

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

吴超伟^{1,2}, 侯明才^{1,2}, 黄虎^{1,2}, 周倩玉², 罗宏谓²

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

2. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

摘要 滇东南麻栗坡位于右江盆地西南缘, 该处蛇绿岩被认为是古特提斯洋壳的遗迹, 对蛇绿岩所代表八布洋的研究是全面了解右江盆地与华南西南缘古特提斯构造演化的重要环节。研究区广泛发育一套夹有硅质岩的深水相沉积, 对麻栗坡八布和西牛堡中一下二叠统他披组硅质岩的地球化学特征研究表明: 硅质岩 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值为 0.43~0.70, Al_2O_3/TiO_2 值为 25.5~44.8, Eu/Eu^* 值为 0.81~1.02, 为非热液成因硅质岩。硅质岩 Ce/Ce^* 值分别为 0.67~1.29 和 0.77~1.18, Y/Ho 值分别为 28.84~31.23 和 26.41~28.91, 形成于大陆边缘环境。结合其他地区硅质岩地球化学特征, 认为早一中二叠世八布洋盆的西南缘可能为活动大陆边缘, 其洋壳的俯冲方向为南西向。

关键词 早一中二叠世; 硅质岩; 地球化学; 八布洋

第一作者简介 吴超伟, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 沉积地球化学, E-mail: YZBYoukobe@163.com

通信作者 侯明才, 男, 教授, E-mail: houmc@cdu.edu.cn

中图分类号 P534.46 **文献标志码** A

0 引言

前人于 1998 年在滇东南麻栗坡八布地区提出蛇绿岩之后, 引起了广泛的关注^[1]。部分学者通过麻栗坡蛇绿岩与金沙江—哀牢山缝合带蛇绿岩年龄及成分的比对, 认为麻栗坡蛇绿岩可能是金沙江哀牢山缝合带蛇绿岩的一部分, 八布蛇绿岩所代表的八布洋盆与金沙江—哀牢山洋盆可能同属古特提斯分支洋, 其经历了泥盆纪初始裂谷、石炭纪—二叠纪洋盆扩张、俯冲和三叠纪闭合造山的过程^[2-6]。八布分支洋的形成、扩张、俯冲以及闭合对右江盆地的演化有着极其重要的影响^[7-9]。然而, 目前有关该洋盆的俯冲方向仍存在北东向和南西向两种不同的观点^[3,10-12]。

硅质岩的成分组成简单且基本不受成岩作用以及风化作用的影响, 其地球化学特征记录了火山碎屑、陆源碎屑以及热液沉积等的含量变化。硅质岩的常量元素常用来判断成因, 而稀土元素用来讨论

形成环境, 均对古环境的恢复有着重要意义^[13-16]。研究区内广泛分布着一套夹有硅质岩序列的深水相沉积, 曾被认为形成于中晚三叠世^[17]。而最近有关地学年代学研究表明, 该套沉积岩可能形成于早二叠世^[18]。本文以麻栗坡硅质岩样品为研究对象, 探讨了其地球化学特征对早一中二叠世八布洋盆乃至右江盆地构造演化的地质意义。

1 地质背景

研究区位于滇桂交界处, 与越南毗邻, 西部为文山—麻栗坡断裂, 东部以那坡裂陷槽与右江盆地相邻^[3](图 1a)。麻栗坡八布地区出露一套东西向长约 20 km, 南北向宽约 4~8 km 的蛇绿岩带。该蛇绿岩带以构造岩片的形式出露于北西向文山—麻栗坡和富宁走滑断裂之间的断块内^[1], 由南向北逆冲—推覆在深水沉积之上, 与晚古生代和早一中二叠世地层均呈逆冲—推覆断裂叠接^[19](图 1b)。

收稿日期: 2018-11-21; 收修改稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502109); 成都理工大学中青年骨干教师计划项目(KYGG201718) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41502109; Young and Middle-Aged Backbone Teacher Program of Chengdu University of Technology, No. KYGG 201718]

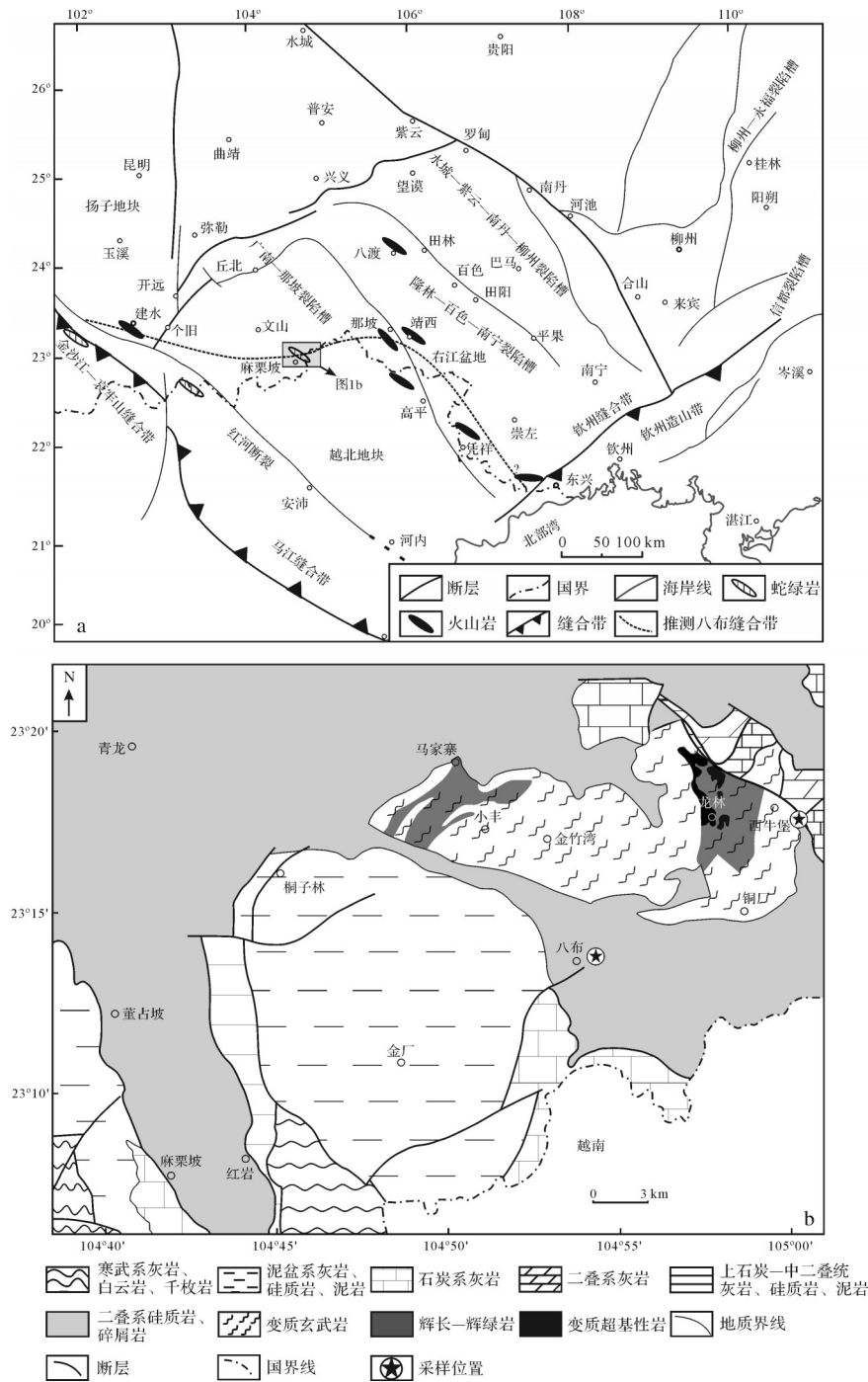


图1 右江地区构造格架图(a)^[7]和研究区地质简图(b)^[5,18]

Fig.1 (a) Tectonic framework in Youjiang area^[7] and (b) geological maps of the study area^[5,18]

八布东部西牛堡东南约1 km的公路旁出露浅灰色薄层硅质岩夹有少量粉红色薄层泥岩。该套硅质岩和泥岩厚度约5 m,并已发生明显变形。硅质岩与下伏玄武岩接触关系不明显,与上覆泥岩、粉砂岩整合接触(图2)。前人的研究认为该套硅质岩是麻栗坡蛇绿岩套的一部分,且硅质岩中含有早一中二叠

世*Pseudoalbaillella lomentaria*带放射虫化石^[20]。而在八布村东侧的碎屑岩地层中,同样存在一套薄层硅质岩为主的沉积序列,相较于西牛堡地区硅质岩,此处泥岩夹层更多,硅质岩和泥岩厚度20~30 m,其上部 and 下部皆与泥岩、粉砂岩呈渐变接触关系^[18](图2)。通过硅质岩—泥岩地层之上火山碎屑岩的碎屑岩结

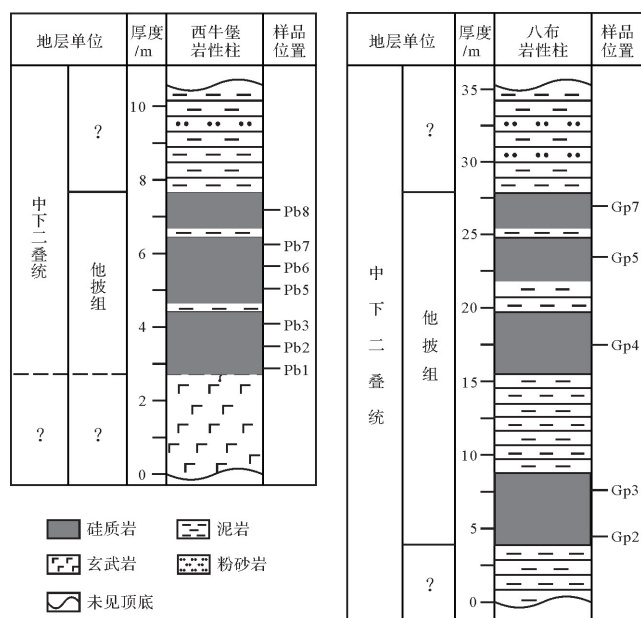


图2 八布和西牛堡中一下二叠统他披组柱状图

Fig.2 Histogram of the Middle-Lower Permian Tapi Formation in the Babu and Xiniubao areas

石年代学研究表明,该套硅质岩可能形成于早二叠世^[18]。考虑到这两套地层在岩石组合和年代上可以与麻栗坡附近红岩地区中一下二叠统他披组对比^[5,18],本文将八布和西牛堡地区该套硅质岩地层命名为他披组。

2 样品及测试方法

本次研究共采集了八布和西牛堡地区他披组12件新鲜的硅质岩样品,详细采样位置见图2。这些硅质岩样品主要由微晶石英或放射虫化石组成,受成岩作用影响小,其样品编号以及主量、稀土元素的结果详见表1。样品的主量元素以及微量元素的测定均在中国地质大学(武汉)测定。主量元素采用仪器XRF—1800波长扫描X射线荧光光谱仪测定,微量元素含量利用Agilent 7500a ICP-MS分析完成。用于ICP-MS分析的样品处理如下:1)称取50 mg约200目的岩石粉末于Teflon溶样器中;2)采用Teflon溶样弹将样品用HF+HNO₃在195℃条件下消解48 h;3)将在120℃条件下蒸干除Si后的样品,用2%稀硝酸溶液稀释2 000倍,定容于干净的聚酯瓶。本文Ce异常表达式为: $Ce/Ce^* = 2 \times Ce_N / (La_N + Pr_N)$,Eu异常表达式为 $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$,均采用澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS)进行标准化。

3 硅质岩地球化学特征

3.1 主量元素

八布及西牛堡地区的硅质岩均有较高的SiO₂含量。其中,八布他披组硅质岩的SiO₂含量(89.41%~94.90%),略低于西牛堡他披组硅质岩(91.87%~95.60%)。由于成岩过程中SiO₂稀释作用的影响,硅质岩其他主量元素的含量均很低。八布和西牛堡他披组硅质岩样品中的Al₂O₃含量远高于其他主量元素(分别为1.02%~4.93%和1.66%~3.80%),反映了样品中可能含有较高的泥质成分。八布和西牛堡他披组硅质岩样品中的Fe₂O₃含量相对较高,分别为1.00%~1.75%和0.73%~1.51%,仅次于Al₂O₃的含量。其余主量元素含量均低于1%。

3.2 稀土元素

稀土元素标准化模式图(图3)显示,八布和西牛堡他披组硅质岩样品总体呈平坦状分布。其中,八布他披组硅质岩样品Ce异常变化较大,而西牛堡他披组样品无明显Ce异常。所有硅质岩样品均没有明显的Y和Eu异常。八布他披组硅质岩除样品Gp2具有较明显的Ce负异常($Ce/Ce^* = 0.67$)外,其他样品的 Ce/Ce^* 值为0.84~1.29,无明显Ce负异常现象。西牛堡地区硅质岩样品的 Ce/Ce^* 值为0.77~1.18,也无明显的Ce负异常现象。八布他披组硅质岩和西牛堡他披组硅质岩的 Eu/Eu^* 值相似,分别为0.81~1.00和0.89~1.02。所有样品的Y/Ho值在26.41和31.23之间,指示Y和Ho两元素没有发生明显的分异。

4 讨论

4.1 硅质岩成因

硅质岩中有热液影响通常伴随着Fe、Mn的富集,而陆源的输入会引起Al、Ti的富集。Boström *et al.*^[21]提出,海相沉积物中衡量沉积物热液组分含量的标志是 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值,该比值随着到扩张中心距离的增加而增大。Adachi *et al.*^[13]和Yamamoto^[22]认为纯热液成因的硅质岩 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值为0.01,纯生物成因的硅质岩 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值为0.6,其余硅质岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值均在0.01~0.6之间变动。据此拟定了Al-Fe-Mn三角判别图解,用于判别硅质岩成因。如图4,西牛堡硅质岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值为0.58~0.70,为非热液成因。除了样品Gp2和Gp3的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值处于热液成因与非热液成因之间外,其余

表1 麻栗坡地区硅质岩样品主量元素(%)和稀土元素含量(10⁻⁶)
Table 1 Major and rare earth element (REE) data for cherts from Malipo area

样品	八布					西牛堡						
	Gp2	Gp3	Gp4	Gp5	Gp7	Pb1	Pb2	Pb3	Pb5	Pb6	Pb7	Pb8
SiO ₂	93.92	94.90	93.20	89.85	89.41	94.14	91.92	95.55	94.92	92.96	91.87	95.60
TiO ₂	0.06	0.04	0.07	0.17	0.19	0.06	0.09	0.05	0.05	0.09	0.10	0.06
Al ₂ O ₃	1.56	1.02	2.26	4.77	4.93	2.25	3.80	1.66	2.24	2.70	3.42	2.11
Fe ₂ O ₃	1.40	1.00	1.75	1.50	1.71	0.83	1.15	0.76	0.96	1.29	1.51	0.73
MnO	0.01	0.01	0.06	0.03	0.02	0.04	0.05	0.07	0.04	0.15	0.05	0.04
MgO	0.16	0.09	0.42	0.53	0.60	0.58	0.74	0.50	0.58	0.77	0.93	0.53
CaO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.22	0.06	0.07	0.01	0.04	0.10	0.08
Na ₂ O	0.04	0.03	0.09	0.33	0.28	0.30	0.44	0.12	0.05	0.13	0.36	0.29
K ₂ O	0.38	0.28	0.60	1.30	1.33	0.26	0.49	0.22	0.25	0.36	0.43	0.26
P ₂ O ₅	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
LOI	2.16	1.87	1.16	1.52	1.67	1.20	1.24	0.84	1.00	1.14	1.32	0.58
Σ	99.75	99.28	99.66	100.1	100.2	99.90	100.0	99.85	100.1	99.64	100.1	100.3
Al [*]	0.46	0.43	0.48	0.70	0.68	0.66	0.70	0.60	0.63	0.58	0.62	0.67
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	26.00	25.50	32.29	28.06	25.95	37.50	42.22	33.20	44.80	30.00	34.20	35.17
La	3.31	2.12	5.93	10.10	11.63	8.76	18.1	5.35	12.9	12.3	12.9	5.22
Ce	4.57	3.78	15.67	23.47	27.08	17.50	42.1	14.1	21.0	29.3	34.0	12.4
Pr	0.75	0.51	1.33	2.20	2.65	2.45	4.65	1.47	3.05	3.17	3.39	1.37
Nd	2.69	1.97	5.08	8.42	9.93	10.0	18.8	6.48	11.9	13.4	13.7	5.63
Sm	0.49	0.37	0.77	1.71	1.58	2.89	4.57	1.79	3.24	3.16	3.36	1.45
Eu	0.08	0.08	0.11	0.32	0.29	0.60	0.87	0.38	0.66	0.67	0.62	0.30
Gd	0.42	0.36	0.48	1.34	1.42	2.84	4.41	2.03	2.90	3.01	3.22	1.33
Tb	0.08	0.06	0.07	0.21	0.24	0.44	0.64	0.32	0.45	0.43	0.47	0.21
Dy	0.44	0.31	0.48	1.21	1.32	2.29	3.33	1.82	2.48	2.28	2.45	1.16
Ho	0.09	0.07	0.09	0.23	0.26	0.39	0.60	0.33	0.43	0.41	0.42	0.21
Er	0.28	0.22	0.29	0.66	0.78	1.01	1.55	0.84	1.11	1.15	1.12	0.57
Tm	0.05	0.03	0.05	0.10	0.11	0.13	0.22	0.12	0.15	0.16	0.15	0.08
Yb	0.39	0.20	0.35	0.65	0.78	0.84	1.22	0.71	0.86	0.94	0.99	0.49
Lu	0.06	0.03	0.04	0.10	0.11	0.13	0.17	0.10	0.12	0.14	0.14	0.06
Y	2.88	2.19	2.74	6.57	7.56	10.3	17.2	9.56	12.0	11.6	11.7	5.90
Ce/Ce [*]	0.67	0.84	1.29	1.15	1.13	0.87	1.06	1.16	0.77	1.08	1.18	1.07
Eu/Eu [*]	0.81	1.00	0.84	0.99	0.90	0.99	0.91	0.94	1.01	1.02	0.89	1.02
Y/Ho	31.23	31.13	28.84	28.88	29.42	26.41	28.67	28.97	27.91	28.29	27.86	28.10

注: Al^{*} = Al / (Al + Fe + Mn)。

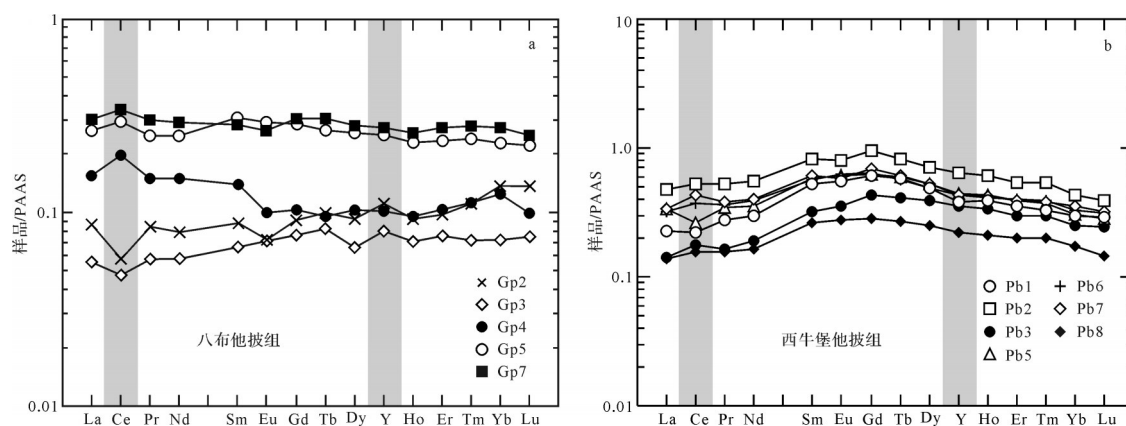


图3 硅质岩 PAAS 标准化稀土模式曲线图
Fig.3 REE + Y patterns of the analyzed samples normalized to PAAS

八布硅质岩样品均处在非热液成因的范围内。受到热液影响较大的沉积物的稀土元素球粒陨石标准化后表现为明显的Eu正异常^[23-25]。西牛堡和八布硅质岩样品的Eu/Eu*值为0.81~1.02,平均值为0.94,无Eu正异常,进一步证明了硅质岩样品为非热液成因。

Murray^[26]认为硅质岩成岩作用对Al和Ti的影响不明显,Al和Ti的元素地球化学行为特性决定了其可以用于分析硅质岩的成因。细粒沉积岩和海相沉积岩的 Al_2O_3/TiO_2 值一般在20~30之间^[27]。在火山岩中,长石往往富Al,而铁镁质的矿物中相较富Ti。当沉积物中混合火山岩碎屑时,其 Al_2O_3/TiO_2 值会发生明显变化,表现为含酸性火山岩碎屑时, Al_2O_3/TiO_2 值会增大,而含基性火山岩碎屑时, Al_2O_3/TiO_2 值则减小^[28]。西牛堡他披组硅质岩的 Al_2O_3/TiO_2 值为30.00~44.80,高于正常海相硅质岩的 Al_2O_3/TiO_2 值,且都位于B区(图4),反映了西牛堡他披组硅质岩中存在一些风化后的酸性火山碎屑成分。八布他披组硅质岩 Al_2O_3/TiO_2 值为25.50~32.30,稍大于海相硅质岩 Al_2O_3/TiO_2 值,除GP5与Gp7位于C区(图5),其他样品均位于B区,指示了该样品含有一些风化后的酸性火山碎屑成分。

4.2 硅质岩形成环境

海水中的 Ce^{3+} 易被氧化为 Ce^{4+} , Ce^{4+} 比 Ce^{3+} 溶度积小,容易被有机物微粒、结核或者铁锰氢氧化物吸附,导致海水中剩余的溶解态Ce相对亏损^[34]。因此,硅质岩的 Ce/Ce^* 值可以用来有效地判别硅质岩的形成环境^[35-38]。Murray *et al.*^[36-37]对加利福尼亚弗朗西斯

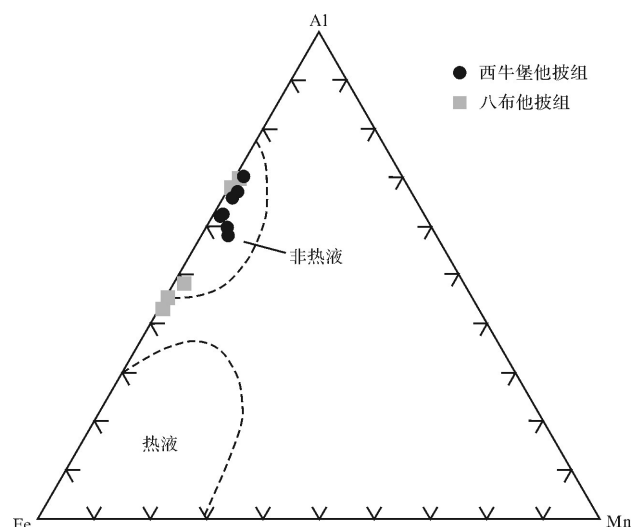


图4 硅质岩成因判别三角图^[13]

Fig.4 Al-Fe-Mn diagram for cherts^[13]

科杂岩中层状硅质岩序列的研究表明,在大洋中脊及两翼环境中形成的硅质岩表现为明显的铈负异常现象,常具有最低的 Ce/Ce^* 值(0.28 ± 0.12 , PAAS标准化);在大陆边缘环境中形成的硅质岩表现为铈负异常的缺失,通常具有较高的 Ce/Ce^* 值(平均值 1.02 ± 0.24 , PAAS标准化);而在开阔洋盆环境中形成的硅质岩则处于两者之间,表现为中等或者弱的铈负异常现象, Ce/Ce^* 值为 0.56 ± 0.10 (PAAS标准化)。另外, Bau *et al.*^[39]提出,部分沉积岩中Ce的负异常是由于富含金属沉积物及高温热液流体中存在La的富集造成的。据此,可以用 Pr/Pr^* 的值来检测是否是因为La的富集才导致样品中出现Ce的异常现象

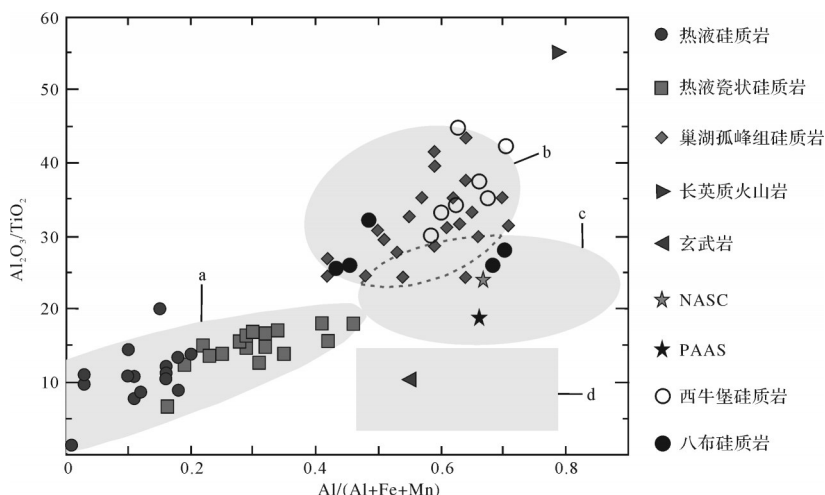


图5 $Al/(Al+Fe+Mn)-Al_2O_3/TiO_2$ 图(据文献[29])

(a)基性火山热液成因硅质岩;(b)含酸性火山碎屑非热液成因硅质岩;(c)正常海相非热液成因硅质岩;(d)含基性火山碎屑非热液成因硅质岩;热液和热液瓷状硅质岩数据(来自文献[13]);巢湖孤峰组硅质岩数据(来自文献[30]);长英质火山岩、玄武岩数据(来自文献[31]);NASC数据(来自文献[32]);PAAS数据(来自文献[33])

Fig.5 $Al/(Al+Fe+Mn)-Al_2O_3/TiO_2$ diagram (after reference[29])

(图6)。一般而言,当 Ce/Ce^* 值小于1且 Pr/Pr^* 值靠近1的时候,La富集(II a区域)。西牛堡和八布硅质岩样品均没有落在II a区域,指示了样品的Ce异常现象不是La富集所引起的,是正常海水沉积所引起的。Y和Ho有着相似的电负性和离子半径,常常具有相似的地球化学行为。平均上地壳组成及PAAS均具有和球粒陨石相似的Y/Ho值(26~28)。Nozaki *et al.*^[40]指出,相较于Y来说(海水中Y的残留时间为5 100年),Ho(海水中Ho的残留时间为2 700年)在海水中有着更高的移出速率。海水的Y/Ho值(平均值55)比河水及河口位置水体的Y/Ho值高。八布他披组硅质岩样品的 Ce/Ce^* 值为0.67~1.29,平均值为1.02,表现为轻微的铈正异常或无铈异常,Y/Ho平均值为29.90,略高于PAAS的Y/Ho值但远低于海水中的Y/Ho值,指示其Y、Ho值并没有发生分异。这些特征反映了八布他披组硅质岩样品形成于陆缘环境。西牛堡他披组硅质岩样品的 Ce/Ce^* 值为0.77~1.18,平均值1.03,Y/Ho平均值为28.03,与八布他披组硅质岩样品的数据相似,同样反映了其形成于陆缘环境,均受到较明显的陆源输入作用的影响。

4.3 石炭纪—中三叠世构造演化模式

早泥盆世时期,随着裂陷作用和华南地区的海侵作用,右江盆地形成了深水和浅水明显分异的沉积序列^[8],即形成以那坡裂陷带、百色裂陷带和南丹裂陷带分隔的台盆相间分布的格局。裂陷作用的加深使得右江盆地在晚泥盆世开始转变为更加开阔的

海盆环境,其表现为右江盆地的硅质岩都有着不同程度的Ce异常现象^[29,41]。右江盆地内玄武岩从晚泥盆世到早石炭世有着从拉斑质向碱性过渡的过程,具有OIB型火山岩的地球化学特征,指示了扬子板块的西南缘随着古特提斯洋的打开和扩张已经变为了被动大陆边缘环境^[42]。位于右江盆地西南缘的麻栗坡八布地区发现了N-MORB型蛇绿岩,部分学者认为其可能是古特提斯洋壳的遗迹^[1,6]。八布蛇绿岩中,变玄武岩锆石U-Pb年龄为 358.9 ± 5.5 Ma^[43],玄武岩全岩Sm-Nd等时线年龄为328 Ma^[3],辉长岩锆石U-Pb年龄为 272 ± 8 Ma^[44],指示了蛇绿岩所代表的八布洋盆形成于晚泥盆世末期—早石炭世早期,并可能一直持续到了中二叠世。早—中二叠世,八布蛇绿岩东北部的硅质岩表现出明显的Ce负异常现象和Y正异常^[9,29,45],如那坡鱼塘四大寨组硅质岩的 Ce/Ce^* 值为0.12~0.33,Y/Ho值为39.05~83.74,暗示该时期八布洋盆可能演化为开阔洋盆。泥盆纪到早—中二叠世,随着古特提斯洋的打开及扩张,右江盆地处于拉张环境中,逐渐进入被动大陆边缘环境。与此同时,右江盆地的西南缘形成了八布洋盆,并逐渐演化成成熟的开阔洋盆(图7a)。

详细的地质、地球化学和地质年代学研究表明,八布地区还存在与N-MORB型蛇绿岩共生的SSZ型蛇绿岩(270~265 Ma),指示了八布洋盆在早—中二叠世的俯冲作用^[6]。八布和西牛堡他披组硅质岩并未像那坡等地显示出明显的Ce负异常现象,Y和Ho也基本没有发生分异,指示了其形成于受陆源影响明显的大陆边缘环境。杨江海等^[18]在硅质岩相邻层位的粗碎屑岩中发现了保存较好的安山质和流纹质火山岩屑,与本文硅质岩中含有风化后的酸性火山碎屑成分相对应,指示了硅质岩的形成受到了越北弧火山活动的影响。结合硅质岩的形成环境以及其中酸性火山碎屑成分的来源,认为早—中二叠世麻栗坡地区为活动大陆边缘环境,八布洋盆的俯冲方向可能为南西向。同一时期,右江盆地北缘发育灰岩、硅质岩以及泥质岩为主的台盆相间沉积组合,仍具有被动大陆边缘的沉积特征^[29],暗示右江盆地东北缘为被动大陆边缘环境。而八布和西牛堡地区在早—中二叠世发育着较粗的碎屑岩,岩性的对比也暗示了八布洋盆是南西向俯冲的。早—中二叠世,右江盆地持续拉张,与扬子板块以被动大陆边缘接触,而随着八布洋盆向越北地块的俯冲,麻栗坡地

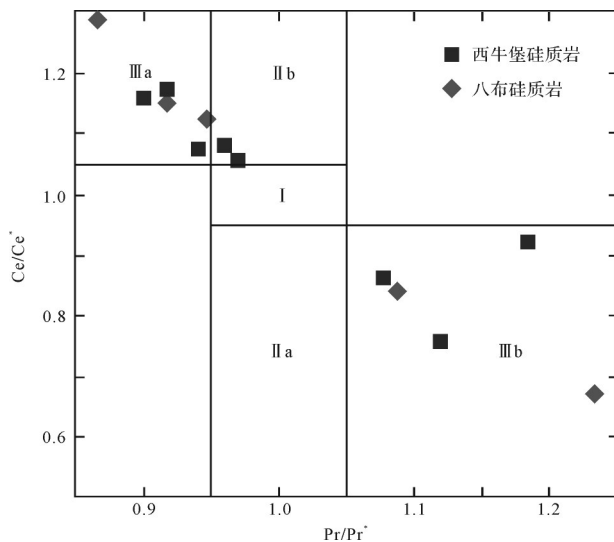


图6 $Ce/Ce^* - Pr/Pr^*$ 图^[39]

I. Ce和La均无异常; II a. La正异常,Ce无异常; II b. La负异常,无Ce异常;
III a. Ce正异常; III b. Ce负异常

Fig.6 $Ce/Ce^* - Pr/Pr^*$ diagram^[39]

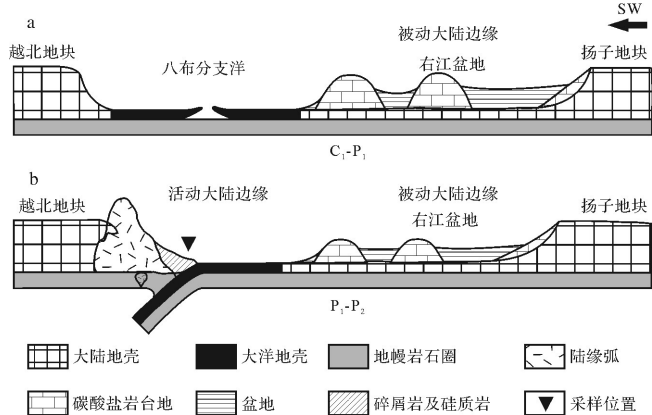


图7 麻栗坡地区石炭世—中二叠世构造演化图

Fig.7 Schematic evolution of Malipo in the Carboniferous-Middle Permian

区变为活动大陆边缘环境(图7b)。

5 结论

八布和西牛堡他披组硅质岩样品的 SiO_2 含量较高。样品的 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值、 Eu/Eu^* 值和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值,指示了其含有少量风化后酸性火山碎屑成分的非热液成因硅质岩。样品具有Ce负异常缺失和Y、Ho两元素不分异的特点,指示了八布和西牛堡他披组硅质岩形成于大陆边缘环境。结合前人研究,认为八布和西牛堡硅质岩形成于八布洋盆西南缘的活动大陆边缘环境中,其形成过程受到岛弧火山碎屑的影响,指示了八布洋盆的俯冲方向可能为南西向。

致谢 所有参与此次项目的同志付出了辛勤的劳动,成都理工大学沉积地质研究院各位老师和同学在撰写文章过程中给予了莫大的帮助,两位匿名评审老师提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

[1] 钟大赉,吴根耀,季建清,等. 滇东南发现蛇绿岩[J]. 科学通报, 1998, 43(13): 1365-1370. [Zhong Dalai, Wu Genyao, Ji Jianqing, et al. Discovery of ophiolite in Southeast Yunnan, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(1): 36-41.]

[2] 董云鹏,朱炳泉,常向阳,等. 哀牢山缝合带中两类火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地球化学, 2000, 29(1): 6-13. [Dong Yunpeng, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Geochemistry of the two-type volcanic rocks from Ailaoshan suture zone and their tectonic implication[J]. Geochimica, 2000, 29(1): 6-13.]

[3] 吴根耀,马力,钟大赉,等. 滇桂交界区印支期增生弧型造山

带:兼论与造山作用耦合的盆地演化[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 8-18. [Wu Genyao, Ma Li, Zhong Dalai, et al. Indosinian turkic-type orogen bordering Yunnan and Guangxi: With reference to coupled basin evolution[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(1): 8-18.]

- [4] 刘俊来,唐渊,宋志杰,等. 滇西哀牢山构造带:结构与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1285-1303. [Liu Junlai, Tang Yuan, Song Zhijie, et al. The Ailaoshan belt in western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1285-1303.]
- [5] Huang H, Du Y S, Yang J H, et al. Geochemistry of the Late Paleozoic cherts in the Youjiang Basin: Implications for the basin evolution [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(4): 402-421.
- [6] Liu H C, Peng T P, Guo X F. Geochronological and geochemical constraints on the coexistent N-MORB- and SSZ-type ophiolites in Babu area (SW China) and tectonic implications[J]. Journal of the Geological Society, 2018, 175(4): 667.
- [7] 杜远生,黄宏伟,黄志强,等. 右江盆地晚古生代—三叠纪盆地转换及其构造意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 10-15. [Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang, et al. Basin translation from Late Palaeozoic to Triassic of Youjiang Basin and its tectonic significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 10-15.]
- [8] 杜远生,黄虎,杨江海,等. 晚古生代—中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 1-11. [Du Yuansheng, Huang Hu, Yang Jianghai, et al. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the Youjiang Basin and its tectonic significance[J]. Geological Review, 2013, 59(1): 1-11.]
- [9] 黄志强,黄虎,杜远生,等. 广西那坡裂陷盆地晚古生代硅质岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(2): 253-265. [Huang Zhiqiang, Huang Hu, Du Yuansheng, et al. Depositional chemistry of cherts of the Late Paleozoic in Napo Rift Basin, Guangxi and its implication for the tectonic evolution[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(2): 253-265.]
- [10] 陈洪德,曾允孚. 右江沉积盆地的性质及演化讨论[J]. 岩相古地理, 1990(1): 28-37. [Chen Hongde, Zeng Yunfu. Nature and evolution of the Youjiang Basin[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1990(1): 28-37.]
- [11] Lepvrier C, Maluski H, van Tich V, et al. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong son belt and Kontum massif); implications for the geodynamic evolution of Indochina [J]. Tectonophysics, 2004, 393(1/2/3/4): 87-118.
- [12] Halpin J A, Tran H T, Lai C K, et al. U - Pb zircon geochronology and geochemistry from NE Vietnam: A 'tectonically disputed' territory between the Indochina and South China blocks [J]. Gondwana Research, 2016, 34: 254-273.
- [13] 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(1/2): 125-148.
- [14] Kato Y, Nakamura K. Origin and global tectonic significance of early Archean cherts from the marble bar greenstone belt, Pilbara craton, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2003, 125(3/4): 191-243.
- [15] 田洋,赵小明,朱志军,等. 鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 590-599. [Tian Yang, Zhao Xiaoming, Zhu Zhijun, et al. Petrogenesis and sedimentary environment of Permian Wujiaping Formation siliceous rocks in Lichuan, southwestern Hubei[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 590-599.]
- [16] 胡丽沙,徐亚军,杜远生,等. 广西东南部钦防海槽晚古生代硅质岩地球化学特征及其地质意义[J]. *古地理学报*, 2014, 16(1): 77-87. [Hu Lisha, Xu Yajun, Du Yuansheng, et al. Geochemical characteristics and its geological significance of the Late Paleozoic siliceous rocks in Qinfang Trough, southeastern Guangxi [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(1): 77-87.]
- [17] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990. [Yunnan Bureau Geological Mineral Resource. Regional geology of Yunan province [M]. Beijing: Geological Publication House, 1990.]
- [18] 杨江海,杜远生,于鑫,等. 滇东南八布早二叠世含火山岩屑砂岩指示古特提斯洋俯冲[J]. *地球科学*, 2017, 42(1): 24-34. [Yang Jianghai, Du Yuansheng, Yu Xin, et al. Early Permian volcanic fragment-bearing sandstones in Babu of Southeast Yunnan: Indicative of Paleo-tethyan ocean Subduction [J]. *Earth Science*, 2017, 42(1): 24-34.]
- [19] 马文璞. 八布蛇绿岩突厥型造山带[J]. *科学通报*, 1998, 43(13): 1363-1364. [Ma Wenpu. Babu Ophiolite orogenic belt of Turkic type [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(13): 1363-1364.]
- [20] 冯庆来,刘本培. 滇东南八布蛇绿混杂岩中的早二叠世放射虫化石[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(1): 1-3. [Feng Qinglai, Liu Benpei. Early Permian radiolarians from Babu ophiolitic mélange in southeastern Yunnan [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(1): 1-3.]
- [21] Boström K, Peterson M N A. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. *Marine Geology*, 1969, 7(5): 427-447.
- [22] 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.
- [23] 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(5): 627-643.
- [24] German C R, Hergt J, Palmer M R, et al. Geochemistry of a hydrothermal sediment core from the OBS vent-field, 21°N East Pacific Rise [J]. *Chemical Geology*, 1999, 155(1/2): 65-75.
- [25] Dias Á S, Früh-Green G L, Bernasconi S M, et al. Geochemistry and stable isotope constraints on high-temperature activity from sediment cores of the Saldanha hydrothermal field [J]. *Marine Geology*, 2011, 279(1/2/3/4): 128-140.
- [26] 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.
- [27] Sugitani K, Horiuchi Y, Adachi M, et al. Anomalously low Al_2O_3/TiO_2 values for Archean cherts from the Pilbara Block, Western Australia—possible evidence for extensive chemical weathering on the early earth [J]. *Precambrian Research*, 1996, 80(1/2): 49-76.
- [28] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115-4137.
- [29] 黄虎,杜远生,杨江海,等. 水城-紫云-南丹裂陷盆地晚古生代硅质沉积物地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(12): 1994-2010. [Huang Hu, Du Yuansheng, Yang Jianghai, et al. Geochemical features of siliceous sediments of the Shuicheng-Ziyun-Nandan rift basin in the Late Paleozoic and their tectonic implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(12): 1994-2010.]
- [30] Kametaka M, Takebe M, Nagai H, et al. 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.
- [31] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 1993, 104(1/2/3/4): 1-37.
- [32] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12): 2469-2482.
- [33] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [34] Holser W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 132(1/2/3/4): 309-323.
- [35] Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 107-118.
- [36] Murray R W, Brink M R B T, Jones D L, et al. Rare earth ele-

- ments as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [37] Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [38] Owen A W, Armstrong H A, Floyd J D. Rare earth element geochemistry of Upper Ordovician cherts from the Southern Uplands of Scotland[J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156(1): 191-204.
- [39] Bau M, Dulski P. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 1996, 79(1/2): 37-55.
- [40] Nozaki Y, Zhang J, Amakawa H. The fractionation between Y and Ho in the marine environment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 329-340.
- [41] 王卓卓, 陈代钊, 汪建国. 广西南宁地区泥盆纪硅质岩稀土元素地球化学特征及沉积背景[J]. *地质科学*, 2007, 42(3): 558-569. [Wang Zhuozhuo, Chen Daizhao, Wang Jianguo. REE geochemistry and depositional settings of the Devonian cherts in Nanning area, Guangxi[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(3): 558-569.]
- [42] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Upper Paleozoic basalts in the southern Yangtze block: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence for asthenosphere-lithosphere interaction and opening of the Paleo-tethyan ocean [J]. *International Geology Review*, 2004, 46(4): 332-346.
- [43] Huang H, Du Y S, Yang J H, et al. New zircon U-Pb age of the Babu Ophiolites in southeast Yunnan, China and constrains of plate subduction time[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(3): 1151-1152.
- [44] 张斌辉, 丁俊, 张林奎, 等. 滇东南八布蛇绿岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1498-1509. [Zhang Binhui, Ding Jun, Zhang Linkui, et al. SHRIMP zircon U-Pb chronology of the Babu ophiolite in southeastern Yunnan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 1498-1509.]
- [45] 黄虎, 杜远生, 黄志强, 等. 桂西晚古生代硅质岩地球化学特征及其对右江盆地构造演化的启示[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2013, 43(2): 304-316. [Huang Hu, Du Yuansheng, Huang Zhiqiang, et al. Depositional chemistry of chert during Late Paleozoic from western Guangxi and its implication for the tectonic evolution of the Youjiang Basin [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2013, 43(2): 304-316.]

Geochemical Features of the Middle-Lower Permian Cherts in Malipo, Southeastern Yunnan, and the Geological Signification

WU ChaoWei^{1,2}, HOU MingCai^{1,2}, HUANG Hu^{1,2}, ZHOU QianYu², LUO HongWei²

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The ophiolite in Malipo, which is located at the SW margin of the Youjiang Basin, is considered to be a remnant paleo-Tethys Ocean. The study of the Babu Ocean is an important part of a comprehensive understanding of the tectonic evolution of the Youjiang Basin and the southwestern margin of south China. The Babu Ocean consisted primarily of deepwater sediments, including cherts, in that area. Major and rare earth elements in the cherts from the Middle-Lower Permian Tapi Formation in Babu and Xiniubao were analyzed in this study. The values of Al/(Al+Fe+Mn) (0.43-0.70), Al₂O₃/TiO₂ (25.5-44.8) and Eu/Eu* (0.81-1.02) indicate that the cherts are of non-hydrothermal origin, within acid pyroclastics, and show low Y/Ho ratios (28.84-31.23 and 26.41-28.91, respectively) and high Ce/Ce* values (0.67-1.29 and 0.77-1.18, respectively), indicating deposition at the continental margin. From comparisons with the geochemistry of cherts in other areas, we conclude that an active continental margin may have developed in the SW Babu Ocean as the ocean crust subducted towards the southwest.

Key words: Middle-Lower Permian; cherts; geochemistry; Babu Ocean