

西太平洋风尘沉积记录研究进展^{*}

万世明^{1,2} 徐兆凯^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 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 青岛 266061)

摘要 研究海底风尘组份、来源和通量的地质记录,对于理解风尘在行星辐射平衡、全球大洋的营养盐供应及碳循环中的作用,以及源区古气候和古大气环流重建有着非常重要的意义。作为全球第二大风尘源区的亚洲内陆,其风尘产物主要被东亚冬季风及西风带携带至西太平洋。现有西太平洋风尘沉积记录的工作主要集中在冰期-间冰期时间尺度,尤其近几年在西菲律宾海和赤道太平洋第四纪风尘物源及通量变化方面取得了重要的进展,在日本海中新世以来的长期风尘记录及其驱动机制方面也获得了重要认识。至少在晚第四纪以来的冰期-间冰期时间尺度上,从高纬度到赤道甚至南极的全球范围,风尘通量在冰期约高出间冰期 2—3 倍,表明冰期风尘源区更加干旱而风力更为强劲。在新生代以来,西太平洋的长期风尘输入主要反映了亚洲内陆干旱逐渐增强,是受到青藏高原隆起和全球变冷的共同影响。但是,总体上西太平洋风尘沉积的研究程度非常低,突出反映在以下几个方面:风尘从源到汇搬运和沉积过程的现代观测的缺乏、大洋风尘组分含量及通量定量化中的误区、西太平洋风尘沉积长期演变特征、机制及风尘长期输入对大洋生产力及全球碳循环的影响方面的研究亟待加强。

关键词 风尘; 源-汇过程; 碳循环; 西太平洋; 日本海; 西菲律宾海

中图分类号 P736 **doi:** 10.11693/hyz20170900224

风尘,即由大气环流携带的陆源碎屑物质,是许多深海沉积物的重要组成部分(Rea, 1994)。自 1846 年达尔文在 Beagle 号考察船上观测风尘开始,科学家对风尘颗粒搬运和深海沉积的兴趣已经有一百七十余年的历史(Rea, 2007)。据估计,每年约有二十亿吨风尘物质从陆地被释放到大气中,最终有约 75% 的风尘会沉降到附近陆地,形成了黄土高原等特殊地形,而其余的 25% 则被传输并沉积到海洋(Shao et al, 2011)。作为全球第二大风尘源区,亚洲内陆每年向东南方向的黄土高原地区(Porter et al, 1995)、西北太平洋(Rea et al, 1988; Nagashima et al, 2007)及热带西太平洋地区(Winckler et al, 2008)提供了大量的风尘物质。其中,每年输送到西北太平洋的粉尘达到七千万吨之多(Shao et al, 2011)。因此,源自于亚洲内陆的风尘物质被认为在陆地和海洋沉积过程乃至全球

尺度气候变化方面起着非常重要的作用(Porter et al, 1995; Jickells et al, 2005; Winckler et al, 2008; Shao et al, 2011; Xiong et al, 2013)。

这些释放到大气和沉积到海洋的粉尘颗粒会参与一系列物理、化学和生物地质过程。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)明确提出,大气粉尘通过反射和吸收地球所接受的太阳辐射,可直接影响大气顶层和表层的辐射通量以及大气的加热速率和稳定性,从而是影响全球辐射平衡的重要组成部分(Forster et al, 2007)。此外,风尘中的铁是大洋生产力的关键营养盐元素,从而可对海洋-大气 CO₂ 交换产生重要影响(Cassar et al, 2007)。近些年来,越来越多的工作揭示出粉尘在大洋生物地球化学循环中的重要作用。冰期阶段中陆源风尘物质及其蕴含的铁营养元素的增

* 中国科学院战略性先导科技专项(A类), XDA11030104号; 国家自然科学基金项目, 41576034, 41376064号; 中科院创新交叉合作团队项目“海山成因演化及深部物质循环”。万世明, 研究员, E-mail: wanshiming@ms.qdio.ac.cn

多会刺激大洋高营养盐低叶绿素海区中的生物生产力, 这一生物泵效应可导致大气 CO₂ 被转移到深海沉积物中埋藏起来从而可影响碳循环, 其贡献被估计为可降低冰期 CO₂ 浓度约 30 ppmv (Falkowski *et al.*, 1998), 这就是著名的“铁假说”(Martin, 1990)。“铁假说”自提出以来, 已经得到了大量海上实验及岩芯记录工作的证实(Jickells *et al.*, 2005; Boyd *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2011; Murray *et al.*, 2012)。除了粉尘的物理和生物化学效应外, 粉尘本身作为来自干旱源区的产物并随后被风远距离携带, 因此与气候因素密切相关, 从而粉尘沉积在古气候研究中如源区古环境和古大气环流强度/模式重建中有着重要的科学价值(Rea *et al.*, 1998)。

相对于陆相粉尘记录, 海洋风尘沉积物的研究有许多优势。首先, 其分布广泛, 有更好的代表性和区域对比性; 其次, 海洋沉积相对陆相沉积来说, 沉积序列更为连续; 再者, 海洋沉积物在定年上有绝对优势, 有孔虫的氧同位素、²³⁰Th/²³²Th、火山灰层、微体古生物化石及古地磁等多种技术针对不同的时间尺度, 可以提供高分辨率的年代框架; 最后, 海洋岩芯还可以同时对风尘同层位样品的其他海洋自生指标如海洋初级生产率、海水 pH 值和碳酸根离子浓度、表层海水温度、盐度等进行综合研究, 从而提供一些风尘与大洋生物地球化学过程相互作用的关键信息, 这也是陆地风尘记录所不具备的(Muhs, 2013)。

但是, 海洋风尘沉积研究也有其自身的难点, 其中一个主要困难在于如何准确定量沉积物中风尘的比例。尤其对于边缘海沉积更是如此, 河流沉积物、火山灰甚至冰筏碎屑都可能提供物源到研究站位, 从而稀释风尘的贡献。为了避开这些干扰, 风尘研究站位常常都选取在远离大陆河流的开放大洋中的海山顶部(Rea, 1994)。尽管如此, 也无法避开火山玻璃或自生矿物的影响。通常有两种方法分离风尘组分和非风尘组分, 一种是物理分离, 另一种是数学分离(万世明等, 2004)。前者主要采用一系列前处理手段如化学溶蚀去掉自生碳酸钙、生物硅等提取出“准风尘”组分(Rea *et al.*, 1981), 在分离完成后, 矿物颗粒就可以用来计算/测量通量(物质堆积速率=风尘含量×线性沉积速率×干容重)及粒度、矿物学和地球化学组成。这一方法被广泛应用于 90 年代之前的海洋风尘沉积研究工作中(Rea *et al.*, 1998), 并被延续至今, 但现在更多发展成为物理的分离并结合 Sr-Nd-Pb 同

位素技术定量估计风尘组分的含量(Xu *et al.*, 2015; Shen *et al.*, 2017)。数学分离方法则常基于激光粒度数据的数学统计方法来模拟各个潜在端元的粒度分布从而定量不同端元如风尘、河流、冰筏碎屑等的贡献。这种技术被广泛应用于大西洋(Stuut *et al.*, 200; Stuut *et al.*, 2004), 东地中海(Hamann *et al.*, 2008)和中国南海(Wan *et al.*, 2007)。该技术操作简单, 但解释的可靠性还需要其他证据谨慎检验。

海洋风尘沉积参数的古气候解释通常基于这样一种基本假设(Rea, 1994), 即风尘由高空气流长途搬运, 当距离风尘源区超过两千公里时, 风尘的粒度和成分已与大气流的能量趋于平衡而保持稳定, 因此风尘的粒度可以反映搬运风力强度的变化; 而风尘的通量则指示源区的古气候; 风尘的矿物组分则可以提供风尘源区的信息。故此, 保存在海洋沉积物中的风尘的组成、粒度和物质通量可以作为长尺度源区古环境和大气循环历史研究的代用指标。

在上述基本认识的基础上, 本文主要回顾在西太平洋风尘沉积记录研究领域取得的一些主要认识, 并重点阐述近几年来我们在西菲律宾海和日本海风尘记录研究中取得的一些新进展及简要展望未来的研究方向。

1 西太平洋的风尘沉积记录

我们对于太平洋地区风尘沉积的了解, 很大程度上来自美国密西根大学的 David Rea 教授和他的学生及同事数十年的开拓性工作。他们还开展了一个专门针对北太平洋风尘记录研究的大洋钻探计划(ODP)145 航次(包括 885/886 站, 图 1)(Rea, 1994, 2007), 通过风尘通量及风尘中值粒径分别指示风尘源区干旱度和风力强度, 并将这一方法用于太平洋地区大量的岩芯研究, 成为后人学习的典范。但限于条件, 有些问题当时并没有被很好解决, 如深海硅酸盐碎屑组分中, 不仅包含风尘, 还有火山灰及少量自生矿物, 尤其在靠近岛弧的研究区, 火山灰组分含量很高, 如果把去掉碳酸盐剩下的组分都当成风尘, 会大大高估风尘的贡献。因此, 在阅读 David Rea 教授的论著时, 要特别注意文中的风尘通量或粒度很多实际上并非“纯风尘”, 而是硅酸盐组分(可能含风尘、火山玻璃、自生矿物等), 甚至还有难溶的硅质生物壳体。

北太平洋沉积的风尘主要来自亚洲内陆干旱地区, 为西风携带而来, 但东亚冬季风也可以携带大量风尘到西太平洋边缘海包括日本海和西菲律宾海等

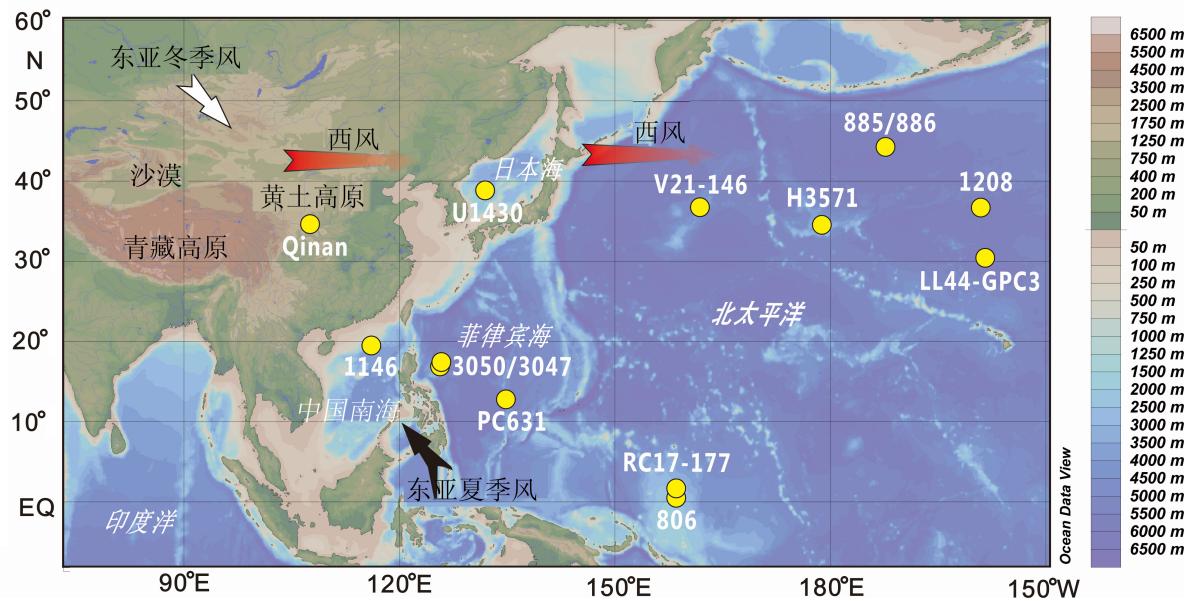


图 1 本文提到的海洋和陆地风尘记录的研究站位图

Fig.1 Location Map showing marine and terrestrial sediment cores mentioned in this study

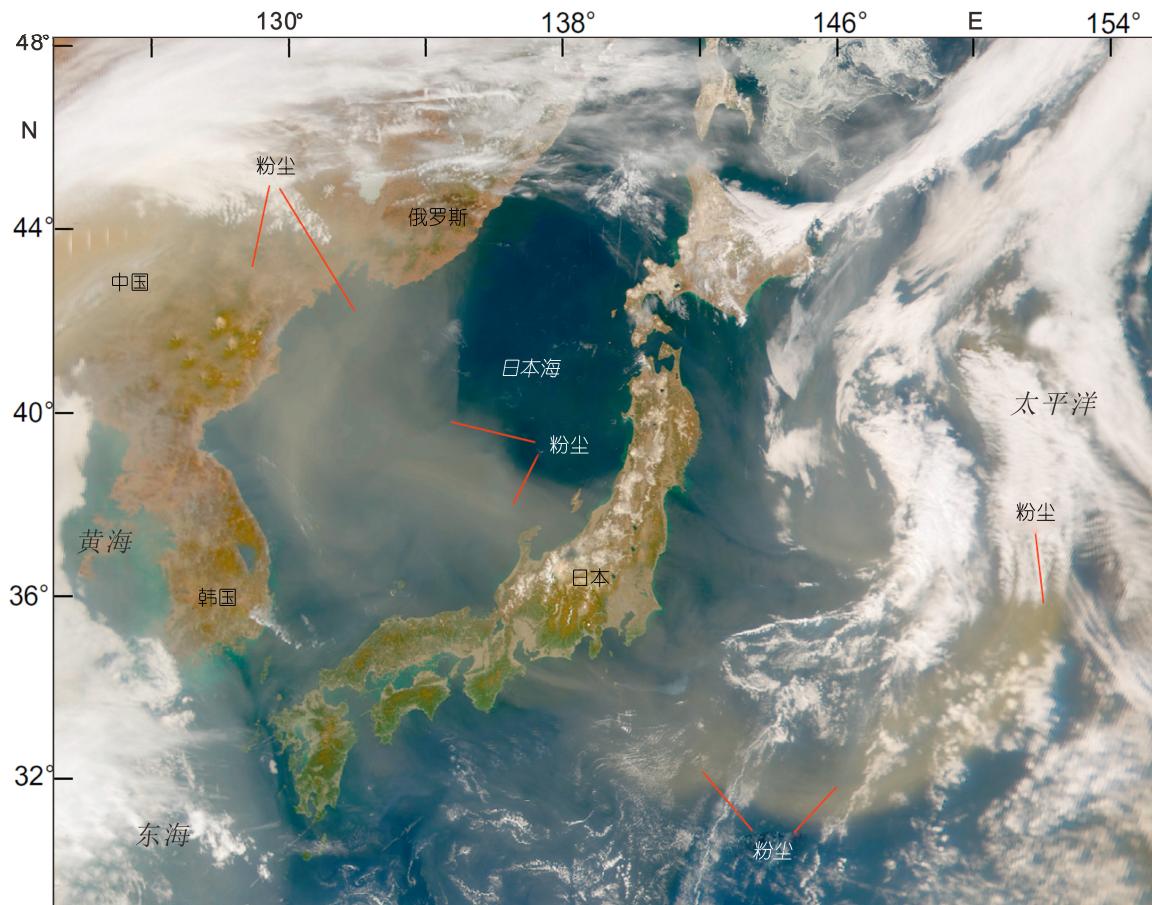


图 2 卫星照片显示的亚洲风尘向西太平洋的传输(修改自 Muhs, 2013)

Fig.2 Satellite image showing dust moving eastward from source areas in mainland Asia to the Sea of Japan and west Pacific Ocean (from Muhs, 2013)

注: 注意日本海南部及邻近西北太平洋受到风尘的影响非常大

邻近东亚大陆的海域(图 2)(Wan *et al*, 2012; Xu *et al*, 2015; Shen *et al*, 2017)。亚洲粉尘源区存在的历史可追溯至二千二百万年到三千四百万年之前, 被认为与青藏高原隆起有关(Guo *et al*, 2002; Zheng *et al*, 2015)。可以恢复至中新世之前的海洋风尘堆积的长期记录主要来自于西风盛行的北太平洋的沉积物岩芯。这些记录中最长的一个代表性岩芯是 LL44-GPC3 (30.3°N, 157.8°W), 该孔建立了七千万年以来的大陆干旱和风力强度记录(图 3)(Janecek *et al*, 1983)。粉尘通量数据显示出在渐新世和更老的时候粉尘输入很少, 而在二千四百万年左右粉尘通量增加为 2 倍, 伴随着晚新生代的变冷和北半球干旱, 粉尘大幅度增加。而该孔的风尘粒度显示在晚始新世变粗, 并且到现在仍然阶段性地持续增加。粉尘粒度在古新世-始新世边界的变化也见于其他北太平洋钻孔, 可能指示了当时西风环流强度的加强(Rea, 2007)。晚新生代亚洲干旱和风力强度的更详细记录来自于北太平洋 ODP885/886

站(44.7°N, 168.3°W), 可追溯至晚中新世一千二百万年以来(图 3)(Rea *et al*, 1998)。其岩芯为生物软泥, 有好的地磁反转地层记录, 相比更南部的 LL44-GPC3 孔有更好的年代控制。该孔显示了晚新生代气候变化的许多重要信息(Rea *et al*, 1998)。尤其三百六十万年以来, 粉尘通量有一个数量级的增加, 反映了青藏高原北部中亚盆地的快速变干, 被认为是青藏高原北部快速隆升的结果。但是, 来自 ODP885/886 站的风尘粒度信息则展示了不同于 LL44-GPC3 孔的另外一种情形。粒度和通量数据各自独立变化, 相关性较少。粒度数据显示出四百五十万年左右西风环流强度的加强, 这领先粉尘通量增加约一百万年, 可能指示北半球热力梯度的变化(Rea *et al*, 1998)。但是, 最近来自 Shatsky 隆起上的 ODP1208 站(36.13°N, 158.2°E) 记录的二千五百万年以来的陆源物质通量却总体上逐渐增加(Zhang *et al*, 2016), 没有 ODP885/886 站所展示的阶段性显著增加趋势(Rea *et al*, 1998)。

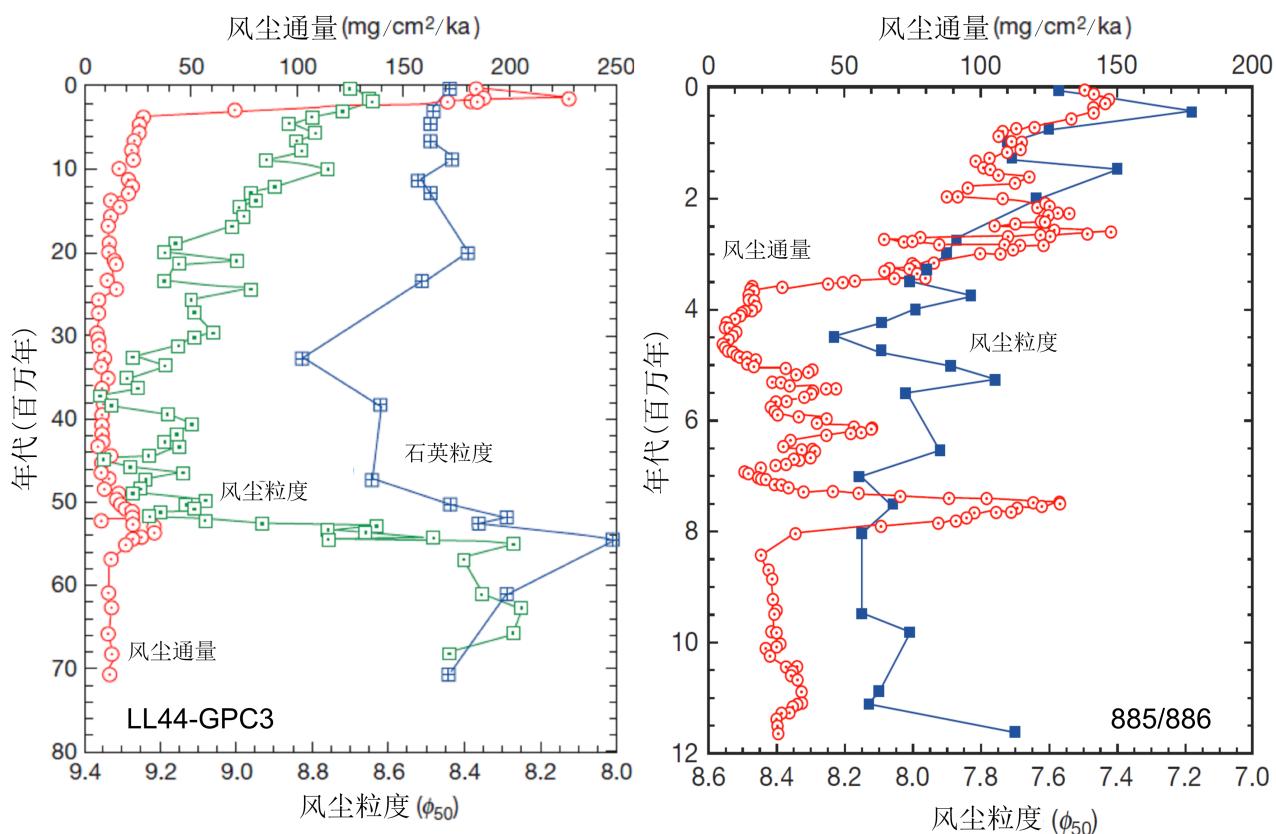


图 3 北太平洋 LL44-GPC3(Janecek *et al*, 1983)和 ODP885/886 孔(Rea *et al*, 1998)记录的新生代以来风尘通量和中值粒径变化

Fig.3 Dust accumulation rate and grain size of dust and quartz grains extracted from core LL44-GPC3 (Janecek *et al*, 1983) and ODP Sites 885/886 (Rea *et al*, 1998) in the North Pacific Ocean

在第四纪以来，已有大量工作揭示了冰期-间冰期时间尺度上北太平洋风尘通量的变化。其中最具研究代表性的一个岩芯为 V21-146 (37.7°N , 163.0°E)，位于日本岛弧以东的 Shatsky 隆起上，离中国粉尘源区约三千五百公里，该岩芯显示五十万年以来风尘通量在冰期时相对间冰期增加 3.5 倍左右，这是首次有关海洋风尘沉积记录可以与中国陆地黄土序列和深海氧同位素曲线直接对比的报道(图 4)(Hovan *et al.*, 1989)。有意思的是，在十万年周期

谱段，该孔风尘粒度在间冰期较粗，却在冰期较细，这与黄土序列记录的东亚冬季风变化正好相反(Ding *et al.*, 2002)，有可能指示西风强度不同于冬季风在冰期尺度的变化特征。Shatsky 隆起站位以东一千五百公里的 Hess 隆起上的另一个岩芯 H3571 (34.9°N , 179.7°E)也显示出类似的风尘通量变化模式，只是通量最大值的时间和幅度有所差异(Rea, 1994)，可能由于年代框架或其他因素(如源区差异或远近不同)所致。

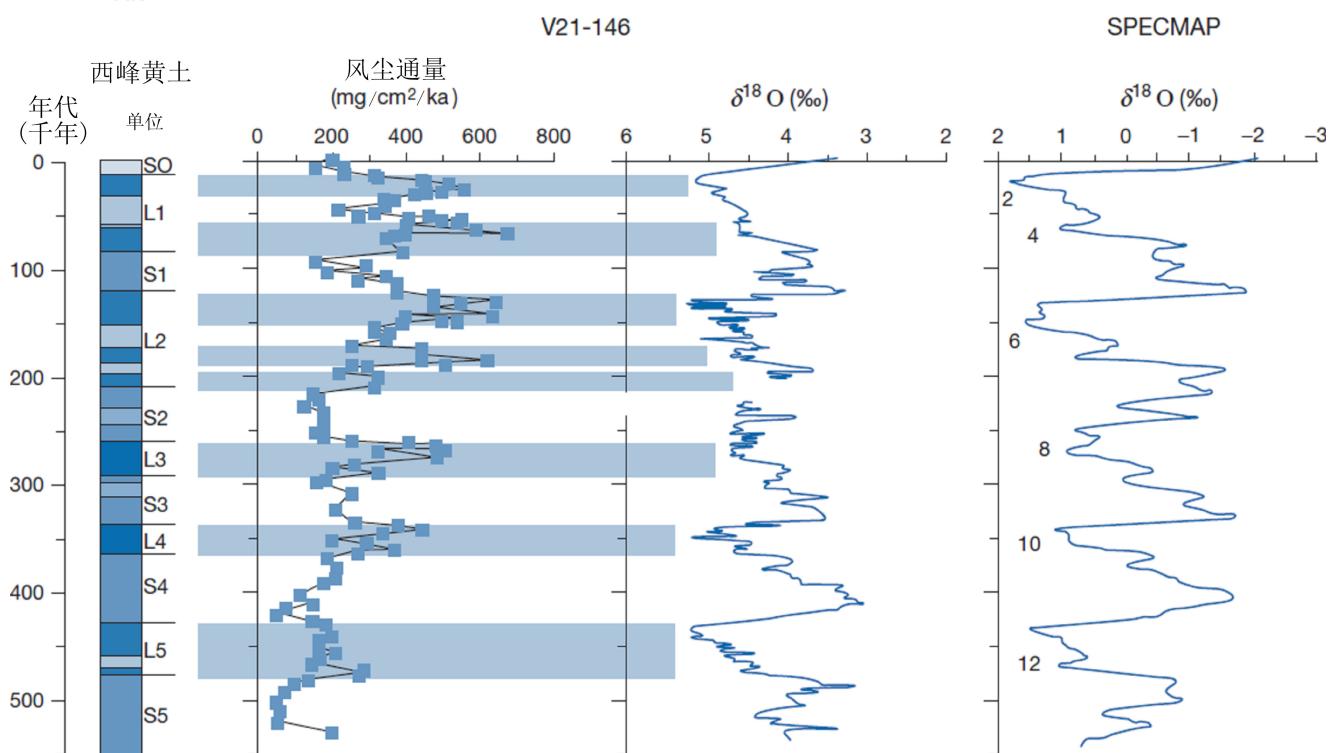


图 4 北太平洋 V21-146 孔记录的 50 万年以来风尘通量变化和中国黄土及深海氧同位素记录对比(修改自 Rea, 2007)

Fig.4 Dust accumulation record since 500 ka from core V21-146 in the northwestern Pacific Ocean (from Rea, 2007)

在赤道太平洋地区，沉积物中风尘含量因为较低而很难定量，常常有火山灰混入，而且其风尘来源也不是单一来源，可能包括了亚洲、澳大利亚甚至南美的混合风尘(Maher *et al.*, 2010)。正因如此，早期赤道太平洋地区的风尘通量定量存在困难，没有观察到明显的冰期-间冰期风尘通量变化，直到 ^{230}Th 标准化”技术的应用才解决了这一问题(Anderson *et al.*, 2006)。该方法基于这样的假设前提：即含 ^{230}Th 的风尘颗粒沉降到海底的延迟速率等于其上覆水层中 ^{234}U 衰变成 ^{230}Th 的形成速率。因此，通量可以通过沉积物中清扫自水体的 ^{230}Th 浓度除以上覆水体中 ^{230}Th 的形成速率得到。此外， ^{232}Th 堆积速率通常被

用于风尘堆积速率的代用指标。不同于 ^{230}Th 主要来自水体中 ^{234}U 的原位放射性衰变， ^{232}Th 主要来自大陆风尘(Th 含量平均 16ppm)，其浓度高出岛弧火山物质一个数量级(平均 1.2ppm)，且在海水中几乎不溶解，不会遭受沉积后氧化还原影响，从而可作为风尘颗粒的一种可靠指标(Anderson *et al.*, 2006)。从西赤道太平洋到东赤道太平洋的一系列 ^{232}Th 指标的岩芯记录揭示出赤道太平洋风尘通量在过去五十万年来冰期阶段相对间冰期高出近 2 倍，且和南极冰芯粉尘通量变化一致(图 5)(Winckler *et al.*, 2008)。

因此，越来越多的数据揭示出，至少在晚第四纪以来的冰期-间冰期时间尺度上，从高纬度到赤道甚

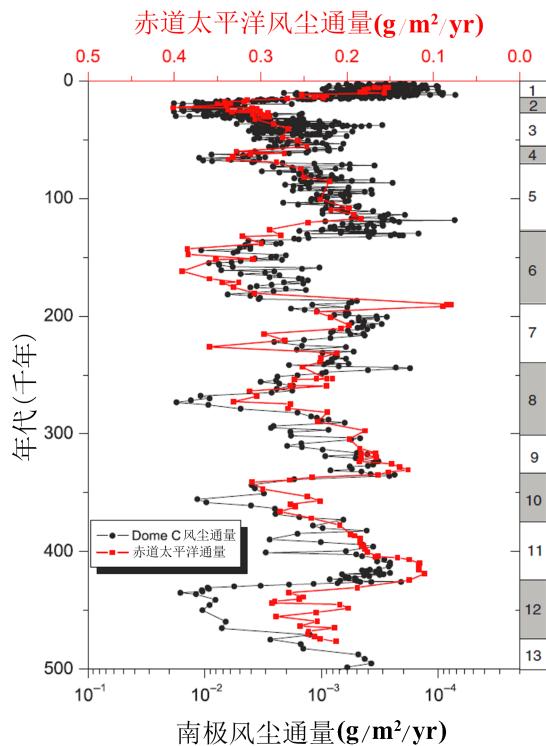


图 5 赤道太平洋 ^{232}Th 指标合成记录的 50 万年以来风尘通量变化和南极冰芯风尘记录对比(修改自 Winckler 等, 2008)

Fig.5 Time series of ^{232}Th -based dust flux of the central equatorial Pacific and the Antarctic ice core (after Winckler *et al.*, 2008, modified)

至南极的全球范围, 风尘的产生和传输过程具有惊人的一致性响应。粉尘通量值跨越赤道太平洋从北到南的变化可能响应于热带辐合带(ITCZ)的强度或经度位置的改变(Rea, 1994; Rea *et al.*, 1995; McGee *et al.*, 2007; Ziegler *et al.*, 2008)。

2 西菲律宾海的风尘沉积记录

西菲律宾海是热带西太平洋地区的一个典型风尘汇聚区, 同时也是黑潮暖流的发源地。该海区的重要地质意义早在二十世纪七十年代就引起了全球科学家们的高度关注, 至今已进行了六个航次的深海钻探(DSDP)和大洋钻探(ODP)研究。

基于西菲律宾海表层沉积物黏土矿物组成中伊利石含量的分布趋势(西北-东南递减), 科学家早在二十世纪六十年代和八十年代就指出了亚洲内陆风尘物质对菲律宾海沉积物组成的潜在贡献(Griffm *et al.*, 1963; Kolla *et al.*, 1980)。这随后得到了西菲律宾海表层和柱状沉积物中粒度、矿物、化学元素及 Rb-Sr 同位素等工作的证实(Asahara *et al.*, 1995, 1999; 秦蕴

珊等, 1995; 石学法等, 1995)。更直接的证据则来自四国海盆沉积物捕获器(29.5°N , 135.25°E)近两年时间连续观测的结果, 发现春季时亚洲内陆粉尘事件与菲律宾海沉积物中高风尘及生物组分通量间存在密切的联系(Li *et al.*, 2004)。

最近几年, 国内外对菲律宾海第四纪沉积物中风尘物质贡献定量化、源区识别及其搬运动力的研究达到了一个高潮。一方面, 基于对菲律宾海柱状沉积物中碎屑态的粒度、黏土矿物、化学元素和 Sr-Nd 同位素以及硅藻席的 Si 同位素等大量指标的系统研究, 国内外科学家从定性、半定量及定量等不同层面上明确了第四纪亚洲内陆风尘物质对菲律宾海的输入(Wan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012, 2013, 2014, 2015; 于兆杰等, 2012; Jiang *et al.*, 2013; Xiong *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2014)(图 6—8)。但是, 对于菲律宾海中亚洲风尘物质的具体源区究竟是亚洲东部沙漠地带还是亚洲中部沙漠地带以及其具体携带动力究竟是东亚冬季风还是西风带, 迄今仍存在争议。

无论是从现代观测还是从地质历史时期风尘物质来源重建的角度出发, 菲律宾海现有的基于黏土矿物、元素及 Sr-Nd-Si 同位素等指标的绝大部分研究工作都支持研究区的风尘物质主要来自于亚洲东部沙漠地带, 其主要携带动力为东亚冬季风(戴璐等, 2010; Shao *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012, 2013, 2014, 2015; Jiang *et al.*, 2013; Xiong *et al.*, 2013)。与之相反, Seo 等(2014)仅基于菲律宾海中部地区一根六十万年来的沉积物岩芯 PC631(12.5°N , 135°E)中十七个样品黏土矿物组成提出了一种不同的观点: 即研究区的风尘物质主要来自于亚洲中部沙漠地带, 其主要携带动力是西风带和信风, 而非传统意义上所认为的东亚冬季风。该观点虽然新颖, 但却存在着非常明显的问题。其一, 相同样品的碎屑态 Sr-Nd 同位素组成这一相对黏土矿物组成更为有效的物源判别指标所得出的物源结论明显不支持该观点。具体来说, 这些样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ε_{Nd} 值明显偏离吕宋岛和亚洲中部沙漠地带风尘物质的混合曲线, 表明亚洲中部沙漠并非所研究沉积物中风尘组分的主要来源(图 7)(Xu *et al.*, 2016)。相反, 这些样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ε_{Nd} 值 [$\varepsilon_{\text{Nd}} = ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}_{\text{样品}}/0.512638 - 1) \times 10000$] 更接近吕宋岛和亚洲东部沙漠(鄂尔多斯)风尘物质的混合曲线, 表明东亚冬季风携带下的亚洲东部沙漠(鄂尔多斯)地带粉尘物质为研究区沉积物中风尘组分的主要贡献者(Xu *et al.*, 2016)。其二, 基于西菲律宾海

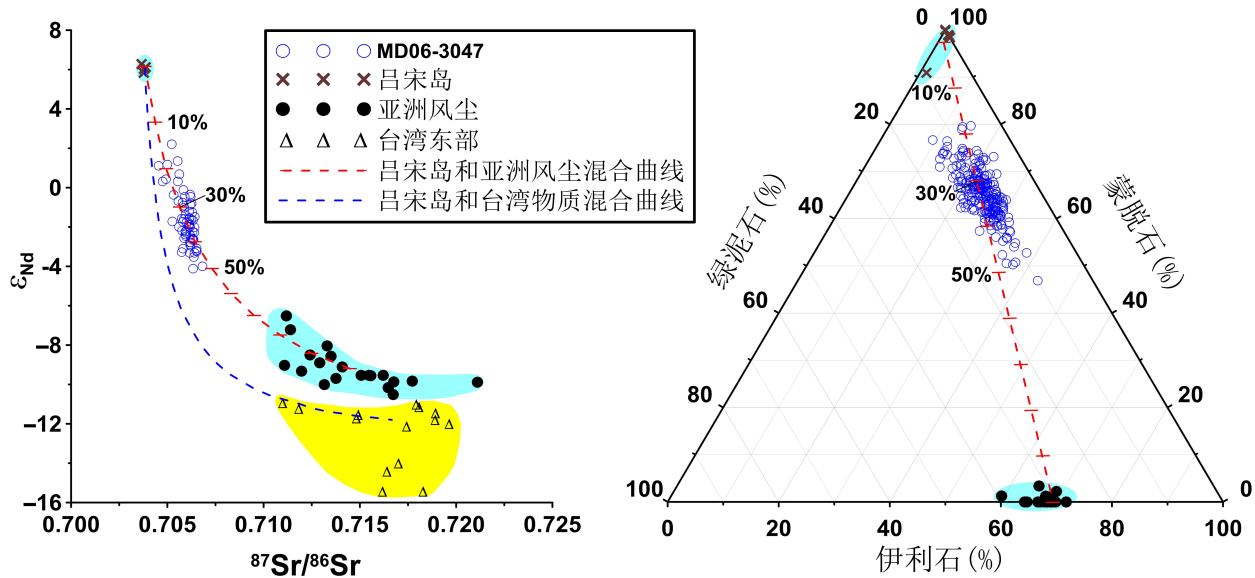


图 6 基于 Sr-Nd 同位素和黏土矿物组成的西菲律宾海 MD06-3047 孔沉积物来源判别图解(修改自 Xu *et al.*, 2015)
Fig.6 Discrimination plots showing variations in Sr-Nd isotopes and clay mineral assemblages of Core MD06-3047 sediments in the western Philippine Sea (from Xu *et al.*, 2015)

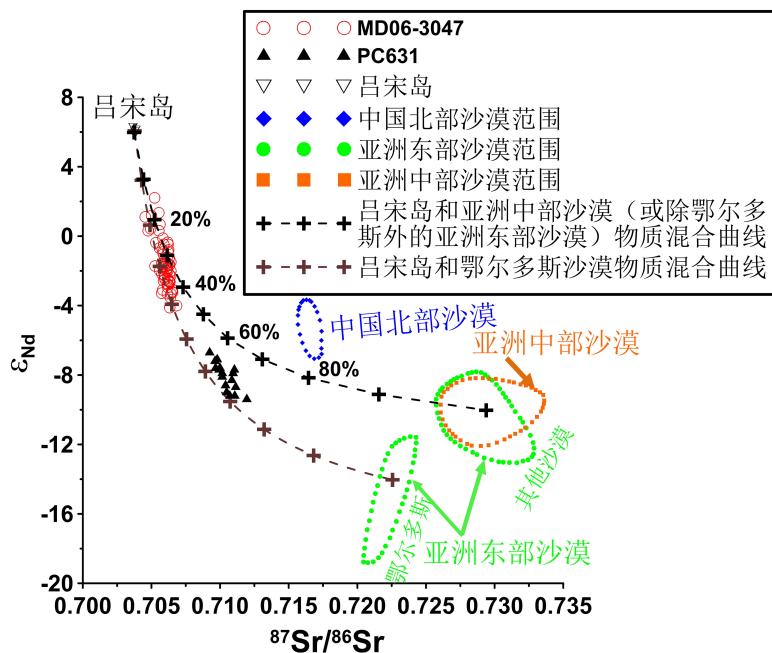


图 7 基于 Sr-Nd 同位素组成的西菲律宾海 MD06-3047 孔和菲律宾海中部 PC631 孔沉积物来源判别图解(修改自 Xu *et al.*, 2016)
Fig.7 Discrimination plot showing variations in Sr-Nd isotopes of Core MD06-3047 sediments in the western Philippine Sea and Core PC631 sediments in the central Philippine Sea (from Xu *et al.*, 2016)

MD06-3047 孔($17.0^{\circ}\text{N}, 124.8^{\circ}\text{E}$)(Xu *et al.*, 2012)和 MD06-3050 孔($15.95^{\circ}\text{N}, 124.78^{\circ}\text{E}$)(Wan *et al.*, 2012)沉积物黏土矿物组成数据也明显不支持 Seo 等(2014)的观点(Xu *et al.*, 2016)。

此外,通过高、低纬太平洋海区陆源风尘物质输入通量的系统对比,研究还发现它们在中-晚第四纪以来的变化非常一致,几乎可以进行峰与峰或谷与谷间的一一对比,表明高、低纬太平洋海区风尘物质

输入通量演化的主控因素为全球气候变化,而区域性因素的影响则可能很小(Wan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2015)。而中-晚第四纪以来西菲律宾海中亚洲风尘物质输入量与当地古生产力水平乃至南极冰芯所记录到的大气二氧化碳浓度间随时间变化的一致性(图 8),则

可能指示着冰期时低纬西太平洋地区亚洲内陆沙漠来源风尘物质输入的增加刺激了当地古生产力水平的提高,进而将更多大气二氧化碳带入海底埋藏下来,从而表明低纬西太平洋地区对冰期时大气二氧化碳浓度降低的可能贡献(Xiong *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2015)。

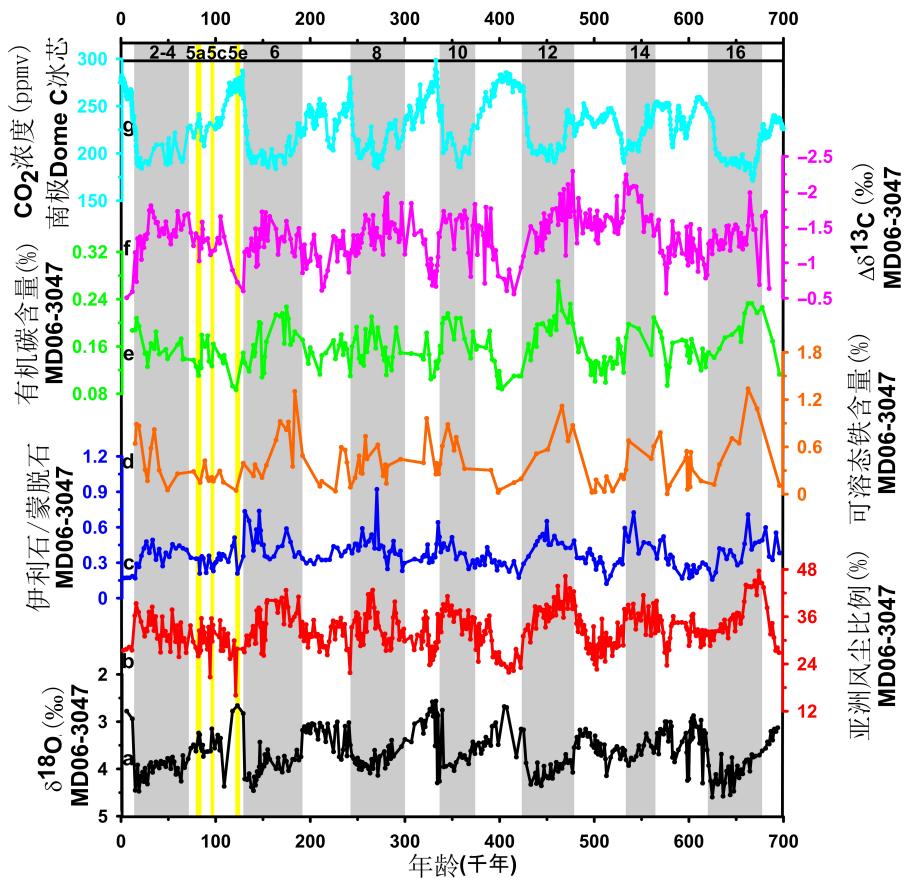


图 8 七十万年来的西菲律宾海亚洲风尘物质输入及其古生产力和碳循环效应(灰色阴影区指示冰期阶段)(修改自 Xu *et al.*, 2016)

Fig.8 Asian dust input into the western Philippine Sea since 700 ka and its significance for paleo-productivity and carbon cycle (the shaded bars indicate glacial periods) (after Xu *et al.*, 2016, modified)

3 日本海的风尘沉积记录

日本海是位于太平洋西北部的由郁陵海盆(Tsushima/Ulleung Basin)、大和海盆(Yamato Basin)以及日本海盆(Japan Basin)等三个海盆组成的一个半封闭的边缘海,通过对马海峡、津轻海峡、宗谷海峡以及鞑靼海峡等四个海槛深度低于一百三十五米的海峡分别与东海、太平洋以及鄂霍次克海等相邻海域相连(Tada *et al.*, 2015)。日本海东侧为日本岛弧,西侧毗邻朝鲜半岛、中国东北部和俄罗斯东南部。相比其他东亚边缘海(如黄渤海和南海)都有世界级大河输入巨量陆源物质,日本海东西侧的朝鲜半岛和日本

岛弧只发育了一些很小的河流(如 Nakdong, Seumjin, Agano, Mogami 等),各自每年分别向对马海峡和日本海输送的沉积物仅有约一千万吨(Milliman *et al.*, 2011)。正因如此,日本海的风尘输入信号不容易被河流输入掩盖。并且,因为日本海正好位于亚洲风尘通过西风带向北太平洋传输的路径上,因此日本海是来自亚洲大陆风尘的主要沉降区(图 1, 2)。

根据电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)以及石英结晶度,日本海中沉积的风尘物质的可能源区包括黄土高原及其周边土壤、包括塔克拉玛干沙漠在内的中东亚内陆干旱区以及中国东北部的西伯利亚地区,主要由西风或东亚冬季风携带而来

(Nagashima *et al*, 2007)。研究表明, 日本海的风尘堆积速率为 0.2—4.5g/cm²/ky, 是介于 30°—40°N 之间的太平洋地区的十倍以上(Irino *et al*, 2002), 据此估计日本海风尘输入量约每年三千万吨, 主要沉降在靠近中国大陆且位于西风路径上的日本海西南部。沉积物捕集器研究估测日本海南部现今的风尘通量为 23—45g/m²/y(Otosaka *et al*, 2004), 这和日本海 ODP797 站(38.6°N, 134.5°E) (Irino *et al*, 2002) 和 IODP U1430 站(37.9°N, 131.54°E)(Shen *et al*, 2017) 在第四纪时期的陆源物质通量几乎相当, 暗示风尘对日本海第四纪沉积物的重要贡献。

日本海晚第四纪的风尘沉积记录已有较多工作。与搬运到太平洋中的风尘相似, 日本海沉积物中的风尘物质也大致显示出了冰期-间冰期旋回变化特征, 在末次冰期冰盛期(LGM)时日本海中的风尘在千年尺度上的堆积速率达到最大, 为其他时期的 2—4 倍(Irino *et al*, 2002)。并且, 在冰期时搬运至日本海中的风尘物质颗粒粒径也通常大于间冰期时期的粒径(Irin *et al*, 2000; Nagashima *et al*, 2007)。颜色韵律变化是日本海晚第四纪沉积物的最显著特征, 通常深色层较浅色层的风尘含量偏低(Irin *et al*, 2000)、粒度偏细(Nagashima *et al*, 2007)。

相比之下, 日本海构造时间尺度(百万年)的风尘沉积记录非常少。最近, 来自日本海南部郁陵海盆的国际综合大洋钻探计划(IODP)U1430 站长达两百五十八米岩芯的黏土矿物和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究建立了过去一千五百万年以来亚洲内陆风尘输入到日本海的长期记录(图 9), 并进而揭示了亚洲内陆干旱化历史及其与青藏高原隆升和新生代全球变冷的联系(Shen *et al*, 2017)。物源分析表明研究区黏土粒级碎屑物质主要来自亚洲内陆的风尘和日本岛弧河流物质的二端元混合。亚洲风尘提供了高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低 ε_{Nd} 而富含伊利石的物质, 而日本岛弧端元供应了低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、高 ε_{Nd} 而富蒙脱石的物质。伊利石/蒙脱石比值以及 ε_{Nd} 值用以指示亚洲内陆风尘输入的强度, 从而指示风尘源区的干旱历史。结果显示, 亚洲内陆自中新世以来整体逐渐变干, 尤其在约一千一百八十万年、八百万年、三百五十万年和一百二十万年发生了阶段性干旱化增强(图 9)。与新生代主要构造-气候事件的对比表明, 一千一百八十万年左右的亚洲干旱为青藏高原隆升和全球变冷(南极冰盖扩展)共同驱动, 八百万年左右的干旱为青藏高原北部进一步隆起驱动, 而三百五十万年以来全球变

冷(北极大冰盖扩展)则是晚上新世亚洲内陆干旱化增强的主导因素(Shen *et al*, 2017)。有意思的是, 在日本海的风尘记录和北太平洋 ODP885/886 站(Rea *et al*, 1998)、南海北部 ODP1146 站(Wan *et al*, 2007)及黄土记录(Guo *et al*, 2002)可以很好地对比, 但却不同于西北太平洋 Shatsky 隆起上的 ODP1208 站单调逐渐增加的陆源输入(Zhang *et al*, 2016)。

4 问题与展望

综上所述, 近几年在西菲律宾海和赤道太平洋第四纪风尘物源及通量变化方面取得了重要的进展。但是, 毋庸置疑, 总体上西太平洋风尘沉积的研究基础和程度其实是非常低的, 尤其突出反映在以下几个方面:

(1) 缺乏风尘从源到汇搬运和沉积过程的现代观测。这导致风尘的物源、传输机制及其生物地球化学效应只能通过海洋沉积岩芯样品的矿物地球化学工作来间接判别, 这显然存在很大不确定性甚至误判。如果有更大空间跨度(如从源头的亚洲内陆沙漠地带到物质汇聚区——西太平洋特定海区的大剖面)的沉积物捕集器或粉尘收集器的长期连续观测和分析, 显然可以给大洋岩芯的风尘沉积记录的解释提供更加直接而有力的证据。

(2) 风尘组分含量及通量定量化中存在误区。如前所述, 早期海洋风尘沉积研究的两个重要参数——风尘通量和粒度数据的质量严重依赖于所提取出“准风尘”的可靠性, 而这一所谓“准风尘”即使经过常规的化学前处理, 其实往往还包含有大量细粒级火山玻璃、难溶的生物硅(硅藻、海绵骨针等)和自生黏土矿物, 因此这种物理分离不是可靠的, 可能会得出错误的结论。需要配合分粒级、显微镜观察及 Sr-Nd-Pb 同位素等技术手段才能获取更真实的风尘含量和通量。

(3) 西太平洋风尘沉积长期记录的工作非常缺乏, 甚至有些记录互相矛盾的, 这造成新生代以来西太平洋风尘沉积长期演变特征及机制方面的研究程度甚低, 而在风尘长期输入对大洋生产力及全球碳循环潜在影响方面更是几乎没有。未来计划通过国际大洋发现计划(IODP)在西北太平洋钻取关键站位形成南北和东西断面对比, 展开长时间尺度、综合性的风尘物源、通量及生物地球化学效应方面的研究, 揭示新生代亚洲内陆干旱历史/西风/东亚冬季风长期演化历史及机制, 及亚洲风尘对构造时间尺度大洋生产力和全球碳循环的贡献。

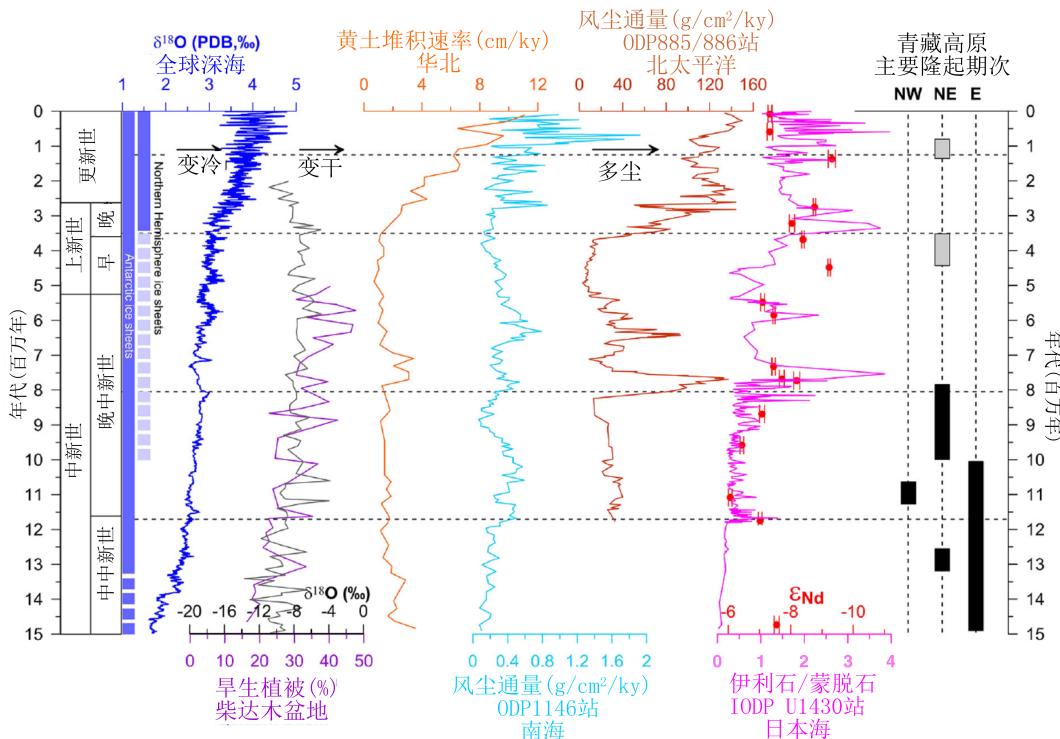


图9 过去一千五百万年以来亚洲内陆干旱演化的海陆记录及其与全球气候变化和青藏高原主要隆升事件的对比 (修改自 Shen et al, 2017)

Fig.9 Marine and terrestrial records since 15 Ma showing the evolution of stepwise aridity in Central Asia, global climate and major uplifts in the Tibetan Plateau (after Shen et al, 2017, modified)

注: 蓝色和浅蓝色方块分别表示两极冰盖的永久性或短暂扩展; 黑色和灰色方块分别表示有较强或不明确的证据所支持的高原隆起事件; 横虚线表示亚洲内陆干旱的四个阶段一千一百八十万年、八百万年、三百五十万年和一百二十万年; PDB: Peedee Belemnite, 标准物质美国拟箭石化石; NW、NE, E 分别表示高原西北部、东北部和东部的隆升。

参 考 文 献

- 于兆杰, 万世明, 孙晗杰等, 2012. 近百万年来亚洲风尘在西菲律宾海的沉积物粒度记录. 地球环境学报, 3(2): 792—800
 万世明, 李安春, 2004. 海洋风尘沉积的古气候学研究进展. 地球科学进展, 19(6): 955—962
 石学法, 陈丽蓉, 1995a. 西菲律宾海晚第四纪沉积地球化学特征. 海洋与湖沼, 26(2): 124—131
 石学法, 陈丽蓉, 李坤业等, 1995b. 西菲律宾海西部海域黏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
 秦蕴珊, 陈丽蓉, 石学法, 1995. 西菲律宾海风成沉积物的研究. 科学通报, 40(17): 1595—1597
 戴璐, 翁成郁, 2010. 西太平洋海域冬季花粉传播观测及其在东亚季风研究中的意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 40(7): 893—902
 Anderson R F, Fleisher M Q, Lao Y, 2006. Glacial-interglacial variability in the delivery of dust to the central equatorial Pacific Ocean. Earth and Planetary Science Letters, 242(3—4): 406—414
 Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H et al, 1995. Asian continental nature of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios in north central Pacific sediments. Earth and Planetary Science Letters, 133(1—2): 105—116
 Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H et al, 1999. Provenance of the

- north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics. Chemical Geology, 158(3—4): 271—291
 Boyd P W, Jickells T, Law C S et al, 2007. Mesoscale iron enrichment experiments 1993—2005: Synthesis and future directions. Science, 315(5812): 612—617
 Cassar N, Bender M L, Barnett B A et al, 2007. The Southern Ocean biological response to aeolian iron deposition. Science, 317(5841): 1067—1070
 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L et al, 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea δ¹⁸O record. Paleoceanography, 17(13): 5—1—5—21
 Falkowski P G, 1997. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. Nature, 387(6630): 272—275
 Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P et al, 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon S, Qin D, Manning M et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 129—234
 Grifffm J J, Goldberg E D, 1963. Clay mineral distribution in the

- Pacific Ocean. In: Hill M N ed. *The Sea*. New York: Interscience Publishers, 728—741
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z et al, 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159—163
- Hamann Y, Ehrmann W, Schmiedl G et al, 2008. Sedimentation processes in the Eastern Mediterranean Sea during the Late Glacial and Holocene revealed by end-member modeling of the terrigenous fraction in marine sediments. *Marine Geology*, 248(1—2): 97—114
- Han Y X, Zhao T L, Song L C et al, 2011. A link between Asian dust, dissolved iron and marine export production in the deep ocean. *Atmospheric Environment*, 45(25): 4291—4298
- Hovan S A, Rea D K, Pisias N G et al, 1989. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the north Pacific. *Nature*, 340(6231): 296—298
- Irin T, Tada R, 2000. Quantification of aeolian dust (Kosa) contribution to the Japan Sea sediments and its variation during the last 200 ky. *Geochemical Journal*, 34(1): 59—93
- Irino T, Tada R, 2002. High-resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP site 797, the Japan Sea, during the last 200 ka. *Global and Planetary Change*, 35(1—2): 143—156
- Janecek T R, Rea D K, 1983. Aeolian deposition in the northeast Pacific Ocean: Cenozoic history of atmospheric circulation. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 730—738
- 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
- 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
- Kolla V, Nadler L, Bonatti E, 1980. Clay mineral distributions in surface sediments of the Philippine Sea. *Oceanologica Acta*, 3(2): 245—250
- Li T, Masuzawa T, Kitagawa H, 2004. Seasonal variations in settling fluxes of major components in the oligotrophic Shikoku Basin, the western North Pacific: Coincidence of high biogenic flux with Asian dust supply in spring. *Marine Chemistry*, 91(1—4): 187—210
- 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
- Martin J H, 1990. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 5(1): 1—13
- McGee D, Marcantonio F, Lynch-Stieglitz J, 2007. Deglacial changes in dust flux in the eastern equatorial Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(1—2): 215—230
- Milliman J D, Farnsworth K L, 2011. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge, New York: Cambridge University Press
- Muhs D R, 2013. The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research*, 9: 3—48
- Murray R W, Leinen M, Knowlton C W, 2012. Links between iron input and opal deposition in the Pleistocene equatorial Pacific Ocean. *Nature Geoscience*, 5(4): 270—274
- Nagashima K, Tada R, Matsui H et al, 2007. Orbital— and millennial—scale variations in Asian dust transport path to the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(1—2): 144—161
- 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—195
- Rea D K, 2007. Eolian records, deep-sea sediments. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 643—650
- Rea D K, Hovan S A, 1995. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific. *Paleoceanography*, 10(2): 251—258
- Rea D K, Janecek T R, 1981. Mass-accumulation rates of the non-authigenic inorganic crystalline (eolian) component of deep-sea sediments from the western mid-Pacific mountains, Deep Sea Drilling Project Site 463. In: Thiede J, Vallier T L eds. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 653—659
- Rea D K, Leinen M, 1988. Asian aridity and the zonal westerlies: Late Pleistocene and Holocene record of eolian deposition in the northwest Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66(1—2): 1—8
- Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H, 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. *Paleoceanography*, 13(3): 215—224
- Otosaka S, Togawa O, Baba M et al, 2004. Lithogenic flux in the Japan Sea measured with sediment traps. *Marine Chemistry*, 91(1—4): 143—163
- Porter S C, An Z S, 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375(6529): 305—308
- 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): 11492—11504
- 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
- Shen X Y, Wan S M, France-Lanord C et al, 2017. History of Asian eolian input to the Sea of Japan since 15Ma: Links to Tibetan uplift or global cooling? *Earth and Planetary Science Letters*, 474, 296—308
- Stuut J B W, Lamy F, 2004. Climate variability at the southern boundaries of the Namib (southwestern Africa) and Atacama (northern Chile) coastal deserts during the last 120,000 yr. *Quaternary Research*, 62(3): 301—309
- Stuut J B W, Prins M A, Schneider R R et al, 2002. A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: inferences from grain—size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Marine Geology*, 180(1—4): 221—233
- Tada R, Murray R W, Alvarez Zarikian C A et al, 2015. Proc. IODP, 346: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program), doi: 10.2204/iodp.proc.346.2015

- Wan S M, Li A C, Clift P D *et al*, 2007. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(3—4): 561—582
- 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
- Winckler G, Anderson R F, Fleisher M Q *et al*, 2008. Covariant glacial—interglacial dust fluxes in the equatorial Pacific and Antarctica. *Science*, 320(5872): 93—96
- Xiong Z F, Li T G, Crosta X *et al*, 2013. Potential role of giant marine diatoms in sequestration of atmospheric CO₂ during the Last Glacial Maximum: δ¹³C evidence from laminated *Eghmodiscus rex* mats in tropical West Pacific. *Global and Planetary Change*, 108: 1—14
- Xu Z K, Li T G, Clift P D *et al*, 2015. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16(9): 3182—3196
- Xu Z K, Li T G, Clift P D *et al*, 2016. Comment on “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” by Seo *et al*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(23): 14137—14141
- Xu Z K, Li T G, Wan S M *et al*, 2012. Evolution of East Asian monsoon: Clay mineral evidence in the western Philippine Sea over the past 700 kyr. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 188—196
- 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
- Xu Z K, Li T G, Yu X K *et al*, 2013. 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
- Zhang W F, Chen J, Ji J F *et al*, 2016. Evolving flux of Asian dust in the North Pacific Ocean since the late Oligocene. *Aeolian Research*, 23: 11—20
- Zheng H B, Wei X C, Tada R *et al*, 2015. Late Oligocene-early Miocene birth of the Taklimakan Desert. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the National Academy of Sciences*, 112(25): 7662—7667
- Ziegler C L, Murray R W, Plank T *et al*, 2008. Sources of Fe to the equatorial Pacific Ocean from the Holocene to Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 270 (3—4): 258—270

RESEARCH PROGRESS ON EOLIAN DUST RECORDS IN THE WEST PACIFIC

WAN Shi-Ming^{1,2}, XU Zhao-Kai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract Research on geologic records of dust composition, sources and flux is important for understanding the role of dust in planetary radiation balance, nutrient addition to the oceans, and carbon cycle, and for paleoclimatic reconstructions. As the second largest dust region among the world, Asia delivered the most of the dust moving eastward to the West Pacific by the East Asian winter monsoon and Westerly jet. Previous studies about eolian records in the West Pacific focus mainly on the glacial-interglacial timescale. Especially, research about the provenance and flux of eolian dust to the West Philippine Sea and equatorial Pacific since the late Quaternary, and the long-term Asian eolian deposition in the Japan Sea since the Miocene, and its forcing mechanism have achieved great progress. At least on the glacial-interglacial timescale since the late Quaternary, on the global-scale from the high-latitude to equatorial, and even to Antarctic, eolian fluxes were 2—3 times higher during a glacial time than an interglacial period. A dustier Earth during glacial periods is likely due to greater aridity in the source region, less vegetation, and stronger winds. Since the Cenozoic, the long-term eolian flux to the West Pacific reflects a stepwise drying in Asian inland, which in turn was controlled by the combined effect of Tibetan uplift and global cooling. However, the research degree of eolian deposition in the West Pacific actually was very low. In the future, it is suggested to strengthen the studies, especially in the areas of 1. continuous observation on eolian dust transport and deposition processes from source to sink; 2. unbiased quantitative estimates of the content and flux of true eolian dust in the marine record; and 3. the evolution, forcing mechanism, and nutritional effect of eolian dust to the West Pacific on long-term timescale since the Cenozoic.

Key words Eolian dust; Source to sink; Carbon cycle; West Pacific; Sea of Japan; West Philippine Sea