



近1 Ma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

肖春晖, 王永红, 林间

引用本文:

肖春晖, 王永红, 林间. 近1 Ma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.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[16 ka以来冲绳海槽中南部沉积物物源演化及其对古气候的响应](#)

Sediment Provenance Change and Its Response to Paleoclimate Change in the Middle Okinawa Trough since 16 ka
沉积学报. 2018, 36(6): 1157–1168 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.102>

[杭州湾潮滩沉积物黏土矿物空间差异与物源指示](#)

Spatial Difference and Provenance of Clay Minerals as Tracers of Intertidal Sediments in Hangzhou Bay
沉积学报. 2016, 34(2): 315–325 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.010>

[新疆柴窝堡盆地南缘晚新生代陆源沉积物岩石磁学特征及其古环境意义](#)

Rock Magnetic Properties and Paleoclimate Implications of Late Cenozoic Terrigenous Succession from the Southern Chaiwopu Basin, Xinjiang
沉积学报. 2017, 35(3): 516–526 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.010>

[阿尔金新近纪红黏土粒度特征及古气候记录](#)

Grain Size Characteristics and Paleoclimate Records of the Neogene Red Clay in Altun, Western China
沉积学报. 2019, 37(2): 309–319 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.129>

[泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素](#)

Grain-size Distribution Patterns of the Surface Sediments and Their Influential Factors in Lake Lugu
沉积学报. 2016, 34(4): 679–687 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.008>

文章编号:1000-0550(2022)02-0508-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.091

近 1 Ma 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

肖春晖¹,王永红¹,林间^{2,3}

1.海底科学与探测技术教育部重点实验室,中国海洋大学海洋地球科学学院,山东青岛 266100

2.美国伍兹霍尔海洋研究所,马萨诸塞 伍兹霍尔 02543

3.中国科学院南海海洋研究所,广州 510301

摘要 通过对西太平洋帕里西维拉海盆的C-P19柱状样沉积物进行磁化率各向异性测量和古地磁分析,建立了磁性地层年代框架,并结合粒度组分和黏土矿物分析,揭示了沉积物中蕴含的物源和古气候信息。古地磁结果表明,C-P19柱状样的底界年龄小于1.072 Ma,为更新世以来的沉积,沉积过程可以划分为两个阶段,沉积速率分别为4.0 mm/kyr(约1~0.78 Ma)和3.6 mm/kyr(0.78 Ma~至今)。粒度和黏土矿物结果表明,研究区的沉积物类型以粉砂和砂质粉砂为主,少部分为黏土质粉砂;黏土矿物组成中伊利石+绿泥石的平均含量高达70%。利用SPSS对粒度参数进行主成分分析可知,研究区的粗颗粒物来源主要为帕里西维拉海盆内或周围海脊的火山岛弧碎屑物质,细颗粒组分主要来自亚洲大陆风尘。利用2~4 μm沉积物粒度组分百分含量和(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石的比值作为替代指标反映了研究区亚洲风尘物质贡献比例的波动,进而揭示了1 Ma以来风尘源区气候干湿程度以及东亚冬季风强度的演变过程。

关键词 物源;古气候;帕里西维拉海盆;西太平洋;亚洲风尘

第一作者简介 肖春晖,女,1991年出生,博士,海洋沉积学,E-mail: chunhuixiao@qq.com

通信作者 王永红,女,教授,E-mail: yonghongw@ouc.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

西太平洋边缘海具有典型且复杂的沟—弧—盆地地形体系,其独具特色的构造、地形和沉积作用及三者的关系日益受到关注^[1-2]。帕里西维拉海盆地理位置特殊,它东临西马里亚纳海脊,南部是复杂的沟弧和断裂带系统,西连帕劳海脊,北接四国海盆,然而索夫干断裂基本阻挡了海盆的东部接受北部的沉积物源(图1),使之成为一个近乎封闭的海盆。海盆平均水深4 800 m左右,普遍位于碳酸盐补偿深度之下^[3]。由于复杂地形的影响,海盆内缺乏陆源物质,是边缘海陆源碎屑沉积物缺乏区域,因而研究该盆地的物质来源有助于认识西太平洋复杂地形控制下的深水沉积过程。

另外,帕里西维拉海盆位于东亚冬季风的下风向,季风影响明显,海盆由于较少受到陆源碎屑物质的影响,同时由于海盆沉积速率较慢^[2,4-5],缺乏海底滑塌沉积或浊流沉积,较少受到周边海山或海脊物质稀释和底层洋流侵蚀作用的干扰,海盆深水区沉积物中风尘组分通量最能代表亚洲大陆风尘对研究区的实际贡献量^[6],因而研究区是研究风尘源区气候干湿程度以及东亚冬季风强度演变过程的理想场所。深海沉积物的粒度组成是追踪物源和古气候变化的重要依据。大陆风尘经过长距离搬运最后沉积于深海海盆,其粒度组成通常介于2~16 μm,尤其集中在2~4 μm,与远洋沉积物的粒度特征具有明显的差异,因此可以通过粒度参数来识别深海沉积中的风尘物质^[7]。前人已经利用该指标成功在西太平洋^[8-9]、北在

收稿日期:2020-02-18; **收修改稿日期**:2020-09-30

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402602);国家自然科学基金(41376054,41176039,41410304022,91628301,U1606401);国家海洋局公益性项目(201405037);中国科学院项目(QYZDY-SSW-DQC005, Y4SL021001) [**Foundation**: National Key R&D Program of China, No. 2016YFC 0402602; National Natural Science Foundation of China, No. 41376054, 41176039, 41410304022, 91628301, U1606401; Public Welfare Project of the State Oceanic Administration, No. 201405037; Chinese Academy of Sciences Project, No. QYZDY-SSW-DQC005, Y4SL021001]

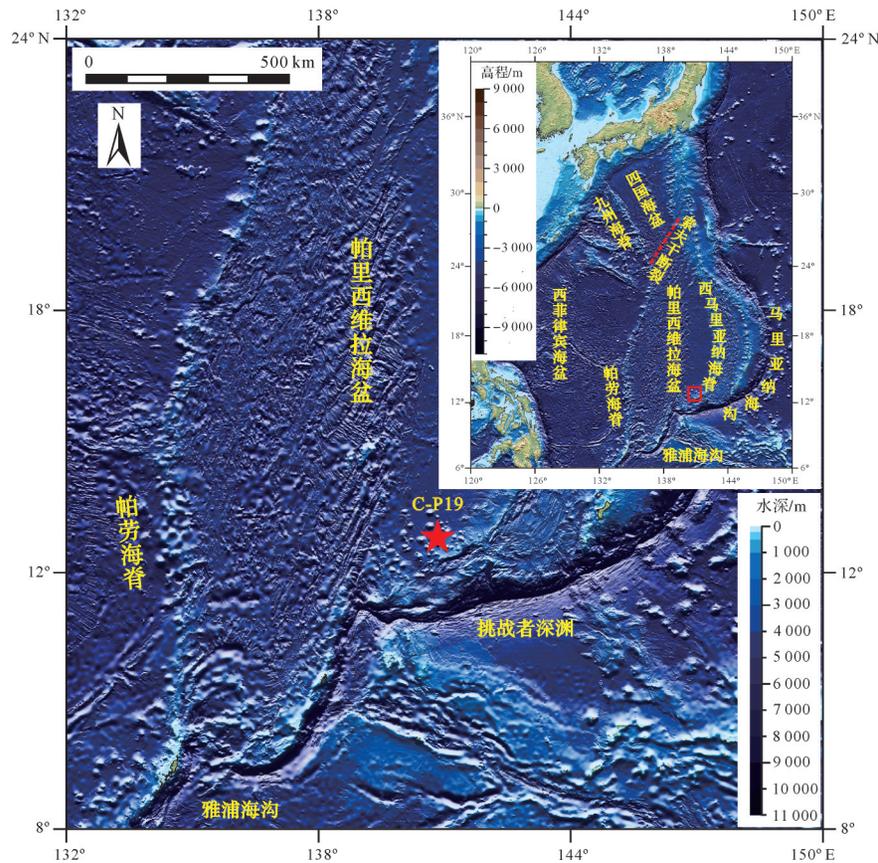


图1 研究区样品位置图

Fig.1 Location of study area

太平洋中部^[10]以及西北太平洋帕里西维拉海盆西部^[11]等深海环境的沉积物中建立了晚新生代以来风尘组分粒度参数与亚洲内陆气候和东亚冬季风强度之间的关联。黏土矿物是海洋沉积物中的重要组成部分,它们主要由母岩在特定的古环境下风化而成,由于其具有颗粒细小、类质替换等特性,保存了各种地质信息,对物源判别具有重要指示意义^[12-16]。

我国在菲律宾海以及帕里西维拉海盆的研究虽然起步较晚,但目前物源、古气候、古海洋及构造方面的研究在国际上具有一定的优势^[5-6,17-27]。目前结果表明,帕里西维拉海盆中沉积物的来源可分为盆内来源和盆外来源两部分,其中盆内的物源主要来自周围岛弧和海脊的火山物质,而盆外物源主要为海流输送的物质以及陆源风尘物质经过水柱沉降到达海底^[11,28-32]。前人关于海洋沉积的研究多集中在帕里西维拉海盆西部^[2,11,28-31,33],鲜有学者涉及海盆东部地区。本文利用帕里西维拉海盆东部的最新柱状样沉积记录,基于古地磁年代地层,以粒度和黏土矿物参数为替代性指标,研究了1 Ma以来亚洲风尘物质输入量与东亚冬季风的阶段性演化特征,为研究更

新世以来东亚大陆古气候演化提供更多证据,也为探讨深海的沉积过程提供了基础资料。

1 材料方法

本文研究的C-P19重力柱状样(12.81°N, 140.83°E)由“实验3”考察船于2016年冬季航次取得,水深4 171 m,位于西太平洋帕里西维拉海盆东南部(图1)。C-P19柱状样沉积物为黄褐色—褐色—棕褐色深海黏土,其颜色随深度增加而增加,上部沉积物含水量高,向下随着沉积物颜色加深,含水量也随之减少,沉积物压实至致密。柱状样总长度为378 cm,除去顶部缺失和底部扰动的样品,实际用于研究的样品长度为372 cm。将柱状样纵向对半剖开,然后用2 cm×2 cm×2 cm的塑料立方体小盒在岩心的新鲜面上进行连续定向取样,取样间隔为2 cm,共取得样品184个。

1.1 磁化率各向异性(AMS)测量

使用MFK1-FA Kappabridge磁力仪测量了全部样品(N=184)的磁化率各向异性(AMS),并计算了磁

各向异性度($P=K_1/K_3$)、形状参数 $[T=(K_2-K_1-K_3)/(K_1-K_3)]$ 、磁线理($L=K_1/K_2$)和磁面理($F=K_2/K_3$)等参数。其中, K_1 代表磁化率各向异性椭球的 K_1 最大轴, K_2 是中间轴, K_3 为最小轴。AMS测量在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室完成。

1.2 古地磁测量

古地磁测量在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室完成,测量仪器为2G-760 U-Channel型低温超导磁力仪,仪器灵敏度为 $2 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$ 。为了排除地球磁场的干扰,保证数据的准确和可靠,所有实验均在最大磁场小于300 nT的磁屏蔽室内进行。

首先对所有样品进行天然剩磁(NRM)测量,然后对样品分15步进行逐步交变退磁(退磁步骤分为0、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、70和80 mT)和剩磁测量。古地磁数据处理使用PaleoMag软件,选择标准为连续5个退磁点,最大角偏差(Maximum Angular Deviation, MAD)小于 10° 时,共183个(99.5%)样品获得了稳定的特征剩磁。最大角偏差由磁偏角和磁倾角联合计算得出, MAD越小,说明拟合获得的沉积剩磁方向越稳定,为了确保数据准确可靠,本文已剔除了 $\text{MAD} > 15^\circ$ 的数据。

1.3 粒度分析

对帕里西维拉海盆C-P19柱状样的184个样品进行了粒度分析。为了尽可能提取陆源信息,避免钙质、硅质生物的干扰,样品上机测试前需要进行预处理,具体方法如下:取约0.3 g样品放入15 mL离心管中,依次加入超纯水、 H_2O_2 溶液(15%)、冰乙酸溶液(20%)和2.0 mol/L的 Na_2CO_3 溶液,分别去除沉积物中的海盐、有机质、碳酸盐和生物硅组分。最后,上机测试前加入5 mL六偏磷酸钠(0.05 mol/L)分散样品,防止发生絮凝。

粒度分析使用Mastersizer-2000型(英国)激光粒度仪,粒径间距为 $1/4 \phi$,重复测量的相对误差小于2%。本研究选择平均粒径(M_z)、分选系数(σ_1)、偏度(S_{k1})和峰度(K_c)4个粒度参数,采用McManus矩法^[34]计算。所有样品的粒度测量工作在海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。

1.4 黏土矿物分析

本文对184个C-P19柱状样沉积物样品进行黏土矿物提取,由于样品量少且沉积物中黏土组含量较低,仅106个样品成功地提取出了黏土矿物,其

深度主要集中在0~300 cm,300 cm以下仅4个样品成功提取出黏土矿物。黏土矿物的提取和定向薄片的制作在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成,X射线衍射分析测试在中国科学院青岛生物能源与过程研究所公共实验室完成。黏土矿物的分离提取是依据文献[35]中的差速离心法,然后采用滴片法制成定向薄片,待其自然风干后置于含有乙二醇溶液的干燥器中,55℃饱和24 h以后上机测试,测试仪器为D8 Advance型(德国)X射线衍射仪。

黏土矿物相对含量的半定量计算是利用jade6.5软件在乙二醇曲线上进行的。使用乙二醇曲线上蒙脱石(17 Å)、伊利石(10 Å)、绿泥石和高岭石(7 Å)的衍射峰峰面积与其强度因子相乘,其强度因子分别为1、4和2;再从绿泥石(3.54 Å)和高岭石(3.58 Å)的强度值求得绿泥石和高岭石的含量比例,根据其各自强度系数,将四种主要黏土矿物的特征峰峰面积之和校正为100%,来计算各自的相对含量。在乙二醇曲线上,伊利石的结晶度可以用伊利石(10 Å)衍射峰的半峰宽(FWHM)来表示,蒙脱石的结晶度则由蒙脱石(17 Å)衍射峰的半峰宽(PWHM)来表示。结晶度数值越低,说明结晶度越好;蒙脱石丰度(S/I)为蒙脱石(17 Å)强度和伊利石(10 Å)强度的比值,可以反映二者的相对重要性。

2 实验结果

2.1 古地磁结果

2.1.1 AMS结果

AMS可以判断沉积物沉积后泥沙扰动存在的可能性^[36],为了建立准确可信的磁性地层年代,对所有样品的磁化率各向异性($N=184$)进行了测量。C-P19柱状样的AMS结果如图2所示,最大轴(K_1)倾角主要集中在 $0^\circ \sim 10^\circ$,平均为 7.2° ,沿水平面分布,最小轴(K_3)倾角主要集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$,平均 74.6° ,基本垂直于水平面(图2a)。磁线理(L)和磁面理(F)(图2b)以及形状参数(T)与各向异性度(P)(图2c)的关系图表明样品磁化率椭球以扁椭球为主。此外,C-P19柱状样顶、底部样品的 K_1 轴和 K_3 轴倾角分布范围集中,曲线整体呈平稳变化且无异常突变(图2d)。

上述AMS结果表明,C-P19柱状样沉积物大部分样品具有典型的未扰动原生沉积的组构特征^[36-37],因而据此柱状样古地磁结果建立的磁性地层年龄也是正确且可靠的。

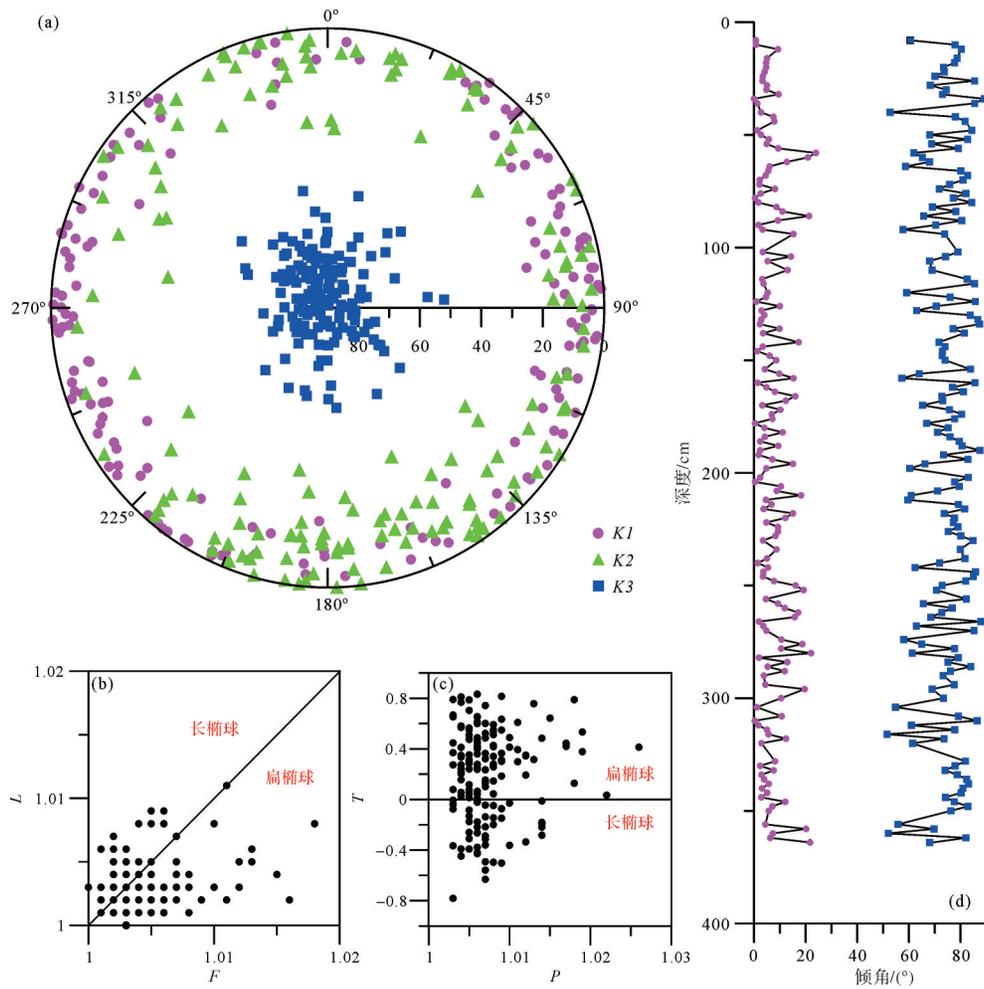


图2 C-P19 低频磁化率各向异性结果

(a) AMS 数据的下半球等面积投影; (b) 磁线理(L)和磁面理(F)的相关图; (c) 形状参数(T)和磁各向异性度(P)的相关图; (d) 最大轴(K_1)和最小轴(K_3)倾角分布图。粉色圆圈、绿色三角和蓝色正方形分别表示最大轴(K_1)、中间轴(K_2)和最小轴(K_3)的磁化率方向。

Fig.2 Anisotropy of low-frequency magnetic susceptibility (AMS) results from Core C-P19

(a) lower hemisphere equal-area projections of AMS data; (b) plot of lineation (L) vs. foliation (F); (c) plot of shape parameter (T) versus anisotropy degree (P); and (d) plot of inclinations of the maximum (K_1) and minimum (K_3) axes. Pink circles, green triangles and blue squares represent directions of maximum (K_1), intermediate (K_2) and minimum (K_3) susceptibility, respectively

2.1.2 交变退磁结果

交变退磁结果得到了所有样品的特征剩磁方向,不同深度的样品均可在 10~60 mT 分离出稳定的特征剩磁。退磁投影图显示(图3)多数样品从 10 mT 开始,便可获得稳定的特征剩磁,且退磁曲线呈现出向原点拟合的线性变化趋势,随着退磁场强度递增,样品的剩余磁化强度逐渐下降,大部分样品在交变退磁场强度为 60 mT 时已经退去天然剩磁的 80%,甚至更多,说明退磁结果理想且可靠。

2.1.3 C-P19 柱状样古地磁年龄框架和沉积速率

选择 183 个样品用于建立 C-P19 柱状样极性柱,由于重力柱状样品在取样过程中,无法进行水平定向,只能对顶、底方向进行标识,所以样品的磁偏角

不具有实际意义,故而本文仅用磁倾角来建立磁极性柱。C-P19 柱状样的极性柱,共确定了 2 个正极性段(N1、N2)和 1 个负极性段(R1)。

前人研究表明^[38-42],自 12 Ma 以来帕里西维拉海盆停止扩张且第四纪以来处于持续缓慢沉降中,沉积连续且相对稳定,不存在地层缺失的情况,因而极性柱也是完整的连续沉积^[2,41]。在上述前提下,将本次研究获取的极性结果与标准地磁极性年表(Geomagnetic Polarity Time Scale, GPTS)^[43]进行对比,结果表明,C-P19 柱状样的两个正极性段(N1、N2)与 GPTS 的 C1n、C1r.1n 正极性组合之间吻合良好,负极性段 R1 与 GPTS 的 C1r.1r 段相对应。C-P19 柱状样的底界位于 C1r.1n 内,其年龄应小于 1.072 Ma^[44](图4)。

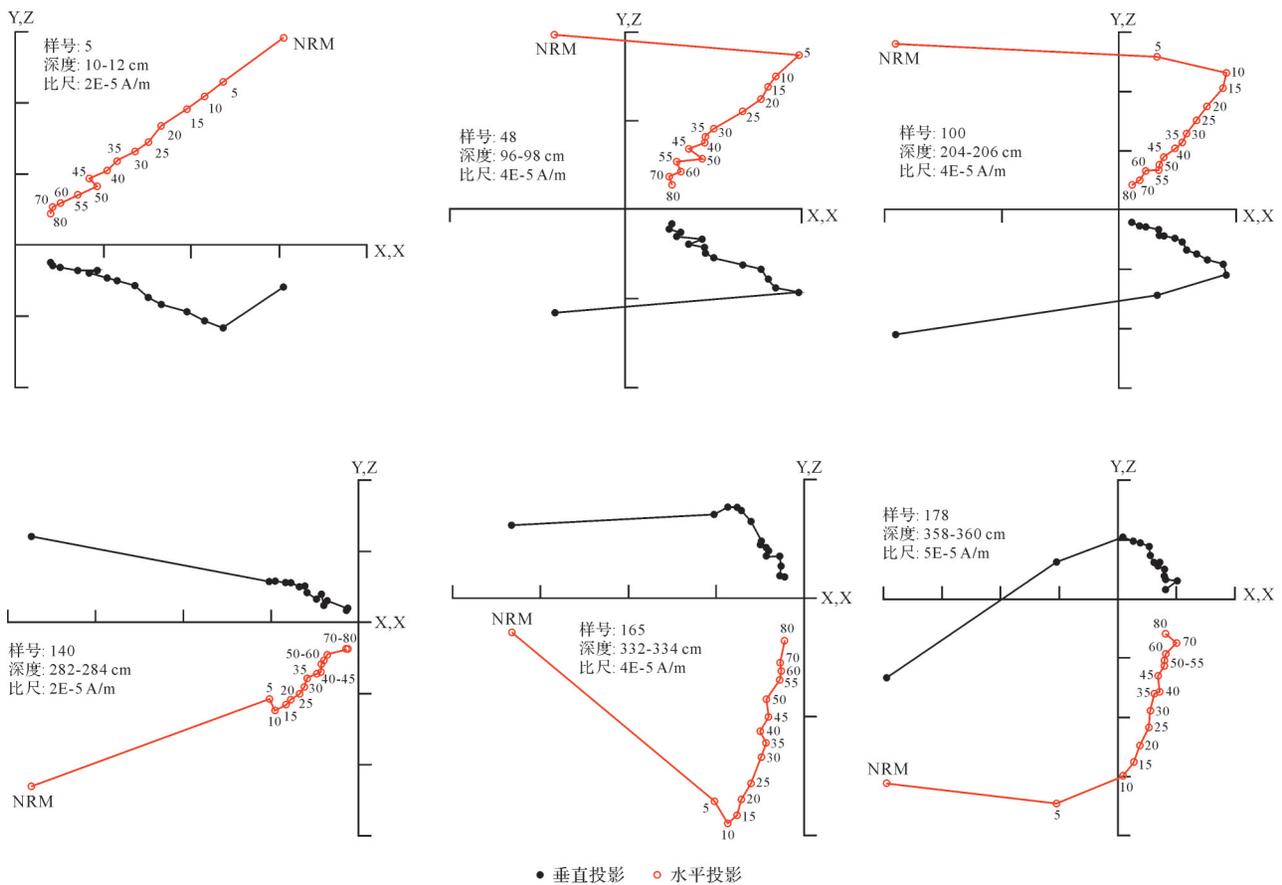


图3 典型样品的交变退磁曲线

Fig.3 Typical orthogonal component plots for the samples

根据上述对比方案, C-P19柱状样的B/M界限(0.78 Ma)位于282 cm处, 0~282 cm段, 为正极性, 与布容极性时(Brunhes)相对应; 282~374 cm段, 以负极性为主, 与松山极性时(Matuyama)相对应, 期间包含深度为366~374 cm段的正极性时, 属于贾拉米洛(Jaramillo)亚极性时^[43], 柱状样底界也位于C1r.1n内, 年龄小于1.072 Ma, 为更新世以来的沉积。布容时期(A段)的沉积厚度为2.82 m, 沉积速率为3.6 mm/ka, 松山反极性时(B段)内沉积厚度为0.92 m, 沉积速率为4.0 mm/ka, 整根柱状样的平均沉积速率约3.7 mm/ka。

2.2 C-P19柱状样粒度分析结果

根据Shepard沉积物分类方案, C-P19柱状样沉积物多属于粉砂和砂质粉砂, 少部分样品属于黏土质粉砂, 个别样品属于粉砂质砂(图5)。柱状样沉积物平均粒径整体波动较大, 介于5.3~86.8 μm , 平均值为20.0 μm ; 分选系数的变化范围介于1.1~2.9, 平均值为1.6, 分选较差; 偏态的整体变化介于-0.5~0.1, 平均值为-0.3, 为负偏; 峰态变化范围为0.7~1.4, 平

均1.1, 峰态呈中等—窄(表1)。

根据沉积物各个粒度参数的垂向变化特征, C-P19柱状样可以被清晰的划分为A、B、C、D、E五段(图6、表1)。

E段(312~374 cm): 沉积物以砂质粉砂为主, 含部分粉砂, 该段粒度最粗, 砂含量也最高, 且波动范围较大, 介于13.3~53.1%, 平均31.0%, 黏土含量始终处于较低水平, 平均8.5%, 无明显波动。沉积物的平均粒径介于21.9~86.8 μm , 平均32.6 μm , 分选系数波动较大, 且分选差, 偏度为负偏, 峰态呈中等峰态。该段沉积物的粒度频率曲线呈多峰(图7i, j)。

D段(232~312 cm): 沉积物主要为砂质粉砂和粉砂, 粒度较E段略细, 砂含量也明显减小, 但波动范围仍较大, 黏土含量与E段相近, 仍稳定地处于较低水平, 而粉砂含量明显增加, 平均可达72.0%。该段沉积物的平均粒径介于20.1~41.1 μm , 平均28.6 μm , 分选差, 偏度呈极负偏, 峰态呈窄峰态。该段沉积物的粒度频率曲线与E段相似, 也呈多峰分布(图7g, h)。

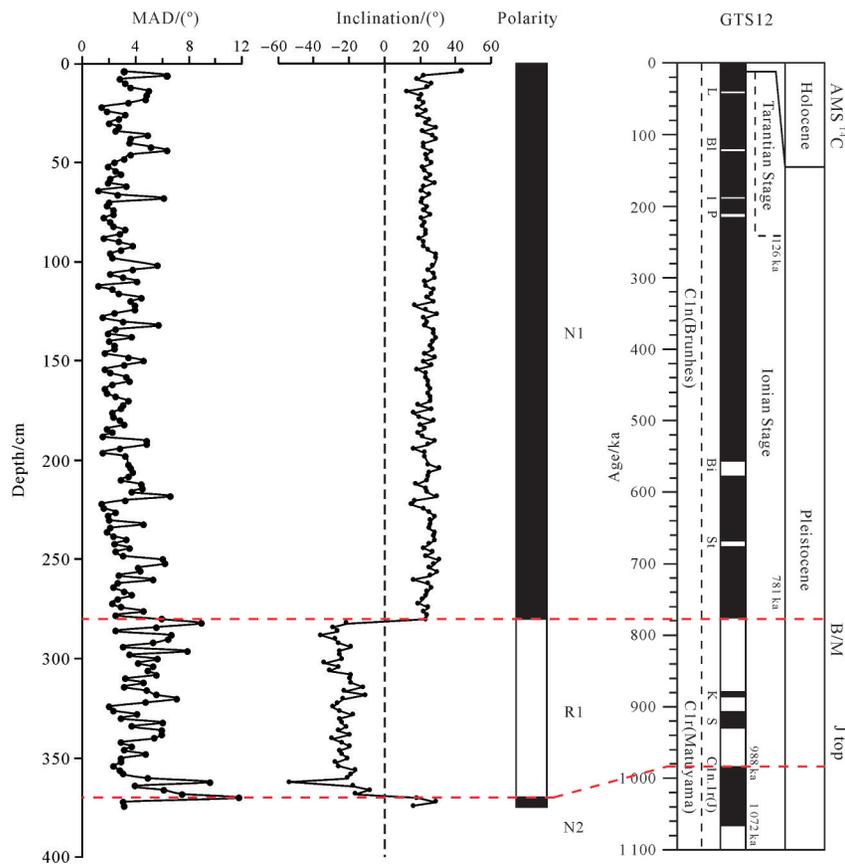


图4 C-P19柱状样的磁性地层框架与GTS12^[43-44]对比图

N表示正常极性,R表示反转极性,L: Laschamp; Bl: Blake; I: Iceland Basin; P: Pringle Falls; Bi: Big Lost; St: Stage 17; K: Kamikatsura; S: Santa Rosa; J: Jaramillo. 图中Kamikatsura和Santa Rosa极性事件的年龄据文献[44]绘制

Fig.4 Magnetostratigraphy of core C-P19 correlated with GTS12^[43-44]

Normal polarity intervals labeled N; reverse polarity intervals labeled R. L = Laschamp; Bl = Blake; I = Iceland Basin; P = Pringle Falls; Bi = Big Lost; St = Stage 17; K = Kamikatsura; S = Santa Rosa; J = Jaramillo. Ages of Kamikatsura and Santa Rosa polar events from reference[44]

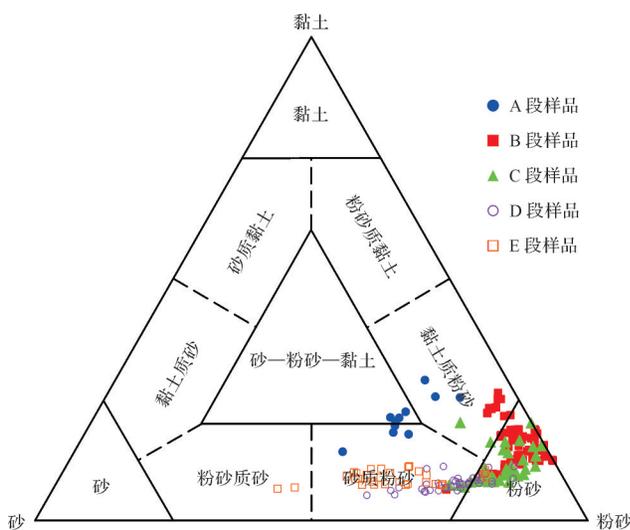


图5 Shepard 沉积物分类三角投点图

Fig.5 Shepard sediment classification triangle plot

C段(160~232 cm):沉积物以粉砂为主,偶见黏土质粉砂和砂质粉砂,该段沉积物的粒度明显较D、

E段细,平均砂含量降至9.9%,粉砂含量增加,高达79.1%,黏土含量略增,平均11.0%。沉积物平均粒径介于7.3~29.3 μm,平均19.4 μm,分选差,偏度呈极负偏,峰态呈窄峰态。该段沉积物的粒度频率曲线呈双峰(图7e)和多峰(图7f)分布。

B段(24~160 cm):该段沉积物的粒度最细,以粉砂为主,含部分黏土质粉砂,砂含量最小,平均仅5.4%,粉砂平均含量可高达79.1%,黏土平均含量也增至15.5%。沉积物平均粒径介于5.3~31.0 μm,平均13.5 μm,分选差,偏度呈负偏,峰态呈中等峰态。该段沉积物的粒度频率曲线呈双峰(图7c)和多峰(图7d)分布。

A段(4~24 cm):A段沉积物粒度再次变粗,以砂质粉砂为主,含部分黏土质粉砂,粉砂含量明显减少,平均为56.3%,而平均砂含量增至22.4%,该段的黏土含量最高,平均21.2%。沉积物的平均粒径介于10.6~

表1 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样粒度参数统计表
Table 1 Grain size parameters of core C-P19 in the Parece Vela Basin

分段	取值	平均粒径/ μm	分选系数	偏度	峰态	砂/%	粉砂/%	黏土/%
A	平均值	16.3	2.1	-0.1	0.8	22.4	56.3	21.2
	最小值-最大值	10.6~27.7	2.0~2.2	-0.4~0.1	0.7~0.9	10.3~37.3	48.7~64.4	14~28.9
B	平均值	13.5	1.5	-0.2	1.1	5.4	79.1	15.5
	最小值-最大值	5.3~31.0	1.2~2.0	-0.4~0.1	0.9~1.3	0.0~22.4	62.5~87.9	6.1~37.3
C	平均值	19.4	1.5	-0.4	1.1	9.9	79.1	11.0
	最小值-最大值	7.3~29.3	1.1~2.0	-0.4~0.1	0.9~1.3	0.0~21.5	67.1~85.3	6.6~20.1
D	平均值	28.6	1.5	-0.4	1.2	20.5	72.0	7.5
	最小值-最大值	20.1~41.1	1.4~1.9	-0.5~-0.2	0.9~1.4	7.6~37.5	57.6~82.5	5.0~10.9
E	平均值	32.6	1.9	-0.3	1.1	31.0	60.5	8.5
	最小值-最大值	21.9~86.8	1.5~2.9	-0.4~-0.1	0.9~1.2	13.3~53.1	40.7~77.6	6.3~11.0
整体	平均值	20.0	1.6	-0.3	1.1	14.9	73.1	12.1
	最小值-最大值	5.3~86.8	1.1~2.9	-0.5~0.1	0.7~1.4	0.0~53.1	40.7~87.9	5.0~37.3

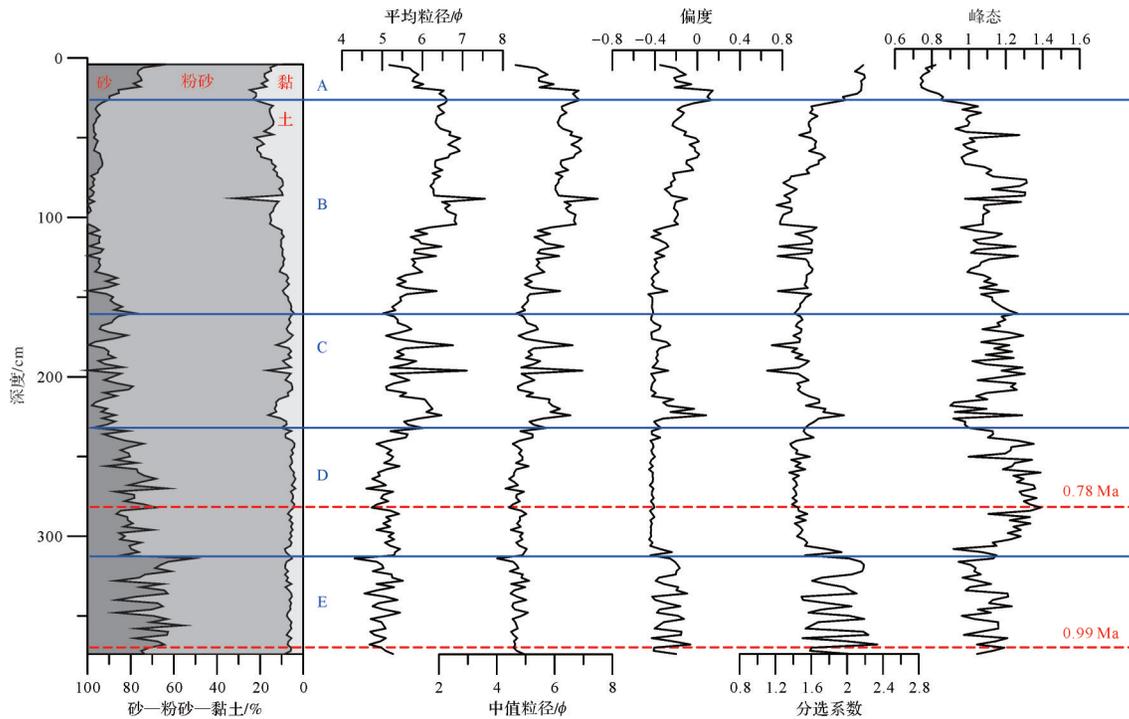


图6 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样的粒度参数垂向分布特征

Fig.6 Vertical plot of grain size parameters for core C-P19, Parece Vela Basin

27.7 μm , 平均 16.3 μm , 该段分选最差, 偏度呈负偏, 峰态呈宽峰态。该段沉积物的粒度频率曲线呈多峰 (图 7a, b) 分布, 但与前四段相比, 可见明显不同。

2.3 C-P19 柱状样黏土矿物分析结果

帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样中黏土矿物含量主要以伊利石为主, 整根柱样的平均值为 59.1%, 蒙脱石次之, 为 21.3%, 二者含量随深度变化的垂向曲线呈镜像分布 (图 8), 绿泥石和高岭石的平均含量均较低, 分别为 13.5% 和 6.1%。伊利石结晶度平均 0.27, 结晶度较高, 说明其源区气候寒冷, 且水解作用

弱, 一般指示陆地来源; 伊利石风化指数的平均值为 0.20, 远小于 0.5, 指示其经历了较强的物理风化过程 (表 2)。分析 C-P19 柱状样沉积物各黏土矿物含量、结晶度及相关参数的垂向分布特征发现, C-P19 柱状样沉积物的黏土矿物变化特征也可以划分为与之前粒度参数相吻合的五段 (图 8)。

E 段 (312~374 cm): 由于该段粒度最粗, 且黏土含量非常少, 仅一个样品 (342 cm 处) 成功提取出了黏土矿物, 其结果显示该段黏土矿物以蒙脱石和伊利石为主, 其中蒙脱石含量较高, 可达 48.5%, 伊利石

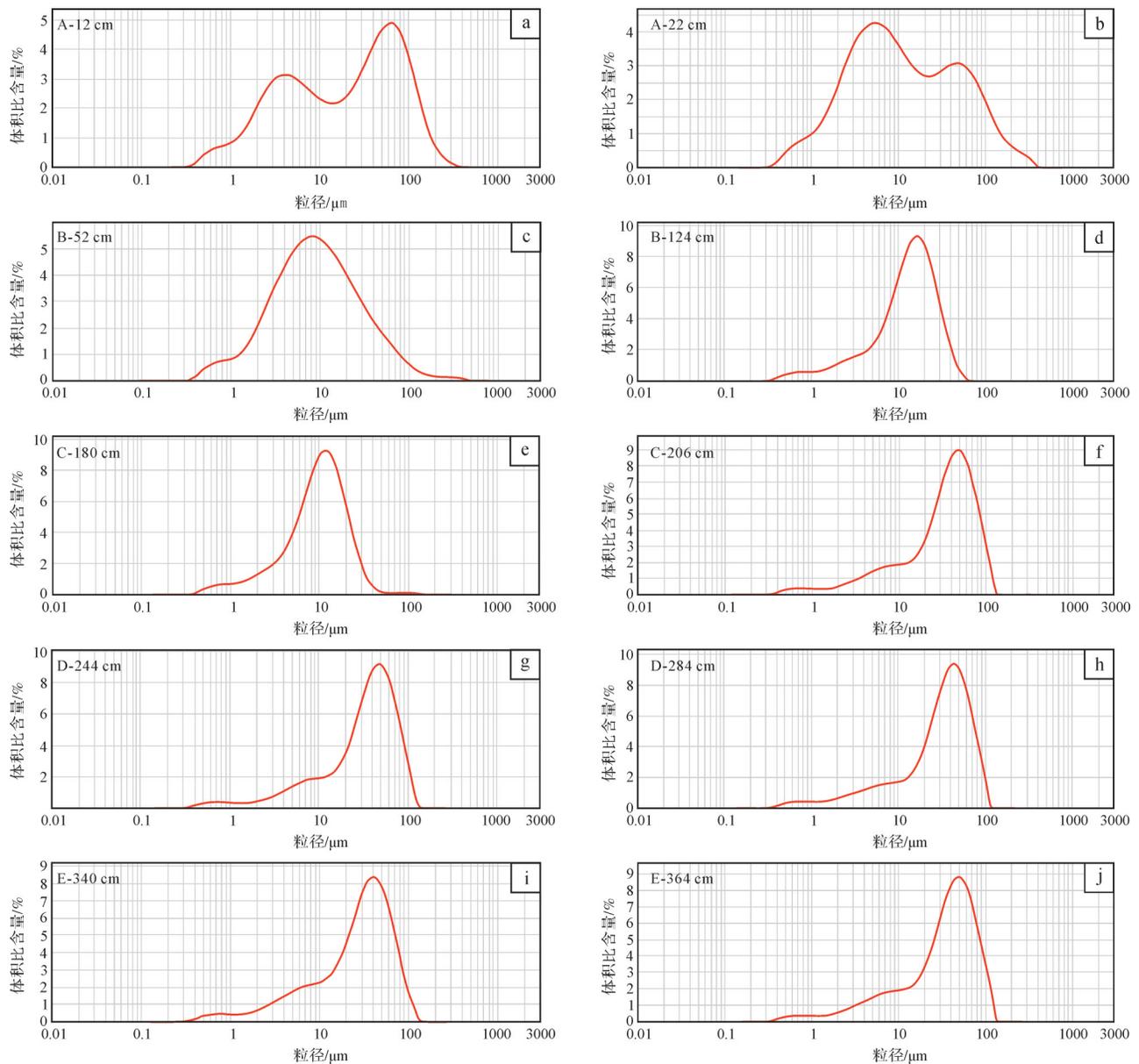


图7 帕里西维拉海盆C-P19柱状样样品粒径分布的体积百分比

(a, b)为A段代表样品;(c, d)为B段代表样品;(e, f)为C段代表样品;(g, h)为D段代表样品;(i, j)为E段代表样品

Fig.7 Percentage by volume of particle size, core C-P19, Parece Vela Basin, for representative samples from:

(a, b) interval A; (c, d) interval B; (e, f) interval C; (g, h) interval D; and (i, j) interval E

含量略低于蒙脱石,为41.8%,而绿泥石和高岭石含量总和占比低于10%。

D段(232~312 cm):该段各曲线均呈现较大波动,蒙脱石含量呈明显递减趋势,伊利石变化与之相反,绿泥石含量明显增加,高岭石含量波动明显,较E段略增。伊利石结晶度波动较小,且结晶度好,伊利石化学指数和S/I曲线波动频繁且振幅较大。

C段(160~232 cm):该段各曲线仍波动明显,但波动范围和幅度较D段有所减小。各黏土矿物曲线

波动频繁,除蒙脱石含量减少外,其余三种黏土矿物的含量均略增。伊利石结晶度和化学指数波动幅度增加,但均值仍与D段相近,S/I均值在该段最小,说明伊利石在C段所占比重最大。

B段(24~160 cm):该段各曲线波动频繁,蒙脱石和伊利石周期性旋回明显,且二者互为镜像,绿泥石和高岭石含量相对稳定,无明显的大幅波动,伊利石结晶度和化学指数波动频繁,但振幅较小,均值与C段接近,S/I逐渐增大,说明蒙脱石含量开始回增。

表2 C-P19柱状样黏土矿物含量及矿物学特征

Table 2 Clay mineral content and mineralogical characteristics for core C-P19

分段	取值	黏土矿物含量/%				伊利石 结晶度	伊利石 化学指数	蒙脱石/ 伊利石
		蒙脱石	伊利石	绿泥石	高岭石			
A	平均值	23.7	58.1	12.0	6.2	0.32	0.24	0.58
	最小值~最大值	16.2~33.1	51.1~65.8	9.4~14.7	5.0~7.9	0.29~0.37	0.20~0.30	0.38~0.80
B	平均值	21.8	58.8	13.5	5.9	0.27	0.20	0.54
	最小值~最大值	4.1~42.4	41.0~78.8	7.4~17.8	4.0~8.7	0.22~0.47	0.12~0.29	0.19~1.39
C	平均值	15.6	61.7	15.9	6.8	0.25	0.20	0.36
	最小值~最大值	6.1~29.1	52.5~71.1	10.5~26.5	3.2~9.7	0.20~0.32	0.11~0.28	0.17~0.70
D	平均值	23.9	58.4	11.5	6.2	0.25	0.18	0.50
	最小值~最大值	3.6~38.2	45.6~75.2	8.2~16.3	4.2~9.5	0.21~0.29	0.13~0.24	0.20~0.91
E	342 cm	48.5	41.8	5.5	4.1	0.26	0.15	0.98
整体	平均值	21.3	59.1	13.5	6.1	0.27	0.20	0.51
	最小值~最大值	3.6~48.5	41.0~78.8	5.5~26.5	3.2~9.7	0.20~0.47	0.11~0.30	0.17~1.39

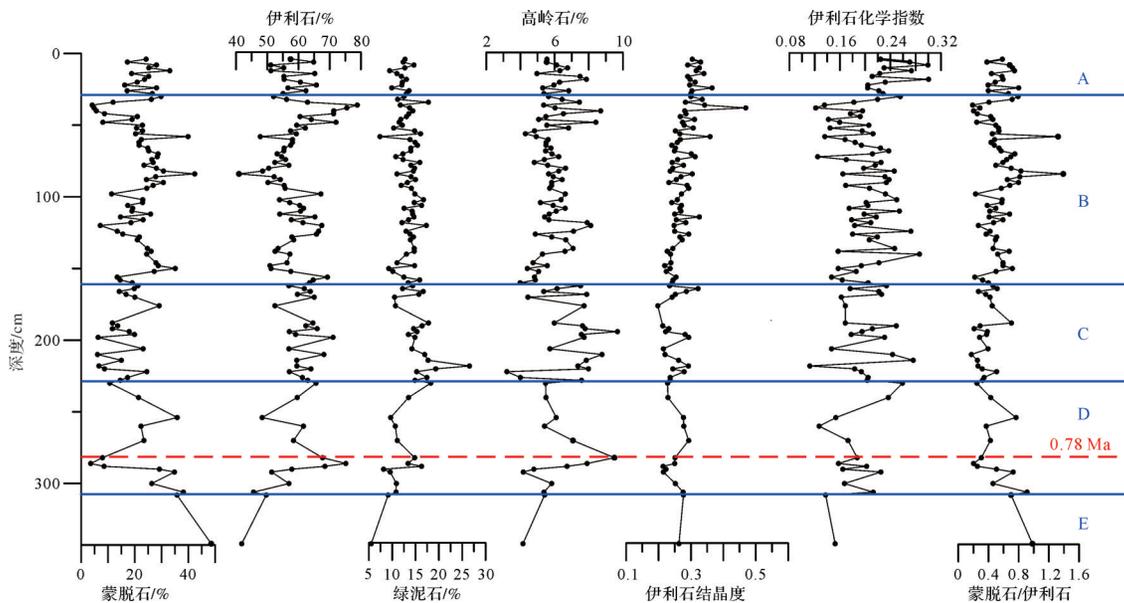


图8 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样沉积物的黏土矿物参数垂向分布特征

Fig.8 Vertical distribution of clay mineral parameters, core C-P19 sediments, Parece Vela Basin

A段(4~24 cm):该段曲线波动幅度较小,蒙脱石含量继续增加,伊利石和绿泥石含量略减,该段伊利石结晶度和化学指数明显增加,S/I变化趋势与蒙脱石曲线一致。

3 讨论

3.1 物源分析

3.1.1 粒度特征对帕里西维拉海盆物质来源的指示

粒度特征一般是多种沉积物来源、搬运介质以及沉积动力过程混合作用的结果,基于降低维度逻辑,

从混合背景中提取出单组信息组分是用粒度特征来解读沉积物运移机制以及古环境演化的关键所在。

本文选用SPSS软件,对全部粒径区间的粒度参数进行主成分分析,其主旨是利用降低维度的方法将联系密切的粒级成分组合成一个综合因子,然后再具体分析各个粒度因子对全部粒级的贡献大小,贡献较大的因子为主要因子,该因子所包含的粒级范围作为沉积环境最敏感的粒级组分,通常是众多粒级的综合^[45]。因子分析可行性检验表明,C-P19柱状样沉积物的粒度参数适用于因子分析,其分析结果如表3所示。

表3 C-P19柱状样沉积物粒度因子结构分析
Table 3 Grain-size factor analysis, core C-P19

公因子	因子构成/ μm	特征值	因子贡献率/%	累积贡献率/%
F1	1~9	16.0	48.6	48.6
F2	125~500	9.5	28.8	77.5
F3	19~125	3.7	11.1	88.6
F4	9~19	1.6	4.7	93.3
F5	500~707	1.1	3.2	96.5

由上表可知,C-P19柱状样提取出了两个粒度因子 F1: 1~9 μm 和 F2: 125~500 μm , 其中 F1 控制了 48.6% 的粒度变化特征, F2 控制了 28.8% 的粒度变化特征, 这两个主控粒度因子反映粒度总体变化规律的 77.5%, 其他 3 个因子贡献率相对较小, 不予讨论。基于前人 Rb-Sr 和 Nd 同位素研究结果, 帕里西维拉海盆沉积物是由同位素特征截然不同的两种来源物质的二端元混合物, 其一为亚洲风尘, 另一个则是新生岛弧来源的火山物质^[11,28]。因此我们推测 F2 因子(粒径范围在 125~500 μm)主要代表了火山物质剥蚀后的粗粒岩屑和较大粒径的碎屑矿物颗粒经过上部水体悬浮过程然后沉降到盆地; 而 F1 因子(粒径范围在 1~9 μm)除了包括来源于亚洲大陆的风尘以外还可能包含部分细粒火山源蚀变或水解后的产物, 前人研究表明, 适合长距离经风输送的颗粒粒径一般小于 16 μm ^[46], 特别集中在 2~4 μm ^[7,11], 但 F1 因子 48.6% 的贡献率中 2~4 μm 的亚洲风尘与其余细组分火山源蚀变物质之间所占贡献比尚无法明确。

综合前述黏土矿物分析结果可知, 整根柱样的黏土含量平均值为 12.1%, 其中约 60% 为指示陆源的伊利石, F2 因子中的大部分贡献源自火山物质, 所以 2~4 μm 的亚洲风尘组分对研究区的物质来源贡献较小。

3.1.2 黏土矿物特征对帕里西维拉海盆物质来源的指示

黏土矿物是海洋沉积物的重要组成部分, 主要受控于它的物源区、源区气候和运移机制(风、洋流等)^[47], 因而黏土矿物特征可以用来指示海洋沉积物的源区信息、气候变化和搬运途径。

(1) 伊利石+绿泥石

伊利石和绿泥石均在碱性环境下形成, 并且易于在寒冷且干旱的(如冰川、沙漠等地区)气候条件下保存^[47]。前人研究显示, 深海沉积物中的伊利石和绿泥石大多数是陆源碎屑成因, 经由河流或风输运至海洋中沉积所致^[48]。

本研究区内伊利石+绿泥石的平均含量可高达 70%~80%, 是本区黏土矿物组成中最重要的组分。由于海洋沉积物中的伊利石和绿泥石几乎都来自陆源碎屑物质^[49], 所以我们对周边的可能源区做了进一步分析。菲律宾岛屿黏土矿物中的伊利石平均含量低于 25%^[25-27], 且黏土矿物从菲律宾岛屿向帕里西维拉海盆的运移会受到九州—帕劳海脊的阻隔, 因而不会成为伊利石的源区。研究区样品与中国内陆黄土的伊利石+绿泥石含量吻合, 且沿着“中国内陆黄土—冲绳海槽—四国海盆—帕里西维拉海盆”一线分布, 由于中国内陆黄土可以通过风尘的形式经由东亚冬季风输送至研究区, 所以我们认为伊利石+绿泥石很可能源自亚洲风尘。

(2) 蒙脱石

蒙脱石广泛分布于大洋中, 一般具有两种环境的指示意义, 第一: 反映了寒冷的气候特征; 第二: 受气候变化影响不大, 主要与水解作用的强弱程度相关, 只要水分充足, 无论气候寒冷还是潮热, 火山物质(比如海底玄武岩)都可以经过长期水解作用而蚀变为蒙脱石。

前人对北太平洋上空大气悬浮物质的矿物组成研究表明, 伊利石为东亚冬季风从亚洲干旱地区携带的细粒风尘物质的重要组分^[50], 而亚洲内陆干旱—半干旱地区的火山碎屑不易被风扬起输入到空气中^[32]。徐兆凯等人基于稀土元素定量计算出帕里西维拉海盆西部表层沉积物平均 56% 来自于火山物质的风化蚀变, 平均 44% 来自于陆源风尘物质的贡献, 且蒙脱石的含量与火山物质贡献比例呈明显正相关, 伊利石含量与陆源风尘物质的贡献比例呈明显正相关^[50]; 柱状样黏土矿物分析结果显示, 蒙脱石主要来自东部紧邻的马里亚纳海槽基性火山物质的蚀变, 平均含量可达 46%^[30]。前人研究已经有很多证据表明帕里西维拉海盆内接受了大量周围海脊剥蚀下来的火山物质, 并且图 9 显示我们的样品与帕里西维拉海盆、四国海盆以及冲绳海槽等周围地区样

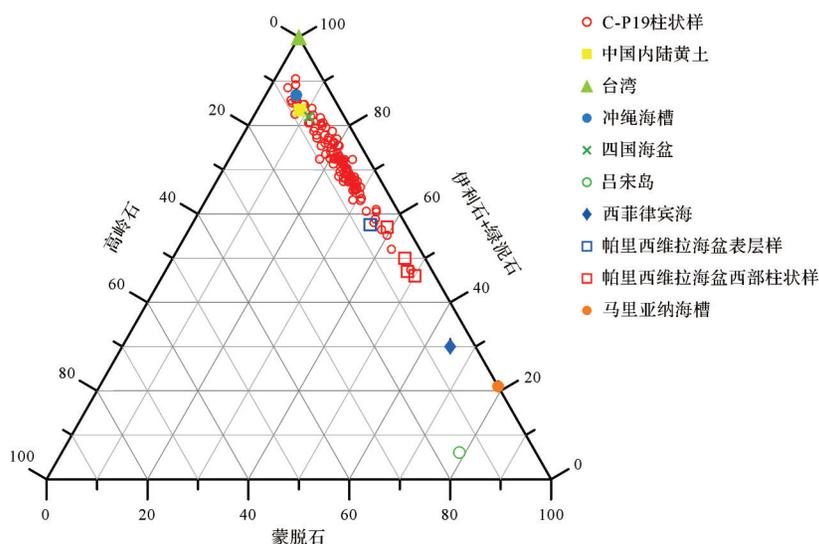


图9 帕里西维拉海盆 C-P19 柱状样及其周边的黏土矿物特征三角图

C-P19 柱状样黏土数据来自本文, 中国内陆黄土和西菲律宾海的数据来自文献[27], 台湾的数据来自文献[51], 冲绳海槽数据来自文献[52], 四国海盆数据来自文献[53], 吕宋岛数据来自文献[54], 帕里西维拉海盆表层样数据来自文献[55], 帕里西维拉海盆西部柱状样数据来自文献[2], 马里亚纳海槽数据来自文献[56]

Fig.9 Triangle plot of clay minerals for core C-P19 samples and surrounding samples in the Parece Vela Basin

Data for core C-P19 samples from this study. Other data from: Chinese loess and West Philippine Sea^[27]; Taiwan^[51]; Okinawa Trough^[52]; Shikoku Basin^[53]; Luzon Island^[54]; Parece Vela Basin^[55]; core sediments, western Parece Vela Basin^[2]; Mariana Trough^[56]

品吻合良好,说明 C-P19 柱状样品中的蒙脱石也主要来自附近火山物质的蚀变。虽然与帕里西维拉海盆西部的前人研究结果相比, C-P19 柱状样中的蒙脱石含量偏低,但结合之前的粒度分布结果,我们做如下推测:研究区沉积的火山源碎屑物质主要以粉砂或砂的形式存在于沉积物中,仅少部分火山物质经水解作用转变为了蒙脱石,而研究区中黏土粒级的细粒组分主要以亚洲风尘带来的伊利石+绿泥石为主。

(3) 高岭石

高岭石形成于温暖潮湿的气候环境下,是岩石在酸性介质中经过强烈淋滤而成,为硅酸盐矿物,特别是云母、长石和辉石等在各种不同的自然环境中分解的最终产物,也被称为“低纬度矿物”^[47]。然而海洋环境呈碱性或者弱碱性,所以高岭石由于其自身的形成条件,在大洋中的分布和含量都很受限,推测其可能也来自于亚洲风尘。在本研究区黏土矿物中高岭石含量也偏低,平均值仅 6.1%。

3.2 古气候意义

根据粒度参数的主成分分析及其对物源的指示结果,可以认为 2~4 μm 组分主要来源于亚洲大陆的风尘。根据黏土矿物对物源的反映, C-P19 柱状样中的蒙脱石主要来源于帕里西维拉海盆周围海脊(例如:帕劳海脊、西马里亚纳海脊)基性火山物质的蚀变,而伊利石、绿泥石和高岭石则主要源自亚洲风尘

的输入。可以利用 C-P19 沉积物中粒径 2~4 μm 组分颗粒的百分含量以及(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石的比值来追溯过去近 1 Ma 来帕里西维拉海盆亚洲风尘输入的变化特征^[2]。

由图 10 可知, C-P19 柱状样 2~4 μm 组分百分含量和(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石的比值变化规律一致,在近 1 Ma 以来整体呈现逐渐增加的趋势,且与黄土高原的黄土堆积速率、北太平洋风尘通量、西赤道太平洋风尘 ⁴He 通量的变化趋势相吻合^[57-59]。作为风尘的源产地,黄土高原的黄土堆积速率记录了东亚冬季风强度变化以及亚洲干旱程度的变化^[57,60]。当东亚冬季风增强或者黄土高原气候变干冷时,黄土高原的黄土堆积速率曲线出现峰值;相反地,当东亚冬季风减弱或者黄土高原气候向温暖潮湿转变时,曲线出现谷值。

基于上述风尘输入的替代性指标,我们可进一步对东亚冬季风和源区气候变化的情况进行分析,若将研究区视为匀速沉积,则其变化趋势可划分成五个阶段(表 4、图 10)。

E 段(约 1 013~856 ka):由于该阶段黏土矿物仅成功提取出了一个样品,代表性差,故而以粒度指标的变化趋势为准。图 10 显示该阶段粒度指标的数值较低,未见明显增大的趋势,与黄土高原的黄土堆积速率和西赤道太平洋风尘 ⁴He 通量曲线吻合度差,说明该阶段研究区风尘输入较少,东亚冬季风作用弱。

表4 C-P19柱状样各层位年龄控制点
Table 4 Age control points of each layer in core C-P19 sediment

层位	深度/cm	底界年龄/ka
A	4~24	66
B	24~160	443
C	146~232	643
D	232~312	856
E	312~374	1013

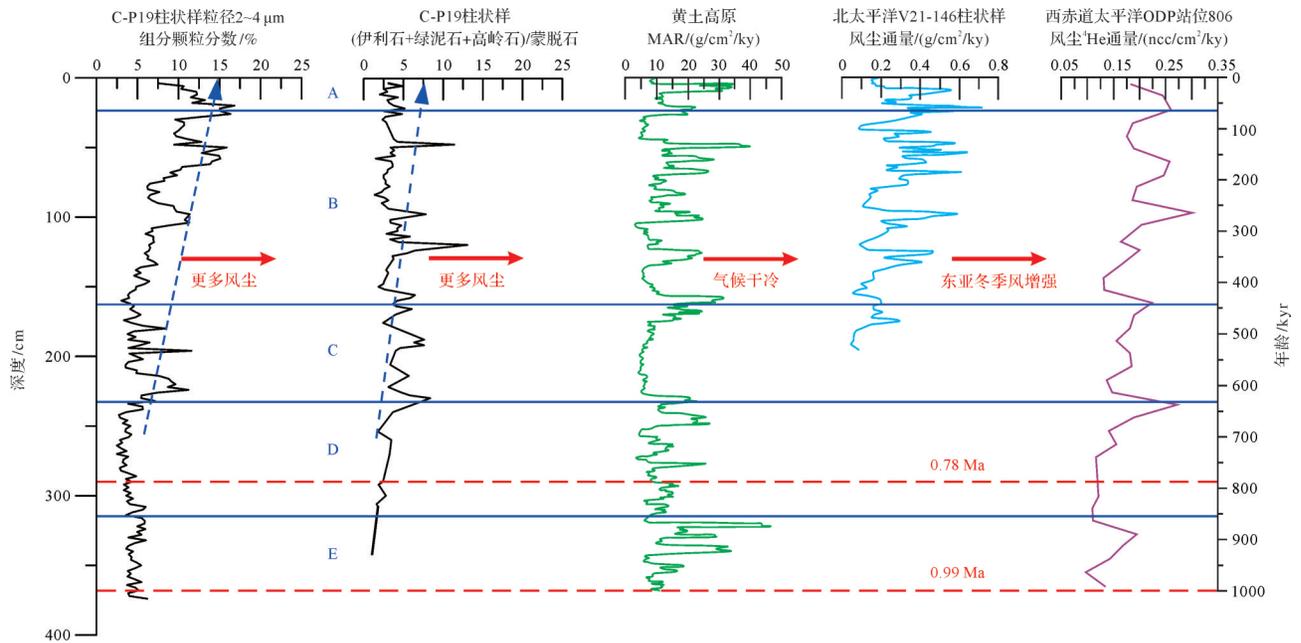


图10 东亚冬季风替代指标变化对比图

对比的指标有帕里西维拉海盆C-P19柱状样(本文)粒径2~4 μm组分颗粒百分含量和(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石,中国黄土高原的黄土堆积速率^[57],北太平洋V21-146柱状样风尘通量^[58]以及西赤道太平洋ODP站点806风尘⁴He通量^[59],蓝色虚线箭头代表曲线的总体变化趋势

Fig.10 Comparison of East Asian winter monsoon substitution indices Comparative indicators are percentage content of particles of size between 2~4 μm. Ratio of (illite+chlorite+kaolinite)/montmorillonite in core C-P19 samples, Parece Vela Basin (this paper). Mass accumulation rate (MAR) in the Chinese Loess Plateau^[57]. Eolian flux for Core V21-146, N. Pacific^[58]. Eolian ⁴He flux at ODP site 806, W. Equatorial Pacific^[59]. Blue dashed arrows represent overall trend of curves

D段(约856~643 ka):该阶段刚开始时粒度指标和黏土矿物指标的数值均较低,且无明显规律性波动,约660 ka之后,粒度和黏土矿物指标的数值呈增加趋势,且与黄土高原的黄土堆积速率和西赤道太平洋风尘⁴He通量曲线趋势一致,说明660 ka以来,东亚冬季风作用开始增强,研究区沉积的亚洲风尘物质开始增加。

C段(约643~443 ka):从D/C段交界处至600 ka左右,粒度和黏土矿物指数均较高,且与黄土高原的黄土堆积速率和西赤道太平洋风尘⁴He通量曲线峰值吻合,说明该阶段东亚冬季风作用仍较强;600 ka之后粒度和黏土矿物指标的波动较大,但未表现出明显增加或减小趋势,且与各参比指标曲线吻合度

差,说明该阶段东亚冬季风有所减弱。

B段(约443~66 ka):中更新世全球气候发生重组,气候波动的主导周期增大为100 ka,波动幅度明显增大^[61]。大约443 ka前后,C-P19柱状样的粒度指标参数曲线发生明显变化,且旋回周期增大至100 ka(图10),推测该变化可能与中更新世全球气候转型有关。该阶段粒度指标和黏土指标的数值均呈明显增加趋势,与各参比指标曲线吻合度良好,且黄土高原的黄土堆积速率结果也表明该阶段东亚冬季风持续增强,亚洲大陆气候也开始向寒冷干燥转变,随着亚洲内陆干旱化程度进一步加剧,研究区沉积的亚洲风尘物质也逐渐增多。

A段(约66 ka~至今):该阶段粒度指标的数值仍

处在较高水平,但有减小的趋势,黏土指标继承了B段后期的变化趋势,整体较稳定。各参比指标的曲线在大约20~30 ka出现明显峰值后均呈递减趋势,说明该时期虽然仍有亚洲风尘的输入但东亚冬季风强度自20 ka后有所减弱,亚洲内陆黄土区的气候也开始由寒冷干燥向温暖潮湿转变。

前人研究表明,西北太平洋风尘石英的含量和沉积速率在2.5 Ma时开始明显增加^[62],帕里西维拉海盆沉积物放射性Sr、Nd同位素结果指示1.2 Ma以来风尘质量积累速率开始明显增加^[28],粒度^[11]和黏土矿物^[2]参数分析表明近2 Ma以来亚洲大陆干旱化程度和东亚大气环流系统增强。本文利用粒度和黏土矿物参数作为指标建立的研究区亚洲风尘输入量和东亚冬季风的阶段性演化与前人采用风尘石英的理化特征、沉积物放射性Sr、Nd同位素特征、黏土矿物比值等指标得出的结果整体一致,且进一步做了更细致的阶段性划分:1 013~660 ka东亚冬季风作用较弱;660~66 ka东亚冬季风明显强劲,且亚洲内陆黄土区干旱化程度加剧,研究区沉积的亚洲风尘物质增加;20 ka以来,东亚冬季风强度开始减弱,研究区沉积的亚洲风尘物质也随之减少,亚洲内陆黄土区的气候也开始向温暖潮湿转变。

4 结论

本文根据古地磁结果建立了西太平洋帕里西维拉海盆C-P19柱状样的年龄框架,并分析了其粒度和黏土矿物特征,研究结果表明:

(1) C-P19柱状样样品具有未扰动的原生沉积组构特征,经逐步交变退磁后,几乎所有样品均获得了稳定的特征剩磁,且磁倾角记录了B/M极性倒转,4~282 cm为布容正极性期,沉积速率为3.6 mm/ka;282~374 cm对应于松山负极性时,其中包含深度为366~374 cm段的正极性时,属于贾拉米洛正极性亚时,沉积速率为4.0 mm/ka。柱状样的底界位于C1r.1n内,年龄小于1.072 Ma,为更新世沉积,整根柱状样的平均沉积速率为3.7 mm/ka。

(2) 粒度和黏土矿物分析结果表明,研究区的沉积物类型以粉砂和砂质粉砂为主,含少量黏土质粉砂,沉积物中黏土含量平均仅占12.06%,黏土矿物组成中伊利石+绿泥石的平均含量高达70%,是研究区黏土矿物最重要的组分。SPSS对粒度参数的主成分分析结果表明,沉积物来源主要为来自帕里西维拉

海盆内或周围海脊的粗颗粒火山岛弧碎屑物质以及细颗粒组分的亚洲大陆风尘,其中火山物质对物源的贡献比亚洲风尘大。

(3) C-P19柱状样沉积物2~4 μm组分百分含量和(伊利石+绿泥石+高岭石)/蒙脱石的比值反映了研究区亚洲风尘物质贡献比例的波动,进而可以作为替代指标揭示风尘源区气候干湿程度以及东亚冬季风强度的演变过程。其结果表明,1 013~660 ka东亚冬季风作用较弱,660 ka以来东亚冬季风明显强劲,且亚洲内陆黄土区干旱化程度加剧,20 ka以来东亚冬季风强度逐渐减弱,亚洲内陆黄土区的气候也向温暖潮湿转变。

致谢 本文样品由中国科学院南海海洋研究所2016年“马沟计划”首个调查航次取得,调查队成员及“实验3号”的全体船员为此付出了巨大的努力;中科院南海海洋研究所的徐维海副研究员和田雨杭博士在分样工作中给予了指导和帮助;中科院地质与地球物理研究所的周灿芬老师、段宗奇博士和沈中山博士在古地磁测年过程中给予了极大的帮助;感谢几位审稿专家提供的宝贵意见和建议。

参考文献(References)

- [1] 何起祥. 海洋沉积作用的物源控制[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(1): 8-13. [He Qixiang. Sediment source and its bearing on marine sedimentation [J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(1): 8-13.]
- [2] 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: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [3] 任建业,李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 203-213. [Ren Jianye, Li Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 203-213.]
- [4] 孟庆勇,李安春,靳宁,等. 东菲律宾海柱状沉积物的磁性特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 57-63. [Meng Qingyong, Li Anchun, Jin Ning, et al. Magnetostratigraphic and magnetic properties of marine sediments from the east Philippine Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 57-63.]
- [5] 殷征欣,李正元,沈泽中,等. 西太平洋帕里西维拉海盆不对称性发育特征及其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(1): 218-229. [Yin Zhengxin, Li Zhengyuan, Shen

- Zezhong, et al. Asymmetric geological developments and their geneses of the Parece Vela Basin in western Pacific Ocean [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49 (1): 218-229.]
- [6] 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 Shiming, Zhang Guoliang, 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.]
- [7] Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10 (2): 251-258.
- [8] 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): 855-858. [Xie Yixuan, Yang Xiaoqiang, Zhang Huodai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from Western Pacific since ~80 ka [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(5): 855-858.]
- [9] 万世明,徐兆凯. 西太平洋风尘沉积记录研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1208-1219. [Wan Shiming, Xu Zhao-kai. Research progress on eolian dust records in the West Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1208-1219.]
- [10] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [11] 周宇,蒋富清,徐兆凯,等. 近2 Ma帕里西-维拉海盆沉积物中碎屑组分粒度特征及其物源和古气候意义[J]. *海洋科学*, 2015, 39(9): 86-93. [Zhou Yu, Jiang Fuqing, Xu Zhaokai, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Parece Vela Basin and its implication of provenance and palaeoclimate over the last 2 Ma [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39 (9): 86-93.]
- [12] Hathon E G, Underwood M B. Clay mineralogy and chemistry as indicators of hemipelagic sediment dispersal south of the Aleutian arc [J]. *Marine Geology*, 1991, 97(1/2): 145-166.
- [13] Naidu A S, Han M W, Mowatt T C, et al. Clay minerals as indicators of sources of terrigenous sediments, their transportation and deposition: Bering Basin, Russian-Alaskan Arctic [J]. *Marine Geology*, 1995, 127(1/2/3/4): 87-104.
- [14] Underwood M B, Pickering K T. Clay-mineral provenance, sediment dispersal patterns, and Mudrock Diagenesis in the Nankai Accretionary prism, southwest Japan [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1996, 44(3): 339-356.
- [15] Zhao Y F, Zou X Q, Liu Q, et al. Clay mineralogy indicates the muddy sediment provenance in the estuarine-inner shelf of the East China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 152: 69-79.
- [16] Khonde N N, Maurya D M, Chamyal L S. Late Pleistocene-Holocene clay mineral record from the Great Rann of Kachchh basin, Western India: Implications for palaeoenvironments and sediment sources [J]. *Quaternary International*, 2017, 443: 86-98.
- [17] 蒋来宾,翦知潜,成鑫荣. 赤道西太平洋末次盛冰期以来的浮游有孔虫氧碳稳定同位素记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24 (2): 67-71. [Jiang Laibin, Jian Zhimin, Cheng Xinrong. Oxygen and carbon stable isotopic records of planktonic foraminifers from the Western Equatorial Pacific since the Last Glacial Maximum [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 67-71.]
- [18] 金海燕,翦知潜,成鑫荣. 赤道西太平洋暖池中更新世过渡期的古海洋变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26 (6): 71-80. [Jin Haiyan, Jian Zhimin, Cheng Xinrong. Pale-oceanographic variations of the Western Pacific warm pool during the Middle Pleistocene climate transition [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 71-80.]
- [19] 林美华,李乃胜. 西菲律宾海中央断裂带地貌学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 39-44. [Lin Meihua, Li Naisheng. Geomorphic study of the central rift zone in the West Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 39-44.]
- [20] 孙晗杰. 西菲律宾海2.36Ma以来古海洋学研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2011. [Sun Hanjie. Research of the paleoceanography of the Western Philippine Sea over the past 2.36 Ma [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [21] 王汝建,成鑫荣,刘传联,等. 赤道西太平洋暖池区更新世以来的生源沉积物沉积特征及其古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21 (4): 67-72. [Wang Rujian, Cheng Xinrong, Liu Chuanlian, et al. Depositional characteristics of biogenic sediments and their paleoceanographic implications in the West Pacific warm pool during Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21 (4): 67-72.]
- [22] 臧绍先,宁杰远. 菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用及其对东亚构造运动的影响[J]. *地球物理学报*, 2002, 45 (2): 188-197. [Zang Shaoxian, Ning Jieyuan. Interaction between Philippine Sea plate (PH) and Eurasia (EU) plate and its influence on the movement Eastern Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(2): 188-197.]
- [23] 石学法,陈丽蓉,李坤业,等. 西菲律宾海沉积物矿物组合及其地质意义[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(3): 328-335. [Shi Xuefa, Chen Lirong, Li Kunye, et al. The mineral assemblages in the sediments in the West Phillipine Sea and their geological implication [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(3): 328-335.]

- [24] 石学法,陈丽蓉,马建国,等. 西菲律宾海沉积物稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 1996, 16(3): 260-267. [Shi Xuefa, Chen Lirong, Ma Jianguo, et al. REE geochemistry of sediments from West Philippine Sea[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1996, 16(3): 260-267.]
- [25] 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 minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995, 15(2): 61-72.]
- [26] 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 Anchun, Jiang Fuqing, et al. Assemblage and provenance of clay minerals off the east of Luzon Island [J]. Marine Sciences, 2009, 33(9): 80-88.]
- [27] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 326-328: 152-159.
- [28] 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.
- [29] 靳宁. 帕里西维拉海盆西北部海域黏土矿物分布特征研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006. [Jin Ning. Clay mineral distribution in the sediments of the northwest Parece Vela Basin [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006.]
- [30] 明洁,李安春,孟庆勇,等. 东菲律宾海帕里西维拉海盆第四纪黏土矿物组合特征及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 139-148. [Ming Jie, Li Anchun, Meng Qingyong, et al. Quaternary assemblage characteristic and provenance of clay minerals in the Parecevela Basin of the East Philippine Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 139-148.]
- [31] 周宇. 近2Ma帕里西—维拉海盆的风尘记录[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2014. [Zhou Yu. Asian dust record in the Parece Vela Basin over the last 2 Ma [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [32] 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 Zhaokai, Feng Xuguang, et al. Composition characteristics and provenance implication of modern dust in the West Philippine Sea [J]. Earth Science, 2020, 45(2): 559-568.]
- [33] 徐兆凯,李安春,蒋富清,等. 东菲律宾海沉积物的地球化学特征与物质来源[J]. 科学通报, 2008, 53(6): 695-702. [Xu Zhaokai, Li Anchun, Jiang Fuqing, et al. Geochemical character and material source of sediments in the Eastern Philippine Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(6): 695-702.]
- [34] McManus J. Grain size determination and interpretation [M]// Tucker M. Techniques in sedimentology. Oxford: Oxford Blackwell, 1988: 63-85.
- [35] 赵德博,万世明,沈兴艳,等. 海洋沉积物中黏土矿物的两种提取方法的对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 173-181. [Zhao Debo, Wan Shiming, Shen Xingyan, et al. A discussion on methodology to extract clay minerals from marine sediments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5): 173-181.]
- [36] Marino R J, Ellwood B B. Anomalous magnetic fabric in sediments which record an apparent geomagnetic field excursion [J]. Nature, 1978, 274(5671): 581-582.
- [37] 王琬璋,周良勇,段宗奇,等. 现代黄河三角洲沉积物磁性地层年代框架及环境磁学研究[J]. 地球物理学报, 62(5): 1772-1788. [Wang Wanzhang, Zhou Liangyong, Duan Zongqi, et al. Magnetostratigraphic framework and magnetic properties of modern sediment in the Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(5): 1772-1788.]
- [38] Mrozowski C L, Hayes D E. The evolution of the Parece Vela basin, eastern Philippine Sea [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 46(1): 49-67.
- [39] Scott R, Kroenke L. Evolution of back arc spreading and arc volcanism in the Philippine Sea: Interpretation of Leg 59 DSDP results [M]// Hayes D E. The tectonic and geologic evolution of southeast Asian seas and islands. Washington: American Geophysical Union, 1980: 283-291.
- [40] 金性春. 大洋钻探与西太平洋构造[J]. 地球科学进展, 1995, 10(3): 234-239. [Jin Xingchun. Ocean drilling program and tectonics of the Western Pacific region [J]. Advance in Earth Sciences, 1995, 10(3): 234-239.]
- [41] Okino K, Ohara Y, Kasuga S, et al. The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(15): 2287-2290.
- [42] 夏成龙,郑彦鹏,董冬冬,等. 菲律宾海盆磁条带特征及61Ma以来的海底扩张过程重建[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 30-40. [Xia Chenglong, Zheng Yanpeng, Dong Dongdong, et al. Characteristics of magnetic lineations and reconstruction of seafloor spreading processes of the Philippine Sea Basin since 61 Ma [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(1): 30-40.]
- [43] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. The geologic time scale 2012 [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-1144.
- [44] Singer B S, Hoffman K A, Chauvin A, et al. Dating transitionally magnetized lavas of the Late Matuyama Chron: Toward a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ timescale of reversals and events [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1999, 104

- (B1): 679-693.
- [45] 陈桥,刘东艳,陈颖军,等. 粒级—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 319-325. [Chen Qiao, Liu Dongyan, Chen Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis [J]. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325.]
- [46] 张德玉. 马里亚纳海槽区黏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.]
- [47] Windom H L. Lithogenous material in marine sediments[M]// Riley J P, Chester R. Chemical Oceanography. London: Academic Press, 1976: 103-135.
- [48] Chamley H. Clay sedimentology [M]. London: Springer, 1989.
- [49] 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. [Yu Xu, Jiang Chao-hua. Research on minerals of modern ocean sedimentation and their X-diffracton[M]. Beijing: Science Press, 1984.]
- [50] 徐兆凯,李铁刚,李安春. 东菲律宾海表层沉积物来源的稀土证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(2): 1-7. [Xu Zhaokai, Li Tiegang, Li Anchun. Provenance of surficial sediments of the East Philippine Sea: Evidence from rare earth elements [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(2): 1-7.]
- [51] 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.
- [52] 李国刚. 中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 470-479. [Li Guogang. The composition, distribution and geological significance of clay minerals in surface sediments from offshore China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 12(4): 470-479.]
- [53] Nagel U, Müller G, Schumann D. 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 [R]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Projects, 1981, 60: 415-435.
- [54] 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.
- [55] 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, 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.]
- [56] Maher B A, Prospero J M, Mackie D, et al. Global connections between Aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(1/2): 61-97.
- [57] Sun Y B, An Z S. Late Pliocene-Pleistocene changes in mass accumulation rates of eolian deposits on the central Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2005, 110(D23): D23101.
- [58] Ruddiman W F, Prell W L, Raymo M E. Late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West: Rationale for general circulation modeling experiments [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D15): 18379-18391.
- [59] 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.
- [60] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(1/2): 33-48.
- [61] Hovan S A, Rea D K, Piasias 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(6231): 296-298.
- [62] 朱潇,蒋富清. 风尘石英在物源示踪和古气候研究中的应用[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 141-152. [Zhu Xiao, Jiang Fuqing. Applications of aeolian quartz in provenance tracing and paleoclimatic research [J]. Marine Sciences, 2018, 42(4): 141-152.]

Provenance and Paleoclimate of Sediments in the Parece Vela Basin in Past 1 Ma: Inferences from grain-size and clay mineral distribution

XIAO ChunHui¹, WANG YongHong¹, LIN Jian^{2,3}

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

2. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA

3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: Measurement of magnetic susceptibility anisotropy and paleomagnetic analysis of the core C-P19 in the Parece Vela Basin of the western Pacific Ocean established the age framework of the magnetostratigraphy. Grain size and clay minerals analysis determined provenance and paleoclimate. The paleomagnetic results show that the sedimentary sequence has a lower limit age younger than 1.072 Ma, which includes the deposition since the early Pleistocene. The sedimentation process was divided into two stages: one with a sedimentation rate of 4.0 mm/kyr during ca. 1-0.78 Ma, and the other at 3.6 mm/kyr since 0.78 Ma. The grain size and clay mineral analyses showed that the predominant sediment types in the study area are silty and sandy silt, with a small clayey silt component. The average content of illite + chlorite in the clay mineral composition is as high as 70%. A principal component analysis of the granularity parameters by SPSS software indicates that the source of coarse-grained material in the study area is mainly volcanic island arc clastic material in and around the Parece Vela Basin, and the fine-grained component is mainly from Asian dust. The percentage content of the 2-4 μm grain size component and the ratio of (illite + chlorite + kaolinite) / smectite corresponds closely with fluctuations in the contribution of Asian dust in the study area. These were used as an alternative indicator to reveal both the dryness or wetness of the paleoclimate in the source area and the evolution process of East Asian winter monsoon intensity since 1 Ma.

Key words: provenance; paleoclimate; Parece Vela Basin; western Pacific Ocean; Asian dust