

藏南彭错林硅质岩地球化学特征及沉积环境分析

何俊国,周永章,杨志军,李红中,王晓悦

中山大学 地球科学系/地球环境与地球资源研究中心,广州 510275

摘要:通过野外地质调查和系统的岩石化学、常量元素、微量元素以及稀土元素等研究,探讨了藏南彭错林硅质岩的地球化学特征及其沉积环境。研究表明,呈厚层状产出的绿色、棕褐色硅质岩具有较高的 SiO_2 含量,局部受Fe、Mn矿化, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值小,在Fe-Mn-Al三角成因判别图解中,大部分硅质岩样品落入热水沉积区域,微量元素Sr、Zr、Cu、Zn和Ba含量较高,稀土元素REE较低,Ce负异常,Eu正异常,北美页岩标准化后配分模式稍向左倾,体现出热水沉积特征;在沉积环境判别图 $100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{100} - \text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{100} - \text{SiO}_2)$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 中,硅质岩样品投影到洋中脊和深海区域,说明形成于大洋中脊和深海盆地环境;硅质岩常量和稀土参数变化特征图显示,在剖面中PCL-1、PCL-5和PCL-7采样位置更接近热液中心;硅质岩的形成与板块的汇聚消减产生的以洋中脊和海底热点为中心的洋壳热水系统有关。

关键词:硅质岩;热水沉积;洋中脊;藏南;彭错林;地球化学

中图分类号:P588.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5888(2009)06-1055-11

Study on Geochemical Characteristics and Depositional Environment of Pengcuolin Chert, Southern Tibet

HE Jun-guo, ZHOU Yong-zhang, YANG Zhi-jun, LI Hong-zhong, WANG Xiao-Yue

Department of Earth Sciences/ Center for Earth Environment & Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The geochemical characteristics and depositional environment of Pengcuolin chert are studied based on the field investigations and analysis on major elements, trace elements and rare earth elements. The massive chert is green and brown, being high in SiO_2 content, locally enriched in Fe and Mn, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ ratio being low. In Fe-Mn-Al triangle diagrams, most chert samples fall into the hydrothermal region. Trace elements such as Sr, Zr, Cu, Zn and Ba are higher and REE is lower, with Ce negative anomaly and Eu anomaly. Their NASC-normalized REE distribution patterns are slightly left-leaning, indicating their hydrothermal origin. In sedimentary environment discrimination diagrams such as $100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{100} - \text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{100} - \text{SiO}_2)$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, chert samples fall into the areas of the mid-ocean ridges or deep-sea. In parameter variation diagrams, samples of PCL-1, PCL-5 and PCL-7 are closer to the hydrothermal center. It is shown that the Pengcuolin chert, southern Tibet was formed by the hydrothermal systems at convergence and subduction sites of plates.

Key words: chert; hydrothermal sedimentation; mid-ocean ridge; southern Tibet; Pengcuolin; geochemistry

收稿日期:2009-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(40573019);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040558050)

作者简介:何俊国(1968—),男,陕西渭南人,博士,主要从事沉积地球化学和矿床地球化学的教学与研究,E-mail: eeshjg@mail.sysu.edu.cn。

0 引言

硅质岩是在化学沉积和生物化学沉积中仅次于碳酸盐岩的岩类,也是造山带中分布较为广泛的岩石类型之一。它不仅具有重要的构造、地层沉积成因意义,而且也是多种矿床的赋矿层位、矿源层及含矿岩系^[1-2]。由于硅质岩抵抗后期改造的能力较强,各种成因信息能被较好地保存下来,因此硅质岩成为了解相关地质历史时期的古环境、古气候和古构造等信息的重要研究对象^[3]。随着测试手段的提高,硅质岩的研究方法也日趋增多,除岩石的产状、结构构造、矿物组成和地球化学分析外,紫外荧光、阴极发光、古地磁等也被引入到硅质岩的研究中。尽管研究方法越来越多,但研究的核心内容多集中在硅质岩的成因、物质来源和环境示踪等问题上^[4]。

西藏南部地区广泛发育硅质岩建造,系统的野外考察显示,藏南地区的硅质岩具有产出规模大、沉积建造类型多样、发育时代由老至新和产出背景从海到陆的特点,这些良好的地质条件为全方位地开展硅质岩研究提供了理想的岩石样本,近年来已引起众多学者的广泛关注^[5-12]。

1 地质背景及岩石学特征

彭错林剖面为硅质岩、玄武岩和超基性岩组合,位于藏南日喀则地区拉孜县城以北 30 km 处(图 1)。在大地构造上,夹于喜马拉雅地块和拉萨地块之间,区内构造混杂岩、高压变质岩等十分发育,北

侧有与之配套的火山-岩浆弧带。自南而北可主要分为蛇绿岩混杂岩带和蛇绿岩带。蛇绿混杂岩带位于蛇绿岩带南侧,主要由蛇绿岩、上三叠统—下白垩统沉积质混杂岩及少量侏罗—白垩纪蛇绿混杂岩所组成。岩体多呈构造岩片被推覆于前寒武系片麻岩及片岩、寒武系齐吾贡巴群石英片岩之上或侵位于上三叠统修康群以及上侏罗统—下白垩统类复理石和放射虫硅质岩之中。

硅质岩位于蛇绿岩序列顶部,呈绿色或紫红色层状,单层厚度达数厘米—数十米。硅质岩底部与蚀变玄武岩整合接触(图 2A),蚀变玄武岩下部产出蛇纹石化超基性岩,两者间断层不整合接触。剖面中上部出露大量黑色、红色和褐色厚层状硅质岩岩块,局部因受铁、锰矿化而呈现灰褐色(图 2B)。

硅质岩的主要矿物是自生石英(有时含量可大于 90%)、玉髓和蛋白石。此外,还有一定量的方解石、粘土矿物及硬锰矿、赤铁矿等金属矿物。手标本上可见明显的铁锰矿化(图 2C),镜下照片几乎全部由隐-微晶质石英颗粒所组成(图 2D)。研究区硅质岩的颜色与杂质的组成具有一定的相关性;其中,黑色硅质岩中通常富含有机物,红色和紫色硅质岩中通常富含赤铁矿,绿色的硅质岩是因为含有数量不等的铁绿泥石和少量混层矿物。

2 样品采集及分析

在彭错林剖面采集 7 件硅质岩样品。样品由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学重点

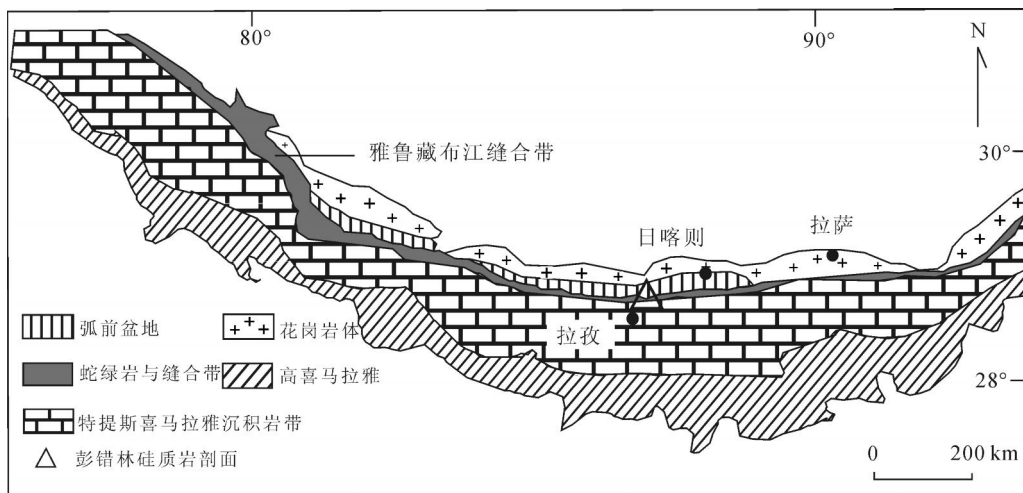


图 1 彭错林硅质岩剖面位置图(据文献[13]改编)

Fig. 1 Profile location of Pengcuolin chert

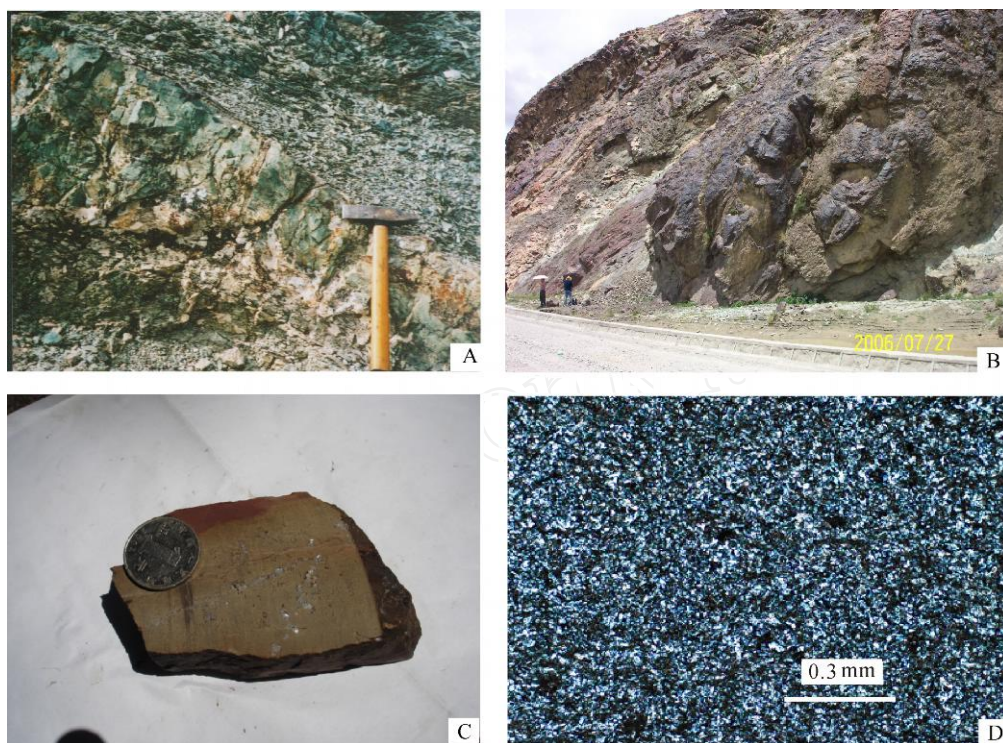


图2 彭错林硅质岩剖面野外及镜下图片

Fig. 2 Field photos and microscope images of Pengcuolin chert

实验室分析完成。元素测定的分析方法及流程如下:将选定的野外硅质岩样品,除去岩石表面的风化层和杂质,用粉碎机碎成小块,挑选新鲜颗粒并用蒸馏水清洗去污,最后置于棒磨机中磨碎至200目以上,干燥保存。化学前处理和上机测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素室完成。常量元素中 SiO_2 采用压片法X荧光光谱(XRF)专门测定,其它组分使用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)测定,分析误差 $<2\%$ 。ICP-AES和ICP-MS测试溶液的制备采用酸溶法。具体流程:准确称取约100 mg样品置于Teflon密闭溶样器中,加入1 mL浓HF和0.3 mL 1:1的 HNO_3 ,用超声波振荡后置于150 °C电热板上将样品蒸干,再次加入相同量的HF和 HNO_3 ,密闭加热一周(约100 °C),蒸干后用2 mL 1:1的 HNO_3 溶解,加入Rh内标,稀释至2 000倍,最后由PE Elan 6000型ICP-MS分析。

3 硅质岩的地球化学特征及沉积环境讨论

3.1 常量元素

元素分析结果见表1。彭错林硅质岩 SiO_2 质量分数较高,变化范围较大(表1),介于51.22%~93.64%,平均75.30%。可以看出,硅质岩剖面自

下而上, SiO_2 质量分数有逐渐增加的趋势; Al_2O_3 质量分数为1.23%~11.59%,平均为5.00%,含量变化大,特别是PCL-5和PCL-6两个样品, Al_2O_3 质量分数较高,分别为6.84%和11.59%; TiO_2 质量分数比较平均,介于0.01%~0.63%,平均为0.23%。 Fe 、 Mn 、 Al 等常量元素含量对区分硅质岩成因类型具有重要意义^[14-15]。硅质岩中 Fe 、 Mn 的富集主要与热水的参与有关,而 Al 的相对富集则多与陆源物质的加入相关。Adachi等^[16]和Yamamoto^[17]在系统地研究了热水沉积和生物沉积硅质岩样品后指出,硅质岩的 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Al})$ 比值由纯热水的0.01到纯生物成因的0.60,且 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Al})$ 比值随离开热水系统中心距离的增大而增大^[18]。彭错林硅质岩的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值为0.08~0.59,平均值为0.32(表2);在 $\text{Fe}-\text{Mn}-\text{Al}$ 三角成因判别图解中,除样品PCL-6外,投影点都落在热水沉积物区(图3a)。

硅质岩中的 MnO 代表大洋深部热液的贡献,而 TiO_2 与碎屑物质的介入有关,因而 MnO/TiO_2 比值可用于区分硅质岩形成的古地理环境^[19]。开阔大洋中沉积的硅质岩 $\text{MnO}/\text{TiO}_2 > 0.5$;大陆斜坡和边缘海沉积的硅质岩 $\text{MnO}/\text{TiO}_2 < 0.5$ 。彭

表 1 硅质岩常量元素质量分数

Table 1 Major contents of Pengcuolin cherts										WB/ %
编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
PCL-1	93.64	1.23	0.88	3.02	0.32	0.09	0.20	0.31	0.03	0.07
PCL-2	80.83	6.14	1.08	5.40	0.13	0.57	0.94	3.17	0.08	0.29
PCL-3	88.64	4.19	0.58	3.17	0.05	0.10	0.51	1.84	0.04	0.15
PCL-4	87.53	3.46	1.65	5.10	0.01	0.81	0.61	0.11	0.01	0.01
PCL-5	51.22	6.84	0.97	31.56	1.43	0.63	1.69	2.44	0.19	0.63
PCL-6	63.16	11.59	6.06	4.62	0.05	3.21	1.27	6.55	0.11	0.37
PCL-7	62.05	1.55	7.30	5.60	0.60	0.90	7.76	0.28	9.84	0.10
平均	75.30	5.00	2.65	8.36	0.37	0.90	1.85	2.10	1.47	0.23

表 2 硅质岩常量元素各项指标值

Table 2 Major element ratios for Pengcuolin cherts						
编号	Al/ (Al + Fe + Mn)	Fe/ Ti	(Fe + Mn)/ Ti	Fe ₂ O ₃ / TiO ₂	MnO/ TiO ₂	Al ₂ O ₃ / (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)
PCL-1	0.22	52.8	56.8	44.2	2.88	0.29
PCL-2	0.42	22.2	26.53	18.5	3.23	0.53
PCL-3	0.46	24.7	29.1	20.8	3.33	0.57
PCL-4	0.31	595.0	673.0	510.0	61.00	0.40
PCL-5	0.13	58.2	61.6	50.4	2.71	0.18
PCL-6	0.59	14.7	19.1	12.5	3.45	0.71
PCL-7	0.08	65.3	165.5	55.0	76.10	0.22
平均	0.32	119	147.4	101.63	21.81	0.41

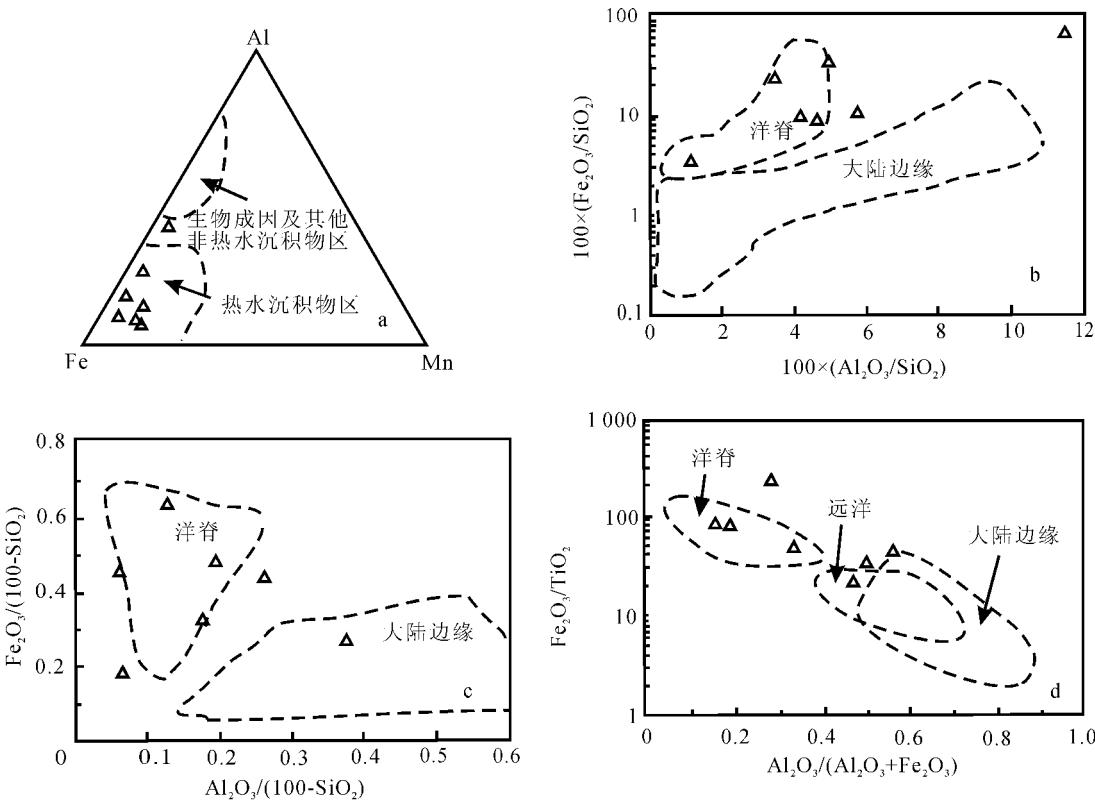


图 3 彭错林硅质岩常量元素图解

Fig. 3 Major element diagrams of Pengcuolin cherts

错林硅质岩 MnO/TiO_2 比值较高,为 2.71 ~ 76.10,平均 21.81(表 2),反映了硅质岩形成于大洋中脊和深海盆地环境。此外, $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 比值也是判别硅质岩形成环境的一个良好指标^[20],研究区硅质岩 $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 比值为 0.18 ~ 0.71,平均 0.41(表 2),接近于大洋中脊硅质岩(< 0.4)的比值。

Murray 利用已知沉积环境的硅质岩化学成分比值作图,圈定了大陆边缘、大洋盆地和洋中脊硅质岩投影区^[21]。在 $100 \times Fe_2O_3/SiO_2$ - $100 \times Al_2O_3/SiO_2$ 判别图中(表 3、图 3b)可以看出,研究区硅质岩(除样品 PCL-6 外)都落在洋中脊范围周围。在 $Fe_2O_3/(100 - SiO_2)$ - $Al_2O_3/(100 - SiO_2)$ 图解中(表 3、图 3c),样品皆投影在靠近洋中脊和大洋盆地的周围。在 Fe_2O_3/TiO_2 - $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 图解中,除 PCL-4 外,硅质岩样品基本都落在洋中脊和远洋盆地区域(表 3、图 3d)。

表 3 常量元素沉积环境判别指标值
Table 3 Major ratios for environment discrimination of cherts

	PCL-1	PCL-2	PCL-3	PCL-4
$100 \times Fe_2O_3/SiO_2$	3.23	6.7	3.6	5.8
$100 \times Al_2O_3/SiO_2$	1.3	7.6	4.7	3.95
$Fe_2O_3/(100 - SiO_2)$	0.47	0.28	0.28	0.41
$Al_2O_3/(100 - SiO_2)$	0.19	0.32	0.37	0.28
	PCL-5	PCL-6	PCL-7	平均
$100 \times Fe_2O_3/SiO_2$	61.6	7.3	9.0	13.89
$100 \times Al_2O_3/SiO_2$	13.4	18.4	2.5	7.41
$Fe_2O_3/(100 - SiO_2)$	0.65	0.13	0.15	0.34
$Al_2O_3/(100 - SiO_2)$	0.14	0.31	0.04	0.24

$Al/(Fe + Mn + Al)$ 比值在剖面中的变化情况如图 4 所示, D 代表距第一个采样点的距离。 $Al/(Fe + Mn + Al)$ 比值出现 3 个最低值,可见在彭错林硅质岩沉积时期,喷口位置至少有 3 次距离彭错林剖面位置很近(图 4)。

3.2 稀土元素

稀土元素是研究硅质岩成因、恢复古海洋环境和判别氧化还原环境良好的地球化学示踪剂^[22-23]。硅质岩中的稀土元素(REE)主要是从海水中吸收,其次是从陆源或海底火山等颗粒中继承。研究认为,硅质岩中的 REE 从洋中脊的最小值 1.09×10^{-6} 到大洋盆地、大陆边缘逐渐增大^[24]。彭错林硅

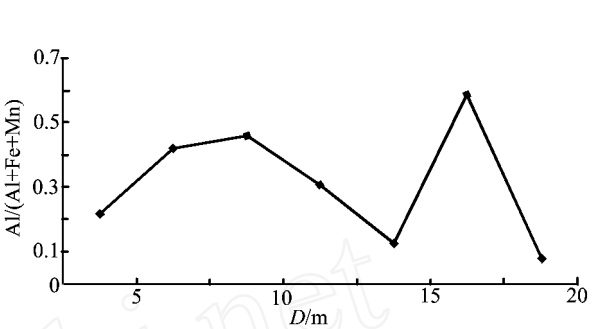


图 4 彭错林硅质岩 $Al/(Al + Mn + Fe)$ 比值在剖面上的局部变化情况
Fig. 4 Partial variations of $Al/(Al + Mn + Fe)$ in Pengcuolin chert profile

质岩中,除样品 PCL-5 和 PCL-7 外,REE 都较低,平均为 77.7×10^{-6} (表 4、表 5),低于正常沉积物($> 200 \times 10^{-6}$)。这表明在成岩过程中较少地混入了陆源物质,可代表硅质岩对加热海水流体的继承。北美页岩标准化后重稀土相对富集,其配分曲线模式稍向左倾斜(图 5),具有热水沉积硅质岩的稀土分布特征。样品 PCL-7 呈现较高的 REE,可能是由于热水沉积过程中混入了少量的含稀土总量高的水成沉积物所致。

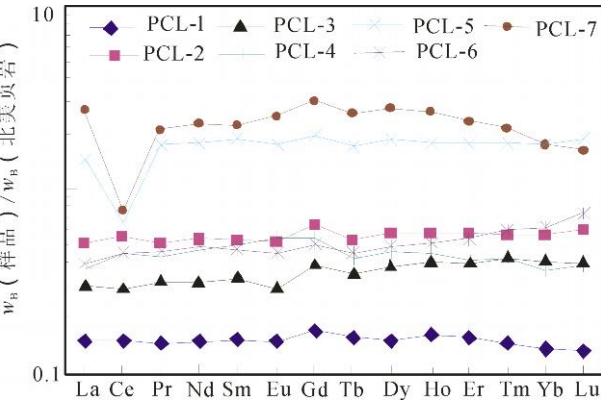


图 5 彭错林硅质岩的稀土元素配分曲线图
Fig. 5 NASC-normalized REE distribution pattern of Pengcuolin cherts

Shimizu 和 Masuda 报道了深海钻探(DSDP)中硅质岩 Ce/Ce^* 的变化范围为 0.29 ~ 0.467^[22],在洋脊及其附近两翼,热液作用可使 Ce/Ce^* 负异常增大并且造成轻稀土相对重稀土的强烈亏损^[25],如东太平洋洋脊附近的沉积物中 Ce/Ce^* 为 0.10 ~ 0.36。彭错林硅质岩 Ce/Ce^* 值为 0.32 ~ 1.15,平

均为 0.85(表 5),多数样品的 Ce 表现为负异常,体现出热水沉积硅质岩的特征;其中 PCL-7 和 PCL-5 两个样品的 Ce/Ce^* 值更低,分别为 0.32 和 0.4,说明剖面更接近洋中脊环境。个别样品(如 PCL-4)中的 Ce 呈现弱负异常甚至正异常,这可能和含有铁锰矿物有关,如前所述,硅质岩手标本上可观察到含大量铁锰矿化(图 2C)。在氧化环境下,海水中的 Ce^{3+} 可以被氧化为溶解度较小的 Ce^{4+} , Ce^{4+} 能与 Mn^{4+} 进行类质同象替换而进入水成铁锰氧化物晶格,这种迁移会造成海水的 Ce 负异常和铁锰矿物的 Ce 正异常。可以认为,在热水沉积过程中:若热水沉积物和铁锰矿物分异,则只遗传海水的 Ce 负异常特征;若热水沉积物和铁锰矿物混合沉积,则会发育 Ce 弱负异常甚至正异常的特征。

Murray et al. 对洋中脊附近的硅质岩进行 Eu/Eu^* 值研究发现^[26],在离洋中脊 75 km 范围内, Eu/Eu^* 值从 1.35 降低到 1.02。因此 Eu 正异常被作为指示高温热水流体参与硅质岩成岩作用的重要证

据。研究区硅质岩 Eu/Eu^* 值为 0.81 ~ 1.05,基本体现为正异常,显示热水沉积特征(表 5,图 6a)。此外,一些稀土参数如 $(La/Ce)_N$ 、 $(La/Lu)_N$ 等可用来推断硅质岩的沉积机制^[27]。在大陆边缘、大洋盆地和洋中脊附近背景中沉积的硅质岩,其 $(La/Ce)_N$ 比值存在着明显的差异。洋中脊附近的硅质岩以严重的 Ce 亏损为特征,其 $(La/Ce)_N$ 值为 3.5;大洋盆地为 2 ~ 3,大陆边缘 $(La/Ce)_N = 1$ 。彭错林剖面 $(La/Ce)_N$ 比值变化大,为 0.8 ~ 3.55,平均为 1.49(图 6b、表 5)。 $(La/Lu)_N$ 或 $(La/Yb)_N$ 值为反映硅质岩轻重稀土分离程度的参数, $(La/Lu)_N$ 从扩张洋中脊附近的 0.65 增加到离洋中脊 85 km 的 1.15,到大洋盆地达到最大值 2.70^[19]。彭错林 $(La/Lu)_N$ 比值为 0.53 ~ 1.65,平均为 0.95, $(La/Yb)_N$ 值为 0.63 ~ 1.53,平均 0.96,显示大洋中脊沉积环境特征(表 5,图 6c、6d)。

表 4 硅质岩的稀土元素和其他微量元素组成

Table 4 REE and trace element contents of Pengcuolin cherts

$w_B/10^{-6}$

微量元素	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
PCL-1	206.5	12.64	21.47	3 652	8.33	12.9	56.1	14.0	1.89	10.3
PCL-2	1439.1	45.10	54.64	4 104	54.4	58.7	50.4	64.4	7.08	5.02
PCL-3	695.4	16.31	10.86	3 717	6.46	12.0	6.45	17.3	4.85	1.52
PCL-4	1451.9	20.24	26.19	5 477	13.2	30.2	28.2	28.4	4.95	6.13
PCL-5	3103.2	454.90	80.81	4 573	27.3	86.3	38.3	95.9	12.30	51.3
PCL-6	2 119.0	70.37	56.58	1 639	28.5	52.8	113.0	43.5	7.21	1.94
PCL-7	585.6	82.41	13.46	7 779	15.6	29.8	33.7	76.4	4.49	21.10
平均	1 371.5	100.30	37.72	4 420	22.0	40.4	46.5	48.6	6.12	13.90

微量元素	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
PCL-1	13.3	5.22	10.4	0.64	41.84	0.30	0.05	7.516	0.81	0.25
PCL-2	31.7	17.4	77.6	5.55	207.20	2.30	0.46	33.4	5.54	0.89
PCL-3	8.94	13.2	53.3	3.57	16.73	1.74	0.35	8.73	5.41	0.86
PCL-4	25.4	15.9	42.5	4.35	56.35	1.30	0.3		4.65	0.97
PCL-5	79.1	51.0	162.0	10.0	243.90	4.04	0.79	57.49	9.06	2.78
PCL-6	22.0	14.9	104.0	4.87	15.56	3.46	0.58	5.39	8.03	1.06
PCL-7	260.0	117.0	23.7	1.6	318.00	0.71	0.16	49.61	1.40	8.86
平均	62.9	33.5	67.6	4.37	128.50	1.98	0.38	27.02	4.99	2.24

表 4(续)

稀土元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
PCL-1	6.02	12.14	1.46	5.68	1.12	0.24	1.11	0.19	0.96	0.22	0.58	0.08	0.47	0.07
PCL-2	20.42	45.78	5.11	19.84	3.92	0.83	4.11	0.64	3.65	0.77	2.12	0.3	1.96	0.31
PCL-3	12.35	24.15	3.23	12.31	2.49	0.47	2.54	0.43	2.49	0.55	1.52	0.23	1.49	0.21
PCL-4	14.96	37.97	4.31	17.94	3.79	0.88	3.46	0.53	2.96	0.60	1.52	0.22	1.26	0.20
PCL-5	60.23	53.73	17.51	68.42	13.90	2.81	12.70	2.11	11.80	2.37	6.70	0.95	6.37	0.99
PCL-6	15.87	37.55	4.60	18.54	3.52	0.71	3.29	0.55	3.18	0.67	2.00	0.31	2.18	0.39
PCL-7	109.50	62.53	20.97	86.43	16.30	3.98	19.70	3.12	17.7	3.50	8.71	1.13	6.17	0.86
平均	34.19	39.12	8.17	32.74	6.43	1.42	6.70	1.08	6.10	1.24	3.31	0.46	2.84	0.43

表 5 硅质岩稀土元素各项指标值

Table 5 REE ratios of Pengcuolin cherts

编号	REE	LREE / HREE	Ce/ Ce *	Eu/ Eu *	(La/ Yb) _N	(La/ Ce) _N	(La/ Lu) _N
PCL-1	30.33	7.26	1.00	0.91	1.09	1.00	1.11
PCL-2	109.75	6.92	1.10	0.89	0.90	0.90	0.85
PCL-3	64.45	5.82	0.94	0.81	0.72	1.04	0.76
PCL-4	90.60	7.43	1.15	1.05	1.02	0.80	0.97
PCL-5	260.57	4.92	0.40	0.92	0.81	2.27	0.79
PCL-6	93.37	6.42	1.07	0.91	0.63	0.86	0.53
PCL-7	360.52	4.92	0.32	0.95	1.53	3.55	1.65
平均值	144.23	6.24	0.85	0.92	0.96	1.49	0.95

稀土参数变化曲线特征显示,Ce/ Ce * 值在 PCL-1、PCL-5 和 PCL-7 处负异常比较明显(图 6e),LREE / HREE 在 PCL-1、PCL-5 和 PCL-7 处轻重稀土分异较大(图 6f),(La/ Ce)_N 值在以上 3 点也显示同样特征(图 6b),说明在硅质岩剖面中,PCL-1、PCL - 5 和 PCL - 7 采样位置可能更靠近热液的中心,这和常量元素所得出的结论相吻合(图 4)。

3.3 微量元素

前人对硅质岩微量元素地球化学特征做过许多研究,认为较高含量的 Ba、As、Sb、Ag、B、U 等是热水沉积的重要标志^[26-29]。现代热水沉积物相对富含 Cu、Ni,而贫 Co,Ni/ Co 比值小于 3.6^[30-31]。彭错林硅质岩 V、Rb、Sr 等元素含量非常少,不足其克拉克值的 1/ 10(表 4);而 Zn、Pb、Zn、Ba、Cu、Cr、Ni 等元素含量波动较大,且与常量元素中的铁锰含量呈正相关。从微量元素蛛网图可以看出,硅质岩 Mn、Ti 质量分数很高,分别达到 7.779 ×10⁻⁶和 3.103 ×10⁻⁶(图 7、表 4)。Ti 含量很高是和陆源物质的输

入有关,Mn 含量高是因为硅质岩和锰矿一起沉积,手标本上可以看到明显的 Fe、Mn 矿化(图 2C)。硅质岩微量元素蛛网图显示,Sr、Zr、Cu、Zn 和 Ba 含量比较高(图 7),Ni/ Co 值为 1.08 ~ 3.16,平均为 1.84,比值小于 3.6(表 4),这些微量元素组成及相关指标均显示了热水沉积特征。

3.4 地球化学示踪

地球化学示踪结果表明,研究区硅质岩具有典型的热热水沉积特征。其中常量元素 Al/ (Al + Fe + Mn) 值低,平均为 0.32,在 Fe-Mn-Al 三角成因判别图解中硅质岩落入热水沉积物区。微量元素 Sr、Zr、Cu、Zn 和 Ba 含量比较高,Ni/ Co 比值小于 3.6,稀土元素 REE 较低,Ce/ Ce * 负异常,Eu/ Eu * 正异常等皆体现热水沉积特征。

前人研究显示,硅质岩的高稳定性可以较好地示踪其形成环境^[1,3,18]。研究区硅质岩分析结果显示,彭错林硅质岩形成于大洋中脊和大洋深海盆地沉积环境。据此可以认为,中生代以来,特提斯洋从扩张到闭合过程中,随着洋壳拉张,深部物质不断地

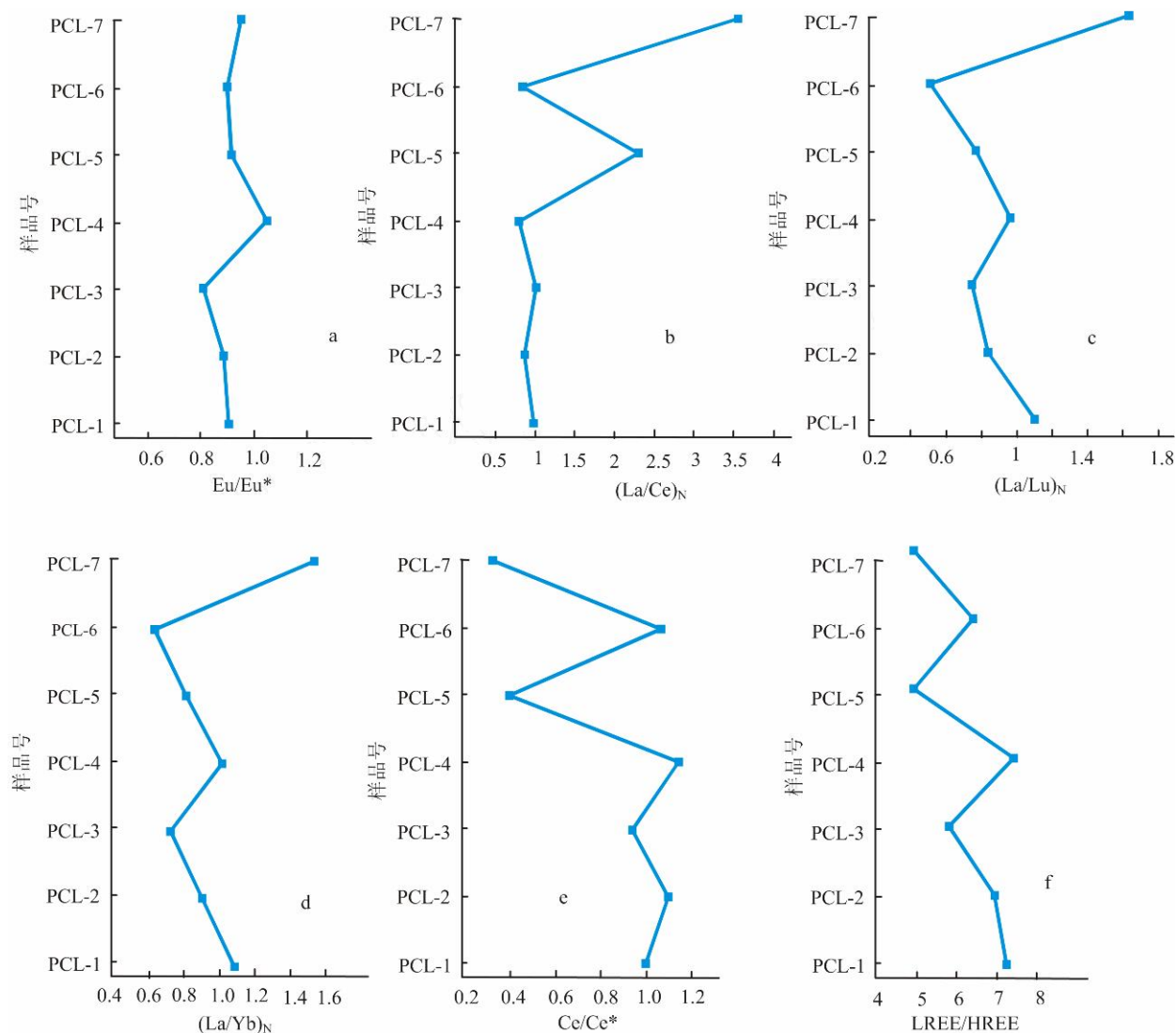


图 6 硅质岩稀土参数变化曲线

Fig. 6 REE parameter variations of cherts

被溢出,海底岩浆喷发和火山作用活跃,在洋壳上部形成超基性岩、基性岩和各种火山熔岩;同时由于板块汇聚消减产生强烈的磨擦降压变形,释放出大量的热量,使俯冲板片部分熔融,熔融物中的 SiO_2 溶解于循环热水系统中,最终形成了一个有利于硅质富集、保存、浓缩和饱和的地球化学域。从侏罗纪开始直至白垩纪不断沉积形成了巨厚的硅质岩系。

4 结论

(1) 彭错林硅质岩 SiO_2 变化范围较大,为 51.22% ~ 93.64%, 平均为 75.3%, 剖面自下而上, SiO_2 含量逐渐增加。

(2) 硅质岩 $Al/(Al + Fe + Mn)$ 值较小, 平均为

0.32, 在 $Fe-Mn-Al$ 三角成因判别图解中, 投影点落入热水沉积区域; 微量元素蛛网图显示 Sr 、 Zr 、 Cu 、 Zn 和 Ba 含量较高, Ni/Co 为 1.08 ~ 3.16, 比值小于 3.6; 硅质岩 REE 较低, 平均 77.7×10^{-6} , Ce/Ce^* 平均 0.85, 呈负异常, Eu/Eu^* 为 0.81 ~ 1.05, 正异常, $(La/Ce)_N$ 平均为 1.49, $(La/Lu)_N$ 为 0.95。常量元素、微量元素和稀土元素皆显示热水成因特征, 说明彭错林硅质岩为热水沉积成因。

(3) 硅质岩 MnO/TiO_2 为 21.81, $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 为 0.41, 在沉积环境判别图 $100 \times Fe_2O_3/SiO_2 - 100 \times Al_2O_3/SiO_2$ 、 $Fe_2O_3/(100 - SiO_2) - Al_2O_3/(100 - SiO_2)$ 和 $Fe_2O_3/TiO_2 - Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 中, 样品都落入洋中脊和深

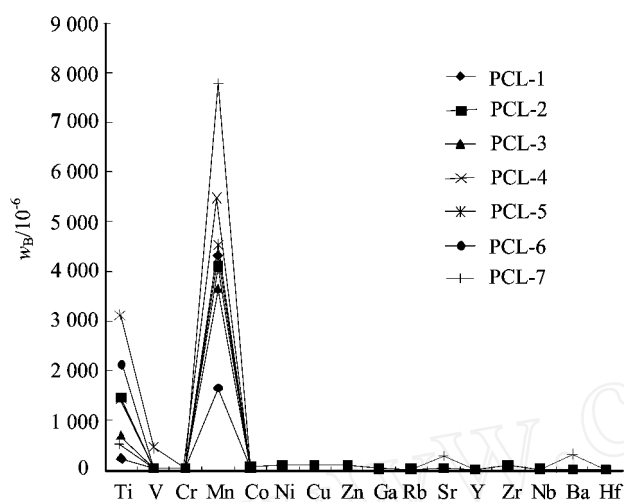


图7 硅质岩微量元素蛛网图

Fig. 7 Spider distribution patterns of trace elements of cherts

海区域,说明硅质岩形成于大洋中脊和深海盆地环境。

(4) 常量元素和稀土参数 Ce/Ce^* 、LREE/HREE 和 $(La/Ce)_N$ 变化曲线特征显示,在硅质岩剖面中,PCL-1、PCL-5 和 PCL-7 采样点可能更靠近热液中心位置。

(5) 中生代以来,特提斯洋从扩张到闭合,由于板块的汇聚和消减,在洋壳上部形成超基性岩、基性岩的同时释放出大量的热量,产生了以洋中脊和海底热点为中心的洋壳热水系统,形成了一个有利于硅质富集、保存的地球化学域,从侏罗纪开始不断沉积形成了巨厚的硅质岩系。

参考文献(References):

- [1] 崔春龙. 硅质岩研究中的若干问题[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 100-104.
CUI Chun-long. Some problems in the study of siliceous rocks[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 100-104.
- [2] 冯彩霞,刘家军. 硅质岩的研究现状及其成矿意义[J]. 世界地质, 2001, 20(2): 119-123.
FENG Cai-xia, LIU Jia-jun. The investive actuslity and mineralization significance of cherts[J]. World Geology, 2001, 20(2): 119-123.
- [3] 杨海生,周永章,杨志军,等. 热水沉积硅质岩地球化学特征及意义——以华南地区为例[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(6): 111-115.

- YANG Hai-sheng, ZHOU Yong-zhang, YANG Zhi-jun, et al. Geochemical characteristics and significance of hydrothermal cherts—a case study of South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitati Sunyatseni, 2003, 42(6): 111-115.
- [4] 杨志军,周永章,张澄博,等. 硅质岩组构信息研究及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(3): 255-258.
YANG Zhi-jun, ZHOU Yong-zhang, ZHANG Cheng-bo, et al. The research of fabric information in the siliceous rock and its significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(3): 255-258.
- [5] 王东安,陈瑞君. 雅鲁藏布江缝合带硅质岩的地球化学成因标志及其地质意义[J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 27-31.
WANG Dong-an, CHEN Rui-jun. Geochemical genetic criteria of silicolites in Yaluzangbu suture belt and their geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(1): 27-31.
- [6] 周永章,杨志军,李文,等. 对西藏硅质岩的初步考察认识[C]//中国矿物岩石地球化学学会第九届学术年会论文集. 贵阳:[s. n.], 2003: 43.
ZHOU Yong-zhang, YANG Zhi-jun, LI Wen, et al. Primaiy study on the cherts from Tibet[C]//China Institute of Mineralogy, Petrology and Geochemistry of the North Annual Conference Essays. Guiyang: [s. n.], 2003: 43.
- [7] 周永章,杨志军,聂凤军,等. 藏南中生代蛇绿岩套硅质岩和非蛇绿岩套硅质岩特征与意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004(增刊): 198-200.
ZHOU Yong-zhang, YANG Zhi-jun, NIE Feng-jun, et al. Characteristics and significances of Mesozonic-Cenozonic ophiolite chert and non-ophiolite chert in southern Tibet[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004(Sup.): 198-200.
- [8] 孙立新,万晓樵,贾建称,等. 雅鲁藏布江缝合带中部硅岩地球化学特征及构造环境制约[J]. 地质学报, 2004, 78(3): 380-389.
SUN Li-xin, WAN Xiao-qiao, JIA Jian-cheng, et al. Sedimentary environments of siliceous rock in the western Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet [J]. Acta Geological Sinica, 2004, 78(3): 380-389.
- [9] 朱杰,杜远生,刘早学,等. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段中生代放射虫硅质岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(12): 1131-1139.
ZHU Jie, DU Yuan-sheng, LIU Zao-xue, et al. Gene-

- sis and geotectonic significance of Mesozoic radiation cherts from middle part of Yarlung Zangbo suture, Tibet[J]. Science China:Series D, 2005, 35 (12) :1131-1139.
- [10] 周永章,付伟,杨志军,等.雅鲁藏布江缝合带及藏南地区硅质岩微组构特征及地质意义[J].岩石学报, 2006, 22(3) : 742-750.
ZHOU Yong-zhang, FU Wei, YANG Zhi-jun, et al. Microfabrics of cherts from Yarlung Zangbo suture zone and southern Tibet and its geological implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (3) : 742 - 750.
- [11] 何俊国,周永章,聂凤军,等.西藏南部热水沉积硅质岩岩石学和地球化学特征及地质意义[J].矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(1) :74-81.
HE Jun-guo, ZHOU Yong-zhang, NIE Feng-jun, et al. Petrologic and geochemical characteristics of the hydrothermal chert in southern Tibet and its geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(1) :74-81.
- [12] 任云生,栗登逵,张金树.西藏甲马铜多金属矿床金的叠加成矿[J].吉林大学学报:地球科学版, 2002, 32 (3) :225-228.
REN Yun-sheng, SU Deng-kui, ZHANG Jin-shu. Superimposed mineralization of gold in Jima copper polymetallic deposit, Tibet[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2002, 32 (3) : 225 - 228.
- [13] 万晓樵,李国彪,司家亮.西藏南部晚白垩世—古新世大洋红层的分布与时代[J].地学前缘, 2005, 12 (2) : 31-37.
WAN Xiao-qiao, LI Guo-biao, SI Jia-liang. The distribution and ages of Late Cretaceous-Paleocene oceanic red beds in southern Tibet [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (2) : 31-37.
- [14] 杨海生,周永章,杨志军,等.华南热水成因硅质岩建造的稀土元素地球化学特征[J].矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1) : 61-64.
YANG Hai-sheng, ZHOU Yong-zhang, YANG Zhi-jun, et al. REE geochemical characteristics of hydrothermal cherts from South China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22 (1) : 61-64.
- [15] 张凡,冯庆来,张志斌,等.滇西南耿马地区弄巴剖面早石炭世硅质岩的地球化学特征及古地理意义[J].地质通报, 2003, 22 (5) :335-340.
ZHANG Fan, FENG Qing-lai, ZHANG Zhi-bin, et al. Characteristics and paleogeographic significance of Early Carboniferous cherts at the Nongba section in the Gengma area, southwestern Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(5) :335-340.
- [16] Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: their geological significance a indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47:125-148.
- [17] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52:65-108.
- [18] 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 Palaeozoic siliceous rocks in western Hubei[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22 (2) : 70-79.
- [19] Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and application[J]. Sedimentary Geology, 1994, 90:213-232.
- [20] 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.
- [21] Murray R W, Buchholtz M R. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56 (7) :2657-2671.
- [22] Shimizu H M A. Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation [J]. Nature, 1977, 266:348-364.
- [23] 丁林,钟大赉.滇西昌宁—孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铈异常特征[J].中国科学:B辑, 1995, 25 (1) :93-100.
DING Lin, ZHONG Da-lai. Characteristics of rare earth elements and Ce abnormality in old Tethys of Chang Ning-Meng Lian, west Yunnan[J]. Science in China:Series B, 1995, 25 (1) :93-100.

- [24] Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey Group, California: assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [25] Elderfield H, Upstill-Goddard R. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal sea waters and their significance to the composition of sea water [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 971-991.
- [26] Murray R W, Jones D L, Gerlach D C, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [27] 王中刚. 稀土元素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- WANG Zhong-gang. Rare earth element geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [28] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- ZHAO Zhen-hua. Trace element geochemistry principle[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [29] 周永章. 广西丹池盆地热水成因的硅质岩的沉积地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1990(3): 75-83.
- ZHOU Yong-zhang. On Sedimentary geochemistry of cherts originated from thermal water in Nandan-Hechi basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990(3): 75-83.
- [30] Crerar D A, Namson J, Chyi M S, et al. Manganiferous chert of the Franciscan assemblage: I. General geology ancient and modern analogues and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers[J]. *Econ Geol*, 1982, 77(3): 519-540.
- [31] 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): 675-683.
- FENG Sheng-bin, ZHOU Hong-rui, YAN Chang-hai, et al. The geochemical characteristics of Erlangping Group in east Qinling and their sedimentary environment importance[J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 675-683.

《吉林大学学报(地球科学版)》、《吉林大学学报(信息科学版)》 荣获“中国北方优秀期刊奖”

由中国期刊协会、中国北方 11 省新闻出版局、期刊协会联合主办,辽宁省新闻出版局、辽宁省期刊协会承办的“中国北方优秀期刊评选活动”,于 2009 年 8 月 24 日至 27 日在沈阳举行。来自北京、天津、河北、山西、内蒙古、吉林、黑龙江、辽宁、宁夏、甘肃、青海等 11 个省、市、区的 219 种期刊参加了角逐。在此次评选活动中,我校《吉林大学学报(地球科学版)》、《吉林大学学报(信息科学版)》荣获“中国北方优秀期刊奖”。