

文章编号: 1000-0550(2013)04-0590-10

鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境

田洋 赵小明 牛志军 王令占 涂兵 谢国刚 吴俊 曾波夫

(武汉地质矿产研究所 武汉 430205)

摘要 鄂西南利川吴家坪组硅质岩与海相石煤及多层火山粘土岩共生,产海绵骨针及放射虫化石,放射虫组合以泡沫虫类为主,内射球虫类次之,隐管虫类很少,代表外陆棚沉积环境。硅质岩的陆源元素 Al、Ti 含量较高,热水来源元素 Fe、Mn 含量较低,Al/(Al+Fe+Mn) 值在 0.64~0.83 之间,平均值 0.73。在 Al—Fe—Mn 三角图中,样品位于或紧邻非热水沉积区,在 SiO₂—(K₂O+Na₂O)、SiO₂—Al₂O₃、(K₂O+Na₂O)—Al₂O₃ 图解中大多数样品落在火山成因区,少数位于火山成因与生物成因区之间。相对于沉积岩的微量元素丰度,生命元素 Mo、V 富集,指示热水沉积的特征元素 Ba、As、Sc 亏损。ΣREE 较低,ΣLREE/ΣHREE 平均值为 3.02,Ce、Eu 均轻度负异常(δCe: 0.75~0.83,平均值 0.79; δEu: 0.61~0.95,平均值 0.84) 经北美页岩标准化后稀土元素配分曲线近水平。以上地球化学特征表明研究区硅质岩属火山成因,并伴有生物作用。氧化还原判别指标 U/Th、V/(V+Ni) 及 Ce_{anom}, 沉积环境判别指标 MnO/TiO₂、La_N/Yb_N 与判别图解 100×TFe₂O₃/SiO₂—100×Al₂O₃/SiO₂、TFe₂O₃/(100—SiO₂)—Al₂O₃/(100—SiO₂)、TFe₂O₃/TiO₂—Al₂O₃/(Al₂O₃+TFe₂O₃)、La_N/Ce_N—Al₂O₃/(Al₂O₃+TFe₂O₃) 与 ΣLREE/ΣHREE—100×Eu/ΣREE 一致表明硅质岩形成于大陆边缘缺氧环境。

关键词 硅质岩 成因 地球化学 二叠纪 吴家坪组 鄂西南

第一作者简介 田洋 男 1984 年出生 硕士 沉积学 E-mail: 41834572@qq.com

中图分类号 P578.94 **文献标识码** A

硅质岩常是金属矿物(如:金、银、硒、钒、钼等)的赋存层位,又常与富含有机质的烃源岩共生,再加上本身的高稳定性,因此其不仅可作为找矿的重要标志,还能提供关于沉积盆地和构造活动的重要信息。华南二叠纪层状硅质岩十分发育,其中恩施渔塘坝地区孤峰组硅质岩中发育罕见的硒矿床。前人已从岩石学、古生物学及地球化学等方面对硅质岩的成因及沉积环境进行了探讨,但仍存在较大分歧,概括起来成因分为:①生物或生物化学成因^[1~3]、②火山—生物成因^[4~8]、③热水成因(多与火山活动有关)^[9~17]、④与上升流有关的(生物)成因^[18~20]、⑤交代成因^[21]。沉积环境则有断陷(深水)盆地^[9,15,16,18,19,22]与大陆边缘(浅水、缺氧)环境^[2,3,5,6,10,12,20,23]之分。鉴于对华南层状硅质岩成因及形成环境的认识仍存在较大分歧,本文对鄂西南利川黄泥塘上二叠统吴家坪组层状硅质岩成因及形成环境进行探讨,为全面研究华南二叠纪层状硅质岩成因及沉积环境提供新材料。

1 硅质岩的岩石学特征及成因

黄泥塘吴家坪组剖面位于湖北省西南部利川市南约 20 km 的黄泥塘(图 1),剖面起点: N30°06'21"、

E108°52'25" 构造上位于湘鄂西南构造带利川复向斜中黄泥塘背斜的北西翼。

1.1 硅质岩的产出特征

利川黄泥塘二叠纪吴家坪组(石油部门称之为“乐平组”)底部为红褐色铁锰质古风化壳,向上为灰黑色薄层状硅质岩、硅质泥岩、夹炭质泥岩及灰白色薄层状火山粘土岩(沉凝灰岩),产石煤,硅质岩水平层理发育,产丰富的菊石、腕足、鱼鳞化石。与下伏茅口组厚层一块状生物屑灰岩呈平行不整合接触,与上覆产牙形石 *Neogondolella wangi* 的长兴组深灰色中层状生物屑灰岩呈整合接触(图 2)。本组底部硅质岩紧邻古风化壳,是对本区硅质岩为深水沉积的否定。下部硅质岩与石煤共生,石煤是高变质的腐泥煤,成煤母质是以藻类为主的低等生物,一般形成于大陆边缘还原环境^[3]。上部硅质岩夹多层沉凝灰岩,如第 6 小层,见 9 层沉凝灰岩。喷发于中—晚二叠世的峨眉山玄武岩广泛出露于我国西南四川、贵州和云南三省,并于川东梁平、华蓥山等地钻探中也有发现^[24],其在时间上与吴家坪组硅质岩沉积时期一致,空间上紧邻研究区,据此推断研究区沉凝灰岩的形成成为峨眉山玄武岩喷发的结果。

①国家自然科学基金(编号:41240016)与中国地质调查局基础地质调查项目(编号:1212010911016,1212010814057)联合资助
收稿日期:2012-08-10; 收修改稿日期:2012-11-19

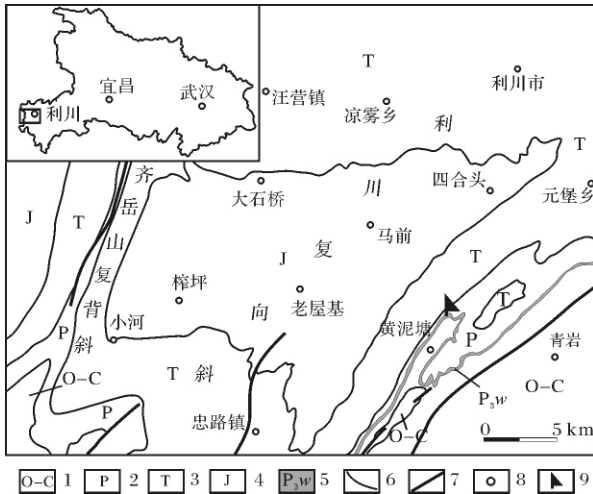


图1 利川地区地质简图及剖面位置图

- 1. 奥陶系-石炭系; 2. 二叠系; 3. 三叠系; 4. 侏罗系; 5. 吴家坪组;
- 6. 地层界线; 7. 断层线; 8. 地名点; 9. 剖面位置

Fig. 1 Geological sketch map of Lichuan area and location of Huangnitang section

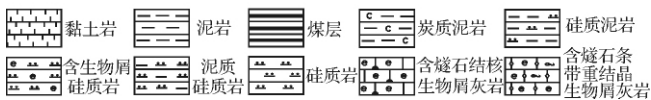
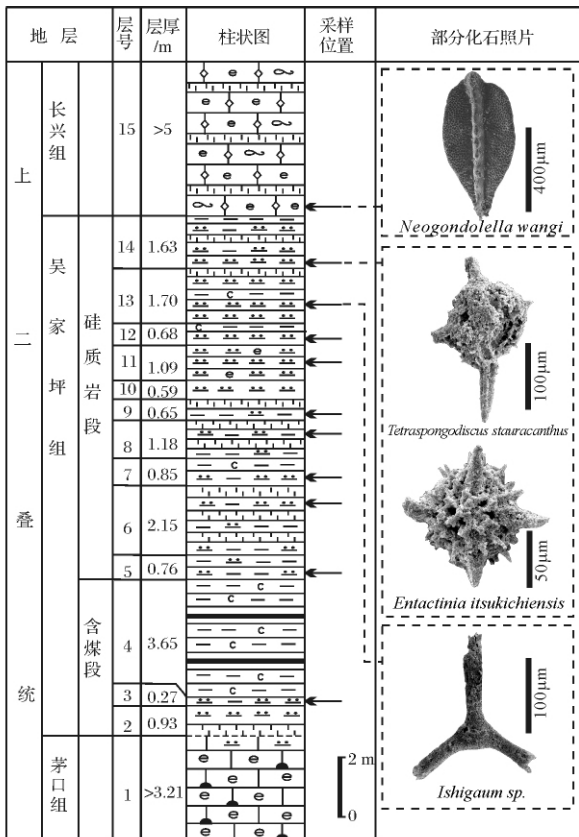


图2 利川黄泥塘剖面硅质岩分布 采样点及部分化石照片

Fig. 2 Distribution, sample location and fossil photomicrographs of the siliceous rocks along Huangnitang section

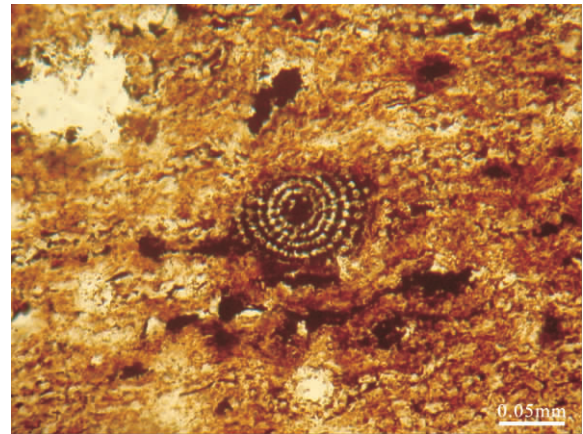


图3 含放射虫硅质岩镜下照片

多圈层网格结构的放射虫 结构清晰, 虫室被微粒石英充填, 壁被褐铁矿取代。HNT-41-4b, 单偏光

Fig. 3 Photomicrograph of siliceous rocks

1.2 硅质岩的岩石学与化石组合特征

镜下观察表明研究区硅质岩可分为(含)生物屑硅质岩(图3)与硅质泥岩两类。生物屑硅质岩由生物屑和基质组成。生物屑为海绵骨针与放射虫; 基质为隐晶石英、绢云母及褐铁矿。海绵骨针: 可识别四射骨针、三轴四射骨针与三轴四射骨针, 由微粒石英组成, 圆形或锥形杆状, 中孔较脏, 直径 0.01 ~ 0.03 mm, 长 0.05 ~ 0.2 mm, 含量约 5%。放射虫: 由微粒石英组成, 呈三枝杈状、圆形、椭圆形, 直径 0.03 ~ 0.1 mm, 含量可达 15%, 属种包括(由冯庆来鉴定): *Paracopicyntra simplex* Feng, *Paracopicyntra* sp., *Tetraspongodiscus stauracanthus* Feng, *Tetraspongodiscus* sp., *Paroertlispongus* sp., *Ishigaum* sp. 与 *Entactinia itsukichiensis* Sashida & Tonishi(图2 3)。放射虫组合以泡沫虫类为主, 内射球虫类次之, 隐管虫类很少, 代表外陆棚环境的放射虫组合, 地质时代为晚二叠世^[25]。硅质泥岩: 由绢云母及黏土矿物、微粒石英(30%左右)、褐铁矿、海绵骨针及介壳组成。

综上所述 硅质岩的产出特征、岩石学及化石组合特征表明其是与火山和生物化学作用有关的一类硅质岩, 形成于陆棚缺氧环境。

2 硅质岩地球化学特征及成因

对所采硅质岩样品, 除去风化表面, 用蒸馏水去污后粉碎至 200 目, 干燥后备用。样品测试在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成, 主量元素在 X 射线荧光光谱仪 (AXIOS) 上测试, 微量元素与稀土元素在电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS-X Series

II) 与原子荧光分光光度仪(AFS230E: As, Sb, Bi) 上进行分析, 测试精度优于5%。

2.1 常量元素特征及来源

2.1.1 元素特征

黄泥塘吴家坪组硅质岩化学成分以 SiO_2 为主, 含量 76.93 ~ 86.15%, 平均值 82.45%; 其次为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O , 平均含量分别为 5.53%、1.18%、1.61%; 其它氧化物含量均未达到 1% (表 1), 与典型热水成因^[26]、生物化学成因^[27-28] 及火山成因^[29] 的硅质岩相比, 最接近火山成因硅质岩的地球化学特征: 低 SiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 , 高 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 , 其次接近火山—生物化学作用形成的硅质岩特征。另外样品具有较高的烧失量, 可能与样品富含有机质有关。

Yamamoto^[26] 指出热水活动能导致 Fe、Mn 元素富集, Adachi^[30] 分析了采自深海钻探计划 Leg32 航次北太平洋的 42 个白垩纪岩石样品后指出, TFe_2O_3 富集是热水沉积硅质岩的重要特征, 最大值可达 6.68%。而黄泥塘硅质岩 TFe_2O_3 含量不高, 最大仅 2.28%, Mn 含量极低, 平均值仅为 0.02%, 不具备典型热水成因特点。

Boström 和 Peterson^[31] 提出用海相沉积物中 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 来判别热液对沉积物的贡献, 位于东太平洋洋隆热液沉积物 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 值多在

0.01 ~ 0.2 之间。采自 Leg32 航次的热液硅质岩比值平均为 0.12^[30], 而日本中部三叠纪 Kamiaso 生物成因的半远洋硅质岩的比值为 0.60^[30]。研究区硅质岩 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 值在 0.64 ~ 0.83 之间, 平均值 0.73 (表 1), 与纯生物成因硅质岩的值较接近。在 Al—Fe—Mn 三角图上 (图 4) 4 个样品落入非热水成因区, 5 个样品位于非热水成因区上方靠近 Al 端元一侧, 而远离热水成因硅质岩区, 指示本区硅质岩应非热水成因硅质岩。

2.1.2 双变量图解

利川黄泥塘硅质岩 $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与火山成因的硅质岩最接近 (表 1)。前人经过分析统计, 总结了一些对硅质岩成因具有很好指示作用的双变量图解。前苏联麦维姆河上游的生物沉积硅质岩与苏联别洛耶湖凝灰质硅质岩在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 、 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 的双变量图解上 (图 5-a, b) 可明显的分为两个区^[29]。同样, 生物成因与火山成因的硅质岩在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})-\text{Al}_2\text{O}_3$ 的双变量图解上 (图 5-c) 可明显分为两个区^[28]。在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解中 3 个样品落入火山成因区, 6 个样品位于生物成因与火山成因之间靠近火山成因一侧, 指示了本区硅质岩以火山成因为主, 并伴有生物作用。 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $(\text{K}_2\text{O} +$

表 1 利川黄泥塘剖面吴家坪组硅质岩主量元素及与热水、生物、火山成因硅质岩的对比 ($w_B/\%$)

Table 1 Major element contents of siliceous rocks at Huangnitang section, in Lichuan area ($w_B/\%$)

主量元素	3-H	6-H	7-H	8-H	9-H	11-H	12-H	13-H	14-H	平均值	热水成因 ^[26]	生物成因 ^[27-28]	火山成因 ^[29]	火山—生物成因 ^[29]		
SiO_2	85.08	83.53	84.26	76.93	78.71	81.17	83.58	82.65	86.15	82.45	92.63	92.80	95.96	88.04	79.91	85.74
Al_2O_3	5.54	4.88	4.60	8.08	7.49	4.85	5.34	5.10	3.88	5.53	1.41	1.99	0.71	0.84	5.85	3.72
Fe_2O_3	1.75	0.66	1.59	1.55	0.85	0.41	1.92	0.74	1.15	1.18	2.67	2.12	0.43	1.59	0.82	1.35
FeO	0.27	0.28	0.35	0.27	0.30	0.31	0.32	0.35	0.28	0.30	0.26	0.73	0.08	0.26	2.10	4.86
CaO	0.68	0.45	0.38	0.22	0.18	0.77	0.41	0.57	0.38	0.45	0.11	1.03	0.30	5.07	2.82	1.00
MgO	0.37	0.39	0.36	0.65	0.56	0.45	0.36	0.41	0.49	0.45	0.33	0.95	0.02	0.19	1.15	1.26
K_2O	1.46	1.68	1.27	2.25	2.04	1.48	1.32	1.45	1.50	1.61	0.42	0.42	0.05	0.16	1.05	0.53
Na_2O	0.58	0.13	0.13	0.13	0.12	0.10	0.16	0.13	0.20	0.19	0.16	0.41	0.06	0.18	1.18	0.51
TiO_2	0.16	0.26	0.21	0.38	0.32	0.22	0.27	0.21	0.10	0.24	0.09	0.08	0.03	0.016	0.46	0.20
P_2O_5	0.49	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.22	0.06	0.24	0.13	0.03	0.11	0.02	0.03		
MnO	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.8	0.78	0.02	0.3	0.11	0.16
灼失量	2.96	6.98	5.88	9.33	8.68	9.95	5.32	7.52	5.20	6.87			2.93	0.34		
总量	99.38	99.29	99.09	99.84	99.30	99.76	99.24	99.20	99.58	99.42	98.91	101.42	100.61	97.02	95.45	99.33
TFe_2O_3^*	2.05	0.97	1.987	1.857	1.177	0.757	2.28	1.13	1.46	1.51	2.96	2.93	0.52	1.88	3.15	6.75
$\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$	0.67	0.79	0.64	0.77	0.83	0.83	0.64	0.77	0.66	0.73	0.22	0.28	0.50	0.22	0.57	0.29
$\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$	41.71	46.15	60.14	32.38	36.39	51.50	56.47	52.24	50.65	47.51	159.7	111.8	872.36	258.94	35.75	82.44
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	15.36	17.12	18.32	9.52	10.51	16.74	15.65	16.21	22.20	15.74	65.70	45.63	135.15	104.81	13.66	23.05
$(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.37	0.37	0.30	0.29	0.29	0.32	0.28	0.31	0.44	0.33	0.41	0.42	0.15	0.40	0.38	0.28
MnO/TiO_2	0.25	0.06	0.06	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06	0.14	0.08	8.89	9.75	0.67	18.75	0.25	0.80

* : $\text{TFe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.1113 \times \text{FeO}$

Na₂O) — Al₂O₃ 图解显示了高度一致性,除 3 个样品紧靠火山成因区外,其它数据都落入火山成因区。这些双变量图解综合表明本区硅质岩成因以火山成因为主,并伴有一定的生物作用。

2.2 微量元素特征及成因

黄泥塘吴家坪组硅质岩微量元素含量如表 2 所示, Pb、Cr、Co、Mo、Sb、V 含量高于沉积岩丰度^[32],尤其是 Cr、Mo、Sb、V 相当富集,分别是沉积岩丰度的 3.68、7.18、20.65 与 6.65 倍。Mo、V 是生物活动性元素,它的高度富集,表明了硅质岩的形成与生物活动有关。而 Cu、Zn、Rb、As、Bi、Sr、Ba、Sc 低于沉积岩丰度,尤其是 Bi、Sr、Ba 严重亏损,分别只有沉积岩丰度的 12%、14% 与 27%。Marchig^[33] 在研究了现代大洋热水沉积物的微量元素特征后指出 As 富集是热水沉积物区别与正常沉积物的重要标志,周永章等(1990^[34], 1994^[35]) 分别对广西丹池盆地与古水热水沉积硅质岩地球化学特征进行分析,并于 2004^[36] 总结了华南热水沉积硅质岩地化特征,指出 Ba、As、Sb、Sc 元素富集是典型热水成因标志。样品 Ba、As、Sc 含量相对于沉积岩丰度亏损,而 Sb 富集,因此不具备典型热水沉积特征。Cr 是一种亲地幔元素,黄泥塘硅质岩 Cr 元素富集,前文已指出硅质岩沉积时期正值峨眉山玄武岩喷发,火山的喷发可从地幔带来丰富的 Cr 元素,这可能是导致 Cr 元素富集的重要原因。

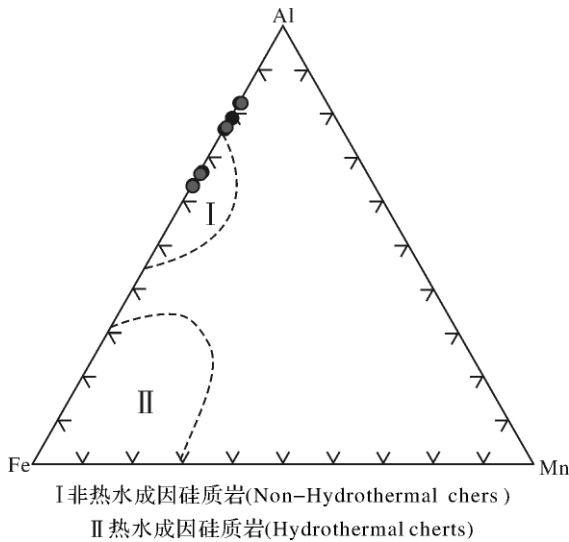


图 4 利川黄泥塘剖面硅质岩 Al—Fe—Mn 图解^[30]
 Fig. 4 Al—Fe—Mn diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area
 I 非热水成因硅质岩(Non—Hydrothermal siliceous rocks)
 II 热水成因硅质岩(Hydrothermal siliceous rocks)

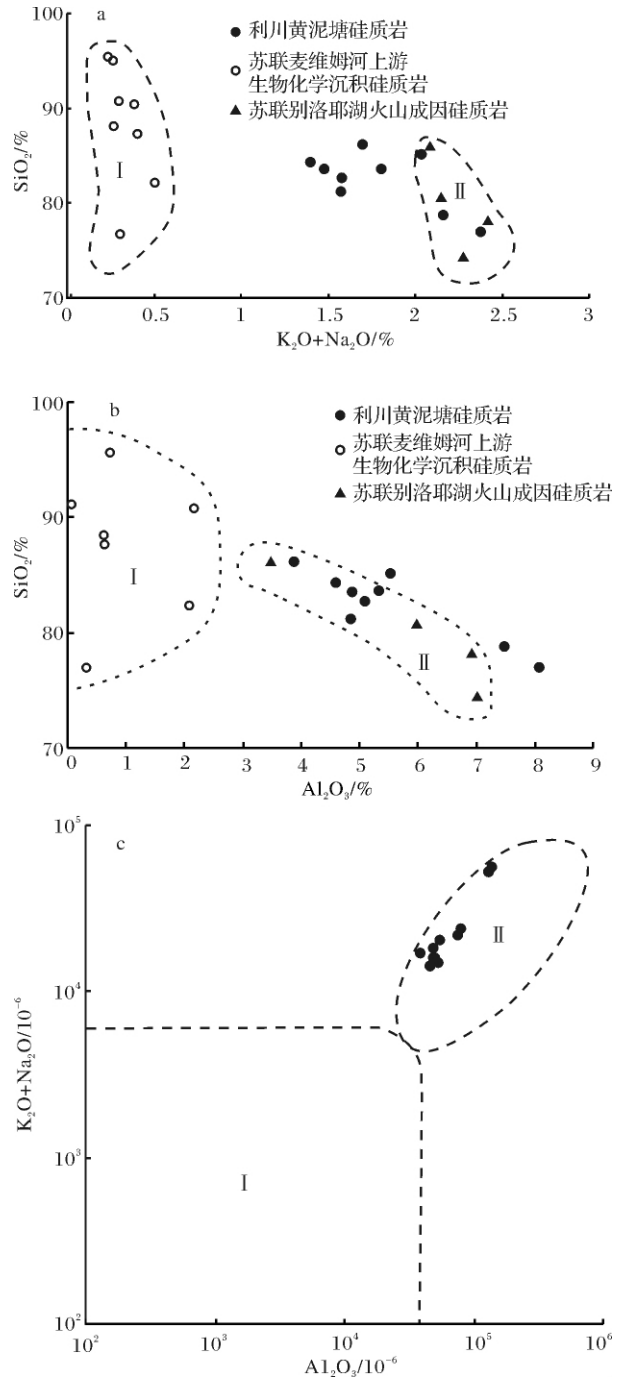
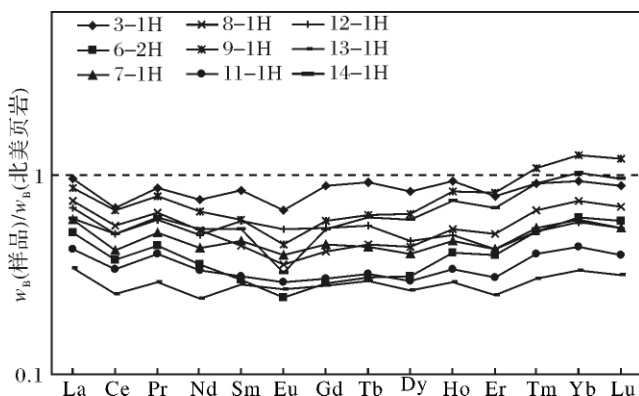


图 5-a 利川黄泥塘剖面硅质岩 SiO₂—(K₂O + Na₂O) 图解^[29]
 Fig. 5-a SiO₂ vs. (K₂O + Na₂O) diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area
 图 5-b 利川黄泥塘剖面硅质岩 SiO₂—Al₂O₃ 图解^[29]
 Fig. 5-b SiO₂ vs. Al₂O₃ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area
 图 5-c 利川黄泥塘剖面硅质岩 (K₂O + Na₂O) —Al₂O₃ 图解^[28]
 Fig. 5-c (K₂O + Na₂O) vs. Al₂O₃ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area
 I 生物成因硅质岩(Biologically—deposited siliceous rocks)
 II 火山成因硅质岩(Volcano—sedimentary siliceous rocks)

表2 利川黄泥塘剖面吴家坪组硅质岩全岩微量元素的质量分数($w_B/\mu\text{g/g}$)Table 2 Trace element contents of siliceous rocks at Huangnitang section, in Lichuan area ($w_B/\mu\text{g/g}$)

微量元素	3-1H	6-1H	7-1H	8-1H	9-1H	11-1H	12-1H	13-1H	14-1H	平均值	沉积岩丰度 ^[32]	与沉积岩比值
Cu	49.30	9.24	21.00	11.50	19.90	6.89	14.00	25.60	17.00	19.38	40.00	0.48
Pb	16.40	13.10	17.10	24.80	24.00	15.60	20.00	16.10	19.00	18.46	15.00	1.23
Zn	82.00	17.40	43.10	39.10	25.80	25.80	47.80	65.50	31.10	41.96	72.00	0.58
Cr	181.00	182.00	271.00	343.00	338.00	257.00	166.00	238.00	113.00	232.11	63.00	3.68
Ni	76.50	56.00	83.70	57.70	93.90	81.00	68.40	75.30	40.20	70.30	56.00	1.26
Co	36.60	15.80	52.00	26.60	42.10	34.20	27.50	31.40	13.40	31.07	15.00	2.07
Rb	38.50	46.40	41.80	64.10	58.70	48.80	46.70	18.60	45.30	45.43	96.00	0.47
Cs	1.86	2.84	2.70	4.97	4.79	2.99	3.61	1.40	3.03	3.13	3.40	0.92
Mo	12.10	9.74	16.60	14.50	5.70	20.20	28.60	53.80	26.10	20.82	2.90	7.18
As	12.40	2.74	11.60	5.24	3.01	1.79	6.88	11.60	3.48	6.53	8.60	0.76
Sb	8.66	19.80	19.10	12.40	9.87	20.90	55.80	26.60	12.70	20.65	1.00	20.65
Bi	0.34	0.33	0.34	0.51	0.42	0.32	0.39	0.25	0.35	0.36	3.00	0.12
Sr	68.10	55.60	53.90	55.20	67.10	41.30	70.20	45.80	50.80	56.44	410.00	0.14
Ba	103.00	139.00	123.00	147.00	164.00	112.00	120.00	80.00	114.00	122.44	460.00	0.27
V	306.00	515.00	677.00	654.00	430.00	1380.00	657.00	414.00	352.00	598.33	90.00	6.65
Sc	15.90	5.22	5.13	7.28	7.31	5.09	7.61	3.68	4.61	6.87	9.00	0.76
Nb	12.00	8.48	6.11	12.70	11.30	6.19	7.87	3.00	7.64	8.37	8.00	1.05
Be	2.41	1.20	1.29	2.04	1.72	1.08	1.11	0.65	0.93	1.38	2.10	0.66
B	42.00	43.80	40.00	90.20	86.40	54.70	52.80	36.30	45.20	54.60	81.00	0.67
Ga	6.67	7.22	6.84	14.80	13.20	9.08	8.52	3.36	6.92	8.51	15.00	0.57
U	36.60	7.24	6.83	7.38	10.20	11.60	15.90	14.00	16.10	13.98	2.80	4.99
Th	4.09	4.00	4.10	6.87	5.69	4.52	5.28	2.47	4.97	4.67	8.50	0.55
U/Th	8.95	1.81	1.67	1.07	1.79	2.57	3.01	5.67	3.24	3.31	0.33	9.10
V/(V+Ni)	0.80	0.90	0.89	0.92	0.82	0.94	0.91	0.85	0.90	0.88	0.62	1.43

图6 黄泥塘剖面硅质岩 REE 北美页岩标准化配分模式
(标准化值 Haskin *et al.*, 1968^[37])Fig. 6 NASC-normalized REE patterns for siliceous rocks
at Huangnitang section in Lichuan area

2.3 稀土元素特征及成因

黄泥塘吴家坪组硅质岩稀土元素值如表3所示, ΣREE 较低, 平均为 $105.58 \mu\text{g/g}$, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 平均值为 3.02, 具轻度的 Ce 负异常(0.75~0.83, 平均值 0.79) 和轻度的 Eu 负异常(0.61~0.95, 平均值 0.84)。经北美页岩标准化后稀土元素配分曲线表

现为近水平(图6)。Fleet^[38] 在系统研究了世界属热水成因和非热水成因的水成金属沉积之后, 认为前者 ΣREE 低, Ce 为负异常, ΣHREE 有富集趋势; 后者 ΣREE 高, Ce 为正异常, ΣHREE 不富集, 而且这一特点在两类沉积之间有连续性变化, 随着热水沉积比例的减少 δCe 负异常逐渐减少, 在北美页岩标准化稀土配分型式图上, 稀土配分曲线由左倾逐渐变化为水平。黄泥塘硅质岩轻度的 Ce 负异常(表3), 不富集的 ΣHREE , 近水平的稀土配分模式(图6) 表明其为非热水沉积产物。

3 硅质岩地化特征及沉积环境

3.1 微量元素特征及沉积环境

通常把 Al_2O_3 与 TiO_2 作为陆源物质指标, 黄泥塘硅质岩 Al_2O_3 与 TiO_2 具有很好的相关性(相关系数 $R=0.85$), 含量明显高于生物成因与热水成因硅质岩, 指示了较高的陆源供给。Sugisaki^[39] 等指出, 硅质岩中 Mn 常被认为是来自大洋深部的标志元素, MnO/TiO_2 比值可作为判断硅质沉积物离大洋盆地远近的标志, 离大陆较近的大陆坡和边缘海沉积的硅质岩该比值应小于 0.5, 开阔大洋底硅质沉积物可达

表 3 黄泥塘剖面吴家坪组硅质岩全岩稀土元素的质量分数 ($w_B/\mu\text{g/g}$)
Table 3 REE contents of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area ($w_B/\mu\text{g/g}$)

稀土元素	3-1H	6-1H	7-1H	8-1H	9-1H	11-1H	12-1H	13-1H	14-1H	平均值
La	30.50	16.30	19.00	23.60	27.20	13.50	21.60	10.90	19.30	20.21
Ce	49.90	27.20	30.40	40.70	48.20	24.50	36.70	18.40	36.80	34.76
Pr	6.76	3.47	4.04	5.07	6.16	3.16	4.70	2.28	4.82	4.50
Nd	24.80	11.60	14.20	17.30	21.40	10.90	16.40	7.84	17.60	15.78
Sm	4.76	1.69	2.63	2.49	3.40	1.77	3.32	1.60	3.02	2.74
Eu	0.82	0.30	0.49	0.44	0.55	0.36	0.66	0.33	0.40	0.48
Gd	4.58	1.49	2.33	2.13	3.04	1.56	2.79	1.44	2.76	2.46
Tb	0.78	0.26	0.37	0.38	0.53	0.27	0.47	0.25	0.52	0.43
Dy	4.76	1.78	2.31	2.53	3.67	1.69	2.70	1.52	3.46	2.71
Ho	0.97	0.42	0.48	0.55	0.85	0.35	0.52	0.30	0.77	0.58
Er	2.65	1.34	1.43	1.72	2.74	1.03	1.44	0.84	2.32	1.72
Tm	0.45	0.26	0.27	0.33	0.54	0.20	0.26	0.15	0.45	0.32
Yb	2.89	1.90	1.83	2.28	3.88	1.34	1.79	1.03	3.15	2.23
Lu	0.42	0.28	0.26	0.33	0.58	0.19	0.26	0.15	0.46	0.33
Y	30.20	12.40	13.80	14.90	24.40	9.21	12.60	7.72	21.70	16.33
Σ REE	165.24	80.69	93.84	114.75	147.14	70.03	106.21	54.75	117.53	105.58
Σ LREE	117.54	60.56	70.76	89.60	106.91	54.19	83.38	41.35	81.94	78.47
Σ HREE	47.70	20.13	23.08	25.15	40.23	15.84	22.83	13.40	35.59	27.11
Σ LREE/ Σ HREE	2.46	3.01	3.07	3.56	2.66	3.42	3.65	3.09	2.30	3.02
δ Ce	0.76	0.79	0.75	0.81	0.81	0.82	0.79	0.80	0.83	0.79
δ Eu	0.77	0.83	0.87	0.84	0.75	0.95	0.95	0.95	0.61	0.84
Ce_{anom}	-0.11	-0.09	-0.11	-0.08	-0.07	-0.07	-0.09	-0.08	-0.06	-0.08
La_N/Yb_N	1.02	0.83	1.01	1.00	0.68	0.98	1.17	1.03	0.59	0.92

注: δ Ce, δ Eu, Ce_{anom} , La_N/Yb_N 为经 Haskin *et al*, 1968^[37] 标准化后计算所得 δ Ce = $2 \times Ce_N / (La_N + Pr_N)$ δ Eu 类同 Ce_{anom} 详见文中

0.5 ~ 3.5。黄泥塘硅质岩 MnO/TiO₂ 值为 0.02 ~ 0.25, 平均值 0.08(表 1), 表明研究区硅质岩形成于离大陆较近的大陆坡和边缘海沉积环境。

3.2 微量元素特征及沉积环境

U 和 Th 在沉积物中的含量取决于沉积环境的氧化还原电位。Th 不受水体氧化还原条件的影响, 常以不溶的 Th⁴⁺ 形式存在, 而 U 在强还原条件下以不溶的 U⁴⁺ 形式存在, 导致沉积物中 U 富集。Jones^[40] 等对西北欧晚侏罗世沉积古氧相地球化学特征后认为: U/Th > 1.25 反映厌氧环境, U/Th < 0.75 指示富氧环境, 而比值介于之间为贫氧环境。Wignall^[41] 则认为 V/(V + Ni) 比值大于 0.83 即为缺氧环境。黄泥塘吴家坪组硅质岩样品 U/Th 平均值为 3.31, 除样品 8-1H 的 U/Th 为 1.07, 其他样品 U/Th 均大于 1.25, 分布于 1.67 ~ 8.95 之间, 指示了厌氧的沉积环境。除样品 3-1H 与 9-1H 的 V/(V + Ni) 值略小于 0.83 外, 其余样品 V/(V + Ni) 值均大于 0.83, 平均值 0.88, 整体表现为缺氧环境。

3.3 稀土元素特征及沉积环境

3.3.1 元素比值特征

研究认为大陆边缘 La_N/Yb_N 平均值为 1.1 ~ 1.4,

洋脊附近 La_N/Yb_N 平均值只有 0.3 左右, 深海平原硅质岩的 La_N/Yb_N 介于两者之间^[5]。研究区黄泥塘硅质岩样品的 La_N/Yb_N 平均值为 0.92, 有 6 件样品值在 1 左右(表 3), 很好的指示该区硅质岩沉积于大陆边缘。

Wright^[42] 把稀土元素中的 Ce 与邻近的 La 和 Nd 元素相关的变化称为铈异常: Ce_{anom} 。其公式为: $Ce_{anom} = \log [3(Ce)_N / (2(La)_N + (Nd)_N)]$ 。 Ce_{anom} 值已被作为判断古海水氧化—还原条件的标志, 其值 > -0.1 时, 反映水体呈缺氧环境, 而 < -0.1 时反映水体呈氧化环境。除 2 件样品的值稍小于 -0.1 外, 黄泥塘硅质岩样品的 Ce_{anom} 值大于 -0.1, 平均值为 -0.08(表 3), 指示了还原沉积环境。

3.3.2 双变量图

前人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、远洋和洋中脊硅质岩投影区及陆壳—浅海沉积体系与洋壳—深海沉积体系^[43, 44]。在 $100 \times TFe_2O_3/SiO_2$ — $100 \times Al_2O_3/SiO_2$ 图解中 5 个样品落入大陆边缘区, 4 个样品远离洋脊而紧邻大陆边缘分布(图 7-a); 所有样品均位于 $TFe_2O_3 / (100 - SiO_2)$ — $Al_2O_3 / (100 - SiO_2)$ 图解的

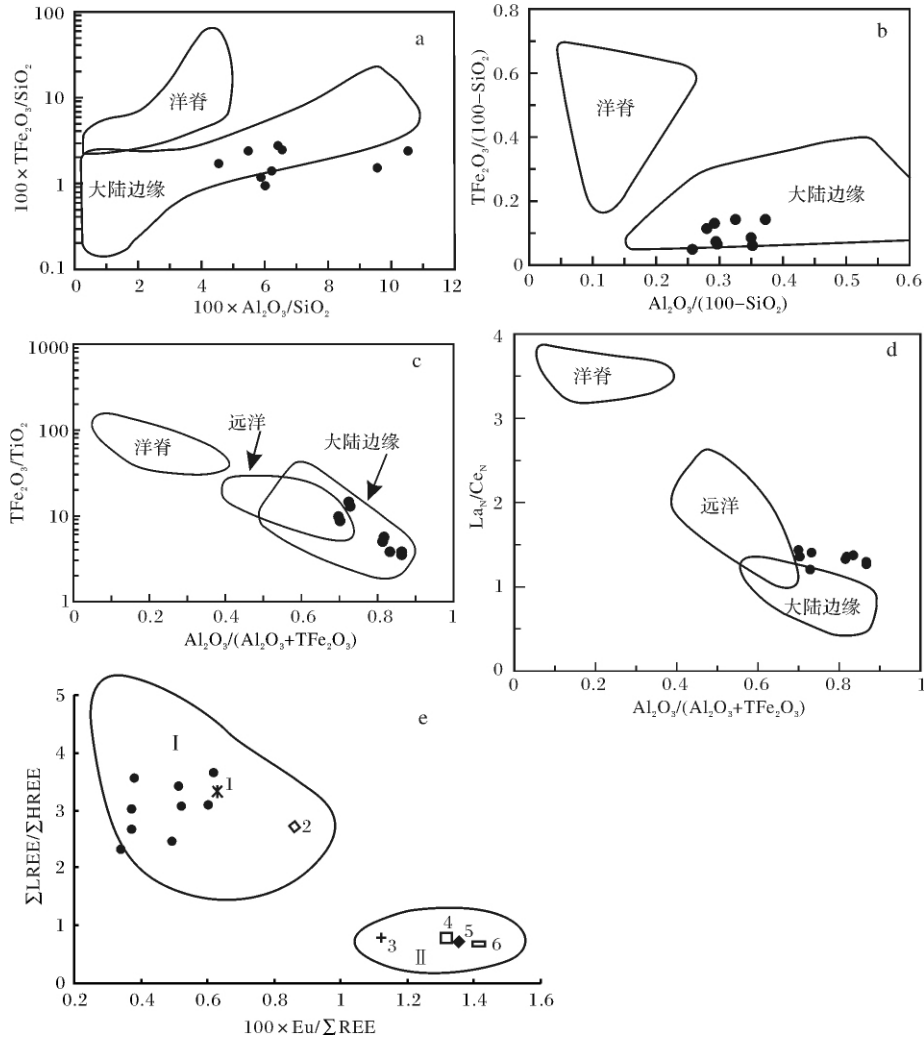


图 7-a 黄泥塘剖面硅质岩 $100 \times \text{TFe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ — $100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 图解^[46]

Fig. 7-a $100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ vs. $100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area

图 7-b 黄泥塘剖面硅质岩 $\text{TFe}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ — $\text{Al}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ 图解

Fig. 7-b $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area

图 7-c 黄泥塘剖面硅质岩 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TFe}_2\text{O}_3)$ 图解^[46]

Fig. 7-c $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area

图 7-d 黄泥塘剖面硅质岩 La_N/Ce_N — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TFe}_2\text{O}_3)$ 图解^[46]

Fig. 7-d La_N/Ce_N vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section in Lichuan area

图 7-e 黄泥塘剖面硅质岩 $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ — $100 \times \text{Eu}/\Sigma \text{REE}$ 图解^[46]

Fig. 7-e $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ vs. $100 \times \text{Eu}/\Sigma \text{REE}$ diagram of siliceous rocks at Huangnitang section, in Lichuan area

I. 陆壳—浅海沉积体系; II. 洋壳—深海沉积体系; 实心圆是本区的 9 个样品; 1. 东海大陆架软泥粉砂; 2. 大陆型沉积壳层; 3. 太平洋深海粘土; 4. 洋壳; 5. 大洋玄武岩; 6. 球粒陨石

I. continental crustal—shallow—sea depositional systems; II. oceanic crustal—deep—sea depositional systems. The solid circles represent nine samples from Huangnitang area, western Hubei; 1. ooze and silt from the East China Sea continental shelf; 2. continental sedimentary crust; 3. Pacific deep-sea clay; 4. oceanic crust; 5. oceanic basalt; 6. chondrite

大陆边缘区(图 7-b); 7 个样品投影到 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TFe}_2\text{O}_3)$ 判别图解的大陆边缘区 2

个样品则位于大陆边缘与远洋的重叠区(图 7-c); 所有样品均紧邻 La_N/Ce_N — $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TFe}_2\text{O}_3)$ 图

解的大陆边缘区分布(图6-d),除1个样品外,其余样品均落入 Σ LREE/ Σ HREE— $100 \times \text{Eu}/\Sigma$ REE图解的陆壳—浅海沉积体系区(图7-e)。在这些判别图解中,黄泥塘硅质岩地球化学特征显示出高度的相似性,样品要么落入大陆边缘区,要么紧邻大陆边缘分布,指示硅质岩形成于大陆边缘环境。综上所述,利川黄泥塘硅质岩地球化学特征一致表明其形成于大陆边缘缺氧环境。

4 结论

通过对利川黄泥塘硅质岩的岩石学特征与地球化学特征系统研究表明:

(1) 利川黄泥塘硅质岩含有较多硅质生物且与海相石煤及多层层凝灰岩共生,放射虫组合指示了外陆棚环境,表明硅质岩沉积于陆棚缺氧环境,其形成与火山及生物作用有关。

(2) 利川黄泥塘硅质岩主量元素具有火山成因硅质岩低 SiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 ,高 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 的特征,双变量图解均表明其为伴有一定生物作用的火山成因硅质岩。微量元素与稀土元素特征表明其形成不受热水影响。

(3) 利川黄泥塘硅质岩主量、微量及稀土元素特征一致表明其形成于大陆边缘缺氧环境。

致谢:所有参与湖北1:5万利川区调项目的同志付出了辛勤的劳动,中国地质大学(武汉)地球科学学院颜佳新教授、冯庆来教授给予悉心的帮助,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)

- 孔庆玉,龚与麒. 安徽巢县下二叠统硅质岩的成因[J]. 石油与天然气地质, 1986, 7(2): 171-174 [Kong Qingyu, Gong Yuqu. Origin of the Lower Permian siliceous rocks in Chaonian County, Anhui [J]. Oil & Gas Geology, 1986, 7(2): 171-174]
- 刘贻灿,金福全. 下扬子地区二叠纪硅质岩成因[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1992, 15(1): 106-114. [Liu Yican, Jin Fuquan. The genesis of the silicalites of the Permian in the lower Yangtze river region [J]. Journal of Hefei University of Technology, 1992, 15(1): 106-114]
- Yao L B, Gao Z M, Yang Z S, et al. Origin of seleniferous cherts in Yutangba Se deposit, Southwest Enshi, Hubei Province [J]. Science in China: Series D, 2002, 45(8): 741-754
- 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]
- 杨水源,姚静. 安徽巢湖平顶山中二叠统孤峰组硅质岩的地球化学特征及成因[J]. 高校地质学报, 2008, 14(1): 39-48 [Yang Shuiyuan, Yao Jing. Geochemistry and origin of siliceous rocks from the Gufeng Formation of Middle Permian in the Pingdingshan area, Chaochu region, Anhui province [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(1): 39-48]
- 王强,马占武,李红中,等. 安徽南部孤峰组硅质岩特征及其成因的综合评述[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2008, 29(4): 21-28 [Wang Qiang, Ma Zhanwu, Li Hongzhong, et al. Study on characteristics and its origin of the cherts of Gufeng Group in Southern Anhui Province [J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Science, Medicine), 2008, 29(4): 21-28]
- 林良彪,陈洪德,朱利东. 重庆石柱吴家坪组硅质岩地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2010, 30(3): 52-58 [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhu Lidong. Geochemical characteristics of silicalites from Wujiaping Formation in Shizhu, Chongqing [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(3): 52-58]
- Chen H, Xie X N, Hu C Y, et al. Geochemical characteristics of Late Permian sediments in the Dalong Formation of the Shangsi Section, Northwest Sichuan Basin in South China: Implications for organic carbon-rich siliceous rocks formation [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 11: 35-53
- 夏邦栋,钟立荣,方中,等. 下扬子区早二叠世孤峰组层状硅质岩成因[J]. 地质学报, 1995, 69(2): 125-137 [Xia Bangdong, Zhong Lirong, Fang Zhong, et al. The origin of cherts of the Early Permian Gufeng Formation in the lower Yangtze area, eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(2): 125-137]
- 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]
- 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 Yuetong. 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]
- 冯彩霞,刘家军. 鄂西南双河渔塘坝矿区硅质岩地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 21-25 [The Geochemistry of Chert from Yutangba Selenium digging in Shuanghe, Hubei province [J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 2002, 32(1): 21-25]
- 冯彩霞,刘家军,刘燊,等. 渔塘坝硒矿硅质岩的地球化学特征及成因[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 727-732 [Feng Caixia, Liu Jiajun, Liu Shen, et al. The geochemistry and genesis of siliceous rocks of Selenium diggings in Yutangba [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 727-732]
- 杨海生,周永章,杨志军,等. 湖南二叠系层状硅质岩的地球化

- 学特征[J]. 矿产与地质, 2003, 17 (5): 622-626 [Yang Haisheng, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, *et al.* Geochemical characteristics of the bedded siliceous rocks from the Permian strata in Hunnan province, southern China[J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 17 (5): 622-626]
- 15 付伟, 周永章, 杨志军, 等. 湘中南二叠系孤峰组硅质岩的成因属性及其地球动力学指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23 (1): 292-300 [Fu Wei, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, *et al.* Petrogenesis of the bedded chert from the Gufeng Formation and its implications to Early Permian geodynamic background in South China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23 (1): 292-300]
- 16 林良彪, 陈洪德, 朱利东. 川东茅口组硅质岩地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 2010, 84 (4): 500-507 [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhu Lidong. The origin and geochemical characteristics of Maokou Formation silicalites in the Eastern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (4): 500-507]
- 17 Qiu Z, Wang Q C. Geochemical evidence for submarine hydrothermal origin of the Middle-Upper Permian chert in Laibin of Guangxi, China [J]. Science in China: Earth Science, 2011, 54: 1011-1023
- 18 朱洪发, 秦德余, 刘翠章. 论华南孤峰组和大隆组硅质岩成因、分布规律及其构造机制[J]. 石油实验地质, 1989, 11 (4): 341-348 [Zhu Hongfa, Qin Deyu, Liu Cuizhang. On the origin, distributive pattern and tectonic control of siliceous rocks in Gufeng and Dalong Formations, South China [J]. Experimental Petroleum Geology, 1989, 11 (4): 341-348]
- 19 杨玉卿, 冯增昭. 华南下二叠纪层状硅岩的形成及意义[J]. 岩石学报, 1997, 13 (1): 111-120 [Yang Yuqing, Feng Zengzhao. Formation and significance of the bedded siliceous rocks of the Lower Permian in south China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1997, 13 (1): 111-120]
- 20 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: 197-222
- 21 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 Qiuxiang, Guo Fusheng, Liu Xiaotong, *et al.* Origin of bedded chert from Dingjiashan Formation in Jiangshan region, Zhejiang province: evidence from cathodoluminescence [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (5): 797-803]
- 22 孔庆玉, 龚与甄. 苏皖地区下二叠统放射虫硅质岩形成环境探讨[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8 (1): 86-89 [Kong Qingyu, Gong Yujin. The formation environment of radiolarian siliciliths in the Lower Permian in Jiangsu-Anhui region [J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8 (1): 86-89]
- 23 Takebe M, Kametaka M, Takayanagi Y, *et al.* Origin and deposition of organic matter in continental chert of the Middle Permian Gufeng Formation in the northeastern Yangtze platform [J]. Sedimentary Geology, 2007, 201: 141-148
- 24 牛志军, 徐安武, 段其发, 等. 湖北建始北部二叠纪地层砾的来源与富集[J]. 中国区域地质, 2000, 19 (4): 396-401 [Niu Zhijun, Xu Anwu, Duan Qifa, *et al.* Origin and enrichment of Selenium in Permian strata in the northern part of Jianshi, Hubei [J]. Regional Geology of China, 2000, 19 (4): 396-401]
- 25 冯庆来, 叶玫. 造山带区域地层学研究的理论、方法与实例剖析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000, 22-35 [Feng Qinglai, Ye Mei. Principles, methods and examples on the regional stratigraphy in orogenic belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000, 22-35]
- 26 Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terrenes [J]. Sedimentary Geology, 1987, 52: 65-108
- 27 Hein J R, Vallier T L, Allan M A. Chert petrology and geochemistry, Mid-Pacific mountains and Hess Rise, deep sea drilling project Log62. Initial reports of the deep sea drilling project [R], 1981, 62: 711-748
- 28 韩发, Hutchinson R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据—含矿建造及热液沉积岩[J]. 矿床地质, 1989, 8 (2): 25-40 [Han Fa, Richard W H. Evidence for exhalative origin for rocks and ores of the Dachang Tin polymetallic field: the ore-bearing formation and hydrothermal exhalative sedimentary rocks [J]. Mineral Deposits, 1989, 8 (2): 25-40]
- 29 王东安. 雅鲁藏布江深断裂带所产硅质岩的特征及其成因[M]. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队著. 西藏南部的沉积岩 [C] 北京: 科学出版社, 1981, 52-72, 1-86 [Wang Dongan. The characteristics and genesis of the silicalite coming from Brahmaputra deep fault [A]. In: Qinghai-Tibet plateau synthesis Science review team of CAS. ed. The sedimentary rocks of southern Tibet [C]. Beijing: Science Press, 1981, 52-72, 1-86]
- 30 Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47: 125-148
- 31 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: 427-447
- 32 黎彤, 郭范. 元素丰度表[J]. 地质与勘探, 1981 [Li Tong, Guo Fan. Element abundance table [J]. Geolgiand Exploration, 1981]
- 33 Marchig V, Gundlach H, Möller P, *et al.* Some geochemical indication for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments [J]. Marine Geology, 1982, 50: 241-256
- 34 周永章. 丹池盆地热水成因硅质岩的沉积地球化学特征[J]. 沉积学报, 1990, 8 (3): 75-83 [Zhou Yongzhang. On sedimentary geochemistry of siliceous rocks originated from thermal water in Nandan-Hechi basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8 (3): 75-83]
- 35 Zhou Y Z, Chown E H, Guha J, *et al.* Hydrothermal origin of Precambrian bedded chert at Gusui, Guangdong, China: Petrologic and geochemical evidence [J]. Sedimentology, 1994, 3: 605-619
- 36 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(中国地质大学北京), 2004, 11 (2): 373-377 [Zhou Yongzhang, He Junguo, Yang Zhijun, *et al.* Hydrother-

- mally sedimentary formations and related mineralization in south China [J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 2004, 11(2): 373-377
- 37 Haskin M A, Haskin L A, Frey F A, *et al.* Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [A]. In: Ahrens L H ed. *Origin and Distribution of the Elements* [C]. Oxford: Pergamon, 1968, 1: 889-911
- 38 Fleet A J. Hydrothermal and hydrogeneous ferromanganese deposits [A]. In: Rona P A ed. *Hydrothermal process at sea floor spreading centres* [C]. New York: Plenum Press, 1983, 473-489
- 39 Sugisaki R, Yamamoto K, Adachi M. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic [J]. *Nature*, 1982, 298: 644-647
- 40 Jones B, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129
- 41 Wignall P B. *Black Shales* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994
- 42 Wright J, Schrader H, Holser W T. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 631-644
- 43 Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and application [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90: 213-232
- 44 方一亭, 边立曾, 俞剑华, 等. 晚奥陶世五峰期扬子板块沉积模式 [J]. *沉积学报*, 1993, 11(3): 7-12 [Fang Yiting, Bian Lizeng, Yu Jianhua, *et al.* Sedimentary environment pattern of Yangtze plate in Wufeng age of Late Ordovician [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(3): 7-12]

Petrogenesis and Sedimentary Environment of Permian Wujiaping Formation Siliceous rocks in Lichuan, Southwestern Hubei

TIAN Yang ZHAO Xiao-ming NIU Zhi-jun WANG Ling-zhan

TU Bing XIE Guo-gang Wu Jun ZENG Bo-fu

(Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources Wuhan 430205)

Abstract: The Upper Permian siliceous rocks of Wujiaping Formation develop in Lichuan, southwestern Hubei. Containing radiolarian and sponge, the siliceous rocks appear with stone coal and volcanic claystone. The radiolarian assemblage is dominated by Spumellaria, followed by Entactinaria and rarely Latentifistularia, which represents the outer shelf environment. The siliceous rocks are rich in terrestrial elements (for example Al, Ti), poor in hydrothermal elements (such as Fe, Mn). Their Al/(Al + Fe + Mn) values are 0.64 ~ 0.83, with an average of 0.73. In the Al-Fe-Mn ternary, chert samples locate in or close to Non-Hydrothermal siliceous rocks region. In SiO₂-(K₂O + Na₂O), SiO₂-Al₂O₃, (K₂O + Na₂O)-Al₂O₃ binary discrimination diagram, samples plot in or near volcano-sedimentary region. Comparing with abundance of trace elements in sedimentary rocks, life elements: Mo and V assemble, hydrothermal elements: Ba, As, Sc deplete. Σ REE is lower and average Σ LREE/ Σ HREE is 3.02, with Ce (δ Ce: 0.75 ~ 0.83, average 0.79) and Eu (δ Eu: 0.61 ~ 0.95, average 0.84) slight negative anomaly. Their NASC-normalized REE distribution patterns are nearly horizontal. These geochemical characteristics prove that siliceous rocks are formed by volcano sedimentation with biological effect. Redox indexes: U/Th, V/(V + Ni) and Ce_{anom}, sedimentary environment indicators: MnO/TiO₂, La_N/Yb_N and discrimination diagrams: 100 × TF_{e2}O₃/SiO₂-100 Al₂O₃/SiO₂, TF_{e2}O₃/(100-SiO₂)-Al₂O₃/(100-SiO₂), TF_{e2}O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Al₂O₃ + TF_{e2}O₃), La_N/Ce_N-Al₂O₃/(Al₂O₃ + TF_{e2}O₃) and Σ LREE/ Σ HREE-100 × Eu/ Σ REE comprehensively make sure that the siliceous rocks deposited in continental shelf under anoxic condition.

Key words: siliceous rocks; petrogenesis; geochemistry; Permian; Wujiaping Formation; southwestern Hubei