

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.05.006

西菲律宾海表层沉积物稀土元素地球化学特征及物源指示意义

褚征^{1,2}, 胡宁静^{1,2}, 刘季花^{1,2}, 高剑峰^{3,4}, 朱爱美^{1,2}, 高晶晶^{1,2}, 张辉^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 青岛 266061;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081; 4. 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要:西菲律宾海地质作用复杂,其表层沉积物稀土元素地球化学特征对其沉积物来源具有明显指示意义。基于西菲律宾海吕宋岛至九州帛琉洋脊之间海域表层沉积物样品的常量元素和稀土元素组成,通过对不同类型沉积区稀土元素组成、配分模式和稀土元素 La/Yb 和 Sm/Eu 比值进行研究发现,研究区沉积物中稀土元素组成受沉积物类型和物质来源控制,沉积物中黏土矿物、铁锰氧化物自生颗粒和磷灰石是稀土元素的主要富集相;吕宋岛与本哈姆高原之间海盆的沉积物含有来自吕宋岛蛇绿岩的物质,而中央裂谷以西海盆区和含结核黏土区沉积物主要由陆源风尘物质、海底火山物质和自生组分组成。

关键词:稀土元素;物源;西菲律宾海

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2016)05-0053-10

海底沉积物物质组成复杂,包含陆源、生源和火山源等不同来源的物质,其元素特别是稀土元素组成记录了一定的物质来源信息,可以作为物源指标^[1-7]。中国学者对菲律宾海的海洋沉积物已经有了较多研究^[1-2,5-6,8-15]。研究结果显示菲律宾海沉积物中包含着火山源、陆源、生源物质和自生矿物等不同来源的组分。石学法等对菲律宾岛弧以东的沉积物的研究表明,该处包含着来自邻近岛弧、亚洲大陆的陆源物质、海底火山物质和生物源物质^[1,8-9]。鄢全树等对分布在吕宋岛至九州帛琉洋脊的表层沉积物的轻碎屑矿物进行了分析,显示此区域海底碎屑矿物受到生物物质、海底火山物质和陆源碎屑物质的影响,轻碎屑矿物的分布呈现一定的分区特征^[10]。徐兆凯等的研究显示东亚季风对西菲律宾海的本哈姆高原的沉积物的沉积速率和黏土矿物组成都有影响^[14]。周宇对帕里西维拉海盆的沉积物的同位素组成的研究表明,该处沉积物中的黏土粒级组分主要来自亚洲大陆的风成物质组成,沉积物全岩则是由火山物质和陆源物质组成^[15]。对于西菲律宾海,目前较为缺乏对大范围的表层沉积

物的元素地球化学,特别是稀土元素地球化学特征和物源指示的认识。本文分析了吕宋岛至九州帛琉洋脊之间海区的表层沉积物的常量元素和稀土元素组成,探讨了稀土元素配分模式、空间分布规律及其对物源的指示意义。

1 地质背景

菲律宾海海底地形复杂,发育海盆、洋脊、海底高原、裂谷等多种海底地貌形态^[16](图1)。西菲律宾海盆位于菲律宾板块西部,是一个弧后盆地,经历了从早始新世到早渐新世的盆地扩张过程^[17]。研究区西邻菲律宾群岛中最大的岛屿吕宋岛,岛上火山活动较为发育,如吕宋岛东南部发育有马荣火山^[18]。吕宋岛以东为本哈姆海底高原,呈近东西向椭圆形分布,其基底为拉斑玄武岩^[19],主体部分形成于40 Ma,可能与热点引发的火山作用有关^[17]。本哈姆海底高原以东为西菲律宾海中央断裂带,位于西菲律宾海中北部,北东东-南西西向伸展,最大水深大于7 000 m^[16],是西菲律宾海盆扩张轴遗迹^[17]。研究区最西侧的九州帛琉洋脊处于菲律宾海的中央位置,近南北走向分布,全长约2 750 km,宽达90 km,是一列狭长的链状山脊^[16],形成于约15 Ma,是由帕里西和维拉海盆的扩张形成的^[20]。

此外,研究区还受到太平洋北赤道流和黑潮等洋流的影响(图1)。太平洋北赤道流自东向西流

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB429704)

作者简介:褚征(1988—),男,硕士生,海洋地质专业,E-mail: chuzheng1988@163.com

通讯作者:刘季花(1965—),女,研究员,硕士生导师,海洋地质专业,E-mail:jihliu@fio.org.cn

收稿日期:2016-05-23;改回日期:2016-07-08. 文凤英编辑

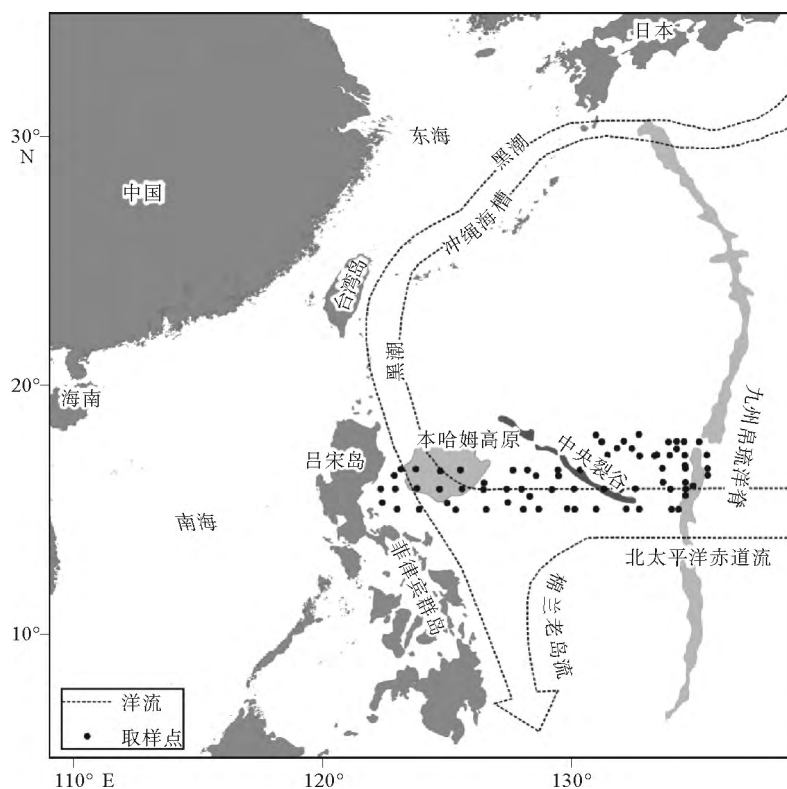


图1 研究区和样品分布(根据文献[10]、[13]、[21]修改)

Fig. 1 Map of study area and sample locations

动,将低生物营养成分的水团带入菲律宾海;黑潮起源于菲律宾以东,是北太平洋亚热带边界流,水质清澈^[21-22]。同时,菲律宾海处于东亚季风区内,受季风影响十分明显,冬季盛行东北季风,夏季盛行南风及西南风^[23]。这些海洋营力影响了研究区沉积物物质供给和迁移。

2 样品和实验方法

本研究所用 71 个表层沉积物样品为国家海洋局第一海洋研究所于 2004 年的菲律宾海综合调查航次中使用箱式取样器所取。多数样品位于西菲律宾海盆区,少量位于本哈姆高原和九州帛琉洋脊的海山区(图 1)。

首先,取少量沉积物样品制作涂片,在偏光显微镜下观察其黏土组分、碎屑矿物、生物组分和自生组分的形貌特征和相对含量,并根据 Dean 的分类^[24]进行分类。9 种常量元素 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 和 14 种稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 的测试分析工作在国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质重点实验室测试中心

完成。样品测试方法采用高晶晶等的方法^[25-26]。精确称量 0.05 g 沉积物冷冻干燥、过 200 目筛后放入聚四氟乙烯坩埚中,加入 1.5 mL HNO_3 和 1.5 mL HF,将其置于烘箱中高温分解,随后冷却后蒸干,加入 1 mL HNO_3 蒸至湿盐状,再加入 3 mL 50% 的 HNO_3 和 0.5 mL Rh 内标溶液(1×10^{-6}),在烘箱中恒温加热。随后将样品冷却,定容至 50 mL,待进行常量元素测试。从中取出 10 mL 再次定容至 20 g,待进行微量、痕量元素测试。每隔 10 个样品测试一个标样(GBW07309)和一个重复样。常量元素测试所用仪器为美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 iCAP6300 型 ICP-AES。稀土元素测试使用 Thermo Fisher Scientific 公司 X Series II 型 ICP-MS。 SiO_2 含量由山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心用重量法测得。本文分析了标样和重复样的测试结果。ICP-OES 测得的主量元素数据,标样的相对误差为 0.04%~2.76%,相对标准偏差为 0.52%~1.85%;重复样的相对双差是 0.04%~2.83%。ICP-MS 测得的稀土元素数据,标样的相对误差为 0.03%~5.41%,相对标准偏差为 1.03%~2.87%;重复样的相对双差是 0.01%~3.9%。

3 结果

3.1 沉积物类型及分区

研究区沉积物有远洋黏土和钙质软泥两种类型。远洋黏土主要由黏土矿物集合体组成,含量均大于 90%,同时含有长石、石英等碎屑矿物以及硅藻、放射虫和海绵骨针等硅质生物碎屑。此外,样品中常见有黑色不透明金属矿物,多为自生铁锰氧化物矿物,它们在沉积物中多以微结核出现。钙质软泥主要特点是含有有孔虫碎屑,含量为 5%~60%,此外,还有数量不等的硅质生物碎屑、黏土矿物和铁锰氧化物自生矿物。

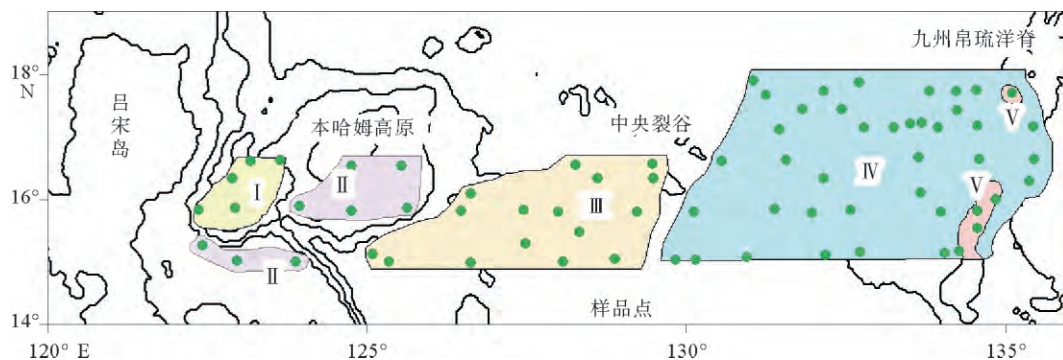
根据沉积物的特征类型、地形、水深等,我们将研究区分为 5 个沉积区(图 2)。第 I 区是吕宋岛与本哈姆高原之间的海盆区,水深范围 4 000~5 600 m,沉积物是褐色的远洋黏土。第 II 区位于本哈姆高原和吕宋岛以东的陆坡区,水深范围 699~4 000 m,沉积物是淡黄色的钙质软泥。第 III 区大致分布于本哈姆高原至中央裂谷之间的海盆区,水深范围 4 200~6 250 m,沉积物是褐色的黏土沉积物。第 IV 区是位于裂谷以东的海盆区,水深范围 4 200~7 280 m,包括九州帛琉洋脊的部分区域,沉积物是褐色的远洋黏土,常见微型结核和大型结核。第 V 区是属九州帛琉洋脊的部分区域,水深范围 2 060~4 000 m,覆盖有浅黄色钙质软泥。

3.2 沉积物元素组成

不同区域沉积物元素组成有明显的差异(表 1)。I 区、III 区和 IV 区沉积物类型同属黏土,在主要

元素组成上,其共同特征是 SiO_2 含量最高(50.2%~56.3%),其次是 Al_2O_3 (13.1%~18%) 和 TFe_2O_3 (5.95%~10.5%)。其差异表现为 I 区与 III 区和 IV 区相比 TFe_2O_3 (8.9%~9.7%)、 MgO (3.7%~6.7%)、 CaO (1.9%~2.7%) 含量较高, K_2O (1.2%~1.7%) 和 MnO (0.1%~0.47%) 含量较低; III 区 SiO_2 (50%~56.3%) 和 Al_2O_3 (13.2%~18.4%) 含量略高于 I 区和 IV 区, IV 区 MnO (0.41%~1.69%)、 P_2O_5 (0.1%~0.43%) 和 K_2O (1.96%~2.68%) 含量高于 I 区和 III 区。II 区、V 区沉积物类型为钙质软泥,在主要元素组成上,其共同特征是 CaO 元素含量较高(5.4%~36%),差异表现为 V 区的 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值高于 I 区。黏土类沉积物和钙质软泥类的主量元素组成差别主要体现在钙质软泥的 CaO 元素含量高于其周围海盆区的黏土类沉积物。

各区沉积物稀土元素都具有一定的 Eu 正异常(表 1),钙质软泥和黏土的稀土元素含量和配分模式都有显著的差别,钙质软泥的稀土元素含量相对较低,而且具有 Ce 负异常,海盆区黏土一般没有明显的 Ce 负异常。3 个黏土分布区的稀土元素含量有明显差别。I 区沉积物的特征是稀土元素总含量较低($(45.1 \sim 110.6) \times 10^{-6}$)且轻重稀土之比(LREE/HREE)为各区最低(3.1~4.5); III 区沉积物的 ΣREE 集中在 $(100 \sim 167) \times 10^{-6}$; IV 区的 ΣREE 含量最高,为 $(165.9 \sim 280) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为各区最高(4.4~8.2), δEu 值 1.1~1.4,为各区最低。同为钙质软泥分布区的 V 区的 ΣREE 为 $(71 \sim 240) \times 10^{-6}$,明显高于 II 区的 $(45.1 \sim 110.6) \times 10^{-6}$ 。



I 区:黏土; II 区:钙质软泥; III 区:黏土; IV 区:含结核黏土; V 区:钙质软泥

图 2 西菲律宾海表层沉积物分区

Fig. 2 Spatial distribution of surface sediments

表1 西菲律宾海沉积物元素含量
Table 1 Chemical composition of sediments from the study area

| 区域 沉积物 | I | | II | | III | | IV | | V | |
|---------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|-----------|------|---------|------|
| | 远洋黏土(5) | | 钙质软泥(8) | | 远洋黏土(16) | | 含结核黏土(37) | | 钙质软泥(5) | |
| | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 |
| SiO ₂ | 51.0 | 0.21 | 35.6 | 11.3 | 52.1 | 1.64 | 51.3 | 2.17 | 16.3 | 12.5 |
| Al ₂ O ₃ | 15.9 | 1.88 | 12.0 | 3.60 | 17.1 | 1.11 | 15.9 | 2.32 | 5.35 | 4.31 |
| TFe ₂ O ₃ | 9.19 | 0.33 | 6.11 | 1.82 | 8.45 | 0.61 | 8.84 | 0.87 | 3.02 | 2.13 |
| CaO | 2.17 | 0.32 | 17.1 | 10.4 | 1.56 | 0.36 | 1.48 | 0.26 | 34.4 | 11.8 |
| MgO | 4.77 | 1.19 | 2.85 | 0.82 | 3.38 | 0.27 | 3.15 | 0.31 | 1.20 | 0.85 |
| K ₂ O | 1.56 | 0.18 | 1.21 | 0.47 | 2.38 | 0.23 | 2.67 | 0.23 | 0.92 | 0.71 |
| Na ₂ O | 3.22 | 0.24 | 2.65 | 0.61 | 3.50 | 0.35 | 3.79 | 0.48 | 1.62 | 0.96 |
| MnO | 0.33 | 0.14 | 0.21 | 0.07 | 0.58 | 0.15 | 1.07 | 0.81 | 0.40 | 0.28 |
| TiO ₂ | 0.76 | 0.04 | 0.54 | 0.16 | 0.77 | 0.06 | 0.76 | 0.06 | 0.25 | 0.20 |
| P ₂ O ₅ | 0.16 | 0.01 | 0.15 | 0.02 | 0.16 | 0.02 | 0.19 | 0.07 | 0.17 | 0.08 |
| La | 10.3 | 2.31 | 13.8 | 5.19 | 26.4 | 5.48 | 39.6 | 12.9 | 29.2 | 11.9 |
| Ce | 21.8 | 4.17 | 23.3 | 10.0 | 56.7 | 11.6 | 89.7 | 22.6 | 35.0 | 26.1 |
| Pr | 2.88 | 0.52 | 3.40 | 1.23 | 6.57 | 1.35 | 9.84 | 3.03 | 7.08 | 3.16 |
| Nd | 12.1 | 1.90 | 14.0 | 4.62 | 25.9 | 5.28 | 39.1 | 13.2 | 29.4 | 12.6 |
| Sm | 3.01 | 0.34 | 3.12 | 0.92 | 5.49 | 1.09 | 8.32 | 2.99 | 6.34 | 2.71 |
| Eu | 0.91 | 0.10 | 0.93 | 0.23 | 1.44 | 0.25 | 2.12 | 0.79 | 1.78 | 0.81 |
| Gd | 2.72 | 0.29 | 2.84 | 0.79 | 5.07 | 1.05 | 7.60 | 2.70 | 5.84 | 2.61 |
| Tb | 0.55 | 0.04 | 0.53 | 0.13 | 0.89 | 0.18 | 1.34 | 0.51 | 1.04 | 0.44 |
| Dy | 3.63 | 0.23 | 3.39 | 0.75 | 5.50 | 1.07 | 8.27 | 3.20 | 6.45 | 2.62 |
| Ho | 0.71 | 0.05 | 0.66 | 0.14 | 1.06 | 0.21 | 1.57 | 0.60 | 1.23 | 0.49 |
| Er | 2.09 | 0.13 | 1.92 | 0.40 | 3.08 | 0.59 | 4.52 | 1.69 | 3.47 | 1.36 |
| Tm | 0.34 | 0.02 | 0.31 | 0.06 | 0.48 | 0.09 | 0.70 | 0.25 | 0.53 | 0.21 |
| Yb | 2.20 | 0.15 | 1.96 | 0.40 | 3.08 | 0.54 | 4.43 | 1.52 | 3.25 | 1.29 |
| Lu | 0.37 | 0.02 | 0.32 | 0.07 | 0.50 | 0.09 | 0.73 | 0.26 | 0.52 | 0.20 |
| ΣREE | 63.6 | 10.0 | 70.5 | 24.7 | 142 | 28.5 | 214 | 52.2 | 131 | 64.2 |
| LREE/HREE | 4.03 | 0.54 | 4.79 | 0.78 | 6.22 | 0.32 | 6.64 | 0.84 | 4.84 | 0.85 |
| δCe | 0.92 | 0.03 | 0.77 | 0.09 | 0.99 | 0.05 | 1.07 | 0.16 | 0.53 | 0.21 |
| δEu | 1.49 | 0.02 | 1.49 | 0.05 | 1.30 | 0.06 | 1.25 | 0.05 | 1.38 | 0.02 |

注:括号内为样品数,主量元素氧化物单位为%,稀土元素单位为 $\times 10^{-6}$, $\delta\text{Ce}=\text{Ce}_{\text{PASS}}/\sqrt{\text{La}_{\text{PASS}}*\text{Pr}_{\text{PASS}}}$, $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_{\text{PASS}}/\sqrt{\text{Sm}_{\text{PASS}}*\text{Gd}_{\text{PASS}}}$ (下标 PAAS 表示样品/澳大利亚后太古宙平均页岩),LREE= $\Sigma(\text{La},\text{Ce},\text{Pr},\text{Nd},\text{Sm},\text{Eu})$,HREE= $\Sigma(\text{Gd},\text{Tb},\text{Dy},\text{Ho},\text{Er},\text{Tm},\text{Yb},\text{Lu})$

4 讨论

4.1 元素的组合特征

海洋沉积物元素组合常常用来进行沉积物元素地球化学特征研究和物源示踪。本文应用 SPSS17.0 软件对 71 个样品的主量元素和 ΣREE 进行了因子分析,分析的结果如图 3 所示,F1 和 F2

二个主因子的累积方差贡献率为 80.8%。

F1 因子方差贡献率为 60%,是最主要的因子。正载荷主要有 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、K₂O、Na₂O、TiO₂、MgO,载荷为 CaO。SiO₂ 是远洋黏土中平均含量最高的元素,在黏土类矿物和碎屑矿物中都有赋存,放射虫、硅藻等硅质生物是硅的另一个来源。Al₂O₃ 与 TiO₂ 一般被认为是典型的亲碎屑元素,是陆源物质的代表^[3-4]。F1 因子的正载荷主要代表了黏土矿物组分和碎屑矿物,以及硅质生物碎

屑。CaO 代表了以碳酸盐为主要成分的有孔虫碎屑等生物源物质,这类物质主要分布在洋脊区和海底高原。

F2 因子方差贡献率为 20.8%。正载荷是 MnO、P₂O₅ 和 ΣREE。沉积物中的铁锰相组分对 MnO 的富集作用非常明显^[6,11]。IV 区沉积物的 MnO 含量明显高于其他区域,指示该区沉积物中富含的微结核等自生铁锰矿物影响了沉积物整体的 MnO 元素含量。海洋沉积物中磷元素主要富集在磷灰石和磷质鱼牙和骨屑中,是高生物生产力和热液活动的证据之一^[27]。结核区黏土的 P₂O₅ 和 MnO 高于其他区域,指示该区可能有较高的生物生产力。图4展示了不同区域的远洋黏土沉积物中

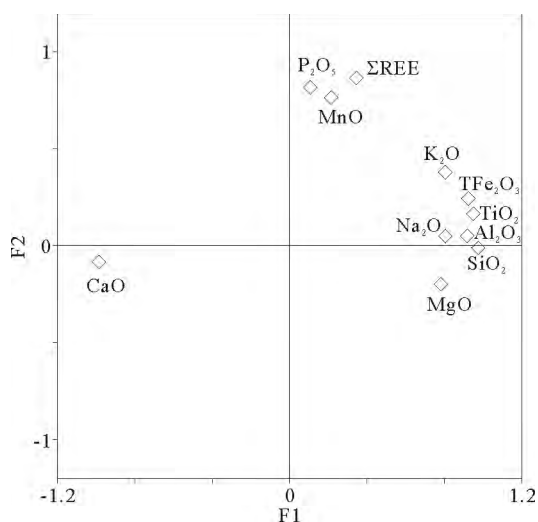


图 3 西菲律宾海沉积物元素因子分析

Fig. 3 Factor analysis of elements in the sediments

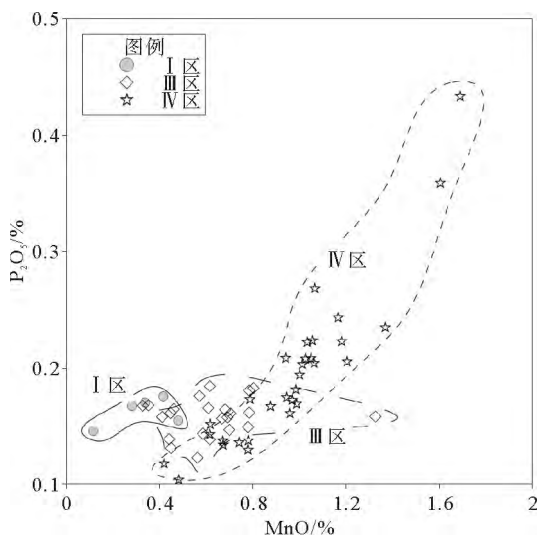


图 4 西菲律宾海黏土类沉积物中 MnO 和 P₂O₅ 含量相关关系

Fig. 4 Correlation between MnO and P₂O₅ of pelagic clays from the study area

MnO 与 P₂O₅ 的含量,只有含结核黏土(IV 区)显示出较为明显的相关关系。远洋沉积物中稀土元素在铁锰相中相对富集^[5],研究区沉积物 ΣREE 与 MnO 也有较明显的相关关系。F2 因子代表的可能是铁锰氧化物自生矿物组分。

4.2 稀土元素的富集机制及配分模式

远洋沉积物中稀土元素有不同的富集机制,例如太平洋中富含沸石矿物的沉积物因沸石很强的吸附能力,富集稀土元素^[7,28],东菲律宾海沉积物中铁锰氧化物相是稀土元素富集的重要因素^[11]。研究区沉积物中稀土元素含量首先与沉积物类型有关,钙质软泥沉积物中,稀土元素与 TFe₂O₃ 元素类似,在钙质生物碎屑中含量低,在黏土矿物和铁锰质自生矿物中富集。IV 区沉积物 ΣREE 明显高于其他区域,指示远洋黏土沉积物中黏土矿物和铁锰氧化物自生矿物是稀土元素重要的赋存相。

此外,沉积物中稀土元素的配分模式图也常常用来指示稀土元素地球化学特征的差异和其富集机制。图 5 展示了不同沉积区的稀土元素配分模式,其中 IV 区的位于九州帛琉洋脊及邻近区域的黏土沉积物因较独特的配分模式被单独列出。从图上可以看出, I 区稀土元素总量低, LREE 亏损明显,弱 Ce 负异常,明显正 Eu 异常。 II 区稀土元素含量低, Eu 正异常明显,有明显的 Ce 负异常,原因是沉积物中的钙质生物碎屑从海水中生成,继承了海水的 Ce 负异常^[2]。 III 区沉积物配分曲线相对平缓,没有明显的 Ce 异常,有弱正 Eu 异常。 IV 区黏土的许多沉积物有正 Ce 异常,稀土元素含量相对较高。 IV 区位于洋脊附近的黏土类沉积物稀土元素含量高于其他区域,大多没有明显的 Ce 异常,个别显示出 Ce 负异常其轻稀土略显亏损,与常显 Ce 正异常轻稀土相对富集的结核区黏土有一定区别。海洋中的自生沸石矿物有富集稀土元素的作用且有明显的 Ce 负异常^[2,28], IV 区洋脊部分的黏土显示 Ce 负异常的原因可能是此处沉积物中含有较多的沸石矿物。 V 区钙质软泥类沉积物均显示明显的 Ce 负异常,轻稀土相对亏损,指示钙质生物碎屑继承了海水中稀土元素 Ce 负异常的特点。

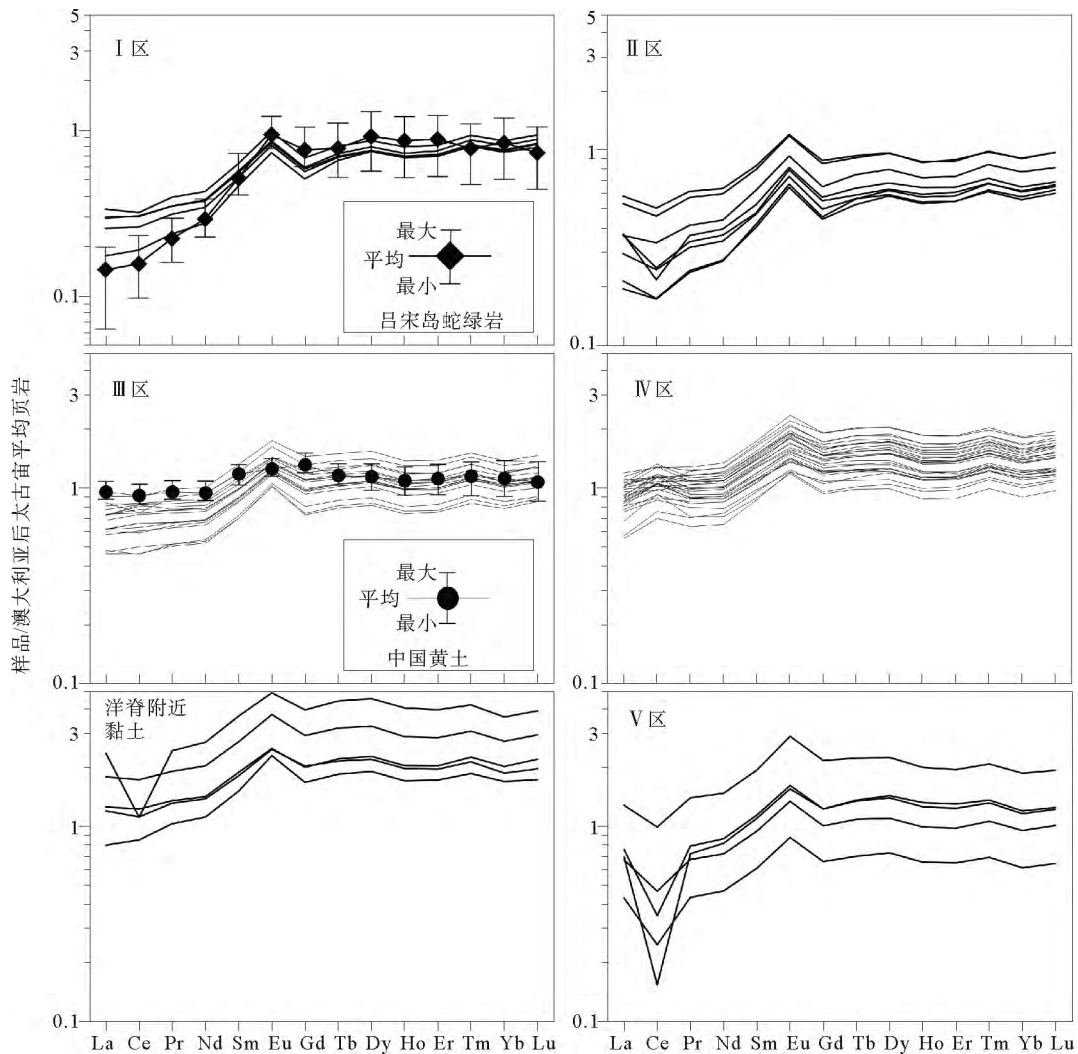
4.3 稀土元素的物源指示意义

从稀土元素的含量和配分特征来看, II 区和 V 区的沉积物的稀土元素特征主要受自生的生物碎屑的影响,而对于主要由黏土组成的 I、III 和 IV 区沉积物来说,稀土元素的特征则主要受到非生物成因的

物源的影响。前人的研究显示,菲律宾海黏土沉积物主要由来自陆源物质和海底火山物质组成,其中陆源物质包括来自亚洲大陆的风成物质和来自菲律宾岛弧的物质,海底火山源物质可能来自洋底玄武岩^[1,5,8-10,12-14]。参照前人的研究,本文采用中国黄土^[29]代表来自亚洲大陆的风成物质,用吕宋岛上的 Mayon 火山^[18]和 Taal 火山^[32]代表吕宋岛的火山物质。研究区靠近吕宋岛的沉积物有富 MgO 的特点,因此,选择吕宋岛东部的 Casiguran 蛇绿岩^[30]作为研究区蛇绿岩物质端元。选择本哈姆高原^[33]和九州帛琉洋脊区海底火山岩^[34]作为海底火山物质端元。由于Ⅳ区沉积物中含有微结核,本文选择东太平洋微结核^[2]作为参照。中国黄土的稀土元素配分曲线平缓,没有明显 Eu 异常,轻重稀土分异不明显。火山岩与蛇绿岩的稀土元素特点是有明显的 Eu 正异常,轻稀土相对亏损。因此,选择稀土元素

对比值 La/Yb 和 Sm/Eu 作为指标,将研究区沉积物与它们对比(图 6)。

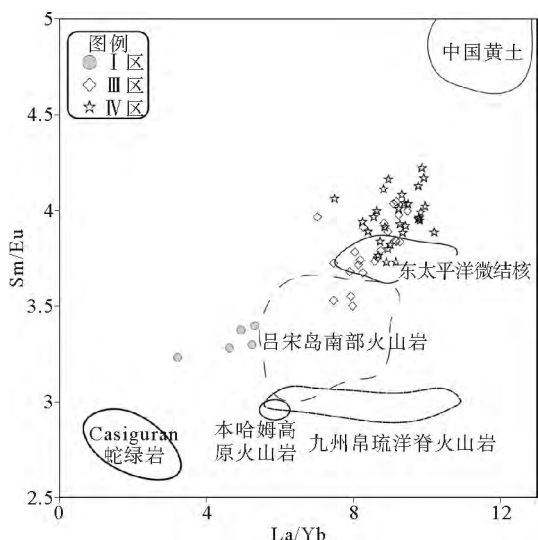
相对而言,中国黄土具有最高的 Sm/Eu 值(> 4.5)和 La/Yb 值(约 10~12.5),Casiguran 蛇绿岩有相对最低的 Sm/Eu 值(约 2.5~3)和 La/Yb 值(约 0.7~3.2)。吕宋岛火山岩 Sm/Eu 值集中在 3~3.7,La/Yb 集中在 6~10。本哈姆高原和九州帛琉洋脊区火山岩 Sm/Eu 值集中在 2.9~3.1,略低于吕宋岛火山岩,高于 Casiguran 蛇绿岩;本哈姆高原的火山岩 La/Yb 值集中在 5.6~6.2 之间,九州帛琉洋脊火山岩 La/Yb 值变化范围较大(约 5.6~11)。中国黄土的 La/Yb 约为 10~12.5。在 La/Yb-Sm/Eu 图解上,吕宋岛火山岩和海底火山岩大体上位于 Casiguran 蛇绿岩和中国黄土之间。东太平洋微结核 La/Yb 比为 7.5~10.76,Sm/Eu 值为 3.61~3.86。



配分曲线为澳大利亚后太古宙平均页岩^[29]标准化,吕宋岛蛇绿岩数据来自文献^[30],中国黄土数据来自文献^[31]

图 5 西菲律宾海表层沉积物稀土元素配分模式

Fig. 5 REE distribution patterns normalized by PAAS of sediments from the study area



(数据来源: Casiguran 蛇绿岩据文献[30], 吕宋岛火山岩据文献[18,32], 本哈姆高原火山岩据文献[33], 九州帛琉洋脊火山岩据文献[34], 东太平洋微结核据文献[2], 中国黄土据文献[31])

图 6 西菲律宾海黏土类沉积物及可能物源的 La/Yb 及 Sm/Eu

Fig. 6 La/Yb-Sm/Eu of the pelagic clays and possible sources

非钙质类型沉积物以黏土和铝硅酸盐碎屑为主,因此只选择 I 区、III 区和 IV 区沉积物进行研究。III 区和 IV 区的沉积物在 La/Yb-Sm/Eu 图解上的分布范围较为接近, I 区与二者有明显区别。I 区沉积物的 La/Yb 为 3.2~5.4, 低于中国黄土和东太平洋微结核, 大致位于 Casiguran 蛇绿岩和吕宋岛火山岩之间; Sm/Eu 为 3.2~3.4, 低于中国黄土, 落在吕宋岛火山岩的变化范围之内, 高于 Casiguran 蛇绿岩。I 区沉积物的 La/Yb 值在 La/Yb-Sm/Eu 图解上明显低于中国黄土和多数火山岩, 指示有 La/Yb 值更低的组分加入, 吕宋岛东部的蛇绿岩可能为该区沉积物贡献了较多低 La/Yb 值物质。III 区的沉积物的 La/Yb 为 7~9.5, 落在九州洋脊区火山的范围, 多数样品落在吕宋岛火山岩和东太平洋微结核的范围; Sm/Eu 为 3.4~4.5, 低于中国黄土, 高于 Casiguran 蛇绿岩和多数岛弧与海底火山岩, 50% 的样品高于东太平洋微结核, 约 31% 的样品落在东太平洋微结核的范围内, 个别样品落在吕宋岛火山岩范围内。IV 区 La/Yb 值为 7.4~10.2, 落在九州帛琉洋脊火山岩和东太平洋微结核的范围之内, 多数样品低于中国黄土; Sm/Eu 值为 3.5~4.2, 低于中国黄土, 高于火山岩和 Casiguran 蛇绿岩, 约 16% 的样品落在东太平洋微结核的范围内, 其余样品高于微结核。III 区和 IV 区沉积物在

La/Yb-Sm/Eu 图解上位于中国黄土和火山岩以及东太平洋微结核之间, 指示它们的稀土元素特征受到了亚洲大陆物质、岛弧和海底火山物质以及自生矿物的影响。

综上所述, 沉积物稀土元素特征指示 I 区与 III 区、IV 区沉积物在物源上存在明显差别。I 区因距离菲律宾岛弧较近, 可以得到来自菲律宾岛弧的物质供应, 而距菲律宾岛弧较远的 III 区、IV 区可能得到一部分靠风力搬运的岛弧上的火山喷发产物, 而对于吕宋岛东部的蛇绿岩物质的风化产物, 其运输方式可能主要依靠河流搬运向西菲律宾海输入, 其远距离的运输受到洋流的影响, 而影响该区的北太平洋赤道流的流向是自东向西(图 1), 对菲律宾岛弧物质向东的运输可能会产生阻碍作用, 因此, 岛弧上通过河流搬运的物质对于研究区的影响可能局限于其邻近区域。

5 结论

(1) 研究区主要沉积物类型包括黏土类沉积物和钙质软泥。根据地形和沉积物类型将沉积物分为 5 个沉积区。黏土类沉积物分布于海盆区, 130°E 以东的黏土类沉积物中含有较多自生铁锰矿物(微结核)。钙质软泥主要分布在吕宋岛以东陆坡、本哈姆高原和九州帛琉洋脊。

(2) 研究区沉积物中稀土元素含量和配分模式受沉积物类型的控制, 钙质软泥稀土元素含量最低, 且具有明显负异常; 含结核黏土中稀土元素含量最高。沉积物中黏土矿物、铁锰氧化物自生颗粒和磷灰石等是稀土元素的主要富集相。

(3) 根据非钙质沉积物中稀土元素 La/Yb 值和 Sm/Eu 值判断, 吕宋岛与本哈姆高原之间海盆的沉积物 La/Yb 值和 Sm/Eu 值最低, 指示沉积物中可能含有来自吕宋岛蛇绿岩的物质。中央裂谷以西海盆区和含结核黏土区的沉积物 La/Yb 值和 Sm/Eu 值介于火山岩、微结核和中国黄土之间, 指示其稀土元素的特征可能受到了多种因素的影响。

参考文献 (References)

[1] 石学法, 陈丽蓉, 马建国, 等. 西菲律宾海沉积物稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 1996, 16(3): 260-267. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, MA Jianguo, et al. REE geochemistry of sediments from West Philippine Sea [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1996, 16(3): 260-267.]

[2] 刘季花. 东太平洋沉积物稀土元素和 Nd 同位素地球化学特征

- 及其环境指示意义[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2004. [The Geochemistry of REEs and Nd Isotope in Deep-sea Sediments from the East Pacific and Their Geologic Implications [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2004.]
- [3] 李国胜, 杨锐, 张洪瑞. 中太平洋 PC5222 孔岩心地球化学特征及物源探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(2): 26-36. [LI Guosheng, YANG Rui, ZHANG Hongrui. Geochemistry and provenance of the PC5222 drill core from the mid Pacific Ocean [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 26-36.]
- [4] 杨锐, 李国胜, 张洪瑞. 中太平洋 CC 区表层沉积物的地球化学[J]. 地质与资源, 2007, 16(3): 200-208. [YANG Rui, LI Guosheng, ZHANG Hongrui. Analysis on the geochemical characteristics and material origin of the surface sediments in the mid-Pacific Ocean [J]. Geology and Resources, 2007, 16(3): 200-208.]
- [5] XU Zhaokai, LI Anchun. Geochemical character and material source of sediments in the eastern Philippine Sea [J]. Chinese science bulletin, 2008, 53(6): 923-931.
- [6] 徐兆凯, 李安春, 李铁刚, 等. 东菲律宾海表层沉积物常量元素组成及地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 43-48. [XU Zhaokai, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Major element compositions of surface sediments in the East Philippine Sea and its geological implication [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(6): 43-48.]
- [7] 朱克超, 任江波, 王海峰, 等. 太平洋中部富 REY 深海粘土的地球化学特征及 REY 富集机制[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40(6): 1052-1060. [ZHU Kechao, REN Jiangbo, WANG Haifeng, et al. Enrichment mechanism of REY and geochemical characteristics of REY-rich pelagic clay from the Central Pacific [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(6): 1052-1060.]
- [8] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海沉积物矿物组合及其地质意义[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(3): 328-335. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, LI Kunye, et al. The mineral assemblages in the sediments in the West Philippine Sea and their geological implication [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(3): 328-335.]
- [9] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(2): 61-72. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, LI Kunye, et al. Study on mineralogy of the clay sediment in the west of Philippine Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1995, 15(2): 61-72.]
- [10] 鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 西菲律宾海盆表层沉积物中的轻碎屑分区及物质来源[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 765-773. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. Provinces and material provenance of light detritus in the surficial sediments from the Western Philippine Sea [J]. Geological Review, 2007, 53(6): 765-773.]
- [11] 徐兆凯, 李安春, 徐方建, 等. 东菲律宾海表层沉积物中元素的赋存状态[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 51-58. [XU Zhaokai, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Elemental occurrence phases of surface sediments from the East Philippine Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(2): 51-58.]
- [12] 葛淑兰, 石学法, 杨刚, 等. 西菲律宾海 780ka 以来气候变化的岩石磁学记录: 基于地磁场相对强度指示的年龄框架[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1040-1052. [GE Shulan, SHI Xuefa, YANG Gang, WU Yonghua. Rock magnetic response to climatic changes in West Philippine Sea for the last 780 ka: based on relative paleointensity assisted chronology [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 1040-1052.]
- [13] 孙晗杰. 西菲律宾海 2.36 Ma 以来古海洋学研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011. [SUN Hanjie. Research of the Paleocyanography of the Western Philippine Sea over the past 2.36 Ma [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [14] Xu Z, Li T, Wan S, et al. Evolution of East Asian monsoon: Clay mineral evidence in the western Philippine Sea over the past 700 kyr [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 60: 188-196.
- [15] 周宇. 近 2 Ma 帕里西—维拉海盆的风尘记录[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014. [ZHOU Yu. Asian dust record in the Parece Vela Basin over the last 2 Ma [D]. The University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2014.]
- [16] 李常珍, 李乃胜, 林美华. 菲律宾海的地势特征[J]. 海洋科学, 2000, 24(06): 47-51. [LI Changzhen, LI Naisheng, LIN Meihua. The topography of Philippine Sea [J]. Marine Science, 2000, 24(06): 47-51.]
- [17] Deschamps A, Lallemand S. The West Philippine Basin: An Eocene to early Oligocene back arc basin opened between two opposed subduction zones [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B12): EPM 1-1-EPM 1-24.
- [18] Castillo P R, Newhall C G. Geochemical constraints on possible subduction components in lavas of Mayon and Taal volcanoes, southern Luzon, Philippines [J]. Journal of Petrology, 2004, 45(6): 1089-1108.
- [19] McKee E H. K-Ar ages of deep-sea basalts, Benham Rise, West Philippine Basin, Leg 31, Deep Sea Drilling Project. [R]// Karig D E, Ingle J C, et al. Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project, Volume 31. Washington, D. C. U. S. Government Printing Office, 1975: 599-600.
- [20] Hilde T W, Chao-Shing L. Origin and evolution of the West Philippine Basin: a new interpretation [J]. Tectonophysics, 1984, 102(1): 85-104.
- [21] Qiu B. Kuroshio and Oyashio currents [C] // Encyclopedia of Ocean Sciences. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2001: 1413-1425.
- [22] 张弦, 俞慕耕, 江伟, 等. 菲律宾海及其邻近海区的水文特征[J]. 海洋通报, 2004, 23(1): 8-14. [ZHANG Xuan, YU Muggeng, JIANG Wei, et al. Hydrologic characteristic of the Philippine Sea and its nearby areas [J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(1): 8-14.]
- [23] 孙守勋, 滕军. 菲律宾海的气候特征[J]. 海洋预报, 2003, 20

- (3):31-39. [SUN Shouxun, TENG Jun. Climate character of the Philippine Sea [J]. *Marine Forecasts*, 2003, 20(3): 31-39.]
- [24] Dean W E, Leinen M, Stow D A V. Classification of deep-sea, fine-grained sediments [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55(2):250-256.
- [25] 高晶晶,刘季花,乔淑卿,等. 电感耦合等离子体-发射光谱法测定海洋沉积物中的常、微量元素[J]. *光谱实验室*, 2010, 27(3):1050-1054. [GAO Jingjing, LIU Jihua, QIAOSHUQING, et al. Determination of major and minor elements in oceanic sediments by ICP-OES [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2010, 27(3):1050-1054.]
- [26] 高晶晶,刘季花,张辉,等. 高压密闭消解-电感耦合等离子体质谱法测定海洋沉积物中稀土元素[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(3):425-429. [GAO Jingjing, LIU Jihua, ZHANG Hui, et al. Determination of rare earth elements in the marine sediments by inductively coupled plasma-mass spectrometry with high-pressure closed digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(3):425-429.]
- [27] Delaney M L. Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(12):563-572.
- [28] Dubinin A V. Geochemistry of rare earth elements in oceanic phillipsites [J]. *Lithology & Mineral Resources*, 2000, 35(2): 101-108.
- [29] Dubinin A V. Geochemistry of Rare Earth Elements in the Ocean [J]. *Lithology & Mineral Resources*, 2004, 39(4): 289-307.
- [30] Encarnación J. Multiple ophiolite generation preserved in the northern Philippines and the growth of an island arc complex [J]. *Tectonophysics*, 2004, 392(s 1-4):103-130.
- [31] Chen J, An Z, Liu L, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(5): 403-413.
- [32] Mukasa S B, Flower M F J, Miklius A. The Nd—, Sr— and Pb— isotopic character of lavas from Taal, Laguna de Bay and Arayat volcanoes, southwestern Luzon, Philippines: Implications for arc magma petrogenesis [J]. *Tectonophysics*, 1994, 235(s 1-2):205-221.
- [33] Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. Geochemical Characteristics of Oceanic Island Basalts from the Philippine Sea Plate: Implications for the Sources of East Asian Plate Margin and Intraplate Basalts [M]// *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. American Geophysical Union, 2013:365-384.
- [34] Ishizuka O, Taylor R N, Yuasa M, et al. Making and breaking an Island arc: a new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc [C]// *AGU Fall Meeting Abstracts*. AGU Fall Meeting Abstracts, 2010.

RARE EARTH ELEMENTS IN SEDIMENTS OF WEST PHILIPPINE SEA AND THEIR IMPLICATIONS FOR SEDIMENT PROVENANCE

CHU Zheng^{1,2}, HU Ningjing^{1,2}, LIU Jihua^{1,2}, GAO Jianfeng^{3,4},
ZHU Aimei^{1,2}, GAO Jingjing^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, Qingdao 266061; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 4. The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Guiyang 550081)

Abstract: The composition of rare earth elements (REE) in sediments, which are effective in revealing the geochemical characters and sources of sediments, is used as a clue to understand the complex geological processes of the West Philippine Sea from the east Luzon Island to the Kyushu-Palau Ridge. Major and minor elements are analyzed. By comparing the concentrations of major and rare earth elements in addition to the REE distribution patterns in different parts of the studying area, we found that REE mainly occur with clay minerals, authigenic Fe-Mn oxide particles and apatite. The sediments in the basin between the Luzon Island and the Benham rise may contain some materials derived from ophiolites from the east of Luzon Island. The sediments in the basin to the west of the central rift and the area covered by nodules containing clays are comprised of the eolian dust from the continent, submarine volcanoes and authigenic materials.

Key words: rare earth elements; sediment provenance; West Philippine Sea