



海马冷泉区沉积物的地球化学特征：对于甲烷渗漏和沉积物来源的指示

龙恒叉，席世川，杨慧良，赵俐红，李金洋，栾振东

Geochemical characteristics of sediments in the Haima Cold Seep area: indication for methane seepage and sediment source

LONG Hengcha, XI Shichuan, YANG Huiliang, ZHAO Lihong, LI Jinyang, and LUAN Zhendong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023101001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海海马冷泉区沉积物孔隙水地球化学特征对冷泉活动的指示

Geochemical characteristics of sediment pore water in Haima area of the South China Sea: An indication of cold seeps
海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 1-14

台湾甲仙地区早上新世冷泉白云岩的地质地球化学特征及沉积环境

Geochemical characteristics of the Early Pliocene cold seep dolomite at Chiah sien, Taiwan and their implications for fluid sources and sedimentary environment
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 85-94

南海北部神狐海域沉积物Fe-P-S元素地球化学特征及对甲烷渗漏的指示

Fe-P-S geochemical characteristics of sediments in the Shenhu area of northern South China Sea and their implications for methane leakage
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 96-110

海底冷泉区沉积物-水界面甲烷通量原位观测研究进展

Progress in in-situ observation of methane flux at sediment-water interface in cold seep
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 167-180

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112-125

西太平洋深海沉积物孔隙水稀土元素地球化学特征及意义

Rare earth element geochemistry characteristics and implications of pore-water from deep sea sediment in Western Pacific Ocean
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 75-86



关注微信公众号，获得更多资讯信息

龙恒义, 席世川, 杨慧良, 等. 海马冷泉区沉积物的地球化学特征: 对于甲烷渗漏和沉积物来源的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 105-120.

LONG Hengcha, XI Shichuan, YANG Huiliang, et al. Geochemical characteristics of sediments in the Haima Cold Seep area: indication for methane seepage and sediment source [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 105-120.

海马冷泉区沉积物的地球化学特征: 对于甲烷渗漏和沉积物来源的指示

龙恒义^{1,2}, 席世川², 杨慧良^{3,4}, 赵俐红¹, 李金洋^{1,2}, 栾振东^{1,2}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

2. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 海底甲烷渗漏会对海洋沉积环境产生重大影响, 使得甲烷渗漏区沉积物与正常海域沉积物的矿物学、地球化学等方面产生明显差异, 因此冷泉沉积物是记录海底甲烷渗漏事件的重要载体。本文基于“海马”冷泉区 ZZY7 站位长 400 cm 的岩芯沉积物研究, 对沉积物矿物组成、主量元素、微量及稀土元素地球化学特征进行分析, 并结合 Bayon 模型等, 结果表明, 该站位沉积物矿物种类较多且成因多样: 陆源沉积物约占 75%, 主要矿物成分为石英、长石、黏土等; 生物及自生矿物沉积物约占 25%, 主要是文石、方解石、高镁方解石等。通过建立以 $\sum\text{REE}$ 、 LREE/HREE 、 δCe 、 CaO 、 Mo_{EF} 、 U_{EF} 、碳酸盐矿物百分含量为甲烷渗漏识别的指标体系, 识别出 4 个硫酸盐-甲烷过渡带 (SMTZ), 并初步推断该站位可能出现 4 次甲烷渗漏事件 (MRE): 210~300 (MRE1)、170~190 (MRE2)、80 (MRE3)、10~50 cmbsf (MRE4)。结合研究区沉积物风化指数和甲烷渗漏历史, 发现新生代早期地层受钾元素交代造成钾含量高, 而研究站沉积物未受成岩作用影响。这一发现对运用“海马”冷泉区沉积物风化指数研究甲烷渗漏历史和渗漏成因有一定的指导意义。

关键词: 甲烷渗漏; 稀土元素; 沉积环境; 氧化还原敏感性元素 (RSE); 海马冷泉区

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023101001

Geochemical characteristics of sediments in the Haima Cold Seep area: indication for methane seepage and sediment source

LONG Hengcha^{1,2}, XI Shichuan², YANG Huiliang^{3,4}, ZHAO Lihong¹, LI Jinyang^{1,2}, LUAN Zhendong^{1,2}

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China

4. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Seabed methane seepage can have a significant impact on the marine sedimentary environment, causing differences in mineralogy, geochemistry, and other aspects between sediments in methane seepage areas and those in normal sea areas. Therefore, cold seep sediments are important carriers for recording methane seepage events on the seabed. A 400-cm sediment core was analyzed that located at Station ZZY7 in the newly discovered "Haima" Cold Seep area in the Qiongdongnan Basin, South China Sea. The mineral compositions and geochemical characteristics of major elements, trace and rare earth elements of the core sediments were studied with which the Bayon model was combined. Result show that terrigenous sediments were accounted for 75% of the total sediments, consisting of mainly quartz, feldspar, clay minerals etc; and biological and authigenic mineral deposits took 25%, and composed of mainly aragonite, calcite, and high magnesium calcite. The sediment minerals at the site are numerous and have diverse origins. An indication system was established using indices of $\sum\text{REE}$, LREE/HREE , δCe , CaO , Mo_{EF} , U_{EF} , and carbonate mineral percentages, with which methane seepage could be detected. Four sulfate methane transition zones (SMTZ) were recognized, from which four methane seepage events (MRE) in the cold seep area at 210~300 cmbsf (MRE1), 170~190 cmbsf

资助项目: 崂山实验室科技创新项目“深海探测关键技术及原位理化和动力过程研究”(LSKJ202203101); 国家自然科学基金委创新研究群体项目“深海界面过程和化能生态系统”(42221005)

作者简介: 龙恒义(1994—), 女, 硕士, 研究方向为沉积物地球化学, E-mail: 1633154453@qq.com

通讯作者: 栾振东(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事深海探测技术及海底地形地貌研究, E-mail: luan@qdio.ac.cn

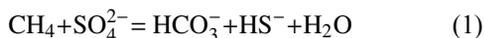
收稿日期: 2023-10-10; **改回日期:** 2024-01-29. 张现荣编辑

(MRE2), 80 cmbsf (MRE3), and 10~50 cmbsf (MRE4) were inferred. Combining the sediment weathering index and methane seepage history in the study area, it was found that the potassium content of the early Cenozoic strata was high due to potassium metasomatism, while the sediments at the station were not affected by diagenesis. This discovery has certain guiding significance for using the sediment-weathering index of the Haima cold seepage area to study the history and causes of methane seepage.

Key words: methane seepage; rare earth elements; sedimentary environment; redox sensitive elements (RSE); Haima cold seep

海底沉积物中储藏着大量的天然气水合物,并形成天然气水合物藏。当天然气水合物藏的稳定条件遭到破坏时,天然气水合物(主要是甲烷)会沿构造面、沉积物裂隙等区域向上迁移至海底附近,形成甲烷渗漏^[1]。海底冷泉主要是指富CH₄、H₂S等组分的流体持续或间歇性溢出或喷出海底所形成的流体系统^[2]。此外,甲烷以多种方式渗漏,当甲烷赋存到一定量,因压力失衡导致甲烷直接以点的形式渗漏,形成泥火山;或者甲烷沿构造薄弱带(如断层)以线状形式渗漏,形成羽状流;由于上覆沉积物质地较均匀,且横向变化差异较小,导致甲烷大面积渗漏,形成面积宽广的麻坑。甲烷渗漏常见于大陆边缘^[3-4],甲烷渗漏区滋养了大量化能自养生物群落^[5-6],这些特征使得甲烷渗漏区成为研究环境变化、海平面变化、海底滑坡、海底火山活动的重要基地。

甲烷渗漏过程中,会对海洋元素分布特征造成重大影响^[7],同时,导致甲烷渗漏区沉积物一些元素或元素组合表现出地球化学异常。渗漏区的甲烷与孔隙水中的硫酸根在甲烷氧化古菌和硫酸盐还原菌的共同作用下,发生甲烷厌氧氧化(AOM)反应和硫酸根还原(SR)反应(公式1)。



SR-AOM作用生成的HCO₃⁻和HS⁻阴离子与Fe²⁺、Mg²⁺、Ce²⁺、Sr²⁺等阳离子结合,使得硫酸盐-甲烷转换带(SWTZ)上生成大量黄铁矿、方解石、高镁方解石、文石、重晶石等冷泉自生矿物。研究表明,自生矿物的文石形成于高渗漏或高甲烷通量时期,而高镁方解石形成于低渗漏或没有渗漏的甲烷扩散时期^[8]。因此,海洋沉积物柱状样中冷泉自生矿物相对含量特征可作为硫酸盐-甲烷转换带的有效判别指标,另外文石和高镁方解石的相对含量可作为渗漏或甲烷通量的判别指标。在地球化学中,冷泉区生物繁盛并生成大量自生矿物,造成某些地球化学元素及元素组合异常,如∑REE被“稀释”,生物相关元素P、Sr、N、S等元素含量增加,氧化还原敏感元素U、Mo等的富集。此外,甲烷渗漏区沉积物与正常海域沉积物相比,C、O同位素明显不同,研究表明,冷泉自生碳酸盐矿物一般具有较负的δ¹³C_{PDB}值(-40.18‰~-38.69‰)^[9]和相对偏正

的δ¹⁸O_{PDB}值(3.75‰~4.31‰)^[10]。

近年来在南海北部发现了30多个冷泉系统,但至今还在活动的只有“海马”冷泉和台西南海域的“Site F”冷泉^[11]。自2015年“海马”冷泉被发现以来,该海域成为了地质学家以及生物学家们研究的热门海域之一,如2018年Wang^[12]运用地震剖面识别出“海马”冷泉区地层中的大量小断层,并观察到地层中的渗漏带。Miao和Dan等^[13-14]通过对“海马”冷泉区柱状沉积物进行粒度、地球化学以及测年等分析,识别出了“海马”冷泉区出现多次古甲烷渗漏活动,并分析了甲烷渗漏的原因。Miao^[15]通过分析“海马”冷泉沉积物中黄铁矿的形态和地球化学特征,发现Q6站点存在3期次不同甲烷通量的渗漏事件,但在运用主量元素、微量元素和全岩矿物研究“海马”冷泉区沉积物上前人资料很少提及。调查显示,“海马”冷泉区浅层和浅表层沉积岩石学、矿物学、地球化学以及年代学资料非常稀缺,导致研究区晚更新世晚期以来的甲烷渗漏历史以及渗漏原因等问题还未得到明确解决,同时也没有相关资料报告关于风化指数与甲烷渗漏的关系。因此,本文主要从ZZY7岩芯矿物学、地球化学研究入手并结合前人的研究资料,旨在探讨和解释“海马”冷泉区甲烷渗漏历史以及渗漏原因。

本文聚焦于“海马”冷泉浅表层沉积物的主、微量元素和稀土元素的富集程度,以及柱状样品中元素及矿物的分布特征,结合研究区的相关资料,旨在探讨:①“海马”冷泉区的沉积物来源;②氧化还原敏感元素对研究区沉积环境的指示;③岩芯沉积物地球化学及矿物学特征对甲烷渗漏事件的指示;④“海马”冷泉区末次冰期以来沉积物及周边源区风化特征与新生代早期地层源区风化间的变化差异,并分析研究区环境变化与甲烷渗漏活动的内在联系。

1 地质背景

琼东南盆地西以莺歌海盆地为界,东靠珠江口盆地,北邻海南岛,南至西沙隆起(图1),是南海北部大陆边缘发育的新生代含气裂谷盆地之一^[16]。

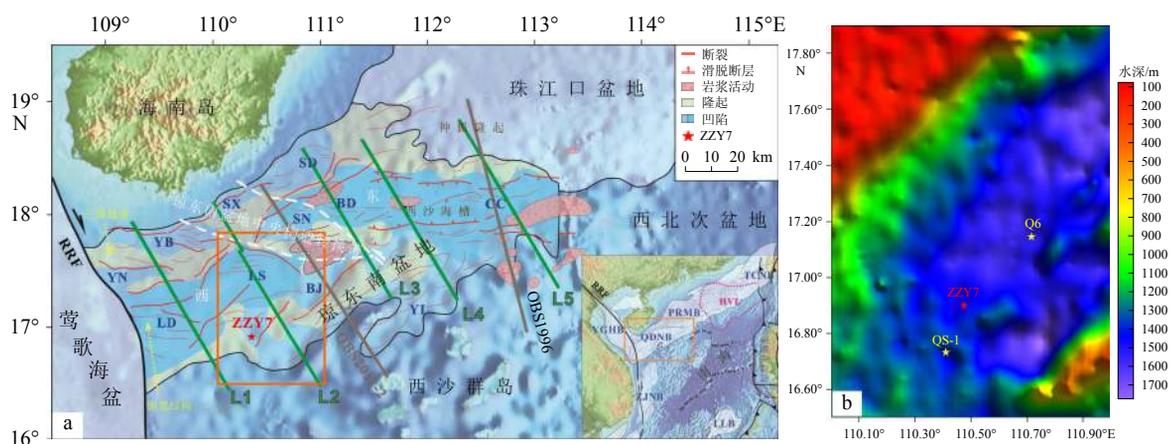


图 1 研究区站位图

a: 南海西北部琼东南盆地(QDNB)地形图和采样位置(修改自李朝阳^[22]), b: ZZY7 站周边地形图。YN:崖南凹陷, YB: 崖北凹陷, SX: 松西凹陷, SD: 松东凹陷, LD: 乐东凹陷, LS: 陵水凹陷, SN: 松南凹陷, BD: 宝岛凹陷, BJ: 北礁凹陷, CC: 长昌凹陷。

Fig.1 The study area and station location

a: Topographic map and sampling location of the Qiongdongnan Basin (QDNB) in the northwest of the South China Sea (modified from Li Chaoyang^[22]), b: topographic map of the surrounding area of ZZY7 station. YN: Yanan Depression, YB: Yabei Depression, SX: Songxi Depression, SD: Songdong Depression, LD: Ledong Depression, LS: Lingshui Depression, SN: Songnan Depression, BD: Baodao Depression, BJ: Beijiao Depression, CC: Changchang Depression.

研究表明, 琼东南盆地地形复杂, 纵横交错的凹陷和隆起使琼东南盆地形成“多坳多隆”的构造格局, 并在乐东-陵水凹陷中发育了多期次大规模的海底扇^[17-19]。琼东南盆地因新生代有利的地形、较高的沉积速率、丰富的陆源物质和有机质等为油气生成创造了有利条件。“海马”冷泉区位于琼东南盆地南部, 面积约 618 km², 已发现具有甲烷渗漏的区域占总面积的一半以上, 是我国已知的为数不多的几个活跃冷泉区域之一^[20]。与此同时, “海马”冷泉是继 Site F 冷泉后发现的南海第 2 个发育大面积化能共生大型底栖生物群落的冷泉生态系统^[21]。采样站位 ZZY7(16°53'00.759"N、110°28'29.004"E)位于琼东南盆地的陵南低凸起与永乐隆起间的峡谷上(图 1), 水深 1436 m, 属于海马冷泉区范畴。

样品由“科学”号 2202 航次采用重力活塞柱状取样采出的浅表层沉积物。沉积物柱状样长 400 cm, 呈软泥状, 颜色从灰色到黑色, 且具有硫化氢气味, 含有大量生物介壳, 极少部分层位含有白色软泥。取样间距为 10 cm, 并将取出的样品放于无菌样品袋中进行编号, 同时置于 4℃ 以下冷藏室储存。

2 材料与方法

2.1 XRD 分析

将低温储藏的样品取出, 并置于烘箱中用 60℃

的温度烘 12 h 以上, 将烘干的样品用玛瑙研钵研磨至手摸无颗粒感的粉末, 并将研磨好的样品粉末放入样品架的凹槽中间, 使松散样品粉末略高于样品架平面, 再用有机玻璃片压实, 让粉末样品表面与框架平面一致。最后, 将压实后的样品架放入 D8 Advance 衍射仪中进行 X 射线衍射分析, 采用 Cuka 衍射 (40 kV, 40 mA), 扫描范围为 3°~60°(2θ), 得到的 X 射线衍射图谱使用 MDI Jade6 和 Topas 2P 软件进行解译分析。以上实验均在中国科学院海洋研究所完成。

2.2 地球化学元素分析

地球化学元素测试包括主量、微量元素和稀土元素的测试, 微量和稀土元素测试在中国科学院海洋研究所大洋岩石圈与地幔动力学实验室测试中心进行。采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析沉积物中的微量元素和稀土元素。将低温储藏的样品放于 60℃ 的烘箱内, 烘 12 h 以上, 烘干后的样品用玛瑙研钵研磨至 200 目以下。将制备好的粉末样品进行测试前处理, 得到的溶液运用电感耦合等离子体质谱仪进行微量和稀土元素测试, 微量和稀土元素测量的相对偏差低于 5%。主量元素测试在青岛斯八达分析测试有限公司进行, 按照 GB/T14506-2010 标准, 采用 X 射线荧光光谱仪(Axios Advanced)进行测试。

3 结果

3.1 样品的矿物组成

根据 ZZY7 站位的柱状沉积物矿物学 XRD 图谱(图 2), 该站位沉积物主要由石英、长石、碳酸盐矿物以及黏土类矿物组成。碳酸盐矿物主要为方解石、高镁方解石、文石等, 陆源碎屑类矿物为石英、长石等, 而黏土类矿物主要有高岭石、伊利石、绿泥石以及少量的蒙脱石。除此之外, 研究柱状样可能还含有少量的盐岩和极少量的黄铁矿、重晶石、白云石、云母等矿物。使用 Topas 2P 软件分析 XRD 图谱, 并通过目标矿物的峰面积乘以经验因素得到矿物相对丰度^[23], 分析结果为: 伊利石含量为 23.03%~46.30%(平均值 34.98%), 高岭石含量为 4.98%~11.85%(平均值 8.63%), 绿泥石含量为 1.10%~3.99%(平均值 2.43%), 石英含量为 13.56%~27.97%(平均值 17.76%), 钾长石含量为 0.60%~27.41%(平均值 4.58%), 斜长石含量为 2.25%~10.93%(平均值 5.44%), 低镁方解石含量为 3.13%~18.50%(平均值 9.48%), 高镁方解石含量为 0.67%~8.72%(平均值 3.57%), 岩盐含量为 4.04%~8.32%(平均值 6.34%), 文石含量为 2.27%~20.72%(平均值 6.80%)。由以上分析可知伊利石含量相对较高, 绿泥石含量相对较低。

3.2 地球化学元素

3.2.1 氧化还原敏感元素

研究柱状样的氧化还原敏感元素含量随沉积物埋藏深度变化如图 3 所示。U 含量范围为 $3.51 \times 10^{-6} \sim 5.89 \times 10^{-6}$ (平均值为 4.64×10^{-6}), 在 60 cmbsf 处 U 的含量最高, 从海水-沉积物界面向下总体趋势呈增加—减少—增加—减少, 有两个峰; Mo 含量范围为 $1.09 \times 10^{-6} \sim 10.34 \times 10^{-6}$ (平均值为 4.17×10^{-6}), 在 30 cmbsf 处 Mo 的含量最高, 从海水-沉积物界面向下总体趋势同样是增加—减少—增加—减少, 有两个峰; V 含量范围为 $50.81 \times 10^{-6} \sim 113.10 \times 10^{-6}$ (平均值为 88.81×10^{-6}), 在 340 cmbsf 处 V 的含量最高, 从海水-沉积物界面向下总体为增加的趋势, 次级趋势为增加—减少—增加。

3.2.2 与自生碳酸盐矿物相关的元素及比值

ZZY7 柱状样中 MgO、CaO、Sr、Sr/Ca 和 Mg/Ca 含量随沉积物埋藏深度变化如图 4 所示, MgO 含量范围为 1.37%~2.44%(平均值为 2.09%), 在 270 cmbsf 处 MgO 的含量最高, 总体趋势为增加—减少—增加; CaO 含量范围为 4.94%~29.10%(平均值为 13.14%), 在 10 cmbsf 处 CaO 的含量最高, 总体趋势为 CaO 含量随深度的增加而减少, 次级变化为减少—增加—减少, 10~170 cmbsf 的深度范围内呈下降趋势, 在 170~290 cmbsf 的深度范围内呈先上升后平缓趋势, 在 290~400 cmbsf 的深度范围内为先

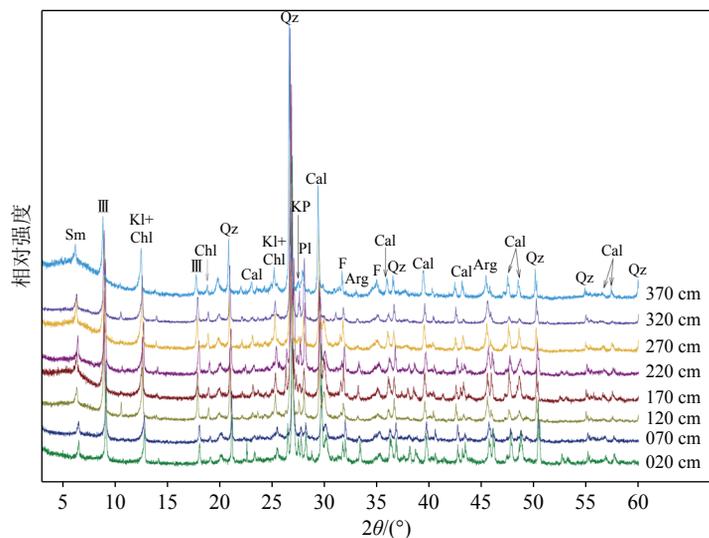


图 2 XRD 图谱

III: 伊利石, Chl: 绿泥石, Cal: 方解石, KI: 高岭石, M-Cal: 高镁方解石, Sm: 蒙脱石, F: 长石, Qz: 石英, Arg: 文石, KP: 钾长石, Pl: 斜长石。

Fig.2 The XRD charts

III: illite, Chl: chlorite, Cal: calcite, KI: kaolinite, M-Cal: Mg-calcite, Sm: smectite, F: feldspar, Qz: quartz, Arg: aragonite, KP: K-feldspar, Pl: plagioclase.

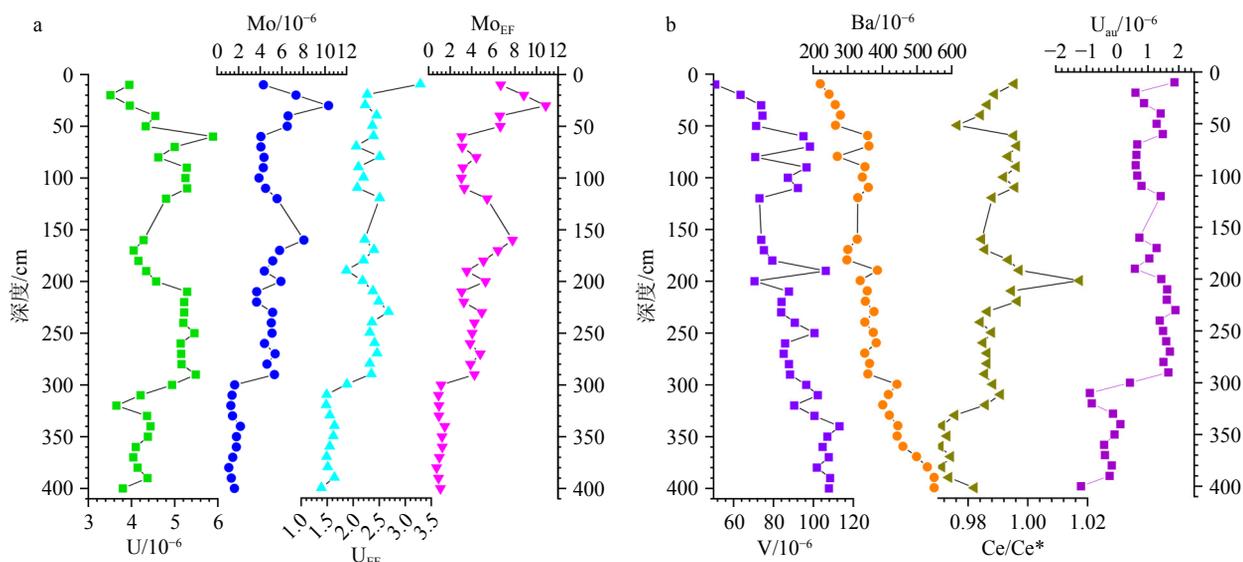


图 3 氧化还原敏感元素垂向变化特征

a: U、Mo、U_{EF}、Mo_{EF} 含量随深度变化, b: V、Ba、δCe、U_{au} 含量随深度变化。

Fig.3 The profile of redox sensitive elements of the study area

a: U, Mo, U_{EF}, Mo_{EF} contents vs depth, b: V, Ba, δCe, U_{au} contents vs depth.

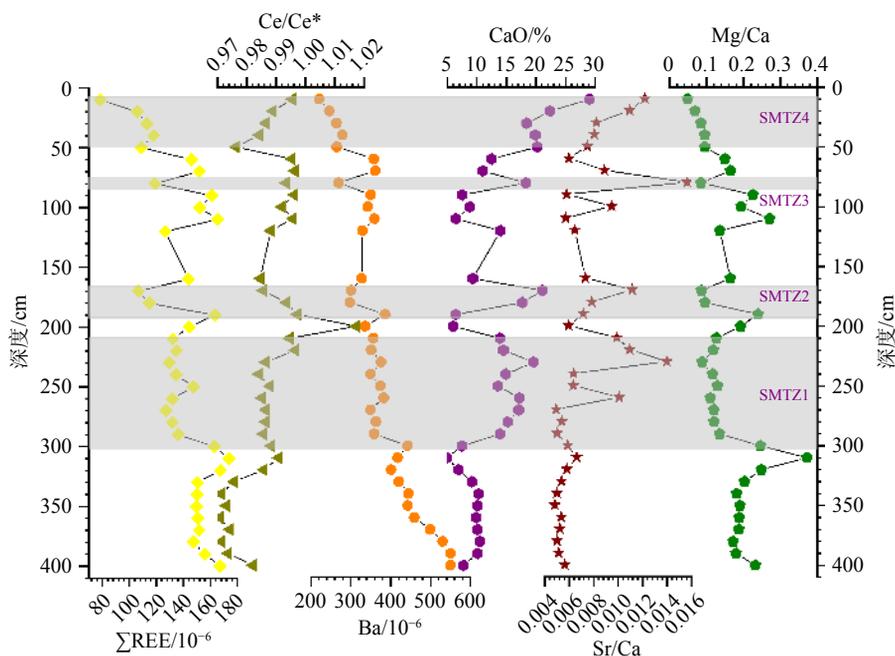


图 4 REE、δCe、(La/Sm)_N、CaO、Sr/Ca、Mg/Ca 值随深度变化

Fig.4 REE, δCe, (La/Sm)_N, CaO, Sr/Ca, and Mg/Ca values vs depth

下降后平缓趋势; Sr 含量范围为 $217.90 \times 10^{-6} \sim 2182.00 \times 10^{-6}$ (平均值为 718.05×10^{-6}), 在 10 cmbsf 处 Sr 的含量最高, 从海水-沉积物界面向下的总体趋势: 减少—增加—减少—增加—减少—增加—减少, 并且出现了明显的 4 个峰, 10~60 cmbsf 的深度范围内呈下降趋势, 在 70~90 cmbsf 的深度范围内出现第一个峰, 在 160~190 cmbsf 的深度范围内出现

第二个峰, 在 200~240 cmbsf 的深度范围内出现第三个峰, 在 250~290 cmbsf 的深度范围内出现第四个峰; Sr/Ca 范围为 0.005~0.016 (平均值为 0.007), 在 80 cmbsf 处 Sr/Ca 值最高, 总体趋势与 Sr 相似; Mg/Ca 范围为 0.049~0.372 (平均值为 0.159), 在 310 cmbsf 处 Mg/Ca 值最高, 从海水-沉积物界面向下的总体趋势为增加—减少—增加—减少—增加—减少。

3.2.3 稀土元素

ZZY7柱状样的总稀土(ΣREE)、轻稀土(LREE)、重稀土(HREE)、LREE/HREE、 δCe 、 δEu 、 δPr 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 元素含量垂向上变化图4和图5所示, ΣREE 含量范围为 $78.32\times 10^{-6}\sim 173.83\times 10^{-6}$ (平均值为 139.24×10^{-6}),在310 cmbsf处含量最高,在10 cmbsf处含量最低;LREE含量范围为 $70.15\times 10^{-6}\sim 156.02\times 10^{-6}$ (平均值为 125.35×10^{-6}),在310 cmbsf处含量最高,在10 cmbsf处含量最低;HREE含量范围为 $8.17\times 10^{-6}\sim 17.81\times 10^{-6}$ (平均值为 13.90×10^{-6}),在310 cmbsf处含量最高,在10 cmbsf处含量最低, ΣREE 、LREE、HREE的趋势非常相似(图5),总体趋势为 ΣREE 、LREE、HREE的含量随深度的增加而增加,而次级变化为增加—减少—增加—减少—增加,10~70 cmbsf的深度范围内为上升趋势,在80 cmbsf的深度范围内出现一个低谷,在170~180 cmbsf的深度范围内出现第二个低谷,210~290 cmbsf的深度范围内出现第三个低谷;LREE/HREE范围为7.56~9.85(平均值为9.02),在200 cmbsf的深度最高,在40 cmbsf的深度最低,对 δCe 、 δEu 、 δPr 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 元素的计算如下:

$$\delta\text{Ce} = \text{Ce}/\text{Ce}^* = 2\text{Ce}_{\text{N}}/(\text{La}_{\text{N}}+\text{Pr}_{\text{N}}) \quad (2)$$

$$\delta\text{Eu} = \text{Eu}/\text{Eu}^* = 2\text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}}+\text{Gd}_{\text{N}}) \quad (3)$$

$$\delta\text{Pr} = \text{Pr}/\text{Pr}^* = 2\text{Pr}_{\text{N}}/(\text{Ce}_{\text{N}}+\text{Nd}_{\text{N}}) \quad (4)$$

$$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = (\text{La}/\text{Sm})_{\text{样品}}/(\text{La}/\text{Sm})_{\text{PAAS}} \quad (5)$$

其中,下标N是指晚太古代澳大利亚页岩(PAAS)的归一化^[24]。此外, δCe 范围为0.97~1.02(平均为0.99),在200 cmbsf的深度范围最高,在360 cmbsf的深度范围内最低; δEu 范围为0.93~1.01(平均值为0.98),在50 cmbsf的深度范围最高,在190 cmbsf的深度范围内最低; δPr 范围为0.98~1.01(平均值为1.00),在330 cmbsf的深度范围内最高,在200 cmbsf的深度范围内最低; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 范围为0.87~0.93(平均值为0.90),在390 cmbsf的深度范围内最高,在310 cmbsf的深度范围内最低。

4 讨论

4.1 沉积物的物质来源

朱赖民等^[25]在2007年测得中国南海大陆架沉积物的 ΣREE 、LREE、HREE以及LREE/HREE分别是 120.46×10^{-6} 、 110.00×10^{-6} 、 10.46×10^{-6} 以及9.71;南海大陆坡沉积物的 ΣREE 、LREE、HREE以及LREE/HREE分别是 105.59×10^{-6} 、 93.97×10^{-6} 、 11.63×10^{-6} 以及7.92;南海海盆区沉积物的 ΣREE 、LREE、HREE以及LREE/HREE分别是 132.80×10^{-6} 、 $117.80\times$

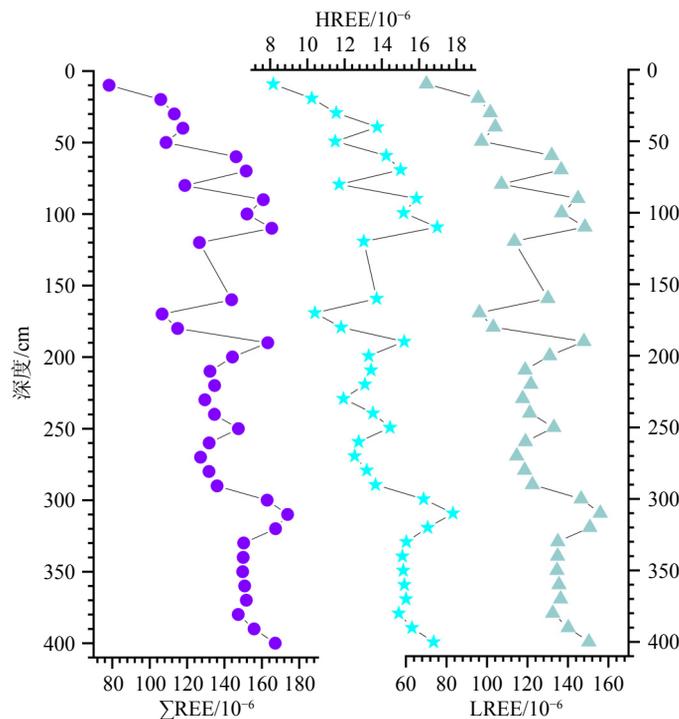


图5 REE、LREE和HREE含量随深度变化

Fig.5 REE, LREE and HREE contents vs depth

10⁻⁶、15.07×10⁻⁶ 以及 7.72; 而 ZZY7 站位柱状沉积物的 Σ REE、LREE、HREE 和 LREE/HREE 平均值为 139.24×10⁻⁶、125.35×10⁻⁶、13.90×10⁻⁶ 和 9.02 (表 1)。本研究柱状沉积物和中国南海大陆架沉积物两组数据的 LREE/HREE 值非常相似, 但本研究柱状沉积物中 LREE/HREE 略低于中国南海大陆架沉积物, 而高于南海陆坡和海盆沉积物。由于海洋化学沉积、生物沉积以及火山沉积可能导致 LREE/HREE 值低, 推测研究区受陆源碎屑影响很大, 与南海大陆架沉积物相比, 研究站位的海洋化学沉积物和生物介壳含量更高。

晚太古代澳大利亚页岩归一化图(参考 PAAS^[24] 图 6a)表明, 各层位曲线形态相似但并不完全重合, 总体上重稀土(HREE)轻微富集, 且在 0~10 cmbsf 层位中沉积物的归一化曲线远低于其他层位。结果表明, 研究区沉积物在 10~400 cmbsf 层位沉积期间具有相同的物源, 除了有陆源物质、正常海洋化学沉积、生物介壳沉积外可能存在冷泉自生沉积和极少量的火山沉积物, 且这些沉积物具有较高的混合度, 在 20~400 cmbsf 层位不同源区供应的沉

表 1 南海沉积物稀土元素对比

Table 1 Comparison of rare earth elements in the South China Sea sediment

沉积物	Σ REE/10 ⁻⁶	LREE/10 ⁻⁶	HREE/10 ⁻⁶	LREE/HREE
南海大陆架	120.46	110.00	10.46	9.71
南海大陆坡	105.59	93.97	11.63	7.92
南海海盆	132.80	117.80	15.07	7.72
ZZY7 站位	139.24	125.35	13.90	9.02

积物含量比值相近, 而 10 cmbsf 层位较其他层位可能含有较多的有机质、自生矿物和/或生物介壳; 球粒陨石归一化图(参考 CI^[26] 图 6b)表明, 研究柱状样的不同层位沉积物稀土元素配分模式非常相似, 均表现为轻稀土(LREE)强烈富集、Eu 明显亏损, 而 Ce 无异常, 是典型的陆源沉积^[1], 表明研究区沉积物以陆源碎屑为主, 且第一层位比其他层位更低。造成这种现象有两个原因, 一是含有更高的自生矿物或生物介壳导致, 二是有机物含量较高导致。

2007 年, Bayon 等^[8] 分析了尼日尔三角洲冷泉区自生碳酸盐岩和沉积物样品的化学成分, 并建立了以文石、高镁方解石、生物成因方解石、碎屑 4 部分组成的端元模型, 即 Bayon 模型。将 ZZY7 站的 Mg/Ca 和 Sr/Ca 数据投到 Bayon 模型中并建立相关数据模型得到图 7a, 由于 ZZY7 站沉积物的 Mg/Ca、Sr/Ca 值均落在模型定义范围内, 通过 Bayon 模型计算 ZZY7 柱状沉积物 4 个端元物质相对含量变化, 并分析该站位沉积物中自生碳酸盐的含量变化特征, 其结果如表 2 和图 7b 所示, 镁方解石的含量是 1.798%~15.849% (由于模型运用的是尼日尔三角洲沉积物端元数据, 因此出现负值), 平均含量 1.00%; 生物成因方解石的含量为 1.29%~22.51%, 平均含量 10.30%; 文石的含量为 0.57%~20.30% 平均含量 4.70%; 碎屑的含量为 46.37%~90.92%, 平均含量 75.00%。结合研究柱状沉积物的矿物特征(图 2)和沉积物中含有生物介壳的特点, 不难发现研究区物质主要由陆源碎屑、海洋化学沉积以及生物沉积 3 部分组成。

研究区域自渐新世以来沉积环境多变, 沉积物

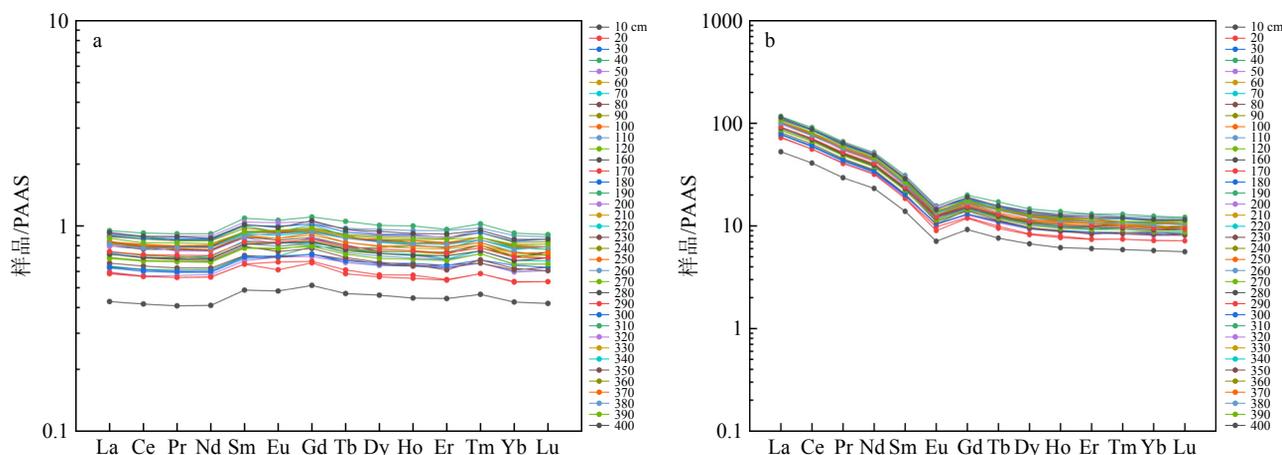


图 6 稀土元素标准化配分模式

a: 稀土元素标准化图谱(PAAS 参考文献 [24]), b: 稀土元素标准化图谱(CI 参考文献 [26])。

Fig.6 Normalized patterns of the rare earth elements (REEs)

a: PASS normalized pattern of REE (PAAS reference [24]), b: chondrite normalized pattern of REE (CI reference [26]).

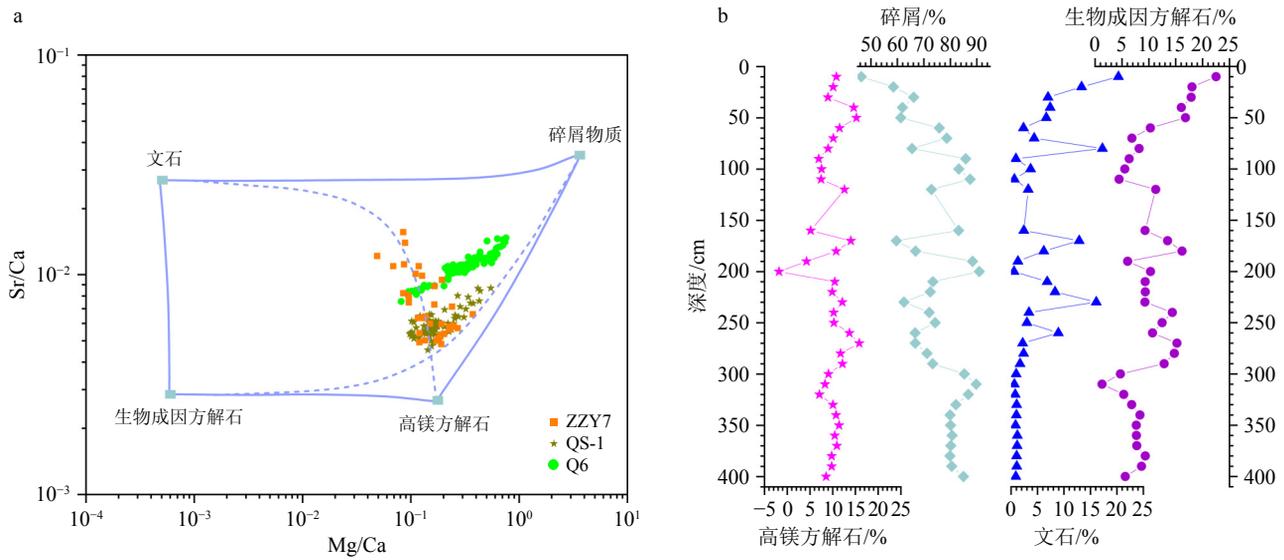


图 7 Bayon 端元模型^[8]与 Mg/Ca 和 Sr/Ca 的关系图 (a) 及 Bayon 模型的矿物含量随深度变化图 (b)

a 图中数据来源: Q6^[13], QS-1^[27]。

Fig.7 Relationships of the Bayon end-member model^[8] and Mg/Ca and Sr/Ca(a) and mineral content variation with depth in the Bayon model(b)

Sources of data in figure a: Q6^[13],QS-1^[27].

表 2 ZZY7 站沉积物运用 Bayon 模型计算高镁方解石、生物方解石、文石和碎屑的含量

Table 2 The contents of high-Mg calcite, aragonite, biogenic calcite and detrital materials in the Site ZZY7 sediments, calculated from the model presented by Bayon

深度/cm	文石/%	碎屑/%	生物方解石/%	高镁方解石/%
10	20.30	46.37	22.51	10.82
20	13.32	58.53	18.04	10.12
30	6.99	66.15	17.88	8.98
40	7.40	61.92	16.05	14.63
50	6.65	61.29	16.82	15.23
60	2.35	75.81	10.30	11.54
70	4.37	78.62	6.86	10.15
80	17.27	65.54	8.20	8.99
90	0.93	85.80	6.35	6.93
100	3.70	83.21	5.54	7.56
110	0.64	87.44	4.48	7.45
120	3.24	72.88	11.28	12.60
160	2.43	83.11	9.30	5.16
170	12.87	59.65	13.49	14.00
180	6.18	66.89	16.18	10.76
190	1.31	88.39	6.06	4.25
200	0.57	90.92	10.31	-1.80
210	6.83	73.40	9.32	10.45
220	8.32	72.42	9.34	9.92

续表 2

深度/cm	文石/%	碎屑/%	生物方解石/%	高镁方解石/%
230	16.10	62.50	9.28	12.12
240	3.37	72.03	14.37	10.23
250	2.99	74.26	12.47	10.28
260	8.94	66.68	10.68	13.70
270	2.18	66.74	15.23	15.85
280	2.38	71.16	14.74	11.73
290	1.70	73.30	12.86	12.15
300	0.97	85.24	4.71	9.09
310	0.63	89.76	1.29	8.32
320	0.78	86.78	5.34	7.09
330	1.06	82.06	6.81	10.07
340	1.01	79.90	8.36	10.74
350	0.85	80.05	7.67	11.43
360	1.19	80.66	7.69	10.47
370	1.15	80.17	7.75	10.92
380	1.04	79.83	9.34	9.78
390	1.07	80.51	8.65	9.77
400	0.89	84.94	5.63	8.54
平均值	4.70	75.00	10.30	10.00

源复杂, 先后出现海水入侵和海相地层, 沉积物以陆源和海洋自生沉积为主, 其中火山岩风化产物占有相当的比例^[28-29]。另外, 研究区季风气候明显、水温和海水含盐度适中, 为海洋生物生长和繁衍提供了一个适宜的环境, 因此, 南海的生物及生物化学沉积也占据一定的比例, 特别是“海马”冷泉区还发现了大面积化能共生大型底栖生物群落的冷泉生态系统^[21]。站点沉积物的微量元素 Th-Co-Zr/10 三角图(图 8)表明, 各层沉积物形成的构造环境差异并不是很大, 大多形成于活动大陆边缘和大陆岛弧附近。而由 Σ REE、LREE、HREE 在沉积柱状样的剖面含量变化可知, 三者的变化趋势(图 5)与陆源碎屑的变化趋势相同(图 7b), 说明研究区的地球化学特征主要受陆源碎屑控制。

总体而言, 以上的地球化学分析和矿物学研究表明研究区的物质来源主要是以陆源碎屑为主, 含有海洋化学沉积和生物介壳沉积, 可能含有极少量的火山沉积, 且沉积物主要形成于活动大陆边缘和大陆岛弧附近, 物质来源较稳定, 混合度高, 结合站点周边地形特征(图 1b), 研究区可能有着较高的沉

积速率。

4.2 地球化学特征对沉积环境指示

对海洋沉积环境的研究发现, 在相对氧化的环境中沉积物中出现 Ce 负异常, 在缺氧还原条件下导致沉积物 Ce 正异常或无异常^[30-31]。然而, 有机物和晚期成岩作用都会干扰 Ce 异常。有机物质可能掩盖氧化还原条件并导致 Ce 的正异常^[13], 后期成岩转化表现为 $(La/Sm)_N < 0.35$, 且 $(La/Sm)_N$ 与 δCe 之间存在明显的相关性^[13], 但在研究站 ZZY7 中各层位的 $(La/Sm)_N$ 都远大于 0.35, 并且与 δCe 相关性不明显 ($R^2=0.0011$)。上述结果进一步表明本站位的成岩转化和有机质对稀土元素特征影响不大, 在原始沉积形成过程中保留了氧化还原条件。本文通过绘制 Ce/Ce* 和 Pr/Pr* 的关系图来判别该区域的真假 Ce 异常, 结果显示柱状样品无异常(图 9a), 表明该区域沉积物在偏缺氧或还原环境下沉淀。

同时, 本文利用富集因子(EF)(富集因子参考地壳值^[32])来讨论 ZZY7 站位岩芯沉积物与陆源碎屑的亲疏程度, 并且将海洋沉积物中的铝(Al)用作

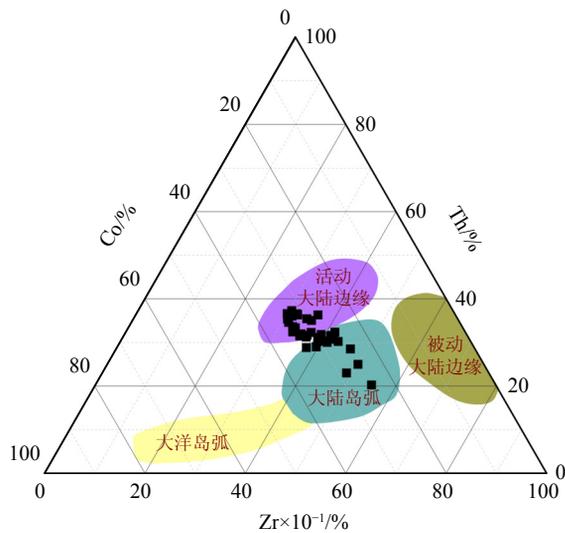


图8 Th-Co-Zr/10 三角图
Fig.8 Ternary plot of Th-Co-Zr/10

陆源物质的指示,其具体计算公式为:

$$X_{EF} = (X/Al)_{\text{沉积物}} / (X/Al)_{\text{地壳}} \quad (6)$$

近些年研究发现, Mo 和 U 两种元素在海水中停留时间长(U 为约 450 ka, Mo 为约 780 ka), 混合均匀^[33-34], 结合氧化还原环境下两种元素的性质^[34-35], 运用 Mo 和 U 的富集指数 (Mo_{EF} , U_{EF}) 来区分海洋水体次氧化、还原、硫化等环境^[33,36]。由以上 Mo、U 的特殊地球化学特征, 可知在海洋沉积物

中甲烷渗漏事件有利于 Mo、U 富集。对此, 在研究柱状样 Mo_{EF}/U_{EF} 图中, 10~290 cmbsf 的沉积物大部分因受甲烷渗漏影响使得沉积物表现为缺氧环境或硫化环境形成, 与 Chen 等人研究的东沙冷泉区和海马冷泉区 Q6、QS-1 站沉积物相似^[13,14,27,37], 300~400 cmbsf 的沉积物在弱氧环境或氧化环境形成, 这与东沙非冷泉区沉积物相似^[37](图 9b)。

蓝先洪等^[38]运用 EF 值来判断沉积物对地壳的亲属关系得出, Sc、Ti、V、Cr、Ga、W、Zr、Ta、Pb、Th、Y、Nb、Rb、Ni、Cu、Zn 在柱状样中其平均值为 0.9~2, 非常接近于 1, 属于正常值; Ba、Hf、Be、Mn、Co 在柱状样中平均值小于 0.9, 这些元素出现较小的亏损; Ge、Cs、U、Sr 在柱状样中平均值为 2~3, 属于稍微富集; 但 Li 和 Mo 元素其含量都大于 3 小于 10 且相对富集。根据以往的研究, 在还原条件下锰以可溶的 Mn^{2+} 或 $MnCl^+$ 离子存在, 但在氧化环境下锰为氧化物 (MnO_2 和 $MnOOH$) 沉淀^[39], 而本文的 Mn 处于亏损状态, 尽管 Mn 的氧化物常与金属如 Co、Cu、Ni、Zn 和 Mo^[40-42] 相结合, 但研究站点沉积物 Mn 含量和 Ni、Zn 和 Mo 等元素无正相关。因此, 在还原环境下沉积物中吸附在锰氧化物上的 Ni、Zn 和 Mo 等微量金属元素释放到间隙水中, 释放出的部分离子可能随后与沉积物中的有机质或硫化物结合。

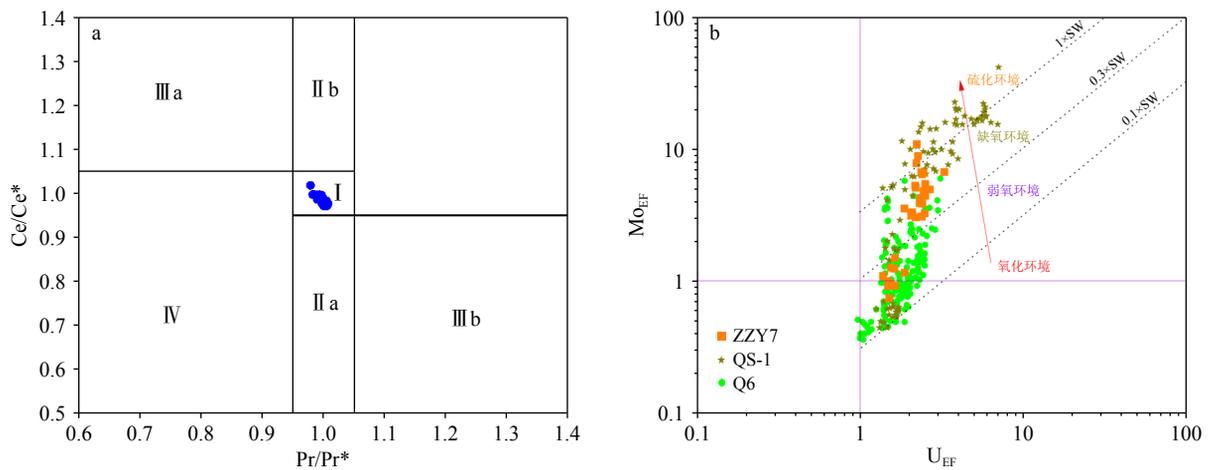


图9 Ce异常判别图

a: Ce/Ce^* 和 Pr/Pr^* 比值图, b: ZZY7 站沉积物 $Mo_{EF}-U_{EF}$ 图。I: 无 Ce 异常区域, II a: La 正异常引起的 Ce 负异常区域, II b: La 负异常引起的 Ce 正异常区域, III a: 真 Ce 正异常区域, III b: 真 Ce 负异常被 La 正异常掩盖, IV: Ce 异常被 La 异常掩盖。*SW 是 Mo/U 摩尔比 7.9(参考文献^[35])(数据来源: Q6 来自文献^[13], QS-1 来自文献^[27])

Fig.9 Ce abnormal discrimination diagram of sediment

a: Ce/Ce^* vs Pr/Pr^* ratio, b: Mo_{EF} vs U_{EF} at ZZY7 station. I: No Ce anomaly region, II a: Ce negative anomaly region caused by La positive anomaly, II b: Ce positive anomaly zone caused by La negative anomaly, III a: True Ce positive anomaly region, III b: True Ce negative anomaly masked by La positive anomaly, IV: The Ce abnormality masked by La abnormality. *SW is the Mo/U molar ratio of 7.9 (Reference from^[35])(data sources: Q6: from reference^[13]; QS-1: from reference^[27])

4.3 甲烷渗漏的地球化学和矿物学证据

研究表明, 甲烷渗漏对海洋沉积物地球化学元素分布造成重大影响^[7,43]。在甲烷渗漏研究中, 因 Mo 和 U 特殊的地球化学性质而成为了识别甲烷泄漏的有效指标之一^[35,42]。在 ZZY7 柱状样中, Mo 和 U 在 10~50、80、120、170~180 和 210~290 cmbsf 中均有不同程度富集(图 3a)。此外, 由于冷泉自生碳酸盐矿物大量生成, 导致沉积物中 CaO 含量增加的同时稀土元素被“稀释”^[13,44], 根据图 4、图 5、图 6a 所示, 研究站位在 10~50、80、120、170~180、210~290 cmbsf 层表现出 CaO 含量增加、 Σ REE 总体减少以及重稀土含量相对增加。与此同时, 由于研究柱状样 Σ REE、LREE/HREE、 δ Ce、CaO、Mo_{EF}、U_{EF}(图 3、图 4 和图 5)在深度变化上存在着耦合关系, 因此, 推测 ZZY7 柱状沉积物在 10~50、80、120、170~180、210~290 cmbsf 可能是由 AOM 反应形成的硫酸盐-甲烷转换带(SMTZ)。

同样, AOM 与 SR 作用生成大量的冷泉自生矿物, 包括文石、高镁方解石、低镁方解石、白云石、菱铁矿等。在 ZZY7 柱状样中主要由生物介壳、陆源碎屑物、化学风化物(主要是黏土类)、自生矿物沉积物组成, 但经 Bayon 模型计算可知, 文石、陆源矿物、生物成因的方解石、高镁方解石平均含量分别为 4.70%、75.00%、10.30%、10.00%(表 2), 变化趋势如图 7 所示, 而研究站点总碳酸盐矿物(生物方解石、高镁方解石、文石)百分含量变化如图 10b 所示, 其在 10~50、80、120、170~180 和 210~290 cmbsf 深度范围内总含量非常高, 并且与地球化学研究推断的 5 个 SMTZ 相同, 因此, 更进一步说明了 10~50、80、120、170~180 和 210~290 cmbsf 层位可能就是

甲烷渗漏形成的 SMTZ。在 Bayon 模型图(图 7a)中, ZZY7 站位沉积物的 Mg/Ca 和 Sr/Ca 比值分布在高镁方解石-文石混合曲线附近, 因此研究站位的沉积物中文石和高镁方解石占有一定比重。在文石含量变化里(图 10a), 由于文石形成于高 SO_4^{2-} 浓度、高碱度、高 Sr/Ca 比值、高甲烷通量的沉积环境中^[45-46], 图中有 5 个明显的文石含量峰, 分别是 10~20、80、170~180、220~230、260 cmbsf 层位, 而 220~230、260 cmbsf 可能在同一个 SMTZ 里。因此, 推断研究站位在 10~400 cmbsf 深度范围内沉积期间至少存在 4 期高甲烷通量的甲烷渗漏事件。另一方面, Ba 通常以铝硅酸盐、氢氧化物以及硫酸盐的形式存在于深海沉积物中, Ba 在铝硅酸盐和氢氧化物中不活跃, 在硫酸盐中可能发生活化、迁移和再结晶。当孔隙水亏损 SO_4^{2-} 时, 重晶石溶解、 Ba^{2+} 上移至 SMTZ 底部与 SO_4^{2-} 反应沉淀形成“钡峰”。研究区 Ba 含量变化从海水-沉积物界面向下总体为增加趋势, 并且在 190、300 cmbsf 出现 2 个明显“Ba 峰”(图 4), 研究表明, 孕育一个“Ba 峰”至少需要 1 万年到 100 万年的时间^[43]。因此, 可以确定 170~190 cmbsf 和 210~300 cmbsf 层位是 1 万年前形成的 SMTZ。同时, 结合 ZZY7 站点的矿物学和地球化学特征, 更进一步证明本站至少存在 4 层 SMTZ, 分别是 SMTZ1(210~300 cmbsf)、SMTZ2(170~190 cmbsf)、SMTZ3(80 cmbsf)和 SMTZ4(10~50 cmbsf), 以及对应的 4 期甲烷渗漏事件(MRE): MRE1(SMTZ1 形成期间)、MRE2(SMTZ2 形成期间)、MRE3(SMTZ3 形成期间)和 MRE4(SMTZ4 形成期间)(图 4), 这与 ZZY7 站位于同一峡谷的其他两个站位 Q6^[13]、QS-1^[27] 研究相似。

研究表明, 在高甲烷渗漏通量期间, 沉积物中

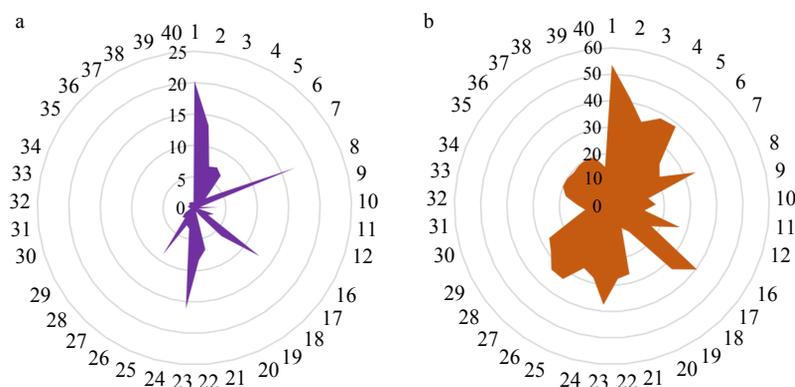


图 10 矿物含量随深度变化(dm)

a: 文石含量百分比, b: 碳酸盐矿物含量百分比。

Fig.10 Mineral content changes with depth (dm)

a: Percentage of aragonite, b: percentage of carbonate minerals.

存在 Mo 富集,同时有较高的文石含量,AOM 发生在水-沉积物界面附近,SMTZ 和硫化区都非常浅(距海水-沉积物界面深度分米或厘米尺度)^[37,27]。根据研究站位的地球化学特征(图 3、4)和矿物学特征(图 7、10)可知,在 MRE4 形成期间文石在海水-沉积物界面上或埋深极浅的层位里形成,研究站位如今依旧存在甲烷渗漏活动;在 120 cmbsf 处文石含量极少,但其总碳酸盐矿物和高镁方解石含量较高,其他化学指示也与甲烷渗漏相同,推断 120 cmbsf 可能形成 SMTZ,期间甲烷通量不高,持续时间也不长,或并没有发生甲烷渗漏;MRE1 (SMTZ1 形成期间)拥有两个高文石含量峰(220~230、260 cmbsf 层位),推测 SMTZ1 形成时甲烷通量可能是两次甲烷渗漏叠加形成的 SMTZ 或一期甲烷渗漏事件,但期间存在两次高甲烷渗漏速率或高甲烷通量。

4.4 琼东南盆地风化强度与甲烷渗漏关系

为研究 ZZY7 站位风化强度变化与甲烷渗漏关系,首先了解研究区陆源沉积物的物质组成、潜在来源和迁移过程。研究发现,琼东南盆地的陆源沉积物主要来自南部的湄公河、巽他陆架和印度尼西亚群岛,以及北部的珠江和红河,然而,南部 3 个主要陆源中,湄公河对研究区的碎屑沉积贡献远大于印度尼西亚群岛和巽他大陆架。因此推断琼东南盆地最大物质来源为湄公河、红河和珠江。陆源沉积物的变化总体上受物源区风化作用的控制,而源区风化过程受岩性、气候条件和构造活动的影响较大^[47]。同时,化学风化导致 K、Na、Mg 和 Ca 等元素易被溶解而 Al、Fe 和 Ti 等元素留在母岩中^[48]。因此,本文运用化学风化指数(CIA)来表示源区硅酸盐岩的化学风化程度,公式如下(公式 7):

$$CIA = Al_2O_3 / [(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (7)$$

公式中 Ca* 的定义与 CIA 中的相同。CaO* 代表硅酸盐岩中的含量^[49-50],假设源区硅酸盐岩中 CaO/Na₂O 的比值为 1,并对碳酸盐岩含量进行了近似校正^[51]。当 CaO ≤ Na₂O 时,采用 CaO=CaO* 的值;当 CaO > Na₂O 时,假设 CaO*=Na₂O 值^[52-53]。

通常,未风化的上地壳 CIA 平均值为 46,页岩 CIA 平均值在 68(NASC)至 70(PAAS)^[53-54]之间,而世界平均风化指数为 55~70^[55]。随着化学风化作用的进行,CIA 逐渐增大,完全风化形成铝土矿 CIA 达到 100。珠江流域的 CIA 风化指数为 70~88(平均为 81),红河流域的 CIA 风化指数值为

65~79(平均为 72),湄公河流域的 CIA 风化指数为 72~87(平均为 78)^[56]。崖城组、陵水组、三亚组和梅山组砂岩的 CIA 值分别为 61.36~73.99(平均值为 66.51)、54.31~66.23(平均值为 60.56)、61.72~82.11(平均值为 70.95)和 64.56~74.74(平均值为 68.11)^[57],研究站位沉积物的 CIA 值为 57.23~69.18(平均值为 65.49)(图 11)。数据显示,研究站位沉积物、陵水组、崖城组、三亚组、梅山组的化学风化强度为中等风化。此外,珠江、红河、湄公河的风化指数都高于研究站点,可能有以下 3 个原因:

(1) 沉积物粒度影响:由于珠江、红河、湄公河的 CIA 值采用的是 < 63 μm 的水系沉积物进行^[56],而本站采用全岩进行实验。

(2) 残积物形成时间与琼东南盆地沉积物沉积时间不同步,残积物多数形成于高山、高原等岩石裸露地区,离海洋沉积盆地较远,需要长距离搬运。因此残积物与最终的沉积物不同步。

(3) 沉积物/残积物本身的性质:化学风化的最终产物是高岭石、铝土矿和绿泥石,它们都具有较强的吸附性,更容易在源区或源区水系中沉积。

同时,A-CN-K 图可以看出 CIA 值以及样品是否受 K-交代作用影响,由此判断源区的风化程度和沉积区的成岩作用^[49]。正常情况下,斜长石先于钾长石风化^[58],在 A-CN-K 图表现为原岩风化趋势与 A-CN 轴平行。琼东南盆地 A-CN-K 图显示(图 11),ZZY7 柱状沉积物风化趋势几乎平行于 A-CN 轴,同时与湄公河、红河、珠江水系沉积物几乎在一条线上,因此推测研究站位沉积物沉积后并未发生太大变化。ZZY7 站位沉积物 CIA 值的变化可能是由源区沉积物引起的,冬季风强时研究区北部的沉积物主要来源于红河,且 CIA 值较低,夏季风强时研究区南部的沉积物主要来源于湄公河,且 CIA 值较高。伊利石主要形成于寒冷少雨的环境下,蒙脱石主要形成于干湿交替的环境下^[59],实际上古近纪和新近纪气候炎热,不利于伊利石的形成,A-CN-K 图中崖城组、陵水组、三亚组、梅山组的样品 K 元素含量较高,表明 4 组地层中 K 元素含量高主要受后期成岩 K-交代作用影响。ZZY7 站位沉积物几乎平行于 A-CN 轴,表明站位沉积物中 K 元素含量不受 K-交代作用的影响,因此可以用研究站的 CIA 值指示琼东南气候变化。刘爽等^[27]采用 AMS¹⁴C 定年法得出距本站 20 km 的 QS-1 站的 4 个沉积层年龄;苗晓明等^[13]采用 AMS¹⁴C 定年法计算出距本站 37 km 的 Q6 站点柱状样 9 个沉积层的年龄,同时,作者认为 3 个站点位置相近(如图 1b),沉积环境相同,构

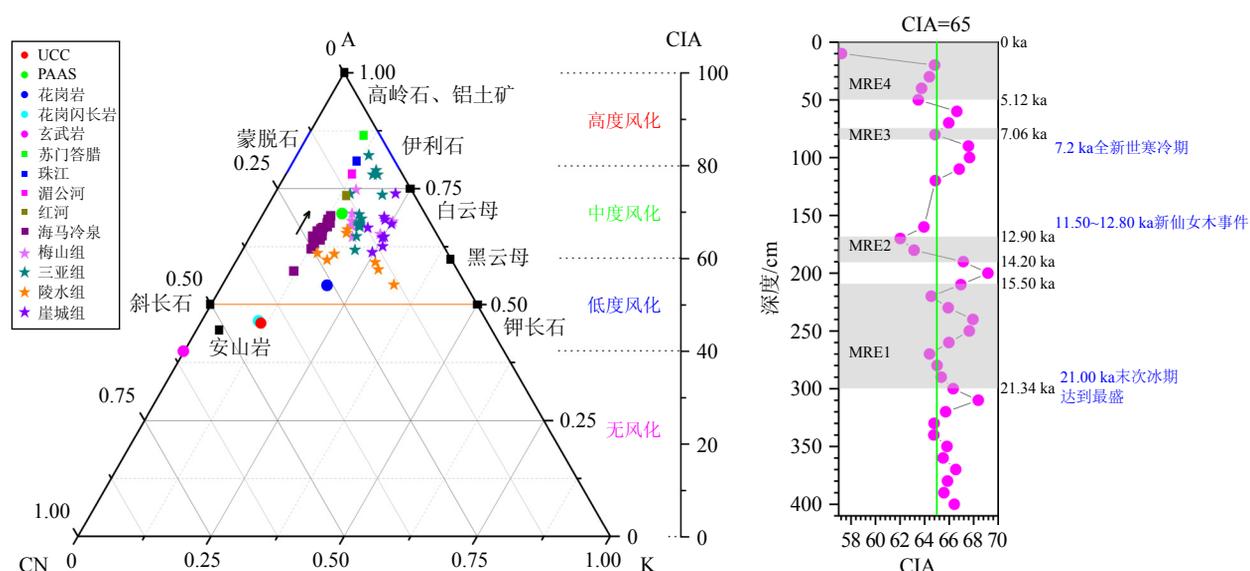


图 11 琼东南盆地 Al_2O_3 - $(\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O})$ - K_2O (A-CN-K) 风化强度三元图^[57] 和剖面图

参考文献 [56]。

Fig.11 Al_2O_3 - $(\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O})$ - K_2O (A-CN-K) ternary discrimination plot of the intensity of weathering in Qiongsoutheast Basin^[57] and the profile

Data are referred from reference [56].

造背景相同, 处于同一海底峡谷中, 但因 QS-1 站的数据相对较少, 因此采用 Q6 站的沉积速率作为获取本站年龄的基础, 通过计算得出 Q6 站位沉积物年龄与沉积层位之间的线性关系 ($y=0.0649x+1.87$, 相关性 $R^2=0.9714$, x 代表沉积层位深度, 单位为 cm; y 代表沉积物年龄, 单位为 kaBP, 由于研究站点和 Q6 有一定的距离可能造成沉积速率差异)。根据这一线性关系与研究站位 CIA 值变化 (图 11), 发现研究站位在 210~300 cmbsf 层位发生甲烷渗漏 (MRE1), 该甲烷渗漏事件形成原因可能是因处于末次冰期的全盛期 (21 kaBP), 海平面降到最低, 造成甲烷渗漏。Dan 和 Liu 等^[14,27] 对 QS-1 站点研究中发现, MRE II-1 发生在末次冰期 (LGM, 约 23~18 kaBP) 期间, 甲烷渗漏的主要原因是海平面的迅速下降引发了天然气水合物的大规模分解, 导致甲烷渗漏。同时, Miao 等^[13] 对 Q6 站点的研究发现: Ia 阶段 (20~18 kaBP) 处于末次冰期, 海平面降低导致静水压力下降和沉积物大量向海洋运输, 使得海底环境不稳定而发生甲烷渗漏, 本站研究与他们的研究不谋而合。

170~190 cmbsf 沉积期间发生第二次甲烷渗漏 (MRE2)。图 11 中 190~210 cmbsf 沉积期间 CIA 值较高, 属于全球温度上升期, 推测该时期气候较温暖夏季风盛行, 海洋生产力较高并且也可能是生产和储藏油气的时期, 由于在 11.50~12.80 kaBP 期间

发生最后一次寒冷事件-“新仙女木事件 (YD)”, YD 事件破坏了研究区海洋环境稳定性, 造成甲烷渗漏。本研究与 Dan^[14] 和 Liu^[27] 的研究相同, 认为 MRE II-3 在 11.3 kaBP 期间的甲烷渗漏可能与 YD 事件有关。同时, 苗晓明^[13] 研究认为, IIa 阶段 (12~10 ka) 是甲烷渗漏的活动期, 其形成的主要原因是 YD 事件导致气候的突然变化, 使得海水温度变化, 海底环境失衡。

7.20 kaBP 开始全球温度降低持续 200~500 a^[60-61], 有研究表明东亚季风区全新世适宜期集中在 10.50~5.50 kaBP, 最暖期出现在 6.80 kaBP^[62], 夏季风在 6.80 kaBP 达到最盛, 活跃的夏季风可能导致研究区沉积速率非常高, 使得大量的沉积物堆积在大陆坡或大陆架上, 这为浊流产生和天然气水合物解离提供了物质基础。Liang 等对海马区甲烷碳酸盐岩的放射性碳年龄研究表明, 在 6.1~5.1 kaBP 和 3.9~2.9 kaBP 两个期间, 海马区的海底环境条件有利于发生甲烷渗漏^[63-64]。MRE3 和 MRE4 的甲烷渗漏发生与 Liang 等对海马甲烷渗漏事件的研究非常相似。在过去的 6 ka 至今, 虽然海马冷泉区没有大的温度变化导致海底环境失衡, 但通过对 ROV1 和 ROV2 站点柱状沉积物的粒度分析发现, 自 6 ka 以来存在浊流活动和深水扇系统^[63,65], 从而使得海马天然气水合物储层失稳^[63]。这可能是导致 MRE3 与 MRE4 甲烷渗漏发生的原因。

5 结论

(1) ZZY7 柱状沉积物主要由黏土矿物、石英、长石、方解石、高镁方解石、文石等矿物组成。通过稀土元素归一化图以及 Bayon 模型研究发现, 研究区沉积物来源以陆源碎屑物质为主, 陆源碎屑混合度高, 火山及生物介壳源物质含量较少, 且研究区沉积物来源稳定。

(2) 通过研究氧化还原敏感元素的富集因子和相关比值, 发现 10~290 cmbsf 的柱状样品可能沉积于硫化或缺氧环境中, 300~400 cmbsf 可能沉积于氧化或弱氧化环境中; 利用甲烷泄漏相关指标识别出研究站位存在 4 期甲烷泄漏事件, 且甲烷通量较高。

(3) 琼东南盆地中崖城组、陵水组、三亚组和梅山组受到钾元素交代影响, 但研究站位钾含量没有明显变化, 没有受成岩作用影响。末次冰期期间海平面下降导致 MRE1, 海洋生产力过高加上 YD 事件使得海底环境不稳定导致 MRE2, 浊流活动和深水扇系统使得天然气水合物储层失稳导致 MRE3 和 MRE4。

致谢: 非常感谢栾振东教授、赵俐红教授和席世川博士对实验和论文撰写的指导, 感谢张晋老师和王晓红老师在 XRD 矿物测试分析和 ICP-MS 测试微量和稀土元素上给予的帮助, 感谢 Bayon 博士提供 Bayon 模型, 感谢审稿专家的建设性意见, 这极大地提高了文章的质量。最后, 感谢那些为提供柱状样品和主量元素测试的所有人员。

参考文献 (References)

- [1] 王峻雅. 南海北部神狐海域 Site 4B 站位沉积物的地球化学特征及其对甲烷渗漏的指示意义 [D]. 浙江大学硕士学位论文, 2019: 1-69. [WANG Junya. Geochemical characteristics of site 4B sediments from the Shenhu area of the South China Sea: implications for methane leakage[D]. Master Dissertation of Zhejiang University, 2019: 1-69.]
- [2] Feng D, Chen D F. Authigenic carbonates from an active cold seep of the northern South China Sea: new insights into fluid sources and past seepage activity[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 74-83.
- [3] Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, et al. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 1037.
- [4] Campbell K A. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: past developments and future research directions[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(2-4): 362-407.
- [5] Bohrmann G, Torres M E. Gas hydrates in marine sediments[M]//Schulz H D, Zabel M. *Marine Geochemistry*. Berlin: Springer, 2006: 481-512.
- [6] Canet C, Prol-Ledesma R M, Escobar-Briones E, et al. Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(5): 605-619.
- [7] Deng Y N, Chen F, Hu Y, et al. Methane seepage patterns during the Middle Pleistocene inferred from molybdenum enrichments of seep carbonates in the South China Sea[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 125: 103701.
- [8] Bayon G, Pierre C, Etoubleau J, et al. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments: implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments[J]. *Marine Geology*, 2007, 241(1-4): 93-109.
- [9] 张美, 鄢黛黛, 吴能友. 南海北部天然气水合物沉积环境中自生矿物特征 [J]. *新能源进展*, 2016, 4(1): 20-27. [ZHANG Mei, WU Daidai, WU Nengyou. Characteristics of authigenic minerals from the northern South China Sea[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(1): 20-27.]
- [10] Pierre C, Demange J, Blanc-Valleron M M, et al. Authigenic carbonate mounds from active methane seeps on the southern Aquitaine Shelf (Bay of Biscay, France): evidence for anaerobic oxidation of biogenic methane and submarine groundwater discharge during formation[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 133: 13-25.
- [11] Feng D, Qiu J W, Hu Y, et al. Cold seep systems in the South China Sea: an overview[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 3-16.
- [12] Wang J L, Wu S G, Kong X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 17-26.
- [13] Miao X M, Feng X L, Li J R, et al. Tracing the paleo-methane seepage activity over the past 20, 000 years in the sediments of Qiongdongnan Basin, northwestern South China Sea[J]. *Chemical Geology*, 2021, 559: 119956.
- [14] Dan X P, Liu S, Feng X L, et al. Geochemical record of methane seepage in carbon cycling and possible correlation with climate events in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 149: 106061.
- [15] Miao X M, Feng X L, Liu X T, et al. Effects of methane seepage activity on the morphology and geochemistry of authigenic pyrite[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 133: 105231.
- [16] Hu B, Wang L S, Yan W B, et al. The tectonic evolution of the Qiongdongnan Basin in the northern margin of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 77: 163-182.
- [17] 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力 [J]. *中国海上油气*, 2011, 23(1): 7-13, 31. [WANG Zhenfeng, LI Xushen, SUN Zhipeng, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan

- Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(1): 7-13,31.]
- [18] 范彩伟, 李绪深, 刘昆, 等. 琼东南盆地乐东、陵水凹陷中新统岩性地层圈闭成藏条件 [J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 53-59. [FAN Caiwei, LI Xushen, LIU Kun, et al. Hydrocarbon accumulation condition of Miocene litho-stratigraphic trap in Ledong & Lingshui sags, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(2): 53-59.]
- [19] 谢玉洪, 范彩伟, 周家雄, 等. 琼东南盆地中中新世重力流海底扇沉积特征及控制因素 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 220-228. [XIE Yuhong, FAN Caiwei, ZHOU Jiaxiong, et al. Sedimentary features and controlling factors of the gravity flows in submarine fan of Middle Miocene in the Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 220-228.]
- [20] 赵静, 梁前勇, 尉建功, 等. 南海北部陆坡西部海域“海马”冷泉甲烷渗漏及其海底表征 [J]. *地球化学*, 2020, 49(1): 108-118. [ZHAO Jing, LIANG Qianyong, WEI Jianguo, et al. Seafloor geology and geochemistry characteristic of methane seepage of the “Haima” cold seep, northwestern slope of the South China Sea[J]. *Geochimica*, 2020, 49(1): 108-118.]
- [21] Ling J, Guan H X, Liu L H, et al. The diversity, composition, and putative functions of gill-associated bacteria of bathymodiolin mussel and vesicomid clam from Haima cold seep, South China Sea[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(11): 1699.
- [22] Li C Y, Gong W, Zhao L H, et al. Gravity-seismic joint inversion of lithospheric density structure in the Qiongdongnan Basin, northwest South China Sea[J]. *Lithosphere*, 2024, 2024(1): lithosphere_2023_124.
- [23] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [25] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2963-2980. [ZHU Laimin, GAO Zhiyou, YIN Guan, et al. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2963-2980.]
- [26] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [27] Liu S, Feng X L, Feng Z Q, et al. Geochemical evidence of methane seepage in the sediments of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Chemical Geology*, 2020, 543: 119588.
- [28] 李娜, 翟世奎, 刘新宇, 等. 琼东南盆地深水 LS33-1-1 钻井岩心微量元素地球化学特征及其沉积环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 1-12. [LI Na, ZHAI Shikui, LIU Xinyu, et al. The trace elements geochemistry and depositional environment changes recorded in the core of well LS33-1-1 in deepwater area of Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 1-12.]
- [29] 王轲, 翟世奎. 沉积物源判别的地球化学方法 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(12): 132-143. [WANG Ke, ZHAI Shikui. Geochemical methods for identification of sedimentary provenance[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(12): 132-143.]
- [30] 周渝程, 曹红, 耿威, 等. 海底冷泉系统氧化还原环境重建方法研究进展 [J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(10): 1-13. [ZHOU Yucheng, CAO Hong, GENG Wei, et al. Research progress on reconstruction method of redox conditions in submarine seafloor cold seeps[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(10): 1-13.]
- [31] German C R, Elderfield H. Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: the ground rules[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(5): 823-833.
- [32] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4).
- [33] 吕荐阔, 翟世奎, 于增慧, 等. 氧化还原敏感性元素在沉积环境判别中的应用研究进展 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 108-124. [LÜ Jiankuo, ZHAI Shikui, YU Zenghui, et al. Application and influence factors of redox-sensitive elements in a sedimentary environment[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(12): 108-124.]
- [34] 汤冬杰, 史晓颖, 赵相宽, 等. Mo-U 共变作为古沉积环境氧化还原条件分析的重要指标: 进展、问题与展望 [J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 1-13. [TANG Dongjie, SHI Xiaoying, ZHAO Xiangkuan, et al. Mo-U covariation as an important proxy for sedimentary environment redox conditions-progress, problems and prospects[J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 1-13.]
- [35] Algeo T J, Morford J, Cruse A. Reprint of: new applications of trace metals as proxies in marine paleoenvironments[J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 1-5.
- [36] 张明亮, 郭伟, 沈俊, 等. 古海洋氧化还原地球化学指标研究新进展 [J]. *地质科技情报*, 2017, 36(4): 95-106. [ZHANG Mingliang, GUO Wei, SHEN Jun, et al. New progress on geochemical indicators of ancient oceanic redox condition[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(4): 95-106.]
- [37] Chen F, Hu Y, Feng D, et al. Evidence of intense methane seepages from molybdenum enrichments in gas hydrate-bearing sediments of the northern South China Sea[J]. *Chemical Geology*, 2016, 443: 173-181.
- [38] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的稀土元素地球化学特征 [J]. *海洋通报*, 2002, 21(5): 46-53. [LAN Xianhong, SHEN Shunxi. Geochemical characteristics of rare earth elements of sediment cores from the central South Yellow Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(5): 46-53.]
- [39] Wong C S, Boyle E, Bruland K W, et al. *Trace Metals in Sea Water*[M]. New York: Springer, 1983: 157-220.
- [40] Shimmiel G B, Price N B. The behaviour of molybdenum and manganese during early sediment diagenesis-offshore Baja California, Mexico[J]. *Marine Chemistry*, 1986, 19(3): 261-280.
- [41] Shimmiel G B, Pedersen T F. The geochemistry of reactive trace metals and halogens in hemipelagic continental margin sediments[J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1990, 3: 255-279.
- [42] Sundby B, Martinez P, Gobeil C. Comparative geochemistry of cadmium, rhenium, uranium, and molybdenum in continental margin sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(11): 2485-2493.
- [43] 于哲, 邓义楠, 陈晨, 等. 海洋沉积物微量元素地球化学特征对天然

- 气水合物勘探的指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 111-122. [YU Zhe, DENG Yinan, CHEN Chen, et al. Trace elements geochemistry of marine sediments and its implications for gas hydrate exploration[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 111-122.]
- [44] 郭黛黛, 杨飞, 黄霞, 等. 南海东沙海域冷泉渗漏区沉积物稀土元素地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 59-69. [WU Daidai, YANG Fei, HUANG Xia, et al. Rare earth elemental geochemistry of the sediments in cold-seep area in Dongsha area of South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 59-69.]
- [45] Naehr T H, Eichhubl P, Orphan V J, et al. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: a comparative study[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(11-13): 1268-1291.
- [46] Haas A, Peckmann J, Elvert M, et al. Patterns of carbonate authigenesis at the Kouilou pockmarks on the Congo deep-sea fan[J]. *Marine Geology*, 2010, 268(1-4): 129-136.
- [47] Sang P N, Liu Z F. Terrigenous sediment variations in the western South China Sea and their implications to east Asian monsoon evolution during the last glacial-interglacial cycle[J]. *Quaternary International*, 2021, 580: 1-10.
- [48] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [49] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [50] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129-147.
- [51] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [52] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America, 1993: 21-40.
- [53] Ma M, Chen G J, Li C, et al. Petrography and geochemistry of Oligocene to Lower Miocene sandstones in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea: provenance, source area weathering, and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(1): 564-589.
- [54] Wang C L, Zhang L C, Dai Y P, et al. Geochronological and geochemical constraints on the origin of clastic meta-sedimentary rocks associated with the Yuanjiacun BIF from the Lüliang complex, North China[J]. *Lithos*, 2015, 212-215: 231-246.
- [55] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [56] 童胜琪. 珠江、红河及湄公河流域表层沉积物元素地球化学研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. [TONG Shengqi. Element geochemistry of surface sediments in the the Pearl River, Red River and Mekong River basins[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.]
- [57] Ma M, Chen G J, Zhang G C, et al. Geochemistry and provenance of Oligocene to Middle Miocene sandstones in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2022, 447: 106794.
- [58] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [59] 何梦颖, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 544-551. [HE Mengying, ZHENG Hongbo, HUANG Xiangtong, et al. Clay mineral assemblages in the Yangtze drainage and provenance implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 544-551.]
- [60] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene[J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- [61] Bakker P, Clark P U, Golledge N R, et al. Centennial-scale Holocene climate variations amplified by Antarctic ice sheet discharge[J]. *Nature*, 2017, 541(7635): 72-76.
- [62] Jiang W Y, Leroy S A G, Yang S L, et al. Synchronous strengthening of the Indian and east Asian monsoons in response to global warming since the last deglaciation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(7): 3944-3952.
- [63] Liang Q Y, Hu Y, Feng D, et al. Authigenic carbonates from newly discovered active cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea: constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017, 124: 31-41.
- [64] Wang X D, Li N, Feng D, et al. Using chemical compositions of sediments to constrain methane seepage dynamics: a case study from Haima cold seeps of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 137-144.
- [65] 彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 从浅水陆架走向深水陆坡: 南海深水扇系统的研究[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 1-11. [PENG Dajun, PANG Xiong, CHEN Changmin, et al. From shallow-water shelf to deep-water slope: the study on deep-water fan systems in South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 1-11.]