

# 末次冰期以来南海北部沉积有机碳记录 及其古植被环境信息\*

周 斌<sup>①②③</sup> 郑洪波<sup>①</sup> 杨文光<sup>④</sup> 韦刚健<sup>③</sup> 李 丽<sup>②</sup> 王 慧<sup>②</sup>

(①南京大学地球科学与工程学院表生地球化学研究所,南京 210093; ②同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092;  
③中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室,广州 510640; ④成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059)

**摘要** 末次冰期以来南海北部深海沉积物中陆源植被碎屑来源及其指示的植被类型变化等一直存在争议。正构烷烃比值、正构烷烃碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ )及总有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ )等有机碳指标的应用可能为之提供新的证据。南海北部 MD05-2905 岩芯中正构烷烃比值  $\text{C}_{31}/\text{C}_{27}$ ,  $\text{C}_{31}/(\text{C}_{31}+\text{C}_{27}+\text{C}_{29})$  和 ACL(长链烷烃平均链长)等呈现末次冰期高,全新世低的变化,指示末次冰期草本植物相对增多,全新世木本植物较多。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  及  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  均呈现末次冰期相对偏正,全新世偏负的变化,指示  $\text{C}_4$  植物在冰期增多,间接印证草本植物的增多。末次冰期,由于相对冷干的气候、大气  $\text{CO}_2$  浓度的降低,以及低海平面导致陆架的广阔出露,均有利于更多草本植物的生长。末次冰消期及全新世随着温度的升高及降水的增多,森林植被发育,  $\text{C}_3$  植物相对较多。该岩芯碳同位素结果与南海北部孢粉结果的对比表明,南海北部深海沉积中正构烷烃指标指示南海北部周边较大区域范围的植被变化信息。

**关键词** 南海北部 末次冰期  $\text{C}_3/\text{C}_4$  植物 正构烷烃 单体碳同位素

**中图分类号** P534.63 **文献标识码** A

## 1 前言

西太平洋边缘海陆架广阔,冰期旋回中随海面升降其地理变迁至为强烈;南海地处东亚季风带,是亚洲夏季风最早爆发地。南海特殊的形态和地理位置决定该区域古植被、古气候研究的重要性<sup>[1,2]</sup>。末次冰盛期海平面低于现今 100~120m<sup>[3]</sup>,此时南海北部陆架宽达 100 多公里,出露面积达  $40 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海平面的降低、陆架的出露致使海陆分布、气候环境以及相应区域的植被都可能发生了极大的变化<sup>[4]</sup>。植被类型及格局会极大地影响地面反射、全球气候碳储量及碳循环,因而正确推断该区域植被对气候模拟和未来气候预测具有重要意义。

然而,末次冰期南海北部地带性植被是亚热带常绿阔叶林还是温带草原,存在不同观点<sup>[5-10]</sup>。近年来,随着 IODP 计划在南海的开展,南海北部深海沉积高分辨率地层学的优越条件,对气候、环境变迁的灵敏性及“放大效应”,使其成为东亚季风区古气候环境变化研究良好的记录体<sup>[2]</sup>,陆源植被研究得

以广泛开展<sup>[11-14]</sup>。然而,南海北部深海沉积中植被碎屑来源所指示的植被类型等,如南海北部深海沉积指示的植被是南海周边的植被还是陆架上的植被<sup>[4,8,10]</sup>一直存在争议?总体来说,以往的研究主要是从孢粉资料来开展,孢粉的产生及扩散,沉积过程十分复杂且难以定量;由此得到的不同看法都需要其他的证据来证实。

南海北部周边陆地记录也有通过有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{Total Organic Carbon}}$ ,简称为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ )和正构烷烃碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{n-alkanes}}$ ,简称为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ )进行古植被信息的探讨<sup>[15,16]</sup>。陆生高等植物因其具有不同的光合途径基本分成  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物。 $\text{C}_3$  植物其  $\delta^{13}\text{C}$  值通常在  $-32\text{‰} \sim -20\text{‰}$  范围内变化(平均值  $-27\text{‰}$ ),  $\text{C}_4$  植物其  $\delta^{13}\text{C}$  值通常在  $-15\text{‰} \sim -9\text{‰}$  范围内变化(平均值  $-13\text{‰}$ ),  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物其  $\delta^{13}\text{C}$  值具有不重合的分布范围,因此可以利用陆地土壤中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  来重建  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物的相对丰度变化<sup>[17,18]</sup>。对海洋沉积物而言,有机碳主要来源于陆地植物碎屑和海洋生物碎屑,因此深海总有机碳通常可能反映陆地植被输入

第一作者简介:周 斌 女 33 岁 副教授 第四纪环境专业 E-mail:zhoubinok@163.com

\* 国家自然科学基金项目(批准号:40802034)、同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金(批准号:MG0910)和中国科学院广州地球化学研究所中国科学边缘海地质重点实验室开放基金(批准号:MSGL09-04)资助

和海洋内生源的混合来源<sup>[19]</sup>。此外,海洋藻类其有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常是 $-19\text{‰} \sim -22\text{‰}$ <sup>[19]</sup>,介于 $\text{C}_3$ 与 $\text{C}_4$ 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间,因此很难单独利用深海沉积 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 来恢复陆源植被变化。近年来,分子化石已成为过去全球变化研究中极具潜力的气候代用记录之一<sup>[20-37]</sup>,特别是正构烷烃类化合物(也称脂类,叶蜡类化合物)及其单体碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ )是研究植被演化的良好的指标<sup>[26,27]</sup>。沉积物普遍含有正构烷烃类化合物,这部分化合物在地质时期较为稳定<sup>[24]</sup>,可相对真实地反映原始的生物、气候信息。其中,长链正构烷烃(以下简称正构烷烃)大都由陆地高等植物产生,经河流或风尘搬运至海洋沉积物中,目前已被广泛用于重建陆地上的古环境和古植被<sup>[19,28,29]</sup>。研究显示,木本植物的正构烷烃以 $\text{C}_{27}$ 和 $\text{C}_{29}$ 为主峰,草本植物以 $\text{C}_{31}$ 和 $\text{C}_{33}$ 为主峰<sup>[21]</sup>。根据这一分布特征,利用这些化合物的不同碳数之间的比值如 ACL(长链正构烷烃平均链长), $\text{C}_{31}/\text{C}_{27}$ 和 $\text{C}_{31}/(\text{C}_{27}+\text{C}_{29}+\text{C}_{31})$ 等可有效区别植被类型,反映了木本植物和草本植物相对变化的关系<sup>[24]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 记录可以进一步从植物利用光合作用的方式上提取植被演化信息<sup>[26,27]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 较植物本身约 $6\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 偏负, $\text{C}_3$ 植物和 $\text{C}_4$ 植物产生的正构烷烃其 $\delta^{13}\text{C}$ 分别在 $-32\text{‰} \sim -39\text{‰}$ 之间和 $-18\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 之间的范围,沉积后期和热改造作用对 $\delta^{13}\text{C}$ 影响很小,因此可以利用沉积物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 恢复 $\text{C}_3$ 与 $\text{C}_4$ 植物比例变化<sup>[23,25]</sup>。正构烷烃比值在南海的应用逐渐开展<sup>[28,29]</sup>,但 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 在南海北部的应用鲜有报道。本次工作对南海北部 MD05-2905 沉积柱状样进行有机地球化学分析,运用正构烷烃含量比值及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 记录对南海北坡深海沉积物陆地植被碎屑来源及其相应的气候环境信息进行探讨。

## 2 研究材料与方法

本次研究工作的样品是由法国 Marion Dufresne 号科学考察船在南海北部高速沉积体<sup>[38]</sup>获取的重力箱式样,这次科学考察活动是中法联合 Marco-Polo 航次的第一航段,同时也是“国际海洋全球变化”计划(IMAGES)的第 12 航次。采样站位 MD05-2905 位置为  $20^{\circ}08.17'N$ ,  $117^{\circ}21.61'E$ (图 1),水深为 1647m,箱式样长度 11.94m。该站沉积条件相对稳定,沉积特征基本无明显扰动现象,未见浊流沉积,因此代表了南海正常海洋环境的稳定沉积记录。

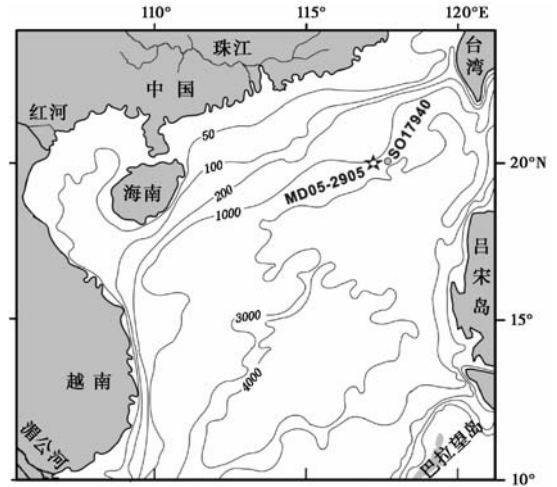


图 1 南海东北部 MD05-2905 站位置图  
Fig. 1 Location of MD05-2905 in the northeastern part of South China Sea

MD05-2905 站年代用 AMS  $^{14}\text{C}$  绝对测年法获得,详细见文献 [39,40]。本次研究共对 11 个样品进行了 AMS  $^{14}\text{C}$  分析,并通过内插和外插法获得各样品所代表的年龄,得到顶部约为 2kaB. P.,底部约为 28kaB. P.,因此,推测距今 28ka 以来的平均沉积速率为 42cm/ka。

本次研究按 8cm 间距取样,进行有机地球化学分析,样品平均分辨率约为 200a。样品处理过程为:称取 1~2g 冷冻干燥后样品并加入一定量的有机物内标,用  $\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{CH}_3\text{OH}(3:1, \text{V}/\text{V})$  超声抽提 ( $4 \times 7\text{ml}$ ),离心分离收集上清液 (3000rpm/5 分钟),得到总的可萃取有机质 (total extractable lipids, 简称 TEL);将 TEL 萃取液浓缩后加入 6% KOH 的甲醇溶液,室温放置过夜后用正己烷萃取非酸类物质 ( $4 \times 3\text{ml}$ );并用硅胶柱层析分离出烷烃和醇类组分,烷烃类组分浓缩加  $30\mu\text{L}$  正己烷定量后直接进行气相色谱分析。

气相色谱分析在配有 HP-1 毛细色谱柱 ( $50\text{m} \times 0.32\text{mm} \times 0.17\mu\text{m}$ , J & W) 和氢火焰离子检测器的 Trace GC 2000 气相色谱仪 (Finnigan, Thermo Electro) 上完成。进样口和检测器温度均为  $300^{\circ}\text{C}$ ,不分流方式进样,氦气为载气,流速 1.2ml/分钟。升温程序为:初始温度  $80^{\circ}\text{C}$ ,保持 1 分钟,先以  $10^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至  $200^{\circ}\text{C}$  后,再以  $5^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至  $270^{\circ}\text{C}$ ,然后以  $2^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至  $300^{\circ}\text{C}$  保持 10 分钟,最后以  $5^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至  $310^{\circ}\text{C}$  保持 5 分钟。

抽提分离后的烷烃在经 GC (HP 6890) 分析之

后,送 GC (HP 6890) - IRMS (GV Instruments IsoPrime) 联用仪进行  $\delta^{13}\text{C}$  测量。实验中使用的石英毛细管柱为 HP-5 MS (30m×0.32mm×0.25 $\mu\text{m}$ ), 载气为氦气, 进样量 1~2  $\mu\text{L}$ 。升温程序为: 初始温度 80 $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 2 分钟, 10 $^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至 220 $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 2 分钟, 再以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$  升温至终温 290 $^{\circ}\text{C}$ , 终温恒温 15 分钟。每天对标准物质 (Indiana STD) 进行测量以检测仪器的性能, 对每个样品都进行了重复测量。对标准物质测量结果和样品重复测量结果的统计分析表明, 实验的整体误差小于 0.4%。取重复测量的结果的均值作为最终的结果。

分析  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  的样品, 首先与过量的浓度约为 10% 的盐酸进行反应, 稍微加热促进反应确保无机碳酸盐去除干净。然后多次洗涤至中性, 将样品在 60 $^{\circ}\text{C}$  温度下烘干。有机碳同位素前处理实验采用的是沈吉和王楚<sup>[41]</sup> 提倡的静态灼烧氧化法的方法。制备的  $\text{CO}_2$  气体在 Finigan 公司生产的 Delta Plus 气体质谱仪上测量其  $\delta^{13}\text{C}$  值。对重复测样和标准物质重复测量结果的统计分析表明, 实验的整体误差估计在  $\pm 0.2\%$  (PDB) 以内。取重复测量结果的平均值作为最终的结果。

以上样品的前处理在同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 仪器测试在中国科学院广州地球化学研究所完成。

### 3 结果与分析

MD05-2905 岩芯沉积物样品中检测出种类丰富的正构烷烃类化合物。正构烷烃系列化合物碳数分布主要为 C15~C33, 最高峰碳数多为长链的 C29 或 C31, 长链正构烷烃具有明显的奇偶优势。这种分布特征揭示该地区沉积环境中高碳数正构烷烃主要来源为高等植物, 微生物和菌藻类的输入量很少<sup>[40]</sup>。

如图 2 所示, 该岩芯沉积物样中正构烷烃比值  $\text{C31}/\text{C27}$ ,  $\text{C31}/(\text{C27}+\text{C29}+\text{C31})$  和 ACL (表达式为  $\text{ACL} = (25 \times \text{C25} + 27 \times \text{C27} + 29 \times \text{C29} + 31 \times \text{C31} + 33 \times \text{C33}) / (\text{C25} + \text{C27} + \text{C29} + \text{C31} + \text{C33})$ ) 自末次冰期以来总体及细节上呈现较好的一致性, 表明不同碳数的长链正构烷烃来源较为一致, 未受细菌作用或降解程度同步, 因此正构烷烃比值能较好地反映陆源高等植被的相对变化。本文选取  $\text{C31}/\text{C27}$  指标作为代表进行详细分析。

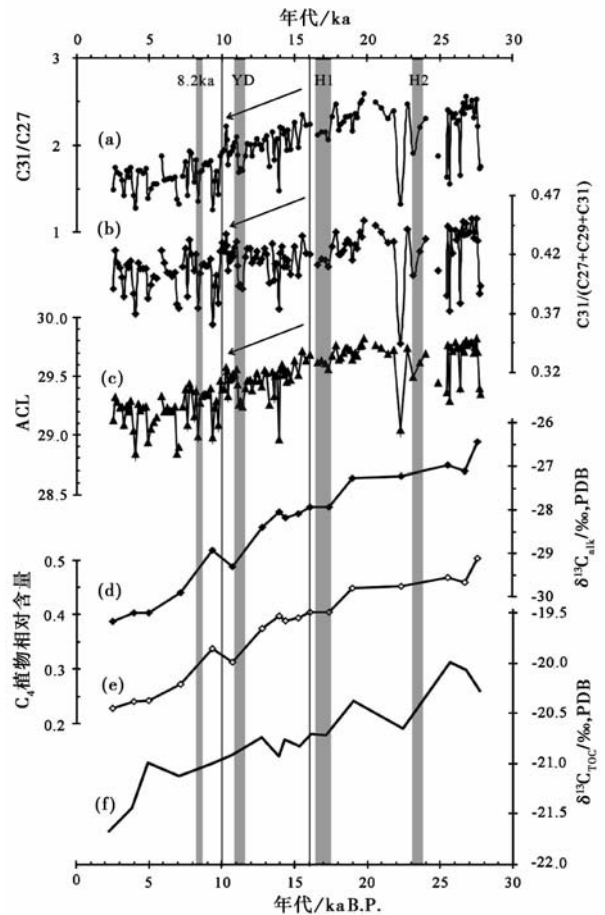


图 2 南海北部 MD05-2905 岩芯正构烷烃指标及植被变化 (a)  $\text{C31}/\text{C27}$  曲线 (b)  $\text{C31}/(\text{C27}+\text{C29}+\text{C31})$  曲线 (c) ACL 曲线 (d) 正构烷烃碳同位素曲线 (e)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  恢复得到的  $\text{C}_4$  植物相对含量变化 (f)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$

Fig. 2 *n*-alkanes proxies from Core MD05-2905 in Northern South China Sea and variations of paleovegetation. (a)  $\text{C31}/\text{C27}$  curve, (b)  $\text{C31}/(\text{C27} + \text{C29} + \text{C31})$  curve, (c) ACL curve, (d)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  curve, (e)  $\text{C}_4$  relative abundance calculated by  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  and (f)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  curve

#### 3.1 正构烷烃 $\text{C31}/\text{C27}$ 比值

$\text{C31}/\text{C27}$  比值总体上呈现逐渐偏低的变化, 冰期相对较高间冰期低 (图 2), 其中在末次冰期及全新世呈现快速波动的变化, 末次冰消期迅速降低的特征。按变化规律可划分为 3 个时段: 27.8~16.0kaB.P. 时期,  $\text{C31}/\text{C27}$  较高, 均值为 2.2, 变幅较大; 16~10kaB.P. 时期,  $\text{C31}/\text{C27}$  比值持续降低, 平均值为 2.0; 10~2kaB.P. 时期,  $\text{C31}/\text{C27}$  值为 1.6, 在较低的水平波动频繁。正构烷烃比值增高时, 代表草本植物增多。MD05-2905 岩芯  $\text{C31}/\text{C27}$  比值的变化表明, 末次冰期 (27.8~16.0kaB.P.) 草

本植物相对较多,但在短暂时段木本植物迅速增多,草本植物与木本植物交替增多;16~10kaB.P.木本植物相对草本植物比例迅速增多;10~2kaB.P.木本植物总体增多,草本植物在短暂时段明显增加。

### 3.2 正构烷烃碳同位素和有机碳同位素

本文按照通用的方法<sup>[27]</sup>对主峰长链正构烷烃(C27,C29和C31)碳同位素组成进行了加权平均,以代表长链正构烷烃整体的碳同位素组成(mean  $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ ,简称为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ ),计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{C27}} \times \text{C27} + \delta^{13}\text{C}_{\text{C29}} \times \text{C29} + \delta^{13}\text{C}_{\text{C31}} \times \text{C31}) / (\text{C27} + \text{C29} + \text{C31})$$

其中C27,C29和C31分别为27,29和31碳数正构烷烃的含量值。

MD05-2905序列距今28ka以来的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 结果及其恢复得到的植被变化趋势如图2d和2e所示。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 变化范围为-30.59‰~-26.45‰,呈现全新世相对末次冰期偏负的变化趋势,指示冰期C<sub>4</sub>植物相对较多,全新世C<sub>3</sub>植物增多。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 的变化基本上也可分为3个阶段:冰期27.8~16.0kaB.P.,碳同位素偏重,平均值为-27‰,C<sub>4</sub>植物与C<sub>3</sub>植物比例约各占45%和55%;冰消期16~10kaB.P.,正构烷烃碳同位素持续偏轻,平均值为-28.3‰,指示C<sub>3</sub>植物迅速增多;全新世10~2kaB.P.,碳同位素在早期突然偏重,之后迅速偏轻,平均值为-30.3‰。正构

烷烃碳同位素指示末次冰期以来C<sub>3</sub>与C<sub>4</sub>植物混合存在,末次冰期C<sub>4</sub>植物相对较多;全新世植被类型总体上以C<sub>3</sub>植物为主。

MD05-2905序列总有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ )结果如图2f所示。距今28ka以来, $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 变化范围为-21.66‰~-19.99‰,与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 的变化趋势一致,呈现自末次冰期逐渐偏低(负)的变化。

## 4 讨论

MD05-2905岩芯正构烷烃比值均指示末次冰期草本植物相对增多,全新世木本植物较多。该岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 结果表明,南海北部自末次冰期以来一直以C<sub>3</sub>植物为主,末次冰期C<sub>4</sub>植物相对较多。通常,C<sub>3</sub>植物有C<sub>3</sub>草本和C<sub>3</sub>乔木,C<sub>4</sub>植物主要是草本植物,因而冰期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 相对偏正结果间接印证草本植物相对较多的观点。该岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 变化与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 变化趋势一致,呈现自末次冰期逐渐偏低(负)的变化,但前者变化范围相对后者较小,这体现了海洋内生源的混合作用。冰期时,陆源营养盐输入增多,如C29含量指示陆源物质在冰期输入量较大(图3c所示),海洋生产力强,海洋输入相应增多<sup>[40]</sup>,因海洋生物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 较C<sub>4</sub>植物偏负,故利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 来估算陆地植被变化时会低估C<sub>4</sub>植物的相对含量;全新世,海洋生物来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对全新世较偏负的C<sub>3</sub>植物输入偏正,故 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 相对正偏。总体上,该岩芯

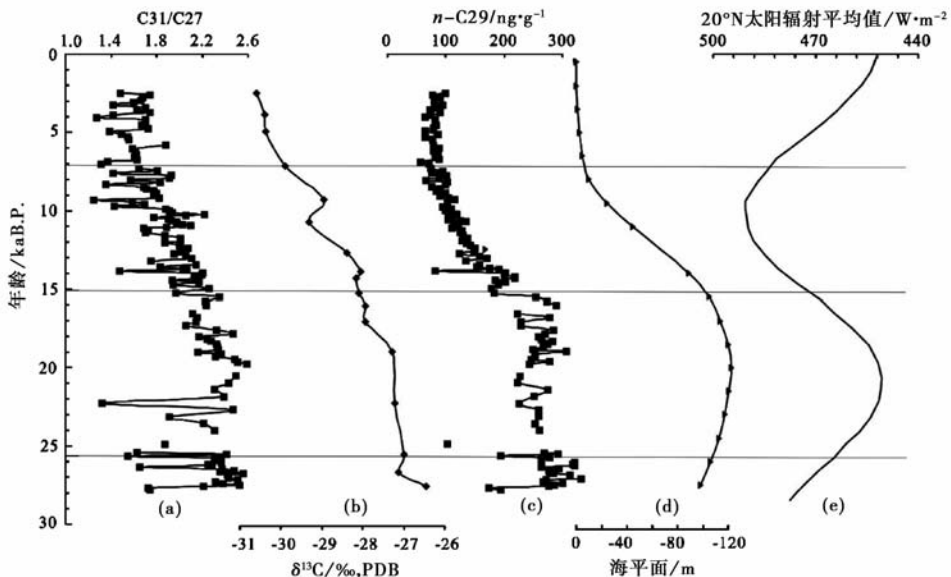


图3 南海北部 MD05-2905 正构烷烃指标与气候影响因素

(a) C31/C27 比值 (b)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  (c) C29 含量值 (d) 相对于现今水平的海平面变化<sup>[3]</sup> (e) 北纬 20° 夏季太阳辐射平均值变化

Fig. 3 Variations of alkanes proxies from Core MD05-2905 in nSCS and climatic factors. (a) C31/C27 curve, (b)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  curve, (c) C29 content curve, (d) sea level change<sup>[3]</sup> and (e) average Summer Insolation of 20°N

$\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  记录仍能反映陆源  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植被在末次冰期旋回的变化。

MD05-2905 岩芯正构烷烃及  $\delta^{13}\text{C}$  变化, 与指示陆源输入的长链正构烷烃含量 C29 (图 3c), 海平面变化 (图 3d) 及  $20^\circ\text{N}$  夏季太阳辐射量 (图 3e) 有较好的对应关系, 这暗示着深海记录的陆源高等植物变化受气候、物源输入与沉积搬运的多重影响。在南海北部, 末次冰期温度比全新世低  $3 \sim 4^\circ\text{C}$  [42], 但平均温度仍在  $22^\circ\text{C}$  以上, 温度不足以成为  $\text{C}_4$  植物生长的限制条件 [15], 而冰期时较低的大气  $\text{CO}_2$  浓度及相对干旱的气候更利于  $\text{C}_4$  草本植物的生长 [43]。此外, 末次冰期海平面降低, 陆架广阔出露, 陆架上的沙质土壤更有利于草本植物的生长 [41]。末次冰消期以来, 随着海平面的上升, 陆架被淹, 南海北部深海沉积来自陆架上的植被输入减少, 如孢粉资料显示陆架上的草本蒿属植物迅速减少, 而夏季太阳辐射量的增加导致海陆受热对比增强, 陆地的降雨量增多 [44], 南海北部较高的温度及湿度有利于该区域木本植物的繁盛。木本植被繁茂导致森林郁闭度增加, 从而进一步影响喜阳  $\text{C}_4$  植物的生长。

在冰期旋回上, 南海北部钻孔已有的正构烷烃含量记录对植被的指示较为一致 [28, 29]。由于 MD05-2905 具有更高的时间分辨率, 其记录可揭示出冰期间冰期内陆源植被的千年尺度变化, 如 H2, H1, YD 以及 8.2ka 变冷事件 [42] 在 C31/C27 记录中均有体现 (如图 2 阴影部分), 表现为 C31/C27 出现低值, 表明木本植物增多, 推测这可能与周边山地植被林线降低有关 [14]。这些结果在木本/草本植被类型上与临近钻孔的孢粉资料 [12, 14] 能较好对应。孢粉结果显示末次冰期时草本植物花粉增多, 全新世时以松属木本花粉为主; 冰期间冰期内高山针叶林花粉和蒿属花交替出现峰值 [12, 14]。

然而从  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物类型角度来看, 冰期孢粉以蒿属为主, 蒿属属于  $\text{C}_3$  植物, 与 MD05-2905 岩芯  $\delta^{13}\text{C}$  记录指示的末次冰期  $\text{C}_4$  草本植物相对增多相矛盾。这可能是由于深海沉积中孢粉与有机分子的来源、搬运及沉积过程的不同所导致。研究认为, 末次冰期南海北部深海钻孔中较多的蒿属孢粉可能主要来自大陆架。其一由于冰期陆架广阔出露, 而陆架的沙质土壤喜于蒿属植物的生长 [41]。现代沿海陆架如苏北海岸宽达数公里的地面上生长着一些盐蒿、碱蓬等貌似草原的草本植物群落 [8], 支持蒿属在陆架区域的大量存在。二是草本花粉个体较小, 他们的传播距离较近, 因而台湾岛屿及东南沿海大

陆较多的  $\text{C}_4$  草类如禾本科、莎草科等 [5, 9] 较少能搬运至南海北部海洋沉积物中, 虽然其他证据表明南海北部沉积物中接受了大量来自此区域的陆源物质 [38, 45, 46]。此外, 蒿属孢粉产量较大, 从而可能掩盖了其他草本植物孢粉的信号。正构烷烃组分主要产生于植物叶蜡, 南海北部深海沉积正构烷烃物质以河流搬运为主 [46], 因此其所受陆架出露面积及其上生长植被的影响相对孢粉而言要小。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  值呈现冰期偏正的变化, 表明深海有机分子碳沉积不仅来自陆架  $\text{C}_3$  植物蒿属, 还有来自南海周边区域的  $\text{C}_4$  植物的大量输入。全新世以来, 虽陆源物质的输入减少 (图 3c 中 C29 含量所示), 但经沿岸流及洋流自中国大陆东南沿海地区及台湾地区等地搬运的陆源碎屑物质可能并没有发生太大的变化 [11]。因此, 末次冰期距今 28ka 以来南海北部深海沉积中正构烷烃指标指示南海北部周边较大区域范围的植被随气候环境变化的信息。

综上所述, 末次冰期以来, 南海北部深海沉积陆生高等植被碎屑来自陆架及周边大陆如南海北部沿岸地区及其附近岛屿 (包括台湾岛)。南海北部深海沉积中正构烷烃指标指示南海北部周边较大区域范围的植被变化信息。南海北部深海沉积植被类型变化不仅与海平面升降、陆架出露的面积及其上的植被状况有关, 而且受控于东亚季风气候的影响。

## 5 结论

高等植被来源的长链正构烷烃的比值可以反映植被中木本与草本类型的变化,  $\delta^{13}\text{C}$  可以反映植被类型中  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物比例的变化, 对两者进行结合从而可探讨南海北部深海沉积陆源植被碎屑来源及其植物类型演化信息。

(1) 从正构烷烃证据来看, 南海北部沉海沉积中的陆源植物碎屑不仅有来自大陆架的物质, 还有来自南海北部沿岸及台湾岛屿的物质。

(2) 南海北部深海沉积正构烷烃指标指示南海北部区域陆源植被呈现冰期-间冰期旋回变化, 冰期草本植物相对增多, 全新世木本植物较多; 冰期旋回上, 海平面及夏季风强度对陆源植被变化影响较大。

(3)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  结果表明, 该区域末次冰期以来  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物混合存在, 冰期  $\text{C}_4$  植物相对增多, 全新世  $\text{C}_3$  植物较多, 印证了末次冰期草本植物增多的观点;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  的一致变化, 暗示其在边缘海应用于陆源植被变化的可能性。

**致谢** 本项研究样品及基础数据是由国际海洋全球变化研究(IMAGES)计划 2005 年 MARCO 航次和国际大洋钻探计划 IODP 提供。实验分析过程中,得到中国科学院广州地球化学研究所廖玉宏副教授和陈华山工程师的大力帮助,审稿专家对文章提出了建设性的修改意见,在此一并致谢。

## 参考文献 (References)

- 1 Wang Pingxian, Wang Luejiang, Bian Yunhua *et al.* Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Surface circulation and carbonate cycles. *Marine Geology*, 1995, **127**(1~4):145~165
- 2 赵泉鸿,汪品先.南海第四纪古海洋学研究进展.第四纪研究, 1999,(6):481~501  
Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: A review. *Quaternary Sciences*, 1999,(6):481~501
- 3 Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 2001, **292**:679~686
- 4 孙湘君,罗运利.用花粉记录探索古植被——答“关于华南地区末次冰盛期植被类型的讨论”.第四纪研究,2004,**24**(2):217~221  
Sun Xiangjun, Luo Yunli. From pollen record to paleovegetation: Reply to “a discussion on the vegetation types during LGM time in South China”. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(2):217~221
- 5 Zheng Z, Lei Z Q. A 400,000 year record of vegetational and climatic changes from a volcanic basin, Leizhou Peninsula, Southern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, **145**(4):339~362
- 6 Yu G, Chen X, Ni J *et al.* Palaeovegetation of China: A pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography*, 2000, **27**(3):635~664
- 7 吕厚远,刘嘉麒,储国强等.末次冰期以来湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录及古环境变化.古生物学报,2003,**42**(2):284~291  
Lü Houyuan, Liu Jiaqi, Chu Guoqiang *et al.* A study of pollen and environment in the Huguangyan Maar Lake since the last glaciation. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2003, **42**(2):284~291
- 8 刘金陵,王伟铭.关于华南地区末次冰盛期植被类型的讨论.第四纪研究,2004,**24**(2):213~216  
Liu Jinling, Wang Weiming. A discussion on the vegetation types during LGM time in South China. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(2):213~216
- 9 Liew Pingmei, Huang Shuyue, Kuo Chaoming *et al.* Pollen stratigraphy, vegetation and environment of the last glacial and Holocene—A record from Toushe Basin, Central Taiwan. *Quaternary International*, 2006, **147**(1):16~33
- 10 刘金陵.再论华南地区末次冰盛期植被类型.微体古生物学报, 2007, **24**(1):105~112  
Liu Jinling. Additional remarks on vegetation types in South China during the last glacial maximum (LGM). *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2007, **24**(1):105~112
- 11 Sun Xiangjun, Li Xun. Different dynamics and routes of modern pollen transport in the northern and southern parts of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 1998, **41**(1):57~61
- 12 Sun Xiangjun, Li Xun. A pollen record of the last 37ka in deep sea core 17940 from the northern slope of the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4):227~244
- 13 Sun Xiangjun, Luo Yunli, Huang Fei *et al.* Deep sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian Monsoon. *Marine Geology*, 2003, **201**(1~3):97~118
- 14 Luo Yunli, Sun Xiangjun. Vegetation evolution and millennial-scale climatic fluctuations since Last Glacial Maximum in pollen record from Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(8):793~799
- 15 Fuhrmann A, Mingram J, Lucke A *et al.* Variations in organic matter composition in sediments from Lake Huguang Maar (Huguangyan), South China during the last 68ka: Implications for environmental and climatic change. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(11):1497~1515
- 16 刘 强,顾兆炎,刘嘉麒等.62kaBP 以来湖光岩玛珥湖沉积物有机碳同位素记录及其古气候环境意义.海洋地质与第四纪地质, 2005, **25**(2):115~126  
Liu Qiang, Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi *et al.* Bulk organic carbon isotopic record of Huguangyan Maar Lake, South Eastern China and its paleoclimatic and paleoenvironmental significance since 62kaBP. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, **25**(2):115~126
- 17 Cerling T E, Quade J, Wang Y *et al.* Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators. *Nature*, 1989, **341**:138~139
- 18 Zhou Bin, Shen Chengde, Zheng Hongbo *et al.* Vegetation evolution on the Central Chinese Loess Plateau since Late Quaternary evidenced by elemental carbon isotopic composition. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(12):2082~2089
- 19 Prahf F G, Ertel J R, Goni M A *et al.* Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(14):3035~3048
- 20 Brassell S C, Eglinton G, Marlowe I T *et al.* Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment. *Nature*, 1986, **320**:129~133
- 21 Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments—II. *Organic Geochemistry*, 1987, **11**(6):513~527
- 22 Prahf F G, Wakeham S G. Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for palaeotemperature assessment. *Nature*, 1987, **330**:367~369
- 23 Hayes J M, Freeman K H, Popp B N *et al.* Compound-specific isotopic analyses: A novel tool for reconstruction of ancient biogeochemical processes. *Organic Geochemistry*, 1990, **16**(4~6):1115~1128
- 24 Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**(7):867~900
- 25 Collister J W, Rieley G, Stern B *et al.* Compound-specific  $\delta^{13}\text{C}$  analysis of leaf lipids from plants with differing carbon dioxide metabolism. *Organic Geochemistry*, 1994, **21**(6~7):619~627
- 26 Huang Yongsong, Street-Perrott F A, Perrott R A *et al.* Glacial-interglacial environmental changes inferred from molecular and compound-specific  $\delta^{13}\text{C}$  analyses of sediments from Sacred Lake, Mt.

- Kenya. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(9):1383 ~ 1404
- 27 Zhang Zhaohui, Zhao Meixun, Eglinton G *et al.* Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**(5 ~ 6):575 ~ 594
- 28 He Juan, Zhao Meixun, Li Li *et al.* Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260ka of core MD05-2904 from the Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(15):2376 ~ 2384
- 29 李 丽, 王 慧, 汪品先. 南海北部 17937 岩芯四万年来古环境变化的分子有机地球化学记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 2008, **33**(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. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, **33**(6):793 ~ 799
- 30 郭志刚, 杨作升, 林 田等. 东海泥质区单体正构烷烃的碳同位素组成及物源分析. *第四纪研究*, 2006, **26**(3):384 ~ 390
- Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Lin Tian *et al.* Compound-specific carbon isotope compositions of individual *n*-alkanes in the East China Sea mud areas. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(3):384 ~ 390
- 31 王志远, 谢树成, 陈发虎. 临夏塬堡黄土层 S<sub>1</sub> 古土壤中的正构烷烃及其古植被意义. *第四纪研究*, 2004, **24**(2):231 ~ 235
- Wang Zhiyuan, Xie Shucheng, Chen Fahu. *n*-Alkane distributions as indicators for paleo-vegetation from Yuanbao S<sub>1</sub> paleosol in Linxia, Gansu Province. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(2):231 ~ 235
- 32 郑艳红, 周卫健, 谢树成. 若尔盖高原全新世气候序列的类脂分子化石记录. *第四纪研究*, 2007, **27**(1):108 ~ 113
- Zheng Yanhong, Zhou Weijian, Xie Shucheng. Fossil records of lipid molecules from Holocene peat on Zoigê. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(1):108 ~ 113
- 33 周 静, 张平中, 贾继红等. 甘南郎木寺中全新世泥炭总有机碳和脂类分子化合物的组合特征. *第四纪研究*, 2008, **28**(4):754 ~ 761
- Zhou Jing, Zhang Pingzhong, Jia Jihong *et al.* Combined characteristic of total organic carbon and lipid compounds from Middle Holocene peat in Langmusi, Southern Gansu. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(4):754 ~ 761
- 34 雷国良, 张虎才, 杨明生等. 干旱-半干旱区兰州兴隆山现代森林典型植被和土壤中类脂分子特征及其意义. *第四纪研究*, 2009, **29**(1):159 ~ 165
- Lei Guolilng, Zhang Hucai, Yang Mingsheng *et al.* Acyclic alkanes of typical plants and modern soils at Xinglong Mountain in semiarid area, NW China. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(1):159 ~ 165
- 35 钟艳霞, 薛 骞, 陈发虎. 黄土高原西部地区现代植被及其表土正构烷烃分布模式研究. *第四纪研究*, 2009, **29**(4):159 ~ 165
- Zhong Yanxia, Xue Qian, Chen Fahu. *n*-Alkane distributions in modern vegetation and surface soil from Western Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(4):159 ~ 165
- 36 刘卫国, 张 普, 孙有斌等. 黄土高原中部 7 ~ 2Ma 期间古植被变化的分子化石证据——以赵家川剖面为例. *第四纪研究*, 2008, **28**(5):806 ~ 811
- Liu Weiguang, Zhang Pu, Sun Youbin *et al.* Molecule fossil evidence for paleovegetation changes in the central of Chinese Loess Plateau during 7 ~ 2Ma——Zhaojiachuan profile as an example. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(5):806 ~ 811
- 37 王素萍, 贾国东, 赵 艳等. 柴达木盆地克鲁克湖全新世气候变化的正构烷烃分子记录. *第四纪研究*, 2010, **30**(6):1097 ~ 1104
- Wang Suping, Jia Guodong, Zhao Yan *et al.* Plant wax *n*-alkanes record of the Holocene paleoclimatic changes from a core sediment of Hurlag Lake in the Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(6):1097 ~ 1104
- 38 Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian *et al.* Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 2001, **44**(10):919 ~ 925
- 39 杨文光, 郑洪波, 谢 昕等. 南海北部陆坡沉积记录的全新世早期夏季风极强事件. *第四纪研究*, 2008, **28**(3):425 ~ 430
- Yang Wenguang, Zheng Hongbo, Xie Xin *et al.* East Asian summer monsoon maximum records in Northern South China Sea during the Early Holocene. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(3):425 ~ 430
- 40 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. *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. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(3):407 ~ 413
- 41 沈 吉, 王 楚. 静态灼烧氧化法制备有机碳同位素质谱分析样品. *分析测试技术与仪器*, 1997, **3**(2):113 ~ 116
- Shen Ji, Wang Chu. Preparation of organic carbon isotopic sample formass spectrometric analysis by static combustion. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 1997, **3**(2):113 ~ 116
- 42 Zhou Bin, Zheng Hongbo, Yang Wenguang *et al.* Vegetation variations since the LGM recorded by *n*-alkanes from Core MD05-2905, Northern South China Sea. *The Holocene*(in press)
- 43 Bird M I, Taylor D, Hunt C. Palaeoenvironments of insular South East Asia during the Last Glacial Period: A savanna corridor in Sundaland? *Quaternary Science Reviews*, 2005, **24**(20 ~ 21):2228 ~ 2242
- 44 Wang Y J, Chen H, Edwards R L *et al.* A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, **294**:2345 ~ 2348
- 45 Liu Zhifei, Trentesaux A, Clemens S C *et al.* Quaternary clay mineralogy in the Northern South China Sea (ODP site 1146)——Implications for oceanic current transport and East Asian monsoon evolution. *Science in China (Series D)*, 2003, **46**(12):1223 ~ 1235
- 46 Pelejero C. Terrigenous *n*-alkane input in the South China Sea: High-resolution records and surface sediments. *Chemical Geology*, 2003, **200**(1 ~ 2):89 ~ 103

## ORGANIC CARBON RECORDS SINCE THE LAST GLACIAL PERIOD IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA SEDIMENTS: IMPLICATIONS FOR VEGETATION AND ENVIRONMENTAL CHANGES

Zhou Bin<sup>①②③</sup> Zheng Hongbo<sup>①</sup> Yang Wenguang<sup>④</sup> Wei Gangjian<sup>③</sup> Li Li<sup>②</sup> Wang Hui<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Institute of Surficial Geochemistry, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093; <sup>②</sup>State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092; <sup>③</sup>Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; <sup>④</sup>Research Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

### Abstract

The pollen-based vegetation type and the provenance of terrestrial plant remnants since the last glacial period retrieved from the Northern South China Sea (SCS) have been controversial. Organic carbon records such as *n*-alkanes ratios, stable carbon isotopic compositions of *n*-alkanes ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ ) and total organic carbon ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ ) in the sediments from core MD05-2905 (20°08. 17'N, 117°21. 61'E, 1647m water depth) which located on the continental slope of the Northern SCS, may supply new evidence for changes in terrestrial vegetations. This core has a total length of 11. 94m, and spanned the time period of ca. 28kaB. P. to 2kaB. P. according to ten AMS  $^{14}\text{C}$  dates. *n*-Alkanes ratios such as C31/C27, C31/(C31+C27+C29), ACL (average chain length of long-chain *n*-alkanes) from core MD05-2905, showing similar variation trend, revealed a pattern of glacial to interglacial variability. *n*-Alkanes ratios of C31/C27 presents fluctuation variations with higher average value of 2. 2 during the last glacial period and lower average value of 1. 6 during the Holocene, while decreasing gradually with a average value of 2. 0 during the deglaciation of 16 ~ 10kaB. P. This indicates that there was increasing grassy vegetation in the last glacial period and more woody vegetation in the Holocene.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  values were more positive in the glacial period than in the Holocene, which indicates that  $\text{C}_4$  plants increased at the LGM, and that more woody plants in the Holocene. At the LGM, increasing grassy vegetations developed in land and in the enlarged exposed continental shelf due to relatively cold-arid climate and lower atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration. During the deglaciation and Holocene, more closed forest ( $\text{C}_3$  plants) flourished due to higher temperature and precipitation. Comparison between carbon isotopic compositions and pollen data from adjacent cores in Northern SCS at LGM, indicated that plant remains in the core were not only from the continental shelf dominated by  $\text{C}_3$  grass *Artemisia*, but also from southeast mainland and Taiwan island that were characterized by abundant  $\text{C}_4$  flora. Alkanes records from core MD05-2905 can recover the regional vegetation changes around the Northern South China Sea.

**Key words** Northern South China Sea, last glacial period,  $\text{C}_4$  plants, *n*-alkanes,  $\delta^{13}\text{C}$