

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2015. 03001

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

王春娟^{1,2}, 刘焱光², 董林森², 刘大海², 王国槐², 李传顺²,
闫仕娟², Anatolii Astakhov³, 王汝建⁴

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局 第一海洋研究所, 青岛 266061;

3. V I Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science, Vladivostok 690041;

4. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:基于中国第 2 次至第 5 次北极科学考察以及俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所提供的表层沉积物样品,开展粒度分析,研究表层沉积物粒度特征及其变化规律对沉积环境的指示意义。白令海与北冰洋表层沉积物类型比较丰富,沉积物主要来源于陆源碎屑,搬运方式以河流、海岸侵蚀、冰筏为主,辅以南流。沉积物类型主要因为沉积物搬运方式及距离的远近产生差异,白令海北部及楚科奇海南部表层沉积物粒度随着离陆地距离的增大而逐渐减小,高纬地区的沉积物因冰筏沉积作用而分选较差。

关键词:粒度特征;沉积物类型;环境意义;白令海;西北冰洋

中图分类号:P736. 2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2015)03-0001-09

北极既是全球气候变化的主要驱动器之一,也是主要响应器之一,在直接影响全球尺度大气环流、大洋环流和气候变异的同时,也拥有典型的全球性环境变化记录,如格陵兰冰心中有 Heinrich 事件、Dansgaard/Oeschger 事件等短期气候变化的详尽记录^[1-2]。现有对北极地区的研究,集中于“极地气候”与“太平洋中低纬度气候”相对独立研究的模式,而将白令海等西北太平洋边缘海的关键区域与楚科奇海、加拿大海盆及马克洛夫海盆等在内的北冰洋重点海域相互关联研究,能够将“白令海—西北冰洋”作为一个整体进行多学科、多尺度的系统考察与研究,将为西太平洋和东亚气候与极地气候之间的区域性差异、内在联系和响应机制等提供重要的科学依据,对于北极地区的整体研究具有重要的作用。北极海域表层沉积物的研究是恢复古气候、古环境的重点,通过对沉积物粒度特征分析,能够系统认识白令海与西北冰洋的底质特征、分布规律及沉积作

用等特点。

因此,本文根据粒度特征及粒度参数的变化,分析西北冰洋及其边缘海——白令海的沉积物分布特征以及沉积环境。对沉积物类型进行划分,结合洋流方向及入海河流大致判断沉积物运移方式和输运机制,分析表层沉积物来源、分类及空间分布规律,判定沉积物所处环境的类型,研究该区域的沉积物来源、沉积动力、生物作用等沉积环境,为解释近现代北极地区的全球性变化研究提供基础性资料。

1 现代海洋环境

现代北冰洋被北美大陆和欧亚大陆环抱,仅通过格陵兰与斯匹次卑尔根之间的弗拉姆(Fram)海峡以及亚美之间的白令海峡与大西洋和太平洋联通。向北流动的大西洋湾流进入北极地区,水团变冷,向下沉降并逐渐增加比重,它们在北极海盆产生逆时针环流并和周围的水团混合^[3]。

太平洋水通过白令海峡后,首先进入楚科奇海,它对北冰洋的影响也首先体现于对楚科奇海的影响^[3]。太平洋水流入楚科奇海后分为三支不同性质的水团:东侧的阿拉斯加沿岸流(Alaska Coastal Current, ACC)具有高温低盐低营养盐的特征,沿着阿拉斯加沿岸流向东北,经过巴罗海谷(Barrow

基金项目:国家自然科学基金项目(41206056);南北极环境综合与考察评估专项(CHINARE2015-03-02);中国大洋协会项目(DY12513R03)

作者简介:王春娟(1981—),女,助理研究员,从事海洋地质与天然气水合物方面的研究,E-mail:cjw@fio.org.cn

通讯作者:刘焱光(1975—),男,研究员,现主要从事海洋沉积学研究

收稿日期:2015-04-16; **修订日期:**2015-05-12. 周立君编辑

Canyon)后转向东沿波弗特海陆坡流动,在加拿大海盆表层由于风力驱动,形成顺时针流向的波弗特环流^[4-7]。西侧的阿纳德尔(Anadyr)流则是低温高盐高营养的洋流,在白令海峡口外沿 50 m 等深线向西北方向流动至弗兰格尔岛(Wrangle Island)西南海域转向北,后又在弗兰格尔岛东部分成两个分支分别沿哈罗德(Herald)水道向北流入北冰洋深水区和沿 60 m 等深线流向东北。在阿纳德尔流与阿拉斯加沿岸流之间还存在一支性质介于两者之间的白令海陆架水,它穿过中央水道后,向北流至哈纳(Hanna)浅滩东北部亦分化为两支^[8-11],带入北冰洋,影响当地物质成分。北冰洋沉积记录中的冰筏碎屑(IRD)事件则反映了冰期与间冰期旋回中北冰洋周围冰盖的不稳定性和崩塌,提供了北极冰盖和环流的重要信息^[12-15]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本次研究的材料来源于中国第 2 次至第 5 次北极科学考察在北冰洋、白令海、楚科奇海等海区以及俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所提供的北冰洋和西北太平洋的表层沉积物样品。本次研究共

选取样品 202 个(图 1),表层沉积物样品采集区域广泛,涉及北冰洋、白令海、楚科奇海、楚科奇海台、阿尔法脊、加拿大海盆和马克洛夫海盆,水深从 19 m 的陆架区到 4 000 m 的深海盆地不等,范围为 53°~88°N、123°E~180°~144°W,涵盖了北极白令海和楚科奇海等海区表层水到深层水的广泛深度。

2.2 粒度分析

对于获取的表层沉积物样品,进行现场岩性描述和实验室粒度分析。由于样品所含的砾石组分较少,颗粒用肉眼很容易分辨,因此,粒度分析时直接将砾石挑选出来,没有参与下一步的激光粒度仪分析。细颗粒组分样品采用激光粒度分析法,仪器采用的是 Malvern 公司的 Mastersizer2000 激光粒度分析仪,其精确度优于 1%,测量范围为 0.02~2 000 μm,重复测量相对误差<3%。本次粒度分析步骤主要包括去除沉积物中的有机质、碳酸盐和生物硅^[16],最后计算不同粒级所占百分含量。

本次研究分别采取图解法和矩法计算沉积物的平均粒径(Mz)、分选系数(或标准偏差)(δ)、偏态(Sk)、峰度(Ku)等参数。图解法是从累积曲线上读出某些累积百分比处的颗粒直径,利用简单的算术公式计算,求得粒度参数。矩法计算沉积物粒度各参数,理论上是统计参数测量中精度最高的方法,不

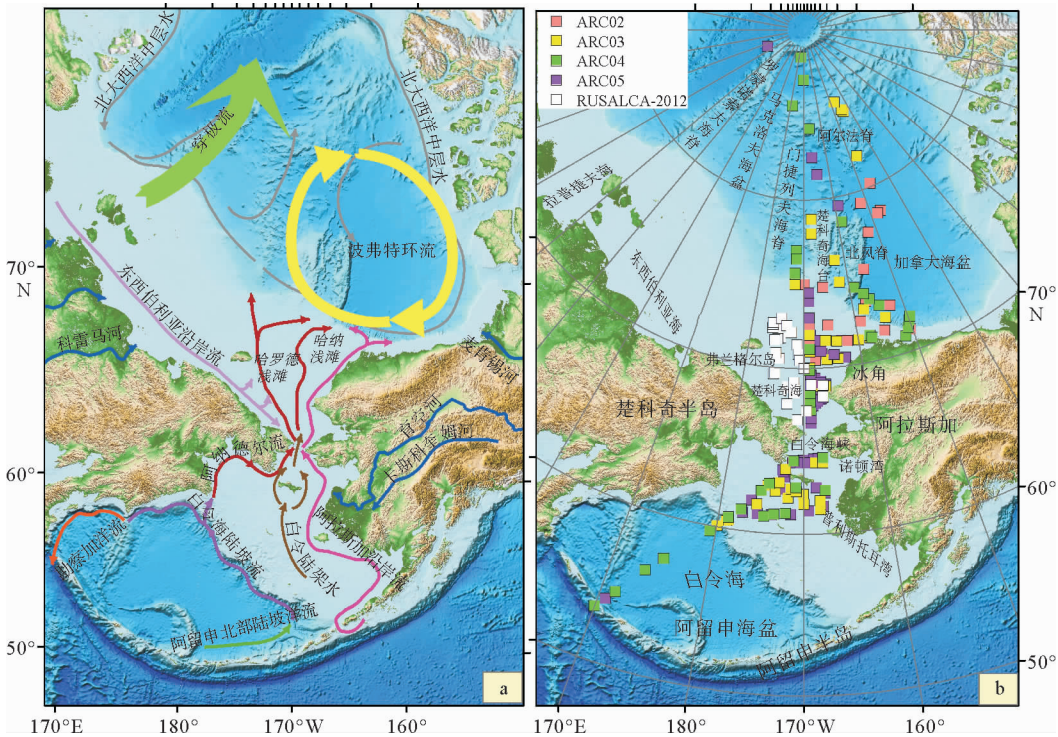


图 1 白令海与西北冰洋海流及表层沉积物取样站位

Fig. 1 The currents and the surface sediment sampling positions in the Bering Sea and the western Arctic

用绘制粒度曲线,而直接由粒度分析的数据中求出来,可以避免绘制曲线时的人为因素,另外,矩法计算时能考虑到每一粒级的百分含量,而不同于图解测量,仅仅把粒度曲线中某几个数据投入计算。

3 沉积特征

3.1 粒度组分布

整个研究区砂粒级组分百分含量($>63\ \mu\text{m}$,以下简称砂含量)的变化较大,0~100%不等(图 2a),含量较高的区域集中在白令海东北部靠近阿拉斯加的陆架区、白令海峡,以及沿阿拉斯加西北部至冰角(Icy Cape)陆架区,另外,在楚科奇海中部海区(70°N 、 170°W)附近也有小部分高值区;白令海中部陆架与陆坡交接带的砂含量居中,约为 50%,楚科奇海高地中部海区也有小部分区域砂含量居中,其分布特征与砂含量差别较大,含量较高的区域分布在楚科奇海的西部和北部海区、白令海的西北陆架区和海盆区;加拿大海盆、北风脊、楚科奇海台及向西北延伸至门捷列夫海脊处的粉砂含量均处于中等,约为 52%。从图 2c 可以看出,白令海峡以北的海区黏土粒级组分百分含量($<4\ \mu\text{m}$,以下简称黏土含量)分布与水深有一定的关系,随着水深的增加,黏土含量逐渐增加,尤其是陆架与陆坡交接处有明显的界线,界线以北直至阿尔法脊等海区黏土含量较高;界线以南的楚科奇海陆架、白令海峡、白令海西北部陆架、陆坡直至水深 2 600 m 以深的深海区,黏土含量均较低;白令海的阿留申海盆西北部直至阿留申群岛的岛坡区黏土含量居中。

3.2 表层沉积物类型及其分布

根据表层沉积物各粒级组分含量间的相互关系和 Folk 等^[17]的海洋碎屑沉积物分类原则,将沉积物站位投影至三角分类图的相应位置进行命名(如图 3),可划分为 6 种基本类型,分别是:砂(S)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)、砂质泥(sM)、泥(M)。根据命名划分研究区沉积物类型(图 4),可以看出,研究区表层沉积物粒度由白令海峡向两侧减小,局部出现相对高值或低值。砂质沉积物主要分布在水深小于 250 m 的白令海和楚科奇海陆架,另外,在深海区如门捷列夫海脊、加拿大海盆、楚科奇海台、楚科奇海中部海区以及白令海的阿留申海盆北部陆坡处也有较粗组分的砂质沉积物出现。粉砂质砂的表层沉积物分布比较均匀且有一定规律,

主要分布于诺顿湾(Norton Sound)以南、普利斯托耳湾(Bristo Channel)西北的地区,但在门捷列夫海脊东侧海盆、水深大于 2 700 m 的楚科奇海台和加拿大海盆等狭长范围亦有分布。砂质粉砂的分布与粉砂质砂的分布很类似,主要分布在水深小于 400 m 的白令海和楚科奇海陆架,另外也有三站位出现在深海区,一例分布于水深为 2 290 m 的加拿大海盆,还有两例分布在水深大于 3 600 m 白令海的阿留申海盆。含量较高的粉砂质组分分布于楚科奇海的西部和北部,白令海的西北陆架区和海盆区域含量较高,另外在水深 2 500 m 的阿尔法脊、水深大于 3 500 m 的加拿大海盆、水深大于 2 600 m 的白令海深海区也有少量分布。砂质泥沉积物主要分布在水深大于 2 000 m 的加拿大海盆,另在水深为 3 800 m 的北风脊处有少量分布,但是,值得注意的是,在靠近楚科奇半岛东南角的楚科奇海陆架水深为 44 m 处也有少量分布。泥质沉积物的分布比较广泛,从水深 34 m 的楚科奇海陆架至水深 4 000 m 的马克洛夫海盆皆有分布;同时,在高纬度地区的表层沉积物粒度不均、分选很差。

3.3 粒度参数

沉积物粒度参数能反映出沉积物的平均粒径、样品的分选性,不仅可以对沉积物的成因作出解释,而且能够间接说明其沉积环境特征,在区分沉积环境方面也具有重要的参考意义。平均粒径的变化情况,代表粒度分布的集中趋势,可以反映沉积介质的平均动能。分选系数反映的是沉积物颗粒大小的均匀性,常常用作反映沉积物分选好坏的一个标志,代表沉积物粒度的集中态势。

本文分别运用图解法和矩法计算沉积物的粒度参数,研究区表层沉积物平均粒径变化范围为 0.03~5.07 μm ,分选系数(标准偏差)变化范围为 0.49~3.13。选取图解法计算的沉积物平均粒径(横坐标)和分选系数(纵坐标)做散点图,如图 5 所示,沉积物分选系数小于 0.5 的仅有一个站位,分布于楚科奇海中部,其砂含量为 100%。处于中等分选程度的沉积物分选系数范围为 0.5~1.0,整个研究区仅有 15 站位,分布于白令海水深小于 404 m 和楚科奇海水深小于 57 m 的陆架区,且这 15 个站位的砂质组分含量较高,一般都大于 80%。研究区大部分站位的表层沉积物分选差或分选很差,分选差的站位沉积物平均粒径为 0.03~2.72 μm ,主要分布于白令海陆架、陆坡及深海区,楚科奇海大部分海区,楚科奇海台以及加拿大海盆的西部;分选很差的站位沉积物平

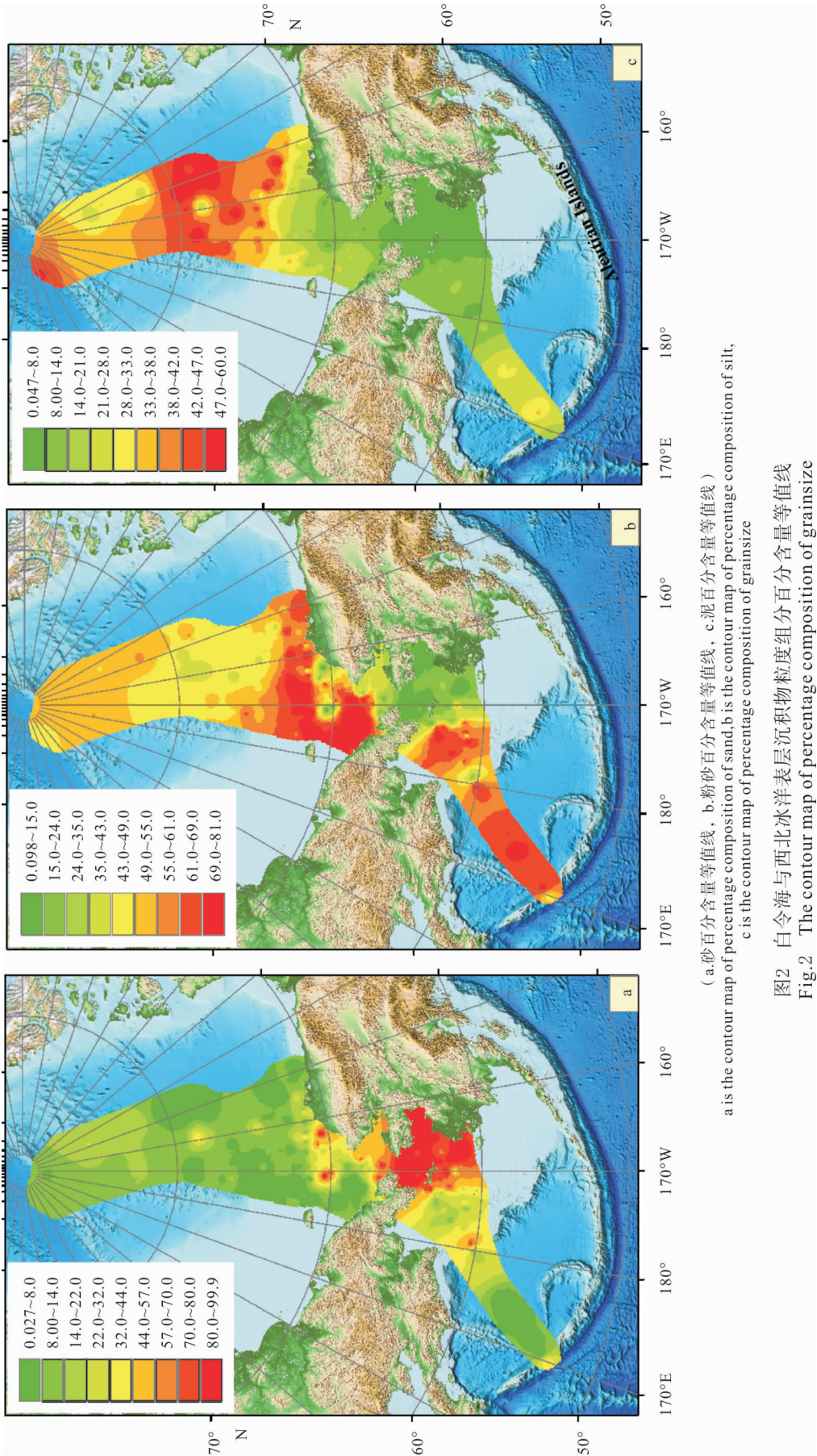


图2 白令海与西北太平洋表层沉积物粒度组分百分含量等值线
Fig.2 The contour map of percentage composition of grainsize

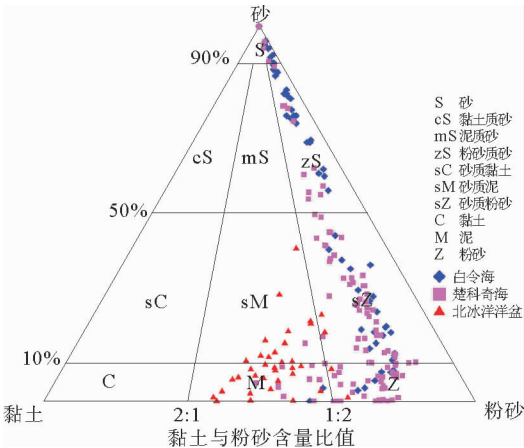


图 3 白令海与西北冰洋表层沉积物 Folk 等三角形分类(无砾)
Fig. 3 Classsification of the surface sediments in the Bering Sea and the western Arctic (without gravel)

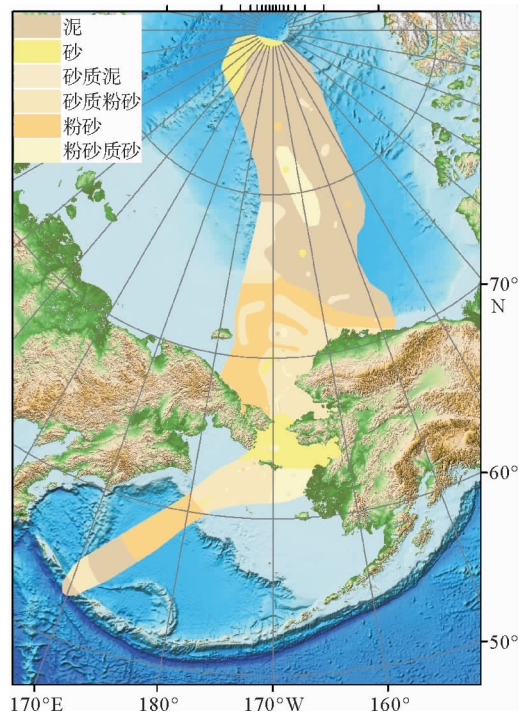


图 4 白令海与西北冰洋沉积物类型分布
Fig. 4 The distribution pattern of sediment types in the Bering Sea and the western Arctic

均粒径变化范围较大,为 $0.04\sim2.33\text{ }\mu\text{m}$,主要分布于包括白令海陆架、楚科奇海陆架、楚科奇海台、北风脊、阿尔法脊、门捷列夫海脊、马克洛夫海盆、罗蒙诺索夫海脊以及加拿大海盆南部小块区域。

偏态和峰度也是沉积物粒度的两个重要参数。偏态可判别粒度分布的对称性,并表明平均值与中位数的相对位置,对于了解沉积物的成因有一定的作用。本文采用图解法计算偏态,如图 6a 为平均粒径(横坐标)和偏态(纵坐标)的散点图,可以看出大

部分站位处于正偏,即沉积物粒度以粗组分为主,且全部位于阿尔法脊的南部,包括加拿大海盆的大部分海域、北风脊、楚科奇海台、楚科奇海和白令海。以平均粒径为 $0.31\text{ }\mu\text{m}$ 为分界点,大于 $0.31\text{ }\mu\text{m}$ 的区域仅有两例位于楚科奇海陆架的站位为负偏,其余全为正偏;小于 $0.31\text{ }\mu\text{m}$ 的区域既有正偏又有负偏。北纬 81.9° 以北的阿尔法脊、门捷列夫海脊、马克洛夫海盆以及罗蒙诺索夫海脊等高纬度海区,偏态均为负偏,负偏的站还有楚科奇海北部陆架、楚科奇海台、加拿大海盆北部等海区。由此可根据偏态将研究区分为 3 个区域:白令海绝大部分区域是正偏,沉积物粒度以砂/粉砂等粗组分为主;而楚科奇海向北直至楚科奇海台和加拿大海盆等海区正偏负偏均有,粒度组分为较混乱,分选性很差;高纬度海区如阿尔法脊、门捷列夫海脊、马克洛夫海盆和罗蒙诺索夫海脊处均为负偏,沉积物粒度以黏土质细组分为主。

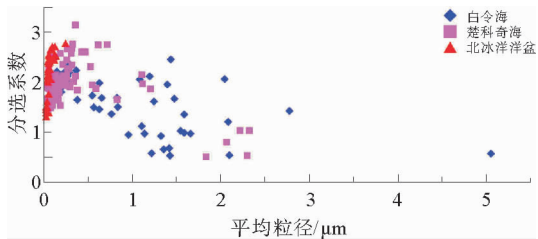


图 5 白令海与西北冰洋表层沉积物
平均粒径与分选系数散点图
Fig. 5 The scatter diagram of the mean size and sorting coefficient of the surface sediments

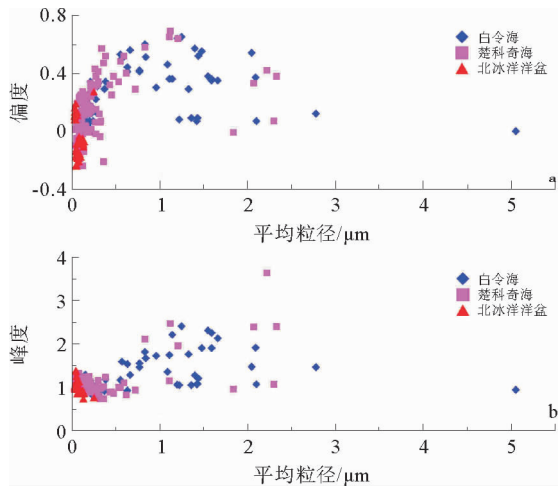


图 6 白令海与西北冰洋表层沉积物粒度参数偏态、峰度与平均粒径散点图
Fig. 6 The scatter diagram of the skewness, kurtosis, and the average particle size

如图 6b, 沉积物粒度峰度基本均大于 0.88, 属于中等峰度或窄峰度, 仅有位于白令海、楚科奇海、加拿大海盆等海区零星分布有 16 个站位的峰度小于 0.88, 属于宽峰度; 以平均粒径 $0.31\ \mu\text{m}$ 为分界点, 小于 $0.31\ \mu\text{m}$ 的站位其峰度均处于小于 1.50 的范围内, 属于宽峰度或者中等峰度, 大于 $0.31\ \mu\text{m}$ 的站位峰度不稳定, 宽峰度、中等峰度、窄峰度均有。据此, 可认为平均粒径 $0.31\ \mu\text{m}$ 是研究区表层沉积物的一个敏感粒级。

造成沉积物分选系数差异的主要因素为沉积物来源、搬运方式以及水动力环境的差异。由于白令海峡的存在, 周边大陆的陆源碎屑可以通过各种方式进入白令海和楚科奇海, 在通过白令海的强大洋流的作用下, 尤其是在较浅水的区域更易受到洋流和波浪的影响, 沉积物结构成熟度增加, 分选性增强。而在白令海陆架及深海部分, 由于白令海深层水等多个水团存在并相互影响, 致使粒度不同的沉积物相互混杂。白令海峡以北的广大西北冰洋地区, 气温低, 广泛存在海冰, 冰筏搬运作用强烈, 楚科奇海以北的沉积物分选系数大的原因主要为此。白令海的大部由于洋流的作用, 沉积物中的细组分被洋流带走, 因此, 其广大的地区以粗组分更为集中。楚科奇海以北的北冰洋大部由于海冰的搬运作用, 沉积物粗细混杂, 粒度混乱。而高纬度海区, 距离大陆远, 粗粒碎屑难以到达, 主要以泥质为主, 组分偏细, 所含的部分粗粒物质亦为冰筏所携带沉积物。

4 表层沉积物输运机制

4.1 白令海

目前, 白令海东部陆架以及阿留申群岛附近的表层沉积物粒度特征研究较多^[18-20], 白令海北部的研究则较少。本文分析了白令海表层沉积物粒度组分分布特征, 可以看出, 砂含量较高, 其次是粉砂含量, 最后是黏土含量。砂含量较大的区域为白令海峡, 白令海中部陆架与陆坡交接带的砂含量比较居中, 约为 50%; 白令海的西北陆架区和海盆区域粉砂含量较高; 白令海的阿留申海盆西北部直至阿留申群岛的岛坡区黏土含量居中。基本符合随着离岸距离的增加和水深的增加, 沉积物的粒度变细的规律^[9], 水深大于 650 m 的深海区, 砂含量较低, 而白令海的陆架区砂含量较高。

白令海表层沉积物平均粒径集中在 $0.63\sim 2.5$ 、 $0.08\sim 0.31\ \mu\text{m}$ 两个区间内, 标准偏差集中于

$0.9\sim 2.0$, 偏度集中于 $0\sim 0.6$, 不同站位峰度变化大, 主要集中在 $0.9\sim 1.2$ 。白令海表层沉积物粒度相对较粗, 分选差, 峰度图像中等到尖锐, 说明粒度较为集中, 应该是近距离的搬运, 主要原因可能是堪察加洋流携带楚科奇半岛东部沿海及白令海峡的陆源碎屑沉积物至白令海并沉降。另外, 白令海陆架东部砂含量最高, 反映了育空河(Yukon)和卡斯科奎姆河(Kuskokwim)流入白令海提供大量的沉积物^[19]。白令海陆架西北部, 阿纳德尔流也为研究区提供沉积物, 多为粉砂粒级。白令海陆架和陆坡区均受到陆源物质输入的影响, 输入速率较高^[21]。由于陆坡区存在堪察加洋流、白令陆坡流等主要的洋流, 对海底表层沉积物进行了一定程度的分选, 使其粒径 $0.63\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒沉积物相对集中。白令海陆架靠近白令海峡的诸多站位含有砾石组分, 且白令海峡砂质组分含量较高, 可能是两个方面的原因造成: 一是阿拉斯加的育空河入海, 携带大量粗颗粒陆源组分; 二是海峡口流速大, 细粒沉积物被搬运走, 留下来相对较粗组分。育空河水源主要为冰川融水, 温暖时期水量加大, 可以携带大量粗颗粒的陆源组分入海, 致使其河口附近为粉砂质砂。另外, Weingartner 等^[22]和 Aagaard 等^[23]的研究表明, 经过白令海峡的诸多海流主要是由白令海流向北冰洋, 因此, 白令海的砾石及粗颗粒组分很难由北冰洋的浮冰携带而来^[24]。

4.2 楚科奇海

楚科奇海是非常浅的陆架边缘海, 位于亚洲大陆东北部楚科奇半岛和北美大陆西北部阿拉斯加之间。其西面是弗兰格尔岛, 东面是波弗特海, 陆架区 56% 面积的水深浅于 50 m。由于夏季楚科奇海的温、盐度明显高于白令海, 白令海水通过白令海峡东水道进入楚科奇海^[25], 将细颗粒组分向北搬运至陆坡区沉降, 而相对较粗的粉砂留在楚科奇陆架; 此外, 从粉砂含量分布图上看到楚科奇海研究区西北侧的粉砂含量高于东南侧(图 2b), 可以大概判断有西伯利亚来源的物质经河流和东西伯利亚沿岸流^[26]长距离的搬运, 最后沉淀下来, 可能是西伯利亚东部科雷马河(Kolyma)等的河流入海和东西伯利亚海的沉积物。另外, 可能还有少量海冰携带的沉积物。而其东南侧靠近白令海峡的部分砂质组分高于西北侧, 其砂质主要来源于阿拉斯加的陆源碎屑, 通过育空河及卡斯科奎姆河携带入海^[26]。由于楚科奇海被阿拉斯加和楚科奇半岛^[27]环抱, 陆源碎屑沉积的相对较多, 楚科奇海靠陆侧粒度较粗, 向海沉

积物粒度变细;由于阿纳德尔流与白令海陆架水在哈罗德浅滩、哈纳浅滩^[28]两侧通过,导致其沉积物为较粗的砂及粉砂质砂;同时,在弗兰格尔岛东侧沿哈罗德水道沉积物粒度也相对较粗,主要是因为在地形的作用下流速增强搬运走相对细粒的沉积物。楚科奇海中北部的广大深海区,距陆较远,以泥质沉积物为主,主要来源于阿纳德尔流以及北大西洋中层水携带的细颗粒组分^[26-27],但楚科奇海北部与楚科奇海台的水深较浅,同时有冰筏碎屑的存在,导致其粒度相对周围较粗。

根据沉积物粒度参数分析,楚科奇海东南部与西北部有明显的差异。东南部表层沉积物平均粒径为 $0.16\sim 0.31\ \mu\text{m}$,标准偏差集中于 $1.5\sim 2.2$,偏度集中于 $0.1\sim 0.3$,峰度为 $0.9\sim 1.2$,由中度到平坦,表明沉积物粒度组成主要为粗粒的粉砂,沉积物分选差,细粒沉积物较为集中,原因主要是地处高纬度地区,其搬运方式以海冰为主,只有粒度较小的陆源碎屑能够通过洋流及风力作用到达。西北部表层沉积物平均粒径为 $0.08\sim 0.16\ \mu\text{m}$,标准偏差主要集中于 $1.3\sim 1.7$,偏度为 $0.1\sim 0.3$,峰度为 $0.9\sim 1.3$,由中度到平坦,表明沉积物粒度组成主要是细粒的粉砂和黏土,细粒沉积物较为集中。楚科奇海东南部表层沉积物较之西北部更粗,主要是因为楚科奇半岛陆源物质输入量低,而东南部阿拉斯加陆源物质输入量相对较高^[29],在楚科奇海表现为距物源越远,沉积物颗粒越细;其次,楚科奇海东南部的阿纳德尔流长距离搬运,水动力减弱,在楚科奇海西北部卸载更细粒沉积物;另外,由于白令海海流从白令海峡进入楚科奇海^[25],进入开阔海域,流速降低,沉积物搬运能力减弱。

4.3 北冰洋洋盆

北冰洋中部全部的粗组分均来源于冰筏搬运^[30],而细颗粒组分来源较多,如北大西洋中层水、波弗特环流等洋流,以及冰山、海冰等,同时,加拿大麦肯锡河也为北冰洋中部提供一些细粒物质^[31]。罗蒙诺索夫海脊、阿尔法海脊的砂质沉积物主要来源于冰筏沉积,可能受到部分洋流的微弱影响。门捷列夫海脊北部的沉积物,主要是因为受波弗特环流的影响,亦为海冰或者冰山携带来的冰筏碎屑沉积。北风脊北部的粉砂沉积物,除冰筏沉积物外,还可能受到加拿大海盆东部岛屿的陆源碎屑影响。加拿大海盆、北风脊、楚科奇海台向西北延伸至门捷列夫海脊处的粉砂含量均处于中等;罗蒙诺索夫海脊、阿尔法海脊等部分地区,存在粒度较粗的组分。

加拿大海盆沉积物平均粒径为 $0.04\sim 0.16\ \mu\text{m}$,部分站点小于 $0.04\ \mu\text{m}$,其标准偏差集中于 $2.0\sim 2.7$,说明加拿大海盆主要为粉砂,掺杂有部分黏土组分,且分选差。加拿大海盆细粒沉积物主要来源于波弗特环流^[32]所携带的细颗粒沉积物,另外,还有部分来自于拉普捷夫海的冰海沉积物以及北大西洋中层水的长距离搬运的黏土级物质^[26]。

5 结论

本文所选研究区的水深变化极大,涵盖的海区较多,站位分布相对不均匀,靠近高纬度地区点的密度较小。通过分析沉积物粒度组成及对沉积物类型进行分区,并结合北极地区的沉积物来源、海底地形、水文动力条件、洋流方向及海流特征讨论了这些条件对沉积环境的影响及沉积物的搬运来源及去向。

(1)研究区砂含量的变化较大, $0\sim 100\%$ 不等,含量较大的区域集中在白令海东北部靠近阿拉斯加的陆架区、白令海峡;粉砂含量分布与砂含量差别较大,在楚科奇海的西部和北部海区含量较高;白令海峡以北海域,随着水深的增加,黏土含量逐渐增加,陆架与陆坡交接处有明显的界线,界线以北直至阿尔法脊等海区黏土含量较高;界线以南直至深海区,黏土含量均较低。根据粒度组成,并结合 Folk 分类命名原则,将北冰洋及西北太平洋海域表层沉积物划分为砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥 6 种沉积物类型。

(2)研究区平均粒径和分选系数从白令海到北冰洋深海区增大。根据偏度可以将研究区分为两个区:加拿大海盆、楚科奇海台、阿尔法脊以及马克洛夫盆地附近为负偏;白令海以及楚科奇海的沉积物为正偏,从白令海到北冰洋深海区域偏态变小。

(3)白令海与西北冰洋的沉积物来源主要是陆源碎屑以及冰筏沉积物。白令海及白令海峡附近沉积物主要来自于楚科奇半岛及阿拉斯加的陆源碎屑,并被堪察加洋流、阿纳德尔流、白令陆坡流、阿拉斯加沿岸流等多条海流再悬浮搬运;楚科奇海及其以北海域,则以冰筏沉积物为主,辅以部分洋流携带而来的细粒陆源碎屑,其中北大西洋中层水、波弗特环流起重要作用。白令海、白令海峡及楚科奇海南部表层沉积物受洋流影响较大,部分受季节性洋流影响;楚科奇海北部以北地区受洋流影响较小,只有北大西洋中层水对其有一定作用。

参考文献(References)

- [1] 孟翊, 陈荣华, 郑玉龙. 白令海和楚科奇海表层沉积中的有孔虫及其沉积环境[J]. 海洋学报, 2001, 23(6):85-93. [MENG Yi, CHEN Ronghua, ZHENG Yulong, et al. Foraminifera in the surface sediments of the Bering and Chukchi Seas and their sedimentary environment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6):85-93.]
- [2] Bond G C, Lotti R. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time during the last glaciation [J]. Science, 1995, 267: 1005-1010.
- [3] 陈立奇. 南极地区与全球变化集成研究展望[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1):133-137. [CHEN Liqi. A perspective of the integrated studies on role of the Antarctic in the global change [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1): 133-137.]
- [4] 史久新, 赵进平, 矫玉田, 等. 太平洋入流及其与北冰洋异常变化的联系[J]. 极地研究, 2004, 16:253-260. [SHI Jiuxin, ZHAO Jinping, JIAO Yutian, et al. Pacific inflow and its links with abnormal variation in the Arctic Ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2004, 16:253-260.]
- [5] Newton J L, Aagaard K, Coachman L K. Deep sea research and oceanographic abstracts[J]. Elsevier, 1974, 21(9):707-719.
- [6] Wang R, Xiao W, März C, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes revealed by multi-proxy records from the Chukchi Abyssal Plain, western Arctic Ocean[J]. Global & Planetary Change, 2013, 108(3):100-118.
- [7] Xiao W, Wang R, Astakhov A, et al. Stable oxygen and carbon isotopes in planktonic foraminifera *Neoglobobulimina* in the Arctic Ocean: An overview of published and new surface-sediment data[J]. Marine Geology, 2014, 352(2):397-408.
- [8] 肖文申, 王汝建, 成鑫荣, 等. 北冰洋西部表层沉积物中的浮游有孔虫稳定氧、碳同位素与水团性质的关系[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(4):361-369. [XIAO Wenshen, WANG Rujian, CHENG Xinrong, et al. Relationship between water properties and planktonic foraminiferal stable isotopes from surface sediments in western Arctic Ocean[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2006, 23(4):361-369.]
- [9] Weingartner T J, Cavalieri D J, Aagaard K, et al. Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012), 1998, 103(C4):7647-7661.
- [10] Weingartner, Aagaard, Woodgate, et al. Circulation on the north central Chukchi Sea shelf[J]. Deep-Sea Research Part II, 2005, 52(24-26):3150-3174.
- [11] 王磊, 王汝建, 陈志华, 等. 白令海盆 17 ka 以来的古海洋与古气候记录[J]. 极地研究, 2014, 26(1):29-38. [WANG Lei, WANG Rujian, CHEN Zhihua, et al. Paleooceanographic and paleoclimatic records in the Bering Basin over the last 17 ka[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1): 29-38.]
- [12] Darby D, Polyak L, Bauch H. Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas—a review [J]. Progress in Oceanography, 2006, 71:129-144.
- [13] 王汝建, 肖文申, 李文宝, 等. 北冰洋西部楚科奇海盆晚第四纪的冰筏碎屑事件[J]. 科学通报, 2009, 54(23):3761-3770. [WANG Rujian, XIAO Wenshen, LI Wenbao, et al. Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(23):3761-3770.]
- [14] 陈志华, 陈毅, 王汝建, 等. 末次冰消期以来白令海盆的冰筏碎屑事件与古海洋学演变记录[J]. 极地研究, 2014, 26(1):17-28. [CHEN Zhihua, CHEN Yi, WANG Rujian, et al. Ice-rafted detritus events and paleooceanographic records in the Bering Basin since the last deglaciation[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1):17-28.]
- [15] 刘伟男, 王汝建, 陈建芳, 等. 西北冰洋阿尔法脊晚第四纪的陆源沉积物记录及其古环境意义[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2):209-216. [LIU Weinan, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. Late Quaternary terrigenous sedimentation in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Alpha Ridge[J]. Advance in Earth Sciences, 2012, 27(2):209-216.]
- [16] Chunjuan W, Zhihua C, Chunshun L I, et al. Distributions of surface sediments surrounding the Antarctic Peninsula and its environmental significance[J]. Advances in Polar Science, 2014, 25(3):164-174.
- [17] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4):937-968.
- [18] Sharma G D, Naidu A S, Hood D W. Bristol Bay: A model contemporary graded shelf[J]. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 1972, 56:2000-2012.
- [19] Smith K R, McConnaughey R A. Surficial sediments of the eastern Bering Sea continental shelf: EBSSD Database Documentation[R]. NOAA Technical Memorandum NMFS-AF-SC-104, 1999.
- [20] Knebel H J, Creager J S, Echols R J. Holocene sedimentary framework, east-central Bering Sea continental shelf [M]// Marine geology and oceanography of the Arctic seas. Springer Berlin Heidelberg, 1974: 157-172.
- [21] 王汝建, 陈荣华. 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, 2004, 29(6):685-690. [WANG Rujian, CHEN Ronghua. Variations of siliceous microorganisms in surface sediments of the Bering Sea and their environmental control factors [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(6):685-690.]
- [22] Weingartner T J, Danielson S, Sasaki Y, et al. The Siberian Coastal Current: A wind and buoyancy-forced Arctic coastal current [J]. J. Geophys. Res., 1999, 104: 29697-29713.
- [23] Aagaard K, Carmack E C. The sea ice and other fresh water in the Arctic circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(C10): 14485-14498.

[24] 高爱国, 王汝建, 陈建芳, 等. 楚科奇海与加拿大海盆表层沉积物表观特征及其环境指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6):49-55. [GAO Aiguo, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. The appearance features and environmental indication of surface sediments in Chukchi Sea and Canada Basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(6):49-55.]

[25] 汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析[J]. 极地研究, 2001, 13(1): 57-68. [TANG Yuxiang, JIAO Yutian, ZOU Emei. A preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2001, 13(1):57-68.]

[26] 董林森, 石学法, 刘焱光, 等. 北冰洋西部表层沉积物矿物学特征及其物质来源[J]. 极地研究, 2014, 26(1): 58-70. [DONG Linsen, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Minerals in surface sediments in the western Arctic Ocean and their sources[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1): 58-70.]

[27] 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]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(4):22-32.]

[28] 汪卫国, 方建勇, 陈莉莉, 等. 楚科奇海悬浮体含量分布及其颗粒组分特征[J]. 极地研究, 2014, 26(1): 79-88. [WANG Weiguo, FANG Jianyong, CHEN Lili, et al. The distribution and composition of suspended particles in the Chukchi Sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1): 79-88.]

[29] 王昆山, 刘焱光, 董林森, 等. 北冰洋西部表层沉积物重矿物特征[J]. 极地研究, 2014, 26(1):71-78. [WANG Kunshan, LIU Yanguang, DONG Linsen, et al. Characteristics of heavy minerals in the surface sediments of the western Arctic Ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1): 71-78.]

[30] Darby D A, Bischof J F, Jones G A. Radiocarbon chronology of depositional regimes in the western Arctic Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1997, 44(8):1745-1757.

[31] 陈志华, 石学法, 韩贻兵, 等. 北冰洋西部表层沉积物黏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.]

[32] 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]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(2):103-114.]

THE DISTRIBUTION PATTERN OF THE SURFACE SEDIMENTS
IN THE BERING SEA AND THE WESTERN ARCRIC AND
ITS ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

WANG Chunjuan^{1,2}, LIU Yanguang², DONG Linsen², LIU Dahai²,
WANG Guohuai², LI Chuanshun², YAN Shijuan², Anatolii Astakhov³, WANG Rujian⁴

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

3. V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia;

4. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the surface samples collected by the 2nd—5th Chinese National Arctic Expedition and the V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, grain size analyses were carried out to define the sediment types and their spatial distribution pattern in order to further probe their environmental implications. The various types of surface sediments are mainly the terrigenous clasts coming from the Arctic and the northwest Pacific, transported by rivers, coastal erosion, ice-rafting, and ocean currents. Most probably due to the different distances from provenance and the different transport medians, the surface sediment types vary from place to place. The grain sizes of the surface sediments decrease gradually with the increase in distance from the land in the north of the Bering sea and the south of Chukchi Sea, and are characterized by poor sorting due to ice-rafting transportation in the high latitude seas.

Key words: grain size; sediment type; environmental significance; the Bering Sea; the western Arctic Ocean