

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0203

危凯,陈孝红,王传尚.湘鄂西地区晚埃迪卡拉世—早寒武世硅质岩成因及其页岩气地质意义[J].地质科技通报,2020,39(2):20-30.

Wei Kai, Chen Xiaohong, Wang Chuanshang, et al. Origin of siliceous rocks in west Hunan and Hubei Provinces during Late Ediacaran-Early Cambrian, and its geological significance of shale gas[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 20-30.

湘鄂西地区晚埃迪卡拉世—早寒武世 硅质岩成因及其页岩气地质意义

危凯^{1,2}, 陈孝红^{1,2}, 王传尚^{1,2}, 刘安¹, 曾雄伟^{1,2}, 李志宏¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘要: 湖北宜昌地区在寒武系水井沱组取得页岩气重大突破后, 中扬子地区下寒武统富有机质页岩受到了更加广泛的关注。为了查明这套富有机质页岩的成因及其与下伏硅质岩之间的内在联系, 系统采集了鄂西宜昌地区鄂宜地2井岩家河组和湘西桃源、张家界地区留茶坡组—牛蹄塘组的硅质岩, 利用主量元素和稀土元素数据分析了硅质岩成因, 并探讨了不同地区、不同沉积模式及其对下寒武统富有机质页岩形成的意义。结果表明: ①鄂宜地2井岩家河组硅质岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值介于 0.30~0.68, 在 $Al-Fe-Mn$ 三角判别图和 $Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn)$ 图解上集中分布在沉积成因区; 稀土元素 Eu 异常不明显, 配分曲线为平坦模式, 且 $(La/Yb)_N$ 介于 1.01~1.81, 指示岩家河组硅质岩为沉积成因。②湘西桃源和张家界地区的硅质岩明显分为两种成因。留茶坡组硅质岩 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值介于 0.03~0.19, 在 $Al-Fe-Mn$ 三角图上靠近 Fe 一端, 稀土元素表现明显的 Eu 正异常, 且配分曲线以重稀土元素相对富集的左倾斜为主, 指示明显的热液成因; 牛蹄塘组硅质岩则表现相反, 指示沉积成因。③埃迪卡拉纪末期, 湘西斜坡地区靠近热液喷流中心, 因此留茶坡组硅质岩以热液成因为主, 而宜昌地区位于局限台地附近, 富硅热液因受到阻隔而无法进入, 因此硅质岩为沉积成因; 至寒武纪早期, 随着气候变暖、海平面上升, 湘西和鄂西地区海水连通, 因此该时期硅质岩均为沉积成因。埃迪卡拉纪末期的热液活动为海洋生物的繁盛提供了大量的磷等无机营养元素, 对下寒武统水井沱组/牛蹄塘组富有机质页岩的形成具有重要的意义。沉积成因的硅质页岩很可能是页岩气的有利相带, 这或许能为页岩气勘探提供一个新思路。

关键词: 湘鄂西; 晚埃迪卡拉世; 早寒武世; 硅质岩成因; 富有机质页岩

中图分类号: P581

文章编号: 1000-7849(2020)02-0020-11

收稿日期: 2019-09-04

Origin of siliceous rocks in west Hunan and Hubei Provinces during Late Ediacaran-Early Cambrian, and its geological significance of shale gas

Wei Kai^{1,2}, Chen Xiaohong^{1,2}, Wang Chuanshang^{1,2}, Liu An¹, Zeng Xiongwei^{1,2}, Li Zhihong¹

(1. Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China)

Abstract: Followed by the major breakthrough of shale gas in Shuijingtuo Formation of Yichang, Hubei Province, the organic-rich shale in Lower Cambrian has received much wider attention. In order to find out the internal relationship of the organic-rich shale and the underlying siliceous rocks, we have made a systematic study of the west Hubei and Hunan Provinces, including Yanjiahe Formation of YIDI-2 Well, Liuchapo-Niutitang Formation of Taoyuan and Zhangjiajie area. Based on the analysis of major elements and

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05034001-002); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160179; DD20190823)

作者简介: 危凯(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事沉积地球化学研究工作。E-mail: kaiwei1983@163.com

rare earth elements, we discuss in the paper the different origins of siliceous rocks during Late Ediacaran–Early Cambrian, as well as their significance of shale gas. The conclusions are reached: ①The $Al/(Al+Fe+Mn)$ values of YIDI-2 Well are between 0.30–0.68, close to the biogenic origin. In the $Al-Fe-Mn$ and $Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn)$ decision diagrams, the sample points are also in the non-hydrothermal area. There is no obvious Eu anomaly but flat partition curves in REE, with La_N/Yb_N values between 1.01–1.81, indicating the lack of hydrothermal activities and the origin of continental margin. Therefore, the siliceous rocks in Yanjiahe Formation of YIDI-2 Well are mainly of nonhydrothermal origin. ② In the Taoyuan and Zhangjiajie area of West Hunan Province, $Al/(Al+Fe+Mn)$ values of Liuchapo Formation are between 0.03–0.19, and the sample points are close to the Fe in the $Al-Fe-Mn$ diagram. Combined with the obvious Eu anomalies and left-inclined partition curves in REE, it is concluded that the siliceous rocks in Liuchapo Formation are hydrothermal origin. However, it has changed into non-hydrothermal origin for the siliceous rocks in Niutitang Formation, which can be inferred by the larger values of $Al/(Al+Fe+Mn)$ (0.29–0.70), the unobvious Eu anomalies and flat partition curves of REE. ③ During the later period of Ediacara, due to the short distance to the hydrothermal vents, a set of hydrothermal-origin cherts are developed on the west Hunan slope. As for the Yichang area in the restricted basin, because of the blocking of siliceous hydrothermal fluid, a set of dolostone is deposited. During the Early Cambrian, followed by the climate warming, sea-level rising and the sea water being connected, a set of biogenic chert is developed both in west Hunan slope and Yichang area. We conclude that the hydrothermal activities that occurred during Late Ediacaran should be of great significance for the generation of organic shales in Shuijingtuo or Niutitang Formations, because of the large supply of nutrient elements, such as phosphorus, for the flourishing of marine organism. Combined with the exploration results of Cambrian shale gas in South China, we consider that the nonhydrothermal siliceous shales are probably the favorable zones, and about to be the main direction of future exploration after more similar discoveries.

Key words: west Hunan and Hubei; Late Ediacaran; Early Cambrian; origin of siliceous rock; organic-rich shale

中国南方下古生界广泛发育下志留统和下寒武统2套富有机质的海相页岩,勘探开发潜力巨大^[1-4]。在构造相对简单的四川盆地,下志留统页岩气率先取得突破,如威远区块、长宁区块和涪陵区块^[5-6]。通过近年来的不懈努力,在湖北宜昌地区的下寒武统也实现了重大发现和突破^[7-9],使得页岩气这一绿色能源引起了社会更为广泛的关注。在上述取得突破的含气地层之下,均发育有一套硅质岩,即下志留统龙马溪组之下的五峰组和下寒武统水井沱组之下的岩家河组^[10-12]。值得思考的是,这些硅质岩的沉积是否与上覆富有机质页岩的形成存在某种内在联系?要查明这一问题,首先必须弄清硅质岩是如何形成的。

硅质可能的来源一般可分为硅质生物、热液或火山活动和富硅的岩石碎屑^[13]。由于较老地层中的硅质岩在镜下难以发现生物化石,加上后期的变质改造作用导致粒度细、成分复杂,因此较难获得可靠的岩石学证据,而元素地球化学的方法可以有效地解决这一问题。硅质岩中的Al、Ti、Fe、Mn等元素及一些稀土元素很少或几乎不受后期成岩作用的影响,在硅质岩成岩过程中保持稳定,可以用来示踪

硅质岩中硅的来源及成因^[14]。

目前,对扬子地区前寒武纪—寒武纪转折期硅质岩的成因存在两种明显不同的观点,多数研究者认为是热液成因,与中扬子地区广泛存在的热液活动有关,如黔东地区留茶坡组(或老堡组)^[15-16]、三峡地区的岩家河组^[17];但也有研究者认为是正常海水沉积,与生物有关^[18]。

为了查明扬子地区前寒武纪—寒武纪转折期硅质岩的成因,本次研究拟考察鄂西地区的鄂宜地2井、湘西地区的桃源叶溪垭剖面、桃源理公港剖面和张家界田坪剖面,对岩家河组、留茶坡组和牛蹄塘组硅质岩进行主量元素和稀土元素的分析,探讨硅质岩的不同成因和分布,及其对寒武系底部富有机质页岩形成的意义。

1 研究区概况

鄂宜地2井是位于湖北省宜昌市点军区土城乡的一口页岩气调查井(图1),该井在下寒武统水井沱组钻获了厚72 m的含气页岩段,解吸气含量为0.19~3.65 m³/t,是我国中扬子地区寒武系页岩气

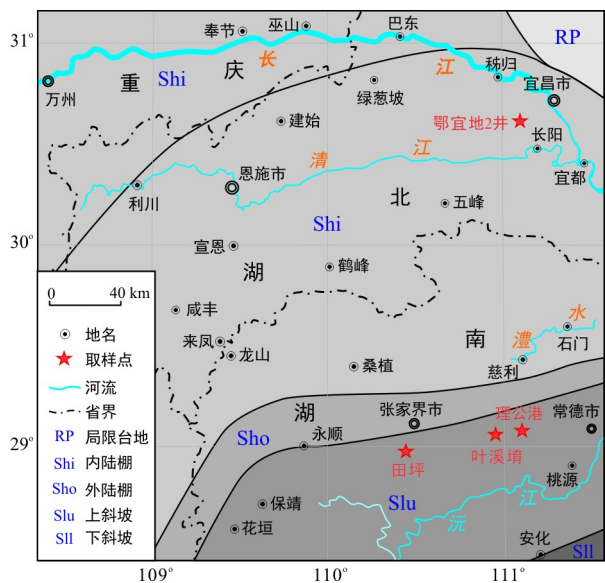


图1 研究区采样位置图(岩相古地理图据文献[19]修改)

Fig.1 The study area and sampling locations

的首口发现井^[7]。该井完钻井深 1 806 m, 自上而下相继钻遇白垩系石门组, 寒武系娄山关组、覃家庙组、石龙洞组、天河板组、石牌组、水井沱组、岩家河组, 完钻层位为埃迪卡拉系灯影组。鄂宜地 2 井岩家河组可分为上下两段, 下段以硅质岩、硅质白云岩夹硅质泥岩为主, 厚约 33 m, 上段以泥质灰岩夹炭质泥岩为主, 上覆地层为水井沱组炭质泥岩。根据陈孝红等^[8]在鄂宜地 2 井获得的碳同位素曲线, 在岩家河组一段上部存在一个显著的碳同位素负漂移 (NE1), 且这一负漂移可与全球其他典型剖面进行很好的对比, 由于在此负漂移之上即为小壳化石的首现位置, 因此可作为全球范围内埃迪卡拉系—寒武系界线划分的标志之一^[20] (图 2)。

为了与鄂西宜昌地区对比研究, 本次研究还考察了湖南桃源理公港—叶溪埡剖面和张家界田坪剖面 (图 1), 分析了留茶坡组 ($Z_2 l$) 和牛蹄塘组 ($\epsilon_1 n$) 硅质岩的主量和稀土元素, 对硅质岩成因进行了探讨。

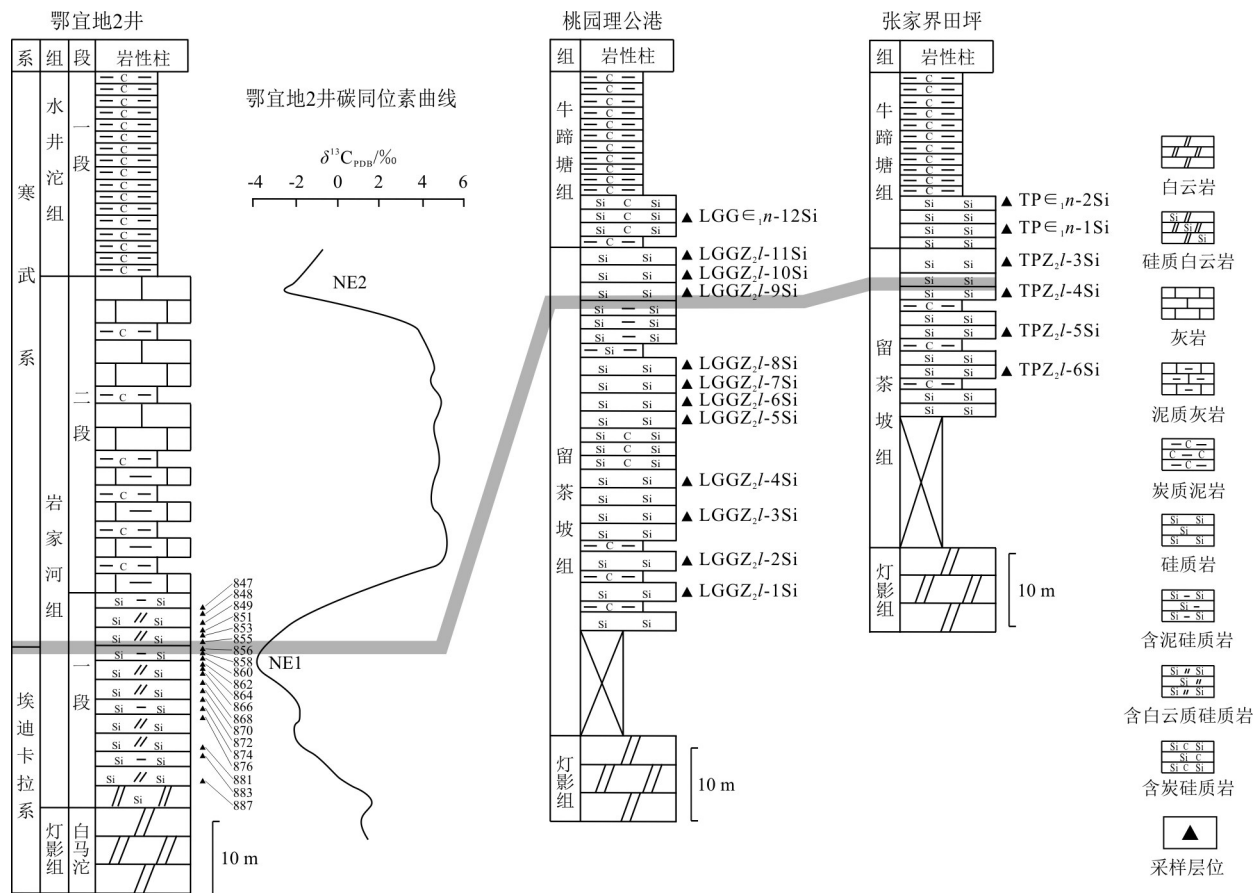


图2 湘鄂西岩家河组和留茶坡组地层对比图(碳同位素曲线据文献[8]修改)

Fig.2 Correlation of Yanjiahe Formation and Liuchapo Formation in west Hunan and Hubei Provinces

桃源理公港—叶溪埡剖面留茶坡组的岩性自下而上依次为: 黑色中层状硅质岩与炭质页岩互层、黑色中层状硅质岩、黑色中薄层状硅质岩、黑色薄层状炭质硅质岩、灰色中薄层状硅质岩; 寒武系牛蹄塘组底部

为黑色薄层状硅质岩, 向上转变为黑色炭质页岩。张家界田坪剖面留茶坡组的岩性自下而上依次为: 灰色中层状白云质硅质岩夹炭质页岩、黑色薄层状硅质岩、灰白色硅质岩, 顶部为一层黑色厚层状硅质

岩;寒武系牛蹄塘组底部为黑色薄层状含炭质硅质岩,向上渐变为黑色炭质页岩。由于前寒武纪地层中缺乏可供对比的生物化石,因此湘黔地区留茶坡组的时代划分长期存在争议,很多学者从岩性组合特征和生物地层学的角度,认为其应当与鄂西地区的灯影组为同期异相的地层^[21-22],也有学者依据含磷硅质岩中的 *Kaiyangties* 和 *Calacihexactina* 化石将留茶坡组顶部归入早寒武世,而在下部未发现带壳动物化石^[23]。笔者赞同将埃迪卡拉系—寒武系界线划在留茶坡组近顶部位置(图 2)。

2 样品采集和测试方法

对鄂宜地 2 井岩家河组,在岩心中自下而上采集了硅质岩样品 19 件,基本覆盖了岩家河组下段。采样中尽量避开了硅质泥岩和硅质白云岩夹层,并

且对所采样品进行了反复清洗,以避免钻井液和岩屑的污染。在桃源地区,埃迪卡拉系留茶坡组—寒武系牛蹄塘组剖面是由相近的理公港剖面 and 叶溪垭剖面组合而成。在剖面测制的基础上,共采集硅质岩样品 18 件,其中留茶坡组 13 件,牛蹄塘组 5 件。在张家界田坪剖面采集硅质岩样品 6 件,其中埃迪卡拉系留茶坡组 4 件,牛蹄塘组 2 件。剖面上采集的硅质岩样品经过筛选和清理,去除了节理裂隙中的石英脉和铁锰氧化物。

清理过的样品经碎样机粉碎、研磨至 0.071 mm (200 目)。主量元素和稀土元素的分析测试均在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成。主量元素(氧化物)含量分析采用玻璃熔片法在 X 射线荧光光谱仪 (AXIOS) 上测定,分析精度优于 6%。稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS-X Series II) 测定,分析精度优于 5%,测试结果见表 1~4。

表 1 鄂宜地 2 井岩家河组下段硅质岩主量元素分析结果
Table 1 Major element contents in siliceous rocks of Yanjiahe Formation, YIDI-2 Well

样号	井深/m	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	灼失	—Al/(Al+Fe+Mn)
		w _B /%												
847	1 776.0	62.00	11.99	4.80	1.33	0.984	2.46	5.86	0.206	0.636	0.226	0.014	8.86	0.58
848	1 776.7	62.84	11.31	3.62	1.52	2.60	2.27	5.27	0.217	0.614	1.520	0.013	7.60	0.61
849	1 777.7	74.50	7.81	2.59	2.12	0.713	1.57	3.70	0.165	0.403	0.111	0.020	5.83	0.53
851	1 778.6	73.59	8.54	2.72	1.64	0.946	1.57	3.87	0.169	0.501	0.365	0.018	5.54	0.58
853	1 779.1	63.45	9.44	3.37	1.77	5.14	1.81	4.15	0.203	0.521	3.430	0.014	6.03	0.56
855	1 779.9	91.80	1.62	0.713	1.77	0.326	0.308	0.59	0.125	0.084	0.050	0.027	2.22	0.30
856	1 780.6	63.73	9.97	2.68	1.54	5.33	1.60	4.58	0.212	0.616	3.820	0.010	5.46	0.62
858	1 781.1	64.09	12.66	3.25	1.72	1.45	2.03	5.82	0.203	0.734	1.020	0.015	6.45	0.64
860	1 781.8	60.87	15.24	3.24	2.02	0.522	2.64	6.70	0.224	0.895	0.313	0.013	6.65	0.67
862	1 782.4	59.50	6.33	1.87	1.46	7.78	5.71	2.94	0.139	0.321	0.446	0.021	13.13	0.57
864	1 783.0	84.84	5.32	1.03	1.67	0.657	0.60	2.93	0.138	0.380	0.434	0.020	1.67	0.57
866	1 783.5	88.25	3.50	0.801	3.01	0.364	0.55	1.82	0.128	0.278	0.054	0.036	0.723	0.38
868	1 784.6	83.98	5.89	1.20	1.73	0.365	0.765	3.23	0.133	0.418	0.171	0.019	1.75	0.58
870	1 785.5	69.49	9.23	2.16	1.70	2.80	2.70	4.51	0.163	0.619	0.499	0.016	5.74	0.62
872	1 786.5	73.14	10.56	2.03	1.44	0.626	1.67	5.52	0.181	0.911	0.213	0.013	3.33	0.68
874	1 787.5	65.30	7.48	1.72	1.44	5.23	4.54	3.72	0.146	0.506	0.090	0.020	9.50	0.62
876	1 788.5	63.36	2.82	1.32	2.69	8.78	5.73	1.45	0.114	0.225	0.150	0.037	12.90	0.32
881	1 791.9	71.38	3.59	0.939	1.73	5.96	4.25	1.69	0.108	0.293	0.082	0.056	9.62	0.47
883	1 792.8	82.46	4.78	1.30	2.03	1.33	1.43	2.40	0.144	0.384	0.084	0.030	3.29	0.49
887	1 795.75	70.46	10.29	1.52	1.88	1.99	2.35	5.32	0.154	0.749	0.137	0.017	4.75	0.67

3 结果与讨论

3.1 鄂宜地 2 井岩家河组硅质岩的成因

硅质岩中某些主量元素指标常可以用来指示其成因或来源。早有学者通过对东太平洋洋脊附近的高温热流沉积物研究发现,受高温热流影响的沉积物一般富集 Fe、Mn 等元素而匮乏 Al、Ti 等元素,通常 Al、Ti 的富集与陆源物质的输入有关,提出一般

海相沉积物的 Al/(Al+Fe+Mn)值不随时间变化,是衡量沉积物中热液组分的重要指数,这个比值随着离洋脊扩张中心距离的增加而增大,即随热液沉积物的减少而变大^[24]。后来进一步的研究表明,位于东太平洋洋隆的热液沉积物 Al/(Al+Fe+Mn)值为 0.01,深海钻探计划 Leg32 航次的热液硅质岩该比值平均为 0.12,而日本中部三叠纪 Kamiaso 生物成因的半远洋硅质岩的比值为 0.60^[25-26]。

表 2 鄂宜地 2 井岩家河组下段硅质岩稀土元素分析结果
Table 2 Rare earth element contents in siliceous rocks of Yanjiahe Formation, YIDI-2 Well

样号	井/m	$w_B/10^{-6}$																	δEu	δCe
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	$(La/Yb)_N$		
847	1 776.0	24.40	36.20	4.93	19.20	3.58	0.76	3.32	0.55	3.41	0.74	2.11	0.34	2.13	0.30	22.20	102.0	1.08	1.03	0.78
848	1 776.7	42.50	63.20	9.52	37.50	6.90	1.46	6.44	1.04	5.98	1.22	3.18	0.45	2.66	0.35	41.80	182.4	1.51	1.03	0.74
849	1 777.7	16.20	23.10	2.97	11.30	2.08	0.44	1.91	0.31	1.89	0.40	1.19	0.19	1.26	0.18	11.50	63.4	1.21	1.04	0.78
851	1 778.6	20.00	30.30	4.24	16.50	3.14	0.68	2.76	0.45	2.66	0.53	1.48	0.23	1.41	0.19	16.00	84.6	1.34	1.08	0.78
853	1 779.1	36.60	51.70	7.71	30.00	5.28	1.12	5.06	0.79	4.58	0.92	2.43	0.34	1.97	0.26	32.10	148.8	1.75	1.02	0.73
855	1 779.9	2.42	3.34	0.39	1.49	0.28	0.11	0.24	0.04	0.26	0.06	0.18	0.03	0.22	0.03	1.76	9.1	1.04	1.99	0.80
856	1 780.6	52.80	72.00	10.70	41.60	7.70	1.76	7.13	1.17	6.94	1.40	3.62	0.48	2.78	0.36	47.00	210.4	1.79	1.11	0.71
858	1 781.1	27.60	37.70	5.05	18.90	3.28	0.73	3.07	0.49	3.01	0.65	1.89	0.30	2.06	0.28	21.30	105.0	1.26	1.08	0.75
860	1 781.8	25.50	36.90	4.47	16.70	2.98	0.61	2.60	0.40	2.50	0.56	1.71	0.30	2.07	0.30	16.70	97.6	1.16	1.03	0.81
862	1 782.4	18.60	30.60	4.63	18.50	3.41	0.78	3.09	0.49	2.70	0.53	1.33	0.18	1.17	0.15	16.40	86.2	1.50	1.13	0.78
864	1 783.0	19.00	37.80	5.38	22.20	4.24	0.95	3.71	0.56	3.00	0.56	1.38	0.18	1.12	0.15	15.50	100.2	1.60	1.12	0.89
866	1 783.5	8.34	14.70	1.71	6.40	1.15	0.33	1.02	0.16	0.90	0.19	0.56	0.09	0.59	0.09	5.04	36.2	1.33	1.43	0.92
868	1 784.6	15.50	27.20	3.56	13.70	2.54	0.54	2.19	0.33	1.75	0.36	0.95	0.14	0.91	0.12	9.82	69.8	1.61	1.07	0.87
870	1 785.5	36.60	64.10	9.44	40.00	8.03	1.74	6.77	1.05	5.38	0.99	2.43	0.33	1.99	0.26	28.50	179.1	1.73	1.11	0.82
872	1 786.5	35.70	61.00	7.38	28.20	4.91	0.99	4.40	0.68	3.88	0.80	2.25	0.34	2.18	0.30	22.00	153.0	1.54	1.00	0.89
874	1 787.5	24.60	36.00	4.56	16.50	2.72	0.59	2.47	0.38	2.24	0.46	1.29	0.20	1.28	0.18	12.70	93.5	1.81	1.07	0.80
876	1 788.5	15.60	24.40	3.54	14.40	2.55	0.55	2.23	0.34	1.87	0.36	0.96	0.13	0.82	0.11	10.20	67.9	1.79	1.083	0.78
881	1 791.9	11.20	17.40	2.35	9.01	1.64	0.39	1.44	0.22	1.31	0.27	0.72	0.11	0.74	0.10	7.01	46.9	1.43	1.191	0.80
883	1 792.8	12.80	20.00	2.59	9.96	1.72	0.47	1.56	0.25	1.46	0.31	0.88	0.13	0.87	0.12	8.43	53.1	1.39	1.347	0.82
887	1 795.75	23.10	36.40	4.59	17.20	3.13	0.69	2.80	0.45	2.71	0.56	1.59	0.25	1.61	0.22	15.20	95.3	1.35	1.094	0.83

表 3 湖南桃源叶溪垭、理公港和张家界田坪剖面留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩主量元素分析结果

Table 3 Major element contents in siliceous rocks of Liuchapo-Niutitang Formation in Yexiyu section, Ligonggang section of Taoyuan, Tianping section of Zhangjiajie, Hunan Province

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	灼失	Al/(Al+
	w _B /%												Fe+Mn)
YXY _∈ _{1n-6} Si	81.81	6.770	0.030	1.09	0.191	0.614	1.610	0.840	0.346	0.020	0.009 4	6.250	0.80
YXY _∈ _{1n-5} Si	85.10	4.860	0.013	0.93	0.071	0.412	1.140	0.684	0.254	0.016	0.011	6.170	0.77
YXY _∈ _{1n-4} Si	82.50	6.390	0.233	1.03	0.045	0.535	1.480	0.825	0.311	0.016	0.008 9	6.230	0.77
YXY _∈ _{1n-3} Si	84.72	4.410	0.011	0.993	0.119	0.399	1.000	0.613	0.236	0.023	0.008 9	7.090	0.74
YXYZ ₂ <i>l</i> -2Si	69.53	7.390	1.360	0.981	0.135	5.930	1.190	0.590	0.468	0.061	0.020	12.020	0.69
YXYZ ₂ <i>l</i> -3Si	76.09	8.320	0.370	0.659	0.047	0.684	2.180	1.080	0.567	0.017	0.0069	9.530	0.85
LGG _∈ _{1n-12} Si	91.62	3.010	0.521	1.82	0.023	0.428	0.867	0.070	0.196	0.033	0.021	0.696	0.46
LGGZ ₂ <i>l</i> -11Si	94.73	1.570	0.360	2.16	0.022	0.218	0.482	0.060	0.076	0.028	0.024	<0.001	0.29
LGGZ ₂ <i>l</i> -10Si	88.82	4.040	1.380	1.54	0.254	0.482	1.480	0.072	0.183	0.224	0.024	0.991	0.49
LGGZ ₂ <i>l</i> -9Si	94.67	0.804	0.047	3.37	0.042	0.153	0.200	0.062	0.050	0.021	0.036	<0.001	0.13
LGGZ ₂ <i>l</i> -8Si	95.67	0.777	0.030	2.31	0.028	0.129	0.140	0.065	0.046	0.019	0.028	0.423	0.18
LGGZ ₂ <i>l</i> -7Si	96.53	0.563	0.132	1.42	0.019	0.117	0.123	0.060	0.043	0.016	0.046	0.568	0.19
LGGZ ₂ <i>l</i> -6Si	96.00	0.413	0.308	2.06	0.048	0.100	0.086	0.058	0.024	0.038	0.024	0.467	0.10
LGGZ ₂ <i>l</i> -5Si	95.37	0.483	0.0044	2.86	0.025	0.105	0.092	0.060	0.021	0.038	0.039	0.495	0.10
LGGZ ₂ <i>l</i> -4Si	95.35	0.410	0.072	3.08	0.200	0.104	0.080	0.062	0.021	0.143	0.055	<0.001	0.08
LGGZ ₂ <i>l</i> -3Si	95.69	0.368	0.087	2.60	0.043	0.106	0.071	0.069	0.022	0.017	0.043	0.511	0.08
LGGZ ₂ <i>l</i> -2Si	94.57	0.231	0.011	4.37	0.015	0.088	0.024	0.059	0.015	0.014	0.058	<0.001	0.03
LGGZ ₂ <i>l</i> -1Si	95.52	0.490	0.594	2.60	0.024	0.110	0.102	0.064	0.025	0.015	0.046	<0.001	0.09
TP _∈ _{1n-1} Si	86.54	5.620	0.258	1.36	0.238	0.498	2.860	0.092	0.352	0.246	0.010	1.120	0.70
TP _∈ _{1n-2} Si	86.56	3.630	1.180	3.04	0.090	0.277	2.010	0.089	0.230	0.103	0.041	2.020	0.36
TPZ ₂ <i>l</i> -3Si	94.18	1.100	0.017	2.85	0.037	0.127	0.475	0.066	0.136	0.023	0.040	<0.001	0.20
TPZ ₂ <i>l</i> -4Si	84.72	6.000	2.030	1.07	0.030	0.516	2.770	0.091	0.386	0.031	0.007 9	1.500	0.58
TPZ ₂ <i>l</i> -5Si	93.12	1.200	0.247	3.42	0.114	0.160	0.525	0.078	0.138	0.064	0.031	<0.001	0.18
TPZ ₂ <i>l</i> -6Si	95.15	0.626	0.243	2.79	0.023	0.104	0.166	0.076	0.042	0.013	0.045	0.232	0.12

鄂宜地 2 井岩家河组硅质岩的 Al/(Al+Fe+Mn) 值在 0.30~0.68 之间, 平均值 0.55, 与生物成因硅质岩的比值较接近。前人根据对热液成因与非

热液成因硅质岩的统计研究, 分别拟定了判别硅质岩成因的 Al—Fe—Mn 三角判别图解和 Fe/Ti—Al/(Al+Fe+Mn) 判别图解^[25]。在 Al—Fe—Mn

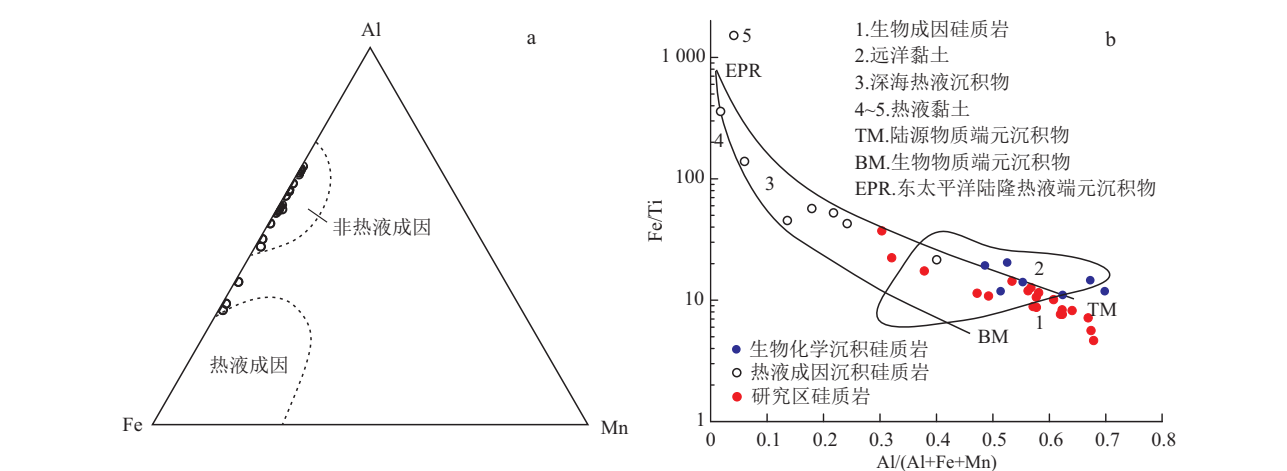


图 3 鄂宜地 2 井岩家河组硅质岩样品的 Al—Fe—Mn 图解(a)和 Fe/Ti—Al/(Al+Fe+Mn)图解(b)(底图据文献[25,27]修改)

Fig.3 Al—Fe—Mn(a) and Fe/Ti—Al/(Al+Fe+Mn) (b) diagrams for siliceous rocks in Yanjiahe Formation, YIDI-2 Well

表 4 湖南桃源叶溪垅、理公港和张家界田坪剖面留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩稀土元素分析结果

Table 4 Rare earth element contents in siliceous rocks of Liuchapo-Niutitang Formation in Yexiyu section, Ligonggang section of Taoyuan, Tianping section of Zhangjiajie, Hunan Province

样品名	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe
YXY∈ _{1n-6}	14.60	29.20	2.97	10.20	1.38	0.30	1.21	0.19	1.26	0.30	0.94	0.16	1.18	0.16	7.80	64.05	1.17	1.09	1.05
YXY∈ _{1n-5}	12.10	23.40	2.37	7.99	1.10	0.27	1.05	0.18	1.26	0.29	0.87	0.14	0.95	0.13	7.81	52.10	1.20	1.18	1.04
YXY∈ _{1n-4}	15.20	27.20	2.70	8.91	1.11	0.29	1.01	0.16	1.11	0.27	0.88	0.15	1.08	0.16	7.38	60.23	1.33	1.29	1.01
YXY∈ _{1n-3}	12.50	23.50	2.43	8.43	1.22	0.28	1.07	0.17	1.11	0.26	0.83	0.14	0.99	0.15	7.27	53.08	1.19	1.15	1.01
YXYZ ₂ -2	26.50	48.80	4.80	18.00	3.31	0.78	2.94	0.48	2.90	0.62	1.81	0.30	1.98	0.27	17.70	113.49	1.26	1.17	1.03
YXYZ ₂ -3	22.50	42.10	4.30	14.80	1.88	0.39	1.82	0.29	1.99	0.48	1.48	0.26	1.71	0.25	14.50	94.25	1.24	0.99	1.02
LGGE∈ _{1n-12}	5.02	8.41	1.13	4.27	0.91	0.27	0.90	0.16	1.08	0.23	0.69	0.12	0.81	0.11	6.08	24.11	0.58	1.40	0.84
LGGE ₂ -11	3.38	5.40	0.57	1.96	0.36	0.09	0.30	0.04	0.25	0.05	0.16	0.03	0.18	0.02	1.36	12.79	1.77	1.30	0.92
LGGE ₂ -10	3.00	5.90	0.96	5.08	2.00	0.53	1.80	0.30	1.80	0.34	0.85	0.12	0.77	0.10	8.46	23.55	0.37	1.31	0.82
LGGE ₂ -9	2.39	3.16	0.52	1.97	0.39	0.15	0.37	0.07	0.50	0.12	0.35	0.06	0.43	0.07	2.61	10.54	0.52	1.85	0.67
LGGE ₂ -8	3.93	6.53	0.99	4.24	0.85	0.21	0.82	0.16	1.18	0.26	0.75	0.12	0.84	0.12	7.03	21.00	0.44	1.18	0.79
LGGE ₂ -7	2.58	4.96	0.72	3.27	0.64	0.22	0.63	0.12	0.89	0.23	0.75	0.14	0.98	0.15	8.43	16.28	0.25	1.63	0.86
LGGE ₂ -6	4.42	7.15	1.08	4.81	1.12	0.25	1.15	0.20	1.38	0.32	1.00	0.16	1.11	0.16	11.60	24.31	0.38	1.03	0.78
LGGE ₂ -5	3.41	6.19	1.04	4.90	1.32	0.34	1.38	0.28	1.98	0.44	1.29	0.21	1.43	0.20	13.90	24.41	0.22	1.18	0.78
LGGE ₂ -4	4.30	4.24	0.91	4.37	1.88	0.51	2.08	0.35	2.23	0.47	1.30	0.20	1.27	0.18	15.70	24.29	0.32	1.21	0.51
LGGE ₂ -3	1.94	2.54	0.35	1.53	0.38	0.12	0.46	0.09	0.69	0.17	0.54	0.08	0.65	0.09	6.53	9.64	0.28	1.35	0.73
LGGE ₂ -2	1.75	3.09	0.74	3.81	1.50	0.47	1.67	0.36	2.43	0.46	1.12	0.16	1.04	0.12	10.30	18.72	0.16	1.39	0.64
LGGE ₂ -1	4.30	4.02	0.96	3.82	0.82	0.20	0.82	0.15	1.00	0.22	0.64	0.10	0.71	0.10	7.31	17.86	0.57	1.14	0.47
TPPE∈ _{1n-1}	18.80	26.40	3.87	14.20	2.55	0.59	2.42	0.39	2.39	0.51	1.47	0.24	1.66	0.24	14.00	75.73	1.07	1.11	0.73
TPPE∈ _{1n-2}	14.70	19.80	2.97	10.70	1.79	0.48	1.71	0.27	1.64	0.34	1.00	0.17	1.19	0.17	8.40	56.93	1.16	1.29	0.71
TPZ ₂ -3	2.23	3.37	0.54	1.83	0.25	0.31	0.28	0.05	0.36	0.09	0.31	0.05	0.40	0.06	2.38	10.12	0.53	5.50	0.73
TPZ ₂ -4	14.30	20.30	2.25	6.40	0.56	0.19	0.67	0.10	0.84	0.24	0.87	0.18	1.35	0.20	6.14	48.45	1.00	1.46	0.85
TPZ ₂ -5	6.44	9.20	1.40	4.87	0.76	0.44	0.70	0.11	0.71	0.16	0.46	0.08	0.54	0.08	3.91	25.95	1.12	2.83	0.73
TPZ ₂ -6	0.73	1.40	0.20	0.86	0.25	0.14	0.31	0.07	0.57	0.13	0.40	0.06	0.48	0.07	3.35	5.67	0.14	2.36	0.87

三角判别图上,鄂宜地2井岩家河组硅质岩样品除3个样品落在非热液成因和热液成因之间外,其余样品均集中落在非热液成因硅质岩区域内(图3-a)。在 $Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn)$ 图解上,硅质岩样品则基本落在生物成因硅质岩的一端(图3-b)。因此,从硅质岩主量元素分析结果来看, $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值、 $Al-Fe-Mn$ 三角判别图解和 $Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn)$ 判别图解的分析结果一致表明,鄂宜地2井岩家河组硅质岩以非热液的沉积成因为主。

此外,由于硅质岩中的稀土元素化学性质较为稳定,受后期成岩作用的影响较弱,因此其地球化学特征一般记录了地质历史时期重要的地质信息,尤其是对于处在特殊时期或关键性层位中的硅质岩而言,其成因特征往往对盆地构造活动及古环境的恢复具有重要启示意义。稀土元素中的Eu异常也常被用来指示海底热液活动。鄂宜地2井岩家河组硅质岩的 δEu 值除底部1个和中部2个样品较高(分别为1.35、1.43和1.99)外,其余样品均在1.10以下,介于1.00~1.19之间(表2),没有明显的Eu异常,表明硅质岩与热液活动总体上没有明显的关系。已有的研究表明,大陆边缘硅质岩的 $(La/Yb)_N$ 平均值为1.1~1.4,洋脊附近硅质岩的 $(La/Yb)_N$ 平均值为0.3,深海平原硅质岩则介于两者之间^[28]。鄂宜地2井岩家河组硅质岩的 $(La/Yb)_N$ 介于1.01~1.81之间,平均值为1.46,表现为明显远离洋脊的大陆边缘硅质岩特征。另外,从稀土元素配分曲线来看(图4),鄂宜地2井岩家河组硅质岩的配分曲线表现为明显的平坦模式,并未表现出典型的火山—热液来源的、重稀土元素相对富集的左倾斜模式。因此从稀土元素结果可推断,鄂宜地2井岩家河组

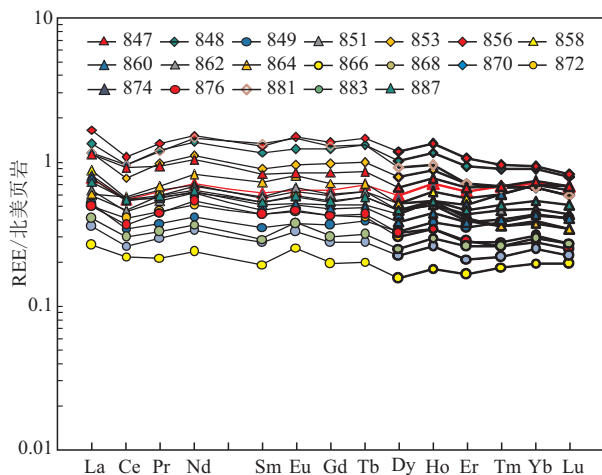


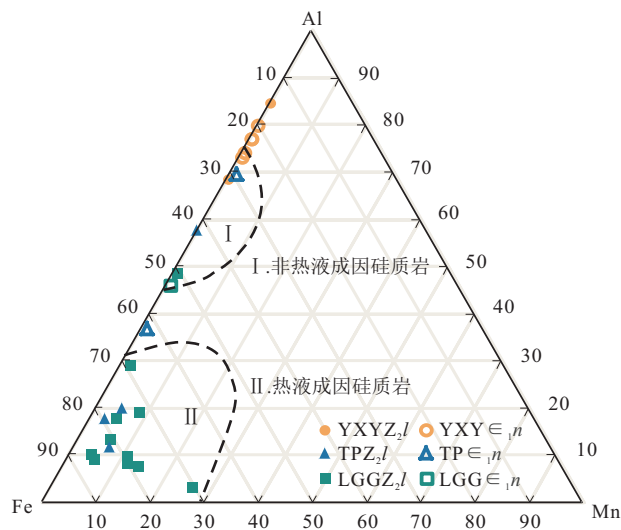
图4 鄂宜地2井岩家河组硅质岩样品的REE北美页岩标准化配分模式

Fig.4 NASC-normalized REE patterns for siliceous rocks in Yanjiahe Formation, YIDI-2 Well

硅质岩应该以非热液沉积成因为主。

3.2 湘西留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩成因

主量元素的分析结果显示,桃源叶溪垭、桃源理公港和张家界田坪留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值在0.03~0.85之间,表明硅质岩既有热液成因,也有非热液的沉积成因。进一步分析发现,留茶坡组顶部以下硅质岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值明显表现为低值,而在留茶坡组顶部及上覆牛蹄塘组的硅质岩则为极高值,如叶溪垭剖面留茶坡组顶部和牛蹄塘组底部6个样品的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值介于0.69~0.85之间,平均值高达0.77;桃源理公港剖面留茶坡组中上部及以下9个样品的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值介于0.03~0.19之间,平均值0.11,但留茶坡组顶部和牛蹄塘组底部3个样品分别为0.49、0.29和0.46;张家界田坪剖面留茶坡组中部2个样品为0.12和0.18,但留茶坡组顶部1个样品和牛蹄塘组底部3个样品分别为0.58、0.20、0.36和0.70。 $Al-Fe-Mn$ 三角判别图(图5)也能够很好地区分上述两种不同硅质岩的成因。理公港剖面的样品主要为留茶坡组,基本落在靠近Fe的一端,落入热液成因硅质岩区,仅留茶坡组近顶部和牛蹄塘组底部的2个样品离Fe的一端略远,落入非热液成因区。田坪剖面样品较少,但仍可看出,留茶坡组除了近顶部1个样品之外,其余3个样品均靠近Fe的一端,而牛蹄塘组2个样则靠近Al一端。叶溪垭剖面的硅质岩主要来自留茶坡组顶部和牛蹄



YXY.桃源叶溪垭; LGG.桃源理公港; TP.张家界田坪; Z₂l.埃迪卡拉系留茶坡组; ∈_{1n}.寒武系牛蹄塘组

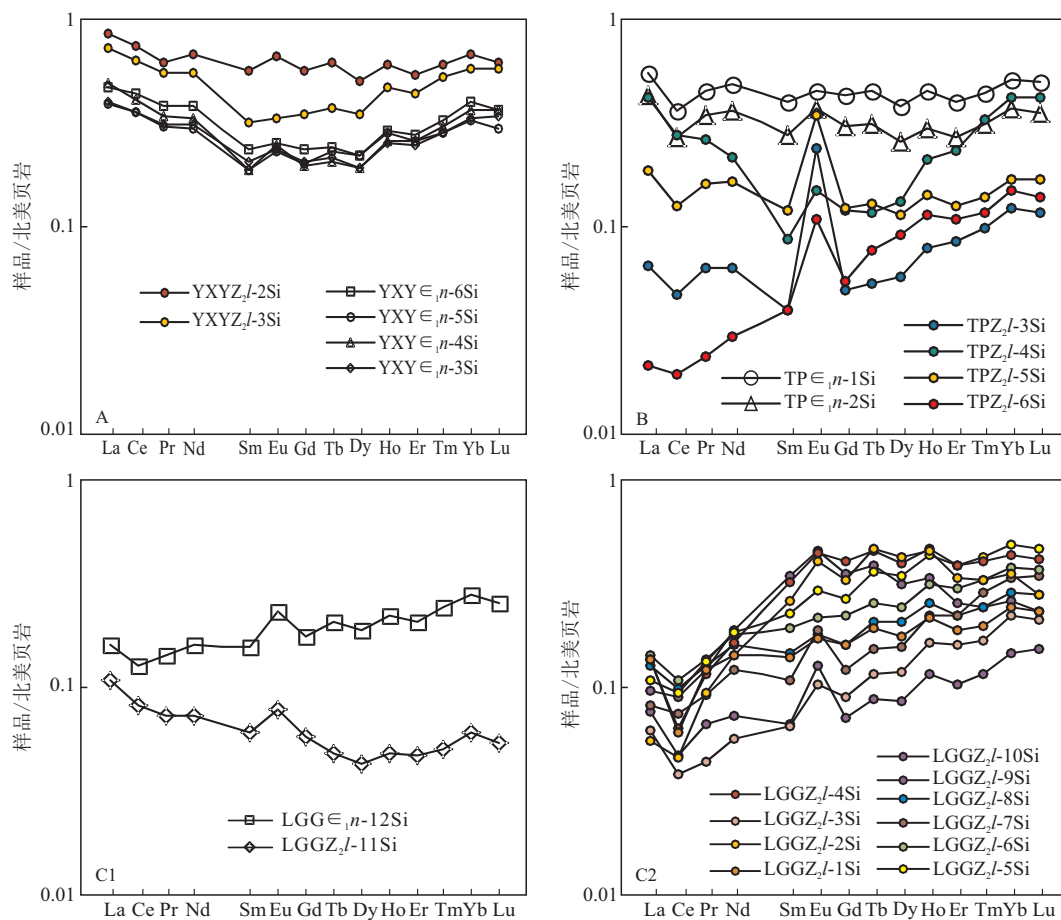
图5 湖南湘西留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩Al-Fe-Mn三角图

Fig.5 Al-Fe-Mn diagram for siliceous rocks of Liuchapo-Niutitang Formation in west Hunan Province

塘组底部,样品均落在靠近 Al 的一端,基本位于非热液成因区上方靠近 Al 端元一侧。上述结果明显表明,湘西地区留茶坡组硅质岩以热液成因为主,至留茶坡组顶部以及牛蹄塘组底部则转换为非热液成因。

稀土元素也可以反映这两种硅质岩在成因上的区别。稀土元素中的 Eu 异常常被用来指示海底热液活动^[29-32]。已有研究表明,若 Eu 表现为正异常,则表示与含磷的热液活动有关;若 Eu 表现为负异常,则表示与含铁锰氧化物的热液有关^[33]。

从北美页岩标准化的稀土元素配分曲线来看(图 6),桃源叶溪埡剖面留茶坡组顶部和牛蹄塘组的 6 个硅质岩样品 Eu 正异常不明显;张家界田坪剖面留茶坡组 4 个样品表现明显的 Eu 正异常,而牛蹄塘组 2 个样品则不明显;桃源理公港剖面除了留茶坡组中部和下部 5 个样品有明显的 Eu 正异常之外,其余样品均不明显。总的来看,湘西地区 3 个剖面硅质岩的 Eu 正异常主要出现在埃迪卡拉系留茶坡组中部及下部,很可能指示了该沉积时期存在含磷的热液活动。



A.桃源叶溪埡剖面;B.张家界田坪剖面;C1.桃源理公港剖面留茶坡组顶部—牛蹄塘组;C2.桃源理公港剖面留茶坡组

图 6 湖南桃源和张家界地区留茶坡组—牛蹄塘组硅质岩 REE 北美页岩标准化配分曲线图

Fig.6 NASC-normalized REE patterns for siliceous rocks of Liuchapo-Niutitang Formation in Taoyuan and Zhangjiajie area, west Hunan Province

此外,3 个剖面硅质岩在北美页岩标准化稀土元素配分曲线的形态上明显可划分为两类。一类是重稀土元素相对富集的左倾斜状,体现了火山—热液来源和开放洋盆环境的典型特征,该类曲线形态主要存在于张家界田坪剖面留茶坡组 2 个样品和桃源理公港剖面留茶坡组的几乎全部样品(顶部 LGGZ₂-11Si 除外)。另一类则为轻、重稀土元素均相对不富集的平坦状,体现了远离陆源区的大陆边缘和深海盆地背景^[34],该类曲线形态主要存在于叶溪

埡剖面留茶坡组顶部和牛蹄塘组的全部 6 个样品、张家界田坪剖面牛蹄塘组的 2 个样品和桃源理公港剖面留茶坡组顶部的 1 个样品中。

综合以上稀土元素的特征可见,3 个剖面的留茶坡组主要表现为明显的 Eu 异常和重稀土元素相对富集、左倾斜的配分曲线形态,指示了湘西地区埃迪卡拉纪晚期硅质岩的形成很可能与含磷的热液有关;而留茶坡组顶部以及寒武系牛蹄塘组硅质岩的 Eu 正异常不明显,且配分曲线转变为平坦模式,指

示了寒武纪早期硅质岩为非热液的沉积成因,以及远离陆源区的大陆边缘和深海盆地背景。

3.3 不同成因的硅质岩沉积模式及页岩气意义

埃迪卡拉纪晚期,中扬子地台广泛发育热液喷流系统,这种深部富硅磷质的热液流体沿着台盆转换带断裂处上涌,以烟囱或热泉的形式在台缘海底发生卸载。湖南桃源叶溪垭、理公港和张家界田坪

位于湘西斜坡地区(图1),靠近热液喷流中心,因此该时期沉积的留茶坡组硅质岩以热液成因为主。宜昌地区位于靠近局限台地的内陆棚区(图1),富硅热液因受到阻隔而无法进入,因此该地区硅质岩为沉积成因。至寒武纪早期,随着气候变暖、海平面上升,湘西和鄂西地区海水得以连通,该时期硅质岩均为沉积成因(图7-A)。

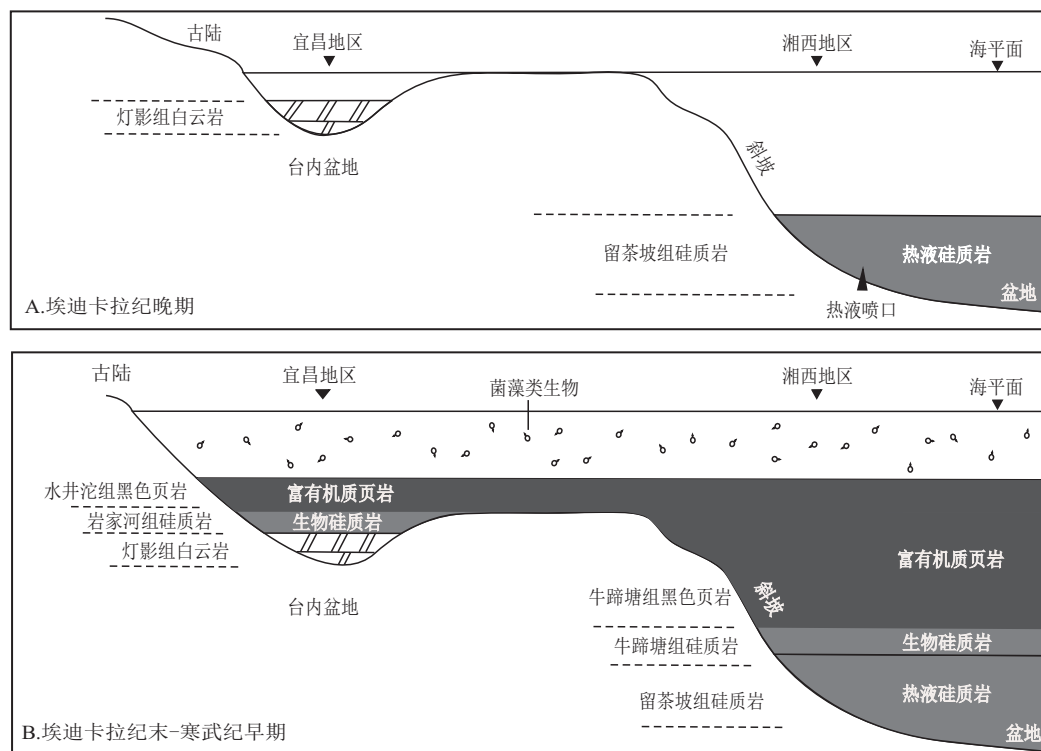


图7 湘鄂西地区埃迪卡拉纪—寒武纪转折期硅质岩和黑色页岩沉积模式

Fig.7 Deposition model of siliceous rocks and black shales in west Hunan and Hubei Provinces during the transition period of Ediacara-Cambrian

早寒武世早期,随着气候变暖和全球范围内的海平面上升,海水连通,海底热液活动带来了大量的磷等无机营养元素,促进了菌藻类等海洋生物的繁盛,因此在这一时期,湘西地区沉积了一套牛蹄塘组非热液成因硅质岩,在鄂西地区也同时沉积了一套岩家河组非热液成因硅质岩(图7-B)。随着气候持续变暖,海平面持续上升,在湘西地区和鄂西地区分别沉积了牛蹄塘组和水井沱组富有机质页岩。随着宜昌地区寒武系水井沱组页岩气的突破,该套页岩目前已成为中扬子地区页岩气勘探的主要目的层之一。

下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组是我国南方海相页岩气勘探的优选层位,且中国南方牛蹄塘组总有机碳含量普遍高于龙马溪组。然而从近年来中国南方寒武系页岩气勘探成果来看,仅在鄂西宜昌地区的水井沱组和川西南犍为等地区筇竹寺组

取得了突破。这两个地区的富有机质页岩从厚度、 $w(\text{TOC})$ 等指标来看并不是区域上最优的,但相同之处是在富有机质页岩之下各有一套重要的非热液成因的硅质岩,即岩家河组和麦地坪组硅质岩。结合本文分析认为,这种非热液成因的硅质页岩相很可能是页岩气的有利相带,将来如果能有更多勘探发现能加以验证,则可能为寒武系页岩气勘探指明了方向。

4 结 论

(1)鄂西地区鄂宜地2井岩家河组的硅质岩为沉积成因,而在湘西地区,上埃迪卡拉统留茶坡组硅质岩以热液成因为主,至下寒武统牛蹄塘组硅质岩则以沉积成因为主。

(2)埃迪卡拉纪晚期,湘西斜坡地区靠近热液喷

流中心,因此留茶坡组硅质岩以热液成因为主,而宜昌地区靠近局限台地,富硅热液因受到阻隔而无法延伸在该地区,因此硅质岩以沉积成因为主。早寒武世早期,随着气候变暖和海平面上升,海水得以连通,湘西斜坡地区和鄂西宜昌地区均沉积了一套非热液成因的硅质岩。

(3)埃迪卡拉纪末期的热液活动为海洋生物的繁盛提供了大量的磷等无机营养元素,对下寒武统水井沱组/牛蹄塘组富有机质页岩的形成具有重要的意义。结合中国南方寒武系页岩气勘探成果来看,沉积成因的硅质页岩相应是页岩气的有利相带,这可能为未来页岩气勘探指明了一个方向。

参考文献:

- [1] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三):南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.
- [2] 张丽雅,李艳霞,李净红,等.页岩气成藏条件及中上扬子区志留系页岩气勘探前景分析[J].地质科技情报,2011,30(6):90-93.
- [3] 赵瞻,余谦,周小琳,等.重庆黔江地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件[J].地质科技情报,2017,36(3):122-129.
- [4] 吴小力,李荣西,李尚儒,等.下扬子地区海陆过渡相页岩气成藏条件与主控因素:以溱乐坳陷二叠系乐平组为例[J].地质科技情报,2018,37(1):160-168.
- [5] 张大伟.中国非常规油气资源及页岩气未来发展趋势[J].国土资源情报,2016,11:3-8.
- [6] 郭彤楼,张汉荣等四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J].石油勘探与开发,2014,41(1):28-36.
- [7] 陈孝红,王传尚,刘安,等.湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J].中国地质,2017,44(1):188-189.
- [8] 陈孝红,危凯,张保民,等.湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J].中国地质,2018,45(2):207-226.
- [9] 陈孝红,张保民,陈林,等.鄂西宜昌地区晚奥陶世一早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J].地球学报,2018,39(3):257-268.
- [10] 张同伟,张亚军,贾敏,等.中国南方寒武系海相页岩含气性主控因素的科学问题[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(4):572-579.
- [11] 罗胜元,刘安,李海,等.中扬子宜昌地区寒武系水井沱组页岩含气性及影响因素[J].石油实验地质,2019,41(1):56-67.
- [12] 李海,刘安,罗胜元,等.鄂西宜昌斜坡区寒武系页岩储层发育特征:以鄂宜页1井为例[J].石油实验地质,2019,41(1):76-82.
- [13] 邱振,王清晨.广西来宾中上二叠统硅质岩海底热液成因的地球化学证据[J].中国科学:地球科学,2011,41(5):725-737.
- [14] Murry R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications[J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(3/4): 213-232.
- [15] 张位华,姜立君,高慧,等.贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):174-178.
- [16] 杨恩林,陈恨水,陈焕,等.黔东留茶坡组硅质岩元素地球化学特征与形成环境[J].矿物学报,2011,31(3):406-411.
- [17] 胡亚,陈孝红.三峡地区前寒武纪-寒武纪转折期黑色页岩地球化学特征及其环境意义[J].地质科技情报,2017,36(1):61-71.
- [18] 张亚冠,杜远生,徐亚军,等.湘中震旦纪-寒武纪之交硅质岩地球化学特征及成因环境研究[J].地质论评,2015,61(3):499-510.
- [19] 马永生,陈洪德,王国力,等.中国南方构造-层序岩相古地理图集(震旦纪-新近纪)[M].北京:科学出版社,2009.
- [20] 王丹,凌洪飞,李达,等.三峡地区岩家河埃迪卡拉系-寒武系界线剖面碳同位素地层学研究[J].地层学杂志,2012,36(1):21-30.
- [21] 薛耀松,唐天福.皖南与湘西晚震旦世地层的划分与对比[J].地层学杂志,1989,13(1):52-58.
- [22] 王约,黄再琴,陈洪德,等.华南留茶坡组与灯影组的地层对比[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(增刊1):328-335.
- [23] 尹恭正,王砚耕,钱逸.贵州震旦系与寒武系分界的初步研究[J].地层学杂志,1982,6(4):286-293.
- [24] Boström K, Peterson M N A. The Origin of aluminium-poor ferromanganoan sediments in area of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. Marine Geology, 1969, 7(5): 427-447.
- [25] Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. Sedimentary Geology, 1986, 47: 125-148.
- [26] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52: 65-108.
- [27] Boström K. Genesis of ferromanganese deposit-diagnostic criteria for recent and old deposits[M]// Rona P A. Hydrothermal Process at Seafloors Spring Centers. New York: Plenum Press, 1983: 473-489.
- [28] 杨水源,姚静.安徽巢湖平顶山中二叠统孤峰组硅质岩的地球化学特征及成因[J].高校地质学报,2008,14(1):39-48.
- [29] Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, 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: 1875-1895.
- [30] Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 627-643.
- [31] Owen A W, Armstrong H A, Floyd J D. Rare earth element geochemistry of upper Ordovician cherts from the Southern Upland of Scotland[J]. Journal of the Geological Society of London, 1999, 156: 191-204.
- [32] Guo Q J, Shields G A, Liu C Q. Trace element chemostratigraphy of two Ediacaran- Cambrian successions in South China: Implications for organosedimentary metal enrichment and silicification in the Early Cambrian[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254: 194-216.
- [33] Frimmel H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeo- environmental indicator[J]. Chemical Geology, 2009, 258: 338-353.
- [34] 杜远生,朱杰,顾松竹,等.北祁连造山带寒武系-奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示[J].中国科学:地球科学,2007,37(10):1314-1329.