

李秋玲, 乔淑卿, 石学法, 等. 北极东西伯利亚陆架沉积物物源: 来自黏土矿物和化学元素的证据[J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 76–89, doi:10.12284/hyxb2021041

Li Qiuling, Qiao Shuqing, Shi Xuefa, et al. Sediment provenance of the East Siberian Arctic Shelf: Evidence from clay minerals and chemical elements[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 76–89, doi:10.12284/hyxb2021041

北极东西伯利亚陆架沉积物物源: 来自黏土矿物和化学元素的证据

李秋玲¹, 乔淑卿^{1,2}, 石学法^{1,2*}, 胡利民^{1,2}, 陈禹飞^{1,3}, 白亚之¹, 朱爱美¹, 崔菁菁¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 本文对北极东西伯利亚陆架表层沉积物进行了粒度、黏土矿物以及常微量元素测定, 阐述了粒度、黏土矿物和常微量元素的分布特征。利用因子分析与聚类分析划分了不同的沉积区, 并探讨了各区沉积物的主要来源。结果表明, 研究区可以划分为 4 个沉积区: (1) 东西伯利亚海近岸河口区 (I 区), 沉积物以粉砂和砂质粉砂为主, TiO_2 、 Zr 、 SiO_2 含量较高, 其他元素在该区都处于低值, La/Th 与 Zr/Hf 比值在 4 个沉积区中为最大值, 黏土矿物中伊利石含量占绝对优势, 约为 70%, 该区受到河流与海岸侵蚀物质输入的强烈影响; (2) 东西伯利亚海中部 (II 区), 沉积物以粉砂和泥为主, MnO 、 Ba 与 Ni 等元素在该区含量较高, 黏土矿物组合与 I 区类似, La/Th 和 Zr/Hf 比值比 I 区略低, 该区沉积物以河流输入的细粒沉积物为主, 受海冰等过程的影响发生了混合, 随着离岸距离的增加, 海洋自生组分开始增多; (3) 东西伯利亚海北部深水区 (III 区), 沉积物以泥为主, Al_2O_3 、 K_2O 、 V 、 Li 等在该区达到最大值, La/Th 和 Rb/Th 比值与 II 区极其类似, 伊利石含量在该区为最低值, 蒙皂石与高岭石含量在该区达到最大值 (>10%), 该区细粒沉积物很可能受大西洋水体以及波弗特环流的影响; (4) 楚科奇海 (IV 区), 该区沉积物主要由粉砂和砂质粉砂组成, CaO 、 P_2O_5 等在该区含量较高, Rb/Th 、 La/Th 与 Zr/Hf 均为 4 个沉积区的最小值, 绿泥石在该区最为富集, 该区沉积物受太平洋入流水的影响强烈。

关键词: 沉积物物源; 黏土矿物; 常微量元素; 东西伯利亚海; 楚科奇海

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)03-0076-14

1 引言

北极东西伯利亚陆架 (East Siberian Arctic Shelf), 包括东西伯利亚海 (East Siberian Sea) 和楚科奇海 (Chukchi Sea), 是世界上罕见的宽广大陆架, 发育特色的沉积体系, 具有复杂的海洋环流以及强烈的陆源

物质和淡水输入^[1-2]。其中, 东西伯利亚海是北极陆源物质与淡水输入最强烈的地区之一^[1]。楚科奇海缺乏大型河流淡水输入, 但它受温暖的太平洋入流水的影响强烈, 是北极生物生产力最高的区域^[3]。近半个世纪以来, 在全球变暖的影响下, 东西伯利亚陆架是目前北极海冰退化最严重、最显著的地区^[4-5]。海底

收稿日期: 2019-12-26; 修订日期: 2020-03-04。

基金项目: 山东省重大科技创新工程专项 (2018SDK0104-3); 国家自然科学基金 (U1606401, 41722603); 自然资源部全球变化与海气相互作用专项 (GASI-GEOGE-03)。

作者简介: 李秋玲 (1995—), 女, 云南省曲靖市人, 主要从事海洋沉积学研究。E-mail: geolql@163.com

* 通信作者: 石学法 (1965—), 男, 山东省昌邑市人, 主要从事海洋沉积学研究。E-mail: xfshi@fio.org.cn

冻土融化、海岸侵蚀加剧、河流淡水输入增加等问题的出现正在改变北极地区的生态与沉积环境^[6-8]。研究北极陆架现代沉积物的分布特征、来源及其运移过程将有助于更好地理解北极陆架沉积物的源-汇过程以及沉积环境的演变历史,揭示北极边缘海与周围大陆、海洋之间的相互作用机制。

以往的研究显示,东西伯利亚海表层沉积物以细粒级为主,局部出现粉砂和砂,黏土粒级组分含量达60%~70%^[9-10]。黏土矿物组合以伊利石-绿泥石-蒙皂石-高岭石为主,其中,伊利石含量最为丰富^[11]。重矿物组合以角闪石、单斜辉石、绿帘石以及石榴石为主,在新西伯利亚群岛(New Siberian Islands)附近和因迪吉尔卡河(Indigirka River)向海延伸方向上,以石榴石和锆石为主,而在科雷马河(Kolyma River)向海延伸方向上,单斜辉石含量较高,科雷马河以东,斜方辉石成为主导^[10,12]。楚科奇海内陆架沉积物以粉砂为主,分选良好,在近岸侵蚀强烈的区域,发育粗砂沉积物,其中混有砾石,分选极差,而在中、外陆架,沉积物颗粒较细,以泥为主^[13]。黏土矿物中蒙皂石和绿泥石的含量较高^[14],主要矿物以石英、钾长石、斜长石、云母为主,典型矿物包括角闪石、辉石、方解石等^[15]。Viscosi-Shirley等^[16]提出东西伯利亚陆架表层沉积物元素地球化学特征有显著的空间差异,可以划分4个不同的沉积端元:(1)东西伯利亚海沉积物,以富Al、K以及REE为特征;(2)楚科奇海沉积物,以富Mg为主要特征;(3)弗兰格尔岛(Wrangell Islands)附近沉积物,以富Si为主要特征;(4)新西伯利亚群岛附近沉

积物,以富Sr、Si为主要特征。

国外学者对北极海域开展的研究让我们对东西伯利亚陆架区沉积物的粒度、黏土矿物、重矿物、地球化学等分布特征有所了解,但大多数研究采用单一指标进行分析,缺乏多指标的结合研究。此外,详细的沉积物元素地球化学特征的研究相对较少。国内学者对北极海域的研究则大多集中在楚科奇海深水部分^[14-15,17-22],对东西伯利亚海的研究基本未开展。本文研究对2016年、2018年两次中俄北极联合科考在东西伯利亚海与楚科奇海所取得的表层沉积物进行了粒度、黏土矿物与常微量元素分析,阐述了沉积物粒度、黏土矿物与元素地球化学的分布特征,探讨了北极东西伯利亚陆架现代沉积物的来源与运移,为全面系统了解北冰洋沉积物的分布规律及其物源提供了新的资料和认识。

2 研究区概况

北极东西伯利亚陆架包括东西伯利亚海和楚科奇海(图1),面积约 $153 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[21],其中东西伯利亚海具有世界上最宽阔的大陆架,海底冻土广泛发育,西部以新西伯利亚群岛为界,紧邻拉普捷夫海(Laptev Sea)。楚科奇海位于东西伯利亚海东部,西至弗兰格尔岛,东侧为北美大陆阿拉斯加,南经白令海峡与太平洋相通,是太平洋水体进入北冰洋的必要通道。东西伯利亚海一年之中大部分时间被海冰所覆盖,仅在夏季海冰消退,可以通航。这里的大陆架宽而浅,地形平坦,平均水深58 m^[24],西部陆架宽度超过800 km,

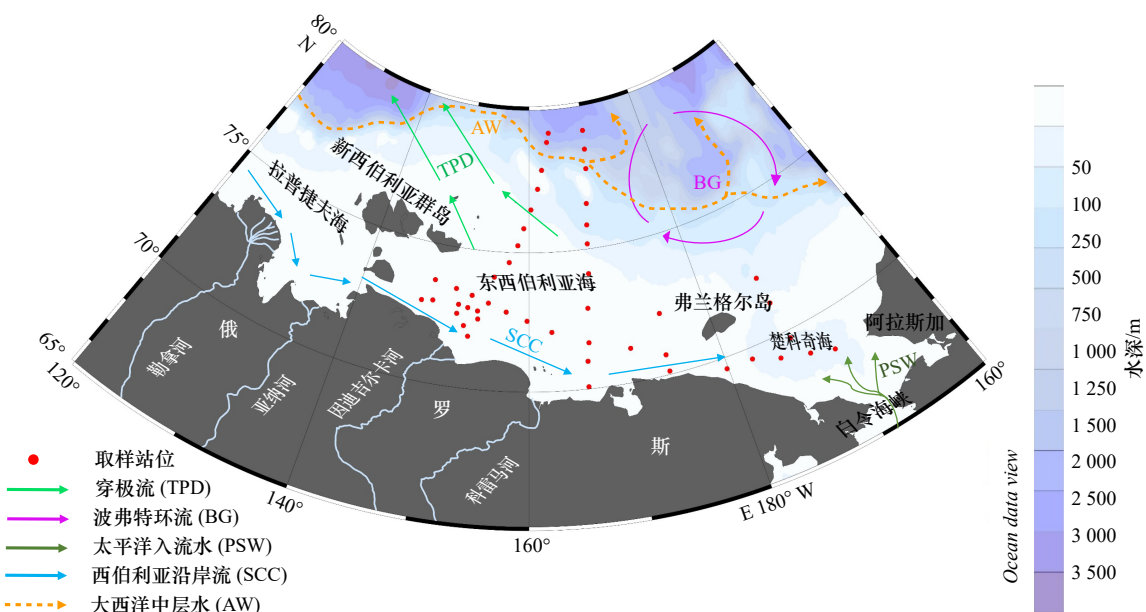


图1 北极东西伯利亚陆架概况及取样站位分布(环流模式根据文献[1,23]绘制)

Fig. 1 Environment setting of the East Siberian Arctic Shelf and sampling locations (circumfluence modified from references [1, 23])

面积为 $93.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ [10]。

西伯利亚腹地河流系统发育且主要集中在中西部,包括勒拿河、亚纳河、因迪吉尔卡河以及科雷马河等 [25]。这些河流径流具有明显的季节性,90% 以上的径流量出现在温暖的春季和夏季 [26],流入东西伯利亚海最大的两条河流是科雷马河与因迪吉尔卡河。科雷马河流域面积约 $647 \times 10^3 \text{ km}^2$,年径流量为 122 km^3 ,年均输沙量为 $10.1 \times 10^6 \text{ t}$ [27],是流入东西伯利亚海径流量最大的河流,第二大河流为因迪吉尔卡河,流域面积约为 $360 \times 10^3 \text{ km}^2$,年径流量为 54.2 km^3 ,年均输沙量为 $11.1 \times 10^6 \text{ t}$ (表 1) [27-28]。虽然因迪吉尔卡河的年径流量还不到科雷马河径流量的一半,但它的含沙量却很高,使得因迪吉尔卡河对东西伯利亚海的泥沙贡献超过了科雷马河,成为东西伯利亚输沙量最大的河流。除此之外,汇入拉普捷夫海的勒拿河,虽然没有直接注入东西伯利亚海,但由于其巨大的径流量与输沙量,在西伯利亚沿岸流的影响下,也可以向东西伯利亚海西部供应沉积物。

表 1 北极东西伯利亚陆架周边主要河流特征 [28]

Table 1 Main rivers' features around the East Siberian Arctic Shelf [28]

河流	流域面积/(10^3 km^2)	年径流量/ km^3	年输沙量/(10^6 t)
勒拿河	2 448	532	20.7
亚纳河	225	31.9	4.0
因迪吉尔卡河	360	54.2	11.1
科雷马河	647	122	10.1

北冰洋水体主要由 3 部分组成:表层水体、中层水体(大西洋层)和深层水体 [1]。表层水体包括极地混合层与温跃层,主要由河流输入的淡水与太平洋入流水组成。在温跃层以下,存在着一个更温暖、盐度更高的中间水体,称为大西洋层,它在北极盆地中普遍存在,大约出现在 $200 \sim 800 \text{ m}$ 水深。深层水体则主要为挪威海与格陵兰海的深层水体的混合。北极东部海域水动力条件复杂,太平洋入流水、穿极流、波弗特环流和西伯利亚沿岸流构成陆架表层水体的主要环流系统,它们主要受风力驱动、径流输入和海冰过程的共同影响 [24, 29-30]。东西伯利亚陆架区被认为是太平洋入流水和北极陆架水体之间的过渡地带 [31]。

3 研究材料与方法

本次研究使用样品为 2016 年和 2018 年两次中俄北极联合考察航次在东西伯利亚海和楚科奇海所取

得的 48 个表层沉积物,取样位置见图 1,样品采集水深在 $6 \sim 2 542 \text{ m}$ 之间,采用箱式取样器采集,现场将顶部 1 cm 的浮泥样品用自封袋于 4°C 保存,用于实验室分析。对各站位表层沉积物样品分别进行了粒度、黏土矿物和常微量元素分析测试,样品粒度与元素分析测试均在自然资源部第一海洋研究所海洋沉积与环境地质重点实验室完成,黏土矿物分析测试在中国科学院海洋研究所完成。

粒度分析测试。首先称取适量的沉积物样品,加入约 15 mL 30% 的 H_2O_2 静置 24 h 以上,去除有机质,然后加入约 5 mL 3 mol/L 的盐酸静置 24 h 以上,去除钙质胶结物及生物壳体,待反应完全,离心清洗至中性,超声振荡使颗粒充分分散,然后上机测试。所用仪器为英国 Master sizer 3000 型激光粒度仪,测试范围为 $0.01 \sim 3 000 \mu\text{m}$,样品重复测量相对误差小于 3%。沉积物类型根据福克法定名 [32],粒度参数采用矩法计算 [33]。

黏土矿物分析测试。样品先用 30% 的 H_2O_2 除去有机质,然后用 1 mol/L 的盐酸除去碳酸盐,反应完全后,用去离子水反复清洗,直到具有抗絮凝作用。根据 Stokes 沉降原理,提取出小于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒组分,采用刮片法制成样品定向薄片。经乙二醇蒸气 60°C 饱和处理 12 h 后,上机测试。测试仪器为德国产 D8 Advance 衍射仪, CuK_α 辐射,管压为 40 kV ,管流为 25 mA 。分别扫描两次:第一次扫描角度为 $3^\circ \sim 30^\circ (2\theta)$,步长为 0.02° ;为了更精确地识别绿泥石和高岭石在 $3.54\text{\AA}/3.58\text{\AA}$ 的混合峰(图 2),进行第二次扫描,扫描角度为 $24^\circ \sim 26^\circ (2\theta)$,步长为 0.01° 。

黏土矿物定性分析及半定量计算利用 Topas2p 软件进行。依据 Biscaye [34] 的方法计算 4 种黏土矿物(蒙皂石、伊利石、高岭石和绿泥石)的相对含量,即选用乙二醇饱和片图谱上蒙皂石 (17\AA)、伊利石 (10\AA)、高岭石+绿泥石 (7\AA) 4 种黏土矿物的 3 个特征峰峰面积作为基础,分别乘以权重因子 1、4、2 进行计算。绿泥石和高岭石的含量比例从 3.54\AA 和 3.58\AA 的衍射峰面积比值求出,4 种黏土矿物总含量为 100%。

常微量元素分析测试。样品经冷冻干燥后研磨至 200 目以下,准确称取 50 mg 样品,加入 1.5 mL 高纯 HNO_3 、 1.5 mL 高纯 HF ,放入烘箱中 190°C 分解 48 h 以上。冷却后取出溶样内胆,置于加热板上蒸干后,加入 1 mL HNO_3 蒸至湿盐状,然后加入 3 mL 体积分数为 50% 的 HNO_3 和 0.5 mL $\text{Rh} (1.0 \times 10^{-6})$ 内标溶液,放入烘箱中 150°C 分解 8 h 以上,以保证对样品的完

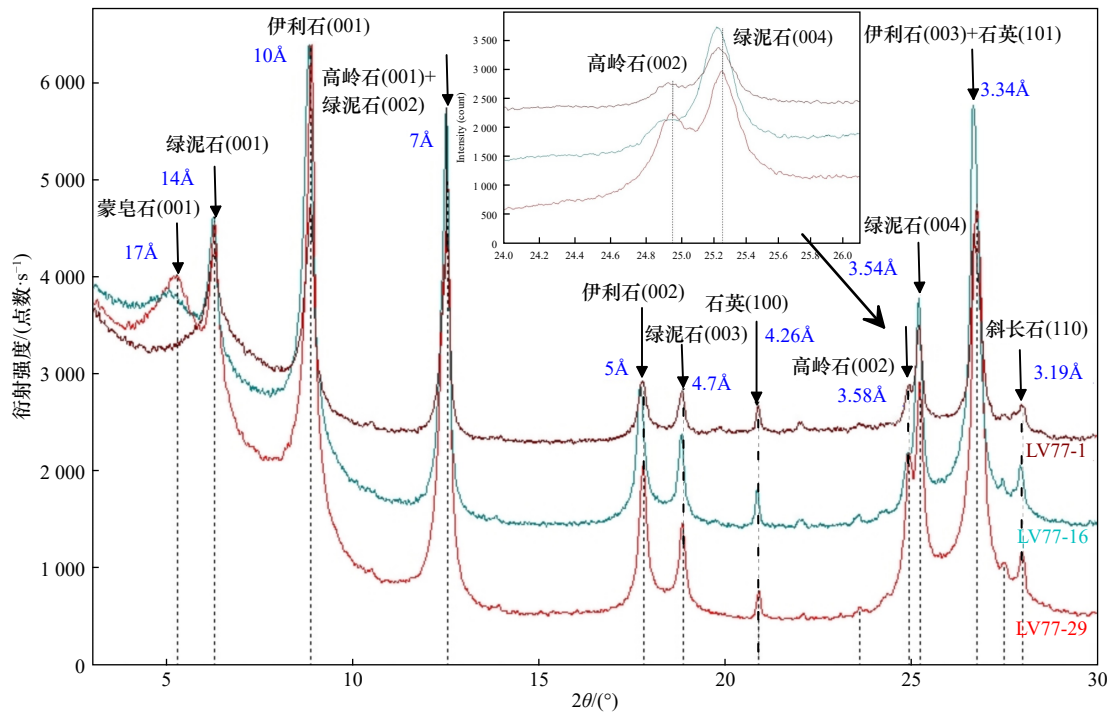


图2 北极东西伯利亚陆架表层沉积物典型黏土矿物 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-Ray diffractograms of clay minerals in the surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf

全提取。冷却后用 2% 的 HNO_3 溶液定容至 50 g, 用 ICP-OES 测定常量元素 (SiO_2 除外, 其测试采用称重法, 委托山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队用 SQP 电子分析天平进行)。从待测溶液中取出 10 g, 用 ICP-MS 测定微量元素。测试过程中采用 GSD-9 作为质量监控样, 每隔 10 个样品做一个重复样、质量监控样。常量元素的测试误差小于 3%, 微量元素测试误差小于 6%。

数据分析(因子分析和 Q-型聚类分析)采用 SPSS Statistics 22.0 统计分析软件进行。因子分析经 KMO 和 Bartlett 球形度检验, 选用主成分分析方法, 结果经最大方差旋转; Q-型聚类分析方法选择 Ward 的方法, 欧氏距离平方作为类间距离, 聚类前进行 Z 分数标准化。

4 结果

4.1 粒度分布特征

依据福克分类方法^[32], 北极东西伯利亚陆架表层沉积物可以分为砂、砂质粉砂、粉砂、砂质泥和泥 5 类。分选系数变化范围在 1.2~3.4 之间, 低值区 (<2) 主要分布在东西伯利亚北部深水区与楚科奇海, 分选较差; 高值区 (>2) 呈斑状分布, 主要在弗兰格尔岛周围与东西伯利亚海北部深水区局部区域, 分选差(图 3)。平均粒径变化范围在 $2.79\Phi\sim 7.94\Phi$ 之间, 平均值为 6.54Φ , 空间分布整体上从近岸到北部深水区

呈递增的趋势, 并在北部深水区出现最大值, 南部科雷马河入海处出现最小值。粒度组分中粉砂的含量最高, 在 3.5%~84.0% 之间, 平均为 63.1%, 主要分布于楚科奇海、因迪吉尔卡河河口。其次为黏土, 含量在 1.4%~43.9% 之间, 平均为 24.4%, 高值主要出现在东西伯利亚海北部深水区, 砂级组分含量最低, 在 0~95.2% 之间, 东西伯利亚海科雷马河河口附近较高。

4.2 黏土矿物特征

东西伯利亚海与楚科奇海黏土矿物中, 伊利石的平均含量最高, 为 68%, 含量在 56%~76% 之间; 绿泥石次之, 平均含量为 20%, 含量在 14%~26% 之间; 蒙皂石与高岭石的平均含量最低, 均为 6%, 其含量变化范围分别为 0~17% 和 3%~17%(表 2)。

4 种黏土矿物的分布特征如图 4 所示。伊利石在整个东西伯利亚陆架黏土矿物中占主导地位, 在东西伯利亚海陆架区含量尤其高, 约为 70%, 在东西伯利亚海北部深水区、楚科奇海弗兰格尔岛周围含量相对较低 ($<60\%$); 绿泥石主要在楚科奇海富集, 平均含量约为 24%, 东西伯利亚海陆架区含量略低, 平均为 18%, 北部深水区含量最低, 约为 15%; 蒙皂石主要分布在东西伯利亚海北部深水区, 出现 17% 的最高值, 其他区域含量较低 ($<10\%$); 高岭石在整个北极西伯利亚陆架区含量都很低 ($<10\%$), 但在东西伯利亚海北部深水区, 含量有所升高, 出现了 17% 的最高值。

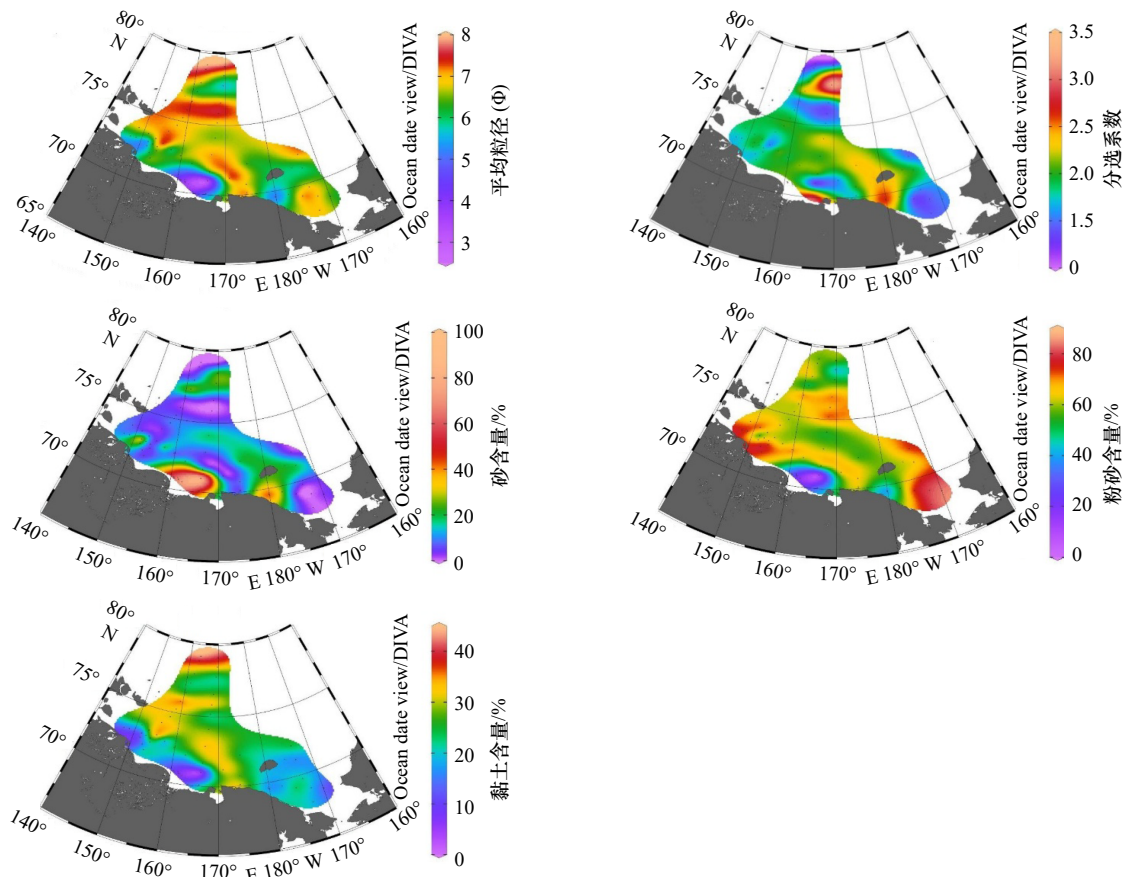


图3 北极东西伯利亚陆架表层沉积物粒度特征

Fig. 3 Grain size characteristics of surface sediments in the East Siberian Arctic Shelf

表2 北极东西伯利亚陆架表层沉积物黏土矿物相对含量

Table 2 Relative content of clay minerals in the surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf

黏土矿物	蒙皂石/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%
最小值	0	56	3	14
最大值	17	76	17	26
平均值	6	68	6	20

4.3 常微量元素特征

东西伯利亚陆架沉积物常量元素中 SiO_2 含量最高, 平均为 64.01%, 含量在 52.70%~77.02% 之间变化。高值区主要分布在东西伯利亚海近岸河口地区与弗兰格尔岛周围, 在科雷马河口附近出现 77% 的最高值, 北部深水区含量最低 (<50%), 整体由近岸向深海呈现含量降低的趋势; 其次为 Al_2O_3 , 平均含量为 12.79%, 含量在 8.69%~16.12% 之间变化(表3), 其分布特征与 SiO_2 相反, 在东西伯利亚海北部深水区出现最高值, 超过了 15%, 而在科雷马河口附近、弗兰格尔岛周围与楚科奇海含量较低 (<10%)(图5);

TFe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 以及 TiO_2 的平均含量分别为 5.27%、2.59%、1.76% 和 0.69%, 含量分别在 2.15%~8.62%、1.69%~3.09%、0.75%~2.77% 与 0.48%~0.82% 之间变化。它们的分布特征与 Al_2O_3 类似, 略有不同的是, MgO 在楚科奇海也具有较高的含量, 约为 2.3%; TiO_2 在东西伯利亚海近岸河口区也出现高值, 约为 0.8%; Na_2O 、 P_2O_5 和 CaO 的平均含量分别为 3.51%、0.23% 和 1.17%, 含量分别在 2.73%~5.12%、0.10%~0.48% 和 0.69%~3.91% 之间变化, 这 3 种元素都在楚科奇海显示较高含量, 但 Na_2O 在东西伯利亚海陆坡一带也出现高值, 平均含量约为 4.0%。 CaO 在楚科奇海与东西伯利亚海北部深水区均出现高值, 平均含量约为 3.3%, 其他地方含量均很低 (<1%); MnO 的平均含量为 0.27%, 含量在 0.03%~1.52% 之间变化, 其分布特征与其他元素明显不同, 在东西伯利亚海陆坡以北含量较高 (>0.5%), 而在陆坡以南东西伯利亚海与楚科奇海陆架区含量则几乎为 0。

微量元素中 Ba 的含量最高, 平均含量达 603 $\mu\text{g/g}$ (表3), 大致在东西伯利亚海陆坡一带出现高值, 约 680 $\mu\text{g/g}$, 而在近岸与北部深水区含量较低, 约为

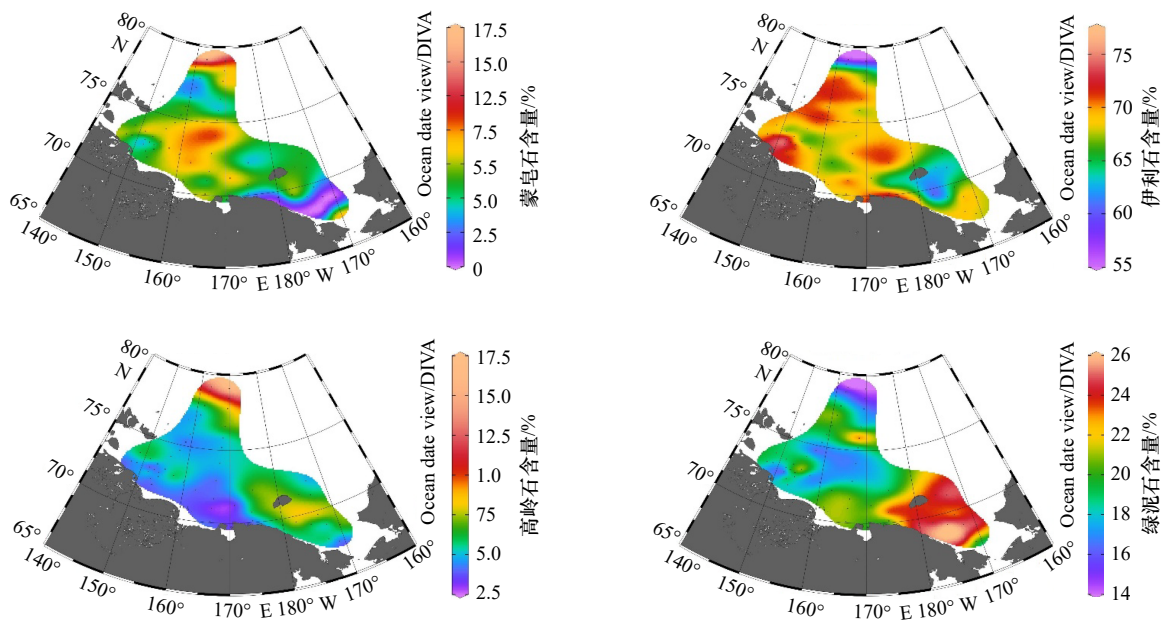


图4 北极东西伯利亚陆架表层沉积物黏土矿物分布特征

Fig. 4 Distribution of clay minerals in the surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf

表3 东西伯利亚陆架表层沉积物常量元素含量

Table 3 Content of major and trace elements in the surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf

常量元素含量/%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
最小值	52.70	8.69	0.69	2.15	1.69	0.75	0.03	2.73	0.10	0.48
最大值	77.02	16.12	3.91	8.62	3.09	2.77	1.52	5.12	0.48	0.82
平均值	64.01	12.79	1.17	5.27	2.59	1.76	0.27	3.51	0.23	0.69
标准差	5.35	2.01	0.65	1.40	0.36	0.49	0.35	0.51	0.06	0.08
微量元素/(μg·g ⁻¹)	Ba	Sr	V	Zn	Zr	Li	Cr	Ni	Rb	La
最小值	516	139	54	34	105	18	37	10	59	21
最大值	731	233	248	161	659	62	96	86	123	48
平均值	603	178	130	92	217	42	68	32	94	34
标准差	47	22	42	27	107	12	12	17	17	6

550 μg/g; V、Zn、Li、Rb 和 Cr 的平均含量分别为 130 μg/g、92 μg/g、42 μg/g、94 μg/g 和 68 μg/g, 分布特征与常量元素 Al₂O₃、TFe₂O₃ 等类似, 在东西伯利亚海北部深水區出现高值, 其中, V、Zn、Rb 的含量超过了 100 μg/g, Li、Cr 的含量超过了 50 μg/g, 在近岸河口附近与楚科奇海含量最低, Cr 略有不同, 其在楚科奇海含量也相对较高(约 75 μg/g); Ni 的平均含量为 32 μg/g, 空间分布与常量元素 MnO 类似, 在东西伯利亚海陆坡以北出现较均匀的高值(约为 60 μg/g), 陆坡以南含量低于 30 μg/g; Zr 和 Sr 的平均含量分别为 217 μg/g 和 178 μg/g, 其分布特征与 SiO₂ 类似, 在近岸河口区出现高值, 其

他地方含量较低, Sr 在东西伯利亚海北部也显示较高含量; 稀土元素以 Ce 的含量最高, 平均达 69 μg/g, 其次为 La、Nd, 平均含量分别为 34 μg/g 与 31 μg/g。稀土族元素具有类似的空间分布特征, 高值集中分布于因迪吉尔卡河河口附近, 楚科奇海含量则很低。以 La 为例, 其在因迪吉尔卡河河口含量超过 40%, 而在楚科奇海, 含量则低于 25%。

5 讨论

5.1 沉积物分区

对常量元素进行 R 型因子分析, 从大量的元素

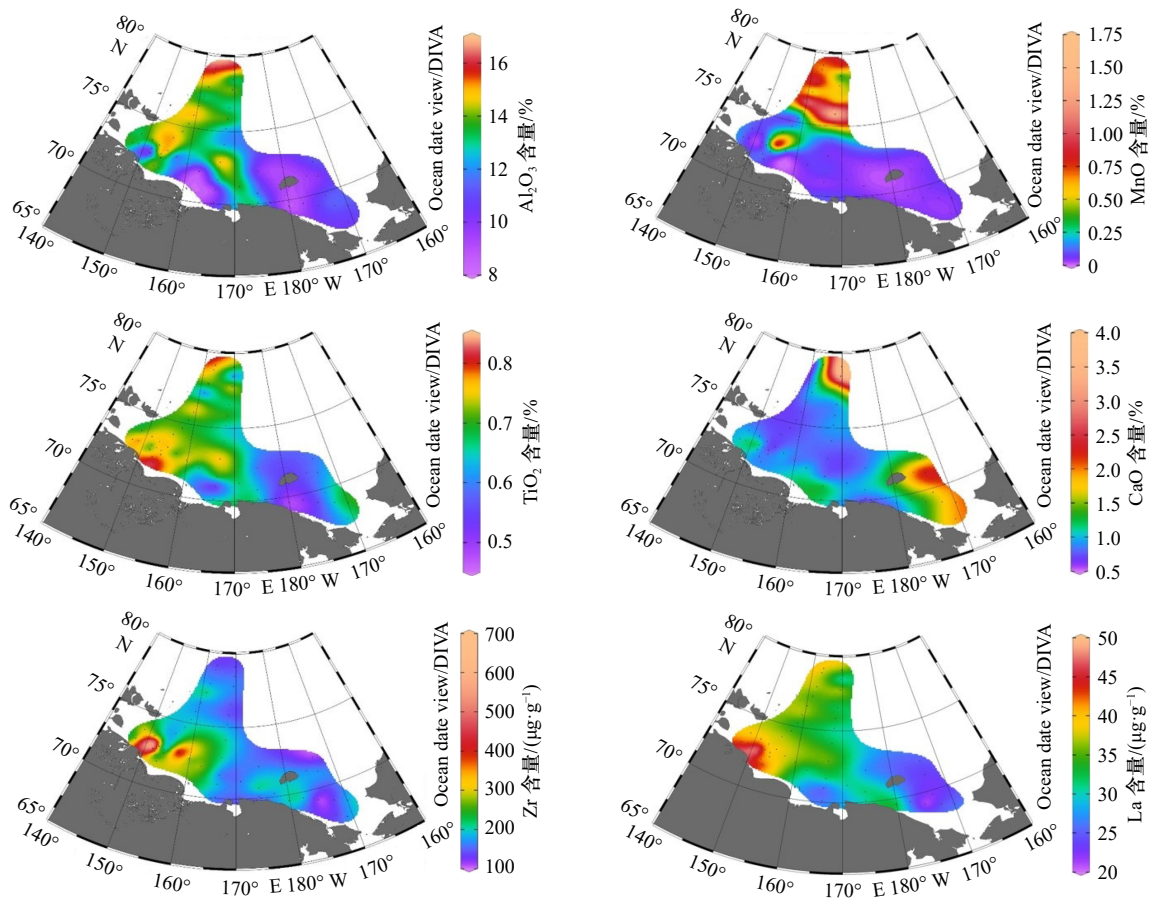


图 5 北极东西伯利亚陆架表层沉积物典型常微量元素分布特征

Fig. 5 Distribution of typical elements in the surface sediments of the East Siberian Arctic Shelf

地球化学数据中提取出共性因子,进而找出元素之间的内在联系^[35]。因子分析得到方差特征值大于1的5个主因子,其累计贡献超过了89%。其中,因子1与因子2的初始方差贡献分别占48%和21%,对沉积物元素地球化学分布特征起主导作用。因子F1主要由 TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Li 、 V 、 Zn 、 Cr 、 Rb 、 Ni 组成,这些元素的分布特征与黏土粒级的分布特征类似,说明这些元素主要在细粒级沉积物中富集,表现出明显的“粒度控制律”^[36];因子F2主要由 TiO_2 、 Zr 、 La 以及 SiO_2 组成, TiO_2 是比较稳定的元素,一般认为海洋中的 TiO_2 均来自陆源碎屑, Zr 常以锆石等重矿物形式富集于粉砂沉积物中, SiO_2 则是陆源粗碎屑沉积物的主要成分,因此,因子F2很可能反映的是陆源碎屑的输入;因子F3主要由 Na_2O 与 P_2O_5 组成,这两种元素的共同特征是在楚科奇海出现了富集;因子F4主要由 MnO 、 Ba 、 Ni 组成, MnO 与 Ni 属于过渡金属元素,其分布在很大程度上受控于环境中氧化还原条件的变化^[37-38];因子F5主要由 CaO 、 Sr 组成,这两种元素常富集在碳酸盐岩中,在海洋沉积物中的富集

往往与生物作用有关。

利用沉积物的平均粒径、4种黏土矿物的含量以及常微量因子分析所得到的5个因子得分载荷对48个沉积物样品进行Q型聚类分析,得到4类聚类结果(图6a,图6b)。结合北极夏季最小冰缘线与河流冲淡水边界(24.5等盐度线)(图6c),将研究区划分为4个不同的沉积区域:东西伯利亚海近岸河口区(I区)、东西伯利亚海中部(II区)、东西伯利亚海北部深水区(III区)以及楚科奇海(IV区)(图6b,表4)。

5.2 沉积物来源

北极东西伯利亚陆架沉积物的来源主要包括河流输入、沿岸侵蚀以及太平洋入流水所携带的沉积物^[39-42],北部深水区还可能受大西洋中层水影响^[15]。季节性的海冰过程、表层环流模式对沉积物的混合有重要影响。黏土矿物三组分图解能很好地反映沉积物黏土矿物组合的不同分布特征,可以确定不同区域沉积物的来源和运输路径^[11,42-46]。稀土元素、高场强元素(Nd 、 Zr 、 Hf 等)以及 Th 、 Cr 等元素在风化作用中迁移性较弱,它们之间的元素比值能进一步去除

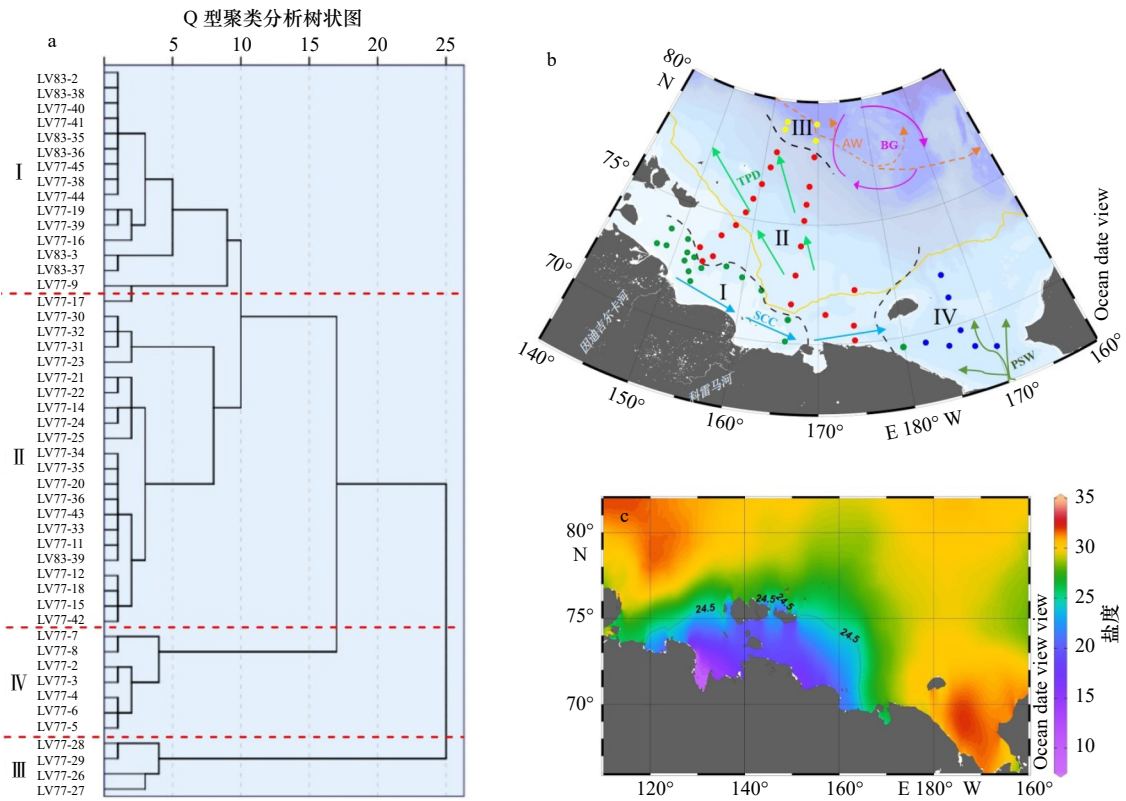


图6 Q型聚类分析树状图(a)和分区图(b), 1922–2012年年均海表盐度分布(c)

Fig. 6 Dendrogram of Q-mode cluster analysis (a), and provinces of the East Siberian Arctic Shelf according to the Q-mode cluster analysis (b), and annual average sea surface salinity distribution from 1922 to 2012 (c)

图b中黄色曲线为1980–2010年夏季最小冰缘线, 数据来源于 www.meereisportal.de; 图c数据来源于 http://odv.awi.de

The yellow curve in fig.b is the summer minimum sea-ice line from 1980 to 2010, data source: www.meereisportal.de; data source of fig.c: http://odv.awi.de

表4 各沉积区内平均水深、粒径、黏土矿物含量以及因子得分统计

Table 4 Mean water depth, grain size, clay minerals content and factor score of elements in each province

	I区	II区	III区	IV区
水深/m	16	74	1 375	49
平均粒径(Φ)	5.80	6.91	7.47	6.41
蒙皂石/%	7	6	12	4
伊利石/%	70	69	60	65
高岭石/%	5	5	13	6
绿泥石/%	19	19	15	25
F1	-0.83	0.46	1.59	-0.44
F2	0.79	-0.16	-0.06	-1.03
F3	-0.31	-0.12	-0.59	1.19
F4	-0.16	0.31	-0.02	-0.52
F5	0.10	-0.61	1.89	0.47

(图7)和微量元素 Rb/Th-La/Th 比值和 Zr/Hf-La/Th 比值散点图(图8)对各区沉积物物源进行研究。

5.2.1 东西伯利亚海近岸河口区(I区)

该区平均水深 16 m, 沉积物以粉砂和砂质粉砂为主, 平均粒径为 5.80Φ , 是研究区内沉积物颗粒最粗的区域。因子 F2 在该区得分 0.79, 是该区的主控因子, SiO_2 、 TiO_2 、Zr、Sr 在该区含量最高, 其他元素都处于低值。黏土矿物组合为伊利石-绿泥石-蒙皂石-高岭石, 其中伊利石占绝对优势, 平均含量为 70%, 绿泥石次之, 平均含量为 19%, 蒙皂石与高岭石含量小于 10%。从伊利石-蒙皂石-高岭石+绿泥石三组分图解(图7)中可以看出, I区黏土矿物组成与科雷马-因迪吉尔卡河三角洲极其类似, La/Th 比值(平均 4.0)与 Zr/Hf 比值(平均 35.1)均为最大值, 与勒拿河、亚纳河悬浮沉积物具有较相似的比值特征。科雷马河与因迪吉尔卡河在很大程度上控制了东西伯利亚海黏土矿物的组成, 其次, 勒拿河与亚纳河输入到拉普捷夫海的物质在西伯利亚沿岸流的作用下可能存在向东运输。在夏季冰消融时期, 大量河流淡水输入在东西

粒度分选的影响, 是沉积物物源判别的常用指标^[47-48]。本文利用伊利石-蒙皂石-高岭石+绿泥石三组分图解

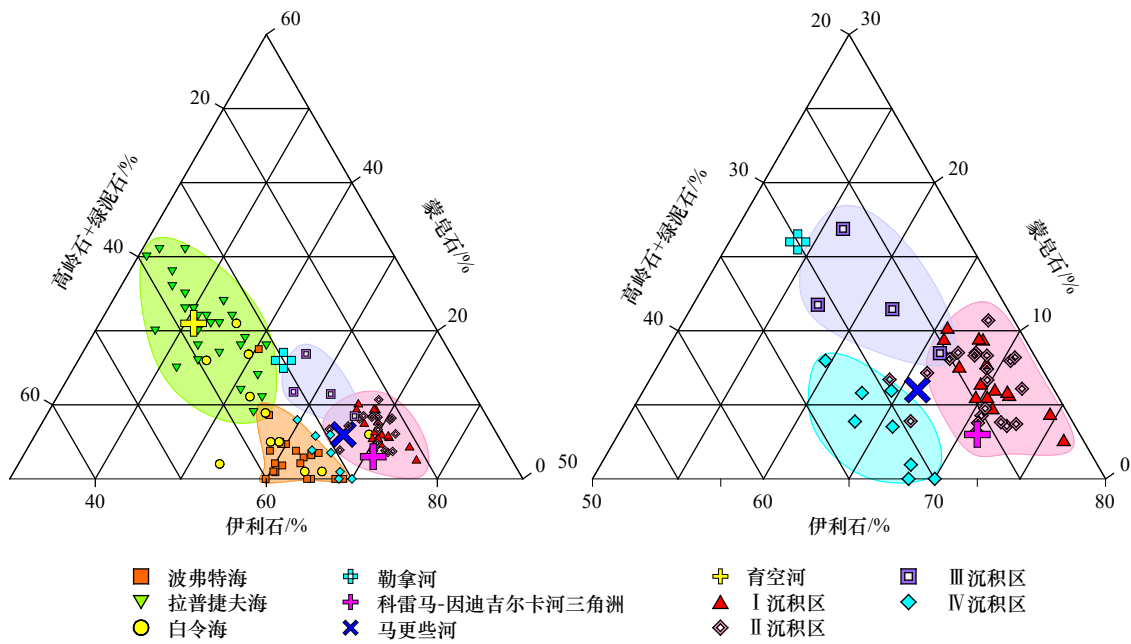


图 7 伊利石-蒙皂石-高岭石+绿泥石三组分图解

Fig. 7 Ternary diagram of clay minerals

勒拿河、马更些河、育空河与科雷马河-因迪吉尔卡河三角洲黏土矿物数据分别来自文献 [44]、[49]、[11]、[50]；波弗特海、拉普捷夫海和白令海数据来自文献 [42, 45, 51]

Clay minerals data of the Lena River, Mackenzie River, Yukon River and Kolyma-Indigirka River Delta are obtained from references [44]、[49]、[11]、[50]；clay minerals data of the Beaufort Sea, Laptev Sea and Bering Sea are obtained from references [42, 45, 51]

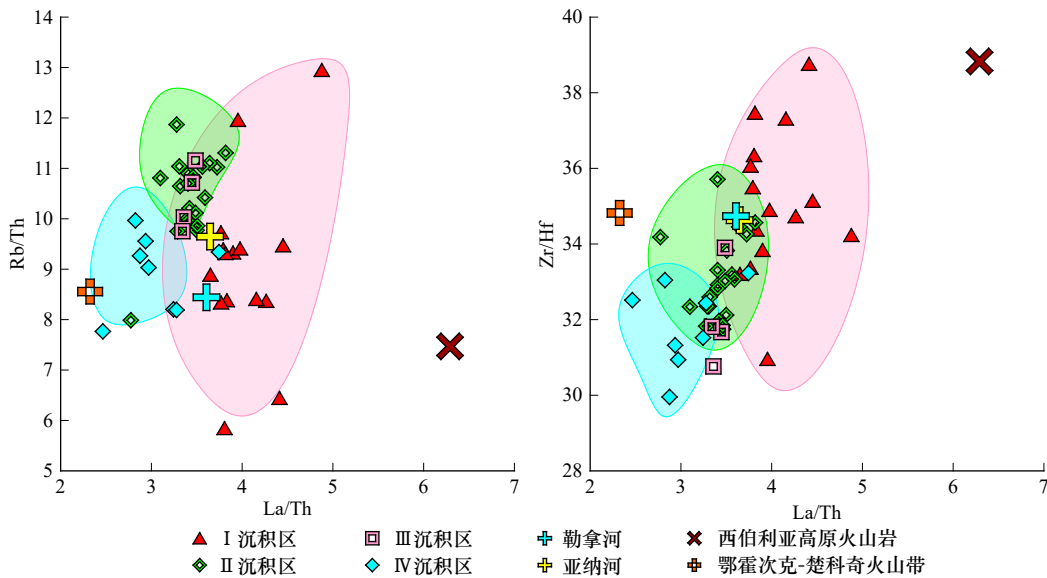


图 8 Rb/Th-La/Th 比值(a)和 Zr/Hf-La/Th 比值(b)散点图

Fig. 8 Scatter plot of Rb/Th-La/Th (a) and Zr/Hf-La/Th (b) ratio

勒拿河与亚纳河数据来自于文献 [52]，西伯利亚高原火山岩与鄂霍次克-楚科奇火山带数据来自于 <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Entry.html>

Data of Lena River and Yana River are obtained from reference [52]；data of Siberian Platform volcanic rocks and Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt are obtained from <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Entry.html>

伯利亚海近岸形成了一个温暖、低盐的水域^[53]，等盐度线 24.5 被认为是被河流径流稀释的陆架水体边界

的标志^[31]，从 1955–2012 年平均夏季海表盐度分布 (图 6c, 数据来源: <http://odv.awi.de>) 可以看出, I 沉积

区完全位于 24.5 等盐度线之内, 是河流输入最为强烈的区域。结合科雷马河与因迪吉尔卡河河口沉积物的分布特征与流域岩性组成, 即在科雷马河河口砂粒级组分含量出现 95% 的最大值, SiO_2 含量大于 70%, 流域岩性以砂岩为主, 高达 72.3%, 因迪吉尔卡河流域岩性组成则以页岩为主 (60.1%), 砂岩含量为 39.9%^[54]。我们认为, 科雷马河是 I 区粗粒沉积物的主要贡献者, 而因迪吉尔卡河输入的沉积物以细粒级为主。此外, 海岸侵蚀是近岸沉积物的一个重要来源。西伯利亚海岸带内冻土带广泛分布, 科雷马河以西的亚纳-因迪吉尔卡河低地广泛分布着第四纪松散沉积物^[10], 夏季温暖的河水输入将加速富含沉积物的冰楔融化, 使得海岸侵蚀输入的沉积物显著增加。

5.2.2 东西伯利亚海中部(II 区)

该区平均水深 74 m, 海底沉积物以粉砂和泥为主, 平均粒径为 6.91Φ 。因子 F4 在该区的得分较高 (0.31), 是控制该区常微量元素分布特征的主要因子, MnO、Ni、Ba 等在该区显示较高的含量。黏土矿物组合与 I 区类似, 但 La/Th、Zr/Hf 比值比 I 区略低, 分别为 3.4 与 33.1。科雷马河与因迪吉尔卡河仍是该区沉积物的主要来源, 但随着离岸距离的增加, 陆源输入物质减少, 海洋自生组分增加。前人研究显示, 冬季北极东西伯利亚陆架上容易形成间歇性的冰间湖^[55-56], 这些冰间湖内波浪和海流作用强烈, 大量的细粒物质极易发生再悬浮, 在寒冷加剧时被保存在海冰之中, 当夏季到来, 在海冰后退的过程中, 破碎的海冰作为细粒沉积物的搬运者, 将沉积物带到其他地方, 使不同来源的沉积物在中、外陆架区混合。从 1981-2010 年平均夏季最小冰缘线 (数据来源: www.meereisportal.de) 的位置可以看出该区大部分常年被海冰覆盖 (图 6), 夏季最小冰缘线一方面阻隔陆源物质向北运输, 将大量粗粒沉积物留在近岸河口区, 另一方面, 常年海冰之下生物生产力极低, 有机物质供应减少, 氧气的消耗减少, 使底层水相对富含氧气, 形成氧化环境, 造成 MnO、Ni 等氧化还原敏感元素逐渐富集。

5.2.3 东西伯利亚海北部深水区(III 区)

该区平均水深 1 375 m, 最大水深 2 542 m。海底沉积物以泥为主, 平均粒径为 7.47Φ , 是研究区沉积物最细的区域。因子 F1、F5 在该区得分最高, 分别为 1.59 与 1.89, Al_2O_3 、 TFe_2O 、MgO、V、Li 和 Cr 在该区达到最大值。黏土矿物组合为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙皂石, 伊利石含量在该区为最低值, 平均含量为 60%, 蒙皂石与高岭石在该区达到最大值, 分别为

12% 和 13%。该区黏土矿物组成与东西伯利亚海陆架区明显不同, 蒙皂石与高岭石的含量明显增多, 在黏土矿物三角图解中位于拉普捷夫海与东西伯利亚陆架之间, 与勒拿河的黏土矿物组成较为相似。La/Th、Rb/Th 比值与 II 区极其接近, Zr/Hf 比值略低, 为 32.0。陆源河流输入的物质通常最远只能到达陆架坡折处, 难以直接到达深海, 且蒙皂石与高岭石在东西伯利亚陆架区含量极低。因此, 该区细粒沉积物除了东西伯利亚陆架区沉积物的向北运输外, 还存在其他来源。结合该区黏土矿物特征, 我们推测该区沉积物很可能受大西洋中层水以及波弗特环流的影响。蒙皂石在北极海域具有重要的物源指示意义, 它的主要来源是西伯利亚腹地普托拉纳 (Putorana) 山脉中巨大的中生代玄武岩^[57], 流经该山脉的鄂毕河、叶尼塞河以及哈坦加河将大量蒙皂石搬运到喀拉海和拉普捷夫海西部, 使这两个海区成为北极地区蒙皂石含量最高的海区。此外, Wahsner 等^[42] 的研究显示, 在巴伦支海北部存在高岭石富集区 (含量大于 30%), 是北极高岭石的主要源区。北冰洋表层水体以下, 存在一种更温暖、盐度更高的中间水体, 称为大西洋层^[1], 这一水体为大西洋暖流分两支进入北冰洋形成, 其中一支经巴伦支海, 通过圣安娜海槽, 与另一支汇合后沿着欧亚大陆边缘延伸^[24]。研究区北部深水区蒙皂石与高岭石的富集很可能来自于该水体穿过巴伦支海与喀拉海时所携带的细粒物质。另外, 阿拉斯加北部和加拿大存在页岩和残余土壤^[43], 波弗特海和加拿大海盆沉积物中高岭石含量约在 10%~30% 之间^[43, 51], 这些富含高岭石的沉积物在波弗特环流的作用下, 也可以向北极中部运输。

5.2.4 楚科奇海(IV 区)

海底表层沉积物主要由粉砂和砂质粉砂组成, 平均粒径为 6.41Φ 。因子 F3 和 F5 在该区得分分别为 1.14 与 0.46, Na_2O 、 P_2O_5 、CaO 与 Sr 在该区含量较高。黏土矿物组合为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙皂石, 伊利石含量较东西伯利亚海略低, 为 65%, 绿泥石在该区最为富集, 平均含量为 25%, 蒙皂石与高岭石含量则小于 10%。从黏土矿物三角图解中可以发现, 该区沉积物以较高的绿泥石含量与东西伯利亚海沉积物相区分, 位于波弗特海、白令海与马更些河、东西伯利亚陆架之间。La/Th 比值、Rb/Th 比值与 Zr/Hf 比值均为最小值, 在散点图中的分布位置与鄂霍次克-楚科奇火山带较为接近。该区沉积物除海岸侵蚀、少量河流输入之外, 受太平洋入流水影响强烈。温暖、高盐的太平洋水体为楚科奇海提供了大量营养

物质,使该区成为生物生产力最高的区域。楚科奇海沉积物中较高的绿泥石含量,一方面可能来自于海岸侵蚀的输入,另一方面可能与太平洋入流水有关。研究显示,加拿大大陆和北美海岸地区绿泥石的浓度高达47%,海岸侵蚀为楚科奇海提供了丰富的绿泥石^[58];其次,白令海表层沉积物中绿泥石含量在20%~30%之间,局部区域大于30%^[42,59],这些富含绿泥石的沉积物在太平洋入流水的携带下,也可以进入到楚科奇海沉积下来。在弗兰格尔岛西侧,绿泥石含量为22%的等值线与太平洋入流水和东西伯利亚海陆架水之间的边界(172°E)^[31]几乎一致,这很可能是太平洋水体在楚科奇海运输的证据。

6 结论

(1) 北极东西伯利亚陆架表层沉积物分为砂、砂质粉砂、粉砂、砂质泥和泥5种类型。平均粒径范围在 $2.79\Phi\sim 7.94\Phi$ 之间;黏土矿物组合以伊利石-绿泥石-蒙皂石-高岭石为主,东西伯利亚海陆架区伊利石占主导地位,约为70%,北部深水区以蒙皂石和高岭石含量较高为特征;楚科奇海以绿泥石含量较高为特征。

(2) 常量元素中 SiO_2 含量最高,其次为 Al_2O_3 ,其余常量元素含量均小于10%。微量元素中Ba的含量最高,平均为603 $\mu\text{g/g}$,其次为Sr、Zr,其余微量元素平均含量均小于100 $\mu\text{g/g}$ 。空间分布上, SiO_2 、 TiO_2 、

Zr主要分布在近岸河口区; Al_2O_3 、 K_2O 、 TFe_2O_3 等主要富集于北部深水区的细粒级沉积物中;MnO和Ni的分布特征受控于环境中氧化还原条件的变化; CaO 、 P_2O_5 等主要富集于楚科奇海,与生物作用有关。

(3) 研究区可以划分为4个不同的沉积区:I区位于东西伯利亚海近岸河口附近,沉积物以粉砂和砂质粉砂为主,黏土矿物组合为伊利石-绿泥石-蒙皂石-高岭石,以伊利石含量占绝对优势, SiO_2 、 TiO_2 、Zr含量较高。河流输入与海岸侵蚀是该区主要的沉积物贡献者;II区位于东西伯利亚海中部,海底沉积物以粉砂和泥为主,黏土矿物组合与I区类似,MnO、Ba与Ni等在该区显示较高的含量。该区沉积物来源主要为河流输入的细粒沉积物,且随着离岸距离的增加海洋自生组分开始增多;III区位于东西伯利亚海北部深水区,海底沉积物以泥为主,黏土矿物中蒙皂石与高岭石在该区达到最大值, Al_2O_3 、 K_2O 、V、Li等元素在该区最为富集。该区细粒沉积物很可能受大西洋中层水以及波弗特环流的影响;IV区位于楚科奇海,海底表层沉积物为粉砂和砂质粉砂,绿泥石在该区最为富集, CaO 、 P_2O_5 含量较高。该区沉积物主要来自于沿岸侵蚀与太平洋入流水所携带的沉积物。

致谢: 本次使用样品为2016年与2018年两次中俄北极联合科学考察航次中获得,感谢参加调查工作的全体考察队员。

参考文献:

- [1] Stein R. Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Paleoenvironment[M]. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [2] Shakhova N, Semiletov I, Leifer I, et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C8): C08007.
- [3] 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.
- [4] Stein R, Fahl K, Schade I, et al. Holocene variability in sea ice cover, primary production, and Pacific-Water inflow and climate change in the Chukchi and East Siberian Seas (Arctic Ocean)[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2017, 32(3): 362-379.
- [5] Frey K E, Moore G W K, Cooper L W, et al. Divergent patterns of recent sea ice cover across the Bering, Chukchi, and Beaufort seas of the Pacific Arctic Region[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 32-49.
- [6] Semiletov I P, Shakhova N E, Sergienko V I, et al. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land-shelf-atmosphere system[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 015201.
- [7] Romanovskii N N, Hubberten H W, Gavrillov A V, et al. Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(11/13): 1359-1369.
- [8] Vonk J E, Sanchez-García L, van Dongen B E, et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia[J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 137-140.
- [9] Dudarev O V, Semiletov I P, Charkin A N, et al. Deposition settings on the continental shelf of the East Siberian Sea[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2006, 409(2): 1000-1005.
- [10] Naugler F P, Silverberg N, Creager J S. Recent sediments of the East Siberian Sea[M]//Herman Y. *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1974: 191-210.
- [11] Naidu A S, Creager J S, Mowatt T C. Clay mineral dispersal patterns in the north Bering and Chukchi Seas[J]. *Marine Geology*, 1982, 47(1/2): 1-15.

- [12] Nikolaeva N A, Derkachev A N, Dudarev O V. Mineral composition of sediments from the Eastern Laptev Sea shelf and East Siberian Sea[J]. *Oceanology*, 2013, 53(4): 472–480.
- [13] Levitan M A, Lavrushin Y A. The arctic ocean[M]//Levitan M A, Lavrushin Y A. Sedimentation History in the Arctic Ocean and Subarctic Seas for the Last 130 kyr. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] 陈志华, 石学法, 韩贻兵, 等. 北冰洋西部表层沉积物粘土矿物分布及环境指示意义[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 446–454.
Chen Zhihua, Shi Xuefa, Han Yibing, et al. Clay mineral distributions in surface sediments from the western arctic ocean and their implications for sediment environments[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(4): 446–454.
- [15] 董林森, 刘焱光, 石学法, 等. 西北冰洋表层沉积物黏土矿物分布特征及物质来源[J]. *海洋学报*, 2014, 36(4): 22–32.
Dong Linsen, Liu Yanguang, Shi Xuefa, et al. Distributions and sources of clay minerals in the surface sediments of the western Arctic Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(4): 22–32.
- [16] Viscosi-Shirley C, Mammone K, Pisiadis N, et al. Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: implications for sediment provenance and grain size sorting[J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(11/13): 1175–1200.
- [17] 陈志华. 北冰洋西部沉积物地球化学特征及环境指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Chen Zhihua. Geochemistry of sediments in the western Arctic ocean and implications of spatial and temporal changes of sedimentary environments[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [18] 高爱国, 韩国忠, 刘峰, 等. 楚科奇海及其邻近海域表层沉积物的元素地球化学特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(2): 132–139.
Gao Aiguo, Han Guozhong, Liu Feng, et al. The elemental geochemistry of the surface sediments in the Chukchi Sea and its adjacent areas[J]. *Haiyang Xuebao*, 2004, 26(2): 132–139.
- [19] 黄晓璇, 王汝建, 肖文申, 等. 西北冰洋楚科奇海台晚第四纪以来陆源沉积物搬运机制及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 52–62.
Huang Xiaoxuan, Wang Rujian, Xiao Wenshen, et al. Transportation mechanism of terrigenous sediment and its paleoenvironmental implications on the Chukchi Plateau, western Arctic Ocean during the late Quaternary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 52–62.
- [20] 尚婷. 南海和北极海域海洋表层沉积物地球化学研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
Shang Ting. Geochemistry study of marine surface sediment in South China sea and Arctic sea area[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [21] 章伟艳, 于晓果, 汪卫国, 等. 近百年来楚科奇海域沉积环境变化的有机碳、氮记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 13–24.
Zhang Weiyang, Yu Xiaoguo, Wang Weiguo, et al. Records of organic carbon and total nitrogen for environmental changes in the Chukchi Sea during the past 100 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 13–24.
- [22] 王春娟, 刘焱光, 董林森, 等. 白令海与西北冰洋表层沉积物粒度分布特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(3): 1–9.
Wang Chunjuan, Liu Yanguang, Dong Linsen, et al. The distribution pattern of the surface sediments in the Bering Sea and the western Arctic and its environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(3): 1–9.
- [23] Pnyushkov A V, Polyakov I V, Ivanov V V, et al. Structure and variability of the boundary current in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 101: 80–97.
- [24] Jakobsson M. Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(5): 1–18.
- [25] Ivanov V V, Piskun A A. Distribution of river water and suspended sediment loads in the deltas of rivers in the basins of the Laptev and East-Siberian Seas[M]//Kassens H. Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 239–250.
- [26] Huh Y, Panteleyev G, Babich D, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: II. Tributaries of the Lena, Omoloy, Yana, Indigirka, Kolyma, and Anadyr draining the collisional/accretionary zone of the Verkhoyansk and Cherskiy ranges[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(12): 2053–2075.
- [27] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, et al. A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 45–1–45–14.
- [28] Gordeev V V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean[J]. *Geomorphology*, 2006, 80(1/2): 94–104.
- [29] Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [30] Weingartner T J, Danielson S, Sasaki Y, et al. The Siberian coastal current: a wind- and buoyancy-forced arctic coastal current[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C12): 29697–29713.
- [31] Semiletov I, Dudarev O, Luchin V, et al. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(10): L10614.
- [32] Folk R L, Andrews P B, Lewis D. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937–968.
- [33] McManus J. Grain size determination and interpretation[C]//Tucker M. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988: 63–85.
- [34] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological So-*

- ciety of America Bulletin, 1965, 76(7): 803–832.
- [35] 杨守业, 李从先. 元素地球化学特征的多元统计方法研究——长江与黄河沉积物元素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 1999(1): 63–67.
Yang Shouye, Li Congxian. Multiple statistic study of element geochemical characteristics element geochemical study on the Changjiang and Huanghe sediments[J]. Journal of Mineral and Petrology, 1999(1): 63–67.
- [36] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地质科学, 1983(4): 307–314.
Zhao Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the China seas[J]. Chinese Journal of Geology, 1983(4): 307–314.
- [37] Calvert S E, Pedersen T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record[J]. Marine Geology, 1993, 113(1/2): 67–88.
- [38] 赵一阳, 喻德科. 黄海沉积物地球化学分析[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(5): 432–446.
Zhao Yiyang, Yu Deke. Geochemical analysis of the sediments of the Huanghai sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(5): 432–446.
- [39] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
Liu Yingjun, Cao Liming. Introduction to Element Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [40] Viscosi-Shirley C, Pisias N, Mammone K. Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian–Arctic's Chukchi and Laptev shelves[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23(11/13): 1201–1225.
- [41] Macdonald R W, Kuzyk Z Z A, Johannessen S C. The vulnerability of Arctic shelf sediments to climate change[J]. Environmental Reviews, 2015, 23(4): 461–479.
- [42] Wahsner M, Müller C, Stein R, et al. Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic Ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways—a synthesis[J]. Boreas, 1999, 28(1): 215–233.
- [43] Darby D A. Kaolinite and other clay minerals in Arctic Ocean sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1975, 45(1): 272–279.
- [44] Dethleff D, Rachold V, Tintelnot M, et al. Sea-ice transport of riverine particles from the Laptev Sea to Fram Strait based on clay mineral studies[J]. International Journal of Earth Sciences, 2000, 89(3): 496–502.
- [45] Rossak B T, Kassens H, Lange H, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the Laptev Sea: indicator for sediment provinces, dynamics and sources[M]//Kassens H, Bauch H A, Dmitrenko I A, et al. Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 587–599.
- [46] Stein R, Grobe H, Wahsner M. Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments[J]. Marine Geology, 1994, 119(3/4): 269–285.
- [47] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169–200.
- [48] Crichton J G, Condie K C. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: a case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming[J]. The Journal of Geology, 1993, 101(3): 319–332.
- [49] Naidu A S, Mowatt T C. Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska[J]. GSA Bulletin, 1983, 94(7): 841–854.
- [50] Silverberg N. Sedimentology of the surface sediments of the east siberian and laptev seas[D]. Washington: University of Washington, 1972.
- [51] Naidu A S, Burrell D C, Hood D W. Clay mineral composition and geologic significance of some Beaufort Sea sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1971, 41(3): 691–694.
- [52] Rachold V. Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean[M]//Kassens H. Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 199–222.
- [53] Münchow A, Weingartner T J, Cooper L W. The summer hydrography and surface circulation of the East Siberian Shelf Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(9): 2167–2182.
- [54] Suchet P A, Probst J L, Ludwig W. Worldwide distribution of continental rock lithology: implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1038.
- [55] Nürnberg D, Wollenburg I, Dethleff D, et al. Sediments in Arctic sea ice: implications for entrainment, transport and release[J]. Marine Geology, 1994, 119(3/4): 185–214.
- [56] Dmitrenko I, Kirillov S, Eicken H, et al. Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(14): L14613.
- [57] Vogt C, Knies J. Sediment dynamics in the Eurasian Arctic Ocean during the last deglaciation—The clay mineral group smectite perspective[J]. Marine Geology, 2008, 250(3/4): 211–222.
- [58] Clark D L, Whitman R R, Morgan K A, et al. Stratigraphy and Glacial-marine Sediments of the Amerasian Basin, Central Arctic Ocean[M]. Boulder: Geological Society of America, 1980.
- [59] Moser F C, Hein J R. Distribution of Clay Minerals in the Suspended and Bottom Sediments from the Northern Bering Sea Shelf Area, Alaska[M]. Alexandria: US Government Printing Office, 1984.

Sediment provenance of the East Siberian Arctic Shelf: Evidence from clay minerals and chemical elements

Li Qiuling¹, Qiao Shuqing^{1,2}, Shi Xuefa^{1,2}, Hu Limin^{1,2}, Chen Yufei^{1,3}, Bai Yazhi¹, Zhu Aimei¹, Cui Jingjing¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Coast and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Grain size, clay minerals and major and trace elements of surface sediment samples collected from the East Siberian Arctic Shelf are analyzed. Based on factor analysis and cluster analysis the study area is divided into four provinces, the main sediment sources of each province are discussed. The results show that province I covers the estuary area of the Kolyma River and the Indigirka River. The sediments are mainly composed of silt and sandy silt, and characterized by higher content of SiO₂, TiO₂, Zr and low content of other elements. The ratios of La/Th and Zr/Hf reach the maximum in the four sedimentary areas. Illite is dominant which accounting for 70% of the whole clay minerals. This area is strongly influenced by terrestrial sources from the Kolyma River and the Indigirka River. Province II is located in the middle of the East Siberian Sea, where the sediments are generally silt and mud. The content of MnO, Ba, and Ni are relatively higher. La/Th and Zr/Hf ratio are slightly lower than that in Province I. Clay minerals composition is similar to Province I. The sediments in this area are mainly fine-grained derived by rivers, which are also influenced by sea ice process. As the distance increasing offshore, the content of marine authigenic components begin to increase. Province III is located in the northern East Siberian Sea, and sediments there are mainly mud. Elements such as Al₂O₃, K₂O, V, Li reach the maximum value in this area. The La/Th and Rb/Th ratios are similar to those in the Province II. The content of illite is the lowest, smectite and kaolinite reach the maximum (>10%). Fine-grained sediments in this area are probably influenced by Atlantic waters and the Beaufort Gyre. Province IV is located in Chukchi Sea where the sediments consist of silt and sandy silt. Elements are characterized by higher contents of CaO, P₂O₅. The ratios of Rb/Th, La/Th and Zr/Hf are the minimum values, the content of chlorite reach peak (>20%). Sediments in this area are significantly influenced by the Pacific inflow water.

Key words: sediment source; clay mineral; major and trace elements; East Siberian Sea; Chukchi Sea