

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 南海北部陆坡 ODP 1144 站位第四纪硅藻 及其古环境演变

李家英

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

**内容提要** 中国南海北部陆坡 ODP 1144 站位硅藻植物群的研究, 建立了西太平洋边缘海一个新的中更新世晚期以来的硅藻生物地层图式。根据硅藻化石中具有指示意义的硅藻种的分布和生态变化(暖水种和冷水种), 划分了8个硅藻组合带, 其硅藻组合带分别在不同的海面环境下形成的。根据 ODP 1144 站位氧同位素(OIS)测定结果, 8个硅藻组合带与 OIS 1~8期相对应。1、3、5、7硅藻组合带相当于 OIS 1、3、5、7期, 间冰期是以热带和亚热带硅藻占优势, 其中冷期出现大量的沿岸硅藻为特征, 反映高海面温暖的气候条件; 2、4、6、8硅藻组合带相当于 OIS 2、4、6、8期, 冰期是以亚热带、热带和出现较多冷水硅藻为特征, 反映低海面较冷气候条件。硅藻丰度值的变化与冰期和间冰期有关, 可以证实间冰期时期高的海平面和较低的生物生产力以及冰期时低的海平面和高的生物生产力, 而生物生产力的变化又与沉积时期沿岸流或上升流的强弱及水团活动有密切关系, 进而揭示该区古海洋环境的演化与季风强弱之间的内在关系。

**关键词** 第四纪 硅藻 丰度值 上升流

海洋硅藻生物地层学的研究, 从20世纪70年代始, 尤其是随着深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)的实施, 硅藻化石成为古海洋学和生物地层学研究的主要微体化石之一, 目前已广泛应用于各个大洋古近纪以来的地层划分和对比, 并在古温度、盐度、再造古地理环境的研究中发挥重要作用。第四纪以来, 青藏高原迅速抬升、南北极冰盖的消长、海岸线的变迁、季风的强弱和海平面变化等一系列事件的发生, 无不与古气候的变化密切相关。近些年来由于厄尔尼诺(El-Nino)现象的频繁发生更增加了人们对海洋学研究的兴趣(Rasmussen and Carpenter, 1982)。通过对海洋沉积物的深入研究, 尤其是对冰期和间冰期的深入研究, 不仅可以重建古气候, 而且还可以为当前研究气候的变化趋势及灾害预测提供借鉴。

ODP 1144 站位正处于东亚季风区, 该站位获得了第四纪最完整、最连续的沉积物。沉积物中保存了丰富的硅藻化石, 为研究古海洋特征、海平面变化和海岸线移动范围等提供了确切的证据。硅藻丰度值的变化可能指示沿岸流或洋流区域的上升流变化特征以及洋流和季风强弱的标志等等, 为重建中国南海的古气候史提供可靠的依据。本文着重论述硅藻

植物群及其古环境的演变。

## 1 材料和方法

硅藻分析样品取自 ODP 1144 站位, 该站位位于南海东北部大陆坡上即 N20°3'18", E117°25'14", 水深2037 m(图1), 孔深近500 m。硅藻样品分析集中在 ODP 1144 站位(综合剖面)180 m 以上沉积段, 该段沉积物相当均一, 其岩性为半深海陆缘淤泥。目前鉴定完成了164个样(不包括重样19个)。硅藻样品的处理主要根据 Schrader (1973) 和 Battarbee (1986) 方法进行: 每个样取2 g 烘干样先用10% HCl 去钙, 水洗后加入30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 煮沸至沉积物呈灰白色, 水洗净后, 用2.4重液浮选2次, 洗净集中浮选物, 用 Hyrax 胶做定量制片, 在100×油镜下进行属种鉴定, 在40×镜下统计250~300个壳体(以镜下观察眼数为准), 作为丰度计算(Schrader and Gersonde, 1978)。在鉴定过程中, 特别注意到划分生物地层的标志种和反映古环境特征的替代指标种。

## 2 硅藻组合带的划分

南海北部陆坡 ODP 1144 站位的钻孔上部

注: 本文为国家自然科学基金重大项目(编号 49676268, 49999560)的成果。

收稿日期: 2001-11-05; 改回日期: 2002-03-11; 责任编辑: 王增吉、王思恩。

作者简介: 李家英, 女, 1936年生。1959年毕业于四川大学生物系植物专业。现任中国地质科学院地质研究所研究员, 一直从事新生代地层和硅藻学研究。通讯地址: 100037, 北京西城区百万庄大街26号, 中国地质科学院地质研究所。

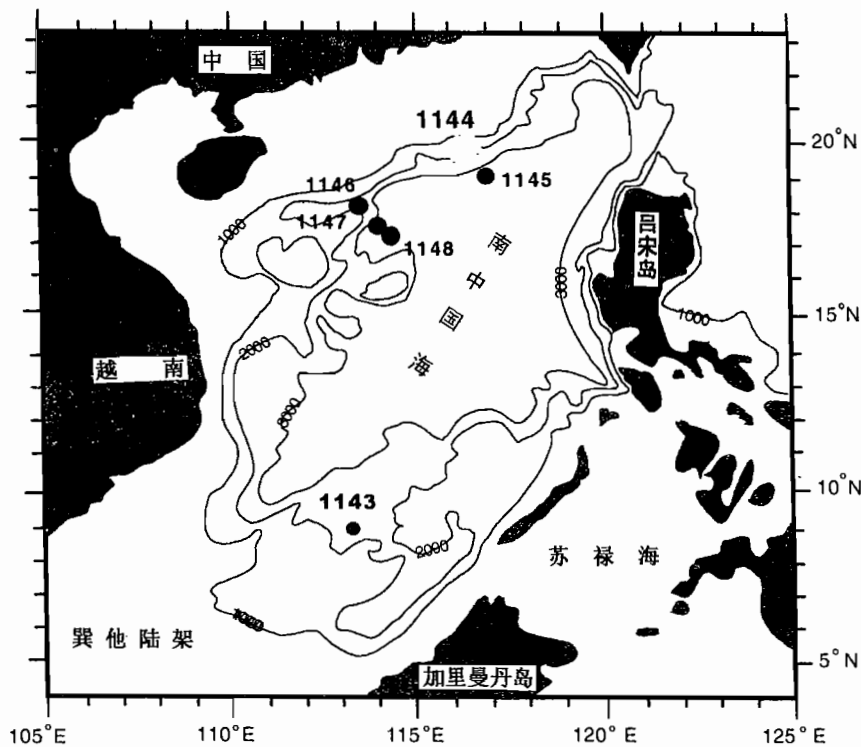


图1 ODP 1144 站位位置图

Fig. 1 Location map of ODP Site 1144

(180 m 之上)共发现硅藻54属,178种(包括变种)硅藻,剖面中出现的优势种和指示种 *Azpeitia nodulifer* (Schm.) Fryxell and Sims、*A. africana* (Jah. et Schm.) Fryxell and Watkins、*Pseudoeunotia doliolus* (Wall.) Grunow、*Roperia tessellata* (Rop.) Grunow、*Thalassionema nitzschioides* Grunow、*Thal. nitzschioides* var. *parva* Heiden and Kolbe、*Thalassiosira oestrupii* (Ostenfela.) Proschkina-lavrenko、*Hemidiscus cuneiformis* Wallich、*Nitzschia marina* Grunow、*Rhizosolenia bergonii* Peragallo、*Thalassiothrix frauenfeldii* Grunow、*Paralia sulcata* (Ehr.) Cleve 和 *Cyclotella striata* (Ktz.) Grunow 以及 *Denticula seminae* Simonsen and Kanaya 等,根据这些硅藻的分布和百分含量(以硅藻单体的个数为单位,下同)及其丰度值的变化,从上至下划分出8个硅藻组合带(图2),其特征如下。

### 2.1 *Azpeitia nodulifer*—*Nitzschia marina*—*Thalassionema nitzschioides* 组合带(相当于0.43~6.17 m)

本组合带硅藻属种丰富,分异度高,最高丰度  $60 \times 10^5$  壳/g(干样,下同),最低丰度  $20 \times 10^5$  壳/g,平

均丰度为  $40 \times 10^5$  壳/g,主要热性种的平均含量为38.1%,暖性种的平均含量为19.5%,沿岸种为7.9%。热带、亚热带远洋种 *Azpeitia nodulifer* 含量最高(下同)为19.5%, *Nitzschia marina* 9.8%, *Thalassionema nitzschioides* 14.0%。本组合带属于典型的热带、亚热带远洋植物群,与现代相近。

### 2.2 *Roperia tessellata*—*Thalassionema nitzschioides* var. *parva*—*Thal. nitzschioides* 组合带(相当于6.91~31.12 m)

本组合带硅藻数量丰富,分异度中等,最高丰度  $22 \times 10^6$  壳/g,最低丰度  $20 \times 10^5$  壳/g,平均丰度  $60 \times 10^5$  壳/g,主要热性种的平均含量为24.8%,暖性种平均含量为25.9%,沿岸种平均含量为6.2%。组合带中三种硅藻的含量分别为23.6%、23.6%和

21.5%。这是亚热带硅藻植物群的特征,组合中典型热带种 *Azpeitia nodulifer* 和 *Nitzschia marina* 明显减少,而温暖种 *Coscinodiscus decrescens* Grunow 数量显著增加,含量达到5.9%,值得指出的是在个别样中沿岸种 *Paralia sulcata* 含量达到20.3%,出现在近岸沉积物中的 *Chaetoceros* 属的休眠孢子达16.5%,同时不少羽纹类的底栖种 *Eunotia* spp.、*Diploneis* spp.、*Navicula* spp.、*Pinnularia* sp. 和 *Trachyneis* sp. 等出现在本组合带中,这显示沉积环境有了明显的变化。

### 2.3 *Azpeitia nodulifer*—*Pseudoeunotia doliolus*—*Thalassionema nitzschioides* var. *parva* 组合带(相当于32.22~65.75 m)

本组合带硅藻较为丰富,分异度中等,根据组合带中硅藻的分布和含量变化,出现了3种不同特征,可自上而下进一步划分为上、中、下三个亚组合带:

(1) 上亚组合带主要以亚热带硅藻 *Thalassiothrix frauenfeldii*、*Thalassionema nitzschioides* 和 *Thal. nitzschioides* var. *parva* 为特征,分布在32.22~39.13 m,其含量分别为23.7%、20.2%和13.6%。热性种的平均含量仅为20.7%,暖

性种平均含量23.5%，沿岸种平均含量为9.8%。就丰度而言，最高丰度达 $25 \times 10^6$ 壳/g，最低为 $37 \times 10^5$ 壳/g，平均丰度为 $10 \times 10^6$ 壳/g，本亚组合带热带种明显减少，亚热带种和浅水硅藻的猛增，使硅藻的丰度达到最高值。

(2)中亚组合带与上亚组合带差异很大，本亚组合带是以典型热带和亚热带远洋硅藻 *Azpeitia nodulifer*、*Roperia tessellata*、*Pseudoeunotia doliolus* 为特征，分布在40.32~54.76 m，其含量分别达到17.6%、19.2%和13.6%，热性种的平均含量高达30.9%，暖性种平均含量为18.6%，沿岸种平均含量仅为9.9%，最高丰度为 $27 \times 10^6$ 壳/g，最低丰度为 $12 \times 10^5$ 壳/g，平均丰度为 $67 \times 10^5$ 壳/g。此外在本亚组合带中另一种代表硅藻 *Thalassiosira oestrupii* 在数量上高达15.2%，相反在上面亚组合带成为优势种的 *Thalassiothrix frauenfeldii* 显著减少，并在有的样品中几乎没有出现。上一亚带中出现的休眠孢子

*Chaetoceros* spp. 除个别样品中数量较多外，多数样品没有出现或出现极少。

(3)下亚组合带硅藻组成与(2)迥然不同，与(1)相近，但也有差别。本亚带是以亚热带和沿岸种 *Thalassionema nitzschioides*、*Thal. nitzschioides* var. *parva* 和 *Paralia sulcata* 为特征，分布在55.56~65.78 m。其含量分别达到19.2%、18.6%和23.8%。热性种的平均含量23.7%，暖性种平均含量8.9%，沿岸种平均含量11.4%。最高丰度 $79 \times 10^5$ 壳/g，最低丰度 $18 \times 10^5$ 壳/g，平均丰度 $53 \times 10^5$ 壳/g。典型热带硅藻明显减少。近岸沉积的休眠孢子 *Chaetoceros* spp. 在数量上明显增加，最高含量达11.9%。本层段从硅藻特征看与上层段硅藻组成极为相似，但又有差异，上层段中的优势种 *Thalassiothrix frauenfeldii* 在本层段最高仅为8.1%，相反沿岸种 *Paralia sulcata* 在本层段最高达23.8%，在沉积环境上有所不同。

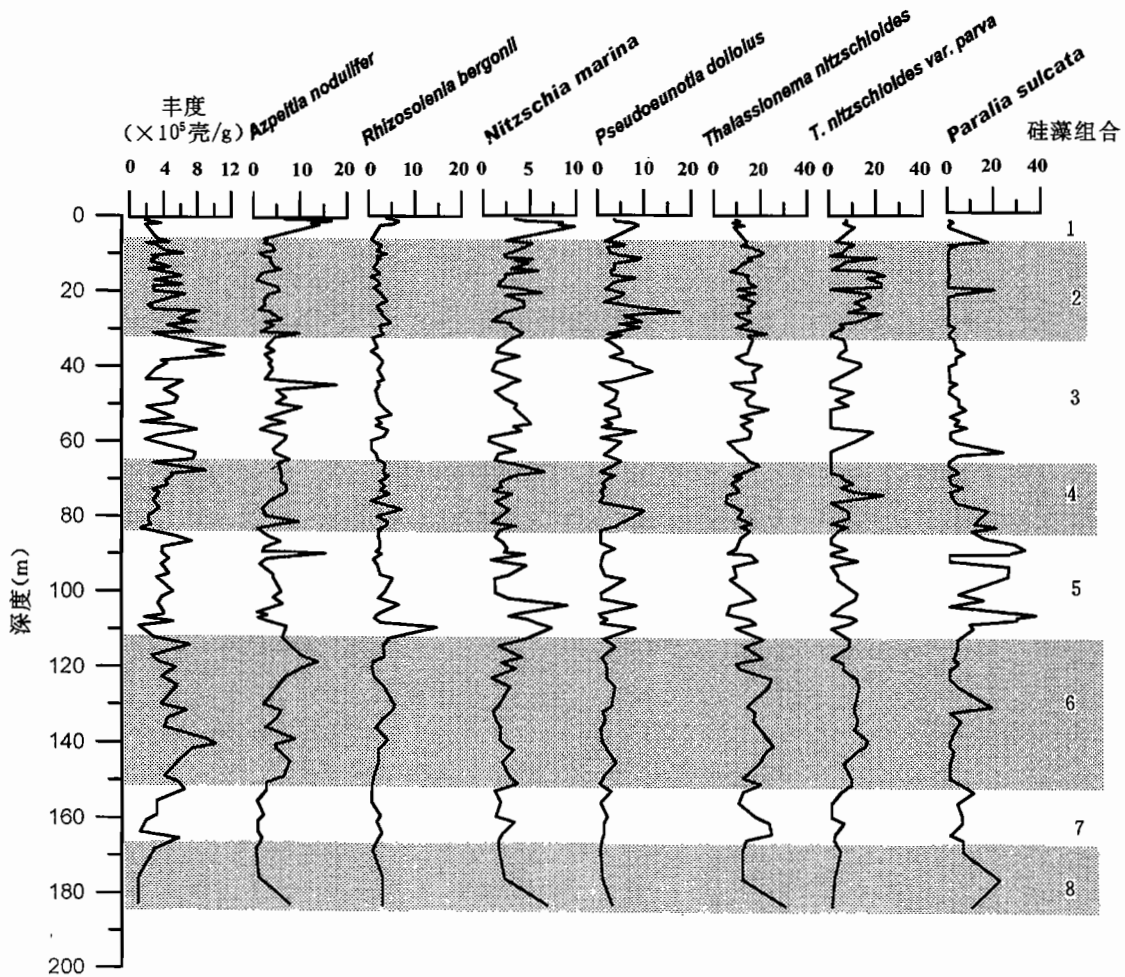


图2 ODP 1144站位柱样主要硅藻种的分布、百分含量和硅藻组合带

Fig. 2 Distribution, percentage contents of major Diatom species and Diatom assemblage zonation in ODP Site 1144

3硅藻组合带总的特征是:本沉积段在整个分析样中是丰度最高的层段,因此3组合带可能是间于冰期与间冰期气候条件下形成的。就本层段三个亚组合带而言,上、下硅藻亚组合带反映冷的气候特征,而中部亚组合带则反映较为温暖的气候特征。

#### 2.4 *Thalassionema nitzschioides*—*Thal. nitzschioides* var. *parva*—*Paralia sulcata* 组合带(相当于67.68~80.16 m)

本组合带硅藻数量丰富,分异度中等,最高丰度为 $10 \times 10^6$ 壳/g,最低丰度为 $20 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度为 $50 \times 10^5$ 壳/g。主要热性种平均含量28.8%,暖性种平均含量16.2%,沿岸种平均含量为13.7%。组合带中三种硅藻含量分别为12.6%、22.9%和17.3%,此外典型热带远洋种 *Azpeitia nodulifer* 在个别样中其含量最高仅达7.1%,最低只有1.3%,*Thalassiosira oestrupii* 出现的数量不少,最高可达14.1%,浅水种 *Thalassiothrix frauenfeldii* 和近岸 *Chaetoceros* sp. (休眠孢子)在个别样品中分别达到13.3%和9.0%。

#### 2.5 *Azpeitia nodulifer*—*Thalassionema nitzschioides* var. *parva*—*Paralia sulcata* 组合带(相当于81.26~113.00 m)

本带硅藻丰度较低,分异度中等。本层段中硅藻的分布特点相当明显,尤其是热带、亚热带和浅水沿岸种的分布变化尤为突出,因此依据这些硅藻的分布和百分含量的变化,可自上而下进一步划分为五个亚组合带:

(1)以热带和亚热带硅藻 *Azpeitia nodulifer*、*Thalassionema nitzschioides* 和 *Paralia sulcata* 为特征的硅藻亚组合带分布在81.26~85.12 m。上述三种硅藻化石的含量分别为9.5%、15.9%和20.9%,主要热性种的平均含量为34.4%,暖性种平均含量为18.6%,沿岸种平均含量为23.4%。最高丰度为 $50 \times 10^5$ 壳/g,最低丰度为 $10 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度 $27 \times 10^5$ 壳/g。此外,本层段还出现了数量不少的 *Thalassiosira oestrupii*,含量达11.9%,近岸休眠孢子 *Chaetoceros* spp. 仅在个别样品中出现。

(2)以沿岸和亚热带硅藻 *Paralia sulcata*、*Thalassionema nitzschioides* 和 *Cyclotella striata* 为特征的亚组合带分布在86.62~89.22 m,上述硅藻的含量分别为32.8%、10.3%和10.4%。热性种的平均含量为19.5%,暖性种平均含量为12.2%,沿岸种的平均含量36.5%。最高丰度为 $70 \times 10^5$ 壳/g,最低丰度为 $17 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度 $40 \times 10^5$ 壳/g。本层段中

热带和亚热带硅藻 *Azpeitia nodulifer*、*Thalassionema nitzschioides* var. *parva* 明显减少,相反浅水底栖冷水硅藻 *Thalassiothrix frauenfeldii* 含量达到7.6%,具有指示水团活动的标志硅藻 *Chaetoceros* sp. 休眠孢子大量出现,其含量高达8.0%,与(1)亚组合带有明显的区别。

(3)以热带和亚热带硅藻 *Azpeitia nodulifer*、*Pseudoeunotia doliolus*、*Thalassionema nitzschioides* var. *parva*、*Nitzschia marina* 为特征的硅藻亚组合带分布在89.72~103.28 m,上述硅藻的含量分别为15.2%、8.2%、12.1%和8.9%。最高丰度 $11 \times 10^6$ 壳/g,最低丰度 $20 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度 $58 \times 10^5$ 壳/g。热性种的平均含量为32.6%,暖性种的平均含量为22.2%,沿岸种的平均含量为18.0%。此外,热带种 *Talassiosira oestrupii* 也有较高含量,为11.1%,沿岸种 *Paralia sulcata* 虽然个别样中含量也不少,但和上一亚带比不仅减少了,而且多个样品中几乎没有出现,同时 *Chaetoceros* spp. 也明显减少。

(4)以沿岸种和亚热带种 *Paralia sulcata* 和 *Thalassionema nitzschioides* 及其变种 *Thal. nitzschioides* var. *parva* 为特征的亚组合带分布在105.58~108.10m。其比含量分别为37.6%、15.1%和11.3%。热性种的平均含量仅为21.2%,暖性种平均含量为9.3%,沿岸种平均含量达到极值32.5%。最高丰度为 $50 \times 10^5$ 壳/g,最低丰度 $17 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度为 $37 \times 10^5$ 壳/g。本亚带最突出的特点是:硅藻的丰度和分异度很低。热带种除 *Thalassiosira oestrupii* 含量达9.0%外,其余典型的热带种 *Azpeitia nodulifer* 和 *Nitzschia marina*、*Pseudoeunotia doliolus* 含量非常少,相反潮间带生活的 *Cyclotella striata* 种其数量明显增加,含量最高可达8.8%,近岸的 *Chaetoceros* spp. 休眠孢子又大量出现,含量高达7.7%。

(5)以热带和亚热带硅藻 *Azpeitia nodulifer*、*Thalassionema nitzschioides* 及其变种 var. *parva*、*Rhizosolenia bergonii* 为特征的硅藻亚组合带分布在109.20~113.00 m,这些硅藻的含量分别为13.5%、20.3%、11.5%和14.5%,热性种平均含量40.8%,暖性种平均含量17.5%,沿岸种平均含量10.3%。最高丰度 $13 \times 10^6$ 壳/g,最低丰度 $10 \times 10^5$ 壳/g,平均丰度 $38 \times 10^5$ 壳/g,本亚带中其他热带种 *Nitzschia marina*、*Pseudoeunotia doliolus*、*Thalassiosira oestrupii* 含量也分别达到7.2%、7.7%和14.5%。上一亚带的优势沿岸种 *Paralia sulcata* 急

剧降低,潮间带种 *Cyclotella striata* 明显减少,以致个别样中全部消失,近岸的 *Chaetoceros* spp. 休眠孢子又明显减少。

值得指出的是,本组合带中除硅藻分布和百分含量变化明显外,更有意义的在本组合带中出现了典型的带化石 *Denticula seminae*,这对于地层划分和对比提供了更确切的证据。

## 2.6 *Thalassionema nitzschioides*—*Thal. nitzschioides* var. *parva*—*Paralia sulcata* 组合带(相当于114.10~150.62 m)

本组合带硅藻数量丰富,分异度中等,最高丰度  $20 \times 10^6$  壳/g,最低丰度  $15 \times 10^5$  壳/g,平均丰度为  $40 \times 10^5$  壳/g。主要热性种平均含量26.4%,暖性种平均含量28.8%,沿岸种平均含量9.5%。组合带中三种硅藻的含量分别为25.3%、16.3%、18.4%。此外在热带硅藻中除个别样品 *Azpeitia nodulifer* 最高含量达到13.5%(在118m),一般都在4%~6%之间,其余的 *Nitzschia marina* 和 *Pseudoeunotia doliolus* 等种均明显减少,相反沿岸浅水硅藻 *Thalassiothrix frauenfeldii* 和 *Cyclotella striata* 数量明显增加,最高含量分别达到14.9%和9.1%,近岸沉积的 *Chaetoceros* sp. (休眠孢子)也有一定数量出现,个别样中也曾达到7.2%。

## 2.7 *Thalassionema nitzschioides*—*Thalassiosira oestrupii*—*Cyclotella striata* 组合带(相当于152.53~165.31 m)

本组合带硅藻丰度不高,分异度低,组合带中三种硅藻的含量分别为24.2%,20.8%和12.0%。最高丰度  $80 \times 10^5$  壳/g,最低丰度  $10 \times 10^5$  壳/g,平均丰度  $45 \times 10^5$  壳/g。主要热性种的平均含量28.1%,暖性种的平均含量21.6%,沿岸种的平均含量14.3%。典型热带种 *Azpeitia nodulifer* 的含量最高仅为4.5%,最低为0.7%,其他热带种如 *Nitzschia marina* 和 *Rhizosolenia bergonii* 的含量仅为3.2%和2.6%,近岸硅藻的休眠孢子 *Chaetoceros* sp. 的含量最高达6.0%。

## 2.8 *Cyclotella striata*—*Thalassionema nitzschioides*—*Paralia sulcata* 组合带(相当于167.22~183.62 m)

本组合带硅藻丰度较低,分异度也不高,组合带中的三种硅藻含量分别为21.7%,29.8%和26.7%。最高丰度  $50 \times 10^5$  壳/g,最低丰度  $40 \times 10^4$  壳/g,平均丰度  $20 \times 10^5$  壳/g。主要热性种的平均含量20.7%,暖性种的平均含量19.9%,沿岸种的平均含量

27.6%。典型热带种 *Azpeitia nodulifer* 和 *Nitzschia marina* 除在个别样中分别达到7.5%和6.7%外,其余样中含量非常低。上一组合带中的 *Thalassiosira oestrupii* 则明显减少,相反近岸休眠孢子 *Chaetoceros* sp. 又大量出现,含量高达8.3%。

## 3 硅藻组合带的古环境演变及其时代

### 3.1 硅藻组合带反映的古气候、古地理特征

南海是西太平洋最大的边缘海之一,其周边被大陆、半岛和岛屿包围着,古气候变化所引起的环境变化远比开阔大洋要复杂得多,更何况更新世以来,地球发生了许多巨变,尤其是多次冰期、间冰期旋回。作为海洋中主要微体生物之一的硅藻植物,其生长发育依赖于所生活的环境,可以利用硅藻化石所提供的信息探讨古气候特征及古海洋环境的演化。

ODP 1144站位位于南海北部陆坡一个沉积牵引体上,从分析层段中获得的硅藻群,有较高的丰度和较好的连续性。硅藻群中有以 *Azpeitia nodulifer*、*A. africana*、*Nitzschia marina* 和 *Pseudoeunotia doliolus*、*Roperia tessellata* 为代表的热带种,以 *Thalassionema nitzschioides* 及变种 var. *parva* 为代表的亚热带种,以 *Paralia sulcata*、*Cyclotella striata* 为代表的沿岸种以及数量丰富的近岸沉积中的 *Chaetoceros* spp. (休眠孢子)和浅海冷水种 *Bacteriastrum hyalinum* Lauder、*Thalassiothrix frauenfeldii* 等,依据硅藻在剖面中的变化,可以反映出沉积时期古气候和古地理特征(图3)。

从图3可见,8个硅藻组合带的丰度特征与硅藻生态种的变化相对应,热性种、暖性种和沿岸种及丰度值的交替变化形成多个旋回。间冰期(相当于 OIS 1、3、5、7期)以热带和亚热带种值高,间冰期中的冷期或‘冰段’,热带种明显减少,亚热带和沿岸种明显增加。冰期(相当于 OIS 2、4、6、8期),热带种减少,亚热带种显著增多,而沿岸种则明显比间冰期中的冷期少。

南海北部大陆架在冰期旋回或冰川波动中形成的海水进退可导致陆架淹没或出露,硅藻浮游种和底栖种的比值变化可作为海平面变化的标志,直接反映出研究点离岸线的距离。8、7硅藻组合带(相当于 OIS 8、7期)与第6硅藻组合带(相当于 OIS 6期)之后的组合带都有明显的不同。首先8、7组合带中硅藻丰度不高,分异度也低;其次典型热带种数量少,主要的优势种是沿岸和潮间带种。反映了当时岸线

变化的幅度较小,这很可能是当时全球海平面升降或高低变化很少影响到中国沿海,因而出现了硅藻组成的单调。第6硅藻组合带与4、2硅藻组合带(相当于 OIS 4、2期)虽然同属于冰期气候下的产物,但明显地表现出远不如4、2硅藻组合带变化大。

6带主要硅藻以亚热带浮游种 *Thalassionema nitzschioides* 及其变种 var. *parva* 占绝对优势,热带种类相对较少。典型的热带浮游种 *Azpeitia nodulifer* 不仅数量少,而且个体也较小,壳体直径几乎都在30~40 μm 之间。沿岸种 *Paralia sulcata* 和 *Cyclotella striata* 占有一定比例。值得指出的是,偏冷的浅水种 *Thalassiothrix frauenfeldii* 在个别样中数量相当丰富,其含量达到14.9%,另外 *Chaetoceros* spp. 休眠孢子也较多。上述硅藻反映出亚热带—温带的特征,气候偏冷。小个体占优势的标本发现在冰期(Lange and Berger, 1993),而个体大小的变化又与上升流有关(Belyaeva, 1970), *Chaetoceros* spp. 休

眠孢子常在水团活动上升流地区很丰富(Kozlova and Mukhina, 1967; Kennington et al., 1999),同时休眠孢子数量的多少也证明上升流的存在所出现高生物生产力(Sancetta, 1982)。本带出现的高丰度  $20 \times 10^6$  壳/g, 即较高生物生产力正是这种沉积环境下的产物。上面分析不难看出,6带硅藻生物是冰期气候条件下水温偏低,海岸线有所退缩,但退缩的幅度并不大(大陆架出露的面积尚小),由于外洋种及其数量较少,证明受大洋水影响不强烈。

4带、2带与6带一样,是低海面环境下的沉积物,带中硅藻以亚热带种占优势,偏冷水种和休眠孢子数量更为丰富,而典型热带种 *Azpeitia nodulifer* 仅个别样品中较为丰富,多数样品中都比较少,这反映4、2硅藻带更偏重于亚热带植物群,气候较冷。但是4、2带中,尤其是2带,大洋种 *Pseudoemotia doliolus*、*Roperia tessellata* 和 *Ethmodiscus* spp. (几乎都是碎片),但数量丰富。

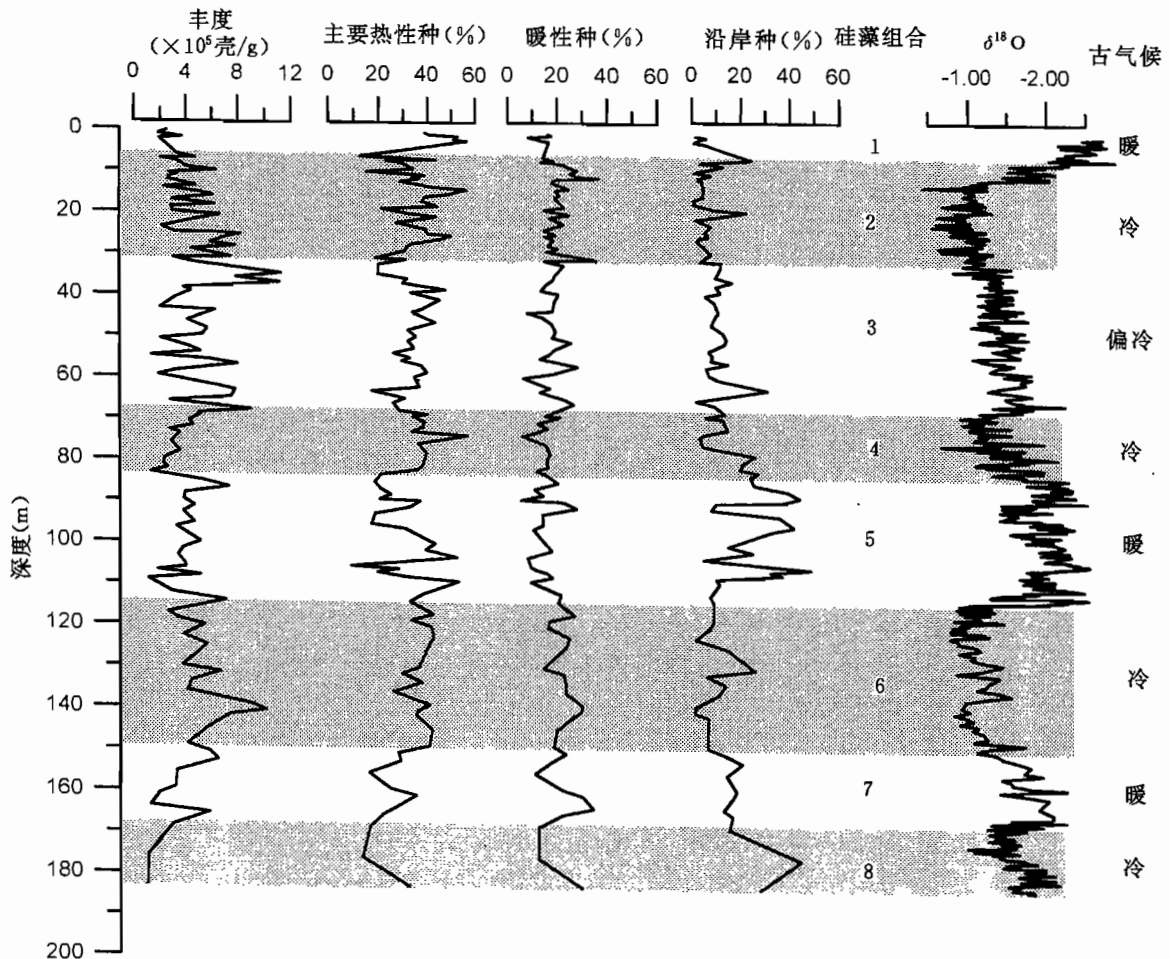


图 3 ODP 1144 站位硅藻的丰度、主要的热性种、暖性种、沿岸种的平均含量及古气候

Fig. 3 Diatom abundance and average contents of main hot-philic, warm-philic, coastal diatom species and paleoclimate of ODP Site 1144

*Pseudoeunotia doliolus* 在亚热带太平洋地区表层沉积物中的分布差异很大,东太平洋最常见,含量常大于30%,往往出现在强上升流发育、营养盐类丰富的地区;而在西太平洋地区数量明显较少(王开发等1990)。*Roperia tessellata* 是大洋中从温水区到冷水区都有分布的浮游种,该种由于水温和地理分布的不同,出现2种类型:一是冷水型,生活于北太平洋;二是暖水型,生活于西半球(Lee et al., 1990)。出现在笔者研究层段中的正是壳面呈圆形或卵型,壳缘平滑无齿状隆起线的冷水型,个体数量达到峰值。*Ethmodiscus* spp. 主要生活在大洋的暖水区,出现在硅藻群中的都是碎片(Tanimura, 1981)。由此推断,研究点在沉积时期,受太平洋洋流系统加强的影响是非常明显的,其动力则是强劲的冬季风的作用,促使东北太平洋的洋流长距离的搬运,经台湾海峡和巴士海峡进入南海,其强度和持续性在硅藻组合带中精确的显示出来。浅海沿岸种除个别样数量较多外,多数样数量均少,证明海退的距离相当大,南海北部大陆架大部分出露水面,陆上来的水源减弱,使低盐海水条件下生活的沿岸种不宜生长繁殖,因此冰期时沿岸流的影响较大洋的影响要弱。冰期时强劲的冬季风所引发的上升流表现非常突出,使生物生产力达到高水平,第2和第4组合带最高丰度分别达到 $22 \times 10^6$ 壳体/g,  $10 \times 10^6$ 壳体/g,正是这种沉积环境的反映。与上述硅藻组合带不同的,是硅藻组合带5、3、1带(相当于 OIS 5、3、1期)是间冰期温暖气候的高海平面条件下形成的。

第1硅藻组合带从热带种和亚热带种及沿岸种的特征看,显然属于热带和亚热带硅藻植物群,反映出与现代相近的环境。但从硅藻指标种的分布特征看,在间冰期与冰后期的沉积中每个层段并不是完全稳定的,短暂的突变在不同的层段表现非常明显,像在6.17 m、9.17 m、25 m、35~43 m、53~65 m、75~79 m、83~87 m、105~108 m 和129 m 前后沉积物中典型热带硅藻其数量急剧减少,这种明显的变化只能是古气候突变的结果。尽管第3组合带一般认为处于温暖的间冰期,但从硅藻组成特征来推论上和下亚组合带中的硅藻明显反映出较冷的气候特征,唯有中层段的亚组合带显示出较温暖的气候,高值的丰度所反映的高生物生产力,证明沉积时期曾受较强冬季风的影响,洋流作用的加强,促使较强上升流的产生,促进硅藻生物的高度繁殖。总之,3带反映的古气候是偏凉的,同时3带内部的不稳定性更突出。

硅藻组合带中变化频率较高的要数第5硅藻组合带,依据组合带主要硅藻种的组成,划分了5个亚组合带,分别与 OIS 2.5 (1)~2.5 (5)期大致相对应。5个硅藻亚组合带中,以第5(5)亚组合带表现出最温暖,因为典型的热带种和亚热带种分别占38.9%、25.26%,沿岸种仅占7.2%,这个亚组合带的硅藻组成和生态特征与第1硅藻组合带非常接近,即第1硅藻组合带中典型热带种,亚热带和沿岸种分别为36.4%、21.6%和6.9%,反映出2.5 (5)亚组合带是典型的间冰期沉积,其温暖程度与冰后期相当或略高于冰后期?与之相反2.5 (4)和2.5 (2)亚组合带是气候突变的产物。首先典型热带种分别降至13.5%和19.5%,亚热带种降至17.2%和14.3%,浅水沿岸种突增至40%和22.0%,沿岸种主要是 *Paralia sulcata* 在亚组合中达到峰值(38%),该种是典型的浅海种,其生活习性主要是浮游也可底栖生活,最适合的水深50~500 m 之间(Schrader, 1973)。该种在南海表层沉积物中数量较少,但在东海、黄海和渤海的表层沉积物中数量极大(王开发,蒋辉,1987;李家英,1989),该种的另一特征是冷水型低温条件下的低盐种。从该种地理分布和生态特征就不难解释2.5 (4)和2.5 (2)硅藻亚组合带所反映出的古气候特征为间冰期中的冷期,这就与以往一般认为 OIS 5期在地史上均为温暖气候条件的高海平面沉积期有差异。

从中国南海中北部和南海北部下大陆坡钻孔中(王开发等,1990;蓝东兆等,1995)及香港地区(李家英等,1997; Yim W W -S and Li Jiaying, 2000),某些沉积段中出现以 *Paralia sulcata* 为主的硅藻群相一致,说明该种在南海中北部陆架区分布有共同的特点,即高海平面的低温条件下沉积的。造成这种环境的原因,一方面要有较强的沿岸流入海;另一方面由于该种的个体非常小,而丰度大,证明存在有强的上升流或水团。因此受沿岸流和径流的控制和强上升流的产生,才有可能出现低盐低温适合 *Paralia sulcata* 大量繁殖的环境。当 *Paralia sulcata* 出现高丰度值的层段,正是典型热带种 *Azpeitia nodulifer* 的急剧减少的层段,证明温度和盐度是环境改变的主因,而温度变化幅度又不如冰期时强劲冬季风的影响所引发的大洋环流的影响强烈,从大洋种 *Pseudoeunotia doliolus* 和 *Ethmodiscus* spp. 出现数量极少就是很好的证明。间冰期高海平面沉积在阿拉斯加西北中更新世沉积相当 OIS 11期, *Paralia sulcata* 也占绝对优势(Pushkar et al., 1999),同时

在北大西洋和日本海更新世沉积中也有类似情况出现 (Tanimura, 1981, 1999; Koizumi, 1992, 1993) 就进一步得到证实。间冰期时出现的冷期反映出海洋环境上的变化是非常复杂的, 因此还有待进一步研究。

综合上述分析可以得出, 8个硅藻带除7和8带受大洋影响较弱外, 6、4、2组合带分别反映了冰期沉积特征, 而5、1组合带反映了间冰期沉积特征, 3组合带是间于冰期和间冰期沉积特征。冰期时研究站位离岸较近, 由于冬季风的加强, 因而受大洋洋流的影响强烈。间冰期时研究站位离岸较远, 因而受沿岸流或径流等的影响较为明显, 受洋流的影响可能要弱些。

### 3.2 硅藻组合带的地质时代探讨

关于第四纪沉积地层的确定与划分, 目前已采用多种方法, 氧同位素地层学和古生物地层学是常用的方法。对 ODP 1144 站位沉积柱, 根据氧同位素测定、孢粉分析、有孔虫和超微化石分析资料, 对其地层已有了较明确的划分, 但考虑到硅藻在柱样中的丰富及连续性, 尤其是在北部大陆架沉积物中首次出现了太平洋其他区域的典型带化石, 有必要以硅藻新资料为依据进一步讨论地层对比与时代归属。

ODP 1144 站位中划分的8个硅藻组合带的地质时代已由有孔虫和超微化石分析所确定, 8个硅藻组合带分别对应于本站位氧同位素 (OIS) 1~8 期, 同时也与本孔的有孔虫和超微化石年龄段的分析相一致, 即钙质超微化石 *Emiliana huxleyi* Acme 首次出现在沉积物 80.47 m 处, 年代为 90 ka。浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (Pink) 最后出现在沉积物 112.63 m 深处, 年代为 120 ka。硅藻的第8组合带相当于氧同位素8期, 年代大致是 200 ka 左右。

关于全新世与更新世的界线, 硅藻的第1组合带是以热带和亚热带远洋硅藻种占优势为特征, 沿岸种和潮间带种 *Paralia sulcata*、*Cyclotella striata* 除在 6.17 m 样中含量较高, 分别达到 17.7% 和 11.4% 外, 其余样中含量非常低, 一般都在 3.4% 和 7.6% 之间。组合带中热带和亚热带硅藻种占 67.3%, 因此组合带代表了典型的热带和亚热带远洋植物群, 时代应为冰后期沉积。在1组合带之下的第2硅藻组合带其特点与1组合带显著不同, 热带种明显减少, 亚热带种 *Thalassionema nitzschioides* 及其变种 var. *parva* 数量明显增多, 含量分别达到 21.3% 和 23.6%。此外, 较典型的暖水种 *Coscinodiscus decrescens* 和近岸 *Chaetoceros* spp. 休眠孢子其含量

分别达到 5.9% 和 16.5%, 尤其值得指出的组合带中冷水型的 *Roperia tessellata* 含量达到最高值 23.6%, 据有关资料认为该种属大洋浮游种, 从暖水区到冷水区都有分布。本种生活在暖水和冷水环境中的细胞形态和边缘构造是不同的, 出现在该组合带中的正是属于冷水环境中的壳体边缘无齿状隆起线的个体较小类型。由此反映出2硅藻组合带与1组合带无论是种类组成和生态特征都有明显的不同, 较为明显的变化是在 6.17 m, 因此全新世和更新世界线划在 6.17 m 处较为妥当。

晚更新世基于 OIS 5(5) 期开始 (Williams, 1988) 反映在 ODP 1144 站位第5和第6硅藻组合带 (OIS 5/6) 之间, 主要在硅藻典型热带种的含量变化上, 但不非常突出。其界线在 113 m 处典型热带种有明显的变化。OIS 5(5) 温暖期正是第5和第6硅藻组合带的界线, 与 Williams (1988) 的研究是一致的, 即晚更新世开始于 OIS 5(5) 期正好与本文划分的第5硅藻组合带的 5(5) 亚组合带相对应。在中国南海北部大陆坡 KL37 剖面样中硅藻组合特征与本文划分的 1~5 组合带相一致 (蓝东兆等, 1995)。

与太平洋其他地区建立的第四纪硅藻带比较, 分析层段的硅藻组合带相当于在赤道太平洋建立的 *Pseudoemotia doliolus* 带的上部 (Burckle, 1972, 1977a, 1977b, 1994), 也相当于 *Roperia tessellata* 带的中上部, 更与新建立的 *Denticula seminae* 带相当 (Koizumi, 1973a, 1973b; Akiba, 1979), 同时与日本 ODP Leg 57 航次划分的第四纪硅藻3个带中最上的1个带, 即 *Denticula seminae* 带相当 (Barron, 1980)。目前所知 *Denticula seminae* 带在北太平洋中和高纬度地区, 古地磁地层相当于布容期 (Brunhe Epoch), 绝对年龄为 0~0.26 Ma (Donahue, 1970; Lange and Berger, 1993)。在 1144 站位该化石出现在本文第5硅藻组合带中, 虽然数量不多, 但从地质意义上看, 该化石种在南海北部的出现, 其地理分布扩大到低纬度地区, 且对该区晚更新世以来的地层划分和对比有其重要意义。

硅藻新的“事件”, 形态和演化上的差异, 主要由于分类观点的不同导致了对演化方面的不同解释, 因而出现不同的古生物带, 但对硅藻带的确认基本上遵循的原则是硅藻种的首次出现和最后出现以及群体的组成特征, 上述硅藻组合带尽管研究地区不同, 仍然是可对比的。

## 4 结论

(1) 位于南海北部陆坡的 ODP 1144 站位顶部



180 m 沉积物中保存的丰富硅藻植物群,根据重要硅藻种类的分布和生态特征划分了8个硅藻组合带,并可与 OIS 1~8期相对比。

(2)间冰期第1、3、5、7硅藻组合带(对应的 OIS 1、3、5、7期)是以热带和亚热带硅藻占优势,其中冷期出现大量的沿岸型硅藻为特征,反映出温暖的气候条件,高海平面环境,与现代南海北部表层沉积物硅藻组合相似,其沉积环境与现代近似。冰期(第2、4、6、8硅藻组合带对应的 OIS 2、4、6、8期)以亚热带、热带硅藻为优势并出现较多冷水型硅藻为特征,反映较冷气候条件下的低海平面沉积环境。

(3)硅藻组合带反映出的间冰期和冰期的不稳定性在第5硅藻组合带中尤为突出,暖期中也出现了突然降温的冷期,冷期的出现与冰期气候有区别。

(4)硅藻丰度值的变化与冰期和间冰期有密切关系,可以证实间冰期有高的海平面和较低的生物生产力,冰期有较低的海平面和高的生物生产力,而生物生产力的变化与沉积时期沿岸流和上升流的产生与强弱及水团活动有密切关系,从而为揭示研究区古海洋环境的演化与季风强弱之间的关系提供参考依据。

(5)ODP 1144站位中第5和第6硅藻带(OIS 5/6)之间的变化表现出终止期 I 的特征。

在1144站柱样的硅藻研究中,得到了同济大学海洋地质教育部重点实验室汪品先院士、赵泉鸿教授,中国科学院植物研究所孙湘君研究员、罗运利博士和中国地质大学苏新、茅绍智教授以及 V. S. Pushker 的支持和帮助。在此深表谢意。

### 参 考 文 献

- 蓝东兆,程兆第,刘师成. 1995. 南海晚第四纪沉积硅藻. 北京:海洋出版社.
- 李家英. 1989. 冲绳海槽第四纪硅藻及其意义. 东海陆架新生代古生物群—微体古植物分册. 北京:地质出版社,170~201.
- 李家英,严维枢. 1997. 香港西博寮海峡 WB7孔的第四纪沉积及硅藻研究. 地质论评,43(6):616~630.
- 王开发,蒋辉. 1987. 黄海晚更新世以来的硅藻组合. 沉积学报,5(1):94~123.
- 王开发,蒋辉,张玉兰. 1990. 南海沿岸地区第四纪孢粉藻类与环境. 上海:同济大学出版社.
- 汪品先,等. 1995. 十五万年来的南海. 上海:同济大学出版社.

### References

- Akiba F. 1979. The morphologies of *Denticula dimorpha* and its related species, and the Neogene diatom biostratigraphy of Japan. Bull. Tech. Lab. JAPEX, 22 (3): 9~50 (in Japanese).
- Barron J A. 1980. Lower Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy of Leg 57, off northeastern Japan. Deep Sea

- Drilling Project. In: Scientific Party, Init. Reports. DSDP, 56, 57, Pt 2; Washington (U. S. Govt. Printing Office):641~691.
- Battarbee R W. 1986. Diatom Analysis. In: Berglund B E, ed. Handbook of Palaeoecology and Palaeohydrology. Wiley, New York, Ny, 527~570.
- Belyaeva T V. 1970. Taxonomy and distribution pattern of plankton diatoms in equatorial Pacific. Oceanology, 10(1):132~139 (in Russian with English abstract).
- Burckle L H. 1972. Late Cenozoic planktonic diatom zones from the eastern equatorial Pacific. Nova Hedwigia (Beih.), 39:217~250.
- Burckle L H. 1977a. Pliocene and Pleistocene diatom datums levels from the equatorial Pacific. Quat. Res., 7: 330~340.
- Burckle L H. 1977b. Size changes in the marine diatom *Coscinodiscus nodulifer* A. Schmidt, in the equatorial Pacific. Micropalaeontology, 23: 216~222.
- Burckle L H. 1994. Late Quaternary interglacial stages warmer than present. Quat. Sci. Rev., 123:825~831.
- Donahue J G. 1970. Pleistocene diatoms as climate indicators in North Pacific sediments. In: Hays J D, ed. Geological Investigations of the North Pacific. Mem. Geol. Soc. Am., 126:121~138.
- Kennington K, Haslatt S K, Funnell B M. 1999. Offshore transport of neritic diatoms as indicators of surface current and trade wind strength in the Plio - Pleistocene eastern equatorial Pacific. Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 149(1999):171~183.
- Koizumi I. 1973a. The Late Cenozoic diatom biostratigraphy in the Circum-North Pacific Region. J. Geol. Soc. Japan, 81(10): 611~627.
- Koizumi I. 1973b. The late Cenozoic diatoms of Sites 183-193. Leg 19 Deep Sea Drilling Project. in Creager J. S., Scholl. D. W., et al. Init Repts, DSDP, 19. Washington ( U. S. Government Printing Office): 805~855.
- Koizumi I. 1992. Diatom biostratigraphy of the Japan Sea. Leg 127. In: Pisolotto K A, et al. ed. Proc. ODP, Sci. Results, 127/128 (1): 249~289.
- Kozlova O G, Mukhina V V. 1967. Diatoms and silicoflagellates in suspension and floor sediments of Pacific Ocean. Init. Geol. Rev., 9:1322~1342.
- Lan Dongzhao, Cheng Zhaodi, Liu Shicheng. 1995. Diatom in Late Quaternary sediments from the South China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1~138 (in Chinese).
- Lange C B, Berger W H. 1993. Diatom productivity and preservation in the western equatorial Pacific: the Quaternary Record. Proc. ODP. Sci. Results, 130:509~523.
- Lee J H, Lee J Y. 1990. A light and scanning electron microscopic study on the marine diatom *Roperia tessellata* (Roper) Grunow. Diatom Research, 5(2):325~335.
- Li Jiaying. 1989. The diatom assemblages of the Quaternary from Okinawa Trough and their geological significance. Cenozoic paleobiota of Continental Shelf of the East China Sea (Donghai)—Micropaleobotanical Colum. Beijing: Geological Publishing House, 170~178(in Chinese).
- Li Jiaying, Yim W W-S. 1997. Quaternary sediments and diatom studies of Borehole WB7 in the West Lamma Channel. Hong Kong. Geol. Rev., 43(6):616~630 (in Chinese with English abstract).
- Pushkar V S, Roof S R, Cherepanova M V, Hopkins D M, Grette J B. 1999. Paleogeographic and paleoclimatic significance of

- diatoms from middle Pleistocene marine and glaci-marine deposits on Baldwin Peninsula, northwestern Alaska. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 152: 67~85.
- Rasmussen Z M, Carpenter T H. 1982. Variations in Tropical Sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern oscillation/ El-Nino. *Mon. Weather Rev.*, 110:354~384.
- Sancetta C. 1982. Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk Sea. *Micropaleontology*, 28(3):221~257.
- Schrader H J. 1973. Cenozoic diatoms from the northeast Pacific, Leg 18. *Init. Rep. DSDP 18*, 673~797.
- Schrader H J, Gersonde R. 1978. Diatoms and Silicoflagellates. *Utrecht Micropalaeontology Bull.*, 17:129~176.
- Tanimura Y. 1981. Late Quaternary diatoms of the Sea of Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Ser, 2, 51(182):1~37.
- Tanimura Y. 1999. Varieties of a single cosmopolitan diatom species associated with surface water masses in the North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 37:199~218.
- Wang Kaifa, Jiang Hui. 1987. Diatom assemblages and their depositional environment in the Yellow Sea since the Late Pleistocene Epoch. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(1): 94~123 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian, et al. 1995. South China sea during the past 150,000 years. *Tongji University Press, Shanghai* (in Chinese).
- Williams D F. 1988. Evidence for and against sea-level changes from the stable isotope record of the Cenozoic. In: Wilgus C K, et al. ed. *Sea-level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Spec. Publ., 42:31~36.
- Yim W W-S, Li Jiaying. 2000. Diatom preservation in an inner continental shelf borehole from the south China Sea. *Jour. Asian Earth Sciences*, 18(2000): 471~488.

## Quaternary Diatoms from the South China Sea, Leg 184, Site 1144 and Their Palaeoenvironmental Evolution

LI Jiaying

*Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037*

### Abstract

This paper presents the late Quaternary diatoms record of the Ocean Drilling Program (ODP) Leg 184, Site 1144 in the South China Sea. The water depth is 2037 m, and sediment thickness is equal to 500 m, a nearly continuous Pleistocene to Holocene sequence is recovered with the cores. The Site 1144 core samples used in this study yield abundant well preserved diatoms from the surface to 183.62 m below the sea floor.

Based on the distribution of the zonal diatom species and on changes in the palaeoecological structure of the diatom assemblages (e. g., warm- vs. cold-water assemblages), eight diatom assemblages are defined from this section. The eight diatom assemblages coincide with the oxygen isotope stages (OIS) 1~8. The diatom assemblage 1, 3, 5 and 7 coincide with the interglacial time (oxygen isotope stage 1, 3, 5, 7), the diatom assemblages 2, 4, 6 and 8 coincide with the glacial time (oxygen isotope stages 2, 4, 6, 8).

Their abundance and preservation are related, with high abundance values accompanied by good preservation states and low abundance by poor preservation. On the whole, the cycles are well in phase, with high sea level (interglacial) related to high diatom abundance, and low sea level (glacial) to high abundance.

Low sea-surface temperature and high bioproductivity is a result of intensified trade wind strength as indicated by the neritic/pelagic diatom ratio. The neritic/pelagic diatom is important as it helps us better understand of the relationship between palaeoceanographic evolution and trade wind strength in the region.

**Key words:** Quaternary; diatom; abundance; upwelling