

雅浦海沟南部超深渊沉积物成分与形貌

尼 鑫^{1,2}, 孙承君³, 金 红⁴, 杨桂朋^{1,2}, 丁海兵^{1*}

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 自然资源部 第一海洋研究所生态中心, 山东 青岛 266061; 4. 山东省青岛生态环境监测中心, 山东 青岛 266003)

摘 要: 对雅浦海沟南部超深渊 D151 站位(137°37'45"E, 8°2'23"N)柱状沉积物的含水率、总有机碳(TOC)和多种金属元素含量、粒径以及表面形貌进行分析, 结果表明该沉积物含水率为 55%~72%, 和马里亚纳海沟“挑战者”深渊沉积物的较为接近, 高于冲绳海槽北部沉积物的; 且随深度增加而减小, 这可能与上覆沉积物的挤压作用有关。沉积物 TOC 质量分数和“挑战者”深渊以及渤海湾的接近, 低于冲绳海槽北部和雅浦海沟北部的; TOC 质量分数随沉积深度增加而减小, 这可能与有机物的降解有关。沉积物样品中的 Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Zn 等元素主要受岩石剥蚀的影响, Al, B, Ca, Fe, Mg, V 等元素主要受陆源物质影响。沉积物中发现的火山玻璃碎片对应火山事件; Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb, Sr, V, Zn 的质量分数在 16~18 cm 沉积层出现最大值, 可能与火山活动有关。D151 站位沉积环境为氧化环境, 沉积物的主要来源为陆源和火山源, 包括粉砂和砂质粉砂, 粒度接近于冲绳海槽北部的, 高于“挑战者”深渊的; 沉积方式以均匀悬浮为主。沉积物 C-M 图的数据点分布较为分散, 可能与雅浦海沟西侧较为陡峭有关。由于位于碳酸盐补偿深度(CCD)以下, 沉积物中的微体古生物化石以硅质为主, 未发现钙质生物。故该站位沉积物的水动力环境在地质历史中整体较为稳定。

关键词: 雅浦海沟; 沉积物元素组成; 超深渊; 沉积环境; 沉积物粒度

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0662-14

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.010

引用格式: NI X, SUN C J, JIN H, et al. Composition and morphology of Hadal Zone sediment in the South Yap Trench[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 662-675. 尼鑫, 孙承君, 金红, 等. 雅浦海沟南部超深渊沉积物成分与形貌[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 662-675

海沟是海洋中深度超过 5 000 m 的狭长沟槽, 两壁陡峭, 深度最大超过 10 000 m。世界最深处位于马里亚纳海沟的“挑战者”深渊, 深 11 034 m。海沟沉积是典型的深海沉积, 与近海沉积物相比深海沉积物受到陆源输入和人类活动影响较小, 因此深海沉积物被认为能够更加完好地记录古代环境与气候特征。利用深海沉积物中的某些参数追踪古环境的演变是古海洋学研究的重要内容^[1-2]。例如, 深海沉积物中的有机碳能够反映古海洋的初级生产力和气候的变化^[3]; 沉积物中的金属含量可反映沉积环境和生产力等信息^[4]。沉积物的粒度则反映了搬运介质的性质、沉积形式、沉积类型、搬运方式以及沉积时的沉积环境状况等。从沉积物中的微体生物化石可以判断地层年代, 推断古代环境变化和复原古地理特征, 这些微体古生物对了解成岩、成矿过程也有重要作用^[5]。

雅浦海沟是世界上最深的海沟之一, 位于西太平洋雅浦海脊和雅浦群岛以东, 从 7°30'N 延伸至 11°30'N, 长度约为 650 km, 发育有典型的俯冲构造侵蚀^[5], 是太平洋板块、菲律宾板块和卡罗林板块的交界处, 最深点达 8 527 m。雅浦海沟具有典型的超深渊环境特点, 存在低温流体和冷泉生物群落^[6], 是研究极端环境生

收稿日期: 2019-12-04

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目——超深渊生物对关键生源要素循环的响应机制(2015CB755904); 国家自然科学基金创新群体项目——海洋有机地球化学(41521064); 国家自然科学基金项目——低分子量有机酸对近岸海水碳循环影响综合研究(41676067)

作者简介: 尼 鑫(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积物方面研究。E-mail: nixin12345@outlook.com

*** 通信作者:** 丁海兵(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋生物地球化学方面研究。E-mail: dinghb@ouc.edu.cn

(高 峻 编辑)

态系统以及各圈层之间相互作用的最佳对象之一。到目前为止,雅浦海沟的水流运动^[7]、地震活动^[8]、岩石组成^[9-10]、地质构造与演化^[11]等方面被广泛地关注和研究。作为超深渊生物的栖息地,雅浦海沟沉积物为其生态系统不断提供物质和能量。对雅浦海沟沉积物的研究有助于掌握其在西太平洋物质循环中的作用。然而由于取样困难,目前相关研究仍然较少。

岳新安等^[12]分析过雅浦海沟北部(9°38′70″~9°53′54″N)5个站位不同深度(水深4 435~6 779 m)沉积物的含水率、有机碳含量、21种元素的含量等参数,探究各个参数的垂直变化特征,分析各沉积物样品的物质来源、微体古生物化石的变化与地形结构、海流运动和板块运动之间的关系。根据其研究结果,雅浦海沟北部的沉积物可分为硅质黏土沉积、硅质软泥和钙质软泥,海沟西侧沉积物受火山源影响更大。海沟东侧沉积物受陆源影响较大,根据微体古生物化石观察结果判断雅浦海沟深渊和超深渊上层8 cm沉积物是上新世末期或早更新世以来的沉积。我们在前人的基础上,通过对雅浦海沟南部超深渊上层22 cm沉积物样品的地球化学特征的研究,进一步探讨环境变化对沉积物的影响以及雅浦海沟与其他海域沉积物地球化学特征的异同,旨在为海洋沉积物的研究提供数据资料积累和参考。

我们对雅浦海沟南部超深渊D151站位柱状沉积物的含水率、粒径、元素质量分数、有机碳质量分数等参数进行研究。采用扫描电子显微镜(荷兰飞利浦公司生产Quanta-200型,带EDS能谱仪)观察,X射线能谱(德国Bruker公司生产D8 Advance型)分析,掌握样品中各参数的垂直变化特征,并观察该沉积物样品的形貌和微体古生物化石的变化情况。在此基础上,进一步分析沉积物的物质来源,以及沉积物组分、沉积过程与雅浦海沟环境的关系,为海洋超深渊沉积物研究提供基础数据积累和技术借鉴。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

2017年5月“向阳红09”号科学考察船承载“蛟龙”号载人深潜器进行中国大洋协会的大洋38航次考察。2017年6月的第3航段考察任务中,在雅浦海沟南部D151站位(139°37′45″E, 8°2′23″N)由“蛟龙”号载人深潜器所携带的金属多管取样器采集柱状沉积物,长度为22 cm(图1)。该站位位于雅浦海沟西侧斜坡上,深度为6 582 m。

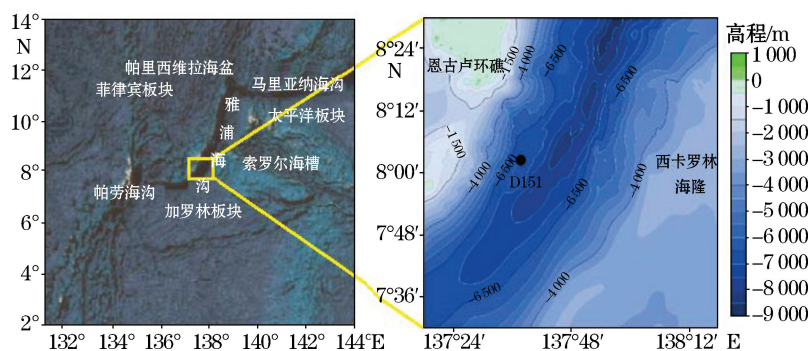


图1 雅浦海沟和D151站位(●)

Fig.1 The location of the Yap Trench and sampling station D151(●)

“蛟龙”号返回母船后,采集的样品按照上密下疏的原则^[13]以0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5, 5~6, 6~7, 7~8, 8~9, 9~10, 10~12, 12~14, 14~16, 16~18, 18~20, 20~22 cm的方式进行切分,总共获得16层沉积物。每层沉积物一部分置于密封袋中用于金属元素质量分数等参数的分析,一部分样品(经过450℃灼烧6 h)用锡箔纸包好用于有机物的分析。分好的样品立即在-20℃的条件下保存并带回实验室。2017年8月—2019年8月在海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室进行分析。整体上该柱状沉积物为黄褐色,随深度增加颜色变深。

1.2 参数分析

1.2.1 含水率

沉积物样品的含水率测定基于《海洋调查规范》的方法^[14]。取约 5 g 的沉积物于 10 mL 试管中称重,冷冻干燥 48 h 后,取出并放于硅胶干燥器中至恒重,根据干燥前后沉积物的质量差别计算含水率,测定相对标准偏差 $\leq 2\%$ 。干燥后的沉积物用研钵轻轻捣碎,过尼龙塑料筛后除去黑色碎块并称重,用于沉积物元素含量分析、SEM 观察和 EDS 能谱分析。另取一部分未过筛的沉积物进行粒径分析。

1.2.2 元素

沉积物样品元素含量的测定基于国际标准化组织提出的 ISO 14869—2001 标准^[15],具体过程:先使用上海新仪微波化学科技有限公司的 MDS-6G 多通量密闭微波化学工作站对沉积物样品进行消解,取 100 mg 过筛后的沉积物样品于仪器附带的 MP-100 消解罐中,进行程序升温微波消解(130 °C 条件 10 min, 170 °C 条件 5 min, 200 °C 条件 15 min),消解后的产物倒入聚四氟乙烯烧杯,放在电热板上赶酸,蒸至剩余约 1 mL 溶液,冷却后用稀硝酸($V_{\text{硝酸}}:V_{\text{水}}=1:7$)定容至 10 mL。定容后的样品保存在聚乙烯塑料瓶中,之后用美国赛默飞世尔科技公司的 ICAP-6300 等离子体发射光谱仪对消解后的沉积物样品的金属含量进行分析,测定的相对标准偏差均小于 5%。元素标准品为多金属元素混标溶液(GSB 04-1767-2004,国家有色金属及电子材料分析测试中心生产)、钙离子单标溶液(GSB 04-1720-2004,国家有色金属及电子材料分析测试中心生产)、钠离子单标溶液(GSB 04-1738-2004,国家有色金属及电子材料分析测试中心生产)以及近海海洋标准物质(GBW07314,自然资源部第二海洋研究所生产)。

1.2.3 总有机碳(TOC)分析

沉积物样品中总有碳(TOC)的定量分析基于国家标准 GB/T 30740—2014^[16]。测定时,取保存在锡箔纸包中的沉积物 2 g 冷冻干燥,过不锈钢筛后,取少量置于天津泰斯特仪器有限公司生产的 SX-12-10 型箱式电阻炉 450 °C 灼烧过的离心管中,精确称量其质量(m_1)。将离心管置于干燥器中,加少量超纯水(德国默克密理博公司生产的 Milli-Q 实验室纯水化系统)润湿,用 12 mol/L 浓盐酸熏蒸 24 h,熏蒸后的样品滴加稀盐酸($V_{\text{盐酸}}:V_{\text{水}}=1:5$)至无气泡产生,除净无机碳,然后将样品在 50 °C 烘干,恒重后再次称量,得到沉积物的质量(m_2),然后取约 10 mg 处理后的样品于锡舟中包好,置于意大利 EuroVector 公司生产的 EA3000 全自动元素分析仪进样器上检测其 TOC 质量分数($w_{\text{TOC}1}$),沉积物有机碳质量分数 $w_{\text{TOC}}=w_{\text{TOC}1}\times m_2/m_1$,测定相对标准偏差为(± 3)%。

1.2.4 沉积物粒径

沉积物粒径测定基于《海洋调查规范》^[14],用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 3000 型激光粒度仪(仪器量程为 0.1~3 500.0 μm)进行分析。分析前将沉积物样品过筛除去超过量程的成分,再先后用质量分数为 30% 的双氧水与盐酸($V_{\text{盐酸}}:V_{\text{水}}=1:5$)浸泡 24 h 除去有机物胶结与碳酸盐,离心后超声分散 30 s,然后进行分析。

1.2.5 SEM 和 EDS 能谱观察

使用荷兰 FEI 公司生产的 Quanta 200 扫描电子显微镜观察沉积物样品,加速电压为 20 kV。用样品匙取少量样品洒在样品台的导电胶带上,经过吹扫,喷金后置于扫描电子显微镜下观察,用 EDS 能谱确定发现的矿物以及生物化石的化学成分。

2 结 果

2.1 沉积物的含水率、粒径以及有机碳质量分数

D151 站位沉积物的含水率随深度变化(图 2),变化范围为 55%~72%,平均值为 65%。随着深度增加,该沉积物样品的含水率呈现减小趋势,含水率最高值出现在 2~3 cm 沉积层,最低值出现在深度为 18~20 cm 的沉积层。

D151 站位沉积物平均粒径随深度增加呈减小的趋势,最小值出现在 18~20 cm 沉积层,为 11 μm ;最大值出现在 8~9 cm 沉积层,为 20 μm 。

D151 站位沉积物中 TOC 质量分数随深度增加呈现降低的趋势,质量分数变化范围为 0.11%~0.49%,平均值为 0.30%。在 2~3 cm 与 18~20 cm 沉积层 TOC 质量分数分别出现最大值与最小值,TOC 质量分数分别为 0.49% 和 0.11%,在 7~8 cm 沉积层出现次极大值,其质量分数为 0.48%。

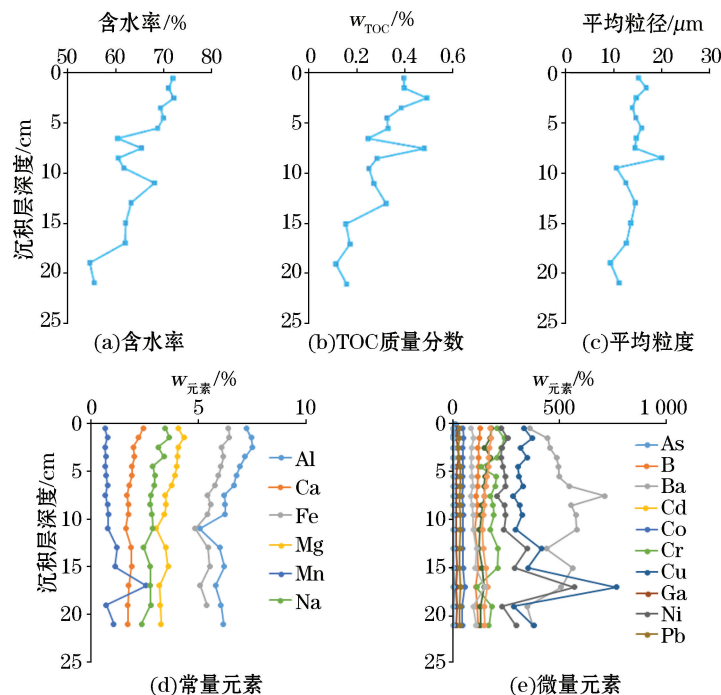


图 2 雅浦海沟 D151 站位柱状沉积物含水率、TOC 质量分数、平均粒度、常量元素和微量元素质量分数的垂直变化

Fig.2 Vertical variations of water content, mass fraction of TOC, average grain size and mass fraction of major elements and trace elements in the sediment samples from D151 station in the Yap Trench

2.2 元素垂直变化特征

沉积物中的元素可划分为常量元素与微量元素^[9]。D151 站位沉积物样品中检测到的 21 种元素中 Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Na 是常量元素;As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ni, Pb, Sb, Sr, Ti, V, Zn 为微量元素(图 2)。Al, B, Ca, Fe, Mg, Ti, V 的质量分数都在 10~12 cm 沉积层附近达到最小值,在 16~18 cm 沉积层附近出现极大值,随深度增加这些元素的质量分数呈下降趋势;Mn, Cd, Co, Cu, Ni, Zn 的质量分数在 14~16 cm 沉积层以浅变化不大,在 16~18 cm 沉积层升高达到最大值;As 的质量分数在 0~7 cm 沉积层随深度增加而显著减少,在 12~14 cm 沉积层突然升高,之后随沉积深度增加保持稳定;Na 质量分数在 1~2 cm 沉积层达到最大值,在其余沉积层变化不显著;整体上 Ba 的质量分数随沉积层深度增加变化较小,在 6~8 cm 沉积层突然增高达到最大值;Ga 和 Sr 的质量分数分别在 3~4 cm 和 4~5 cm 沉积层达到最大值,在 16~18 cm 沉积层出现次极大值;Pb 和 Cr 的质量分数在 2~3 cm 与 4~5 cm 沉积层达到最小值,在 16~18 cm 沉积层出现极小值;Sb 的质量分数在 0~4 cm 沉积层迅速下降,5~6 cm 沉积层迅速升高,在更深的沉积层随深度增加呈逐渐上升趋势。

2.3 SEM 观察和 EDS 能谱仪分析结果

D151 站位沉积物以黏土为主,微古生物化石以硅藻、放射虫、海绵骨针、硅鞭藻等硅质生物为主。因 D151 站位在碳酸盐补偿深度(CCD)以下,沉积物中未发现钙质生物。在这些生物化石中 *Ethmodiscus rex*

硅藻片最多,每一层沉积物样品中都有;放射虫也是每层沉积物中都有,大部分的放射虫为泡沫虫,笼罩虫在 0~12 cm 沉积物中出现。除 *Ethmodiscus rex* 硅藻片,D151 站位沉积物中的典型硅藻还有圆筛藻和羽纹藻等,但数量较少;海绵骨针在各层沉积物中均有发现,以单轴种为主,还有少量的三轴、四轴以及棘棒状骨针;硅鞭藻数量很少,仅在 1~2 cm 沉积层中发现(图 3 和图 4)。

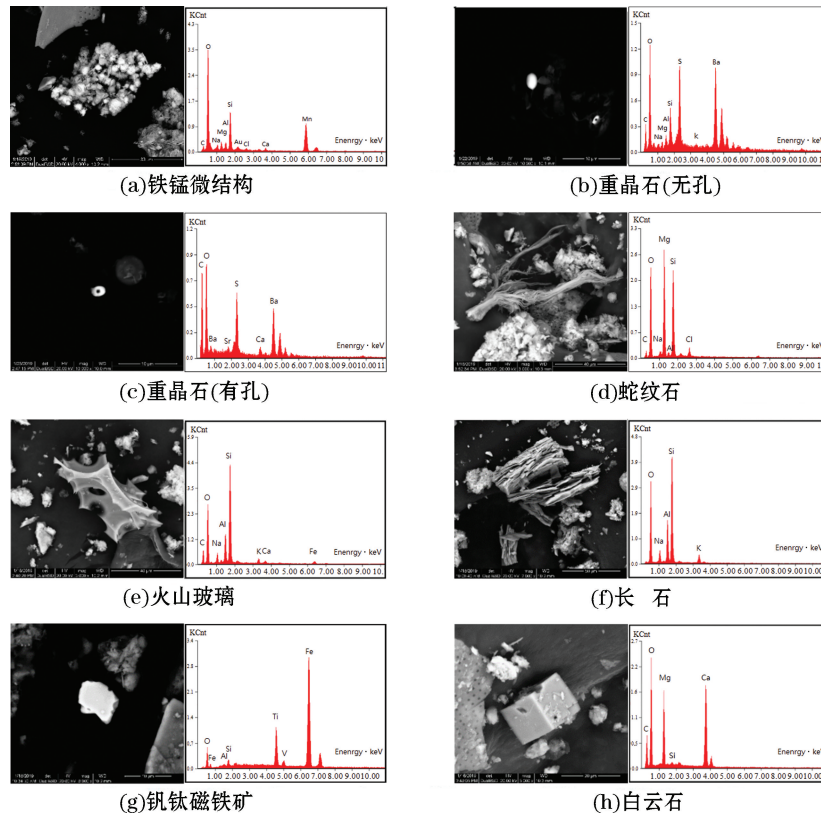


图 3 D151 站位沉积物中发现的部分矿物 SEM 照片及其 EDS 能谱

Fig.3 SEM photos of partial minerals found in the sediment sample from D151 station and its EDS spectrum

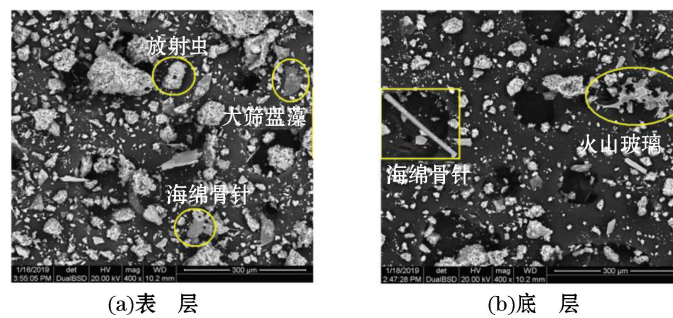


图 4 雅浦海沟 D151 站位表层(0~1 cm)与底层(16~18 cm)沉积物扫描电子显微镜照片

Fig.4 SEM images of surface sediment (0~1 cm) and bottom sediment (16~18 cm) from D151 station in the Yap Trench

根据 SEM 的观察结果,D151 站位沉积物中的主要非生物成分为黏土;根据 EDS 能谱判断,沉积物中有多种矿物。一种典型矿物的主要成分包括 O, Mg, Si 等元素,与蛇纹石成分一致(图 3h)。而图 3b 中的矿物成分为 Ba, S 和 O,表明该矿物为重晶石,此种矿物在每一层沉积物中都有存在。根据 EDS 能谱结果与

多孔形貌判断图 3e 中的沉积物组分为火山玻璃,在 9~22 cm 沉积层中存在,其中 16~18 cm 沉积层的火山玻璃最多。在该沉积层发现了大量铁锰微结核且多为聚集状(图 3a),该沉积物样品中发现的矿物还有长石(图 3f)、钽钛磁铁矿(图 3g)和白云石(图 3h)等,部分长石有明显的蚀变现象(图 3f)。

3 讨 论

3.1 D151 站位的沉积环境

D151 站位沉积物含水率随着沉积层深度增加呈减小趋势,这与上覆沉积物压力造成的挤压作用有关^[17]。该站位沉积物平均含水率为 65%,0~8 cm 处平均含水率为 71%,低于雅浦海沟北部相近深度的 Dive 113 站位 0~8 cm 沉积物的平均含水率(水深 6 578 m,77%)^[12],和马里亚纳海沟“挑战者”深渊南侧水深 6 471 m 表层沉积物含水率接近(约 70%)^[18],明显高于渤海北部 B108 站位沉积物的(约 43%)^[19],略高于冲绳海槽北部 S9 站位沉积物的(56%~62%)^[20],超深渊沉积物较高的含水率可能与 D151 站位超深渊环境水动力较小,沉积物粒度较细且水压较高有关。

D151 站位沉积物样品粒度数据(图 5)显示其组成以粉砂为主,按照福克命名法^[21],判定深度浅于 9 cm 沉积物属于粉砂,深度在 9~22 cm 沉积物属于砂质粉砂。该沉积物样品平均粒度范围是 9.2~19.8 μm ,明显小于黄、渤海陆架的沉积物粒度(20.6~58.3 μm),接近于冲绳海槽北部 S9 站位(128°15'49"E,29°23'30"N,水深 1 062 m,6.8~15.6 μm)的,比西南印度洋洋中脊(50°54'E,34°59'S,水深 4 430 m,2.8~7.3 μm)^[21]沉积物的和“挑战者”深渊南侧 JL7KGC01A 站位沉积物粒度(6~11 μm)^[22]大,说明该站位沉积物搬运动力和冲绳海槽相接近,和近海环境相比搬运动力较小,比同样位于深海环境下的西南印度洋洋中脊(坡度约为 3°)沉积物的大,可能与海沟坡度(约为 20°)较大有关。

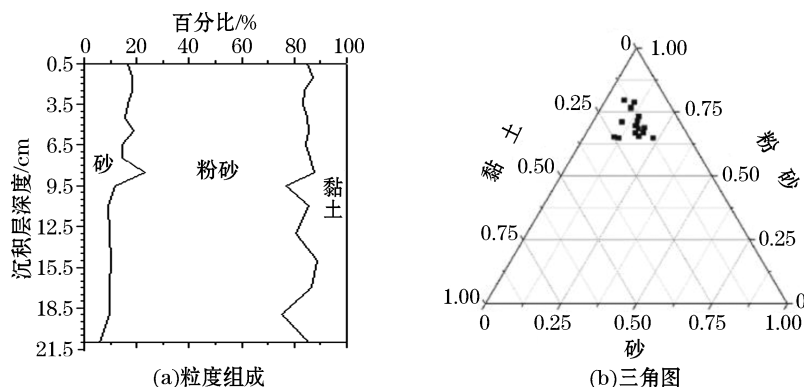


图 5 D151 站位沉积物粒度组成以及三角图

Fig.5 Grain size composition and triangular graph of the sediment in D151 station

三角图(图 5b)显示,该沉积物样品粒径分布整体较为集中,表征形成该沉积物的水动力环境在地质历史中整体较为稳定。利用 Passega 提出的 C-M 图(图 6)^[23]分析沉积物与沉积环境,其中 C 为累计曲线 1% 对应粒度,代表最大搬运动能;M 为中值粒径,代表平均搬运能力。D151 站位 C-M 图表明该站位沉积物主要搬运方式应为均匀悬浮,均匀悬浮沉积方式颗粒较细,沉积速率较慢。Yang 等人的 C¹⁴定年数据^[24]显示雅浦海沟北部 S02 站位(138°49'E,9°38'N)表层沉积物平均沉积速率约为 0.2 cm/ka。海沟东侧 D152 站位比 D151 站位沉积物 C-M 图数据点分布更为分散。D151 站位位于坡度较大的雅浦海沟西侧,与海沟东侧站位 D152(137°50'37"E,8°1'23"N,水深 6 679 m 的待发表数据)相比,该站位沉积物会有更多沿着斜坡滑落下来的岩石影响 C 值与 M 值。而大洋沉积速率是不断变化的^[25],因此与东侧站位相比,D151 站位沉积物粒度变化较大。且沉积物中值粒径与偏度以及分选系数之间存在一定的负相关关系(图 7),当沉积物粒径

由粗转细时,表明搬运动力逐渐下降,偏度逐渐转向负偏(细偏),分选性变好,指示着沉积环境转变为更加稳定低能的环境。

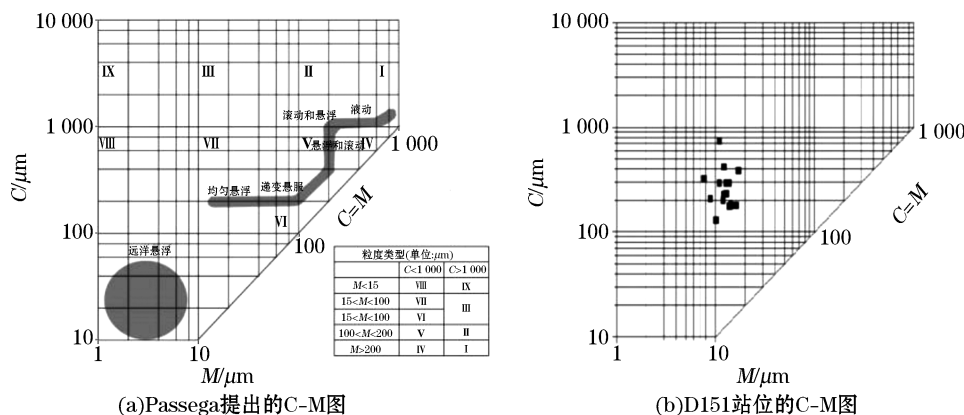


图6 Passega提出的沉积物粒度C-M图和D151站位沉积物粒度C-M图

Fig.6 C-M plot of sediment grain size proposed by Passega and drawn on the data of D151 station separately

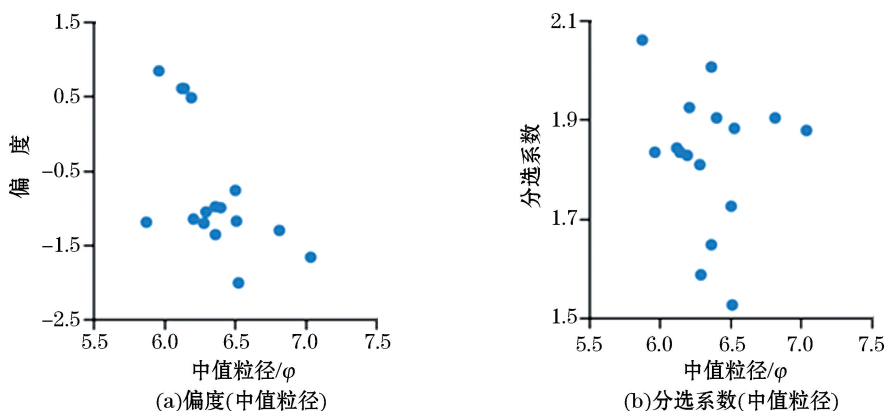


图7 D151 站位沉积物偏度(中值粒径)与分选系数(中值粒径)图

Fig.7 Plots of skewness-median particle diameter and sorting coefficient-median particle diameter of the sediment from D151 station

D151 站位沉积物的 TOC 质量分数随深度降低,可能与沉积物中微生物对有机物的分解,以及 MnO_2 、 Fe^{3+} 、溶解氧和其它氧化剂对有机物的氧化等因素有关。根据吴彬等人的研究结果,雅浦海沟沉积物 D150 站位的 TOC 应属于降解型分布,其垂直变化受降解速率影响较大^[26]。与雅浦海沟北部相近深度的 D113 站位(0~8 cm, 0.23%~0.28%)相比, D151 站位 TOC 质量分数随深度减小幅度较大(0~8 cm, 0.24%~0.49%)。可能与 D113 站位沉积速率较快导致较高比例的有机物被埋藏有关,整体上使沉积物中的 TOC 含量升高^[12]。D151 站位沉积物 TOC 质量分数平均值接近于渤海湾北部表层(117°30'~119°30'E, 38°30'~39°30'N, 0.4%)^[27]和马里亚纳海沟南部“挑战者”深渊(142°E, 11°N, 水深 10 900 m, 约 0.4%)^[28],说明与生产力较高的近海海域相比,雅浦海沟有明显的汇聚作用。TOC 质量分数明显低于中美海沟(90°56'W, 12°43'N, 水深 5 529 m, 约 2.5%)^[29]、秘鲁海沟(80°35'6"W, 9°45'9"S, 水深 5 086 m, 2.54%)^[30-31]以及冲绳海槽北部 S9 站位(约 1%)^[20]。这应是雅浦海沟距离陆地较远,陆源物质较少输入导致的。

综上所述,与近海环境相比 D151 所在站位沉积动力较小,粒度较细,含水率明显较高,沉积方式属于均匀悬浮。受海沟坡度较大的影响,与同样位于深海环境下的西南印度洋中脊相比搬运动力较大,但所研究区域水动力环境历史上变化并不大。受有机碳降解作用的影响,沉积物中的 TOC 质量分数随深度逐渐减少。

雅浦海沟虽对有机碳有明显的汇聚作用,但因陆地较远,与距离陆地较近的沉积物相比,沉积物中 TOC 质量分数较低。

3.2 D151 站位沉积物中元素质量分数变化的地球化学意义

D151 站位不同元素质量分数相关性分析的结果(表 1)显示,Al 分别与 Fe, Mg 和 Ti, Ca 分别与 Fe 和 Mg, Fe 分别与 Mg 和 Ti, Mg 与 Ti 之间存在显著正相关;Cd 分别与 Cu 和 Ni, Cu 分别与 Ni 和 Zn, Ni 分别与 Zn, Sr 与 V 显著正相关;As 分别与 B, Ti 和 V, Ca 与 V, Fe 分别与 Sr 和 V, Mg 分别与 Sr 和 V, Mn 分别与 Ni 和 Zn, Na 分别与 Sr 和 V, Ti 分别与 B, Sr 和 V 之间显著正相关,As, Ba, Cr, Ga, Na, Pb, Sb, Sr 与其他元素之间无显著相关关系。

根据 SEM 观察结果(图 3),沉积物中重晶石长度为 $2\ \mu\text{m}$ 左右,呈现出两端较尖的形态特征(图 3b),这种形态的重晶石被认为是生物体死后形成的^[32]。部分重晶石中心出现溶蚀现象(图 3c),我们在溶蚀的重晶石中检测到了 Sr,重晶石的溶蚀普遍被认为是其中富集的 Sr 导致的^[33],这与我们的 EDS 结果是相符合的。Bernstein 的研究^[34]表明重晶石中的 Sr 来自于棘骨虫 *Acanthaarians* 骨骼中的 SrSO_4 。Ti 作为陆源输入的指示因子,与 Al, B, Ca, Fe, Mg, Na, Sr, V 显著正相关说明上述元素含量变化受陆源物质影响较大,其中 V 能够在钛磁铁矿形成的初期取代 Fe^{3+} 进入矿物而富集,因此 V 和 Ti 显著正相关与钛磁铁矿的存在有关^[35](图 3g)。火山活动是沉积物中锰微结核的来源之一。锰微结核可能是火山喷发后由于元素熔点不同从岩浆中分离出来的物质^[36]。通过扫描电子显微镜观察发现在 D151 站位沉积物的 16~18 cm 沉积层有较多聚集状锰微结核以及火山玻璃(图 3)。这些聚集状锰微结核可能是一些小颗粒矿物在火山岩浆中相互黏合导致的。雅浦海沟北部站位 37I-Yap-S01 表层锰结核含量很高(92%),受此影响 Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb, Sr, V, Zn 在表层出现最大值^[12]。在 D151 站位沉积物样品的 16~18 cm 沉积层中,这几种元素含量也出现极大值,很可能与火山活动产生的锰微结核有关。此外由于自然环境中的 As 主要来源于地壳风化和火山爆发等^[37],在 D151 站位 12~22 cm 沉积层,As 元素含量迅速升高也可归于火山活动。洋壳的主要成分为岩浆岩,Cd, Co, Cu, Ni, Zn 以及二价 Mn 属于亲硫元素,与岩浆岩的形成往往有密切的联系。董冬冬等人认为雅浦海沟因俯冲侵蚀而没有发育明显的水平沉积^[11],因此 D151 站位沉积物中 Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Zn 之间相关性较大可能是海底裸露岩石剥蚀的影响所导致的。蛇纹石可以由基性岩和超基性岩经热液蚀变产生,经过电子扫描显微镜观察和 EDS 能谱扫描分析结果,沉积物中蛇纹石较多,也同样说明沉积物的成分受到岩石的剥蚀影响,海水的冲刷和腐蚀作用以及海洋生物活动都可以对海底物质产生破坏作用。

Murry 等人提出的计算沉积物中陆源物质占比公式:陆源物质占比 = $(w_{\text{Ti}_{\text{样品}}}/w_{\text{Ti}_{\text{PAAS}}}) \times 100\%$, $w_{\text{Ti}_{\text{PAAS}}}$ 是晚太古代澳大利亚页岩的 Ti 质量分数^[38]。对 D151 站位沉积物样品陆源物质占比的计算结果(表 2)表明,样品中沉积物陆源物质平均质量分数约占 60%,变化范围是 54%~70%。且随沉积物深度增加陆源组分所占百分比呈下降趋势。另一方面,以太平洋深海黏土指示陆源,以太平洋拉斑玄武岩指示火山来源,以太平洋底栖附浊层指示生物源,以 $w_{\text{Ti}}/w_{\text{Al}}$ 比值为 0.06, 0.10, 0.12 分别代表中太平洋深海黏土、火山源、生物源^[12], D151 站位 $w_{\text{Ti}}/w_{\text{Al}}$ 比值变化范围是 0.05~0.06,说明该沉积物主要来源是陆源。以 $w_{\text{Fe}}/w_{\text{Al}}$ 比值为 0.61, 0.73, 1.56 分别代表陆源、火山源和生物源, D151 站位 Fe/Al 比值范围是 0.80~0.96,更偏向于火山源,因此判断 D151 站位的物质来源主要是陆源和火山源。陆源物质的输入方式有河流、风和海洋动力等,由于研究站位远离大陆,陆源物质应以风尘输入为主。王汾连等人认为雅浦海沟附近的马里亚纳海沟南部站位陆源物质主要来源于中国黄土^[23],而我们的结果(表 3 和表 4)与中国黄土($w_{\text{Sr}}/w_{\text{Al}}=22.74$, $w_{\text{Ca}}/w_{\text{Al}}=0.88$, $w_{\text{Mg}}/w_{\text{Al}}=0.22$, $w_{\text{Fe}}/w_{\text{Al}}=0.46$, $w_{\text{Cr}}/w_{\text{Al}}=10.22$, $w_{\text{Ni}}/w_{\text{Al}}=5.38$, $w_{\text{Co}}/w_{\text{Al}}=2.93$, $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Al}}=2.38$)^[39]相比, 0~8 cm 沉积层样品的 $w_{\text{Ca}}/w_{\text{Al}}$ (0.28) 明显较低, $w_{\text{Mg}}/w_{\text{Al}}$ (0.56)、 $w_{\text{Fe}}/w_{\text{Al}}$ (0.87)、 $w_{\text{Cr}}/w_{\text{Al}}$ (28.47)、 $w_{\text{Ni}}/w_{\text{Al}}$ (34.04)、 $w_{\text{Co}}/w_{\text{Al}}$ (6.75) 以及 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Al}}$ (46.64) 明显较高,说明沉积物的化学组成与黄土差异较大,黄土成分对沉积物贡献较低。另外海底火成岩的剥蚀产物是火山源之一。雅浦海沟缺少活跃的火山活动,但海沟周边存在很多火山岛,因此火山玻璃可能来自其附近区域,由风尘或洋流搬运过来。

表 1 DI51 站位沉积物元素之间相关性
Table 1 The relationship between various metallic elements in the sediment of DI51 station

	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sb	Sr	Ti	V	Zn
Al	1																				
As	0.354	1																			
B	0.845	0.548	1																		
Ba	0.321	-0.623	-0.531	1																	
Ca	0.773	0.431	0.838	-0.481	1																
Cd	0.040	0.490	0.078	-0.266	0.270	1															
Co	0.002	0.128	-0.047	0.129	0.165	0.758	1														
Cr	0.503	0.224	0.513	-0.165	0.492	-0.268	-0.231	1													
Cu	-0.216	0.304	-0.183	-0.089	-0.032	0.935	0.778	-0.494	1												
Fe	0.966	0.326	0.898	-0.360	0.860	-0.054	-0.022	0.534	-0.282	1											
Ga	0.558	0.245	0.493	-0.280	0.484	0.011	-0.191	0.189	-0.105	0.525	1										
Mg	0.949	0.286	0.830	-0.207	0.812	-0.051	0.097	0.539	-0.247	0.969	0.466	1									
Mn	-0.408	0.246	-0.322	-0.005	-0.215	0.861	0.711	-0.562	0.968	-0.475	-0.232	-0.432	1								
Na	0.717	0.200	0.532	-0.136	0.765	0.082	0.212	0.486	-0.149	0.762	0.440	0.769	-0.350	1							
Ni	-0.352	0.269	-0.268	-0.077	-0.153	0.883	0.733	-0.523	0.977	-0.412	-0.224	-0.367	0.991	-0.319	1						
Pb	-0.689	-0.389	-0.563	0.279	-0.590	0.102	0.252	-0.674	0.297	-0.622	-0.682	-0.582	0.418	-0.572	0.409	1					
Sb	-0.702	-0.234	-0.453	0.090	-0.408	0.254	0.207	-0.475	0.362	-0.665	-0.624	-0.707	0.513	-0.647	0.471	0.641	1				
Sr	0.795	0.236	0.660	-0.143	0.797	0.185	0.208	0.203	-0.012	0.838	0.546	0.821	-0.223	0.863	-0.195	-0.457	-0.587	1			
Ti	0.925	0.295	0.812	-0.316	0.774	-0.184	-0.063	0.519	-0.394	0.958	0.453	0.938	-0.572	0.812	-0.523	-0.586	-0.704	0.822	1		
V	0.850	0.501	0.735	-0.360	0.839	0.348	0.359	0.256	0.153	0.848	0.457	0.851	-0.052	0.800	-0.003	-0.516	-0.541	0.898	0.831	1	
Zn	-0.434	0.331	-0.293	-0.117	-0.230	0.848	0.672	-0.507	0.939	-0.491	-0.282	-0.461	0.979	-0.396	0.979	0.435	0.533	-0.305	-0.579	-0.095	1

注:空白为无此项

表 2 雅浦海沟 DI51 站位沉积物的部分元素质量分数比值
Table 2 The mass fractions ratios of partial element in the sediment from DI51 station of the Yap Trench

元素比值	沉积层深度/cm										
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	11
w_V/w_{Cr}	0.84	0.75	0.74	0.82	1.27	0.79	0.78	0.83	0.79	0.74	0.8
w_{Fe}/w_{Al}	1.05	1.03	0.97	0.96	0.94	0.95	0.94	0.95	0.96	0.94	1.04
w_{Ti}/w_{Al}	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
$w_{Ti样品}/w_{TiPAAAS}$	0.67	0.70	0.65	0.66	0.65	0.63	0.61	0.57	0.58	0.57	0.54

注: * 表示澳大利亚太古代页岩中 Ti 的质量分数^[38]

w_V/w_{Cr} 比值可用于判断沉积环境是氧化环境还是还原环境, w_V/w_{Cr} 比值低于 2, 沉积物的形成环境为氧化环境, 否则为还原环境^[40]。D151 站位 w_V/w_{Cr} 比值均低于 2, 表明该站位表层沉积物形成于氧化环境。所有沉积层中 w_V/w_{Cr} 变化范围为 0.67~1.27, 总体上该站位沉积物可能主要形成于氧化环境, 这种氧化环境可能与含氧量较高的南极底层水的进入有关^[41]。

表 3 常量元素质量分数(%)
Table 3 The mass fraction of major elements (%)

沉积层深度/cm	w_{Al}	w_{Ca}	w_{Fe}	w_{Mg}	w_{Mn}	w_{Na}	w_{Ti}
0~1	7.22	2.43	6.38	4.04	0.64	3.45	0.40
1~2	7.45	2.20	6.42	4.31	0.75	3.64	0.42
2~3	7.49	1.96	6.06	4.04	0.65	3.13	0.39
3~4	7.16	2.03	6.15	4.00	0.67	3.39	0.39
4~5	6.92	1.90	6.03	3.99	0.67	2.86	0.39
5~6	6.75	1.90	5.93	3.90	0.70	2.96	0.38
6~7	6.64	1.77	5.75	3.73	0.77	2.95	0.37
7~8	6.19	1.66	5.42	3.45	0.66	2.78	0.34
8~9	6.23	1.73	5.55	3.49	0.77	2.74	0.35
9~10	6.22	1.72	5.42	3.41	0.80	2.83	0.34
10~12	5.04	1.61	4.84	3.02	0.77	2.86	0.32
12~14	5.98	1.86	5.43	3.47	1.20	2.44	0.32
14~16	6.19	1.89	5.51	3.59	1.12	2.75	0.35
16~18	5.79	1.75	5.07	3.18	2.56	2.75	0.31
18~20	6.03	1.70	5.37	3.21	0.71	2.77	0.35
20~22	6.15	1.71	5.41	3.24	1.06	2.34	0.34

表 4 微量元素质量分数($\times 10^{-6}$)
Table 4 The mass fraction of trace elements ($\times 10^{-6}$)

沉积层深度/cm	w_{As}	w_B	w_{Ba}	w_{Cd}	w_{Co}	w_{Cr}	w_{Cu}	w_{Ga}	w_{Ni}	w_{Pb}	w_{Sb}	w_{Sr}	w_V	w_{Zn}
0~1	0.55	124	358	0.37	44.0	207	332	19.97	226	26	2.08	178	174	84
1~2	1.20	123	445	0.38	48.6	240	370	13.03	256	28	1.38	173	179	95
2~3	0.80	116	453	0.31	43.9	226	314	19.95	229	22	1.17	147	168	86
3~4	0.85	120	486	0.35	43.6	205	346	25.75	225	25	0.83	175	167	87
4~5	0.42	118	495	0.30	44.5	130	302	17.33	234	33	1.63	160	164	87
5~6	0.38	116	496	0.31	45.1	202	309	15.16	244	32	1.90	150	160	88
6~7	0.07	113	544	0.31	44.9	197	326	15.02	246	32	1.72	146	154	91
7~8	0.08	107	710	0.29	40.9	175	281	14.27	205	30	1.85	147	146	81
8~9	0.00	113	554	0.31	44.9	186	311	14.98	240	30	2.18	135	147	90
9~10	0.02	110	575	0.31	45.5	191	322	15.47	245	31	2.34	131	141	94
10~12	0.00	99	580	0.30	44.6	173	294	12.89	238	33	2.18	124	138	93
12~14	0.63	114	437	0.37	44.1	210	414	15.07	348	31	2.01	119	141	110
14~16	1.05	118	561	0.35	45.8	209	351	15.86	287	29	2.23	135	153	104
16~18	0.78	106	507	0.50	53.5	110	765	14.85	568	34	2.54	145	161	149
18~20	0.90	112	347	0.31	39.5	181	283	16.17	229	30	1.82	128	145	93
20~22	0.98	115	374	0.34	41.5	167	378	14.69	294	31	2.50	127	148	108

扫描电镜结果表明 D151 站位沉积物的主要成分为黏土,黏土是典型的陆源物质,说明陆源成分对沉积物贡献较大。蛇纹石可由橄榄石蚀变产生,其形成与热液活动密切相关^[42],在俯冲带可以发生大规模的蛇纹石化反应。白云石主要由碳酸钙与 Mg^{2+} 作用产生^[43],由于该站位深度远深于碳酸盐补偿深度(CCD),因此白云石可能来自海沟上方沟壁的沉积物。火山玻璃的存在对应火山事件,第三纪雅浦海沟与卡罗琳海岭相撞使得雅浦海沟缺少活动的火山作用^[44],但所发现的火山玻璃说明雅浦海沟可能仍存在火山活动。该沉积物样品中重晶石尺寸多为 $2\sim 3\ \mu m$,归为生物成因^[45]。根据 SEM 观察结果(图 4),D151 站位主要非生物成分为黏土,按照张富元等提出的深海沉积物三角命名方案^[46],D151 站位沉积物中钙质和硅质生物含量都小于 50%,应归为深海黏土类。电子扫描显微镜观察和 EDS 能谱分析结果显示,沉积物样品中含有长石。长石可以陆源碎屑的形式进入沉积物,也能在火成岩中存在,因此也可能来自于海底岩石的分解。

4 结 语

我们对雅浦海沟南部 D151 站位柱状沉积物样品含水率、总有机碳(TOC)、多种金属元素质量分数、粒径以及表面形貌进行了分析研究,该沉积物的含水率和 TOC 质量分数随沉积物深度增加而下降,可能与上覆沉积物的挤压作用和有机物的降解有关,其 TOC 质量分数与渤海湾北部和马里亚纳海沟“挑战者”深渊的沉积物较为接近,明显低于冲绳海槽北部 S9 站位。Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Zn 受海底岩石剥蚀影响较大。沉积物中的 Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb, Sr, V, Zn 的质量分数在 16~18 cm 沉积层出现最大值,可能与火山活动产生的锰微结核有关。D151 站位沉积物的主要物质来源为陆源和火山源,该站位沉积环境为氧化环境,可能与南极底层水输入有关。沉积物主要成分为黏土、微生物化石以硅藻、放射虫以及海绵骨针为主,该站位位于碳酸盐补偿深度(CCD)以下,碳酸钙溶解,因此未发现钙质生物和碳酸钙。该站位沉积物属于深海黏土,以粉砂和砂质粉砂为主,搬运方式以均匀悬浮为主,沉积动力接近于冲绳海槽北部,C-M 图的数据点分布较为分散,可能与雅浦海沟西侧较为陡峭有关,随着搬运动力减小,粒度逐渐转向负偏,分选系数逐渐减小,显示形成该站位沉积物的水动力环境在地质历史中整体上较为稳定。

参考文献(References):

- [1] LEG 154 Scientific Party. Ceara Rise sediments document ancient climate change[J]. EOS, 1995, 76(5): 41-45.
- [2] ZHAO X L, LI S J. Micropaleontology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2017: 2-4. 赵秀丽, 李守军. 微体古生物学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 2-4.
- [3] SUN X, SONG J M, YU Y, et al. A rapid method for determining the total organic carbon and total nitrogen in marine sediments with an elemental analyzer[J]. Marine Science, 2014, 38(7): 14-19. 孙莹, 宋金明, 于颖, 等. 元素分析仪快速测定海洋沉积物 TOC 和 TN 的条件优化[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 14-19.
- [4] SHUMILIN E N, CARRIQUIRY J D, CAMACHO-IBAR V F, et al. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California[J]. Marine Chemistry, 2002, 79(3-4): 113-131.
- [5] ZHANG J, MENG X W, XIA P. Barium cycle during the early diagenesis of deep-sea sediments and its implications for paleoceanographical environment[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 270-280. 张俊, 孟宪伟, 夏鹏. 深海沉积物早期成岩过程中的 Ba 循环及其古海洋环境意义[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 275-280.
- [6] CHEN Y. 'Dragon' goes to sea again, the first exploration of the secret of the northwest Indian Ocean[N/OL]. Science and Technology Daily, 2017-02-09[2019-03-01]. http://www.kjrb.com/kjrb/html/2017-02/09/content_361708.htm?div=-1. 陈瑜. “蛟龙”再出海首探西北印度洋秘密[N/OL]. 科技日报, 2017-02-09[2019-03-01]. http://www.kjrb.com/kjrb/html/2017-02/09/content_361708.htm?div=-1.
- [7] LIU Y Z, LIU X H, LÜ X Q, et al. Watermass properties and deep currents in the northern Yap Trench observed by the Submersible Jiaolong system[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2018, 139: 27-42.
- [8] SATO T, KASAHARA J, KATAO H, et al. Seismic observations at the Yap Islands and the northern Yap Trench[J]. Tectonophysics, 1997, 271(3-4): 285-294.
- [9] BECCALUVA L, SERRI G, DOSTAL J. Geochemistry of volcanic rocks from the Mariana, Yap and Palau Trenches bearing on the tec-

- tono-magmatic evolution of the Mariana Trench-arc-Backarc system[J]. *Developments in Geotectonics*, 1986, 21(5): 481-508.
- [10] CHEN L, TANG L M, LI X H, et al. Geochemistry of peridotites from the Yap Trench, Western Pacific: implications for subduction zone mantle evolution[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(9): 1037-1051.
- [11] DONG D D, ZHANG G X, QIAN J, et al. Geomorphology and stratigraphic frame work of the Yap subduction zone, Western Pacific [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 29-35. 董冬冬, 张广旭, 钱进, 等. 西太平洋雅浦俯冲带的地貌及地层结构特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 29-35.
- [12] YUE X A. Biological geochemical characteristics of the sediments in the Yap Trench abyssal and hadal zones and its paleoceanographical significance[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2017. 岳新安. 雅浦海沟深渊和超深渊沉积物的生物地球化学特征及其古海洋学意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2017.
- [13] LÜ R Y, ZHU M X, LI T, et al. Speciation of solid-phase iron in mud sediments collected from the shelf of the East China Sea: constraints on diagenetic pathways of organic matter, iron, and sulfur[J]. *Geochimica*, 2011, 40(4): 61-69. 吕仁燕, 朱茂旭, 李铁, 等. 东海陆架泥质沉积物中固相 Fe 形态及其对有机质、Fe、S 成岩路径的制约意义[J]. *地球化学*, 2011, 40(4): 61-69.
- [14] National Center of Ocean Standards and Metrology. Specifications for oceanographic survey: part 8 Marine geology and geophysics survey: GB/T 12763. 8—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 8 部分 海洋地质地球物理调查: GB/T 12763. 8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [15] Soil quality—dissolution for the determination of total element content—part 1: Dissolution with hydrofluoric and perchloric acids: ISO 14869—1: 2001[S/OL]. [2018-04-03]. <https://www.iso.org/standard/28454.html>.
- [16] National Technical Committee of Ocean Standardization. Determination of total organic carbon in marine sediment—Nondispersive infrared absorption: GB/T 30740—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. 全国海洋标准化管理委员会. 海洋沉积物中总有机碳的测定—非色散红外吸收法: GB/T 30740—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [17] YU Y J, DUAN L C, WANG H F, et al. Preliminary study on physico-mechanical properties of deep-sea sediments from Western Pacific[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2016, 36(5): 1-4. 于彦江, 段隆臣, 王海峰, 等. 西太平洋深海沉积物的物理力学性质初探[J]. *矿冶工程*, 2016, 36(5): 1-4.
- [18] ZHU K J, HE S P, CHEN F, et al. Engineering geological characteristics and genesis of the sediments from the southern Mariana Trench[J]. *Journal of Geology*, 2015, 39(2): 251-257. 朱坤杰, 何树平, 陈芳, 等. 马里亚纳海沟南部海域沉积物的工程地质特性及其成因[J]. *地质学报*, 2015, 39(2): 251-257.
- [19] WANG K, WU J Z, AN Y N, et al. Physico-mechanic properties of surface sediments in the north of Bohai Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(1): 14-18. 王凯, 吴建政, 安永宁, 等. 渤海湾北部表层沉积物的物理力学性质[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(1): 14-18.
- [20] JIANG T. The sedimentary geochemical characteristics of the core S9 in the northern Okinawa Trough and their environmental significance during[D]. Qingdao: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2015. 姜韬. 冲绳海槽北部 S9 柱沉积地球化学特征及其环境指示[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
- [21] LÜ W Z. Study on grain size characteristics of sediments from different marine environment[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2017: 7. 吕文哲. 海岸带至深海典型海洋沉积物粒度特征研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017: 7.
- [22] WANG F L, HE G W, WANG H F, et al. Geochemistry of rare earth elements in a core from Mariana Trench and its significance[J]. *Marinegeology and Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 67-75. 王汾连, 何高文, 王海峰, 等. 马里亚纳海沟柱状沉积物稀土地球化学特征及其指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 67-75.
- [23] PASSEGA R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(4): 830-847.
- [24] YANG J C, CUI Z, DADA O A, et al. Distribution and enrichment of trace metals in surface marine sediments collected by the manned submersible Jiaolong in the Yap Trench, northwest Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 1035-1041.
- [25] PAN Z L, SHI S Q. Study on the sediments and sedimentation in Okinawa Trough[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1986, 6(1): 19-31. 潘志良, 石斯器. 冲绳海槽沉积物及其沉积作用的研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(1): 19-31.
- [26] WU B, LI D, ZHAO J, et al. Vertical distribution of sedimentary organic carbon in the Yap Trench and its implications[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(9): 304-313. 吴彬, 李栋, 赵军, 等. 雅浦海沟沉积有机碳垂向分布及其指示意义[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 304-313.
- [27] CHEN B, HU L M, DENG S G, et al. Organic carbon in surface sediments of the Bohai Bay, China and its contribution to sedimentation[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 35(5): 37-42. 陈彬, 胡利民, 邓声贵, 等. 渤海湾表层沉积物中有机碳的分布与物源贡献估算[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 35(5): 37-42.
- [28] GLUD R N, WENZHÖFER F, MIDDELBOE M, et al. High rates of microbial carbon turnover in sediments in the deepest oceanic trench on Earth[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(4): 284-288.

- [29] KVENVOLDEN K A. Gas hydrates of the Middle America Trench—deep sea drilling project leg 84¹[R]//Deep Sea Drilling Project Initial Reports, Washington, U.S.A.: Government Printing Office, 1985, 84: 667-682.
- [30] MEISTER P, PROKOPENKO M, SKILBECK G, et al. Compilation of total organic and inorganic carbon data from Peru margin and eastern equatorial Pacific drill sites (ODPLEGS 112, 138, AND 201)¹[R]//Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results, New York, U.S.A.: Joint Oceanographic Institution, 2005, 201: 1-20.
- [31] MEISTER P, GUTJAHR M, FRANK M, et al. Dolomite formation within the methanogenic zone induced by tectonically driven fluids in the Peru accretionary prism[J]. *Geology*, 2011, 39(6): 563-566.
- [32] RENATE E B, ROBERT H B, PETER R B, et al. Morphologies and transformations of celestite in seawater: the role of acantharians in strontium and barium geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3273-3279.
- [33] PANG Y, FAN D J, SUN X Y, et al. Feature and origin of suspended barite in the Yangtze River Estuary and its adjacent area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016(34): 524-530. 逢悦, 范德江, 孙晓霞, 等. 长江口及邻近海域悬浮颗粒重晶石特征与成因探讨[J]. *沉积学报*, 2016(34): 524-530.
- [34] BERNSTEIN R E, BYRNE R H, BETZER P R, et al. Morphologies and transformations of celestite in seawater: the role of acantharians in strontium and barium geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3273-3279.
- [35] SUN H Y, ZHU Q S, LI H Z, et al. The technical state and development trend of the direct reduction of titanomagnetite by fluidized bed[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(6): 35-48. 孙昊延, 朱庆山, 李洪钟. 钒钛磁铁矿流态化直接还原技术现状与发展趋势[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(6): 35-48.
- [36] YAN Q S, WANG K S, SHI X F. Provinces and provenance of heavy minerals in surface sediments of the sea area near Zhongsha Islands in South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 17-24. 鄢全树, 王昆山, 石学法. 南沙群岛近海表层沉积物重矿物组合分区及物质来源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 17-24.
- [37] ZHU A M, SHI X F, ZOU J J, et al. Paleoenvironment changes in the northern Okinawa Trough since 88 ka: evidences from element geochemistry[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(6): 58-69. 朱爱美, 石学法, 邹建军, 等. 88 ka 以来冲绳海槽北部古环境演化: 来自元素地球化学的证据[J]. *海洋学报*, 2015, 37(6): 58-69.
- [38] MURRAY R W, LEINEN M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20): 3869-3878.
- [39] WU Q M, WEN Q Z, PAN J Y, et al. Average chemical composition of Loess in China: as a good representative of the upper continental crust[J]. *Lithofacies Paleogeography*, 1995, 15(2): 127-136.
- [40] RAISWELL R, PLANT J. The incorporation of trace elements into pyrite during diagenesis of black shales, Yorkshire, England[J]. *Economic Geology*, 1980, 75(5): 684-699.
- [41] JOHNSON G C, TOOLE J M. Flow of deep and bottom waters in the Pacific at 10°N[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(2): 371-394.
- [42] YU X, CHU F Y, CHEN H L, et al. Advances in research of abyssal peridotite serpentinization[J]. *Journal of Marine Science*, 2011, 29(1): 96-103. 余星, 初凤友, 陈汉林, 等. 深海橄榄岩蛇纹石化作用的研究进展[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 96-103.
- [43] HE Y L, LIU B, QIN S. Study on the Dolomitization and Dolostone Genesis[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(2): 1010-1020. 赫云兰, 刘波, 秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 1010-1020.
- [44] HAWKINS J, BATIZA R. Metamorphic rocks of the Yap arc-trench system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 37(2): 216-229.
- [45] WANG D Y, LU XIAN C, XU S J, et al. Application of deep sea sedimentary barite in paleoceanographic research[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 67-71. 王大勇, 陆现彩, 徐士进, 等. 深海沉积重晶石在古海洋研究中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 67-71.
- [46] ZHANG F Y, ZHANG W Y, ZHANG X Y, et al. Classification and nomenclature of deep sea sediments[M]. Beijing: Ocean Press, 2013: 182-184. 张富元, 李安春, 林振宏, 等. 深海沉积物分类与命名[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 182-184.

Composition and Morphology of Hadal Zone Sediment in the South Yap Trench

NI Xin^{1,2}, SUN Cheng-jun³, JIN Hong⁴, YANG Gui-peng^{1,2}, DING Hai-bing¹

(1. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;*

3. *Marine Ecology Center, The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

4. *Qingdao Eco-environmental Monitoring Centre, Shandong Province, Qingdao 266003, China)*

Abstract: The water content, total organic carbon (TOC), multiple metal elements content, grain size and surface morphology of a columnar sediment from D151 station (137°37'45"E, 8°2'23"N) in hadal zone of the southern Yap Trench are analyzed. The results show that the water content ranges from 55% to 72%, similar to the hadal sediment from Challenger Deep, higher than sediment from north Okinawa Trough and decreases as depth increases, attributing to the extrusion of overlying sediment. The mass fraction of TOC is closer to those of both Challenger Deep and the Bohai Bay, lower than north Okinawa Trough and decreases as depth increases, which may be related to the degradation of organic matter. The contents of Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Zn in the sediment samples are affected by the denudation of rocks in sea, and the content of Al, B, Ca, Fe, Mg and V are mainly affected by terrestrial materials. Volcanic glass fragments found in the sediment are corresponded to volcanic event, and the maximum mass fraction of Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Sb, Sr, V, Zn in the sediment layer from 16 cm to 18 cm may be related to volcanic activity. The sedimentary environment at D151 station is oxic. The main sources of sediment are terrestrial and volcanic, sediments consist of silt and sandy silt, and its grain sizes are similar to those of north Okinawa Trough and higher than those of Challenger Deep. The sedimentary process is mainly uniform suspension. The distribution of data points of C-M plot of the sediment are scattered, which might be related to the steepness of the west side of the Yap Trench. Because this site is below the calcium carbonate compensation depth (CCD), the microbial fossils found in the sediment are mainly siliceous organisms, calcareous organisms are not found. The hydrodynamic environment of the sediment at this station is relatively stable throughout the geological history.

Key words: Yap Trench; elemental composition of sediment; hadal zone; sedimentary environment; sediment grain size

Received: December 4, 2019