

长链烯酮在西北大西洋重建全新世气候变化的研究进展

王 丹, RASHID Harunur

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 大量研究表明, 长链烯酮不饱和度($U_{37}^{K'}$ 指数)可用于重建过去的海面温度(sea surface temperature, SST), 然而是否存在其他因素导致实际温度与重建的 SST 之间存在差异, 以及重建的温度是代表年均 SST 还是季节性温度都仍有争议。除了反映温度, 在受季节性海冰影响或 SST 较低的区域, 长链烯酮 $C_{37:4}$ 在 C_{37} 中的占比($\%C_{37:4}$)还能为盐度变化提供重要信息, 特别是在拉布拉多和格陵兰岛陆地边缘海域。在此总结了西北大西洋长链烯酮重建古海洋气候的研究进展, 指出了在使用 $U_{37}^{K'}$ 重建 SST 时, 需要考虑营养盐、横向平流、成岩作用以及烯酮母源的生长季节性等因素, 认为 $\%C_{37:4}$ 有望用作重建过去海冰融水或海冰覆盖情况的替代指标, 但季节性因素对烯酮重建古温的影响程度的评估还需要进一步研究。

关键词: 长链烯酮; 海洋表层温度; 冰融水; 烯酮 $\%C_{37:4}$; 西北大西洋

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)1-0181-11

DOI: 10.11759/hyxx20201228005

在北大西洋海域, 墨西哥湾流(Gulf Stream, GS)及其延伸的北大西洋流(North Atlantic Current, NAC)从热带向高纬度海域传输暖而咸的海水, 影响了流经区域的水文条件变化, 并向上层大气释放热量和水汽, 因而北大西洋在调节全球气候中发挥着重要作用。NAC 和伊尔明厄洋流(Irminger Current, IC)、西格陵兰洋流(West Greenland Current, WGC)以及拉布拉多洋流(Labrador Current, LC)共同构成副极地环流(Subpolar Gyre, SPG)的重要组成部分^[1], 将北大西洋不同区域的环境变化联系起来。在北大西洋中高纬度海域, 北极淡水和极地冰盖融水的输入能够影响海洋环流的强弱, 进而对气候造成影响。北大西洋环境影响因素众多, 季节性差异较大, 是评估气候变化的重要区域。其中拉布拉多海不仅存在冷暖表层水的相互作用, 也是北大西洋两个海水下沉区域之一, 因而是气候研究的关键区域之一。常用的研究古气候变化的指标有: 有孔虫相关指标(组合特征、Mg/Ca 比值和氧同位素 $\delta^{18}O$ 等)^[2-5]、硅藻(diatom)或沟鞭藻囊孢(dinocyst)组合^[6-8]、四醚膜类脂物(glycerol dialkyl glycerol tetraethers, GDGTs)的古温标(TEX₈₆)^[9-10]、长链烯酮(简称, 烯酮)等。其中, 烯酮在古气候研究中已有广泛的应用, 一般是利用 $U_{37}^{K'}$ 或 U_{37}^{K} 指数重建古海面温度(sea surface temperature, SST)。烯酮可用于更长时间尺度的古气候变化研究^[11-14], 但本文主要

讨论其在北大西洋全新世(约 0~10 ka BP)的应用。

全新世西北大西洋古气候变化的控制因素众多, 其中 3 个最主要的变化机制为: 1) 北半球 65°N 夏季太阳辐射的减弱是导致温暖的早全新世向较冷的晚全新世气候转变的主要机制之一^[15-17]; 2) 来自极地或陆地残留冰盖的淡水输入通过改变海洋表层温度和盐度, 直接影响深层水的形成^[18-19]。特别是有研究表明, 劳伦太德冰盖的 Agassiz 湖和 Ojibway 湖崩塌排泄的淡水引发了 10.2 ka、8.2 ka 等冷事件, 并削弱了深层水的形成^[20-22]; 3) 末次冰期阶段, 北极锋从原本的南部位置撤退, 使得表层洋流(冷而淡的 LC 和暖而咸的 NAC)重组和增强(图 1)。因此, 研究认为 SPG 强弱状态的转换取决于剩余冰盖排放的淡水量^[18-19, 23]。表层洋流的重组显著影响了加拿大东部边缘以及更为广阔的北大西洋北部的 SST^[24]。而 SST 的重建有利于评估全新世以来的古气候变化。

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776064, 41976056)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, Nos. 41776064; 41976056]

作者简介: 王丹(1996—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事古海洋学研究, 电话: 15061952053, E-mail: 943795544@qq.com; RASHID Harunur(1969—), 通信作者, 男, 教授, 博导, 从事海洋地质、古海洋学、低温地球化学研究, E-mail: Harunurbhola@gmail.com

在北大西洋, 烯酮不饱和度曾用于重建加拿大东边缘海域、挪威海等区域的 SST^[4, 15, 25-27]。西北大西洋弗吉尼亚(Virginia)与纽芬兰岛(Newfoundland)之间的陆坡区域重建的温度变化显示, 陆坡上覆 SST 在 ~11 ka BP 到 0 ka BP 期间降低了 4~10 °C^[15, 28-29]。除了这一降温趋势, 烯酮在北大西洋其他海域重建的 SST 变化较为波动, 能记录一些影响范围较为广泛的气候变化事件, 如: 在公元 1000—1350 年间北大西洋的大范围海域出现的气候异常变暖, 即中世纪气候异常 (medieval climate anomaly, MCA); 公元 1350—1850 年间气候异常寒冷的时期, 即小冰期 (Little Ice Age, LIA)^[26, 30]。近年来研究表明烯酮指标不仅可以作为温度指标, 在亚极地海域烯酮 $C_{37:4}$ 在 C_{37} 中的占比 (% $C_{37:4}$) 还可以指示其他海洋环境变化, 如: 冰融水、海冰覆盖^[4, 31-34]。此外, % $C_{37:4}$ 也可用于评估高海拔和高纬度含盐湖泊的表层盐度变化^[35-36]。然而, 不同环境合成烯酮的定鞭藻种属有所不同, 含盐湖泊或盐湖、沿海地区中主要为 II 组 (如 *Isochrysis galbana* 和 *Tisochrysis lutea*), I 组可见于高纬度淡水湖泊, 而海洋环境中的烯酮母源为 III 组 (*E. huxleyi* 和 *G. oceanica*)^[34, 37-38], 也是本文主要提及的种类。本文主要总结了全新世长链烯酮指标 (U_{37}^K 指数、% $C_{37:4}$) 在北大西洋的应用, 讨论了利用该指标所需要考虑到的影响因素。

1 长链烯酮重建 SST 的概况

长链烯酮 (C_{37} 、 C_{38} 、 C_{39}) 主要由广泛分布在海洋表层的颗石藻 *Emiliania huxleyi* 和 *Gephyrocapsa oceanica* 合成^[39-41]。古海洋温度重建主要是利用长链烯酮 C_{37} ($C_{37:2}$ 、 $C_{37:3}$ 、 $C_{37:4}$), 它由 37 个碳原子组成, 分别有 2、3 或 4 个碳-碳双键。Brassell 等人^[42]最早提出这一指标, 将长链烯酮不饱和度表达为 $U_{37}^K = [C_{37:2}-C_{37:4}]/[C_{37:2}+C_{37:3}+C_{37:4}]$ 。进而 Prahl 和 Wakehan^[43]将这一指标简化为 $U_{37}^K = [C_{37:2}]/[C_{37:2}+C_{37:3}]$, 提出校准方程: $U_{37}^K = 0.033T + 0.043$ 。后来, Prahl 等^[44]又将校准方程改进为 $U_{37}^K = 0.034T + 0.039$, 西北大西洋和北太平洋古温重建常用此校准方程^[15, 26-27, 45-46]。Müller 等^[47]基于分布在 60°S~60°N, 温度范围为 0~29 °C 的大西洋、太平洋和印度洋的表层沉积物样品, 指出了 U_{37}^K 和年均 SST (以 T 表示) 之间的相关性, 得出校准方程 $U_{37}^K = 0.033T + 0.044$ 。在 2006 年, Conte 等^[48]也提出表层海水样品 (-1~30 °C) 的 U_{37}^K 指数对于烯酮生产温度的非线性

校准方程: $T = -0.957 + 54.293(U_{37}^K) - 52.894(U_{37}^K)^2 + 28.321(U_{37}^K)^3$ ($r^2 = 0.97$, $n = 567$); 又基于表层沉积物的 U_{37}^K 数据, 提出 0 m 深度的年均海表温 (annual sea surface temperature, AnnO) 的校准方程: $AnnO = 29.876(U_{37}^K) - 1.334$ ($r^2 = 0.97$, $n = 592$)。尽管在建立校准方程时, 一定程度上考虑到了极端的温度条件, 但此前研究表明烯酮温标重建 SST 仍有温度限制为 5~29 °C^[49-50]; 当 $T < 5$ °C 时, 数据偏离线性关系, 烯酮指标重建 SST 的不确定性增加^[34]。通常认为烯酮不饱和度重建的是年均 SST, 但随着研究者对其深入研究发现烯酮的合成具有一定的季节性^[51-52], 从而可能导致重建的温度与实际年均 SST 不符。因而, 进一步研究烯酮指标应用的影响因素十分必要。

2 西北大西洋长链烯酮的研究

在世界各个大洋中, 长链烯酮广泛用于重建古气候学变化。这在北大西洋海域已有相当多且早的应用, 不仅是因为该海域本身的研究意义, 也是因为这里具有不同的环境特征, 有利于探讨长链烯酮的应用差异。图 1, 表 1 中列出了北大西洋海域 (以西侧为主) 烯酮的研究情况, 但图表中并未列出所有的数据, 仅列出位于 30°N 与 80°N 之间的重要数据点, 在文中有所使用。

2.1 烯酮指标的现代过程

从烯酮源生物的繁殖 (烯酮合成季节)、栖息 (透光层) 和沉降过程着眼, 有利于评估烯酮指标 (U_{37}^K , % $C_{37:4}$) 应用的可行性以及判断是否有其他的因素影响其应用。常见的便是通过表层颗粒有机物 (surface particulate organic matter, SPOM)、沉降颗粒物或表层沉积物样品来对烯酮信号产生及保存的过程进行研究, 在获取样品的同时可以测得温度。例如: Prahl 等^[53]于 250 m 深度捕获的沉降颗粒的季节性记录显示, 生物标志物通量在夏季达到最高, 而此时的海洋环境具有这样一个特征: 表层水持续分层, 次表层叶绿素最大值 (surface chlorophyll maximum, SCM) 层存在于缅因湾的温跃层上部 (也是透光层底部), SCM 层光照较弱, 但却有充足的营养物质可供浮游植物生长。通过比较沉降颗粒和表层沉积物的生物标志物含量和组成, 发现由于早期成岩作用 (early diagenesis) 的影响, 生标信号有超过 50% 的损失, 但 U_{37}^K 的值并未受影响。

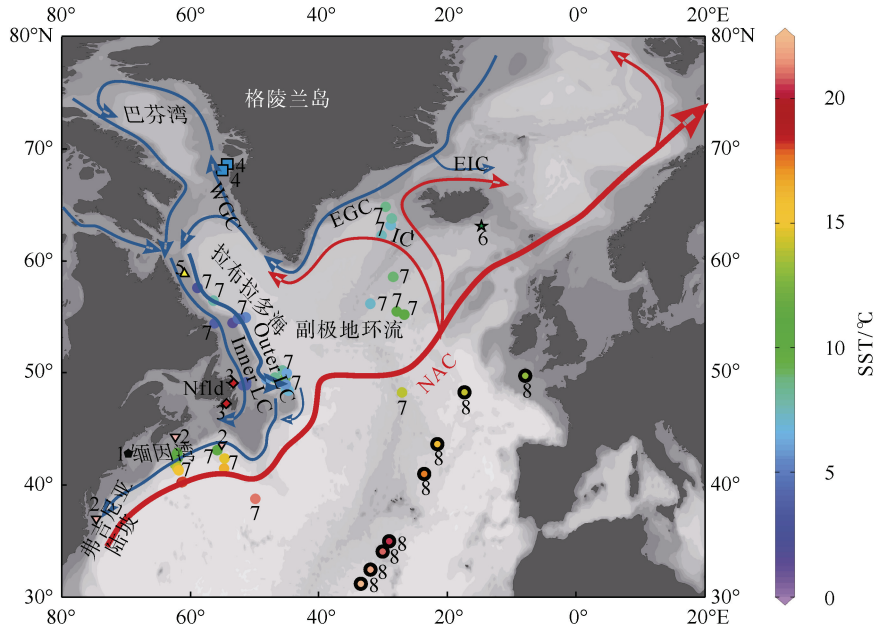


图 1 北大西洋区域地图

Fig. 1 North Atlantic Map

注: LC-拉布拉多洋流; EIC-东冰岛洋流; EGC-东格陵兰洋流; IC-伊尔明厄洋流; SPG-副极地环流; WGC-东格陵兰洋流; NAC-北大西洋流; Nfld-纽芬兰岛; 图中圆形的颜色对应年均 SST

表 1 图 1 中各数据来源

Tab. 1 Data resource of Fig. 1

序号	海洋区域	样品类型	数据数量	参考文献
1	缅因湾, 西北大西洋	沉降颗粒	1	[53]
2	加拿大东部	岩芯	3	[15]
3	东北和东南纽芬兰岛近海	岩芯	2	[26]
4	迪斯科湾, 格陵兰西侧	岩芯	2	[32]
5	西拉布拉多海	岩芯	1	[33]
6	冰岛南部	悬浮颗粒物	1	[54]
7	西北大西洋	表层沉积物	51	[56]
8	东北大西洋	悬浮颗粒物	8	[55]

Rodrigo-Gamiz 等^[54]结合了 SPOM、沉降颗粒和表层沉积物这三种材料, 对亚极地海洋(冰岛附近)中的生物标志物进行分析, 指出了相应的使用限制。该研究通过连续一年对沉降颗粒的收集与分析, 发现烯酮通量($C_{37:2}$ 和 $C_{37:3}$)表现出季节性, 在早春和夏季出现峰值。研究又进一步通过比较表层沉积物中 U_{37}^K 重建的温度 (U_{37}^K -SST) 和卫星记录的 SST, 发现在各季节中 U_{37}^K -SST 与夏季均 SST 显著相关。由此表明 U_{37}^K 重建的 SST 可能具有季节性, 在亚极地区域可能指示的是夏季平均 SST, 此时浮游藻类勃发, 烯酮通量较高。另外, 该研究发现这三种样品的 U_{37}^K -SSTs 也不同, 一方面是因为包含烯酮信号的颗粒沉

降需要时间, 更重要的原因是: 1) 横向平流(lateral advection): 即洋流导致的水平输送和再悬浮; 2) 次表层烯酮生产: 温跃层烯酮的合成; 3) 烯酮的选择性成岩作用: 烯酮信号传输时, $C_{37:3}$ 比 $C_{37:2}$ 具有更高的溶解率。

Gould 等^[55]利用 31 个 SPOM 数据并大西洋已发表的数据, 采用理查德曲线(Richards curve)重新建立 SPOM- U_{37}^K 对 SST 的校准模型。该曲线克服了线性校准模型的缺点, 斜率可变, 为极热和极冷的 U_{37}^K 值提供了更可靠的校准, 且标准误差较小。研究中采集的 SPOM 数据也表现出一定的季节性, 纬度越高的区域, 越倾向于在夏季采集到烯酮信号。SPOM 的 U_{37}^K -SST

与位温具有一定偏差,可能是因为采集的样品中混有采集时间点之前合成的烯酮。因而,类似的非热量因素可能会导致海洋中烯酮信号与实际温度的差异。

Filippova 等^[56]通过 101 个已发表的和 51 个新的北大西洋表层沉积数据,探究了烯酮古温测定在校准方程末端低温范围的不确定性(图 2),讨论了不饱和和指数与 SST 之间的关系,指出了回归模型中离散增加的原因。Filippova 等^[56]考虑到了 $C_{37:4}$ 在低温海域对不饱和度及其与 SST 的相关性的影响,采用了三种烯酮指标分别为 U_{37}^K 、 $U_{37}^{K'}$ 和 $U_{37}^{K^*}$ ($U_{37}^{K^*} = [C_{37:2}] / [C_{37:2} + C_{37:3} + C_{37:4}]$),并对年均和春—夏平均 SST 分别进行回归分析,结果表明 U_{37}^K 与春—夏平均 SST 的相关性相对来说是最显著的(图 2b),尤其是针对温度较低($SST < 10\text{ }^\circ\text{C}$)的数据。该研究表明尽管有如海冰覆盖、横向平流等因素的影响,但如果能够对此充分考虑,烯酮不饱和度仍可用于北大西洋多数区域 SST 的重建。然而在有季节性海冰覆盖的寒冷海域,如拉布拉多海西北部、格陵兰岛西侧区域, U_{37}^K 仍难以准确重建 SST。在讨论烯酮信号对海水温度的保存记录时,需考虑到这些非热量因素,如:营养盐、光照条件、成岩作用、横向平流等,以便对烯酮记录海洋环境有更为准确的了解。因而,接下来本文会对相应的影响因素进行讨论。

2.2 低温海域烯酮的应用

在北大西洋海域,长链烯酮不饱和度重建过去 SST 的历史已有 30 年^[15, 25, 57]。2007 年, Sachs^[15]利用 $U_{37}^{K'}$ 重建了全新世西北大西洋陆坡上覆的表层海水(简称,陆坡水)的 SST,指出由于太阳辐射降低、拉布拉多海对流增强及墨西哥湾流向赤道方向的移动,美国和加拿大东侧陆地边缘(图 1)的陆坡上覆表层海水呈降温趋势。这一研究引发了关于大西洋全新世气候变冷机制的讨论和深入调查^[4, 23, 58]。例如, Sicre 等^[26]利用 $U_{37}^{K'}$ 指数重建了过去公元 2000 年间位于加拿大纽芬兰岛附近的 2 个站位(图 1,表 1)的 SST 变化。研究中 2 个站点的 SST 变化不同,东北纽芬兰岛站点主要受拉布拉多洋流的影响,每年都会有 2~3 个月的海冰覆盖;相反,东南纽芬兰岛站点位于拉布拉多洋流的南部边缘,更接近墨西哥湾暖流的北部,基本上全年无冰^[45]。由于季节性海冰覆盖和海水混合作用的差异,东北站点的浮游植物繁殖时间推迟至晚春或早夏,此时的 SST 高于东南站点浮游植物繁殖时,也就是烯酮所记录的温度。因此,东北

站点处长链烯酮重建的海水温度高于东南站点,这 和现代温度条件下东北站点温度低于东南站点相反。东南站点重建的温度变化趋势和晚全新世阶段大西洋的变冷相符,而东北站点记录了中世纪气候异常(MCA)和小冰期(LIA)两个事件下的温度变化。这也证明了在多种影响因素下, $U_{37}^{K'}$ 指数仍能用来准确反映温度变化。

近年来, Moros 等^[32]和 Lochte 等^[33]在全新世拉布拉多海两岸的低温环境中采用了烯酮指标,但并没有用于重建古温,而是利用 $\%C_{37:4}$ 来反映海洋环境的变化。Rosell-Melé 等^[59]曾提出当 $\%C_{37:4} > 5\%$ 时,至少在北欧海沉积物中根据 $U_{37}^{K'}$ 和 U_{37}^K 建立的温度将不再具有可靠性。Lochte 等^[33]也认为在不利于颗石藻生长的环境中,烯酮浓度较低, $\%C_{37:4}$ 相对偏高,这使得 $U_{37}^{K'}$ 指数难以用于估算此处的 SST。基于这一情况, Moros 等^[32]通过 $\%C_{37:4}$ 和硅藻组合来指示格陵兰岛冰川融水输入,并认为尽管无法重建 SST,但 U_{37}^K 指数的增长仍能反映海水温度的变暖;Lochte 等^[33]则用西北拉布拉多海(图 1)沉积物中的 $\%C_{37:4}$ 、烯酮浓度(ΣC_{37} , $C_{37:2} + C_{37:3} + C_{37:4}$)和底栖有孔虫丰度进行对比,较好地反映了底层水团(此处为 202 m 水深)和拉布拉多洋流的变化。另外值得注意的是,这里的烯酮浓度(ΣC_{37})用于指示生物生产力,烯酮浓度的增加往往伴随着生物生产力的增长^[33],这种方法也适用于靠近北冰洋的巴伦支海^[60]。对比 Moros 等^[32]和 Lochte 等^[4]的研究,可以发现 U_{37}^K 指数与 $\%C_{37:4}$ 均有镜像关系。在后者的研究中,尽管 $\%C_{37:4}$ 超过 5%,其仍通过 $U_{37}^{K'}$ 指数而非 U_{37}^K 重建了拉布拉多陆架南部站点的 SST,考虑到了 $C_{37:4}$ 对 SST 的影响。此前, Filippova 等^[56]也对烯酮不饱和度表达式的采用有一定讨论。因而,如果要在低温条件下利用不饱和度重建 SST 必然要考虑到 $C_{37:4}$ 的影响。

3 $U_{37}^{K'}$ 指数重建 SST 的影响因素

3.1 营养盐对烯酮的影响

研究中常通过对烯酮母源的培养实验来讨论 $U_{37}^{K'}$ 与海水温度的相关性^[43-44, 61]。海洋中,仅有少数几个颗石藻种类会合成烯酮,其中 *E. huxleyi* 是开放大洋中烯酮的主要生产者^[41],而 *G. oceanica* 则主要分布于温带至热带海域,其在温暖的边缘海域和低纬度边界区域常见,偶尔也出现在上升流区域^[40]。此外, Bentalab 等^[62]的研究表明,温度小于 $26.4\text{ }^\circ\text{C}$ 时,

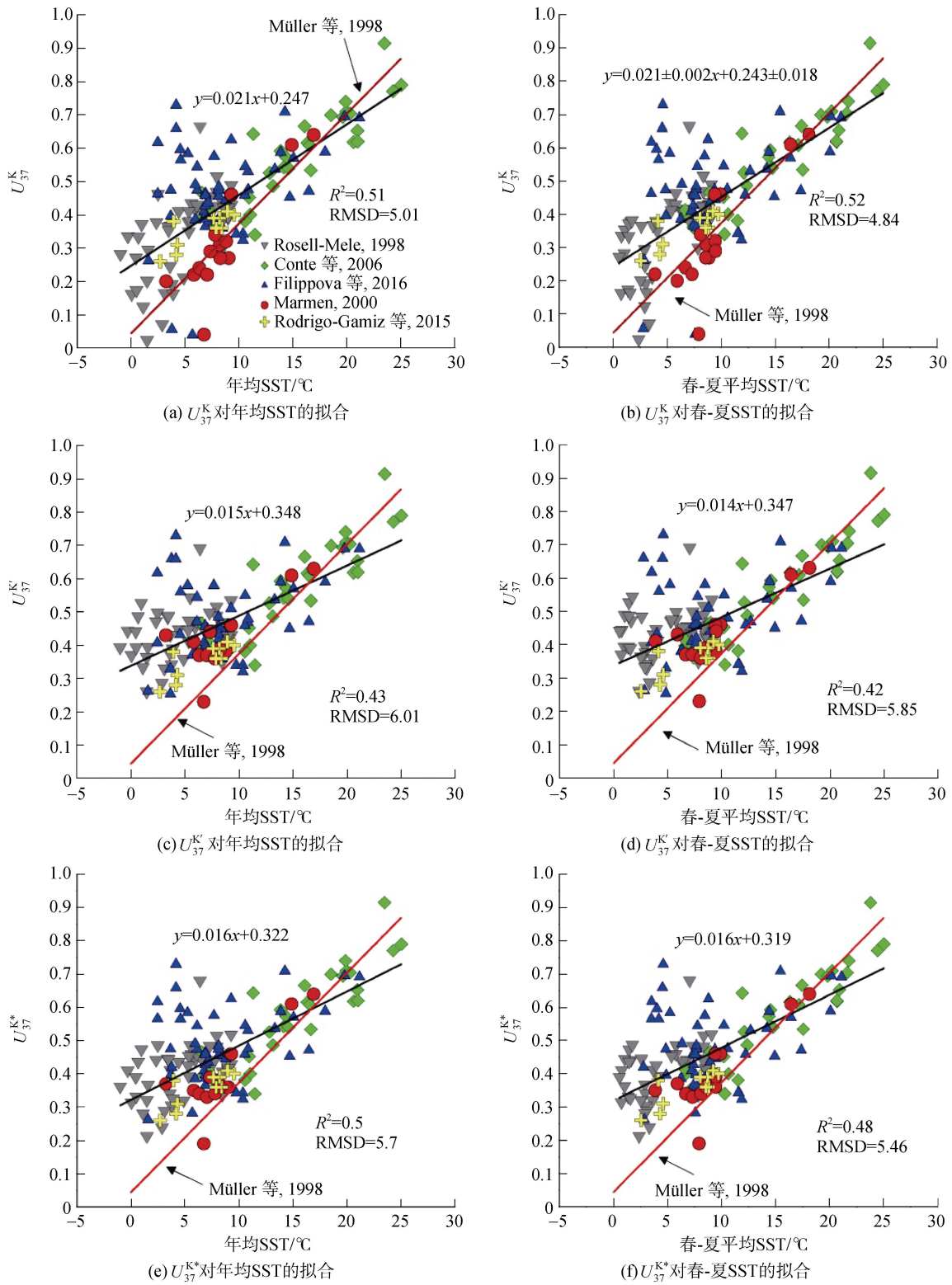


图2 烯酮不饱和度 U_{37}^K 、 $U_{37}^{K'}$ 和 $U_{37}^{K^*}$ 分别对年均和春-夏 SST 的回归模型^[56]

Fig. 2 Regression model between the alkenone unsaturation ratios (U_{37}^K , $U_{37}^{K'}$, and $U_{37}^{K^*}$) and the annual SST, spring and summer SST respectively^[56]

E. huxleyi 是主要的颗石藻种类(>60%), 超过这个温度时, *G. oceanica* 和 *Gephyrocapsa ericsonii* 则更为丰富(>77%)。因而在西北大西洋海域, 从海水样品中分离出的颗石藻种类主要是 *E. huxleyi*^[48, 63]。通过在一定条件下培养分离出的 *E. huxleyi*, 更易于了解非热量因素对烯酮合成的影响。

Prahl 等^[61]设计的两个 15 °C 恒温下的 *E. huxleyi* 培养实验, 分别评估了营养盐和光照条件对烯酮浓度和 $U_{37}^{K'}$ 的影响程度。其营养盐胁迫实验表明, 当营养盐充足时, 总烯酮(C_{37:39})浓度(ΣAlk)和 $U_{37}^{K'}$ 较为稳定, 但进入贫营养盐(nutrient-starved)状态后, ΣAlk 继续升高, $U_{37}^{K'}$ 转而下降。在另一个光照限制实验中, 光照正常情况下 ΣAlk 和 $U_{37}^{K'}$ 恒定, 进入 5 天黑暗环境后 ΣAlk 减少, 而 $U_{37}^{K'}$ 显著增长。因而, 当这两个条件有限制的情况下, 烯酮的生物合成会受到影响, 进而导致 $U_{37}^{K'}$ 重建的 SST 产生一定误差。

除了颗石藻培养实验, 该研究曾利用 2 个分别来自开放大洋和陆地边缘(continental margin)站点的深度剖面数据(温度、 $U_{37}^{K'}$ 、 ΣAlk 、硝酸盐、叶绿素值)与培养实验结果相比较^[61]。开放大洋海水样品中, 由于营养盐和光照条件稳定, $U_{37}^{K'}$ 重建的生长温度与实际水体温度相符。而在陆地边缘站点, 近表层水体中检测到高 ΣAlk 而低营养盐, 与营养盐胁迫实验相似, 此时 $U_{37}^{K'}$ 重建的温度低于实际水温约 3 °C。因此, 营养盐可能对陆地边缘海域烯酮信号的影响较大。然而, 在实际应用中, 多数研究默认营养盐和光照对烯酮重建温度的影响较小, 但在所述的陆地边缘、温带或更冷的水体中, 仍会导致得到的数据出现误差^[48, 61]。

3.2 横向平流和成岩作用对烯酮的影响

横向平流(Lateral Advection)传输和差异的成岩作用(diagenesis)会导致表层沉积物中的烯酮信号和上层水体的 SST 产生空间上或短时间的不相符^[48]。强大的表层洋流、较高的生产力和温度梯度会形成海水的横向传输, 导致外来烯酮的输入, 从而造成 $U_{37}^{K'}$ 值的异常。Filippova 等^[56]也认为具有高温梯度锋面系统(frontal systems)的区域更容易出现较高的温度残差(residuals), 也就是烯酮不饱和度重建的 SST 与实际温度之间的差别较大。例如: 在纽芬兰岛南部, NAC 携带的暖而咸的海水与来自圣劳伦斯湾和缅因湾的冷而淡的海水混合导致了 1~5 °C 的

温度差; 而在拉布拉多海西岸同样也有较高的温度差, 暖期的外来烯酮输入是导致这种结果的原因之一^[56, 64]。Rosell-Melé 等^[52]在东北大西洋海域检测到异常的 $U_{37}^{K'}$ 值, 怀疑是有来自其他地方的烯酮输入而不是上覆水体, 可能和附近强大的中尺度涡流(NAC 的支流)有关, 因而进一步发现, 由涡流驱动的横向传输可能是烯酮温度指标出现偏差的原因。

众所周知, 烯酮大多是以颗石(coccospheres)的形式储存和沉降的, 最后以化石的形式保存在沉积物中。在这一过程中, 有人提出烯酮的溶解速率可能不同, 从而导致一定的温度偏差^[49]。而表层沉积物中烯酮测定的 SST 的异常可能就是水体或表层沉积物中 C_{37:2} 和 C_{37:3} 不同的成岩作用导致的^[48]。然而同时, 亦有研究认为成岩作用对于北大西洋中 $U_{37}^{K'}$ 指标和 SST 之间的相关性并没有相应的影响^[65]。

3.3 烯酮合成的季节性

正如先前所讨论的, 北大西洋采集的烯酮通量具有一定的季节性^[53-55]。调查显示沉积物中烯酮通量(alkenone flux, $\mu\text{g}/\text{m}^2$)最高的季节在全球海洋范围内都有不同, 主要受纬度、光照条件以及当地海洋学因素的影响^[66]。烯酮通量的变化本质上和烯酮源生物的生长季节有关, 中高纬度海域的颗石藻通常在早春或夏季勃发^[48, 56]。如果能够捕捉到烯酮信号的时间集中于某一特定季节, 那么其记录的温度也会偏向这一季节, 因此有研究认为烯酮在高纬度海域重建的 SST 不能简单的认为是年均 SST^[67]。早在 1995 年, Rosell-Melé 等^[49]就发现大西洋中 $U_{37}^{K'}$ 与温度具有季节性关系。在西北大西洋海域, Filippova 等^[56]建立的烯酮指数与温度的回归模型显示, 相较于年均 SST, 春-夏平均 SST 和烯酮不饱和度($U_{37}^{K'}$)的相关性更高(图 2)。基于全球表层沉积物样品的研究中, Conte 等^[48]也认为烯酮生产的季节性会使沉积物中烯酮信号和 AnnO 不符。特别是在寒冷海域, 由于季节性海冰和强烈的洋流扰动, 浮游植物的生长繁殖受到推迟, 烯酮指数所记录的温度会略高于浮游植物正常生长的温度^[26]。近来, Lochte 等^[4]提出烯酮反映的既不是夏季温度, 也不是年均 SST, 而是浮游植物繁盛季节的平均温度, 例如拉布拉多陆架上 $U_{37}^{K'}$ 重建的 SST 是 5 月至 11 月的平均温度。相似的, 在纬度几乎相同的西北太平洋鄂霍次克海, 该海域在全新世时期有季节性海冰覆盖, 烯酮主要在夏季合

成,特别是在9月份^[46]。在这一区域利用 U_{37}^K 重建的温度则与烯酮的生产季节温度相对应,而不是年均温^[68]。

4 %C_{37:4}对海洋环境变化的指示作用

研究表明,海洋环境中的C_{37:4}主要出现在温度较低的海水中,Sicre等^[65]和Bendle等^[31]在北大西洋寒冷的极地海水(Arctic waters)中曾检测到含量较高的C_{37:4}。Sikes等^[69]也曾对大西洋、太平洋和南大洋的水体样品进行检测,发现C_{37:4}大多存在于盐度、温度都较低的水体中。Rosell-Melé等^[59]最早提出%C_{37:4}与盐度之间的函数关系;Sicre等^[65]指出北大西洋%C_{37:4}与盐度呈负相关($r^2 = 0.78$)。Bendle等^[31]曾对%C_{37:4}能否作为表层海水盐度指标进行评估,认为其更适用于指示北大西洋淡水输入。Filippove等^[56]曾推测,融水输入导致盐度改变,这可能会使藻类离开原本的耐盐区(salt tolerance zone),导致了烯酮生物合成的改变。

在格陵兰西北岸的迪斯科湾,%C_{37:4}的增加(最高可达28%)指示融水供应的增强;其减少时,融水通量也有相应的减少^[32]。该研究区域海水盐度较低,主要受格陵兰冰盖融水的影响。相似的,%C_{37:4}在北极的北欧海和巴伦支海区域亦可指示寒冷北极水的输入^[60]。此外,在寒冷的拉布拉多海西北部,%C_{37:4}还可用于指示海冰边缘环境,当海冰覆盖减少时,C_{37:4}的占比也有所降低,与底栖有孔虫丰度指示的海冰信号相符^[33]。在邻近的拉布拉多陆架南部,Lochte等^[4]再次证明了高%C_{37:4}(最高可达20%)指示海冰覆盖增多,也可能是融水输入增强,%C_{37:4}的降低反映海水温度的回升和海冰覆盖的减少。尽管此前仍有研究者对此提出异议^[69],但%C_{37:4}指标仍有较为广泛的应用,尤其是在受海冰影响且盐度较低的海域^[31]。

5 总结与展望

长链烯酮作为重建古海洋SST的指标,在中高纬度低温区域由于受低温、低盐、低生产力等的影响,这一指标的应用仍有所限制。本文总结了全新世北大西洋,特别是更冷的西北大西洋长链烯酮的研究进展,进而探讨烯酮重建古气候的影响因素以及在指示淡水和生物生产力上的应用。研究发现烯酮的应用主要受营养盐、横向平流、成岩作用、烯酮母源生长的季节性等因素的影响,其中横向平流和季节性在温度较低的海域对指标的影响更大。营养

盐胁迫和光照条件不足会限制烯酮的生产,中尺度的涡旋和横向平流可能会将外来烯酮带到研究区域,而成岩作用差异及季节性则可能会使 U_{37}^K 指标建立的温度与实际温度或年均SST不相符。在建立烯酮的温度校准方程中,研究者发现偏差大多会出现在低温区域。因此,在温度较低的海域利用长链烯酮重建SST时,必须考虑上述可能的影响因素,以解释误差或异常值。在高能量的大陆边缘,如加拿大东部,非热量因素如营养盐、光照条件、横向平流、成岩作用等因素对SST重建的影响还未能得到充分考虑。

此外,目前仅有拉布拉多海的两个研究利用%C_{37:4}获取的盐度信息,评估直接来自相邻陆地或海冰融化的淡水输入。在%C_{37:4}广泛应用之前,更多的数据仍有待收集,特别是在拉布拉多海南部和纽芬兰大浅滩区域。且由于缺乏资料,%C_{37:4}与淡水总量、持续时间、海冰厚度的关系目前尚不清楚。介于当前对北极冰川融化引起北极或西北太平洋,如鄂霍次克海和白令海,海洋学状况变化的持续关注,当务之急是针对校准的末端低温范围进行培养实验。同时,烯酮氢同位素在重建开放大洋过去的表层海水盐度方面的应用吸引了越来越多的关注^[70-71]。总的来说,长链烯酮指标(U_{37}^K 、%C_{37:4}、烯酮浓度)在北大西洋及其他中高纬度海域均有相应的应用,对进一步探究古气候变化具有重要意义。

参考文献:

- [1] MYERS P G, DONNELLY C, RIBERGAARD M H. Structure and variability of the West Greenland Current in Summer derived from 6 repeat standard sections[J]. Progress in Oceanography, 2009, 80: 93-112.
- [2] RASHID H, BOYLE E A. Mixed-layer deepening during Heinrich Events: A multi-planktonic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ approach[J]. Science, 2007, 318(5849): 439-441.
- [3] SALGUEIRO E, VOELKER A H L, MARTIN P A, et al. $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca Thermometry in planktonic foraminifera: A multiproxy approach toward tracing coastal upwelling dynamics[J]. Paleoceanography and Paleoclimatology, 2020, 35: e2019PA003726.
- [4] LOCHTE A A, SCHNEIDER R, KIENAST M, et al. Surface and subsurface Labrador Shelf water mass conditions during the last 6000 years[J]. Climate of the Past, 2020, 16: 1127-1143.
- [5] 叶孝贤, RASHID Harunur. 北大西洋 45°N 区氧同位素 3 期以来上层水体性质的变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 114-123.
YE Xiaoxian, RASHID Harunur. Changes of the upper

- water column at the 45°N North Atlantic since marine isotope stage 3[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 114-123.
- [6] KRAWCZYK D W, WITJOWSKI A, LLOYD J, et al. Late-Holocene diatom derived seasonal variability in hydrological conditions off Disko Bay, West Greenland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 67: 93-104.
- [7] MOCK T, OTILLAR R P, STRAUSS J, et al. Evolutionary genomics of the cold-adapted diatom *Fragilariopsis cylindrus*[J]. *Nature*, 2017, 541: 536-540.
- [8] OUELLET-BERNIER M M, DE VERNAL A, HILLAIRE-MARCEL C, et al. Paleooceanographic changes in the Disko Bugt area, West Greenland, during the Holocene[J]. *The Holocene*, 2014, 24(11): 1573-1583.
- [9] SCHOUTEN S, HOPMANS E C, SINNINGGHE DAMSTE J S. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 54: 19-61.
- [10] SEKI O, BENDLE J A, HARADA N, et al. Assessment and calibration of TEX₈₆ paleothermometry in the Sea of Okhotsk and sub-polar North Pacific region: Implications for paleoceanography[J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 126: 254-266.
- [11] MARTRAT B, GRIMALT J O, SHACKLETON N J, et al. Four climate cycles of recurring deep and surface water destabilizations on the Iberian margin[J]. *Science*, 2004, 317: 502-507.
- [12] NAFFS B D A, HEFTER J, ACTON G, et al. Strengthening of North American dust sources during the late Pliocene (2.7 Ma)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 317/318: 8-19.
- [13] RODRIGUES T, ALONSO-GARCÍA M, HODELL D A, et al. A 1-Ma record of sea surface temperature and extreme cooling events in the North Atlantic: A perspective from the Iberian Margin[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 172: 118-130.
- [14] LI D W, ZHAO M X, TIAN J. Low-high latitude interaction forcing on the evolution of the 400 kyr cycle in East Asian winter monsoon records during the last 2.8 Myr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 172: 72-82.
- [15] SACHS J P. Cooling of northwest Atlantic slope waters during the Holocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L03609.
- [16] JIANG H, MUSCHELER R, BJÖRCK S, et al. Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic[J]. *Geology*, 2015, 43(3): 203-206.
- [17] ORME L C, MIETTINEN A, SEIDENKRANTZ M S, et al. Mid to late-Holocene sea-surface temperature variability off north-eastern Newfoundland and its linkage to the North Atlantic Oscillation[J]. *The Holocene*, 2021, 31(1): 3-15.
- [18] THORNALLEY D J R, ELDERFIELD H, MCCAVE N. Holocene oscillations in temperature and salinity of the surface subpolar North Atlantic[J]. *Nature*, 2009, 457: 711-714.
- [19] VAN NIEUWENHOVE N, PEARCE C, FAURSCHEU KNUDSEN M, et al. Meltwater and seasonality influence on Subpolar Gyre circulation during the Holocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology*, 2018, 502: 104-108.
- [20] BARBER D C, DYKE A, HILLAIRE-MARCEL C, et al. Forcing of the cold event of 8 200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes[J]. *Nature*, 1999, 400: 344-348.
- [21] LEWIS L, DITCHFIELD P, PAL J N, et al. Grain size distribution analysis of sediments containing Younger Toba tephra from Ghoghara, Middle Son valley, India[J]. *Quaternary International*, 2012, 258: 180-190.
- [22] RASHID H, PIPER D J W, MANSFIELD C, et al. Signature of the Gold Cove event (10.2 ka) in the Labrador Sea[J]. *Quaternary International*, 2014, 352: 212-221.
- [23] RASHID H, MACKILLOP K, SHERWIN J, et al. Slope instability on a shallow contourite-dominated continental margin, southeastern Grand Banks, eastern Canada[J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 203-215.
- [24] MOFFA - SÁNCHEZ P, MORENO-CHAMARRO E, REYNOLDS D J, et al. Variability in the northern North Atlantic and Arctic Oceans across the last two millennia: A review[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2019, 34: 1399-1436.
- [25] MOROS M, EMEIS K, RISEBROBAKKEN B, et al. Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: Climate influences on northern Europe and Greenland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 2113-2126.
- [26] SICRE M A, WECKSTRÖM K, SEIDENKRANTZ M S, et al. Labrador current variability over the last 2000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 400: 26-32.
- [27] MOLLENHAUER G, BASSE A, KIM J H, et al. A four-year record of $U_{37}^{K'}$ - and TEX₈₆-derived sea surface temperature estimates from sinking particles in the filamentous upwelling region off Cape Blanc, Mauritania[J]. *Deep-sea Research I*, 2015, 97: 67-79.
- [28] KEIGWIN L D, SACHS J P, ROSENTHAL Y. A 1600-year history of the Labrador Current off Nova Scotia[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21: 53-62.
- [29] RASHID H, MARCHE B, VERMOOTEN M, et al. Comment on "Asynchronous variation in the East Asian winter monsoon during the Holocene" by Xiaojian Zhang, Liya Jin, and Na Li[J]. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 2016, 121: 1611-1614.
- [30] HALFAR J, ADEY W H, KRONZ A, et al. Arctic sea-ice decline archived by multicentury annual-resolution record from crustose coralline algal proxy[J]. PNAS, 2013, 110(49): 19737-19741.
- [31] BENDLE J, ROSELL-MELÉ A, ZIVERI P. Variability of unusual distributions of alkenones in the surface waters of the Nordic seas[J]. Paleoceanography, 2005, 20: PA2001.
- [32] MOROS M, LLOYD J M, PERNER K, et al. Surface and sub-surface multi-proxy reconstruction of middle to late Holocene palaeoceanographic changes in Disko Bugt, West Greenland[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 132: 146-160.
- [33] LOCHTE A A, REPSCHLAGER J, SEIDENKRANTZ M, et al. Holocene water mass changes in the Labrador Current[J]. The Holocene, 2019, 29(4): 676-690.
- [34] 邢磊, 杨欣欣, 肖睿. 长链烯酮的组合特征及其对盐度和母源种属指示意义的研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(10): 79-87.
XING Lei, YANG Xinxin, XIAO Rui. Progress of compositions and indications of long-chain alkenones[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(10): 79-87.
- [35] HE Y X, ZHAO C, WANG Z, et al. Late Holocene coupled moisture and temperature changes on the northern Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 80: 47-57.
- [36] LIU W G, LIU Z H, FU M Y, et al. Distribution of the C₃₇ tetra-unsaturated alkenone in Lake Qinghai, China: A potential lake salinity indicator[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(3): 988-997.
- [37] LONGO W M, THEROUX S, GIBLIN A E, et al. Temperature calibration and phylogenetically distinct distributions for freshwater alkenones: Evidence from northern Alaskan lakes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 180: 177-196.
- [38] ARAIE H, NAKAMURA H, TONEY J L, et al. Novel alkenone-producing strains of genus Isochrysis (Haptophyta) isolated from Canadian saline lakes show temperature sensitivity of alkenones and alkenoates[J]. Organic Geochemistry, 2018, 121: 89-103.
- [39] VOLKMAN J K, EGLINTON G, CORNER E D S, et al. Long-chain alkenes and alkenones in the marine coccolithophorid *Emiliania huxleyi*[J]. Photochemistry, 1980, 19: 2619-2622.
- [40] VOLKMAN J K, BARRETT S M, BLACKBURN S I, et al. Alkenones in *Gephyrocapsa oceanica*: Implication for studies of paleoclimate[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(3): 513-520.
- [41] MARLOWE I T, GREEN J C, NEAL A C, et al. Long chain (*n*-C₃₇-C₃₉) alkenones in the Prymnesiophyceae. Distribution of alkenones and other lipids and their taxonomic significance[J]. British Phycological Journal, 1984, 19: 203-216.
- [42] BRASSELL S C, EGLINTON G, MARLOWE I T, et al. Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment[J]. Nature, 1986, 320: 129-133.
- [43] PRAHL F G, WAKEHAM S G. Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for palaeotemperature assessment[J]. Nature, 1987, 330: 367-369.
- [44] PRAHL F G, MUEHLHAUSEN L A, ZAHNLE D L. Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(9): 2303-2310.
- [45] LEE K E, LEE S, PARK Y, et al. Alkenone production in the East Sea/Japan Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014, 74: 1-10.
- [46] HARADA N, SATO M, SAKAMOTO T. Freshwater impacts recorded in tetraunsaturated alkenones and alkenone sea surface temperatures from the Okhotsk Sea across millennial-scale cycles[J]. Paleoceanography, 2008, 23: PA3201.
- [47] MÜLLER P J, KIRST G, RUHLAND G, et al. Calibration of the alkenone paleotemperature index $U_{37}^{K'}$ based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N~60°S)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(10): 1757-1772.
- [48] CONTE M H, SICRE M A, RÜHLEMANN C, et al. Global temperature calibration of the alkenone unsaturation index ($U_{37}^{K'}$) in surface waters and comparison with surface sediments[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2006, 7(2): Q02005.
- [49] ROSELL-MELÉ A, EGLINTON G, PFLAUMANN U, et al. Atlantic core-top calibration of the $U_{37}^{K'}$ index as a sea-surface paleotemperature indicator[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(15): 3099-3107.
- [50] PELEJERO C, CALVO E. The upper end of the $U_{37}^{K'}$ temperature calibration revisited[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2003, 4(2): 1014.
- [51] VOLKMAN J K. Ecological and environmental factors affecting alkenone distributions in seawater and sediments[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2000, 1: 2000GC000061.
- [52] ROSELL-MELÉ A, COMES P, MÜLLER P J, et al. Alkenone fluxes and anomalous $U_{37}^{K'}$ values during 1989-1990 in the Northeast Atlantic (48°N, 21°W)[J]. Marine Chemistry, 2000, 71: 251-264.
- [53] PRAHL F G, PILAKALN C H, SPARROW M A. Seasonal record for alkenones in sedimentary particles

- from the Gulf of Maine[J]. *Deep-Sea Research I*, 2001, 48: 515-528.
- [54] RODRIGO-GÁMIZ M, RAMPEN S W, DE HAAS H, et al. Constraints on the applicability of the organic temperature proxies $U_{37}^{K'}$, TEX_{86} and LDI in the sub-polar region around Iceland[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12: 6573-6590.
- [55] GOULD J, KIENASTA M, DOWD M. Investigation of the $U_{37}^{K'}$ vs. SST relationship for Atlantic Ocean suspended particulate alkenones: An alternative regression model and discussion of possible sampling bias[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 2017, 123: 13-21.
- [56] FILIPPOVA, A, KIENAST M, FRANK M, et al. Alkenone paleothermometry in the North Atlantic: A review and synthesis of surface sediment data and calibrations[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2016, 17: 1370-1382.
- [57] CONTE M H, EGLINTON G, MADUEIRA L A S. Long-chain alkenones and alkyl alkenoates as paleotemperature indicators: Their production, flux and early sediment diagenesis in the eastern North Atlantic[J]. *Advances in Organic Geochemistry*, 1992, 19: 287-298.
- [58] CABEDO-SANZ P, BELT S T, JENNINGS A E, et al. Variability in drift ice export from the Arctic Ocean to the North Icelandic Shelf over the last 8 000 years: A multi-proxy evaluation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 146: 99-115.
- [59] ROSELL-MELÉ A. Interhemispheric appraisal of the value of alkenone indices as temperature and salinity proxies in high latitude locations[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(6): 694-703.
- [60] ŁAĆKA M, CAO M, ROSELL-MELÉ A, et al. Post-glacial paleoceanography of the western Barents Sea: Implications for alkenone-based sea surface temperatures and primary productivity[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 224: 105973.
- [61] PRAHL F G, WOLFE G V, SPARROW M A. Physiological impacts on alkenone paleothermometry[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(2): 1025.
- [62] BENTALEB I, FONTUGNE M, BEAUFORT L. Long-chain alkenones and $U_{37}^{K'}$ variability along a south-north transect in the Western Pacific Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 2002: 173-183.
- [63] CONTE M H, WEBER J C, KING L L, et al. The alkenone temperature signal in western North Atlantic surface waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(23): 4275-4287.
- [64] MAO L, PIPER D J W, SAINT-ANGE F, et al. Provenance of sediment in the Labrador Current: A record of hinterland glaciation over the past 125 ka[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(7): 650-660.
- [65] SICRE M A, BARD E, EZAT U, et al. Alkenone distributions in the North Atlantic and Nordic sea surface waters[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, 3(2): 10.1029/2001GC000159.
- [66] ROSELL-MELÉ A, PRAHL F G. Seasonality of $U_{37}^{K'}$ temperature estimates as inferred from sediment trap data[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 72: 128-136.
- [67] LEDUC G, SCHNEIDER R, KIM J H, et al. Holocene and Eemian sea surface temperature trends as revealed by alkenone and Mg/Ca paleothermometry[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 989-1004.
- [68] SEKI O, KAWAMURA K, IKEHARA M, et al. Variation of alkenone sea surface temperature in the Sea of Okhotsk over the last 85 kyrs[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35: 347-354.
- [69] SIKES E L, SICRE M A. Relationship of the tetra-unsaturated C_{37} alkenone to salinity and temperature to salinity and temperature: Implications for paleoproxy applications[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, 3(11): 1-11.
- [70] GOULD J, KIENAST M, DWOD M, et al. An open-ocean assessment of alkenone δD as a paleo-salinity proxy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 246: 478-497.
- [71] WEISS G M, SCHOUTEN S, SINNINGHE DAMSTÉ J S, et al. Constraining the application of hydrogen isotopic composition of alkenones as a salinity proxy using marine surface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 250: 34-48.

Progress in using the long-chain alkenones to reconstruct the Holocene climate changes in northwest Atlantic Ocean

WANG Dan, RASHID Harunur

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Dec. 28, 2020

Key words: long-chain alkenones; sea surface temperature; meltwater; alkenone %C_{37:4}; northwest Atlantic Ocean

Abstract: Numerous studies have demonstrated the application of long-chain alkenone unsaturation ratios ($U_{37}^{K'}$) to reconstruct past sea-surface temperatures (SSTs). However, whether there are factors resulting in divergence between the actual and reconstructed sea-surface temperatures and whether the reconstructed temperature or the seasonal temperature represents the annual average SST have remained controversial. In regions influenced by seasonal sea-ice or low SSTs, the proportion of long-chain alkenone C_{37:4} in C₃₇ (i.e., %C_{37:4}) provides significant information on salinity, particularly on the Labrador and Greenland continental margin. This study reviews the progress of using $U_{37}^{K'}$ in the northwest Atlantic Ocean and evaluates factors, including nutrient, lateral advection, early diagenesis, and seasonality of the production of alkenone-producing algae, to reconstruct SSTs. Our results suggest that C_{37:4} can reconstruct past sea-ice released meltwater and sea-ice cover; however, quantifying the contribution of the $U_{37}^{K'}$ seasonality needs further study.

(本文编辑: 赵卫红)