

文章编号: 1000-0550(2012)03-0556-09

# 南海北部陆架中全新世沉积记录及古环境意义<sup>①</sup>

徐勇航 陈 坚 王爱军 李云海 汪卫国 赖志坤 李东义

(海洋与海岸地质环境开放实验室 国家海洋局第三海洋研究所 福建厦门 361005)

**摘 要** 通过分析珠江口外陆架 C069 孔沉积柱样的粒度、黏土矿物、主量元素及底栖有孔虫,来研究南海北部中全新世晚期古环境演化。4.2 ka 前为全新世大暖期后期,气候湿润,珠江口外陆架受大量的珠江淡水影响,导致 C069 孔位置的水动力条件较强,形成下段粒度较粗的碎屑沉积物,高岭石含量较高,低的 MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值,以及受冲淡水影响形成的底栖有孔虫。由于受 4.2 ka 的极冷事件的影响, C069 孔上段的沉积环境受珠江冲淡水影响减小,水动力条件减弱,沉积物粒度变细,高岭石含量降低, MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值增大,形成正常浅水环境的底栖有孔虫。4.2 ka 以后,台湾来源物质的贡献增多,导致沉积物中伊利石和绿泥石的含量增多,伊利石结晶度和化学指数值都明显变小。

**关键词** 南海北部 中全新世 沉积环境 古气候

**第一作者简介** 徐勇航 男 1980 年出生 博士 助理研究员 海洋地质 E-mail: yonghang\_xu@163.com

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

全新世(11.5 ka 至今)是最年轻的地质时期,其气候变化与人类社会、经济发展密切相关。全新世存在 8 次较明显的冷事件,这些冷事件当中的全新世事件 5(8.2 ka)和 3(4.2 ka)两次冷事件影响范围广、变化幅度较大而备受关注<sup>[1,2]</sup>。全新世事件 3 可能是新仙女木事件以来最为寒冷的一次降温过程,是历史记录以来最具影响力的一次小冰期,标志全新世气候适宜期结束的<sup>[3]</sup>,再加上当时大范围的古文化变迁,因此,全新世事件 3 引起了各国学者的兴趣<sup>[4~7]</sup>。

4.2 ka 左右存在大范围的降温事件,但在干湿分布上存在明显的地域差异,尤其是北半球,中、低纬度地区主要表现为干旱的气候条件。施雅风发现中国全新世大暖期出现在 8.5~3.0 ka,5.0~3.0 ka 为大暖期后期,但在 4.0 ka 前后存在一个多灾时期,气候一度恶化<sup>[8]</sup>。刘嘉麒等对全新世以来湖光岩玛珥湖沉积物干密度高分辨率时间序列的能谱分析和滤波分析发现 2 930 a 周期所对应的 3 次降温期峰值分别发生在距今 7 300 a,4 250 a 和 1 200 a,特别是发生在距今 4 250 a 左右的干旱、降温事件<sup>[9]</sup>,与我国边缘海沉积环境记录中的 Pulleniatina 降温事件很好的对应关系<sup>[10]</sup>。对于南海北部陆架近 4.2 ka 以来沉积记录的研究相对薄弱<sup>[11,12]</sup>。赵宏樵等通过研究南海

北部陆坡 191 站位柱状沉积物的主量元素,发现在 32~23 cm 处的陆源物质增加,反映气温和海平面下降,认为与全球发现的全新世晚期距今 4~2 ka 的变冷事件有关<sup>[11]</sup>。

陆源碎屑物质组成是源岩从风化剥蚀、搬运到沉积整个过程的综合反映,因此,边缘海沉积物中的陆源组分不仅反映沉积物的物质来源,而且可以用于地质历史时期古环境演化的重建<sup>[13,14]</sup>。南海北部利用沉积柱样来研究全新世事件 3 的工作很少,制约了对这千年尺度降温事件时空特征分析。因此,本文利用在珠江口外陆架采集到的沉积柱样,通过分析沉积物的粒度、黏土矿物和主量元素及底栖有孔虫特征,来探讨南海北部陆架 4.2 ka 前后古环境的演化。

## 1 样品和分析方法

### 1.1 样品

C069 孔沉积柱样是国家海洋局第三海洋研究所于 2009 年在珠江口外陆架进行“我国近海海洋综合调查与评价专项”调查时用重力取样器获得,站位坐标为(113°49′48.5″E, 21°15′34.4″N)(图 1)。C069 孔沉积柱样长为 210 cm,以粉砂、砂质粉砂为主,自下而上颜色由深灰色变为浅灰色,弱粘性,质软,分选差。沉积柱按照 10 cm 的间隔 2 cm 的厚度取样,共得 22 个分析样品,进行粒度、黏土矿物、主量元素、有

<sup>①</sup>国家青年基金项目(编号:40906047) 国家 908 专项 CJ18 区块海底底质调查与研究(编号:908-01-CJ18),国家海洋局青年海洋科学基金项目(编号:2010326) 联合资助。

收稿日期:2011-01-20; 收修稿日期:2011-04-21

孔虫分析和<sup>14</sup>C 测年。

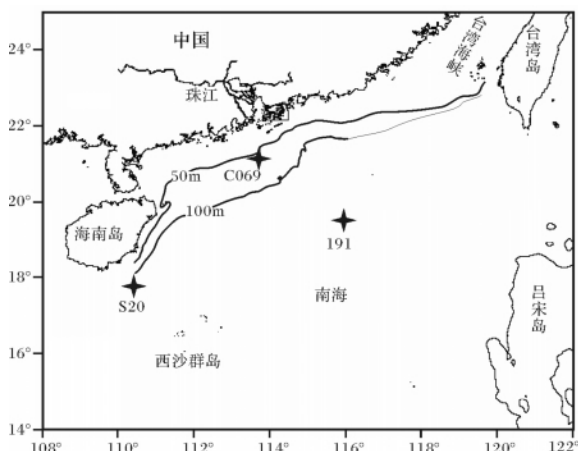


图 1 南海北部陆架 C069 孔位置图  
191 站位据文献[11] S20 站位据文献[12]

Fig. 1 Location of Core C069 from shelf in the northern South China Sea

### 1.2 分析方法

粒度分析称取烘干后的样品 0.15 g 左右置于烧杯中, 加入 100 mL 去离子水和 15 mL 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 室温反应 24 h, 去除有机质。反应完全后加入 1 mL 2N 的盐酸, 室温放置 24 h 后移去烧杯顶部清液, 去除碳酸盐。最后加入 7 mL 0.5N 的 (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>, 静置 24 h, 超声振荡分散后, 利用 MasterSizer 2000 型激光粒度仪进行粒度测试, 仪器测试范围为 0.02 ~ 2 000 μm,

粒度分辨率为 0.01 φ, 重复测量的相对误差 < 3%。

黏土矿物样品先后用 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 25% 醋酸反应去除有机质和碳酸盐, 按 Stokes 沉降原理所确定的沉降时间, 将小于 2 μm 的悬浮液吸出, 离心, 用涂片法制成定向薄片。采用荷兰的 PANalytical X' Pert PRO 衍射仪, 分别对自然条件、乙二醇蒸气饱和和加热条件(490°C 2 h) 的样品薄片进行测试(图 2)。4 种黏土矿物蒙脱石(含少量伊利石/蒙脱石混层矿物)、伊利石、高岭石和绿泥石的相对含量按 Biscaye<sup>[15]</sup> 的方法计算, 绿泥石和高岭石的相对比例通过拟合 3.54 nm/3.58 nm 的衍射峰面积比确定。

沉积物常量元素用 X 射线荧光光谱法分析。先将沉积物样品烘干后, 用磨样机磨细至 200 目以上。将磨细的样品压片制成粉末片, 利用 X 射线荧光光谱仪(XRF) 进行常量元素的分析。方法的精度: 主元素相对标准偏差(RSD) 不大于 5%。

有孔虫分析样品采用 0.063 mm 孔径标志铜筛进行冲洗, 筛上部分经烘干称重后鉴定。不仅定出有孔虫的种类, 而且计算出各样品的丰度值、简单分异度、复合分异度以及优势度。

<sup>14</sup>C 是在北京大学核物理与核技术国家重点实验室利用加速器质谱光谱仪(AMS) 完成年代测试的, <sup>14</sup>C 测年所用的仪器为美国 NEC 1.5 SDH-1 串联加速器质谱仪, <sup>14</sup>C 半衰期采用 5568 年。

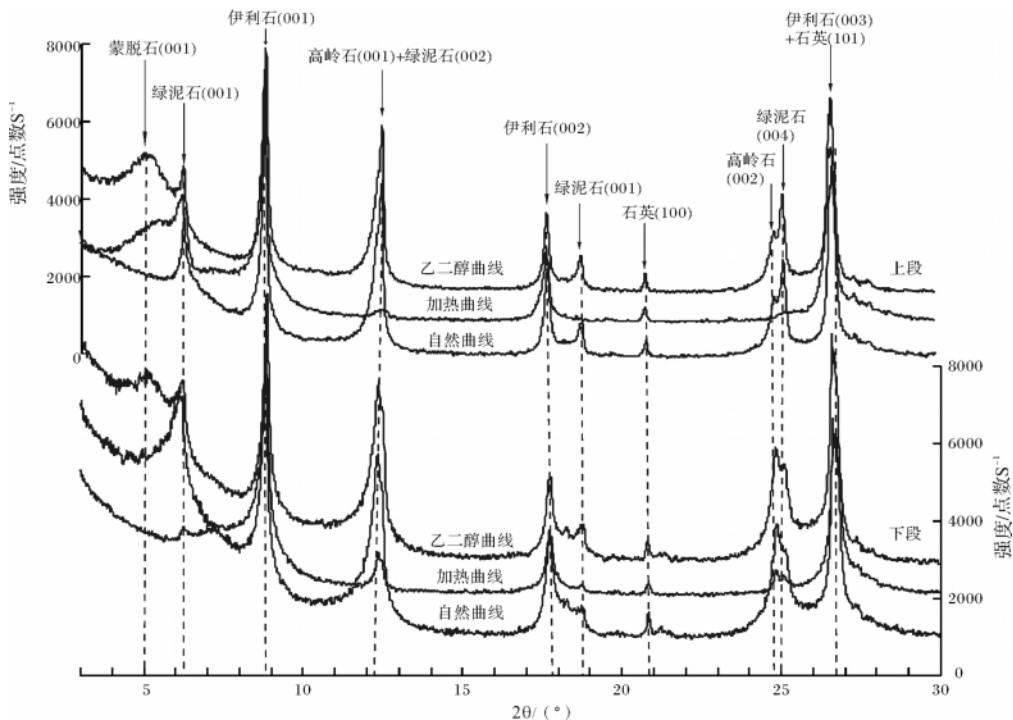


图 2 C069 孔样品 X 射线衍射叠加图谱

Fig. 2 Multiple X-ray diffractograms of typical samples from Core C069

利用 Calib 6.01 软件中的 Marine09 数据库<sup>[16]</sup>将<sup>14</sup>C 年龄校正为日历年龄(表1)。

表1 南海北部陆坡 C069 孔沉积物 AMS<sup>14</sup>C 测年年代及其对应的日历年龄

Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating of Core C069 from shelf in the northern South China Sea

深度/cm	AMS <sup>14</sup> C 年龄/a BP	日历年龄/a BP
22~24 cm	1045	636
108~114 cm	4280	4433

## 2 结果

### 2.1 粒度特征

沉积物类型自下往上,砂的含量明显减少(60%→6%),粉砂含量则明显增加(27%→84%),黏土含量略有波动的减少。沉积物平均粒径( $\phi$ 值)分布范围为3.45~6.24 $\phi$ ,自下往上平均粒径( $\phi$ 值)有变大趋势(图3);下部分的分选系数介于2.30~2.54(平均2.44),属于分选很差;而上部分的分选系数介于1.51~1.92(平均1.71),属于分选差,分选系数自下而上明显变小。根据沉积物类型和分选系数,以110 cm为分界线把沉积柱样分为上段(0~110 cm)和下段(110~210 cm)两段。从粒度频率分布曲线上可以看出C069孔上、下特征完全不同(图3),下段沉积物粒度为典型的双峰分布特征,高、峰值粒度组分布

范围分别在200~300  $\mu\text{m}$ (砂),低峰值的为8~16  $\mu\text{m}$ (粉砂);而上段沉积物粒度分布为单峰特征,主要为粉砂级,粒度相对较细,粒度值在16~63  $\mu\text{m}$ 占总量的5%以上(图3)。

### 2.2 黏土矿物组成

C069孔的黏土矿物组成特征为,伊利石含量最高为45~54%,其次是高岭石为15~29%和绿泥石为17~25%,蒙脱石含量最少为6~15%,垂向分布特征如图4所示。黏土矿物组成在110 cm上、下两部分也有明显的不同:(1)下段4种黏土矿物组分相对含量都较稳定,平均百分含量分别为伊利石47%、高岭石27%、绿泥石19%和蒙脱石7%;(2)上段伊利石和绿泥石含量略有波动增加趋势,但上段高岭石的含量(平均为18%)明显比下段(平均为27%)低,蒙脱石在60~110 cm出现最大值15%。

利用乙二醇曲线计算伊利石的化学指数,即5  $\text{\AA}$ /10  $\text{\AA}$ 峰面积比,用伊利石10  $\text{\AA}$ 的半高宽FWHM表示伊利石的结晶度。C069孔的伊利石结晶度和化学指数在110 cm上、下两段也有明显的差别(图4),下段伊利石结晶度为0.27°~0.29°  $\Delta 2\theta$ (平均为0.28°  $\Delta 2\theta$ ),明显高于上段伊利石的结晶度为0.21°~0.26°  $\Delta 2\theta$ (平均为0.23°  $\Delta 2\theta$ );伊利石化学指数下段(0.55~0.70)也明显高于上段(0.41~0.51)。

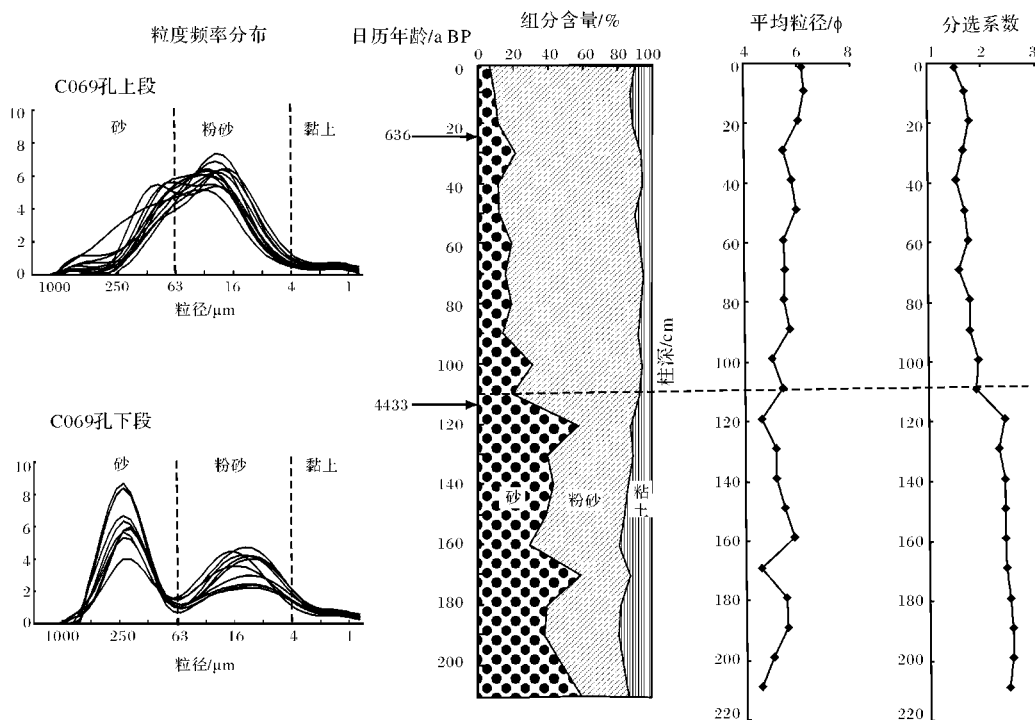


图3 C069孔粒度参数垂向分布图

Fig. 3 Variation of grain size at Core C069

表 2 C069 孔沉积物黏土矿物分析数据

Table 2 Clay mineral assemblage data of Core C069

样品号	层位/cm	蒙脱石/%	伊利石/%	绿泥石/%	高岭石/%	伊利石结晶度/(°Δ2θ)	伊利石化学指数
上段							
C069-01	0 ~ 2	8	50	22	20	0.24	0.50
C069-05	8 ~ 10	9	47	25	18	0.24	0.51
C069-10	18 ~ 20	7	49	23	20	0.23	0.47
C069-15	28 ~ 30	9	51	21	19	0.24	0.49
C069-20	38 ~ 40	8	50	23	19	0.21	0.45
C069-25	48 ~ 50	11	46	25	18	0.25	0.41
C069-30	58 ~ 60	12	53	20	15	0.23	0.48
C069-35	68 ~ 70	14	46	23	17	0.26	0.44
C069-40	78 ~ 80	12	54	19	16	0.25	0.46
C069-45	88 ~ 90	15	50	20	15	0.25	0.44
C069-50	98 ~ 100	13	47	23	16	0.22	0.46
C069-55	108 ~ 110	12	49	21	18	0.23	0.48
下段							
C069-60	118 ~ 120	8	45	20	27	0.29	0.55
C069-65	128 ~ 130	9	46	19	26	0.27	0.69
C069-70	138 ~ 140	9	48	18	25	0.28	0.67
C069-75	148 ~ 150	7	46	19	28	0.28	0.60
C069-80	158 ~ 160	7	45	20	29	0.28	0.67
C069-85	168 ~ 170	7	48	17	28	0.28	0.70
C069-90	178 ~ 180	6	48	20	26	0.28	0.64
C069-95	188 ~ 190	7	47	19	27	0.29	0.68
C069-100	198 ~ 200	9	48	17	26	0.28	0.64
C069-105	208 ~ 210	10	47	18	25	0.28	0.56

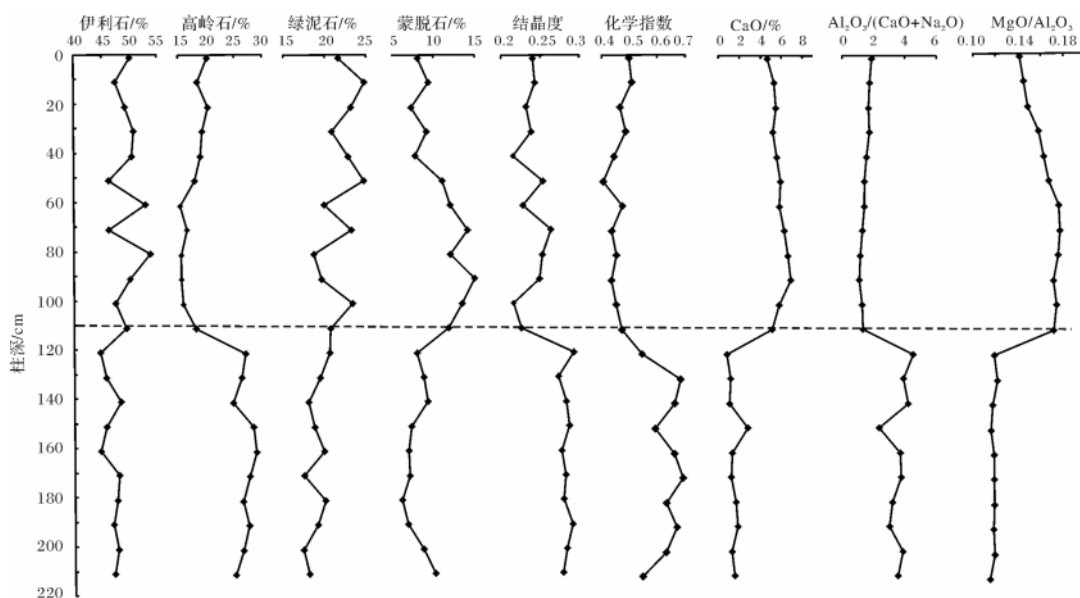


图 4 C069 孔黏土矿物组成及地球化学特征垂向分布图

Fig. 4 Variation of clay minerals assemblage and geochemistry at Core C069 in the northern South China Sea

2.3 地球化学特征

C069 孔沉积物地球化学特征在上、下两部分具有明显的差异 (表 3)。(1) 上段: SiO<sub>2</sub> 含量为

57.34% ~ 65.36%; CaO 含量为 4.69% ~ 6.96%, 平均值为 5.77%; MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值为 0.16; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值为 1.52。(2) 下段: SiO<sub>2</sub> 含量较高为

68.92% ~ 75.53%; CaO 含量明显低于上段,为 0.92% ~ 2.94%,平均值为 1.63%,其烧失量也相应的较小; MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值为 0.12; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值高于上段为 3.71。

表3 C069 孔沉积物全岩主量(%)元素分析数据  
Table 3 Whole rock analyses of major (wt%) of Core C069

样品号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a)	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	MgO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
上段												
C069-01	58.53	14.33	5.24	2.03	4.69	2.56	2.85	0.07	0.72	0.13	10.85	0.14
C069-05	57.34	14.45	5.17	2.10	5.37	2.56	2.90	0.07	0.71	0.13	10.35	0.15
C069-10	58.18	13.98	5.03	2.08	5.48	2.52	2.69	0.06	0.70	0.12	10.30	0.15
C069-15	58.53	13.99	4.99	2.21	5.20	2.58	2.63	0.07	0.69	0.12	9.70	0.16
C069-20	60.11	13.11	4.70	2.13	5.59	2.50	2.51	0.06	0.68	0.12	9.21	0.16
C069-25	60.32	12.41	4.48	2.07	5.96	2.41	2.53	0.06	0.66	0.11	9.55	0.17
C069-30	60.11	12.51	4.58	2.20	5.87	2.45	2.51	0.06	0.67	0.12	9.47	0.18
C069-35	60.42	11.87	4.36	2.10	6.35	2.37	2.42	0.05	0.65	0.11	9.48	0.18
C069-40	61.69	10.88	3.96	1.90	6.70	2.22	2.17	0.05	0.61	0.10	9.22	0.17
C069-45	62.15	10.48	3.82	1.79	6.96	2.16	2.09	0.05	0.59	0.10	9.39	0.17
C069-50	63.77	10.89	3.91	1.88	5.85	2.19	2.12	0.05	0.61	0.10	8.55	0.17
C069-55	65.36	10.36	3.82	1.77	5.25	2.15	1.96	0.05	0.59	0.11	7.84	0.17
下段												
C069-60	75.53	10.63	3.70	1.25	0.92	2.18	1.40	0.05	0.66	0.07	4.62	0.12
C069-65	71.76	11.74	4.15	1.41	1.30	2.28	1.67	0.06	0.69	0.08	5.44	0.12
C069-70	71.37	12.34	4.30	1.43	1.18	2.35	1.69	0.06	0.72	0.08	5.44	0.12
C069-75	70.14	10.99	4.06	1.25	2.94	2.13	1.51	0.06	0.69	0.08	6.72	0.11
C069-80	71.56	11.86	4.34	1.38	1.51	2.28	1.61	0.06	0.71	0.08	5.74	0.12
C069-85	72.93	11.34	3.94	1.32	1.41	2.23	1.54	0.05	0.68	0.08	5.40	0.12
C069-90	72.91	11.05	3.81	1.29	1.82	2.21	1.52	0.05	0.68	0.08	5.12	0.12
C069-95	71.63	11.38	4.12	1.32	2.02	2.21	1.59	0.06	0.70	0.08	5.72	0.12
C069-100	68.92	13.06	4.63	1.52	1.44	2.38	1.82	0.07	0.74	0.09	6.48	0.12
C069-105	70.57	12.07	4.38	1.35	1.71	2.24	1.55	0.06	0.71	0.09	5.78	0.11

a) 代表总铁含量;

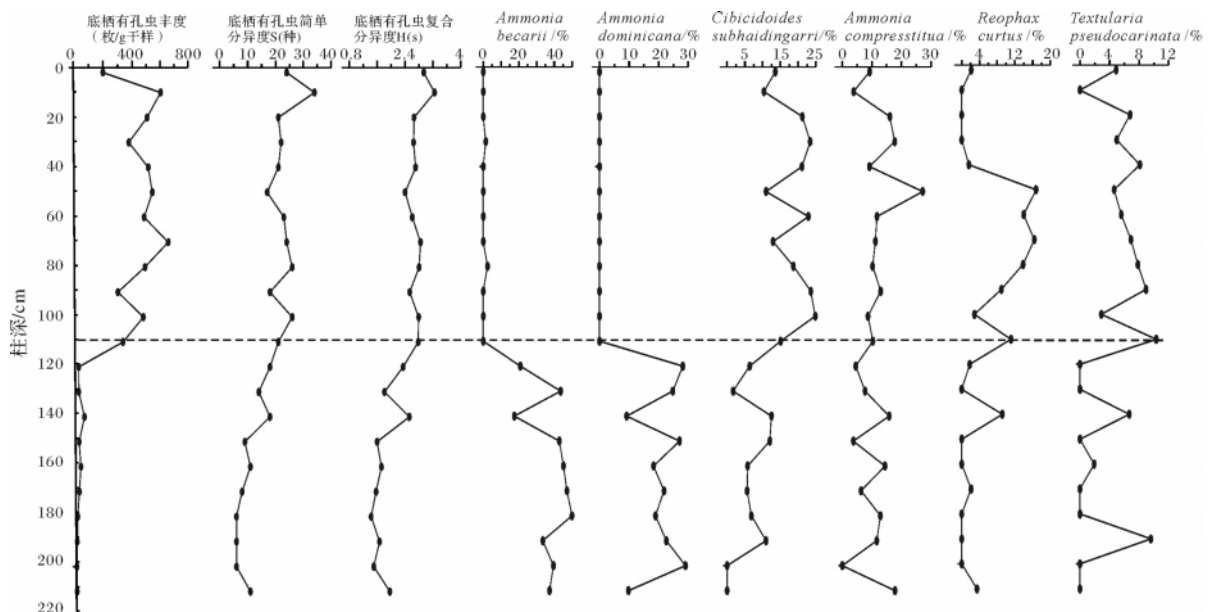


图5 C069 孔底栖有孔虫垂直变化特征

Fig. 5 The vertical variation of benthic foraminifera at Core C069 in the northern South China Sea

## 2.4 底栖有孔虫

C069 孔沉积物下段的底栖有孔虫丰度很低,平均仅有 20 枚/g 干样,与之对应的底栖有孔虫简单分异度和复合分异度也都处于相对低值阶段,均值只有 11 种和 1.82(图 5)。下段底栖有孔虫优势种是 *Ammonia becarii* 和 *Ammonia dominicana*,平均含量分别占到了全群的 37.8% 和 21.0%。上段的底栖有孔虫丰度显著高于下段,均值增至 458 枚/g 干样,而简单分异度和复合分异度的均值也相应增加到了 23 种和 2.75。从底栖有孔虫优势种组合上来看,与下部层位的种群组合截然不同,下半段中的绝对优势种 *Ammonia becarii* 和 *Ammonia dominicana* 含量骤降,前者平均含量由 37.8% 降至 0.3%,而后者则完全消失,取而代之的是 *Cibicidoides subhaidingarii*(18.2%)、*Ammonia compressituta*(12.47%)、*Reophax curtus Cushman*(7.31%)、*Textularia pseudocarinata Cushman*(5.99%) 等成为优势种(图 5),但是优势地位不及下段的两个种那么突出,这些属种都是我国近海中、内陆架常见属种。

## 3 讨论

### 3.1 物质来源

C069 孔位于南海北部的珠江口水下古三角洲区域,沉积物主要以粗颗粒的砂质粉砂和粉砂质砂为主。该孔粗颗粒沉积物来源相对单一,主要来自近源的珠江。然而,南海北部细粒级( $< 2 \mu\text{m}$ )的黏土矿物具有多物源的特征,其中珠江、台湾和吕宋岛是主要的三个物源区,这些黏土矿物是分别受不同洋流搬运而来的<sup>[17,18]</sup>。

珠江河流中的黏土矿物含大量高岭石(46%),蒙脱石含量一般小于 5%,说明珠江流域向南海北部主要贡献高岭石,基本上不提供蒙脱石<sup>[19]</sup>。台湾河流的黏土矿物组成以伊利石(56%)和绿泥石(41%)为主,含有极少量的高岭石和蒙脱石<sup>[20]</sup>。而吕宋岛河流的黏土矿物特征则以蒙脱石为主(86%),含有少量的高岭石和绿泥石,几乎不含伊利石<sup>[21]</sup>。

C069 孔的黏土矿物组合以伊利石含量最高(45%~54%),其次是高岭石(15%~29%)和绿泥石(17%~25%),蒙脱石含量最少(6%~15%)。因此,C069 孔的黏土矿物也主要是珠江、台湾和吕宋岛的三个物源区提供的。C069 孔下段高岭石(27%)明显高于上段高岭石的含量(18%),反映下段沉积物受珠江提供的陆源物质更多。C069 上段的伊利石和

绿泥石含量明显增加,反映了有更多台湾来源的黏土物质加入。伊利石化学指数和结晶度也能反映物源区的变化<sup>[22]</sup>。珠江伊利石的化学指数和结晶度都明显高于台湾的<sup>[18]</sup>。C069 孔上段伊利石化学指数和结晶度明显低于下段的,是由于上段有更多台湾的伊利石输入,导致 C069 孔上段低的伊利石化学指数和结晶度。

### 3.2 沉积环境

C069 孔下段沉积物粒度频率分布曲线为双峰分布特征,以砂为主,分选很差;自下而上,砂的含量减少,粉砂含量增加,分选也相对变好(图 3),反映上段沉积环境的水动力条件相对于下段有减弱的趋势。

海洋沉积物中  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值大小主要反映陆源物质的输入量大小,比值越小,陆源物质输入越多,反之则越少<sup>[23]</sup>。C069 孔下段  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值明显低于上段的,说明 C069 孔下段有更多的珠江陆源物质输入。C069 孔下段 CaO 含量明显低于上段 CaO 含量(图 4),并具有高的  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$  值,说明下段的碳酸盐含量较少,受到珠江陆源碎屑的稀释作用导致低的 CaO 含量。此外,C069 孔下段至上段高岭石含量明显减少(27%→18%),南海北部的高岭石主要来自珠江<sup>[19]</sup>,因此再次反映了 C069 孔下段的沉积物受珠江陆源物质的影响较大。

此外,下段底栖有孔虫的绝对优势种是 *Ammonia becarii* 和 *Ammonia dominicana*,反映 C069 孔下段所在区域应当是受到淡水强烈影响的环境<sup>[24]</sup>;而上段绝对优势种变为更适合生活在盐度正常浅海相环境的 *Cibicidoides subhaidingarii*、*Ammonia compressituta*(图 5),可见上段内的海洋环境应当是一种受到珠江陆源冲淡水影响较小的正常海相浅水环境。

综上所述,C069 孔下段沉积物是在受珠江淡水强烈作用下,携带大量珠江陆源物质形成的,导致细颗粒沉积物较少,高岭石含量较高,伊利石和绿泥石含量较低,及低的  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值和相应的底栖有孔虫优势种。随着珠江淡水影响的减少,陆源物质减少,大量较细的粉砂沉积物沉积, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值迅速增大,高岭石含量减少;更多台湾来源的黏土矿物沉积,伊利石和绿泥石含量增加。

### 3.3 古环境意义

输入海洋中的陆源碎屑物质主要是陆壳岩石的风化产物,而源区风化程度受到气候和构造活动的影响,气候越干燥,风化程度就越高。伊利石化学指数大小可以指示其风化程度,例如伊利石化学指数小于

0.5 代表富 Fe-Mg 伊利石,为物理风化;大于 0.5 为富 Al 伊利石,代表强烈的水解作用<sup>[25]</sup>,从而可以用来指示气候变化<sup>[22-26]</sup>。此外,伊利石结晶度为低值代表结晶度高,指示陆地物源区水解作用弱,为干冷的气候条件<sup>[26]</sup>。C069 孔上段伊利石的结晶度平均值为  $0.23^\circ \Delta 2\theta$ ,明显低于下段伊利石结晶度  $0.28^\circ \Delta 2\theta$ (图 4)。伊利石化学指数上段平均值为 0.47,小于 0.5 代表富 Fe-Mg 伊利石,为物理风化结果;而下段伊利石化学指数平均值为 0.64,大于 0.5 为富 Al 伊利石,代表强烈的水解作用。

C069 孔伊利石的化学指数和结晶度的变化反映了古气候有变冷的趋势,但由于 C069 孔的伊利石具有多源的特征,随着上段来自台湾的物质增多,可以导致伊利石的化学指数和结晶度值也相应的减少。因此,C069 孔伊利石的化学指数和结晶度值不能很好地反映珠江流域黏土矿物风化时的古气候特征。因此,在利用伊利石化学指数和结晶度反映古气候变化时,应该考虑不同源区伊利石的影响。

C069 孔 108 ~ 114 cm 层位日历年龄为距今 4 433 a,正处于全新世事件 3(4.2 ka)大范围的降温事件。该极冷事件在北半球中、低纬度地区主要表现为干旱的气候条件,但是这次降温事件并没有立即恢复暖湿,在中国一直持续了 2 000 多年的干旱期,从而导致中国新石器文化的衰落<sup>[27]</sup>。在中国华南和南海对该事件也有体现,湖光岩玛珥湖沉积物也发现距今 4 250 a 左右的干旱、降温事件<sup>[9]</sup>,以及我国边缘海沉积环境记录中的 Pulleniatina 降温事件<sup>[10]</sup>。

4.2 ka 事件正是 C069 孔上、下段的分界线,因此正是 4.2 ka 的气候突变导致珠江口外的沉积环境发生了变化。4.2 ka 前为全新世大暖期后期<sup>[8]</sup>,气候湿润,受大量的珠江淡水影响,导致 C069 孔下段的水动力较强,形成粒度较粗的碎屑沉积物;受大量珠江陆源物质影响,高岭石含量较高,低的 MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值,以及在冲淡水环境下形成 *Ammonia beccarii* 和 *Ammonia dominicana* 绝对优势种的底栖有孔虫。由于 4.2 ka 的极冷事件,导致气候干燥,中国南北方降水普遍减少<sup>[28]</sup>,使得 C069 孔上段的沉积环境受珠江淡水影响减小,沉积物粒度变细,高岭石含量降低, MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值增大,形成正常浅水环境的底栖有孔虫。此时台湾来源物质的贡献增多,导致伊利石化学指数和结晶度值变小。

## 4 结论

(1) C069 孔沉积物自下往上平均粒径变大,沉

积物颗粒变细,分选程度相对变好;下段粒度分布为双峰分布特征,分选很差,反映水动力条件较强。粗颗粒沉积物主要源自珠江。而黏土矿物具有多源性,其中的高岭石主要是珠江提供,而伊利石和绿泥石主要来自台湾河流的提供,而蒙脱石则来自吕宋岛。

(2) 4.2 ka 前为全新世大暖期后期,气候湿润,珠江口外陆架受大量的珠江淡水影响,导致 C069 孔下段的水动力较强,形成粒度较粗的碎屑沉积物;受珠江陆源物质影响,高岭石含量较高,低的 MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值,以及在冲淡水环境下形成的底栖有孔虫。

(3) 由于受 4.2 ka 的极冷事件的影响,导致气候干燥,C069 孔上段的沉积环境受珠江淡水影响较小,沉积物粒度变细,高岭石含量降低, MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值增大,形成正常浅水环境的底栖有孔虫。台湾来源物质的贡献增多,沉积物中伊利石和绿泥石的含量增多,伊利石结晶度和化学指数值都明显变小。

## 参考文献 (References)

- Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278: 1257-1266
- Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308: 854-857
- Perry C A, Hsu K J. Geophysical, archeological, and historical evidence support a solar-output model for climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of USA*, 2000, 97(23): 12433-12438
- Booth R K, Jackson S T, Forman S L, et al. A severe centennial-scale drought in mid-continental North America 4 200 years ago and apparent global link ages [J]. *The Holocene*, 2005, 15: 321-328
- Wu W, Liu T. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of Neolithic Cultures around the central plain of China [J]. *Quaternary International*, 2004, 117: 153-166
- Staubwasser M, Sirocko F, Grootes P M, et al. Climate change at the 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8): 1425 doi: 10.1029/2002GL01682
- deMenocal P B. Cultural response to climate change during the late Holocene [J]. *Science*, 2001, 292: 667-673
- 施雅风, 孔昭宸, 唐领余, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. *中国科学: B 辑*, 1992, 26(2): 1300-1308 [Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Tang Lingyu, et al. Basic feature of climates and environments during the Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China: Series B*, 1992, 26(2): 1300-1308]
- 翦知湣, 李保华, Pflaumann U 等. 西太平洋晚全新世变冷事件 [J]. *中国科学: D 辑*, 1996, 26(5): 461-466 [Jian Zhimin, Li Baohua, Pflaumann U, et al. Late Holocene cooling event in the western

- Pacific[J]. *Science in China: Series D*, 1996, 39(5): 543-550]
- 10 刘嘉麒,吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性[J]. *科学通报*, 2000, 45(11): 1190-1195 [Liu Jiaqi, Lu Houyuan, Negendank J, *et al.* Periodicity of Holocene climatic variations in the Huguangyan Maar Lake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(18): 1712-1717]
  - 11 赵宏樵,韩喜彬,陈荣华, 等. 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 85-93 [Zhao Hongqiao, Han Xibin, Chen Ronghua, *et al.* Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 85-93]
  - 12 徐方建,陈世悦,操应长, 等. 近 4400 年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1198-1205 [Xu Fangjian, Chen Shiyue, Cao Yingchang, *et al.* Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the Northern South China Sea since 4400 a [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1198-1205]
  - 13 Wang L, Samthein 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: 245-284
  - 14 Prins M A, Postma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope [J]. *Marine Geology*, 2000, 169: 351-371
  - 15 Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76: 803-831
  - 16 Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, *et al.* IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 50 000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2009, 51: 1111-1150
  - 17 刘志飞. 南海沉积物中的黏土矿物: 指示东亚季风演化历史[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 1012-1019 [Liu Zhifei. Clay mineral assemblages in sediments of the South China Sea: East Asian Monsoon Evolution Proxies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 1012-1019]
  - 18 Liu Z F, Colin C, Li X J, *et al.* Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: source and transport [J]. *Marine Geology*, 2010, 277: 48-60
  - 19 Liu Z F, Colin C, Huang W, *et al.* Clay minerals in surface sediments of the Pear River drainage basin and their contribution to the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(8): 1101-1111
  - 20 Liu Z F, Tuo S T, Colin C, *et al.* Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation [J]. *Marine Geology*, 2008, 255: 149-155
  - 21 Liu Z, Zhao Y, Colin C, *et al.* Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 2195-2205
  - 22 Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography [J]. *Marine Geology*, 1996, 130: 203-229
  - 23 颜文,古森昌,陈忠, 等. 南海 97-37 柱样的主元素特征及其潜在的古环境指示作用[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(2): 75-83 [Yan Wen, Gu Senchang, Chen Zhong, *et al.* Characteristics of major elements of sediments in Core 97-37 from southern South China Sea and its potential implications to palaeoenvironment [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(2): 75-83]
  - 24 李建芬,商志文,王宏, 等. 渤海湾西部现代有孔虫群垂直分带的特征及其对全新世海面、地质环境变化的指示[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 650-659 [Li Jianfen, Sang Zhiwen, Wang Hong, *et al.* Modern foraminifera assemblages: vertical zonation and its indication for Holocene sea level and geoenvironmental reconstruction in Bohai Bay, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5): 650-659]
  - 25 Gingele F X, M ller P M, Schneider R R. Orbital forcing of freshwater input in the Zaire Fan area clay mineral evidence from the last 200 kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 138: 17-26
  - 26 Ehrmann W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound ( Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998: 139: 213-231
  - 27 Wang S W, Huang J B, Wen X Y, *et al.* Evidence and modeling study of droughts in China during 4-2 ka BP [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 2215-2221
  - 28 谭亮成,安芷生,蔡演军, 等. 4.2 ka BP 气候事件在中国的降雨表现及其全球联系[J]. *地质论评*, 2008, 54(1): 94-104 [Tan Liangcheng, An Zhisheng, Cai Yanjun, *et al.* The hydrological exhibition of 4.2 ka BP event in China and its global linkages [J]. *Geological Review*, 2008, 54(1): 94-104]



## Records and Palaeoenvironmental Implications from the Shelf of the Northern South China Sea since the Mid-Holocene

XU Yong-hang CHEN Jian WANG Ai-jun LI Yun-hai  
WANG Wei-guo LAI Zhi-kun LI Dong-yi

(Open Laboratory of Ocean & Coast Environmental Geology, Third Institute of Oceanography  
State Oceanic Administration, Xiamen Fujian 361005)

**Abstract:** High resolution records as lakes, peats, speleothems are reported to study the hydrological exhibition of 4.2 ka BP event in China in recent years. The terrigenous clastic matter in continental shelf could reveal sedimentary environment evolution and paleoclimate. Sediment grain size, clay mineral, major elements, and benthic foraminifera of the Core C069 (113°49'E, 21°15'N, length: 2.1 m), which is from inner shelf of the northern South China Sea, have been investigated to reveal sedimentary environment evolution and paleoclimate. The results indicate that sediments became finer and well from bottom to top. The frequency distribution curves of grain size in the lower segment (1.1 ~ 2.1 m) are poorly sorted with bimodal distribution, which display the strong hydrodynamic condition. However, in the upper segment (0 ~ 1.1 m) after 4.4 ka, the sediments have single peak frequency distribution curves. The coarse sediments derived from the Pearl River. The clay mineral assemblage consists dominantly of illite, lesser abundance of kaolinite and chlorite, with scarce smectite. Kaolinite of the northern South China Sea is dominantly originated major origin from the Pearl River, predominant illite and chlorite from Taiwan, and principal smectite from the Luzon islands. The content of kaolinite decreases from 27% (1.1 ~ 2.1 m) to 18% (0 ~ 1.1 m), and illite crystallinity and illite chemistry index decrease similarly. The upper segment with more illite displays that more contribution of illite from Taiwan carried by surface currents, result in lower illite crystallinity and chemistry index. The results suggest that clay mineral assemblages in the inner shelf of the northern South China Sea are mainly controlled by provenance supply and downcore records do not bear contemporaneous paleoclimatic features. The benthic foraminifera dominant species in the lower segment are *Ammonia beccarii* and *Ammonia dominicana*, which lived in brackish environment where the water was influenced by Pearl River diluted water. However, the benthic foraminifera dominant species changed with *Cibicides subhaidingarii*, *Ammonia compressituta* in the upper segment, which lived in normal shallow water environment. MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio increased from bottom to top due to the less terrigenous clastic matter transported to inner shelf of the northern South China Sea in extreme dry-cold after 4.2 ka. The lower segment sediments contain higher kaolinite content; lower MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio, with benthic foraminifera dominant species lived in brackish environment where the water was influenced by Pearl River diluted water in the Holocene Megathermal. However, the upper segment sediments contain lower kaolinite content, higher MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio in the upper segment, displaying that less Pearl River's contribution in extreme dry-cold time since 4.2 ka.

**Key words:** South China Sea; Mid-Holocene; sedimentary environment; paleoclimate