科学通报 2010 年 第 55 卷 第 2 期: 171 ~ 175
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

末次冰期低纬度西太平洋硅藻席沉积

翟滨[①②], 李铁刚[①*], 常凤鸣[①], 曹奇原[①]

① 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: tgli@ms.qdio.ac.cn

2009-03-09 收稿, 2009-05-28 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815903)、国家自然科学基金(批准号: 40776031)和中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-YW-221)资助

摘要 硅藻贡献了海洋 40%的初级生产力, 在海洋生物地球化学循环中发挥重要作用, 是全球碳固定的主要贡献者之一. 大洋硅藻席沉积是硅藻大规模"勃发"的产物, 通过对东菲律宾海 136°~140°E, 15°~21°N 区域内藻席的分析鉴定发现, 出现于这一低纬西太平洋的硅藻席的成席藻类为 *Ethmodiscus rex* (Wallich) Hendey; 同时, 大量的 AMS^{14}C 测年数据显示这些富含硅藻席的沉积物形成于 16000 ~ 28600 a BP (^{14}C 年龄)期间, 即硅藻"勃发"发生于末次冰期, 而其他层位并未发现藻席沉积. 初步分析表明, 末次冰期由于南极中层水(AAIW)北扩, 将富含硅酸盐的海水带入了研究区, 即南大洋的"硅溢漏"作用, 使该区域硅藻得以勃发; 同时, 末次冰期铁输入的增加, 也可能促进了该区硅藻的勃发.

关键词
硅藻席
西太平洋
AMS^{14}C 测年
末次冰期

硅藻对于全球碳固定起着非常重要的作用. 硅藻在贫养大洋贡献了超过 35%的生产力, 而在沿岸区域则超过 75%, 并主导着输出生产力[1,2]. 要理解全球碳循环, 扩大我们对海洋硅藻的认识非常必要[3]. 根据"沉积雨比例"(rain ratio)假说, 海洋生产力一定, 海洋沉积物中输出的有机碳和无机碳的比例增大时, 大洋生物泵吸收 CO_2 的能力增强, 继而提高大洋"生物泵"的碳输出效率[4]. "树荫种"硅藻如 *Rhizosolenia*, *Ethmodiscus* 等的勃发会产生大量的生物量及输出生产力[5,6], 从而增强"生物泵"的输出作用, 形成大规模通量事件, 并在海底形成硅藻席沉积[7]. 对硅藻席沉积的研究有助于理解大洋营养物质循环、利用及海洋生产过程, 在全球碳循环研究中有独特而重要的意义.

现有资料表明, 纹层硅藻席沉积主要分布在北太平洋、东赤道太平洋、南大洋、热带-亚热带北大西洋及东印度洋. 在东赤道太平洋, ODP138 航次发现了晚第三纪主要由 *Thalassiothrix longissima* 组成的大型纹层硅藻席沉积[7,8]. 在南大洋, ODP177 航次采集到与晚第三纪东赤道太平洋硅藻席沉积类似的第四纪多期纹层状 *Thalassiothrix antartica* 硅藻席沉积[9]. 由 *Thalassiothrix* 和 *Thalassionema* 占主要物种的晚中新世到早上新世的硅藻软泥在北太平洋区域均有发现[10]. 在北大西洋北部亚北极收敛带(SAC)之下, 发现了 3 m 厚的 *Thalassiothrix longissima* 硅藻席沉积, 其发生年代为氧同位素 5e 期[11]. 在赤道东大西洋发现 MIS 4, 6 期 *Ethmodiscus rex* 单种硅藻纹层沉积[12]. 此外, 在低纬东印度洋的末次冰期也发现了相似的硅藻席沉积[13,14]. 而在低纬度西太平洋尚未见与硅藻席沉积相关的报道, 本文首次报道了采集于低纬度西太平洋 15 个岩芯中的硅藻席沉积, 分析了成席藻类, 利用 AMS^{14}C 测年确定了其勃发年代, 并初步探讨了该区硅藻席沉积形成的机制.

英文版见: Zhai B, Li T G, Chang F M, et al. Vast laminated diatom mat deposits from the west low-latitude Pacific Ocean in the last glacial period. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0447-1

1 材料和方法

研究区位于西太平洋暖池边缘的东菲律宾海帕里西维拉(Parece Vela)海盆西北部, 平均水深在4000~4500 m, 地理范围为: 136°~140°E, 15°~21°N. 本文所利用样品均由“科学一号”科学考察船利用重力取样器在2003~2004年期间采得, 共采集富含硅藻沉积物的柱状岩芯32个(图 1).

32 个岩芯中富含硅藻沉积物的沉积层厚度在20~385 cm 不等, 多为黄褐色-灰黄色-灰白色相间的纹层软泥, 颜色较该区褐色大洋黏土浅, 且夹杂有富含有机质的黑色条带, 呈层状. 手感滑腻, 无粗糙感且呈半流动状, 似浆糊, 无黏性或弱黏性, 可塑性差, 无异味. 风干后呈片状(图 2).

经 KYKY-2800B 扫描电子显微镜在 25 kV, ×800 下成像观测显示, 该硅藻富集层几乎全部由硅藻碎片组成, 且碎片几乎为同属巨型硅藻, 故我们确定该沉积应为“硅藻席”沉积. 亦在硅藻富集层发现其他种属硅藻(图 3(a))和放射虫(图 3(b))等硅质壳体生物. 在32个富含“硅藻席”沉积物的岩芯中选取15个岩芯共计 34 个富含硅藻席的层位由美国伍兹霍尔海洋研究所 NOSAMS 中心, 利用沉积物总有机碳进行 AMS^{14}C 年龄测试.

硅藻样品的主要处理步骤如下: (1) 去除钙质: 在装有硅藻样品的小烧杯中加入浓度为 10%~15%的稀盐酸, 待样品与盐酸完全反应后搅拌均匀并静置 12~24 h, 然后用蒸馏水水洗 3 次; (2) 去除有机质: 加入浓度为 30%的双氧水, 置于恒温水浴锅中(60℃)加热 1~2 h, 其后将样品从水浴锅中取出, 同样用蒸馏水洗 3 次; (3) 制片: 用玻棒将硅藻液体涂于载玻片上, 自然风干后滴上 1~2 滴加拿大树脂, 盖上盖玻片, 然后在烘箱中 45~55℃加热 48 h, 取出玻片, 待玻片冷却后保存于样品盒中. 硅藻观察鉴定在 Leica DM 4000 型显微镜×1000 倍下进行.

2 结果与讨论

2.1 成席藻类

经扫描电子显微镜和大量薄片鉴定, 确定研究区域的成席硅藻为 *Ethmodiscus rex*, 所见多为单一种硅藻碎片, 仅见少数完整壳体(图 3). 其壳体巨大、呈圆形, 壳面直径约 1000 μm, 壳面中央部分的孔纹呈稀疏规则排列, 约占直径的 1/3, 其内星散着比孔纹大许多倍的肾状孔管, 通常 30~50 个, 每个长约 10 μm.

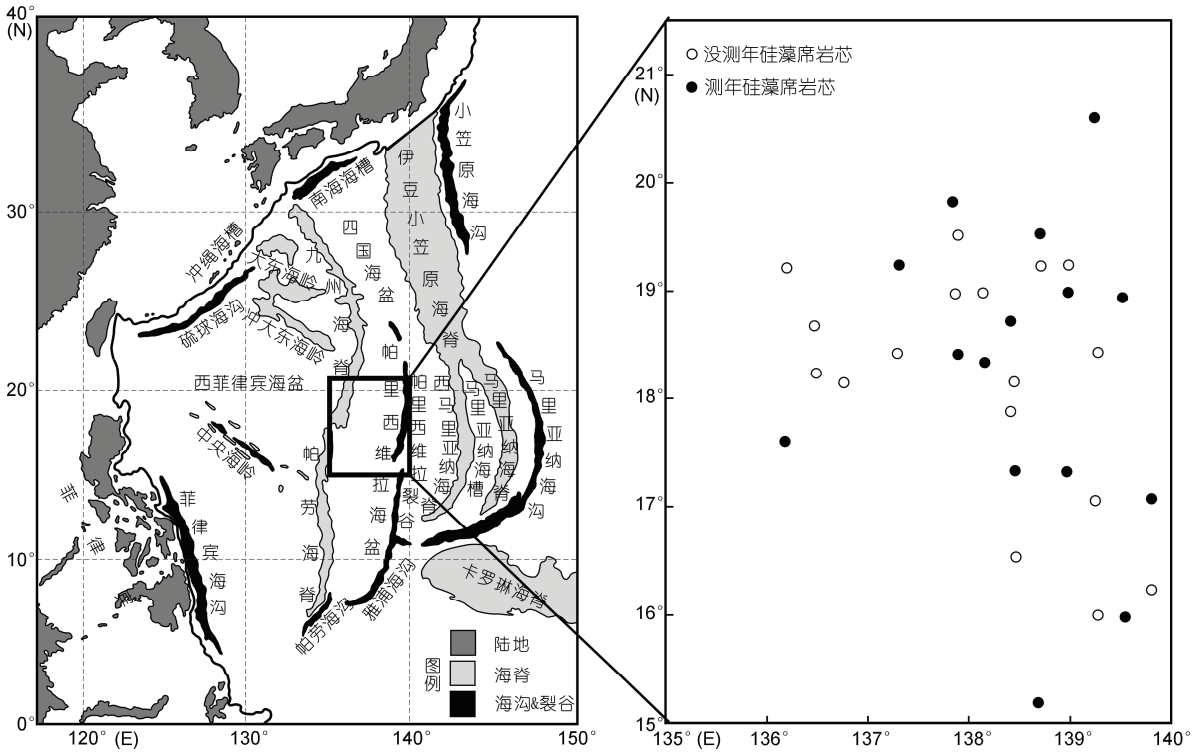


图 1 研究区域地理位置及站位分布图

外围的孔纹呈辐射状, 10 μm 约 4 个, 壳缘为一圈很窄的无纹带.

Ethmodiscus rex 是广泛分布于贫养大洋水体中的暖水种[15,16], Villareal 等人[16]认为该种具有浮力调节及垂向迁移能力, 属于典型的巨型“树荫种”硅藻. 由于 *Ethmodiscus rex* 坚固的细胞碎片可以阻止溶解, 并能形成软泥[12]. *Ethmodiscus* 可以在低光照条件下生长, 主要依靠细胞个体可以下降到营养跃层吸收氮(及其他的常量和微量营养物质)并返回到透光带进行光合作用[17]. 因此可以在适当条件下勃发. 浮力作用和垂向迁移能力使其不能作为上升流指示种, 但可以在贫养条件下生存且在大洋锋面收敛带富集使其成为很好的大洋锋面变化指示种[18].

2.2 成席时间

本次研究的测年层位及测定结果见表 1. 测定结果显示, WPD 03, WPD 04 的 333 和 382 cm 处, 也就是硅藻席沉积与其下部大洋黏土的交界处年龄分别为(27600±140)和(27100±140) a BP, 但测定的 WPD 02 站位 33 cm 处年龄最老为(28500±200) a BP.

由表 1 可见, AMS^{14}C 测年数据在 16000 ~ 28600 a BP 之间. 我们所取得样品从岩芯顶部开始即为硅藻席沉积层, 测年数据显示较浅层位年龄已达 16 ka, 由于硅藻席沉积速率较高, 而研究区黏土沉积速率低, 仅为 1.38 mm·ka^{-1}[19], 因此我们认为采集的样品表层部分在采样时可能被海水冲走, 该海区的硅藻席主要形成于末次冰期, 且硅藻的大规模“勃发”主要发生于末次冰期极盛期(LGM). 在两个加密测定站位 WPD 03 和 WPD 12 都有年龄倒置现象出现. 年龄倒置是由于硅藻席沉积是相当快速的过程, 经过在洋底的压实成岩作用, 使年龄较小的硅藻有机碳进入较老层位, 从而造成部分层位的年龄出现倒置现象.

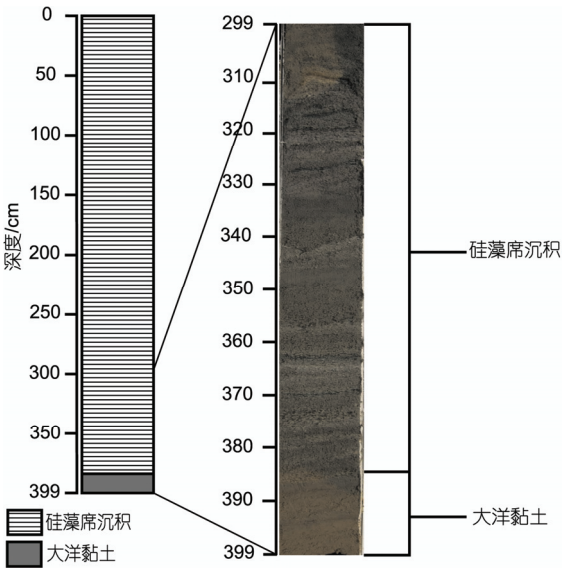


图 2 WPD04 岩芯岩性图及 299~399 cm 段沉积照片

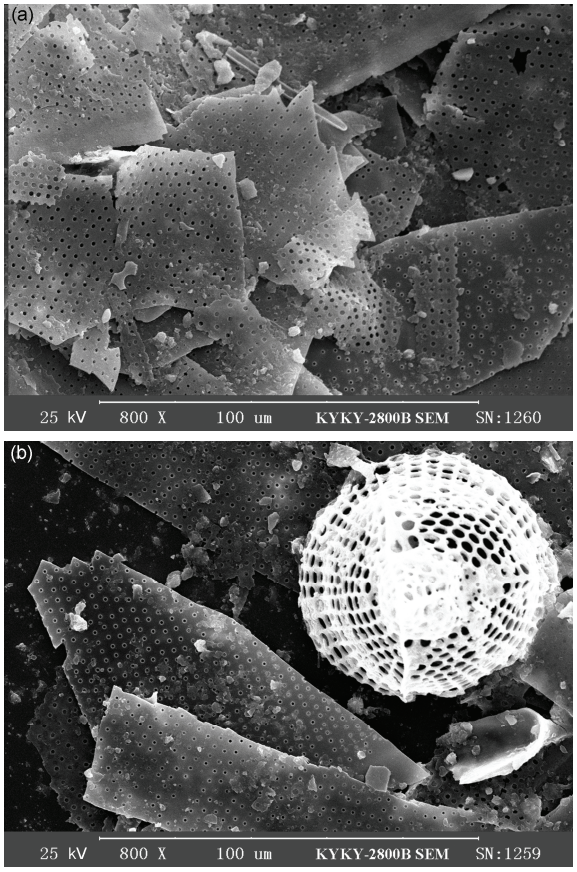


图 3 硅藻席扫描电子显微镜照片
(a) 含有其他种属硅藻; (b) 含有放射虫

2.3 硅藻席形成机制

低纬度海区控制硅藻生产的主要因素是硅酸盐的可利用度, 以及透光带硝酸盐和磷酸盐的浓度. 因此, 硅藻在该区域末次冰期期间的勃发, 需要有硅酸盐和其他营养物质的持续供给. 研究区属于贫营养开放大洋, 因此硅藻勃发所需的营养物质来源是十分关键的问题.

“硅溢漏假说”认为冰期时, 低纬度表层水中在抑制颗石藻生长的情况下, 硅藻的生长导致碳酸盐

表 1 选取的站位层位及测年结果 a)

岩芯	层位/cm	^{14}C 年龄/a BP	岩芯	层位/cm	^{14}C 年龄/a BP
WPD 02	18~20	23300±170	WPD 11	248±0.5	24000±120
WPD 02	32~34	28600±200	WPD 12	12~14	16050±75
WPD 03	40~45	17800±65	WPD 12	22~24	18900±95
WPD 03	70~75	18400±75	WPD 12	40~42	16600±80
WPD 03	100~105	20600±80	WPD 12	64~66	18850±95
WPD 03	135~140	20700±80	WPD 12	68~70	16450±65
WPD 03	170~175	23300±110	WPD 12	77~79	21400±110
WPD 03	203~205	22800±140	WPD 12	90~92	18650±85
WPD 03	228~230	21600±100	WPD 13	155~157	27500±160
WPD 03	256~258	20700±100	WPD 15	16~18	25100±130
WPD 03	284~286	21700±100	WPD 17	28~30	21400±100
WPD 03	332~334	27600±140	WPD 22	44~45	24100±130
WPD 04	208~210	20900±70	WPD 23	72~74	23500±95
WPD 04	381~383	27100±140	WPD 25	148~150	25700±110
WPD 06	29~31	18250±95	WPD 27	89~91	23700±75
WPD 10	65~70	18300±95	WPD 27	208~209	25500±150
WPD 11	202~204	22700±160	WPD 28	25~26	25300±120

泵减弱, 使得大气中的 CO_2 含量下降, 而这是由南大洋高 Si:N 水体的溢漏所驱动[20]. 这些高硅氮比的水体通过南极中层水(AAIW)和亚南极模态水(SAMW)传送到世界大洋的其他地区[21]. AAIW 形成在南极辐合带, 在中层扩散到太平洋中低纬度[22]. 以往研究结果显示, AAIW 由新几内亚沿岸潜流(NGCUC)从所罗门海到达赤道, 跨过赤道后, AAIW 的一部分向东流进入赤道环流, 剩下的继续沿着西边界向北流[23], 延伸到 13°N 附近[24]. Broecker 等人[13]在东印度洋 90°E 海隆采到 ^{14}C 年龄为 11000~30000 a BP 的 *Ethmodiscus rex* 的软泥沉积层, 以及 Deckker 和 Gingele[14]在 6°04.56′S, 102°25.08′E 的 BAR 9442 岩芯中发现末次冰期时期的 *Ethmodiscus rex* 硅藻软泥沉积, 认为末次冰期高硅海水通过印度尼西亚穿越流从太平洋输送到东印度洋.

另外, 现代西太平洋上层水体成层化稳定[25], 营养盐跃层厚, 很大程度上阻碍了跃层下富营养化冷水向真光层的补给, 使得混合层上部的营养盐浓度很低. Koutavas 等人[26]认为 LGM 期间热带太平洋的温度变化出现类 El Niño 现象, 这时西太平洋混合层上部水体变薄, 温跃层变浅. 我们在低纬度西太平洋采集到末次冰期 *Ethmodiscus rex* 硅藻席样品, 说明硅藻大量勃发, 这可能是由于南大洋的“硅溢漏”作用, AAIW 北扩至 15°~21°N 的研究区, 带入的富含硅酸盐的海水相对上涌所引发(图 4).

此外, 研究表明铁的输入可以使硅藻在较低的硅氮比条件下生长[27,28]. 末次冰期时西太平洋海平面下降使得大片海区出露成陆地, 以及冬季风加强[29]可以从亚洲大陆携带更多的风尘进入研究区, 而风尘是铁的主要来源. 因此研究区末次冰期时期硅藻的勃发, 可能与铁输入量的增加有关(图 4).

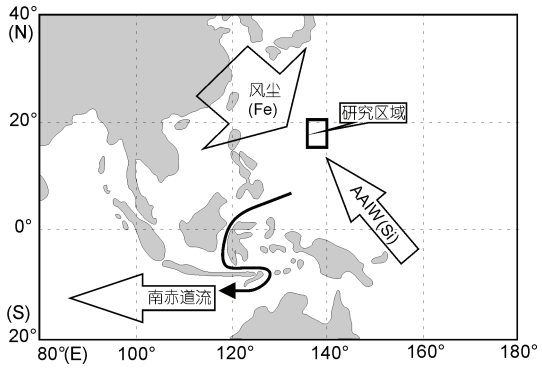


图 4 末次冰期研究区域硅藻席的形成机制

3 结论

东菲律宾海的 136°~140°E, 15°~21°N 区域存在大量硅藻席沉积, 成席藻类为 *Ethmodiscus rex*; 经 AMS ^{14}C 测年结果显示, 富含硅藻席的沉积物 ^{14}C 年龄为 16000 ~ 28600 a BP 间的末次冰期, 在其他年龄的层位并未发现硅藻席沉积. 初步分析表明末次冰期, 由于南大洋的“硅溢漏”作用, 且伴随 AAIW 北扩, 将富含硅酸盐的海水带入了研究区, 使该区域硅藻得以勃发. 同时, 铁输入的增多, 也可能是低纬度西太平洋硅藻勃发成席的原因之一.

致谢 感谢蒋辉教授和黄元辉博士提供的硅藻制片及鉴定方法, 熊志方和路波博士评阅了论文, 并提出了宝贵意见.

参考文献

1 Nelson D M, Brzezinski M A, Sigmon D E, et al. A seasonal progression of Si limitation in the Pacific sector of the Southern Ocean. Deep-Sea Res Part Ⅱ, 2001, 48: 3973—3995
2 Sarthou G, Timmermans K R, Blain S, et al. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: A review. J Sea Res, 2005, 53: 25—42
3 Bopp L, Aumont O, Cadule P, et al. Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. Geophys Res Lett, 2005, 32: L19606, doi: 10.1029/2005GL023653
4 Archer D, Winguth A, Chicago I, et al. What caused the glacial/interglacial atmospheric pCO_2 cycles? Rev Geophys, 2000, 38: 159—189
5 Goldman J C, Dennis J. McGillicuddy J. Effect of large marine diatoms growing at low light on episodic new production. Limnol Oceanogr, 2003, 48: 1176—1182
6 Kemp A E S, Pike J, Pearce R B, et al. The "Fall dump"—A new perspective on the role of a "shade flora" in the annual cycle of diatom production and export flux. Deep-Sea Res Part Ⅱ, 2000, 47: 2129—2154
7 Kemp A E S, Baldauf J G. Vast neogene laminated diatom mat deposits from the eastern equatorial Pacific Ocean. Nature, 1993, 362: 141—144
8 Kemp A E S, Baldauf J G, Pearce R B. Origins and paleoceanographic significance of laminated diatom ooze from the eastern equatorial Pacific Ocean. Proc Ocean Drill Program Sci Results, 1995, 138: 641—645
9 Grigorov I, Pearce R B, Kemp A E S. Southern Ocean laminated diatom ooze: Mat deposits and potential for palaeo-flux studies, ODP leg 177, Site 1093. Deep-Sea Res Part Ⅱ, 2002, 49: 3391—3407
10 Dickens G R, Barron J A. A rapidly deposited pennate diatom ooze in Upper Miocene-Lower Pliocene sediment beneath the North Pacific polar front. Mar Micropaleontol, 1997, 31: 177—182
11 Bodén P, Backman J. A laminated sediment sequence from the northern North Atlantic Ocean and its climatic record. Geology, 1996, 24: 507—510
12 Abrantes F. Assessing the *Ethmodiscus* ooze problem: New perspective from a study of an eastern equatorial Atlantic core. Deep-Sea Res Part Ⅰ, 2001, 48: 125—135
13 Broecker W S, Clark E, Lynch-Stieglitz J, et al. Late glacial diatom accumulation at 9°S in the Indian Ocean. Paleoceanography, 2000, 15: 348—352
14 De Deckker P, Gingele F X. 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. Mar Geol, 2002, 183: 31—43
15 Villareal T A. Abundance of the giant diatom *Ethmodiscus* in the southwest Atlantic Ocean and central Pacific gyre. Diatom Res, 1993, 8: 171—177
16 Villareal T A, Joseph L, Brzezinski M A, et al. Biological and chemical characteristics of the giant diatom *Ethmodiscus* (Bacillariophyceae) in the central North Pacific gyre. J Phycol, 1999, 35: 896—902
17 Villareal T A, McKay R M L, Al-Rshaidat M M D, et al. Compositional and fluorescence characteristics of the giant diatom *Ethmodiscus* along a 3000 km transect (28°N) in the central North Pacific gyre. Deep-Sea Res Part Ⅰ, 2007, 54: 1273—1288
18 Kemp A E S, Pearce R B, Grigorov I, et al. Production of giant marine diatoms and their export at oceanic frontal zones: Implications for Si and C flux from stratified oceans. Global Biogeochem Cycles, 2006, 20: GB4S04, doi: 10.1029/2006GB002698
19 徐兆凯, 李安春, 蒋富清, 等. 东菲律宾海沉积物的地球化学特征与物质来源. 科学通报, 2008, 53: 695—702
20 Brzezinski M, Pride C J, Franck V M, et al. A switch from $Si(OH)_4$ to NO_3^- depletion in the glacial Southern Ocean. Geophys Res Lett, 2002, 29, doi: 10.1029/2001GL014349
21 Sarmiento J L, Gruber N, Brzezinski M A, et al. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. Nature, 2004, 427: 56—60
22 Talley L D. Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations. Geophys Monogr, 1999, 112: 1—22
23 Tsuchiya M. Flow path of the Antarctic Intermediate Water in the western equatorial South Pacific Ocean. Deep-Sea Res Part A, 1991, 38: 273—279
24 Qu T, Mitsudera H, Yamagata T. A climatology of the circulation and water mass distribution near the Philippine Coast. J Phys Oceanogr, 1999, 29: 1488—1505
25 Lindstrom E, Lukas R, Fine R, et al. The western equatorial Pacific Ocean circulation study. Nature, 1987, 330: 533—537
26 Koutavas A, Lynch-Stieglitz J, Marchitto T M, et al. El Niño-Like pattern in ice age tropical Pacific sea surface temperature. Science, 2002, 297: 226—230
27 Hutchins D A, Bruland K W. Iron-limited diatom growth and Si∶N uptake ratios ina coastal upwelling regime. Nature, 1998, 393: 561—564
28 Takeda S. Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters. Nature, 1998, 393: 774—777
29 Sun X, Luo Y, Huang F, et al. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. Mar Geol, 2003, 201: 97—118