

四川盆地晚二叠世龙潭期 沉积环境及其源控作用分析

曹清古,刘光祥,张长江,潘文蕾

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126)

摘要:作为四川盆地最重要的气源岩之一,二叠系烃源岩逐渐被越来越多的研究者所重视。通过对四川盆地晚二叠世龙潭期岩相古地理的恢复,以及沉积环境对烃源岩发育的控制作用分析,指出四川盆地上二叠统优质烃源岩主要发育于浅海陆棚、潮坪-潟湖及滨岸沼泽等相带。文中引入了“有机碳厚度”的概念,即采用有机碳含量与烃源岩厚度之积综合反映烃源岩的发育特征;并结合无机地化与有机碳分析测试数据,论述了沉积环境的源控意义,为烃源岩宏观分布预测与资源量估算提供了理论参考。

关键词:烃源岩;沉积环境;控制因素;二叠纪;四川盆地

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标识码:A

Sedimentary environment and its controlling on source rocks during late Permian in Sichuan Basin

Cao Qinggu, Liu Guangxiang, Zhang Changjiang, Pan Wenlei

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: As the most important source rock for gas generation in the Sichuan Basin, Permian source rocks have attracted more and more attentions. The lithofacies palaeogeography during the Longtan phase of the Late Permian in the Sichuan Basin was reconstructed, and the controlling effects of sedimentary environment on source rock generation were analyzed. In the Upper Permian of the Sichuan Basin, favorable source rocks mainly developed in the shallow shelf, tidal flat-lagoon and onshore swamp facies. The concept of “organic carbon thickness” was introduced in this article. Organic carbon content was multiplied by source rock thickness so as to illustrate the generation features of source rocks. Combined with inorganic geochemical characteristics and organic carbon analyses, the controlling effects of sedimentary environment on source rock generation were studied, providing theoretical reference for the macroscopic distribution prediction of source rocks and resource estimation.

Key words: hydrocarbon source rock; sedimentary environment; controlling factor; Permian; Sichuan Basin

勘探实践证明,四川盆地具有广阔天然气勘探前景^[1-2]。“三次资评”结果指出盆地天然气总资源量 $53\ 477.4\times 10^8\ \text{m}^3$ 。四川盆地发育多套烃源岩层系,包括下寒武统、下志留统、二叠系、上三叠统及下侏罗统等^[3-4]。随着勘探和研究的日益深入,越来越多的人认为二叠系烃源岩是四川盆地最重要的气源岩之一^[5-7]。因此,查明二叠系烃源岩的资源规模对于四川盆地油气勘探前景预测具有重要意义。上二叠统作为二叠系的优质烃源岩发育层位,其研究意义尤为重要。本文拟对这套优质烃源岩的环境控制因素进行分析,旨在为进一步预测其空间分布、资源量计算等提供依据。

1 晚二叠世龙潭期岩相古地理特征

1.1 地层岩性分区

中二叠世末的华力西运动使得四川盆地大部分地区整体抬升,康滇古陆进一步隆升、扩大,成为四川盆地上二叠统的主要物源区。古地势为南西高、北东低。晚二叠世之初,海平面大幅上升,研究区内广泛沉积了一套含煤岩系,沉积层序不断向古陆周边地区上超。沉积相带由陆到海大致呈东西向展布、南北向延伸^[8]。区域地质研究表明^[9],上二叠统从北东往南西相变清晰(图1):旺苍、万源一线以北,硅质岩发育,为深水环境下的大隆组

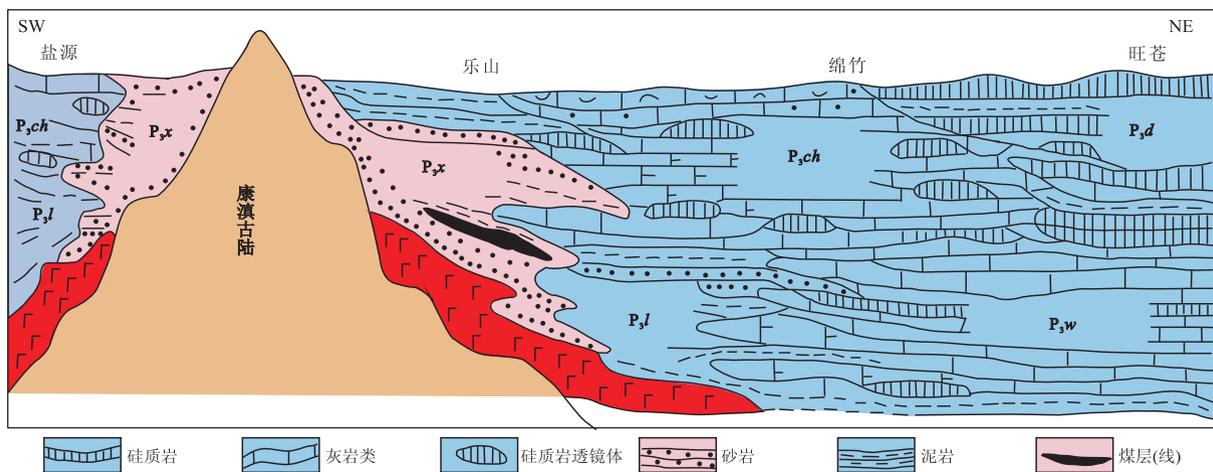


图 1 四川盆地上二叠统相变示意

Fig. 1 Lithofacies transition of Upper Permian in Sichuan Basin

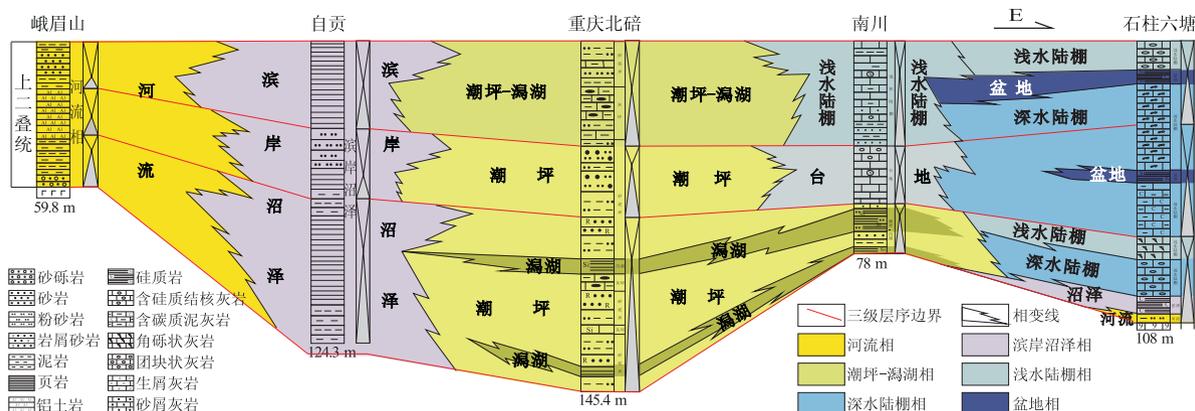


图 2 四川盆地晚二叠世龙潭期(吴家坪期)沉积相带时空迁移规律

Fig. 2 Rhythm of sedimentary facies transition during Longtan phase of Late Permian in Sichuan Basin

(P_3d)分布区;旺苍、万源一线与绵竹、达县、南川一线之间为大隆组和长兴组(P_3ch)的相变区,即为硅质岩和灰岩的相变带;绵竹、达县、南川一线和乐山、珙县一线之间为长兴组和龙潭组(P_3l)分布区;靠康滇古陆两侧为宣威组(P_3x)分布区。

1.2 沉积相带展布特征

根据本次沉积相研究成果(图 2),晚二叠世龙潭期四川盆地从南西往北东依次发育以下沉积相带:河流相、滨岸沼泽相、潮坪—潟湖相、浅水陆棚相、深水陆棚相及盆地相,在南江—万源、奉节—巫山—巴东及武隆—彭水等地区存在局部低隆,形成台地相沉积。

从康滇古陆边缘往北东至成都—遂宁—重庆一带,广泛发育含煤碎屑沉积。该时期主要沉积 2 种类型的含煤碎屑岩系:陆相含煤岩系、海相或海陆交互相含煤岩系。靠近古陆边缘的天全—乐山—美姑一带,为宣威组陆相含煤层系,主要为河流漫滩沼泽相含煤建造。天全—乐山—美姑一带

至成都—遂宁—重庆一带之间为龙潭组海陆交互相含煤建造区,可划分出 2 个相带:滨岸沼泽相与潮坪—潟湖相。前者主要沉积泥岩、碳质页岩、岩屑砂岩,夹多层煤层(线),典型剖面如珙县大水沟剖面;后者沉积以泥、页岩夹砂岩、灰岩及煤线为主要特征,如女基井龙潭组下部主要为以页岩、泥岩夹煤层为特征的泥炭沼泽亚相沉积,上部为以灰岩、页岩及含燧石结核灰岩为特征的硅质灰泥坪亚相沉积,总体反映水体相对闭塞的潟湖沉积环境。

成都—遂宁—重庆一带以东广大区域为浅海陆棚相区,沉积以碎屑岩与灰岩及砂质灰岩混合沉积为主,因此又称作混积陆棚。碎屑岩系以泥质岩、页岩为主,紧邻武隆—彭水低隆的地区含较多的砂屑。该相区是四川盆地二叠系烃源岩发育的最有利地区,具有水体较深、能量较弱等特点,沉积物以细粒沉积物为主,有利于有机质的赋存,有机质丰度高。关基井龙潭组以页岩、泥岩、钙质泥岩、

云质泥岩、厚层块状微晶灰岩为主,其中页岩、泥岩所占比例较大。桐梓坡剖面龙潭组以碳质页岩、砂质页岩、泥岩、泥质灰岩、结晶灰岩为主,含黄铁矿结核或透镜体。西部绵竹天池剖面龙潭组以砂质灰岩、灰岩夹页岩为主,灰岩成分占绝对优势,仅中段夹页岩层。南川东胜剖面龙潭组以泥岩、页岩、砂屑灰岩为主。

浅水陆棚区以北以东地区为深水陆棚区,沉积以碳酸盐岩为主,碎屑岩较少,灰岩及页岩多含硅质成分,反映出远源、深水沉积特征。该相带为碎屑岩与碳酸盐岩过渡沉积区,为龙潭组与吴家坪组相变区。

深水陆棚区外侧往城口以东相变为盆地相沉积区,吴家坪组灰岩硅质含量更高,由含硅质过渡为含燧石结核、燧石团块或燧石透镜体。

此外,在南江—万源、奉节—巫山—巴东及武隆—彭水等地区存在局部低隆,以台地相沉积为主。

1.3 烃源岩发育的有利沉积相带

众所周知,烃源岩厚度、有机质丰度及成熟度是评价一套烃源岩优劣的三大基本参数。本文拟讨论的是原始沉积环境对烃源岩发育的控制作用,因此仅考虑前2项基本参数。而成熟度是烃源岩后期热演化过程的产物,属成岩演化阶段范畴。

研究发现,单纯依赖有机质丰度高低难以表征烃源岩发育规模。如欠补偿盆地相,尽管烃源岩有机质丰度较高,但因沉积厚度薄,烃源岩厚度小,难以成为主力烃源岩;又如台内洼地相烃源岩厚度较大,但有机质丰度较低,也难以表征有利烃源岩发育区与沉积相的关系。因此,为了更加客观地反映烃源岩的发育规模,综合了厚度与有机质丰度两方面的因素进行考量,在此引入“有机碳厚度”的概念,即采用有机碳含量与烃源岩厚度之积综合反映烃源岩的发育特征。

通过对烃源岩有机碳厚度分布特征叠合沉积相展布(图3),表明四川盆地上二叠统烃源岩发育的有利沉积相带主要为浅海陆棚相区(包括浅水陆棚相与深水陆棚相)、潮坪—泻湖相带,其次为滨岸沼泽相带,其他相带烃源岩相对不发育。

2 上二叠统烃源岩沉积环境

上文从宏观上对有利于烃源岩发育的沉积相带特征进行了阐述,下面从地球化学特征方面对烃源岩发育的微观沉积环境进行探讨。

沉积环境是控制海相烃源岩发育和分布的重要因素,即“环境控源”^[10]。生物生产力、海水含氧量(氧化—还原条件)、沉积速率及水动力条件等

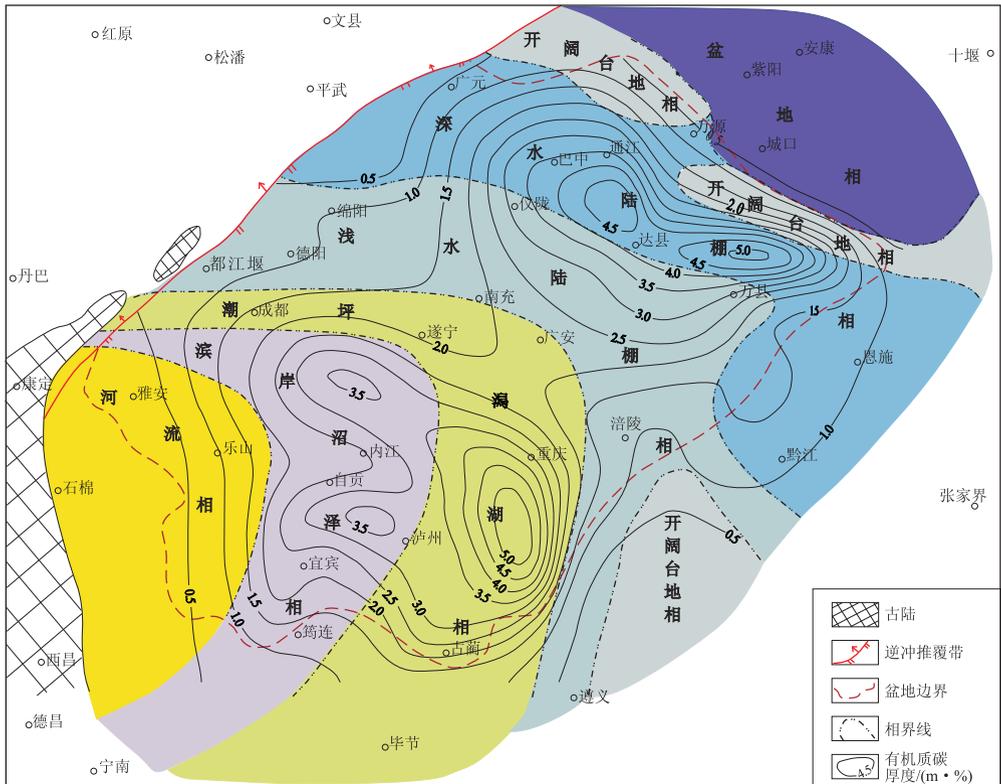


图3 四川盆地上二叠统龙潭组(吴家坪组)沉积相与烃源岩有机碳厚度叠合图

Fig.3 Sedimentary facies during Longtan phase of Late Permian vs. organic carbon thickness of source rocks in Sichuan Basin

诸环境要素共同控制着烃源岩的发育与分布^[11-14]。然而,如何恢复这些控制因素,使之有效地应用于海相油气勘探仍存在诸多亟待解决的问题。我国海相地层的演化程度较岩石学上真正的变质作用要低得多($R_0 < 4\%$)^[15-17],烃源岩多为一种细粒的沉积岩,在成岩后期,其所含的大部分过渡元素虽然在含量上发生了一定的变化,但相关元素和分布形式仍保持稳定。因此,虽然古生界甚至更为古老地层有机质演化程度普遍较高,但是由于微量元素、稀土元素和碳、氧同位素等无机参数较有机质更为稳定,具有较好的保存原始地球化学信息的能力,其反应古海洋原始地球化学特征及环境演化的可信度较高。故而,可通过这些无机参数来恢复古环境条件,进而分析古环境与烃源岩发育关系。

2.1 无机地球化学参数

2.1.1 常量元素

沉积岩中一些常量元素的分布与沉积环境密切联系^[18-19]。如 Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 等主要赋存于粘土矿物中,代表了陆源泥质。同时 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的质量分数反映出沉积环境的氧化作用强弱。而 MnO 、 FeO 的高含量则主要反映还原环境, MgO 质量分数高主要反映海盆内缘环境。另外, P_2O_5 是海水的深度指示器,同时 P 、 S 元素也是生物生命活动重要的物质,反映海水的原始生产力。

2.1.2 微量元素

一些微量元素及其组合特征也是环境的指示剂^[20-21],如 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Ni 、 V 、 Co 等元素及其组合的变化可以反映沉积水体深浅变化。 Sr 和 Ba 是化学性相似的同族元素,活动性 Sr 强于 Ba ,因此,溶液中 Sr 和 Ba 的迁移能力不同,由淡水进入海水时, Ba^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成 $BaSO_4$ 沉淀,陆源的 Ba 到达海水中容易沉淀且靠近海岸附近,而 $SrSO_4$ 溶解度较大,比 Ba 迁移地远,从而沉淀在较深处,因而沉积物中 Sr 和 Ba 的质量分数比值可以反映沉积水体的相对深浅及沉积环境。 V 和 Ni 组合可反映水体的氧化—还原环境,一般 $V/(V+Ni) > 0.46$ 表征为还原环境,比值越大,还原性越强。

2.1.3 碳、氧同位素

自然界的碳基本上储藏在有机碳(还原碳)和无机碳(氧化碳)两大碳库内,两者的 $\delta^{13}C$ 平均值大约相差 25‰,因此,在影响海相碳酸盐岩碳同位素的众多因素中,当时的有机碳氧化与相对埋藏量是最重要的。当有机碳的相对埋藏量大于氧化量时,较多的 ^{12}C 进入有机碳中,使同期海相碳酸盐

岩的 $\delta^{13}C$ 值向正的方向移动,反之则向负的方向移动。此外,沉积介质盐度的增高会引起碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值变大,大气降水和陆源淡水的注入使 $\delta^{13}C$ 值降低。氧化条件下,有机质中的 ^{12}C 氧化消耗,并以 CO_2 的形式回到海水中,使碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值降低;还原条件下,富 ^{12}C 的有机质快速埋藏而导致碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值增大。此外生物发育时消耗海水中富 ^{12}C 的 CO_2 和 HCO_3^- ,并经快速埋藏,使碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值升高;生物贫乏时海水中 CO_2 和 HCO_3^- 消耗量减少,加之有机质埋藏速率降低,均会导致碳酸盐岩更富 ^{12}C ,使 $\delta^{13}C$ 值减小^[22-23]。

氧同位素 $\delta^{18}O$ 值受介质温度和浓度的影响较大,成岩作用也会使 $\delta^{18}O$ 值发生较大变化。沉积环境对氧同位素也有一定的控制作用,沉积环境中水介质盐度的增高,蒸发作用加强,均会使碳酸盐岩 $\delta^{18}O$ 值明显变大;大气降水和陆源淡水的注入会引起水介质盐度降低,从而使 $\delta^{18}O$ 值变小。

2.2 沉积环境控制优质烃源岩发育

通过对城口、珙县、绵竹、南江、石柱、丁山 1 井、河坝 1 井、普光 5 井等多个野外剖面 and 钻井的样品分析测试以及沉积相的分析研究表明,四川盆地上二叠统优质烃源岩的发育直接受控于沉积环境。

以南江桥亭剖面为例,上二叠统吴家坪组烃源岩的发育状况明显受沉积环境的控制。同时,测试数据(表 1)分析表明,常量元素、微量元素及碳氧同位素等无机地球化学特征具有较好的环境指示意义,也与烃源岩有机碳含量的变化特征相吻合。

吴家坪组上段:未见顶,实测厚度 16.6 m,岩性为深灰色薄层状燧石团块状泥灰岩,燧石团块呈串珠状嵌于泥灰岩中,含量大致各占 50%,沉积相分析认为本段为台地边缘斜坡相沉积产物(图 4)。 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 的含量总体较低,反映沉积时细粒粘土物质含量较小,远离物源区; S 、 P 、 Ba 含量明显偏低,一方面反映了海水总体不深,再者原始海洋生产力低下; Sr/Ba 比值、 V/Cr 比值都相对较小,然而 $V/(V+Ni)$ 比值为 0.51,大于 0.46,表明仍然处于还原环境,分析认为吴家坪组上部地层沉积时总体处于弱还原环境。同时,总有机碳含量偏低,为 0.08%~0.29%,表明台地边缘斜坡环境下烃源岩不发育。

吴家坪组中段:实测地层厚度 50.39 m,岩性总体以深灰色—灰黑色含硅质灰岩、泥灰岩为主,夹薄层碳质页岩、硅质岩,局部含生屑。沉积相分析认为本段为深水陆棚相沉积产物。本段样品

表1 四川盆地南江桥亭吴家坪组无机地化与有机碳分析测试结果

Table 1 Experimental results of inorganic element and TOC in Wujiaping Formation, Qiaoting, Nanjiang, Sichuan Basin

样品	$\omega(\text{TOC})/\%$	$\omega(\text{S})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\omega(\text{Ba})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\omega(\text{P})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\omega(\text{V})/\omega(\text{V}+\text{Ni})$	$\omega(\text{Sr})/\omega(\text{Ba})$	$\omega(\text{V})/\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$\omega(\text{TiO}_2)/\%$
SCNJ-54	0.29	0.07										
SCNJ-55	0.08	0.04	4.59	-3.95	6.64	166.40		129.46	0.54	0.31	0.143	0.009
SCNJ-56	0.28	0.13										
SCNJ-57	0.13	0.08	2.61	-5.07	17.54	171.39	0.51	10.04	0.47	0.43	0.567	0.014
SCNJ-58	11.60	0.44										
SCNJ-59	1.60	0.36										
SCNJ-60	1.12	0.51										
SCNJ-61	0.56	0.28										
SCNJ-62	0.21	0.22	3.15	-4.25	27.76	195.36	0.48	45.51	1.79	1.38	1.989	0.056
SCNJ-63	2.80	0.20										
SCNJ-64	4.29	0.33	0.39	-5.04	20.61	702.90	0.47	42.59	0.20	1.51	0.762	0.028
SCNJ-65	1.22	0.14										
SCNJ-66	1.64	0.40										
SCNJ-67	0.87	0.71	1.63	-3.62	15.86	1 948.86	0.57	49.88	0.71	1.19	0.844	0.028
SCNJ-31	0.96	0.11										
SCNJ-30	0.80	0.09										

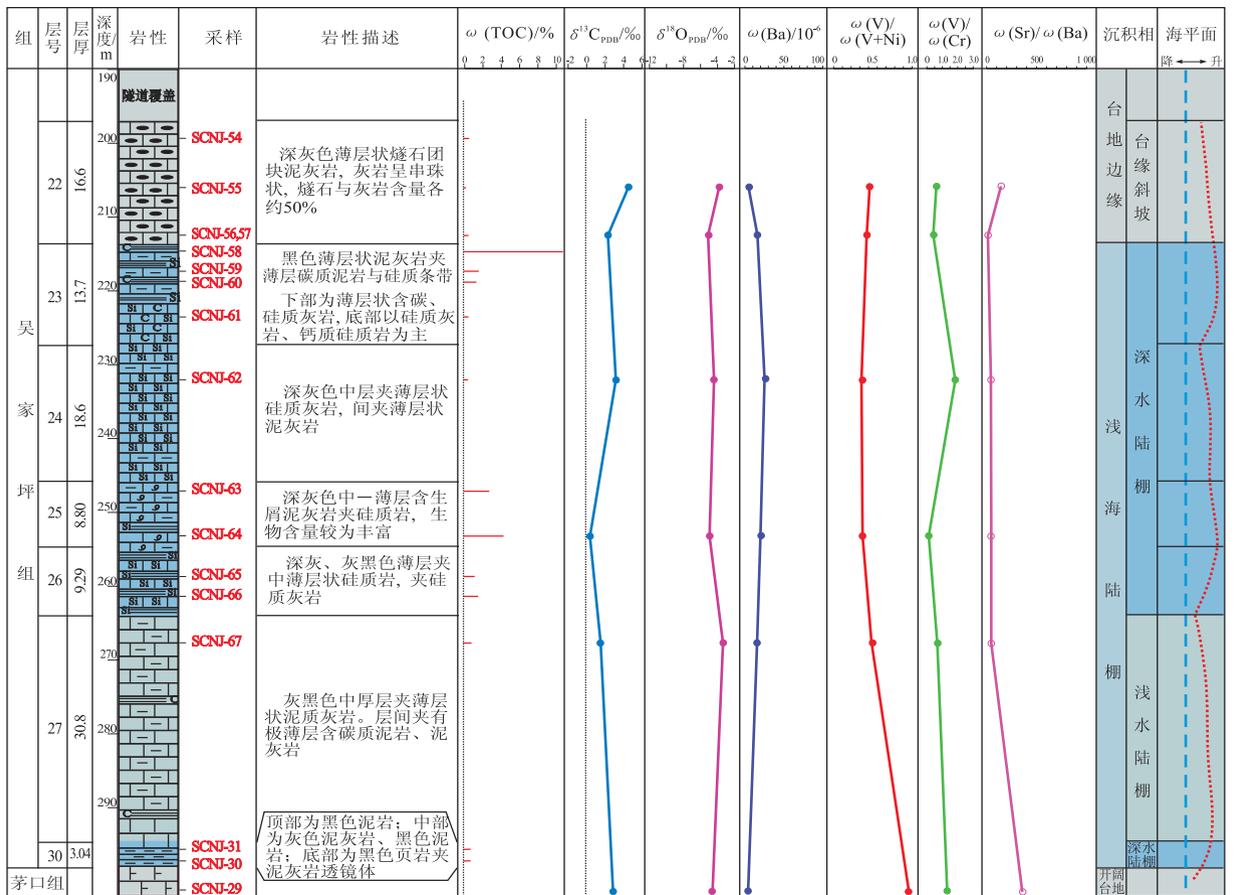


图4 四川盆地南江桥亭剖面吴家坪组地球化学综合柱状图

Fig. 4 Synthetical histogram for geochemistry characteristics in Wujiaping Formation on Qiaoting profile, Nanjiang, Sichuan Basin

SCNJ-58 至 SCNJ-66, 其 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 的含量相对上部地层明显高; S, P, Ba 的含量相对也高, V/(V+Ni) 比值、Sr/Ba 比值、V/Cr 比值均较高, 表

征了沉积物中细粒粘土物质含量较高、生物生产力较高、海水还原性较强等特点。总有机碳含量相对上部地层明显高, 为好烃源岩。表明深水陆棚环境

下烃源岩极为发育。

吴家坪组下段:实测地层厚度 33.84 m,岩性以灰黑色含泥质灰岩为主,局部夹碳质页岩。底部黑色泥岩夹泥灰岩透镜体,厚约 3 m。沉积相分析认为本段主要为浅水陆棚相沉积产物,底部为深水陆棚相。样品 SCNJ-67 测试数据中 S、P 含量较高,反映海水古生产力较强, $V/(V+Ni)$ 比值 0.57 代表了较强还原环境。本段 3 个样品总有机碳含量均在 0.8% ~ 0.96% 之间,有机质丰度较高,属较好烃源岩。

本剖面中, $\delta^{13}C$ 值、 $\delta^{18}O$ 值从下往上具有振荡漂移特征,反映出海水的振荡升降旋回,与沉积环境的变化、相带的迁移具有较好的相关性。

3 结论

1)晚二叠世龙潭期,四川盆地古地理面貌为南西高、北东低。沉积相带由南西往北东呈弧形带状分布,依次为河流相、滨岸沼泽相、潮坪—泻湖相、浅水陆棚相、深水陆棚相以及盆地相,局部高地貌区形成台地。

2)上二叠统烃源岩的分布状况、品质等明显受到沉积相带的控制与制约。优质烃源岩主要发育于浅海陆棚、潮坪—泻湖及沼泽环境。常量元素、微量元素及碳氧同位素等的测试分析结果进一步验证了优质烃源岩的发育严格地受沉积环境的制约。

参考文献:

[1] 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.

[2] 郭彤楼. 川东北地区台地边缘礁、滩气藏沉积与储层特征[J]. 地质前缘,2011,18(4):201-211.

[3] 魏国齐,刘德来,张林,等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学,2005,16(4):437-442.

[4] 刘光祥,陶静源,潘文蕾,等. 川东北及川东区天然气成因类

型探讨[J]. 石油实验地质,2002,24(6):512-516.

[5] 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.

[6] 腾格尔,秦建中,付小东,等. 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):334-345.

[7] 付小东,秦建中,腾格尔,等. 四川盆地北缘上二叠统大隆组烃源岩评价[J]. 石油实验地质,2010,32(6):566-571.

[8] 郭正吾. 四川盆地形成演化[M]. 北京:地质出版社,1994.

[9] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991.

[10] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等. 海相地层无机参数与烃源岩发育环境的相关研究:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油与天然气地质,2005,26(4):411-421.

[11] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地质前缘,2000,7(4):534-547.

[12] 陈践发,张水昌,鲍志东,等. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 海相油气地质,2006,11(3):49-54.

[13] 赵文智,王兆云. 高效气源灶及其对形成高效气藏的作用[J]. 沉积学报,2005,23(4):709-718.

[14] 秦建中,腾格尔,付小东,等. 海相优质烃源层评价与形成条件研究[J]. 石油实验地质,2009,31(4):366-372.

[15] Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. New York: Freeman,1979:62-273.

[16] Demaison G J, Moor G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin,1980,64(8):1179-1209.

[17] 李荣西. 有机质热演化与极低级变质作用[J]. 地质科技情报,1996,15(3):64-66.

[18] 赵一阳,鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京:科学出版社,1994.

[19] 王中波,杨守业,李从先,等. 南黄海中部沉积物岩心常量元素组成与古环境[J]. 地球化学,2004,33(5):483-490.

[20] 张长江,刘光祥,曾华盛,等. 川西地区二叠系烃源岩发育环境及控制因素[J]. 天然气地球科学,2012,23(4):626-633.

[21] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等. 缺氧环境及地球化学标识标志的探讨:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报,2004,22(2):365-372.

[22] 吴智勇. 化学地层学及其研究进展[J]. 地层学杂志,1999,23(3):234-240.

[23] 李荣西,魏家庸,肖家飞,等. 海进体系域碳氧同位素地球化学响应:以黔西南地区三叠系为例[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1):1-5.

(编辑 徐文明)