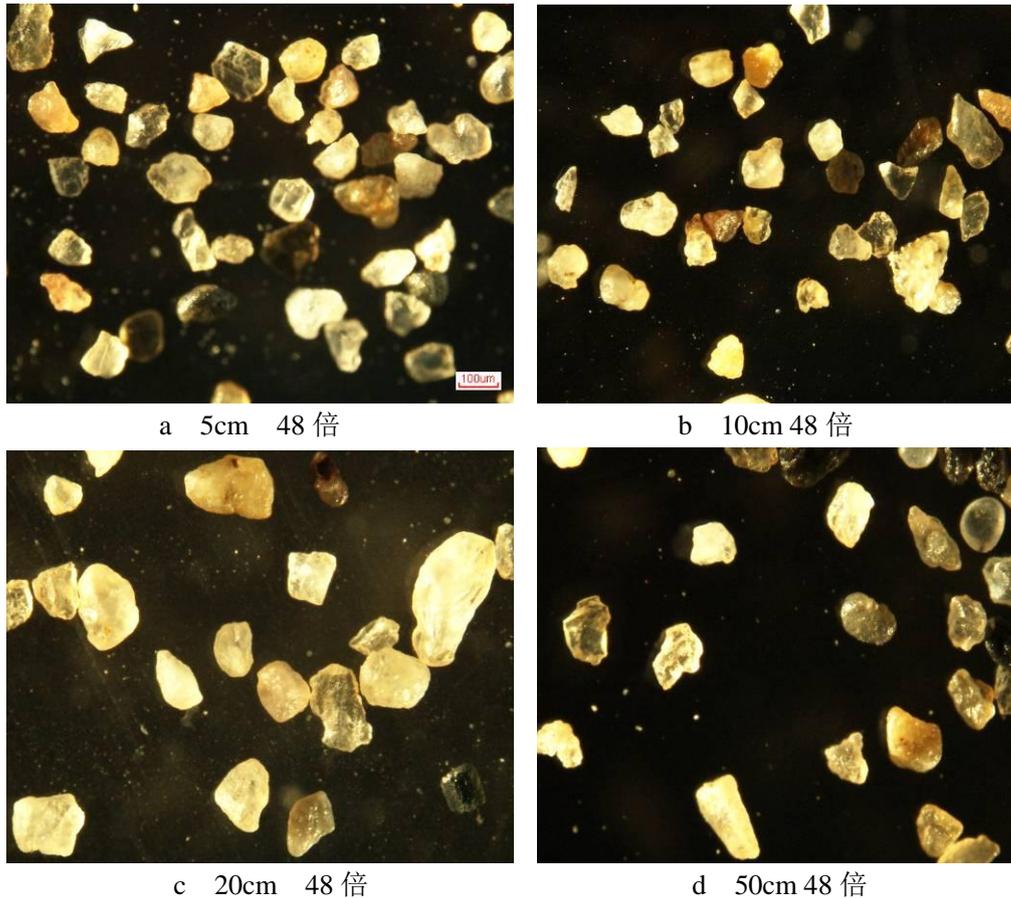


图 6-3 不同高度粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 6-3 The sand between 0.125-0.3mm on different height

图 6-3 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍。大多沙粒的表面磨蚀较轻，凸凹不平，棱角较多，只有少数沙粒表面光滑，形状较圆。沙粒颜色以五色透明状的为主，也有黄色、红色、黑色、褐色的沙粒分布。带有尖角的沙粒较多，也有条形沙粒和不规则多边形沙粒存在。整体上沙粒的圆形度较好，如表 6-2 所示：沙粒圆度值都在 0.7-1.0 之间，90% 以上的沙粒圆度值都在 0.8-1.0 之间。圆度值在 0.9-1.0 之间圆度好的沙粒不同高度上分布不同，20cm 高度上所采沙样占比例最高。达到 31.91%，最低的是 10cm 高度上的沙样，占了 15.79%。

表 6-2 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-2 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
0.7-0.8	2.86	5.26	2.13	3.13
0.8-0.9	74.28	78.95	65.96	68.74
0.9-1.0	22.86	15.79	31.91	28.13

(3) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒微观形貌特征

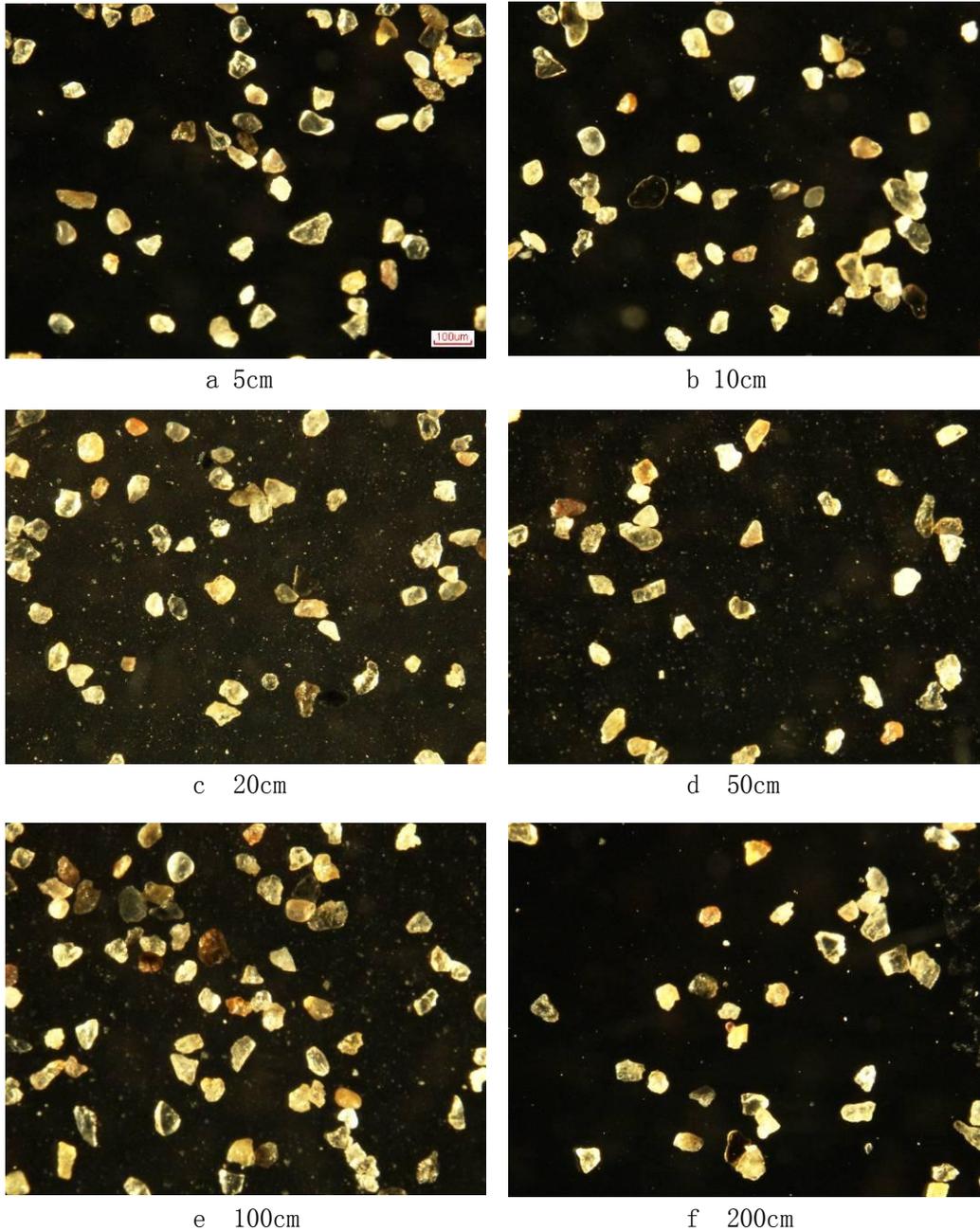


图 6-4 不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 6-4 The sand particle size is between 0.074-0.125mm on different height

图 6-4 是粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍，

沙粒由于粒径较小，传输过程中碰撞摩擦里较小，所以表面的磨蚀作用不是很明显。不过由于沙粒较小，沙粒的整体圆形度较好，但是沙粒表面还是有很多的凸凹存在，尖角也很多，都可以说明沙粒在传输过程中的磨蚀不明显。沙粒颜色还是无色透明状的较多，也有少量的黄色、黑色、褐色、红色沙粒存在。沙粒形状虽然圆度较好，依然比较复杂，三角状、不规则多边形、条形、锥形都有存在。圆度值分布具体情况如表 6-3 所示，除了 50cm 高度上的沙样之外，其他几层上的沙样圆度值有 90% 以上都在 0.8-1.0 之间。就圆度较好的沙粒来说，圆度值在 0.9-1.0 之间沙粒分布情况是 10cm 高度上占的最多，达到 47.06%，最少的是 20cm 高度上的沙样占了 20%。

表 6-3 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-3 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
0.7-0.8	4.76	2.94	7.5	12.9	5.77	4.55
0.8-0.9	61.91	50	72.5	66.13	71.15	63.63
0.9-1.0	33.33	47.06	20	20.97	23.08	31.82

6.2 塔中西站 2011 年 3 月 21-22 日沙尘暴过程中风沙流输沙沙粒特征分析

6.2.1 沙粒的粒径分布特征

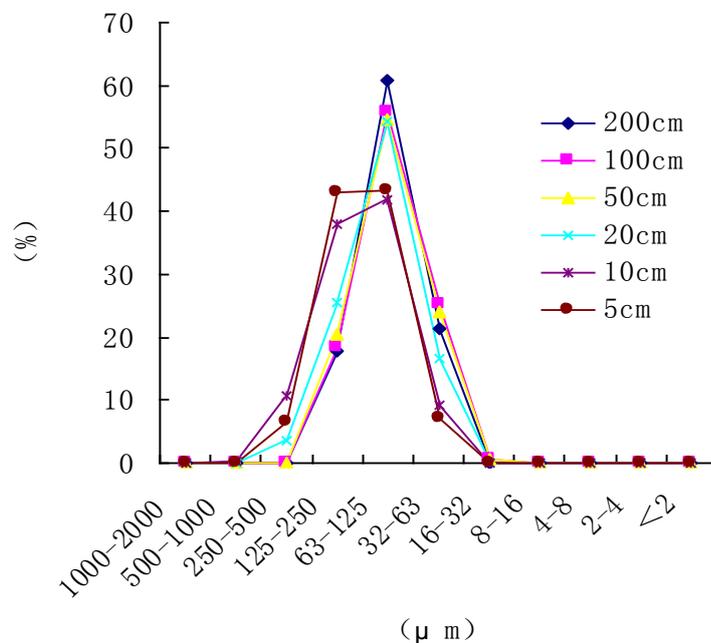


图 6-5 不同高度沙粒粒径分布特征

Fig.6-5 The particle size distribution of sand from different hight

2011 年 3 月 21-23 日沙尘暴过程所采的沙样粒径分布情况如图 6-5 所示，沙

粒粒径集中在 $63-250\ \mu\text{m}$ 之间，多为细沙和极细沙。其他粒径范围也有分布，但比例较小，从图中曲线的偏度上看，5cm 和 10cm 高度上沙样粒径偏大，粗沙粒较多，以粒径在 $125-250\ \mu\text{m}$ 和 $63-125\ \mu\text{m}$ 之间的沙粒为主。其他高度上的沙样是以粒径在 $63-125\ \mu\text{m}$ 之间的极细沙为主，所占比例都在 55% 以上，最高的是 200cm 高度上的沙样极细沙超过了 60%，不过也有一定比例的中沙、粉砂等颗粒存在。

6.2.2 沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径大于 0.3mm 沙粒的微观形貌特征

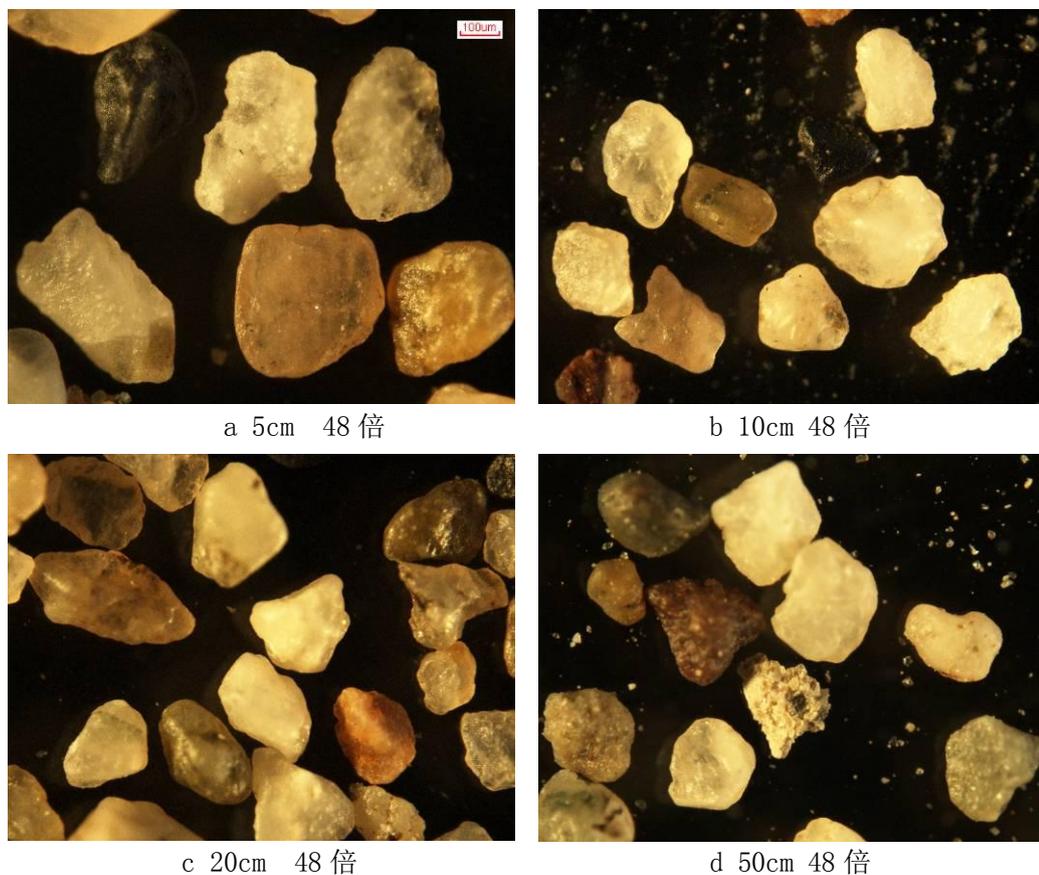


图 6-6 不同高度上粒径大于 0.3mm 的沙粒

Fig 6-6 The sand particle size above 0.3mm on different height

图 6-6 是粒径大于 0.3mm 沙粒的显微图像，从沙粒表面看出，虽然表面有凹凸，但是表面仍然有很明显的磨蚀痕迹，这是沙粒在传输的过程中颗粒之间碰撞摩擦的结果，只是不同物质组成的沙粒表面的磨蚀程度不同，一般透明度差的沙粒表面磨蚀的明显。透明度好的沙粒表面磨蚀较轻。沙粒颜色多为无色透明状，也有少量的黄色、红色、黑色、褐色等沙粒存在，沙粒形状复杂多样，有条形、椭圆形、不规则多边形、锥形等存在，也有极少数接近圆形。表 6-4

显示了粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度分布情况，从表中看出，不同高度上所采的沙样圆度分布不均，从不同圆度值范围来看，各个高度上沙粒所占的比例也不相同，圆度在 0.8-0.9 之间的比例最高的是 5cm 高度的沙样，占了 87.18%，最低的是 50cm 高度上的，占了 69.23%。圆度在 0.9-1.0 之间的情况是 50cm 高度上占最高位 15.38%，最低为 10cm 高度上的沙样，占了 3.85%。整体上圆度较好的是 5cm 高度上的沙样，圆度值在 0.8-1.0 之间的占了 97.44%，最差的是 10cm 高度上的沙样，占了 84.62%。

表 6-4 粒径大于 0.3mm 沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-4 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
<0.7				3.85
0.7-0.8	2.56	15.38	7.14	11.54
0.8-0.9	87.18	80.77	82.15	69.23
0.9-1.0	10.26	3.85	10.71	15.38

(2) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征

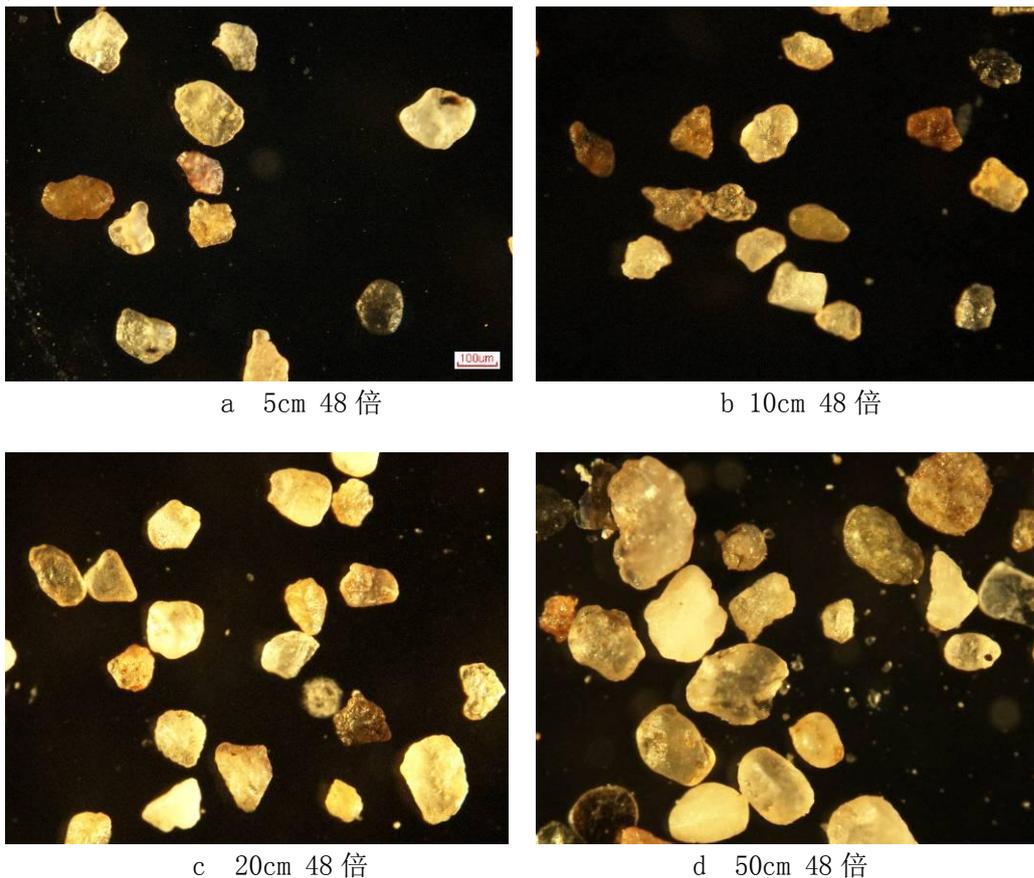


图 6-7 不同高度上粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 6-7 The sand particle size is between 0.125-0.3mm on different height

图 6-7 是粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的显微图像，从图中看出沙粒的表面

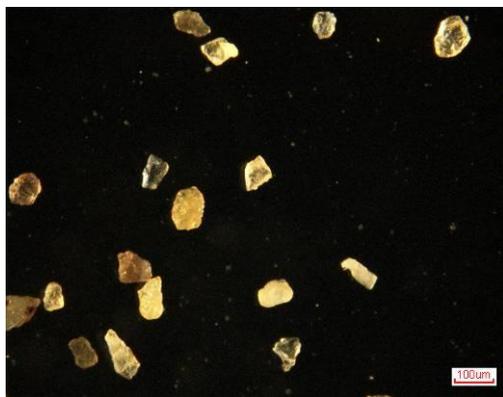
有磨蚀的痕迹，但是相比较 0.3mm 以上的沙粒来说磨蚀不是很明显，沙粒表面有明显的凸凹，也有一些沙粒有尖角存在，不过有极个别沙粒表面比较光滑，磨蚀明显。沙粒的颜色多为透明度好的无色沙粒，也有黄色、黑色、红色、褐色沙粒存在。沙粒的形状不一，多为不规则的多边形沙粒，还有近似三角形、圆形、椭圆形、条形等沙粒存在，接近圆形的沙粒较少，沙粒的圆度分布不均，情况如表 6-5 所示，粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒圆度整体上是越往高处圆度越差，但是从不同的圆度值区间来看稍有差异，圆度在 0.9-1.0 之间的情况是 5cm 和 20cm 高度上的沙粒的圆度较好，10cm 和 50cm 高度上的沙粒圆度稍差，50cm 最差，只占了 6.9%。就不同高度上的沙样来说，圆度值集中分布在 0.8-0.9 之间，比例值最高的，都在 70% 以上。

表 6-5 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒圆度值分布比率

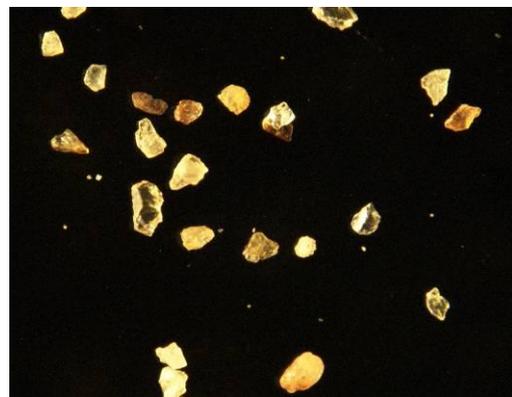
Tab.6-5 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
0.6-0.7				3.45
0.7-0.8	3.23	3.33	6.06	10.34
0.8-0.9	74.19	83.34	75.76	79.31
0.9-1.0	22.58	13.33	18.18	6.9

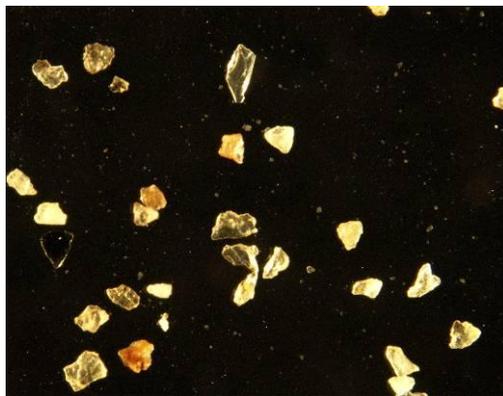
(3) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒微观形貌特征



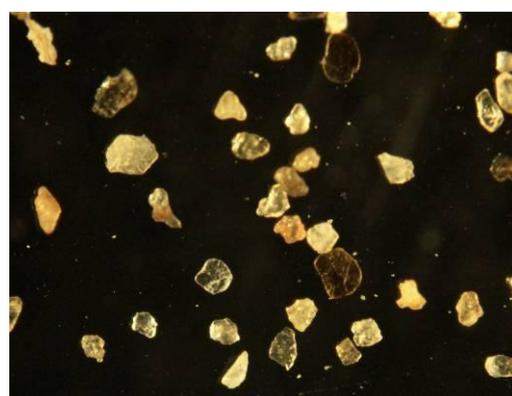
a 5cm 48 倍



b 10cm 48 倍



c 20cm 48 倍



d 50cm 48 倍

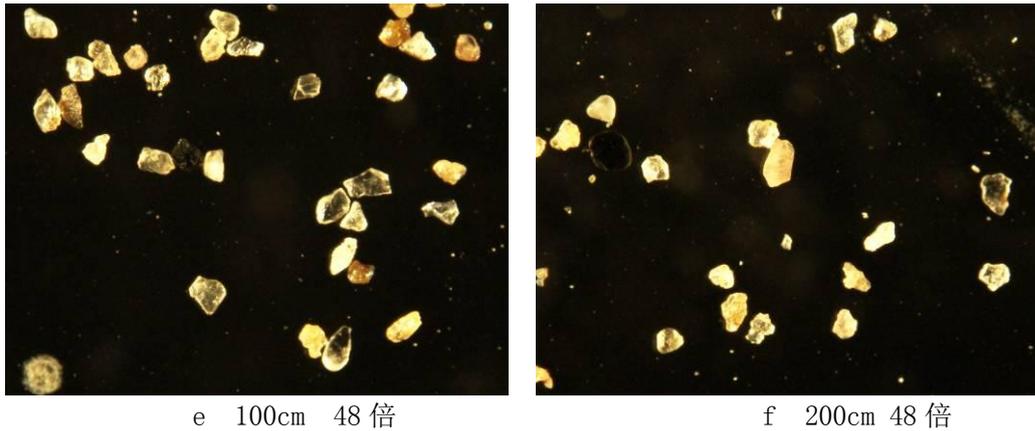


图 6-8 不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 6-8 The sand particle size is between 0.074-0.125mm on different height

图 6-8 是粒径在 0.074-0.125 μ m 之间沙粒的显微图像，放大倍数为 48 倍，沙粒表面尖锐棱角较多，凸凹明显，表面的磨蚀较轻，这是由于沙粒较小，在传输的过程中颗粒之间的碰撞摩擦力小的缘故，使得沙粒表面的磨蚀没有大颗粒明显，也有个别沙粒表面光滑，可能是因为沙粒的组成物质容易磨蚀所致。沙粒的颜色还是以透明的无色沙粒为主，间有黄色、红色、黑色、褐色等沙粒存在。沙粒形状复杂，基本都是不规则的多边形、三角形、圆形、椭圆形、条形等。沙粒的圆度分布如表 6-6 所示，基本都在 0.7-1.0 之间，只有 50cm 高度上的沙样圆度值有低于 0.7 的，其他都在 0.7 以上。就不同的圆度区间去看几个高度所采的沙样都是在 0.8-0.9 之间的比例最高。而圆度在 0.9-1.0 之间的沙粒比例较高的是 10cm 高度上的沙样，占了 31.42%，其次是 200cm 高度上的沙样，占了 31.3%，最低的是 20cm 高度上的沙样占了 17.39%。

表 6-6 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-6 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
0.6-0.7				3.7		
0.7-0.8	13.95	5.71	13.04	3.7	12.9	6.9
0.8-0.9	62.79	62.87	69.57	70.38	67.75	61.8
0.9-1.0	23.26	31.42	17.39	22.22	19.35	31.3

6.3 塔中西站 2011 年 4 月 4 日至 5 日沙尘暴集沙沙粒特征

6.3.1 沙粒的粒径特征

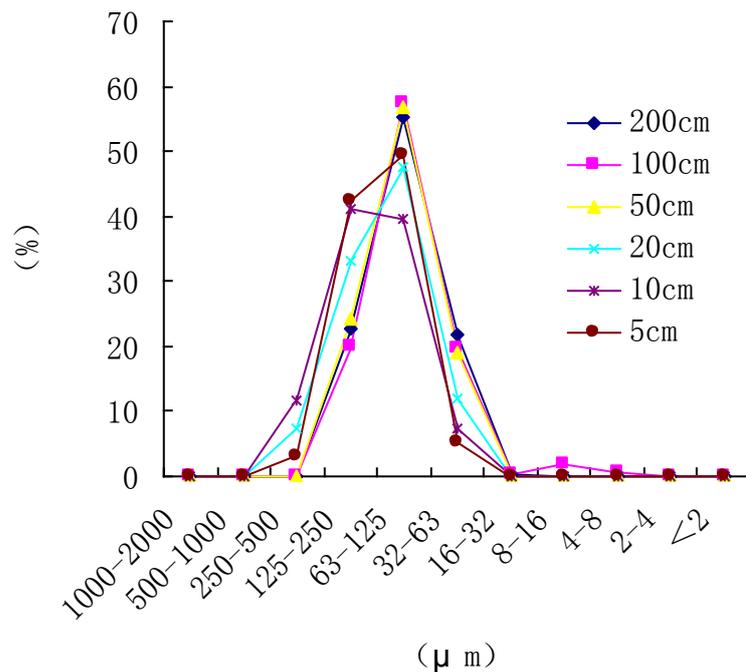


图 6-9 不同高度沙粒粒径分布

Fig.6-9 The particle size distribution of sand from different hight

2011年4月4日至5日的沙尘暴强度较大,沙尘暴期间能见度大幅度降低,Williams^[2]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;2m高度范围内平均粒径 M_z (ϕ 值)在2.92-3.58之间变化,10cm处最小,10cm以上随高度的上升而递增,沙样在2m高度范围内的平均粒径在10cm处达到最大为144.378 μm 。10cm高度以上随高度的上升而递减,2m处平均粒径最小为83.169 μm ,50cm以下平均粒径变化较大,50cm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10cm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减低,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。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 μm ,多为细砂、极细砂、和粗粉砂,贴地层100cm和200cm高度上77%的沙粒粒径分布在63-250 μm ,10cm、20cm和50cm上80%的沙粒粒径集中在

63-250 μm , 5cm 高度上 91%的沙粒粒径集中在 63-250 μm 。

6.3.2 沙粒的微观形貌特征

(1) 粒径大于 0.3mm 的沙粒微观形貌特征

图 6-10 中是粒径在 0.3mm 以上的沙粒图片, a、b、c、d 四幅图分别是 5cm、10cm、20cm、50cm 高度上所采的沙样图片。100cm 和 200cm 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如表 6-7 所示: 从表中看出, 大于 0.3mm 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 20cm 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 20cm 这个高度上都有分布, 混杂较为明显, 分选较差所致。

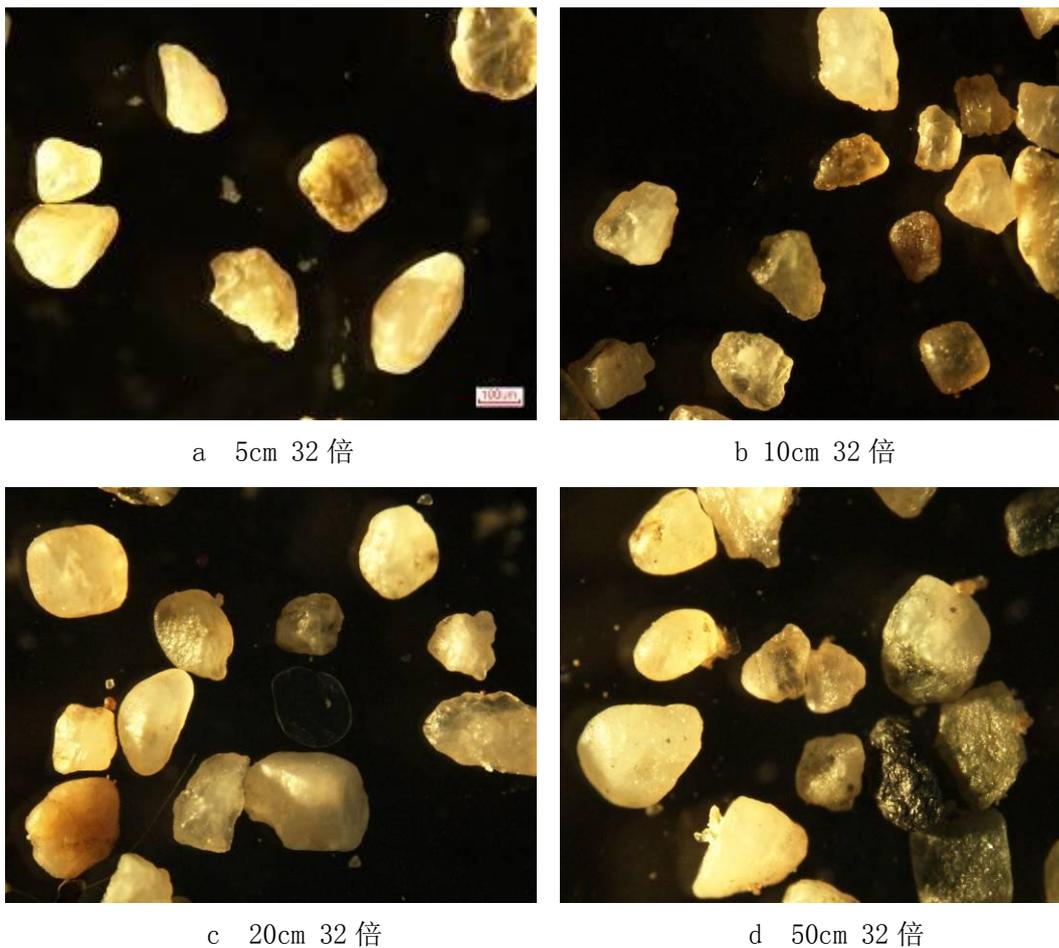


图 6-10 不同高度上粒径大于 0.3mm 沙粒

Fig 6-10 The sand particle size is above 0.3mm on different height

表 6-7 大于 0.3mm 沙粒的圆度值分布比率

Tab.6-7 The roundness distribution ratio of sand is above 0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
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

(2) 粒径在 0.125-0.3mm 之间沙粒的微观形貌特征分析

图 6-1 是 5cm、10cm、20cm、50cm 四个高度上采集的粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒图片，从图片我们可以看出，和上文中大于 0.3mm 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。

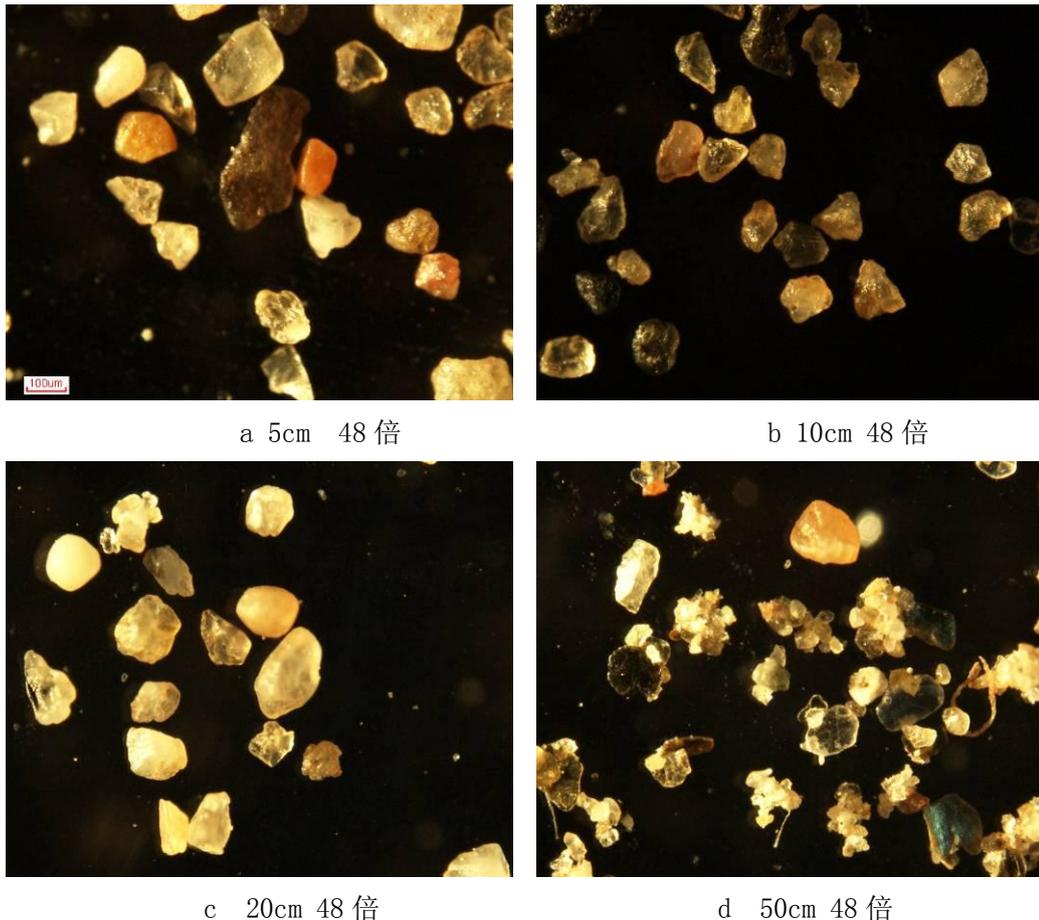


图 6-11 不同高度粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒

Fig 6-11 The sand particle size is between 0.125-0.3mm on different height

表 6-8 是粒径在 0.125-0.3mm 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 50cm 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 厘米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%。

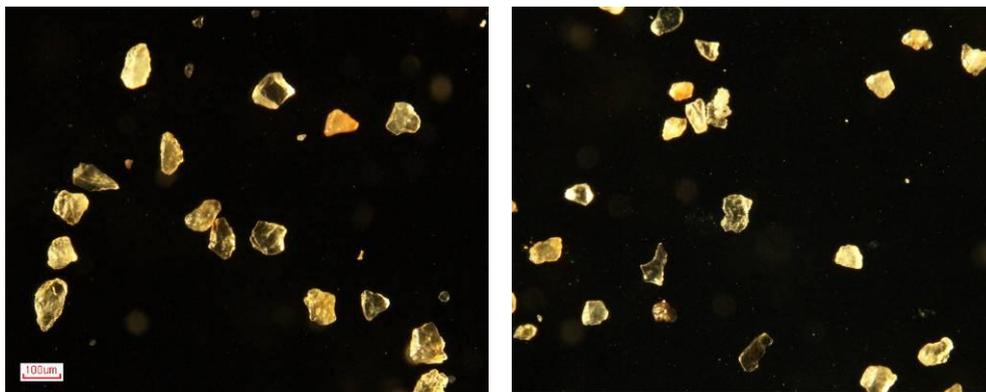
表 6-8 粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒圆度值分布比率

Tab.6-8 The roundness distribution ratio of sand is between 0.125-0.3mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm
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

(3) 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的微观形貌特征分析

图 6-12 是粒径在 0.074-0.125mm 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的沙粒依然是主体，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。



a 5cm 48 倍

b 10cm 48 倍

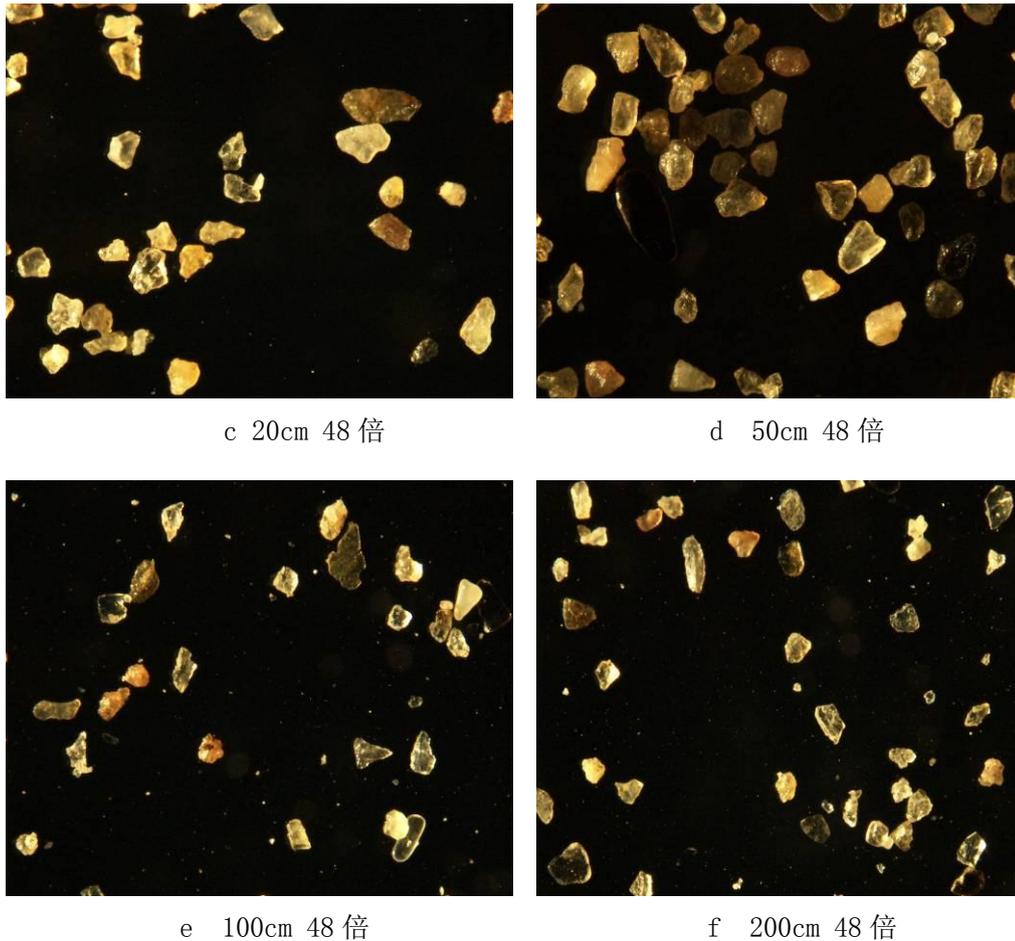


图 6-12 不同高度上粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒

Fig 6-12 The sand particle size is between 0.074-0.125mm on different height

表 6-9 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 5cm、10cm 和 200cm 高度上的沙粒最为明显。另外，就圆度值的分布来看，5cm、50cm 和 100cm 高度上的沙粒形状相对多样。200cm 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^[1]，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。

表 6-9 粒径在 0.074-0.125mm 之间沙粒的圆度分布比率

Tab.6-9 The roundness distribution ratio of sand is between 0.074-0.125mm

圆度值	5cm	10cm	20cm	50cm	100cm	200cm
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

7 结论与展望

7.1 结论

通过对塔克拉玛干沙漠沙样的粒径和微观形貌的分析得出以下几点结论:

- 1 塔克拉玛干沙漠公路两边所采沙样的粒径集中分布在 63-250 μm 之间, 占到 88%以上, 沙粒相对较细。塔中沙丘表面所取沙样粒径大于 250 μm 的沙粒比例增多, 低处沙丘高于高处沙丘, 迎风坡大于背风坡, 尤其是沙丘迎风坡底部和背风坡底部粗沙粒比例更大。肖塘站梯度沙样和塔中西站梯度沙样的粒径集中在 63-250 μm 之间, 但是整体上看肖塘站的沙样比塔中的粒径偏小, 250 μm 以上的沙粒较少, 细沙粒比例较高。自地面向上随高度的上升沙样平均粒径变小。
- 2 借助显微镜发现塔克拉玛干沙漠的沙粒多为无色透明状, 间有黄色、红色、黑色等颜色沙粒存在。沙粒形状复杂多样, 有近似圆形、椭圆形、三角形、长条形及不规则多边形沙粒存在。沙粒间基本没有粘连, 只有塔中西站一次沙尘暴的沙样有个沙样有粘连, 其它的沙样沙粒都是分散。
- 3 通过显微镜观察沙粒的表面特征, 发现塔克拉玛干沙漠沙丘表面所取的沙样中, 粗沙粒表面更为光滑, 磨蚀作用明显, 尖锐棱角较少, 沙粒越小表面的磨蚀作用越弱, 表面凸凹越明显, 棱角越多。沙漠公路两边的沙样表面磨蚀不明显, 棱角较多。肖塘站和塔中站梯度沙样中依然是粗沙粒表面磨蚀比细沙粒要明显, 沙粒越细表面的尖锐棱角越多, 并且随着高度的上升, 所取沙样的表面磨蚀逐渐减弱。
- 4 利用图像分析软件将塔克拉玛干沙漠的沙样图片进行处理, 得出相关的参数, 计算出塔克拉玛干沙漠沙粒的圆度值集中分布在 0.8-1.0 之间, 尤其是圆度在 0.8-0.9 之间的沙粒比例最高, 圆度值在 0.8 以下的沙粒非常少。另外结果显示沙粒圆度值和沙粒大小有一定的相关性, 粒径在 0.3mm 以上的沙粒和粒径在 0.074-0.125mm 之间的沙粒圆度较好, 而 0.125-0.3mm 之间沙粒的圆度稍差。
- 5 就不同地点所取沙样来看, 沙漠公路两边的沙样接近圆形的沙粒较多, 所选沙样的圆度值在 0.8-1.0 之间的沙粒占 80%以上, 大部分都在 90%以上。塔中低处的沙丘表面所取沙样的圆度值仍然集中在 0.8-1.0 之间, 但是比例相对减小, 最低占到 74%, 而高处沙丘表面所取沙样由于粒径较小, 沙粒的圆度值在 0.8-1.0 之间的比例较高, 和沙漠公路的接近, 尤其是粒径小的沙粒圆度更好, 有 90% 以上的沙粒圆度值都在 0.8-1.0 之间。
- 6 塔中西站梯度集沙仪所取沙尘暴过程的沙样圆度值随高度的变化有所不同, 粒径大于 0.3mm 的沙粒三次沙尘暴过程所采沙样的圆度值的变化情况是: 不同高度上采集的沙样圆度值集中在 0.8-1.0 之间, 除 2011 年 4 月 4 日至 5 日的样

品中 20cm 高度上粒径大于 0.3mm 的沙粒和 50cm 高度上粒径在 0.125-0.3mm 之间的沙粒,其他的沙样圆度值在 0.8-1.0 之间比例都在 80%以上。并且随高度上升沙粒的形状越来越复杂,其他圆度值的沙粒比例增加。每次沙尘暴过程由于风速等因素不一样,所取沙样的情况也略有差别。肖塘站梯度集沙仪沙尘暴过程所取沙样的圆度情况和塔中有相同之处,圆度值也是集中在 0.8-1.0 之间,

7.2 展望

本文研究范围研究了塔克拉玛干沙漠公路两侧、塔中沙丘、肖塘和塔中站梯度集沙仪所采沙样沙粒的粒径分布和微观形貌特征,尚未研究沙粒的微观形貌特征与沙粒物质组成及沙粒的传输远近的关系,如果能够详细的研究沙粒的微观形貌特征的产生原因及不同地区沙粒的微观形貌特征做一下对比可能会有更好的效果。

参考文献

- [1] McCrone WC, Delly JG (eds). 1973. The Particle Atlas. Edition Two Ann Arbor science uhshers Inc. Ann Arbor, 1:24-89
- [2] Russell P A Ruud CO. 1973. An analysis of particulates from the Denver urban plume using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry .In Denver Air Pollution Study-Vol I.U.S. EPA Report 600/9.76.007a. 65-233.
- [3] Raradsen AR, Shibaoka M.1982.Characterization and analysis of individual flash particles from coal fired power stations by a combination of optical microscopy, electron microscopy and quantitative electron microprobe analysis [J]. Atmospheric Environment, 16 (9):2191-2206.
- [4] 名古屋大学水圏科学研究所, 黄沙[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [5] Dentener F J, Carlilichael GR, Zhang Y etal.Role of mineral aerosol asa reactive surface in the global troposphere[J].J.GeoPhys.Res,1996,101(17): 22869-22875
- [6] VanMalderen HRojas C, Van Grieken R.1992.Characterization of individual giant aerosol particles above the North Sea [J]. Environmental Science & Technology, 26(4):147-150.
- [7] Puledda S.Paoletti L. Ferdinandi M.1999.Airborile quartz concentration in an urban site [J] .Environmental Pollution.104:441-448.
- [8] Wittirmack K.2002.Impact and growth phenomena observed with submicro meter atmospheric aerosol particles collected on polished sili-con at low coverage [J]. Atmospheric envirolment, 36: 3963-3971.
- [9] Prospero J.1999. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the south –eastern Unites States [J].Proceeding of National Academics Science USA. 96:3396-3403.
- [10] Marrtin S.Yu Han J.etal.2000.An aerosol chemical reactorfor coat. Inmetal oxide particles with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -Part2: Manipulation of the metal oxide core [J] .Journal of Aerosol Science: 31(11):1283-1298.
- [11] Paoletti L.diociaiuti M.Berardis B.etal 1999.Characterisation of aerosol individual particlesin a controlle dunder ground area [J]. Atmospheric Environment.33:3603-3611.
- [12] Zhuang Guoshun, et al. Link between iron and sulfur cycles suggested by detection of iron (II) in remote marine aerosols [J]. Nature (London), 1992,355 (6):360-369.
- [13] 肖正辉, 邵龙义, 张宁等. 兰州市冬季大气 PM₁₀ 的微观形貌和粒度分布 [J]. 辽宁工业大学学报, 2007, 26 (1) :147-150
- [14] 刘义, 钟秦, 胡伟等. 南京市 PM₁₀ 时空变化特征及微观形貌分析[J]. 环境科学与技术, 2008, 30 (10) :83-91.
- [15] 张强华, 石莹莹, 李东等, 南京市典型地区可吸入颗粒物 PM₁₀ 中颗粒的微观形貌特征及其矿物组成[J]. 环境工程学报, 2008, 2 (4) :527-531.
- [16] 罗莹华, 戴塔根, 梁凯等. 韶关市大气降尘矿物成分和研貌特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25 (2) :162-164.

- [17] 朱岗蓼. 大气污染物理学基础[M], 高等教育出版社, 1990.
- [18] 程旭, 祁海鹰, 由长福等. 沙漠的沙粒物理特性分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3):437-440.
- [19] 姚正毅, 陈广庭, 韩致文等. 塔克拉马干沙漠腹地风沙土的力学性质[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1):28-33.
- [20] 李杰, 庄继德. 沙力学特性影响因素的试验研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(4):145-152.
- [21] 邵龙义, 刘君霞, 宋晓焱等. 奥运会及残奥会期间北京市区大气颗粒物污染特征及微观形貌类型[J]. 现代地质, 2010, 24(2):337-344.
- [22] 杨书申, 邵龙义等, 郑州市大气可吸入颗粒物单颗粒污染特征分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(5):774-777.
- [23] 赵旭光, 李长城, 文梓芸等. 高炉矿渣粉体的颗粒形貌研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5):558-561.
- [24] 窦竞, 张雄. 矿渣微粉颗粒群几何特征的图像分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2003, (1):31-34.
- [25] 刘咸德, 贾红, 齐建兵. 青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别[J]. 环境科学研究, 1994, 7(3):10-17.
- [26] 祁士华, 傅家谟, 盛国英等, 大气气溶胶物质来源研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6):26-31.
- [27] 王玮, 潘志, 刘红杰等. 交通来源颗粒物粒径谱分布及其与能见度关系[J]. 环境科学研究, 2001, 14(4):17-22.
- [28] 张代洲, 赵春生, 秦瑜. 沙尘粒子的形态和成分分析[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5):450-456.
- [29] 汪安璞, 杨淑兰, 沙因. 北京大气气溶胶单个颗粒的化学表征[J]. 环境化学. 1996, 15(6):488-495.
- [30] 张代洲. 沙尘粒子的成分和形态分析[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5):450-455.
- [31] 时宗波, 邵龙义, 李红等. 北京市西北城区取暖期环境大气中 PM_{10} 的物理化学特征[J]. 环境科学, 2002, 23(1):30-34.
- [32] 吕森林, 邵龙义, Tim Jones 等. 北京 PM_{10} 中矿物颗粒的微观形貌及粒度分布[J]. 环境科学学报, 2005, 25(7):863-869.
- [33] 杨书申, 邵龙义, 李卫军等. 上海市冬季可吸入颗粒物微观形貌和粒度分布[J]. 环境科学, 2008, 28(1):20-25.
- [34] 王赞红. 近地面大气颗粒物粒度与粒形特征[J]. 环境科学与技术, 2007, 28(9):1935-1940.
- [35] 李娟, 张广兴, 李霞等. PM_{10} 浓度及微观特征季节分布分析—以乌鲁木齐天山区 2004 年为例[J]. 城市环境与城市生态, 2005, 18(6):16-18.
- [36] 蒋红梅, 王定勇. 大气可吸入颗粒物的研究进展[J]. 环境科学动态, 2001, (1):11-15.
- [37] 崔中华, 程晓霞, 张亚维等. 哈尔滨松北区 2007 年春季可吸入颗粒物 PM_{10} 的粒度分布及来源分析[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1):74-76.
- [38] 杨利普. 新疆维吾尔自治区地理[M]. 新疆人民出版社, 1987.
- [39] 李锡纯. 新疆国土资源第二卷[M]. 新疆人民出版社, 1986.
- [40] 中国科学院登山科学考察队主编. 天山托木尔峰地区的自然地理[M]. 新疆人民出版社, 1985.

- [41] 李江风. 罗布泊和古楼兰之谜[M]. 气象出版社, 1991.
- [42] 朱震达, 陈治平, 吴正等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981:37-45.
- [43] 李恒鹏, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠腹地复合沙垄间地新月形沙丘的逆向演变[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2):128-133.
- [44] 岳高伟, 蔺海晓, 常旭. 沙尘暴科学问题研究[M]. 郑州大学出版社. 2009
- [45] 梁云, 刘新春, 张广兴等. 沙漠腹地-荒漠戈壁-绿洲的气候过渡性研究[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3):332-335.
- [46] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985:309-320.
- [47] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. 科学通报, 1997, 42(1):66-69.
- [48] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(1):82-87.
- [49] 吴正. 风沙地貌学[M], 北京: 科学出版社, 1987:280-281
- [50] 徐馨, 何才华, 沈志达等. 第四纪环境研究方法[M]. 贵阳: 贵阳科技出版社, 1992:74-75.

在读期间发表的论文

- [1] 赵聪敏,何清,艾力买买提等.巴丹吉林沙漠风沙流输沙沙粒特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(2):25-29.
- [5] 何清,胡文峰,杨兴华等.巴丹吉林沙漠贴地层风速廓线和风沙流结构特征研究[J].干旱区研究,2012,29(3):517-523.
- [6] 何清,胡文峰,杨兴华等.拐子湖地区沙尘天气风蚀起沙量的估算[J].水土保持研究,2012,19(1):6-10.
- [7] 何清,胡文峰,杨兴华等.内蒙古拐子湖地区风沙运动若干参数计算[J].干旱区地理,2012,35(2):187-192.

后记

论文完成之际，我感慨万千。一份耕耘，一份收获。三年来那些给予我帮助的人太多太多，令我感动的时刻数不胜数，岁月的脚步依然匆匆，每每念及老师的培养与教诲，朋友的鼓励与帮助，家人的关爱与支持，心中总有无限感激，非言语所能表达！

论文能顺利完成，首先要向我的导师何清研究员表示衷心的感谢！从论文的构思、选题到论文的初稿、修改等，每一个环节都倾注了何老师的大量心血。何老师知识渊博，治学严谨，对工作永远充满热情，值得我学习；老师于我亦师亦友，平等而坦诚的学术交流，使我获益良多；老师宽容豁达的人生态度和处处与人为善的行事准则，更使我受益终生。在这里，谨向尊敬的导师表示深深的敬意和衷心的感谢！祝愿您身体健康，工作顺利，生活快乐！

新疆师范大学给我提供了学习平台，感谢在新疆师范大学地理科学与旅游学院学习期间，学院的焦黎院长、武胜利副院长、楚新正老师、海鹰老师、叶茂老师、毋兆鹏老师、陆亦农老师等给予的关心和帮助；同时感谢来风兵老师在学习期间的帮助和支持，在此真诚的祝福老师们身体健康、事事顺利！

特别要感谢沙漠气象科研团队的艾力·买买提明、刘新春、霍文、王敏仲、杨兴华、钟玉婷等的帮助和关心，他们在学习方面给予了我很多的指导和启发，有了他们的帮助我的论文才得以顺利完成。

感谢王世杰、姚俊强、胡文峰、李漠岩、孔维巍、霍迎春等同学的热心帮助。

感谢新疆巴音郭楞蒙古自治州气象局吴钧局长，且末县塔中气象站马海新站长、刘厚勇站长及其他工作人员的关心与帮助，感谢肖塘气象站的达赖和王文来两位观测员，他们的工作为沙漠腹地的气象观测研究提供了宝贵的一手资料，同时对于野外观测仪器的维护做了大量工作。

学习期间特别要感谢家人，为了我的学业一直默默奉献支持，无怨无悔。

最后，再次衷心地感谢所有关心支持我的朋友们、同事们、亲人们，正是来自你们的关心和帮助，才使我走到今天，顺利的完成学业。

赵聪敏

2012年6月5日于乌鲁木齐