

四川盆地中二叠统茅口组硅质岩研究现状

李立基, 范建平, 任佳鑫

成都理工大学能源学院, 四川 成都
Email: 458894077@qq.com

收稿日期: 2021年2月5日; 录用日期: 2021年3月18日; 发布日期: 2021年3月25日

摘要

硅质岩在四川盆地中二叠统茅口组广泛发育, 研究茅口组硅质岩对指导油气勘探有着重要的理论意义。本文在阅读大量文献的基础上, 详细论述了四川盆地中二叠统茅口组硅质岩研究现状, 同时对硅质岩进行了产状分类, 并且详细介绍了各类硅质岩的形成环境、硅质来源以及成因模式的地球化学判断依据。在前人工作的基础之上探讨层状硅质岩与茅一段非常规油气储层的关系以及非层状硅质岩与茅二段、茅三段白云岩储层的关系。

关键词

茅口组, 硅质岩, 研究现状

Research Status of Middle Permian Maokou Formation Chert in Sichuan Basin

Liji Li, Jianping Fan, Jiixin Ren

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan
Email: 458894077@qq.com

Received: Feb. 5th, 2021; accepted: Mar. 18th, 2021; published: Mar. 25th, 2021

Abstract

Cherts are widely developed in Maokou Formation of Middle Permian in Sichuan Basin. Researches on cherts in Maokou Formation have a prolonged influence on petroleum exploration theoretically. After long-period investigates, this study summarizes researches about cherts in Maokou Formation, mid Permian, Sichuan Basin, classifies the occurrence of chert, and introduces the formation environment, source of chert and geochemical judgment basis of genetic model of all kinds of chert. On the basis of previous work, this paper discusses the relationship between stratiform

chert and unconventional reservoirs in 1st member of Maokou Formation, and the relationship between non stratiform chert and dolomite reservoirs in 2nd member of Maokou Formation and 3rd member of Maokou Formation.

Keywords

Maokou Formation, Chert, Research Status

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硅质岩和二叠纪硅质沉积事件一直是前人研究的热点课题之一。硅质岩是沉积岩的重要类型之一，其结构稳定，不容易被后期成岩作用改造，并且四川盆地茅口组广泛发育硅质岩，因此硅质岩的研究对于指导四川盆地茅口组油气勘探有重要的理论意义。

2. 硅质岩研究现状

硅质岩的研究起源于 20 世纪初期，早期的硅质岩研究主要通过野外剖面实测和室内显微镜研究为主，研究手段相对简单，研究内容也相对局限，因此这时期研究成果较少[1]。20 世纪中后期，硅质岩研究热潮的到来，国内外涌现许多研究成果，其主要集中在硅质岩的成因模型与成因模式上，主要提出五种硅质岩成因模型，包括非层状硅质岩的有机质氧化模型(在早成岩阶段，硅的溶解度受到有机物氧化的间接影响而降低而形成非层状硅质岩)、硫化氢氧化模型(硅溶解度受到 PH 值降低的间接影响而降低形成非层状硅质岩)、混合带模型(在海水和陆源水的混合带，且硅溶液过饱和形成非层状硅质岩)、结晶交代模型(非层状硅质岩的成因是硅质矿物发生重结晶作用，不断交代围岩) [2]以及层状硅质岩的硅质软泥结晶模型(在成岩过程中，硅质软泥受 25℃ 以上温度以及多因素综合控制下重结晶形成非层状硅质岩) [3]；还提出四种硅质岩成因模式，包括生物成因模式(主要由海洋硅质生物沉淀而成)、交代成因模式(陆源硅质发生硅质交代作用而形成的硅质岩)、火山成因模式(火山作用来源的硅质经化学沉淀作用而形成的硅质岩)以及热水沉积模式(火山作用来源的硅质经硅质热水沉淀而成的) [4] [5]。20 世纪末期，随着地球化学学科的发展，硅质岩的研究朝定量化研究发展，前人分别从主量元素(Si、Ca、Mg、Fe、Mn、Al、Ti 等)、微量元素(Sr、Ba、V、Co、Ni、Th、U 等)、稀土元素(δC 、 δEu 、LREE/HREE 等)以及硅同位素($\delta^{30}Si$)等方面建立了硅质岩的形成环境、硅质来源和成因模式的判别指标[4] [6] [7] [8] [9]。21 世纪以来，我国学者提出硅质岩的研究在地化数据的基础上，还应重视硅质沉积的构造背景以及硅质岩岩石共生组合的研究[5] [10]。

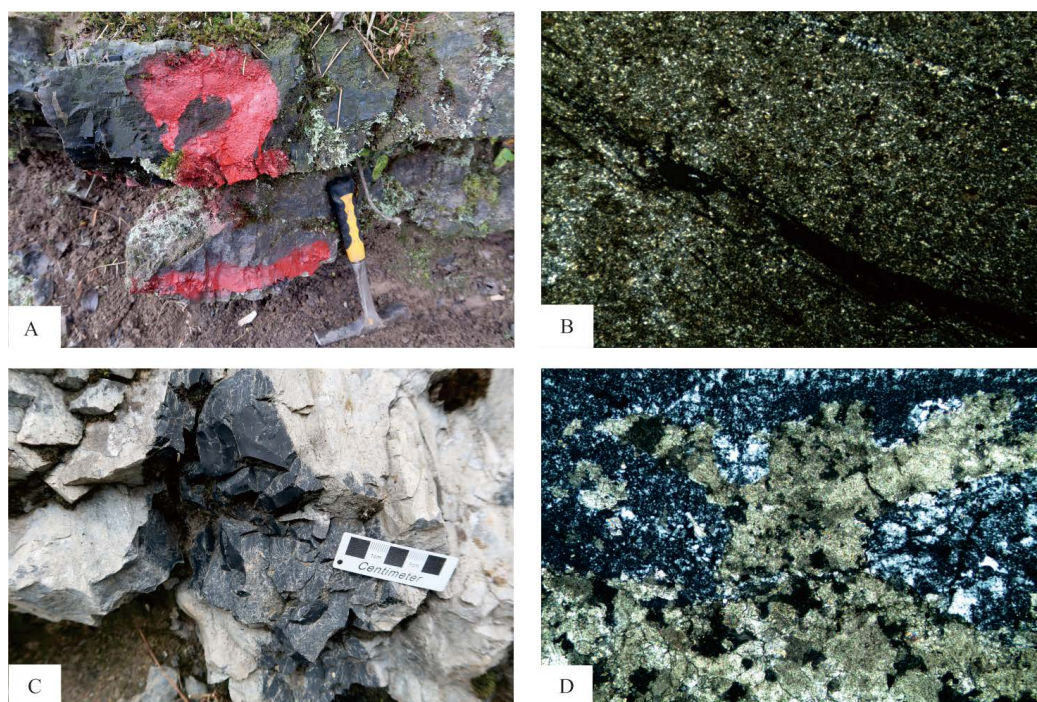
国内学者从 20 世纪 80~90 年代开始对四川盆地二叠系硅质岩进行研究，早期的研究主要根据硅质岩岩石学特征对硅质岩成因进行研究，何起祥等(1990)认为四川盆地上二叠统的硅质岩属于上升流沉积并且认为受火山热液的影响大，其中层状硅质岩见生物残余结构以及放射虫等硅质生物表明层状硅质岩为生物成因；非层状硅质岩由早成岩阶段的 SiO_2 再分配的结果[11]；王一刚等(2006)认为四川盆地上二叠统的硅质岩属于海槽裂隙期凝缩沉积[12]。21 世纪，国内学者用地球化学的方法对中上二叠统的硅质岩进行研究，按产状对硅质岩进行分类，针对不同类型的硅质岩分析其地球化学特征，并结合其构造特征分

析其形成的环境、硅质来源以及成因模式[13][14];用地球化学的方法定量证明了火山作用对中上二叠统的硅质岩的贡献,同时证明中上二叠统的硅质岩为复合来源:生物、热水以及玄武岩淋滤,成因模式为生物化学沉积以及热水沉积。

3. 硅质岩岩石学特征

硅质岩主要成分 SiO_2 , 还含有少量 MnO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 等[15]。硅质岩按产状进行分类,可分为层状硅质岩和非层状硅质岩。研究区茅口组的层状硅质岩主要发育在茅一段,厚度一般,分布范围广,其野外露头岩性为深灰色薄层状硅质岩(图 1(A)),其微观特征:显微镜下见,微晶石英、灰泥、泥质、有机质、还有一些生屑(图 1(B))。

非层状硅质岩又称为硅质结核或硅质条带,其产状一般为结核状、透镜状、条带状,常与碳酸盐岩伴生,少数出现在层状硅质岩或膏岩之中[14]。茅二段、茅三段广泛发育非层状硅质岩,而且在野外露头上常常与灰岩、白云岩伴生(图 1(C));非层状硅质岩的微观特征:显微镜下见玉髓、白云石、方解石(图 1(D))。



A. 层状硅质岩野外特征,华蓥山剖面; B. 层状硅质岩镜下特征,华蓥山剖面; C. 非层状硅质岩野外特征,新基姑剖面; D. 非层状硅质岩镜下特征,新基姑剖面。

Figure 1. Outcrop and microscopic characteristics of stratiform and non stratiform cherts

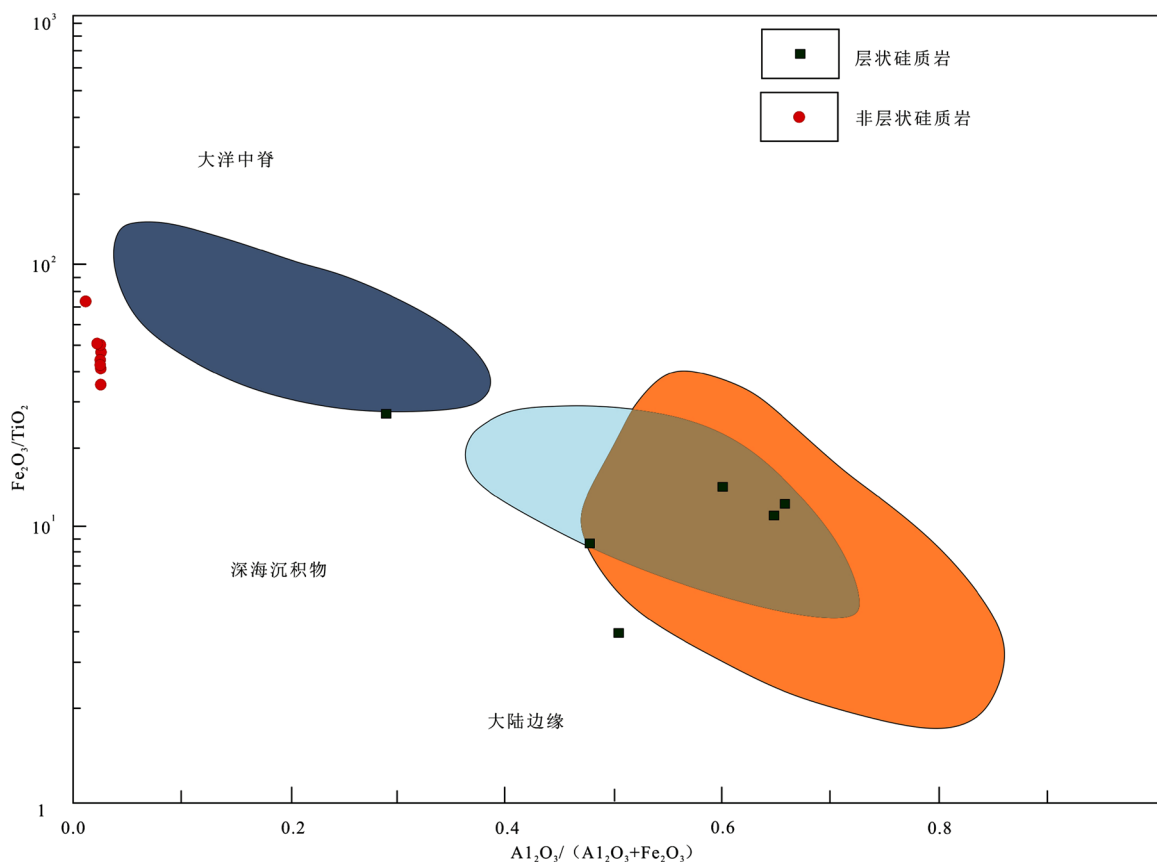
图 1. 层状硅质岩、非层状硅质岩野外特征和镜下特征

4. 硅质岩地球化学判别方法

4.1. 硅质岩形成环境判别方法

Murray [6]对 49 个形成于不同时代以及不同沉积环境的硅质岩样品进行研究,得出硅质岩的形成环境与样品中 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 的比值相关,并且绘制 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 交会图以用来判断硅质岩的形成环境。川东地区中二叠统茅口组的层状硅质岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为 3~28,

平均值 12.07; $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值为 0.28~0.70, 平均值为 0.56, 结合 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 交会图(图 2), 则可以说明其形成于大陆边缘但同时受到热液的影响。川东地区中二叠统茅口组的非层状硅质岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为 36.5~72, 平均值 50.7; $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值为 0.013~0.026, 平均值为 0.02, 结合 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 交会图(图 2), 则可以说明其形成于大洋中脊环境。



(底图据 Murray, 1994; 叶远谋, 2020; Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Al_2O_3 数据据林良彪, 2010、周新平, 2012)

Figure 2. Crossplot of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

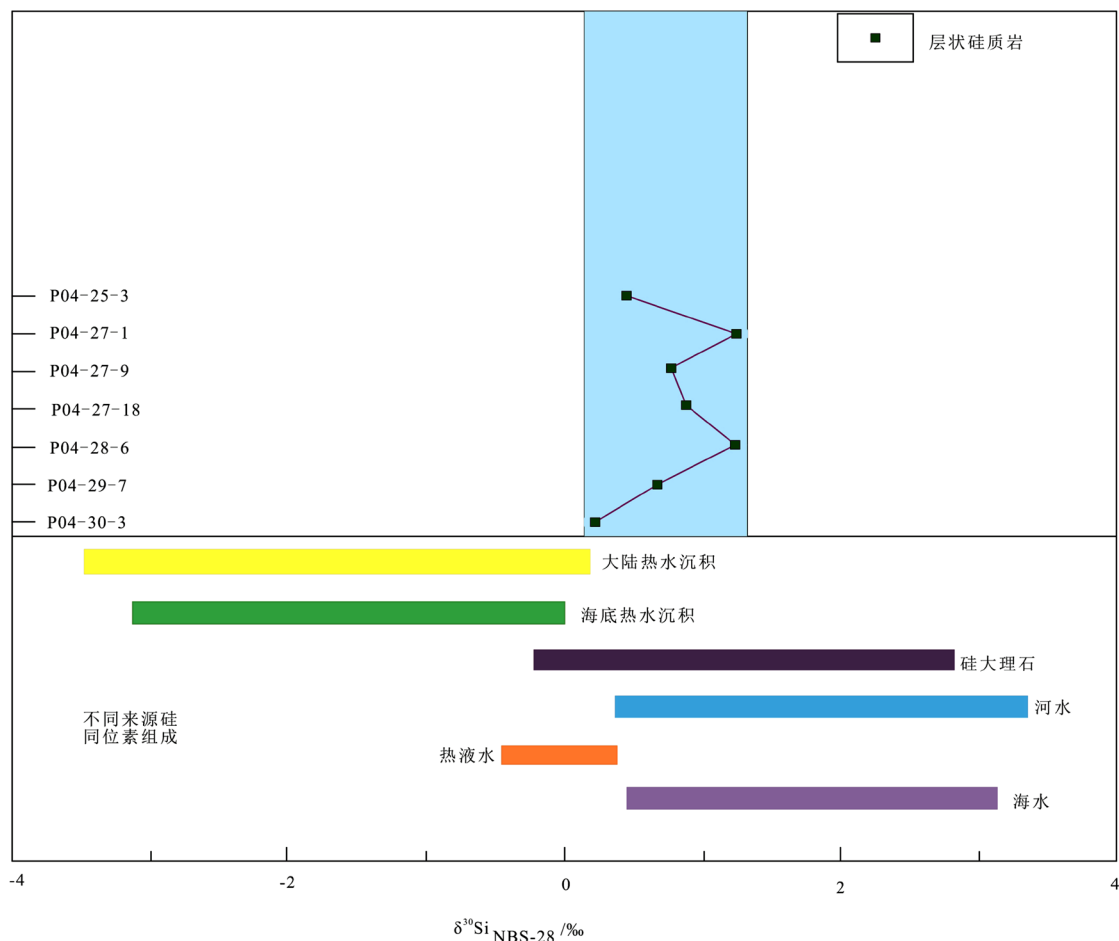
图 2. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 交会图

4.2. 硅质岩硅质来源判别方法

大洋热水来源的硅质岩 MnO 含量偏高, 而来自于陆源的硅质岩 TiO_2 的含量偏高[9]。若硅质岩的 MnO/TiO_2 比值 < 0.5 , 则代表该硅质岩受陆源物质的影响较大, 形成于大陆边缘环境; 而若 MnO/TiO_2 比值 $0.5\sim 3.5$, 则代表该硅质岩受陆源影响较小, 形成于远离陆地的开阔大洋底的环境[8]。川东地区中二叠统茅口组的层状硅质岩 MnO/TiO_2 比值为 $0.05\sim 0.7$, 平均值为 0.22, 所以川东地区中二叠统茅口组的层状硅质岩的来源为陆表海及边缘海范围。川东地区中二叠统茅口组的非层状硅质岩 MnO/TiO_2 比值为 $2\sim 9$, 平均值为 5.39; 所以其主要来源为热源。

Mn 、 Ti 的含量对后期成岩作用的改造比较敏感, 容易造成误差。硅质岩硅质来源的研究还可以用硅同位素进行研究, 硅同位素受到后期成岩作用的改造影响较小。 $\delta^{28}\text{Si}$ 的含量与搬运硅质流体的搬运距离成反比, $\delta^{30}\text{Si}$ 的含量与搬运硅质流体的搬运距离成正比, 因此若陆源硅质随河流搬运入大海并且在浅海沉积, 则此时的硅质 $\delta^{30}\text{Si}$ 的含量高, $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $-0.35\text{‰}\sim 3.4\text{‰}$ (平均数为 1.3‰); 若深海洋中脊火山口附

近沉积的硅质, 则 $\delta^{30}\text{Si}$ 的含量较低, $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 -0.6‰ ~ 0.8‰ (平均数为 0.16‰); 若洋中脊硅质经过一定距离搬运到半深海, 则 $\delta^{30}\text{Si}$ 的含量较高, 介于浅海陆源硅质和深海洋中脊火山口的硅质之间, $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 0.1‰ ~ 0.6‰ , 平均数为 0.4‰ [16]; 将川东地区中二叠统茅口组层状硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 数据投点到不同源区 $\delta^{30}\text{Si}$ 组成范围图版(图 3), 层状硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 0.2‰ ~ 1.2‰ , 平均值为 0.8‰ , 其来源为陆表海范围。



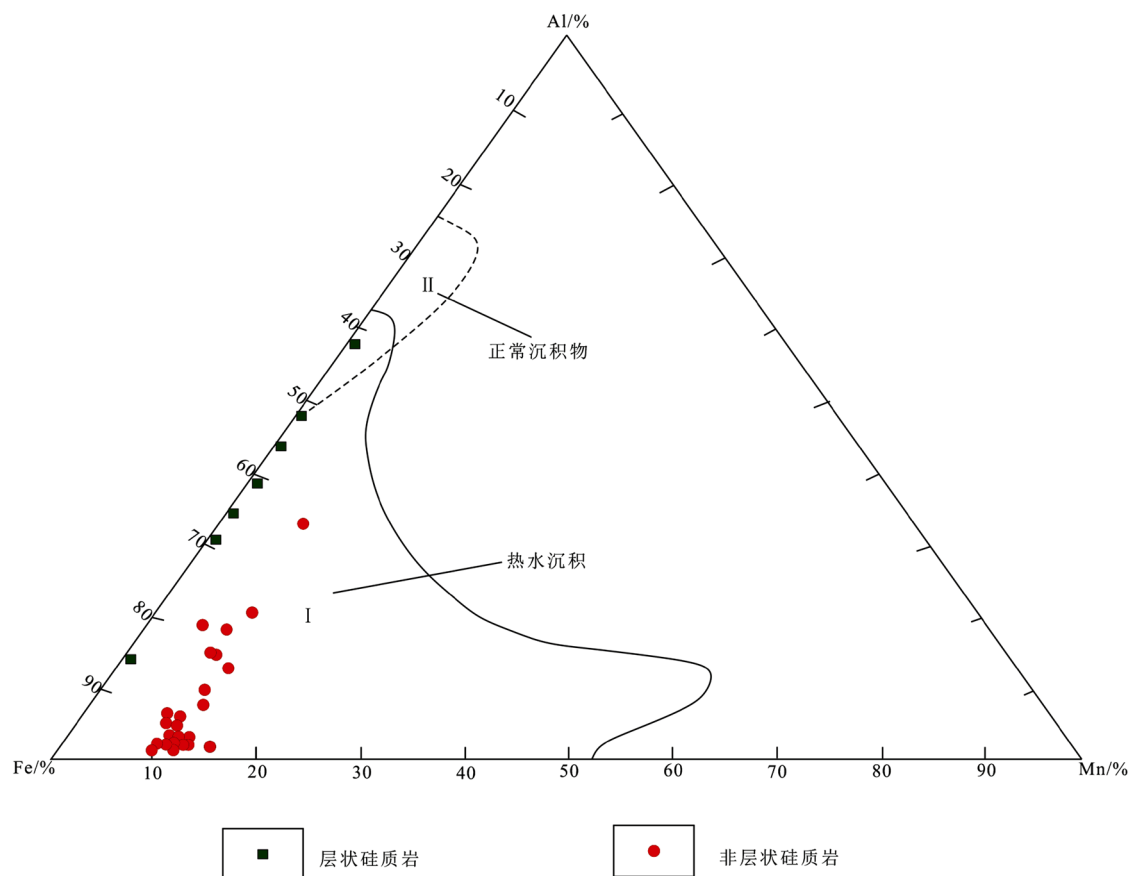
(底图据丁梯平, 1994; 叶远谋, 2020; $\delta^{30}\text{Si}$ 数据据林良彪, 2010)

Figure 3. Relation between $\delta^{30}\text{Si}$ range and silicon source

图 3. $\delta^{30}\text{Si}$ 范围与硅来源关系图版线

4.3. 硅质岩硅质成因判别方法

硅质岩的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 的比值大小可以判断硅质岩的成因[4] [7], 其比值受热水沉积与生物沉积的影响, 其比值大小与生物沉积成正比, 其比值越接近 0.01, 热水沉积的贡献越大, 其比值约接近 0.6 生物沉积的贡献越大[5]。川东地区中二叠统茅口组的层状硅质岩 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 的最小值为 0.11, 最大值为 0.5, 平均值为 0.3, 将川东地区中二叠统茅口组层状硅质岩的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 数据投点到 Al-Fe-Mn 判别图解(图 4), 所以川东地区中二叠统茅口组的层状硅质岩的成因比较复杂, 样品受热液的影响。川东地区中二叠统茅口组的非层状硅质岩 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值为 0.01 ~ 0.32 , 平均值为 0.07 , 将川东地区中二叠统茅口组非层状硅质岩的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 数据投点到 Al-Fe-Mn 判别图解(图 4), 所以其主要成因为热水沉积。



(底图据 Yamamoto, 1987; Fe、Al、Mn 数据据林良彪, 2010、周新平, 2012)

Figure 4. Al-Fe-Mn discriminant diagram of stratiform and non stratiform cherts
图 4. 层状硅质岩与非层状硅质岩 Al-Fe-Mn 判别图解

5. 结束语

1) 四川盆地茅口组硅质岩的研究成果主要集中在川东地区, 川东地区茅一段层状硅质岩的硅质形成环境为大陆边缘环境, 其硅质来源主要为陆源, 其成因由多因素控制, 受到热液和上升流的影响; 川东地区茅二段、茅三段非层状硅质岩的硅质形成环境为大洋中脊环境, 其硅质来源主要为火山热液, 其成因主要热液成因。

2) 四川盆地茅口组硅质岩的下一步研究方向应该考虑岩石的共生组合, 把茅一段层状硅质岩的研究与茅一段的非常规储层的研究以及茅二段、茅三段的非层状硅质岩的研究与茅二段、茅三段的白云岩储层的研究相结合, 为四川盆地茅口组是油气勘探提供理论支撑。结合上文以及前人的工作表明: 川东地区茅一段层状硅质岩与泥页岩或灰岩互层以及茅一段非常规储层的眼皮眼球结构, 受上升流沉积的影响 [13] [17]; 茅二段、茅三段的非层状硅质岩以及白云岩储层, 受到热液的影响。

参考文献

- [1] 唐世荣, 王东安. 硅岩研究的进展[J]. 地球科学进展, 1994(6): 71-75.
- [2] Maliva, R.G. Knoll, A.H. and Siever, K.R. (1989) Secular Change in Chert Distribution: A Reflection of Evolving Biological Participation in the Silica Cycle. *PALAIOS*, **4**, 519-532. <https://doi.org/10.2307/3514743>
- [3] Siever, R. (1962) Silica Solubility, 0°-200°C., and the Diagenesis of Siliceous Sediments. *The Journal of Geology*, **70**,

- 127-150. <https://doi.org/10.1086/626804>
- [4] Adachi, M., Yamamoto, K. and Sugisaki, R. (1986) Hydrothermal Chert and Associated Siliceous Rocks from the Northern Pacific Their Geological Significance as Indication of Ocean Ridge Activity. *Sedimentary Geology*, **47**, 125-148. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(86\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(86)90075-8)
- [5] 方雪. 四川广元上寺剖面上二叠统不同形态硅质岩的微观成因研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017
- [6] Murray, R.W. (1994) Chemical Criteria to Identify the Depositional Environment of Chert: General Principles and Applications. *Sedimentary Geology*, **90**, 213-232. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90039-6)
- [7] Yamamoto, K. (1987) Geochemical Characteristics and Depositional Environments of Cherts and Associated Rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, **52**, 65-108. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(87\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0037-0738(87)90017-0)
- [8] Sugisaki, R., Yamamoto, K. and Adachi, M. (1982) Triassic Bedded Cherts in Central Japan Are Not Pelagic. *Nature*, **298**, 644-647. <https://doi.org/10.1038/298644a0>
- [9] 王东安. 扬子地台晚元古代以来硅质岩地球化学特征及其成因[J]. 地质科学, 1994(1): 41-54.
- [10] 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.
- [11] 何起祥, 业治铮, 张明书. 四川盆地晚二叠世沉积作用的比较沉积学分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990(2): 1-12.
- [12] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 夏茂龙, 张静, 宋蜀筠, 等. 四川盆地及邻区上二叠统一下三叠统海槽的深水沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 702-714.
- [13] 周新平, 何幼斌, 罗进雄, 徐怀民. 川东地区二叠系结核状、条带状及团块状硅质岩成因[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 143-154.
- [14] 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.
- [15] 张桥. 硅质岩研究进展[J]. 辽宁化工, 2017, 46(10): 997-999.
- [16] 丁悌平, 等. 硅同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [17] 罗进雄, 何幼斌. 中—上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究[J]. 地质论评, 2010, 56(5): 629-637.