

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020031201

赣东-浙西下寒武统荷塘组稀土元素特征及其地质意义

朱文博^{1,2}, 张训华³, 曲中党¹, 黄正清², 王修齐¹, 丁大林¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 南京地质调查中心, 南京 210016

3. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要:为揭示下扬子下寒武统黑色岩系的物源属性、构造背景及其沉积环境等特征,对赣东-浙西地区下寒武统荷塘组野外露头及钻井岩心进行了系统采样与稀土元素分析测试。结果显示,荷塘组样品稀土元素总量变化波动大($16.83 \times 10^{-6} \sim 321.22 \times 10^{-6}$),均值低(103.11×10^{-6}),轻稀土元素富集且分异明显,重稀土元素亏损但分异小,普遍存在Ce负异常和明显Eu正异常。研究表明:①荷塘组硅质泥页岩形成于缺氧还原的裂陷海盆环境,构造背景为被动大陆边缘,物源受陆源、海水和热液共同影响,横峰、上饶受热液和海水影响最大,受陆源碎屑影响最小,常山、江山与之相反;②沉积过程普遍有热液活动参与,在上饶存在热液活动中心,活动强度呈西强东弱特点,并发现低温热液活动有利于有机质的富集。

关键词:稀土元素;沉积环境;热液活动;荷塘组;赣东-浙西地区

中图分类号:P595

文献标识码:A

REE composition and its geological implications of the Hetang Formation mudstones in the East Jiangxi and west Zhejiang, China

ZHU Wenbo^{1,2}, ZHANG Xunhua³, QU Zhongdang¹, HUANG Zhengqing², WANG Xiuqi¹, DING Dalin¹

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

2. Nanjing Geological Survey Center, Nanjing 210016, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: The provenance, tectonic setting and sedimentary environment of the Lower Cambrian black shale named Hetang Formation in the east Jiangxi and west Zhejiang of the Lower Yangtze platform are studied in this paper. Characteristics of rare earth elements (REEs) are revealed from 22 outcrop samples and 15 core samples of the Well ZJD-1. It suggests that the total amount of rare earth elements in the Hetang Formation of the study area vary substantially from 16.83 to 321.22×10^{-6} , with a lowest mean value around 103.11×10^{-6} . Light rare-earth elements are obviously enriched and differentiated, while the heavy rare-earth elements deficit and poorly differentiated. Commonly observed are negative Ce and positive Eu anomalies. Combined with previous researches, we reached the followings as conclusions. (1) The Hetang Formation was deposited in a rift basin with anoxic water along a passive continental margin tectonically. The provenance of the sediments was jointly controlled by the terrestrial source and the outputs from seawater and hydrothermal fluid. The region of Hengfeng and Shangrao is little affected by terrigenous debris, but substantially influenced by the materials from hydrothermal fluid and seawater, and the region of Changshan and Jiangshan is just the opposite. (2) The Hetang Formation is obviously affected by hydrothermal activities, and the low temperature hydrothermal activity is favorable for the deposition and enrichment of organic matters. The hydrothermal activity was centered at Shangrao, with decreasing influence from west to east.

Key words: rare earth element; sedimentary environment; hydrothermal activity; Hetang Formation; East Jiangxi and west Zhejiang area

资助项目:“十三五”国家科技重大专项任务“下扬子地区寒武系页岩地球化学特征与含气性研究”(2016ZX05034-001-003);中央财政二级项目“苏皖地区页岩气地质调查”(DD20190083)

作者简介:朱文博(1990—),男,在读博士生,从事地球物理及页岩气成藏研究, E-mail: zhuwenbo_2012@163.com

通讯作者:张训华(1961—),男,研究员,博导,从事构造地质、综合地球物理研究, E-mail: xunhuazh611102@sina.com

收稿日期:2020-03-12; 改回日期:2020-04-12. 周立君编辑

稀土元素(REEs)在地球化学研究中占有相当重要的地位,其地球化学行为相近,稳定性好,在自然界往往呈现“整体”运移,但在特定环境下稀土元素会产生分异并记录在地质体中,是良好的反映地质作用过程的地球化学指示^[1-2]。其中,稀土元素的含量、配分模式、铕元素(Eu)异常和铈元素(Ce)异常等特征在阐明黑色岩系物源属性、古沉积环境,指示氧化还原、古海洋条件等方面具有重要作用^[3-6]。

广泛分布在扬子地区的下寒武统黑色岩系是我国南方海相页岩气主力层系之一,自 2009 年,上扬子地区的筲竹寺组(牛蹄塘组)、中扬子地区黄陵背斜周缘的水井沱组相继取得了重大成果^[7-8],而下扬子地区的下寒武统荷塘组却一直未见突破。不少学者利用稀土元素对中上扬子地区的下寒武统黑色泥页岩的古沉积环境、源区构造背景以及有机质富集机制等进行了探讨,取得了一定成果^[9-11]。针对下扬子地区的下寒武统荷塘组的研究则相对较少,且主要集中于烃源岩评价、矿物成分分析、储层表征等生储能力的鉴别^[12-15]。因此,本文以赣东-浙西下寒武统荷塘组暗色泥岩为研究对象,重点开展稀土元素的地球化学特征分析,并结合总有机碳含量(TOC),对研究区荷塘组的物源属性、沉积-构造背景以及热液活动等特征进行讨论,以期为下扬子地区荷塘组的页岩气勘探开发选区提供有力支撑。

1 地质背景

研究区位于浙江与江西两省的交界部位,在构

造区划上属于下扬子地块钱塘拗陷,在地层沉积上属于江南地层大区。震旦纪时期研究区经历了一次完整的海进海退的过程,期间受到澄江运动的影响,在杭嘉湖一带产生了 NE 向的水下隆起;寒武纪时期经历了又一次的海侵,且受到杭嘉湖一带水下隆起的影响,海水整体由南向北变浅^[16]。该时期的沉积环境大体为静水滞留还原环境,为一套深水盆地-陆棚-局限台地相沉积^[14, 17]。研究目的层段下寒武统荷塘组为静水滞流盆地沉积的含磷碳硅质岩,下段为硅质页岩、黑色碳质页岩夹石煤层,含磷结核及少量黄铁矿结核;中段为灰—灰黑色薄层灰岩,含磷白云质灰岩夹钙质页岩;上段为灰色薄层白云岩、条带状白云质灰岩夹泥质灰岩^[18]。以石煤层与下伏灯影组或皮园村组呈整合或平行不整合接触,层厚约 30 ~ 370 m。中上统依次沉积大陈岭组、杨柳岗组、华严寺组以及西阳山组,总体以白云质灰岩、条带状灰岩及透镜状泥质灰岩为主,富产球接子化石。

2 样品采集及实验方法

本次研究样品共 37 块,其中 22 块样品为江西南部至浙江西部地区的露头采样(图 1A),均取自荷塘组底部暗色泥岩的新鲜露头,未经明显的风化、蚀变,其余 15 块样品为 ZJD-1 井荷塘组层段岩心(图 1B),岩性绝大部分为硅质泥页岩。ZJD-1 井位于浙江省江山市,完钻井深 1 100.15 m,于 616.32~639.76 m 钻遇荷塘组,同时收集了部分前人研究的

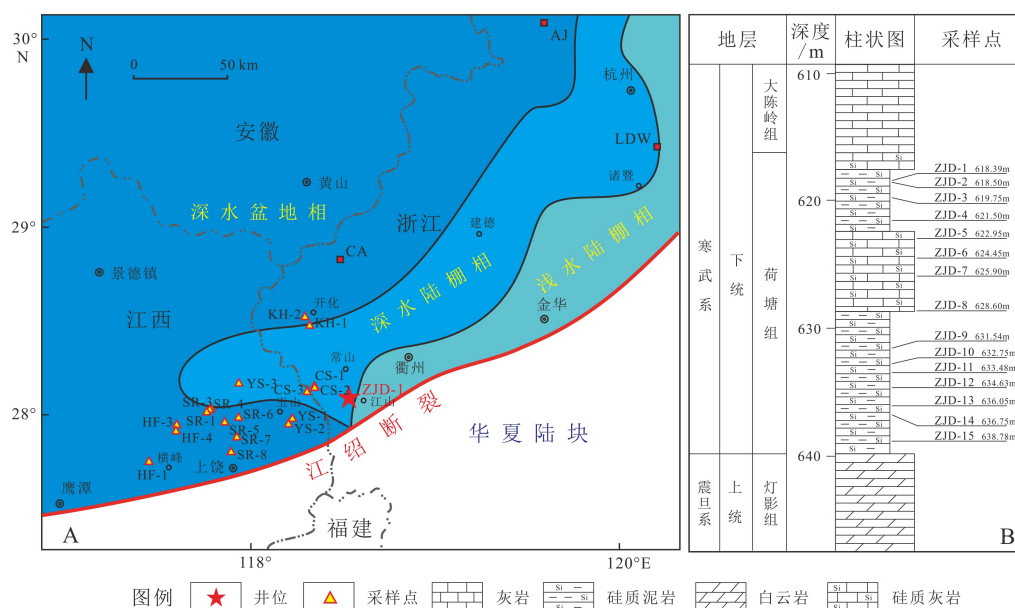


图 1 研究区早寒武世沉积相及岩性柱状图^[14]
 Fig.1 Sedimentary facies of the Early Cambrian and lithological column of study area

荷塘组样品测试数据进行分析对比。本次研究对所有样品的16个稀土元素及总有机碳(TOC)进行了分析测试。

稀土元素测试由南京地质调查中心实验室完成,总有机碳测试由重庆地质矿产研究院完成。稀土元素分析在温度为23℃、相对湿度为30%的条件下,依据GB/T14506.30-2010标准,采用赛默飞世尔Xseries II电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试完成,测试精度优于5%。有机质丰度分析是在温度为22℃、相对湿度为30%的条件下,依据GB/T19145-2003沉积岩中总有机碳的测定准则,采用德国耶拿Multi N/C 3000型总碳分析仪完成。

3 稀土元素地球化学特征

3.1 稀土元素含量特征

本次稀土元素测试样品37个,基本为硅质岩或硅质泥岩,稀土元素(REE)含量结果见表1,分析结果见表2。研究区荷塘组样品稀土元素总量(Σ REE)范围为(16.83~321.22) $\times 10^{-6}$,但均值仅为 103.11×10^{-6} ,明显低于PAAS的平均值 184.77×10^{-6} ,但高于一般开阔洋盆的硅质岩^[2,21]。稀土元素总量变化波动较大,可能是由于样品的岩性变化以及地球化学条件存在较大差异造成的。轻稀土含量(Σ LREE)为(12.75~258.58) $\times 10^{-6}$,平均 91.31×10^{-6} ;重稀土含量(Σ HREE)为(3.05~62.64) $\times 10^{-6}$,平均 11.80×10^{-6} ;轻重稀土元素的比率(Σ LREE/ Σ HREE)为2.25~22.23,平均8.65,较北美黑色页岩比值7.5大,表现出轻稀土元素相对富集、重稀土元素严重亏损特征。

3.2 稀土元素配分模式

页岩样品经球粒陨石归一化后^[20],稀土元素分布格局均呈现向右倾斜的LREE趋势和较为平坦的HREE趋势(图2), $(La/Yb)_s$ 比值为1.77~32.42(平均10.46), $(La/Sm)_s$ 比值为1.29~6.69(平均3.93),说明轻稀土元素分异明显而重稀土元素分异不明显。PAAS归一化的REE分布格局相对平坦, $(La/Yb)_N$ 比值为0.19~3.46(平均1.12),但在上饶和横峰地区样品呈轻微向右或向左的趋势(图3)。同时,大多数页岩样品显示Eu正异常以及Ce的轻微负异常, δ Eu范围为0.92~7.47,平均值为1.75, δ Ce范围为0.48~2.21,均值为0.84。

4 稀土元素指示的地质意义

4.1 物源属性

由于稀土元素在海水中的稳定性高、溶解度低,在海相地质沉积过程中,细粒沉积物中稀土元素可较好地保留沉积物来源区的物源特征及古沉积环境信息,可以用来确定物源^[2]。陆源输入的碎屑物质与水体都表现为较高的 Σ REE以及轻重稀土间无明显分异现象^[22];海水的稀土元素配分模式则表现为明显Ce负异常、重稀土富集以及铈(Y)的正异常以及较低的 Σ REE^[23];热液流体则呈现轻稀土富集、低 Σ REE、无明显Ce异常、显著的Eu正异常^[6,24]。研究区荷塘组样品的 Σ REE相对较低(平均 103.11×10^{-6})且变化波动较大,但高于日本Sasayama和弗朗西斯科远洋盆地的硅质岩数值^[4,25],初步判断物源较为复杂并受到陆源碎屑的影响。对比常见自然水体及沉积物PAAS标准化的稀土元素特征(图4),普遍具有低温热液流体的特征,说明沉积或成岩过程中有海底热液或深部幔源的混入。将有关结果投入La/Yb- Σ REE和La/Yb-Ce/La图解中^[27-28],La/Yb- Σ REE图解结果显示大部分样品落在沉积岩和钙质泥岩区域,部分落在花岗岩重叠区和碱性玄武岩重叠区(图5a);La/Yb-Ce/La图解结果显示大部分样品落在沉积岩与玄武岩重叠区域,小部分样品落在沉积岩、玄武岩和铁镁岩三者重叠区(图5b)。这些特征说明荷塘组属于正常海水沉积与热水混合沉积的产物,物源中部分来源于深部幔源物质。

稀土元素Y及Ho因在地质环境中通常一同迁移或沉淀,不受氧化-还原条件的影响,两者比值Y/Ho可用来对物源进行分析^[29]。研究发现,火山岩及碎屑沉积物中的Y/Ho平均值约为28,上地壳约为27.5,下地壳约为24.7,PAAS约为27.2,而海水的Y/Ho比值变化范围较大(44~74),但当体系受到外来热液混入时,该比值表现出较大波动^[2,30-31]。本次研究的37件样品Y/Ho值为20.53~47.92,均值为30.36,介于PAAS值与海水值之间,更接近于PAAS值,说明荷塘组样品中的稀土元素受陆源碎屑的影响较大,同时部分受沉积时期海水以及海底热液的影响。

δ Eu值正异常主要与海底热液影响有关,当海相沉积过程中有较高温和强还原性的热液加入,其中的Eu²⁺可稳定存在从而造成正异常^[6,22,32]。现代

表 1 赣东-浙西下寒武统荷塘组稀土元素含量
Table 1 REE contents of Lower Cambrian Hetang Formation in east Jiangxi and west Zhejiang

10⁻⁶

| 采样地区 | 样品 | Sc | Y | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | TOC/% |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 开化 | KH-1 | 9.82 | 5.51 | 25.36 | 45.33 | 5.29 | 18.79 | 2.92 | 2.04 | 2.20 | 0.26 | 1.24 | 0.24 | 0.72 | 0.12 | 0.87 | 0.13 | 2.99 |
| | KH-2 | 11.13 | 7.82 | 27.33 | 40.08 | 6.53 | 21.93 | 3.24 | 0.72 | 2.07 | 0.26 | 1.27 | 0.29 | 0.98 | 0.18 | 1.43 | 0.23 | 1.43 |
| | KH-3 | 6.98 | 9.19 | 26.12 | 41.83 | 5.16 | 17.85 | 3.03 | 1.30 | 2.08 | 0.29 | 1.55 | 0.33 | 0.96 | 0.17 | 1.22 | 0.19 | 3.43 |
| 常山 | CS-1 | 9.64 | 15.59 | 25.85 | 50.27 | 6.45 | 23.09 | 4.43 | 0.95 | 3.55 | 0.57 | 3.00 | 0.61 | 1.62 | 0.29 | 1.93 | 0.29 | 1.48 |
| | CS-2 | 1.97 | 16.55 | 9.94 | 14.66 | 1.66 | 6.47 | 1.20 | 0.34 | 1.28 | 0.22 | 1.33 | 0.35 | 1.01 | 0.15 | 0.91 | 0.13 | 3.76 |
| | CS-3 | 3.53 | 5.89 | 7.51 | 13.93 | 1.81 | 6.87 | 1.38 | 0.30 | 1.12 | 0.18 | 1.03 | 0.21 | 0.58 | 0.09 | 0.63 | 0.09 | 2.9 |
| 玉山 | YS-1 | 6.38 | 22.51 | 36.49 | 70.42 | 9.52 | 34.60 | 6.53 | 1.17 | 5.47 | 0.85 | 4.37 | 0.85 | 2.20 | 0.32 | 2.10 | 0.30 | 3.1 |
| | YS-2 | 4.00 | 12.86 | 14.13 | 26.25 | 3.64 | 13.76 | 2.75 | 0.52 | 2.37 | 0.40 | 2.25 | 0.47 | 1.26 | 0.19 | 1.31 | 0.19 | 2.18 |
| | YS-3 | 12.62 | 41.90 | 53.98 | 62.38 | 11.80 | 41.03 | 6.76 | 2.17 | 6.08 | 1.10 | 7.00 | 1.62 | 4.83 | 0.79 | 5.33 | 0.80 | 10.73 |
| | YS-4 | 4.10 | 11.59 | 13.41 | 23.10 | 2.82 | 9.91 | 1.94 | 2.28 | 1.76 | 0.29 | 1.71 | 0.38 | 1.07 | 0.18 | 1.23 | 0.18 | 5.8 |
| 横峰 | HF-1 | 1.72 | 14.21 | 24.91 | 30.86 | 4.89 | 21.88 | 4.48 | 1.16 | 3.93 | 0.53 | 2.39 | 0.42 | 0.93 | 0.11 | 0.62 | 0.09 | 6.03 |
| | HF-2 | 1.14 | 6.82 | 4.14 | 5.54 | 0.70 | 2.87 | 0.73 | 0.30 | 0.94 | 0.16 | 0.87 | 0.18 | 0.44 | 0.06 | 0.35 | 0.04 | 4.08 |
| | HF-3 | 1.36 | 9.94 | 6.05 | 7.47 | 1.06 | 4.11 | 0.76 | 0.82 | 0.84 | 0.14 | 0.89 | 0.22 | 0.61 | 0.09 | 0.59 | 0.08 | 12.08 |
| | HF-4 | 7.09 | 9.63 | 31.39 | 58.83 | 8.31 | 31.07 | 6.35 | 3.28 | 4.10 | 0.52 | 2.11 | 0.42 | 1.20 | 0.20 | 1.44 | 0.22 | 2.39 |
| 上饶 | SR-1 | 7.06 | 9.42 | 39.81 | 40.72 | 8.94 | 30.44 | 5.64 | 0.95 | 4.08 | 0.58 | 2.51 | 0.40 | 0.96 | 0.13 | 0.85 | 0.12 | 4.27 |
| | SR-2 | 9.36 | 4.31 | 17.70 | 72.95 | 3.25 | 9.97 | 1.66 | 2.60 | 1.62 | 0.19 | 1.04 | 0.21 | 0.64 | 0.12 | 0.91 | 0.13 | 3.05 |
| | SR-3 | 15.01 | 39.77 | 37.55 | 53.91 | 9.22 | 34.70 | 6.96 | 1.77 | 6.21 | 1.11 | 6.68 | 1.39 | 3.79 | 0.59 | 3.72 | 0.53 | 3.06 |
| | SR-4 | 8.28 | 12.56 | 49.50 | 81.28 | 11.52 | 50.63 | 10.14 | 1.92 | 6.91 | 0.89 | 3.67 | 0.59 | 1.49 | 0.21 | 1.40 | 0.19 | 3.59 |
| | SR-5 | 4.77 | 19.66 | 26.46 | 34.32 | 4.77 | 16.61 | 2.71 | 1.69 | 2.42 | 0.35 | 2.02 | 0.50 | 1.43 | 0.20 | 1.39 | 0.21 | 15.79 |
| | SR-6 | 1.61 | 26.17 | 7.03 | 9.76 | 2.15 | 7.61 | 1.89 | 0.58 | 2.28 | 0.46 | 3.38 | 0.77 | 2.46 | 0.41 | 2.76 | 0.38 | 1.97 |
| | SR-7 | 3.94 | 35.13 | 22.09 | 23.28 | 3.37 | 12.78 | 2.26 | 0.56 | 2.52 | 0.44 | 2.91 | 0.73 | 2.10 | 0.30 | 1.76 | 0.24 | 10.43 |
| | SR-8 | 1.54 | 6.98 | 2.30 | 3.63 | 0.96 | 4.42 | 1.12 | 0.32 | 0.98 | 0.18 | 1.14 | 0.25 | 0.68 | 0.11 | 0.66 | 0.09 | 5.0 |
| ZJD-1井 | ZJD-1 | 11.9 | 15.6 | 22.6 | 41.9 | 5.27 | 20.4 | 3.96 | 0.75 | 3.43 | 0.55 | 3.2 | 0.63 | 1.9 | 0.31 | 2.01 | 0.31 | 3.13 |
| | ZJD-2 | 4.75 | 10.7 | 12 | 23.8 | 3.08 | 12.4 | 2.42 | 0.51 | 2.11 | 0.3 | 1.93 | 0.37 | 1.09 | 0.17 | 1.06 | 0.15 | 3.52 |
| | ZJD-3 | 5.15 | 10.7 | 13.2 | 26.4 | 3.43 | 13.9 | 2.76 | 0.56 | 2.27 | 0.36 | 2.02 | 0.38 | 1.11 | 0.17 | 1.1 | 0.15 | 3.51 |
| | ZJD-4 | 6.1 | 12.6 | 15.3 | 28.9 | 3.66 | 14.5 | 2.9 | 0.59 | 2.48 | 0.4 | 2.31 | 0.44 | 1.33 | 0.21 | 1.32 | 0.2 | 3.57 |
| | ZJD-5 | 7.34 | 16 | 21.5 | 40.4 | 5.04 | 20.4 | 3.87 | 0.8 | 3.35 | 0.53 | 3.01 | 0.6 | 1.7 | 0.27 | 1.73 | 0.26 | 1.93 |
| | ZJD-6 | 8.02 | 21.1 | 28.5 | 49.8 | 6.27 | 24.5 | 4.52 | 0.95 | 3.9 | 0.65 | 3.77 | 0.75 | 2.25 | 0.36 | 2.19 | 0.33 | - |
| | ZJD-7 | 8.95 | 22.4 | 28.6 | 55 | 6.97 | 28.2 | 5.38 | 1.08 | 4.56 | 0.72 | 4.03 | 0.78 | 2.25 | 0.34 | 2.08 | 0.31 | 2.76 |
| | ZJD-8 | 6.43 | 14.3 | 19.3 | 36 | 4.39 | 17.1 | 3.38 | 0.7 | 2.89 | 0.46 | 2.69 | 0.53 | 1.57 | 0.26 | 1.54 | 0.23 | - |
| | ZJD-9 | 7.31 | 12.5 | 17 | 30.2 | 3.61 | 14.1 | 2.74 | 0.57 | 2.3 | 0.38 | 2.25 | 0.47 | 1.4 | 0.24 | 1.49 | 0.22 | 2.97 |
| | ZJD-10 | 5.55 | 10.8 | 13.5 | 25.6 | 3.17 | 12.7 | 2.5 | 0.55 | 2.1 | 0.35 | 2.08 | 0.41 | 1.19 | 0.19 | 1.24 | 0.18 | 3.33 |
| | ZJD-11 | 5.16 | 9.6 | 12.3 | 23.7 | 3.04 | 12.1 | 2.3 | 0.49 | 1.99 | 0.32 | 1.78 | 0.35 | 1.06 | 0.17 | 1.07 | 0.16 | 3.57 |
| | ZJD-12 | 2.35 | 12.6 | 10.1 | 20.1 | 2.21 | 9.01 | 1.79 | 0.4 | 1.71 | 0.29 | 1.72 | 0.36 | 1.07 | 0.16 | 0.93 | 0.14 | 5.22 |
| | ZJD-13 | 7.45 | 56 | 42.5 | 66 | 7.77 | 32.7 | 5.99 | 1.4 | 6.08 | 0.99 | 6.25 | 1.32 | 3.89 | 0.58 | 3.29 | 0.48 | 16.93 |
| | ZJD-14 | 8.55 | 150 | 75.9 | 74.3 | 16.9 | 73.4 | 14.7 | 3.38 | 15.5 | 2.75 | 17.4 | 3.82 | 11.2 | 1.64 | 9.06 | 1.27 | 9.56 |
| | ZJD-15 | 8.73 | 34.1 | 22.8 | 33.8 | 5.48 | 22.7 | 4.68 | 1.06 | 4.26 | 0.76 | 4.88 | 1.07 | 3.35 | 0.57 | 3.46 | 0.54 | 13.67 |
| | 平均值 | 6.92 | 27.27 | 23.67 | 38.39 | 5.35 | 21.87 | 4.26 | 0.92 | 3.93 | 0.65 | 3.95 | 0.82 | 2.42 | 0.38 | 2.24 | 0.33 | 5.67 |
| 淳安 | CA | - | 9.93 | 18.92 | 33.92 | 4.04 | 13.79 | 3.23 | 0.38 | 1.66 | 0.28 | 1.68 | 0.38 | 1.09 | 0.18 | 1.13 | 0.17 | - |
| 安吉 | AJ | - | 60.34 | 29.97 | 34.79 | 6.06 | 24.33 | 4.85 | 1.23 | 6.17 | 0.97 | 6.31 | 1.45 | 4.16 | 0.62 | 3.53 | 0.52 | - |
| PAAS ^a | | - | - | 38.20 | 79.60 | 8.83 | 33.90 | 5.55 | 1.08 | 4.66 | 0.77 | 4.68 | 0.99 | 2.85 | 0.41 | 2.82 | 0.43 | |
| 球粒陨石 ^b | | - | - | 0.23 | 0.60 | 0.09 | 0.45 | 0.15 | 0.06 | 0.20 | 0.04 | 0.24 | 0.06 | 0.16 | 0.02 | 0.16 | 0.02 | |

注: a (PAAS: 后太古代澳大利亚页岩) 数据引自Meclennan (2001) [19]; b数据引自Sun (1989) [20]。

表2 赣东-浙西下寒武统荷塘组稀土元素分析结果
Table 2 REE analyses of Lower Cambrian Hetang Formation in east Jiangxi and west Zhejiang

| 样品 | $\Sigma\text{REE}/10^{-6}$ | $\Sigma\text{LREE}/10^{-6}$ | $\Sigma\text{HREE}/10^{-6}$ | $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ | Y/Ho | La/Yb | $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ | $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{S}}$ | $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{S}}$ | $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ | $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ | δCe | δEu |
|--------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| KH-1 | 105.52 | 99.72 | 5.79 | 17.21 | 22.75 | 29.10 | 1.17 | 5.43 | 20.15 | 1.26 | 2.15 | 0.90 | 3.79 |
| KH-2 | 106.55 | 99.84 | 6.72 | 14.87 | 26.54 | 19.10 | 1.42 | 5.28 | 13.23 | 1.22 | 1.41 | 0.69 | 1.30 |
| KH-3 | 102.07 | 95.28 | 6.79 | 14.03 | 27.67 | 21.45 | 1.30 | 5.41 | 14.85 | 1.25 | 1.58 | 0.83 | 2.44 |
| CS-1 | 122.89 | 111.04 | 11.85 | 9.37 | 25.39 | 13.43 | 1.07 | 3.66 | 9.30 | 0.85 | 0.99 | 0.90 | 1.13 |
| CS-2 | 39.64 | 34.26 | 5.38 | 6.37 | 47.61 | 10.89 | 1.41 | 5.20 | 7.54 | 1.21 | 0.80 | 0.82 | 1.28 |
| CS-3 | 35.74 | 31.80 | 3.94 | 8.07 | 28.10 | 11.92 | 1.12 | 3.42 | 8.25 | 0.79 | 0.88 | 0.87 | 1.14 |
| YS-1 | 175.19 | 158.73 | 16.46 | 9.64 | 26.60 | 17.37 | 1.08 | 3.50 | 12.03 | 0.81 | 1.28 | 0.87 | 0.92 |
| YS-2 | 69.47 | 61.03 | 8.44 | 7.23 | 27.34 | 10.81 | 1.12 | 3.23 | 7.48 | 0.75 | 0.80 | 0.84 | 0.95 |
| YS-3 | 205.66 | 178.11 | 27.54 | 6.47 | 25.94 | 10.12 | 1.80 | 5.00 | 7.01 | 1.16 | 0.75 | 0.57 | 1.60 |
| YS-4 | 60.25 | 53.46 | 6.79 | 7.87 | 30.47 | 10.89 | 1.21 | 4.34 | 7.54 | 1.01 | 0.80 | 0.87 | 5.83 |
| HF-1 | 97.18 | 88.17 | 9.01 | 9.79 | 34.00 | 40.24 | 1.68 | 3.49 | 27.86 | 0.81 | 2.97 | 0.64 | 1.30 |
| HF-2 | 17.33 | 14.28 | 3.05 | 4.68 | 38.93 | 11.68 | 1.56 | 3.54 | 8.09 | 0.82 | 0.86 | 0.74 | 1.69 |
| HF-3 | 23.71 | 20.26 | 3.45 | 5.86 | 46.19 | 10.33 | 1.69 | 4.99 | 7.15 | 1.16 | 0.76 | 0.68 | 4.80 |
| HF-4 | 149.43 | 139.22 | 10.21 | 13.64 | 23.10 | 21.83 | 1.11 | 3.10 | 15.11 | 0.72 | 1.61 | 0.84 | 3.02 |
| SR-1 | 136.13 | 126.51 | 9.63 | 13.14 | 23.60 | 46.82 | 2.04 | 4.42 | 32.42 | 1.03 | 3.46 | 0.50 | 0.93 |
| SR-2 | 112.98 | 108.11 | 4.86 | 22.23 | 20.52 | 19.39 | 0.51 | 6.69 | 13.43 | 1.55 | 1.43 | 2.21 | 7.47 |
| SR-3 | 168.14 | 144.10 | 24.04 | 5.99 | 28.55 | 10.08 | 1.45 | 3.38 | 6.98 | 0.78 | 0.74 | 0.67 | 1.27 |
| SR-4 | 220.34 | 205.00 | 15.35 | 13.36 | 21.19 | 35.32 | 1.27 | 3.06 | 24.45 | 0.71 | 2.61 | 0.79 | 1.08 |
| SR-5 | 95.07 | 86.56 | 8.51 | 10.17 | 39.51 | 19.07 | 1.61 | 6.13 | 13.20 | 1.42 | 1.41 | 0.70 | 3.10 |
| SR-6 | 41.92 | 29.01 | 12.91 | 2.25 | 33.85 | 2.55 | 1.50 | 2.34 | 1.77 | 0.54 | 0.19 | 0.57 | 1.32 |
| SR-7 | 75.33 | 64.33 | 11.00 | 5.85 | 47.92 | 12.58 | 1.98 | 6.13 | 8.71 | 1.42 | 0.93 | 0.61 | 1.10 |
| SR-8 | 16.83 | 12.75 | 4.09 | 3.12 | 27.87 | 3.51 | 1.32 | 1.29 | 2.43 | 0.30 | 0.26 | 0.54 | 1.43 |
| ZJD-1 | 107.22 | 94.88 | 12.34 | 7.69 | 24.76 | 11.24 | 1.12 | 3.58 | 7.78 | 0.83 | 0.83 | 0.89 | 0.96 |
| ZJD-2 | 61.39 | 54.21 | 7.18 | 7.55 | 28.92 | 11.32 | 1.05 | 3.11 | 7.84 | 0.72 | 0.84 | 0.90 | 1.06 |
| ZJD-3 | 67.81 | 60.25 | 7.56 | 7.97 | 28.16 | 12.00 | 1.04 | 3.00 | 8.31 | 0.69 | 0.89 | 0.90 | 1.05 |
| ZJD-4 | 74.54 | 65.85 | 8.69 | 7.58 | 28.64 | 11.59 | 1.10 | 3.31 | 8.03 | 0.77 | 0.86 | 0.89 | 1.04 |
| ZJD-5 | 103.46 | 92.01 | 11.45 | 8.04 | 26.67 | 12.43 | 1.11 | 3.48 | 8.60 | 0.81 | 0.92 | 0.90 | 1.05 |
| ZJD-6 | 128.74 | 114.54 | 14.20 | 8.07 | 28.13 | 13.01 | 1.19 | 3.95 | 9.01 | 0.92 | 0.96 | 0.86 | 1.07 |
| ZJD-7 | 140.30 | 125.23 | 15.07 | 8.31 | 28.72 | 13.75 | 1.08 | 3.33 | 9.52 | 0.77 | 1.02 | 0.90 | 1.03 |
| ZJD-8 | 91.04 | 80.87 | 10.17 | 7.95 | 26.98 | 12.53 | 1.12 | 3.58 | 8.68 | 0.83 | 0.93 | 0.90 | 1.05 |
| ZJD-9 | 76.97 | 68.22 | 8.75 | 7.80 | 26.60 | 11.41 | 1.17 | 3.89 | 7.90 | 0.90 | 0.84 | 0.89 | 1.07 |
| ZJD-10 | 65.76 | 58.02 | 7.74 | 7.50 | 26.34 | 10.89 | 1.10 | 3.38 | 7.54 | 0.78 | 0.80 | 0.90 | 1.13 |
| ZJD-11 | 60.83 | 53.93 | 6.90 | 7.82 | 27.43 | 11.50 | 1.08 | 3.35 | 7.96 | 0.78 | 0.85 | 0.89 | 1.08 |
| ZJD-12 | 49.99 | 43.61 | 6.38 | 6.84 | 35.00 | 10.86 | 1.05 | 3.54 | 7.52 | 0.82 | 0.80 | 0.98 | 1.08 |
| ZJD-13 | 179.24 | 156.36 | 22.88 | 6.83 | 42.42 | 12.92 | 1.34 | 4.45 | 8.94 | 1.03 | 0.95 | 0.83 | 1.09 |
| ZJD-14 | 321.22 | 258.58 | 62.64 | 4.13 | 39.27 | 8.38 | 2.13 | 3.24 | 5.80 | 0.75 | 0.62 | 0.48 | 1.05 |
| ZJD-15 | 109.41 | 90.52 | 18.89 | 4.79 | 31.87 | 6.59 | 1.41 | 3.05 | 4.56 | 0.71 | 0.49 | 0.70 | 1.12 |
| CA | 80.85 | 74.28 | 6.57 | 11.31 | 26.13 | 16.74 | 1.16 | 3.67 | 11.59 | 0.85 | 1.24 | 0.89 | 0.77 |
| AJ | 124.96 | 101.23 | 23.73 | 4.27 | 41.61 | 8.49 | 1.80 | 3.87 | 5.88 | 0.90 | 0.63 | 0.59 | 1.06 |

注：下标S表示球粒陨石标准化^[20]，下标N表示经过后太古代澳大利亚页岩值（PAAS）标准化^[19]； $\Sigma\text{REE}=\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu}+\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu}$ ， $\Sigma\text{LREE}=\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu}$ ， $\Sigma\text{HREE}=\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu}$ ， $\delta\text{Ce}=2*\text{Ce}_S/(\text{La}_S+\text{Pr}_S)$ ， $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_S/(\text{Sm}_S+\text{Gd}_S)^{0.5}$ 。

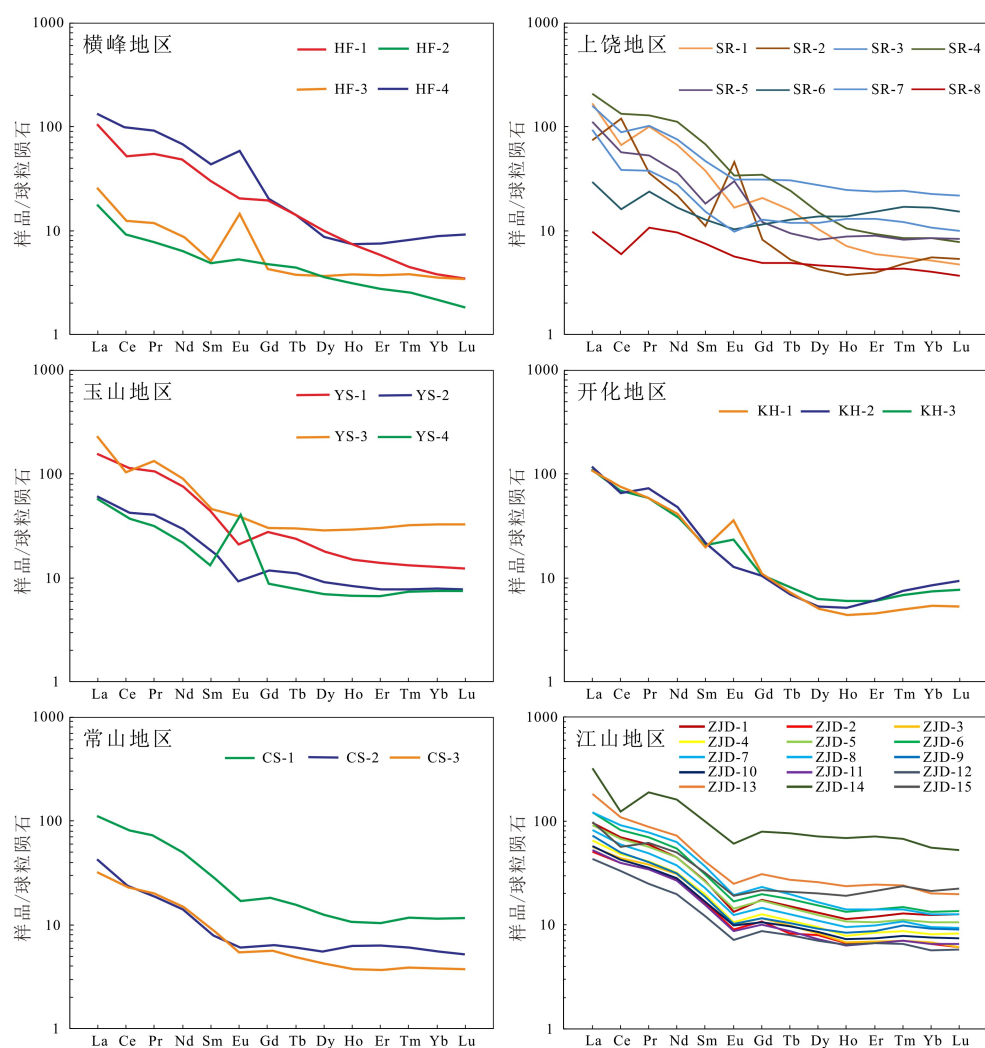


图 2 赣东-浙西地区荷塘组球粒陨石标准化模式图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Hetang Formation in east Jiangxi and west Zhejiang

海洋中的高温体系 ($>250\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的流体, 如洋中脊或弧后扩张中心, 常具有明显的 Eu 正异常; 而低温 ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$) 或距离热液区比较远地带, Eu 元素则具有弱异常或无异常, 以及高的 Sm/Yb 值^[32-33]。因此, δEu 值的大小可反映热液活动的强弱程度, 从表 3 及图 3 可知, δEu 值为 0.92~7.47 (均值 1.75), 总体为正异常, 说明荷塘组沉积过程中普遍有海底热液活动参与。

Murray 利用 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 值来判别陆源影响的程度, $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 越高, 说明受陆源影响越小^[34]。如表 3 所示, 横峰、上饶地区各参数值变化范围较大, 但多数样品均表现出较高的 Y/Ho、 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 以及 δEu 值特征, 说明物源受陆源碎屑影响最小, 受热液和海水的影响最大。同时上饶地区 SR-2 样品具有明显 Ce 正异常 ($\delta\text{Ce}=2.21$)、高的 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu}=7.47$) 以及高的轻重稀土元素分馏程度 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=22.23$), 表现出高温热液流体的特征(图 4), 推测上

饶地区是研究区热液活动的中心。常山、江山地区样品较其余地区具有较低的 δEu 、 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 以及较高的 Y/Ho 值, 说明物源受热液影响最小, 结合古地理, 该区域主要受华夏古陆的陆源碎屑以及部分海水的影响。玉山地区样品 Y/Ho 值 (25.94~30.47, 均值 27.59) 最为贴近上地壳比值, 但 δEu 与 $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 变化范围均较大, 由于玉山地区与上饶地区 (热液活动中心) 相邻, 推测该地区主要受陆源碎屑及部分热液活动的影响。开化地区样品特征表现相对一致, Y/Ho 值 (22.75~27.67, 均值 25.65) 趋向于下地壳特征, δEu 较高, $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$ 适中, 说明该地区受到陆缘碎屑、热液以及海水的共同影响, 占主体的为热液活动。结合钱建民对浙江淳安和安吉地区 δEu 的研究 (均值分别为 0.77 以及 1.06), 热液活动强度表现出从赣东向浙西的东北部有逐渐减弱的趋势^[35]。

综上所述, 研究区荷塘组样品的物质来源应具

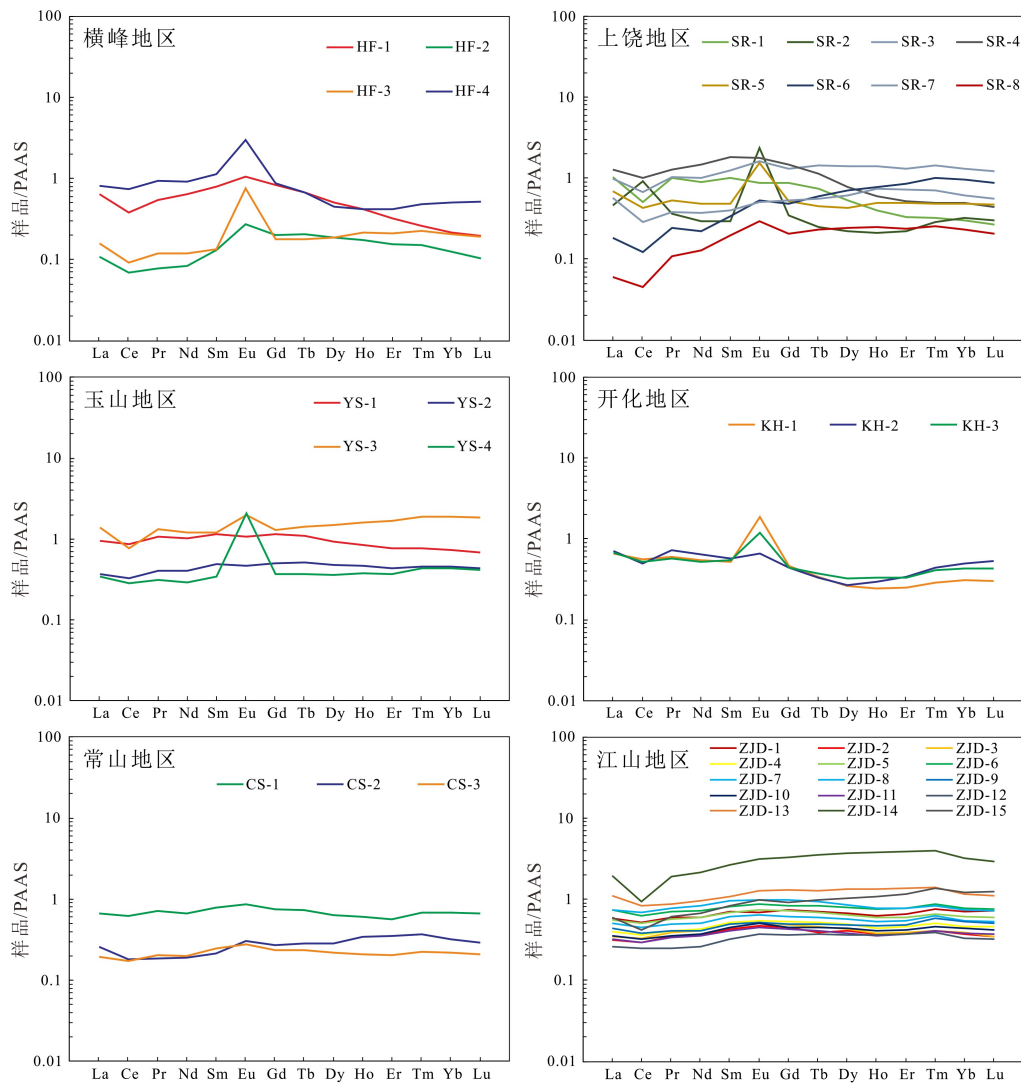


图3 赣东-浙西地区荷塘组 PAAS 标准化模式图

Fig.3 PAAS-normalized REE distribution patterns of the Hetang Formation in east Jiangxi and west Zhejiang

有混合性,主要受陆源碎屑、海水和不同程度的深部热液活动的影响,在深水盆地相中的横峰、上饶地区受陆源碎屑影响最小,受热液和海水的影响最大,而处于深水陆棚与浅水陆棚相交区域的常山、江山地区受陆源碎屑影响最大,受热液和海水的影响最小。

4.2 热液活动对有机质的影响

赣东-浙西地区荷塘组泥页岩有机碳含量(TOC)为1.43%~16.93%,均值高达5.23%,属于优质烃源岩。有4个样品TOC小于2%, δEu 值为1.05~1.32(均值1.20);有6个样品TOC为2%~3%, δEu 值为0.95~3.79(均值1.83);12个样品TOC为3%~4%, δEu 值为0.92~7.47(均值1.73);TOC大于4%的有13个样品, δEu 值为0.93~5.83(均值2.01)。可以看出,TOC有随着 δEu 增大而增大的趋势,说明热液

活动对有机质富集有一定的促进作用(图6a)。为进一步研究两者的相关关系,将研究区TOC与热水活动特征值 δEu 进行统计分析(图6b),发现 δEu 值在1.0~1.12以及1.12~1.6的范围中,与TOC有一定的正相关关系(相关系数分别为0.47和0.61),TOC呈分段式上升;但 δEu 值>1.6时,样品离散化程度高,并呈下降的趋势。 δEu 值的大小可反映热液活动的强弱程度, δEu 值相对较小,说明主要受正常海相沉积作用和低温热水沉积作用影响, δEu 值较大时,说明受高温热水沉积作用影响。可知在研究区,低温热液活动对有机质富集与保存有一定的促进作用,但当热液温度过高、活动强度过大,反而不利于生物的繁盛和有机质的富集,这与对贵州中东部下寒武统牛蹄塘组页岩的热水活动研究相符^[11]。但是为何在代表低温热水活动的 δEu 值变化区间内会出现分段式的正相关关系,还需要进一步的研究。

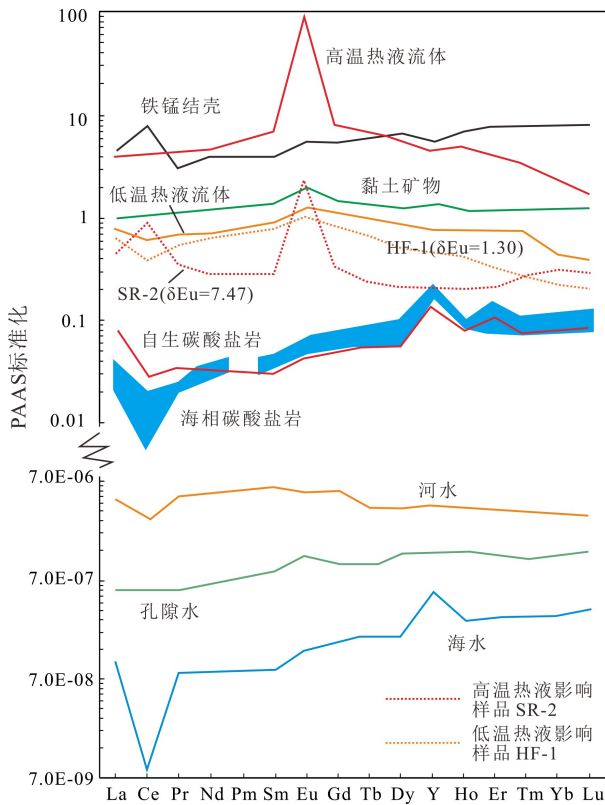


图 4 常见水体和沉积物 PAAS 标准化后 REE+Y 模式图解^[6,26]

Fig.4 PAAS-normalized REE+Y patterns of various waters and sediments

4.3 构造背景

不同构造背景下的稀土元素特征有所不同, 由此可反演推断当时的构造环境, Murray 与 Kato 总结了扩张洋脊、远洋盆地以及大陆边缘等不同沉积背

景中 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Ce)_N$ 、 δEu 以及 δCe 的特征^[4,21,25,34]。从表 3 可以看出, 各采样地区样品的关键参数 $(La/Ce)_N$ 与 δCe 值变化均符合大陆边缘特征, $(La/Yb)_N$ 值在玉山、常山以及江山地区表现出大陆边缘特征, 在横峰、上饶以及开化地区表现出部分远洋盆地的特征。 δEu 值整体变化较大 (0.92~7.47), 大部分地区样品具有明显的正异常, 一般认为与受海底热液影响有关, 并不能明确构造背景。研究区主体应该处于大陆边缘的构造背景。

Pirajno 研究发现, 澳大利亚古元古代裂谷环境中的硅质岩其稀土元素特征表现出较弱的 Ce 异常 ($\delta Ce=0.91\pm 0.28$)、明显的 Eu 正异常 ($\delta Eu=0.87\sim 20.65$, 均值 6.59), $(La/Ce)_N=1.16\pm 0.36$, $(La/Yb)_N=0.46\pm 0.40$, 并且硅质岩的形成受热液活动影响较大^[36], 研究区荷塘组样品与其特征较为相近。有学者研究认为扬子台地在埃迪卡拉纪晚期—寒武纪早期是处于由裂谷盆地向被动大陆边缘转化的重要构造转折阶段^[37-38], 结合研究区内热液活动普遍的特征, 推测是处在构造拉张的背景下, 由同沉积深大断裂沟通深部物质上涌所引起的。综上, 本文认为研究区构造背景为被动大陆边缘, 荷塘组沉积于裂陷海盆环境中。

4.4 沉积环境

4.4.1 氧化还原条件

在沉积过程中 Ce 受环境的氧化还原条件和 pH 变化的影响, 通常有 +3 和 +4 两种价态, 在氧化环境下 Ce^{3+} 会被氧化成 Ce^{4+} , 造成 Ce^{3+} 浓度减小, 使得 Ce 发生亏损, 进而沉积物中呈现正异常或无明

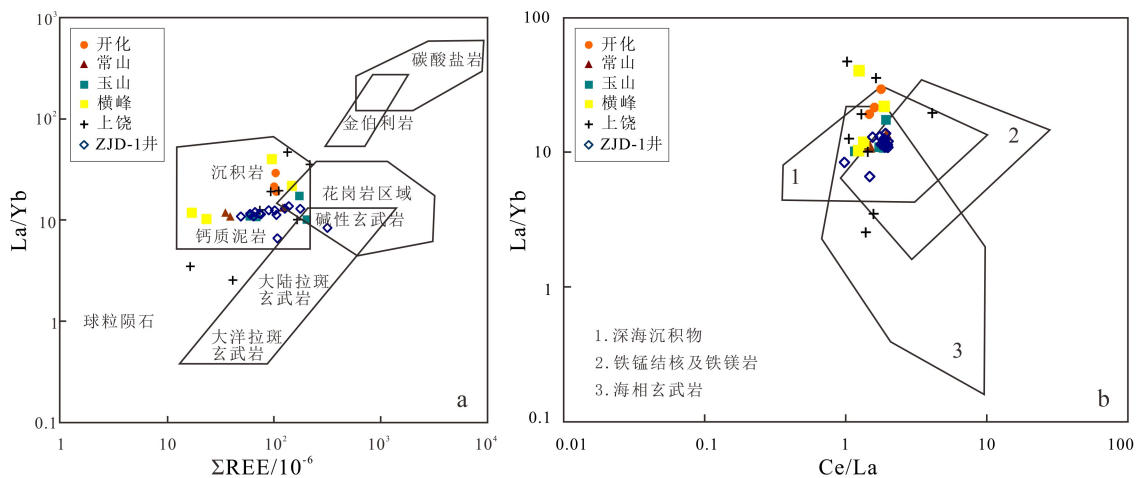


图 5 物源输入类型判别图

a. La/Yb - ΣREE 交汇图(底图据文献^[27]), b. La/Yb - Ce/La 交汇图(底图据文献^[28])。

Fig.5 Diagrams of provenance discrimination

a. Cross plot between La/Yb and ΣREE , b. Cross plot between La/Yb and Ce/La .

表3 赣东-浙西荷塘组与不同沉积环境硅质岩对比^[4, 21, 25, 34]

Table 3 Comparison between Hetang Formation and the cherts of different sedimentary environments

| | Y/Ho | (La/Yb) _S | (La/Yb) _N | (La/Ce) _N | δCe | δEu |
|------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| 横峰地区 | 23.10~46.19 (35.55) | 7.15~27.86 (14.56) | 0.76~2.97 (1.55) | 1.11~1.69 (1.51) | 0.64~0.84 (0.72) | 1.30~4.80 (2.70) |
| 上饶地区 | 20.52~47.92 (30.38) | 1.77~32.42 (12.92) | 0.19~3.46 (1.38) | 0.51~2.04 (1.46) | 0.50~2.21 (0.82) | 0.93~7.47 (2.21) |
| 玉山地区 | 25.94~30.47 (27.59) | 7.01~12.03 (8.51) | 0.75~1.28 (0.91) | 1.08~1.80 (1.30) | 0.57~0.87 (0.79) | 0.92~5.83 (2.32) |
| 开化地区 | 22.75~27.67 (25.65) | 13.23~20.15 (16.08) | 1.41~2.15 (1.71) | 1.17~1.42 (1.30) | 0.69~0.90 (0.81) | 1.30~3.79 (2.51) |
| 常山地区 | 25.39~47.61 (33.70) | 7.54~9.30 (8.36) | 0.80~0.99 (0.89) | 1.07~1.41 (1.20) | 0.82~0.90 (0.86) | 1.13~1.28 (1.18) |
| 江山地区 | 24.76~42.42 (29.99) | 4.56~9.52 (7.87) | 0.49~1.02 (0.84) | 1.04~2.13 (1.21) | 0.48~0.98 (0.85) | 0.96~1.13 (1.06) |
| 弗朗西斯科陆缘 | — | — | 0.43~1.22 (0.75) | ≈1 | 0.67~1.52 (1.11) | 0.64~1.72 (1.21) |
| 弗朗西斯科远洋 | — | — | 0.48~2.26 (1.30) | 2.0~3.0 | 0.50~0.76 (0.60) | 1.06~1.33 (1.15) |
| 弗朗西斯科洋脊 | — | — | 0.57~0.96 (0.74) | ≥3.5 | 0.18~0.60 (0.29) | 0.97~1.35 (1.08) |
| Sasayama远洋 | 29.70~44.33 (36.80) | — | 0.47~1.51 (0.87) | — | 0.36~1.22 (0.72) | 1.00~1.23 (1.11) |
| 澳大利亚裂谷 | — | — | 0.46±0.40 | 1.16±0.36 | 0.91±0.28 | 0.87~20.65 (6.59) |

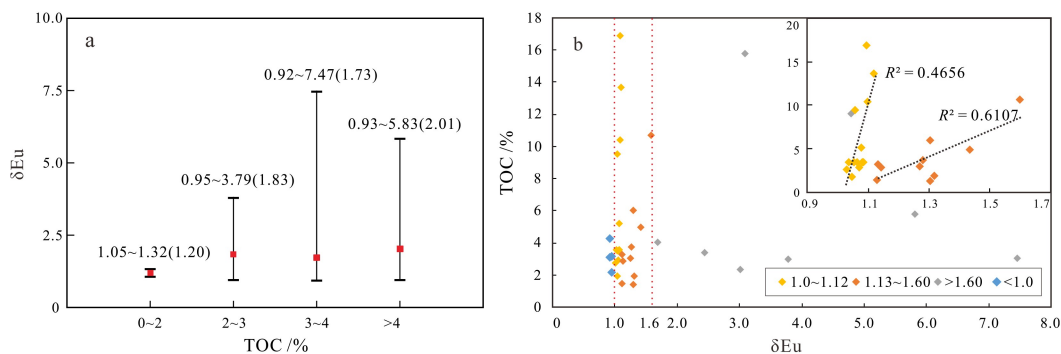


图6 赣东-浙西荷塘组 TOC 与 Eu 异常值统计图

a. TOC 与 δEu 值分布图, b. δEu 值与 TOC 及交汇分析图。

Fig.6 Statistical figure of TOC and Eu anomalies in Hetang Formation of west Jiangxi and east Zhejiang

a. Distribution of TOC and Eu anomalies, b. Cross plot between TOC and Eu anomalies.

显负异常^[23]。因此,当 $\delta Ce > 1$ 为正异常,代表氧化环境;当 $\delta Ce < 0.95$ 为负异常,表示还原环境,负异常值越小,说明水深越深,水体越缺氧^[39]。研究区 δCe 范围为0.48~2.21(均值为0.84),除SR-2与ZJD-12样品值在0.95以上外,其余样品均显示出负异常特征,说明研究区荷塘组泥页岩主要沉积于较深水的还原环境中。

横峰(0.64~0.84,均值0.72)、上饶(0.50~2.21,均值0.82)地区大多数样品的 δCe 值均在0.75以下,应为研究区水体较深处,还原性最强;玉山(0.57~0.87,均值0.79)、开化(0.69~0.90,均值0.81)地区样品的 δCe 值变化范围大,结合古地理,推测是处于陆棚与盆地交界场所造成,水体也较深;而常山(0.82~0.90,均值0.86)与江山(0.48~0.98,均值0.85)地区样品特征较为一致, δCe 值大多

在0.85以上,为研究区水体最浅区域。综合来看,各地区值体现出由西向东、由北向南逐渐增加的趋势,表明水体逐渐变浅,符合平面沉积相图。从ZJD-1井的垂向变化上看,荷塘组下段(ZJD-12至ZJD-15) δCe 为0.48~0.98(均值0.75),中、上段(ZJD-1至ZJD-11)为0.86~0.90(均值0.89),整体为缺氧还原环境,且自下而上还原条件逐渐减弱。曾子轩在对诸暨狼底坞的荷塘组野外剖面研究中,也发现了相同的演化规律^[17]。究其原因,研究区在早寒武世早期经历海侵事件,水体不断加深,并受江南隆起及江山-桐庐-浦江水下隆起影响,水体更为滞留,使得荷塘组沉积早期是处于一个静水滞留的缺氧还原环境中;但随着海侵事件的减弱,研究区由盆地相向水体相对较浅的深水陆棚相转变,与周围水域的水体循环加强,还原条件减弱,致使荷塘

组中上段有向贫氧还原条件转变的趋势。

4.4.2 沉积速率

稀土元素常吸附于碎屑矿物或悬浮物质入海并沉积下来。当REE随载荷以较快的沉降速率快速沉积后,与海水发生交换的机会较少,REE分异程度较弱;若沉降速率较慢,促进细粒物质中REE分解,使带入海水中的REE在足够的时间内被黏土吸附并与有机质络合发生化学作用导致REE配分模式的极大不同,轻、重稀土出现亏损或富集。因此,可通过REE分异程度的变化来推测沉积物与有机质的沉降速率^[5]。在研究中,球粒陨石配分曲线的斜率 $(La/Yb)_s$ 的值能反映轻重稀土分异程度, $(La/Yb)_s$ 值越大代表分异程度越大,沉积速率越慢。

开化地区及横峰地区样品的 $(La/Yb)_s$ 值整体较高,分别为13.23~20.15(均值16.08)以及7.15~27.86(均值14.56),表现出较慢的沉积速率;上饶地区 $(La/Yb)_s$ 值变化范围较大(1.77~32.42,均值12.92),推测是部分样点由于靠近热液活动中心,造成沉积速率较快,但整体表现出较慢的沉积速率;玉山地区样品数值变化范围较小(7.01~12.03,均值8.51),沉积速率居中;常山地区 $(La/Yb)_s$ 为7.54~9.30(均值8.36),江山地区ZJD-1井样品为4.56~9.52(均值7.87),说明整体沉积速率较快。对比可知,横峰、开化地区为研究区沉积速率最慢区域,结合前文氧化还原条件的研究,应为研究区的两个沉降中心。其次为上饶地区,再次为玉山地区,沉积速率最快区域为常山、江山地区。在岩相古地理中,横峰、上饶、开化全部处于深水盆地沉积相中,玉山、常山、江山虽然都处于深水陆棚相内,但常山、江山地区位于深水陆棚-浅水陆棚相交处,水体更为动荡,表明沉积速率结果与岩相古地理匹配良好。

5 结论

(1)研究区构造背景为被动大陆边缘,荷塘组硅质泥页岩形成于构造拉张作用背景下的裂陷海盆环境中;物质来源受陆源碎屑、海水和不同程度的热液活动的影响,横峰、上饶地区受陆源碎屑影响最小,受热液和海水的影响最大,常山、江山地区与之相反。

(2)研究区整体处于缺氧还原环境中,横峰与开化地区为沉降中心,由西向东、由北向南水体逐渐变浅,沉降速率逐渐加快;并在垂向上有向贫氧还原条件转变的趋势。

(3)研究区普遍有海底热液活动参与,上饶地区为热液活动的中心,活动强度由赣东向浙西的东北部逐渐减弱;同时低温热液活动对有机质富集有一定的促进作用,高温热液活动会破坏有机质的保存,具体关系还需进一步的研究。

致谢:衷心感谢南京地质调查中心能源室项目组成员,在数据分析及论文撰写过程中所给予的建议指导!

参考文献 (References)

- [1] Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [2] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [3] Murray R W, Brink M R B T, Jones D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [4] Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [5] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 135-206. [CHEN Deqian, CHEN Gang. Practical REE Geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 135-206.]
- [6] Sylvestre G, Laure N T E, Djibril K N G, et al. A mixed seawater and hydrothermal origin of superior-type banded iron formation (BIF)-hosted Kouambo iron deposit, Palaeoproterozoic Nyong series, Southwestern Cameroon: constraints from petrography and geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80: 860-875.
- [7] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 1-12. [WEI Guoqi, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 1-12.]
- [8] Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 182-196.
- [9] 李娟, 于炳松, 郭峰. 黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 20-31. [LI Juan, YU Bingsong, GUO Feng. Depositional setting and tectonic background analysis on Lower Cambrian Black Shales in the North of Guizhou Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 20-31.]
- [10] 曹婷婷, 徐思煌, 王约. 川东北下寒武统筇竹寺组稀土元素特征及其地质意义——以南江杨坝剖面为例[J]. *石油实验地质*, 2018,

- 40(5): 716-723. [CAO Tingting, XU Sihuang, WANG Yue. Characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northeastern Sichuan Basin and its geological implications: a case study of Yangba section, Nanjiang [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2018, 40(5): 716-723.]
- [11] 贾智彬, 侯读杰, 孙德强, 等. 热水沉积区黑色页岩稀土元素特征及其地质意义——以贵州中部和东部地区下寒武统牛蹄塘组页岩为例[J]. *天然气工业*, 2018, 38(5): 44-51. [JIA Zhibin, HOU Dujie, SUN Deqiang, et al. Characteristics and geological implications of rare earth elements in black shale in hydrothermal sedimentation areas: a case study from the Lower Cambrian Niutitang Fm shale in central and eastern Guizhou [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(5): 44-51.]
- [12] 谢国梁, 刘水根, 沈玉林, 等. 赣东北荷塘组页岩气成藏条件及有利区评价[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(4): 704-713. [XIE Guoliang, LIU Shuigen, SHEN Yulin, et al. Reservoir-forming conditions and favorable areas evaluation of shale gas reservoir in Hetang formation, northeastern Jiangxi area [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(4): 704-713.]
- [13] 付常青, 朱炎铭, 陈尚斌. 浙西荷塘组页岩孔隙结构及分形特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 77-86. [FU Changqing, ZHU Yanming, CHEN Shangbin. Pore structure and fractal features of Hetang formation shale in western Zhejiang [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(1): 77-86.]
- [14] 樊佳莉. 下扬子地区下寒武统富有机质页岩的岩相与沉积环境[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5): 156-163. [FAN Jiali. Lithofacies and depositional setting of the lower cambrian organic-rich shale of the lower Yangtze Region, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 156-163.]
- [15] 黄正清, 周道容, 李建青, 等. 下扬子地区寒武系页岩气成藏条件分析与资源潜力评价[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(1): 94-98. [HUANG Zhengqing, ZHOU Daorong, LI Jianqing, et al. Shale gas accumulation conditions and resource potential evaluation of the Cambrian in the Lower Yangtze area [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(1): 94-98.]
- [16] 薛耀松, 俞从流. 浙西、赣东北寒武系下统荷塘组岩石特征及沉积环境分析[J]. *地层学杂志*, 1979, 3(4): 283-293. [XUE Yaosong, YU Congliu. The analysis of rocks features and sedimentary of Lower Cambrian Hetang formation in west Zhejiang-northeast of Jiangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1979, 3(4): 283-293.]
- [17] 曾子轩. 浙西北下寒武统荷塘组硅质(页)岩成因及沉积环境研究[D]. *浙江大学硕士学位论文*, 2019: 13-31. [ZENG Zixuan. Research on origin and sedimentary environment of lower cambrian of hetang formation cherts in northwestern Zhejiang, China[D]. Master Dissertation of Zhejiang University, 2019: 13-31.]
- [18] 刘计勇, 张飞燕, 印燕铃. 下扬子下寒武统岩相古地理及烃源岩条件研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(3): 85-95. [LIU Jiyong, ZHANG Feiyan, YIN Yanling. Lithofacies and paleogeographic study on late Cambrian hydrocarbon source rocks in Lower Yangtze region [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(3): 85-95.]
- [19] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4): 2000GC000109.
- [20] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [21] Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(7): 2657-2671.
- [22] Shields G, Stille P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(1-2): 29-48.
- [23] Bolhar R, van Kranendonk M J. A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates [J]. *Precambrian Research*, 2007, 155(3-4): 229-250.
- [24] Yu Z H, Li H M, Li M X, et al. Hydrothermal signature in the axial-sediments from the Carlsberg Ridge in the northwest Indian Ocean [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 180: 173-181.
- [25] Kato Y, Nakao K, Isozaki Y. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan: implications for an oceanic redox change [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(1): 15-34.
- [26] 赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(1): 141-167. [ZHAO Yanyan, LI Sanzhong, LI Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(1): 141-167.]
- [27] Allègre C, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25.
- [28] Kunzendorf H, Stoffers P, Gwozdz R. Regional variations of REE patterns in sediments from active plate boundaries [J]. *Marine Geology*, 1988, 84(3-4): 191-199.
- [29] Sugahara H, Sugitani K, Mimura K, et al. A systematic rare-earth elements and yttrium study of Archean cherts at the Mount Goldsworthy greenstone belt in the Pilbara Craton: implications for the origin of microfossil-bearing black cherts [J]. *Precambrian Research*, 2010, 177(1-2): 73-87.
- [30] Nozaki Y, Zhang J and Amakawa H. The fractionation between Y and Ho in the marine environment [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1-2): 329-340.
- [31] 杨宗玉, 罗平, 刘波, 等. 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组两套黑色岩系的差异及成因[J]. *岩石学报*, 2017, 33(6): 1893-1918. [YANG Zongyu, LUO Ping, LIU Bo, et al. The difference and sedimentation of two black rock series from Yurtus Formation during the earliest Cambrian in the Aksu area of Tarim Basin, Northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(6): 1893-1918.]
- [32] Alexander B W, Bau M, Andersson P, et al. Continentally-derived solutes in shallow Archean seawater: rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South

- Africa [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(2): 378-394.
- [33] Johannessen K C, Vander Roost J, Dahle H, et al. Environmental controls on biomineralization and Fe-mound formation in a low-temperature hydrothermal system at the Jan Mayen Vent Fields [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 202: 101-123.
- [34] Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 213-232.
- [35] 钱建民, 李海亭, 徐岳行, 等. 扬子地台东南缘黑色岩系(荷塘组)地球化学研究[J]. *矿物岩石*, 2010, 30(2): 95-102. [QIAN Jianmin, LI Haiting, XU Yuehang, et al. Study on the geochemical characteristics of black rock series from the Hetang Formation in southeast margin of Yangtze Platform [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2010, 30(2): 95-102.]
- [36] Pirajno F, Grey K. Chert in the Palaeoproterozoic Bartle Member, Killara Formation, Yerrida Basin, Western Australia: a rift-related playa lake and thermal spring environment? [J]. *Precambrian Research*, 2002, 113(3-4): 169-192.
- [37] Wang J G, Chen D Z, Wang D, et al. Petrology and geochemistry of chert on the marginal zone of Yangtze Platform, western Hunan, South China, during the Ediacaran-Cambrian transition [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(3): 809-829.
- [38] Zhou L, Wang Z X, Gao W L, et al. Provenance and tectonic setting of the Lower Cambrian Niutitang formation shales in the Yangtze platform, South China: implications for depositional setting of shales [J]. *Geochemistry*, 2019, 79(2): 384-398.
- [39] Planavsky N, Bekker A, Rouxel O J, et al. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(22): 6387-6405.