

张娅璐,春喜,周海军,等.沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义[J].中国沙漠,2020,40(5):1-9.

沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义

张娅璐^{abc}, 春喜^{ac}, 周海军^{ac}, 张样洋^{abc}, 王晓珍^{abc}

(内蒙古师范大学 a. 内蒙古自治区湿地环境修复工程实验室, b. 地理科学学院, c. 内蒙古自治区蒙古高原环境与全球变化实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 沉积物粒度特征不仅能够指示沉积物的来源和迁移方式,还可以揭示沉积环境的区域差异性及其形成机制的复杂性。使用粒度对数拟合方法初步区分风沙与湖相沉积物的特征,再以乌兰布和沙漠和浑善达克沙地的218个表层风沙沉积与湖相沉积样品作为训练样本,并用同一区域不同时段采集的186个表层风沙沉积与湖相沉积样品进行验证,建立了风沙沉积物与湖相沉积物的判别模型。结果表明:该模型能够很好地分辨风沙和湖相沉积物,准确率在90%以上。结合提取沉积物的动力组分,可指示风沙沉积和湖泊沉积以外的沉积环境。

关键词: 粒度特征; 判别模型; 风沙沉积; 湖相沉积; 沉积环境

文章编号: 1000-694X(2020)05-001-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00036

中图分类号: P531

文献标志码: A

0 引言

沙漠的表层沉积物记录了气候变化、环境演变等多种信息^[1-2]。现代陆地沙漠包括很多亚种环境,如风成沙海、冲积扇、季节河流、干盐湖及正遭受侵蚀的岩石裸露区域^[3]。其物源与区域内的风、湖泊、河流、山脉、基岩甚至从远方来的高空降尘等都有不同程度的关联^[4-6]。粒度参数受到沉积物的搬运介质、搬运形式和沉积环境等因素的影响,表现出不同组合特征^[7-8]。因此,利用粒度参数对沉积环境变化的敏感效应,可以很好地区分沉积物的来源及形成方式^[9]。前人建立的判别模型能够有效地区分沉积环境种类。如使用线性多元方法得出的综合函数来分辨风成沙、浅海沉积物、海滩沉积物、河流沉积物以及浊流沉积物^[10];使用核心判别分析法和区域图解法建立的数学模型对泥石流、冰碛物及河湖沉积物的粒度参数特征进行对比研究^[11];利用统计学的分析方法获得标准粒度判别模

型,再基于粒度参数的特征对稳定湖相沉积物和风成黄土样品加以区别^[12];使用Fisher判别法,结合训练样本拟合和测试样本验证推导出分辨河漫滩沉积和黄土的判别函数^[13]。然而,针对沙漠沉积物,依然没有恰好适用的模型来区分沉积物的形成环境或来源。沙漠是干旱区的重要地貌,关系到区域生态安全问题^[14-15]。风成沙具有高孔隙度,是重要的储水层和烃类聚集的场所,而干盐湖沉积物是蒸发岩矿物的丰富源泉^[3]。所以,探明沙漠物源对气候变化、环境演变以及沙漠治理都有极其重要的意义^[16-17]。本文运用Fisher判别法,通过对沙漠地区风沙沉积和湖相沉积的对比研究,尝试建立区分两种沉积环境的数学模型。

1 研究方法

1.1 样品采集与实验方法

样品分别于2015年和2017年采自中国北方干

收稿日期:2020-03-05; 改回日期:2020-04-04

资助项目:国家自然科学基金项目(41662011,41967052);内蒙古自然科学基金项目(2019ZD10,2019GG020);研究生科研创新基金项目(CXJJS18097)

作者简介:张娅璐(1994—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,研究方向为环境演变。E-mail: 18647425898@163.com

通信作者:春喜(E-mail: chunxi@imnu.edu.cn)

旱区的乌兰布和沙漠和浑善达克沙地,分为风沙沉积样品和内陆湖相沉积样品(表1)。风沙沉积样品选择沙丘发育良好的迎风坡沉积物,湖相样品选择各个湖泊典型湖滨阶地的沉积物。使用2015年采

集沉积物作为训练样本,2017年采集沉积物作为测试样本,样点分布情况如图1所示。采集时拨开土层风化表面1~2 cm,每个样点铲取50 g左右沙土,剔除植物根系、残渣等杂质。

表 1 样品记录
Table 1 The sample description

采集地点	样本总数	风沙沉积物样本	湖相沉积物样本	利用方式	样品采集地点描述
乌兰布和沙漠	135	105	30	训练样本	风沙样品采集于南部的高大沙山和东部沙漠腹地,颜色浅且颗粒均匀,少砾石;湖相样品采集于中部的季节性盐湖群和北部的纳林湖、冬青湖等淡水湖的阶地。中部阶地盐碱化,植被少。北部阶地多形成耕地
	109	80	29	测试样本	
浑善达克沙地	83	64	19	训练样本	风沙样品采集于沙地腹地,颜色浅,整体比乌兰布和沙漠颗粒粗,均匀度差,含砾石,植被生长情况良好;湖相样品主要采集于查干淖尔湖泊阶地,沙粒细且颗粒不均匀,颜色发白,气味刺鼻,植被极少
	77	60	17	测试样本	
合计	404	309	95		

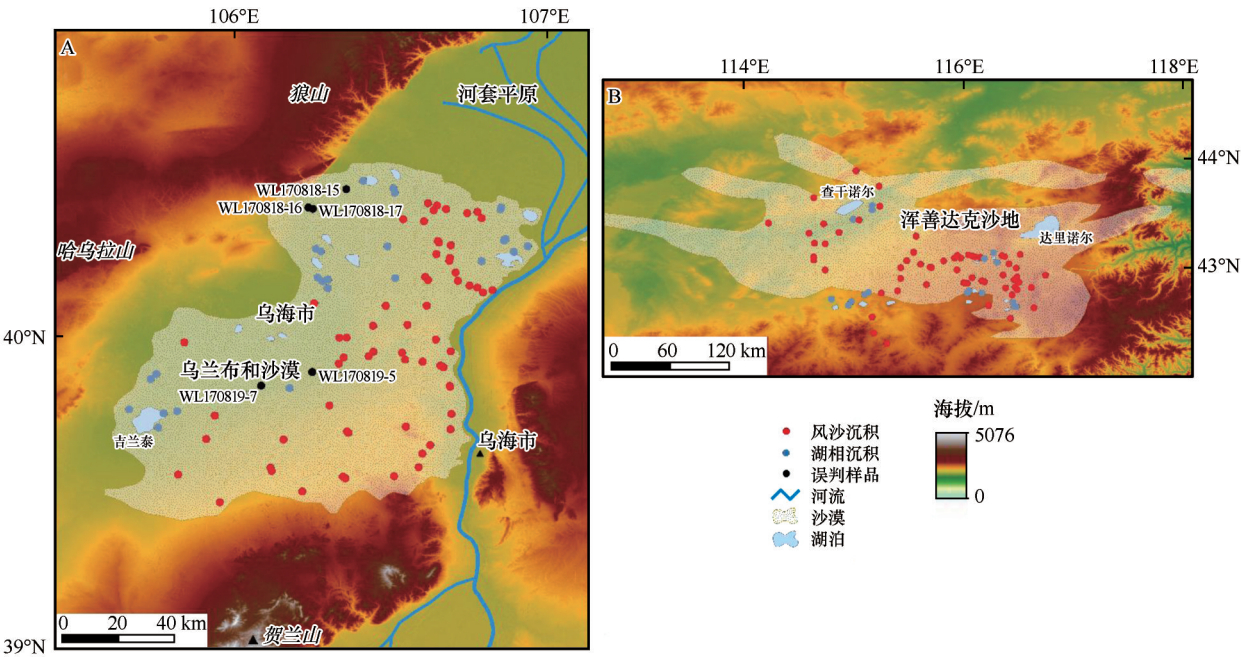


图 1 乌兰布和沙漠(A)和浑善达克沙地(B)测试样本分布
Fig.1 Distribution of test samples in the Ulan Buh Desert (A) and the Otindag Sandy Land (B)

所采集的样品在内蒙古自治区湿地环境修复工程实验室完成,采用Konert等^[18]提出的方法对粒度样品进行前处理。分别用10%的H₂O₂和10%的HCl去除有机质和碳酸盐,将溶液洗至呈中性后加入(NaPO₃)₆。使用Mastersizer3000型激光粒度分析仪测量,误差小于0.6%。矩值法在计算粒度参数时能够很好地描述样品整体粒度特征,而图解法解释区间有限^[19],所以粒度参数采用Friedman等^[20]

介绍的矩值法计算:

$$D = -\log_2 d \tag{1}$$

$$M_z = \sum_{i=1}^n (x_i f_i) / 100 \tag{2}$$

$$S_d = \sum_{i=1}^n f_i (x_i - M_z)^2 / 100^2 \tag{3}$$

$$SK = \sum_{i=1}^n f_i (x_i - M_z)^3 / 100 S_d^3 \tag{4}$$

$$K_g = \sum_{i=1}^n f_i (x_i - M_z)^4 / 100 S_d^4 \quad (5)$$

式中： D 为沙粒直径，单位为 Φ ； d 为沙粒直径，单位为 mm ； x_i 为粒径值； f_i 为粒径值对应的频率百分比； M_z 、 S_d 、 SK 和 K_g 分别为粒径平均值、标准偏差、偏态值和峰态值。

1.2 初步辨别方法

粒度对数正态拟合方法^[21-22]能提取沉积物中的动力敏感组分，结合粒度概率累计曲线可进一步表达沉积物的运移方式^[23-24]。粒度对数拟合的具体计算方法为：

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{c_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - a_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) dx \right] \quad (6)$$

$$dF = \sum_{j=1}^m (F(x_j) - G(x_j))^2 \quad (7)$$

式中： $F(x)$ 为拟合函数； $x = \ln(d)$ ， d 为粒径，单位 μm ； n 是模拟得到的组分个数； c_i 是第 i 个组分所占百分比 $c_i \geq 0$ ， $\left(\sum_{i=1}^n c_i = 1\right)$ ； σ_i 是第 i 个组分的标准差； a_i 是第 i 个组分的粒度对数平均值， $a_i = \ln(d_i)$ ； dF 为拟合残差； m 是粒度级的数量； $F(x_j)$ 和 $G(x_j)$ 分别是第 j 个粒度级的拟合值和实测值。当 dF 最小时，所获结果是可靠的^[21]。以上方法可实现风沙沉积与湖相沉积的初步辨别。

1.3 判别分析方法

由于 M_z 、 S_d 、 SK 和 K_g 等粒度参数能够较为全面地表征沉积物的特征^[25]，可被选择作为变量建立判别模型，并可取得较好的结果^[10-13]。

假设存在两组已知环境的样本，每组都有相同的变量 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

$$Y = \sum_{i=1}^n C_i X_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中： n 表示变量 X_i 的个数； C_i 为 X_i 对应的系数，可表示变量的作用方向及分辨能力。

再利用Fisher判别法，将高维数据点投影到低维空间上重新分类。使类间均差与类内离差平方和比值最大，由极值原理列出 C_i 所满足的方程组，解得判别函数。

最后计算判别函数的 Y_1 与 Y_2 ，若 $Y_1 > Y_2$ ，可判别为其中一类沉积环境，若 $Y_1 < Y_2$ ，则为另一类^[12,26]。

2 结果

2.1 沉积物的初步辨别

将浑善达克沙地和乌兰布和沙漠的训练样本分别去极端后取平均值，得到相对有代表性的综合粒度频率曲线，再结合其他沙漠沙地^[27-30]的典型风沙和湖相沉积物进行比对。结果显示，风沙沉积物粒度频率曲线几乎对称分布、峰型尖窄，分选良好。主峰 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ，细粒部分有尾部（图2A）。湖相沉积物曲线都呈正偏态，峰型宽矮，双峰明显，细粒含量较风沙沉积物高，主峰 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ （图2B）。这与塔克拉玛干沙漠^[31]风沙流和湖积物的主要粒级相似。

图2C表明，风沙沉积物以C4组分为主，可能是冬季风带来的跳跃组分。但是在部分样品中伴随有细粉砂C1组分和粗粉砂C2组分。其中，C1组分与黄土高原悬移分散于大气中的背景粉尘粒度范围一致^[32]，C2组分多存在于固定或半固定沙丘。季风环流带来的粗细粒混合沉积物受到植被的屏障作用^[33]，外来的悬移质粗粉砂堆积出现薄层覆沙，即悬移质亚组分C2。图2E是图2C对应的粒度概率曲线，表现为陡直的一段式加两段式，动力机制单一，是风沙跃移质和悬移质的特征。两段式的悬移质总与陡直的风沙组分伴随出现（图2E，图2D），应是相同动力条件下不同风速造成的结果。湖相沉积物粒度拟合曲线表现为C1和C3组分的组合（图2D），C3组分是湖滨沙在强水动力条件下形成的沉积物，后湖泊萎缩，湖滨相露出水面形成裸地，并受到风的改造。从粒度概率累积曲线看，湖相沉积由于受到多种作用力的扰动，其跃移质占主要部分，呈现二段式（图2F）。它的两个跳跃亚组分是同源沙受到不同作用力的结果。即在湖滨沙发育的风水动力交界处，沉积物既保存了原本水动力影响留下的痕迹，同时又受到了局地风力作用的改变。

2.2 判别函数的建立

组均值均等性检验显示，4个变量的显著性概率均小于0.05（表2），表明 M_z 、 S_d 、 SK 和 K_g 的组均值有显著的差异，拒绝原假设，说明4个变量对函数的正确分类都起到了作用。判别函数的显著性检验结果表明，Wilk' λ 值很小，为0.534，卡方统计量为

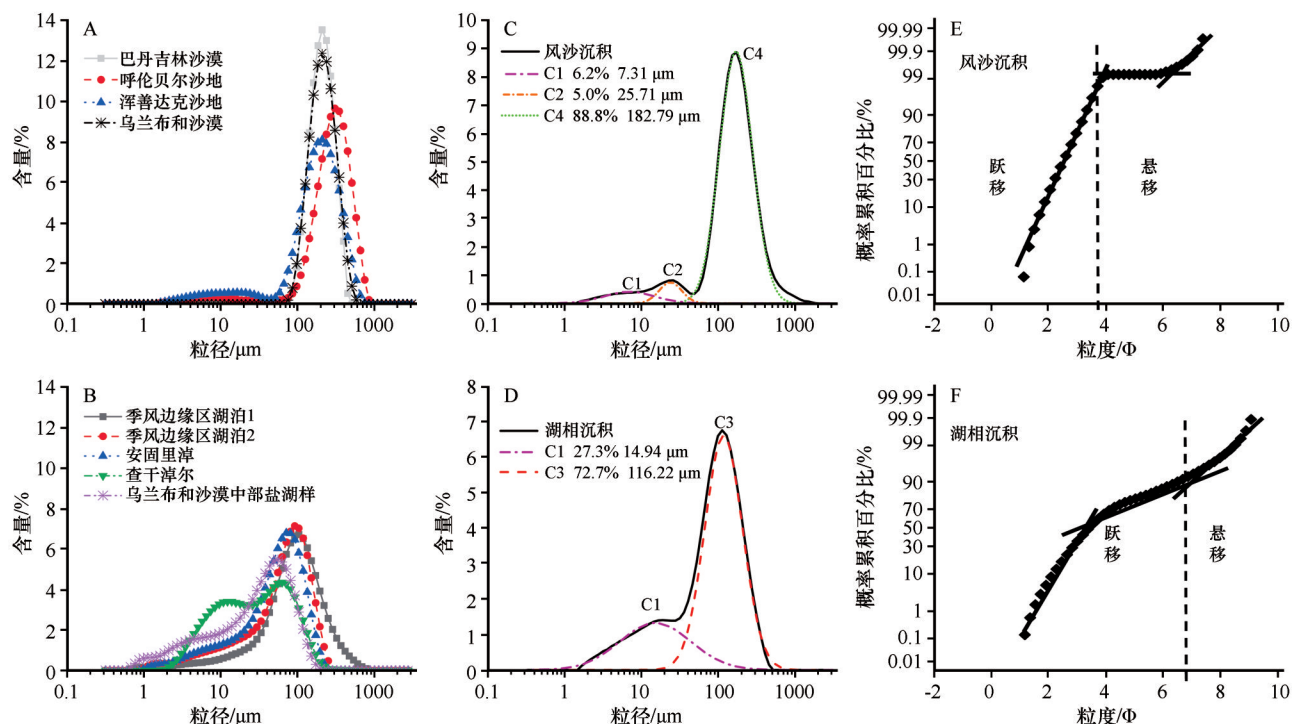


图2 内蒙古干旱区典型风沙沉积物(A)和湖相沉积物(B)的粒度频率曲线、训练样本风沙沉积和湖相沉积的粒度对数正态分布拟合曲线(C, D)及其概率累积曲线(E, F)

Fig.2 The grain size frequency curves of typical aeolian (A) and lacustrine deposits (B) in the arid area of Inner Mongolia, and grain-size lognormal distribution fitting curves (C, D) and cumulative probability curves (E, F) of aeolian deposits and lacustrine deposits of training samples

表2 组均值的均等性检验

Table 2 Equality test of group means

变量	Wilks' λ	F	df_1	df_2	Sig.
M_z	0.549	177.605	1	216	0.000
S_d	0.900	23.950	1	216	0.000
SK	0.968	7.161	1	216	0.000
K_g	0.928	16.783	1	216	0.000

134.166, 自由度为 4, 显著性概率远远小于 0.05 (表 3)。所以, 建立的判别函数有意义。由协方差相等的 Box's M 检验结果可知, Box's M 统计量为

159.343, 远大于 0.05, 可认为各类协方差矩阵相等, 这意味着能够得到满意的判别结果。同时, F 检验的显著性概率远小于 0.05, 表明函数的判错率很小。方差贡献率 (表 3) 可以用来解释所得判别函数的贡献量, 判别函数 1 的方差贡献率为 100%, 利用判别函数 1 就可完成所有样品的判别。结构矩阵 (表 3) 可表明判别变量和其函数之间的相关性, 由大到小排序依次为 M_z (0.971)、 S_d (0.357)、 K_g (0.299) 和 SK (-0.195)。这可能是由于干旱环境下的风沙沉积和湖相沉积平均值和分选性差异明显, 与塔克拉玛干沙漠风水复合地貌的研究中出现的情况相符^[34]。

表3 Wilks' λ 和 Box's M 检验以及判别函数的方差特征值和结构矩阵

Table 3 Wilks' λ and Box's M Test, Eigenvalues of discriminant function and Structure matrix

Wilks' λ 检验		Box's M 检验		方差特征值		结构矩阵	
参数	数值	参数	数值	参数	数值	变量	判别函数
函数检验	1	Box's M	159.343	函数检验	1	M_z	0.971
Wilks' λ	0.534	近似值	15.424	特征值	0.872	S_d	0.357
F	134.166	df_1	10	方差百分比	100	SK	0.299
自由度	4	df_2	35760.592	累计百分比	100	K_g	-0.195
显著性	0	显著性	0	典型相关性	0.682		

表 4 给出了判别函数最终的系数和常数项,可得到的判别函数 1 和判别函数 2 分别为:

$$y_1 = 1.163M_z - 6.549S_d - 1.633SK + 12.065K_g - 6.576$$

(9)

$$y_2 = 3.045M_z - 6.560S_d - 2.446SK + 12.707K_g - 14.044$$

(10)

表 4 分类函数系数

Table 4 Classification function coefficients					
函数	变量				常量
	M_z	S_d	SK	K_g	
分类函数 1	1.163	-6.549	-1.633	12.065	-6.576
分类函数 2	3.045	-6.560	-2.446	12.707	-14.044

将待测样品的参数分别代入以上建立的两个判别函数进行计算,当 $y_1 > y_2$ 时,沉积物样品归入 1 类,即为风沙沉积物,若 $y_1 < y_2$,沉积物样品归入 2 类,即为湖相沉积物。

2.3 判别函数的检验

为了充分证明判别函数的可靠性,将 2017 年采集于乌兰布和沙漠和浑善达克沙地的 186 个测试样本的粒度参数和前人研究数据(塔克拉玛干沙漠的风沙流和湖积物 28 组粒度参数数据^[35])代入公式(9)和(10)进行检验,并统计 218 个训练样本的回判情况(表 5)。测试样本中,除乌兰布和沙漠的湖相样本判别率较低(83%)外,其余类型样本判别率皆较高(大于 98%)。塔克拉玛干沙漠风沙沉积物判别准确率达 80%,湖相沉积物可达 100%,回判结果

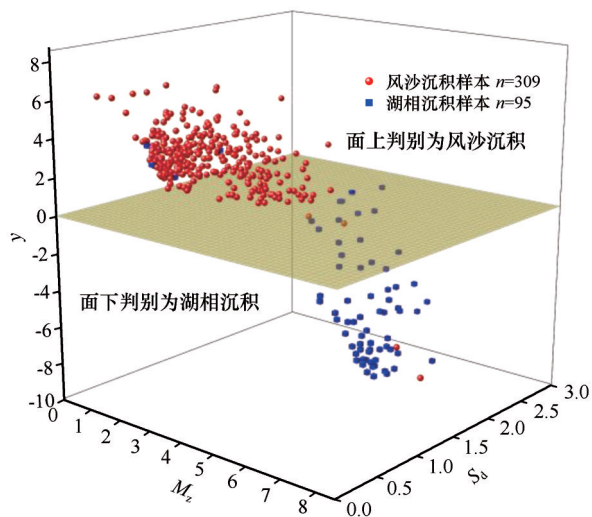
准确率在 97% 以上。将测试样本和塔克拉玛干沙漠的数据代入萨胡判别式^[10]进行对比。结果表明,155 个风沙样本中有 122 个判别准确,其余 19 个分别被判别为浅海沉积(1 个)、河流沉积(10 个)和浊流沉积(3 个)。59 个湖相沉积样本分别被判别为风沙沉积(23 个)、海滩沉积(15 个)、浅海沉积(2 个)、河流沉积(11 个)和浊流沉积(8 个)。比较而言,虽然萨胡判别函数使用范围较广,但针对沙漠环境下风沙沉积和湖相沉积的辨别,本文所建立的判别式更适用。由于判别结果 y (即 $y_1 - y_2$)与 M_z 、 S_d 的关联度更高,遂用它们三者的三维判别图直观表示样品的分布及判别公式的可靠性(图 3)。以上验证了模型的准确性,但在对沙漠沙地的未知沉积物进行判断时,还需结合粒度对数正态拟合的方法来提取沉积物的动力组分并判断其运移方式,得到更加精确的结果。

3 讨论

采集的样品,尤其是表层沉积物,多以混合状态存在。在对沉积物种类的判别中,复合沉积成因的样品尤其是含有大量判别范围以外组分的样品,极易误判。所有误判的个例都可能代表某几种沉积类型和演化过程的组合。对于本文中造成湖相沉积判别有误差的原因可能是沉积物暴露过久导致风蚀加重而产生了某些风沙沉积的特点,或河流注入湖泊导致湖滨沉积环境中新砂砾组分加入。测试样本分布信息如图 1 所示。在测试样品中,发现稳定风沙沉积物和湖相沉积物的粒度频率曲线

表 5 判别函数验证结果

Table 5 Verification result of discriminant function						
样品		数量 /个	实际类别	判别结果/个		准确率 /%
				类别 1	类别 2	
训练样本 (<i>n</i> =218)	乌兰布和沙漠风沙沉积	105	1	102	3	97.14
	浑善达克沙地风沙沉积	64	1	63	1	98.43
	乌兰布和沙漠湖相沉积	30	2	1	29	96.67
	浑善达克沙地湖相沉积	19	2	0	19	100
测试样本 (<i>n</i> =186)	乌兰布和沙漠风沙沉积	80	1	80	0	100
	浑善达克沙地风沙沉积	60	1	59	1	98.33
	乌兰布和沙漠湖相沉积	29	2	5	24	82.76
	浑善达克沙地湖相沉积	17	2	0	17	100
前人数据 (<i>n</i> =28)	塔克拉玛干沙漠风沙沉积	15	1	12	3	80
	塔克拉玛干沙漠湖积物	13	2	0	13	100

图3 基于 M_z 和 S_d 的三维判别图Fig.3 3D discriminant graph based on M_z and S_d

形态都很好地与训练样本中的沉积物吻合,更加佐证了判别函数的准确性。“误判样品”来自于乌兰布和沙漠的湖相沉积物,粒度频率曲线呈多峰态,样品分选性较差,与稳定湖相沉积差别明显,主要表现在粗粒部分有明显峰(图4);从多组分拟合的粒度频率曲线看,C3组分含量明显减小,而C5组分升高。这表明湖滨沉积环境不仅受到湖泊水动力条件的控制,也受到其他沉积动力作用的影响。

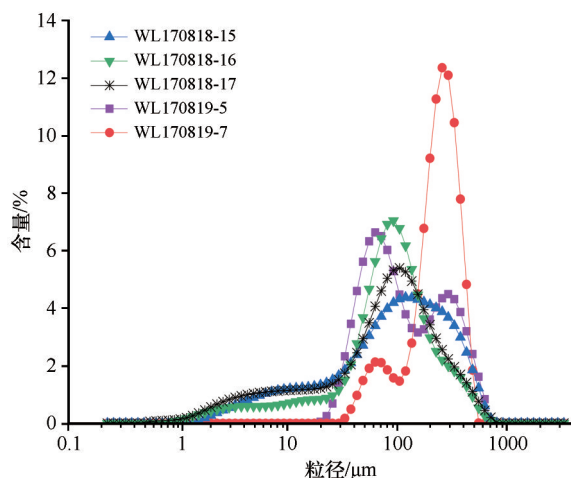


图4 测试样品中误判样品的粒度频率曲线

Fig.4 The grain size frequency curves of misjudged samples in test samples

从粒度曲线的峰来看,“误判样品”与典型湖相沉积差异较大,分为两种类型,分别是C3、C5组成的双组分沉积物(WL170819-5和WL170819-7)和以C3、C5为主的多组分沉积物(WL170818-15、

WL170818-16和WL170818-17)。新出现的中粗砂组分C5粒径在300 μm 左右,含量为11%~84%(图5A、B和C)。两个双组分沉积物样品的粒度概率累积曲线表现为三段式,由蠕移质和两个跳跃亚组分组成,区别在于样品WL170819-5以跃移质为主(图5D),WL170819-7以蠕移质为主(图5E)。多组分沉积物曲线形态相似,以样品WL170818-16为例,其粒度概率累积曲线表现为蠕移质、跃移质和两段式悬移质的组合,陡直的跃移质为主要组分(图5F),这表明了“误判样品”沉积动力机制和过程的复杂性。从拟合组分上看,所有提取出的“误判样品”的共同特点是存在粗粒C5组分。对该组分的来源有两种不同推测:沙漠西部哈乌拉山、狼山和东南部贺兰山山体基岩的风化碎屑或者沙漠东部的河岸沉积物。研究显示乌兰布和沙漠主要受到冬季风的影响,流经的黄河西岸较东岸沙粒粗且风能高^[36],说明沙漠西部的沉积物较少受到东部的影响,即河岸沉积物很难移动到沙漠腹地。此外,较粗的河岸东部沉积物主要粒级为100~250 μm ^[36],小于C5组分,不太可能是C5组分的供给来源。同理,由于风能和风向的控制,处于沙漠下风向的贺兰山也与C5组分关联较少。结合“误判样品”的采集位置判断,沙漠西部哈乌拉山、狼山的山体基岩最有可能带来粗粒的C5组分,从而引起模型误判。研究表明,乌兰布和沙漠风积沙的主要源区有3个,分别是沙漠西北方向山脉基岩风化产物、沙漠西部的戈壁和沙漠腹地的古湖相沉积物^[37]。其中,沙漠腹地的古湖相沉积物为风积沙提供了大量细粒均匀的松散沙物质,而戈壁的粗颗粒难以远距离移动到乌兰布和沙漠。这更加佐证了C5组分来自沙漠西部哈乌拉山和狼山脉风化产物这一观点。

4 结论

内蒙古中西部沙漠沙地为建立风沙与湖相沉积物的判别模型提供了良好的样本。本文使用粒度对数拟合方法初步区分上述两类沉积物的特征,再通过乌兰布和沙漠和浑善达克沙地的典型风沙沉积和湖相沉积的粒度参数定量化判别,以及测试样本的验证,获得了风沙沉积和湖相沉积的粒度判别公式:

$$y_1 = 1.163M_z - 6.549S_d - 1.633SK + 12.065K_g - 6.576$$

$$y_2 = 3.045M_z - 6.560S_d - 2.446SK + 12.707K_g - 14.044$$

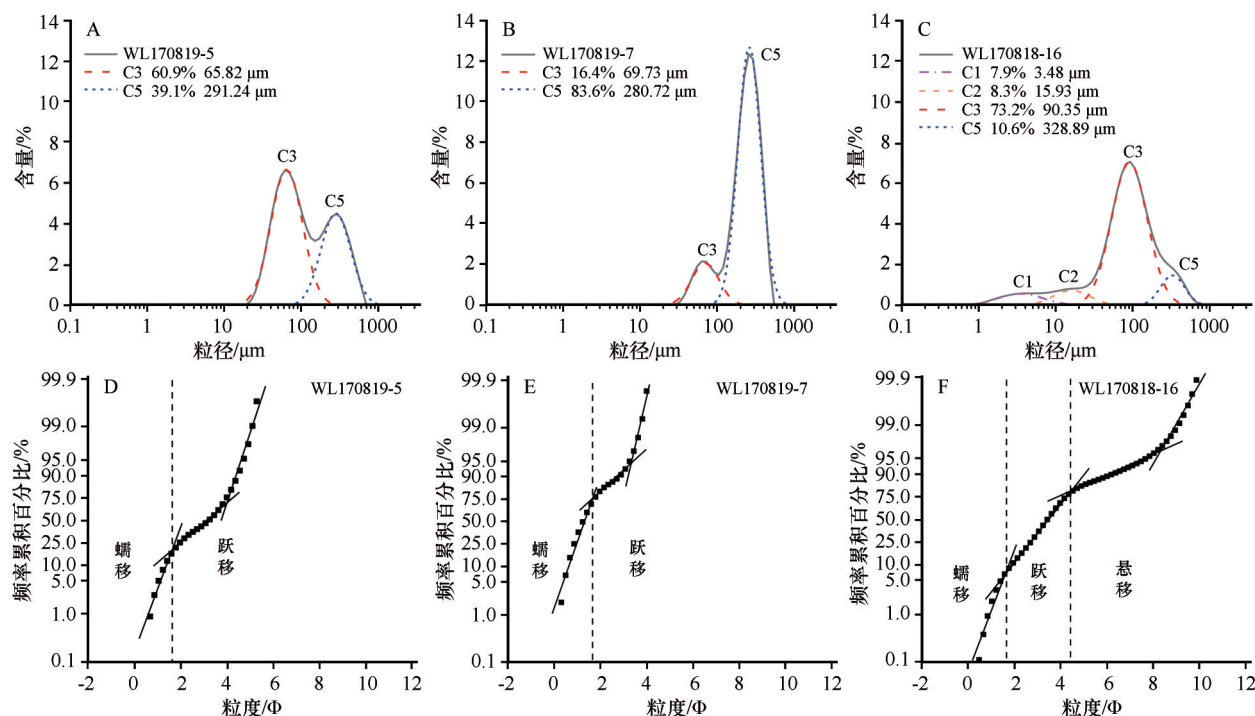


图5 乌兰布和沙漠典型误判样品对数正态分布拟合曲线(A,B,C)以及概率累积曲线(D,E,F)

Fig.5 Grain-size lognormal distribution curves of typical miscalculation deposits (A, B, C) and probability cumulative grain size curves (D, E, F) in the Ulan Buh Desert

当 $y_1 > y_2$ 时,为风沙沉积物;若 $y_1 < y_2$,为湖相沉积物。利用该判别模型与沉积物动力组分提取相结合的方法,可较为准确地分辨出风沙和湖相沉积物。研究结果也表明,乌兰布和沙漠和浑善达克沙地测试样本的风沙沉积物和湖相沉积物的粒度频率曲线的形态都很好地与训练样本的典型沉积物吻合,但在乌兰布和沙漠的个别湖相沉积物样品中可提取出粗粒的山体基岩风化组分,指示了沉积环境的区域性差异。这种差异来源于沙漠物源的复杂性、沉积环境形成机制以及沙物质迁移的多样性。

参考文献:

- [1] Ahmady-Birgani H, Agahi E, Ahmadi S J, et al. Sediment source fingerprinting of the Lake Urmia sand dunes [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1-15.
- [2] 李卓仑, 马素辉, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠盐湖面积变化对湖泊边缘表层沉积物盐类矿物组合影响[J]. 盐湖研究, 2015, 23(4): 8-14.
- [3] Reading H G. 沉积环境与相[M]. 周明鉴等, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] Liu B, Jin H L, Sun L Y, et al. Geochemical characteristics of Holocene aeolian deposits and their environmental significance in the Mu Us Desert, northern China [J]. Geological Journal, 2016, 51(3): 325-337.
- [5] Xian B, Wang J, Gong C, et al. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China [J]. Sedimentary Geology, 2018, 3(6): 68-82.
- [6] Liu M, Hasi E, Sun Y. Variation in grain size and morphology of an inland parabolic dune during the incipient phase of stabilization in the Hobq Desert, China [J]. Sedimentary Geology, 2016, 3(16): 100-112.
- [7] 周建超, 吴敬禄, 曾海鳌. 新疆乌伦古湖沉积物粒度特征揭示的环境信息[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1158-1165.
- [8] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 590-596.
- [9] 于瑞雪, 李畅游, 李文宝, 等. 内蒙古达来诺尔湖湖泊沉积物中敏感粒度组分沉积环境及地层分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(3): 77-82.
- [10] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(1): 73-83.
- [11] 李昌志, 王裕宜. 泥石流、冰碛和河湖沉积物的粒度特征及判别[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 50-54.
- [12] 张平, 宋春晖, 杨用彪, 等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 501-507.
- [13] 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等. 河漫滩相沉积与风成沉积物粒度判别函数的建立及在红土中应用[J]. 地理研究, 2014, 33(10):

- 1848–1856.
- [14] 刘海江,柴慧霞,程维明,等.基于遥感的中国北方风沙地貌类型分析[J].地理研究,2008,27(1):109–118.
- [15] 迟妍妍,许开鹏,张惠远.浑善达克沙漠化防治区生态安全评价与对策[J].干旱区研究,2015,32(5):1024–1031.
- [16] 付旭东,王岩松.中国沙漠物源研究:回顾与展望[J].沉积学报,2015,33(6):1063–1073.
- [17] 肖生春,陈小红,丁爱军.近现代阿拉善荒漠气候变化与环境演变机制研究进展[J].中国沙漠,2017,37(6):1102–1110.
- [18] Konert M, Vandenbergh J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction [J]. *Sedimentology*, 1997, 44 (3): 523–535.
- [19] 曾方明,张萍.图解法和矩值法计算西台吉乃尔盐湖沉积物粒度参数的差异[J].盐湖研究,2015,23(3):1–4.
- [20] Friedman G M, Sanders J B. *Principles of Sedimentology* [M]. New York, USA: Wiley, 1978: 78–80.
- [21] Xiao J L, Fan J W, Zhai D Y, et al. Testing the model for linking grain-size component to lake level status of modern clastic lakes [J]. *Quaternary International*, 2014, 4(23): 1–10.
- [22] Qin X G, Cai B G, Liu T S. Loess record of the aerodynamic environment in the East Asia monsoon area since 60,000 years before present [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2005, 110(1): 1–16.
- [23] Reineck H E, Singh I B. *陆源碎屑沉积环境* [M]. 陈昌明等,译.北京:石油工业出版社,1979.
- [24] 沈亚萍,张春来,李庆,等.中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2016,36(1):150–157.
- [25] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3–27.
- [26] 李伯德.数学建模方法[M].兰州:甘肃教育出版社,2006.
- [27] 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.
- [28] 周炎广,陈惠中,管超,等.呼伦贝尔沙地风蚀坑粒度特征及其环境意义[J].中国沙漠,2018,38(3):724–733.
- [29] 殷志强,秦小光,吴金水,等.湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J].第四纪研究,2008,28(2):345–353.
- [30] 郭晓阳,王维,王国良,等.季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素[J].地理研究,2016,35(4): 677–691.
- [31] 朱震达,郭恒文,吴功成.塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘移动的研究[J].地理学报,1964,31(1):37–52.
- [32] 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等.古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J].自然科学进展,2001,11(3):269–276.
- [33] 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.
- [34] 李小妹,吴玉伟,吴文健,等.塔克拉玛干沙漠策勒河岸风水复合地貌过程研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(4): 154–162.
- [35] 冯起,陈广庭,朱震达.塔克拉玛干沙漠北部全新世环境演变[J].环境科学学报,1996,16(2):238–244.
- [36] 常宏,左合君,王海兵,等.黄河乌兰布和沙漠段两岸地表沉积物多重分形特征及其指示意义[J].干旱区研究,2019,36(6):1559–1567.
- [37] Zhang C, Li Z, Chen Q, et al. Provenance of eolian sands in the Ulan Buh Desert, northwestern China, revealed by heavy mineral assemblages [J]. *Catena*, 2020, 193: 104624.

Grain size discriminant method for eolian and lacustrine sediments of deserts and it's environmental indication

Zhang Yalu^{abc}, Chun Xi^{ac}, Zhou Haijun^{ac}, Zhang Yangyang^{abc}, Wang Xiaozhen^{abc}

(a. Inner Mongolia Laboratory of Wetland Eco-Environment System Repair Engineering / b. College of Geographical Science / c. Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Sediment particle size characteristics not only indicate its source and migration mode, but also reveal the regional differences in the depositional environments and the complexity of the formation mechanism. In this paper, the characteristics of eolian and lacustrine sediments are preliminarily distinguished by lognormal-distribution fitting method. Then, in order to establish a discriminant model between aeolian and lacustrine sediments, 218 aeolian and lacustrine sediment samples from the Ulan Buh Desert and the Otindag Sandy Land are used as training samples, and 186 aeolian and lacustrine sediment samples from the same places in different years are used as testing samples. The results show that the model is able to distinguish aeolian and lacustrine sediments with an accuracy of more than 90%. Combined with the method of extracting sedimentary dynamic components, it is possible to identify sedimentary environments other than aeolian and lacustrine. This is of great significance to the preliminary judgment of the provenance of desert sediments, and also is of great reference value to the study of environmental evolution and climate reconstruction.

Key words: particle size characteristics; discrimination model; eolian sediments; lacustrine sediments; sedimentary environment