

doi:10.3799/dqkx.2015.101

天津滨海平原区深孔沉积物 环境敏感粒度提取及其意义

何继山¹, 梁杏^{2*}, 李静¹, 杨吉龙³

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

摘要: 沉积物环境敏感粒度是进行古环境研究的重要方法之一, 然而华北平原地区很少进行完整的第四纪全取心深孔沉积物环境敏感粒度组分的提取及分析。对天津渤海湾 G1 和 G2 孔第四纪沉积物样品进行粒度分析, 采用粒级—标准偏差和主成分分析两种方法进行了沉积物环境敏感粒度组分提取。对比提取结果发现, 两种方法存在差异性的同时还存在一定的兼容性, 沉积层理厚度越薄, 兼容性越明显; 主成分分析方法对沉积物环境敏感粒度组分刻画得更为细致, 粒级—标准偏差方法不适合深孔沉积物整体敏感粒度组分的提取。G1 孔环境敏感粒度组分的粒度峰值为 6.700 μm 、15.650 μm 、36.240 μm 、176.900 μm 、282.100 μm 、716.800 μm ; G2 孔环境敏感粒度组分的粒度峰值为 0.578 μm 、176.000 μm , 分别对应 6 个和 3 个粒度分布区间, 指示两孔整体上的沉积物来源及沉积环境空间存在差别。G2 孔相对于 G1 孔整体上的沉积强度大且沉积环境较为稳定, 适合于开展高分辨率的古环境重建工作。

关键词: 天津渤海湾; 粒级; 标准偏差; 主成分分析; 敏感粒度组分; 古地理; 古环境。

中图分类号: P531

文章编号: 1000—2383(2015)07—1215—11

收稿日期: 2014—09—16

Environmentally Sensitive Grain-Size Extraction of Deep Hole Sediment from Tianjin Coastal Plain and Its Significance

He Jishan¹, Liang Xing^{2*}, Li Jing¹, Yang Jilong³

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

Abstract: Sediment environment sensitive granularity is one of the important methods of the ancient environment study, but there are very few complete quaternary sediment core deep hole to extract environmentally sensitive granularity component and analysis in the north China plain regions. Grain size versus standard deviation, and principal component analyses have been applied to extract sensitive grain size components from sediment samples of G1 and G2 in Tianjin Bohai bay. Comparison of extraction results of the two methods shows both differences and compatibility. The thinner the thickness of sediment bedding is, the more obvious the compatibility is. It is found that principal component analyses can provide better description while grain size versus standard deviation is not suitable for the deep hole extraction. Six and three environmentally sensitive granularity component peaks appear in G1 and G2 holes, which are 6.70 μm , 15.65 μm , 36.24 μm , 176.90 μm , 282.10 μm , 716.80 μm for G1, 0.578 μm and 176.000 μm for G2 respectively, indicating different sediment sources and sedimentary spatial environment for G1 and G2. Compared with G1 hole, the sedimentary environment of G2 is more stable with stronger deposit strength, which can be used to reconstruct the palaeoenvironment.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272258); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2010CB428802)。

作者简介: 何继山(1990—), 男, 硕士, 主要从事水文地球化学及环境地质学研究, E-mail: hejishan90@163.com

*** 通信作者:** 梁杏, E-mail: xliang@cug.edu.cn

引用格式: 何继山, 梁杏, 李静, 等, 2015. 天津滨海平原区深孔沉积物环境敏感粒度提取及其意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1215—1225.

Key words: Tianjin Bohai bay; grain size; standard deviation; principal component analysis; sensitive grain-size component; paleogeography; palaeoenvironment.

沉积物的粒度数据广泛应用于物质运动方式的判定和沉积环境类型的识别,能有效地判定沉积物搬运方式、判别水动力条件、区分沉积环境类型以及研究沉积物的成因机制。然而,现代和地质历史时期的沉积物往往都是多种物源或沉积动力过程的混合,用全样的粒度参数显然只能近似地作为沉积环境的代用指标(Syvitsk, 1991; Prins *et al.*, 2000; 周磊和操应长, 2010)。因此,如何从众多的粒度信息中,提取出单一粒度组分的特征(众数、不同粒级的体积和质量百分含量等),抑或是敏感的环境替代粒度组分,进而根据其在沉积序列中的变化推断气候环境的演化历史,逐渐成为古环境以及沉积物粒度分析研究的热点。近年来,学者们通过对将进行粒度分析的样品做前处理以及对粒度资料进行各种数学处理,提取出对沉积环境变化敏感的粒度组分或者端元组分,据此重建地质历史时期的古气候、古环境已经取得了一系列的研究成果(Wang *et al.*, 1999; Stuut *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2002; Xu and Wang, 2011)。

Prins *et al.* (2000) 则利用端元粒度模型(End-member modeling)从阿拉伯海的沉积物中分离出风尘和河流输入的相对贡献;孙东怀等(2001)以 Weibull 分布作为黄土和河流沉积物的拟合函数,运用数学方法对多成因的沉积物粒度分布进行了多组分分离;汪海斌等(2002)运用主成分分析及聚类分析对黄土高原西部两个典型黄土剖面敏感粒度进行提取,分析结果指出 $>30\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量作为东亚冬季风的代用指标在黄土高原地区不具有通用性, $>40\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量是黄土高原西部地区更为敏感的古季风替代指标;孙有斌等(2003)用端元粒度模型和粒度—标准偏差变化这两种方法分别计算了边缘海冲绳海槽和琉球海沟的重力柱样品,发现获得的粒度组分的个数相同,指出了冲绳海槽和琉球海沟的沉积物来源和沉积环境存在空间差异;徐树建(2007)采用主成分分析对黄土高原西部末次冰期沉积的宁夏中卫冰沟剖面 and 兰州沙金坪剖面的环境敏感粒度指标进行研究,得出了剖面的阈值(搬运动力的一种临界状态)粒度;周磊和操应长(2010)通过提取沉积物中对沉积环境变化敏感的粒度组分,确定了各自组分所对应的沉积水动力类型,并结合沉积相和构造背景资料,进而指出沉积物的来源及搬运方式。

从孢粉、浅层沉积物实现对渤海西部以及华北平原第四纪环境反演的研究已有不少(蒋辉等, 1981; 童国榜等, 1983; 王艳, 2000; Liu *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2011), 研究结果基本体现了此地区第四纪以来的古气候、古植被及古地理的演变情况。然而很少有完整的全取心深孔沉积物粒度数据,分析该地区气候变化的替代指标。鉴于此,本文从渤海湾西岸两个钻孔粒度数据着手,运用粒度—标准偏差曲线和主成分分析两种方法对比探讨该地区第四纪古环境以及对环境变化敏感的粒度组分,为进一步的古环境研究工作做好铺垫。

1 材料和方法

1.1 材料来源

天津滨海地区位于渤海湾西岸,在构造上处于华北地台东北部的冀渤断块拗陷内,晚新生代以来沉积了巨厚的松散沉积物,记录了丰富的环境变化信息,尤其是渤海中部渤中拗陷钻孔记录了大约第四纪以来渤海开始形成。渤海海湾第四纪经历海陆相互作用过程,并在该区沉积了多个海侵—海退旋回序列(王强, 2002; 徐杰等, 2004; 阎玉忠等, 2006; 肖国桥等, 2008; Li *et al.*, 2014)。

研究钻孔 G1 和 G2 位于渤海湾西岸(图 1)、天津市东部,距市区分别约 34 km、47 km。该区在构造上位于黄骅凹陷的北塘凹陷次级构造单元中。渤海湾沿岸几乎全为全新世沉积物,其地貌可分为冲—海积平原和海积平原,形成极为平坦的粉砂淤泥质海岸典型地势。

G1 和 G2 钻孔深度分别为 500 m 和 1 200 m, G2 钻孔以第四纪底界深度 303 m 为界(肖国强等, 2014),以上岩性以灰黄色、灰褐色、深灰色和暗灰色粉质粘土、粘土和粉细砂为主,含钙核,以下岩性以棕色、黄棕色和红棕色粘土以及橄榄绿色和棕色粉细砂、细砂为主,粘性土和砂性土交互沉积;沉积物颜色的变化主要受气候影响。G1 钻孔位于 G2 北面的北塘区,为第四纪以来的沉积中心,相近岩性的沉积深度比 G2 钻孔略深 15~20 m,砂性土颗粒比 G2 钻孔略粗,含水砂层以粉细砂、细砂和中粗砂为主。鉴于 G2 孔研究区域第四系底界深度为 303 m,而 G1 和 G2 为同一地区相距较近的两个钻孔, G1 孔

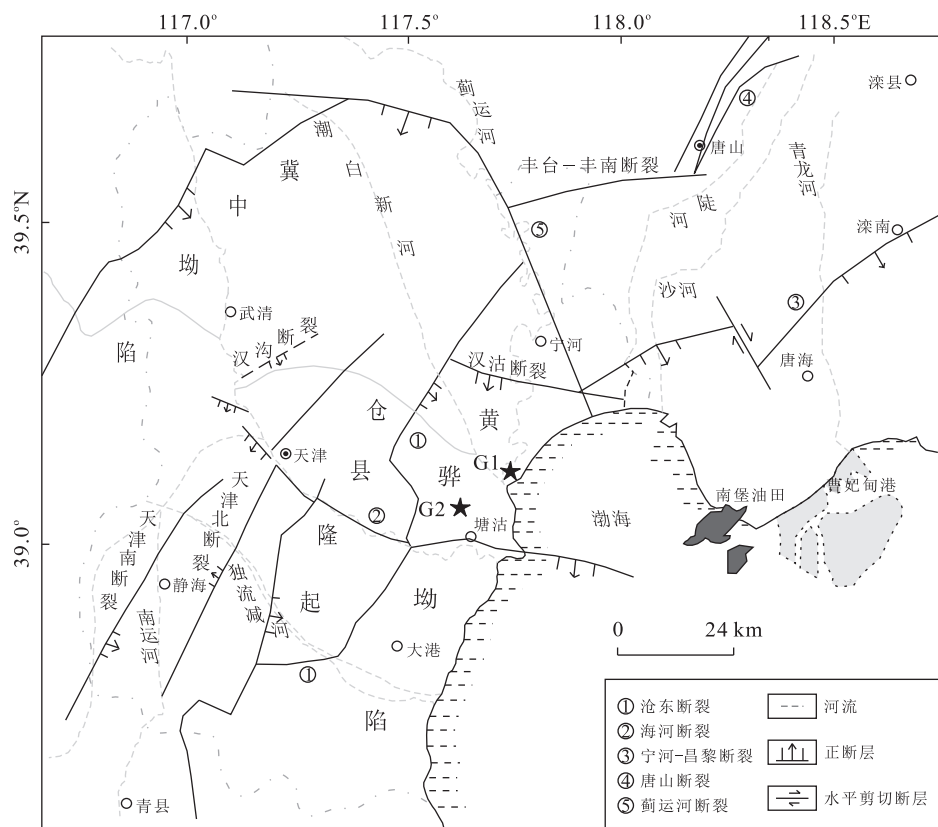


图 1 研究区位置及钻孔 G1 和 G2 分布

Fig.1 Position of the study area and distribution of the drill holes G1 and G2

第四纪底界近似深度为 310 m(Li *et al.*, 2014).本文只对第四纪以上地层的粒度数据进行研究,G1 孔样品共 61 件,取自深度 6.8~311.4 m,采样间隔 1~6 m;G2 孔样品共 171 件,取自深度 2.8~304.1 m,采样间隔 1~3 m,间隔岩性为粘土、亚粘土、亚砂土和砂,对其进行粒度分析测试.样品的分析测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成.粒度测试采用 LS230 全自动激光粒度分析仪完成,检测范围为 0.04~2 000 μm ,对于超出仪器测试范围($>2\text{ mm}$)的颗粒粒径,需用 2 mm 的孔径漏筛,筛分出粒径大于 2 mm 的颗粒,并进行统计.G1、G2 孔样品的颗粒较细,几乎没有大于 2 mm 的颗粒,因此直接用仪器测试得到试验结果.

样品前处理方法:称取 1 g 左右的样品置于小玻璃杯中,添加 10%的双氧水 20 mL,浸泡 24 h,等到玻璃杯中的双氧水已经澄清,抽取上清液,加入 10%的盐酸 15 mL,再浸泡 6~8 h;抽取已经澄清的上清液,加入 30~50 mL 的去离子水浸泡 12 h,除去上清液,剩余玻璃杯的部分为待测样品.测样前,在样品中加入 0.5 mol $\cdot$ L⁻¹ 的偏磷酸钠 10 mL,充分震荡后,倒入仪器中测试.

1.2 分析方法

粒度特征通常采用两种方法,一种是绘制频率分布曲线或概率累计曲线方法;另一种是统计并计算各种粒度参数(粒度中值、标准偏差、峰度和偏度等)解释沉积作用.平均粒径代表沉积物粒度分布的集中趋势,反映搬运和沉积介质的平均动力能(速度);分选系数用标准差表示,反映沉积物颗粒粗细的均匀程度,其值越大,分选越差(成都地质学院陕北队,1987).计算各粒度组分的相对含量和分布范围,能够准确地反映各组分的粒度特征指标,便于对不同特征的粒度组分分类和环境敏感粒度组分的提取(蒋庆丰等,2006;郑国璋等,2006).环境敏感粒度组分的提取,最常用的方法有粒级-标准偏差法和主成分分析法.

粒级-标准偏差法是先利用各粒级的体积百分含量计算其标准偏差 s ,再以粒级对数为横坐标,以标准偏差值为纵坐标,作粒级-标准偏差图.标准偏差计算公式为 $s = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (s_i - s)^2] / n}$,式中 s 为偏差, s_i 为样本值, n 为样本数.主成分分析是运用软件 SPSS13.0 获得各沉积物柱状样粒度主控因子

(陈桥等,2013;Zhao and Shi,2014).

主成分分析法通过探讨各粒级之间的内部关联性,将相关联的粒级成分组合在一起,多个粒级归数到有代表性的因子中,分析各个因子对粒级的贡献大小,将贡献较大的因子作为主要因子,该因子所包含的粒级范围作为沉积环境最敏感的粒级组分,是众多粒级的综合体.

2 数据处理

2.1 粒级一标准偏差法提取环境敏感因子

对于粒级一标准偏差分析方法,某一粒级所对应的标准偏差值越大,说明该粒级沉积物对沉积环境变化越敏感,沉积环境稍有变化就会导致其沉积物的粒度发生变化,因此,可用它代表与之相对应的沉积环境.标准偏差值越小,说明该粒级受沉积环境变化敏感性越小,沉积水动力强度越微弱.其值大小的波动可以反映出在沉积过程中沉积环境及水动力条件变化,由此可得出不同沉积环境下的环境敏感粒度组分(肖尚斌和李安春,2005;徐树建,2007;周磊和操应长,2010).

图 2 为 G1 和 G2 钻孔粒度数据每个粒级组分的标准偏差值随粒级的变化曲线. G1 孔大于 1 660.000 μm 和 G2 孔大于 497.800 μm 的颗粒组分含量较低,多个样品的百分含量值为 0,在进行分析时不予考虑.粒级一标准偏差曲线的横坐标为粒级大小,用对数刻度表示;纵坐标为标准偏差值,可以显示沉积环境敏感的粒度众数.

G2 孔偏差值大小范围为 0.057~6.272.由图 2 可知,G1 钻孔呈现出多峰分布,这说明沉积物粒度受多种因素控制,沉积环境多变,而 G2 钻孔虽然呈现出双峰,但两峰值大小偏差极大.各峰值大小指示

表 1 G1 孔沉积物粒度主成分分析结果

Table 1 The sediment granularity principal component analysis results of G1 hole

公因子	F1	F2	F3	F4	F5
特征值	69.318	12.191	7.575	6.904	5.191
贡献率占总方差(%)	59.757	10.509	6.530	5.952	4.475
累积贡献率(%)	59.757	70.266	76.796	82.748	87.223

表 2 G2 孔沉积物粒度主成分分析结果

Table 2 The sediment granularity principal component analysis results of G2 hole

公因子	F1	F2	F3	F4
特征值	26.180	8.420	5.020	2.790
贡献率占总方差(%)	54.571	17.543	10.465	5.816
累积贡献率(%)	54.571	72.083	82.548	88.384

该粒径的沉积物对该种沉积环境的变化最为敏感,表明该类型水动力条件下最适合沉积的沉积物粒径.对于 G1 孔而言,共有 4 个明显峰值,其中第 2、3 组峰值大小相当,由此可以说明第 2、3 组分别处于相同的水动力类型下,且第 2、3 组的水动力能量较强.4 个明显峰值分别出现在 15.650 μm 、176.900 μm 、309.600 μm 和 716.800 μm ,所对应的粒度组分范围分别为 0.048~24.950 μm 、24.950~234.000 μm 、234.00~594.800 μm 和 594.800~1 660.000 μm ; G2 孔有 2 个峰值,分别出现在 0.578 μm 、176.000 μm .在 0.972~176.000 μm 之间,可以看出曲线一直是递增的,不存在峰值,但先后分别表现为凸曲线和凹曲线,也就是该曲线函数的二阶导数先小于零后大于零,曲线的微变对应沉积环境的变化,由此可以得到与环境变化相对应的粒度组分范围为 0.972~25.000 μm .所以 G2 孔对应的敏感粒度组分范围分别为 0.243~0.972 μm 、0.972~

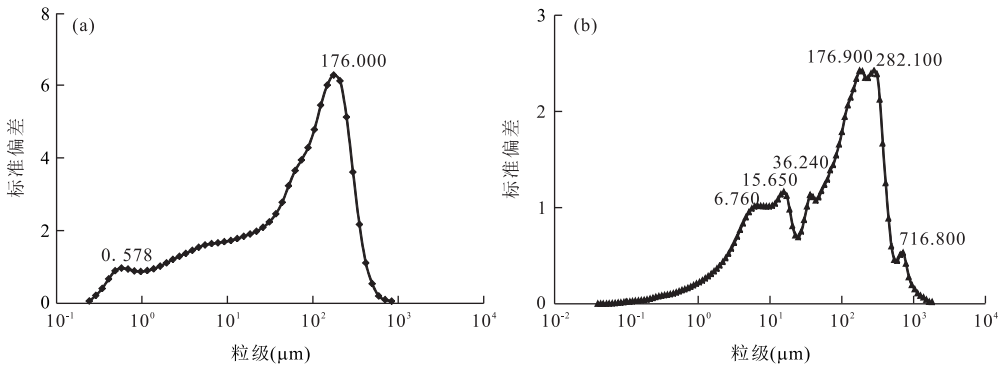


图 2 G1(a)和 G2(b)粒级一标准偏差曲线
Fig.2 The grain size versus standard deviation curves of G1 (a) and G2 (b)

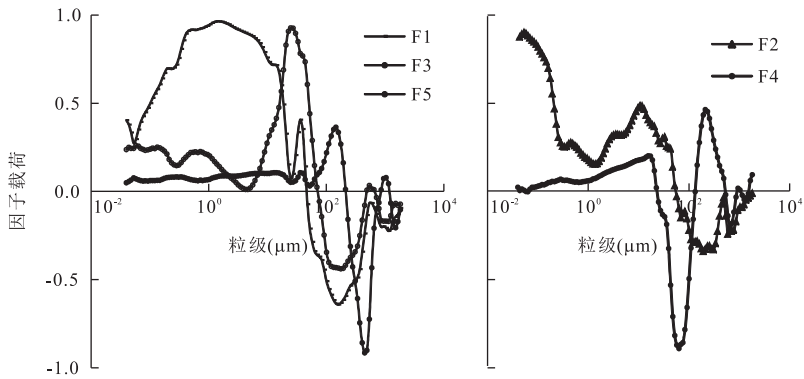


图 3 G1 孔经极大方差旋转后的因子载荷

Fig.3 The great variance rotation factor loading of G1 hole

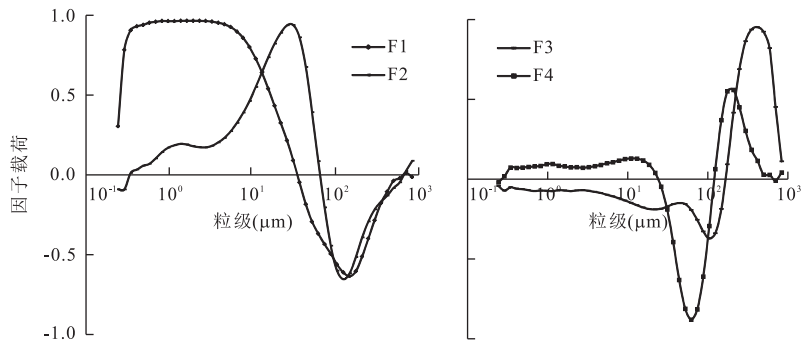


图 4 G2 孔经极大方差旋转后的因子载荷

Fig.4 The great variance rotation factor loading of G2 hole

表 3 G1 和 G2 钻孔沉积物敏感粒度组分

Table 3 The drilling sensitive sediment particle size compositions of G1 and G2		F1	F2	F3	F4	F5
因子构成(μm)	G1	0.112~18.860	0.040~0.195	18.860~47.940	43.670~92.090	282.100~541.900
		101.100~213.200	8.943~12.990		176.900~234.000	
	G2	0.289~15.550	11.000~62.220	248.900~497.800	44.000~87.990	176.000~209.300

25.000 μm 和 25.000~497.800 μm.

2.2 主成分分析提取敏感因子

笔者运用 SPSS13.0 进行主成分分析,以 2 个钻孔各粒级对应的百分含量为变量,获得 2 个钻孔粒度的主控因子.

对粒度的主成分分析之前首先要对粒度进行粒径分级,粒径的划分是由粒度仪配套软件给出的.粒级划分方法对主成分分析结果影响不大(汪海斌等, 2002).G1 和 G2 有效分级分别为 116 和 66 级,粒级对应百分含量为零者不参与主成分分析.

根据软件计算结果(表 1,表 2,图 3,图 4),G1 孔获得 5 个主控因子,G2 孔获得 4 个主控因子.G1 孔前 5 个主成分累积贡献率为 87.223%,其中主控因子 F1

和 F2 分别控制了 59.757%和 10.509%的粒度变化特征,这 2 个主控因子反映粒度总体特征变化的 70.266%;G2 孔前 4 个主成分的累积贡献率为 88.384%,其中主控因子 F1 和 F2 分别控制了 54.571%和 17.543%的粒度变化特征,这 2 个主控因子反映了粒度总体变化特征变化的 72.083%.由极大方差旋转因子载荷的分布(图 4),可以得出 G1 和 G2 孔通过主成分分析提取的敏感粒径组分(表 3).

3 数据处理结果的对比分析

3.1 粒级一标准偏差提取的敏感粒度结果分析

由图 5 中 G1 和 G2 孔的频率分布曲线看出,

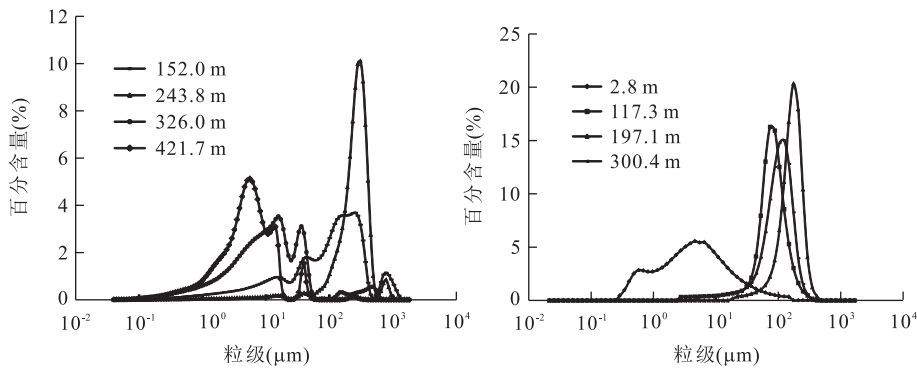


图 5 G1 孔(a)和 G2 孔(b)不同深度样品的频率分布曲线

Fig.5 The bore frequency distribution curves of the samples from different depth of G1 (a) and G2 (b)

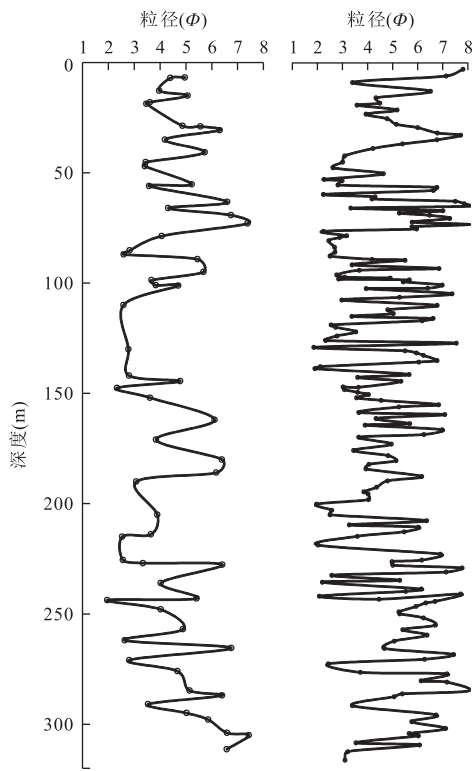


图 6 G1 孔(a)和 G2 孔(b)平均粒径分布

Fig.6 The average particle size distribution of G1 (a) and G2 (b)

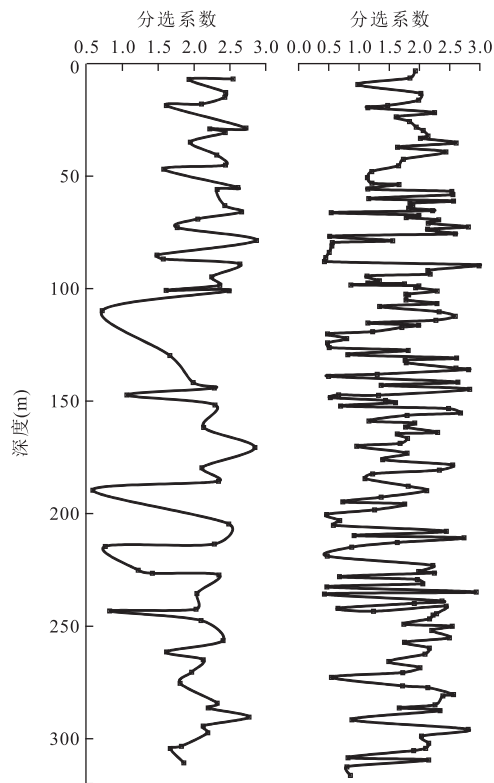


图 7 G1(a)和 G2(b)分选系数分布

Fig.7 The sorting coefficient of G1 (a) and G2 (b)

G1 孔频率分布曲线至少有 2 个峰值,而 G2 孔与形态和分布范围大体一致,主要表现为—明显的单峰;从粒级—标准偏差曲线来说,由于 G2 孔 2 个偏差峰值差别较大,整体上来说,其沉积环境较为简单,反映出该孔只有一种明显的水动力类型,而 G1 孔则较为复杂.沉积物的频率曲线特征是判断沉积作用形式的重要手段之一,频率曲线峰态变化反映了沉积作用形式的变化,外来的或粗或细的新组分的加入,会导致沉积物分选变差,频率曲线变为不对称,使偏度呈现出负偏或正偏的变化(孙千里等,

2001;沈吉等,2006).由此可知整个 G2 孔的沉积环境相对稳定,控制因素为比较单一的物源或水动力条件,而 G1 孔沉积环境很不稳定,控制因素也比较复杂.沉积环境越稳定,沉积物成因和来源越单一,某一个特定的指标受到的影响因素也就越少,因此 G2 孔更适合于开展高分辨率的古环境重建工作.

图 6 和图 7 分别为 G1 和 G2 两孔的平均粒径和分选系数的对比,平均粒径和分选系数的计算根据 Folk and Ward(1957)的算法公式得出.G1 孔平均粒径分布范围为 1.96~7.44 Φ ,平均值为 4.53 Φ ,

分选系数分布范围为 $0.59 \sim 2.87\Phi$, 平均值为 2.04Φ ; G2 孔平均粒径分布范围为 $1.86 \sim 8.15\Phi$, 平均值为 4.89Φ , 分选系数分布范围为 $0.43 \sim 3.01\Phi$, 平均值为 1.70Φ . 由图 7 可知, 两孔分选差的样品占大多数, G1 孔分选系数大多位于 $1.50 \sim 3.00$ 之间, G2 孔则是位于 $1.00 \sim 2.50$ 之间的较多, G2 孔分选系数小于 1.00 的百分含量为 21.9%, 而 G1 孔为 6.6%, 说明 G2 孔整体分选性较 G1 孔好; 另外, G2 孔平均粒径的分布范围较 G1 孔宽, 且 G2 孔平均粒径 Φ 值小于 3 的样品占 16.0%, 而 G1 孔仅占 10.0% 左右, 对应着较粗的组分; 综合两孔粒度一标准偏差曲线特征, G1 孔出现多个峰值, 而 G2 孔只有一个明显的峰值, 而且 G1 孔的粒径标准偏差平均值明显低于 G2 孔, G2 孔的沉积水动力条件相对较强且稳定, 而 G1 孔沉积强度多变, 考虑到 G1 孔距离渤海湾较近, 其复杂的沉积环境及水动力类型可能与该地区晚更新世以来多次海陆相互作用形成的多个海侵—海退序列有关.

3.2 两种方法敏感粒度提取结果的对比分析

由粒度一标准偏差和主成分分析提取的环境敏感粒度结果对比, 尤其是 G2 孔的数据分析结果, 其敏感粒度组分的划分呈现出明显的不同, 但前一种方法提取敏感粒度曲线的 2 个峰值 $0.578 \mu\text{m}$ 、 $176.000 \mu\text{m}$ 皆落在第 1 主成分 F1 中; G1 孔 4 个峰值, 其中 $716.800 \mu\text{m}$ 由于其对提取的 5 个主成分贡献较小, 未体现在主成分分析结果中, $15.650 \mu\text{m}$ 和 $176.900 \mu\text{m}$ 处的峰值落在第 1 主成分 F1 中, $309.600 \mu\text{m}$ 处的峰值落在第 3 主成分 F3 $248.900 \sim 497.800 \mu\text{m}$ 的粒度组分中.

标准偏差是反映数据离散程度的一个重要指标, 标准偏差越大, 说明观测值的离散程度越大, 标准偏差值越小, 说明观测值的离散程度越小. 也就是说, 粒度一标准偏差曲线是通过不同深度各粒度体积百分含量的离散程度来进行绘制的, 较大的偏差值和对应的粒度区间从数学上标志着该深度各粒度百分含量的不均性; 而主成分分析旨在将多个实测粒度变量转化为少数几个不相关的主控粒度, 将多数粒度归属到有代表性的因子中. 两者原理不同, 从不同的角度提取敏感粒度因子, 其结果也必然存在差异.

G2 孔两种方法分析结果呈现出了明显的差异, 这也从一方面说明了两种方法的差异性, 用偏差方法提取的敏感粒度组分范围为 $0.243 \sim 0.972 \mu\text{m}$ 、 $1.000 \sim 25.000 \mu\text{m}$ 和 $0.972 \sim 497.800 \mu\text{m}$, 它们的范

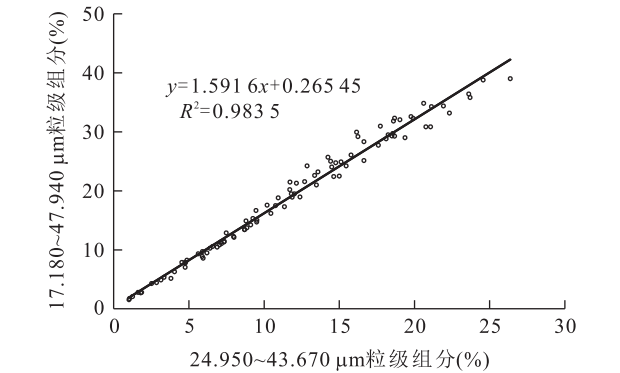


图 8 G1 孔沉积物敏感粒度相关性分析
Fig.8 The sensitive graded sediment correlation analysis of G1 hole

围前者极窄后者极宽, 没有主成分分析提取的粒度范围那么细致, 其粒度一标准偏差曲线和频率分布曲线很好地体现了相对稳定的沉积环境.

然而, 对于 G1 孔的两种方法敏感粒度组分划分结果相差不大, 例如, 标准偏差分析提取的组分范围为 $0.048 \sim 24.950 \mu\text{m}$, 主成分分析提取的组分范围为 $0.112 \sim 18.860 \mu\text{m}$, 可以看出前者的范围包含后者划分的范围. 由于在统计某一深度位于某一粒度范围颗粒百分含量时, 是对该深度某一粒度范围内颗粒体积百分含量的累加, 这两种方法提取的两个粒度组分必然相关, 其相关性达到 0.984 (图 8). 不同方法提取的组分 $234.000 \sim 594.800 \mu\text{m}$ 与 $282.100 \sim 541.900 \mu\text{m}$ 的相关性也达到了 0.969, 这也说明了两种方法存在一定的兼容性.

粒度一标准偏差方法不仅可以提取环境敏感粒度组分, 还可以结合频率分布曲线以及概率累计曲线, 分析研究区的沉积环境变化状态、水动力类型变化、沉积物的搬运方式 (风沙、流水作用等) 以及沉积物来源等 (沈吉等, 2006; 徐树建, 2007; 周磊和操应长, 2010), 在这方面提供的信息要明显地优于主成分分析; 但是通过以上论述可知, 该方法对于整体沉积环境相对稳定且沉积物层理厚度较大的地区提取敏感组分并不适宜, 单纯地考虑沉积环境敏感粒度、寻找季风、研究区的阈值、搬运动力的临界状态 (徐树建, 2007; 徐方建等, 2009), 则主成分分析方法更加适合. 由于主成分分析方法对粒度分组较为细致, 可以很好地刻画粒度组分对沉积环境的敏感性, 若研究区粒度标准偏差曲线呈单峰分布, 且表现为划分的粒度组分范围较宽, 可以考虑选择主成分分析方法辅助研究.

4 讨论

G1 和 G2 孔都位于渤海湾附近, 粒度标准偏差范围分别为 0.001~2.424 和 0.057~6.272, G2 孔偏差范围明显要比 G1 孔分布的要宽. 既然是同一地区, 那么它们的沉积环境敏感粒度会不会有所相同呢? 从粒度—标准偏差方法对敏感粒度的提取结果来看, G1 孔的 0.048~24.950 μm 粒度组分, 其标准偏差值分布在 0~2 之间. G2 孔的 0.972~25.000 μm 粒度组分, 其偏差值亦在 0~2 之间. 由此推测, 两孔相似的敏感粒度组分共同对应着相同的沉积环境, 这种环境因素的确定有待于更多的资料进行分析.

笔者从主成分分析结果来对两孔相应的粒度组分进行了相关性分析, 结果显示两孔的粒度组分不存在相关关系. 陈桥等(2013)也曾对主成分分析以及粒度标准偏差两种方法在提取敏感粒度方面进行了对比; 相关性分析显示, 两种分析方法其相关性达到了 0.9 以上, 而 G1 和 G2 两孔两种分析结果对比其相关性达不到 0.8. 考虑到方法相同而结果却差异显著, 笔者再对样品整体对比后发现, 采集样品的深度存在明显的差别, 前者 3 个孔 A1、A5、C3 深度分别为 0.95 m、1.22 m、1.19 m, 且取样间隔仅为 1 cm; G1 孔和 G2 孔深度分别为 311.4 m、304.1 m, 取样间隔分别为 1~6 m、1~3 m, 那么样品的取样间隔及钻孔的深度是否对分析方法存在影响呢?

相同岩性层段的样品, 其粒度分析结果基本相同. G2 钻孔颗分样品的采集较为密集, 间隔相对较小. 因此笔者选择对 G2 孔相邻层段岩性相同且采集数量较多的样品进行剔除, 也就是 G2 孔整体上样品数量减少, 当达到与 G1 孔样品数量相同时, 绘制其粒度—标准偏差曲线(图 9), 与图 2b 相比, 不存在明显的变化, 仅第 2 个峰值发生变化, 但是, 在进行粒度测试时, 176.000 μm 的下一级粒度即为 209.300 μm , 其对应的标准偏差值分别为 5.886 和 5.930, 2 个峰值同属于一个敏感粒度区间. 因此, 采样的间隔对于两孔敏感粒度提取的结果影响不大; 然而, 由于在不同层段水动力强弱、沉积物来源必然不同, 也就是说在某一层段相对较强的水动力条件, 在整个钻孔的分析研究中, 这种水动力条件可能微不足道. 显然, 采样间隔对单独一个孔的敏感粒度提取是存在较大影响的, 但笔者只研究相同区域 2 个钻孔的数据对比.

沉积物厚度(钻孔深度)不同, 其敏感粒度范围

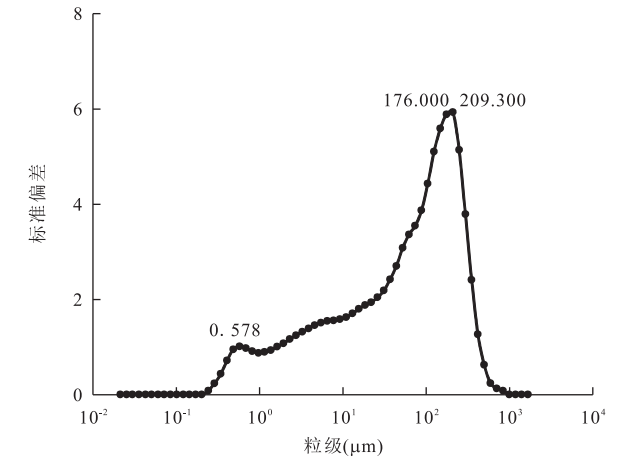


图 9 G2 孔增大采样间隔后的粒度—标准偏差曲线
Fig.9 The standard deviation curve of G2 after increasing the sampling interval

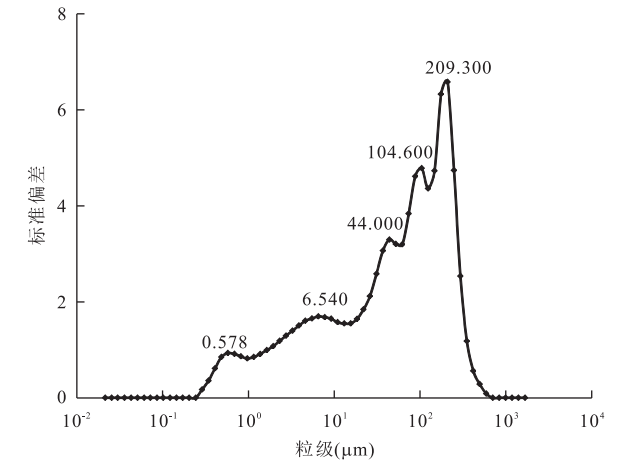


图 10 2.8~50.8 m 沉积层粒度—标准偏差分析
Fig.10 2.8—50.8 m grain size standard deviation analysis

表 4 主成分分析提取的敏感粒度组分			
Table 4 Sensitive grain size component of the principal component analysis			
公因子	F1	F2	F3
因子构成 (μm)	0.289~22.000 73.990~296.000	18.500~73.990 148.000~418.600	73.990~124.400

必然不同, 撇开对 G2 孔整体沉积物粒度数据, 分别选取 2.8~50.8 m 的粒度数据进行粒度标准偏差和主成分分析. 粒度标准偏差曲线(图 10)有 5 个峰值, 分别为 0.578 μm 、6.540 μm 、44.000 μm 、104.600 μm 、209.300 μm , 对应的敏感粒度范围分别为 0.289~0.972 μm 、0.972~13.080 μm 、13.080~62.220 μm 、62.220~124.400 μm 、124.400~591.900 μm . 笔者对主成分分析结果(表 4)进行相关性分析, R^2 均在 0.85 以上, 由此可知, 样品采集深

度越深,两种方法差异性越明显.对比图 10 与图 2b,除有共同的粒度峰值 $0.578\ \mu\text{m}$ 外,两曲线表现出显著差异,图 10 更精细地出现了次峰现象,由此导致由该曲线提取的 2.8~50.8 m 层段沉积层与整体第四纪的环境敏感粒度组分不同,说明了深度越深,粒级标准偏差分析方法对沉积物敏感粒度数据提取越不灵敏,即该方法对于深孔整体沉积物敏感粒度组分的提取并不适合,而主成分分析方法却总能细致地划分出敏感粒度组分.

此外,根据肖国强等(2014)可知,G2 孔 2.8~50.8 m 位于更新世晚期,图 10 表示自晚更新世以来,G2 孔区域沉积环境多变,这也与该阶段历经海陆交互作用、多个海侵海退旋回以及复杂多变的古气候相印证(王强,2002;徐杰等,2004;阎玉忠等,2006;肖国桥等,2008).由图 10 揭示出的敏感粒度组分及其代表的古沉积环境意义,有待于结合更多的相关资料进行研究.

G1 和 G2 孔地理位置相近,但沉积环境变动却明显不同,有待于结合更多的地质背景及气候等方面的资料,对提取的敏感粒度所指示的环境意义进行探讨,进而更好地分析该地区的沉积环境及古气候.

5 结论

主成分分析方法与粒级一标准偏差方法,对同一地区两个钻孔环境敏感粒度指标的提取表明,不同的数学方法提取的指标存在差异,所以数学方法的运用必须考虑其数值所表示的物理机制和环境意义.粒级标准偏差分析方法对于较深的沉积物敏感粒度组分提取效果较差,而主成分分析方法对粒级分组较为细致,可以很好地刻画粒级组分对沉积环境的敏感性,两种方法存在差异性和一定的兼容性.若研究区粒级标准偏差曲线呈单峰分布,且表现为划分的粒级组分范围较宽,可以考虑选择主成分分析方法辅助研究.沉积物厚度越薄,两种方法的兼容性越明显.相对于 G1 孔,G2 孔整体上的沉积强度大且沉积环境较为稳定,显著的控制因素为单一的物源和水动力条件,适合于开展高分辨率的古环境重建工作.

References

Chen, Q., Liu, D. Y., Chen, Y. J., et al., 2013. Comparative Analysis of Grade-Standard Deviation Method and Factors Analysis Method for Environment Sensitive Factor

Analysis. *Earth and Environment*, 41(3): 319—325 (in Chinese with English abstract).

Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Barazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 31: 514—519.

Huang, J., Li, A. C., Wan, S. M., 2011. Sensitive Grain-Size Records of Holocene East Asian Summer Monsoon in Sediments of Northern South China Sea Slope. *Quaternary Research*, 75(3): 734—744. doi: 10.1016/j.yqres.2011.03.002

Jiang, H., Wang, K. F., Zhang, Y. L., 1981. Spore-Pollen Assemblages from the Western Part of Bohai Bay since the Late Pleistocene and Their Paleoclimate and Paleogeography. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 34—42 (in Chinese with English abstract). doi: 10.13984/j.cnki.cn37—1141.1981.04.007

Jiang, Q. F., Liu, X. Q., Shen, J., 2006. Grain-Size Characteristics of Wulungu Lake Sediments and Its Palaeoclimate and Palaeoenvironment Implication. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6): 877—882 (in Chinese with English abstract). doi: 1000—0550(2006)06—0877—06

Li, J., Liang, X., Jin, M. G., et al., 2014. Geochemistry of Clayey Aquitard Pore Water as Archive of Paleo-Environment, Western Bohai Bay. *Journal of Earth Science*, 25(6): 1—8. doi: 10.1007/s12583—014—0491—x

Liu, J. G., Li, A. C., Chen, M. H., et al., 2008. Sedimentary Changes during the Holocene in the Bohai Sea and Its Paleoenvironmental Implication. *Continental Shelf Research*, 28(10): 1333—1339. doi: 10.1016/j.csr.2008.03.006

North Shaanxi Team of Chengdu Geology Institute, 1978. Grain-Size Analysis of Sedimentary Rock and Its Application. Geological Publishing House, Beijing, 31—143 (in Chinese).

Prins, M. A., Postma, G., Weltje, G., 2000. Controls on Terigenous Sediment Supply to the Arabian Sea during the Late Quaternary: The Makran Continental Slope. *Marine Geology*, 169(3): 351—371. doi: 10.1016/S0025—3227(00)00087—6

Shen, J., Wang, Y., Yang, X. D., et al., 2006. Lake Sedimentary Records of Regional Characteristics of Sand and Evolution History: Hongjiannao Lake in Shaanxi, for Example. *Chinese Science Bulletin*, 51(1): 87—92 (in Chinese).

Stuut, J. B. W., Prins, M. A., Schneider, R. R., et al., 2002. A 300-kyr Record of Aridity and Wind Strength in Southwestern Africa: Inferences from Grain-Size Distributions of Sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Marine Geology*, 180(1): 221—233. doi: 10.1016/S0025—

3227(01)00215—8

- Sun, D. H., An, Z. S., Su, R. X., et al., 2001. Mathematical Approach to Sedimentary Component Partitioning of Poly-modal Sediments and Its Applications. *Progress in Natural Science*, 11(3): 269—276 (in Chinese).
- Sun, D. H., Bloemendal, J., Rea, D. K., et al., 2002. Grain-Size Distribution Function of Polymodal Sediments in Hydraulic and Aeolian Environment, and Numerical Partitioning of the Sedimentary Components. *Sedimentary Geology*, 152(3): 263—277. doi: 10.1016/S0037-0738(02)00082-9
- Sun, Q. L., Zhou, J., Xiao, J. L., 2001. Grain-Size Characteristics of Lake Daihai Sediments and Its Palaeoenvironment Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 93—95 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. B., Gao, S., Li, J., 2003. Preliminary Analysis of Environmentally Sensitive Grain-Size Population in the Continental Sources of Marginal Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(1): 83—86 (in Chinese).
- Syvitski, J. P. M., 1991. Factor Analysis of Size Frequency Distributions: Significance of Factor Solutions Based on Simulation Experiments. In: Syvitski, J. P. M., ed., Principles, Methods, and Applications of Particle Size Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 249—263.
- Tong, G. B., Ke, M. H., Yu, S. F., 1983. Quaternary Sporopollen Assemblages in Hebei Plain, China and Their Geological Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3(4): 91—102 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. B., Chen, F. H., Zhang, J. W., 2002. Environmental Significance of Grain Size of Loess-Paleosol Sequence in Western Part of Chinese Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 22(1): 21—26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian Monsoon Climate during the Late Pleistocene: High-Resolution Sediment Records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156(1): 245—284. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00182-0
- Wang, Q., 2002. The Block Dynamic Environment Change in the North China since Late Cenozoic. Precambrian and Quaternary Geological Anthology. Geological Publishing House, Beijing.
- Wang, Y., 2000. Evolution Sequences of Palaeovegetation & Palaeoclimate in the Caofeidian Area since the Last Stage of the Late Pleistocene Epoch. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(2): 87—92 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. Q., Guo, Z. T., Chen, Y. K., et al., 2008. Magnetostratigraphy of BZ₁ Borehole in West Coast of Bohai Bay, Northern China. *Quaternary Sciences*, 28(5): 909—916 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. Q., Yang, J. L., Zhao, C. R., et al., 2014. Magnetostratigraphy of Drill Hole G2 in the Tianjin Coastal Area and Its Tectonic Significance. *Geological Bulletin of China*, 33(10): 1642—1650 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. B., Li A. C., 2005. A Study on Environmentally Sensitive Grain-Size Population in Inner Shelf of the East China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 122—129 (in Chinese with English abstract). doi: 1000-0550(2005)01-0122-08
- Xu, F. J., Li, A. C., Wan, S. M., et al., 2009. The Geological Significance of Environmental Sensitive Grain-Size Populations in the Mud Wedge of the East China Sea during the Mid-Holocene. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(3): 95—102 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Ran, Y. K., Shan, X. J., et al., 2004. Development of the Quaternary System in the Bohai Sea Area, China. *Seismology and Geology*, 26(1): 24—32 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. J., 2007. Analysis of Grain-Size Populations with Environmentally Sensitive Components in Aeolian Deposits and Their Implications. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 21(3): 95—98 (in Chinese with English abstract). doi: 1003-7578(2007)03-095-04
- Xu, S. J., Wang, T., 2011. Comparative Study on the Grain Size Characteristics of Loess Deposit both on Miaodao Islands and on the Laizhou Bay Plain and Its Implications for Provenance. *Procedia Environmental Sciences*, 10: 1869—1875. doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.292
- Yan, Y. Z., Wang, H., Li, F. L., et al., 2006. Sedimentary Environment and Sea Level Fluctuation Revealed by Holes BQ1 on the West Coast of the Bohai Bay, China. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 357—382 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Shi, L., 2014. Automated Learning of Factor Analysis with Complete and Incomplete Data. *Computational Statistics and Data Analysis*, 72: 205—218. doi: 10.1016/j.csda.2013.11.008
- Zheng, G. Z., Yue, L. P., He, J. F., et al., 2006. Grain-Size Characteristics of the Sediments at Palaeoswamp in Anxi County Downstream of Shulehe River during Holocene and Its Paleoclimatic Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(5): 733—739 (in Chinese with English abstract). doi: 1000-0550(2006)05-0733-07

Zhou, L., Cao, Y. C., 2010. The Application of Clastic Grain-Size Analysis to the Genetic Study of Sand Bodies in Upper Es4 Submember of Xin176 Area in Dongying Sag. *Acta Geoscientica Sinica*, 31 (4): 563 — 573 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈桥, 刘东艳, 陈颖军, 等, 2013. 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. *地球与环境*, 41(3): 319—325.

蒋辉, 王开发, 张玉兰, 1981. 渤海西部晚更新世以来的孢粉组合及其古气候、古地理. *海洋湖沼通报*, (4): 6.

蒋庆丰, 刘兴起, 沈吉, 2006. 乌伦古湖沉积物粒度特征及其古气候环境意义. *沉积学报*, 24(6): 877—882.

成都地质学院陕北队, 1978. *沉积岩(物)粒度分析及其应用*. 北京: 地质出版社, 31—143.

沈吉, 汪勇, 羊向东, 等, 2006. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕西红碱淖湖泊为例. *科学通报*, 51(1): 87—92.

孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等, 2001. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用. *自然科学进展*, 11(3): 269—276.

孙千里, 周杰, 肖举乐, 2001. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 21(1): 93—95.

孙有斌, 高抒, 李军, 2003. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. *科学通报*, 48(1): 83—86.

童国榜, 柯曼红, 于淑凤, 1983. 河北平原第四纪孢粉组合及其地质意义. *海洋地质与第四纪地质*, 3(4): 91—101.

汪海斌, 陈发虎, 张家武, 2002. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义. *中国沙漠*, 22(1): 21—26.

王强, 2002. 晚新生代以来华北断块板内环境变迁动力学. 前寒武纪第四纪地质文集. 北京: 地质出版社, 171: 182.

王艳, 2000. 渤海湾曹妃甸晚更新世末期以来古植被与古气候演变序列. *海洋地质与第四纪地质*, 20(2): 87—92.

肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等, 2008. 渤海湾西岸 BZ₁ 钻孔的磁性地层学研究. *第四纪研究*, 28(5): 909—916.

肖国强, 杨吉龙, 赵长荣, 等, 2014. 天津滨海地区 G2 孔磁性地层年代及其构造指示. *地质通报*, 33(10): 1642—1650.

肖尚斌, 李安春, 2005. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分. *沉积学报*, 23(1): 122—129.

徐方建, 李安春, 万世明, 等, 2009. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义. *海洋学报*, 31(3): 95—102.

徐杰, 冉勇康, 单新建, 等, 2004. 渤海海域第四系发育概况. *地震地质*, 26(1): 24—32.

徐树建, 2007. 风成沉积物环境敏感粒度指标的提取及意义. *干旱区资源与环境*, 21(3): 95—98.

阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等, 2006. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动. *地质通报*, 25(3): 357—382.

郑国璋, 岳乐平, 何军锋, 等, 2006. 疏勒河下游安西古沼泽全新世沉积物粒度特征及其古气候环境意义. *沉积学报*, 24(5): 733—739.

周磊, 操应长, 2010. 碎屑颗粒粒度分析在东营凹陷辛 176 块沙四上亚段砂体成因研究中的应用. *地球学报*, 31(4): 563—573.