

文章编号:0253-9993(2013)05-0794-06

# 四川盆地古生界泥页岩的地球化学特征

吴陈君<sup>1,2</sup>,张明峰<sup>1</sup>,刘艳<sup>1,2</sup>,陈茹<sup>1,2</sup>,熊德明<sup>1,2</sup>,妥进才<sup>1</sup>

(1. 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,甘肃 兰州 730000;2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**通过四川盆地古生界不同层系的探井及典型剖面样品的地球化学分析,从有机碳含量、有机碳同位素,热成熟度以及生物标志化合物特征讨论了四川盆地古生界4套泥/页岩地球化学特征及其生烃潜力。研究表明:古生界下寒武统、上奥陶统、下志留统3套黑色页岩有机碳含量高,平均值分别为6.31%,3.53%,1.87%,有机质类型主要为生烃能力极强的I型干酪根, $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-29.0\text{‰} \sim -32.0\text{‰}$ ,低碳数正构烷烃相对丰度高、 $\text{C}_{27}$ 规则甾烷优势分布、三环二萜烷的相对含量较高等生物标志化合物分布特征表现了腐泥型有机质特征,有机质来源为低等水生生物和藻类;上二叠统龙潭组泥/页岩有机碳含量平均为4.0%,有机质类型为II,III型,生物标志化合物研究表明龙潭组页岩既有丰富的水生生物输入,又有一定数量的陆生生物来源,煤和炭质泥岩母质来源以陆源有机质输入为主。

**关键词:**四川盆地;古生界;泥/页岩;地球化学特征

**中图分类号:**P618.13 **文献标志码:**A

## Geochemical characteristics of Paleozoic shale in Sichuan Basin and their gas content features

WU Chen-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming-feng<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Ru<sup>1,2</sup>, XIONG De-ming<sup>1,2</sup>, TUO Jin-cai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Through geochemistry analysis of core and outcrop samples from different Paleozoic strata in Sichuan Basin, geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of the 4 sets shales were discussed from organic carbon isotope, thermal maturity and biomarker characteristics. The results show that three sets of Paleozoic high quality black shales (i. e. Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Ordovician Wufeng Formation, and Lower Silurian Longmaxi Formation) have high organic abundance, with an average percentage of 6.31%, 3.53% and 1.87%, respectively. The main type of organic matter for all three sets of Paleozoic high quality black shales is of sapropalic Type I, with  $\delta^{13}\text{C}$  for TOC (total organic carbon) ranging from  $-29.0\text{‰}$  to  $-32.0\text{‰}$ . The higher relative abundance of low-molecular n-alkanes,  $\text{C}_{27}$  regular steranes, and tricyclic terpanes show that the organic matters in the Paleozoic high quality black shales are derived from lower hydrobiont and algae. The average organic carbon abundance of Upper Permian Longtan shale is 4.0%, and the organic matter is of Type II and III. The study of biomarkers indicates 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:** Sichuan Basin; Paleozoic; shale; geochemical features

随着常规油气勘探难度的增大,页岩气的勘探逐渐被重视。南方地区是中国页岩气发育的有利区域,

收稿日期:2013-03-14 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214701)

作者简介:吴陈君(1988—),男,安徽池州人,博士研究生。Tel:0931-4960921, E-mail:wcj627@163.com。通讯作者:妥进才(1962—),男,新疆沙湾人,研究员。Tel:0931-4960854, E-mail:jctuo@lzb.ac.cn

广泛发育4套富有机质页岩。寒武系、奥陶系、志留系海相黑色页岩以及二叠系煤系富有机质泥/页岩分布面积广,厚度大,品质好,成熟度高<sup>[1]</sup>,主体处于高过成熟生气阶段( $R_o$ 一般大于2.5%),有利于页岩气藏的形成<sup>[2-3]</sup>。目前,很多学者对四川盆地泥/页岩分布规律、成藏的地质条件、成藏机理、资源评价等方面进行了深入的研究<sup>[4-8]</sup>。笔者通过四川盆地古生界不同层系的探井及典型剖面样品的地球化学分析,从有机碳含量、有机碳同位素、热成熟度以及生物标志化合物特征等方面讨论四川盆地古生界四套泥/页岩地球化学特征及其生烃潜力。

## 1 四川盆地泥/页岩分布特征

四川盆地古生界主要发育了4套暗色泥/页岩层系,自下而上分布在下寒武统、上奥陶统、下志留统、上二叠统。下寒武统筇竹寺组(牛蹄塘组和九老洞组等)、上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组是四川盆地古生界的3套优质黑色页岩,上二叠统烃源岩在四川盆地广泛发育,呈区域性分布,富含有机质,是1套优质的煤系泥页岩,具备较好的生烃能力,是四川盆地的主力烃源岩。

下寒武统筇竹寺组黑色页岩分布稳定,除在川中古隆起一带不发育外,在整个盆地广泛分布,具有多个沉积中心,厚度一般在300~500 m,有向南或东南方向逐渐增厚的趋势<sup>[9-10]</sup>;上奥陶统五峰组黑色页岩一般厚度不足20 m;下志留统龙马溪组黑色页岩在四川盆地广泛发育,在乐山—龙女寺古隆起区已被剥蚀殆尽,古隆起区之外的东部和南部发育较全,主要分布在川东及川南地区,镇巴—观音、云阳—石柱—观音桥、宜宾—泸州3个烃源岩优势发育区,最厚能达到500~1 250 m<sup>[11-13]</sup>;上二叠统龙潭组/吴家坪组泥/页岩主要分布在川东、川南及川西南地区,主要有资阳、宜宾和万县3个沉积中心,整体厚度较薄,一般为20~60 m,局部可达120 m,呈现自北向南逐渐增厚的特点<sup>[4]</sup>。

## 2 四川盆地泥/页岩基础地球化学特征

### 2.1 有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩的重要指标,总有机碳含量(TOC)、生烃潜量( $S_1+S_2$ )和氯仿青“A”是评价烃源岩有机质丰度的常规指标,由于四川盆地古生界烃源岩整体处于高一过演化成熟阶段,氯仿沥青“A”和生烃潜量已不能准确地反映高一过成熟烃源岩的生烃能力,因而总有机碳含量成为评价四川盆地古生界泥/页岩生烃强度的最主要指标。有机碳含量的高

低直接影响到页岩的成烃物质基础以及对页岩气的吸附能力,针对商业性页岩气烃源岩的有机碳含量下限标准,很多学者进行过研究<sup>[5,7,14-16]</sup>。张金川等<sup>[5,7]</sup>认为,要获得具有工业价值的页岩气藏,有机碳的平均含量应大于1%。

四川盆地下寒武统黑色页岩有机质含量较为丰富,TOC量为0.71%~9.89%,平均为6.31%,其中TOC含量大于2%的样品占89.6%(图1),表明下寒武统黑色页岩具有较高的生烃潜能;上奥陶统五峰组TOC含量为0.77%~7.76%,平均为3.53%,90%五峰组样品TOC含量大于2%;下志留统龙马溪组TOC含量主要分布在1.0%~4.0%,平均1.87%,大于1%的样品占81.5%,有机碳含量较下寒武统、上奥陶统黑色页岩有所降低,为好或较好级别的烃源岩;上二叠统龙潭组泥/页岩TOC含量平均为4.0%,最高可达到21%,TOC含量大于1%的样品占79%,是二叠系好—最好的烃源岩。

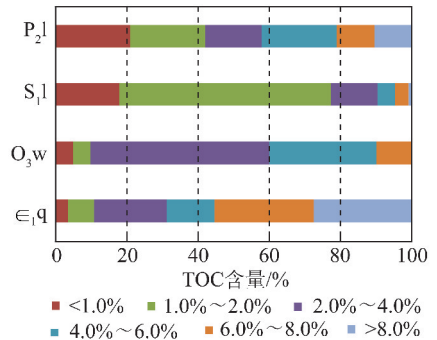


图1 四川盆地古生界泥/页岩有机碳含量分布频率

Fig. 1 Abundance of organic carbon of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

四川盆地古生界泥页岩由于热演化程度高,液态烃、残余烃值都很低,生烃潜量( $S_1+S_2$ )在0.02~0.40 mg/g,平均0.07 mg/g,90%泥页岩样品热解生烃潜量低于0.1 mg/g,热解氢指数HI极低,最高不超过3 mg/g TOC,表明生烃已近枯竭,这些参数不能准确反映其原始生烃潜力。根据下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组、上二叠统龙潭组暗色泥页岩有机质类型好、有机碳含量高、热演化程度高的事实:四川盆地古生界泥页岩历史上已经经历过大规模生烃过程,具备形成页岩气藏的基础。

### 2.2 有机质类型

胡见义等<sup>[17]</sup>根据我国陆相生油岩干酪根碳同位素的大量资料,提出用 $\delta^{13}C = -26\text{‰}$ 和 $\delta^{13}C = -27.5\text{‰}$ 来区分III,II,I型干酪根类型。梁狄刚等<sup>[18]</sup>将海相II型与I型干酪根的界限值调整为 $\delta^{13}C = -29\text{‰}$ ,依据此划分标准,对四川盆地古生界4套烃源岩242件样

品有机碳同位素分析结果表明:

(1)四川盆地寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组、下志留统龙马溪组黑色页岩原始有机质主要为盆地海相沉积环境中的藻类,有机质类型好,主要为生烃能力极强的 I 型干酪根,δ<sup>13</sup>C 分布在-29.0‰~-32.0‰,其中,下寒武统黑色页岩有机质类型最好,δ<sup>13</sup>C 值为-31.0‰~-32.0‰,平均-31.7‰;上奥陶统五峰组、下志留统龙马溪组黑色页岩主要分布在-29.0‰~-31.0‰。二叠系有机质类型主要为 II 型和 III 型,龙潭组页岩有机质类型为 II 型,δ<sup>13</sup>C 为-26.9‰~-28.5‰;龙潭组煤和炭质泥岩有机质类型为 III 型,碳同位素值分布在-23.5‰~-25.6‰,有机质来源以陆源高等输入占优势,见表 1。

表 1 四川盆地古生界有机碳同位素分布

Table 1 Distribution of carbon isotopic compositions of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin ‰

层系	岩性	δ <sup>13</sup> C		
		最大值	最小值	平均值(样品数)
上二叠统	煤、炭质泥岩	-23.5	-25.6	-24.6(10)
	页岩	-26.9	-28.5	-27.4(4)
下志留统	黑色页岩	-26.6	-31.4	-30.0(182)
上奥陶统	黑色页岩	-29.5	-30.8	-30.3(20)
下寒武统	黑色页岩	-31.0	-32.2	-31.7(23)

(2)古生界烃源岩随地层变新,δ<sup>13</sup>C 值从下寒武统筇竹寺组到二叠系龙潭组逐渐变重,有机质类型也依次变差,从下寒武统和上奥陶统 I 型,到下志留统 I 型、II 型(I 型为主),再到二叠系的 II 型、III 型(图 2);其中,下志留统 δ<sup>13</sup>C 值在-26‰~-29‰的样品仅占 4.3%,而且这几个样品的 TOC 含量普遍很低,都在 0.1% 左右。

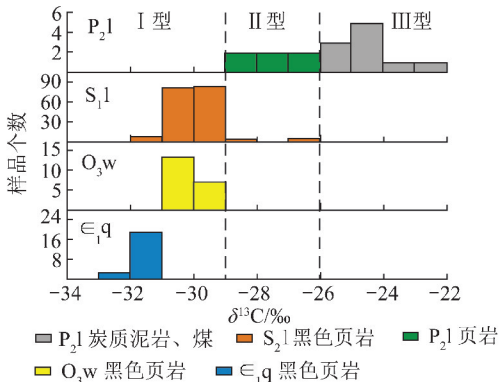


图 2 四川盆地古生界有机碳同位素分布

Fig. 2 Carbon isotope variation of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

(3)通过对下寒武统筇竹寺组以及下志留统龙

马溪组黑色页岩样品有机碳含量和有机碳同位素相关性分析,四川盆地古生界同一层位 TOC 含量与 δ<sup>13</sup>C 存在良好的负相关性,即有机碳含量越高,岩石有机碳同位素值越轻,有机质类型越好(图 3),预示着高含量的有机质主要以藻类和低等水生生物的贡献为主。

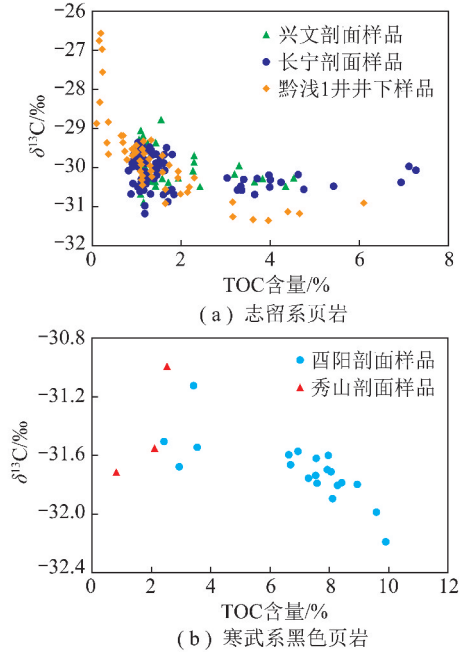


图 3 四川盆地志留系、寒武系黑色页岩有机碳与碳同位素关系

Fig. 3 Cross plot of δ<sup>13</sup>C vs. TOC of Silurian and Cambrian black shale samples in Sichuan Basin

2.3 成熟度特征

四川盆地古生界泥/页岩有机质热演化程度较高,整个盆地古生界均达到了过成熟阶段,以生成热解气和裂解气为主。筇竹寺组黑色页岩 R<sub>o</sub> 值为 2.0%~5.0%,奥陶系、志留系黑色页岩成熟度整体略低于寒武系,R<sub>o</sub> 为 2.0%~4.0%<sup>[3,11]</sup>,分布区域上以川东南、川北地区成熟度最高,两套页岩 R<sub>o</sub> 值均达到 4.0%;川西、川西南地区成熟度相对较低,但也达到了过成熟阶段。二叠系成熟度适中,R<sub>o</sub> 最低也在 1.3% 以上,主要变化在 2.0%~3.0%<sup>[19]</sup>。

3 生物标志化合物特征

3.1 正构烷烃及类异戊二烯烷烃

四川盆地古生界可溶有机质饱和烃正构烷烃分布特征变化较大(图 4):下寒武统筇竹寺组黑色页岩样品具有比较丰富的低碳数正构烷烃,呈单峰型分布,主峰碳均为 nC<sub>16</sub>,以 nC<sub>21</sub> 以前低碳数正构烷烃相对丰度高为特征,Σw(C<sub>21</sub><sup>-</sup>)/Σw(C<sub>22</sub><sup>+</sup>) 比值普遍特别高,为 7.49~138.39,反映了下寒武统暗色泥岩中的

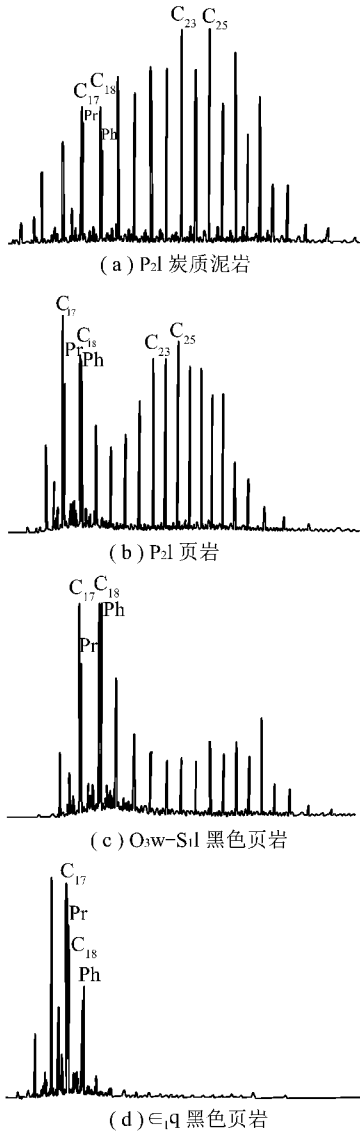


图 4 四川盆地古生界烃源岩正构烷烃分布  
Fig. 4 The distribution of n-alkane of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

有机质主要为藻类母质来源的特征,同时还可能受筇竹寺组样品高演化程度影响。上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组黑色页岩样品正构烷烃呈双峰型分布,前峰群、后峰群主峰碳分布为  $nC_{17}$  和  $nC_{23}$ ,  $\Sigma w(C_{21}^-)/\Sigma w(C_{22}^+)$  比值都大于 1。二叠系样品正构烷烃分布范围在  $nC_{14} \sim nC_{33}$ , 龙潭组煤和炭质泥岩样以单峰型分布为主,主峰碳为  $nC_{25}$  或  $nC_{27}$ , 以  $nC_{21}$  以后高碳数正构烷烃相对丰度较高为特征;龙潭组页岩样品正构烷烃呈双峰型分布,前峰群一般以  $nC_{17}$  为主峰碳,而后峰群的主峰碳则主要集中在  $nC_{25}$  或  $nC_{27}$ 。上述特征表明,下古生界黑色页岩有机质来源都为低等藻类输入,从两套黑色页岩正构烷烃分布差异上可以看出二者在藻类输入的种类上存在区别;上二叠统龙潭组煤和炭质泥岩有机质来源以高等植物

为主,龙潭组页岩既有丰富的水生生物输入,又有一定数量的陆生生物来源。

在类异戊二烷烃方面,Pr/Ph 比值可以反映氧化还原环境,姥鲛烷与相邻正构烷烃之比 ( $Pr/nC_{17}$ ) 及植烷与其邻正构烷烃之比 ( $Ph/nC_{18}$ ) 能较好地反映样品中有机质的降解程度及母质类型。下古生界页岩 Pr/Ph 比值主要分布在 0.9 ~ 1.5,总体上反映了海相还原环境,在高成熟演化过程中,在高温应力条件下,由于热裂解作用,Pr/Ph 比值随成熟度的增高而增加<sup>[20]</sup>。龙潭组煤和炭质泥岩样品表现明显的姥鲛烷对植烷优势,Pr/Ph 比值为 1.29 ~ 6.31,平均 3.61,反映氧化—强氧化的沉积环境,龙潭组页岩 Pr/Ph 比值为 0.55 ~ 0.88,平均为 0.76,反映还原环境。从图 5 可以看出,二叠系煤系烃源岩主要是在较强氧化条件的陆相环境中形成的 III 型有机质,上二叠统龙潭组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组页岩是在强还原条件的海相环境中形成的藻类 I ~ II 型有机质。

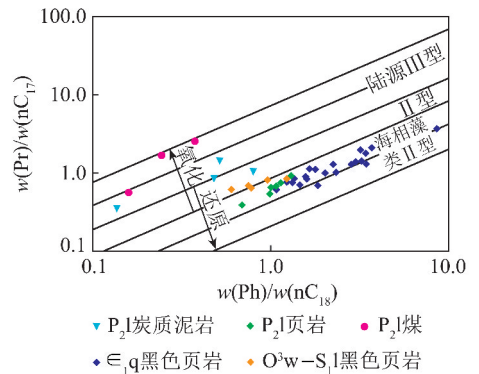


图 5 四川盆地古生界烃源岩 Pr/ $nC_{17}$  和 Ph/ $nC_{18}$  的关系  
Fig. 5 Cross plot of Pr/ $nC_{17}$  vs. Ph/ $nC_{18}$  ratios of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

### 3.2 甾烷、萜烷系列化合物

四川盆地古生界不同层系烃源岩甾烷系列化合物分布特征同样存在差异,常用甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20R$  构型的  $C_{27}$ ,  $C_{28}$  和  $C_{29}$  相对丰度组成三角图,对母质类型进行评价(图 6),上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组页岩甾烷具有明显的  $C_{27}$  甾烷优势分布的特点,除个别筇竹寺组页岩以外,  $C_{27}R/C_{29}R$  比值都大于 1,表明有机质主要来源于低等的水生生物和藻类。龙潭组煤和炭质泥岩甾烷具有明显的  $C_{29}$  甾烷优势分布的特点,  $C_{27}R/C_{29}R$  比值均小于 1,即龙潭组煤和炭质泥岩有机质以腐殖型为主,指示以陆源有机质输入为主的生源构成。龙潭组页岩样品甾烷系列化合物分布变化较大,  $C_{27}R/C_{29}R$  比值为 0.38 ~ 1.49,显示了低等水生生物和陆源高等植物混



合来源的特征。

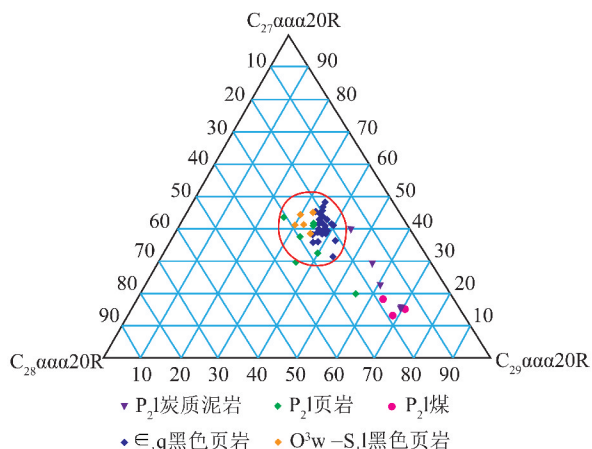


图 6 四川盆地古生界烃源岩规则甾烷  $C_{27} \sim C_{29}$  组成对比

Fig. 6 Ternary diagram of  $C_{27}$ ,  $C_{28}$  and  $C_{29}$   $\alpha\alpha\alpha$  20R sterane compositions of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

在甾烷分布方面,上奥陶统五峰组—下志留统龙

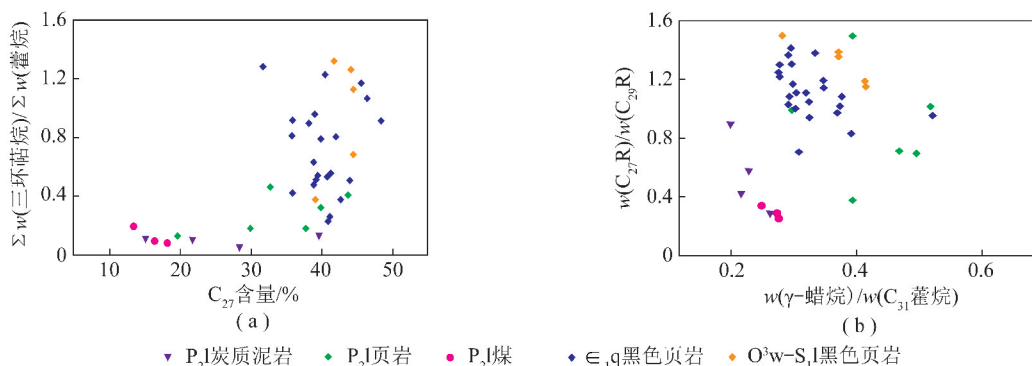


图 7 四川盆地古生界烃源岩  $\Sigma w(\text{三环萜烷})/\Sigma w(\text{藿烷})$  与  $C_{27}$ ,  $C_{27}R/C_{29}R$  和  $\gamma$ -蜡烷/ $C_{31}$  的关系

Fig. 7 Cross plot of  $\Sigma$  tricyclic terpane/ $\Sigma$  hopanoid vs.  $C_{27}$  and gammacerane/ $C_{31}$  hopane vs.  $C_{27}$  sterane 20R/ $C_{29}$  sterane 20R of Paleozoic source rock samples in Sichuan Basin

## 4 结 论

(1) 四川盆地自下而上分别发育下寒武统、上奥陶统、下志留统、上二叠统 4 套富有机质泥/页岩。下寒武统有机碳含量最高, 平均为 6.31%; 上奥陶统平均为 3.53%, 其中 90% 黑色页岩样品大于 2%; 下志留统平均 1.87%, 为较好—好级别的烃源岩; 上二叠统龙潭组泥/页岩有机碳含量平均为 4.0, 最高可达到 21%, 有机碳含量大于 1% 的样品占 79%, 是二叠系好—最好的烃源岩。上述特征表明, 四川盆地具备形成页岩气的基本地质条件和物质基础。

(2) 通过对四川盆地下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组、下志留统龙马溪组黑色页岩以及上二叠统龙潭组煤、炭质泥岩、页岩样品有机碳同位素分析, 认

马溪组、下寒武统筇竹寺组页岩表现为明显的富含长链三环二萜烷的分布特征, 部分样品长链三环二萜烷的相对含量甚至超过了五环三萜烷的含量,  $\Sigma w(\text{三环萜烷})/\Sigma w(\text{藿烷})$  比值为主要集中在 0.6 ~ 1.3, 同时这些样品规则甾烷中具有明显的  $C_{27}$  甾烷优势 (图 7(a)), 进一步说明了下古生界黑色页岩低等的水生生物和藻类的有机质来源。二叠系烃源岩样品表现为明显的富含五环三萜烷的分布特征, 特别是煤和炭质泥岩样品长链三环二萜烷的相对含量很低,  $\Sigma w(\text{三环萜烷})/\Sigma w(\text{藿烷})$  比值都不到 0.2, 说明古环境水体相对波动, 反映了二叠系龙潭组海陆过渡相的沉积环境。由图 7(b) 可以看出, 下古生界黑色页岩样品  $C_{27}R/C_{29}R$ ,  $\gamma$ -蜡烷/ $C_{31}$  比值都相对较大, 有机质特征为腐泥型, 龙潭组煤和炭质泥岩  $C_{27}R/C_{29}R$  比值平均为 0.4 左右,  $\gamma$ -蜡烷/ $C_{31}$  比值为 0.20 ~ 0.28, 都比较低, 表现了龙潭组煤和炭质泥岩偏腐殖型有机质特征。

为古生界烃源岩随时代变新,  $\delta^{13}C$  值逐渐变重, 有机质类型也依次变差。下古生界黑色页岩主要为 I 型干酪根,  $\delta^{13}C$  分布在  $-29.0\% \sim -32.0\%$ ; 龙潭组页岩有机质类型为 II 型, 煤和炭质泥岩有机质类型为 III 型。

(3) 四川盆地下古生界黑色页岩正构烷烃以低碳数相对丰度高为特征, 规则甾烷表现为明显的  $C_{27}$  甾烷优势, 三环二萜烷的相对含量较高表现了腐泥型有机质特征, 有机质来源为低等水生生物和藻类; 龙潭组页岩正构烷烃呈双峰型分布特征,  $Pr/Ph$  比值平均为 0.76, 规则甾烷  $C_{27}R/C_{29}R$  比值变化较大显示了低等水生生物和陆源高等植物混合来源的特征; 龙潭组煤和炭质泥岩高碳数正构烷烃相对丰度较高、富含  $C_{29}$  甾烷和五环三萜烷的分布特征表明有机质来

源主要为陆源高等植物输入。

## 参考文献:

- [1] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.  
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geology conditions of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [2] 黄籍中, 陈盛吉, 宋家荣, 等. 四川盆地烃源岩体系与大中型气田形成[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(6): 504-510.  
Huang Jizhong, Chen Shengji, Song Jiarong, et al. Hydrocarbon source systems and formation of gas fields in Sichuan Basin[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(6): 504-510.
- [3] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地质前缘, 2006, 13(2): 234-248.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan Basin and its sources[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248.
- [4] 戴金星, 夏新宇, 卫延召, 等. 四川盆地天然气的碳同位素特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 115-132.  
Dai Jinxing, Xia Xinyu, Wei Yanzhao, et al. Carbon isotope characteristics of natural gas in the Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(2): 115-132.
- [5] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 14-18.  
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 14-18.
- [6] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质: 上册[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 259-364.  
Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al. Geostucture and marine facies hydrocarbon geology of South China: Volume one[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 259-364.
- [7] 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.
- [8] 朱炎铭, 陈尚斌, 方俊华, 等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1160-1164.  
Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, et al. The geologic background of the Silurian shale-gas reservoiring in Sichuan, China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1160-1164.
- [9] 腾格尔, 高长林, 胡凯, 等. 上扬子北缘下组合优质烃源岩分布及生烃潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 254-259.  
Tenger, Gao Changlin, Hu Kai, et al. High quality source rocks of lower combination in the northern Upper-Yangtze area and their hydrocarbon potential[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2): 254-259.
- [10] 聂海宽, 张金川, 李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 959-967.  
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Li Yuxi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 959-967.
- [11] 王兰生, 邹春艳, 郑平, 等. 四川盆地地下古生界存在页岩气的地球化学依据[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 59-62.  
Wang Lansheng, Zou Chunyan, Zheng Ping, et al. Geochemical evidence of shale gas existed in the Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 59-62.
- [12] 王社教, 王兰生, 黄金亮, 等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 45-50.  
Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 45-50.
- [13] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 782-787.  
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Shale gas accumulation conditions and favorable zones of Silurian Longmaxi Formation in south Sichuan Basin, China[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 782-787.
- [14] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [15] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [16] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.  
Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466.
- [17] 胡见义, 黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 189.  
Hu Jianyi, Huang Difan. The foundation of China continental petroleum geology theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 189.
- [18] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 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, Gu 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.
- [19] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 35-44.  
Zhu Yangming, Gu Shengxiao, Li Ying, et al. Biological organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan Basin[J]. Geochimica, 2012, 41(1): 35-44.
- [20] Koopmans M P, Koster J, Kaam-Peters H M E. Diagenetic and Catagenetic products of isorenieratene: molecular indicators for photic zone anoxia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(44): 67-96.