

文章编号:1000-1638(2025)01-0055-14

DOI:10.13484/j.nmgdxxbzk.20250107

鄱阳湖沙岭沙山沉积物粒度特征及其影响因素^{*}

耿嘉慧¹,杜丁丁¹,吴汪洋¹,李志文²,戴友为¹,高斌¹

(1. 东华理工大学地球科学学院,南昌 330013; 2. 佛山大学环境与化学工程学院,广东 佛山 528225)

摘要:鄱阳湖位于亚热带湿润气候区,湖周广泛发育多处大型沙山,一直为研究的热点区域。然而,已有的研究多侧重于过去风沙活动,缺少对现代风沙活动的研究,鄱阳湖周边现代风沙活动强烈,分析沙山不同高度现代沉积物粒度特征,有助于探讨其垂直分布规律与影响因素,为风沙治理提供科学依据。因此,本文选取庐山市星子镇沙岭沙山为研究对象,采用粒度和端元模型进行研究,结果表明:(1)沙岭沙山沉积物主要由中砂、细砂和粗砂组成,中砂含量最高,占总量的49.52%,平均粒径为2.15 Φ ,分选程度较差,呈极正偏和很窄峰态分布;(2)从沙山坡脚至坡顶,随高度升高,沙山沉积物细颗粒含量波动式上升,粗颗粒含量波动式下降,平均粒径呈粗—细—粗变化,分选性由好—差—好变化,偏度由小—大—小变化,峰态逐渐趋向极窄;(3)沉积物粒度随高度变化,坡顶主要与风力搬运能力强弱有关,坡中主要受植被覆盖影响,坡脚受重力堆积作用显著;利用概率累积曲线得出沉积物搬运方式以跃移为主。

关键词:沙岭沙山;沉积物粒度;垂直分布;影响因素;鄱阳湖

中图分类号:P931.3 **文献标志码:**A

风是驱动沙粒活动及塑造风沙地貌的主要动力,风沙地貌是风力作用的结果,沉积物为风沙地貌的形成和演化提供物质基础^[1]。沉积物粒度特征是解释风沙活动、土壤侵蚀、黄土堆积及荒漠化过程的关键要素,沉积物粒度组成及其随时间和空间的变化揭示物质来源、地形变化与气候条件等方面的时空差异性^[2]。沉积物粒度参数是确定沉积物物源、沉积环境及沉积过程的一种重要方法,可以用于推断沉积介质的能量水平和物质搬运方式,有助于揭示沉积物粒度特征的空间差异和影响因素^[3]。前人在腾格里沙漠^[3-5]、毛乌素沙地^[6-7]、浑善达克沙地^[8-9]及巴丹吉林沙漠^[10-11]等地利用沉积物粒度及参数进行研究,但这些研究多针对于我国西北内陆的干旱与半干旱地区。

亚热带湿润气候区鄱阳湖周边具有“土地风沙化^[12]”现象,发育了吉山沙山、松门沙山、多宝沙山、沙洲村沙山与沙岭沙山等沙山(图1)。杨达源^[13]和吴艳宏等^[14]分别对长江中下游南沿地带和九江—彭泽一带的沙山进行研究,认为古长江、古赣江以及湖水水位下降而露出的大片河湖滩是沙山的物质基础。其他学者也对鄱阳湖湖滨及沙山地区的网纹红土^[15]、下蜀黄土^[16]、水土流失^[17]和土地沙化^[18]等进行了研究。前人研究主要集中在沙山演化与风沙灾害,缺乏对鄱阳湖沙山现代变化过程的探讨。

庐山市星子镇沙岭沙山作为鄱阳湖周边具有代表性的典型沙山,整体规模较大,相对高度较高,人类影响较少,植被覆盖较好,一直为研究的热点区域。例如,韩志勇等^[19]对沙岭进行地质调查并用光释光测年法测定风蚀坑形成年代,从地貌学、动力学和沉积学角度分析垄状地形的成因和槽形风蚀坑的发育过程。任黎秀等^[20]通过对沙岭的野外考察,利用TL、¹⁴C等技术将鄱阳湖湖滨沙山形成演

^{*} 收稿日期:2024-01-16;修回日期:2024-04-24

基金项目:江西省大气污染成因与控制重点实验室开放基金项目(AE2105)

作者简介:耿嘉慧(1998—),女,江苏南京人,2022级硕士研究生。E-mail:gjhdili1998@163.com

通信作者:杜丁丁(1988—),男,甘肃陇南人,讲师,博士。主要从事湖泊环境演化研究。E-mail:duddy007@

化分为 4 个风成沙山期及 7 类沉积物。Han 等^[21]使用 OSL 技术重建沙岭剖面风沙沉积的年代序列,揭示了东亚夏季风异常变化下华南极端干旱事件与 Henrich 事件的对应关系。Gong 等^[22]对沙岭多处高于鄱阳湖历史最高水位的具有交错层理的粉砂层进行 MET-pIRIR 测年,证明该层为水成沉积层并进一步推测古鄱阳湖在 MIS 3a 时期已存在。然而,已有的研究多侧重于过去风沙活动以及沙山成因,随着沙岭沙山被纳入开发规划,人类活动日益加剧,该区域的现代风沙活动变得更为复杂,因此,解决影响沙山现代变化过程的主要因素至关重要。

本文通过对沙岭沙山不同高度的现代沉积物粒度进行分析,阐述沙山粒度的垂直分布规律,探讨影响不同高度沉积物粒度特征的主要因素,揭示风力在沙山不同高度的搬运、沉积和分选作用,为沙化治理、沙地保护与合理开发利用提供科学依据,也有助于亚热带湿润气候区沙地形成与演化理论体系框架构建。

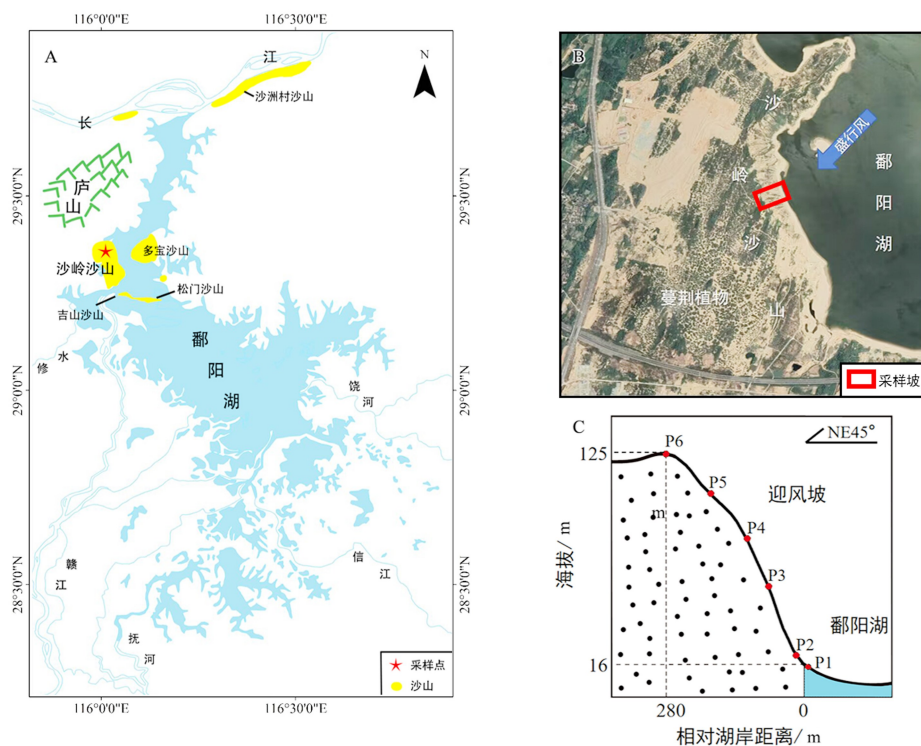


图 1 鄱阳湖北部、中部主要沙山分布图(A)、沙岭沙山位置(B)与采样点分布(C)

Fig. 1 Sand hills in the central-north part of Poyang Lake(A)、location of the Shaling sand hill (B)and sampling sites distribution(C)

1 研究区概况

沙岭沙山位于江西省庐山市星子镇,整体规模较大,相对高度较高,风沙活动强烈,为鄱阳湖湖滨面积最大、植被覆盖度最好的沙山之一。沙山总体呈南北方向,整体面积约 10 km^2 ,南北方向范围介于 $29^{\circ}19'30''\text{N}$ 和 $29^{\circ}24'\text{N}$ 之间,东西方向范围介于 $115^{\circ}59'53''\text{E}$ 和 $116^{\circ}1'23''\text{E}$ 之间。地形以南高北低为主,最高点位于沙山的东南部,高度为 136 m ^[15],以鄱阳湖年均水位 15 m 计算,沙山的相对高度高达 120 m 。气候以中亚热带湿润型为主,受东亚季风环流主导,年均气温约为 18°C ,年均降水量约为 1400 mm ,但全年分配极不均匀。一年中起沙风以东北方向为主,频率约为 79.81% 。年均风速约为 3.2 m/s ,年间风速超过 5 m/s 的平均天数为 268.7 d ,超过 10 m/s 的平均天数为 49.6 d ^[23]。“风季”和“旱季”的出现时间大体一致,且风向较为平稳,强大且频繁的风力使得土地沙化加剧^[18],沙岭沙山进一步发育。研究区内植物以旱生植物为主,草本植物有狗牙根、球柱草等^[24],灌木植物有胡枝

子、算盘子,也有人工种植的马尾松和湿地松等。

2 采样和分析方法

2.1 采样布点

沙岭沙山盛行风为东北风(图 2),因此选择东北坡作为采样坡(图 1B)。采用剖面挖掘法,从坡脚至坡顶每间隔 15~25 m 高差进行布点,标为 P1—P6(图 1C),分别以表层 0~20 cm 和浅层 20~40 cm 进行采样,每个点挖取 3 个剖面作为重复样本(表 1),共采集湖滩沉积物样品 6 个,沙山沉积物样品 54 个,样品采集时间为 2023 年 9 月。

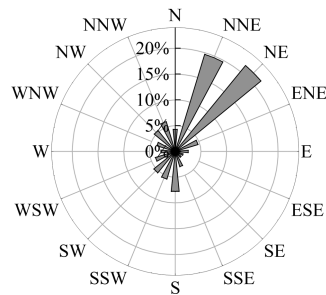


图 2 2005—2022 年星星子站多年风向频率图

Fig. 2 Wind frequency chart of Xingzi station from 2005 to 2022

表 1 采样点位置及地表情况

Table 1 Sampling point location and surface conditions

采样点	位置	采样点序号	高度/m	植被特征	地表特征
P1	湖滩	P1-1	7	长有稀疏蒿类	湖浪冲蚀,具有明显的波纹沉积现象
		P1-2	6		
		P1-3	7		
P2	坡脚	P2-1	16	长有球柱草、狗牙根	坡积台地
		P2-2	20	多黄花蒿,盖度 40%	
		P2-3	21	多黄花蒿,植株较高	
P3	坡下部	P3-1	51	多黄花蒿,盖度 40%	植被覆盖率高
		P3-2	47	多胡枝子,盖度大于 80%	
		P3-3	48	长有胡枝子,盖度 30%~40%	
P4	坡中部	P4-1	76	多胡枝子、黄花蒿,植株高约 1m	有冲蚀沟遗迹
		P4-2	73	多胡枝子、黄花蒿	
		P4-3	68	多黄花蒿	
P5	坡上部	P5-1	98	若干苔藓、地衣	多崩塌地块和冲蚀沟
		P5-2	96	无植被	
		P5-3	90	低矮胡枝子	
P6	坡顶	P6-1	122	长有胡枝子、黄花蒿	多裸沙斑块和风蚀坑
		P6-2	125	蔓荆植物	
		P6-3	118	蔓荆植物	

2.2 实验方法

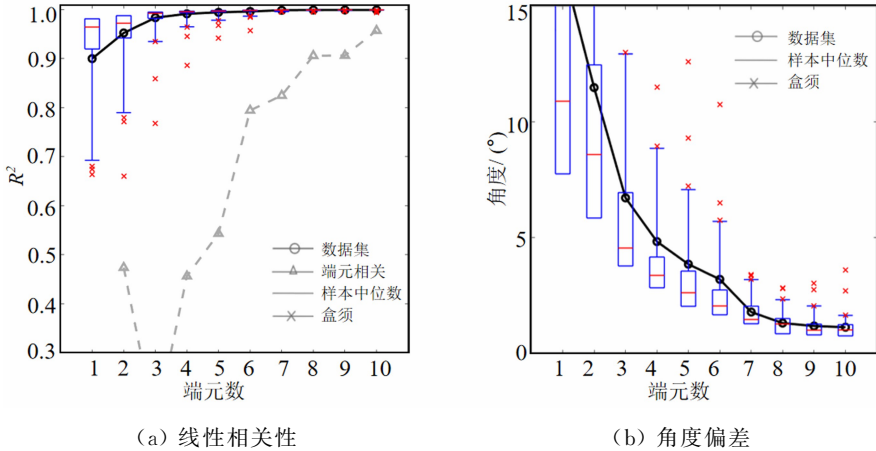
采集的样品在实验室自然风干后过 2 mm 筛子以筛除植物根茎和其他杂质,粒度测定仪器为 Mastersizer-2000M,测量范围为 0.01~2000 μm ,测试误差 $<2\%$ 。对每个样本进行 3 次重复测量,以确定不同粒级所占体积的百分比,最终结果取平均值。本次粒度测试在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室进行。运用 Krumbein^[25]的对数转换公式,使用 Φ 值来量化粒度。根据 Folk 等^[26]提出的粒度参数计算公式,计算平均粒径(Mz)、分选系数(σ)、偏度(Sk)和峰度(Kg)。粒度分级采用

Wentworth^[27]的分类方法,将砂粒划分为黏土($0.01\sim 4\ \mu\text{m}$)、粉砂($4\sim 63\ \mu\text{m}$)、极细砂($63\sim 125\ \mu\text{m}$)、细砂($125\sim 250\ \mu\text{m}$)、中砂($250\sim 500\ \mu\text{m}$)、粗砂($500\sim 1000\ \mu\text{m}$)以及极粗砂($1000\sim 2000\ \mu\text{m}$)。

2.3 端元分析

端元分析方法最早由 Weltje^[28]在1997年提出,通过对粒度曲线主要特征的提取和拟合分析,将沉积物划分成多个端元,可以有效地分析沉积物的物源、搬运动力和沉积环境等信息。本文应用 Paterson 等^[29]开发的端元分析软件,在 Matlab R2022b 平台上,加载 Analysize-masters 工具包进行计算处理。一般认为,线性相关系数越大(>0.9)且角度偏差值越小($<5^\circ$),样品的粒度曲线与端元曲线的吻合度越高。此外,端元数过多可能会导致过度拟合,所以应遵循端元数尽量取小原则。

如图 3(a)所示,线性相关性随端元数量的增加稳步提升。在端元数量从 1 个增至 3 个的过程中,曲线斜率显著上升,且相关系数 R^2 迅速增加至 0.98,表明拟合质量较高。当端元数达到或超过 4 个时, R^2 增长幅度不再明显。如图 3(b)所示,随着端元数的增加,角度偏差逐渐降低。在端元数量从 1 个增到 3 个的过程中,角度偏差显著下降,而随着端元数量达到或超过 4 个,下降速度则放缓。端元数量为 3 个时,角度偏差大于 5° ;而端元数量为 4 个时,角度偏差小于 5° 。因此,本次将粒度最优端元数量定为 4 个。为了便于描述,文中将沙岭沙山东北坡沉积物的端元组分分别命名为 EM1、EM2、EM3 和 EM4。



(a) 线性相关性

(b) 角度偏差

图 3 沉积物粒度端元分析结果

Fig. 3 End-element analysis results of grain size of sediments

3 结果与分析

3.1 沙岭沙山沉积物粒度

由图 4 可知,沙岭沙山沉积物以 $125\sim 500\ \mu\text{m}$ 的中砂和细砂为主,其中中砂含量最高,达到 49.52%(表 2),其次是细砂(18.39%)和粗砂(15.16%),三者含量总和为 83.07%。粉砂(11.37%)含量也较高,黏土(2.96%)、极细砂(2.19%)和极粗砂(0.42%)含量最少。与沙山相比,湖滩沉积物主要由粒径 $< 125\ \mu\text{m}$ 的粉砂、极细砂和细砂组成,三者占总量的 79.84%,其中粉砂(48.59%)含量最高,极细砂(18.07%)、细砂(13.18%)、中砂(10.29%)次之,黏土(7.32%)和粗砂(2.66%)含量最少,不含极粗砂。

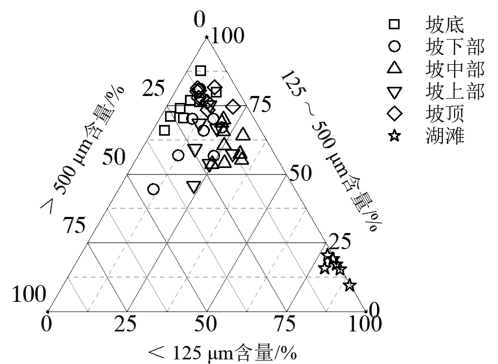


图 4 沙岭沙山和湖滩粒度组成三元相图

Fig. 4 Ternary phase diagram of grain size composition of Shaling sand hill and lake beaches

沙岭沙山沉积物 Mz 为 2.15Φ , 属细砂组分。分选性较差, 分选系数为 1.51Φ , 偏度 Sk 为极正偏分布, 峰态很窄。湖滩沉积物 Mz 更细, 为 4.47Φ , 属粉砂组分, 分选更差, 分选系数为 2.13Φ , 偏度为正偏分布, 峰态呈正态。

表 2 沉积物的粒径组成与粒度参数

Table 2 Grain size composition and parameters of sediments

位置	粒级含量/%							粒度参数			
	黏土	粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	Mz/Φ	σ/Φ	Sk	Kg
湖滩	7.32	48.59	18.07	13.18	10.29	2.66	0.00	4.47	2.13	0.29	0.97
坡脚	1.85	6.17	0.80	16.94	55.64	17.95	0.66	1.70	0.99	0.25	1.64
坡下部	3.22	11.94	2.49	17.39	46.39	18.00	0.60	2.09	1.65	0.49	2.11
坡中部	4.56	19.41	2.02	18.56	43.08	12.38	0.00	2.84	2.21	0.67	1.69
坡上部	2.85	12.84	3.83	16.31	46.77	16.67	0.76	2.12	1.53	0.44	2.07
坡顶	2.31	6.51	1.82	22.77	55.75	10.78	0.07	1.99	1.16	0.39	2.63
平均值 (除湖滩)	2.96	11.37	2.19	18.39	49.52	15.16	0.42	2.15	1.51	0.45	2.03

3.2 不同高度沉积物粒度特征对比

3.2.1 不同高度沉积物的粒度组成对比

沙岭沙山不同高度 0~20 cm 沉积物粒度组成变化比 20~40 cm 更为明显(图 5)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 深度, 黏土与粉砂的含量皆在坡中部达到最高, 而坡顶与坡脚的含量最少。0~20 cm 极细砂在坡上部的含量最高(平均值为 5.99%), 20~40 cm 极细砂在坡下部含量较高(3.38%)。0~20 cm 细砂在坡顶含量最高(22.47%), 其次是坡脚(19.27%); 20~40 cm 细砂也在坡顶含量最高(23.08%), 在坡脚和坡下部的含量最低(均为 14.60%)。0~20 cm 中砂在坡顶含量最高(55.13%), 其次是坡脚(53.74%), 在坡上部含量最少(38.04%)。20~40 cm 中砂的最高含量在坡脚(57.53%), 坡顶次之(56.37%), 在坡中部含量最低(44.58%)。0~20 cm 粗砂在坡中部含量最高(22.38%), 其次是坡脚(17.95%), 在坡上部含量最少(16.67%)。20~40 cm 粗砂在坡中部含量最高(18.00%), 其次是坡脚(16.94%), 在坡上部含量最少(12.38%)。0~20 cm 极粗砂在坡中部含量最高(0.60%), 其次是坡脚(0.66%), 在坡上部含量最少(0.76%)。20~40 cm 极粗砂在坡中部含量最高(0.60%), 其次是坡脚(0.66%), 在坡上部含量最少(0.76%)。

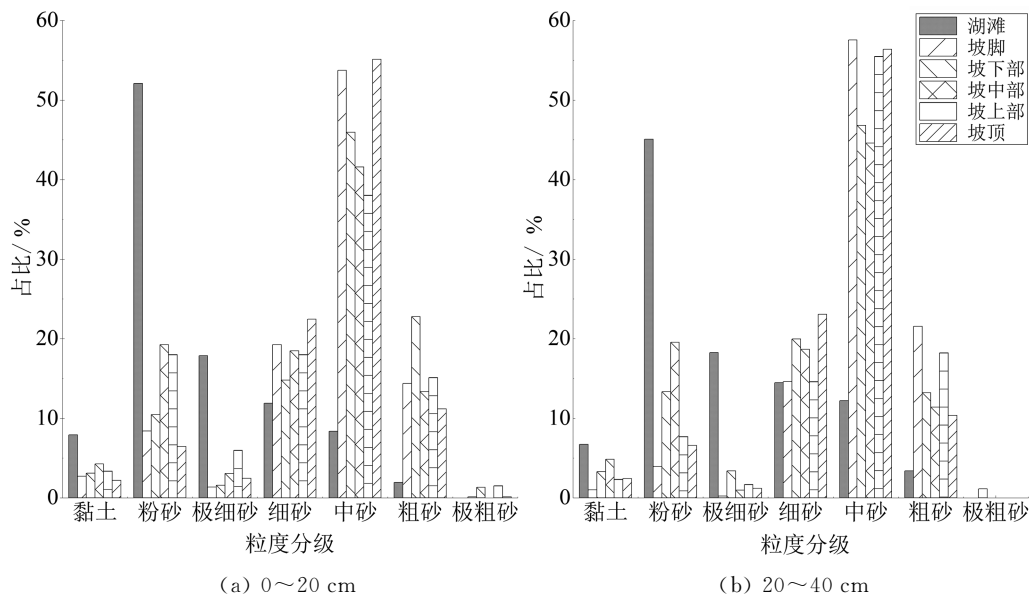


图 5 不同高度沉积物粒度分级

Fig. 5 Grain size composition of sediment at different heights

对于粗砂,0~20 cm 坡下部含量最高(22.78%),20~40 cm 坡脚含量最高(21.54%),两者在坡顶的含量均为最低(分别为 11.17%和 10.38%)。对于极粗砂,0~20 cm 坡上部的含量(1.52%)略高于坡下部(1.32%),而在其他高度极粗砂的含量几乎为零。20~40 cm 只有坡脚含有 1.13%的极粗砂。

3.2.2 不同高度沉积物的粒度参数对比

沙岭沙山 0~20 cm 和 20~40 cm 沉积物平均粒径 Mz 、分选系数 σ 、偏度 Sk 均在坡中部最高(图 6),说明坡中部相较于其他高度,沉积物中细颗粒占比更多,分选效果更差,曲线更偏向极正偏。0~20 cm 和 20~40 cm 沉积物平均粒径 Mz 最粗,分别出现在坡下部和坡脚,分别为 1.86 Φ 和 1.47 Φ ,都属于中砂粒级。0~20 cm 沉积物分选系数 σ 在坡顶最小,为 1.15 Φ ,分选较差;20~40 cm 最小值出现在坡脚,为 0.80 Φ ,分选中等。坡脚的 0~20 cm 和 20~40 cm 沉积物偏度 Sk 最小,分别为 0.311 和 0.190,分别属于极正偏和正偏。不同高度沉积物 0~20 cm 和 20~40 cm 峰度 Kg 变化规律不明显,但峰态都很窄。

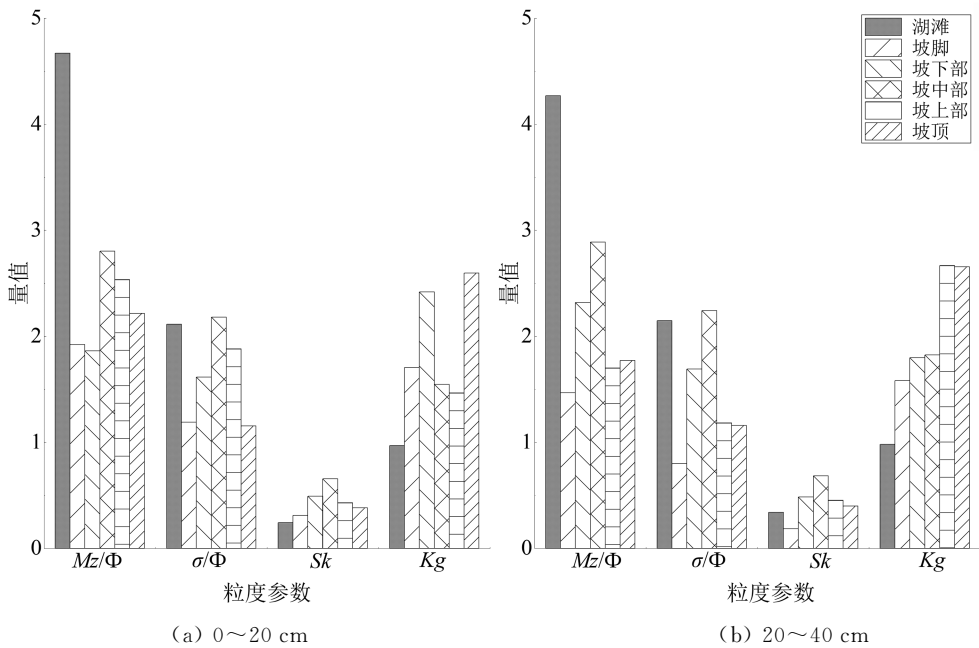


图 6 不同高度沉积物粒度参数

Fig. 6 Grain size parameters of sediment at different heights

3.3 不同高度沉积物粒度参数之间的关系

由表 3 可知,沙岭沙山沉积物的平均粒径和分选系数显示出极其显著的正向关联($P < 0.01$),即随平均粒径变细,分选系数增大,分选性变差。特别是在坡脚和坡顶区域,这种趋势相较于坡中部区域更为显著(图 7)。沉积物的平均粒径和偏度值之间也呈现出极其显著的正向关联($P < 0.01$),各部位的偏度都明显随平均粒径的变细而变大。在平均粒径和峰态值的关系上,存在极其显著的负向相关性($P < 0.01$),但局部各部位峰态随平均粒径的变化不明显。分选系数与偏度值之间有极其显著的正向关联($P < 0.01$),但沙山局部不同高度部位二者的相关关系复杂,分选性与偏度在坡中部呈负相关关系,在坡顶呈正相关关系,其他部位则无明显相关关系。就湖滩沉积物而言,其平均粒径较细,分选效果较差,偏度偏向正偏,峰态倾向于正态,这些特点与前文所述沙岭沙山的沉积物粒度参数之间的相关性规律不一致。

3.4 沙岭沙山粒度端元分析

自然频率分布曲线可以直观地反映出沉积物的主要粒级和不同粒级的相对含量^[30]。沙岭沙山

不同高度的沉积物粒度频率曲线都为双峰型(图 8),有一个明显主峰和微弱次峰,主峰呈现出“高窄”形。主峰范围集中在 250~500 μm ,属中砂组分;次峰范围集中在 10~70 μm ,属粉砂-极细砂组分。湖滩沉积物的粒度频率曲线为单峰型,呈现出“宽平”形,单峰的众数粒径为 56~70 μm ,属粉砂-极细砂组分。

表 3 各粒度参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of grain size parameters

粒度参数	Mz	σ	Sk	Kg
Mz/Φ	1			
σ/Φ	0.750**	1		
Sk	0.643**	0.650**	1	
Kg	-0.545**	-0.269	0.05	1

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

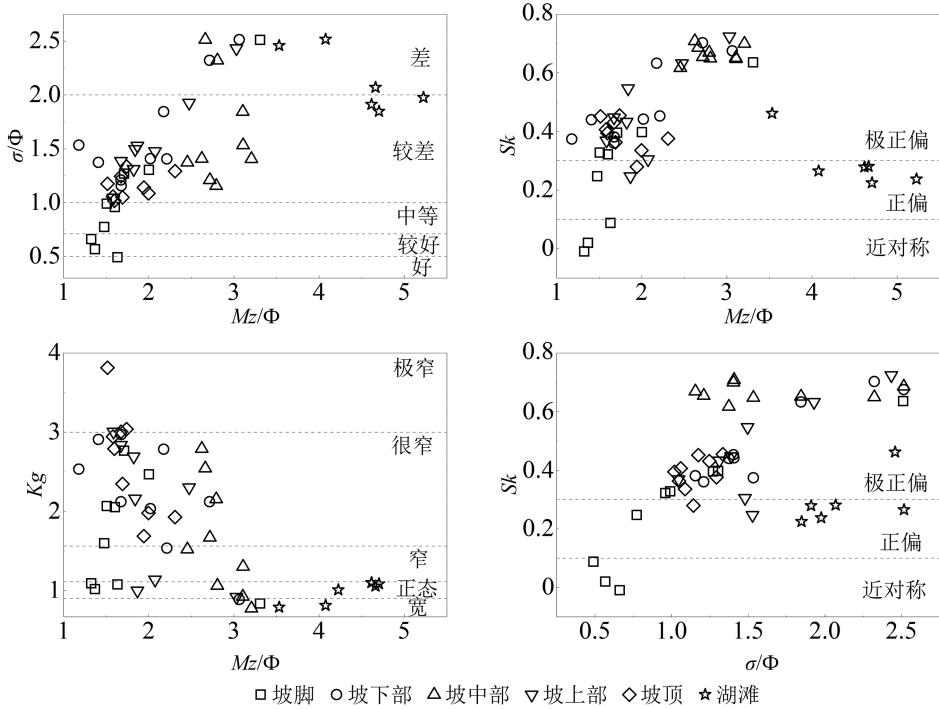


图 7 粒度参数之间散点关系

Fig. 7 Relationships between grain size parameters

EM1-EM4 的频率分布曲线也皆为双峰型。EM1 主峰对应粒径为 356 μm ,属中砂范畴,次峰对应粒径为 18 μm ,属粉砂。EM1 平均粒径 Mz 最小,为 61.00 μm (表 4),属粉砂;粒径分布范围宽,分选极差,为负偏分布,峰态为宽峰态。EM2 主峰和次峰对应的粒径分别为 252 μm 和 50 μm ,分别位于中砂区间和粉砂区间。EM2 的平均粒径 Mz 大于 EM1,为 201.20 μm ;分选系数为 2.21,分选差,为极负偏分布,峰态很窄。EM3 的主峰对应粒径为 365 μm ,属中砂区间,在粒径 6 μm 处还存在一个微小弱峰,可能是其他来源或搬运方式带来的粉砂。EM3 平均粒径 Mz 为 340.78 μm ,属中砂区间;分选系数为 1.44,是 EM1-EM4 中颗粒集中程度最强、分选性最好的;为近对称分布,峰态为正态。砂含量为 95.13%,说明 EM3 中砂占绝对主导。EM4 与 EM2 粒度频率曲线极其相似,但 EM4 的粒径更粗,主峰和次峰对应的粒径更大,分别为 564 μm 和 63 μm ,分别位于粗砂区间和极细砂区

间。EM4 的平均粒径 M_z 也大于 EM2, 为 $424.69 \mu\text{m}$, 属中砂; 分选系数为 2.3, 分选差, 为极负偏分布, 峰态很窄。

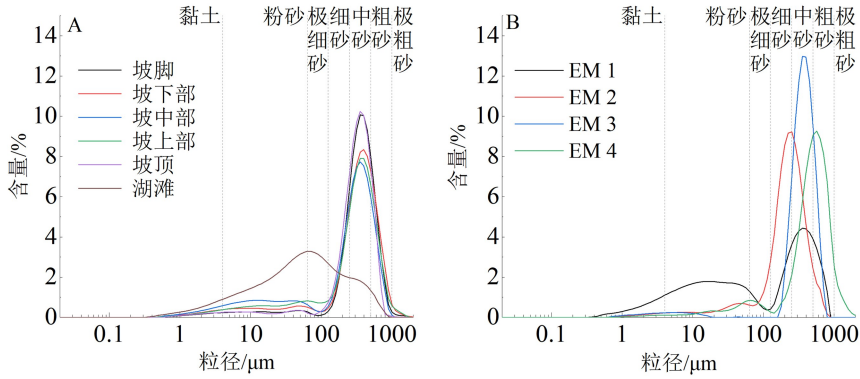


图 8 沙岭不同高度沉积物(A)和粒度端元(B)频率分布曲线

Fig. 8 Frequency distribution curves of sediments at different heights (A) and grain size end-element (B)

表 4 端元 EM1—EM4 粒度参数和 CSS 比值

Table 4 Grain size parameters and CSS ratio of end-element EM1—EM4

端元组分	粒度参数				CSS 比值		
	$M_z/\mu\text{m}$	σ/Φ	Sk	Kg	黏粒/%	粉砂/%	砂/%
EM1	61.00	6.50	-0.23	0.70	9.40	38.68	51.92
EM2	201.20	2.21	-0.33	1.95	1.88	9.12	89.00
EM3	340.78	1.44	-0.12	1.08	2.37	2.50	95.13
EM4	424.69	2.26	-0.41	1.95	1.03	7.76	91.21

4 讨论

4.1 沙岭沙山沉积物粒度变化趋势

4.1.1 各粒级含量变化趋势

沙山沉积物细颗粒组分(黏土、粉砂和极细砂)含量随高度升高先增后减, 见图 9, 总含量从坡脚的 3.90% 增加到坡中上部的 42.03%, 再减少到坡顶的 6.83%。细砂含量随高度波动式上升, 从坡脚的 11.48% 增加到坡顶的 34.74%。中砂含量总体呈波动式下降, 但整体变化幅度不明显。表层粗颗粒组分(粗砂和极粗砂)含量变化幅度较大, 尤其是在高度 50~80 m 处含量突增, 可能是由于 P3 和 P4 采样点采集的样品中含有较粗的云母片; 20~40 cm 粗颗粒组分含量随高度升高而降低, 更符合整体的变化规律。Zhang 等^[31]在毛乌素沙地对不同粒径的砂粒输沙率进行计算研究, 发现近年来毛乌素沙地持续降低的风速, 提高了运输细砂的能力, 而搬运中砂的能力却有所减少, 这一变化导致沙丘迎风坡顶部累积的细砂含量超过了坡中部。近年来, 沙岭地区较大规模的人为采砂和大量风机电机的安装^[32], 使得沙山风速降低, 改变了输砂能力, 因此从坡脚到坡顶, 随高度升高, 沉积物细颗粒含量波动式上升, 粗颗粒含量波动式下降。

4.1.2 粒度参数变化趋势

如图 10 所示, 由沙岭沙山沉积物平均粒径随高度的变化曲线可以得出, 从沙山坡脚至坡顶, 0~20 cm 和 20~40 cm 沉积物平均粒径都呈粗—细—粗的变化趋势。风洞试验结果显示, 地形会对

近地表气流产生一定的阻滞和抬升效应,导致气流在坡前减速,在越过坡底后逐渐加速,直到达到坡顶时风速最大^[33]。实地观测结果也证实,随着气流爬坡加速,最大风速出现在迎风坡的坡顶处^[34]。从迎风坡坡脚至坡顶,风速逐渐增加,搬运动力也逐渐增强,风将砂粒搬运至坡顶时,较粗的颗粒会在坡顶沉积,而较细颗粒则在风力作用下越过坡顶,在背风坡处沉积^[35],因此坡顶沉积物平均粒径更粗。而在重力作用下,坡上表层粗颗粒下滑堆积在坡脚,使得坡脚沉积物的粒径较粗,坡中沉积物的粒径较细。

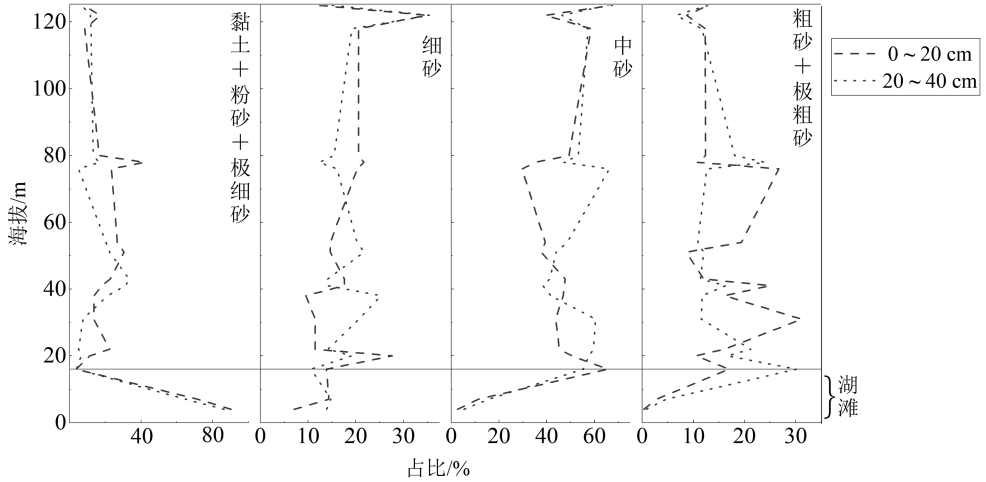


图 9 沉积物 0~20 cm 与 20~40 cm 各粒级平均含量随高度的变化

Fig. 9 Mean percentage variation of various grain size at 0—20 cm and 20—40 cm varies with heights

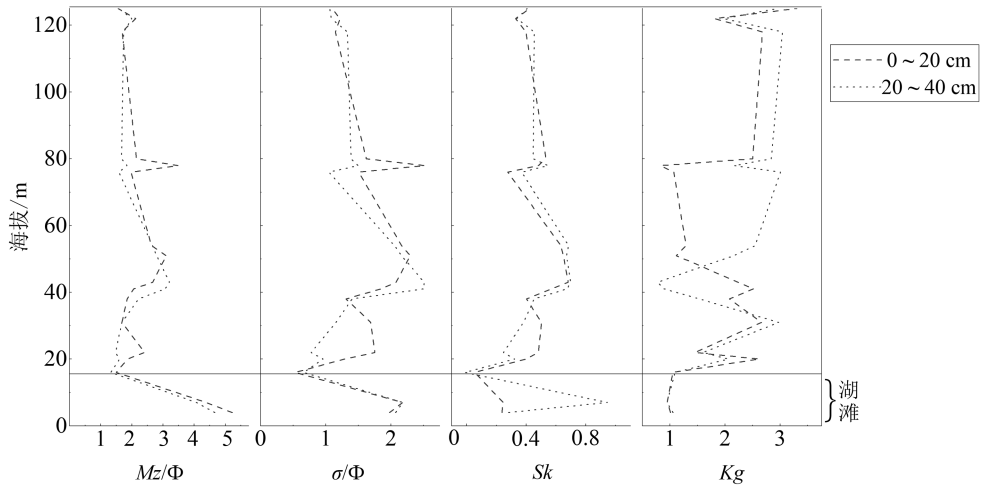


图 10 沉积物 0~20 cm 与 20~40 cm 粒度参数随高度的变化

Fig. 10 Grain size parameters variation of sediments at 0—20 cm and 20—40 cm varies with heights

从沙山坡脚至坡顶,随高度升高,沉积物分选性由好—差—好变化,从沙岭沙山沉积物概率累积曲线(图 11A)可以明显看出,坡脚和坡顶跃移组分上、下两段的线段斜率最大。线段的斜率愈大,表明分选效果愈好^[36]。坡顶的分选性好于坡中部,也可能与坡顶风速更大,受到更大风力的分选作用有关^[37]。通常,颗粒越细,分选效果越好^[38],这一规律在腾格里沙漠^[3-4]、浑善达克沙地^[8]都适用,但本文得出的规律却与之相反。张雯等^[39]对鄱阳湖固定、半固定沙地和湿地草滩的粒度研究显示三者沉积物的分选性都随平均粒径变细而变差,与本文得出的结论相同。这可能由于沙岭沙山所处地区、

风力作用和物源距离与干旱半干旱地区的沙漠区别明显,这些因素都有可能影响分选性随平均粒径的变化规律。

沙岭沙山沉积物峰态多呈正偏态,频率分布曲线(图 8A)形态不对称,峰偏向粗颗粒一侧,这是由于细颗粒被风吹走,粒径整体分布显示出向粗颗粒倾斜的倾向,表明沉积物中含有的细小颗粒填满了粗颗粒之间的空隙^[40]。随高度升高,沙山沉积物偏度由小一大一小变化,偏度与平均粒径之间有极其显著的正向关联,随平均粒径变细,曲线偏态逐渐趋向极正偏,与陈广庭^[41]和李向洁等^[42]分别对塔克拉玛干沙漠和南昌厚田沙漠的研究结论基本一致。

何强强等^[37]通过分析策勒绿洲-沙漠过渡带 4 种沙丘得出峰态值从迎风坡坡底到顶部逐渐增大,沙岭沙山 20~40 cm 沉积物的峰度随高度的变化情况符合上述规律。峰态最大值出现在坡顶处,表明沉积物在粗颗粒处有一个很窄的峰值,因此坡顶处的沉积过程可能受到风况的强烈影响^[40]。

4.2 搬运方式

在沉积环境研究中,概率累积曲线更能反映沉积过程的细节信息^[43]。沉积物的搬运方式主要有推移、跃移和悬移 3 种类型^[44]。风成沉积物概率累积曲线多由 1~3 个截点分成 2~4 段独立线段^[30]。沙岭沙山 4 个端元的概率累积曲线呈现 3 段趋势(图 11B),其中跃移组分占比最大,根据曲线斜率又可分为上、下两段。

EM1 的概率累积曲线与湖滩沉积物概率累积曲线相似度最高,跃移组分和悬移组分的截点为 3.8 Φ ,悬移组分含量最高,达到 49%。平均粒径最细,分选效果最差,宽峰态,与湖滩砂的粒度特征相似,所以 EM1 受一定水动力环境影响,指示弱动力环境和强风化作用^[45]。EM2 和 EM4 都以跃移组分为主,占 90%~95%,悬移组分占 1%~4%,都呈极负偏分布,峰态很窄。但 EM4 两个跃移组分的截点为 1.8 Φ ,而 EM2 的截点为 3.1 Φ ,由此可以推断端元 EM2 和 EM4 虽然都是由风力搬运的跃移组分,但指示的风动力大小存在差异^[6],EM2 相较于 EM4 颗粒更细,受风力搬运距离更远。EM3 两个跃移组分的截点为 2.5 Φ ,跃移组分和悬移组分的截点为 5.5 Φ ,平均粒径最粗,跃移组分占比高达 95%,为粗颗粒跃移质。EM3 跃移组分的线段斜率最大,线段的斜率愈陡,表明分选效果愈好^[36],所以 EM3 的分选性最好。一般而言,风沙活动的频率和强度越大,曲线就越陡^[38],EM3 经历的风力作用最为强烈,可以较好地指示鄱阳湖中北部地区风沙活动强度,体现了强搬运动力和弱风化作用^[45]。

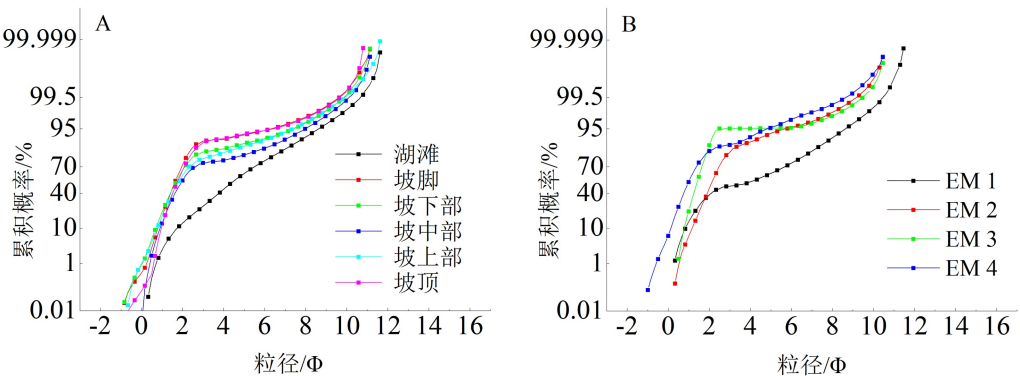


图 11 沙岭不同高度沉积物(A)和粒度端元(B)概率累积曲线

Fig. 11 Probability accumulation curves of sediments at different elevations (A) and grain size end-element (B)

4.3 影响因素

胡亚萍等^[46]指出,鄱阳湖北部沙山沉积物粒度组成以中砂为主,中砂含量甚至超过 90%,这是由于鄱阳湖北部离沙山物源更近,因此当风将沙粒吹起时,粒径为 1~2 Φ 的中砂容易在附近堆积形成

沙山。沙岭沙山位于鄱阳湖中北部,沉积物以中砂和细砂为主,其中中砂含量最高,细砂次之。在冬季风作用下,自北向南随着搬运距离的增长,风对粗颗粒的搬运能力降低,导致鄱阳湖中部的湖滨沙山沉积物出现以细砂为主的现象。粉砂组分中粒径在 $20\sim 70\ \mu\text{m}$ 的颗粒能够通过悬移搬运至较远的距离,这是鄱阳湖南部沙山沉积物中粉砂和黏土含量上升的关键原因^[47],比如新余打鼓岭剖面黏土和粉砂的总量在 90% 以上^[48]。由此综合分析可以得出,鄱阳湖从北向南沙山沉积物呈逐渐变细的趋势,北部沙山主要为中砂和细砂,而南部主要为粉砂和黏土。这种变化主要与冬季风搬运能力随物源距离增加而减少,以及与鄱阳湖地处亚热带湿润地区的气候条件有关。

沙山表层沉积物粒度特征受到风力作用的影响,其中坡顶处的风力搬运能力最强。郭酉元等^[40]对库姆塔格沙漠三垄沙地区典型砾波纹的研究发现最大平均粒径出现在峰顶处。龚逸夫等^[35]对西藏定结地区不同类型现代沙丘表层沉积物进行采样,分析得出随海拔升高,流动沙丘和爬坡沙丘的平均粒径变粗。从图 10 可以看出,从坡中部至坡顶,随高度升高,沙岭沙山沉积物平均粒径由 $1.99\ \Phi$ 变为 $2.84\ \Phi$,平均粒径逐渐变粗,这是由于随高度的增加,风力不断加大,风的搬运能力不断增强,沙粒被跃移搬运至更高处,到达坡顶时,较粗的颗粒在坡顶沉降,较细的颗粒物则可以越过坡顶,堆积在背风坡处。

植被覆盖度是影响风沙侵蚀和堆积的关键因素之一。Thomas 等^[49]提出植被通过改变地表的空气动力学粗糙度来影响地貌形成的过程,并指出植被的 3 个主要作用:提升地表的稳定性、捕捉风沙形成灌木沙丘以及塑造沙丘的形状^[50]。植被对风沙具有显著的阻截作用,可以通过增大地表粗糙度,减小地表的风速,进而降低沙尘再悬浮。赵永来等^[51]证实,随着空气动力学粗糙度的增大,土壤风蚀量呈指数规律下降,植被对尘埃的再悬浮具有明显的抑制作用。Yan 等^[52]由实验得出粉尘积聚的临界点,即植被覆盖度在 55%~75% 之间,可以达到对沙尘的最大捕集能力。本次研究采样时间为 9 月,是沙岭地区雨水最为丰沛的月份之一。位于东北坡中部位置的 P3 和 P4 采样点,由黄花蒿和胡枝子组成的植被带,植被覆盖度可以达到 60%~80%。植被带作为上风向植被起到屏障作用,阻挡中砂等较粗颗粒使其沉降在植被带下部,粉砂、极细砂等悬浮颗粒随风速减小沉降到植被带中,沙岭沙山东北坡沉积物中黏土、粉砂和极细砂的总含量在坡中部达到最高,平均粒径也在坡中部达到最细。

由于重力分选的作用,沉积物表层较粗的颗粒在重力作用下向低海拔处滑落。沙山相对高度越高、坡度越大,坡脚处表层粗颗粒组分含量越高,平均粒径更粗^[53]。从沙岭沙山沉积物粒级含量随高度的变化趋势(图 9)来看,表层粗颗粒组分(粗砂和极粗砂)总含量从坡脚的 18.62% 减少到坡顶的 10.85%,总含量在坡脚处最大,坡脚受重力堆积作用最为显著。沙岭沙山坡中部表层粗颗粒受重力作用,向下滚动堆积在坡脚,因此坡脚沉积物的粒径大于坡中部。

5 结论

(1) 沙岭沙山沉积物主要由中砂、细砂和粗砂组成,其中,中砂含量最高,占总量的 49.52%,细砂和粗砂次之,分别占 18.39% 和 15.16%。平均粒径为 $2.15\ \Phi$,属细砂组分,分选程度较差,呈极正偏分布和很窄峰态。

(2) 湖滩沉积物细颗粒含量最高,粗颗粒含量最低,平均粒径最细,分选性较差,偏度正偏,峰态呈正态。从沙山坡脚至坡顶,随高度升高,沙山沉积物细颗粒含量波动式上升,粗颗粒含量波动式下降,平均粒径呈粗—细—粗变化,分选性由好—差—好变化,偏度由小—大—小变化,峰态逐渐趋向极窄。沉积物粒度随高度变化主要与风力搬运能力、植被覆盖、重力作用有关,利用概率累积曲线得出沉积物搬运方式以跃移为主。

(3) 采用端元模型分析沙岭沙山东北坡沉积物粒度,可分离为4个端元组分,端元EM1是最细的端元组分,受水动力环境影响最大,指示弱动力环境和强风化作用;端元EM2和EM4是不同风动力条件下的跃移组分,但EM2相较于EM4颗粒更细,受风力搬运距离更远;端元EM3经历的风力作用最为强烈,可以指示鄱阳湖中北部地区风沙活动强度,体现了强搬运动力和弱风化作用。

参考文献:

- [1] 董治宝,屈建军,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J].中国沙漠,2011,31(4):805-814.
- [2] 张焱,马鹏飞,潘凯佳,等.雅鲁藏布江中游江心洲和河漫滩沉积物粒度特征[J].干旱区资源与环境,2022,36(8):161-168.
- [3] 古拉依赛木·艾拜都拉,张峰,吴枫,等.腾格里沙漠沙丘沉积物粒度特征及其空间差异[J].中国沙漠,2022,42(5):133-145.
- [4] 高文婷,王斌,彭俊,等.腾格里沙漠南缘风积物粒度空间分布及物源指示[J].水土保持研究,2022,29(6):129-137.
- [5] 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.
- [6] 贾飞飞,徐成琳,张建伟,等.晚全新世毛乌素沙地东南缘沉积物粒度特征及其指示的环境变化[J].地球科学与环境学报,2023,45(6):1285-1298.
- [7] 李静芸,傅天阳,申玉龙,等.毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):226-232.
- [8] 俞鑫晨,李鸿威,杨小平,等.浑善达克沙地沉积物粒度特征及其指示意义[J].地理学报,2023,78(7):1809-1824.
- [9] 田飞,王永,袁路朋,等.浑善达克沙地碱湖表层沉积物的粒度、沉积有机质变化特征与指示意义[J].地学前缘,2022,29(2):317-326.
- [10] 李逢博,徐先英,王立,等.巴丹吉林-腾格里沙漠间沉积物粒度和磨圆度的空间分异[J].国土与自然资源研究,2023(4):54-58.
- [11] 刘铮瑶,董治宝,萨日娜,等.巴丹吉林沙漠边缘沉积物粒度和微形态特征空间分异[J].中国沙漠,2018,38(5):945-953.
- [12] 朱震达.湿润及半湿润地带的土地风沙化问题[J].中国沙漠,1986(4):5-16.
- [13] 杨达源.江南的晚更新世风成砂丘[J].中国沙漠,1985(4):40-47.
- [14] 吴艳宏,羊向东,王苏民,等.九江彭泽一带沙山研究存在问题探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2000,20(2):103-106.
- [15] 韩志勇,李徐生,陈英勇,等.鄱阳湖滨沙岭地区网纹层的顶界年代[J].地理科学,2012,32(1):110-115.
- [16] 龙进,贾玉连,张智,等.末次冰期以来鄱阳湖东北缘下蜀黄土常量元素地球化学特征及其物源指示[J].沉积学报,2015,33(5):932-940.
- [17] 左长清,谢颂华.江西省水土流失动态监测与分析[J].水土保持通报,2006,26(6):55-58.
- [18] 丁明军,郑林,聂勇.鄱阳湖沙山地区沙化土地特征及成因分析[J].水土保持通报,2010,30(2):159-163.
- [19] 韩志勇,李徐生,张兆干,等.鄱阳湖湖滨沙山垄状地形的成因[J].地理学报,2010,65(3):331-338.
- [20] 任黎秀,和艳,杨达源.鄱阳湖湖滨十万年来沙山的演化[J].地理研究,2008,27(1):128-134.
- [21] HAN Z Y, LI X S, YI S W, et al. Extreme monsoon aridity episodes recorded in south China during Heinrich events[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 440: 467-474.
- [22] GONG Z J, LI Q W, LUO M, et al. Sedimentary facies and chronological study for a late pleistocene sand layer with swash cross bedding within a sand hill at north of Poyang Lake, as inferred from sedimentary structure and optical dating of K-feldspar and quartz grains[J]. Quaternary International, 2023, 673: 29-39.
- [23] 任翌成.自然和人为因素影响下鄱阳湖滨抛物线沙丘的发育模式[D].南京:南京大学,2020.
- [24] 李升峰,任黎秀.鄱阳湖滨沙生植被的初步研究[J].植物资源与环境,1995(2):32-38.

- [25] KRUMBEIN W C. Application of logarithmic moments to size frequency distributions of sediments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1936, 6(1): 35-41.
- [26] 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.
- [27] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *Journal of Geology*, 1925, 33(5): 377-392.
- [28] WELTJE G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [29] PATERSON G A, HESLOP D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [30] 王晓枝, 董治宝, 南维鸽, 等. 拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 22-31.
- [31] ZHANG D G, LIANG P, YANG X P, et al. The control of wind strength on the barchan to parabolic dune transition[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(10): 2300-2313.
- [32] 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 等. 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 837-846.
- [33] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 青藏高原不同气候带爬坡沙丘沉积物特征及其环境指示[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1825-1846.
- [34] 张德平, 王效科, 胡日乐, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(Ⅲ): 微地貌和土层的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 25-31.
- [35] 龚逸夫, 潘美慧, 李娜, 等. 西藏定结地区不同类型沙丘表层沉积物粒度特征及其环境意义[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(4): 588-598.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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(1): 33-46.
- [39] 张雯, 杜丁丁, 李志文, 等. 鄱阳湖沙地沉积物粒度特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 122-132.
- [40] 郭西元, 钱广强, 杨转玲, 等. 库姆塔格沙漠三垄沙地区砾波纹形态、粒度及环境风况[J]. *中国沙漠*, 2024(4): 1-9.
- [41] 陈广庭. 塔里木盆地沙漠石油公路沿线风沙环境的形成与演变[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 112-130.
- [42] 李向洁, 李志文, 詹江振, 等. 南昌厚田沙地沉积物的粒度特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 92-99.
- [43] 范天来, 范育新. 频率分布曲线和概率累积曲线在沉积物粒度数据分析中应用的对比[J]. *甘肃地质*, 2010, 19(2): 32-37.
- [44] 冯静, 王为. 基于 Origin 的概率累积曲线的计算与绘制[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 565-574.
- [45] 李世乾, 李志文, 周万蓬, 等. 九江市蓼花剖面末次冰期中晚期沉积的粒度端元特征与气候变化[J]. *热带地理*, 2023, 43(1): 135-143.
- [46] 胡亚萍, 贾玉连, 张智, 等. 粒度揭示的末次间冰期以来长江中游风沙: 风尘体系[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1324-1332.
- [47] PYE K. *Aeolian dust and dust deposits*[M]. London: Academic Press, 1987.
- [48] 王昕梅, 张智, 凌超豪, 等. 鄱阳湖西南缘的历史近源风成堆积的粒度特征[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 29-37.
- [49] THOMAS D, TSOAR H. The geomorphological role of vegetation in desert dune systems[M]//PARSONS A J, ABRAHAMS A D. *Geomorphology of Desert Environments*. Dordrecht: Springer, 1990: 471-489.
- [50] 吴霞, 哈斯, 杜会石, 等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 937-944.

- [51] 赵永来,麻硕士,陈智. 植被覆盖地表的空气动力学粗糙度及对土壤风蚀的影响[J]. 农机化研究,2007(2): 36-39.
- [52] YAN Y C, XU X L, XIN X P, et al. Effect of vegetation coverage on aeolian dust accumulation in a semiarid steppe of northern China[J]. *Catena*, 2011, 87(3): 351-356.
- [53] 邵天杰,赵景波,李恩菊,等. 巴丹吉林典型高大沙山粒度分布规律研究[J]. 地理科学,2010,30(5):790-795.

(责任编辑 于瑞宏)

Grain Size Characteristics and Influencing Factors of Sediments in the Shaling Sand Hill around Poyang Lake

GENG Jiahui¹, DU Dingding¹, WU Wangyang¹, LI Zhiwen², DAI Youwei¹, GAO Bin¹

(1. *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;*

2. *School of Environment and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China*)

Abstract: Poyang Lake is situated within the subtropical humid climate zone, and it is surrounded by extensive sand hills that have attracted significant research attention. However, previous studies have predominantly focused on historical aeolian activities, neglecting investigations into modern aeolian activities. The modern aeolian activities around Poyang Lake are strong. Analyzing the grain size characteristics of modern sediments at various heights of the sand hills can facilitate an exploration of their vertical distribution patterns and underlying factors, providing scientific foundation for managing aeolian activities. Therefore, Shaling sand hill in Xingzi County, Lushan City was selected as the research object in this paper. The investigation employed grain size analysis and end-member modeling as research methods. The results showed that: (1) The sediment composition of the Shaling sand hill primarily consist of medium sand, fine sand and coarse sand, with medium sand accounting for the highest proportion at 49.52% of the total content. The average grain size measures 2.15Φ and exhibits poor sorting characteristics, an extremely positive skewness distribution, and very narrow kurtosis distribution. (2) The content of fine particles fluctuating and increases as the height ascends from the foot of the slope to the top of the sand hill, while there is a corresponding decline in the content of coarse particles. The average grain size exhibits a pattern of coarse-fine-coarse changes, with sorting transitioning from good to poor and then back to good. Additionally, skewness shows a progression from small to large and then back to small, while kurtosis gradually increases towards extremely narrow distribution. (3) The study indicates that sediment grain size exhibits vertical variation, with the upper part of the slope primarily influenced by wind transport, the middle section predominantly affected by vegetation cover, and the foot significantly affected by gravitational accumulation. Analysis of the probability accumulation curve suggests that saltation is the dominant mode of sediment transport.

Key words: Shaling sand hill; sediment grain size; vertical distribution; influencing factor; Poyang Lake