

四川盆地龙潭组烃源岩全硫含量特征 及其对沉积环境的响应

付小东^{1,2},邱楠生¹,秦建中³,滕格尔³,刘文汇³,王小芳²

(1. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151)

摘要:通过对四川盆地龙潭组烃源岩全硫含量系统分析,研究了龙潭组烃源岩硫含量分布特征和控制因素,以及全硫含量对沉积环境的响应和指示意义。龙潭组不同岩性烃源岩全硫含量差异明显,泥页岩全硫含量高,灰岩硫含量则很低。烃源岩全硫含量(*TS*)与其总有机碳含量(*TOC*)、黄铁矿含量、干酪根碳同位素之间具有较好的正相关性。龙潭组烃源岩全硫含量和 *TOC/TS* 值对其沉积环境具有明显的响应和指示意义。川中、川东南等地区海陆交互相环境下形成的龙潭组烃源岩硫含量极高,*TOC/TS* 值低;川东北地区台内凹陷、深水陆棚等环境下形成的烃源岩硫含量相对较高,*TOC/TS* 值较高;盆地边缘城口、南江、石柱等地区碳酸盐台地、浅水陆棚等环境下形成的低有机质丰度灰岩烃源岩全硫含量低,而 *TOC/TS* 值高。

关键词:全硫含量;沉积环境;烃源岩;龙潭组;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Total sulfur distribution of source rock of the Upper Permian Longtan Formation and its response to sedimentary environment in Sichuan Basin

Fu Xiaodong^{1,2}, Qiu Nansheng¹, Qin Jianzhong³, Tenger³, Liu Wenhui³, Wang Xiaofang²

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Hangzhou Research Institute of Geology,

PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology,

Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: Based on the systematic analysis of Total Sulfur content (*TS*) of source rock from the Upper Permian Longtan Formation (LTF) in Sichuan Basin, this paper studied the distribution feature of *TS*, its controlling factors as well as its responses to and significance as a indicator for sedimentary environment. Shale source rock of LTF is rich in sulfur, but limestone is poor in sulfur. *TS* has positive correlations with *TOC*, pyrites content and $\delta^{13}\text{C}$ value of kerogen respectively. The *TS* and *TOC/TS* value of source rock have distinct responses to and significance as indicators for the sedimentary environment. Source rocks of LTF in paralic facies in middle and southern Sichuan Basin has high *TS* and low *TOC/TS* value. Source rocks in intra-platform sag or deep-water shelf facies in northeastern Sichuan Basin has relatively higher *TS* and *TOC/TS* value. And limestone in carbonate platform or shallow-water carbonate shelf facies in Chengkou, Nanjiang, Shizhu areas located at the edge of Sichuan Basin has low *TS* and high *TOC/TS* value.

Key words: total sulfur, sedimentary environment, source rock, Longtan Formation, Sichuan Basin

四川盆地川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层中相继发现多个大中型高含硫气藏^[1-11],上二叠统龙潭组(吴家坪组)烃源岩是这些气藏的主力气源之一^[1-4,12-15]。龙潭组烃源岩作为四川盆地一套重要的区域性烃源岩,其沉积环境变化频繁,导致烃源岩岩性组合、厚度分布、有机地化特征等在纵、横向上显示出强烈的差异性^[16-18]。前人对四川盆地龙潭组烃源岩有机地化特征已进行了大量研究^[12-14],但针对龙潭组烃源岩中的全硫

含量(*TS*)特征及分布研究较少,文中系统分析了龙潭组烃源岩全硫含量,研究其分布特征、控制因素,探讨了烃源岩硫含量对沉积环境的响应和指示意义。

1 样品与实验分析

晚二叠世龙潭期是四川盆地烃源岩发育的重要时期之一,海陆交互相沉积的以碎屑岩为主的含煤地层

收稿日期:2013-08-10;修订日期:2014-05-19。

第一作者简介:付小东(1980—),男,博士研究生,石油地质、油气地球化学。E-mail: fuxd_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2012CB214801);石油化工联合基金项目(40839910)。

表1 四川盆地龙潭组烃源岩全硫含量
Table 1 TS of the Longtan Formation
source rock in Sichuan Basin

剖面		烃源岩 岩性	全硫含量分布 范围/%	均值/ %	样品数/ 个
类型	名称				
钻井	普光5井	泥质岩	0.40~1.38	0.78	13
		灰岩	0.02~0.62	0.18	7
	毛坝3井	泥质岩	0.139~1.099	0.52	15
		灰岩	0.029~0.566	0.14	12
	河坝1井	泥质岩	0.28~2.63	0.98	14
	元坝3井	泥质岩	0.41~0.87	0.61	3
		灰岩	0.05~0.65	0.41	3
	龙8井	泥质岩	0.36~5.79	2.63	16
		灰岩	0.23~0.31	0.27	2
		煤	1.69	1.69	1
	浅8-3井	泥质岩	0.54~9.89	2.68	10
		灰岩	0.02~3.37	0.56	11
	浅10-3	泥质岩	0.05~7.06	1.88	23
		灰岩	0.01~4.49	0.52	26
	浅10-6	泥质岩	0.13~10.45	3.98	21
		灰岩	0.01~4.99	0.57	24
	丁山1井	泥质岩	0.13~6.95	2.26	9
露头	绵竹天池	泥质岩	0.04~6.67	2.51	3
		硅质岩	0.03~0.60	0.32	2
		灰岩	0.01~0.41	0.08	21
	城口木瓜	硅质岩	0.05~0.19	0.13	3
		灰岩	0.01~1.05	0.15	9
	南江桥亭	泥质岩	0.09~0.44	0.21	4
		硅质岩	0.14~0.40	0.27	3
		灰岩	0.04~0.71	0.30	8
	石柱六塘	泥质岩	0.03~0.11	0.07	6
		灰岩	0.03~0.33	0.23	4
	华蓥山	煤	4.56~5.67	21.16	6
	重庆南川	煤	4.19	4.19	1
	万源白果	煤	6.34~10.88	8.61	2

高可达10%;3口浅井平均含量分别为1.57%、2.34%和1.15%。川东南地区丁山1井、南川三泉剖面硫含量更高,平均值分别为2.26%和3.98%。而鄂西利川地区龙8井龙潭组烃源岩硫含量平均也高达2.33%。总体来说,川中、川东南和鄂西利川地区,龙潭组烃源岩硫含量高;在川东北地区,龙潭组烃源岩硫含量较高;而盆地边缘城口、南江、绵竹和石柱等地区龙潭组烃源岩硫含量低。

3 龙潭组烃源岩全硫含量控制因素

3.1 岩性对全硫含量的控制

龙潭组不同岩性烃源岩全硫含量差异明显,泥质岩全硫含量明显较灰岩高,煤则主要为中高硫煤。泥页岩全硫含量分布在0.04%~10.45%,平均2.23%;其中约60%的样品在硫含量在1.0%以上。硅质烃源岩硫含量分布在0.05%~0.60%,平均0.26%。灰岩硫含量分布在0.02%~4.99%,平均0.51%,超过70%的灰岩硫含量低于0.50%。龙潭组煤全硫含量极高,分布在1.70%~21.70%,大多在5.00%以上,平均9.89%,远高于泥页岩和灰岩。与盆地内三叠系须家河组、侏罗系自流井组、千佛涯组等湖沼、河流相煤系烃源岩相比,龙潭组烃源岩全硫含量明显要高,陆相层系的197个泥页岩全硫含量在0.004%~1.87%,平均仅0.13%^[19]。

3.2 有机质丰度与硫含量的关系

龙潭组烃源岩在各剖面全硫含量与TOC之间总

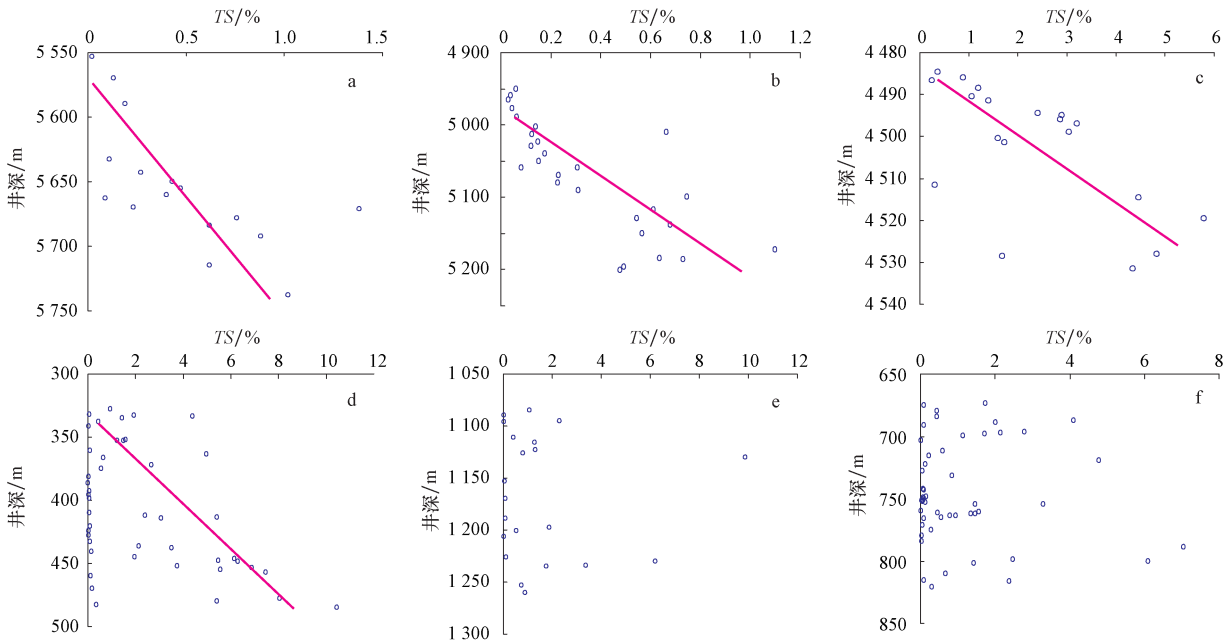


图2 四川盆地各剖面龙潭组烃源岩硫含量随深度变化

Fig. 2 TS vs. depth of LTF source rock in Sichuan Basin

a. 普光5井;b. 毛坝3井;c. 龙8井;d. 浅10-6井;e. 浅8-3井;f. 浅10-3井

体上都存在着较明显的正相关性(图3),表明烃源岩中硫的富集与沉积时有机质数量有关。这主要存在两方面的原因,一是烃源岩中的硫部分来自成烃生物自身所含的有机硫,有机质的富集同时导致硫的富集,如湘西地区牛蹄塘组黑色页岩中有机硫占全硫的百分比在1.84%~73.39%,平均可高达27%^[20]。另一方面,TOC与全硫同时受沉积环境的控制,缺氧的还原水体有利于有机质的保存,而硫酸盐的还原速率取决于可代谢的有机碳浓度^[21-23],因而有利于有机质保存的沉积环境下,有机质数量增加在沉积和成岩过程中可更多的从沉积水体中还原硫酸盐,从而导致烃源岩高TOC同时也富集硫。

3.3 含硫矿物与全硫含量的关系

黄铁矿在龙潭组烃源岩中较为普遍,全岩X-衍射分析的46块烃源岩样品中20块富含黄铁矿。黄铁矿占全岩矿物组成的百分比在0.5%~12.0%,大多在5.0%以下,平均约3.15%。在发现黄铁矿的不同岩性烃源岩中,黄铁矿含量与全硫含量之间都表现出较明显的正相关性(图4a),表明黄铁矿硫在全硫中占有较大比重,黑色页岩中黄铁矿硫可占全硫的40%左右^[20],说明烃源岩中黄铁矿硫对全硫有明显的影响。

石膏是海相地层中最主要的含硫矿物,但在烃源岩尤其是泥页岩中并非广泛存在。分析的46块样品

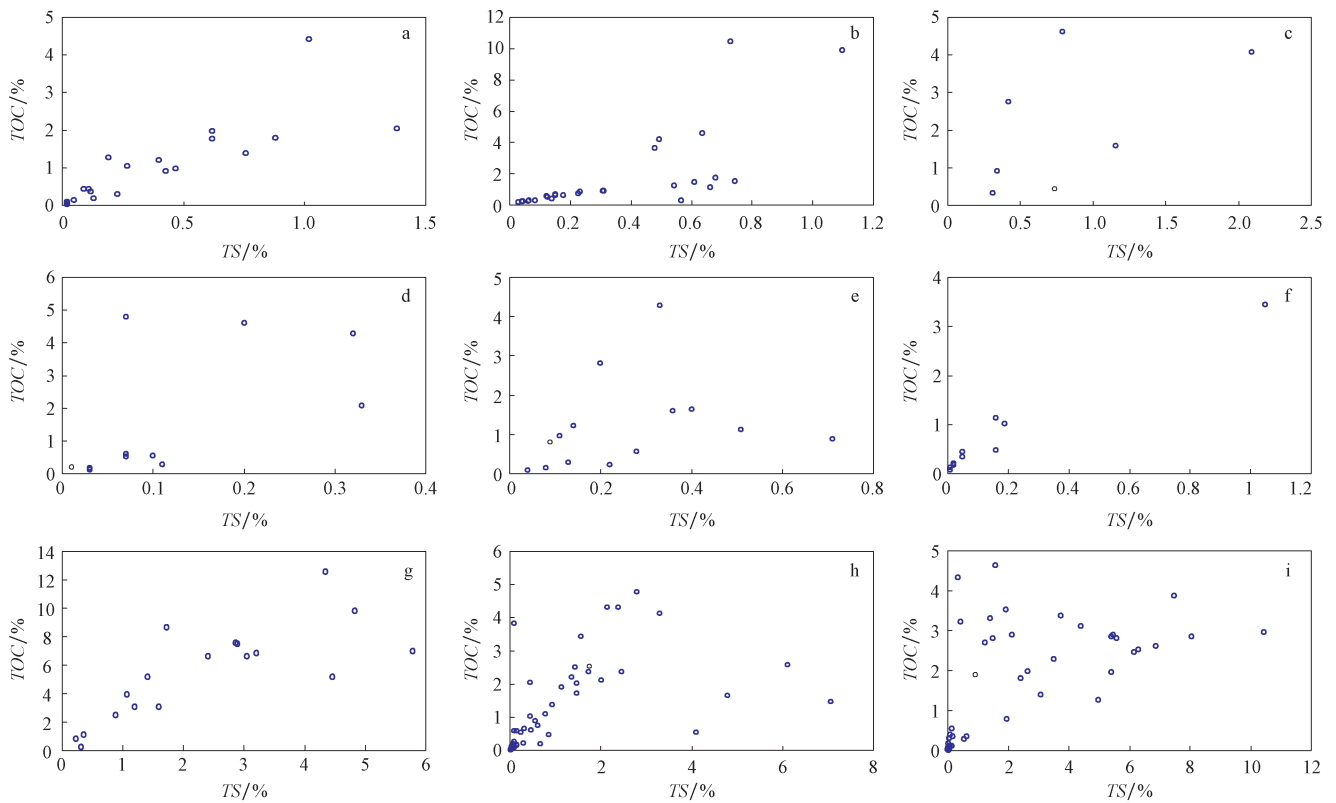


图3 四川盆地龙潭组烃源岩全硫含量分布及其与TOC关系

Fig. 3 TS distribution and its relationship with TOC of the Longtan Formation source rock in Sichuan Basin

a. 普光5井; b. 毛坝3井; c. 河坝1井; d. 石柱六塘; e. 南江桥亭; f. 城口木瓜; g. 龙8井; h. 浅10-3; i. 浅10-6

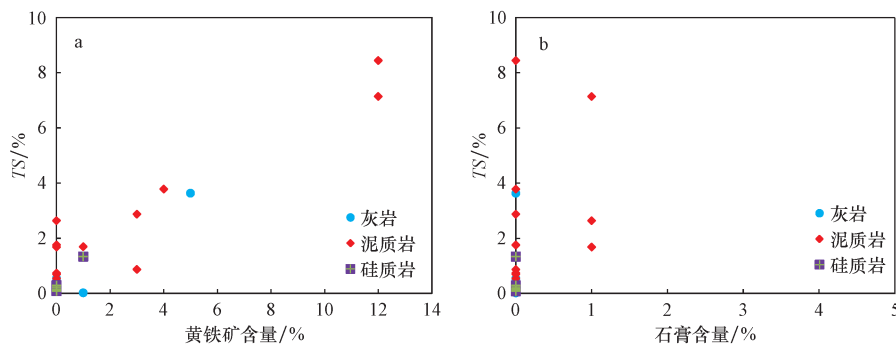


图4 四川盆地龙潭组烃源岩含硫矿物含量与全硫关系

Fig. 4 Sulfur-bearing mineral content vs. TS of the Longtan Formation source rock in Sichuan Basin

中仅数块检测出石膏,含量在 0.1% ~ 2.0%,平均在 0.91%。石膏含量与全硫含量之间相关性也不明显(图 4b),表明石膏硫对全硫的贡献不大。重晶石、芒硝等硫酸盐矿物在龙潭组烃源岩中十分少见,仅在 3 块样品中含有重晶石,芒硝则未检出。

3.4 干酪根碳同位素与全硫含量的关系

干酪根碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)含量是判别烃源岩有机质类型的良好指标,可在很大程度上反映烃源岩的形成环境和成烃生物类型。四川盆地龙潭组烃源岩硫含量与干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间具有较好的正相关性(图 5),干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值越重的烃源岩全硫含量越高,硫含量大于 3.0% 的有机质类型主要为 III 型干酪根,而 I 和 II 有机质的样品硫含量多在 1.5% 以下。可见,在有大量陆源有机质输入的沉积环境中形成的烃源岩,可能具有高的全硫含量。

4 龙潭组烃源岩全硫含量沉积环境响应

四川盆地龙潭组泥页岩烃源岩形成于海相和海陆交互环境,龙潭组海相、海陆交互环境的烃源岩与三叠系-侏罗系陆相烃源岩全硫含量差异;以及龙

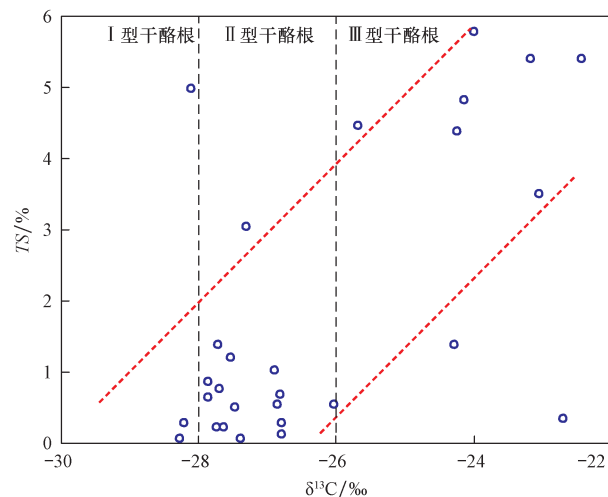


图 5 四川盆地龙潭组烃源岩硫含量与干酪根碳同位素值关系

Fig. 5 Sulfur content vs. $\delta^{13}\text{C}$ of the Longtan Formation source rock in Sichuan Basin

潭组不同岩性全硫差异;硫含量纵、横向分布的差异;全硫与 TOC 、干酪根碳同位素之间关系;都表明沉积环境对全硫含量具有重要控制作用,而硫含量则对烃源岩沉积环境具有明显的响应和指示作用(图 1,图 6)。同时有机碳含量与全硫的浓度比能较好的区分海水沉积和淡水沉积^[24],通常淡水沉积物的比值明显高于海相沉积物,龙潭组烃源岩与陆相烃源岩 TOC/TS 明显的体现了这一特点(图 7)。龙潭组烃源岩 TOC/TS 值多小于

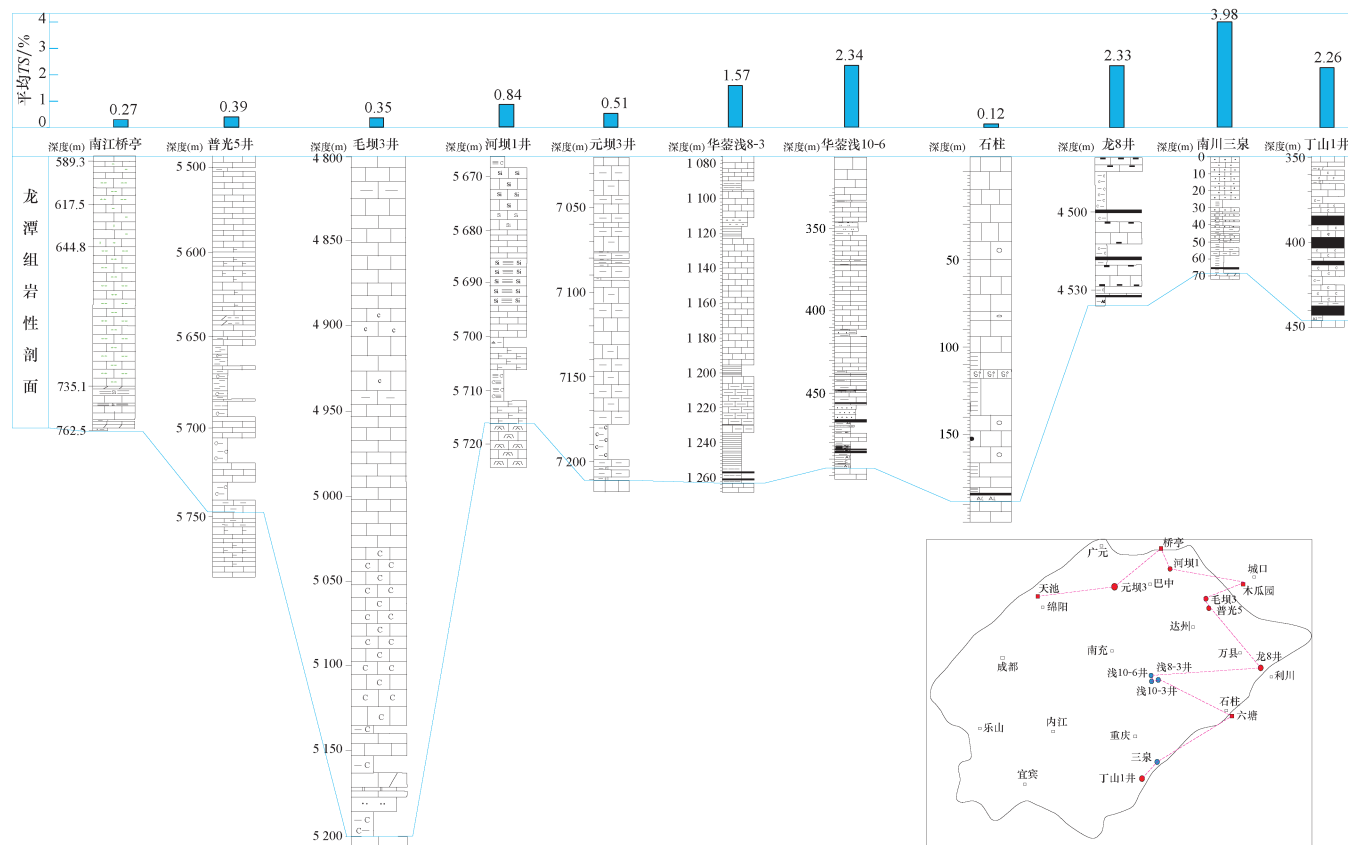


图 6 四川盆地龙潭组地层岩性对比

Fig. 6 Stratigraphic correlation of the Longtan Formation in Sichuan Basin

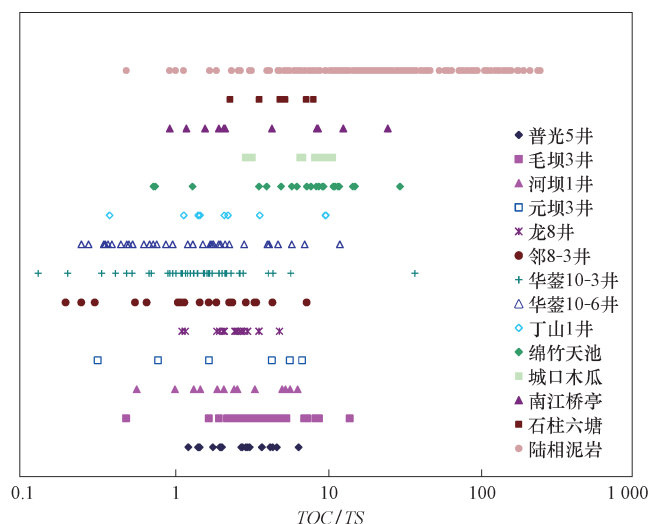


图7 四川盆地龙潭组烃源岩有机碳含量与全硫比值变化

Fig. 7 Variation of TOC/TS of the Longtan Formation source rock in Sichuan Basin

10, 平均仅 4.13; 陆相烃源岩 TOC/TS 值分布范围广, 且多大于 10, 平均 41.8, 明显大于龙潭组烃源岩。而各剖面龙潭组烃源岩由于具体沉积环境的差异, TOC/TS 值分布也存在一定差异(图 7)。

沉积物中硫的富集除与硫的供应有关外, 环境介质的 pH 值、Eh 值, 有机质的数量和类型, 细菌活动及金属离子的丰度都是其重要的影响因素^[21-23]。在海陆交互作用的沉积环境下, 海水的渗入可为沉积物提供丰富的硫源(SO_4^{2-} 离子), 淡水的输入则可带来丰富的金属离子和大量陆源有机质。海陆交互相沉积环境下沉积流体中的 SO_4^{2-} 离子可大量的被有机质和微生物还原成有机硫和矿物硫, 使硫在烃源岩中富集固定, 因此形成的烃源岩通常具高硫含量特征。川中华蓥山地区浅, 川东南丁山 1 井, 川东地区龙 8 井等剖面龙潭组在中、下部多发育较厚煤层, 上部虽煤层不发育, 但其泥页岩 $\delta^{13}C$ 值多重于 -25% , 总体上属于煤系烃源岩。主要形成于三角洲、潟湖、潮坪等环境, 硫含量均值都在 1.0% 以上, 明显高于其他地区(图 1, 图 6)。同时烃源岩还具有 TOC/TS 值小, 分布范围较广的特征, TOC/TS 值主要在 0.1 ~ 10(图 7)。滨岸沼泽、三角洲、潮坪、海湾、潟湖等具体环境由于受海水和淡水影响程度的不同, 可造成煤系烃源岩中硫富集程度差异^[25-26], 通常受海水影响强烈的煤系烃源岩较淡水作用为主的煤系烃源岩全硫含量高^[23]。

台内凹陷、深水陆棚等沉积环境由于沉积水体较深, 水动力条件弱, 属于静海环境, 海底沉积物处于缺氧的还原条件, 使得有机质可以大量的保存。同时海水中的硫酸盐又可源源不断地渗透进入沉积物, 因而是一种相对硫酸盐开放的体系^[27], 在沉积过程中, 流体中的硫酸盐被大量的有机质和微生物还原从而使硫

被固定在沉积物中并富集。因此该类沉积环境下形成的烃源岩则具有较高的全硫含量和 TOC/TS 值, 日本海全新世以来沉积物硫含量介于 0.4% ~ 2.0%, 硫含量与深度呈正相关性^[28], 可能正反映了烃源岩在沉积和成岩早期阶段硫富集的时间效应。川东北地区普光 5、毛坝 3、河坝 1、元坝 3 井剖面龙潭组以泥质灰岩, 碳质泥岩、页岩, 泥灰岩和碳屑灰岩等为煤层不发育, 沉积环境即以台内凹陷或台内盆地为主^[12-13], 烃源岩硫含量较高, 平均值基本在 0.3% 以上(图 1, 图 6)。且该类沉积环境形成的烃源岩 TOC/S 值也相对较高, 分布范围相对较窄, 主要为 1 ~ 10(图 7)。

碳酸盐台地、浅水碳酸岩陆棚等环境形成的低 TOC 灰岩类烃源岩常具有低全硫含量和高 TOC/TS 值。这类环境水动力条件较强, 沉积界面处于氧化还原界面之上, 有机质不容易保存; 而以化学沉淀为主的沉积方式也使沉积物中活性金属离子缺乏。因沉积物中有机质和活性金属离子匮乏, 水体中的硫酸盐难以被还原而固定在沉积物中, 导致这类沉积环境下形成的灰岩烃源岩有机碳含量低, 总硫含量很低。盆地边缘的南江桥亭、城口木瓜和绵竹天池等剖面龙潭组泥页岩不发育, 主要形成于碳酸岩台地环境, 烃源岩主要为低 TOC 灰岩, 其全硫含量基本在 0.3% 以下(图 1, 图 6), 但 TOC/TS 值相对较高, 主要为 1 ~ 50(图 7)。

5 结论

1) 四川盆地龙潭组烃源岩硫含量纵、横向分布具明显差异性。纵向上从下段至中上段烃源岩全硫含量明显降低。横向上, 川中、川东南等地区龙潭组烃源岩全硫含量高, 均值多在 1.0% 以上; 川东北达州—巴中一带龙潭组烃源岩硫含量较高, 均值多在 0.3% 以上; 盆地边缘城口、南江、绵竹等地区龙潭组烃源岩硫含量低, 均值多在 0.3% 以下。

2) 龙潭组不同岩性烃源岩硫含量差异明显, 泥页岩和煤中硫含量明显高于灰岩。全硫含量与 TOC 、黄铁矿含量间具有较好的正相关性; 烃源岩全硫含量与干酪根碳同位素 $\delta^{13}C$ 值间也具有较明显相关性, 表明全硫含量受沉积环境影响明显。

3) 沉积环境是烃源岩硫含量的重要控制因素, 全硫含量与 TOC/TS 值对沉积环境具有较明显的响应和指示意义。海相和海陆交互相泥页岩全硫含量远高于陆相泥页岩; 海陆交互相环境下形成的烃源岩硫含量高, TOC/TS 值低, 分布范围广; 台内凹陷、深水陆棚等环境下形成的烃源岩, 硫含量相对较高, TOC/TS 值较高。碳酸盐台地、浅水陆棚等环境下形成的烃源岩, 硫含量值低而 TOC/TS 值高。

致谢:感谢中国石化勘探南方分公司、江汉油田分公司、四川省煤田地质工程勘察设计院等单位在样品采集方面提供的支持。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,李国雄,等.四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J].地质学报,2005,79(6):43-47.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Guoxiong, et al. Basic characteristics and concentration of the Puguang gas field in the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 43-47.
- [2] 马永生,蔡勋育.四川盆地川东北区二叠系-三叠系天然气勘探成果与前景展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):741-750.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu. Exploration achievements and prospects of the Permian-Triassic natural gas in northeastern Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 741-750.
- [3] 张水昌,朱光有,陈建平,等.四川盆地川东北部飞仙关组高含硫化氢大型气藏群气源探讨[J].科学通报,2007,52(增):85-94.
Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Chen Jianping, et al. The discussion on gas source of gas field group with high H₂S content in Feixianguan formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S0): 85-94.
- [4] 刘文汇,腾格尔,高波,等.四川盆地大中型天然气田(藏)中H₂S形成及富集机制[J].石油勘探与开发,2010,37(5):513-520.
Liu Wenhui, Tengger, Gao Bo, et al. H₂S formation and enrichment mechanism in medium to large scale natural gas fields (reservoirs) in Sichuan Basin[J]. Petroleum exploration and Development, 2010, 37(5): 513-520.
- [5] Cai Chunfang, Worden R H, Bottrell S H, et al. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China[J]. Chemical Geology, 2003, 202: 39-57.
- [6] 王一刚,窦立荣,文应初,等.四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏H₂S成因研究[J].地球化学,2002,31(6):517-524.
Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu, et al. Origin of H₂S in Triassic Feixianguan Formation gas pools, Northeastern Sichuan Basin, China[J]. Geochimica, 2002, 31(6): 517-524.
- [7] 张俊,蔡镏璐,向雷,等.川东北地区飞仙关组成岩晚期白云石溶解作用[J].石油与天然气地质,2012,33(4):599-606.
Zhang Jun, Cai Liulu, Xiang Lei, et al. Late diagenetic dissolution of dolomites in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 599-606.
- [8] 朱光有,张水昌,梁英波.四川盆地H₂S的硫同位素组成及其成因探讨[J].地球化学,2006,35(4):432-442.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Stable sulfur isotopic composition of hydrogen sulfide and its genesis in Sichuan basin[J]. Geochimica, 2006, 35(4): 432-442.
- [9] 杨莹莹,李国蓉,邓勇.川东北开江-梁平陆棚两侧飞仙关组储层特征[J].石油与天然气地质,2012,33(5):736-742.
Yang Yingying, Li Guorong and Deng Yong. Reservoir characteristics of the Feixianguan Formation in Kaijiang-Liangping continental shelf flanks, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 736-742.
- [10] 汪泽成,赵文智,胡素云,等.我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J].石油与天然气地质,2013,34(2):153-160.
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, et al. Reservoir types and distribution characteristics of large marine carbonate oil and gas fields in China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 153-160.
- [11] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一):南方四套区域性海相烃源岩的分布[J].海相油气地质,2008,13(2):1-16.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 1): distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1-16.
- [12] 秦建中,付小东,腾格尔.川东北宣汉-达县地区三叠-志留系海相优质烃源层评价[J].石油实验地质,2008,30(4):367-374.
Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, Teng. Evaluation of The Excellent Triassic To Silurian marine hydrocarbon source rocks in XuanHan-Daxian Area of Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum geology & Experiment, 2008, 30(4): 367-374.
- [13] 腾格尔,秦建中,付小东.川东北地区上二叠统吴家坪组烃源岩评价[J].古地理学报,2010,12(3):334-344.
Teng, Qin Jianzhong, Fu Xiaodong. Hydrocarbon source rocks evaluation of the Upper Permian Wujiaping Formation in northeastern Sichuan area[J]. Journal Of Palaeogeography, 2010, 12(3): 334-344.
- [14] 刘全有,金之钧,高波,等.四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力[J].石油与天然气地质,2012,33(1):10-18.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 10-18.
- [15] 蔡勋育,朱扬明,黄仁春.普光气田沥青地球化学特征及成因[J].石油与天然气地质,2006,27(3):340-346.
Cai Xunyu, Zhu Yangming, Huang Renchun. Geochemical behaviors and origin of reservoir bitumen in Puguang gas pool[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 340-346.
- [16] 黄大瑞,蔡忠贤,朱扬明.川东北龙潭(吴家坪)组沉积相与烃源岩发育[J].海洋石油,2007,27(3):57-63.
Huang Darui, Cai Zhongxian, Zhu Yangming. The sedimentary setting and the source rock of Longtan (Wujiaping) strata in the northeastern Sichuan Basin[J]. Offshore Oil, 2007, 27(3): 57-63.
- [17] 刘喜停,马志鑫,颜佳新.扬子地区晚二叠世吴家坪组沉积环境及烃源岩发育的控制因素[J].古地理学报,2010,12(2):245-251.
Liu Xiting, Ma Zhixin, Yan Jiayi. Sedimentary environments and controlling factors of hydrocarbon source rocks of the Late Permian Wujiaping Age in Yangtze area[J]. Journal Of Palaeogeography, 2010, 12(2): 245-251.
- [18] 田雨,张兴阳,何幼斌,等.四川盆地晚二叠世吴家坪组岩相古地理[J].古地理学报,2010,12(2):164-175.
Tian Yu, Zhang Xingyang, He Youbin. Lithofacies palaeogeography of the Late Permian Wujiaping Age of Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(2): 164-175.
- [19] 付小东,邱楠生,秦建中,等.中上扬子区海相层系烃源岩硫含量分布与硫同位素组成特征[J].石油实验地质,2013,35(5):545-551.
Fu Xiaodong, Qiu Nansheng, Qin Jianzhong, et al. Content distribution

- and isotopic composition characteristics of sulfur in marine source rocks in Middle-Upper Yangtze region[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 98–107.
- [20] 吴朝东, 曾凡刚, 雷家锦. 湘西黑色页岩多种形态硫的分离与同位素指示意义[J]. *科学通报*, 1999, 44(6): 661–664.
- Wu Chaodong, Zeng Fangang, Lei Jiajin. The separation and isotopic indicating significance of sulfur with different forms in black shales in the Xiangxi area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 661–664.
- [21] Berner R A. Sedimentary pyrite formation[J]. *American Journal of Science*, 1970, 268(1): 1–23.
- [22] Westrich J T, Berner R A. The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: the G-model Tested[J]. *Limnology and oceanography*, 1984, 29(2): 236–249.
- [23] White D. The relationship between the sulfur content and the sedimentary environment of Illinois Coal[J]. *US Bureau of Mines Bulletin*, 1913, 38: 52–84.
- [24] 寺岛滋, 米谷宏, 松本英二, 等著; 杨锡章, 译. 现代沉积物中硫、碳含量及其与沉积环境的关系[J]. *地质调查所月报*, 1983, 34(7): 361–381.
- [25] 濮英英, 雷加锦, 王运泉. 聚煤环境对煤岩中形态硫赋存的影响[J]. *岩石学报*, 1995, 11(4): 462–470.
- Pu Yingying, Lei Jiajin, Wang Yunquan. The Influence of sedimentary environment on distribution of sulfur species in coal[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(4): 462–470.
- [26] 雷加锦, 任德贻, 韩德馨. 不同沉积环境成因煤显微组分的有机硫分布[J]. *煤田地质与勘探*, 1995, 23(5): 14–18.
- Lei Jiajin, Ren Deyi, Han Dexin. The Distribution of Organosulfur In macerals of coals accumulated in different environments[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1995, 23(5): 14–18.
- [27] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 科学出版社, 2000: 218–244.
- Zheng Yongfei, Cheng Jiangfeng. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Science Press, 2000: 218–244.
- [28] 邹建军, 石学法, 刘焱光, 等. 48ka 以来日本海古生产力和古氧化还原环境变化的地球化学记录[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 98–107.
- Zou Jianjun, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. The geochemical records of paleoproductivity and paleoredox in the Sea of Japan since 48 ka[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 98–107.

(编辑 高岩)

(上接第316页)

- [10] 胡明毅, 沈娇. 西湖凹陷平湖构造带平湖组储层特征及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 185–191.
- Hu Mingyi, Shen Jiao. Reservoir characteristic and its main controlling factors of Pinghu formation in Pinghu structural belt, Xihu Depression. [J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(2): 185–191.
- [11] 孙玉梅, 李友川, 黄正吉. 部分近海湖相烃源岩有机质异常碳同位素组成[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(5): 609–616.
- Sun Yumei, Li Youchuan, Huang Zhengji. Abnormal carbon isotopic compositions in organic matter of lacustrine source rocks close to sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(5): 609–616.
- [12] 黄第藩. 陆相烃源岩有机质中碳同位素组成特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 1993, 7(4): 1–5.
- Huang Difan. Distributive characteristics of carbon isotope composition in organic matters of continental source rocks[J]. *China offshore Oil and Gas(geology)*, 1993, 7(4): 1–5.
- [13] 张迎朝, 陈志宏. 珠江口盆地文昌 B 凹陷及周边油气成藏特征与有利勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(3): 297–301.
- Zhang Yingzhao, Chen zhihong. Petroleum accumulation characteristics and favorable exploration directions in Wenchang B Sag and its surrounding areas in Pearl River Mouth Basin. [J]. *Petroleum Experimental Geology*, 2011, 33(3): 297–301.
- [14] 郭小文, 何生, 施和生, 等. 番禺低隆起 PY30–1 构造热流体活动及油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 297–303.
- Guo Xiaowen, He Sheng, Shi Hesheng, et al. Hot fluid activities and hydrocarbon accumulation in the PY30–1 structure of Panyu low uplift, Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 297–303.
- [15] Magara K. Compaction and fluid migration, development in petroleum geology[M]. London: Elsevier Applied Science Publisher Ltd. 1977.
- [16] Levorsen A I. Geology of petroleum[M]. San Francisco: W H Freeman. 1956.
- [17] 张迎朝, 李绪深. 珠江口盆地西部油气成藏组合和成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 108–113.
- Zhang Yingzhao, Li Xushen. Hydrocarbon playsand accumulation mode in the western of Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 108–113.
- [18] 谢玉洪. 珠江口盆地西部新近系海相低阻轻质油田的发现[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(5): 16–22.
- Xie Yuhong. The new finding of Neogene marine low-resitivity light Oil Field in the western part of the Pearl River Mouth Basin. [J]. *China engineering science*, 2011, 13(5): 16–22.
- [19] 蒋有录, 卢浩, 刘华, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点及主控因素[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 793–794.
- Jiang Youlu, Lu Hao, Liu Hua, et al. Enrichment characteristics and major controlling factors of hydrocarbon in the Neogene of Raoyang Depression, Bohai bay basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 793–794.
- [20] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. *石油学报*, 2001, 22(2): 1–7.
- Gong Zaisheng, Wang Guochun. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai sea[J]. *Acta Petrolei Sinica* 2001, 22(2): 1–7.

(编辑 高岩)