

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.007.

何强强, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带不同沙丘的沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 135-145.

HE Qiangqiang, MAO Donglei, XU Jiarui, et al. Sediment Granularity Characteristics and Deposition Environment of Different Dunes in the Cele Oasis-Desert Ecotone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 135-145.

策勒绿洲—沙漠过渡带不同沙丘的沉积物粒度特征及沉积环境

何强强^{1,2}, 毛东雷^{1,2}, 徐佳瑞^{1,2}, 张凯丽^{1,2}, 刘 蕾^{1,2}, 杨郭程^{1,2}

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘 要: [目的] 通过对策勒绿洲—沙漠过渡带不同沙丘类型下风沙沉积物粒度、磁化率分布特征及环境敏感粒级组分进行分析, 探讨不同沙丘类型下风沙沉积物相关参数及分布规律。 [方法] 基于绿洲—沙漠过渡带 4 种沙丘各部位粒度数据及磁化率数据, 采用数理统计方法进行相关性分析。 [结果] 4 种沙丘在不同地貌部位表层的沙物质粒级含量有所差别, 回风、灌丛、新月形及风影沙丘表面沙物质主要由极粗粉砂、极细砂、细砂组成, 百分含量总和由小到大依次为 96.71%, 97.54%, 98.48%, 98.65%。 4 种不同沙丘表面沙物质分选性均为分选中度好。不同沙丘的峰态平均值介于 0.93~1.02, 属于中等峰态, 从总体上分析 4 种沙丘的峰态值从迎风坡底到顶部逐渐增大, 顶部到背风坡底部逐渐减小。新月形沙丘偏度值最小, 偏度值介于 -0.03~0.01, 主要表现为对称, 风影、回风及灌丛沙丘偏度值介于 -0.04~0.44, 为对称和正偏。风影、灌丛及新月形沙丘表面沙物质平均粒径与偏度值呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 表明沙粒平均粒径愈粗愈趋向正偏。风影、回风及新月形沙丘表面沙物质偏度与峰态呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 沙物质分选性愈差, 就愈趋于窄峰态。通过沉积环境判别得出沉积物为风成沙, 主体为风成沉积环境, 4 种不同的沙丘环境敏感粒级组分集中于 100~570 μm , 表明研究区域风沙活动强烈。由于地理要素所组成的差异化构造及人为原因, 导致每个不同地貌部位表面沉积物的粒级—标准偏差值相对变化差异较大。 [结论] 绿洲—沙漠过渡带 4 种风积地貌沙物质粒径差异主要是由地形、风况及沙源沉积物结构所导致。

关键词: 绿洲—沙漠过渡带; 沉积环境; 粒度特征; 磁化率; 沙丘; 策勒

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0135-11

Sediment Granularity Characteristics and Deposition Environment of Different Dunes in the Cele Oasis-Desert Ecotone

HE Qiangqiang^{1,2}, MAO Donglei^{1,2}, XU Jiarui^{1,2}, ZHANG Kaili^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, YANG Guocheng^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of particle size, magnetic susceptibility and environmentally sensitive grain size fractions of eolian sand sediments under different dune types in the oasis-desert ecotone were studied to explore the relevant parameters and distribution patterns of eolian sand sediments under different dune types. [Methods] Based on the grain size data and susceptibility data of each part of the four kinds of sand dunes in the oasis-desert ecotone, the correlation analysis was carried out by using mathematical statistical method. [Results] The surface sand contents of the four types of dunes differ in different geomorphic areas, with the surface sand content of the four types of dunes consisting mainly of very coarse silty sand, very fine sand and fine sand, with the total percentage content of 96.71%, 97.54%, 98.48% and

收稿日期: 2022-03-31

修回日期: 2022-04-20

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划资助项目(18YJAZH064); 新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心招标项目(XJNURWJD2019A06); 新疆师范大学“十三五”校级重点学科地理学招标项目(17SDKD0701); 新时代党的治疆方略与实践研究课题(2021ZJFLY36)

第一作者: 何强强(1994—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事风沙地貌研究。E-mail: 1939886700@qq.com

通信作者: 毛东雷(1975—), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士, 主要从事风沙地貌及荒漠化防治研究。E-mail: donglei6325@sina.com

<http://stbcy.paperonce.org>

98.65%, respectively. All the four different dunes have moderately good sortability of surface sand material. The mean kurtosis values of the different dunes range from 0.93 to 1.02, which is a medium kurtosis. In general, the kurtosis values of the four dunes increase gradually from the bottom to the top of the windward slope and decrease from the top to the bottom of the leeward slope. The crescent-shaped dunes have the lowest kurtosis values, ranging from -0.03 to 0.01, which are mainly symmetrical, while kurtosis values of the wind shadow, gyre and scrub range from -0.04 to 0.44, which are mainly symmetrical and positively skewed. The mean grain sizes of sand material on the surface of wind shadow dunes, scrub dunes and crescent dunes show the highly significant positive correlation ($p < 0.01$) with the skewness value, indicating that the coarser the mean grain size is, the more positive the skewness tends to be. A highly significant positive correlation ($p < 0.01$) is found between the skewness and kurtosis of the sand material on the surface of the wind-shaded, scrub and crescent dunes, indicating that the poorer the sand material sorting is, the more narrowly kurtotic the sand material tends to be. The four different dune environments have sensitive grain size fractions concentrating in the range of 100~570 μm , indicating strong wind and sand activity in the study area, and large differences in the relative variation of grain size-standard deviation values of the samples due to the differential structure and anthropogenic causes of the geographical elements. [Conclusion] The differences in grain size between the four dune types in the oasis-desert ecotone are mainly due to topography, wind conditions and the structure of the sand source sediments.

Keywords: oasis-desert ecotone; sedimentary environment; grain size characteristics; magnetic susceptibility; sand dunes; Cele

沉积物粒度特征一直是沉积学领域分析粒度组成演变过程,获取沉积环境信息的探索热点之一^[1-2]。沙丘是一种堆积形态,其沉积物不仅是沙丘堆积过程的记录,也是沙丘形成发育过程中沉积环境的重要记录^[3-4]。大量学者研究表明在沙丘动力系统中,地形—气流—沙粒三者之间的相互反馈作用,导致沙丘表面物质机械组成发生空间分异,表现出不同地理环境下的沙丘在沉积物粒度组成上具有显著的差别^[5-8]。沙丘表面沙物质粒度特征主要受沙源区域物质的粒度组成和风况两个方面的影响^[9-10]。在不同的沙丘类型下,各粒级组成的百分比含量、各沙丘不同地貌部位的平均粒径、分选系数、偏度、峰态等都有很大差别^[11]。对风沙沉积粒径分布及分选特征研究,理解近地判定搬运方式与动力条件、区分沉积环境以及反演风沙环境变化具有重要的意义^[12-13]。粒度是沉积物的重要结构特征,其组成及分布特征受到沉积物来源、搬运条件、沉积环境及沉积后的风化作用影响。宋洁等^[14]认为敏感粒度参数的获取是研究恢复古环境的核心内容之一,粒度分布曲线、萨胡判别函数值是确定沉积物沉积相、反演沉积环境变化的重要手段,敏感粒径的获取主要用粒级—标准偏差模型^[15],风成环境下的沉积物粒度一般集中于 100~1 000 μm , 60~550 μm 可以指示区域风沙活动强度, 275.4~550.0 μm 可作为沙尘暴的敏感代用指标^[16]。王蒙等^[17]、梁爱民等^[18]、王佩等^[19]分别研究了巴丹吉林沙漠、库姆塔格沙漠、新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形

沙丘表面沙物质的粒度特征。毛东雷^[20]、武胜利^[21]、李志忠^[22-23]等在风沙活动强烈的干旱半干旱区,灌丛沙丘的形成演化及对不同灌丛沙堆形态特征、粒度特征及流场特征进行研究,不同地貌部位沉积物的粒级变化具有明显的规律。在判别古气候记录中,沉积物的磁化率和粒度参数已成为研究气候变化的环境代用指标^[24],目前在磁化率的研究中,多以黄土、湖泊、海洋、冰川、河流表层沉积物为主要研究对象,对于风沙沉积物磁化率的研究相对较少。孔凡彪^[25]、朱元璞^[26]等研究了不同沉积物中磁化率的指示意义,得出风沙沉积物的磁化率特征与粒度密切相关,因此,风沙沉积的磁化率可以反映风力的变化,也可作为古气候的代用指标。策勒绿洲—沙漠过渡带以固定半固定沙丘为主,文中选取4种风积地貌为研究对象,通过野外实地考察采样及室内粒度和磁化率试验分析,探讨其沙物质粒度及磁化率变化特征及沉积环境意义,为该区环境的演化及防风固沙研究提供依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

策勒县位于昆仑山北麓,塔克拉玛干大沙漠南缘,以干旱而著称(图1)。其地理坐标为北纬 35°18'—39°30',东经 80°03'—82°10',属于暖温带荒漠干旱气候区,年平均降水量为 35.5 mm,年平均蒸发量为 2 751.6 mm,平均大风日数为 1.8 d,平均浮尘日数为 147.6 d,平均扬

沙日数为 46.9 d,平均沙尘暴日数为 20.4 d,年平均风速为 1.6 m/s,最多风向盛行西风,历年极大风速为 28 m/s^[27]。绿洲—沙漠过渡带前沿至绿洲边缘海拔高度呈现逐渐升高的趋势相对高差约 18 m 左右,地貌类型有流动沙地、半固定沙地和固定沙地,半固定沙地面积较大,流动沙丘粒径平均值以极细砂为主,细砂含量较低^[28],主要分布有回涡沙丘、灌丛沙丘、风影沙丘和新月形沙丘等。

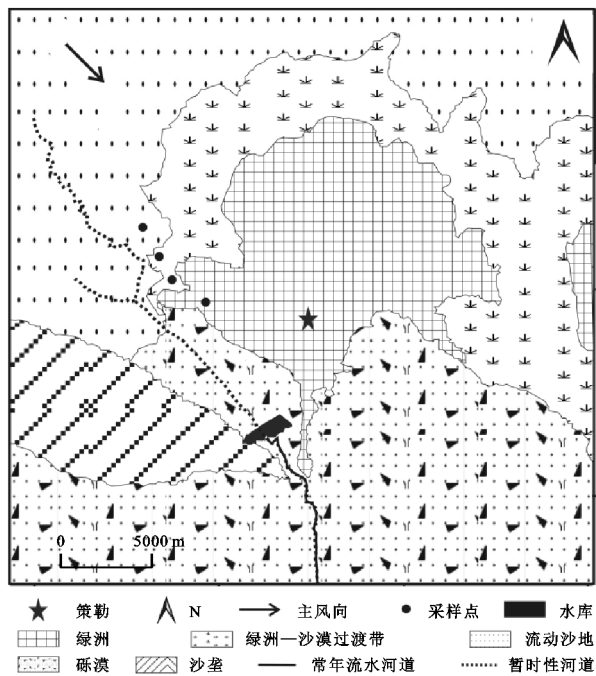


图 1 研究区位置及采样点

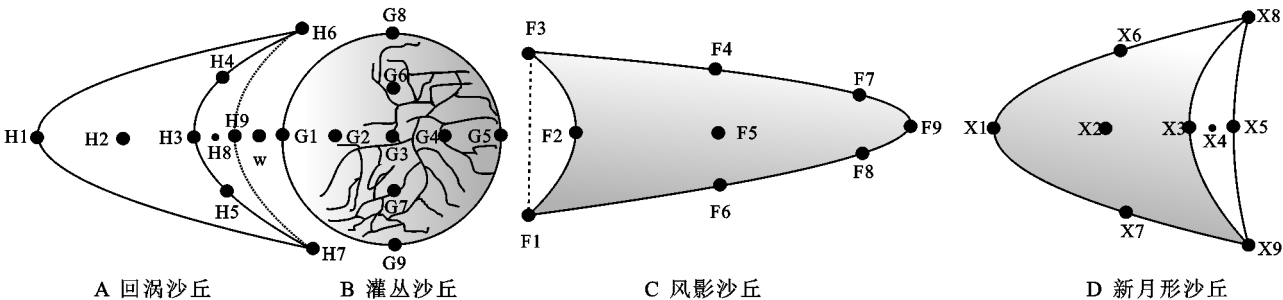


图 2 不同沙丘类型沙洋采集点

1.3 粒径分级与粒度参数

根据福克—沃德公式和定义^[29]用 GRADISTAT 粒度分析软件得到各粒度参数,粒度分级采用 Udden-Wentworth 分类^[30-31]:黏土,0~2 μm;粉砂,2~63 μm(细分为极细粉砂,2~4 μm;细粉砂,4~8 μm;中粉砂,8~16 μm;粗粉砂,16~31 μm;极粗粉砂,31~63 μm);砂,63~1 000 μm(细分为极细砂,63~125 μm;细砂,125~250 μm;中砂,250~500 μm;粗砂,500~1 000 μm)。所有数据采用 Excel 2010, Origin 2018, GRADISTAT, CorelDRAW 等软件分析并绘制相关图件。

1.2 试验材料及研究方法

在策勒绿洲—沙漠过渡带沿流沙地至半固定沙地间野外采样,沿着主风向依次选取回涡沙丘、灌丛沙丘、风影沙丘和新月形沙丘,共计 111 个不同表层的 1~5 cm 风沙沉积物粒采样样品。回涡沙丘(图 2)采样部位依次为迎风坡底部(H1)、迎风坡中部(H2)、顶部(H3)、翼中(H4, H5)、兽角(H6, H7)、背风坡中部(H8)、背风坡底部(H9)及涡槽(W);灌丛沙丘(图 2B)采样部位依次为迎风坡底部(G1)、迎风坡中部(G2)、顶部(G3)、背风坡中部(G4)、背风坡底部(G5)、侧翼中部(G6, G7)、侧翼底部(G8, G9)、丘间地、裸平沙地;风影沙丘(图 2C)采样部位依次为侧翼前(F1, F3)、迎风坡顶(F2)、侧翼中(F4, F6)、背风坡中部(F5)、侧翼后(F7, F9)、背风坡底部(F8);新月形沙丘(图 2D)采样部位依次为迎风坡底(X1)、迎风坡中部(X2)、顶部(X3)、背风坡中部(X4)、背风坡底部(X5)、翼中(X6, X7)及兽角(X8, X9)。样品经纯化处理之后,采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测算,仪器测试范围为 0.02~2 000 μm,每组样品重复测量三次,测量各粒级范围机械组成的体积百分含量。磁化率样品测量采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率测量仪完成,将样品移至 MS2 磁化率仪测量低频(0.47 KHz),对于磁化率分析时采用低质量磁化率方法,低质量磁化率(X_{lf})单位为 10^{-8} m³/kg,所有样品重复测试 3 次取其平均值。

2 结果与分析

2.1 不同沙丘表面沙物质粒径特征

风影、灌丛、回涡及新月形沙丘表面沙物质粒级组成相差较大,沙物质粒级范围在 0~158.86 μm(图 3),灌丛沙丘的沙物质粒径均大于风影、回涡及新月形沙丘的沙物质平均粒径;沙物质粒级范围在 158.86~178.25 μm,风影和新月形沙丘沙物质粒径大于灌丛和回涡沙丘沙物质的平均粒径,从整体上分析,除灌丛沙丘外,沙丘沙物质粒度依次为风影沙丘、新月形沙丘、回涡沙丘。说明风影沙丘比新月形、灌丛及回涡沙丘沙表面沙物质整体偏粗,回涡沙丘的沙物质最细。

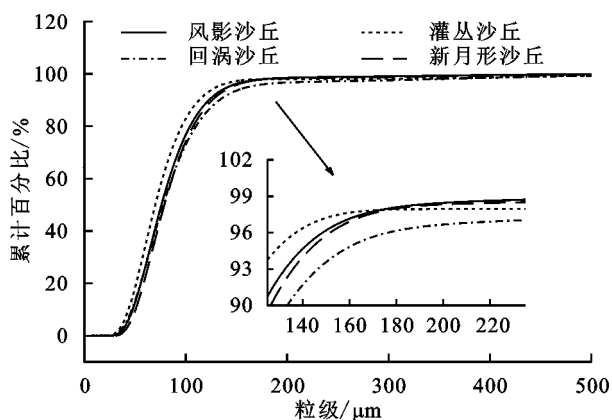


图3 不同沙丘粒级累计百分含量

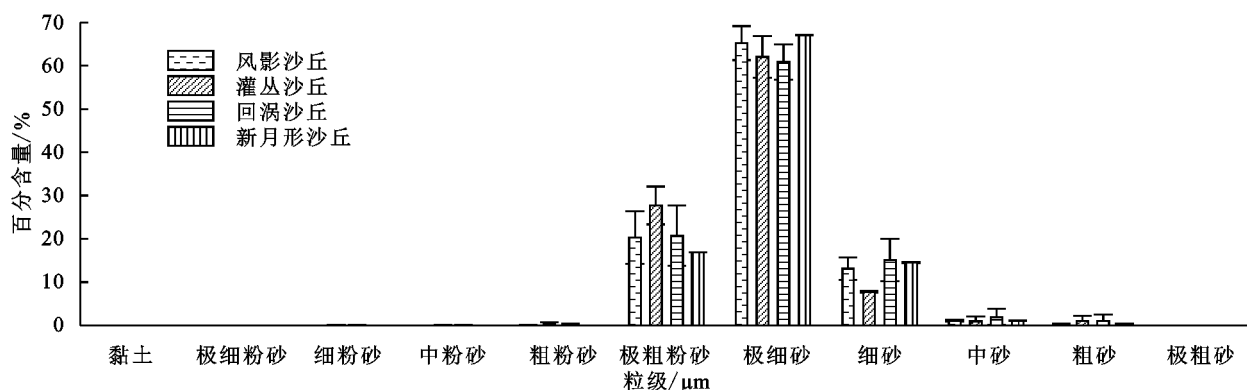


图4 不同沙丘表面沙物质粒级组成

风影、灌丛、回涡、新月形沙丘在不同地貌部位中表层沙物质粒级含量有所差别(图5),极粗粉砂、极细砂、细砂为不同地貌部位的优势粒级。其中极细砂在粒级组成中平均百分含量最大,分别是风影沙丘、新月形沙丘、回涡沙丘及灌丛沙丘,平均百分含量依次为 68.42%, 67.04%, 64.48%, 63.49%, 风影沙丘的极细砂在左侧翼后表现最大,平均为 76.00%,在左侧翼后表现最小,平均为 60.87%;灌丛沙丘的极细砂在裸平沙地中表现最大,在丘间地表现最小,其次依次为裸平沙地、迎风坡中部、顶部,平均百分含量依次为 75.44%, 67.61%, 67.26%。回涡沙丘的极细砂在背风坡中部表现最大,其平均百分含量为 68.59%,在涡槽表现最小,平均为 51.62%,其次依次为背风坡中部、右兽角、迎风坡底部,平均百分含量依次为 68.59%, 67.88%, 66.98%。新月形沙丘的极细砂在顶部表现最大,其平均百分含量为 71.41%,在右兽角表现最小,平均为 56.34%。

在优势粒级组成中极粗粉砂仅次于极细砂,由大到小依次为灌丛沙丘、风影沙丘、新月形沙、回涡沙丘,平均百分含量依次为 24.22%, 20.20%, 16.87%, 14.58%。其中灌丛沙丘的极粗粉砂在侧翼中部表现最大,在裸平沙地表现最小,依次为侧翼中部、背风坡中部、背风坡底部、侧翼底部,平均百分含量依次为

回涡、灌丛、新月形及风影沙丘表面沙物质主要由极粗粉砂、极细砂和细砂组成,百分含量总和由小到大依次为 96.71%, 97.54%, 98.48%, 98.65%,其余粒级百分含量很少,均不足 2%。在沙物质粒级组成中,4种沙丘的极细砂百分含量均最高,其中新月形沙丘极细砂百分比含量最大,约为 67.07%,回涡沙丘极细砂百分比含量最小,约为 60.85%(图4)。在4种风积地貌中新月形沙丘表面物质主要的粒级组成最不丰富,灌丛沙丘和回涡沙丘的粗砂百分含量高达 1.06%,说明灌丛沙丘和回涡沙丘分选出更粗的沙物质,植被和地形更加有利于分选出更粗的沙物质。

32.30%, 30.78%, 27.49%, 26.89%。风影沙丘的极粗粉砂在左侧翼中表现最大,平均为 29.65%,在左侧翼前表现最小,平均为 10.58%。新月形沙丘的极粗粉砂在右翼中表现最大,其平均百分含量为 19.69%,在顶部表现最小,平均为 12.70%。回涡沙丘的极粗粉砂在左兽中表现最大,其平均百分含量为 20.13%,在迎风坡中部表现最小,平均为 10.92%,其次依次为左兽中、右侧翼、迎风坡中部、迎风坡底部,平均百分含量依次为 20.13%, 18.41%, 18.32%, 14.42%。

在优势粒级组成细砂百分含量中回涡沙丘>新月形沙丘>风影沙丘>灌丛沙丘,平均百分含量依次为 20.77%, 14.58%, 10.41%, 7.75%。表现最大的部位依次为回涡沙丘的涡槽其平均百分含量为 34.01%,风影沙丘左侧翼前部其平均百分含量为 23.38%,新月形沙丘的迎风坡中部,其平均百分含量为 17.88%,灌丛沙丘的迎风坡底部,其平均百分含量为 10.41%;表现最小的部位依次为回涡沙丘的左兽角其平均百分含量为 11.98%,风影沙丘右侧翼前部其平均百分含量为 4.05%,新月形沙丘的右兽角,其平均百分含量为 11.41%,灌丛沙丘的背风坡底部,其平均百分含量为 4.43%,在4种不同的沙丘中发现,灌丛沙丘表面沙物质在粒级组成上离散程度最大,可能与沙物质来源及植被的屏障作用有关。

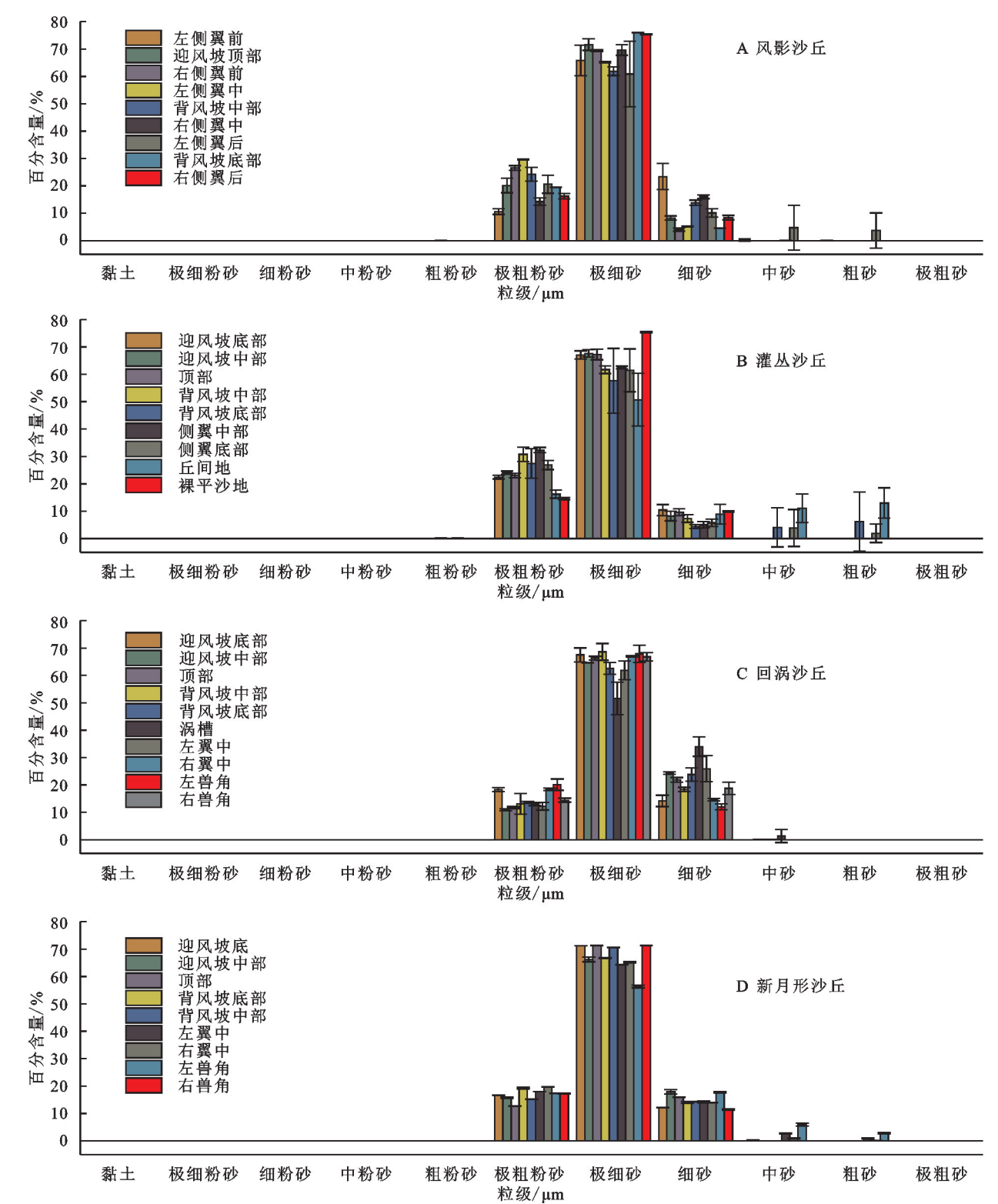


图 5 不同地貌部位下沙堆表层沙物质粒度分布

2.2 不同沙丘表面沙物质粒度参数特征

受地形地势及风向影响,从总体上来看迎风坡底经迎风坡中部到顶部逐渐变细,而从沙丘顶部至背风坡中、背风坡底、侧翼逐渐变粗(图 6)。4 种沙丘表面风沙物质平均粒径最大为回涡沙丘的 93.69 μm ,最小为风影沙丘的 87.84 μm 。除风影沙丘的左侧翼后部位和回涡沙丘的丘间地部位沙物质分选系数分别

为 2.04 μm 和 2.24 μm ,其余 4 种沙丘的各个部位沙物质分选系数介于 1.32~1.79,主要属于中等偏上一中等分选性,总体上迎风坡分选系数比背风坡小,是受到较大风力分选作用的结果。从 4 种不同沙丘对比发现,新月形沙丘偏度值最小,偏度值介于-0.03~0.01之间,主要表现为相对于中值对称,风影、回涡、灌丛介于-0.04~0.44,主要表现为相对于中值对称或

粗偏,并且在灌丛沙丘的丘间偏度值高达0.44,表现为非常粗偏,灌丛沙丘的丘间地沙物质偏度值离散程度最大,主要受到地表沙波纹和地形的影响较大。不

同沙丘的峰态平均值介于0.93~1.02,属于中等峰态,从总体上分析4种沙丘的峰态值从迎风坡底到顶部逐渐增大,顶部到背风坡底部逐渐减小。

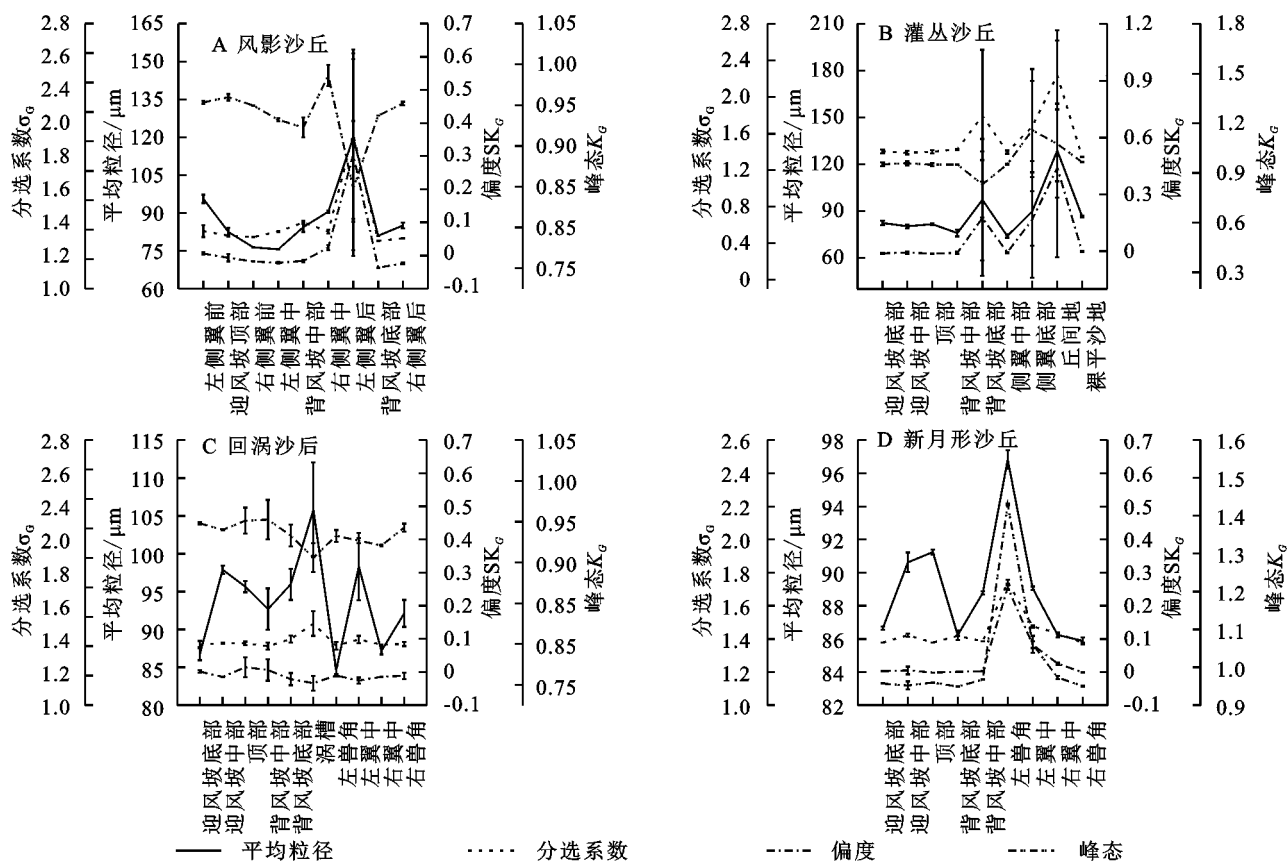


图6 不同沙丘粒度指标变化曲线

2.3 不同类型沙丘下风沙沉积物粒度参数相关分析

根据不同沙丘表层风沙沉积物粒度参数的相关关系,风影沙丘表面沙物质平均粒径与分选系数、偏度值呈极显著正相关性($p < 0.01$)(表1),风影沙丘表面沙物质平均粒径与峰态值呈显著负相关关系($p < 0.05$),风影沙丘表面沙物质分选系数与偏度呈极显著正相关性($p < 0.01$),与峰态呈显著负相关关系($p < 0.05$),风影沙丘表面沙物质偏度与峰态呈极显著负相关性($p < 0.01$)。灌丛沙丘表面沙物质平均粒径与分选系数、偏度值呈极显著正相关性($p < 0.01$),灌丛沙丘表面沙物质分选系数与偏度呈极显著正相关性($p < 0.01$)。回涡沙丘表面沙物质偏度与峰态呈极显著正相关性($p < 0.01$)。新月形沙丘表面沙物质平均粒径与偏度、峰态值呈极显著正相关性($p < 0.01$),新月形沙丘表面沙物质偏度与峰态呈极显著正相关性($p < 0.01$)。

2.4 不同类型沙丘磁化率参数含量及沉积物粒度与磁化率相关关系

风影沙丘表层沉积物的低质量磁化率(X_{lf})最大值为 $2.355 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,最小值为 $1.44 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,平

均值为 $1.91 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,标准偏差最大为9.37,平均值为3.82(图7A)。灌丛沙丘 X_{lf} 的变化范围为 $(1.60 \sim 3.14) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $2.19 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图7B)。灌丛沙丘 X_{lf} 值呈现以下特征, X_{lf} 值其中最大值出现在侧翼底,最小值出现在顶部;沿灌丛沙丘迎风坡脚—迎风坡中—坡顶—背风坡中—背风坡脚的顺序, X_{lf} 值呈现波动变化,从迎风坡脚经坡中至坡顶, X_{lf} 值呈现先增大后减小,从坡顶经坡中到背风坡脚 X_{lf} 值的变化为先增加后减小的趋势。回涡沙丘 X_{lf} 的变化范围为 $(1.29 \sim 2.82) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $2.01 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图7C)。灌丛沙丘 X_{lf} 值呈现以下特征, X_{lf} 值其中最大值出现在迎风坡中,最小值出现在涡槽;沿回涡沙丘迎风坡脚—迎风坡中—坡顶—背风坡中—背风坡脚的顺序, X_{lf} 值呈现波动变化,从迎风坡脚经坡中至坡顶, X_{lf} 值呈现先增大后减小,从坡顶经坡中到背风坡脚 X_{lf} 值的变化为先增加后减小的趋势,沿回涡沙丘左翼角—左翼中—右翼中—右翼角的顺序, X_{lf} 值呈现先增大后减小又增大的趋势。新月形沙丘 X_{lf} 的变化范围为 $(1.62 \sim 2.70) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $2.01 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图

7D)。新月形沙丘 X_{lf} 值呈现以下特征, X_{lf} 值其中最大值出现在左翼中, 最小值出现在右翼角; 沿新月形沙丘迎风坡脚低—迎风坡中—坡顶—背风坡中—背风坡脚的顺序, X_{lf} 值逐渐减小的趋势。沿新月形沙丘左翼角—左翼中—右翼中—右翼角的顺序, X_{lf} 值呈现先增大后减小的趋势。

表 1 不同沙丘沙物质粒度参数相关性矩阵

沙丘类型		平均粒径	分选系数	偏度	峰态
风影沙丘	平均粒径	1			
	分选系数	0.896**	1		
	偏度	0.927**	0.984**	1	
	峰态	-0.673*	-0.887**	-0.807**	1
灌丛沙丘	平均粒径	1			
	分选系数	0.950**	1		
	偏度	0.960**	0.992**	1	
	峰态	0.338	0.346	0.434	1
回涡沙丘	平均粒径	1			
	分选系数	0.152	1		
	偏度	-0.488	-0.408	1	
	峰态	-0.407	-0.196	0.871**	1
新月形沙丘	平均粒径	1			
	分选系数	-0.290	1		
	偏度	0.800**	-0.081	1	
	峰态	0.829**	-0.137	0.993**	1

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

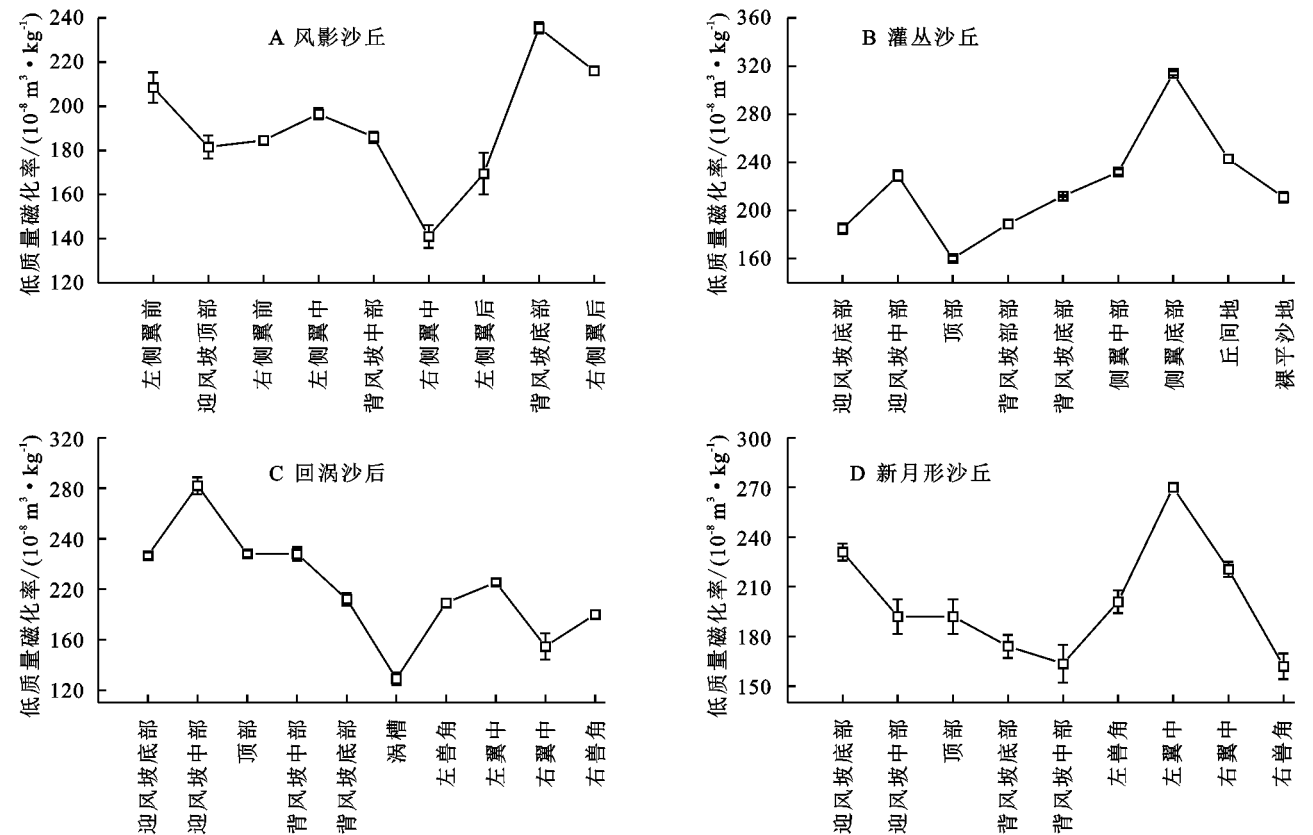


图 7 不同沙丘不同部位质量磁化率

沉积物磁化率是反映沉积物磁性含量、古气候变化及沉积环境的指标之一, 将策勒绿洲—沙漠过渡带表层沉积物的粒度各参数和低质量磁化率参数进行相关性分析, 研究区表层沉积物 X_{lf} 与各粒度指数均

无显著相关性,由图8可知,低质量磁化率与砂体积百分含量存在微弱的正相关,与粉砂体积百分含量存

在较弱负相关,说明研究区表层沉积物磁性矿物含量主要受粒径较小颗粒影响。

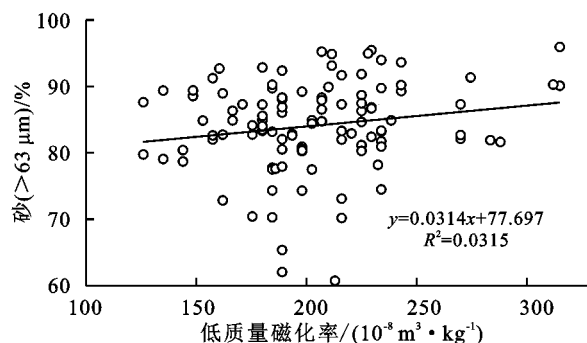
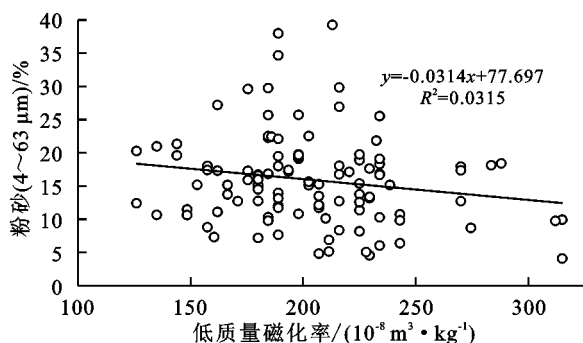


图8 策勒绿洲—沙漠过渡带表层沉积物粒度及磁化率相关关系

2.5 沉积环境分析

2.5.1 沉积环境判别 第四纪沉积物的粒径粗细旋回变化反映了沉积环境的变化,也就是沉积搬运介质如水、风的流速、流向、流量等动力条件的变化。Sahu 判别是基于世界各地大量碎屑沉积物样品的统

计分析结果建立的风沙、海滩、浅海、河流及浊流等5种沙丘沉积环境的判别公式(表2),具有一定的普遍意义^[32]。依据沉积物的平均粒径(M_z)、标准偏差(σ_G)、偏度(SK_1)和峰态(K_G)4项指标,建立了经验判别公式。

表2 沉积环境判别公式及判定标准

环境鉴别	判别公式	判定标准
风成与海滩	$Y_1 = -3.568M_z + 3.7016\sigma^2 - 2.0766SK_1 + 3.1135K_G$	$Y < -2.7411$, 为风成沉积环境 $Y > -2.7411$, 为海滩沉积环境
海滩和浅海	$Y_2 = 15.6534M_z + 65.7091\sigma^2 + 18.1071SK_1 + 18.5043K_G$	$Y < 65.3650$, 为海滩沉积环境 $Y > 65.3650$, 为浅海沉积环境
浅海与河流	$Y_3 = 0.2825M_z - 8.7604\sigma^2 + 4.8932SK_1 - 0.0482K_G$	$Y < -7.4190$, 为河流沉积环境 $Y > -7.4190$, 为浅海沉积环境
河流与浊流	$Y_4 = 0.7215M_z - 0.40304\sigma^2 + 6.7322SK_1 + 5.2927K_G$	$Y < 9.8433$, 为浊流沉积环境 $Y > 9.8433$, 为河流沉积环境

由于风沙沉积物样品取自于现代沙漠环境,首先选用风成与海滩判别公式:将4种沙丘的111个沉积物样品的粒度参数值带入 Y_1 式中,回涡沙丘和新月形沙丘的57个样品 Y_1 值均 < -2.7411 ,为风成沉积物;且风影沙丘只有一个样品左侧翼后的 $Y_1 > -2.7411$,为海滩沉积物,灌丛沙丘有3个样品 $Y_1 > -2.7411$,为海滩沉积物,其余42个样品 Y_1 值均 < -2.7411 。将以上计算出的海滩沉积物4个样品的粒度参数值带入海滩和浅海判别公式 Y_2 式中,结果 Y_2 值均 > 65.3650 ,为浅海沉积物。再将浅海沉积物4个样品的粒度参数值带入浅海与河流判别公式 Y_3 式中,结果 Y_3 值均 $Y < -7.4190$,为河流沉积物。将经过计算得出的河流沉积物样品带入河流与浊流判别公式 Y_4 式中,结果 Y_4 值均 < 9.8433 ,为浊流沉积物。通过以上的综合计算与验证,可以得出策勒绿洲—沙漠过渡带形成环境为风成沉积环境和河流冲积(洪积)环境,但主体为风成沉积环境,策勒位于塔克拉玛干沙漠南缘,主风向以西风为主,每年8级以上的大风3~9次,多年平均沙尘日数25.2d,最长可以达到59d,风力强劲,

风成作用明显。将沙物质沉积物进一步进行分析,沙丘取样点靠近策勒河,策勒河是条内流河,靠昆仑山冰雪补给为主,枯水期和丰水期明显,枯水期河床裸露,风力的作用下将颗粒物吹拂至下风向沉积形成河流冲积(洪积)环境。

2.5.2 环境敏感粒级提取 敏感粒度参数的获取和指代的环境意义是恢复古环境的核心研究内容之一^[15]。由于物源和沉积环境的多样性与复杂性,沉积物粒度特征以及环境判别公式往往只能反映出沉积动力、物质来源以及古环境演变的平均水平,忽视对沉积环境演变的过程性和细节性的探讨^[32]。采用粒级—标准偏差法来提取各采样点敏感粒级组分,标准偏差最大值对应的粒级为沉积环境敏感粒级组分,表明风成环境下的沉积物粒度一般集中于 $100 \sim 1\,000\,\mu\text{m}$, $60 \sim 550\,\mu\text{m}$ 可以指示区域风沙活动强度^[16]。

通过沉积环境判别得出策勒绿洲—沙漠过渡带形成环境为风成沉积环境和河流冲积(洪积)环境,但主体为风成沉积环境。4种不同的沙丘环境敏感粒级组分集中在 $100 \sim 570\,\mu\text{m}$ (表3),表明研究区域风

沙活动强烈。图 9 显示 4 种不同沙丘采样点粒级—标准偏差曲线变化相对一致,揭示其相近的沉积环境,但可以看出每个采样点的样品粒级—标准偏差相对变化差异较大,每一级敏感粒级组分各不相同,其新月形沙丘的各采样部位粒级—标准偏差值均小于

其他 3 种沙丘,标准偏差与粒径组分较小,粒级分布相对均匀。由于地势地貌、沙源沉积物结构、风况变化特征以及地理要素所组成的差异化构造,甚至人为原因造成的沉积环境差异,导致了每个不同地貌部位表面沉积物的粒级—标准偏差变化差异较大。

表 3 不同沙丘代表性采样点敏感粒径组分统计

类型	采样点	敏感粒径组分 a	敏感粒径组分 b	敏感粒径组分 c
风影沙丘	迎风坡底部	50.24±0.78	100.24±0.81	
	背风坡中部	44.77±0.61	100.24±0.46	
	背风坡底部	56.37±0.02	112.47±0.03	
	平均值	63.25±1.81	141.59±1.83	502.38±0.74
灌丛沙丘	迎风坡底部	70.96±0.73	126.19±0.70	
	顶部	39.91±0.27	70.96±0.58	141.59±0.42
	背风坡底部	70.96±2.74	502.38±3.00	
	丘间地	79.62±2.18	316.98±1.21	563.68±1.39
回涡沙丘	平均值	89.34±1.75	502.38±1.64	
	迎风坡底部	44.77±0.24	79.62±0.68	158.87±0.63
	顶部	70.96±0.19	112.47±0.45	200.00±0.61
	背风坡底部	79.62±0.41	178.25±0.63	
新月形沙丘	涡槽	100.24±1.27	224.40±2.02	
	平均值	70.96±1.39	158.87±1.50	
	迎风坡底部	44.77±0.02	158.87±0.02	
	顶部	56.37±0.04	141.59±0.04	
新月形沙丘	背风坡底部	56.37±0.07	158.87±0.08	
	平均值	89.34±1.07		

注:表中数值为粒径(μm)±标准偏差。

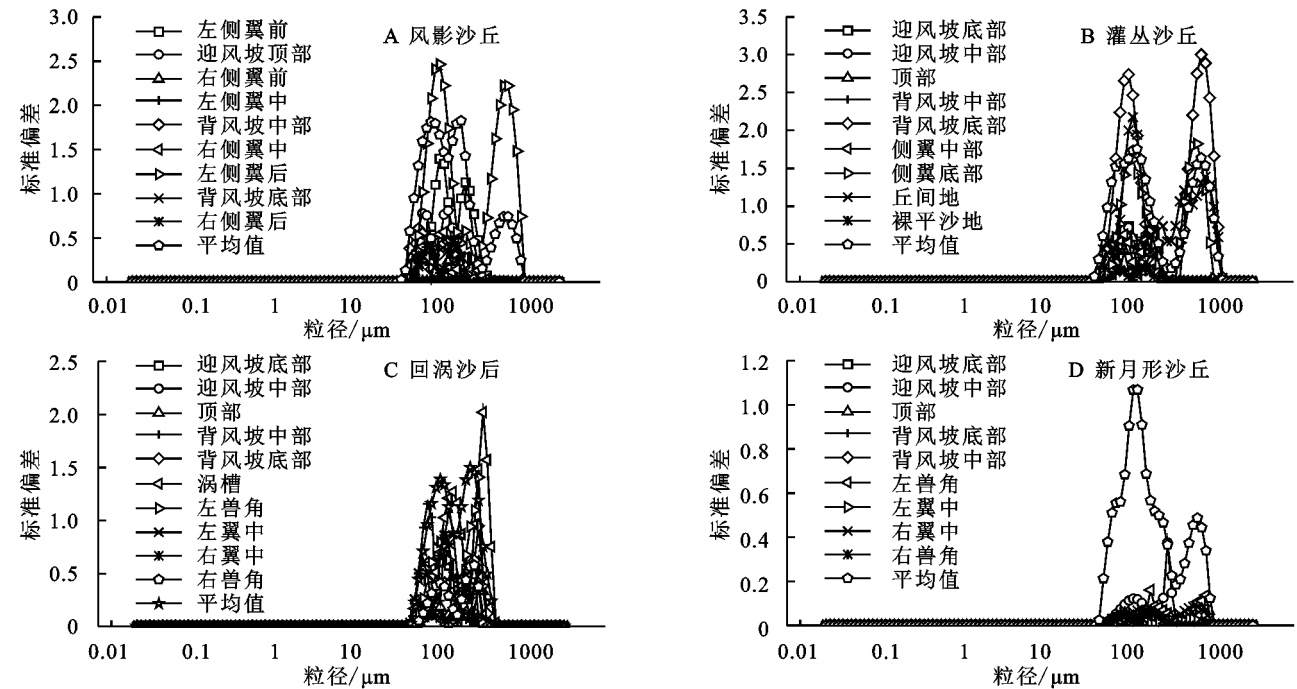


图 9 采样点敏感粒径组分

3 讨论与结论

3.1 讨论

粒度分析作为风沙沉积物的重要研究内容之一,

也是风沙地貌形成和发育的指代性物质^[14]。本文通过研究策勒绿洲—沙漠过渡带的 4 种不同风积地貌表面沙物质粒径特征及粒度参数的相关性,发现不同风积地貌形成的风动力、植被及地形条件不同,其表

面风沙沉积物粒度特征也有显著差异。已有研究表明^[20],策勒沙漠—绿洲过渡带的地表沙物质机械组成以极细砂和细砂为主,其余粒级砂粒含量很少。本文研究得出了相似结果,表明沿着主风向4种沙丘表面沙物质主要由极粗粉砂、极细砂、细砂组成,百分含量总和由小到大依次为96.71%,97.54%,98.48%,98.65%。研究表明^[10],沙物质平均粒径与偏度值呈极显著正相关,沙粒平均粒径愈粗愈趋向正偏;沙物质的分选系数与峰态值呈极显著正相关,沙物质分选性愈差,就愈趋于窄峰态,这与文中结论基本吻合。目前在磁化率的研究中,多以黄土为主,对于风积地貌磁化率的研究相对较少^[26],本文研究发现低质量磁化率与砂体积百分含量存在微弱的正相关,与粉砂体积百分含量存在较弱负相关,说明研究区表层沉积物磁性矿物含量主要受粒径较小颗粒影响。本文仅以低频磁化率作相关分析,具有一定的局限性,在以后研究中应通过高频磁化率和频率磁化率作进一步验证分析。有学者研究^[16]认为60~550 μm 的粒径碎屑物也可能为风成沙沉积物源。通过对4种不同风积地貌环境敏感粒级组分的提取集中在100~570 μm ,表明研究区风沙活动强烈,沉积物为风成沙,主体为风成沉积环境。土壤风蚀沙化严重,严重影响了绿洲农业的健康发展,风沙活动是土壤风蚀沙化的重要因子,研究风沙活动过程所形成的不同风积地貌,对防风固沙具有重大意义。策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动形成不同风积地貌粒径差异可以指示不同沙漠化程度,也反映了沉积动力、物质来源及环境演变,为塔里木盆地南缘绿洲—沙漠过渡带防风固沙提供重要依据。

3.2 结论

(1) 4种沙丘表面沙物质主要由极粗粉砂、极细砂、细砂组成,百分含量总和由小到大依次为96.71%,97.54%,98.48%,98.65%,其余粒级百分含量很少,均不足2%。沿着主风向,不同沙丘类型下地表风沙沉积物平均粒径由迎风坡底部至顶部逐渐变细,分选性逐渐变差,顶部至背风坡底部逐渐变粗,分选性稍变好。

(2) 不同沙丘的峰态平均值介于0.93~1.02,属于中等峰态,从总体上分析4种沙丘的峰态值从迎风坡底到顶部逐渐增大,顶部到背风坡底部逐渐减小。新月形沙丘偏度值最小,偏度值介于-0.03~0.01,主要表现为相对中值对称,风影、回涡、灌丛介于-0.04~0.44,主要表现为相对中值对称或粗偏。

(3) 风影沙丘、灌丛沙丘表面沙物质平均粒径与分选系数呈极显著正相关($p < 0.01$)。风影沙丘、灌丛沙丘、新月形沙丘表面沙物质平均粒径与偏度值呈

极显著正相关($p < 0.01$),表明沙粒平均粒径愈粗愈趋向正偏。风影沙丘、灌丛沙丘表面沙物质分选系数与偏度呈极显著正相关($p < 0.01$),风影沙丘、回涡沙丘、新月形沙丘表面沙物质偏度与峰态呈极显著正相关($p < 0.01$),沙物质分选性愈差,就愈趋于窄峰态。

(4) 通过沉积环境判别得出策勒绿洲—沙漠过渡带沉积物为风成沙,主体为风成沉积环境,沙物质的粒级组成、运动形式、植被覆盖度、风力及地形等均是导致粒级—标准偏差差异的主要原因,4种风积地貌环境敏感粒级组分集中在100~570 μm ,风沙运动强烈。

参考文献:

- [1] Purkait B. The use of grain-size distribution patterns to elucidate aeolian processes on a transverse dune of Thar Desert, India[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,35(5):525-530.
- [2] Langford R P, Gill T E, Jones S B. Transport and mixing of eolian sand from local sources resulting in variations in grain size in a gypsum dune field, White Sands, New Mexico, USA[J]. *Sedimentary Geology*, 2016,333(1):184-197.
- [3] 李超,董治宝,崔徐甲.腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J].*中国沙漠*,2015,35(1):129-135.
- [4] 钱广强,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J].*中国沙漠*,2011,31(6):1357-1364.
- [5] 董治宝,吕萍.70年来中国风沙地貌学的发展[J].*地理学报*,2020,75(3):509-528.
- [6] 凌智永,周亚辉,李廷伟,等.东昆仑库木库里沙漠表层沉积物粒度特征、物源与沉积环境[J].*干旱区地理*,2017,40(5):1013-1019.
- [7] Lancaster K. Grain-size characteristics of linear dunes in the Southwestern Kalahari[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986,56(3):395-405.
- [8] 苏松领,毛东雷,蔡富艳,等.新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J].*干旱区资源与环境*,2020,34(8):124-132.
- [9] 毛东雷,雷加强,王翠,等.新疆策勒县沙漠—绿洲过渡带风沙流结构及输沙粒度特征[J].*水土保持通报*,2015,35(1):25-33.
- [10] 王倩,毛东雷,赵枫,等.策勒绿洲—沙漠过渡带不同植被沙丘表面风沙沉积物粒度特征分析研究[J].*干旱区资源与环境*,2021,35(3):96-102.
- [11] 苏松领,毛东雷,赵枫,等.新疆策勒不同荒漠化程度下地表沉积物粒度及分形特征[J].*干旱区资源与环境*,2021,35(11):127-134.
- [12] 苏志珠,梁爱民,马义娟,等.库姆塔格沙漠典型线形沙丘粒度特征[J].*中国沙漠*,2016,36(4):877-884.
- [13] 宁凯,李卓仑,王乃昂,等.巴丹吉林沙漠地表风积砂粒度空间分布及其环境意义[J].*中国沙漠*,2013,33(3):642-648.
- [14] 宋洁,春喜,白雪梅,等.中国沙漠粒度分析研究综述

- [J].中国沙漠,2016,36(3):597-603.
- [15] 隆浩,王乃昂,马海州,等.腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的区域风沙特征[J].沉积学报,2007,25(4):626-631.
- [16] 隆浩,王乃昂,李育,等.毛乌素沙地北缘泊江海子剖面粒度特征及环境意义[J].中国沙漠,2007,27(2):187-193.
- [17] 王蒙,逯军峰,付鹏,等.巴丹吉林沙漠周边地区土壤养分和粒度特征[J].中国沙漠,2022,42(5):232-244.
- [18] 梁爱民,屈建军,董治宝,等.库姆塔格沙漠沉积物粒度端元特征及其物源启示[J].中国沙漠,2020,40(2):33-42.
- [19] 王佩,马倩,朱元璞,等.新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J].干旱区地理,2021,44(6):1644-1653.
- [20] 毛东雷,吴云霞,蔡富艳,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J].泥沙研究,2019,44(2):48-54.
- [21] 武胜利,李志忠,焦黎,等.新疆和田河流域怪柳沙堆表面沙物质粒度特征[J].干旱区研究,2008,25(5):745-751.
- [21] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的试验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.
- [23] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的试验研究(II)[J].中国沙漠,2007,27(1):15-19.
- [24] 李艳红,徐莉,陈成贺日,等.新疆罗布泊湖盆沉积物剖面粒度与磁学特征及沉积环境[J].地质通报,2014,33(10):1507-1513.
- [25] 孔凡彪,陈海涛,徐树建,等.山东章丘黄土粒度指示的粉尘堆积过程及古气候意义[J].地理科学,2021,76(5):1163-1176.
- [26] 朱元璞,马倩,吉小芳.新疆塔克尔莫乎尔沙漠表层沉积物磁化率特征及环境意义[J].干旱区资源与环境,2020,34(6):124-130.
- [27] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].土壤学报,2018,55(1):88-99.
- [28] 杨佐涛,戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J].中国沙漠,1990,10(3):33-39.
- [29] 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.
- [30] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1914,25(1):655-744.
- [31] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Journal of Geology, 1922,30(1):377-392.
- [32] 安庆,安萍,徐汝汝,等.青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J].聊城大学学报:自然科学版,2017,30(4):37-47.

(上接第134页)

- [11] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等.基于DEM的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J].水土保持通报,2014,34(3):141-144.
- [12] 安琪琪,乔文英,李维军,等.灌丛化对黄土高原草地植物群落结构和地上生物量的影响[J].西北植物学报,2021,41(4):664-671.
- [13] 黄雅茹,董杰,汪季,等.神府东胜煤田沉陷区3种人工林生长状况比较研究[J].水土保持研究,2013,20(2):115-120.
- [14] 冯建雄,常静,李海平,等.外源茉莉酸诱导对油菜防御酶活性和4种物质含量及植株生长的影响[J].植物保护,2021,47(1):128-134.
- [15] 高福元,张吉立,刘振平.冬季低温对4种彩叶植物SOD, POD活性影响的研究[J].中国农学通报,2010,26(5):169-173.
- [16] 秦立刚,李雪,李韦瑶,等. PEG 干旱胁迫对3种葱属植物种子萌发期渗透调节物质及酶活性的影响[J].草地学报,2021,29(1):72-79.
- [17] 彭志红,彭克勤,胡家金,等.渗透胁迫下植物脯氨酸积累的研究进展[J].中国农学通报,2002,18(4):80-83.
- [18] 马静,卢永强,张琦,等.黄土高原采煤沉陷对土壤微生物群落的影响[J].土壤学报,2021,58(5):1278-1288.
- [19] 张艳如,李国庆,刘冠,等.陕西省延安市燕沟流域水系分形与地貌侵蚀发育研究[J].水土保持研究,2022,29(2):7-10.
- [20] 许传阳,马守臣,张合兵,等.煤矿沉陷区沉陷裂缝对土壤特性和作物生长的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(5):597-604.
- [21] 苏贝贝,张英,道日娜.4种豆科植物根际土壤真菌群落特征与土壤理化因子间相关性分析[J].草地学报,2021,29(12):2670-2677.
- [22] 王志刚,郭洋楠,毕银丽,等.接种AM真菌对采煤沉陷区复垦植物生长及土壤化学生物性状的影响[J].北方园艺,2016(24):163-170.
- [23] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2000,53(3/4):215-230.
- [24] 宋世杰,张玉玲,王双明,等.陕北煤矿区采动地裂缝对土壤微生物和酶活性的影响[J].煤炭学报,2021,46(5):1630-1640.
- [25] 郭晓明,赵同谦.采煤沉陷区耕地土壤微生物数量及酶活性的空间特征[J].环境工程学报,2010,4(12):2837-2842.
- [26] 周伟伟,王雁,杜静.干旱胁迫对景天属植物生理生化特性的影响[J].林业科学研究,2009,22(6):829-834.