

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019110601

雅浦海沟南缘海底表层矿物碎屑粒度特征及其物源指示

陈康^{1,2}, 徐继尚^{1,2,3,4}, 李广雪^{1,2,3,4}, 田举^{1,2}, 杨继超⁵, 周尚^{1,2}, 孙思婷^{1,2}

1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海洋地球科学院, 青岛 266100

3. 海洋油气开发与安全保障教育部工程研究中心, 青岛 266100

4. 青岛海洋科学与技术国家试点实验室, 青岛 266100

5. 国家深海基地管理中心, 青岛 266237

摘要: 对取自雅浦海沟南缘海域的 112 个表层沉积物样品, 进行了矿物碎屑粒度特征和粒度组分分离分析, 探讨了矿物碎屑的来源。结果表明, 研究区海底表层沉积物的矿物碎屑主要粒级是粉砂和黏土。使用粒度组分分离方法, 由细到粗共分离出四个组分: M1、M2、M3 和 M4, 其中 M1 和 M2 为风尘物质, 遍布整个研究区; M3 和 M4 为火山碎屑和硅质生物碎屑, 主要分布在雅浦海沟和西加洛林海槽附近。雅浦海沟和西加洛林海槽内矿物碎屑偏粗, 峰态值偏小, 分选差, 反映物源复杂; 西加洛林海盆内矿物碎屑偏细, 峰态值偏小, 分选较差, 物源多样; 西加洛林海脊处矿物碎屑最细, 峰态值普遍较大, 分选好, 优势粒级明显, 物源相对单一。从海脊、海盆到海槽与海沟, 矿物碎屑粒径变粗, 分选变差, 物源逐渐变得复杂, 表明矿物碎屑分布与构造环境密切相关。

关键词: 表层沉积物; 矿物碎屑; 粒度特征; 物源; 雅浦海沟

中图分类号:P736.21 文献标识码:A

Grain-size characteristics of the surface clastic sediments on the southern margin of the Yap Trench and their provenance implications

CHEN Kang^{1,2}, XU Jishang^{1,2,3,4}, LI Guangxue^{1,2,3,4}, TIAN Ju^{1,2}, YANG Jichao⁵, ZHOU Shang^{1,2}, SUN Siting^{1,2}

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Engineering Research Center of Marine Petroleum Development and Security Safeguard, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

4. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China

5. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The grain size characteristics of the surface detrital sediments near the southern margin of Yap trench and their implications for sediment provenance were studied. Results show that the sediments are dominated by silt and clay in the region. Using the method of grain size component separation, four components, M1, M2, M3 and M4, were separated from fine to coarse. Among them, M1 and M2 are wind dust, which are distributed throughout the study area. M3 and M4 are pyroclast and siliceous bioclast mainly distributed near the Yapu Trench and West Caroline Trough. The detrital particles are rather coarse in the Yap Trench and the West Caroline Trough, whereas the kurtosis figure is small and the sorting is poor, indicating a complex sediment source; the sediments in the West Caroline basin are relatively fine, with low kurtosis and poor sorting, showing a relatively complex material source; whereas the sediments on the West Caroline ridge are the finest with high kurtosis and good sorting, suggesting a rather simple sediment source. From the ridge, basin to the trough and trench, the clastic sediments gradually become coarser, and poorly sorted, with the provenance gradually becoming more complex. It suggests that the distribution of mineral composition of sediments are closely related to the tectonic environment.

Key words: surface sediments; mineral detritus; grain size; provenance; Yap trench

资助项目: 自然资源部“全球变化与海气相互作用”专项“西太平洋 PAC-CJ15 区块海底底质和底栖生物调查”(GASI-02-PAC-CJ15)

作者简介: 陈康(1992—), 男, 硕士, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: ck@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 徐继尚(1981—), 硕士生导师, 副教授, E-mail: jishangxu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-11-06; 改回日期: 2020-01-09。文凤英编辑

深海大洋沉积物的来源主要有生物碎屑、火山碎屑以及季风和洋流带来的陆源碎屑等^[1-3]。由于深海大洋中的陆源沉积物粒径普遍偏细, 故其粗粒沉积物主要来自于生物源、海底火山以及热液等。长期以来, 人们普遍认识到粒度特征是沉积物的主要特征之一, 不但可以作为研究沉积物输运方式和沉积环境的指标, 还可以用来指示物源^[4-9]。近年来, 有关学者利用不同的函数模型和数学方法对沉积物粒度进行分析, 探讨了其粒度特征、输运趋势、沉积环境和物源^[10-13]。王汾连等^[10]对马里亚纳海沟南部的柱状沉积物进行了粒度分析, 发现该区域的沉积物粒径以 4~63 μm 为主, 分选系数均值为 1.77, 分选较差, 结合黏土矿物和稀土元素特征推测其物源主要为火山和陆源风尘物质。付峰等^[11]对东太平洋 CC 区西区的 12 个表层沉积物样品进行了分析, 指出沉积物平均粒径由南向北逐渐变粗, 砂含量也逐渐增多, 反映了其水动力条件从南到北逐渐增强, 并结合黏土矿物和地球化学数据推测研究区物源为亚洲黄土和附近的火山物质。周宇等^[12]利用 Weibull 函数对帕里西维拉海盆柱状沉积物进行了组分分离, 分离出粒径范围为 0.5~16 μm 的细粒组分和 1.6~32 μm 的粗粒组分, 其物源分别为亚洲大陆的风尘和当地海脊、岛弧的火山物质。周烨等^[13]同样也利用此方法对菲律宾海西北部奄美三角盆地柱状沉积物的粒度特征进行了研究, 提取出碎屑沉积物中的 4 个不同组分, 其中超细粒组分粒度范围为 0.04~0.9 μm, 主要来源于海洋自生黏土; 细粒组分粒度范围为 0.2~32 μm, 其物源主要为亚洲大陆的风尘; 粗粒组分和超粗粒组分粒度范围分别为 0.3~90 μm 和 3~160 μm, 这两个组分的物源均为当地海脊和岛弧的火山物质。

众所周知, 太平洋板块在西太平洋边缘沿海沟俯冲于亚洲大陆和岛弧之下, 形成了众多的沟弧系统, 而雅浦海沟则是其中的代表。雅浦海沟地处西北太平洋暖池核心区, 最大水深超过 8000 m, 沉积物来源及沉积环境复杂。目前国内外针对雅浦海沟附近海域的研究多集中在构造岩石学方面^[14-17], 缺乏详细的沉积物粒度资料。粒度分析作为海洋沉积物测试分析中一项最基本的指标, 不但能够反映沉积物“源-汇”过程^[5, 8], 而且还蕴藏着海平面升降、构造运动和气候环境变化等方面的信息^[18]。

本文旨在通过对西太平洋雅浦海沟南缘西加洛林海盆北部表层沉积物样品的矿物碎屑进行粒度分析, 并借鉴粒度组分分离方法, 研究矿物碎屑粒度特征, 并据此初步探讨矿物碎屑来源。

1 研究区概况

本文研究区位于太平洋板块、菲律宾板块与加洛林板块的交界处(图 1), 为西太平洋暖池区的核心部位。处在西加洛林海盆北部, 西部紧接帕劳群岛, 西北部与菲律宾海相连, 南端为赤道新几内亚大陆。西加洛林海槽穿过研究区南部, 北部横跨雅浦海沟、西加洛林海脊和索罗尔海槽^[17, 19-20]。研究区水深范围变化较大(2395~7837 m), 平均水深为 4015 m(图 2)。

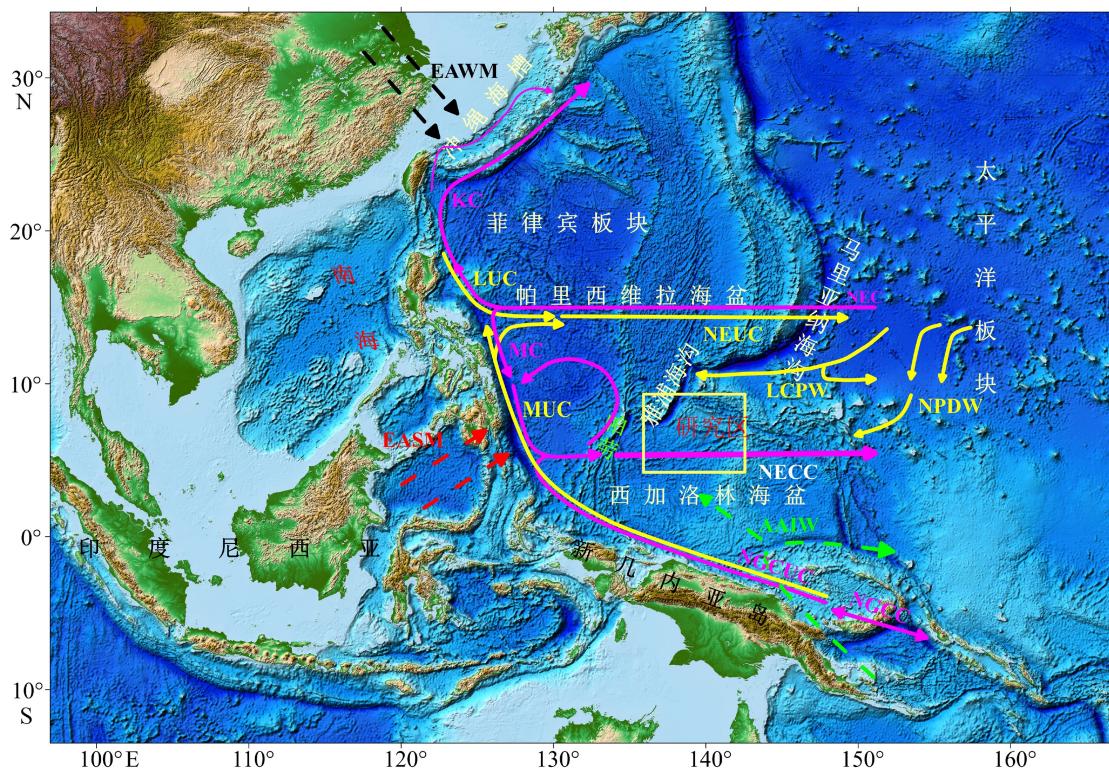
热带西太平洋是一个洋流十分复杂的海域, 是许多水团的十字路口, 从图 1 中可以看出影响到研究区的流场主要包括赤道流与西太平洋的边界流。影响到研究区的表层洋流包括北赤道流和棉兰老流^[21-23], 南部的新几内亚近岸流也会沿着西太平洋边界北上与南下的棉兰老流相遇, 形成环流体系, 影响到研究区^[22]。

深层流方面, 发源于吕宋岛的吕宋潜流会沿着吕宋近岸向南输运, 与北向的棉兰老潜流相遇, 汇入东向的北赤道潜流影响到研究区^[22]。在新几内亚附近, 南极中层水会有一个西北向的分支流向研究区^[23]。在北纬 13°附近, 绕极深层水沿马里亚纳边界由东北向西南方向运输, 并穿过马里亚纳和雅浦海沟之间的交界处流向西马里亚纳海盆, 而在转向处还有一个向东的分支; 同时, 由北向南的北太平洋深层水可携带绕极底层水东向的分支一起流向西加洛林海盆, 进而影响到研究区^[24]。

由于研究区远离大陆, 海底沉积物几乎不受河流输运物质的影响, 其海底沉积物主要由当地的自生物质堆积形成, 包括钙质和硅质生物遗体、火山和海底热液活动形成的物质, 另外还有宇宙物质以及由东亚冬季风(EAWM)和高层西风(EASM)带来的亚洲风尘等外来物^[25]。亚洲风尘粒径普遍偏细, 形成了研究区沉积物中的细粒组分, 而当地的生物源和火山源物质粒径较粗, 是研究区沉积物中粗粒组分的主要来源。

2 样品来源及分析方法

本文研究样品是基于“全球变化与海气相互作用”专项, 于 2017 年 4 月至 6 月使用箱式取样器获得, 所有表层样站位按 40 km 的间隔均匀布设, 少数站位的取样位置根据现场条件有所偏移, 共计 112 个站位, 其站位分布见图 2。

图 1 研究区位置及地质背景图^[26]

图中红色箭头代表表层与次表层流, 黄色箭头代表深层流, 绿色箭头代表南极中层水; 其中, AAIW: 南极中层水, KC: 黑潮, LCPW: 绕极深层水, LUC: 吕宋潜流, MC: 棉兰老流, MUC: 棉兰老潜流, NEC: 北赤道流, NECC: 北赤道逆流, NEUC: 北赤道潜流, NGCC: 新几内亚近岸流, NGCUC: 新几内亚沿岸潜流, NPDW: 北太平洋深层水, EAWM: 东亚冬季风, EASM: 东亚夏季风。

Fig.1 Study area and its geological background^[26]

Yellow arrows represent the bottom currents and undercurrents, Green arrows represent the Antarctic Intermediate Water, Red arrows represent the surface and sub-surface currents; AAIW: Antarctic Intermediate Water, KC: Kuroshio Current, LCPW: Lower Circumpolar Water, LUC: Luzon Undercurrent, MC: Mindanao Current, MUC: Mindanao Undercurrent, NEC: North Equatorial Current, NECC: North Equatorial Counter Current, NEUC: North Equatorial Undercurrent, NGCC: New Guinea Coastal Current, NGCUC: New Guinea Coastal Undercurrent, NPDW: North Pacific Deep Water, EAWM: East Asian Winter Monsoon, EASM: East Asian Summer Monsoon.

由于沉积物中发育大量钙质和硅质生物碎屑, 为了尽可能地提取矿物碎屑的信息, 粒度的前处理流程需要去除有机质、钙质和硅质生物。使用碳酸钠去除硅质生物是经过前人检验的方法, 前人大量研究证明碳酸钠能去除沉积物中绝大部分的硅质生物^[27-30]。实验的具体流程如下:

因本研究区样品粒径均小于 2 mm, 故所有沉积物样品一律采用激光粒度分析仪进行粒度分析。取充分混匀的样品 0.5~0.6 g, 用过量的过氧化氢 (H_2O_2) 溶液充分去除有机质。之后加入过量 10% 盐酸去除钙质生物。处理完的样品离心清洗一次, 再加入 20 mL 1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液于 85 °C 水浴反应 4 h, 以去除硅质生物。之后上机测试, 样品浓度(遮光度)一般控制在 10%~20% 之间, 但最低不能低于 5%, 最高不能大于 20%。本文使用

Mastersize-2000 激光粒度仪测试, 该仪器的测试粒径范围是 0.02~2 000 μm , 重复测试误差 < 5%。鉴于矩值法具有更好的代表性和准确性^[31-32], 本文粒度参数的计算采用矩值法^[33]。

$$\text{平均粒径: } \bar{x} = \frac{\sum f M_\phi}{100}$$

$$\text{分选系数: } \delta = \sqrt{\sum f (M_\phi - \bar{x})^2 / 100}$$

$$\text{偏态: } Sk = \frac{\sum f (M_\phi - \bar{x})^3}{100 \delta^3}$$

$$\text{峰态: } Ku = \frac{\sum f (M_\phi - \bar{x})^4}{100 \delta^4}$$

其中, f 是各粒级范围的百分含量; M_ϕ 是该粒级区间的粒径中间值, 单位为 Φ 。

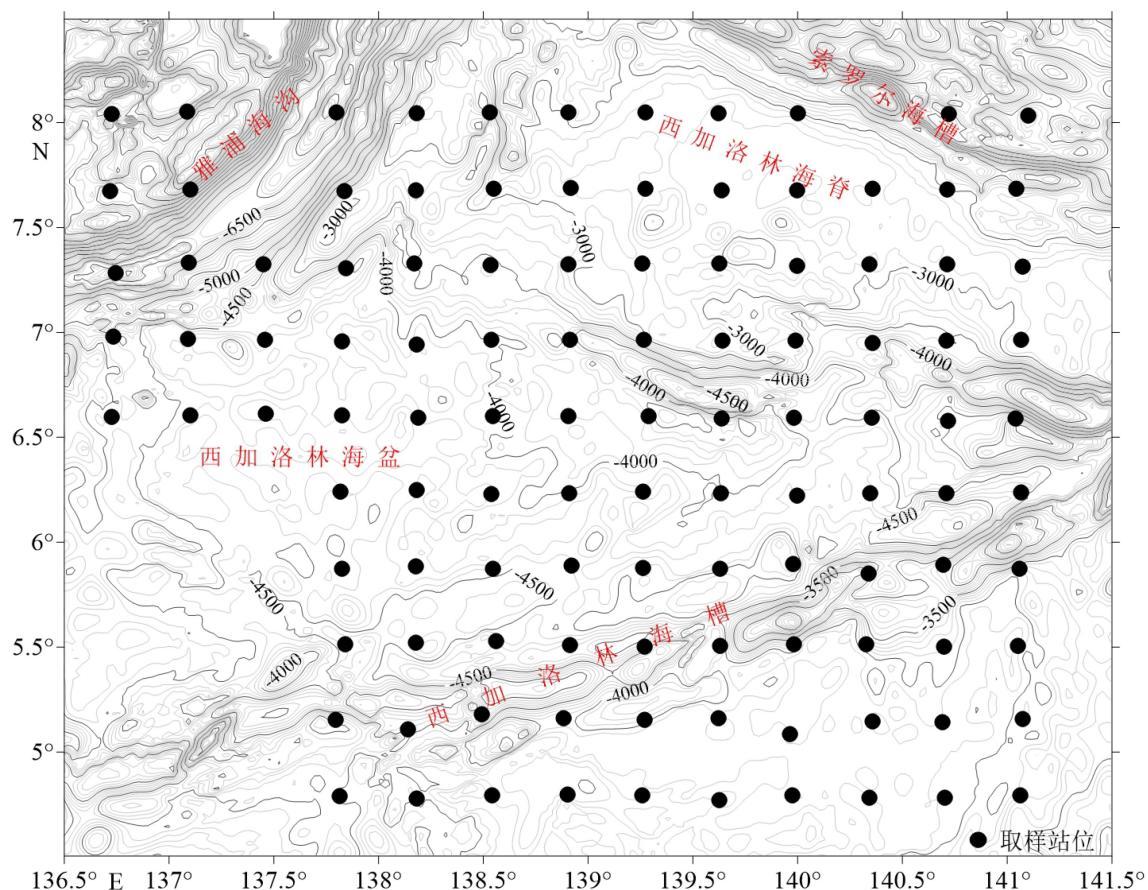


图 2 取样站位分布图

Fig.2 Location of the sampling stations

3 结果

3.1 表层沉积物矿物碎屑粒级组分分布特征

研究区矿物碎屑按粒径大小可以分为黏土、粉砂和砂。各粒级的矿物碎屑百分含量分别为: 砂 0%~6.2%, 平均含量为 1.4%; 粉砂 27.1%~94.4%, 平均含量为 55.8%; 黏土 4.9%~72.9%, 平均含量为 42.9%。由于缺乏研究区附近沉积物相关粒度测试数据作对比, 我们与明洁^[34]在暖池区北部帕里西维拉海盆内测得的沉积物粒级组分进行了比较(处理流程与本文一致), 测试结果非常接近, 说明本文测试数据比较准确, 能够真实反映研究区矿物碎屑的粒度特征。

由图 3 可以看出, 研究区砂的含量非常小, 大部分站位都小于 5%, 反映了研究区表层矿物碎屑粒径整体在砂粒级以下。

研究区粉砂含量较其他两种组分的含量高, 是主要的粒级组分, 粉砂含量呈现出与构造环境明显相关的趋势, 主要表现在西加洛林海槽、雅浦海

沟和西加洛林海盆等水深较深的区域为粉砂含量的高值区, 粉砂平均含量在 65% 以上, 而西加洛林海脊等水深相对较浅的区域为粉砂的低值区, 这部分区域位于碳酸盐补偿深度以上, 主要为钙质沉积区, 粉砂含量为 27%~40%。

黏土和粉砂的分布特征有大致相反的趋势, 即黏土含量高值区和低值区分别对应粉砂含量的低值区和高值区, 黏土含量在研究区内呈现出随着水深的减小有上升的趋势。黏土含量高值区(>50%)主要位于西加洛林海脊处, 而低值区(<10%)主要位于海沟、海槽和海盆等水深较深的区域。

从矿物碎屑的粒级组分来看, 在去除了钙质生物和硅质生物之后, 研究区矿物碎屑的粒级组分以粉砂和黏土为主, 整体分布趋势与研究区水深地形有很大的关系。

3.2 表层沉积物矿物碎屑粒度参数分布特征

采用福克-沃德提出的平均粒径、分选系数、偏态和峰态 4 种参数, 反映沉积物来源和沉积环境。普遍认为, 沉积物平均粒径和分选系数能反映沉积

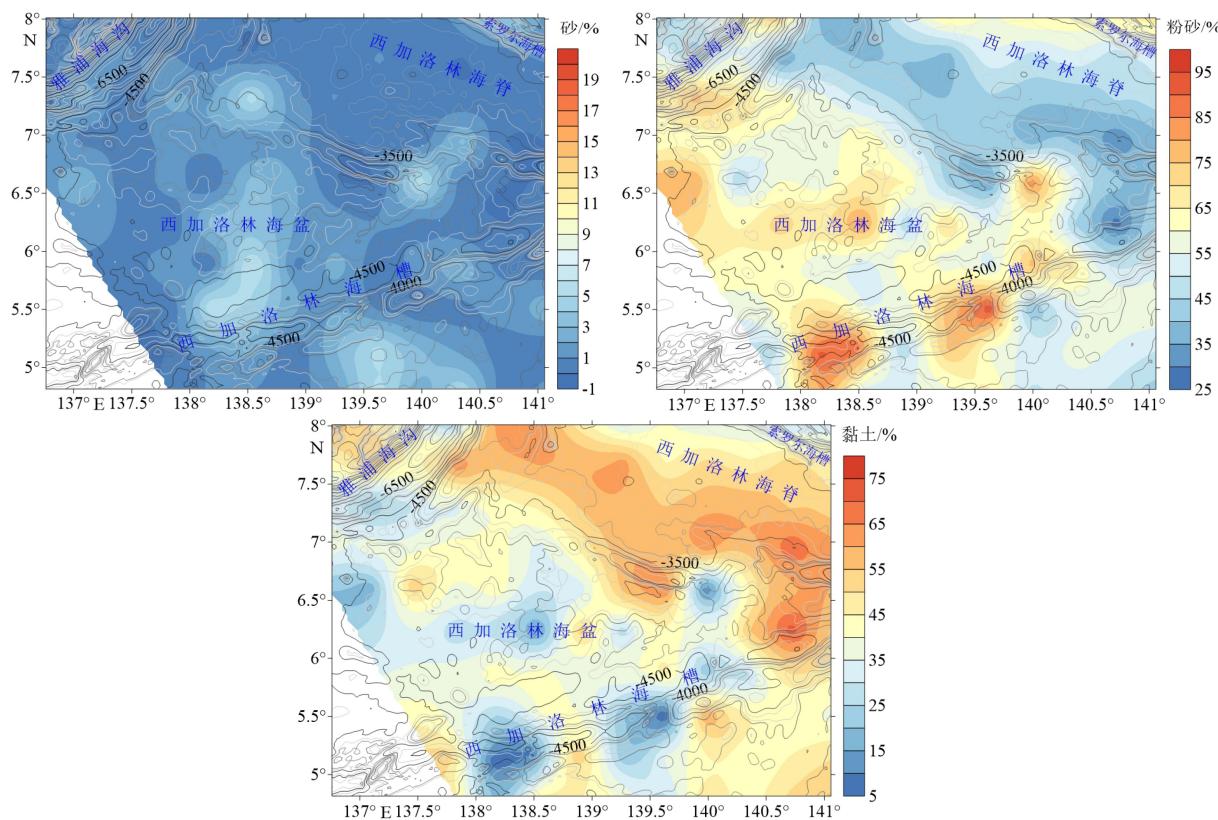


图 3 表层沉积物中的矿物碎屑粒级组分（砂、粉砂与黏土）百分含量分布图

Fig.3 Map of grain size distribution of surface sediments

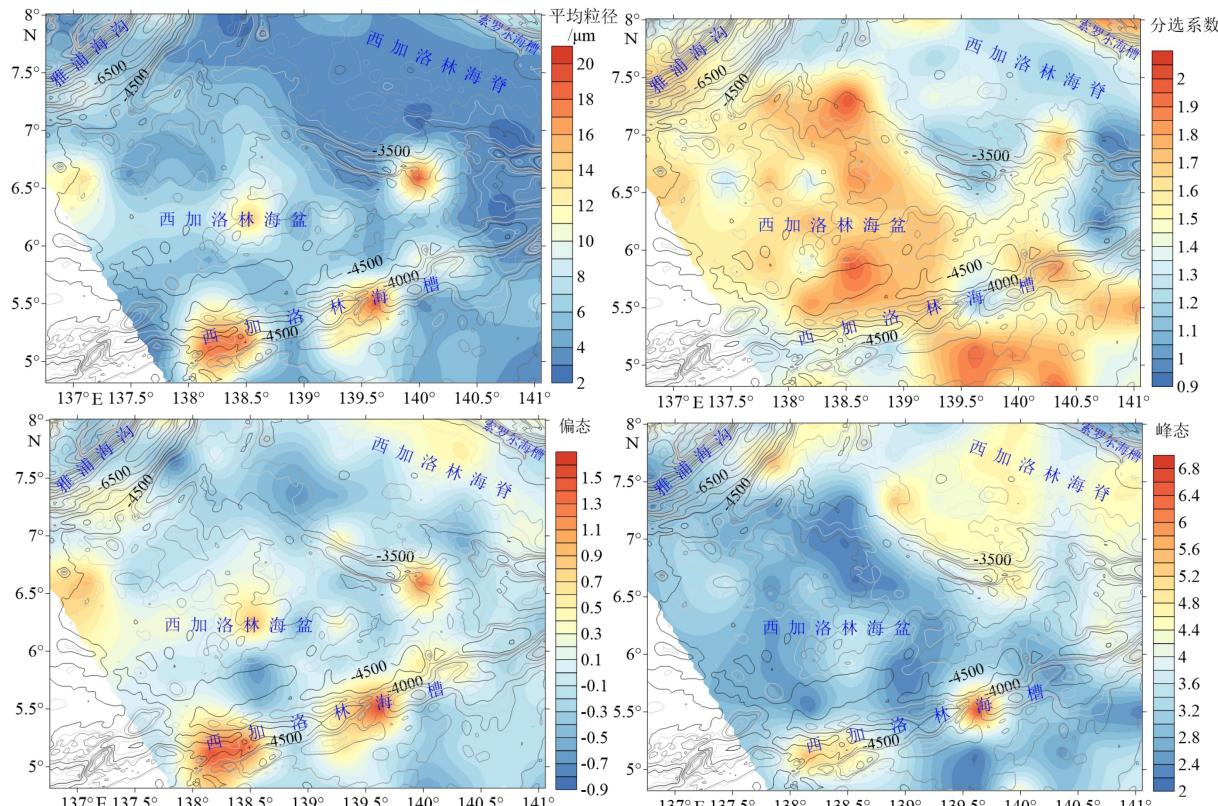


图 4 表层沉积物中的矿物碎屑粒度参数平面分布图

Fig.4 Distribution map of grain size parameters of surface sediments

物的来源信息, 偏态和峰态反映的是沉积环境对沉积物的改造作用^[35]。研究区沉积物中的矿物碎屑粒度参数及分布见图4。

平均粒径指示了沉积物颗粒大小的总体分布趋势。研究区内矿物碎屑的平均粒径的变化范围为2.8~20.2 μm, 平均为5.9 μm。在东北部水深小于3000 m的西加洛林海脊区域, 平均粒径整体小于4 μm; 而在中部和南部水深大于4000 m的区域, 平均粒径几乎都在5.5 μm以上。整体来说, 在西北部的雅浦海沟和南部的西加洛林海槽处, 矿物碎屑的粒径普遍偏粗; 而在东北部的西加洛林海脊处, 矿物碎屑粒径则偏细。

分选系数代表了沉积物的粒度分选程度, 反映了颗粒大小的均匀性, 能够表现出沉积物粒度分布的集中态势。若分选系数小, 则说明分选较好, 有突出的主要粒级, 百分含量高; 反之分选系数大, 则说明粒级分布范围广, 没有主要粒级。其影响因素除了水动力条件和沉积环境的自然地理条件外, 物源也有很大的影响。从图4可以看出, 研究区整体分选系数的变化范围为0.9~2, 平均为1.5, 分选性差。研究区东北部的西加洛林海脊处分选系数较其他区域低, 约为1.3, 分选性较好, 说明该区域的矿物碎屑粒级比较集中。研究区水深较深的雅浦海沟、西加洛林海槽和深海平原处分选系数明显较大, 普遍在1.5以上, 说明这些水深较深的区域矿物碎屑物质组成复杂, 优势粒级不明显。综上可以看出, 研究区矿物碎屑粒度分选系数和区域构造地形密切相关。

偏态代表频率曲线的对称程度, 是沉积物中粗颗粒和细颗粒所占比例的反映, 不仅可以表示沉积物频率曲线分布的对称程度, 而且可以指示中值粒径和平均粒径的相对位置。偏态大于0时, 代表沉积物粒度集中在粗粒部分; 反之, 偏态小于0时, 则说明沉积物中细颗粒物质较多, 粒度集中在细粒部分; 偏态接近0时, 则代表沉积物中粗细颗粒物质含量相当。从图中可以看出, 表层矿物碎屑偏态的变化范围为-0.9~1.7, 平均为0, 属于对称型。从区域分布特征来看, 研究区南部西加洛林海槽、西北部雅浦海沟和中部深海盆地的粗粒分布区为明显的正偏, 而东北部西加洛林海脊附近以及大部分4300 m以上的海域为明显的负偏。

峰态值反映的是沉积物粒度曲线中部和尾部的展形比, 是度量沉积物粒度频率曲线尖锐程度的参数, 能够指示沉积物颗粒粒径分布的集中趋势。一般认为峰态值可以反映环境对于沉积物粒度改

造的情况, 同时也可以反映沉积物来源的颗粒粒径集中情况。研究区表层矿物碎屑峰态值的变化范围为2.1~6.9, 平均为3.5。在东北部西加洛林海脊附近矿物碎屑峰态值普遍较大, 在4.6左右, 矿物碎屑来源粒径范围比较集中, 其中单一的来源优势明显。其他区域峰态则显示出尖锐或者中等, 颗粒粒径范围相对分散。

3.3 表层沉积物矿物碎屑粒度组分分离

本区矿物碎屑物质来源具有多样化特点, 对于同一个沉积体系来讲, 多峰态的粒度特征一般指示不同来源的物质混合。本文用粒度组分分离的方法为本区矿物碎屑物源研究提供粒度方面的证据。

本文采用Qin等^[36]提出的对数正态分布函数识别并拟合各站位多峰分布的粒度组分。对数正态分布函数的分离结果表明, 研究区各站位矿物碎屑粒度可以分离出4个组分(M1、M2、M3、M4), 其中M2、M3为两个主要的组分(图5)。按照粒径从细到粗的顺序依次为: M1组分, 粒度众数约为0.7 μm, 粒度分布范围约为0.3~1.5 μm, 百分含量范围为1.3%~18.8%; M2组分, 粒度众数为4 μm, 粒度分布范围约为1.6~15 μm, 百分含量范围为14.5%~88.3%; M3组分, 粒度众数约为30 μm, 粒度分布范围约为16~100 μm, 百分含量范围为1.5%~84.3%; M4组分, 粒度众数约为200 μm, 粒度分布范围为101~300 μm, 百分含量范围为0.2%~5.2%。

4 讨论

4.1 物源分析

结合前人研究可知, 西北太平洋深海碎屑沉积物中细粒组分的来源主要是亚洲大陆的风尘物质^[37-38], 粗粒组分则主要来自于周围海脊和岛弧的火山物质^[2]。Jiang等^[25]对西菲律宾海的柱状沉积物进行了粒度和Sr-Nd同位素分析, 通过Weibull函数拟合出了两个组分, 其粒度范围分别为0.3~16 μm和0.5~60 μm, 物源分别为来自于中国西部和中部的黄土以及来自于吕宋岛附近的火山物质; 同时指出亚洲大陆在22万年以来的冰期干旱程度不断加深, 使研究区沉积物冰期的沙尘含量高于间冰期。于兆杰等^[39]也对西菲律宾海的柱状沉积物进行了粒度分析, 提取出了3个对环境敏感的粒度组分, 2.4~4.6 μm组分主要来自于吕宋岛河流输运的细颗粒物质, 14~22 μm组分主要来源于亚洲的风尘,

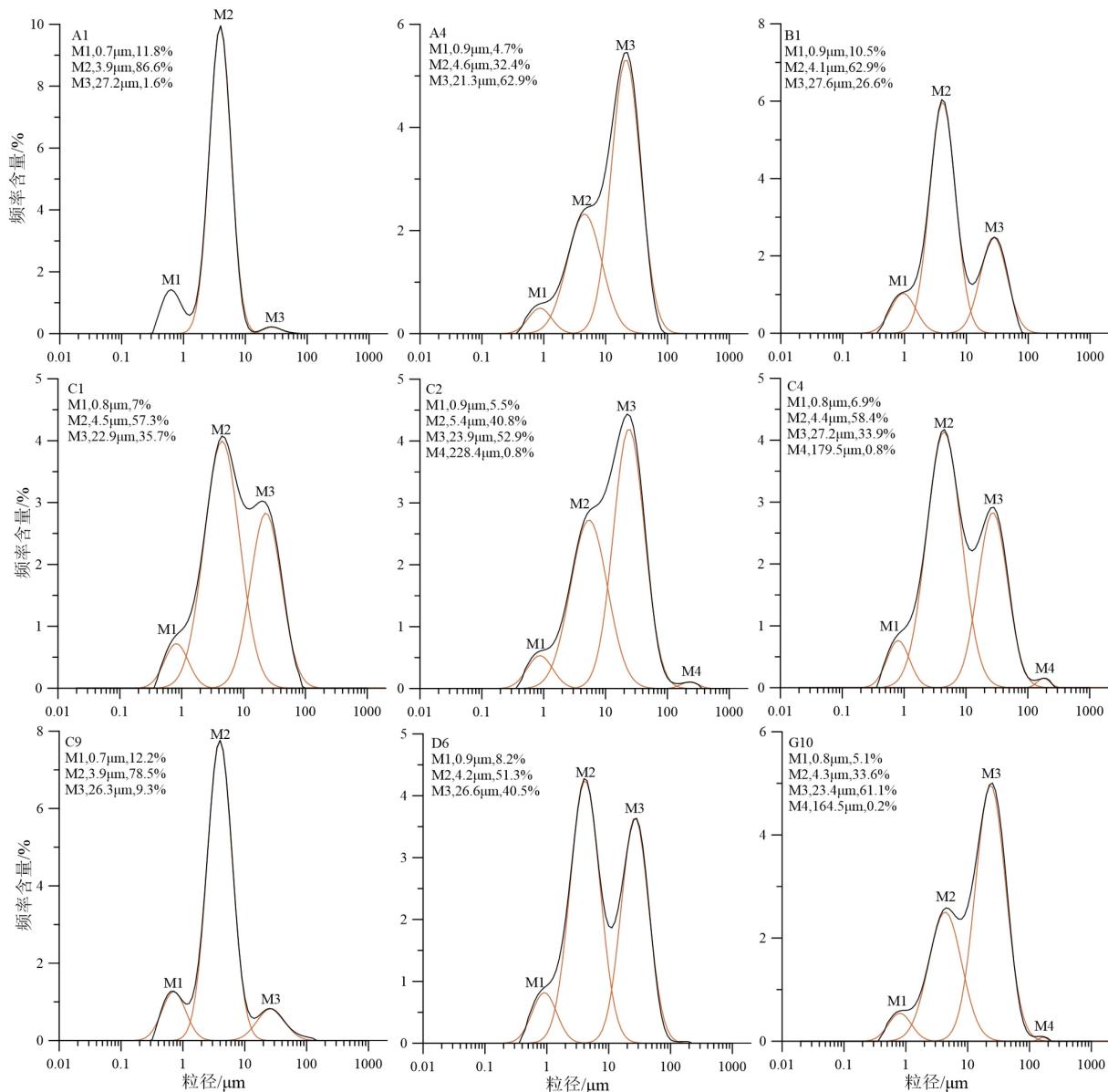


图 5 研究区代表性站位表层沉积物中的矿物碎屑粒度组分分离图

Fig.5 Grain size distribution of the surface sediments in representative stations

36~50 μm 组分主要为火山物质和吕宋岛河流输运来的粗颗粒物质；通过对 14~22 μm 组分堆积速率、伊利石/蒙脱石和石英平均粒径等指标的分析，指出相比于 1~0.6 Ma，亚洲内陆干旱程度和冬季风强度自 0.6 Ma 以来显著增强。周宇和周烨等^[12-13]在菲律宾海通过组分分离出的亚洲大陆风尘的粒级组分分别为 0.5~16 μm(众数 2 μm)、0.2~32 μm(众数 3.5 μm)，通过对沉积物中不同年代的风尘组分含量进行对比，指出近 2 Ma 以来亚洲内陆干旱化程度加大以及东亚大气环流系统逐渐增强。

本文沉积物的组分分离结果显示，M1(0.3~1.5 μm, 众数为 0.7 μm) 和 M2(1.6~15 μm, 众数为 4 μm) 两个细粒组分符合亚洲风尘的粒度特征，且

二者表现出较好的相关性(图 6)，表明二者很可能

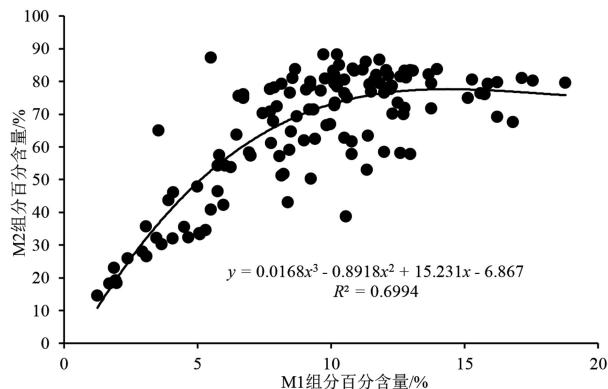


图 6 表层沉积物粒度 M1 和 M2 组分含量相关性

Fig.6 Correlation diagram of components M1 and M2

为同一物质来源。对比粒径范围可知, M1 和 M2 两个组分可能均来自亚洲风尘, 只是二者的输运方式不一样。研究区受东亚冬季风和高层西风的影响, 东亚冬季风搬运的风尘粒径通常比高层西风搬运的风尘粒径要粗, 两者搬运的风尘源区均为中亚/东亚/中国北部沙漠^[25, 38, 40-41]。据此推测 M1 组分是由高层西风搬运到研究区, 而 M2 组分则是由东亚冬季风输运而来。本研究中 M2 组分百分含量范围为 14.5%~88.3%, 平均值为 65.45%, 而 M1 的百分含量范围为 1.3%~18.8%, 平均值仅为 9.42%, 沉积物中 M2 组分含量明显高于 M1 组分, 这说明东亚

冬季风比高层西风对研究区的影响更明显。

研究区附近的奄美三角盆地沉积物组分分离的结果指示 0.3~90 μm(众数 10 μm)的粗粒组分和 3~160 μm(众数 40 μm)的超粗粒组分主要来源于当地海底火山物质^[13], 其粒度范围与本区沉积物 M3 组分 (16~100 μm, 众数为 30 μm) 和 M4 组分 (101~300 μm, 众数为 200 μm) 接近。扫描电镜下观察的结果显示, M3 和 M4 粗粒组分主要为火山碎屑及残留的硅质生物碎屑(图 7)。

田举^[26]对本研究区的表层沉积物常量元素(硅铝比值和铁铝比值)、微量元素(Sc-La-Th 三角图)

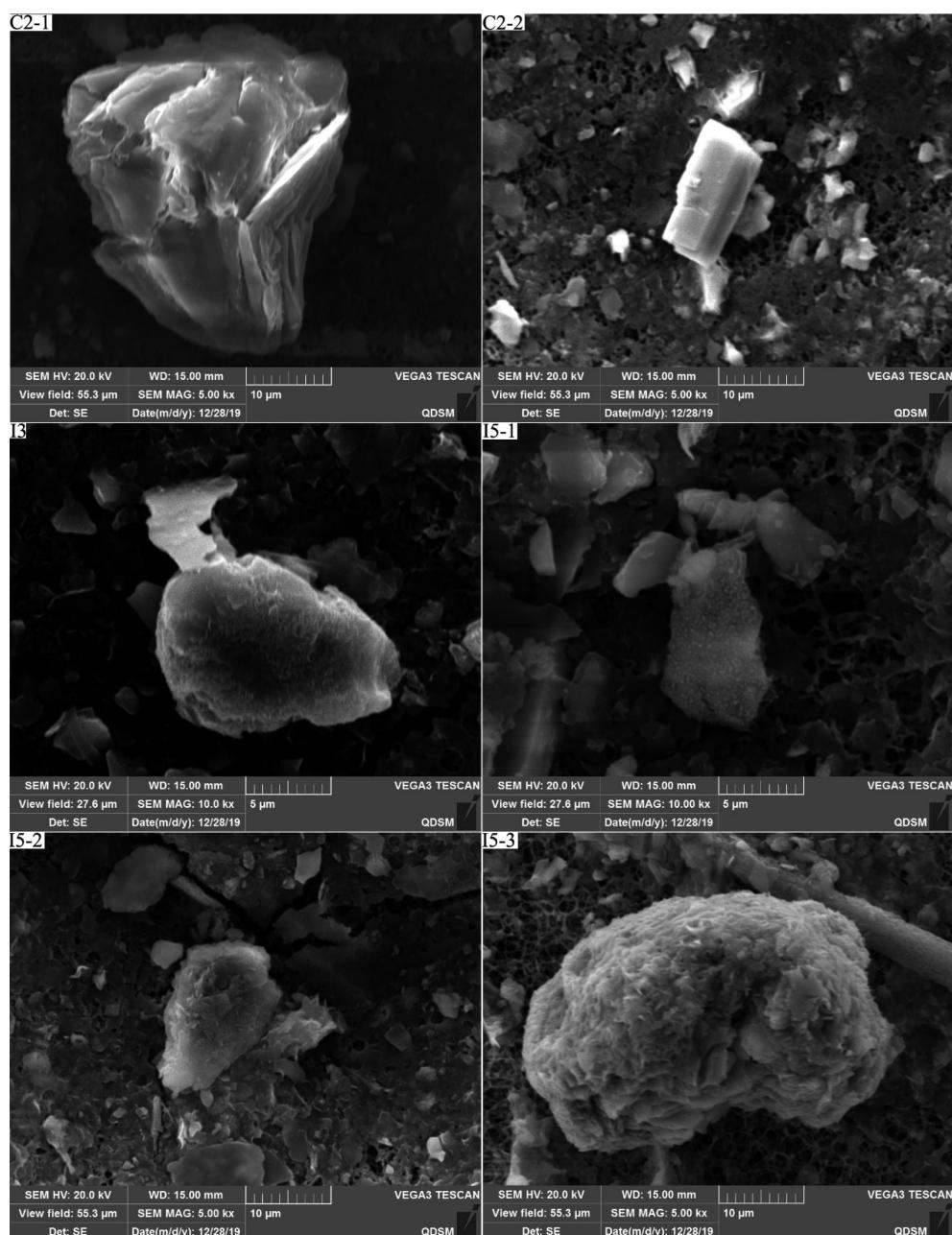


图 7 火山碎屑颗粒的 SEM 照片
Fig.7 SEM photomicrographs of the pyroclasts

和稀土元素(比较了本研究区沉积物与潜在物源区物质的配分模式差别)进行了分析,指出本研究区除生物源以外,当地的火山物质和亚洲风尘是其主要物源,这与本文对物源分析的结果一致。

4.2 粒度分布特征的主要控制因素

物源和沉积环境是影响沉积物粒度分布特征的主要因素^[9]。研究区的粒度分布特征主要受物源、构造环境和水动力条件等的影响。

粒度组分分离结果中的 M1 和 M2 组成了研究区的细粒组分,M3 和 M4 则构成了研究区的粗粒组分,将所有站位中 M1 和 M2 的百分含量之和大于或等于 50% 的站位划分为 A 类,反之则划分为 B 类,两类站位的分布见图 8。其中,A 类站位遍布于整个研究区,尤其是在西加洛林海脊的平坦地带全部为此类;B 类站位集中在雅浦海沟、西加洛林海槽和深海盆地等水深较深的地带,尤其是集中在西加洛林海槽周边。

雅浦海沟和西加洛林海槽区域的矿物碎屑粒径较粗,分选性差,偏态为正偏(图 4),反映其物质来源复杂,包括亚洲风尘、火山碎屑和硅质生物碎屑等。雅浦海沟最初形成于始新世或渐新世,当时的火山作用形成了大量的火山物质,Ohara 等发现雅浦海沟的斜坡上裸露有火山岩、辉长岩和变质岩^[42]。有研究表明,雅浦海沟仍处于活动状态,某些区域也会发生海底滑坡^[43]。本文发现雅浦海沟和西加洛林海槽区火山碎屑含量相对较高,反映构造活动相对强烈。

西加洛林海盆区的矿物碎屑粒径较海沟和海槽处要偏细,分选较差,偏态为对称型,峰态为中等峰型(图 4),反映物质来源较复杂,个别站位含有较多火山碎屑。东北部的西加洛林海脊主要粒级组分为黏土,矿物碎屑粒径最细,分选较好,偏态值普遍小于 0,为细粒沉积区,峰态为尖锐峰型,反映物质来源相对单一,以亚洲风尘为主。

研究区附近流系复杂,特别是深层与底层流可

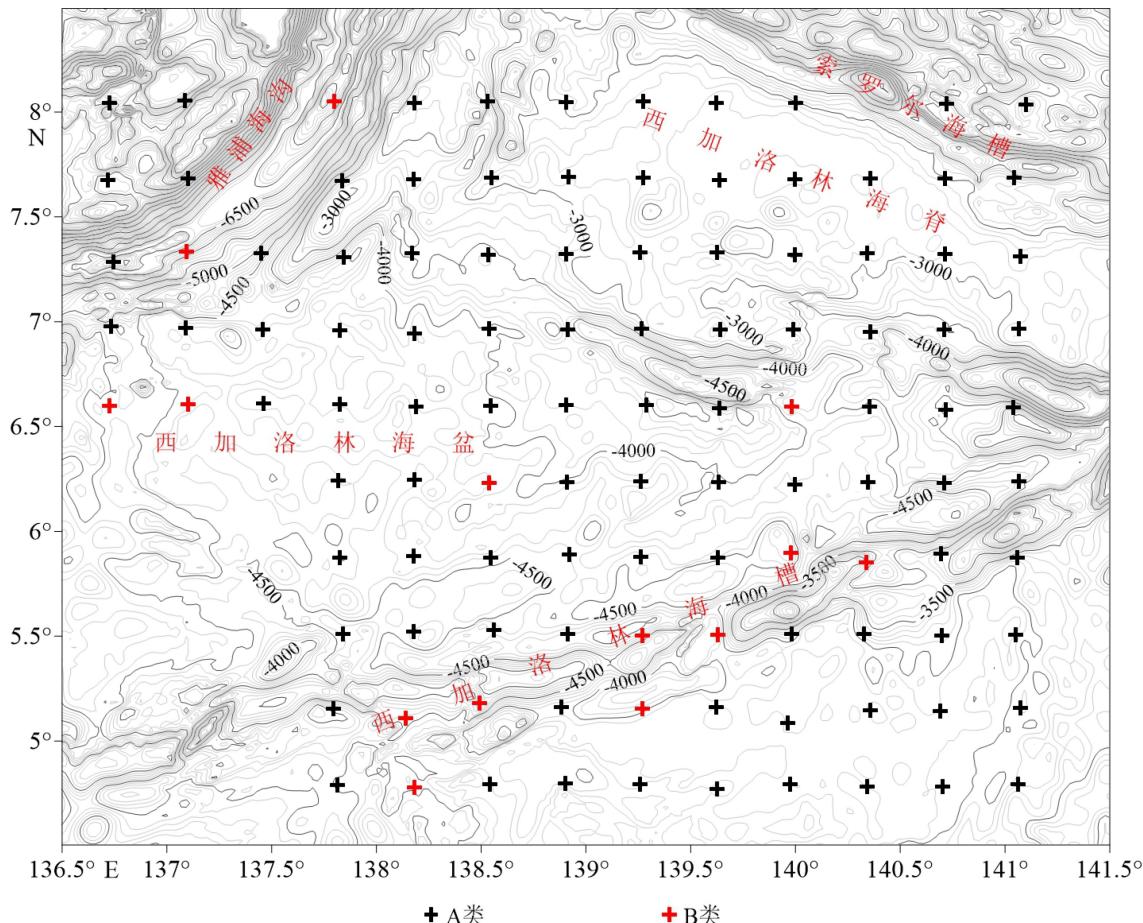


图 8 矿物碎屑细粒和粗粒组分相对百分含量分类图

A 类表示细粒组分百分含量 $\geq 50\%$, B 类表示细粒组分百分含量 $< 50\%$ 。

Fig.8 Map of percentage contents of fine and coarse components of mineral debris

Class A and B indicates that the percentage content of fine-grained component is greater and less than 50%, respectively.

导致沉积物在海底再分配, 对沉积过程和沉积特征有重要影响。研究区深层流主要包括北赤道潜流、绕极深层水和北太平洋深层水等, 其分布主要受海底地形控制^[24]。在复杂的构造背景与海底地形影响下, 西太平洋底层流具有极其复杂的空间结构, 但目前对西太平洋底层流条件知之甚少。少量的研究表明, 海沟边缘流速强, 流向多变, 沉积物可能被侵蚀和再悬浮^[44-45]; 海沟处“漏斗”状地形和内潮等因素, 导致沉积物向海沟横向输运, 并在海沟轴部堆积, 使海沟成为沉积物的沉降中心^[45-46]。海槽接受周围岛弧输送的火山物质^[47-49], 从而影响沉积物类型和沉积特征。总之, 海沟、海槽、深海平原、海岭等不同环境下的沉积物类型和沉积特征差别明显, 这可能与底层流对沉积物的再分配有关, 但目前对不同环境下的底层动力环境及其对沉积过程的影响机制有待于加强调查、观测与研究。

综上所述, 构造环境对粒度分布特征有明显控制作用, 不同构造环境下的底层流有很大差异, 从而影响沉积物的再分配。总的来说, 从海脊、海盆到海槽与海沟, 矿物碎屑粒径变粗, 分选变差, 反映物源逐渐变得复杂。

5 结论

(1) 粒度组分分离方法由细到粗共分离出 4 个组分: M1(众数为 0.7 μm, 粒度范围为 0.3~1.5 μm)、M2(众数为 4 μm, 粒度范围为 1.6~15 μm)、M3(众数为 30 μm, 粒度范围为 16~100 μm) 和 M4(众数为 200 μm, 粒度范围为 101~300 μm), 其中 M1、M2 主要为风尘物质, 分别由高层西风和东亚冬季风搬运, 遍布整个研究区; M3 和 M4 为火山碎屑及残留的硅质生物碎屑, 主要分布在雅浦海沟和西加洛林海槽附近。

(2) 根据细粒与粗粒组分相对百分含量的多少将研究区站位划分为 A、B 两类, A 类站位遍布于整个研究区, 尤其是在西加洛林海脊的平坦地带全部为此类; B 类站位集中在雅浦海沟、西加洛林海槽和深海盆地等水深较深的地带, 尤其是集中在西加洛林海槽周边。

(3) 研究区表层沉积物矿物碎屑的粒度分布特征主要受构造环境的控制。西加洛林海槽和雅浦海沟表层矿物碎屑粒径明显偏粗, 分选系数高, 偏态为正偏, 峰态值普遍偏小, 物质来源复杂, 包括亚洲风尘、火山碎屑和硅质生物碎屑等; 深海盆地表层矿物碎屑粒径次之, 以粉砂为主, 分选系数较高,

偏态值接近于 0, 峰态值较大, 个别站位含有较多火山碎屑; 西加洛林海脊表层矿物碎屑粒径最细, 以黏土为主, 分选系数最低, 峰态值最大, 主要粒级突出, 物质来源相对单一, 以亚洲风尘为主。

参考文献 (References)

- [1] 秦启龙. 深海沉积物细菌和丝状真菌的基因组学研究[D]. 山东大学博士学位论文, 2010. [QIN Qilong. Genomic studies of deep-sea sedimentary bacteria and filamentous fungus[D]. Doctor Dissertation of Shandong University, 2010.]
- [2] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Provenance of the north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics [J]. Chemical Geology, 1999, 158 (3): 271-291.
- [3] Mahoney J B. Nd and Sr isotopic signatures of fine-grained clastic sediments: a case study of western Pacific marginal basins [J]. Sedimentary Geology, 2005, 182 (1-4): 183-199.
- [4] McLaren P. An interpretation of trends in grain size measures [J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51 (2): 611-624.
- [5] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55 (4): 457-470.
- [6] Shi X F, Liu Y G, Chen Z H, et al. Origin, transport processes and distribution pattern of modern sediments in the Yellow Sea[M]//Li M Z, Sherwood C R, Hill P R. Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves: Advances in Technologies, Research, and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 321-350.
- [7] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors” [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81 (1-2): 47-60.
- [8] Gao S, Collins M B. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments [J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10 (1): 70-78.
- [9] 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40 (5): 525-531. [WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40 (5): 525-531.]
- [10] 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. [WANG Fenlian, HE Gaowen, WANG Haifeng, et al. Geochemistry of rare earth elements in a core from Mariana trench and its significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36 (4): 67-75.]
- [11] 付锋, 郑洋, 姚旭莹, 等. 东太平洋CC区西区表层沉积物黏土矿物和地球化学特征[J]. 海洋学研究, 2017, 35 (1): 55-65. [FU Feng, ZHENG Yang, YAO Xuying, et al. Clay mineral and geochemical analysis of surface sediments in the western region of CC Zone in the

- East Pacific Ocean [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2017, 35(1): 55-65.]
- [12] 周宇, 蒋富清, 徐兆凯, 等. 近2 Ma帕里西-维拉海盆沉积物中碎屑组分粒度特征及其物源和古气候意义 [J]. *海洋科学*, 2015, 39(9): 86-93. [ZHOU Yu, JIANG Fuqing, XU Zhaokai, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Parece Vela Basin and its implication of provenance and palaeoclimate over the last 2 Ma [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(9): 86-93.]
- [13] 周烨, 蒋富清, 南青云, 等. 奄美三角盆地晚更新世以来碎屑沉积物粒度特征及其物源和古气候意义 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31(3): 298-309. [ZHOU Ye, JIANG Fuqing, NAN Qingyun, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Amami Sankaku Basin since late pleistocene and its provenance and palaeoclimate implications [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(3): 298-309.]
- [14] 张正一, 董冬冬, 张广旭, 等. 板块俯冲侵蚀雅浦岛弧的地形制约 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 41-50. [ZHANG Zhengyi, DONG Dongdong, ZHANG Guangxu, et al. Topographic constraints on the subduction erosion of the Yap arc, Western Pacific [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 41-50.]
- [15] 瞿洪宝, 郑彦鹏, 刘晨光, 等. 晚始新世以来雅浦海沟-岛弧构造演化模式 [J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 249-257. [QU Hongbao, ZHENG Yanpeng, LIU Chenguang, et al. Model of tectonic evolution for Yap Trench-arc since late Eocene [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 249-257.]
- [16] 宫士奇. 雅浦海山区海底地形及海山形态特征研究与分析 [D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士学位论文, 2015. [GONG Shiqi. Topographic and geomorphologic features and analyses of the seafloor and seamounts in the Yap seamounts area [D]. Master Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2015.]
- [17] 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): 23-29. [DONG Dongdong, ZHANG Guangxu, QIAN Jin, et al. Geomorphology and stratigraphic framework of the Yap subduction zone, Western Pacific [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 23-29.]
- [18] 张晋, 李安春, 万世明, 等. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 1-10. [ZHANG Jin, LI Anchun, WAN Shiming, et al. Grain size distribution of surface sediments in the southern South China Sea and influencing factors [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 1-10.]
- [19] Weissel J K, Anderson R N. Is there a Caroline plate? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41(2): 143-158.
- [20] Gaina C, Müller D. Cenozoic tectonic and depth/age evolution of the Indonesian gateway and associated back-arc basins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 83(3-4): 177-203.
- [21] 刘子洲, 李培良, 王雪竹, 等. 太平洋气候态环流场的数值模拟及其季节性变化特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(11): 17-26. [LIU Zizhou, LI Peiliang, WANG Xuezhu, et al. Climatological simulation of Pacific Ocean circulation and analysis of its seasonal variability [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(11): 17-26.]
- [22] Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299-308.
- [23] Lukas R, Yamagata T, McCreary J P. Pacific low-latitude western boundary currents and the Indonesian throughflow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C5): 12209-12216.
- [24] Siedler G, Holfort J, Zenk W, et al. Deep-water flow in the Mariana and Caroline basins [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(3): 566-581.
- [25] Jiang F Q, Zhou Y, Nan Q Y, et al. Contribution of Asian dust and volcanic material to the western Philippine Sea over the last 220 kyr as inferred from grain size and Sr-Nd isotopes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(9): 6911-6928.
- [26] 田举. 雅浦海沟南缘及附近海域表层沉积物特征和物源研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2019. [TIAN Ju. Properties and Source analysis of the surface sediments in the southern margin of Yapu Trench and adjacent areas [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2019.]
- [27] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [28] DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(10): 1715-1732.
- [29] Demaster D J. Measuring biogenic silica in marine sediments and suspended matter [M]//Hurd D C, Spencer D W. *Marine Particles: Analysis and Characterization*, Volume 63. Washington: American Geophysical Union, 1991: 363-367.
- [30] Conley D J. An interlaboratory comparison for the measurement of biogenic silica in sediments [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 63(1-2): 39-48.
- [31] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577-582. [JIA Jianjun, GAO Shu, XUE Yunchuan. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: a comparative study [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577-582.]
- [32] 徐兴永, 易亮, 于洪军, 等. 图解法和矩值法估计海岸带沉积物粒度参数的差异 [J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 80-86. [XU Xingyong, YI Liang, YU Hongjun, et al. The differences of grain-size parameters estimated with graphic and moment methods in coastal sediments [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(2): 80-86.]
- [33] Friedman G M, Johnson K G. *Exercises in Sedimentology* [M]. New York: Wiley, 1982: 68-83.
- [34] 明洁. 东菲律宾海帕里西维拉海盆第四纪沉积特征和物质来源及其古环境意义 [D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2013. [MING Jie. The characteristics and provenance of the sediment in the Parece Vela Basin since the Quaternary and their environmental implications [D]. Doctor Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2013.]
- [35] 张富元, 章伟艳, 杨群慧. 南海东部海域沉积物粒度分布特征 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 452-460. [ZHANG Fuyuan, ZHANG Weiyan, YANG Qunhui. Characteristics of grain size distributions of surface

- sediments in the eastern South China sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21 (3) : 452-460.]
- [36] Qin X G, Cai B G, Liu T S. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60,000 years before present [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (B1) : B01204.
- [37] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [38] Seo I, Lee Y I, Yoo C M, et al. Sr-Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: Implications for the transport mechanism of Asian dust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119 (19) : 11492-11504.
- [39] 于兆杰, 万世明, 孙晗杰, 等. 近百万年来亚洲风尘在西菲律宾海的沉积物粒度记录[J]. *地球环境学报*, 2012, 3(2) : 792-800. [YU Zhaojie, WAN Shiming, SUN Hanjie, et al. Grain-size records of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(2) : 792-800.]
- [40] Leinen M. Quartz content of northwest Pacific Hole 576A and implications for Cenozoic eolian transport[R]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1985, 86: 581-588.
- [41] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 最近2.6 Ma中国北方季风环流与西风环流演变的风尘沉积记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 46 (10) : 1049-1059. [SUN Donghuai, AN Zhisheng, SU Ruixia, et al. Eolian sedimentary records for the evolution of monsoon and westerly circulations of northern China in the last 2.6 Ma [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46 (10) : 1049-1059.]
- [42] Ohara Y, Fujioka K, Ishizuka O, et al. Peridotites and volcanics from the Yap arc system: implications for tectonics of the southern Philippine Sea Plate [J]. *Chemical Geology*, 2002, 189 (1-2) : 35-53.
- [43] Yang Y M, Wu S G, Gao J W, et al. Geology of the Yap Trench: new observations from a transect near 10°N from manned submersible Jiaolong [J]. *International Geology Review*, 2018, 60 (16) : 1941-1953.
- [44] Taira K, Kitagawa S, Yamashiro T, et al. Deep and bottom currents in the Challenger Deep, Mariana Trench, measured with super-deep current meters [J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60 (6) : 919-926.
- [45] Turnewitsch R, Falahat S, Stehlíkova J, et al. Recent sediment dynamics in hadal trenches: evidence for the influence of higher-frequency (tidal, near-inertial) fluid dynamics [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 90: 125-138.
- [46] Luo M, Gieskes J, Chen L Y, et al. Provenances, distribution, and accumulation of organic matter in the southern Mariana Trench rim and slope: implication for carbon cycle and burial in hadal trenches [J]. *Marine Geology*, 2017, 386: 98-106.
- [47] 蒋富清, 李安春, 李铁刚. 冲绳海槽南部柱状沉积物地球化学特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (3) : 11-17. [JIANG Fuqing, LI Anchun, LI Tiegang. Geochemical characteristics for core sediments of the southern Okinawa Trough and their paleoenvironment implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22 (3) : 11-17.]
- [48] 李传顺. 冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积特征及其物源与环境意义[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2009. [LI Chuanshun. The characteristics and provenance of the sediment in the southwestern Okinawa Trough since the mid-Holocene and their environmental implications[D]. Doctor Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2009.]
- [49] 何起祥. 海洋沉积作用的物源控制[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27 (1) : 8-13. [HE Qixiang. Sediment source and its bearing on marine sedimentation [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27 (1) : 8-13.]