https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.003



# 西菲律宾海现代风尘物质组成特征及其物源指示意义

王 薇<sup>1,3</sup>,徐兆凯<sup>1,2\*</sup>,冯旭光<sup>1,3</sup>,蔡明江<sup>1,3</sup>,陈红瑾<sup>1,3</sup>,李铁刚<sup>2,3,4</sup>

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

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室,海洋地质过程与环境功能实验室,山东青岛 266061

3. 中国科学院大学,北京100049

4. 国家海洋局第一海洋研究所,海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室,山东青岛 266061

摘 要:为识别西菲律宾海现代风尘物质的具体来源及其携带动力,本次研究于2015年冬季对西菲律宾海上空风尘进行了采 集,并系统分析了碎屑态组分的矿物组成和常、微量元素组合特征.西菲律宾海现代风尘沉积物中碎屑矿物成分主要有石英、 伊利石、斜长石和石膏等,矿物形态均呈次棱角状,具有明显的风成沉积特征.所研究样品的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>投影主要与鄂尔多斯 沙漠和巴丹吉林沙漠物质相似,而其微量元素 Zr-Th-Sc组成则表现为鄂尔多斯沙漠和塔克拉玛干沙漠物质的两端元混合,说 明鄂尔多斯沙漠是西菲律宾海现代风尘的主要源区,而塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠的风尘输入对该区的影响较小.后向 轨迹分析表明,西菲律宾海冬季的风尘携带动力主要是东亚冬季风.

关键词:西菲律宾海;现代风尘;矿物学;常、微量元素;物质来源.

**中图分类号:** P736 **文章编号:** 1000-2383(2020)02-559-10

# Composition Characteristics and Provenance Implication of Modern Dust in the West Philippine Sea

收稿日期:2019-01-02

Wang Wei<sup>1,3</sup>, Xu Zhaokai<sup>1,2\*</sup>, Feng Xuguang<sup>1,3</sup>, Cai Mingjiang<sup>1,3</sup>, Chen Hongjin<sup>1,3</sup>, Li Tiegang<sup>2,3,4</sup>

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

2. Laboratory of Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

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

 $4. \ Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China China$ 

**Abstract:** To discriminate the provenances and the transport mechanism of modern eolian sediments in the West Philippine Sea, mineral compositions as well as major and trace elements in the detrital phase of modern dust samples collected from the sea in the winter of 2015 were analyzed. Quartz, illite, plagioclase and gypsum are the most common detrital minerals, which are subangular and show obvious characteristics of aeolian deposits. The samples in our study show similar characteristics with the eolian dust from the Ordos Desert and the Badain Jaran Desert in the TiO<sub>2</sub> versus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram. Furthermore, the Zr-Th-Sc compositions of our samples display a binary mixing of the sediments from the Ordos Desert and the Taklimakan Desert. These results indicate that the Ordos Desert is the dominant source of the modern dust input to the Philippine Sea, whereas the contributions of the Taklimakan Desert and the Badain Jaran Desert are relatively small. In terms of the backward trajectory analysis, the modern

引用格式: 王薇, 徐兆凯, 冯旭光, 等, 2020. 西菲律宾海现代风尘物质组成特征及其物源指示意义. 地球科学, 45(2):559-568.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 41676038, 41876034, 41376064);青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(No. 2016ASKJ13);国家自然科学基金委员会一山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目(No. U1606401);国家海洋局全球变化与海气相互作用专项(Nos. GASI-GEOGE-06-02, GASI-GEOGE-02, GASI-GEOGE-04).

**作者简介:**王薇(1993—),女,硕士研究生,主要从事海洋地质学研究工作.ORCID:0000-0002-1076-4376.E-mail:wangwei166@mails.ucas.ac.cn \* **通讯作者:**徐兆凯,ORCID:0000-0003-0718-6736。E-mail:zhaokaixu@qdio.ac.cn

eolian dust in the Philippine Sea is dominantly transported by the Eastern Asian Winter Monsoon. **Key words:** the West Philippine Sea; modern dust; mineralogy; major and trace elements; provenance.

# 0 引言

风尘是由大气环流搬运并在一定区域沉降的 陆源碎屑沉积物(Rea, 1994). 全球每年从源区释放 并进入大气中的风尘约有2000 Mt,其中有75% 沉 降到陆地,剩余的25%可远距离搬运并沉积到海洋 (Shao et al., 2011),因此风尘是深海沉积物的重要 组成部分,同时也是地质历史时期源区古气候与古 环境演化信息的重要载体(Rea, 1994; Maher et al., 2010). 风尘不仅能够影响地球系统的辐射平 衡,而且其携带的铁等营养元素能够参与海洋的生 物地球化学循环,对海洋生产力、海气CO2交换以及 全球碳循环产生重要影响,从而在全球气候变化中 发挥重要作用(Jickells et al., 2005; 邵龙义等, 2018). 此外,近年来频繁出现的强沙尘暴事件以及 强雾霾等极端气候事件对经济社会发展与人类生 产生活造成了十分严峻的威胁.因此通过对海洋风 尘沉积物的系统研究,探索气候变化机制,对于研 究全球气候演化模式和预测人类未来生存环境具 有十分重要的科学价值.

亚洲内陆是仅次于撒哈拉沙漠的全球第二大 风尘源区(Shao et al., 2011),主要集中在我国北方 干旱一半干旱地区. 根据风尘物质的 Sr-Nd 同位素 组成特征,亚洲风尘源区可划分为3个区域:中国北 部沙漠、亚洲东部沙漠和亚洲中部沙漠(Chen et al., 2007; Seo et al., 2014). 近地面季风环流和高 空西风急流是亚洲风尘向中国内陆、太平洋、北美 甚至格陵兰地区搬运的主要携带动力(Sun, 2002; Shi and Liu, 2011; Zhao et al., 2014). 太平洋风尘 的研究钻孔主要集中在中纬度的北太平洋地区,目 前对于北太平洋中心地区的风尘来源及其携带动 力有了基本统一的认识,已有的研究普遍认为该地 区风尘物质由西风从亚洲中部沙漠(如:塔克拉玛 干沙漠)搬运而来(Rea, 1994; Sun, 2002; Zhao et al., 2014). 但是对于较低纬度的北太平洋边缘海区 缺乏系统研究,仅推断该地区的风尘来源于亚洲东 部沙漠,其携带动力为东亚冬季风(Zhao et al., 2014).

菲律宾海位于西太平洋暖池边缘,是黑潮暖流 的发源地,该海区地处东亚冬季风的下风向,是赤 道西太平洋地区典型的风尘汇聚区(Wan et al., 2012; Jiang et al., 2013; Yu et al., 2016). 近年来, 国内外科学家对菲律宾海柱状沉积物中风尘物质 组成特征、源区识别及其搬运动力等科学问题开展 了大量研究工作,如通过对菲律宾海第四纪沉积物 的粒度、粘土矿物、地球化学等指标的研究,明确了 亚洲内陆风尘物质对菲律宾海的输入(Wan et al., 2012; Xu et al., 2012, 2018; Jiang et al., 2013; Seo et al., 2014; Yu et al., 2016). 但是对于菲律宾 海中风尘物质的具体来源及其携带动力,还存在较 大争议:一种观点认为其主要来源于亚洲东部沙漠 (如:鄂尔多斯沙漠、巴丹吉林沙漠)(Wan et al., 2012; Jiang et al., 2013; Yu et al., 2016; Xu et al., 2018),另一种观点则认为亚洲中部沙漠(以塔克拉 玛干沙漠为中心)是其主要物源(Seo et al., 2014). 目前针对菲律宾海域开展的绝大多数风尘研究工 作主要集中在第四纪时期,而缺乏海洋风尘沉积过 程的现代观测,因此基于大洋岩心的矿物、化学元 素以及 Sr-Nd 同位素等指标得出的风尘物质来源及 其演化历史的可靠性还有待检验.

基于以上认识,本研究希望通过对在菲律宾海 收集的现代风尘样品进行显微矿物学以及常、微量 元素组合特征的综合分析,以探讨研究区风尘物源 识别的有效指标,进而初步探索现代风尘的搬运过 程,从而为该海域地质历史时期的风尘研究提供现 代依据.

# 1 样品采集及实验分析

本次研究材料由中国科学院海洋研究所"科学"号海洋调查船在执行西太平洋地质调查任务时,走航收集获得,采样时间为2015年11月27日~2015年12月25日,对应于北方的冬季.采样仪器为 唠应2031型智能大流量风尘采样器,利用玻璃纤维 滤膜采集风尘颗粒,流量设定为1.05 m<sup>3</sup>/min,航行 期间连续采样,每次采样时间为48h,采样站位如图 1所示,共采集现代风尘样品15份.为尽量减少船 尾气排放对采样的影响,我们将采样器放置在船的 顶层甲板.采样结束后,将采集的样品储存在干净 的封口袋中,带回实验室分别进行扫描电镜和能谱



Fig.1 Schematic map showing the modern dust sampling sites in the West Philippine Sea, East Asian Winter monsoon, the prevailing Westerlies and Trades and Asian deserts

分析以及常、微量元素分析.

本研究选取9个高质量样品分别进行扫描电镜 和能谱分析.首先剪下1 cm<sup>2</sup>左右的滤膜样品,然后 用导电胶布粘在样品台上,镀金处理后固定在扫描 电镜台上进行测试.实验仪器为日立S-3400型扫描 电子显微镜及能谱仪,实验操作在中国科学院海洋 研究所的电镜中心完成.

此外,将风尘颗粒与滤膜分离后对其碎屑态组 分进行了常、微量元素分析.首先取1/2大小的滤 膜,剪碎后放入盛有蒸馏水的烧杯中,静置8h左 右,使样品充分分散;然后将盛有样品的烧杯进行 超声处理,并将烧杯中的液体移入干净的离心管 中,离心去除上清液获得风尘颗粒样品.采用顺序 淋滤的方法提取风尘样品的碎屑态组分,分别用优 级纯的4 mol/L 冰醋酸、0.25 mol/L 盐酸羟氨溶液 (含25% 醋酸)、30% 过氧化氢与0.02 mol/L 硝酸混 合溶液、4M无水碳酸钠溶液依次去除沉积物样品 中的碳酸盐、铁锰氧化物、有机质以及生物硅组分, 每去除一种组分后,用去离子水反复离心清洗至少 3次,最后将剩余的样品离心提取出碎屑态组分.将 样品的碎屑组分在低温条件下烘干(50℃)并研磨 至小于200目,送交至青岛斯巴达分析测试中心用 电感耦合等离子体发射光谱仪(IRIS Intrepid Ⅱ XSP)进行测试,采用海底沉积物国家标准物质 GBW07314、GBW07315、GBW07316作为质控样,测试误差均小于5%.

为分析现代风尘运移与大气运动的关系,基于 NCEP 混合风场资料(https://www.esrl.noaa.gov/ psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html),我们对西菲律宾海 2015年12月平均海面风场 进行模拟,并利用气团移动轨迹模型(HYSPLIT\_ 4)模拟现代风尘的传输路径.HYSPLIT\_4模型是 由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的,用 来模拟气团携带颗粒的输送、扩散和沉降模式,能 够对气流及其携带粒子的运动状态进行追踪 (Draxler and Hess, 1998).本文对W04、W13站位 120 h内气流运移轨迹进行模拟,轨迹起始点设置为 距地面1000 m.气象数据及模型运行来源于ARL-NOAA 服务器(http://ready.arl.noaa.gov/ HYSPLIT\_traj.php).

### 2 实验结果

根据扫描电镜及能谱分析结果,本区现代沉积物样品中的碎屑矿物主要有石英、伊利石和斜长石,而次要矿物则主要有石膏和钾长石等,另外还有少数含Fe、Ti等元素的未定名物质.

在扫描电镜下观察,石英、长石等碎屑矿物的

Table 1 Comparison on compositions of major elements between modern aeolian sediments and related materials ( $\%$ )							
	西菲律宾海现代风尘	深海沉积物	全球标准物质	陆源风尘物质			
	平均值1	MD06-3047 <sup>2</sup>	上陆壳 <sup>3</sup>	塔克拉玛干沙漠4	鄂尔多斯沙漠5	巴丹吉林沙漠。	中国黄土7
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	9.72	14.06	15.20	9.98	9.47	9.87	11.88
CaO	9.88	11.75	4.20	9.05	1.32	4.59	7.80
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	1.32	5.99	5.00	3.38	1.70	4.36	4.18
$K_2O$	0.53	1.54	3.40	1.87	2.31	1.99	2.25
MgO	2.63	2.84	2.20	2.49	0.49	2.13	2.36
MnO	0.01	0.20	0.08	0.07	-	-	0.06
Na <sub>2</sub> O	1.67	3.37	3.90	2.33	2.33	2.16	1.77
$P_2O_5$	0.18	0.03	-	0.11	-	-	0.15
$\mathrm{TiO}_2$	0.45	0.59	0.50	0.54	0.16	0.27	0.60

表1 西菲律宾海现代风尘物质及潜在源区相关物质的常量元素组成对比(%)

注:1. 为本次研究结果;2. 引自Xu et al. (2012);3. 引自Taylor and Mclennan(1985);4. 引自Yang et al. (2007);5. 引自Shu et al. (2016); 6. 引自Hu and Yang(2016); 7. 引自Ding et al.(2001), Qiao et al.(2011)

形态类似,有一定的磨圆度,矿物形态呈次棱角 状一次圆状,棱角状颗粒较为少见.石英颗粒表面 有明显的撞击凹坑,具有典型风尘石英的形态特 征,极少数颗粒表面有少量次生硅质沉淀,说明研 究区石英主要来自干冷的气候条件(孙有斌和安芷 生,2000).伊利石主要呈不规则片状,颗粒边缘清 晰,磨圆度较好,表明研究区伊利石可能经历了长 距离的搬运,并经受了强烈的物理剥蚀,石膏自形 程度较高,晶体颗粒边缘受到磨蚀,呈次棱角状.

西菲律宾海现代风尘碎屑态组分常量元素组 成与研究区附近的MD06-3047孔深海沉积物、全球 标准物质(上陆壳)以及可能源区(塔克拉玛干沙 漠、鄂尔多斯沙漠、巴丹吉林沙漠和中国黄土)细粒 风尘物质的常量元素组成如表1所示.研究区现代 风尘常量元素组成与菲律宾海 MD06-3047 孔第四 纪以来的深海沉积物差别较大,这可能与MD06-3047孔深海沉积物主要是来自吕宋岛的火山物质 与亚洲内陆风尘的两端元混合有关. 与全球标准物 质(上陆壳)相比,本区现代风尘的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 K<sub>2</sub>O、MnO、Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>相对亏损,而CaO和MgO相 对富集.此外,本研究中,西菲律宾海现代风尘碎屑 态组分Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量约为6.57%~11.06%,平均值为 9.72%; TiO2含量约为0.25%~0.94%, 平均值为 0.45%,这与塔克拉玛干沙漠(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>平均含量约为 9.98%, TiO2平均含量约为0.54%)和鄂尔多斯沙漠 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>平均含量约为9.47%, TiO<sub>2</sub>平均含量约为 0.16%)等碎屑源区的细粒风尘物质十分相近.

#### 3 讨论

#### 3.1 碎屑矿物组成特征及其物源指示意义

石英颗粒形态及其表面特征是判别沉积物源 及其沉积环境的有效手段(Doornkamp and Krinsley, 1971). 本区所研究样品中石英颗粒大多呈次 棱角状,其表面较为干净,次生硅质沉淀和溶蚀痕 迹较为少见,但是富有明显的碰撞浅坑(图2),具有 风力搬运的特点,且石英形态和微结构特征与亚洲 内陆现代沙漠石英砂相似(孙有斌和安芷生, 2000),因此我们初步推断研究区的石英来自亚洲 内陆干冷气候条件下的风尘堆积.

伊利石是典型的干冷气候条件下陆源碎屑矿 物的风化产物(靳宁等, 2007; Yu et al., 2016). 本 次研究中,伊利石主要呈片状,具有一定磨圆度(图 2),未见边缘有"细针"的自生颗粒,说明研究区现 代风尘中的伊利石为陆源碎屑成因. 扫描电镜分析 结果表明,粘土矿物中伊利石的相对含量最高,但 是研究区附近的吕宋岛河流沉积物中伊利石含量 极低(<2%)(Liu et al., 2009),因此吕宋岛不可能 是该区伊利石的主要来源.此外,尽管台湾地区伊 利石含量较高,但其结晶度和化学指数都与研究区 相差甚远(Wan et al., 2012; Yu et al., 2016),因而 也不可能是该区伊利石的主要来源.由于本研究中 伊利石形态和微结构特征说明伊利石经历了远距 离的风力搬运,基于以上认识,我们推测研究区伊 利石来源于亚洲内陆较高纬度的干冷地区,这也与 前人对研究区表层和岩心沉积物的研究结果相吻 合(靳宁等, 2007; Wan et al., 2012; Yu et al.,



图 2 西菲律宾海现代风尘碎屑矿物的扫描电镜形貌图 Fig.2 Scanning electron micrography of modern aeolian sediments over the West Philippine Sea a. 石英; b. 伊利石; c. 石膏

2016).此外,扫描电镜下观察到,所研究样品中普 遍存在石膏(图2),石膏与伊利石成因相似,也是典 型的干燥环境的指示矿物,因而它不可能来源于热 带西太平洋(石学法等,1995),推断它也来源于较 高纬度的干冷地区,为风成成因.

前人通过对菲律宾海的地形、大气环流以及洋流等地质条件的分析,排除了台湾岛、菲律宾内陆 以及澳大利亚作为菲律宾海风尘物源的可能性,认 为该地区的风尘主要是从亚洲内陆搬运而来(靳宁 等,2007; Wan et al., 2012; Jiang et al., 2013; Seo et al., 2014; Yu et al., 2016). 基于以上认识,综合 本次显微矿物学研究结果,我们认为西菲律宾海现 代沉积物具有显著的风成沉积特征,且研究区位于 亚洲内陆的下风向,因此我们推断西菲律宾海现代 风尘主要来源于亚洲内陆干旱一半干旱地区.

由于收集到的风尘样品浓度较低,样品量达不 到X-射线衍射的需求,很难进行矿物组成的定量 计算,因此只能通过物相定性分析判断亚洲风尘对 西菲律宾海的输入,对于风尘源区具体是亚洲东部 沙漠还是亚洲中部沙漠还需利用其他指标做进一 步的研究.

### 3.2 常量元素比值及其物源指示意义

由于矿物学分析在本研究中受到制约,为进一步识别所研究风尘样品的具体来源,我们运用地球化学方法,并结合之前对研究区附近柱状沉积物的研究成果,来深入探讨菲律宾海现代风尘物质的常量元素组成特征及其物源指示意义.

元素地球化学指标在陆地风尘、深海沉积物物 源研究中得到了广泛应用,是目前示踪地质历史时 期沉积物源的主要手段.在风化、搬运、沉积以及沉 积后成壤成岩过程中,沉积物的地球化学特性不断 发生改变,但一些化学性质不活泼的常量元素如 Ti、Al等,基本不受表生过程的影响,能够反映碎屑 源区的地球化学特征,可作为物源示踪的有效指标 (Taylor and Mclennan, 1985;毛欣等, 2017).本文 选取受外界条件影响较小、对物源信息保存较好的 Al和Ti元素与潜在源区的元素地球化学特征进行 对比分析,综合探讨西菲律宾海现代风尘的具体 物源.

Al元素主要赋存在长石、粘土等铝硅酸盐碎屑 矿物中,在各类岩石中含量较为固定;Ti元素主要 存在于钛铁矿以及金红石中,在各类岩石中含量变 化较大,Al、Ti两元素在沉积过程中性质相对稳定 且基本代表碎屑来源(Taylor and Mclennan, 1985; 毛欣等, 2017),因此Al和Ti常作为物源识别的代 用指标. 例如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>相关性图解已被应用于研 究区附近的南海沉积物源示踪(Wehausen et al., 2003). 西菲律宾海现代风尘及潜在源区的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO2相关性图解如图3所示.西菲律宾海现代风尘 的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>投影主要分布在塔克拉玛干沙漠和 巴丹吉林沙漠、鄂尔多斯沙漠之间,而与中国黄土 物源区的元素组成相差较远(图3),表明所研究的 样品主要来自于塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠和 鄂尔多斯沙漠.进一步讲,所研究样品的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 TiO<sub>2</sub>投影大部分与亚洲东部沙漠(如鄂尔多斯沙 漠、巴丹吉林沙漠)重合,因此我们推断,西菲律宾 海现代风尘主要来源于亚洲东部沙漠(鄂尔多斯沙 漠、巴丹吉林沙漠),但不排除塔克拉玛干沙漠对其 的较小贡献.

#### 3.3 微量元素组成及其物源指示意义

在表生条件下,Sc、Th、Zr、Nb、Be、Hf、Ta、Y等 高场强元素化学性质相对稳定,在风化一沉积循环 的过程中,一般被粘土等细粒物质吸附,不易发生 迁移,几乎被等量的转移到碎屑沉积物中,因而能 够代表母岩碎屑的化学特征,能有效的指示不同的 物源区(McLennan *et al.*, 1983; Bhatia and Crook,





作为对比的潜在源区包括:鄂尔多斯沙漠(Liu et al., 2015; Wen et al., 2016);巴丹吉林沙漠(Hu and Yang, 2016);塔克拉玛干沙漠(Yang et al., 2007);中国黄土(张虎才等, 1997; Ding et al., 2001; Qiao et al., 2001);阴影部分代表不同区域风尘物质的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 分布特征,其中蓝色代表本研究中现代风尘样品,红色代表塔克拉 玛干沙漠物质,绿色代表亚洲东部沙漠(鄂尔多斯沙漠和巴丹吉林 沙漠)物质,浅黄色代表中国南、北方黄土一古土壤

1986). Zr元素主要存在于锆石中; Th、Sc元素在沉积物中的分布特征主要受控于母岩类型,其中 Th主要富集在长英质岩石中,而 Sc主要赋存在铁镁质基岩中,在沉积过程中基本都不受表生地质作用的影响,因此 Zr-Th-Sc 三角图解目前已被成功应用于判别沉积物源中(Bhatia and Crook, 1986). 例如, Hao et al.(2010)以及 Qiao et al.(2011)通过对长江中下游黄土-古土壤序列的系统研究发现,长江流域黄土与西峰黄土和灵台黄土在 Zr-Th-Sc 三角图中分别靠近不同的端元,从而推断长江流域黄土与黄土高原黄土来源不同.又如 Xu et al.(2014)利用Zr-Th-Sc 三角图解明确了西菲律宾海 MD06-3047孔深海沉积物主要来源于当地的火山物质和亚洲内陆风尘,并排除了中国南海以及台湾物质对该海域的输入.

在细粒组分中,塔克拉玛干沙漠的Th和Sc含量明显区别于巴丹吉林沙漠和鄂尔多斯沙漠以及黄土高原风尘区(Honda *et al.*, 2004; Ferrat *et al.*, 2011),这为风尘源区的具体识别提供了可靠指标.





作为对比的潜在源区包括:鄂尔多斯沙漠(Rao et al., 2011);巴丹 吉林沙漠(Hu and Yang, 2016);塔克拉玛干沙漠(Yang et al., 2007);中国黄土(张虎才等, 1997; Ding et al., 2001; Qiao et al., 2011);阴影部分代表不同区域风尘物质的Zr-Th-Sc变化范围,其 中蓝色代表本研究中现代风尘样品,红色代表塔克拉玛干沙漠物 质,绿色代表亚洲东部沙漠(鄂尔多斯沙漠和巴丹吉林沙漠)物 质,浅黄色代表中国南、北方黄土-古土壤

因此我们应用Zr-Th-Sc三角图解判断了西菲律宾 海现代风尘的具体来源.图4中,西菲律宾海现代风 尘物质的Zr-Th-Sc明显区别于黄土高原风尘源区, 主要介于塔克拉玛干沙漠与亚洲东部沙漠之间,且 与两个物源端元均有部分重合,显示为二端元的混 合.尽管与亚洲中部沙漠比较,巴丹吉林沙漠与鄂 尔多斯沙漠的Zr-Th-Sc值接近,但二者仍存在细微 差别,总体上表现为巴丹吉林沙漠具有相对较低的 Zr值和较高的Sc值,西菲律宾海现代风尘的二端元 混合模式更趋向于塔克拉玛干沙漠和鄂尔多斯沙 漠的混合,但也不排除巴丹吉林沙漠的贡献,因此 我们推断西菲律宾海现代风尘主要来自鄂尔多斯 沙漠和塔克拉玛干沙漠,也有极少量来源于巴丹吉 林沙漠.结合常量元素Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>分析结果,我们 认为鄂尔多斯沙漠是西菲律宾海现代风尘最重要 的物源,而塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠对研究 区现代风尘输入的贡献相对较小.

此外,基于菲律宾海现代沉积物捕获器样品碎 屑态组分Sr-Nd同位素组成的沉积物源识别研究,



图 5 西菲律宾海 2015年冬季海面风场模式图及 W04、W13站位后向轨迹分析图 Fig.5 Sea surface wind field of the West Philippine Sea in the winter of 2015 and backward trajectories of site W04、W13

揭示了菲律宾海现代沉积物捕获器样品来源于吕 宋岛火山物质与亚洲沙漠风尘物质的两端元混合, 且其中的风尘组分主要来自于鄂尔多斯沙漠(贡献 量大于80%),而塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠 风尘物质贡献很小(小于20%)(Xu et al., 2018),这 一研究成果为我们的结论提供了更准确的定量化 依据.

#### 3.4 西菲律宾海现代风尘携带动力分析

现代卫星观测以及前人研究表明,亚洲内陆风 尘向海传输的路径主要有两个:一是西风急流将亚 洲中部沙漠(如:塔克拉玛干沙漠)的风尘由西向东 搬运到中纬度的北太平洋、北美甚至格陵兰地区 (Rea, 1994; Sun, 2002; Shi and Liu, 2011; Zhao *et al.*, 2014),二是近地面的东亚冬季风携带亚洲东 部沙漠(如:巴丹吉林沙漠、鄂尔多斯沙漠)的风尘 碎屑向东南方向输送至中国近海以及较低纬度的 西太平洋地区(Shi and Liu, 2011; Jiang *et al.*, 2013).

本研究中,海面风场模拟表明2015年冬季菲律

宾海面主要受东北季风的影响,W04、W13站位现 代风尘后向轨迹分析都显示,研究区现代风尘主要 是由东亚冬季风从源区搬运而来.在120h内,近地 面1000m的气流从塔克拉玛干沙漠、鄂尔多斯沙 漠向东南方向运移,经中国内陆到达菲律宾海后, 受到东北向风的影响发生转折,然后向西南方向运 移并最终在研究区沉降(图5).这一结果表明,低空 的东亚冬季风不仅能够搬运亚洲东部沙漠(如鄂尔 多斯沙漠、巴丹吉林沙漠)的风尘(Wan et al., 2012; Jiang et al., 2013; Yu et al., 2016; Xu et al., 2018),对于较远距离的亚洲中部沙漠(以塔克拉玛 干沙漠为中心)风尘也有一定的携带能力.前人的 研究表明,塔克拉玛干沙漠的细粒风尘主要被地表 冬季风扬起后注入到高空西风带,并在北太平洋地 区沉降(Shi and Liu, 2011; Zhao et al., 2014),但是 本研究中所模拟的气团移动路径证明,塔克拉玛干 沙漠和鄂尔多斯沙漠的风尘物质都是被东亚冬季 风搬运到低纬度的西太平洋地区.由于菲律宾海现 代风尘物源判别结果表明,塔克拉玛干沙漠对该区 风尘输入贡献较小(小于20%)(Xu et al., 2018),因 此我们认为,塔克拉玛干沙漠的风尘大部分被西风 携带到中纬度太平洋,而较低纬度的西太平洋地区 所检测到的较少量的塔克拉玛干沙漠风尘是由东 亚冬季风携带而来,综上,我们推断:

冬季时,受到亚洲内陆西伯利亚高压和北太平 洋阿留申低压的共同作用,东亚冬季风强度明显增 加,亚洲内陆气候寒冷干燥,地表植被稀少,物理风 化和风力侵蚀作用加剧,有利于粉尘的释放.近地 面强盛的冬季风能够携带大量亚洲东部沙漠(如鄂 尔多斯沙漠)风尘和极少量亚洲中部沙漠(如鄂 尔多斯沙漠)风尘和极少量亚洲中部沙漠(如塔克 拉玛干沙漠)的风尘物质向东南方向搬运,途径中 国内陆,最终在西菲律宾海区沉降.Jiang et al. (2013)模拟了本哈姆高原和西菲律宾海盆两个站 位的现代风尘在2006年春季尘暴事件发生期间的 气团移动轨迹,其结果显示亚洲内陆风尘可被冬季 风携带至研究区,这为我们的推断提供了有力依据.

由于我们的采样时间仅聚焦在2015年冬季,对 于其他季节的风尘移动轨迹未做详尽研究,因此西 风带是否在西太平洋现代风尘传输过程中有影响 还不明确,目前对于如何区别东亚冬季风和西风急 流这两种大气环流以及二者对西菲律宾海风尘贡 献的研究较为匮乏,而且二者的搬运机制以及相互 关系尚不明确,海洋风尘长距离传输的过程较为复 杂,还需综合多种因素进一步研究.

## 4 结论

通过对西菲律宾海现代风尘物质进行显微矿 物学以及常、微量元素组成分析,结合Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>相 关性图解、Zr-Th-Sc三角图解以及后向轨迹分析, 探讨了西菲律宾海现代风尘的具体来源及其携带 动力,初步得到以下结论:

(1)扫描电镜和能谱分析结果表明,所研究沉积物主要含有石英、伊利石、斜长石和石膏等碎屑 矿物,粘土矿物中伊利石含量最高,碎屑矿物形态 都具有明显的风尘沉积特征,风是其主要携带动力.

(2)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>相关性图解揭示了研究区现代 风尘主要来源于亚洲东部沙漠(如:鄂尔多斯沙漠、 巴丹吉林沙漠),塔克拉玛干沙漠也有较小的贡献; Zr-Th-Sc三角图解进一步验证了这一结论,并且指 示了鄂尔多斯沙漠对西菲律宾海现代风尘的贡献 要相对大于巴丹吉林沙漠,因此我们认为西菲律宾 海现代风尘主要来源于鄂尔多斯沙漠. (3)冬季时,亚洲内陆东亚冬季风强度增加,西 菲律宾海盛行东北向风,现代风尘由鄂尔多斯沙 漠、塔克拉玛干沙漠向研究区长距离搬运的主要携 带动力为东亚冬季风.

致谢:感谢中国科学院海洋研究所刘伟老师在 扫描电镜和能谱分析实验中提供的指导和帮助.

#### References

- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193. https://doi.org/ 10.1007/bf00375292
- Chen, J., Li, G. J., Yang, J. D., et al., 2007. Nd and Sr Isotopic Characteristics of Chinese Deserts: Implications for the Provenances of Asian Dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3904-3914. https://doi. org/ 10.1016/j.gca.2007.04.033
- Ding, Z. L., Sun, J. M., Yang, S. L., et al., 2001. Geochemistry of the Pliocene Red Clay Formation in the Chinese Loess Plateau and Implications for its Origin, Source Provenance and Paleoclimate Change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(6): 901-913. https://doi.org/ 10.1016/s0016-7037(00)00571-8
- Doornkamp, J. C., Krinsley, D., 1971. Electron Microscopy Applied to Quartz Grains from a Tropical Environment. Sedimentology, 17(1-2): 89-101. https://doi.org/ 10.1111/j.1365-3091.1971.tb01133.x
- Draxler, R. R., Hess, G. D., 1998. An Overview of the Hysplit\_4 Modeling System for Trajectories. *Australian Meteorological Magazine*, 47(4):295-308.
- Ferrat, M., Weiss, D. J., Strekopytov, S., et al., 2011. Improved Provenance Tracing of Asian Dust Sources Using Rare Earth Elements and Selected Trace Elements for Palaeomonsoon Studies on the Eastern Tibetan Plateau. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(21): 6374— 6399. https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.08.025
- Hao, Q. Z., Guo, Z. T., Qiao, Y. S., et al., 2010. Geochemical Evidence for the Provenance of Middle Pleistocene Loess Deposits in Southern China. *Quaternary Science Reviews*, 29(23/24): 3317-3326. https://doi. org/ 10.1016/j.quascirev.2010.08.004
- Honda, M., Yabuki, S., Shimizu, H., 2004. Geochemical and Isotopic Studies of Aeolian Sediments in China. Sedimentology, 51(2): 211-230. https://doi.org/10.1111/ j.1365-3091.2004.00618.x
- Hu, F. G., Yang, X. P., 2016. Geochemical and Geomorpho-

logical Evidence for the Provenance of Aeolian Deposits in the Badain Jaran Desert, Northwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 131: 179-192. https://doi.org/ 10.1016/j.quascirev.2015.10.039

- Jiang, F. Q., Frank, M., Li, T. G., et al., 2013. Asian Dust Input in the Western Philippine Sea: Evidence from Radiogenic Sr and Nd Isotopes. *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, 14(5): 1538-1551. https://doi.org/ 10.1002/ggge.20116
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., et al., 2005. Global Iron Connections between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, 308(5718): 67– 71. https://doi.org/10.1126/science.1105959
- Jin, N., Li, A. C., Liu, H. Z., et al., 2007. Clay Minerals in Surface Sediment of the Northwest Parece Vela Basin: Distribution and Provennace. *Oceanol Limnol Sin*, 38 (6): 504-511 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Jin, H. L., Sun, L. Y., et al., 2015. Geochemical Evidence for Holocene Millennial-Scale Climatic and Environmental Changes in the South-Eastern Mu us Desert, Northern China. *International Journal of Earth Sciences*, 104(7): 1889–1900. https://doi. org/10.1007/ s00531-015-1161-7
- Liu, Z. F., Zhao, Y. L., Colin, C., et al., 2009. Chemical Weathering in Luzon, Philippines from Clay Mineralogy and Major-Element Geochemistry of River Sediments. *Applied Geochemistry*, 24(11): 2195-2205. https://doi. org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.025
- Maher, B. A., Prospero, J. M., Mackie, D., et al., 2010. Global Connections between Aeolian Dust, Climate and Ocean Biogeochemistry at the Present Day and at the Last Glacial Maximum. *Earth Science Reviews*, 99(1/2): 61-97. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.12.001
- Mao, X., Liu, L.J., Li, C. A., et al., 2017. Elemental Composition Features of Loess-Paleosol Profile in Fengning, Hebei Province. *Journal of Earth Science*, 42(10): 1750-1759. (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., Kröner, A., 1983. Geochemical Evolution of Archean Shales from South Africa. I. The Swaziland and Pongola Supergroups. Precambrian Research, 22(1/2): 93-124. https://doi.org/ 10.1016/0301-9268(83)90060-8
- Qiao, Y. S., Hao, Q. Z., Peng, S. S., et al., 2011. Geochemical Characteristics of the Eolian Deposits in Southern China, and their Implications for Provenance and Weathering Intensity. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 308(3/4): 513-523. https://doi.org/ 10.1016/j.palaeo.2011.06.003

- Rao, W. B., Tan, H. B., Jiang, S. Y., et al., 2011. Trace Element and Ree Geochemistry of Fine - and Coarse -Grained Sands in the Ordos Deserts and Links with Sediments in Surrounding Areas. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 71(2): 155–170. https://doi.org/10.1016/j. chemer.2011.02.003
- Rea, D. K., 1994. The Paleoclimatic Record Provided by Eolian Deposition in the Deep Sea: The Geologic History of Wind. *Reviews of Geophysics*, 32(2): 159. https://doi. org/10.1029/93rg03257
- Seo, I., Lee, Y. I., Yoo, C. M., et al., 2014. 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. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(19):11,492-11,504.
- Shao, L.Y., Wang, W.H., Xing, J.P., et al., 2018. Physicochemical Characteristics and Effects of Airborne Particles: Research Progress and Prospects. *Journal of Earth Science*, 43(5):1691-1708(in Chinese with English abstract).
- Shao, Y. P., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., et al., 2011. Dust Cycle: An Emerging Core Theme in Earth System Science. *Aeolian Research*, 2(4): 181–204. https://doi. org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001
- Shi, X. F., Chen, L. R., Li, K. Y., et al., 1995. Study On Minerageny of the Clay Sediment in the West of Philippine Sea. *Marine Geology and Quanternary Geology*, 15(2):61-72(in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. G., Liu, X. D., 2011. Distinguishing the Provenance of Fine-Grained Eolian Dust over the Chinese Loess Plateau from a Modelling Perspective. *Tellus B*, 63(5): 959-970. https://doi.org/10.3402/tellusb.v63i5.16429
- Shu, P. X., Li, B. S., Wang, H., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Surface Dune Sand in the Mu Us Desert, Inner Mongolia, and Implications for Reconstructing the Paleoenvironment. *Quaternary International*, 479: 106-116.https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.05.053
- Sun, J. M., 2002. Provenance of Loess Material and Formation of Loess Deposits on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(3/4): 845-859. https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00921-4
- Sun, Y. B., An, Z. S., 2000. Sedimentary Interpretation of Surface Textures of Quartz Grains from the Eolian Deposits. Acta Sedimentologica Sinica, 18(4): 506-509, 652(in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., Mclennan, S. M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks.

Blackwell Scientific Pub, London.

- Wan, S. M., Yu, Z. J., Clift, P. D., et al., 2012. History of Asian Eolian Input to the West Philippine Sea over the Last One Million Years. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 326-328: 152-159. https: //doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.02.015
- Wehausen, R., Tian, J., Brumsack, H. J., et al., 2003. Geochemistry of Pliocene Sediments from ODP Site 1143 (Southern South China Sea). *Scientific Results*, 184: 1-25.
- Wen, X. H., Li, B. S., Zheng, Y. M., et al., 2016. Early Holocene Multi-Centennial Moisture Change Reconstructed from Lithology, Grain-Size and Chemical Composition Data in the Eastern Mu Us Desert and Potential Driving Forces. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 459:440-452. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.07.035
- Xu, Z. K., Li, T. G., Colin, C., et al., 2018. Seasonal Variations in the Siliciclastic Fluxes to the Western Philippine Sea and Their Impacts on Seawater eNd Values Inferred from 1 Year of in Situ Observations above Benham Rise. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123: 6688– 6702. https://doi.org/10.1029/2018JC014274
- Xu, Z. K., Li, T. G., Wan, S. M., et al., 2014. Geochemistry of Rare Earth Elements in the Mid-Late Quaternary Sediments of the Western Philippine Sea and Their Paleoenvironmental Significance. *Science China Earth Sciences*, 57(4): 802-812. https://doi. org/10.1007/ s11430-013-4786-z
- Xu, Z. K., Li, T. G., Yu, X. K., et al., 2012. Sediment Provenance and Evolution of the East Asian Winter Monsoon since 700 Ka Recorded by Major Elements in the West Philippine Sea. *Chinese Science Bulletin*, 58(9): 1044– 1052. https://doi.org/10.1007/s11434-012-5538-8
- Yang, X. P., Zhu, B. Q., White, P. D., 2007. Provenance of Aeolian Sediment in the Taklamakan Desert of Western

China, Inferred from REE and Major-Elemental Data. *Quaternary International*, 175(1): 71-85. https://doi. org/10.1016/j.quaint.2007.03.005

- Yu, Z. J., Wan, S. M., Colin, C., et al., 2016. 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 446: 45-55.
- Zhang, H. C., Li, J. J., Ma, Y. Z. et al., 1997. A Study on Elemental Geochemical Characters of the Wuwei Loess Section in the South Vicinity of Tengger Desert. Acta Sedimentologica Sinica, 15(4): 154-160 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. C., Sun, Y. B., Balsam, W., et al., 2014. Hf-Nd Isotopic Variability in Mineral Dust from Chinese and Mongolian Deserts: Implications for Sources and Dispersal. *Scientific Reports*, 4(1): 5837. https://doi.org/ 10.1038/srep05837

#### 附中文参考文献

- 靳宁,李安春,刘海志,等,2007.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.海洋与 湖沼,38(6):504-511.
- 毛欣,刘林敬,李长安,等,2017.丰宁黄土-古土壤剖面常 量元素地球化学特征.地球科学,42(10):1750-1759.
- 邵龙义,王文华,幸娇萍,等,2018.大气颗粒物理化特征和影响 效应的研究进展及展望.地球科学,43(5):1691-1708.
- 石学法,陈丽蓉,李坤业,等,1995.西菲律宾海西部海域粘 土沉积物的成因矿物学研究.海洋地质与第四纪地质, 15(2):61-72.
- 孙有斌,安芷生,2000.风尘堆积物中石英颗粒表面微结构 特征及其沉积学指示.沉积学报,18(4):506-509,652.
- 张虎才,李吉均,马玉贞,等,1997.腾格里沙漠南缘武威黄 土沉积元素地球化学特征.沉积学报,15(4):154-160.