

南海北部 17937 岩心四万年来古环境变化的分子有机地球化学记录

李 丽, 王 慧, 汪品先

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 以分子有机地球化学为手段对南海北部四万年来的古环境古气候研究表明, U_{37}^k -SST 表层水温在冰期、间冰期平均范围分别为 27 °C 和 24 °C, LGM 与全新世温差达 4.5 °C; 以高分子量烷烃所代表的陆源物质输入和长链不饱和酮化合物所代表的海洋初级生产力都呈现冰期高、间冰期低特征, 表明冰期时陆源物质输入的增加和海洋表层生产力的提高; 正构烷烃 C_{31}/C_{27} 记录了南方大陆的植被由冰期时草本植物占优势向间冰期时木本植物占优势的转变, 说明南海在末次冰期以来气候的不稳定性, 和海陆生态系统对气候变化的响应以及分子有机地球化学在古环境古气候研究中的巨大潜力。

关键词: 生物地球化学; 生物标志化合物; 南海; 古气候。

中图分类号: P532; P593

文章编号: 1000-2383(2008)06-0793-07

收稿日期: 2008-01-22

Molecular Organic Geochemical Record of Paleoenvironmental Changes of Core 17937 in Northern South China Sea Since 40 ka

LI Li, WANG Hui, WANG Pin-xian

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

Abstract: Molecular organic geochemical analysis of Core 17937 in the northern South China Sea has provided useful information on the paleoenvironmental change in the 40 ka and revealed that the average surface temperature of U_{37}^k -SSTs in glacial and interglacial is 27 °C and 24 °C respectively, resulting in a difference of 4.5 °C between Holocene and LGM. The terrestrial input, mainly consisting of high molecular weight alkanes and marine primary productivity, constituting long chain alkenones, both exhibited a high value in glacial and low value in interglacial, which suggests the supply of organic matter from the land is enhanced and the productivity in the ocean during glacial is increased. Alkane ratio of C_{31}/C_{27} indicated that the predominant plants in South China changed from grass during glacial to tree during interglacial. All the results show the instability of climate since the last glacial in the SCS, and the significant role played by marine and terrestrial ecosystems in climate changes, as well as the potential of molecular organic geochemistry in paleoenvironment and paleoclimate studies.

Key words: biogeochemistry; molecular biomarker; South China Sea; paleoclimate.

南海作为西太平洋最大的边缘海, 其独特的地理位置和较高的沉积速率使其成为古气候古环境学研究的一个关键区域。近年来南海古海洋学研究在深海地层学、古气候变化、快速气候事件、大洋碳储库的长周期变化等各方面都已取得了一系列成果, 并得到国际同行的认可(汪品先等, 2003; Wang *et al.*, 2004; 田军和汪品先, 2006)。但从海洋生物有

机地球化学角度去考察南海的古海洋古气候研究, 与其他方法相比仍然比较薄弱。

分子生物标志化合物是地质沉积记录中与原始生物母质有关的特殊分子, 根据地质体中检测到的不同种类生物标志化合物的组成、含量变化可以重建沉积地的古气候、古环境变迁, 从分子水平探讨过去环境的演变历史。例如以长链烯酮不饱和度重建

表层海水温度,根据 TOC 和叶绿素含量恢复海洋表层生产力状况,根据不同浮游藻类生化化合物探讨海洋浮游植物群落交替,根据有机碳同位素变化恢复陆地植被变迁史 (Zhao *et al.*, 2006a). 近十几年,南海也展开了生物有机地球化学方面的研究,尤以 U_{37}^k -SST 方法恢复过去海水的表层水温应用居多 (Pelejero *et al.*, 1999a, 1999b; Kienast *et al.*, 2001; Zhao *et al.* 2006b), 其他方面的研究相对较少 (Hu *et al.*, 2002, 2003a, 2003b; Jia *et al.*, 2003; Pelejero, 2003). 本文以生物有机地球化学为手段,提取了与温度、陆地植被及海洋生产力演变信息相关的系列烷烃、长链烯酮化合物,探讨了冰期、间冰期循环中南海北部四万年来的古气候古环境变迁。

1 研究材料及方法

1.1 研究材料

本研究所分析的岩心为 1994 年 4—6 月中德合作“Sonne 95”考察船所采取的深海岩心 17937. 该站位于南海北部(19°30'N, 117°39. 9'E, 见图 1), 水深 3 428 m, 所采岩心柱长 12. 92 m, 根据浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 氧同位素确定了地层年代框架 (Wang *et al.*, 1999). 岩心沉积速率在全新世为 11 cm/ka, 末次冰期为 35 cm/ka. 本次研究主要对岩心上部 6 m、4 万年以来的样品以 10 cm 间隔取

样,分析生物有机分子化合物。

1.2 分析方法

将冷冻干燥后的沉积物样品研磨后,称取 1~2 g 样品装入 10 mL 的样品管中,加入一定量的有机物内标,用 CH_2Cl_2 超声抽提(7 mL×4),离心分离收集上清液(3 000 r/min, 5 min),得到总的可萃取有机质(total extrable lipids, TEL);将 TEL 萃取液旋转蒸发浓缩后, N_2 流下吹干加入 6% KOH 的甲醇溶液 3 mL,超声 10 min 后,室温放置过夜,用 *n*-hexane 萃取非酸类物质(3 mL×4)后进行硅胶柱层析分离;用 *n*-hexane : CH_2Cl_2 (7 : 3) 溶液淋洗得到非极性组分,浓缩后进行仪器分析。

将上述萃取物质进行 GC、GC/MS 定量、定性分析。

1.3 分析条件

GC 条件:柱长 60 m, 内径 0. 25 mm, 涂层 0. 25 μ m. 升温程序:初始温度为 45 $^{\circ}C$, 保持 1 min, 先以 15 $^{\circ}C/min$ 升温至 200 $^{\circ}C$ 后,再以 5 $^{\circ}C/min$ 升温至 300 $^{\circ}C$, 然后以 2 $^{\circ}C/min$ 升温至 310 $^{\circ}C$, 保持 50 min. 进样口温度为 300 $^{\circ}C$, 不分流方式进样, 氮气为载气, 流速 1 mL/min. FID 检测器温度 300 $^{\circ}C$.

部分样品进行 GC/MS 定性分析, 鉴定化合物和分析是否有色谱峰共溢出情况. GC 条件同上. 质谱条件:离子源为 EI 源. 离子源温度:200 $^{\circ}C$, 发射电子能量:70 eV, 扫描范围: m/z 50~650 amu, 接口温度为 300 $^{\circ}C$. 通过将各化合物的质谱图与 NIST 谱库和文献中的数据相互对照, 并参考保留时间而确定其最终结构. 全部样品依据相对保留时间以气相色谱进行定量分析。

2 结果

17937 岩心沉积物中非极性组分中主要检测到两类物质:正构烷烃系列化合物和长链烯酮化合物(图 2)。

正构烷烃系列化合物碳数分布主要为 C_{15} - C_{33} , 最高峰碳数为 29 或 31, 具有明显的奇偶优势. 其中高分子量烷烃 C_{21} - C_{33} 含量总和($\sum C_{21}$ - C_{33})在全新世和末次冰期的变化范围分别为 407~700 ng/g 和 500~2 200 ng/g(图 3b), 呈现出冰期高、间冰期低的特征, 末次盛冰期时最高达 2 227 ng/g, 比全新世高近 4 倍. 高分子量烷烃 n - C_{29} 也呈现相同的变化规律(图 3c, 与 $\sum C_{21}$ - C_{33} 相关性为 $R^2 = 0. 96$), 只是前

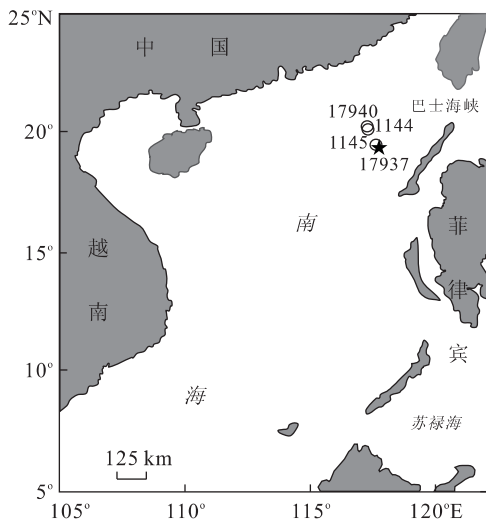


图 1 MD05-2901 站位示意图

Fig. 1 Sketch map showing location of core 17937

★代表本次研究站位;○代表文章中提及的南海相关站

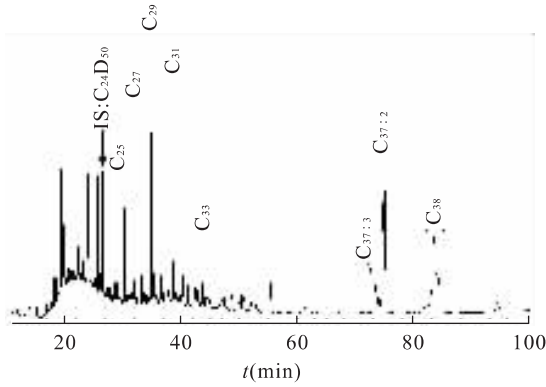


图 2 17937 岩心沉积物中性组分气相色谱图(以 165 cm 深度样品为例)

Fig. 2 Gas chromatography of neutral compounds in the core of 17937

者含量是后者的大约 5 倍。

非极性组分中的另一类物质是碳数分别为 37 和 38 的长链烯酮化合物,二者含量变化几乎相同(图 3d),只是 C₃₈ 烯酮的含量比 C₃₇ 烯酮略低(相

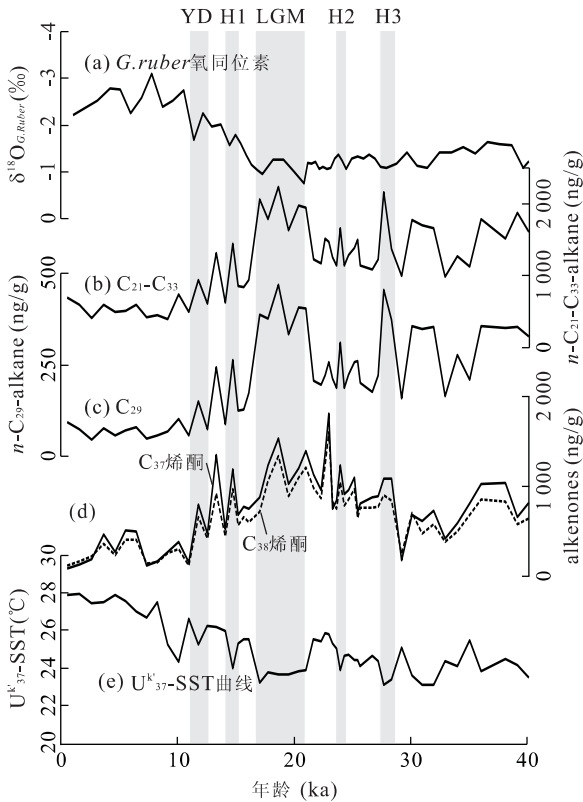


图 3 17937 岩心浮游有孔虫 *G. ruber* 氧同位素曲线(a)和生物标志化合物变化曲线(b-e)

Fig. 3 Plot of $\delta^{18}\text{O}$ of planktonic foraminifera *G. ruber* (a) and the molecular biomarkers in core 17937 (b-e)

性 $R^2=0.97$),二者在间冰期、冰期的平均值分别为 300 ng/g 和 1 000 ng/g,也表现为冰期高、间冰期低的特征。

应用 Pelejero and Grimalt(1997)在本航次中采集的 31 口岩心表层样的长链烯酮不饱和度: U_{37}^k 与各岩心 0~30 m 上层水柱的年均表层水温所确定的关系式: $U_{37}^k=0.031T+0.092$,得出本站位过去 4 万年来的表层水温变化幅度在 23~27 °C 之间(图 3e),与 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 变化同步.全新世与末次冰期的平均温度分别为 27 °C 和 24 °C,末次盛冰期(LGM)与全新世温度差为 4.5 °C.

3 讨论

3.1 南海北部过去 4 万年的表层水温变化

对比本岩心与南海北部 17940 站位 U_{37}^k -SST 记录和 ODP1144、1145 站位的 Mg/Ca-SST 结果显示(Pelejero *et al.*, 1999a, 1999b; Oppo and Sun, 2005; Wei *et al.*, 2007)(图 4),温度曲线变化形状一致,全新世温度平均为 27.5 °C,末次盛冰期 23 °C,末次冰期、间冰期的温差不小于 3 °C.有别于 CLIMAP 认为末次间冰期与全新世无显著温差的结论(CLIMAP Project Members, 1976).而同样是 U_{37}^k -SST 方法,17937 站位的温度记录比 17940 高,

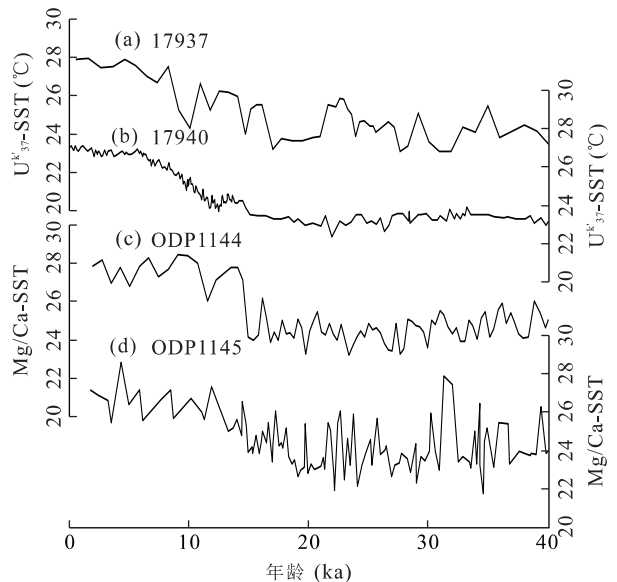


图 4 南海北部不同站位的表层水温记录对比(各站位位置见图 1)

Fig. 4 Comparisons of the SST record in northern South China Sea

温度波动程度也比 17940 大,而与 Mg/Ca-SST 相似。

虽然本岩心的时间分辨率低,但在 14~16 ka, 23~24.5 ka, 27~28.5 ka 南海表层海水温度同样记录了北大西洋冰筏事件 H1-H3 及 11~12.5 ka 的 Younger Dryas 事件。这些事件在南海 SST 的记录可能与北大西洋和格陵兰上空的降温通过西风急流带和蒙古冷高压诱发东亚季风发生快速变化有关 (Porter and An, 1995)。

3.2 过去 4 万年来南海北部陆源输入特征

利用烷烃系列化合物的分布特征来记录陆源物质在冰期、间冰期的输入已被广泛应用在古海洋学研究中 (Ikehara *et al.*, 2000; Calvo *et al.*, 2001; Ternois *et al.*, 2001; Pelejero, 2003)。本岩心中烷烃化合物分布特点显示出典型的陆源物质输入的特征。 $\Sigma C_{21}-C_{33}$ 烷烃变化规律表明冰期时陆源物质输入量多,间冰期时输入少 (图 2b)。元素地球化学研究结果也表明,冰期时陆源物质的输入量明显高于间冰期,代表陆源物质输入 Ti、Al、SiO₂ 等含量在冰期明显增多 (Wei *et al.*, 2003)。单个高分子量烷烃 $n-C_{29}$ 呈现与 $\Sigma C_{21}-C_{33}$ 相同的变化规律,表明可以代表高等植物输入源的单分子化合物来表示陆源物质的输入特征来简化计算过程 (Pelejero, 2003)。纵观过去 4 万年来陆源输入的特征,除整体的冰期、间冰期变化外,末次冰期以来千年尺度的 Heinrich 事件、Younger Dryas 事件在陆源物质的输入中也有记录,表现为陆源物质的突然增多。

对比 $\Sigma C_{21}-C_{33}$ 和 $n-C_{29}$ 烷烃代表的陆源物质的输入量与 U_{37}^k -SST 记录,可以发现二者变化呈镜像关系 ($R^2=0.71$),温度低时陆源物质输入多,温度高时输入少,而冰消期时,陆源物质从 480 ng/g 迅速减少到 150 ng/g 对应于温度从 22.5 °C 快速升至 25 °C。说明陆源物质的输入和温度变化相关。

海洋沉积物中陆源物质的来源主要有两种途径:一是由地表径流直接带入;二是经风、空气搬运带入。以往研究表明南海海盆陆源沉积主要受河流输入的影响 (Wang *et al.*, 1999)。冰期时海平面下降,大陆架出露,河流携带大量陆源物质入海,而冰期又以温度低为其显著特征,因而表现出温度和陆源输入的镜像关系。

对 H3 时陆源输入的显著增多,也见于南海南部 (Pelejero *et al.*, 1999a, 1999b; 胡建芳等, 2003) 可能主要与此时期的降雨增多导致河流输入增多有

关。冰消期时,陆源物质的迅速减少则是当地河流对海平面上升的快速响应 (Kienast *et al.*, 2003)。

3.3 过去 4 万年来南方陆地植被变化

现代分子有机地球化学研究表明,木本植物和草本植物的正构烷烃分布特征不同,分别以 $n-C_{27}$ 和 $n-C_{31}$ 为主峰 (Cranwell *et al.*, 1987; Meyers and Ishiwatari, 1993),正构烷烃 $n-C_{31}/C_{27}$ 比值变化与木本和草本植物相对变化的关系已在湖相沉积物研究中得到证实 (Cranwell *et al.*, 1987)。Xie *et al.* (2003) 对我国南方更新世红土剖面的分析表明,正构烷烃 $n-C_{27}/C_{31}$ 比值的曲线与深海氧同位素气候曲线具有很好的可对比性,高比值 (木本植物占优势) 对应于氧同位素曲线的温暖期,低比值 (草本植物占优势) 对应于干冷期。

17937 岩心 4 万年来正构烷烃 C_{31}/C_{27} 比值变化曲线如图 5 所示,呈现出冰期高、间冰期低的特征,17~40 ka 年比值平均约 2.2,全新世以来平均约 1.5,说明冰期时草本植物比木本植物占优势,而全新世时则相反,木本植物比草本植物占优势。孙湘君和罗运利 (2001) 对此岩心接近的南海北部陆坡的 17940 站和 1144 站沉积物中花粉分析资料显示,冰期孢粉组合中则出现大量草本植物,如蒿属 (*Artemisia*)、禾本科 (*Gramineae*)、莎草科 (*Cyperaceae*) (Sun and Li, 1999; Sun *et al.*, 2000, 2003); Termination 1 时期 $n-C_{31}/C_{27}$ 比值从 2.27 快速减少到 1.25,从 17940 高分辨率的花粉分析显示,此时热带—亚热带常绿阔叶乔木花粉增加,指示气候变暖,特别是 14 ka 前后出现红树林的高峰,可能是海平面

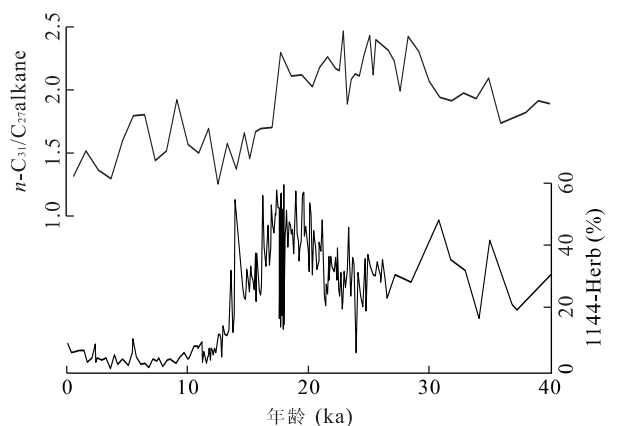


图 5 17937 岩心正构烷烃 C_{31}/C_{27} 变化曲线与 1144 站孢粉含量的对比 (Sun *et al.*, 2003)

Fig. 5 Comparison of the alkane ratio of C_{31}/C_{27} in 17937 and pollen percent in 1144

一度上升的结果(Sun *et al.*, 2000)。

陆地植被的这种变化可能与海陆热力差引起的东亚夏季风强度变化有关,冰期时,夏季风减弱,致使东亚大陆降水减少,不利于高大的木本植物生长,因而草本植物相对发育;而全新世时期,东亚夏季风加强,从海上带来丰富的降水,有利于木本植物的繁盛。而东亚大陆石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,也显示末次冰期条件下夏季风环流消弱导致东亚降水同位素组成向正漂移,对应于北大西洋的干冷气候,而现今条件下夏季风的加强使降水的同位素发生负向偏移,对应于高纬地区的暖湿气候(Wang *et al.*, 2001)。

3.4 过去 4 万年来南海北部表层生产力变化

海洋沉积物中发现的 $\text{C}_{37}\text{-C}_{39}$ 长链不饱和酮化合物,主要专属于生长在海洋透光带的颗石藻 *Emiliania huxleyi* 和 *Gephyrocapsa oceanica*, 利用此类化合物可以追溯以颗石藻为代表的海洋表层生产力状况(Zhao *et al.*, 2006a)。本研究中根据 C_{37} 和 C_{38} 长链不饱和酮化合物的含量来恢复 4 万年来南海北部颗石藻的生产力变化,说明颗石藻的生产力在冰期时高、间冰期时低, LGM 时期是全新世的近 4 倍。

海洋初级生产力受许多错综复杂的环境因素所控制。在世界许多海洋体系中,营养物质是初级生产力的一个限制因素。在南海,冰期时南海海平面下降,岸线向海方向大大推进,大量的陆源物质直接输入,营养元素增多,使得表层生产力增高,这可由颗石藻生产力和陆源物质输入的同步变化得到证实。另一方面,冰期时东亚冬季风增强,海洋中混合层厚度增加,有利于营养物质的充分利用,也促进了海洋表层生产力的提高(Huang *et al.*, 1997)。

末次冰期以来的千年尺度的 H3 事件, YD 事件在颗石藻的生产力也有记录,表现为颗石藻生产力的突然增多。与 3.2 讨论这些快速变化气候事件发生时陆源物质输入变化相同,陆源物质带来的营养元素增多,使得表层生产力增高,体现出海洋浮游植物对环境变化的响应。从末次冰期以来颗石藻生产力变化情况还可以发现:在 22~24 ka 时颗石藻的初级生产力大大高于其他时期,说明此时的颗石藻生长更繁盛,初级生产力更高,而此时陆源物质的输入增加,但并没有末次盛冰期和邻近的 H2 事件时的高,但由颗石藻长链不饱和酮 U_{37}^k 方法恢复的古温度表明,此时期海水表层温度比末次盛冰期和邻近的 H2 事件时高约 2 °C。虽然一般认为是营养物

质而不是温度影响海洋初级生产力,但在 21~23 ka 时颗石藻的初级生产力的突然增加,说明在营养物质增加而温度也适宜时可能更有利于颗石藻勃发。

4 结论

对南海北部 17937 岩心 4 万年来的生物有机地球化学研究表明:以 $\text{U}_{37}^k\text{-SST}$ 方法恢复过去海水表层水温的结果显示,冰期间、冰期平均温度范围分别为 27 °C 和 24 °C,在末次盛冰期与全新世温度差达 4.5 °C。Younger Dryas 事件、H3 事件千年尺度事件在海水表层温度的记录说明高低纬度气候变化存在相关性。

正构烷烃的分布特征显示出典型的陆源物质输入的特征,并表现出冰期时陆源物质输入多,间冰期输入少的特征,与冰期时陆架出露、冬季风强化有关。同时冰期/间冰期气候变化也造成了陆地植被交替,冰期时草本植物相对占优势,间冰期时木本植物相对占优势。

以 C_{37} 、 C_{38} 长链不饱和酮化合物的含量恢复颗石藻初级生产力,表现出冰期高、间冰期低的特征,末次盛冰期是全新世时期的 4 倍。主要与该时期大量的陆源物质直接输入、营养元素增多,以及东亚冬季风增强所造成的海水混合层厚度增加有关。

References

- Calvo, E., Villanueva, J., Grimalt, J. O., et al., 2001. New insights into the glacial latitudinal temperature gradients in the North Atlantic; Results from U_{37}^k sea surface temperatures and terrigenous inputs. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3-4): 509-519.
- CLIMAP Project Members, 1976. The surface of the ice-age Earth. *Science*, 191(4232): 1131-1137.
- Cranwell, P. A., Eglinton, G., Robinson, N., 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments II. *Organic Geochemistry*, 11(6): 513-527.
- Hu, J. F., Peng, P. A., Fang, D. Y., et al., 2003a. No aridity in Sunda Land during the last glaciation; Evidence from the molecular-isotopic stratigraphy of long-chain *n*-alkanes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201(3-4): 269-281.
- Hu, J. F., Peng, P. A., Jia, G. D., et al., 2003b. A biomarker and isotopic approach for the paleoenvironmental reconstruction Nansha area, South China Sea since the last 30

- ka. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 211–218 (in Chinese with English Abstract).
- Hu, J. F., Peng, P. A., Jia, G. D., et al., 2002. Biological markers and their carbon isotopes as an approach to the paleoenvironmental reconstruction of Nansha area, South China Sea, during the last 30 ka. *Organic Geochemistry*, 33(10): 1197–1204.
- Huang, C. Y., Wu, S., Zhao, M., et al., 1997. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation. *Marine Micropaleontology*, 32(1–2): 71–94.
- Ikehara, M., Kawamura, K., Ohkouchi, N., et al., 2000. Variations of terrestrial input and marine productivity in the southern ocean (48°S) during the last two deglaciations. *Paleoceanography*, 15: 170–180.
- Jia, G. D., Peng, P. A., Zhao, Q. H., et al., 2003. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea. *Geology*, 31(12): 1093–1096.
- Kienast, M., Hanebuth, T. J. J., Pelejero, C., et al., 2003. Synchronicity of meltwater pulse 1a and the boling warming: New evidence from the South China Sea. *Geology*, 31(1): 67–70.
- Kienast, M., Steinke, S., Stategger, K., et al., 2001. Synchronous tropical South China Sea SST change and Greenland warming during deglaciation. *Science*, 291(5511): 2132–2134.
- Meyers, P. A., Ishiwatari, R., 1993. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 20(7): 867–900.
- Oppo, D. W., Sun, Y. B., 2005. Amplitude and timing of sea-surface temperature change in the northern South China Sea: Dynamic link to the East Asian monsoon. *Geology*, 33(10): 785–788.
- Pelejero, C., 2003. Terrigenous *n*-alkane input in the South China Sea: High-resolution records and surface sediments. *Chemical Geology*, 200(1–2): 89–103.
- Pelejero, C., Grimalt, J. O., 1997. The correlation between the U_{37}^k index and sea surface temperatures in the warm boundary: The South China Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(22): 4789–4797.
- Pelejero, C., Grimalt, J. O., Heilig, S., et al., 1999a. High resolution U_{37}^k -temperature reconstructions in the South China Sea over the last 220 kyrs. *Paleoceanography*, 14: 224–231.
- Pelejero, C., Grimalt, J. O., Sarnthein, M., et al., 1999b. Molecular biomarker record of sea surface temperature and climatic change in the South China Sea during the last 140 000 years. *Marine Geology*, 156(1–4): 109–121.
- Porter, S. C., An, Z. S., 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375: 305–308.
- Sun, X. J., Li, X., 1999. A pollen record of the last 37 ka in deep sea core 17940 from the northern slope of the South China Sea. *Marine Geology*, 156(1–4): 227–244.
- Sun, X. J., Li, X., Luo, Y. L., et al., 2000. The vegetation and climate at the last glaciation on the emerged continental shelf of the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3–4): 301–316.
- Sun, X. J., Luo, Y. L., 2001. A deep sea pollen record of the last 280 ka in northern South China Sea. *Science in China (Ser. D)*, 31(10): 846–853 (in Chinese).
- Sun, X. J., Luo, Y. L., Huang, F., et al., 2003. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. *Marine Geology*, 201(1–3): 97–118.
- Ternois, Y., Kawamura, K., Keigwin, L., et al., 2001. A biomarker approach for assessing marine and terrigenous inputs to the sediments of sea of Okhotsk for the last 27 000 years. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(5): 791–802.
- Tian, J., Wang, P. X., 2006. Tropical process and its periodicity in the deep sea records. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 747–753 (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(1–4): 245–284.
- Wang, P. X., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., et al., 2003. The deep sea record in South China Sea since 30 Ma. *Chinese Science Bulletin*, 48(21): 2206–2215 (in Chinese).
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., et al., 2004. Major Pleistocene stages in a carbon perspective: The South China Sea record and its global comparison. *Paleoceanography*, 19: PA4005, doi: 10.1029/2003PA000991.
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave. *Science*, 294(5550): 2345–2348.

Wei, G. , Liu, Y. , Li, X. , et al. , 2003. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments; Evidence from ODP Site 1144, South China Sea. *Geochemical Journal*, 37: 593-602.

Wei, G. J. , Deng, W. F. , Liu, Y. , et al. , 2007. High-resolution sea surface temperature records derived from foraminiferal Mg/Ca ratios during the last 260 ka in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 250(1-4): 126-138.

Xie, S. C. , Yi, Y. , Liu, Y. Y. , et al. , 2003. The Pleistocene vermicular red earth in South China signaling the global climatic change; The molecular fossil record. *Science in China (Ser. D)*, 46(11): 1113-1120.

Zhao, M. X. , Mercer, J. L. , Eglinton, G. , et al. , 2006a. Comparative molecular biomarker assessment of phytoplankton paleoproductivity for the last 160 kyr off Cap Blanc, NW Africa. *Organic Geochemistry*, 37(1): 72-97.

Zhao, M. X. , Huang, C. Y. , Wang, C. C. , et al. , 2006b. A millennial-scale $U_{37}^{K'}$ sea-surface temperature from the South China Sea (8°N) over the last 150 kyr; Monsoon and sea-level influence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236(1-2): 39-55.

附中文参考文献

胡建芳, 彭平安, 贾国东, 等, 2003. 三万年来南沙海区古环境重建: 生物标志物定量与单体碳同位素研究. *沉积学报*, 21(2): 211-218.

孙湘君, 罗运利, 2001. 南海北部 280 ka 以来深海花粉记录. *中国科学(D辑)*, 31(10): 846-853.

田军, 汪品先, 2006. 深海记录中的热带过程及其周期性. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(6): 747-753.

汪品先, 赵泉鸿, 翦知湔, 等, 2003. 南海三千万年的深海记录. *科学通报*, 48(21): 2206-2215.

《地球科学——中国地质大学学报》
2009 年 第 34 卷 第 1 期 要目预告

中国大陆新生代上地幔铅同位素特征	路凤香等
中国原生金刚石的碳同位素组成及其来源	张宏福等
中生代华北南缘带状岩石圈结构特征及其大陆形成演化意义	郑建平等
锂同位素分馏机制讨论	汤艳杰等
华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏	孙金凤等
长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用	禹 尧等
西大别湾高压变质带变沉积岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义	杨赛红等
扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示	谢士稳等
河北阳原新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体矿物化学: 华北岩石圈地幔演化意义	陈 曦等
拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学: 形成构造环境的讨论	康志强等