

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.185



30 ka 以来东阿拉伯海 U1456 站位粘土粒级碎屑沉积物来源及其古环境意义

陈红瑾^{1,2}, 徐兆凯^{1,3*}, 蔡明江^{1,2}, 李铁刚^{2,3,4}

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. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 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
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: 通过对国际大洋发现计划 U1456 站位沉积物 AMS ¹⁴C 年代、粘土矿物、常量元素及粒度组成的综合分析, 探讨了东阿拉伯海粘土粒级碎屑沉积物的源-汇过程及其古环境指示意义。30 ka 以来 U1456 站位的粘土矿物组合以蒙脱石和伊利石为主, 并含有少量的绿泥石和高岭石。物源分析结果表明粘土粒级碎屑沉积物主要来自于印度河与德干高原。30 ka 以来西南季风很可能是影响喜马拉雅山脉以及印度大陆风化剥蚀的重要因素。在西南季风减弱的阶段, 印度河物源端元对研究区的输入量减少, 这可能与此时热带辐合带的南移及末次冰盛期喜马拉雅山脉冰川覆盖面积的增加有关, 从而导致印度河径流量及喜马拉雅山脉可供风化剥蚀的区域减少。K/Al 比值指示的源区大陆化学风化作用强度与前人重建的西南季风记录间较为同步, 在东阿拉伯海可以作为晚第四纪以来西南季风演化的有效重建指标。

关键词: 东阿拉伯海; 粘土矿物; 常量元素; 物质来源; 风化剥蚀; 西南季风。

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2019)08-2803-15

收稿日期: 2019-01-18

Provenance of Clay-Sized Detrital Sediments and Its Paleoenvironmental Implications at Site U1456 in the Eastern Arabian Sea since 30 ka

Chen Hongjin^{1,2}, Xu Zhaokai^{1,3*}, Cai Mingjiang^{1,2}, Li Tiegang^{2,3,4}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Laboratory of Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China
4. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanology, SOA, Qingdao 266061, China

Abstract: AMS ¹⁴C dating, clay minerals, major elements and grain size at site U1456 from International Ocean Discovery Program were analyzed, in order to constrain the source-to-sink processes of clay-sized detrital sediments and their paleoenvironmental significance in the eastern Arabian Sea. The clay mineral assemblages at site U1456 since 30 ka are dominated by smectite and illite, with minor chlorite and kaolinite. Provenance analysis results suggest that clay-sized detrital sediments are primarily derived from the Indus River and Deccan Trap. Southwest Asian monsoon probably is the main factor affecting the

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目(No. U1606401); 国家自然科学基金项目(Nos. 41676038, 41376064, 41106043, 41230959, 41476043); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(No. XDA11030104); 国家海洋局全球变化与海气相互作用专项项目(Nos. GASI-GEOGE-06-02, GASI-GEOGE-02, GASI-GEOGE-04)。

作者简介: 陈红瑾(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究工作。ORCID: 0000-0001-6554-6096. E-mail: chen hongjin15@mails.ucas.ac.cn

* **通讯作者:** 徐兆凯, ORCID: 0000-0003-0718-6736. E-mail: zhaokaixu@qdio.ac.cn

引用格式: 陈红瑾, 徐兆凯, 蔡明江, 等, 2019. 30 ka 以来东阿拉伯海 U1456 站位粘土粒级碎屑沉积物来源及其古环境意义. 地球科学, 44(8): 2803-2817.

weathering and erosion in the western Himalaya and the Indian subcontinent since 30 ka. Relatively reduced contribution from the Indus River to the study area during weak southwest Asian monsoon intervals should correlate with the southward migration of the Intertropical Convergence Zone and the extension of glacial cover over the Himalayas during the Last Glacial Maximum, and thus reduction in the Indus River runoff as well as available exposure area for erosion and weathering over the Himalayas. The weathering and erosion on the continent revealed by K/Al ratio show coherent variations to the previous southwest Asian monsoon records, indicating the efficiency of K/Al ratio for tracking the regional climate signal in the eastern Arabian Sea since the late Quaternary.

Key words: eastern Arabian Sea; clay mineral; major elements; provenance; erosion and weathering; southwest Asian monsoon.

0 引言

通过河流、冰川、风尘等方式进入海洋的陆源物质占全球大洋沉积物总量的一半以上,是海洋沉积物中最主要的外源物质(Griffin *et al.*, 1968).不同于在海洋环境中的自生内源物质,陆源碎屑物质中蕴含着物源区气候和环境变化及搬运过程等丰富信息(陈忠和颜文, 2000).全球大洋陆源碎屑中的粘土矿物、常量元素组成在垂向上的变化与气候波动、环境变迁等有着十分密切的联系(Chamely, 1989; Xu *et al.*, 2012a, 2012b, 2013, 2017; Tripathy *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017),因而可用于有效追踪物源、洋流及物源区气候环境等关键地质因素的演化.

亚洲季风是全球气候系统的一个重要组成部分,它直接影响着全球约一半人口的生产与生活,而作为其子系统之一的南亚季风(又称印度季风),更是地球上最强烈的气候现象之一.南亚季风又可细分为东北季风(冬季风)和西南季风(夏季风),并在阿拉伯海表现出明显的季节性变化特征(Cabarcos *et al.*, 2014).西南季风盛行期间(6—9月),在该海盆内形成了顺时针方向的环流,具体表现为在印度西岸形成了自北向南的表层洋流,而在西阿拉伯海则形成了稳定的上升流,前人常将该海区风驱上升流的强度作为西南季风强度的指标;与之相反,东北季风盛行期间(11—2月),在海盆内却形成了逆时针方向的环流(Rao and Rao, 1995; Saraswat *et al.*, 2013).

固体地球与气候系统间的相互作用是地球科学研究的前沿领域,喜马拉雅山脉风化剥蚀与亚洲季风系统演化间的耦合关系就是其中最典型的研究案例之一(Clift *et al.*, 2014).不同时间尺度上大陆风化剥蚀作用如何响应西南季风的演化、粘土矿物的形成对于气候变化的响应时间以及它能否记录到短时间尺度上的气候变化等问题迄今仍未得

到很好的解决(Alizai *et al.*, 2012).在长时间尺度上,许多学者通过元素地球化学和粘土矿物学等手段进行的研究认为构造抬升及气候变化(如季风)是影响陆地风化剥蚀作用强度的重要因素(Liu *et al.*, 2003; Clift *et al.*, 2008b; Wan *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2016),还有学者提出了“通道流”的模型——认为气候(如季风)驱动的剥蚀作用是控制喜马拉雅地区深埋火成岩或变质岩剥露的重要原因(Beaumont *et al.*, 2001);而在短时间尺度上,海平面波动、气候变化(如季风降水)及洋流演化等对粘土矿物、常量元素组成的影响更为明显(Liu *et al.*, 2004; Dou *et al.*, 2010; 徐兆凯等, 2012; Xu *et al.*, 2013, 2017).现有研究表明,至少在千年时间尺度上,西南季风降水可能是控制西喜马拉雅山脉风化剥蚀作用强度的主要因素(Clift *et al.*, 2008a).利用粘土矿物、常量元素记录来重建陆地风化剥蚀历史在东亚季风控制区(如南海)已经有了较为成熟的应用并取得了丰硕的研究成果(Liu *et al.*, 2004, 2005, 2010; Wei *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2012),而相关研究尤其是粘土矿物学研究在南亚季风控制区则较为缺乏.特别是现有少量针对南亚季风区的研究工作,其靶区主要集中在孟加拉湾地区(Chauhan and Gujar, 1996; Chauhan *et al.*, 2004; Phillips *et al.*, 2014; Tripathy *et al.*, 2014; Ali *et al.*, 2015; Joussain *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017),而阿拉伯海地区的研究工作则更加少见(Chauhan *et al.*, 2000; Thamban *et al.*, 2002; Das *et al.*, 2013)

亚洲大陆因其独特的构造特征及气候条件,在其边缘发育着许多大型的沉积体系,是开展沉积物源—汇过程、季风演化、构造抬升及其相互作用研究的理想区域.位于印度洋北部的阿拉伯海,其东侧与印度大陆相邻,并接受了大量的河流来源碎屑物质输入,尤其是来自于世界性大河——印度河输送的青藏高原—喜马拉雅地区的风化剥蚀产物.阿拉伯海及其潜在物源区处于亚洲两大季风子系统

之一的南亚季风控制范围内,西南季风的强弱控制着潜在物源区陆表的风化剥蚀作用强度,进而控制着印度河、恒河等世界性大河和一些区域性小型河流所搬运的碎屑沉积的入海过程及其汇聚区海底沉积物的物质组成(Thamban *et al.*, 2002; Das *et al.*, 2013).此外,洋流和海平面的波动对陆源物质的入海搬运和沉降过程也具有重要影响(Thamban *et al.*, 2002; Ferrier *et al.*, 2015).位于东阿拉伯海的拉克希米盆地保存了区域大陆张裂、构造沉降及古海洋演化历史的沉积记录,同时也蕴含着印度—欧亚大陆碰撞以来喜马拉雅山脉的长期风化剥蚀历史的信息(Pandey *et al.*, 2015).近年来,一系列大洋钻探项目如深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)和国际大洋发现计划(IODP)在阿拉伯海相继开展,为查明地质历史时期喜马拉雅山脉及印度大陆的风化剥蚀历史、与气候系统间的耦合关系及风化剥蚀产物的入海过程等关键科学问题提供了非常难得的机会.

国际大洋发现计划 355 航次于 2015 年在东阿拉伯海进行了科学钻探并获取了高质量的长沉积物岩芯.本研究主要对该航次 U1456 站位 C 孔上部 2.74 m 的 28 个沉积物样品开展了粘土矿物、常量元素、粒度分析及 AMS ^{14}C 测年工作,进而探讨了晚第四纪以来东阿拉伯海粘土粒级碎屑的物质来源及其古环境指示意义.

1 材料与方 法

国际大洋发现计划 355 航次 U1456 站位位于东阿拉伯海的拉克希米海盆内($16^{\circ} 37.28'\text{N}$ 、 $68^{\circ} 50.33'\text{E}$,图 1),地处印度河海底扇西侧边缘,水深 3 640 m,距现代印度河口约 820 km,距印度西部海岸约 475 km.U1456 站位一共包括 5 个钻孔,分别是 U1456A、U1456B、U1456C、U1456D、U1456E,本次研究对象取自 U1456C 孔上部的 2.74 m,取样间隔为 10 cm,共获得 28 个样品,其岩性主要为浅棕—浅绿的钙质超微化石软泥或富有孔虫的钙质超微化石软泥,并夹有粘土、粉砂和砂的互层.

粘土矿物分析采用的是粘土组分($<2\ \mu\text{m}$)定向薄片的 X 射线衍射方法,首先取约 2 g 沉积物样品,用 10% 的过氧化氢($60\ ^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min)去除有机质,再用冰醋酸($60\ ^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min)去除碳酸钙.待反应完成后加入去离子水反复清洗并离心去除上清液,根据 Stoke 原理使用离心的方法提取 $<2\ \mu\text{m}$

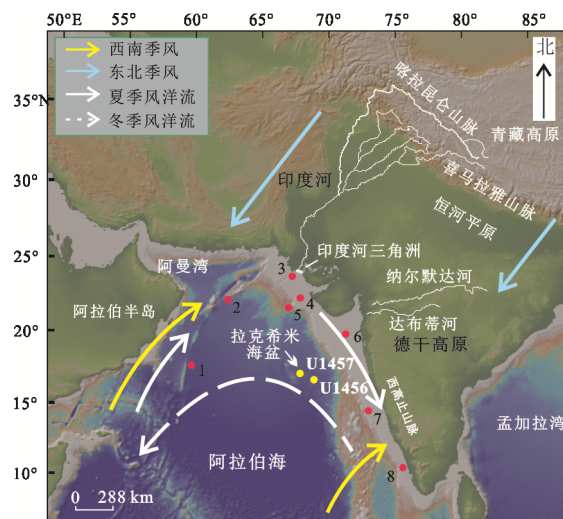


图 1 阿拉伯海 U1456 站位,南亚季风、洋流及相关典型站位示意图

Fig.1 Schematic map showing the site U1456, South Asian monsoon, ocean currents and typical sites

1. ODP 722; 2. DSDP 222; 3. Indus-23; 4. SK 148/22; 5. SK 148/21; 6. SK 148/38; 7. GC 3; 8. GC 5

组分,并制作粘土矿物定向薄片.对制成的定向薄片分别进行自然烘干、 $60\ ^{\circ}\text{C}$ 条件下乙二醇饱和 12 h 及 $490\ ^{\circ}\text{C}$ 高温加热 2 h 处理以鉴定粘土矿物组成.X 射线衍射分析使用的是中国科学院海洋地质与环境重点实验室的 D8 ADVANCE 衍射仪,分别进行了 $3^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的 2θ 及 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 的 2θ 两种不同范围和速度的扫描.4 种主要粘土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)的衍射峰面积使用 Topas 2P 软件在乙二醇饱和曲线上获得(图 2),进而根据 Biscaye (1965)的方法计算得出各种粘土矿物的相对百分含量,该分析的精度为 5%.蒙脱石结晶度与伊利石结晶度分别是乙二醇饱和曲线上 $17\ \text{\AA}$ 峰与 $10\ \text{\AA}$ 峰的半高宽,值越小代表结晶度越好.

常量元素分析同样是基于沉积物样品粘土粒级($<2\ \mu\text{m}$)的碎屑组分进行.沉积物样品碎屑态的提取采用的是顺序淋滤的方法,分别用冰醋酸、盐酸羟胺、过氧化氢、无水碳酸钠溶液依次去除沉积物中的碳酸盐、铁锰氧化物、有机质以及生物硅.每去除一种海洋自生组分后加入去离子水反复离心清洗至少 3 次,最后通过离心的方法提取出 $<2\ \mu\text{m}$ 的碎屑组分.将所提取的碎屑组分在低温条件下烘干($50\ ^{\circ}\text{C}$)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,测试误差均小于 5%.除此以外,本研究还对沉积物碎屑态组分(去除

有机质和碳酸盐后的剩余部分)进行了粒度测试,分析使用的是中国科学院海洋地质与环境重点实验室的 Cilas 940L 型激光粒度仪,其测量范围为 0.5~2 000 μm ,重复测试的相对误差小于 2%。

为构建有效的地层年代框架,我们对 U1456 站位 C 孔 10 个典型层位的浮游有孔虫壳体进行了 AMS ^{14}C 测年.这些典型层位的沉积物样品经 50 $^{\circ}\text{C}$ 低温烘干后,取干样约 2 g 加清水浸泡 24 小时使其充分分散,经过孔径为 63 μm 的铜筛冲洗后,对得到的 >63 μm 组分进行低温烘干.在显微镜下挑选个体 >250 μm 的完整且洁净的浮游有孔虫单种 *Globigerinoides sacculifer*,每个样品不少于 4 mg.挑选好的浮游有孔虫单种样品送至美国 Bata 实验室进行 AMS ^{14}C 年代测试.测得的 ^{14}C 年龄利用 Calib 7.0 程序校正至日历年龄 (Stuiver *et al.*, 1993),区域碳库年龄校正值 ($\Delta R=138 \pm 68$) 是根据附近相似站位的 ΔR 值平均而来 (John *et al.*, 2002)。

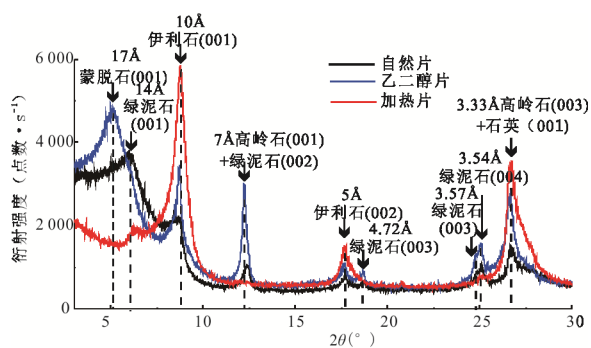


图 2 U1456 站位粘土矿物 X-射线典型衍射图谱(样品深度 92 cm, 年龄 20.9 ka)

Fig.2 Typical X-ray diagrams of clay mineral at site U1456

2 结果

本研究获得的 10 个年龄控制点的 AMS ^{14}C 年龄和校正后的日历年龄如表 1 所示.通过线性内插和外延法获得剩余样品的年龄,其中顶部和底部样品的校正年龄分别为 2 522 和 30 956 cal. a,平均线性沉积速率为 8.8 cm/ka.下文中提到的年龄均为校正后的日历年龄.

本研究获得的 U1456 站位 C 孔上部 28 个沉积物样品的线性沉积速率、中值粒径、4 种主要粘土矿物的相对百分含量、粘土矿物结晶度及比值剖面分布情况如图 3 所示.U1456 站位 C 孔上部 30 ka 以来的粘土矿物组成主要为蒙脱石(30%~71%)和伊利石(22%~58%),并含有少量绿泥石(3%~13%)和高岭石(2%~7%)(图 3)。

由图 3 可以看出,30 ka 以来 U1456 站位伊利石与蒙脱石的相对百分含量剖面变化呈镜像关系,绿泥石与高岭石的波动相对较小.根据 30 ka 以来的气候变化,可将其划分为 3 个阶段:S1 阶段(11~0 ka)、S2 阶段(18~11 ka)及 S3 阶段(30~18 ka),分别对应着全新世、末次冰消期及末次冰期晚期.伊利石、绿泥石及高岭石的相对百分含量在 S3 阶段波动幅度较大,并在 ~30 ka、~24 ka 及 ~18 ka 时出现较明显的谷值.该阶段蒙脱石的相对百分含量呈现出相反的变化趋势,在上述 3 个时期均表现为明显的峰值.同时,该阶段的线性沉积速率与中值粒径较高,尤其在末次盛冰期时.在 S2 阶段,伊利石、绿泥石和高岭石的相对百分含量自下而上先是迅速回升,而后又逐渐降低,在 ~11 ka 时分别降低到了 22%、4% 和 2%.同时此阶段的线性沉积速率与中

表 1 U1456 站位 C 孔 AMS ^{14}C 年代数据

Table 1 AMS ^{14}C age, calibrated calendar age, and sedimentation rate of site U1456

层位(cm)	AMS ^{14}C 年龄(a)	日历年龄 (cal. a; $\pm 2\sigma$)	沉积速率(cm/ka)	测试材料
12	6 550 \pm 30	7 652~7 480	1.64	
22	8 510 \pm 30	9 865~9 549	4.74	
42	1 110 \pm 40	13 272~13 035	5.86	
62	1 456 \pm 50	18 091~17 705	4.21	
92	17 120 \pm 60	21 080~20 622	10.33	<i>Globigerinoides sacculifer</i>
102	17 330 \pm 70	21 412~20 869	37.45	
132	20 760 \pm 80	25 542~25 012	7.32	
142	21 810 \pm 80	26 424~25 948	9.24	
182	24 680 \pm 100	29 185~28 596	15.01	

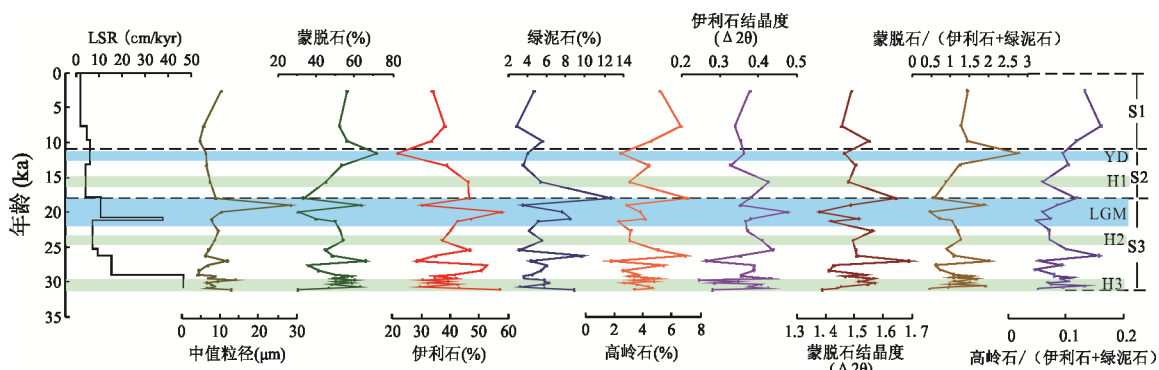


图 3 U1456 站位线性沉积速率(LSR)、中值粒径及粘土矿物组成、结晶度和比值剖面变化

Fig.3 Vertical changes of linear sedimentation rate, median grain size, clay mineral composition, clay mineral crystallinity and clay mineral ratio of site U1456

YD代表新仙女木事件;H1、H2和H3分别代表Heinrich 1、Heinrich 2和Heinrich 3事件;LGM代表末次盛冰期

表 2 东阿拉伯海 U1456 站位常量元素含量 (%) 间相关性

Table 2 Correlation of major elements at site U1456 in the eastern Arabian Sea^{a)}

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Ti
Al	1.00								
Ca	-0.26	1.00							
Fe	-0.07	-0.20	1.00						
K	0.45*	0.17	-0.13	1.00					
Mg	0.66*	-0.24	-0.06	0.48*	1.00				
Mn	0.26	0.21	-0.04	0.58*	0.48*	1.00			
Na	-0.24	0.24	-0.15	-0.39*	-0.29	-0.05	1.00		
P	-0.26	0.43*	-0.12	0.30	-0.10	0.29	0.30	1.00	
Ti	-0.05	0.18	0.30	-0.34	-0.42*	-0.23	0.31	0.21	1.00

注:*代表在0.05水平上显著相关

值粒径相对较低且总体保持稳定.S1阶段中4种主要粘土矿物的相对百分含量变化总体较小,线性沉积速率与中值粒径在该阶段中也依然保持稳定.

除此以外,30 ka 以来伊利石的结晶度波动较小,而蒙脱石结晶度的波动则较大.30 ka 以来蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值在~30 ka、~24 ka、~19 ka及~11 ka时出现了明显的峰值,分别对应着Heinrich 3事件、Heinrich 2事件、末次盛冰期及新仙女木事件;尽管在Heinrich 1事件时该比值没有出现明显的峰值,但此时蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值也呈现出增加的趋势.高岭石/(伊利石+绿泥石)比值的变化则在Heinrich 3事件、Heinrich 2事件、末次盛冰期、Heinrich 1事件及新仙女木事件期间出现了不同程度的降低(图3).

表2给出了U1456站位上部28个沉积物样品常量元素含量之间的相关分析结果,结果表明,K和Mg与碎屑成因的Al之间具有显著的相关性,因此

选取Al、K和Mg作为陆源碎屑的代表元素.U1456站位30 ka 以来常量元素(Al、K、Mg)含量及比值、线性沉积速率、中值粒径及蒙脱石/(伊利石+绿泥石)的剖面分布情况如图4所示.

从图4可以看到,U1456站位30 ka 以来常量元素K、Mg和Al的含量呈现出大体一致的变化趋势,三者S3阶段都表现出大幅的波动,进入冰消期后逐渐稳定.常量元素比值K/Al与Mg/Al变化也具有相似的变化型式,同样在S3阶段波动幅度较大,在全新世分别稳定在0.16和0.31左右.其中K/Al比值自下而上表现出逐渐减小的趋势,而Mg/Al比值则没有这样的变化趋势.K/Al与Mg/Al比值在Heinrich 2事件、~21 ka、Heinrich 1事件时出现了不同程度的升高,且两者都在~19 ka左右出现了明显的低值,对应着同时期中值粒径及蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值的峰值.

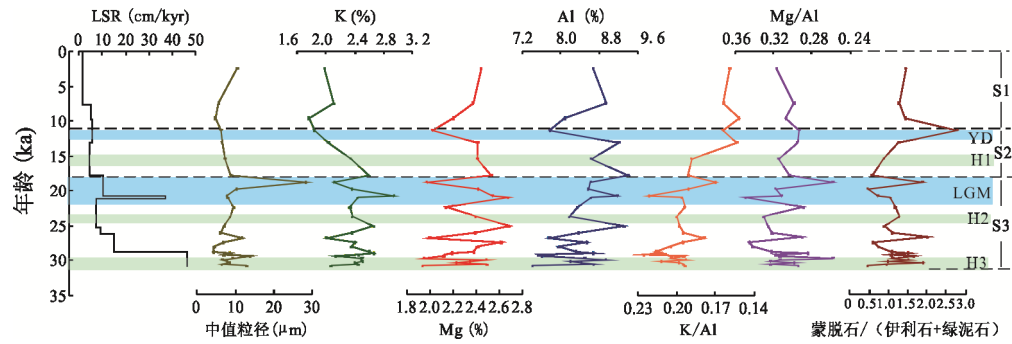


图4 U1456 站位线性沉积速率(LSR)、中值粒径及常量元素(K、Al、Mg)百分含量及比值剖面变化

Fig.4 Vertical changes of linear sedimentation rate, median grain size, percentages of major elements (K, Al, Mg), major element ratios of site U1456

3 讨论

3.1 粘土矿物物源分析

海洋中的粘土矿物主要有两个来源:陆源碎屑和海洋自生,前者包括了丰富的物源区气候环境信息,而后者则往往与火成岩蚀变或热液蚀变有关(Dou *et al.*, 2010).通常情况下,利用粘土矿物组合来进行古气候与古环境重建的最重要前提即为物源分析(Liu *et al.*, 2004)

前人对于东阿拉伯海粘土矿物的研究工作主要集中在表层沉积物层面,目的在于探讨细粒陆源沉积物的来源及其搬运路径(Griffin *et al.*, 1968; Kolla *et al.*, 1981; Rao and Rao, 1995; Chauhan and Gujar, 1996; Kessarkar *et al.*, 2003; Das *et al.*, 2013).已有研究表明,印度西部大陆边缘海中的粘土矿物主要来源于印度西岸的众多河流(Thamban *et al.*, 2002).风尘物质对阿拉伯海东部的贡献非常小(Thamban *et al.*, 2002; Kessarkar *et al.*, 2003; Goswami *et al.*, 2012),而且风尘颗粒粒径一般 $> 2 \mu\text{m}$ (Dou *et al.*, 2010),因而粘土组分中的风尘物质贡献基本可以忽略不计.同时该海区受海底火山、热液活动影响也较小,因而自生来源粘土矿物的贡献也可以忽略不计.如此一来,东阿拉伯海沉积物中粘土矿物的陆地物源主要可能有:印度河的碎屑物质输入(喜马拉雅山脉风化剥蚀产物)、阿拉伯海东部的达布蒂河及纳尔默达河的碎屑物质输入(德干高原风化剥蚀产物)及印度南部片麻岩区的碎屑物质输入(Rao and Rao, 1995; Thamban *et al.*, 2002; Kessarkar *et al.*, 2003).世界性大河——印度河每年向阿拉伯海输送的悬浮颗粒物通量达 $\sim 250 \times 10^6 \text{ t}$ (Milliman and Farnsworth, 2011),是阿拉伯海最大的碎屑物源(Clift, 2002).印度河流经

区域的主要岩性为喜马拉雅前寒武变质岩,来自于喜马拉雅山脉的风化剥蚀产物以富结晶度好的伊利石和绿泥石为特征(Thamban *et al.*, 2002; Das *et al.*, 2013).来自于印度河的碎屑沉积物被盛行的表层洋流分散(Kolla *et al.*, 1981),其向海扩展距离可达 $1\ 000 \sim 1\ 500 \text{ km}$ (Rao and Rao, 1995),夏季风时期的南向沿岸流促进了印度河悬浮物的向南搬运,对东阿拉伯海粘土矿物分布的影响自北向南逐渐减弱.德干高原的岩石类型主要是玄武岩,在干旱一半干旱的气候条件下形成以蒙脱石为主的粘土矿物组合(Chamely, 1989; Thiry, 2000),每年通过达布蒂河及纳尔默达河输送 $\sim 95 \times 10^6 \text{ t}$ 悬浮沉积物进入东阿拉伯海(图1).除此以外,达布蒂河以南的西高止山脉发育了一系列小河流,径流量较小,也输送以蒙脱石为主的粘土矿物(Rao and Rao, 1995).而印度南部(果阿邦以南)以前寒武片麻岩、片岩及紫苏花岗岩为主要岩石类型,在湿热的气候条件下经历了强烈的化学风化作用,其粘土矿物组成以高岭石为主,且形成的伊利石结晶度往往较差.冬季风期间,北向沿岸流对于印度西岸外的粘土矿物分布影响较小,主要是受限于印度南部河流此时较小的径流量(Rao and Rao, 1995).不同地质历史时期所研究岩芯沉积物潜在物源的粘土矿物组合特征如表3所示.

综上所述,U1456 站位 30 ka 以来的粘土矿物应主要为大陆来源.由于本研究的时间跨度为晚第四纪以来,因此成岩作用对粘土矿物组成的影响可以忽略不计(Chamely, 1989).根据潜在物源的粘土矿物组合特征,从中选择典型参数——伊利石+绿泥石含量、蒙脱石含量及高岭石含量为3个端元作粘土矿物组合三角图,将U1456 站位及晚更新世以来潜在物源的粘土矿物数据(表3)在三角图上投点

表 3 东阿拉伯海潜在物源的粘土矿物组合对比^(a)

Table 3 Comparison among the clay mineral assemblages of potential provenances for the eastern Arabian Sea

阶段	潜在物源	数据来源	蒙脱石(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	伊利石结晶度
晚更新世	印度河	SK 148/22 ^(c)	7.00	70.00	5.00	18.00	—
		SK 148/21 ^(c)	9.00	61.00	6.00	23.00	—
		Keti Bandar ^(b)	40.50±3.74	46.25±2.76	4.13±1.36	9.12±0.83	0.30±0.03
	德干高原	SK 148/38 ^(c)	62.00	21.00	12.00	5.00	—
	片麻岩区	GC 3	34.00±3.20	32.00±6.92	19.00±4.81	14.00±2.86	0.45±0.13
GC 5		24.00±6.80	31.00±7.21	27.00±5.32	17.00±2.65		
全新世	印度河	SK 148/22 ^(c)	34.00	44.00	4.00	18.00	—
		SK 148/21 ^(c)	31.00	48.00	5.00	16.00	—
		Keti Bandar ^(b)	45.11±3.40	40.47±2.14	4.42±1.43	9.68±2.52	0.31±0.03
		Indus-23	40.05±3.88	49.38±3.95	3.08±0.53	7.85±1.44	0.34±0.02
	德干高原	SK 148/38 ^(c)	76.00	12.00	7.00	5.00	—
		坎贝湾 ^(c)	73.00	7.00	10.00	10.00	—
片麻岩区	GC 3	27.00±2.44	41.00±6.28	20.00±3.37	12.00±1.77	0.41±0.13	
	GC 5	36.00±8.24	16.00±8.54	31.00±3.85	17.00±2.79		

注:a. 潜在物源的粘土矿物组合据文献(Rao and Rao, 1995; Thamban *et al.*, 2002; Kessarkar *et al.*, 2003; Alizai *et al.*, 2012; Limmer *et al.*, 2012a);b. 位于印度河三角洲(图 1);c. 粘土矿物组合为多个样品平均值

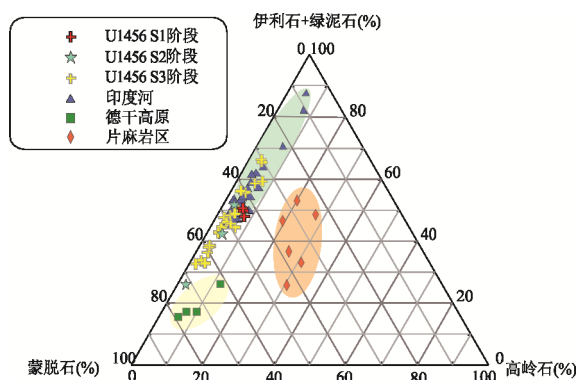


图 5 U1456 站位不同阶段粘土矿物组合及其与潜在物源(印度河、德干高原及片麻岩区)粘土矿物组合间对比

Fig.5 Comparison of clay mineral assemblages among site U1456 during different stages and the potential provenances

(图 5). 结果表明:30 ka 以来 U1456 站位的粘土矿物组合主要位于印度河与德干高原之间,但却明显不同于印度南部片麻岩区的粘土矿物组成,其中 S1 阶段的粘土矿物组合更加靠近印度河端元的粘土矿物组合,而 S2 与 S3 阶段的粘土矿物组合波动较大,主要位于印度河端元与德干高原端元之间(图 5).

30 ka 以来 U1456 站位蒙脱石含量较高(平均~50%),其中德干高原的蒙脱石含量在上述 3 个可能物源中最高(高达~73%),是潜在物源中唯一能够为本站位沉积物提供高含量蒙脱石的物源区.由

图 5 可知,除了 S1 阶段,研究站位蒙脱石含量都受到德干高原端元的显著影响.所研究站位沉积物中的伊利石含量为 22%~58%,且其结晶度较好(表 3).尽管印度河及片麻岩区都可能为研究区沉积物提供较高含量的伊利石,但片麻岩区来源的伊利石结晶度一般较差(Thamban *et al.*, 2002; Pandarinath, 2009; 表 3),由此可以排除片麻岩区为所研究沉积物中伊利石主要贡献者的可能性.此外,印度南部的片麻岩区的粘土矿物组合比另外两个潜在物源区明显富高岭石(平均~27%;表 3).前人对东南阿拉伯海粘土矿物的研究发现,该海区高含量的高岭石主要来自于印度内陆片麻岩区的供应(Chauhan *et al.*, 2000; Thamban *et al.*, 2002).但所研究站位沉积物中高岭石的含量仅为 2%~7%,这与印度河及德干高原来源粘土矿物组合中高岭石的含量十分相近(表 3),由此我们推断高岭石同时受到了这两个物源的影响.同样,3 个潜在物源区都可能提供所研究站位沉积物中含量为 3%~13% 的绿泥石.通过前面的分析可知,印度南部的片麻岩区对于本研究站位沉积物中的伊利石、蒙脱石及高岭石的贡献都基本可以忽略,因而可以推断片麻岩区同样不是所研究站位绿泥石的主要物源,且同样受到了印度河与德干高原的共同影响.因此,30 ka 以来 U1456 站位的粘土矿物组合主要由印度河与德干高原的共同控制,而片麻岩区来源的粘土矿物组合对研究站位的影响较小.

3.2 古环境指标含义

海洋中陆源粘土矿物组合的变化主要受到以下因素影响:物源、气候条件(如季风)、河流径流量、海平面波动及洋流等,其中河流径流量、海平面波动及洋流变化与气候也存在一定的联系.一般情况下,低海平面有助于海底扇的发育,而高海平面时期来自河流的沉积物容易被限制在近岸区域(Prins and Postma, 2000).洋流有助于细粒物质在海洋中的搬运,在有的海区甚至是粘土矿物组合变化的重要控制因素(Liu *et al.*, 2010).但东阿拉伯海的现有研究表明,洋流并不是影响该海区晚第四纪以来粘土矿物组合垂向变化的主要因素(Thamban *et al.*, 2002; Das *et al.*, 2013).南亚地区 80% 的降水都源自于西南季风降水(Clift *et al.*, 2008a),印度河的年际最大径流量就出现在 6—9 月的西南季风时期,即印度河的径流量在很大程度上受控于西南季风强度.从全球海洋表层沉积物中的粘土矿物分布可以看出,气候条件是控制不同区域粘土矿物组成的主要因素(Griffin *et al.*, 1968).有研究表明,厚层高岭石土壤的形成一般情况下至少需要 1 Ma (Thiry, 2000; 孔为伦等, 2011),但是在某些高温、高降雨量的热带—亚热带地区,由于风化剥蚀速率加快,形成土壤的时间甚至可以缩短到年际水平(Oliva *et al.*, 2003; 刘志飞等, 2010).前人对印度河流域锆石颗粒的 U-Pb 定年结果表明,砂粒级颗粒从陆地到海洋的搬运时间约 5~10 ka (Alizai *et al.*, 2011).尽管缺乏对于研究区细粒粘土颗粒搬运时间的直接研究,但可以肯定的是其搬运时间要远远短于 5~10 ka.在这样的条件下,短时间尺度上的海相粘土矿物在一定程度上能够记录同时期陆地气候条件的演化.

通常情况下,由于物源众多及运输过程复杂等原因,再加上单种粘土矿物的含量容易受到稀释作用的影响,因而很难利用钻孔中单种粘土矿物含量的变化来反演古环境演化.利用特定粘土矿物含量的比值如蒙脱石/(伊利石+绿泥石)、高岭石/(伊利石+绿泥石)则可以去除粘土矿物含量间稀释作用的影响,进而有效重建古环境变化历史.鉴于高伊利石与绿泥石含量是印度河特有的粘土矿物组合特征,而高蒙脱石含量则为德干高原的特有粘土矿物组合特征,因此蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值能够指示德干高原物源端元相对于印度河物源端元的输入量大小.由于源区本身的粘土矿物组合

也会随着气候条件的变化而发生改变(表 3),因而该比值在一定程度上也受两个源区陆地化学风化强度变化的控制.但由于高岭石在研究站位中的相对含量较低(图 3),与高含量的伊利石+绿泥石进行比值则会严重削弱其本身的信号,因此在本研究中主要以蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值作为古环境重建指标(图 6).

同时,在硅酸盐的风化作用过程中,保守元素如 Al、Si 等难以迁移,而非保守元素如 K、Mg、Sr 等易于迁移(Limmer *et al.*, 2012b; Wan *et al.*, 2017; 王妍妍, 2017),因此常常用易流失元素与不易流失元素的比值如 K/Al 和 Mg/Al 作为化学风化的强度指标,低值代表强化学风化作用,高值代表弱化学风化作用.一般来说,元素在沉积物中的分布不可避免地受到粒度效应的影响,例如 Si 一般偏向于富集在砂粒级颗粒中,稀土元素、Al、Mg、K 则一般富集在粘土颗粒中(蓝先洪等, 2016; Wan *et al.*, 2017).在本研究中,常量元素的测试主要是基于粘土粒级的碎屑组分,因而推测 K/Al 和 Mg/Al 比值可能受到粒度效应的影响较小.为了进一步验证,通过相关分析发现 U1456 站位 30 ka 以来 Mg/Al 比值却与中值粒径显著相关($r = -0.53$),而 K/Al 比值与中值粒径不相关($r = -0.17$)(图 4).前人对印度河外陆架 Indus 10 和 Indus 23 站位全新世以来沉积物中元素组成的研究也表明(Limmer *et al.*, 2012a),对比 Mg/Al, K/Al, K/Rb 等比值, K/Al 比值是粒度影响最小的指标,因此可以用 K/Al 比值作为大陆源区化学风化强度的指标(图 6),从而间接指示西南季风强度变化.

3.3 粘土矿物与常量元素组成的古环境意义

在前文物源分析的基础上,下面我们通过特征粘土矿物含量比值、常量元素比值与北半球 20°N 夏季(8 月)太阳辐射量(Laskar *et al.*, 2004)、格陵兰冰芯氧同位素(Svensson *et al.*, 2008)、葫芦洞/董哥洞石笋氧同位素(Cheng *et al.*, 2009)、海平面变化(Rohling *et al.*, 2014)及西阿拉伯海 RC27-14 站位(18°15.2'N, 57°39.3'E)生产力指标 $\delta^{15}\text{N}$ (Altabet *et al.*, 2002)间的系统对比(图 6),来进一步探讨 30 ka 以来东阿拉伯海粘土粒级沉积物来源、沉积过程及其控制因素的演化过程.阿拉伯海具有世界上最大的氧低值区,该区域的脱氮作用也常常作为古生产力研究的有效手段,前人的研究表明(Naidu and Malmgren, 1996),西阿拉伯海氧低值区沉积物

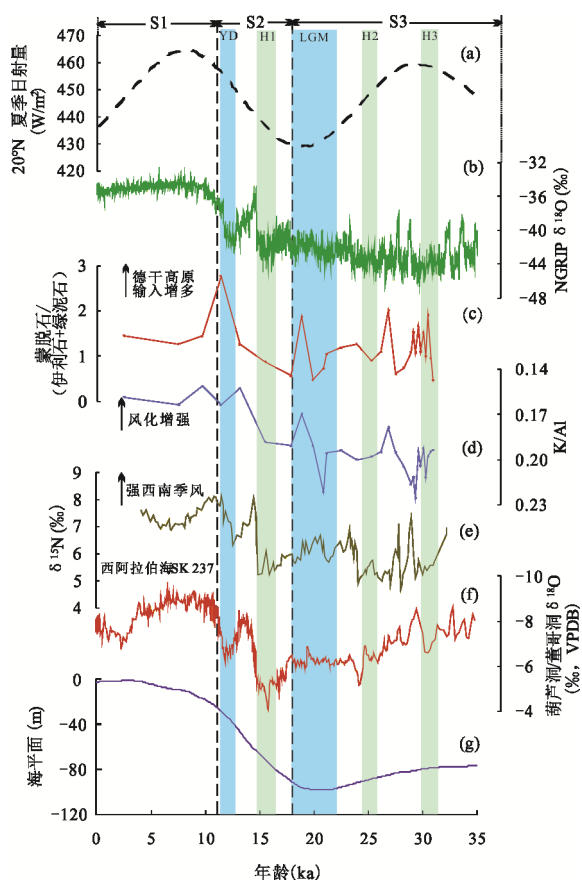


图6 U1456站位典型粘土矿物比值与前人研究成果间对比
Fig 6 Comparison of typical clay minerals ratio at site U1456 and previous research results

中的 $\delta^{15}\text{N}$ 为可以作为生产力的有效指标,因此可以指示南亚夏季风的强度。

3.3.1 S3阶段(30~18 ka) S3阶段属于末次冰期晚期,该阶段中北半球的夏季日射量逐渐降低,在~19 ka时达到最低,全球气候较为干冷。该阶段中全球海平面较现在要低,尤其是在末次盛冰期(22~18 ka)时。当时的大陆架大范围出露,古海岸线及古河口位置明显向海推进,印度西岸河流输送的陆源碎屑物质相较于全新世高海平面时期只需搬运较短的距离就能进入到所研究站位。这可以从该阶段(尤其是末次盛冰期)较高的线性沉积速率及较粗的中值粒径上得到有效反映。同样的现象也被广泛发现于同时期的东阿拉伯海SK-221和GC-3等站位中(Thamban *et al.*, 2002; Goswami *et al.*, 2012; Das *et al.*, 2013),表明大幅度的海平面下降是控制东阿拉伯海S3阶段陆源碎屑沉积物输入的重要因素。此外,基于生产力及表层海水盐度重建的西南季风演化显示末次冰期晚期时的夏季风强度整体较弱(Altabet *et al.*, 2002; Saraswat *et al.*, 2013;

Cabarcos *et al.*, 2014),西阿拉伯海生产力水平也相应下降(图6),特别是在末次盛冰期及Heinrich事件时期。

西南季风的强度变化不仅影响着陆地风化剥蚀作用,还控制着河流径流量的大小,从而决定着进入东阿拉伯海的陆源碎屑物质组成及沉积通量。蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值在末次冰期晚期波动较大,尤其在Heinrich 3事件、Heinrich 2事件及~19 ka这三个冷气候时期出现了明显的峰值,表明来自于印度河的物质输入相对于德干高原明显减少(图6)。

已有研究表明在末次盛冰期,喜马拉雅山脉的冰川覆盖面积增加(Owen *et al.*, 2002),冰川的大面积覆盖导致可供风化剥蚀的区域减小,特征物理剥蚀产物如伊利石和绿泥石的数量也相应减少。前人基于对孟加拉湾沉积物中常微量元素及浮游有孔虫Nd同位素的研究也发现末次盛冰期阶段源自喜马拉雅山脉的河流对其研究站位的物质组成贡献减少(Stoll *et al.*, 2007; Tripathy *et al.*, 2014)。不仅如此,在千年时间尺度上有研究表明,快速气候冷事件如Heinrich事件往往伴随着西南季风降水的减少,从而引起了印度河径流量的减少,相应的印度河提供的伊利石和绿泥石的数量也减少。同时,模拟研究表明热带辐合带的南北移动很可能与不同纬度间的热量交换有关,不论是冰期—间冰期时间还是千年时间尺度上的气候变化都会对热带辐合带的移动产生影响(Broccoli *et al.*, 2006),例如Heinrich事件的发生被认为也能够引起热带辐合带南北向的移动(Stager *et al.*, 2011)。基于印度湖泊沉积中孢粉记录的研究表明末次冰期晚期的气候变冷导致热带辐合带的南移(Kotlia *et al.*, 2010)。降雨带的南向移动导致未被覆盖区域(如喜马拉雅山脉)降水减少同时河流径流量也相应减小,这很可能是导致该时期所研究沉积物中印度河物质输入量相对减少的重要原因之一。

同时,K/Al比值指示的大陆化学风化作用强度在S3阶段整体较S2、S1阶段低,说明末次冰期晚期大陆化学风化作用比冰消期及全新世要弱,这与西阿拉伯海的 $\delta^{15}\text{N}$ 记录、东亚石笋氧同位素记录及北半球日射量的变化趋势较为同步,进而说明了南亚夏季风强度对印度大陆化学风化作用强度的控制。其中在Heinrich 2事件和~21 ka大陆化学风化作用强度出现了不同程度减弱的趋势,对应于相应

阶段西南季风降水的减少(Zorzi *et al.*, 2015; Patten *et al.*, 2017). 值得注意的是,在末次冰期晚期(~19 ka),K/Al的低值指示此时阶段的化学风化作用较强,而难以用当时寒冷的气候条件来解释(Cabarcos *et al.*, 2014; Gebregiorgis *et al.*, 2016). 结合当时海平面大幅下降,我们认为很可能由于陆架大范围暴露,大量先前滞留在陆架的沉积物经历再改造作用进入深海,这些沉积物往往在上一个间冰期因为高海平面而滞留在了陆架区,因此呈现出较强的化学风化作用(Wan *et al.*, 2017),从而导致了此时K/Al的低值出现,此时较高的中值粒径以及沉积速率也验证了此时大量沉积物入海的事实(图6).

3.3.2 S2 阶段(18~11 ka) S2阶段属于末次冰消期,此阶段北半球夏季日射量上升,气候开始转暖,同时海平面也逐渐回升,所研究站位逐渐远离河口,因而陆源碎屑物质的供应也相应减少.这可以从所研究沉积物线性沉积速率的降低及中值粒径的变细得到证实(图6).阿拉伯海季风指标显示该阶段的西南季风强度开始逐渐增强,其中在Heinrich 1事件及新仙女木事件时期西南季风强减弱(Singh *et al.*, 2011; Cabarcos *et al.*, 2014; Gebregiorgis *et al.*, 2016),而在波林-阿洛德暖期西南季风强度则增强(Sinha *et al.*, 2005; Kessarkar *et al.*, 2013).

末次盛冰期结束后,K/Al比值反映的大陆化学风化强度表现出明显增强的趋势,对应着末次冰消期气候转暖,南亚季风降水明显增强(图6).而在气候转暖过程中的两个冷事件阶段,尤其是新仙女木事件发生期间印度河的相对输入量显著减少,同时大陆源区化学风化作用强度减弱.北半球气候变化模拟研究表明,在Heinrich 1阶段热带辐合带平均位置向南移动了大约 10° (Kageyama *et al.*, 2009),此时非洲北部也记录到干冷的气候条件(Mulitza *et al.*, 2008).同样的,非洲Masoko湖泊的孢粉记录表明在新仙女木事件期间,非洲季风减弱并且热带辐合带此时出现了大幅的南移(Garcin *et al.*, 2007).同时,大陆化学风化作用强度的明显减弱也被发现于印度河外陆架的Indus-10及Indus-23站位(Limmer *et al.*, 2012a).因此我们认为在Heinrich 1事件及新仙女木事件阶段很可能同样在于西南季风减弱大陆源区化学风化作用强度的减弱,同时热带辐合带的南移导致未被降水带覆盖的喜马拉雅山脉

地区机械剥蚀减弱,因而相应的伊利石与绿泥石的供应减少.

3.3.3 S1 阶段(11~0 ka) S1阶段属于全新世,此时的海平面高度已经与现今十分接近,因而线性沉积速率及中值粒径与S2阶段相比并没有明显变化.南亚季风记录显示在早全新世阶段南亚夏季风增强,在~7 ka达到最强后又逐渐减弱(Sarkar *et al.*, 2000; Kessarkar *et al.*, 2013),这在石笋氧同位素及西阿拉伯海生产力指标上都有体现(图6),只是不同记录中季风强度减弱的时间略有差异而已.

新仙女木事件结束后,蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值在早全新世迅速下降,而后略有上升但波动较小.南亚地区高分辨率的古气候记录表明,早全新世季风降水增加,热带辐合带向北移动(Haug *et al.*, 2001; Fleitmann *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008),此时西南季风降水对喜马拉雅山脉的机械剥蚀作用很可能是导致此阶段蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值快速下降的重要原因.同时,前人基于对印度河三角洲沉积物中Nd同位素的研究也表明早全新世阶段的季风降水增强促进了小喜马拉雅山脉的物理剥蚀.而此阶段K/Al比值代表的大陆化学风化作用与西阿拉伯海生产力指标指示的南亚夏季风变化同步,都表现出在早全新世上升,在~7.6 ka达到最盛,而后下降的趋势,进一步说明了西南季风降水对源区大陆风化剥蚀的重要影响.

总的来说,30 ka以来东阿拉伯海U1456站位粘土矿物及常量元素组成变化与西南季风的演化密切相关,而在末次冰期晚期阶段两者还受到了海平面波动的影响.30 ka以来研究站位指示大陆化学风化强度的K/Al比值的的变化与阿拉伯海其它气候指标记录到的西南季风演化间非常同步,因此东阿拉伯海沉积物中的K/Al比值的剖面变化至少在晚第四纪以来能够作为追踪区域气候信号的有效指标.同时北大西洋冷事件在所研究岩芯的蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值上也有所反映,说明南亚季风演化与北大西洋气候事件间在一定程度上存在遥相关,这在很多南亚地区的其他研究中也有所体现(Altabet *et al.*, 2002; Kessarkar *et al.*, 2013; Saraswat *et al.*, 2013).

4 结论

本文通过对U1456站位C孔30 ka以来粘土矿物、常量元素及粒度组成的系统分析,并结合与其

它相关气候指标间的系统对比,探讨了东阿拉伯海粘土粒级碎屑沉积的物质来源及其古环境指示意义,得到的结论主要包括:

(1) U1456 站位 C 孔晚第四纪以来所形成沉积物中的粘土矿物组合主要由蒙脱石(30%~71%)及伊利石(22%~58%)组成,并含有少量绿泥石(3%~13%)和高岭石(2%~7%)。物源分析结果表明,30 ka 以来 U1456 站位粘土级碎屑沉积物主为印度河与德干高原的混合。

(2) U1456 站位 30 ka 以来蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比值能够指示德干高原物源端元相对于印度河物源端元物质供应量大小,同时也受大陆源区气候条件的影响。研究站位 K/A1 比值未受到粒度效应的影响,可以作为大陆化学风化作用强度的有效指标。

(3) 30 ka 以来西南季风很可能是控制喜马拉雅山脉及印度大陆风化剥蚀的重要因素。在西南季风减弱的时期,以物理性剥蚀产物如伊利石和绿泥石为特征的印度河物源端元的物质输入量减少,这很可能与此时热带辐合带的南移以及末次冰盛期阶段喜马拉雅山脉冰川覆盖面积的增加有关。

(4) 研究站位 30 ka 以来 K/A1 比值指示的大陆化学风化作用与前人恢复的西南季风记录间较为同步,表明前者为东阿拉伯海晚第四纪以来西南季风演化的有效重建指标。

References

- Ali, S., Hathorne, E. C., Frank, M., et al., 2015. South Asian Monsoon History over the Past 60 kyr Recorded by Radiogenic Isotopes and Clay Mineral Assemblages in the Andaman Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16(2): 505–521. <https://doi.org/10.1002/2014gc005586>
- Alizai, A., Carter, A., Clift, P. D., et al., 2011. Sediment Provenance, Reworking and Transport Processes in the Indus River by U-Pb Dating of Detrital Zircon Grains. *Global and Planetary Change*, 76(1–2): 33–35. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.11.008>
- Alizai, A., Hillier, S., Clift, P. D., et al., 2012. Clay Mineral Variations in Holocene Terrestrial Sediments from the Indus Basin. *Quaternary Research*, 77(3): 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.01.008>
- Altabet, M. A., Higginson, M. J., Murray, D. W., 2002. The Effect of Millennial-Scale Changes in Arabian Sea Denitrification on Atmospheric CO₂. *Nature*, 415(6868): 159–162. <https://doi.org/10.1038/415159a>
- Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low-Viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation. *Nature*, 414(6865): 738–742. <https://doi.org/10.1038/414738a>
- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7): 803–831.
- Broccoli, A. J., Dahl, K. A., Stouffer, R. J., 2006. Response of the ITCZ to Northern Hemisphere Cooling. *Geophysical Research Letters*, 33(1): 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005gl024546>
- Cabarcos, E., Flores, J. A., Singh, A. D., et al., 2014. Monsoonal Dynamics and Evolution of the Primary Productivity in the Eastern Arabian Sea over the Past 30 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 411(1): 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.07.006>
- Chamely, 1989. *Clay Sedimentology*. Springer, Berlin, 1–623.
- Chauhan, O. S., Gujar, A. R., 1996. Surficial Clay Mineral Distribution on the Southwestern Continental Margin of India: Evidence of Input from the Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*, 16(3): 321–333. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00015-S](https://doi.org/10.1016/0278-4343(95)00015-S)
- Chauhan, O. S., Patil, S. K., Suneethi, J., 2004. Fluvial Influx and Weathering History of the Himalayas since Last Glacial Maxima-Isotopic, Sedimentological and Magnetic Records from the Bay of Bengal. *Current Science*, 87(4): 509–515.
- Chauhan, O. S., Sukhija, B. S., Gujar, A. R., et al., 2000. Late-Quaternary Variations in Clay Minerals Along the Sw Continental Margin of India: Evidence of Climatic Variations. *Geo-Marine Letters*, 20(2): 118–122. <https://doi.org/10.1007/s003670000043>
- Chen, Z., Yan, W., 2000. Advance of the Studies on Clay Minerals in Marine Sediments and Its Response to Evolution of Paleoclimate and Paleoenvironment. *Marine Sciences*, 24(2): 25–27. (in Chinese)
- Cheng, H., Edwards, R. L., Broecker, W. S., et al., 2009. Ice Age Terminations. *Science*, 326(5950): 248–252. <https://doi.org/10.1126/science.1177840>
- Clift, P. D., 2002. A Brief History of the Indus River. *Geological Society, London, Special Publications*, 195(1): 237–258. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2002.195.01.13>
- Clift, P. D., Giosan, L., Blusztajn, J., et al., 2008a. Holocene Erosion of the Lesser Himalaya Triggered by Intensified Summer Monsoon. *Geology*, 36(1): 79–82. <https://doi.org/10.1130/G24343A1>

- [//doi.org/10.1130/g24315a.1](https://doi.org/10.1130/g24315a.1)
- Clift, P. D., Hodges, K. V., Heslop, D., et al., 2008b. Correlation of Himalayan Exhumation Rates and Asian Monsoon Intensity. *Nature Geoscience*, 1(12): 875 – 880. <https://doi.org/10.1038/ngeo351>
- Clift, P. D., Wan, S., Blusztajn, J., 2014. Reconstructing Chemical Weathering, Physical Erosion and Monsoon Intensity since 25 Ma in the Northern South China Sea: A Review of Competing Proxies. *Earth - Science Reviews*, 130(3): 86 – 102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.002>
- Das, S. S., Rai, A. K., Akaram, V., et al., 2013. Paleoenvironmental Significance of Clay Mineral Assemblages in the Southeastern Arabian Sea During Last 30 Ka. *Journal of Earth System Science*, 122(1): 173–185. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0251-1>
- Dou, Y. G., Yang, S. Y., Liu, Z. X., et al., 2010. Clay Mineral Evolution in the Central Okinawa Trough since 28 ka: Implications for Sediment Provenance and Paleoenvironmental Change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 288(1–4): 108 – 117. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.01.040>
- Ferrier, K. L., Mitrovica, J. X., Giosan, L., et al., 2015. Sea-Level Responses to Erosion and Deposition of Sediment in the Indus River Basin and the Arabian Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 416(3): 12 – 20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.026>
- Fleitmann, D., Burns, S. J., Mangini, A., 2007. Holocene ITCZ and Indian Monsoon Dynamics Recorded in Stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Review*, 26(1–2): 170 – 188. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.04.012>
- Garcin, Y., Vincens, A., Williamson, D., et al., 2007. Abrupt Resumption of the African Monsoon at the Younger Dryas-Holocene Climatic Transition. *Quaternary Science Reviews*, 26(5–6): 690 – 704. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.10.014>
- Gebregiorgis, D., Hathorne, E. C., Sijinkumar, A. V., et al., 2016. South Asian Summer Monsoon Variability During the Last ~ 54 ka Inferred from Surface Water Salinity and River Runoff Proxies. *Quaternary Science Reviews*, 138: 6 – 15. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.02.012>
- Goswami, V., Singh, S. K., Bhushan, R., et al., 2012. Temporal Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and ϵ_{Nd} in Sediments of the Southeastern Arabian Sea: Impact of Monsoon and Surface Water Circulation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1): 1 – 3. <https://doi.org/10.1029/2011gc003802>
- Griffin, J. J., Hent, W., Dorris, G. E., 1968. The Distribution of Clay Minerals in the World Ocean. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 15(4):433–459.
- Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., et al., 2001. Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*. 293(5533): 1304 – 1308.
- Hu, D. K., Böning, P., Köhler, C. M., et al., 2012. Deep Sea Records of the Continental Weathering and Erosion Response to East Asian Monsoon Intensification since 14 ka in the South China Sea. *Chemical Geology*, 326 – 327(11): 1 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.07.024>
- Huang, J. B., Wang, S. W., Wen, X. Y., et al., 2008. Progress in Studies of the Climate of Humid Period and the Impacts of Changing Precession in Early-Mid Holocene. *Progress in Natural Science*, 18(12): 1459–1464. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.05.011>
- John, S., Michale, K., Michel, F., et al., 2002. Marine Reservoir Corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia. *Radiocarbon*, 44(1): 167–180.
- Joussain, R., Colin, C., Liu, Z., et al., 2016. Climatic Control of Sediment Transport from the Himalayas to the Proximal Ne Bengal Fan During the Last Glacial-Interglacial Cycle. *Quaternary Science Reviews*, 148: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.016>
- Kageyama, M., Mignot, J., Swingedouw, D., et al., 2009. Glacial Climate Sensitivity to Different States of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Results from the IPSL Model. *Climate of the Past*, 5: 551 – 570. <https://doi.org/10.5194/cp-5-551-2009>
- Kessarkar, P. M., Purnachandra Rao, V., Naqvi, S. W. A., et al., 2013. Variation in the Indian Summer Monsoon Intensity During the Bølling-Ållerød and Holocene. *Paleoceanography*, 28(3): 413 – 425. <https://doi.org/10.1002/palo.20040>
- Kessarkar, P. M., Rao, V. P., Ahmad, S. M., et al., 2003. Clay Minerals and Sr - Nd Isotopes of the Sediments along the Western Margin of India and Their Implication for Sediment Provenance. *Marine Geology*, 202(1–2): 55 – 69. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(03\)00240-8](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(03)00240-8)
- Kolla, V., Kosteckl, J. A., Robinson, F., et al., 1981. Distributions and Origins of Clay Minerals and Quartz in Surface Sediments of the Arabian Sea. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2): 563–569.
- Kong, W. L., Li, S. Y., Wan, Q., et al. 2011. Differentiation

- and Discrimination of Marine Clay Minerals as Indicators of Paleoenvironment. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 35(5): 100 – 108(in Chinese with English abstract).
- Kotlia, B. S., Sanwal, J., Phartiyal, B., et al., 2010. Late Quaternary Climatic Changes in the Eastern Kumaun Himalaya, India, as Deduced from Multi-Proxy Studies. *Quaternary International*, 213(1 – 2): 44 – 55. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.09.002>
- Lan, X. H., Li, R. H., Mi, B. B., et al., 2016. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas. *Earth Science*, 31(4): 463 – 474(in Chinese with English abstract).
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Isolation Quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261 – 285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Limmer, D. R., Boning, P., Giosan, L., et al., 2012a. Geochemical Record of Holocene to Recent Sedimentation on the Western Indus Continental Shelf, Arabian Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1): 1 – 26. <https://doi.org/10.1029/2011gc003845>
- Limmer, D. R., Kolher, C. M., Hillier, S., et al., 2012b. Chemical Weathering and Provenance Evolution of Holocene-Recent Sediments from the Western Indus Shelf, Northern Arabian Sea Inferred from Physical and Mineralogical Properties. *Marine Geology*, 326 – 328(9): 101 – 115. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.07.009>
- Li, J. R., Liu, S. F., Feng, X. L., et al., 2017. Major and Trace Element Geochemistry of the Mid-Bay of Bengal Surface Sediments: Implications for Provenance. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(3): 82 – 90. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1041-z>
- Liu, Z. F., 2010. Clay Mineral Assemblages in Sediments of the South China Sea: East Asian Monsoon Evolution Proxies? *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 1012 – 1019. (in Chinese with English Abstract)
- Liu, Z. F., Colin, C., Li, X. J., et al., 2010. Clay Mineral Distribution in Surface Sediments of the Northeastern South China Sea and Surrounding Fluvial Drainage Basins: Source and Transport. *Marine Geology*, 277(1–4): 48 – 60. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.08.010>
- Liu, Z. F., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2005. Late Quaternary Climatic Control on Erosion and Weathering in the Eastern Tibetan Plateau and the Mekong Basin. *Quaternary Research*, 63(3): 316 – 328. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.02.005>
- Liu, Z. F., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2004. Erosional History of the Eastern Tibetan Plateau Since 190 kyr ago: Clay Mineralogical and Geochemical Investigations from the Southwestern South China Sea. *Marine Geology*, 209(1 – 8): 1 – 4. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.06.004>
- Liu, Z. F., Trentesaux, A., Clemens, S. C., et al., 2003. Clay Mineral Assemblages in the Northern South China Sea: Implications for East Asian Monsoon Evolution over the Past 2 Million Years. *Marine Geology*, 201(1–3): 133 – 146. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(03\)00213-5](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(03)00213-5)
- Milliman, J. D., Farnsworth, K. L., 2011. River Discharge to the Coastal Ocean—A Global Synthesis. Cambridge University Press, Cambridge, 1–384.
- Mulitza, S., Prange, M., Stuut, J. B., et al. 2008. Shale Megadrought Triggered by Glacial Slowdowns of Atlantic Meridional Overturning. *Paleoceanography*, 23(4): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008PA001637>
- Naidu, P. D., Malmgren, B. A., 1996. A High-Resolution Record of Late Quaternary Upwelling along the Oman Margin, Arabian Sea Based on Planktonic Foraminifera. *Paleoceanography*, 11(1): 129 – 140. <https://doi.org/10.1029/95pa03198>
- Oliva, P., Viers, J., Dupré, B., 2003. Chemical Weathering in Granitic Environments. *Chemical Geology*, 202(3–4): 225 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.08.001>
- Owen, L. A., Finkel, R. C., Caffee, M. W., 2002. A Note on the Extent of Glaciation Throughout the Himalaya During the Global Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21(1–3): 147 – 157. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00104-4)
- Pandarinath, K., 2009. Clay Minerals in SW Indian Continental Shelf Sediment Cores as Indicators of Provenance and Palaeomonsoonal Conditions: A Statistical Approach. *International Geology Review*, 51(2): 145 – 165. <https://doi.org/10.1080/00206810802622112>
- Pandey, D. K., Clift, P. D., Kulhanek, D. K., et al., 2015. Expedition 355 Preliminary Report: Arabian Sea Monsoon. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.355.2015>
- Pattan, J. N., Parthiban, G., Garg, A., et al., 2017. Intense Reducing Conditions during the Last Deglaciation and Heinrich Events (H1, H2, H3) in Sediments from the Oxygen Minimum Zone off Goa, Eastern Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 84: 243 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.03.034>
- Phillips, S. C., Johnson, J. E., Underwood, M. B., et al.,

2014. Long-Timescale Variation in Bulk and Clay Mineral Composition of Indian Continental Margin Sediments in the Bay of Bengal, Arabian Sea, and Andaman Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 117 – 138. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.06.018>
- Prins, M. A., Postma, G., 2000. Effects of Climate, Sea Level, and Tectonics Unraveled for Last Deglaciation Turbidite Records of the Arabian Sea. *Geology*, 28(4): 375 – 378. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<375:eocsla>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<375:eocsla>2.0.co;2)
- Rao, V. P., Rao, B. R., 1995. Provenance and Distribution of Clay Minerals in the Sediments of Clay Minerals in the Sediments of the Western Continental Shelf and Slope of India. *Continental Shelf Research*, 15(14): 1757 – 1771
- Rohling, E. J., Foster, G. L., Grant, K. M., et al., 2014. Sea-Level and Deep-Sea-Temperature Variability over the Past 5.3 Million Years. *Nature*, 508(7497): 477 – 482. <https://doi.org/10.1038/nature13230>
- Saraswat, R., Lea, D. W., Nigam, R., et al., 2013. Deglaciation in the Tropical Indian Ocean Driven by Interplay between the Regional Monsoon and Global Teleconnections. *Earth and Planetary Science Letters*, 375: 166 – 175. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.022>
- Sarkar, A., Ramesh, R., Somayajulu, B. L. K., et al., 2000. High Resolution Holocene Monsoon Record from the Eastern Arabian Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 177(3 – 4): 209 – 218. [https://doi.org/10.1016/S0012-821x\(00\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821x(00)00053-4)
- Singh, A. D., Jung, S. J. A., Darling, K., et al., 2011. Productivity Collapses in the Arabian Sea During Glacial Cold Phases. *Paleoceanography*, 26(3): 1318 – 1323. <https://doi.org/10.1029/2009pa001923>
- Sinha, A., Cannariato, K. G., Stott, L. D., et al., 2005. Variability of Southwest Indian Summer Monsoon Precipitation During the Bølling-Ållerød. *Geology*, 33(10): 813 – 816. <https://doi.org/10.1130/g21498.1>
- Stager, J. C., Ryves, D. B., Chase, B. M., et al., 2011. Catastrophic Drought in the Afro-Asian Monsoon Region During Heinrich Event 1. *Science*, 33: 1299 – 1302. <https://doi.org/10.1126/science.1198322>
- Stoll, H. M., Vance, D., Arevalos, A., 2007. Records of the Nd Isotope Composition of Seawater from the Bay of Bengal: Implications for the Impact of Northern Hemisphere Cooling on ITCZ Movement. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1 – 2): 213 – 228. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.016>
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Reimer, R., 1993. Extended ¹⁴C Database and Revised Calib Radiocarbon Calibration Program. *Radiocarbon*, 35(1): 215 – 230.
- Svensson, A., Andersen, K. K., Bigler, M., et al., 2008. A 60 000 Year Greenland Stratigraphic Ice Core Chronology. *Climate of the Past*, 4(1): 47 – 57. <https://doi.org/10.5194/cp-4-47-2008>
- Thamban, M., Rao, V. P., and Schneider, R. R., 2002. Reconstruction of Late Quaternary Monsoon Oscillations Based on Clay Mineral Proxies Using Sediment Cores from the Western Margin of India. *Marine Geology*, 186(3 – 4): 527 – 539. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00268-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00268-2)
- Thiry, M., 2000. Palaeoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Marine Deposits: An Outlook from the Continental Origin. *Earth-Science Reviews*, 49(1 – 4): 201 – 221. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00054-9)
- Tripathy, G. R., Singh, S. K., Ramaswamy, V., 2014. Major and Trace Element Geochemistry of Bay of Bengal Sediments: Implications to Provenances and Their Controlling Factors. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 397: 20 – 30. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.04.012>
- Wan, S. M., Clift, P. D., Li, A. C., et al., 2012. Tectonic and Climatic Controls on Long-Term Silicate Weathering in Asia since 5 Ma. *Geophysical Research Letters*, 39(15): 151 – 155. <https://doi.org/10.1029/2012gl052377>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.12.010>
- Wang, Y. Y., Huang, S. B., Zhao, L., et al., 2017. Evolution of Quaternary Sedimentary Environment in Shallow Aquifers, at Shahu Area, Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5): 751 – 760. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.063> (in Chinese with English abstract)
- Wei, G. J., Li, Liu, Y. X. H., et al., 2006. Geochemical Record of Chemical Weathering and Monsoon Climate Change since the Early Miocene in the South China Sea. *Paleoceanography*, 24(4): 1 – 11. <https://doi.org/10.1029/2006PA001300>
- Xu, Z. K., Chang, F. M., Li, T. G., et al., 2012a. Provenance of Sediments in the Northern Okinawa Trough over the Last 24 ka: High Resolution Record from Major Elements. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(4): 73 – 82 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. K., Li, T. G., Wan, S. M., et al., 2012b. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.018>
- Xu, Z. K., Li, T. G., Clift, P. D., et al., 2017. Sediment Provenance and Paleoenvironmental Change in the Middle Okinawa Trough During the Last 18.5 ka: Clay Mineral and Geochemical Evidence. *Quaternary International*, 440: 139 – 149. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.058>
- 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, <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5538-8>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.022>
- Zorzi, C., Sanchez Goni, M. F., Anupama, K., et al., 2015. Indian Monsoon Variations during Three Contrasting Climate Periods: The Holocene, Heinrich Stadial 2 and the Last Interglacial-Glacial Transition. *Quaternary Science Reviews*, 125: 50 – 60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirew.2015.06.009>
- #### 附中文参考文献
- 陈忠, 颜文, 2000. 海洋沉积粘土矿物与古气候, 古环境演化响应的研究进展. *海洋科学*, 24(2): 25–27.
- 孔为伦, 李双应, 万秋, 等, 2011. 海洋粘土矿物的古环境含义辨析. *安徽大学学报(自然科学版)*, 35(5): 100–108.
- 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等, 2016. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别. *地球科学*, 41(3): 463–474.
- 刘志飞, 2010. 南海沉积物中的黏土矿物: 指示东亚季风演化历史? *沉积学报*, 28(5): 1012–1019.
- 王妍妍, 黄爽兵, 赵龙, 等, 2017. 江汉平原沙湖地区浅层含水层第四纪沉积环境演化. *地球科学*, 42(5): 751–760.
- 徐兆凯, 常凤鸣, 李铁刚, 等, 2012. 24 ka来冲绳海槽背部沉积物来源的高分辨率常量元素记录. *海洋地质与第四纪地质*, 32(4): 73–82.