

末次冰消期以来巽他陆架孢粉、藻类及其古环境意义

王晓梅^{1,2)} 孙湘君^{2,3)} 汪品先²⁾ Stattegger K⁴⁾

1) 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083, chouxiaoya_77@yahoo.com.cn;

2) 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

3) 中国科学院植物研究所, 北京 100093;

4) 基尔大学地球科学系, 基尔 24118, 德国

提要 根据南海南部巽他陆坡上的柱状剖面 SONNE 18287 的高分辨率的藻类和孢粉记录, 探讨海平面变化和其反映的古环境, 得到在 16.5—13.9kaBP 之间, 较高的热带低山雨林百分含量和较低的热带低地雨林含量反映了当时仍较低的气温; 各类陆相花粉和环纹藻浓度都很高, 而沟鞭藻含量很低, 说明当时巽他陆架处于低水位环境; 13.9—10.2kaBP 期间, 热带低山雨林含量的减少和热带低地雨林的增加反映了气温的回升; 各类陆相花粉和环纹藻浓度都大大降低, 而沟鞭藻含量增加, 说明巽他陆架逐渐被淹没; 10.2—7kaBP 热带低山雨林含量的持续减少和热带低地雨林的增加反映了气温继续缓慢回升; 花粉浓度的降低说明陆架完全被淹没, 花粉的物源区变远, 同时环纹藻浓度的略有增加说明此时有淡水注入; 7kaBP 各类花粉的百分含量相对稳定, 说明气温基本稳定, 沟鞭藻浓度的突然降低, 说明存在一个气候变冷事件使得海平面升高受到抑制, 但接下来沟鞭藻浓度又继续回升, 指示温度升高, 海平面稳定升高。

关键词 孢粉 藻类 海平面 巽他陆坡

1 前言

巽他陆架也称“亚洲大浅滩 (Great Asian Bank)”, 位于南沙群岛海区的西南部, 是连接南海与印度洋的重要通道, 冰盛期出露水面后与南海诸岛如苏门答腊、爪哇、婆罗洲等联合成一个统一的陆地, 即“巽他古陆” (Sunda Shelf) (Tjia, 1980) (插图 1)。它以少于 -40m 的浅海海峡连接西太平洋和东印度洋, 这里从陆相到海相环境转型明显, 陆架古河道沉积记录完整。1997 年基尔大学对“太阳号” 115 航次的 18287 柱状样展开了高分辨率的海平面古温度变化研究 (Steinke *et al.*, 2001), 19—7kaBP 期间的末次冰消期, 是冰后期地球表层系统变化最大的时期, 北半球厚达 3—4km 的大冰盖消融, 在 19—14.6kaBP, 海平面以 0.41m/100a 的速度从 -114m 升高到 -96m, 14.6—14.3kaBP, 海平面以 5.33m/100a 的速度从 -96m 升高到 -80m; 14.3—13.1kaBP, 海平面以 1.33m/100a 的速度从 -80m

升高到 -64m (Hanebuth *et al.*, 2000; Hanebuth and Stattegger, 2003)。而由于南海南部巽他陆架梯度很小, 少量的海面变化就能引起大幅度的岸线迁移, 这直接影响人口密集的海岸地区, 海平面变化引起的风暴潮、洪涝威胁、水域污染、盐水入侵和港区功能等方面的变化将直接影响沿海地区人类的生存环境。因此研究巽他陆架第四纪海平面变化, 摸清海平面变化规律及其替代指标, 不仅对地球科学具有重要的理论意义, 而且具有重大的现实意义。

我国第四纪藻类研究最早始于东海陆架盆地 (何承全、李彭, 1981; 吴作基, 1985)。随后, 南海及海南岛也陆续有报道 (如郝诒纯等, 1989; 孙学坤、宋之琛, 1992; 赵芸芸、Marie, 1992; Mao and Hariand, 1993)。但巽他陆架第四纪藻类研究尚未见有研究, 本文将着重对巽他陆架发现的藻类, 结合以前对巽他陆架研究的孢粉资料 (Sun *et al.*, 2002; 王晓梅、孙湘君, 2005; Wang *et al.*, 2007;), 对其所反映的古环境意义进行探讨。

收稿日期: 2008-01-29

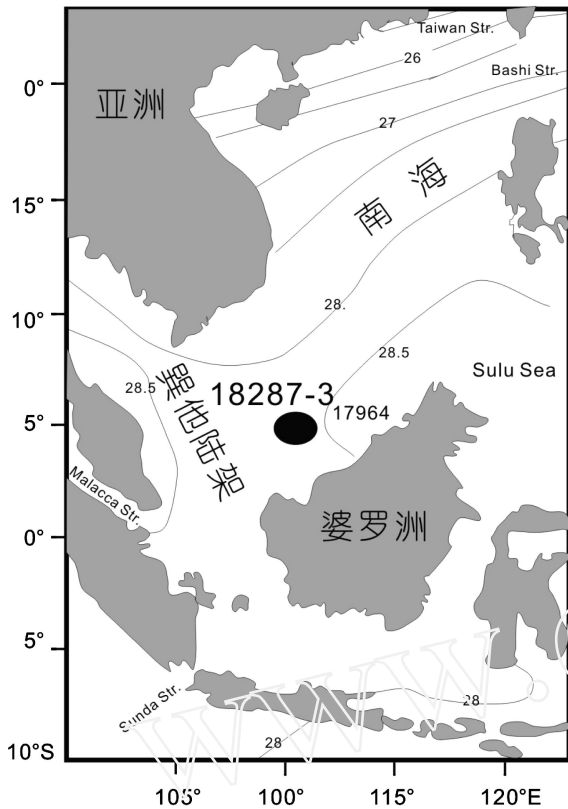


插图1 18287孔地理位置
The position of Core 18287

2 材料和方法

18287-3 柱状样 (Stattegger *et al.*, 1997) (5°39' N, 110°39' E, 水深 598m) 沉积物厚度 566cm, 566—152cm 为橄榄灰均质泥岩, 152—0cm 为黄绿色泥岩。沟鞭藻孢囊样品处理与孢粉相同 (Wang *et al.*, 2007), 在同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 取样间隔 5cm, 单个样品分析用量 10ml。分析方法如下: 首先用盐酸去钙质, 清洗后, 再用氢氟酸浸泡样品溶解硅质, 然后将样品放在超声波发生器中, 用 10 μ m 尼龙筛震荡过滤。本次研究对孢粉和藻类进行了绝对浓度分析。采用国际上普遍认可的“外加标志法”。即样品处理前每个样品加入一到两粒外加石松药片, 每片药片约含石松孢子 10 680 粒。每个样品统计陆生种子植物花粉(蕨类孢子和松除外) 150 粒以上, 浓度值 (粒/g) = $\frac{\text{加入石松孢子数} \times \text{藻类(孢粉)}}{\text{鉴定得石松孢子数} \times \text{样品重量(g)}}$

德国基尔大学提供了 6 个 AMS¹⁴C 测年数据, 经过 CALIB 4.1.2 版本的放射碳 (Stuiver and Reimer, 1998) 软件和 -400a (Bard, 1988) 校正得到

日历年年龄: 10cm: 3 570 \pm 50a; 140cm: 8 280 \pm 50a; 175cm: 9 200 \pm 50a; 288cm: 11 680 \pm 50a; 410cm: 14 090 \pm 50a; 512cm: 15 680 \pm 50a。共分析样品 112 个, 全新世沉积速率为 135a, 冰期沉积速率为 52a。

3 结果

本文所报道的巽他陆架陆坡 18287-3 柱状样的 112 个样品中孢粉主要为高山雨林、低山雨林、热带低地雨林、草本植物及红树林 (Wang *et al.*, 2007)。高山雨林植被以 *Phyllacladus*、鸡毛松属 (*Dacrycarpus*)、杨梅属 (*Myrica*) 及杜鹃属 (*Rhododendron*) 为主; 热带低山雨林以栲属 (*Castanopsis*)、栎属 (*Quercus*)、茶科 (Theaceae)、桃金娘科 (Myrtaceae) 及杜英科 (Elaeocarpaceae) 等为主; 热带低地雨林成分主要有苦苣苔科 (Gesneriaceae)、山榄科 (Sapotaceae)、漆树科 (Anacardiaceae)、楝科 (Araliaceae)、五加科 (Araliaceae)、猕猴桃科 (Actinidiaceae)、棕榈科 (Palmae) 及大戟科 (Euphorbiaceae)、龙脑香科 (Dipterocarpaceae)、无患子科 (Sapindaceae)、桑科 (Moraceae)、茜草科 (Rubiaceae) 及芸香科 (Rutaceae); 红树林以红树属 (*Rhizophora*) 和海桑属 (*Sonneratia*) 等最为常见。草本植物中以莎草科 (Cyperaceae)、禾本科 (Gramineae) 及少量的菊科 (Compositae) 为主, 藜科 (Chenopodiaceae) 和毛茛科 (Ranunculaceae) 零星出现。淡水藻类以环纹藻 (*Concentricystes*) 最为常见, 海生沟鞭藻丰度较低, 主要由 4 个属组成, 即 *Spiniferites* (刺甲藻属), *Operculodinium* (口盖藻属), *Impagidinium* (加固藻属) 以及 *Lingulodinium* (舌藻属)。植被类型百分比和藻类与孢粉浓度变化如插图 2 和插图 3 所示, 特征如下:

冰消期早期 (566—400cm, 16.5—13.9kaBP): 热带低地雨林百分含量相对较高, 而热带低山雨林百分含量较低; 沟鞭藻浓度较低, 大约 10 粒/g; 环纹藻的浓度相对较高, 大约 40 粒/g, 本段顶部达 100 粒/g; 孢粉浓度在本组合中最高, 红树、低山雨林以及草本植物浓度都在 1 500—500 粒/g 之间, 热带低地雨林浓度则在 1 000—2 000 粒/g 之间。

冰消期晚期 (400—225cm, 13.9—10.2kaBP): 热带低地雨林百分含量降低, 热带低山雨林百分含量增高; 藻类孢子相对于上一时期大量增加。但各类花粉的浓度都降低。沟鞭藻浓度缓慢增高, 从

10 粒/g 逐渐增长到 40 粒/g,但仍然不稳定;环纹藻浓度急剧降低到 5 粒/g,在有的样品甚至完全消失。各类花粉的浓度都明显降低,红树和低山雨林浓度都低于 100 粒/g,热带低地雨林浓度在 200—300 粒/g 之间,草本植物浓度则降低到 200 粒/g 左右。

全新世早期 (225—100cm, 10.2—7kaBP): 热带

低地雨林的百分含量进一步增加,热带低山雨林的百分含量降低。沟鞭藻浓度显著增加,从 40 粒/g 增长到 100 粒/g,个别达到 200 粒/g,环纹藻浓度相对于上一时期略有增加,但含量很低。除热带低地雨林浓度在 8ka 左右有一个增长点外其余花粉浓度相对于上一时期基本没有变化。

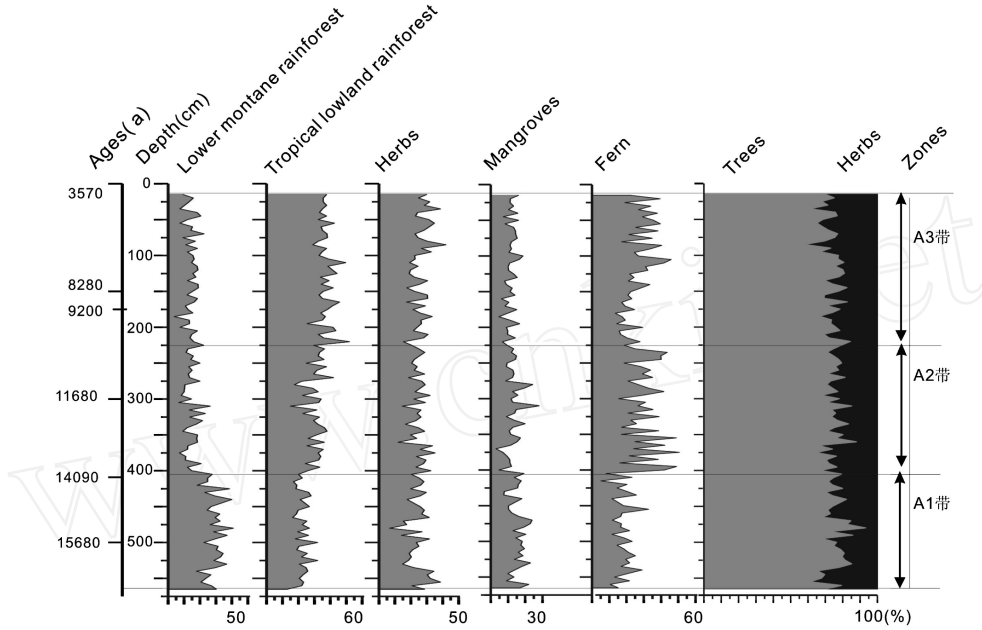


插图 2 南海柱状样 18287 植被类型百分比变化图谱 (据 Wang *et al.*, 2007 修改)

The algae and pollen percentage diagram of Core 18287 from the southern South China Sea (modified after Wang *et al.*, 2007)

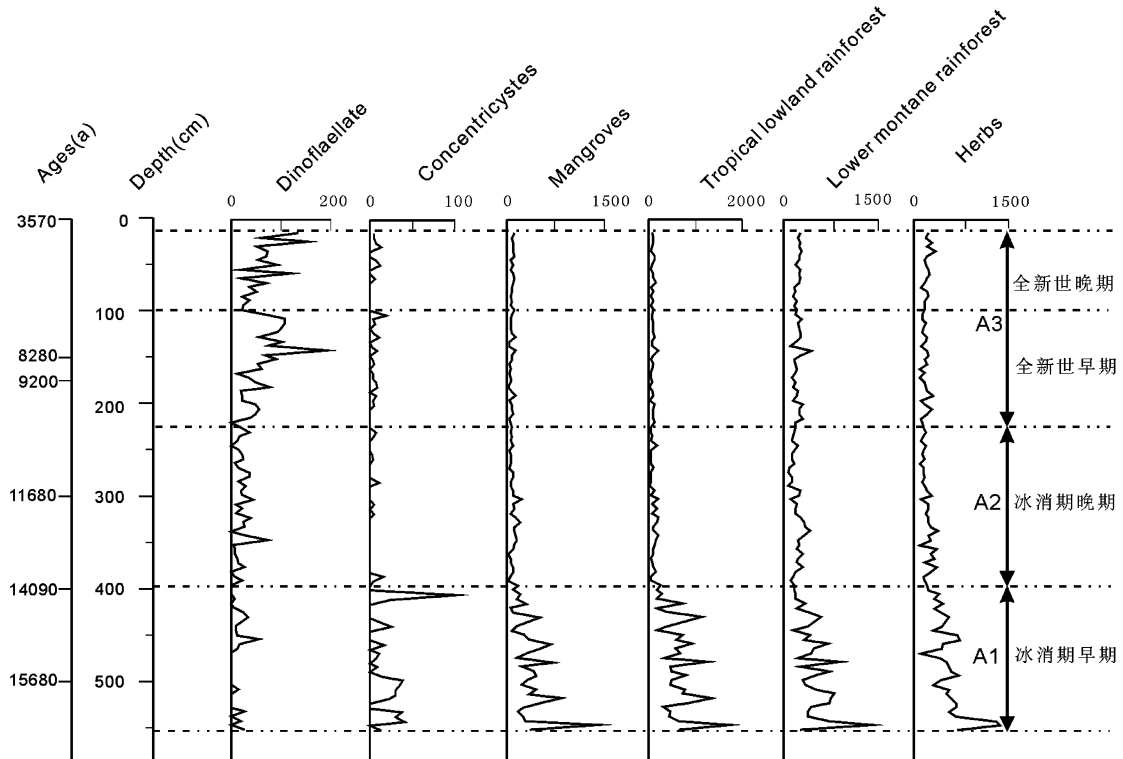


插图 3 南海柱状样 18287 藻类和花粉浓度变化图谱

The algae and pollen concentration diagram of Core 18287 from the southern South China Sea

全新世晚期(100—15cm, 7—3.6kaBP):沟鞭藻浓度在本组合开始较低,大约 20 粒/g,然后逐渐增高到 150 粒/g;环纹藻几近消失。花粉浓度同全新世早期,变化不大。

4 讨 论

冰消期早期,即 16.5—13.9kaBP,相对较高的热带低地雨林含量和较低的热带低山雨林含量反映气温还较低。各类花粉的浓度都很高,低地雨林的花粉浓度最高达到 1 200 粒/g,热带低地雨林、草本植物和红树林的花粉沉积率都达到 1 000 粒/g,且低山雨林相对于热带低地雨林具有高的含量(Wang *et al.*, 2007),说明物源区距离研究区较近,有足够的孢粉来源,但气温尚低。高分辨率的记录证明浮游藻类组合特征与环境条件变化密切相关(Vernal *et al.*, 1992)。本次研究的孢粉、藻类化石组合一个显著的特征就是环纹藻的高含量,而环纹藻是藻体产生的结合孢子,其可能的亲缘关系属于绿藻类的双星藻(吴国 等, 2000)。现代双星藻的生活习性是大范围的淡水,包括冷的、快速流动的河流,暖的、滞流的水塘和潮湿的土壤和泥炭,但较偏向于生活在滞流的水塘、池塘和沟渠,是一种生态幅度较宽、对气候适应较强、只要有淡水、静水、浅水环境就能生长的藻类(王开发、韩信斌, 1983; 柯曼红, 1995; Sun *et al.*, 1995)。孢粉藻类组合中出现了高浓度的环纹藻,说明巽他陆架当时水位较低,或者仅是地面局部有积水甚至水域出现。同时本时段沟鞭藻具有极低的含量,现代大洋,尤其是大陆边缘的海洋是这种单细胞浮游藻类的大本营,保存于沉积物或地层中的沟鞭藻为这些单细胞生命史中能石化的孢囊。极低的沟鞭藻含量也说明了当时巽他陆架的低水位环境。说明海平面刚刚开始上升,还没有对生态环境造成大的影响。但陆相沉积孢粉、藻类化石组合中出现海相化石分子,即使其含量很低,也说明此时已经受到海水影响。

在 13.88—10.2kaBP 期间,热带低地雨林含量的剧增和低山雨林含量大幅度减少反映了气候回升。藻类孢子相对于上一段时期的大量增加说明周边气候相对于之前湿润。同时各类花粉的浓度都下降,低山雨林的浓度下降到 100 粒/g,热带低地雨林、草本植物和红树林下降到 200 粒/g,大量陆架种和大洋种沟鞭藻开始出现,此时巽他河道河口后退,河谷被淹没(Hanebuth and Stattegger, 2004),故

有了适应沟鞭藻生存的广阔的空间,此时段占优势的 *Spiniferites* 属的部分种是大西洋及其毗邻海暖热浅海至半深海的常见分子,例如 *Spiniferites bulloideus* 是分布在夏季表层水温超过 20 的浅海,普遍存在的 *S. hyperacanthus* 和 *S. mirabilis* 则多见于海水较深的外陆架沉积物中,同时暖温带到亚热带外陆架至大洋的优势组分 *Impagidinium* 也广泛存在。生态环境的改变导致适合淡水环境下的环纹藻生活空间大大缩小,环纹藻的浓度剧减几乎到零。但是由于有新仙女木期的气候变冷,海平面升高受到抑制,沟鞭藻的浓度增加缓慢。同时本时段草本植物中的禾本科被莎草科代替,而禾本科花粉指示草原环境,莎草科花粉往往指示湿地和沼泽环境,也进一步说明此时陆架周围的植被转变为适应湿润条件下的生态类型。

10.2—7kaBP 热带低地雨林含量的进一步增加和热带低山雨林的含量降低说明气温进一步回升。但由于陆架被淹没,花粉的物源区变远,故沉积物中花粉浓度极低且无大变化,而沟鞭藻浓度的剧增则说明海平面又迅速上升,同时环纹藻的浓度略有增加,说明有淡水注入,海平面继续升高。

7kaBP 时花粉组成的相对稳定说明气温比较稳定。沟鞭藻浓度的突然降低,说明存在一个气候变冷事件使得海平面升高受到抑制,但接下来沟鞭藻浓度又继续回升,指示温度升高,海平面缓慢回升。群落环境论(陈源仁, 1988)认为海平面的变化是造成生物群落取代(非演替)的主要原因,那么由此可以推断沟鞭藻是海平面变化的直接响应,故它对反演和标识海平面变化有重要参考价值。

5 结 论

16.5—13.9kaBP,各类花粉和环纹藻的高浓度指示较低的海平面,花粉的物源区较近,气温较低; 13.9—10.2kaBP,花粉和环纹藻浓度的降低,以及沟鞭藻浓度的增加指示海平面大幅度升高,广阔的巽他陆架被完全淹没,花粉的物源区变远,淹没的巽他陆架为沟鞭藻生存提供了生活空间,气温回升; 10.2—7kaBP,巽他陆架海平面继续升高,沟鞭藻的生活空间继续扩大,故继续繁盛,温度继续升高; 7—3.6kaBP,沟鞭藻浓度突然降低,说明可能存在一个快速气候变冷事件,导致海平面升高受到抑制,沟鞭藻的生存空间受到一定的影响。

参考文献 (References)

- Bard E, 1988. Correction of accelerator mass spectrometry ^{14}C ages measured in planktonic foraminifera. paleoceanographic implications. *Paleoceanography*, 3: 635—645.
- Chen Yuan-ren (陈源仁), 1988. The succession of fossil community. *Journal of Chengdu College of Geology*, 15(1):36—561 (in Chinese).
- Hanebuth T J J, Stattegger K, 2003. The stratigraphic evolution of the Sunda Shelf during the past fifty thousand years. *In: Sidi F H, Nummedal D, Posamentier H W, Darman H, Imbert P (Eds.), Deltas of Southeast Asia and Vicinity—Sedimentology, Stratigraphy and Petroleum Geology. SEPM Special Publications*, 76:189—200.
- Hanebuth T J J, Stattegger K, 2004. Depositional sequences on a late Pleistocene—Holocene tropical siliciclastic shelf (Sunda Shelf, southeast Asia). *Journal of Asian Earth Science*, 23: 113—126.
- Hanebuth T J J, Stattegger K, Grootes P M, 2000. Rapid flooding of the Sunda Shelf—a late-glacial sea-level record. *Science*, 288: 1033—1035.
- Hao Yi-chun (郝诒纯), Zheng Hong (郑洪), Sun She-ping (孙社平) *et al.*, 1989. The Quaternary micropalaeontological assemblages and their geological implications in northern Xisha Trough. Beijing: China Geology University Publishing House. 1—223 (in Chinese).
- He Cheng-quan (何承全), Li Peng (李彭), 1981. Dinoflagellate and Acritarchs. *In: Tertiary palaeophyte atlas in northern shelf in South China Sea. Guangzhou: Guangdong Technology Publishing House.* 1—238 (in Chinese).
- Ke Man-hong (柯曼红), 1995. Discovery and significance of the Concentricystes fossils on Loess Plateau. *Journal of Xi'an College of Geology*, 17(2): 90—93 (in Chinese with English abstract).
- Mao Shao-zhi, Hariand R, 1993. Quaternary organic-walled dinoflagellate cysts from the South China Sea and their paleoclimatic significance. *Palynology*, 17: 47—65.
- Stattegger K, Kuhnt W, Wong H K *et al.*, 1997. Cruise Report SONNE115 SUNDAFLUT. Sequence Stratigraphy, Late Pleistocene—Holocene Sea Level Fluctuations and High Resolution Record of the Post-Pleistocene Transgression on the Sunda Shelf. *Berichte-Reports. Geol. Paläont. Inst. Univ. Kiel*, 186: 211.
- Steinke S, Kienast M, Pflaumann U *et al.*, 2001. A High-Resolution Sea-Surface Temperature Record from the Tropical South China Sea (16,500—3000 yr B. P.). *Quaternary Research*, 5: 352—362.
- Stuiver M, Reimer P J, 1998. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35: 215—230.
- Sun Xiang-jun, Li Xun, Luo Yun-li, 2002. Vegetation and Climate on the Sunda Shelf of the South China Sea During the Last Glaciation—Pollen Results from Station 17962. *Acta Botanica Sinica*, 44(6): 746—752.
- Sun Xiang-jun, Song Chang-qing, Wang Yu *et al.*, 1995. Vegetation history of the Loess Plateau of China during the last 100 000 years based on pollen data. *Chinese Science Bulletin*, 40(13): 1222—1224.
- Sun Xue-kun (孙学坤), Song Zhi-chen (宋之琛), 1992. The discovery of Quaternary dinoflagellates from arenaceous dolomite in Hainan Island. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 9(1): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Tjia H D., 1980. The Sunda Shelf, Southeast Asia. *Z Geomorph N E*, 24(4): 405—427.
- Vernal A D, Mudie P J, Harland R *et al.*, 1992. Quaternary wall dinoflagellae cyst of the North Atlantic and adjacent seas ecostatigraphy and biostratigraphy. *In: Head M J, Wrenn J H (eds.), Neogene and Quaternary dinoflagellae cyst and Acritarchs. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation*, 289—328.
- Wang Kai-fa (王开发), Han Xin-bin (韩信斌), 1983. Study on the Cenozoic fossil Concentricystes of East China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 22(4): 68—47 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiao-mei (王晓梅), Sun Xiang-jun (孙湘君), 2005. Palynological records since the last glacial maximum on the Sunda Shelf of the South China Sea. *Advances in Earth Science*, 20(8): 833—839 (in Chinese).
- Wang Xiao-mei, Sun Xiang-jun, Wang Pin-xian *et al.*, 2007. A high-resolution history of vegetation and climate history on Sunda Shelf since the last glaciation. *Science in China Series D: Earth Science*, 50(1): 75—80.
- Wu Guo-xuan (吴国), Wang Ji-liang (王吉良), Song Chang-qing (宋长青) *et al.*, 2000. Environment changes from phytoplankton accumulation rate in the Northern Okinawa Trough since about 10 000 a B. P. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 20(4): 69—74 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zu-ji (吴作基), 1985. The existence and its significance of Eocene steta in East Sea Basin. *Tropical Marine*, 4(1): 25—92 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yun-yun (赵芸芸), Marie T M, 1992. Late Pleistocene—Holocene dinoflagellate cysts from South China Sea. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 9(3): 291—302 (in Chinese with English abstract).

PALYNOLOGY AND ALGAE RECORDS AND THEIR PAL EOENVIRONMENTAL SIGNIFICANCES ON SUNDA SHELF SINCE THE LAST DEGLACIATION

WANG Xiao-mei^{1,2)}, SUN Xiang-jun^{3,1)}, WANG Pin-xian¹⁾ and STATTEGGER K⁴⁾

1) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China, chouxiaoya_77@yahoo.com.cn;*

2) *Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

3) *Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;*

4) *Institute of Geosciences, University of Kiel, Olshausenstrasse 40, Kiel 24118, Germany*

Key words pollen and spore, algae, sea level, Sunda slope

Abstract

We present a high-resolution palynology and algae records from sediments of core 18287 on the continental slope of the southern South China Sea, and discuss the sea level changes of South China Sea and its environment. During 16.5—13.9kaBP, there were low percentages of the low-mountain rainforest and high percentages of lowland rainforest, which reflect low temperature, high concentration of all kinds of pollen, spore and Concentricyst, and low concentration of dinoflagellae cyst, which in turn means the sea level of Sunda Shelf was low at that time. During 13.9—10.2kaBP, the percentages of the low-mountain rainforest fell and the percentages of the lowland rainforest rose, which show the temperature was increased. The concentration of all kinds of pollen, spore and Concentricyst decreased greatly, while the concentra-

tion of dinoflagellae cyst increased, which indicate Sunda Shelf was submerging slowly. And during 10.2—7kaBP, the percentages of the low-mountain rainforest fell continually and the percentages of the lowland rainforest rose, which show the temperature was still increased. The distinct reduction of the concentration of pollen and spores shows the complete submergence of Sunda Shelf and the increase of the distance between the source area and the slope. And the little increase of Concentricyst indicates the input of fresh water. At the time of 7kaBP, the stability of the percentages of the low-mountain rainforest and the lowland rainforest shows the climate was just like the previous time. The abruptly decrease of the concentration of dinoflagellae cyst indicates a cold period occurred in the early Holocene and the rising sea level was restrained. The increase of the concentration of dinoflagellae cyst marked the rising temperature and the continuing rising sea level.