



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

俄罗斯极地海表层海水悬浮体浓度和磁性矿物分布特征及其影响因素

边佳琪, 时美楠, 吴怀春, 汪卫国

**Concentration of suspended particulate matter and magnetic minerals from surface seawater in Russian Arctic Seas:
Distribution and influencing factors**

BIAN Jiaqi, SHI Meinan, WU Huaichun, and WANG Weiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061602>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

边佳琪,时美楠,吴怀春,等.俄罗斯极地海表层海水悬浮体浓度和磁性矿物分布特征及其影响因素[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(5): 94-102.

BIAN Jiaqi, SHI Meinan, WU Huaichun, et al. Concentration of suspended particulate matter and magnetic minerals from surface seawater in Russian Arctic Seas: Distribution and influencing factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 94-102.

俄罗斯极地海表层海水悬浮体浓度和磁性矿物分布特征及其影响因素

边佳琪^{1,2,3},时美楠^{1,2,3},吴怀春^{1,2,3},汪卫国⁴

1. 中国地质大学(北京)生物地质与环境地质国家重点实验室,北京 100083

2. 中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083

3. 中国地质大学(北京)海洋与极地研究中心,北京 100083

4. 自然资源部第三海洋研究所,厦门 361005

摘要:为了解俄罗斯极地海悬浮体颗粒物(Suspended Particulate Matter, SPM)的分布特征及其沉积学意义,对2019年中俄北极联合考察(AMK78航次)在喀拉海-拉普捷夫海-东西伯利亚海表层海水采集的SPM样品开展了颗粒浓度、组成和岩石磁学分析。研究发现,SPM主要由陆源碎屑和硅质浮游生物碎屑组成。悬浮体浓度在德米特里拉普捷夫海峡及其东侧海域最高,鄂毕河和叶尼塞河河口外侧次之,其他海域整体较低。悬浮体中携磁矿物为单畴、多畴磁铁矿。陆源碎屑集中分布在近岸和河流入海口附近海域,离海岸和河口较远海域悬浮体中硅质生物碎屑占比升高。SPM浓度主要受到河流搬运入海的陆源碎屑通量和海岸侵蚀的影响,而SPM中磁性矿物与流域内岩石类型有关,并受西伯利亚沿岸流的影响,磁性矿物集中在洋流流速缓慢的区域,粒径粗的磁性矿物分布在沿岸地区,可能与海岸侵蚀有关。

关键词:悬浮体;颗粒组分;岩石磁学;西伯利亚沿岸流;俄罗斯极地海

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061602

Concentration of suspended particulate matter and magnetic minerals from surface seawater in Russian Arctic Seas: Distribution and influencing factors

BIAN Jiaqi^{1,2,3}, SHI Meinan^{1,2,3}, WU Huaichun^{1,2,3}, WANG Weiguo⁴

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Marine and Polar Research Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China

Abstract: To understand the distribution characteristics and sedimentological significance of suspended particulate matter (SPM) in the Russian Arctic Seas, the particle concentration, composition, and rock magnetism of SPM samples collected in the surface seawater of the Kara Sea-Laptev Sea-Eastern Siberia Sea during the Sino-Russian joint Arctic expedition (AMK78 voyage) were analyzed. Results show that the SPM was mainly composed of terrigenous detritus and siliceous plankton debris. The SPM concentration was the highest in the Dmitry Laptev Strait and its eastern sea areas, followed by the outer sides of the Ob and Yenisei estuaries, and were generally lower in the other sea areas. The magnetic minerals in the SPM were single-domain and multi-domain magnetite. The terrigenous detritus was concentrated in the waters near the coast and the estuary of the river, and the proportion of siliceous bioclasts in the SPM in the sea farther from the coast and the estuary increases. The SPM concentration was mainly affected by the flux of terrigenous debris transported into the sea by rivers and coastal erosion, while the magnetic minerals in SPM were related to the rock types in the watershed and were affected by the Siberian Coastal Current. Coarse magnetic minerals were distributed in the coastal areas, which might be related to coastal erosion.

Key words: suspended particulate matter; composition; rock magnetism; Siberian coastal current; Russian Arctic Seas

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金“中国南海IODP368航次U1501站位渐新世以来高精度年代地层学研究”(42002028)

作者简介:边佳琪(1997—),女,硕士研究生,海洋科学专业,E-mail:bjq0317@qq.com

通讯作者:汪卫国(1970—),男,研究员,主要从事海洋地质与第四纪地质研究,E-mail:wangwg@vip.126.com

收稿日期:2022-06-16; 改回日期:2022-08-11。文凤英编辑

海水悬浮体(SPM)主要由非生物(矿物)和生物(浮游植物、碎屑、部分浮游细菌、孢子)颗粒构成^[1]。在海洋环境中, SPM不仅是陆架和洋盆沉积的主要物质来源, 同时也作为主要的反应物质或催化剂参与生物地球化学过程^[1]。海水中 SPM 含量受水动力条件、物理化学过程、生物过程等控制, 是进行海洋沉积过程、物质循环研究的可靠材料^[2-3]。

北冰洋拥有巨大的河水径流流量^[4], 河流将风化产生的颗粒和溶解物质转移到海洋^[5], 使得大量 SPM 汇入北冰洋。前人对北冰洋陆架区域的 SPM 进行了大量的研究, 取得了丰硕的成果。在楚科奇海南部 SPM 以硅藻为主, 其分布受到经白令海峡西侧流入的富营养盐的阿纳德尔斯流影响^[6], 反映出 SPM 中颗粒组分的分布与河流、洋流有着密切的联系。在喀拉海中部和西部的 SPM 浓度最低, 鄂毕河和叶尼塞河河口 SPM 浓度最高, 且鄂毕河口 SPM 浓度高于叶尼塞河, 大多数侵蚀物质被困在 20 km 的近岸海域, SPM 主要向东传播^[7]。无冰期的拉普捷夫海 SPM 浓度分别由南至北、由东至西减小^[8], 而且汇入的三条河流中 SPM 的 Sr 浓度分布差别很大^[9]。

本文以 2019 年中俄北极联合考察(AMK78 航次)期间所获取的喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海表层海水 SPM 为素材, 展开了 SPM 的浓度、颗粒组成、岩石磁学研究, 通过分析 SPM 在空间上的分布差异探讨其在各海域的分布规律, 并围绕洋流、径流、海岸侵蚀等多种因素对海域表层海水 SPM 分布特征的影响, 探究 SPM 分布的控制因素。该研究成果对该海域现代沉积过程具有重要意义。

1 区域概况

喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海是位于俄罗斯北部的北冰洋边缘海(图 1a), 分布在西伯利亚大陆架上。喀拉海接收了整个欧亚北极地区约 50% 的河流径流, 大部分流量由鄂毕河(Ob)和叶尼塞河(Yenisei)贡献^[7], 两者流量表现出强烈的季节和年际变化。在 6 月观察到两条河流最大的排放速率, 大约有 45%~65% 的年淡水径流和 80% 的年 SPM 被释放^[10]。拉普捷夫海被 5 个向北和西北方向的海底通道切割, 是保持北冰洋淡水和冰态平衡的关键区域^[11]。勒那河(Lena)流入拉普捷夫海东部, 春季的淡水和河流泥沙输入最高^[8]。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。流入

东西伯利亚海最大的两条河流是因迪吉尔卡河(Indigirka)和科雷马河(Kolyma)。汇入拉普捷夫海的勒那河虽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, 可以向东西伯利亚海西部供应沉积物^[12]。

巴伦支海分流(Barents Sea Branch, BSB)由北大西洋水经淡水输入、海冰融化和净降水等过程改造而来^[13], 一部分沿海岸进入新地岛以南的喀拉海, 另一部分沿新地岛北部向东与西斯匹次卑尔根洋流在喀拉海北部合并^[14-15](图 1a)。西伯利亚沿岸流(Siberian Coastal Current, SCC)发源于东西伯利亚海西部, 受到风力和浮力的驱动, 向东通过德米特里拉普捷夫海峡(图 1a)。拉普捷夫海海水与勒那河河水交汇流入德米特里拉普捷夫海峡, 与东西伯利亚海的因迪吉尔卡河、科雷马河河水合并沿陆架向东穿过朗格海峡流至楚科奇海^[16]。

2 材料

中俄北极联合考察 AMK78 航次于 2019 年在喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海的海区共进行了 50 个站位的悬浮体调查。采样站位分别为 P1—P46 站位以及 6489、6495、6498、6500 站位(图 1b)。各站位表层海水样品由船上表层海水温室气体实时分析的采水系统采集。水样选用提前称量至恒重的直径 47 mm、孔径 0.45 μm 的 Millipore 醋酸纤维滤膜进行抽滤, 过滤后的滤膜放置在 -20 °C 的环境中保存。由于 P38 站位在采集时见大量暗色碎屑, 可能为管路堵塞后的沉渣, 不能表示该站位 SPM 的特征, 故本研究中将该站位样品予以剔除。

3 研究方法

3.1 浓度计算

为了测量 SPM 质量浓度, 在过滤前后分别使用 Sartorius 电子天平(精度为 0.01 mg)称量冷冻干燥后的滤膜。海水中 SPM 浓度(ρ , 单位 mg/L):

$$\rho = \frac{M_p - M_s}{V}$$

式中 M_p 为滤后膜重的平均值(mg); M_s 为滤前膜重的平均值(mg); V 为过滤水样的体积(L)。

3.2 扫描电镜实验

为了观察 SPM 的形貌特征, 在自然资源部第三

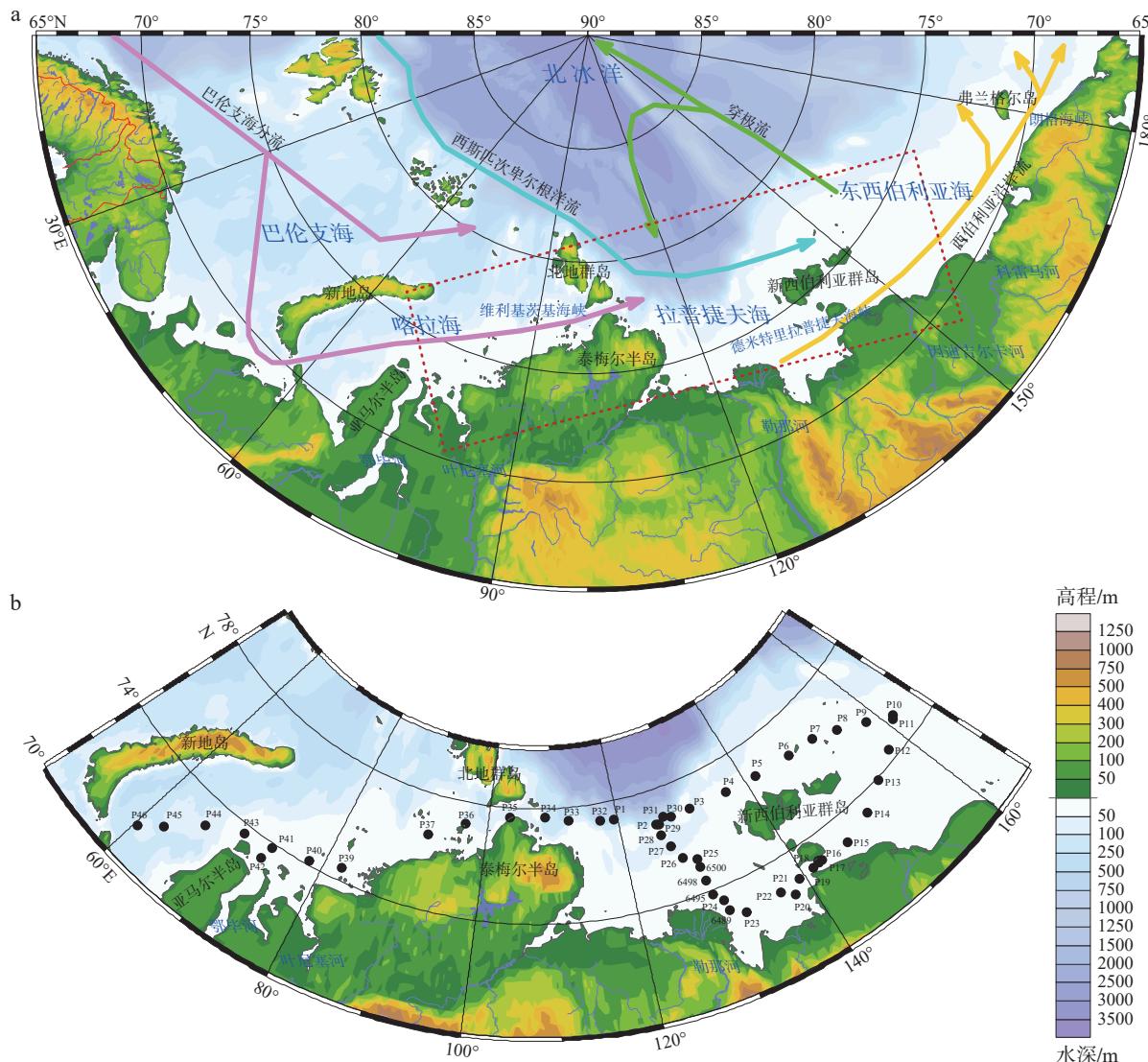


图 1 北极西伯利亚陆架概况和主要洋流^[13-18] (a) 及采样站位 (b)

Fig.1 Environment setting of Siberian Arctic Shelf and the schematically major currents^[13-18] (a) and the sampling sites (b)

海洋研究所使用 FEI Quanta 450 型环境扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 对滤膜上 SPM 的形态特征进行图像扫描。

3.3 磁学实验

磁学实验在中国地质大学(北京)古地磁与环境磁学实验室及中国地震局岩石磁学实验室完成。将空白滤膜和带有 SPM 的滤膜置于已完成磁化率测试的 8 cm³ 无磁性的塑料方盒中。用 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪分别进行低频(976 Hz)磁化率与高频(15 616 Hz)磁化率测试, 扣除样品盒体积磁化率以及空白滤膜体积磁化率后, 分别获得 SPM 的低频体积磁化率(κ_{lf})与高频体积磁化率(κ_{hf})。对体积磁化率进行质量浓度归一化后获得低频和高频质量磁化率(χ_{lf} 和 χ_{hf}), 并计算获得 SPM 的频率

磁化率百分比($\chi_{fd}\%=(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}\times 100\%$)。使用配套有 CS-3 温度控制系统的 KLY-4S 卡帕桥磁化率仪测定 SPM 磁化率随温度变化($\kappa-T$)曲线, 温度变化为-195 °C 至室温, 升温速度为 5 °C/min。

SPM 样品的天然剩磁(natural remanent magnetization, NRM)在磁屏蔽室(<300 nT)内用 755-4K 低温超导磁力仪测量获得。使用 MicroMag 3900 变梯度振动磁力仪测试 SPM 的磁滞回线(Loop)、等温剩磁(isothermal remanent magnetization, IRM)获得曲线及反向场退磁曲线, 最大外加磁场为 1 T。从 Loop 测试数据中读取样品矫顽力(coercivity, B_c)、饱和磁化强度(saturation magnetization, M_s)以及饱和剩余磁化强度(saturation remanent magnetization, M_{rs})参数。剩磁矫顽力(coercivity of remanence, B_{cr})参数从反向场退磁曲线中读取。

4 结果

4.1 SPM 含量分布

AMK78 航次各站位表层海水 SPM 浓度为 0.18~32.25 mg/L(图 2)。浓度高值主要分布在两个区域, 分别是位于新西伯利亚群岛与西伯利亚大陆之间的德米特里拉普捷夫海峡和位于喀拉海的叶尼塞河和鄂毕河河口。其中在德米特里拉普捷夫海峡 SPM 浓度自西向东逐渐增加, 在其东部的 P15 站位达到最高值 32.25 mg/L。从拉普捷夫海勒那河三角洲向大陆架北部延伸 SPM 浓度逐渐降低, 直到 P31 站位达到最低值 0.22 mg/L。新西伯利亚群岛以北、泰梅尔半岛以西、亚马尔半岛以西 SPM 浓度均为低值。

4.2 SPM 颗粒组分特征

对不同区域采集的悬浮体滤膜进行扫描电镜分析发现, SPM 由陆源碎屑颗粒和硅质生物碎屑(硅藻和鞭毛藻)(图 3)组成。在远离岸线的海域, 如 P1 和 P10 站位, 滤膜上的 SPM 零散分布, 硅质生物碎屑在 SPM 中的占比高(图 3a—d)。在近岸和海峡海域, SPM 含量高, 完全覆盖滤膜, SPM 中硅质生物碎屑的占比相对较低, SPM 以陆源碎屑颗粒为主。以位于德米特里拉普捷夫海峡东侧的 P15 站位为例, 其 SPM 多为不同粒径的片状矿物, 硅质生物碎屑含量极少(图 3e)。位于叶尼塞河河口北侧的 P39 站位, 其 SPM 也以陆源碎屑颗粒为主, 硅质生物碎屑含量少于 15%(图 3f、g)。位于鄂毕河口

北侧的 P42 站位, 仍以陆源碎屑矿物为主, 但硅藻含量较叶尼塞河口外侧多(图 3h、i)。

4.3 SPM 磁学特征

4.3.1 SPM 岩石磁学特征

磁化率随温度变化曲线可以根据磁性矿物特有的相变温度来鉴别磁性矿物类型^[19]。本文对悬浮体进行了低温 $\kappa-T$ 测试(图 4), 结果显示从 -192°C 开始温度上升磁化率值急剧下降, 在 -150°C 左右出现一个高值, 之后磁化率值保持稳定。在 -150~-149°C(120~124 K)时, 磁铁矿晶体结构中电子热能减小使得铁离子被冻结在各自的位置上, 导致整个晶体不再对称, 变为单斜结构, 这个温度点称为 Verwey 转换温度(T_v)^[20]。低温 $\kappa-T$ 测试表明样品中存在磁铁矿。

Loop 形态及其相关的磁滞参数可以用来判别样品磁性矿物颗粒的类型和粒径大小^[21]。图 5 显示, 顺磁矫正前样品显示了顺磁性矿物(图 5 中 P17、P42 站位)和抗磁性矿物(图 5 中 P5、P33 站位)的不同影响, 其中抗磁性主要受醋酸纤维材质滤膜的影响。顺磁矫正后的 Loop 形态基本一致, 在 400 mT 时曲线均趋于闭合, 整体呈现为中间宽而两头窄的“粗腰型”形态。样品的 B_{cr} 在 34~43 mT 范围内, 表明样品中磁性矿物矫顽力较低, 存在单畴的磁铁矿。

Day 图可以指示磁性矿物的磁畴状态^[22]。将获得的磁滞参数 M_{rs}/M_s 、 B_{cr}/B_c 两组比值投到 Day 图上^[23-24], 结果表明表层海水 SPM 中磁性矿物的磁畴状态为单畴(single domain, SD)、多畴(multidomain, MD)混合(图 6)。

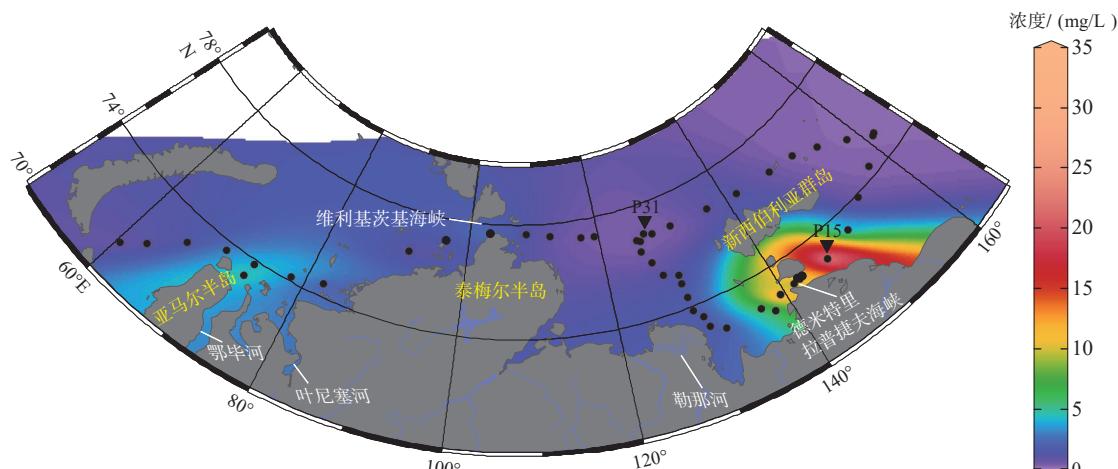


图 2 SPM 浓度空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of SPM concentration

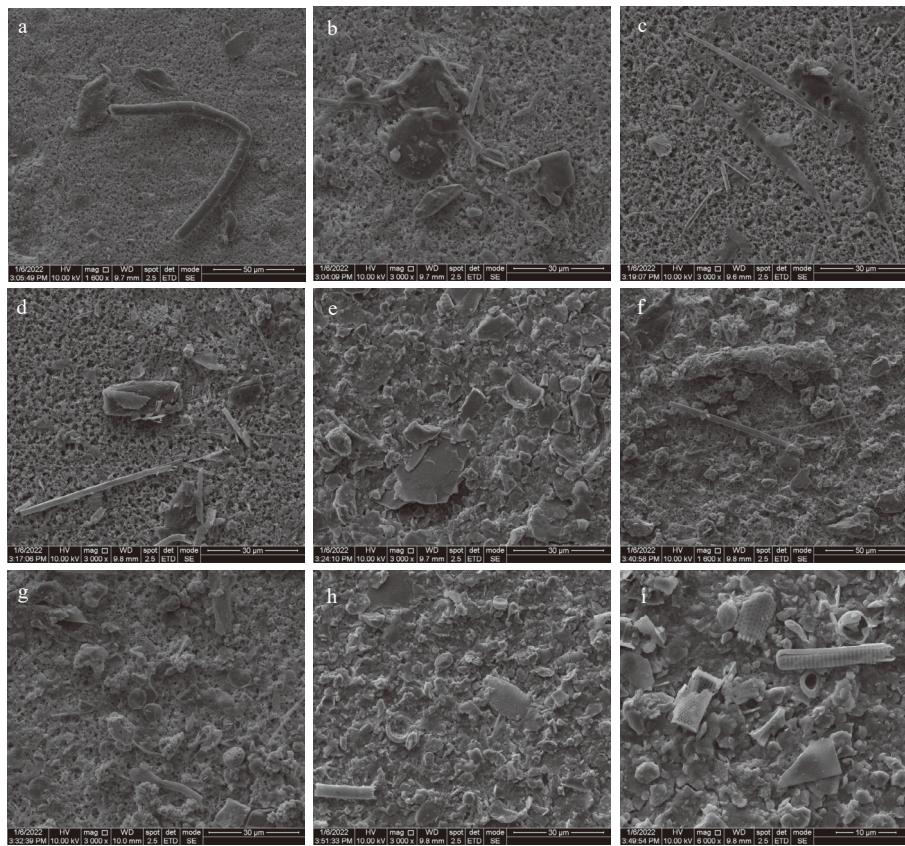


图 3 典型 SPM 颗粒组分扫描电镜照片

a、b. P1 站位, c、d. P10 站位, e. P15 站位, f、g. P39 站位, h、i. P42 站位。

Fig.3 The SEM images of representative SPM compositions in sites P1(a, b), P10 (c, d), P15 (e), P39 (f, g), and P42 (h, i)

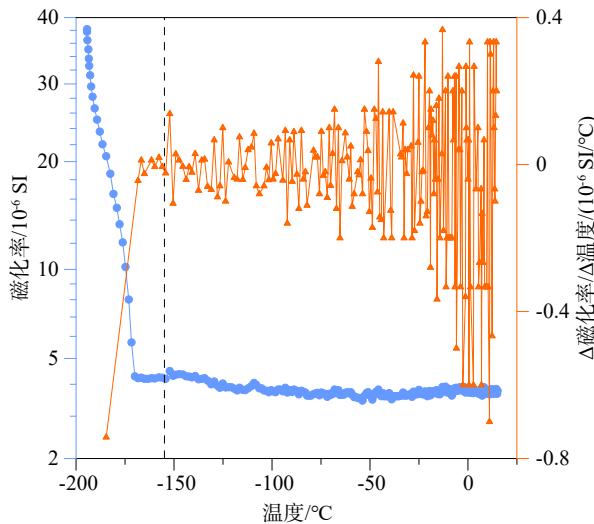


图 4 P17 站位低温 κ -T 曲线

蓝色线: 磁化率随温度变化曲线, 橙色线: 求导曲线。

Fig.4 Low temperature κ -T curve at site P17

Blue line: magnetic susceptibility curve with temperature,

Orange line: derivative curve.

4.3.2 SPM 磁学参数空间分布特征

磁化率的大小主要取决于磁性矿物含量的多

少^[25]。表层海水 SPM 的 χ_{lf} 值为 $-4.21 \times 10^{-6} \sim 4.87 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图 7)。磁化率高值区域位于泰梅尔半岛以西, 其中 P41 站位磁化率最高, 为 $4.87 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。磁化率低值区域位于勒那河三角洲和新西伯利亚群岛以东, 拉普捷夫海大部分海域及亚马尔半岛以西悬浮体磁化率值介于中间。SPM 磁化率的空间分布反映了从喀拉海到拉普捷夫海再到东西伯利亚海悬浮体中磁性矿物含量呈减少趋势。频率磁化率反映从单畴到超顺磁磁铁矿的存在, 指示样品中较细磁性矿物的含量^[26]。表层海水 SPM 的 $\chi_{fd}\%$ 值为 $(-3.25 \times 10^{-6} \sim 2.47 \times 10^{-5})\%$ (图 8), 位于德米特里拉普捷夫海峡的 P19 站位值最低, 位于拉普捷夫海大陆架边缘的 P30 站位次之, 整体分布均匀, 说明超顺磁矿物含量变化不明显。

NRM 的数值反映了样品中亚铁磁性矿物的含量。表层悬浮体的 NRM 为 $4.60 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ (图 9), 最高值在 P26 站位, 位于拉普捷夫海中部, 位于鄂毕河口的 P41 站位次之, 最低值在更靠近河口的 P42 站位, 更靠近河口。在其他海域 NRM 数值均较低。表示亚铁磁性矿物主要集中于拉普捷夫海中部。

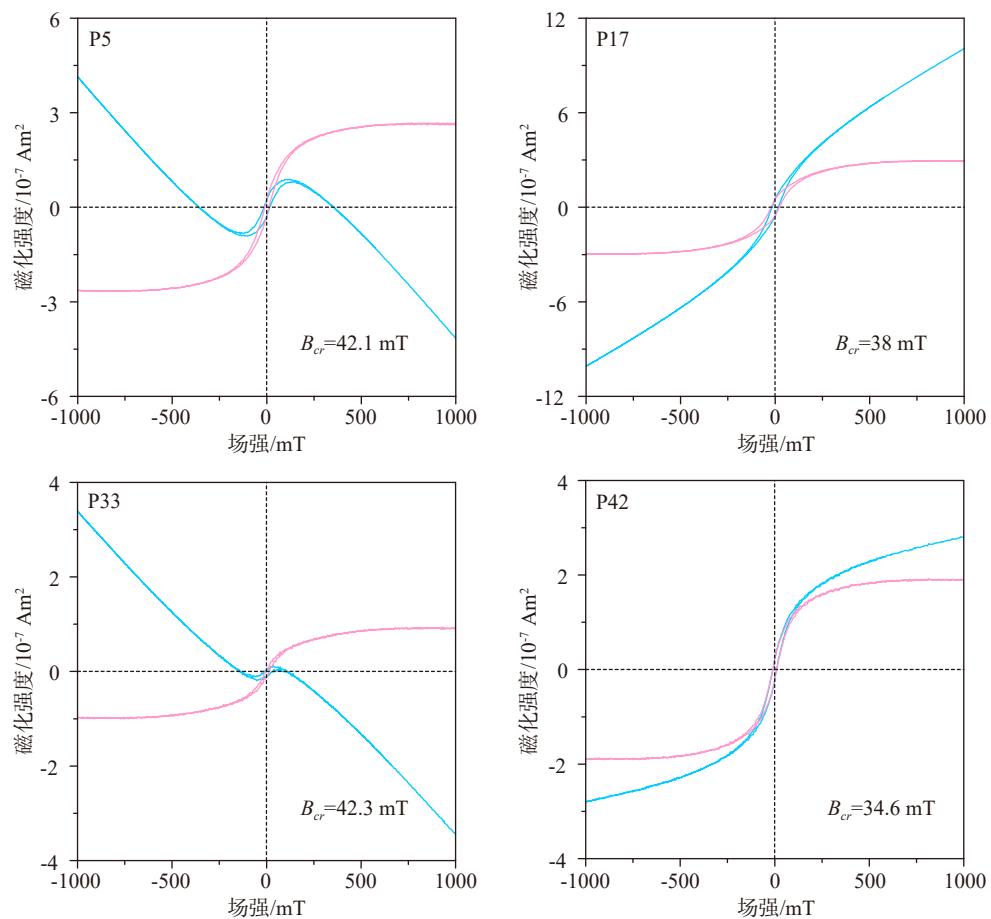


图 5 SPM 代表性样品 Loop 曲线

蓝色线: 顺磁矫正前, 粉色线: 顺磁矫正后。

Fig.5 Loop curves of representative samples of SPM

Blue line: before paramagnetic correction, pink line: after paramagnetic correction.

5 讨论

5.1 喀拉海 SPM 分布特征

喀拉海 SPM 含量在河口区域较高, 磁性矿物含量较多, 磁性矿物粒径较细。在鄂毕河河口的 P41 站位 SPM 含量最高, 亚铁磁性矿物含量最多, SPM 中以陆源碎屑颗粒为主。P41 站位相较于叶尼塞河河口的 P39 站位硅藻含量多, 可能是由于 P39 站位距离河口较远, 营养盐较少导致生物碎屑少。而距离鄂毕河河口较近的 P42 站位 SPM 含量低于 P41 站位, 亚铁磁性矿物含量最低, 推测该处河流流速较快, 河水径流将陆源物质继续向海水里输送。喀拉海东部和西部海域陆源输入较少, SPM 含量普遍较少。

5.2 拉普捷夫海 SPM 分布特征

拉普捷夫海 SPM 含量普遍低, 亚铁磁性矿物在中部聚集, 磁性矿物粒径较细, 但在外大陆架 P31 站

位甲烷渗漏区粒径较粗。SPM 含量从勒那河河口向中部海域逐渐降低, 亚铁磁性矿物集中在中部海域的 P26 站位, 北部海域含量最低。北部海域的 SPM 中硅质生物碎屑占比较高, 与其离岸远有关。沿勒那河河口向东部海域 SPM 含量逐渐升高, 磁性矿物含量降低, 磁性矿物粒径逐渐变粗。

5.3 东西伯利亚海西部 SPM 分布特征

东西伯利亚海西部的 SPM 含量, 最高值位于德米特里拉普捷夫海峡的东部 P15 站位, SPM 以陆源碎屑颗粒为主, 硅质生物碎屑的占比极低, 磁性矿物含量在海峡附近较高, 粒径较粗。在其他海域, SPM 含量相对较低, 磁性矿物含量相对较少, 粒径相对较粗, P10 站位由于距离海岸远 SPM 中硅质碎屑占比较高。

5.4 河水径流对 SPM 分布的影响

喀拉海 SPM 含量在河口区域 P41 站位较高, 这

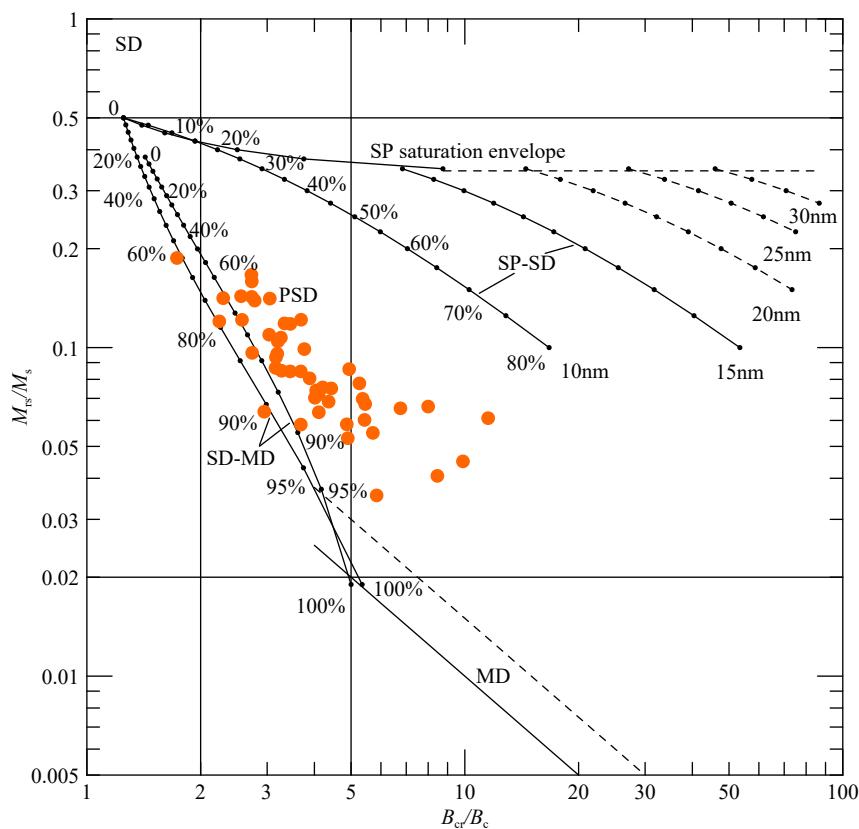


图 6 磁性矿物 Day 图

SD: 单畴, MD: 多畴, SP: 超顺磁, PSD: 假单畴。

Fig.6 The Day plot of magnetic minerals

SD: single domain, MD: multidomain, SP: superparamagnetic, PSD: pseudo-single domain.

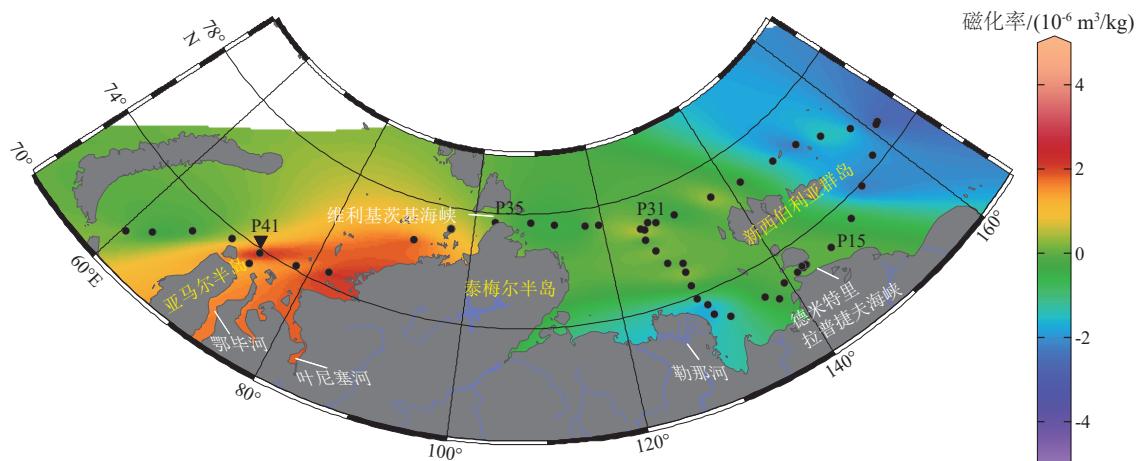


图 7 SPM 磁化率空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution characteristics of SPM magnetic susceptibility

是由于在河口河流流速降低, 淡水与盐水混合(盐度 2~10), 细颗粒 SPM 在絮凝作用下发生快速积累(沉淀), 大多数河流 SPM 被困在河口^[10]。叶尼塞河的 SPM 来自于普托拉纳地块广泛分布的三叠纪高原玄武岩和凝灰岩沉积物; 而鄂毕河的 SPM 来源于西伯利亚低地, 相比于叶尼塞河, 磁化率值非常

低^[10]。但由于叶尼塞河口的 P39 站位和 P40 站位距离河口较远, SPM 困在河口较近的区域, 与海水混合后 SPM 含量较 P41 站位低。随着与河口距离的增加, SPM 中陆源碎屑颗粒也随之减少, 而河口丰富的营养盐会使得站位中的生物碎屑相对较多。

晚全新世以来, 勒那河三角洲逐渐突出河口向

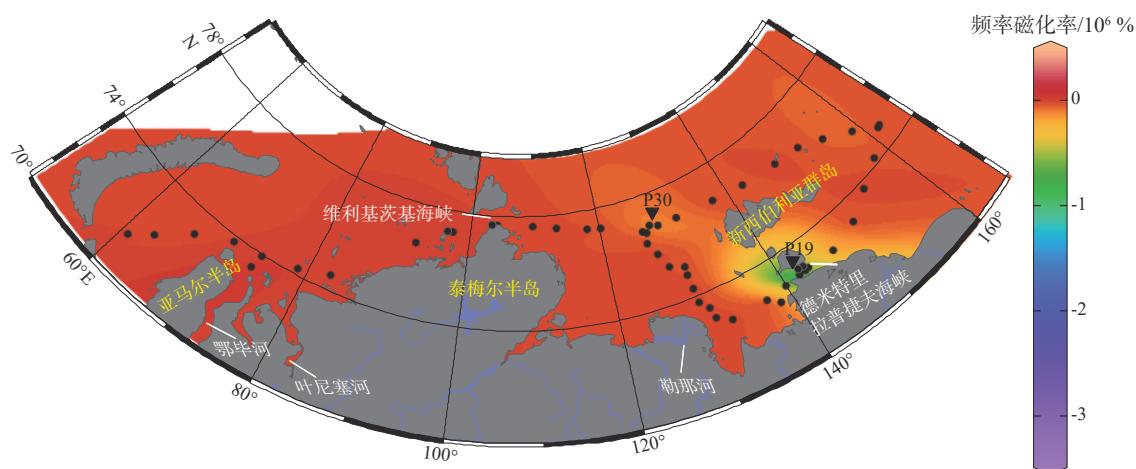


图 8 SPM 频率磁化率空间分布特征

Fig.8 Spatial distribution characteristics of SPM frequency magnetic susceptibility

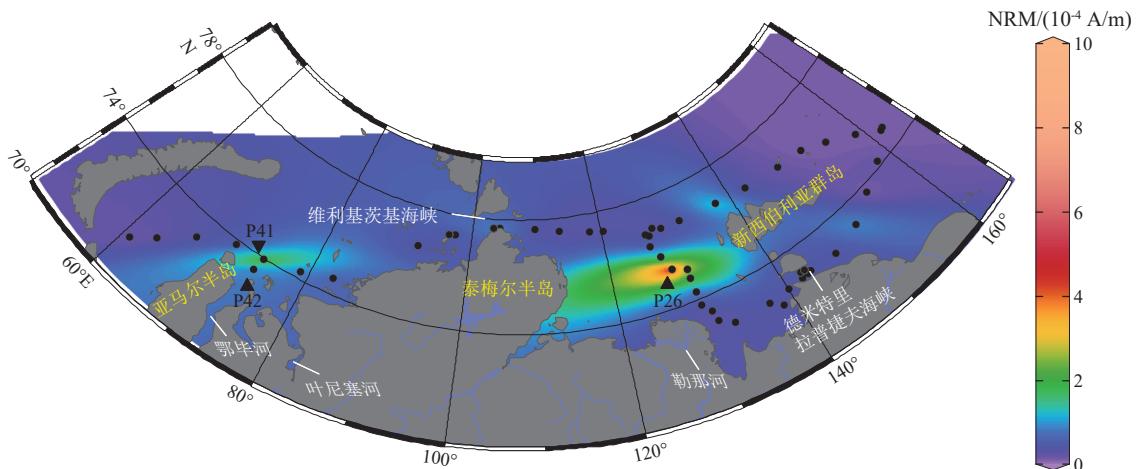


图 9 SPM 天然剩磁空间分布特征

Fig.9 Spatial distribution characteristics of SPM natural remanence

东偏转^[27], 勒那河河口向东至德米特里拉普捷夫海峡 SPM 含量逐渐增加, 但勒那河河口外侧 SPM 含量整体较低。德米特里拉普捷夫海峡 SPM 磁性矿物的粒径较粗, 反映出德米特里拉普捷夫海峡及其东侧的高浓度 SPM 是海岸侵蚀作用形成的, 而非来自勒那河搬运入海的颗粒物。

5.5 洋流对 SPM 分布的影响

受 BSB 影响, 维利基茨基海峡西部 SPM 磁性矿物的含量与 BSB 方向一致, 随洋流运移呈现出不断递减的趋势。由于海峡全年浮冰覆盖, 自西向东的 BSB 表层洋流流速变缓, SPM 在此聚集导致含量较高, 亚铁磁性矿物含量较多。

从勒那河河口向东至德米特里拉普捷夫海峡 SPM 含量逐渐增加, 磁性矿物粒径也较粗, 是由于该处受到了强烈的 SCC 对海岸的侵蚀。

6 结论

(1) SPM 中组分主要来自陆源碎屑及硅质浮游生物。SPM 含量由南向北逐渐递减, 由陆向海扩散。陆源碎屑集中分布在近岸和河流入海口附近海域, 离海岸和河口较远海域 SPM 中硅质生物碎屑的占比升高。

(2) SPM 中磁性矿物为单畴、多畴磁铁矿, 磁性矿物与流域内岩石类型有关, 通过河流输送至海洋中。

(3) SPM 分布受控于河水径流、沿岸流等因素, 河口处浓度高、磁性矿物多, 磁性矿物集中在表层流速缓慢的区域, 粒径普遍较细, 主要受到 SCC 的影响。粒径较粗的磁性矿物分布在沿岸地区, 可能与海岸侵蚀有关。

致谢: 感谢 2019 年中俄北极联合考察的全体科考队员。

参考文献 (References)

- [1] Kravchishina M D, Lisitsyn A P, Klyuvitkin A A, et al. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes [M]//Lisitsyn A P, Demina L L. Sedimentation Processes in the White Sea. Cham: Springer, 2018: 13-48.
- [2] 胡吉连, 杜晓琴. 舟山海域悬浮体的特征及输运机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 39-48. [HU Jilian, DU Xiaoqin. Characteristics and transport mechanism of suspended particles in offshore area of Zhoushan Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 39-48.]
- [3] 李文建, 王珍岩, 黄海军. 夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 49-60. [LI Wenjian, WANG Zhenyan, HUANG Haijun. Grain size distribution pattern and influencing factors of suspended matters in the southern Yellow Sea during summer season [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 49-60.]
- [4] Stein R. The Late Mesozoic-Cenozoic arctic ocean climate and sea ice history: a challenge for past and future scientific ocean drilling [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2019, 34(12): 1851-1894.
- [5] Larkin C S, Piotrowski A M, Hindshaw R S, et al. Constraints on the source of reactive phases in sediment from a major Arctic river using neodymium isotopes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 565: 116933.
- [6] 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.]
- [7] Kravchishina M, Lein A, Burenkov V, et al. Distribution and sources of suspended particulate matter in the Kara Sea [C]//Complex Interfaces Under Change: Sea-River-Groundwater-Lake. Gothenburg: IAHS, 2014: 42-48.
- [8] Wegner C, Hölemann J A, Dmitrenko I, et al. Suspended particulate matter on the Laptev Sea shelf (Siberian Arctic) during ice-free conditions [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(1-2): 55-64.
- [9] Rachold V, Eisenhauer A, Hubberten H W, et al. Sr isotopic composition of suspended particulate material (SPM) of east Siberian rivers: sediment transport to the arctic ocean [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1997, 29(4): 422-429.
- [10] Stein R, Dittmers K, Fahl K, et al. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(11-13): 1485-1511.
- [11] Matul A G, Khusid T A, Mukhina V V, et al. Recent and Late Holocene environments on the southeastern shelf of the Laptev Sea as inferred from microfossil data [J]. *Oceanology*, 2007, 47(1): 80-90.
- [12] 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. [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.]
- [13] Lien V S, Trofimov A G. Formation of Barents sea branch water in the north-eastern Barents Sea [J]. *Polar Research*, 2013, 32(1): 18905.
- [14] Schauer U, Loeng H, Rudels B, et al. Atlantic water flow through the Barents and Kara seas [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2002, 49(12): 2281-2298.
- [15] Rozhkova A Y, Dmitrenko I A, Baukh D, et al. Variations in characteristics of the Barents branch of the Atlantic Water in the Nansen Basin under the influence of atmospheric circulation over the Barents Sea [J]. *Doklady Earth Sciences*, 2008, 418(1): 149-154.
- [16] 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.
- [17] 贾福福, 沙龙滨, 李冬玲, 等. 西伯利亚极地海域第四纪以来古海洋环境研究进展 [J]. *极地研究*, 2020, 32(2): 250-263. [JIA Fufu, SHA Longbin, LI Dongling, et al. Review of research on Quaternary paleoceanography of the Siberian arctic seas [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2020, 32(2): 250-263.]
- [18] 田引, 白学志, 黄颖祺. 北冰洋穿极流强度和源头位置变动机制分析 [J]. *极地研究*, 2021, 33(4): 529-544. [TIAN Yin, BAI Xuezhi, HUANG Yingqi. Analysis of the variation in intensity and source region of the arctic transpolar drift [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(4): 529-544.]
- [19] Deng C, Zhu R, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene Eolian deposits in the Chinese loess plateau: a Pedogenesis indicator [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(11-12): 873-878.
- [20] Verwey E J W. Electronic conduction of magnetite (Fe_3O_4) and its transition point at low temperatures [J]. *Nature*, 1939, 144(3642): 327-328.
- [21] Tauxe L, Bertram H N, Seberino C. Physical interpretation of hysteresis loops: micromagnetic modeling of fine particle magnetite [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(10): 1-22.
- [22] Roberts A P, Tauxe L, Heslop D, et al. A critical appraisal of the “day” diagram [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(4): 2618-2644.
- [23] Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetic data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B3): 2056.
- [24] Dunlop D J. Theory and application of the day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B3): 2057.
- [25] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: Allen & Unwin, 1986.
- [26] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 432-442. [AO Hong, DENG Chenglong. Review in the identification of magnetic minerals [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 432-442.]
- [27] Rudenko O, Taldenkova E, Ovsepian Y, et al. A multiproxy-based reconstruction of the mid- to Late Holocene paleoenvironment in the Laptev Sea off the Lena River Delta (Siberian Arctic) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 540: 109502.