

doi: 10.12029/gc20170308

陈文彬, 付修根, 谭富文, 曾胜强, 冯兴雷. 2017. 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩地球化学特征讨论[J]. 中国地质, 44(3): 499–510.

Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Zeng Shengqiang, Feng Xinglei. 2017. Organic Geochemistry of Carboniferous–Permian Sources rocks in Qiangtang Basin, Tibet[J]. Geology in China, 44(3): 499–510(in Chinese with English abstract).

羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩地球化学特征讨论

陈文彬¹ 付修根^{1,2} 谭富文^{1,2} 曾胜强¹ 冯兴雷¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要:长期以来,羌塘盆地烃源岩的研究一直限于中生代地层,而对其古生代地层生烃能力一直缺乏系统研究。针对这一问题,本文选择羌塘盆地石炭—二叠系8条剖面的暗色泥岩及碳酸盐岩样品,对其从有机质丰度、有机质类型和热演化程度等方面进行了有机地球化学特征的分析。研究发现,石炭—二叠系可能烃源岩类型包括泥岩和碳酸盐岩两种,其分布总体上受沉积相的控制,碳酸盐岩烃源岩可能为局限台地相发育的泥晶灰岩,而泥质烃源岩主要为三角洲及斜坡相发育的暗色泥岩及凝灰质泥岩。石炭—二叠系泥岩有机碳含量较高,具有较好生烃能力,大多达到烃源岩标准,尤其是刻莫石炭系剖面及贡日二叠系剖面,大多为中等—好烃源岩。碳酸盐岩有机碳含量总体比较低,为非烃源岩。石炭—二叠系碳酸盐岩烃源岩有机质类型为Ⅱ₁型,泥质烃源岩有机质类型主要为Ⅱ₂—Ⅲ型。石炭—二叠系烃源岩热演化程度总体较高,除盆地东部刻莫石炭系剖面处在成熟阶段外,大都处在高成熟—过成熟阶段,非常有利于天然气的生成,具备良好的天然气勘探前景。

关键词:羌塘盆地; 石炭—二叠系; 烃源岩; 有机质丰度; 有机质类型; 有机质成熟度

中图分类号: P618.130.2; TE122.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2017)03-0499-12

Organic geochemistry of Carboniferous–Permian sources rocks in Qiangtang Basin, Tibet

CHEN Wenbin¹, FU Xiugen^{1,2}, TAN Fuwen^{1,2}, ZENG Shengqiang¹, FENG Xinglei¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The Jurassic source rocks have long been one of the research hotspots, but the Carboniferous–Permian source rocks' capability of hydrocarbon generation has not aroused much attention due to the scattered distribution in Qiangtang Basin. Organic geochemical characteristics of carbonate rock and mudstone samples from eight sections in the Carboniferous–Permian strata of Qiangtang Basin were analyzed for the organic matter abundance, types and thermal evolution. The authors found that source rocks, including carbonate rock and mudstone, were influenced by the evolution of sedimentary environment. The carbonate source rocks might have been the micrite limestone of the carbonate platform, and the mudstone source rocks were mainly the dark mudstone of

收稿日期: 2016-03-03; 改回日期: 2016-06-20

基金项目: 中国地质调查局天然气水合物试采专项(GZH201400301)、青藏地区油气评价项目(1212011221114)及国家自然科学基金项目(41172098)联合资助。

作者简介: 陈文彬, 男, 1979年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事羌塘盆地石油地质研究; E-mail: cdcwenbin@qq.com。

delta and slope facies and tuffaceous mudstone. The organic carbon content of Carboniferous–Permian mudstone is higher, suggesting hydrocarbon–generative potential; most sections have moderate to high content of organic carbon except Rejuechaka section which has no or poor source rock. Kemo section and Gongri section have mainly reached the standard of mid–good hydrocarbon source rock. However, the Carboniferous–Permian carbonate rock shows a lower content of organic carbon, with no or poor source rock. The type of organic matter of Carboniferous–Permian carbonate rock is mainly II₁, but the type of organic matter of Carboniferous–Permian mudstone is mainly II₂ and III. The degree of thermal evolution of Carboniferous Permian source rock is generally high, and all the source rocks, except for the Kemo areas where the source rock is at the mature stage, are mostly in the high mature and over–mature stage. Such a situation is very favorable for the generation of natural gas and has a good prospect of natural gas exploration.

Key words: Qiangtang Basin; Carboniferous–Permian; source rocks; abundance of organic matter; type of organic matter; maturity of organic matter

About the first author: CHEN Wenbin, male, born in 1979, senior engineer, master, engages in the petroleum geological study of the Qiangtang Basin; E–mail: cdwenbin@qq.com.

Fund support: Supported by the Program of China Geological Survey (No. GZH201400301, No.1212011221114), National Natural Science Foundation of China (No. 41172098).

1 引 言

羌塘盆地内部主要为中生代海相地层所覆盖,而晚古生代地层在羌塘盆地内部多被覆盖,仅在盆地中部及东部零星出露(郑洪伟等,2012;曾胜强等,2013)。因此,长期以来,对于羌塘盆地中生代烃源岩已经做了大量的工作(秦建中,2006;陈文彬等,2015),而对古生代烃源岩研究较少,一直都缺乏有效认识。但是一些学者很早就注意到了羌塘盆地古生代烃源岩可能具有一定生烃潜力,如李才等指出在中央隆起的北缘发育有稳定台型的泥盆纪—三叠纪沉积(李才等,2005),在一些未变质地区古生代D–T地层可能也具有一定生烃潜力;王成善等也认为羌塘盆地内发育厚度较大的早古生代海相沉积有可能成为盆地新的成藏组合(王成善等,2006);陈文彬等在羌塘盆地中部首次发现了一套石炭系烃源岩(陈文彬等,2013),达到了好烃源岩的标准;2014年成都地质矿产研究所在羌塘盆地中部实施的QZ–5井钻遇二叠纪地层,并在其中发现了二叠系的油苗(宋春彦等,2014),油源对比显示其来自二叠系烃源岩(陈文彬,2017)。那么,羌塘盆地晚古生代地层烃源岩特征和勘探潜力如何?有可能成为盆地又一个重要勘探目的层和新领域吗?针对该领域的勘探现状和存在问题,笔者在羌塘盆地采集了8条有代表性的石炭—二叠系烃源岩样品,运用有机地球化学方法,对其有机质丰度、有

机质类型、热演化程度等方面进行了详细研究。

2 地质背景、可能烃源岩沉积特征

2.1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原腹地,行政上属于青海省和西藏自治区管辖,是青藏高原最大的含油气盆地,其南北宽约300 km,东西长约640 km,总面积约 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (王剑等,2009)。羌塘盆地是在前古生界结晶基底和古生界褶皱基底之上发育起来的以中生界海相沉积为主的一个残留盆地,构造较为复杂,以可可西里—金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带为界,北部为北羌塘拗陷,中部为中央隆起,南部为南羌塘拗陷(图1)。在羌塘盆地中部的中央隆起带,主要由前泥盆纪变质岩系和古生代地层构成。盆地内主要发育三套地层,即泥盆系—中三叠统海相碳酸盐岩、砂泥岩夹火山岩、硅质岩组合,上三叠统一白垩系滨浅海碎屑岩、台地碳酸盐岩、三角洲相碎屑岩夹膏盐岩组合,以及古近系—新近系陆相碎屑岩组合(赵政璋等,2000a)。

2.2 石炭—二叠时期沉积特征

羌塘盆地石炭—二叠地层主要发育了瓦垄山组(C_{1-2w})、擦蒙组(C_{2c})、杂多群(C_{1s})、展金组(P_{1z})、鲁谷组(P_{1l})、那益雄组(P_{3n})及热觉茶卡组(P_{3r})等地层(表1),这些地层中包含了碳酸盐岩台地边缘斜坡相、碳酸盐岩台地相、海陆过渡三角洲和潮坪等环境的沉积记录(图2)。

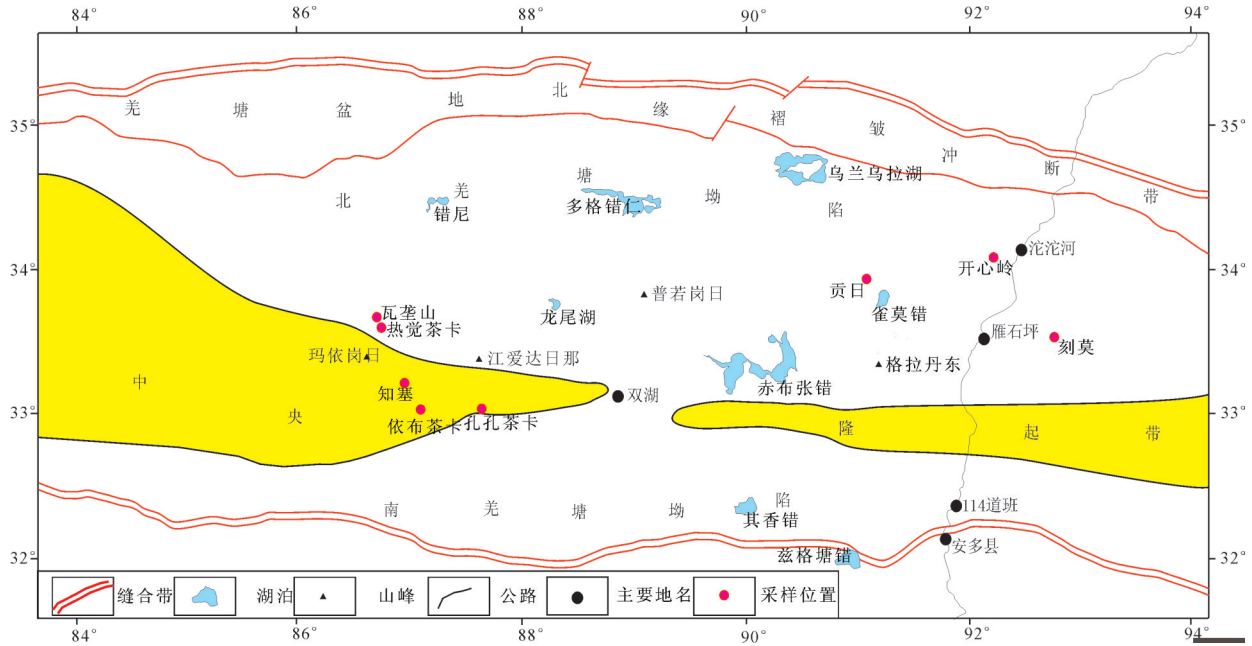


图1 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩剖面取样位置

Fig. 1 Sampling sites in Carboniferous-Permian source rocks in the Qiangtang Basin

瓦垒山组($C_{1-2}w$)地层岩性组合特点可分为上、下两部分,下部以黑灰色中厚层状泥晶灰岩、中薄层状泥质条纹灰岩及生物碎屑灰岩为主夹少量粉砂岩,普遍产珊瑚,腕足类,海百合茎,筳及非筳有孔虫化石,未见底。上部以黄灰色中层状中粉长石石英砂岩、细砂岩,褐灰色粉砂岩,

含炭质粉砂岩为主夹数层生物碎屑灰岩,灰岩中普遍产珊瑚、筳、层孔虫、苔藓虫等,粉细砂岩普遍产保存欠佳的腕足类、双壳类化石,未见顶。总体为一套碳酸盐岩台地相沉积环境,可能烃源岩为局限台地相发育的泥晶灰岩,其厚度在200 m左右,约占地层厚度的68.1%。

杂多群(C_{1s})地层整体以陆源碎屑岩为主,岩性以岩屑石英砂岩、岩屑长石石英砂岩为主,夹粉砂质泥岩和泥页岩。砂岩单层厚度以中厚层为主,发育平行层理、水平层理、小型交错层理;泥岩中发育水平层理。该套沉积物总体上显示为三角洲相环境,可能烃源岩为一套前三角洲相发育的暗色泥岩,残余厚度为127.4 m,约占地层厚度的23.6%。

擦蒙组(C_{2c})在沉积学响应上表现出灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、灰黄色中厚层状细中粒长石石英砂岩与灰黄色含砾不等粒长石岩屑砂岩向上变粗的基本沉积层序特点,为典型三角洲沉积序

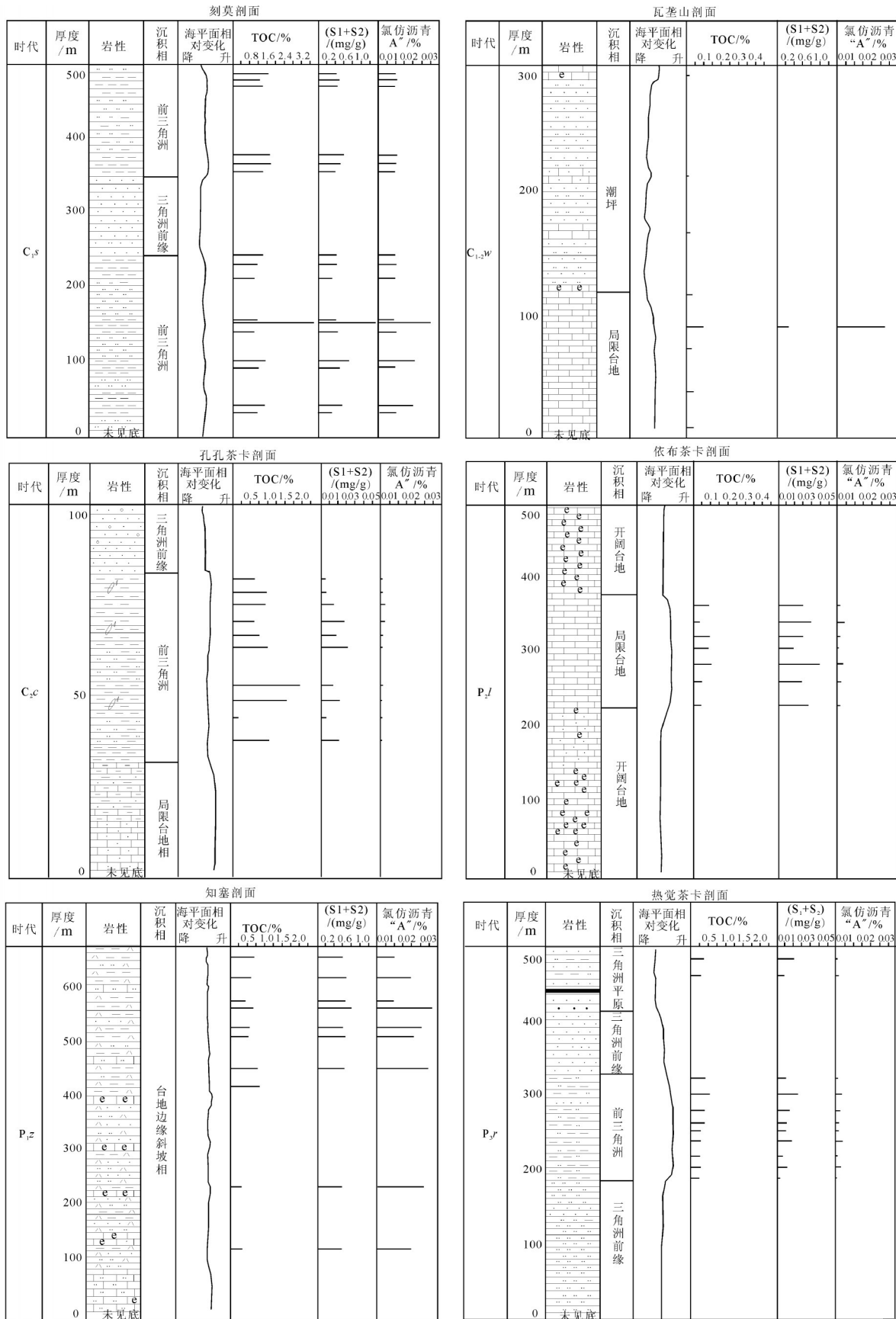
列;而泥岩段中具冰川搬运特征(压裂面、熨斗石)的砾石发育穿层现象,说明同期伴生冰筏沉积。其中可能烃源岩为一套前三角洲相暗色泥岩,厚度约为20 m,约占地层厚度的20.8%。

展金组(P_{1z})地层主要为一套中厚状凝灰质砂岩、中薄层状泥岩,夹中薄层泥晶灰岩,产丰富的腕足、苔藓虫、海绵、海百合茎、珊瑚等生物化石,整体

表1 羌塘盆地石炭—二叠纪地层划分与对比 (据王剑等,2009修改)

Table 1 Stratigraphic classification and correlation of Carboniferous-Permian strata in the Qiangtang Basin (modified from Wang Jian et al,2009)

| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |



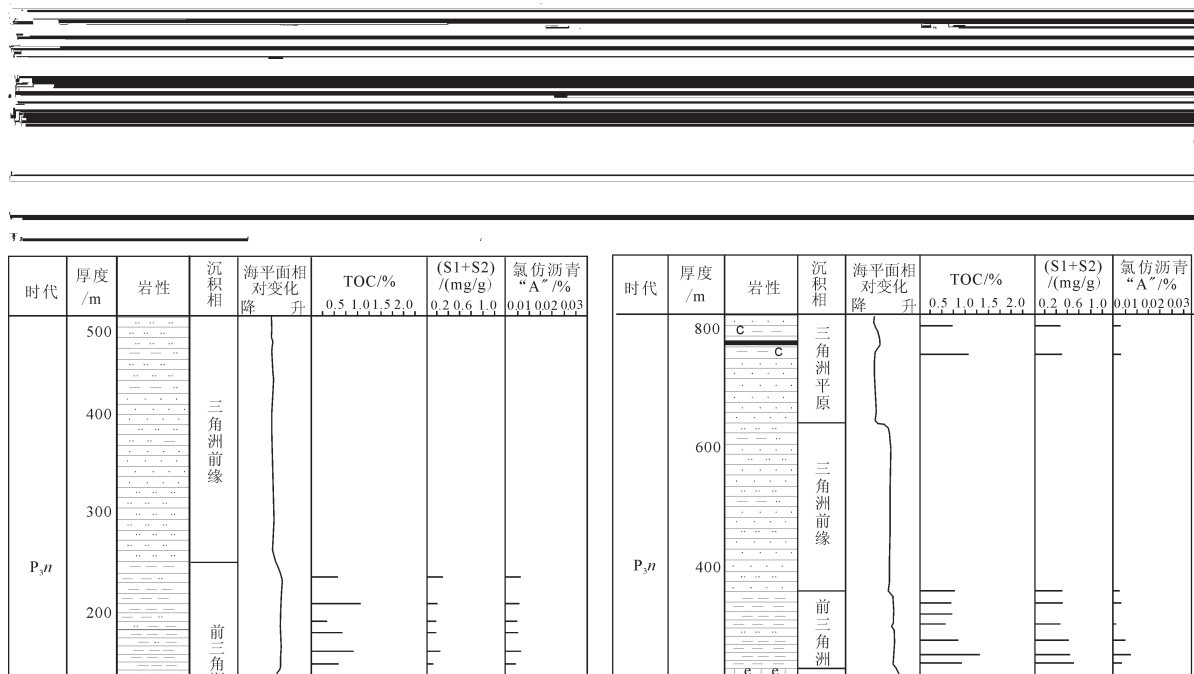


图2 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩剖面沉积特征及有机质丰度含量变化柱状图

Fig.2 The depositional characteristics and the histogram changes of organic abundance of Carboniferous-Permian source rocks in the Qiangtang Basin

为一套台地边缘斜坡相沉积环境。其中可能的烃源岩为下斜坡相的含凝灰质粉砂质泥岩及凝灰质泥岩,其残余厚度大于50 m,约占地层厚度的7.8%。

鲁谷组(P₂l)地层主要为一套灰色中层状泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩等,碎屑岩为灰色、黄灰色中—薄层状粉砂岩、钙泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等细碎屑岩。含丰富的珊瑚、腕足、筴类、网格苔藓虫和牙形石等。灰岩段底部与下伏火山岩段整合接触,上未见顶,总体表现为一套碳酸盐台地沉积环境,其中可能烃源岩为一套局限台地相发育的泥晶灰岩,厚度在100 m以上,约占地层厚度的19.4%。

那益雄组(P₃n)地层岩性主要以灰、灰黑色薄层状含炭质、钙质粉砂质泥岩为主,夹灰色中层状泥晶灰岩、生物屑泥晶灰岩、厚层状泥晶砂屑灰岩、薄层泥灰岩以及石英粉(细)砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩、岩屑砂岩等,中、上部夹两层薄煤层,近顶部夹灰绿色中层状火山岩层。粉砂岩及粉砂质泥岩中发育水平层理,石英细砂岩中发育小型交错层理。产筴类、非筴有孔虫、腕足类以及少量的珊瑚类、双壳类等。从沉积环境看,那益雄组为一套海陆交互相沉积环境,可能烃源岩为前三角洲发

育的暗色泥岩,开心岭剖面泥质岩厚度为146.2 m,约占地层厚度的19.4%;贡日剖面泥岩厚度为122.8 m,约占地层厚度的22.1%。

热觉茶卡组(P₃r)为一套灰色含煤碎屑岩,岩性为灰—深灰色中厚层粗砂岩、粉砂岩、页岩、泥岩夹薄煤层,为一套三角洲相沉积环境,其中可能烃源岩为前三角洲发育的暗色泥岩,厚度约80 m,约占地层厚度的15.9%。

由以上可见,羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩分布总体上受沉积相的控制(图2),碳酸盐岩可能烃源岩为局限台地相发育的泥晶灰岩,泥质岩可能烃源岩主要为三角洲及斜坡相发育的暗色泥岩及凝灰质泥岩。而从沉积旋回上分析,羌塘盆地石炭—二叠纪沉积时期表现为海进—海退旋回:瓦垄山组时期,碳酸盐岩台地相与潮坪相交互相出现,沉积物主要以灰岩为主;擦蒙组沉积期和杂多群沉积期则主要表现为海陆交互相沉积;晚二叠世后期海平面持续下降,逐渐向潮坪环境和海陆交替的三角洲环境转变。从图2也可以看出,三角洲相发育的泥质岩烃源岩有机碳含量明显要好于局限台地相碳酸盐岩,因此,海陆交互相沉降时期及其临近地层是最有利的石炭—二叠纪烃源岩层。

3 有机质丰度

3.1 有机质丰度评价标准

有机质丰度是烃源岩评价的最基本依据之一,常用有残余有机碳、氯仿沥青“A”、总烃含量、残余生烃潜力等进行评价。对于泥岩样品,国内外的评价标准基本一致,下限为0.4%或者0.5%。而对于碳酸盐岩样品各类评价标准不一,但是总体较低,一般在0.05%~0.50%范围,总体来看,国外的标准高于国内标准,一般在0.5%左右,国内早期的标准都很低,有的甚至低至0.05%(付家谟等,1982; Tissot B P et al., 1984; Peters K E et al., 1994; Bjoroy M et al., 1994; 张水昌等,2002; 柳广弟,2009; 陈建平等,2012),但是近年来,越来越多的学者对国内外碳酸盐岩烃源岩进行了广泛的调研和评价,认为碳酸盐岩和泥岩作为有效烃源岩的有机质丰度下限没有本质区别,其有机碳含量必须大于0.5%,低丰度的碳酸盐岩不能作为有效烃源岩(张水昌等,2002),因而本次评价烃源岩时参考了这一最新的烃源岩评价标准,泥质烃源岩和碳酸盐岩烃源岩残余有机碳下限均为0.5%。由于羌塘盆地目前所采样品大多来源于地表露头,样品经历了很强的风化作用,热演化程度很高,衡量有机质丰度的可溶有机质指标如氯仿沥青“A”、生烃潜力等受影响较大,因此评价时主要选用受风化作用和成熟度影响较小的有机碳含量作为主要评价指标,其他指标仅供参考。

3.2 有机质丰度评价

野外采集了89件羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩样品,岩石类型主要为泥晶灰岩、粉砂质泥(页)岩以及泥(页)岩等。为了降低地表现代有机物质的污染、减小因生物降解对沉积有机质的影响,在采样时尽量采集地表新鲜的岩石样品,并用小刀刮去样品表面相对松散的物质。所有样品的有机地球化学测试均在中国石油华北油田分公司勘探开发研究院生油实验室完成,各个剖面有机碳含量变化见图2,总体来看,羌塘盆地石炭—二叠系泥质烃源岩有机碳含量明显要高于碳酸盐岩烃源岩。

石炭系一共测试了34件样品,总体上泥质烃源岩达到了烃源岩标准,而碳酸盐岩没有达到烃源岩最低标准。在羌塘盆地中部的孔孔茶卡地区,测试了10件擦蒙组泥岩样品,其有机碳含量0.20%~

1.97%,平均1.15%,为差烃源岩或中等烃源岩。在羌塘盆地东部的刻莫地区,测试了16件泥岩样品,其有机碳含量1.04%~3.78%,平均1.51%,均为中等—好烃源岩(图2)。在羌塘盆地中部瓦垄山剖面,测试了8件瓦垄山组灰岩样品,有机碳含量0.01%~0.12%,平均0.04%,为非烃源岩(图2)。

二叠系烃源岩一共测试了55件样品,总体上也是泥质岩好于碳酸盐岩(表2)。在羌塘盆地中央隆起带附近的知塞剖面,一共测试了10件展金组泥岩样品,有机碳含量从0.35%~0.98%,平均0.62%,除少数样品未达到烃源岩标准外,大部分为差烃源岩(图2)。在热觉茶卡剖面,测试了11件热觉茶卡组泥岩样品,有机碳含量从0.25%~0.56%,平均0.35%,大部分未达到烃源岩标准,少数为差烃源岩(图2)。在东部开心岭一带,测试了11件那益雄组泥岩样品,其有机碳含量从0.34%~1.28%,平均0.77%,仅1件样品未达到烃源岩标准,总体为差—中等烃源岩(图2)。在雀莫错贡日乡剖面,测试了16件那益雄组泥岩样品,有机碳含量从0.42%~2.87%,平均0.99%,总体为差—中等烃源岩,少数达到好烃源岩标准(图2)。在羌塘盆地中部依布茶卡地区,7件鲁谷组灰岩样品有机碳含量0.04%~0.11%,平均0.07%,未到达烃源岩标准(图2)。

羌塘盆地石炭—二叠系样品中,有机碳含量与氯仿沥青“A”大致呈正线性关系,但是氯仿沥青“A”含量普遍比较低,大多为非烃源岩或差烃源岩(图3);生烃潜量(S_1+S_2)更低,有机碳含量与生烃潜量(S_1+S_2)基本无线性关系,所有样品均未达到烃源岩标准(图3)。造成此的原因可能是石炭—二叠系烃源岩的热演化程度比较高,同时研究的样品为露头样品,遭受大气雨水的淋漓、风化作用影响较大。

综上,羌塘盆地石炭—二叠系泥质烃源岩有机碳含量明显要高于碳酸盐岩烃源岩。碳酸盐岩有机碳含量低,为非烃源岩;泥质岩有机碳含量较高,除热觉茶卡组烃源岩外,大都达到烃源岩标准,尤其是刻莫石炭系及贡日二叠系烃源岩,以中等—好为主,具有较好生烃能力。

4 有机质类型

干酪根显微组分鉴定也是常用的判定有机质类型的方法,它通过透射显微镜和荧光显微镜对于

表2 羌塘盆地有机质类型测试结果

Table 3 Test results of organic matter type of Carboniferous–Permian source rocks in the Qiangtang Basin

| 采样位置 | 层位 | 岩性 | 岩性 | | | 指数 TI | 碳同位素/‰ | 类型 |
|-------|-----------------|----|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|-----------------|
| | | | 腐泥组 | 镜质组 | 惰质组 | | | |
| 刻莫剖面 | C _{1s} | 泥岩 | 35~58 47(16) | 18~52 31(16) | 5~37 22(16) | -21.50~24.75 1.70 (16) | -25.8~-25.1 -25.5(16) | II ₂ |
| 瓦垄山剖面 | C _{2w} | 灰岩 | 70(1) | 1 | 21(1) | 58(1) | -25.1(1) | II ₁ |

注:表中分式含义:分子最小值~最大值,分母为平均值(样品数)。

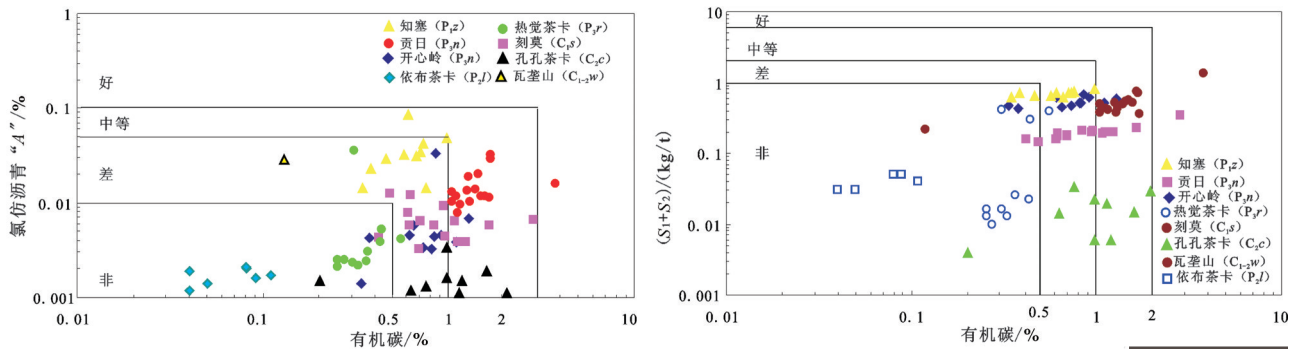


图3 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩有机碳含量与氯仿沥青“A”、有机碳含量与生烃潜力关系图

Fig. 3 Correlation between TOC and chloroform bitumen “A”, TOC and hydrocarbon potential of Carboniferous - Permian source rocks in the Qiangtang Basin

酪根显微组分进行鉴定进而确定有机质类型。羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩样品干酪根显微组分分析表明:石炭—二叠系烃源岩样品中有机显微组成主要以腐泥组为主,其次是惰质组和镜质组,不含壳质组和沥青组(表2),在干酪根显微组分三角图中,绝大部分投点接近腐泥组一角(图4)。根据干酪根类型指数(TI)=[腐泥组×100+壳质组×50+镜质组×(-75)+惰质组×(-100)]/100,研究区石炭—二叠系烃源岩类型指数TI计算结果如下(表2),其中开心岭剖面(P_{3n})TI值为-10.75~38,主要为II₂型有

机质,还有少量III型有机质;贡日剖面(P_{3n})TI值为1~33.50,显示其为II₂型有机质;展金组(P_{1z})TI值为-71.50~22.25,显示其为II₂型有机质和III型有机质;热觉茶卡组TI值为-38.75~39.75,显示其为II₂型有机质,还有少量III型有机质;依布茶卡剖面1件样品TI值为75.25,显示其为II₁型有机质;孔孔茶卡剖面TI值为4~50,显示其主要为II₂型,还有少量II₁型有机质;瓦垄山剖面1件样品TI值为58,显示其为II₁型有机质;刻莫剖面TI值为-21.50~24.75,显示其有机质主要为III型,还有少量II₂型有

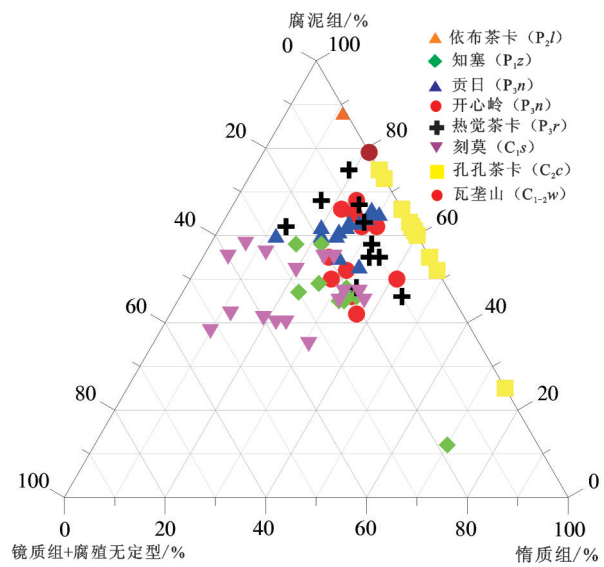


图4羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩干酪根显微组分三角图
Fig. 4 Maceral triangular plots of kerogen for Carboniferous-Permian source rocks in the Qiangtang Basin

机质。

干酪根元素分析也是常用的鉴定干酪根类型的方法。从羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩干酪根碳氢、氧3种元素的含量特征来看,所研究的暗色灰岩、泥岩样品中干酪根的碳元素含量最高达20.41%~78.22%,平均为50.16%;氧元素含量次之,平均含量为6.13%,最大值达15%,最小也有0.43%;氢元素含量较低,为0.98%~2.97%,平均值仅为1.56%。对羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩干酪根元素分析表明,H/C原子比分布范围为0.10~0.57,平均值为0.37;O/C原子比范围为0.01~0.19,平均值为0.01。将所有样品投在范氏(Van Krevelen)图上,这些点大多位于Ⅲ型干酪根区间(图5),还有部分Ⅱ₂型和Ⅰ型,与前面干酪根碳同位素鉴定结果差异较大。造成这种原因可能是研究的样品为地表样品,不同程度地受到风化作用的影响,同时也可能与烃源岩热演化程度高有关(孟元林等,1999;卢双舫等,2008)。

干酪根碳同位素主要取决于它们的生物先驱物、有机相及沉积环境,因此干酪根有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)常用来判断烃源岩母质类型。对于羌塘盆地,干酪根碳同位素小于-28‰的为Ⅰ型有机质,干酪根碳同位素大于-24‰的为Ⅲ型有机质,干酪根

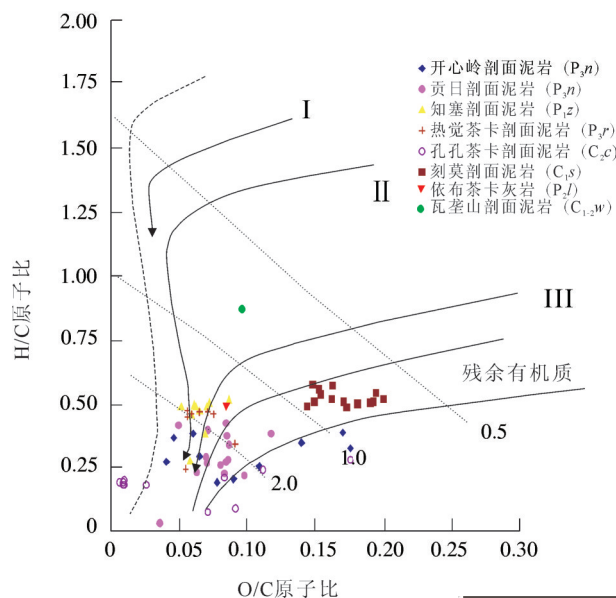


图5羌塘盆地石炭—二叠系泥岩H/C-O/C原子比图解
Fig. 5 Van Krevelen diagram of kerogen elements of Carboniferous-Permian source rocks in the Qiangtang Basin

碳同位素介于其间的为Ⅱ型有机质,其中-28‰~-26‰的为Ⅱ₁型,干酪根碳同位素-26‰~-24‰的为Ⅱ₂型(赵政璋等,2000b;丁文龙等2010)。羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩干酪根碳同位素分布显示,碳酸盐岩烃源岩有机质类型为Ⅱ₂型,泥质烃源岩有机质类型主要为Ⅱ₂-Ⅲ型,并且随着地层由老至新,干酪根碳同位素有逐渐加重的趋势(图6,表2)。其中开心岭地区那益雄组烃源岩干酪根碳同位素值为-23.8‰~-22.4‰,平均值-23.2‰,表现有机质类型主要为Ⅲ型;贡日地区那益雄组烃源岩碳同位素值介于-23.6‰~-22.3‰,平均值-22.8‰,表现有机质类型主要为Ⅲ型;展金组烃源岩碳同位素值为-24.3‰~-23.2‰,平均值-23.8‰,表现有机质类型主要为Ⅱ₂-Ⅲ型;热觉茶卡组烃源岩碳同位素值为-24.6‰~-23.5‰,平均值-24.0‰,表现有机质类型主要为Ⅱ₂-Ⅲ型;依布茶卡鲁谷组1件烃源岩干酪根碳同位素值为-23.07‰,表现有机质类型主要为Ⅱ₂型;孔孔茶卡擦蒙组烃源岩碳同位素值为-23.6‰~-23.2‰,平均值-23.4‰,表现有机质类型主要为Ⅲ型,少量为Ⅱ₂型;瓦垄山组1件烃源岩干酪根碳同位素值为-25.1‰,表现有机质类型主要为Ⅱ₂型;刻莫地区杂多群烃源岩碳同位素值为-

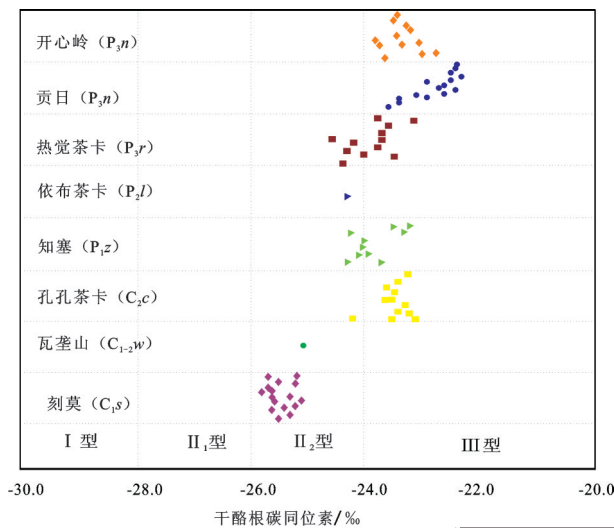


图6 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩干酪根碳同位素分布图
Fig. 6 Kerogen carbon isotope distribution for Carboniferous-Permian source rocks in the Qiangtang Basin

25.8‰ ~ -25.1‰, 平均值-25.5‰, 表现有机质类型主要为II₂型。与干酪根镜检的结果相比, 干酪根碳同位素略微偏重。已有研究表明, 沉积岩中干酪根碳同位素组成除取决于它们的前身碳同位素组成外, 还受到热演化程度影响, 随着热演化程度的提高稍有变重的趋势(一般小于2‰)(王大锐等, 2000), 研究的样品大部分位于中央隆起带附近, 同时石炭—二叠系埋深较大, 热演化程度普遍较高, 因此石炭—二叠系烃源岩干酪根碳同位素偏重可能与其烃源岩热演化程度较高也有一定关系。

综合考虑到各种因素的影响认为研究的石炭—二叠系碳酸盐岩烃源岩有机质类型主要以II₁型为主, 泥岩有机质类型主要为II₂~III型。

5 有机质热演化程度

有机质热演化程度是烃源岩评价的重要地球化学指标之一, 它决定着一个盆地的油气勘探方向。镜质体反射率(R_o)是温度和有效加热时间的函数, 被公认为划分成熟阶段的最可靠、应用范围最广的指标(王启军, 1988)。羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩实测镜质体反射率数据见表3, 从测试的结果来看, 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩样品成熟度较高, 除刻莫石炭系烃源岩处在成熟阶段外, 其余都处在高成熟—过成熟阶段。具体到各个剖面

的结果如下: 盆地东部石炭系刻莫剖面烃源岩 R_o 值为0.92%~0.97%, 平均值0.95%, 显示烃源岩处在成熟阶段, 以生油为主; 而中部的孔孔茶卡地区石炭系烃源岩 R_o 值为2.01%~2.89%, 平均值2.37%, 显示烃源岩已经达到过成熟阶段, 以生成干气为主。盆地中部二叠系知塞剖面烃源岩镜质体反射率 R_o 值为1.54%~1.59%, 热觉茶卡剖面二叠系烃源岩镜质体反射率 R_o 值为1.57%~1.98%, 依布茶卡灰岩中有1件样品 R_o 值为1.60%, 处在高成熟阶段, 以生成凝析油和湿气为主; 而盆地东部的二叠系开心岭剖面和贡日剖面, R_o 值为2.06%~2.34%, 显示烃源岩两者均已经达到过成熟阶段, 以生成干气为主。

石炭—二叠系烃源岩饱和烃 CPI 、 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$ 、 $C_{29}\alpha\beta\beta / (\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 及 $22S / 22R$ (C_{31} 藿烷) 等值也都达到或接近热演化平衡值(表4), 故应用其基本已无法准确判别烃源岩真实的热演化程度。相比较而言, 芳烃较饱和烃有更宽的化学动力学范围和一定的优越性, 在热演化程度确定上具有更宽指示范围的优势。芳烃中菲系列化合物是芳香烃馏分中的重要组分, 常用菲(P)及甲基菲(MP)系列化合物的相关比值对高演化烃源岩进行成熟度研究。样品中检测出了菲及同系物, 以甲基菲含量最为丰富, 包括1-甲基菲、2-甲基菲、3-甲基菲和9-甲基菲。Radke et al.(1981)首先提出用甲基菲指数(MPI1)作为成熟度指标, 该值与镜质体反射率存在良好相关性, 其关系如下: $R_c = 0.60MPI1 + 0.40$ ($R_o < 1.35$), $R_c = -0.60MPI1 + 2.30$ ($R_o > 1.35$) (Radke, 1981), 分析结果表明, 刻莫地区石炭系杂多群(C_{1s})的MPI1值为0.16~0.69, 平均0.49($n=16$), 其等效镜质体反射率值为0.50%~0.81%, 平均0.70%(表3), 表明其处在成熟阶段; 其余石炭—二叠系剖面MPI1值为0.38~0.81, 其等效镜质体反射率值为1.81%~2.20%(表3), 表明其处在高成熟—过成熟阶段, 上述用芳烃参数计算得到的 R_c 与镜质体反射率结果基本一致。

综合考虑到各种因素的影响认为研究的石炭—二叠系烃源岩有机质热演化程度总体较高, 除刻莫地区处在成熟阶段外, 其余处在高成熟—过成熟阶段。由于研究的样品主要分布在中央隆起带与南羌塘坳陷的边界断层带, 而东部的贡日剖面和开心岭剖也位于北羌塘断褶带附近, 断层和褶皱非常

表3 羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩Ro-Tmax值统计
Table 3 Ro-Tmax data of Carboniferous-Permian source rocks from Qiangtang Basin

| 剖面 | 地层 | Ro/ % | CPI | C _{29-20S} /(20S+20R) | C _{29αββ} /(ααα+αββ) | C _{31-22S} /22R | MPI1 | Rc | 演化 阶段 |
|------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
| 刻莫 | C _{1s} | <u>0.92~0.97</u> 0.95 (16) | <u>1.03~1.32</u> 1.17 (16) | <u>0.17~0.45</u> 0.37 (16) | <u>0.27~0.49</u> 0.42 (16) | <u>0.94~1.97</u> 1.46 (16) | <u>0.16~0.69</u> 0.50 (16) | <u>0.50~0.81</u> 0.70 (16) | 成熟 |
| 瓦垄山 | C _{1-2w} | / | 1.13(1) | 0.38(1) | 0.54(1) | 1.83(1) | 0.38(1) | 2.07(1) | 过成熟 |
| 孔孔茶卡 | C _{2c} | <u>2.01~2.89</u> 2.37 (10) | <u>0.74~1.14</u> 1.01 (10) | <u>0.34~0.46</u> 0.41 (10) | <u>0.38~0.48</u> 0.45 (10) | <u>0.98~1.79</u> 1.41 (10) | <u>0.38~0.47</u> 0.44 (4) | <u>2.02~2.07</u> 2.03 (4) | 过成熟 |
| 依布茶卡 | P _{1l} | 1.60 (1) | / | 0.34(1) | 0.41(1) | 0.60(1) | / | / | 高成熟 |
| 知塞 | P _{1z} | <u>1.54~1.59</u> 1.57 (10) | <u>0.95~2.35</u> 1.21 (10) | <u>0.40~0.49</u> 0.45 (10) | <u>0.44~0.58</u> 0.50 (10) | <u>1.38~1.91</u> 1.56 (10) | <u>0.42~0.81</u> 0.53 (10) | <u>1.81~2.05</u> 1.98 (10) | 高成熟 |
| 热觉茶卡 | P _{3r} | <u>1.57~1.98</u> 1.68 (11) | <u>1.01~1.12</u> 1.07 (11) | <u>0.33~0.46</u> 0.40 (11) | <u>0.38~0.49</u> 0.44 (11) | <u>0.87~1.90</u> 1.47 (11) | <u>0.45~0.76</u> 0.60 (3) | <u>1.84~2.03</u> 1.94 (3) | 高成熟 |
| 开心岭 | P _{3n} | <u>2.25~2.34</u> 2.28 (11) | <u>1.0~1.34</u> 1.11 (11) | <u>0.29~0.57</u> 0.38 (11) | <u>0.31~0.59</u> 0.46 (11) | <u>1.07~1.60</u> 1.38 (11) | <u>0.46~0.63</u> 0.56 (11) | <u>1.92~2.02</u> 1.96 (11) | 过成熟 |
| 贡日 | P _{3n} | <u>2.06~2.25</u> 2.16 (15) | <u>0.91~1.38</u> 1.01 (15) | <u>0.32~0.45</u> 0.38 (15) | <u>0.33~0.48</u> 0.42 (15) | <u>1.13~1.88</u> 1.42 (15) | <u>0.16~0.59</u> 0.46 (15) | <u>1.94~2.20</u> 2.02 (15) | 过成熟 |

注:表中分式含义:分子最小值~最大值,分母为平均值(样品数)。

发育,这可能是导致烃源岩有机质的热演化程度较高的主要原因。

6 讨 论

羌塘盆地是在古老基底之上形成的以古生代—中生代海相地层为主的大型叠合盆地,泥盆纪—早石炭世时期,羌塘盆地处于冈瓦纳大陆和欧亚大陆的被动大陆边缘沉积环境(和钟铎等,2000)。石炭纪以后随着拉张作用的继续进行,海平面不断上升,并逐渐将整个羌塘地块淹没,主要形成了一套稳定型的细碎屑岩—碳酸盐岩沉积环境(李才等,2005),因此在盆地中部瓦垄山地区发育了一套碳酸盐岩台地沉积,在刻莫地区和孔孔茶卡地区则沉积了一套以碎屑岩为主的三角洲相沉积。早二叠世末,随着古特提斯洋的关闭,羌塘盆地由伸展构造环境转为挤压构造环境(黄继钧,2000),在中央隆起带角木茶卡地区,展金组为一套中厚层状凝灰质砂岩、中薄层状泥岩夹薄层泥晶灰岩的台地—斜坡相沉积,显示了早二叠世早期为强烈拉张时期(王岫岩等,1999),晚二叠世时期,受金沙江缝合带关闭的影响,同时受全球海面下降的影响,羌塘陆块全面抬升,发生大规模海退(刘勇等,1998),在北

羌塘南部热觉茶卡地区及盆地东部贡日—开心岭地区发育了一套海陆洲相沉积。由此,从沉积演化来看,羌塘盆地自泥盆纪至二叠纪末,形成多期海陆交互相沉积,具备形成烃源岩的沉积环境。从来自羌塘盆地石炭—二叠系露头的烃源岩的有机质丰度的研究结果来看,碳酸盐岩台地相形成的烃源岩有机碳含量低,按照现行的评价标准基本上为非烃源岩;而海陆交互相的泥质烃源岩有机碳含量较高,大多为中等—好烃源岩,因此石炭—二叠时期发育的海陆交互相地层非常有利于优质烃源岩的形成。有机质类型方面,羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩有机质类型主要为Ⅱ₂型—Ⅲ型;烃源岩热演化程度方面,烃源岩主要处在高成熟—过成熟阶段(刻莫地区石炭系烃源岩处在生油高峰期),以生气为主,这说明了羌塘盆地古生代的石炭—二叠纪烃源岩具备较好的油气生成潜力。

7 结 论

(1)羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩分布总体上受沉积相的控制,碳酸盐岩烃源岩可能为局限台地相发育的泥晶灰岩,而泥质烃源岩主要为三角洲及斜坡相发育的暗色泥岩及凝灰质泥岩。其中海陆

交互相沉降时期及其临近地层是最有利的石炭—二叠纪烃源岩层。

(2)羌塘盆地石炭—二叠纪泥质烃源岩有机碳含量明显要高于碳酸盐岩烃源岩。碳酸盐岩有机碳含量低,为非烃源岩;泥质岩有机碳含量较高,除热觉茶卡组烃源岩外,大都达到烃源岩标准,尤其是刻莫石炭系及贡日二叠系烃源岩,以中等—好为主,具有较好生烃能力。

(3)羌塘盆地石炭—二叠系碳酸盐岩烃源岩有机质类型为Ⅱ₁型,泥质烃源岩有机质类型主要为Ⅱ₂—Ⅲ型。

(4)羌塘盆地石炭—二叠系烃源岩有机质热演化程度总体较高,主要处在高成熟—过成熟阶段;但盆地东部刻莫地区石炭系烃源岩主要处在成熟阶段,以生油为主。

References

- Bjoroy M, Hall P B, Moe R P. 1994. Stable carbon isotope variation of nalkanes in Central Graben oils[J]. *Organic Geochemistry*, 22: 355–381.
- Chen Jiangping, Liang Digang, Zhang Shuichang. 2012. Evaluation Criterion and Methods of the Hydrocarbon Generation Potential for China's Paleozoic Marine Source Rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(7):1132–1141(in Chinese with English abstract).
- Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Feng Xinglei. 2013. The discovery and significance of the Carboniferous source rocks in Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1105–1112(in Chinese with English abstract).
- Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Feng Xinglei. 2015. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet [J]. *Geology in China*, 42(4): 1151–1160(in Chinese with English abstract).
- Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Zeng Shengqiang, Feng Xinglei, Song Chunyan, Wang Dong. 2017. Geochemical characteristics and significance of Permian dolomite oil seepages Qiangtang basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3): 611–620(in Chinese with English abstract).
- Ding Wenlong, Li Chao, Su Aiguo, He Zhonghua. 2010. Study on the comprehensive geochemical cross section of Mesozoic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtan basin, Tibeta[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 878–896(in Chinese with English abstract).
- Fu Jiamo, Liu Dehan. 1982. Some charactersitics of the evolution of organic matter in Carbonate Formations[J]. *Acta Petroleum Sinica*, (1):1–8(in Chinese with English abstract).
- He Zhonghua, Li Cai, Yang Deming, Chen Guangquan. 2000. The tectonic– sedimentary feature and evolution of Qiangtang basin in Northern Tibet[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(4) :347–352(in Chinese with English abstract).
- Huang Jiyun. 2000. Nature of the Qiangtang basin and its tectonic evolution[J]. *Journal of Geomechanics*, 6 (4):58– 66(in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhai Qingguo, Cheng Liren, Xu Feng, Huang Xiaopeng. 2005. Though on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai–Tibet plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(4):295–301(in Chinese with English abstract).
- Liu Guangdi, Zhang Houfu. 2009. *Petroleum Geology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press:179–183(in Chinese).
- Liu Yong, Cao Chuncao, Lu Jinhai. 1998. Tectonic evolution in Qiangtang basin of northern Tibet[J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 5(5): 6–12(in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Zhang Min. 2008. *Petroleum Geochemistry*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 65–77(in Chinese).
- Magoon L B, Dow W G. 1991. The petroleum system—from source to trap[J]. *AAPG Memoir*, 14(3): 93–120.
- Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Yang Junsheng, Wang Jianguo, Sun Yuanlin. 1999. Influences of weathering on organic matter of outcrop and correcting methods in Xining Basin[J]. *Geochimica*, 28 (1):42–50(in chinese with English abstract).
- Qin Jianzhong. 2006. Distributions of the main Mesozoic hydrocarbon source rocks in the Qiangtang Basin of the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Pet. Geol. Exp.*, 28(2): 134– 141(in Chinese with English abstract).
- Radke M, Welte D H. 1981. The Methylphenanthrene Index(MPI): A Maturity Parameter Based on Aromatic Hydrocarbons[M]. *Advances in Organic Geochemistry*. Chichester: Wiley, 504–512.
- Song Chunyan, Cao Junfeng, Wang Jian, Tan Fuwen, Fu Xiugen, He Jianglin, Zeng Shengqiang, He Li. 2014. The discovery and basic characteristics of ancient reservoir in Permian of Jiaomuchaka Area, Qiangtang Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 32(1): 87– 91(in Chinese with English abstract).
- Tissot B P, Welte D H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer–Verlag, 1–699.
- Wang Chengshan, Li Yalin, Li Yongtie. 2006. Discussion on evaluation of oil and gas resources in Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Wang Darui. 2000. *Stable Isotope Geochemistry of Oil and Gas*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 179–183(in Chinese).
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen, Chen Ming. 2009. The Investigation and Evaluation of the Oil and Gas Resources in the Qinghai–Xizang Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–22((in Chinese).
- Wang Qijun, Chen Jianyu. 1988. *Petroleum Geochemistry*[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 97–176(in Chinese).
- Wang Xiuyan, Yun Jinbiao, Luo Duqing, Teng Yuhong, Lin Tiefeng.

1999. Discussion on geodynamic evolution and oil-gas prospect of Qiangtang Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 20(3): 38-42(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Dajiang. 2002. Evaluation on criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 29(2): 8-12(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, Zhang Yuwen. 2000a. Mesozoic Sedimentary Facies, Reservoir and Caprock Characteristics on the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1-9(in Chinese).
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, Zhang Yuwen. 2000b. Petroleum Generation of the Marine Source Rocks on the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1-634(in Chinese).
- Zeng Shengqiang, Wang Jian, Fu Xiugen, Feng Xinglei, Sun Wei. 2013. Hydrocarbon generation potential and sedimentary environment for the source rocks along the Changshe Mountain oil shale section in North Qiangtang Basin[J]. *Geology in China*, 40(6): 1861-1871(in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongwei, He Rizheng, Yang Gui. 2012. Geological and geophysical characteristics of Shuanghu-Gangmacuo-Longmucuo structural belt in Qiangtang area[J]. *Geology in China*, 39(5): 1229-1235(in Chinese with English abstract).
- 和钟铎, 李才, 杨德明, 陈光权. 2000. 西藏羌塘盆地的构造沉积特征及演化[J]. *长春科技大学学报*, 30(4): 347-352.
- 黄继钧. 2000. 羌塘盆地性质及构造演化[J]. *地质力学学报*, 6(4): 58-66.
- 李才, 翟庆国, 程立人, 徐峰, 黄小鹏. 2005. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J]. *地质通报*, 2005, 24(4): 295-301.
- 柳广弟, 张厚福. 2009. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 179-183.
- 刘勇, 曹春潮, 吕金海. 1998. 藏北羌塘盆地演化初探[J]. *断块油气田*, 15(5): 6-12.
- 卢双舫, 张敏. 2008. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 65-77.
- 孟元林, 肖丽华, 杨俊生, 王建国, 孙元林. 1999. 风化作用对西宁盆地野外露头有机质性质的影响及校正[J]. *地球化学*, 28(1): 42-50.
- 秦建中. 2006. 青藏高原羌塘盆地中生界主要烃源层分布特征[J]. *石油实验地质*, 28(2): 134-140.
- 宋春彦, 曹俊峰, 王剑, 谭富文, 付修根, 何江林, 曾胜强, 何利. 2014. 羌塘盆地角木茶卡地区二叠系古油藏的发现及基本特征[J]. *新疆地质*, 32(1): 87-91.
- 王成善, 李亚林, 李永铁. 2006. 青藏高原油气资源远景评价问题[J]. *石油学报*, 27(4): 1-7.
- 王大锐. 2000. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 179-183.
- 王启军, 陈建渝. 1988. 油气地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 97-176.
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文, 陈明. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 1-22.
- 王岫岩, 云金表, 罗笃清, 滕玉洪, 林铁峰. 1999. 西藏羌塘盆地动力学演化与油气前景探讨[J]. *石油学报*, 20(3): 38-42.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2000a. 青藏高原中生界沉积相、油气储盖层特征[M]. 北京: 科学出版社, 1-9.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2000b. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京: 科学出版社, 1-634.
- 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 2002. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. *石油勘探与开发*, 29(2): 8-12.
- 曾胜强, 王剑, 付修根, 冯兴雷, 孙伟. 2013. 北羌塘盆地长蛇山油页岩剖面烃源岩生烃潜力及沉积环境[J]. *中国地质*, 40(6): 1861-1871.
- 郑洪伟, 贺日政, 杨贵. 2012. 羌塘地体内部双湖-冈玛错-龙木错构造带地质与地球物理特征[J]. *中国地质*, 39(5): 1229-1235.

附中文参考文献

- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 冯兴雷. 2013. 藏北羌塘盆地石炭系烃源岩的发现及其油气地质意义[J]. *地质通报*, 32(7): 1105-1112.
- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 冯兴雷. 2015. 藏北羌塘盆地上三叠统典型剖面烃源岩地球化学特征研究[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 1151-1160.
- 陈文彬, 付修根, 谭富文, 曾胜强, 冯兴雷, 宋春彦, 王东. 2017. 羌塘盆地二叠系白云岩油苗地球化学特征及意义[J]. *沉积学报*, 35(3): 611-620.
- 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 何春萍, 赵喆, 张蒂嘉. 2012. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. *地质学报*, 86(7): 1132-1141.
- 丁文龙, 李超, 苏爱国, 何忠华. 2010. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩综合地球化学剖面研究及有利生烃区预测[J]. *岩石学报*, 27(3): 878-896.
- 傅家谟, 刘德汉. 1982. 碳酸盐岩有机质演化特征与油气评价[J]. *石油学报*, (1): 1-8.