



近2.1 Ma以来帕里西维拉海盆黏土矿物输入变化及其对中更新世气候转型的响应

颜 钰, 蒋富清, 曾志刚, 郑 昊

Variation of clay mineral input in the Parece Vela Basin since the last 2.1 Ma and the response to the mid-Pleistocene climate transition

YAN Yu, JIANG Fuqing, ZENG Zhigang, and ZHENG Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022071701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示](#)

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

[渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价](#)

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

[全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应](#)

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

[南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征](#)

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163

[南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化](#)

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

[北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示](#)

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

颜钰, 蒋富清, 曾志刚, 等. 近 2.1 Ma 以来帕里西维拉海盆黏土矿物输入变化及其对中更新世气候转型的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 150-161.

YAN Yu, JIANG Fuqing, ZENG Zhigang, et al. Variation of clay mineral input in the Parece Vela Basin since the last 2.1 Ma and the response to the mid-Pleistocene climate transition[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 150-161.

近 2.1 Ma 以来帕里西维拉海盆黏土矿物输入变化及其对中更新世气候转型的响应

颜钰^{1,2,3}, 蒋富清^{1,2,3,4}, 曾志刚^{1,2,3,4}, 郑昊^{1,2,3}

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237

摘要: 对帕里西维拉海盆 PV090102 孔 2.1 Ma 以来沉积物中黏土矿物的含量、特征参数和形貌特征进行了分析, 结果表明, 黏土矿物以伊利石 (48%) 和蒙皂石 (34%) 为主, 绿泥石 (13%) 和高岭石 (6%) 含量较低。伊利石结晶度平均为 $0.29^{\circ}\Delta 2\theta$, 表明其形成于气候寒冷且水解作用弱的陆地源区; 伊利石化学指数平均为 0.32, 表明该孔伊利石为富 Fe-Mg 伊利石, 且经历了较强的物理风化。黏土矿物的组合特征和形貌特征表明, 蒙皂石主要来源于周围火山岛弧, 伊利石、绿泥石和高岭石主要来源于亚洲大陆风尘。在中更新世气候转型期, 伊利石通量、绿泥石通量和高岭石通量均呈增加趋势, 这与该孔总的风尘通量和风尘石英通量的变化趋势一致, 且与亚洲大陆干旱化一致, 表明其响应了中更新世气候转型期亚洲内陆的干旱变化, 因而可以作为亚洲内陆干湿变化的示踪指标。此外, 第四纪以来 PV090102 孔蒙皂石通量的变化与该孔火山物质通量的变化趋势具有很好的一致性, 因而可以作为火山物质输入西菲律宾海的替代指标。

关键词: 黏土矿物; 源区; 中更新世; 帕里西维拉海盆

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022071701

Variation of clay mineral input in the Parece Vela Basin since the last 2.1 Ma and the response to the mid-Pleistocene climate transition

YAN Yu^{1,2,3}, JIANG Fuqing^{1,2,3,4}, ZENG Zhigang^{1,2,3,4}, ZHENG Hao^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

Abstract: The composition and morphology of clay minerals collected from Core PV090102 in the Parece Vela Basin over the last 2.1 Ma were analyzed. Results show that the clays are mainly composed of illite (48% on average) and smectite (34%), and chlorite (13%) and kaolinite (6%). The illite crystallinity ($0.29^{\circ}\Delta 2\theta$) indicates that illite is mainly derived from cold and dry terrestrial regions; and the illite chemical index (0.32) implies that illite is rich in Fe-Mg and has experienced strong physical weathering. The clay mineral assemblage and morphological characteristics reflect that smectite is mainly derived from surrounding volcanic islands, while illite, chlorite, and kaolinite from Asian dust. The mass accumulation rates (MARs) of illite, chlorite, and kaolinite in Core PV090102 increased during mid-Pleistocene, which is consistent with

资助项目: 国家自然科学基金“西太平洋暖池 8.5 Ma 以来风尘输入变化及其古气候效应”(42076049), “第四纪以来亚洲风尘和火山物质输入西北太平洋的制约机制”(41776065), “西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约”(91958213); 中国科学院战略性先导科技专项“印太交汇区海洋物质能量中心形成演化过程与机制”(XDB42000000), “热液/冷泉区岩浆物质贡献与流体化学过程”(XDB42020402); 中科院海洋地质与环境重点实验室开放基金“晚中新世以来西太平洋暖池碎屑沉积物的来源”(MGE2020KG15); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”(2013CB429700); 泰山学者工程专项(ts201511061)

作者简介: 颜钰(1996—), 女, 博士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: yanyu@qdio.ac.cn

通讯作者: 蒋富清(1972—), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: fqjiang@qdio.ac.cn

曾志刚(1968—), 男, 研究员, 主要从事海底热液活动研究, E-mail: zgzeng@qdio.ac.cn

收稿日期: 2022-07-15; 改回日期: 2022-09-15. 文凤英编辑

the increase of MARs of eolian dust quartz in the Parece Vela Basin and Asia continent, suggesting that the MARs of illite, chlorite, and kaolinite in the Parece Vela Basin responded to the aridification in Asia during the mid-Pleistocene. Therefore, the MARs of illite, chlorite, and kaolinite in the Parece Vela Basin can be used to trace the paleoclimate change of Asian continent. In addition, variation of smectite MARs in Core PV090102 since the Quaternary is very consistent with the trend of volcanic material MARs in this core, and thus the variation can be used as a proxy of volcanic material input into the West Philippine Sea.

Key words: clay minerals; provenance; mid-Pleistocene; Parece Vela Basin

帕里西维拉海盆是西北太平洋的一个深水盆地, 西邻九州-帕劳海脊, 北接四国海盆, 东邻西马里亚纳海槽, 南部是复杂的岛弧、海沟和断裂带系统, 海盆底部西高东低, 中部相对较平坦(图 1)。帕里西维拉海盆最主要的表层流为北赤道流, 最主要的底层流是南极底层水(图 1)。由于远离大陆, 缺少河流来源物质的输入^[1], 该海盆沉积的碎屑沉积物主要由亚洲风尘和火山碎屑物质组成^[2]。近 2 Ma 以来, 风尘沉积明显地响应了亚洲内陆的古气候变化以及中更新世气候转型^[2], 因而帕里西维拉海盆碎屑沉积物是古气候的重要载体, 是重建亚洲内陆古气候以及气候驱动机制研究的重要区域。

由于黏土矿物对气候和环境的变化十分敏感, 不同的气候和环境形成的黏土矿物组成、特征参数和含量等具有不同的特征, 因而黏土矿物不仅可以记录源区信息, 而且可用于源区的古气候重建^[3-5]。黏土矿物是帕里西维拉海盆沉积物的主要矿物组成, 在碎屑组分中的含量可达 58.7%~63.5%^[6]。因

此, 研究帕里西维拉海盆的黏土矿物可以提供源区古气候演化的重要信息。

在帕里西维拉海盆附近的几个深水盆地和海脊区域, 如北部的奄美三角盆地、伊豆-小笠原海脊, 西部的西菲律宾海盆, 针对黏土矿物的源区识别已经开展了系统的研究^[3-5, 7-12]。在西菲律宾海盆, 石学法等^[7]通过对 WP1、WP2 以及 WP40 三个站的黏土矿物的研究, 认为西菲律宾海盆伊利石、绿泥石和高岭石来源于陆地, 蒙脱石来源于海底风化的火山岩。Wan 等^[3]和 Yu 等^[5]对 2.36 Ma 以来菲律宾海本哈姆隆起上 MD06-3050 孔黏土矿物的来源进行了研究, 认为伊利石、绿泥石和高岭石主要来源于亚洲大陆, 蒙皂石为吕宋岛火山物质风化形成。刘华华等^[8]和杨佳毅等^[9]分别通过对晚更新世以来奄美三角盆地 U1438A 孔和上新世以来伊豆-小笠原海脊 ODP 782A 孔的黏土矿物的研究, 认为伊利石、绿泥石和高岭石主要来源于亚洲大陆风尘, 蒙皂石主要来源于研究区周围火山岛弧物质。

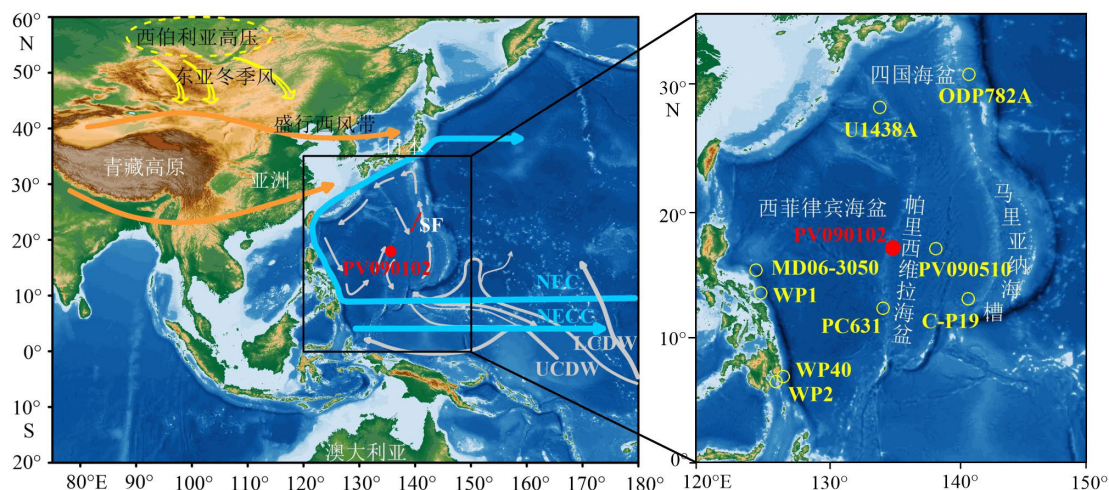


图 1 研究区地形、洋流和岩心站位

红色实心圆: PV090102 孔; 黄色空心圆: 本文提及的其他站位 (MD06-3050^[3,5], PC-631^[11], C-P19^[12], PV090510^[4], WP1、WP2 和 WP40^[7], U1438A^[8], ODP 782A^[9]); 黄色箭头: 东亚冬季风; 橙色箭头: 盛行西风带; 浅蓝色箭头: 表层流流向; 浅灰色箭头: 底层水流向^[13-14]; 红色虚线: 索夫干断裂; SF: 索夫干断裂; NEC: 北赤道流; NECC: 北赤道逆流; UCDW: 上层绕极深层水; LCDW: 下层绕极深层水。

Fig.1 The topography and ocean currents in the study area, and the core locality

Red dot: Core PV090102; Yellow circle: other stations mentioned in this article (MD06-3050^[3,5], PC-631^[11], C-P19^[12], PV090510^[4], WP1, WP2, and WP40^[7], U1438A^[8], and ODP 782A^[9]). Yellow arrows: the East Asian winter monsoon; orange arrows: prevailing westerly trajectories; light blue arrows: shallow currents; light gray arrows^[13-14]: deep water currents. Red dotted line: the Suofgan fault. SF: Suofgan Fault; NEC: North Equatorial Current; NECC: North Equatorial Counter Current; UCDW: Upper Circumpolar Deep Water; LCDW: Lower Circumpolar Deep Water.

然而目前对于帕里西维拉海盆黏土矿物的来源还存在模糊的认识。靳宁等^[10]通过对帕里西维拉海盆西北部表层沉积物中黏土矿物进行研究,认为该区伊利石主要来源于研究区以西陆地及周边岛屿,可能与中国内陆黄土有关;高岭石和绿泥石以陆源为主;蒙皂石则为基性火山物质蚀变形成。而 Seo 等^[11]对 600 ka 以来的帕里西维拉海盆九州-帕劳海脊上的 PC-631 孔黏土矿物来源分析,认为其主要来源于亚洲中西部沙漠与火山岛弧,但是对于 4 种主要黏土矿物的具体来源缺乏明确的认识。Ming 等^[4]通过对 1.95 Ma 以来的帕里西维拉海盆东部 PV090510 孔黏土矿物的研究认为,伊利石、绿泥石以及高岭石来源于中亚大陆,蒙皂石来源于马里亚纳岛弧火山物质。

西北太平洋沉积的黏土矿物通常被用作古气候变化的示踪指标。在菲律宾海北部,ODP 782A 孔(伊利石+绿泥石)/蒙皂石比值记录了上新世以来北半球冰盖进一步扩张和亚洲内陆的干旱,而(伊利石+绿泥石)/高岭石可以作为亚洲大陆干湿变化的示踪指标^[9]。西菲律宾海本哈姆隆起上的 MD06-3050 孔伊利石/蒙皂石比值被用作东亚冬季风的替代指标^[3],而蒙皂石/(伊利石+绿泥石)比值被用作东亚夏季风的替代指标^[5]。在帕里西维拉海盆中南部的 PV090510 孔和 C-P19 孔沉积物中,(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石比值可以作为东亚季风和中亚干旱强度的替代指标^[4,12],然而该比值重建的古气候变化与帕里西维拉海盆的风尘通量记录变化并不相同^[2],而且与中更新世气候特征并不一致,表明在帕里西维拉海盆,通过黏土矿物比值进行古气候重建还存在问题。

为此,本文以菲律宾海帕里西维拉海盆西部 PV090102 孔沉积物为研究对象,对其中黏土矿物的含量、特征参数和形貌特征指标进行了系统分析,在此基础上探讨了近 2.1 Ma 以来帕里西维拉海盆黏土矿物的来源,并进一步研究了不同黏土矿物组合及通量变化特征,及其对中更新世气候转型的响应,为第四纪以来亚洲大陆古气候演化及火山岛弧气候变化的重建提供更多依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

本文的研究样品 PV090102 孔取自西北太平洋帕里西维拉海盆西部(17.921°N、135.878°E)(图 1),

由中国科学院海洋研究所于 2004 年在“科学一号”科考船上用重力取样器采集,取样水深 4350 m。沉积物主要由黄褐色黏土组成,并含有红褐色黏土夹层。岩心的年代框架已通过古地磁对比建立^[15],378 cm 长的岩心沉积物记录了约 2.1 Ma 的沉积历史。每隔 4 cm 取样,共计取样 95 个用于黏土矿物的分离提取及分析。

1.2 黏土矿物的分离和识别

首先取沉积物原样 1~2 cm³,加入 10% 的 H₂O₂ 去除有机质,然后经蒸馏水清洗至产生抗絮凝作用,采用沉降法分离出 <2 μm 黏土组分。在黏土样品中加入适量超纯水充分混合后,用涂片法制成定向薄片,自然风干后获得自然片(N片)。对自然片进行乙二醇蒸汽饱和处理(60℃,12 h),制成乙二醇饱和片(EG片)。挑选部分有代表性的样品加热(550℃,2 h),制成加热片(T片)。用 X-射线衍射仪对自然片、乙二醇饱和片和加热片分别进行测试,依据主要黏土矿物特征衍射峰在自然片、乙二醇饱和片和加热片的变化,识别不同的黏土矿物。上述分析测试在中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成,X-射线衍射仪为德国布鲁克(Bruker)D8 Advance,扫描角度(2θ)为 3°~30°,步长 0.02°,步频 0.5 s/步,管流 40 mA,管压 40 kV。

1.3 黏土矿物的含量、通量和特征参数

黏土矿物相对含量的计算是使用 Topas 2P 软件和 Biscaye 方法,将主要黏土矿物的特征衍射峰面积乘以强度因子得到的,各黏土矿物的强度因子为蒙皂石:伊利石:(高岭石+绿泥石)=1:4:2,绿泥石和高岭石的含量依据绿泥石(3.54 Å)和高岭石(3.58 Å)的衍射峰面积比值进行计算,4种黏土矿物加权后含量总和为 100%^[16]。

黏土矿物通量的计算公式如下,以伊利石为例:

伊利石通量(mg·cm⁻²·ka⁻¹)=线性沉积速率(cm⁻²·ka⁻¹)×干容重(g·cm⁻³)×伊利石在全样中的含量(%)

其中,伊利石在全样中的含量(%)=碎屑含量×小于 2 μm 组分在碎屑中的含量×伊利石的相对含量×100%

伊利石的化学指数是乙二醇饱和曲线上 5 Å 与 10 Å 衍射峰的面积比,若比值大于 0.4,为富 Al 伊利石,表明该伊利石经历了较强的水解作用;若比值小于 0.4,为富 Fe-Mg 伊利石,说明该伊利石经历了较强的物理风化^[17]。伊利石的结晶度是乙二醇饱

和曲线上 10 Å 衍射峰的半峰宽, 该指数越低, 表明伊利石的结晶度越好, 反之则相反^[18]。蒙皂石的结晶度是乙二醇饱和曲线上 17 Å 衍射峰的半峰宽, 该指数小于 1.5, 表明蒙皂石结晶程度好, 1.5~2.0 说明结晶程度中等, 大于 2.0 说明结晶程度差^[17]。

1.4 黏土矿物的形貌特征

在黏土样品中加入 0.2 mL 超纯水充分混合后, 取 2~3 滴样品加入 0.2 mL 无水乙醇, 用涡旋混匀器将黏土矿物颗粒充分分散, 然后取少量分散溶液涂于干净的盖玻片上自然风干。将待测样品镀碳后, 在扫描电镜下进行形貌特征的观察, 同时辅以能谱分析以确认黏土矿物的种类。样品在南京宏创地质勘查技术服务有限公司用捷克共和国电子公司生产的 MIRA3 扫描电子显微镜分析, 该电镜

为高分辨率的热场发射扫描电镜, 最高分辨率为 1.0 nm, 附带 AMETEK EDAX element30 电子能谱。拍摄照片时使用电压为 15 kv, 放大倍数根据样品做调整, 工作距离 15 mm, 束斑大小为 5 nm, 图片获取模式为高精度模式。

2 结果

2.1 黏土矿物的组成

在黏土矿物的自然定向片 X 射线衍射图谱 (图 2) 上 15 Å 附近的反射峰识别出蒙皂石和绿泥石的混合叠加峰; 在经乙二醇饱和处理后, 此特征峰分异为 17 Å 和 14 Å 衍射峰, 分别为蒙皂石和绿泥石的特征衍射峰, 说明存在这两种黏土矿物。在黏土

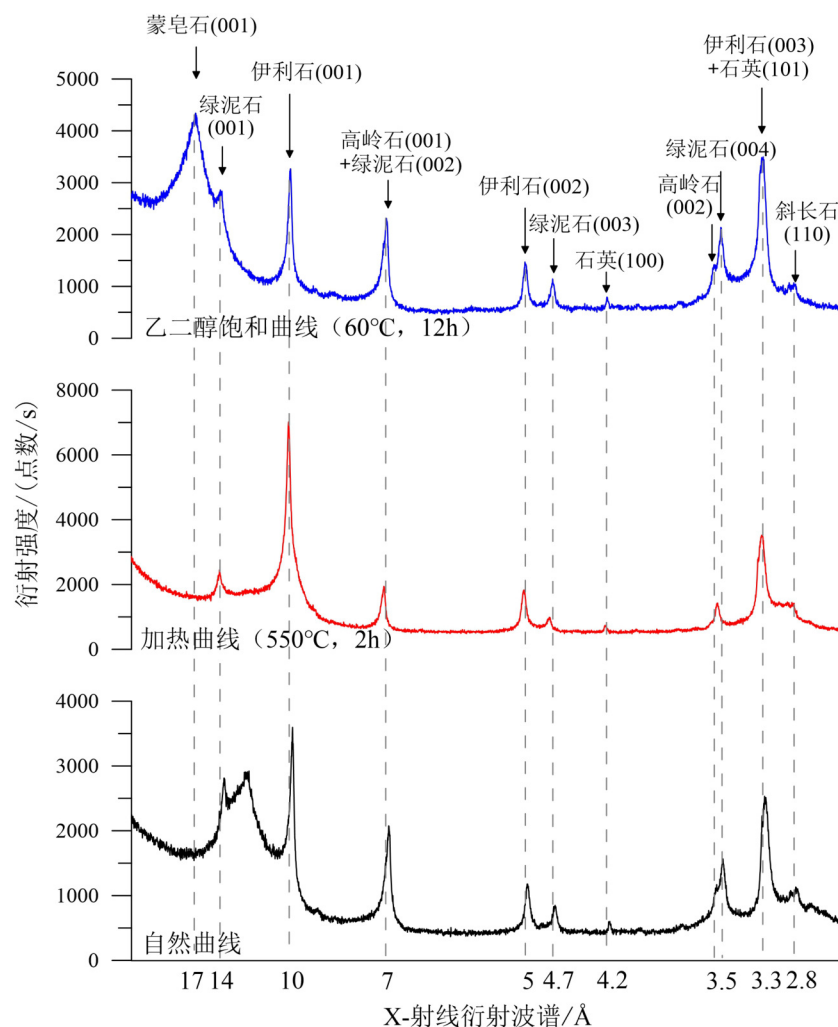


图 2 PV090102 孔黏土矿物典型 X-射线衍射图谱
深度为 116~118 cm 的样品。

Fig.2 Typical X-Ray diffraction spectra of clay minerals in Core PV090102 sediment
Sample from 116~118 cm.

矿物的自然定向片X射线衍射图谱(图2)上12 Å附近的反射峰识别出伊利石-蒙皂石混层矿物,为了便于讨论,下文中提到的蒙皂石包含了此处的伊利石-蒙皂石混层矿物。自然片中,伊利石10 Å和5 Å反射峰清晰明显,经乙二醇饱和和处理后,特征峰的位置和强度没有发生明显变化,当加热至550°C后,由于蒙皂石转变为伊利石,衍射峰强度有所增强,因此我们认为样品中存在伊利石。高岭石和绿泥石矿物在自然定向片图谱上都出现了7 Å和3.5 Å两个特征峰,3.5 Å特征峰出现了双峰现象,说明两种矿物同时存在。经加热处理后,高岭石变为非晶物质而消失。绿泥石的第一级和第三级基面反射较弱,而第二级和第四级基面反射较强,说明绿泥石具有富铁的特征^[9]。

2.2 黏土矿物的含量和通量

PV090102孔中4种主要黏土矿物在全样中的含量和通量变化如图3所示。蒙皂石含量变化范围为4%~13%,平均为8%。2.1~1.2 Ma,蒙皂石含量呈降低趋势;1.2~0.5 Ma,蒙皂石含量上升;0.5 Ma以来,蒙皂石含量迅速降低(图3)。蒙皂石通量平均为7.6 mg·cm⁻²·ka⁻¹,变化范围为1.9~13.7 mg·cm⁻²·ka⁻¹。2.1 Ma以来,其变化趋势与蒙皂石含量相似,2.1~1.2 Ma,蒙皂石通量整体较低,平均为5.4 mg·cm⁻²·ka⁻¹;1.2~0.5 Ma,蒙皂石通量从4.8 mg·cm⁻²·ka⁻¹迅速增加至13.6 mg·cm⁻²·ka⁻¹;0.5 Ma以来,蒙皂石通量呈现降低的趋势,由13.6 mg·cm⁻²·ka⁻¹降低至5.9 mg·cm⁻²·ka⁻¹(图3)。伊利石含量平均含量为11%,变化范围为7%~14%。2.1~1.2 Ma,伊

利石含量呈明显的增加趋势;1.2 Ma以来,伊利石含量呈略微增加的趋势(图3)。伊利石的通量平均为10.8 mg·cm⁻²·ka⁻¹,变化范围为2.7~16.8 mg·cm⁻²·ka⁻¹。在2.1~1.2 Ma期间,伊利石通量较小,变化范围为2.7~10.0 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势;1.2~0.7 Ma,伊利石通量由6.8 mg·cm⁻²·ka⁻¹增加至12.2 mg·cm⁻²·ka⁻¹;0.7 Ma至今,伊利石通量较高,变化范围为8.3~16.8 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势(图3)。绿泥石的含量变化范围为1%~5%,平均为3%,2.1 Ma以来没有明显的变化趋势(图3)。绿泥石通量平均为2.9 mg·cm⁻²·ka⁻¹,变化范围为0.7~5.4 mg·cm⁻²·ka⁻¹。在2.1~1.2 Ma期间,绿泥石通量较小,为0.7~2.7 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势;1.2~0.7 Ma,绿泥石通量由1.5 mg·cm⁻²·ka⁻¹增加至4.4 mg·cm⁻²·ka⁻¹;0.7 Ma至今,绿泥石通量较高,为2.3~4.4 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势(图3)。高岭石含量在0.3%~3%变化,平均为1%,2.1 Ma以来没有明显的变化趋势(图3)。高岭石通量平均为1.3 mg·cm⁻²·ka⁻¹,变化范围为0.3~3.7 mg·cm⁻²·ka⁻¹。在2.1~1.2 Ma期间,高岭石通量较小,变化范围为0.3~1.5 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势;1.2~0.7 Ma,高岭石通量由1.0 mg·cm⁻²·ka⁻¹增加至1.4 mg·cm⁻²·ka⁻¹;0.7 Ma至今,高岭石通量较高,变化范围为0.4~3.7 mg·cm⁻²·ka⁻¹,没有明显的变化趋势(图3)。

2.3 黏土矿物的特征参数

PV090102孔中蒙皂石结晶度变化范围为1.03~2.28°Δ2θ,平均为1.48°Δ2θ,小于1.5°Δ2θ,

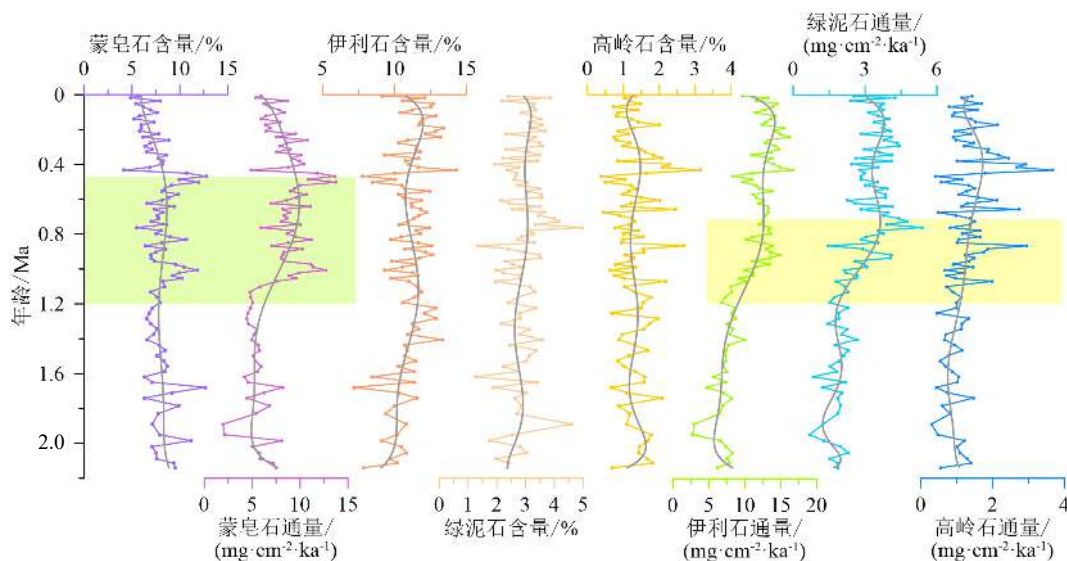


图3 PV090102孔沉积物中主要黏土矿物的含量和通量变化

Fig.3 Variation of contents and mass accumulation rates (MARs) of the major clay minerals in Core PV090102 sediment

显示其结晶程度好。2.1 Ma 以来, 蒙皂石结晶度没有明显的变化趋势; 2.1~1.2 Ma 期间, 变化范围为 $1.17^{\circ}\Delta 20$ ~ $2.13^{\circ}\Delta 20$; 1.2~0.5 Ma, 蒙皂石结晶度从 $1.69^{\circ}\Delta 20$ 降低至 $1.54^{\circ}\Delta 20$; 0.5 Ma 至今, 蒙皂石结晶度从 $1.54^{\circ}\Delta 20$ 降低至 $1.31^{\circ}\Delta 20$ (图 4)。

伊利石结晶度变化范围为 $0.23^{\circ}\Delta 20$ ~ $0.51^{\circ}\Delta 20$, 平均为 $0.29^{\circ}\Delta 20$, 代表结晶度较高, 指示其形成于气候寒冷且水解作用弱的陆地源区; 伊利石化学指数变化范围为 0.18~0.5, 平均为 0.32, 小于 0.4, 表明该孔中的伊利石为富 Fe-Mg 伊利石, 且经历了较强的物理风化。2.1 Ma 以来, 伊利石化学指数整体呈现降低的趋势, 在 2.1~1.2 Ma 期间, 伊利石化学指数从 0.36 降低至 0.22; 1.2~0.5 Ma, 伊利石化学指数没有明显的变化趋势, 变化范围为 0.18~0.48; 0.5 Ma 至今, 伊利石化学指数变化很小, 变化范围为 0.20~0.40(图 4)。在 2.1~1.2 Ma 期间, 伊利石结晶度从 $0.33^{\circ}\Delta 20$ 增加至 $0.40^{\circ}\Delta 20$; 1.2~0.5 Ma, 伊利石结晶度从 $0.40^{\circ}\Delta 20$ 降低至 $0.23^{\circ}\Delta 20$; 0.5 Ma 至今, 伊利石结晶度先从 $0.23^{\circ}\Delta 20$ 增加至 $0.44^{\circ}\Delta 20$, 然后降低至 $0.24^{\circ}\Delta 20$ (图 4)。

2.4 黏土矿物的形貌特征

扫描电镜结合能谱分析表明, PV090102 孔中蒙皂石形状不规则, 多为花朵状和蜂窝状, 边缘较模糊(图 5A、B); 伊利石为板片状, 边缘清晰, 部分伊利石颗粒边缘棱角受到磨蚀, 呈现钝圆状(图 5C); 绿泥石呈不规则薄片状(图 5D)。

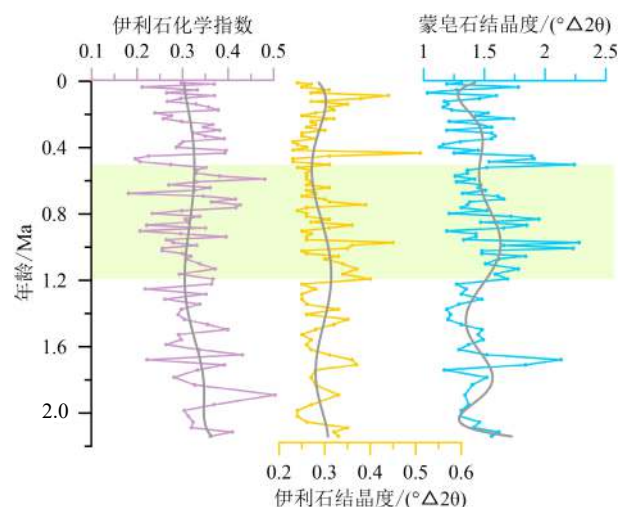


图 4 PV090102 孔沉积物中伊利石化学指数、伊利石和蒙皂石结晶度变化

Fig.4 Variations in chemistry index of illite, the crystallinity of illite and smectite in Core PV090102 sediment

3 讨论

3.1 黏土矿物的来源

PV090102 孔黏土矿物的来源是通过与潜在源区黏土矿物组成和特征参数进行对比, 并结合黏土矿物的形貌特征、化学特征和区域地质背景的分析进行识别。根据帕里西维拉海盆的地理位置、地质环境以及黏土矿物的组成特征(图 6), 我们认为 PV090102 孔黏土矿物的可能源区包括亚洲大陆^[20-23]、台湾岛^[23-27]、四国海盆^[28]、九州-帕劳海脊^[11]、南海海槽^[29]、日本^[30]、马里亚纳海槽^[31] 和吕宋岛^[32] 等(图 6)。依据主要黏土矿物组成, PV090102 孔黏土矿物组成与菲律宾海其他海域相似, 总体上表现为亚洲大陆物质与火山岛弧物质混合的特征(图 6), 但是 4 种主要黏土矿物伊利石、蒙皂石、绿泥石和高岭石的具体来源需要进一步的分析。

3.1.1 伊利石

由于马里亚纳海槽^[31]、日本^[30] 和吕宋岛^[32] 的伊利石含量均低于 PV090102 孔伊利石含量(图 6), 因此上述火山岛弧区不是 PV090102 孔伊利石的主要源区。PV090102 孔伊利石多呈不规则片状(图 5C), 没有发现边缘有“细针状”的伊利石, 这表明伊利石不是自生成因的, 而是陆源伊利石^[33]。亚洲大陆(以黄土为例)^[20-23] 和台湾岛^[23-27] 的伊利石含量高于 PV090102 孔的伊利石含量, 是伊利石的两个潜在源区。虽然台湾岛河流沉积物中黏土矿物的伊利石含量可达 53%, 但是台湾岛伊利石的结晶度^[23-24] 明显低于 PV090102 孔伊利石的结晶度(图 7), 表明台湾岛不是 PV090102 孔伊利石的源区。PV090102 孔伊利石化学指数变化范围为 0.18~0.5, 平均为 0.32, 小于 0.4(图 4), 表明该孔伊利石为富 Fe-Mg 伊利石, 且经历了较强的物理风化。伊利石结晶度变化范围为 $0.23^{\circ}\Delta 20$ ~ $0.51^{\circ}\Delta 20$, 平均为 $0.29^{\circ}\Delta 20$ (图 4), 代表结晶度较高, 指示形成于气候寒冷且水解作用弱的陆地源区。同时, 这也与中国黄土($0.22^{\circ}\Delta 20$ ~ $0.33^{\circ}\Delta 20$) 及古土壤($0.22^{\circ}\Delta 20$ ~ $0.42^{\circ}\Delta 20$) 的伊利石结晶度变化范围相似^[34](图 7), 表明 PV090102 孔中的伊利石主要来源于亚洲大陆。另外, 从亚洲大陆向帕里西维拉海盆和马里亚纳海槽方向, 随着与亚洲大陆距离的逐渐增加, 伊利石的含量逐渐降低^[10], 伊利石区域分布特征从另一侧面证实了 PV090102 孔中的伊利石来源于亚洲大陆。

3.1.2 蒙皂石

蒙皂石广泛分布于大洋沉积物中, 有两种主要

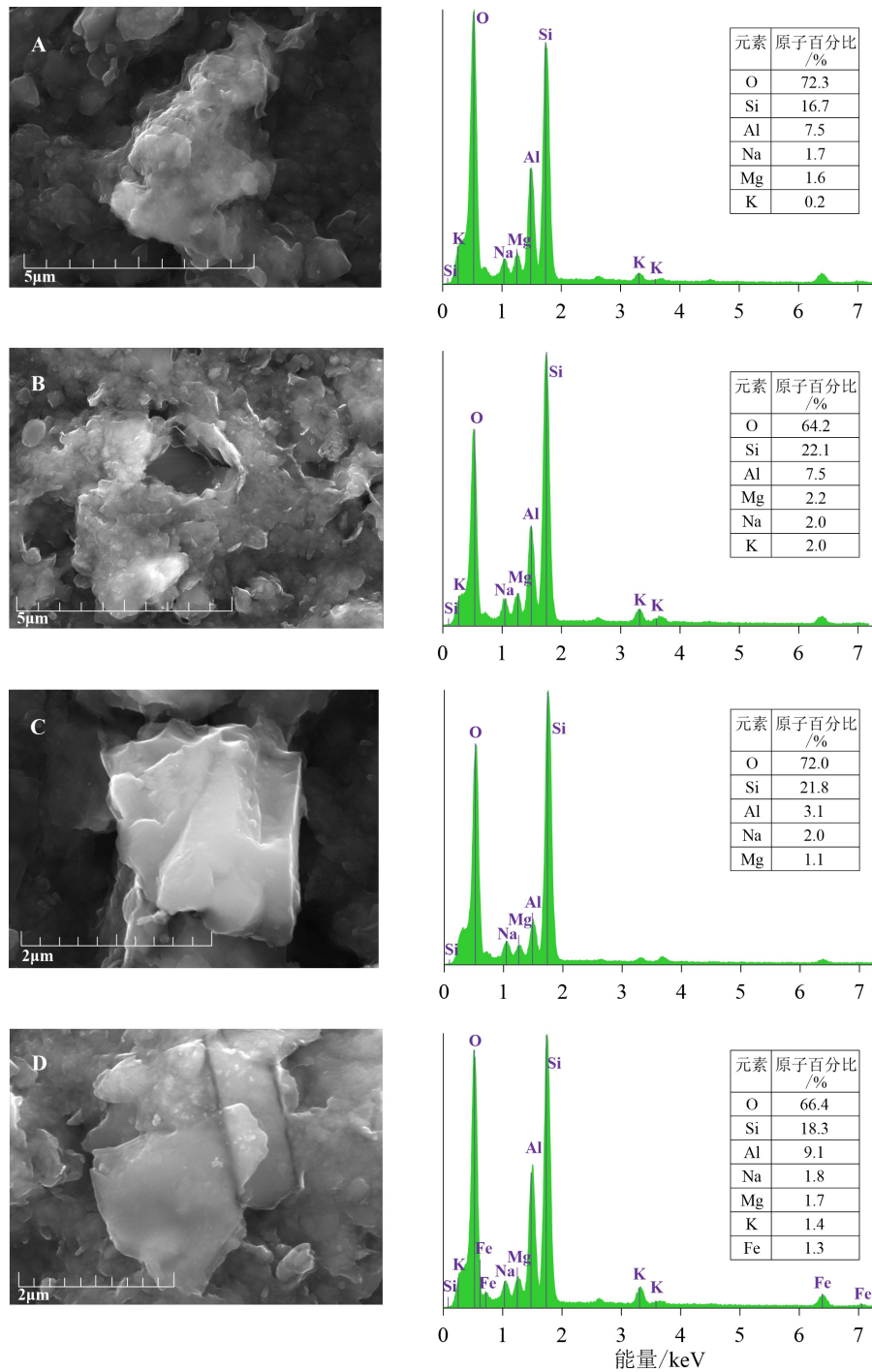


图 5 PV090102 孔黏土矿物的扫描电镜照片和对应的能谱图

A. 花朵状蒙皂石, B. 蜂窝状蒙皂石, C. 伊利石, D. 绿泥石。

Fig.5 The scanning electron microscope photographs and corresponding energy dispersive spectra of clay minerals in Core PV090102

A. Flower-like smectite, B. honeycomb-like smectite, C. illite, D. chlorite.

成因,一是陆源碎屑成因,是温暖至半干旱气候条件下大陆母岩水解作用的产物^[18];另一种为火山岛弧成因,是海底基性火山物质经长时间海解作用蚀变形成^[18]。PV090102 孔蒙皂石含量平均为 34%,明显高于亚洲大陆^[20-23]和台湾岛^[23-27]的蒙皂石含量(图 6),因此亚洲大陆和台湾岛不是该孔蒙皂石的

主要源区。马里亚纳海槽、吕宋岛和日本列岛的蒙皂石含量分别为 79%、87% 和 70%^[30-32],高于 PV090102 孔的蒙皂石含量(图 6),可能是 PV090102 孔蒙皂石的源区。PV090102 孔蒙皂石结晶度变化范围为 1.03~2.28° $\Delta 2\theta$,平均为 1.48° $\Delta 2\theta$,低于吕宋岛河流沉积物中蒙皂石的结晶度(平均为 1.66° $\Delta 2\theta$)^[32],而

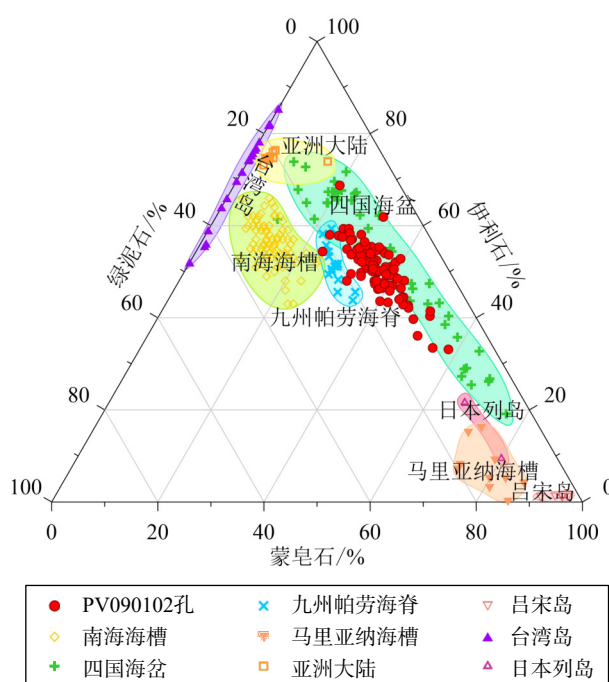


图 6 PV090102 孔与可能源区的黏土矿物特征三角图
可能源区包括九州-帕劳海脊^[11]、亚洲大陆(黄土)^[20-23]、台湾岛^[23-27]、
四国海盆^[28]、南海海槽^[29]、日本列岛^[30]、马里亚纳海槽^[31]和
吕宋岛^[32]。

Fig.6 Ternary diagram showing variation in clay mineral composition of sediments from Core PV090102 (this study) and the potential source areas

The potential source areas include Kyushu-Palau Ridge^[11], Asian continent (loess)^[20-23], Taiwan Island^[23-27], Shikoku Basin^[28], Nankai Trough^[29], Japanese archipelago^[30], Mariana Trough^[31], and Luzon Island^[32].

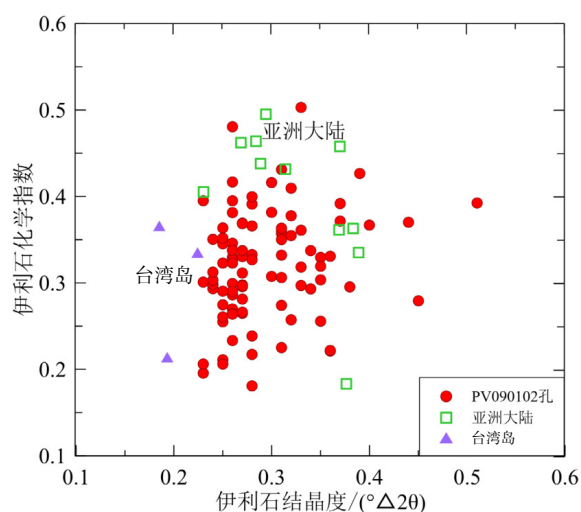


图 7 PV090102 孔、亚洲大陆(黄土)^[3]和台湾岛^[23-24]沉积物中伊利石结晶度和化学指数散点图

Fig.7 Scatter diagram of chemistry index and crystallinity of illite in sediments from Core PV090102 (this study), Asian continent (loess)^[3] and Taiwan Island^[23-24].

且由于自东向西流动的北赤道流的阻挡作用, 吕宋岛的物质很难到达 PV090102 孔, 因此吕宋岛不是 PV090102 孔中蒙皂石的源区。尽管日本列岛黏土矿物中蒙皂石含量高达 51%^[30], 但是由于由西南向东北流动的对马暖流以及索夫干断裂的阻挡作用, 日本列岛很难向 PV090102 孔输送大量的蒙皂石。PV090102 孔蒙皂石 Fe_2O_3 含量平均为 5.9%, MgO 含量平均为 5.3%, 符合海洋沉积物自生蒙皂石富含铁及少量镁的特征^[35-37], 并且该孔蒙皂石多呈花朵状和蜂窝状(图 5A、B), 具有典型的火山成因蒙皂石特征^[10], 因此我们认为 PV090102 孔蒙皂石为来源于火山岛弧蚀变的自生蒙皂石。

3.1.3 绿泥石

绿泥石多形成于干冷的条件下, 且深海沉积物中的绿泥石大部分是陆源碎屑成因的, 也有少部分是由火山物质蚀变形成的^[38]。PV090102 孔绿泥石含量与该孔伊利石含量呈正相关关系(图 3), 与蒙皂石含量呈负相关关系(图 3), 因此我们认为 PV090102 孔中绿泥石可能与伊利石有相同的源区。Kolla 等^[39]通过对菲律宾海黏土矿物的研究发现, 研究区绿泥石的区域分布特征与伊利石相似, 这进一步说明 PV090102 孔中的绿泥石与该孔的伊利石有相同的源区。由于 PV090102 孔中的伊利石来源于亚洲大陆, 因此该孔绿泥石也来源于亚洲大陆。另外, PV090102 孔中的绿泥石的 X-射线衍射图中绿泥石的第一级基面反射较弱, 而第二级和第四级基面反射较强, 表明该绿泥石为富铁绿泥石^[19], 这与亚洲大陆的绿泥石相似^[39]。上述证据均表明 PV090102 孔中的绿泥石为来源于亚洲大陆的风尘绿泥石。

3.1.4 高岭石

由于高岭石的形成需要酸性环境, 而海洋呈碱性或弱碱性环境, 因此大洋中的高岭石多来源于陆地^[38]。PV090102 孔中高岭石的平均含量为 6%, 明显低于台湾岛^[23-27]、南海海槽^[29]、日本列岛^[30]和马里亚纳海槽^[31]的高岭石含量, 因此日本列岛、台湾岛、马里亚纳海槽和南海海槽不是该孔高岭石的主要源区。虽然吕宋岛的高岭石平均含量为 8.6%^[32], 略高于 PV090102 孔中高岭石含量, 但是由于自东向西流动的北赤道流的阻挡作用, 吕宋岛的物质很难到达 PV090102 孔, 因此吕宋岛也不是 PV090102 孔中高岭石的源区。由于该孔黏土矿物主要来源于亚洲大陆和火山岛弧, 通过上述分析可以排除火山岛弧对 PV090102 孔高岭石的贡献, 因此该孔高岭石主要来源于亚洲大陆。另外, 该孔高岭石含量

明显低于亚洲大陆黄土的高岭石含量(6%~16%, 平均为9%)^[30]和亚洲沙漠高岭石含量(9%~18%, 平均为10%)^[21](图6), 并且该孔伊利石与高岭石的比值为8, 与黄土的8.9较为接近^[3], 因此, 我们认为亚洲大陆是PV090102孔高岭石的主要源区。

3.2 黏土矿物对中更新世气候转型的响应

PV090102孔中的伊利石、绿泥石和高岭石来源于亚洲大陆, 蒙皂石来源于周围火山岛弧, 因此可以用伊利石+绿泥石+高岭石代表亚洲大陆端元, 蒙皂石代表火山岛弧端元, 采用(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值代表PV090102孔中亚洲大陆风尘物质相对于火山岛弧物质的输入变化。2.1 Ma以来, PV090102孔(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值整体上变化不大(图8)。2.1~0.5 Ma, (伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值较低且较稳定; 0.5 Ma以来, (伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值呈增加趋势(图8), 这与邻近站位PV090510孔中(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值^[4]变化一致。Ming等^[4]认为PV090510孔中(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值可以作为东亚季风和中亚干旱的替代指标。然而, PV090510孔(伊利石+绿泥

石+高岭石)/蒙皂石比值的变化并没有响应中更新世气候转型期东亚季风增强以及亚洲大陆干旱增强的变化, 因此该比值作为东亚季风和干旱的替代指标存在很大的局限性。同时, PV090102孔中(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值与该孔总风尘通量^[2]以及风尘石英通量^[40]在中更新世明显增加不同(图8), 无法明确指示中更新世亚洲内陆干旱加剧和东亚季风的增强^[41-42]。因此, (伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石比值尽管可以部分消除黏土矿物之间稀释效应的影响, 但是作为东亚季风和干旱的替代指标显然存在问题。

中更新世气候转型期PV090102孔火山物质含量呈降低趋势^[2](图9), 但是沉积速率却明显增加, 表明中更新世气候转型期帕里西维拉海盆的陆源碎屑沉积物输入增加。中更新世以来, PV090102孔中伊利石、绿泥石和高岭石的沉积通量均明显增加(图9), 是早更新世的1.6倍以上, 这与该孔总的风尘通量^[2]、风尘石英通量^[40]以及沉积速率^[2]在中更新世明显增加一致(图9), 表明中更新世气候转型期亚洲大陆干旱化加剧, 风尘沉积物对研究区的贡献量增大, 进而使该孔黏土矿物、风尘石英以及总风尘通量明显增加。由于伊利石、绿泥石和高岭石

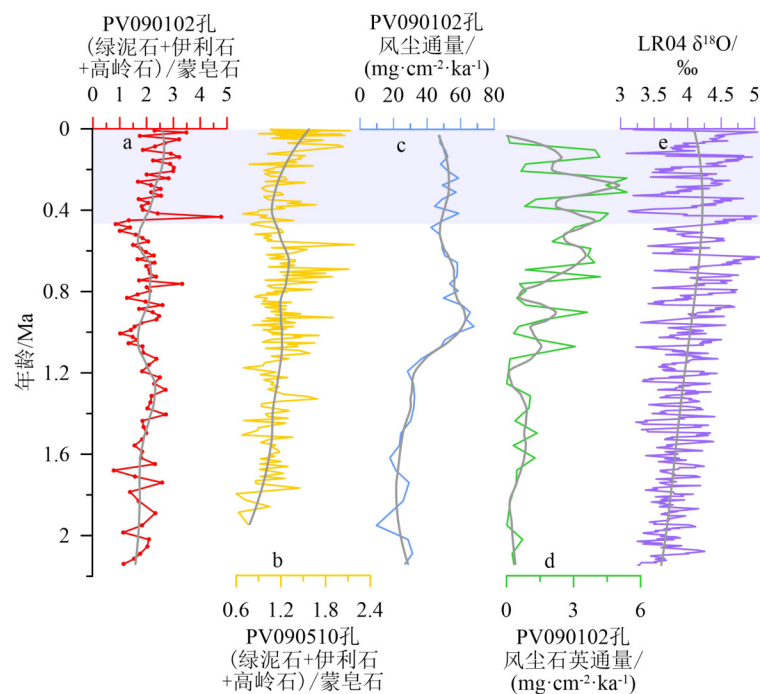


图8 PV090102孔(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石与其他陆地和海洋风尘记录对比

a. PV090102孔(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石, b. PV090510孔(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙皂石^[4], c. PV090102孔风尘通量^[2], d. PV090102孔风尘石英通量^[40], e. LR04的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[43]。

Fig.8 Comparison in the (illite+chlorite+kaolinite)/smectite in Core PV090102 and other terrestrial and oceanic dust records

a. (Illite+chlorite+kaolinite)/smectite in Core PV090102 (this study), b. (illite+chlorite+kaolinite)/smectite in core PV090510^[4], c: dust MARs in Core PV090102^[2], d. quartz MARs in Core PV090102^[40], e. the stacked benthic oxygen isotope record^[43].

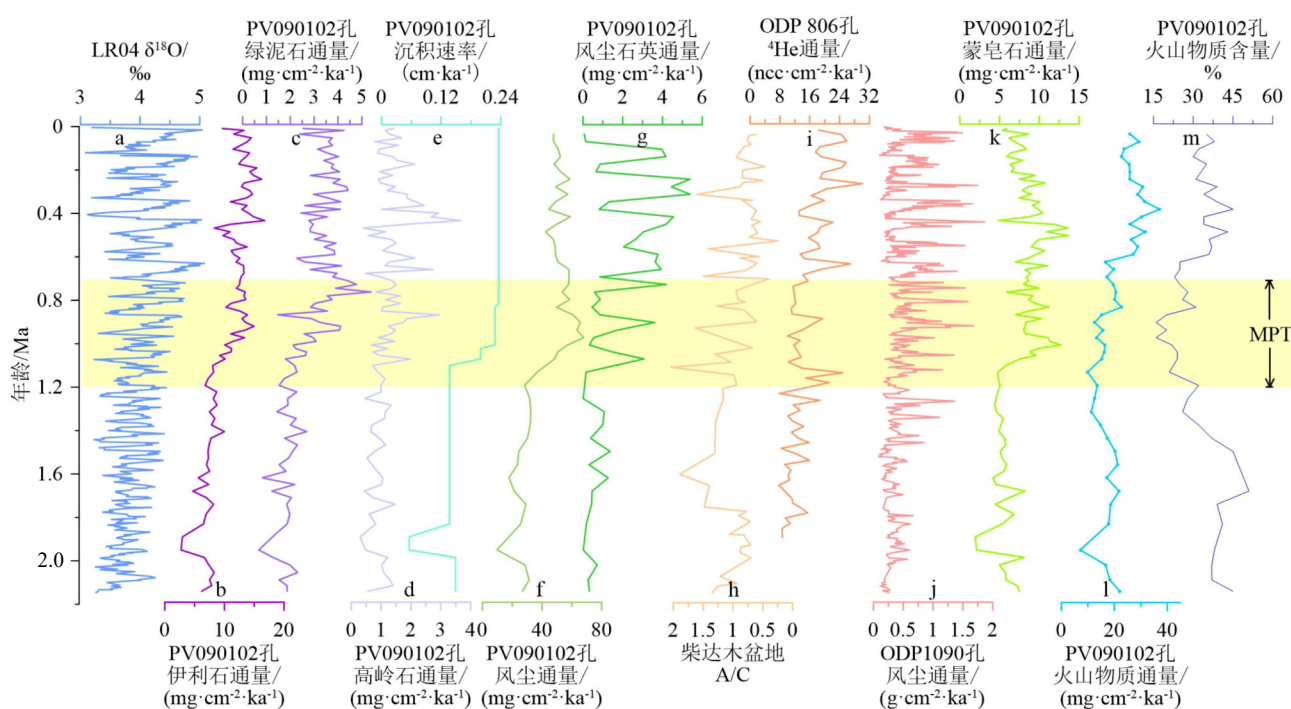


图 9 PV090102 孔主要黏土矿物沉积通量与其他陆地和海洋风尘记录对比

- a. LR04 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[43], b. PV090102 孔伊利石通量, c. PV090102 孔绿泥石通量, d. PV090102 孔高岭石通量, e. PV090102 孔沉积速率^[2], f. PV090102 孔风尘通量^[2], g. PV090102 孔风尘石英通量^[40], h. 柴达木盆地 A/C^[41], i. ODP 806 的 ^4He 通量^[44], j. ODP 1090 的风尘通量^[45], k. PV090102 孔蒙皂石通量, l. PV090102 孔火山物质通量^[2], m. PV090102 孔火山物质含量^[2].

Fig.9 Comparison of MARs of major clay minerals in Core PV090102 with other terrestrial and oceanic dust records

- a. the stacked benthic oxygen isotope record^[43], b. MARs of illite in core PV090102 (this study), c. MARs of chlorite in core PV090102 (this study), d. MARs of kaolinite in core PV090102 (this study), e. sedimentary rate of the core PV090102^[2], f. dust MARs in Core PV090102^[2], g. quartz MARs in Core PV090102^[40], h. the ratio of Artemisia/Chenopodiaceae in the Qaidam Basin^[41], i. average ^4He flux of ODP site 806 in the western equatorial Pacific^[44], j. the dust mass accumulation rates (MARs) of ODP site 1090 in the South Atlantic^[45], k. MARs of smectite in core PV090102 (this study), l. volcanic material MARs in Core PV090102^[2], m. volcanic material contents in core PV090102^[2].

来源于亚洲大陆, 因此伊利石通量、绿泥石通量和高岭石通量的增加代表了亚洲内陆风尘供应量的增加。这与柴达木盆地的蒿/藜(A/C)记录的亚洲内陆干旱化加剧^[41]的环境一致(图 9), 表明伊利石、绿泥石和高岭石通量的增加响应了中更新世以来的亚洲内陆的干旱加强。然而, 中更新世以来, 伊利石、绿泥石和高岭石通量变化并没有像风尘石英通量^[40]那样呈现出明显的高低变化(可能是冰期-间冰期旋回)(图 9), 其主要原因可能是黏土矿物对于气候变化不如石英敏感; 另外, 由于研究样品的年代框架是基于古地磁极性特征和线性内插得到的, 分辨率较低, 这在一定程度上影响了不同指标的对比研究。

中更新世以来, 帕里西维拉海盆伊利石、绿泥石和高岭石的沉积通量明显增加, 与南大西洋风尘通量^[45]、赤道太平洋风尘通量^[44]和氧同位素曲线记录的全球冰量^[43]的增加是一致的, 表明中更新世以来风尘通量的增加是一种全球性的现象, 指示了这

一时期全球干旱程度加强, 同时也表明中更新世气候转型这一全球性的变化在西太平洋深海沉积物中有明显的响应。

中更新世以来, 蒙皂石通量(平均 $8.5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$)明显增加, 是早更新世(平均 $5.4 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$)的 1.6 倍, 这与该孔火山通量在中更新世的明显增加是一致的^[2](图 9)。由于 PV090102 孔中蒙皂石来源于火山岛弧, 且蒙皂石的通量与该孔火山通量变化一致, 因此我们认为中更新世以来蒙皂石通量的增加可能响应了中更新世火山物质输入的增加。

4 结论

(1) 2.1 Ma 以来, 帕里西维拉海盆 PV090102 孔中黏土矿物以伊利石(48%)和蒙皂石(34%)为主, 绿泥石(13%)和高岭石(6%)含量相对较少。通过研究黏土矿物组合特征、含量、特征参数和形貌特征, 并与潜在源区进行对比分析, 我们认为蒙皂石

主要来源于帕里西维拉海盆周围的岛弧火山物质,伊利石、绿泥石和高岭石主要来源于亚洲大陆风尘。

(2) 亚洲大陆来源的黏土矿物(伊利石、绿泥石和高岭石)的沉积通量在中更新世明显增加,与柴达木盆地蒿/藜反映的亚洲大陆干旱的变化一致,表明中更新世气候转型期亚洲内陆干旱加剧,导致帕里西维拉海盆输入的伊利石、绿泥石和高岭石增加。因此,西北太平洋伊利石等黏土矿物的通量可以作为亚洲内陆气候变化的示踪指标,并可用于重建长时间尺度亚洲内陆古气候变化。

(3) 2.1 Ma 以来,帕里西维拉海盆 PV090102 孔中的蒙皂石通量先增加后降低的趋势与该孔火山通量的变化趋势具有很好的一致性,可以作为火山物质输入的替代指标,用于西北太平洋火山物质输入的相关研究。

致谢: 感谢“科学一号”考察船上所有科学家及船员做出的贡献。

参考文献 (References)

- [1] Scott R B, Kroenke L, Zakariadze G, et al. Evolution of the South Philippine Sea: deep sea drilling project leg 59 results [C]//Kroenke L, Scott R B, Balshaw K, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington: U. S. Government Printing Office, 1981: 803-815.
- [2] Jiang F Q, Zhu X, Li T G, 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*, 2019, 173: 83-95.
- [3] 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]. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [4] Ming J, Li A C, Huang J, et al. Assemblage characteristics of clay minerals and its implications to evolution of eolian dust input to the Parece Vela Basin since 1.95 Ma [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32 (1): 174-186.
- [5] Yu Z J, Wan S M, 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 and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 45-55.
- [6] 周宇. 近2Ma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)硕士学位论文, 2014: 30. [ZHOU Yu. Asian dust record in the Parece Vela Basin over the last 2 Ma[D]. Master Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014: 30.]
- [7] 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 minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15 (2): 61-72.]
- [8] 刘华华, 蒋富清, 周焯, 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 Huahua, JIANG Fuqing, ZHOU Ye, et al. Provenance of clay minerals in the Amami Sankaku Basin and their paleoclimate implications since Late Pleistocene [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (3): 286-297.]
- [9] 杨佳毅, 蒋富清, 颜钰, 等. 上新世以来伊豆-小笠原海脊黏土矿物的来源与古气候意义[J]. *地学前缘*, 2022, 29 (4): 73-83. [YANG Jiayi, JIANG Fuqing, YAN Yu, et al. Provenance and paleoclimatic significance of clay minerals from Izu-Ogasawara Ridge since Pliocene [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29 (4): 73-83.]
- [10] 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粘土矿物的分布特征及物源分析[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38 (6): 504-511. [JIN Ning, LI Anchun, LIU Haizhi, et al. Clay minerals in surface sediment of the northwest Parece Vela Basin: distribution and provenance [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38 (6): 504-511.]
- [11] 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.
- [12] 肖春晖, 王永红, 林间. 近1Ma以来帕里西维拉海盆沉积物物源和古气候: 粒度和黏土矿物特征的指示[J]. *沉积学报*, 2022, 40 (2): 508-524. [XIAO Chunhui, WANG Yonghong, LIN Jian. Provenance and paleoclimate of sediments in the Parece Vela Basin in past 1 Ma: inferences from grain-size and clay mineral distribution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40 (2): 508-524.]
- [13] Kawabe M, Fujio S, Yanagimoto D, et al. Water masses and currents of deep circulation southwest of the Shatsky Rise in the western North Pacific [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56 (10): 1675-1687.
- [14] Lee I, Ogawa Y. Bottom-current deposits in the Miocene-Pliocene Misaki Formation, Izu forearc area, Japan [J]. *Island Arc*, 1998, 7 (3): 315-329.
- [15] 孟庆勇, 李安春, 蒋富清, 等. 近2 Ma来东菲律宾海地球磁场相对强度变化的沉积记录[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41 (4): 606-613. [MENG Qingyong, LI Anchun, JIANG Fuqing, et al. A geomagnetic paleointensity record over the last 2Ma from the east Philippine Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41 (4): 606-613.]
- [16] 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): 803-825.
- [17] Ehrmann W. Implications of Late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics [J]. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139 (3-4): 213-231.
- [18] Chamley H. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin: Springer, 1989: 1-623.
- [19] 杨雅秀, 张乃娟, 苏昭冰, 等. 中国粘土矿物[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 143-150. [YANG Yaxiu, ZHANG Naixian, SU Zhaobing, et al.

- Clay Minerals of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 143-150.]
- [20] 师育新, 戴雪荣, 李节通, 等. 末次间冰期兰州黄土记录中的粘土矿物及其环境意义探讨 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(1): 87-94. [SHI Yuxin, DAI Xuerong, LI Jietong, et al. Origin and significance of clay minerals in the last interglacial loess in Lanzhou area, North Central China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(1): 87-94.]
- [21] 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*, 2005, 23(4): 690-695. [SHI Yuxin, DAI Xuerong, SONG Zhiguang, et al. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese loess in different climatic zones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 690-695.]
- [22] 郑洪汉. 中国黄土中粘土矿物的古气候记录 [J]. *第四纪研究*, 1985, 6(2): 41-47. [ZHENG Honghan. Paleoclimatic records of clay minerals in loess, China [J]. *Quaternary Sinica*, 1985, 6(2): 41-47.]
- [23] Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(3-4): 561-582.
- [24] Liu Z F, Tuo S T, 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(3-4): 149-155.
- [25] 李传顺, 石学法, 高树基, 等. 台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源 [J]. *科学通报*, 2012, 57(6): 673-681. [LI Chuanshun, SHI Xuefa, GAO Shuji, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(6): 673-681.]
- [26] 郑智睿. 南冲绳海槽表层沉积物中黏土矿物之研究 [D]. 台湾大学海洋研究所硕士学位论文, 2008: 23-46. [ZHENG Zhirui. Clay mineral distribution in surface sediments of the southern Okinawa Trough [D]. Master Dissertation of Institute of Oceanography, National Taiwan University, 2008: 23-46.]
- [27] Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [28] Nagel U, Müller G, Schumann D, et al. Mineralogy of sediments cored during deep sea drilling project legs 58-60 in the north and south Philippine Sea: results of X-ray diffraction analyses [C]//Hussong D M, Uyeda S, Blanchet R, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington: U. S. Government Printing Office, 1981: 415-435.
- [29] Underwood M B, Orr R, Pickering K, et al. Provenance and dispersal patterns of sediments in the turbidite wedge of Nankai Trough [C]//Hill I A, Taira A, Firth J V, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results, 1993: 15-34.
- [30] Shen X Y, Wan S M, France-Lanord C, et al. History of Asian eolian input to the Sea of Japan since 15 Ma: Links to Tibetan uplift or global cooling? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 474: 296-308.
- [31] 张德玉. 马里亚纳海槽区粘土矿物组成及分布特征 [J]. *黄渤海海洋*, 1994, 12(2): 32-39. [ZHANG Deyu. Clay mineral composition and distribution in the Mariana Trough [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1994, 12(2): 32-39.]
- [32] Liu Z F, Zhao Y L, 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.
- [33] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 81-92. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. *Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 81-92.]
- [34] Ji J F, Chen J, Lu H Y. Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, Central China [J]. *Clay Minerals*, 1999, 34(4): 525-532.
- [35] Aoki S, Kohyama N, Ishizuka T. Sedimentary history and chemical characteristics of clay minerals in cores from the distal part of the Bengal Fan (ODP 116) [J]. *Marine Geology*, 1991, 99(1-2): 175-185.
- [36] Aoki S, Kohyama N. The vertical change in clay mineral composition and chemical characteristics of smectite in sediment cores from the southern part of the Central Pacific Basin [J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 41-49.
- [37] Aoki S, Kohyama N. Modern sedimentation in the Japan Trench: implications of the mineralogy and chemistry of clays sampled from sediment traps [J]. *Marine Geology*, 1992, 108(2): 197-208.
- [38] Windom H L. Lithogenous material in marine sediments [M]//Riley J P, Chester R. *Chemical Oceanography*. 2nd ed. London: Academic Press, 1976: 103-135.
- [39] Kolla V, Nadler L, Bonatti E. Clay mineral distributions in surface sediments of the Philippine Sea [J]. *Oceanologica Acta*, 1980, 3(2): 245-250.
- [40] Yan Y, Jiang F Q, Zeng Z G, et al. Response of eolian quartz flux and grain size in the Parece Vela Basin sediment to the mid-Pleistocene transition [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 236: 105332.
- [41] Cai M T, Fang X M, Wu F L, et al. Pliocene-Pleistocene stepwise drying of Central Asia: Evidence from paleomagnetism and sporopollen record of the deep borehole SG-3 in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 94-95: 72-81.
- [42] Han W X, Fang X M, Berger A. Tibet forcing of mid-Pleistocene synchronous enhancement of East Asian winter and summer monsoons revealed by Chinese loess record [J]. *Quaternary Research*, 2012, 78(2): 174-184.
- [43] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): PA1003.
- [44] Patterson D B, Farley K A, Norman M D. ^4He as a tracer of continental dust: A 1.9 million year record of aeolian flux to the west equatorial Pacific Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 615-625.
- [45] Martínez-García A, Rosell-Melé A, Jaccard S L, et al. Southern Ocean dust-climate coupling over the past four million years [J]. *Nature*, 2011, 476(7360): 312-315.