

doi:10.3799/dqkx.2011.063

巽他海峡 BAR9442 岩心 30 kaBP 以来的 沉积记录与古季风活动

赵悦^{1,2,3}, 丁旋¹

1. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘要: 为重建巽他海峡区古季风活动历史, 通过对 BAR9442 岩心氧同位素、AMS¹⁴C 测年、陆源碎屑标准偏差区间粒径分布, 以及上升流种 *Globigerina bulloides* 等变化特点分析, 并结合前人对该岩心粘土矿物的研究, 获得如下认识: 末次冰期 30~17 kaBP, 海平面下降, 陆源粉砂物质输入增加; 南半球夏季日照率高, 然而受冰期热带辐聚带位置影响, 西北季风受阻, 东南信风持续吹过研究海域形成类似东南季风的效应, 气候冷干; 受印度东北季风影响, 伊利石含量最高, 上升流活动不发育, 古生产力降低。17~8 kaBP, 海平面迅速上升, 出现较强的表层穿越流活动, 粘土物质成为沉积物的主要组分; 此时东南与西北季风都有增强, 说明当时研究区气候有着更强的季节性。全新世 8 kaBP 以来, 全球海平面上升使穿越流活动加强, 沉积物粘土组含量最大, 西北季风带来温暖湿润的气候条件。

关键词: 南瓜哇流; 粒度分析; 粘土矿物; 古季风; 穿越流; 末次冰期。

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2011)04-0610-11

收稿日期: 2010-11-12

Sedimentary Record and Monsoon Activity of Core BAR9442 in Sunda Strait during 30 kaBP

ZHAO Yue^{1,2,3}, DING Xuan¹

1. Marine School, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

3. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, MLR, Beijing 100037, China

Abstract: Core BAR9442 (6°04.56'S and 102°25.08'E; 2 542 m water depth) is obtained below the present South Java Current, offshore the southern portion of Sumatra in the eastern Indian Ocean. Based on analyses of $\delta^{18}\text{O}$, AMS¹⁴C ages, grain-size distribution of standard deviation stages and relative abundance of *Globigerina bulloides* which commonly encountered in upwelling areas, as well as the record of clay mineral in Gingele *et al.* (2002), we come to the following conclusion: during the last glacial period 30—17 kaBP, when sea level was lower, terrigenous sands supply increased. Even the austral summer insulations strengthened, though the southward shift of the ITCZ in the austral summer may have been considerably restricted, where the northwest monsoon did not operate, and this would create a situation analogous to the southeast monsoon operating throughout the year, because the trade winds would blow continually across the study area. The climate was cold and dry. Under the influence of Indian northeastern monsoon, the percentage content of illite was the highest, and upwelling activity was absent and induced a low productivity. Rapid rise of sea level at the deglaciation 17—8 kaBP, the shallow connections re-opened, Makassar Strait and Lombok Strait were wider, leading to intensified surface ITF, and clay mineral became the dominated terrigenous material. The SE monsoon and NW monsoon seem to be strengthened in Early Holocene, indicating that the biannual monsoonal system was mostly intense at this time. During the Holocene (about 8 kaBP), with the sea level rising, the throughflow enhanced, and the clay minerals of the terrigenous sediments have a maximum influx while intensified

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40676034)。

作者简介: 赵悦 (1986—), 女, 硕士研究生, 海洋地质专业, 研究方向为晚第四纪西太平洋—东北印度洋高分辨率的古气候与古海洋学。

E-mail: pianpian0612@163.com

NW monsoon generated a warm and wet climate.

Key words: South Java Current; grain size analysis; clay minerals; paleomonsoon; throughflow; Last Glacial.

巽他海峡位于印度尼西亚多岛海区,苏门答腊岛与爪哇岛之间,连通爪哇海与东北印度洋.研究区现代受澳大利亚季风系统和印度季风系统控制,5月到9月(澳大利亚冬季)多岛海区为干季,盛行东南季风,气候干燥少雨;澳大利亚高压系统和亚洲低压系统的交互作用促进了印度次大陆的西南风,此时印度西南季风活动强烈,西南亚洲大陆大量降雨.11月到3月(澳大利亚夏季)多岛海区处于湿季,西北季风带来强降雨;澳大利亚低压系统和亚洲高压系统的作用促进了东南亚的东北季风(Gingele *et al.*, 2002; Spooner *et al.*, 2005; Rashid *et al.*, 2007).

受季节性的风向变化及降雨影响,巽他海峡以高度变化的洋流流向为特征,11月到3月(澳大利亚夏季),西北季风增强,使源自印度季风流(Indian Monsoon Current,简称IMC)和赤道逆流(Equatorial Eddy Current,简称EEC)的南爪哇流(South Java Current,简称SJC)向东流动(Wyrtki, 1961; Wijffels, 1996).8月~9月,东南季风增强,南爪哇流减弱,并且可能在9月至10月间转向向西流动供给南赤道流(Wyrtki, 1961; Murgese *et al.*, 2008)(图1),此时可能会造成爪哇海南部的海平面下降,并在该处形成一个上升流区(Martinez *et al.*, 1998).

由于风场模式差异,太平洋海平面较印度洋海平面有一个显著高差,致使海水自太平洋向印度洋流动产生印度尼西亚穿越流(Indonesian Throughflow,简称ITF)(Hirst and Godfrey, 1993; Bray *et al.*, 1996; Fieux *et al.*, 1996; Martinez *et al.*, 1998).通过苏拉威西海进入望加锡海峡(Makassar Strait)的印度尼西亚穿越流,少部分通过巴厘岛(Bali)和龙目岛(Lombok)之间的龙目海峡(Lombok Strait)直接进入印度洋,大部分进入印度洋之前在弗洛勒斯海(Flores Sea)向东转向班达海(Banda Sea),之后经帝汶海(Timor Sea)和Ombai海峡进入印度洋(Lückge *et al.*, 2009; Sprintall *et al.*, 2009)(图1),穿越流进入印度洋后分别成为南爪哇流,南赤道流和沿西澳大利亚边缘 Leeuwin 流的组成部分(Hirst and Godfrey, 1993; Bray *et al.*, 1996; Gordon and Fine, 1996).

该区的季风格局与热带辐聚带(Intertropical Convergence Zone,简称ITCZ)在澳大利亚和南亚

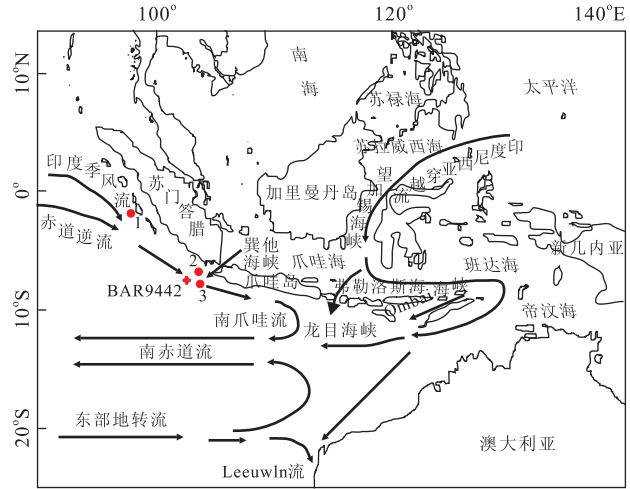


图1 现代印尼海区8月表层洋流活动示意和BAR9442岩心位置(Gingele *et al.*, 2002; Lückge *et al.*, 2009)

Fig. 1 Surface currents of the Indonesian archipelago in August and location of core BAR9442

1. Core BAR9432; 2. Core BAR9403; 3. Core S0139-74kL.

大陆之间的位置密切相关,且ITCZ年际范围内的季节性迁移对两地区的降雨分布也有很大影响. ITCZ是东南和东北信风相遇的低压槽,南半球冬季通常位于赤道以北的 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,夏季向南移动到澳大利亚或以北的位置,约南纬 10° (Spooner *et al.*, 2005).南半球冬季,源自南半球高压带的东南季风相对冷干,降雨集中分布在南海和西太平洋.澳大利亚夏季,源自亚洲高压带的西北季风刮过海洋携带大量水汽,当抵达ITCZ时,饱和的湿气团上升形成强降雨,降雨集中在印度尼西亚穿越流途经的大部分区域(van der Kaars *et al.*, 2000; Spooner *et al.*, 2005).

印度尼西亚多岛海区内不同海盆对同一古海洋与古气候事件的反映各不相同(丁旋等, 2005).对同一区域的研究往往也会出现相互矛盾的结果.目前为止,针对本地区已进行了包括地震地层学、孢粉学、构造地质学、氧同位素地层学和地球化学等诸多方面的详细研究(赵玉龙等, 2006).然而,陆源碎屑的粒度分布特征作为研究本地区古环境变化的一个重要指标,在前人的工作中却鲜有涉及.前人对BAR9442岩心进行过粘土矿物分布(Gingele *et al.*, 2001)、硅藻 *Ethmodiscus rex* 等方面的研究(De Deckker and Gingele, 2002),也重建过古海洋

历史(Gingele *et al.*, 2002),但由于仅进行氧同位素对比确定绝对年龄而使地层划分有误。

BAR9442 位于印度尼西亚岛弧南部的苏门答腊海域,巽他海峡洋流通道的出口处。文章通过对岩心陆源碎屑粒度进行标准偏差分析,找出对环境变化最敏感的粒级,结合前人对粘土矿物的研究(Gingele *et al.*, 2002),解释洋流流向及气候变化情况,并辅助有孔虫上升流种的证据,重建 30 kaBP 以来巽他海峡区的古季风活动历史。

1 材料与方法

BAR9442 岩心是 RV Baruna Jaya I 号科考船 1994 年在南纬 $6^{\circ}04.56'$,东经 $102^{\circ}25.08'$,水深 2 542 m 的海底钻探获取的。岩心长 980 cm,本次研究只针对上部 500 cm 进行。间隔 10 cm 取样,样品经干燥、称重后,用孔径 $150\ \mu\text{m}$ 的铜筛筛洗,余留物经 $40\ ^{\circ}\text{C}$ 烘干后挑出个体大小在 $250\sim 315\ \mu\text{m}$ 之间的 *Globigerinoides ruber* 10~15 个,置于甲醇溶液中用超声波清洗 10 s,在法国国家科研中心气候与环境科学实验室(Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement,简称 LSCE)用 Fannigan MAT-251 同位素质谱仪进行氧、碳稳定同位素分析。

对 BAR9442 岩心位于 19.5、30.5、60.5、70.5 和 291.0 cm 处的 5 个样品挑出 *Globigerinoides ruber*、*G. trilobus* 和 *G. sacculifer* 个体 10 mg,95.5 和 164.5 cm 处的 2 个样品挑出全部 *G. ruber* 个体 10 mg,在 LSCE 进行 AMS¹⁴C 分析。对 41.5、394.5、451.5 和 672.5 cm 处的 4 个样品,挑出全部浮游有孔虫完整个体约 30 mg,在蒸馏水中经超声波清洗约 15 s,在北京大学使用 Tandetron 加速器作 AMS¹⁴C 测年。将得到的有孔虫¹⁴C 年龄减去海洋与大气间 400 a 年代差(Bard *et al.*, 1987),改正为表层海水¹⁴C 视年龄后,使用 Fairbanks 等 0107 程序(Fairbanks *et al.*, 2005)校正为日历年龄(Calendar Ages)(表 1)。

称取干样 0.5 g,进行粒度分析。样品处理基本步骤为:用去离子水浸泡样品,加入 10%双氧水 5 mL 煮沸以去除有机质并使反应剩余的 H₂O₂ 挥发;待反应完全后加入 10%盐酸溶液 5 mL,超声振荡使充分反应,去除生物碳酸盐;离心洗至中性,在 60 °C 以下干燥样品后加 2 mol/L 的碳酸钠溶液 30 mL,在 85 °C 下水浴 5 h,去除生物硅;离心洗至中性,然后加入分散

剂超声,使样品充分分散,在激光粒度分析仪 Mastersizer2000 上进行粒度测试。粒度分析在中国地质大学(北京)海洋中心实验室进行。

校正 Gingele *et al.* (2002) 的粘土矿物含量曲线:通过深度把 Gingele 等的年龄转换为本次研究相应的年龄,并采用网格加密读点的方法确定突出变化的粘土矿物值后代入新的纵坐标年龄值作图。

2 结果

2.1 地层年代

将 11 个 AMS¹⁴C 测年校正后的日历年龄作为年龄控制点(表 1),利用沉积速率内插法将该岩心的深度转换为日历年龄。根据 AMS¹⁴C 测年校正后的日历年龄与 *G. ruber* 氧同位素曲线可判断氧同位素 1/2 期界限大致位于 82 cm 处,自深度 90 cm 至 60 cm 前后, $\delta^{18}\text{O}$ 值发生快速变轻,应是氧同位素第 2 期向第 1 期转折的阶段,与测年结果吻合。氧同位素最重值(-0.63‰PDB)位于 150 cm 处,日历年龄为 17.3 kaBP,与全球大洋标准氧同位素曲线(Martinson *et al.*, 1987)比较,认为此处是末次冰盛期(Last Glacial Maximum,简称 LGM)。氧同位素 2/3 期界限大致位于 324 cm 处。500 cm 处年龄大约为 31.2 kaBP。

2.2 标准偏差分析及粒度分布特征

粒度分析结果采用粒级一标准偏差算法(孙有斌等,2003;叶芳等,2007),获得对环境变化最敏感的组分。按 Mastersizer2000 配套的分析软件给出的粒级范围(保留到小数点后 2 位),由 $0.01\sim 0.02\ \mu\text{m}$

表 1 BAR9442 岩心 AMS¹⁴C 测试结果

Table 1 AMS¹⁴C ages and the calibrated calendar ages of core BAR9442

深度 (cm)	AMS ¹⁴ C 年龄 (aBP)	校正后的日历年龄 (cal. aBP)
19.5	2 800±40	2 891±49
30.5	3 475±30	3 737±52
41.5	4 415±40	4 998±93
60.5	7 470±40	8 305±52
70.5	8 550±50	9 526±23
95.5	12 890±70	15 017±119
164.5	14 930±70	17 965±198
291.0	19 190±160	22 798±215
394.5	22 495±80	27 034±155
451.5	24 595±90	29 408±162
672.5	32 305±115	37 698±188

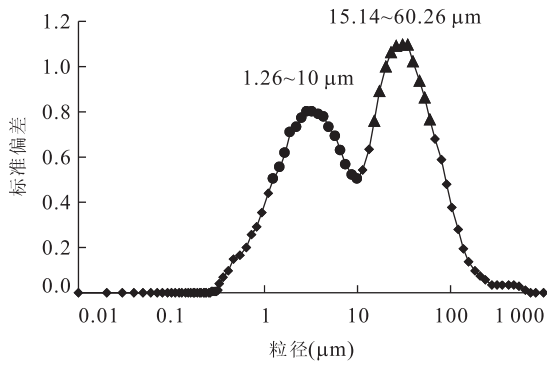


图2 BAR9442 站点陆源碎屑粒度分析的标准偏差分布曲线
Fig. 2 Standard deviation of grain size analysis of site BAR9442

到 955.00~1 000.00 μm 共截取了 91 个粒级,提取每个样品在这些组分内的体积分数,全部提取后计算这 91 个粒级组分的标准偏差,把有较大标准偏差值的粒度组分合并,最后得到本次研究的最大标准偏差区间。

图 2 显示了用粒级—标准偏差算法获得的每个粒级的标准偏差随粒级的变化,图中较高标准偏差值所对应的粒级即对沉积环境敏感的粒度众数。对 BAR9442 岩心而言,2 个明显的标准偏差峰值分别出现在 2.88 μm 和 30.2 μm ,所对应的粒度范围即最大标准偏差区间分别为 1.26~10 μm 和 15.14~60.26 μm 。最大标准偏差粒径分布代表样品间粒径差别最大,较高标准偏差值所对应的粒级是对沉积环境敏感的粒度组分(叶芳等,2007)。

粒径在 1.26~10 μm 和 15.14~60.26 μm 之间的组分构成整个沉积物的主要组成部分,占总体的 80% 左右。粒径为 1.26~10 μm 的颗粒主要是粘土矿物,印度尼西亚多岛海第四纪粘土矿物组合主要由蒙脱石和伊利石组成,并含有高岭石和绿泥石,且这些矿物都有其相对固定的物源区和搬运方式(Gingele *et al.*, 2001)。粒径为 15.14~60.26 μm 的颗粒属于粉砂级,该区间也是陆源碎屑的主要组成部分,主要是石英、长石等轻矿物。

从 2 个标准偏差粒径组分的分布及其变化趋势(图 3),可以看出粒径为 1.26~10 μm 的陆源碎屑颗粒在全新世的含量明显高于末次冰期,在末次冰期其变化范围在 25.7%~51.8% 之间,平均含量为 41.6% 左右;在全新世其变化范围为 40.9%~69.7%,平均含量约为 57.4%。粒径为 15.14~60.26 μm 的陆源碎屑颗粒在全新世的含量明显低于末次冰期,末次冰期的变化范围为 24.5%~56.5%,平均含量为 33.8% 左右;全新世的变化范

围为 10.7%~33.5%,平均含量为 20.0%。在 30~17 kaBP,中值粒径呈高频变化,但变化幅度较小,平均为 10.7 μm ;自 17 kaBP 以来,中值粒径基本恒定,平均为 5.9 μm ,仅在 10 kaBP 有一突出峰值。从中值粒径以及这两个粒径组分含量的变化可以明显看出末次冰期和全新世的不同,2 个粒径组分含量变化趋势相反,15.14~60.26 μm 的变化和中值粒径变化趋势相同,1.26~10 μm 则正相反。这 2 个粒径区间、中值粒径和氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 10 kaBP 附近都有一明显变化,1.26~10 μm 粒径组分含量降低,15.14~60.26 μm 组分含量上升。

根据粒度分布特征的总体趋势可见末次冰期 30~17 kaBP 粒度较粗,自 17 kaBP 以来粒度较细,而 30 kaBP 以来粗粒粉砂组分逐渐减少,细粒粘土组分逐渐增多由总数不足一半,到 8 kaBP 以来约占总数的 71%。可知冰期时陆源粗颗粒物输入丰富,与高沉积速率相符,冰后期陆源物质输入减少,沉积速率也随之降低。末次冰期的沉积速率是冰后期的 3 倍多,沉积速率大体与全球海平面高度曲线(Chappell *et al.*, 1996)反相关(图 3)。

因而研究认为, BAR9442 岩心总体表现为受海平面变化影响,末次冰期海平面下降,该站位离岸线距离较近,陆源物质输入增多,沉积速率较高,粗粒粉砂质沉积物含量较高。而 17 kaBP 以来则相反。

2.3 粘土矿物含量分布特征

粘土矿物、石英和长石在海洋沉积物中的含量提供了陆源的替代性指标数据,可用于解释陆上源区的气候变化、输入介质(风或河流)的动力强度变化或洋流对输入物质的传播情况。岩心中矿物含量变化最可能取决于陆地源区现代分布区域、原岩成分和独立的气候替代性指标数据(Gingele *et al.*, 2002)。

4 种粘土矿物中,伊利石和绿泥石是原生矿物,指示了物理风化作用较强的气候条件;蒙脱石是一种次生矿物,形成于温暖、湿润伴随季节性降雨的条件下,是火山岩化学风化的产物(Singer, 1984);高岭石是湿热气候条件下长期化学风化的最终稳定矿物(曹伯勋,1995)。在风化的初期以物理风化为主,化学风化居次要地位,仅能形成少量的伊利石、绿泥石等风化程度较低的原生矿物(曹伯勋,1995),其含量增加被认为反映大陆风化水解条件的减弱以及在干冷气候条件下物理风化的增强(万世明等,2008)。随着化学风化作用不断深入,水介质环境由弱碱性→酸性,硅铝酸盐矿物分解出的硅和铝在地表结合,

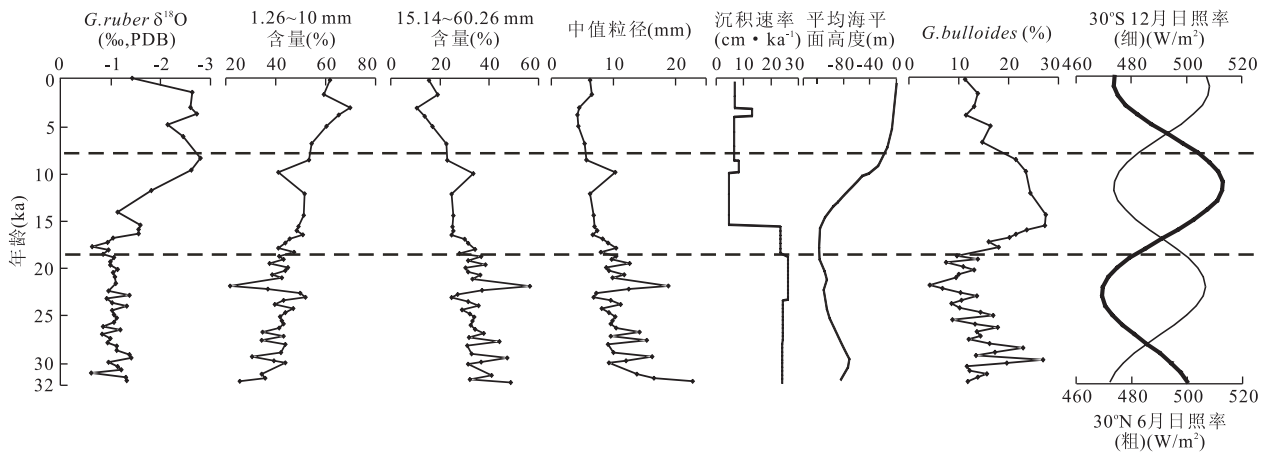


图 3 BAR9442 站 *G. ruber* 氧、碳同位素, 粒度标准偏差区间、中值粒径、*G. bulloides* 百分含量(丁旋数据未发表)、沉积速率、全球相对海平面高度曲线(Chappell *et al.*, 1996) 及 30°N 6 月(粗)和 30°S 12 月(细)日照率曲线

Fig. 3 Down-core variations of the oxygen and carbon isotopes of *G. ruber*, grain size distribution of standard deviation stages, percentage of middle grain size, sedimentation rate, global relative sea level (Chappell *et al.*, 1996), relative abundance of *G. bulloides* of core BAR9442 and the insolation of 30°N Jun. (thick) and 30°S Dec. (thin)

分别形成伊利石、蒙脱石与高岭石等粘土矿物,同时原生矿物相对含量不断减少,次生矿物含量大增,在风化产物中占主要地位(曹伯勋,1995).通常伊利石形成于较干冷气候条件,而高岭石、蒙脱石则是湿润气候条件的产物(曹伯勋,1995;伍光平等,2000),因此用这 3 种矿物作为本次研究推断古气候的标志矿物。

Gingele *et al.* (2001)通过对 166 根岩心顶部样品的分析,获得了印度尼西亚岛弧 (Indonesian Islands Arc)和西北澳大利亚(NW Australia)沉积物的现代粘土矿物分布(图 4),并根据粘土矿物组合与附近内陆地区的地质特点、风化能力等关系,按 4 种粘土矿物的不同,划分了 4 个区域.沿印度尼西亚岛弧,由最西的苏门答腊到最东的帝汶,分为西区、中区和东区,再加上西北澳大利亚区(西北和西部澳大利亚陆架和陆坡及近岸高原).西区和东区的主要粘土矿物为伊利石,中区富含蒙脱石,西北澳大利亚区高岭石占优。

从现代源区 4 种粘土矿物的分布情况(图 4)可以看出,巽他海峡处富含高岭石,印度尼西亚穿越流龙目海峡的通道及爪哇海也是潜在的高岭石源区,在爪哇岛以南以及巴厘岛和龙目岛以南可观测到高含量的蒙脱石,同时苏门答腊岛的西北端及东帝汶为伊利石源区,沿印度尼西亚岛弧绿泥石含量近乎一致.在 BAR9442 岩心位置,现代 4 种粘土矿物含量大致相当,高岭石含量为 30%~35%,蒙脱石为 20%~25%,伊利石含量在 20%左右,绿泥石在

20%~25%左右。

虽然粘土矿物的物源分析是基于表层或全新世沉积物的情形,但各物源区提供的主要粘土矿物种类不因冰期或间冰期的转变而发生重大变化(Gingele *et al.*, 2001;刘志飞等,2007)。

在过去 30 kaBP 间,BAR9442 岩心 4 种粘土矿物的含量变化如图 5 所示,30~17 kaBP 高岭石含量最低,在 20%左右波动;17 kaBP 以来含量上升,稳定在 20%以上;8 kaBP 以来增加至 25%~35%;3.5 kaBP 时出现高岭石含量的最高值.岩心中蒙脱石百分含量在 25%~30%间波动,30~17 kaBP 百分含量较低,平均为 28.3%;最高含量出现在 ~17 kaBP,高达 40%;在 17~8 kaBP 阶段,含量始终保持在 30%以上;8 kaBP 以来含量再次下降,平均为 27.2%.伊利石在 30~17 kaBP 始终保持高含量,平均达 31%;17~8 kaBP 和 8 kaBP 以来含量持续降低,平均分别为 26.6%和 23.5%.绿泥石含量在整个岩心中相对稳定,在 18%~22%之间波动。

2.4 古生产力

Globigerina bulloides 是典型的适应低温高肥力水的上升流种(Ding *et al.*, 2006),其丰度的变化与苏门答腊上升流活动密切相关.因而可以通过上升流活动强度指示东南季风的强弱.*Globigerina bulloides* 的百分含量(丁旋数据未发表)在 30~17 kaBP 总体呈下降趋势,平均为 13.2%;在 17~8 kaBP 阶段,含量显著上升,出现最高含量,平均为 22.8%;8 kaBP 以来含量下降,与末次冰期水平接

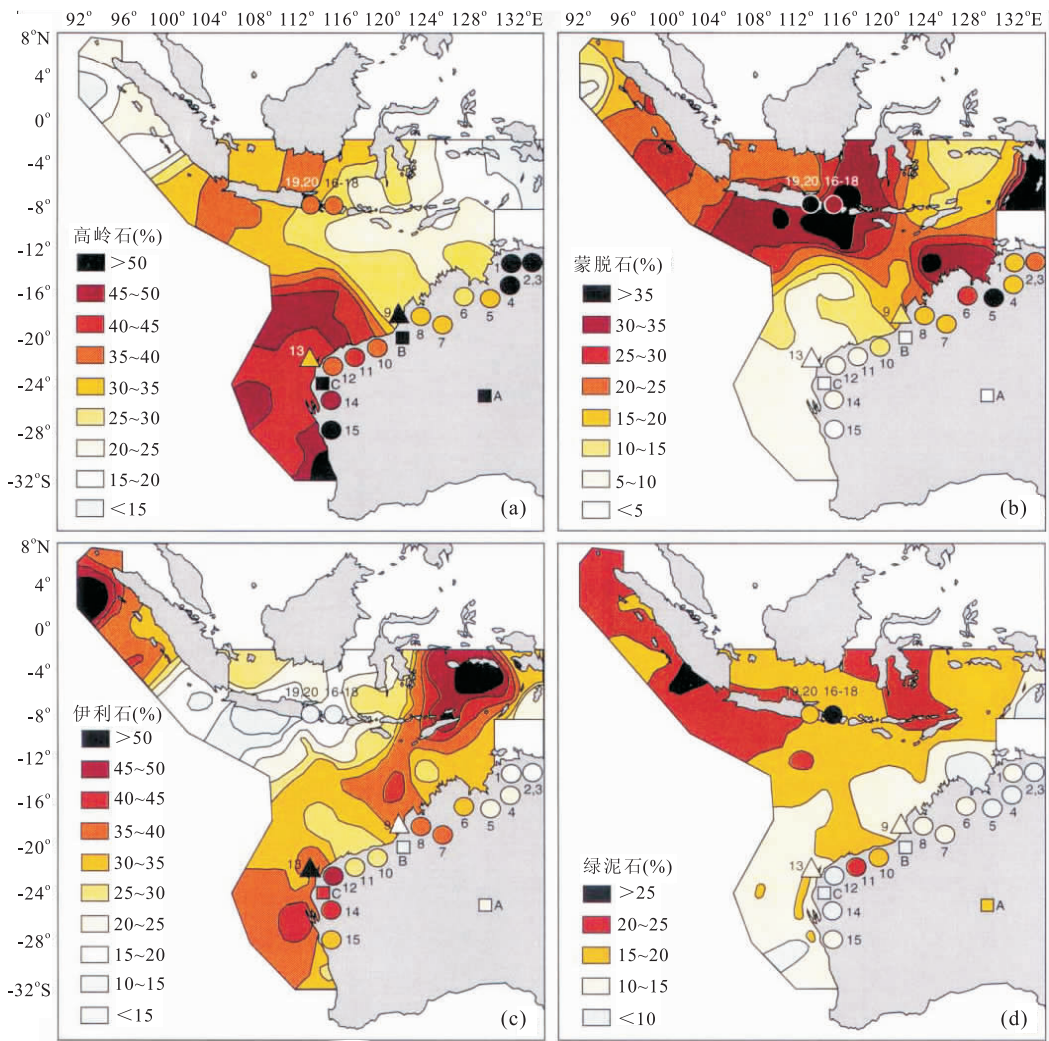


图 4 印度尼西亚及西北澳大利亚地区高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石分布(Gingele et al., 2001)
Fig. 4 Distribution of kaolinite, smectite, illite, chlorite between Indonesia and NW Australia

近,平均为 13.4%(图 3)。

$\delta^{13}C$ 记录可用来辅助指示古生产力, $\delta^{13}C$ 值较低,指示古生产力较低,反之较高。30~17 kaBP 期间 $\delta^{13}C$ 曲线总体走势与 *G. bulloides* 的百分含量变化一致,指示古生产力自 17 kaBP 上升,在 17~8 kaBP 阶段古生产力最高。

3 讨论

根据上述陆源碎屑粒度标准偏差区间粒度分布、粘土矿物百分含量及生物古生产力等变化特点,本次研究将 30 kaBP 分为 30~17 kaBP、17~8 kaBP 以及 8 kaBP 以来这 3 个阶段,依次论述巽他海峡区古气候及古季风变化特点。

末次冰期 30~17 kaBP,粒度标准偏差区间的

百分含量分布曲线显示,粉砂物质含量较高,粘土矿物含量较低。由于末次冰期海平面下降(图 3),巽他海峡出露,爪哇海浅海成陆,龙目海峡变窄,致使 BAR9442 岩心所在位置更接近大陆,陆源物质搬运距离缩短,包括出露地表的巽他陆架在内的陆源碎屑更容易被搬运到该处,故沉积速率很高,沉积物粒度较粗。

海平面下降使巽他海峡出露,截断了洋流通过巽他海峡对研究区高岭石的输入,高岭石含量很低。穿越流西向分支流经巴厘岛和龙目岛以南的蒙脱石富集区可能会携带部分蒙脱石汇入向西流动的 SJC,但海平面下降穿越流活动微弱,蒙脱石含量也很低。

由于研究区特殊的地理位置,在地质历史时期,由 23 kaBP 岁差周期引起的日照率变化控制着大

陆和相邻海区的温度梯度,季风的演化与北半球夏季日照率吻合较好(Leuschner and Sirocko, 2003; 刘志飞等, 2007; Lückge *et al.*, 2009; Mohtadi *et al.*, 2010). 在 30~17 kaBP 阶段,南半球夏季(30°S, Dec.)日照率较高,北半球日照率(30°N, Jun.)较低(图 3),北半球受西伯利亚冷高压控制,研究区应出现源自亚洲高压带的西北季风和与之相关的强降雨;印度季风系统盛行东北季风,反映大陆风化水解条件的减弱以及在干冷气候条件下物理风化增强的伊利石含量最高(图 5),与其时西北季风增强,潮湿多雨的背景明显不符,且高岭石及蒙脱石含量低也指示了一种干冷的气候条件.

Spoooner *et al.* (2005)对帝汶海区的研究认为末次冰期阶段,热带辐聚带(ITCZ)向南移动时,可能在相当程度上受到了限制,并没有到达澳大利亚北部,而是处于班达海北部,相比现代更偏北,由较低的北半球夏季日射率形成的西北季风受到 ITCZ 阻挡,未能到达研究区,然而 ITCZ 以南的东南信风持续吹过研究海域,形成类似东南季风的效应(Barrows and Juggins, 2005; Spoooner *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2006). Magee *et al.* (1995)、Magee and Miller(1998)、Croke *et al.* (1999)、Veeh *et al.* (2000)、English *et al.* (2001)、van der Kaars and De Deckker(2002)、Hesse and McTainsh(2003)和 Hesse *et al.* (2004)对澳大利亚北部的研究表明在氧同位素 2、3 期气候条件干燥,并认为与西北季风相比,东南季风的影响更大. 研究区气候冷干,与本次粘土矿物指标得出的结论一致. 印度尼西亚地区的植被历史指示,干燥的气候条件在末次冰盛期(Last Glaci-

ation Maximum,简称 LGM, 23~19 kaBP(Koutavas *et al.*, 2002))时达到顶点(Wang *et al.*, 1999; van der Kaars *et al.*, 2000; Spoooner *et al.*, 2005). 澳大利亚内陆风成沙丘活动也表明南半球整个 LGM 时期气候干燥,干旱程度最高,风力最强.

在印度东北季风的影响下,近进一步加强了研究区气候干冷、强物理风化的条件,利于原生矿物伊利石的形成. 苏门答腊岛西北端和东帝汶、班达海是潜在物源区中最可能提供高达约 40%伊利石的物源区,但末次冰期海平面下降,浅海成路,印度尼西亚穿越流通道狭窄,穿越流活动微弱,导致东帝汶和班达海源区的来源近乎被截断;然而推测苏门答腊西北端伊利石物源区较现代扩大,伊利石被直接从物源区输送至本站位,因而在 30~17 kaBP 始终保持高含量. 另外受东北季风的影响,洋流在东北印度洋形成逆时针方向的环流(Kolla *et al.*, 1976),在苏门答腊沿岸会产生向岸的堆水现象,*Globigerina bulloides* 含量及有孔虫壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均较低,总体呈下降趋势,上升流活动不发育,古生产力降低. Murgese *et al.* (2008)对苏门答腊南部 BAR9403 的研究认为在 35~14.4 kaBP,水体分层,表层和次表层水营养水平很低,因而初级生产力很低. Lückge *et al.* (2009)通过 S0139-74KL 岩心的研究,认为 27~17 kaBP 表层水古生产力很低. 这与亚洲季风系统在末次冰期时产生较强的东北风,使来自中亚源区(类似中国黄土)的浮尘含量增高的认识相一致(Wang *et al.*, 1999). 丁旋等(2003)对孟加拉地区的研究及赵悦和丁旋(2011)对印度尼西亚岛弧西部苏门答腊海域 BAR9432 岩心的研究均发现,在末

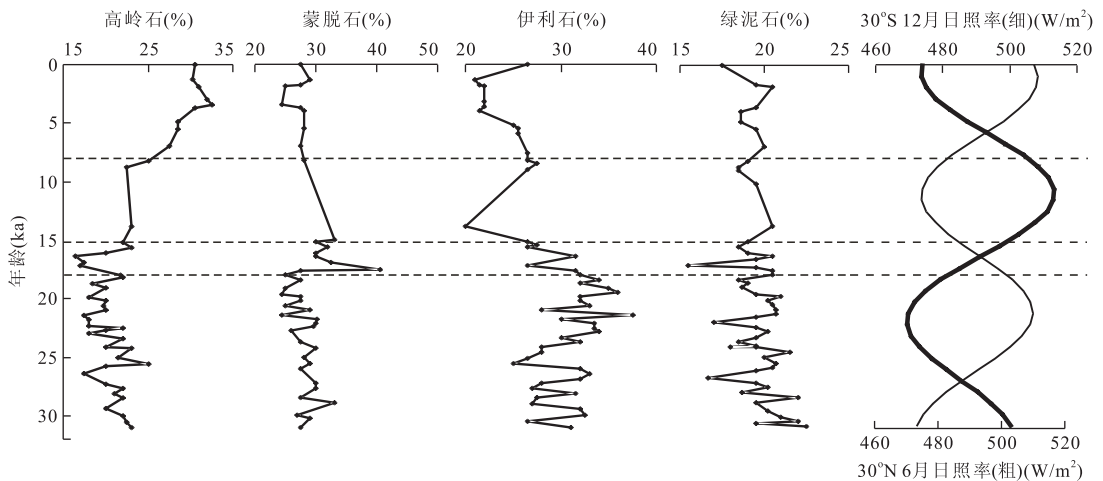


图 5 粘土矿物百分含量分布(Gingele *et al.*, 2002)

Fig. 5 Down-core variations of the clay mineral percentages of core BAR9442

次冰期特别是 LGM 阶段出现表层水温下降、盐度增加等指示印度东北冬季风增强的现象。

17~8 kaBP 阶段,海平面快速上升(Chappell *et al.*, 1996; Bassett *et al.*, 2005)(图 3),巽他陆架再次被淹没,陆源物质搬运距离增加,因而陆源物质输入迅速减少,沉积速率大幅降低,粒度标准偏差区间的百分含量分布曲线显示,1.26~10 μm 细粒粘土物质含量增加,并成为陆源输入的主要组分;洋流通道相继打开,致使水体流通条件得到改善,爪哇海水流通,望加锡海峡和龙目海峡通道变宽,表层穿越流活动逐渐活跃,爪哇海水从巽他海峡注入 SJC,使站位高岭石含量上升。

此时南半球夏季(30°S, Dec.)日照率较低,北半球日照率(30°N, Jun.)较高,澳大利亚及印度洋相对亚洲大陆处于高压,澳大利亚东南季风和印度西南季风较为发育。BAR9442 岩心上升流种 *Globigerina bulloides* 百分含量曲线与北半球夏季日照率(30°N, Jun.)曲线完美响应,在 17~8 kaBP 阶段出现最高峰值,有孔虫壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也升高,说明此时东南季风增强,上升流发育,古生产力高。Murgese *et al.* (2008) 对 BAR9403 的研究及 Lückge *et al.* (2009) 通过 S0139-74KL 岩心对苏门答腊南部的古海洋学研究也均表明:该时段澳大利亚东南季风增强,海岸上升流活动加强,古生产力升高。在东南季风的影响下,穿越流西向分支流经巴厘岛和龙目岛以南的蒙脱石富集区时,可能会携带部分蒙脱石汇入向西流动的 SJC,海平面上升,穿越流活动增强,蒙脱石含量上升。

赵悦和丁旋(2011)对苏门答腊海域 BAR9432 岩心的研究发现:在 15~8 kaBP 阶段,印度西南季风增强,印度洋形成顺时针的地转流,由于海平面还未上升到现代的高度,印度季风流与赤道逆流较微弱,在澳大利亚东南季风的影响下,在研究区部分洋流提前转向,与向西流动的南瓜哇流相遇,一同汇入南赤道流,在苏门答腊西南岸产生离岸水,形成上升流活动。因此本次研究认为:洋流的提前转向造成印度季风流和赤道逆流从苏门答腊岛西北端物源区向 BAR9442 站位输送的伊利石含量降低。

然而研究区高岭石含量上升,稳定在 20% 以上,蒙脱石含量上升,伊利石出现最低值皆指示了一种较温暖、湿润的气候条件,与东南季风带来的干冷气候不符,且西南季风带来的降雨 80% 以上降落在西南亚洲大陆上,对苏门答腊地区影响很小。有研究表明自 14 kaBP 以来,澳大利亚西北季风出现并逐

渐增强(Wyrwoll and Miller, 2001; van der Kaars and De Deckker, 2002)。因此 3 种粘土矿物含量的变化很可能与西北季风带来的降雨和淡水输入增加有关,研究区在该阶段表现出更强的季节性。

不能忽略的是,在大约 10 kaBP, 1.26~10 μm 粘土组分出现低值,而 15.14~60.26 μm 粗粒组分含量上升,中值粒径变大,总体上体现粗粒物质注入增加且沉积速率增大(图 3),伊利石含量激增,上升流种 *G. bulloides* 含量高。推测是东南季风的瞬间强化造成的。赵悦和丁旋(2011)对苏门答腊海域 BAR9432 岩心的研究也显示在大约 11 kaBP 上升流种 *G. bulloides* 含量大增,认为是东南季风的瞬时强化与印度西南夏季风的共同影响造成的。Spooner *et al.* (2005) 也得出过类似的结论,在 7.5 kaBP, T_{mean}、温跃层物种及上升流种 *G. bulloides* 百分含量的凸增显示了班达海区东南季风的瞬间强化。

全新世 8 kaBP 以来的古海洋环境与过去 30 kaBP 完全不同。全球海平面上升超过 -25 m,且仍在上升(Ding *et al.*, 2006),巽他陆架被淹没,同时穿越流通道打开,富高岭石的爪哇海水经巽他海峡汇入 SJC,8 kaBP 以来高岭石含量持续上升。该阶段北半球夏季日照率(30°N, Jun.)较低(图 3),受西伯利亚冷高压控制,西北季风增强。在海平面上升至全新世的高度后,南海和爪哇海的运输通道打开,由于强西北季风的的活动,大量淡水从南海注入爪哇海,3.5 kaBP 时出现高岭石含量的最高值可能代表了爪哇海海水的最强注入量。此时还可以观察到 1.26~10 μm 粘土组分出现了最大值,推测是由于海平面上升,海岸线后退以及陆源物质搬运距离增大造成的。粘土矿物高岭石含量最高,伊利石含量最低指示温暖湿润的气候条件,应是西北季风带来大量降雨造成的,与 BAR9403 有孔虫及腰鞭毛虫的记录一致(Murgese *et al.*, 2008)。

4 结论

(1) 末次冰期 30~17 kaBP 阶段,海平面下降,巽他海峡出露,穿越流通道狭窄,陆源粗粒粉砂物质输入增加;南半球夏季日照率高,然而受冰期 ITCZ 位置影响,西北季风受阻,东南信风持续吹过研究海域,形成类似东南季风的效应,气候冷干;受印度东北季风影响,伊利石含量最高,上升流活动不发育,古生产力降低。

(2) 17~8 kaBP 阶段,海平面迅速上升,出现较

强的表层穿越流活动, 细粒粘土物质成为沉积物的主要组分; 北半球夏季日照率增强, 东南季风活动强烈, 上升流活动发育, 古生产力高; 然而粘土矿物指示的湿润气候可能与西北季风带来的降雨和淡水输入增加有关, 说明研究区该阶段有着更强的季节性。

(3) 全新世 8 kaBP 以来, 全球海平面上升使穿越流活动加强, 陆源输入细粒粘土组分含量最大; 高岭石含量最高指示西北季风带来温暖湿润的气候条件。

致谢: 感谢法国国家科研中心气候与环境科学实验室(Laboratoire des Sciences du Climate et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France) 为本次研究提供样品及评审专家和编辑部老师为文章修改和完善提供宝贵意见!

References

- Bard, E., Arnold, M., Maurice, P., et al., 1987. Retreat velocity of the North Atlantic polar front during the last deglaciation determined by ^{14}C accelerator mass spectrometry. *Nature*, 328: 791—794.
- Barrows, T. T., Juggins, S., 2005. Sea-surface temperatures around the Australian margin and Indian Ocean during the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews*, 24(7—9): 1017—1047.
- Bassett, S. E., Milne, G. A., Mitrovica, J. X., et al., 2005. Ice sheet and spid Earth influences on far-field sea-level histories. *Science*, 309(5): 925—928.
- Bray, N. A., Hautala, S., Chong, J., et al., 1996. Large-scale sea level, thermocline, and wind variations in the Indonesian throughflow region. *Journal of Geophysical Research*, 101: 12239—12254.
- Cao, B. X., 1995. *Geomorphology and Quaternary geology*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 31 (in Chinese).
- Chappell, J., Omura, A., Esat, T., et al., 1996. Reconciliation of Late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep-sea oxygen isotope records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 141: 227—236.
- Croke, J. C., Magee, J. W., Wallensky, E. P., 1999. The role of the Australian monsoon in the western catchment of Lake Eyre, central Australia, during the last interglacial. *Quaternary International*, 57/58: 71—80.
- De Deckker, P., Gingele, F. X., 2002. On the occurrence of the giant diatom *Ethmodiscus rex* in an 80 ka record from a deep-sea core, southeast of Sumatra, Indonesia; implications for tropical palaeoceanography. *Marine Geology*, 183: 31—43.
- Ding, X., Bassinot, F., Guichard, F., et al., 2006. Distribution and ecology of planktonic foraminifera from the seas around the Indonesian Archipelago. *Marine Micropaleontology*, 58: 114—134.
- Ding, X., Fang, N. Q., Chen, P., 2003. Upwelling actions in the Bay of Bengal during marine isotope stages 2 and 3 evidence for Indian winter monsoon. *Quaternary Sciences*, 23(1): 54—59 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Guichard, F., Bassinot, F., et al., 2005. Paleoenvironment of the last glacial maximum in the Flores Sea of the Indonesian Archipelago. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 565—572 (in Chinese with English abstract).
- English, P., Spooner, N. A., Chappell, J., et al., 2001. Lake Lewis basin, central Australia: environmental evolution and OSL chronology. *Quaternary International*, 83—85: 81—102.
- Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Chiu, T. C., et al., 2005. Marine radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50 000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews*, 24: 1781—1796.
- Fieux, M., Andrié, C., Charriaud, E., et al., 1996. Hydrological and chlorofluoromethane measurements of the Indonesian throughflow entering the Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 101(C5): 12433—12454.
- Gingele, F. X., De Deckker, P., Girault, A., et al., 2002. History of the South Java Current over the past 80 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183(3—4): 247—260.
- Gingele, F. X., De Deckker, P., Hillenbrand, C. D., 2001. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia—source and transport by ocean currents. *Marine Geology*, 179: 135—146.
- Gordon, A. L., Fine, R. A., 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian Oceans in the Indonesian Seas. *Nature*, 379: 146—149.
- Hesse, P. P., Magee, J. W., van der Kaars, S., 2004. Late Quaternary climates of the Australian arid zone. *Quaternary International*, 118—119: 87—102.
- Hesse, P. P., McTainsh, G. H., 2003. Australian dust deposits: modern processes and the Quaternary record. *Quaternary Science Reviews*, 22: 2007—2035.
- Hirst, A. C., Godfrey, J. S., 1993. The role of Indonesian throughflow in a global ocean GCM. *Journal of Physical Oceanography*, 23: 1057—1085.
- Kolla, V., Moore, D. C., Curray, J. R., 1976. Recent bottom-current activity in the deep western Bay of Bengal. *Ma-*

- rine Geology*, 21: 255–270.
- Koutavas, A., Lynch-Stieglitz, J., Marchitto, T. M. Jr., et al., 2002. El Niño-like pattern in ice age tropical Pacific Sea surface temperature. *Science*, 297(12): 226–230.
- Leuschner, D. C., Sirocko, F., 2003. Orbital insolation forcing of the Indian monsoon—a motor for global climate changes? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 197: 83–95.
- Liu, Z. F., Zhao, Y. L., Li, J. R., 2007. Clay mineralogy record in Vietnam of west portion of South China Sea during Late Quaternary; source analyse and East Asian monsoon evolution. *China Science (Ser. D): Earth Science*, 37(9): 1176–1184 (in Chinese with English abstract).
- Lückge, A., Mohtadi, M., Rühlemann, C., et al., 2009. Monsoon versus ocean circulation controls on paleoenvironmental conditions off southern Sumatra during the past 300 000 years. *Paleoceanography*, 24, PA1208. doi: 10.1029/2008PA001627
- Magee, J. W., Bowler, J. M., Miller, G. H., et al., 1995. Stratigraphy, sedimentology, chronology and palaeohydrology of Quaternary lacustrine deposits at Madigan Gulf, Lake Eyre, South Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113: 3–42.
- Magee, J. W., Miller, G. H., 1998. Lake Eyre palaeohydrology from 60 ka to the present: beach ridges and glacial maximum aridity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144: 307–329.
- Martinez, J. I., Taylor, L., De Deckker, P., et al., 1998. Planktonic foraminifera from the eastern Indian Ocean; distribution and ecology in relation to the western Pacific warm pool (WPWP). *Mar. Micropaleontology*, 34: 121–151.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27(1): 1–29.
- Mohtadi, M., Lückge, A., Steinke, S., et al., 2010. Late Pleistocene surface and thermocline conditions of the eastern tropical Indian Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 29: 887–896.
- Murgese, D. S., De Deckker, P., Spooner, M. I., et al., 2008. A 35 000 year record of changes in the eastern Indian Ocean offshore Sumatra. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265: 195–213.
- Rashid, H., Flower, B. P., Poore, R. Z., et al., 2007. A ~25 ka Indian Ocean monsoon variability record from the Andaman Sea. *Quaternary Science Reviews*, 26(19–21): 2586–2597.
- Singer, A., 1984. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments—a review. *Earth-Science Reviews*, 21: 251–293.
- Spooner, M. I., Barrows, T. T., De Deckker, P., et al., 2005. Palaeoceanography of the Banda Sea, and Late Pleistocene initiation of the Northwest monsoon. *Global and Planetary Change*, 49(1–2): 28–46.
- Sprintall, J., Wijffels, S. E., Molcard, R., et al., 2009. Direct estimates of the Indonesian throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006. *Journal of Geophysical research*, 114, C07001. doi:10.1029/2008JC005257
- Sun, Y. B., Gao, S., Li, J., 2003. The preliminary analysis on sensitive grain-size populations of terrigenous material in marginal seas. *Science Bulletin*, 48(1): 83–86 (in Chinese with English abstract).
- van der Kaars, S., De Deckker, P., 2002. A Late Quaternary pollen record from deep-sea core FR10/95, GC17 offshore Cape Range Peninsula, northwestern western Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 120(1–2): 17–39.
- van der Kaars, S., Wang, X., Kershaw, P., et al., 2000. A Late Quaternary palaeoecological record from the Banda Sea, Indonesia: patterns of vegetation, climate and biomass burning in Indonesia and northern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155: 135–153.
- Veeh, H. H., McCorkle, D. C., Heggie, D. T., 2000. Glacial/interglacial variations of sedimentation on the West Australian continental margin: constraints from excess ²³⁰Th. *Marine Geology*, 166: 11–30.
- Wan, S. M., Li, A. C., Xu, K. H., et al., 2008. Characteristics of clay minerals in the Northern South China Sea and its implications for evolution of East Asian monsoon since Miocene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 289–300 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Sarnthorn, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156: 245–284.
- Wijffels, S. E., Hautala, S., Meyers, G., et al., 1996. The WOCE Indonesian throughflow repeat hydrography sections: I10 and IR6. *Int. WOCE Newsl*, 24: 25–28.
- Wu, G. H., Tian, L. S., Hu, S. X., et al., 2000. Physical geography (the third edition). Higher Education Press, Beijing, 189 (in Chinese).
- Wyrtki, K., 1961. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand. NAGA

- Report 2, University of California, Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA.
- Wyrwoll, K. H., Miller, G. H., 2001. Initiation of the Australian summer monsoon 14 000 years ago. *Quaternary International*, 83–85: 119–128.
- Xu, J., Kuhnt, W., Holbourn, A., et al., 2006. Changes in the vertical profile of the Indonesian throughflow during termination II: evidence from the Timor Sea. *Paleoceanography*, 21, PA4202. doi:10.1029/2006PA001278
- Ye, F., Liu, Z. F., Tuo, S. T., et al., 2007. Grain size record of terrigenous clast during mid-Pleistocene transition (0.78–100 Ma) in the northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 77–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Ding, X., 2011. Monsoon and upwelling activity records in the Sumatra during Late Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 31(2): 265–275 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. L., Liu, Z. F., Cheng, X. R., et al., 2006. Dominance factors of the terrigenous sediment granulometric distribution in the Lower Sunda Slope. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(2): 73–78 (in Chinese with English abstract).
- 出版社, 31–33.
- 丁旋, 方念乔, 陈萍, 2003. 孟加拉湾深海氧同位素 2、3 期上升流活动——北印度洋冬季风的实证. *第四纪研究*, 23(1): 54–59.
- 丁旋, Guichard, F., Bassinot, F., 等, 2005. 印度尼西亚弗洛勒斯海 LGM 以来的古海洋学记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 565–572.
- 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 2007. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 37(9): 1176–1184.
- 孙有斌, 高抒, 李军, 2003. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. *科学通报*, 48(1): 83–86.
- 万世明, 李安春, 胥可辉, 等, 2008. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(3): 289–300.
- 伍光和田连恕, 胡双熙, 等, 2000. *自然地理学(第三版)*. 北京: 高等教育出版社, 189–191.
- 叶芳, 刘志飞, 拓守廷, 等, 2007. 南海北部中更新世 0.78~1.0 Ma 期间的陆源碎屑粒度记录. *海洋地质与第四纪地质*, 27(2): 77–83.
- 赵玉龙, 刘志飞, 成鑫荣, 等, 2006. 巽他陆坡下部陆源碎屑粒度分布的控制因素. *海洋地质与第四纪地质*, 26(2): 73–78.
- 赵悦, 丁旋, 2011. 苏门答腊海区晚更新世以来的季风上升流活动记录. *第四纪研究*, 31(2): 265–275.

附中文参考文献

曹伯勋, 1995. *地貌学与第四纪地质学*. 武汉: 中国地质大学