

雷艳, 胡建芳, 向荣, 等. 末次盛冰期以来南海北部神狐海域沉积有机质的组成特征及其古气候/环境意义[J]. 海洋学报, 2017, 39(11):75-84, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.11.007

Lei Yan, Hu Jianfang, Xiang Rong, et al. Composition of sedimentary organic matter in Shenhu, northern South China Sea since the Last Glacial Maximum and its implication for paleoclimate[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(11):75-84, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.11.007

末次盛冰期以来南海北部神狐海域沉积有机质的组成特征及其古气候/环境意义

雷艳^{1,2}, 胡建芳^{1*}, 向荣³, 付少英⁴, 李永祥⁵, 曹怀仁^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 4. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 5. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:通过对两根沉积柱 GHE27L 和 GHE24L 的总有机碳(TOC)、总氮(TN)、C/N 比值及稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)的分析, 本文探讨了 21.1 ka BP 以来南海北部陆坡神狐海域沉积有机质的组成特征及可能的古气候/环境信息。沉积柱 GHE27L 的 TOC 含量、TN 含量、C/N 比值及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别为 0.53%~1.81%, 0.07%~0.18%, 8.2~16.0 和 -23.6‰ ~ -20.3‰ 。沉积柱 GHE24L 各参数则分布为 0.45%~1.65%, 0.09%~0.24%, 5.3~12.2 和 -22.6‰ ~ -20.4‰ 。沉积柱总体有机质的剖面变化显示, 末次盛冰期以来南海北部沉积有机质具有海洋和陆地混合来源, 但以海洋有机质来源为主。冰期陆源有机质对总有机质的相对贡献比全新世高。末次盛冰期南海北部气候相对干旱, C_4 植被发育。全新世夏季风增强、降雨增多。自 20 ka BP 以来, 人类活动对南海北部海洋初级生产力产生一定的影响。

关键词:南海北部; 末次盛冰期; 稳定碳同位素; 古气候

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2017)11-0075-10

1 引言

南海是西太平洋最大的边缘海, 其宽阔平缓的陆架以及特殊的地理位置使南海在冰期旋回过程中对气候变化具有放大效应^[1-3]。此外, 南海的碳酸盐补偿深度(CCD)相对于其他边缘海更深^[1], 且陆坡沉积物供应充足^[2], 沉积速率高^[4-5], 是研究高分辨率古环境、古气候变迁的理想场所。前人在南海已经做了

大量的古海洋学研究工作, 涉及的研究领域包括地球化学^[2,6-7]、磁学^[5,8]和矿物学^[9-10]等, 其中有机地球化学的研究内容主要是重建海洋表层水体温度(SST)^[11-13], 而关于末次冰期以来南海北部陆坡沉积有机质的研究还不多^[2,14], 不利于探讨该地区冰期/间冰期旋回有机碳(OC)埋藏的变化特征及影响因素。

本文以取自南海北部陆坡神狐海域的两根沉积

收稿日期: 2016-12-23; 修订日期: 2017-03-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0601204); 广州海洋地质调查局“天然气水合物分解的沉积记录”项目(GZH201100311-02); 国家自然科学基金(41576053); 有机地球化学国家重点实验室自主课题项目(SKLOGA201603B)。

作者简介: 雷艳(1989—), 女, 四川省成都市人, 主要从事有机地球化学研究。E-mail: leiyandream@163.com

* 通信作者: 胡建芳, 女, 研究员, 主要从事生物-有机地球化学研究。E-mail: hujf@gig.ac.cn

柱 GHE27L、GHE24L 为研究对象,进行高分辨率取样,对沉积总有机碳(TOC)、总氮(TN)及稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)进行测试分析,揭示了末次盛冰期以来该海域埋藏 OC 的组成特征,并探讨了相关的古气候/环境变化对沉积 OC 埋藏的影响。

2 材料和方法

2.1 样品采集

本次研究的样品由广州海洋地质调查局“HY4—2011—4”航次于 2011 年 9 月用重力活塞取样器取得,两站点 GHE27L、GHE24L 均位于神狐海域,处于 17940 站^[15]的西偏南方向(图 1)。沉积柱 GHE27L 柱长 5.73 m,水深 1 533 m;沉积柱 GHE24L 柱长 5.98 m,水深 1 387 m。本次研究以 2 cm 间隔取样,沉积柱 GHE27L 共取得样品 287 个,GHE24L 共取得样品 298 个。

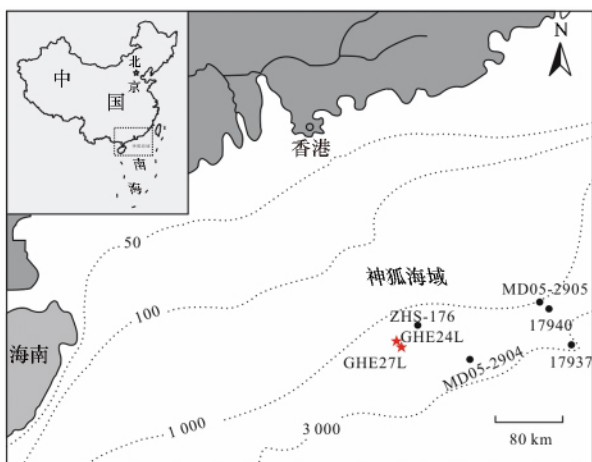


图 1 GHE27L 和 GHE24L 柱样及附近相关钻孔地理位置
Fig. 1 The locations of the studied GHE27L and GHE24L cores as well as the nearby cores

两根沉积柱均无明显沉积扰动和特殊气味,而且均以灰绿色含有孔虫软泥为主。沉积柱 GHE27L 在 0~120 cm 段为灰绿色软泥,120~180 cm 段为灰绿至浅褐色软泥,180~573 cm 段逐渐变为深绿色软泥;沉积柱 GHE24L 在 0~200 cm 段为灰绿色软泥,200~260 cm 为浅褐至灰绿色软泥,260~594 cm 段颜色逐渐变深,为深绿色软泥。两根沉积柱均未见明显浊流沉积痕迹,因此认为它们为正常海洋环境沉积。

2.2 碳、氮元素及稳定碳同位素分析

样品冷冻干燥后研磨均匀,准确称取适量研磨均

匀的样品于聚四氟乙烯离心管中,加入过量 6 mol/L 的盐酸,反应 24 h,用去离子水将反应后的样品清洗 3 次以除去碳酸盐。去除碳酸盐后的样品经冷冻干燥并恒重。处理后的每个样品一部分用于做 C、N 元素分析,一部分用于稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)测试。

元素分析使用 Vario El-Elemental Analyzer III 元素分析仪,每个样品均测定平行样,最终结果取其平均值,数据结果表达为 TOC(wt%)和 TN(wt%)。对某一样品重复测试(5 次),其标准偏差 δ 分别为: $\pm 0.02\text{wt}\%$ (C)和 $\pm 0.003\text{wt}\%$ (N)。稳定碳同位素在 CE Flash EA 1112-Finnigan Delta plus XL 元素分析仪一同位素质谱联用仪上完成,每个样品测试 2~3 次,最终结果取其平均值,数据结果表述为千分数(VPDB 标准),分析误差小于 $\pm 0.5\text{‰}$ 。

3 结果

3.1 沉积柱的年代框架

GHE27L 沉积柱的年龄是依据浮游有孔虫的 ^{14}C -AMS 测试,具体测年结果见图 2^[10]。沉积柱

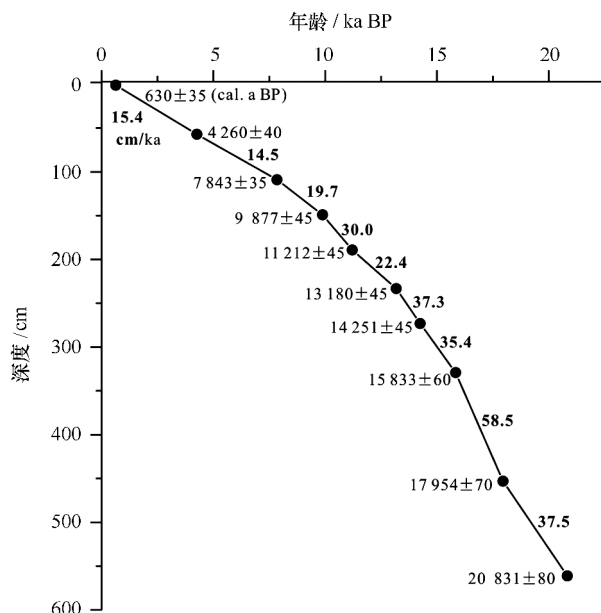


图 2 GHE27L 沉积柱 ^{14}C -AMS 测年结果^[10]
(深蓝色数字代表对应层位的沉积速率)

Fig. 2 The ^{14}C -AMS age-depth model of the GHE27L Core^[10] (the darkblue number representing the calculated sedimentation rates at the corresponding horizon)

GHE24L 没有直接的测年数据,其年龄是由与沉积柱 GHE27L 的磁化率比对来确定的^[5]。通过两根沉积柱磁化率曲线的比对(图 3a),确定出沉积柱 GHE24L 关

键层位点的年龄(结果见图 3b)。根据关键层位的年龄数据可以计算出沉积柱 GHE27L、GHE24L 各段的平均沉积速率,并由线性内插方法确定每个取样层位的

年龄,由此得到沉积柱 GHE27L 的底部年龄为 21.1 ka BP, GHE24L 沉积柱底部年龄为 20.9 ka BP。

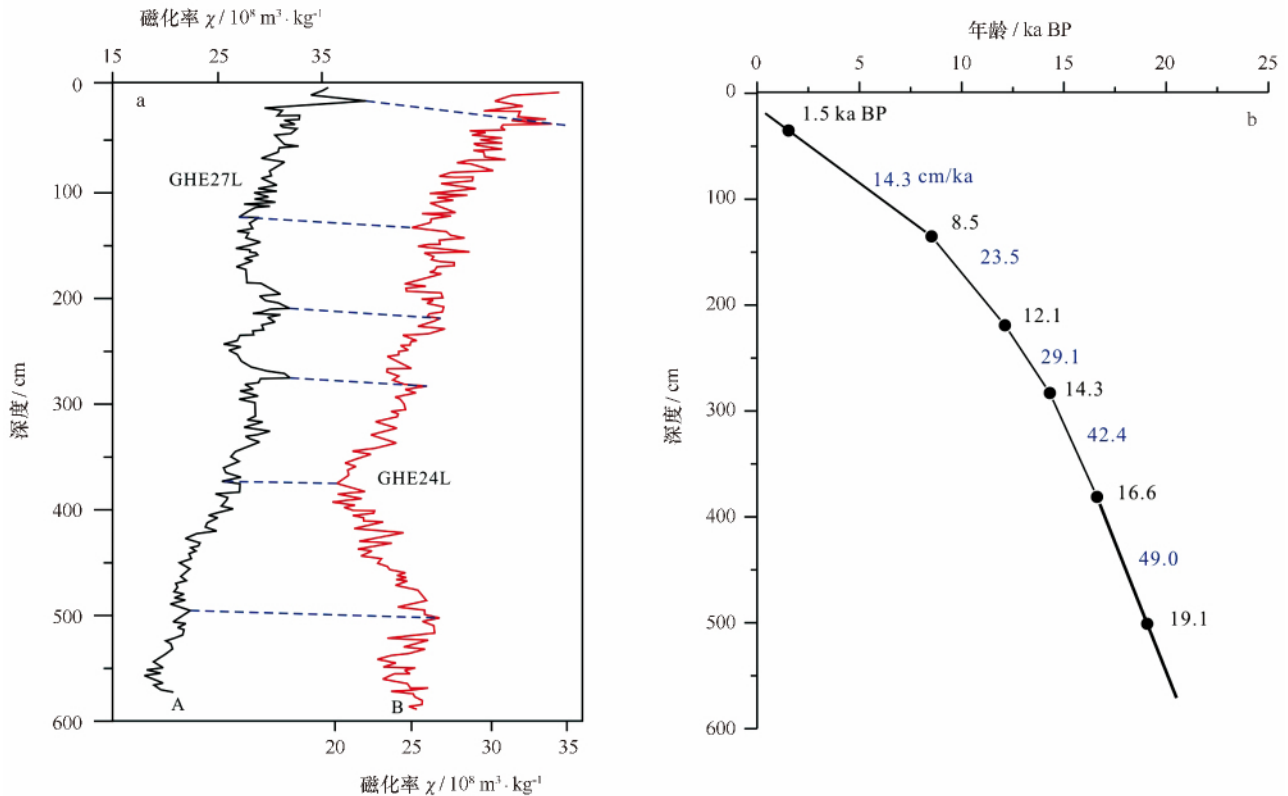


图3 GHE27L和GHE24L沉积柱磁化率比对(a)^[5]和GHE24L沉积柱深度—年龄关系(深蓝色数字代表对应层位的沉积速率)(b)

Fig. 3 The pattern matching of magnetic susceptibility between GHE27L and GHE24L (a)^[5] and the age-depth model of the GHE24L Core (the darkblue number representing the calculated sedimentation rates at the corresponding horizon) (b)

3.2 TOC 含量

沉积柱 GHE27L 的 TOC 含量为 0.53% ~ 1.81%(图 4)。根据 TOC 的剖面变化特征,结合其已有的粒度分析数据^[10],可将沉积柱 GHE27L 的沉积划分为 4 个阶段:末次盛冰期(LGM),21.1~17.0 ka BP,此时 TOC 含量最高,为 0.89%~1.81%;末次冰消期,17.0~13.0 ka BP,TOC 含量相对较高(1.07%~1.67%),且变化平稳,但自 13.2 ka BP 以来,TOC 显著降低;早全新世,13.0~6.5 ka BP,TOC 为 0.53%~1.18%,呈现下降的趋势;中晚全新世,6.5~0.3 ka BP(图 4),TOC 维持在低值,但近 2.0 ka BP 以来,TOC 出现升高的趋势(图 4)。

沉积柱 GHE24L 的 TOC 含量分布范围为 0.45%~1.61%(图 4),相对于 GHE27L,GHE24L 沉积柱 TOC 的含量稍低。但整个沉积柱 TOC 随

时间的变化规律与 GHE27L 基本一致,都表现出冰期 TOC 含量高,间冰期 TOC 含量低的状况。

3.3 TN 含量

沉积柱 GHE27L 的 TN 含量为 0.07% ~ 0.18%(图 4),其剖面变化趋势与 TOC 类似,具有明显的冰期高、间冰期低的特征。沉积柱 GHE24L 的 TN 含量为 0.09%~0.24%(图 4),但末次盛冰期的 TN 含量并没有表现出比末次冰消期高的特点。除末次盛冰期外,GHE24L 的 TN 含量的剖面变化趋势与其 TOC 一致。

3.4 C/N 比值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值

沉积柱 GHE27L、GHE24L 的 C/N 比值分布为 8.2~16.0 和 5.3~12.2,都表现出冰期高间冰期低的特征(图 4)。GHE24L 的 C/N 比值普遍比 GHE27L 的 C/N 比值小。

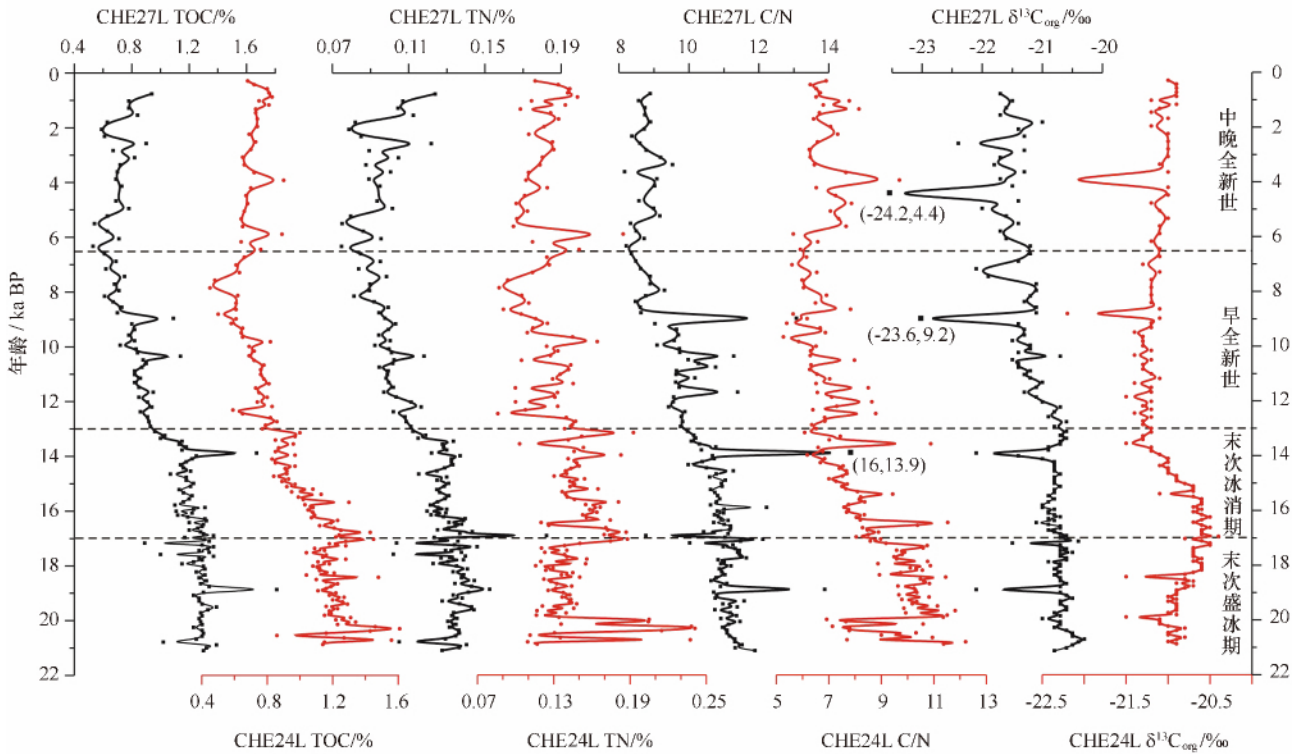


图4 沉积柱 GHE27L 和 GHE24L 总体有机质的剖面变化

Fig. 4 Profiles of bulk organic matter of GHE27L and GHE24L cores

图4显示沉积柱 GHE27L 的 $\delta^{13}C_{org}$ 值在 $-23.6\text{‰} \sim -20.3\text{‰}$ 之间变化。其中,末次盛冰期 $\delta^{13}C_{org}$ 值为 $-22.1\text{‰} \sim -20.3\text{‰}$;末次冰消期, $\delta^{13}C_{org}$ 值范围分布在 $-22.1\text{‰} \sim -20.6\text{‰}$ 之间,该值相比于末次盛冰期的值略有下降;早全新世 $\delta^{13}C_{org}$ 值负偏,为 $-23.6\text{‰} \sim -20.6\text{‰}$;中晚全新世 $\delta^{13}C_{org}$ 值 $-22.4\text{‰} \sim -21.0\text{‰}$ 。沉积柱 GHE24L 的 $\delta^{13}C_{org}$ 值的范围为 $-22.7\text{‰} \sim -20.4\text{‰}$ (图4)。末次盛冰期阶段 $\delta^{13}C_{org}$ 值介于 $-21.5\text{‰} \sim -20.5\text{‰}$, 呈一定的正偏趋势;末次冰消期 $\delta^{13}C_{org}$ 值显著负偏;早全新世 $\delta^{13}C_{org}$ 值则为 $-22.2\text{‰} \sim -21.1\text{‰}$;中晚全新世 $\delta^{13}C_{org}$ 值为 $-22.7\text{‰} \sim -20.9\text{‰}$ 。

4 讨论

4.1 末次盛冰期以来有机质来源的变化

4.1.1 沉积物中 TOC 埋藏通量的估算

海洋沉积有机碳的埋藏通量是评估海洋储碳的关键,本文试图计算神狐海域末次盛冰期以来 TOC 的埋藏通量,计算式如下^[16-17]:

$$TOC_{BF} = TOC \times S \times \rho_d, \quad (1)$$

式中, TOC_{BF} 表示沉积物中 TOC 的埋藏通量; S 为

沉积速率(通过年龄和深度计算可得沉积柱 GHE27L、GHE24L 在不同时期的沉积速率); ρ_d 为沉积物的干密度。

根据前人的研究,认为该海域的沉积物干密度为 0.80 g/cm^3 ^[10],计算出两沉积柱的 TOC_{BF} 如图5所示。两沉积柱的 TOC_{BF} 表现出类似的剖面变化特征:末次盛冰期 TOC_{BF} 高,全新世 TOC_{BF} 低。但 GHE27L 在 $18 \sim 16 \text{ ka BP}$ 、 $14.6 \sim 13.4 \text{ ka BP}$ 及 $10.8 \sim 10 \text{ ka BP}$ 期间 TOC_{BF} 却呈现增加趋势,这与其黏土矿物的沉积通量变化一致^[10]。

TOC_{BF} 的剖面变化特征可能与以下4个因素有关:(1)冰期的沉积速率远远高于全新世,而高的沉积速率有利于有机质的快速保存与埋藏^[18];(2)冰期强盛的冬季风使得海洋初级生产力升高^[7,19],TOC 沉积通量增加, TOC_{BF} 增大;(3)冰期的海洋初级生产力的增加导致海水表层、温跃层及深层水体之间的垂向循环减弱,从而使得深层海水缺氧,这有利于有机质的保存^[20-21];(4)冰期海平面降低,有利于陆源有机碳(OC_T)被搬运到研究区内沉积^[3,5,19]。但从图5也可以看出,两沉积柱的 TOC_{BF} 剖面变化趋势并不完全一致。推测可能的原因主要是:(1)两沉积柱的有机质

来源存在一定差异;(2)两沉积柱所处的局部沉积环境存在一定的差异,导致有机质的保存环境存在差

异;(3)两沉积柱的物质输入存在差异,特别是黏土矿物的含量不同,导致沉积 TOC 的含量存在差异。

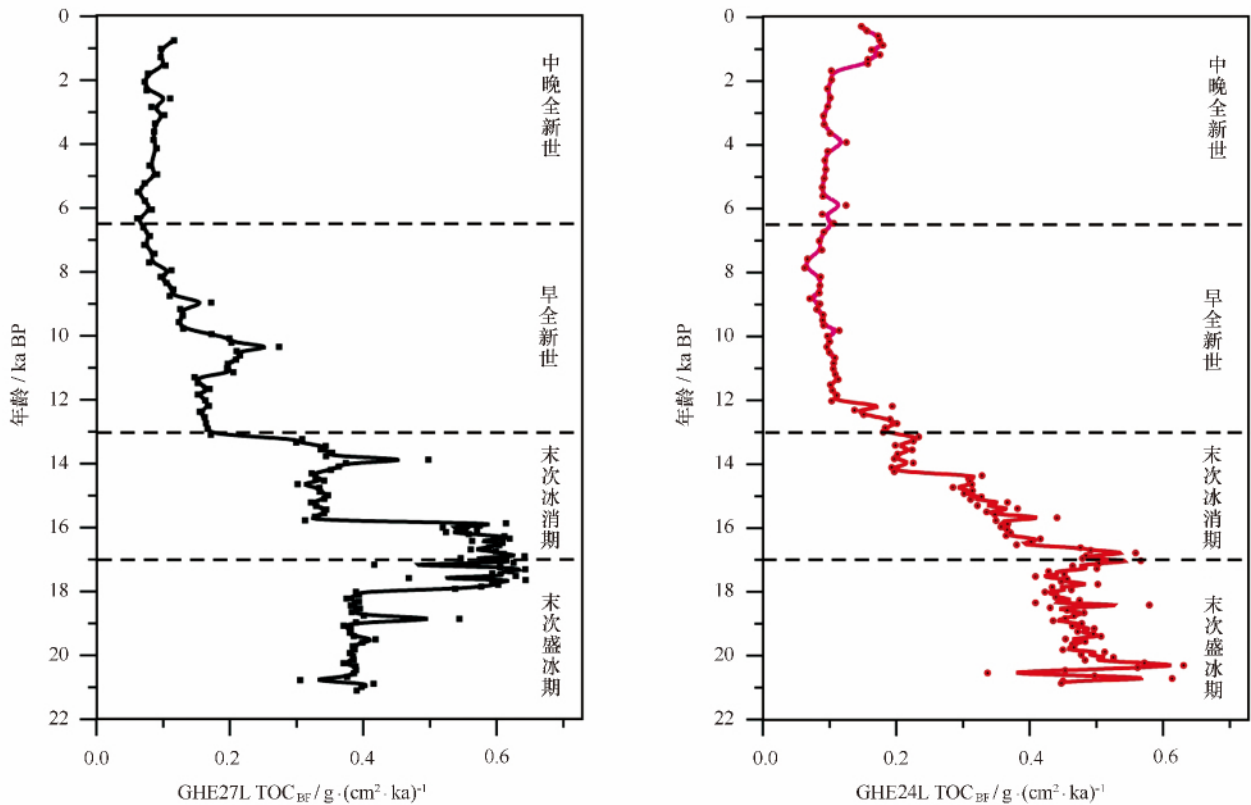


图5 GHE27L和GHE24L沉积柱TOC埋藏通量(TOC_{BF})的剖面变化

Fig. 5 Profiles of burial fluxes of TOC in the GHE27L and GHE24L cores

4.1.2 C/N 比值与有机质来源

C/N 比值通常用来判断有机质的来源(陆地或海洋来源)^[22-23]。一般认为 C/N 比值小于 8 为典型的海洋有机质来源^[24],而 C/N 比值大于 12 为陆源有机质^[25]。GHE27L、GHE24L 沉积柱的 C/N 比值分别为 8.2~16.0 和 5.3~12.2(图 4)反映了沉积有机质的混合来源。两沉积柱 C/N 比值的剖面变化反映出在末次冰期陆源有机碳对沉积有机质的相对贡献高于全新世(图 4),这与南海北部 17937 钻孔的研究结果一致^[19]。虽然 C/N 比值可以用来判断有机质的来源,但因为受成岩作用及沉积物中黏土矿物吸附无机 N(主要是 NH_4^+) 的影响,通常会导致该比值偏离正常值范围。因此,在利用该比值识别有机质来源时需要结合其他指标。两沉积柱 TOC 与 TN 都存在一定的相关性(图 6),表明其 TN 主要为有机 N。但 GHE24 沉积柱 TOC 与 TN 的相关系数明显偏低,推测可能是沉积物中黏土矿物吸附了相对多的无机 N

导致的。

4.1.3 $\delta^{13}C_{org}$ 值与有机质来源

陆生植物和海洋藻类具有不同的碳同位素分馏特征,可以利用 $\delta^{13}C$ 值来判断有机质的来源^[7,26]。一般认为海洋自生藻类的有机碳同位素 $\delta^{13}C$ 值分布在 $-20\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 之间^[27],典型 C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 值则介于 $-26\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ^[28],而 C_4 植物的平均 $\delta^{13}C$ 值约为 -14‰ ^[23,27]。沉积柱 GHE27L、GHE24L 的 $\delta^{13}C_{org}$ 值表明两根沉积柱的有机质具有海洋和陆地双重来源,且以海洋来源为主(图 4),与 C/N 比值所反映的结果基本一致。

两根沉积柱 $\delta^{13}C_{org}$ 的剖面变化都显示:从冰期到全新世, $\delta^{13}C_{org}$ 呈现轻微的负偏,表明陆地 C_3 植物对其总有机质的输入相对增加。但前人在南海北部的研究^[4,29-30]表明自末次盛冰期以来,陆地 C_4 植物对南海北部沉积有机质也有一定的贡献,特别是在末次盛冰期, C_4 植物对 TOC 的贡献不可忽略。因此,为

了使 $\delta^{13}C_{org}$ 值二端元模型可以更准确地表征陆地和海洋有机质的相对输入量,本文对陆源有机碳的同位

素端元值进行如下校正:

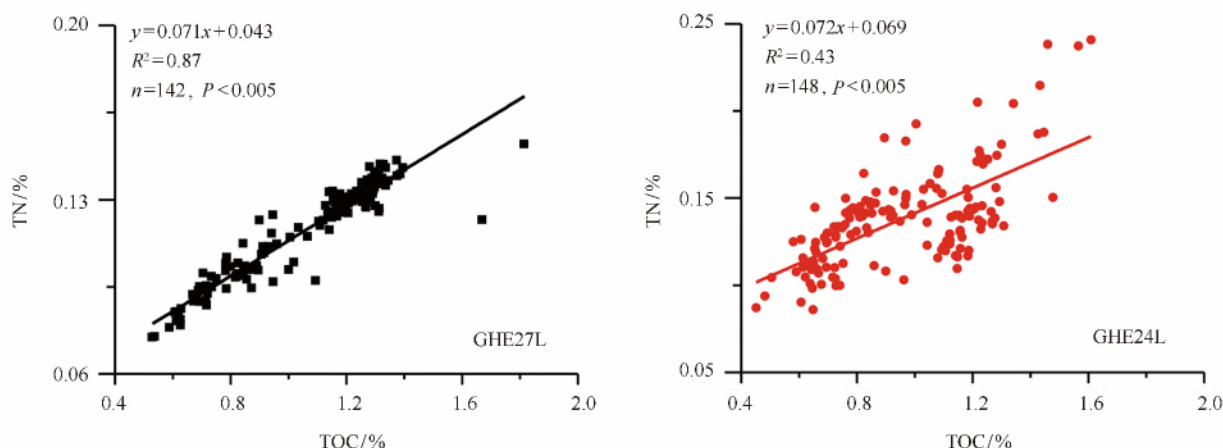


图 6 GHE27L 和 GHE24L 沉积柱 TOC 与 TN 的相关关系

Fig. 6 Correlations between TOC and TN in the GHE27L and GHE24L cores

$$\delta^{13}C_T = f_{C_3} \cdot \delta^{13}C_3 + f_{C_4} \cdot \delta^{13}C_4, \quad (2)$$

$$f_{C_3} + f_{C_4} = 1, \quad (3)$$

式中, $\delta^{13}C_T$ 表示校正后的陆源有机碳同位素值; $\delta^{13}C_3$ 、 $\delta^{13}C_4$ 分别表示 C_3 、 C_4 植物的有机碳同位素值, 本文取 $\delta^{13}C_3 = -29\%$, $\delta^{13}C_4 = -13\%$ ^[30]; f_{C_3} 、 f_{C_4} 分别表示 C_3 、 C_4 植物在陆源有机碳中的百分含量(%). 参考 Zhou 等^[4]对南海北部 MD05-2905 钻孔的研究, 认为末次冰期以来 C_4 的相对含量为 45%. 因此, 本文设定在 21.1~19.0 ka BP 期间, $f_{C_4} = 0.45$; 在 19.0~0.3 ka BP 之间, f_{C_4} 与年龄(ka BP)存在如下线性关系:

$$f_{C_4} = 0.0136 \cdot \text{Age} + 0.1856 \quad (R^2 = 0.9725), \quad (4)$$

通过式(2)、式(3)及式(4)得到 $\delta^{13}C_T$ 校正值, 再根据二元模型可计算沉积 TOC 中海洋 OC(OC_M)和陆源 OC(OC_T)的百分含量^[21,31], 具体计算式如下:

$$\delta^{13}C_{org} = f_M \cdot \delta^{13}C_M + f_T \cdot \delta^{13}C_T, \quad (5)$$

$$f_M + f_T = 1, \quad (6)$$

$$OC_M = f_M \cdot \text{TOC}, \quad (7)$$

式中, $\delta^{13}C_M$ 表示海洋有机碳的同位素值, 本文取 $\delta^{13}C_M = -20\%$ ^[21]; f_M 、 f_T 分别表示海洋、陆源 OC 在 TOC 中的百分比; OC_M 为海洋有机碳的绝对含量。

由此计算出的 GHE27L 和 GHE24L 沉积柱自 21.1 ka BP 以来的海洋 OC 在 TOC 中的百分比 (f_M)以及 OC_M 、 OC_T 绝对含量如图 7 示。从图 7 可

以看出, 两沉积柱的有机质整体上均以海洋来源为主($\geq 60\%$), 但在冰期与全新世海洋来源 OC 的相对贡献存在一定的差异, 冰期 f_M 低, 全新世 f_M 高。而由海洋有机碳的绝对含量(OC_M)所反映的海洋初级生产力则表现出冰期比全新世高的特征(图 7), 这与用特征生物标志化合物表征的海洋初级生产力特征一致^[2,14]。陆源有机碳的绝对含量(OC_T)也显示陆源有机质的输入在冰期比全新世高(图 7), 这与主、微量元素所揭示的南海北部在冰期陆源物质输入增多的结论一致^[32]。

4.2 有机质组成特征揭示的古气候/环境变化

根据对 GHE27L 和 GHE24L 沉积柱总体有机质的分析, 发现其沉积有机质的组成特征揭示了该地区的古气候/环境变化, 具体如下:

末次盛冰期(LGM)内沉积柱的 TOC、 OC_T 、 OC_M 以及 TOC_{BF} 都表现为高值(图 4, 图 5, 图 7)。冰期强劲的冬季风带来丰富的营养盐, 使得研究区海洋初级生产力升高^[14], 同时在冰期由于海平面的降低^[33], 出露的宽阔陆架使得更多陆源有机质被搬运至研究区内^[4-5,7], 导致此阶段 OC_M 升高, 从而使得 TOC 以及 TOC_{BF} 都升高。但 GHE24L 沉积柱的 OC_M 在末次盛冰期并不是最高值(图 7), OC_T 和 TOC 以及 TOC_{BF} 却为最高值, 表明其沉积 OC 和埋藏 OC 的增加更多的是陆源 OC 输入增多导致的。此阶段其 $\delta^{13}C_{org}$ 为 -21% (图 4), 推测是由于 C_4 植被相对贡献增加导致

的^[29],表明在末次盛冰期南海北部 C_4 植被发育,气候干燥,与南海南部存在明显的不同^[34]。

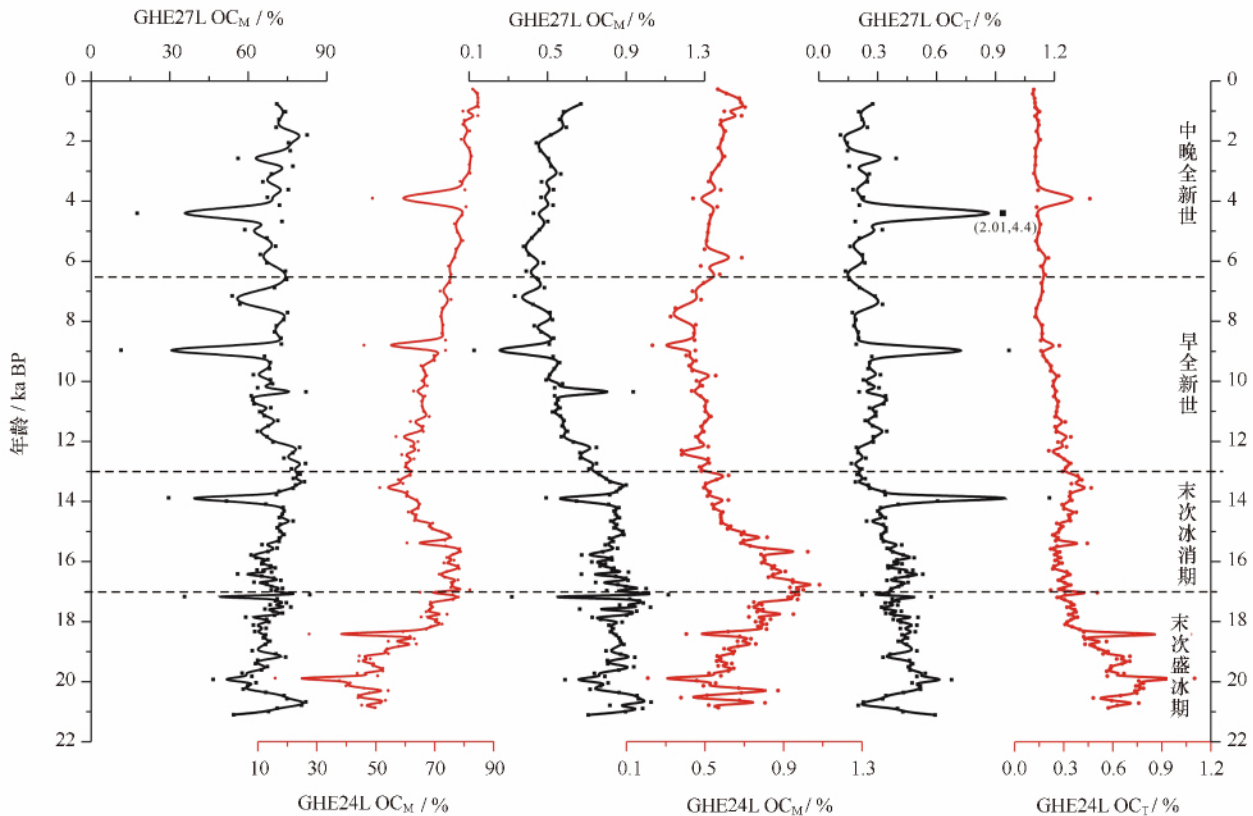


图7 GHE27L和GHE24L沉积柱海洋OC和陆源OC的剖面变化

Fig. 7 Profiles of OC_M and OC_T in the GHE27L and GHE24L cores

末次冰消期 TOC 、 OC_T 、 OC_M 以及 TOC_{BF} 都较高,但都表现出逐渐降低的趋势(图4,图5,图7),反映出海洋初级生产力逐渐降低、陆源有机质输入也逐渐减少。此时埋藏OC的减少是沉积OC的减少导致的。但GHE27L与GHE24L沉积柱的剖面变化不完全一致,GHE27L沉积柱中 OC_T 含量和 $\delta^{13}C_{org}$ 值都相对稳定, OC_M 和 TOC 呈现逐渐降低的趋势,表明此时沉积OC的减少是由于海洋OC的输入减少导致的,同时 C_3 植被的相对贡献增加,反映气候逐渐湿润。而GHE24L沉积柱中 OC_T 含量呈现小幅增加趋势, OC_M 含量先增加后减小, $\delta^{13}C_{org}$ 值先正偏后负偏,表明其沉积OC主要受海洋OC的输入影响。两沉积柱有机质表现出的这种差异可能与它们所处位置局部沉积环境的不同相关。

早全新世 TOC 、 OC_T 、 OC_M 以及 TOC_{BF} 都表现为下降趋势(图4,图5,图7)。沉积柱GHE27L的有孔虫氧同位素显示在早全新世 $\delta^{18}O$ 明显负偏^[5],表明海水温度升高或盐度降低,不利于海洋藻类的生

长^[2],导致 OC_M 含量降低。而此时海平面上升,陆源有机质的输入减少,但 $\delta^{13}C_{org}$ 值负偏(图4),表明 C_3 植被输入相对贡献增加,此时东亚夏季风增强、降雨增多,气候湿润。但两沉积柱沉积有机质在此阶段都表现出一系列的波动,推断可能与早全新世不稳定气候事件有关^[35]。

中晚全新世 TOC 、 OC_T 和 TOC_{BF} 都相对稳定,但 OC_M 明显升高(图4,图5,图7),反映出此阶段气候/环境相对稳定,这与孢粉数据所揭示的6.5 ka BP以来南海北部流域内的植被类型相对稳定的结论一致^[36]。从6.5 ka BP起,南海北部海岸线开始靠近台湾西南端陆地^[37],黑潮暖流及其他洋流能够为研究区带来丰富的营养盐^[10,38],从而刺激海洋初级生产力的提高,使得 OC_M 升高, $\delta^{13}C_{org}$ 值正偏。可以看出,两沉积柱的 TOC 、 OC_T 以及 $\delta^{13}C_{org}$ 值在约4.0 ka BP与9.0 ka BP时都出现不同程度的峰值,推测与全新世强降雨事件有关^[21]。此外,自2.0 ka BP以来,两沉积柱 OC_M 表现出明显的增加趋势,可能反映了近

20 ka以来人类活动对海洋初级生产力的影响^[39]。

5 结论

本文通过对南海北部神狐海域 GHE27L、GHE24L 沉积柱总体沉积有机质的高分辨率研究,得出以下主要结论:

(1)末次盛冰期以来,南海北部沉积有机质具有海洋和陆地混合来源,但以海洋有机质来源为主。冰

期陆源有机质对总有机质的相对贡献比全新世高。

(2)OC_M, OC_T 以及 TOC_{BF} 都表现出显著的冰期高、全新世低的特征。

(3)末次盛冰期南海北部气候相对干旱, C₄ 植被发育;末次冰消期以后,气候向温暖湿润转变;全新世夏季风增强、降雨增多;自 20 ka BP 以来,人类活动对南海北部海洋初级生产力产生一定的影响。

参考文献:

- [1] 赵泉鸿, 汪品先. 南海第四纪古海洋学研究进展[J]. 第四纪研究, 1999, 19(6):481-501.
Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(6): 481-501.
- [2] 周斌, 郑洪波, 杨文光, 等. 末次冰期以来南海北部物源及古环境变化的有机地球化学记录[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 407-413.
Zhou Bin, Zheng Hongbo, Yang Wenguang, et al. Provenance and paleo-environment changes in the northern part of South China Sea since the last glacial period as recorded by organic geochemistry proxies[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(3): 407-413.
- [3] 常琳, 罗运利, 孙湘君. 南海北部 MD05-2904 站位 2 万年以来孢粉记录的古环境演变[J]. 科学通报, 2013, 58(30):3079-3087.
Chang Lin, Luo Yunli, Sun Xiangjun. Paleoenvironmental change base on a pollen record from deep sea core MD05-2904 from the northern South China Sea during the past 20000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30):3079-3087.
- [4] Zhou Bin, Zheng Hongbo, Yang Wenguang, et al. Climate and vegetation variations since the LGM recorded by biomarkers from a sediment core in the northern South China Sea[J]. Journal of Quaternary Science, 2012, 27(9):948-955.
- [5] 王世朋, 李永祥, 付少英, 等. 南海北部陆坡 GHE24L 柱样沉积物磁性特征及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2014, 34(3):516-527.
Wang Shipeng, Li Yongxiang, Fu Shaoying, et al. Environmental changes as recorded by mineral magnetic properties of sediments from the core GHE 24L, South China Sea[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3):516-527.
- [6] 杨文光, 谢昕, 郑洪波, 等. 南海北部陆坡高速堆积体沉积物稀土元素特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 2012, 32(1): 74-81.
Yang Wenguang, Xie Xin, Zheng Hongbo, et al. Rare earth elements characteristics of sediments from high-deposition-rate sediment in the north slope of South China Sea and its provenance significance[J]. Journal Mineral Petrol, 2012, 32(1): 74-81.
- [7] 常晓红, 杨楚鹏, 刘芳, 等. 末次冰期以来南海北部下陆坡区沉积有机质地球化学特征及其意义[J]. 地球化学, 2014, 43(5): 538-546.
Chang Xiaohong, Yang Chupeng, Liu Fang, et al. Geochemical characteristics of sedimentary organic matter from the lower slope facies of northern South China Sea since the last glacial and significance[J]. Geochimica, 2014, 43(5): 538-546.
- [8] Kissel C, Laj C, Clemens S, et al. Magnetic signature of environmental changes in the last 1.2 Myr at ODP Site 1146, South China Sea [J]. Marine Geology, 2003, 201(1/3):119-132.
- [9] 张俊, 孟宪伟, 王湘芹. 晚第四纪南海北部陆坡沉积物常量元素比值对气候变冷事件的指示意义[J]. 海洋学报, 2013, 35(4):106-111.
Zhang Jun, Meng Xianwei, Wang Xiangqin. The record of major element ratio in late Quaternary at northern slope of the South China Sea its indicative significance on the cooling events[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(4):106-111.
- [10] Liu Jianguo, Xiang Rong, Kao S J, et al. Sedimentary responses to sea-level rise and Kuroshio Current intrusion since the Last Glacial Maximum: Grain size and clay mineral evidence from the northern South China Sea slope[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2016, 450:111-121.
- [11] He J, Zhao M X, Li L, et al. Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260 ka of core MD05-2904 from the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(15):2376-2384.
- [12] Shintani T, Yamamoto M, Chen M T. Paleoenvironmental changes in the northern South China Sea over the past 28,000 years: A study of TEX₈₆-derived sea surface temperatures and terrestrial biomarkers[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 6(6): 1221-1229.
- [13] Yan H, Soon W, Wang Y H. A composite sea surface temperature record of the northern South China Sea for the past 2500 years: A unique look into seasonality and seasonal climate changes during warm and cold periods[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141:122-135.
- [14] 李丽, 王慧, 汪品先. 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[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2008(6):793-799.
Li Li, Wang Hui, Wang Pinxian. Molecular organic geochemical record of paleoenvironmental changes of core 17937 in northern South China Sea Since 40ka[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008(6):793-799.
- [15] 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 27-31.
Wang Lüjiang, Sarnthein M. Forty thousand years high resolution paleoceanography records in the slope of northern South China Sea [J]. Quaternary Science, 1999, 19(1): 27-31.
- [16] 赵一阳, 李凤业, DeMaster D J, 等. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(1):38-43.

- Zhao Yiyang, Li Fengye, Demaster D J, et al. Pilot study on sedimentary rate and flux of southern Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 22(1):38-43.
- [17] Ingall E, Jahnke R, Ingall E, et al. Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(11):2571-2575.
- [18] Tyson R V. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modelling study[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(2):333-339.
- [19] 李丽, 王慧, 罗布次仁, 等. 南海北部 4 万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6):79-85.
- Li Li, Wang Hui, Luo B C R, et al. The characterizations and paleoceanographic significances of organic and inorganic carbon in northern South China Sea during past 40 ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6):79-85.
- [20] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1):245-284.
- [21] 葛倩, 孟宪伟, 初凤友, 等. 南海北部 ZHS-176 孔古海洋学记录: 氧同位素和有机碳[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5):73-80.
- Ge Qian, Meng Xianwei, Chu Fengyou, et al. Paleoceanographic records of core ZHS-176 from the northern South China Sea: oxygen isotope and organic carbon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(5):73-80.
- [22] 刘瑞娟, 于培松, 扈传昱, 等. 南极普里兹湾沉积物中有机碳和总氮的含量与分布[J]. *海洋学报*, 2014, 36(4):118-125.
- Liu Ruijuan, Yu Peisong, Hu Chuanyu, et al. Contents and distributions of organic carbon and total nitrogen in sediments of Prydz Bay, Antarctic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(4):118-125.
- [23] 尹希杰, 许江, 赵绍华, 等. 南日群岛东部海域岩芯沉积物有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值的变化特征及古气候环境意义[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(2):160-166.
- Yin Xijie, Xu Jiang, Zhao Shaohua, et al. Total organic carbon, organic carbon isotope and paleoclimatic significance of sediments core in the eastern Nanri Islands[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(2):160-166.
- [24] Bordovsky O K. Accumulation and transformation of organic substances in marine sediments[J]. *Marine Geology*, 1965, 3(1/2):3-114.
- [25] Prahl F G, Bennett J T, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44(12):1967-1976.
- [26] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4):289-302.
- [27] 葛晨东, 王颖, Pedersen T F, 等. 海南岛万泉河口沉积物有机碳、氮同位素的特征及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5):845-852.
- Ge Chendong, Wang Ying, Pedersen T F, et al. Variability of organic carbon isotope, nitrogen isotope, and C/N in the Wanquan River Estuary, eastern Hainan Island, China and its environmental implications[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5):845-852.
- [28] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(5):621-634.
- [29] 杨楚鹏, 刘芳, 常晓红, 等. 30ka 以来南海东北部陆坡坡底沉积有机质的长链正构烷烃特征及其古植被意义[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(4):881-889.
- Yang Chupeng, Liu Fang, Chang Xiaohong, et al. The n-alkane records from sediments in the base of slope (near abyssal plain) of the north-eastern South China Sea (SCS) over the last 30 ka: implication for paleovegetation[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4):881-889.
- [30] Yu F, Zong Y, Lloyd J M, et al. Bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2010, 87(4):618-630.
- [31] 蔡德陵, 孙耀, 张小勇, 等. 由东海、黄海沉积物中有机碳含量及稳定同位素组成重建 200 a 以来初级生产力历史记录[J]. *海洋学报*, 2014, 35(2):40-50.
- Cai Deling, Sun Yao, Zhang Xiaoyong, et al. Reconstructing a primary productivity history over the past 200a using sediment organic carbon content and the stable isotope composition from the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 35(2):40-50.
- [32] Wei Gangjian, Liu Ying, Li Xianhua, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37:593-602.
- [33] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 2001, 292(5517):679-686.
- [34] Hu Jianfang, Peng Ping'an, Fang Dianyong, et al. No aridity in Sunda Land during the Last Glaciation: Evidence from molecular-isotopic stratigraphy of long-chain n-alkanes[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2003, 201(3):269-281.
- [35] 徐海. 中国全新世气候变化研究进展[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(2):9-16.
- Xu Hai. Advance in research on the Holocene climate fluctuations[J]. *Geology Geochemistry*, 2001, 29(2):9-16.
- [36] Sun Xiangjun, Li Xun. A pollen record of the last 37 ka in deep sea core 17940 from the northern slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1/4):227-244.
- [37] Zong Y Q, Huang G, Switzer A D, et al. An evolutionary model for the Holocene formation of the Pearl River delta, China[J]. *Holocene*, 2009, 19(1):129-142.
- [38] 刘志飞, 李夏晶, Colin C, 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率黏土矿物记录及其时间序列物源区分析[J]. *科学通报*, 2010, 55(29):2852-2862.

Liu Zhifei, Li Xiajing, Colin C, et al. A high-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(29):2852–2862.

[39] 贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近年来富营养化加剧的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2):158–165.

Jia Guodong, Peng Ping'an, Fu Jiemo. Sedimentary records of accelerated eutrophication for the last 100 years at the Pearl River Estuary [J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(2): 158–165.

Composition of sedimentary organic matter in Shenhu, northern South China Sea since the Last Glacial Maximum and its implication for paleoclimate

Lei Yan^{1,2}, Hu Jianfang¹, Xiang Rong³, Fu Shaoying⁴, Li Yongxiang⁵, Cao Huairen^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 5. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: The total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), C/N ratios and the stable carbon isotope of bulk sediment organic matter ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) in the GHE27L and GHE24L cores, collected from Shenhu area in the northern South China Sea (NSCS), were analyzed to reveal the composition of sedimentary organic matter (OM) and the paleoclimate changes since the Last Maximum Glacial (LMG). The values of TOC, TN, C/N, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ranged from 0.53% to 1.81%, 0.07% to 0.18%, 8.2 to 16.0 and -23.6% to 20.3% in Core GHE27L, and 0.45% to 1.65%, 0.09% to 0.24%, 5.3 to 12.2 and -22.6% to -20.4% in Core GHE24L, respectively. The profiles of bulk OM indicated that the OM mixed origins from both terrigenous and marine OM, and that marine OC was the major source of OC in the NSCS since the LGM. The relative contribution of terrigenous OM in the glaciation was higher than that in the Holocene. The climate was dry and C_4 plants were to thrive in the NSCS during the last glaciation. The precipitation enhanced due to the strong summer Asian Monsoon in the NSCS during the Holocene. However, it seems that the primary productivity in the NSCS was impacted by the anthropogenic activities since the last 2.0 ka BP.

Key words: northern South China Sea; Last Glacial Maximum; stable carbon isotope; paleoclimate