

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.110>



湄公河三角洲第四系沉积物 地球化学特征及其地质意义

杨允柳¹, 何云龙^{1,2*}, 解习农^{1,2}, 裴健翔³, Hoang Dinh Tuan¹, 张道军³

1. 中国地质大学海洋地质资源湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 湄公河三角洲是由发源于青藏高原的世界第 7 长河——湄公河于南海西南部入海口处沉积而成。由于缺少可靠的地球化学资料和系统研究, 湄公河三角洲地区第四系沉积物源性质尚不明确, 制约了对湄公河三角洲源汇系统的进一步认识。本文对湄公河三角洲第四系沉积物进行了重矿物、主元素和微量元素的地球化学特征分析, 结果表明: 所有样品稀土元素球粒陨石标准化分布均表现为负 Eu 异常, 为典型的陆源沉积。全新统样品 ZTR 指数为 2~13, 更新统样品 ZTR 指数为 21~69; 相关图解表明全新统样品主要受分选影响, 更新统样品主要受旋回影响。更新统样品最远物源可能为青藏高原东部, 经过多次沉积旋回, 由古湄公河搬运并再次沉积于湄公河三角洲, 而全新统样品成分成熟度较低, 为近源沉积, 可能为大叻区基岩产物。湄公河三角洲不同时期沉积物源区变化, 可能与湄公河和湄公河三角洲在第四系的沉积过程和演化有关。

关键词: 物源; 地球化学; 第四系; 湄公河三角洲。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2022)03-1107-15

收稿日期: 2021-07-28

Geochemical Characteristics and Geological Significance of Quaternary Sediments in the Mekong Delta

Yang Yunliu¹, He Yunlong^{1,2*}, Xie Xinong^{1,2}, Pei Jianxiang³, Hoang Dinh Tuan¹, Zhang Daojun³

1. Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Zhanjiang Branch, CNOOC Limited, Zhanjiang 524057, China

Abstract: Originating from Qinghai-Tibet Plateau, the Mekong River is seventh longest river of the world, forming the Mekong River Delta in southwestern South China Sea. Due to lack of reliable geochemical data and systematic research, the properties of Quaternary sediments in the Mekong Delta are still unclear, which restricts further understanding of the source and sink system of the Mekong River. Based on the analysis of heavy minerals, geochemical characteristics of major elements and trace elements of samples from Mekong Delta, all the samples present negative chondrite-normalized Eu anomaly, indicating typical terrigenous

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42130408, 42172125, 41502102); 中国-东盟海上合作基金项目 (No. 12120100500017001)。

作者简介: 杨允柳 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究。ORCID: 0000-0003-0720-878X。E-mail: 1079245799@qq.com

* **通讯作者:** 何云龙, ORCID: 0000-0003-1925-5356。E-mail: ylhe@cug.edu.cn

引用格式: 杨允柳, 何云龙, 解习农, 裴健翔, Hoang Dinh Tuan, 张道军, 2022. 湄公河三角洲第四系沉积物地球化学特征及其地质意义. 地球科学, 47(3): 1107-1121.

Citation: Yang Yunliu, He Yunlong, Xie Xinong, Pei Jianxiang, Hoang Dinh Tuan, Zhang Daojun, 2022. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Quaternary Sediments in the Mekong Delta. *Earth Science*, 47(3): 1107-1121.

deposition. With respect to the Pleistocene samples, the *ZTR* index ranges between 21 and 69. By contrast, the *ZTR* index of the Holocene samples ranges from 2 to 13. The correlation diagrams show that the Holocene samples are mainly affected by sorting and the Pleistocene samples are mainly affected by sedimentary recycling. The provenance of sediments from the Pleistocene with high component maturity was probably derived from eastern part of the Tibet, which has experienced several depositional recycling and have been transported by Paleo-Mekong River to the Delta. However, with low component maturity, the sediments of the Holocene are proximal source, and most likely from basement of Dalat area nearby. Variation of provenance of Mekong River Delta during different depositional periods may be related to the tectonic activities, depositional processes and evolution of the Mekong River and the Mekong River Delta in Quaternary.

Key words: provenance; geochemistry; Quaternary; Mekong River Delta.

河流三角洲是河流入海/湖形成的重要沉积体,其沉积物中记录了丰富的物源区古环境、古地形和古气候以及构造活动和地壳演化等多种信息,是沉积物源-汇系统研究的重要载体(杨守业等,2003,2006;Yang *et al.*, 2015).作为南海南部最大的河流,湄公河是南海西南部新生代沉积盆地晚期沉积物的

主要供给者(图1).湄公河三角洲沉积物的研究对于深入探讨湄公河沉积物从源到汇的过程,以及揭示湄公河三角洲沉积演化具有重要意义,而这种演化可能与区域构造活动、局部物源加入、气候或者海平面变化有关(Liu *et al.*, 2007; Statterger *et al.*, 2013; Hennig *et al.*, 2018; 王菲等, 2021). 同时

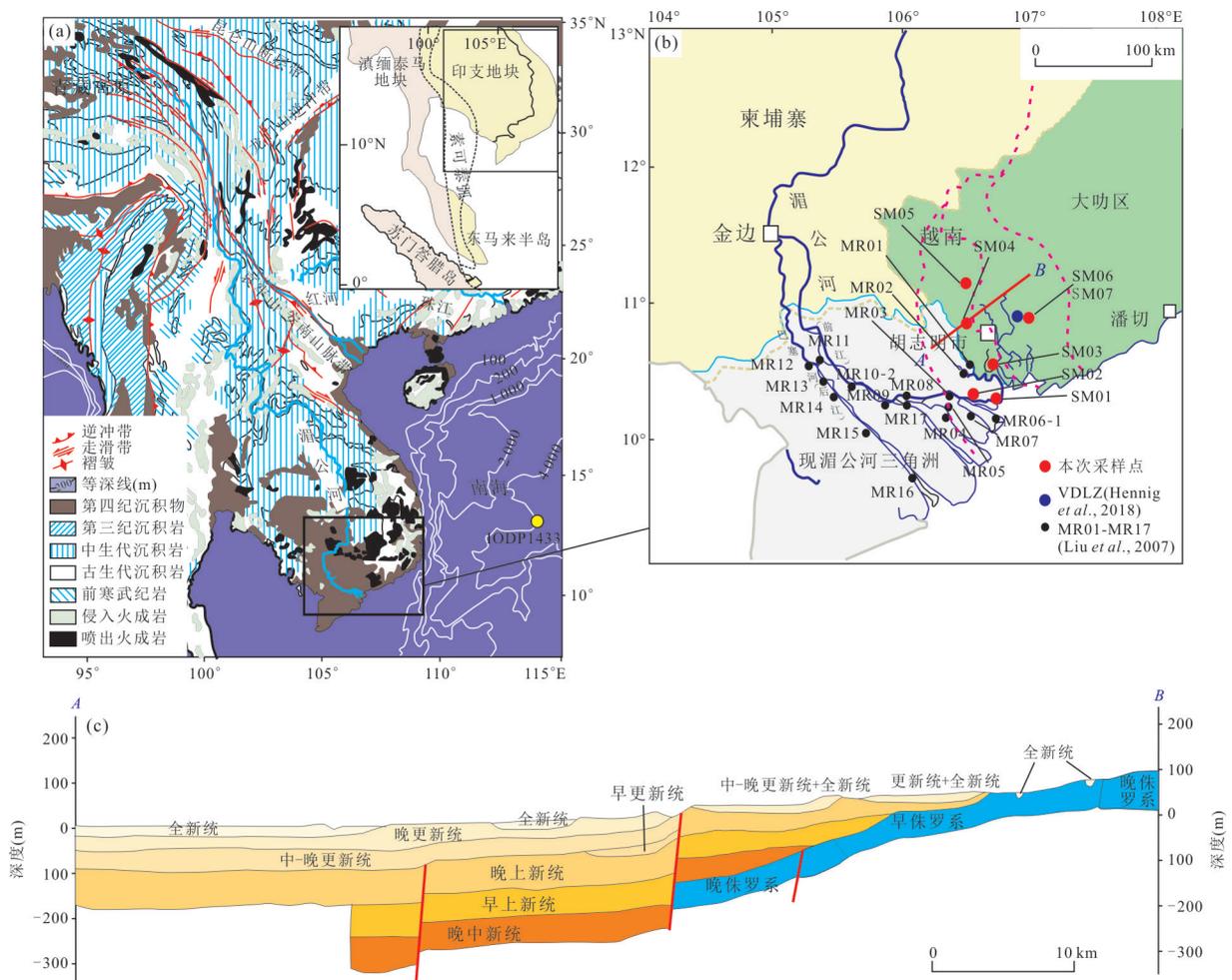


图1 东南亚及研究区地质背景(a)、采样位置(b)(据 Liu *et al.*, 2007; Hennig *et al.*, 2018 修改)以及 A-B 地层剖面(c)

Fig.1 Geological map and bathymetry of SE Asia (a); sampling location in the study area (b) (modified after Liu *et al.*, 2007; Hennig *et al.*, 2018), and the profile of A-B shown in figure b (c)

图b中粉色虚线为古湄公河,据 Hennig *et al.*(2018)修改;现湄公河三角洲(灰色)和大叻区(绿色)范围合为古湄公河三角洲范围,据 Hennig *et al.*(2018)修改;A-B剖面据内部未发表资料

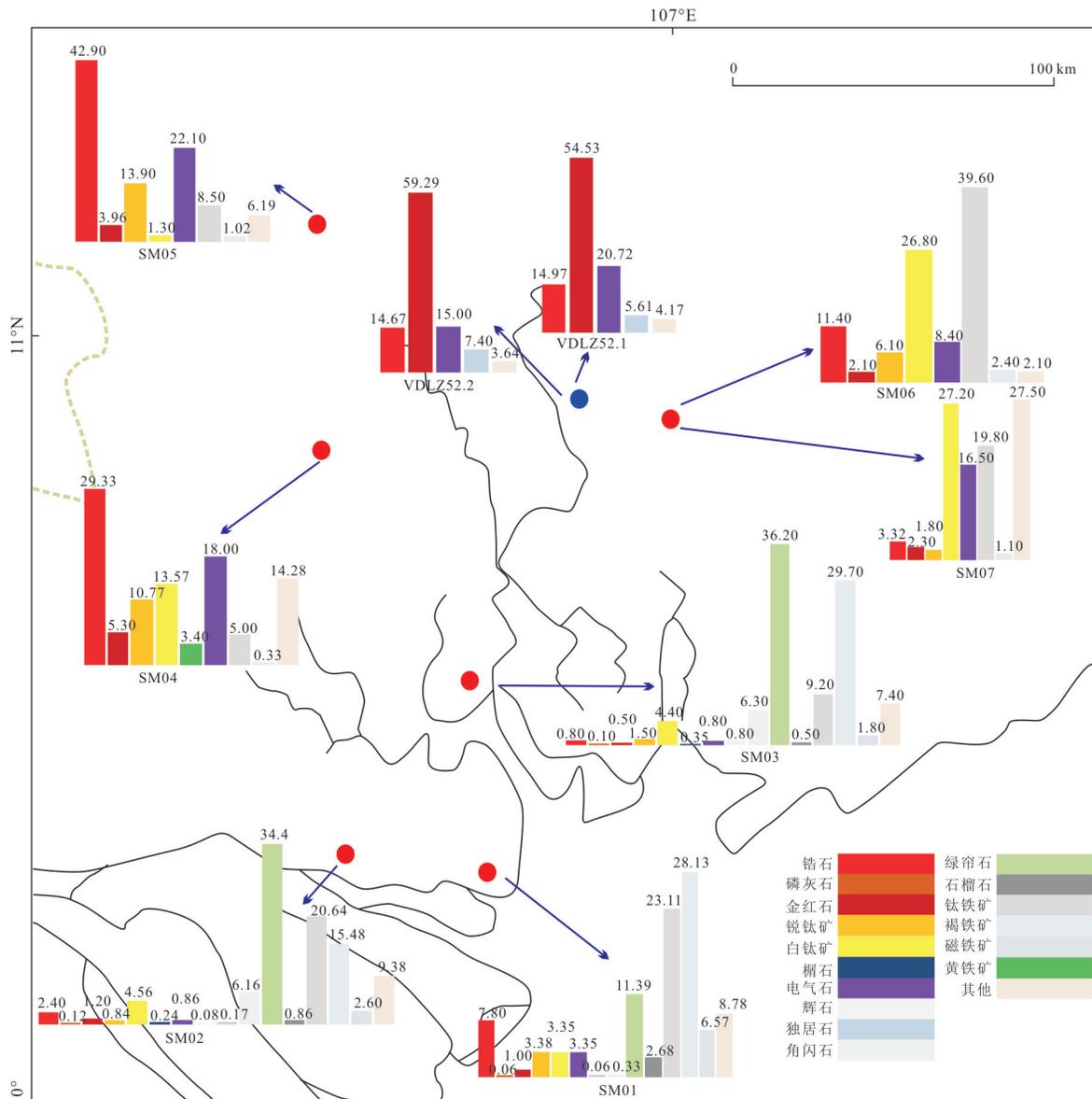


图 2 湄公河三角洲第四系沉积物重矿物组合特征

Fig.2 Characteristics of heavy mineral assemblages of sediments in Quaternary, Mekong Delta

图中数据单位为%;VDLZ52.1和VDLZ52.1据 Hennig *et al.* (2018)

该研究对南海西南海域沉积物沉积地球化学特征的研究具有重要的对比意义. 目前, 利用南海南部已完成的IODP站位和海洋地质调查资料, 国内对于南海西南部海域沉积物的地球化学特征已经取得了比较丰富的成果(刘志飞等, 2004; 乔培军等, 2006; 刘志飞等, 2007; Liu *et al.*, 2017; 王红星等, 2021). 刘志飞等(2007)通过粘土矿物对比发现, 南海西缘沉积物(MD05-2901)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. Liu *et al.* (2017)利用南海南部钻孔IODP U1433样品的Sr-Nd同位素与湄公河河口样品(Liu *et al.*, 2007)比较, 发现其物源来自湄公河三角洲, 且 8 Ma

前后沉积物源性质有较大差异, 得出湄公河三角洲是在 8 Ma 以后形成的结论. Liu *et al.* (2007)通过对现代湄公河河口主河道(图 1b 中 MR01-MR17)、珠江及红河河口的河床淤泥进行主量元素、粘土矿物及 Sr-Nd 同位素的研究发现, 导致湄公河、红河下游三角洲主要矿物含量高的主要原因为青藏高原东部和沿河流域剧烈的构造活动和河流下切而导致的强烈物理剥蚀作用, 而非气候变暖导致的逐渐增强的风化作用. 此外, 国外学者 Hennig *et al.* (2018)对本次研究区北部的大叻区新近系沉积岩进行取样分析发现, 大叻区碎屑岩地层中观察到的岩性与现在湄公河三角洲沉积特征相似, 并在大叻区发现

了典型的潮坪沉积环境,表明现今湄公河三角洲以北的大叻区在第四系以前为古湄公河三角洲的一部分,另外根据现今胡志明市西贡 A-B 地质剖面也可得出同样结论(图 1b)。此外 Nguyen *et al.* (2018) 发现现今湄公河老挝至湄公河三角洲主河道的 3 个样品的锆石年龄具有相似性(主峰为二叠纪、三叠纪及古生代),而与现今大叻区西贡河锆石年龄峰值(主峰为白垩纪)存在明显差异,表明古湄公河三角洲物源在不同位置存在差异。

鉴于此,本次研究在 Liu *et al.* (2007) 的基础上针对湄公河三角洲进行了补充采样,从主河道扩充至大叻区第四系湄公河三角洲沉积区,对湄公河三角洲北部不同位置的全新统和更新统沉积物采样,利用多种地球化学分析方法,讨论湄公河三角洲沉积物的物源特征,可为解释古湄公河和古湄公河三角洲的迁移提供新的证据。同时,本次研究的相关成果亦能为未来可能实施的南海西南缘大洋钻探计划提供更丰富的背景数据和地质认知。

1 研究区概况

湄公河是印支半岛最重要的河流之一,发源于中国青海省玉树藏族自治州杂多县,上游在我国境内被称为澜沧江,其自北向南于越南胡志明市西南面注入南海。湄公河三角洲始于金边以下,河流过金边后分为湄公(Mekong)河和巴塞(Bassac)河,在越南境内被称为前江和后江,这两江把三角洲分成 3 个部分。在越南出海口,前江分成 6 条支流,后江分成 3 条支流,共 9 个河口入海。湄公河的下游及其 9 条叉道流入南海时所形成的冲积平原,称为湄公河三角洲,是越南第一大平原,也是东南亚最大的河口三角洲(图 1b)。

湄公河三角洲在构造区划上处于印支地块东南缘,东与南海西南部陆架相邻,西海岸为东马来西亚火山弧带(图 1)。中生界以来印支地块与华南地块的构造事件对湄公河三角洲物源体系构成具有重要影响。滇缅泰马(Sibumasu)地块和素可泰(Sukhothai)弧至印支地块的增生发生在三叠系至下侏罗统, Carter *et al.* (2001) 认为这一增生事件导致了印支地块的挤压,进而发生区域的高温变质作用。Lepvrier *et al.* (2008) 指出了印支地块向西俯冲导致了湄公河三角洲以北的大叻区基底主要为岩浆岩和变质岩。

越南北部红河流域内地层发育齐全,该区域最

老的地层为新元古界,主要分布在安南山脉一带、扬子克拉通和哀牢山红河断裂带,岩性主要为片麻岩、混合岩、角闪岩和云母片岩。古生代沉积岩岩性主要为砾岩、石英岩、片岩和碳酸盐岩。中生界多为侏罗纪时期的粗粒沉积岩,岩性为砂岩、粉砂岩、泥岩和夹薄层碳酸盐岩。新生界沉积岩以及未固结的沉积物主要分布于红河流域和河口区域,成岩性差。红河断裂带除了广泛分布的沉积岩和高级变质岩之外,部分仍有岩浆岩出露,从元古代到古近纪都有分布。岩体形成时代主要集中在元古代、志留纪、晚二叠世-中三叠世、侏罗纪和白垩纪。流域内大面积出露有晚古生代-中生代岩浆岩,其中沿红河剪切带分布的二叠纪-三叠纪岩体年龄集中于 260~220 Ma,晚白垩世岩体形成年龄为 90~80 Ma (Shi *et al.*, 2015)。此外,在流域内,与红河剪切带有关的新生代岩体形成时代为 60~20 Ma (Zhang and Schärer, 1999; 赵春强等, 2014)。

越南东部在构造上属昆嵩隆起区,母岩岩性以碎屑岩、灰岩为主,局部有基性、酸性喷出岩和花岗岩。前寒武系地体主要岩性为麻粒岩、混合片麻岩、大理岩、角闪岩等,多集中于昆嵩地体,有古元古代 1.7~1.3 Ga 和新元古代 0.7~0.6 Ga 形成的岩体 (Khuc, 2011); 早-中古生代岩体 (460~400 Ma) 主要分布于越南中部和北部 (Carter *et al.*, 2001; Tran *et al.*, 2014); 晚古生代岩性以花岗闪长岩和黑云母花岗岩为主; 早中生代岩浆岩形成时代为 250~230 Ma (Lepvrier *et al.*, 2008); 晚中生代岩性主要为花岗岩和浅色花岗岩; 新生代岩体岩性以超镁铁质-镁铁质喷发岩为主(图 1a)。在研究区北部广泛分布着晚新生代玄武岩带,厚度可达几百米 (Hoang and Flower, 1998)。碱性玄武岩岩浆作用始于中新世中期,其地球化学特征与海南岛的榴辉岩洋壳来源相似 (An *et al.*, 2017)。火山喷发和岩浆流可能与南海重新激活的局部断层有关 (Nguyen *et al.*, 2018)。

由图 1c 中 A-B 剖面可知,自晚中新统以来湄公河三角洲的沉积范围呈现向东北部逐渐扩展的趋势。新生界渐新统至早中新统古南海边缘的走滑伸展及随后的沉降导致万安盆地和九龙盆地的形成,这与古湄公河渐-中新统水系向北迁移有着密切的关系 (Hennig *et al.*, 2017)。

2 样品与分析方法

2.1 样品采集

本次研究样品于2019年取自湄公河三角洲东北部胡志明市境内湄公河干流和支流共7个三角洲平原样品。样品SM01为全新统河沙,取自湄公河支流入海口处,样品SM02、SM03为全新统河沙,取自支流河堤/河漫滩;样品SM04和SM05分别为更新统细沙和中-上更新统中-粗粒砂岩,样品SM06和SM07为下-中更新统细-中砂岩。具体取样位置见图1b。

2.2 样品分析方法

重矿物成分及组合分析是在廊坊岩拓地质服务有限公司进行。(1)先将样品用锤破碎至7~10 cm大小的块状,然后用颚式破碎机(XPE100×125)进行粗碎,碎至约0.5~1.5 cm左右粒状,再用双辊破碎机(HFSG200×75)进行细碎;(2)淘洗:利用矿物比重的差异,先将大淘洗盘装满水,并在其中置一中淘洗盘盛尾砂,然后将预淘洗的砂样倒入另一淘洗盘中,双手握盘半浸于水中作回旋转动,使重矿物沉聚盘底,而轻矿物则聚集在砂的上部,当轻矿物显著聚集时,将盘微倾斜使轻矿物随水流带出盘外。然后再通过三溴甲烷(重液)分离;(3)磁选:将样品放置在铝板上,调节磁力开关,根据矿物的磁性不同分选;(4)通过

双目镜鉴定样品,并用数粒法进行定量。

全岩主量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用日本理学Primus II X射线荧光光谱仪(XRF)分析完成,(1)将全样碎样到200目的样品置于105℃烘箱中烘干12 h;(2)称取约1.0 g烘干样品置于恒重陶瓷坩埚中,在1 000℃马弗炉中灼烧2 h,取出待冷却至室温再称量,计算烧失量;(3)分别称取6.0 g助熔剂(Li₂B₄O₇:LiBO₂:LiF=9:2:1)、0.6 g样品、0.3 g氧化剂(NH₄NO₃)置于铂金坩埚中,在1 150℃熔样炉中熔融14 min,取出坩埚转移到耐火砖上冷却,然后将玻璃片取出以备XRF测试。检测依据为波长色散X射线荧光光谱法《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次成分量测定》(GB/T14506.28-2010)。分析结果如表1所示。

全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用Agilent7700eICP-MS分析完成,(1)将200目样品置于105℃烘箱中烘干12 h;(2)准确称取粉末样品50 mg置于Teflon溶样弹中;(3)先后依次缓慢加入1 mL高纯HNO₃和1 mL高纯HF;(4)将Teflon溶样弹放入钢套,拧紧后置于190℃烘箱中加热24 h以上;(5)待溶样弹冷却,开盖后置于140℃电热板上蒸干,然后加入1 mL HNO₃并再次蒸干;(6)加入1 mL高纯HNO₃、1 mL超纯水和1 mL内标In(浓度为1×10⁻⁶),再次将Teflon溶样

表1 湄公河三角洲第四系样品主量元素(%)分析结果

Table 1 Analysis of major elements (%) of samples in Quaternary, Mekong Delta

样号	SM01	SM02	SM03	SM04	SM05	SM06	SM07
层位	全新统	全新统	全新统	上更新统	中-上更新统	下-中更新统	下-中更新统
SiO ₂	83.86	89.32	86.67	89.03	90.37	92.04	94.03
TiO ₂	0.65	0.23	0.28	0.76	0.43	0.20	0.10
Al ₂ O ₃	5.70	4.92	6.09	5.85	5.47	4.43	3.16
Fe ₂ O ₃ ^T	4.35	1.96	2.16	0.83	0.76	0.88	1.11
MnO	0.08	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01
MgO	0.89	0.36	0.50	0.08	0.04	0.09	0.04
CaO	0.42	0.28	0.29	0.05	0.04	0.05	0.04
Na ₂ O	0.61	0.58	0.75	0.06	0.03	0.05	0.03
K ₂ O	1.15	1.53	1.65	0.15	0.03	0.37	0.17
P ₂ O ₅	0.08	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03
LOI	1.81	1.02	1.33	2.65	2.68	1.60	1.21
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	24.97	30.84	24.17	25.82	28.06	35.30	50.45
K ₂ O/Na ₂ O	1.23	1.74	1.45	1.72	0.66	5.24	3.45
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	6.92	16.81	17.03	6.03	10.03	17.25	24.53
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.22	0.34	0.29	0.03	0.01	0.09	0.06
CIA	65.35	61.18	63.21	94.42	97.35	88.78	91.45

表 2 湄公河三角洲第四系样品微量元素 (10^{-6}) 分析结果Table 2 Analysis of rare elements (10^{-6}) of samples in Quaternary, Mekong Delta

样号	SM01	SM02	SM03	SM04	SM05	SM06	SM07
层位	全新统	全新统	全新统	上更新统	中-上更新统	下-中更新统	下-中更新统
Li	20.50	13.60	17.40	7.91	4.88	8.32	7.70
Be	1.20	0.81	1.13	0.21	0.16	0.37	0.39
Sc	6.72	3.22	3.99	4.69	3.16	2.68	2.11
V	49.7	25.6	31.7	27.3	26.6	20.9	19.8
Cr	62.00	20.20	23.40	34.40	34.60	16.60	7.09
Co	13.0	5.44	6.76	0.70	0.39	0.35	0.51
Ni	17.40	9.76	12.70	4.62	5.04	2.34	2.57
Cu	7.48	4.14	5.31	8.19	3.70	3.41	5.29
Zn	49.90	23.20	29.10	9.02	6.07	4.85	5.14
Ga	7.68	5.48	7.08	7.10	6.73	4.63	2.77
Rb	50.50	60.00	67.30	13.50	2.66	18.70	8.99
Sr	65.30	55.20	61.70	15.60	6.25	10.60	6.07
Y	34.00	10.80	11.60	18.40	8.41	6.78	5.02
Zr	1 106.0	117.0	102.0	444.0	377.0	98.2	55.6
Nb	12.80	5.06	5.95	5.47	8.69	4.41	2.37
Sn	1.77	1.03	1.28	1.67	1.33	0.90	0.60
Cs	2.72	2.27	2.89	3.14	1.16	1.40	0.58
Ba	174.0	289.0	297.0	70.7	16.2	59.1	36.6
La	43.00	14.40	15.80	15.50	5.48	10.70	9.99
Ce	87.8	29.7	33.0	28.7	10.0	23.1	17.3
Pr	9.85	3.34	3.63	3.10	1.11	2.26	1.80
Nd	37.30	12.60	14.10	10.70	4.02	8.08	6.11
Sm	6.88	2.38	2.69	1.98	0.73	1.37	1.01
Eu	1.00	0.49	0.52	0.41	0.13	0.21	0.19
Gd	5.92	2.04	2.23	2.08	0.77	1.13	0.87
Tb	0.93	0.33	0.34	0.40	0.16	0.17	0.15
Dy	5.33	1.91	2.02	2.88	1.17	1.13	0.85
Ho	1.03	0.38	0.44	0.61	0.27	0.25	0.18
Er	3.42	1.05	1.15	1.84	0.92	0.64	0.54
Tm	0.490	0.160	0.170	0.300	0.160	0.110	0.084
Yb	3.58	1.10	1.16	2.02	1.13	0.74	0.55
Lu	0.540	0.140	0.170	0.310	0.200	0.110	0.085
Hf	26.90	2.98	2.57	11.20	9.34	2.45	1.45
Ta	0.95	0.45	0.44	0.11	0.65	0.36	0.22
Tl	0.280	0.370	0.410	0.160	0.050	0.130	0.066
Pb	16.00	12.90	14.10	11.90	4.19	7.47	11.60
Th	17.50	5.19	5.74	8.16	6.81	4.96	3.34
U	4.23	1.32	1.37	2.59	1.33	0.89	0.76
Σ REE	577.50	195.79	215.75	215.41	85.71	133.02	108.27
LREE/HREE	3.17	3.30	3.34	2.04	1.49	3.74	3.92
δ Eu	0.47	0.66	0.64	0.61	0.52	0.49	0.59
$(La/Yb)_N$	8.10	8.84	9.20	5.16	3.26	9.75	12.26

弹放入钢套,拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 12 h 以上;
(7)将溶液转入聚乙烯塑料瓶中,并用 2% HNO_3 稀释至

100 g 以备 ICP-MS 测试.检测依据为 GB/T14506.30-
2010 硅酸盐岩石化学分析方法.分析结果如表 2.

3 结果与分析

3.1 重矿物特征

所采集样品沉积物中重矿物包括锆石、金红石、锐钛矿、白钛石、黄铁矿、方铅矿、透闪石、电气石、十字石、石榴石、钛铁矿、褐铁矿、辉石、赤铁矿、绿帘石、独居石、磷灰石、辰砂、自然金、角闪石、榍石共21种,其中辰砂、自然金、十字石等矿物仅在少数样品中出现,且含量极少,不具有特征意义.本文主要讨论几种常见重矿物(锆石、磷灰石、电气石、榍石、黄铁矿、绿帘石、角闪石、辉石、石榴子石、赤褐铁矿、钛铁矿和磁铁矿).分析结果显示,湄公河三角洲沉积物的第四系重矿物组合存在显著差异,且不同时期均有能够代表本时期的特征重矿物(图2).

从单矿物来看,全新统和更新统差异明显,北部更新统样品电气石含量(16%~22%)较南部河口处全新统样品(0.85%~3.35%)高,多产于花岗伟晶岩及气成热液矿床中,表明母岩可能与酸性岩浆岩有关;而河口全新统样品绿帘石含量为11.39%~36.20%,更新统样品基本不含绿帘石,绿帘石形成与热液活动有关,常见于接触交代矽卡岩中,可以从斜长石、辉石和角闪石中析出,表明全新统母岩含有一定成分的变质岩.另外钛铁矿在SM01、SM02、SM03、SM03、SM07中含量比SM04、SM05高,但其作为副矿物,主要产于岩浆岩,沉积岩和变质岩中也有产出,所以根据重矿物组合更能有效判断母岩岩性(图2).

根据沉积环境和源区分析,可将其中重矿物分为以下两类组合:(1)稳定矿物组合,主要包括锆石、电气石、金红石、锐钛矿、榍石、蓝晶石、独居石、磁铁矿、石榴石和白钛石等;(2)不稳定矿物组合,主要为角闪石、绿帘石、磷灰石、黄铁矿和辉石等.

全新统(SM01、SM02和SM03)重矿物组合:绿帘石-钛铁矿-褐铁矿-磁铁矿-角闪石-锆石-白钛石,特征矿物为绿帘石;其中稳定矿物组合含量约占15.34%,不稳定矿物组合含量约占31.98%.上更新统(SM04、SM05)重矿物组合:锆石-电气石-锐钛矿-白钛石-金红石,特征矿物为锆石;其中稳定矿物组合含量约占80.58%,不稳定矿物极少.下更新统-中更新统(SM06、SM07)重矿物组合:钛铁矿-白钛石-电气石-锆石,特征矿物为钛铁矿;其中稳定矿物组合约占52.91%,不稳定矿物极少.

沉积物重矿物组合特征及特征矿物能很好地反映沉积物物源区的岩石类型.河口处全新统样品存在绿帘石和石榴子石等变质矿物,指示沉积物源区含变质岩,且绿帘石等不稳定矿物含量高,说明搬运距离相对较近,同时钛铁矿-褐铁矿-磁铁矿-角闪石组合含量较高,可能反映母岩为基性火成岩;更新统的锆石和钛铁矿含量高、绿帘石和石榴石含量低,指示源区主要为沉积岩及火成岩.

ZTR指数=锆石(%) + 电气石(%) + 金红石(%),代表沉积物重矿物的成分成熟度,指数越大,矿物的成分成熟度越高(SM01:12.15;SM02:4.46;SM03:2.01;SM04:52.63;SM05:68.96;SM06:21.90;SM07:22.02),在一定程度上可指示沉积物的搬运距离长短和物源大致方向.更新统的ZTR指数明显高于其他层位(21~69),其成熟度高,表明该时期的沉积物源经过较长距离的搬运;全新统ZTR指数较低(2~13),其成熟度低,极稳定矿物主要为次圆状,少量半自形断柱状及自形柱状,表明其可能多经过中等距离搬运沉积而成.

3.2 主量元素地球化学

沉积物中SiO₂为含量最多的主量元素氧化物,平均含量为91%(图3),其中全新统样品SiO₂含量相对较低(83.86%~89.32%,平均值86.82%),更新统样品SiO₂含量相对较高(82.03%~94.03%,平均值91.37%)(表1).其次是Al₂O₃、Fe₂O₃^T和CaO,占7%左右.沉积物中常量元素从全新世到更新世含量逐渐升高,其中TiO₂、MnO含量变化较小,而SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃^T含量变化较大(图3).

研究区SiO₂极度富集,可能受多个因素影响.首先石英抗风化能力强,常呈较粗颗粒保存在沉积物中,SiO₂易在较粗颗粒中富集,而Al是难迁移元素,含Al硅酸盐矿物在风化过程中变细,Al₂O₃在细颗粒中易富集,一定粒度范围内,SiO₂/Al₂O₃值与粒度成正相关.研究区全新统SiO₂/Al₂O₃值在24~31,平均为26.7;更新统SiO₂/Al₂O₃值在25~51,平均为34.9.表明更新统样品较粗,与采样结果一致.

由图4主量元素平均上地壳标准化蛛网图中可以看到第四系所有样品都存在Si富集(0.98~1.43),SM01和SM04样品存在Ti富集,其他样品的主量元素均表现为不同程度亏损,且更新统样品(如Na、K、Ca和Mg等元素)比全新统样品亏损更为严重.可能受到原岩、分选、旋回和风化等因素影响.同时全新统主河道样品MR01-MR17(位置见图1b)与

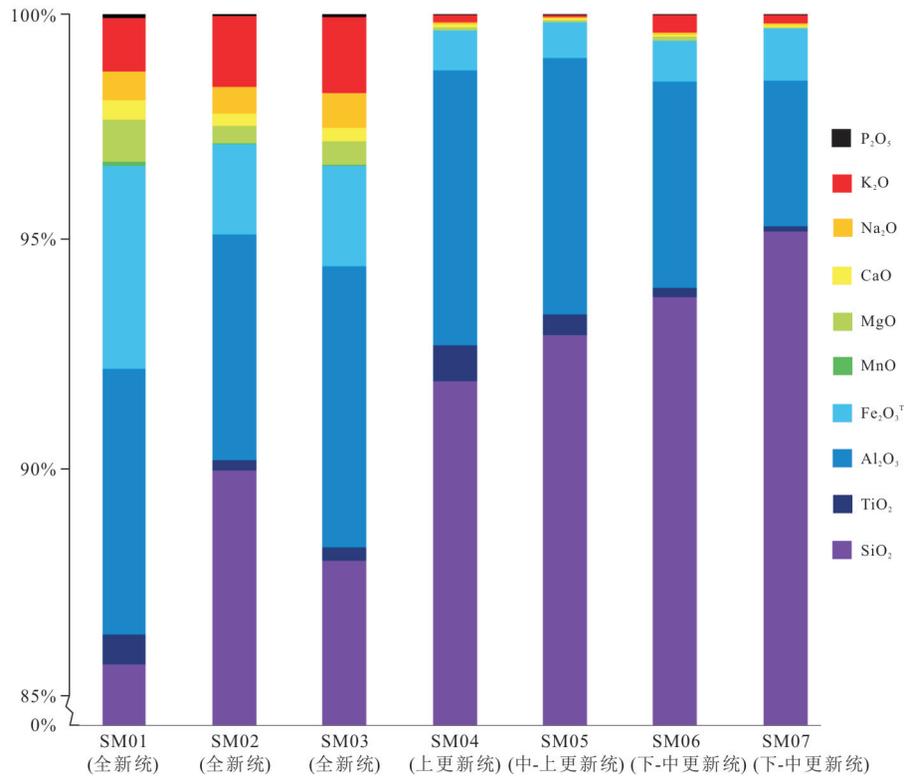


图3 湄公河三角洲第四系不同样品主要元素含量百分比对比

Fig.3 Comparison of content percentage of major elements in different samples in Quaternary, Mekong Delta

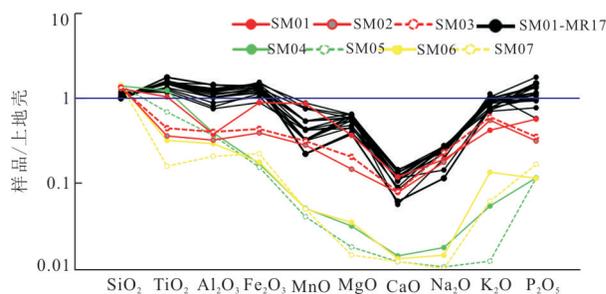


图4 湄公河三角洲第四系不同样品主要元素平均上地壳标准化蛛网图

Fig.4 Major elements spider-diagram normalized to average UCC in different samples in Quaternary, Mekong Delta 上地壳标准值据 Hu and Gao (2008); MR01-MR17 数据据 Liu *et al.* (2007)

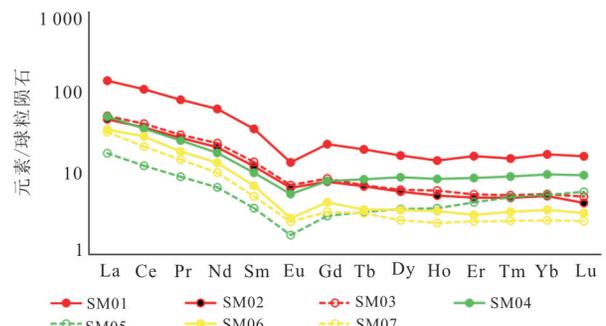


图5 湄公河三角洲第四系稀土元素球粒陨石标准化分布

Fig.5 REE distribution map normalized to chondrite of samples in Quaternary, Mekong Delta

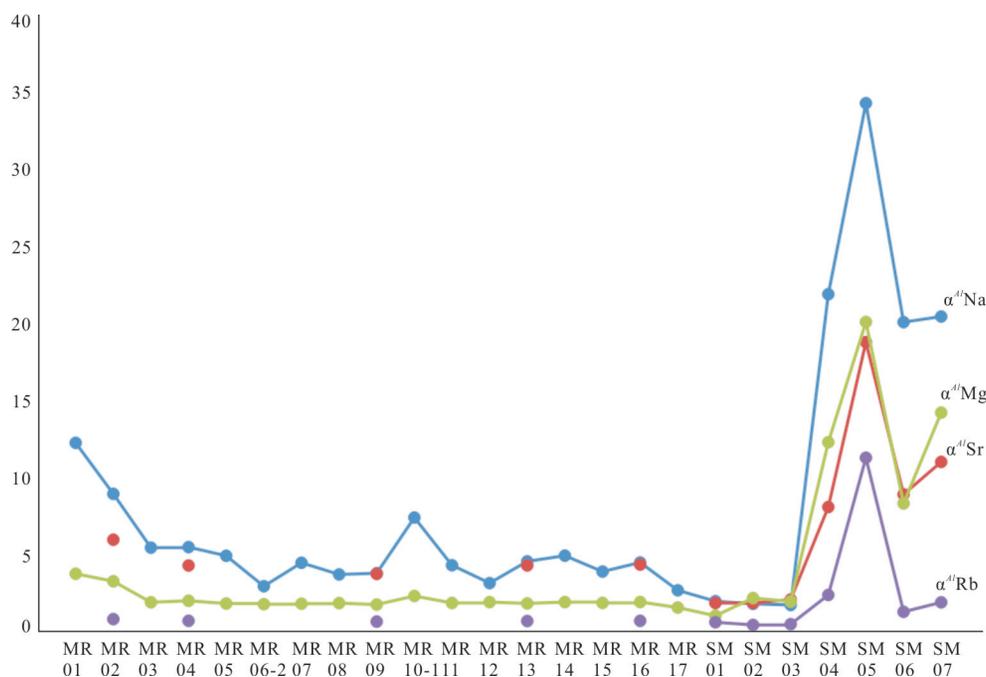
球粒陨石标准化值据 Boynton and Wark(1984)

SM01、SM02 和 SM03 趋势更为相似。表明全新统样品 (MR01-MR17、SM01-SM03) 可能有相似沉积过程和沉积环境, 更新统样品 (SM04-SM07) 可能与全新统样品的原岩、分选、旋回和风化等存在差异。

3.3 微量元素地球化学

从沉积物稀土元素球粒陨石标准化分布图中可以看出 (图 5), 全新统样品的 Σ REE 含量明显高于更新统, 全新统样品中 Σ REE 含量在 $195.79 \times 10^{-6} \sim 577.50 \times 10^{-6}$, 更新统样品中 Σ REE 含量在

$85.71 \times 10^{-6} \sim 215.41 \times 10^{-6}$ 。第四系不同时期沉积物稀土元素具有相似的特征, 各层位曲线呈现出斜率为负值的右倾型, 且轻稀土部位斜率明显大于重稀土, 所有样品中轻稀土元素与重稀土元素比值在 1.49~3.92 之间 (表 2), 差异较小, 表明该流域轻稀土 (LREE) 富集, 重稀土 (HREE) 平缓, 且表现出明显的负 Eu 异常, 其中全新统样品 δ Eu = $0.47 \times 10^{-6} \sim 0.66 \times 10^{-6}$, 平均 0.59×10^{-6} , 更新统样品 δ Eu = $0.49 \times 10^{-6} \sim 0.61 \times 10^{-6}$, 平均 0.55×10^{-6} 。

图6 碱性金属和碱土金属迁移性对比(Garzanti *et al.*, 2013)Fig.6 Comparison of migration of alkaline metals and alkaline earth metals (Garzanti *et al.*, 2013)

$\alpha^{Al}E$ 值根据平均上地壳数据(UCC)标准化,据Hu and Gao(2008);MR01-MR17据Liu *et al.*(2007)

上述结果表明地壳内的分异作用较强(McLennan and Taylor, 1982),为典型的陆源沉积物的特征。

沉积物搬运过程中,易移动元素(如:Mg、Ca、Na、Sr、K、Ba等)会逐渐流失,而不易移动元素(如:Al、Ti、Sm、Nb、Th等)则会保留下来.Garzanti *et al.* (2013)通过公式: $\alpha^{Al}E = [Al/E]_{\text{样品}}/[Al/E]_{\text{UCC}}$,把易移动元素(Mg、Ca、Na、Sr、K、Ba)与不易移动元素(Al)比值与平均上地壳相同元素进行比较,可以反映易移动元素在风化过程中的迁移程度.随着风化作用的增强,所有的 $\alpha^{Al}E$ 值均会增加, $\alpha^{Al}E$ 值的相对大小能够反映出岩石中不稳定的矿物和稳定矿物在原岩中所占的比例,但碱金属和碱土金属的流失并不一定是风化的影响,还受到原岩类型和旋回的影响(Garzanti *et al.*, 2013).

从图6可以看出本次全新统渭公河支流样品和主河道样品(Liu *et al.*, 2007)元素流失序列和程度相似,与更新统样品差异较大.全新统元素流失序列为: $\alpha^{Al}Na > \alpha^{Al}Sr > \alpha^{Al}Mg > \alpha^{Al}Rb$;更新统元素流失序列为: $\alpha^{Al}Na > \alpha^{Al}Mg > \alpha^{Al}Sr > \alpha^{Al}Rb$.风化作用的强弱和原岩类型共同控制着元素流失的相对大小.全新统与更新统元素流失序列不同,可能受原岩不同所控制.在风化过程中,Na更倾向于流失,而Mg和Ba则更倾向于保存在粘土矿物中(Garzanti *et al.*, 2013).更新统 $\alpha^{Al}Na$ 相对较高,相对于其他易移

动元素,Na流失严重,反映其风化作用可能相对较强,同时Garzanti *et al.* (2013)发现泥岩比砂岩有更大的 $\alpha^{Al}E$ 值,这与样品岩性矛盾,笔者推测其另外也可能受到很强沉积旋回影响,需要进一步讨论。

4 讨论

4.1 沉积过程

Nesbitt and Young(1982)用化学风化指数CIA来衡量沉积物的化学风化程度,计算公式如下: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$. CaO^* 表示硅酸盐部分CaO的含量.由于本实验没有对硅酸盐进行定量,故不能校正其中的含量进而计算.据Bock *et al.* (1998),如果样品中 $CaO \leq Na_2O$ 时, $CaO^* = CaO$;当 $CaO > Na_2O$ 时,取 $CaO^* = Na_2O$,计算出的CIA指数越大,表明沉积物经历了越强烈的化学风化作用,说明风化蚀变越强.CIA指数越高,反映风化作用越强,引起碱性 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子的亏损, Al_2O_3 的富集.CIA小于65为低等化学风化强度;CIA在65~85之间为中等化学风化强度;CIA为85~100为强化学风化强度(Nesbitt and Young, 1982).而相对于河岸沉积物、漫滩沉积物和河床沉积物而言,悬浮颗粒物可以更好地反映一个流域内原岩的整个风化历史,然而,

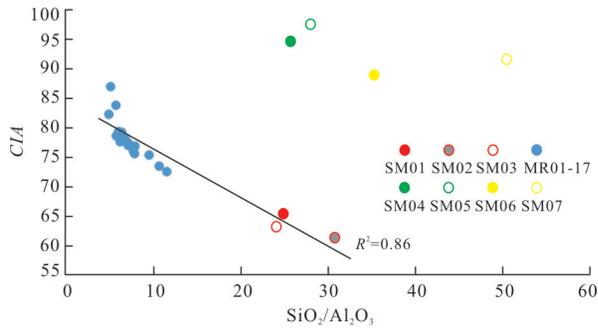


图7 湄公河三角洲第四系样品 CIA-SiO₂/Al₂O₃ 相关关系
Fig.7 The relationship of CIA-SiO₂/Al₂O₃
MR01-MR17 数据据 Liu *et al.* (2007)

由沉积物化学计算出的 CIA 并不是目前流域化学风化率的直接指标,而是沉积物形成过程中综合风化历史(再循环沉积物)的代理指标(Li and Yang, 2010),本次样品不能很好区分不同时期风化情况,但 CIA 值可以作为判断旋回分选等沉积过程的参数(图 8a)。

从表 1 可以看出该段流域全新统和更新统都有着高 SiO₂ 值,但 CIA 差异明显。笔者推测可能是来自粒度分选和沉积旋回的影响。结合主河道样品(Liu *et al.*, 2007)分析,通过 CIA-SiO₂/Al₂O₃ 相关图,可以识别出粒度分选对 CIA 值的影响(图 7)。从图 7 中可以发现,全新统 CIA 与 SiO₂/Al₂O₃ 成负相关,相关系数为 0.86。更新统样品(SM04、SM05、SM06 和 SM07) CIA 与 SiO₂/Al₂O₃ 无明显相关性,推测其 CIA 值可能与旋回有关。

La_N/Y_N 比值则能够反映原岩的性质(Roser and Korsch, 1999),通过 La_N/Y_N-SiO₂/Al₂O₃ 相关图,可以识别出成分变化、分选和旋回的影响。

研究人员基于 $WIP (WIP = (2Na_2O/0.35 + MgO/0.9 + 2K_2O/0.25 + CaO^*/0.7) \times 100)$ 和 CIA 对粒度的敏感性差异,通过 WIP-CIA 相关图可以了解样品是否是第一旋回风化,以及受到水动力分选、粒度和旋回的影响(Garzanti *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2018)。从图 8a 中可以看出全新统主要受水动力分选的影响,更新统主要受旋回的影响,都非第一旋回风化。而 La_N/Y_N-SiO₂/Al₂O₃ 图可以看出,更新统样品成分变化和分选旋回变化都较大,全新统样品基本无成分变化,受分选与再旋回影响较小,推测受到粒径或者水动力分选的影响,这与 WIP-CIA 图反映的结果一致。

从 ZTR 指数和重矿物组合来看全新统样品应是近源物源,其 SiO₂ 值高,推测可能是由于断层活动或者强降雨时期,水动力增强,河道变宽,流量增大,带来的粗碎屑增多所致;其低 CIA 值不能反映气候条件,同时如图 7 所示,SM01、SM02 和 SM03 的 SiO₂/Al₂O₃ 值比现代湄公河主河道样品(MR01-MR17)大,表明 SM01、SM02 和 SM03 样品搬运距离较近亦或是水动力较强;而更新统样品从 ZTR 指数和重矿物组合来看应是远源物源,暗示其形成于构造活动稳定的大陆边缘环境,在较远距离的搬运过程中,更为强烈的改造最终导致 SiO₂ 的极度富集,而 Fe₂O₃、MgO、Na₂O 及 K₂O 等氧化物的亏损程度又高于稳定性相对较强的 Al₂O₃,则高 CIA 值也不一定反映当时气候。

Holeman(1968)于 20 世纪 60 年代在湄公河口上游 1 000 km 处观测该处输沙量为 1.90 × 10⁹ t/a;现代水文研究表明湄公河偏下游的巴色、上丁和桔

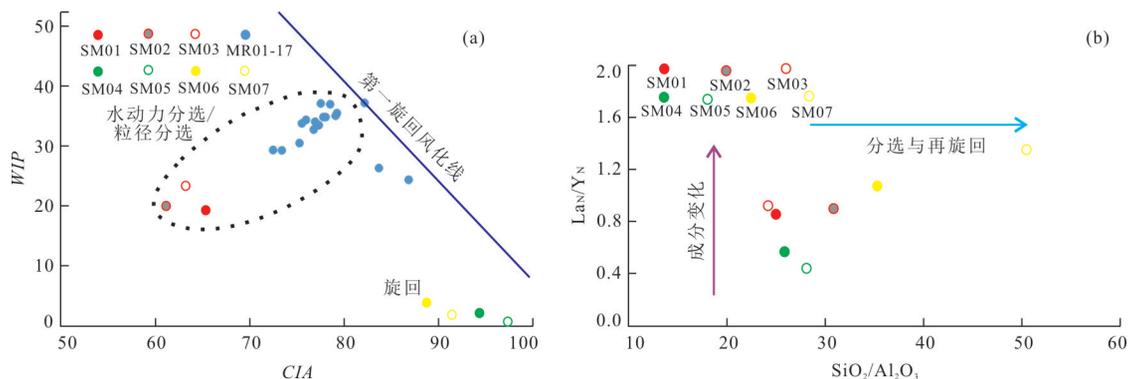


图8 湄公河三角洲第四系样品成分及分选与再旋回变化

Fig.8 Variations of composition, sorting and recycling in Quaternary, Mekong Delta

a. WIP-CIA 图,据 Guo *et al.* (2018); b. La_N/Y_N-SiO₂/Al₂O₃ 图,据 Roser and Korsch (1999); N 表示平均上地壳标准化;平均上地壳标准值据 Hu and Gao (2008); MR01-MR17 数据据 Liu *et al.* (2007)

井的输沙量为 0.73×10^9 t/a、 1.06×10^9 t/a 和 1.16×10^9 t/a (Pimant and Shrestham, 2017); Harden and Sundborg (1992) 在河口上游 850 km 处观测输沙量为 1.78×10^9 t/a, 同时指出只有 $1.00 \times 10^9 \sim 1.50 \times 10^9$ t/a 的泥沙入海, 26%~44% 的泥沙都沉积在了下游冲积平原和三角洲, 偏下游的水文站点明显小于湄公河口的输沙量, 说明湄公河三角洲沉积物有来自近距离支流带来的泥沙。

4.2 物源分析

前人针对湄公河三角洲地区沉积物已开展一些研究. 刘志飞等 (2004) 通过南海西南陆架岩心 MD01-2393 的粘土矿物组合以及湄公河土壤的矿物组分分析, 并综合考虑风成砂尘、巽他陆架、印度尼西亚群岛和红河等物源区因素, 认为南海西南陆架岩心中钻遇沉积物中伊利石和绿泥石主要来源于青藏高原东部, 其母岩主要为变质岩和花岗岩 (图 1), 亦指示着作为可为南海西南陆架提供物源的湄公河三角洲, 其第四系沉积物源最远可自青藏高原东部. Hennig *et al.* (2018) 发现现今大叻区更新统 BaMieu 组 (图 1 采样点 VDLZ) 含有大量的新元古界-中元古界锆石, 同时白垩系锆石年龄组峰值特征与现今湄公河三角洲河口处 (Clift *et al.*, 2006, 2008) 和老挝北部沉积物 (Bodet and Schärer, 2000) 的白垩系锆石年龄组特征差异明显, 一些研究者认为湄公河在渐新统到上新统期间并没有流经泰国的呵叻高原, 而可能更偏东北部. 同时采样点 VDLZ 处两个样品重矿物组合为金红石-锆石-电气石, 且金红石含量均大于 50%, 表明母岩为沉积岩或酸性岩浆岩, 同时表现出极高的 ZTR 值 (图 3), 这与本次重矿物研究结果相似, 表明其成分成熟度高, 可能物源较远. Hennig *et al.* (2018) 对大叻区碎屑岩进行分析后认为古湄公河三角洲物源区很可能为华南地块, 并经过安南山脉带 (图 1).

通过主量元素判别函数 (Roser and Korsch, 1988) 可以确定砂岩的物源特征 (图 9a), 其中本次所采样品主要源区为石英岩沉积物源区, 物源以沉积岩为主, 但主量元素受到沉积再旋回物源影响较为严重, 需要更为准确的物源图解. 同时与 Liu *et al.* (2007) 对比发现, 从本次采样位置到主河道, 物源性质逐渐从石英岩沉积物源区向铁镁质火成岩物源区过渡, 暗示了湄公河三角洲物源性质在第四系时期的变化. 另外 Liu *et al.* (2017) 的 IODP 1433 样品 (位置见图 1a) 投点与 Liu *et al.* (2007) 样品投点极

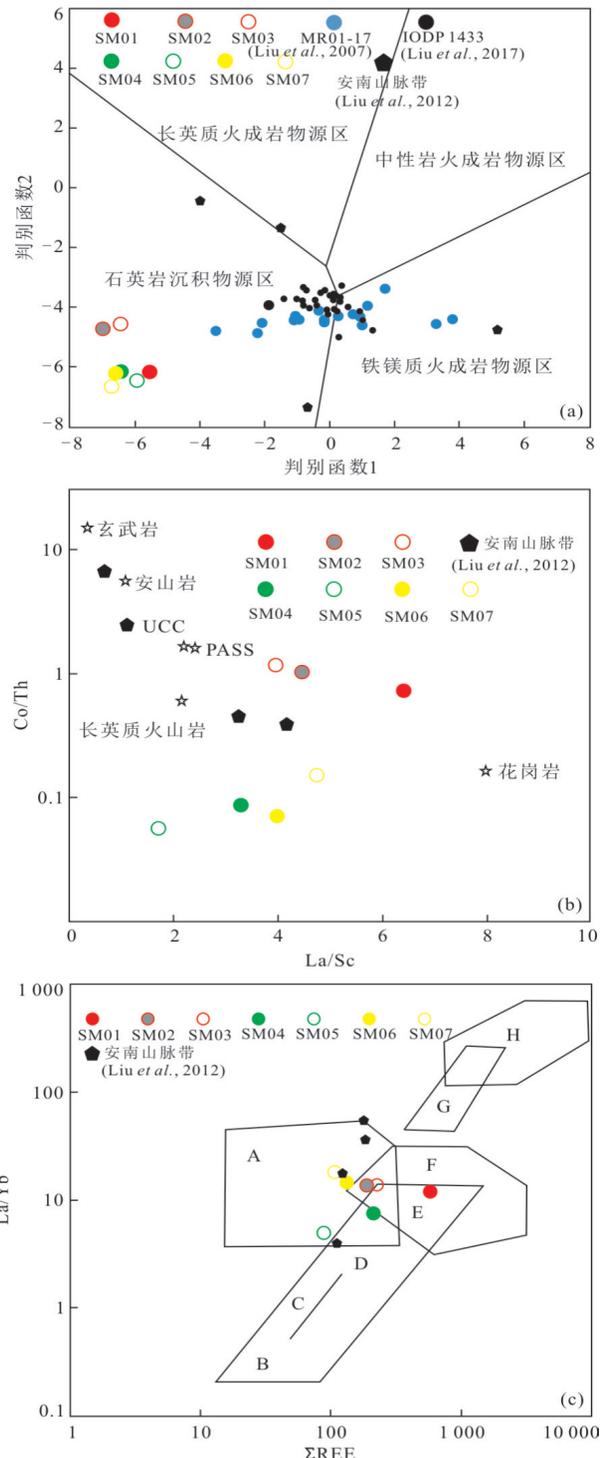


图9 湄公河三角洲第四系母岩性质判别图

Fig.9 Discrimination map of source rock properties in Quaternary, Mekong Delta

a. 判别函数图, 据 Roser and Korsch (1988), 判别函数因子 $1 = -1.773\text{TiO}_2 + 0.607\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.76\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1.5\text{MgO} + 0.616\text{CaO} + 0.509\text{Na}_2\text{O} - 1.224\text{K}_2\text{O} - 9.09$; 判别函数因子 $2 = 0.445\text{TiO}_2 + 0.07\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1.142\text{MgO} + 0.438\text{CaO} + 0.475\text{Na}_2\text{O} + 1.426\text{K}_2\text{O} - 6.861$. b. Co/Th-La/Sc 图解, 据 Gu *et al.* (2002). c. La/Yb- ΣREE 母岩性质判别图, 其中: A. 沉积岩; B. 大洋拉斑玄武岩; C. 玄武岩区域; D. 大陆拉斑玄武岩; E. 碱性玄武岩; F. 花岗岩; G. 金伯利岩; H. 碳酸盐岩区

为接近,从侧面进一步证明了南海南部钻孔 IODP 1433 样品物源来自湄公河三角洲.而沉积岩中的微量元素相对稳定,受成岩作用和变质作用影响较小,可以很好地反映母岩性质和源区地球化学特征,如微量元素 Co/Th-La/Sc 图解(Gu *et al.*, 2002; 图 9b)所示,Co/Th 比值在 0.06 到 1.12 之间,La/Sc 比值在 1.73 到 6.39 之间,样品落入安山岩物源与花岗岩物源之间.Allègre and Minster (1978)提出了 Σ REE 和 La/Yb 图解来判别源区性质(图 9c),稀土元素由于更为稳定,受成岩和变质作用影响更小,通过该图解能更好地判断源区.研究区样品 SM01 为碱性玄武岩和花岗岩混合区,SM02、SM03 和 SM04 落在沉积岩和花岗岩碱性玄武岩混合区域,SM05、SM06 和 SM07 为沉积岩区.本文将安南山脉带(Liu *et al.*, 2012)的样品和本研究区样品投点,结果与本次研究中样品 SM06 和 SM07 投点结果接近(图 9c),表明该研究区样品 SM05、SM06 和 SM07 的物源性质和安南山脉带的物源性质相似,可为 Hennig *et al.* (2018)的结论提供新的证据.

本文研究区更新统 SM04、SM05、SM06 和 SM07 样品采样位置与大叻区更新统 BaMieu 组相近(图 1b),由此推测更新统样品和 BaMieu 组沉积物有着同样的物源区.结合其搬运距离长,成熟度高,沉积再循环等特点,而现今 SM04、SM05、SM06 和 SM07 处的河流短且流量小,推测更新统时期,古湄公河主河道可能偏向东北部.

第四系的沉积物搬运与海平面波动密切相关,特别是在全新统 8 ka 以后的变化,海平面在 8~6 ka 达到最高,随后在湄公河带来充沛沉积物的影响下,湄公河三角洲的范围开始逐渐扩大,快速进积,海岸线向海推进(Statterger *et al.*, 2013).在 6 ka 海岸线已从柬埔寨向南海推进了大约 250 km,并在最后 3 ka 时从一个潮汐主导的三角洲转变为一个潮控和波控混合主导的三角洲(Dung *et al.*, 2013).SM01、SM02 和 SM03 样品位于河口位置处,及易受到潮控和波控混合作用影响,但其物源成熟度较低,表明其为近源物源,且主要为岩浆岩和沉积岩,含变质岩,而大叻区发育大量的白垩系西太平洋板块在东南亚大陆边缘下向北西俯冲而产生的花岗岩类(Nguyen *et al.*, 2004),并且从图 1c 的 A-B 剖面可以看出,断层在第四系开始活动,大叻区基岩被大量剥蚀,从而推测样品物源可能为现今湄公河三角洲东北侧大叻区基岩,而此阶段的断层活动亦很

可能导致了第四系湄公河向西南方向的迁移.此外,根据采样位置,SM04~SM07 位于三角洲平原,主要受到河流作用控制,物源较远.SM01~SM03 为近物源,结合南海南部第四系的季风气候和风化的研究(刘志飞等, 2004; 乔培军等, 2006; 刘志飞等, 2007),表明古环境气候对大叻区内陆基岩风化剥蚀较大,并通过南海西缘的沿岸向湄公河河口搬运,至近河口位置后由于现今湄公河三角洲较强的潮汐作用导致沉积物与湄公河带来的沉积物相混合沉积至湄公河三角洲海岸附近,导致 SM01~SM03 中含有大叻内陆基岩的风化产物.

5 结论

(1)重矿物、ZTR 指数、主量元素和现代泥沙量的比较结果表明,本次全新统样品沉积物成分成熟度较低,搬运距离较近,主要受粒径分选或水动力分选的影响;更新统样品沉积物具有较高成熟度,可能为远物源,由一定再循环沉积而成.

(2)通过 La/Yb- Σ REE 和 Co/Th-La/Sc 母岩性质判别图,并结合前人重矿物和锆石年龄的研究,不同时期和位置的沉积物可能来自不同源区:全新统 SM01、SM02 和 SM03 样品,是构造活动和沿岸流、潮汐共同作用下输入的近物源,可能为大叻区基岩产物.更新统 SM04、SM05、SM06 和 SM07 样品最远物源可能为青藏高原东部,经过多次沉积旋回,由更偏东北部古湄公河搬运并再次沉积.同时全新统和更新统样品物源性质和源区差异,可能会为湄公河第四系的迁移提供了新的证据,而全新统和更新统样品分别受到不同分选和旋回影响,笔者推测可能与湄公河三角洲在第四系导致沉积范围变化的构造活动及全新世以来湄公河口沿岸流和潮汐作用有关.

References

- Allègre, C. J., Minster, J. F., 1978. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1–25. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90123-1)
- An, A. R., Choi, S. H., Yu, Y., et al., 2017. Petrogenesis of Late Cenozoic Basaltic Rocks from Southern Vietnam. *Lithos*, 272–273: 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.12.008>
- Bock, B., McLennan, S. M., Hanson, G. N., 1998. Geochemistry and Provenance of the Middle Ordovician Austin

- Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. *Sedimentology*, 45(4): 635–655. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1998.00168.x>
- Bodet, F., Schärer, U., 2000. Evolution of the SE-Asian Continent from U-Pb and Hf Isotopes in Single Grains of Zircon and Baddeleyite from Large Rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(12): 2067–2091. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00352-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00352-5)
- Boynton, W. V., Wark, D. A., 1984. Trace Element Abundances in Rim Layers of an Allende Type a Coarse-Grained Ca, Al-Rich Inclusion. *Meteoritics*, 19: 195–197.
- Carter, A., Roques, D., Bristow, C., et al., 2001. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211–214. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)0290211:umaisa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)0290211:umaisa>2.0.co;2)
- Clift, P. D., Carter, A., Campbell, I. H., et al., 2006. Thermochronology of Mineral Grains in the Red and Mekong Rivers, Vietnam: Provenance and Exhumation Implications for Southeast Asia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(10): Q10005. <https://doi.org/10.1029/2006gc001336>
- Clift, P. D., Long, H. V., Hinton, R., et al., 2008. Evolving East Asian River Systems Reconstructed by Trace Element and Pb and Nd Isotope Variations in Modern and Ancient Red River-Song Hong Sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): Q04039. <https://doi.org/10.1029/2007gc001867>
- Dung, B. V., Stattegger, K., Unverricht, D., et al., 2013. Late Pleistocene-Holocene Seismic Stratigraphy of the Southeast Vietnam Shelf. *Global and Planetary Change*, 110: 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.010>
- Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., et al., 2013. Weathering Geochemistry and Sr-Nd Fingerprints of Equatorial Upper Nile and Congo Muds. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(2): 292–316. <https://doi.org/10.1002/ggge.20060>
- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., et al., 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393–407. <https://doi.org/10.1306/081601720393>
- Guo, Y. L., Yang, S. Y., Su, N., et al., 2018. Revisiting the Effects of Hydrodynamic Sorting and Sedimentary Recycling on Chemical Weathering Indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 227: 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.02.015>
- Harden, P. O., Sundborg, A., 1992. The Lower Mekong Basin Suspended Sediment Transport and Sedimentation Problems. AB Hydroconsult, Uppsala.
- Hennig, J., Breitfeld, H. T., Gough, A., et al., 2018. U-Pb Zircon Ages and Provenance of Upper Cenozoic Sediments from the Da Lat Zone, SE Vietnam: Implications for an Intra-Miocene Unconformity and Paleodrainage of the Proto-Mekong River. *Journal of Sedimentary Research*, 88(4): 495–515. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.26>
- Hennig, J., Breitfeld, H. T., Hall, R., et al., 2017. The Mesozoic Tectono-Magmatic Evolution at the Paleopacific Subduction Zone in West Borneo. *Gondwana Research*, 48: 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.001>
- Nguyen, H. H., Carter, A., Hoang, L. V., et al., 2018. Provenance, Routing and Weathering History of Heavy Minerals from Coastal Placer Deposits of Southern Vietnam. *Sedimentary Geology*, 373: 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.06.008>
- Hoang, N., Flower, M. F. J., 1998. Petrogenesis of Cenozoic Basalts from Vietnam: Implication for Origins of a ‘Diffuse Igneous Province’. *Journal of Petrology*, 39(3): 369–395. <https://doi.org/10.1093/ptro/39.3.369>
- Holeman, J., N., 1968. The Sediment Yield of Major Rivers of the World. *Water Resources Research*, 4(4): 737–747. <https://doi.org/10.1029/WR004i004p00737>
- Hu, Z. C., Gao, S., 2008. Upper Crustal Abundances of Trace Elements: A Revision and Update. *Chemical Geology*, 253(3–4): 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.010>
- Khuc, V., 2011. Stratigraphic Units of Vietnam. Vietnam National University Publishing House, Hanoi.
- Lepvrier, C., van Vuong, N., Maluski, H., et al., 2008. Indosinian Tectonics in Vietnam. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.10.005>
- Li, C., Yang, S. Y., 2010. Is Chemical Index of Alteration (CIA) a Reliable Proxy for Chemical Weathering in Global Drainage Basins? *American Journal of Science*, 310(2): 111–127. <https://doi.org/10.2475/02.2010.03>
- Liu, C., Clift, P. D., Murray, R. W., et al., 2017. Geochemical Evidence for Initiation of the Modern Mekong Delta in the Southwestern South China Sea after 8 Ma. *Chemical Geology*, 451: 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.01.008>

- Liu, J. L., Tran, M. D., Tang, Y., et al., 2012. Permo-Triassic Granitoids in the Northern Part of the Truong Son Belt, NW Vietnam: Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 22(2): 628–644. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.011>
- Liu, J. P., DeMaster, D. J., Nguyen, T. T., et al., 2017. Stratigraphic Formation of the Mekong River Delta and Its Recent Shoreline Changes. *Oceanography*, 30(3): 72–83. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2017.316>
- Liu, Z. F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007. Climatic and Tectonic Controls on Weathering in South China and Indochina Peninsula: Clay Mineralogical and Geochemical Investigations from the Pearl, Red, and Mekong Drainage Basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(5): Q05005. <https://doi.org/10.1029/2006gc001490>
- Liu, Z. F., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2004. Clay Mineral Records of East Asian Monsoon Evolution during Late Quaternary in the Southern South China Sea. *Science in China (Series D)*, 34(3): 272–279 (in Chinese).
- Liu, Z. F., Zhao, Y. L., Li, J. R., et al., 2007. Late Quaternary Clay Minerals off Middle Vietnam in the Western South China Sea: Implications for Source Analysis and East Asian Monsoon Evolution. *Science in China (Series D)*, 37(9): 1176–1184 (in Chinese).
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1982. Geochemical Constraints on the Growth of the Continental Crust. *The Journal of Geology*, 90(4): 347–361. <https://doi.org/10.1086/628690>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Nguyen, T. T. B., Satir, M., Siebel, W., et al., 2004. Granitoids in the Dalat Zone, Southern Vietnam: Age Constraints on Magmatism and Regional Geological Implications. *International Journal of Earth Sciences*, 93(3): 329–340. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0387-6>
- Piman, T., Shrestha, M., 2017. Case Study on Sediment in the Mekong River Basin: Current State and Future Trends. Sotckholm Environment Institute, Stockholm.
- Qiao, P. J., Shao, L., Yang, S. Y., 2006. The Paleoenvironmental Significance of the Character of the Element Geochemistry in the Southwestern South China Sea since Late Pleistocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(4): 59–65 (in Chinese with English abstract).
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1999. Geochemical Characterization, Evolution and Source of a Mesozoic Accretionary Wedge: The Torlesse Terrane, New Zealand. *Geological Magazine*, 136(5): 493–512. <https://doi.org/10.1017/s0016756899003003>
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Shi, M. F., Lin, F. C., Fan, W. Y., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Granitoids in the Truong Son Terrane, Vietnam: Tectonic and Metallogenic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 101: 101–120. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.02.001>
- Stattegger, K., Tjallingii, R., Saito, Y., et al., 2013. Mid to Late Holocene Sea-Level Reconstruction of Southeast Vietnam Using Beachrock and Beach-Ridge Deposits. *Global and Planetary Change*, 110: 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.014>
- Tran, H. T., Zaw, K., Halpin, J. A., et al., 2014. The Tam Ky-Phuoc Son Shear Zone in Central Vietnam: Tectonic and Metallogenic Implications. *Gondwana Research*, 26(1): 144–164. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.04.008>
- Wang, F., Wu, Y. M., Ding, W. W., 2021. Sedimentary Budget and Controlling Factors of the Northwest and Southwest Sub-Basins, the South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 986–1007 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. X., Liu, Z. F., Wu, J. W., et al., 2021. Clay Mineralogical Record and Its Paleoenvironmental Significance during Marine Isotope Stage 3 on the Sunda Shelf, Southern South China Sea. *Earth Science*, 46(10): 3467–3480 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., 2006. Advances in Sedimentary Geochemistry and Tracing Applications of Asian Rivers. *Advances in Earth Science*, 21(6): 648–655 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Li, C. X., Jung, H. S., et al., 2003. Geochemistry of Trace Elements in Chinese and Korean River Sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(2): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Bi, L., Li, C., et al., 2015. Major Sinks of the Changjiang (Yangtze River)-Derived Sediments in the East China Sea during the Late Quaternary. *Geological Society, London, Special Publications*, 429(1): 137–152. <https://doi.org/10.1144/sp429.6>
- Zhao, C. Q., Zhao, L., Cao, S. Y., et al., 2014. Cenozoic

Deformation - Metamorphic Evolution of the Diancang Shan Metamorphic Complex and Regional Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 851-866 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L. S., Schärer, U., 1999. Age and Origin of Magmatism along the Cenozoic Red River Shear Belt, China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 67-85. <https://doi.org/10.1007/s004100050469>

附中文参考文献

刘志飞, Colin, C., Trentesaux, A., 等, 2004. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的粘土矿物记录. *中国科学(D辑)*, 34(3): 272-279.

刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等, 2007. 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. *中国科学(D辑)*, 37(9): 1176-1184.

乔培军, 邵磊, 杨守业, 2006. 南海西南部晚更新世以来元素地球化学特征的古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 26(4): 59-65.

王菲, 吴艳梅, 丁巍伟, 2021. 南海西北与西南次海盆沉积通量及其控制因素. *地球科学*, 46(3): 986-1007.

王红星, 刘志飞, 吴家望, 等, 2021. 南海南部巽他陆架氧同位素3期粘土矿物记录及其古环境意义. *地球科学*, 46(10): 3467-3480.

杨守业, 2006. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展. *地球科学进展*, 21(6): 648-655.

杨守业, 李从先, Jung, H.S., 等, 2003. 中韩河流沉积物微量元素地球化学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 23(2): 19-24.

赵春强, 赵利, 曹淑云, 等, 2014. 点苍山变质杂岩新生代变质-变形演化及其区域构造内涵. *岩石学报*, 30(3): 851-866.