

周北昱,李盼,曾雯,等.湖北峡东地区奥陶系南津关组灰岩中硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J].地球科学与环境学报,2020,42(4):464-478.

ZHOU Bei-yu, LI Pan, ZENG Wen, et al. Geochemistry Characteristics of Cherts from Ordovician Nanjinguan Formation Limestone in the Eastern Yangtze Gorges Area of Hubei, China and Their Implications for Sedimentary Environment[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(4): 464-478.

DOI:10.19814/j.jese.2020.01028

## 湖北峡东地区奥陶系南津关组灰岩中硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义

周北昱<sup>1</sup>, 李盼<sup>2</sup>, 曾雯<sup>1\*</sup>, 曾薇<sup>1</sup>, 汪蕾<sup>2</sup>, 刘越<sup>2</sup>, 刘影<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**湖北峡东地区位于华南板块上扬子地块分区,其奥陶系南津关组灰岩中发育大量条带状和结核状硅质岩。在详细野外调查的基础上,对这些硅质岩进行岩相学和地球化学分析,探讨其成因及沉积环境意义。结果表明:硅质岩主要由石英、玉髓组成;硅质岩贫 Mn、Fe,其 Al/(Al+Fe+Mn) 值为 0.27~0.84,平均值为 0.64, Mn/TiO<sub>2</sub> 值小于 0.5, Th/U 值为 0.02~0.86;硅质岩具有低的稀土元素含量(质量分数,下同),稀土元素总含量为(0.67~27.79)×10<sup>-6</sup>,经北美页岩标准化后呈现相对平缓右倾的稀土元素配分模式和弱的 Ce 异常,同时(La/Yb)<sub>N</sub> 平均值为 1.31;硅质岩寄主灰岩的 δ<sup>13</sup>C 值为-2.37‰~2.30‰,平均值为-0.006 4‰, δ<sup>18</sup>O 值为-9.04‰~-6.49‰,平均值为-7.61‰,计算的古环境温度为 4℃~21℃。这些结果反映湖北峡东地区奥陶系南津关组灰岩中的硅质岩主要为生物成因,形成于温暖缺氧的大陆边缘环境。

**关键词:**沉积环境;岩石成因;硅质岩;灰岩;地球化学;奥陶系;南津关组;湖北

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2020)04-0464-15

## Geochemistry Characteristics of Cherts from Ordovician Nanjinguan Formation Limestone in the Eastern Yangtze Gorges Area of Hubei, China and Their Implications for Sedimentary Environment

ZHOU Bei-yu<sup>1</sup>, LI Pan<sup>2</sup>, ZENG Wen<sup>1\*</sup>, ZENG Wei<sup>1</sup>,

WANG Lei<sup>2</sup>, LIU Yue<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>

(1. Three Gorges Research Center for Geohazards of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. School of Earth Sciences, China University of

Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** The eastern Yangtze Gorges area in Hubei belongs to the Upper Yangtze block of South China plate. The cherts from Ordovician Nanjinguan Formation limestone in this area are mostly developed as nodules and strips. Based on the detailed field geological survey, the petrography and geochemistry characteristics of these cherts were analysed, and the genesis and sedimentary

收稿日期:2020-01-20;修回日期:2020-05-06;网络首发日期:2020-06-28

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120113061900)

作者简介:周北昱(1994-),男,广西藤县人,理学硕士研究生,E-mail:2410221678@qq.com。

\* 通讯作者:曾雯(1981-),女,湖北武汉人,助理研究员,理学博士,E-mail:cathaysia@163.com。

environment were discussed. The results show that the main mineral compositions of cherts are quartz and chalcedony. Cherts are poor in Mn and Fe, the ratios of  $Al/(Al+Fe+Mn)$  range from 0.27 to 0.84 with an average of 0.64, which is closer to that of the biogenic cherts. The ratio of  $MnO/TiO_2$  is much less than 0.5, indicating cherts in this area form in the shallow sea sedimentary environment near the edge of the land. The ratios of Th/U range from 0.02 to 0.86 with an average of 0.24. Cherts have low REE content, the total REE content is  $(0.67-27.79) \times 10^{-6}$ . The NASC-normalized REE pattern shows a relatively gentle right-leaning trend. The  $\delta Ce$  ranges from 0.97 to 1.19 with an average of 1.11, and the average value of  $(La/Yb)_N$  is 1.31, reflecting a bio-chemical origin rather than hydrothermal origin, and cherts form in a setting of continental margin. The carbon and oxygen isotope information of the host limestone of cherts in Nanjinguan Formation shows that the  $\delta^{13}C$  ranges from  $-2.37\%$  to  $2.30\%$  with an average of  $-0.0064\%$ , the  $\delta^{18}O$  ranges from  $-9.04\%$  to  $-6.49\%$  with an average of  $-7.61\%$ . The paleoenvironmental temperature varies from  $4^\circ C$  to  $21^\circ C$ . The geochemistry characteristics of cherts in Nanjinguan Formation limestone indicate that cherts are biogenic origin and form in a warm and anoxic continental marginal tectonic settings.

**Key words:** sedimentary environment; petrogenesis; chert; limestone; geochemistry; Ordovician; Nanjinguan Formation; Hubei

## 0 引言

硅质岩(Siliceous Rock)是指自生硅质矿物的含量(质量分数,下同)大于50%,且 $SiO_2$ 含量一般大于70%的一类特殊自生沉积岩。硅质岩主要由生物作用、化学作用、生物化学作用以及某些热液作用和火山作用所形成,也包括一些在盆地内部经过物理破碎后沉积形成的岩石<sup>[1-3]</sup>。国际上很多学者把硅质岩统称为燧石(Chert),并强调其石英含量达95%或更高<sup>[4-7]</sup>。前寒武纪是硅质岩产出的高峰期,在北美洲、欧洲、非洲等古老地盾上至今保存着由燧石和铁质岩共同构成的巨厚燧石铁建造,相应的岩石在中国变质为磁铁石英岩。大致从中元古代早期开始,硅质岩的数量明显减少<sup>[1]</sup>。伴随显生宙生物的演化,大量的硅质岩形成被认为与生物有关,而且硅循环被认为是气候变化的记录<sup>[8-17]</sup>。二叠纪硅质沉积事件(Permian Chert Event)和始新世硅质沉积区间(Eocene Silica Burial)两个富硅时代的硅质岩研究成为热点<sup>[18-23]</sup>。

硅质岩矿物组成简单,常见的是蛋白石、玉髓和石英等硅质矿物,抗风化能力强,保留了丰富的原生地球化学“指纹”信息,特别是原生硅质岩的特殊成因使其具有重要的理论研究价值<sup>[1]</sup>,对揭示古地理、古环境和古气候具有十分重要的指示意义<sup>[17,24-28]</sup>。产于灰岩中的硅质岩结核因为与灰岩的抗应变强度差异巨大,常被作为古应变指标用于地质应力的三

维分析<sup>[29-32]</sup>。

硅质岩的成因复杂多样,目前主要有4种认识:①生物及生物化学作用成因,分泌硅质壳体的生物死亡后沉淀下来的硅质经历各种成岩转化作用,最终以隐晶或微晶石英集合体的形式组成硅质岩结核<sup>[28,33-35]</sup>;②热液成因,硅质岩发育地区岩浆作用强烈,富含硅质的岩浆热液进入到碳酸盐岩沉积物中并发生水-岩反应,碳酸盐岩部分被溶解,同时硅质交代碳酸盐矿物形成硅质岩<sup>[2,36-45]</sup>;③富钙岩石被硅质交代,碳酸盐岩中方解石、白云石被硅质矿物交代,保留碳酸盐矿物假象<sup>[1,35,46]</sup>;④海水的正常沉积成因,对于没有生物标记的硅质岩,可能因为海水局部硅过饱和,通过化学沉淀而形成<sup>[1,47]</sup>。尽管硅质岩具有相对简单的矿物组成和单一的结构构造,但是硅质岩的成因却十分复杂,其中最关键的问题是硅质来源和 $SiO_2$ 形成的机理以及硅质岩形成的沉积环境<sup>[3]</sup>。实际研究发现,同一套地层的硅质岩可能也是多成因的。例如,滇东北会泽灯影组硅质岩既有正常沉积成因,也有热液成因<sup>[48]</sup>;扬子地块下志留统龙马溪组硅质岩也是多成因的<sup>[49]</sup>。岩石磁学研究揭示了层状硅质岩是沉积物中大量的生物硅质在成岩过程的强烈分异作用下形成的<sup>[50-53]</sup>。

硅质岩成因复杂,备受关注。Lei等通过中上扬子地块下志留统龙马溪组硅质岩的岩石和地球化学特征研究重建古环境演化过程<sup>[49]</sup>。Kidder等认为气候引起的环境变化是制约生物成因硅质岩发育

和奥陶纪硅循环的主要因素<sup>[12]</sup>。近年来,国内学者对不同地区不同时代分布的硅质岩广泛开展深入研究,取得一系列研究成果<sup>[48,54-66]</sup>。广泛应用硅质岩的地球化学特征判别其形成环境,则要归因于 Murray 等的研究成果<sup>[67-69]</sup>。

湖北峡东地区出露的很多地层均发育有硅质岩,不同地层中硅质岩的产状特征和研究侧重点有差别,但主要是关注层状和厚层状硅质岩成因和古环境意义<sup>[3,25,44,48]</sup>。峡东地区奥陶系地层出露完整,两个“金钉子”(宜昌王家湾上奥陶统赫南特阶和黄花场中奥陶统大坪阶底界层型剖面及点位)均分布于该地区,足见其典型标准,是研究扬子地块奥陶纪生物演化和沉积环境最有利的地区。其中,灰岩普遍含有条带状或者结核状硅质岩,但对其成因及意义研究不多。在对湖北宜昌黄花场地区和秭归南部桂娅地区奥陶系剖面的详细野外研究基础上,本文对下奥陶统南津关组灰岩中硅质岩石学和地球化学特征开展系统研究,并探讨其成因和沉积环境意义。

### 1 区域地质背景

湖北峡东地区在大地构造上属于华南板块上扬子地块分区,奥陶系主要出露于黄陵穹隆的外围(图1),自下而上分别为下奥陶统南津关组(O<sub>1n</sub>)、分乡组(O<sub>1f</sub>)、红花园组(O<sub>1h</sub>),中奥陶统大湾组(O<sub>2d</sub>)、牯牛潭组(O<sub>2g</sub>),中一下奥陶统庙坡组(O<sub>2-3m</sub>),上奥陶统宝塔组(O<sub>3b</sub>)、临湘组(O<sub>3l</sub>)及五峰组(O<sub>3w</sub>)。奥陶系地层主要由碳酸盐岩组成,另有少量的砂岩、硅质岩及页岩。碳酸盐岩在该地区以灰白色中厚层状灰岩和白云岩居多,部分为生物碎屑灰岩;硅质岩则多呈结核状和条带状赋存于灰岩中。

南津关组地层根据岩性自下而上划分为4段:一段以中层泥晶灰岩为主,可见薄层硅质岩条带;二段以厚层细晶灰岩夹中厚层含砾砂屑白云岩为主;三段以含生物碎屑灰岩和含砾砂屑灰岩为主,可见条带状和结核状硅质岩;四段以含生物碎屑泥晶灰岩为主,另有鲕粒灰岩。样品主要采集于宜昌黄花场地区和秭归南部桂娅地区的南津关组,其上覆地层为下奥陶统分乡组,下伏地层为上寒武统三游洞组,具体的采样位置和层位如图1、2所示。

### 2 岩石学特征

#### 2.1 产状特征

宜昌黄花场地区南津关组灰岩产出的硅质岩可

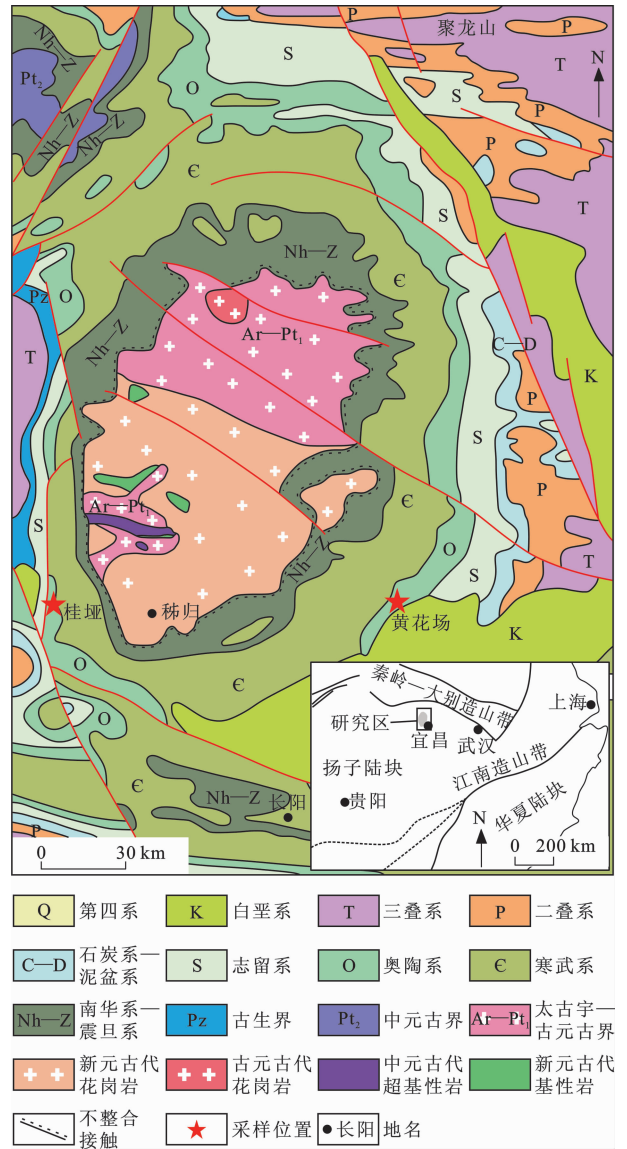


图1 湖北峡东地区地质简图

Fig. 1 Geological Sketch Map of the Eastern Yangtze Gorges Area in Hubei

见条带状、透镜状和结核状3种(图3)。其中,以灰黑色条带状为主要特征,偶见有灰黑色及红褐色硅质岩结核,长轴与灰岩层面平行,表现出压实作用的特征,硅质岩结核与灰岩接触边界较清楚。条带状硅质岩厚度约为10 cm[图3(a)]。透镜状硅质岩最厚处约为7 cm。灰黑色硅质岩结核中可见有灰白色灰岩包裹体,质地较纯,粒度约为2 mm[图3(b)];红褐色硅质岩结核岩性较为均一[图3(c)]。

秭归南部桂娅地区南津关组的硅质岩以灰黑色条带状为主(图4)。条带状硅质岩与寄主灰岩的接触界线清晰,条带宽度约为8 cm。硅质岩多呈致密团块,较为坚硬,可见有碳酸盐岩细脉穿插硅质岩的现象,岩性均一,如毫米级别的方解石细脉。

系	统	组	厚度/m	岩性	样品分布及编号	
志留系	下统	龙马溪组	400.0	泥岩		
				白云岩		
	奥陶系	上统	五峰组	5.0	含硅质结核灰岩	—15HL26-03~08
			临湘组 宝塔组	30.0	鲕粒灰岩	
		中统	庙坡组	2.5	生物碎屑灰岩	—15HL26-01
			牯牛潭组	35.0	鲕粒灰岩	
			大湾组	55.0	硅质条带	
					瘤状灰岩	
		下统	红花园组	45.0	灰岩	—15HL25-02
					含硅质结核灰岩	—15HL25-01
			分乡组	50.0	鲕粒灰岩	—15HL24-03
					瘤状灰岩	—15HL24-01
	南津关组		15.0	64.0	鲕粒灰岩	—16KL8-1~8-4
					含硅质结核灰岩	—16KL7-7 —17GY3-1~3-2 —16KL7-2
			54.0	73.0	白云岩	—16KL6-1 —17GY2-1 —17GY1-1
					硅质条带	—16KL5-1
			73.0	220.0	瘤状灰岩	—17HH2-4 —17HH2-1~2-3
					灰岩	—15HL23-02~05 —17HH1-4 —17HH1-1~1-3
		白云岩				
		白云岩				
寒武系		上寒武统	三游洞组	220.0	白云岩	

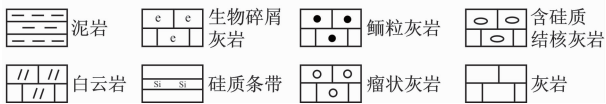


图 2 峡东地区奥陶系地层柱状图及样品分布

Fig. 2 Stratigraphic Column of Ordovician in the Eastern Yangtze Gorges Area and Distribution of Samples

2.2 岩相学特征

硅质岩矿物组成主要为石英、玉髓(图 5)。块状的微晶石英呈等粒状集合体,不辨边界,单偏光下无色,正交偏光下呈 I 级灰干涉色[图 5(a)]。玉髓形态多样,多呈椭圆形放射状集合体,单偏光下无色,正交偏光下呈 I 级灰白干涉色[图 5(b)]。粗晶石英单偏光下无色,正交偏光下呈 I 级灰白干涉色,

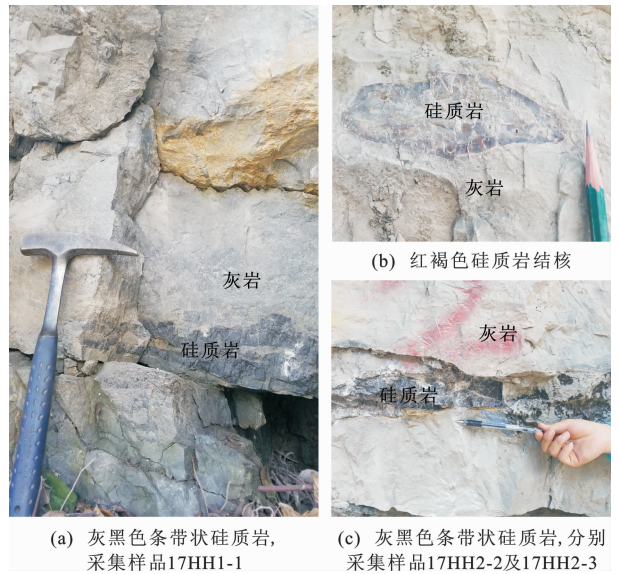


图 3 黄花场地区硅质岩野外照片  
Fig. 3 Field Photographs of Cherts in Huanghuachang Area



(a) 灰黑色条带状硅质岩,采集样品17GY1-1



(b) 灰黑色条带状硅质岩,采集样品17GY2-1

图 4 桂垭地区硅质岩野外照片  
Fig. 4 Field Photographs of Cherts in Guiya Area

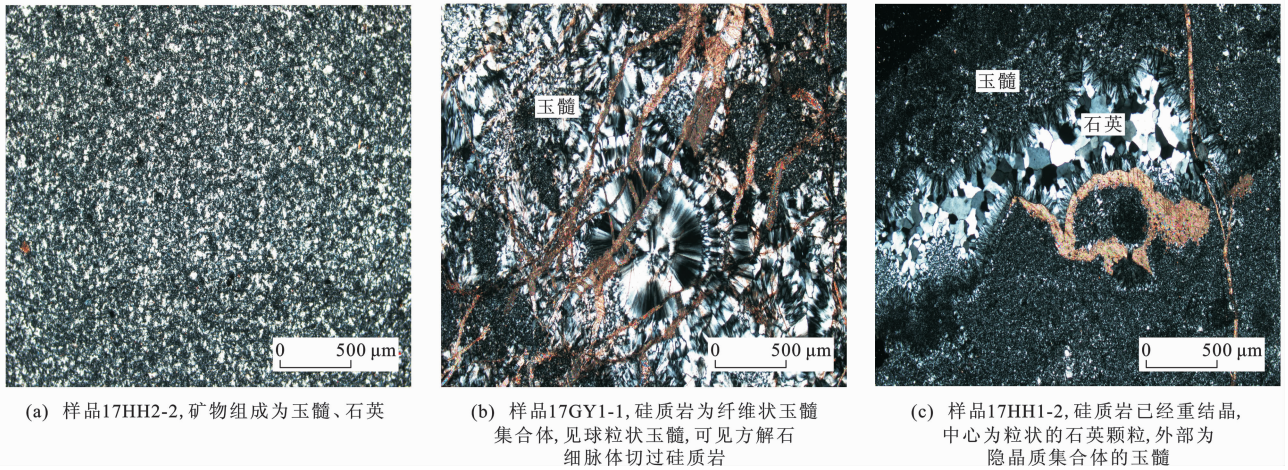


图5 硅质岩显微照片

Fig. 5 Micrographs of Cherts

其外为放射状、针状玉髓, 由外围向中心粒度由细变粗[图 5(c)]。

### 3 地球化学特征

将所有采集的硅质岩样品破碎至粒径 1 cm, 严格剔除四周的碳酸盐岩部分, 只选择其中质地纯净的硅质岩条带、结核和团块, 用清水洗净后晾干, 在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室用德国莱驰 RS200 振动盘式研磨仪将样品粉碎至 200 目。样品主量、微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成。主量元素分析采用玻璃熔片法在 Rigaku100e 型 X 荧光光谱仪上进行; 微量元素分析使用酸溶解法在 PEELan6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上进行。X 射线荧光光谱分析精度为 2%, 电感耦合等离子体质谱仪精度优于 3%。详细的实验方法见文献[70], 硅质岩主量、微量元素分析结果见表 1。

#### 3.1 主量元素

湖北峡东地区奥陶系南津关组硅质岩样品中  $\text{SiO}_2$  含量为 68.35%~96.94%, 平均值为 87.34%。其中, 样品 17HH1-2、17HH1-3、17HH2-2、17GY2-1 质地纯净,  $\text{SiO}_2$  含量为 93.86%~96.94%; 样品 17HH2-1 及 17GY3-2 中  $\text{SiO}_2$  含量较低, 分别为 68.35% 及 79.48%, 这主要是由于其中含有较多的灰岩杂质, 其  $\text{CaO}$  含量分别高达 16.40% 及 8.34%。其他样品中  $\text{SiO}_2$  含量均略低于 90%, 但高于 84%。

主量元素含量是判断硅质岩成因的重要指标。一般硅质岩中的 Mn 能够作为来自海洋深部的标识元素, 典型热液成因的硅质岩 Fe、Mn 相对富集<sup>[67-69, 71]</sup>。与典型热液成因硅质岩特征相比较, 研

究区硅质岩的 Fe、Mn 含量极低, 其  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  和 MnO 含量平均值分别为 0.15% 和 0%, 因此, 不太可能是热液成因。Si/(Si+Al+Fe) 值能够作为判别硅质岩是否为热液成因的指标之一<sup>[71]</sup>。研究区硅质岩的 Si/(Si+Al+Fe) 值为 0.97~0.99, 平均值为 0.99, 进一步证明硅质岩为非热液成因。Al/(Al+Fe+Mn) 值亦常被用作判别硅质岩成因的指标<sup>[71-72]</sup>。如来源于东太平洋洋中脊热液沉积的硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值低于 0.01; 而硅质岩也有比较典型的生物成因, 如日本放射虫硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值则高达 0.60。研究区硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值为 0.27~0.84, 平均值为 0.64(表 2), 显示硅质岩为生物成因。结合 Al-Fe-Mn 判别图解(图 6), 进一步说明硅质岩为非热液成因。另外, 富 Na 也是热液成因的重要标识。一般认为: 硅质岩  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值小于 1, 指示硅质岩为热液成因; 若  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值大于 1, 则为生物成因<sup>[71-72]</sup>。研究区硅质岩的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量普遍较低, 其  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值均远大于 1, 为 1.67~10.38(表 2), 显示硅质岩与生物作用有关。

由于 Ti 主要与陆源物质有关, 而 Mn 主要来源于海洋深部, 所以 MnO/TiO<sub>2</sub> 值能够作为判别硅质岩沉积环境的一个重要指标。已有研究成果表明: 在离陆较远的海洋环境中, 硅质岩的 MnO/TiO<sub>2</sub> 值比较高, 一般为 0.5~3.5; 而在边缘浅海或者是大陆坡这种离陆较近的沉积环境中, 硅质岩的 MnO/TiO<sub>2</sub> 值较低, 一般低于 0.5<sup>[73]</sup>。峡东地区南津关组硅质岩的 MnO 含量较低, 其 MnO/TiO<sub>2</sub> 值均小于 0.5, 显示近陆环境。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量之间显示较好的正相关关系, 也显示近陆环境<sup>[74]</sup>。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量是洋中脊热液成分参与的指标。由于 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在成

表1 硅质岩主量、微量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major and Trace Elements of Cherts

样品编号	17HH1-1	17HH1-2	17HH1-3	17HH2-1	17HH2-2	17HH2-3	17GY1-1	17GY2-1	17GY3-1	17GY3-2
$w(\text{SiO}_2)/\%$	88.46	93.97	96.94	68.35	93.86	86.16	84.23	94.35	87.58	79.48
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.09	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	1.92	0.90	0.24	0.37	0.29	0.17	0.15	0.13	0.26	0.35
$w(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	0.27	0.16	0.07	0.09	0.09	0.09	0.30	0.11	0.15	0.14
$w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\%$	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
$w(\text{MgO})/\%$	1.29	0.41	0.04	0.40	0.28	2.59	0.10	0.12	0.18	1.92
$w(\text{MnO})/\%$	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
$w(\text{CaO})/\%$	2.51	1.16	0.49	16.40	2.80	4.23	6.52	1.94	6.05	8.34
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.83	0.31	0.07	0.14	0.10	0.05	0.04	0.03	0.08	0.11
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.08	0.04	0.03	<0.01	0.05	0.03	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
$w(\text{BaO})/\%$	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.80	0.02	0.13	0.03
$w(\text{SrO})/\%$	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
$w(\text{SO}_3)/\%$	0.35	0.13	0.10	0.18	0.16	0.02	1.01	0.19	0.10	0.20
烧失量/ $\%$	4.44	2.25	1.12	13.92	3.27	6.89	6.10	2.27	5.52	9.29
$w_{\text{total}}/\%$	100.26	99.39	99.12	99.96	99.89	100.92	100.24	99.17	100.07	99.89
$w(\text{La})/10^{-6}$	2.0	0.9	<0.5	5.4	1.1	0.5	0.5	<0.5	0.6	0.7
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	3.9	1.8	0.7	12.7	2.5	1.0	0.8	0.5	1.1	1.4
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	0.43	0.17	0.04	1.36	0.23	0.08	0.07	0.03	0.09	0.11
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	1.5	0.6	0.2	4.9	0.9	0.4	0.3	0.1	0.3	0.5
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	0.28	0.09	0.03	0.85	0.14	0.08	<0.03	<0.03	0.11	0.08
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.05	<0.03	<0.03	0.13	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	0.21	0.12	<0.05	0.71	0.12	0.10	0.07	<0.05	0.11	0.12
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.04	0.02	<0.01	0.10	0.02	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.02
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	0.25	0.08	<0.05	0.62	0.09	0.05	0.05	<0.05	0.08	0.09
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.05	0.02	<0.01	0.13	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
$w(\text{Er})/10^{-6}$	0.15	0.05	<0.03	0.37	0.05	0.03	0.03	<0.03	0.05	0.06
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	0.14	0.04	0.05	0.44	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.06
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.02	0.01	<0.01	0.08	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	9.02	3.90	1.02	27.79	5.26	2.32	1.87	0.67	2.54	3.17
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	2.5	1.5	1.2	1.7	1.6	1.1	1.3	1.0	1.3	1.2
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	0.5	0.3	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	2.3	1.5	1.1	0.5	0.8	0.8	0.4	0.9	0.5	0.5
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	1.5	0.6	0.2	4.9	0.9	0.4	0.3	0.1	0.3	0.5
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	0.43	0.17	0.04	1.36	0.23	0.08	0.07	0.03	0.09	0.11
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	15.5	7.2	2.2	3.3	2.8	1.5	1.2	1.0	2.1	2.4
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	117.5	183.0	99.0	49.1	72.3	55.7	7 070.0	183.5	1 115.0	263.0
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	20	30	10	10	10	20	10	10	10	10
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	1.06	0.67	0.46	0.47	0.50	0.43	0.14	0.18	0.16	0.17
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	<1	1	<1	<1	<1	<1	1	<1	1	<1
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	41.6	24.4	16.1	81.1	22.5	27.7	141.0	25.2	60.8	48.3
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.3	0.4	0.5	0.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2
$w(\text{Th})/10^{-6}$	2.84	1.07	0.30	0.49	0.29	0.18	0.16	0.11	0.21	0.25
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.02	<0.01	<0.01	0.06	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
$w(\text{U})/10^{-6}$	3.31	1.45	1.63	3.10	5.60	0.81	9.26	6.02	2.24	3.69
$w(\text{V})/10^{-6}$	8	5	<5	5	14	<5	11	21	12	21
$w(\text{W})/10^{-6}$	114.0	213.0	276.0	668	218.0	201.0	108.0	261.0	120.0	115.0
$w(\text{Y})/10^{-6}$	1.0	<0.5	<0.5	3.2	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	19	10	3	4	2	2	2	<2	3	2

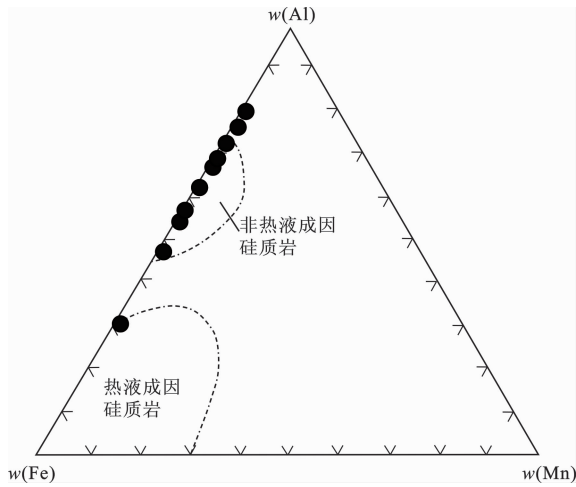
注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; $w_{\text{total}}$ 为主量元素总含量; $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量。

表 2 主要元素相关参数

Tab. 2 Related Parameters of Major Elements

样品编号	Al/(Al+Fe+Mn)值	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O值	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )值	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> 值
17HH1-1	0.84	10.38	0.88	3.00
17HH1-2	0.81	7.75	0.85	4.00
17HH1-3	0.72	2.33	0.77	7.00
17HH2-1	0.76	—	0.80	4.50
17HH2-2	0.71	2.00	0.76	9.00
17HH2-3	0.59	1.67	0.65	9.00
17GY1-1	0.27	—	0.33	—
17GY2-1	0.47	3.00	0.54	—
17GY3-1	0.57	—	0.63	15.00
17GY3-2	0.65	—	0.71	7.00

注：“—”表示低于检测限。



图件引自文献[71]

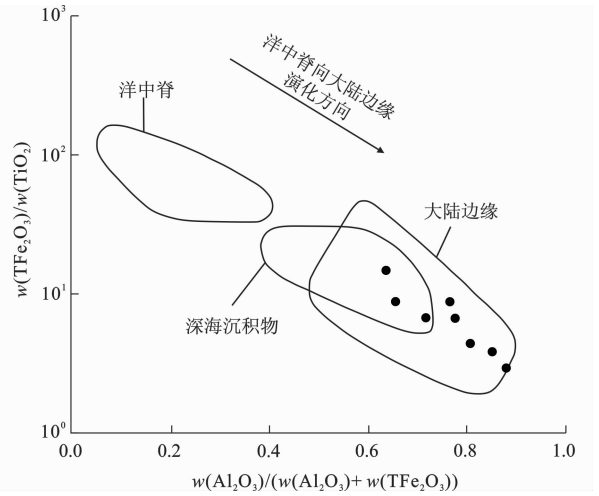
图 6 Al-Fe-Mn 判别图解

Fig. 6 Discrimination Diagram of Al-Fe-Mn

岩过程中相对比较稳定,所以  $TFe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+TFe_2O_3)$  图解(图 7)和  $0.01TFe_2O_3/SiO_2-0.01Al_2O_3/SiO_2$  图解(图 8)常作为判别硅质岩沉积环境的依据<sup>[67]</sup>。从图 7、8 可以看出,研究区所有硅质岩样品均落于大陆边缘环境区域,或者落于大陆边缘及其周围环境区域。

### 3.2 微量元素

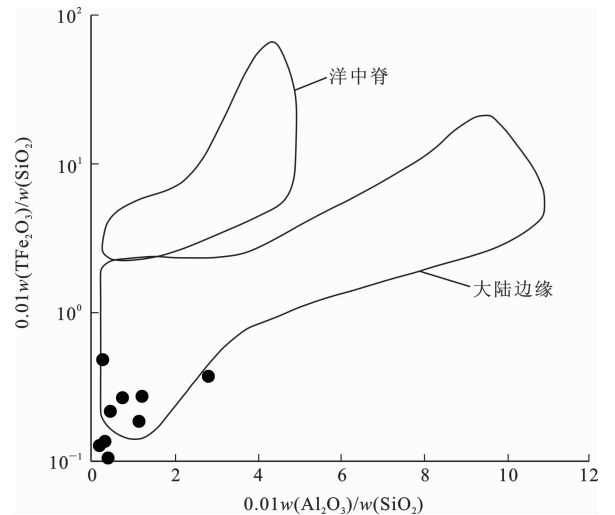
峡东地区南津关组硅质岩样品除 Ba、Sr、W 含量较高以外,其余微量元素含量均较低(表 1),硅质岩微量元素相关参数见表 3。轻、重稀土元素分并不明显,有轻微的 Ce 正异常和 Eu 负异常。王忠诚等认为 Ba 在有热液参与的海水中与  $SiO_2$  含量成较好的正相关关系,并且 Ba 可富存于生物大量繁殖的海域环境,若为单纯生物成因的硅质岩,则其



图件引自文献[67]

图 7  $TFe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+TFe_2O_3)$  图解

Fig. 7 Diagram of  $TFe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+TFe_2O_3)$



图件引自文献[67]

图 8  $0.01TFe_2O_3/SiO_2-0.01Al_2O_3/SiO_2$  图解

Fig. 8 Diagram of  $0.01TFe_2O_3/SiO_2-0.01Al_2O_3/SiO_2$

Ba 含量一般较高<sup>[75]</sup>。研究区硅质岩 Ba 含量较高,但 Ba 和  $SiO_2$  含量之间分布较为离散,没有显著的正相关关系(图 9),显示硅质岩与热液成因无关,而与生物成因相关。

硅质岩中的 Eu 异常同样受到沉积环境中热液作用的影响。研究结果表明:硅质岩与热液作用之间的关联越密切,则 Eu 异常越高,离岸距离越近;反之,则 Eu 异常越低,离岸距离越远。根据史冀忠等的研究可知,从洋中脊到离大陆约 75 km, Eu 异常从 1.35 逐渐降低到 1.02 左右<sup>[76]</sup>。研究区硅质岩的 Eu 异常平均值为 0.80,显示硅质岩与洋中脊热液成因无关。

硅质岩中的稀土元素极少受到沉积之后内外动

表 3 微量元素相关参数

Tab. 3 Related Parameters of Trace Element

样品编号	LREE/HREE 值	Ce 异常	Eu 异常	(La/Lu) <sub>N</sub> 值	(La/Yb) <sub>N</sub> 值	(La/Ce) <sub>N</sub> 值	Th/U 值
17HH1-1	9.27	0.99	0.96	1.21	1.35	1.01	0.86
17HH1-2	10.26	1.08	0.88	1.49	2.12	1.01	0.74
17HH1-3	7.32	1.19	0.81	0.48	0.75	0.98	0.18
17HH2-1	10.10	1.11	0.79	0.94	1.16	0.89	0.16
17HH2-2	13.24	1.17	1.09	1.52	2.07	0.75	0.05
17HH2-3	7.79	1.16	0.62	0.51	0.94	1.00	0.22
17GY1-1	8.08	0.97	0.77	1.01	1.57	1.99	0.02
17GY2-1	6.82	1.13	0.76	0.99	0.94	0.94	0.02
17GY3-1	6.38	1.09	0.60	0.99	1.13	1.01	0.09
17GY3-2	7.19	1.16	0.74	0.95	1.10	1.00	0.07

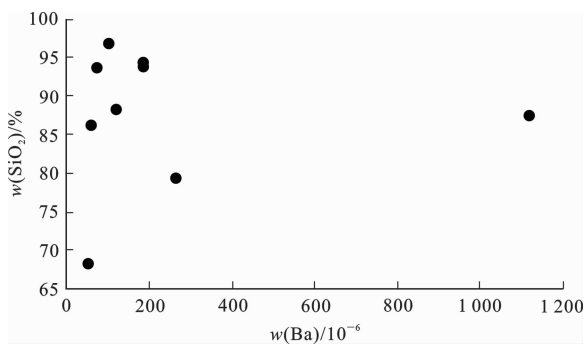


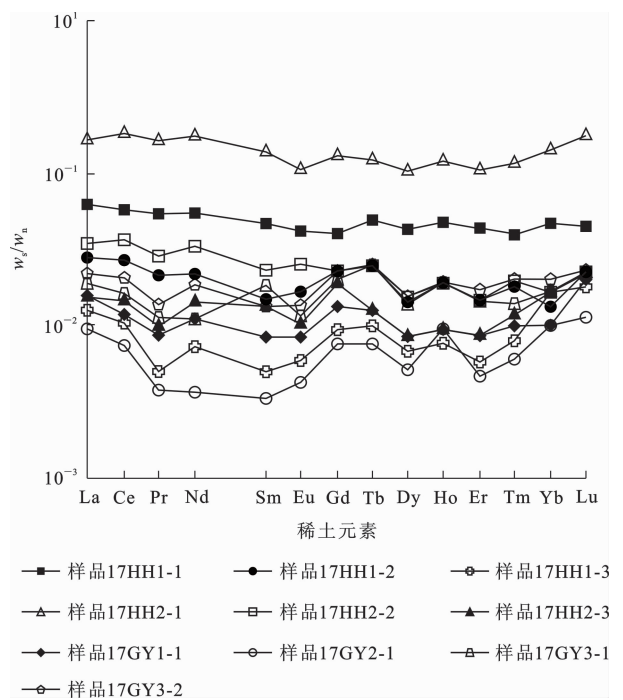
图 9 Ba 和 SiO<sub>2</sub> 含量相关关系

Fig. 9 Relationship Between Contents of Ba and SiO<sub>2</sub>

力地质作用的影响。通常情况下,热液成因的硅质岩稀土元素总含量比较低,Ce 亏损比较明显,且北美页岩标准化稀土元素配分模式通常呈现出平缓左倾的特点;非热液成因的硅质岩相对富集轻稀土元素,特征与北美页岩相似,北美页岩标准化稀土元素配分模式呈现出平缓右倾的特征<sup>[76]</sup>。研究区硅质岩北美页岩标准化稀土元素配分模式呈平缓右倾的特点,且无明显的 Ce 亏损(图 10),显示硅质岩为非热液成因。

Murray 等研究表明 V 等微量元素含量可以作为判别硅质岩沉积环境的有效参数<sup>[67]</sup>。通常大陆边缘硅质岩的 V 含量约为  $20 \times 10^{-6}$ <sup>[67]</sup>;冯胜斌等研究认为远洋盆地或洋中脊环境形成的硅质岩 V 含量约为  $38.3 \times 10^{-6}$ <sup>[2]</sup>。研究区硅质岩的 V 含量为  $(5 \sim 21) \times 10^{-6}$ ,指示其沉积环境为大陆边缘环境。

硅质岩受热液作用的影响大小及其与热液活动中心的间距远近,可以通过 Ce 异常进行判断<sup>[67]</sup>。Murray 等的研究表明:Ce 异常随着离岸距离减小而不断增加,洋中脊及两翼(0~85 km)硅质岩的 Ce 异常为 0.22~0.38,平均值约为 0.30;深海平原硅质岩的 Ce 异常为 0.50~0.76,平均值约为



$w_s$  为样品含量; $w_n$  为北美页岩含量

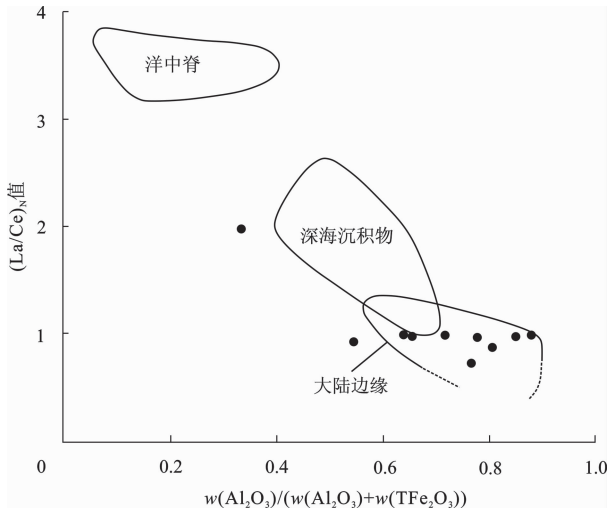
图 10 北美页岩标准化稀土元素配分模式

Fig. 10 NASC-normalized REE Patterns

0.60;大陆边缘硅质岩的 Ce 亏损并不十分显著,其 Ce 异常为 0.67~1.35,平均值约为 1.09<sup>[67-69]</sup>。峡东地区南津关组灰岩中的硅质岩具有轻微的 Ce 异常,为 0.97~1.19,平均值约为 1.11,显示硅质岩沉积环境为近大陆边缘环境。

另外,(La/Yb)<sub>N</sub> 值也可用于硅质岩形成环境的判别。若硅质岩形成于洋中脊环境区域附近,则 (La/Yb)<sub>N</sub> 平均值约为 0.3;若其形成于近大陆边缘环境区域,则 (La/Yb)<sub>N</sub> 值为 1.1~1.4;若其形成于深海平原环境区域,则 (La/Yb)<sub>N</sub> 值介于上述两者之间<sup>[66]</sup>。研究区硅质岩 (La/Yb)<sub>N</sub> 平均值为 1.31,显示硅质岩形成于近大陆边缘环境区域。

近大陆边缘环境区域的硅质岩  $(La/Ce)_N$  值为  $0.5 \sim 1.5^{[47]}$ 。研究区硅质岩的  $(La/Ce)_N$  值为  $0.75 \sim 1.99$ (表 3), 平均值为 1.06, 将其投于 Murray 提出的  $(La/Ce)_N - Al_2O_3 / (Al_2O_3 + TFe_2O_3)$  图解<sup>[67]</sup>(图 11)中, 发现除样品 17GY1-1 未落在大陆边缘环境区域, 以及样品 17GY2-1 落在近大陆边缘环境区域外, 其他样品都落在大陆边缘环境区域。



图件引自文献<sup>[67]</sup>

图 11  $(La/Ce)_N - Al_2O_3 / (Al_2O_3 + TFe_2O_3)$  图解

Fig. 11 Diagram of  $(La/Ce)_N - Al_2O_3 / (Al_2O_3 + TFe_2O_3)$

硅质岩沉积时水体的氧化-还原条件可以用 U 和 Th 含量指示。在强还原环境下, U 常以不溶的  $U^{4+}$  形式留存于水体中, 造成 U 富集; 而在氧化环境下, U 则常以可溶的  $U^{6+}$  形式留存于水体中, 造成沉积物中 U 亏损。而 Th 基本不受水体的氧化-还原电位影响, 常以不溶的  $Th^{4+}$  形式存在于水体中<sup>[66]</sup>。研究表明: 在缺氧环境条件下形成的沉积物 Th/U 值一般为  $0 \sim 2$ ; 在氧化环境条件下形成的沉积物 Th/U 值则趋近于 8。研究区硅质岩的 Th/U 值为  $0.01 \sim 0.86$ , 平均值为 0.24, 显示为缺氧环境。

史冀忠等研究表明,  $Ce_{anom}$  值也能够作为判断古海水氧化-还原条件的标志。Ce 富集时,  $Ce_{anom}$  值大于  $-0.1$ , 指示水体为缺氧环境; Ce 亏损时,  $Ce_{anom}$  值小于  $-0.1$ , 指示为氧化环境<sup>[76]</sup>。研究区硅质岩的  $Ce_{anom}$  值趋近于 0, 大于  $-0.1$ , 显示为缺氧环境。

#### 4 寄主灰岩碳氧同位素特征

同位素地球化学特征能揭示古环境信息, 是因为古环境温度是沉积物与海水之间同位素平衡的控制因素。硅质岩这类稳定、抗风化的自生沉积岩被

认为能记录比较多的古环境温度信息。但是, 根据沉积岩成岩过程的复杂性, 以及随着硅质岩精细显微结构研究的深入和微区分析技术的发展, 可以看出硅质岩氧同位素组成的成因也是非常复杂的<sup>[77-81]</sup>。因此, 寄主灰岩的碳氧同位素组成在古环境研究中得到非常广泛应用<sup>[82-83]</sup>。

沉积物和海水之间的 C、O 等稳定同位素地球化学在古环境中应用主要是利用平衡与温度的关系。峡东地区南津关组硅质岩的寄主灰岩碳氧同位素分析在台湾大学海洋研究所 MAT-253 型同位素质谱仪上用正磷酸法完成, 分析结果见表 4。

表 4 寄主灰岩碳氧同位素分析结果

Tab. 4 Analysis Results of Carbon and Oxygen Isotopes of Host Limestone

序号	样品编号	$\delta^{13}C$ 值/ $\text{‰}$	$\delta^{18}O$ 值/ $\text{‰}$
1	15HL23-02	-0.52	-7.49
2	15HL23-03	-0.83	-7.57
3	15HL23-04	-0.84	-7.41
4	15HL23-05	-1.30	-7.21
5	15HL24-01	-2.09	-8.10
6	15HL24-03	-1.10	-7.60
7	15HL25-01	-1.13	-7.91
8	15HL25-02	-1.27	-7.84
9	15HL25-03	0.19	-7.18
10	15HL25-04	0.22	-6.49
11	15HL26-01	0.58	-7.04
12	15HL26-03	1.43	-7.44
13	15HL26-04	2.30	-8.51
14	15HL26-05	1.97	-8.65
15	15HL26-06	1.75	-9.04
16	15HL26-07	1.28	-9.00
17	15HL26-08	1.03	-8.79
18	16HL5-1	0.57	-7.08
19	16HL6-1	-0.37	-7.25
20	16HL7-2	-2.37	-8.40
21	16HL7-7	-0.92	-7.78
22	16HL8-1	0.08	-6.50
23	16HL8-2	0.36	-6.64
24	16HL8-3	0.16	-6.63
25	16HL8-4	0.66	-6.74

海相石灰岩的  $\delta^{13}C$  值接近于  $0\text{‰}$ , 多在  $-4\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 。南津关组寄主灰岩的  $\delta^{13}C$  值为  $-2.37\text{‰} \sim 2.30\text{‰}$ (平均值为  $-0.0064\text{‰}$ ),  $\delta^{18}O$  值为  $-9.04\text{‰} \sim -6.49\text{‰}$ (平均值为  $-7.61\text{‰}$ ), 指示其为海相沉积地层。

前人以  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  之间是否具有正相关关系为依据判别岩石是否受到成岩作用的影响<sup>[84-86]</sup>。图

12 显示南津关组寄主灰岩碳氧同位素相关关系。由图 12 可知,两者的分布较为离散,不存在明显的线性关系。这说明研究区岩石很少受到成岩作用的影响,基本保留了岩石原始形成时的信息,由同位素数据所得出的地层信息是有效的。

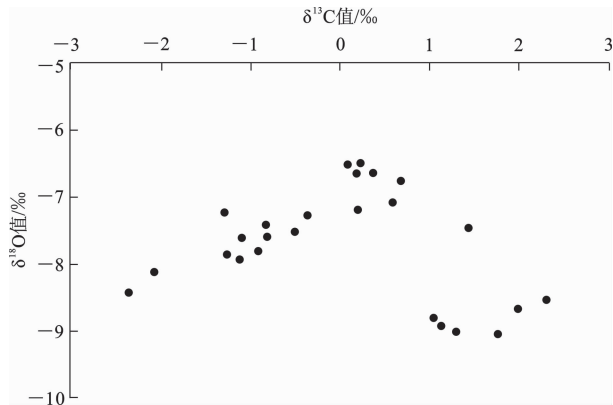
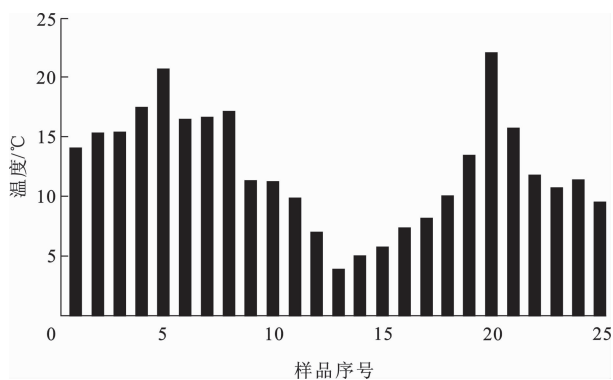


图 12 寄主灰岩碳氧同位素相关关系  
Fig. 12 Relationship Between Carbon and Oxygen Isotopes of Host Limestone

灰岩的盐度(Z 值)用于判别其沉积环境。若 Z 值大于 120,则灰岩为海相沉积;若 Z 值小于 120,则指示其为淡水沉积<sup>[87]</sup>。研究区灰岩样品中除样品 16KL7-2、15HL24-01 的 Z 值分别为 118.27 和 119.00,略小于 120.00 外,其他样品 Z 值均大于 120.00,为 120.80~127.77,平均值为 123.50,说明该地区灰岩为海相沉积。

海相沉积的古温度可依据灰岩中的碳氧同位素含量进行计算<sup>[88]</sup>。结果显示,峡东地区奥陶系南津关组寄主灰岩地层在沉积时的古环境温度为 4℃~21℃(图 13),总体温度处于较温暖的环境,与其出现的大量生物所指示的温暖环境相对应。



样品序号对应表 4 中序号  
图 13 寄主灰岩古环境温度分布  
Fig. 13 Paleoenvironmental Temperature Distribution of Host Limestone

## 5 结 语

(1)湖北峡东地区奥陶系南津关组灰岩中硅质岩以结核或者条带状产出,主要由微粒石英或者玉髓组成。

(2)峡东地区奥陶系南津关组灰岩中的硅质岩主要为生物成因,元素地球化学特征指示其形成于温暖的大陆边缘环境。

(3)硅质岩寄主灰岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-2.37\text{‰} \sim 2.30\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-9.04\text{‰} \sim -6.49\text{‰}$ ,平均值为  $-7.61\text{‰}$ ,估算的古环境温度为  $4\text{℃} \sim 21\text{℃}$ 。

中国科学院广州地球化学研究所韦刚健研究员及其团队参与了黄花场野外地质工作,中国科学院广州地球化学研究所刘颖和涂湘林高级工程师在元素分析中给予了帮助,台湾大学海洋研究所王佩玲教授在碳氧同位素分析中给予了大力协助,在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 路凤香,桑隆康. 岩石学[M]. 北京:地质出版社,2002.  
LU Feng-xiang, SANG Long-kang. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [2] 冯胜斌,周洪瑞,燕长海,等. 东秦岭二郎坪群硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 现代地质,2007,21(4):675-682.  
FENG Sheng-bin, ZHOU Hong-rui, YAN Chang-hai, et al. The Geochemical Characteristics of Cherts of Erlangping Group in East Qinling and Their Sedimentary Environment Importance [J]. Geoscience, 2007, 21(4):675-682.
- [3] 程成,李双应,赵大千,等. 扬子地台北缘中上二叠统层状硅质岩的地球化学特征及其对古地理、古海洋演化的响应[J]. 矿物岩石地球化学通报,2015,35(1):155-166.  
CHENG Cheng, LI Shuang-ying, ZHAO Da-qian, et al. Geochemical Characteristics of the Middle-Upper Permian Bedded Chert in the Northern Margin of the Yangtze Block and Its Responses to the Evolution of Paleogeography and Paleo-ocean [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 35(1):155-166.
- [4] FOLK R L. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Austin: Hemphill Publishing Company, 1980.
- [5] HESSE R. Origin of Chert; Diagenesis of Biogenic Siliceous Sediments [J]. Geoscience Canada, 1988, 15:171-192.

- [6] EKER C S, SIPAHI F, KAYGUSUZ A. Trace and Rare Earth Elements as Indicators of Provenance and Depositional Environments of Lias Cherts in Gumushane, NE Turkey[J]. *Geochemistry*, 2012, 72(2): 167-177.
- [7] LEDEVIN M, ARNDT N, SIMIONOVICI A, et al. Silica Precipitation Triggered by Clastic Sedimentation in the Archean; New Petrographic Evidence from Cherts of the Kromberg Type Section, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 316-334.
- [8] ROBERT F, CHAUSSIDON M. A Palaeotemperature Curve for Precambrian Oceanic Based on Silicon Isotopes in Cherts[J]. *Nature*, 2006, 443: 969-972.
- [9] CONLEY D J, CAREY J C. Silica Cycling over Geologic Time[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 431-432.
- [10] HAQ B U, SCHUTTER S R. A Chronology of Paleozoic Sea-level Changes[J]. *Science*, 2008, 322: 64-68.
- [11] MUNNECKE A, CALNER M, HARPER D A T, et al. Ordovician and Silurian Seawater Chemistry, Sea Level, and Climate: A Synopsis[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(3/4): 389-413.
- [12] KIDDER D L, MUMMA S A. Silica-replaced Oolites, Bedded Shelf Cherts and Paleozoic Changes in the Silica Cycle[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(3/4): 159-166.
- [13] POPE M C, STEFFEN J B. Widespread, Prolonged Late Middle to Late Ordovician Upwelling in North America; A Proxy Record of Glaciation? [J]. *Geology*, 2003, 31(1): 28-29.
- [14] SIEVER R. The Silica Cycle in the Precambrian[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3265-3272.
- [15] TOLMACHEVA T J, DANELIAN T, POPOV L E. Evidence for 15 m. y. of Continuous Deep-sea Biogenic Siliceous Sedimentation in Early Paleozoic Oceans[J]. *Geology*, 2001, 29(8): 755-758.
- [16] TROTTER J A, WILLIAMS I S, BARNES C R, et al. Did Cooling Oceans Trigger Ordovician Biodiversification? Evidence from Conodont Thermometry[J]. *Science*, 2008, 321: 550-554.
- [17] KIDDER D L, TOMESCU I. Biogenic Chert and the Ordovician Silica Cycle[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 458: 29-38.
- [18] 姚旭, 周瑶琪, 李素, 等. 硅质岩与二叠纪硅质沉积事件研究现状及进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1189-1200.  
YAO Xu, ZHOU Yao-qi, LI Su, et al. Research Status and Advances in Chert and Permian Chert Event[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(11): 1189-1200.
- [19] MURCHEY B L, JONES D L. A Mid-Permian Chert Event; Widespread Deposition of Biogenetic Siliceous Sediments in Coastal, Island Arc and Oceanic Basins [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992, 96(1/2): 161-174.
- [20] BEAUCHAMP B, BOUD A. Growth and Demise of Permian Biogenic Chert Along Northwest Pangea; Evidence for End-Permian Collapse of Thermohaline Circulation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 184(1/2): 37-63.
- [21] MCGOWRAN B. Silica Burial in the Eocene Ocean[J]. *Geology*, 1989, 17(9): 857-860.
- [22] MUTTONI G, KENT D V. Widespread Formation of Chert During the Early Eocene Climate Optimum[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 253(3/4): 348-362.
- [23] MOORE T C. Chert in the Pacific; Biogenic Silica and Hydrothermal Circulation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 261(1/2): 87-99.
- [24] HE J H, DING W L, HUANG W H, et al. Petrological, Geochemical, and Hydrothermal Characteristics of Ordovician Cherts in the Southeastern Tarim Basin, NW China, and Constraints on the Origin of Cherts and Permian Tectonic Evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 170: 294-315.
- [25] 雷卞军, 阙洪培, 胡宁, 等. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2002, 22(2): 70-79.  
LEI Bian-jun, QUE Hong-pei, HU Ning, et al. Geochemistry and Sedimentary Environments of the Paleozoic Siliceous Rocks in Western Hubei [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2002, 22(2): 70-79.
- [26] MASAO K, MASAMICHI T. Sedimentary Environments of the Middle Permian Phosphorite-chert Complex from the Northeastern Yangtze Platform, China; the Gufeng Formation; A Continental Shelf Radiolarian Chert [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 174(3/4): 197-222.
- [27] ZONG R W, WANG Z Z, JIANG T, et al. Late Devonian Radiolarian-bearing Siliceous Rocks from the Karayay Ophiolitic Melange in Western Junggar; Implications for the Evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 266-278.
- [28] YAO X, ZHOU Y Q. Astronomical Forcing of a Middle Permian Chert Sequence in Chaohu, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 206-221.
- [29] ANTONELLINI M, SOLE L D, MOLLEMA P N. Chert

- Nodules in Pelagic Limestones as Paleo-stress Indicators: A 3D Geomechanical Analysis[J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 132: 103979.
- [30] ANTONELLINI M, MOLLEMA P N. Outcrop Fracture Network Characterization for Unraveling Deformation Sequence, Geomechanical Properties Distribution, and Slope Stability in a Flysch Sequence (Monte Venere Formation, Northern Apennines, Italy) [J]. *International Journal of Earth Science*, 2019, 108: 735-751.
- [31] DAVIS T, HEALY D, BUBECK A, et al. Stress Concentrations Around Voids in Three Dimensions: The Roots of Failure [J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 102: 193-207.
- [32] PETRACCHINI L, ANTONELLINI M, BILLI A, et al. Pressure Solution Inhibition in a Limestone-chert Composite Multilayer: Implications for the Seismic Cycle and Fluid Flow [J]. *Tectonophysics*, 2015, 646: 96-105.
- [33] 唐朝辉, 曾允孚. 西秦岭中志留统含铀岩系中硅质岩的岩石学、地球化学及其成因 [J]. *岩石学报*, 1990, 5(2): 62-71.
- TANG Zhao-hui, ZENG Yun-fu. Petrology, Geochemistry and Origin of Cherts in the Uraniferous Formations, Middle Silurian West Qinling Range [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1990, 5(2): 62-71.
- [34] 朱杰, 杜远生. 北祁连造山带老虎山奥陶系硅质岩地球化学特征及古地理意义 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(1): 69-76.
- ZHU Jie, DU Yuan-sheng. Geochemistry Characteristics and Palaeogeographic Significance of the Ordovician Siliceous Rocks from Laohushan Area, North Qilian Orogenic Belt [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(1): 69-76.
- [35] 刘红光, 刘波. 显生宙碳酸盐岩中燧石结核的几种成因模式 [J]. *地质通报*, 2017, 36(9): 1635-1644.
- LIU Hong-guang, LIU Bo. Several Genetic Models of Nodular Chert Hosted in Phanerozoic Carbonate [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(9): 1635-1644.
- [36] 杨瑞东, 张传林, 罗新荣, 等. 新疆库鲁克塔格地区早寒武世硅质岩地球化学特征及其意义 [J]. *地质学报*, 2006, 80(4): 598-605.
- YANG Rui-dong, ZHANG Chuan-lin, LUO Xin-rong, et al. Geochemical Characteristics of Early Cambrian Cherts in Quruqtagh, Xinjiang, West China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(4): 598-605.
- [37] 丁振举, 姚书振, 周宗桂. 碧口岩群硅质岩成因及地质意义 [J]. *矿物学报*, 1998, 18(3): 331-336.
- DING Zhen-ju, YAO Shu-zhen, ZHOU Zong-gui. Genesis of the Bikou Group Siliceous Rocks and Geological Significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1998, 18(3): 331-336.
- [38] 徐跃通. 广东茂名地区二叠纪层状硅质岩成因地球化学特征及其沉积环境意义 [J]. *西安地质学院学报*, 1997, 19(3): 27-33.
- XU Yue-tong. Geochemistry and Sedimentary Environment of Cherts in the Permian Period in Maoming Area [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1997, 19(3): 27-33.
- [39] 张位华, 姜立军, 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.
- ZHANG Wei-hua, JIANG Li-jun, GAO Hui, et al. Study on Sedimentary Environment and Origin of Black Siliceous Rocks of the Lower Cambrian in Guizhou Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 174-178.
- [40] 周永章, 何俊国, 杨志军, 等. 华南热水沉积硅质岩建造及其成矿效应 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 373-377.
- ZHOU Yong-zhang, HE Jun-guo, YANG Zhi-jun, et al. Hydrothermally Sedimentary Formations and Related Mineralization in South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 373-377.
- [41] 江永宏, 李胜荣. 湘、黔地区前寒武—寒武纪过渡时期硅质岩生成环境研究 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 622-629.
- JIANG Yong-hong, LI Sheng-rong. A Study of the Fluid Environment of Silicalite of Transitional Precambrian-Cambrian Age in Hunan and Guizhou Province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 622-629.
- [42] 毛晓东, 段其发, 陈泽云. 湘桂地区泥盆系硅质岩稀土元素地球化学及沉积环境 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1999, 18(3): 229-236.
- MAO Xiao-dong, DUAN Qi-fa, CHEN Ze-yun. REE Geochemistry and Sedimentary Environment of Devonian Cherts in Guangxi and Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1999, 18(3): 229-236.
- [43] 徐跃通. 浙江西裘晚元古代层状硅质岩热水沉积地球化学标志及其沉积环境意义 [J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 600-608.
- XU Yue-tong. The Geochemical Characteristics of Hydrothermal Sediment Chert of the Late Proterozoic Era and Their Sedimentary Environmental Implication in Xiqiu Area, Zhejiang Province [J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 600-608.
- [44] 李晓彪, 罗远良, 罗泰义, 等. 重庆城口地区早前寒武系黑色岩系研究: (2) 早寒武世硅质岩的沉积环境研

- 究[J]. 矿物学报, 2007, 27(3/4): 302-314.
- LI Xiao-biao, LUO Yuan-liang, LUO Tai-yi, et al. Pre-Early Cambrian Black Rock Series in Chengkou District, Chongqing: (2) Sedimentary Environment Study of Chert in Lower Cambrian Bashan Formation[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(3/4): 302-314.
- [45] 洪才均, 康仁东, 韩俊, 等. 跃进地区奥陶系硅质岩地球化学特征及成因研究[J]. *新疆地质*, 2018, 36(2): 239-245.
- HONG Cai-jun, KANG Ren-dong, HAN Jun, et al. Geochemical Characteristics and Origin of the Ordovician Siliceous Rocks in Yuejin Region[J]. *Xinjiang Geology*, 2018, 36(2): 239-245.
- [46] 曹秋香, 郭福生, 刘向铜, 等. 浙江江山丁家山组层状硅质岩阴极发光特征及成因探讨[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 797-803.
- CAO Qiu-xiang, GUO Fu-sheng, LIU Xiang-tong, et al. Origin of Bedded Chert from Dingjiashan Formation in Jiangshan Region, Zhejiang Province: Evidence from Cathodeluminescence[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 797-803.
- [47] 杜远生, 朱杰, 顾松竹. 北祁连肃南一带奥陶纪硅质岩沉积地球化学特征及其多岛洋构造意义[J]. *地球科学*, 2006, 31(1): 101-109.
- DU Yuan-sheng, ZHU Jie, GU Song-zhu. Sedimentary Geochemistry and Significance of Ordovician Cherts in Sunan, North Qilian Mountains[J]. *Earth Science*, 2006, 31(1): 101-109.
- [48] 陈庆松, 杨润柏, 刘德民, 等. 滇东北会泽灯影组硅质岩成因及沉积环境: 来自岩石学和地球化学证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(5): 1327-1337.
- CHEN Qing-song, YANG Run-bai, LIU De-min, et al. Petrogenesis and Sedimentary Environment of Cherts of Dengying Formation in Huize County, Northeastern Yunnan: Evidence from Petrology and Geochemistry[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2019, 49(5): 1327-1337.
- [49] LEI Z H, DASHTGARD S E, WANG J, et al. Origin of Chert in Lower Silurian Longmaxi Formation: Implications for Tectonic Evolution of Yangtze Block, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 529: 53-66.
- [50] ABRAJEVITCH A, HORI R S, KODAMA K. Rock Magnetic Record of the Triassic-Jurassic Transition in Pelagic Bedded Chert of the Inuyama Section, Japan[J]. *Geology*, 2013, 41(7): 803-806.
- [51] ABRAJEVITCH A, HORI R S, KODAMA K. Magnetization Carriers and Remagnetization of Bedded Chert[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305(1/2): 135-142.
- [52] ABRAJEVITCH A. Diagenetic Formation of Bedded Chert: Implications from a Rock Magnetic Study of Siliceous Precursor Sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 533: 116039.
- [53] ABRAJEVITCH A, KONDRATYEVA L M, GOLUBEVA E M, et al. Magnetic Properties of Iron Minerals Produced by Natural Iron- and Manganese-reducing Groundwater Bacteria[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(2): 1340-1351.
- [54] 吴超伟, 侯明才, 黄虎, 等. 滇东南麻栗坡中一下二叠统硅质岩地球化学特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 196-204.
- WU Chao-wei, HOU Ming-cai, HUANG Hu, et al. Geochemical Features of the Middle-Lower Permian Cherts in Malipo, Southeastern Yunnan, and the Geological Signification[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 196-204.
- [55] 张金虎, 金春爽, 徐立明, 等. 福建黄塘晚侏罗世长林组硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 190-201.
- ZHANG Jin-hu, JIN Chun-shuang, XU Li-ming, et al. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environmental Implications of the Late Jurassic Siliceous Rock in the Changling Formation, Huangtang Section, Fujian Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 190-201.
- [56] 严松涛, 秦蒙, 谭昌海, 等. 甘孜—理塘蛇绿混杂岩带中段晚古生代硅质岩的识别及其地质意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(9): 2197-2208.
- YAN Song-tao, QIN Meng, TAN Chang-hai, et al. Identification of Late Paleozoic Siliceous Rocks in the Middle Part of the Ganzi-Litang Ophiolite Mélange Belt and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(9): 2197-2208.
- [57] 曾子轩, 刘晓峰, 楼章华, 等. 古代深海硅质岩-粘土岩-碳酸盐岩系列(SAC)的岩石学分类[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 475-488.
- ZENG Zi-xuan, LIU Xiao-feng, LOU Zhang-hua, et al. Petrological Classification of Ancient Deep-marine Siliceous-argillaceous-carbonate Rock Series(SAC)[J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 475-488.
- [58] 赵悦, 李延河, 范昌福, 等. 华北蓟县中元古界剖面中燧石条带的形成机制: 硼硅同位素证据[J]. *地质学报*, 2019, 93(8): 2055-2067.
- ZHAO Yue, LI Yan-he, FAN Chang-fu, et al. Formation

- Mechanism of Chert Bands in the Mesoproterozoic Jixian Section; Evidence from Boron Isotopes and Silicon Isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(8): 2055-2067.
- [59] 史毅, 屈红军, 李文厚, 等. 陕西富平上奥陶统赵老峪组硅质岩地化特征及地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(1): 168-179.
- SHI Yi, QU Hong-jun, LI Wen-hou, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Siliceous Rocks in Upper Ordovician Zhaolaoyu Formation in Fuping Region, Shaanxi Province[J]. *Earth Science*, 2020, 45(1): 168-179.
- [60] 刘新宇, 颜佳新. 华南地区二叠纪栖霞组燧石结核成因研究及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 730-736.
- LIU Xin-yu, YAN Jia-xin. Nodular Chert of Permian Chihsia Formation from South China and Its Geological Implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 730-736.
- [61] 徐梦婧, 赵佩云, 兰锐, 等. 狮泉河—永珠—嘉黎构造带中西段硅质岩地球化学特征及其沉积环境[J]. *地质学前沿*, 2020, DOI:10.13745/j.esf.sf.2020.4.1.
- XU Meng-jing, ZHAO Pei-yun, LAN Rui, et al. Geochemical Characteristic and Sedimentary Environments of Siliceous in the Middle and Western Part of the Shiquanhe-Yongzhu-Jiali Tectonic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, DOI:10.13745/j.esf.sf.2020.4.1.
- [62] 韦少港, 宋扬, 唐菊兴, 等. 西藏多龙矿集区硅质岩岩石地球化学、Si-O同位素特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(2): 428-439.
- WEI Shao-gang, SONG Yang, TANG Ju-xing, et al. Geochemistry, Si-O Isotopic Compositions and Its Tectonic Significance of the Siliceous Rocks in the Duolong Deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(2): 428-439.
- [63] 周倩玉, 侯明才, 黄虎, 等. 右江盆地泥盆系硅质岩地球化学特征及地质意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 280-289.
- ZHOU Qian-yu, HOU Ming-cai, HUANG Hu, et al. Geochemical Characteristics of Devonian Siliceous Rocks in Youjiang Basin of Guangxi and Its Implication for Tectonic Evolution[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2019, 46(3): 280-289.
- [64] 杨宗玉, 罗平, 刘波, 等. 早寒武世早期热液沉积特征: 以塔里木盆地西北缘玉尔吐斯组底部硅质岩系为例[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3845-3870.
- YANG Zong-yu, LUO Ping, LIU Bo, et al. Depositional Characteristics of Early Cambrian Hydrothermal Fluid; A Case Study of Siliceous Rocks from Yurtus Formation in Aksu Area of Tarim Basin, Northwest China[J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3845-3870.
- [65] 赵振洋, 李双建, 王根厚. 中下扬子北缘中二叠统孤峰组层状硅质岩沉积环境、成因及硅质来源探讨[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(2): 137-153.
- ZHAO Zhen-yang, LI Shuang-jian, WANG Gen-hou. Discussion on Sedimentary Environments, Origin and Source of Middle Permian Gufeng Formation Bedded Cherts in the Northern Margin of the Middle-lower Yangtze Area[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(2): 137-175.
- [66] 高媛, 王国芝, 李娜. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组硅质岩地球化学特征及成因[J]. *古地理学报*, 2019, 21(4): 647-660.
- GAO Yuan, WANG Guo-zhi, LI Na. Geochemical Features and Origin of Siliceous Rocks of the Permian Fengcheng Formation in the Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(4): 647-660.
- [67] 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.
- [68] MURRAY R W, BUCHHOLTZTEN B M R, JONES D, et al. Rare Earth Elements as Indicators of Different Marine Depositional Environments in Chert and Shale[J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [69] 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 Finegrained Marine Sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [70] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 552-558.
- LIU Ying, LIU Hai-chen, LI Xian-hua. Simultaneous and Precise Determination of 40 Trace Elements in Rock Samples Using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 552-558.
- [71] YAMAMOTO K. Geochemical Characteristics and Depositional Environments of Cherts and Associated Rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 52(1/2): 65-108.
- [72] 张汉文. 秦岭泥盆系的热液沉积岩及其与矿产的关系: 概论秦岭泥盆纪的海底热水作用[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1991(1): 15-39.

- ZHANG Han-wen. On Hydrothermal Sedimentary Rocks and Their Relationships with Mineral Resources in Devonian Period of Qinling Area, China[J]. Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1991(1):15-39.
- [73] MCLENNAN S M. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1):169-200.
- [74] 田云涛,冯庆来,李 琴. 桂西南柳桥地区上二叠统大隆组层状硅质岩成因和沉积环境[J]. 沉积学报, 2007, 25(5):671-677.
- TIAN Yun-tao, FENG Qing-lai, LI Qin. Genesis and Sedimentary Environment of the Layered Siliceous Rocks of the Upper Permian Dalong Formation in the Liushiqiao Area, Southwest Guangxi, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5):671-677.
- [75] 王忠诚,吴浩若,邝国敦. 广西晚古生代硅岩的地球化学及其形成的大地构造环境[J]. 岩石学报, 1995, 11(4):449-455.
- WANG Zhong-cheng, WU Hao-ruo, KUANG Guo-dun. Geochemistry and Origin of Late Paleozoic Cherts in Guangxi and Their Explanation of Tectonic Environments[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(4):449-455.
- [76] 史冀忠,卢进才,魏建设,等. 银额盆地及邻区二叠系硅质岩岩石学、地球化学特征及沉积环境[J]. 地质通报, 2018, 37(1):120-131.
- SHI Ji-zhong, LU Jin-cai, WEI Jian-she, et al. Petrology, Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of the Permian Siliceous Rocks in the Yin'e Basin and Adjacent Areas[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(1):120-131.
- [77] CHEN K, LU X X, QIAN Y X, et al.  $\delta^{30}\text{Si}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of Multiple Silica Phases in Chert: Implications for  $\delta^{30}\text{Si}_{\text{seawater}}$  of Darriwilian Seawater and Sea Surface Temperatures[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 544:109584.
- [78] CAMMACK J N, SPICUZZA M J, CAVOSIE A J, et al. SIMS Microanalysis of the Strelley Pool Formation Cherts and the Implications for the Secular-temporal Oxygen-isotope Trend of Cherts[J]. Precambrian Research, 2018, 304:125-139.
- [79] YANCHILINA A G, YAM R, KOLODNY Y, et al. From Diatom Opal-A  $\delta^{18}\text{O}$  to Chert  $\delta^{18}\text{O}$  in Deep Sea Sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 268:368-382.
- [80] PETTITT E A, CHERNIAK D J, SCHALLER M F, et al. Diffusive Retention of Carbon and Nitrogen in a Microcrystalline Quartz-dominated Chert: Implications for Reconstructing Earth's Ancient Atmosphere[J]. Chemical Geology, 2020, 541:119572.
- [81] FRASIER L, LILJESTRAND, ANDREW H, et al. The Triple Oxygen Isotope Composition of Precambrian Chert[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 537:116167.
- [82] ZACHOS J, PAGANI M, SLOAN L, et al. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J]. Science, 2001, 292:686-693.
- [83] SCHOBEN M, ULLMANN C V, LEDA L, et al. Discerning Primary Versus Diagenetic Signals in Carbonate Carbon and Oxygen Isotope Records: An Example from the Permian-Triassic Boundary of Iran[J]. Chemical Geology, 2016, 422:94-107.
- [84] 邵龙义. 碳酸盐岩氧碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(1):39-45.
- SHAO Long-yi. The Relation of the Oxygen and Carbon Isotope in the Carbonate Rocks to the Paleotemperature etc[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1994, 23(1):39-45.
- [85] MELEZHIK V A, FALLICK A E.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  Variations in Primary and Secondary Carbonate Phases: Several Contrasting Examples from Palaeoproterozoic  $^{13}\text{C}$ -rich Metamorphosed Dolostones[J]. Chemical Geology, 2003, 201(3/4):213-228.
- [86] AMANDA M, PETER O, SWART K. Rolling Window Regression of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  Values in Carbonate Sediments: Implications for Source and Diagenesis[J]. The Depositional Record, 2019, 5(3):613-630.
- [87] 遇 昊,陈代钊,韦恒叶,等. 鄂西地区上二叠统大隆组硅质岩成因及有机质富集机理[J]. 岩石学报, 2012, 28(3):1017-1027.
- YU Hao, CHEN Dai-zhao, WEI Heng-ye, et al. Origin of Bedded Chert and Organic Matter Accumulation in the Dalong Formation of Upper Permian in Western Hubei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3):1017-1027.
- [88] 杨振鸿. 唐山及邻区下奥陶统碳酸盐岩微相分析、白云石化特征和碳氧同位素研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2013.
- YANG Zhen-hong. Studies on Lower Ordovician Carbonate Rock Microfacies Analysis, Dolomitization Character and Carbon Oxygen Isotope Analysis in Tangshan Area and Adjacent Region[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2013.