

宁夏沙湖南岸沙丘沙粒度特征及其成因分析

马正虎^{1,2}, 璩向宁^{1,2}, 赵希妮^{1,2}, 刘雅清^{1,2}, 何志润^{1,2}

(1.宁夏大学 西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021;
2.宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要:沙丘粒度特征能够反映物质沙源、搬运、分选作用以及沙丘形成过程中的风力强度, 同时还能体现地形及人类活动等对风沙流运移的影响等。通过对沙湖南岸线型沙丘链分 0—5 cm, 20—25 cm, 25—50 cm 采样、应用相关分析、McManus 矩值法等对粒度进行分析。结果表明: 其粒度组分以极细沙(33.72%~64.52%)和细沙(29.12%~64.39%)为主, 不含粗沙、极粗沙, 黏土仅存在于迎风坡向东延伸的采样带, 各个部位深层较浅层粒度偏细。粒度参数特征表明, 沙脊线平均粒径值显著高于其它部位。分选性在沙丘不同部位以及不同深度都较好。沙脊线及对照区部分偏度粗偏, 其它部位均细偏。峰度则偏窄且大部分属于极窄峰态($K_{g\varphi} > 1.5$), 沙丘发育较成熟。上述结果表明, 沙湖南岸沙丘粒度组分主要是细沙和极细沙, 其沙源主要源于本底起沙; 同时, 风力作用、沉积环境以及人为因素等在沙丘形成与发展过程中亦产生了重要影响。

关键词:沙丘沙; 粒度特征; 成因分析; 宁夏沙湖

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0267-07

Grain Size Characteristics and Genesis Analysis of Sand Dunes on the South Bank of Lake Shahu in Ningxia

MA Zhenghu^{1,2}, QU Xiangning^{1,2}, ZHAO Xini^{1,2}, LIU Yaqing^{1,2}, HE Zhirun^{1,2}

(1.State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecosystem Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Key Laboratory of Northwest Degraded Ecosystem Restoration and Reconstruction, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The grain size characteristics of sand dune can reflect the sand source, transportation, sort and wind intensity during the formation of sand dunes, and can also reflect the influence of terrain and human activities on the movement of sand flow. Through sampling the samples in the depths of 0—5 cm, 20—25 cm, 25—50 cm along the linear dune chain on the south bank of Lake Shahu, the correlation analysis and McManus (1988) moment method were used for particle size analysis. The results show that the particle size components are mainly fine sand (33.72%~64.52%) and fine sand (29.12%~64.39%), and do not contain coarse sand and very coarse sand, the clay only exists in the eastward extension of the windward slope, particle size of the deeper layer is finer than that of the shallow layer in each part. The characteristics of the particle size parameters indicate that the average grain size of the sand ridge line is significantly higher than that of the other parts. Sorting is better in different parts of the dune and at different depths. The partial deviation of the sand ridge line and the control area was coarse and partial, and other parts were finely biased. The kurtosis is narrow and most of them belong to the extremely narrow kurtosis ($K_{g\varphi} > 1.5$), and the dune is more mature. The results show that the grain size components of sand dunes on the south bank of Lake Shahu are mainly fine sand and very fine sand, and the sand source is mainly from local sandy area. At the same time, wind force, sedimentary environment and human factors are also the important influences on processes of the formation and development of sand dunes.

Keywords: sand dunes; granularity characteristics; causes; Lake Shahu of Ningxia

我国西北地区地处内陆,气候干旱,是世界上最为典型的干旱半干旱荒漠区,区域内广泛分布的沙丘是风力蚀积的产物,由于其具有揭示区域环境变化、进行区域生态环境治理参考等价值和作用,成为国内外学者进行区域资源与环境研究的重点。其中对该区沙漠沙丘粒度特征、组成及风沙运移等进行了大量研究。尤其对沙丘粒度特征的分析研究,既能反映沙物质来源,风力对沙物质搬运和分选作用,又能指示沙丘形成过程中的风力强度,同时还能体现地形对风沙流运移的改变等,对研究区域环境变化具有重要意义^[1-2]。但这些研究主要基于塔克拉玛干沙漠^[3-7]、古尔班通古特沙漠^[8]、巴丹吉林沙漠^[9-10]、毛乌素沙地^[11-12]、腾格里沙漠^[13-14]、库姆塔格沙漠^[15]等著名沙漠区域。对比沙漠边缘的独立沙丘及广泛分布的绿洲沙地,典型沙漠区域面积广阔,边缘沙丘广袤,而绿洲沙地相对封闭,其地表沉积环境及风力风向等存在一定差异,不同部位、不同风沙运移时期,沉积环境及风力风向等均存在变异性,因此这些研究对各个独立沙丘及绿洲沙地并不具备代表性。

目前国内对于边缘沙丘以及绿洲沙地粒度特征的相关研究主要集中在著名绿洲沙地、敦煌月牙湖、宁夏沙坡头等典型区域。20世纪90年代起,相关学者就开始对上述区域进行粒度相关研究,研究主要基于以下几个方面:一是区域风沙来源、风沙运移路径以及沙丘运移动力^[16-17];二是区域沙粒度分布特征、变化特征等^[18];三是土地沙化、主要风沙危害研究以及为营建绿洲防护林带等提供科学依据等^[19-20]。但这些研究主要基于自然状态下对浅层0—5 cm范围内沙粒度特征进行,并未对较深层粒度特征进行分析,层间粒度特征对比研究较少;再者,即使是人类活动频繁的敦煌月牙湖、宁夏沙坡头等旅游景区,前人研究仍未把游客踩踏等人为因素对沙丘沙粒度的影响考虑在内,对这方面的研究鲜有报道。

沙湖地处银川平原北部,贺兰山阻碍腾格里沙漠进一步南移,属于西北典型的绿洲沙地。一般认为,沙湖沙丘沙源于本底,近些年,随着风力侵蚀、搬运,沙湖南岸线性沙丘不停南移萎缩,大有和湖区分离之象;再者,全区旅游业的推广,游客数量猛增,对南岸沙丘粒度影响愈加明显。各营力综合作用,使得景区水映沙山这种奇观面临消失的风险。本文通过对沙湖景区沙丘沙粒度特征研究,旨在说明南岸线性沙丘链不同部位以及同一部位在不同风沙运移时期粒级粒度特征,从风沙运移、沉积学及人为影响等方面加以分析,从而对该区沙源、运移特征及沙丘运移与演变提供理论基础。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

沙湖(38°39′27.97″N,104°04′58.66″E)位于贺兰山东麓,银川市西北56 km平罗县境内的西大滩。沙湖由北部湖区和南部沙区组成,其南部沙区面积达22.5 km²,由一系列近东西走向的线型沙丘链和丘间洼地组成,沙丘高度自北向南依次降低,北部研究区第一列线型沙丘链由4个沙丘相连而成,相对高度自东向西分别达到20 m,25 m,17 m和17 m,至沙区南端,沙丘相对高度则不足5 m,迎风坡坡度自西向东分别为28°,21°,16°和22°,背风坡坡度自西向东分别为46°,36°,24°和41°。地处黄土高原内部,第四纪马兰黄土沉积区,气候属于典型的大陆性半湿润半干旱气候,海拔在1000 m以上,夏季基本没有酷暑;1月平均气温在零下8℃以下,极端低温在零下22℃以下。降水主要集中在夏秋季节,尤以7月、8月份居多,降水形式多以暴雨为主,蒸发量大于降水量。地处西北中高纬度地带,靠近西伯利亚冷气流中心,常年盛行风向主要为西北风。沙湖生态旅游资源丰富,因其丰富的动植物群落及特殊的湿地—荒漠景观,吸引了无数的海内外游客前来参观,每年5—10月,是其最佳旅游时期,年接待游客超过百万人次。

1.2 研究方法

2017年10月24日在沙湖南岸第一列线型沙丘链上进行样品采集,10月23日为雨天,雨后沙物质分层取样较为容易。该区西风、西北风频发,因此考虑到表层沙粒新近沉积,颗粒间碰撞挤压小,游客踩踏影响尚未发生;再者,西部地区土地沙化、风力侵蚀、搬运、堆积是一个漫长的过程,同时上述过程以及景区人为因素影响又是一种随机而频发的现象,因此很难严格界定其沉积时期,为尽可能表现是不同沉积时期沙粒度特征,故选择加大层间梯度,去除5—20 cm,25—45 cm沙。采样前将表层0—1 cm沙轻轻刮去,用铁锹取0—5 cm深度为第一层样品,用土钻取20—25 cm为第二层样,取45—50 cm为第三层样品,样品质量为200~300 g,为便于描述,将采样深度统一为5 cm,25 cm,50 cm三层进行描述。沿着近东西向沙丘链沙脊线(S)为样线,间隔50 m取样,16个取样点共采集样品48个。在比较典型的区域,向迎风坡和背风坡延伸各取了两个条带,其中迎风坡样带取样点8个,向北(SN)3个,向东(SW)5个,间隔30 m,采集样品24个,背风坡样带向南(SS)取样点4个,间隔30 m,采集样品12个。选取一个不受游客干扰的内部沙丘作为对照(CK),设3个取样点,采集样品9个。总共31个取

样点(样点用 GPS 进行定位),均匀分布于沙丘坡底、坡中、坡顶,共采集样品 93 个。

对采集的样品进行粒度分析,首先将样品晾干后过 2 mm 筛子,去除粒径大于 2 mm 的颗粒及其他杂质,用 Mastersizers 3000M 型激光粒度分析仪(分析范围为 3.12~2 000 μm)进行粒度分析,每个样品测量做 3 个重复,最后取平均值,保证数据的相对精确性,测得各粒级分布的百分比含量。根据 Udden-Wentworth 粒级标准划分方法,统计出沙丘不同部位、不同深度的粒径级配^[21-22]。粒度单位采用 Φ 值,转换公式为 $D = -\log_2 d$ (D 为粒径,单位为 Φ , d 为粒径,单位 mm)^[10]。粒度参数平均粒径 \bar{X}_φ 、分选系数 Φ_φ 、偏度 SK_φ 、峰度 Kg_φ 等参数的计算采用 McManus 矩值法公式^[18,23-24]。最后,用 SPSS 软件进行粒度参数的相关性分析。

$$\text{平均粒径} \quad \bar{X}_\varphi = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i} \quad (1)$$

$$\text{分选系数} \quad \Phi_\varphi = \sqrt{\frac{f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum f_i}} \quad (2)$$

$$\text{偏度} \quad \text{SK}_\varphi = \frac{\sum f_i (x_i - \bar{x}_\varphi)^3}{\sum f_i \Phi_\varphi^3} \quad (3)$$

$$\text{峰度} \quad \text{Kg}_\varphi = \frac{\sum f_i (x_i - \bar{x}_\varphi)^4}{\sum f_i \Phi_\varphi^4} \quad (4)$$

式中: \bar{X}_φ 、 Φ_φ 、 SK_φ 、 Kg_φ 分别表示沙丘沙的平均粒径、分选系数、偏度和峰度; f_i 为对应粒级所占沉积物百分比; x_i 为某一粒径范围内最大值与最小值的平均值; $\sum f_i = 100$ 。

2 结果与分析

2.1 沙丘沙粒级分布特征

粒度是根据采集的样品直接测得的沙丘沙最基本参数,揭示了该沙丘不同粒级沙粒的相对含量,其变化主要受沙源地、风动力及人类活动等因素影响。

2.1.1 沙丘迎风坡粒级分布特征 迎风坡采样点 SW、SN 两个条带(表 1),其 5 cm 深度粒度组分以细沙、极细沙为主,分别占到 49.59% 和 47.75%,最大值分别为 55.07% 和 53.76%。粉沙含量均值 1.92%,中沙、黏土亦有少量分布,粗沙、极粗沙含量为 0.25 cm 深度,细沙和极细沙均值为 49.93% 和 47.64%,和 5 cm 深度相差无几,但细沙最高值含量达到 62.63%,粉沙均值 1.5%,最大值达 4.21%,中沙 0.32%,黏土 0.34%。50 cm 深度,细沙和极细沙所占比例分别为 49.28% 和 48.10%,细沙最大值高达 64.39%,粉沙比例占 1.71%,中沙、黏土分别占 0.49%,0.33%。迎风

坡以细沙、极细沙为主,两者所占比例高达 96%,并且随深度增加,细沙、极细沙含量有增加趋势。中沙、粉沙含量较少,黏土含量很少,分布在 SW 条带,SN 条带不含黏土,无粗沙、极粗沙成分。与对照相比,迎风坡中沙和细沙所占比重更高,极细沙及粉沙比重较低,含有少量黏土。

2.1.2 沙丘沙脊线粒级分布特征 S 脊线粒度组分在 3 个层面均以细沙和极细沙为主,两者合占比例高达 95% 以上,最高达 98.34%,随着深度增加,细沙、极细沙含量逐渐增加,其中 5 cm、25 cm 深度,细沙含量均高于极细沙,50 cm 深度,极细沙(50.36%)> 细沙(47.61%),中沙、粉沙含量很少,中沙含量与迎风坡相比略低,整体也有随着深度加深含量增加趋势。不含粗沙、极粗沙以及黏土成分。S 脊线粒度特征与迎风坡相似,与对照区存在较大差异,都没有黏土成分。

2.1.3 沙丘背风坡粒级分布特征 背风坡(SS)粒度组分以极细沙和细沙为主,极细沙成分在 3 个层面均高于细沙,并且各个层面均超过了 50%,都有随深度增加而比重升高的趋势。中沙、粉沙含量极少,相较于迎风坡与脊线,两者亦有不同程度下降。背风坡沙粒度特征与对照区具有相似性,极细沙所占比重在各个层面均超过了细沙,中沙含量极低,粉沙含量相对较高,在各个层面均达到了 1.5% 左右,高于迎风坡与脊线,不含黏土、粗沙、极粗沙成分。

2.2 沙丘沙粒度参数特征

基于粒度参数研究沉积物环境与过程是一种较为高效的研究方法,沙丘沙粒度参数是重要的粒度分析参数,主要包括平均粒径、分选系数、偏度、峰度等,其与沙丘的形成环境、搬运和沉积过程等密切相关。目前多采用的粒度参数计算方法主要包括 McManus 矩值法和 Folk-Ward 图解法。本文选取 McManus 矩值法公式,原因是矩值法公式考虑粒度分布总体特征,更有统计学意义^[23]。

2.2.1 平均粒径 通过分析(图 1),宁夏沙湖南岸沙丘不同部位、不同深度平均粒径有所差异。5 cm 层面迎风坡平均粒径 2.94~3.08 Φ ,沙脊线平均粒径 2.88~3.09 Φ ,背风坡平均粒径 2.97~3.12 Φ 。与对照区平均粒径 2.98~3.27 Φ 相比,研究区粒径变化范围较小,迎风坡、沙脊线、背风坡之间差异不显著($p > 0.05$),与对照区差异显著($p < 0.05$)。25 cm 层面迎风坡平均粒径 2.86~3.13 Φ ,沙脊线平均粒径 2.92~3.16 Φ ,背风坡平均粒径 2.97~3.07 Φ ,平均粒径变动范围在各个部位均大于对照区(3.06~3.11 Φ)。从相关性分析来看,迎风坡、沙脊线、背风坡之间无差异性,对照区差异性显著($p < 0.05$)。50 cm 层面迎风坡平均粒径 2.82~

3.09 ϕ , 沙脊线平均粒径 2.89~3.01 ϕ , 背风坡平均粒径 2.97~3.12 ϕ , 与对照区相比, 研究区平均粒径变化范围较小且平均粒径值较大。对照区与迎风坡、沙脊线、背风坡之间差异性显著 ($p < 0.05$)。沙丘各部位与对照区相比都具有显著性, 说明人为因素影响显著。平均粒径代表粒度分布集中趋势, 能够揭示沉积物运移过程中所承受的动力能量值和沉积环境变化等^[24]。该区动力能量值主要来自风动力条件, 沙丘不同部位, 沉积

环境亦存在差异, 加上此地旅游活动开展, 对粒径产生影响。因此, 同一沉积物运移时期, 在上述因素综合影响下, 沙粒所承受动力条件为沙脊线 > 迎风坡 > 背风坡 > 对照区; 不同沉积物运移时期, 沉积环境在相同部位保持一致, 平均粒径差异主要受风动力条件及人为因素影响, 从图中可以看出沙丘各部所受动力在不同沉积时期有所差异, 但整体而言, 依然符合以上规律, 说明这段时间, 风动力条件比较稳定。

表 1 宁夏沙湖沙丘沙粒级分配

采样位置	采样点	样品数	粒级/ ϕ	%					
				极粗沙/粗沙 2.00~0.50 mm	中沙 0.50~0.25 mm	细沙 0.25~0.125 mm	极细沙 0.125~0.063 mm	粉沙 0.063~0.003 mm	黏土 <0.003 mm
迎风坡	SW/SN-5	8	最小值	0.00	0.02	43.90	43.49	0.79	0.00
			最大值	0.00	0.72	55.07	53.76	2.81	1.94
			平均值	0.00	0.49	49.59	47.75	1.92	0.20
	SW/SN-25	8	最小值	0.00	0.00	41.22	36.59	0.08	0.00
			最大值	0.00	0.70	62.63	55.60	4.21	3.36
			平均值	0.00	0.32	49.93	47.64	1.50	0.34
	SW/SN-50	8	最小值	0.00	0.00	42.91	33.72	0.11	0.00
			最大值	0.00	1.78	64.39	55.30	2.09	3.32
			平均值	0.00	0.49	49.28	48.10	1.71	0.33
沙脊线	S-5	16	最小值	0.00	0.00	41.27	41.16	0.28	0.00
			最大值	0.00	0.58	57.97	55.06	3.65	0.00
			平均值	0.00	0.24	49.61	46.24	1.15	0.00
	S-25	16	最小值	0.00	0.00	44.28	35.88	0.12	0.00
			最大值	0.00	1.75	62.25	53.55	2.16	0.00
			平均值	0.00	0.36	49.71	48.63	1.30	0.00
	S-50	16	最小值	0.00	0.03	42.74	46.48	0.74	0.00
			最大值	0.00	0.58	51.43	53.22	3.81	0.00
			平均值	0.00	0.25	47.61	50.36	1.79	0.00
背风坡	SS-5	4	最小值	0.00	0.00	41.25	44.99	1.12	0.00
			最大值	0.00	0.62	53.28	55.68	3.06	0.00
			平均值	0.00	0.20	46.51	51.40	1.89	0.00
	SS-25	4	最小值	0.00	0.00	44.10	45.29	0.79	0.00
			最大值	0.00	0.57	53.06	54.44	1.86	0.00
			平均值	0.00	0.19	47.96	50.55	1.30	0.00
	SS-50	4	最小值	0.00	0.00	40.87	45.54	0.95	0.00
			最大值	0.00	0.54	52.96	56.26	2.86	0.00
			平均值	0.00	0.17	46.93	51.21	1.69	0.00
对照	CK-5	3	最小值	0.00	0.00	29.56	47.09	0.27	0.00
			最大值	0.00	0.04	52.60	64.19	6.25	0.00
			平均值	0.00	0.01	39.19	57.21	3.59	0.00
	CK-25	3	最小值	0.00	0.00	30.76	56.99	2.04	0.00
			最大值	0.00	0.01	40.97	62.18	7.06	0.00
			平均值	0.00	0.00	36.72	59.46	3.82	0.00
	CK-50	3	最小值	0.00	0.00	29.12	57.27	1.58	0.00
			最大值	0.00	0.00	41.15	64.52	6.36	0.00
			平均值	0.00	0.00	35.53	60.78	3.68	0.00

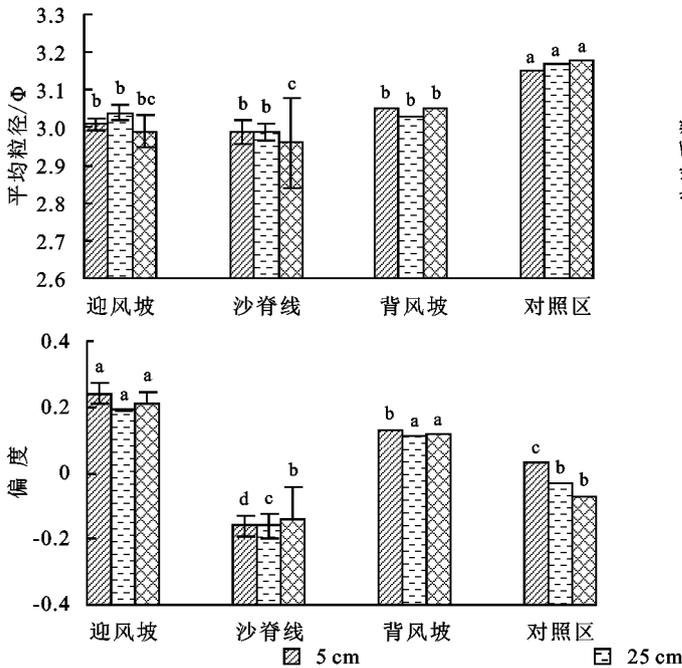
2.2.2 分选系数 分选系数常作为环境指标, 表示沉积物分选性好坏, 分选系数越大, 分选性越差; 反之, 则分选性越好, 风成沙丘分选性一般较好^[25]。根据弗里德曼提出的分选系数分级表, 由图 1 和图 2 分

析得, 沙湖沙丘沙分选系数均处于 0.50~0.80 范围内, 属分选较好。具体分析如下: 5 cm 层面迎风坡分选系数 0.53~0.58, 沙脊线分选系数 0.51~0.56, 背风坡分选系数 0.52~0.55, 对照区分选系数 0.51~

0.55; 25 cm 层面迎风坡分选系数 0.50~0.69, 沙脊线分选系数 0.51~0.54, 背风坡 0.52~0.54, 对照区分选系数 0.53~0.57。50 cm 层面迎风坡分选系数 0.51~0.69, 沙脊线分选系数 0.52~0.57, 背风坡分选系数 0.52~0.54, 对照区分选系数 0.52~0.55。沙丘不同部位、不同时期分选性存在差异, 整体而言, 迎风坡分选性各个时期均最差, 迎风坡动力充足, 符合风动力沉积规律, 但迎风坡 SW 条带分选性更差, 说明风动力并不是造成这一现象的原因, 而是受到其他营力叠加影响。

2.2.3 偏度 偏度用来判别沙丘沙粒度分布对称性, 表明平均值与中位数的相对位置。偏度值为负, 称负偏, 表明沉积物粒度整体较粗, 均值向中位数较粗方向移动; 反之, 表明沉积物粒度整体偏细, 均值向

中位数较细方向移动^[25]。由图 1 和图 3 分析得, 同一沉积时期, 脊线处数值均为负, 偏度除 5 cm, 25 cm 深度个别值对称分布($-0.1 < SK_{\varphi} < 0.1$), 其他均负偏($SK_{\varphi} < -0.1$), 说明脊线沙粒度整体相对粗偏, 可能受风营力较大且有背风坡风力顶托作用存在。迎风坡处偏度值大于 0.01, 绝大部分偏度 > 0.1 ($0.13 < SK_{\varphi} < 0.43$), 说明迎风坡粒度普遍较细, 这主要与迎风坡 SW 条带黏土成分有关, 背风坡偏度均大于 0, 属对称分布或正偏, 对照处偏度值有正有负 ($-0.09 < SK_{\varphi} < 0.15$), 属对称分布 ($-0.1 < SK_{\varphi} < 0.1$) 或正偏 (SK_{φ})。不同沉积时期, 各层面偏度参数亦有所差异, 主要表现为各粒度参数偏度趋向于集中, 即各部位内部之间差异逐渐缩小, 主要是风营力长期筛选的结果。



注: 同一深度不同小写字母表示不同部位样品之间差异性显著 ($p < 0.05$)。

图 1 沙丘沙不同部位粒度参数

2.2.4 峰度 沙湖沙丘沙峰度偏窄且大部分属于极窄峰态 ($Kg_{\varphi} > 1.5$), 仅少数属中等或窄峰态 (图 1, 图 4), 沙丘各部位之间峰度差异并不明显。具体分析: 5 cm 深度, 沙丘各部位峰度值均位于 1.21~2.16, 均属窄峰态或极窄峰态; 25 cm 深度迎风坡峰度值 0.96~1.97, 属中等峰态、窄峰态及极窄峰态, 沙脊线峰度值 1.64~2.04, 属极窄峰态; 背风坡峰度值 1.45~1.87, 属窄峰态和极窄峰态; 对照区峰度值 1.55~2.01, 属极窄峰态。50 cm 深度沙丘各部位峰度值介于 1.09~2.44, 中等峰态、窄峰态、极窄峰态都有分布, 窄峰态和极窄峰态居多。通过分析, 沙丘各部位及不同沉积时期, 粒度曲线峰态都偏窄, 且 5 cm 深度较其他两层

更明显, 曲线中部较尾部分选性好, 说明沙丘长时间受风营力作用, 发育较成熟^[26]。

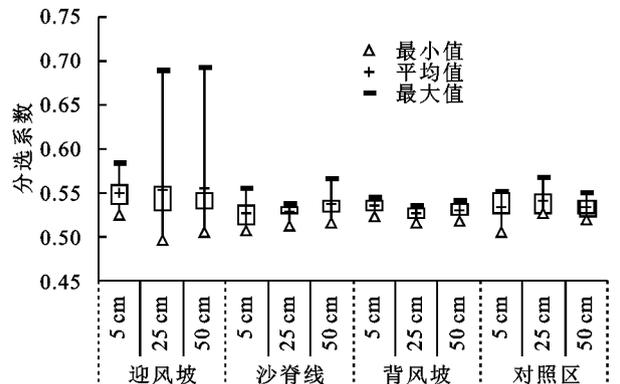


图 2 沙丘沙不同部位粒度分选系数

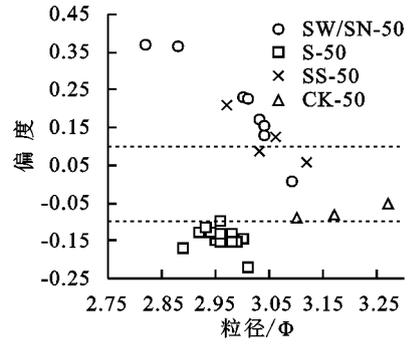
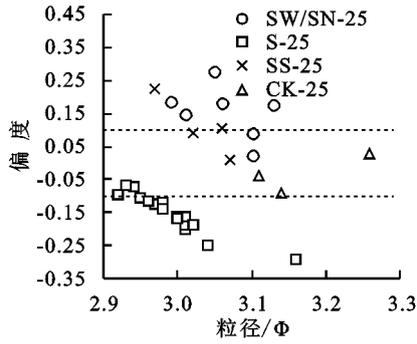
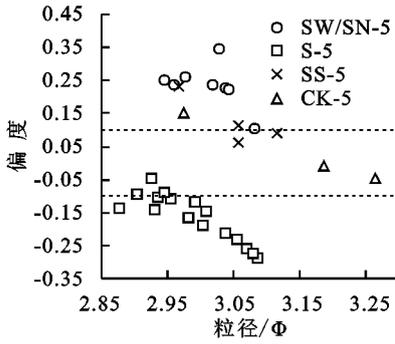


图 3 粒度偏度参数散点

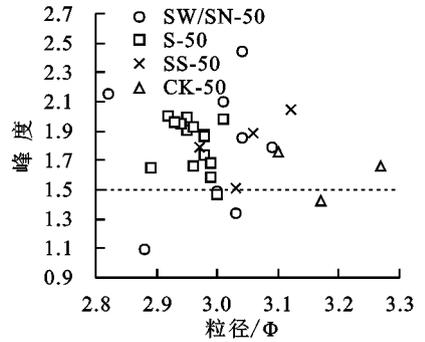
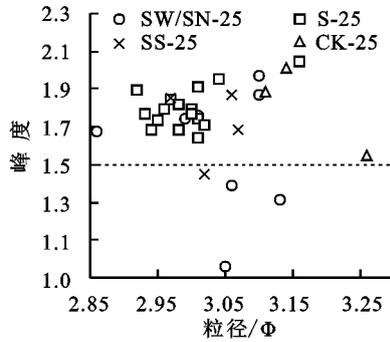
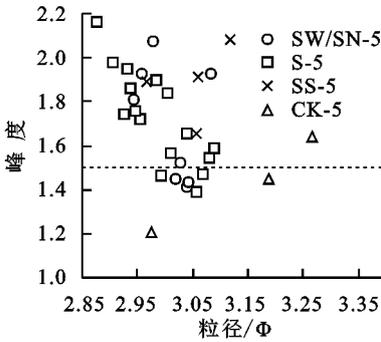


图 4 粒度峰度参数散点

3 讨论与结论

沙湖属于绿洲沙地,位于第四纪马兰黄土沉积区。早期受黄河水及洪水等水流侵蚀、搬运、堆积及风营力等综合作用影响。通过分析,沙丘 50 cm 深度范围内,粒度组分不含粗沙砾石,表明随着河道稳定,河洪水作用几近消失,因此主要基于沙源地、风营力、沉积环境及人为因素考虑其粒度特征及其成因。然而目前尚未有学者对沙湖南岸沙丘做过相关研究,因此结合此地盛行风向及周围环境,认为其潜在沙源地可能为其周边大型沙漠。李超^[13]、杨庆江^[14]、庞红丽^[27]等对腾格里沙漠,舒培灿等^[11]对毛乌素沙地,李恩菊等^[28]对巴丹吉林沙漠,桂洪杰等^[24]对乌兰布和沙漠及库布齐沙漠等周边大型沙漠研究均表明,这些沙漠粒度组分均以细沙和中沙为主,粗沙、极细沙含量极少,因此周边大型沙漠地并不是其主要沙源地。沙湖南岸沙丘属于典型的绿洲沙地,其黄土母质本底条件,由于土壤结构破坏,易沙化,银川平原是西北重要粮产地,农业发展的同时,土地退化问题依然突出,为本底起沙提供可能。再者,虽贺兰山的存在阻滞腾格里沙漠风沙进一步南移,但高空气流的影响仍然存在,气流越过山区对绿洲沙地进行侵蚀、搬运、堆积同时以悬移形式携带少量细沙粒进入。沙砾在运移过程中,需足够动力起沙风,风动力条件在不同时期存在差异,运移形式主要有悬移、跃移及蠕动等形式^[25]。粒度越大,距离越长,所需动力越强,再者风作为一种分选介质,对沙粒有再分配功能,沙粒运

移过程中,相互碰撞及地表摩擦力等使其产生损耗,从而使粒度细化。湖区位于沙丘西北部上风向,跃移、蠕动及悬移物在动力不足情况下,较粗沙砾很难越过湖区进入沙丘,导致沙丘沙粒偏细,以细沙和极细沙为主,平均粒径 $2.95 \pm 0.1 \sim 3.18 \pm 0.09\Phi$ (表 2),两者所占比重达 90% 以上,中沙和粉沙含量极少,黏土仅存在迎风坡 SW 条带,粗沙和极粗沙含量为 0,分选性较好。再者,随着旅游业开展,游客活动对粒度特征亦有影响,如仅 SW 迎风坡面存在黏粒,是因为此地开展沙滩排球活动,游客活动强度大所致。另一方面,分析角度以及试验方案不同也会对分析结果产生影响。前人在腾格里沙漠相关研究中都只对表层进行取样分析,大多为 0—1 cm, 0—3 cm 以及 0—5 cm 单层取样,并未分层进行分析。本文在试验设计中设计了 3 层取样, 5 cm, 25 cm, 50 cm 对比分析。

根据前人研究结论,沙丘粒度分布主要有两种模式,从坡面两侧至坡顶粒度逐渐变粗、分选变好以及从坡面至坡顶粒度渐细,分选渐好^[29]。迎风坡,风动力充足,沙粒分选性较强,但作为中心活动区,受人类活动影响,粒度偏细。脊线处,所受风动力较强,有足够的动力进行粒度分选及运移,再者受背风坡气流顶托作用,分选性好,粒度偏粗。风越过脊线时,动力减弱,背风坡气流对风动力具有顶托作用,在脊线附近形成涡流,沙粒因动力不足,难以前行,在脊线处下沉,重力作用下,沿着沙坡滚落^[25],因此在背风坡处分选性差,粒度偏细。然而由于营力、沉积环境及人为活动变化导致其粒度分布与模式存在差异。如沙

粒在运移过程中,随着距离的增加,动力下降,随即悬移乃至跃移沙粒变为表层蠕动前移,在迎风坡处开始顺着坡面跃移或滚动,向丘顶移动^[25]。研究区迎风坡 SW 条带自然地形正好处于 S 沙脊线地形凹面,坡底布局了沙滩排球场,此条带分布的 5 个采样点,仅位于沙滩排球场的 SW-45 存在黏土,5 cm,25 cm,50 cm 各层黏土含量分别达到 1.94%,3.36%和 3.32%。说明人为踩踏亦会对沙粒度产生影响,沙粒流动性强,表层

仅受人力踩踏影响,而越往深层不仅有人为踩踏的影响,更是存在沙粒间各个方向的碰撞挤压力,双重力的作用下,导致深层黏土比重大。沙粒推进至丘顶,动力进一步下降,再加上背风坡气流的顶托作用,形成涡流,气流进一步减弱,沙粒在迎风坡附近下落堆积,形成一条较粗沙粒脊线,当一次强劲气流抵达时,会对沙脊线进行侵蚀、搬运,使其向背风坡推移一定距离,如此往复循环,使得沙丘不断前移。

表 2 宁夏沙湖沙丘沙粒度参数

粒度参数	分层/cm	迎风坡(SW/SN)	沙脊线(S)	背风坡(SS)	对照区(CK)
平均粒径	5	3.01±0.05b	2.99±0.07b	3.05±0.06b	3.15±0.15a
	25	3.04±0.09b	2.99±0.06b	3.03±0.05b	3.17±0.08a
	50	2.99±0.09bc	2.96±0.03c	3.05±0.06b	3.18±0.09a
分选系数	5	0.55±0.02a	0.53±0.02b	0.54±0.01ab	0.54±0.02ab
	25	0.55±0.06a	0.53±0.01a	0.53±0.01a	0.54±0.02a
	50	0.56±0.06a	0.54±0.01a	0.53±0.01a	0.53±0.02a
偏度	5	0.24±0.07a	-0.16±0.07d	0.13±0.07b	0.03±0.11c
	25	0.19±0.12a	-0.16±0.06c	0.11±0.09a	-0.03±0.06b
	50	0.21±0.12a	-0.14±0.03b	0.12±0.07a	-0.07±0.02b
峰度	5	1.69±0.27ab	1.72±0.22ab	1.88±0.18a	1.43±0.22b
	25	1.59±0.34ab	1.8±0.11a	1.72±0.2a	1.82±0.24a
	50	1.78±0.45a	1.83±0.17a	1.81±0.23a	1.61±0.17a

注:同一深度不同小写字母表示不同部位样品间差异显著($p < 0.05$)。

综上所述,沙湖南岸沙丘沙粒度组分主要以细沙(29.12%~64.39%)、极细沙(33.72~64.52%)为主,中沙、粉沙含量很少,不含粗沙、极粗沙,黏土仅存在于迎风坡 SW 条带,50 cm 深度粒度相较 25 cm 和 50 cm 偏细,主要是本地沙源、风力分选作用的结果。沙脊线附近平均粒径均大于沙丘其他部位,分选性都较好,沙脊线附近分选性最好,而迎风坡 SW 条带分选性在各个时期均较差。偏度沙脊线全部以及对照区部分粗偏,其他部位均为细偏。峰度则偏窄且大部分属于极窄峰态($K_{g\varphi} > 1.5$),说明沙丘长期受风营力作用,发育较成熟。沙湖南岸沙丘沙粒度特征与其本底沙源、风营力、沉积环境及人类活动有关,是各营力长期综合作用的结果。

参考文献:

[1] 陈国祥,董治宝,崔徐甲,等.毛乌素沙地中部风成沙的组成与微形态特征[J].中国沙漠,2018,38(3):473-483.

[2] Visher G S. Grain-size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39(3):1074-1106.

[3] 贺佳嘉,全占军,潘美慧,等.塔克拉玛干沙漠高大沙垄区垄间地沿主风向连续分布新月形沙丘表面沙粒粒度特征[J].北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(3):292-297.

[4] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea[J]. Sedimentary Geology, 2003,161(1):1-14.

[5] Honda M, Shimizu H. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands[J]. Sedimentology, 1998,45(6):1125-1143.

[6] Wenru J, Shengyu L, Xiaoyang G, et al. The foliar dust grain size characteristics of different plant species in the central taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(3):658-665.

[7] 李生宇,孙娜,马学喜,等.塔克拉玛干沙漠腹地垄间沙粒胶结体的基本特性及研究价值[J].中国沙漠,2016,36(2):265-273.

[8] 周颖,曹月娥,杨建军,等.古尔班通古特沙漠东缘风沙流结构特征[J].水土保持学报,2016,30(3):78-83.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 舒培仙,牛东风,李保生,等.毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J].中国沙漠,2016,36(1):158-166.

[12] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等.不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):230-235.

[13] 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.

[14] 杨庆江,温小浩,李保生,等.腾格里沙漠南缘土门剖面末次间冰阶段的粒度特征及其反映的气候—沉积环境[J].中国沙漠,2017,37(4):666-677.

(5) 2000—2013年西安市面降雨量和区域植被覆盖度均值均呈现增加趋势,降雨量与植被覆盖度均值皮尔逊相关性系数为0.47($p < 0.09$),呈不显著正相关。降雨量空间分布重心呈现从东北向西南转移的趋势,与植被变化呈现相反的趋势,西安市降雨对植被变化存在一定程度促进作用,但主要起作用的是非降雨因素。

参考文献:

- [1] 胡良军,张晓萍,杨勤科,等.黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J].水利学报,2002,33(1):81-85.
- [2] 翟绍果,谌基东.共建美好生活的时代蕴意、内涵特质与实现路径[J].西北大学学报:哲学社会科学版,2017,47(6):20-26.
- [3] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.
- [4] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):98-108.
- [5] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,62(3):241-252.
- [6] Lanfredi M, Simoniello T, Macchiato M. Comment on "Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999" by L. Zhou et al [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108 (D/12), DOI: 10.1029/2002JD003046.
- [7] Sun Y, Yang Y, Zhang L, et al. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2015, 87/88:67-78.
- [8] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2015,9(1):38-41.
- [9] 李析男,谢平,李彬彬,等.变化环境下不同等级干旱事件发生概率的计算方法:以无定河流域为例[J].水利学报,2014,45(5):585-594.
- [10] 章诞武,从振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.
- [11] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.
- [12] 陈占寿,乔爱芳.几种水文序列变异点诊断方法的性能比较[J].青海师范大学学报:自然科学版,2014(3):1-5.
- [13] 毕燕,徐洪琼,陈乔.广西国内旅游规模区域差异分析[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2012,29(4):118-123.
- [14] 李巍.大兴安岭地区土壤侵蚀动态研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [15] 许炯心.黄土高原植被—降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义[J].生态学报,2005,25(6):1233-1239.
- [16] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [15] He Q, Yang X H, Huo W, et al. Characteristics of sand granularity from Kumtag Desert and its environmental significance [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(1):18-22.
- [16] 王翠,雷加强,李生字,等.策勒绿洲—沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J].干旱区地理,2014,37(2):230-238.
- [17] 张号,张克存,安志山,等.敦煌月牙泉景区沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):645-649.
- [18] 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):271-275.
- [19] 张克存,牛清河,安志山,等.敦煌沙漠—绿洲过渡带近地表风沙动力环境[J].水土保持通报,2015,35(4):8-11,17.
- [20] 林永崇,徐立帅.策勒绿洲—沙漠过渡带风成沉积物粒度的空间变化[J].应用生态学报,2017,28(4):1337-1343.
- [21] 周娜,尤源,雷加强,等.毛里塔尼亚努瓦克肖特沙丘粒度分布特征及其环境意义[J].中国沙漠,2018,38(2):252-261.
- [22] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. the Journal of Geology, 1922,30(5):377-392.
- [23] 刘志杰,公衍芬,周松望,等.海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究[J].海洋学报:中文版,2013,35(3):179-188.
- [24] 桂洪杰.黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [25] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987(1):95-285.
- [26] 唐进年,王继和,苏志珠,等.库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征[J].干旱区地理,2008,31(6):918-925.
- [27] 庞红丽.腾格里沙漠北缘沙丘分布及粒度特征研究[D].北京:中国地质大学,2012.
- [28] 李恩菊,董治宝,赵景波.巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J].干旱区地理,2011,34(3):471-478.
- [29] Lancaster N. Geomorphology of desert dunes [M]. London: Routledge, 1995.

(上接第273页)