

文章编号: 1000-0550(2010) 05-1012-08

# 南海沉积物中的黏土矿物: 指示东亚季风演化历史? <sup>①</sup>

刘志飞

(同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092)

**摘要** 黏土矿物以其示踪洋流变化和揭示物源区同时期气候变化的能力,近年来在南海沉积古环境研究中的地位日益显现。但是,南海黏土矿物能否用于直接指示东亚季风演化历史的研究仍然颇为争议。本研究认为,南海黏土矿物主要受控于物源区供给和洋流搬运作用,黏土矿物本身不具同时期气候条件特征。以南海北部为例,珠江、台湾和吕宋岛这三个主要物源区无论是冰期还是间冰期都提供相同的黏土矿物组合,这些黏土矿物在输入到南海后分别受到不同洋流的搬运。因此,南海晚第四纪黏土矿物组合用于指示东亚季风演化历史的应用是通过洋流的搬运用来实现的,在不同海区的应用效果不同。

**关键词** 黏土矿物 东亚季风 物源区 洋流 晚第四纪 南海

**作者简介** 刘志飞 男 1969 年出生 教授 博士生导师 沉积学 E-mail: lzlife@tongji.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

黏土矿物是海洋陆源碎屑沉积物中最重要的颗粒成份,在世界大洋几乎全部的环境中都广泛分布,已经在海洋沉积物来源、洋流搬运、以及过去古环境演化研究中发挥了越来越重要的作用<sup>[1~5]</sup>。黏土矿物用于指示沉积物来源和洋流搬运是考虑其成份在从源到汇的搬运过程中不发生变化,且在海底沉积后不发生自生及成岩后生作用<sup>[3,4]</sup>;用于开展古环境演化研究是考虑其具有揭示同时期气候变化的能力<sup>[5]</sup>。然而,黏土矿物是否能够直接指示同时期气候条件长期以来一直受到质疑<sup>[6]</sup>。海洋沉积物的碎屑黏土矿物主要是形成于陆地硅铝酸盐岩的化学风化作用,伊利石和绿泥石被认为初始矿物,形成于弱的水解作用和岩石的直接侵蚀;高岭石代表了强烈的水解作用,是温暖和潮湿气候条件下化学风化作用的结果;而蒙脱石代表铁镁质硅铝酸盐岩的化学风化产物<sup>[7]</sup>。因此,从直观上讲,高岭石形成于温暖和潮湿的气候条件,伊利石和绿泥石形成于相对寒冷和干旱的气候条件,而蒙脱石也多形成于温暖和潮湿的气候环境,但与火山岩的化学风化作用密切相关。这样,各黏土矿物的属种就与气候条件具有直接的对应关系。问题在于黏土矿物通过化学风化作用来形成需要多长时间。Thiry 认为黏土矿物形成至少需要 1 Ma<sup>[6]</sup>,黏土矿物对应的气候条件就有大约 1 Ma 的滞后。如果这个前提成立,黏土矿物在轨道时间尺度或

更高时间分辨率上显然不能指示同时期的气候条件,但可用于指示物源区和洋流搬运过程。然而,Oliva 等认为在热带高降雨量和温热的气候条件下,形成土壤的年均化学风化速率可达 5.4 cm,表明在年、季的时间尺度上黏土矿物就可以形成<sup>[8]</sup>。因此,黏土矿物的气候条件应用可能要视具体情况而定。

南海作为西太平洋低纬地区最大的边缘海,由于紧邻亚洲大陆和西太平洋岛弧带,陆源碎屑颗粒占南海新生代渐新世以来全部沉积物近 80%<sup>[9]</sup>,为全球古环境和构造演化、特别是亚洲古季风的研究提供良好材料,从而使南海成为国际过去全球变化计划研究的海洋研究基地<sup>[10,11]</sup>。黏土沉积学近年来在南海沉积古环境研究中的地位日益显现<sup>[12~18]</sup>,这些研究工作主要是围绕南海“国际大洋钻探计划 (ODP)”第 184 航次和“国际海洋过去全球变化计划 (MAGES)”航次的岩心分析展开的。前人研究的结果显示,南海晚第四纪时间序列变化的黏土矿物组合大都具有冰期—间冰期的旋回变化,多数被解释为与同时期物源区气候变化有密切联系的化学风化或洋流搬运作用。主要包括两类不同的解释:其一,黏土矿物组合的冰期—间冰期旋回变化被解释为陆地同时期化学风化作用,认为间冰期时期温暖和潮湿的夏季风气候加速出露岩石的化学风化作用,形成相对较高含量的高岭石和蒙脱石矿物<sup>[14,16,19]</sup>;其二,这种黏土矿

<sup>①</sup>国家自然科学基金项目(批准号:40925008、40876024、40776027)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号:2007CB815906)、上海市曙光人才计划(批准号:07SG23)和上海市优秀学科带头人计划(批准号:10XD1406300)联合资助。

收稿日期:2010-05-20 收修修改稿日期:2010-06-05

物组合的冰期—间冰期旋回变化不受同时期的气候条件直接控制, 而是由物源区供给和洋流搬运控制, 认为各主要物源区在晚第四纪无论是冰期还是间冰期都提供相同的黏土矿物种类, 而冰期和间冰期时期季风风向驱动的相互反转的表层洋流搬运作用才直接造成黏土矿物组合的旋回变化<sup>[12, 20, 21]</sup>。本研究围绕南海黏土矿物这个古环境解释的问题, 通过回顾和讨论黏土矿物源区分析和洋流搬运研究的最新进展, 阐述南海黏土矿物组合主要受控于物源区供给和洋流搬运作用, 可以间接地指示晚第四纪东亚季风演化历史。

### 1 区域背景

南海及其邻近陆地是东亚季风气候盛行的地区, 冬季风以大陆变冷、亚洲北部发育高压和东北风穿过南海为特征, 而夏季风表现为大陆加热、西藏上空发育低压、南海上空形成西南风以及华南降雨量普遍增高<sup>[11, 22]</sup>。冬季在东北风的驱动下形成逆时针表层洋流, 而夏季在西南风的驱动下形成西南向表层洋流, 接受邻近陆地化学风化和机械剥蚀的产物<sup>[23]</sup>。然而, 近期研究发现南海发育十分复杂的洋流系统<sup>[24]</sup>。

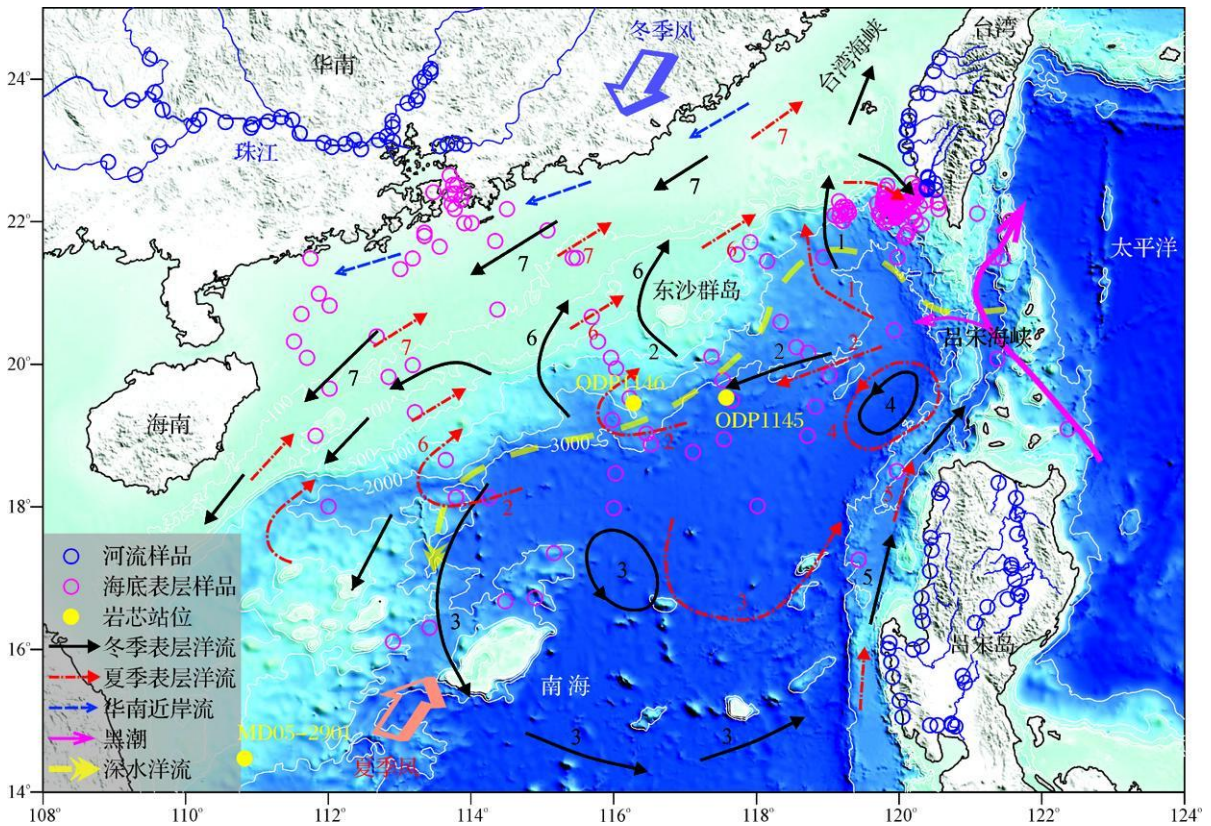


图 1 南海北部东亚季风和洋流系统<sup>[24]</sup>

图中显示本文讨论涉及的河流样品(蓝色圈)、海底表层样品(紫色圈)、ODP和MAGES站点(黄色圆点)的位置。夏季盛行西南向季风(粉红色立体箭头)和冬季盛行的东北向季风(蓝色立体箭头)据文献[22]; 夏季和冬季表层洋流(分别为红色点画线和黑色实线箭头)据文献[25]; 深水洋流(黄色虚线箭头)据文献[26]; 华南近岸流(蓝色虚线箭头)据文献[27]; 黑潮(紫色箭头)据文献[28]。南海表层洋流的编号分别代表<sup>[25]</sup>: 1. 回路洋流; 2. 黑潮南海分支; 3. 西北吕宋涡流; 4. 西北吕宋旋涡; 5. 吕宋沿岸流; 6. 南海暖流; 7. 广东沿岸流

Fig 1 East Asian monsoon and oceanic current systems in the northern South China Sea (SCS)<sup>[24]</sup>

Locations of surface sediments from surrounding rivers (blue circles) and seafloor (purple circles) and of ODP (Ocean Drilling Program) and MAGES (International Marine Past Global Change Study) sites (yellow round dots) are indicated. Southwesterly winds prevailing in summer (pink three-dimensional arrow) and northeasterly winds prevailing in winter (blue three-dimensional arrow) after reference [22]; summer and winter surface currents (red dotted line arrow and black solid arrow, respectively) after reference [25]; deep current (yellow dashed arrow) deduced from reference [26]; bngshore current (blue dashed arrow) after reference [27]; Kuroshio current (purple arrow) after reference [28]; Numbers for surface currents<sup>[25]</sup>: 1. Loop Current; 2. SCS Branch of Kuroshio; 3. NW Luzon cyclonic gyre; 4. NW Luzon cyclonic eddy; 5. NW Luzon coastal current; 6. SCS warm current; 7. Guangdong coastal current

本文以南海北部为例来说明,南海北部洋流系统主要包括:表层洋流、深水洋流、以及局部分布的华南近岸流和吕宋沿岸流(图1)。夏季和冬季的表层洋流并不完全随季风方向的转变而全部反向,仅在北部陆架和上陆坡区域在西南向南海暖流和东北向广东沿岸流之间转变<sup>[25]</sup>。其他海区的表层洋流在夏季和冬季基本保持一致,特别是位于陆坡和广海的大部分区域明显受到黑潮侵入影响<sup>[28]</sup>,由吕宋海峡侵入的黑潮南海分支向北转变为南海暖流,向南演变为西北吕宋涡流和旋涡<sup>[25]</sup>。靠近陆地的华南近岸流<sup>[27]</sup>和吕宋沿岸流<sup>[25]</sup>也不随季节的变化而改变。根据海水含氧和盐度分布推测的深水洋流由吕宋海峡进入南海后,大致沿2000~2500m深度逆时针方向流动,也不具季节性变化<sup>[26]</sup>。南海北部以珠江、台湾和吕宋岛弧为主的物源供给区输入的陆源碎屑颗粒受到这些洋流系统的综合影响,使海洋沉积的碎屑黏土矿物既携带物源区气候变化的信息,又富有洋流搬运和沉积的特征<sup>[13, 29]</sup>。

## 2 南海晚第四纪黏土矿物组合

南海晚第四纪黏土矿物组合的时间序列研究在国际上始于ODP第184航次的钻孔分析,位于南海北部陆坡ODP1146站(图1)第四纪的黏土矿物组合具有明显的冰期—间冰期旋回变化,伊利石、绿泥石和高岭石含量在冰期时增高,而蒙脱石含量在间冰期时增高<sup>[13, 20]</sup>。这项研究结果解释认为,南海北部的黏土矿物主要受控于物源区供给和表层洋流搬运作用,提出在冰期—间冰期的时间尺度上,间冰期盛行的西南表层洋流将更多的蒙脱石由南部和东部向北搬运,表现为加强的夏季风;冰期盛行的逆时针表层洋流将大量伊利石和绿泥石由台湾以及东北部其他物源搬运至南海北坡,表现为强盛的冬季风<sup>[13, 20]</sup>。然而,位于其东侧的ODP1145站(图1)晚第四纪的黏土矿物组合则不显示冰期—间冰期的旋回变化,却呈现出20ka的周期性波动<sup>[16]</sup>。该项研究发现蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率与北纬20°(9月)平均辐射量具有较好的对应关系,高比值发生在辐射量增加之时,据此提出黏土矿物的形成与受辐射量控制的夏季风降雨影响,认为黏土矿物的形成代表了同时期陆源区的气候条件<sup>[16]</sup>。

南海西部MD05-2901孔(图1)的晚第四纪黏土矿物组合是迄今最高分辨率(1ka)的时间序列变化研究<sup>[21]</sup>。该项研究揭示,南海西部450ka以来的伊

利石、绿泥石和高岭石含量表现出明显的冰期—间冰期旋回变化,而蒙脱石含量呈现频率更高的周期性变化(图2)。通过物源区分析认为,该孔的蒙脱石主要由巽他陆架及其主要源区印度尼西亚岛弧提供,伊利石和绿泥石主要由湄公河和红河提供,而高岭石则主要由珠江提供,表层洋流的搬运过程对黏土矿物的组合起到了决定性作用<sup>[21]</sup>。高岭石/(伊利石+绿泥石)比值的频谱分析显示强烈的100ka偏心率周期,指示了冰盖驱动的冬季风演化;而蒙脱石含量的频谱分析除了具有41ka斜率周期以外,还具有23ka和19ka岁差周期,以及13ka半岁差周期,指示了热带驱动的夏季风演化<sup>[21]</sup>。由此可见,该孔的黏土矿物组合指示东亚季风演化主要是通过洋流搬运过程来实现的,而不是季风气候直接驱动同时期化学风化的过程。

## 3 南海北部表层沉积物的黏土矿物组合及其源区和搬运机制

现代表层沉积物中黏土矿物组成及其搬运机制,在很大程度上可以帮助地质历史时期黏土矿物的古环境解释。南海表层及其周边流域盆地表层沉积物的黏土矿物学调查虽然在20世纪70年代后期就已开展<sup>[30]</sup>,但其系统研究随着南海古环境研究的整体发展趋势在近几年才全面展开<sup>[24, 29, 31~33]</sup>,而且以南海北部最为成熟。根据前人研究,南海北部的陆源碎屑沉积物主要来源于华南的珠江、台湾西南部河流、以及吕宋岛河流<sup>[24, 29]</sup>。尽管有学者认为风尘沉积对南海北部有所贡献<sup>[10, 14]</sup>,但至今没有提供直接证据的研究成果发表,而多数其他研究通过黏土矿物学、Nd同位素和颗粒粒度的大量研究,认为风尘沉积的贡献完全可以被忽略,而认为南海周边河流沉积物是其主要来源<sup>[13, 15~21]</sup>。

珠江属于世界上重要的大型河流,其沉积物的黏土矿物成分主要为高岭石(平均值为46%,下同),其次为绿泥石(29%)和伊利石(26%),基本不含蒙脱石<sup>[31, 32]</sup>。台湾的山区河流虽然汇水区面积很小,但是由于构造活动和季风、台风降雨的影响,其径流量和沉积物输送量都非常巨大,成为南海周边陆源悬浮沉积物的重要来源,其河流沉积物的黏土矿物成分主要为伊利石(56%)和绿泥石(41%),含有极少量的高岭石和蒙脱石<sup>[29]</sup>。吕宋岛河流的汇水区面积也很小,构造活动尤其是火山活动非常发育,季风降雨的影响也很大,其河流沉积物的黏土矿物成分主要为

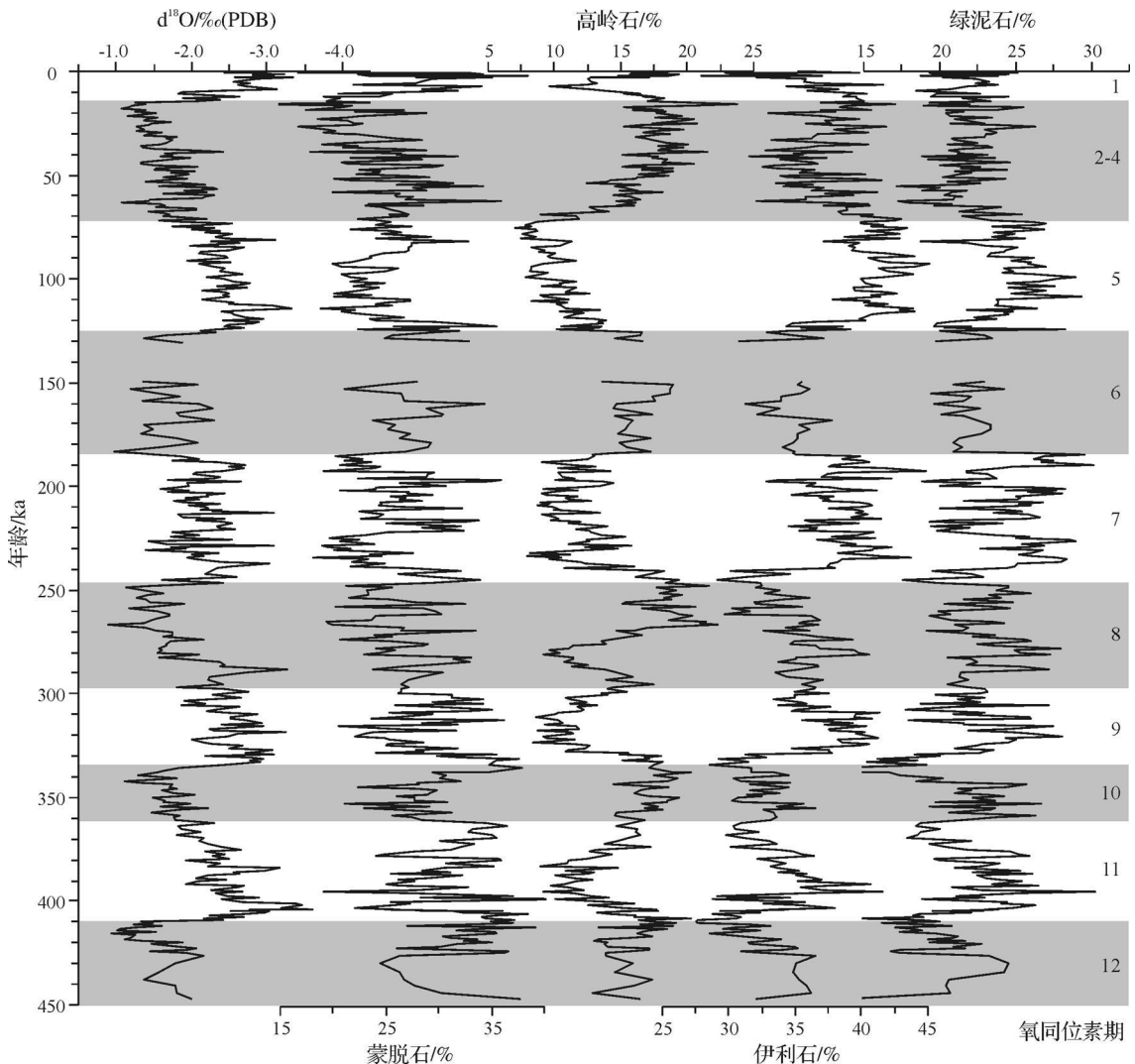


图 2 南海西部 MD05-2901 孔 450 ka 以来黏土矿物组合<sup>[21]</sup>

Fig 2 Clay mineral assemblages over the past 450 ka at Core MD05-2901 in the western South China Sea<sup>[21]</sup>

蒙脱石 (8%), 含有少量高岭石 (9%) 和绿泥石 (9%), 几乎不含伊利石<sup>[33]</sup>。这三个物源区的黏土矿物组合在晚第四纪的时间尺度上并不发生显著变化<sup>[29, 31, 33]</sup>。珠江盆地自中生代以来都很稳定, 长期受东亚季风降雨气候影响, 土壤剖面富含高岭石。吕宋岛虽然也受季风降雨的气候影响, 但其中基性火山活动频繁, 这类火山岩极易通过化学风化作用形成蒙脱石。台湾的新生代沉积岩和变质岩受到构造活动和台风降雨的强烈影响, 剥蚀速率极高, 使出露的岩石没有充足的时间发生化学风化作用就遭侵蚀, 形成伊利石和绿泥石组合。因此, 这三个地区提供的黏土矿物组合在晚第四纪的时间尺度上不会发生显著变化, 无论是冰期还是间冰期都提供相同的黏土矿物组合。

通过珠江、台湾和吕宋岛主要河流沉积物黏土矿

物含量与其近岸和南海北部表层黏土矿物含量的对比研究, 发现河流近岸沉积物的黏土矿物组合都接近其河道的黏土矿物组成, 但陆架至深水盆地的黏土矿物组合都介于这三个主要物源区端元成分之间 (图 3)<sup>[24]</sup>。其中, 南海北部东侧的样品全部分布在台湾和吕宋岛端元成分之间, 并呈现线性分布, 说明珠江对其黏土矿物含量的贡献很低<sup>[32]</sup>; 而西侧多数样品主要也介于台湾和吕宋岛端元成分之间, 并略向珠江端元偏移, 另有少量样品 (主要产自陆架区域) 分布珠江口近岸样品区间, 表明珠江对南海东北部西侧特别是其深水区的黏土矿物贡献量仍然是较低的<sup>[24, 32]</sup>。因此, 在考虑主要由珠江、台湾和吕宋岛三个物源区提供南海北部陆源沉积物的情况下, 蒙脱石就主要源自吕宋岛, 高岭石主要源自珠江, 而伊利石

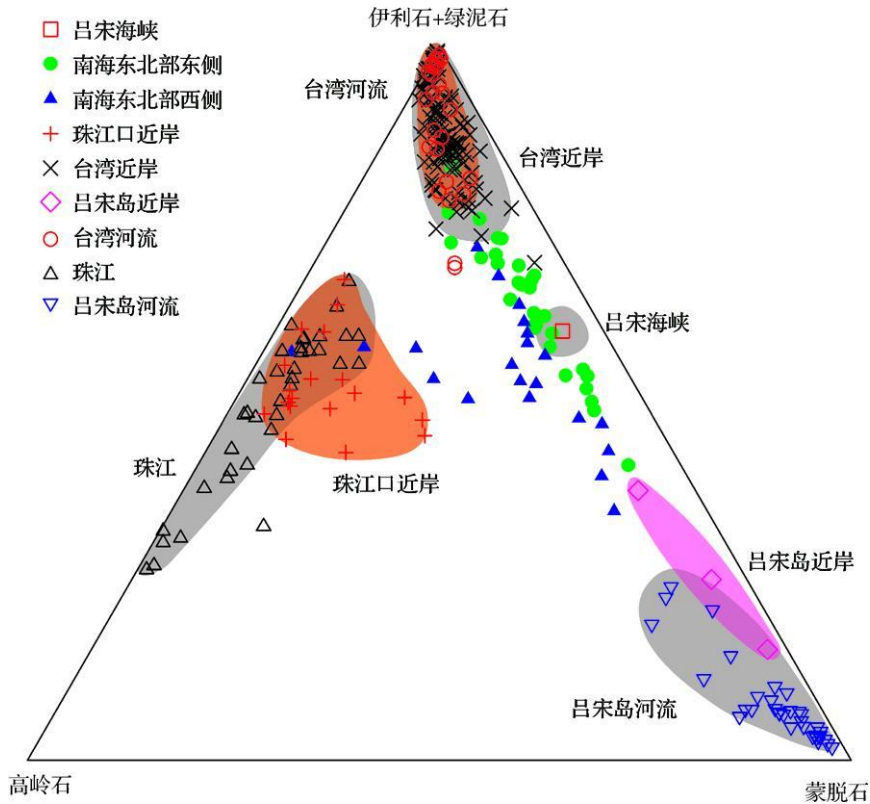


图 3 南海北部表层及邻近的珠江、台湾和吕宋岛流域表层沉积物的黏土矿物含量对比<sup>[24]</sup>  
 样品位置分布见图 1 南海北部表层沉积物的黏土矿物资料据文献 [24], 珠江资料据文献 [31, 32],  
 台湾河流资料据文献 [29], 吕宋岛河流资料据文献 [33]

Fig 3 Ternary diagram of the major clay mineral groups illite+ chlorite, kaolinite and smectite of surface sediments in the northern South China Sea and adjacent Pearl River, Taiwan, and Luzon drainage basins<sup>[24]</sup>

See Fig 1 for sample locations. Data of the northern South China Sea from reference [24]; data of the Pearl River from references [21, 32]; data of Taiwan rivers from reference [29]; data of Luzon rivers from reference [33]

和绿泥石主要分别源自台湾和珠江<sup>[24, 29]</sup>。

根据南海北部表层样品中黏土矿物组合平面分布的研究结果, 这三个主要物源区的黏土矿物在输入到南海后分别受到不同洋流的搬运(图 4)<sup>[24]</sup>。南海北部深水区的伊利石和绿泥石主要源自台湾, 由深水洋流搬运而至, 但也部分由珠江提供; 而北部陆架和上陆坡的伊利石和绿泥石也是主要源自台湾, 但由冬季盛行的广东沿岸流搬运。蒙脱石主要源自吕宋岛弧, 由黑潮侵入后形成的黑潮南海分支表层洋流搬运而至。由珠江提供的高岭石传输受到广东沿岸流和华南近岸流严重影响, 由珠江口输入到南海后即向西搬运, 很少量进入南海深水区, 造成在南海北部大部分海区的高岭石含量普遍都在 5% ~ 10% 范围<sup>[24]</sup>。因此, 南海北部黏土矿物组合主要受控于物源区供给和洋流搬运作用, 黏土矿物本身不具同时期气候条件特征, 其应用于晚第四纪东亚季风演化历史的研究是

通过洋流的搬运作用来实现。比如: 位于南海西部的 MD05-2901 孔(图 1)在冬季和夏季时表层洋流受控于反转的季风风向而反向, 分别从北部和南部搬运完全不同的黏土矿物组合, 形成明显的冰期—间冰期黏土矿物组合的旋回变化; 而位于南海北部的 ODP1145 站(图 1)在冬季和夏季时的表层洋流不发生反转, 仅是位置的偏移, 造成其搬运黏土矿物的种类维持不变, 加之深水洋流搬运的黏土矿物混合效应, 使该海区黏土矿物组合没有明显的冰期—间冰期旋回变化。

## 4 主要认识

(1) 南海黏土矿物组合主要受控于物源区供给和洋流搬运作用, 黏土矿物本身不具同时期气候条件特征。以南海北部为例, 珠江、台湾和吕宋岛这三个主要物源区无论是冰期还是间冰期都提供相同的黏

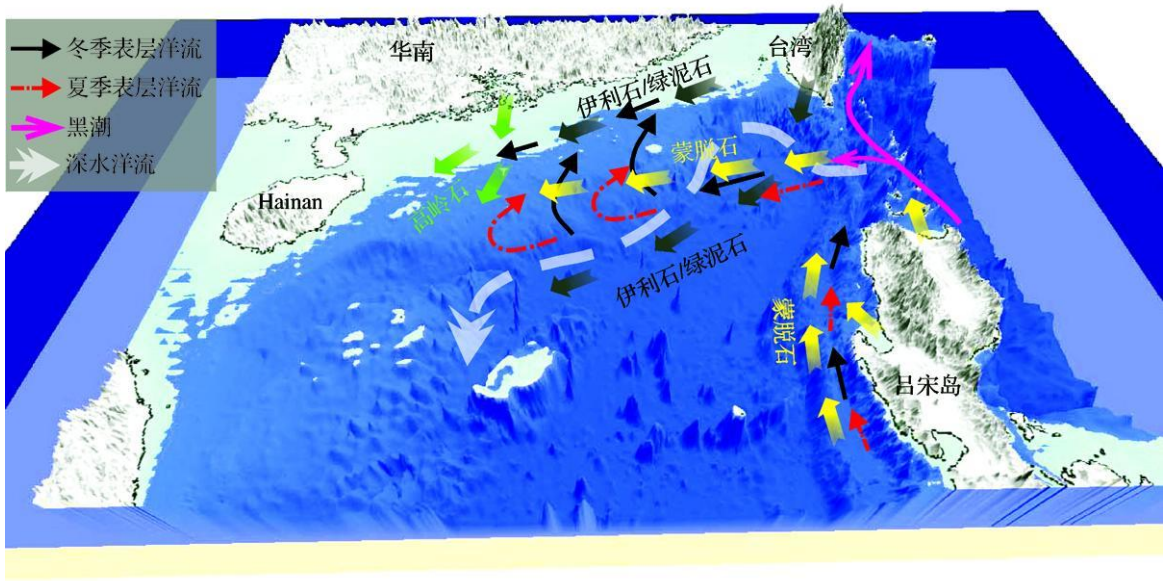


图 4 南海北部黏土矿物的源区及其搬运机制<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Sources and spatial transport processes of main clay mineral species in the northern South China Sea<sup>[24]</sup>

土矿物组合, 珠江主要提供高岭石 (并含伊利石和绿泥石), 台湾主要提供伊利石和绿泥石, 而吕宋岛则主要提供蒙脱石。这些黏土矿物在输入到南海后分别受到不同洋流的搬运, 台湾提供的伊利石和绿泥石组合大部分由深水洋流向西南深水区搬运, 部分由广东沿岸流在北部陆架和上陆坡向西搬运; 吕宋岛提供的蒙脱石由黑潮侵入后形成的黑潮南海分支表层洋流向西搬运; 而珠江提供的高岭石在进入南海后, 即受到广东沿岸流和华南近岸流严重影响而向西搬运。

(2) 南海晚第四纪黏土矿物组合用于指示东亚季风演化历史的应用是通过洋流的搬运作用来实现的。南海西部由于冬季和夏季反转的季风风向驱动反转的表层洋流, 分别从北部和南部搬运完全不同的黏土矿物组合, 形成明显的冰期—间冰期黏土矿物组合的旋回变化。南海北部虽然季风风向在冬季和夏季反转, 但大部分海区表层洋流主要受控于黑潮侵入后形成的黑潮南海分支, 加之深水洋流搬运的黏土矿物混合效应, 使该海区黏土矿物组合没有明显的冰期—间冰期旋回变化。

致谢 本研究工作得到同济大学海洋地质国家重点实验室拓守廷、赵玉龙、李夏晶和王浩的帮助, 法国巴黎第十一大学 Christophe Colin 教授参与有益讨论, 在此表示衷心感谢!

## 参考文献 (References)

- 1 Griffin J J, Windom H, Goldberg E D. The distribution of clay minerals in the world ocean [J]. *Deep-Sea Research*, 1968, 15: 433-459
- 2 Rataev M A, Gorbunova Z N, Lisitzyn A P, *et al*. The distribution of clay minerals in the oceans [J]. *Sedimentology*, 1969, 13: 21-43
- 3 Fagel N, Hillaire-Marcel C, Robert C. Changes in the western boundary undercurrent outflow since the last glacial maximum, from smectite/illite ratios in deep Labrador Sea sediments [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 79-96
- 4 Gingele F X, Deckker P D, Hiltenbrand G-D. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia—source and transport by ocean currents [J]. *Marine Geology*, 2001, 179: 135-146
- 5 Colin C, Turpin L, Bertaux J *et al*. Erosional history of the Hainan and Buma ranges during the last two glacial-interglacial cycles [J]. *Earth Planet Science Letters*, 1999, 171: 647-660
- 6 Thiery M. Paleoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49: 201-221
- 7 Chamley H. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin: Springer, 1989: 623
- 8 Oliva P, Viers J, Dupré B. Chemical weathering in granitic environments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 202: 225-256
- 9 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36 (9): 822-829 [Huang Wei, Wang Pinxian. Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49 (11): 1147-1155]

- 10 Wang L, Samthein M, Erlenkeuser H, *et al*. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284
- 11 Wang P, Prell W L, Blum P, *et al*. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports 184 [CD-ROM]. College Station: Ocean Drilling Program, Texas A&M University, 2000
- 12 Clift P, Lee J I, Clark M, *et al*. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2002, 184: 207-226
- 13 Liu Z, Trentesaux A, Clemens S C, *et al*. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 133-146
- 14 Tamburini F, Adatte T, Flüh K, *et al*. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial interglacial period (0-140,000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 147-168
- 15 Liu Z, Colin C, Trentesaux A, *et al*. Erosional history of the eastern Tibetan Plateau over the past 190 kyr: clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 1-18
- 16 Boulay S, Colin C, Trentesaux A, *et al*. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 kyr: mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228: 260-277
- 17 Wan S, Li A, Clift P D, *et al*. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254: 561-582
- 18 Liu Z, Huang W, Li J, *et al*. Sedimentology [M] // Wang P, Li Q, eds. *The South China Sea-Paleoceanography and Sedimentology*. Berlin: Springer, 2009: 171-295
- 19 Boulay S, Colin C, Trentesaux A, *et al*. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144) [C] // Prell W L, Wang P, Blum P, *et al*, eds. *Proceedings of ODP Scientific Results*, 2003, 184: 1-21 [Online]. [http://www-odp.tamu.edu/publications/184\\_SR/](http://www-odp.tamu.edu/publications/184_SR/). [Cited 01-04-2003]
- 20 刘志飞, Trentesaux A, Clemens S C, 等. 南海北坡 ODP1146 站第四纪黏土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33 (3): 271-280 [Liu Zhifei, Trentesaux A, Clemens S C, *et al*. Quaternary clay mineralogy in the northern South China Sea (ODP Site 1146): implications for oceanic current transport and East Asian monsoon evolution [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2003, 46 (12): 1223-1235]
- 21 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 39 (9): 1176-1184 [Liu Zhifei, Zhao Yulong, Li Jianru, *et al*. Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: Implications for source analysis and East Asian monsoon evolution [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50 (11): 1674-1684]
- 22 Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interaction [J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 427-476
- 23 Wang P, Wang L, Bian Y, *et al*. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles [J]. *Marine Geology*, 1995, 127: 145-165
- 24 Liu Z, Colin C, Li X, *et al*. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport [J]. *Marine Geology*, in revision
- 25 Fang G, Fang W, Fang Y, *et al*. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 37 (1): 1-16
- 26 Qu T, Gibson J B, Whitehead J A. Deepwater overflow through Luzon Strait [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: C01002, doi:10.1029/2005JC003139
- 27 Wang Y, Ren M-E, Zhu D. Sediment supply to the continental shelf by the major rivers of China [J]. *Journal of Geological Society London*, 1986, 143: 935-944
- 28 Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62: 559-575
- 29 Liu Z, Tuo S, Colin C, *et al*. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation [J]. *Marine Geology*, 2008, 255: 149-155
- 30 Chen P-Y. Minerals in bottom sediments of the South China Sea [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1978, 89: 211-222
- 31 Liu Z, Colin C, Huang W, *et al*. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and the Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl River and Mekong drainage basins [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2007, 8: Q05005, doi:10.1029/2006GC001490
- 32 刘志飞, Colin C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献 [J]. *科学通报*, 2007, 52 (4): 448-456 [Liu Zhifei, Colin C, Huang Wei, *et al*. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (8): 1101-1111]
- 33 Liu Z, Zhao Y, Colin C, *et al*. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 2195-2205

# Clay Mineral Assemblages in Sediments of the South China Sea: East Asian Monsoon Evolution Proxies?

LIU Zhifei

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** Clay minerals can be used to track oceanic current variations and to reveal contemporaneous paleoclimatic changes prevailing in continental source areas and have played a significant role in sedimentation and paleoenvironment studies of the South China Sea. However, it is quite debatable whether clay minerals in the South China Sea can directly indicate the East Asian monsoon evolution. This study reports that the clay mineral assemblage in the South China Sea is mainly controlled by provenance supply and current transport, and that the clay minerals themselves do not bear the contemporaneous paleoclimatic characteristics. For example, as three major provenances of terrigenous clastics, the Pearl River, Taiwan, and Luzon provide similar clay mineral assemblages, respectively, regardless of glacial or interglacial stages. Once entering the South China Sea, these clay minerals are transported by different oceanic currents. Therefore, the implication of late Quaternary clay mineral assemblages in the South China Sea for proxies of the East Asian monsoon evolution is realized through the current transport processes with various results in different parts of the South China Sea.

**Key words** clay minerals, East Asian monsoon, provenance, oceanic current, late Quaternary, South China Sea