

# 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征 及对有机质来源和沉积环境的指示意义

魏志福<sup>1</sup>, 王永莉<sup>1</sup>, 吴陈君<sup>1</sup>, 吴保祥<sup>1</sup>, 孙则鹏<sup>1</sup>, 李生喜<sup>2</sup>, 魏威<sup>2</sup>

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省地矿局第二地勘院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**通过对四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩典型剖面样品的地球化学分析,从 TOC 含量、TOS 含量、生物标志化合物特征等方面讨论四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩地球化学特征及意义。实验数据显示:四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩 TOC 含量、TOS 含量在剖面上变化幅度较大,表现出明显的非均质性;上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩中正构烷烃主要呈现单峰型,高碳数正构烷烃相对丰度较高,姥鲛烷优势明显;而页岩样品以双峰型为主,低碳数峰群主碳集中在  $nC_{17}$ ,而高碳数峰群以  $nC_{25}$  或  $nC_{27}$  为主碳峰,具明显植烷优势。这些实验结果表明龙潭组页岩母质来源主要为低等水生生物和陆源高等植物,而龙潭组煤和炭质泥岩以陆源有机质输入为主,在母质来源特征上与龙潭组页岩具有很大的差别。

**关键词:**页岩;地球化学特征;上二叠统龙潭组;四川盆地

**中图分类号:** TE122.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-1926(2015)08-1613-06

**引用格式:** Wei Zhifu, Wang Yongli, Wu Chenjun, *et al.* Geochemical characteristics of source rock from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1613-1618. [魏志福, 王永莉, 吴陈君, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征及对有机质来源和沉积环境的指示意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1613-1618.]

## 0 引言

随着美国“页岩气革命”的成功,页岩气逐渐地引起了广泛的关注,其巨大的资源量和经济效益得到各国政府的重视<sup>[1]</sup>。四川盆地富有机质页岩丰富,区域性富有机质页岩有 6 套,自下而上分别是:上震旦统陡山沱组、下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、上二叠统龙潭组、上三叠统须家河组及下侏罗统自流井组(一沙溪庙组)<sup>[2]</sup>。目前,已在寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组实现了页岩气勘探开发战略性突破,特别是 2014 年在涪陵焦石坝龙马溪组探明了中国

首个千亿立方米大型页岩气田,成为中国页岩气勘探开发历史性转折点,掀起了中国页岩气勘探开发新的高潮。

四川盆地上二叠统龙潭组是一套海陆过渡相含煤铁沉积,深灰色、灰黑色泥页岩、岩屑砂岩夹煤层发育,含黄铁矿结核,有时夹石灰岩、硅质岩薄层或透镜体。厚度介于 20~125m 之间,TOC>2% 的页岩厚度介于 20~52m 之间,有机质类型以 III 型为主,有机质热成熟度达 1.0%~3.0%,处在生气高峰期,石英、黏土矿物含量较高,页岩可压裂性较海相相差,总体上有利于成气且多与煤层、致密砂岩呈互层,利于形成页岩气藏<sup>[3-6]</sup>。然而,目前为止,对龙潭

收稿日期:2015-04-28;修回日期:2015-06-03.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(编号:2012CB214701);中国科学院战略性先导科技专项(编号:XDB10030404);中国科学院“西部之光”人才培养计划项目和中国科学院“西部之光”联合学者项目联合资助。

作者简介:魏志福(1985-),男,甘肃会宁人,助理研究员,博士,主要从事油气/有机地球化学研究. E-mail: williamwei2011@hotmail.com.

通讯作者:王永莉(1969-),女,甘肃兰州人,研究员,博士生导师,主要从事有机地球化学和环境科学研究. E-mail: wyll6800@lzb.ac.cn.

组页岩的相关研究相对较少。笔者选取四川盆地上二叠统龙潭组泥页岩典型剖面的样品,从有机碳、硫含量及生物标志化合物特征等方面讨论四川盆地上二叠统龙潭组页岩地球化学特征,以期为四川盆地上二叠统有机质的来源和沉积环境提供科学依据。

## 1 研究区域地质特征

四川盆地位于扬子地台西北缘,呈北东向菱形展布,盆地周边为环绕盆地的相连山脉<sup>[7]</sup>。自古生代至中、新生代以来,四川盆地经过复杂的地质构造过程,完成了克拉通盆地到前陆盆地的演化,是一个海陆相复杂叠合的盆地<sup>[1,8]</sup>。四川盆地上二叠统包括龙潭组和大隆组(图1),而龙潭组泥页岩在纵向分布上具有一定的规律,表现为灰岩、泥页岩与煤的互层。龙潭组烃源岩在四川盆地广泛发育,主要分布在川东、川南及川西南等地区,主要有资阳、宜宾和万县3个沉积中心<sup>[9]</sup>。页岩厚度较大,厚度介于20~120m之间,一般厚度都在50m,仅盆地南缘页岩厚度低于30m;有机质丰度高,TOC值为0.85%~

35.7%,平均为7.51%,有机质类型主要为Ⅲ型,热演化程度达高一过成熟( $R_o$ 值为1.95%~2.4%,平均为2.22%),利于干气生成;页岩中富含脆性矿物和黏土,微米级孔隙比较发育,利于吸附气赋存。与成功勘探开发页岩气的北美页岩相比,四川盆地上二叠统龙潭组页岩有利于干气的生成及赋存,结合张吉振等<sup>[10]</sup>研究,认为泸州—自贡—宜宾、女基井—潼南—高科井2个区块为页岩气富集有利区。

## 2 样品与实验

### 2.1 研究样品

研究样品采自广元地区和华蓥市华蓥山上二叠统龙潭组( $P_3l$ )露头剖面(图1)。野外观测显示龙潭组主要为一套含煤和含有机质为主的碎屑岩岩性组合,是重要的潜在页岩气烃源岩发育层段,详细岩性描述见表1。系统采集广元剖面和华蓥山剖面相关实验测试样品30件。样品相关分析在中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室完成。

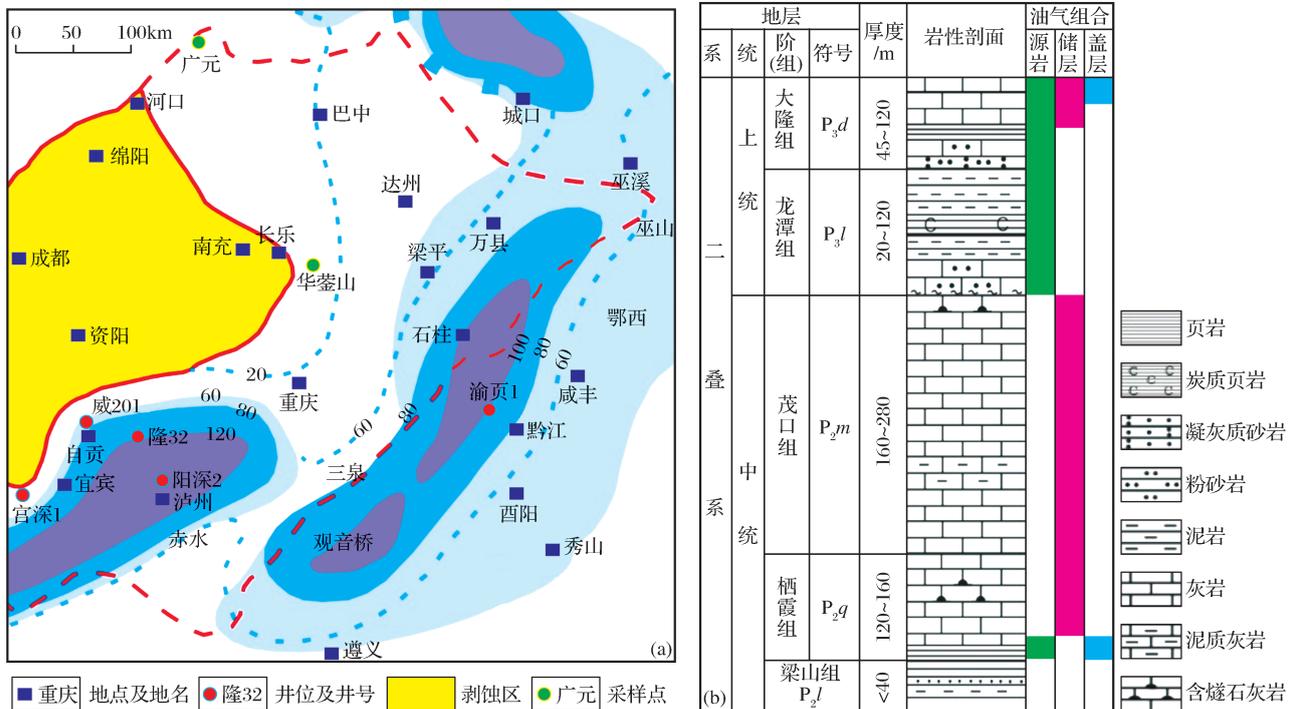


图1 样品采集位置(a)及四川盆地二叠系柱状图(b)

Fig. 1 Sampling locations and Permian System column in Sichuan Basin

### 2.2 实验方法

样品磨碎至100目,用索氏抽提法萃取烃源岩中的可溶有机组分后,用正己烷脱去氯仿沥青“A”中的沥青质,然后采用硅胶—氧化铝柱色谱分离法,

把脱沥青质沥青分离为饱和烃、芳烃和非烃。

总有机碳和总有机硫分析采用LECO公司的碳—硫分析仪(CS-344),气相色谱—质谱联用仪型号为HP6890GC/5973MS,美国惠普公司产品,用

于分析生物标志化合物。

色谱条件: HP-5MS 石英毛细管柱 (30m × 0.25mm × 0.25μm), 柱始温 80℃, 以 3℃/min 速率程序升温至 300℃, 终温恒定 30min, 进样口温度为 300℃, 载气为氦气。

质谱条件: 离子源为 EI, 电离能量为 70eV, 离子源温度为 230℃, GC-MS 接口温度为 280℃。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 有机碳含量垂向的非均质性

上二叠统龙潭组样品的总有机碳数据列于表 1, 广元地区泥页岩有机碳含量变化幅度较大, 灰色页岩有机碳含量分布在 0.05%~0.93% 之间; 黑色炭质泥岩有机碳含量较高, 分布在 2.31%~21% 之间; 煤样有机碳含量分别在 37.5%~73.6% 之间, 煤、炭质泥岩互层发育; 华莹山剖面炭质泥岩有机碳含量分布在 0.3%~17.1% 之间, 2 块煤样有机碳含量分别为 31.3% 和 35.7%, 有机碳含量垂向的非均质性比较明显。

表 1 上二叠统龙潭组烃源岩样品有机碳含量

Table 1 The total organic carbon content of source rock samples from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin

广元地区	岩性	TOC/%	华莹山剖面	岩性	TOC/%
QC-2	煤	0.93	HYS-2	炭质泥岩	4.26
QC-3	灰质页岩	0.11	HYS-4	炭质泥岩	4.07
QC-4	灰质泥岩	2.13	HYS-6	炭质泥岩	7.47
QC-5	灰质页岩	0.09	HYS-8	煤	35.70
QC-6	灰质页岩	0.07	HYS-10-1	煤	31.30
QC-7	灰质页岩	0.08	HYS-10-2	炭质泥岩	2.18
QC-9	灰绿色泥岩	0.05	HYS-11	炭质泥岩	4.50
QC-10	炭质泥岩	21.00	HYS-13	炭质泥岩	3.44
QC-11-1	煤	30.90	HYS-15	炭质泥岩	0.37
QC-11-2	炭质泥岩	0.89	HYS-17	炭质泥岩	4.31
QC-14-1	煤	73.60	HYS-19	炭质泥岩	2.04
QC-14-2	炭质泥岩	2.51	HYS-21	炭质泥岩	4.48
QC-16-1	煤	37.50	HYS-23	炭质泥岩	2.97
QC-16-2	炭质泥岩	8.15	HYS-25	炭质泥岩	3.21
QC-17	灰色页岩	0.93	HYS-27	炭质泥岩	4.09

华莹山上二叠统龙潭组由于处于海陆过渡相带, 海平面的升降变化致使岩性在垂向分布上具有一定的规律性, 表现为灰岩、灰色泥岩、炭质泥岩以及煤的互层 (图 2)。由于岩性变化较大, 海平面频繁升降造成沉积环境变化明显, TOC 含量、TOS 含量在剖面上变化幅度较大, 表现出很强的非均质性。

通过 TOC—TOS 相关性 (图 2) 可以看出, 在上二叠系龙潭组沉积时期, 沉积相带变化明显, TOC > 5% 的煤、炭质泥岩主要分布在正常海相沉积—非海相沉积之间的区域, 指示了沉积时期水体盐度较低, 海水较浅, 大量淡水的输入稀释了水体硫酸盐, 导致浓度降低, TOS 含量较低; TOC < 5% 的泥页岩可分别形成于正常海相、沼泽相 (正常海相与非海相之间)、以及

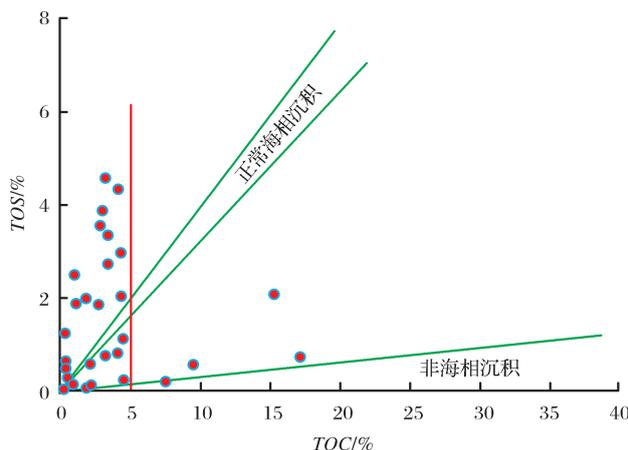
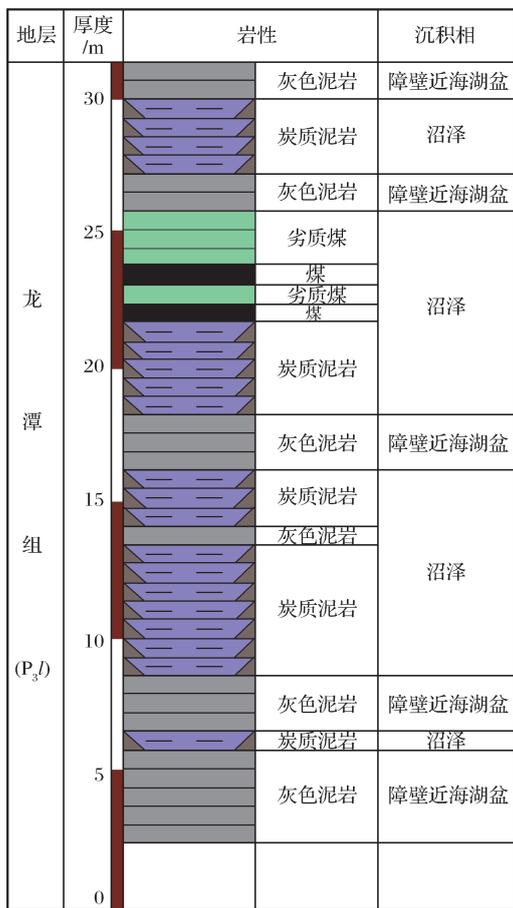


图 2 华莹山上二叠统龙潭组剖面上 TOC 含量与 TOS 含量相关性

Fig. 2 TOC and TOS content correlation of source rock samples from Upper Permian Longtan Formation in Huayingshan

还原的静水海相沉积环境(在正常海之上)。

### 3.2 生物标志化合物特征

#### 3.2.1 正构烷烃

烃源岩中正构烷烃的分布特征常被用来揭示母质来源,一般认为低碳数正构烷烃与低等水生生物、藻类以及细菌来源有关,高碳数正构烷烃主要来源于高等植物<sup>[11]</sup>。

图3可见,上二叠统龙潭组烃源岩正构烷烃碳数主要分布在14~33之间。煤和炭质泥岩样品峰型主要为单峰型,主碳峰集中在 $nC_{25}$ 或 $nC_{27}$ ,高碳数正构烷烃的相对丰度较高;而页岩样品以双峰型为主,低碳数峰群主碳峰集中在 $nC_{17}$ ,而高碳数峰群以 $nC_{25}$ 或 $nC_{27}$ 为主碳峰,峰型上与龙潭组煤、炭质泥岩有明显差异,表明母质来源输入有所不同。因此,上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩母质来源主要是高等植物,而龙潭组页岩为低等水生生物和陆源

高等植物混合来源。此外,龙潭组灰质页岩和炭质泥岩具有较明显的奇偶优势(OEP>1),而龙潭组煤OEP=1(表2),表明龙潭组煤的成熟度较高,而灰质页岩和炭质泥岩成熟度较低,这与前人统计的有机质热成熟度达1.0%~3.0%有一定的差异,可能是露头样品和井下岩心的样品之间存在一定的差异而造成。

#### 3.2.2 类异戊二烯烷烃

姥姣烷/植烷(Pr/Ph)值常被用于指示氧化还原环境,高Pr/Ph值(>3.0)反映了氧化条件下陆源有机质的输入,低Pr/Ph值(<1.0)反映典型的还原沉积环境<sup>[12-13]</sup>。

龙潭组煤和炭质泥岩样品表现明显的姥姣烷对植烷优势(表2),Pr/Ph平均值大于3.0,为典型的煤系地层有机质Pr/Ph值分布特征,反映氧化—强氧化的沉积环境,表明有机质类型为氧化环境下的

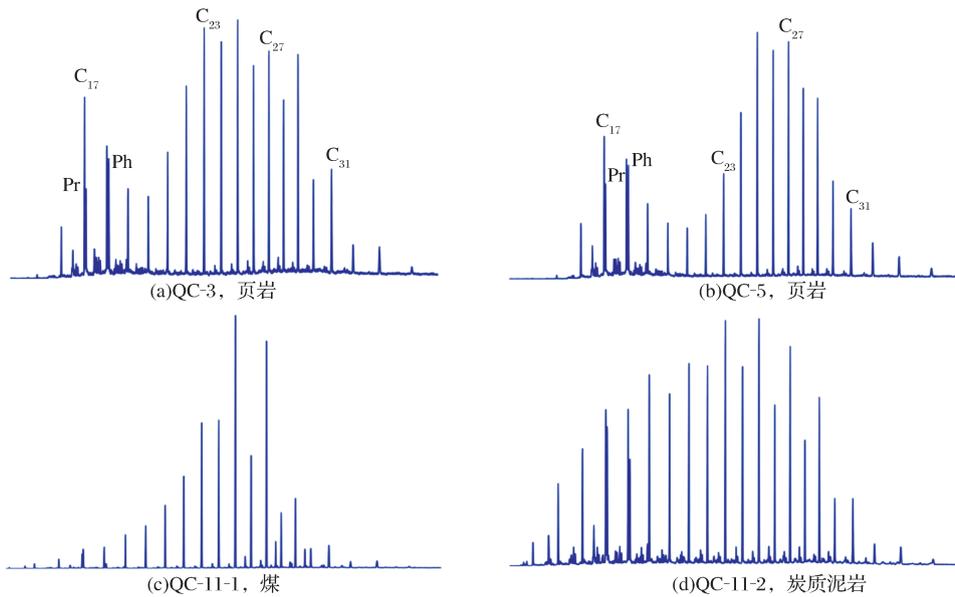


图3 上二叠统龙潭组烃源岩样品  $m/z$  85 质量色谱

Fig. 3 The  $m/z$  85 mass chromatograms of source rock samples from Upper Permian Longtan Formation

表2 上二叠统龙潭组烃源岩样品生物标志化合物参数

Table 2 The biomarker compound parameters of source rock samples from Upper Permian Longtan Formation

样品	岩性	地层	峰型	主峰	$\Sigma C_{21-} / \Sigma C_{22+}$	OEP	Pr/Ph	Pr/C <sub>17</sub>	Ph/C <sub>18</sub>
QC-3	灰质页岩	P <sub>3</sub> l	双峰	$nC_{25}$	0.30	1.64	0.78	0.54	0.98
QC-4	灰质泥岩	P <sub>3</sub> l	双峰	$nC_{17}$	1.57	1.13	0.77	0.39	0.69
QC-7	灰质页岩	P <sub>3</sub> l	双峰	$nC_{27}$	0.31	1.21	0.55	0.73	1.06
QC-10	炭质页岩	P <sub>3</sub> l	单峰	$nC_{25}$	0.36	0.98	6.31	3.36	0.42
QC-11-1	煤	P <sub>3</sub> l	单峰	$nC_{25}$	0.15	1.00	4.59	1.70	0.25
QC-11-2	炭质泥岩	P <sub>3</sub> l	单峰	$nC_{25}$	0.60	1.16	1.29	0.96	0.79
QC-14-1	煤	P <sub>3</sub> l	单峰	$nC_{25}$	0.27	0.98	5.02	2.47	0.38
QC-14-2	炭质泥岩	P <sub>3</sub> l	单峰	$nC_{29}$	0.55	1.09	2.47	1.40	0.52

陆源有机质;而龙潭组页岩 Pr/Ph 值均小于 1.0,显示还原性的水体沉积环境。因此,二叠系龙潭组不同岩性组成的 Pr/Ph 值分布特征表明该时期海陆过渡相沉积环境变化。

研究表明,Pr/nC<sub>17</sub> 和 Ph/nC<sub>18</sub> 的交会图能在很大程度上较好地反映样品中有机质的母质类型、沉积环境的氧化还原性<sup>[14-15]</sup>。从图 4 可以看出,龙潭组煤样主要为陆源Ⅲ型有机质;炭质泥岩落在混合型区域,指示了海、陆相母质来源的混合型;龙潭组页岩为海相藻类Ⅱ型有机质。

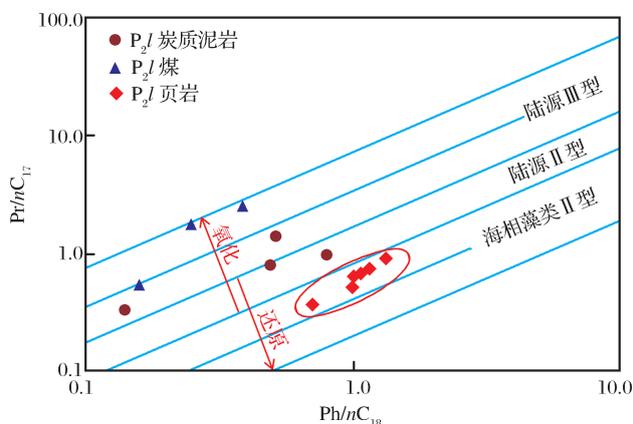


图 4 上二叠统龙潭组烃源岩样品  
Pr/nC<sub>17</sub>和 Ph/nC<sub>18</sub>关系

Fig. 4 The Pr/nC<sub>17</sub> and Ph/nC<sub>18</sub> diagram of source rock samples from Upper Permian Longtan Formation

## 4 结论

(1)四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩 TOC 含量、TOS 含量在剖面上变化幅度较大,表现出明显的非均质性。TOC>5%的煤、炭质泥岩在沉积时期水体盐度较低,海水较浅,大量淡水的输入稀释了水体硫酸盐,导致浓度降低,TOS 含量较低;TOC<5%的泥页岩可形成于正常海相、沼泽相以及还原的静水海相沉积环境。

(2)四川盆地上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩正构烷烃峰型主要为单峰型,主碳峰集中在 nC<sub>25</sub> 或 nC<sub>27</sub>,高碳数正构烷烃的相对丰度较高;而页岩样品以双峰型为主,低碳数峰群主碳峰集中在 nC<sub>17</sub>,而高碳数峰群以 nC<sub>25</sub> 或 nC<sub>27</sub> 为主碳峰,表明上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩母质来源主要是高等植物,而龙潭组页岩为低等水生生物和陆源高等植物混合来源。

(3)四川盆地上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩样品表现明显的姥鲛烷对植烷优势,为典型的煤系地

层有机质 Pr/Ph 值分布特征,反映氧化—强氧化的沉积环境,指示着氧化条件下陆源有机质的输入贡献;而龙潭组页岩的 Pr/Ph 值反映偏还原性的水体环境。而且,龙潭组煤样主要为陆源Ⅲ型有机质;炭质泥岩落在混合型区域,指示了海相、陆相母质来源的混合型;龙潭组页岩为海相藻类Ⅱ型有机质。

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Xiaolong, Li Yanfang, Lü Haigang, *et al.* Relationship between organic matter characteristics and depositional environment in the Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 851-856. [张小龙, 李艳芳, 吕海刚, 等. 四川盆地志留系龙马溪组有机质特征与沉积环境的关系[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 851-856.]
- [2] Dong Dazhong, Gao Shikui, Huang Jinliang, *et al.* A discussion on the shale gas exploration & development prospect [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1-15. [董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1-15.]
- [3] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, *et al.* Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [4] Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, *et al.* Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39. [邹才能, 董大忠, 杨桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.]
- [5] Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136. [贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.]
- [6] Li Xianqing, Zhao Pei, Sun Jie, *et al.* Study on the accumulation conditions of shale gas from the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2013, 38(5): 865-867. [李贤庆, 赵佩, 孙杰, 等. 川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 865-867.]
- [7] Wei Guoqi, Yang Wei, Xie Wuren, *et al.* Formation conditions, accumulation models and exploration direction of large gas fields in Sinian-Cambrian, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 785-795. [魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 四川盆地震旦系—寒武系大气田形成条件、成藏模式与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 785-795.]
- [8] Deng Kangling. Formation and evolution of Sichuan Basin and domains for oil and gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 1992, 12(5): 7-12. [邓康龄. 四川盆地形成演化与油气勘探领域[J]. 天然气工业, 1992, 12(5): 7-12.]
- [9] Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, *et al.* Characterization of gas

- pyrolysates from different types of permian source rocks in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(5): 700-704. [刘全有, 金之钧, 高波, 等. 四川盆地二叠系不同类型烃源岩生烃热模拟实验[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(5): 700-704.]
- [10] Zhang Jizhen, Li Xianqing, Liu Yang, *et al.* Longtan Formation shale gas reservoiring conditions and favorable region analysis in southern Sichuan area[J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(2): 1-6. [张吉振, 李贤庆, 刘洋, 等. 川南地区龙潭组页岩气成藏条件及有利区分析[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(2): 1-6.]
- [11] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: II. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 1-704.
- [12] Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xu Jiayou, *et al.* Application of biomarker compounds in assessment of paleo-environments of Chinese terrestrial sediments[J]. *Geochimica*, 1991, 20(1): 1-12. [傅家谟, 盛国英, 许家友, 等. 应用生物标志化合物参数判识古沉积环境[J]. *地球化学*, 1991, 20(1): 1-12.]
- [13] Powell T, Mckirdy D M. Relationship between ratio of pristane to phytane, crude oil composition and geological environments in Australia[J]. *Nature*, 1973, 243(12): 37-39.
- [14] Peters K E, Fraser T H, Amris W, *et al.* Geochemistry of crude oils from eastern Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(12): 1927-1942.
- [15] Hanson A D, Zhang S C, Moldowan J M, *et al.* Molecular organic geochemistry of the Tarim Basin, Northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(8): 1109-1128.

## Geochemical Characteristics of Source Rock from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin

WEI Zhi-fu<sup>1</sup>, WANG Yong-li<sup>1</sup>, WU Chen-jun<sup>1</sup>, WU Bao-xiang<sup>1</sup>, SUN Ze-peng<sup>1</sup>, LI Sheng-xi<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research,*

*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

*2. The 2nd Institute of Geology and Mineral Exploration, Lanzhou 730020, China)*

**Abstract:** Through geochemical analysis of core and outcrop source rocks from the Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin, organic matter type and redox depositional conditions were discussed through organic carbon and biomarker characteristics. The results show that the content of *TOC* and *TOS* has fluctuation in the profile, showing obvious heterogeneity. The *n*-alkanes in coal and carbonaceous mudstone of Upper Permian Longtan Formation are mainly unimodally distributed with relatively high abundance of high carbon number *n*-alkanes. However, the *n*-alkanes in shale of Upper Permian Longtan Formation are mainly bimodally distributed with phytanic advantage, and the main peak of the front mode was at *nC*<sub>17</sub>, in contrast, the main peak of the back mode was at *nC*<sub>25</sub> or *nC*<sub>27</sub>. These results indicate that the organic matter in Longtan shale is mainly of aquatic and continental organic matter input, whereas the organic matter in Longtan coal and mudstone are terrestrial organic matter input.

**Key words:** Shale; Geochemical characteristics; Upper Permian Longtan Formation; Sichuan Basin