

# LGM 热带西太平洋硅藻席古生产力定量评估

熊志方<sup>1</sup>, 李铁刚<sup>1\*</sup>, 翟滨<sup>2,3</sup>, 常凤鸣<sup>1</sup>

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

2. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071

3. 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

**摘要:** 巨型“树荫种”硅藻在成层化大洋中通过“秋季倾泻”勃发模式向深部大洋输出的有机碳通量等于甚至超过“春季勃发”硅藻, 其在第四纪全球气候转型、大洋碳储库演变中的重要地位最近才予以重视。作为大洋碳循环系统的重要参数, 生产力无疑成为探索这一作用的有效窗口。以东菲律宾海的 *Ethmodiscus rex* 硅藻席(LDM, laminated diatom mats)岩心 WPD-03 为材料, 以 opal、TOC、bio-Ba 等生源组分数据为基础, 运用前人建立的各种生产力经验公式, 试图估算 LGM(last glacial maximum)热带西太平洋 LDM 的古生产力状况。结果显示, LDM 沉积期初级生产力、有机碳雨率和埋藏生产力估算合理, 平均分别为  $248.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $61.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $5.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。估计的初级生产力与代表高生产力的世界大洋各上涌海区可比, 纠正了成层化大洋生产力低下的传统观点, 支持巨型“树荫种”硅藻对大洋有机碳生产与输出的充分贡献。然而, 估算的输出生产力明显不合理, 表明利用基于真光层建立的生产力模型评估次表层水中的巨型“树荫种”硅藻时应格外谨慎, 加强了区别对待“深部”生产力和“表层”生产力的重要性。LGM 热带西太平洋 LDM 的高生产力状况与风尘硅输入的 *E. rex* 勃发条件以及还原的沉积环境相一致。

**关键词:** 古生产力; 次表层水; 硅藻席; 热带西太平洋; LGM(last glacial maximum); 海洋地质。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2013)01-0025-08

收稿日期: 2012-02-08

## Quantitative Evaluation of Paleoproductivity of Diatom Mats from Tropical West Pacific during the Last Glacial Maximum (LGM)

XIONG Zhi-fang<sup>1</sup>, LI Tie-gang<sup>1\*</sup>, ZHAI Bin<sup>2,3</sup>, CHANG Feng-ming<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The organic carbon flux to deep ocean, dominated by the bloom of giant “shade flora” diatoms via “fall dump” in stratified ocean, could rival or even exceed that of “spring bloom” diatoms. The giant “shade flora” diatoms played a significant role in the global climate transition and ocean carbon reservoir change in the Quaternary, which could be exploited by the paleoproductivity, one of most important factors in the ocean carbon cycle systems. We tried to estimate the paleoproductivity of laminated *Ethmodiscus rex* diatom mats (LDM) from tropical West Pacific during the Last Glacial Maximum (LGM), based on the data of opal, total organic carbon and biogenic barium from Core WPD-03 located in the eastern Philippine Sea. Primary productivity, organic carbon rain rates, burial productivity during the LDM deposition were estimated to average  $248.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $61.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  and  $5.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively, of which the primary productivity is comparable to those of some modern continent-margin upwelling zones, correcting low primary productivity with a largely stratified ocean and supporting substantial contribution of giant “shade flora” diatoms to the production and export of organic carbon in the world ocean. However, the unreasonable estimations for the export productivity by the empirical formulas in base of photic zone suggest that a caution must be taken to assess the “deep” productivity represented by giant “shade flora” diatoms, which should be

**基金项目:** 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金资助项目(No. MGE2011KG03); 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(Nos. 41230959, 41106042, 40776031, 41006032).

**作者简介:** 熊志方(1981-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地球化学与古海洋学研究。

\* 通信作者: 李铁刚, E-mail: tgli@qdio.ac.cn

distinguishable from classic “surface” productivity characterized by common diatoms. The high levels of productivity of LDM were consistent with the blooming conditions of dust silicon inputs and reducing depositional environments.

**Key words:** paleoproductivity; subsurface water; diatom mats; tropical West Pacific; last glacial maximum; marine geology.

## 0 引言

春季时,海洋表层水中的小型普通硅藻利用水体混合或上涌导入的丰富营养物迅速繁殖,其生长期能持续几天到几周.随着营养物的耗尽以及季节性温跃层的加强,这些硅藻快速沉降到海底,这就是一般以“春季勃发”为特征的表层生产力模式.然而,以 *Ethmodiscus rex*, *Rhizosolenia* spp. 和 *Thalassiothrix* spp. 为代表的巨型“树荫种”(shade flora)硅藻适宜生活在夏季成层化的次表层水中,它们可调控浮力下沉到深部营养处跃层吸取营养物,然后上升到表层进行光合作用(Villareal, 1992; Villareal and Carpenter, 1994),在深部高叶绿素带(deep chlorophyll maxima)中缓慢繁殖,此过程明显比“春季勃发”长,可达数月(Kemp *et al.*, 2000).秋/冬季节时,表层温度降低或水体混合加强导致水体成层化解体,这些硅藻迅速死亡并大规模地整体沉降到海底形成层状硅藻沉积物(即硅藻席, diatom mats),表现为以“秋季倾泻”(fall dump)为特征的次表层生产力模式(Kemp *et al.*, 2000; Smetacek, 2000).这类“树荫种”硅藻虽然生长速率较慢,沉积频率较低,但其通过跨季节长周期生长积累下来的碳、硅输出总量可能等于甚至高于“春季勃发”硅藻,其在全球碳、硅循环中的作用最近才予以重视(Kemp *et al.*, 2000, 2006).

更为重要的是,第四纪重大气候突变或转型期中如“中布容事件”和“中更新世革命”等,世界大洋都发现硅藻席沉积(Schmieder *et al.*, 2000; Gingele and Schmieder, 2001; Romero and Schmieder, 2006),且与碳同位素重值期( $\delta^{13}C_{max}$ )对应(汪品先等, 2006),表明硅藻席在全球气候和大洋碳储库变化中扮演着重要角色.汪品先等(2006)提出以“生物泵中硅藻与颗石藻比例变化”为核心的工作假说,试图解释大洋碳储库的偏心率长周期,但其中的具体机制与细节过程仍不清晰.生产力作为气候变化和碳循环系统中的重要参数,或许定量探讨硅藻席的古生产力状况有助于该科学问题的解决.然而,问题是如何评估这类“树荫种”硅藻造成的次表层生产力.Kemp *et al.* (2000)鉴于成席硅藻特殊的生态学特征和生长—输出模式,首次表明应区别对待上涌

环境中的表层生产力和成层化条件下的次表层生产力.De Deckker and Gingele(2002)也发现 *E. rex* 硅藻席沉积期的高生产力特征并没有被经典的古生产力指标所指示.

尽管我们已经利用多元指标联合表明硅藻席沉积时的高生产力状况(Xiong *et al.*, 2012),但并没有进行定量估算.基于以上分析,本文以热带西太平洋硅藻席岩心为材料,利用蛋白石(opal)、总有机碳(TOC)和生源钡(bio-Ba)等生源组分数据,试图估算硅藻席沉积期的各种次表层生产力(如:初级生产力、输出生产力、有机碳雨率和埋藏生产力),并与上涌系统的表层生产力对比;其次揭示次表层生产在全球 TOC 生产与输出中的地位以及加强区别对待表层生产力和次表层生产力的必要性;再者将硅藻席沉积期的高生产力状况与 *E. rex* 勃发条件以及硅藻席沉积环境链接起来.

## 1 材料与方法

含硅藻席岩心 WPD-03 由“科学一号”科考船于 2004 年 1 月在东菲律宾海帕里西维拉海盆中部取得,站位为  $17^{\circ}19.82' N$ ,  $138^{\circ}27.28' E$ ,水深 5 250 m(图 1).岩心长 405 cm,从岩性上可分为 3 层:0~286 cm 为纹层状硅藻席(用 LDM 表示),灰

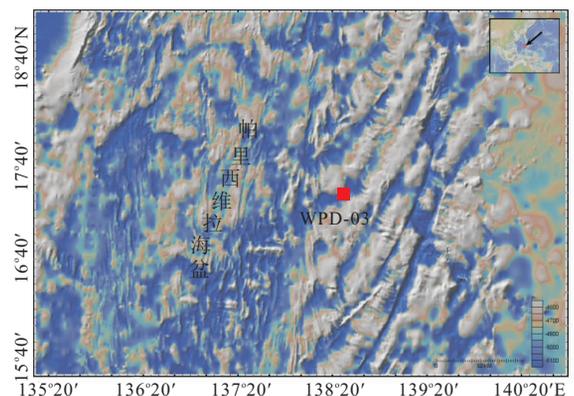


图 1 东菲律宾海帕里西维拉海盆海底地形与岩心 WPD-03 的站位

Fig. 1 Map showing the seafloor topography and core WPD-03 location of the Parece Vela basin of the eastern Philippine Sea

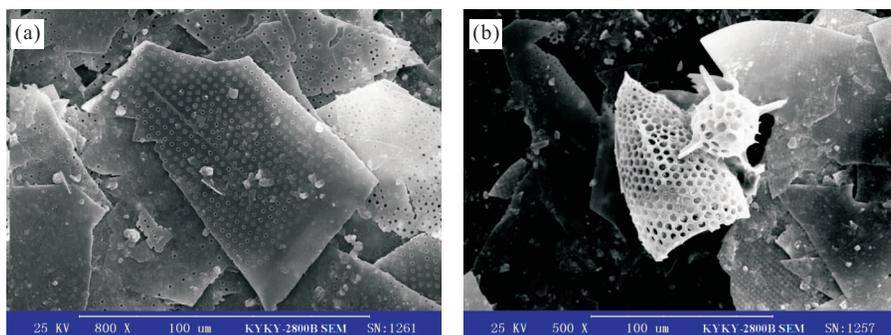


图 2 WPD-03 孔硅藻席中的“树荫种”硅藻 *Ethmodiscus rex* (a) 与放射虫 (b)

Fig. 2 Scanning electron microscope photos showing the “shade flora” diatoms *Ethmodiscus rex* (a) and radiolarians (b) in laminated diatom mats of Core WPD-03

白—灰黄色硅藻席纹层且夹杂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 *E. rex* 碎片组成(图 2a),含极少量的他属硅藻和放射虫(图 2b)(Zhai *et al.*, 2009);图 2 中,286~334 cm 为灰黄色硅藻质粘土(DC);334~405 cm 为均质红褐色远洋粘土(PC)。

图 3a 展示了 WPD-03 孔总有机质 AMS<sup>14</sup>C 测年结果,9 个硅藻席样品的 AMS<sup>14</sup>C 数据介于 17.8~23.3 ka。另外,研究区其他 14 个岩心中 24 个硅藻席样品的 AMS<sup>14</sup>C 测年结果在 16.05~28.60 ka 之间。综合表明,研究区硅藻席沉积于末次盛冰期(LGM)(Zhai *et al.*, 2009)。在熊志方等(2010a)中,已经讨论了 WPD-03 孔下部 4 个硅藻席样品(图 3a 椭圆圈闭所示)AMS<sup>14</sup>C 年龄倒置的原因:(1)异地有机质的输入导致测年出现偏差,这些异地有机质可能来自活性蛋白石的吸附以及洋流的侧向搬运;(2)<sup>14</sup>C 测定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)早期成岩过程中,硅藻席下部有机质降解形成的老碳运移到上部也能造成年代倒置。但这些因素都没有表明硅藻席沉积本身发生过倒转现象。因此,在计算沉积速率时我们除去了这 4 个年龄控制点(图 3b)。

根据 WPD-03 孔各层位岩性及厚度,分别按 2 cm、5 cm 和 10 cm 不等间距连续取样 137 个,其中用于 opal、TOC、Ba 和 Ti 分析的硅藻席样品共计 81 个。opal 的分析依据湿碱消解—电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法(熊志方等, 2010b)。硅藻席样品去有机质和去碳酸盐后,经碳酸钠溶液提取出可溶硅,在 ICP-OES 上测试,分析精度(RSD)优于 8.9%。TOC 的分析方法具体参考熊志方等(2010a),样品去碳酸盐后,在元素分析仪 EA3000

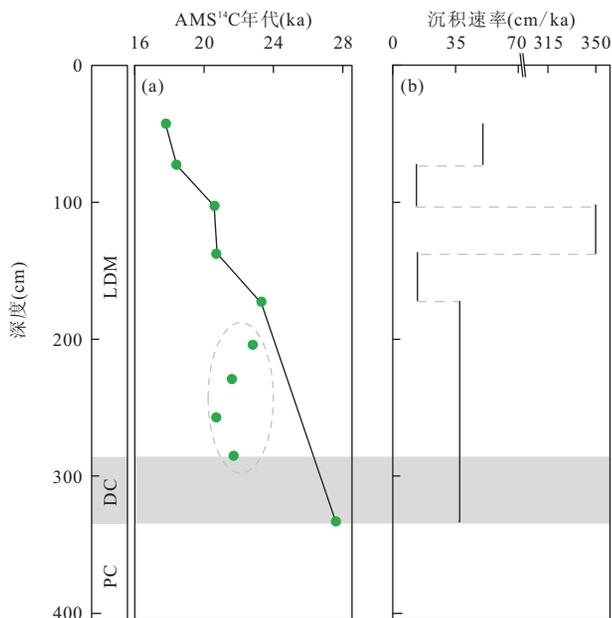


图 3 WPD-03 孔硅藻席中的总有机质 AMS<sup>14</sup>C 年代(a)与沉积速率(b)

Fig. 3 AMS<sup>14</sup>C dates of bulk organic matter (a) and linear sedimentation rates (b) in laminated diatom mats of core WPD-03

测试,分析精度(RSD)小于 5.3%。Ba、Ti 的分析方法采用三酸法(Xiong *et al.*, 2012)。样品经硝酸、氢氟酸和高氯酸顺序消解后,分别在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和 ICP-OES 上测试,分析精度(RSD)优于 5%。

## 2 古生产力估算

本文估算的古生产力类型有初级生产力、输出生产力、埋藏生产力和有机碳雨率(Rain rates),结合具体情况说明如下:初级生产力指(次)表层水中

表 1 WPD-03 孔硅藻席中相邻年代控制点之间 opal、TOC、Ba 和 Ti 的平均含量

Table 1 Average contents of opal, TOC, Ba and Ti between adjacent date controlling points in laminated diatom mats of core WPD-03

层位(cm)	水深*(m)	opal(%)	TOC(%)	Si/C(摩尔比)	Ba(%)	Ti(%)
42.5~72.5	5 250.6	60.4	0.230	46.86	0.038	0.105
72.5~102.5	5 250.9	60.1	0.247	43.41	0.043	0.091
102.5~137.5	5 251.2	62.1	0.247	44.84	0.041	0.090
137.5~172.5	5 251.6	61.5	0.244	45.08	0.047	0.109
172.5~286.0	5 252.3	52.1	0.222	41.83	0.071	0.159
平均值	5 251.3	59.2	0.238	44.40	0.048	0.111

注：\* 水深为 WPD-03 孔硅藻席中某处沉积物的瞬时水深，即为某处沉积物在岩心中的深度与现代水深之和，是用来计算下文中的输出生产力的，代表公式(13)中的水深  $Z$ 。

生产的总有机碳通量，由于硅藻席中主要生产者为 *E. rex*，因此初级生产力简化为 *E. rex* 的初级生产力。输出生产力是指(次)表层水中免于重新矿化和再循环从而向深部大洋输出的那部分初级生产力。埋藏生产力指沉积物中有机碳的质量堆积速率。有机碳雨率代表从大洋深部输出到水-岩界面的有机碳通量，其与埋藏生产力的差值即是在水-岩界面和孔隙水中重矿化、再循环的有机碳通量。估算所需要的 opal、TOC、Ba 和 Ti 含量取 WPD-03 孔硅藻席中相邻 AMS<sup>14</sup>C 年代控制点之间相应原始数据的平均值，具体见表 1。

### 2.1 埋藏生产力

LDM 沉积期的埋藏生产力 ( $P_B$ ) 可用下式计算：

$$P_B = W_{\text{TOC}} \times \text{MAR}, \quad (1)$$

其中， $W_{\text{TOC}}$  和  $\text{MAR}$  分别为 LDM 中 TOC 含量和质量堆积速率。而  $\text{MAR}$  由下式计算：

$$\text{MAR} = P_{\text{dry}} \times V_{\text{LSR}}, \quad (2)$$

其中， $P_{\text{dry}}$  和  $V_{\text{LSR}}$  分别为 LDM 的干样密度和线性沉积速率。由于缺乏实测数据， $P_{\text{dry}}$  由以下公式估计 (Brunelle *et al.*, 2007)：

$$P_{\text{dry}} = 2.1 \times W_{\text{opal}} + 2.7 \times (1 - W_{\text{opal}}), \quad (3)$$

其中， $W_{\text{opal}}$  为 opal 含量，而  $V_{\text{LSR}}$  由以下公式计算：

$$V_{\text{LSR}} = \Delta H / \Delta D, \quad (4)$$

其中， $\Delta H$  和  $\Delta D$  分别为相邻 AMS<sup>14</sup>C 测年点之间的深度差和年龄差。综合(1)~(4)，可得埋藏生产力的最终计算公式：

$$P_B = W_{\text{TOC}} \times [2.1 \times W_{\text{opal}} + 2.7 \times (1 - W_{\text{opal}})] \times \Delta H / \Delta D, \quad (5)$$

类似地，LDM 蛋白石的质量堆积速率 ( $\text{MAR}_{\text{opal}}$ ) 可用下式计算：

$$\text{MAR}_{\text{opal}} = W_{\text{opal}} \times [2.1 \times W_{\text{opal}} + 2.7 \times (1 - W_{\text{opal}})] \times \Delta H / \Delta D. \quad (6)$$

### 2.2 初级生产力

*E. rex* 向深部大洋沉降并沉积于海底的过程都要发生有机质的降解和蛋白石的溶解。由于有机质降解速率明显大于蛋白石溶解速率，LDM 中的 Si/C(摩尔比，平均为 44.40) 远远大于现代大洋中鲜活 *E. rex* 的 Si/C(0.95) (Villareal *et al.*, 1999a)。假设 WPD-03 孔 LDM 中蛋白石溶解相对于有机质的强烈降解可忽略不计，则初级生产的有机碳 ( $W_{\text{POC}}$ ) 可用下式计算：

$$W_{\text{POC}} = 12.0 \times W_{\text{opal}} / (67.3 \times 0.95), \quad (7)$$

其中，0.95 为现代大洋鲜活 *E. rex* 的 Si/C (Villareal *et al.*, 1999a)，12.0 和 67.3 分别为 C 和 opal ( $\text{SiO}_2 \cdot 0.4\text{H}_2\text{O}$ ) 的摩尔质量 (g/mol)。因此，初级生产力 ( $P_P$ ) 计算公式为：

$$P_P = W_{\text{POC}} \times \text{MAR} = 12.0 \times [W_{\text{opal}} / (67.3 \times 0.95)] \times [2.1 \times W_{\text{opal}} + 2.7 \times (1 - W_{\text{opal}})] \times \Delta H / \Delta D. \quad (8)$$

### 2.3 有机碳雨率

Dymond *et al.* (1992) 基于赤道太平洋和加利福尼亚洋流系统中沉积物捕获器的生源钡雨率 ( $RR_{\text{bio-Ba}}$ ) 与有机碳雨率 ( $RR_{\text{OC}}$ ) 存在强烈正相关关系，从而提出有机碳雨率计算公式为：

$$RR_{\text{OC}} = 25 \times RR_{\text{bio-Ba}}, \quad (9)$$

而  $RR_{\text{bio-Ba}}$  与 bio-Ba 质量堆积速率 ( $\text{MAR}_{\text{bio-Ba}}$ ) 满足以下公式 (Dymond *et al.*, 1992)：

$$RR_{\text{bio-Ba}} = \text{MAR}_{\text{bio-Ba}} / (0.209 \times \lg \text{MAR} - 0.213) = W_{\text{bio-Ba}} \times \text{MAR} / (0.209 \times \lg \text{MAR} - 0.213). \quad (10)$$

bio-Ba 的含量 ( $W_{\text{bio-Ba}}$ ) 可用下式计算：

$$W_{\text{bio-Ba}} = W_{\text{Ba}} - W_{\text{Ti}} \times (\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}}, \quad (11)$$

其中， $W_{\text{Ba}}$ 、 $W_{\text{Ti}}$  为 LDM 中 Ba 和 Ti 的含量， $(\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}}$  为后太古宙澳大利亚页岩 (PAAS) 的 Ba/Ti 值，其值为 0.11 (Taylor and McClennan, 1985)。

基于式(2)~(4)和式(9)~(11)，有机碳雨率的

最终计算公式为:

$$RR_{OC} = 25 \times (W_{Ba} - W_{Ti} \times (Ba/Ti)_{PAAS}) \times [2.1 \times W_{opal} + 2.7 \times (1 - W_{opal})] \times \Delta H / \Delta D / \{0.209 \times \lg\{[2.1 \times W_{opal} + 2.7 \times (1 - W_{opal})] \times \Delta H / \Delta D\} - 0.213\} \quad (12)$$

## 2.4 输出生产力

Sarnthein *et al.* (1988) 根据世界各大洋沉积捕获器样品、现代沉积物样品以及水体资料, 建立了有机碳雨率与输出生产力的经验公式。据此, LDM 的有机碳雨率可进一步转化为输出生产力 ( $P_E$ ):

$$P_E = [(RR_{OC} / 20.5631) \times Z^{0.5537}]^{1/0.6648} \quad (13)$$

其中,  $Z$  为水深。另外, François *et al.* (1995) 基于沉积物捕获器样品中生源钡建立的输出生产力公式如下:

$$P_E = 1.95 \times RR_{bio-Ba}^{1.41} \quad (14)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 埋藏生产力与初级生产力

图 3b 和表 2 展示了 WPD-03 孔 LDM 的沉积速率, 除去极大值 (350.0 cm/ka) 外, LDM 沉积速率一般为  $10 \times n$  cm/ka。这与 Kemp *et al.* (2006) 总结的巨型硅藻的沉积速率 (0.6~80.0 cm/ka) 范围一致, 但明显高于世界大洋捕获器或沉积物中记录的硅藻颗粒 (沉积物) 的沉积速率 (一般为  $n$  cm/ka) (Ragueneau *et al.*, 2000), 也明显高于研究区远洋粘土 1.38 mm/ka 的沉积速率 (Xu *et al.*, 2008)。

埋藏生产力与初级生产力的估算结果见表 2。埋藏生产力介于  $0.79 \sim 20.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平均为  $5.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 除极大值 ( $20.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 外, 与 Kemp *et al.* (2006) 总结的巨型硅藻 TOC 质量堆积速率 ( $0.14 \sim 9.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 一致。opal 质量堆积速率在  $191.64 \sim 5055.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平均为  $1322.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 明显高于 Kemp *et al.* (2006) 总结的巨型硅藻 opal 质量堆积速率 ( $1.87 \sim 232.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。估计的初级生产的有机碳平均为 11.13%, 而 LDM 中 TOC 平均为 0.24%, 这表明 *E. rex* 向海底“秋季倾泻”时, 有机质降解比例极高, 平均为 97.86%。估计的初级生产力在  $36.00 \sim 949.87 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平均为  $248.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。世界大洋上涌系统代表着高的初级生产力海区, 如秘鲁大陆架的初级生产力平均为  $350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (Müller and Suess, 1979), 加利福尼亚海湾为  $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (Brumsack, 1989), 纳米比亚大陆架则为  $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (Calvert and Price, 1983)。LDM 的初级生产力与现代大陆边缘上涌海区的初高级生产力一致, 表明以巨型“树荫种”硅藻为特征的成层化系统和以小型普通硅藻为特征的上涌系统在初级生产力的量值上可对等, 即纠正了成层化系统因营养物不能进入表层而导致生产力低下的认识, 也加强了巨型“树荫种”硅藻在世界大洋, 尤其是贫养大洋中对有机碳生产的巨大贡献。

3.2 有机碳雨率与输出生产力

计算的有机碳雨率介于  $26.12 \sim 160.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平均为  $61.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (表 3), 其值在估算的埋藏生产力和初级生产力之间, 表明估算的合理性。基于 Sarnthein *et al.* (1988) 和 François *et al.* (1995) 模型估计的输出生产力平均为  $8094.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $8.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (表 3), 前者远大于初级生产力, 而后者小于有机碳雨率, 显然估算的输出生产力结果很不合理。

下面对输出生产力估算的不合理性做进一步分析。Sarnthein *et al.* (1988) 输出生产力模型的建立是基于真光层的初级生产力, 而硅藻席向深部大洋输出的生产力主要不是来自于表层, 而是来源于次

表 2 WPD-03 孔硅藻席中的沉积速率、埋藏生产力与初级生产力

Table 2 Linear sedimentation rates, burial productivity and primary productivity in laminated diatom mats of core WPD-03

层位 (cm)	沉积速率 (cm/ka)	初级生产的 TOC (%)	质量堆积速率 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	埋藏生产力 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	opal 质量堆积速率 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	初级生产力 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
42.5~72.5	50.0	11.36	1168.68	2.69	706.34	132.70
72.5~102.5	13.6	11.29	318.18	0.79	191.64	36.00
102.5~137.5	350.0	11.66	8146.75	20.12	5055.84	949.87
137.5~172.5	13.5	11.56	314.67	0.76	193.01	36.26
172.5~286.0	37.3	9.80	890.41	1.98	464.57	87.28
平均值	92.9	11.13	2167.74	5.27	1322.28	248.42

表 3 WPD-03 孔硅藻席中的有机碳雨率与输出生产力

Table 3 Organic carbon rain rates and export productivity in laminated diatom mats of core WPD-03

层位 (cm)	bio-Ba (%)	bio-Ba 质量 堆积速率 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	有机碳雨率 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	输出生产力 (Sarnthein <i>et al.</i> , 1988) ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	输出生产力 (François <i>et al.</i> , 1995) ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
42.5~72.5	0.026	0.30	34.59	2 743.55	3.08
72.5~102.5	0.033	0.11	26.12	1 798.16	2.07
102.5~137.5	0.031	2.53	160.11	27 498.38	26.74
137.5~172.5	0.035	0.11	27.56	1 948.90	2.24
172.5~286.0	0.054	0.48	61.27	6 483.77	6.90
平均值	0.036	0.71	61.93	8 094.55	8.21

表层 *E. rex* 的生产,因而硅藻席输出生产力模式不满足式(13)的边界条件,盲目的套用公式会带来结果的不合理性. François *et al.* (1995)输出生产力模型的建立假设海水中 Ba 浓度不影响 bio-Ba 的形成,且 bio-Ba 的形成与水深无关,只受控于表层水体生产力.而硅藻席中主要生产者为次表层中的 *E. rex*,有机质主要受控于次表层生产力,因此与有机质直接相关的 bio-Ba (Paytan and Griffith, 2007)不仅受控于表层生产力而且主要受控于次表层生产力,显然不满足式(14)的假设条件,估计结果也就不合理.另外, Dymond *et al.* (1992)考虑水深及水体 Ba 浓度对 bio-Ba 影响建立的输出生产力公式为:

$$P_E = (RR_{\text{bio-Ba}} \times 0.171 \times C_{\text{Ba}}^{2.218} \times Z^{0.476-0.00478 \times C_{\text{Ba}}/2056})^{1/0.665}, \quad (15)$$

其中,  $C_{\text{Ba}}$  为海水中 Ba 的浓度,一般取约 1 700 m 处的 Ba 浓度.我们缺乏 LDM 沉积期, LGM 时东菲律宾海水体的 Ba 浓度,因此无法估算,但式(15)估算的输出生产力结果应该比较合理.

综上所述,我们关于 LDM 沉积期各种生产力估算的尝试加强了区别对待“深部”生产力和“表层”生产力的重要性和必要性 (Kemp *et al.*, 2000; De Deckker and Gingele, 2002). *E. rex* 等巨型“树荫种”硅藻勃发代表的是一类“深居”在次表层,选择性地吸取深部营养物质(如硝酸盐 (Villareal *et al.*, 1993, 1999b))或表层营养物质而形成的“深部”生产力.这种生产力模式从营养物质来源、光利用途径和从事生产的主要浮游植物生态特征(如种类及个体大小)明显不同于在透光带中发生的经典“表层”生产力模式,因而在利用基于真光层建立的生产力评估模型时应格外谨慎.

### 3.3 链接于 *E. rex* 的勃发条件以及 LDM 的沉积环境

熊志方等(2010a)初步推断研究区硅藻席很可能由成席硅藻 *E. rex* 利用 DC 沉积期强烈风尘输

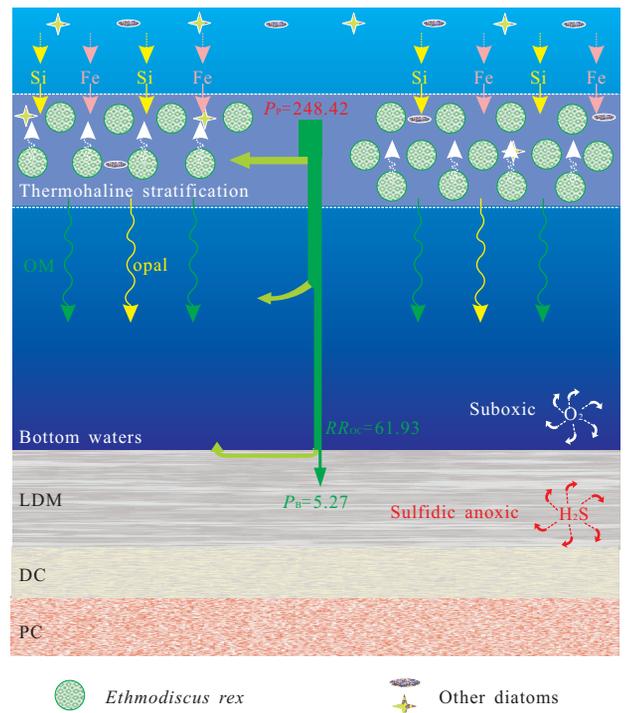


图 4 东菲律宾海硅藻席高生产力状况与“树荫种”硅藻 *Ethmodiscus rex* 的勃发条件、氧化还原沉积环境的链接

Fig. 4 Mode linking high levels of productivity of laminated diatom mats to blooming conditions of “shade flora” diatoms *Ethmodiscus rex* and depositional redox environments

图中  $P_p$ 、 $RR_{OC}$  和  $P_B$  分别代表初级生产力、有机碳雨率和埋藏生产力,单位都为  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . OM, opal 代表有机质和生源蛋白石. Thermohaline stratification 为温盐成层化; Bottom waters 为底层水; Suboxic 为亚氧化条件; Sulfidic anoxic 为硫化缺氧条件

入而带入的硅,在风尘铁的刺激下,在成层化水体中勃发沉积而成(图 4). WPD-03 孔氧化还原敏感元素记录表明 LDM 沉积时孔隙水为硫化缺氧环境、底层水为亚氧化条件,并认为是较高的 TOC 输出通量而非底层水滞流导致了 LDM 沉积环境向还原条件发展 (Xiong *et al.*, 2012). 这里,我们将 *E.*

*rex* 勃发条件——LDM 的生产力状况——LDM 的沉积环境链接起来,做个总结(图 4)。

LDM 沉积时,海水呈现温盐成层化状态。DC 沉积期风尘携带的硅和铁经一定时间的化学溶解后可形成大量的可溶硅和可溶铁。同时,这些可溶硅和可溶铁再经生物地球化学过程接近次表层,此时 *E. rex* (可能也会借助浮力上浮)充分利用可溶硅和可溶铁在成层化的平稳环境中“秋季倾泻”(图 4)。估计初级生产力极高,平均为  $248.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而埋藏在海底的有机碳堆积速率却极低,平均为  $5.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 这表明有机质在海水、水-岩界面和孔隙水中大量降解。正是有机质的大量降解消耗掉了底层水中的溶解  $\text{O}_2$ , 且温盐成层化条件阻碍溶解  $\text{O}_2$  从表层向深部输送,造成了 LDM 沉积时硫化缺氧的沉积环境以及底层水的亚氧化条件。

## 4 结论

利用东菲律宾海帕里西维拉海盆 WPD-03 孔中 LDM 的生源组分数据,结合前人建立的各种生产力计算经验公式,合理估算了 LDM 沉积期的埋藏生产力、初级生产力和有机碳雨率,并分析了输出生产力估算不合理的原因,得到如下 3 点认识:

(1) LDM 沉积期,估计的初级生产力、有机碳雨率和埋藏生产力分别平均为  $248.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $61.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $5.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其初级生产力与现代高生产力的上涌海区可比,先前低估了巨型“树荫种”硅藻在大洋有机碳生产和输出中的重要作用。

(2) 当运用基于现代真光层生产力数据建立的模型估计 LDM 沉积期的输出生产力时,往往得到不合理的结论,表明在巨型“树荫种”硅藻生产力评估中要格外谨慎,应区分其代表的“深部”生产力和透光带普通硅藻代表的“表层”生产力模式。

(3) LDM 沉积期, *E. rex* 勃发而初级生产的有机质向深部大洋输出一直到最后埋藏到海底的过程中,降解比例平均可达 97.86%。如此高的有机质降解比例和高的古生产力与 LDM 沉积时的硫化缺氧沉积环境、亚氧化的底层水条件相对应。

## References

Brumsack, H. J., 1989. Geochemistry of Recent TOC-Rich Sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 78: 851–882.

- Brunelle, B. G., Sigman, D. M., Cook, M. S., et al., 2007. Evidence from Diatom-bond Nitrogen Isotopes for Subarctic Pacific Stratification during the Last Ice Age and A Link to North Pacific Denitrification Changes. *Paleoceanography*, 22: PA1215. doi: 10.1029/2005PA001205
- Calvert, S. E., Price, N. B., 1983. Geochemistry of Namibian Shelf Sediments. In: Suess, E., Thiede, J., eds., Coastal Upwelling—Its Sediment Record, Part A: Response of the Sedimentary Regime to Present Coastal Upwelling, Volume 10. Plenum Press, New York, 337–375.
- 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 Oceanography. *Marine Geology*, 183: 31–43.
- Dymond, J., Suess, E., Lyle, M., 1992. Barium in Deep-Sea Sediment: A Geochemical Proxy for Paleoproductivity. *Paleoceanography*, 7: 163–181.
- François, R., Honjo, S., Manganini, S. J., et al., 1995. Biogenic Barium Fluxes to the Deep Sea: Implications for Paleoproductivity Reconstruction. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 289–303.
- Gingele, F. X., Schmieder, F., 2001. Anomalous South Atlantic Lithologies Confirm Global Scales of Unusual Mid Pleistocene Climate Excursion. *Earth and Planetary Science Letter*, 186: 93–101.
- Kemp, A. E. S., Pearce, R. B., Grigorov, I., et al., 2006. 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: 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 Exportation. *Deep-Sea Research II*, 47: 2129–2154.
- Müller, P. J., Suess, E., 1979. Productivity, Sedimentation-Rate, and Sedimentary Organic-Matter in the Oceans 1: Organic-Carbon Preservation. *Deep Sea Research I*, 26 (12): 1347–1362.
- Paytan, A., Griffith, E. M., 2007. Marine Barite: Recorder of Variations in Ocean Export Productivity. *Deep Sea Research II*, 54: 687–705. doi:10.1016/j.dsr2.2007.01.007
- 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: 317–365.

- 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: 321–329. doi:10.1016/j.palaeo.2005.10.026
- Sarnthein, M., Winn, K., Duplessy, J. C., et al., 1988. Global Variations of Surface Ocean Productivity in Low and Mid-Latitudes: Influence on CO<sub>2</sub> Reservoirs of the Deep Ocean and Atmosphere during the Last 21000 Years. *Paleoceanography*, 3(3): 361–399.
- Schmieder, F., Von Döbenek, T., Bleil, U., 2000. The Mid-Pleistocene Climate Transition as Documented in the Deep South Atlantic Ocean: Initiation, Interim State and Terminal Event. *Earth and Planetary Science Letter*, 179: 539–549.
- Smetacek, V. S., 2000. The Giant Diatom Dump. *Nature*, 406: 574–575.
- Taylor, S. R., McClelland, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Villareal, T. A., 1992. Buoyancy Properties of the Giant Diatom Ethmodiscus. *Journal of Plankton Research*, 14(3): 459–463.
- Villareal, T. A., Altabet, M. A., Culver-Rymsza, K., 1993. Nitrogen Transport by Vertically Migrating Diatom Mats in the North Pacific Ocean. *Nature*, 363: 709–712.
- Villareal, T. A., Carpenter, E. J., 1994. Chemical Composition and Photosynthetic Characteristics of Ethmodiscus Rex (Bacillariophyceae): Evidence for Vertical Migration. *Journal of Phycology*, 30: 1–8.
- Villareal, T. A., Joseph, L., Brzezinski, M. A., et al., 1999a. Biological and Chemical Characteristics of the Giant Diatom Ethmodiscus (Bacillariophyceae) in the Central North Pacific Gyre. *Journal of Phycology*, 35: 896–902.
- Villareal, T. A., Pilskaln, C., Brzezinski, M., 1999b. Upward Transport of Oceanic Nitrate by Migrating Diatom Mats. *Nature*, 397: 423–425.
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Liu, Z. F., 2006. Interactions between the Earth Spheres: Deep-Sea Processes and Record (II) Tropical Forcing of Climate Changes and Carbon Cycling. *Advances in Earth Science*, 21(4): 338–345 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z. F., Li, T. G., Zhai, B., et al., 2010a. Clay Mineral Characteristics of Ethmodiscus Rex Diatom Mats from Low-Latitude Western Pacific during the Last Glacial and Implications for Their Formation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 551–562 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z. F., Lu, B., Yu, X. K., et al., 2010b. Determination of Biogenic Opal in Marine Sediments by Inductively Coupled Plasma—Atomic Emission Spectrometry with Wet Alkaline Digestion. *Rock and Mineral Analysis*, 29(1): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z. F., Li, T. G., Algeo, T., et al., 2012. Paleoproductivity and Paleoredox Conditions during Late Pleistocene Accumulation of Laminated Diatom Mats in the Tropical West Pacific. *Chemical Geology*, 334: 77–91.
- 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.
- 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: 4529–4533.
- Zheng, Y., Anderson, R. F., Froelich, N. P., 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

- 汪品先, 翦知潜, 刘志飞, 2006. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录(II): 气候变化的热带驱动与碳循环. *地球科学进展*, 21(4): 338–345.
- 熊志方, 李铁刚, 翟滨, 等, 2010a. 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的启示. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(4): 551–562.
- 熊志方, 路波, 于心科, 等, 2010b. 湿碱消解—等离子体发射法测定海洋沉积物中的生物硅. *岩矿测试*, 29(1): 1–4.