

内蒙古巴彦浩特盆地及其南缘上石炭统太原组烃源岩有机地球化学

林海涛,张亭荣,冯 岩,杨 才

内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室/内蒙古自治区地质调查院,内蒙古 呼和浩特 010020

摘 要: 内蒙古巴彦浩特盆地广泛发育上石炭统太原组煤系烃源岩。在野外地质勘查、典型剖面实测、样品采集及实验分析基础上,开展了有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度等有机地球化学特征分析与研究,初步对其生烃潜力进行评价。结果表明:太原组烃源岩有机质丰度高,热演化程度属于成熟—高成熟演化阶段,具备较好的页岩气气源条件。通过多因素叠加分析的方法,圈定了页岩气成藏有利区 3 处,分别是北部的查干布拉格有利区、通古勒格淖尔嘎查—伊克尔嘎查苏木有利区和南部的下河沿—营盘水有利区。

关键词: 巴彦浩特盆地;页岩气;有机碳含量;太原组;地球化学有利区;内蒙古

ORGANIC GEOCHEMISTRY OF THE SOURCE ROCKS FROM UPPER CARBONIFEROUS TAIYUAN FORMATION IN BAYAN HOT BASIN, INNER MONGOLIA

LIN Hai-tao, ZHANG Ting-rong, FENG Yan, YANG Cai

Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-prospecting/Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China

Abstract: The coal-bearing source rocks of Upper Carboniferous Taiyuan Formation are widely developed in Bayan Hot Basin of Inner Mongolia. Based on the geological exploration, typical section survey, sampling and experimental analysis, the paper carries out study on the organic geochemical characteristics including organic matter abundance, types and maturity and makes preliminary evaluation on the hydrocarbon potential. The results show that the organic matter of source rocks has good shale gas source conditions with high abundance, the thermal evolution belonging to maturity-high maturity stage. Three favorable areas of shale gas reservoir are selected by multi-factor overlay analysis, namely the northern Chaganbulage, Tonggulegenaoergacha-Yikeergacha and southern Xiaheyan-Yingpanshui areas.

Key words: Bayan Hot Basin; shale gas; TOC; Taiyuan Formation; geochemical favorable area; Inner Mongolia

0 引言

近年来页岩气在美国能源结构体系中的比例稳步上升,这一现象已经证实了以商业规模开采页岩气的

可行性^[1-2]。由于其丰富的资源量和近年来国际市场对天然气需求量的持续增长,页岩气已成为近年全球油气勘探的重点和热点领域之一。我国页岩气勘探开发

收稿日期:2018-03-13;修回日期:2018-08-01。编辑:张哲。

基金项目:内蒙古自治区地质矿产勘查基金“内蒙古自治区巴彦浩特盆地页岩气远景调查评价”项目(编号 2015-01-KY03)。

作者简介:林海涛(1984—),男,硕士,工程师,现从事能源矿产地质调查工作,通信地址 内蒙古自治区呼和浩特市赛罕区金桥世纪五路,E-mail//82728826@qq.com

也取得重大突破,据中国石化新闻网报道^[3],四川盆地涪陵页岩气田 2017 年产气量已达到 $60.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长 20%。

目前我国南方页岩气的重点勘探领域主要为海相地层,北方陆相页岩气在陕西甘泉县也取得重大进展^[4],研究表明^[5],以巴彦浩特盆地石炭系为代表的海陆过渡相沉积体系中同样蕴含着巨大的资源潜力,因此实现该领域页岩气勘探突破具有重要的意义。

1 地质背景

巴彦浩特盆地位于内蒙古自治区阿拉善左旗境内,北西以巴彦乌拉山为界,南临祁连山,东与贺兰山相接,盆地面积 18000 km^2 。巴彦浩特盆地大地构造位置处于华北板块北缘,华北地块北部阴山隆起,在区域构造上位于鄂尔多斯地块、阿拉善地块和祁连山褶皱带三大构造体系接合部位,是叠置在贺兰山拗陷槽与华北地块大陆边缘上的由内陆石炭纪拗陷与中生代断陷双层构造叠置而成的一个复合盆地^[6-9](图 1)。

巴彦浩特盆地及其周缘地区东缘贺兰山中、北段地层发育较为齐全,在老变质岩基底之上,除志留系、泥盆系缺失外,其余各地层基本均有出露。盆地南缘上古生界地层发育较完整,可见局部分布的奥陶系及三叠系地层,盆地西缘露头非常零星,仅毛山、半个山见厚度不大的前寒武系和下石炭统,盆地内部大面积为新生界覆盖。该区石炭系为主要目的层系,自下而上有石炭系下统前黑山组、臭牛沟组,上统太原组,其中太原组为一套海陆交互相含煤地层^[11],是盆地油气勘探的主要目的层。

本次工作及区域地质资料显示,太原组在区内广泛发育。太原组 1 段为一套黑色泥页岩与浅灰色粉细粒、中—粗粒石英砂岩及中—细粒石英砂岩夹薄煤层和薄层生物灰岩、泥灰岩组合。上部见一薄层黑色油页岩,灰岩含蠕、有孔虫化石。太原组 2 段的岩性在南缘主要为暗色泥岩夹薄层灰白色粉—细粒石英砂岩,在盆地北部及东缘地区,主要为黑色泥页岩、灰黑色—灰白色含砾粗粒石英砂岩。太原组 3 段下部以灰白色中厚层细—粉砂岩、泥质粉砂岩、砂质泥岩及灰黑色炭质页岩为主夹薄层灰岩与煤层,上部为灰白色—灰色厚层细—中粒石英砂岩、灰黑色泥质粉砂岩及灰黑色泥岩夹生物灰岩和煤。其中太原组 1 段厚度为 $40 \sim 516 \text{ m}$,

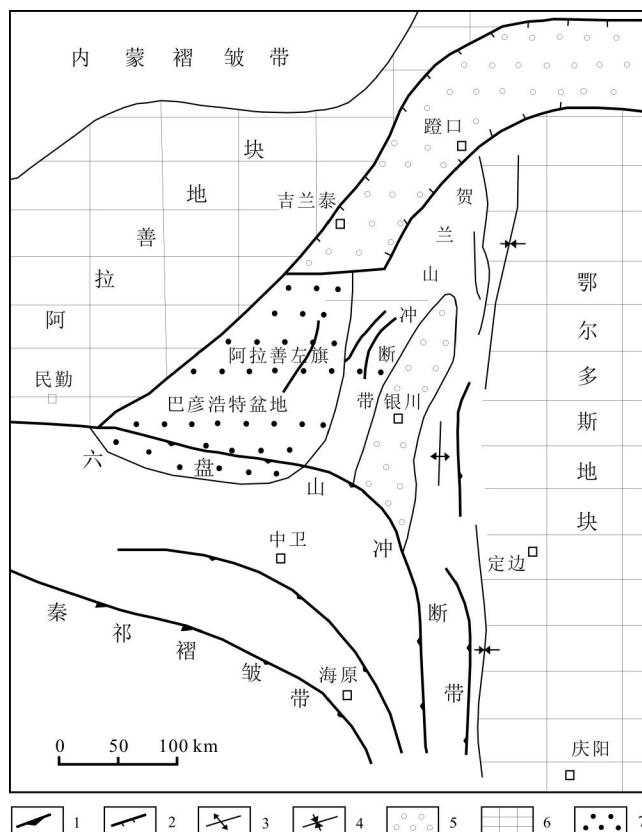


图 1 巴彦浩特盆地大地构造位置示意图
(据文献^[10])

Fig. 1 Geotectonic sketch map of Bayan Hot Basin
(From Reference [10])

1—冲断层(thrust fault); 2—正断层(normal fault); 3—背斜(anticline);
4—向斜(syncline); 5—新生代断陷(Cenozoic fault depression); 6—华北
北地台(North China Platform); 7—J-K 地台(J-K platform)

平均泥地比为 43%; 太原组 2 段厚度为 $70 \sim 460 \text{ m}$, 平均泥地比为 60%; 太原组 3 段厚度为 $50 \sim 330 \text{ m}$, 平均泥地比为 52%。以太原组 3 段及太原组 2 段泥页岩最为发育, 且上石炭统太原组在区内整体上具有北厚南薄, 东厚西薄的分布特征。

2 有机地球化学特征

页岩气有机地球化学特征主要包括有机质丰度、有机质成熟度及有机质类型等方面^[12-15]。本次主要在巴彦浩特盆地及其东南缘露头区开展了地质调查及取样工作(图 2)。采集的样品主要为黑色页岩、黑色泥岩、炭质泥页岩。经室内再次筛选, 挑取 59 件新鲜样品, 送交重庆地质矿产研究院实验中心完成了有机碳含量、干酪根显微组分、镜质体反射率、热解等有机地球化学分析。

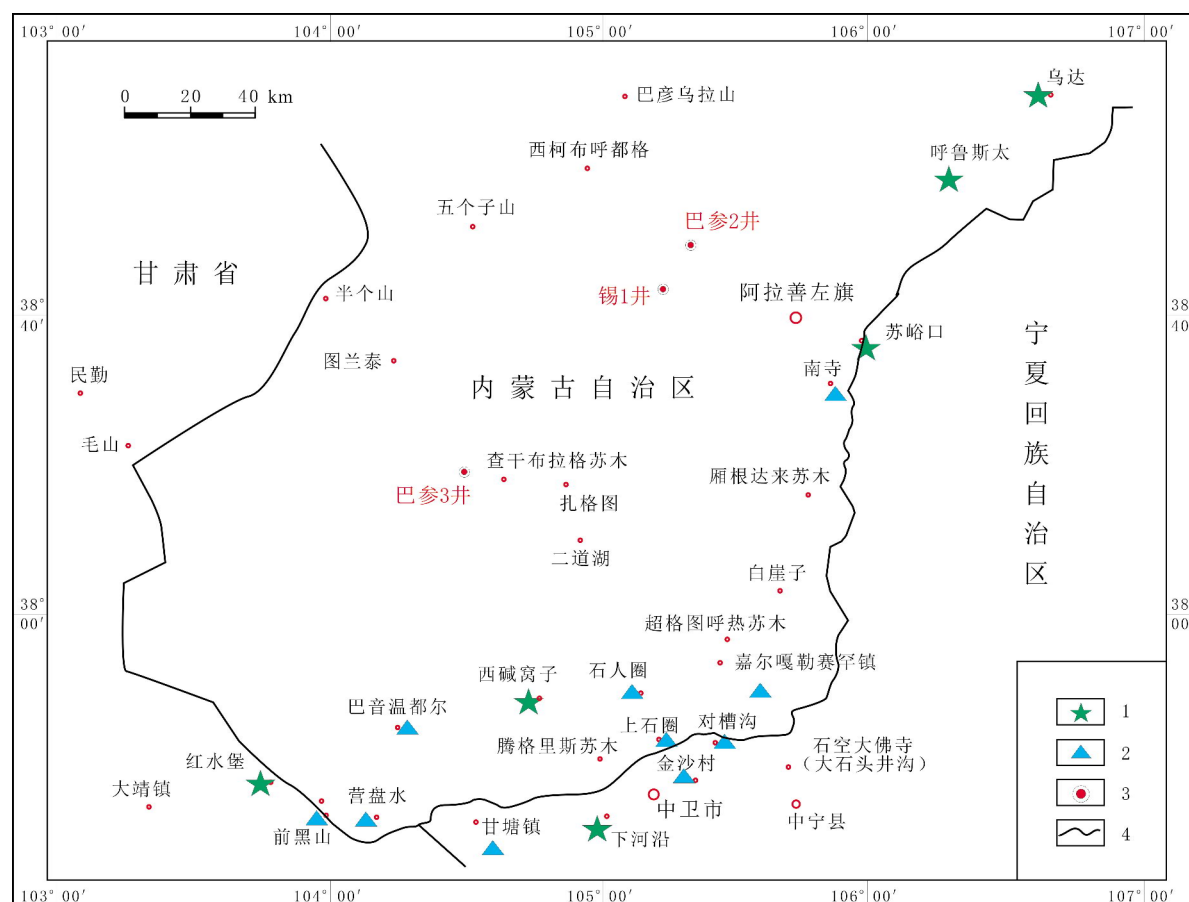


图2 太原组有机地球化学样品采集分布图

Fig. 2 Distribution of organic geochemical samples in Taiyuan Formation

1—收集数据(collected data); 2—本文实测数据(survey data of this study); 3—收集石油钻孔数据(collected drilling data); 4—省级行政区界线(provincial boundary)

2.1 有机质丰度

有机碳含量为有机质丰度评价的重要指标之一。通过对前人研究数据与本次野外采集完成的露头样品测试结果进行分析,上石炭统太原组暗色泥页岩有机碳含量整体较高,TOC值主体分布在1%~5%之间,最低为0.12%,最高值为7.63%,平均值为2.18%(表1)。太原组1段有机碳含量平均值为3.41%,太原组2段有机碳含量平均值为2.3%,其中最低值分布在盆地东南缘对槽沟、金沙村、上石圈一带,最高值位于盆地南缘巴音温都尔及营盘水一带。太原组3段有机碳含量平均值为1.47%,最高值位于盆地东缘南寺和南缘前黑山一带,低值分布在盆地东南缘对槽沟一带(图3)。其中以太原组1、2段有机碳含量最高,太原组3段次之。

岩石热解分析中的生烃潜力是评价有机质丰度的又一重要指标。通常地表采集的样品因受到风化作用,生烃潜力的指标也会受到影响,但仍可作为辅助参考指标。本次测试结果显示,太原组整体残余生烃潜力较低,其中太原组1段(S1+S2)通常分布在 $0.0246 \times 10^{-3} \sim 3.74 \times 10^{-3}$ 之间,平均值为 1.54×10^{-3} ;太原组二段生烃潜力(S1+S2)分布在 $0.0385 \times 10^{-3} \sim 5.18 \times 10^{-3}$ 之间,平均值为 1.35×10^{-3} ;太原组3段生烃潜力(S1+S2)分布在 $0.0442 \times 10^{-3} \sim 5.3 \times 10^{-3}$ 之间,平均值为 1.53×10^{-3} 。分析认为,本次测试结果较低的原因,除了地表样品风化严重外,高成熟度也是导致残余生烃潜力较低的原因之一。综合有机质丰度各项指标,最终评价结果显示太原组均为较好烃源岩(表2)。

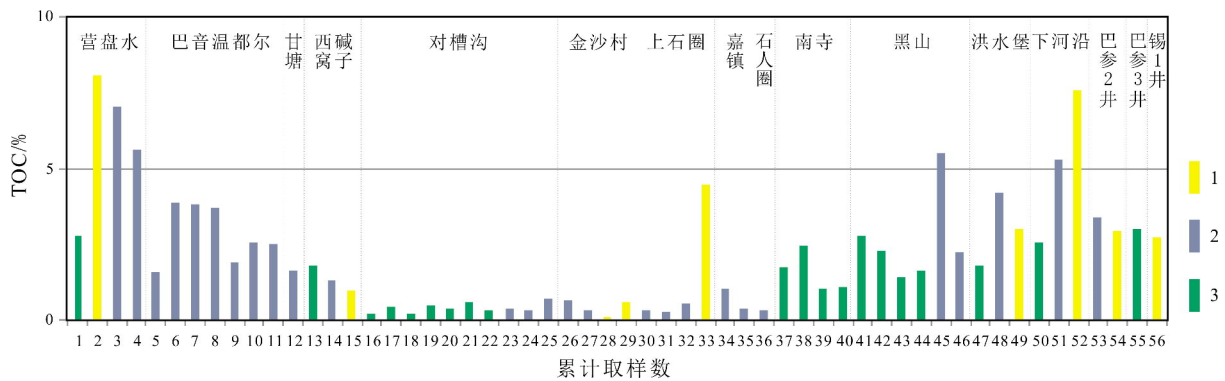


图 3 研究区太原组有机碳分布柱状图

Fig. 3 Histogram of TOC distribution in Taiyuan Formation

1—太原组 1 段(1st mem. of Taiyuan fm.); 2—太原组 2 段(2nd mem. of Taiyuan fm.); 3—太原组 3 段(3rd mem. of Taiyuan fm.)

表 1 太原组有机碳含量分析结果
Table 1 TOC content in Taiyuan Formation

地点	太原组 1 段	太原组 2 段	太原组 3 段
营盘水	8.14	5.67-7.07/6.37(2)	2.8
巴音温都尔		1.61-3.87/2.87(7)	
干塘		1.66	
西碱窝子	1	1.33	1.8
对槽沟		0.32-0.74/0.49(3)	0.21-0.63/0.41(7)
金沙村	0.12-0.58/0.35(2)	0.35-0.64/0.50(2)	
上石圈		0.30-4.52/1.43(4)	
嘉镇		0.39-1.02/0.71(2)	
石人圈		0.35	
南寺			1.03-2.49/1.59(4)
黑山		2.25-5.54/3.90(2)	1.43-2.80/2.05(4)
洪水堡	3	4.23	1.79
下河沿	7.63	5.32	2.56
巴参 2 井	2.95	3.39	
巴参 3 井			3.03
锡 1 井	2.76		

数据表示:最大值-最小值/平均值(样品数);含量单位:%.

表 2 太原组各层系有机质丰度综合对比表
Table 2 Organic matter abundance of each member of Taiyuan Formation

层位	有机碳含量 平均值	S1+S2 范围/ 10^{-3}	S1+S2 平均 值/ 10^{-3}	综合评价
太原组 3 段	1.47%(20 件)	0.0442~5.3	1.53	较好烃源岩
太原组 2 段	2.3%(27 件)	0.0385~5.18	1.35	较好烃源岩
太原组 1 段	3.41%(9 件)	0.0246~3.74	1.54	较好烃源岩

2.2 有机质类型

有机质的类型不同,其生烃潜力、产烃类型及门限

深度(温度)都有一定的差异,因此对有机质类型的研究成为评价烃源岩的重要内容之一. 有机质类型即干酪根类型,一般分为 I、II (II₁、II₂)及 III 型,其中 I 型偏生油,III 型偏生气,II 型是既生油又生气的复合类型^[16]. 本次工作主要通过热解分析和全岩显微组分三角图版法开展有机质类型研究. 干酪根热解结果显示,太原组低成熟区域有机质类型主要为 III 型,高成熟区域无法分辨(图 4). 全岩显微组分三角图中指示,

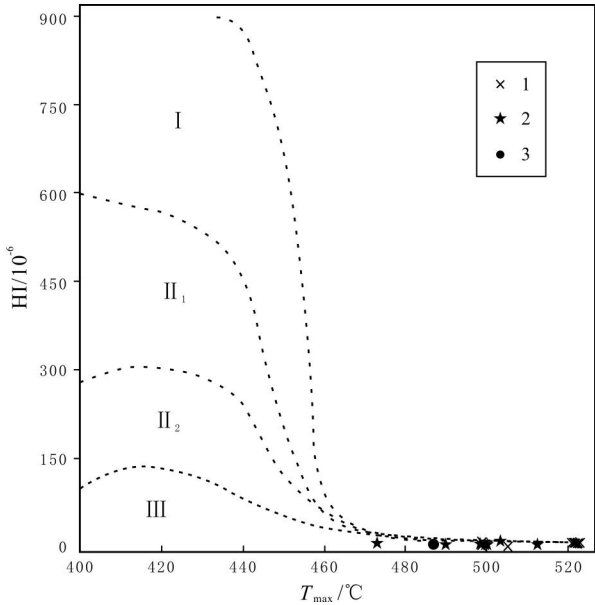


图 4 太原组泥页岩样品 HI-T_{max} 关系图

Fig. 4 The HI-T_{max} diagram of shale samples from Taiyuan Formation

1—太原组 3 段(3rd mem. of Taiyuan fm.); 2—太原组 2 段(2nd mem. of Taiyuan fm.); 3—太原组 1 段(1st mem. of Taiyuan fm.)

太原组 1 段分布在 II₁ 和 III 型区域, 太原组 2、3 段大部分样品位于干酪根的 II₂ 型区域, 其次位于 III 型区域(图 5).

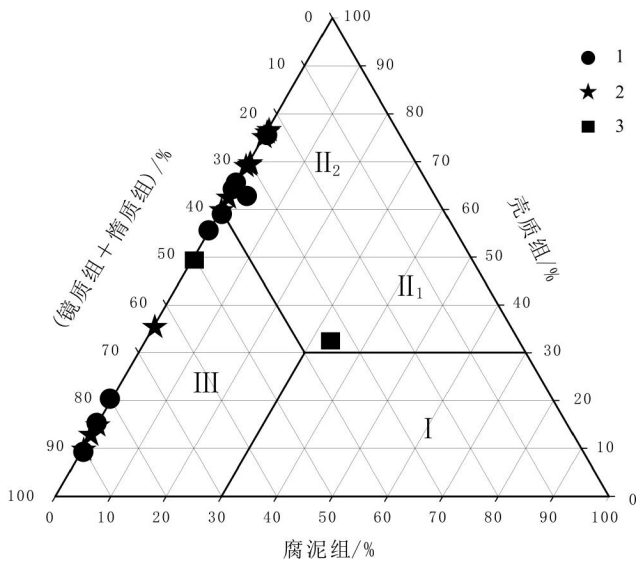


图 5 太原组泥页岩干酪根全岩显微组分三角图

Fig. 5 The triangular diagram for whole rock maceral of kerogen in the shale from Taiyuan Formation

1—太原组 3 段(3rd mem. of Taiyuan fm.); 2—太原组 2 段(2nd mem. of Taiyuan fm.); 3—太原组 1 段(1st mem. of Taiyuan fm.)

2.3 有机质成熟度

烃类的生成不仅要求烃源岩中含有丰富的有机质, 而且要求有机质的热演化程度能够达到一定的成熟度. 因此, 有机质的成熟度是烃源岩研究的又一重要指标^[17]. 常用的有机质成熟度的实验测试方法为镜质体反射率(R_o)和烃源岩最大热解峰温(T_{max})值等. 本次采用镜质体反射率试验数据(表 3). 因部分样品在测试过程中有未检测到镜质体, 最终显示结果共 23

表 3 太原组有机质镜质体反射率分析结果

Table 3 Vitrinite reflectance (R_o) analysis results of organic matters in Taiyuan Formation

数据点位置	太原组 1 段	太原组 2 段	太原组 3 段
乌达	1.05(1)		
阿左旗			1.20~1.49/1.34(3)
嘉镇	0.66(1)		
巴音温都尔		0.66~1.38/1.15(10)	
营盘水		1.48~2.36/1.88(4)	1.34~1.86/1.69(4)

数据表示:最大值-最小值/平均值(样品数);数据单位: %.

个. 结果显示太原组整体处于成熟—高成熟演化阶段, 生气潜力较大. 其中太原组 1 段 R_o 平均值为 0.85%; 太原组 2 段最高值为 2.36%, 最低值为 0.66%, 平均值为 1.51%; 太原组 3 段最高值为 1.86%, 最低值为 1.2%, 平均值为 1.54%(图 6).

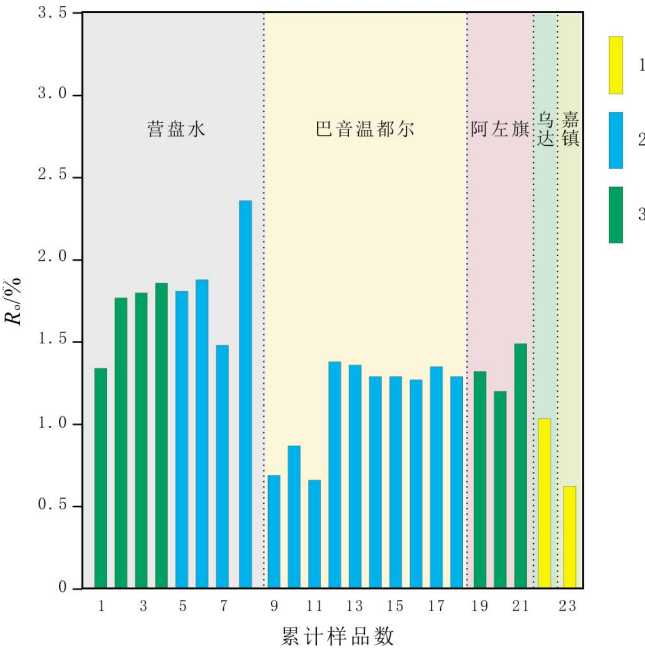


图 6 巴彦浩特盆地太原组有机质成熟度柱状图

Fig. 6 Histogram for the organic maturity of Taiyuan Formation in Bayan Hot Basin

1—太原组 1 段(1st mem. of Taiyuan fm.); 2—太原组 2 段(2nd mem. of Taiyuan fm.); 3—太原组 3 段(3rd mem. of Taiyuan fm.)

3 综合分析

调查区有机地化指标显示较好, 通过对采样点数据及收集的资料进行统计, 编制了有机碳含量及有机质成熟度等值线分布图. 其中有机碳含量具有南北分区的特征, 有机碳等值线多呈条带状展布, 北部高值区主要分布在巴参 2 井、巴参 3 井一带, 均可达到 3% 以上. 南部高值区分布在营盘水—下河沿一带, 有机碳含量也达到 3% 以上, 部分地区达到 5%.

有机质成熟度在平面展布上具有南北较为对称的特点. 整体有机质成熟度都较高. 北部高值区主要分布在西侧半个山和东侧苏峪口一带, R_o 最高值为 2.0%, 其余地区主要分布在 1.0%~1.2% 之间, 成熟度等值线主体呈北东向展布. 南部有机质成熟度等值线

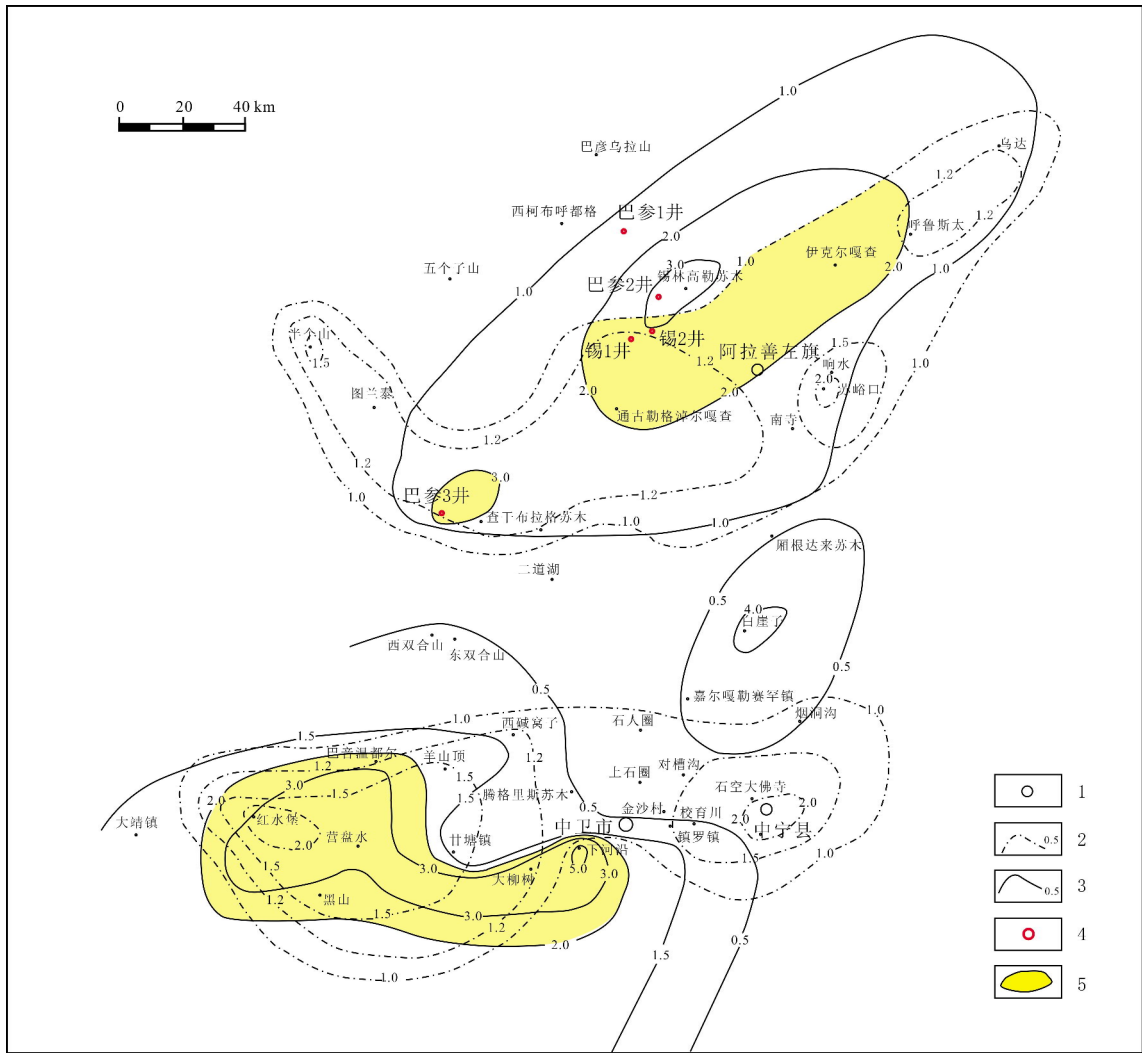


图 7 巴彦浩特盆地太原组有机地球化学分布等值线图

Fig. 7 Organic geochemical distribution contour of Taiyuan Formation in Bayan Hot Basin

1—地名(place name); 2—有机质成熟度(R_o); 3—有机碳含量(TOC); 4—石油钻孔(oil drilling hole); 5—有利区(favorable area)

主体呈东西向展布, 高值区主要分布在西侧的营盘水和东侧的中宁县一带, 对应最高值分别为 2.01% 和 2.96%。其余地区 R_o 值大部分分布在 1.0%~1.5% 之间 (图 7)。

4 页岩气发育有利区预测

本次有利区优选是在综合研究页岩气成藏主控因素的基础之上, 采用有机地球化学数据叠合法, 利用太原组泥页岩有机碳含量、成熟度等指标, 对巴彦浩特盆地石炭系页岩气有利区域进行了初步预测。

调查区内石炭系太原组有机质类型主要为 II_2 型,

其次为 III 型, 主体为海陆过渡相沉积体系。有利区优选采用参数标准略高于现有评价标准^[18]●, 评价指标为有机碳 $TOC > 2\%$, 有机质成熟度 $R_o > 1.0\%$ 。根据上述标准共选取了有利区 3 处, 分别是北部的查干布拉格有利区、通古勒格淖尔嘎查-伊克尔嘎查苏木有利区和南部的下河沿-营盘水有利区 (图 7)。

5 结论

1) 巴彦浩特盆地及其周缘上石炭统太原组整体有机地球化学指标较好, 具有高有机质丰度、高有机质成熟度等特征, 对应有机质类型主要为 II_2 型和 III 型,

●王淑玲, 等. 国内外页岩气资源及勘查开发现状. 中国地质图书馆, 2013.

反映该区太原组生气潜力较大。

2)通过对有机地球化学参数叠加分析,优选了查干布拉格苏木、通古勒格淖尔嘎查-伊克尔嘎查苏木和南部的下河沿-营盘水一带为页岩气成藏有利区。

参考文献:

- [1] Cuitis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [2] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for un-conventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1993-1999.
- [3] 刘冬娅,胡永杰,朱一麟. 涪陵页岩气田圆满完成2017年生产任务[EB/OL]. 中国石化新闻网, 2018-01-02.
- [4] 王芮. 鄂尔多斯盆地志丹-甘泉地区延长组长7段页岩油及页岩气成藏条件研究[D]. 西安:西安石油大学, 2015:14-18.
- [5] 李昂,黄文辉,闫德宇,等. 巴彦浩特盆地及其南缘石炭系页岩气聚集条件[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2013, 28(6):34-41.
- [6] 宋桂桥,马玉表,刘传川,等. 巴彦浩特盆地构造样式分析及其意义[J]. 河南石油, 1999, 13(4):8-14.
- [7] 刘绍平,刘学锋. 巴彦浩特盆地的构造类型[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3):24-27.
- [8] 熊保贤,陈文学,陈文礼,等. 巴彦浩特原型盆地形成与演化[J]. 石油实验地, 2001, 23(1):19-22.
- [9] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京:地质出版社, 2006:22-25.
- [10] 熊保贤,孙自明,肖波,等. 巴彦浩特盆地石炭系含油气系统及有利区带分析[J]. 现代地质, 2000, 14(4):429-434.
- [11] 卫平生,李天顺,李安春,等. 巴彦浩特盆地石炭系沉积相及沉积演化[J]. 沉积学报, 2005, 23(2):240-246.
- [12] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京:石油工业出版社, 2009:50-75.
- [13] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6):641-653.
- [14] 邹才能. 非常规油气勘探[M]. 北京:地质出版社, 2012:35-60.
- [15] 张雪芬,陆现彩. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6):597-603.
- [16] 王安发,徐国盛,叶斌. 石油及天然气地质学[M]. 成都理工大学出版社, 2002:15-115.
- [17] 程顶胜. 烃源岩有机质成熟度评价方法综述[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(5):428-432.
- [18] 张大伟,李玉喜,张金川,等. 全国页岩气资源潜力调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2012:60-85.

致歉声明

本人等作者在《地质与资源》2018年第2期发表的文章《青海阿达滩沟脑铜多金属矿床地质特征、控矿因素及找矿方向》,在未参与该项目的野外工作和原始资料编制的情况下,使用了贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院宋小军等承担完成的《青海省茫崖行委阿达滩沟脑铁多金属矿预查报告》的图件及原始资料。由于本人的疏漏,未与宋小军等相关项目组成员取得沟通,且在论文中未做标注说明。我对自己的学术不端行为深感自责与愧疚,现刊文补充说明,并向宋小军等同志、《地质与资源》编辑部及广大读者致歉。同时补充致谢,感谢贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院宋小军等参与青海省茫崖行委阿达滩沟脑铁多金属矿预查项目的各位同仁,感谢你们在野外一线及项目报告提交中的辛勤付出,一并感谢匿名审稿专家对文章提出的建设性修改意见。凡在文章的参阅或引用中出现的纠纷问题,责任自负,与项目实施单位无关。

于小亮

2019年3月13日