

doi:10.3799/dqkx.2010.071

低纬度西太平洋末次冰期 *Ethmodiscus rex* 硅藻席 粘土矿物特征及形成机制启示

熊志方^{1,2}, 李铁刚^{1*}, 翟 滨^{1,2}, 万世明¹, 南青云¹

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 为研究低纬度西太平洋(15°~21°N, 136°~140°E)发现的末次冰期晚期 *Ethmodiscus rex* 硅藻席形成机制, 运用 X 射线衍射、湿碱消解—ICP-OES 和高温燃烧—EA 方法分别测定了硅藻席岩心 WPD-03 中的粘土矿物、蛋白石和有机质。结果表明, WPD-03 孔中粘土矿物主要为蒙脱石(50%)和伊利石(39%), 而绿泥石(8%)、高岭石(3%)含量极低。蒙脱石主要来源于海底基性火山物质的化学蚀变, 伊利石主要来源于研究区以西陆地(中国内陆干旱区和周边岛屿), 风力输送是主要搬运途径, 绿泥石也以陆源为主。伊利石/蒙脱石、蒙脱石丰度等指示硅藻席底部发生过显著的风尘输入增强过程, 风尘携带的丰富硅和铁可能促进了 *Ethmodiscus rex* 的勃发, 致使生物硅和有机碳大规模地输出到海底, 形成硅藻席。同时, *Ethmodiscus rex* 特殊的生态学特征及对海洋环境的特殊需求可解释其勃发对风尘输入的滞后响应。“风尘输入有利硅藻席沉积”对全面认识硅藻席形成机制及正确理解硅藻席在全球碳循环和气候中的作用具有重要意义。

关键词: *Ethmodiscus rex* 硅藻席; 粘土矿物; 形成机制; 风尘输入; 西太平洋; 末次冰期。

中图分类号: P588.22

文章编号: 1000-2383(2010)04-0551-12

收稿日期: 2009-09-10

Clay Mineral Characteristics of *Ethmodiscus rex* Diatom Mats from Low-Latitude Western Pacific during the Last Glacial and Implications for Their Formation

XIONG Zhi-fang^{1,2}, LI Tie-gang^{1*}, ZHAI Bin^{1,2}, WAN Shi-ming¹, NAN Qing-yun¹

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: WPD-03 is a sediment core with the *Ethmodiscus rex* diatom mats recently reported from the low-latitude western Pacific Ocean. Clay mineral assemblages, opal and organic material contents in sediments from Core WPD-03 were measured to trace the formation of diatom mats, based on a multi-approach including X-ray diffraction, inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) with wet alkaline digestion and elemental analysis (EA) with high-temperature combustion. Clay minerals at Core WPD-03 are mainly composed of smectite (50%) and illite (39%), with extremely low contents of chlorite (8%) and kaolinite (3%). Provenance studies indicate that most smectite is derived from the chemical alteration of submarine basic volcanic materials, while illite is originated from the dry area of Chinese inland and nearby islands by the transport of wind mainly, the same as chlorite. The analysis of illite/smectite ratio and smectite abundance shows that, at the bottom of diatom mats, it recorded a remarkable strengthened eolian deposition, which imported plentiful silicon and iron to promote the bloom of *Ethmodiscus rex* probably, resulting in the export of mass biogenic silicon and organic carbon to seafloor and subsequently forming diatom mats. Special ecological characteristics of *Ethmodiscus rex* and their peculiar demands on marine environments may result in the lag response of *Ethmodiscus rex* bloom to dust inputs. Therefore, the dust input was considered to favor the formation of diatom mats. The mechanism of “dust input-diatom mats” is significant for comprehensive understanding of the mechanism of diatom mats formation and their role in global carbon cycle and climate changes.

Key words: *Ethmodiscus rex* diatom mats; clay minerals; formation; dust inputs; western Pacific; last glacial.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB815903); 国家自然科学基金项目(No. 40776031)。

作者简介: 熊志方(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事地球化学与古海洋学研究。* 通讯作者: 李铁刚, E-mail: tgli@ms.qdio.ac.cn

0 引言

硅藻席是“巨型”或“树荫”种硅藻勃发形成“藻席”迅速埋藏并由单种组成的纹层沉积。硅藻席将巨量的有机碳和生物硅输出到海底,提高海洋生物泵效率,可引起大气 p_{CO_2} 的变化,最终调节全球气候 (Kemp and Baldauf, 1993; Grigorov *et al.*, 2002)。由于取样的困难性和偶然性,全球海洋现今发现的硅藻席非常稀少 (Kemp *et al.*, 2006; Romero and Schmieder, 2006), 因而其在古海洋学中具有极其重要的研究价值和研究意义。

查明硅藻席形成机制是将其进一步应用于古环境和古海洋分析的前提。Gingele and Schmieder (2001) 和 Romero and Schmieder (2006) 认为前人对硅藻席形成机制的解释趋于复杂和多样化, 多有争议。硅藻席沉积可能是洋流(或大洋锋面)、水体环境、营养物等综合作用的结果, 其中硅藻勃发所利用营养物(硅酸、硝酸盐以及刺激元素 Fe) 的来源及循环一直是探索的关键问题 (Broecker *et al.*, 2000; Gingele and Schmieder, 2001)。目前对营养物的关注主要集中在携带营养物质或造就稳定成层环境的洋流或水团上。然而, 对于遥远的开放大洋, 风尘却是提供营养物质的另一主要途径, 其携带的铁及营养物质对海洋浮游生物生长的促进作用也非常重要。Martin (1990) 和 Harrison (2000) 分别提出的“铁假说”和“硅假说”表明风尘提供的丰富铁和硅可以

促进远洋硅藻的勃发, 从而解释冰期—间冰期尺度大气 p_{CO_2} 的变化。现代过程也记录了风尘输入增强有硅藻等浮游生物的高生产力伴随 (Yuan and Zhang, 2006)。Gingele *et al.* (2002) 虽然没有直接探讨硅藻席与风尘输入增强的关系, 但在硅藻席形成的末次冰期, 加强的东亚冬季风确实给其研究区带来了丰富的风尘。可见, 风尘可以促进硅藻勃发, 形成硅藻席。

在东菲律宾海的帕里西维拉海盆西北部 (图 1a) 发现多个岩心中存在 *Ethmodiscus rex* 硅藻席 (Zhai *et al.*, 2009), 这是硅藻席首次在低纬度西太平洋被发现。Zhai *et al.* (2009) 认为该区 *Ethmodiscus rex* 的勃发主要由南大洋的“硅溢漏”作用引发, 同时初步推测硅藻席的形成也可能与末次冰期增加的风尘铁有关。本研究选取该区一根典型的含硅藻席岩心, 分析其粘土矿物组成并结合生源组分 (TOC、TN 和 opal) 特征, 试图揭示风尘对硅藻勃发的影响, 进而探讨 *Ethmodiscus rex* 硅藻席的形成机制。

1 材料和方法

研究区位于东菲律宾海的帕里西维拉海盆西北部, 平均水深约为 4 800 m。研究区海底地形、地貌以及表层洋流格局分别见图 1a 和图 1b。岩心 WPD-03 由中国科学院海洋研究所“科学一号”考察船 2004 年在该海盆中部取得, 站位为 $17^{\circ} 19. 82' N$ 、

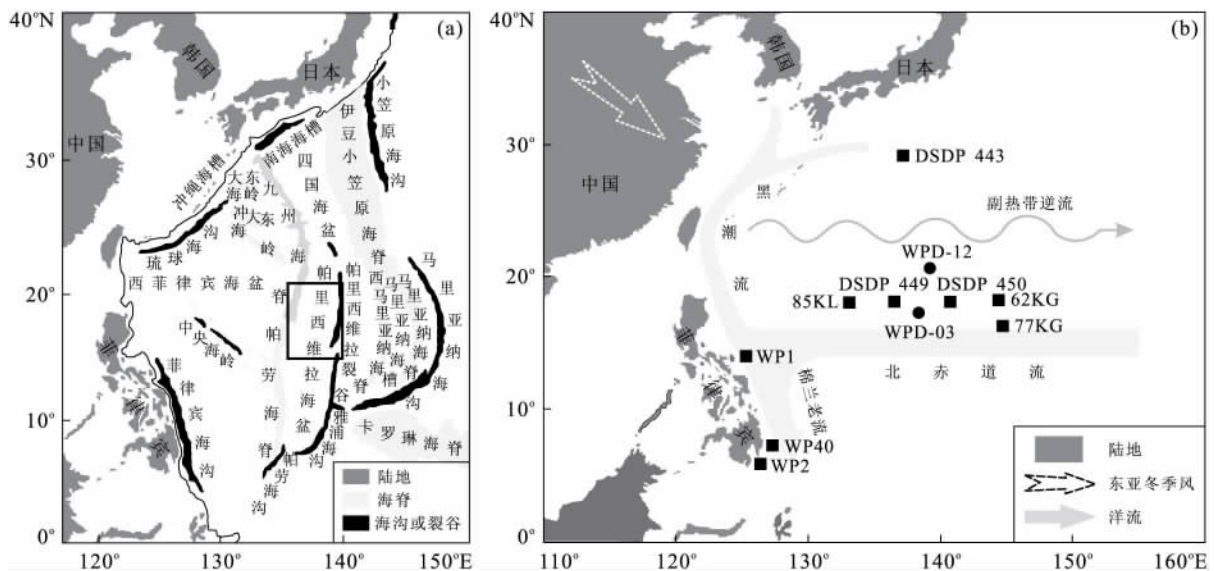


图 1 研究区海底地形(a)和洋流分布与岩心站位(b)

Fig. 1 Sketch map showing the seafloor topography (a), surface currents and cores locality (b) of the northwest Pacific
a 图据 Nagel *et al.* (1981) 改绘, 黑色方框代表硅藻席发现海区; b 图参考 Qiu (2001), 文中涉及的其他岩心也标于该图中

138°27.28'E,水深 5 250 m.岩心长 405 cm,可分为三层:0~286 cm 为硅藻席层,灰白-灰黄色硅藻纹层夹黑色的富有机质条带,扫描电镜和显微镜观测表明该层主要由成席硅藻 *Ethmodiscus rex* 碎片组成,含极少量的其他属硅藻和放射虫(Zhai *et al.*, 2009);286~334 cm 为灰黄色硅藻-远洋粘土过渡层;334~405 cm 为红褐色远洋粘土层(图 2a).另一纯硅藻席岩心 WPD-12 (20° 35.95' N, 139° 14.54' E,水深 4 954 m,全长 100 cm)用于作对比分析.

根据 WPD-03 各层位岩性及厚度,分别按 2、5 cm 和 10 cm 不等间距连续取样 137 个,经真空冷冻干燥后研磨至 200 目(约 74 μm)做下述分析.其中,选取 10 个层位的样品送美国伍兹霍尔海洋研究所 NOSAMS 中心进行沉积物总有机碳的 AMS¹⁴C 年龄测定.

粘土矿物分析采用粘土粒级组分定向薄片的 X 射线衍射法(XRD),其制备、测试方法详见万世明等(2008).粘土矿物的识别和解释主要依据 3 种测试条件(自然条件、乙二醇蒸气饱和条件(60 °C、12 h)和加热条件(550 °C、2 h)下获得的 XRD 叠加图谱的综合对比(Moore and Reynolds, 1997)(图 3).波峰参数的半定量计算使用 Topas2p 软件在乙二醇图谱上进行,粘土矿物的相对含量主要使用(001)晶面衍射峰的面积比.根据 Biscaye(1965)的计算方法,用蒙脱石(17 Å)、伊利石(10 Å)、绿泥石和高岭石(7 Å)4 种矿物的 3 个特征峰面积分别乘以其权重强度因子 1、4、2 作为各自的含量,进一步用绿泥石(004)晶面(3.54 Å)和高岭石的(002)晶面

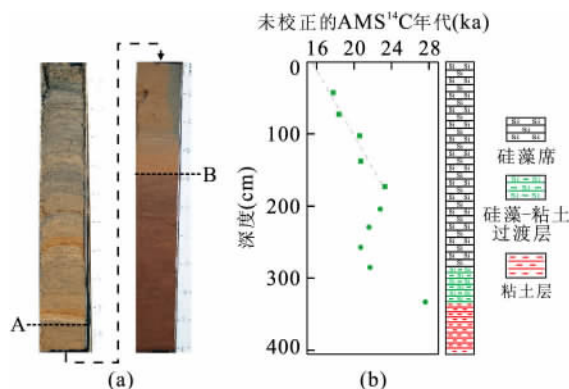


图 2 WPD-03 岩心照片(a)及沉积物总有机质 AMS¹⁴C 年代(b)

Fig. 2 Lithology and AMS¹⁴C date based on bulk organic matter of Core WPD-03

a 为 A 线以上 195~286 cm 的硅藻席;A 线与 B 线之间为 286~334 cm 的硅藻-粘土过渡层;b 为 B 线以下 334~395 cm 的远洋粘土层

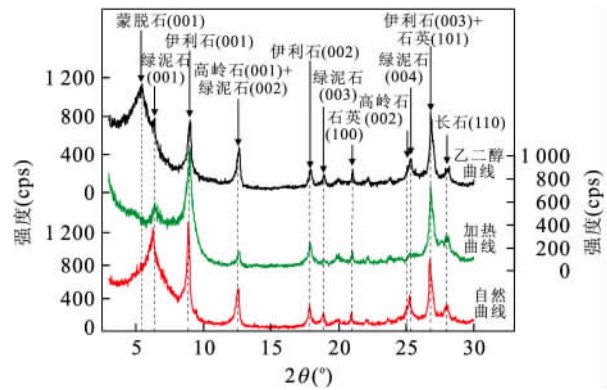


图 3 WPD-03 岩心典型样品的 X 射线衍射叠加图谱
Fig. 3 X-ray diffraction patterns of the typical sample from Core WPD-03

乙二醇饱和和蒸汽条件为 60 °C、12 h;加热条件为 550 °C、2 h

(3.58 Å)衍射峰面积比求得两者的相对含量,最后 4 种矿物的总含量归一为 100%.同时,利用乙二醇曲线图谱上 17 Å/10 Å 峰高比计算蒙脱石丰度(Chamley, 1989);5 Å/10 Å 峰面积比计算伊利石化学指数(Esquevin, 1969);10 Å 半峰宽(FWHM)作为伊利石的结晶度(Chamley, 1989).另外,基于 Petschick *et al.* (1996)的方法求得蒙脱石和伊利石以积分宽度(IB)表示的结晶度.

蛋白石(opal)分析的前处理参考 Mortlock and Froelich(1989)的湿碱消解法.准确称取一定量干样,用 5 mL 10%的 H₂O₂ 除去有机质;用 5 mL 1 mol/L 的盐酸除去碳酸钙;离心滤出上层清液后,向底层烘干的残留固体中准确加入 30 mL 2 mol/L 的碳酸钠溶液提取出可溶硅溶液,在美国产 iCAP 6300 radial 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)上测试.结果以 opal(%) = 2.4 × Si_{opal}(%) 换算成蛋白石含量,方法的精密度(RSD)优于 8.9%.

有机碳(TOC)和总氮(TN)分析采用高温燃烧法.称取约 0.3 g 干样在 -44 °C 下真空冷冻 48 h 后称重,加入 3 mL 1 mol/L 的盐酸除去碳酸盐,再次在 44 °C 下真空冷冻 60 h 后称重,样品研磨混匀,取适量样品在意大利产 EA3000 型元素分析仪上测试.结果以碳、氮元素质量百分含量形式表述,方法的精密度(RSD)对于 TOC 小于 5.3%;对于 TN 小于 3.3%.

2 结果

2.1 AMS¹⁴C 年代

由于使用沉积物总有机碳来测定放射性年龄以及出现年龄倒置现象,同时考虑到硅藻席作为快速

堆积的类似事件层的沉积,故没有将 AMS¹⁴C 测年数据校正为日历年(图 2b). 虽然没有测试硅藻席最顶部年龄,但我们认为硅藻席应形成于全新世之前,其顶部并不能代表原始沉积物的最表层(即 0 a). 这是因为:(1) *Ethmodiscus rex* 硅藻席还未见报道于全新世海洋沉积序列中(De Deckker and Gingele, 2002). (2) WPD-03 孔附近的 DSDP 449 和 DSDP 450 站位最上部也报道过类似的 *Ethmodiscus rex* 硅藻软泥,据与其共生的放射虫化石带年龄判断其形成于更新世末期(Martini, 1981). (3) 研究区正常远洋粘土沉积速率为 1.38 mm/ka(Xu *et al.*, 2008),如此低沉积速率形成的薄层全新世沉积物很容易在底流作用下形成类似雾状层的物质而缺失. (4) 据硅藻上部正常年龄拟合的最顶部年龄也未到全新世(图 2b). 另外,硅藻席下层存在明显的 AMS¹⁴C 测年倒置现象,硅藻席或富蛋白石海洋沉积物 AMS¹⁴C 年代的倒置已经报道过(Broecker *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2002),可能原因有:(1) 总沉积物有机质包括异地有机质从而导致测年出现偏差,这些异地有机质可能来自疏松多孔蛋白石的吸附以及洋流的侧向搬运. (2) 测试过程中蛋白石对空气中微量新碳的吸附也能造成测年偏差(Zheng *et al.*, 2002). (3) 硅藻席在早期成岩过程中下部有机质降解形成的老碳运移到上部也能造成年代出现倒置. 然而,这些因素都没有表明沉积序列本身发生过倒转. WPD-03 孔 9 个硅藻席 AMS¹⁴C 年龄介于 17 800~23 300 a,结合研究区另外 14 个岩心中硅藻席的 AMS¹⁴C 测年结果(16 050~28 600 a),表明研究区 *Ethmodiscus rex* 硅藻席形成于末次冰期晚期,且集中于末次盛冰期(Zhai *et al.*, 2009),这一形成时期与 Broecker *et al.* (2000) 和 De Deckker and Gingele(2002) 报道的赤道印度洋附近的 *Ethmodiscus rex* 硅藻席年代一致.

2.2 粘土矿物组成与结晶学参数

WPD-03 孔中小于 2 μm 的矿物主要由蒙脱石、伊利石、绿泥石和高岭石 4 种粘土矿物和少量的石英、长石等非粘土矿物组成. 粘土矿物中蒙脱石和伊利石是主控组分,平均含量分别为 50% 和 39%;绿泥石和高岭石含量极低,平均为 8% 和 3%(图 4,表 1,2). 垂向上,在远洋粘土层,蒙脱石含量(或丰度)缓慢减少,伊利石、绿泥石含量逐渐增加;在过渡层,蒙脱石含量(或丰度)显著减少,伊利石含量显著增加,绿泥石含量略有增加;在硅藻席层,蒙脱石含量(或丰度)、伊利石和绿泥石含量基本趋于稳定;而在

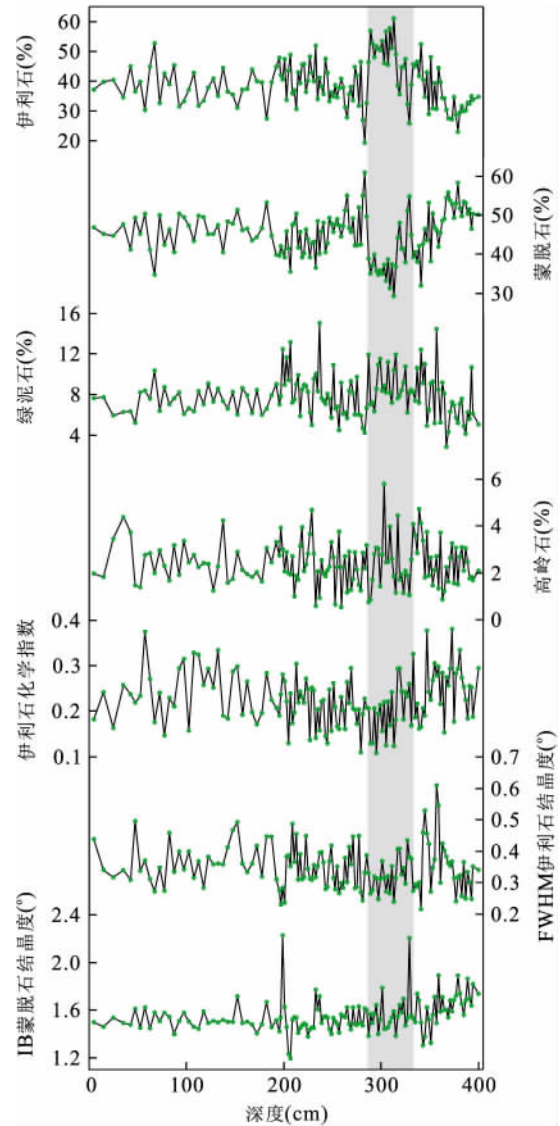


图 4 WPD-03 岩心粘土矿物组成及结晶学参数

Fig. 4 Assemblages and crystallinity parameters of mineral clays from Core WPD-03

阴影标示硅藻-粘土过渡层

整个岩心中,微量的高岭石含量保持不变. 总体上,伊利石与蒙脱石呈强烈负相关,表明两者此消彼长的镜像关系及物源的差异;绿泥石与伊利石有较弱的正相关,与蒙脱石有较弱的负相关,暗示伊利石和绿泥石物源可能相同(图 5).

伊利石化学指数指示其风化程度,进而示踪物源与气候变化(Ehrmann, 1998). 伊利石化学指数大于 0.5 时为高度风化的富 Al 伊利石,代表强烈的水解条件;小于 0.5 时为未风化的富 Fe-Mg 伊利石(云母),代表物理风化的结果(Gingele, 1996). WPD-03 孔伊利石化学指数为 0.11~0.38,平均为 0.23,表明其为富 Fe-Mg 伊利石,产于强烈的物理风

表 1 WPD-03 岩心各层段粘土矿物含量与结晶学参数、有机质和蛋白石含量

Table 1 Contents and crystallinity parameters of mineral clays, and contents of organic matter and opal from each layer in Core WPD-03

层位	深度 (cm)	粘土矿物					有机质				蛋白石 (%)			
		伊利石 (%)	蒙脱石 (%)	绿泥石 (%)	高岭石 (%)	伊利石化学指数	伊利石结晶度 (°) FWHM	伊利石结晶度 (°) IB	蒙脱石结晶度 (°)	TOC (%)		TOC/AI	TN (%)	TN/AI
硅藻席层	0~286	39* 19~53	51 35~74	8 4~15	3 1~5	0.22 0.11~0.37	0.35 0.23~0.50	0.54 0.38~0.80	1.51 1.19~1.77	0.23 0.10~0.35	0.118 0.042~0.382	0.03 0.02~0.06	0.016 0.007~0.057	55.2 26.8~75.9
硅藻-粘土过渡层	286~334	47 26~61	41 26~65	9 6~12	3 1~7	0.20 0.11~0.33	0.32 0.24~0.43	0.50 0.39~0.67	1.55 1.38~2.21	0.23 0.15~0.32	0.036 0.018~0.052	0.06 0.04~0.08	0.009 0.005~0.013	21.2 4.0~40.9
粘土层	334~405	35 23~52	55 31~70	7 3~15	3 1~5	0.25 0.15~0.38	0.35 0.22~0.61	0.53 0.37~0.71	1.63 1.30~1.89	0.11 0.09~0.14	0.011 0.013~0.017	0.03 0.03~0.04	0.004 0.003~0.005	3.50 1.5~5.8
整个岩心	0~405	39 19~61	50 26~74	8 3~15	3 1~7	0.23 0.11~0.38	0.35 0.22~0.61	0.53 0.37~0.80	1.55 1.19~2.21	0.20 0.09~0.35	0.079 0.013~0.052	0.04 0.02~0.08	0.012 0.003~0.057	37.2 1.5~75.9

* 指各层段平均值; ° 指各层段范围值。

表 2 研究区及周边地区粘土矿物含量及结晶学参数对比

Table 2 Comparison of contents and crystallinity parameters of clay minerals from area studied and its vicinity

研究区	样品描述	粘土矿物 (%)					IB 结晶度 (°)				数据来源			
		伊利石	蒙脱石	绿泥石	高岭石	伊利石	伊利石	蒙脱石	蒙脱石	蒙脱石				
中国内陆干旱区	黄土	78	1	15	6	0.46	0.49	—	—	—	—	—	万世明等, 2008	
	冲绳海槽	61	6	25	7	—	—	—	—	—	—	—	李国刚, 1990	
	四国海盆	57	11	25	7	—	—	—	—	—	—	—	Nagel <i>et al.</i> , 1981	
	中国台湾	69	0	30	1	0.25	—	—	—	—	—	—	万世明等, 2008	
菲律宾吕宋岛	吕宋河样品	4	77	4	16	—	—	—	—	—	—	—	Liu <i>et al.</i> , 2008	
	表层样, 代表吕宋岛	21	46	24	9	0.33	1.33	—	—	—	—	—	万世明等, 2008	
	WP1 柱样 (平均值), 靠近吕宋岛	16	37	25	23	—	—	—	—	—	—	—	—	
	WP40 柱样 (平均值), 西临棉兰老岛	7	56	20	18	—	—	—	—	—	—	—	石学法等, 1995	
西非律宾海	WP2 柱样 (平均值), 西临棉兰老岛	7	54	20	19	—	—	—	—	—	—	—	—	
	85KL 表层样, 海盆东侧	56	24	15	5	—	—	—	—	—	—	—	—	张德玉, 1993
	表层沉积物 (平均值)	47	35	10	7	—	—	—	—	—	—	—	—	靳宁等, 2007
	WPD-12 柱样 (平均值)	53	36	8	3	0.61	1.56	—	—	—	—	—	—	—
帕里西维拉海盆	WPD-03 柱样 (平均值)	39	50	8	3	0.53	1.55	—	—	—	—	—	—	—
	62KG 表层样, 海槽北部	9	79	12	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
马里亚纳海槽	77KG 表层样, 海槽南部	4	87	9	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
														张德玉, 1994

= 便于对比, 表中吕宋河样品数据依据 Biscaye(1965)的粘土矿物相对含量计算方法做了重新计算。

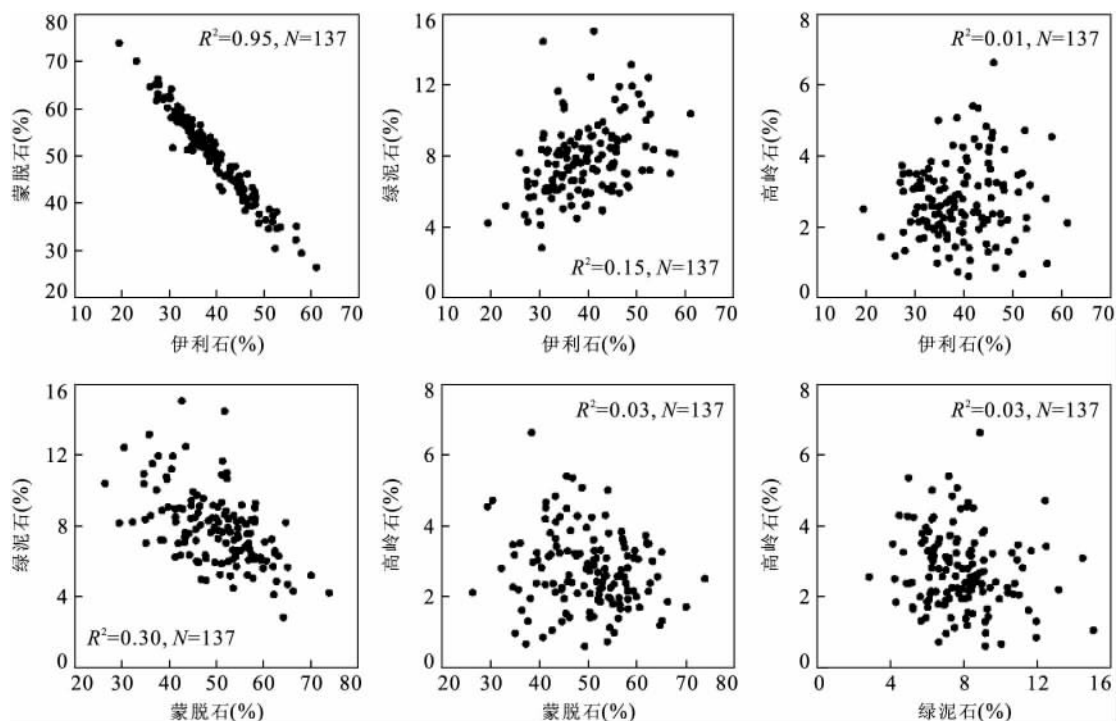


图 5 WPD-03 岩心各粘土矿物间的相关性

Fig. 5 Correlation of four clay minerals in Core WPD-03

化作用. 结晶度用来表征粘土矿物的有序度和晶体颗粒的大小. 以 FWHM 表示的伊利石结晶度值越低, 代表结晶度越高, 指示陆地物源区水解作用弱, 气候条件干冷 (Chamley, 1989). WPD-03 孔伊利石结晶度 (FWHM) 为 $0.22^{\circ}\sim 0.61^{\circ}$, 平均为 0.35° , 也表明其形成于物理风化较强的气候环境. 以 IB 表示的伊利石结晶度为 $0.37^{\circ}\sim 0.80^{\circ}$, 平均为 0.53° ; 以 IB 表示的蒙脱石结晶度为 $1.19^{\circ}\sim 2.21^{\circ}$, 平均为 1.55° . 按照 Ehrmann (1998) 提出的基于 IB 的伊利石和蒙脱石结晶度分类: WPD-03 孔的伊利石结晶度好, 蒙脱石结晶度中等. 垂向变化上, 伊利石化学指数、结晶度除在过渡层时期有减小趋势外, 基本保持稳定; 而蒙脱石结晶度在整个岩心中维持不变 (图 4, 表 1).

2.3 TOC、TN 和 opal

TOC、TN 总体上表现出与 opal 相似的变化趋势, 但对应的 3 个层段内部变化却又不同 (表 1, 图 6~8), 表现出非线性相关的特征 (图 6). 相关性体现了远洋有机质主要来源于原地硅藻等生物体的生产; 而非线性主要由于粒度效应、稀释效应、差异溶解效应以及生态、生理效应, 堆积的 opal 与有机质往往是不耦合或非线性的 (Anderson *et al.*, 1998; Ragueneau *et al.*, 2000). 由于硅藻席的 opal 含量太高, 严重稀释了有机质, 掩盖了原始含量携带

的真实信息. 鉴如此, Al 或 Ti 标准化后的 TOC、TN 数据能减小稀释效应, 还能起到通量的作用 (Murray *et al.*, 2000). 标准化前的 TOC、TN 与 opal 的相关性较弱, 标准化后相关性增强 (图 6). 另外, WPD-03 孔的 C/N (质量比) 为 2.7~11.6, 平均为 5.7; 而陆源有机质的 C/N 大于 12, 平均约为 29; 典型的 C3 维管植物约为 20 甚至更大, C4 草本植物在 30 以上; 海源有机质 C/N 一般小于 10, 海洋藻类为 5.5~9.0, 海洋颗粒有机质为 4~10 (Lamb *et al.*, 2006). 这表明有机质来自于海洋, 与研究区处于开放大洋的环境相符. 岩心的 C/N 与硅藻来源有机质 C/N (6.6) (Parsons *et al.*, 1961) 和硅藻圈闭有机质 C/N (3~7) (Crosta *et al.*, 2002) 相近, 进一步表明岩心中有机质主要来自于硅藻. 结合校正后的 TOC、TN 与 opal 较强的相关性, 可以判定 WPD-03 孔中有机质总体上表征硅藻有机质的特征.

粘土层的 opal 维持在极低的水平, 平均为 3.5%; 过渡层 opal 开始增加, 且个别层位已达硅藻席态势, 但大多维持在 21.2% 的平均水平上; 硅藻席 opal 含量极高, 平均为 55.2%, 但明显可以分为 2 个阶段: 196~286 cm, opal 波动频繁, 总体呈增加趋势; 0~196 cm, opal 波动较小, 总体维持稳定 (图 8). 硅藻席内部的 opal 两阶段变化同样表现在有机质上 (图 7). 生源组分的堆积是其生产和溶解的函

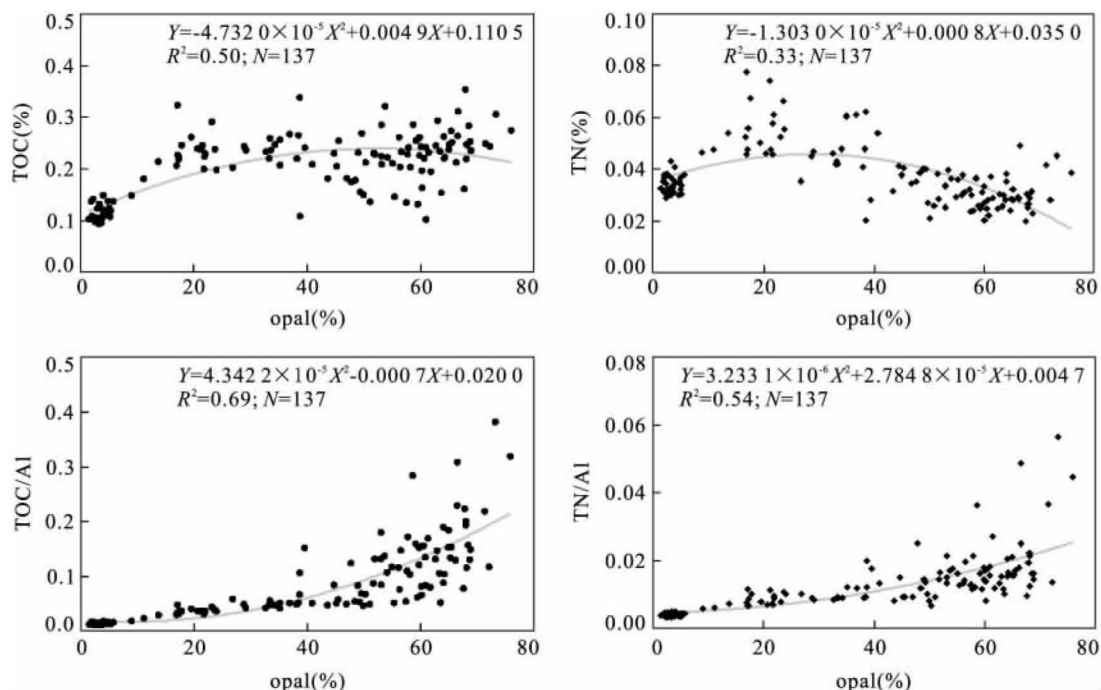


图 6 WPD-03 岩心经 Al 标准化前后的 TOC(或 TN)-opal 拟合

Fig. 6 Poly-fit diagram between TOC (or TN) and opal before and after normalized by Al in Core WPD-03

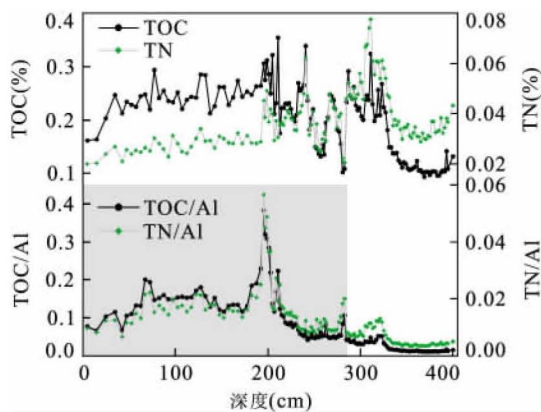


图 7 WPD-03 岩心经 Al 标准化前后的 TOC 和 TN 含量
Fig. 7 Contents of TOC and TN before and after normalized by Al in Core WPD-03

阴影标示硅藻席

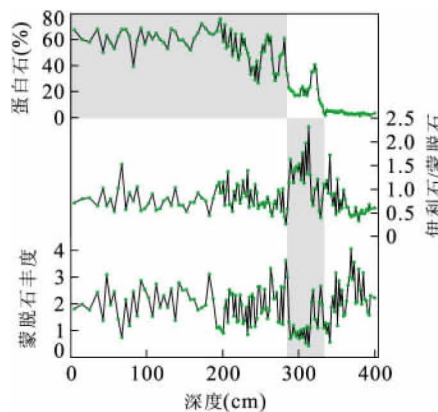


图 8 WPD-03 岩心蒙脱石、蛋白石含量和伊利石/蒙脱石
Fig. 8 Smectite abundance, opal content and illite/smectite ratio of Core WPD-03

上部阴影标示硅藻席;下部阴影标示硅藻-粘土过渡层

数(Gingele and Schmieder, 2001; Gingele *et al.*, 2002),据现有资料很难断定到底是生产还是溶解导致了硅藻席内部的两阶段模式。

3 讨论

3.1 粘土矿物的成因与来源

Kolla *et al.* (1980)、徐兆凯等(2007)和靳宁等(2007)先后对东菲律宾海以及帕里西维拉海盆表层沉积物粘土矿物做过系统研究,现已基本查明该区

4 种粘土矿物的成因与来源:伊利石为陆源碎屑成因,主要来源于研究区以西陆地(中国内陆干旱区和周边岛屿),风力输送是其主要搬运途径;蒙脱石主要为海洋自生成因,由原地拉斑玄武岩或火山灰海解而来;绿泥石与高岭石都为陆源碎屑成因.本文数据也支持上述成因与来源,在此不作赘述,只对伊利石的风尘来源作进一步探讨。

伊利石主要来源于中国北方干旱地区的风尘物质. WPD-03 孔伊利石化学指数及结晶度表明其形成于冷气候条件下的物理风化,正好符合中国北

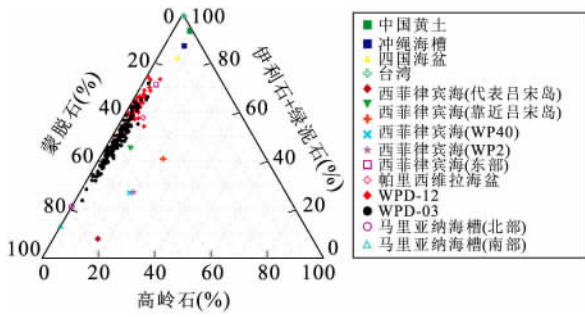


图 9 研究区及周边地区粘土矿物三角图

Fig. 9 Ternary diagram of clay minerals from area studied and its vicinity

方干旱地区气候特征. WPD-03 孔伊利石以 FWHM 表示的结晶度($0.22^{\circ}\sim 0.61^{\circ}$, 平均为 0.35°)接近于 Ji *et al.* (1999) 报道的中国内陆黄土 ($0.22^{\circ}\sim 0.33^{\circ}$)、古土壤 ($0.22^{\circ}\sim 0.42^{\circ}$) 的结晶度; 以 IB 表示的结晶度 ($0.37^{\circ}\sim 0.80^{\circ}$, 平均为 0.53°) 也接近于万世明等 (2008) 报道的中国黄土 (0.46°) 以及彭淑贞和郭正堂 (2007) 报道的第四纪黄土 ($0.3^{\circ}\sim 0.4^{\circ}$) 和古土壤 ($0.35^{\circ}\sim 0.50^{\circ}$) 的结晶度, 这表明伊利石来源与中国黄土强烈关联. 从北太平洋远洋沉积物提取的风尘组分中粘土矿物的含量大于 70%, 且主要为伊利石, 由东亚冬季风从中亚干旱地区携带而来 (Pettke *et al.*, 2000); 在北太平洋收集的矿物气溶胶 $<2\ \mu\text{m}$ 组分中伊利石含量占主导地位, 最高可达 87% (Arnold *et al.*, 1998), 这些都表明伊利石完全可以由充足物源的风尘携带而来. 而中国黄土—冲绳海槽 (李国刚, 1990)—四国海盆 (Nagel *et al.*, 1981)—西菲律宾海 (石学法等, 1995; Liu *et al.*, 2008)—帕里西维拉海盆 (研究区)—马里亚纳海槽 (张德玉, 1993, 1994) 一线, 伊利石含量逐渐降低 (表 2, 图 9), 与季风携带物质的方向及方式非常吻合, 也从总体上暗示了伊利石来源于风尘.

3.2 粘土矿物指示的风尘输入增强

图 4 展示的粘土矿物含量曲线中最显著的特征是过渡层时期伊利石相对含量明显增大, 而蒙脱石含量明显减小. 这期间, 伊利石和蒙脱石的变幅非常接近, 分别可达 35% 和 38%, 与伊利石和蒙脱石相比, 绿泥石有轻微增加, 高岭石几乎不变. 显然, 伊利石和蒙脱石两者必有其一控制了这种镜像关系, 下面从物源、物源区气候、搬运路径上对比分析. 物源上, 伊利石来源于东亚干旱地区, 而蒙脱石来源于海底火山物质, 且末次冰期以来研究区及周边区火山活动基本停止 (Scott *et al.*, 1980), 可见两者物源

都比较稳定. 物源区气候可由结晶度和化学指数 (Ehrmann, 1998) 指示. 蒙脱石的结晶度在整个岩心中基本保持不变, 这表明形成蒙脱石的海底物化条件没有发生明显变化; 而伊利石的化学指数和结晶度虽然在整个岩心中变化不大, 但在过渡层有减小趋势, 这表明过渡层时期气候更干冷、物理风化加强, 更多的伊利石生成被风搬到研究区. 搬运路径上, WPD-03 孔所处的帕里西维拉海盆中部比较平坦, 过渡层的蒙脱石不会因为地形因素产生重力垮塌得以损失, 而伊利石的气源输送受控于气候、大气环流等诸多因素, 更容易变化. 综合认为, 过渡层时期风尘输入增强导致伊利石含量显著增加并主控了这种模式.

由于粘土矿物来源的不同以及相互间的稀释效应, 采用粘土矿物间含量的比值而非单个矿物的含量来做替代性指标能促进对问题的解译 (Gingele *et al.*, 2001). 这里, 用伊利石/蒙脱石来指示风尘输入的状况, 其值越大表明风尘输入增强, 值越小风尘输入减弱. 蒙脱石丰度是一个不依赖于粘土矿物含量的独立变化指标 (Robinson, 1986), 用于表征蒙脱石和伊利石来源的相对重要性 (Chamley, 1989), 其值越低伊利石相对蒙脱石的来源越重要, 即风尘输入越强; 其值越高, 风尘输入越弱. 因此在过渡层时期, 伊利石/蒙脱石的极高值和蒙脱石丰度的极低值都指示了一个显著的风尘输入增强时期.

3.3 风尘输入有利 *Ethmodiscus rex* 勃发, 促进硅藻席沉积

伊利石/蒙脱石、蒙脱石丰度以及蛋白石含量综合显示, 在过渡层时期发生了显著的风尘输入增强过程, 随后便沉积了硅藻席 (图 8), 这充分表明这次风尘输入可能促进了硅藻的勃发, 进而形成硅藻席纹层沉积. 关于风尘输入提高海洋浮游生物初级生产力, 已从海底沉积物 (Calvo *et al.*, 2004)、捕获器 (Yuan and Zhang, 2006) 和自动剖面浮标 (Bishop *et al.*, 2002) 得到证实, 但还未见对在硅藻席这种高生物生产量的快速堆积体中的直接报道.

在南大洋、亚北极太平洋和赤道太平洋等开放大洋高氧低能 (HNLC) 区域的施铁试验证明, 铁受限会抑制浮游植物的生长或勃发, 阻止硝酸盐的充分利用, 进而影响浮游植物种群的组成 (De Baar *et al.*, 2005). 风尘供铁和上升流供铁是开放大洋的 2 种供铁方式, 其中从供铁总量以及供铁效率上来看, 风尘供铁是最主要的供铁方式 (Jickells *et al.*, 2005), 风尘中铁的含量可达 10%~15% (Young *et*

al., 1991). 研究区并不是上升流活跃地区, 而 WPD-03 孔过渡层时期风尘携带的铁正好促进了紧随其后的硅藻席勃发. 由于沉积物中铁形态的多样性及复杂性, 现在还不能分离或分辨出刺激硅藻勃发的那部分铁, 用来作为风尘供铁刺激生物生产的证据. 然而铁影响硅藻勃发的生理效应为: 铁富集时, C 和 N 相对于 Si 摄入多, 硅壳较薄; 铁亏损时, C 和 N 相对于 Si 摄入少, 硅壳较厚 (Crosta *et al.*, 2002), 这样硅藻有机碳和氮的变化可以作为供铁的间接证据. 南大洋风尘输入的峰值往往对应于硅藻圈闭 TOC、TN 的峰值也证明了这点 (Crosta *et al.*, 2005). WPD-03 孔中以 Al 标准化的 TOC、TN 在硅藻席阶段明显高于非硅藻席阶段 (图 7), 也表明风尘供铁确实刺激 *Ethmodiscus rex* 勃发.

另外, 虽然风尘供硅不是世界大洋硅的主要来源, 但对于河流输硅很难触及的远洋, 风尘硅却是重要硅来源 (Duce *et al.*, 1991), 充足的可溶硅是硅藻勃发的物质基础, 而 WPD-03 孔过渡层富铝硅酸盐的风尘可以为硅藻勃发合成硅壳提供物质保证. 当然, 南大洋“硅溢漏”作用带入的深部硅可能是引发研究区硅藻勃发的另一主要硅来源 (Zhai *et al.*, 2009).

值得注意的是, 与南大洋、赤道大洋等海区硅藻生产迅速响应风尘输入 (Erickson *et al.*, 2003) 不同的是, WPD-03 孔硅藻勃发却没有发生在风尘输入增强的过渡层时期, 而是紧随其后, 尽管过渡层时期的硅藻生产也有大幅度提高. 这主要归因于成席硅藻生态因素的特殊性及其勃发的特殊环境需求. 与一般能生长在动荡水体中的表层春季勃发种 (Spring bloom) 不同的是, *Ethmodiscus rex* 是适宜在稳定水体 (成层化) 中生存的次表层秋季倾斜种 (Fall dump) (Kemp *et al.*, 2000). 这样风尘提供的铁和硅到达海洋表层后并不能像春季勃发种那样直接被 *Ethmodiscus rex* 吸收, 要么经一定的物理、化学循环过程直接到达次表层, 要么经过生物的一分解等生物地化过程到达次表层, 被 *Ethmodiscus rex* 利用. 另外, 生物利用的是可溶性铁和硅, 但风尘中可溶铁仅占总铁的 10%, 可溶硅仅占 5% (Duce *et al.*, 1991), 显然供给 *Ethmodiscus rex* 利用的铁和硅应主要是由进一步生物化学转化而来. 而上述铁和硅向次表层的输运以及向可溶性的转化的过程是需要时间的. 目前, 还很难评估这些过程所需要的时间, 但铁和硅在海洋的滞留时间分别为 30 a (Toggweiler, 1999) 和 15 000 a (Tréguer *et al.*, 1995), 虽然上述过程并不能完全用滞留时间

来解释, 但至少暗示这一滞后时间可以发生在千年到万年尺度上. 另外, 风尘输入增强时必是季风加强期, 而加强的季风会破坏成层化的水体, 也抑制了 *Ethmodiscus rex* 在过渡层时期的勃发. 而过渡层时期生物硅的增多很可能是表层春季勃发种迅速响应风尘输入的结果.

4 结论

运用 X 射线衍射、湿碱消解—ICP-OES 和高温燃烧—EA 分析技术对东菲律宾海的帕里西维拉海盆西北部含 *Ethmodiscus rex* 硅藻席岩心 WPD-03 中粘土矿物组成、结晶学特征和生源组分 (opal、TOC 和 TN) 进行了研究, 分析了粘土矿物的物质来源及其对硅藻席形成机制的启示.

(1) WPD-03 孔粘土矿物组合特征为伊利石和蒙脱石占主导地位, 绿泥石和高岭石含量极低, 伊利石和蒙脱石的相对含量控制了该孔粘土矿物组合的垂向变化. 垂向上, 伊利石在过渡层时期相对含量明显增大, 而蒙脱石明显减少; 绿泥石含量在该孔中轻微增加, 高岭石则保持不变. 伊利石化学指数小、结晶度好, 蒙脱石结晶度中等. 垂向上, 伊利石化学指数、结晶度值除在过渡层时期轻微减小外, 基本保持稳定; 而蒙脱石结晶度值在该孔维持不变.

(2) 物源分析表明伊利石主要来源于中国内陆干旱区 (或研究区周边岛屿), 由风尘携带至研究区; 蒙脱石主要来源于海底原地玄武质火山物质的化学蚀变; 绿泥石很可能也来源于来自中国内陆的风尘物质.

(3) 伊利石/蒙脱石、蒙脱石丰度以及蛋白石含量表明在过渡层时期发生过显著的风尘输入增强过程, 紧随其后便沉积了硅藻席. 进一步研究表明, 风尘携带的硅为 *Ethmodiscus rex* 勃发提供充足的营养来源, 而携带的铁刺激了 *Ethmodiscus rex* 勃发, 从而促进硅藻席形成. *Ethmodiscus rex* 的生态特殊性以及对环境的特殊需求可能导致了硅藻席的形成滞后于风尘输入增强时期.

References

- Anderson, R. F., Kumar, N., Mortlock, R. A., et al., 1998. Late-Quaternary changes in productivity of the Southern Ocean. *Journal of Marine Systems*, 17 (1-4): 497-514. doi:10.1016/S0924-7963(98)00060-8
- Arnold, E., Merrill, J., Leinen, M., et al., 1998. The effect

- of source area and atmospheric transport on mineral aerosol collected over the North Pacific Ocean. *Global and Planetary Change*, 18(3-4): 137-159. doi: 10.1016/S0921-8181(98)00013-7
- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7): 803-832. doi: 10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2
- Bishop, J. K. B., Davis, R. E., Sherman, J. T., 2002. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 298(5594): 817-821. doi: 10.1126/science.1074961
- Broecker, W., Clark, E., Lynch-Stieglitz, J., et al., 2000. Late glacial diatom accumulation at 9° S in the Indian Ocean. *Paleoceanography*, 15(3): 348-352. doi: 10.1029/1999PA000439
- Calvo, E., Pelejero, C., Logan, G. A., et al., 2004. Dust-induced changes in phytoplankton composition in the Tasman Sea during the last four glacial cycles. *Paleoceanography*, 19(2): PA2020. doi: 10.1029/2003PA000992
- Chamley, H., 1989. *Clay Sedimentology*. Springer, Berlin.
- Crosta, X., Shemesh, A., Etourneau, J., et al., 2005. Nutrient cycling in the Indian sector of the Southern Ocean over the last 50,000 years. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(3): GB3007. doi: 10.1029/2004GB002344
- Crosta, X., Shemesh, A., Salvignac, M. E., et al., 2002. Late Quaternary variations of elemental ratios (C/Si and N/Si) in diatom-bound organic matter from the Southern Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(9-10): 1939-1952. doi: 10.1016/S0967-0645(02)00019-X
- De Baar, H. J. W., Boyd, P. W., Coale, K. H., et al., 2005. Synthesis of iron fertilization experiments: from the iron age in the age of enlightenment. *Journal of Geophysical Research*, 110(C9): C09S16. doi: 10.1029/2004JC002601
- 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(1-4): 31-43.
- Duce, R. A., Liss, P. S., Merrill, J. T., et al., 1991. The atmospheric input of trace species to the world ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 5(3): 193-259. doi: 10.1029/91GB01778
- Ehrmann, W., 1998. Implications of Late Eocene to Early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 139(3-4): 213-231. doi: 10.1016/S0031-0182(97)00138-7
- Erickson III, D. J., Hernandez, J. L., Ginoux, P., et al., 2003. Atmospheric iron delivery and surface ocean biological activity in the Southern Ocean and Patagonian region. *Geophysical Research Letters*, 30(12): 1609. doi: 10.1029/2003GL017241
- Esquevin, J., 1969. Influence de la composition chimique des illites sur cristallinité. *Bulletin du Centre de Recherches Pau-SNPA*, 3(1): 147-153.
- Gingele, F. X., 1996. Holocene climatic optimum in South-west Africa—Evidence from the marine clay mineral record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 122(1-4): 77-87. doi: 10.1016/0031-0182(96)00076-4
- 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. doi: 10.1016/S0031-0182(01)00489-8
- 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(3-4): 135-146. doi: 10.1016/S0025-3227(01)00194-3.
- Gingele, F. X., Schneider, F., 2001. Anomalous South Atlantic lithologies confirm global scale of unusual mid-Pleistocene climate excursion. *Earth and Planetary Science Letters*, 186(1): 93-101. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00234-5
- Grigorov, I., Pearce, R. B., Kemp, A. E. S., 2002. Southern Ocean laminated diatom ooze: mat deposits and potential for palaeo-flux studies, ODP leg 177, Site 1093. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(16): 3391-3407. doi: 10.1016/S0967-0645(02)00089-9
- Harrison, K. G., 2000. Role of increased marine silica input on paleo- $p\text{CO}_2$ levels. *Paleoceanography*, 15(3): 292-298. doi: 10.1029/1999PA000427
- Ji, J. F., Chen, J., Lu, H. Y., 1999. Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, Central China. *Clay minerals*, 34(4): 525-532.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., et al., 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308(5718): 67-71. doi: 10.1126/science.1105959

- Jin, N., Li, A. C., Liu, H. Z., et al., 2007. Clay minerals in surface sediment of the northwest Parece Vela basin; distribution and provenance. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 38 (6): 504–511 (in Chinese with English abstract).
- Kemp, A. E. S., Baldauf, J. G., 1993. Vast Neogene laminated diatom mat deposits from the eastern equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 362: 141–144. doi: 10. 1038/362141a0
- Kemp, A. E. S., Pearce, R. B., Grigorov, I., et al., 2006. The production of giant marine diatoms and their export at oceanic frontal zones; implications for Si and C flux from stratified oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(4): GB4S04. doi: 10. 1029/2006GB002698
- Kemp, A. E. S., Pike, J., Pearce, R. B., et al., 2000. 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 Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47 (9–11): 2129–2154. doi: 10. 1016/S0967-0645(00)00019-9
- Kolla, V., Nadler, L., Bonatti, E., 1980. Clay mineral distributions in surface sediments of the Philippine Sea. *Oceanologica Acta*, 3(2): 245–250.
- Lamb, A. L., Wilson, G. P., Leng, M. J., 2006. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth Science Reviews*, 75 (1–4): 29–57. doi: 10. 1016/j. earscirev. 2005. 10. 003
- Li, G. G., 1990. Composition, distribution and geological significance of clay minerals from surface sediments of Chinese marginal sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 12(4): 470–479 (in Chinese).
- Liu, Z. F., Tuo, S. T., Colin, C., et al., 2008. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Marine Geology*, 255 (3–4): 149–155. doi: 10. 1016/j. margeo. 2008. 08. 003
- Martin, J. H., 1990. Glacial-interglacial CO_2 change; the iron hypothesis. *Paleoceanography*, 5 (1): 1–13. doi: 10. 1029/PA005i001p00001
- Martini, E., 1981. Pliocene and Quaternary diatoms, silicoflagellates, sponge spicules, and endoskeletal dinoflagellates from the Philippine Sea, Deep Sea Drilling Project Legs 59 and 60. In: Hussong, D. M., Uyeda, S., Blanchet, R., et al., eds., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. U. S. Government Printing Office, Washington, 60: 565–574. doi: 10. 2973/dsdp. proc. 60. 129. 1982
- Moore, D. M., Reynolds, R. C., 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, New York.
- Mortlock, R. A., Froelich, P. N., 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 36(9): 1415–1426. doi: 10. 1016/0198-0149(89)90092-7
- Murray, R. W., Knowlton, C., Leinen, M., et al., 2000. Export production and carbonate dissolution in the central equatorial Pacific Ocean over the past 1 Myr. *Paleoceanography*, 15 (6): 570–592. doi: 10. 1029/1999PA000457
- Nagel, U., Müller, G., Schumann, D., et al., 1981. Mineralogy of sediments cored during Deep Sea Drilling Project Legs 58–60 in the North and South Philippine Sea; results of X-ray diffraction analyses. In: Hussong, D. M., Uyeda, S., Blanchet, R., et al., eds., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. U. S. Government Printing Office, Washington, 60: 415–435. doi: 10. 2973/dsdp. proc. 60. 118. 1982
- Parsons, T. R., Stephens, K., Strickland, J. D. H., 1961. On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 18: 1001–1016.
- Peng, S. Z., Guo, Z. T., 2007. Clay mineral composition of the Tertiary red clay and the Quaternary loess-paleosols as well as its environmental implication. *Quaternary Sciences*, 27 (2): 277–285 (in Chinese with English abstract).
- Petschick, R., Kuhn, G., Gingele, F., 1996. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Marine Geology*, 130 (3–4): 203–229. doi: 10. 1016/0025-3227(95)00148-4
- Pettke, T., Halliday, A. N., Hall, C. M., et al., 2000. Dust production and deposition in Asia and the North Pacific Ocean over the past 12 Myr. *Earth and Planetary Science Letters*, 178 (3–4): 397–413. doi: 10. 1016/S0012-821X(00)00083-2
- Qiu, B., 2001. Kuroshio and Oyashio currents. In: Steele, J. H., ed., Encyclopedia of ocean sciences. Academic Press, New York, 1413–1425. doi: 10. 1006/l-wos. 2001. 0350
- Ragueneau, O., Treguer, P., Leynaert, A., et al., 2000. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy. *Global and Planetary Change*, 26(4): 317–365. doi: 10. 1016/S0921-8181(00)00052-7

- Robinson, S. G., 1986. The Late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42(1-2): 22-47. doi: 10.1016/S0031-9201(86)80006-1
- Romero, O., Schmieder, F., 2006. Occurrence of thick Ethmodiscus oozes associated with a terminal Mid-Pleistocene transition event in the oligotrophic subtropical South Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 235(4): 321-329. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.10.026
- Scott, R. B., Kroenke, L., Zakariadze, G., et al., 1980. Evolution of the South Philippine Sea; Deep Sea Drilling Project Leg 59 results. In: Kroenke, L., Scott, R. B., Balshaw, K., et al., eds., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. U. S. Government Printing Office, Washington, 59:803-815. doi:10.2973/dsdp.proc.59.138.1981
- Shi, X. F., Chen, L. R., Li, K. Y., et al., 1995. Study on mineralogy of the clay sediment in the west of Philippine Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(2): 61-72 (in Chinese with English abstract).
- Toggweiler, J. R., 1999. Oceanography—an ultimate limiting nutrient. *Nature*, 400:511-512. doi:10.1038/22892
- Tréguer, P., Nelson, D. M., van Bennekom, A. J., et al., 1995. The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science*, 268(5209): 375-379. doi: 10.1126/science.268.5209.375
- 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).
- Xu, Z. K., Li, A. C., Jiang, F. Q., et al., 2007. Grain-size and clay mineral characteristics of sediments under deep water ferromanganese crusts in the eastern Philippine Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(2):150-155 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. K., Li, A. C., Jiang, F. Q., et al., 2008. Geochemical character and material source of sediments in the eastern Philippine Sea. *Chinese Science Bulletin*, 53(6): 923-931. doi:10.1007/s11434-008-0118-7
- Young, R. W., Carder, K. L., Betzer, P. R., et al., 1991. Atmospheric iron inputs and primary productivity: phytoplankton responses in the North Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*, 5(2): 119-134. doi: 10.1029/91GB00927
- Yuan, W., Zhang, J., 2006. High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 33(7): L07603. doi:10.1029/2005GL025174
- Zhai, B., Li, T. G., Chang, F. M., et al., 2009. Vast laminated diatom mat deposits from the west low-latitude Pacific Ocean in the last glacial period. *Chinese Science Bulletin*, 54(23): 4529-4533. doi: 10.1007/s11434-009-0447-1
- Zhang, D. Y., 1993. Clay mineralogy of the sediments deposited since the Pleistocene in the Mariana Trough and the West Philippine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 11(1):111-120 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. Y., 1994. Clay mineral composition and distribution in the Mariana Trough. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 12(2):32-39 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Anderson, R. F., Froehlich, P. N., et al., 2002. Challenges in radiocarbon dating organic carbon in opal-rich marine sediments. *Radiocarbon*, 44(1):123-136.

附中文参考文献

- 靳宁, 李安春, 刘海志, 等, 2007. 帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中粘土矿物的分布特征及物源分析. *海洋与湖沼*, 38(6): 504-511.
- 李国刚, 1990. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义. *海洋学报*, 12(4): 470-479.
- 彭淑贞, 郭正堂, 2007. 风成三趾马红土与第四纪黄土的粘土矿物组成异同及其环境意义. *第四纪研究*, 27(2): 277-285.
- 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等, 1995. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 15(2): 61-72.
- 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
- 徐兆凯, 李安春, 蒋富清, 等, 2007. 东菲律宾海深水铁锰结壳发育站位沉积物的粒度及粘土矿物学特征. *海洋学报*, 29(2): 150-155.
- 张德玉, 1993. 马里亚纳海槽和西菲律宾海盆更新世以来沉积物中的粘土矿物. *沉积学报*, 11(1): 111-120.
- 张德玉, 1994. 马里亚纳海槽区粘土矿物组成及分布特征. *黄渤海海洋*, 12(2): 32-39.