

新疆策勒绿洲—沙漠过渡带不同植被下的沙丘形态特征及沉积物粒度分析

何强强^{1,2}, 毛东雷^{1,2}, 朱文煜^{1,2}, 徐佳瑞^{1,2},
张凯丽^{1,2}, 张勇^{1,2}, 赛亚热·赛都拉^{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: 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带为典型的极端干旱区, 风是最主要的搬运动力, 风蚀和沙尘暴对土壤沙粒的搬运和堆积造成了土地沙化和荒漠化。运用回归分析和相关分析方法, 探讨不同灌丛沙堆风沙沉积物的沉积规律和沙丘发育的影响因素, 对不同植被下的沙丘形态特征及沉积物粒度进行分析。结果表明: (1) 在不同植被覆盖度下, 柽柳比骆驼刺灌丛沙堆的沙物质粒径分布均匀, 柽柳和骆驼刺分选的沙物质粒径最粗分别为高覆盖度下和中覆盖度下, 最细均为低覆盖度下。(2) 沙丘和障碍物演化过程中, 高度、长度、宽度三者之间协同变化, 相互影响、相互反馈。障碍物的高度和宽度与沙丘长度、宽度和高度之间均存在显著关系, 植株的大小影响沙丘形态的发育。(3) 风影和灌丛沙丘的沙物质主要由极粗粉砂、极细砂和细砂组成, 回涡沙丘的沙物质主要由极细砂和细砂组成, 其余粒级沙粒含量很少, 均不足5%。从植被类型解析, 沙物质粗细为柽柳>骆驼刺>花花柴; 从沙丘类型分析, 沙物质粗细为回涡沙丘>灌丛沙丘>风影沙丘。(4) 沙丘沙物质平均分选系数介于1.42~1.60, 属于中等偏上—中等分选性, 沙物质偏度平均值介于0.01~0.20, 属于对称, 沙物质峰态平均值介于0.96~1.07, 属于常峰态。(5) 沙丘沙物质分选系数与偏度值均呈极显著相关($R^2>0.70$, $p<0.01$), 沙物质平均粒径与分选系数和偏度值均呈极显著相关($p<0.01$)。研究结果对深入理解不同植被下的灌丛沙堆表面沉积物粒度特征和沙丘形态的发育具有重要的意义。

关键词: 绿洲—沙漠过渡带; 植被类型; 粒度特征; 沙丘; 灌丛; 策勒

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0070-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.010

Morphological Characteristics and Sediment Particle Size Analysis of Sand Dunes with Different Vegetations in the Cele Oasis-Desert Ecotone, Xinjiang

HE Qiangqiang^{1,2}, MAO Donglei^{1,2}, ZHU Wenyu^{1,2}, XU Jiarui^{1,2},
ZHANG Kaili^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, SAIDOUULA Saiyare^{1,2}

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

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

Abstract: The Cele Oasis-Desert Ecotone in Xinjiang is a typical extreme arid zone, where wind is the most important driving force of land desertification caused by the transport and accumulation of soil sand grains by wind erosion and sandstorms. Regression analysis and correlation analysis methods were used to investigate the sedimentation law and influencing factors of sand dune development of aeolian sand dunes in different shrublands, and the morphological characteristics and sediment particle size of sand dunes under different vegetations were also analyzed. The results showed that: (1) Under different vegetation cover, *Tamarix chinensis* was more uniformly distributed than the sand particle size of the sand pile of *Alhagi sparsifolia* shrubs, and the coarsest particle size of the sand material sorted by *Tamarix chinensis* and *Alhagi sparsifolia* appeared under the high and medium coverage respectively, and both the finest appeared under the low coverage. (2) In the evolution process of dunes and obstacles, all the height, length and width changed in synergy, influencing each other and giving feedback to each other. There was a significant relationship between the height and width of the obstacle and the length, width and height of the dune, and the size of the plant affected the development of the dune morphology. (3) The sand material of wind shadow and shrub dunes

收稿日期: 2022-03-22

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(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)

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, 副教授, 博士, 主要从事风沙地貌及荒漠化防治研究。E-mail: donglei6325@sina.com

was mainly composed of extremely coarse silt sand, extreme fine sand and fine sand, and the sand material of the whirlpool sand dunes was mainly composed of extremely fine sand and fine sand, and the remaining granular sand particle content was very small, less than 5%. From the analysis of vegetation types, the thickness of sand material was *Tamarix chinensis* > *Alhagi sparsifolia* > *Karelinia caspia*, and from the analysis of sand dune types, the thickness of sand matter was echo dunes > shrub dunes > wind shadow dunes. (4) The average sorting coefficient of sand dune sand material was between 1.42 and 1.60, which belonged to the upper middle to medium sorting, the average deviation of sand as iws between 0.01 to 0.20, which belonged to symmetry, and the peak state average of sand matter was between 0.96 to 1.07, which belonged to the constant peak state. (5) The sorting coefficients and skewness values of sand dunes were significantly correlated ($R^2 > 0.70$, $p < 0.01$), and the average particle size of sand substances was significantly correlated with the sorting coefficient and skewness value ($p < 0.01$). The results are of great significance for the in-depth understanding of the particle size characteristics of sediment surface sediments and the development of dune morphology in shrubland dunes under different vegetations.

Keywords: oasis-desert ecotone; vegetation type; granularity characteristics; sand dunes; scrub; Cele

沙丘是由风力作用从物源区分选出沉积物而累积形成的堆积床面,风力分选作用在不同形态和各部位之间出现不同程度的差异,从而形成不同的沙丘^[1-3]。国内外学者^[4-9]大量研究表明,由于不同地理环境、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,表现出不同地理环境下沙丘的沉积物粒径组成上具有显著差别。对风沙沉积粒径分布及分选特征研究,理解近地表输沙动力、分析风沙沉积环境,以及反演风沙环境变化具有重要的意义^[10-11]。崔徐甲等^[12]、何清等^[13]、马倩等^[14]分别研究了巴丹吉林沙漠、库姆塔格沙漠、艾比湖抛物线沙丘表面沙物质的粒度特征;蔡东旭等^[15]研究发现,在风影沙丘演化过程中,沙丘形态参数间存在显著的相关性,沙丘垂向与水平方向之间相关性较好;李志忠等^[16-17]在风沙活动强烈的和田河流域对灌丛沙丘的形成演化和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存在明显的规律;武胜利等^[18]研究了和田河流域灌草丛沙堆的形态特征与发育过程,各种灌草丛沙堆的长度、宽度与高度之间存在较好的相关性;王翠等^[19]研究了花花柴沙堆形态发育,分为早期的盾形沙堆和较稳定时期的半球形沙堆,得出沙堆的发育与植株的形态有显著的相关关系;毛东雷等^[20]研究得出,回涡沙丘表面沙颗粒平均粒径较粗,沙粒属于中等—较好的分选性。在区域环境基本相同的条件下,植被的形态、密度和生长特性均会影响灌丛沙堆的形态及发育过程^[15]。风沙活动强度与植被覆盖度有关,随着植被覆盖度增加,地表风蚀活动强度呈指数降低,植被覆盖度越高,越能有效降低风沙活动强度^[21-22]。文中选取以固定半固定沙丘为主的策勒绿洲—沙漠过渡带,依据怪柳、花花柴和骆驼刺不同灌丛沙堆防风固沙的影响,通过野外实地考察采样及室内粒度试验,探讨沙物质

粒度和沙丘形态特征的关系,为该区环境的演化及防风固沙研究提供重要的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

策勒县(35°18'—39°30'N, 80°03'—82°10'E)位于昆仑山北麓,塔克拉玛干沙漠南缘,属于极端干旱区。年均降水量为 35.5 mm,年均蒸发量为 2 751.6 mm,平均大风日数为 1.8 天,平均浮尘日数为 147.6 天,平均扬沙日数为 46.9 天,平均沙尘暴日数为 20.4 天,年平均风速为 1.6 m/s,历年极大风速为 28 m/s,风向以 WNW、W 为主,频率占 62.43%~76.25%;NW 风次之,频率占 17.75%^[23]。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。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,流动沙丘沙粒径平均值以极细砂为主,细砂含量较低^[24],质地轻,粒径细,易形成风沙流。土壤以棕漠土(正常干旱土)和风沙土(砂质新成土)为主。自然植被主要为疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)和多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*),其次有盐生草(*Halogeton glomeratu*)、芦苇(*Phragmites australis*)、胡杨(*Populus euphratica*)等。

1.2 试验材料与研究方法

2020 年 12 月在策勒绿洲—沙漠过渡带沿流沙地至半固定沙地间进行采样,共采样 364 个风沙沉积物样品。首先,在植被覆盖度约为 0~10%,10%~20%,20%~40%和 40%~60%附近进行采样,由于低植被覆盖区无花花柴灌丛,且高植被覆盖区无回涡沙丘和风影沙丘的发育,所以不同植被覆盖度下只采集怪柳和骆驼刺灌丛沙丘表层沙样共 56 个样品。其次,在覆盖度相近(10%~15%)的区域,分别选取骆驼刺、怪柳和花花柴沙丘进行沙样采集,按照

0.4 m×0.4 m 样方对角线采集沙丘表层 0—1 cm 样品并混合装袋。回涡沙丘(图 1a)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)和涡槽(W)共 90 个样品。灌丛沙丘(图 1b)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)、丘间地和裸平沙地共 81 个样品。风影沙丘(图 1c)采样部位依次为迎风坡侧翼(F1、F3)、迎风坡顶(F2)、背风坡侧翼(F4、F6)、背风坡中部(F5)和背风坡底部(F7)共 81 个样品。利用相机对每个灌丛进行拍照,运用 Photoshop 2019 软件计算灌丛疏透度,利用皮尺测量灌丛南北、东西长度和高度,高度为灌丛最高点至沙丘顶部的垂直距离,并测量灌丛沙丘长度、宽度和高度,风影沙丘长度和宽度,回涡沙丘迎风坡和背风坡长度、高度以及涡槽长度。样品经纯化处理之后,采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测算,测试范围为 0.02~2 000 μm,每组样品重复测量 3 次。采用福克和沃德(1957)粒度参数公式及对应的等级划分标准,计算沙物质参数

指标。所有数据采用 Excel 2010、Origin 2018、GRA-DISTAT 等软件分析并绘制相关图件。

利用 Landsat8 OLI 卫星遥感影像估算研究区植被覆盖度(时间分辨率 16 天,空间分辨率为 30 m×30 m),数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)。利用 ENVI 5.2 对影像进行辐射定标和大气校正,根据研究区范围内的 NDVI 值区间分布,结合实地考察和 Google Earth 的观测,以 5% 和 95% 作为 NDVI_{soil} 和 NDVI_{veg} 的阈值。本文采用像元二分模型估算植被覆盖度,FVC 计算公式为^[25]:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI 为归一化植被指数;NDVI_{soil} 为裸土区域对应的像元 NDVI;NDVI_{veg} 为完全植被区域对应的像元 NDVI。利用 Band math 对年最大 NDVI 影像的 FVC 进行计算。计算结果与植被覆盖度实测数据进行拟合发现两者拟合程度较高($R^2=0.83$),估算结果可靠。通过策勒绿洲—沙漠过渡带植被覆盖度有关研究^[26],将过渡带内的 FVC 划分为低覆盖度(0~10%)、中低覆盖度(10%~20%)、中覆盖度(20%~40%)和高覆盖度(40%~60%)。

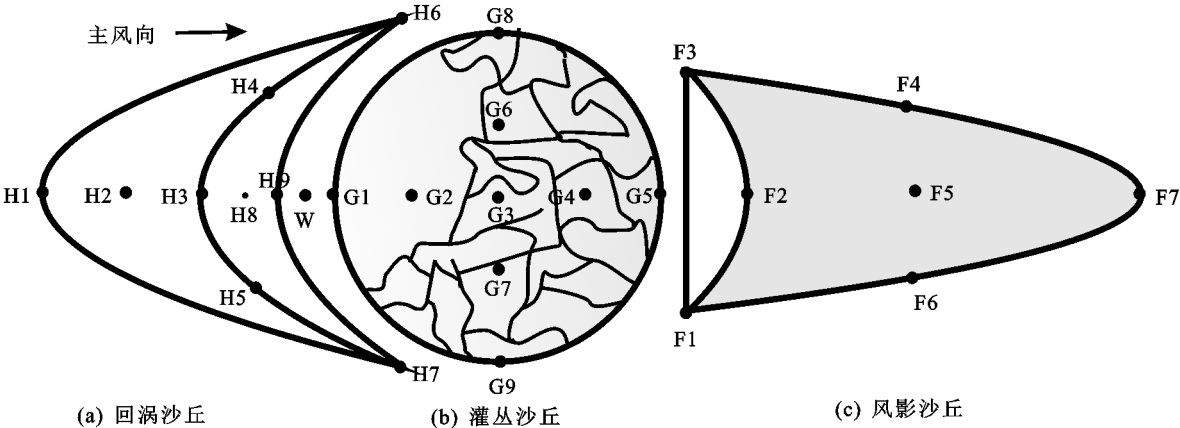


图 1 不同沙丘类型样品采集点示意图

2 结果与分析

2.1 不同覆盖度下灌丛沙丘表面沙物质粒径特征

在不同植被覆盖度下,怪柳比骆驼刺灌丛沙丘的沙物质粒径分布均匀,怪柳和骆驼刺分选的沙物质粒径最粗分别为高覆盖度下和中覆盖度下,最细为低覆盖度下(图 2a、图 2b)。怪柳和骆驼刺灌丛沙丘表层的沙物质粒径含量有明显的差别(图 2c),极粗粉砂、极细砂、细砂为优势粒级,极细砂在粒级组成中平均含量最大,怪柳灌丛沙丘表面的极细砂百分比含量为低覆盖度>中低覆盖度>中覆盖度>高覆盖度,百分比含量值分别为 57.26%,48.52%,47.56%,46.72%,骆驼刺灌丛沙丘表面的极细砂百分比含量为低覆盖度>高覆盖度>中覆盖度>中低覆盖度,百分比含量值分别为 55.57%,52.09%,50.08%,49.76%。在极

细砂粒级中,不同覆盖度下的骆驼刺灌丛沙丘分选较集中,怪柳灌丛沙丘较分散,但总体植被覆盖度越低,分选的极细砂含量比重越大,且低覆盖度怪柳沙丘比骆驼刺更利于分选出极细砂。极粗粉砂在粒级组成中平均含量次之,怪柳灌丛沙丘的极粗粉砂百分比含量为中低覆盖度>高覆盖度>中覆盖度>低覆盖度,百分比含量值分别为 43.47%,38.80%,33.61%,31.76%,骆驼刺灌丛沙丘的极细砂百分比含量为高覆盖度>中覆盖度>中低覆盖度>低覆盖度,百分比含量值分别为 38.01%,36.26%,35.91%,33.61%,由于怪柳灌丛的形态特征,中低覆盖度更有利于分选出极粗粉砂,骆驼刺灌丛沙丘覆盖度越高越有利拦截极粗粉砂,怪柳灌丛沙丘的极粗粉砂比骆驼刺灌丛沙丘比重更大。

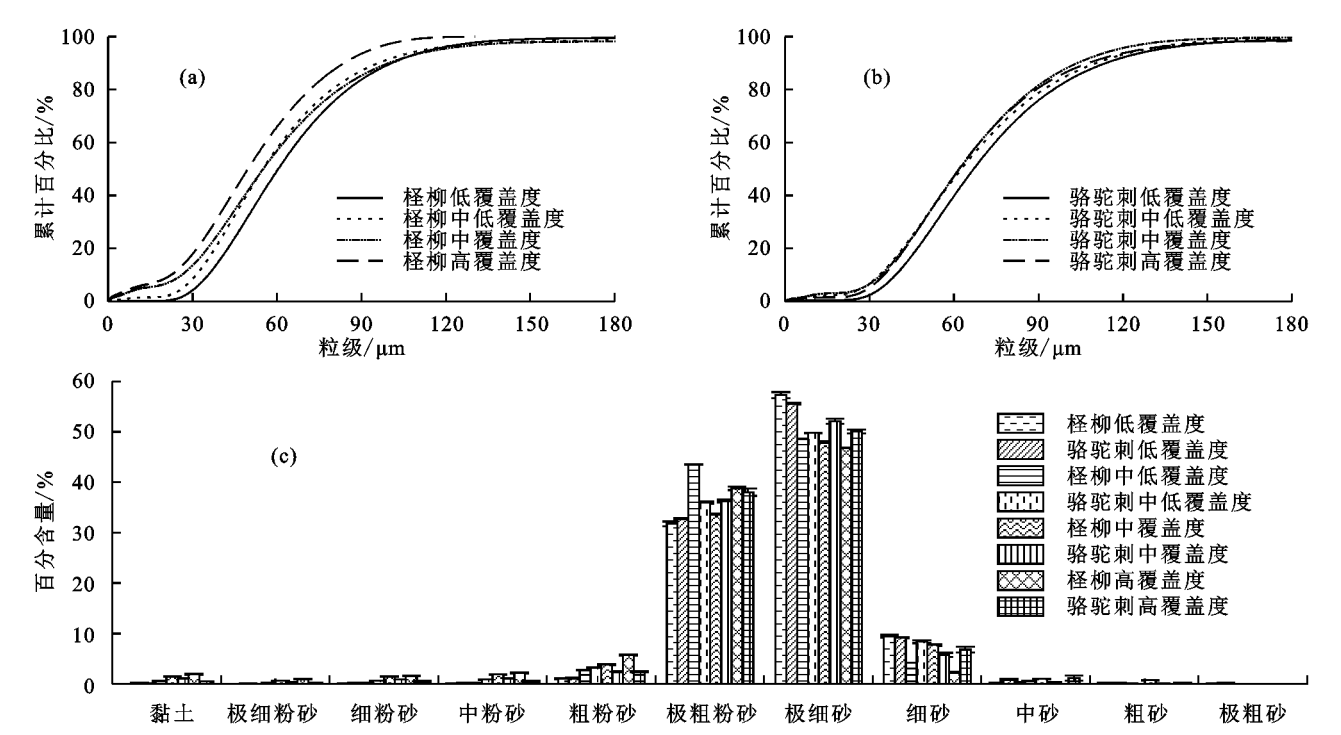


图2 不同覆盖度下灌丛沙丘累计百分比及百分含量曲线

由沉积物颗粒分布曲线(图 3a、图 3b)可知,在不同植被覆盖度下,柽柳与骆驼刺的灌丛沙丘均为双峰型,柽柳沙堆沙物质的双峰型曲线比骆驼刺分布均匀,骆驼刺沉积物颗粒分布范围宽,且中覆盖度有一较高的尾峰。主峰从高到低为骆驼刺中低覆盖度>

骆驼刺低覆盖度>骆驼刺高覆盖度>骆驼刺中覆盖度,柽柳低覆盖度>柽柳中覆盖度>柽柳高覆盖度>柽柳中低覆盖度,表明粒度体积含量频率在骆驼刺灌丛沙丘的中低覆盖度和柽柳灌丛沙丘低覆盖度下表现为最高。

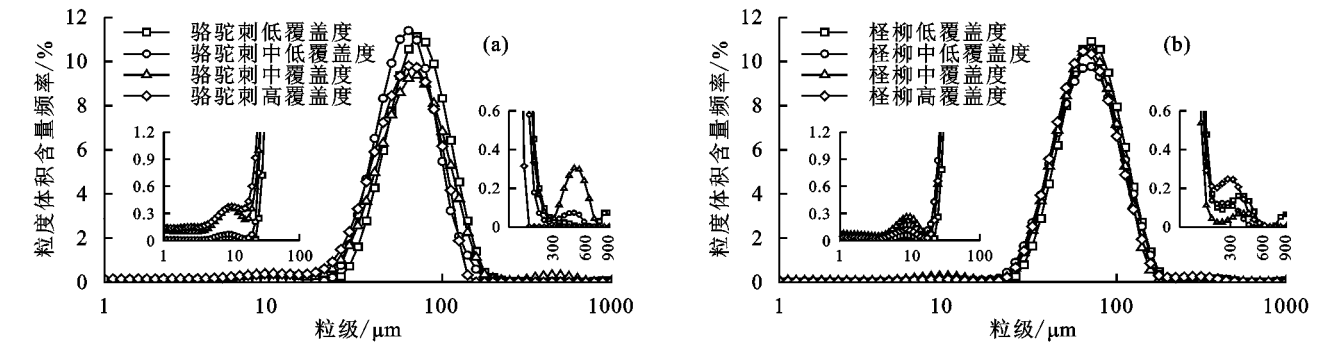


图3 沉积物颗粒频率分布曲线

2.2 不同植被沙丘的形态特征及形态参数的相关性

对沙丘和植被的形态参数进行相关性分析(表 1),沙丘的长度、宽度和高度之间的相关系数为 0.738~0.954($p<0.01$),植被长度、宽度和高度之间的相关系数为 0.570~0.874($p<0.01$)(表 2),说明沙丘和障碍物演化过程中,高度、长度、宽度三者之间协同变化,是一个相互影响、相互反馈的过程。障碍物的高度和宽度与沙丘长度、宽度和高度均存在显著关系,说明植株的大小影响着沙丘形态的发育。

灌丛的疏透度与植被长度、宽度和高度之间的相关系数为 0.391~0.496(表 2),灌丛的疏透度与植被高度存在极显著相关性($p<0.01$),灌丛的疏透度与植被长度和宽度存在显著相关性($p<0.05$),灌丛的疏透度与植被的长度、宽度和高度之间线性相关性

较差(图 4),但存在显著的正相关关系($p<0.05$),与沙丘的大小无明显关系。沙丘沙物质的平均粒径与灌丛的疏透度存在极显著的正相关关系($R^2=0.360$, $p<0.01$),说明沙丘沙物质的平均粒径与灌丛植株的疏密、高度和冠型直接相关;平均粒径与植被障碍物的宽度存在显著的正相关关系($R^2=0.148$, $p<0.05$),与植被高度之间相关性极显著($R^2=0.279$, $p<0.01$),可以得出沙丘沙物质的平均粒径与植被高度和宽度存在显著性相关,障碍物越高大,沉积颗粒物越粗;沙丘沙物质的平均粒径与沙丘的宽度存在着极显著关系($p<0.01$),与沙丘的高度也存在显著关系($p<0.05$)。

2.3 不同植被类型下沙丘地貌部位的沙物质粒度差异

风影和灌丛沙丘的沙物质主要由极粗粉砂、极细砂

和细砂组成,回涡沙丘的沙物质主要由极细砂、细砂组成,其余粒级沙粒含量很少,均不足 5%(图 5)。风影、灌丛和回涡沙丘的沙物质极细砂均占比最大,极细砂的平均百分含量介于 55.64%~68.70%,其中花花柴沙丘沙物质最小,骆驼刺沙丘沙物质最大,表明骆驼刺植被更

有利于近地表极细砂的拦截和堆积。在优势粒级组成中,极粗粉砂含量仅次于极细砂,灌丛和风影沙丘的沙物质极细砂平均百分含量介于 19.87%~32.15%,灌丛沙丘的沙物质极粗粉砂比风影沙丘比重更大,但回涡沙丘沙物质的极粗粉砂含量几乎接近于 0。

表 1 回涡、风影、灌丛沙丘及其障碍物形态参数

灌丛种类		回涡、风影、灌丛沙丘/m				障碍物(灌丛沙丘)/m			灌丛 疏透度/%
		迎风坡	背风坡	高度	涡槽	长度	宽度	高度	
		长度(L)	宽度(W)	(H)	(W)	(Lz)	(Wz)	(Hz)	
回涡沙丘	骆驼刺	2.30±0.75	0.93±0.25	0.70±0.20	0.30±0.10	3.10±1.57	3.53±1.38	2.30±0.75	11.7±5.5
	柽柳	6.73±0.64	3.53±1.22	1.87±0.81	0.77±0.25	15.67±13.28	13.57±6.17	6.73±0.64	23.0±6.1
	花花柴	1.50±0.50	0.45±0.30	0.37±0.21	0.21±0.09	2.57±1.72	4.10±4.42	1.50±0.50	6.8±5.5
风影沙丘	骆驼刺	6.47±4.88	1.67±0.76	—	—	3.10±1.57	3.53±1.38	6.47±4.88	11.7±5.5
	柽柳	15.33±10.26	4.77±4.53	—	—	15.67±13.28	13.57±6.17	15.33±10.26	23.0±6.1
	花花柴	2.33±1.89	1.57±0.55	—	—	2.57±1.72	4.10±4.42	2.33±1.89	6.8±5.5
灌丛沙丘	骆驼刺	2.98±1.60	3.50±1.14	—	—	0.87±0.21	3.10±1.57	2.98±1.60	11.7±5.5
	柽柳	13.97±14.97	12.63±6.56	—	—	5.52±4.23	12.13±7.68	13.97±14.97	23.0±6.1
	花花柴	2.43±1.80	4.10±4.42	—	—	0.82±0.51	2.50±1.61	2.43±1.80	6.8±5.5

注:表中数值为均值±标准差;—表示无数据。

表 2 沙丘参数相关性矩阵

沙丘参数	L	W	H	Lz	Wz	Hz	灌丛疏透度	平均粒径
L	1							
W	0.738**	1						
H	0.899**	0.954**	1					
Lz	0.570**	0.335	0.454	1				
Wz	0.798**	0.614**	0.708*	0.831**	1			
Hz	0.808**	0.872**	0.707*	0.656**	0.874**	1		
灌丛疏透度	0.329	0.289	0.547	0.391*	0.478*	0.496**	1	
平均粒径	0.299	0.517**	0.762*	0.147	0.385*	0.529**	0.600**	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。

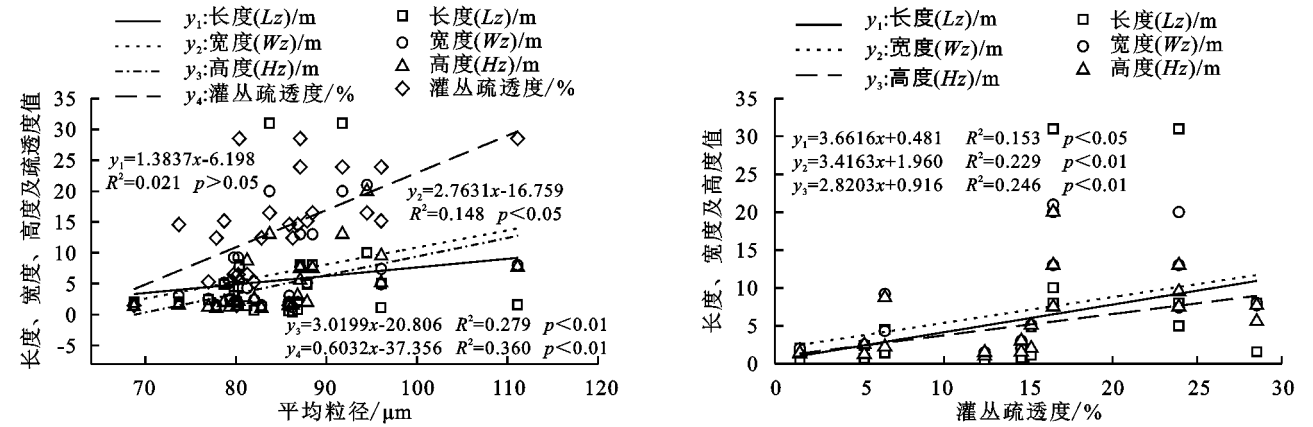


图 4 沙物质平均粒径、灌丛疏透度及灌丛植被的长度、宽度和高度线性回归分析

风影沙丘的 5 个地貌部位,极细砂的百分含量介于 57.10%~73.29%,其中花花柴风影沙丘迎风坡侧翼表面的沙物质极细砂百分含量最大,为 64.58%,背风坡百分含量最小,为 57.10%;柽柳风影沙丘的沙物质极细砂百分含量在背风坡中部表现最大,为 73.29%,迎风坡侧翼表现最小,为 57.10%;骆驼刺风影沙丘的沙物质迎风坡侧翼极细砂百分含量最高,为 71.80%,最低为背风坡中部 61.68%。在不同障碍物植被下,同样沙丘类型所沉积

的极细砂表现差异巨大,骆驼刺沙丘沙物质极细砂百分含量的最小值和花花柴的最大值接近。灌丛沙丘的 10 个地貌部位表面的沙物质极细砂百分含量介于 43.08%~70.49%,极粗粉砂百分含量介于 38.38%~13.56%。回涡沙丘的 9 个地貌部位表面的沙物质极细砂百分含量介于 46.63%~71.62%,其中花花柴沙丘的沙物质百分含量在迎风坡底部最小,为 55.79%,而骆驼刺则相反,背风坡底部最小,为 61.93%;柽柳和骆驼刺沙丘的沙物质极细砂百分

含量在兽角均最大,分别为 78.91%和 79.64%。灌丛沙丘比回涡和风影沙丘的沙物质粒级更加丰富。

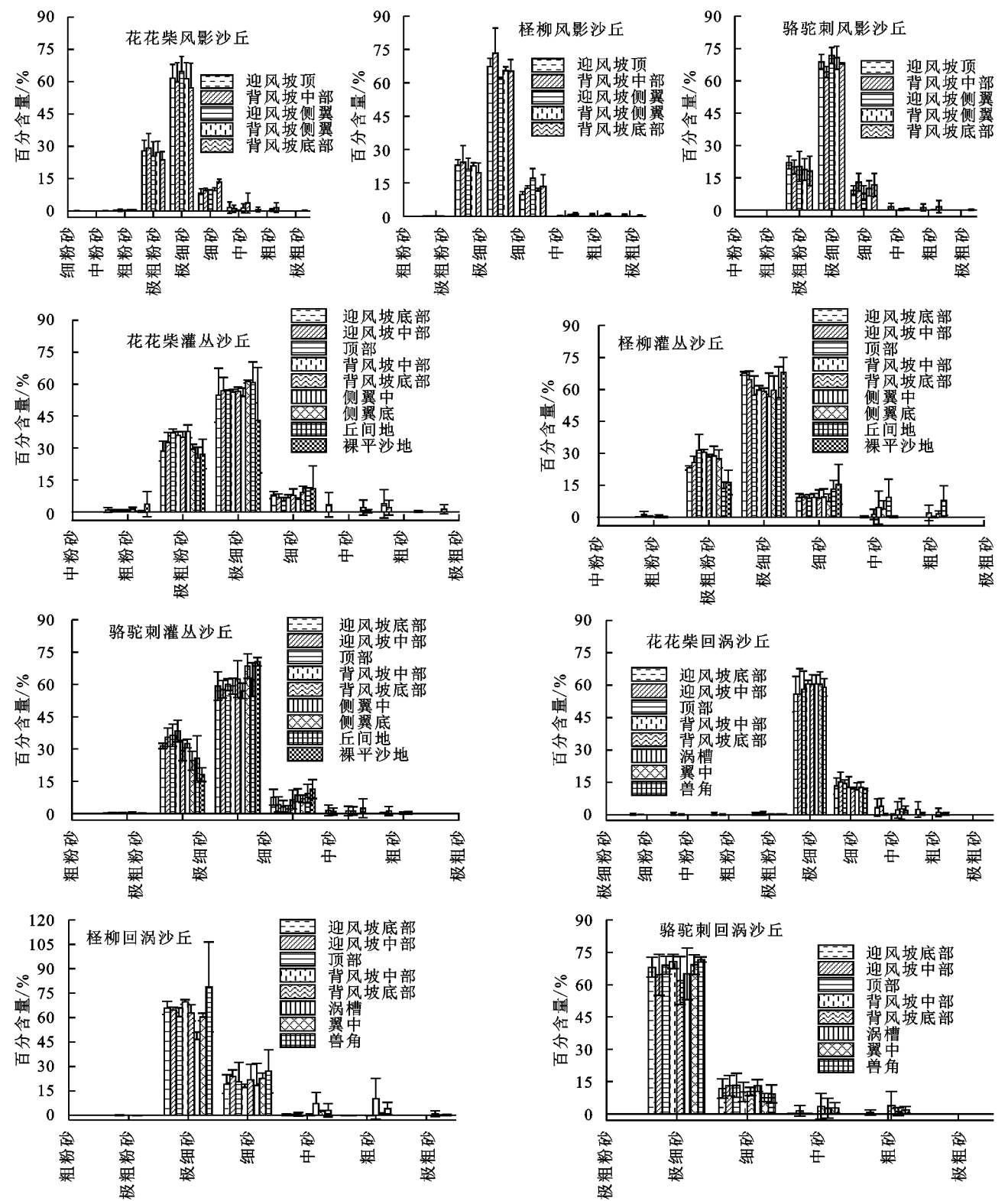


图 5 不同地貌部位下沙堆表层沙物质粒级分布

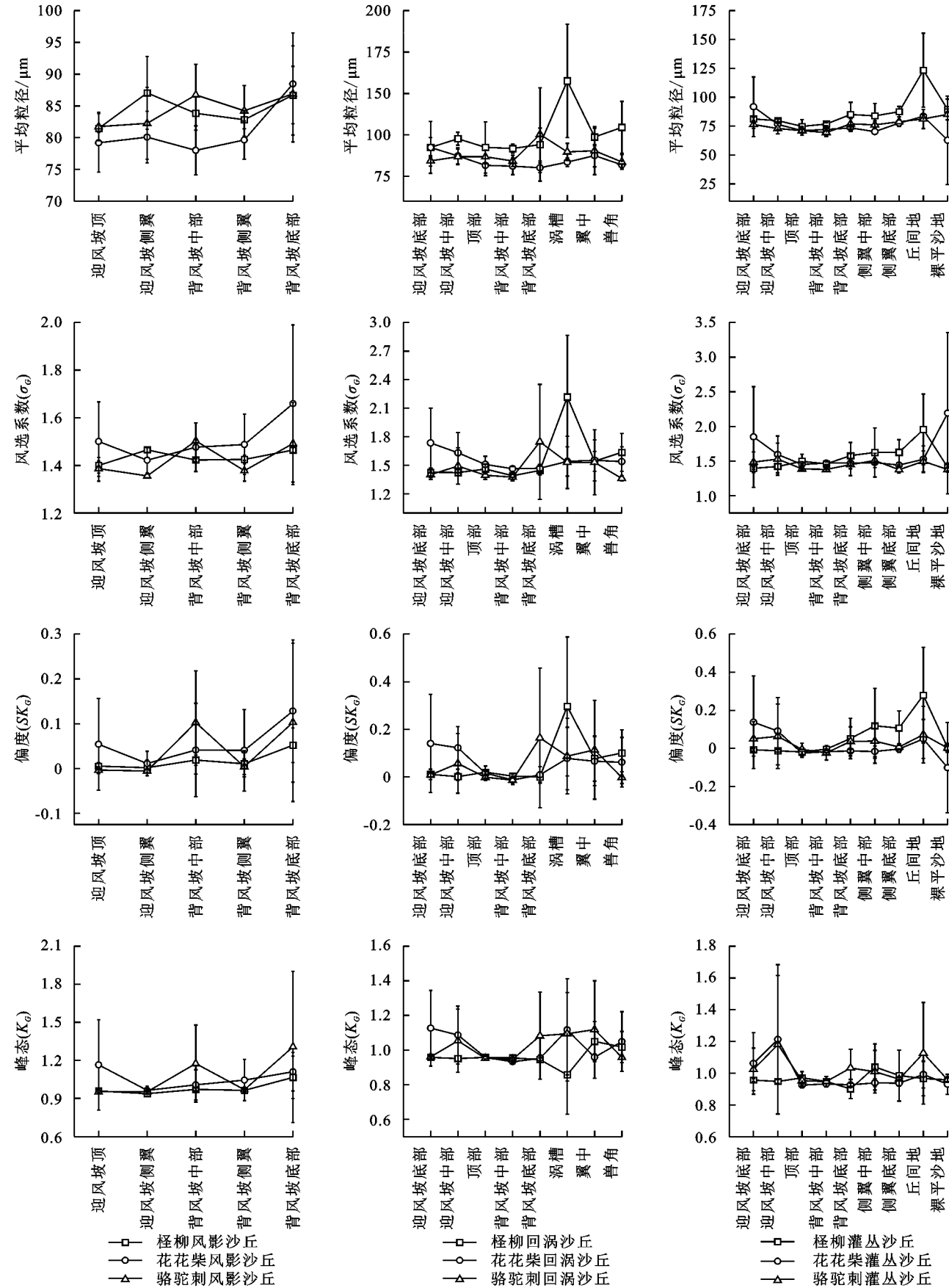
2.4 不同植被类型下沙丘表层风沙沉积物粒度参数特征

骆驼刺、花花柴和怪柳风影沙丘表面沉积物的平均粒径从迎风坡顶经背风坡中部到背风坡顶部逐渐变粗,且迎风坡顶部至迎风坡侧翼变粗(图 6)。花花柴和骆驼刺风影沙丘在背风坡底部沙物质颗粒最粗,

分别为 88.46,86.89 μm ;怪柳和骆驼刺风影沙丘在迎风坡顶沙物质颗粒最细,分别为 81.47,81.74 μm 。在回涡沙丘中,花花柴的迎风坡底部最粗,为 94.44 μm ,背风坡最细,为 80.20 μm ,怪柳的涡槽部最粗,为 132.58 μm ,骆驼刺的背风坡底部最粗,为 100.27 μm 。怪柳和骆驼刺灌丛沙丘的丘间地和裸平沙地最粗,但怪柳

回涡沙丘的最粗部位值比花花柴和骆驼刺灌丛沙丘最粗部位值更大,为 $123.44\text{ }\mu\text{m}$ 。植被和沙丘类型共同影响着沙丘部位沙物质的粗细分布,是一个相互

作用的动态过程。从植被类型来看,沙物质粗细为怪柳>骆驼刺>花花柴;从沙丘类型分析,沙物质粗细为回涡沙丘>灌丛沙丘>风影沙丘。



风影、回涡和灌丛沙丘沙物质平均分选系数介于 1.42~1.60,属于中等偏上—中等分选性,表面沙物质分选系数平均值由大到小依次为回涡沙丘、灌丛沙丘、风影沙丘,而沙物质偏度平均值介于 0.01~0.20,属于对称。从植被类型分析,偏度值由大到小依次为骆驼刺、柽柳、花花柴;从沙丘类型来看,偏度值由大到小依次为风影沙丘、回涡沙丘、灌丛沙丘,骆驼刺风影沙丘的平均偏度值最高,为 0.20,花花柴灌丛沙丘平均偏度值最小,为 0.01。风影、回涡和灌丛沙丘表

面沙物质峰态平均值介于 0.96~1.07,骆驼刺平均峰态值大于花花柴和柽柳,回涡沙丘的平均峰态值最大,风影沙丘的平均峰态值最小,骆驼刺回涡沙丘的平均偏度值最大,柽柳风影沙丘的平均峰态值最小,但均属于常峰态。

2.5 不同植被类型下沙丘风沙沉积物粒度参数分析

花花柴、骆驼刺和柽柳风影沙丘沙物质平均粒径与分选系数、偏度值和峰态值之间的 R^2 均小于 0.70,二次项拟合较差(图 7)。

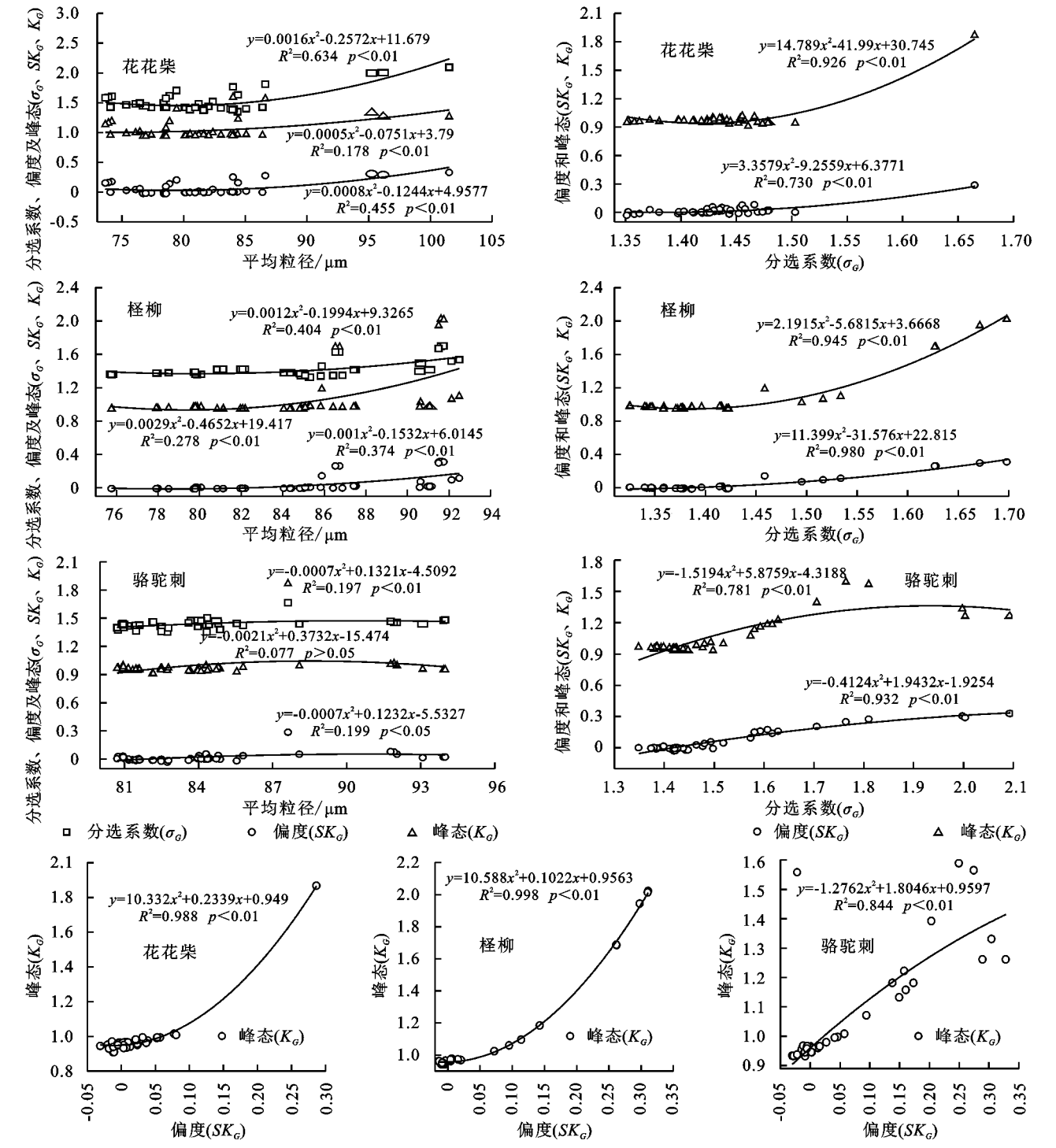


图 7 风影沙丘的风沙沉积物粒度参数相关分析

花花柴和柽柳风影沙丘的沙物质平均粒径与分选系数、偏度值和峰态值之间呈极显著相关($p < 0.01$)

0.01); 骆驼刺风影沙丘平均粒径与分选系数呈极显著相关($p<0.01$), 与峰态值呈显著相关($p<0.05$)。花花柴、骆驼刺和柽柳风影沙丘沙物质分选系数与偏度值和峰态值之间的 R^2 均大于 0.70, 二次项拟合关系中等好, 其中柽柳风影沙丘沙物质分选系数与偏度值和峰态值之间的 R^2 为 0.98, 花花柴、骆驼刺和柽柳风影沙丘沙物质分选系数与偏度值和峰态值均呈极显著相关($p<0.01$), R^2 均大于 0.84。

柽柳回涡沙丘沙物质平均粒径与分选系数和偏

度值 R^2 均大于 0.80, 呈极显著相关($p<0.01$), 花花柴回涡沙丘沙物质平均粒径与分选系数、偏度值和峰态值之间呈极显著相关($p<0.01$)。花花柴、骆驼刺和柽柳回涡沙丘沙物质分选系数与偏度值呈极显著相关($p<0.01$), R^2 均大于 0.89, 骆驼刺回涡沙丘沙物质分选系数与峰度值呈极显著相关($R^2=0.89, p<0.01$)。花花柴、骆驼刺和柽柳回涡沙丘沙物质偏度值和峰态值之间呈极显著相关($R^2>0.85, p<0.01$), 二次项拟合较好(图 8)。

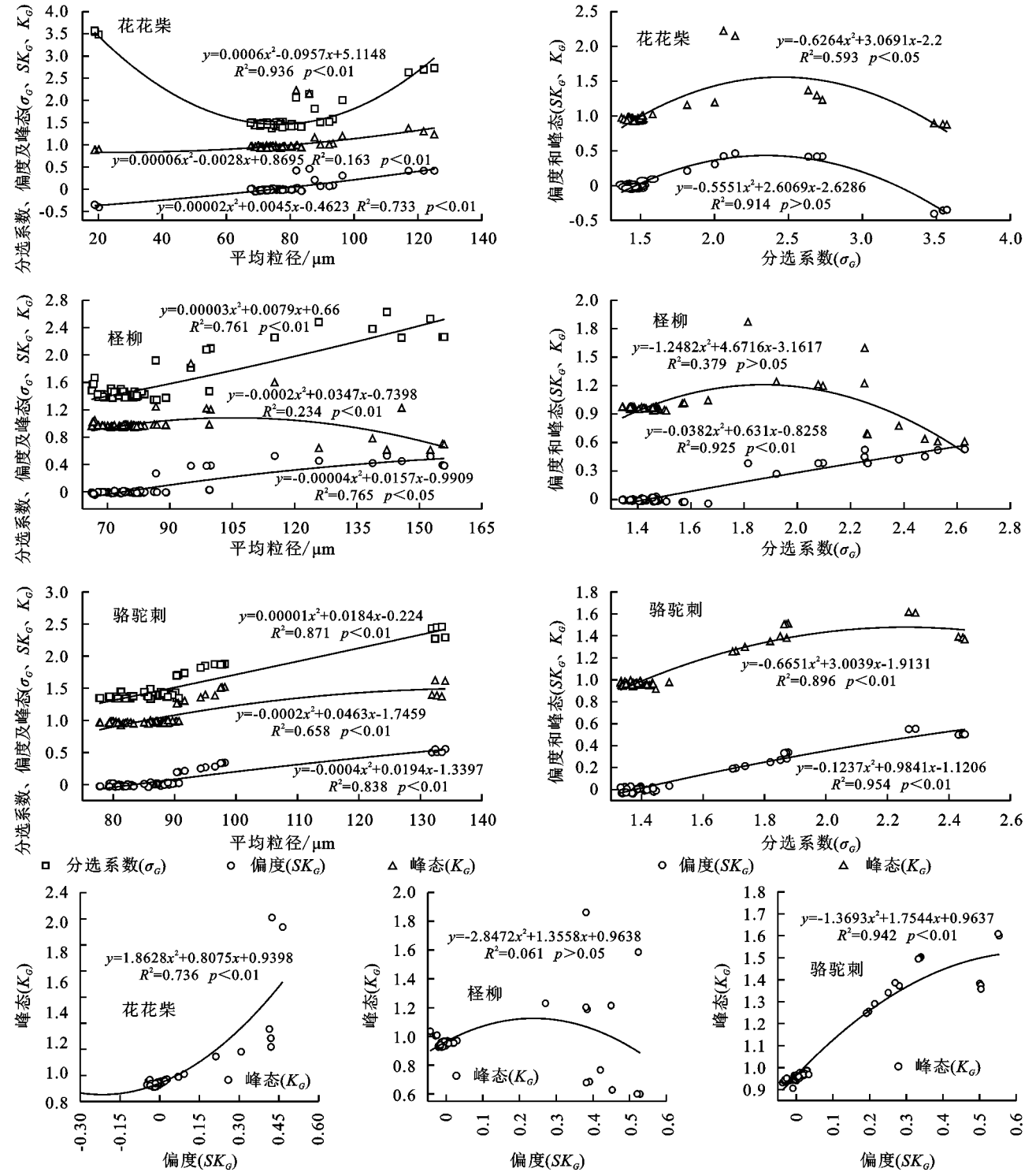


图 8 回涡沙丘的风沙沉积物粒度参数相关分析

灌丛沙丘沙物质平均粒径与分选系数和偏度值 R^2 均大于0.7,呈极显著相关($p<0.01$)。骆驼刺灌丛沙丘沙物质分选系数与偏度值和峰态值之间呈极显著相关($R^2>0.89, p<0.01$)。花花柴和骆驼刺灌丛沙丘沙物质偏度值和峰态值之间呈极显著相关

($R^2>0.89, p<0.01$)(图9)。

不同植被类型下风沙沉积物粒度特征既有相同的相关性,也有不完全一致的相关性,植被差异较大,形成粒度特征之间差异的原因与沙丘形态大小、植被自身形态特征有关。

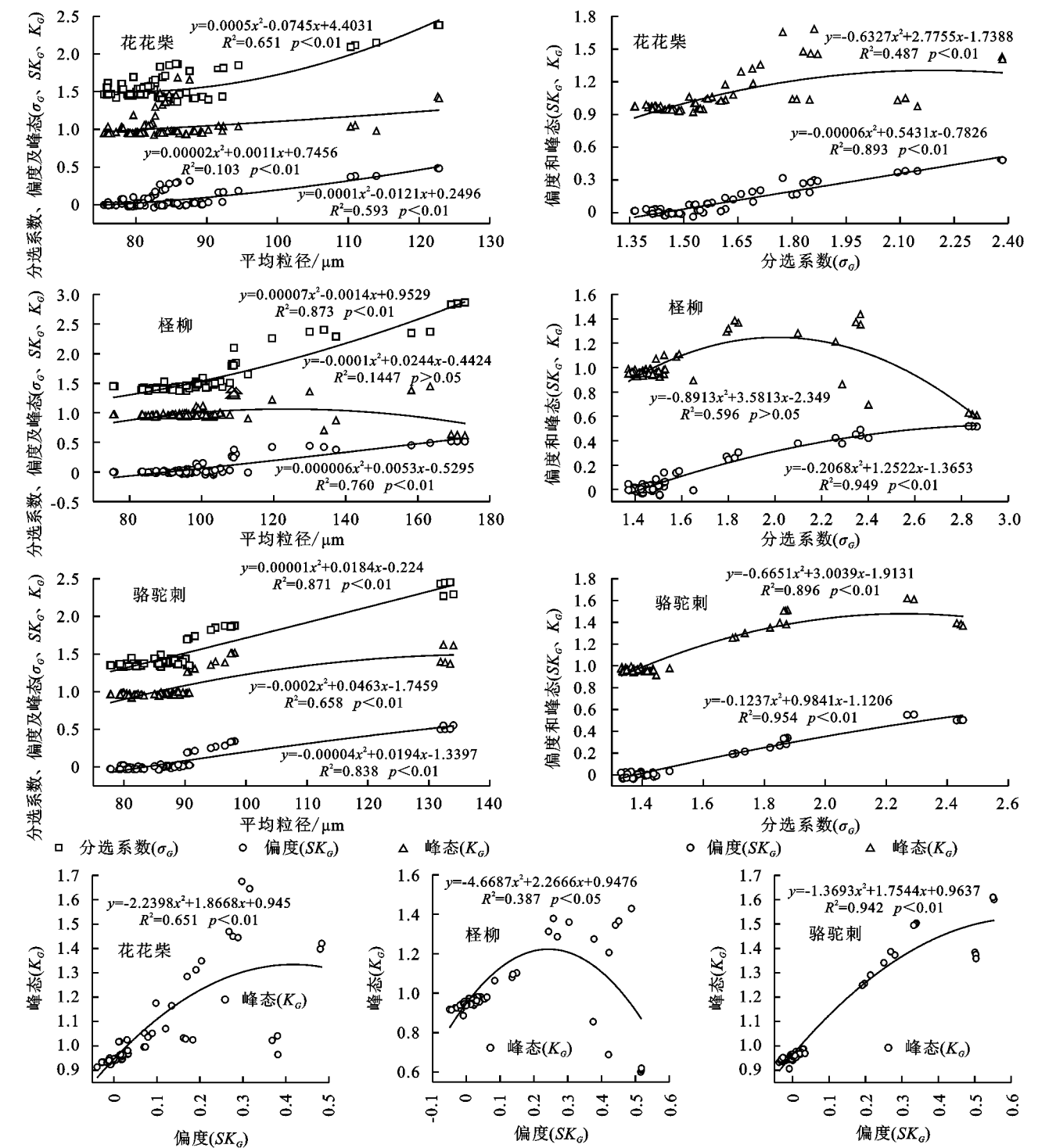


图9 灌丛沙丘的风沙沉积物粒度参数相关分析

3 讨论

粒度是沉积物的重要结构特征,其组成和分布特征受到沉积物来源、搬运条件、沉积环境及沉积后风化作用的影响^[27]。已有研究^[28]表明,灌丛植被作为控制土壤风蚀和防风固沙最为理想的措施之一,能够

有效增加地表覆盖度与近地面的粗糙度,改变风动力结构以达到防风固沙效果。风沙沉积物的粒径分布受植被、沙源和地形的影响,植被的出现增大地表的粗糙度,近地表风场发生变化,风速下降,部分颗粒物沉降。有学者^[22,29]对不同植被覆盖度的土壤颗粒物

粗细进行分析,随着植被覆盖度逐渐降低而变粗。本文通过对不同植被下的沙丘沉积物粗细研究发现,沙物质的平均粒径与疏透度存在极显著的正相关关系,研究得出高植被覆盖度下沉积物粒径反而比低植被覆盖度下较粗,在不同的植被覆盖度下怪柳比骆驼刺灌丛沙堆的表面沙物质粒径分布较为均匀,怪柳灌丛沙堆的表面沙物质粒径最粗为高植被覆盖度下,骆驼刺灌丛沙堆沙物质粒径最粗为中植被覆盖度下,但最细均为低植被覆盖度下,在中高植被覆盖度下,植株具有一定的高度,拦截高空中较细的沙尘物质,沉降至灌丛沙堆表面,但低植被覆盖度下,多为流沙地,极易起沙降尘,细颗粒物被大风携带至下风向发生沉降,较粗的颗粒物留在低植被覆盖度下,从而得出并非所有的低植被覆盖度沉积颗粒物粗,且与植株的形态特征有一定的关系,沙丘周围流场影响沙物质的空间分布,表明策勒绿洲—沙漠过渡带灌丛沙堆表面的沙物质最粗并非在高植被覆盖度下,而在于低植被覆盖度下。毛东雷等^[30]对新疆策勒沙拐枣(*Calligonum*)灌丛形态分析得出,沙堆长度与沙堆宽度、沙堆高度与沙堆底面积之间呈现一定程度相关性,株高、冠幅东西宽度、南北宽度与沙堆迎风坡和背风坡长度、总长度、沙堆宽度、沙堆高度两两之间都呈现极显著相关性,本文证实灌丛沙堆与障碍物的形成是一个相互作用的动态过程。通过风影、回涡和灌丛沙丘的对比发现,除骆驼刺风影沙丘的平均粒径与分选系数呈显著相关外,其余均呈极显著相关,灌丛沙丘的平均粒径与分选系数的二次项拟合最好,沙丘的平均粒径与偏度值和峰态值相关性差异较大,可能与障碍物和沙丘的形态特征有关系。灌丛植被周围普遍发育了顺风向延伸的不同沙丘,它们对于该区域风沙运动和沙漠化发展起着十分重要的阻滞和延缓作用^[15]。通过花花柴、骆驼刺和怪柳 3 种植被下发育形成的回涡沙丘、灌丛沙丘和风影沙丘,对沙丘的形态参数进行对比,分析不同沙丘形态特征及沙丘表面沉积物的参数特征,解析与灌丛植被的关系,有助于了解沙区灌丛植被与风沙活动的相互作用,为策勒绿洲—沙漠过渡带防风固沙和保护绿洲提供基础数据。

4 结论

(1)在不同植被覆盖度下,怪柳比骆驼刺的灌丛沙丘沙物质粒径分布更均匀,沉积物颗粒分布曲线为双峰型,怪柳灌丛沙堆的双峰型曲线比骆驼刺的分布更均匀,骆驼刺灌丛沙堆沉积物颗粒分布范围宽。

(2)沙丘的长度、宽度和高度之间存在极显著相关性($0.738 < R^2 < 0.954$, $p < 0.01$),障碍物的长度、宽度和高度之间的相关系数也呈极显著相关性($0.570 < R^2 < 0.874$, $p < 0.01$),沙丘和障碍物演化过程中,高

度、长度、宽度三者之间动态变化,灌丛沙堆与障碍物的形成是一个相互作用的动态过程。

(3)灌丛的疏透度与障碍物的长度呈显著正相关($p < 0.05$),与植被的宽度和高度呈极显著正相关($p < 0.01$),线性关系均较差,与平均粒径极呈极显著正相关($R^2 = 0.359\ 8$, $p < 0.01$),沙丘沙物质的平均粒径与灌丛植被的疏密、高度和冠型直接相关。

(4)风影和灌丛沙丘沙物质主要由极粗粉砂、极细砂和细砂组成,回涡沙丘沙物质主要由极细砂和细砂组成。沙丘沙物质平均分选系数介于 1.42~1.60,属于中等偏上—中等分选性,沙物质偏度平均值介于 0.01~0.20,属于对称,沙物质峰态平均值介于 0.96~1.07,属于常峰态。

(5)沙丘沙物质的分选系数与偏度值均呈极显著相关($p < 0.01$),平均粒径与分选系数和偏度值呈极显著相关($p < 0.01$),骆驼刺和花花柴沙丘沙物质偏度值和峰态值间存在极显著相关($p < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨岩岩,刘连友,屈志强,等.新月形沙丘研究进展[J].地理科学,2014,34(1):76-83.
- [3] 哈斯,王贵勇.沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2001,21(3):57-61.
- [4] 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.
- [5] Pye K. Negatively skewed aeolian sands from a humid tropical coastal dunefield, northern Australia[J]. Sedimentary Geology,1982,31(3/4):249-266.
- [6] 陈渭南.塔克拉玛干沙漠 84°E 沿线沙物质的粒度特征[J].地理学报,1993,48(1):33-46.
- [7] Lancaster K. Grain-size characteristics of linear dunes in the Southwestern Kalahari[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1986,56(3):395-405.
- [8] 杨欢,李玉强,王旭洋,等.半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J].中国沙漠,2018,38(6):1144-1152.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 崔徐甲,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物粒度特征及其与植被、地貌关系[J].中国沙漠,2015,35(4):857-864.

[13] 何清,杨兴华,霍文,等.库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J].中国沙漠,2009,29(1):18-22.

[14] 马倩,武胜利,刘永泉,等.艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):650-657.

[15] 蔡东旭,李生字,刘耀中,等.台特玛湖干涸湖盆区植物风影沙丘的形态特征[J].干旱区地理,2017,40(5):1020-1028.

[16] 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实验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.

[17] 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实验研究(II)[J].中国沙漠,2007,27(1):15-19.

[18] 武胜利,李志忠,惠军,等.和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程[J].地理研究,2008,27(2):314-322.

[19] 王翠,雷加强,李生字,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带花花柴(*Kareliniacaspica*)沙堆的形态特征[J].中国沙漠,2013,33(4):981-989.

[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] 张萍,康经理,袁瑛,等.两类植物型沙丘上植物群落的异同及其对沙丘形态的响应[J].生态学报,2017,37(23):7920-7927.

[22] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报,2017,33(22):135-142.

[23] 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.

[24] 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):36-42.

[25] 朱文煜.策勒绿洲—沙漠过渡带沙丘表层沙物质粒度特征研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2021.

[26] 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等.再议绿洲—沙漠过渡带:以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J].干旱区地理,2013,36(2):195-202.

[27] 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.

[28] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J].干旱区地理,2014,37(4):777-785.

[29] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J].干旱区研究,2014,31(4):636-642.

[30] 毛东雷,雷加强,薛杰,等.新疆策勒砾质戈壁沙拐枣(*Calligonum*)灌丛沙堆形态特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):105-110.

(上接第 62 页)

[20] 韩庆功,彭守璋.黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性[J].水土保持学报,2021,35(5):188-193,203.

[21] Jiang C, Zhang H Y, Tang Z P, et al. Evaluating the coupling effects of climate variability and vegetation restoration on ecosystems of the Loess Plateau, China [J].Land Use Policy,2017,69:134-148.

[22] Zhao J, Li J, Liu Q H, et al. Estimating fractional vegetation cover from leaf area index and clumping index based on the gap probability theory[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2020,90:e102112.

(上接第 69 页)

[23] Yalin M S, Ferreira Da Silva A M. Regime channels in cohesionless alluvium [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(6): 725-742.

[24] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J].Geoderma,2016,262:165-173.

[25] 邢行,陈晓燕,韩珍,等.饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比[J].水土保持学报,2018,32(3):92-97.

[26] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.

[27] 赵宇.黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D].重庆:西南大学,2015.

[28] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J].Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1298-1304.

[29] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J].Transactions of the ASAE,1972,15(1):99-102.

[30] 张晴雯,陈尚洪,刘定辉,等.农业措施对玉米季坡耕地水沙过程的调控效应[J].核农学报,2016,30(7):1395-1403.