

上扬子地块北缘灯影组硅质岩系地球化学特征及其成因

赵长缨,段立志,马中豪

(陕西地矿局区域地质矿产研究院,陕西 咸阳 712000)

摘要:通过野外调研,表明大巴山构造带和米仓山构造带震旦系灯影组发育多套硅质岩系,并与海相碳酸盐岩相伴产出。微量、稀土元素分析结果表明,硅质岩系具有热水成因特征。其中,Ba含量较高,Ba/Sr值大于1;Th/U值小于1, Th-U图解中所有样品均投到热水沉积物区;Zr元素较为富集,Zr-Cr图解中样品全部投到热水沉积物趋势线附近;硅质岩系REE总量低,Ce总体为负异常,Eu正异常明显,硅质岩HREE富集,硅质白云岩HREE富集不明显。Ce/Ce^{*}、La_N/Ce_N、V/Y值表明灯影组硅质岩形成于大洋盆地到大陆边缘的过渡地带;Th/Sc、Th/U、V/Cr、V/(V+Ni)值表明硅质岩主要形成于还原环境中,部分形成于氧化环境中。综合硅质岩稀土、微量元素特征并结合震旦纪区域地质构造演化,本区硅质岩应形成于复杂大陆边缘富氧的浅海陆棚环境及缺氧的陆内裂陷槽环境中。

关键词:大巴山构造带;灯影组;硅质岩系;热水成因

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248-(2015)02-0031-12

Geochemical Characteristics and Genesis of Cherts of Dengying Formation on the North Rim of Yangzi Block

ZHAO Changying, DUAN Lizhi, MA Zhonghao

(1. Institute of Geology and Mineral Resources, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Shaanxi Province, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: Field survey indicates that a large scale of cherts occur in Dengying formation of Sinian System in the tectonic belt of Dabashan and Micangshan, together with carbonatite. The results of trace and rare earth elements analysis indicate that the cherts have the characteristics of hydrothermal origin. Among the trace elements, Ba is enriched and most of the Ba/Sr ratio is greater than 1. Th/U ratio is less than 1 and the values from all samples fall into the hydrothermal sediment area in the Th-U diagram. Zr is also enriched and its content in all samples are neighboring the hydrothermal sediment trend line in the Zr-Cr diagram. The Σ REE of cherts is very low. Ce is negative anomaly in general while Eu is obviously positive. HREE is enriched in the radiolarian

收稿日期:2015-01-13;修回日期:2015-03-10

基金项目:国家自然科学基金(41173055),中国地质调查局“环扬子地质流体与低温热液成矿作用研究”(1212011121117)项目资助

作者简介:赵长缨(1964-),男,河南邓州人,教授级高工,硕士学位,主要从事矿床地质、矿产勘查等工作。E-mail:419350335@qq.com

cherts, but not distinctly enriched in the siliceous dolostone. The Ce/Ce*, La_N/Ce_N, V/Y ratios indicate that the cherts are formed in the transition zone from oceanic basin to continental margin. The Th/Sc, Th/U, V/Cr, V/(V+Ni) ratios indicate that the cherts are mostly formed in the reducing environment, with a small number formed in the oxidation environment. Considering the trace and rare earth elements characteristics and regional evolution of tectonics during Sinian period, it is inferred that the cherts are formed in shallow-sea shelf oxygen-enriched environment and anoxic intracontinental taphrogenic trough environment in the complex continental margin.

Key words: tectonic belts of Daba Mountain; Dengying formation; cherts; hydrothermal origin

自从 Wadsworth 提出硅质岩(chert)的概念以来,对硅质岩的成因问题的研究至今没有停止过。从前人研究资料来看,硅质岩成因大致可归纳为 3 类:①生物成因。②化学成因,包括火山成因和热水沉积成因。③交代(硅化)成因。许多地区硅质岩还属于过渡型成因类型。例如,湘黔桂地区晚前寒武纪层状硅质岩属于生物沉积与热水沉积共同作用的结果;安徽巢湖平顶山中二叠统孤峰组硅质岩以生物作用为主,还受火山作用的影响。从大洋中脊到大洋盆地再到大陆边缘均可形成硅质岩,不同成因的硅质岩由于成岩物质来源、沉积环境的不同,其地球化学特征也显著不同(薛春纪等,1995;王磊等,2012)。因此,常用地球化学分析方法来研究硅质岩系成因特征,并由此建立了多种反映硅质岩系成因类型的地球化学参数(表 1)。

微量元素 Cr、Zr、Th、U、Hg、As、Ba、Sr、V、Y 等对硅质岩成因和沉积环境具有指示意义。由于 U、Cr 等元素主要富集在还原性的热水沉积物中,而 Th、Zr 主要富集在水成及碎屑成因的颗粒物中,因而在 U-Th 及 Zr-Cr 图解中,热水及水成碎屑沉积物将分别投影于不同的区域。同时,因为热水沉积具有较高的速率,故在热水沉积岩中 Th/U 值小于 1,而正常水成沉积岩中 Th/U 值大于 1(RONA P A, 1978)。Hg、As 是热水流体作用过程中的活跃元素(Rancourt D G, 2001; Pichler T, 1999),沉积物中 Hg、As 异常可以指示海底热水流体的活动。Ba 在硅质岩中的变化比较大,高含量的 Ba 可以作为识别热液沉积物的标志。Large D(1985)在研究加拿大育空地区托姆铅锌矿床时,发现矿化区岩石中的 Ba 含量明显高于矿区外围,认为 Ba 的富集与海底热水活动有关。由于 BaSO₄ 在海水中的溶解度极低,而 Sr 在海水中的溶解度比较大,Ba/Sr 的变

化不但可用于判别海陆相沉积物,而且可以作为衡量海底热水流体作用的尺度(孙省利等,2004)。正常海相沉积岩 Ba/Sr 值基本小于 1,而现代海底热水沉积物 Ba/Sr 值大于 1,变化范围通常也较大(Peter J M, 1988; Smith P A, 1983)。因此,根据 Ba/Sr 值变化幅度的大小可以反映海底热水流体的影响程度(葛朝华等,1987)。Wood et al. (1979)曾利用 Hf/3 - Th - Ta 三角图解来区分不同成因类型的玄武岩,Quinby-Hunt et al. (1991)利用此图来讨论海相沉积的低钙黑色页岩的物质来源和沉积构造背景。不同环境下形成的硅质岩 V/Y 值大小也不同,据此还可以判断硅质岩系的沉积环境。笔者通过总结多年来各学者在硅质岩研究的成果的基础上,归纳了硅质岩的成因类型及其地球化学特征(表 1)(张汉文,1991; 杨建民等, 1999; Rona P A, 1988; Murray R W, 1991; Fleet A J, 1983; Shimizu H, 1977; Henderson P, 1984; Douthitt C B, 1982; 姚林波等, 2002; 吕志成等, 2004; 李晓彪等, 2007; Murray R W, 1994)。

硅质岩稀土元素的变化与相应环境下的海水和沉积物相类似(Murray R W, 1994),因而硅质岩稀土元素的分布特点可作为其沉积时的古海水及其对应沉积物的近似代表。从海水中吸附和继承陆源及海底火山颗粒中的稀土元素是大洋沉积物中稀土元素的主要来源。在大洋的不同构造环境下(洋中脊、大洋盆地及大陆边缘),由于陆源物质和热液中稀土元素对沉积物中稀土元素的相对贡献不同而引起沉积物中稀土元素及有关参数(Ce/Ce*、La/Ce、Eu/Eu*、ΣREE、La/Yb)的系统变化,根据此特点可以反映其沉积时的古构造环境。

已有的研究实例表明细碎屑岩及硅质岩中的稀土元素已成为古构造环境示踪的有效手段之一(Murray R W, 1991)。

表1 硅质岩成因类型及其地球化学表征参数表
Tab. 1 Genetic type on chert and its geochemistry parameters

成因类型		化学成因		生物成因	交代成因	备注
		热水成因	火山成因			
主量元素	Al/(Al+Fe+Mn)	<0.4	—	>0.4(纯生物成因 约为0.6)	—	受陆源物质影响大
	K ₂ O/Na ₂ O	富Na	<1	>1	>1	
	P ₂ O ₅ 、TiO ₂ 、MgO、碱	低K ₂ O、P ₂ O ₅ 、高TiO ₂		高P ₂ O ₅ 、低TiO ₂ 、 MgO及碱	—	
微量元素	As、Ba、B、Sb	高	低	低	低	
	U/Th	>1	<1	<1	<1	
稀土元素	ΣREE	低	高	高	高	
	Ce异常	负	正	正	正	
	HREE	富集	贫乏	贫乏	贫乏	
同位素	δ ³⁰ Si	-1.5‰~0.8‰		-1.1‰~1.7‰	2.4‰~3.4‰	

位于大巴山构造带和碑坝穹窿构造带震旦系灯影组是上扬子地块北缘一个重要的铅锌矿层,灯影组含矿层主要为一套角砾状白云岩,同时含有大量硅质岩、硅质灰岩和硅质白云岩等,统称为硅质岩系。笔者通过分析硅质岩系微量、稀土元素地球化学特征,探讨灯影组硅质岩系的成因类型及沉积环境。结果表明研究区灯影组硅质岩系形成于具还原特性的大洋盆地到大陆边缘的过渡环境,并且受到不同程度热水沉积的影响。

1 区域地质概况

1.1 构造特征

研究区位于扬子地块北缘,南秦岭造山带中段南侧,包括大巴山构造带和马元铅锌矿所在的碑坝穹窿2个构造单元(图1)。

大巴山构造带地处上扬子地块和秦岭造山带之间,是一个向西南凸出的弧形构造带。近年来研究表明,大巴山构造带是叠加在三叠纪构造带之上的一个侏罗纪前陆构造(董树文等,2006;施炜等,2007)。构造带自北而南分为四大次级构造单元,以城口-房县断裂带为界,其北为大巴山冲断-推覆构造带,出露一套厚度巨大的下古生界。城口-房县断裂和镇巴断裂之间为前陆基底拆离带,区域主拆离带出露地表,地层以震旦系和寒武

系为主,灯影组硅质岩系主要出露在该构造带内;镇巴断裂和铁溪-巫溪断裂之间为前陆褶皱带,由侏罗系组成紧密向斜的核部;而铁溪-巫溪隐伏断裂以南的四川盆地区为大巴山前陆坳陷,出露白垩纪红层。

碑坝穹窿构造位于扬子地块北缘、汉南古陆南侧,地处米仓山大型复式背斜东段,东临大巴山前陆构造带。碑坝穹窿构造核部由前震旦纪火地垭群变质岩系和晋宁-澄江期侵入杂岩体构成,震旦系灯影组一中三叠统沉积盖层围绕穹隆构造核部呈环形分布,总体上表现为一大型穹窿构造。近年来,在碑坝穹窿新发现的马元大型铅锌矿就赋存在灯影组角砾状白云岩中(侯满堂等,2007)。

1.2 地层岩性特征

野外实测地层剖面表明,大巴山构造带灯影组岩性自下而上主要由中厚层条带状白云岩、硅质白云岩向硅质灰岩、硅质泥岩、碳硅质岩过渡,显示了沉积水体由浅变深的过程。其中麻柳坝剖面灯影组岩性自下而上主要为灰白色中薄层条带状白云岩、深灰色中薄层硅质白云岩、深灰色中厚层硅质岩、灰绿色中薄层硅质页岩、灰色中薄层硅质岩夹碳质泥岩;青荆剖面下部为灰白色薄层硅质白云岩,中部过渡为灰色厚层硅质岩、碳硅质岩,上部变为黑色中薄层碳质硅板岩。何家湾剖面下部为灰白色硅质白云岩、硅质岩夹黄铁矿化构造角砾岩,上部为薄层泥

页岩。

碑坝穹窿灯影组下部为碎屑岩建造,上部为碳酸盐岩建造,属海陆交互相-碳酸盐岩台地相沉积。侯满堂等(2007)根据化石和岩性组合,将灯影组分为上、下2段。灯影组下段($Z_b dn_1$)又分为2个岩性层:第一岩性层($Z_b dn_{1-1}$)为灰黄色中厚层白云质砂砾岩及含砾白云岩和复成分砾岩。第二岩性层

($Z_b dn_{1-2}$)与下部岩性层整合接触,为黄灰-砖红色中厚层长石英砂岩与灰白色中厚层硅质白云岩互层,间夹泥沙质白云岩。灯影组上段($Z_b dn_2$)也分为2个岩性层:第一岩性层($Z_b dn_{2-1}$)为中厚层角砾状白云岩,夹薄层藻屑白云岩,为铅锌矿赋矿层位。第二岩性层($Z_b dn_{2-2}$)为纹层状白云岩、硅质白云岩和泥质白云岩,上部含硅质条带和团块(图1)。

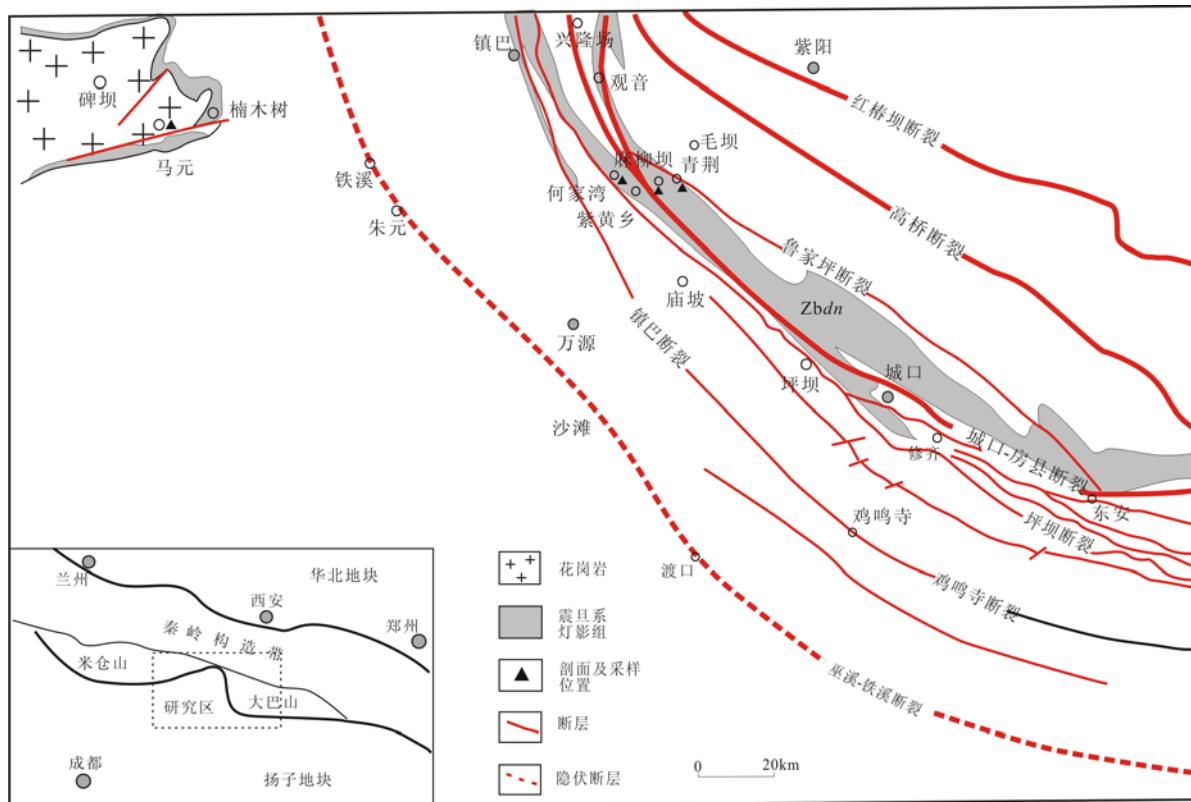


图1 研究区震旦系灯影组分布及剖面位置图

Fig. 1 Stratigraphic distribution and profile positions of Dengying Formation, Sinian in studied area

通过灯影组岩性特征对比分析表明,大巴山构造带与碑坝穹窿灯影组岩性在横向基本可以对比,以角砾状白云岩铅锌矿(化)层为对比标志层。位于碑坝穹窿的马元剖面角砾状白云岩为重要铅锌矿层,而位于大巴山构造带的青荆剖面和何家湾剖面灯影组角砾状白云岩中见铅锌矿化和黄铁矿化,麻柳坝剖面灯影组角砾状白云岩发育,但未见黄铁矿化。

从岩性层位上分析,大巴山构造带灯影组受构造影响出露不全,出露的地层仅相当于碑坝穹窿灯影组上段的第一岩性层($Z_b dn_{2-1}$)。

2 样品分析与测试

通过野外调研发现,研究区灯影组硅质岩系主要岩性包括硅质岩、硅质灰岩和硅质白云岩。硅质岩为深灰色至黑色,呈层状,微晶结构,块状构造,致密坚硬,主要矿物为微晶石英。硅质灰岩为灰色-深灰色,微晶结构,块状构造,致密坚硬,主要矿物为微晶石英和细晶方解石。硅质白云岩为灰白色-深灰色,微晶结构,块状构造,主要矿物为微晶石英和细晶白云石。在实测灯影组剖面的

基础上,分别采集了位于碑坝穹窿的马元剖面、大巴山构造带的何家湾剖面、麻柳坝剖面和毛坝4

条剖面(图2)灯影组硅质岩系样品,进行地球化学分析研究。

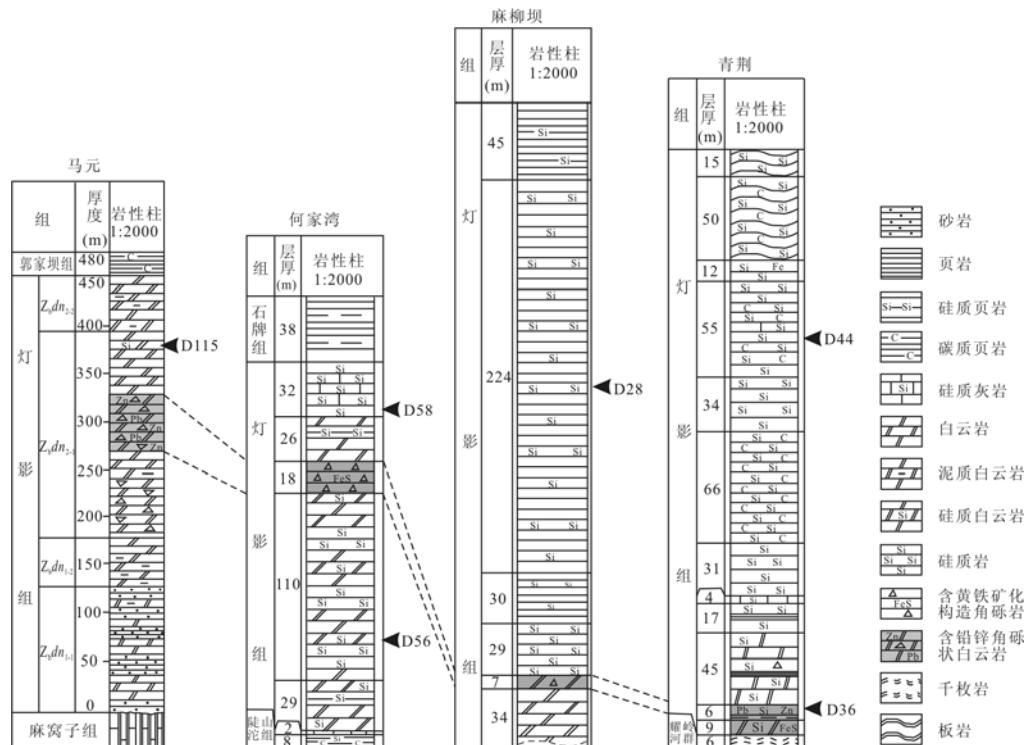


图2 灯影组实测剖面及样品位置图

Fig. 2 Geological section and sample positions of Dengying Formation

硅质岩系微量元素和稀土元素分析是在长安大学国土资源部成矿作用及其动力学开放实验室进行的,采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析测试,其分析精度为1%~3%,测试溶液的制备采用酸溶法。具体流程是:准确称取100 mg样品置于Teflon密闭容器中,加入1 mL浓HF和0.3 mL 1:1的HNO₃,用超声波震荡后置于150 °C电热板上将样品蒸干,再次加入相同量的HF和HNO₃,密闭加热一周(约100 °C)。蒸干后用2 mL 1:1 HNO₃溶解,加入Rh内标,稀释至2 000倍,最后由PE Elan 6000型ICP-MS分析。硅质岩系样品地质特征与微量、稀土分析结果见表2、表3。

3 硅质岩系微量元素地球化学特征及成因类型

由表2可以看出,采自剖面上铅锌矿化层内的

硅质岩样品其V、Cr、Ni、Ba、Zr元素含量高出其上部层位样品的几倍至几十倍;横向,东部青荆剖面硅质岩V、Sr、Ba等元素含量高出其他剖面样品几倍,而Rb、Zr元素含量则较低,其他元素含量变化不大。与上、下地壳相比,下地壳中V、Cr、Co、Ni、Th、U、Y的含量高于上地壳,本区硅质岩中Co、Ni、Th、U、Y基本上比上地壳还要低,表现为相对于上地壳亏损,而V、Cr元素含量却高于上地壳值。与上、下地壳一样,本区硅质岩Sr的含量远高于Rb含量。上、下地壳中Ba含量极低,而本区硅质岩Ba含量却高出它们几百倍,而较高含量的Ba正是热水沉积的重要标志(Rona P A, 1978; Fleet A J, 1983; Rona P A, 1988)。上下地壳中Zr含量较低,而本区硅质岩中Zr含量普遍高出上下地壳十几倍。前人研究成果表明,热液含金属沉积物的Zr含量一般小于50×10⁻⁶,而深海含金属沉积物Zr含量通常大于100×10⁻⁶(Rona P A, 1978)。

表2 灯影组硅质岩系微量元素含量及参数表($\times 10^{-6}$)Tab. 2 Trace elements analysis of Dengying Formation cherts and parameters($\times 10^{-6}$)

样号	D115	D56	D58	D28	D36	D44	UC	LC
岩性	硅质白云岩	硅质白云岩	硅质岩	硅质岩	硅质岩	硅质岩	上地壳	下地壳
采样地点	马元	何家湾		麻柳坝	青荆			
Li	2.252	0.959	7.314	33.69	3.42	11.87		
Be	0.114	0.081	0.685	1.024	0.528	0.233		
Sc	3.228	3.140	5.495	8.225	4.766	4.033		
V	1.443	1.313	62.88	28.2	755.5	167.7	11.6	38
Cr	4.462	4.525	26.26	28.84	155.8	22.64	18.6	99
Co	1.412	2.175	5.331	4.738	3.445	3.618	14.3	37.4
Ni	5.025	5.745	19.67	12.21	42.75	23.06	52	79
Cu	14.72	1.878	27.19	30.88	68.11	35.57	14	17
Zn	42.22	3.068	31.860	31.1	85.96	26.89	1.4	1.4
Ga	0.653	0.194	3.609	4.907	1.815	0.703	2.0	1.3
Rb	3.246	1.350	17.09	25.73	7.346	4.842	20.72	7.2
Sr	5.361	9.598	175.4	97.48	95.7	1920	237	165
Y	0.403	0.195	7.784	10.16	15.52	10.67	25.9	28.1
Zr	3.683	1.314	31.32	43.08	15.58	13.90	1.4	0.6
Nb	0.292	0.256	1.623	3.018	0.874	0.411	0.055	0.08
Cd	0.243	0.011	0.285	0.143	3.335	0.74	2.5	2.1
In	0.008	0.004	0.020	0.030	0.031	0.010	0.31	0.30
Cs	0.068	0.009	1.141	1.212	0.402	0.393	5.8	4.0
Ba	10.840	31.68	124.5	250.1	551.2	404.3	1.5	0.48
Hf	0.098	0.031	0.721	1.076	0.327	0.211	1.4	0.6
Ta	0.022	0.016	0.124	0.215	0.054	0.038	0.75	0.26
Pb	3.309	1.424	29.83	2.506	4.408	4.243	10.3	6.6
Bi	0.016	0.009	0.048	0.077	0.048	0.044	2.5	0.93
Th	0.185	0.081	3.121	3.420	0.667	0.641	11.6	38
U	0.374	0.146	5.910	0.867	6.558	8.831	18.6	99
V/Y	3.58	6.73	8.08	2.78	48.68	15.72		
Ni/Co	3.56	2.64	3.69	2.58	12.41	6.37		
Th/Sc	0.06	0.03	0.57	0.42	0.14	0.16		
Th/U	0.49	0.55	0.53	3.94	0.10	0.07		
Ba/Sr	2.02	3.30	0.71	2.57	5.76	0.21		
V/Cr	0.32	0.29	2.39	0.98	4.85	7.41		
V/(V+Ni)	0.22	0.19	0.76	0.70	0.95	0.88		

注:UC为上地壳平均成分;LC为下地壳平均成分;UC和LC数据据Wedepohl(1995)。

以下地壳物质平均值(Wedepohl K H, 1995)标准化的微量元素蛛网图(图3)显示,各硅质岩样品微量元素曲线具有相似的趋势,其中Cs、Th、U、Y相对下地壳亏损,Ba、Zn、Zr等元素高度富集等,可以推测,本区硅质岩形成时受到热水沉积的影响。标准化后的2个硅质白云岩样品的微量元素含量总体较低,单个元素的含量也较低,均位于硅质岩曲线下方,显示出了硅质岩与硅质白云岩形成时具有不同的物质来源,且硅质白云岩受到的热水沉积比例明显小于硅质岩。

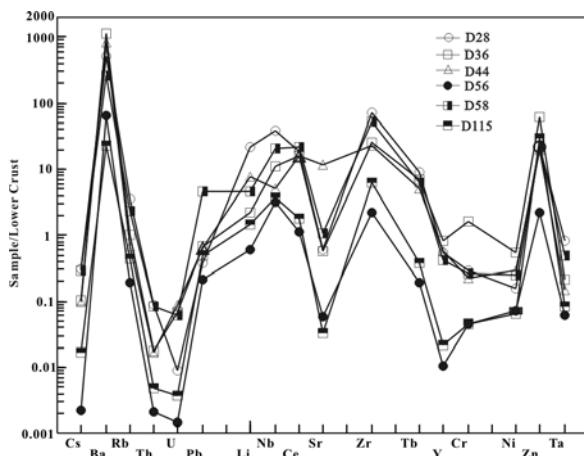


图3 研究区硅质岩系微量元素蛛网图

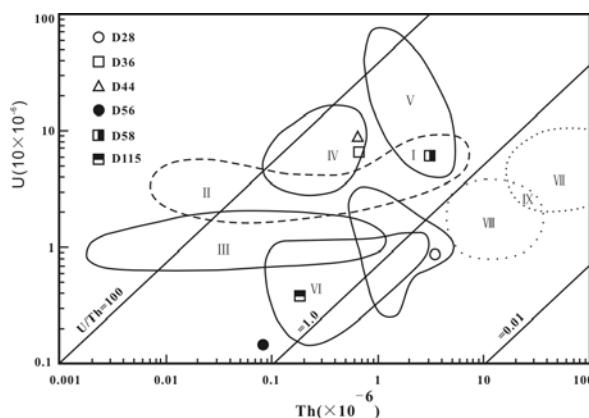
Fig. 3 Spider diagram of trace elements of cherts in studied area

有研究表明,大多数沉积岩的Th/U值都大于1,但热水沉积岩的Th/U值则小于1。本区硅质岩中有5件Th/U值<1,且所有样品均投到热水沉积物区(图4),说明硅质岩在形成时受到热水沉积的影响。在Zr-Cr图解(图5)中,热水及现代水成沉积物分别具有不同的趋势线及集中区,本区样品投影点全部落于现代热水沉积物的趋势线附近,也反映了本区硅质岩热水成因的地球化学特点。Ba/Sr值基本大于1,根据前述,说明硅质岩形成时受到海底热水的影响。

4 硅质岩系稀土元素地球化学特征及成因类型

笔者使用澳大利亚后太古宙平均沉积岩(PAAS)作为标准值(Mclennenan, 1989)对研究区硅质岩系分析值进行标准化。表征REE组成的参数

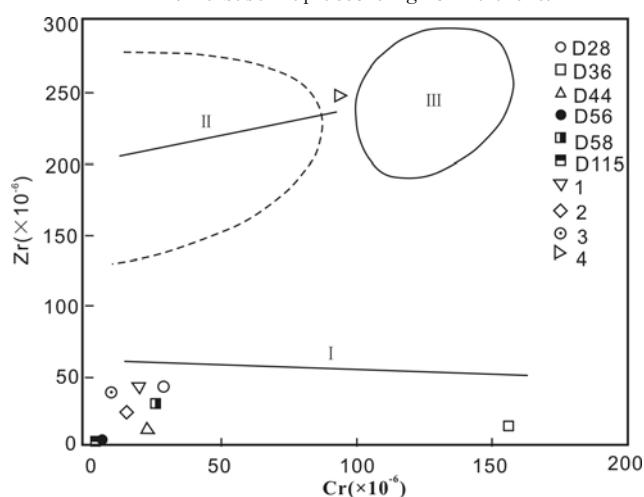
有 Σ REE, LREE_N/HREE_N, Ce/Ce*, Eu/Eu*, (La_N/Yb_N), (La_N/Ce_N)。其中,Ce/Ce*, Eu/Eu*的计算公式采用王中刚等(1989)提出的公式计算。硅质岩系稀土元素分析数据及参数见表3。



I. TAG 热水沉积物区; II. Galapagos 热水沉积物区; III. Amphitrite 热水沉积物区; IV. 红海热水沉积物区; V. 中太平洋中脊热水沉积物区; VI. Langban 热水沉积物区; VII. 锰结核区; VIII. 普通深海沉积物区; IX. 铝土矿区; X. 古老石化的热水沉积物区

图4 不同类型沉积物的Th-U关系图

(底图据 Bostrom K, 1979)
Fig. 4 U verses Th diagram of different sediments
(the base map according to literature)



I. 现代热水沉积物的趋势线; II. 现代水成沉积物的趋势线及集中区; III. 现代水成成岩含金属沉积物的分布区;
1. DSDPLeg32 燧石岩; 2. Shimanto 地体燧石岩; 3. Franciscan 地体燧石岩; 4. 深海沉积黏土平均值(黎彤, 1981)

图5 不同类型沉积物的Cr-Zr关系图

(底图据 Marchig(1982))
Fig. 5 Cr verses Zr diagram of different sediments
(the base map according to literature)

从表3可以看出,研究区灯影组硅质岩系稀土总量均较低,其中采自于大巴山构造带何家湾剖面的硅质白云岩 Σ REE最低,仅为 1.85×10^{-6} ,青荆剖面硅质岩 Σ REE最高,为 50.97×10^{-6} (PAAS稀土总量平均值为 184.8×10^{-6})。比较而言,硅质岩的 Σ REE比硅质白云岩 Σ REE要高出一个数量级,这与PAAS标准化配分型式图结果一致(图6)。

硅质岩系REE参数也表现出不同的特征。其中,2个硅质白云岩样品 La_N/Yb_N 值分别为0.94和1.54,即近于1或大于1,说明硅质白云岩轻、重稀土分异不明显或轻稀土富集。而硅质岩的 La_N/Yb_N 值均小于1,说明硅质岩重稀土较轻稀土富集;大部分样品的 δCe 等于或小于1,为Ce负异常,而 δEu 则大于1或等于1,为Eu正异常(图6)。

表3 灯影组硅质岩系稀土元素含量及参数表($\times 10^{-6}$)
Tab. 3 REE data of Dengying Formation cherts and parameters($\times 10^{-6}$)

样号	D115	D56	D58	D28	D36	D44
岩性	硅质白云岩	硅质白云岩	硅质岩	硅质岩	硅质岩	硅质岩
采样地点	马元	何家湾		麻柳坝		青荆
La	0.623	0.376	5.723	8.202	8.249	6.010
Ce	1.124	0.686	13.20	11.63	9.589	9.591
Pr	0.134	0.073	1.606	1.901	1.653	1.364
Nd	0.538	0.289	6.968	7.887	7.320	6.261
Sm	0.096	0.055	1.511	1.955	1.377	1.198
Eu	0.019	0.024	0.359	0.497	0.397	0.334
Gd	0.108	0.054	1.696	2.365	1.858	1.413
Tb	0.014	0.007	0.237	0.337	0.258	0.192
Dy	0.083	0.036	1.379	1.959	1.770	1.213
Ho	0.016	0.007	0.258	0.378	0.408	0.276
Er	0.048	0.019	0.715	1.043	1.249	0.815
Tm	0.007	0.003	0.096	0.150	0.170	0.109
Yb	0.049	0.018	0.577	1.028	1.018	0.704
Lu	0.007	0.003	0.086	0.159	0.135	0.111
Y	0.403	0.195	7.784	10.16	15.52	10.67
Σ REE	3.27	1.58	42.20	49.65	50.97	40.26
La_N/Yb_N	0.94	1.54	0.73	0.59	0.60	0.63
La_N/Ce_N	2.00	1.00	0.88	1.40	1.83	1.33
δEu	1.00	2.00	1.06	1.09	1.17	1.21
δCe	0.50	1.00	1.03	0.70	0.59	0.77
$(LREE)_N$	0.10	0.07	1.31	1.62	1.36	1.14
$(HREE)_N$	0.16	0.07	2.40	3.59	3.63	2.55
$LREE_N/HREE_N$	0.61	0.96	0.54	0.45	0.37	0.45

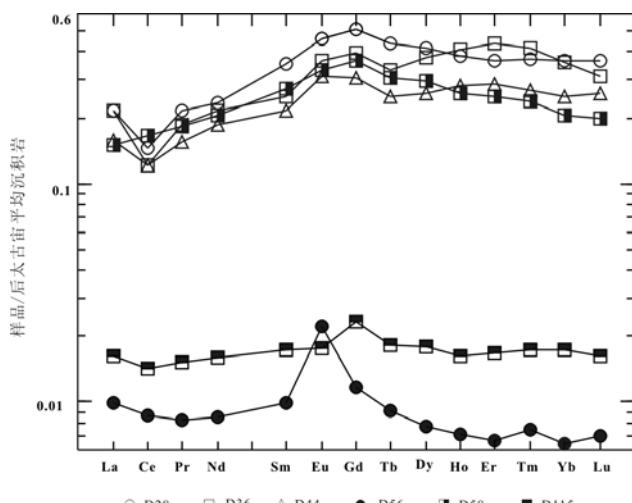


图 6 研究区 PAAS 标准化硅质岩系稀土配分型式图

Fig. 6 PAAS-normalized REE patterns of cherts in studied area

由稀土配分型式图(图 6)看出, 硅质岩稀土配分型式均为左倾, 重稀土富集明显, 负 Ce 异常, 而 2 个硅质白云岩稀土配分型式近于平坦或弱的右倾, 正 Eu 异常。据 Henderson(1984)的研究, 热水沉积物具有相对高的重稀土含量和负的 Ce 异常, 对于混合水体沉积物, 热水沉积物比例越高, Ce 负异常越明显, 重稀土含量越高(图 7)。通过对比分析, 表明研究区硅质岩具有典型的热水沉积物的稀土配分曲线特征, 而且硅质岩的热水沉积比例明显高于硅质白云岩, 也就是说, 研究区硅质岩为典型的热水沉积物, 而硅质白云岩则有较大比例的正常海水参与。

表 4 不同沉积背景下硅质岩稀土元素的标志表(据张汉文, 1991 修改)
Tab. 4 REE indices of cherts from different depositional settings(amended by Zhang H W, 1991)

沉积环境	Ce/Ce [*]	Eu/Eu [*]	(La/Ce) _N	(La/Yb) _N
洋中脊	0.18~0.60	0.97~1.35	1.66~5.49	0.57~0.96
	0.29	1.08	3.59	0.74
开阔洋盆	0.50~0.76	1.06~1.33	1.30~2.48	1.30~2.48
	0.60	1.15	1.82	1.82
大陆边缘	0.67~1.52	0.64~1.72	0.66~1.33	0.66~1.33
	1.11	1.21	0.96	0.96

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} - \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

本次研究采用硅质岩稀土参数与前人研究的不同环境下硅质岩稀土参数(表 4)进行对比, 以判识大巴山构造带硅质岩的古沉积环境。本区样品的

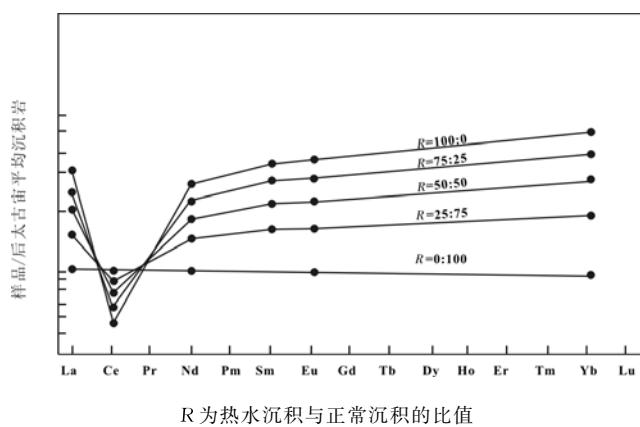


图 7 按不同比例混合的热水与非热水沉积物的 REE 型式图(Henderson P, 1984)

Fig. 7 REE patterns of mixtures of hydrothermal sediments and non-hydrothermal sediments in different proportions
(Henderson P, 1984)

5 硅质岩系沉积环境探讨

硅质岩稀土元素很少受沉积之后地质作用的影响, 能够较好的恢复古海洋环境及构造环境, 大多数学者用硅质岩去恢复古沉积环境(徐跃通, 1997; 田云涛等, 2007)。用来有效判别硅质岩形成环境的参数主要有 Ce/Ce^{*}、La_N/Yb_N、La_N/Ce_N(表 4)及微量元素 Th/U 值等。Murray 等(1990, 1991)的研究结果显示:大洋中脊 Ce/Ce^{*} 最低(平均 0.29), 大洋盆地拥有中等的 Ce/Ce^{*} (平均 0.60), 大陆边缘的 Ce/Ce^{*} 最高(平均 1.11)。Ce/Ce^{*} 越大说明受陆源影响越大; La_N/Ce_N 越高说明受陆源影响越小(Murray, 1994)。

Ce/Ce^{*} 为 0.50~1.03, 平均为 0.76; La_N/Ce_N 为 0.88~2.0, 平均为 1.41, 其特征介于大洋盆地与大陆边缘之间。

与稀土元素不同,微量元素在成岩作用过程中表现出相对的活动性(Murray, 1990),有关沉积于不同大洋环境的硅质岩微量元素系统变化的研究资料很少,难以进行系统的对比研究。已有的少数研究资料表明(Murray, 1991; 李献华, 2000),洋中脊和大洋盆地硅质岩的V含量明显高于大陆边缘硅质岩,而Y含量则相反,所以洋中脊和大洋盆地硅质岩的V/Y值明显高于大陆边缘硅质岩。根据前人研究,大洋盆地V/Y≈5.8; 洋中脊V/Y≈4.3; 大陆边缘V/Y≈1.34(吕志成, 2004)。同时,在远离大陆边缘环境的洋盆内,Th/Sc和Th/U值将会降低(分别为0.01~0.3和0.6~5.0)(Girty, 1996)。此外,Th和U在沉积物中的含量取决于沉积环境的氧化还原电位,一般在缺氧条件下Th/U值为0~2,强氧化环境下为8(Kimura, 2001)。Jones(1994)对西北欧晚侏罗世沉积古氧相地球化学研究后,认为当V/Cr值大于4.25时即属缺氧环境;而Wignall(1994)认为V/(V+Ni)值大于0.83即为缺氧环境。本区硅质岩V/Y值介于2.78~48.68,处于大洋盆地到大陆边缘的过渡地带,部分数据具有大陆边缘环境的特征; Th/Sc值介于0.03~0.57,也显示出大洋盆地到大陆边缘的过度环境; Th/U值介于0.07~3.94,显示出具有还原性质的大洋盆地特征。V/Cr、V/(V+Ni)值表明本区硅质岩部分形成于还原环境中,部分形成于氧化环境中,这与后面讨论的裂陷槽带和浅海陆棚环境具有一致性。

结合本区构造演化特征,震旦纪在扬子板块内部发育了内陆裂谷,而在板块边缘则往往发育与内陆裂谷相对应的边缘裂陷槽,并进而发育为岛弧海或复杂的大陆边缘,这也与地台型硅质岩所反映的沉积环境相一致。因此,本区硅质岩系显示出的大洋盆地到大陆边缘的过渡环境可能与此有一定的关系。

6 结论

通过对上扬子北缘灯影组硅质岩系地球化学特征的研究,可以得出如下认识。

(1) 硅质岩系Ba含量较高,Ba/Sr值基本大于1; Th/U值小于1,Th-U图解中所有样品均投到热水沉积物区; Zr元素较为富集,Zr-Cr图解中样

品全部投到热水沉积物趋势线附近;微量元素特征表明硅质岩形成时受到海底热水的影响。

(2) 硅质岩系REE总量低,Ce总体为负异常,Eu正异常明显,硅质岩HREE富集,硅质白云岩HREE富集不明显。 δCe 负异常程度反映出研究区硅质岩热水沉积比例明显高于硅质白云岩,也就是说,研究区硅质岩为典型的热水沉积物。

(3) Ce/Ce^* 、 La_N/Ce_N 、V/Y值表明灯影组硅质岩形成于大洋盆地到大陆边缘的过渡地带; Th/Sc、Th/U值显示出具有还原性质的大洋盆地特征。V/Cr、V/(V+Ni)值表明硅质岩主要形成于还原环境中,部分形成于氧化环境中。综合硅质岩稀土、微量元素特征,本区硅质岩应形成于复杂大陆边缘富氧的浅海陆棚环境及缺氧的陆内裂陷槽环境中。

参考文献(References):

- 薛春纪,祁思敬. 南秦岭泥盆纪同生热水沉积环境的沉积学及地球化学信息[J]. 西北地质,1995,16(4):38-42.
- XUE, Chunji, QI Sijing. The sedimentology and geochemical information of syngenetic and hydrothermal sedimentary environment of South qinling devonian[J]. Northwestern Geology, 1995,16(4):38-42.
- 王磊,杨建国,王小红,等. 甘肃北山红山铁矿区硅质岩地球化学特征及其成因意义[J]. 西北地质,2012,45(3):32-38.
- WANG Lei, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. Geochemical Characteristics of Chert of Hongshan Iron Deposit in Gansu Province and Its Petrogenic Significance[J]. Northwestern Geology, 2012,45(3):32-38.
- Large D. 加拿大育空地区托姆铅锌钡矿床附近沉积岩的地球化学. 地质地球化学[J]. 1985,(3):21-25.
- Large D. The geochemistry of sediment rocks near the lead-zinc-barium deposit of thom in yukong area, Canada [J]. Geology-Geochemistry, 1985,(3):21-25.
- 孙省利,陈践发,刘文汇. 塔里木盆地下寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):46.
- SUN Shengli, CHEN Jianfa, LIU Wenhui. Geochemical characteristics of cherts of Lower Cambrian in the Tarim Basin and its implication for environment [J]. Petroleum exploration and development, 2004, 31(3):46.

- 葛朝华,韩发. 广东大宝山矿床喷气-沉积成因地质地球化学特征[M]. 北京:北京科学技术出版社,1987,26-29.
- GE Chaohua, HAN Fa. The geological and geochemical characteristics of jet-sedimentary origin in Dabaoshan deposition[M]. Beijing: Beijing Science & Technoogy Press, 1987,26-29.
- 张汉文. 秦岭泥盆系的热水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[A]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊[C],北京:地质出版社,1991: 15-42.
- ZHAN Hanwen. The relation of thermal water sedimentary rocks between its minerals—outlining the action of submarine hot-water in vonian, Qinling area[A]. The issue of Xi 'an institute of geology and mineral resources, chinese academy of geologecal sciences[C]. Beijing: Geological Publishing House,1991:15-42.
- 杨建民. 硅质岩岩石学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. 岩石矿物学,1999,18(2) :108-120.
- YANG Jianmin. The research method of petrochemistry about siliceous rocks and its application in Jingtieshan type ore deposit[J]. Petromineralogy, 1999, 18 (2) : 108-120.
- 姚林波,高振敏,杨竹森. 鱼塘坝硒矿床富硒硅质岩的成因[J]. 中国科学(D辑),2002,32(1):54-63.
- YAO Linbo, GAO Zhenmin, YANG Zhusen. The origin of se-enriched siliceous in selenium deposit of Yuetangba [J]. Science In China(Series D) ,2002,32(1):54-63.
- 吕志成,刘丛强,刘家军,等. 北大巴山下寒武统毒重石矿床赋矿硅质岩地球化学研究[J]. 地质学报,2004,78(3): 390-391.
- LV Zhicheng, LIU Congqiang, LIU Jiajun, et al. Geochemical Studies on the Lower Cambrian Witherite-bearing Cherts in the Northern Daba Mountains [J]. Acta Geologica Sinica,2004,78(3):390-391.
- 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):302-303.
- LI Xiaobiao, LUO Yuanliang, LUO Taiyi, et al. Pre-early Cambrian Black Rock Series in Chenkou District, Chongqing:(2)Sedimentary Environment Study of Chert in Lower Cambrian Bashan Formation [J]. Acta Mineralogica Sinica,2007,27(3/4):302-303.
- 董树文,胡建民,施炜,等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆[J]. 地球学报,2006,27(5):403-410.
- DONG Shuwen, HU Jinmin, SHI W, et al. Jurassic Superposed Folding and Jurassic Foreland in the Daba Mountain, Central China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006,27(5):403-410.
- 施炜,董树文,胡建民,等. 大巴山前陆西段叠加构造变形分析及其构造应力场特征[J]. 地质学报,2007,81(10): 1314-1327.
- SHI Wei, DONG Shuwen, HU Jianmin, et al. An analysis of superposed deformation and tectonic stress fields of the western segment of Daba mountains foreland[J]. Acta Geologica Sinica,2007,81(10):1314-1327.
- 侯满堂,王党国,邓胜波,等. 陕西马元地区铅锌矿地质特征及找矿远景[J]. 中国地质,2007,34(1):102.
- HOU Mantong, WANG Dangguo, DENG Shengbo, et al. Geological characteristics of lead-zinc Mineralized Zones in the Mayuan area, Shaanxi, and their Ore Prospects [J]. Geology In China,2007,34(1):102.
- 黎彤. 元素的丰度与应用[J]. 地质与勘探,1981, 6 (3): 204-212.
- LI Tong. The abundance of elements and its application[J]. Geology and Prospecting,1981,6(3):204-212.
- 王中刚,于学元,赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989,88-93.
- WANG Zhonggang, YU Xueyuan, ZHAO Zhenhua. Geochemistry of rare earth elements [M]. Beijing: Science Press,1989,88-93.
- 徐跃通. 鄂东南晚二叠世大隆组层状硅质岩成因地球化学及沉积环境[J]. 桂林工学院学报,1997, 17 (3): 204-212.
- XU Yuetong. Genetic Geochemistry for the Bedded Silicalite in the Late Permian Dalong Formation and Its Sedimentary Setting in Southeastern Hubei[J]. Journal of guilin institute of technology,1997,17(3):204-212.
- 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 Yuntao, FENG Qinglai, LI Qin. The Petrogenesis and Sedimentary Environment of the Bedded Cherts from Upper Permian Dalong Formation, Southwest Guangxi [J] . Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25 (5): 671-677.
- 李献华. 赣东北蛇绿混杂岩的地球化学特征及构造意义[J]. 中国科学(D辑),2000,30(3):1-5.
- LI Xianhua. Characteristics and tectonic significance of ophiolitic mélange in northeast Jiangxi[J]. Science In China(Series D),2000,30(3):1-5.
- RONA P A. Criteria for recognition of hydrothermal mineral depots in oceanic crust[J]. Economic Geology, 1978,

- 73(2):135-160.
- Rancourt D G, Fortin D, Pichler T, et al. Mineralogical characterization of a natural very As-rich hydrous ferric oxide coprecipitate formed by mixing of hydrothermal fluid and sea water[M]. *American Mineralogist*, 2001, 86:834-851.
- Pichler T, Veizer J, Hall G E M. Natural input of arsenic into a coral reef ecosystem by hydrothermal fluids and its removal by Fe (III) oxyhydroxides[M]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33:1373-1378.
- Peter J M, Scott S. Mineralogy, composition, and fluid-inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California [J]. *Canadian Mineralogist*, 1988, 26: 567-587.
- Smith P A, Cronan D S. The geochemistry of metalliferous sediments and waters associated with shallow submarine hydrothermal activity (Santorini, Aegean Sea) [J]. *Chemical Geology*, 1983, 39:241-262.
- Wood D A, Joron J L, Treuil M. Are-qppraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. *Earth Planet Sci Letts*, 1979, 45:326-336.
- Quinby-Hunt M S, Wilde P. The provenance of low-calcic black shales[J]. *Min Deposit*, 1991, 26(2):113-121.
- Rona P A. Hydrothermal mineralization at oceanic ridges [J]. *Canadian Mineralogist*, 1988, 26:431-465.
- 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, Californian: assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55:1875-1895.
- Fleet A J. Hydrothermal and hydrogenous ferromanganese deposits[A]. In: Rona P A. et al, eds. *Hydrothermal Process at sea Floor Spreading Centers*[C]. New York: Rlenum Press, 1983, 537-570.
- Shimizu H, Masuda A. Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation[J]. *Nature*, 1977, 266 (5600):346-348.
- Henderson P. Rare earth element geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V. , 1984. 195-211.
- Douthitt C B. The geochemistry of the stable isotope of silicon[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46 (8):1149-1458.
- Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert; general principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90:213-232.
- Rona P A, et al. Hydrothermal mineralization at ocean ridges [J]. *The Canadian Mineralogist- Seafloor Hydrothermal Mineralization*, 1988, 26 (3):431-466.
- Wedepohl K H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim*[J]. *Acta*, 1995, 59: 1217-1232.
- Bostrom K, Rydell H and Joensuu O. Langbank: An exhalative sedimentary deposit[J]. *Econ Geol*. 1979. 74 (5):1002-1011.
- Marchig V. Some geochemistry indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments[J]. *Marine Geology*, 1982, 58(3):241-256.
- McLennenan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviewa in Mineralogy*, 1989, 21:169-200.
- Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L. et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18:268-271.
- Girty H G. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66:107-118.
- Kimura H, Watanabe Y. Oceanic anoxia at the PrecambrianCa-mbrian boundary[J]. *Geology*, 2001, 29 (11):995-998.
- Jones B L, Manning A C. Comparison of geochemieal indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111: 111-129.
- Wignall P B. Black Shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994.