

粒度在沉积物物源判别中的运用

安福元^{1,2}, 马海州¹, 樊启顺¹, 周宝³, 张启兴⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 青海省地质环境监测总站, 青海 西宁 810008;

4. 青海省水文地质、工程地质、环境地质调查院, 青海 西宁 810008)

摘要: 自然界中沉积物的组成和成因具有多样性。应用粒度方法可以区分、提取和判别沉积物中的各个组分。粒度方法主要有频率曲线和累积曲线分布法、数学函数组分提取法(包括 Weibull 分布函数拟合法、端元模型分析法、标准偏差法、粒度分维法等)和粒度参数判别公式法。综合应用上述方法可有效地判别出单一沉积物的物质来源或者复杂沉积物中的各个组分,而这些方法被前人广泛地应用于湖泊研究中,提取了过去的环境变化信息,也指导了作者在盐湖沉积中的研究工作。

关键词: 粒度; 沉积物; 物源判别

中图分类号: P512

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2012)01-0049-08

1 前言

不同沉积物的物质来源具有多样性,或者一种沉积物包含了不同来源的物质成分。如何识别和区分这些物质的来源,成为地学领域研究的重要方向。在物源判别研究中,运用较多的有同位素示踪法^[1-2]、稀土示踪法^[3-4]、常量和微量元素法^[2-4]以及扫描电镜法^[5-6]等。然而近年来,粒度分析作为一种简单而有效的物源判别方法被众多学者广泛使用,其中在黄土^[7-8]、湖泊沉积物^[9-10]、风成沉积物^[11]以及深海沉积物^[12-13]中运用较广,取得了一定的成果。本文就粒度分析应用于物源判别的一些方法、前人的研究和最新进展做一个综述,总结和归纳出有关粒度反映物质来源、物质成因和其环境意义的有用信息。

2 粒度频率曲线和累计曲线对于物源辨别的意义

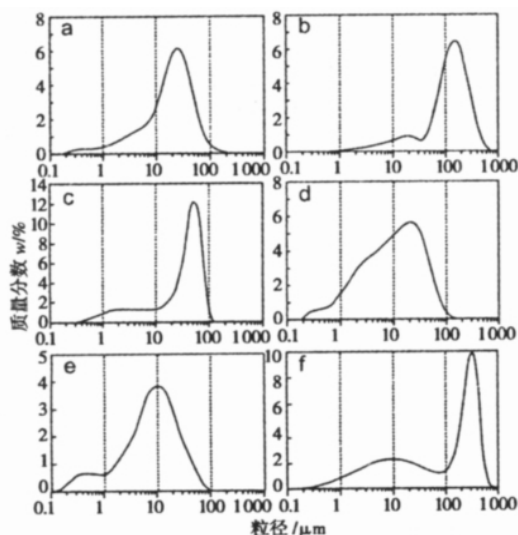
将粒度直方图每个柱子的顶点中点连接起来,绘制成一条圆滑曲线,就是频率曲线。频率曲线表示样品的粒度分布,可清楚地表明粒度分布特点、分选好坏、粒度分布的对称度(偏度)、尖度(峰度)等^[14]。粒度的频率曲线表现为单峰形态、双峰甚至多峰形态。理论上,单一物源沉积物的粒度频率曲线表现为单峰形态,而包含两种或两种以上物质来源的沉积物表现为双峰或多峰形态。但在实际情况下,单一物源沉积物的粒度频率曲线也往往呈现多峰形态,即一个高大而明显的主峰和一至两个不明显的次峰组成。如图1所示的是几种单一物源沉积物的粒度频率曲线分布图: a 现代粉尘^[15]; b 冷湖11次尘暴平均值^[11]; c 风成黄土^[16]; d 风成红粘土^[15]; e 岱海稳定湖相沉积

收稿日期: 2011-9-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41002060)

作者简介: 安福元(1981-),男,博士,主要研究方向为地球化学。E-mail: dongzhu8@sina.com

物^[17]; f 河流相沉积物^[16]。



a. 现代风尘; b. 冷湖 11 次尘暴平均值; c. 黄土; d. 红粘土;
e. 稳定湖相沉积物; f. 河流相沉积物

图 1 典型沉积物粒度频率曲线分布图

Fig. 1 Typical grain-size distribution curves (a) modern dust, (b) average grain-size distribution settled materials during 11 dust storms in Lenghu, (c) Yulin loess section, (d) red clay, (e) stable lacustrine sediment, (f) fluvial sediment

从图 1 中可以看出,上述沉积物均为单一的物源成因,但却表现出较明显的双峰或者多峰。对于单一物源却表现出多峰的原因,可能有以下几点:(1)对于现代风成沉积物如黄土和红粘土等而言,近地面强大的冬季风携带大量较粗的颗粒在较短距离上运送物质,沉积下来形成粒径较粗、突出而明显的主峰(众数粒径在 10~40 μm 之间);而高空的西风携带颗粒较细的飘尘沉积下来形成低矮的次峰(众数粒径 < 1 μm);在风力变化、地形地貌因素影响下甚至可能形成其他相对较小的峰,这就是多峰形态^[15,18];(2)在尘暴天气下,强劲的近地面风携带的粗颗粒物质沉积下来形成高大的主峰,而粘附在这些粗颗粒上的细颗粒粘土等沉积下来形成低矮的次峰^[11];(3)对于稳定湖相沉积来说,高大的主峰代表湖相沉积物的主体部分,指示湖水水动力的强弱,而低矮的次峰可能和湖泊微生物化学作用有关^[19],笔者对柴达木盆地察尔汗钻孔的研究也证实了这一观点;

(4)河流相沉积物多峰形态可能和河水水动力大小变化有关^[20]。单一物源沉积物的这种多峰形态给运用粒度判别物源成因研究带来了干扰和不便,在实际工作中应当与复合物源沉积物的多峰形态加以区别。

对于多种物源的混合沉积物而言,其粒度频率曲线也往往表现为双峰或者多峰。这一现象在干旱和半干旱地区的湖泊沉积物中表现得尤其明显,因为这些湖泊接受了多种物源物质的沉积,如湖相沉积、风成沉积、生物化学沉积甚至洪水沉积等。在多种沉积物混合沉积的情况下,其粒度的频率曲线表现为多峰形态,代表着不同成因的沉积物组分。例如河流相沉积物的众数粒径最粗,风成沉积物居中,湖相沉积物最细。几种沉积物组分混合,在频率曲线上可能表现出几个峰态或者峰态的叠加,只有运用一定的方法才能将其区分开来。孙千里^[17]等研究了岱海样品的粒度频率分布特征,认为该湖接受了流水和风力的混合作用的共同沉积,而粒度频率曲线的双峰模式也恰恰说明了这一点。Chu 等^[21]分析了中国北方四海龙湾湖和小龙湾湖沉积物的粒度频率曲线分布特征,发现该湖存在一个明显的双峰特征,他们认为其中一个峰记录了该湖接受尘暴沉积物的过程。作者在柴达木盆地察尔汗盐湖的工作证明该沉积物亦有尘暴的记录。

粒度的累积曲线也经常用于沉积物物源判别研究中^[7-8,22]。累积曲线是由粒度分析成果中的累积重量百分比数做成的图,一般构成“S”形,在不同沉积环境形成的沉积物,其累积曲线形态是有差别的(图 2a)。滨海沉积和风成沉积的碎屑物质分选好,粒度范围窄,因而累积曲线很陡;洪流及冰川沉积分选差,粒度分布范围宽,累积曲线表现得平缓^[14]。而在实际应用中,众多学者往往采用概率累积曲线,所谓概率累积曲线就是仍然用累积重量百分比作图,横坐标仍为 ϕ 值,而纵坐标改用概率百分数标度,这样做成的便是概率值累积曲线图。与“S”形累积曲线相比,概率累积曲线是将碎屑组分中含量较少的粗、细尾部的特点放大,便于沉积成因分析^[14]。一般来说,沉积物存在着滚动、跳跃和悬浮 3 种搬运方式,沉积物的这 3 种

搬运方式可以在概率累积曲线上产生响应,从而在曲线上表现出滚动组分、跳跃组分和悬浮组分(图2b)。范天新等^[22]通过概率累积曲线的这个特征分析了沙漠砂和湖相沉积物样品,发现概率曲线作为一个有效的粒度分析方法,可以恢复古环境的沉积过程和物质来源。

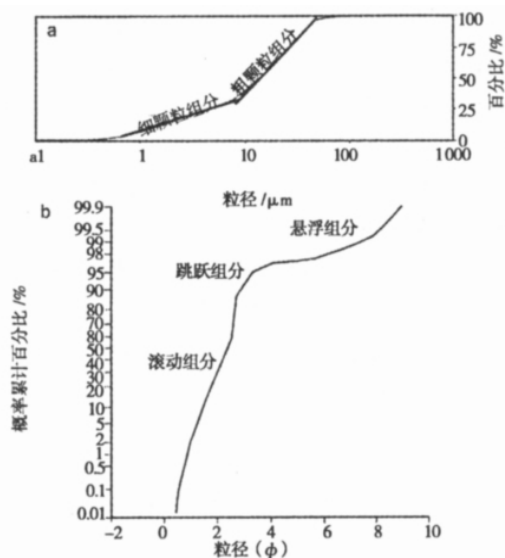


图2 (a) 累积曲线; (b) 概率累积曲线^[7 22]

Fig. 2 (a) Cumulative curve and (b) probability cumulative curve

3 应用粒度方法对沉积物各个组分的提取和判别

对于应用粒度判别物源而言,最简单的方法是将样品粒度频率曲线的峰态和已知的典型沉积物的频率曲线峰态作对比,如果两者形态相似,峰值和众数粒径相近,那么就可以判断该样品和典型沉积物相似;反之,则两者物源不同。根据上述方法,把复合沉积物多峰曲线中的某一峰和典型沉积物分布曲线对比,可以判别并分离该峰所代表的组分,这种方法可以称之为对比法。Jiang 等^[15]运用上述方法判别了黄土高原四口子新第三纪湖相沉积物样品,从中分离出了风成组分。近年来不少学者应用参数化分解粒度分布曲线的方法研究了包括黄土、湖相等各种沉积物,把多峰的粒度频率分布曲线分解为多个单峰的具有特定分布的端元,

有效地将各个子组分分离开来。这些方法包括 Weibull 分布函数拟合法、端元模型分析法、标准偏差法、粒度分维法等。这些方法的应用,很好地完成了沉积物粒度分布曲线中各个组分的分离,从而解决了沉积物各个组分的成因和来源。

Weibull 分布函数拟合法在黄土和湖相沉积中应用较多,从黄土粒度中两个组分的分布特征,特别是对称性和分布形态的自由度变化来看,符合该函数的规律^[23]。Weibull 分布函数的原型为:

$$f(x; \mu, b) = \frac{a}{b^a} x^{a-1} e^{-(\frac{x}{b})^a} \quad (1)$$

公式(1)中 x 为自变量, μ 和 b 分别为 Weibull 分布函数的形态和位置参数,前者主要决定分布曲线的峰态和偏态特征,后者主要决定分布曲线在 x 轴上的位置。对于 3 个 Weibull 函数组成的分布函数,它的概率分布密度函数为

$$f(x; a_1, b_1, a_2, b_2, c_1, c_2) = c_1 \frac{a_1}{b_1^{a_1}} x^{a_1-1} e^{-(\frac{x}{b_1})^{a_1}} + c_2 \frac{a_2}{b_2^{a_2}} x^{a_2-1} e^{-(\frac{x}{b_2})^{a_2}} + (1 - c_1 - c_2) \frac{a_3}{b_3^{a_3}} x^{a_3-1} e^{-(\frac{x}{b_3})^{a_3}} \quad (2)$$

公式(2)中 a_1 和 b_1 分别为总体分布函数中第 1 个 Weibull 函数的形状和位置参数; a_2 和 b_2 分别为总体分布函数中第 2 个 Weibull 函数的形状和位置参数; a_3 和 b_3 分别为总体分布函数中第 3 个 Weibull 函数的形状。孙东怀^[23]用公式(2)对黄土粒度分布曲线进行拟合时,有 8 个待定参数,以各粒级的粒径作为自变量,以该粒级的百分含量为分布密度函数值,并以最小残差平方和为拟合目标,都可以得到较高拟合度的分布函数,从而分离出样品中的超细组分。Sun 等用 Weibull 函数法分离了黄土的粗细组分,认为细组分和西风有关,而粗组分的形成与东亚冬季风有关^[7, 48]。另外 Sun 等^[8]应用此方法还分离了河流相和湖相的样品,很好地达到了研究的目标。

端元分析法亦称之为端元分析模型 (End - Member Modeling),最早由 Weltje 等总结出来^[24]。Weltje 和 Maarten 对粒度数据方法进行了总结,并提出了动力组分 (Dynamic Pop-

ulation) 概念。这种概念认为海洋沉积物的粒度分布由不同物源或者不同运输机制和路径决定,而上述每一种过程都具有分选性,都会优选出具有某一特征的粒级组合,即动力组分。在不同动力组分作用下的沉积物由于生物扰动作用以及较低的沉积速率等原因,对同时期的动力组分进行混合,形成海洋沉积物。根据动力组分概念,沉积物的粒度数据 X 可表示为多个动力组分 B 的组合:

$$X = MB. \quad (3)$$

式中 $X(n \times p)$ 为沉积物粒度矩阵; n 为样品总数; p 为粒级总数; $M(n \times q)$ 为相对含量矩阵; q 为动力组分总数; $B(q \times p)$ 为动力组分矩阵。由于每个样品中各粒级相对含量总和为 100%,而且每个动力组合中各粒级相对含量总和也为 100%,另外每个样品数据由几个动力组合混合而成,每个样品中各动力组分相对含量总和也为 100%,因此式(3)中的沉积物粒度矩阵、相对含量矩阵和动力矩阵都是成分数据,满足以下的约束条件:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^p x_{ij} &= 1, & x_{ij} &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^q m_{ik} &= 1, & m_{ik} &\geq 0 \\ \sum_{j=1}^p b_{kj} &= 1, & b_{kj} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对成分数据的反演要用到端元分解算法。在沉积物分析领域,Weltje 根据前人的经验,结合沉积物粒度数据特点,总结出端元分析模型,并借此对沉积物粒度数据进行反演,分离出若干端元,每一端元与一个动力组合相对应。该模型成功地对许多沉积类型的沉积物粒度数据进行了演算,包括浊流沉积、冰川沉积、平流沉积、风成沉积、近海沉积等,分离出了风力、海流、冰川等对沉积物输运与沉降的影响。此后,端元分析模型成为地质学领域用来反演多组分沉积物粒度数据的有力工具,许多学者和专家利用该模型对不同地区的粒度进行了反演。例如 Liu^[25]等运用端元分析模型反演了青藏高原库赛湖沉积的粒度数据,并从中分离出了风成组分,这些风成组分与东亚冬季风有关。

粒级—标准偏差分析方法是全部样品在各个不同粒径中的百分含量变化分别进行标准

偏差分析,观察各粒径与标准偏差的关系,并按照其中的不同峰值确定不同沉积组分各自对沉积环境变化敏感的粒级范围,再将它们的百分含量变化分别提取出来,这样可以得到变化特征较为明显的粒度曲线,从而能更加准确有效地分析气候环境变化过程^[26-27]。如 Boulay 等^[27]应用此方法研究了南海沉积物样品,认为 2.5 ~ 5 μm 和 20 ~ 40 μm 为环境敏感组分,并用该组分的粒度百分含量反演了 1.1 Ma 以来的环境变化过程。

粒度分维法是基于分形理论形成的。分形理论由 Mandelbrot 首次提出,用来研究自然界中没有特征长度但有自相似性的图形与现象。按照分形理论,若某一集合关于标度 γ 具有自相似性,且在标度 γ 度量下的个数为 N ,按照分形的定义,则有:

$$N(\gamma) (1/\gamma)^D = \gamma^{-D}. \quad (5)$$

式(5)中 γ 为颗粒体积的立方根; $N(\gamma)$ 表示粒径大于 γ 的颗粒数目; D 为分维数。经推导^[28]可得:

$$D = 3 - v. \quad (6)$$

这样只要在 $M(\gamma)/M$ 与 γ 的双对数坐标图上通过最小二乘法拟合计算,就可以得到直线的斜率 b 值、对应的相关系数 R ,并求得粒度分维值 D 。

根据分形理论,以沉积物样品的粒度成分资料为数据源,采用最小二乘法拟合计算,即可获得其分维值和对应的相关系数。相关系数 R 的大小代表沉积物粒度统计自相似程度的高低, R 值越大,统计自相似程度越高;粒度的分维值 D 代表沉积物粒度组成的复杂程度, D 值越大,代表沉积物粒度组成越复杂。赵梅^[29]应用粒度分维法研究了黄海中部海岸末次冰盛期硬质粘土,认为该粘土沉积物的沉积环境为河湖相。

4 粒度判别函数在物源判别中的应用

粒度判别公式在物源判别应用中其突出的优点是判别方便直观,只可将粒度各参数代入判别公式,计算出公式值的范围就可判别沉积

物的类型。但它也有不可避免的缺点,如某一判别公式只能应用于特定的领域,其判别范围较窄,因此前人根据不同的沉积环境提出了一些不同的判别公式。

萨胡于 1964 在碎屑沉积物研究中提出了著名的萨胡判别公式^[30]。该判别函数是根据

现代沉积物做出的,故对碎屑岩环境分析存在局限性^[14]。萨胡利用河道、泛滥平原、三角洲、海滩、风坪、风成沙丘、浅海以及浊流沉积物的粒度分析结果,应用线性多元判别公式,得出 4 个综合公式,用以区别上述沉积环境沉积物,该判别公式见表 1。

表 1 鉴别沉积环境的萨胡判别函数^[14]

Table 1 The Sahu discriminant function of clastic sediments

鉴别沉积环境	判别公式	鉴别值	函数平均值
风成沙丘与海滩	$Y = -3.5688Mz + 3.7016Sd^2 - 2.0766Sk + 3.1135Kg$	风成沙丘: $Y < -2.7411$	$Y_{\text{风}} = -3.0973$
		海滩沙丘: $Y > -2.7411$	$Y_{\text{海滩}} = -1.7824$
海滩与浅海	$Y = 15.6543Mz + 65.7091Sd^2 + 18.1071Sk + 18.5043Kg$	海滩沙丘: $Y < 65.3650$	$Y_{\text{海滩}} = 51.9536$
		浅海沙丘: $Y > 65.3650$	$Y_{\text{浅海}} = 104.7536$
浅海与河流 (三角洲)	$Y = 0.2852Mz - 8.7604Sd^2 - 4.8932Sk + 0.0482Kg$	浅海沙丘: $Y > -7.4190$	$Y_{\text{浅海}} = -5.3167$
		河流沙丘: $Y < -7.4190$	$Y_{\text{河流}} = -10.4418$
河流(三角洲) 与浊流	$Y = 0.7215Mz - 0.4030Sd^2 + 6.7322Sk + 5.2927Kg$	河流沙丘: $Y > 9.8433$	$Y_{\text{河流}} = 10.775$
		浊流沙丘: $Y < 9.8433$	$Y_{\text{浊流}} = 7.9791$

表中 Mz 、 Sd 、 Sk 和 Kg 分别为粒度的平均粒径、标准偏差、偏度和峰态。应用萨胡判别函数,对于每一个有粒度参数资料的样品都可以做沉积环境鉴别。一般情况下,每一沉积环境需要两个以上的一组样品。

李昌志等^[31]运用核心区域图解法和判别分析方法,初步对泥石流、冰碛和河湖沉积物的粒度特征参数进行了对比研究,建立了判别上述 3 种沉积物的数学模型,该判别函数见表 2。

表 2 泥石流、冰碛和河湖相沉积判别函数^[31]

Table 2 Discriminant function for deposits of debris flow, moraine and river-lake

鉴别沉积环境	判别公式	鉴别值	函数平均值
泥石流与冰碛	$Y = 0.86486Mz - 0.70819Sd - 5.01804Sk + 0.010845Kg$	泥石流: $Y < -2.6415$	$Y_{\text{泥石流}} = -19.4980$
		冰碛: $Y > -2.6415$	$Y_{\text{冰碛}} = 0.3962$
泥石流与河相	$Y = 0.71345Mz - 4.04274Sd + 0.18417Sk - 0.52035Kg$	泥石流: $Y < -11.8405$	$Y_{\text{泥石流}} = -17.0720$
		河相: $Y > -11.8405$	$Y_{\text{冰碛}} = -2.2872$
冰碛与河相	$Y = -0.07021Mz - 7.6609Sd + 0.09191Sk - 1.98192Kg$	冰碛: $Y < -23.4333$	$Y_{\text{冰碛}} = -30.5224$
		河相: $Y > -23.4333$	$Y_{\text{冰碛}} = -13.2620$

除上述判别函数外,近年来湖相和风成沉积物之间的粒度参数综合判别公式也有报道。张平等^[32]利用统计学方法对 405 块典型稳定湖相沉积物和 263 块典型风成黄土样品的粒度参数进行了定量化分析,并经稳定湖相和风成沉积物验证,获得稳定湖相与风成沉积物的判别公式如下:

$$F = 20.363Mz - 56.371Sd - 67.922Sk +$$

$$23.516Kg - 55.626 \quad (7)$$

若 $F > 0$,为稳定湖相沉积物;若 $F < 0$,为风成沉积物。利用此判别公式可以对未知沉积环境的沉积物进行物源成因的判断,同时在湖相沉积序列中,综合粒度分布模式能简捷地提取出代表干旱化趋势的风成组分。需要指出,为减少构造等因素的影响,对研究分析的样品采集时,需要注意沉积物的地质时间不宜太长。

5 粒度物源判别在湖泊以及盐湖沉积物中的应用

湖泊沉积物包含着丰富的古气候变化的信息,并具有连续沉积、很少受外界干扰的特点。而粒度作为指示古气候变化的代用指标在湖泊沉积中应用较多。湖相沉积序列粒度的平均粒径、中值粒径、各粒级敏感组分以及其他参数(例如标准偏差、偏度、峰态等)等能够反映一定时间尺度内连续的气候和湖水水动力变化过程。王君波等^[33]研究了藏南沉错湖沉积物的粒度参数,认为该湖在1400 a B. P. 来经历了4个不同的气候变化阶段和湖面变化过程。郭雪莲等^[34]研究了青海湖湖相沉积物的粒度曲线,认为在暖湿期,沉积物的平均粒径较细;在干冷时期,平均粒径较粗。自8500 a B. P. 以来,青海湖的气候经历了4个变化阶段,即暖湿—凉干—温湿—冷干的变化过程。

然而位于干旱和半干旱区的封闭湖泊中除了湖泊自身的沉积以外,还可能有尘暴沉积、河相沉积、生物化学沉积等^[9-10,19]。在盐湖中,情况更为复杂,沉积物的沉淀除了水动力的因素外,还跟盐湖自身的水化学情况有关^[35]。在盐滩形成过程中还包括水下沉积和水上风成沉积叠加和改造的复杂历程^[36]。对于这些封闭的咸水湖—盐湖沉积物而言,区分其中的各种物源组分对于恢复过去的气候具有非常重要的意义。例如准确区分沉积物中的湖相组分才能更加客观准确地反映湖面变化和水动力强弱;而风成组分则反映大气环流的变化;与盐湖相关的生物化学和无机化学沉积反映湖泊的咸化和盐度变化。区分这些沉积物的不同组分,判别出它们的物质来源和成因,就要应用前述的各种方法甚至综合应用几种方法,才能取得良好的效果。针对中国西北地区和青藏高原地区的众多封闭湖泊,许多学者在这方面做了一定的探索。刘兴起等^[9,25]应用端元分析模型研究了库赛湖的湖泊沉积物的粒度特征,认为沉积物的来源主要由径流搬运、风成和冰川搬运组分组成,所占平均比例分别为55.5%、35.9%和8.5%,并以此来反演了晚全新世以来的亚

洲冬季风和夏季风的变化,指出这种变化的驱动机制和青藏高原有关。申慧彦等^[37]通过和已知风成沉积物的粒度频率分布特征对比,发现在兹格塘错湖沉积物中有尘暴的记录。隆浩等^[38]应用粒级—标准偏差法研究腾格里沙漠湖泊沉积物的粒度特征,提取出敏感组分,认为60~550 μm 组分指示了区域风沙活动的强弱,而<60 μm 组分指示了入湖径流量的变化,并用这两种组分恢复了该地区全新世以来的气候变化过程。肖舜等^[10]应用Weibull函数法分离了柴达木盆地苏干湖的沉积物,认为该湖沉积地层客观地记录了区域大气风尘和尘暴事件,具有重建干旱区大气粉尘变化历史的优势。另外,作者应用典型沉积分布曲线对比、判别函数法等多种方法对柴达木盆地察尔汗盐湖沉积物进行了研究,发现该沉积物无论是在淡水阶段,还是成盐阶段都有风成组分的存在,而在成盐阶段风成组分明显增多,说明了该地区气候干旱化的趋势。由于察尔汗盐湖位于柴达木中东部,其西部广阔的湖相地层为该盐湖提供了丰富的风成物源,从湖相沉积中分离这种组分具有十分重要的环境意义。

6 结 语

粒度的分布曲线特征、组分分离和参数判别函数等给沉积物物源判别研究提供了有效的方法。这类方法简单易行,成本低廉,只要测出沉积物样品的粒度参数和分布模式,应用粒度软件就可以获得研究结果,甚至在前人研究的基础上(如判别公式),可以直接提供结果或者参考。然而在自然界中,沉积物的组成复杂,来源广泛,成因多变。在这种情况下,要准确判断一种沉积物的组成或物源成因,就要综合应用粒度的多种判别方法或者借助一些粒度之外的方法,如扫描电镜、稀土元素法、同位素法等,才能对研究目标有一个科学的定论。对于相对来源简单的沉积物,单一地应用粒度的各种判别方法即可获得满意的效果。粒度的各种参数还可以反演过去环境和气候变化过程,如利用判别公式检验出湖相沉积物中的风成组分的相对含量,就可以反演过去古气候干旱—湿润的变

化过程。粒度的这些特点将使其更多地应用于物源成因研究领域和古环境领域。而在盐湖中,由于盐湖沉积的复杂性,如何准确地应用这些粒度判别方法,将需要进一步探索。

参考文献:

- [1] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2002 203(3-4): 845-859.
- [2] Sun J M, Zhu X K. Temporal variations in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change[J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2010 290(3-4): 438-447.
- [3] Yang X P, Zhu B Q, Paul D *et al.* Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data[J]. *Quaternary International* 2007 175: 71-85.
- [4] Ding Z L, Sun J M, Yang S L *et al.* Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleo-climate change[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001 65(6): 901-913.
- [5] Sun J M, Li S H, Han P *et al.* Holocene environmental changes in the central Inner Mongolia, based on single-aliquot-quartz optical dating and multi-proxy study of dune sands[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2006 233(1-2): 51-62.
- [6] 李珍, 张家武, 马海州. 西宁黄土石英颗粒表面结构与黄土物质来源探讨[J]. *沉积学报*, 1999, 17(2): 221-225.
- [7] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K *et al.* Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its palaeoclimatic implications[J]. *Catena* 2004 55(3): 325-340.
- [8] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K *et al.* Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology* 2002 152(3-4): 263-277.
- [9] 刘兴起, 姚波, 杨波. 青藏高原北部可可西里库赛湖沉积物及风成物的粒度特征[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(6): 1193-1198.
- [10] 肖舜, 陈发虎, 强明瑞, 等. 青海苏干湖表层沉积物粒度分布模式与大气粉尘记录[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1153-1164.
- [11] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu(Qaidam Basin, China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010 74(10): 1232-1239.
- [12] Moreno A, Cacho I, Canals M *et al.* Saharan dust transport and high-latitude glacial climatic variability: the Alboran searecord[J]. *Quaternary Research* 2002 58(3): 318-328.
- [13] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the north Pacific: Asian drying, Tibetan uplift and cooling of the Northern Hemisphere[J]. *Paleoceanography* 1998 13(3): 215-224.
- [14] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 1-16.
- [15] Jiang H C, Ding Z L. Eolian grain-size signature of the SiKouzi lacustrine sediments(Chinese Loess Plateau): Implications for Neogene evolution of the East Asian winter monsoon[J]. *GSA Bulletin* 2010, 122(5-6): 843-854.
- [16] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K *et al.* Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its palaeo climatic implications[J]. *Catena* 2004 55(3): 325-340.
- [17] 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 21(1): 93-95.
- [18] 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. *沉积学报* 2000 18(3): 327-335.
- [19] 莱尔曼. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民, 等译. 北京: 地质出版社, 1989, 184-187.
- [20] Wang Z Q, Chen Z Y, Li M. T *et al.* Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam [J]. *Geomorphology*, 2009, 113(3-4): 217-229.
- [21] Chu G Q, Sun Q, Gu Z Y *et al.* Dust records from varved lacustrine sediments of two neighboring lakes in northeastern China over the last 1400 years[J]. *Quaternary International* 2009 194: 108-118.
- [22] 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.
- [23] 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因[J]. *第四纪研究* 2006 26(6): 925-936.
- [24] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物耗度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报*, 2006 28(4): 159-166.
- [25] Liu X Q, Dong H L, Yang X D *et al.* Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2009 280(1-4): 276-284.
- [26] 杨文光, 郑洪波, 王可, 等. 南海东北部 MD05-2905 站 36kaBP 以来的陆源碎屑沉积特征与东亚季风的演化[J]. *地球科学进展* 2007 22(10): 1012-1018.

- [27] Boulay B ,Colin C Trentesaux A. *et al.* Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP site 1144) [R]. Proceedings of the Ocean Drilling Program ,Scientific Results 2003 ,184: 1 – 21.
- [28] 柏广春,王建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报 2003 21 (2) : 234 – 239.
- [29] 赵梅. 黄海中部海岸末次冰盛期第 1 硬质粘土层的粒度分维特征及其环境意义[J]. 海洋地质动态, 2008 (10) : 8 – 14.
- [30] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology , 1964 34(1) : 73 – 83.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 王君波,朱立平. 藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义[J]. 地理科学进展 2002 21(5) : 459 – 467.
- [34] 郭雪莲,王琪,史基安,等. 青海湖沉积物有机碳含量与同位素和粒度特征及其古气候意义[J]. 2002 ,22 (3) : 99 – 103.
- [35] 胡东生. 柴达木盆地沙下盐湖的卤水化学及矿物沉积特征——以察尔汗盐湖区北部外围地带为例[J]. 湖泊科学, 1995 7(4) : 327 – 333.
- [36] 胡文喧. 利用盐层中碎屑沉积物粒度分布鉴别干盐湖沉积层序[R]. 1991.
- [37] 申慧彦,李世杰,于守兵,等. 青藏高原兹格塘错沉积物粒度组成及其环境记录的研究[J]. 第四纪研究 2007 , 27 (4) : 613 – 619.
- [38] 隆浩,王乃昂,马海州,等. 腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的区域风沙特征[J]. 沉积学报, 2007 25(4) : 626 – 631.

The Application of Grain size Analysis in Sediments Provenance Discriminance

AN Fu-yuan^{1, 2}, MA Hai-zhou¹, FAN Qi-shun¹, ZHOU Bao³, ZHANG Qi-xing⁴

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes ,Chinese Academy of Sciences ,Xining 810008 ,China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,100039 ,China;

3. Geology and Environment monitoring station of Qinghai Province ,Xining 810008 ,China;

4. The Survey Institute of hydrogeology ,engineering geology and environmental geology of
Qinghai Province ,Xining 810008 ,China)

Abstract: Lots of sediments have been proven to be the sum all kinds of sedimentary components ,these different components can be discriminated and separated by grain size analysis and they represented the process of paleoclimate ,so the grain size analysis bears important significance in the study of sediment origin. There are three main methods for the discrimination of sediment origin through grain size: the feature of frequency curves and the accumulative curves ,the way of mathematic functions (including Weibull function ,the end member modeling algorithm ,the method of grain size classes vs standard deviation values and the grain size fractal dimension) and the grain-size parameters discriminant functions. Above methods can distinguish conveniently the origin of sediments or part the respective components from the multiple sediments ,and they widely used in the research realm of sediments origin. It also offered a study tool of sediment origin to the author of this paper.

Key words: Grain size; Sediments; Provenance discriminance