



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403714

引用格式:朱逸青,石学文,杨雪,等.川东南五峰组-龙马溪组黑色页岩热液活动证据及意义[J].科学技术与工程,2025,25(10):4067-4077.

Zhu Yiqing, Shi Xuewen, Yang Xue, et al. Evidence of hydrothermal activity and its significance in the black shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4067-4077.

石油、天然气工业

## 川东南五峰组-龙马溪组黑色页岩热液活动证据及意义

朱逸青<sup>1</sup>, 石学文<sup>1</sup>, 杨雪<sup>1</sup>, 吴伟<sup>1</sup>, 杨雨然<sup>1</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 李怡<sup>1</sup>, 许幻<sup>2</sup>, 冉波<sup>2\*</sup>

(1. 中国石油西南油气田公司, 成都 610051; 2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

**摘要** 热液流体活动对盆地中流体与岩石相互作用、烃类形成具有重要影响。为此,运用大视域拼接扫描电镜、矿物定量分析、X射线衍射、同位素、电子探针等技术手段,阐明了川东南五峰组-龙马溪组黑色页岩热液活动的矿物学和地球化学特征。研究表明:以钡冰长石、方解石、磷灰石、重晶石为主的非金属矿物和以闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿为主的金属矿物组合具有典型的热液活动特征;重晶石原位锶同位素比值在 0.719 76~0.723 94,平均值为 0.722 37;碳酸盐矿物含量异常高,最高达 60%。结合前人研究构建了川东南地区五峰组-龙马溪组热液流体活动的矿物学和地球化学识别标志,认为热液流体活动对储集空间具破坏性。

**关键词** 热液流体; 黑色页岩; 五峰组-龙马溪组; 川东南地区

中图分类号 TE122.2; 文献标志码 A

### Evidence of Hydrothermal Activity and Its Significance in the Black Shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Southeastern Sichuan Basin

ZHU Yi-qing<sup>1</sup>, SHI Xue-wen<sup>1</sup>, YANG Xue<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, YANG Yu-ran<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1</sup>, XU Huan<sup>2</sup>, RAN Bo<sup>2\*</sup>

(1. PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, China;

2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**[Abstract]** The influence of hydrothermal fluids on fluid-rock interactions and hydrocarbon generation in basins is of great significance. The mineralogical and geochemical characteristics of hydrothermal activity in the black shale of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in southeastern Sichuan was investigated using advanced techniques such as large field splicing scanning electron microscopy, mineral quantitative analysis, X-ray diffraction, isotopes, and electron probes. The results show that non-metallic minerals such as barium ice feldspar, calcite, apatite, and barite, as well as metal minerals like sphalerite, pyrite, galena, and chalcopryrite, exhibit distinct characteristics of hydrothermal activity. The *in-situ* Sr isotope ratio of barite ranges from 0.719 76 to 0.723 94, with an average of 0.722 37. The carbonate mineral content is exceptionally high, up to 60%. Based on previous research, mineralogical and geochemical indicators for hydrothermal fluid activity in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation of southeastern Sichuan were established, suggesting that hydrothermal fluids have detrimental effects on reservoir space.

**[Keywords]** hydrothermal fluid; black shale; Wufeng Formation-Longmaxi formation; southeastern Sichuan

四川盆地作为五峰组-龙马溪组海相页岩勘探开发的主要盆地,对中国非常规油气的成藏成储具有重要的引领作用<sup>[1-2]</sup>。然而,越来越多的研究表明,由于热液流体富含 H<sub>2</sub>S 等酸性气体和多种阴阳离子<sup>[3]</sup>,可与储层岩石矿物发生化学反应影响油气的生成以及储层的形成和发育<sup>[4-5]</sup>,因此深部热液

流体活动对于油气成藏、成储具十分重要的影响。

针对川东南五峰组-龙马溪组黑色页岩中热液流体活动的识别研究主要集中在地球化学方法。例如,Wang等<sup>[6]</sup>利用伽马射线异常指示川东南地区五峰组-龙马溪组热液流体活动;Chen等<sup>[7]</sup>利用Fe、Fe/Ti等地球化学元素含量异常法指示威远地

收稿日期:2024-05-20; 修订日期:2025-01-03

基金项目:国家自然科学基金(42072129)

第一作者:朱逸青(1987—),男,汉族,湖北荆州人,博士,高级工程师。研究方向:页岩气地质综合评价。E-mail:zhuyiqing420@petrochina.com.cn。

\*通信作者:冉波(1980—),男,汉族,重庆人,博士,教授。研究方向:沉积岩石学。E-mail:ranbo08@cduet.cn。

区热液流体活动较为活跃,进而探讨热液流体活动对有机质富集的影响。但目前尚未建立川东南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩热液流体活动的矿物学指标。本次研究除了采用地球化学方法,还提供了五峰组-龙马溪组页岩热液流体活动详细的矿物学证据,以期构建一套相对完善的热液流体识别标准。

为此,现以川东南地区五峰组-龙马溪组海相页岩为研究对象,运用钻井岩心的大视域拼接扫描电镜(简称“大拼”)、矿物定量分析(quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy, QEMSCAN)、电子探针和原位同位素分析等测试手段,系统地阐明了五峰组-龙马溪组黑色页岩热液流体活动的矿物学及地球化学特征,构建川东南地区热液流体活动的空间展布,并在此基础上分析热液流体对储集空间的影响。

### 1 研究区地质概况

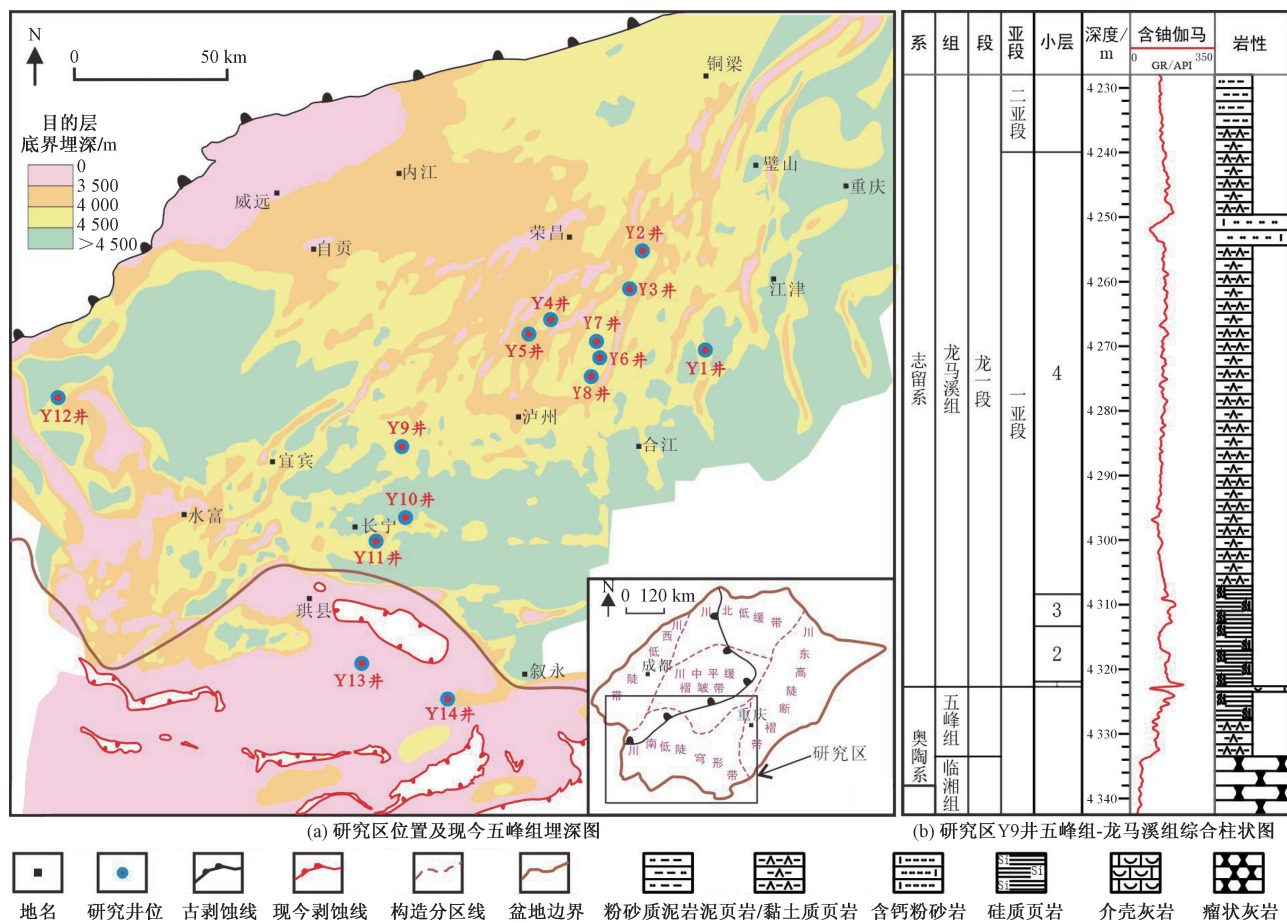
四川盆地位于扬子地块偏西北侧,其在印支期初具盆地雏形,后经喜山旋回形成现今构造面

貌<sup>[8]</sup>,而研究区主要指大凉山以东、乐山—龙女寺古隆起龙马溪组剥蚀线以南、华蓥山以西和黔北凹陷以北的区域[图 1(a)]<sup>[9]</sup>。目的层为沉积于晚奥陶世凯迪期、早志留世鲁丹期、埃隆期以及特列奇早期的五峰组-龙马溪组富有机质页岩,层理发育,沉积环境为低能、欠补偿、缺氧的陆表海环境<sup>[10-11]</sup>。现今埋深自北西向东南变迁,厚度稳定,分布介于 0~4 500 m[图 1(b)]。其中五峰组下部为黏土质页岩,上部为硅质页岩;龙马溪组自下而上分为龙一段和龙二段,其中龙一段的龙<sub>1</sub>亚段主要发育硅质页岩、黏土质页岩夹少量含钙粉砂岩,可划分为龙<sub>1</sub><sup>-1</sup>、龙<sub>1</sub><sup>-2</sup>、龙<sub>1</sub><sup>-3</sup>、龙<sub>1</sub><sup>-4</sup>共 4 个小层[图 1(c)]。

### 2 实验样品及方法

本次研究共测试了川东南地区 14 口钻井的五峰组-龙马溪组黑色页岩样品以及 1 条剖面样品,其钻井分布图如图 1(a)所示,开展包括大拼、QEMSCAN、电子探针、同位素、全岩 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)等实验分析热液流体活动。

大拼和 QEMSCAN 在中国科学院地质与地球物



据朱逸青等<sup>[12]</sup>修改

图 1 研究区位置及钻井综合图

Fig. 1 Location of the study area and comprehensive lithology histogram of drilling well

理研究所分别使用德国蔡司 MERLIN 场发射扫描电子显微镜和 Bruker XFlash 6130 仪器完成,首先将用于测试的 20 块岩心样品制成 8 mm × 8 mm × 3 mm 的小方块,使用砂纸粗抛,后经氩离子抛光制得成像区域。使用二次电子和背散射对前述小方块进行 250 nm 的整体扫描,随后利用 Atlas 制成一张高精度(4 nm)、大视域(像素 50 000 × 50 000)的 MAPS 图像。

电子探针在武汉上谱科技有限责任公司进行,首先将 20 块用于电子探针和 BSE 的岩心样品制成长不超过 5 cm,宽不超过 3 cm 的探针片,使用日本电子探针(JXA-8230)在电流为  $2 \times 10^{-8}$  A、电压为 20 kV,束斑为 1  $\mu\text{m}$  的条件下进行实验,同时拍摄相应的 BSE 照片。

原位锶同位素组成在科荟测试(天津)科技有限公司利用 LA-MC-ICP-MS(RESOLUTION SE 193 nm + Neptune plus)微区原位分析完成,首先将 2 个目标样品制成前述标准的探针片,在激光能量密度约为  $6 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,频率为 8 Hz,剥蚀的斑束直径为 10 ~ 100  $\mu\text{m}$  的条件下,采用单点剥蚀模式,对其进行原位锶同位素测试。

XRD 在四川省科源工程技术测试中心完成,使用仪器为 X 射线衍射仪(MS214)对 221 块岩心样品和 19 块剖面样品进行矿物组成分析(全岩)。

孔隙度在中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院分析实验中心完成,使用仪器为全径柱塞岩心孔隙度测定仪(K34813)对川东南地区 Y1 井(49 块)、Y7 井(60 块)、Y11 井(79 块)共计 188 块不规则岩心样品进行孔隙度测试。

总有机碳(total organic carbon, TOC)分析于中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院分析实验中心完成,在温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度为 56% RH 的检测环境下,使用仪器为碳硫分析仪(K35222)对川东南地区 Y1 井(49 块)、Y7 井(60 块)、Y11 井(79 块)共计 188 件岩心样品进行分析。

### 3 结果分析

#### 3.1 大拼和 QEMSCAN

研究区岩心样品的大拼为高精度(4 nm)的动态图,其可展示页岩单矿物的颗粒大小、形态结构、颗粒内部孔隙分布、大小等信息,以及多种矿物的接触关系、矿物分布等信息<sup>[13]</sup>。QEMSCAN 识别页岩矿物种类及其含量<sup>[13]</sup>,共识别川东南地区五峰组-龙马溪组页岩组成矿物约 17 种,包括石英、长石(钾长石、钠长石)、碳酸盐矿物(方解石、白云石、铁白云石)、黏土矿物(伊利石、绿泥石)、钡冰长石、黄

铁矿、磷灰石、金红石、闪锌矿等,同时大拼和 QEMSCAN 可搭配观察分析,对同一矿物和不同矿物的微观特征有效识别和精细解剖。

#### 3.2 主量元素特征

电子探针共识别出钠长石、钡冰长石、方解石、绿泥石、闪锌矿等 9 种矿物,其中钡冰长石与钠长石共生的电子探针分析表明,钡冰长石中 BaO 含量 17.20% ~ 18.08%,平均 17.64%, $\text{K}_2\text{O}$  含量 8.44% ~ 8.16%,平均 8.30%;钠长石中 BaO 含量 0.13% ~ 0.06%,平均 0.10%, $\text{Na}_2\text{O}$  含量 11.23% ~ 12.02%,平均 11.63%(表 1)。

#### 3.3 原位锶同位素

本次研究获得的 Y10 井重晶石原位锶同位素组成结果如表 2 所示,锶同位素比值在 0.719 76 ~ 0.723 94,平均值为 0.722 37。

#### 3.4 XRD

川东南地区 Y11 井和 G 剖面的碳酸盐矿物(方解石 + 白云石)XRD 平均值分别为 26%、9%,另外 8 口钻井碳酸盐矿物含量异常高,平均值范围在 12% ~ 60%,其中 Y1 井为 60%,Y2 井为 45%、Y3 井为 39%、Y4 井为 35%、Y5 井为 47%、Y6 井为 46%、Y9 井为 12%、Y10 井为 20%。

#### 3.5 孔隙度

本次研究获得川东南地区 Y1 井、Y7 井、Y11 井三口钻井共计 188 件样品的孔隙度,其中 Y1 井孔隙度在 0.83% ~ 5.90%,平均值为 4.15%;Y7 井孔隙度在 2.42% ~ 6.29%,平均值为 4.66%;Y11 井 1.88% ~ 8.26%,平均值为 5.04%。

#### 3.6 TOC

本次研究获得川东南地区 Y1 井、Y7 井、Y11 井三口钻井共计 188 件样品的 TOC,其中 Y1 井 TOC 在 0.07% ~ 7.03%,平均值为 2.34%;Y7 井 TOC 在 0.72% ~ 5.45%,平均值为 2.62%;Y11 井 TOC 在 0.51% ~ 5.55%,平均值为 2.41%。

## 4 热液流体的判别指标及对储集空间的意义

#### 4.1 矿物学证据

热液流体活动常伴随着热液矿物的沉淀,如钡冰长石、重晶石、方解石、磷灰石、黏土矿物、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,以及以特定的共生组合形式出现。本次研究基于电子探针、大拼和 QEMSCAN 分析观察,共识别出川东南地区五峰组-龙马溪组 2 类热液流体活动指示矿物:以钡冰长石、方解石、磷灰石为主的非金属矿物和以闪锌矿、黄铁矿、方铅矿为主的金属矿物及其组合。

表1 川东南钻井矿物电子探针主量元素分析

Table 1 Electron probe major element analysis of minerals in drilling in southeastern Sichuan

样品 编号	矿物	CaO/ wt%	TiO <sub>2</sub> / %	BaO/ %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	SiO <sub>2</sub> / %	MnO/ %	FeO/ %	Na <sub>2</sub> O/ %	MgO/ %	K <sub>2</sub> O/ %	SrO/ %	ZnO/ %	SO <sub>3</sub> / %	CO <sub>2</sub> / %	总量/ %					
Y10-1-1	钡冰长石	0.05	0.62	17.20	22.00	50.51	0.00	0.08	0.34	0.00	8.44	—	—	—	—	99.25					
Y10-1-2	钠长石	0.04	0.00	0.13	19.33	68.42	0.00	0.06	11.23	0.00	0.03	—	—	—	—	99.23					
Y10-2-1	钠长石	0.12	0.01	0.06	19.20	67.94	0.02	0.07	12.02	0.01	0.04	—	—	—	—	99.49					
Y10-2-2	钡冰长石	0.29	0.50	18.08	21.99	50.26	0.06	0.07	0.41	0.00	8.16	—	—	—	—	99.81					
Y10-2-3	方解石	53.51	—	0.00	0.05	0.06	0.57	0.58	0.00	0.27	—	0.35	—	—	43.29	98.66					
Y14-1-1	方解石	54.23	—	0.22	0.02	0.00	0.31	0.26	0.04	0.17	—	0.12	—	—	43.27	98.64					
Y14-1-2	绿泥石	0.05	0.00	0.07	19.15	28.51	0.06	15.17	0.00	21.69	0.00	—	—	—	—	84.71					
Y13-1-1	重晶石	0.02	—	65.96	0.06	—	0.00	0.00	0.09	0.02	—	0.12	0.11	34.53	—	100.91					
样品 编号	矿物	Ag/ %	Cd/ %	Sb/ %	Te/ %	Se/ %	As/ %	Ge/ %	Zn/ %	Cu/ %	Ni/ %	Co/ %	Fe/ %	Pb/ %	S/ %	Au/ %	Hg/ %	Bi/ %	Mn/ %	Ga/ %	总量/ %
Y13-1-2	黄铁矿	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	46.17	0.00	53.32	0.00	—	—	—	—	99.61
Y10-3-1	黄铜矿	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	1.30	32.39	0.00	0.02	29.33	0.04	34.96	0.02	—	—	—	—	98.09
Y10-3-2	闪锌矿	0.00	0.05	0.01	0.04	0.03	0.00	0.00	63.65	0.05	0.00	0.05	2.20	0.02	32.86	0.00	—	—	—	—	98.97
Y10-3-3	黄铁矿	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	2.20	0.05	0.00	0.09	45.13	0.00	52.71	0.00	—	—	—	—	100.97
Y10-3-4	方铅矿	—	0.23	—	—	0.42	0.12	0.07	2.06	0.03	0.00	0.13	83.40	12.95	—	0.00	0.30	0.01	0.09	—	99.80
Y14-1-3	黄铜矿	0.02	0.05	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.04	32.99	0.00	0.04	29.74	0.03	34.93	0.06	—	—	—	—	97.96
Y14-1-4	黄铁矿	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.30	0.11	45.93	0.07	54.54	0.03	—	—	—	—	101.06
Y12-1-1	黄铁矿	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.02	0.00	0.31	0.39	0.31	0.29	45.23	0.00	54.14	0.02	—	—	—	—	100.79
Y12-1-2	黄铁矿	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.32	32.53	0.00	0.03	30.20	0.01	34.98	0.00	—	—	—	—	98.09
Y12-1-3	闪锌矿	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	53.97	5.23	0.00	0.03	8.15	0.00	33.14	0.00	—	—	—	—	100.73

表2 Y10井重晶石原位锶同位素组成

Table 2 The in-suit Sr isotopic compositions of barites from drilling Y10

序号	样品	岩性	<sup>84</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr (corr)	2σ	<sup>84</sup> Sr/ <sup>88</sup> Sr (corr)	2σ	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr (corr)	2σ	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr (corr)	2σ
1	Y10-1-1	重晶石	0.055 8	0.000 1	0.006 67	0.000 01	0.015 05	0.000 58	0.721 92	0.000 04
2	Y10-1-2	重晶石	0.054 6	0.000 3	0.006 52	0.000 04	0.066 17	0.005 39	0.723 20	0.000 10
3	Y10-1-3	重晶石	0.055 9	0.000 1	0.006 68	0.000 02	0.004 01	0.000 13	0.722 09	0.000 07
4	Y10-1-4	重晶石	0.056 6	0.000 7	0.006 76	0.000 08	0.044 78	0.002 90	0.719 76	0.000 17
5	Y10-1-5	重晶石	0.055 2	0.000 4	0.006 59	0.000 04	0.073 05	0.003 12	0.723 76	0.000 11
6	Y10-1-6	重晶石	0.054 8	0.000 3	0.006 54	0.000 03	0.047 52	0.001 02	0.723 94	0.000 07
7	Y10-2-1	重晶石	0.055 8	0.000 2	0.006 66	0.000 02	0.018 05	0.000 78	0.723 47	0.000 06
8	Y10-2-2	重晶石	0.056 4	0.000 1	0.006 73	0.000 02	0.007 00	0.000 38	0.722 15	0.000 06
9	Y10-2-3	重晶石	0.055 6	0.000 2	0.006 64	0.000 02	0.005 91	0.000 15	0.723 08	0.000 07
10	Y10-2-4	重晶石	0.055 3	0.000 1	0.006 60	0.000 02	0.009 78	0.000 68	0.721 92	0.000 05
11	Y10-2-5	重晶石	0.056 5	0.000 9	0.006 75	0.000 11	0.435 82	0.010 03	0.721 50	0.000 32
12	Y10-2-6	重晶石	0.056 6	0.000 1	0.006 75	0.000 01	0.003 47	0.000 22	0.721 68	0.000 05

注:σ为标准偏差。

## 4.1.1 非金属矿物学证据

(1) 钡冰长石: 钡冰长石部分或完全包裹方解石、钠长石,如图2(a)和图2(b)所示。现今中外研究表明钡冰长石形成于成岩期、中低温热液环境<sup>[14-15]</sup>。此外,扬子元等<sup>[16]</sup>对钾-钡长石系列与钡交代作用的研究,认为热液活动促使钡交代钾长石形成钡冰长石,这与该处钡冰长石相对富钡贫钾的特征相一致(表1)。综上所述,钡冰长石的存在并非沉积成因,而是典型的热液流体成因的指示矿物。

(2) 重晶石: 重晶石呈脉状沿裂隙分布于页岩中[图2(c)],在脉体边缘广泛出现黄铁矿,这种产出形式的重晶石常被认为热液成因<sup>[17-18]</sup>。

(3) 方解石: 方解石呈微菱形密集散乱分布于有机质中,颗粒大小普遍 < 2 μm [图2(d)和图2(g)]。该方解石颗粒细小且大面积分布,表面干净、边界平直,表明其未明显受到有机质热演化的溶蚀作用。此外,方解石颗粒粒度均匀,表明沉淀析出较快。这与李克等<sup>[19]</sup>研究的产于火山-热液活动的泥晶方解石较为相似,指示微菱形方解石可能为热液流体活动的快速沉淀析出的标志。

(4) 磷灰石: 川东南五峰组-龙马溪组磷灰石广泛出现,呈现单颗粒或集合体形态,部分沿黏土矿物层间分布[图2(e)和图2(h)]。这种集合体磷灰石与Lin等<sup>[20]</sup>研究的中国西南部卡林型金矿中的热液磷

灰石相似。含磷热液流体的运移和富集对于孔隙空间要求较高,然而页岩渗透率和孔隙度相对较低,唯有黏土矿物、有机质等塑形矿物可为其提供所需的形成空间,这种方式形成的磷灰石形态及空间分布特征受黏土控制较为明显,沿着黏土层间分布。

**黏土矿物脉:**黏土矿物作为五峰组-龙马溪组主要矿物之一,其成因类型丰富,包括长石的成岩转化,大陆风化沉积、热液蚀变等<sup>[21-23]</sup>。研究区黏土矿物脉体含异常高的绿泥石和伊利石,与有机质呈紧密接触,其间含有钡冰长石、石英、黄铁矿、方解石[图2(f)和图2(i)]。据前人研究表明,异常高的绿泥石可能与热液流体活动有关,因热液流体呈酸性且富含  $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ ,从而促进绿泥石的发育<sup>[23]</sup>。此外,黏土矿物脉体中含有的石英、黄铁矿

等矿物可能为热液流体流经时捕获的围岩基质。

4.1.2 金属矿物学证据

**黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿-方铅矿共生组合:**该组合以闪锌矿为主体,呈团斑状充填于围岩基质中。黄铜矿呈固溶体分离结构分布于闪锌矿中,他形黄铁矿与闪锌矿呈包含结构,同时可见闪锌矿、黄铜矿、方铅矿呈共边结构[图3(a)]。

**闪锌矿-黄铜矿-方解石-绿泥石共生组合:**该组合以绿泥石-黄铜矿-方解石为主体呈脉状充填于裂隙中,其中黄铁矿呈自形-半自形粗粒状,黄铜矿呈脉状充填于裂隙中,此外可见黄铜矿与闪锌矿具固溶体分离结构[图3(b)]。绿泥石呈脉状充填说明其形成时的流体具酸性、富  $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  的特点<sup>[23]</sup>。

**黄铁矿-闪锌矿-黄铜矿共生组合:**该组合整体

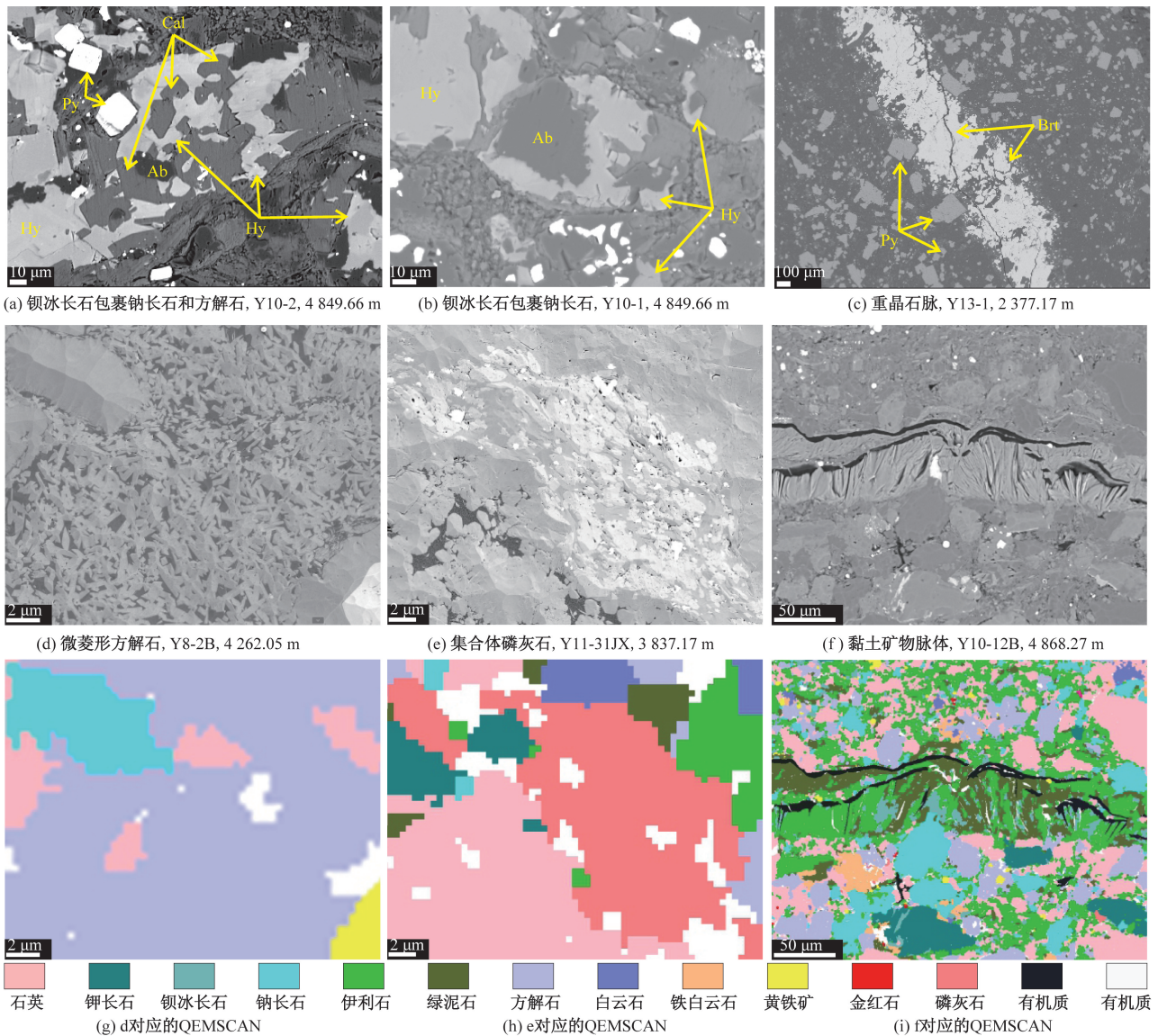


图2 川东南地区海相页岩具热液特征的非金属矿物

Fig. 2 Non metallic minerals with hydrothermal fluid characteristics in marine shale in southeastern Sichuan

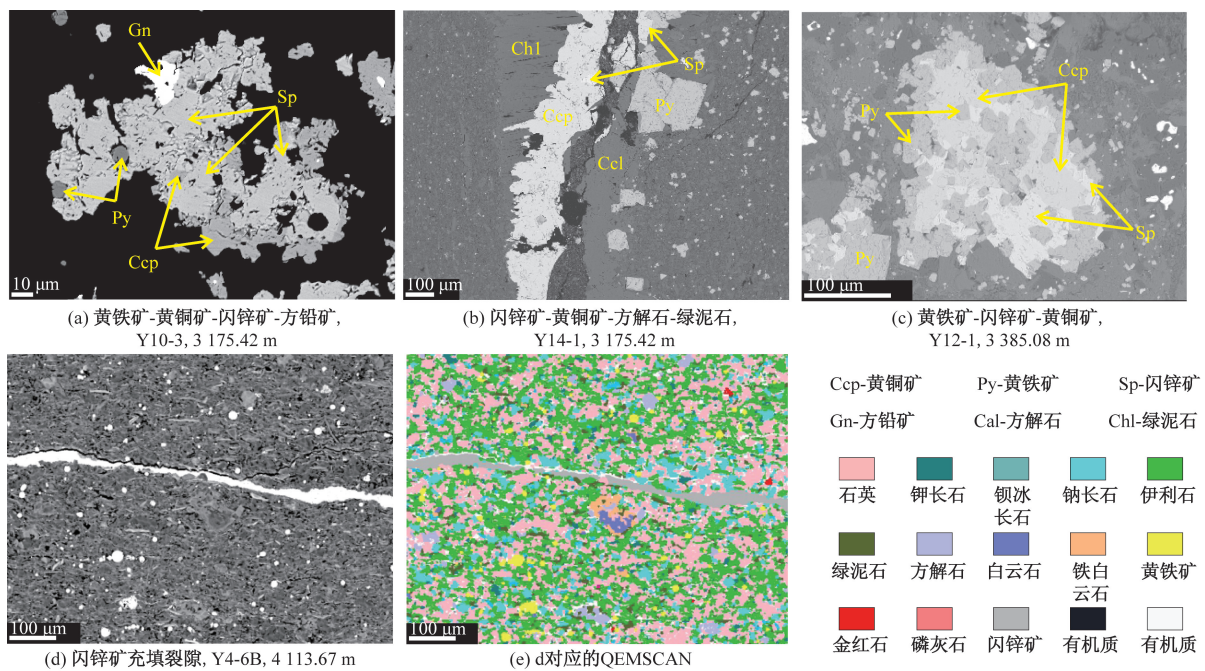


图3 川东南地区海相页岩具热液流体特征的金矿矿物

Fig. 3 Metallic minerals with hydrothermal fluid characteristics in marine shale in southeastern Sichuan

呈充填结构,早期的黄铁矿呈立方体,约 $10\ \mu\text{m}$ ,晚期黄铜矿-闪锌矿呈共边结构[图3(c)]。热液流体在较低的硫逸度、冷却速度较快以及物质供应匮乏的环境下,主要发育立方体黄铁矿。

**闪锌矿脉:**闪锌矿在自然界各类热液矿床中广泛出现,一定程度上指示热液成因<sup>[24-25]</sup>。研究区的闪锌矿主要以充填裂缝的形式出现,内部含少量石英[图3(d)和图3(e)],为典型的热液成因。

## 4.2 地球化学证据

### 4.2.1 原位铈同位素

由于铈同位素分馏不受物理、化学或生物反应影响<sup>[26]</sup>,同时具有保留时间长( $1.9 \times 10^7\ \text{a}$ )的特点<sup>[26]</sup>,铈同位素作为地壳演化、气候变化、海底热事件等重大地质事件的敏感示踪剂。蒋裕强等<sup>[27]</sup>利用铈同位素指示四川盆地中部中二叠统白云岩储集空间受热液流体控制。刘家军等<sup>[28]</sup>分析铈同位素组成,表明南秦岭大巴山志留系地层中的钡矿床为同时代海水与深部热液带来的壳源铈混合所致。因此,铈同位素常用于示踪热液流体的来源。

前人对于川东南地区铈同位素组成进行了大量研究:Zou等<sup>[29]</sup>研究表明川东南武隆地区早奥陶世重晶石-萤石矿床原位铈同位素比值在 $0.709\ 95 \sim 0.712\ 26$ ,平均为 $0.711\ 47$ ,高于同时期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值( $0.707\ 8 \sim 0.708\ 7$ )<sup>[30]</sup>,且与地壳岩浆值( $0.711\ 1 \sim 0.711\ 3$ )<sup>[31]</sup>相近,指示该矿床为典型的热液成因;张廷山等<sup>[32]</sup>四川盆地綦江地区志留统铈同位素比值为 $0.709\ 67 \sim 0.712\ 50$ ,高于

同时期海水,与地壳岩浆值相近,指示该区一定程度受热液流体的影响;Zhang等<sup>[33]</sup>四川盆地长宁地区下志留统黑色页岩铈同位素比值为 $0.715\ 55 \sim 0.728\ 13$ ,平均为 $0.721\ 19$ ,高于同时期海水和地壳岩浆值,推断该区不受或受热液影响程度较小。本次研究区内重晶石原位铈同位素数据显示, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 $0.719\ 76 \sim 0.723\ 94$ ,平均为 $0.722\ 37$ 。重晶石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高于同期海水值和地壳岩浆值,表明地壳岩浆热液和海水来源的可能性很小。因此,武隆地区、綦江地区铈同位素显示明显的热液流体活动影响,而泸州地区、长宁地区铈同位素不受或受热液流体活动影响较小(图4)。

### 4.2.2 碳酸盐矿物含量异常

热液流体活动会携带一定的化学物质从地层深部沿裂隙、断层向浅部运移,会改变流经围岩的成岩环境,从而导致某些元素或某些矿物含量出现异常,这对于热液流体活动具一定的指示作用<sup>[34]</sup>。

本次研究基于川东南地区9口钻井及1条剖面样品表明,五峰组碳酸盐矿物平均含量异常高,最高达60%。据前人研究表明,五峰组顶部的观音桥段以介壳灰岩为主,但观音桥段仅在事件影响范围内存在,而在其缺失处,五峰组-龙马溪组可整合连续沉积<sup>[35]</sup>。此外,本次研究岩心观察及取样过程中无明显的观音桥段沉积,且该区方解石呈微菱形密集及分布[图2(d)和图2(g)]的特征。因此,碳酸盐矿物含量的异常不太可能是观音桥段沉积成因,而是热液成因。

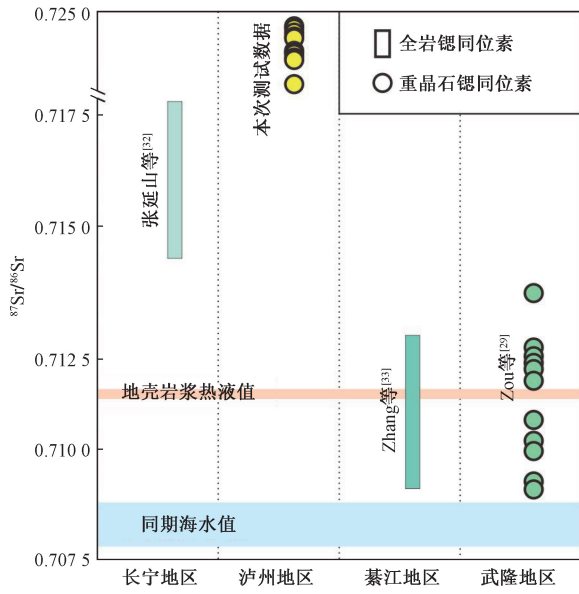


图4 川东南地区下志留统龙马溪组锶同位素特征  
Fig. 4 Sr isotope characteristics of the Longmaxi Formation in southeastern Sichuan

川东南五峰组-龙马溪组碳酸盐矿物含量不仅存在异常,空间上还存在一定的展布特征。为了明确这一特征,选择靠近盆地中心 Y11 井和盆地东边的 G 剖面碳酸盐矿物含量平均值(26%和9%)作为川东南地区的背景值,探讨该地区碳酸盐矿物的异常趋势。研究表明,碳酸盐矿物含量异常值与最大背景值相差最大为34%,且自北东向西南方向呈降低趋势,一定程度指示了热液流体活动呈现相似的强度变化。这与锶同位素对泸州地区和綦江地区热液流体影响程度的指示相一致(图4)。因此,结合碳酸盐矿物含量在区域上的异常趋势评估热液流体活动的强度,划分了强(50%)、中(26%~50%)、弱(<26%)3个强度分区,其中热液流体活动较强地区包括 Y1 井;热液流体活动强度中等地区包括 Y2 井、Y3 井、Y4 井、Y5 井、Y6 井;热液流体活动强度较弱地区包括 Y9 井、Y10 井(图5)。

### 4.3 热液流体对储集空间的意义

前人研究表明,热液流体可以矿物充填形式阻

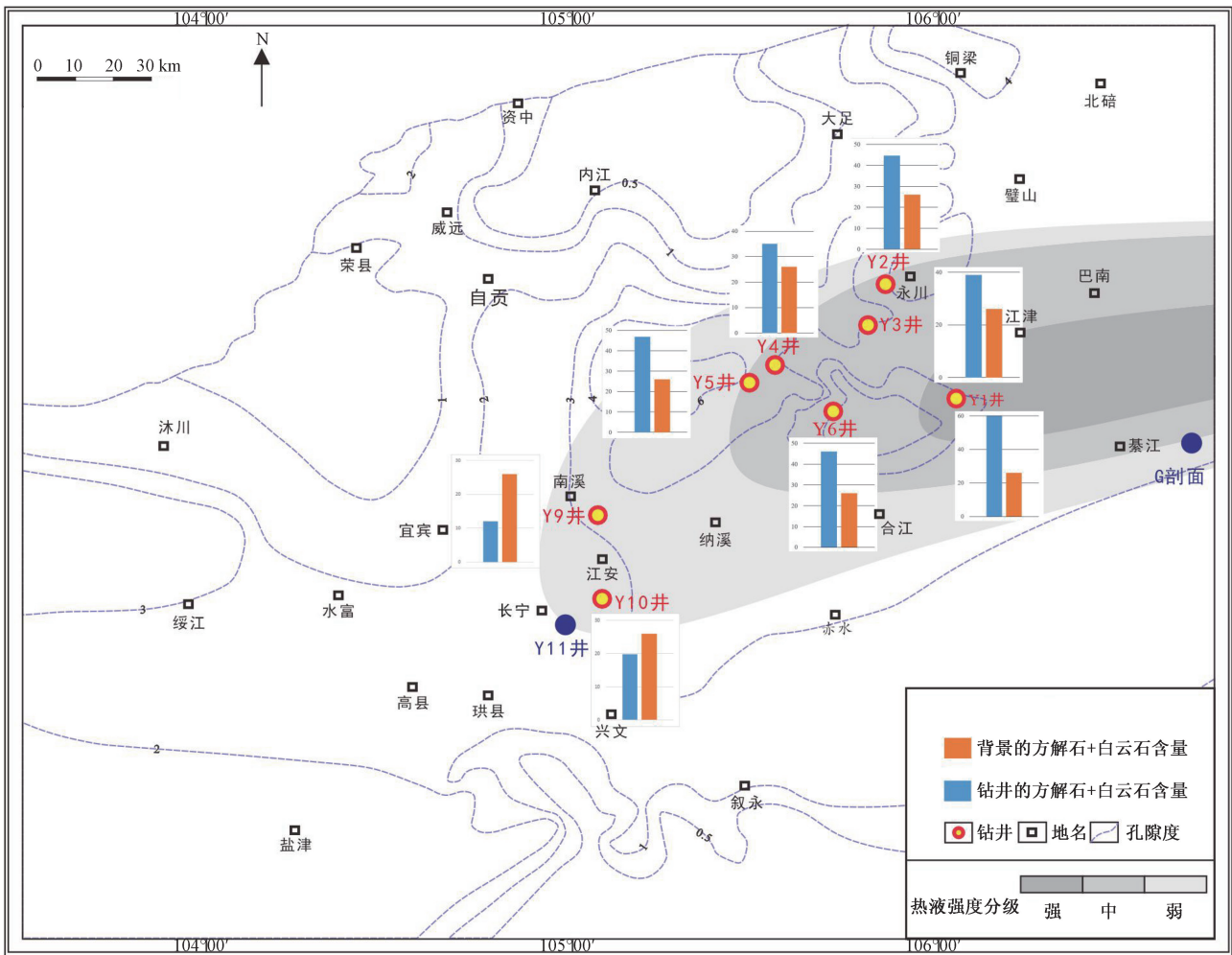


图5 川东南地区钻井五峰组碳酸盐矿物(方解石+白云石)含量(%)平面展布特征  
Fig. 5 Distribution characteristics of carbonate minerals (calcite + dolomite) content (%) in the drilling Wufeng Formation in southeastern Sichuan

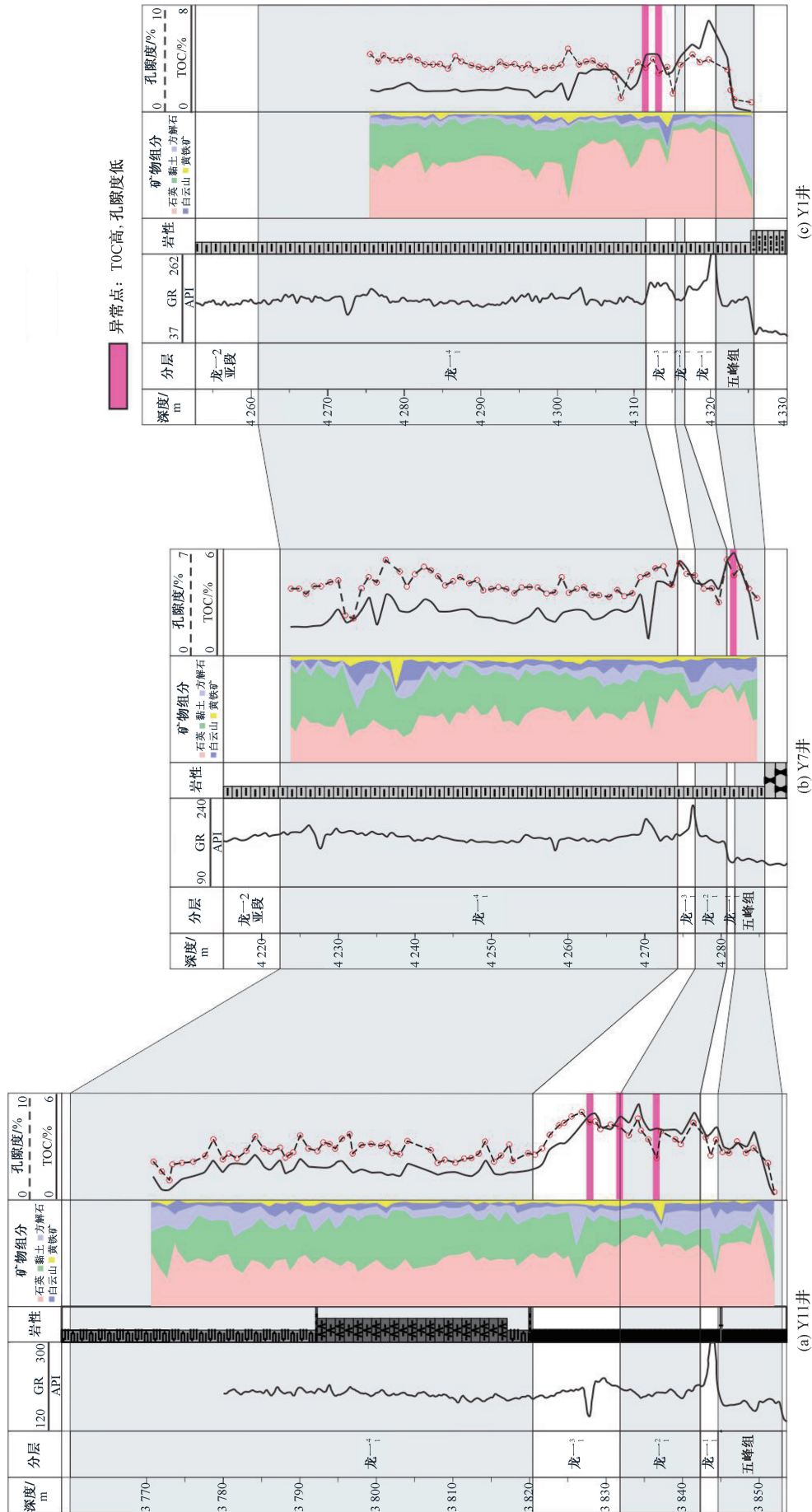


图6 川东南地区Y11井-Y7井-Y1井孔隙度、TOC、矿物组成数据  
Fig.6 Porosity, TOC, and mineral composition data of Y11-Y7-Y1 wells in southeastern Sichuan

碍储集空间的发育<sup>[36]</sup>,主要包括石英、方解石、铁白云石等<sup>[37]</sup>。随着温压变化,热液流体会携带上覆地层或周边区域的物质,以沉淀特征矿物及组合充填裂隙、矿物粒间孔等,使得储集性能减弱<sup>[38]</sup>。

据前述研究表明,在川东南地区五峰组-龙马溪组热液流体可能来源于北东方向,且自北东方向至西南方向呈减弱趋势,可能会影响储集性能。为了明确热液流体活动对储集空间的影响,选择 Y11 井-Y7 井-Y1 井进行解剖。据孔隙度数据表明(图 6):孔隙度自北东方向至西南方向呈明显的降低趋势,由 Y11 井的 1.88%~8.26%,平均值为 5.04%,到 Y7 井的 2.42%~6.29%,平均值为 4.66%,最后到 Y1 井的 0.83%~5.90%,平均值为 4.15%。这与黎霆等<sup>[39]</sup>研究表明四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩孔隙度的变化揭示热液流体对储层发育的破坏相一致,说明川东南地区热液流体活动对储集空间的发育具有破坏性。此外,单井中存在 TOC 高对应孔隙度低的明显异常点,这可能为热液活动的局部突发性影响造成。

## 5 结论

(1)热液流体与接触的岩石发生复杂的流体-岩石化学反应,引起了岩石矿物组成、矿物含量等产生明显的异常。结合矿物学和地球化学证据可有效识别川东南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩中热液流体活动。

(2)热液流体活动的矿物学指标为多种类型的热液矿物及其组合,包括钡冰长石、方解石、黏土矿物、重晶石、闪锌矿-方铅矿、闪锌矿-黄铜矿-方解石-绿泥石等。

(3)热液流体活动的地球化学指标为原位锶同位素和碳酸盐矿物含量异常,指示川东南地区五峰组-龙马溪组热液流体发育,且强度自北东向至西南方向划分为强、中、弱 3 个等级。此外,热液流体活动对储层具有破坏性,自西南向北东方向热液强度增强,其储集空间减小。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡勋育,刘金连,张宇,等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 31-42.
- [2] 胡鹏飞,蔡明海,何光武,等. 广西大厂铜坑矿床中闪锌矿微量、稀土元素及氢氧同位素特征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10857-10866.
- [3] Tschauner O, Huang S, Greenberg E, et al. Ice-VII inclusions in diamonds: evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle[J]. Science, 2018, 359(6380): 1136-1139.
- [4] 李迎瑞,马奔奔,陆永潮,等. 塔西南地区石炭系碳酸盐岩储层热液流体识别及储层改造意义[J]. 沉积学报, 2024. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.067.
- [5] 朱士波. 济阳拗陷热液流体活动特征及其油气地质意义[J]. 非常规油气, 2024, 11(2): 21-28.
- [6] Wang G P, Jin Z J, Liu G X, et al. Geological implications of gamma ray (GR) anomalies in marine shales: a case study of the Ordovician-Silurian Wufeng-Longmaxi succession in the Sichuan Basin and its periphery, Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 199. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104359.
- [7] Chen Z P, Cui J P, Ren Z L, et al. Geochemistry, paleoenvironment and mechanism of organic-matter enrichment in the lower Silurian Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 505-519.
- [8] Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, et al. Intraplate orogenesis in response to Gondwana assembly: Kwangsi orogeny, South China [J]. American Journal of Science, 2016, 316(4): 329-362.
- [9] 刘树根,邓宾,孙玮,等. 四川盆地: 周缘活动主控下形成的叠合盆地[J]. 地质科学, 2018, 53(1): 308-326.
- [10] Ran B, Liu S G, Jansa L, et al. Origin of the upper ordovician-lower Silurian cherts of the Yangtze block, South China, and their palaeogeographic significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 108: 1-17.
- [11] Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Large scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, South China [J]. Geology, 2010, 38(7): 599-602.
- [12] 朱逸青,陈更生,刘勇,等. 四川盆地南部凯迪阶——埃隆阶层序地层与岩相古地理演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 974-985.
- [13] 李文浩,卢双舫,王民,等. 基于扫描电镜大视域拼接技术定量表征致密储层微观非均质性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1497-1504.
- [14] Li Wenhao, Lu Shuangfang, Wang Min, et al. Quantitative characterization of micro heterogeneity of tight reservoirs by large-view

- FE-SEM splicing technology[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1497-1504.
- [14] Zhou Z B, Wen H J, Zhu Y, et al. Submarine hydrothermal fluids facilitated the accumulation of cadmium in Lower Cambrian black shales, South China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2024, 136(9/10): 3634-3648.
- [15] Chang C, Hu W X, Fu Q, et al. Characteristics and formation processes of (Ba, K, NH<sub>4</sub>)-feldspar and cymrite from a lower Cambrian black shale sequence in Anhui Province, South China[J]. *Mineralogical Magazine*, 2018, 82(1): 1-21.
- [16] 杨子元, 孙未君, Drew L J. 白云鄂博的钾-钡长石系列与钡交代作用[J]. *地质找矿论丛*, 1993, 8(3): 89-94.  
Yang Ziyuan, Sun Weijun, Drew L J. Hyalophane series from bayan obo and barium metasomatism[J]. *Geological Mineral Exploration Forest*, 1993, 8(3): 89-94.
- [17] 汤望新, 姜在兴, 申涛. 塔中地区上奥陶统良里塔格组构造裂缝成岩作用研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(25): 238-242.  
Tang Wangxin, Jiang Zaixing, Shen Tao. The diagenesis of Lianglitag formation structural fracture of upper ordovician in Tazhong Region, Tarim Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(25): 238-242.
- [18] 周锡强, 遇昊, 黄泰誉, 等. 重晶石沉积类型及成因评述——兼论扬子地区下寒武统重晶石的富集机制[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1044-1056.  
Zhou Xiqiang, Yu Hao, Huang Taiyu, et al. Genetic classification of sedimentary barites and discussion on the origin of the lower cambrian barite-rich deposits in the Yangtze Block, South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1044-1056.
- [19] 李克, 惠克来, 操应长, 等. 湖相细粒沉积岩中晶粒方解石成因及其对火山-热液活动的指示——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 541-552.  
Li Ke, Xi Kelai, Cao Yingchang, et al. Genesis of granular calcite in lacustrine fine-grained sedimentary rocks and its indication to volcanic-hydrothermal events; a case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 541-552.
- [20] Lin S R, Hu K, Cao J, et al. Geochemistry and origin of hydrothermal apatite in Carlin-type Au deposits, southwestern China (Gaolong deposit)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 154. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105312.
- [21] Velde B. Composition and mineralogy of clay minerals[M]//Origin and mineralogy of clays: clays and the environment. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- [22] 龙华山, 向才富, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷滨海断裂带热流体活动及其对油气成藏的影响[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 673-684.  
Long Huashan, Xiang Caifu, Niu Jiayu, et al. Hydrothermal fluid flow and its influence on the hydrocarbon migration and accumulation along Binhai fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 35(4): 673-684.
- [23] 陈鑫, 戚明辉, 邓翔, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组7段泥页岩储层特征及其控制因素[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(22): 9460-9469.  
Chen Xin, Qi Minghui, Deng Xiang, et al. Mineral composition characteristics and its controlling factors in shale of Chang 7 member of Yan chang Formation in the south of Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9460-9469.
- [24] Malvoisin B, Mazzini A, Miller S A. Deep hydrothermal activity driving the Lusi mud eruption[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 497: 42-49.
- [25] 刘龙, 张树明, 张鑫, 等. 相山南部花岗斑岩黑云母及绿泥石矿物化学特征及地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(8): 3029-3037.  
Liu Long, Zhang Shuming, Zhang Xin, et al. Mineral characteristics of biotite and chlorite porphyries in the southern Xiangshan and their geological significance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(8): 3029-3037.
- [26] McNutt R H. Strontium isotopes[M]//Cook P, Herczeg A. Environmental tracers in subsurface hydrology. Boston: Springer, 2000.
- [27] 蒋裕强, 谷一凡, 李开鸿, 等. 四川盆地中部中二叠统热液白云岩储渗空间类型及成因[J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 16-24.  
Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Li Kaihong, et al. Space types and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, Central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 16-24.
- [28] 刘家军, 吕志成, 吴胜华, 等. 南秦岭大巴山大型钼成矿带中铈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 varium metallogenic belt in southern Qinling Mountains[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 23-30.
- [29] Zou H, Li M, Santosh M, et al. Fault-controlled carbonate-hosted barite-fluorite mineral systems: the Shuanghe deposit, Yangtze Block, South China[J]. *Gondwana Research*, 2022, 101: 26-43.
- [30] 胡作维, 李云, 李北康, 等. 显生宙以来海水铈同位素组成研究的回顾与进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(1): 37-49.  
Hu Zuowei, Li Yun, Li Beikang, et al. An overview of the strontium isotopic composition of phanerozoic seawater[J]. *Advance in Earth Science*, 2015, 30(1): 37-49.
- [31] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92(1): 11-26.
- [32] 张廷山, 俞剑华, 边立曾, 等. 四川盆地南北缘志留系的锶和碳、氧同位素演化及其地质意义[J]. *岩相古地理*, 1998, 18(3): 41-49.  
Zhang Tingshan, Yu Jianhua, Bian Lizeng, et al. Strontium, carbon and oxygen isotopic compositions and their geological significance: the Silurian strata on the northern and southern margins of the Sichuan Basin[J]. *Paleogeography*, 1998, 18(3): 41-49.
- [33] Zhang Y, Jia D, Yin H W, et al. Remagnetization of lower Silurian black shale and insights into shale gas in the Sichuan Basin, south China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(2): 491-505.
- [34] 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 200-214.  
Hou Zhongshuai, Zhou Lihong, Jin Fengming, et al. Hydrothermal fluid activity and its reformation on reservoirs in Qikou Depression[J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 200-214.

- [35] 高振中,何幼斌,李罗照,等. 中国南方上奥陶统五峰组观音桥段成因讨论:是“浅水介壳相”,还是深水异地沉积? [J]. 古地理学报, 2008(5): 487-494.  
Gao Zhenzhong, He Youbin, Li Luozhao, et al. Genesis of the Guanyinqiao member of upper Ordovician Wufeng Formation in southern China: “shallow water shelly facies” or deep-water allo-genic deposition? [J]. Journal of Palaeogeography, 2008(5): 487-494.
- [36] 王清斌,刘立,牛成民,等. 渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2751-2760.  
Wang Qingbin, Liu Li, Niu Chengmin, et al. The geological evi-dences and impacts of deep thermal fluid onlacustrine carbonate reservoir in the Actic Area of the North Part of Bozhong Depres-sion, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2751-2760.
- [37] 刘文栋,钟大康,尹宏,等. 川西北栖霞组超深层白云岩储层特征及主控因素[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 342-362.  
Liu Wendong, Zhong Dakang, Yin Hong, et al. Development characteristics and main controlling factors of ultra deep dolomite reservoirs of the Qixia Formation in the north- western Sichuan Ba-sin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 342-362.
- [38] Liu Y, Jin S D, Cao Q, et al. Tertiary hydrothermal activity and its effect on reservoir properties in the Xihu Depression, East Chi-na Sea[J]. Petroleum Science, 2019, 16: 14-31.
- [39] 黎霆,诸丹诚,杨明磊,等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 639-651.  
Li Ting, Zhu Dancheng, Yang Minglei, et al. Influence of hydro-thermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 639-651.