

# 华南海岸现代沙丘沙与海滩沙粒度的定量识别<sup>\*</sup>

唐丽<sup>1,2</sup>, 董玉祥<sup>1</sup>, 汪旭东<sup>3</sup>

- (1. 中山大学地理科学与规划学院//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275;  
2. 广州大学教师培训学院, 广东 广州 510405;  
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广东 广州 510240)

**摘要:** 海岸沙丘沙和海滩沙的粒度识别与区分是海岸风沙研究中争论较大的问题之一。以我国华南海岸为研究区域, 基于在海岸风沙地貌广泛发育的闽南、粤东、粤西、海南岛沿岸4个区域的141个现代海岸沙丘沙和70个海滩沙样品的粒度数据, 尝试运用多元线性判别分析和人工神经网络分析两种方法进行现代沙丘沙和海滩沙粒度的定量识别。结果表明, 比较而言非线性的人工神经网络分析法较传统线性判别分析方法的识别率为高, 人工神经网络分析可以通过粒度数据区分部分海岸的沙丘沙和海滩沙, 但整体而言2种定量识别方法均难以完全对华南海岸的现代沙丘沙和海滩沙进行粒度的有效区分。

**关键词:** 华南海岸; 沙丘沙; 海滩沙; 粒度; 定量识别

**中图分类号:** P931.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)06-0130-07

## Quantitative Discrimination of Grain Size of Modern Coastal Aeolian Sands and Beach Sands of South China

TANG Li<sup>1,2</sup>, DONG Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Xudong<sup>3</sup>

- (1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. School of Teacher Training, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;  
3. Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation, Guangzhou 510240, China)

**Abstract:** The discrimination of grain size of modern aeolian sands and beach sands is one of the heated argument problems in coastal aeolian research. Based on the data of grain size of 141 modern Aeolian sand samples and 70 beach sand samples from the southern Fujian coast, eastern Guangdong coast, western Guangdong coast and Hainan island coast which are the typical coastal dune distribution places in south China coast, the modern aeolian sands and beach sands are quantitatively discriminated by use of the multivariate linear discriminant analysis method and B-P artificial neural network analysis method. The results show that the B-P artificial neural network analysis method has higher discrimination precision than the multivariate linear discriminant analysis method. Modern aeolian sands and beach sands in Hainan island coast could be discriminated based on the grain size data by use of the B-P artificial neural network analysis method. However, viewing the results as a whole, the modern aeolian sands and beach sands in south China coast could not be significantly discriminated based on grain size by using two quantitative discriminated methods.

**Key words:** south China coast; Aeolian sands; beach sands; grain size; quantitative discrimination

\* 收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371030, 40971007)

作者简介: 唐丽(1987年生), 女, 研究方向: 海岸风沙地貌; 通讯作者: 董玉祥; E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn

粒度分析因在区分沉积环境、判定物质运输方式和分析粒径趋势等方面的重要作用,从海洋到陆地沉积物分析、自古环境研究到现代沉积物类型判别,一直是不可或缺的重要研究内容<sup>[1-6]</sup>,其分析方法也由先前的粒径组成、粒度参数及散点图等的对比分析发展到现今的聚类分析、人工神经网络分析和主成分因子分析等的定量识别<sup>[7-14]</sup>。近期,国内在风沙沉积物粒度方面也进行了较多研究,不仅对内陆主要沙漠及不同沙丘类型的粒度特征进行了深入分析<sup>[15-27]</sup>,还对海岸沙地与沙丘的粒度特性进行了有益探索<sup>[28-36]</sup>。但是,在现代海岸沙丘沙与海滩沙的粒度区分上,如同国外类似研究一样<sup>[37-42]</sup>,对利用粒度数据是否能够区分海岸沙丘沙和海滩沙存在较大争议,大致可以归结为无法有效区分、部分区分和完全能够区分3类不同观点<sup>[28-29,31,33]</sup>。为此,针对先前有关现代海岸沙丘沙与海滩沙的粒度区分研究主要是根据传统的粒度结构、粒度概率图、粒度参数及其参数散点图进行差异分析而较少采用现代定量判别方法的问题<sup>[43-48]</sup>,基于我国海岸风沙地貌广泛发育的华南海岸的141个现代沙丘沙和70个海滩沙样品的粒度数据,尝试采用多元线性判别分析和神经网络分析方法,进行现代海岸沙丘沙与海滩沙粒度的区识别并比较两种定量判别方法的识别效率,以探寻采用定量方法进行现代海岸沙丘沙与海滩沙粒度识别的可能性。

## 1 研究技术与方法

### 1.1 粒度样品的采集与分析

海岸现代沙丘沙和海滩沙的粒度样品分别采集自华南海岸的闽南、粤东、粤西和海南岛沿岸的典型海岸沙丘分布区域,具体野外选取其中风沙地貌发育的典型区段对应采集表层(0~5 cm)现代风成沙和海滩沙样品,其中样品采集地点主要有闽南海岸的长乐、东山岛、古雷半岛以及平潭岛,粤东沿海的潮阳田心、惠来南海、陆丰甲子和湖东、汕尾马宫,粤西沿海的湛江东海岛和南三岛、吴川吴阳、电白电城、阳西的沙扒和溪头,海南岛沿岸的昌江昌化和海尾、东方的四更和罗带、文昌的锦山和翁田等地,共采集了141个海岸沙丘沙和70个海滩沙的粒度样品。样品采集时主要依据海岸地表形态确定其样品的类型,其中沙丘沙样完全采集自典型的不受海浪作用的高潮线之上的海岸沙丘表面,海滩沙则取自相应的海滩表层。同时,上述样品采集的海岸沙丘发育地点的海岸属于沙质海岸,

其海滩全部属于沙质海滩,故所有样品基本不含砾石级颗粒。

室内对野外采集的粒度样品进行风干、筛选、双氧水去除有机质、盐酸去除碳酸盐类物质、蒸馏水去盐等步骤的预处理后,利用Malvern Mastersizer2000激光粒度仪进行粒度分析,由此获得各个粒度样品的粒径组成和粒度参数等粒度数据<sup>[48]</sup>。

### 1.2 粒度定量识别方法

基于已有对华南海岸现代141个沙丘沙和70个海滩沙的粒径组成、粒度参数、粒度参数图和概率累积曲线等方面的具体对比分析<sup>[48]</sup>,选用多元线性判别分析和神经网络分析法进行两者粒度的定量识别。

多元线性判别分析法是一种多变量统计分析方法,主要是根据对观察类别样本的分析,从中总结出分类的规律性,拟合一个最优的判定模型,用于对新事物所属类别的判别。多元线性判别(Fisher判别)是常用的沉积物粒度判别分析法之一<sup>[12]</sup>,其大致步骤是首先依据分析样本构造一个判别函数 $F(x) = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n$ ,然后根据费歇尔(Fisher)准则利用加权平均值法求出判别标准 $F(c)$ ,判别未知样品时只需将其变量代入判别函数计算出 $F(x)$ 值与 $F(c)$ 临界值进行比较即可,一般 $F(x)$ 值与 $F(c)$ 值相差愈大判别愈好。具体可采用SPSS19.0软件进行判别运算。

神经网络(ANNS)是近年发展起来的一种新的信息处理方法,具有对数据要求不严格及解决非线性问题等优点,可弥补多元线性判别分析法之不足<sup>[9]</sup>,其基本原理是根据过去的例子(已获得的确定数据),经过训练和学习使网络记住确定数据应有的模式,然后根据记忆去判别未知事物。具体选择B-P网络模型,采用MATLAB8.0内部神经网络工具箱进行华南海岸现代沙丘沙和海滩沙粒度的神经网络分析识别。分析中,分别从每个取样点中随机选取沙丘沙和海滩沙样品组成训练样本和待判别样本,共选取了93个沙丘沙和47个海滩沙数据作为训练样本,剩余的48个沙丘沙和23个海滩沙组成待判别样本。

## 2 定量识别结果分析

一般多用粒径组成和粒度参数表征沉积物的粒度特征,但粉沙和粘土含量被认为是区分海滩沙和沙丘沙的重要标志<sup>[29,39,47]</sup>,故分别选用海岸沙丘沙和海滩沙的7个粒级含量百分比(极粗沙、粗沙、中沙、细沙、极细沙、粉沙和粘土,划分标准以

$\Phi$  为单位分别为 <0、0~1、1~2、2~3、3~4、4~8 和 >8)、4 个粒度参数 (平均粒径  $M_z$ 、标准偏差  $\sigma$ 、偏度  $S_k$  和峰态  $K_c$ ) 以及 4 个粒度参数 + 粉沙与粘土含量 3 组变量数据, 分闽南、粤东、粤西和海南岛 4 个区域的样品样本和所有华南海岸的全部样品样本, 分别进行海岸现代沙丘沙和海滩沙粒度的多元线性判别分析和 B-P 模型神经网络分析的区分别。

## 2.1 多元线性判别分析结果

华南海岸 141 个沙丘沙和 70 个海滩沙样品数据的多元线性判别分析结果 (表 1), 以粒级含量百分比为变量, 沙丘沙和海滩沙样品的总识别率为 61.1%, 其中沙丘沙 64.5%、海滩沙 51.4%; 以粒度参数为变量, 沙丘沙和海滩沙样品的总识别率为 61.6%, 其中沙丘沙 64.5%、海滩沙 55.7%; 以粒度参数 + 粉沙与粘土含量为变量, 沙丘沙和海滩沙样品的总识别率亦只有 63.5%, 其中沙丘沙 65.2%、海滩沙 60.0%。依据上述 3 组粒度变量数据进行多元线性判别分析识别风成沙和海滩沙的识别率均为约 60%, 识别率不高, 多元线性判别分析法应难以通过粒度数据有效区分华南海岸的现代风成沙和海滩沙。

表 1 华南海岸现代沙丘沙和海滩沙多元线性判别分析的整体识别结果 %

Table 1 The discrimination results of modern coastal aeolian sands and beach sands in the coastal region of South China by use of the multivariate linear discriminant analysis method

变量	沙丘沙识别率	海滩沙识别率	总识别率
粒级含量百分比	64.5	51.4	61.1
粒度参数	64.5	55.7	61.6
粒度参数 + 粉沙/粘土含量	65.2	60.0	63.5

采用同样数据变量分别对对闽南 (66 个沙丘沙样品和 26 个海滩沙样品)、粤东 (32 个沙丘沙样品和 19 个海滩沙样品) 粤西 (34 个沙丘沙样品和 16 个海滩沙样品) 和海南岛 (9 个沙丘沙样品和 9 个海滩沙样品) 4 个岸段的沙丘沙和海滩沙进行粒度的多元线性判别分析, 结果表明华南海岸 4 个岸段的 3 组变量的类内均值相等检验均显示基本均不存在显著差异 (表 2), 说明粒级含量百分比、粒度参数、粒度参数 + 粉沙与粘土含量 3 组数据为变量进行的多元线性判别分析也无法根据粒度数据有效区分上述各岸段的沙丘沙和海滩沙。

表 2 华南海岸 4 个岸段不同变量的类内均值相等检验

Table 2 Tests of equality of group means with different variables in four coastal regions of South China

变量	闽南岸段	粤东岸段	粤西岸段	海南岛沿岸	
粒级含量	极粗沙	0.195	0.315	0.488	0.111
	粗沙	0.184	0.622	0.762	0.210
	中沙	0.940	0.726	0.209	0.024
	细沙	0.251	0.251	0.805	0.247
	极细	0.347	0.020	0.173	0.252
	粉沙	0.188	0.027	0.335	0.096
	粘土	0.373	0.413	0.479	0.128
粒度参数	平均粒径	0.118	0.251	0.997	0.075
	标准偏差	0.529	0.005	0.127	0.900
	偏度	0.046	0.294	0.597	0.010
	峰态	0.679	0.208	0.673	0.053
粒度参数 + 粉沙/粘土含量	平均粒径	0.118	0.251	0.839	0.075
	标准偏差	0.529	0.005	0.152	0.900
	偏度	0.046	0.294	0.542	0.010
	峰态	0.684	0.207	0.442	0.053
	粉沙含量	0.188	0.027	0.335	0.096
粘土含量	0.373	0.413	0.479	0.128	

## 2.2 B-P 神经网络分析识别结果

训练 1 000 次的 B-P 神经网络分析对华南海岸现代沙丘沙和海滩沙的全部粒度样品的识别结果

(表 3), 两种沉积物的区分别率并不高, 其中以粒级含量百分比为网络输入类型时, 沙丘沙和海滩沙样品的总识别率为 76.92%, 其中沙丘沙

84.09%、海滩沙 61.90%；以粒度参数为网络输入类型时，沙丘沙和海滩沙样品的总识别率为 75.38%，其中沙丘沙 81.82%、海滩沙 61.90%；以粒度参数 + 粉沙与粘土含量为网络输入类型时，沙丘沙和海滩沙样品的总识别率亦只有 73.46%，其中沙丘沙 83.28%、海滩沙 42.37%。总体而言采用 B-P 神经网络分析方法对华南海岸现代沙丘沙和海滩沙的粒度识别效果亦不显著，3 种网络输入类型的总识别率大致相当即约为 75%，即使在粒度参数的基础上加入粉沙和粘土含量作为网络输入，其识别率亦未见明显提高，其中海滩沙的识别率还有下降。

表 3 华南海岸现代沙丘沙和海滩沙 B-P 网络分析的整体识别结果 %

Table 3 The total discrimination results of modern coastal aeolian sands and beach sands in the coastal region of South China by use of the B-P artificial neural network method

网络输入类型	沙丘沙 识别率	海滩沙 识别率	总识 别率
粒度含量百分比	84.09	61.90	76.92
粒度参数	81.82	61.90	75.38
粒度参数 + 粉沙/粘土含量	83.28	42.37	73.46

同样采用训练 1 000 次的 B-P 神经网络分析方法对华南海岸的闽南、粤东、粤西和海南岛沿岸 4 个岸段分别进行沙丘沙和海滩沙的粒度识别，其识别结果存在一定差异（表 4）。其中，以粒度含量百分比和粒度参数 + 粉沙/粘土含量为网络输入时，

海南岛沿岸沙丘沙和海滩沙的识别率达到 100%，沙丘沙和海滩沙能够完全识别；以粒度含量百分比为网络输入时，除海南岛沿岸外粤东海岸的识别效果也相对较好，总识别率为 83.33%，其沙丘沙可 100% 识别；以粒度参数为网络输入时，总识别率介于 70% ~ 78%；以粒度参数 + 粉沙/粘土含量为网络输入时，除海南岛沿岸外粤西海岸总识别率也相对为高，为 76.47%；比较 4 个岸段的识别率，闽南海岸不同网络输入时的识别率相差并不大。因此，B-P 神经网络分析对华南海岸现代沙丘沙和海滩沙的粒度识别效果不尽理想，只在海南岛海岸可完全识别。

### 3 结果讨论

两种定量识别结果，多元线性判别分析法对华南海岸沙丘沙和海滩沙的正确识别率仅约 60%（表 1 和 2），识别率普遍偏低，采用该方法无法从粒度上有效区分华南海岸的现代沙丘沙和海滩沙；B-P 神经网络分析方法较传统判别分析法对华南海岸沙丘沙和海滩沙粒度的识别程度有一定提升，总识别率提高到 70% 以上（表 3 和 4），尤其是沙丘沙的识别率基本在 80% 以上，甚至海南岛沿岸的沙丘沙识别率、海滩沙识别率和总识别率均达到了 100%，说明采用 B-P 神经网络分析方法的识别率相对有所提高，虽然其对华南海岸沙丘沙和海滩沙粒度的总体识别效果不尽理想，但在局部海岸达到了较好的识别效果。

表 4 华南海岸四个岸段现代沙丘沙和海滩沙 B-P 网络分析的识别结果

Table 4 The discrimination results of modern coastal aeolian sands and beach sands in four coastal regions of South China by use of the B-P artificial neural network method %

网络输入类型	区域	沙丘沙识别率	海滩沙识别率	总识别率
粒度含量百分比	闽南岸段	86.36	37.50	73.33
	粤东岸段	100.00	42.85	83.33
	粤西岸段	70.59	33.33	61.91
	海南岛沿岸	100.00	100.00	100.00
粒度参数	闽南岸段	77.27	50.00	70.00
	粤东岸段	81.82	71.43	77.78
	粤西岸段	81.82	50.00	70.59
	海南岛沿岸	60.00	100.00	77.78
粒度参数 + 粉沙/粘土含量	闽南岸段	72.73	62.50	70.00
	粤东岸段	90.91	42.86	72.22
	粤西岸段	81.82	66.67	76.47
	海南岛沿岸	100.00	100.00	100.00

该定量识别结果, 与采用传统的粒度分析方法, 通过粒径组成、粒度参数、粒度参数图和概率累积曲线等粒度参数和数据, 对华南海岸现代 141 个沙丘沙和 70 个海滩沙粒度样品数据的对比分析结果基本一致<sup>[48]</sup>, 即华南海岸的风成沙丘沙与海滩沙相比粒度特征虽有一定差异但差异并不明显, 故一般难以将其区分, 只有在海岸风成沙和海滩沙粒度差异较大的海南岛海岸才能通过 B-P 神经网络分析方法进行有效识别和区分。究其原因, 主要与华南海岸的季风气候背景、海岸沙丘形成时代较晚、台风频率较高、风沙活动空间范围有限等密切相关, 如华南沿海受制于季风气候特征风向的季节变化明显, 不同季节间离岸风与离岸风的交替出现导致风力对海岸沙粒的分选效果不明显; 华南海岸沙丘主要是中全新世以来尤其是晚全新世后近 3 000 a 发育而成, 风力对其沙源海滩沙的改造再作用时间不够充分; 华南海岸深受台风影响, 台风登陆时的强风及风暴潮往往造成风成沙和海滩沙的相互混杂堆积; 华南海岸岸线曲折, 所发育的海岸沙地一般规模较小且分布零散, 致使风沙活动空间有限, 风力改造作用不强。由此, 决定了华南海岸风力对风成沙沙源海滩沙的作用与改造不足, 海岸沙丘沙对海滩沙粒度特征的继承性较强, 海岸沙丘沙与海滩沙的粒度特性较为相近、差异并不明显 (表 5), 故即使采用定量识别方法一般也难以在粒

度方面进行有效的区分和识别。但是, 在海岸沙地面积较大、海滩沙粒度较粗的海岸, 如海南岛文昌海岸<sup>[48]</sup>, 其海岸沙丘带宽度最宽超过 10.0 km, 长度 20.0 km 以上, 沙丘高度达 10.0 ~ 30.0 m, 风力对地表沙物质的吹蚀、搬运和堆积作用的空间较为充裕, 加之其沙源海滩沙的粒度又以粗沙为主, 平均粒径 ( $M_z$ ) 为  $0.55\Phi$ , 致使风沙过程中对海滩沙的分选作用较为明显, 沙丘沙和海滩沙的粒度差异相对较为显著 (表 5), 其粒级组成海滩沙主要由粗沙和极粗沙组成, 但沙丘沙则以中沙和粗沙为主; 平均粒径由  $0.55\Phi$  的海滩沙变为  $1.28\Phi$  的沙丘沙, 不同  $M_z$  值样品数占总样品数的比例也由  $M_z$  值  $0 \sim 1\Phi$  为主的海滩沙变为以  $M_z$  值  $1 \sim 2\Phi$  为主的沙丘沙; 海滩沙中不同偏度样品数占总样品数比率为极负偏 22.22% 和近对称 77.78%, 沙丘沙中则是近对称、正偏和极正偏分别占 55.56%、33.33% 和 11.11%; 海滩沙中宽峰态样品占第二大比例且无窄峰态和很窄峰态样品, 沙丘沙中宽峰态样品数量减少且出现了一定比例的窄峰态甚至很窄峰态的样品, 二者的峰态值差异较大。因此, 只有这种沙丘沙和海滩沙的粒度特征差异较大时, 采用 B-P 神经网络分析方法以粒级含量百分比和粒度参数 + 粉沙/粘土含量为网络输入时才可以将其进行完全有效的区分。

表 5 华南海岸 4 个岸段现代沙丘沙与海滩沙的粒径组成与粒度参数

Table 5 Component and parameters of grain size of coastal aeolian sands and beach sands in four coastal regions of South China

指标	沙丘沙				海滩沙			
	闽南	粤东	粤西	海南岛	闽南	粤东	粤西	海南岛
极粗沙	1.19	13.96	13.63	11.86	3.65	20.32	10.56	28.09
粗沙	7.66	30.23	34.36	32.40	11.48	32.68	32.30	46.26
中沙	45.36	38.58	32.41	36.32	45.10	36.53	39.43	16.93
粒级含量/%								
细沙	42.44	15.65	15.93	16.46	37.58	10.35	17.39	7.76
极细	2.88	0.79	2.50	1.21	2.20	0.11	0.33	0.58
粉沙	0.44	0.76	0.94	1.64	0.00	0.00	0.00	0.36
粘土	0.03	0.04	0.22	0.11	0.00	0.00	0.00	0.02
平均粒径	1.88	1.07	1.09	1.28	1.73	0.85	1.13	0.55
粒度参数								
标准偏差	0.55	0.70	0.64	0.71	0.54	0.57	0.55	0.69
均值 ( $\Phi$ )								
偏度	0.01	0.04	0.00	0.13	-0.02	0.02	0.01	-0.09
峰态	0.97	0.99	0.95	1.27	0.97	0.95	0.95	0.94

## 4 结 论

为探究海岸沙丘沙与海滩沙粒度定量识别的可能性,明确不同定量方法对海岸沙丘沙与海滩沙的粒度区分效果及其区域差异,深入分析不同粒度数据与参数对海岸沙丘沙与海滩沙的识别意义,分别采用多元线性判别分析和 B-P 神经网络分析两种常用方法,以 7 个粒级含量百分比、4 个粒度参数、4 个粒度参数 + 粉沙和粘土含量为变量数据,从华南海岸整体及 4 个主要岸段两个尺度,对华南海岸现代沙丘沙和海滩沙进行了粒度的定量识别分析,其基本结论是:

1) 多元线性判别分析及人工神经网络分析法两种定量方法均难以在粒度上完全有效识别和区分华南海岸的现代沙丘沙和海滩沙,多元线性判别分析法粒度识别华南海岸现代沙丘沙和海滩沙的准确率刚及 60%, B-P 模型神经网络分析法的总识别率也大多不足 80%。故由于华南海岸现代沙丘沙和海滩沙粒度特征相近,多元线性判别分析法及人工神经网络分析法这些定量识别方法也并非区分其的有效工具<sup>[43-47]</sup>,只有粒度特征差异较大时采用定量识别方法才会取得较好的区分效果。

2) 比较而言非线性的人工神经网络分析法要较线性的多元判别分析法对华南海岸现代沙丘沙和海滩沙的粒度识别率为高,尤其是采用 B-P 模型神经网络分析法可以将海南岛沿岸的沙丘沙和海滩沙完全区分,说明进行沉积物粒度识别时不同定量识别方法的适用性应在沉积物类型与区域上存在一定差异。

3) 华南海岸现代沙丘沙和海滩沙粒度的定量识别中,不同分析的变量数据或网络输入类型的识别率存在较大的区域差异,同时沙丘沙和海滩沙的识别率也存在较大差异,说明进行粒度定量识别中分析指标的选取会对分析结果造成较大影响,指标值差异大的指标应是着重选用的分析指标。

### 参考文献:

[1] 丁喜桂,叶思源,高宗军. 粒度分析理论技术进展及其应用[J]. 世界地质,2005,24(2):203-207.  
 [2] 石学法,陈春峰,刘焱光,等. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用[J]. 科学通报,2003,47(6):452-456.  
 [3] 田姗姗,张富元,阎丽妮,等. 东海西南陆架表层沉积物粒度分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):13-20.  
 [4] 曹惠美,蔡锋,苏贤泽. 华南沿海若干砂质海滩沉积物

粒度特征的分析[J]. 海洋通报,2005,24(4):36-45.  
 [5] 鹿化煜,安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. 科学通报,1997,42(1):66-69.  
 [6] 殷志强,秦小光,吴金水,等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. 沉积学报,2009,27(2):343-351.  
 [7] 方志江,曲政. BP 网络在沉积环境自动识别中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2000,28(2):13-15.  
 [8] 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展,2001,11(3):269-276.  
 [9] 李双成,郑度. 人工神经网络模型在地质研究中的应用进展[J]. 地球科学进展,2003,18(1):68-76.  
 [10] 李玉中,陈沈良. 系统聚类分析在现代沉积环境划分中的应用[J]. 沉积学报,2003,21(3):487-494.  
 [11] 葛晓光,吴潇,钱凯. 自组织人工神经网络与聚类法在矿区沉积物分类中实用性对比[J]. 煤炭学报,2006,31(2):169-173.  
 [12] 董文娟,朱远鑫,万明刚. 基于 Fisher 判别准则的沉积环境判别与分类方法[J]. 长江大学学报:自然科学版,2011,8(5):5-8.  
 [13] 陈桥,刘东艳,陈颖军,等. 粒级-标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境,2013,41(3):319-325.  
 [14] 杨立辉,叶玮,郑祥民,等. 河漫滩相沉积与风成沉积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.  
 [15] 史培军,王静爱. 中国干旱、半干旱沙区风成沙粒度的统计分析[J]. 内蒙古师大学报:自然科学版,1986,(4):12-21.  
 [16] 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.  
 [17] 李志忠. 塔克拉玛干沙漠腹地纵向沙垄的粒度分布特征[J]. 干旱区研究,1996,13(2):37-43.  
 [18] 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.  
 [19] 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.  
 [20] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨[J]. 地理研究,1998,17(2):178-184.  
 [21] 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.  
 [22] 俞胜清,阿布都米基提,周向玲,等. 新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征[J]. 中国沙漠,2013,33(6):1629-1635.  
 [23] 哈斯,庄燕美,王蕾,等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应[J]. 地理科学进展,

- 2006, 25(6): 42-51.
- [24] 李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌沉积物粒度特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1187-1192.
- [25] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 回涡沙丘的形态特征与表面物质组成[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 587-592.
- [26] 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.
- [27] 张伟民. 金字塔沙丘粒度变化及表面过程的初步研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1615-1621.
- [28] 蔡爱智, 蔡月娥. 中国海岸风沙沉积的成因与特征[J]. 中国沙漠, 1983, 3(3): 1-10.
- [29] 陈方, 李祖光, 张文开, 等. 长乐东部沿岸风沙沉积物的粒度分布特征[J]. 福建师范大学学报, 1991, 7(2): 84-91.
- [30] 傅启龙, 沙庆安. 昌黎海岸风成沙丘组构特征及其与海滩砂的比较[J]. 地质科学, 1993, 28(1): 52-59.
- [31] 吴正. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 5-68.
- [32] 王月霄. 昌黎黄金海岸沙丘沉积特征及形成演变[J]. 地理学与国土研究, 1996, 12(3): 60-64.
- [33] 董玉祥. 海岸现代风成砂粒度参数特征的研究——以中国温带海岸为例[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 656-662.
- [34] 董玉祥. 国内外海岸风成砂粒度参数特征的比较与分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(4): 110-113.
- [35] 祁兴芬, 庄振业, 韩德亮, 等. 秦皇岛市海岸风成沙丘的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(4): 617-624.
- [36] 董玉祥, 马骏, 黄德全. 福建长乐海岸横向前丘表面粒度分异研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 813-819.
- [37] MASON C C, FOLK R L. Differentiation of beach, dune and aeolian flat environment by size analysis, Mustang Island, Texas[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1958, 28(2): 211-226.
- [38] FRIEDMAN M F. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1961, 31(4): 514-529.
- [39] SHEPARD F P, YOUNG R. Distinguishing between beach and dune sands [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1961, 31(2): 196-214.
- [40] FRIEDMAN G M. Textural parameters of sands: useful or useless? [J]. Geol Soc America Abs. With Programs, 1973, 5(7): 626-627.
- [41] MOIOLA R J, WEISER D. Texture parameter: an evolution [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1968, 38(1): 45-53.
- [42] BIGARELLA J J, BECKER R D, DUARTE G M. Coastal dune structures from Parana Brazil [J]. Marine Geology, 1969, 7(1): 5-55.
- [43] KLOVAN J E, BILLINGS G K. Classification of geological samples by discriminant-function analysis [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1967, 15(3): 313-330.
- [44] GREENWOOD B. Sediment parameters and environment discrimination: an application of multivariate statistics [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(6): 1347-1358.
- [45] MOIOLA R J, SPENCER A B, WEISER D. Differentiation of modern sand bodies by linear discriminant analysis [J]. Journal of Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans, 1974, 24: 321-326.
- [46] WILLIAMS A T, WILTSHIRE R J, THOMAS M C. Sand grain analysis——image processing, textural algorithms and neural nets [J]. Computers & Geosciences, 1998, 24(2): 111-118.
- [47] 王为, 吴正. 应用人工神经网络识别闽南粤东沿海老红沙沉积[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 397-401.
- [48] 唐丽, 董玉祥. 华南海岸现代风成沙与海滩沙的粒度特征差异[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 14-23.