

李科, 金海燕, 赵香爱, 等. 白令海及西北冰洋有机质来源与新鲜程度的脂肪酸指示[J]. 海洋学报, 2020, 42(10): 14–27, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.002

Li Ke, Jin Haiyan, Zhao Xiang'ai, et al. Sources and degradation of organic matter in the Bering Sea and the western Arctic Ocean: Implication from fatty acids[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(10): 14–27, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.002

# 白令海及西北冰洋有机质来源 与新鲜程度的脂肪酸指示

李科<sup>1</sup>, 金海燕<sup>1,2\*</sup>, 赵香爱<sup>1</sup>, 庄燕培<sup>1</sup>, 季仲强<sup>1</sup>, 张扬<sup>1</sup>, 陈建芳<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 白令海、西北冰洋等高生产力海域在北冰洋“生物泵”中起到重要作用; 海水升温、海冰消退等北极快速变化, 将强烈影响该海域“生物泵”的结构与规模, 并在沉积物中有机质的来源与新鲜程度上有所体现, 可用脂肪酸加以指征。对第五次、第六次中国北极科学考察在以上海域采集的表层沉积物进行脂肪酸含量(以沉积物干重计)及组成分析, 结果显示楚科奇海陆架总脂肪酸含量非常高((97.15±55.31) μg/g), 白令海盆最低((15.00±1.30) μg/g), 加拿大海盆、楚科奇海陆架、白令海陆架居中(分别为(88.65±3.52) μg/g, (70.35±11.32) μg/g 与 (38.28±14.89) μg/g)。海源脂肪酸占总脂肪酸比例最高(86.82%±7.08%), 陆源次之(8.45%±6.62%), 细菌最低(4.63%±2.24%); 硅藻指数(16:1ω9/16:0)在楚科奇海陆架(>0.82)、白令海陆架边缘(>0.65)较高, 其他区域均较低。脂肪酸结果表明:(1)该海域沉积有机质主要来自海源, 陆源贡献小; 在北部、南部楚科奇海陆架、白令海陆架边缘, 硅藻生物量占主要优势; 细菌脂肪酸比例显著低于温暖海域, 指示低温抑制细菌活动。(2)楚科奇海陆架区硅藻生产力高、细菌活动弱, 新鲜有机质沉降效率高, 但对未来海水升温、浮游植物群落变化也较为敏感。(3)加拿大海盆、楚科奇海陆架的浮游植物群落由绿藻与金藻主导。以上结论说明脂肪酸可指示表层沉积物中有机质的来源与新鲜程度; 未来, 脂肪酸有望进一步揭示北冰洋“生物泵”对北极快速变化的响应。

**关键词:** 白令海; 西北冰洋; 有机质; 脂肪酸; 生物泵; 北极快速变化

中图分类号: P714<sup>+</sup>.4; P734.4<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)10-0014-14

## 1 引言

过去几十年, 北冰洋是全球变化最显著的海区之一, 大气及海表升温、海冰消融是其主要特征<sup>[1-4]</sup>。伴随着升温与海冰消融, 北冰洋的物理化学生物性质正发生一系列强烈且持续的变化; 预计在将来几十年, 北冰洋还将以同样、甚至更强烈的速率发生变化<sup>[5-9]</sup>。

“生物泵”是指海洋中的初级生产者通过光合作

用将大气 CO<sub>2</sub> 固定为颗粒有机碳, 沉降于海底, 埋藏在沉积物中的过程, 具有降低大气 CO<sub>2</sub> 的能力。北冰洋的“生物泵”如何响应北极快速变化, 是全球碳循环研究中的一个关键问题<sup>[10-12]</sup>。

北冰洋具有全球最为宽广的大陆架, 在大陆架埋藏的有机质占全北冰洋的 70% 以上<sup>[13]</sup>。其中, 西北冰洋的楚科奇海陆架由于生产力高, 生物粒径大, 水温低等特点, “生物泵”效率远高于其他区域<sup>[14-15]</sup>。未来,

收稿日期: 2019-10-24; 修订日期: 2019-12-02。

基金项目: 国家自然科学基金(41776205, 41406217, 41976226); 南北极环境综合考察与评估专项(Chinare 2017-03-04)。

作者简介: 李科(1992—), 男, 浙江省杭州市人, 研究方向为海洋与极地生物地球化学。E-mail: likelikelee@163.com

\* 通信作者: 金海燕(1974—), 研究员, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: jinhaiyan@sio.org.cn

开阔水域增加<sup>[16]</sup>与太平洋入流增强<sup>[17]</sup>导致的生产力升高可能会促进“生物泵”的运转;但浮游植物小型化<sup>[18]</sup>、水温升高<sup>[19]</sup>、浮游食物链增强<sup>[20]</sup>等又能影响“生物泵”结构,降低其效率。为了更好地预测未来“生物泵”的变化,需加深对现代“生物泵”的理解。

沉积物中生源指标为理解有机质的生产、沉降与保存提供了重要信息<sup>[21-22]</sup>。白令海与西北冰洋已开展大量生源指标工作,包括有机碳( $C_{org}$ )<sup>[23]</sup>、生物硅(BSi)<sup>[24-25]</sup>、绿素(chlorin)<sup>[26]</sup>、类脂生物标志物<sup>[27-28]</sup>等。前人工作表明,西北冰洋陆架是非常高效的有机碳汇区,而且沉降有机碳以海洋自生来源为主,主要由较大粒径的硅藻( $>20\ \mu\text{m}$ )贡献<sup>[29-30]</sup>,其他藻类有机质所占的比例较小。这些海源自生有机质通过硅藻壳体的“压舱”效应,快速地沉降到海底,不仅形成了高效的“生物泵”,还支撑了大量底栖生物<sup>[31]</sup>。但是,前人工作主要运用了化学性质较为保守的生源指标,虽然指示了有机质的来源,但未反映有机质新鲜程度。沉降有机质新鲜程度也是“生物泵”结构的重要特征:新鲜有机质能够支撑起更大生物量,同时对于环境的变化也更加敏感。

脂肪酸作为沉积物中含量最丰富的脂类生物标志物之一,广泛应用于有机质的来源与保存研究中<sup>[32-34]</sup>。一方面,沉积物中脂肪酸的组成,可为有机质的来源提供线索<sup>[32]</sup>。不同来源的脂肪酸,其碳链长度及构型、双键的数目及位置存在差异。特定物种还有合成特征脂肪酸的能力<sup>[32,35]</sup>;海洋浮游植物的脂肪酸以短链偶碳数脂肪酸( $12:n\sim 20:n$ )为主,硅藻的特征脂肪酸为 $16:1\omega 9$ ,绿藻主要以 $18:1$ 、 $18:2$ 为特征脂肪酸;陆地高等植物主要为长链偶碳饱和脂肪酸( $22:0\sim 30:0$ );而细菌则以支链及奇数碳链脂肪酸为主。另一方面,脂肪酸,特别是短链饱和脂肪酸及不饱和脂肪酸,也是十分易于降解的有机质,脂肪酸含量的多少,可以在一定程度上代表沉积物中有机质的新鲜程度,从而为“生物泵”结构提供指示意义<sup>[10,33]</sup>。

西北冰洋陆架区表层沉积物的脂肪酸研究较为有限,仅在十几年前有加拿大的研究者对楚科奇海的两个站位的沉积物柱样进行过脂肪酸分析<sup>[33,36]</sup>。结果表明,西北冰洋陆架区表层沉积物脂肪酸含量丰富,高于北冰洋其他海区。但以上工作的样本量过小,在缺乏代表性的同时,也难以反映脂肪酸的空间分布差异与影响因素。

本文依据白令海与西北冰洋表层沉积物中脂肪酸的分布与组成,结合主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)的统计手段,对楚科奇海以及白令

海有机质的来源与新鲜程度进行了分析,并尝试探讨北极快速变化对以上区域“生物泵”可能造成的影响。

## 2 采样站位及研究方法

### 2.1 采样站位及方法

本研究所分析的表层沉积物样品依托第五次、第六次中国北极科学考察航次采集,共33个站位,分布于白令海盆、楚科奇海盆、加拿大海盆(图1),采样时间分别为2012年夏季与2014年夏季。表层沉积物用箱式采样器获取,取表面 $0\sim 1\ \text{cm}$ 。沉积物在采集后保存于 $-20^\circ\text{C}$ 冷库,直至进一步处理。

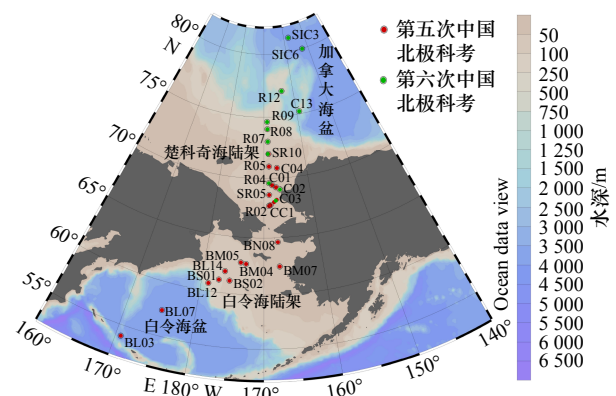


图1 采样站位  
Fig. 1 Sample Locations

### 2.2 脂肪酸化学处理及气相色谱分析方法

样品前处理及仪器分析测试工作于自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室进行。沉积物在遮光、低温( $-45^\circ\text{C}$ )环境下真空干燥,而后在1个月内完成前处理及上机测试。

脂肪酸前处理方法运用Budge等<sup>[37]</sup>对Folch等<sup>[38]</sup>进行改良后的方法:取2g干燥、研磨后的沉积物,加入内标(十九烷酸( $19:0$ ), NU-CHEK)后,先以5mL甲醇( $\text{CH}_3\text{OH}$ )超声萃取(200W超声功率,5min;3000r/min,10min),再用5mL二氯甲烷/甲醇(2:1, V/V)超声萃取两遍。将萃出液在低温水浴下氮吹浓缩,加铜粒去硫后,加入4mL  $\text{KOH} / \text{CH}_3\text{OH}$  (0.5 mol/L)溶液,在 $90^\circ\text{C}$ 下皂化2h。用正己烷萃取出中性组分后,在剩余液体中加入10%盐酸至 $\text{pH} < 1$ ,继续用正己烷萃取出酸性组分(主要为脂肪酸)。将酸性组分在低温下氮吹至1mL,加入3mL  $\text{BF}_3 / \text{CH}_3\text{OH}$  (15%)溶液,  $80^\circ\text{C}$ 下甲酯化1h。冷却至室温后用5mL正己烷萃出,低温氮吹,定容至0.5mL,使用气相色谱仪器进行分析。溶剂皆为液相色谱纯,超纯水及盐酸亦皆以二氯甲烷萃取两遍后使用。

使用气相色谱-质谱检测仪(GC-MS, Agilent

7890A/5970C) 鉴定化合物组成。色谱柱为 HP-5 毛细管柱 (Agilent, 30 m×0.32 mm×0.25 μm), 升温程序为: 初始 50°C, 以 5°C/min 升温至 270°C 后保持 5 min。以不分流模式进样, 进样口温度 250°C, 载气为氦气, 流速 1 mL/min。质谱仪使用电子轰击源 (70 eV) 作为离子源, 采用全扫描/选择离子检测采集模式。与标准样品 (40 种脂肪酸甲酯混标, 安谱, N1070012) 的出峰时间与特征离子谱图进行比对, 确定物质种类。

定量分析使用气相色谱-火焰离子检测器 (GC-FID, Agilent 7890A), 色谱柱为脂肪酸甲酯专用毛细管柱 (Agilent, 100 m×0.25 mm×0.25 μm), 升温程序为: 初始 50°C, 保持 15 min 后以 5°C/min 升温至 120°C, 保持 10 min 后再以 5°C/min 升温至 200°C, 保持 20 min 后再以 5°C/min 升温至 230°C, 最后保持 20 min, 总运行时间 101 min。以不分流模式进样, 进样口温度 250°C, 载气为高纯氮气, 流量 1.4 mL/min。FID 温度为 280°C, 氢气与空气流速分别为 35 与 400 mL/min。最后使用内标-标准曲线法确定脂肪酸含量。

脂肪酸命名常用格式为 (a/i)X:YωZ(c/t)。其中, X 为总碳数, 后面跟一个冒号; Y 表示双键数; ω 表示从甲基末端开始排序; Z 是双键距离甲基端的距离; c 表示顺式异构, t 表示反式异构; a 和 i 分别表示支链的反异构和异构。

### 2.3 主成分分析

由于脂肪酸种类众多, 为寻求控制脂肪酸分布的主要因素, 使用 SPSS 软件对 33 个站位中的 26 个脂肪酸指标进行主成分分析, 具体分析详见文献 [33-34, 39]。

## 3 结果

如表 1 与图 2 所示, 总脂肪酸 (Total Fatty Acid, TFA; 以沉积物干重计) 在 33 个站位的含量范围在 13.70 μg/g 至 213.96 μg/g 之间; 南部楚科奇海陆架表层沉积物中的 TFA 非常高, 平均值可达 123.61 μg/g。所有站位中, 对各类脂肪酸进行排序, 短链饱和脂肪酸最高 (Short Chain Saturated Fatty Acids, SCSFA, (42.3±25.43) μg/g), 单不饱和脂肪酸次之 (Mono-Unsaturated Fatty Acids, MUFA, (23.27±24.31) μg/g), 长链饱和脂肪酸 (Long Chain Saturated Fatty Acids, LCSFA)、奇碳数脂肪酸 (Odd FA)、多不饱和脂肪酸 (Poly-Unsaturated Fatty Acids, PUFA) 较少, 分别为 (4.79±3.89) μg/g、(3.49±2.78) μg/g 与 (1.80±2.47) μg/g。

如表 2 所示, 检出的 26 种脂肪酸中, 16:0 普遍含量最高; 楚科奇海陆架区, 16:1ω9 与 16:0 含量相近, 但在其他部分区域, 14:0 与 18:0、18:1ω9 取代 16:1ω9

成为除 16:0 外含量最高的脂肪酸。

## 4 讨论

### 4.1 白令海及西北冰洋表层沉积物中脂肪酸来源分析

海洋中脂肪酸的来源可分为海源、陆源以及细菌来源 3 个大类, 大量研究表明, 海源脂肪酸主要包括 SCSFA、MUFA 与 PUFA, 陆源脂肪酸主要为高等植物产生的 LCSFA, Odd FA 以及支链脂肪酸为细菌来源 [32-34, 36]。

对 33 个站位的 26 种脂肪酸指标进行主成分分析, 结果如表 3 所示: PC1 至 PC5 的贡献率分别为 45.00%、19.00%、9.19%、5.61% 和 4.54%, 累计贡献率 83.34%。将各脂肪酸与 PC1、PC2 的相关性作图 (图 3), 脂肪酸主要分布在两个聚类, 右下角的聚类主要包括海源、较易降解的 SCSFA、MUFA 与 PUFA; 另一个聚类以陆源、不易降解的 LCSFA 为主。该结果表明, LCSFA 与 SCSFA、MUFA、PUFA 的分布由两组不同因素控制, 与前人结论一致 [33-34]。据此, 将 (SCSFA + MUFA + PUFA) 定为海源脂肪酸, LCSFA 定为陆源脂肪酸, Odd FA 定为细菌脂肪酸 (表 4)。

对以上 3 种来源的贡献比例排序, 所有站位均为海源 > 陆源 > 细菌 (图 4)。海源脂肪酸在 TFA 中占 70% 以上, 特别是加拿大海盆, 海源脂肪酸的比例达 95% 左右 (图 5a)。陆源脂肪酸比例较低, 除 BL07 (25.53%) 及 CC6 (26.00%) 两站位以外, 均不超过 15% (图 5b)。细菌脂肪酸占比最低, 除 BL14 站 (13.08%), 均未高于 8%; 陆架区略高于陆坡及海盆区 (图 5c)。白令海陆架及西北冰洋陆架表层沉积物的细菌脂肪酸比例显著低于温暖海区, 如东海、南海陆架细菌脂肪酸比例可达 20% 以上 [41-42]; 这显示在白令海陆架及西北冰洋陆架, 低水温抑制了细菌活动 [43]。

此外, 脂肪酸硅藻指数 (以下简称硅藻指数, 16:1ω9 / 16:0) 可用来表征硅藻对有机质的贡献 (表 4, 图 5d)。16:1ω9 是硅藻的特征脂肪酸, 在大多数硅藻体内, 16:1ω9 常占 TFA 的 40% 以上; 在沉积物或悬浮颗粒物中, 较高的硅藻指数 (16:1ω9 / 16:0 > 1) 指示硅藻在浮游植物群落中的主导地位 [32]。硅藻指数分布范围为 0~1.76, 陆架区的硅藻指数普遍大于陆坡及海盆区, 特别是楚科奇海陆架与白令海陆架边缘, 硅藻指数大于 1, 指示硅藻占主要优势。

与本文其他海区相比, 白令海盆区 TFA 最低 ((15.00±1.30) μg/g), 海源脂肪酸比例最低 (75.33%±7.13%), 陆源脂肪酸最高 (19.98%±5.56%), 细菌脂肪酸较低 (4.69%±1.57%), 硅藻指数几乎为 0。指示白

表 1 白令海及楚科奇海表层沉积物站位信息及样品脂肪酸含量

Table 1 FA, TOC and station properties of the Bering Sea and western Arctic Ocean surface sediments

区域	站位	经纬度	水深/m	TOC/%	TFA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	SCSFA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	LCSFA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	MUFA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	PUFA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Odd FA / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
白令海盆	BL03	53.98°N, 170.72°E	3 592.00	0.64	13.70	10.72	1.98	0.34	0.23	0.43
	BL07	57.40°N, 175.12°E	3 771.00	0.24	16.30	10.61	4.16	0.00	0.51	1.02
白令海陆架	BL12	60.69°N, 178.85°W	225.00	1.10	30.39	13.34	4.30	9.87	2.45	0.44
	BS01	61.12°N, 177.26°W	127.00	1.61	34.71	14.81	1.78	14.55	1.31	1.66
	BS02	61.13°N, 175.53°W	99.00	1.62	63.51	46.93	8.97	4.07	1.14	2.40
	BL14	61.93°N, 176.42°W	102.00	1.75	16.02	13.06	0.87	0.00	0.00	2.10
	BM07	62.48°N, 167.33°W	30.00	0.20	20.55	14.32	1.76	3.67	0.18	0.42
	BM04	62.70°N, 173.00°W	63.00	1.16	45.65	24.92	4.55	13.61	0.00	2.55
	BM05	62.79°N, 173.92°W	45.00	0.39	44.41	35.68	3.30	1.25	1.13	3.04
	BN08	64.61°N, 167.46°W	27.00	0.62	51.00	20.38	6.36	21.24	0.73	2.29
楚科奇海陆架	R02	67.69°N, 168.94°W	43.60	1.33	123.29	79.52	12.70	21.41	4.34	5.31
	CC1	67.77°N, 168.61°W	43.00	1.60	172.41	72.14	2.04	83.54	9.27	5.42
	CC3	68.01°N, 167.87°W	46.30	0.44	45.89	34.89	5.35	3.10	0.78	1.77
	CC4	68.13°N, 167.51°W	48.90	0.71*	105.36	65.40	0.00	36.67	0.00	3.29
	CC6	68.19°N, 167.31°W	36.30	1.58	6.94	4.31	1.80	0.38	0.23	0.22
	SR05	68.62°N, 168.86°W	52.00	1.22	61.17	29.46	7.11	21.52	0.00	3.08
	C03	69.03°N, 166.48°W	33.00	1.26*	50.17	23.93	2.49	17.37	4.54	1.83
	C02	69.23°N, 167.32°W	40.50	1.10	125.96	57.90	9.66	47.54	4.34	6.53
	C01	69.41°N, 168.16°W	44.50	1.33	78.24	34.48	12.40	23.02	3.84	4.50
	R04	69.60°N, 168.88°W	45.30	1.03	90.38	33.99	10.13	41.82	1.11	3.34
	C04	70.84°N, 166.89°W	39.40	0.94	51.88	23.28	7.28	16.71	1.57	3.04
	R05	70.98°N, 168.78°W	37.10	1.11	152.87	72.56	10.01	55.30	2.71	11.38
	SR10	72.00°N, 168.81°W	51.00	1.37	85.94	49.61	9.09	19.37	1.13	6.73
	R06	72.00°N, 168.98°W	51.35	1.88*	143.25	69.39	5.55	60.99	2.22	5.10
	SR11	73.00°N, 168.97°W	67.00	1.58	183.97	87.09	11.90	68.43	4.84	11.70
	R07	73.00°N, 168.97°W	73.36	1.97*	213.96	101.44	1.74	93.42	9.78	7.58
	SR12	74.00°N, 169.02°W	174.60	0.74	38.45	30.76	3.72	1.31	0.38	2.27
	R08	74.00°N, 169.00°W	82.69	1.50*	81.40	56.20	5.28	16.63	0.69	2.59
R09	74.61°N, 169.03°W	190.00	1.09*	34.40	23.52	0.00	10.88	0.00	0.00	
楚科奇海陆坡	C13	75.20°N, 159.18°W	941.76	1.07*	59.02	44.88	0.93	10.49	0.00	2.71
	R12	77.00°N, 163.89°W	438.86	0.63*	81.68	57.53	0.44	21.62	0.00	2.08
加拿大海盆	SIC6	79.98°N, 152.63°W	3 763.00	0.97*	85.13	73.81	0.00	6.85	0.00	4.47
	SIC3	81.08°N, 157.66°W	3 634.20	0.60*	92.17	66.68	0.47	21.02	0.00	4.01

注: SCSFA = 10:0 + 12:0 + 14:0 + 16:0 + 18:0; LCSFA = 20:0 + 22:0 + 24:0; MUFA = 14:1 + 16:1 $\omega$ 9 + 18:1 + 20:1 + 22:1; PUFA = 18:2 + 20:2 + 20:4 + 20:5 + 22:5 + 22:6; Odd FA = 11:0 + 13:0 + 15:0 + 15:1 + 17:0 + 17:1 + 21:0 + 23:0。\*标注TOC数据引自文献[40]。

表 2 白令海及楚科奇海各站位沉积物脂肪酸组成 (单位:  $\mu\text{g/g}$ )Table 2 Individual FA compounds of the Bering Sea and the western Arctic Ocean surface sediments (unit:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

区域	站位	11:0	12:0	13:0	14:0	14:1	15:0	15:1	16:0	16:1 $\omega$ 9	17:0	17:1	18:0	18:1 $\omega$ 9	18:2
白令海盆	BL03	0.00	0.00	0.00	0.34	0.34	0.00	0.00	5.61	0.00	0.00	0.00	4.77	0.00	0.00
	BL07	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.37	0.00	5.83	0.00	0.00	0.00	4.16	0.00	0.00
白令海陆架	BL12	0.00	0.00	0.00	2.38	0.80	0.44	0.00	7.72	6.36	0.00	0.00	3.24	2.71	0.00
	BS01	0.00	0.00	0.00	3.71	0.00	0.91	0.00	8.58	12.17	0.22	0.53	2.53	2.38	0.45
	BS02	0.00	0.00	0.00	8.45	1.38	2.40	0.00	31.66	2.69	0.00	0.00	6.81	0.00	0.00
	BL14	0.00	0.30	0.00	2.97	0.00	1.44	0.00	7.57	0.00	0.65	0.00	2.23	0.00	0.00
	BM07	0.00	0.00	0.00	2.81	0.00	0.00	0.00	9.63	2.43	0.42	0.00	1.89	0.54	0.00
	BM04	0.00	0.21	0.22	5.53	0.00	1.77	0.00	16.60	10.87	0.57	0.00	2.58	2.75	0.00
	BM05	0.00	0.38	0.00	8.74	0.00	2.14	0.00	23.58	0.23	0.90	0.00	2.98	0.47	0.00
	BN08	0.00	0.00	0.00	3.16	0.00	0.77	0.00	13.55	18.58	0.67	0.31	3.67	2.65	0.00
	楚科奇海陆架	R02	0.00	0.72	0.33	19.54	0.00	2.86	0.00	47.81	9.65	1.71	0.41	11.45	6.39
CC1		0.15	1.12	0.34	22.95	0.60	2.76	0.00	42.59	74.91	0.93	0.79	5.48	7.44	1.60
CC3		0.00	0.32	0.13	5.96	0.00	0.93	0.00	20.67	0.36	0.72	0.00	7.95	1.39	0.00
CC4		0.00	1.50	0.54	11.24	0.00	2.75	0.00	38.93	14.86	0.00	0.00	13.73	18.16	0.00
CC6		0.00	0.36	0.00	0.61	0.00	0.22	0.00	2.43	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00
SR05		0.00	0.00	0.70	7.80	4.27	2.39	0.00	17.40	12.43	0.00	0.00	4.26	4.81	0.00
C03		0.00	0.00	0.00	3.97	1.05	1.32	0.00	15.06	11.32	0.51	0.00	4.90	5.01	0.73
C02		0.00	0.83	0.38	19.20	0.00	3.95	0.00	34.35	44.48	1.00	1.21	3.51	3.06	3.54
C01		0.00	0.69	0.36	7.99	0.00	2.24	0.00	21.26	15.02	1.05	0.00	4.53	6.53	0.00
R04		0.00	0.00	0.00	6.57	0.00	1.37	0.00	22.34	37.56	0.43	0.68	5.08	3.29	0.00
C04		0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	1.37	0.00	15.81	12.93	0.46	0.40	2.70	2.34	0.00
R05		0.00	0.52	0.34	16.94	0.00	5.38	0.00	47.89	47.78	2.05	3.04	7.21	4.12	1.03
R06		0.00	1.08	0.00	19.36	0.00	5.10	0.00	43.46	47.72	0.00	0.00	5.48	6.28	0.91
SR10		0.00	0.57	0.38	11.68	0.00	3.42	0.00	31.23	14.85	1.76	0.37	6.12	3.99	0.00
SR11		0.86	2.42	0.82	28.19	0.69	6.50	0.00	51.70	54.09	2.01	1.52	4.78	9.31	0.91
R07		0.00	1.64	0.77	24.78	0.00	5.62	0.00	67.49	76.99	1.19	0.00	7.53	13.95	9.78
SR12		0.00	0.00	0.00	1.51	0.00	0.00	0.00	15.79	0.24	0.77	0.00	13.46	1.07	0.00
R08		0.00	1.19	0.55	8.28	0.00	1.81	0.00	35.03	7.28	0.00	0.23	11.70	4.87	0.00
R09		0.00	0.00	0.00	5.42	0.00	0.00	0.00	16.63	8.78	0.00	0.00	1.47	2.10	0.00
楚科奇海陆坡		C13	0.00	0.35	0.26	3.80	0.00	0.00	1.72	26.62	1.47	0.73	0.00	14.11	7.99
	R12	0.00	0.74	0.36	3.59	0.00	1.27	0.00	31.87	1.16	0.45	0.00	21.33	18.61	0.00
加拿大海盆	SIC6	0.00	1.56	0.76	8.07	0.00	2.97	0.00	45.35	0.82	0.74	0.00	18.84	6.02	0.00
	SIC3	0.00	0.40	0.37	6.14	0.00	2.81	0.00	40.54	1.86	0.83	0.00	19.60	16.48	0.00

续表 2

区域	站位	20:0	20:1	21:0	20:2	22:0	22:1	20:4	23:0	24:0	20:5	22:6	22:5
白令海盆	BL03	0.59	0.00	0.43	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.23	0.00
	BL07	1.03	0.00	0.65	0.00	1.13	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.51	0.00
白令海陆架	BL12	0.59	0.00	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.00	2.97	2.45	0.00	0.00
	BS01	0.40	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.59	0.86	0.86	0.00	0.00
	BS02	1.57	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00	5.20	0.00	1.14	0.00
	BL14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00
	BM07	0.33	0.00	0.00	0.00	0.57	0.16	0.00	0.20	0.86	0.00	0.18	0.00
	BM04	1.07	0.00	0.00	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	0.00
	BM05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.30	0.00	1.13	0.00
	BN08	0.90	0.00	0.54	0.00	1.67	0.00	0.00	0.00	3.79	0.00	0.73	0.00
楚科奇海陆架	R02	2.08	1.98	0.00	0.00	3.47	1.06	1.29	0.00	7.15	0.00	1.95	0.00
	CC1	0.63	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41	4.89	0.00	1.97
	CC3	0.96	0.00	0.00	0.00	1.50	0.00	0.00	0.00	2.89	0.00	0.78	0.00
	CC4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	CC6	0.00	0.38	0.00	0.00	0.66	0.00	0.00	0.00	1.14	0.00	0.23	0.00
	SR05	1.56	0.00	0.00	0.00	1.80	0.00	0.00	0.00	3.75	0.00	0.00	0.00
	C03	0.94	0.00	0.00	0.00	1.56	0.00	0.00	0.00	0.00	3.81	0.00	0.00
	C02	1.20	0.00	0.00	0.00	2.53	0.00	0.00	0.00	5.93	0.00	0.79	0.00
	C01	2.17	0.27	0.85	0.00	3.94	1.20	0.00	0.00	6.30	2.10	1.74	0.00
	R04	1.67	0.00	0.86	0.00	2.43	0.97	0.00	0.00	6.03	0.00	1.11	0.00
	C04	1.30	0.00	0.81	0.00	1.92	0.00	0.75	0.00	4.06	0.00	0.81	0.00
	R05	1.45	0.23	0.58	0.00	2.55	1.35	0.67	0.91	6.01	0.00	1.00	0.00
	R06	1.73	0.00	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00	2.37	1.30	0.00	0.00
	SR10	1.76	0.00	0.81	0.00	2.45	0.53	0.00	0.00	4.88	0.00	1.13	0.00
	SR11	2.03	0.00	0.00	0.00	3.39	0.00	0.00	0.00	6.48	2.16	1.21	0.00
	R07	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SR12	0.94	0.00	1.50	0.00	1.13	0.00	0.00	0.00	1.65	0.00	0.38	0.00	
R08	1.04	0.00	0.00	0.00	1.65	4.48	0.00	0.00	2.59	0.00	0.00	0.00	
R09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
楚科奇海陆坡	C13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00
	R12	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
加拿大海盆	SIC6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SIC3	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

令海盆区,海源有机质贡献较其他海域略少,可能与生产力较低<sup>[44]</sup>、水深较深有关;陆源有机质贡献较其他海域略高,与海源有机质比例低、且陆源脂肪酸不

易降解有关<sup>[34]</sup>;细菌脂肪酸含量低,指示细菌活动较弱,可能与低温以及新鲜有机质的缺乏有关<sup>[43]</sup>。

白令海陆架区, TFA((38.28 ± 14.89) μg/g)略高于

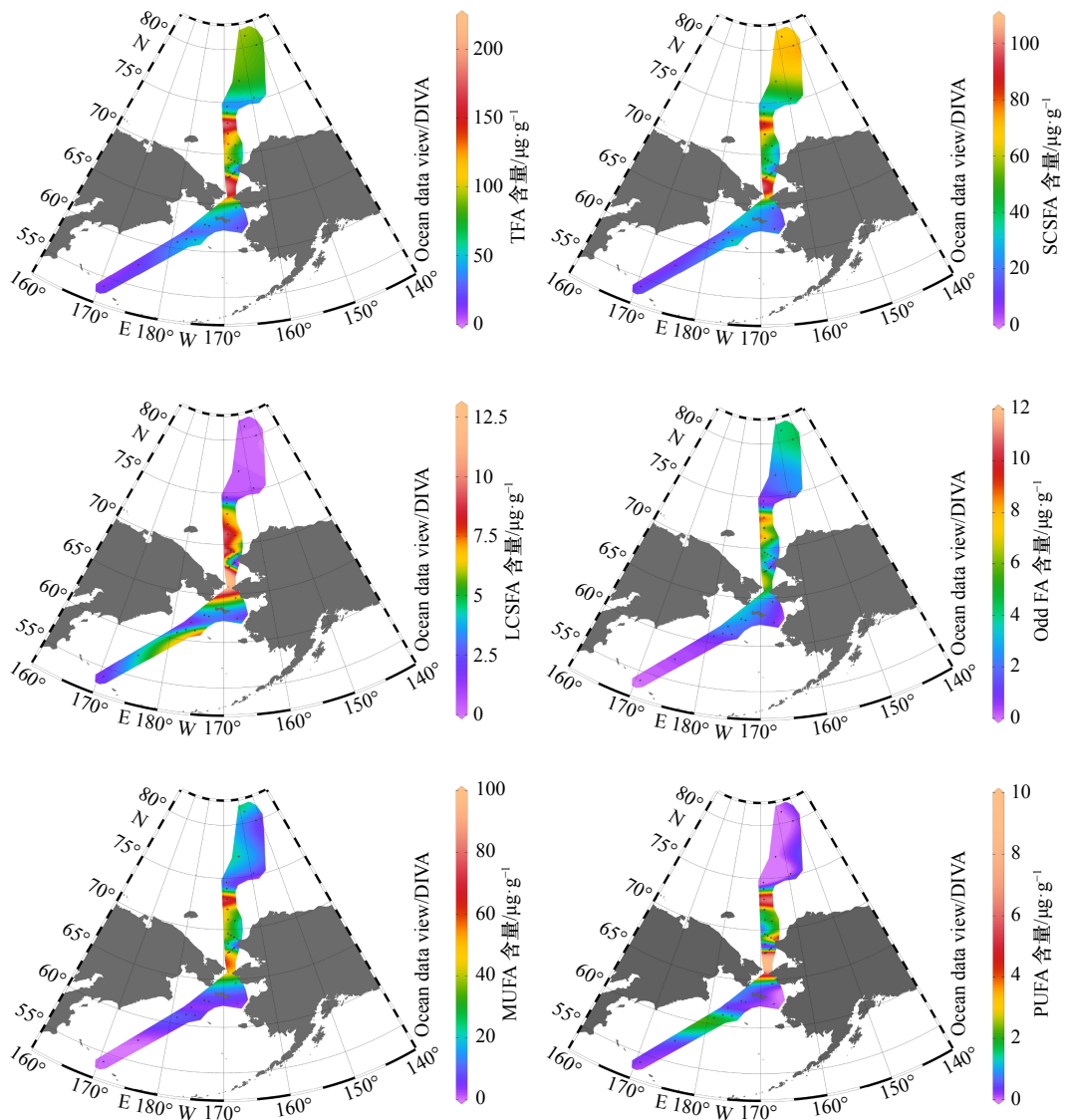


图 2 白令海及西北冰洋表层沉积物中总脂肪酸及各类脂肪酸含量

Fig. 2 TFA, SCSFA, LCSFA, Odd FA, MUFA and PUFA contents of the Bering Sea and the western Arctic Ocean surface sediments

表 3 主成分分析结果

Table 3 PCA results

	总计	方差/%	累积/%
PC1	11.25	45.00	45.00
PC2	4.75	19.00	64.00
PC3	2.30	9.19	73.19
PC4	1.40	5.61	78.80
PC5	1.14	4.54	83.34

白令海盆, 海源脂肪酸含量较高 ( $84.75\% \pm 2.45\%$ ), 陆源脂肪酸含量低 ( $9.66\% \pm 3.40\%$ ), 细菌含量略高 ( $5.26\% \pm 3.38\%$ ), 硅藻指数在白令海陆架北缘与南缘较高 ( $> 0.82$ ), 中部较低 ( $< 0.65$ )。白令海陆架区陆源

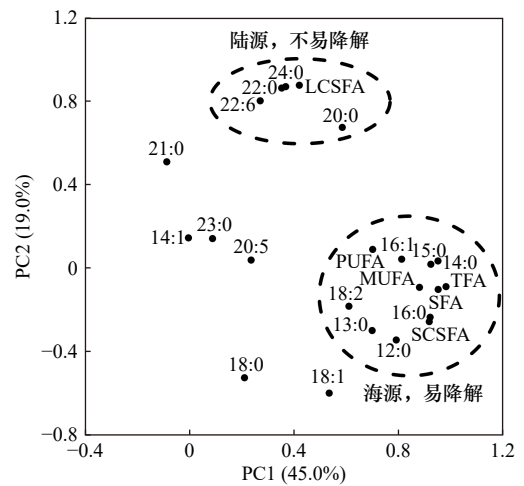


图 3 各脂肪酸与 PC1、PC2 的相关性

Fig. 3 First two principal components score plot of FAs

脂肪酸绝对含量与白令海海盆相当,但陆源脂肪酸的百分比要显著小于后者:这一方面是由于白令海陆架

区生产力高于海盆区;另一方面,也因为白令海陆架区水深远小于海盆区,使得海盆区原本就贫瘠的海源

表4 各站位不同来源脂肪酸百分比及硅藻指数

Table 4 Percentage of FA sources and diatom index of the Bering Sea and the western Arctic Ocean surface sediments

站位	TFA/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	海源脂肪酸 /%	陆源脂肪酸 /%	细菌脂肪酸 /%	硅藻指数(16:1 $\omega$ 9 / 16:0)
BL03	13.70	82.46	14.42	3.12	0.00
BL07	16.30	68.21	25.53	6.26	0.00
BL12	30.39	84.42	14.14	1.45	0.82
BS01	34.71	88.38	5.13	4.79	1.42
BS02	63.51	82.10	14.12	3.77	0.09
BL14	16.02	81.49	5.43	13.08	0.00
BM07	20.55	88.39	8.58	2.05	0.25
BM04	45.65	84.43	9.98	5.60	0.65
BM05	44.41	85.71	7.44	6.85	0.01
BN08	51.00	83.04	12.47	4.49	1.37
R02	123.29	85.39	10.30	4.31	0.20
CC1	172.41	95.67	1.18	3.14	1.76
CC3	45.89	84.49	11.65	3.85	0.02
CC4	105.36	96.88	0.00	3.12	0.38
CC6	6.94	70.88	26.00	3.13	0.00
SR05	61.17	83.34	11.62	5.04	0.71
C03	50.17	91.38	4.97	3.66	0.75
C02	125.96	87.14	7.67	5.19	1.29
C01	78.24	78.40	15.85	5.75	0.71
R04	90.38	85.10	11.20	3.69	1.68
C04	51.88	80.09	14.04	5.87	0.82
R05	152.87	85.41	6.55	7.45	1.00
SR10	85.94	81.59	10.58	7.84	0.48
R06	143.25	92.57	3.88	3.56	1.10
SR11	183.97	87.17	6.47	6.36	1.05
R07	213.96	95.64	0.81	3.54	1.14
SR12	38.45	84.41	9.69	5.90	0.02
R08	81.40	90.33	6.49	3.18	0.21
R09	34.40	100.00	0.00	0.00	0.53
C13	59.02	93.82	1.58	4.59	0.06
R12	81.68	96.91	0.54	2.55	0.04
SIC6	85.13	94.75	0.00	5.25	0.02
SIC3	92.17	95.14	0.51	4.35	0.05

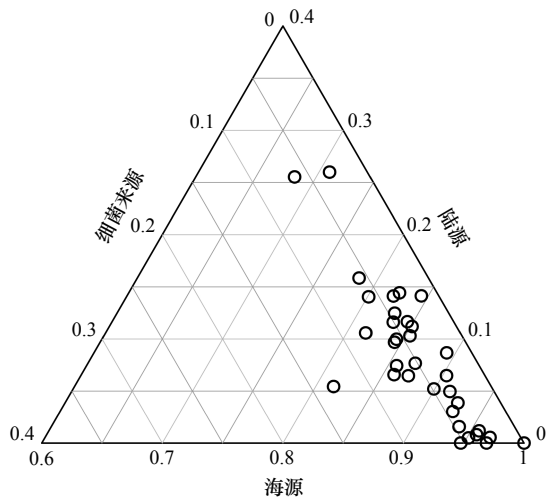


图4 脂肪酸来源三元图  
Fig. 4 Ternary figure of FA sources

脂肪酸在更长的沉降时间中进一步被分解,而陆源脂肪酸的化学性质则相对较稳定;两种因素叠加,陆架区的陆源脂肪酸比海盆区受到更多海源的稀释,从而比例更低。脂肪酸结果指示白令海陆架区有机质以海源自生为主,陆源贡献小;硅藻在陆架边缘区占主要优势;细菌脂肪酸与海源有机质的同步增加,可能指示细菌活动随新鲜有机质的增加而略为增强<sup>[43]</sup>。

楚科奇海陆架, TFA 非常高 ( $97.15 \pm 55.31$ )  $\mu\text{g/g}$ ,

特别是南部陆架,最高可达  $213.96 \mu\text{g/g}$ ,与前人调查结果相同<sup>[33]</sup>,比东海长江口区域高一个量级<sup>[41]</sup>;海源脂肪酸占其中绝大部分 ( $87.15\% \pm 6.97\%$ ),陆源脂肪酸与细菌脂肪酸比例均很低 ( $8.37\% \pm 6.20\%$  与  $4.45\% \pm 1.79\%$ ),硅藻指数非常高。而且硅藻指数高值区与 TFA 高值区域重合,表明楚科奇海陆架的高脂肪酸含量主要与硅藻有关:一方面,充足的营养盐支撑了极高的硅藻生物量,且硅藻在浮游植物群落中占绝对优势,与现场水柱生产力、浮游植物群落调查结果具有相似性<sup>[29, 45]</sup>,也与沉积物中的其他生源指标重建结果相同<sup>[24-26]</sup>;另一方面,硅藻在高营养盐环境下通常形成较大的个体 ( $> 20 \mu\text{m}$ )<sup>[29]</sup>,为有机质的快速沉降提供了“压舱物”,减少有机质在水柱中的分解,使表层生产的新鲜有机质快速地沉降到沉积物表面。但值得注意的一点是,在空间分布上,沉积物中脂肪酸与绿素<sup>[26]</sup>、生物硅<sup>[25]</sup>的高值区吻合得较好,但与表层生产力高值区<sup>[29, 45]</sup>存在一定的错位,这很可能由于表层颗粒在垂直沉降过程中同时也在发生着侧向输运,强劲的太平洋入流将颗粒物沉降的区域带离了生产区域。偏低的细菌脂肪酸比例亦表明,细菌活动在低温下受到抑制,有利于新鲜有机质的保存。

楚科奇陆坡、加拿大海盆与深度相似的白令海盆存在明显差异: TFA 非常高 ( $70.35 \pm 11.32$ )  $\mu\text{g/g}$  与

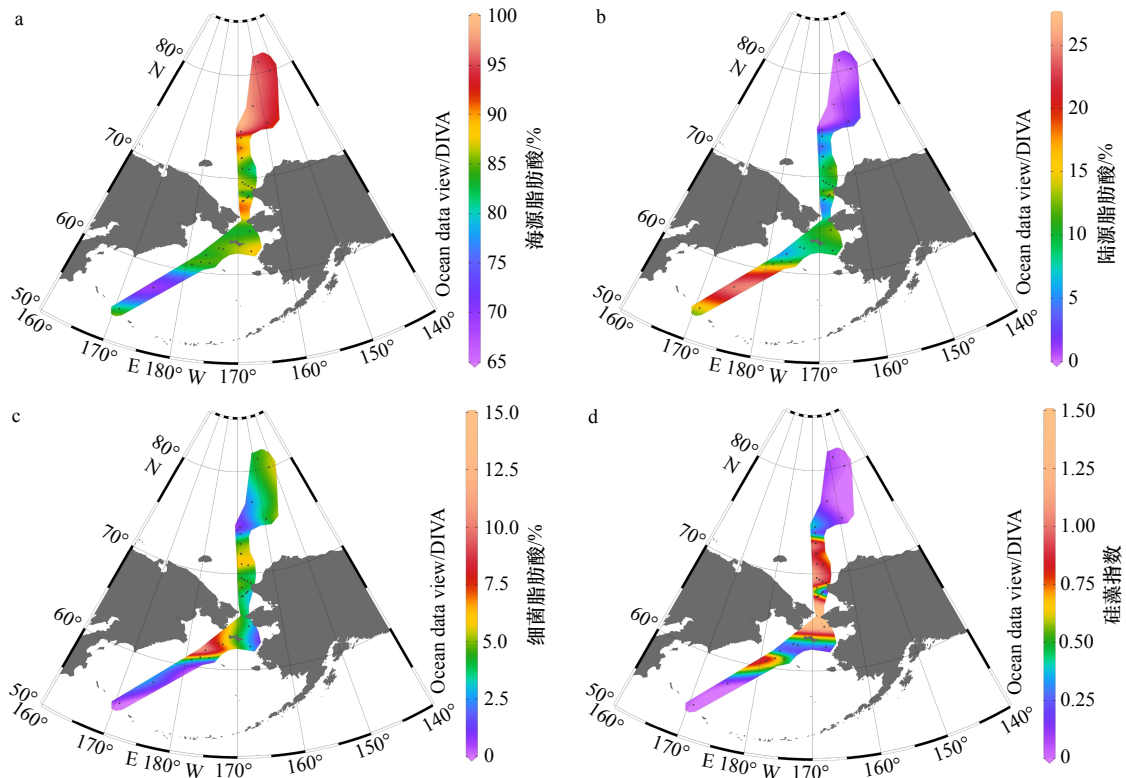


图5 各来源脂肪酸百分比及硅藻指数分布图

Fig. 5 Percentage of FA sources and diatom index of the Bering Sea and the western Arctic Ocean

( $88.65 \pm 3.52$ )  $\mu\text{g/g}$ ), 海源脂肪酸几乎占全部( $95.37\% \pm 1.54\%$  与  $94.95\% \pm 0.20\%$ ), 陆源脂肪酸非常少( $1.06\% \pm 0.52\%$  与  $0.25\% \pm 0.25\%$ ), 细菌脂肪酸也较低( $3.57\% \pm 1.02\%$  与  $4.80\% \pm 0.45\%$ ), 硅藻指标几乎为 0, 18:0:18:1 $\omega$ 9 明显高于其他海区。根据这些特点进行推论, 首先, 可以得到与 Honjo 等<sup>[46]</sup>相似的结论, 即楚科奇陆坡、加拿大海盆由于海冰的存在, 有机质沉降机制与白令海盆不同: 持续的海冰覆盖、稀少的“压舱物”阻止了大部分陆源有机质在海盆与陆坡的沉积; 其次, 偏低的硅藻指数与较高的 18:0:18:1 $\omega$ 9 脂肪酸(表 2) 指示, 硅藻在该海区不占主导, 绿藻与金藻占浮游植物群落的主要部分<sup>[32, 35]</sup>, 与该区域叶绿素极大层色素分析<sup>[47]</sup>以及沉积物碳酸钙含量<sup>[48]</sup>的证据一致。然而, Honjo 等<sup>[46]</sup>认为海盆区的有机质来源可能主要由侧向输运贡献, 垂向沉积较弱; 冰藻在融冰期的快速沉降可能也贡献了较多的新鲜有机质。但以上观点在脂肪酸结果中无法反映, 还需要更多证据。

脂肪酸结果显示白令海及西北冰洋表层沉积物中的有机质主要由海源自生来源产生, 陆源贡献不显著, 与表层沉积物中甘油二烷基甘油四醚(GDGT)对有机质来源的结果相似<sup>[49]</sup>。细菌脂肪酸比例偏低, 表明细菌活动在低温下受到抑制<sup>[43]</sup>。楚科奇海陆架区 TFA 与硅藻指数均非常高, 与其他生源指标类似, 均指示海源有机质的大量沉积主要由高生物量的硅藻构成<sup>[4, 25-26]</sup>; 硅藻壳体的“压舱物”效应、受抑制的细菌活动, 也是新鲜有机质快速沉降、高效保存的原因。楚科奇陆坡、加拿大海盆的浮游植物群落由绿藻与金藻主导, 硅藻不占主要优势。

#### 4.2 脂肪酸所指示白令海及西北冰洋表层沉积物中有机质的新鲜程度

脂肪酸分析结果显示, 楚科奇海陆架由于生产力高, 硅藻壳体“压舱物”丰富、细菌活动受低温抑制等原因, 是新鲜有机质的高效沉降区; 而白令海陆架新鲜有机质沉降效率明显较低。为了比较新鲜有机物沉降的差异, 图 6 总结了北冰洋几个特征陆架区表层沉积物中 TFA 与总有机碳 (Total Organic Carbon, TOC) 的关系<sup>[33, 50]</sup>。需要说明的是, 前人工作<sup>[33-34]</sup>将 SCSFA、MUFA、PUFA 定义为新鲜有机质的指标, 但西伯利亚海陆架区的文献资料<sup>[50]</sup>只提供了 TFA, 未细分脂肪酸种类。需要先分析易降解脂肪酸(SCSFA + MUFA + PUFA, 表征有机质新鲜程度)与 TFA 之间的相关关系。分析结果显示, 本研究中 33 个表层沉积物中易降解脂肪酸与 TFA 呈显著正相关(图 7), 因而 TFA 在本研究区域可作为新鲜有机质的指标。

由图 6 可见, 楚科奇海陆架表层沉积物中的新鲜

有机质占总有机质的比例明显高于白令海陆架与西伯利亚海陆架, 3 条拟合线的斜率分别是 82.99, 21.46 与 14.33, 表示在相同的 TOC 含量下, 楚科奇海陆架区新鲜有机质含量是白令海陆架的近 4 倍, 是西伯利亚海陆架的近 6 倍。这是由于楚科奇海陆架区的生产力高, 又有大粒径的硅藻壳体作为“压舱物”, 因而有大量的新鲜有机质沉降到沉积物表面; 同时, 楚科奇海陆架区缺少陆源输入, 对新鲜有机质的稀释效应弱, 而西伯利亚海生产力较低, 又有大量的陆源有机质通过河流输入, 本就有限的海源新鲜有机质在陆源有机质的稀释作用下, 占 TOC 的含量更低<sup>[50]</sup>; 白令海陆架虽然没有大量陆源物质输入, 但生产力略低, 且硅藻“压舱物”不如楚科奇海陆架充足<sup>[44]</sup>, 因而新鲜有

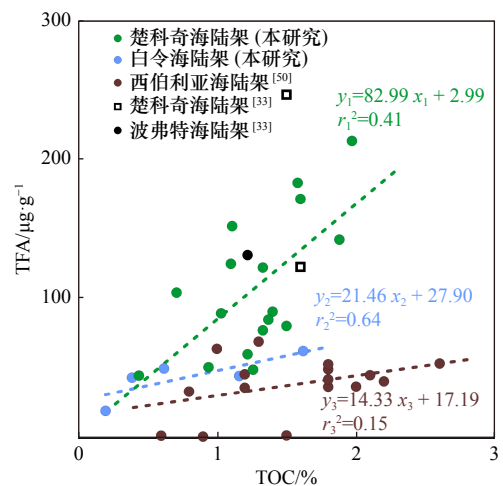


图 6 北冰洋部分陆架海区表层沉积物中 TFA 与 TOC 的关系<sup>[33, 50]</sup>

Fig. 6 Relationship between TFA and TOC among the Bering, Chukchi, Beaufort and Siberian shelves<sup>[33, 50]</sup>

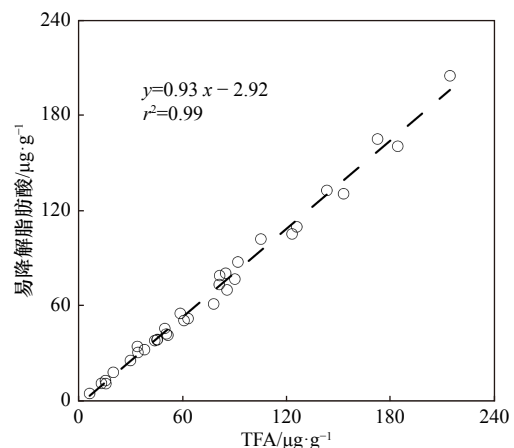


图 7 本研究表层沉积物中易降解脂肪酸(SCSFA + MUFA + PUFA)与 TFA 的相关关系

Fig. 7 Correlation between labile FA (SCSFA + MUFA + PUFA) and TFA among all surface sediments in this study

机碳沉降速率不如后者。

楚科奇陆坡、加拿大海盆的有机质新鲜程度亦非常高,推测主要与有机质在融冰期快速沉降<sup>[51]</sup>与楚科奇陆架有机质的侧向运输<sup>[46]</sup>有关。但可惜脂肪酸解释能力有限且海盆区站位较少,无法深入讨论海冰与侧向运输对有机质沉降的影响。由于此区域是主要的海冰消退区,未来工作需更加注重对该区域的有机质沉降机制的研究。

### 4.3 陆架区有机质在北极快速变化下的敏感性

硅藻生物量大、细菌活动弱、新鲜有机质高效沉降的特点,使得楚科奇海陆架区“生物泵”在未来的北极快速变化下比北冰洋其他海区更为敏感。

由于太阳辐射量<sup>[7]</sup>与温暖太平洋水入流<sup>[17]</sup>的增加,楚科奇海陆架水将会升温<sup>[19]</sup>,增强细菌活动,从而加快新鲜有机质的降解<sup>[43]</sup>,将更多的二氧化碳释放回水柱中,降低“生物泵”的效率。目前,楚科奇海陆架区的高效碳沉降,除了生产力高、沉降快速等原因外,很大程度上依靠低温抑制的细菌活动,使得新鲜有机质在沉降过程中较少地受到降解。未来陆架水的升温,细菌活动的增强,很可能会影响有机碳的保存,降低“生物泵”的效率。

浮游植物的群落变化,也会影响有机质的沉降速率,从而影响“生物泵”的效率。目前楚科奇海的大量新鲜有机质沉降很大程度上得益于硅藻壳体的“压舱物”效应<sup>[24,44]</sup>,若是由于温度、光照、营养盐等条件的变化,使硅藻在浮游植物群落中占比减小,硅藻壳体“压舱物”减少,在生产力不变的情况下,由于沉降速率的降低,造成有机质在水柱中停留、分解的时间增加,也会大大降低有机碳向沉积物输出的效率。

当然,最近国际上已有共识,北冰洋的浮游植物生物量在最近十几年来一直是增加的,预期未来的相当一段时间内也都会上升<sup>[16]</sup>。生产力的增加,是否能与“生物泵”效率的降低相抵消?楚科奇海,以及整个

北冰洋的“生物泵”究竟如何变化?脂肪酸能够指征沉降颗粒物及沉积物中有机质的来源与新鲜程度,结合其他一系列指标,有望监测与研究未来北冰洋的“生物泵”变化。

## 5 结论

在白令海、西北冰洋各个海区中,楚科奇海陆架区表层沉积物中脂肪酸的含量非常高,特别是中部、南部陆架区,达到 213.96  $\mu\text{g/g}$ ,是全球沉积物中脂肪酸含量最高的海区之一;白令海陆架的脂肪酸含量稍低于楚科奇海陆架;楚科奇海陆坡、加拿大海盆的浮游植物群落由绿藻与金藻主导。白令海陆架及西北冰洋表层沉积物中的脂肪酸指示了有机质主要由海源贡献,陆源、细菌来源都较低。楚科奇海陆架中南部、白令海陆架边缘硅藻指数高,有机质主要由硅藻贡献,其他海区硅藻不占主要优势。

楚科奇海陆架区由于生产力高、硅藻“压舱”效应明显、低温抑制细菌活动等原因,是新鲜有机质高效沉降的一个海区。这些新鲜有机质,在构成高效的“生物泵”,供养丰富的底栖生物的同时,也使得楚科奇海陆架区的有机质沉降对未来的北极快速变化较其他海区更为敏感;浮游植物群落变化、水温升高很可能会减少新鲜有机质的沉降量,降低“生物泵”的效率。未来楚科奇海陆架区乃至北冰洋的“生物泵”究竟会如何变化,还需进行长期、连续、全方位的监测与研究。脂肪酸作为有机质来源与新鲜程度的指标,有望应用于未来北冰洋“生物泵”变化研究中。

**致谢:** 感谢中国第五次、第六次北极科学考察队为样品采集所付出的艰辛劳动;感谢自然资源部第二海洋研究所、自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室各位老师的帮助;感谢中国极地研究中心及“雪龙”号给予的支持。

### 参考文献:

- [1] Grebmeier J M, Cooper L W, Feder H M, et al. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic[J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 71(2/4): 331–361.
- [2] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 985–995. Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Wang Zhaomin, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(9): 985–995.
- [3] Zhuang Yanpei, Jin Haiyan, Chen Jianfang, et al. Nutrient and phytoplankton dynamics driven by the Beaufort Gyre in the western Arctic Ocean during the period 2008–2014[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2018, 137: 30–37.
- [4] Zhuang Yanpei, Li Hongliang, Jin Haiyan, et al. Observation of nitrate deficit along transects across the Canada Basin after major sea-ice loss[J]. *Polar Science*, 2019, 21: 224–227.
- [5] Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1533–1536.
- [6] Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: faster than forecast[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9):

- L09501.
- [7] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [8] Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(6): 1786–1793.
- [9] Meier W N, Hovelsrud G K, van Oort B E H, et al. Arctic sea ice in transformation: a review of recent observed changes and impacts on biology and human activity[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 185–217.
- [10] Belicka L L, Macdonald R W, Harvey H R. Sources and transport of organic carbon to shelf, slope, and basin surface sediments of the Arctic Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2002, 49(8): 1463–1483.
- [11] Lalande C, Bélanger S, Fortier L. Impact of a decreasing sea ice cover on the vertical export of particulate organic carbon in the northern Laptev Sea, Siberian Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): L21604.
- [12] 陈建芳, 金海燕, 李宏亮, 等. 北极快速变化对北冰洋碳汇机制和过程的影响[J]. *科学通报*, 2015, 60(35): 3406–3416.  
Chen Jianfang, Jin Haiyan, Li Hongliang, et al. Carbon sink mechanism and processes in the Arctic Ocean under Arctic rapid change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(35): 3406–3416.
- [13] Stein R, Macdonald R W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. global ocean[M]//Stein R, MacDonald R W. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 315–322.
- [14] Walsh J J, McRoy C P. Ecosystem analysis in the southeastern Bering Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1986, 5(1/2): 259–288.
- [15] 陈敏, 黄奕普, 郭劳动, 等. 北冰洋: 生物生产力的“沙漠”吗[J]. *科学通报*, 2002, 47(12): 1037–1040.  
Chen Min, Huang Yipu, Guo Laodong, et al. Biological productivity and carbon cycling in the Arctic Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 1037–1040.
- [16] Arrigo K R, van Dijken G L. Continued increases in Arctic Ocean primary production[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 60–70.
- [17] Woodgate R A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 124–154.
- [18] Li W K W, McLaughlin F A, Lovejoy C, et al. Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 539.
- [19] Grebmeier J M, Frey K E, Cooper L W, et al. Trends in benthic macrofaunal populations, seasonal sea ice persistence, and bottom water temperatures in the Bering Strait region[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 136–151.
- [20] Grebmeier J M, Overland J E, Moore S E, et al. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea[J]. *Science*, 2006, 311(5766): 1461–1464.
- [21] Jin Haiyan, Chen Jianfang, Weng Huanxin, et al. Variations in paleoproductivity and the environmental implications over the past six decades in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(3): 38–45.
- [22] Jia Guodong, Li Zhiyang. Easterly denitrification signal and nitrogen fixation feedback documented in the western Pacific sediments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(24): L24605.
- [23] 张海峰, 王汝建, 孙焯忱, 等. 白令海北部表层沉积物中的生源组分分布特征及其古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 79–87.  
Zhang Haifeng, Wang Rujian, Sun Yechen, et al. Distribution pattern of biogenic components in surface sediments of the northern Bering Sea and their paleoceanographic implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 79–87.
- [24] 李宏亮, 陈建芳, 金海燕, 等. 楚科奇海表层沉积物的生源组分及其对碳埋藏的指示意义[J]. *海洋学报*, 2008, 30(1): 165–171.  
Li Hongliang, Chen Jianfang, Jin Haiyan, et al. Biogenic constituents of surface sediments in the Chukchi Sea: implications for organic carbon burying efficiency[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(1): 165–171.
- [25] 王斌, 朱庆梅, 庄燕培, 等. 北极楚科奇海沉积物生物硅的分布及其硅质泵过程初探[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(6): 1131–1141.  
Wang Bin, Zhu Qingmei, Zhuang Yanpei, et al. Biogenic silica distribution in Chukchi Sea and its implications for silicate pump process[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(6): 1131–1141.
- [26] 张扬, 季仲强, 庄燕培, 等. 绿素对西北冰洋海源有机碳埋藏的指示意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(6): 1123–1130.  
Zhang Yang, Ji Zhongqiang, Zhuang Yanpei, et al. The implication of chlorin to marine-derived organic matter in northwest Arctic Ocean[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(6): 1123–1130.
- [27] 白有成, 陈建芳, 李宏亮, 等. 楚科奇海附近表层沉积物中类脂生物标志物的分布特征和意义[J]. *海洋学报*, 2010, 32(2): 106–117.  
Bai Youcheng, Chen Jianfang, Li Hongliang, et al. The distribution of lipids biomarkers in the surface sediments of the Chukchi Sea and their implications[J]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(2): 106–117.
- [28] Ruan Jiaping, Huang Yuanhui, Shi Xuefa, et al. Holocene variability in sea surface temperature and sea ice extent in the northern Bering Sea: a multiple biomarker study[J]. *Organic Geochemistry*, 2017, 113: 1–9.
- [29] Zhuang Yanpei, Jin Haiyan, Li Hongliang, et al. Pacific inflow control on phytoplankton community in the eastern Chukchi Shelf during summer[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 129: 23–32.
- [30] Jin Haiyan, Zhuang Yanpei, Li Hongliang, et al. Response of phytoplankton community to different water types in the western Arctic Ocean surface water based on pigment analysis in summer 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 109–121.

- [31] Grebmeier J M, Bluhm B A, Cooper L W, et al. Ecosystem characteristics and processes facilitating persistent macrobenthic biomass hotspots and associated benthivory in the Pacific Arctic[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 92–114.
- [32] Dalsgaard J, John M S, Kattner G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. *Advances in Marine Biology*, 2003, 46: 225–340.
- [33] Yunker M B, Belicka L L, Harvey H R, et al. Tracing the inputs and fate of marine and terrigenous organic matter in Arctic Ocean sediments: a multivariate analysis of lipid biomarkers[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(24/26): 3478–3508.
- [34] Niggemann J, Schubert C J. Fatty acid biogeochemistry of sediments from the Chilean coastal upwelling region: sources and diagenetic changes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(5): 626–647.
- [35] de Carvalho C C R, Caramujo M J. The various roles of fatty acids[J]. *Molecules*, 2018, 23(10): 2583.
- [36] Belicka L L, Macdonald R W, Yunker M B, et al. The role of depositional regime on carbon transport and preservation in Arctic Ocean sediments[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 86(1/2): 65–88.
- [37] Budge S M, Iverson S J, Koopman H N. Studying trophic ecology in marine ecosystems using fatty acids: a primer on analysis and interpretation[J]. *Marine Mammal Science*, 2006, 22(4): 759–801.
- [38] Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1957, 226(1): 497–509.
- [39] Yunker M B, Macdonald R W, Veltkamp D J, et al. Terrestrial and marine biomarkers in a seasonally ice-covered Arctic estuary—integration of multivariate and biomarker approaches[J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(1): 1–50.
- [40] Li Zhongqiao, Wang Xinyi, Jin Haiyan, et al. Variations in organic carbon loading of surface sediments from the shelf to the slope of the Chukchi Sea, Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 131–136.
- [41] 李凤, 贺行良, 徐刚, 等. 东海近岸表层沉积物中脂肪酸与脂肪醇的组成以及分布与来源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 13–18.
- Li Feng, He Xingliang, Xu Gang, et al. Composition, distribution and source of fatty acids and fatty alcohols in marine surface sediments of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 13–18.
- [42] 朱小畏, 茅晟懿, 吴能友, 等. 神狐海域Site4B表层沉积物中脂肪酸组成及其碳同位素分布特征[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 75–85.
- Zhu Xiaowei, Mao Shengyi, Wu Nengyou, et al. Molecular distributions and carbon isotopic compositions of fatty acids in the surface sediments from Shenhu Area, northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(6): 75–85.
- [43] Kirchman D L, Morán X A G, Ducklow H. Microbial growth in the polar oceans—role of temperature and potential impact of climate change[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2009, 7(6): 451–459.
- [44] 刘子琳, 陈建芳, 刘艳岚, 等. 2008年夏季白令海粒度分级叶绿素 $a$ 和初级生产力[J]. *海洋学报*, 2011, 33(3): 148–157.
- Liu Zilin, Chen Jianfang, Liu Yanlan, et al. The size-fractionated chlorophyll  $a$  concentration and primary productivity in the Bering Sea in the summer of 2008[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(3): 148–157.
- [45] 刘子琳, 陈建芳, 张涛, 等. 楚科奇海及其海台区粒度分级叶绿素 $a$ 与初级生产力[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 4953–4962.
- Liu Zilin, Chen Jianfang, Zhang Tao, et al. The size-fractionated chlorophyll  $a$  concentration and primary productivity in the Chukchi Sea and its northern Chukchi Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 4953–4962.
- [46] Honjo S, Krishfield R A, Eglinton T I, et al. Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise[J]. *Progress in Oceanography*, 2010, 85(3/4): 137–170.
- [47] Zhuang Yanpei, Jin Haiyan, Gu Fan, et al. Composition of algal pigments in surface freshen layer after ice melt in the central Arctic[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 122–130.
- [48] 孙烨忱, 王汝建, 肖文申, 等. 西北冰洋表层沉积物中生源和陆源粗组分及其沉积环境[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 103–114.
- Sun Yechen, Wang Rujian, Xiao Wenshen, et al. Biogenic and terrigenous coarse fractions in surface sediments of the western Arctic Ocean and their sedimentary environments[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(2): 103–114.
- [49] Ji Zhongqiang, Jin Haiyan, Stein R, et al. Distribution and sources of organic matter in surface sediments of the northern Bering and Chukchi Seas by using bulk and Tetraether proxies[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(3): 563–572.
- [50] Tesi T, Semiletov I, Hugelius G, et al. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land–ocean continuum in East Siberia: insights from biomarkers and carbon isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 133: 235–256.
- [51] Søreide J E, Leu E, Berge J, et al. Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3154–3163.

## Sources and degradation of organic matter in the Bering Sea and the western Arctic Ocean: Implication from fatty acids

Li Ke<sup>1</sup>, Jin Haiyan<sup>1,2</sup>, Zhao Xiang'ai<sup>1</sup>, Zhuang Yanpei<sup>1</sup>, Ji Zhongqiang<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Chen Jianfang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** The Bering Sea and western Arctic Ocean, as high production areas, play a key role in the Arctic Ocean biological pump, and are vulnerable to abrupt climate change, especially sea water warming and sea ice melt. Alterations in biological pump can influence the sources and degradation of sedimentary organic matter, and thus can be indicated by fatty acid (FA) content and composition of sediment. FA analysis of surface sediments, collected during the 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> Chinese Arctic Research Expeditions, showed that the total FA of the Chukchi Shelf was exceptionally high ( $(97.15 \pm 55.31) \mu\text{g/g}$ ), while the Bering Basin was the lowest ( $(15.00 \pm 1.3) \mu\text{g/g}$ ), and the Canada Basin, the Chukchi Shelf and the Bering Shelf were intermediate ( $(88.65 \pm 3.52) \mu\text{g/g}$ ,  $(70.35 \pm 11.32) \mu\text{g/g}$  and  $(38.28 \pm 14.89) \mu\text{g/g}$ , respectively). Marine FAs (short chain saturated FA + unsaturated FA) accounted for the most abundant ( $86.82\% \pm 7.08\%$ ), terrestrial FAs (long chain saturated FA) as the second abundant ( $8.45\% \pm 6.62\%$ ), while bacterial FAs (odd FA) as the least ( $4.63\% \pm 2.24\%$ ); diatom index (16:1 $\omega$ 9/16:0) was high at the southern and northern Chukchi Shelf ( $> 0.82$ ) and the Bering Shelf edge ( $> 0.65$ ), while it was low at the rest areas. These results indicated that: (1) marine source was the major contributor of sedimentary organic matter of the Bering Sea and the western Arctic Ocean, while terrestrial one contributes minor; diatom predominates was the primary producers of the southern and northern Chukchi Shelf and the Bering Shelf edge; percentage of bacterial FAs was remarkably low, comparing with tropical and temperate seas, suggesting a suppressed bacterial activity under low temperature; (2) labile organic matter accumulation rate was extremely high at the Chukchi Shelf, and was extremely sensitive to sea water warming and sea ice melt; (3) chlorophyceae and prymnesiophyceae dominate phytoplankton community at the Canada Basin and the Chukchi Slope. In conclusion, FA of surface sediment can be used to indicate sources and degradation of organic matter in the Bering Sea and the western Arctic Ocean; further, combining with other samples and biomarkers, FA was viable to shed light on the response of biological pump under the abrupt Arctic climate change.

**Key words:** Bering Sea; western Arctic Ocean; Organic Matter; fatty acid; biological pump; abrupt Arctic climate change