



西北太平洋多金属结核区沉积物黏土矿物特征

王 银¹, 吕士辉¹, 苏 新¹, 李嘉盈², 李怀明³, 任向文⁴

- (1. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083;
2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;
3. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;
4. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘 要: 以中国大洋 48 航次在西北太平洋中国多金属结核合同区(马尔库斯-威克海山群山间盆地与麦哲伦海山群山间盆地)采集到的 30 个站位表层沉积物为研究对象, 开展了黏土矿物组成、分布特征及物质来源等方面的相关分析研究工作。结果发现: 研究区表层沉积物中黏土矿物类型以伊利石为主, 其次为蒙脱石, 高岭石及绿泥石含量较低; 研究区沉积物中的伊利石主要来源于亚洲大陆的风尘输入。蒙脱石有 3 种主要物质来源: 陆地风化来源(亚洲大陆)、海山(风化)自生来源及富含蒙脱石的洋流(下部环南极深层水)。亚洲风尘输入可能是绿泥石和高岭石的主要物源之一。

关键词: 黏土矿物; 物质来源; 陆地风化; 风尘输入; 下部环南极深层水

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2696-17

中图分类号: P73

文献标志码: A

引文格式: 王 银, 吕士辉, 苏 新, 等. 西北太平洋多金属结核区沉积物黏土矿物特征[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2696–2712. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37977

WANG Yin, LÜ Shi-hui, SU Xin, et al. Assemblage of clay minerals at polymetallic nodules contract area in Northwest Pacific Ocean[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2696–2712. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37977

黏土矿物大多是由母岩经风化作用而形成, 粒径通常小于 2 μm , 可被远距离搬运, 因此, 在海洋中分布广泛, 是深海沉积物的重要组成部分, 物质来源地区、气候等因素均会影响到黏土矿物的组成^[1-6]。海洋环境的变化控制和影响着海洋沉积物中的黏土矿物组成, 因此, 海洋沉积物中黏土矿物组合特征是研究海洋环境演变的重要指标, 明确沉积物中黏土矿物的物质来源及其入海后的迁移方式是解释古气候、重建古环境的基础^[7-10]。

本文研究区位于西北太平洋马尔库斯-威克海山区与麦哲伦海山区。该区域是太平洋富钴结壳的重要富集区, 因此, 对于研究区的相关研究主要集中在富钴结壳与海山环境方面的相关调查研究。关于山间盆地中沉积物(黏土矿物)及沉积环境的相关

研究, 未见详细研究成果发表。2019 年 10 月中国(北京先驱高技术开发公司)在研究区(山间盆地中)圈定了多金属结核资源勘探区, 并与国际海底管理局签订了为期 15 年的多金属结核资源“勘探合同”。本文以大洋 48 航次在研究区采集的 30 个站位表层沉积物为研究对象, 通过沉积物中黏土矿物组合特征的相关分析, 探讨了研究区表层沉积物中黏土矿物的物质来源, 为研究区沉积环境的研究工作提供基础地质资料。

1 研究区概况

研究区位于西北太平洋马尔库斯-威克海山群山间盆地(以下简称 C 海盆)和麦哲伦海山群山间盆

基金项目: 中国大洋协会项目(DY135-N2-1-01)

收稿日期: 2021-06-03; **修订日期:** 2021-09-22

通信作者: 吕士辉, 讲师, 博士; 电话: 18810166295; E-mail: lvshihui@cugb.edu.cn

地(以下简称 M 海盆), 西临马里亚纳海沟, 北接沙茨基隆起, 往东逐渐向中太平洋海盆过渡(见图 1)^[11-13]。

研究区所在的马尔库斯-威克海山群和麦哲伦海山群具有复杂的地质演化历史, 曾经历过强烈的火山活动, 区域构造多为 NW 向展布的火山链, 并发育有大量的火山、平顶海山、山间盆地^[14]。这些海山呈较平直的线状延伸, 长达 1000 km, 宽 100~300 km, 海山顶面水深约为 1500~2000 m, 山间盆地水深可达 6000 m 以上^[15]。北赤道流(NEC)^[13]、北太平洋中层水(NPIW)^[12]和下部环南极深层水(LCDW)^[11]是影响西北太平洋研究区最主要的洋流系统。研究区海山岩石由拉斑玄武岩和碱性玄武岩组成, 覆盖在玄武岩基底之上的主要为中、晚白垩纪的浅水碳酸盐岩, 再往上为古新世至现代的深海沉积物^[16]。

2 材料和方法

本文样品是 2018 年 7 月至 11 月中国大洋科考 48 航次(“大洋一号”船)在西北太平洋中国多金属结核合同区通过箱式取样器采集, 并用柱状取样管获得表层 30~50 cm 柱状样(见图 2)。其中, C 海盆共 24 个站位, 各站位按照 1 cm 间隔进行分层取样, 取样厚度为 1 cm, 共分析样品 280 个。M 海盆共 6 个站位, 各站位按照 1 cm 间隔进行分层取样, 取样厚度为 1 cm, 共分析样品 105 个。研究区共分析 385 个样品, 如表 1 所列。

每件沉积物样品取样 1~2 cm³, 加入 30% H₂O₂(质量分数)去除样品中的有机质, 再加入适量冰醋酸除去碳酸盐矿物, 调节 pH 直至样品接近中

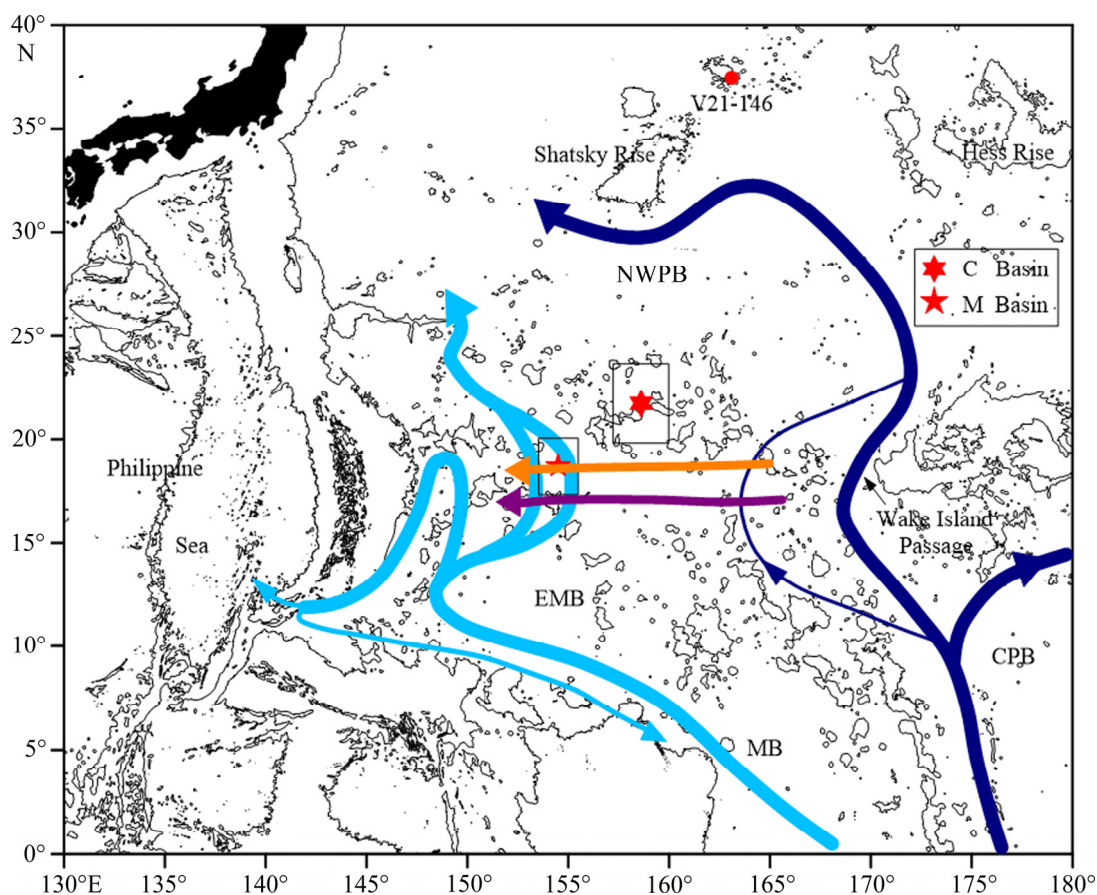


图 1 研究区位置图^[11-13]

Fig. 1 Location of study area^[11-13] (Dark blue and light blue arrows show eastern and western branch currents of Lower Circumpolar Deep Water (LCDW)^[11]. Purple and orange arrows show North Pacific Intermediate Water (NPIW)^[12] and North Equatorial Current (NEC)^[13], respectively. NWPB—Northwest Pacific Basin; CPB—Central Pacific Basin; EMB—East Mariana Basin; MB—Melanesian Basin. Black thin lines show 4000 m isobath(data from <https://www.gebco.net>))

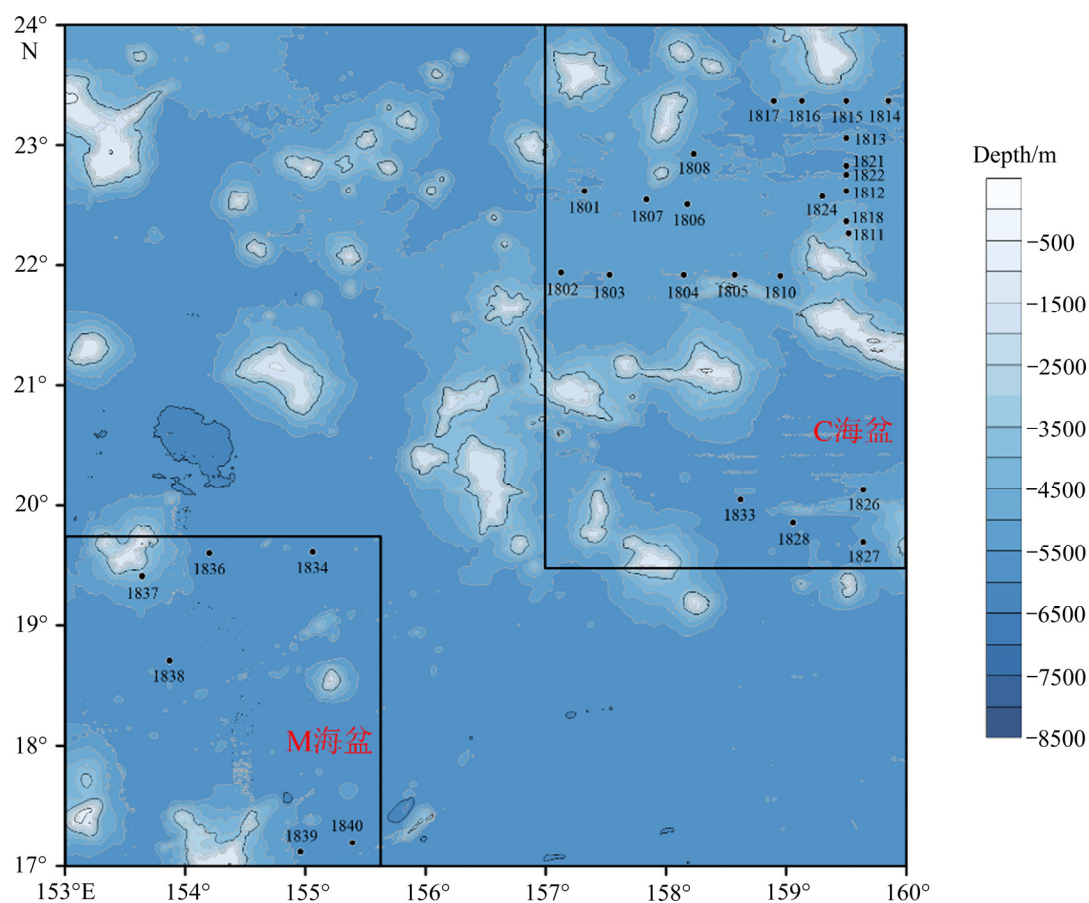


图2 研究区取样位置示意图

Fig. 2 Sampling stations in study area

性减少溶液中的电解质并发生抗絮凝作用。将处理好的样品转入离心管中,离心机转速为4500 r/min,离心5 min,然后将得到的样品转入2 L的烧杯中,加蒸馏水至15 cm高的位置并搅拌3 min,再依据Stokes定律提取 $<2\ \mu\text{m}$ 的黏土组分,制成自然风干片(N片),进行X射线衍射仪测试后,随后使用同一自然片进行乙二醇饱和(60 $^{\circ}\text{C}$, 12 h),得到乙二醇饱和片(EG片)并上机测试,再选取部分典型乙二醇饱和片进行加热(550 $^{\circ}\text{C}$, 2 h),得到加热片(T片)并上机测试。加热步骤和加热片测试在自然资源部第二海洋研究所海底科学实验室完成,分析所用仪器为荷兰X'Pert PRO X射线衍射仪,采用Cu靶辐射,管电压为45 kV,管电流为40 mA,扫描范围为 $3^{\circ}\sim 35^{\circ}(2\theta)$,扫描速度为1.8 ($^{\circ}$)/min;自然片和乙二醇饱和片测试在中国地质大学(北京)海洋学院完成,使用仪器为德国BRUKER公司的D2 PHASER型X射线衍射仪,仪器工作条件为:Cu K_{α} , Ni滤

波器,管压30 kV,管流10 mA,步宽0.01 $^{\circ}$,扫描范围 2θ 为 $3.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

黏土矿物的鉴定和解释主要依据自然风干、乙二醇饱和以及加热测试条件下获得的XRD叠加波谱的综合对比。使用Jade 6.0软件,根据Biscaye的计算方法^[17],将蒙脱石衍射峰(17 Å)、伊利石衍射峰(10 Å)、绿泥石和高岭石混合叠加峰(7 Å)的峰面积分别与其强度因子为1、4、2进行计算。绿泥石和高岭石的含量则以3.54 Å衍射峰面积与3.57 Å衍射峰面积的比值来计算,最后将四种黏土矿物的总含量校正为100%。

同时,利用乙二醇曲线来计算黏土矿物的特征参数。伊利石化学指数用5 Å/10 Å衍射峰的峰面积比表示,比值 <0.5 代表富Fe-Mg伊利石,以物理风化为主,风化程度较弱;比值 >0.5 代表富Al伊利石,指示其经历了较强的水解作用,以化学风化为主,风化程度较强^[18]。国际上用结晶度来表示黏

表 1 表层沉积物类型和黏土矿物特征

Table 1 Type of surface sediments and clay mineral characteristics

Station	Depth/ m	Longitude/ (°E)	Latitude/ (°N)	Sediment type	Illite/ %	Smectite/ %	Chlorite/ %	Kaolinite/ %	Smectite crystallinity FWHM/ (°Δ2θ)	Illite crystallinity FWHM/ (°Δ2θ)	Illite chemical index
1801	5457.1	157.32	22.62	Pelagic clay	68.70	10.30	13.36	7.64	0.62	0.24	0.14
1802	5435.7	157.13	21.94	Siliceous ooze	64.12	14.79	15.36	5.74	1.00	0.31	0.18
1803	5428.2	157.53	21.92	Pelagic clay	63.70	13.47	14.99	7.84	0.87	0.27	0.20
1804	5486.7	158.15	21.92	Pelagic clay	65.05	14.29	15.92	4.73	0.94	0.33	0.16
1805	5496.2	158.57	21.92	Pelagic clay	67.10	11.21	18.10	3.60	0.90	0.31	0.20
1806	5439.5	158.18	22.51	Pelagic clay	63.54	16.11	15.65	4.70	0.82	0.31	0.20
1807	5387.1	157.84	22.55	Pelagic clay	62.67	19.04	14.23	4.06	1.04	0.31	0.16
1808	5314.8	158.23	22.93	Pelagic clay	61.52	19.73	15.66	3.09	1.17	0.38	0.24
1810	5273.8	158.95	21.91	Pelagic clay	63.95	15.53	13.93	6.59	0.80	0.30	0.15
1811	4284.0	159.52	22.27	Calcareous ooze	70.14	5.90	15.87	8.09	0.60	0.27	0.22
1812	5136.8	159.50	22.62	Pelagic clay	67.76	11.50	14.37	6.38	0.67	0.35	0.23
1813	5286.9	159.50	23.06	Pelagic clay	66.10	12.68	17.07	4.15	0.68	0.39	0.26
1814	5459.0	159.85	23.37	Pelagic clay	62.72	18.47	14.41	4.40	0.97	0.34	0.20
1815	5328.6	159.50	23.37	Pelagic clay	61.32	14.26	16.07	8.35	0.99	0.26	0.25
1817	5451.1	158.90	23.37	Pelagic clay	63.92	15.26	16.37	4.46	0.81	0.30	0.19
1818	5368.6	159.50	22.37	Pelagic clay	68.65	14.17	11.60	5.58	1.27	0.44	0.18
1821	5597.1	159.50	22.83	Pelagic clay	64.01	16.46	12.65	6.88	0.96	0.33	0.17
1822	5490.9	159.50	22.76	Pelagic clay	62.71	20.98	11.44	4.87	1.06	0.39	0.18
1824	5224.3	159.30	22.58	Pelagic clay	64.07	16.83	15.07	4.03	0.79	0.37	0.19
1826	5610.0	159.64	20.13	Siliceous clay	56.92	27.06	13.19	2.83	1.11	0.43	0.21
1828	5724.2	159.06	19.86	Pelagic clay	55.85	27.39	11.87	4.89	1.06	0.29	0.18
1833	5605.4	158.62	20.05	Pelagic clay	63.74	18.03	13.12	5.11	1.04	0.35	0.21
1834	5738.5	155.06	19.61	Pelagic clay	60.61	25.62	10.69	3.08	1.03	0.36	0.18
1836	5756.3	154.20	19.60	Siliceous ooze	55.74	29.14	12.20	2.92	1.13	0.32	0.22
1837	4522.2	153.64	19.41	Pelagic clay	72.27	12.54	10.37	4.82	0.82	0.31	0.16
1838	5646.2	153.87	18.71	Silic-clay	63.26	20.68	11.94	4.12	1.11	0.29	0.18
1839	5661.8	154.96	17.12	Silic-clay	62.57	18.71	12.18	6.54	0.92	0.25	0.23
1840	5748.0	155.39	17.20	Silic-clay	60.00	24.15	12.28	3.58	1.03	0.32	0.16

土矿物的有序度和晶体颗粒的大小, 其中伊利石结晶度通常用 10 Å 衍射峰的半峰宽(FWHM)来表示。结晶度值<0.4 代表结晶程度极好; 结晶度值为 0.4~0.6 代表结晶程度好; 结晶度值为 0.6~0.8 代表结晶程度中等; 结晶度值>0.8 代表结晶程度差^[19], 即低值代表结晶程度好, 指示陆地物源区水解作用弱, 为干旱寒冷的气候条件。蒙脱石结晶度用 17 Å 衍射峰的半峰宽(FWHM)来表示, 低值同样代表结晶好, 也可用于指示物源区水解作用的强弱^[20]。

3 结果

3.1 黏土矿物的 XRD 分析

对研究区沉积物样品黏土矿物的自然片、乙二醇饱和片和加热片进行 XRD 谱的分析。在乙二醇饱和片的 XRD 谱线上(见图 3)可以看到, 17 Å、14 Å、10 Å、7 Å、5 Å、4.72 Å、3.57 Å、3.54 Å、3.33 Å 的衍射峰。由此可以识别出蒙脱石、伊利石、高

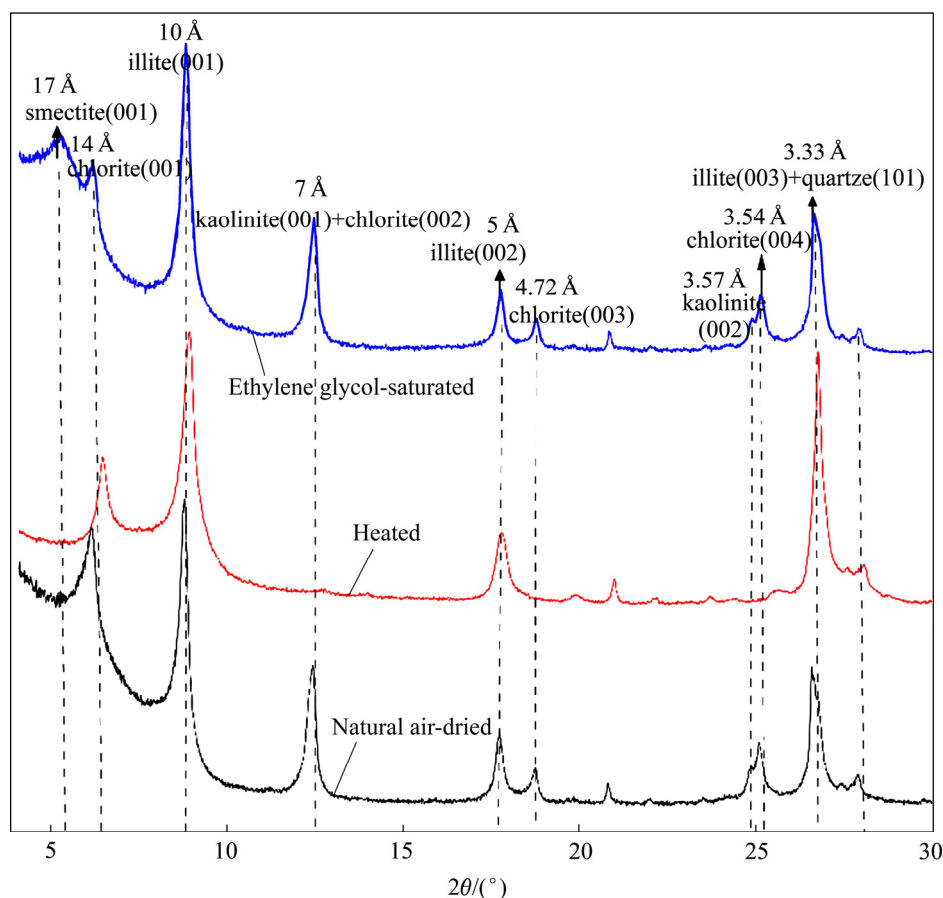


图3 样品典型X射线衍射图谱(1818站位表层沉积物样品)

Fig. 3 Typical X-ray diffraction diagram (surface sediment sample from 1818 station)

岭石、绿泥石四种黏土矿物以及石英、长石等非黏土矿物(数据结果详见表1)。

在黏土矿物的自然片XRD谱线上可以看到, 15 Å附近一系列的基面反射峰为蒙脱石和绿泥石的混合叠加峰。在经过乙二醇饱和后, 蒙脱石矿物膨胀, 其特征峰分异为17 Å蒙脱石衍射峰(001)、14 Å绿泥石衍射峰(001)。经过550 °C加热后, 蒙脱石矿物晶层间距收缩, 衍射峰的强度增加, 17 Å蒙脱石衍射峰(001)完全消失。在自然片XRD谱线上, 可以清楚地看到10 Å衍射峰和5 Å衍射峰, 证明了伊利石的存在, 经过乙二醇饱和后, 衍射峰位置和强度没有明显变化。在自然曲线上, 7 Å的叠加峰和3.57 Å、3.54 Å的双峰现象, 都说明了高岭石和绿泥石矿物的存在。经过乙二醇饱和后, 衍射峰位置和强度没有明显变化。经过550 °C加热处理后, 高岭石特征峰由于其变成非晶质物质而消失, 绿泥石发生脱羟作用, 除14 Å的衍射峰(001)

外, 其他衍射峰均减弱或消失。另外, 由研究区大部分样品的乙二醇饱和片的XRD谱线上都可以看到, 14 Å绿泥石衍射峰(001)和4.72 Å绿泥石衍射峰(003)反射较弱, 而7 Å高岭石(001)和绿泥石(002)的叠加峰及3.54 Å绿泥石衍射峰(004)反射较强, 说明绿泥石具有富铁特征^[21]。

3.2 表层黏土矿物分布特征

研究区C海盆表层沉积物黏土矿物成分以伊利石为主(56%~70%, 平均值为63.75%), 其次为蒙脱石(6%~27%, 平均值为16.29%)。在C海盆东南部可见蒙脱石高值区(18.03%~27.39%, 平均值为24.53%), 绿泥石含量相对较少(11%~18%, 平均值为14.67%), 高岭石含量最低(3%~8%, 平均值为5.33%)(见图4)。M海盆表层沉积物黏土矿物成分以伊利石为主(55.74%~72.27%, 平均值为62%), 在靠近海山一侧的1837站位可见明显的伊利石高

值(72.27%);其次为蒙脱石(12.54%~29.14%,平均值为22%),绿泥石含量较低(10.37%~12.28%,平均值为12%),高岭石含量最少(2.92%~6.54%,平均值为4.18%)(见图5)。M海盆表层沉积物中蒙脱石含量整体略高于C海盆。在海山区山麓附近、水

深较浅处,伊利石含量相对较高;在接近海盆中部、地势平坦、水深较深处,蒙脱石含量相对较高。

对C海盆和M海盆表层沉积物中的黏土矿物进行相关性分析可知(见图6和7):研究区沉积物中伊利石和蒙脱石呈明显的负相关关系(C海盆相关系数 $r=-0.9580$,M海盆 $r=-0.9553$),即沉积物中伊利石与蒙脱石含量呈现此消彼长的趋势,伊利石含量高的站位样品中蒙脱石含量低,反之亦然;绿泥石与蒙脱石呈负相关关系(C海盆 $r=-0.4626$,M海盆 $r=-0.6065$),与伊利石呈弱正相关关系(C海盆 $r=0.2948$,M海盆 $r=0.3841$);高岭石与蒙脱石呈负相关关系(C海盆 $r=-0.4067$,M海盆 $r=-0.5608$),与伊利石呈弱正相关关系(C海盆 $r=0.2441$,M海盆 $r=0.4164$)。

4 分析与讨论

4.1 研究区黏土矿物成因及其物源分析

为更好地讨论研究区沉积物黏土矿物的物质来源,本文统计了研究区周边海域的黏土矿物物源分析研究成果。研究区西部的菲律宾海、北部的沙茨基隆起、东部的中太平洋与东太平洋海域沉积物中的黏土矿物的主要物质来源均具有陆源(亚洲风尘)与火山物质(风化)混合的来源特征^[22-37]。将这些海域的黏土矿物数据与研究区的黏土矿物特征进行对比分析,绘制了(伊利石+绿泥石)-蒙脱石-高岭石黏土矿物三角图解和伊利石结晶度-化学指数相关关系图(见图8)。从图8中可以明显看出,研究区黏土矿物与亚洲黄土、长江、西菲律宾海、帕里西维拉海盆、中太平洋海盆、东太平洋CC区沉积物中黏土矿物特征均有相似之处,因此可以推测亚洲风尘以及火山物质(风化)是研究区黏土矿物的主要物质来源。

结合研究区的相关地质背景,并与周边可能源区的黏土矿物组成和特征对比,就4种黏土矿物伊利石、蒙脱石、绿泥石和高岭石展开具体物源分析。

4.1.1 伊利石

一般来说,伊利石是黏土矿物中最稳定的物相,是典型的风化产物,可以在不同的气候条件和不同的碱性环境中形成^[38]。研究表明,海洋中的

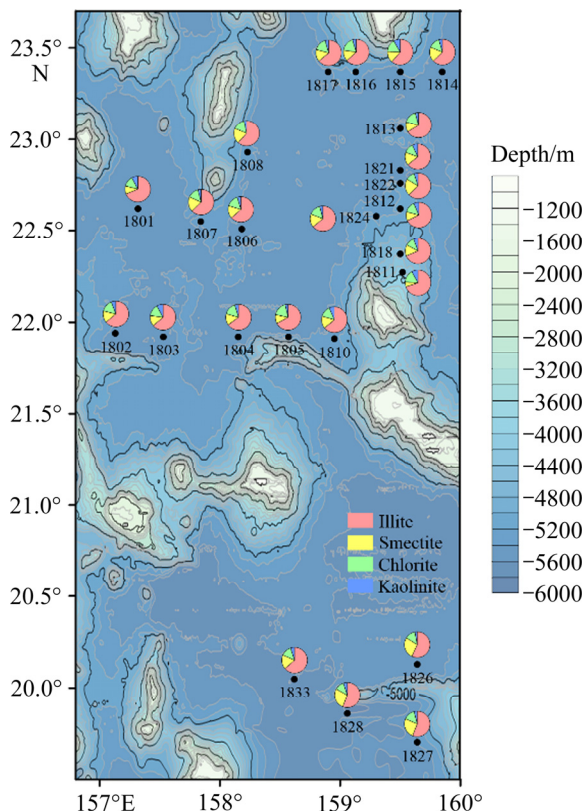


图4 C海盆表层黏土矿物分布图

Fig. 4 Distribution of clay minerals in surface sediments of C Basin

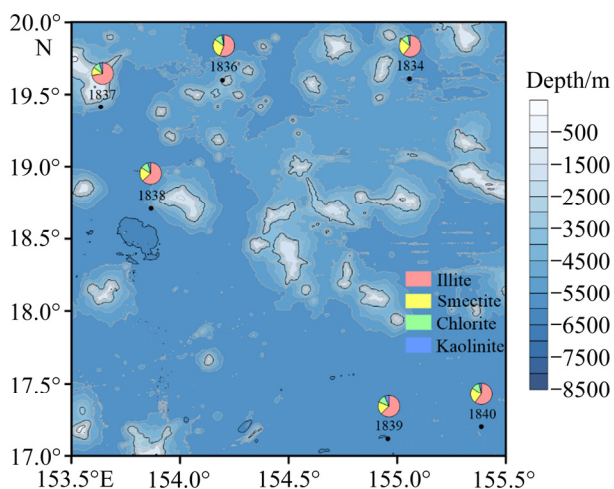


图5 M海盆表层黏土矿物分布图

Fig. 5 Distribution of clay minerals in surface sediments of M Basin

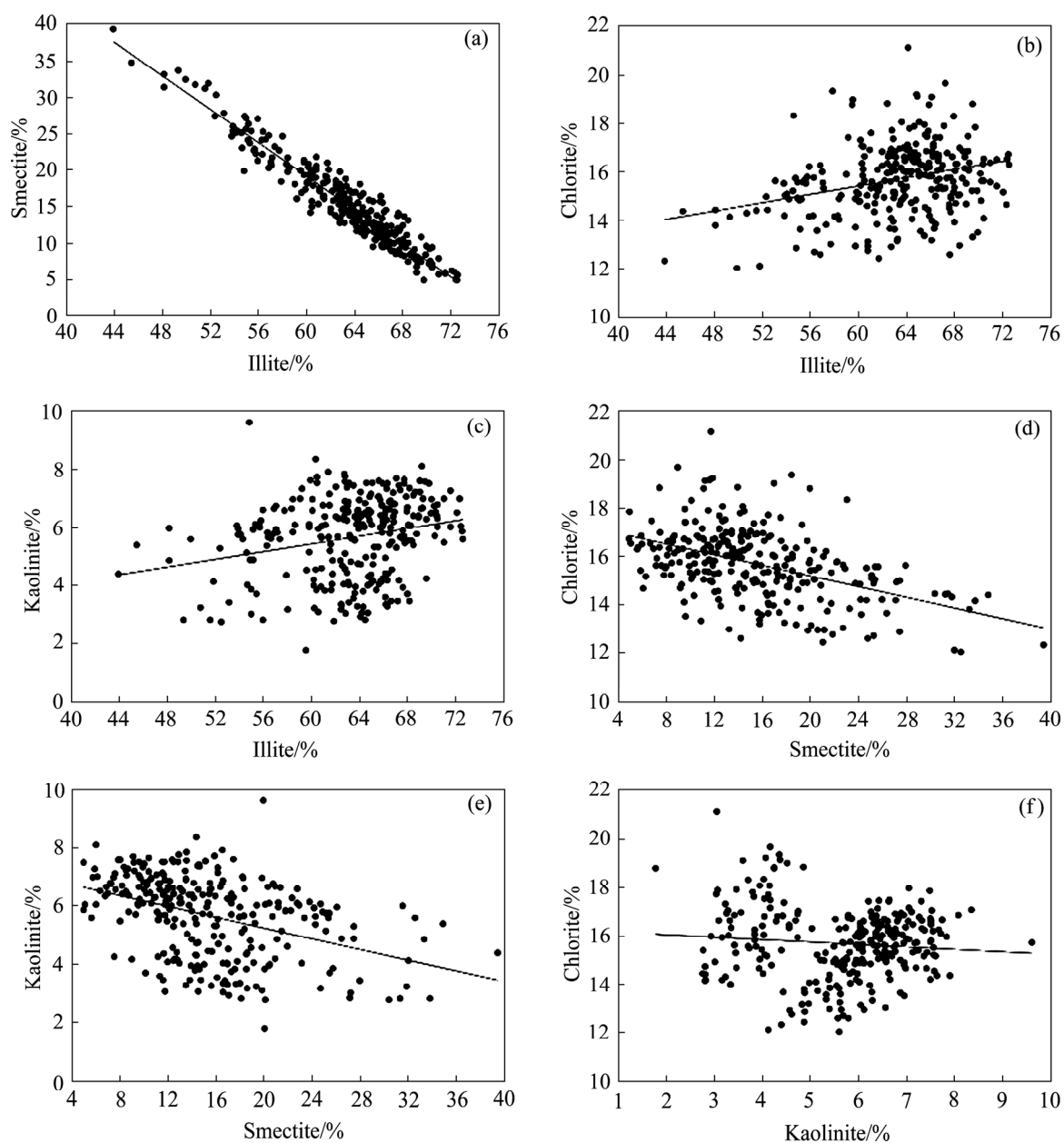


图6 C海盆各黏土矿物间的相关性

Fig. 6 Correlation diagrams between clay minerals in C Basin: (a) $r=-0.9580$; (b) $r=0.2948$; (c) $r=0.2441$; (d) $r=-0.4624$; (e) $r=-0.4067$; (f) $r=-0.0959$

伊利石主要来自陆地，河流和风为其主要营力^[39]。

研究区远离大陆，受内陆河流的影响较小，且北赤道流和北太平洋中层水自东向西流动^[12-13]，再加上近岸流、岛弧、海沟以及海山链的影响，西菲律宾海以及帕里西维拉海盆等地的沉积物很难通过洋流输送到研究区。因此，研究区的伊利石可能是由风力输送。

研究区周边的大陆主要为亚洲大陆、澳洲大陆和美洲大陆，其中又与亚洲大陆最为接近。以伊利

石/高岭石(I/K)比值为基础，对研究区伊利石的陆源进行分析。澳洲的 I/K 比值为 0.8~1.9^[40]，美洲的 I/K 比值为 1.1~3.5^[41]，亚洲的 I/K 比值为 1~22^[42]，研究区的 I/K 比值为 5.8~21.5，平均为 12.2，远大于澳洲和美洲，而与亚洲最为接近。与澳洲和美洲相比，研究区更富伊利石，这也说明研究区的伊利石主要来自于亚洲大陆。

吕宋岛弧区位于研究区西部，其伊利石含量极低，最高不超过 20%，最低约 1%，平均 5%^[29]，

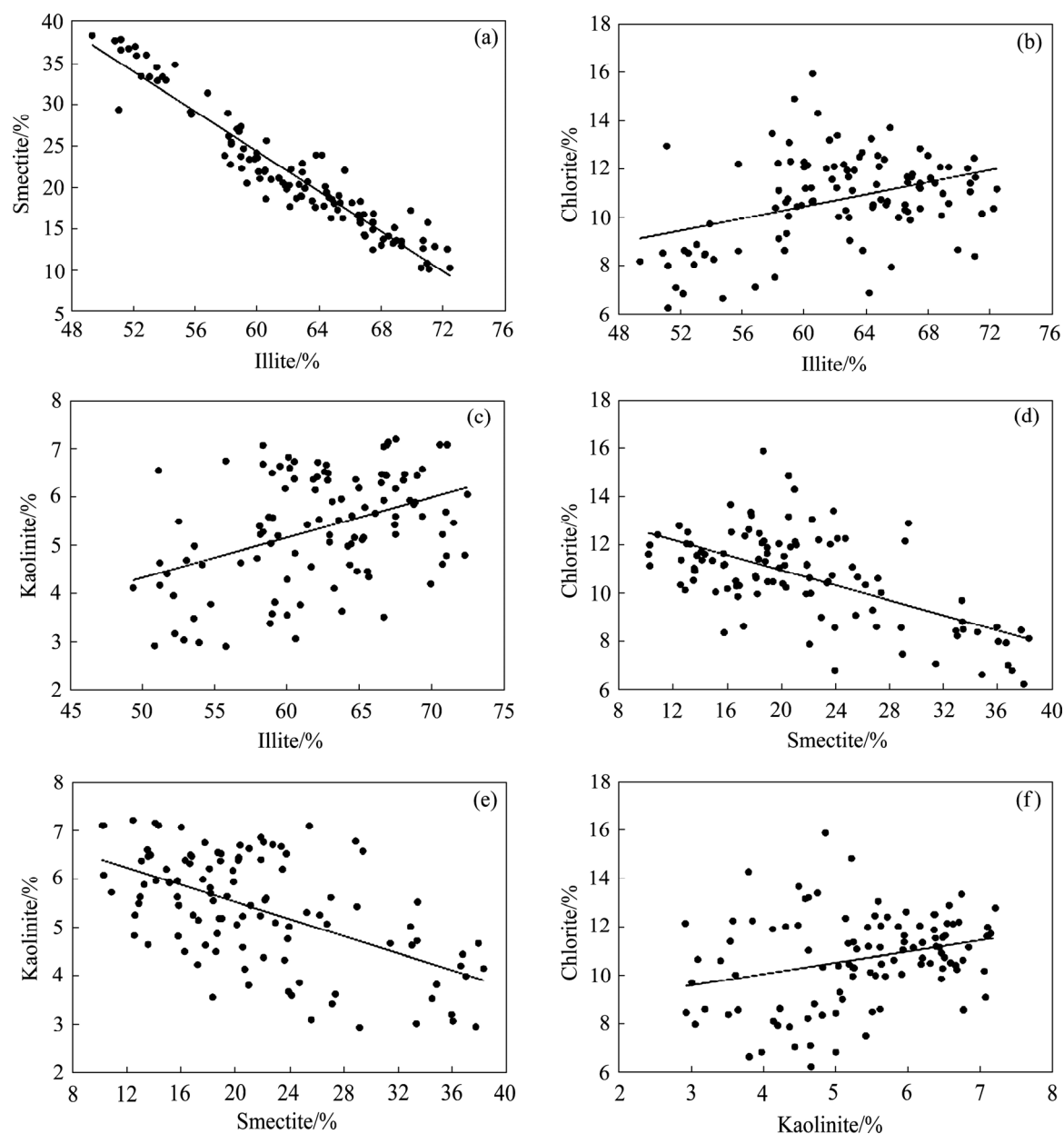


图 7 M 海盆各黏土矿物间的相关性

Fig. 7 Correlation diagrams between clay minerals in M Basin: (a) $r=-0.9553$; (b) $r=0.3841$; (c) $r=0.4164$; (d) $r=-0.6065$; (e) $r=-0.5608$; (f) $r=0.2859$

低于研究区内伊利石的含量(C 海盆平均为 61%, M 海盆平均约 61%),因此研究区中的伊利石不可能主要来源于吕宋岛。台湾地区的沉积物中伊利石含量高达 65%以上^[43],但是通过对比台湾地区的伊利石结晶度和化学指数可以发现,其伊利石的结晶度值一般都较低(<0.23),伊利石的化学指数平均值为 0.49^[44],而研究区中伊利石结晶度平均为 0.29,伊利石的化学指数平均为 0.20,台湾地区伊利石的化学指数远高于研究区,因此台湾不是研究区伊利石

的主要来源。亚洲黄土中伊利石含量通常 $>65\%$,最高可达 78%^[45],可以为研究区提供足量的伊利石,且黄土和古土壤中伊利石结晶度值的变化范围分别为 0.22~0.33 和 0.22~0.42^[32,46],与研究区最为接近,说明研究区的伊利石形成于物理风化较强的气候环境,可能与亚洲黄土相关。日本岛河流沉积物中伊利石/高岭石(I/K)比值为 1.8~7,伊利石结晶度为 0.27~0.34,伊利石的化学指数为 0.21~48^[47],与亚洲黄土及研究区相似,因此,可以推测日本岛

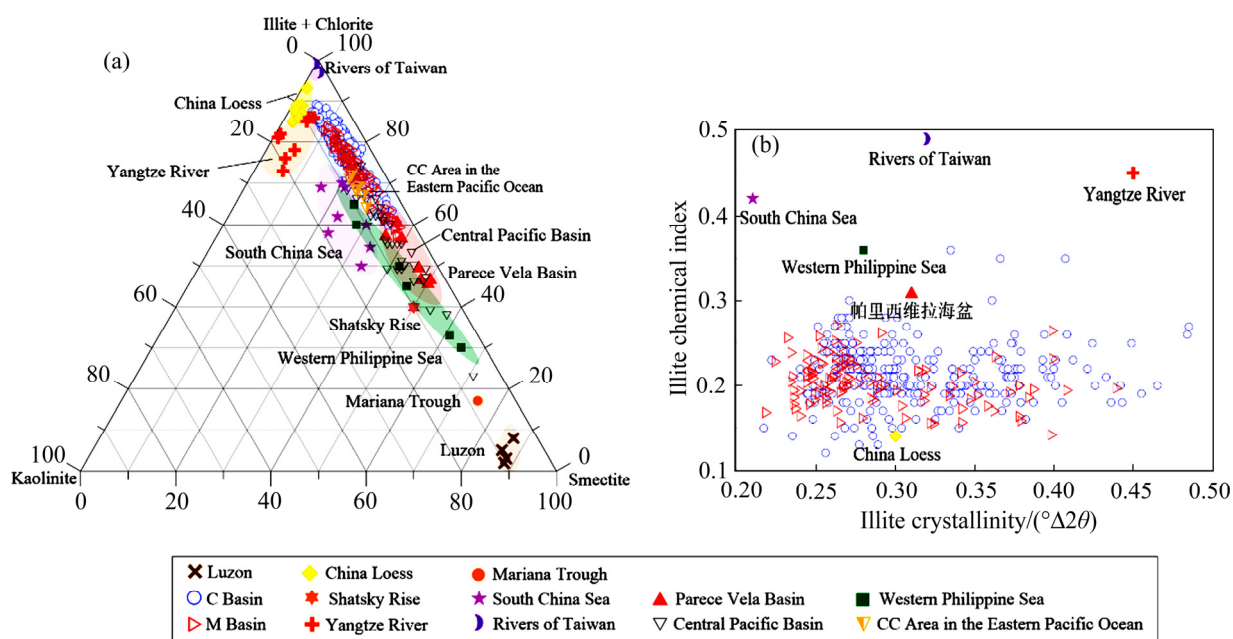


图8 (伊利石+绿泥石)-蒙脱石-高岭石黏土矿物三角图解与伊利石结晶度-化学指数相关关系图

Fig. 8 Ternary diagram of three clay mineral groups(a) and relationship between illite crystallinity and illite chemical index(b)

可能为研究区伊利石物源区之一, 同时也不排除研究区伊利石可能与日本岛具有共同的物源——亚洲黄土。

从地理位置上来看, 研究区位于亚洲大陆东侧, 其表层沉积物中伊利石的搬运介质可能为东亚冬季风和西风急流。而西风急流大致位于 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 之间^[48], 研究区在 $17^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 之间, 西风急流很难将大量风尘物质输送至研究区。前人对于研究区邻近海域西菲律宾海风尘物质的研究结果也表明, 东亚冬季风是风尘搬运的重要动力^[49-51]。因此, 可以推测研究区伊利石的搬运介质也主要为东亚冬季风。

4.1.2 蒙脱石

海洋沉积物中的蒙脱石有两个来源: 陆源蒙脱石多由周边大陆母岩的化学风化作用生成, 自生蒙脱石一般来源于海底基性火山物质的风化和蚀变^[52]。通常来说, 自生成因的蒙脱石在海底较为稳定, 且当沉积物中火山灰和火山玻璃增加时, 蒙脱石含量也会相应增加^[20], 如南太平洋和中太平洋海盆较高含量的蒙脱石就被认为是海底火山发生活动的产物^[53]。

蒙脱石/伊利石(S/I)比值可以用来衡量海洋黏土矿物的自生程度, 可以得到自生黏土矿物与陆源

黏土矿物的相对比例, S/I 比值越小, 陆源黏土含量越高, 自生程度越低^[54]。C 海盆 S/I 比值的变化范围为 0.07~0.88, 绝大多数在 0.25 左右, M 海盆 S/I 比值的变化范围为 0.14~0.78, 平均值为 0.36, 这两个地区的 S/I 比值都远小于北太平洋和南太平洋的 S/I 平均值(分别为 0.85 和 2.04)^[55], 表明研究区内黏土矿物物源主要是陆源。石学法等研究发现, 在以陆地物质为主要来源的海域, 蒙脱石含量一般不超过 20%^[52], C 海盆蒙脱石含量平均为 15%, 低于 20%, 也表明该海盆内黏土矿物以陆源为主。但是 M 海盆蒙脱石含量平均为 22%, 且有很多层位蒙脱石含量超过 30%, 说明海盆内的部分蒙脱石为海洋自生成因。陆源蒙脱石(如黄河和长江沉积物中的蒙脱石)的结晶度值约为 0.50^[56], 海底基性火山物质蚀变而成的自生蒙脱石结晶度值约为 1.45^[43], 而 C 海盆和 M 海盆内蒙脱石结晶度平均值分别为 0.92 和 0.95, 介于 0.50~1.45 之间, 也说明研究区蒙脱石是陆源与海洋自生成因的混合产物。

通过分析研究区表层沉积物黏土矿物分布特征(见文中 3.2 小节)发现, 研究区蒙脱石分布特征与下部环南极深层水对研究区底层水的影响程度相对应: M 海盆直接受下部环南极深层水影响(途径 M 海盆), 与之对应的是 M 海盆沉积物中蒙脱石含

量高于C海盆; C海盆的东南部地形较为开阔更易受到下部环南极深层水的影响则对应C海盆的东南部沉积物中蒙脱石含量高于其他区域(见图1、图4和图5)。另外, KOHYAMA^[57]通过对中太平洋麦哲伦海槽(下部环南极深层水影响区)沉积物中黏土矿物的分析研究中发现: 该区沉积物中的蒙脱石并非均是海底原位形成的, 部分蒙脱石具有同种异体来源。下部环南极深层水上游区南太平洋的沉积物具有高蒙脱石含量特征(平均为53%)^[20], 因此, 可以推测下部环南极深层水途径南太平洋携带了高蒙脱石含量沉积物, 进入研究区山间盆地后, 流速降低^[58], 高蒙脱石含量沉积物沉积并与亚洲风尘(高伊利石含量)及研究区原位自生成因黏土矿物混合, 形成了现今的黏土矿物分布特征。

综上所述可知, 研究区沉积物中的蒙脱石有3种主要物质来源: 海山(风化)自生来源, 富含蒙脱石的洋流及陆地来源(亚洲大陆)。洋流搬运作用影响可能是研究区蒙脱石分布的主控因素之一。

4.1.3 绿泥石

绿泥石一般是由中高纬地区陆地低级变质岩、火成岩及古老沉积岩在干冷的气候环境下机械侵蚀而成的^[20], 大洋沉积物中的绿泥石大多是陆源碎屑成因^[59]。XRD谱特征说明本研究区的绿泥石具有富铁特征, 与中国内陆黄土中的绿泥石相似^[26]。如图6和7所示, 绿泥石与伊利石具有一定的正相关关系(C海盆 $r=0.2948$, M海盆 $r=0.3841$), 与蒙脱石为负相关关系(C海盆 $r=-0.4626$, M海盆 $r=-0.6065$)。另外, 在研究区西部菲律宾海西北部的奄美三角盆地与东菲律宾海帕里西维拉海盆的沉积物中绿泥石与伊利石具有相似的物质来源(亚洲风尘)^[36, 60], 因此, 可以推断亚洲风尘是研究区绿泥石的主要物质来源之一。

4.1.4 高岭石

高岭石是强烈的化学风化作用下形成的产物, 多在潮湿气候条件下、酸性介质中由长石淋滤风化而成。大洋中的高岭石一般都是来自陆地, 这是由于碱性、弱碱性的海洋环境并不适合高岭石的形成^[59]。亚洲大陆黄土中高岭石含量为6%~16%^[61], 且研究区高岭石也与伊利石具有一定的正相关性(C海盆 $r=0.2441$, M海盆 $r=0.4164$), 与蒙脱石具有一定的负相关性(C海盆 $r=-0.4067$, M海盆 $r=-0.5608$, 见图6和7), 在研究区西部菲律宾海西

北部的奄美三角盆地与东菲律宾海帕里西维拉海盆沉积物中的高岭石均具有陆源(亚洲风尘)来源特征^[36, 60], 因此, 可以推断亚洲风尘是研究区高岭石的主要物质来源之一。

4.2 水深与黏土矿物组成特征

研究区蒙脱石含量、伊利石含量与水深有明显的相关关系。选取C海盆1811-1818-1812-1822-1821-1813由南向北分布的6个站位绘制表层伊利石、蒙脱石含量与水深剖面图(见图9)。从图9中可以看出, 伊利石含量曲线与水深曲线趋势大致相同, 蒙脱石含量曲线则呈相反趋势, 即水深处蒙脱石含量较高, 水浅处伊利石含量高。

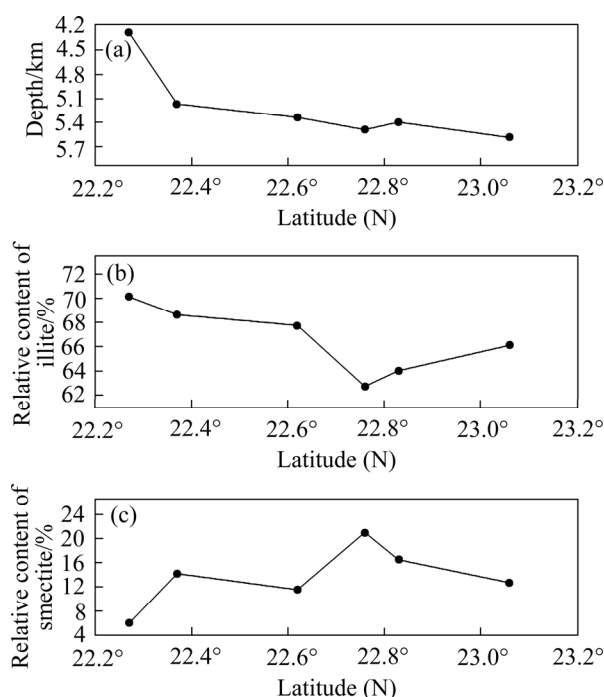


图9 C海盆表层伊利石、蒙脱石相对含量变化与水深剖面图

Fig. 9 Profile of relative contents change of illite and smectite with depth in surface sediments of C Basin: (a) Relationship between latitude and depth; (b) Relationship between latitude and relative content of illite; (c) Relationship between latitude and relative content of smectite

前人研究表明, 底层流进入山间盆地后, 水深较浅处底流流速较快, 而盆地中心水深较深处则流速较慢, 沉积物沉积速率增大更有利于沉积^[36, 62]。假设底层洋流(下部环南极深层水)没有为研究区提

供外来高蒙脱石含量沉积物输入(或输入量很少),那么,研究区黏土矿物分布特征应与东菲律宾海帕里西维拉海盆相似,即伊利石主要富集在深水区,在海山山麓水深较浅处蒙脱石出现高值(海山山麓由于底流流速较快,高伊利石含量的亚洲风尘会在海底进一步重新分布,在水深较深处更有利于亚洲风尘的保存)^[36],而研究区却与东菲律宾海帕里西维拉海盆蒙脱石与伊利石的分布特征正好相反。根据前文分析结果(见文中 4.1.1 小节),研究区伊利石主要为亚洲风尘来源,与东菲律宾海帕里西维拉海盆一致,那么蒙脱石来源的差异应是研究区蒙脱石与伊利石特殊分布特征的主控因素(帕里西维拉海盆蒙脱石为原位自生成因),因此,下部环南极深层水携带的高蒙脱石含量沉积物(来自南太平洋)应是研究区蒙脱石的主要物源之一,下部环南极深层水携带高蒙脱石含量沉积物进入研究区山间盆地后,在盆地中心水深较深处流速较慢,更有利于沉积,稀释了亚洲风尘带来的伊利石含量,而在水深较浅处,流速较快、不利于沉积,从而出现了蒙脱石含量与水深呈正相关,伊利石含量与水深呈负相关的现象。

4.3 柱状沉积物中黏土矿物的垂向分布特征

作为母岩的风化产物,黏土矿物本身就具有一定的气候信息^[63]。研究区在东亚季风的影响范围内,且位于大洋中西部,远离亚洲大陆,受河流和近岸洋流输入的陆源碎屑物质比边缘海要少得多,风尘的影响占据主要地位,因此,适合开展源区古环境和东亚古季风演化的研究^[64]。

前人研究发现,海洋沉积物中伊利石与绿泥石的正相关性较高,来源于周边大陆寒冷干旱气候条件下母岩的物理风化,故将这两种矿物作为一个整体来代表大陆物质端元;蒙脱石大多来源于周围火山物质的蚀变,与火山岩的化学作用密切相关,代表火山物质端元;高岭石虽然也多来源于周边大陆,但其对气候的指示意义通常与伊利石和绿泥石有所不同。因此,前人研究中多采用(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值来代表海洋沉积物中大陆物质端元与火山物质端元的相对含量,反映不同的物源输入在冰期、间冰期发生的系列变化,从而得到古环境演化的信息^[60]。

研究区的取样站位均位于水深 5000 m 以下(除

1811 站位外),低于太平洋碳酸盐补偿深度,因此,很难用钙质生物中的碳、氧同位素来确定沉积年代^[48]。谢一璇等对研究区附近采薇海山山间盆地(M 海盆中)的柱状沉积物样品开展了系列磁学特征研究,在不考虑沉积物固结压实与沉降作用的情况下,计算出表层厚 62 cm 的沉积物对应的沉积年代为 72.6 ka^[65]。因此,可以计算出西北太平洋海山区沉积物的平均沉积速率约为 8.5 mm/ka。本文采用计算出的平均沉积速率初步建立研究区柱状沉积物的年龄框架。研究区采集的柱状岩心长度约为 50 cm,计算出其年龄与深海有孔虫氧同位素 3 期(MIS 3)的起始年代(57 ka)接近。

对研究区柱状样品黏土矿物特征进行对比分析,以样品的顶面位置为准,将各站位的伊利石、蒙脱石含量、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值的垂向变化与西北太平洋风尘通量^[66]的变化绘制成图(以 C 海盆的 1821、1822 与 M 海盆 1834、1839 站位为例,见图 10 和 11)。

从图 10 和 11 中可以看出:各站位不同层位(垂向)沉积物中伊利石与蒙脱石呈镜像分布,即伊利石与蒙脱石呈此消彼长的变化趋势;各站位同层位段(垂向深度)伊利石、蒙脱石、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值的变化趋势并不一致。根据前人研究^[36, 62]及前文分析结果(4.2 节),由于海底地形的影响,不同水深(地形)处底层流流速不同,从而造成沉积速率不同,因此各站位同层位段(垂向深度)可能代表了不同时期的沉积记录,利用平均沉积速率来推算各站位的沉积年代只是估计值,详细的黏土矿物演化趋势(垂向)分析,还需更精细的定年手段。根据 5 万年以来的西北太平洋风尘通量记录^[66],在 MIS2 期存在风尘通量明显的峰值期,但在研究区各站位沉积物伊利石、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值的总体垂向变化趋势中并未观察到明显的对应峰值(即使考虑沉积速率不同,而上下浮动一定沉积年代)。推测该现象可能与研究区伊利石与蒙脱石物源输入变化有关:MIS2 期为冰期,全球气候转冷,下部环南极深层水增强,其携带而来的蒙脱石总量必然有所增加,但是在该时期,西北太平洋风尘通量也出现了明显的峰值,伊利石(风尘输入)的输入量也明显增加,两种控制因素的相互抵消效应造成伊利石、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值的总体变化趋势中并未出现对应峰值。

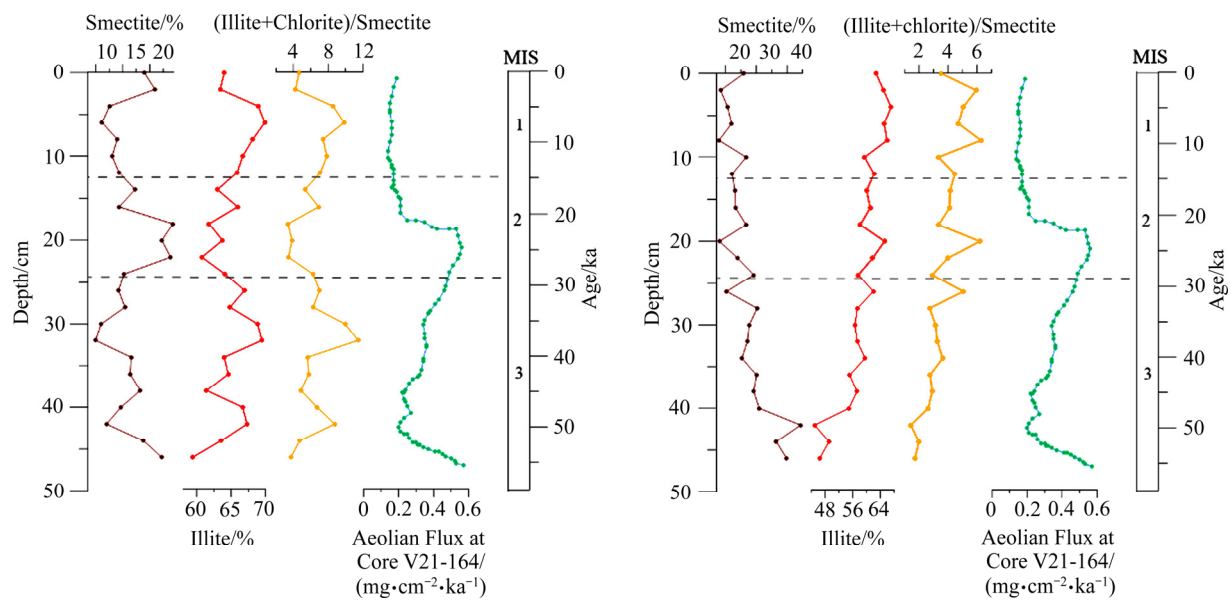


图 10 1821 站位(左)、1822 站位(右)蒙脱石、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石与西北太平洋 V21-146 孔风尘通量对比
Fig. 10 Comparison of smectite, (illite+chlorite)/smectite ratio from 1821(left) and 1822(right), and aeolian flux at Core V21-146 in North Pacific (Dotted lines show marine isotope stages(MIS) boundary)

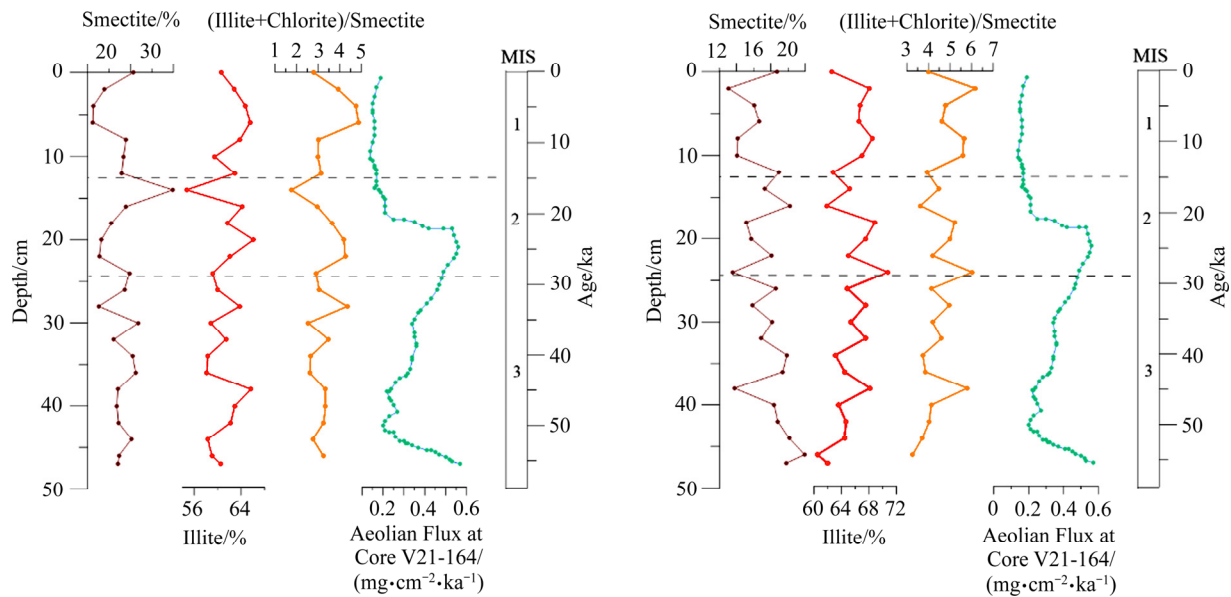


图 11 1834 站位(左)、1839 站位(右)蒙脱石、(伊利石+绿泥石)/蒙脱石与西北太平洋 V21-146 孔风尘通量对比
Fig. 11 Comparison of smectite, (illite+chlorite)/smectite ratio from 1834(left) and 1839(right), and aeolian flux at Core V21-146 in North Pacific (Dotted lines show marine isotope stages(MIS) boundary)

5 结论

1) 研究区表层沉积物中黏土矿物类型以伊利石为主, 其次为蒙脱石, 高岭石及绿泥石含量较低。

2) 研究区表层伊利石与蒙脱石的分布存在明显规律, 即伊利石含量高的区域蒙脱石含量较低, 反之亦然; 海山区附近、水深较浅处伊利石含量相对较高, 接近海盆中部、地势平坦、水深较深处蒙脱石含量相对较高。

3) 研究区表层沉积物中的蒙脱石有 3 种主要物质来源: 海山(风化)自生来源, 富含蒙脱石的洋流及陆地来源(亚洲大陆); 洋流搬运作用可能是蒙脱石分布的主控因素之一。伊利石主要来源于亚洲大陆的风尘输入; 亚洲风尘可能也是研究区绿泥石和高岭石主要物源之一。

REFERENCES

- [1] 张富元, 李安春, 林振宏, 等. 深海沉积物分类与命名[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 517-523.
ZHANG Fu-yuan, LI An-chun, LIN Zhen-hong, et al. Classification and nomenclature of deep sea sediments[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 37(6): 517-523.
- [2] 刘华华. 中新世以来奄美三角盆地沉积物中粘土矿物的来源[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
LIU Hua-hua. Provenance of clay minerals in the sediments of Amami Sankaku Basin since Miocene[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2016.
- [3] XU Zhao-kai, WAN Shi-ming, COLIN C, et al. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level lowstands: Forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle[J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 232: 106211.
- [4] XU Zhao-kai, WAN Shi-ming, COLIN C, et al. ENSO-like Modulated Tropical Pacific Climate changes since 2.36 Myr and its implication for the Middle Pleistocene Transition[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2018, 19(2): 415-426.
- [5] XIONG Zhi-fang, LI Tie-gang, JIANG Fu-qing, et al. Millennial-scale evolution of elemental ratios in bulk sediments from the western Philippine Sea and implications for chemical weathering in Luzon since the Last Glacial Maximum[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 179: 127-137.
- [6] XIONG Zhi-fang, LI Tie-gang, CHANG Feng-ming, et al. Rapid precipitation changes in the tropical West Pacific linked to North Atlantic climate forcing during the last deglaciation[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 197: 288-306.
- [7] 蓝先洪. 海洋沉积物中粘土矿物组合特征的古环境意义[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(1): 5-7.
LAN Xian-hong. Paleoenvironmental significance of clay mineral assemblages in marine sediments[J]. Marine Geology Letters, 2001, 17(1): 5-7.
- [8] SUN Ye-chen, XIAO Wen-shen, WANG Ru-jian, et al. Changes in sediment provenance and ocean circulation on the northern slope of the Bering Sea since the last deglaciation[J]. Marine Geology, 2021, 436: 106492.
- [9] GAO Yuan, GAO You-feng, IBARRA D E, et al. Clay mineralogical evidence for mid-latitude terrestrial climate change from the latest Cretaceous through the earliest Paleogene in the Songliao Basin, NE China[J]. Cretaceous Research, 2020, 24: 104827.
- [10] DIEKMANN B, PETSEHICK R, GINGELE F X, et al. Clay mineral fluctuations in late quaternary sediments of the southeastern south atlantic: Implications for past changes of deep water advection[M]. Berlin: The South Atlantic, 1996: 621-644.
- [11] KAWABE M, FUJIO S, YANAGIMOTO D. Deep-water circulation at low latitudes in the western North Pacific[J]. Deep-Sea Research Part I, 2003, 50(5): 631-656.
- [12] KAWABE M, FUJIO S. Pacific ocean circulation based on observation[J]. Journal of Oceanography, 2010, 66(3): 389-403.
- [13] WEISS T L, LINSLEY B K, GORDON A L. Pacific North Equatorial Current bifurcation latitude and Kuroshio Current shifts since the Last Glacial Maximum inferred from a Sulu Sea thermocline reconstruction[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 264: 106999.
- [14] 李守军, 陶春辉, 初凤友, 等. 浅地层剖面在富钴结壳调查研究中的应用[J]. 海洋技术, 2007, 26(1): 54-57.
LI Shou-jun, TAO Chun-hui, CHU Feng-you, et al. A practical application of sub-bottom profile system to cobalt-rich crust investigation in middle pacific ocean[J]. Marine Technology, 2007, 26(1): 54-57.
- [15] 徐建, 郑玉龙, 包更生, 等. 基于声学深拖调查的海山微地形地貌研究——以马尔库斯-威克海岭一带的海山为例[J]. 海洋学研究, 2011, 29(1): 17-24.
XU Jian, ZHENG Yu-long, BAO Geng-sheng. Research of seamount micro-topography based on acoustic deep-tow system investigation: A case from the Marcus-Wake Ridge area[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(1): 17-24.

- [16] 陈建林, 马维林, 武光海, 等. 中太平洋海山富钴结壳与基岩关系的研究[J]. 海洋学报(中文版), 2004, 26(4): 71–79.
- CHEN Jian-lin, MA Wei-lin, WU Guang-hai. Research on the relationships between cobalt-rich crusts and substrate rocks in the Mid-Pacific Mountains[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(4): 71–79.
- [17] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803–832.
- [18] LIU Zhi-fei, TRENTESAUX A, CLEMENS S C, et al. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1/3): 133–146.
- [19] EHRMANN W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1998, 139(3): 213–231.
- [20] CHAMLEY, HERVÉ. *Clay sedimentology*[M]. Berlin: Springer, 1989.
- [21] 杨雅秀, 苏昭冰, 陈正国. 粘土矿物 X 射线衍射法定量研究(上)[J]. 建材地质, 1994(4): 28–34.
- YANG Ya-xiu, SU Zhao-bing, CHEN Zheng-guo. Quantitative study of clay minerals by X-ray diffraction method[J]. *Nonmetallic Geology*, 1994(4): 28–34.
- [22] SHAO Ya-ping, WYRWOLL K H, CHAPPELL A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science[J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181–204.
- [23] ZHANG Wen-fang, CHEN Jun, JI Jun-feng, et al. Evolving flux of Asian dust in the North Pacific Ocean since the late Oligocene[J]. *Aeolian Research*, 2016, 23: 11–20.
- [24] ZHANG Qiang, LIU Qing-song, ROBERTS A P, et al. Mechanism for enhanced eolian dust flux recorded in North Pacific Ocean sediments since 4.0 Ma: Aridity or humidity at dust source areas in the Asian interior?[J]. *Geology*, 2019, 48(1): 77–81.
- [25] MARX S K, KAMBER B S, MCGOWAN H A, et al. Palaeo-dust records: A window to understanding past environments[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 165: 13–43.
- [26] KOLLA V, NADLER L, BONATTI E. Clay mineral distributions in surface sediments of the Philippine sea[J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 1980, 20(2): 245–250.
- [27] 张德玉. 马里亚纳海槽和西菲律宾海盆更新世以来沉积物中的粘土矿物[J]. 沉积学报, 1993, 11(1): 111–120.
- ZHANG De-yu. Clay mineralogy of the sediments deposited since the Pleistocene in the Mariana Trough and the West Philippine Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(1): 111–120.
- [28] LENOTRE N, CHAMLEY H, HOFFERT M. Clay stratigraphy of Deep Sea Drilling Project sites 576 and 578, Leg 86 (western North Pacific)[J]. Initial reports of the Deep Sea Drilling Projects, 1985, 86: 571–579.
- [29] 池野, 李安春, 蒋富清, 等. 吕宋岛东部海域黏土矿物组合特征及物源分析[J]. 海洋科学, 2009, 33(9): 80–88.
- CHI Ye, LI An-chun, JIANG Fu-qing, et al. Assemblage and provenance of clay minerals of the east of Luzon Island[J]. *Marine Science*, 2009, 33(9): 80–88.
- [30] 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: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11492–11504.
- [31] 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]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- MING Jie. The characteristics and provenance of the sediment in the Parece Vela Basin since the Quaternary and their environmental implications[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2013.
- [32] 靳宁. 帕里西维拉海盆西北部海域粘土矿物分布特征研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2006.
- JIN Ning. Clay Mineral Distribution in the Sediments of the Northwest Parece Vela Basin[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2006.
- [33] WAN Shi-ming, YU Zhao-jie, 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.
- [34] 丁雪, 胡邦琦, 徐方建, 等. 晚上新世以来菲律宾海盆 XT4 孔黏土矿物特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第

- 四纪地质, 2021, 41(1): 42–51.
- DING Xue, HU Bang-qi, XU Fang-jian, et al. Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(1): 42–51.
- [35] 舒雨婷, 郑玉龙, 许冬, 等. 西菲律宾海盆 18 孔黏土矿物的物源分析[J]. *海洋学研究*, 2015, 33(4): 61–69.
- SHU Yu-ting, ZHENG Yu-long, XU Dong, et al. The provenance of clay minerals in core I8 from the West Philippine Basin[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2015, 33(4): 61–69.
- [36] 黄杰, 万世明, 张国良, 等. 海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 77–85.
- HUANG Jie, WAN Shi-ming, ZHANG Guo-liang, et al. Impact of seafloor topography on distribution of clay minerals in the East Philippines Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 77–85.
- [37] 赵全基, 张壮域. 中太平洋调查区沉积黏土矿物[J]. *热带海洋*, 1989(3): 90–95.
- ZHAO Quan-ji, ZHANG Zhuang-yu. Clay minerals in sediments from the central Pacific investigative region[J]. *Tropic Oceanology*, 1989(3): 90–95.
- [38] 靳宁, 李安春, 刘海志, 等. 帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中黏土矿物的分布特征及物源分析[J]. *海洋与湖沼*, 2007(6): 504–511.
- JIN Ning, LI An-chun, LIU Hai-zhi, et al. Clay minerals in surface sediment of the northwest Parece Vela Basin: Distribution and provenance[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007(6): 504–511.
- [39] 俞旭, 江超华. 现代海洋沉积矿物及其 X 射线衍射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 113–156.
- YU Xu, JIANG Chao-hua. Research on minerals of modern ocean sedimentation and X-ray diffraction method[M]. Beijing: Scientific Publishing House, 1984: 113–156.
- [40] GINGELE F X, DECKKER P D, HILLENBRAND C D. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia—Source and transport by ocean currents[J]. *Marine Geology*, 2001, 179(3): 135–146.
- [41] LEINEN M, PROSPERO J M, ARNOLD E, et al. Mineralogy of aeolian dust reaching the North Pacific Ocean: 1. Sampling and analysis[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1994, 99(D10): 21017–21023.
- [42] ARNOLD E, MERRILL J, LEINEN M, et al. The effect of source area and atmospheric transport on mineral aerosol collected over the North Pacific Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 18(3): 137–159.
- [43] LIU Zhi-fei, TUO Shou-ting, COLIN C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(3): 149–155.
- [44] LIU Zhi-fei, ZHAO Yu-long, COLIN C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(11): 2195–2205.
- [45] 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2008, 33(3): 289–300.
- WAN Shi-ming, LI An-chun, XU Ke-hui, et al. Characteristics of clay minerals in the northern South China Sea and its implications for evolution of east Asian monsoon since Miocene[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(3): 289–300.
- [46] JI Un-feng, CHEN Jun, LU Hua-yu. Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, Central China[J]. *Clay Minerals*, 1999, 34(4): 525–532.
- [47] 沈兴艳. 中中新世以来中亚干旱和 C4 植被演化在日本海的沉积记录[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
- SHEN Xing-yan. Evolution of central Asian aridity and C4 plants since the middle Miocene recorded by marine sediments in the Japan sea[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2018.
- [48] 王晨, 徐方建, 胡邦琦, 等. 3.7 Ma 以来西菲律宾海 XT-4 孔沉积物元素特征及其古环境指示意义[J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 205–214.
- WANG Chen, XU Fang-jian, HU Bang-qi, et al. Elemental geochemistry of Core XT-4 sediments from the western Philippines Sea since 3.7 Ma and its paleoenvironmental implications[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(8): 205–214.
- [49] XU Zhao-kai, LI Tie-gang, COLIN C, et al. Seasonal Variations in the Siliciclastic Fluxes to the Western Philippine Sea and Their Impacts on Seawater ϵNd Values Inferred From 1 Year of In Situ Observations Above Benham

- Rise[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6688–6702.
- [50] 王 薇, 徐兆凯, 冯旭光, 等. 西菲律宾海现代风尘物质组成特征及其物源指示意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 559–568.
- WANG Wei, XU Zhao-kai, FENG Xu-guang, et al. Composition characteristics and provenance implication of modern dust in the West Philippine sea[J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 559–568.
- [51] YU Zhao-jie, WAN Shi-ming, COLIN C, et al. Co-evolution of monsoonal precipitation in East Asia and the tropical Pacific ENSO system since 2.36 Ma: new insights from high-resolution clay mineral records in the West Philippine Sea[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2016, 446: 45–55.
- [52] 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 Xue-fa, CHEN Li-rong, LI Kun-ye. Study on minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 61–72.
- [53] GRIFFIN J J, WINDOM H, GOLDBERG E D. The distribution of clay minerals in the World Ocean[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1968, 15(4): 433–459.
- [54] 刘季花, 石学法, 陈丽蓉, 等. 东太平洋沉积物中粘土组分的REEs和 ε_{Nd} : 粘土来源的证据[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2004, 9(6): 552–561.
- LIU Ji-hua, SHI Xue-fa, CHEN Li-rong, et al. REEs and ε_{Nd} of clay minerals in eastern Pacific sediments: Evidence of clay origin[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004, 9(6): 552–561.
- [55] 程振波, 石学法, 苏 新, 等. 西太平洋麦哲伦海山铁锰结壳生物地层、生长年代及沉积环境[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(4): 422–430.
- CHENG Zhen-bo, SHI Xue-fa, SU Xin, et al. Biostratigraphy, growth period and sedimentary environment of ferromanganese crusts from Magellan seamounts in the Western Pacific[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(4): 422–430.
- [56] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. *海洋与湖泊*, 1988, 32(4): 336–346.
- YANG Zuo-shen. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1988, 32(4): 336–346.
- [57] AOKI S, KOHYAMA N. Cenozoic sedimentation and clay mineralogy in the northern part of the Magellan Trough, Central Pacific Basin[J]. *Marine Geology*, 1998, 148(1): 21–37.
- [58] 胡 镨, 陈天宇, 凌洪飞. 晚新生代北太平洋西部深海洋流演化: 来自铁锰结壳 Nd 同位素的证据[J]. *科学通报*, 2012, 57(Z2): 2757–2766.
- HU Rong, CHEN Tian-yu, LING Hong-fei. Late Cenozoic history of deep water circulation in the western North Pacific: Evidence from Nd isotopes of ferromanganese crusts[J]. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(Z2): 2757–2766.
- [59] WINDOM H. Lithogenous material in marine sediments[J]. *Chemical Oceanography*, 1976, 5: 103–135.
- [60] 刘华华, 蒋富清, 周 烨, 等. 晚更新世以来奄美三角盆地黏土矿物的来源及其对古气候的指示[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(3): 286–297.
- LIU Hua-hua, JIANG Fu-qing, ZHOU Ye, et al. Provenance of clay minerals in the Amami Sankaku Basin and their paleoclimate implications since late Pleistocene[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2016, 31(3): 286–297.
- [61] 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 等. 我国不同气候带黄土中粘土矿物组合特征分析[J]. *沉积学报*, 2006, 23(4): 690–695.
- SHI Yu-xin, DAI Xue-rong, SONG Ghi-guang, et al. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese Loess in different climatic Zones[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 23(4): 690–695.
- [62] 吕华华. 赤道北太平洋粘土沉积物的标型特征及其应用研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
- LÜ Hua-hua. Study on the typical characteristics and application of clay sediments from the Northern Equatorial Pacific[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanology), 2005.
- [63] 杨士雄, 叶思源, 何 磊, 等. 渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 75–87.
- YANG Shi-xiong, YE Si-yuan, HE Lei, et al. Geochemical and clay mineral characteristics of the Holocene sediments on the west coast of Bohai Bay and their implications for

- environmental and climatic changes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 75–87.
- [64] JIANG Fu-qing, ZHU Xiao, LI Tie-gang, et al. Increased dust deposition in the Parece Vela Basin since the mid-Pleistocene inferred from radiogenic Sr and Nd isotopes[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 173: 83–95.
- [65] 谢一璇, 杨小强, 张伙带, 等. 西太平洋深海沉积物记录的~80 ka 以来风尘物质输入与东亚冬季风强度[J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 855–868.
- XIE Yi-xuan, YANG Xiao-qiang, ZHANG Huo-dai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from Western Pacific since ~80 ka[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(5): 855–868.
- [66] HOVAN S A, REA D K, PISIAS N G, et al. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the north Pacific[J]. *Nature*, 1989, 340: 296–298.

Assemblage of clay minerals at polymetallic nodules contract area in Northwest Pacific Ocean

WANG Yin¹, LÜ Shi-hui¹, SU Xin¹, LI Jia-ying², LI Huai-ming³, REN Xiang-wen⁴

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

4. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: In this paper, the surface sediments of 30 stations collected at the polymetallic nodules contract area in the Northwest Pacific (The abyssal seabed between Marcus-Wake and Magellan seamounts) during the COMAR 48th Cruise were studied, with a specific focus on the characteristics of composition, distribution and provenance of clay minerals. The results indicate that the illite is the most abundant mineral species, smectite is moderate, and kaolinite and chlorite are the lowest. Illite in study area is mainly derived from the input of Asian dust. Smectite may originate from continental weathering (Asian continent), seamount (weathering) autogenesis and smectite-rich currents (lower circumpolar deep water), the input of Asian dust may be one of the major sources of chlorite and kaolinite.

Key words: clay minerals; provenance; continental weathering; dust input; lower circumpolar deep water

Foundation item: Project(DY135-N2-1-01) supported by China Ocean Mineral Resources Research and Development Association

Received date: 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-09-22

Corresponding author: LÜ Shi-hui; Tel: +86-18810166295; E-mail: lvshihui@cugb.edu.cn

(编辑 李艳红)