

第四纪黑潮源区沉积物的源-汇过程、主要控制因素及其碳循环效应*

徐兆凯^{1, 2, 3, 4} 张骞月^{1, 5} 常凤鸣^{1, 2, 3}

(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试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室 青岛 266061; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 4. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心 西安 710061; 5. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文系统地总结了第四纪黑潮源区沉积物的源-汇过程、主要控制因素及其碳循环效应方面的最新研究进展。基于不同学科的综合指标研究结果一致表明: 黑潮源区的碎屑沉积物主要来源于附近的吕宋岛和大陆架及远端的亚洲东部沙漠。在轨道、千年和百年等不同时间尺度上两者对研究区的物质输入主要与海平面高度和东亚季风强度相关, 并最终受控于高、低纬过程的双重驱动。而人类活动对黑潮源区的影响则出现于距今 2100 a。上述陆源物质对研究区的输入过程与古海洋生物生产力、海底有机碳埋藏通量和大气二氧化碳浓度间也有着良好的协变性, 表明黑潮源区的沉积物源-汇过程对全球碳循环起着重要的调节作用。上述研究工作可以为更好地预测未来气候环境的变化趋势提供关键低纬度海区的区域性资料和理论支持。

关键词 黑潮源区; 碳循环; 源-汇过程; 控制因素; 第四纪

中图分类号 P736 **doi:** 10.11693/hyhz20200600184

深入了解与人类活动密切相关的、第四纪气候环境自然演变的规律和成因机制, 是更好地认识全球变暖和预测未来气候环境变化趋势的先决条件。米兰科维奇理论是 20 世纪气候演变研究的最大突破, 认为北半球高纬度地区(65°N)的夏季太阳辐射量变化是驱动第四纪冰期-间冰期旋回的主要因素, 但上述单一敏感区触发驱动机制难以圆满解释现有的古气候环境演化记录, 如“10 万年难题”和“40 万年难题”等(Imbrie *et al.*, 1993; 丁仲礼, 2006)。因此, 科学家们普遍认为需要重新评估低纬度地区关键气候环境过程(如厄尔尼诺-南方涛动和东亚季风)在全球变化中的重要性, 并形成了气候演变的轨道-热带双重驱动假说, 其核心就是上述低纬过程在全球气候系统中也起着非常重要的调控作用(Wang *et al.*, 2006)。热带太平洋尤其是西太平洋暖池是典型的低纬度海区以

及全球海洋和气候系统的重要组成部分, 更是大气的主要热量和水分来源, 且具有厄尔尼诺-南方涛动等特殊的气候环境现象, 在调节全球变化方面发挥着至关重要的作用(Beaufort *et al.*, 2001; Murray *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2013)。黑潮源区位于菲律宾以东、西太平洋暖池北部边缘, 受典型的东亚季风气候控制(Liu *et al.*, 2009)。因此, 黑潮源区是研究厄尔尼诺-南方涛动和东亚季风演化过程及其古海洋学效应的理想靶区(Beaufort *et al.*, 2001, 2003; Wan *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013), 进而为全球气候变化的驱动机制等国际前沿科学问题的探讨提供了理想的天然实验室(Li *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012)。

风尘物质可为海洋表层(尤其是开阔大洋地区)带来丰富的营养元素(如铁和硅), 从而提高浮游生物的生产力并促进大气中温室气体二氧化碳向海洋深部

* 中国科学院战略性先导科技专项(B类), XDB42000000号; 国家自然科学基金项目, 41676038号, 41876034号。徐兆凯, 博士, 研究员, E-mail: zhaokaixu@qdio.ac.cn

通信作者: 张骞月, 硕士研究生, E-mail: zhangqianyu19@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2020-06-29, 收修改稿日期: 2020-08-24

的输送(Martin, 1990), 这已经得到了现代时间尺度上赤道太平洋铁施肥实验及东菲律宾海沉积物捕获器记录的有效证实(Coale *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2004)。而在地质历史时期, 南大洋地区风尘物质输入通量和生物生产力的波动则可以解释第四纪冰期-间冰期旋回过程中大气二氧化碳浓度波动幅度的三分之一到二分之一(Martínez-García *et al.*, 2011)。此外, 陆表的物理侵蚀和化学风化作用对海洋沉积物组成、大气二氧化碳浓度和全球气候变化等也有着非常重要的影响。例如, 陆地化学风化作用可以消耗大量的大气二氧化碳, 且该过程主要发生在低纬度地区(Hartmann *et al.*, 2009)。末次盛冰期时, 海平面的明显下降(~120m)所引起的、大陆架的出露面积约为现今陆地总面积的 7%, 且其中约一半(48%)的新陆地也出现在低纬度地区(Ludwig *et al.*, 1999)。因此, 末次盛冰期时大陆化学风化速率的增加而引起的巨量大气二氧化碳消耗可能是此时二氧化碳低浓度的重要诱因之一(Ludwig *et al.*, 1999; Munhoven, 2002)。黑潮源区的陆源沉积物主要来自于周边菲律宾群岛火山物质的风化剥蚀产物及远端亚洲内陆的风尘物质输入(秦蕴珊等, 1995; 石学法等, 1995b; Liu *et al.*, 2009; Wan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012), 而包括菲律宾群岛在内的热带火山岛弧又是当下化学风化作用最为强烈的区域之一(Hartmann *et al.*, 2009)。因此, 黑潮源区还是研究亚洲内陆风尘物质输入、热带火山岛弧化学风化作用及其海表生物生产力和海底有机碳埋藏效应等地球系统科学当前所关注热点和难点科学问题的理想靶区(Xu *et al.*, 2020)。

自 20 世纪 60 年代开始, 黑潮源区的重要地质、气候和环境意义就引起了全球科学家们的高度关注, 迄今已开展了一系列的调查研究工作, 并取得了丰硕的研究成果(Wan *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2018)。本文将重点围绕黑潮源区海底沉积物的源-汇过程、主要控制因素及其碳循环效应等方面, 来简要总结它们在第四纪时间跨度范围内的主要研究进展, 并初步展望其未来需要重点关注的研究方向。

1 陆源碎屑沉积物的来源

对于黑潮源区海底陆源碎屑沉积物的来源, 前人已经通过多年来对其粒度、黏土矿物、元素地球化学和同位素地球化学组成等方面的系统分析, 基于与其潜在源区相关指标间的细致对比, 并结合对现

代沉积物的相关研究工作, 得出了其中的陆源物质主要来自于附近岛屿(如吕宋岛)的火山物质和亚洲内陆的风尘物质的初步结论(Wan *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013, 2015)。

早在 20 世纪, 科学家们就基于西菲律宾海表层和柱状沉积物的粒度、矿物及 Rb-Sr 同位素组成特征等方面的研究, 初步证实了亚洲风尘物质对该区域陆源沉积物组成的潜在贡献(Kolla *et al.*, 1980; 石学法等, 1994, 1995a; 秦蕴珊等, 1995; Asahara *et al.*, 1999)。但这些早期研究中所用到的沉积物岩芯往往缺乏有效年代地层的约束, 故无法在时间序列基础上进行较为有效的解译。

近年来, 科学家们对该地区海底沉积物中陆源碎屑组分的潜在物源端元组成及各端元的具体贡献大小的研究工作逐渐增多。例如, 在半定量分析层面上, 西菲律宾海本哈姆高原上 MD06-3050 孔(图 1)近 100 万年以来所形成沉积物中的黏土矿物主要由蒙脱石(平均~65%)和伊利石(平均~25%)组成, 此外还包含少量的高岭石(平均~5%)和绿泥石(平均~5%); 其中伊利石的结晶度良好, 而蒙脱石的结晶度中等; 据此与潜在源区黏土矿物组成特征间的系统对比, 排除了中国东海陆架、长江和台湾岛物质对西菲律宾海黏土矿物输入的可能性, 并认为蒙脱石主要来源于附近的、吕宋岛火山岩的化学风化作用产物, 而伊利石则来自于遥远的、亚洲内陆干旱-半干旱地区的风尘物质(Wan *et al.*, 2012)。同一岩芯中陆源碎屑组分的粒度组成特征则显示: 三个主要的粒级范围 14—22 μm 、2.4—4.6 μm 和 36—50 μm 分别源自于亚洲内陆的风尘物质、吕宋岛河流所携带的细粒沉积物以及火山物质和吕宋岛河流带来的粗颗粒物(于兆杰等, 2012)。与 MD06-3050 孔同处本哈姆高原的 MD06-3047 孔 70 万年以来所形成沉积物中的黏土矿物组合也有着相似的特征(Xu *et al.*, 2012), 此外, 针对后者沉积物的常量元素和稀土元素组成特征研究结果也再次表明: 其中的陆源沉积物主要受附近火山岩和远端亚洲大陆风尘物质输入的控制, 而海洋生物沉积和热液活动的影响较小(Xu *et al.*, 2013, 2014)。

在定量分析层面上, 西菲律宾海柱状沉积物的 Sr-Nd 同位素组成特征表明: 它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70452—0.70723)和 ϵ_{Nd} (-5.3—+2.4)变化范围指示着吕宋岛火山岩与亚洲大陆风尘物质的两端元混合, 其中后者的贡献比例为 10%—50%(Jiang *et al.*, 2013)。而基于 MD06-3047 孔沉积物中稀土元素、黏土矿物及

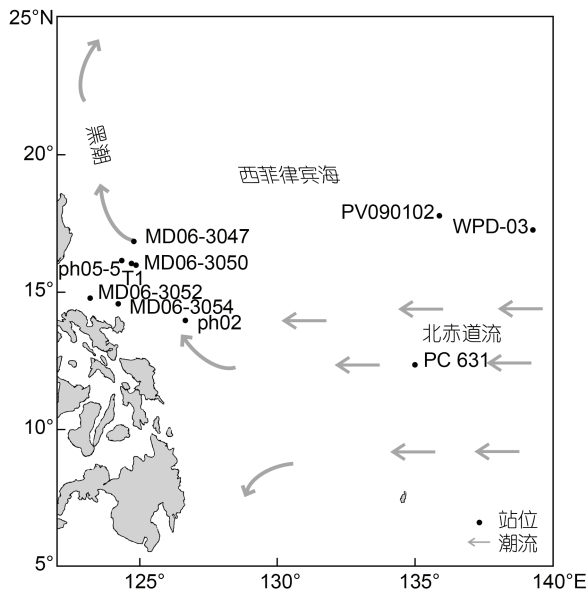


图1 黑潮源区示意图及本文提到的站位分布图 (修改自 Xu *et al.*, 2020)

Fig.1 Schematic diagram of Kuroshio source region and station deployment (modified from Xu *et al.*, 2020)

注: 图中英文字符和数字表示站位名称

Sr-Nd 同位素这三种不同指标, Xu 等(2015)综合性地提取了 70 万年以来黑潮源区的高时间分辨率陆源碎屑物质输入和沉积记录, 由此得出的陆源风尘物质的定量贡献比例范围基本一致, 分别为 16%—48%、18%—50%和 15%—50%。而 MD06-3052 孔 15.6 万年以来所形成的陆源碎屑沉积物中亚洲风尘物质的贡献比例明显偏低, 为 0%—32%; 吕宋岛的贡献值则可以达到 68%—100%。这与该岩芯的地理位置更靠近于吕宋岛、进而可以接收到更多来自于该岛的火山物质输入的实际情况相吻合(Xu *et al.*, 2018a)。

但对于黑潮源区陆源碎屑沉积物中亚洲大陆风尘物质的具体源区, 近年来仍存在着较大的争议(Seo *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016)。研究区的大多数研究工作均认为上述亚洲风尘物质的具体源区应该是亚洲东部沙漠; 仅 Seo 等(2014)认为亚洲中部沙漠才是菲律宾海沉积物中沙尘组分的主要来源, 其主要依据为菲律宾海中部 PC631 孔 60 万年以来所形成沉积物中黏土矿物的组成特征。但黏土矿物组成的半定量分析结果其本身误差相对较大, 况且 Seo 等(2014)所研究的样品数量也很少(仅 17 个样品), 特别是其基于黏土矿物组成和 Sr-Nd 同位素组成得出的物源结论明显相反。因此, Xu 等(2016)基于对菲律宾海大量岩芯沉积物中陆源碎屑组分黏土矿物和 Sr-Nd 同位素组成的系统总结分析结果进一步证实: 研究区的风尘物质

组成更接近于吕宋岛火山物质和亚洲东部沙漠风尘物质的混合曲线, 表明该风尘组分应该主要来源于亚洲东部沙漠而非亚洲中部沙漠。

上述地质历史时期黑潮源区的陆源碎屑沉积物来源结论也得到了该地区现代沉积物源-汇过程研究的有效证实。2015 年内收集到的、黑潮源区 T1 站位(图 1)的海底陆源碎屑沉积物主要来自于附近的吕宋岛(45.5%—66.2%)和远端的亚洲东部沙漠(33.8%—54.5%)(Xu *et al.*, 2018b)。此外, 于 2014—2015 年在 T1 站位及其附近位置所收集到的风尘颗粒的微量元素组成(Zr、Th 和 Sc)特征也显示该区域的现代风尘物质主要来自亚洲东部的鄂尔多斯沙漠(>80%), 而亚洲中部的塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠的贡献有限(<20%)(Wang *et al.*, 2020)。

2 陆源碎屑沉积物输入的主要控制因素

基于上述研究工作可知: 第四纪阶段黑潮源区海底的陆源碎屑沉积物主要来自于吕宋岛和亚洲东部沙漠。其中, 吕宋岛地处亚热带东亚季风气候控制区, 主要受季节性降水影响, 每年约 85%—90%的降水发生在 5—10 月之间的夏季风盛行季节, 因此, 吕宋岛来源碎屑物质对黑潮源区的输入很可能主要受控于该岛屿的夏季风降水量以及基岩物理侵蚀和化学风化作用强度的变化(Liu *et al.*, 2009)。此外, 吕宋岛附近的陆架相对菲律宾其他岛屿宽广, 因此海平面波动也可能影响到黑潮源区海底陆源沉积物中吕宋岛来源火山物质的输入(Xu *et al.*, 2020)。而对于黑潮源区陆源碎屑沉积物中亚洲沙漠风尘物质的具体运输机制, 则存在着一定的争议(Seo *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016)。Seo 等(2014)认为, 中纬度地区盛行的西风可以将亚洲中部沙漠的风尘物质搬运到太平洋中部地区, 进而在东北信风的影响下抵达菲律宾海中部。但 Dai 等(2011)的研究工作则发现东亚冬季风才是现代西太平洋花粉传播的最主要动力。同样, Jiang 等(2013)对西菲律宾海本哈姆高原(ph05-5)和西菲律宾海盆(ph02)两个站位 2006 年春季气团移动轨迹的反演结果显示, 亚洲内陆风尘在东亚冬季风的携带下自西北向东南运移, 在到达西太平洋后转为西南向进而沉降到了研究区中。近期, Xu 等(2016)对菲律宾海大量岩芯中陆源碎屑沉积物黏土矿物和 Sr-Nd 同位素组成的分析结果也表明其主要携带动力为东亚冬季风而非西风。因此, 黑潮源区亚洲风尘物质的运输机制主要是东亚冬季风, 西风的影响较小。下面以

时间分辨率自低到高的顺序进行具体阐述。

在轨道时间尺度上,黑潮源区海底陆源沉积物中不同物源端元贡献大小的演化过程主要受控于东亚季风强度。例如,MD06-3050 孔 100 万年以来所形成的陆源沉积物中伊利石/蒙脱石的比值可以有效地反演亚洲东部沙漠风尘物质输入强度的变化,该值表现出冰期时偏高而间冰期时偏低的明显特征,并与指示东亚冬季风强度的权威指标——黄土高原石英平均粒径的变化一致(Sun *et al.*, 2006),进而彰显出第四纪阶段西菲律宾海风尘物质输入与东亚冬季风强度间的正相关性(Wan *et al.*, 2012)。对该岩芯粒度和不同粒径组分堆积速率的分析结果则表明:14—22 μm 粒径组分的堆积速率也是追踪亚洲风尘物质输入强度的可靠指标,且其变化与黄土高原石英平均粒径值的波动同样具有一致性,从而再次证明了 100 万年以来黑潮源区的风尘物质输入变化对东亚冬季风强度的依赖性(于兆杰等, 2012)。对 MD06-3047 孔 70 万年以来所形成黏土矿物的含量和结晶度变化的研究则发现:伊利石含量和蒙脱石含量及后者的结晶度均表现出强烈的冰期-间冰期旋回特征,且受东亚季风演化的控制,冰期时东亚冬季风较强且风尘成因伊利石的含量较高,而间冰期时东亚夏季风强度增加,与之相对应的是来自于吕宋岛火山岩化学风化产物——蒙脱石的较高含量和较差结晶度(Xu *et al.*, 2012)。基于该岩芯稀土元素的二端元混合模型分析结果也表明,轨道时间尺度上研究区风尘物质的定量贡献大小同样主要受控于东亚冬季风强度的变化(Xu *et al.*, 2014)。此外,包括上述研究工作在内的、低纬度地区的亚洲风尘物质输入过程与高纬度地区的风尘记录之间具有良好的相关性。如 Winckler 等(2008)曾报道过赤道太平洋和南极洲这两个高、低纬地区约 50 万年以来冰期-间冰期旋回中风尘物质输入通量的同步变化。又如在热带西太平洋的黑潮源区(Xu *et al.*, 2015)和极地南太平洋的风尘物质贡献变化(Lamy *et al.*, 2014)在过去 70 万年来的冰期-间冰期交替中也表现出很明显的协变特征,这可能意味着它们对第四纪全球性气候变化的普遍性响应,而非主要受控于区域性因素(Xu *et al.*, 2015)。研究区上述古气候环境反演指标的频谱分析结果则进一步揭示了东亚季风强度演化的具体周期:偏心率(10 万年)、斜率(4.1 万年)和岁差(2.3 万年)等(Wan *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012)。其中,伊利石的含量和结晶度指标均指示着东亚冬季风强度的 10 万年变化周期,表明轨道偏

心率是驱动该季风变化的最重要因素。而蒙脱石结晶度的剖面变化则表现出明显的 10 万年、2.3 万年和 3 万年周期,推测 70 万年以来研究区东亚夏季风强度的变化除了受控于低纬度地区的太阳辐射量外,还受到了厄尔尼诺-南方涛动活动的影响(Xu *et al.*, 2012)。这可能指示着第四纪阶段高、低纬地区间通过东亚季风等途径所建立的紧密联系。在更长的时间跨度上,MD06-3050 岩芯 236 万年以来的高时间分辨率黏土矿物记录也表明:蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值的波动可以很好地指示吕宋岛东亚夏季风降水强度的变化,并再次证实了厄尔尼诺-南方涛动活动对东亚夏季风降水强度的重要调节作用(Yu *et al.*, 2016)。

在相对靠近吕宋岛的西菲律宾海大陆坡上,陆源沉积物的堆积速率相对黑潮源区的深海区域偏高,因而可以记录到更高时间分辨率的(如轨道-亚轨道-千年-百年时间尺度等)的沉积物源-汇过程及其主要控制因素变化。例如,MD06-3052 岩芯 15.6 万年以来所形成陆源碎屑沉积物的堆积速率、Sr-Nd 同位素以及常、微量元素的高时间分辨率多指标综合记录显示:在距今 13—15.6 万年和 1.4—4 万年这两个冰期阶段,伴随着海平面的明显下降,吕宋岛周边、西菲律宾海的大陆架广泛出露,由此引起了出露陆架上松散硅酸盐沉积物的强物理侵蚀和化学风化作用及其产物的大量入海,因而,海平面波动是控制 15.6 万年以来轨道-亚轨道时间尺度上西菲律宾海大陆坡上陆源碎屑沉积物输入的主要因素(Xu *et al.*, 2018a)。而 Jiang 等(2016)也在 MD06-3052 孔附近的 Ph05-5 岩芯记录中发现了类似的陆源碎屑沉积物输入特征及其成因机制。在更短的千年-百年时间尺度上,西菲律宾海大陆坡上 MD06-3054 和 MD06-3052 岩芯沉积物的黏土矿物和地球化学记录则揭示了更为复杂的黑潮源区沉积物源-汇过程及其潜在控制机理。具体来讲,2.7 万年以来吕宋岛的物理侵蚀和化学风化作用强度在末次盛冰期、海因里希 1 冷事件和新仙女木冷事件期间明显增强,然而热带辐合带位置、厄尔尼诺-南方涛动活动、太阳辐射量和东亚夏季风强度等均不是末次冰期以来研究区陆地风化剥蚀作用的关键控制因素,上述变化应主要受控于海平面高度的变化;而到了全新世晚期,尤其是距今 2100 年以来,人类活动则成为了控制研究区内吕宋岛来源碎屑沉积物输入的主要因素(Xu *et al.*, 2019)。

在更短的现代时间尺度上,黑潮源区 T1 站位的沉积物捕获器样品 Sr-Nd 同位素组成特征分析结果揭

示出: 吕宋岛来源碎屑物质和亚洲东部沙漠来源风尘颗粒的堆积速率均具有明显的季节性变化特征, 而引起上述变化的主要控制因素则分别是东亚夏季风降水和东亚冬季风的强度(Xu *et al.*, 2018b)。随后, 对 2015 年春、冬季采集到的、黑潮源区现代风尘颗粒物后向轨迹分析结果也表明: 研究区的现代风尘物质系由东亚冬季风从亚洲东部沙漠搬运而来, 从而再次证实了东亚冬季风强度对黑潮源区风尘物质输入的主要控制作用(Wang *et al.*, 2020)。综上所述, 第四纪不同时间尺度上黑潮源区海底的陆源碎屑沉积物的输入过程主要受控于东亚季风强度和海平面高度, 同时, 人类活动在距今 2100a 以来也有一定的影响(Wan *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018a, b, 2019)。

3 陆源物质输入的碳循环效应

第四纪阶段冰期-间冰期旋回过程中大气里温室气体二氧化碳浓度的波动范围高达 80×10^{-6} 以上(Lüthi *et al.*, 2008), 而这其中深海的作用非常之大(Jacobel *et al.*, 2017)。西太平洋暖池海域对全球的碳循环更是有着很重要的调控作用, 科学家们籍此也提出了多种不同的科学假说。具体到本次研究区, 末次盛冰期时东亚冬季风的盛行、亚洲东部沙漠风尘物质输入的增强、硅藻席的大量形成和海底有机碳埋藏通量的增加, 致使东菲律宾海的表层海水比其上覆大气的二氧化碳分压低了 $\sim 18 \times 10^{-6}$, 即此时的黑潮源区成为了大气中二氧化碳的汇(Xiong *et al.*, 2013)。类似的现象也发现于西菲律宾海和马里亚纳海沟地区(Xu *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2018a, b), 这都对此时大气二氧化碳浓度的降低做出了积极贡献(Lüthi *et al.*, 2008)。此外, 第四纪冰期低海平面时期吕宋岛周边出露大陆架上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用还可以直接消耗大气二氧化碳, 从而也对全球碳循环起着重要的调节作用(Xu *et al.*, 2018a)。

3.1 热带陆架的出露和化学风化作用

硅酸盐的化学风化过程中会释放出大量的 Ca、Mg、K 和 Na 等元素, 进而形成碳酸盐物质并最终沉降到海洋中, 上述过程会直接消耗大气中的温室气体二氧化碳, 从而影响全球的碳循环和气候变化(Pallister *et al.*, 1992; France-Lanord *et al.*, 1997)。热带地区(尤其是热带火山岛弧)的硅酸盐化学风化速率相对更快, 因而对大气二氧化碳消耗的贡献往往更大(Hartmann *et al.*, 2009; Schopka *et al.*, 2011)。据

Hartmann 等(2009)推测, 全球~9%的强化学风化区域(主要分布在热带大陆)可以解释当下全球由硅酸盐化学风化所消耗的二氧化碳总量的~50%。具体到黑潮源区周边的热带火山岛弧, 据 Schopka 等(2011)估计, 目前吕宋岛火山岩化学风化作用对大气二氧化碳的消耗效率比热带玄武岩的最高值可能还要高 2—3 倍; 仅占全球陆地面积~1%的热带火山岛弧地区的化学风化作用, 就能消耗全球每年通过硅酸盐化学风化过程所消耗的大气二氧化碳总量的~10%。如上所述, 第四纪冰期阶段全球海平面的明显降低, 引起了热带火山岛弧周边大陆架的广泛出露, 进而可能通过出露陆架上松散硅酸盐的强化学风化作用消耗了大量的大气二氧化碳(Schopka *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2018a)。

例如, 西菲律宾海大陆坡上 MD06-3052 岩芯 15.6 万年以来的高时间分辨率多指标综合性分析结果表明: 第四纪冰期阶段所研究沉积物中记录到的强化学风化作用与此时大气二氧化碳浓度的低值之间存在着很好的对应关系, 进而说明当时的低海平面所引起的吕宋岛周边大陆架的广泛出露及其上松散硅酸盐的强化学风化作用可能对冰期时大气二氧化碳浓度的降低具有显著的贡献(Xu *et al.*, 2018a)。进一步的定量估算结果显示: 冰期低海平面时包括吕宋岛在内的热带火山岛弧硅酸盐的强化学风化作用对此时大气二氧化碳浓度总降低量($\sim 80 \times 10^{-6}$; Lüthi *et al.*, 2008)的贡献比例为~8%—10%, 具体来讲, 根据岩芯最顶部沉积物数据推测得出的现代吕宋岛地区硅酸盐化学风化作用对大气二氧化碳的消耗量高达 1.01×10^{10} mol/a, 这与 Schopka 等(2011)根据现代河流数据对该岛屿的估算结果(1.72×10^{10} mol/a)相当; 特别是在第四纪的冰期低海平面时期, 热带火山岛弧周边大陆架上出露的松散沉积物的风化过程相对于岛弧基岩的化学风化可以更高效地消耗二氧化碳, 此时研究区硅酸盐化学风化作用消耗大气二氧化碳的效率高达~1.25 mol/kg, 明显高于同时期、同纬度的南海周边陆架地区(Wan *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018a)。此外, 研究区附近的南海地区的研究结果也表明: 第四纪冰期低海平面时期出露的热带大陆架上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用可以贡献此时大气二氧化碳浓度总降低量的~9%(Wan *et al.*, 2017), 这也与 Xu 等(2018a)的估计结果相当。由此可见, 第四纪冰期低海平面阶段大陆架的广泛出露、出露陆架上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用及由此引起的、对大气二氧化碳浓度降低的显著贡献, 很可能是热带地

区的普遍现象(Wan *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018a)。

值得关注的是,在第四纪的冰期低海平面时期,吕宋岛周边大陆架的广泛出露及其上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用既可以消耗大量的大气二氧化碳,同时也能为所研究海区带来大量的陆源碎屑、营养和有机物质(图 2)。该时期 MD06-3052 和 MD06-3054 岩芯记录到的陆源硅质沉积物堆积速率、

Ti/Ca_{biologic} 和 TOC/TN 的增加以及 Mg/Al、K/Al 和海表盐度的降低,指示着此时充沛的大陆径流对研究区的明显影响,即其能将大量的陆源碎屑、营养及有机物质带入海洋,进而刺激了海表生物生产力,并将大量的陆源和海洋来源有机碳埋藏到海底中,从而促进了该时期大气二氧化碳浓度的急剧降低(Xiong *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018a, 2020)。

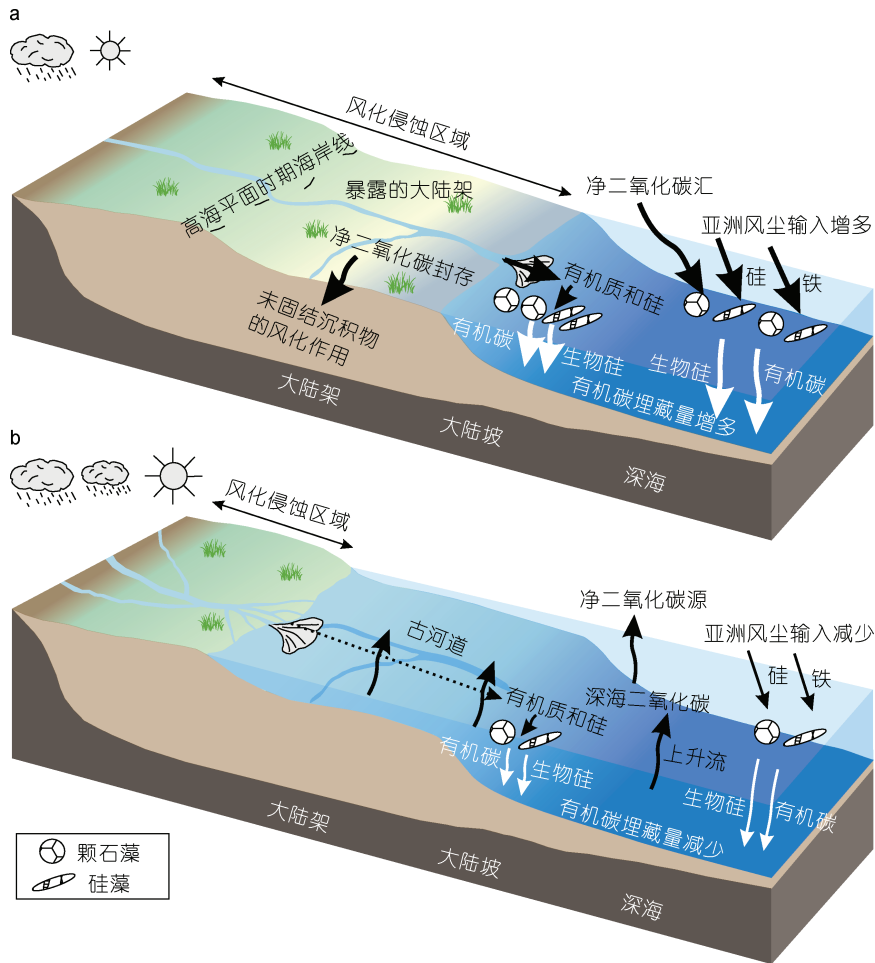


图 2 低海平面(a)和高海平面(b)时期黑潮源区陆源物质输入的碳循环效应示意图(修改自 Xu *et al.*, 2020)

Fig.2 Schematic diagram of carbon cycle with terrestrial inputs in the Kuroshio source region during sea-level lowstands(a) and highstands(b) (modified from Xu *et al.*, 2020)

3.2 亚洲风尘物质的输入

风尘物质的运输和沉降可以影响海洋生物地球化学过程(Martin, 1990)或大气物质组成(Jickells *et al.*, 2005),进而在全球的气候环境变化中发挥着非常关键的作用。据估计每年约有 5 亿吨风尘颗粒被排放到海洋中(Shao *et al.*, 2011),其中铁和硅等营养元素的存在对海洋生物生产力和海洋-大气间二氧化碳的交换至关重要(Shao *et al.*, 2011; Murray *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2013; Lamy *et al.*, 2014; Martínez-García *et*

al., 2014)。据 Menviel 等(2012)推测,第四纪冰期低海平面阶段风尘物质中所携带的有机物和营养物供给的增加可能引发了大气二氧化碳浓度 $\sim 10 \times 10^{-6}$ 的波动。近几年的研究工作也表明:黑潮源区所接收的、远距离搬运而来的亚洲风尘物质输入对此处的海洋生物生产力变化有着非常重要的贡献,进而能够影响到大气二氧化碳浓度、全球碳循环和气候环境变化(Jiang *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020)。

最初,“铁假说”是基于南大洋地区的高营养盐低

叶绿素特征而提出的(Martin, 1990)。风尘物质是远离陆地的开阔大洋地区中铁等营养物质的重要来源,进而可能会影响到铁输入受限地区的生态系统结构和碳循环(Winckler *et al.*, 2008; Murray *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2013)。尽管黑潮源区并非典型的高营养盐低叶绿素海区,但这里的大部分海区同样也是贫营养的,即其生态系统也可能受到了铁供应的显著影响(Kondo *et al.*, 2007)。例如,当前该地区的浮游植物生长已被证实的确受到了铁供应的限制(Coale *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2004; Kondo *et al.*, 2007)。开阔大洋的铁来源主要是大陆边缘沉积物孔隙水扩散、风尘溶解和热液喷流三种方式(陈天宇等, 2019)。研究区周边岛屿河流和大陆架释放的铁主要沉积在附近的西菲律宾海大陆坡地区,很难输出到大洋(Xiong *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2020)。此外,研究区沉积物受热液活动影响较小(Xu *et al.*, 2013),南大洋的营养物质输入也有限(Xiong *et al.*, 2015)。因此西菲律宾海的深海盆地和海底高原的铁应主要来自于风尘物质输入(Xu *et al.*, 2015, 2020)。海洋生物生产力是轨道时间尺度上大气二氧化碳浓度的最重要调控因素之一(Beaufort *et al.*, 2001; Martínez-García *et al.*, 2011),而陆源输入和厄尔尼诺-南方涛动相关的温跃层动力学是解释第四纪西太平洋暖池海域生产力变化的两个可能过程(Xu *et al.*, 2015; Winckler *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019)。第四纪冰期阶段黑潮源区亚洲风尘物质及其所携带营养元素输入通量的增强可能刺激了古海洋生物生产力的提升(Zhang *et al.*, 2007; Xiong *et al.*, 2013)。例如,基于 55 万年以来热带西太平洋古海洋生物生产力和北太平洋风尘物质输入量的间接对比,Zhang 等(2007)认为亚洲风尘物质的输入可能是控制该地区古生产力变化的最重要因素。Murray 等(2012)的研究工作也证实了过去 100 万年内,特别是其中 18 万年之前的冰期阶段,热带太平洋中部的沉积物中蛋白石含量这一硅质生物生产力指标与铁输入之间的密切关系。对于本次研究区,70 万年以来冰期阶段西菲律宾海中亚洲东部沙漠风尘物质对研究区输入量的增加也直接对应着此时海洋生物生产力的提高(Xu *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2013)。Xiong 等(2013)则论证了末次盛冰期时亚洲风尘物质输入量的增加对东菲律宾海生物生产力提高的重要贡献。而 MD06-3047 和 MD06-3052 岩芯中温跃层深度变化与有机碳含量,上升流强度变化与生物硅、有机碳含量之间相关性弱,表明第四纪冰期温跃层动力学对该

区域海洋生物生产力没有显著影响(Xu *et al.*, 2015, 2020)。因此,第四纪冰期阶段黑潮源区风尘物质输入量的增加引起了海洋生物生产力的提升,很可能在一定程度上降低了大气中二氧化碳浓度(Li *et al.*, 2010; Xiong *et al.*, 2013)。

上述推论已经得到了近年来对第四纪阶段黑潮源区亚洲风尘物质输入、海洋生物生产力和大气二氧化碳浓度变化方面综合性研究成果的初步证实,从而进一步明确了风尘物质输入对研究区古生产力和碳循环的潜在价值(Xu *et al.*, 2015)。在西菲律宾海,MD06-3047 岩芯的高时间分辨率多指标分析结果显示:70 万年以来亚洲风尘物质输入、可溶性铁含量、海洋生物生产力以及大气二氧化碳浓度的变化间具有良好的同步性,冰期时亚洲风尘物质的输入量、海表可溶性铁的含量、古生产力的水平及海底有机碳的埋藏量较高而大气二氧化碳的浓度较低,而间冰期时则表现出相反的变化特征,这都说明了第四纪冰期阶段研究区增强的亚洲含铁风尘物质输入对黑潮源区海洋生物生产力、海底有机碳保存和大气二氧化碳浓度降低的积极贡献(Xu *et al.*, 2015)。对于东菲律宾海,末次盛冰期增强的亚洲内陆风尘输入为研究区带来了大量的硅和铁等营养元素,进而刺激了海表生物生产力,并将大量的生物生产力成因有机碳带入到海底埋藏下来,从而降低了大气二氧化碳浓度(Xiong *et al.*, 2013; 李铁刚等, 2015);而 Jiang 等(2019)也发表了第四纪冷期阶段该地区亚洲风尘物质输入和生物钡含量这一有效的海洋生物生产力指示剂之间的良好相关性。

最近, Xu 等(2020)系统收集和整理了黑潮源区纬向分布的 MD06-3052、MD06-3047 和 WPD-03 岩芯沉积物的高时间分辨率多指标数据集,综合性地阐述和证明了包括吕宋岛火山物质和亚洲风尘物质在内的陆源物质输入是第四纪阶段黑潮源区营养物质(如硅和铁)和有机质供应以及海洋生物生产力的最重要控制因素。具体来讲,在大陆坡等相对较浅海区,陆源物质主要来源于附近的吕宋岛和大陆架,而在深水盆地等相对较深区域,亚洲风尘物质输入则是最主要的陆源物质来源。总体而言,在第四纪冰期低海平面阶段,黑潮源区周边的吕宋岛和出露陆架上的硅酸盐风化剥蚀产物以及亚洲风尘物质(包含碎屑物质、营养物质和有机质)的大量输入、海表生物生产力的提升、上升流强度的减弱、海底还原性沉积环境的形成、海底有机碳的大量埋藏和大气中二氧化碳

浓度降低之间的耦合,使该地区成为了全球碳循环中的一个重要汇(图 2)(Xu *et al.*, 2020)。

4 总结与展望

综上所述,近年来对第四纪不同时间尺度上黑潮源区海底沉积物的源-汇过程、主要控制因素及其碳循环效应等方面的研究已经取得了一系列非常重要的阶段性成果和认识:该地区的陆源碎屑沉积物主要来自周边的吕宋岛和大陆架以及远端的亚洲东部沙漠,它们的贡献大小主要受控于海平面高度和东亚季风强度;此外,人类活动在距今 2100a 以来也有一定的影响。具体来讲,吕宋岛及其周边陆架上硅酸盐化学风化作用的主要控制因素是东亚夏季风强度以及海平面高度,而东亚冬季风强度则制约着亚洲内陆风尘物质的输入。在第四纪冰期低海平面时期,黑潮源区周边的化学风化作用强度和亚洲风尘物质输入量的增强均可以提高该海区的海洋生物生产力,并对海底的碳埋藏和大气二氧化碳浓度的降低有着重要的调控作用。

尽管对黑潮源区岩芯沉积物的多指标综合性研究工作已经初步揭示了第四纪陆源物质输入对该地区海洋生物生产力、全球碳循环和全球气候环境变化的潜在影响,但上述推论仍未得到更长时间跨度和更广地域范围上沉积记录的有效证实。因此,接下来亟需补充进行相关的研究工作,如基于国际大洋发现计划等地球科学史上持续时间最长、影响最深的国际合作计划来获取研究区内的高质量长沉积物岩芯以便开展更长时间跨度的研究工作。此外,在空间范围上,未来也需要在其它的热带海域开展更多的对比性研究工作,从而避免一孔之见,进而深入揭示整个热带海区的陆源物质输入过程、主要成因机制及其古气候环境效应。同时,未来还应该对研究区铁和硅等营养元素的来源进行定量化识别,并对风尘物质从陆到海的迁移和沉积过程进行长期连续观测,将对黑潮源区风尘物质的定量源-汇过程及其与大洋生物地球化学过程和气候变化之间的耦合关系有更清晰的认识。此外,目前关于高、低纬地区之间耦合关系的研究相对较少,以后应侧重研究区和高纬度地区间的系统性对比研究,通过数值模拟和指标记录相结合的方法,为不同时间尺度上高、低纬之间的相互作用评估提供可靠证据,这也将进一步明确低纬度地区在全球气候变化中的作用。

参 考 文 献

- 丁仲礼, 2006. 米兰科维奇冰期旋回理论: 挑战与机遇. 第四纪研究, 26(5): 710—717
- 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
- 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, 1994. 西菲律宾海沉积物矿物组合及其地质意义. 海洋与湖沼, 25(3): 328—335
- 石学法, 陈丽蓉, 李坤业等, 1995b. 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
- 李铁刚, 熊志方, 翟滨, 2015. 低纬度西太平洋硅藻席沉积与碳循环. 北京: 海洋出版社, 192
- 汪品先, 翦知潜, 刘志飞, 2006. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录(II): 气候变化的热带驱动与碳循环. 地球科学进展, 21(4): 338—345
- 陈天宇, 蔡平河, 李伟强等, 2019. 大洋溶解铁的物质来源及其同位素示踪. 海洋地质与第四纪地质, 39(5): 46—57
- 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
- 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
- Beaufort L, De Garidel-Thoron T, Linsley B *et al.*, 2003. Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380 kyr and the East Asian monsoon dynamics. Marine Geology, 201(1—3): 53—65
- Beaufort L, De Garidel-Thoron T, Mix A C *et al.*, 2001. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene. Science, 293(5539): 2440—2444
- Chen L Y, Luo M, Dale A W *et al.*, 2019. Reconstructing organic matter sources and rain rates in the southern West Pacific Warm Pool during the transition from the deglaciation period to early Holocene. Chemical Geology, 529: 119291
- Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E *et al.*, 1996. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. Nature, 383(6600): 495—501
- Dai L, Weng C Y, 2011. A survey on pollen dispersal in the western Pacific Ocean and its paleoclimatological significance as a proxy for variation of the Asian winter monsoon. Science China Earth Sciences, 54(2): 249—258
- France-Lanord C, Derry L A, 1997. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Himalayan erosion. Nature, 390(6655): 65—67
- Hartmann J, Jansen N, Durr H H *et al.*, 2009. Global CO₂-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions? Global and Planetary Change, 69(4): 185—194
- Imbrie J, Berger A, Boyle E A *et al.*, 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles 2. The 100, 000-year cycle. Paleoceanography, 8(6): 699—735

- Jacobel A W, McManus J F, Anderson R F *et al*, 2017. Repeated storage of respired carbon in the equatorial Pacific Ocean over the last three glacial cycles. *Nature Communications*, 8: 1727
- 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
- Jiang F Q, Zhou Y, Nan Q Y *et al*, 2016. Contribution of Asian dust and volcanic material to the western Philippine Sea over the last 220 kyr as inferred from grain size and Sr-Nd isotopes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9): 6911—6928
- Jiang F Q, Zhu X, Li T G *et al*, 2019. Increased dust deposition in the Parece Vela Basin since the mid-Pleistocene inferred from radiogenic Sr and Nd isotopes. *Global and Planetary Change*, 173: 83—95
- 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
- Kondo Y, Takeda S, Furuya K, 2007. Distribution and speciation of dissolved iron in the Sulu Sea and its adjacent waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(1—2): 60—80
- Lamy F, Gersonde R, Winckler G *et al*, 2014. Increased dust deposition in the Pacific southern ocean during glacial periods. *Science*, 343(6169): 403—407
- Li T G, Zhao J T, Sun R T *et al*, 2010. The variation of upper ocean structure and paleoproductivity in the Kuroshio source region during the last 200 kyr. *Marine Micropaleontology*, 75(1—4): 50—61
- 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
- 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
- Ludwig W, Amiotte-Suchet P, Probst J L, 1999. Enhanced chemical weathering of rocks during the last glacial maximum: a sink for atmospheric CO₂? *Chemical Geology*, 159(1—4): 147—161
- Luo M, Algeo T J, Chen L Y *et al*, 2018a. Role of dust fluxes in stimulating *Ethmodiscus rex* giant diatom blooms in the northwestern tropical Pacific during the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 511: 319—331
- Luo M, Algeo T J, Tong H P *et al*, 2018b. More reducing bottom-water redox conditions during the Last Glacial Maximum in the southern Challenger Deep (Mariana Trench, western Pacific) driven by enhanced productivity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 155: 70—82
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B *et al*, 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650, 000–800, 000 years before present. *Nature*, 453(7193): 379—382
- Martin J H, 1990. Glacial-interglacial CO₂ change: the iron hypothesis. *Paleoceanography*, 5(1): 1—13
- Martínez-García A, Rosell-Melé A, Jaccard S L *et al*, 2011. Southern Ocean dust-climate coupling over the past four million years. *Nature*, 476(7360): 312—315
- Martínez-García A, Sigman D M, Ren H J *et al*, 2014. Iron fertilization of the subantarctic ocean during the last ice age. *Science*, 343(6177): 1347—1350
- Menviel L, Joos F, Ritz S P, 2012. Simulating atmospheric CO₂, ¹³C and the marine carbon cycle during the Last Glacial-Interglacial cycle: possible role for a deepening of the mean remineralization depth and an increase in the oceanic nutrient inventory. *Quaternary Science Reviews*, 56: 46—68
- Munhoven G, 2002. Glacial-interglacial changes of continental weathering: estimates of the related CO₂ and HCO₃⁻ flux variations and their uncertainties. *Global and Planetary Change*, 33(1—2): 155—176
- 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
- Pallister J S, Hoblitt R P, Reyes A G, 1992. A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano. *Nature*, 356(6368): 426—428
- Schopka H H, Derry L A, Arcilla C A, 2011. Chemical weathering, river geochemistry and atmospheric carbon fluxes from volcanic and ultramafic regions on Luzon Island, the Philippines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(4): 978—1002
- 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
- Sun Y B, Clemens S C, An Z S *et al*, 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 25(1—2): 33—48
- Tang Z, Li T G, Chang F M *et al*, 2013. Paleoproductivity evolution in the West Philippine Sea during the last 700 ka. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31(2): 435—444
- Wan S M, Clift P D, Zhao D B *et al*, 2017. Enhanced silicate weathering of tropical shelf sediments exposed during glacial lowstands: A sink for atmospheric CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 200: 123—144

- 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
- Wang C Z, Wang X, 2013. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in southern China and typhoon tracks. *Journal of Climate*, 26(4): 1322—1338
- Wang W, Xu Z K, Li T G *et al*, 2020. Sources and origins of eolian dust to the Philippine Sea determined by major minerals and elemental geochemistry. *Geological Magazine*, 157(5): 719—728
- 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
- Winckler G, Anderson R F, Jaccard S L *et al*, 2016. Ocean dynamics, not dust, have controlled equatorial Pacific productivity over the past 500, 000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(22): 6119—6124
- Xiong Z F, Li T G, Algeo T *et al*, 2015. The silicon isotope composition of *Ethmodiscus rex* laminated diatom mats from the tropical West Pacific: implications for silicate cycling during the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 30(7): 803—823
- Xiong Z F, Li T G, Chang F M *et al*, 2018. Rapid precipitation changes in the tropical West Pacific linked to North Atlantic climate forcing during the last deglaciation. *Quaternary Science Reviews*, 197: 288—306
- 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: $\delta^{13}\text{C}$ evidence from laminated *Ethmodiscus 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, Clift P D *et al*, 2018a. Bathyal records of enhanced silicate erosion and weathering on the exposed Luzon shelf during glacial lowstands and their significance for atmospheric CO₂ sink. *Chemical Geology*, 476: 302—315
- Xu Z K, Li T G, Clift P D *et al*, 2019. Sea-level, monsoonal, and anthropogenic impacts on the millennial-scale variability of siliciclastic sediment input into the western Philippine sea since 27 ka. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177: 250—262
- Xu Z K, Li T G, Colin C *et al*, 2018b. Seasonal variations in the siliciclastic fluxes to the western Philippine sea and their impacts on seawater ϵNd values inferred from 1 year of in situ observations above Benham Rise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9): 6688—6702
- 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
- Xu Z K, Wan S M, Colin C *et al*, 2020. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level lowstands: Forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle. *Quaternary Science Reviews*, 232: 106211
- 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 J Y, Wang P X, Li Q Y *et al*, 2007. Western equatorial Pacific productivity and carbonate dissolution over the last 550 kyr: Foraminiferal and nannofossil evidence from ODP Hole 807A. *Marine Micropaleontology*, 64(3—4): 121—140

SEDIMENTARY SOURCE-SINK PROCESSES, DOMINANT CONTROLLING FACTORS, AND THEIR CARBON CYCLE IN THE KUROSHIO SOURCE REGION IN THE QUATERNARY

XU Zhao-Kai^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Qian-Yue^{1, 5}, CHANG Feng-Ming^{1, 2, 3}

(1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China*; 3. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 4. *CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China*; 5. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In this paper, the status quo of the sedimentary source-sink processes, dominant controlling factors, and their carbon cycle significance in the Kuroshio source region during the Quaternary were systematically reviewed. The results derived from comprehensive indicators of different disciplines consistently show that the main sources of the terrestrial detritus include nearby Luzon and continental shelf, as well as remote eastern Asian deserts. Their contributions to the studied area are dominantly correlated with sea level height and intensity of the East Asian monsoon on orbital, millennial, and centennial timescales, and ultimately controlled by the dual drives of both high- and low-latitude processes. In addition, the significant impact of human activity on the Kuroshio source region has occurred since 2.1 ka. Furthermore, there are also good correlations between the abovementioned processes associated with terrestrial inputs into the studied area, paleoproductivity, organic carbon burial in the sea, and atmospheric carbon dioxide concentration, indicating the significance of sedimentary source-sink processes in the Kuroshio source region for modulating the global carbon cycle. The abovementioned research work can provide regional data and theoretical support at low-latitudes for better predicting the climatic and environmental change trend in the future.

Key words Kuroshio source region; carbon cycle; source-sink processes; controlling factor; Quaternary