

# 滇黔北地区下寒武统热水沉积烃源岩发育特征

程青松,石阳志,章超,王鑫,季永承,王紫琪

中国石油浙江油田勘探开发一体化中心

**摘要** 在收集滇黔北地区寒武系筇竹寺组典型热水沉积剖面资料的基础上,通过热解、TOC、饱和烃色谱-质谱、微量元素和稀土元素等实验分析,对研究区页岩的发育特征进行了深入探究,并对现代海洋热水生物及沉积物的生物标志物组合与四川盆地寒武系和塔里木盆地寒武系出现的独特生物标志物分布特征进行了对照分析。结果表明:①滇黔北地区筇竹寺组沉积时期发育热水沉积,热水环境丰富的营养物质和强还原条件有利于生物的繁盛和沉积有机质的保存,从而有利于形成优质烃源岩。②滇黔北地区筇竹寺组广泛发育陆棚相泥页岩烃源岩,优质烃源岩的发育多与热水沉积有关,热水深水环境烃源岩的形成和保存条件更佳。热水浅水陆棚相烃源岩的有机质丰度较高,TOC在2%~5%之间;热水深水陆棚相烃源岩的有机质丰度更高,TOC在5%~10%之间甚至更高。③热水沉积烃源岩在四川、塔里木等盆地寒武系普遍存在。除了陆棚区外,深海盆地也具有发育优质烃源岩的物质基础与保存条件,也可能发育优质烃源岩。

**关键词** 热水沉积;烃源岩;页岩气;寒武纪;滇黔北

**中图分类号**:TE122.1 **文献标识码**:A

## 0 前言

我国西南地区地质构造运动复杂,在多阶段构造演化背景下,发育海相、海陆过渡相及陆相3类富有机质页岩。海相富有机质页岩主要分布在古生界寒武系、奥陶系、志留系和泥盆系<sup>[1]</sup>。滇黔北地区位于上扬子地台,是下寒武统海相黑色页岩沉积的广泛分布区,页岩气资源勘探潜力巨大<sup>[2]</sup>。目前正在威远地区下寒武统筇竹寺组和与筇竹寺组层位相对应的鄂西地区水井沱组获得日产(1.08~7.83) $\times 10^4$  m<sup>3</sup>的页岩气流<sup>[3]</sup>;此外,黔南H1井的下寒武统九门冲组、黔东南T1井的下寒武统牛蹄塘组,压裂测试均获得页岩气流<sup>[4]</sup>。这些勘探成果表明下寒武统是五峰组—龙马溪组以外另一套重要的含气页岩层系,展现出了良好的勘探前景。但是,目前下寒武统的研究程度较低,加之下寒武统页岩的时代老、演化程度高,因此页岩气勘探开发一直未取得实质性突破。

前人研究表明,中上扬子区烃源岩主要形成于5类不同的构造环境中:①上升洋流控制的缓坡陆

棚环境<sup>[5]</sup>(下寒武统烃源岩);②活动大陆边缘海槽盆相区<sup>[6]</sup>(湘桂上古生界烃源岩);③前陆挠曲阶段形成的滞留盆地<sup>[7]</sup>(上奥陶统顶部—下志留统底部、下三叠统及上三叠统烃源岩);④克拉通台内滞流盆地<sup>[8]</sup>(下二叠统碳酸盐岩烃源岩);⑤滨海平原—三角洲相带<sup>[9]</sup>(上二叠统、上三叠统煤系烃源岩)。本文研究的滇黔北地区的沉积构造环境属于第①类,在黔北寒武系陆棚相沉积区存在广泛分布的热水沉积<sup>[4,10]</sup>。受热水影响的剖面又可以进一步分为3种类型:第1种类型为热水和正常海水反复交替,发育较厚的好烃源岩;第2种类型以出现一期热水沉积为特征;第3种类型以出现两期热水沉积为特征。这些剖面中热水沉积段的有机质丰度明显高于正常水沉积的烃源岩<sup>[10]</sup>。

本文对滇黔北地区Ys106井、宝1井、川龙1井、金竹1井等井的下寒武统筇竹寺组大量的页岩样品进行热解、TOC分析,选择金竹1井筇竹寺组16块页岩样品进行了微量元素和稀土元素分析,此外还对川北南江杨坝剖面下寒武统筇竹寺组页岩、塔里木盆地LG19井寒武系原油样品进行了饱和烃色

收稿日期:2021-11-13;改回日期:2022-10-30

本文受国家科技重大专项“昭通页岩气勘探开发示范工程”(编号:2017ZX05063)、中国石油天然气集团有限公司重大现场试验项目“深层页岩气有效开采关键技术攻关与试验”(编号:2019F-13)联合资助

**第一作者**:程青松,博士,主要从事油气地球化学及油气成藏研究。通信地址:311100 浙江省杭州市余杭区丰岭路 浙江油田勘探开发一体化中心;E-mail:chengqs85@petrochina.com.cn

谱-质谱分析。主要目的是深入剖析和明确研究区下寒武统筇竹寺组富有机质页岩发育的控制因素,进而为滇黔北地区寒武系优质页岩储层的分布预测,以及后续的寒武系页岩气探勘开发工作提供依据和基础资料。

## 1 地质背景

滇黔北地区地处云南(昭通)、贵州(毕节—遵义)、四川(宜宾—泸州)三省交会区域,大地构造上属于扬子地块构造域西南边缘的滇黔北坳陷,主体是威信凹陷的中西部区域。滇黔北研究区北邻四川盆地,南抵滇东黔中隆起,西与滇黔北坳陷之昭通凹陷毗邻,东到贵州习水—仁怀一线。

滇黔北地区经历了晚元古代晚期—早古生代扬子陆架南部大陆边缘、晚古生代—中三叠世裂陷陆表海、中生代前陆盆地的构造沉积演化历史,发育了层系较齐全、地层厚度大且分布广的海相震旦系—中三叠统和陆相上三叠统—下白垩统两大沉积组合<sup>[11]</sup>。加里东构造运动晚期的华夏板块碰撞挤压造山的构造运动,使得滇黔北—四川地区的晚志留世—泥盆纪沉积受乐山—龙女寺、小草坝等古隆起控制。早白垩世沉积之后的晚燕山构造运动期,随着扬子东南的雪峰基底拆离造山带和粤海造山带向西北方向的持续冲断和上隆,扬子块体东南部区域发生区域性的陆内造山形变,川东—湘鄂西侏罗山式隔槽隔档褶皱波及研究区并形成云贵燕山高原。喜马拉雅构造运动期,随着太平洋—古特提斯洋与扬子板块碰撞、印度洋板块向北俯冲碰撞,形成近东西向和近南北向共同剪切的构造应力格局,云贵燕山高原发生“南强北弱”的持续隆升剥蚀、系列冲断与“西强东弱”的扭动走滑,造就了滇黔北目前的强烈构造改造残留型坳陷。滇黔北地区高原地形地貌起伏大,河流切割深,晚期的油气保存条件整体变差。

筇竹寺组沉积时,发生大规模海侵,上扬子区古地貌呈西高东低的格局,研究区主体为陆棚沉积(图1)。受裂陷槽及古地貌向东、向北降低影响,深水陆棚主要分布于裂陷槽区及上扬子区东部、北部古地貌低的地区。区域上,筇竹寺组物源主要来自于西部康滇古陆,西部砂质含量较高,主要发育砂质陆棚,向东砂质含量减少,逐渐过渡为泥质陆棚。

滇黔北大部分地区出露中生界红层,约占了四分之三的面积,总厚为2 100~5 250 m。古生界主要出

露于珙县和盐津—筠连大雪山附近,组成两个较大的背斜,占了约四分之一的面积,总厚为2 109~4 604 m。新生界仅有第四系的一部分,零星分布在河谷两侧,厚0~27 m。

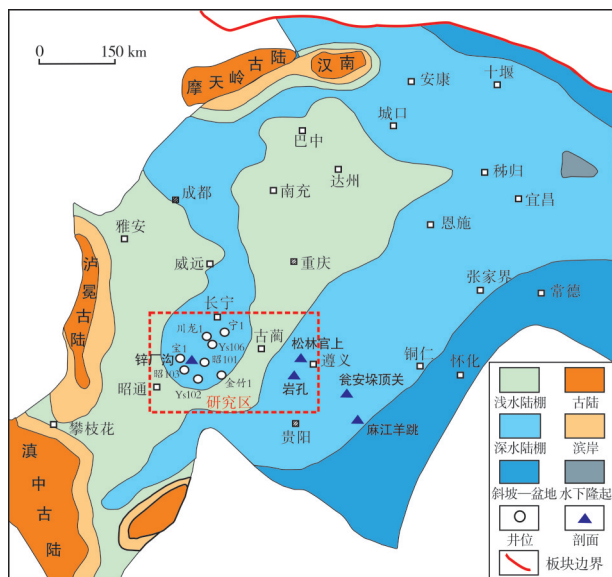


图1 研究区筇竹寺组沉积背景及井位和剖面位置图  
(据文献[4]修改)

Fig.1 Sedimentary background of Qiongzhusi Formation, well location and outcrop location of the study area  
(cited from reference [4], modified)

下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组、上奥陶统五峰组和中志留统罗惹坪组等海相黑色页岩是研究区的主要气源岩,其中下志留统龙马溪组—上奥陶统五峰组厚度大、有机质丰度高、保存较好,为页岩气开发的重点目标层系。

## 2 滇黔北寒武系烃源岩发育特征

研究区筇竹寺组厚度为200~500 m,根据岩性、电性和元素含量等特征,可将筇竹寺组从下往上分为3段且具可对比性:筇竹寺组一段(简称第一段)为浅海含磷镁质碳酸盐岩夹泥质碎屑岩;第二段以黑色泥岩为主,中部见深灰色泥岩;第三段以灰色、深灰色泥岩为主。第一段在研究区东北部发育较差;第二段底部优质烃源岩在全区分布,且厚度稳定。统计分析各钻井筇竹寺组3个地层段的不同TOC的地层厚度(图2),发现第二段底部富有机质硅质页岩相对较发育。筇竹寺组TOC>2%的地层厚度在22~110 m之间,平均为56 m,平面上呈现高县—镇雄—黔西一带厚、东北部叙永—习水一带与西南部彝良—鲁甸一带较薄的分布特征(图3)。

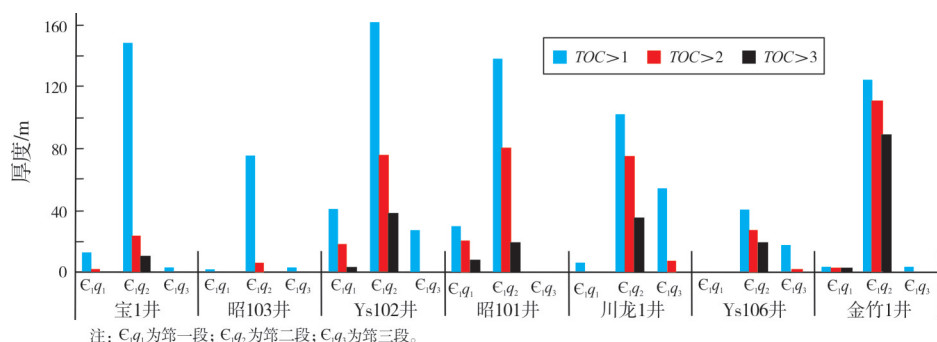


图2 滇黔北地区筇竹寺组3个地层段不同TOC的烃源岩厚度直方图

Fig. 2 Thickness histogram of the Qiongzhusi source rocks with different TOC in northern Yunnan and Guizhou

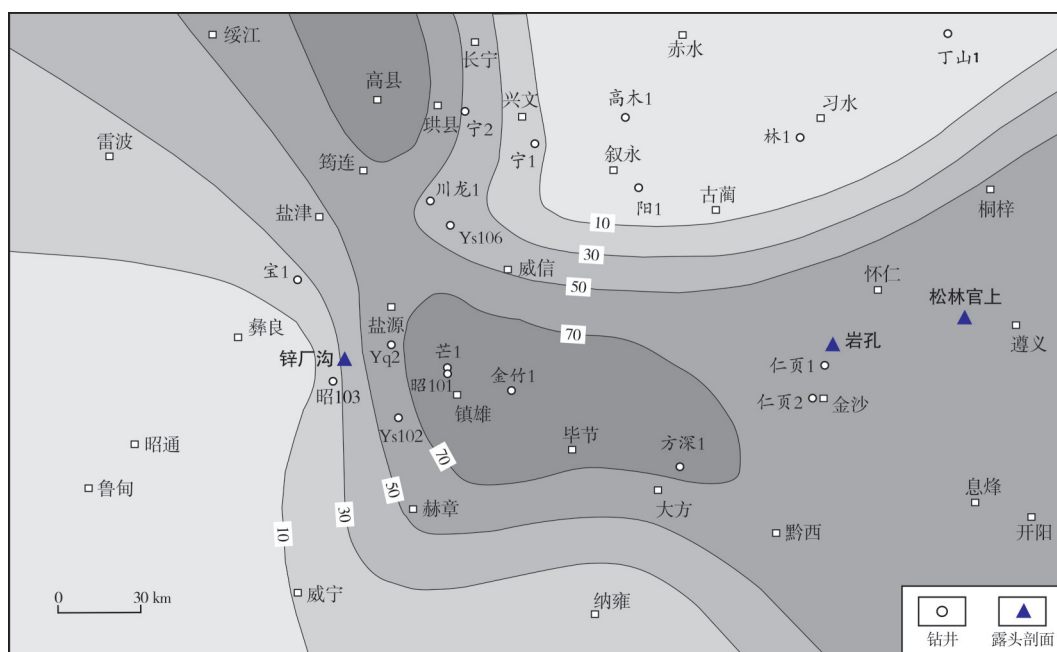


图3 滇黔北地区筇竹寺组TOC &gt; 2%的烃源岩厚度等值线图

Fig. 3 Distribution of the Qiongzhusi source rocks with TOC &gt; 2% in northern Yunnan and Guizhou

据滇黔北地区金竹1井的钻井资料分析,筇竹寺组的 $R_o$ 普遍在3.6%以上,烃源岩处于过成熟阶段,页岩中残留的液态烃也已经裂解成气,具有良好的页岩气资源潜力。对滇黔北地区川南低陡褶皱带和威信凹陷进行资源评价,两个地区筇竹寺组页岩气资源量合计为 $6\,589.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

### 3 滇黔北寒武系典型热水沉积剖面

本次研究收集了3条典型热水沉积剖面(图4)的资料加以分析。

滇黔北麻江羊跳剖面(图4a,剖面位置见图1)代表近喷水口的热水陆棚环境,具有热水与正常水反复交替的特征。羊跳剖面筇竹寺组优质烃源

岩主要发育在热水/正常水较深水陆棚相,其次是热水较深水陆棚相。该剖面样品的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值较低,有的样品 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $-0.1\text{‰}$ ,说明地层沉积于热液喷口附近;除底部外,剖面上热水和正常水较深水陆棚相交替环境占了大部分。剖面上以含石膏为标志的热水沉积连续厚度达80 m,在距底40 m左右位置有机碳含量最高。热水沉积优质烃源岩厚度为80 m,TOC大于5%,底部10 m左右厚的烃源岩TOC大于10%(图4a)。此外,底部硅质岩及其上40 m以内的层位中发育指示热水沉积环境的麻江生物群<sup>[10]</sup>。

黔中瓮安垛顶关剖面(图4b,剖面位置见图1)是一条典型的具有2个高TOC段的剖面,此外黔中



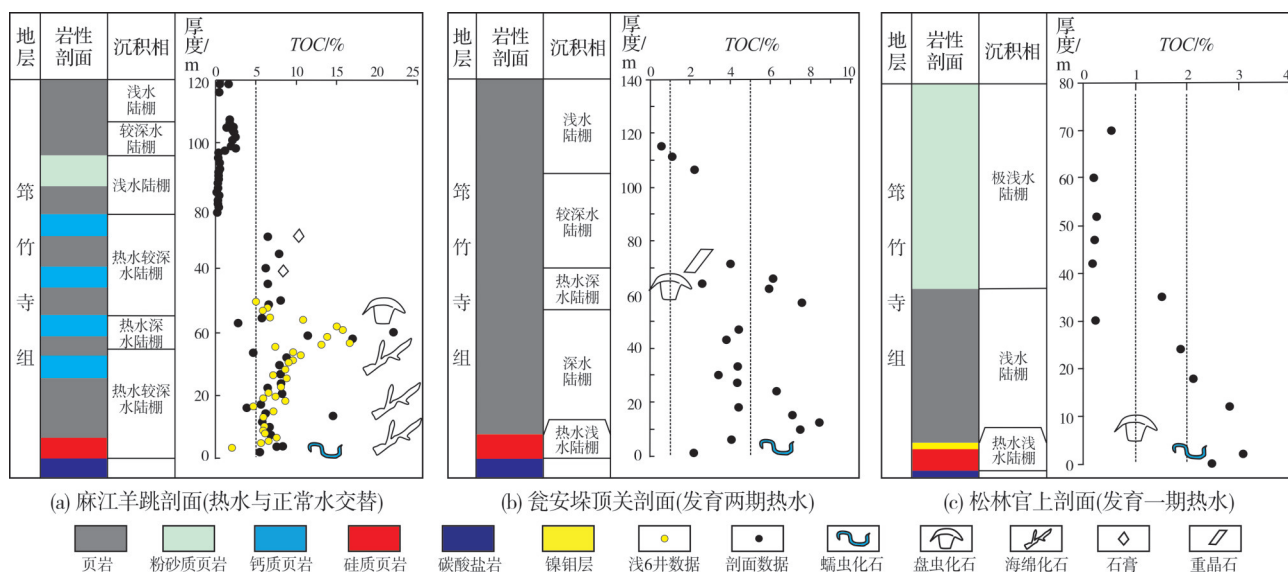


图4 黔北地区筇竹寺组典型热水沉积剖面(据文献[10]修改)

Fig. 4 Typical hydrothermal sedimentary section of Qiongzhusi Formation in northern Guizhou (cited from reference [10], modified)

地区具2个高TOC段的剖面还有松桃盘石剖面。同一个剖面的筇竹寺组为什么出现2个高TOC段? 埡顶关剖面的热水沉积使这个问题有了一个可能的解释。在筇竹寺组底部硅磷层的磷结核样品中发现丰富的热水沉积环境标志的蠕虫化石,这是第1期热水沉积。第2个高TOC沉积段发育重晶石(图4b),这是热水陆棚发育高峰期,而重晶石的发育被认为和热水沉积环境有关<sup>[12-13]</sup>。这就说明热水陆棚在这2个剖面上反映出2个扩展期,相应地形成了2个有机碳高峰值。埡顶关剖面的高TOC烃源岩发育于正常深水泥质陆棚和两次热水事件的交替过程中。该剖面TOC在5%~10%之间的烃源岩厚度有60多米(图4b),底部热水沉积约6 m,中部的热水沉积约15 m<sup>[10]</sup>。

遵义松林官上剖面(图4c,剖面位置见图1)是发育一期热水沉积的典型剖面,发育很好的蓝藻藻席。因为蓝藻化石一般发现于浅水环境,所以蓝藻藻丝体在松林官上剖面的发现说明存在浅水沉积。剖面底部发育好的镍钼矿层;在镍钼矿层之下出现海绵 *Triticispongia*, 镍钼矿层之上发现盘虫化石(图4c)。这也说明该剖面筇竹寺组沉积以浅水环境为主,正常海水沉积在镍钼矿层之上就开始了。尽管遵义松林官上剖面的烃源岩发育于热水和正常水浅水陆棚,但是,由于该剖面在镍钼层之上主要发育浅水泥质陆棚,所以TOC比羊跳剖面低许多(羊跳剖面热水深水陆棚的TOC为5%~15%,松林官上

剖面热水浅水陆棚的TOC为2%~5%,正常水浅水陆棚的TOC为1.5%~3%)。遵义松林官上剖面仅底部10 m左右受热水影响,明显区别于羊跳剖面、金沙剖面的持续热水和正常水交替型深水陆棚相,正因为如此,其TOC也比麻江羊跳剖面深水陆棚相要低许多,烃源岩厚度也薄得多<sup>[10]</sup>。

#### 4 筇竹寺组热水沉积的元素地球化学证据

选取金竹1井筇竹寺组页岩进行了元素地球化学分析,分析结果如表1所示。筇竹寺组页岩微量元素中的U/Th值在0.25~3.38之间,平均值为1.17。张琴等<sup>[14]</sup>的研究认为U/Th值>1代表热水沉积环境。从表1可知,深度大于等于2 385 m的样品该比值分布在1.52~3.10之间,即金竹1井筇竹寺组底部的优质烃源岩,表现出热水沉积的元素特征。

样品的稀土总量较低, $\Sigma \text{REE}$ 在 $(152.44 \sim 284.41) \times 10^{-6}$ 之间;且富集轻稀土元素,LREE/HREE值在2.02~4.40之间(表1),REE的北美页岩标准化曲线近于水平(图5)。这是因为在热液系统中,稀土元素与配体离子结合形成的络合物稳定性存在差异,该差异即可能导致稀土元素在溶液迁移的过程中发生分异作用; $\text{CO}_3^{2-}$ 的加入会进一步提高HREE在流体中的溶解度,从而产生小的LREE/HREE值,所以显示出近平坦的稀土配分特征<sup>[15-16]</sup>。

表1 黔北地区金竹1井筇竹寺组页岩微量元素与稀土元素参数表

Table 1 Parameters of trace elements and rare earth elements in the Qiongzhusi shale of Well Jinzhu-1 in northern Guizhou

深度/m	微量元素含量/ $10^{-6}$															U/Th	$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	LREE/HREE
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y			
2 104	1.19	1.01	1.08	0.98	1.12	1.47	1.13	1.12	0.91	0.99	0.92	0.98	0.99	0.98	1.06	0.26	212.71	3.09
2 130	1.03	0.89	0.98	0.90	1.11	1.40	1.11	1.09	0.88	1.06	0.84	0.90	0.91	0.92	0.97	0.25	192.01	2.95
2 160	1.26	1.10	1.22	1.13	1.26	1.48	1.21	1.18	0.95	1.06	0.94	1.00	1.05	1.02	1.05	0.25	229.10	3.35
2 190	0.97	0.83	0.91	0.86	0.95	1.41	1.05	0.98	0.79	0.85	0.80	0.84	0.85	0.90	0.89	0.27	178.78	2.99
2 220	1.05	0.89	0.96	0.88	0.97	1.34	1.05	0.95	0.81	0.88	0.78	0.82	0.86	0.85	0.90	0.29	187.05	3.16
2 250	1.09	0.82	1.03	0.96	1.11	1.50	1.04	1.02	0.83	0.91	0.85	0.92	0.95	0.94	0.97	0.28	190.81	2.99
2 265	0.82	0.69	0.79	0.74	0.92	1.35	1.02	0.92	0.77	0.88	0.78	0.84	0.83	0.83	0.89	0.53	158.43	2.58
2 295	0.86	0.73	0.82	0.78	0.95	1.77	1.13	0.93	0.79	0.88	0.78	0.84	0.85	0.88	0.92	0.54	166.46	2.63
2 325	0.77	0.64	0.73	0.70	0.96	1.39	0.95	0.93	0.82	0.90	0.82	0.88	0.86	0.88	0.94	0.63	153.49	2.34
2 355	0.71	0.59	0.72	0.70	0.94	1.35	1.08	0.99	0.88	1.06	0.94	0.94	0.96	0.98	1.03	0.49	152.44	2.02
2 385	1.80	1.46	1.57	1.39	1.35	1.46	1.38	1.41	0.90	1.06	0.91	0.92	0.96	0.96	1.03	1.59	284.41	4.40
2 400	1.02	0.82	0.95	0.86	0.98	1.41	0.98	0.95	0.79	0.90	0.80	0.82	0.87	0.85	0.99	3.00	182.96	2.87
2 415	0.95	0.79	0.86	0.81	0.90	1.53	0.92	0.86	0.72	0.79	0.73	0.78	0.78	0.77	0.88	3.10	171.43	3.02
2 430	1.06	0.84	0.98	0.90	1.00	1.27	1.04	1.02	0.85	1.06	0.91	0.92	0.93	0.92	1.06	2.39	191.17	2.75
2 450	1.15	0.88	1.08	0.98	1.12	1.91	1.13	1.07	0.86	1.25	1.09	0.92	0.96	0.96	1.09	1.52	203.49	2.82
2 470	0.94	0.72	0.86	0.79	0.91	1.61	1.02	0.91	0.77	0.88	0.78	0.82	0.78	0.81	1.02	3.38	170.84	2.56

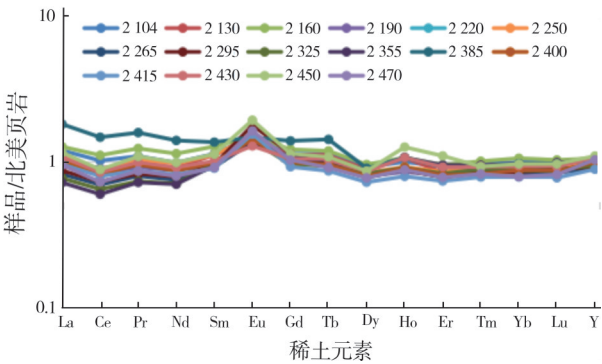


图5 黔北地区金竹1井筇竹寺组页岩稀土元素标准化配分模式图

Fig. 5 Standardized distribution pattern of rare earth elements in the Qiongzhusi shale of Well Jinzhu-1 in northern Guizhou

金竹1井筇竹寺组泥页岩Ce均为负异常(图5),在 $(0.59\sim1.46)\times10^{-6}$ 之间变化(表1),平均值为 $0.86\times10^{-6}$ 。缺氧环境下, $\text{Ce}^{4+}$ 被还原以 $\text{Ce}^{3+}$ 形式释放到水中,导致海水由负Ce异常向正异常转化,沉积物中Ce就会亏损,呈现负异常<sup>[17]</sup>。

金竹1井筇竹寺组泥页岩Eu均为正异常(图5),在 $(1.27\sim1.91)\times10^{-6}$ 之间变化(表1),平均值为 $1.48\times10^{-6}$ 。一般情况下Eu呈 $\text{Eu}^{3+}$ ,而在强酸、还原条件下 $\text{Eu}^{3+}$ 被还原为 $\text{Eu}^{2+}$ ,引起海水中Eu亏损,沉积物中Eu

富集<sup>[18-19]</sup>。金竹1井筇竹寺组泥页岩稀土元素Eu均为正异常,表明筇竹寺组沉积环境为酸性、还原环境。

综合微量元素与稀土元素的分布特征,推断研究区筇竹寺组存在热水沉积。

5 古今热水沉积对比

5.1 有机质丰度对比

现代海洋热水喷口通常在2 400 m左右水深。距热水活动区越近,生物活动强度越高、生物数量越多,生物类群以古细菌和细菌为主。古细菌和细菌以热液喷口喷出的 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_4$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 等为原料经过化学能合成作用合成有机质<sup>[20-24]</sup>。海底热水流体活动区生物数量比正常海洋区高1~3个数量级<sup>[25]</sup>,因此,热液喷口被称为“深海绿洲”。热液区高的生物通量、栖息密度及生长速率与化学能自养微生物的高生产力密不可分<sup>[26]</sup>。

从3种典型的热热水沉积剖面(图4)可见,热水沉积发育优质烃源岩,深水环境的形成和保存条件更佳。寒武系热水浅水陆棚相沉积烃源岩的TOC在2%~5%之间,有机质丰度较高;而热水深水陆棚相烃源岩的TOC更高,在5%~10%之间甚至更高。由此

可见,热液区极高的生物通量是形成优质烃源岩的物质基础。总体上,还原酸性热液加大了海底缺氧程度,有利于有机质保存。热水深水陆棚的有机质丰度比浅水陆棚高,可能与浅水环境水体能量高,水底含氧量更高,相对来说不利于有机质的保存有关。

## 5.2 水深范围对比

世界各大洋的洋中脊和弧后盆地以及陆内裂谷广泛发育热液活动<sup>[27]</sup>。深海热液活动是指海水通过深海底的洋壳缝隙渗透到洋壳深部,被炙热的岩浆、新生的热地壳或玄武岩蛇纹石化时放出的热量所加热,形成的高温海水再从缝隙溢出或喷涌而出的现象<sup>[28]</sup>。栾锡武<sup>[27]</sup>对已发现的490多个热液活动区进行了统计分析发现:现代海底热液活动区主要出现在大洋中脊、弧后盆地和板内火山等构造活动的部位,主要分布在40°N和40°S中、低纬度带之间;其分布的水深范围跨度较大,深可超过5 000 m,浅可到6 m,多数水深范围在1 300~3 700 m之间,平均为2 532 m。

早寒武世时期全球非造山火山活动广泛存在<sup>[28]</sup>。在黔北的各个沉积剖面中发现,不论是深水陆棚还是浅水陆棚都存在热水沉积。可见,现代与古代热液沉积发育的水深分布范围大,浅海至深海

大洋均可发育热水沉积。值得注意的是,寒武纪时期深海盆地存在热水沉积,结合现代深海盆地中热水生物群落发育的特征推测,古代海洋的深海盆地具有发育优质烃源岩的物质基础与保存条件。因此,除了陆棚相之外,深海盆地相也可能发育优质烃源岩。

## 5.3 生物标志化合物对比

现代海底热液沉积物具有独特的有机地球化学特征。一方面,热液区沉积物中的正构烷烃以长链为主,且具有明显的奇碳优势<sup>[29-30]</sup>。另一方面,C<sub>28</sub>甾醇(图6的1,2,3号化合物)为冷泉双壳类*Calyp-togena soyoae*的主要甾醇成分,C<sub>29</sub>甾醇(图6的4,5,6号化合物)为热液区双壳类*Bathymodiolus septem-dierum*的主要甾醇成分<sup>[31]</sup>。通常认为长链奇碳数正构烷烃和C<sub>29</sub>甾醇为高等植物所特有的生物标志物。在深海热液沉积物及生物体内检测出这些化合物具有特殊意义。

寒武系烃源岩及原油中也存在类似的异常生物标志物分布。本次研究在川北南江杨坝剖面的寒武系筇竹寺组烃源岩中发现:正构烷烃低碳数部分没有明显的奇偶优势(图7a),而高碳数部分表现出明显的奇碳优势。此外,规则甾烷存在C<sub>29</sub>甾烷占优势的现象(图7b)。

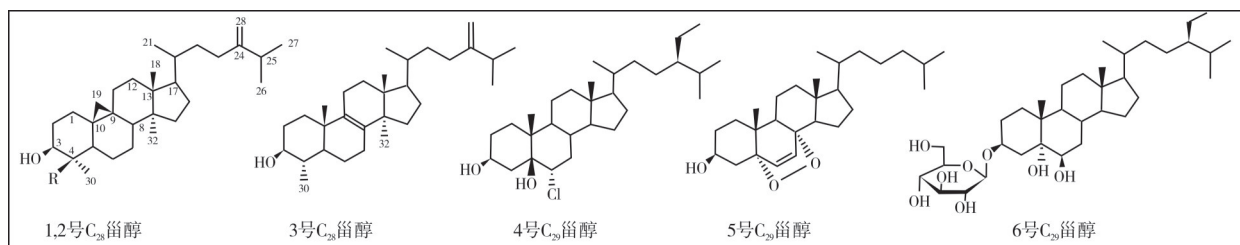


图6 现代海洋中正常水环境和热液区不同双壳类中的甾醇(据文献[31])(1,2号表示两种立体构型的化合物)

Fig. 6 Sterols in different bivalves of normal water environment and hydrothermal zone in modern ocean (cited from reference [31])

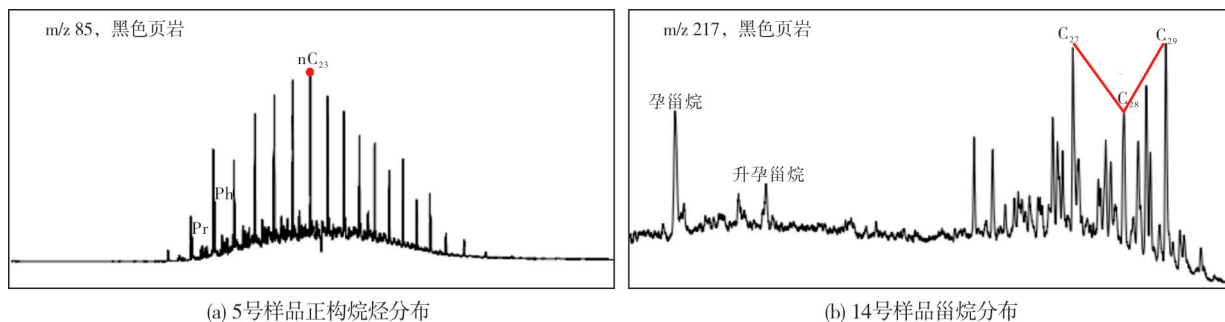


图7 川北南江杨坝剖面筇竹寺组烃源岩中的正构烷烃和甾烷分布

Fig. 7 Distribution of n-alkanes and steranes in the Cambrian source rocks of the Qiongzhusi Formation in the Yangba section of Nanjiang county, northern Sichuan



有的学者认为这种生物标志物的异常分布可能是露头样品被中新生界的有机质污染所致。然而,在井下的寒武系烃源岩以及由其产生的原油和沥青中也存在这种现象。李勇等<sup>[32]</sup>在川西北筇竹寺组泥岩和在泥盆系观雾山组白云岩储层中的来自寒武系的沥青中均发现了异常高丰度的 $C_{29}$ 甾烷

(图8)。除此之外,作者发现塔里木盆地来自寒武系的原油中也存在异常高丰度的 $C_{29}$ 甾烷(图9a),而且这些 $C_{29}$ 甾烷与原生动物的生物标志物伽马蜡烷具有极好的相关性(图9b)。可见,热液区现代沉积物与古代沉积物中高丰度的 $C_{29}$ 甾烷可能来自以化学能自养细菌为食的动物。

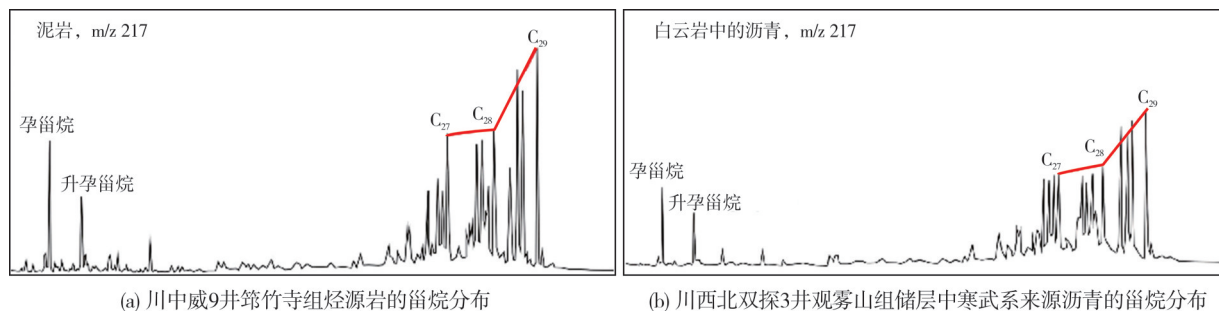


图8 四川盆地寒武系烃源岩及其产生的沥青的甾烷分布(据文献[32])

Fig. 8 Distribution of steranes in Cambrian source rocks and bitumen produced by them in Sichuan Basin (cited from reference [32])

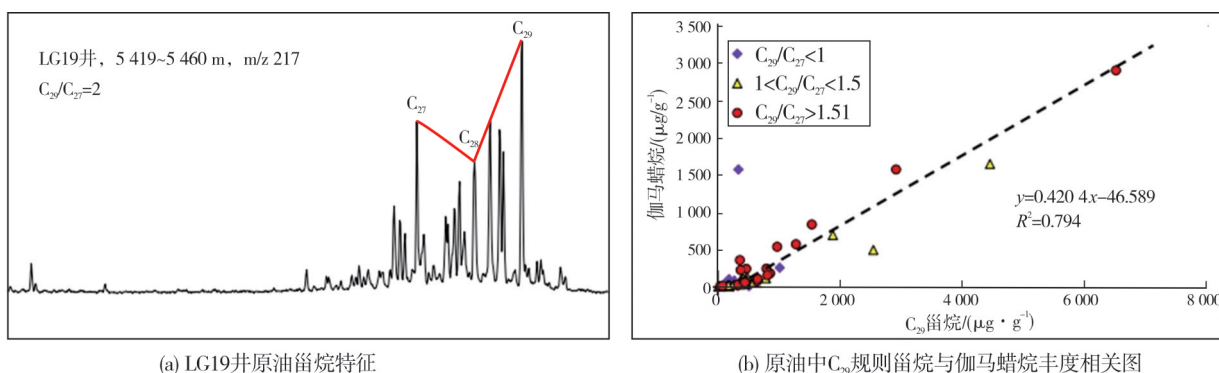


图9 塔里木盆地来源于寒武系烃源岩的原油甾烷特征

Fig. 9 Characteristics of steranes in crude oil from Cambrian source rocks in Tarim Basin

上述分析也说明了两个问题:第一,烃源岩已经处于过成熟,通常正构烷烃奇碳优势会随着成熟度的升高而逐渐消失,但是这些高过成熟样品中依然存在奇碳优势。第二,寒武纪地球上还没有高等植物出现,但沉积物中确定存在优势分布的 $C_{29}$ 甾烷。

通过对从川北南江杨坝剖面采集的筇竹寺组烃源岩和从重庆綦江采集的龙马溪组烃源岩进行分析发现,川北寒武系烃源岩中的三萜系列化合物以硫萜占绝对优势,重庆綦江龙马溪组烃源岩中的三萜系列以芬占优势(图10)。川北寒武系烃源岩的含硫化合物更加丰富,说明下寒武统沉积环境的还原性要强于下志留统。现代海洋热水区域中有大量的硫酸盐等还原酸性物质喷出,使得海底更加贫氧、还原性更强,从而有利于有机质的保存。

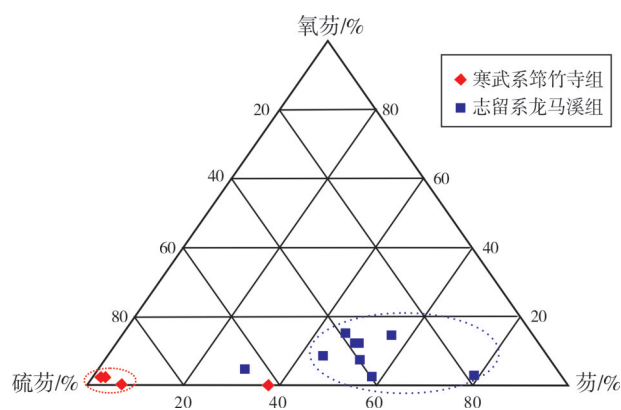


图10 川北南江下寒武统烃源岩与重庆綦江下志留统烃源岩的三萜系列含量分布特征

Fig. 10 Content characteristics of Trifluorene series of the Lower Cambrian source rocks in Nanjiang, northern Sichuan and of the Lower Silurian source rocks in Qijiang, Chongqing

## 6 结 论

通过岩石学分析及热解、TOC、饱和烃色谱-质谱、微量元素和稀土元素等实验分析,对滇黔北地区寒武系筇竹寺组页岩的发育特征进行了深入探究,并对现代海洋热水生物及沉积物的生物标志物组合与四川盆地、塔里木盆地寒武系烃源岩及生成原油的生物标志物特征进行了对照分析,取得以下几点认识:

(1)典型沉积剖面岩石特征、古生物特征及微量元素和稀土元素特征表明滇黔北地区寒武系筇竹寺组普遍发育热水沉积。

(2)热水环境丰富的营养物质和强还原条件有利于生物的繁盛和沉积有机质的保存,滇黔北地区筇竹寺组优质烃源岩的发育多与热水沉积有关,热水深水环境烃源岩的形成和保存条件更佳,热水深水陆棚相烃源岩的有机质丰度最高,TOC在5%~10%之间甚至更高。

(3)正构烷烃、甾烷、三萜系列化合物分布特征对照分析表明,热水沉积烃源岩在四川、塔里木等盆地的寒武系中普遍存在。

(4)结合现代深海盆地中热水生物群落发育特征推测,古代海洋的深海盆地具有发育优质烃源岩的物质基础与保存条件。因此,除了陆棚相之外,深海盆地相也可能发育优质烃源岩。

### 参 考 文 献

- [1] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 115-118.  
LI Yuxi, NIE Haikuan, LONG Pengyu. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China [J]. Natural gas industry, 2009, 29(12): 115-118.
- [2] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.  
NIE Haikuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China [J]. Acta petrolei sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [3] 赵培荣, 高波, 郭战峰, 等. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 335-344.  
ZHAO Peirong, GAO Bo, GUO Zhanfeng, et al. Exploration potential of marine-continental transitional and deep-water shelf shale gas in Upper Permian, Sichuan Basin [J]. Petroleum geology & experiment, 2020, 42(3): 335-344.
- [4] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 701-715.  
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region [J]. Oil & gas geology, 2019, 40(4): 701-715.
- [5] 程青松, 龚建明, 李智高, 等. 下扬子陆域下寒武统烃源岩特征及其对南黄海油气勘探的借鉴[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 66-72.  
CHENG Qingsong, GONG Jianming, LI Zhigao, et al. Cambrian source rocks in the land area of Yangtze block and implications for oil and gas exploration in the South Yellow Sea [J]. Marine geology frontiers, 2016, 32(1): 66-72.
- [6] 赵锡奎, 雍自权, 李国蓉, 等. 残留被动大陆边缘盆地: 一种被忽略的盆地类型[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 121-128.  
ZHAO Xikui, YONG Ziquan, LI Guorong, et al. Residual basin of passive continental margin: a neglected basin type [J]. Oil & gas geology, 2007, 28(1): 121-128.
- [7] 尹福光, 许效松, 陈明. 加里东期上扬子区前陆盆地演化过程中的层序特征与地层划分[C]//2001年全国沉积学大会摘要论文集, 武汉: 中国地质大学(武汉), 2001: 108-110.  
YIN Fuguang, XU Xiaosong, CHEN Ming. Characteristic of sequence and stratigraphical division in evolution of Upper Yangtze region during Caledonian [C]//Collection of abstracts of the 2001 National Congress of Sedimentology, Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2001: 108-110.
- [8] 陈洪德, 张成弓, 黄福喜, 等. 中上扬子克拉通海西-印支期(泥盆纪-中三叠世)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2281-2298.  
CHEN Hongde, ZHANG Chenggong, HUANG Fuxi, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Hercynian-Indosinian (Devonian-Middle Triassic) [J]. Acta petrologica sinica, 2011, 27(8): 2281-2298.
- [9] 赵时久, 陈家怀, 陈善庆. 滇东田坝黔西土城晚二叠世煤系上段沉积相及含煤性[J]. 沉积学报, 1988, 6(4): 62-71.  
ZHAO Shijiu, CHEN Jiahui, CHEN Shanqing. Facies and coal-bearing characters of the upper member of the Late Permian coal measures in Tianba (Eastern Yunnan) and Tucheng (Western Guizhou) [J]. Acta sedimentologica sinica, 1988, 6(4): 62-71.
- [10] 梁狄刚, 张水昌, 陈建平. 南方复杂构造区有效烃源岩评价[R]. 北京: CNPC油气地球化学重点实验室, 2007.  
Liang Digang, Zhang Shuichang, Chen Jianping. Evaluation of effective source rocks in southern complex structural area [R]. Beijing: CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Geochemistry,



- 2007.
- [11] 梁兴, 叶熙, 张介辉, 等. 滇黔北下古生界海相页岩气藏赋存条件评价[J]. 海相油气地质, 2011, 16(4): 11–21.
- LIANG Xing, YE Xi, ZHANG Jiehui, et al. Evaluation of preservation conditions of Lower Paleozoic marine shale gas reservoirs in the northern part of Dianqianbei Depression[J]. Marine origin petroleum geology, 2011, 16(4): 11–21.
- [12] 夏菲, 马东升, 潘家永, 等. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2592–2595.
- XIA Fei, MA Dongsheng, PAN Jiayong, et al. Strontium isotopic evidence for the genesis of hydrothermal sedimentation of Dahebian and Yuping barite deposits in Tianzhu, Guizhou[J]. Chinese science bulletin, 2004, 49(24): 2592–2595.
- [13] 陈永权, 蒋少涌, 凌洪飞, 等. 华南寒武纪海洋中沉积矿床及其古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 79–84.
- CHEN Yongquan, JIANG Shaoyong, LING Hongfei, et al. Sedimentary ore deposits in Cambrian ocean of the South China and the Paleo-ocean environments[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2005, 25(1): 79–84.
- [14] 张琴, 梁峰, 王红岩, 等. 页岩元素地球化学特征及古环境意义: 以渝东南地区五峰—龙马溪组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 380–390.
- ZHANG Qin, LIANG Feng, WANG Hongyan, et al. Elements geochemistry and paleo sedimentary significance: a case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southeast Chongqing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 380–390.
- [15] GIRTY G H, HANSON A D, KNAACK C, et al. Provenance determined by REE, Th, and Sc analyses of metasedimentary rocks, Boyden Cave roof pendant, central Sierra Nevada, California[J]. Journal of sedimentary research, 1994, 64(1b): 68–73.
- [16] 韦春婉, 许成, 付伟, 等. 稀土元素在岩浆和水热系统的实验岩石学和地球化学研究进展[J]. 岩石学报, 2022, 38(2): 455–471.
- WEI Chunwan, XU Cheng, FU Wei, et al. Research advances in experimental petrology and geochemistry of rare earth elements in magmatic and hydrothermal systems[J]. Acta petrologica sinica, 2022, 38(2): 455–471.
- [17] WILDE P, QUINBY-HUNT M S, ERDTMANN B D. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies[J]. Sedimentary geology, 1996, 101(1/2): 43–53.
- [18] ALLÈGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and planetary science letters, 1978, 38(1): 1–25.
- [19] GANESHRAM R S, PEDERSEN T F, CALVERT S E, et al. Large changes in oceanic nutrient inventories from glacial to interglacial periods[J]. Nature, 1995, 376(6543): 755–758.
- [20] 李日辉, 侯贵卿. 深海热液喷口生物群落的研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 103–108.
- LI Rihui, HOU Guiqing. Research advances in deep-sea hydrothermal vent communities[J]. Marine geology & Quaternary geology, 1999, 19(4): 103–108.
- [21] 王春生, 杨俊毅, 张东声, 等. 深海热液生物群落研究综述[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(增刊2): 141–149.
- WANG Chunsheng, YANG Junyi, ZHANG Dongsheng, et al. A review on deep-sea hydrothermal vent communities[J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2006, 45(S2): 141–149.
- [22] CHILDRESS J J, FISHER C R. The biology of hydrothermal vent animals: physiology, biochemistry, and autotrophic symbioses[J]. Oceanography and marine biology, 1992, 30: 337–441.
- [23] 王春生. 中国首次环球大洋科学考察[J]. 科学, 2006, 58(4): 5–7.
- WANG Chunsheng. China's first global ocean scientific expedition[J]. Science, 2006, 58(4): 5–7.
- [24] SCEARCE C. Hydrothermal vent communities[EB/OL]. [2006–05]. [http://jvarekamp.web.wesleyan.edu/public\\_htmlA/public\\_htmlA/Vents.pdf](http://jvarekamp.web.wesleyan.edu/public_htmlA/public_htmlA/Vents.pdf).
- [25] 冯军. 海底黑烟囱中微生物矿化过程: 冲绳海槽与冀东高板河黑烟囱及其中微生物矿化对比研究[D]. 北京: 北京大学, 2006.
- FENG Jun. The microbial mineralization in submarine black smoker chimneys: a comparison study on the black smoker fossils from Okinawa through and from Gaobanhe in eastern Hebei[D]. Beijing: Peking University, 2006.
- [26] 黄丁勇, 林荣澄, 牛文涛, 等. 西南印度洋深海热液区铠甲虾初探[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 88–93.
- HUANG Dingyong, LIN Rongcheng, NIU Wentao, et al. Preliminary study on squat lobsters from the hydrothermal areas in southwest Indian ocean[J]. Marine science bulletin, 2011, 30(1): 88–93.
- [27] 栾锡武. 现代海底热液活动区的分布与构造环境分析[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 931–938.
- LUAN Xiwu. Distribution and tectonic environments of the hydrothermal field[J]. Advances in earth science, 2004, 19(6): 931–938.
- [28] 翟明国, 樊祺诚. 华北克拉通中生代下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 1–8.
- ZHAI Mingguo, FAN Qicheng. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton: anorogenic mantle-crust interaction[J]. Acta petrologica sinica, 2002, 18(1): 1–8.
- [29] SIMONEIT B R T, LEIN A Y, PERESYPKIN V I, et al. Composition and origin of hydrothermal petroleum and associated lipids in the sulfide deposits of the Rainbow field (Mid-Atlantic Ridge at 36°N)[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2004, 68(10): 2007.

- 2275–2294.
- [30] SIMONEIT B R T, GOODFELLOW W D, FRANKLIN J M. Hydrothermal petroleum at the seafloor and organic matter alteration in sediments of Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge [J]. *Applied geochemistry*, 1992, 7(3): 257–264.
- [31] KAWAI S, TAKADA Y, TSUCHIDA S, et al. Sterols from bivalves *Calypptogena soyoae* and *Bathymodiolus septemdierum* living in deep sea[J]. *Fisheries science*, 2007, 73(4): 902–906.
- [32] LI Yong, CHEN Shijia, WANG Yuexiang, et al. The origin and source of the Devonian natural gas in the Northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2019, 181: 106259.

编辑:黄革萍

## Characteristics of the Lower Cambrian hydrothermal sedimentary source rocks in northern Yunnan and Guizhou

CHENG Qingsong, SHI Yangzhi, ZHANG Chao, WANG Xin,  
JI Yongcheng, WANG Ziyang

**Abstract:** On the basis of collecting the data of typical hydrothermal sedimentary outcrops of the Cambrian Qiongzhusi Formation in the northern Yunnan and Guizhou, the development characteristics of source rocks in the study area were deeply explored through pyrolysis, *TOC*, saturated hydrocarbon chromatography–mass spectrometry, trace elements and rare earth elements and other experimental analysis, and the biomarker assemblages of modern marine hydrothermal organisms and sediments were compared with unique biomarker distribution characteristics of the Cambrian source rocks and generated crude oil in Sichuan Basin and Tarim Basin. The results show that: (1) Hydrothermal deposition are developed during the sedimentary period of Qiongzhusi Formation in northern Yunnan and Guizhou, and the rich nutrients and strong reduction conditions in the hot water environment are conducive to the prosperity of organisms and the preservation of sedimentary organic matter, which is conducive to the formation of high-quality source rocks. (2) Shale source rocks of continental shelf are widely developed in the Qiongzhusi Formation in the north of Yunnan and Guizhou, and the development of high-quality source rocks is mostly related to hydrothermal deposition. The formation and preservation conditions of source rocks in hot deep water environment are better. The organic matter abundance of hot shallow water shelf source rocks is high, *TOC* is between 2% and 5%; the abundance of organic matter in hot deep water shelf source rocks is higher, and *TOC* is between 5% and 10% or more than 10%. (3) The thermal evolution of the source rock of Qiongzhusi Formation in the north of Yunnan and Guizhou is high, and it is in the over-mature evolution stage, with good shale gas resource potential. The total amount of shale gas resources of South Sichuan Low-Steep Fold Belt and Weixin Depression in southern Sichuan is  $6\,589.5\times10^8\text{ m}^3$ , indicating they are potential shale gas exploration zones. (4) Hydrothermal sedimentary source rocks are widespread in the Cambrian in Sichuan, Tarim and other basins. Besides the continental shelf, the deep-sea basin also has the material basis and preservation conditions for source rocks, and may also develop high-quality source rocks.

**Key words:** hydrothermal sedimentary; source rock; shale gas; Cambrian; northern Yunnan and Guizhou

**CHENG Qingsong**, First author: PhD, mainly engaged in the research of petroleum geochemistry and oil-gas accumulation. Add: Zhejiang Oilfield Exploration and Development Integration Center, Fengling Rd., Yuhang District, Hangzhou, Zhejiang 311100, China