

济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用

向荣¹, 杨作升², 郭志刚², Saito Y.³, 范德江², 肖尚斌¹, 陈木宏¹

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266003

3. Geological Survey of Japan, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567, Japan

摘要: 利用激光粒度仪对位于东海陆架济州岛西南泥质区的 B2 孔进行了沉积物粒度分析, 根据标准偏差变化检出了 B2 孔含有 4 个粒度组分: >65.6 、 $65.6\sim 10.5$ 、 $10.5\sim 1.3$ 和 $<1.3\ \mu\text{m}$, 其中 $>65.6\ \mu\text{m}$ 粗组分含量很低, 主要是以底栖有孔虫为主的生源沉积。各组分平均粒径和粒度含量随孔深的变化显示了 $65.6\sim 10.5\ \mu\text{m}$ 组分在 B2 孔含量较高(21%~30%), 变化最明显, 是该孔对环境变化最敏感的粒度组分。研究表明该敏感组分的粒度含量和平均粒径变化主要受东亚冬季风的强弱变化制约, 其变化恢复的近 2 ka 来东亚冬季风变化和中国东部气候变化序列具有很好的一致性, 证明 $65.6\sim 10.5\ \mu\text{m}$ 粒度组分可以作为东亚冬季风的替代指标。

关键词: 东海泥质区; 环境敏感粒度组分; 东亚冬季风; 气候变化; 全新世。

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2005)05-0582-07

收稿日期: 2005-05-17

Paleoenvironmental Implications of Grain-Size Component Variations in the Mud Area Southwest off Cheju Island, ECS

XIANG Rong¹, YANG Zuo-sheng², GUO Zhi-gang², Saito Y.³, FAN De-jiang², XIAO Shang-bin¹, CHEN Mu-hong¹

1. Key Lab of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. College of Marine Geosciences, China Ocean University, Qingdao 266003, China

3. Geological Survey of Japan, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

Abstract: Grain-size analysis of sediment core B2, retrieved from mud area southwest off Cheju Island, East China Sea (ECS), was carried out using a Malvern 2000 grain-size analyzer. 4 grain-size components, >65.6 , $65.6-10.5$, $10.5-1.3$ and $<1.3\ \mu\text{m}$, can be easily identified according to variations in the grain-size standard deviation. Mainly containing benthic foraminifera, the coarse component ($>65.6\ \mu\text{m}$) has a very low content, and can be neglected. Downcore variations of the mean-size and content of the other 3 components show that the $65.6-10.5\ \mu\text{m}$ component 1 is relatively high, 21%–30%, and fluctuates most strongly, suggesting it is the environmentally sensitive grain-size component (ESGSC) in core B2. The mean-size and content of ESGSC in the studied mud area appears to have been mainly controlled by variations in the strength of the East Asian winter monsoon, with high content and mean-size of ESGSC when the winter monsoon was strong. The winter monsoon variations reconstructed according to this relationship are consistent with climate series records from eastern China over the past 2 000 years, indicating that the grain-size component of $65.6-10.5\ \mu\text{m}$ can be used as a proxy of the East Asian winter monsoon variation.

Key words: mud deposits, East China Sea; environmentally sensitive grain size component; East Asian winter monsoon; climate changes; Holocene.

人类在对其未来生存的环境变化进行预测时,往往需要从古气候、古环境的研究中寻求类比、发现规律,而古气候、古环境研究的当务之急是寻求高分辨率的古环境记录(汪品先和翦知湓,1999). 国际全球变化核心计划 PAGES 的一个重要研究内容就是利用代用指标(地质记录)重建最近 2 ka 以来气候和环境变化,要求分辨率达到 20 a,最终要达到年或季节性的变化(Eddy, 1992). 有关最近 2 ka 以来的高分辨率气候环境记录目前多来自于陆地,主要是通过树轮(Esper *et al.*, 2002; 邵雪梅等,2004)、冰心(姚檀栋和 Thompson, 1992; Grootes *et al.*, 1993)、泥炭(洪业汤等,1997; 徐海等,2002)、石笋(马志邦等,2002)以及历史文献记录(竺可桢,1973; 葛全胜等,2002)等来获得的. 海洋作为全球最大的组成部分,在全球变化研究中起着举足轻重的作用,因此,如何从海洋中获取高分辨率气候环境变化记录对于全面认识气候变化规律至关重要. 然而深海沉积物由于沉积速率相对较低,很难获取高分辨率的地质记录,而陆架泥质区因沉积速率较高保存有高分辨率的沉积记录(刘健等,1999),为分析超短尺度的海洋气候环境变化提供了良好的材料. 但是如何从陆架泥质沉积记录中提取出能够反映气候环境变化的代用指标,则仍需要大量的研究工作.

近年来,随着激光粒度仪的出现,粒度测量结果的重复性和准确性得到了很大提高,样品测量速度明显加快,致使利用沉积物粒度分析进行气候古环境演化的研究也得到了很好的发展,取得了一系列的研究成果(Xiao *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1999; Prins *et al.*, 2000; Stuu *et al.*, 2002; Ding *et al.*, 2002; 孙有斌等,2003),表明了粒度分析在古环境演化研究中有良好的应用前景. 本文以济州岛西南泥质区的 B2 孔为研究对象,分析泥质区沉积物粒度资料中反映环境变化最为敏感的粒度组分,探讨该环境敏感粒度组分的环境指示意义,建立了东亚冬季风的代用指标,据此重建近 2 ka 来东亚冬季风高分辨率的变化历史.

1 材料和样品处理方法

本研究所用样品系中国海洋大学“东方红 2 号”考察船执行“2003 年东海陆架水交换调查航次”时所取的振动柱状样. B2 孔(125°45'E, 31°45'N)位于东海陆架济州岛西南泥质区内(图 1),水深 64 m,柱

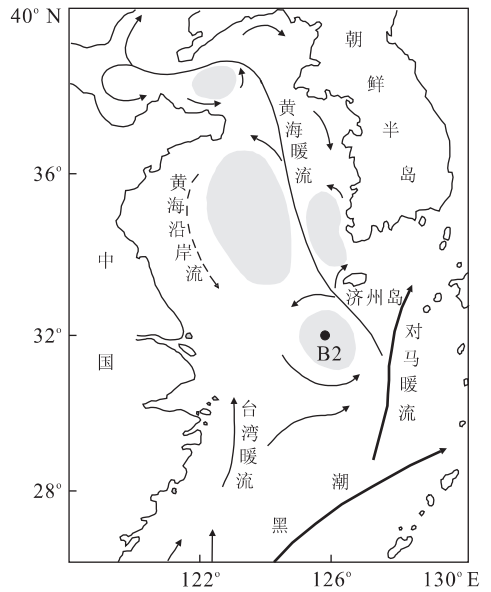


图 1 研究区流系和 B2 孔站位分布(据刘健等,1999 改绘)
Fig. 1 Location of the studied core B2 and current system in the study area

阴影部分对应泥质沉积区

长 4.03 m,整个岩心以青灰色粉砂质粘土为主,在 3.27~3.47 m 处为一明显的砂质粉砂层. 本文主要对 B2 孔 3.27 m 以上的样品进行分析(下文 B2 孔特指该段),该段样品为均一的青灰色粉砂质粘土,代表了一个连续的泥质区沉积序列,是高分辨率古气候环境的良好材料. 样品按 2 cm 的间距进行了分割,共获取样品 163 个.

由于不同时期的沉积物往往都是多种物源和沉积动力过程的混合产物,因此在粒度分析时通常要进行样品前处理,以求达到不同的研究目的(孙有斌等,2001). 如对经历了较强风化成壤改造的古土壤通常利用前处理方法提取石英颗粒来进行粒度分析(Xiao *et al.*, 1995),而对于深海沉积物则视不同要求去除有机质、钙质或硅质生源物质(Stuu *et al.*, 2002; 孙有斌等,2003),从多物源、多动力条件影响的沉积物中提取一至两个能够反映气候环境变化的组分. 济州岛西南泥质区地处东海上陆架,沉积物主要以黄河来源的陆源物质为主(范德江等,2002b),该区沉积物生源组分主要为底栖有孔虫,并且主要分布在只占 0.3% 的 $>63 \mu\text{m}$ 的粗组分中,表明泥质区沉积物中的生物源组分含量极低. 而细粒度组分多为来自黄河的陆源物质,包括较多的细粒碳酸盐颗粒(范德江等,2002a),为更好地反映陆源悬浮物搬运沉积时的粒度特征,在粒度分析的前处理过程

中只加入 10% H_2O_2 溶液去除有机质的影响,而保留沉积物中的碳酸盐。

粒度分析在中国海洋大学海洋地球科学学院用英国 Malvern 2000 型激光粒度仪进行测试,仪器测量范围为 $0.02\sim 2\,000\ \mu m$, 粒度分辨率为 0.01ϕ , 重复测量的相对误差 $<3\%$ 。对所有 163 个样品进行了粒度分析,部分样品还进行了重复测试,显示了良好的可重复性。

从 4 个样品层位分别挑选出底栖有孔虫混合种在美国 Beta Analyses 公司进行了 AMS¹⁴C 年代测试,并对原始测年数据利用 CALIB4.3 程序(Stuiver *et al.*, 1998)进行了日历年龄校正,各深度年代结果对应如下: 51 cm 为 619 a; 97 cm 为 987 a; 165 cm 为 1 222 a; 249 cm 为 1 902 a。

2 主要粒度组分的环境指示意义

在运用沉积物粒度数据进行沉积序列中的古环境分析时,通常需把序列中不同物质来源或不同动力条件下的粒度组分分离,再详细研究不同组分所代表的地质环境意义,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。目前从沉积物粒度中进行粒度组分分离的方法主要有 3 种: (1) 孙东怀等(2001)曾以 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进行了组分分离; (2) Prins *et al.* (2000) 和 Stuu *et al.* (2002) 根据端元粒度模型(end-member modeling)对沉积序列中的粒度组分进行分离; (3) 王律江等(Wang *et al.*, 1999)和孙有斌等(2003)则是通过计算粒度—标准偏差的变化来获得粒度组分的个数和分布范围。本文主要是依据粒度—标准偏差的变化对 B2 孔的粒度组分进行了分离。

从 B2 孔的粒度频率分布曲线(图 2a)可以看出,其形态和分布范围大体一致,主要表现为—明显的单峰,指示了整个 B2 孔的沉积环境相对稳定控制因素为较单一的物源或水动力条件。因此,这样的沉积物是反映高分辨率气候环境变化的良好材料。

图 2b 显示了利用粒度—标准偏差变化得出的 B2 孔的 4 个粒度组分,图中较高标准偏差值所对应的粒度代表不同粒度组分的综合峰值,分别出现在 $0.8, 5.1, 21.9$ 和 $522\ \mu m$ 。根据峰值和曲线变化,可将四大粒度组分范围分别划为 $>65.6\ \mu m$ (4), $65.6\sim 10.5\ \mu m$ (1), $10.5\sim 1.3\ \mu m$ (2) 和 $<1.3\ \mu m$

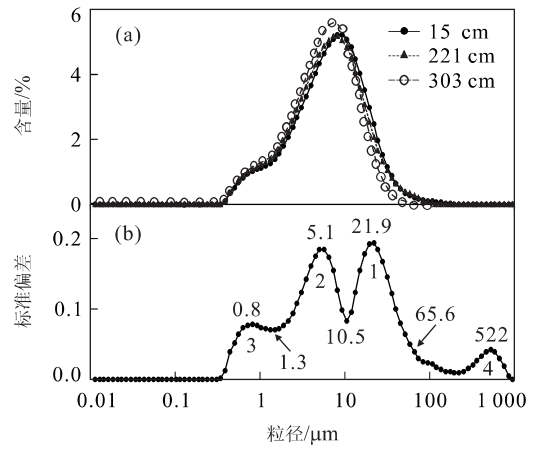


图 2 B2 孔粒度频率分布曲线(a)和标准偏差随粒级的变化(b)

Fig. 2 Grain-size frequency distribution (a) and grain-size standard deviation variation (b) in core B2

(3)。其中 $>65.6\ \mu m$ 组分为粗组分,标准偏差值相对较低。根据有孔虫冲样分析得知 $>65.6\ \mu m$ 主要为生源底栖有孔虫,平均含量约 0.3% ,与粒度分析结果非常一致,表明了该组分所代表的生源组分在泥质区含量极低。由于 $<65.6\ \mu m$ 的粒度含量在整个 B2 孔中含量非常高,平均 99.7% ,因此,我们主要考虑 $<65.6\ \mu m$ 以下 3 个粒度组分反映的环境变化。组分 1 和组分 2 的标准偏差值相对较高,组分 3 的标准偏差值相对较低(图 2b),根据各组分的分布范围可分别计算出各组分的粒度含量和平均粒径,如图 3 所示,但是这些粒度组分的古环境意义是什么呢?

对济州岛西南泥质区的研究表明,该区是东海细颗粒物质的“汇”(Yang *et al.*, 1994; 郭志刚等, 1995)。其沉积物主要来源于黄河扩散系统物质(Milliman *et al.*, 1985; Demaster *et al.*, 1985),经过黄海沿岸流输送而来(Milliman *et al.*, 1985; 郭志刚等, 1995)。黄海、东海陆架泥质区的悬浮体呈明显的“夏储冬输”格局(杨作升等, 1992; 郭志刚等, 1999; 孙效功等, 2000),夏季悬浮体浓度含量很低,生物骨屑量超过了矿物碎屑,而冬季悬浮体含量明显增加,以矿物碎屑为主。在冬季盛行的西北季风影响下,黄海沿岸流向东扩散明显加强,同时,冬季风暴引起的苏北老黄河口水下三角洲海底沉积物发生再悬浮,使悬浮体含量高出夏季数倍(秦蕴珊等, 1989),也通过黄海沿岸流向东输送。各类陆架悬浮体在冬季总体是向东输送(杨作升等, 1992; 孙效功等, 2000),最终在济州岛西南形成泥质沉积物区。该

区的反气旋性涡旋在冬季最强烈(毛汉礼等,1986),水深 60 m 以上,一般的冬季风暴不能使海底沉积物重新悬浮,并且涡旋中心动力较弱,有利于悬浮体的沉积(Graber *et al.*, 1989). 这样,冬季黄海沿岸流输送的充沛的物源物质与强烈的环流—涡旋动力的“捕获”作用相结合(郭志刚等,1999),导致悬浮体在该区沉积下来,形成了扰动作用较弱的泥质沉积记录,非常有利于进行高分辨率的古气候环境研究.

因此,B2 孔沉积物的粒度变化反映的主要是黄海沿岸流输送的陆源悬浮体的粒度变化,与冬季风暴和黄海沿岸流的强弱密切相关. 强烈的冬季风暴可以引起苏北老黄河口水下三角洲悬浮体含量增高、粒度变粗(秦蕴珊等,1989),黄海沿岸流的增强也可能导致输送的悬浮体粒度变粗,二者都与东亚冬季风的强弱密切相关. 增强的东亚冬季风可以导致冬季风暴和黄海沿岸流加强,从而引起泥质区沉积物粒度变粗. 因此,泥质区沉积物粒度最终反映的是东亚冬季风的强弱变化.

既然 B2 孔的物源和动力条件相对单一,为何从粒级和标准偏差变化曲线上却表现为 3 个明显的陆源粒级组分呢? 究竟哪一种陆源组分对东亚冬季风变化最为敏感呢? 从图 3 可以看出,沉积物中的粒度变化主要受组分 1 介于 $65.6\sim 10.5\ \mu\text{m}$ 粒级含量的变化控制,这些粗粒陆源物质可能是反映冬季风强弱变化最重要的指标. 组分 3 位于粘土粒级范围,其平均粒径和平均含量都大致保持在一稳定的水平,表明该组分受东亚冬季风的强弱变化影响不大. 这可能与粘土粒级的起动力较弱有关,无论冬季风强弱如何变化,该组分在陆源物质中的输运量基本保持一致. 组分 2 和组分 1 的粒度含量都呈现出明显的波动变化(图 3),他们的标准偏差值也最高,表明这两者对东亚冬季风变化都很敏感. 然而从平均粒径的变化上看,组分 2 在整个 B2 孔中无明显的变化,而组分 1 的平均粒径和粒度含量不仅表现出明显的波动,并且变化趋势非常相似,这表明了组分 2 的粒度含量主要是由组分 1 的粒度含量所引起的被动变化,所以两者在粒度含量上的变化成反相关. 因此,B2 孔中粒度变化主要受组分 1 的粒度变化控制,组分 1 含量增加,粒度就变粗,同时组分 2 的含量就相对减少,反之亦然. 所以,组分 1 是反映东亚冬季风强弱波动的敏感粒度组分. 它的粒度含量和平均粒径则可以作为表征东亚冬季风强弱变化的 2 个替代指标. 东亚冬季风增强时,组分 1 的粒度

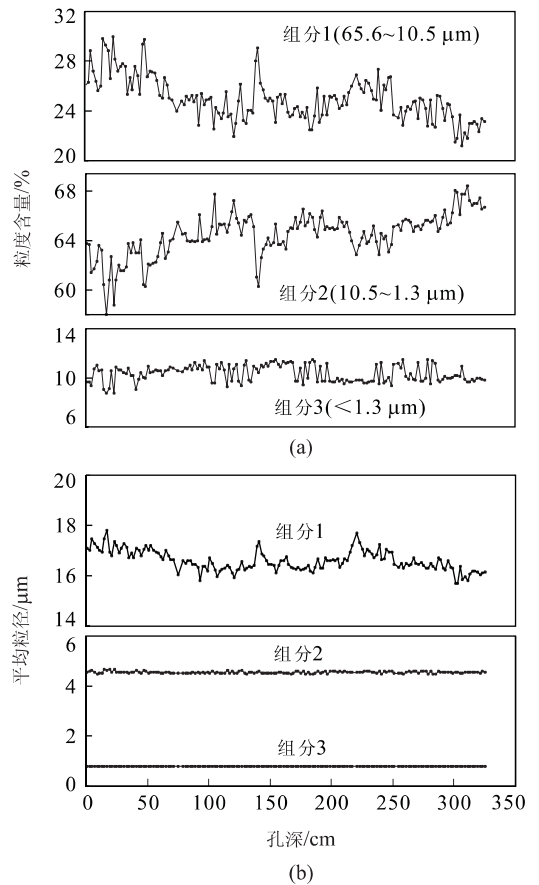


图 3 B2 孔 3 个主要粒度组分的粒度含量(a)和平均粒径变化(b)

Fig. 3 Content (a) and mean-size variations (b) of 3 main grain-size components in core B2

含量增加、平均粒径变粗. 图 4a, 4b 标出了 B2 孔冬季风 2 个代用指标的大致变化情况, 组分 1 粒度含量的波动范围为 $21.2\% \sim 30.0\%$, 平均含量 25.0% , 平均粒径的波动范围为 $15.6 \sim 17.8\ \mu\text{m}$, 平均 $16.6\ \mu\text{m}$ (图 4), 反映了近 2 000 年以来东亚冬季风有明显的波动变化.

3 东亚冬季风粒度指标的应用检验

在陆地黄土的研究中,粒度是反映东亚冬季风变化的一个非常有用的指标(Xiao *et al.*, 1995). 然而受黄土的沉积速率所限,很难获得包括百、十年际尺度的超高分辨率的东亚冬季风变化记录. 以上根据济州岛西南泥质区的沉积物粒度分析建立的东亚冬季风替代指标,是否较好地反映了短尺度上东亚冬季风的变化呢? 下面利用 B2 孔恢复的东亚冬季风记录与中国其他地区的气候变化序列进行比较,

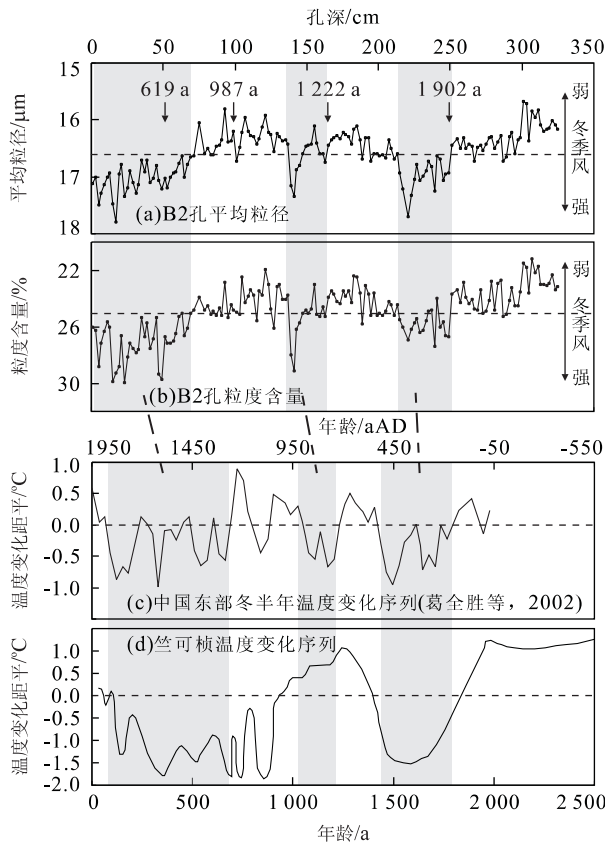


图 4 B2 孔记录的东亚冬季风演化与中国其他气候变化序列的对比

Fig. 4 Comparison of East Asian winter monsoon changes recorded in core B2 with other climate series reconstructed from China

箭头所指层位为 AMS14C 测年层位, 数字为对应的日历年龄

来检验代用指标的可靠性。

根据现代气象资料, 郭其蕴(1994)研究了 1951~1990 年近 40 年的东亚冬季风变化与中国气温的变化关系, 发现冬季风源地的冷高压强度与我国的气温呈明显的负相关(西南高原地区除外), 即冬季风愈强, 我国的气温愈低, 也即强盛的东亚冬季风对应于气候变化的寒冷期。从 B2 孔的冬季风记录与气候记录对比的结果来看, 这种对应关系得到了很好的体现。

从图 4 可以看出, B2 孔记录的近 2 ka 来东亚冬季风变化有明显的波动, 总体上呈弱—较强盛—弱—强盛的变化趋势, 与竺可桢(1973)的气候变化序列反映出的冷暖波动大体一致, 即冬季风强盛期对应于气候变化的寒冷期。B2 孔记录有 2 个明显的东亚冬季风强盛期, 分别位于孔深 0~70 cm 和 213~250 cm, 还有一次在冬季风较弱阶段的突然加强事

件, 位于孔深 136~166 cm 处(图 4)。这些明显的冬季风强盛期与中国东部冬半年温度变化反映的气候冷期对应很好, 即出现在 210~560 AD(1740~1390 a)的冷期、1320~1910 AD(630~40 a)的小冰期和 780~920 AD(1170~1030 a)的小冷期, 均在历史文献中有广泛记录(葛全胜等, 2002)。所以, 经 AMS¹⁴C 年代数据控制的 B2 孔粒度记录所反映的冬季风强盛期和其他气候记录揭示的冷期相一致, 说明利用粒度代用指标可以很好地恢复东亚冬季风的演化历史。

4 结论

陆架泥质区汇集的细颗粒陆源物质是分析高分辨率的海洋气候环境变化记录的良好材料。本文利用激光粒度仪测量准确、迅速、重复性高的优点, 分析了济州岛西南泥质区沉积物近 2000 年来的粒度变化, 从中提取出对沉积环境变化敏感的粒度组分, 建立了反映东亚冬季风变化的替代指标。结果表明 65.6~10.5 μm 粒度组分是该泥质区反映冬季风演化最敏感的组分, 较好的记录了 210~560 AD、780~920 AD 和 1320~1910 AD 三冷期冬季风增强的气候变化历史, 反映了粒度分析在提取陆架泥质区高分辨率环境指标上有很好的应用前景。

致谢: 中国海洋大学海洋地球科学学院的孙晓霞、潘燕俊、李谷祺等和“东方红 2 号”考察船全体船员协助进行了海上取样工作, 潘燕俊、毕乃双等协助进行了沉积物粒度分析, 海洋沉积与环境地质国家重点实验室的石学法、韩贻兵和王昆山在样品分割和磁化率测量时提供了帮助, 谨此表示感谢。

References

- Demaster, D. J., Mckee, B. A., Nitrouer, C. A., et al., 1985. Rates of sediments accumulation and particles reworking based on radiochemical measurements from shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4: 143-158.
- Ding, Z. L., Derbyshire, E., Yang, S. L., et al., 2002. Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}O$ record. *Paleoceanography*, 17(3): 1029/2001PA000725.
- Eddy, J. A., 1992. Past global changes project: Proposed implementation plans for research activities. *Global Chan-*

- ges Report, No. 19, Sweden, Stockholm: IGBP, 1—112.
- Eesper, J., Cook, E. R., Schweingruber, F. H., 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295: 2250—2253.
- Fan, D. J., Sun, X. G., Yang, Z. S., et al., 2002a. A mathematical model on the quantitative provenance identification; Take the identification of the surface sediment sources from ECS as example. *Acta Sedimentol. Sinica*, 20(1): 30—33 (in Chinese with English abstract).
- Fan, D. J., Yang, Z. S., Wang, W. Z., 2002b. The composition and discrepancy of carbonate in sediments from Yangtze and Huanghe Rivers. *Prog. Natural Sci.*, 12(1): 60—64 (in Chinese with English abstract).
- Ge, Q. S., Zheng, J. Y., Man, Z. M., et al., 2002. Reconstruction and analysis on the series of winter-half-year temperature changes over the past 2 000 years in eastern China. *Earth Sci. Frontiers*, 9(1): 169—181 (in Chinese with English abstract).
- Graber, H. C., Beardsley, R. C., Grain, W. D., 1989. Storm-generated waves and sediment resuspension in the East China and Yellow Seas. *J. Phys. Oceanogr.*, 19: 1039—1059.
- Grootes, P. M., Stuiver, M., White, J. W. C., et al., 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 366: 552—555.
- Guo, Q. Y., 1994. Relationship between variations of East Asia winter monsoon and temperature anomalies in China quarterly. *J. Applied Meteorol.*, 5(2): 218—225 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Lei, K., et al., 1999. Seasonal variation of the sedimentary dynamics processes for the mud area in the northern East China Sea. *J. Ocean Univ. Qingdao*, 29(3): 507—513 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Wang, Z. X., 1995. Influence of water masses on the distribution of sea-floor sediments in the Yellow Sea and East China Sea. *J. Ocean Univ. Qingdao*, 25(1): 75—83 (in Chinese with English abstract).
- Hong, Y. T., Jiang, H. B., Tao, F. X., et al., 1997. Temperature variations in the past 5 000 years inferred from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose from Jinchuan, China. *Science in China (Ser. D)*, 27(6): 520—524 (in Chinese).
- Liu, J., Li, S. Q., Wang, S. J., et al., 1999. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea warm current since the last deglaciation. *Mar. Geol. Quat. Geol.*, 19(1): 13—24 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. B., Li, H. C., Xia, M., et al., 2002. Paleotemperature changes over the past 3 000 years in eastern Beijing, China; A reconstruction based on Mg/Sr records in a stalagmite. *Chinese Science Bulletin*, 48(4): 395—400.
- Mao, H. L., Hu, D. X., Zhao, B. R., et al., 1986. A cyclonic eddy in the northern ECS. *Studia Marina Sinica*, 27: 23—31 (in Chinese with English abstract).
- Milliman, J. D., Bestdley, K. C., Yang, Z. S., et al., 1985. Modern Huanghe derived on the outer shelf of the East China Sea; Identification and potential mud-transport mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4: 175—188.
- Prins, M. A., Postma, G., Weltje, G., 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary; The Makran continental slope. *Mar. Geol.*, 169: 351—371.
- Qin, Y. S., Li, F., Xu, S. M., et al., 1989. Study on the suspended particulate matter in the water mass of the southern Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 20(2): 101—111 (in Chinese with English abstract).
- Shao, X. M., Huang, L., Liu, H. B., et al., 2004. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1 000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China (Ser. D)*, 34(2): 145—153 (in Chinese).
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., et al., 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration 24 000—0 cal a. *Radiocarbon*, 40: 1041—1083.
- Stuut, J. B., Prins, M. A., Schneider, P. R., et al., 2002. A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa; Inference from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Mar. Geol.*, 180: 221—233.
- Sun, D. H., An, Z. S., Su, R. X., et al., 2001. Numerical partitioning of the sedimentary components and their palaeoclimatic implications. *Prog. Natural Sci.*, 11(3): 269—276 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. G., Fang, M., Huang, W., 2000. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf. *Oceanol. Limnol. Sinica*, 31(6): 581—587 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. B., Gao, S., Li, J., 2003. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting. *Chinese Science Bulletin*, 48(2): 184—187.

- Sun, Y. B., Gao, S., Lu, H. Y., 2001. Influence of different pretreatment procedures on the particle-size distribution of surface sediments in the northern Yellow Sea. *Oceanol. Limnol. Sinica*, 32(6): 112—118 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Sarnthein, M., Erlenheuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar. Geol.*, 156: 245—284.
- Wang, P. X., Jian, Z. M., 1999. Searching high-resolution paleoenvironmental records: A review. *Quat. Sci.*, (1): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J. L., Porter, S. C., An, Z. C., et al., 1995. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Chinese Loess Plateau of central China during the last 130 000 yr. *Quat. Res.*, 43: 22—29.
- Xu, H., Hong, Y. T., Lin, Q. H., et al., 2002. Temperature variations in the past 6 000 years inferred from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose from Hongyuan, China. *Chinese Science Bulletin*, 47(18): 1578—1584.
- Yang, Z. S., Guo, Z. G., Wang, Z. X., et al., 1992. The macro pattern of suspended particulate matter transport to the eastern open ocean on the Yellow and East China Sea shelf. *Acta Oceanol. Sinica*, 14(2): 81—90 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Saito, Y., Guo, Z. G., et al., 1994. Distal mud areas as a material sink in the East China Sea. Proceedings of international symposium on global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean atmosphere system. Hokkido University, Sapporo, 1—6.
- Yao, T. D., Thompson, L. G., 1992. Temperature variation record of the past 5 000 years from Dundee ice core. *Science in China (Ser. B)*, (10): 1089—1093 (in Chinese).
- Zhu, K. Z., 1973. A preliminary study on the climate fluctuations during the last 5 000 years in China. *Science Sinica*, 16: 226—237 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 范德江, 孙效功, 杨作升, 等, 2002a. 沉积物物源定量识别的非线性模型规划. *沉积学报*, 20(1): 30—33.
- 范德江, 杨作升, 王文正, 2002b. 长江、黄河沉积物中碳酸盐组成及差异. *自然科学进展*, 12(1): 60—64.
- 葛全胜, 郑景云, 满志敏, 等, 2002. 过去 2 000 a 中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析. *地学前缘*, 9(1): 169—181.
- 郭其蕴, 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. *应用气象学报*, 5(2): 218—225.
- 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等, 1999. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化. *青岛海洋大学学报*, 29(3): 507—513.
- 郭志刚, 杨作升, 王兆祥, 1995. 黄东海海域水团发育对底质沉积物分布的影响. *青岛海洋大学学报*, 25(1): 75—83.
- 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等, 1997. 近 5 ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *中国科学(D 辑)*, 27(6): 520—524.
- 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等, 1999. 末次冰消期以来黄海海面变化与黄海暖流的形成. *海洋地质与第四纪地质*, 19(1): 13—24.
- 马志邦, 李红春, 夏明, 等, 2002. 距今 3 ka 来京东地区的古温度变化: 石笋 Mg/Sr 记录. *科学通报*, 47(23): 1829—1834.
- 毛汉礼, 胡敦欣, 赵保仁, 等, 1986. 东海北部的一个气旋型涡旋. *海洋科学集刊*, 27: 23—31.
- 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等, 1989. 南黄海海水中悬浮体的研究. *海洋与湖沼*, 20(2): 101—111.
- 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等, 2004. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. *中国科学(D 辑)*, 34(2): 145—153.
- 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.
- 孙效功, 方明, 黄伟, 2000. 黄东海陆架区悬浮体输送的时空变化规律. *海洋与湖沼*, 31(6): 581—587.
- 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.
- 孙有斌, 高抒, 鹿化煜, 2001. 前处理方法对北黄海沉积物粒度的影响. *海洋与湖沼*, 32(6): 112—118.
- 汪品先, 翦知湣, 1999. 寻求高分辨率的古环境记录. *第四纪研究*, (1): 1—17.
- 徐海, 洪业汤, 林庆华, 等, 2002. 红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化. *科学通报*, 47(15): 1181—1186.
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等, 1992. 黄东海陆架悬浮体向东部深海区输送的宏观格局. *海洋学报*, 14(2): 81—90.
- 姚檀栋, Thompson, L. G., 1992. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. *中国科学(B 辑)*, (10): 1089—1093.
- 竺可桢, 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, (2): 168—189.