



220 ka以来西菲律宾海黏土矿物输入变化及其控制因素

蒋富清, 周晓静, 李传顺

Variation in clay mineral input and the control factors in the Western Philippine Sea since 220 ka

JIANG Fuqing, ZHOU Xiaojing, and LI Chuanshun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082402>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 42

海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响

IMPACT OF SEAFLOOR TOPOGRAPHY ON DISTRIBUTION OF CLAY MINERALS IN THE EAST PHILIPPINES SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 77

西菲律宾海26万年来古生产力变化的颗石藻证据

Variations of primary productivity in the western Philippine Sea in the past 260000 years:evidence from coccolith

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 113

非洲东南纳塔尔海谷MIS12期以来的物质来源和古气候变化: IODP U1474孔黏土矿物记录

Provenance and climatic changes of the Natal Valley, Southeastern Africa since MIS12: the clay minerals records from Hole U1474, IODP361

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 142

菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中放射虫的分布对不同区域环境的响应

Radiolarian distribution in surface sediments of the Philippine Sea and adjacent areas and its response to environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 87

基于DEM数据的菲律宾海典型区地貌类型划分

Landform classification for the Philippine Sea based on DEM data

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 192



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蒋富清, 周晓静, 李传顺. 220 ka 以来西菲律宾海黏土矿物输入变化及其控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 85-95.
JIANG Fuqing, ZHOU Xiaojing, LI Chuanshun. Variation in clay mineral input and the control factors in the Western Philippine Sea since 220 ka[J].
Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 85-95.

220 ka 以来西菲律宾海黏土矿物输入变化及其控制因素

蒋富清^{1,2,3,4}, 周晓静⁵, 李传顺⁶

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. 崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237
5. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 大连 116023
6. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要:为揭示晚更新世以来西太平洋暖池黏土矿物输入变化的控制因素,对采自西菲律宾海本哈姆隆起上的 Ph05-5 孔沉积物中的黏土矿物组成、来源和堆积速率进行了分析。结果表明,220 ka 以来,该孔沉积物中的黏土矿物主要以伊利石(13%)和蒙皂石(8%)为主,其次为绿泥石(6%)和高岭石(2%)。伊利石和绿泥石主要来源于亚洲大陆,蒙皂石主要源于菲律宾海周围岛屿的火山物质在海底遭受海水侵蚀后形成的自生 Fe-蒙皂石和西菲律宾海周围岛屿上的物质风化后形成的他生 Al-蒙皂石。220 ka 以来,伊利石和绿泥石的堆积速率表现出明显的冰期高-间冰期低的旋回变化,与该孔总的风尘堆积速率、亚洲风尘和北太平洋风尘堆积速率一致。冰期/间冰期太阳辐射降低/增强、亚洲内陆干旱程度加强/减弱,是导致伊利石等源于亚洲内陆的黏土矿物向菲律宾海输入增加/减少的主控因素。Ph05-5 孔蒙皂石的堆积速率同样表现出明显的冰期高-间冰期低的特征,与该孔总的火山物质堆积速率一致。蒙皂石在轨道尺度的变化,主要受到海平面变化和热带类 ENSO 过程影响的降雨过程控制。冰期低海平面,菲律宾岛和海水的混合作用加强,使得蒙皂石的输入增加。此外,冰期在热带太平洋类拉尼娜较强,降雨量增加,导致向菲律宾海输入的火山物质(蒙皂石)增加,间冰期则相反,由于类厄尔尼诺增强,菲律宾岛区域干旱,火山物质(蒙皂石)向菲律宾海的输入减少。

关键词:黏土矿物;堆积速率;晚更新世;西菲律宾海

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082402

Variation in clay mineral input and the control factors in the Western Philippine Sea since 220 ka

JIANG Fuqing^{1,2,3,4}, ZHOU Xiaojing⁵, LI Chuanshun⁶

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. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China
5. College of Marine Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China
6. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: To reveal the controlling factors of clay minerals input in the Western Pacific Warm Pool since the Late Pleistocene, we analyzed the composition, source, and mass accumulation rates (MARs) of clay minerals in the sediment from Core Ph05-5 recovered from the Benham Rise in the Western Philippine Sea. The results indicate that the clay minerals in the core sediment are mainly composed of illite (13%) and smectite (8%), followed by chlorite (6%) and kaolinite (2%). Over the last 220 ka, illite and chlorite are derived mainly from the Asian continent, and

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);崂山实验室科技创新项目“新生代西太平洋环境演化的沉积记录及机制”(LSKJ20224200);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);辽宁省教育厅项目“北黄海西部陆架环流与沉积体系”(JL201905)

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

收稿日期:2023-08-24; **改回日期:**2023-09-15. 文凤英编辑

smectite is mainly authigenic Fe-smectite in volcanic origin from islands around the Philippine Sea after erosion by seawater at the seabed, and smectite formed by weathering of volcanic material from islands around the West Philippine Sea. The MARs of illite and chlorite displayed significant high value during the glacial period and low value during the interglacial period, which is consistent with the total MARs of eolian dust of Core Ph05-5, MARs of Asian dust and North Pacific dust over the last 220 ka. The decrease/enhancement of solar radiation during the glacial/interglacial period, as well as the strengthening/weakening of arid in Asian continent are the main controlling factors for the increase/decrease in the input of clay minerals, such as illite from Asian continent into the Philippine Sea. The MARs of smectite in Core Ph05-5 also exhibits high value during the glacial period and low value during interglacial period, which is consistent with the total MARs of the volcanic material in Core Ph05-5. The changes of smectite in the orbital scale are mainly controlled by global sea level change and precipitation influenced by tropical ENSO processes. The low sea level during the glacial period resulted in the strengthened mixing effect between the Philippine Island and seawater, and led to an increase of smectite input in the Philippine Sea. In addition, during the glacial period, La Niña-like process was stronger in the tropical Pacific, resulting in an increase in rainfall and increased volcanic materials (smectite) input into the Philippine Sea. On the contrary, during interglacial period, the strengthened El Niño-like process resulted in the drought in the Philippine islands, and the decreased volcanic materials (smectite) input in the Philippine Sea.

Key words: clay minerals; mass accumulate rate; late Pleistocene; Western Philippine Sea

西菲律宾海是西北太平洋最大的边缘海盆,地处亚洲大陆东南侧琉球群岛和吕宋岛以东,马里亚纳群岛以西的海域,四周被岛弧和海沟包围,平均水深超过 5 000 m(图 1)。这里是第四纪以来亚洲大陆风尘物质和火山岛弧物质的汇集盆地^[1-2],蕴含

着亚洲大陆和火山岛弧物质输入的历史和古气候演变的信息^[3-5]。位于西菲律宾海盆西部和吕宋岛东侧的本哈姆隆起水深在 3 000 m 左右,沉积物的厚度超过 100 m^[6]。连续的新生代地层及其丰富的钙质生物化石记录了本区沉积历史和古气候演化

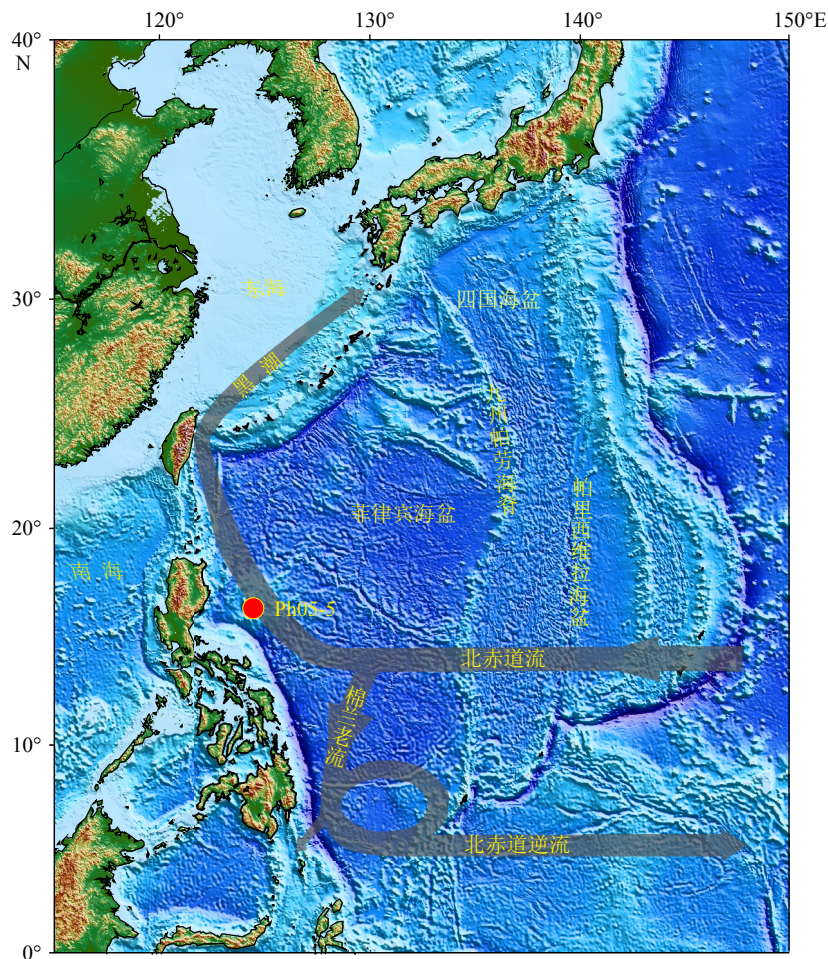


图 1 Ph05-5 孔位置

Fig.1 Location of Core Ph05-5

信息^[5-7], 为开展轨道尺度古气候演化提供了依据^[3,5,8]。碎屑组分的 Sr、Nd 同位素研究表明, 本哈姆隆起上的碎屑沉积物主要来源于亚洲大陆风尘和火山岛弧物质, 其中的细粒组分主要来源于亚洲大陆风尘^[2,5]。碎屑组分中的细粒风尘组分记录了源区——亚洲大陆的古气候变化^[5,9]。

在深海沉积物中, 以黏土矿物为代表的细颗粒组分, 是特定气候条件作用的直接产物, 其中保存着大量的气候信息。海洋中的黏土矿物伊利石主要来自于陆地^[10], 不同的气候和环境条件下形成的伊利石具有不同的物理和化学特征。伊利石的开形指数^[11-12]、Hw 指数^[13]和 Kübler 指数^[14-15]等表征伊利石结晶度的参数在不同的环境条件下有所差异。不同成因类型的伊利石亦具有不同的形貌特征, 在扫描电镜下, 陆源伊利石呈薄片状, 厚度较均匀; 而自生伊利石的矿物晶体边缘往往长有“细针”^[16]。本哈姆隆起上晚第四纪以来沉积物中 $< 2 \mu\text{m}$ 的细粒组分平均含量超过 27%^[5], 其中的黏土矿物是主要矿物组成。通过黏土矿物组合以及黏土矿物参数分析, 发现本哈姆隆起的黏土矿物自第四纪以来主要来源于亚洲大陆和火山岛弧物质, 其中伊利石、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^[3-4,8]。

由于不同黏土矿物特有的物源属性, 因而不同来源黏土矿物的比值通常被用作源区古气候变化的示踪指标。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^[8], 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^[4]。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^[17-18]。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^[19]。然而在帕里西维拉海盆, 黏土矿物的上述比值却无法指示中更新世气候转型和亚洲内陆的干旱^[20], 说明用黏土矿物的比值指示亚洲内陆气候仍存在的问题。首先在这些比值中使用的黏土矿物是一个相对含量, 其比值代表的是陆源和火山物质的相对变化, 只有当火山物质输入不变时, 该比值是可靠的。然而以往的研究表明, 晚更新世以来本哈姆隆起火山物质的输入是变化的^[5], 因此该比值重建的古气候变化可靠性有待进一步的验证。沉积物的堆积速率是一个

绝对量, 可以进行全球对比。帕里西维拉海盆伊利石等亚洲大陆来源黏土矿物的堆积速率敏感地响应了亚洲内陆干旱气候的变化^[20], 因而通过黏土矿物的堆积速率变化可以更好地探究黏土矿物输入变化的控制因素, 以及重建黏土矿物源区的古气候演变, 然而目前针对西菲律宾海盆的黏土矿物还缺乏这方面的研究。

综上所述, 本文拟通过西菲律宾海本哈姆隆起上一个沉积记录连续的柱状样, 对其中黏土矿物的含量、特征参数和形貌特征指标进行系统分析, 通过其中黏土矿物的组成、来源、堆积速率及其含量在轨道尺度的变化研究, 并与该区域的其他古气候示踪指标进行对比, 以探讨西菲律宾海主要黏土矿物的变化规律及其驱动机制, 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 材料和方法

1.1 研究样品

本文研究样品 Ph05-5 孔位于西菲律宾海西部本哈姆隆起(图 1), 水深 3382 m, 柱状样长度 440 cm, 由中国科学院海洋研究所在 2004 年执行“黑潮源区古环境演化研究”海上调查时用重力取样器采集。每隔 2 cm 取样分析, 共计采集 109 个沉积物样品, 每个样品的时间分辨率大约为 2 ka。该岩芯主要由黄褐色、褐黄色和灰绿色黏土质粉砂组成, 含有孔虫和钙质超微化石; 柱状样中普遍含有火山物质(以火山玻璃为主), 含 4 个火山灰层, 其中 108~112 cm 和 156~160 cm 为肉红色, 以无色透明火山玻璃为主; 288~294 cm 和 358~368 cm 为黑色, 以褐色火山玻璃为主。

Ph05-5 孔年代地层模式是基于 4 个 AMS¹⁴C 测年数据控制点、高分辨率的氧同位素地层记录^[21,22]和全球底栖有孔虫氧同位素数据库 SPECMAP^[23]来共同建立(图 2)。其中, 小于 4 万年的地层年龄用 AMS¹⁴C 年代进行标定, 大于 4 万年的地层用 SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ 来标定^[23], 在深度-年代转换和沉积速率计算中, 扣除了 4 个火山灰层的影响。4 个层位的 AMS¹⁴C 测年分别用有孔虫单种 *G. sacculifer* (14~16 cm 和 46~48 cm)、*G. conglobatus* (98~100 cm) 和 *G. ruber* (122~124 cm), 样品在美国 Woods Hole 海洋研究所的 AMS 测试中心测定。氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 选用底栖有孔虫 *C. wullerstorfi*, 在中国科学院海洋

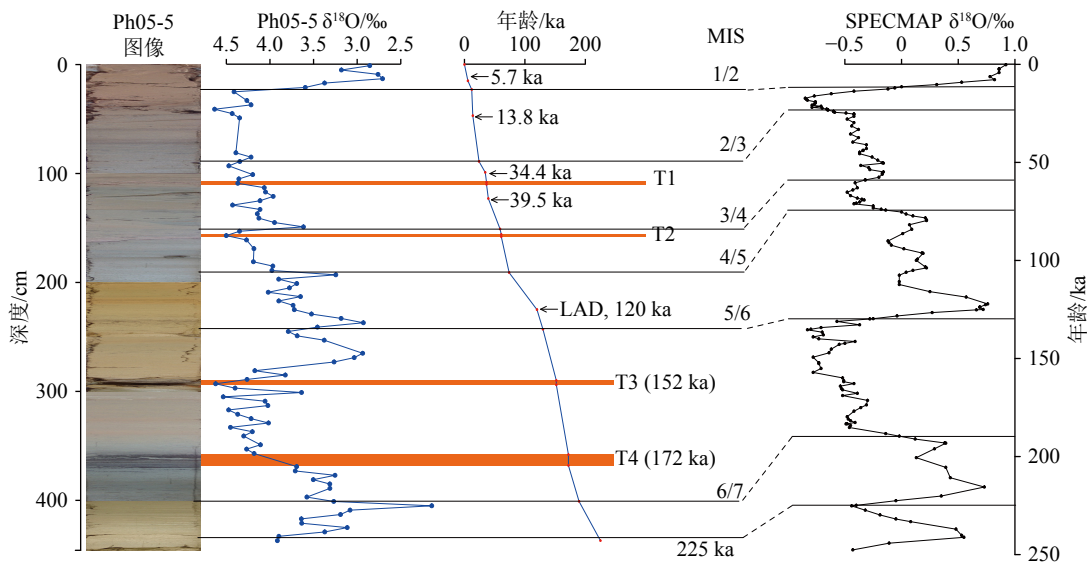


图2 Ph05-5孔图像、 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线^[21-22]和深度-年龄模式^[5]及其与SPCMAP氧同位素曲线^[23]对比图

其中4个AMS¹⁴C测年数据, LAD为粉红色*G. ruber*的末现面, MIS1—7为海洋氧同位1—7期, 橙色的条带T1, T2, T3, T4为4个火山灰层。

Fig.2 Images, oxygen isotopic stratigraphy^[21-22], and depth-age model for core Ph05-5^[5] in comparison with the $\delta^{18}\text{O}$ curve of SPCMAP^[23]

Showing four AMS¹⁴C age points, the LAD (last appearance datum) of pink *G. ruber*, and the MIS1—7 boundaries. The orange bars T1, T2, T3, and T4 indicate the four tephra layers.

研究所海洋地质与环境重点实验室的Isoprime稳定同位素质谱仪上分析, 测试结果经过NSB19标准校正, 并转换为PDB, 平均精度为 $\pm 0.06\text{‰}$ 。用外插法获得Ph05-5孔底部年龄约为220 ka。沉积物的线性沉积速率自220 ka以来总体为增加的趋势, 但是在MIS7—5, 沉积速率普遍小于2 cm/ka; 自MIS4以来, 沉积速率明显增加, 除了MIS3部分层位沉积速率略低外, 其他层位的沉积速率普遍高于2 cm/ka, 最高可达5.1 cm/ka(图2)。

1.2 黏土矿物分析

用于黏土矿物分析的样品, 首先取原样用10%双氧水去除有机质, 为防止酸处理对黏土矿物结构的破坏, 采用10%醋酸去除碳酸钙, 然后用去离子水反复清洗, 直到具有抗絮凝作用发生; 根据斯托克斯沉降原理提取小于2 μm 的黏土颗粒, 制成定向薄片, 样片经乙二醇饱和处理(60 $^{\circ}\text{C}$, 12 h)后进行X-射线扫描分析。另外选取部分有代表性的样品制成自然片和加热片(490 $^{\circ}\text{C}$, 加热2 h)。仪器分析使用Bruker公司D8 ADVANCE固定靶X-射线衍射仪, Cu K α 辐射, Ni滤波器, 管压40 kV, 管流40 mA, 步长0.02 $^{\circ}$, 步频0.5 s/step, 扫描范围3 $^{\circ}$ ~30 $^{\circ}$ (2 θ)。为剥离高岭石(002)和绿泥石(004)的衍射峰, 对24 $^{\circ}$ ~26 $^{\circ}$ (2 θ)的衍射峰进行反复慢速扫描。样品制备和分析在中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成。

对于乙二醇饱和曲线, 经过背景扣除和平滑处理后, 用Topas 2P软件进行曲线拟合, 获得特征衍射峰的峰面积和半高宽, 依据Biscaye(1965)的方法进行黏土矿物的半定量计算^[24]。高岭石和绿泥石的相对含量通过拟合0.357 nm/0.354 nm衍射峰面积比值求得。根据乙二醇曲线计算出伊利石和蒙皂石的矿物学特征。伊利石的结晶度为1 nm峰的半峰宽, 低值代表结晶度高, 指示源区水解作用弱, 为干冷的气候条件^[14]。伊利石化学指数为0.5 nm/1 nm峰面积比, 比值小于0.5代表富Fe-Mg伊利石, 为物理风化的结果, 比值大于0.5为富Al伊利石, 代表强烈的水解作用^[15]。

1.3 黏土矿物的含量和堆积速率

依据沉积物的粒度分析结果^[5], 可以获得 $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分在沉积物全样中的含量($M1$)。尽管在 $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分中含少量的石英和长石等碎屑矿物, 但是其含量较低(图3), 因此, 假定 $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分主要是由黏土矿物组成。4种主要黏土矿物伊利石、绿泥石、高岭石和蒙皂石的含量分别用各自的相对含量($M2$)乘以 $< 2 \mu\text{m}$ 粒级组分在沉积物全样中的含量($M1$)来获得。黏土矿物的堆积速率计算方法如下: 以伊利石为例, 伊利石的含量($M1 \times M2_{\text{伊利石}}$)乘以沉积物的干容重(DBD)和线性沉积速率(LSR), 就可以获得伊利石的堆积速率 $\text{MAR}_{\text{伊利石}} = M1 \times M2_{\text{伊利石}} \times \text{DBD} \times \text{LSR}$ 。其他黏土矿

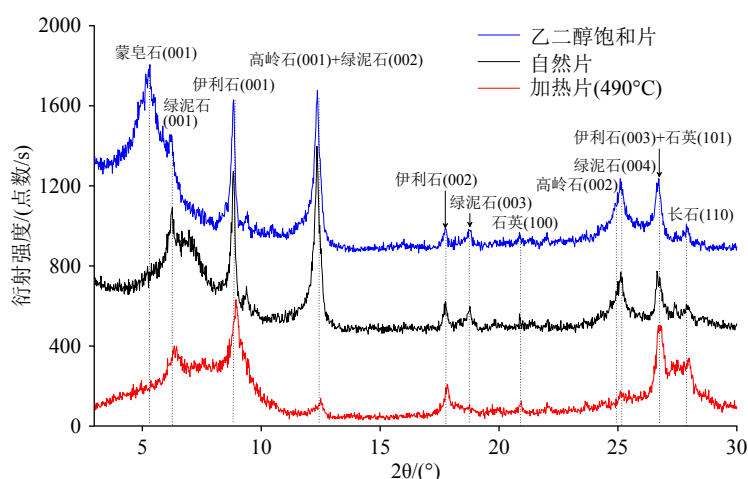


图 3 Ph05-5 孔黏土矿物的典型 X-射线衍射图谱
样品为 Ph05-5 孔 8~10 cm 沉积物。

Fig.3 Typical X-Ray diffraction spectrum of clay minerals in Core Ph05-5

The sample is sediment at 8~10 cm in Core Ph05-5.

物的堆积速率依此类推。

2 结果

黏土矿物的鉴定主要根据自然片、乙二醇饱和片和加热片的 X-射线衍射图进行综合对比(图 3)。加热曲线和自然曲线比较, 1.4 nm 衍射峰明显减弱。在 1~1.4 nm 之间表现为一个平台, 表明伊利石/蒙皂石随机混层矿物的存在; 同时 0.7 nm 衍射峰也明显减弱, 表明高岭石的存在。乙二醇曲线和自然曲线比较, 1.7 nm 的衍射峰出现, 1.4 nm 衍射峰明显减弱, 指示蒙皂石的存在。1~1.4 nm 之间没有出现明显的平台或小峰, 表明伊利石/蒙皂石随机混层矿物衍射峰移至 1.4~1.7 nm 之间。上述分析结果表明, Ph05-5 孔 220 ka 以来 <2 μm 的黏土粒级矿物主要由 4 种主要黏土矿物伊利石、蒙皂石、绿泥石和高岭石组成。此外, 在自然片的 X-射线衍射图上(图 3)可以看出, 黏土粒级的矿物中还含有少量石英、长石。

4 种主要黏土矿物的含量以及主要参数的变化如图 4 所示。伊利石的含量最高, 变化范围 3%~23%, 平均为 13%; 其次为蒙皂石, 含量为 1%~18%, 平均为 8%; 绿泥石含量相对较少, 变化范围 4%~14%, 平均为 6%; 高岭石在 4 种黏土矿物中含量最低, 为 0~7%, 平均仅为 2%。自 220 ka 以来, 伊利石的含量总体上呈减少的趋势, MIS6 和 MIS7 伊利石的含量明显高于 MIS1—5; 在每一个冰期-间冰期旋回中, 伊利石呈现冷期含量高, 暖期含量低的特点。绿泥石的含量变化与伊利石的类似, 但在

MIS1 和 MIS5 期出现两个高峰值。蒙皂石含量变化最明显的特征是 MIS7—6 含量明显低于 MIS5—1, 没有表现出明显的冰期-间冰期旋回。高岭石含量在 MIS1 和 MIS5—6 的含量较高。伊利石结晶度变化范围为 0.1~0.34° Δ2θ, 平均为 0.22° Δ2θ; 其中除了 4~6 cm 沉积物的伊利石结晶指数为 0.1 之外, 其他层位均在 0.18~0.34 之间, 比较稳定。伊利石化学指数变化范围为 0.07~0.3, 平均为 0.17, 均小于 0.50, 表明主要为富 Fe-Mg 伊利石, 伊利石的化学指数在冰期 (MIS2—4、6) 相对较高, 间冰期 (MIS1、5、7) 相对较低(图 4)。

4 种主要黏土矿物堆积速率的变化如图 5 所示。伊利石的堆积速率最高, 变化范围 0.077~1.7 g·cm⁻²·ka⁻¹, 平均为 3.2 g·cm⁻²·ka⁻¹; 其次为蒙皂石, 堆积速率为 0.018~1.6 g·cm⁻²·ka⁻¹, 平均为 0.2 g·cm⁻²·ka⁻¹; 绿泥石的堆积速率为 0.13~1.4 g·cm⁻²·ka⁻¹, 平均为 0.12 g·cm⁻²·ka⁻¹; 高岭石在 4 种黏土矿物中堆积速率最低, 范围为 0.002~0.5 g·cm⁻²·ka⁻¹, 平均仅为 0.05 g·cm⁻²·ka⁻¹。4 种黏土矿物的堆积速率均表现为冰期高、间冰期低的特征。

3 讨论

3.1 黏土矿物的来源

Ph05-5 孔伊利石化学指数均小于 0.50, 主要为富 Fe-Mg 伊利石, 表明是强烈物理风化作用的产物^[15]。伊利石结晶度指数很低, 平均仅为 0.22° Δ2θ, 表明伊利石的结晶度较高, 主要形成于物理风化较

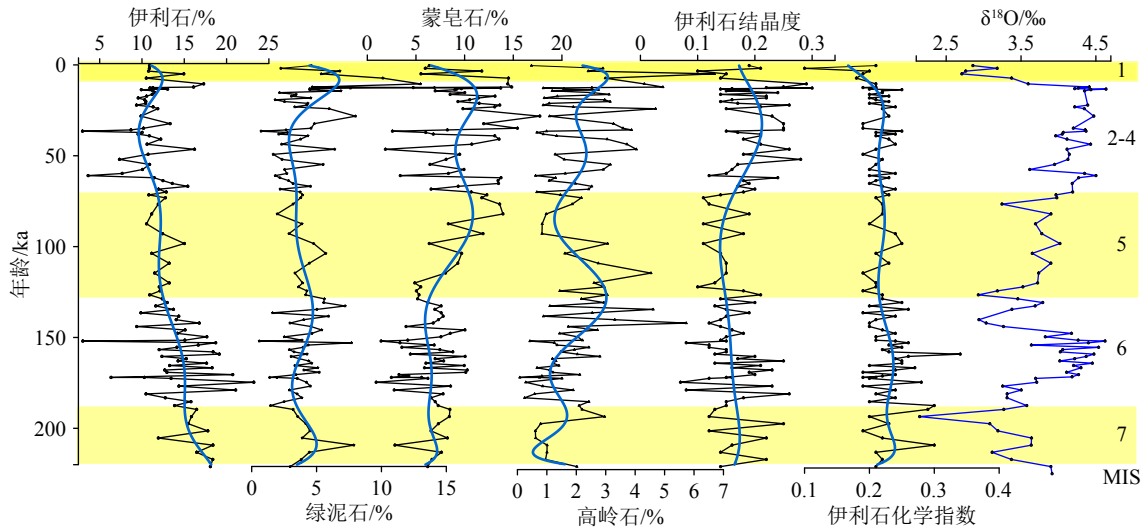


图4 Ph05-5孔黏土矿物含量及其特征参数变化
 $\delta^{18}O$ 为Ph05-5孔氧同位素数据^[21-22]。

Fig.4 Contents and characteristic parameters of clay minerals in Core Ph05-5
 $\delta^{18}O$ is the oxygen isotope data of core Ph05-5^[21-22].

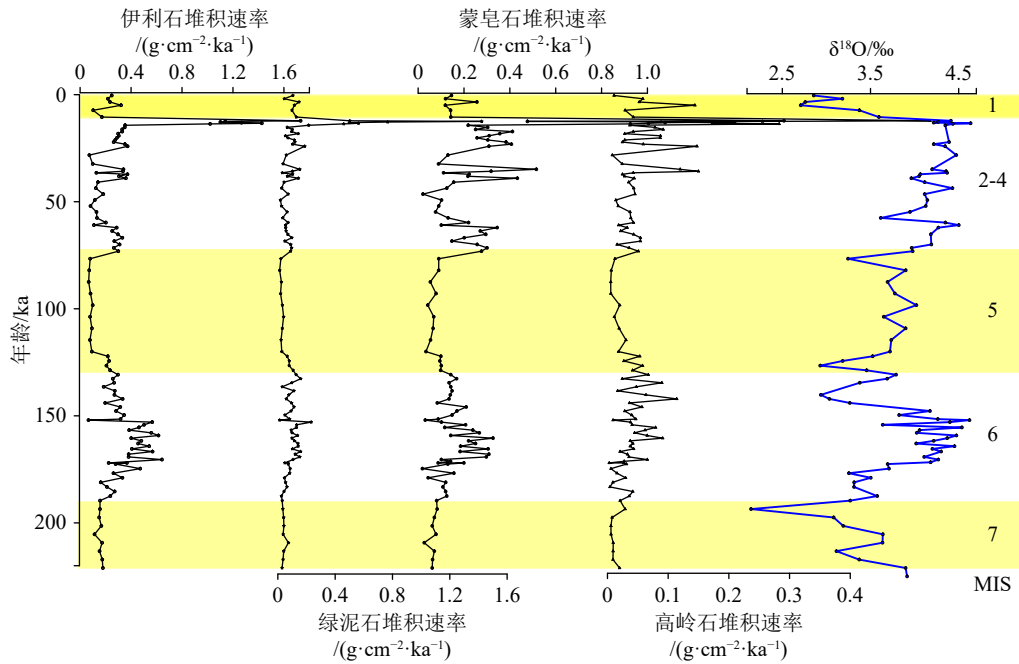


图5 Ph05-5孔黏土矿物堆积速率变化
 $\delta^{18}O$ 为Ph05-5孔氧同位素数据^[21-22]。

Fig.5 MARs of clay minerals in Core Ph05-5
 $\delta^{18}O$ is the oxygen isotope data of core Ph05-5^[21-22].

强、水解作用弱的干冷气候环境^[14],其变化范围与中国内陆黄土(0.22°~0.33°Δ20)和古土壤(0.22°~0.42°Δ20)类似^[25]。伊利石在扫描电镜下呈薄片状或集合体,未见有“细针”状的伊利石,具有陆源成因的特征;上述特征与该区域MD06-3050孔黏土矿物一致^[8],说明伊利石主要源自亚洲大陆干旱气候条件下的沉积。此外,本哈姆隆起的北部、东部和

南部均为菲律宾深海盆地,且远离大陆,而西部的菲律宾海沟与吕宋岛和棉兰老岛分隔,因此可以排除河流搬运方式来源的陆源碎屑物;因此,伊利石主要是源自亚洲大陆的风尘沉积。伊利石的结晶度大多为0.18°~0.34°Δ20(图4),在冰期与间冰期没有很明显的差别,表明菲律宾海伊利石在冰期与间冰期的来源稳定,即使在夏季风盛行的间冰期都

主要来源于亚洲大陆。

绿泥石一般是陆上寒冷干燥、机械风化作用强的环境产物, 尽管火山物质在强烈的化学风化作用下也可由三水铝石转变为绿泥石^[26], 但是在菲律宾海沉积物中的绿泥石都富含铁, 不太可能由三水铝石转变而来^[11]。在扫描电镜下, 本区的绿泥石多呈边缘不规则的片状、角钝圆, 边也不平直, 这是来源于母岩碎屑物质的他生绿泥石的特征^[27]。此外, 绿泥石和伊利石的堆积速率呈明显的正相关(图 6A), 因此西菲律宾海的绿泥石和伊利石的来源相同, 主要来自于气候相对干冷的亚洲大陆, 而非低纬度暖湿气候条件的菲律宾岛及太平洋岛屿。

太平洋沉积物中的蒙皂石主要有两种来源, 其一是暖湿气候条件下陆上的硅质岩化学风化的次生矿物——Al-蒙皂石, 其二是海底火山物质风化作用形成的蚀变物质形成的 Fe-蒙皂石^[28]。在火山活动强烈、火山物质丰富的海区, 如太平洋中部^[29]、

马里亚纳海槽^[30], 蒙皂石的含量高, 且主要由基性火山物质经过海底风化形成。在菲律宾海的南部, 黏土矿物中蒙皂石的含量在 50% 左右, 向北蒙皂石的含量减少, 但是远高于一般的陆源海蒙皂石的含量。蒙皂石通常与火山玻璃、钙十字沸石和斜发沸石共生, 在菲律宾海南部的 WP2 和 WP40 孔中火山玻璃尤其多^[31], 相应地蒙皂石的含量也很高。能谱分析结果表明, 菲律宾海盆的蒙皂石主要是由陆源的 Al-蒙皂石和海底火山灰风化形成的 Fe-蒙皂石组成^[11]。一般认为, 以陆源为主的黏土矿物中, 蒙皂石的相对含量大都低于 20%^[11]。在 Ph05-5 孔中, 蒙皂石的平均相对含量超过 30%^[8], 而且沉积物中普遍含有火山玻璃, 证明火山成因的蒙皂石占了一定的比例。西菲律宾海的西部是吕宋岛和棉兰老岛, 东边则是马里亚纳火山岛链, 强烈的火山活动造成大量的火山物质在菲律宾海沉积; 而岛上的火山物质在暖湿的气候条件下风化后, 形成继承性碎

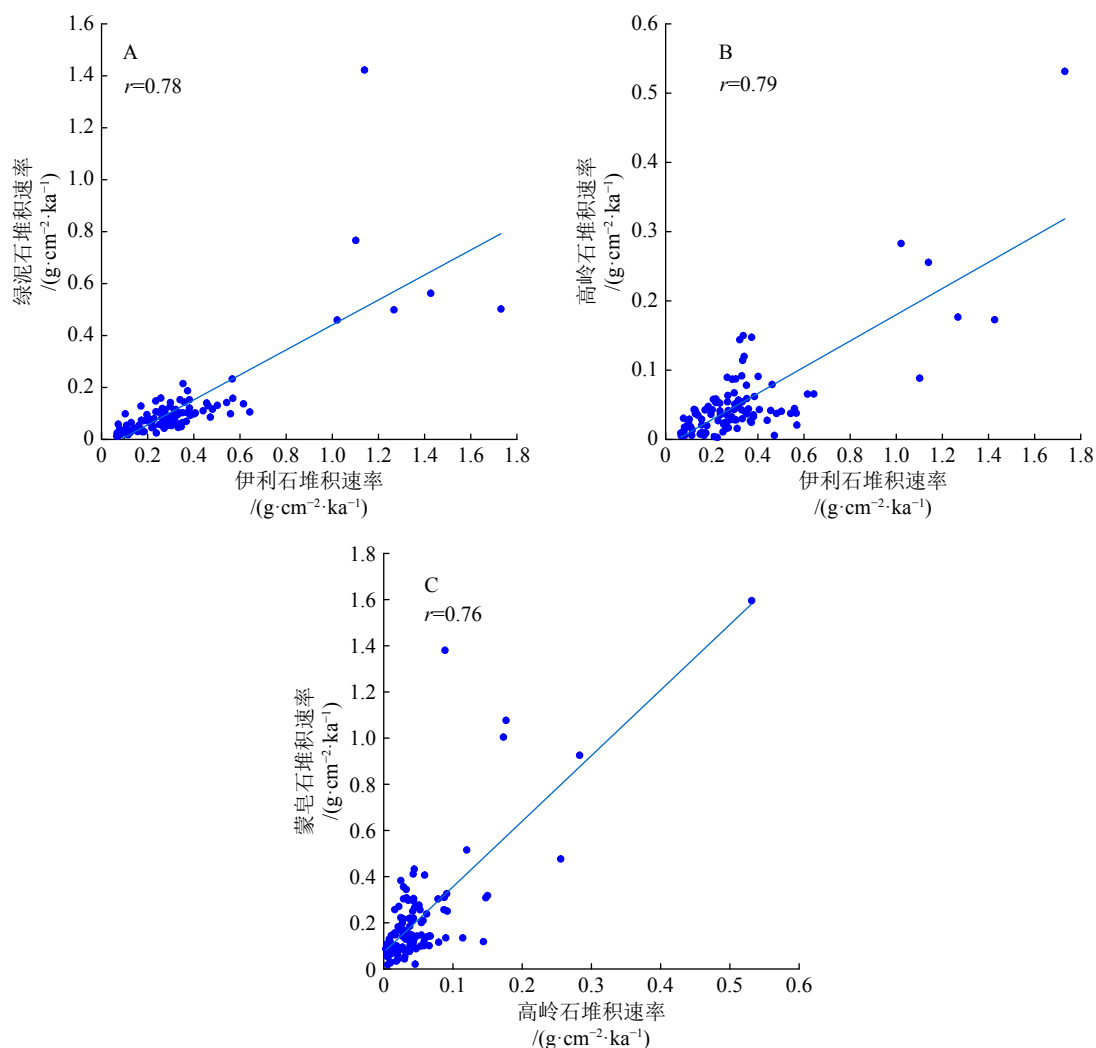


图 6 Ph05-5 孔黏土矿物堆积速率之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between MARs of clay minerals in Core Ph05-5

屑黏土矿物,会在风或北赤道流和黑潮暖流的作用下搬运到西菲律宾海,因此菲律宾岛及其他太平洋岛屿等湿热环境下风化形成的蒙皂石也是其主要来源之一。Ph05-5孔沉积物中蒙皂石的含量自MIS5开始明显增加(图4),这与赤道太平洋岛屿火山活动相对比较活跃的时间^[32]是一致的,这也从一个侧面证实了蒙皂石主要来源于火山岛弧物质。

由于高岭石在西太平洋沉积物中的含量较低,很难通过高岭石的特征给出直接的物源证据,一般是依据高岭石形成环境、含量以及与其他黏土矿物的相关性等进行其源区判别。通常情况下,海洋中的高岭石一般是陆源次生黏土矿物,是强烈的化学风化作用的产物,多在热带和亚热带土壤中富集,指示暖湿气候条件下强烈的水解作用。Chamley认为西菲律宾海沉积物中高岭石主要是西南亚洲大陆上的火成岩在温暖潮湿条件下形成的风化产物^[33]。然而,依据高岭石和伊利石含量之间的正相关性和协同变化,一些研究认为高岭石来源于亚洲大陆^[8,20]。由于菲律宾海的沉积物中高岭石的含量通常较低,黏土矿物之间的相关分析通常使用的是相对含量,因此相关分析结果值得商榷,而且两种黏土矿物即使正相关,也未必意味着二者有相同的来源。为了增加相关分析结果的可靠性,在Ph05-5孔黏土矿物的相关分析中,我们使用了黏土矿物的堆积速率进行相关分析,发现高岭石、伊利石和蒙皂石的堆积速率之间都具有正相关性(图6B,C),这表明高岭石来源的复杂性,其中可能既有来源于亚洲内陆暖湿气候条件下形成的高岭石,可能也有菲律宾岛弧火山物质风化形成的产物^[33]。鉴于高岭石的低含量及其物源的不确定性,后文将不对高岭石的控制因素进行讨论。

3.2 黏土矿物变化的控制因素

由于冰期旋回中的海平面升降会通过再沉积作用对黏土矿物的沉积产生影响,因此其可能是西菲律宾海沉积物中伊利石等在冰期-间冰期时间尺度的周期性变化的原因之一。伊利石和绿泥石等陆源黏土矿物的变化在冰期-间冰期尺度上和海平面变化之间大致上一致,即低海平面对应高的伊利石等高堆积速率,然而在细节上,二者不存在明显的对应,如在最低海平面形成的时间和最高的黏土矿物堆积速率之间并不一致,反之,在最高海平面,黏土矿物的堆积速率也不是最低的。由于Ph05-5孔位于深海盆地中一个地形较为平坦的隆起上,平均水深3000m左右,周围都是水深5000m以上的

深海盆地和海沟;220ka以来,冰期-间冰期海平面升降幅度不超过150m^[34],因此即使在最低海平面时,研究区也处于深水环境;而来源于亚洲大陆的伊利石和绿泥石等矿物,主要是通过风的作用从亚洲内陆搬运至菲律宾深海,因此,海平面变化不足以引起黏土矿物的周期性变化。

北太平洋岩芯V21-146^[35,36]、冰芯^[37]和黄土记录^[38,39]的研究结果表明,冰期亚洲风尘的含量明显比间冰期高;大量的亚洲风尘在东亚季风和西风作用下,被搬运到西北太平洋。对比研究发现,220ka以来菲律宾海伊利石和绿泥石的堆积速率与中国西峰黄土剖面风尘堆积速率^[40]的变化一致,而与65°N太阳辐射变化相反^[41](图7);表现为冰期太阳日射量相对较小,而风尘通量和伊利石的含量相对较高,间冰期完全相反;这种变化规律在MIS4—7表现得尤为明显。冰期-间冰期太阳日射与亚洲粉尘之间的关系,伊利石和绿泥石在冰期-间冰期旋回的规律性变化,使得我们可以做如下推论:地球轨道偏心率在100ka周期的变化,导致地球接受的太阳辐射发生周期性的变化。冰期由于轨道偏心率较小,太阳日射量减少,北极冰盖增加,以及风尘输入的内反馈机制等^[5],使得亚洲内陆干旱程度增加,导致了亚洲风尘的含量增加,最终驱动了输入西菲律宾海风尘黏土矿物伊利石和绿泥石增加;间冰期由于太阳日射加强,北极冰盖减小,亚洲内陆干旱程度减弱,导致伊利石和绿泥石的输出减少。因此,Ph05-5孔沉积物中伊利石和绿泥石在冰期-间冰期旋回的周期性变化,实际上记录的是亚洲内陆干旱程度的变化,同时也表明伊利石和绿泥石的变化主要受控于地球轨道参数的变化。

Ph05-5孔蒙皂石的堆积速率和伊利石类似,表现出冰期高、间冰期低的特征(图8)。这种冰期-间冰期尺度的变化,与该区域总的火山岛弧来源物质堆积速率以及分散态火山物质的堆积速率^[5]一致。吕宋岛附近海区和菲律宾海沉积物中的火山岛弧物质的堆积速率均受到全球海平面变化的影响^[5,42],通常在冰期低海平面时,火山碎屑物质的堆积速率相对较高。由于Ph05-5孔蒙皂石主要来源于火山岛弧物质,且其堆积速率在高/低海平面时呈现低/高的变化(图8),因此,海平面变化可能是蒙皂石的冰期-间冰期变化的因素之一。冰期低海平面时,吕宋岛物质和海水混合过程的加强,导致火山物质向菲律宾海输入的增加^[43]。

降雨是驱动热带太平洋岛弧物质向菲律宾海输送的另一个主要因素^[5]。菲律宾季节性的降雨受

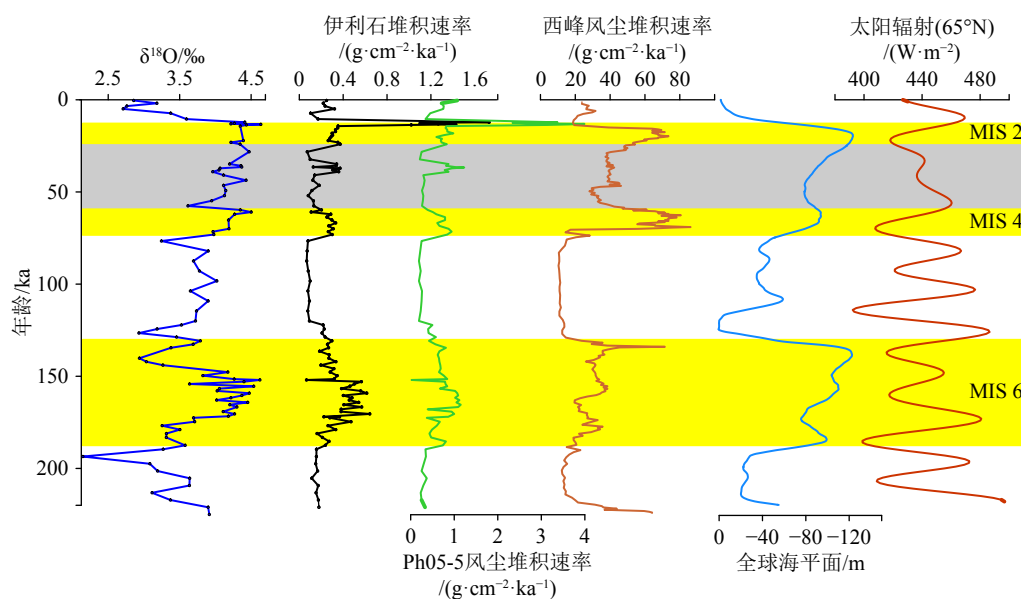


图 7 Ph05-5 孔伊利石和风尘堆积速率及其可能控制因素

Ph05-5 孔风尘堆积速率、西峰风尘堆积速率、全球海平面和太阳辐射 (65°N) 数据分别引自文献 [5]、[40]、[34] 和 [41]。

Fig.7 MARs of illite and eolian dust in core Ph05-5 sediment and the potential controlling factors

The MARs of eolian dust from the Xifeng profile, the global sea level data, and the insolation data are from references [5], [40], [34] and [41], respectively.

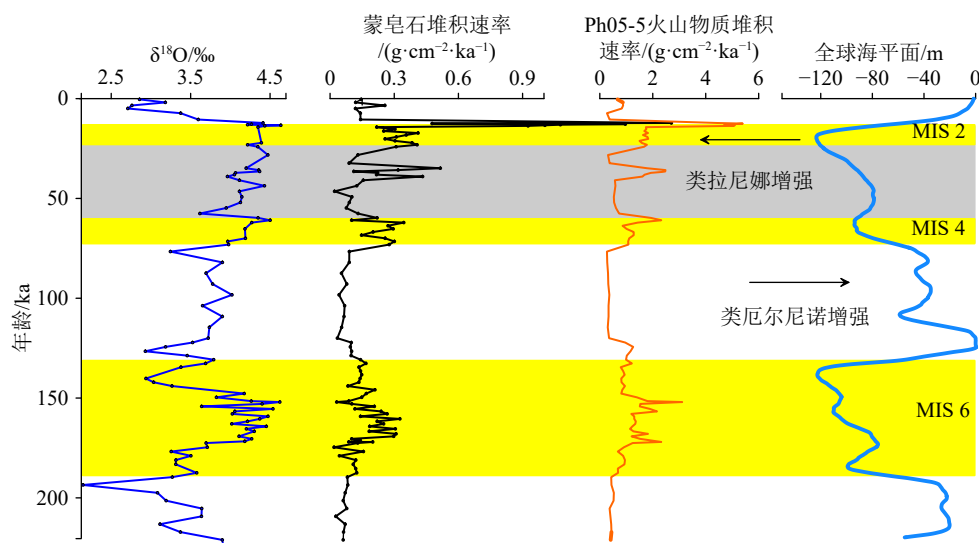


图 8 Ph05-5 孔蒙皂石和火山物质堆积速率及可能控制因素

Ph05-5 孔火山物质堆积速率和全球海平面数据分别引自文献 [5] 和 [34]。

Fig.8 MARs of smectite and bulk volcanic materials in core Ph05-5 sediment and the potential controlling factors

The MARs of volcanic materials in core Ph05-5 sediment and the global sea level data are adopted from references [5] and [34], respectively.

到厄尔尼诺和南方涛动过程的调节, 在赤道太平洋和周围的岛屿区域, 厄尔尼诺过程以降雨量减少为特征^[44-45]。Hughen 等认为, 厄尔尼诺过程中, 西太平洋暖池向东迁移至中太平洋, 减弱了降雨并引起干旱^[46]。相反, 拉尼娜期间则以加强的降雨为特征^[47-48]。热带太平洋纬向温度梯度的变化指示过去几十万年以来气候偏冷的冰期热带太平洋呈现出类拉尼娜状态^[49]。陆地径流示踪数据表明, 菲律宾

岛弧南部 (棉兰老岛) 的降雨在冰期 (如 MIS2 和 MIS4) 增加^[50]。然而在气候较暖的间冰期, 地表温度升高, 东西太平洋温度梯度减小, 热带太平洋表现出类厄尔尼诺状态^[49]。Ph05-5 孔蒙皂石堆积速率在冰期-间冰期时间尺度与热带太平洋的类拉尼娜和类厄尔尼诺事件协同变化, 表明在冰期菲律宾岛降雨增强, 导致更多火山物质从吕宋岛扩散到菲律宾海。这一机制是蒙皂石在冰期增加, 间冰期减

少的因素之一(图8)。

4 结论

(1) Ph05-5 孔的黏土矿物中的伊利石和绿泥石主要来源于亚洲大陆,两种矿物的堆积速率表现为明显的冰期高-间冰期低的旋回变化,这种轨道尺度的变化与该孔总的风尘堆积速率、亚洲风尘通量和北太平洋风尘堆积速率一致。对比分析表明,冰期/间冰期太阳辐射降低/增强、亚洲内陆干旱程度加强/减弱,是导致伊利石等源于亚洲内陆的黏土矿物向菲律宾海输入增加/减少的主控因素。

(2) Ph05-5 孔的黏土矿物中的蒙皂石主要来源于火山岛弧物质,蒙皂石的堆积速率同样表现出明显的冰期高-间冰期低的变化,这种轨道尺度的变化与该孔的火山物质堆积速率一致。蒙皂石在轨道尺度的变化,主要受到海平面变化和热带类 ENSO 过程影响的降雨控制。冰期低海平面,菲律宾岛和海水的混合作用加强,使得蒙皂石的输入增加。此外,冰期热带太平洋类拉尼娜作用加强,降雨量增加,导致向菲律宾海输入的火山物质增加,间冰期则相反。

参考文献 (References)

- [1] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Asian continental nature of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in north central Pacific sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133: 105-116.
- [2] Jiang F, Frank M, Li T et al. Asian dust input in the western Philippine Sea: Evidence from radiogenic Sr and Nd isotopes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14: 1538-1551.
- [3] Xu Z K, Li T, Wan S M, 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.
- [4] 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.
- [5] Jiang F, Zhou Y, Nan Q, 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-Oceans*, 2016, 121: 6911-6928.
- [6] Ingle J C, Karig D E, Bourma A H e a. Site 292. In: Karig, DE, Ingle, JC et al, (Eds), *Init Reports of the Deep-Sea Drilling Project* Washington, DC, US Government Printing Office, 1975, 31: 67-79.
- [7] Wei K-Y, Lee T-Q, Cruise(LegII) t S S P o I I M-I. Nannofossil bio-chronology of tephra layers in Core MD972143, Benham Rise, Western Philippine Sea. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1998, 9: 153-156.
- [8] Wan S, Yu Z, 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(2): 152-159.
- [9] Xu Z, Li T, Clift P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16: 3182-3196.
- [10] 俞旭, 江超华. 现代海洋沉积物矿物及 X 射线研究. 北京: 科学出版社. 1984, 113-156. [YU Xu, JIANG Chao-hua. *Modern Marine Sediment Minerals and X-ray Studies* [M]. Beijing: Science Press. 1984, 113-156.]
- [11] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域黏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 & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 61-72.]
- [12] 王诗怡. 伊利石“开形指数”的地质意义探讨 [J]. *沉积学报*, 1987, 5: 48-57. [WANG Shiyi. Geological significance of illite opening index[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5: 48-57.]
- [13] 刘东生等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 191-263. [LIU Dongsheng et al. *Loess and Environment* [M]. Beijing: Science Press, 1985, 191-263.]
- [14] Krumm S, Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, 9: 671-677.
- [15] Esquevin J. Influence de la composition chimique des illites sur-crystallinité. *Bull Centre Rech Rau-SNPA*, 1969, 3: 147-153.
- [16] 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.]
- [17] Ming J, Li A, 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: 174-186.
- [18] 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.]
- [19] 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.]
- [20] 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. Variations in clay mineral input in the Parece Vela Basin since the last 2.1 Ma and their response to the mid-Pleistocene

- transition[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(6): 150-161.]
- [21] Li T, Zhao J, Sun R, et al. The variation of upper ocean structure and paleoproductivity in the Kuroshio source region during the last 200 kyr[J]. *Marine Micropaleontology*, 2010, 75: 50-61.
- [22] 赵京涛, 常凤鸣, 李铁刚等. 近 190 ka BP 以来菲律宾海黑潮源区的碳酸盐旋回及其控制因素 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(6): 1401-1410. [ZHAO Jingtao, CHANG Fengming, LI Tiegang et al. Carbonate cycle and its control factors in Kuroshio source region during the last 190 ka BP. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1401-1410.]
- [23] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300, 000-year chronostratigraphy[J]. *Quaternary Research*, 1987, 27: 1-29.
- [24] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1965, 76: 803-832.
- [25] Ji J, Chen J, Lu H. Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, Central China[J]. *Clay Minerals*, 1999, 34: 525-532.
- [26] 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.
- [27] 张天乐和王宗良. 中国黏土矿物的电子显微镜研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1978, 1-175. [ZHANG Tianle, WANG Zongliang. *Electron Microscopic Study of Clay Minerals in China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978, 1-175.]
- [28] Горбунова З. И. 蒙脱石在世界大洋沉积物中的堆积史 [J]. *海洋石油*, 1990, 10(6): 45-48. [Горбунова З. И. The Accumulation History of Montmorillonite in World Ocean Sediments[J]. *Offshore Oil*, 1990, 10(6): 45-48.]
- [29] 游仲华. 太平洋中部沉积物中黏土矿物的初步研究 [J]. *沉积学报*, 1985, 3(3): 115-124. [YOU Zhonghua. Preliminary study on the clay minerals of sediments in the middle of the Pacific Ocean[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(3): 115-124.]
- [30] 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黏土矿物 [J]. *沉积学报*, 1993, 11(1): 111-120. [ZHANG Deyu. 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.]
- [31] 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. 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.]
- [32] Rampino M R, Stephen S. Climate-volcanism feedback and the Toba eruption of ~74, 000 years ago. *Quaternary Research*, 1993, 40: 269-280.
- [33] Chamley H. Clay sedimentation and paleoenvironment in the Shikoku Basin since the Middle Miocene (Deep Drilling project, Leg 58, North Philippine Sea). Initial reports of DSDP, 1980, 58: 669-678.
- [34] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 2001, 292: 677-686.
- [35] Hovan S A, Rea D K, Pisias N G. Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in northwest Pacific sediments. *Paleoceanography*, 1991, 6: 349-370.
- [36] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 159-195.
- [37] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- [38] An Z, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 1991, 18: 125-132.
- [39] Zhang X Y, Lu H Y, Arimoto R, et al. Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: two 250-kyr loess records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202: 637-643.
- [40] Guo Z T, Berger A, Yin Q Z, et al. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records[J]. *Climate Past*, 2009, 5: 21-31.
- [41] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Review*, 1991, 10: 297-317.
- [42] Zhang Z, Jiang F, Li T et al. Sea-level changes controlled detrital sediment inputs to the Bicol Shelf in the western Philippine Sea since 150 ka[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(4): 1153-1168.
- [43] Bolliet T, Holbourn A, Kuhnt W, et al. Mindanao Dome variability over the last 160 kyr: Episodic glacial cooling of the West Pacific Warm Pool[J]. *Paleoceanography*, 2011, 26: PA1208.
- [44] Jose A M, Francisco R V, Cruz N A. A study on the impact of climate variability/change on water resources in the Philippines[J]. *Journal of Philippine development*, 1999, 26: 115-134.
- [45] Lyon B, Cristi H, Verceles E R et al. Seasonal reversal of the ENSO rainfall signal in the Philippines[J]. *Geophysics Research Letters*, 2006, 33: L24710.
- [46] Hughen K A, Schrag D P, Jacobsen S B, et al. El Niño during the Last Interglacial Period recorded by a fossil coral from Indonesia[J]. *Geophysics Research Letters*, 1999, 26: 3129-3132.
- [47] Ropelewski C F, Halpert M S. Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9: 1043-1059.
- [48] Mason S J, Goddard L. Probabilistic precipitation anomalies associated with ENSO[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82: 619-638.
- [49] 刘天昊, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 450ka 以来冰期旋回中冷暖期热带太平洋的类 ENSO 状态 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 646-657. [LIU Tianhao, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. ENSO like state in the tropical Pacific Ocean during the cold and warm periods of the glacial cycle since 450ka[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 646-657.]
- [50] Kissel C, Laj C, Kienast M, et al. Monsoon variability and deep oceanic circulation in the western equatorial Pacific over the last climatic cycle: Insights from sedimentary magnetic properties and sortable silt[J]. *Paleoceanography*, 2010, 25: PA3215.