

南海西南陆坡末次冰期以来的 硅藻及其古环境意义*

孙美琴^{1,2} 蓝东兆^{2,1**} 曹志敏¹ 兰彬斌²

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

摘要 通过对 SA08-34 柱状沉积物样品的硅藻分析, 共鉴定出硅藻 165 种和变种, 隶属 45 个属. 根据硅藻组合特征, 结合¹⁴C 测年和 CaCO₃ 分析结果, 进行了柱样地层的划分, 讨论了该海域末次冰期以来的沉积环境. 研究表明, 硅藻组合带与间冰期和冰期相对应, 硅藻丰度变化反映出南海南部气候的不稳定性特征, 暖期也出现了突然降温的冷事件. 硅藻丰度值的变化与间冰期和冰期有关, 间冰期对应高的丰度值, 冰期则相反, 由此推测该海域间冰期发育较强的上升流, 而上升流的发育又受季风的强弱影响, 进而揭示了末次冰期以来东亚古季风在该海区的演化历史.

关键词 硅藻 末次冰期 沉积环境 南海

南海是西太平洋最大的边缘海之一, 其独特的地理位置和地形条件决定了南海对环境变迁的敏感性, 同时南海地处东亚季风带, 是亚洲夏季风最早爆发地^[1]. 近年来, 随着德国太阳号对南海的多次考察和南海大洋钻探 ODP184 航次的实施, 南海的古环境研究也不断升温. 到目前为止, 许多学者对南海的古生物群进行过有孔虫^[2,3]、放射虫^[4,5]、钙质超微化石^[6]、孢粉^[7,8]、硅藻^[9,10]等门类的研究, 借以探讨南海的古海洋环境变迁. 然而在以往对柱状和钻孔样品的研究中, 用以开展高分辨率的硅藻生物地层研究主要集中在南海北部, 对南海南部柱状沉积硅藻研究非常少见, 目前只见到 ODP1143 钻孔硅藻记录的相关研究报告^[11], 但该钻孔取样间距长, 不能高分辨率地反映古环境变化. 另外, 硅藻的硅质骨骼(或壳体)性质决定其生存条件与钙质类微体古生物存在差异, 对生态环境有不同的需求, 因而要全面反映古海洋生态环境的特征, 必须在完整地揭示各种类群生物的结构和组成基础上才

得以实现. 本文通过对南海西南陆坡 SA08-34 柱状样中硅藻的高分辨率研究, 结合¹⁴C 测年和 CaCO₃ 分析结果, 试图揭示该海区末次冰期以来古环境的演变.

1 材料与方法

1.1 材料

SA08-34 柱样位于南海西南陆坡 (8°54.9660' N, 110°59.8620' E) (图 1), 水深 1834 m. 岩心长度 778 cm, 柱样岩性比较均一, 主要为青灰色黏土和粉砂质黏土, 未见非正常沉积. 对该柱样按 8 cm 间距取样, 部分层段 4 cm 间距采样, 共进行了 106 个样品的硅藻分析.

该柱状样碳酸盐分析和¹⁴C 测年数据皆由广州海洋地质调查局提供. 柱状样¹⁴C 测年结果(未作年龄校正)为: 162—165 cm 段为 (10890 ± 350) aBP, 460—463 cm 段为 (21080 ± 1000) aBP, 765—768 cm 段为 ≥30000 aBP.

2008-09-01 收稿, 2008-11-27 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40676026)

** 通信作者, E-mail: landz@public.xm.fj.cn

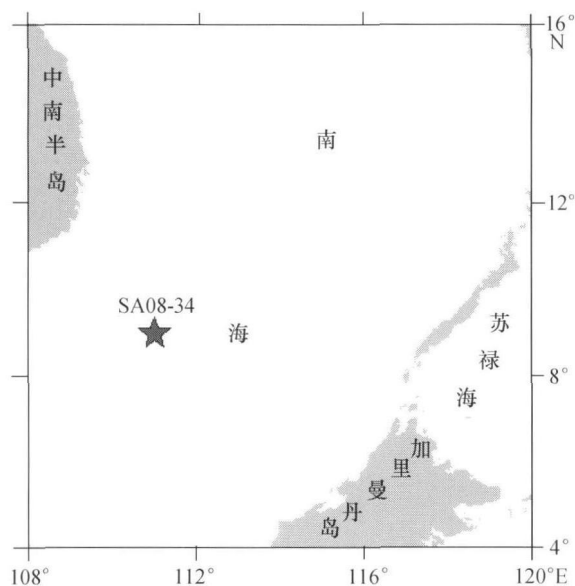


图1 采样位置

1.2 分析方法

用电子天平称取定量 10 g 干样放于低皿中, 加入蒸馏水, 用超声波分散仪分散 (功率 120 W, 时间 3 min), 倒入 15 μm 网筛过滤, 把 15 μm 网筛中洗好的材料倒入玻璃离心管中, 再将获得的材料用加拿大树脂制成固定片, 在光学显微镜下鉴定和统计硅藻, 每个样品鉴定和统计硅藻壳体 300 粒以上, 不足者以统计观测完 3 张 18 mm × 18 mm 标准片为准。硅藻的分类鉴定主要参考文献[9, 12—15]等硅藻书籍。

2 结果与讨论

2.1 硅藻主要属种

对 SA08-34 岩心的硅藻分析共鉴定出硅藻 165 种和变种, 隶属 45 个属。优势种有透明辐杆藻 *Bacteriastrum hyalinum* Lauder, 结节圆筛藻 *Coscinodiscus nodulifer* A. Schmidt, 辐射圆筛藻 *Coscinodiscus radiatus* Ehrenberg, 柱状小环藻 *Cyclotella stylorum* Brightwell, 具槽直链藻 *Melosira sulcata* (Ehr.) Kützlin, 方格罗氏藻 *Roperia tessellata* (Rop.) Grunow, 离心列海链藻 *Thalassiosira excentrica* (Ehr.) Cleve, 斯摩森海链藻 *Thalassiosira simonsenii* Hasle et Fryxell, 菱形海线藻 *Thalassionema nitzschioides* Grunow 等 9 种。常见种有爱氏辐环藻 *Actinocyclus ehrenbergii* Ralfs、爱

氏辐环藻优美变种 *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella* (Bréb.) Hustedt, 波状辐杆藻 *Actinoptychus undulates* (Bail.) Ralfs, 南方星纹藻 *Asterolampra marylandica* Ehrenberg, 扇形星脐藻 *Asteromphalus flabellatus* (Breb.) Greville, 布氏马鞍藻 *Campylodiscus brightwellii* Grunow, 非洲圆筛藻 *Coscinodiscus africanus* Janisch, 减小圆筛藻 *Coscinodiscus decrescens* Grunow, 条纹小环藻 *Cyclotella striata* (Kütz.) Grunow, 楔形半盘藻 *Hemidiscus cuneiformis* Wallich, 海洋菱形藻 *Nitzschia marina* Grunow, 伯戈根管藻 *Rhizosolenia bergonii* Peragallo, 笔尖根管藻 *Rhizosolenia styliiformis* Brightwell, 细长列海链藻 *Thalassiosira leptopus* (Grun.) Hasle, 对称海链藻 *Thalassiosira symmectica* Fryxell et Hasle, 长海毛藻 *Thalassiothrix longissima* Cleve et Grunow, 安蒂粗纹藻 *Trachyneis antillarum* Cleve 等 17 种。

2.2 硅藻生态特征

为了有利于划分南海晚更新世沉积物中的硅藻组合和解释环境变迁, 在金德祥^[12, 14]、王开发^[16, 17]等的研究基础上, 参考我国海域和太平洋表层沉积物中的硅藻分布, 将南海常见的 18 种硅藻生态环境列于表 1。

表 1 南海常见硅藻的生态环境

种名	生态环境		
	金德祥 ^[12, 14]	王开发 ^[16, 17]	本文
<i>Bacteriastrum hyalinum</i>	广布种		广温种
<i>Asterolampra marylandica</i>	暖水种		暖水种
<i>Coscinodiscus africanus</i>	暖水种	热水种	热性种
<i>Coscinodiscus decrescens</i>	暖水种		暖水种
<i>Coscinodiscus nodulifer</i>	暖水种	热性种	热性种
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	广布种		广温种
<i>Cyclotella stylorum</i>	广布种		广温种, 沿岸
<i>Cyclotella striata</i>	广布种		广温种, 沿岸
<i>Melosira sulcata</i>	广布种		广温种, 沿岸
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	暖水种	热性种	热性种
<i>Nitzschia marina</i>	暖水种	热性种	热性种
<i>Rhizosolenia bergonii</i>	暖水种	热性种	热性种
<i>Rhizosolenia styliiformis</i>	广布种		广温种
<i>Roperia tessellata</i>	暖水种		热性种
<i>Thalassiosira excentrica</i>	广布种		广温种
<i>Thalassiosira simonsenii</i>			广温种
<i>Thalassiothrix longissima</i>	广布种		广温种
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	广布种	暖水种	广温种

2.3 SA08-34 柱样硅藻组合特征

根据该柱样硅藻主要种的分布和含量变化,丰度值大小以及主要热性种,主要暖性种和沿岸广温种的总平均含量的变化,自下而上可将本柱样分为3个硅藻带(图2,3).

I带:位于515—778 cm处,为结节圆筛藻—柱状小环藻—透明辐杆藻组合,本带的特点是主要硅藻种的含量变化大,硅藻含量贫富悬殊.该柱样硅藻最高丰度值(16.8万个/g)出现在本带621—629 cm处.根据主要硅藻种的分布和含量变化及丰度高低,本带可划分成3个亚带.

I₁亚带 739—778 cm,为结节圆筛藻—柱状小环藻—辐射圆筛藻组合,该带主要热性种的平均含量为46.3%,暖性种为6%,沿岸广温种为19.9%.

I₂亚带 699—739 cm,本亚带硅藻稀少,仅检出个别结节圆筛藻和柱状小环藻细胞,平均丰度为93个/g.本亚带硅藻丰度突然降低至近为零,可能是一次气候变冷事件的反映.

I₃亚带 515—699 cm,为结节圆筛藻—柱状小环藻—透明辐杆藻—辐射圆筛藻组合,该组合中4种硅藻的平均含量分别为44.7%,9.1%,6.5%,

5.7%.主要热性种的平均含量为50.8%,暖性种为2.6%,沿岸广温种为12.4%.

就本层段3个亚组合带而言,I₁和I₃亚带反映较为温暖的气候特征,I₂亚带则反映冷的气候特征.

II带:位于162—515 cm处,为硅藻贫乏带.根据硅藻数量,主要硅藻种的分布和含量变化,本带自下而上可进一步划分成3个亚带.

II₁亚带 415—515 cm,为结节圆筛藻—辐射圆筛藻—柱状小环藻组合,该组合中3种硅藻的平均含量分别为40.5%,10.7%,6.6%.此外,透明辐杆藻、离心列海链藻也有一定数量分布.该带主要热性种的平均含量为45.9%,暖性种为5.1%,沿岸广温种为11.9%.

II₂亚带 293—415 cm,为结节圆筛藻—柱状小环藻—方格罗氏藻—离心列海链藻组合,本亚带硅藻数量非常贫乏,种类也特别稀少,平均丰度为223个/g.该亚带4种硅藻的平均含量分别为51.9%,21.6%,2.5%,2.3%.

II₃亚带 162—293 cm,为硅藻稀少带.部分层段偶见柱状小环藻、结节圆筛藻、具槽直链藻.

总体来说,该段硅藻平均丰度非常低,显示沉积环境有了明显的变化.II₁亚带与I带相比较主要热性

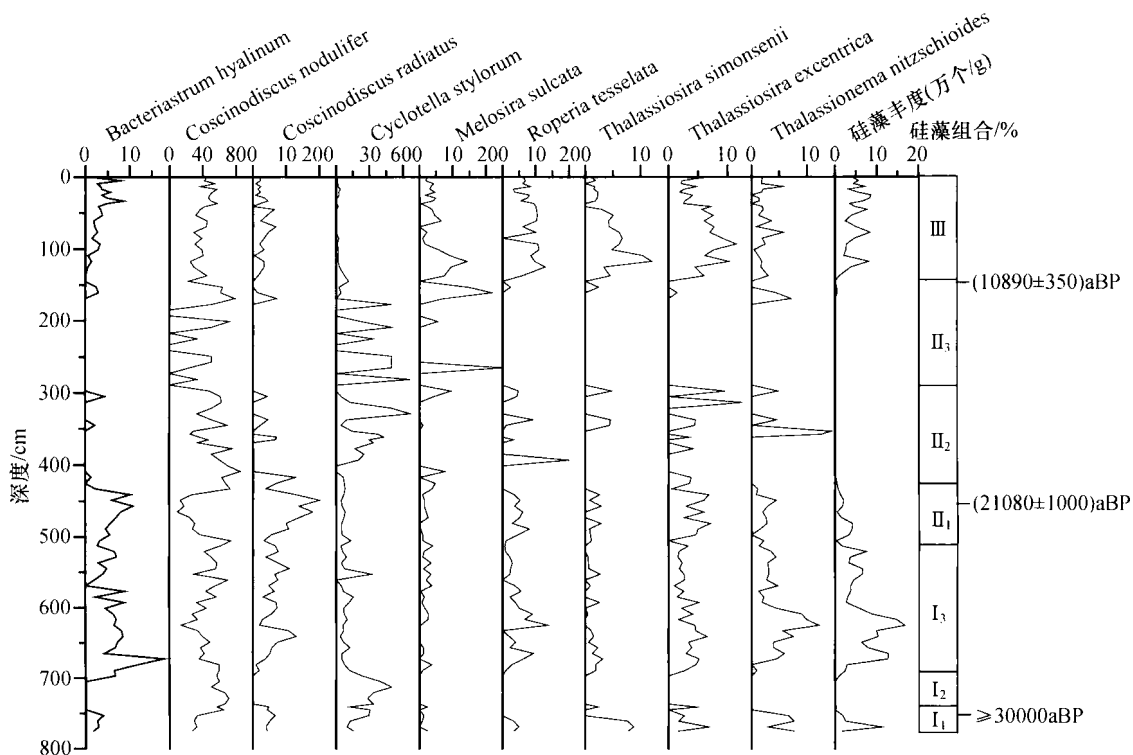


图2 SA08-34 柱状样主要硅藻种类百分含量及硅藻组合

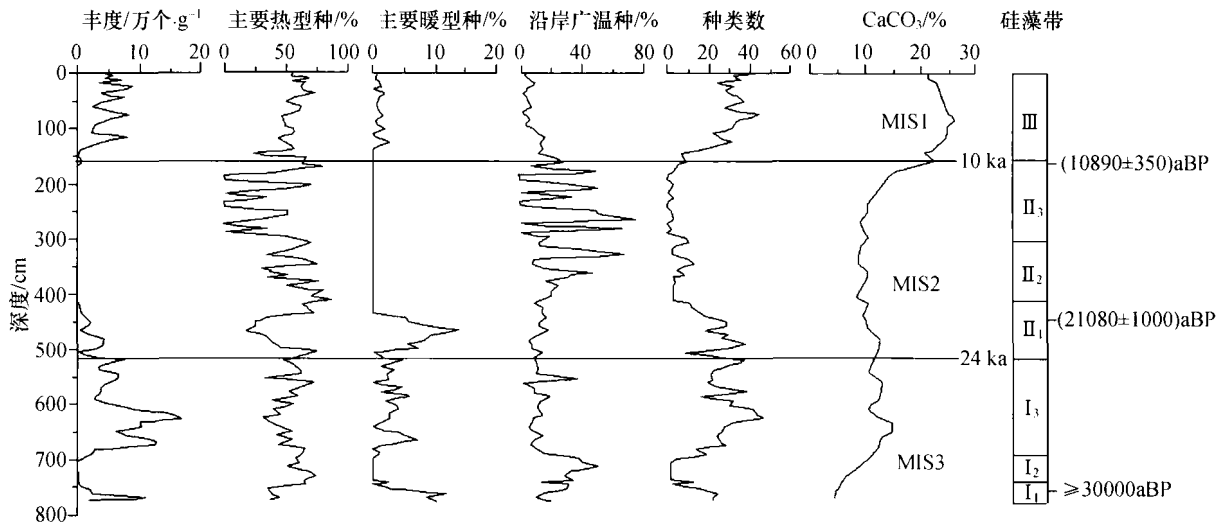


图 3 SA08-34 柱状样硅藻丰度、主要热性种、暖性种、沿岸广温种的百分含量、种类数和 CaCO_3 含量

种和暖性种的含量也较低，沉积时期气候比 I 带寒冷。

III 带：位于 0—162 cm 处，为结节圆筛藻—方格罗氏藻—具槽直链藻组合，本组合带硅藻属种丰富，分异度高，最高丰度为 8.7 万个/g，最低丰度为 134 个/g，平均丰度为 4.4 万个/g，组合带中 3 种硅藻的平均含量分别为 42.7%，7.1%，5.2%。本带主要热性种的平均含量为 55.9%，暖性种为 0.8%，沿岸广温种为 8.4%。本组合带属于典型的热带远洋植物群的特点，与现代沉积环境相近。

2.4 年代框架

南海大量柱状样碳酸盐含量分析结果表明，位于温跃层之上（小于 3000 m 水深）的碳酸盐旋回属“大西洋型”，碳酸钙百分含量曲线基本与底栖有孔虫氧同位素曲线平行，表现为冰期低，间冰期高的特征，与 SA08-34 钻孔相近的 MD05-2897 柱状样两曲线也证明对比良好^[18]。因此，SA08-34 柱状样 CaCO_3 百分含量曲线可以代替氧同位素曲线对比地层。根据 SA08-34 柱样 ^{14}C 同位素年龄，以及综合分析 CaCO_3 百分含量曲线特征，可以推测 SA08-34 柱状样为末次冰期氧同位素 MIS3 阶段（ ≥ 30 ka）以来的沉积，其中，162，515 cm 处分别为 MIS1，MIS2 阶段的底界，其年龄分别约为 10 和 24 kaBP；515 cm 以下为 MIS3 阶段上部。

2.5 南海西南陆坡末次冰期以来的沉积环境

根据 SA08-34 柱状样的硅藻丰度和百分含量变

化划分的硅藻带与氧同位素分期相对应（图 3）。硅藻鉴定统计结果显示，不同时期的地层中硅藻个体丰度变化十分明显，硅藻丰度总体上表现为冰期低，间冰期高的特征：

(1) 末次间冰段（对应深度 515—778 cm），相当于 MIS3 阶段上部。该段岩性为青灰色含钙质生物黏土，夹薄层青灰色含硅质钙质粉砂质黏土，硅藻平均丰度较高，反映了沉积时期高的生物生产力，另外硅藻丰度变化较大，也反应了气候的不稳定性特征。在 699—739 cm 层段，存在着 1 个明显的硅藻丰度低值区，这一特征可能是 1 个降温事件的反映，吴庐山等对浮游有孔虫研究也发现这一现象^[19]，根据绝对年龄测定数据推测，硅藻植物群记录到的古海洋事件可能为晚更新世的 Heinrich 冷事件（H4）。该段一般认为处于温暖的间冰期，但从硅藻组成特征来说，主要热性种含量相比冰后期（III 带）也较低，因此推断该段古气候相比冰后期偏凉。

(2) 末次盛冰期（对应深度 162—515 cm），相当于 MIS2 阶段。该段岩性 450 cm 以下为青灰色含钙质生物黏土，以上为青灰色含钙质生物粉砂质黏土，硅藻数量表现为贫乏的特征，同时发现硅藻丰度降低，放射虫也变少，部分层段甚至缺失，但浮游有孔虫丰度在这一阶段相对较稳定，变化不大^[19]。显然，硅藻的变化记录说明该阶段古生态环境不利于硅质微体浮游生物发育和保存，而对钙质浮游生物并没有很大的影响。从图 3 可以看出 MIS2 早期硅藻数量急剧减

少,主要硅藻热性种百分含量也突然减少,这种明显的变化显示古气候的突变。MIS2中后期(162—415 cm段)硅藻数量非常贫乏,由此造成了个别属种的含量偏差,所以图3上反映出的这一段硅藻百分含量信息难以判别气候的变化特征。

(3)冰后期(对应深度0—162 cm),相当于MIS1阶段。该段岩性为青灰色含钙质生物粉砂质黏土,夹薄层褐灰色含钙质生物黏土,硅藻数量丰富,代表为有利于硅质微体浮游生物发育和保存的古生态环境。全新世界线在硅藻丰度上反映明显。

研究区远离大陆,一般情况下上层水体呈现贫营养状态,不利于硅藻等浮游植物的生长,因而沉积硅藻的数量很少。另一方面,南海终年受到季风的影响,局部海区的上升流活动较为频繁,在上升流活动区硅藻丰度很高,其余海区则较低^[20]。因此冰期与间冰期硅藻丰度的变化可能指示了古上升流的变化,由此可推测该海域间冰期时发育较强的上升流,而上升流的发育又受季风的强弱影响,在南海南部上升流主要由夏季风驱动,由此可以说明末次冰期以来东亚古季风在该海区的演化历史。间冰期冬季风弱而夏季风强劲,夏季风的盛行使得上升流发育从而为上层水体中的硅藻提供了丰富的营养物质,使硅藻植物群繁盛,并在沉积物中得以良好保存。冰期则相反,冬季风几乎没有触发上升流,上层水体呈现贫营养状态,不利于硅质的生物繁殖和保存。

3 结论

(1)硅藻分析共鉴定出硅藻45个属,165种和变种。优势种有9种:透明辐杆藻、结节圆筛藻、辐射圆筛藻、柱状小环藻、具槽直链藻、方格罗氏藻、离心列海链藻、斯摩森海链藻、菱形海线藻。根据硅藻主要种的含量及丰度的变化趋势,自下而上可将本柱样分为3个组合带。

(2)根据SA08-34柱样¹⁴C测年数据,结合CaCO₃分析结果,可以推测该柱状样为末次冰期氧同位素MIS3阶段以来的沉积。硅藻组合带与间冰期和冰期相对应,硅藻丰度变化反映出南海南部气候的不稳定性特征,暖期也出现了突然降温的冷事件。

(3)硅藻丰度值的变化与间冰期和冰期有关,由此可以推测间冰期发育较强的上升流,而上升流的发育又受季风的强弱影响,进一步揭示了末次冰

期以来该海区间冰期冬季风弱而夏季风强劲,冰期则相反的演化历史。

参 考 文 献

- 1 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, 19(6): 481—501
- 2 金海燕, 翦知潜. 南海北部ODP 1144站中更新世气候转型期有孔虫稳定同位素古气候意义. 地球科学进展, 2007, 22(9): 914—921
- 3 翦知潜, 汪品先, 赵泉鸿. 南海北部上新世晚期东亚冬季风增强的同位素和有孔虫证据. 第四纪研究, 2001, 21(9): 461—469
- 4 张丽丽, 陈木宏, 张兰兰, 等. 南海南部晚第三纪放射虫缺失事件及古海洋学意义. 自然科学进展, 2007, 17(9): 1244—1250
- 5 杨丽红, 陈木宏, 王汝建, 等. 南海南部1.2MaBP以来古生态环境变化事件的放射虫记录. 科学通报, 2002, 47(14): 1098—1102
- 6 刘传联, 祝幼华, 成鑫荣. 南海南部第四纪表层海水古生产力变化的钙质超微化石证据. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 62—66
- 7 王晓梅, 孙湘君, 汪品先, 等. 末次冰消期以来巽他陆架高分辨率的孢粉记录. 中国科学, D辑: 地球科学, 2007, 37(1): 71—76
- 8 张玉兰. 南海184站深海沉积中孢粉、藻类研究及古环境分析. 微体古生物学报, 2008, 25(1): 97—101
- 9 蓝东兆, 程兆第, 刘师成. 南海晚第四纪沉积硅藻. 北京: 海洋出版社, 1999
- 10 李家英. 南海北部陆坡ODP1144站位第四纪硅藻及其古环境演变. 地质论评, 2002, 48(5): 542—551
- 11 Lu J, Chen MH, Wang RJ, et al. DR: Diatom records of ODP site 1143 in the southern South China Sea. In: Prell W L, Wang P, Blum P, et al. Eds. Proc ODP, Sci Results, 184, 2004 [Online]
- 12 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1965
- 13 金德祥, 程兆弟, 林均民, 等. 中国海洋底栖硅藻类(上). 北京: 海洋出版社, 1982
- 14 金德祥, 程兆弟, 刘师成, 等. 中国海洋底栖硅藻类(下). 北京: 海洋出版社, 1991
- 15 郭玉洁. 中国海藻志, 第五卷第一册, 硅藻门中心纲. 北京: 科学出版社, 2003
- 16 王开发, 蒋辉, 张玉兰. 南海及沿岸地区第四纪孢粉. 藻类与环境. 上海: 同济大学出版社, 1990
- 17 王开发, 蒋辉, 冯文科. 南海深海盆地硅藻组合的发现及其地质意义. 海洋学报, 1985, 7(5): 590—597
- 18 梅西, 郑洪波, 黄恩清, 等. 南海南部近50年来沉积物特点及古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 77—83
- 19 吴庐山, 朱照宇, 邱燕, 等. 南海西南陆坡末次冰期以来的浮游有孔虫及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 1—8
- 20 陆钧. 南海深海表层沉积硅藻的分布. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 27—30