



晚第四纪热带西太平洋Noelaerhabdaceae科颗石长度和质量变化及其影响因素

孙晗杰, Beaufort Luc, 安佰正, 李铁刚, 常凤鸣, 南青云, 黄翠

Variations in the length and weight of Noelaerhabdaceae coccolith in the Late Quaternary tropical Western Pacific and their influencing factors

SUN Hanjie, Beaufort Luc, AN Baizheng, LI Tiegang, CHANG Fengming, NAN Qingyun, and HUANG Cui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023071602>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西菲律宾海26万年来古生产力变化的颗石藻证据

Variations of primary productivity in the western Philippine Sea in the past 260000 years:evidence from coccolith
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 113

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

亚北极鄂霍次克海晚第四纪冰海沉积作用与水团变化历史

Changing histories of glaciomarine deposition and water masses in the subarctic Okhotsk Sea of Late Quaternary
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 124

西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层

The Late Quaternary Carbonate sand deposits at the Xuande Atoll
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 37

海南岛西南海域晚第四纪古水深反演

THE INVERSION OF LATE QUATERNARY PALEO-WATER DEPTH IN SOUTHWESTERN OFFSHORE HAINAN ISLAND
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 128

西北冰洋楚科奇海台晚第四纪以来陆源沉积物搬运机制及其古环境意义

Transportation mechanism of terrigenous sediment and its paleoenvironmental implications on the Chukchi Plateau, western Arctic Ocean during the late Quaternary
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 52



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙晗杰, Beaufort Luc, 安佰正, 等. 晚第四纪热带西太平洋 Noelaerhabdaceae 科颗石长度和质量变化及其影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 38-47.

SUN Hanjie, Beaufort Luc, AN Baizheng, et al. Variations in the length and weight of Noelaerhabdaceae coccolith in the Late Quaternary tropical Western Pacific and their influencing factors [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 38-47.

晚第四纪热带西太平洋 Noelaerhabdaceae 科颗石长度和质量变化及其影响因素

孙晗杰^{1,2}, Beaufort Luc³, 安佰正⁴, 李铁刚^{2,5}, 常凤鸣^{1,2}, 南青云^{1,2}, 黄翠⁶

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, 青岛 266071

2. 崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

3. Aix Marseille University, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France

4. 临沂大学地质与古生物研究所, 临沂 276000

5. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061

6. 国家海洋技术中心, 天津 300112

摘要: 选取热带西太平洋暖池北部边缘西菲律宾海本哈姆高原 (Benham Rise) MD06-3050 站位的柱状样沉积物样品, 利用双向圆偏光法拍摄并合成图像, 通过 SYRACO 人工智能软件自动识别并测量和计算 Noelaerhabdaceae 科颗石的平均长度和平均质量。研究结果显示, 自 35 万年以来, Noelaerhabdaceae 科平均颗石长度和质量的变化趋势具有较强的相似性, 两者的冰期/间冰期变化特征均不明显。根据颗石长度和质量计算得到的颗石钙化作用指标曲线与前两者的变化趋势也存在一定的相似性, 说明研究海区颗石的平均质量和长度均可作为指示颗石藻钙化作用程度的指标。通过与冰芯记录的大气 $p\text{CO}_2$ 变化曲线进行对比, 发现在大气 $p\text{CO}_2$ 浓度较高的冰期终止期以及间冰期早期, 该科颗石的钙化作用相对较低, 表明 $p\text{CO}_2$ 在一定程度上影响了颗石藻的钙化作用。此外, 对颗石的平均长度和质量进行 23 ka 周期滤波, 两滤波曲线的变化与北纬 15° 夏季平均日照辐射曲线的变化较为一致, 指示了地球天文轨道参数对颗石藻演化的调控作用。

关键词: 颗石质量; 颗石长度; 晚第四纪; 西太平洋

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023071602

Variations in the length and weight of Noelaerhabdaceae coccolith in the Late Quaternary tropical Western Pacific and their influencing factors

SUN Hanjie^{1,2}, Beaufort Luc³, AN Baizheng⁴, LI Tiegang^{2,5}, CHANG Fengming^{1,2}, NAN Qingyun^{1,2}, HUANG Cui⁶

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

2. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. Aix Marseille University, CNRS, IRD, INRA, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

4. Institute of Geology and Paleontology, Linyi University, Linyi 276000, China

5. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

6. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract: Sediment samples from core MD06-3050 in the Benham Rise in the Western Philippine Sea at the northern edge of the tropical Western Pacific Warm Pool were selected for Family Noelaerhabdaceae coccolith size analyses. Images were taken and synthesized using bidirectional circular polarization method. The average coccolith length and weight were automatically identified and measured by SYRACO artificial intelligence software. Results show that the average coccolith length and weight show strong similarities in the last 350000 years, with no obvious glacial-interglacial changes. The coccolith calcification index was estimated based on the length and weight of coccolith, and shows the same patterns of the morphological parameters, but presents a more obvious glacial-interglacial pattern. The coccolith calcification index

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“中更新世以来热带西太平洋颗石藻钙化作用研究”(41876041); 国家自然科学基金重点项目“晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应”(41830539); 崂山实验室科技创新项目“新生代西太平洋环境演化的沉积记录及机制”(LSKJ202204200); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金课题(MGE2022KG5)

作者简介: 孙晗杰(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事古海洋与古环境研究, E-mail: sunhanjie@qdio.ac.cn

收稿日期: 2023-07-16; **改回日期:** 2023-08-13. 周立君编辑

was compared with the ice-core atmospheric $p\text{CO}_2$, which shows that the calcification of Noelaerhabdaceae coccoliths was weakened in the glaciation termination period and the early-middle interglacial periods when the atmospheric $p\text{CO}_2$ concentration was higher. The 23-ka filtering of the average coccolith length and weight agrees with the summer average solar radiation at 15°N , suggesting the regulation of the Earth's astronomical orbit parameters on the evolution of coccolithophores.

Key words: coccolith weight; coccolith length; Late Quaternary; Western Pacific

工业革命以来, 人类活动产生了大量的 CO_2 , 约有三分之一被海洋吸收^[1], 海洋酸化持续加强, 对海洋生态系统^[2], 尤其是钙质生物产生重大威胁。颗石藻 (coccolithophores) 是大洋中广泛分布的钙质浮游植物, 其外部的微小钙质盘片称为颗石 (coccoliths)。通过光合作用和钙化作用, 颗石藻在海洋碳酸盐系统中扮演了重要的角色^[3]。受海洋环境、碳库变动以及颗石藻自身适应性演化等复杂因素的影响, 颗石藻的钙化作用在地质历史中不断发生着变化。在颗石藻死亡后, 颗石被释放出来, 快速沉降并保存在海底^[4], 成为海洋碳酸钙的主要贡献者^[5]。对这些保存在海底沉积物中的颗石进行群落、形态和质量的定量研究, 不仅可以恢复地质历史时期海洋环境的变化, 解决颗石藻钙化作用的发生机制, 而且能够定量估算碳酸钙的输出通量, 为了解全球碳循环的机制提供线索。

然而到目前为止对热带西太平洋在地质历史上的颗石质量和形态方面的研究相对较少。在本研究中, 借助于近几年新发展的基于双向圆偏光显微镜自动拍摄和测量以及方解石双折射特性的方法^[6-8], 我们选取位于西太平洋暖池北部边缘的沉积物岩芯 MD06-3050, 对其颗石藻 Noelaerhabdaceae

科的主要颗石种属进行长度测量和质量估算, 且基于这两个参数计算了过去 35 万年以来该科颗石的平均钙化作用程度。在查明热带西太平洋颗石藻钙化作用长期演化的特征之外, 结合其他已有古气候记录, 尝试讨论晚第四纪该海区 Noelaerhabdaceae 科颗石藻大小和质量演化的受控因素。

1 材料和方法

1.1 样品材料和年代模式

本文研究材料 MD06-3050 岩芯 ($15^\circ 57.0943'\text{N}$ 、 $124^\circ 46.7747'\text{E}$, 水深 2967 m) 由法国极地研究所组织的 Marco Polo IMAGES XIV 航次取自西菲律宾海本哈姆高原 (Benham Rise) (图 1)。沉积物主要由黄褐色钙质软泥组成, 研究层位沉积连续, 没有明显的沉积间断, 浮游有孔虫和颗石保存良好。有关岩芯的其他描述和所在海区海洋物理背景在前期已发表的文章中有详细介绍^[9-10]。本工作选取岩芯上部 7.7 m 沉积物样品进行颗石鉴定和测量的相关研究。按照 4~8 cm 间隔取样, 对 180 个样品进行颗石玻片制备、照片拍摄和图像合成。利用 SYRACO

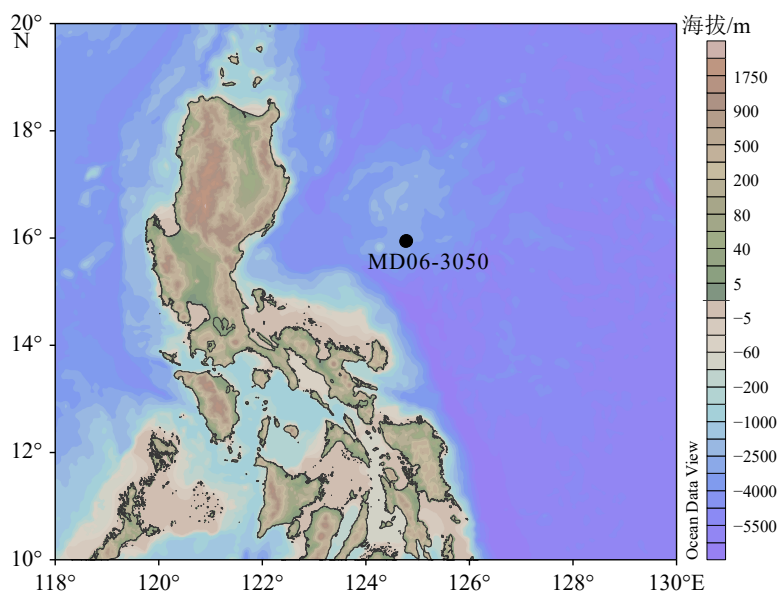


图 1 西太平洋暖池北部边缘区 MD06-3050 岩芯位置图

Fig.1 Location of Core MD06-3050 in the northern part of the Western Pacific Warm Pool

自动鉴定和测量系统分析了全部研究层位的关键颗石藻 Noelaerhabdaceae 的颗石长度和质量。样品玻片制备、圆偏光法照片拍摄以及测量工作均在法国欧洲环境科学与教学中心(Cerege)进行。

本研究年代模式基于底栖有孔虫 *Cibicidoides wuellerstorfi* 的氧同位素曲线与 LR04 标准曲线进行对比而获得的年代控制点而建立^[10-11]。根据氧同位素年代模式,岩芯上部 7.7 m 记录了过去 35 万年以来的连续沉积,沉积物沉积速率变化范围为 1.4~3.2 cm/ka^[10]。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

利用沉降法进行样品玻片制备^[7,12]。具体流程如下:用微取样勺选取约 0.5 mm³ 沉积物,放置在小烧杯中,加入约 1 mL 自来水后,将悬浊液置于超声波清洗器中超声 5 s 进行分散。用 32 μm 金属筛对悬浊液进行过筛,过滤后的悬浮液全部倒入直径为 75 mm 的平底烧杯中,再次对金属筛进行几次冲洗,用量筒接住清洗后的水体,并续加自来水至量筒 30 mL 刻度线。将量筒中的水体全部倒入平底烧杯中,超声悬浮液 5 s 后,立即加入干净的 12 mm×12 mm 盖玻片,静置 4 h 后,用抽吸器小心将水体吸出,避免吸掉盖玻片上的沉积物。将平底烧杯放入 70 °C 烘箱中,烘干盖玻片后用 Norland Optical Adhesive 74 胶将其粘贴在载玻片上。按照标记顺序,每个显微镜载玻片上固定 8 个盖玻片,以便进行自动拍摄。按照 4~8 cm 的取样间隔对 MD06-3050 岩芯的 180 个样品进行颗石分析,并选取一些样品进行重复的玻片制备。

1.2.2 颗石数据采集

将两张载玻片(16 个样品)放置在自动双向圆偏光显微镜(Leica DM6000)的载物台上。自动对焦后,使用黑白 SPOTFLEX 相机(显微诊断仪)对每个样品的 123 个连续视域(每个视域的面积为 125 μm×125 μm)进行拍摄成像。在本研究中人工智能的使

用极大地提高了工作效率。SYRACO 是一个基于人工神经网络的软件程序^[13],可以有效识别图像中 33 组颗石藻分类群的所有标本^[14]。测量得到颗石的长度和质量这两个形态计量学参数,其中颗石质量的测量基于双折射法^[6-7]。SYRACO 系统统计测量得到优势颗石藻群体 Noelaerhabdaceae 科颗石平均长度和质量数据的主要属种命名分别为: EhuxRminutula, Rhaqii, Gericsonii, Gcaribbeanica, Goceanica, Povata, 这些命名是按照大小和形状进行的分类,代表某一类相似的颗石属种,例如 *Pseudoemiliana ovata*(与 *Pseudoemiliana lacunosa* 相近),其在 45 万年左右灭绝^[15],以此命名的序列代表的是大小和形状与之相近的颗石种属(如 *Gephyrocapsa Oceanica* 中间的桥缺失时)。此外, Rhaqii 代表小于 3 μm 的 *Reticulofenestra* 属颗石, EhuxRminutula 代表 *Emiliana huxleyi* 和较小的 *Reticulofenestra* 属以及 *Gephyrocapsa* 属颗石(3 μm 以下), Gericsonii 代表小于 2 μm 的 *Gephyrocapsa* 属颗石, Gcaribbeanica 主要代表 *Gephyrocapsa caribbeanica*, Goceanica 主要代表 *Gephyrocapsa oceanica*。因为本文的主要目的是计算 Noelaerhabdaceae 科包含的所有颗石的平均长度,因此,我们把以上所有获得属种的颗石的长度进行了加权取平均值,公式为: $(N_1 * L_{EhuxRminutula} + N_2 * L_{Rhaqii} + N_3 * L_{Gericsonii} + N_4 * L_{Gcaribbeanica} + N_5 * L_{Goceanica} + N_6 * L_{Povata}) / (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6)$,其中 L 代表每组的平均长度,下标代表不同分组, N 为对应的颗石个数。同样的方法也适用于 Noelaerhabdaceae 科颗石平均质量的计算。

1.2.3 颗石长度误差范围

Noelaerhabdaceae 科颗石的长度和质量测量结果共给出了 6 组数据,SYRACO 系统按照不同属种给出了标准偏差,其中系统默认输出的颗石长度标准偏差在每个层位均相同,具体见表 1。而对颗石质量标准偏差,系统默认按照每个层位分别给出了不同数值,为了方便表示,本文仅展示经过计算得到所有层位的平均质量标准偏差,如表 1 所示。

表 1 Noelaerhabdaceae 科颗石长度和质量的平均值和标准偏差
Table 1 Average and standard deviation of Noelaerhabdaceae coccolith length and mass

颗石类别	EhuxRminutula	Rhaqii	Gericsonii	Gcaribbeanica	Goceanica	Povata
长度平均值/μm	2.5	2.15	1.94	3.00	3.68	3.91
平均长度的标准偏差/μm	0.81	0.81	0.55	0.70	0.43	0.61
质量平均值/pg	3.01	2.90	1.76	5.64	6.19	7.11
平均质量的标准偏差/pg	1.83	1.98	1.30	2.27	1.74	1.85

2 结果

2.1 35 万年以来 *Noelaerhabdaceae* 科颗石的平均长度变化

在 MD06-3050 站位的所有研究样品中, 均含有丰富的 *Noelaerhabdaceae* 科颗石, 且保存状态良好。但每个样品中识别出的 *Noelaerhabdaceae* 科颗石的总数目不尽相同, 识别个数的范围为 11~14644, 个数较少的层位其对应结果在分析时舍弃不用, 以保证分析结果的可靠性。 *Noelaerhabdaceae* 的总数少于 67 个的样品层位有 23 个, 分别为: 44~46 cm (18 ka), 120~122 cm (64 ka), 132~134 cm (68.5 ka), 212~214 cm (103 ka), 220~222 cm (108 ka), 224~226 cm (109 ka), 232~234 cm (111 ka), 236~238 cm (113 ka), 244~246 cm (116 ka), 368~370 cm (171 ka), 372~374 cm (172 ka), 380~382 cm (175 ka), 384~386 cm (177 ka), 388~390 cm (178 ka), 392~394 cm (180 ka), 404~406 cm (184 ka), 412~414 cm (187 ka), 416~418 cm (189 ka), 422~424 cm (191 ka), 424~426 cm (193 ka), 464~466 cm (219 ka), 484~486 cm (229 ka), 488~490 cm (230 ka)。这些层位主要集中在 MIS 5、MIS 6、MIS 7。其中 10 个层位属于 MIS 6 期, 前期已有研究表明研究站位的钙质化石在冰期和冰消期保存程度很好, 排除了这些时期受溶解作用的影响^[9]。推测可能与颗石制片质量以及沉积物本身受到火山灰等粗组分的扰动相关。

如图 2b 所示, 35 万年以来 *Noelaerhabdaceae* 科颗石平均长度具有明显的长周期变化趋势, 即在 MIS 7 之前, 颗石平均长度值相对较高, 而在 MIS 7 之后, 颗石的平均长度整体相对降低。颗石平均长度没有明显的冰期和间冰期旋回的变化特征, 但是, 过去 35 万年以来, 每个冰期向间冰期过渡阶段均显示了相对较低的颗石平均长度。MIS 10 至 MIS 8 期间颗石的平均长度变化幅度相对较小, 自 MIS 7 开始平均长度变化范围增大, 其中 MIS 5、MIS 6 和 MIS 7 变化幅度较大, 且 MIS 5 和 MIS 6 出现平均长度最小值。不过值得注意的是颗石平均长度低值出现的层位相对较少, 不排除会受到制片时样品量选取、颗石密度分布以及拍摄图像中颗石数目过多或过少等因素对该数值的影响, 加密样品分析层位有望进一步对这些数值的可靠性进行评估。同样, 由于某些样品本身其颗石含量相对较低, 也会影响颗石统计的可靠性, 导致数据的连续

性受到一定的影响, 比如在 70~100 ka 期间, 颗石平均长度的数据有一定的缺失, 另外, 200~230 ka 期间, 仅有 6 个样品得到颗石平均长度的数据。不过本研究并不关注冰期和间冰期内部高分辨率气候事件的记录变化, 因此部分层位数据的缺失并不会影响到结果的可靠性。35 万年以来颗石的平均长度的变化范围为 1.60~3.20 μm , 平均值为 2.33 μm 。该变化范围比 Beaufort 等^[8]已发表的世界范围内热带大洋 50 万年以来颗石平均长度的变化范围 3.6~4.1 μm 要小, 且颗石长度的平均值比 Jin 等^[16]在南海站位岩芯对应时段记录的颗石长度的平均值低。

2.2 35 万年以来 *Noelaerhabdaceae* 科颗石平均质量变化

35 万年以来 *Noelaerhabdaceae* 科颗石的平均质量(图 2c)与平均长度的变化趋势存在较强的相似性, 具有明显的长周期变化特征, 且冰期-间冰期变化特征不明显。但是相对于平均长度, 平均质量变化频率更高, 变化幅度相对更大。MIS 10 至 MIS 8 期间, 颗石的平均质量变化幅度较小, 整体呈现高值。自 MIS 8 后期平均质量快速降低, 且变化幅度增大, 尤其 MIS 7 和 MIS 5 期变化幅度最大, 且 MIS 7 期和 MIS 5 期出现平均质量最小值。35 万年以来颗石平均质量的变化范围为 1.1~5.63 pg, 平均值为 3.1 pg。这比 Beaufort 等^[8]合成曲线显示的 *Noelaerhabdaceae* 科的平均颗石质量数值要低, 且整体低于 Jin 等^[16]利用 ImageJ 人工分析圆偏光拍摄的图像而获得的颗石平均质量。对比颗石平均质量和平均长度各自的平滑曲线, 可以看出两者的变化趋势非常相似。Su 等^[17]在南海 MD05-2904 岩芯中的记录同样也显示了颗石的平均质量和平均长度的变化存在较强的一致性, 这说明在热带西太平洋及其边缘海区 *Noelaerhabdaceae* 科颗石的长度是影响颗石质量的重要因素。颗石的长度大则颗石藻细胞的直径大, 进而颗石藻的体积也相对较大, 并使得颗石具有较高的质量。利用这种简单的对应关系, 在难以得到颗石质量数据的情况下, 利用 *Noelaerhabdaceae* 科颗石平均长度可以定性地估算出其颗石平均质量的变化幅度。

2.3 35 万年以来 *Noelaerhabdaceae* 科颗石的钙化作用强度指标

基于颗石平均质量和长度可以计算出钙化作用强度指标(Calcification index, 简称 CI), 计算方法参照 D'Amario 等^[18]和 Su 等^[17]建立和使用的方法,

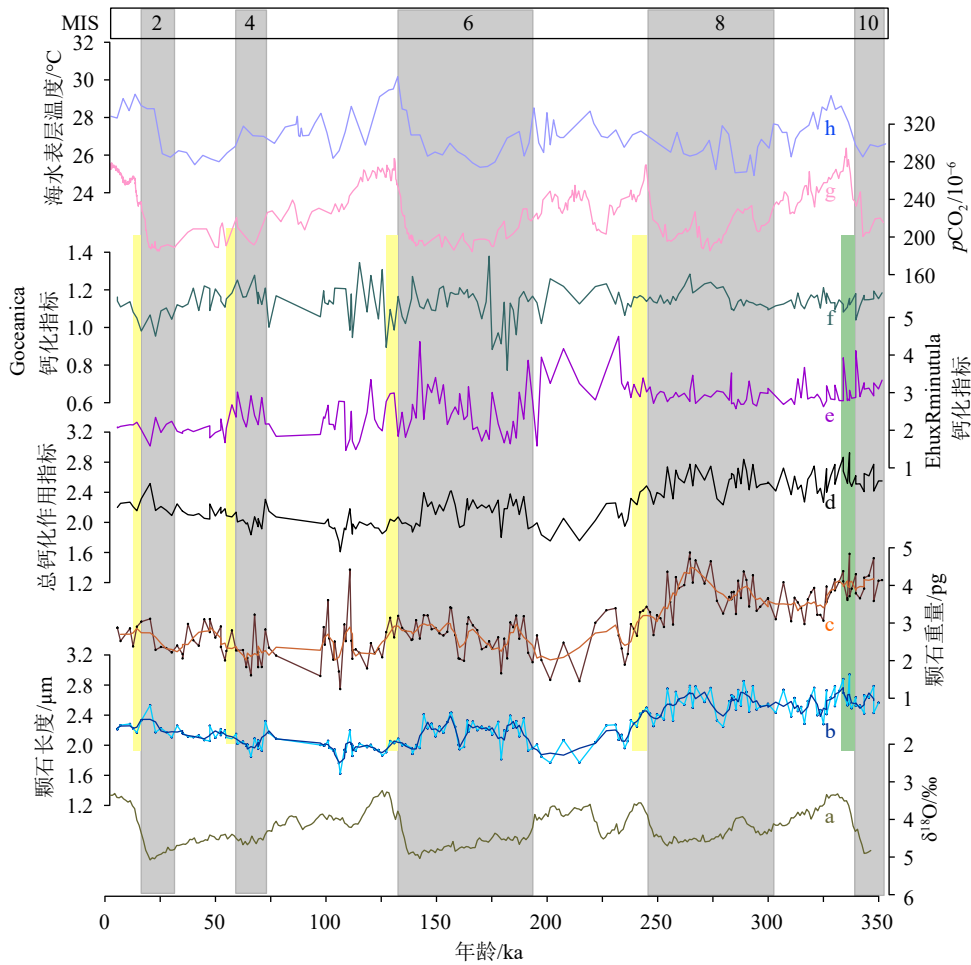


图2 35万年以来MD06-3050 站位 Noelaerhabdaceae 科颗石的平均长度和质量变化曲线及与其他指标对比

自下而上依次为: a: 全球大洋底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 合成曲线(LR04)^[11], b: MD06-3050 站位 35 万年以来 Noelaerhabdaceae 科颗石的平均长度变化曲线(蓝色曲线为颗石平均长度的五点平滑曲线), c: 颗石平均质量变化曲线(棕色曲线为颗石平均质量的五点平滑曲线), d: Noelaerhabdaceae 科颗石平均钙化作用强度指标曲线, e: EhuxRminutula 组颗石钙化作用强度指标曲线, f: Goceanica 组颗石钙化作用强度指标曲线, g: 来自 EPICA^[20] 和 Vostok^[21] 冰芯记录的大气 $p\text{CO}_2$ 浓度变化曲线, h: MD06-3047B 岩芯海水表层温度(SST)变化曲线^[22]。黄色和绿色条带代表冰期终止期(I, II, III, IV)以及间冰期早期。灰色条带代表冰期。

Fig.2 Variation curves in length and mass of Noelaerhabdaceae coccolith over the past 350 000 years in core MD06-3050

The curves, from bottom to top, show variations in the oxygen isotope stack LR04^[11] (a), average coccolith length change curve with a five-point smooth curve in blue (b), and average coccolith weight change curve with a five-point smooth curve in orange (c) at core MD06-3050, coccolith calcification index curve (d), calcification index of EhuxRminutula group (e), and of Goceanica group (f) at core MD06-3050; atmospheric $p\text{CO}_2$ concentration recorded in the ice cores EPICA^[20] and Vostok^[21] over the past 350,000 years (g), and sea surface temperature (SST) curve of MD06-3047B core^[22] (h). The yellow and green bands represent Termination I, II, III, IV, and the early period of interglacials. The gray bands represent ice ages, and the top number represents the ice ages number of the Marine Isotope Stage (MIS).

CI 的计算公式为:

$$\text{CI} = \text{Ms}/\text{Mn} \quad (1)$$

其中, Ms 是 SYRACO 测量的颗石平均质量, Mn 是根据 Young 和 Ziveri^[19] 建立的公式来计算的标准化质量:

$$\text{Mn} = k_s \times L^3 \times \rho \quad (2)$$

在公式(2)中, L 为 SYRACO 测量的平均颗石长度, ρ 为碳酸钙的密度($2.7 \text{ pg}/\mu\text{m}^3$), k_s 是估计的形

状因子^[19]。Noelaerhabdaceae 科颗石平均钙化作用强度指标的计算基于颗石平均质量和平均长度, 公式(2)中 k_s 赋值 0.05^[17]。同时, 分别对 EhuxRminutula 和 Goceanica 两组颗石进行钙化作用指标的计算(k_s 分别为 0.02 和 0.05)^[17], 以评估不同大小的颗石其钙化指标与平均颗石钙化作用指标的异同。通过计算得到的 CI 指标如图 2d 所示, 颗石整体平均 CI 的变化范围是 1.6~3, 整体的变化趋势与颗石的质量和长度变化趋势相似, 但相对质量和长度变化

来说, CI 指标具有相对明显的冰期-间冰期变化特征。从图 2 可以看出, CI 值在 MIS 6、MIS 8、MIS 9 均显示出高值, 指示了这些时段 Noelaerhabdaceae 科颗石的钙化作用相对较强。而在冰期末期以及冰消期 CI 数值则相对较低, 指示了这些时期平均钙化作用相对较弱。EhuxRminutula 组颗石和 Goceanica 组颗石的钙化作用指标的长期变化趋势有一定的差异, 前者如图 2e 所示, 在 MIS 7 期以及之前钙化强度明显较高, 自 MIS 6 期开始突然降低, 而后者(图 2f)的长期变化特征不甚明显。两者在冰期向间冰期过渡期, 则具有相似的变化特征, 即在 MIS 10/MIS 9、MIS 8/MIS 7、MIS 6/MIS 5、MIS 4/MIS 3 以及 MIS 2/MIS 1 等冰消期阶段, 钙化作用强度均相对较低, 这些特征与平均钙化作用强度指标的变化也存在着一致性。

3 讨论

3.1 大气 $p\text{CO}_2$ 对颗石钙化作用的影响

将颗石的平均质量、平均长度以及钙化作用指标与冰芯中的 $p\text{CO}_2$ 记录^[20-21]进行对比, 发现这些指标在某些时段与大气 $p\text{CO}_2$ 浓度具有一定的相似性(图 2)。为了评估钙化作用对大气 $p\text{CO}_2$ 的响应, 我们分析了 CI 指标的变化特征。在 LGM 后期至末次冰消期, 也即冰期终止期 Termination 1, 大气 CO_2 浓度开始逐渐增加, 颗石平均质量整体呈现逐渐降低的趋势(见图 2c 桔色平滑曲线), 颗石的长度也逐渐减少(图 2b), 颗石的钙化作用指标整体呈现较低值。同样的, MIS 6 向 MIS 5 过渡的倒数第二个冰期终止期(Termination II)以及 MIS 5 期早期(MIS 5e), 大气 $p\text{CO}_2$ 浓度很高, 对应的钙化作用的指标出现降低的趋势。另外, MIS 8 后期向 MIS 7 期过渡的倒数第三个冰期终止期(Termination III), $p\text{CO}_2$ 的较高浓度对应于颗石相对较低的钙化程度。以上特征说明在气候变化较为明显的时期, $p\text{CO}_2$ 浓度对热带西太平洋颗石的钙化作用产生了一定的影响。

这是由于颗石藻的钙化作用会受到海水碳酸盐体系变动的影响。大气 $p\text{CO}_2$ 随着海气相互作用进入到海水中, 从而改变海水碳酸盐体系, 进而影响颗石藻的钙化作用, 使其对大气 $p\text{CO}_2$ 浓度的变化产生反馈。在热带太平洋海区, 海水温度与大气 CO_2 浓度有着密切的关系。根据 Jia 等^[22], SST 的变化主要受到大气 $p\text{CO}_2$ 变化的影响, 随着 CO_2 浓度

的增加, 表层海水温度也升高, 海水的 pH 有所下降。此外, 在冰消期, 由于大洋深部呼吸碳快速释放出来^[23], 大气 CO_2 浓度快速升高, 势必也会降低海水的 pH 值。因此相对冰期来说, 冰消期和间冰期期间西太平洋其大洋酸化程度加强。根据室内培养实验、野外调查实验以及地质记录^[17, 24-27], 颗石藻钙化作用的程度会随着大洋酸化的加强而有所降低, Su 等^[17]对南海海区的岩芯颗石钙化指标的分析表明, 颗石藻 *Emiliania huxleyi* 和 small *Gephyrocapsa* spp. 组合的钙化作用和质量与海水 pH 以及 $p\text{CO}_2$ 的变化相关。我们的记录显示大气 CO_2 浓度较高的冰期终止期颗石藻钙化作用确实相对较弱。不过值得注意的是, 跟大气 $p\text{CO}_2$ 较高且大洋酸化程度较强的间冰期相比, 其钙化作用程度(即 CI 数值)与之持平, 说明尽管大气 $p\text{CO}_2$ 和 SST 协同变化下, 颗石的质量和长度等钙化作用指标会受到影响, 但其并非唯一的影响因素。要想厘清多个因素对钙化作用的影响, 需要后续深入研究更多的环境和碳酸盐系统参数指标。尤其值得注意的是 MIS 10 向 MIS 9 过渡的冰消期, 颗石的钙化作用程度具有较大的波动, 且变化频率和幅度都相对较高。这是由于该时期恰处于中布容颗石藻爆发事件^[28-29], 大量 *Gephyrocapsa* 属颗石的繁盛影响了钙化指标的数值。这也从一定程度上说明了颗石藻的群落组成会影响颗石的平均质量和长度等与钙化作用相关的指标。

此外, 颗石藻对 $p\text{CO}_2$ 变化存在着双重的影响作用, 会通过钙化作用释放 CO_2 , 成为碳源, 同时光合作用则会通过吸收 CO_2 并生成有机质而成为碳汇, 因此颗石藻在碳循环过程中的双重角色使得它们能够对全球碳库的变动产生一定的调节作用。基于在近 3 个冰期终止期颗石藻的钙化作用相对较低的研究结果, 初步推断这些时期内颗石藻作为反向碳酸盐泵对大气 $p\text{CO}_2$ 产生的影响较为有限。

3.2 日照辐射对颗石长度和质量变化的调控作用

颗石藻不同种属相对丰度的变化, 可以直接影响到颗石的平均质量。比如温带大西洋 ODP 980 岩芯记录显示^[30], 在倒数第二次冰消期的颗石藻群落组合的变化影响了颗石平均质量的变化, 从而掩盖了大气 $p\text{CO}_2$ 的升高对颗石钙化作用影响的信号。上一小节也提出了大规模全球颗石藻爆发事件也会掩盖 $p\text{CO}_2$ 对颗石藻钙化作用的影响。因此, 分析颗石藻群落组合的变化是我们在应用颗石平均质量和长度变化等钙化作用指标时不可忽略的环

节。在热带大洋,当海水混合层表层颗石藻种属繁盛,会导致颗石藻深层水体种属(主要是 *Florisphaera profunda* (*F. profunda*))的相对丰度有所减少^[31-33]。因此,我们推断,表层水体中 *Gephyrocapsa* spp. 和 *Reticulofenestra* spp. 等颗石藻种属的繁盛,很可能导致颗石的平均质量、平均长度以及钙化程度有所增加。相反,当颗石藻表层种属减少,初级生产力降低时,颗石的平均质量和平均长度则会有所降低。事实上,图 3d 中,颗石的平均长度的变化趋势与同一岩芯已发表的 *F. profunda* 的相对百分含量的变

化曲线^[34]确实存在较好的对应关系。*F. profunda* 含量低的时候(注意图 3d 中纵轴坐标为逆序),颗石的平均长度较大,而 *F. profunda* 含量高的时候,颗石的平均长度则相对较小。尤其值得注意的是,在 270~350 ka, *F. profunda* 的相对百分含量非常低,这是该时期全球范围内的 *Gephyrocapsa* 属颗石藻的爆发造成的^[28-29],该时段颗石的平均长度、平均质量以及钙化指标均出现高值,同时 EhuxRminutula 组颗石的 CI 指标数值也较高,进一步表明该时期优势颗石藻种属的钙化作用是加强的。

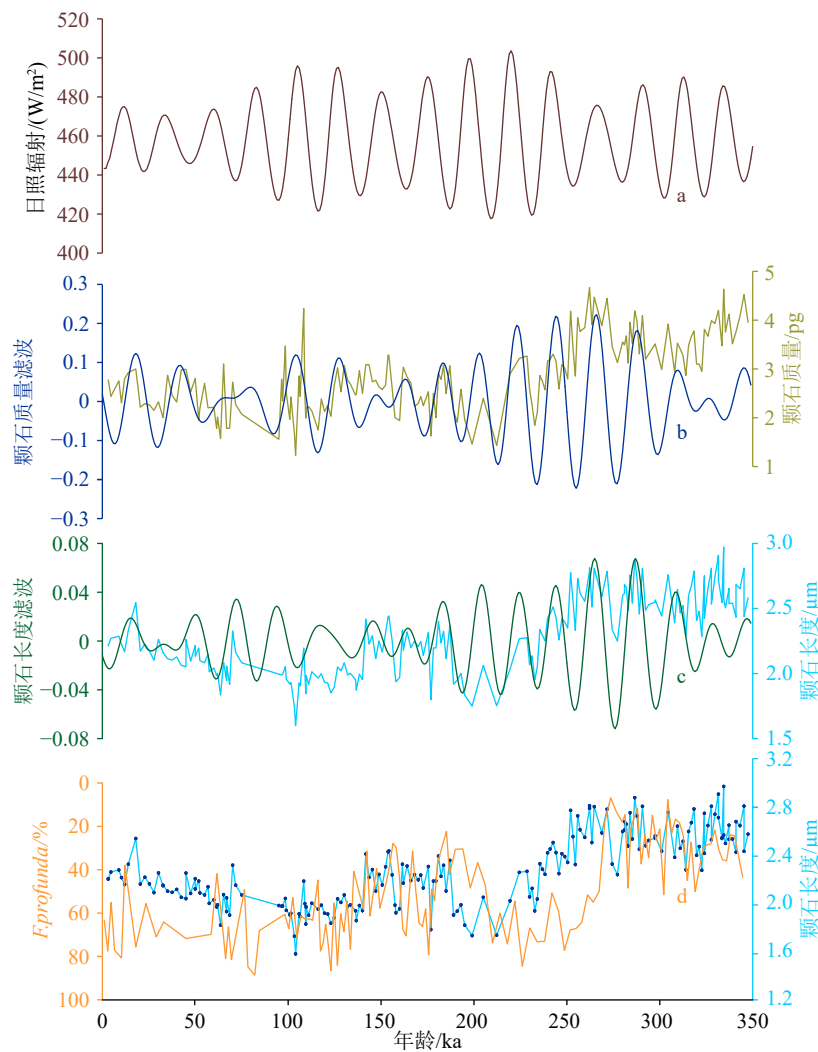


图 3 35 万年以来 MD06-3050 岩芯 Noelaerhabdaceae 科颗石平均质量和长度滤波曲线及日照辐射量对比曲线
自上而下依次是: a: 北半球 15°N 夏季日照辐射曲线; b: 颗石平均质量变化曲线和对该曲线的 23 ka 滤波曲线; c: 颗石平均长度变化曲线和对该曲线的 23 ka 滤波曲线; d: 颗石平均长度变化曲线和相同岩芯的 *Florisphaera profunda* 相对百分含量曲线(注意坐标轴是逆序)。其中日照辐射曲线是由 Acycle 软件^[35]根据 Laskar 等^[36]计算的北纬 15°在 35 万年以来 5 月 21 日至 7 月 23 日接受的日平均辐射值。

Fig.3 Variations in average length and average mass of Noelaerhabdaceae coccolith and their 23 ka-filter curves

a: the mean daily insolation curve of 15°N in the Northern Hemisphere between May 21 and July 23 (brown) in the past 350 000 according to the Laskar et al.^[36] calculated by Acycle software^[35]; b: the mean coccolith mass (yellow green) and its 23 ka filtering curve (dark blue); c: the mean coccolith length curve (light blue) and its 23 ka filtering curve (green); d: the average coccolith length change curve of Noelaerhabdaceae in MD06-3050 core over the past 350 000 years (light blue) and the relative abundance curve of *Florisphaera profunda* for the same core (orange) (note that the axes are in reverse order).

地球轨道变化不仅能够驱动全球气候周期性变化, 而且对大洋微体浮游植物的生长和演化也有重要的影响^[8]。利用 *F. profunda* 的相对百分含量, 通过转换函数可以计算出海洋表层初级生产力, 前人研究表明热带印度洋的海洋初级生产力变化在过去 90 万年以来主要受到日照辐射和岁差周期影响和控制^[32-33]。近年来, Beaufort 等^[8]通过对印度洋、大西洋和热带太平洋的多个岩芯的颗石质量分异指数 (MDI) 的分析, 发现晚上新世以来地球轨道偏心率是调控颗石藻演化的重要因素。对 MD06-3050 岩芯的颗石平均长度和平均质量进行频谱分析, 发现两者均具有较为明显的 23 ka/19 ka 和 21 ka 的岁差周期 (图 4), 说明岁差这一地球轨道参数自 35 万年以来对颗石藻的大小和质量演化具有重要的调控作用。

MD06-3050 岩芯记录显示初级生产力指标变化曲线与颗石平均长度指标具有良好对应关系, 一方面颗石藻的群落组成对于颗石的平均长度和质量具有一定的影响, 另一方面, 由于热带大洋日照辐射是影响初级生产力的重要因素, 因此颗石平均长度和质量变化也可以同日照辐射联系起来。日照辐射与颗石藻生产力的变化的一致性, 前人研究提出可以通过岁差周期控制的热带 ENSO 过程影响研究区营养盐的变动来解释^[33], 另一方面, 也有可能是北半球夏季日照辐射强促进颗石藻生长^[37]。北半球夏季日照辐射强度高, 白天日照时间长, 有利于颗石藻的生长。日照辐射强度随地质时间尺度上的周期性变化, 是地球轨道参数 (偏心率、倾角和岁差) 综合变化导致的结果^[11, 38]。日照辐射直接影响表层大洋接受光的量, 并影响其温度条件, 进而对浮游生物的生长产生重要影响^[39]。充足的光

线和温度有利于光合作用, 因此日照辐射在地质尺度上的变动可以影响颗石藻的生产力, 即日照辐射加强, 将提高颗石藻的生产力^[40-41]。与此同时, 颗石藻的钙化作用也依赖于光^[42]。大量研究观察到细胞内碳酸钙含量随辐照度的增加而增加^[27, 43]。反之, 低光合有效辐射可使颗石中的碳酸钙含量减少, 并使细胞变小。Su 等^[17]发现南海北部两个群组的颗石的钙化作用变化均显示了明显的岁差周期, 认为可能与北半球太阳辐射具有相关性。

为了验证日照辐射与颗石平均长度的相关性, 我们对 MD06-3050 岩芯得到的颗石平均质量和平均长度进行了 23 ka 的滤波, 并将滤波曲线与 35 万年以来北半球 15°N 夏季平均日照辐射变化曲线 (Laskar) 进行对比, 发现它们之间在周期上具有非常好的一致性。这说明日照辐射是影响研究区 Noelaerhabdaceae 科颗石藻的生长和钙化作用的重要因素, 进一步支持了前人的假说。不过值得注意的是, 日照辐射曲线的变化幅度与其他两条滤波曲线的变化幅度存在着较大的差别, 说明日照辐射强度对颗石钙化作用的影响并非是线性的。

4 结论

(1) 35 万年以来热带西太平洋 Noelaerhabdaceae 科颗石的平均长度、平均质量以及估算的钙化作用指标曲线表现了较强的相似性, 三者均无明显的冰期旋回变化特征, 但具有明显的两段式长周期变化趋势。

(2) MIS 10/MIS 9、MIS 8/MIS 7、MIS 6/MIS 5、MIS 2/MIS 1 这四个冰期向间冰期过渡的冰期终止期, 在较高的大气 $p\text{CO}_2$ 浓度下, 颗石的平均钙化作

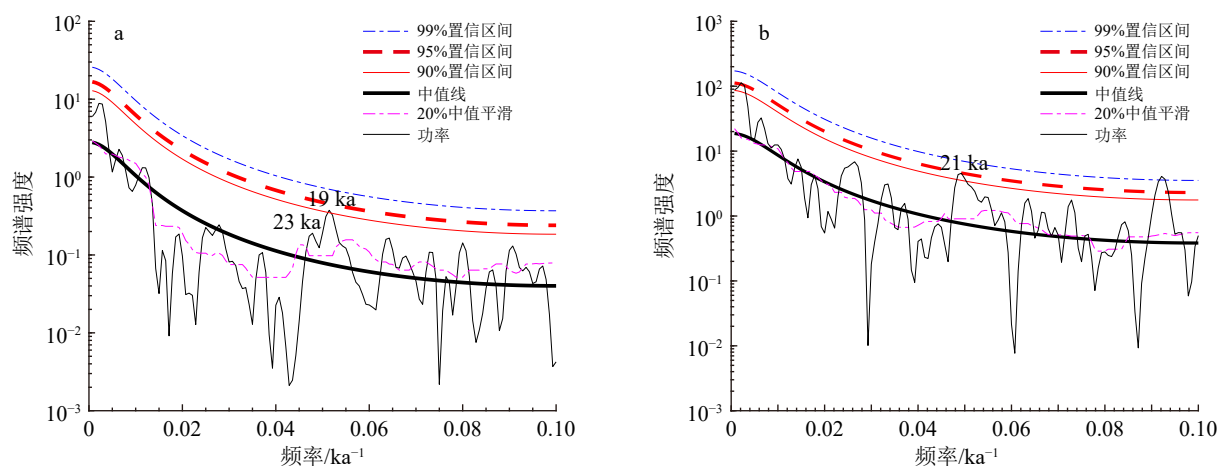


图 4 西太平洋暖池北部边缘 MD06-3050 岩芯 350 ka 以来颗石平均长度频谱分析 (a) 与颗石平均质量频谱分析 (b)

Fig.4 Spectral power results showed by Acycle: (a) average coccolith length, (b) average coccolith mass for core MD06-3050

用较低,但是钙化指标与间冰期的钙质指标数值相比,其大小相当或略低,说明了 $p\text{CO}_2$ 不是影响冰消期/间冰期 Noelaerhabdaceae 科颗石藻钙化作用的唯一因素。

(3)初级生产力的变化曲线与颗石平均长度的变化曲线相似,说明初级生产力,也即颗石藻群落组成的分布是影响颗石平均长度的重要因素之一。通过对颗石平均长度和平均质量进行 23 ka 滤波,并与日照辐射曲线进行对比,发现三者之间具有很好的一致性,指示了地球轨道参数对颗石钙化作用具有一定的调控作用。

致谢: 感谢参加航次调查工作的全体科考队员,同时感谢审稿专家提出的修改建议。

参考文献 (References)

- [1] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2 [J]. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [2] Fabry V J, Seibel B A, Feely R A, et al. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(3): 414-432.
- [3] Rost B, Riebesell U. Coccolithophores and the biological pump: responses to environmental changes[M]//Thierstein H R, Young J R. Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact. Berlin: Springer, 2004: 99-125.
- [4] Brownlee C, Taylor A. Calcification in coccolithophores: a cellular perspective[M]//Thierstein H R, Young J R. Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact. Berlin: Springer, 2004: 31-49.
- [5] Milliman J D. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: budget of a nonsteady state[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 927-957.
- [6] Beaufort L. Weight estimates of coccoliths using the optical properties (birefringence) of calcite[J]. *Micropaleontology*, 2005, 51(4): 289-297.
- [7] Beaufort L, Barbarin N, Gally Y. Optical measurements to determine the thickness of calcite crystals and the mass of thin carbonate particles such as coccoliths[J]. *Nature Protocols*, 2014, 9(3): 633-642.
- [8] Beaufort L, Bolton C T, Sarr A- C, et al. Cyclic evolution of phytoplankton forced by changes in tropical seasonality[J]. *Nature*, 2022, 601(7891): 79-84.
- [9] Sun H J, Li T G, Chang F M, et al. Deep-sea carbonate preservation in the western Philippine Sea over the past 1Ma[J]. *Quaternary International*, 2017, 459: 101-115.
- [10] Sun H J, Li T G, Liu C L, et al. Variations in the western Pacific warm pool across the mid-Pleistocene: Evidence from oxygen isotopes and coccoliths in the West Philippine Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 483: 157-171.
- [11] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): PA1003.
- [12] Beaufort L. Adaptation of the random settling method for quantitative studies of calcareous nanofossils[J]. *Micropaleontology*, 1991, 37(4): 415-418.
- [13] Beaufort L, Dollfus D. Automatic recognition of coccoliths by dynamical neural networks[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 51(1-2): 57-73.
- [14] Barbarin N. La Reconnaissance Automatisée des Nanofossiles Calcaires du Cénozoïque[D]. Français: Aix-Marseille University, 2014.
- [15] Young J R. Neogene[M]//Bown P R. Calcareous Nanofossil Biostratigraphy. London: Micropalaeontological Society Publication Series, 1998.
- [16] Jin X B, Ma W T, Liu C L. Origin of the long-term increase in coccolith size and its implication for carbon cycle and climate over the past 2 Myr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 290: 107642.
- [17] Su X, Liu C L, Beaufort L. Late Quaternary coccolith weight variations in the northern South China Sea and their environmental controls[J]. *Marine Micropaleontology*, 2020, 154: 101798.
- [18] D'Amario B, Ziveri P, Grelaud M, et al. *Emiliania huxleyi* coccolith calcite mass modulation by morphological changes and ecology in the Mediterranean Sea[J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0201161.
- [19] Young J R, Ziveri P. Calculation of coccolith volume and its use in calibration of carbonate flux estimates[J]. *Deep Sea Research II: Tropical Studies in Oceanography*, 2000, 47(9-11): 1679-1700.
- [20] Monnin E, Indermühle A, Dällenbach A, et al. Atmospheric CO_2 concentrations over the last glacial termination[J]. *Science*, 2001, 291(5501): 112-114.
- [21] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429-436.
- [22] Jia Q, Li T G, Xiong Z F, et al. Hydrological variability in the western tropical Pacific over the past 700 kyr and its linkage to Northern Hemisphere climatic change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 493: 44-54.
- [23] Jaccard S L, Galbraith E D, Sigman D M, et al. Subarctic Pacific evidence for a glacial deepening of the oceanic respired carbon pool[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1-2): 156-165.
- [24] Beaufort L, Probert I, de Garidel-Thoron T, et al. Sensitivity of coccolithophores to carbonate chemistry and ocean acidification[J]. *Nature*, 2011, 476(7358): 80-83.
- [25] Bach L T, Bauke C, Meier K J S, et al. Influence of changing carbonate chemistry on morphology and weight of coccoliths formed by *Emiliania huxleyi*[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(8): 3449-3463.
- [26] De Bodt C, Van Oostende N, Harlay J, et al. Individual and interacting effects of $p\text{CO}_2$ and temperature on *Emiliania huxleyi* calcification: study of the calcite production, the coccolith morphology and the coccosphere size[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(5): 1401-1412.
- [27] Zondervan I, Rost B, Riebesell U. Effect of CO_2 concentration on the PIC/POC ratio in the coccolithophore *Emiliania huxleyi* grown under light-limiting conditions and different day-lengths[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 272(1): 55-70.
- [28] Barker S, Archer D, Booth L, et al. Globally increased pelagic carbon-

- ate production during the Mid-Brunhes dissolution interval and the CO₂ paradox of MIS 11[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23-24): 3278-3293.
- [29] Bollmann J, Baumann K H, Thierstein H R. Global dominance of Gephyrocapsa coccoliths in the late Pleistocene: selective dissolution, evolution, or global environmental change?[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(5): 517-529.
- [30] Meier K J S, Berger C, Kinkel H. Increasing coccolith calcification during CO₂ rise of the penultimate deglaciation (Termination II)[J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 112: 1-12.
- [31] Molino B, McIntyre A. Precessional forcing of nutricline dynamics in the Equatorial Atlantic[J]. *Science*, 1990, 249(4970): 766-769.
- [32] Beaufort L, Lancelot Y, Camberlin P, et al. Insolation cycles as a major control of equatorial Indian Ocean primary production[J]. *Science*, 1997, 278(5342): 1451-1454.
- [33] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene[J]. *Science*, 2001, 293(5539): 2440-2444.
- [34] 孙晗杰, 李铁刚, 苏翔, 等. 中更新世以来西菲律宾海上层水体结构演化特征: 来自钙质超微化石 *Florisphaera profunda* 的证据 [J]. 第四纪研究, 2011, 31(2): 216-226. [SUN Hanjie, LI Tiegang, SU Xiang, et al. Upper water mass structure evolution in the western Philippine Sea since mid-Pleistocene: evidence from the abundance of coccolith species *Florisphaera profunda*[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 216-226.]
- [35] Li M S, Hinnov L, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 127: 12-22.
- [36] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [37] Cavaleiro C, Voelker A H L, Stoll H, et al. Insolation forcing of coccolithophore productivity in the North Atlantic during the Middle Pleistocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 191: 318-336.
- [38] Berger A. Milankovitch theory and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 1988, 26: 624-657.
- [39] Vallina S M, Simó R. Strong relationship between DMS and the solar radiation dose over the global surface ocean[J]. *Science*, 2007, 315(5811): 506-508.
- [40] Nimer N A, Merrett, M J. Calcification rate in *Emiliana huxleyi* Lohmann in response to light, nitrate and availability of inorganic carbon[J]. *New Phytologist*, 1993, 123(4): 673-677.
- [41] Zhang Y. Effects of Temperature, Carbonate Chemistry and Light Intensity on the Coccolithophores *Emiliana Huxleyi* and *Gephyrocapsa Oceanica*[D]. University of Kiel, 2014.
- [42] Zondervan, I. The effects of light, macronutrients, trace metals and CO₂ on the production of calcium carbonate and organic carbon in coccolithophores-a review[J]. *Deep-Sea Research II: Tropical Studies in Oceanography*, 2007, 54(5-7): 521-537.
- [43] van Bleijswijk J D L, Kempers R S, Veldhuis M J, et al. Cell and growth characteristics of type A and B of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) as determined by flow cytometry and chemical analyses[J]. *Journal of Phycology*, 1994, 30(2): 230-241.