

# 巽他陆坡下部陆源碎屑粒度分布的控制因素

赵玉龙, 刘志飞, 成鑫荣, 翦知湓

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**通过对“太阳号”115 航次 18268-2 孔陆源碎屑高分辨率沉积粒度分析, 获取了大约 2.5 万年以来巽他陆坡下部沉积物粒度分布特征的详细记录。结果显示, 该孔陆源碎屑颗粒较细, 粒径在  $2\sim 10\ \mu\text{m}$  之间的含量最高, 几乎不含大于  $63\ \mu\text{m}$  的颗粒。沉积物粒度分布的均值和中值与粒径在  $10\sim 63\ \mu\text{m}$  之间的百分含量相关性较好, 说明古水流速度决定着沉积物粒度分布在短时间尺度上的变化。14.6~14.3 kaBP 期间海平面迅速上升造成海岸线后退数百千米, 使本地区沉积物供应产生了明显的变化, 从而造成所有统计参数及各组分相对百分含量在 15 kaBP 前后均发生了明显变化, 这说明沉积物供应控制着沉积物粒度分布较长时间尺度上的变化。

**关键词:**陆源碎屑; 粒度分布; 控制因素; 水动力条件; 巽他陆坡

**中图分类号:** P736.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2006)02-0073-06

南海南部巽他陆架地区, 被认为是目前世界上除两极之外最宽广的陆架。晚新生代以来, 由于受冰期-间冰期旋回的影响, 该地区曾频繁出露与淹没, 因此成为全球古环境研究的热点地区之一。目前为止, 针对本地区已进行了包括地震地层学<sup>[1]</sup>、孢粉学<sup>[2]</sup>、构造地质学<sup>[3]</sup>、氧同位素地层学<sup>[4]</sup>和地球化学<sup>[5]</sup>等诸多方面的详细研究。然而, 陆源碎屑的粒度分布特征作为研究本地区古环境变化的一个重要指标, 在前人的工作中却鲜有涉及。本文通过研究巽他陆坡下部沉积物柱状样中陆源碎屑的粒度分布特征, 探讨决定该地区陆源碎屑粒度分布的控制因素以及造成本地区粒度分布特征在融冰 1a 期(14.6~14.3 ka)<sup>[6]</sup>发生明显变化的原因。

## 1 材料及方法

本文分析所采用的 18268-2 孔沉积柱状样( $6^{\circ}38.782'\text{N}$ ,  $111^{\circ}52.309'\text{E}$ , 水深 1 975 m, 柱长 837.5 cm)是德国“太阳号”科学考察船 115 航次期间在南海南部巽他陆坡下部通过重力采样方式取得的(图 1)。该柱状样主要为橄榄灰色至深灰绿色黏土, 中下部有局部生物扰动迹象, 600~700 cm 深度夹有很多富含有机质的薄层, 颜色较深, 厚度多为 0.5~1.0 cm<sup>[7]</sup>。本次工作主要对该孔沉积物样品进行了

浮游有孔虫氧碳稳定同位素分析、碳酸盐含量分析及陆源碎屑粒度特征分析, 均采用 10 cm 等间距采样。

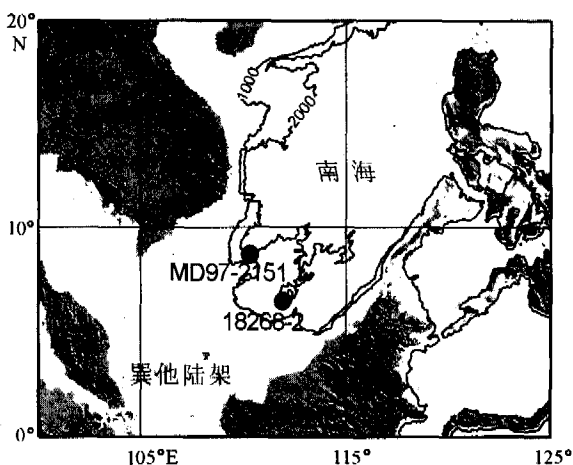


图 1 巽他陆坡 18268-2 孔站位

(MD97-2151 孔用于氧同位素地层对比)

Fig. 1 Location of Core 18268-2 in the Sunda slope  
(Core MD97-2151 is used for the oxygen isotope stratigraphy correlation)

本次研究共对 65 个样品进行了浮游有孔虫氧碳同位素组成分析。样品烘干并称重后, 以  $63\ \mu\text{m}$  (250 目) 分样筛湿筛, 烘干后挑出其中新鲜未污染的浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer* 个体若干, 在 Finnigan MAT 252 稳定同位素质谱仪上测定其氧同位素比值( $\delta^{18}\text{O}$ )。碳酸盐含量分析样品共 82 个, 烘干后称取 0.8 g 左右用法国 Controlab 公司生产的 NFP18-508 碳酸盐含量分析仪进行分析, 分析误差优于 2%。陆源碎屑粒度分析时每个样品取大约 0.5 g, 分别与稀盐酸及双氧水反应去除

**基金项目:**国家自然科学基金项目(40321603, 40331002);教育部新世纪优秀人才支持计划和优秀青年教师资助计划;霍英东教育基金会项目(101018)

**作者简介:**赵玉龙(1982—), 男, 硕士生, 主要从事海洋地质学和古气候学研究, E-mail: yeoloon@gmail.com

**收稿日期:** 2006-02-03; **改回日期:** 2006-03-01. 周立君编辑

其中碳酸钙和有机质,用超声波振荡仪振荡 3~5 min 使沉积物充分分散,然后在 Coulter LS230 激光粒度分析仪上进行测试。以上分析全部在同济大学海洋地质国家重点实验室进行。

粒度分组采用 McCave 等所建议的方式进行<sup>[8]</sup>,首先将整个粒径分布范围划分为细组分和粗组分两部分,两部分划分界线为 63  $\mu\text{m}$ 。在细组分中,粒径小于 2  $\mu\text{m}$  的部分划分为黏土,粒径 2~63  $\mu\text{m}$  的部分中以 10  $\mu\text{m}$  为界线划分为 2~10  $\mu\text{m}$  和 10~63  $\mu\text{m}$  两个部分。在本文中将粒径 <2  $\mu\text{m}$ 、2~10  $\mu\text{m}$ 、10~63  $\mu\text{m}$  及 >63  $\mu\text{m}$  的各部分分别称为沉积物的 4 个组分,以  $v(<2 \mu\text{m})$ 、 $v(2\sim10 \mu\text{m})$ 、 $v(10\sim63 \mu\text{m})$  及  $v(>63 \mu\text{m})$  表示各组分的相对体积百分含量。

## 2 结果

### 2.1 年龄框架及碳酸钙含量

准确的年代框架是在不同沉积记录间进行对比的前提,由于用浮游有孔虫氧稳定同位素数据进行深海高分辨率地层学研究具有良好的全球可比性,氧同位素曲线已成为晚第四纪高分辨率地层学的主要依据。18268-2 孔氧碳稳定同位素测定采用浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer*,测定结果通过对比 MD97-2151 孔浮游有孔虫氧同位素曲线得到年龄值<sup>[9]</sup>。结果显示,18268-2 孔底部年龄约为 25.4 ka,为氧同位素 3 期顶部。时间分辨率在氧同位素 1 期约为 120 a,在氧同位素 2 期约为 210 a。

同时,南海大量柱状样分析结果表明在溶跃面以上的地层中碳酸钙含量曲线在相当程度上可以替代氧同位素曲线进行地层对比<sup>[10-11]</sup>。18268-2 孔碳酸盐含量曲线与氧同位素曲线变化趋势基本一致,可以作为地层对比的良好标志。通过对 18268-2 孔氧同位素地层学和碳酸盐地层学的研究,我们为该区建立起了一个较为完整的年龄框架(图 2)。

### 2.2 粒度分布特征

按照 McCave 等(1995)所建议的方式,我们分别统计了粒径 <2  $\mu\text{m}$ 、2~10  $\mu\text{m}$ 、10~63  $\mu\text{m}$  和 >63  $\mu\text{m}$  各组分的相对百分含量,其中 <2  $\mu\text{m}$ 、2~10  $\mu\text{m}$  及 10~63  $\mu\text{m}$  各组分的平均含量分别为 21.3%、64.1%和 14.6%(图 3)。除少数几个样品含有不到 1%的粗组分外,大于 63  $\mu\text{m}$  的颗粒在大多数样品中含量为 0,因而在计算中将其忽略不计,

而将粒径小于 63  $\mu\text{m}$  的组分含量折算为 100%。从计算结果可以看出,粒径在 2~10  $\mu\text{m}$  之间的组分构成整个沉积物的主要组成部分。

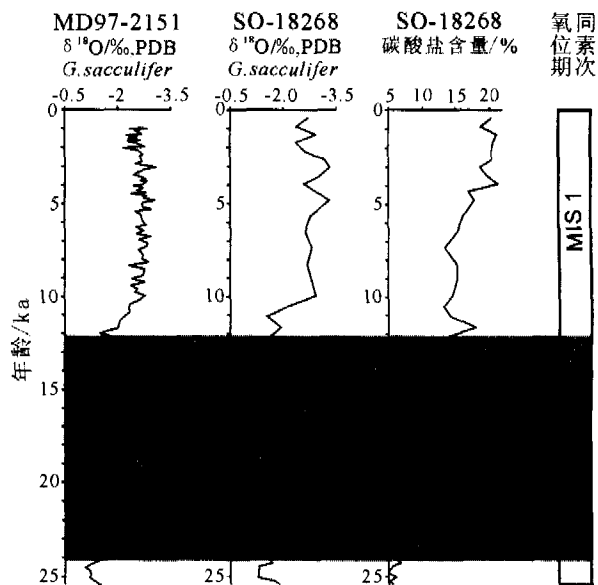


图 2 巽他陆坡 18268-2 孔氧同位素地层学和碳酸盐地层学 (MD97-2151 孔上部年龄由 AMS  $^{14}\text{C}$  标定<sup>[9]</sup>)

Fig. 2 Oxygen isotope stratigraphy and carbonate stratigraphy of Core 18268-2 in the Sunda slope (the upper part of Core MD97-2151 was AMS  $^{14}\text{C}$  dated<sup>[9]</sup>)

各组分的相对百分含量在 15 ka 左右都发生了明显变化,2~10  $\mu\text{m}$  组分的相对含量迅速上升,变化幅度达到 15%,其他两种组分的相对百分含量则表现为下降。同时,各组分相对百分含量在 15 ka 之前均有变化幅度大、频率高的特征,这种幅度大而频繁的成分含量变化体现了动荡的水动力环境。14 ka 之后,各组分相对百分含量变化的频率和幅度都明显减小,这说明从 14 ka 左右本地区的水动力环境开始趋于稳定。可见,到 14 ka 巽他陆架地区已经上升到一个较高的海平面,海平面变化对本地区的沉积物供应及水动力条件的影响开始显著减小。

同时我们还统计了反映沉积物粒度平均分布情况的 3 个参数(平均值、中值和众数)随时间的变化。其中平均值的变化范围为 4~12  $\mu\text{m}$ ,平均为 6.2  $\mu\text{m}$ ;中值变化范围为 3~8  $\mu\text{m}$ ,平均为 4.3  $\mu\text{m}$ ;众数在 3~11  $\mu\text{m}$  之间变化,平均为 4.6  $\mu\text{m}$ 。3 个参数的大小顺序表现为平均值 > 众数 > 中值,这说明大部分样品呈正偏态分布,粒径小于平均值的部分占主要部分。与各组分相对百分含量类似,3 种统计指标在 15 ka 左右也发生了明显变化,其数值均向负值方向偏移,其中以平均值的变化幅度最大、众数变化幅度最小。

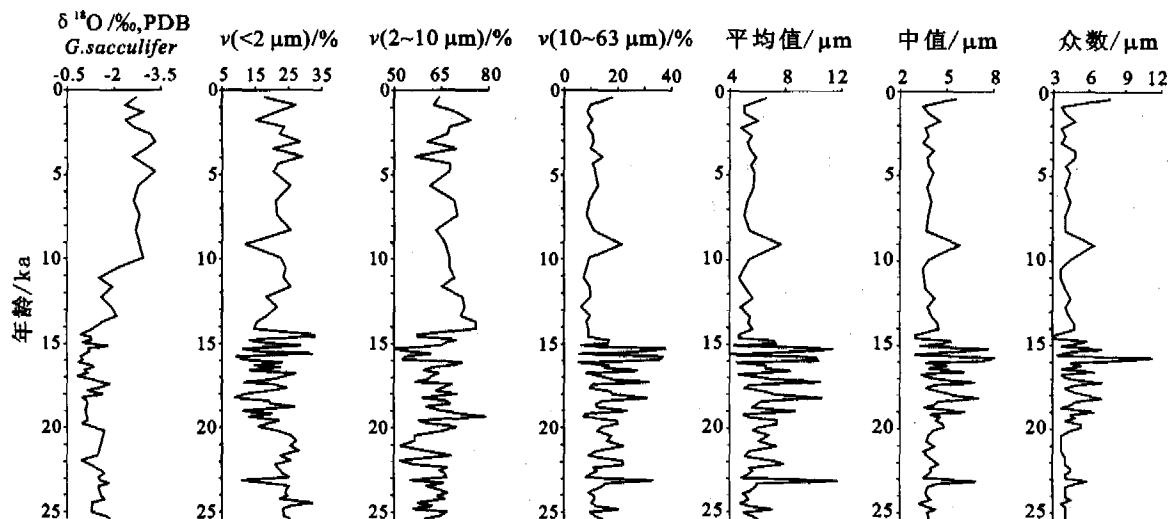


图 3 巽他陆坡 18268-2 孔各粒径组分的相对百分含量及统计参数

Fig. 3 Relative percentages of the grain size fractions and the statistic parameters of Core 18268-2 in the Sunda slope

### 3 讨论

#### 3.1 水动力条件对沉积物粒度分布的影响

McCave 等(1995)通过回归分析和计算机模拟的方法计算了古水流流速的指标,他们认为:粒径在  $10\ \mu\text{m}$  以上的颗粒在搬运过程中表现为非黏结性,以单颗粒的形式对侵蚀和堆积作用产生响应,并且在搬运过程中可以很好地分选;而粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  的部分由于较大的内部凝聚力使颗粒之间相互接合比较紧密,无法在搬运过程中很好地进行分选;粒径大于  $63\ \mu\text{m}$  的粗组分因自身重力很难被大洋底部微弱的水流搬运。因此,他们将粒径在  $10\sim 63\ \mu\text{m}$  之间的粉砂称为可分选粉砂(Sortable Silt,简称 SS)。可分选粉砂的含量与古水流速度呈现出良好的线性相关关系,可以作为古水流速度的指标<sup>[8,12]</sup>。

本文采用双变量相关分析的方法计算了  $v(<2\ \mu\text{m})$ 、 $v(2\sim 10\ \mu\text{m})$  及  $v(10\sim 63\ \mu\text{m})$  与平均值、中值和众数的相关系数,相关系数采用双变量的 Pearson 积矩相关系数。Pearson 相关系数是度量两个变量之间的线性相关程度,其数值在  $-1$  到  $1$  之间变化,相关系数前面的符号表征相关关系的方向,其绝对值的大小代表相关程度的大小,绝对值越接近  $1$  表示两个变量的相关程度越大,相关性越好。表 1 中列出的是通过计算得到的各组变量之间的 Pearson 相关系数。所有计算均在 99% 的置信水平下进行,计算过程通过 SPSS 软件完成<sup>[13]</sup>。

表 1 巽他陆坡 18268-2 孔沉积物各组分百分含量与几个统计量的双变量 Pearson 相关系数

Table 1 Bivariate Pearson correlation coefficients between sediments fraction percentages and several statistical parameters of Sunda slope

	$v(<2\ \mu\text{m})$	$v(2\sim 10\ \mu\text{m})$	$v(10\sim 63\ \mu\text{m})$
平均值	-0.710	-0.552	0.975
中值	-0.872	-0.219	0.890
众数	-0.800	-0.159	0.832

计算结果显示,平均值与  $v(10\sim 63\ \mu\text{m})$  的相关系数最高,达到 0.975;在粒径  $<2\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 10\ \mu\text{m}$  和  $10\sim 63\ \mu\text{m}$  这 3 组粒度组分中,  $v(10\sim 63\ \mu\text{m})$  与平均值、中值和众数的相关程度均最大,且都表现为正相关;  $v(<2\ \mu\text{m})$  与平均值、中值和众数均表现为负相关,相关性也较好;而相对百分含量最高的  $2\sim 10\ \mu\text{m}$  组分百分含量与 3 种统计参数的相关程度均很低。这说明平均粒径的数值决定于粒径在  $10\sim 63\ \mu\text{m}$  之间组分的含量,而与其是否为沉积物中的主要组分无关;粒径在  $2\sim 10\ \mu\text{m}$  之间的组分虽然相对百分含量很高,但却不是决定沉积物平均粒径的关键部分,同样的情况在青子琪等对越南岸外 17954 孔粒度特征研究中也出现过<sup>[14]</sup>。由于  $v(10\sim 63\ \mu\text{m})$  数值的大小是古水流速度的良好指标<sup>[8]</sup>,因此,可以认为沉积物平均粒径的大小是由古水流的速度决定的,由于平均粒径反映的是一个较短时间尺度上的沉积物的粒度分布情况,可以认为沉积物粒度分布在较短时间尺度上的变化是由沉积区的水动力条件控制的。

$v(<2\ \mu\text{m})$ 与平均粒径相关性较好而  $v(2\sim10\ \mu\text{m})$ 与之相关性较差的原因可以解释为:粒径小于  $2\ \mu\text{m}$  的部分由于颗粒间相互作用力很大,相互结合形成粒径较大的颗粒,在搬运过程中实际上也是以  $10\sim63\ \mu\text{m}$  颗粒的形式进行搬运的,因此与古水流速度也表现出较高的相关性,但由于沉积物供应的关系,所以其与平均粒径大小呈负相关;而粒径在  $2\sim10\ \mu\text{m}$  之间的颗粒其相互作用力不足以使它们结合成较大颗粒进行搬运,但却会影响水动力条件变化而对其进行分选,因而与古水流速度表现出较差的相关性。

同时,本研究也说明在平均值、中值和众数 3 个参数中,平均值最好地反映了沉积物粒度的平均分布情况;众数与各组分的相对百分含量相关性均较差,作为反映沉积物粒度平均分布情况的参数误差较大。

### 3.2 沉积物供应对沉积物粒度分布的影响

各组分的相对百分含量( $v(<2\ \mu\text{m})$ 、 $v(2\sim10\ \mu\text{m})$ 及  $v(10\sim63\ \mu\text{m})$ )及平均值、中值和众数等统计参数在 15 ka 左右均发生了明显的变化。我们计算了研究孔位沉积速率随时间的变化情况,也发现在 15 ka 左右沉积速率发生了非常明显的变化,由

之前的 60 cm/ka 迅速降低到 15 cm/ka 左右(图 4)。引起这个变化的原因可解释为:在 14.6~14.3 kaBP 期间北半球冰盖迅速消融,海平面以 5.33 m/100 a 的速度由 -96 m 迅速升高到 -80 m,这一时期在古气候学上称为融冰 1a 期(melt water pulse 1a,简称为 MWP-1a<sup>[6,16]</sup>)。虽然在 MWP-1a 期相对海平面只升高了 16 m,但是由于巽他陆架异常宽阔平坦,陆架坡度只有  $0.03^\circ$ <sup>[17]</sup>,所以十几米的海平面上升造成了海岸线后退了数百千米<sup>[18]</sup>。在此期间,古巽他平原河流体系的中部迅速淹没,并伴随有短时间的河道下切和沉积物充填,造成了大量的陆源碎屑滞留在陆架的中部。此外,大面积红树林沼泽的发育使陆坡接受的陆源硅质碎屑沉积物迅速减少和碳酸盐百分含量迅速上升。巽他陆坡沉积物来源也从河流控制的细粒陆源沉积供应转变为主要接受来自原海岸带地区的再造沉积物<sup>[19]</sup>。受陆源碎屑的减少影响较大的是  $10\sim63\ \mu\text{m}$  组分和  $<2\ \mu\text{m}$  组分。 $2\sim10\ \mu\text{m}$  沉积物实际堆积量也下降了,但由于另外两种组分下降幅度更大,因此在相对百分含量上却表现为上升。同时陆源硅质碎屑的减少还导致了平均值、中值和众数等统计参数值的减小和碳酸盐相对百分含量的上升,这说明沉积物粒度分布的变化总体上是由沉积物供应的变化决定的。

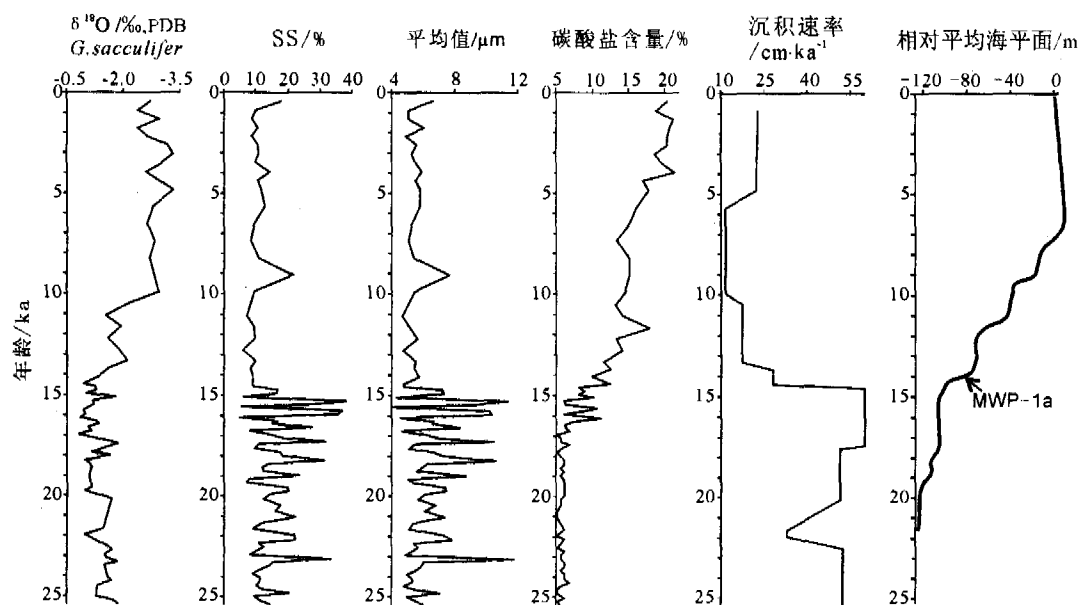


图 4 巽他陆坡 18268-2 孔沉积物粒度分布的控制因素

(图中相对海平面系指西太平洋地区相对平均海平面<sup>[15]</sup>)

Fig. 4 Dominance factor of the grain-size distribution of Core 18268-2 in the Sunda slope

(Relative sea level curve in the figure is that of the West Pacific<sup>[15]</sup>)

## 4 结论

(1) 巽他陆坡下部陆源碎屑的主要组分为 2~10  $\mu\text{m}$  的颗粒,几乎不含粒径大于 63  $\mu\text{m}$  的颗粒。

(2) 平均粒径的数值决定于粒径为 10~63  $\mu\text{m}$  组分的含量,而与其是否为沉积物中的主要组分无关;粒径在 2~10  $\mu\text{m}$  之间的组分虽然相对百分含量很高,但是却不是决定沉积物平均粒径的关键因素。

(3) 沉积物粒度分布在较短时间尺度上的变化是由沉积区的水动力条件控制的,但其大幅度的变化总体上还是由沉积物供应的变化决定的。

致谢:韦春柳参加了碳酸盐含量分析,特此致谢。

### 参考文献 (References)

- [1] Zheng G, Geng J, Wong H, et al. A semi-quantitative method for the reconstruction of eustatic sea level history from seismic profiles and its application to the southern South China Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223: 443-459.
- [2] Sun X, Li X, Luo Y, et al. The vegetation and climate at the last glaciation on the emerged continental shelf of the South China Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 160: 301-316.
- [3] Hutchison C. Marginal basin evolution; the southern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [4] Kuhnt W, Hess S, Jian Z. Quantitative composition of benthic foraminiferal assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 123-157.
- [5] Hu J, Peng P, Jia G, et al. Biological markers and their carbon isotopes as an approach to the paleoenvironmental reconstruction of Nansha area, South China Sea, during the last 30 ka [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 1197-1204.
- [6] Hanebuth T, Stattegger K, Grootes P. Rapid flooding of the Sunda Shelf—a late glacial sea-level record [J]. *Science*, 2000, 288: 1033-1035.
- [7] Stattegger K, Kuhnt W, Wong H, et al. Cruise Report SONNE 115 Sundaflut. Berichte-Reports, Geo.-Paläont. Inst. Univ. Kiel [R]. 1997, 86: 100-101.
- [8] McCave I, Manighetti B, Robinson S. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(3): 593-610.
- [9] Lee M, Wei K, Chen Y. High resolution oxygen isotope stratigraphy for the last 150 000 years in the southern South China Sea; core MD97-2151 [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1999, 10: 239-254.
- [10] 汪品先. 十五万年来的南海 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 28-30. [WANG Pin-xian. The South China Sea during the last 150 000 Years [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 28-30.]
- [11] Wang P, Wang L, Bian Y, et al. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles [J]. *Marine Geology*, 1995, 127: 145-165.
- [12] Bianchi G, Hall I, McCave I, et al. Measurement of the sortable silt current speed proxy using the Sedigraph 5100 and Coulter Multisizer IIe: precision and accuracy [J]. *Sedimentology*, 1999, 46: 1001-1014.
- [13] Andy Field. *Discovering Statistics Using Spss for Windows* [Z]. London: Sage Publications Inc, 2000.
- [14] 青子琪, 刘连文, 郑洪波. 越南岸外夏季上升流区 22 万年来东亚季风的沉积与地球化学记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 67-72. [QING Zi-qi, LIU Lian-wen, ZHENG Hong-bo. Sedimentological and geochemical records of East Asian Monsoon in Summer Upwelling Region off the coast of Vietnam for the past 220 000 Years [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, 25(2): 67-72.]
- [15] Liu J, Milliman J, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 45-67.
- [16] Fairbanks R. A 17 000-year glacio-eustatic sea level record; influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation [J]. *Nature*, 1989, 342: 637-642.
- [17] Wong H, Lüdmann T, Haft C, et al. Quaternary sedimentation in the Molengraaf paleo-delta, northern Sunda Shelf (southern South China Sea) [C]//Sidi F, Nummedal D, Imbert P, et al. *Tropical Deltas of Southeast Asia and Vicinity-Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*. SEPM Spec. Publ. 76. 2003.
- [18] Hanebuth T, Stattegger K. Depositional sequences on a late Pleistocene Holocene tropical siliciclastic shelf (Sunda Shelf, southeast Asia) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 113-126.
- [19] Steinke S, Kienast M, Hanebuth T. On the significance of sea-level variations and shelf paleo-morphology in governing sedimentation in the southern South China Sea during the last deglaciation [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 179-206.

## DOMINANCE FACTORS OF THE TERRIGENOUS SEDIMENT GRANULOMETRIC DISTRIBUTION IN THE LOWER SUNDA SLOPE

ZHAO Yu-long, LIU Zhi-fei, CHENG Xin-rong, JIAN Zhi-min

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** High resolution grain size analysis was performed on sediments of Core 18268-2, drilled during the "SONNE-115" cruise. Detailed granulometric distribution record of lower Sunda slope sediments for the last 25 ka was obtained. The analysis revealed that sediments in this core were fine grained, predominated by 2~10  $\mu\text{m}$  grains and short of grains larger than 63  $\mu\text{m}$ . Statistical parameters such as mean and median values of the grain size were highly correlative with the relative percentage of the 10~63  $\mu\text{m}$  fraction, implying that short-term change of the sediment grain size distribution was controlled by the paleocurrent speed. All statistical parameters and the relative percentage of the fractions underwent a notable transformation at about 15 ka, attributed to the rapid rising of the sea level during the MWP-1a (Melt Water Pulse 1a, 14.6~14.3 ka). Simultaneous with the rapid flooding of the Sunda shelf, the coastline retreated for several hundred kilometers, which changed the sediment supply of the region dramatically. We can conclude that the relative long-term variation of the siliclastic sediment granulometric distribution was controlled by the sediment supply.

**Key words:** granulometric distribution; dominance factor; sediment supply; hydrodynamics; Sunda slope