

# 西伯利亚极地海域表层沉积硅藻分布特征 及其与海洋环境变量的相关性研究\*

李显富<sup>1</sup> 刘焱光<sup>2</sup> 邱悦<sup>1</sup> 黄元辉<sup>2</sup> 徐皓<sup>1</sup> 李冬玲<sup>1</sup>

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系 浙江宁波 315211; 2. 海洋地质与成矿作用自然资源部重点实验室 山东青岛 266061)

**摘要** 北冰洋西伯利亚陆架海是北极气候快速变化最为显著的海域之一, 而沉积硅藻作为极地海洋生态系统的重要组成部分, 对环境变化具有敏感的响应。对楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海表层沉积物开展了硅藻组成鉴定, 利用典型对应分析方法分析了硅藻属种与 1986~2015 年环境变量之间的关系。结果表明, 夏季和秋季海冰密集度、表层海水盐度是影响研究区表层硅藻分布特征最主要的因素。此外, 根据表层站位与环境变量的典型对应分析, 可将西伯利亚极地海域划分为 4 个区域, 分别为海冰硅藻组合带、暖水硅藻组合带、沿岸硅藻组合带和混合硅藻组合带。这些表层站位的分区与相应区域的海流模式有明显的相关性, 海冰硅藻组合带仅分布于研究区北部的高纬度地区; 暖水硅藻组合带位于受白令水和太平洋海水的分支——阿拉斯加沿岸水影响为主的区域; 拉普捷夫海南部的沿岸硅藻组合带则受到河流径流和西伯利亚沿岸流的强烈影响; 混合硅藻组合带受极地冷水、海冰覆盖、太平洋暖水和陆地径流的共同影响。

**关键词** 硅藻; 环境变量; 西伯利亚极地海域; 典型对应分析

中图分类号 P72 doi: 10.11693/hyhz20220700182

随着全球气温的上升, 北极地区的气候正在经历剧烈的变化。自 20 世纪 80 年代以来, 北极表面气温升高的速度至少是全球平均气温升高速度的 2 倍, 这种现象被称为“北极放大”效应。此外, 在同一时期海冰、格陵兰冰盖和冰川范围都在不断地减小, 永久冻土的温度在不断上升(Abram *et al.*, 2022)。当海冰融化时, 其表面反照率降低, 同时增加了海洋表面对太阳能量的吸收, 进一步加剧了海冰的融化。北极变暖不仅对北极生态系统有潜在的巨大影响, 而且能通过各种反馈机制影响全球气候(Abram *et al.*, 2022)。

海冰通过调节大气和极地海洋之间的热量、动量和水分交换, 并通过重新分配海洋中的盐, 在全球气候中发挥着至关重要的作用。北冰洋浮冰覆盖面积的减少是气候变化最显著的表现之一(Stroeve *et al.*, 2018)。北冰洋海冰的范围通常在 3 月达到最大值, 在

9 月达到最小值。根据现代卫星记录(1979 年至今), 北极海冰范围在所有月份都显著下降, 其中 9 月下降最明显(Serreze *et al.*, 2019)。Yadav 等(2020)发现, 北冰洋海冰在过去 40 a 以每 10 a 减少 4.7% 的速度迅速下降, 导致海洋热通量失衡。近年来, 西伯利亚北极圈以北出现前所未有的高温现象导致楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海的海冰加速融化, 使这一地区成为研究全球气候变暖背景下海冰减退及生态系统变化的热点海域。

硅藻是一种分布极为广泛的微型水生藻类, 对温度、盐度等环境因子的变化反应灵敏, 并且在沉积物中可以较好地保存, 因此, 在古环境重建中被认为是良好的环境指示器。在北极海域的研究中, 钙质微体古生物化石难以在沉积物中保存, 而拥有坚硬硅质外壳的硅藻则成为研究这一区域海洋环境演变的

\* 国家自然科学基金, 41876215 号, 42176226 号, 42176245 号, 42130412 号; 浙江省省属高校基本科研业务项目, SJLY2020004 号。李显富, 硕士研究生, E-mail: 1056998896@qq.com

通信作者: 李冬玲, 硕士生导师, 副教授, E-mail: lidongling@nbu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-06, 收修改稿日期: 2022-08-23

有力工具(王汝建等, 2004; 黄元辉等, 2012)。此外, 极地海域的海洋初级生产力较低, 许多微生物无法生存, 而硅藻中的部分属种可以在海冰底部或内部栖息, 其生长、分布都与海冰存在直接关联(Horner *et al.*, 1972; Brown *et al.*, 2014)。因此, 硅藻是研究极地高纬海洋环境演变的一种重要手段。

近几十年, 西伯利亚极地海域表层沉积物中的硅藻分布引起了研究者的兴趣(Tsoy, 2001; Matul *et al.*, 2007; Obrezkova *et al.*, 2014, 2019)。Cremer (1999)对拉普捷夫海表层沉积物样品的现代硅藻分布进行了研究, 发现控制硅藻分布的主要因素是夏季河流淡水的输入, 它强烈影响着拉普捷夫海的盐度和海冰范围。Tsoy (2001)对拉普捷夫海东南陆架的表层沉积物硅藻进行了分析, 其结果表明拉普捷夫海硅藻含量较低, 反映研究区生产力较低。Ran 等(2013)分析了白令海和楚科奇海表层沉积物中硅藻的分布特征, 发现白令海盆和楚科奇海台北部主要为北极硅藻组合, 而白令海峡东北部和阿拉斯加利斯伯恩(楚科奇海)海角岸外则主要为沿岸-底栖硅藻组合。Obrezkova 等(2014)研究了拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海表层沉积物样品中的硅藻组合, 并指出拉普捷夫海硅藻组合主要受盐度影响, 楚科奇海北部和东西伯利亚海东部的硅藻组合主要受西伯利亚冷水的影响, 楚科奇海西南部主要受高生产力的白令海水影响。

综上, 前期研究主要关注不同海域硅藻的分布特征及其与盐度或水团性质之间的关系, 而对于影响硅藻分布的主要环境因素及其季节性影响程度如何没有详细展开。Ren 等(2014)分析了北太平洋亚北极地区(30°~70°N, 包括鄂霍次克海和白令海)表层沉积硅藻的空间分布特征及其与环境变量之间的关系, 但研究区没有涉及 70°N 以北海域。

因此, 本文拟通过对 70°N 以北西伯利亚极地海域表层沉积硅藻的研究, 分析楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海的表层沉积物中的硅藻组合; 探讨表层沉积物中硅藻组合与水温、盐度、海冰密集度等现代环境变量的关系; 确定哪些环境变量是影响硅藻分布的主要因素, 为西伯利亚极地海域的古海洋环境重建与相关研究提供参考。

## 1 研究区域概况

楚科奇海是北冰洋的边缘海, 位于欧亚大陆东北部楚科奇半岛和北美大陆西北部阿拉斯加半岛之间, 是北太平洋水进入北冰洋的重要枢纽。楚科奇海

和白令海通过白令海峡相连, 太平洋海水通过白令海峡流入北冰洋。楚科奇海大陆架宽达 300 km, 陆架区水深相对较浅, 深度为 30~50 m (Wang *et al.*, 2005)。

受北太平洋暖水的影响, 楚科奇海的海冰覆盖时间与拉普捷夫海和东西伯利亚海相比时间较短, 平均每年 5 个月(王辉武等, 2012)。每年 11 月底开始出现浮冰, 海冰覆盖面积不断扩大, 到次年 3 月底达到最大范围(Stroeve *et al.*, 2008)。随着气温的不断升高, 海冰逐渐消融, 从南部进入楚科奇海的太平洋暖水带来了热量和营养物质。因此, 该海域海水初级生产力较高(Springer *et al.*, 1993), 成为西北冰洋生产力最高的区域, 同时也是有机碳的重要汇集区。

如图 1 所示, 楚科奇海的海流系统受到白令海陆架水、阿纳德尔水(Anadyr water, AW)、阿拉斯加沿岸流(Alaskan coastal water, ACW)的影响。中部的白令海陆架水穿过白令海峡后, 与阿纳德尔水形成白令水(Bering Sea water, BSW), 而东侧高温低盐的阿拉斯加沿岸流则向东北汇入波弗特环流(Beaufort gyre, BG) (Weingartner *et al.*, 2005; Woodgate *et al.*, 2005)。北太平洋水在进入楚科奇海后, 大多汇入波弗特环流和穿极流(transpolar drift, TPD), 最终经弗拉姆海峡流入北欧海(Pickart *et al.*, 2010)。

东西伯利亚海是北冰洋最宽的陆架海。东侧隔弗兰格尔岛和楚科奇海相邻, 西侧以新西伯利亚群岛与拉普捷夫海分隔, 其每年有 10~11 个月被海冰覆盖(Jakobsson, 2002)。冬季, 东西伯利亚海表层水温度通常接近冰点, 表层海水冷却, 海面结冰。夏季, 在无冰地区, 表层海水温度会上升到 0 °C 以上。在上升流条件下, 底层海水很可能受到来自大陆斜坡的温暖大西洋海水侵入的影响(Dmitrenko *et al.*, 2010)。

研究区内的主要表层洋流包括穿极流、西伯利亚沿岸流(Siberian coastal current, SCC)和太平洋水(图 1)。穿极流是欧亚北冰洋的主导表层流, 可直接将欧亚北冰洋大陆架水从东西伯利亚海输送到中部盆地, 并向南通过弗拉姆海峡离开盆地。西伯利亚沿岸流沿海岸自西向东流动, 穿过德朗海峡与北上的阿纳德尔水混合(Weingartner *et al.*, 2005)。注入东西伯利亚海的陆地径流主要有因迪吉尔卡河和科利马河。东西伯利亚海域受到海岸侵蚀和淡水输入的影响, 盐度梯度较大, 表层海水盐度最大值和最小值之间相差 20.5%。另外, 由于气温、风场和陆地径流的影响, 使得该海域的表层海水温度和盐度波动十分频繁(Codispoti *et al.*, 1968)。

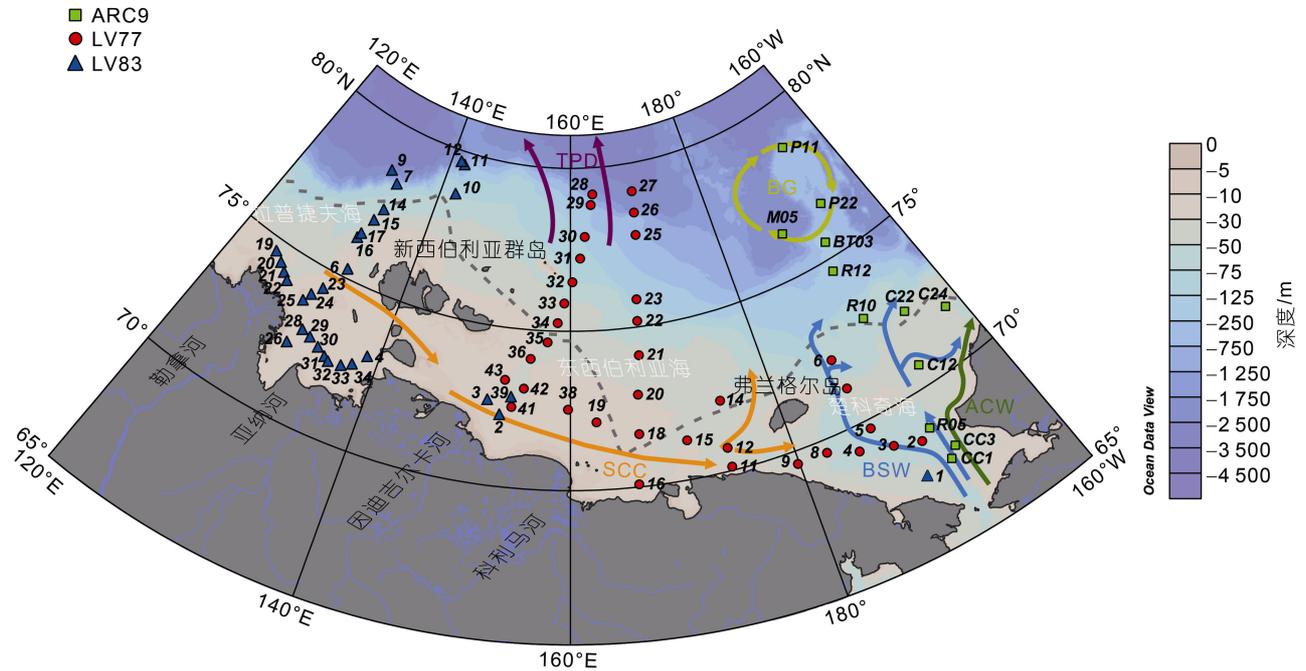


图 1 硅藻站位以及研究区域表层洋流模式图

Fig.1 Locations of diatom samples and the surface current pattern of the investigation area

注: LV77(红色圆点)表示 2016 年中俄联合考察采集的站位; ARC9(绿色方块)表示 2018 年中国国家第九次北极科学考察采集的站位; LV83(蓝色三角形)表示在 2018 年中俄联合考察采集的站位; ACW: 阿拉斯加海岸水; BSW: 白令水; SCC: 西伯利亚沿岸流; BG: 波弗特环流; TPD: 穿极流; 灰色虚线表示 1981~2010 年 9 月份平均冰缘线范围(美国国家冰雪数据中心)(图 6 同); 图改编自胡利民等(2020)

拉普捷夫海是北冰洋一个开放的边缘海, 西邻泰梅尔半岛, 东邻新西伯利亚群岛(图 1)。拉普捷夫海是欧亚大陆以北广阔的西伯利亚大陆架的中心部分, 它的大陆架地势平坦, 向北缓缓倾斜, 水深为 50~60 m, 陆架边缘水深 80~100 m 左右(Taldenkova *et al*, 2005)。拉普捷夫海被称为北冰洋的“冰工厂”, 其形成的大量海冰在气候系统中发挥着关键作用(Kassens *et al*, 1998)。此外, 拉普捷夫海对北冰洋的淡水和海冰平衡具有重要意义(Aagaard *et al*, 1989; Kassens *et al*, 1998; Steele *et al*, 2004)。拉普捷夫海最大的淡水来源是勒拿河, 流量约 570 km<sup>3</sup>/a (Jakobsson, 2002)。从各种溪流和河流流入拉普捷夫海的大量淡水(Gordeev *et al*, 1996)对表层水团的盐度和漂移模式有强烈的影响。一般来说, 拉普捷夫海东部表层和底层海水的盐度都较低。在拉普捷夫海中部, 海底水温几乎全年都是负的(大约-1.5 °C)。但在大陆坡上部(深度>80~100 m), 受来自北部的较暖大西洋水团的影响, 温度上升至 0.6~0.8 °C (Wegner, 2003)。拉普捷夫海陆架东部特殊的水文条件影响着该海域浮游生物和底栖生物的分布(Gukov, 1999; Petryashov *et al*, 1999; Bauch *et al*, 2000)。

## 2 材料与研究方法

### 2.1 研究站位

本研究共分析了 77 个表层(0~1 cm)沉积物样品, 覆盖了楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海。这些表层样品是 2016 年(35 个样品)和 2018 年(30 个样品)两次中俄联合考察以及 2018 年(12 个样品)中国第九次北极科学考察利用箱式取样器和多管取样器获取的。

### 2.2 现代海洋环境数据

本文选用的现代海洋环境数据包括春、夏、秋、冬四个季节的海冰密集度(sea ice concentration, SIC)、表层海水温度(sea surface temperature, SST)和表层海水盐度(sea surface salinity, SSS)。海冰密集度数据和表层海水温度数据来自于欧洲航天局(European Space Agency, ESA)(<https://cds.climate.copernicus.eu>), 空间分辨率为 0.05°×0.05°。表层海水盐度数据来自亚太数据研究中心(Asia-Pacific Data-Research Center, APDRC)(<http://apdrc.soest.hawaii.edu>), 空间分辨率为 0.5°×0.5°。选用 1986~2015 年的海冰密集度、表层海水温度及表层海水盐度数据计算其季平均数据, 共得到 12 个环境变量, 分别为春季海冰密集度(SIC<sub>spr</sub>)、夏季海冰密集度(SIC<sub>sum</sub>)、秋季海冰密集度(SIC<sub>aut</sub>)、冬季海冰密

集度( $SIC_{win}$ )、春季表层海水温度( $SST_{spr}$ )、夏季表层海水温度( $SST_{sum}$ )、秋季表层海水温度( $SST_{aut}$ )、冬季表层海水温度( $SST_{win}$ )、春季表层海水盐度( $SSS_{spr}$ )、夏季表层海水盐度( $SSS_{sum}$ )、秋季表层海水盐度

( $SSS_{aut}$ )、冬季表层海水盐度( $SSS_{win}$ ), 各变量在研究区的分布特征见图 2。其中, 春季为 4、5、6 月, 夏季为 7、8、9 月, 秋季为 10、11、12 月, 冬季为 1、2、3 月(Ren *et al.*, 2014)。

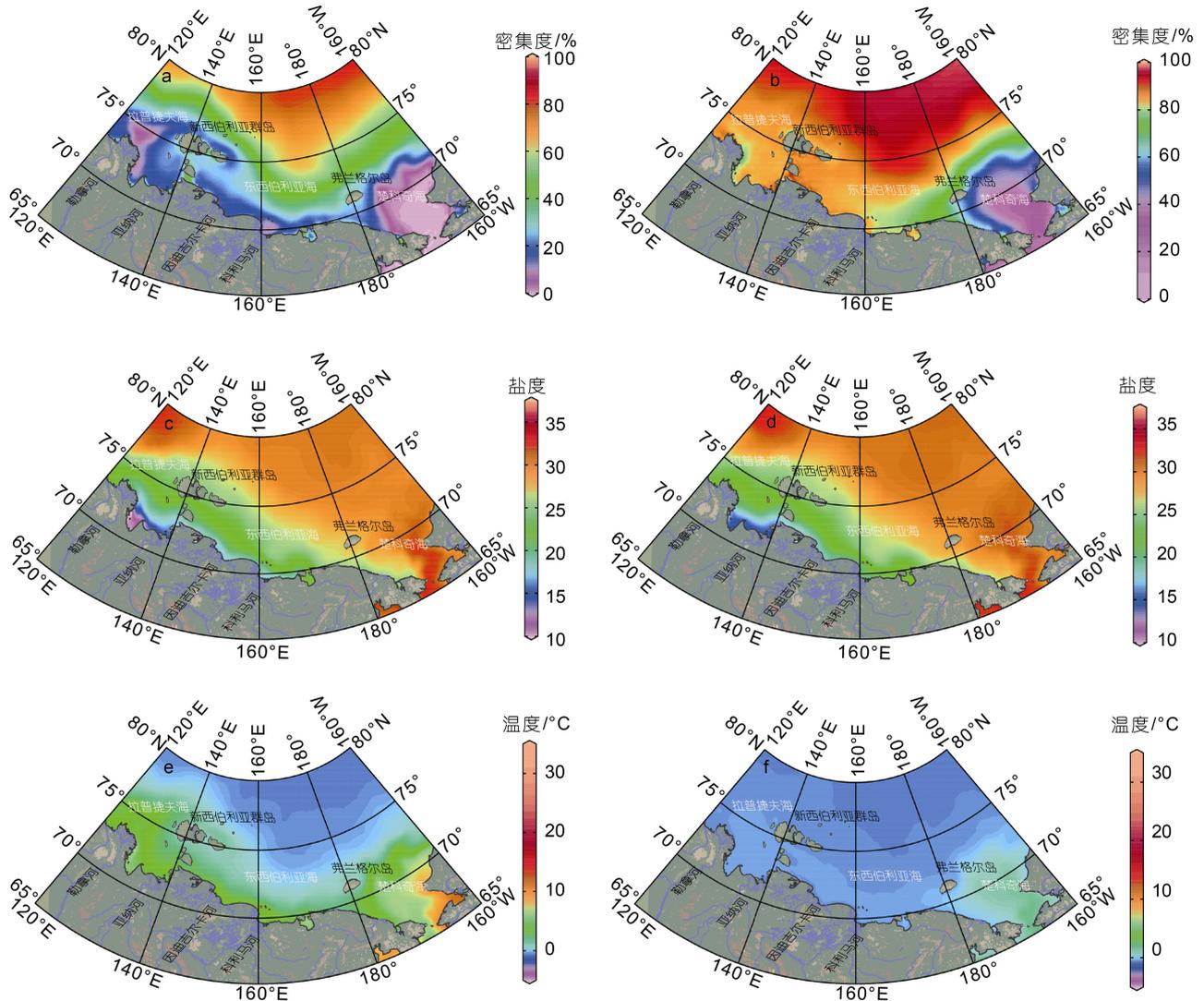


图 2 主要环境变量的现代海洋数据

Fig.2 Modern ocean data of main environmental variables

注: a: 夏季海冰密集度; b: 秋季海冰密集度; c: 夏季表层海水盐度; d: 秋季表层海水盐度; e: 夏季表层海水温度; f: 秋季表层海水温度

### 2.3 硅藻分析

沉积物硅藻样品的实验室处理按照 Håkansson (1984)的方法进行, 主要步骤如下: (1) 去钙质: 取沉积物样品 0.01 g, 加入 10% HCl, 搅拌均匀以除去沉积物中的钙质, 多余的稀盐酸用纯水洗净; (2) 去有机质: 再加入 30%  $H_2O_2$  在水浴锅中以 60~70 °C 恒温条件下加热 1~2 h, 直至无气泡或均匀的小气泡, 沉积物呈现灰白色, 从而去除其中的有机质, 镜检达到标准后, 加纯水沉降 12 h, 重复 3 次洗净多余的  $H_2O_2$ ;

(3) 制片: 在洗净后的样品中加入无水乙醇, 将混匀的沉积物样品均匀涂在盖玻片上, 用 Naphrax 胶固定于载玻片上, 放置在电热板(150~200 °C)上加热至玻片内气泡消失, 待玻片冷却后保存于样品盒中。

硅藻属种鉴定与计数在 1 000 倍莱卡油镜下进行, 每个样品硅藻壳体的计数不少于 200 个, 不包括角毛藻休眠孢子(*Chaetoceros resting spores*)。

### 2.4 数据处理与分析

为了检测不同环境变量对硅藻属种分布的影响,

选用 CANOCO 程序进行统计分析(ter Braak *et al.*, 2002)。应用去趋势对应分析(DCA)来确定硅藻属种分布是单峰分布还是线性分布。根据 DCA 的结果得到硅藻属种的响应梯度长度为 3.17, 表明硅藻呈单峰分布(ter Braak, 1988)。因此, 对应分析(correspondence analysis, CA)和典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)的非线性方法比较适合我们的数据集。相对于 CA, CCA 是研究生物组合变化的直接梯度分析, 可以被相应环境变量所解释(ter Braak, 1988)。因此, CCA 更加适用于对该数据集的分析。环境变量由矢量代表, 箭头方向指向其极值。环境变量之间的相互关系由其间夹角大小表示: 两环境变量之间夹角小于  $90^\circ$  为正相关, 夹角越小, 关系越密切; 夹角大于  $90^\circ$  小于  $180^\circ$  为负相关, 若其夹角近以  $90^\circ$ , 则两环境变量之间基本上无直接联系(蒋辉等, 2002)。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 硅藻属种及硅藻组合分布特征

西伯利亚极地海域主要硅藻属种有 *Fossula arctica*、*Fragilariopsis oceanica*、*Fragilariopsis cylindrus*、*Thalassiosira antarctica* var. *borealis* resting spores、*Aulacoseira subarctica*、*Thalassiosira*

*hyperborea*、*Neodenticula seminae*、*Thalassiosira nordenskioldii*、*Porosira glacialis*、*Thalassionema nitzschioides*、*Bacterosira bathyomphala*、*Paralia sulcata* 等 12 种。

其中, 海冰硅藻主要包括 *F. cylindrus* 和 *F. oceanica*, 其百分含量介于 0~77.7% 之间。极地硅藻主要包括 *F. arctica* 和 *T. antarctica* var. *borealis* resting spores, 它们的百分含量分别介于 0.4%~80.5% 和 0~31.4% 之间。海冰硅藻和极地硅藻主要分布在东西伯利亚海中南部及北部等纬度较高的海域(图 3a、3b)。

暖水种硅藻包括 *T. nitzschioides*, 其百分含量介于 0.27%~14.3% 之间, 主要分布在楚科奇海(图 3c)。沿岸种 *P. sulcata* 为半底栖半浮游种, 生活在较浅的海域, 其在本文研究区域的含量为 0.16%~18.7%, 主要分布在楚科奇海。本文将暖水种 *T. nitzschioides* 和沿岸种 *P. sulcata* 组合的变化用于指示表层海水的暖化。

淡水种硅藻和半咸水种硅藻, 如 *Aulacoseira subarctica*, 其百分含量介于 0.8%~52.7% 之间, 主要分布在拉普捷夫海南部海域(图 3d)。广布种及极地冷水种, 如 *Porosira glacialis*, 其百分含量介于 0.3%~31.5% 之间, 为所研究海域普遍存在的硅藻属种。

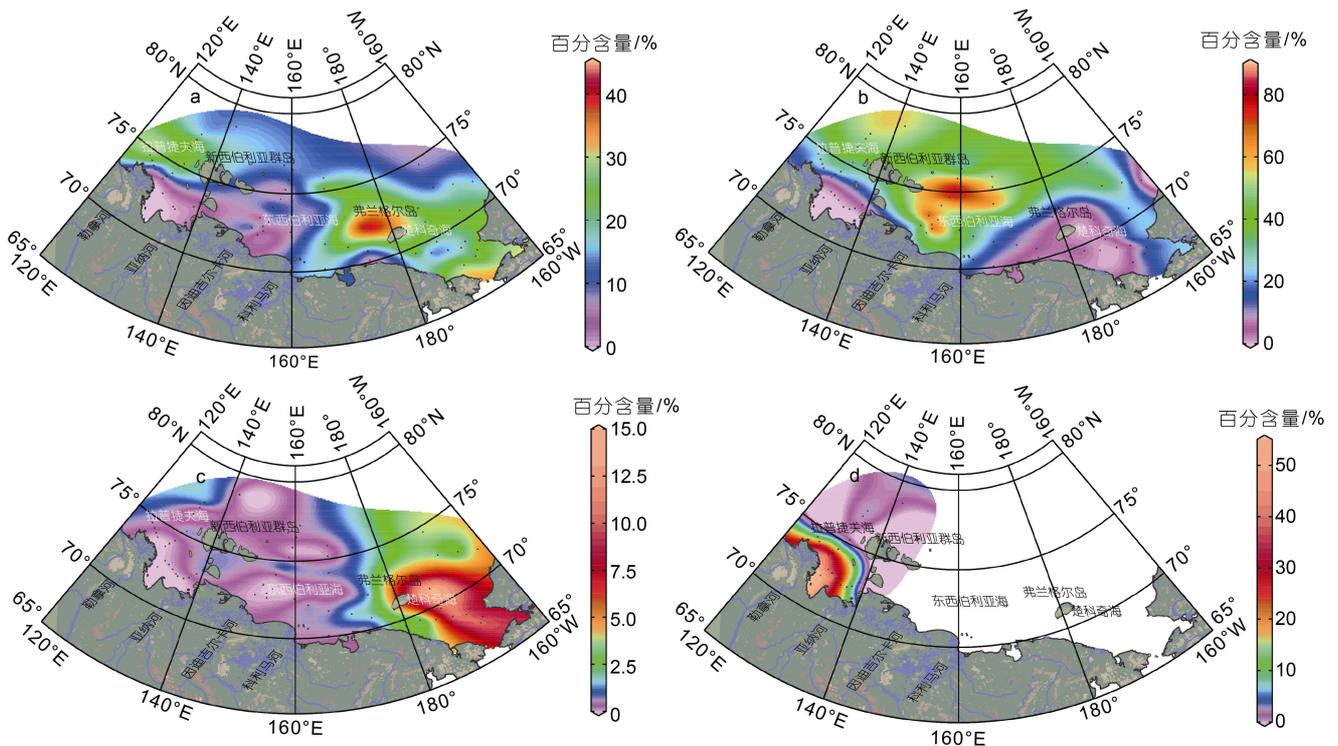


图 3 西伯利亚极地海域部分硅藻属种的百分含量分布图

Fig.3 The percentages of some diatom species in the Siberian Arctic Seas

注: a: *Fragilariopsis oceanica*; b: *Fossula arctica*; c: *Thalassionema nitzschioides*; d: *Aulacoseira subarctica*

### 3.2 环境变量之间的关系及其对硅藻属种分布的影响

CCA 排序轴的特征值所反映的是坐标轴对环境变量的解释能力, 特征值介于 0~1 之间, 特征值越高, 说明该轴对环境变量的解释力越强, 排序轴越重要 (ter Braak, 1988)。在本文中, CCA 轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.44 和 0.17, CCA 轴 1 和轴 2 的物种-环境相关性较高, 分别为 0.93 和 0.89。这表明, 硅藻分布与环境变量之间关系密切。

通过膨胀系数 ( $VIF \geq 20$ ) 以及蒙特卡罗筛选检验后, 最终筛选出 4 个环境变量:  $SIC_{sum}$ 、 $SIC_{aut}$ 、 $SST_{sum}$  和  $SSS_{aut}$  (图 4), 这 4 个环境变量的现代海洋数据见图 2。将这 4 个环境变量重新进行 CCA 分析, 结果表明前两个排序轴特征值分别为 0.441 和 0.164, 与包含 12 个环境变量的 CCA 结果相比仅有略微差异, 说明  $SIC_{sum}$ 、 $SIC_{aut}$ 、 $SST_{sum}$ 、 $SSS_{aut}$  概括了硅藻数据的主要信息。而且由于多余环境变量的剔除, 前两个排序轴的硅藻属种与环境关系的累计方差百分比得到了明显的提升, 说明前两个排序轴可以解释 76.53% 的硅藻属种与环境变量之间的关系。这 4 个环境变量形成了最佳的环境指标组合, 表明其在解释硅藻变化上相对独立, 对硅藻分布有显著影响 (Jiang *et al.*, 2001, 2004)。

在 CCA 排序图中用向量表示环境变量, 箭头指向表示该环境变量的极值, 将某一环境变量的向量沿相反方向延长, 该向量可以近似地看作这一环境变量的“数轴”(图 4)。通过硅藻属种在该环境变量“数轴”上的投影可以表示该硅藻属种与环境变量之间的定量关系, 最终得出影响属种分布的主要环境变量。例如图 4 中, 通过比较 *Aulacoseira subarctica* 和 *Achnanthes minutissima* 在  $SSS_{aut}$  向量上的投影位置可以发现, *A. minutissima* 在  $SSS_{aut}$  向量轴(负方向)上的投影值更大, *A. minutissima* 相较 *A. subarctica* 来说更喜淡水环境。

从 CCA 排序图(图 4)中可以看出,  $SIC_{sum}$  与  $SIC_{aut}$  之间的夹角为锐角, 表明  $SIC_{sum}$  与  $SIC_{aut}$  关系密切, 而  $SIC_{sum}$  和  $SST_{sum}$  这两个向量与  $SSS_{aut}$  的关系不大。 $SST_{sum}$  与  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  这两个向量之间的夹角为钝角, 表明  $SST_{sum}$  与  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  这两个向量呈负相关。 $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  这两个向量与  $SST_{sum}$  呈负相关,  $SST_{sum}$  高时海冰密集度低。

西伯利亚极地海域主要硅藻属种与  $SIC_{sum}$ 、 $SIC_{aut}$ 、 $SST_{sum}$ 、 $SSS_{aut}$  四个环境变量之间的相互关系如图 4 所示。*Neodenticula seminae*、*Thalassiosira oestrupii* 和 *Thalassiosira anguste-lineata* 等硅藻属种

主要分布在“CCA 排序轴 2”的左侧, 在  $SST_{sum}$  矢量轴上投影值较高, 表明它们的生长主要受到  $SST_{sum}$  的影响。另外一些硅藻属种, 如 *Thalassiosira angulata*, 分布在图 4 的左上象限, 在  $SST_{sum}$  和  $SSS_{aut}$  矢量轴上的投影值都相对较高, 表明这些硅藻属种不仅对高温的海水环境响应明显, 也对盐度相对较高的海水环境有着强烈的响应, 它们的分布可能与太平洋水的影响有关。

位于“CCA 排序轴 2”右侧的硅藻属种与受到高盐海水影响的硅藻属种相反, 主要为典型的淡水种硅藻和半咸水种硅藻, 如 *A. minutissima*、*Tabellaria flocculosa* 和 *Fragilaria pinnata*。这些硅藻属种在拉普捷夫海南部海域表层站点中百分含量较高, 与拉普捷夫海南部海域大量陆地径流的汇入有关。因此, 这类硅藻属种可用于指示淡水和半咸水环境。

海冰种硅藻 *Fragilariopsis cylindrus*、*Fragilariopsis oceanica* 和 *Melosira arctica*, 以及极地种硅藻 *Fossula arctica*、*Nitzschia laevisissima* 和 *Thalassiosira antarctica* var. *borealis* resting spores, 主要分布在“CCA 排序轴 1”的下侧。*F. arctica* 是海冰种硅藻(黄元辉等, 2012), 广泛分布于北极各大边缘海的浮冰边缘或浮冰中, 如挪威海、巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海以及楚科奇海等 (Von Quillfeldt, 2000; Von Quillfeldt *et al.*, 2003; 黄元辉等, 2012)。在海冰覆盖的情况下, *F. arctica* 在春季浮游生物大量出现的时期也存在于浮游生物群落中。在拉普捷夫海中部和西北部陆架表层沉积物, 该种是最为常见的硅藻种类之一, 而在沿岸的沉积物中相对较少 (Cremer, 1998, 1999)。从图 3b 可以看出, 该种在东西伯利亚海中部及拉普捷夫海中部海域出现两个峰值, 向沿海地区及高纬深海区递减。在深海区该种丰度相对较低, 是由于其壳壁硅质化程度较弱 (黄元辉等, 2012)。*F. oceanica* 广泛分布于北极高纬度海域, 前人研究发现该种在白令海北部大陆架、楚科奇海、鄂霍茨克海含量很高 (Hasle, 1965; Sancetta, 1981)。该种普遍生存在海水温度为  $-1 \sim 3$  °C 的北极沿岸海域浮游植物群落和海冰中, 与海冰关系密切, 可以用来指示海冰变化 (Hasle, 1965; 冉莉华等, 2012)。Sancetta (1981) 研究表明, *F. oceanica* 在楚科奇海南部丰度较高, 白令海陆架区次之。由图 3a 可以发现, 该种在西伯利亚极地海域分布广泛, 从白令海北部陆架向高纬地区逐渐递增, 峰值出现在东西伯利亚海中部及楚科奇海西部, 与前人的研究具有高度一致性。然而, 该种在拉

普捷夫海南部和东西伯利亚海西部等沿海地区含量较低, Cremer (1999)的研究也记录了同样的特征。硅藻属种与环境变量的 CCA 结果显示 *F. oceanica* 在 SIC 上得分较低(图 4), 表明该种的分布除受海冰影响以外, 还受到其他环境变量的影响, 因此, 这可能是拉普捷夫海和东西伯利亚海的海冰密集度虽然比楚科奇海高, 但该种的含量却较低的原因。*F. cylindrus* 是少有的几种在南北极海域中均广泛分布的硅藻属种之一, 主要出现在寒冷水域的浮游植物群落中(Halse *et al.*, 1996; 黄元辉等, 2012)。冉莉华等(2012)和 Ran 等(2013)发现该种在白令海北部陆架区含量相对较高, 而在白令海海盆及北太平洋海域含量极低。

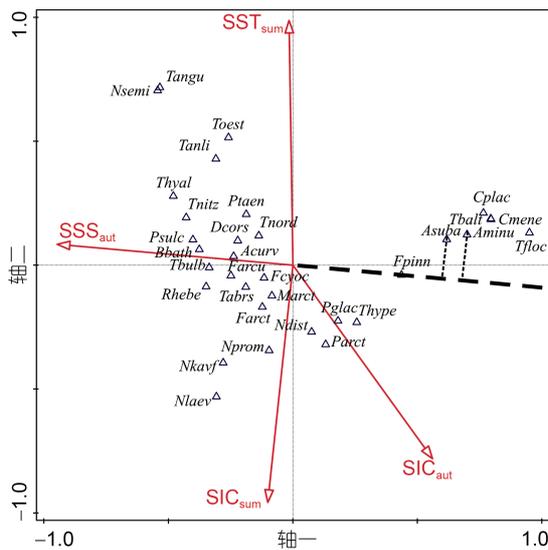


图 4 硅藻属种与环境变量关系图

Fig.4 The CCA biplot of diatom taxa and environmental variables

注: SSS<sub>aut</sub>: 秋季表层海水盐度; SST<sub>sum</sub>: 夏季表层海水温度; SIC<sub>sum</sub>: 夏季海冰密集度; SIC<sub>aut</sub>: 秋季海冰密集度; 带三角形箭头的红色直线为环境变量; 硅藻名称缩写见表 1

位于“CCA 排序轴 1”上侧的硅藻以暖水种为主, 如 *T. oestrupii*、*T. anguste-lineata*、*Paralia sulcata* 和 *T. nitzschioides*。*T. nitzschioides* 在白令海陆架及楚科奇海东部海域分布广泛, 属于世界性范围的浅海硅藻种(Halse *et al.*, 1996)。邵丽霞等(2012)发现该种为世界广布种, 在白令海海盆区和陆架区都有分布。该种主要生存在高温高盐或高生产力的海洋环境中, 常用来指示暖水团的影响。本研究中发现该种在楚科奇海东北部含量较高, 但在拉普捷夫海及东西伯利亚海含量较低(图 3c), 出现此现象的原因可能是受到太平洋暖水的影响, 太平洋暖水无法深入至拉普捷夫海和东西伯利亚海。

另外, 位于“CCA 排序轴”中部的硅藻属种, 为所研究海域普遍存在的硅藻属种。这些硅藻属种主要为广布种及极地冷水种, 如 *Rhizosolenia hebetata*、*Actinocyclus curvatulus* 和 *Thalassiosira bulbosa*。在此区域受海冰密集度、海冰盐度和温度的影响不是很明显, 因此在研究区域广泛分布。

表 1 主要硅藻属种名称及其在图 4 中的缩写  
Tab. 1 Diatom species/species groups and the abbreviations in Fig.4

硅藻属种名	缩写
<i>Actinocyclus curvatulus</i>	Acurv
<i>Achnanthes minutissima</i>	Aminu
<i>Aulacoseira subarctica</i>	Asuba
<i>Bacterosira bathyomphala</i>	Bbath
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	Cmene
<i>Cocconeis placentula</i>	Cplac
<i>Detonula confervacea</i> resting spores	Dcors
<i>Fossula arctica</i>	Farct
<i>Fragilaria arcus</i>	Farcu
<i>Fragilariopsis cylindrus</i> + <i>Fragilariopsis oceanica</i>	Fcyoc
<i>Fragilaria pinnata</i>	Fpinn
<i>Melosira arctica</i>	Marct
<i>Navicula distans</i>	Ndist
<i>Navicula kariana</i> var. <i>frigida</i>	Nkavf
<i>Navicula laevisissima</i>	Nlaev
<i>Nitzschia promare</i>	Nprom
<i>Neodenticula seminae</i>	Nsemi
<i>Pauliella arctica</i>	Parct
<i>Petronella glacialis</i>	Pglac
<i>Paralia sulcata</i>	Psulc
<i>Pauliella taeniata</i>	Ptaen
<i>Rhizosolenia hebetata</i>	Rhebe
<i>Thalassiosira antarctica</i> var. <i>borealis</i> resting spores	Tabrs
<i>Thalassiosira angulata</i>	Tangu
<i>Thalassiosira anguste-lineata</i>	Tanli
<i>Thalassiosira baltica</i>	Tbalt
<i>Thalassiosira bulbosa</i>	Tbulb
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Tfloc
<i>Thalassiosira hyalina</i>	Thyal
<i>Thalassiosira hyperborea</i>	Thype
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	Tnitz
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	Tnord
<i>Thalassiosira oestrupii</i>	Toest

### 3.3 硅藻组合特征与环境变量之间的关系

在硅藻组合特征与环境变量之间的关系图中,

根据站位在某一环境变量上的得分情况, 可以得出该站位硅藻组合与环境变量之间的相互关系。不同表层沉积站点的硅藻组合面貌及环境变量越相近, 则它们在图中位置也越相近。

“CCA 排序轴 1”可以用来区分受到海冰覆盖及暖水团影响的表层站位分布; “CCA 排序轴 2”被用来区分受到海水盐度影响是否强烈的表层站位分布。“轴 1”下侧表示具有海冰密集度的表层站位, 主要分布在东西伯利亚海中部及北部等纬度较高海域, 受到极地冷水团和冰融水的影响; 而“轴 1”上侧表示受到太平洋水影响的表层站位, 主要分布在楚科奇海。“轴 2”右侧的表层站位主要为受陆地径流影响的表层站位。

分布在楚科奇海的站位, 除纬度较高的 LV77-6 和 ARC9-(C22、C24、R10) 站位外, 其余站位均位于  $SST_{sum}$  矢量轴的正方向上(图 5), 这表明在夏季时, 温度较高的北太平洋水大量流入楚科奇海, 使得楚科奇海在夏季时 SST 相对较高。而 LV77-6 和 ARC9-(C22、C24、R10) 站位则位于  $SST_{sum}$  矢量轴的负方向上, 是因为这些站位纬度位置相对更高, 因此, 受太平洋水的作用相对较弱, SST 较楚科奇海南部更低(Coachman *et al*, 1975; Walsh *et al*, 1989)。综上, 该海域主要是受到了太平洋水的影响。

$SIC_{aut}$  两个矢量轴的正方向上(图 5), 说明在该海域受  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  影响显著。楚科奇海的站位 ARC9-R12 和拉普捷夫海的站位 LV83-10 也分布在上述两个矢量轴的正方向上, 这两个站位由于受到纬度位置的影响, 受  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  的影响也较为显著。

分布在  $SSS_{aut}$ 、 $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  矢量轴坐标原点附近的站位主要分布在两个海域, 一部分位于在东西伯利亚海沿岸海域, 另一部分位于拉普捷夫海中中部海域。其中拉普捷夫海中中部海域和东西伯利亚海中中部海域纬度位置相同, 但对环境因子的响应却不同, 这可能是由于少量高温的北大西洋水通过喀拉海进入拉普捷夫海, 使得其海水温度相对较高, 在  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  明显低于东西伯利亚海。

位于  $SSS_{aut}$  矢量轴的负方向上的站位, 例如 LV83-(26、31、32、33) 等, 这些站位主要分布在拉普捷夫海南部沿岸海域, 受到陆地径流大量注入的影响。CCA 分析图显示了硅藻属种、表层站位与  $SIC_{sum}$ 、 $SIC_{aut}$ 、 $SST_{sum}$  和  $SSS_{aut}$  四个环境变量之间的相互关系, 与已知的硅藻生态及本文研究区域的海域环境相符。

### 3.4 硅藻组合及其海洋学意义

根据研究区表层沉积硅藻组合与环境变量之间以及硅藻属种与环境变量之间的关系, 可划分出 4 个硅藻组合带(图 6), 即海冰硅藻组合带、暖水硅藻组合带、沿岸硅藻组合带和混合硅藻组合带。

**3.4.1 海冰硅藻组合带** 海冰硅藻组合带所包含的站位有 LV83-10, LV77-(14、20、21、22、23、31、32、33、34) 和 ARC9-R12, 包括东西伯利亚海中部及北部等纬度较高的海域(图 6)。这些站位在  $SIC$  向量上为正值, 而在  $SST_{sum}$  向量上为负值(图 5), 表明该分区  $SIC$  较高而  $SST$  较低。这些站位中主要的硅藻属种为 *Fragilariopsis oceanica* 和 *Fragilariopsis cylindrus*, 以及一些北极硅藻属种, 比如 *Fossula arctica* 和 *Thalassiosira antarctica* var. *borealis* resting spores(图 6)。其中 *F. oceanica* 和 *F. arctica* 属种的空间分布图如图 3a、3b 所示。

*F. cylindrus* 在北极和南极均有分布, 可能以底栖硅藻和浮游生物的形式生活在海冰边缘区域, 常出现于寒冷水域的浮游植物群落里(Hasle *et al*, 1990)。在白令海和楚科奇海的季节性海冰覆盖地区, 它已被记录为海冰浮游生物的主要组成部分(Taniguchi *et al*, 1976)。*F. oceanica* 是一种常见的极地浮游硅藻, 与海冰关系密切(Halse *et al*, 1996)。

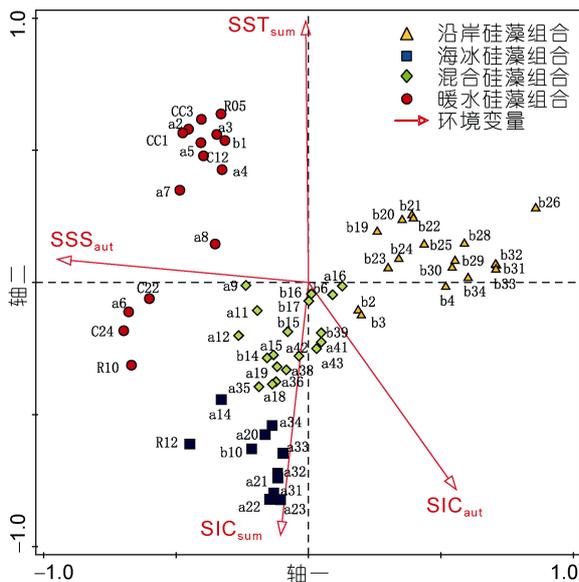


图 5 硅藻组合特征与环境变量关系图

Fig.5 The CCA biplot of diatom assemblage characteristics and environmental variables

注: 站位号“a”代表 LV77 航次; 站位号“b”代表 LV83 航次; “C”或“R”代表 ARC9 航次

东西伯利亚海中部海域的站位处在  $SIC_{sum}$  和

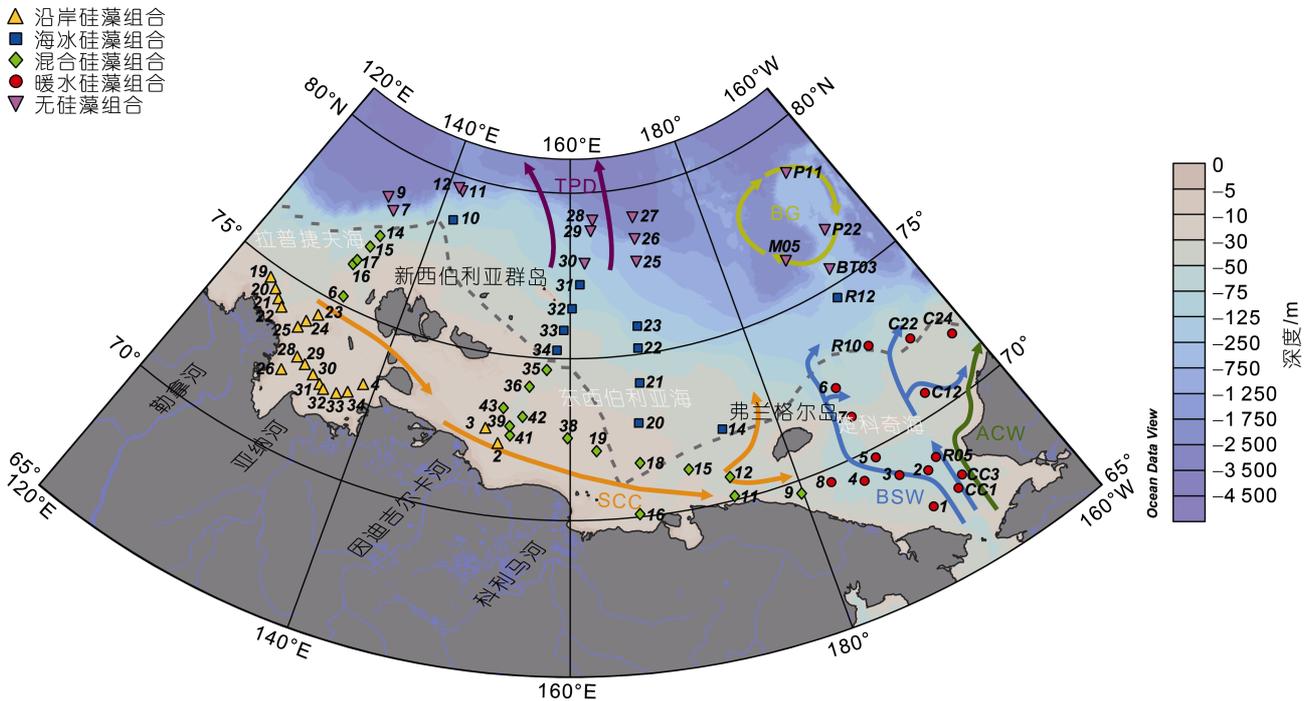


图 6 研究区表层沉积物硅藻组合分带

Fig.6 The zonation of diatom assemblages in surface sediments of the study area

注: 黄色三角形代表沿岸硅藻组合; 蓝色正方形代表海冰硅藻组合; 绿色菱形代表混合硅藻组合; 红色圆圈代表暖水硅藻组合; 紫色倒三角形代表无硅藻组合

Sancetta(1981)将白令海表层沉积物硅藻划分为 4 个组合, 其中含有 *F. cylindrus* 和 *F. oceanica* 的硅藻组合被认为是与海冰相关的春季水华的标志。北欧海域也报道了类似的硅藻组合, 显示出 *F. cylindrus* 和 *F. oceanica* 与春季海冰的关系十分密切(Koc Karpuz *et al*, 1990)。此外, *F. cylindrus* 和 *F. oceanica* 与拉普捷夫海陆架中部和西北部的海冰也有很强的联系(Cremer, 1999)。Ran 等(2013)划分的白令海和楚科奇海表层沉积物中的海冰硅藻组合, 包括了 *F. oceanica*, *F. cylindrus*, *F. arctica* 和 *Pauliella taeniata*, 与本项研究的海冰组合基本一致。在北太平洋北部, *F. cylindrus* 和 *F. oceanica* 是白令海陆架上的优势种(百分含量高达 80%), 其最大丰度出现在夏季海温为 5~8 °C 时, 而在夏季海温超过 12.5 °C 时丰度减少(Ren *et al*, 2014, 2020)。本研究的海冰硅藻组合位于高纬度地区, 特别是东西伯利亚海北部(图 6), 受冷水和海冰覆盖的影响较大, 因此该组合可作为研究区寒冷的极地水和海冰覆盖的指标。

**3.4.2 暖水硅藻组合带** 在暖水硅藻组合带中(图 6), 大部分站位具有高温的特征, 它们位于 SST<sub>sum</sub> 向量轴的正方向上(图 4)。LV77-6 和 ARC9-(C22、C24、R10)这 4 个站位在 SST<sub>sum</sub> 向量的负方向上, 这

是由于它们受到白令海水的影响, 白令海水随着纬度的升高水温逐渐降低, 受暖水影响较弱(Coachman *et al*, 1975; Walsh *et al*, 1989)。此外, 暖水硅藻组合中所包含的所有站位都在 SSS<sub>aut</sub> 向量的正方向上(图 5)。该组合 *Thalassiosira oestrupii* 和 *Thalassionema nitzschioides* 的含量较高, 主要分布在楚科奇海。其中 *T. nitzschioides* 属种的空间分布图如图 3c 所示。*T. oestrupii* 发现于温带地区的海水中, 在楚科奇海的分布较多(Tomas, 1997)。*T. nitzschioides* 在亚北极太平洋和大西洋丰度较高(Hendey, 1964; Koc Karpuz *et al*, 1990; Halse *et al*, 1996; Jiang *et al*, 1996, 2001), 指示表层海水温度较高的水体环境。此外, 该组合还包括 *Paralia sulcata* 和 *N. seminae*。*P. sulcata* 含量的增加曾被用来指示阿拉斯加沿岸流携带的淡水增加(Obrezkova *et al*, 2014; Ren *et al*, 2014; Astakhov *et al*, 2015), 也被用来间接反映气候变暖以及海冰融化的加剧(Artemova *et al*, 2019)。*N. seminae* 是亚北极太平洋水域特有的浮游硅藻种(Sancetta, 1982; Ren *et al*, 2014; Sattarova *et al*, 2015)。已有研究发现, 该种在北太平洋西北部、白令海盆地、阿拉斯加湾和阿留申群岛一带大量分布, 但在高纬度海域却很少见。此外, 该种也被认为是阿留申流的指示种, 其含量的增加

表明北太平洋水团对高纬度海域的影响增强(Teraishi *et al*, 2016; Stroynowski *et al*, 2017)。在该组合中, *N. seminae* 的出现可用来指示温暖且盐度较高的太平洋海水对楚科奇海的影响(图 6)。

**3.4.3 沿岸硅藻组合带** 沿岸硅藻组合带的站位在  $SSS_{aut}$  向量轴负方向上的投影值都相对较高(图 5, 图 6), 表明它们具有较低的海水盐度特征。该硅藻组合以半咸水和淡水属种为主, 主要有 *Aulacoseira subarctica*、*Achnanthes minutissima*、*Cyclotella meneghiniana*、*Cocconeis placentula*、*Fragilaria pinnata*、*Tabellaria flocculosa* 和 *Thalassiosira baltica*。其中 *A. subarctica* 属种的空间分布图如图 3d 所示。沿岸硅藻组合主要分布在拉普捷夫海南部, 一个以低盐度为特征的近岸地区。勒拿河注入拉普捷夫海后, 拉普捷夫海表层形成了明显的水平盐度梯度。160°E 的水域受到太平洋流入的影响(Semiletov *et al*, 2005)。拉普捷夫海的水文状况是北极水团的北部平流和南部每年约 714 km<sup>3</sup> 河流径流流入的结果(Ivanov *et al*, 1999; Gordeev, 2000)。进入北冰洋的陆地淡水径流中, 有四分之一以上注入了拉普捷夫海, 其中勒拿河约占所有河流总径流量的 70% (Gordeev *et al*, 1996; Gordeev, 2000)。每年初夏, 大量的河流径流流入直接影响了拉普捷夫海的盐度条件和海冰范围。 $SSS_{sum}$  与  $SSS_{aut}$  变化空间分布特征相似, 以拉普捷夫海为中心, 由沿岸向外海表层海水盐度逐渐增加(图 2c, 2d)。CCA 结果显示  $SSS_{sum}$  的  $VIF > 20$ , 表明  $SSS_{sum}$  与其他环境变量之间存在共线性关系, 不能单独对硅藻数据进行解释, 因此, 本文在对硅藻属种与环境变量之间的关系进行 CCA 分析时, 对  $SSS_{sum}$  进行了剔除。此外, 从图 2 中可以看出,  $SSS_{sum}$  受河流径流与冰融水的影响大, 夏季河流水动力强, 不利于硅藻保存, 而秋季河流水动力较弱, 有利于硅藻保存, 这可能是  $SSS_{aut}$  对硅藻空间分布影响较大的原因。因此, 盐度是拉普捷夫海大陆架水域最多变的环境因子, 也是影响拉普捷夫海域表层硅藻空间分布特征的主要环境变量(Taldenkova *et al*, 2005)。

**3.4.4 混合硅藻组合带** 根据站位在  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  向量轴上的位置(图 5), 混合硅藻组合(图 6)的  $SIC_{sum}$  和  $SIC_{aut}$  略高于沿岸硅藻组合和暖水硅藻组合。它们在  $SST_{sum}$  向量轴的负方向, 表明它们位于夏季表层海水温度较低的海域。该组合以 *T. nordenskiöldii* 为主。*T. nordenskiöldii* 生长在寒冷

到温带地区(Halse *et al*, 1996), 也是最重要和最丰富的浅海属种之一, 常见于北大西洋、北海、挪威海和北冰洋(Hendey, 1964)。海冰硅藻如 *F. oceanica*、*F. cylindrus* 和 *F. arctica* 在该组合中含量也较丰富。此外, 该组合也包括一些相对温暖的硅藻属种, 如 *T. nitzschioides* 和 *T. oestrupii*。与暖水硅藻组合相比, 混合硅藻组合中海冰硅藻属种和北极属种含量较高, 而暖水硅藻属种的含量较低。混合硅藻组合被海冰硅藻组合、暖水硅藻组合和沿岸硅藻组合包围, 这是该地区受冷水、海冰覆盖、太平洋暖水和陆地径流共同影响的结果。

## 4 结论

本研究探讨了楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海表层沉积物中硅藻的空间分布特征。应用典型对应分析方法分析了硅藻与环境变量之间的关系。结果表明, 楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海的硅藻分布与秋季表层海水盐度( $SSS_{aut}$ )、秋季海冰密集度( $SIC_{aut}$ )、夏季表层海水温度( $SST_{sum}$ )和夏季海冰密集度( $SIC_{sum}$ )密切相关, 这 4 个环境变量是硅藻组成发生变化的主要原因。

楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海表层站位的空间分布可划分为 4 个组合带, 即海冰硅藻组合带、暖水硅藻组合带、沿岸硅藻组合带和混合硅藻组合带。海冰硅藻组合带主要为东西伯利亚海中部及北部等纬度较高海域, 以海冰种和极地种为主(如 *F. cylindrus*、*F. oceanica* 和 *F. arctica*), 受极地冷水和海冰覆盖的影响。暖水硅藻组合带主要分布在楚科奇海, 沿岸种 *P. sulcata*、暖水种 *T. nitzschioides* 的含量较高, 受到北太平洋暖水的影响。沿岸硅藻组合带主要分布在拉普捷夫海南部, 以半咸水和淡水硅藻, 如 *A. subarctica*、*C. meneghiniana*、*F. pinnata*、*T. flocculosa* 和 *T. baltica* 为主, 受到陆地径流的影响。混合硅藻组合带被海冰硅藻组合带、暖水硅藻组合带和沿岸硅藻组合带所包围, 该组合位于夏季表层海水温度较低的海域, 受到冷水、海冰覆盖、温暖的太平洋海水和陆地径流的共同影响。

## 参 考 文 献

- 王汝建, 陈荣华, 2004. 白令海表层沉积物中硅质生物的变化及其环境控制因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 685-690.
- 王辉武, 刘娜, 赵昌, 等, 2012. 2008 年夏季楚科奇海余流分布特征[J]. 海洋科学进展, 30(3): 338-346.

- 冉莉华, 陈建芳, 金海燕, 等, 2012. 白令海和楚科奇海表层沉积硅藻分布特征[J]. 极地研究, 24(1): 15-23.
- 邵丽霞, 林荣澄, 高亚辉, 等, 2012. 白令海表层沉积硅藻的种类组成与分布[J]. 极地研究, 24(4): 331-338.
- 胡利民, 石学法, 叶君, 等, 2020. 北极东西伯利亚陆架沉积有机碳的源汇过程研究进展[J]. 地球科学进展, 35(10): 1073-1086.
- 黄元辉, 石学法, 吕华华, 等, 2012. 白令海特征区域的表层沉积硅藻分布及其古海洋学意义[J]. 海洋学报, 34(3): 106-113.
- 蒋辉, 吕厚远, 支崇远, 等, 2002. 硅藻分析与第四纪定量古地理和古气候研究[J]. 第四纪研究, 22(2): 113-122.
- AAGAARD K, CARMACK E C, 1989. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 94(C10): 14485-14498.
- ABRAM N, GATTUSO J P, PRAKASH A, *et al*, 2022. Framing and context of the report [M] // IPCC. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press: 73-130.
- ARTEMOVA A V, VASILENKO Y P, GORBARENKO S A, *et al*, 2019. Climatic and oceanological changes in the southwestern part of the Sea of Okhotsk during the last 94 kyr [J]. Progress in Oceanography, 179: 102215.
- ASTAKHOV A S, BOSIN A A, KOLESNIK A N, *et al*, 2015. Sediment geochemistry and diatom distribution in the Chukchi Sea: application for bioproductivity and paleoceanography [J]. Oceanography, 28(3): 190-201.
- BAUCH H A, POLYAKOVA Y I, 2000. Late Holocene variations in Arctic shelf hydrology and sea-ice regime: evidence from north of the Lena Delta [J]. International Journal of Earth Sciences, 89(3): 569-577.
- BROWN T A, BELT S T, TATAREK A, *et al*, 2014. Source identification of the Arctic sea ice proxy IP<sub>25</sub> [J]. Nature Communications, 5: 4197.
- COACHMAN L K, AAGAARD K, TRIPP R B, 1975. Bering Strait: the Regional Physical Oceanography [M]. Seattle: University of Washington Press.
- CODISPOTI L A, RICHARDS F A, 1968. Micronutrient distributions in the East Siberian and Laptev seas during summer 1963 [J]. Arctic, 21(2): 67-83.
- CREMER H, 1998. The Diatom Flora of the Laptev Sea (Arctic Ocean) [M]. Berlin: Stuttgart.
- CREMER H, 1999. Distribution patterns of diatom surface sediment assemblages in the Laptev Sea (Arctic Ocean) [J]. Marine Micropaleontology, 38(1): 39-67.
- DMITRENKO I A, KIRILLOV S A, TREMBLAY L B, *et al*, 2010. Impact of the arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 115(C8): C08010.
- GORDEEV V V, 2000. River input of water, sediment, major ions, nutrients and trace metals from Russian territory to the Arctic Ocean [M] // LYN LEWIS E, JONES E P, LEMKE P, *et al*. The freshwater budget of the Arctic Ocean. Dordrecht: Springer: 297-322.
- GORDEEV V V, MARTIN J M, SIDOROV I S, *et al*, 1996. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean [J]. American Journal of Science, 296(6): 664-691.
- GUKOV A Y, 1999. *Ekosistema Sibirskoi Polyn'i* (the Ecosystem of the Syberian Polynya) [M]. Moscow: Nauchnyi Mir.
- HÅKANSSON H, 1984. The recent diatom succession of Lake Havgårdssjön, South Sweden [C] // Proceedings of the Seventh International Diatom Symposium. Koenigstein: Otto Koeltz Science Publishers: 411-429.
- HASLE G R, SYVERTSEN E E, STEIDINGER K A, *et al*, 1996. Identifying marine diatoms and dinoflagellates [M]. Elsevier.
- HASLE G R, 1965. *Nitzschia* and *Fragilariopsis* species studied in the light and electron microscopes. II. The group *Pseudonitzschia* [J]. Skrifter utgitt av Det/Norske Videnskaps-Akademi i Oslo. I. Matematisk- Naturvidenskapelig Klasse, 18: 5-15.
- HASLE G R, SYVERTSEN E E, 1990. Arctic diatoms in the Oslofjord and the Baltic Sea—a bio- and palaeogeographic problem [C] // Proceedings of the 10th International Diatom Symposium. Koenigstein: Koeltz Scientific Books: 285-300.
- HENDEY N I, 1964. An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. Part V: Bacillariophyceae (Diatoms) [M]. London: Fishery Investigations: 317.
- HORNER R, ALEXANDER V, 1972. Algal populations in Arctic sea ice: an investigation of heterotrophy [J]. Limnology and Oceanography, 17(3): 454-458.
- IVANOV V V, PISKUN A A, 1999. Distribution of river water and suspended sediment loads in the deltas of rivers in the basins of the Laptev and East-Siberian Seas [M] // Land-ocean systems in the Siberian Arctic. Berlin, Heidelberg: Springer: 239-250.
- JAKOBSSON M, 2002. Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 3(5): 1-18.
- JIANG H, NORDBERG K, 1996. Late Weichselian environmental changes of the southern Kattegat, Scandinavia, inferred from diatom records [J]. Geological Society, London, Special Publications, 111(1): 245-260.
- JIANG H, SEIDENKRANTZ M S, KNUDSEN K L, *et al*, 2001. Diatom surface sediment assemblages around Iceland and their relationships to oceanic environmental variables [J]. Marine Micropaleontology, 41(1/2): 73-96.
- JIANG H, ZHENG Y L, RAN L H, *et al*, 2004. Diatoms from the surface sediments of the South China Sea and their relationships to modern hydrography [J]. Marine Micropaleontology, 53(3/4): 279-292.
- KASSENS H, DMITRENKO I, RACHOLD V, *et al*, 1998. Russian and German scientists explore the Arctic's Laptev Sea and its climate system [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 79(27): 317-323.
- KOC KARPUSZ N, SCHRADER H, 1990. Surface sediment diatom distribution and Holocene paleotemperature variations in the Greenland, Iceland and Norwegian Sea [J]. Paleoceanography, 5(4): 557-580.
- MATUL A G, KHUSID T A, MUKHINA V V, *et al*, 2007. Recent

- and Late Holocene environments on the southeastern shelf of the Laptev Sea as inferred from microfossil data [J]. *Oceanology*, 47(1): 80-90.
- OBREZKOVA M S, KOLESNIK A N, SEMILETOV I P, 2014. The diatom distribution in the surface sediments of the Eastern Arctic seas of Russia [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 40(6): 465-472.
- OBREZKOVA M S, POSPELOVA V Y, 2019. Distribution of diatoms and dinocysts in surface sediments from the East Siberian and Chukchi Seas [J]. *Paleontological Journal*, 53(8): 790-794.
- PETRYASHOV V V, SIRENKO B I, GOLIKOV A A, *et al*, 1999. Macrobenthos distribution in the Laptev Sea in relation to hydrology [M] // KASSENS H, BAUCH H A, DMITRENKO I A, *et al*. *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic*. Berlin: Springer: 169-180.
- PICKART R S, PRATT L J, TORRES D J, *et al*, 2010. Evolution and dynamics of the flow through Herald Canyon in the western Chukchi Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(1/2): 5-26.
- RAN L H, CHEN J F, JIN H Y, *et al*, 2013. Diatom distribution of surface sediment in the Bering Sea and Chukchi Sea [J]. *Advances in Polar Science*, 24(2): 106-112.
- REN J, CHEN J F, BAI Y C, *et al*, 2020. Diatom composition and fluxes over the Northwind Ridge, western Arctic Ocean: impacts of marine surface circulation and sea ice distribution [J]. *Progress in Oceanography*, 186: 102377.
- REN J, GERSONDE R, ESPER O, *et al*, 2014. Diatom distributions in northern North Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 402: 81-103.
- SANCETTA C, 1981. Oceanographic and ecologic significance of diatoms in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas [J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 28(8): 789-817.
- SANCETTA C A, 1982. Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas [J]. *Micropaleontology*, 28(3): 221-257.
- SATTAROVA V V, ARTEMOVA A V, 2015. Geochemical and micropaleontological character of Deep-Sea sediments from the Northwestern Pacific near the Kuril-Kamchatka Trench [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 111: 10-18.
- SEMILETOV I, DUDAREV O, LUCHIN V, *et al*, 2005. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(10): L10614.
- SERREZE M C, MEIER W N, 2019. The Arctic's sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1): 36-53.
- SPRINGER A M, MCROY C P, 1993. The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea—III. Patterns of primary production [J]. *Continental Shelf Research*, 13(5/6): 575-599.
- STEELE M, ERMOLD W, 2004. Salinity trends on the Siberian shelves [J]. *Geophysical Research Letters*, 31(24): L24308.
- STROEVE J, NOTZ D, 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons [J]. *Environmental Research Letters*, 13(10): 103001.
- STROEVE J, SERREZE M, DROBOT S, *et al*, 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007 [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(2): 13-14.
- STROYNOWSKI Z, ABRANTES F, BRUNO E, 2017. The response of the Bering Sea gateway during the mid-Pleistocene transition [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485: 974-985.
- TALDENKOVA E, BAUCH H A, STEPANOVA A, *et al*, 2005. Last postglacial environmental evolution of the Laptev Sea shelf as reflected in molluscan, ostracodal, and foraminiferal faunas [J]. *Global and Planetary Change*, 48(1/2/3): 223-251.
- TANIGUCHI A, SAITO K, KOYAMA A, *et al*, 1976. Phytoplankton communities in the Bering Sea and adjacent seas [J]. *Journal of Oceanography*, 32(3): 99-106.
- TER BRAAK C J F, 1988. CANOCO—a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [etrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (version 2.1) [R]. Wageningen: Agricultural Mathematics Group.
- TER BRAAK C J F, SMILAUER P, 2002. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) [R]. Ithaca: www.canoco.com.
- TERAISHI A, SUTO I, ONODERA J, *et al*, 2016. Diatom, silicoflagellate and ebridian biostratigraphy and paleoceanography in IODP 323 Hole U1343E at the Bering slope site [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 125/126: 18-28.
- TOMAS C R, 1997. Identifying marine phytoplankton [J]. Academic Press.
- TSOY I, 2001. Diatoms in surface sediments of the Siberian Arctic shelf (Laptev and East-Siberian seas) [M] // SEMOLETOV I P. *Changes in the Atmosphere-Land-Sea System in the Amerasian Arctic*. Vladivostok: Dalnauka: 245-249.
- VON QUILLFELDT C H, 2000. Common diatom species in arctic spring blooms: their distribution and abundance [J]. *Botanica Marina*, 43(6): 499-516.
- VON QUILLFELDT C H, AMBROSE W G, Clough L M, 2003. High number of diatom species in first-year ice from the Chukchi Sea [J]. *Polar Biology*, 26(12): 806-818.
- WALSH J J, MCROY C P, COACHMAN L K, *et al*, 1989. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 22(4): 277-359.
- WANG J, COTA G F, COMISO J C, 2005. Phytoplankton in the Beaufort and Chukchi Seas: distribution, dynamics, and

- environmental forcing [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24/25/26): 3355-3368.
- WEGNER C, 2003. Sediment transport on arctic shelves-seasonal variations in suspended particulate matter dynamics on the Laptev Sea Shelf (Siberian Arctic) [R]. Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research: 455.
- WEINGARTNER T, AAGAARD K, WOODGATE R, *et al*, 2005. Circulation on the North Central Chukchi Sea shelf [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24/25/26): 3150-3174.
- WOODGATE R A, AAGAARD K, WEINGARTNER T J, 2005. A year in the physical oceanography of the Chukchi Sea: moored measurements from autumn 1990-1991 [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(24/25/26): 3116-3149.
- YADAV J, KUMAR A, MOHAN R, 2020. Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming [J]. *Natural Hazards*, 103(2): 2617-2621.

## DIATOM ASSEMBLAGES IN SURFACE SEDIMENT IN THE SIBERIAN ARCTIC SEAS AND THEIR RELATIONSHIP TO OCEANIC ENVIRONMENTAL VARIABLES

LI Xian-Fu<sup>1</sup>, LIU Yan-Guang<sup>2</sup>, QIU Yue<sup>1</sup>, HUANG Yuan-Hui<sup>2</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, LI Dong-Ling<sup>1</sup>

(1. *Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*)

**Abstract** The Siberian shelf sea in the Arctic Ocean is one of the most remarkable areas affected by rapid change in the Arctic climate. As an important part of the polar marine ecosystem, sedimentary diatoms have a sensitive response to environmental changes. The diatom composition in the surface sediments of Chukchi, East Siberian and Laptev Seas were identified and the relationship between diatom species and environmental variables data (sea surface temperatures, sea ice concentrations, and sea surface salinity) from 1986 to 2015 were analyzed by using canonical correspondence analysis method. Results show that summer and autumn sea ice concentrations, and sea surface salinity are main environmental factors affecting the distribution of diatoms in those area. In addition, as shown in the canonical correspondence analysis between surface samples and oceanographic environmental variables, the Siberia polar sea could be divided into four regions, namely the sea-ice diatom zone, the warm water diatom zone, the coastal diatom zone, and the mixing diatom zone. The zonation of these surface samples was significantly correlated with patterns of ocean current in the corresponding regions. The sea-ice diatom zone was limited to the northern part of the study area at higher latitudes; and the warm water diatom zone was located in the area dominated by Bering Sea Water and Alaska Coastal Water, a branch of warm Pacific waters; the coastal diatom zone in the southern Laptev Sea was strongly influenced by both river discharge and the Siberian Coastal Current; and the mixing diatom zone was controlled by the combined effects of cold polar water, sea ice cover, warm Pacific water, and land runoff.

**Key words** diatom; environmental variables; Siberian Arctic Seas; canonical correspondence analysis