

肖斌,郭东旭,王浩,等.四川盆地北缘下志留统龙马溪组重晶石发育特征及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1137-1153. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230339.

Xiao Bin, Guo Dongxu, Wang Hao, et al. Development Characteristics and Geological Significance of Barite in the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in the Northern Margin of the Sichuan Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1137 - 1153. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230339.

四川盆地北缘下志留统龙马溪组重晶石发育特征及其地质意义

肖斌¹, 郭东旭¹, 王浩¹, 熊姝臻², 富向¹, 赵忠海¹, 李胜³

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000

2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000

3. 辽宁地质工程职业学院资源系, 辽宁 丹东 118000

摘要: 扬子板块北缘志留系黑色岩系中重晶石-毒重石成矿带的形成构造背景和成矿过程一直受到众多学者的关注。本文选择四川盆地北缘城口月亮坪剖面下志留统龙马溪组泥页岩中的重晶石矿物为研究对象, 从岩石学、矿物学入手探讨重晶石发育特征, 并结合锶同位素分析重晶石的成因及其反映的地质意义。结果显示: 重晶石主要发育成岩作用为主的针状晶体、冷泉作用为主的较大粒径溶蚀状晶体、热液作用为主的树枝状晶体, 以及生物作用为主的小粒径椭球体形晶体; 重晶石结核以扁椭球体形顺层分布, 存在同心分层结构、致密均一结构、龟裂纹充填结构, 其成因以成岩作用为主, 局部出现后期热液流体充填收缩缝形成的龟裂纹; 层状重晶石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值为0.7084, 反映其形成过程受到深部幔源(低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值)和围岩(高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值)的混染作用, 推测其成因为深部幔源热液与冷泉(或成岩作用)共同作用的结果。研究认为: 四川盆地北缘龙马溪组沉积时期为一个具有拉张构造背景的被动大陆边缘, 在北大巴山发育同沉积断裂; 在龙马溪组早期四川盆地北部斜坡区受到弱的拉张作用, 断裂发育规模不大, 形成间歇性小规模冷泉渗流; 在龙马溪组晚期拉张作用增强, 断裂加深, 产生重晶石黑烟囱, 大量含Ba²⁺和H₂S的热液进入海水中并在北大巴山地区形成重晶石矿床。

关键词: 黑色岩系; 重晶石; 锶同位素; 冷泉; 龙马溪组; 四川盆地; 钡

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230339

中图分类号: P571; P578.71

文献标志码: A

Development Characteristics and Geological Significance of Barite in the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in the Northern Margin of the Sichuan Basin

Xiao Bin¹, Guo Dongxu¹, Wang Hao¹, Xiong Shuzhen², Fu Xiang¹, Zhao Zhonghai¹, Li Sheng³

收稿日期: 2023-12-17

作者简介: 肖斌(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事沉积地球化学和非常规油气地质学方面的研究, E-mail: binxiao2013@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174117, 42274129); 辽宁省自然科学基金项目(2022-BS-328); 辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-14, LNTU20TD-30)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52174117, 42274129), the Natural Science Foundation of Liaoning Province (2022-BS-328), and the Project of Discipline Innovation Team of Liaoning Technical University (LNTU20TD-14, LNTU20TD-30)

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China
2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China
3. Department of Resources, Liaoning Geology Engineering Vocational College, Dandong 118000, Liaoning, China

Abstract: The formation tectonic background and mineralization process of the barite-witherite mineralization belt in the Silurian black rock series on the northern margin of the Yangtze plate have always been the focus of many scholars. This article selects the barite minerals in the mud shale of the Longmaxi Formation in the Lower Silurian of the Yueliangping section at the northern margin of the Sichuan basin as the research object. Starting from petrology and mineralogy, the development characteristics of barite are discussed, and the genesis of barite and its geological significance are analyzed by combining strontium isotopes. The results show that barite mainly develops into acicular shaped crystals dominated by diagenesis, larger particle size dissolution shaped crystals dominated by cold methane seeps, dendritic crystals dominated by hydrothermal processes, and small particle size ellipsoidal crystals dominated by biological processes. The barite nodules are distributed along the layers with oblate ellipsoid shape, with a concentric stratification structure, dense homogeneity structure, and turtle-crack filling structure. The genesis is mainly diagenesis, and local late hydrothermal fluid filling shrinkage cracks form turtle-cracks. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of layered barite is 0.708 4, indicating that its formation process was influenced by the mixing effect of the deep mantle sources (low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value) and the host rocks (high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value). It is speculated that its formation was the result of the joint action of deep mantle derived hydrothermal fluids and cold methane seeps (or diagenesis). Research suggests that the sedimentary period of the Longmaxi Formation on the northern margin of the Sichuan basin was a passive continental margin with an extensional tectonic background, and synsedimentary faults developed in the North Dabashan. In the early stage of the Longmaxi Formation, the northern slope area of the Sichuan basin was subjected to weak extension, and the scale of fault development was not large, forming intermittent small-scale cold methane seepage. In the late stage of the Longmaxi Formation, the extension was strengthened, the fault deepened, and a black chimney of barite was generated. A large amount of hydrothermal fluids containing Ba^{2+} and H_2S entered the seawater, forming barite deposits in the North Dabashan area.

Key words: black rock series; barite; strontium isotopes; cold methane seepage; Longmaxi Formation; Sichuan basin; Ba

0 引言

海水中含有大量硫酸根,而钡的硫酸盐在水中的溶解度很低,为 2.4 mg/L(20 °C下),钡在海水中的平均质量分数仅为 2×10^{-6} [1]。在正常的海水条件下,钡在海水的任何深度都是不饱和的,但一些地质作用的发生会导致钡局部富集,使得古今海洋沉积物中广泛形成重晶石[2]。这一现象存在于古生代和现今的海洋中。根据钡的不同来源,前人将重晶石分为四大类[3-5]:生物重晶石,在富有机质沉积物孔隙水环境下形成;热液重晶石,形成受到海底热液系统的控制,这一过程需要特定的物理、化学条件;成岩重晶石,形成于成岩阶段沉积物孔隙水环境;冷

泉重晶石,与冷泉渗流系统关系紧密。

虽然钡矿物(重晶石和毒重石)在扬子板块边缘震旦系—志留系黑色岩系中广泛分布,并且扬子板块北缘重晶石—毒重石成矿带尤为引人注目[6-8],但是人们对于重晶石的形成机制,尤其是其形成的构造环境和成矿过程的认识仍不明确。无论是热液系统的重晶石还是海洋高生产力区成岩模式的重晶石,它们的形成构造位置都是在大陆边缘,但是关于板块之间的相互作用或者断裂促使重晶石形成的具体细节,地质学家们却没有一致的意见。关于扬子板块下古生界重晶石的形成机制,前人从岩石学、矿物学、地球化学等方面开展了许多工作,取得了不少成就,对其成因也有不同看法:韩善楚等[9]通过对重

晶石矿床有机地球化学研究得出了重晶石热水喷流-生物复合成因的模式;Xu等^[7]利用锶、硫、氧同位素对扬子板块北缘的重晶石-毒重石成矿带进行了系统地分析,认为钡来源于海水,成矿分带的主要原因是有机质降解形成的富CO₂流体的存在;管博文等^[10]认为渝东北地区发育的重晶石结核为成岩早期形成的,其钡的来源是由于生物死亡后在其体腔内微环境中有机质分解释放钡沉积的生物重晶石,并且伴随着埋藏,生物重晶石中的钡由于细菌硫酸盐还原反应(BSR)发生了活化、迁移并且再次沉积。总体而言,至今仍未有统一的认识。此外,前人对不同成因重晶石反映的地质意义探讨较少。因此,本文选择四川盆地北缘城口月亮坪剖面下志留统龙马溪组泥页岩中的重晶石矿物为研究对象,主要从岩石学、矿物学入手探讨重晶石发育特征,并结合锶同位素分析重晶石的成因及其反映的地质意义。

1 区域地质概况

华南板块在晚奥陶世至早志留世期间与冈瓦纳大陆边缘相连^[11-12]。此时,华南板块由西北部的扬子地块和东南部的华夏地块组成(图1a)^[13-15]。同时,华夏地块对扬子地块的挤压,与正在进行的陆内造山运动导致扬子地块的大部分地区与广海隔绝^[15]。四川盆地被川中隆起、黔中隆起、雪峰隆起和康滇古陆等一系列隆起和古陆所包围^[16-18],形成晚奥陶世向北开放的半封闭局限浅海/海湾(图1b)^[17]。

研究区月亮坪(YLP)剖面位于四川盆地北缘(坐标为31°45′32.8″N,108°46′44.7″E),区内五峰组—龙马溪组页岩露头发育良好,从底部向上依次发育上奥陶统临湘组、五峰组和下志留统龙马溪组(图1c)。其中临湘组是一套灰黄绿色粉砂质页岩;五峰组由含大量放射虫的硅质页岩段、笔石页岩段、粉砂质页岩段和顶部的灰黑色硅质白云岩薄层“观音桥段”组成。YLP剖面龙马溪组厚度大,按岩性特征划分为下、中、上三段:下段以黑色笔石页岩和灰黑色粉砂质页岩为主;中段以灰黑色粉砂质泥岩和泥岩为主,含丰富的笔石,下部发育3层厚5~10 cm的凝灰岩夹层,上部泥岩与凝灰岩互层,泥岩中含大量重晶石结核;上段为灰绿色粉砂质泥岩夹粉—细砂岩条带。

2 采样与研究方法

样品采自四川盆地北缘城口月亮坪剖面,主要研究对象是下志留统龙马溪组的重晶石矿物。图2展示了月亮坪剖面中重晶石矿物的分布及重晶石结核产出的位置在龙马溪组底部采集1件硅质页岩(M-J-0);在重晶石段中采集了27件样品,其中凝灰岩样品11件,含重晶石泥页岩样品9件,层状重晶石样品2件(M-J-5、M-J-7),重晶石结核样品5件。对28件样品开展了薄片鉴定和扫描电镜观察,并对其中20件样品开展了Sr同位素测试。

重晶石的岩石学、矿物学、Sr同位素分析均在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成。微观形态观察利用Quanta250FEG高分辨率场发射环境扫描电镜和Oxford INCAx-max20能谱仪进行。重晶石矿物的成分特征利用背散射电子成像技术获得,即矿物组成元素平均原子序数高的部位产生较强的背散射电子信号,在电脑图像上呈现较亮的区域,而平均原子序数较低的部位则产生较少的背散射电子,呈现较暗的区域。

使用小型牙钻对用于⁸⁷Sr/⁸⁶Sr分析的样品进行钻孔取样。重晶石矿物的分离在双目显微镜下手工挑选得到。所选的重晶石样品的极高Sr质量分数和低Rb质量分数减轻了原位⁸⁷Rb衰变引入的误差,初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值可忽略不计。将重晶石样品完全溶解进行锶同位素分析,在超净实验室用标准离子交换色谱法分离锶,并采用德国Thermo Fisher Scientific公司的热电离质谱仪TIMS(型号Triton Plus)上进行分析。标准样品NBS987(1 000×10⁻⁶)的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr测试结果为0.710 257 39(2σ=4.29×10⁻⁶),与推荐值0.710 241±0.000 012^[19]在误差范围内一致,表明本仪器的稳定性和校正策略的可靠性满足高精度Sr同位素分析。作为流程监控标样,BCR-2的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr分析测试值为0.704 986 41(2σ=2.37×10⁻⁵),与推荐值0.705 026±0.000 015^[20]在误差范围内一致。数据表明,分析准确度和精密度满足高精度的Sr同位素分析要求。

3 结果分析

3.1 重晶石野外发育特征

在四川盆地北缘的城口明中、月亮坪剖面,以及巫溪徐家坝剖面的龙马溪组中均发现重晶石结核顺层产出,各剖面区域位置如图1所示。重晶石结核

在城口明中和巫溪徐家坝剖面主要分布在龙马溪组下部“黑色页岩段”中,在城口月亮坪剖面主要分布在龙马溪组顶部灰色泥岩中,结核的直径一般在2.0~15.0 cm 之间。重晶石结核宏观特征如图 3 所示。城口月亮坪剖面重晶石矿物扫描电镜下的显微特征将在下文详细讨论。

3.2 锶同位素结果

本次研究选取了月亮坪剖面的重晶石结核 2 件、层状重晶石 1 件、含重晶石泥页岩 6 件、凝灰岩 11 件样品进行了锶同位素测试。测试结果显示:重晶石结核⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值分别为 0.709 6 和 0.709 3,平均值为 0.709 4;层状重晶石⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.708 4;

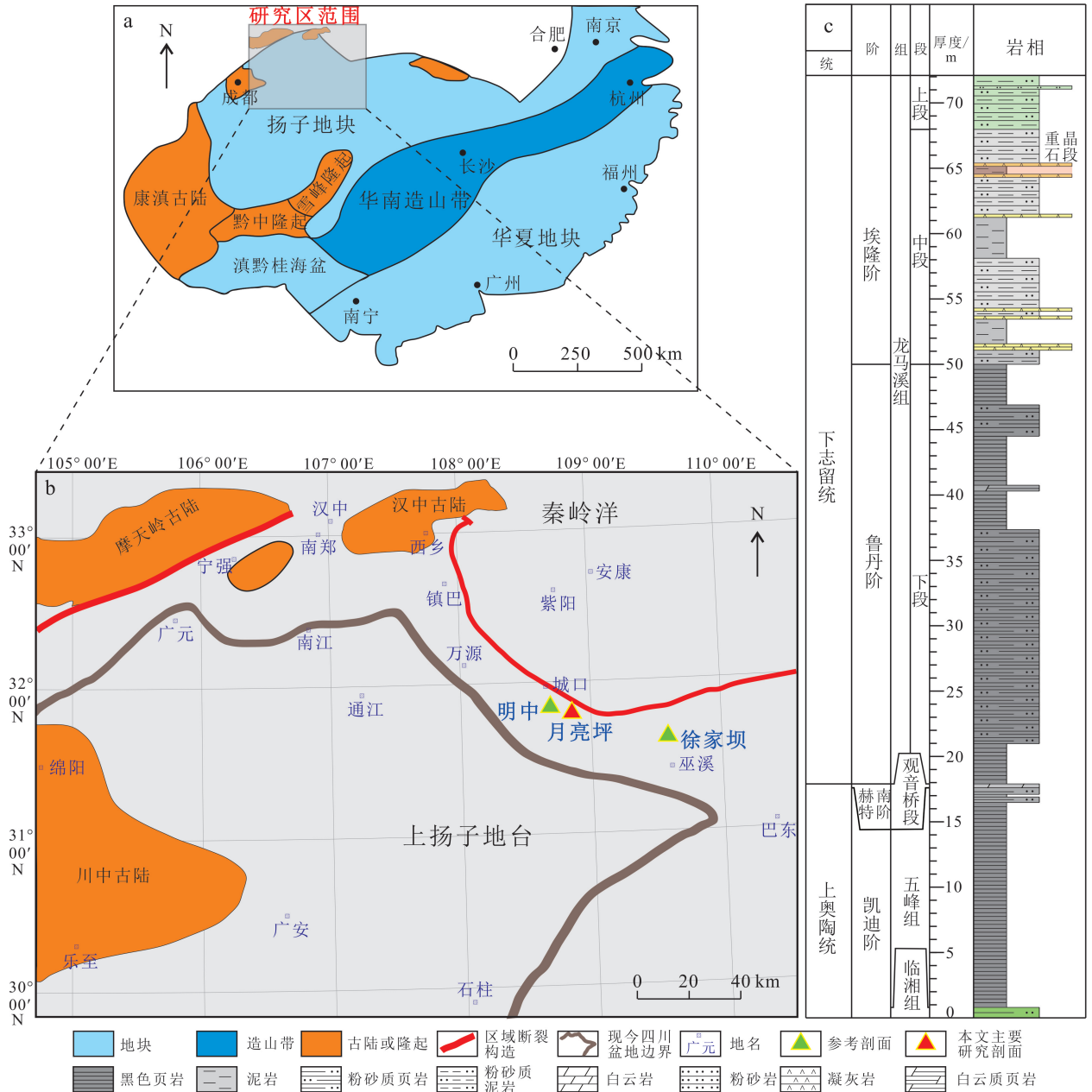
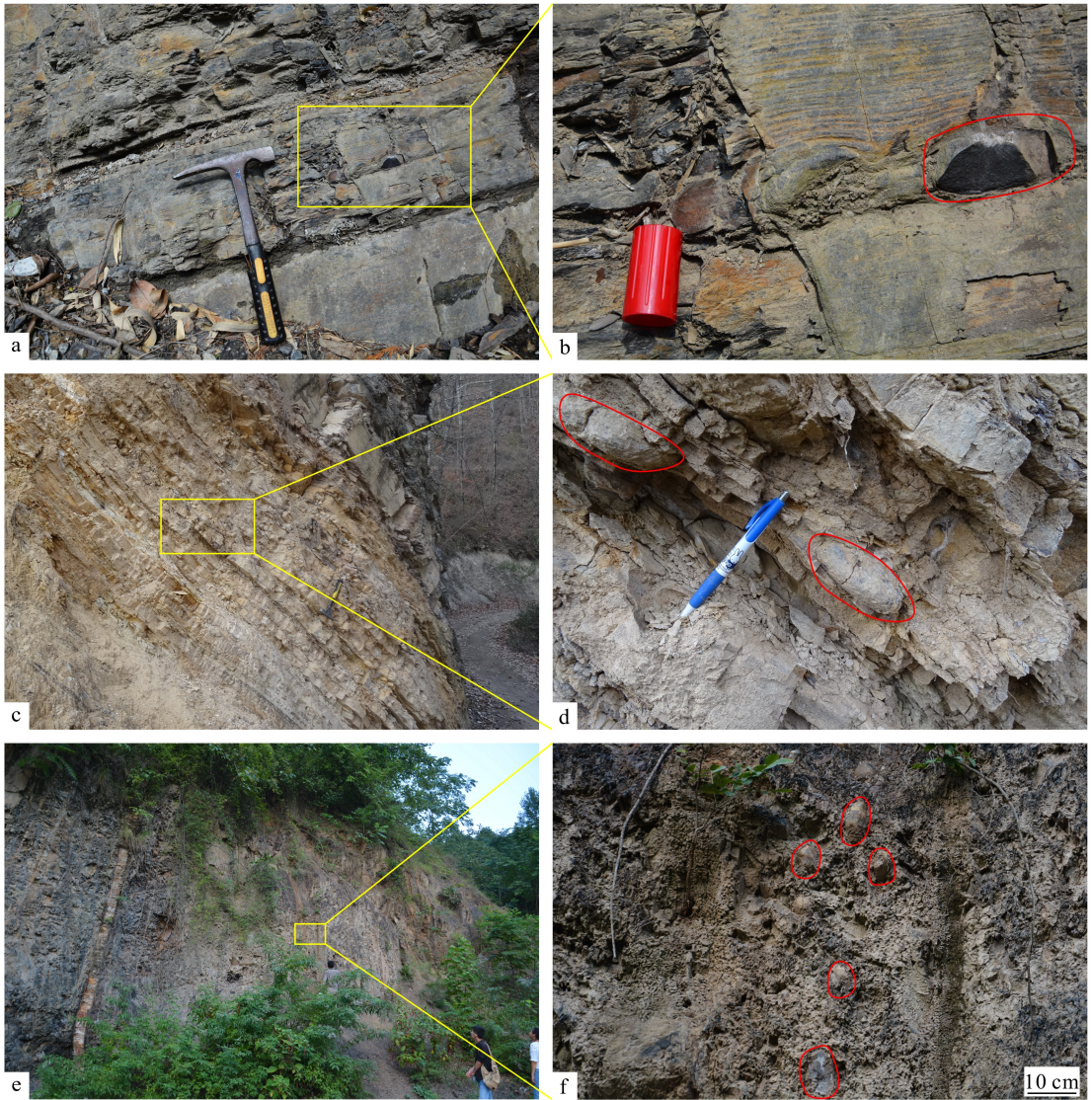


图 a 据文献[13 - 15]修编;图 b 据文献[17]修编。

图 1 晚奥陶世—早志留世扬子地块及华夏地块的位置(a)、研究区构造格局(b)、月亮坪剖面五峰组和龙马溪组地层柱状图(c)

Fig.1 Relative position of Yangtze block and Cathaysian block (a), tectonic pattern of the study area from Late Ordovician to Early Silurian period (b), stratigraphic column of Wufeng and Longmaxi Formations of Yueliangping section (c)



a、b. 城口明中剖面龙马溪组下部黑色页岩段中重晶石结核顺层分布；c、d. 城口月亮坪剖面龙马溪组顶部灰色泥岩中重晶石结核顺层分布；e、f. 巫溪徐家坝剖面龙马溪组下部黑色页岩段中重晶石结核顺层分布。

图 3 研究区重晶石结核野外分布特征

Fig.3 Field distribution characteristics of barite nodules in the study area

含重晶石泥页岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.713 6~0.736 8, 平均值为 0.727 7; 凝灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710 0~0.757 0, 平均值为 0.733 1。具体结果详见表 1。

4 讨论

4.1 重晶石主要产出环境和晶体形态特征

不同类型重晶石产出模式主要为: ①生物重晶石, 这种类型的重晶石晶体粒径为 0.5~5.0 μm , 形成于水体中有机质降解微环境, 其中的有机质降解会释放大量的 Ba^{2+} 和 Sr^{2+} , 形成的大量 BaSO_4 在海水中局部过饱和发生沉淀会形成重晶石(图 4a)^[21]。

②成岩重晶石, 形成于沉积物-水界面以下, 即海底沉积物与上覆海水的界面之下, 早期生物重晶石发生重新溶解产生富钡孔隙水, 其在硫酸盐-甲烷转换带附近与孔隙水中的 SO_4^{2-} 相互作用生成重晶石(图 4b)。③热液重晶石, 主要依赖于大型断裂, 深部地幔富含 Ba^{2+} 的热液流体通过断裂运移至海底, 并喷发到水体中, 其与海水中硫酸盐相互作用生成重晶石(图 4c)。④冷泉重晶石, 其形成模式类似于成岩重晶石, 需要沉积物中富含较多的有机质, 但冷泉重晶石的形成主要发生于沉积物-水界面之上, 即海底沉积物与上覆海水的界面之上, 其形成环境为具

表1 月亮坪剖面重晶石段重晶石矿物及围岩锶同位素测试结果

Table 1 Test results of strontium isotopes of barite minerals and surrounding rocks in the barite section of Yueliangping section

序号	样品编号	岩性	测试对象	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	M-J-1B	含重晶石泥页岩	全岩	0.717 7
2	M-J-2B	含重晶石泥页岩	全岩	0.713 6
3	M-J-4B	含重晶石泥页岩	全岩	0.736 8
4	M-J-6B	含重晶石泥页岩	全岩	0.727 6
5	M-J-7B	层状重晶石	重晶石矿物	0.708 4
6	M-J-8B	含重晶石泥页岩	全岩	0.734 2
7	M-J-9B	含重晶石泥页岩	全岩	0.736 1
8	M-JH-1	重晶石结核	重晶石矿物	0.709 3
9	M-JH-2	重晶石结核	重晶石矿物	0.709 6
10	M-N-1D	凝灰岩	全岩	0.757 0
11	M-N-2D	凝灰岩	全岩	0.754 9
12	M-N-3D	凝灰岩	全岩	0.710 0
13	M-N-4D	凝灰岩	全岩	0.754 5
14	M-N-5D	凝灰岩	全岩	0.722 6
15	M-N-6D	凝灰岩	全岩	0.732 1
16	M-N-7D	凝灰岩	全岩	0.742 6
17	M-N-8D	凝灰岩	全岩	0.727 5
18	M-N-9D	凝灰岩	全岩	0.719 7
19	M-N-10D	凝灰岩	全岩	0.726 7
20	M-N-11D	凝灰岩	全岩	0.716 4

有一定张性裂隙的被动大陆边缘上升洋流区,这些张性裂隙可以导致沉积物中富 Ba^{2+} 和 CH_4 的流体释放进入海水中,与 SO_4^{2-} 结合形成重晶石。例如秘鲁大陆边缘和墨西哥湾被动大陆边缘海洋沉积物中的重晶石,以及我国贵州泥盆系中的重晶石矿床,均属于冷泉重晶石(图 4d)^[4,23-25]。

不同成因的重晶石形态如图 5 所示:生物重晶石晶体以椭球体形为主^[26];热液重晶石以树枝状、菱形、片状为主^[27-28];成岩重晶石和冷泉重晶石的形态相似,以针状、溶蚀状、长板状为主,其中冷泉重晶石晶体形态较为完整,晶体粒径较大^[29-31]。

4.2 研究区重晶石的发育特征及成因

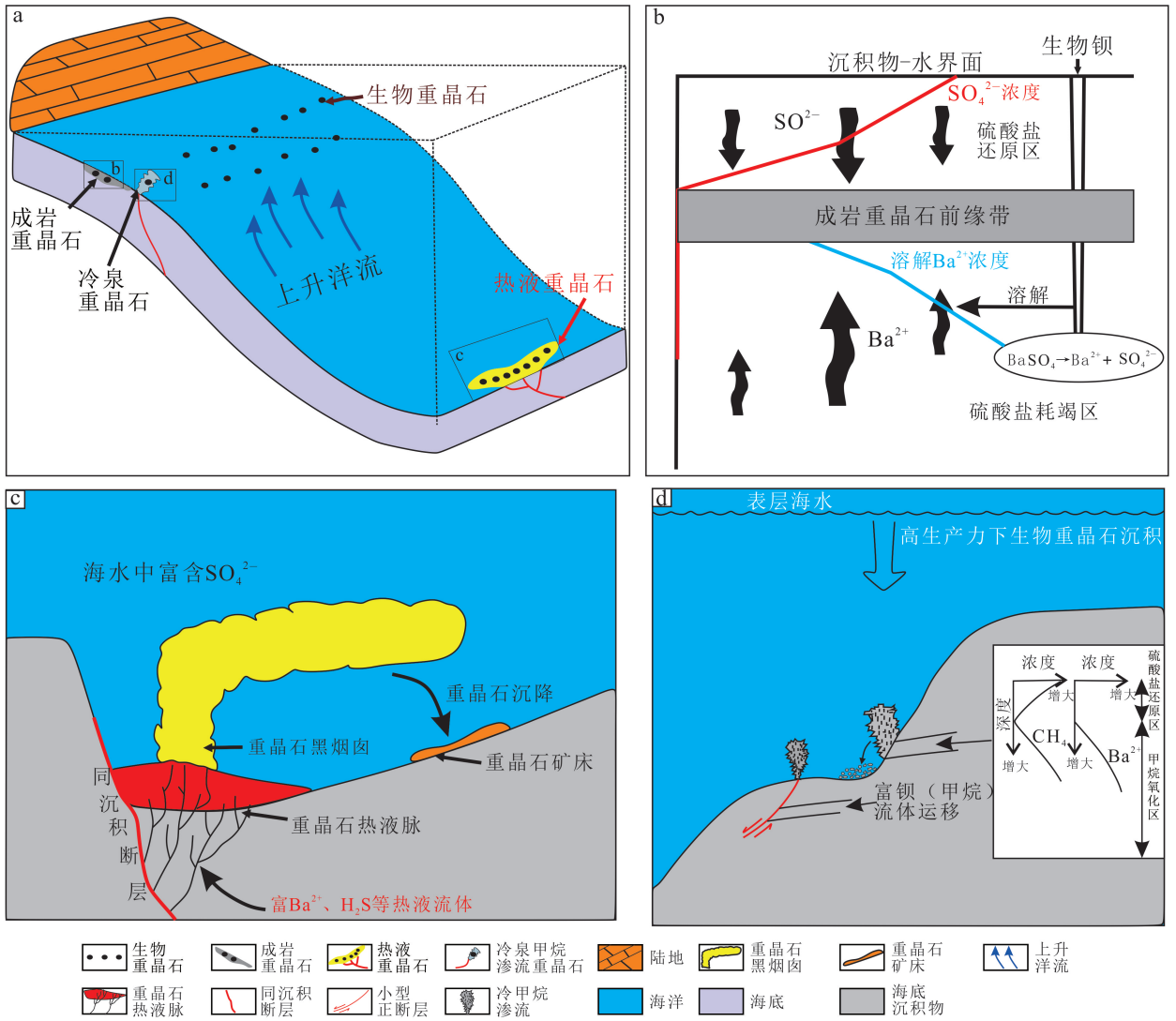
4.2.1 研究区重晶石晶体形态特征

从图 6a—d 中可见,样品 M-J-2 中的重晶石晶体整体呈层状分布,且晶体以细小的针状为主,判

断为成岩重晶石。并且在图 6b 中可以发现,上下两层含重晶石晶体的薄层夹灰色泥岩,这反映了沉积物-水界面的波动,导致成岩重晶石前缘带在沉积物-水界面之下的位置不断变化。图 6d 能谱显示了图 6c 中针状重晶石晶体元素 O 质量分数为 11.84%, Si 为 6.90%, S 为 8.68%, Ba 为 72.58%。图 6e 为龙马溪组底部的碳硅质页岩样品 M-J-0,观察到呈长板状、溶蚀状的重晶石晶体,晶体形态完整。从图 6f、g 可以看到样品 M-J-6 中出现的重晶石晶体呈溶蚀状且粒径较大,表明重晶石晶体具有足够的生长空间,并且图 6h 能谱中可以发现一定的 C 元素,认为其成因与冷泉作用有关。龙马溪组底部样品 M-J-0 中的重晶石晶体形态(图 6e)与样品 M-J-6 中的溶蚀状晶体(图 6g)相似,认为其为冷泉重晶石。

从图 7a、b 中可以观察到样品 M-J-5 中呈树枝状的重晶石晶体,显示其受到热液的影响;在图 7c—h 中观察到样品 M-J-6、M-J-7 中树枝状和溶蚀状重晶石晶体混合堆积,这暗示着两件样品中重晶石的形成受到热液作用的影响,结合前文所述 M-J-6 还受到冷泉作用的影响,可以推测在该地区重晶石形成在一个既可以接受到热液,又可以接受到冷泉的地区,可能为被动大陆边缘断裂带靠陆一侧、受到相对弱的拉张作用影响的地区。由图 7i、j 可见,在样品 M-J-6 中有呈椭球体形的生物重晶石晶体,晶体粒径较小,在 $1.0\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 之间,能谱显示晶体元素成分复杂,这与其形成机制依赖于生物遗体的降解相关。从以上观察可以推测该地区重晶石为混合成因,生物、热液、冷泉、成岩作用均有贡献,这与其所处的地理位置以及当时复杂的构造背景相关。

在 YLP 剖面重晶石段凝灰岩中存在以长板状和溶蚀状为主的成岩重晶石晶体(图 8a、b),其中有大量的鸡骨状玻屑(图 8c),玻屑常形成于黏度较大的中酸性岩浆喷发过程;表明龙马溪组中上部凝灰岩源岩性质可能为中酸性火山岩,有别于五峰组中的偏中性钙碱性玄武质凝灰岩,暗示了随着洋壳向华北板块的俯冲,华南板块与华北板块逐渐靠近,在华南板块北部可以接收到来自北秦岭地区的岛弧型中酸性火山碎屑物质。从图 8d—n 可以观察到重晶石结核的宏观形态基本呈扁椭球体形,直径为 $5.0\sim 15.0\ \text{cm}$ 的较多,其内部结构有的呈同心分层结构



a. 生物重晶石及其他类型重晶石; b. 成岩重晶石, 据文献[22]修编; c. 热液重晶石, 据文献[4]修编; d. 冷泉重晶石, 据文献[23-24]修编。

图 4 不同类型重晶石形成模式

Fig.4 Formation patterns of different types of barite

(图 8e), 有的存在龟裂纹(图 8h、i、n), 有的较为致密均一(图 8j、k、l); 成岩重晶石的晶体结构主要为针状结构, 但在重晶石结核龟裂纹中出现粒径较大的溶蚀状和树枝状晶体呈脉状充填, 表明在重晶石结核成岩收缩过程中, 有热液流体进入龟裂纹中, 从而形成树枝状晶体充填裂纹。

4.2.2 研究区重晶石锶同位素地球化学特征

重晶石矿物中的 Ba 元素含量在海洋沉积物中可作为表征古生产力的指标^[32-34], 通过重晶石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值可重建海水 Sr 同位素曲线^[35-37]。在这些应用中, 都假定重晶石晶体是直接从海水中析出的生物成因重晶石, 其记录了同时期海水的生产力

和化学性质。但是, 在海相沉积岩中除了生物成因重晶石外, 还有热液重晶石、冷泉重晶石和成岩重晶石, 而这些重晶石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值将会偏离同期海水的比值。因此, 可以利用重晶石 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值来反推重晶石的成因^[38]。

研究表明, 海洋 Sr 同位素组成的变化是许多复杂地质作用共同作用的结果^[39]。一般而言, 以下 3 个储库控制了海水 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的变化: ①海底玄武岩和海底热液中的锶, 其 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.704; ②古老硅铝质陆壳风化产物中的锶, 其 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值约为 0.720; ③海相碳酸盐岩风化提供的锶, 其 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.708。在不同地质时代, 上述 3 个储库对海水


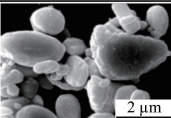

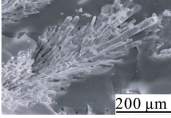
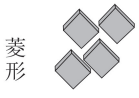

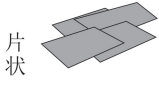
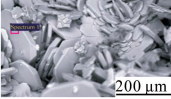
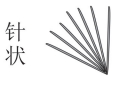

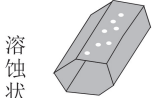
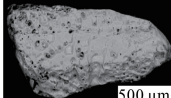
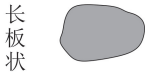
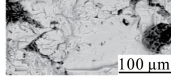
成因类型	晶体形态	扫描电镜图	可能的化学环境	参考文献
生物重晶石	 椭球体形		有机质降解的微环境, 生物成因	[26]
热液重晶石	 树枝状形		SO ₄ ²⁻ 扩散进入Ba ²⁺ 溶解度很高的液体, 一般为热液成因	[27-28]
	 菱形		重晶石晶体中形成温度最高的一种, 热液成因	[27-28]
	 片状		温度骤然下降的低过饱和度流体, 热液成因	[28]
	 针状		高过饱和和流体形成, 析出速率也较慢, 孔隙水环境	[29-30]
成岩、冷泉重晶石	 溶蚀状		形成过程中伴随着溶蚀, 孔隙水环境	[31]
	 长板状		低饱和度流体, 孔隙水环境	[30]

图 5 不同成因重晶石晶体形态特征

Fig.5 Morphological characteristics of the barite crystals with different genesis modes

Sr 同位素的贡献比例不同, 导致海洋 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值随时间发生变化^[39-41]。海相碳酸盐岩作为重要的油气储集层^[42-43], 其广泛的研究推动着众多学者对不同时期海洋锶同位素的研究^[35-37]。

刘家军等^[6]将南秦岭大巴山大型钡矿带划分为毒重石成矿亚带和重晶石成矿亚带, 其中重晶石成矿亚带分布在红椿坝—曾家坝断裂以北, 发育在寒武系洞河群和志留系含碳硅岩建造中, 水坪、神河、石梯是典型的志留纪重晶石矿床(图 9)。通过对水坪、神河、石梯的钡矿物进行铷锶同位素分析发现, 其 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 与 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、 $\omega(\text{Rb})$ 与 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 线性关系明显, Rb 主要受控于陆源碎屑物质输入, 样品中的 Sr 曾被放射成因 Sr 叠加, 而 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值位于志留纪海水 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(0.707 9~0.708 8)范围内, 表明钡矿物的 Sr 受到深部热液的影响, 并有陆源高放射成因壳源锶混染(图 10)^[6]。从城口月亮坪剖面层状重晶石样品 M-J-7 的树枝状晶体形态上,

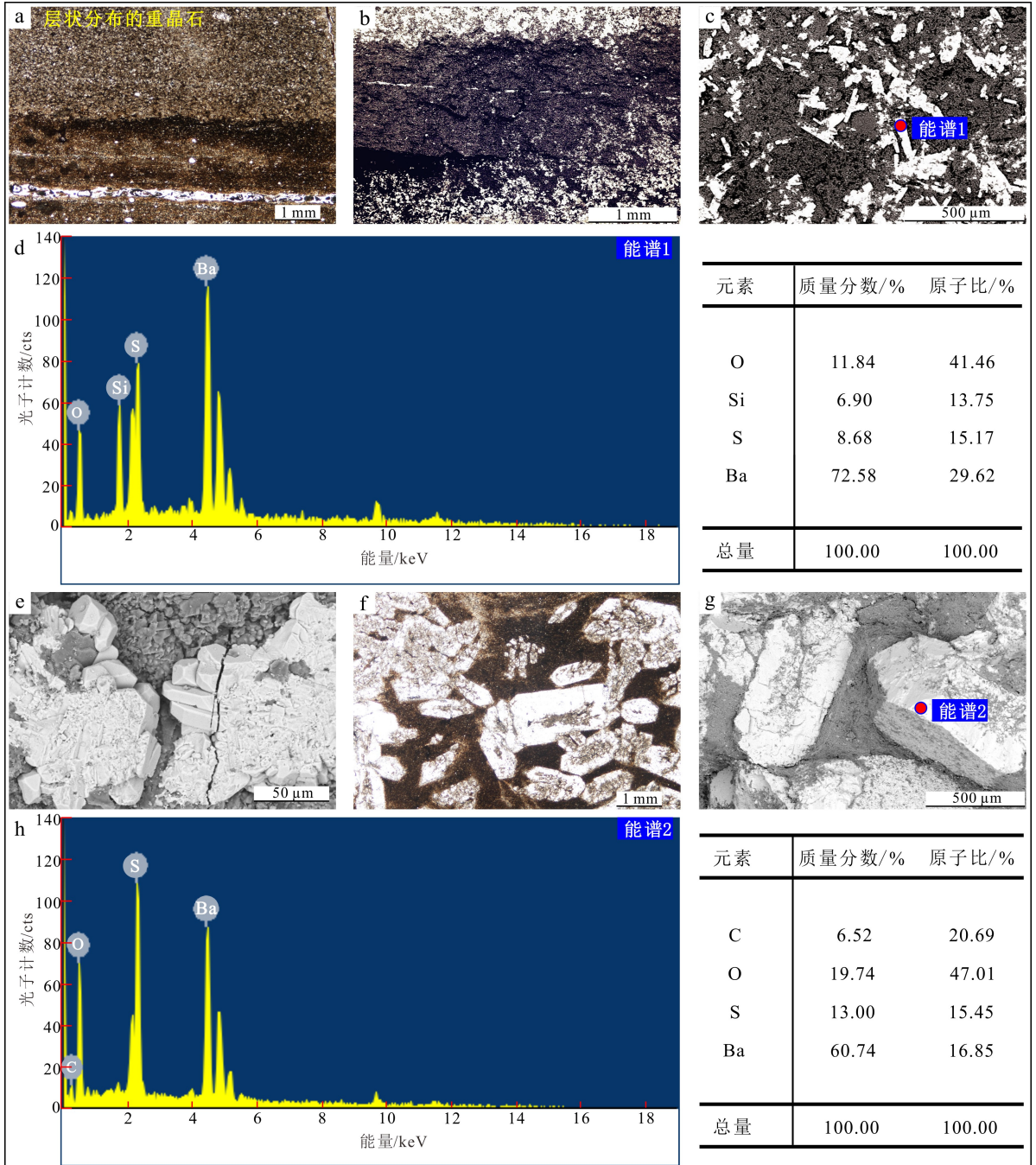
已经可以确定其在形成过程中受到热液作用影响。因为如果受壳源热液影响, 其 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值应高于同期海水, 而如果受幔源热液影响, 则 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值应低于同期海水; 但样品 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.708 4, 位于志留纪同期海水比值范围内(图 10)。因此, 推测城口月亮坪剖面样品 M-J-7 中重晶石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值应该受到来自深部的幔源低 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和围岩高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的混染作用, 其重晶石成因应该为深部幔源热液与冷泉(或成岩)共同作用的结果, 这与其镜下观察到的树枝状重晶石晶体和溶蚀状重晶石晶体共存相一致。从图 10 可以发现, 城口明中、月亮坪和巫溪徐家坝剖面的重晶石结核的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值介于同期海水与围岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值之间, 笔者认为这是成岩过程中受到孔隙中残留的海水与围岩高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值共同作用的结果; 再结合其镜下晶体特征, 认为重晶石结核的成因是以成岩作用为主, 后期龟裂纹充填脉体中有热液作用的影响。

4.3 研究区重晶石的成因模式及地质意义

物的晶体形态特征和锶同位素地球化学特征的分

综合以上对四川盆地北缘龙马溪组中重晶石矿

析,建立其简略的成因模式(图11)。其形成环境为



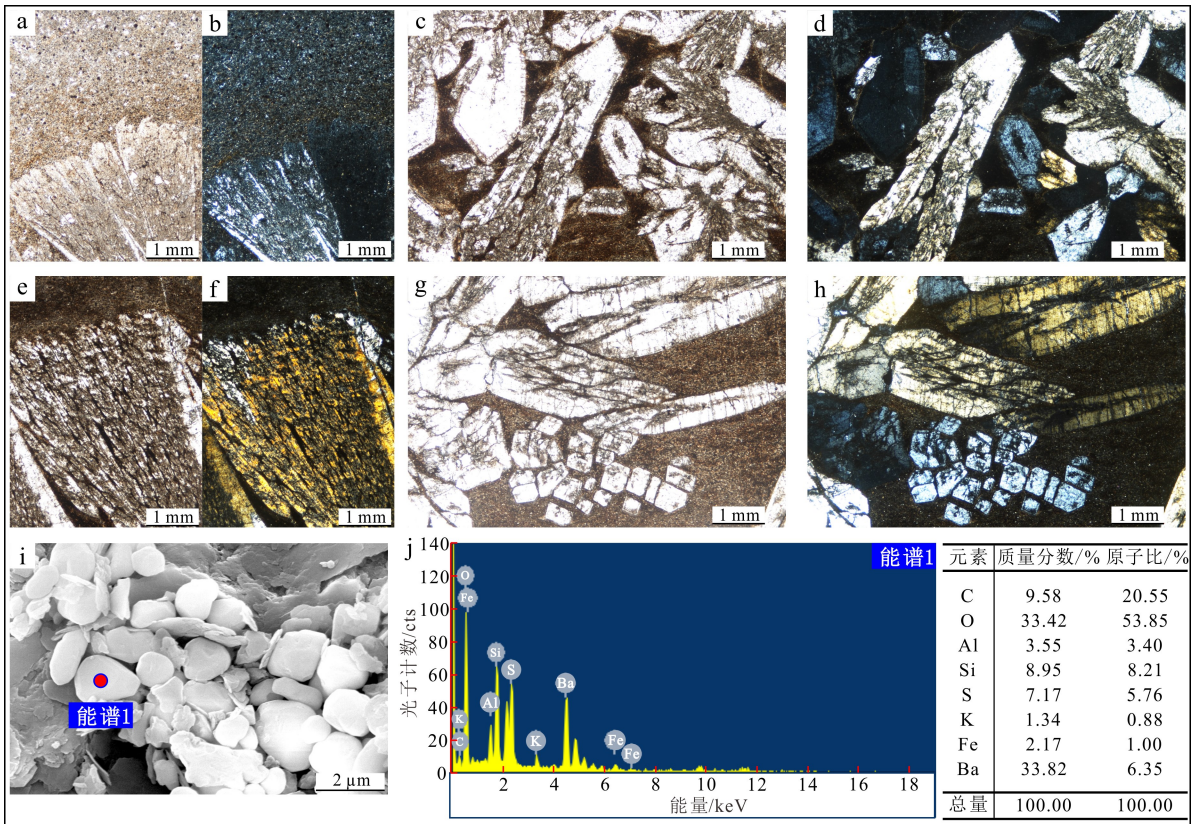
a. 单偏光显微镜下显示重晶石呈层状分布;b,c. 扫描电镜背散射照片,显示针状重晶石晶体分散在基质中;d. 重晶石晶体元素组成主要为 O、Ba、S、Si;e. 龙马溪组底部页岩样品扫描电镜背散射照片,显示长板状、溶蚀状重晶石晶体分布在基质中;f. 单偏光显微镜下显示溶蚀状重晶石晶体杂乱分布在基质中;g. 扫描电镜背散射照片,显示长板状和溶蚀状重晶石晶体分散在基质中;h. 能谱显示溶蚀状重晶石晶体的元素组成主要为 C、O、Ba、S。a—d 为样品 M-J-2,e 为样品 M-J-0,f—h 为样品 M-J-6。

图 6 城口月亮坪剖面成岩和冷泉重晶石晶体特征

Fig.6 Characteristics of diagenesis barite and cold methane seep genesis barite crystals in Yueliangping section

一个具有拉张构造背景的被动大陆边缘,其动力学机制应该与“秦岭洋”洋壳向华北板块俯冲之后导致对华南板块的拖拽作用相关。具体表现为在南秦岭北大巴山发育大的同沉积断裂,这些断裂在龙马溪组早期发育规模不大,对四川盆地北部斜坡区的影响仅表现为弱的拉张作用,形成间歇性小规模的冷泉渗流,这也可以解释在龙马溪组底部发现了具冷泉重晶石特征且晶形发育完整的长板状重晶石。由图 11a 分析可知,在龙马溪组晚期拉张作用增强,城口断裂加深,产生重晶石黑烟囱,大量含 Ba^{2+} 和 H_2S 的热液进入海水中,在南秦岭地区重晶石沉降形成具规模的重晶石矿床;而一小部分热液向南流向南大巴山地区,在四川盆地北缘城口—巫溪一带

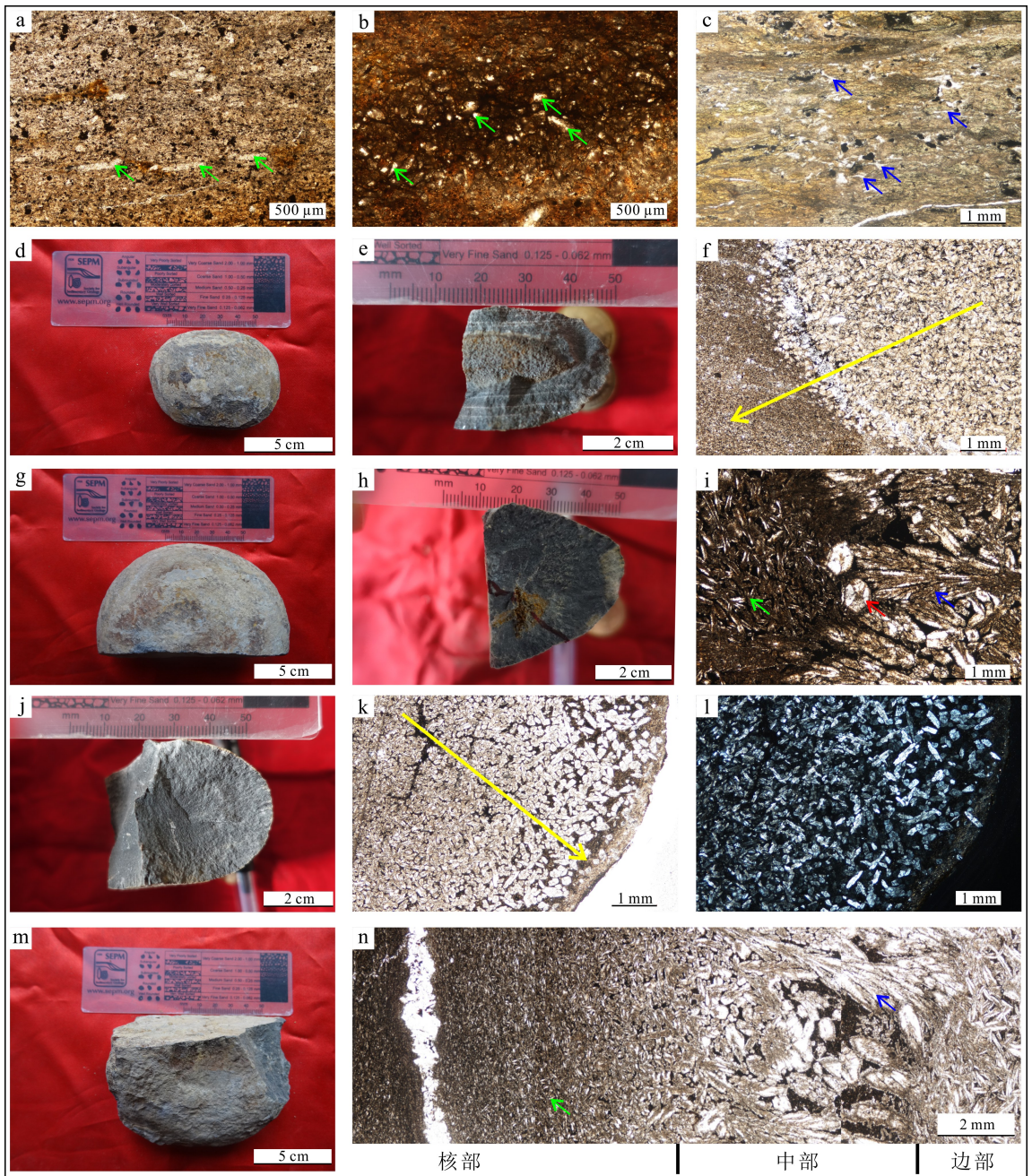
与冷泉渗流的含 Ba^{2+} 和 CH_4 流体一同参与重晶石的化学形成过程。由图 11b 可见冷泉渗流 Ba^{2+} 和深部热液 Ba^{2+} 混合了化学反应式①产生的有机质分解生物 Ba^{2+} , 是主要的 Ba^{2+} 源,上部海水是 SO_4^{2-} 主要的来源,其中凝灰岩会经过水化反应③产生一定量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ; 这些含有 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的孔隙水向上遇到化学反应式④生物硫酸盐还原反应产生的 HCO_3^- , 反应生成了 $CaMg(CO_3)_2$, 在过饱和状态下沉淀生成钡-白云石条带(化学反应式⑤),钡-白云石条带在城口明中地区较为发育;含 Ba^{2+} 流体继续向上运移,在硫酸盐-甲烷转化带之上经过化学反应式⑥形成重晶石纹层,一部分形成重晶石结核。



a、b. 分别为单偏光和正交光显微镜下照片,显示呈树枝状的热液重晶石晶体; c、d. 分别为单偏光和正交光显微镜下照片,显示树枝状、溶蚀状重晶石晶体混合分布; e、f. 分别为单偏光和正交光显微镜下照片,显示树枝状热液重晶石晶体; g、h. 分别为单偏光和正交光显微镜下照片,显示溶蚀状重晶石晶体杂乱分散在基质中; i. 扫描电镜背散射照片,显示生物重晶石特征呈椭球体形的细小重晶石堆积; j. 能谱显示椭球体形重晶石晶体元素成分复杂。a、b 为样品 M-J-5, c、d 为样品 M-J-6, e—h 为样品 M-J-7, i、j 为样品 M-J-6。

图 7 月亮坪剖面热液和生物重晶石晶体特征

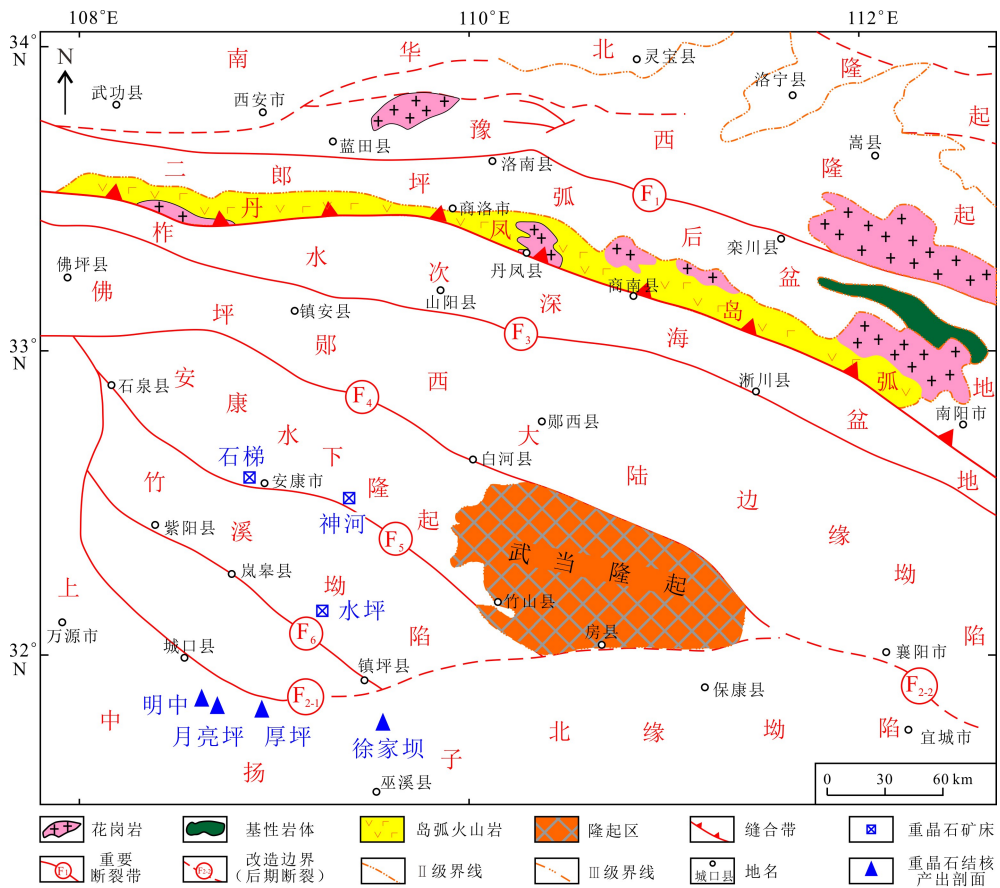
Fig.7 Characteristics of hydrothermal barite and biogenic barite crystals in Yueliangping section



凝灰岩样品单偏光显微镜下照片:a. 样品 M-N-1 显示零星长板状重晶石晶体顺层分布(绿色箭头);b. 样品 M-N-4 显示溶蚀状重晶石晶体杂乱分布(绿色箭头);c. 样品 M-N-5 显示鸡骨状玻璃(蓝色箭头指示)。重晶石结核样品 M-JH-3:d. 重晶石结核呈椭球状,直径 6 cm 左右;e. 重晶石结核敲开后内部分层,核心为粒径较大的重晶石,外层为粒径较小的重晶石;f. 单偏光显微镜下照片,显示结核核心为粒径较大的针状重晶石晶体致密堆积,外层有一圈硅质包裹,再向外为粒径细小的针状重晶石晶体(黄色箭头指示由核部向边部分层)。重晶石结核样品 M-JH-5:g. 结核呈椭球状被节理截断,直径在 12~15 cm 之间;h. 结核内部有龟裂纹,脉体充填,外部致密;i. 单偏光显微镜下照片,显示结核整体为细小针状成岩重晶石晶体(绿色箭头),核部有龟裂纹,较大粒径的溶蚀状成岩重晶石(红色箭头)和树枝状热液重晶石(蓝色箭头)脉体充填。重晶石结核样品 M-JH-1;j. 椭球状重晶石结核,内部致密;k. 单偏光显微镜下照片,显示结核自核部向边部粒径逐渐变大,且核部主要为针状,边部为长板状、溶蚀状(黄色箭头指示核部向边部重晶石晶体粒径变大);l. 正交光显微镜下照片。重晶石结核样品 M-JH-10;m. 结核呈椭球状被节理截断,直径在 10~15 cm 之间;n. 单偏光显微镜下照片,显示核部为细小针状晶体(绿色箭头),有龟裂纹,方解石和石英充填,中部晶体粒径变大,出现树枝状热液重晶石晶体(蓝色箭头),边部为针状晶体。

图 8 月亮坪剖面重晶石段凝灰岩和重晶石结核特征

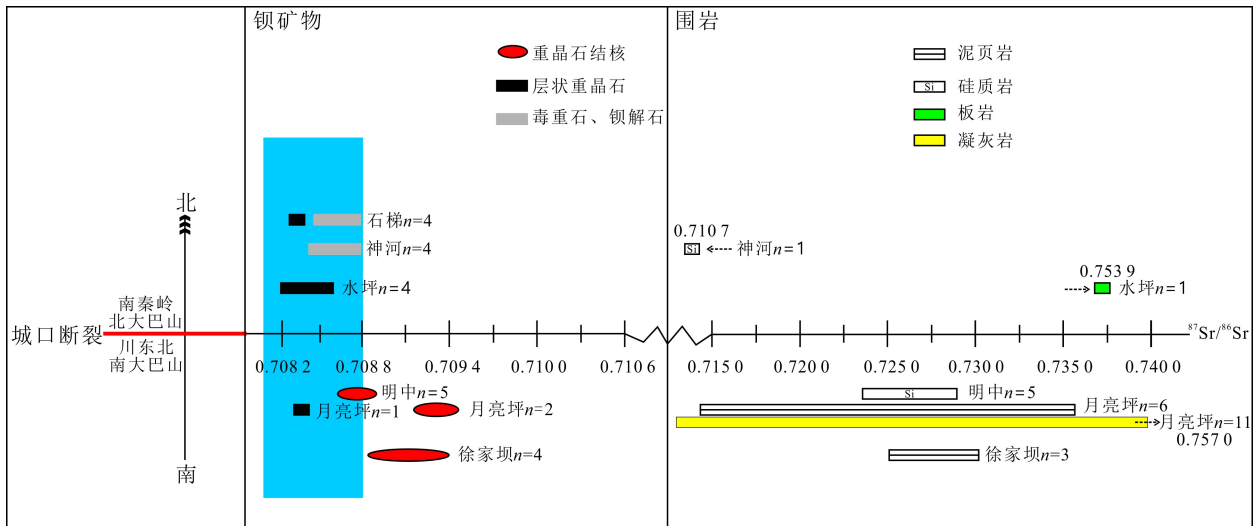
Fig.8 Characteristics of tuff and barite nodules in the barite section of Yueliangping section



F₁. 洛南—栾川—确山—固始断裂; F₂₋₁. 城口—房县断裂; F₂₋₂. 襄阳—广济断裂; F₃. 凤县—山阳断裂; F₄. 白河断裂; F₅. 石泉—安康断裂; F₆. 红椿坝—曾家坝断裂。

图9 大巴山志留系钡矿及重晶石结核产出剖面分布特征

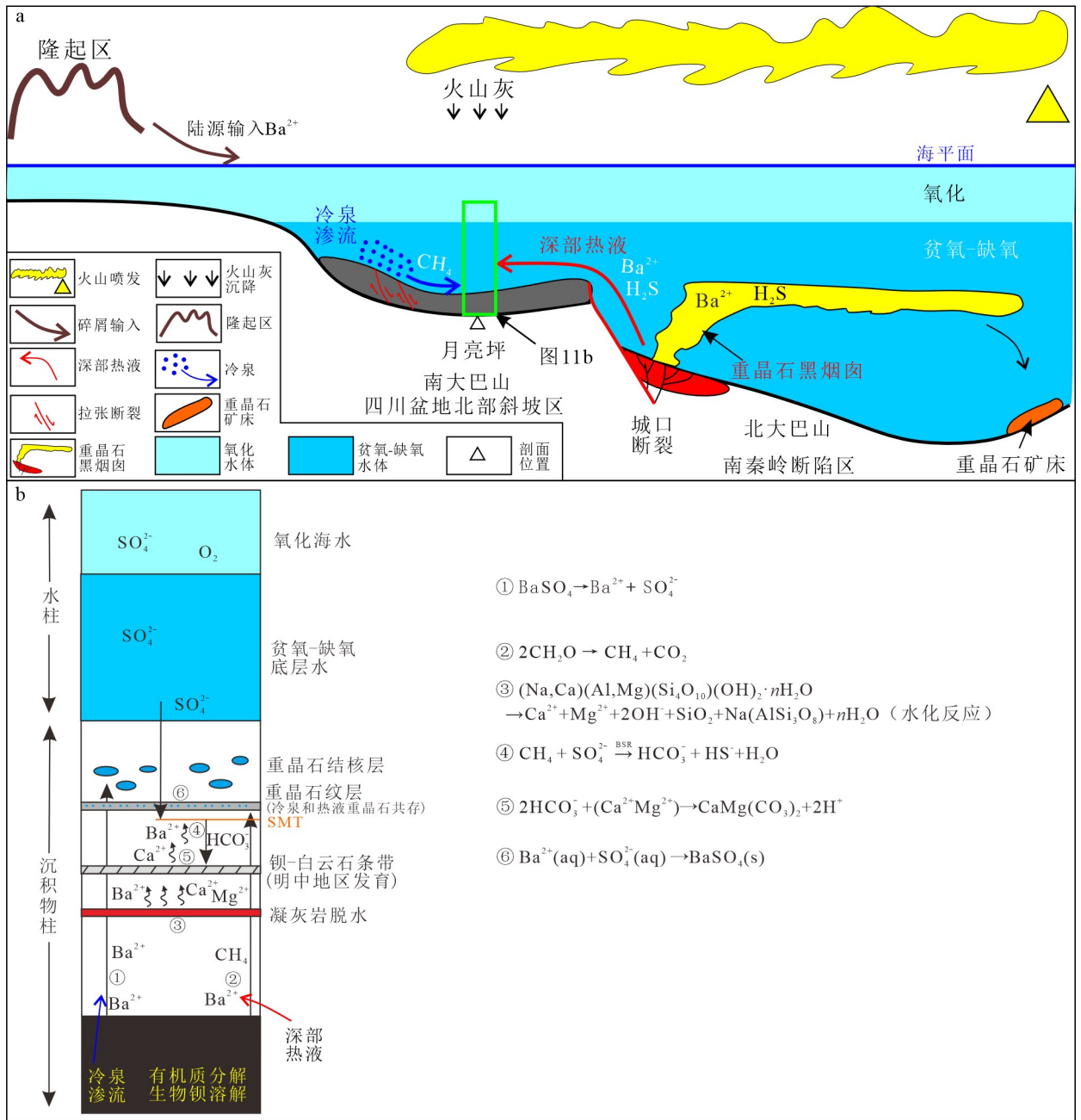
Fig.9 Distribution characteristics of barium bearing minerals and barite nodules in Silurian section in Dabashan area



南秦岭水坪、神河、石梯等地区的数据来源于文献[6];城口明中、巫溪徐家坝的数据来源于文献[10];蓝色区域代表志留纪海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值范围,据文献[36]。

图10 四川盆地北缘重晶石及其他钡矿物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值分布图

Fig.10 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values of barite and other barium minerals in the northern margin of Sichuan basin



a. 重晶石成因环境模型示意图;b. 重晶石形成化学模型示意图。SMT.硫酸盐-甲烷过渡带。

图 11 四川盆地北缘重晶石矿物成因模式

Fig.11 Genetic model of barite minerals in the northern margin of Sichuan basin

5 结论

1)重晶石主要分布在龙马溪组顶部泥岩中,重晶石晶体类型多样,存在成岩作用为主的针状重晶石晶体、冷泉作用为主的较大粒径溶蚀状重晶石晶体、热液作用为主的树枝状重晶石晶体,以及生物作用为主的小粒径椭球体形重晶石晶体。

2)重晶石结核以扁椭球体形顺层分布,其内部结构多样,存在同心分层结构、致密均一结构、龟裂纹充填结构,重晶石结核内部的晶体形态表明其成因以成岩作用为主,局部出现后期热液流体充填收缩缝形成龟裂纹。

3)层状重晶石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值受到来自深部的幔源低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值和围岩高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值的混染作用,其重晶石成因推测为深部幔源热液与冷泉(或成

岩)共同作用的结果,这与其镜下观察到的树枝状重晶石晶体和溶蚀状重晶石晶体共存现象相一致。

4)四川盆地北缘龙马溪组沉积时期为一个具有拉张构造背景的被动大陆边缘,在北大巴山发育同沉积断裂,在龙马溪组早期断裂发育规模不大,四川盆地北部斜坡区受到弱的拉张作用,形成间歇性小规模冷泉渗流,在龙马溪组晚期拉张作用增强,断裂加深,产生重晶石黑烟囱。

参考文献(References):

- [1] Rushdi A, MacManu J, Collier R, et al. Marine Barite and Celestite Saturation in Seawater [J]. *Marine Chemistry*, 2000, 69: 19 - 31.
- [2] Jewell P. Bedded Barite in the Geologic Record [J]. *SEPM Spec Public*, 2000, 66: 147 - 161.
- [3] Griffith E M, Paytan A. Barite in the Ocean—Occurrence, Geochemistry, and Palaeoceanographic Applications [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1817 - 1835.
- [4] Hein J R, Zierenberg R A, Maynard J B, et al. Barite-Forming Environments Along a Rifted Continental Margin, Southern California Borderland [J]. *Deep Sea Res II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54 (11/12/13): 1327 - 1349.
- [5] Torres M E, Brumsack H J, Bohrmann G, et al. Barite Fronts in Continental Margin Sediments: A New Look at Barium Remobilization in the Zone of Sulfate Reduction and Formation of Heavy Barites in Diagenetic Fronts [J]. *Chemical Geology*, 1996, 127 (1): 125 - 139.
- [6] 刘家军, 吕志成, 吴胜华, 等. 南秦岭大巴山大型钡成矿带中锶同位素组成及其成因意义 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 23 - 30.
- Liu Jiajun, Lü Zhicheng, Wu Shenghua, et al. Strontium Isotopic Composition and Its Genetic Significance of the Dabashan Large Barium Metallogenic Belt in Southern Qinling Mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 23 - 30.
- [7] Xu L G, Bernd L, Mao J W, et al. Strontium, Sulfur, Carbon, and Oxygen Isotope Geochemistry of the Early Cambrian Stratabound Barite and Witherite Deposits of the Qinling-Daba Region, Northern Margin of the Yangtze Craton, China [J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 695 - 718.
- [8] Zan B W, Mou C L, Lash G G, et al. Diagenetic Barite-Calcite-Pyrite Nodules in the Silurian Longmaxi Formation of the Yangtze Block, South China: A Plausible Record of Sulfate-Methane Transition Zone Movements in Ancient Marine Sediments [J]. *Chemical Geology*, 2022, 595: 1 - 15.
- [9] 韩善楚, 胡凯, 曹剑. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究 [J]. *地球化学*, 2014, 43 (4): 386 - 398.
- Han Shanchu, Hu Kai, Cao Jian. Organic Geochemistry of Barite Deposits Hosted in the Early Cambrian Black Shales from the Tianzhu County, Guizhou Province [J]. *Geochimica*, 2014, 43(4): 386 - 398.
- [10] 曾博文, 刘树根, 冉波, 等. 扬子板块北缘下志留统龙马溪组重晶石结核特征及其成因机制分析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(2): 213 - 226.
- Zan Bowen, Liu Shugen, Ran Bo, et al. An Analysis of Barite Concretions from Lower Silurian Longmaxi Formation on the Northern Margin of the Yangtze Block and Their Genetic Mechanism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(2): 213 - 226.
- [11] Metcalfe I. Late Palaeozoic and Mesozoic Palaeogeography of Eastern Pangea and Tethys [J]. *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir*, 1994, 17: 97 - 111.
- [12] Robertson A H F. Late Palaeozoic-Cenozoic Tectonic Development of Greece and Albania in the Context of Alternative Reconstructions of Tethys in the Eastern Mediterranean Region [J]. *International Geology Review*, 2012, 54: 373 - 454.
- [13] 聂仕琪, 黄金水, 李三忠. 奥陶纪到志留纪全球板块重建: 中国三大陆块位置及其洋陆格局的运动学检验 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(4): 177 - 188.
- Nie Shiqi, Huang Jinshui, Li Sanzhong. Global Plate Reconstruction from Ordovician to Silurian: Kinematics Test of Their Locations of Three China's Continents and Ocean-Continent Configuration [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2015, 35 (4): 177 - 188.
- [14] Su W B, Huff W D, Etensohn F R, et al. K-Bentonite, Black-Shale and Flysch Successions at the Ordovician-Silurian Transition, South China: Possible Sedimentary Responses to the Accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and Its Implications for the Evolution of Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 2009, 15: 111 - 130.
- [15] Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. Tectonics of

- South China Continent and Its Implications [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56: 1804 - 1828.
- [16] 单玄龙, 邢健, 苏思远, 等. 川南长宁地区下古生界五峰组—龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(5): 1323 - 1337.
- Shan Xuanlong, Xing Jian, Su Siyuan, et al. Shale Lithofacies and Gas-Bearing Characteristics of the Lower Paleozoic Wufeng Formation-Member 1 of Longmaxi Formation in Changning Area, Southern Sichuan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5): 1323 - 1337.
- [17] Zhou K K, Mou C L, Xu X S, et al. Early Silurian Paleogeography and Source-Reservoir-Cap Rocks of the Middle-Upper Yangtze Region in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41: 684 - 694.
- [18] 肖斌, 郭东旭, 冯明飞, 等. 渝东北五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质富集主控因素[J]. *断块油气田*, 2024, 31(1): 18 - 25, 49.
- Xiao Bin, Guo Dongxu, Feng Mingfei, et al. Main Controlling Factors for Organic Matter Enrichment in Black Shale of Wufeng-Longmaxi Formation in Northeast Chongqing [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2024, 31(1): 18 - 25, 49.
- [19] Thirlwall M F. Long-Term Reproducibility of Multicollector Sr and Nd Isotope Ratio Analysis[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1991, 94(2): 85 - 104.
- [20] Li C F, Li X H, Li Q L, et al. Rapid and Precise Determination of Sr and Nd Isotopic Ratios in Geological Samples from the Same Filament Loading by Thermal Ionization Mass Spectrometry Employing a Single-Step Separation Scheme [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 727: 54 - 60.
- [21] Mcmanus J, Berelson W M, Klinkhammer G P, et al. Remobilization of Barium in Continental Margin Sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(22): 4899 - 4907.
- [22] Lash G G. Authigenic Barite Nodules and Carbonate Concretions in the Upper Devonian Shale Succession of Western New York: A Record of Variable Methane Flux During Burial [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 305 - 319.
- [23] Greinert J, Bollwerk S M, Derkachev A, et al. Massive Barite Deposits and Carbonate Mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: Precipitation Processes at Cold Seep Sites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 165 - 180.
- [24] Feng D, Roberts H H. Geochemical Characteristics of the Barite Deposits at Cold Seeps from the Northern Gulf of Mexico Continental Slope[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 309(1/2): 89 - 99.
- [25] Gao J B, Yang R D, Chen J, et al. Multiple Proxies Indicating Methane Seepage as the Origin of Devonian Large Barite Deposit in Zhenning-Ziyun, Guizhou, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80: 18 - 26.
- [26] Paytan A, Mearon S, Cobb K, et al. Origin of Marine Barite Deposits: Sr and S Isotope Characterization[J]. *Geology*, 2002, 30(8): 747 - 750.
- [27] Shikazono N. Precipitation Mechanisms of Barite in Sulfate-Sulfide Deposits in Back-Arc Basins [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(10): 2203 - 2213.
- [28] Ray D, Kota D, Das P, et al. Microtexture and Distribution of Minerals in Hydrothermal Barite-Silica Chimney from the Franklin Seamount, SW Pacific: Constraints on Mode of Formation [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(1): 213 - 225.
- [29] Zhou X Q, Chen D Z, Dong S F, et al. Diagenetic Barite Deposits in the Yurtus Formation in Tarim Basin, NW China: Implications for Barium and Sulfur Cycling in the Earliest Cambrian [J]. *Precambrian Research*, 2015, 263: 79 - 87.
- [30] Lash G G, Blood D R. Organic Matter Accumulation, Redox, and Diagenetic History of the Marcellus Formation, Southwestern Pennsylvania, Appalachian Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 244 - 263.
- [31] Raiswell R, Bottrell S H, Dean S P, et al. Isotopic Constraints on Growth Conditions of Multiphase Calcite-Pyrite-Barite Concretions in Carboniferous Mudstones[J]. *Sedimentology*, 2002, 49(2): 237 - 254.
- [32] Gingele F, Dahmke A. Discrete Barite Particles and Barium as Tracers of Paleoproductivity in South Atlantic Sediments[J]. *Paleoceanography*, 1994, 9(1): 151 - 168.
- [33] Dean W E, Gardner J V, Piper D Z. Inorganic

- Geochemical Indicators of Glacial-Interglacial Changes in Productivity and Anoxia on the California Continental Margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(21): 4507 - 4518.
- [34] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12 - 32.
- [35] Martin E E, Macdougall J D, Herbert T D, et al. Strontium and Neodymium Isotopic Analyses of Marine Barite Separates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1353 - 1361.
- [36] Qing H R, Barnes C R, Buhl D, et al. The Strontium Isotopic Composition of Ordovician and Silurian Brachiopods and Conodonts: Relationships to Geological Events and Implications for Coeval Seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(10): 1721 - 1733.
- [37] Young S A, Saltzman M R, Foland K A, et al. A Major Drop in Seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ During the Middle Ordovician (Darriwilian): Links to Volcanism and Climate? [J]. *Geology*, 2009, 37(10): 951 - 954.
- [38] Paytan A, Averyt K, Faul K, et al. Barite Accumulation, Ocean Productivity, and Sr/Ba in Barite Across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum[J]. *Geology*, 2007, 35(12): 1139 - 1142.
- [39] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Chen Jun, Wang Henian. *Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [40] 张军涛, 武重阳, 杨佳奇, 等. 富硅质碳酸盐岩储层地球化学特征及成因;以四川盆地泰来地区茅口组为例[J]. *断块油气田*, 2023, 30(5): 790 - 798, 807.
- Zhang Juntao, Wu Chongyang, Yang Jiaqi, et al. Geochemical Characteristics and Origin of Silicon-Rich Carbonate Reservoirs: A Case Study of Maokou Formation in Tailai Area, Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(5): 790 - 798, 807.
- [41] 曾志刚. 海底热液硫化物中金属、非金属和稀有气体同位素组成的关系及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(1): 1 - 19.
- Zeng Zhigang. The Relationship Between Isotopic Compositions of Metals, Non-Metal, and Rare Gases in Seafloor Hydrothermal Sulfides and Its Geological Significances[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 1 - 19.
- [42] 杨德彬, 鲁新便, 鲍典, 等. 塔里木盆地北部奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏成因类型及特征再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 357 - 366.
- Yang Debin, Lu Xinbian, Bao Dian, et al. New Insights into the Genetic Types and Characteristics of the Ordovician Marine Fault-Karst Carbonate Reservoirs in the Northern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 357 - 366.
- [43] 张涛, 孙天礼, 陈伟华, 等. 不同孔-缝-洞组合碳酸盐岩储层气水两相孔隙尺度流动模拟[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(5): 88 - 96.
- Zhang Tao, Sun Tianli, Chen Weihua, et al. Pore-Scale Simulation of Gas-Water Two Phase Flow in Carbonate Reservoir with Different Combinations of Pore, Network and Hole[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(5): 88 - 96.