

文章编号:1009-9603(2020)04-0013-13

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.04.002

准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征

王圣柱,王千军,张关龙,白仲才,熊峥嵘,梅文科,赵乐强
(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:石炭系是准噶尔盆地油气勘探的重要层系,油气成藏具有明显的源控特征。查明石炭系烃源岩地球化学特征,对于精细厘定有效烃源岩,指导油气勘探具有重要的现实意义。系统采集露头 and 钻井烃源岩样品,采用总有机碳含量、岩石热解、饱和烃色谱-质谱、单体烃碳同位素和金管-高压釜生烃热模拟实验等分析手段,对烃源岩地球化学特征及生烃能力开展对比研究。结果表明:准噶尔盆地石炭系残留洋(海)、弧后盆地、弧内盆地、海相裂谷环境和陆相裂谷盆地等沉积环境形成了5种烃源岩发育模式;不同环境的烃源岩表现出不同的地球化学特征,可分为5种类型,分别为乌参1井型烃源岩、滴水泉型烃源岩、扎河坝型烃源岩、滴西8井型烃源岩和五彩城型烃源岩;不同环境发育的烃源岩的生烃能力存在明显差异,其中,弧后盆地和弧内盆地烃源岩表现为强生烃能力,为优质烃源岩,其生成的油气是油气勘探的重要目标。

关键词:烃源岩;单体烃碳同位素;地球化学特征;生烃能力;石炭系;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.1*1

文献标识码:A

Development mode and geochemical characteristics of Carboniferous source rocks in Junggar Basin

WANG Shengzhu, WANG Qianjun, ZHANG Guanlong, BAI Zhongcai,
XIONG Zhengrong, MEI Wenke, ZHAO Leqiang

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,
SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The Carboniferous strata is important for hydrocarbon exploration in Junggar Basin, and its hydrocarbon accumulation is mainly controlled by source rocks. Identifying geochemical characteristics of the Carboniferous source rocks is significant to determine the effective source rocks in detail and to guide hydrocarbon exploration. The outcrop and drilling samples of source rock were systematically collected and the analysis methods were used including organic carbon content, rock pyrolysis, chromatography-mass spectrometry saturated hydrocarbon, single hydrocarbon carbon isotope, and experiment of hydrocarbon generation thermal simulation in gold tube-autoclave to study the geochemical characteristics and hydrocarbon generation capacity of source rocks. The results show that there are five types of source rock development modes of the Carboniferous strata in Junggar basin resulted from five types of sedimentary settings, namely residual ocean (sea), back-arc basin, intra-arc basin, marine rift, and continental rift basins. The source rocks in different sedimentary environments show different geochemical characteristics, and can be divided into 5 types, including Well Wucan1 type source rock, Dishuiquan type source rock, Wucaicheng type source rock, Zaheba type source rock, and Dixi8 well type source rock. The hydrocarbon generation capacity of source rocks developed in different sedimentary environments have huge difference. Among them, the source rocks in back-arc basin and intra-arc basin show strong hydrocarbon generation capacity and are high-quality source rocks, and the generated hydrocarbon is an important exploration target.

收稿日期:2020-04-20。

作者简介:王圣柱(1979—),男,山东济宁人,高级工程师,博士,从事油气资源评价、页岩油及油气成藏研究工作。E-mail: pillar1979@163.com。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“准噶尔盆地碎屑岩层系油气富集规律与勘探评价”(2016ZX05002-002),中国石化科技攻关项目“石炭系领域油气成藏规律及目标评价”(P17001-4)。

Key words: source rock; individual *n*-alkane carbon isotope; geochemical characteristics; hydrocarbon generation capacity; Carboniferous; Junggar Basin

石炭纪为准噶尔盆地由古亚洲洋体系向陆内变形体系的重要变革期,经历了由伸展到聚敛的构造发展旋回,整体呈“早海晚陆、南海北陆”的古地理演化格局^[1-3]。石炭纪残留洋(海)、弧后、弧内、裂陷等沉积环境为烃源岩的发育创造了条件^[4-7]。随着准噶尔盆地石炭系勘探的展开,石油地质工作者逐渐认识到石炭系是一套重要的生烃层系,改变了以往重点寻找以石炭系火山岩为储层的古潜山油气藏和新生古储型油气藏的勘探思路^[8-10],相继发现了克拉美丽气田和美6-美8等多个以石炭系为烃源灶的油气藏(田)^[11-12]。勘探证实,石炭系油气成藏具有明显的源控特征^[13-14],圈定有效烃源岩分布是实现高效勘探的关键。虽然早在上世纪七八十年代石油地质工作者即已发现石炭系烃源岩具有生烃条件,且已认识到车排子、五彩湾和石西地区等发现的油气有来自石炭系烃源岩的贡献^[10,13-16],但受石炭系原始沉积建造复杂、后期改造强烈,埋深大、资料情况限制,前期研究主要集中于某局部地区^[17-21]、或某露头剖面^[22-23]、或某口探井^[24],缺乏对石炭系烃源岩的精细研究,对上、下石炭统烃源岩的地球化学特征甄别不够,致使对其生成的油气贡献大小不明确,制约了对石炭系勘探潜力的评价。为此,笔者根据准噶尔盆地实际地质情况及前人研究成果,将下石炭统滴水泉组(姜巴斯套组)和上石炭统巴塔玛依内山组(包谷图组)烃源岩作为重点研究对象,从区域角度出发,系统采集盆内钻井和盆缘露头剖面的大量烃源岩样品,基于有机碳含量、岩石热解、饱和烃色谱-质谱、单体烃碳同位素及金管-高压釜生烃热模拟实验等分析手段,系统地开展准噶尔盆地石炭系不同环境发育烃源岩地球化学特征研究,为精细厘定研究区有效烃源岩分布及勘探选区奠定基础。

1 岩相古地理特征

早石炭世,准噶尔盆地处于“多岛洋”演化阶段。克拉美丽洋首先发生俯冲碰撞闭合^[25],沿陆梁-克拉美丽一带形成一系列北西-南东向展布的火山岛弧^[1],其间发育了石西、石北和滴水泉等多个弧内凹陷,充填滴水泉组凝灰质泥岩、泥岩和粉砂岩。东北缘处于陆梁-克拉美丽岛弧后翼的弧后环境,其中,克拉美丽山以北地区发育姜巴斯套组厚

层泥岩、凝灰质泥岩和火山碎屑岩,夹火山角砾岩、安山岩;以南地区发育松喀尔苏组火山岩与沉积岩的岩性组合。西北缘和南缘分别处于达拉布特残留洋和北天山残留洋环境,发育太勒古拉组深水泥岩、硅质泥岩沉积^[2-3](图1a)。晚石炭世,达尔布特残留洋和北天山残留洋先后俯冲闭合消亡,准噶尔地区与阿勒泰地区、天山地区连为一体,准噶尔盆地初具雏形,形成“南海北陆”的古地理格局。东北缘处于陆相裂陷环境,形成了巴塔玛依内山组火山岩-沉积岩-火山岩的岩性组合^[26],以发育碳质泥岩和煤岩为特点。西北缘处于扇三角洲海陆过渡相和滨浅海沉积环境,发育包谷图组泥岩和砂质泥岩的岩性组合。南缘处于海相裂谷环境,博格达裂谷区发育次深海相细粒沉积(图1b)。

2 烃源岩发育模式

构造沉积环境对准噶尔盆地石炭系烃源岩的发育具有明显的控制作用,石炭纪多种沉积环境为滴水泉组(姜巴斯套组)和巴塔玛依内山组(包谷图组)凝灰质泥岩、泥岩、碳质泥岩等多种岩性类型烃源岩的发育创造了条件。烃源岩发育模式研究对石炭系火山岩-沉积岩复杂建造烃源岩的分布预测具有重要指导意义。为此,笔者通过火山岩锆石测年和沉积岩古生物组合年代学分析,辅以元素地球化学构造环境判识、有机地球化学沉积环境分析,建立了研究区石炭系残留地层对比格架;并以地层格架为约束,综合运用重力、磁力、电法、地震等资料开展火山岩-沉积岩复杂建造充填样式研究,进而明确准噶尔盆地石炭系烃源岩的发育特征,建立了弧后盆地广盆、弧内盆地局限、陆相裂谷盆地局限、海相裂谷环境区域和残留洋(海)广盆5种烃源岩发育模式。

2.1 弧后盆地广盆烃源岩发育模式

早石炭世早期,准噶尔盆地广泛发育火山岩,表现为一系列由爆发相火山角砾岩、喷溢相玄武岩、安山岩及火山沉积岩、凝灰质砂砾岩组成的沉积旋回;早石炭世中晚期为火山喷发旋回间歇期,火山活动明显减弱,准东北缘乌伦古地区处于陆梁-克拉美丽岛弧带后翼弧后盆地沉积环境,受阿勒泰古陆和陆梁-克拉美丽岛弧带双向物源供给及火山活动等因素控制,沉积充填及相带展布发生规

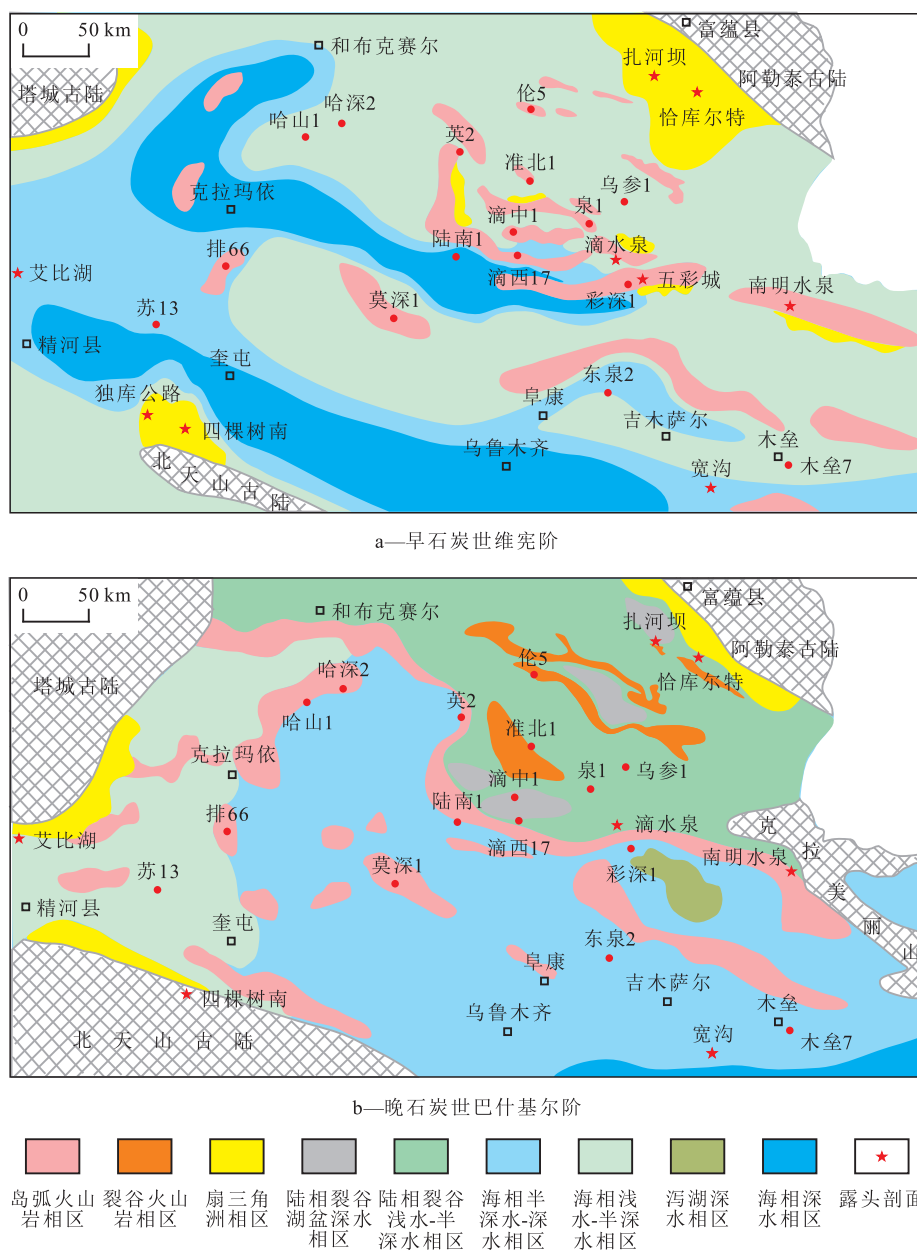


图1 准噶尔盆地石炭纪岩相古地理分布

Fig.1 Palaeogeographic distribution of Carboniferous lithofacies in Junggar Basin

律性变化。北部的扎河坝-塔克尔地区受陆源沉积体系的控制,发育扇三角洲粗碎屑岩沉积;南部紧邻岛弧带的淮北1-滴北1-滴16井条带,处于弧后盆地浅水沉积区,受岛弧物源沉积体系影响明显,主要为火山岩、凝灰质砂岩夹凝灰质泥岩沉积;中部的乌参1井-卡姆斯特地区处于弧后盆地深水沉积区,受双物源体系的控制,广泛发育凝灰质泥岩和泥岩。克拉美丽山以北地区的姜巴斯套组整体表现为“粗-细-粗”岩性组合特征:姜一段沉积水体相对较浅,发育大套凝灰质砂砾岩、砂岩,近岛弧区为凝灰质砂岩夹火山岩沉积;姜二段沉积时期为火山喷发间歇期,火山活动强度明显减弱,广泛发育

深水细粒沉积,岩性为灰黑色、深灰色凝灰质泥岩、泥岩夹粉砂岩、沉凝灰岩;姜三段沉积时期火山活动再次增强,发育凝灰质砂岩、凝灰质泥岩与火山角砾岩、凝灰岩互层沉积。克拉美丽山以南地区的松喀尔苏组整体表现为火山活动逐渐减弱特征:松喀尔苏组下段发育大套火山岩、火山碎屑岩,上段为火山碎屑岩与沉积岩不等厚互层。姜二段和松喀尔苏组上段为弧后盆地烃源岩主要发育层段,厚度大,横向分布稳定(图2)。伦6井北、恰库尔特、萨尔布拉克、南明水泉等剖面均有姜二段和松喀尔苏组上段暗色泥质岩出露,盆内覆盖区乌参1井钻遇深灰色凝灰质泥岩、碳质泥岩的视厚度达1400余

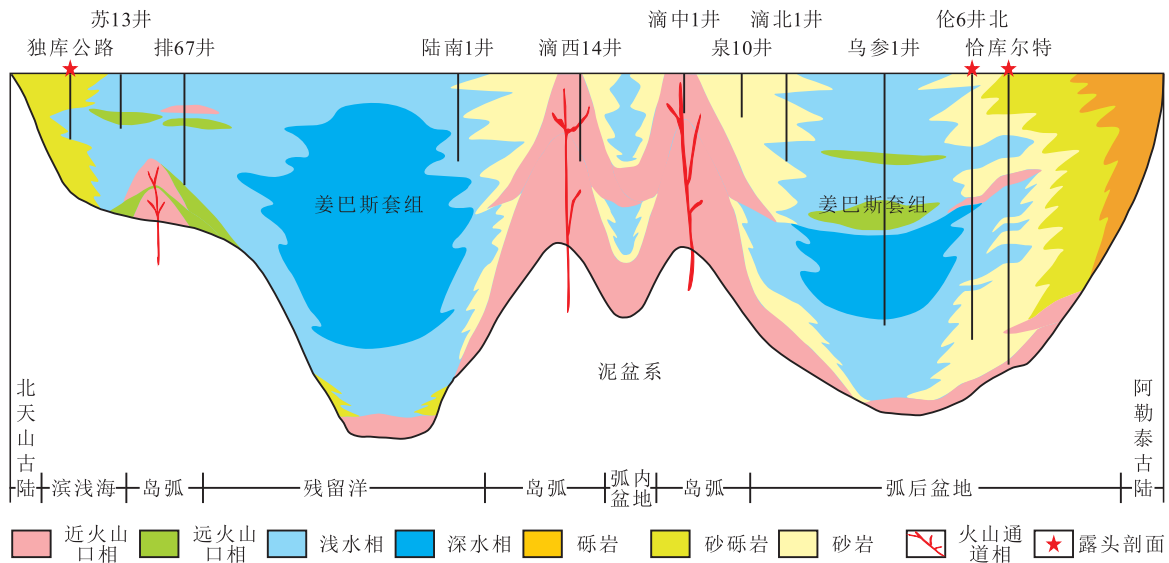


图2 准噶尔盆地石炭系弧后盆地广盆烃源岩发育模式

Fig.2 Development mode of broad Carboniferous source rock in back-arc basin of Junggar Basin

米。后期受构造抬升剥蚀影响,形成索索泉、石北、滴水泉等多个残留凹陷^[27],烃源岩最大厚度可达300 m以上,滴南和滴北凸起一带厚度较薄,一般小于150 m。

2.2 弧内盆地局限烃源岩发育模式

弧内盆地为位于弧地块之上具有火山岩-沉积岩堆积物的沉积盆地,弧地块总体上为火山建造,表现为高重磁异常特征,弧内盆地沉积主要来自弧地块的火山岩、火山碎屑物质,近火山口发育冲积扇、扇三角洲浅水粗碎屑沉积,远离火山口逐渐过渡为深水细粒沉积,沉积岩相对更为发育,具有低密度和低磁化率的特点^[28]。早石炭世受NE向挤压应力环境的影响,沿克拉美丽岛弧由于不平衡挤压应力作用而产生一系列走滑断层,造成弧块体发生

旋转,形成石西、滴水泉等多个弧内盆地。例如石西凹陷Z2019TFEM02时频电磁剖面显示下石炭统呈高磁区和低磁区相间分布特征,表明石西地区发育多个近平行的小型弧地块和弧内盆地;结合地震剖面分析,高磁区与低磁区之间无明显的正断层发育,表现为火山边界弧内盆地沉积充填特征。受沉积时期的火山喷发影响,姜巴斯套组烃源岩分布较为局限,剖面上呈“槽”状分布,平面上呈条带状分布(图3)。露头区以滴水泉剖面最为典型,灰色、深灰色(凝灰质)泥岩、碳质泥岩、砂质泥岩厚度达300余米^[17-18];盆内覆盖区有陆南1、滴西17、美13等多口井钻遇,烃源岩厚度为10~300 m。

2.3 陆相裂谷盆地局限烃源岩发育模式

晚石炭世,由于俯冲洋壳的拆离造成岩浆物质

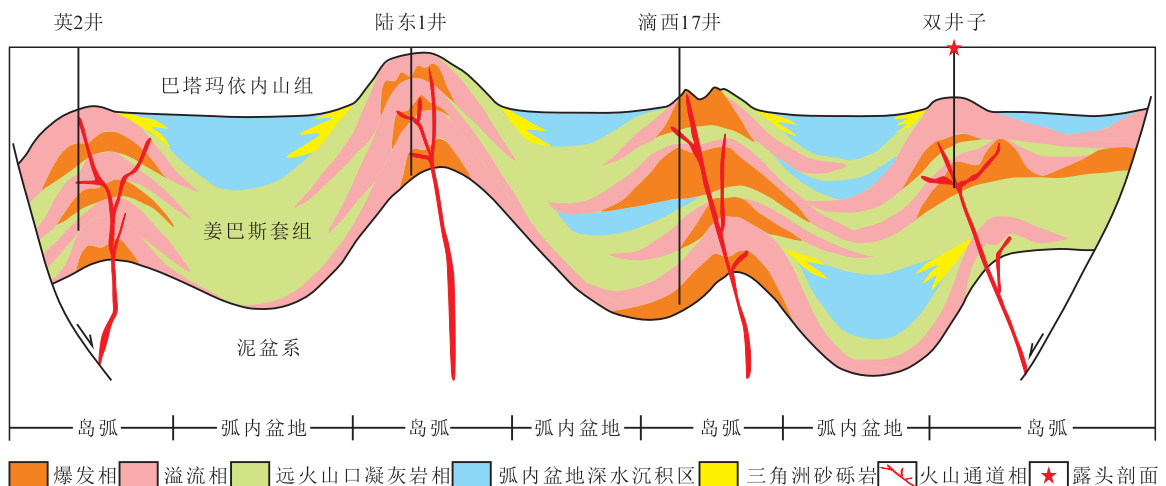


图3 准噶尔盆地石炭系弧内盆地局限烃源岩发育模式

Fig.3 Development mode of restricted Carboniferous source rocks in intra-arc basin of Junggar Basin

的上涌,使得地壳发生熔融减薄,准东北缘地区进入碰撞后的陆相伸展裂谷盆地演化阶段。该时期火山活动强烈,沿深大伸展断裂发生大规模火山喷发,整体表现为2期火山喷发-沉积旋回,发育宝塔玛依内山组中基性-酸性火山岩夹碳质泥岩、泥岩及劣质煤沉积,垂向上整体表现为火山岩-沉积岩-火山岩层状结构特征。火山喷发期,在火山机构侧翼或火山机构所围限的区域形成小型裂隙湖盆,表现为沉积岩与火山岩共生特征,发育厚度较薄、横向分布不稳定的烃源岩;火山喷发间歇期,也可发育一定厚度的烃源岩,与上、下火山岩呈“三明治”夹层式分布^[8](图4)。该沉积时期湖盆水体相对较浅,且分隔性较强,存在扎河坝、索索泉、陆东地区等多个沉积中心,不同地区沉积水体氧化-还原性变化较大,如扎河坝地区表现为还原性沉积水体环境,陆东地区表现为氧化性沉积水体环境。受海西期构造运动的影响,宝塔玛依内山组遭受不同程度的剥蚀,其分布与下石炭统相似。钻井和露头剖面显示,宝塔玛依内山组烃源岩厚度及规模均小于下石炭统烃源岩,且空间分布变化较大;石北、滴水泉等凹陷准北1、准北3、滴中1等井钻遇灰黑色碳质泥岩、灰色泥岩、凝灰质泥岩的厚度为7~265 m;不同露头剖面烃源岩发育程度也具有较大差异,帐篷沟剖面烃源岩厚度为114 m,扎河坝、塔克尔巴斯套、拜尔库都克剖面烃源岩的厚度分别为58,63和15 m。

2.4 海相裂谷环境区域烃源岩发育模式

晚石炭世,以陆梁-克拉美丽陆缘岛弧带为分隔,准东南博格达地区由早期的残留洋进入海相裂谷环境演化阶段,博格达裂谷强烈伸展裂陷,伴随

强烈的火山喷发。准东地区的五彩湾、大井、古城和木垒等石炭系残留凹陷当时处于博格达裂谷盆地的斜坡部位,主体为滨浅海沉积环境;其中,五彩湾地区被五彩城-双井子岛弧和沙奇岛弧所包围,形成半封闭瀉湖。该时期火山活动强烈,中-基性岩浆沿深大断裂呈裂隙式喷发,或在断裂交叉部位呈中心式喷发,形成大规模层状稳定分布的火山岩。火山喷发间歇期以正常碎屑岩沉积为主,形成厚度较大、横向分布较为稳定的烃源岩。受火山喷发-沉积旋回的控制,烃源岩发育也具有多旋回性特征(图5)。五彩城、双井子等露头剖面均不同程度的发育烃源岩,五彩湾凹陷彩深1井钻遇深灰色泥岩、砂质泥岩和碳质泥岩的累积厚度约为350 m,古城凹陷城1井钻遇灰黑色碳质泥岩、深灰色泥岩的厚度为130余米。

2.5 残留洋(海)广盆烃源岩发育模式

早石炭世,除准东北缘之外的其他广大地区均为残留洋沉积环境,其中西北缘-东缘白家海地区和西缘四棵树凹陷-南缘博格达地区分别处于达尔布特洋和北天山洋沉积环境;晚石炭世,陆梁-克拉美丽陆缘弧以南,整体为滨浅海沉积环境。石炭纪残留洋沉积环境为烃源岩的广泛发育创造了条件,除深水洋盆和深海区的有机母质供给相对较少,不利于形成高有机质丰度的烃源岩,局部岛弧区烃源岩欠发育外,其他地区均有利于形成有机质丰度较高、厚度较大、区域分布广泛的烃源岩。西北缘、南缘和腹部地区石炭系埋深较大,目前仅排66、排67、莫深1等少数井钻遇,推测存在四棵树凹陷和沙湾-东道海子凹陷2个沉积中心,烃源岩厚度可达200 m以上;南缘沿依林黑比尔-博格达山一带烃源岩厚

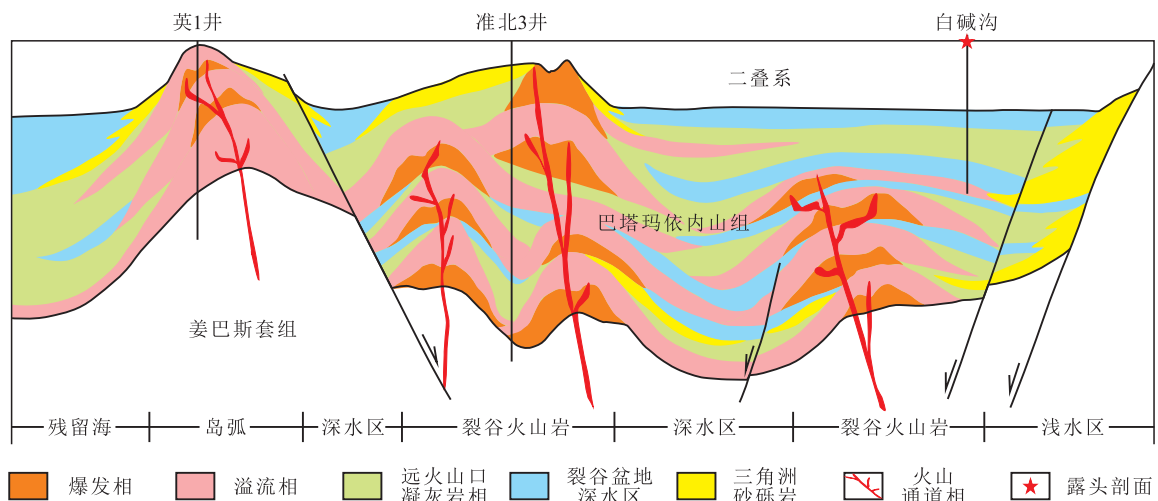


图4 准噶尔盆地石炭系陆相裂谷盆地局限烃源岩发育模式

Fig.4 Development mode of restricted Carboniferous source rocks incontinental rift basin of Junggar Basin

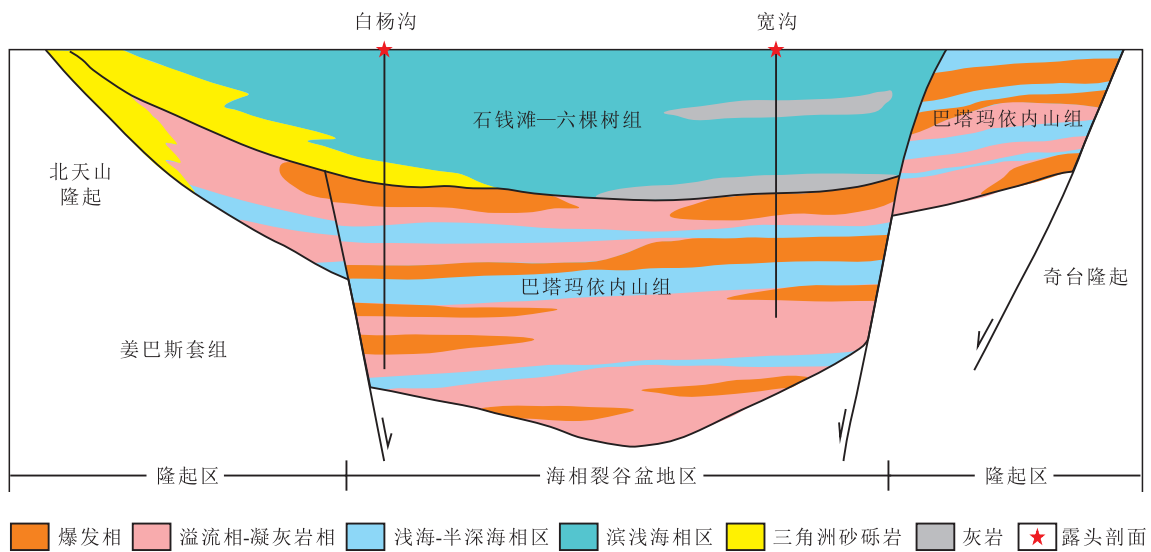


图5 准噶尔盆地石炭系海相裂谷环境区域烃源岩发育模式

Fig.5 Development mode of regional Carboniferous source rocks in marine rift basin of Junggar Basin

度为50~200 m。

3 烃源岩地球化学特征

3.1 有机质丰度及类型

3.1.1 下石炭统烃源岩

乌参1井姜巴斯套组烃源岩样品分析结果显示,总有机碳含量(*TOC*)为0.43%~1.88%,平均为0.85%;氯仿沥青“A”含量为0.013 6%~0.146 8%;生烃潜量(S_1+S_2)为0.04~3.59 mg/g,平均为0.551 3 mg/g。有机显微组分分析结果表明,腐泥组占优势,平均含量为87.29%,镜质组平均含量为10.11%,惰质组平均含量仅为2.61%。虽然石炭系烃源岩具有重碳同位素特征,但姜巴斯套组烃源岩 $\delta^{13}C$ 值最轻,干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-27.6‰~-26.6‰,饱和烃、芳烃、非烃和沥青质的 $\delta^{13}C$ 值分别为-27.6‰~-27.5‰,-26.2‰~-25.2‰,-27.7‰~-26.2‰和-27.0‰~-25.3‰。姜巴斯套组烃源岩有机质丰度较高,以I-II型干酪根为主,部分为III型,为好烃源岩。

除滴水泉等露头剖面外,陆东-五彩湾地区有滴西17、陆南1等多口井钻遇滴水泉组烃源岩^[17-20]。地化分析结果显示,不同岩性烃源岩的品质存在一定差异。泥岩的*TOC*值为0.90%~3.15%,氯仿沥青“A”含量为0.010 0%~0.049 2%,(S_1+S_2)值为0.22~0.84 mg/g;碳质泥岩的*TOC*值为4.51%~12.65%,氯仿沥青“A”含量为0.220 1%~0.520 9%,(S_1+S_2)值为5.21~21.41 mg/g;沉凝灰岩有机质丰度相对较低,*TOC*值为0.43%~1.72%,氯仿沥青“A”含量为

0.006 0%~0.037 6%,(S_1+S_2)值为0.13~0.68 mg/g。滴水泉组烃源岩 $\delta^{13}C$ 值相对较轻:干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-27.50‰~-21.98‰,平均为-23.62‰;氯仿沥青“A”的 $\delta^{13}C$ 值为-25.94‰~-24.22‰,平均为-24.11‰;饱和烃、芳烃、非烃和沥青质的 $\delta^{13}C$ 值分别为-28.02‰~-25.70‰,-23.84‰~-22.73‰,-25.21‰~-23.68‰和-24.76‰~-23.58‰。滴水泉组烃源岩有机质丰度高,以II₂-III型干酪根为主,属于较好-好烃源岩。

3.1.2 上石炭统烃源岩

陆东-五彩湾地区有滴中1、滴西8、彩深1等20多口井钻遇巴塔玛依内山组烃源岩,主要岩性为深灰色、灰黑色泥岩、碳质泥岩、沉凝灰岩夹煤层^[17-22]。烃源岩样品分析结果表明,泥岩、碳质泥岩的*TOC*值为0.40%~10.58%,平均为3.27%;氯仿沥青“A”含量为0.011 4%~1.274 3%,平均为0.072 4%;(S_1+S_2)值为0.102 1~10.362 8 mg/g,平均为2.564 2 mg/g;沉凝灰岩的*TOC*值平均为2.28%,氯仿沥青“A”含量平均为0.041 0%。有机显微组分分析结果表明,有机质类型以III型为主,少量II₂或II₁型。巴塔玛依内山组烃源岩 $\delta^{13}C$ 值最重:干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-25.96‰~-21.00‰,氯仿沥青“A”的 $\delta^{13}C$ 值为-29.33‰~-25.60‰。上石炭统烃源岩与下石炭统烃源岩相比,陆源高等植物输入明显增多,有机质类型变差,以III型为主,部分为II型,评价为较好-好气源岩。

3.2 成熟度特征

受多期构造运动影响,不同地区的石炭系烃源

岩经历了不同的埋藏热演化过程,成熟度存在明显差异,烃源岩实测镜质组反射率(R_0)为0.54%~4.21%,从低成熟-成熟-高成熟甚至过成熟均有分布,整体以盆缘造山带、腹部深洼区、索索泉、滴水泉、五彩湾和四棵树等凹陷为高值区,乌参1、滴西12、彩深1等井 R_0 值均为1.3%以上,处于高成熟-过成熟演化阶段,向周边呈逐渐减小趋势。海西期构造运动形成的继承性凸起区,如车排子凸起、三个泉-滴北凸起及白家海凸起等烃源岩的热演化程度较低,排66、泉5、滴北1、滴北2等井 R_0 值为0.50%~1.04%,处于低成熟-成熟演化阶段。宝塔玛依内山组烃源岩处于成熟-高成熟演化阶段,局部处于过成熟演化阶段。下石炭统滴水泉组和姜巴斯套组烃源岩成熟度明显高于上石炭统宝塔玛依内山组烃源岩,主体烃源岩达到生湿气-干气演化阶段。

3.3 生物标志化合物特征

受石炭纪古地理环境的控制,准噶尔盆地滴水泉组(姜巴斯套组)和宝塔玛依内山组烃源岩的地球化学特征存在明显差异,根据生物标志化合物和单体烃碳同位素特征可划分为5种类型。

第1种以乌参1井姜巴斯套组烃源岩为代表(简称乌参1井型烃源岩),其形成于弧后盆地较深水环境,主要岩性为深灰色泥岩、凝灰质泥岩和沉凝灰岩。该类型烃源岩饱和烃气相色谱具有明显的植烷优势,Pr/Ph值为0.41~0.95,平均为0.56;硫芬系列化合物含量丰富,为50.7%~83.9%,平均为75.6%,氧芬系列化合物含量较低,为7.6%~16.7%,平均为12.8%,反映出烃源岩形成于还原沉积水体环境。 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷相对含量为 $C_{28} < C_{29} < C_{27}$,呈不对称“V”型分布; C_{27} 重排甾烷含量较低, C_{27} 重排甾烷/(C_{27} 重排甾烷+ C_{27} 规则甾烷)值为0.07~0.13,平均值为0.10。三环萜烷不同分布构型对烃源岩发育环境的水体盐度、藻类等输入具有很好的指示意义,三环萜烷/17 α -藿烷值可以用来反映细菌或藻类脂体(三环萜烷)和原核生物(藿烷)对母质的贡献^[29]。乌参1井型烃源岩的三环萜烷含量丰富, C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷以 C_{23} 为主峰,呈上升型分布;三环萜烷/17 α -藿烷值为0.32~1.41,平均为0.94,反映出烃源岩母质较高的藻类贡献特征; C_{24} 四环萜烷被认为是陆源高等植物有机质输入的标志物,与陆源有机质的输入有较好的对应关系,同时可以较好的反映水体蒸发条件^[29]。乌参1井型烃源岩 C_{24} 四环萜烷含量较低, C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 三环萜烷)值为0.33~0.57,平均为0.37;Ts含量较低,Ts/Tm值为0.42~0.51,平均为

0.49。伽马蜡烷主要通过喜盐生物(如纤毛虫)提供的四膜虫醇的硫化而形成,因此,伽马蜡烷对沉积水体盐度以及水体存在分层具有很好的指示意义^[30]。乌参1井型烃源岩具有高伽马蜡烷含量特征,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值为0.25~0.38,平均为0.27(图6a)。正构烷烃单体烃碳同位素受热演化影响较小,可以较好地反映石炭系高成熟烃源岩的沉积环境与有机质母质来源特征^[31]。乌参1井姜巴斯套组烃源岩单体烃 $\delta^{13}C$ 值相对最轻,正构烷烃($nC_{14}-nC_{31}$)的 $\delta^{13}C$ 值为-33.77‰~-28.33‰,随着正构烷烃碳数的增加, $\delta^{13}C$ 值逐渐变轻,尤其是 nC_{28} 以上正构烷烃的 $\delta^{13}C$ 值变轻更加明显,呈上升“翘尾”型分布(图7a)。上述地化特征表明,乌参1井型烃源岩为咸水、深水还原环境沉水植物和漂浮水生植物来源,并混有一定量藻类贡献的偏腐泥型母质类型^[30,32-33]。

第2种以滴水泉剖面、美11、滴南7和滴西17等井滴水泉组烃源岩为代表(简称滴水泉型烃源岩),形成于弧内盆地沉积环境,受火山作用影响明显,以富含火山物质为特色。烃源岩饱和烃气相色谱具有明显的姥鲛烷优势,Pr/Ph值为1.43~5.23,平均为3.03,反映为较浅水弱还原-弱氧化沉积环境。不同地区的烃源岩母源供给存在一定差异,规则甾烷相对含量为 $C_{28} < C_{29} < C_{27}$ 或 $C_{28} < C_{27} < C_{29}$, $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷呈不对称“V”型或反“L”型分布。该类烃源岩的典型特征是 C_{27} 重排甾烷和Ts较为发育, C_{27} 重排甾烷/(C_{27} 重排甾烷+ C_{27} 规则甾烷)值为0.15~0.54,平均为0.34;Ts/Tm值为0.40~25.98,平均为5.91。滴南7井埋深为3662~3666m灰黑色泥岩样品的 C_{27} 重排甾烷含量甚至超过 C_{27} 规则甾烷含量,滴水泉剖面、滴西17等井部分烃源岩样品的Ts含量也异常高,推测重排甾烷分子和Ts的形成与偏氧化相对淡水环境^[34],或受火山作用含火山灰成分、特殊微生物母源有关^[35]。该类烃源岩 C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 和 C_{23} 三环萜烷以 C_{20} 为主峰,呈山峰型分布;三环萜烷含量较高,三环萜烷/17 α -藿烷值为0.12~2.76,平均为0.77; C_{24} 四环萜烷相对含量较乌参1井型烃源岩含量高, C_{24} 四环萜烷/(C_{24} 四环萜烷+ C_{26} 三环萜烷)值为0.30~0.84,平均为0.50;伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值为0.12~0.34,平均为0.24(图6b)。滴水泉型烃源岩单体烃 $\delta^{13}C$ 值相对较轻,正构烷烃($nC_{12}-nC_{33}$)的 $\delta^{13}C$ 值为-28.91‰~-24.48‰,随正构烷烃碳数的增加,单体烃 $\delta^{13}C$ 值逐渐变轻,呈依次上升型分布(图7b)。上述地化特征表明,滴水泉型烃源岩形成于弱还原-

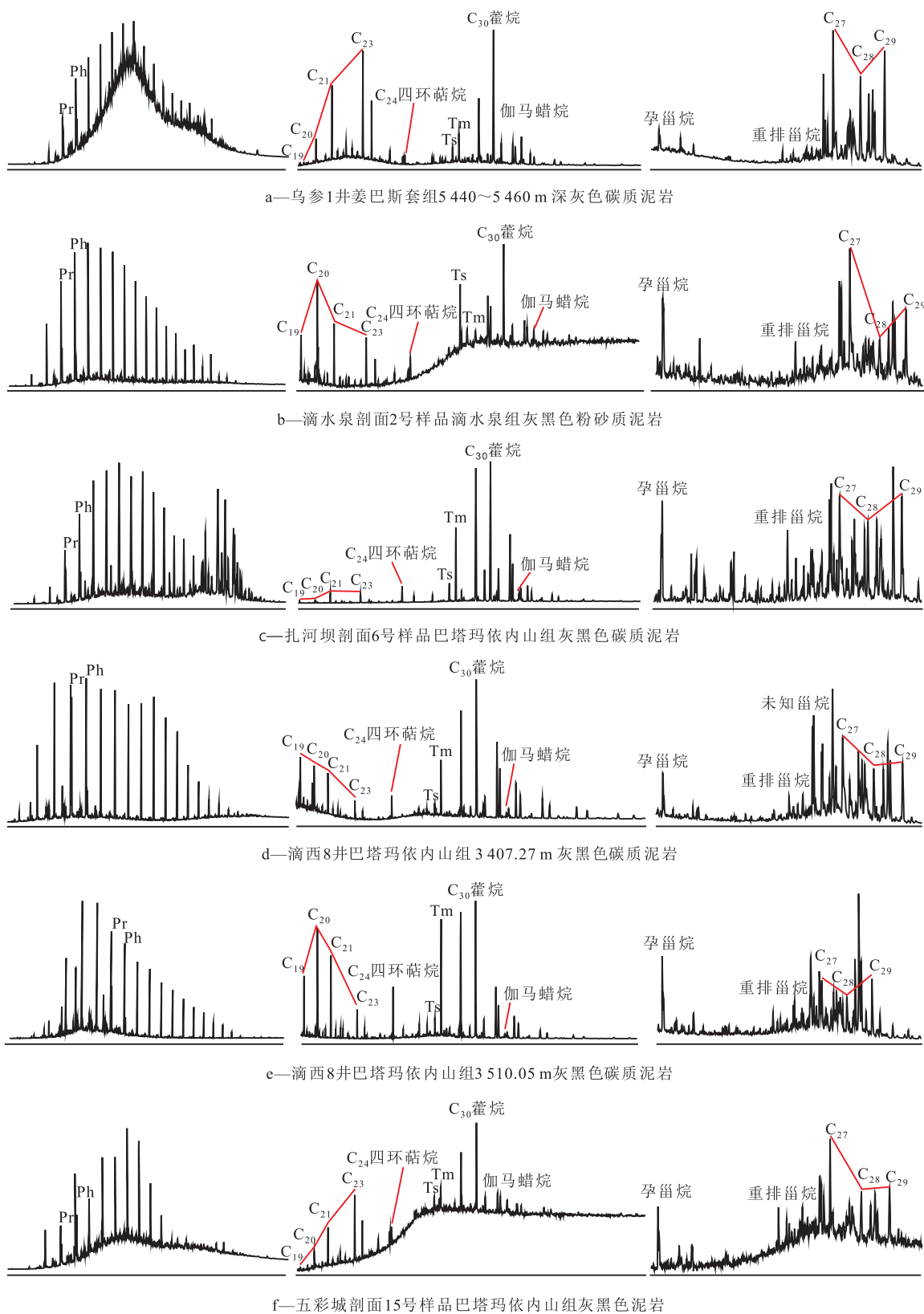


图6 准噶尔盆地石炭系烃源岩生物标志化合物谱图

Fig.6 Biomarkers of Carboniferous source rocks in Junggar Basin

弱氧化、微咸水-半咸水沉积环境,具有陆源高等植物和水生低等生物混合母质来源特征。

第3种以扎河坝剖面巴塔玛依内山组烃源岩为

代表(简称扎河坝型烃源岩),形成于陆相裂谷盆地还原水体沉积环境。烃源岩饱和烃气相色谱具有一定的植烷优势或姥植烷均势,Pr/Ph值为0.46~

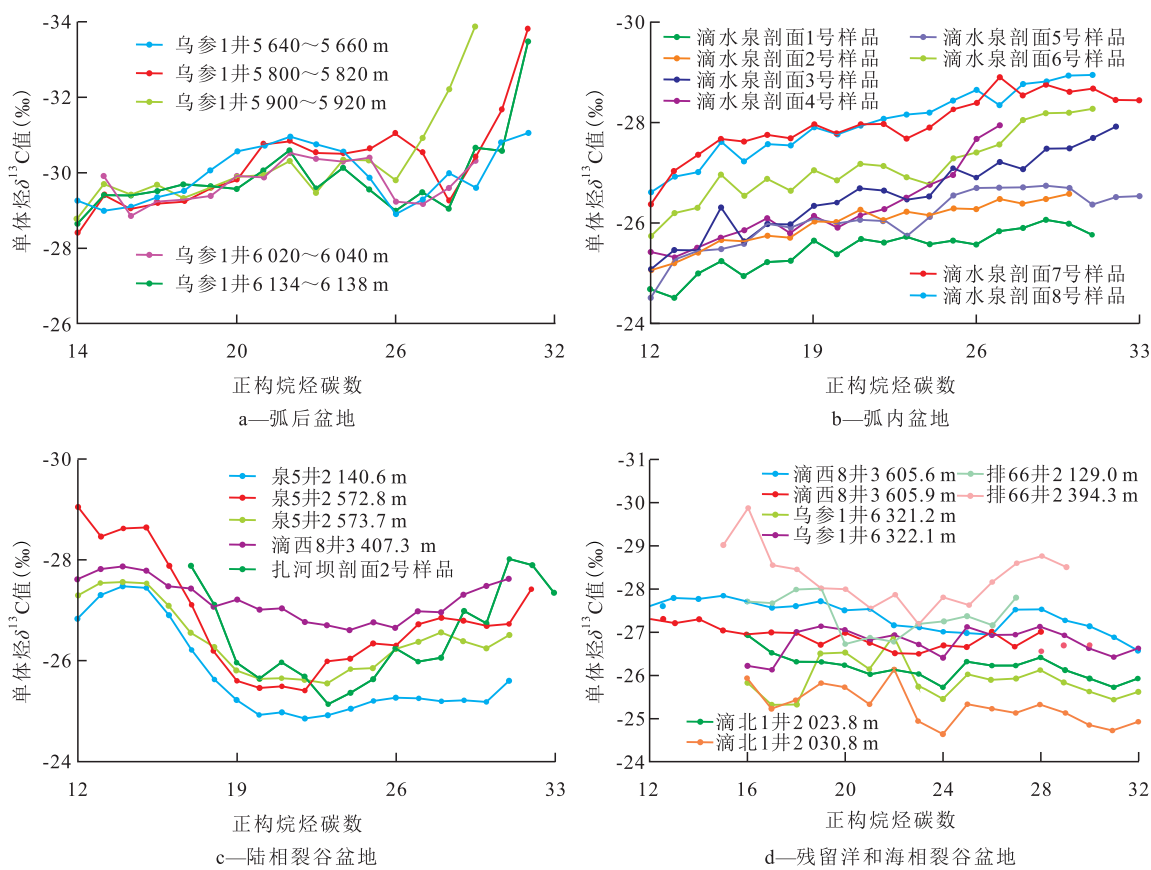


图7 准噶尔盆地石炭系烃源岩正构烷烃单体烃 δ¹³C 值分布

Fig.7 Distribution of δ¹³C values of n-alkanes in Carboniferous source rocks in Junggar Basin

1.26, 平均为0.78, 由于以陆源高等植物母源输入为主, 具有较高含量的甾萜烷等异构烷烃^[33,36], 该时期还原水体环境与火山喷发造成的水体缺氧有关。αα20R-C₂₇-C₂₈-C₂₉ 规则甾烷相对含量为 C₂₇ > C₂₉ > C₂₈, 呈近似对称“V”型分布; C₂₇重排甾烷含量较高, C₂₇重排甾烷/(C₂₇规则甾烷+C₂₇重排甾烷)值为0.16~0.31, 平均为0.25。三环萜烷含量较低, 大部分样品 C₁₉, C₂₀, C₂₁, C₂₃三环萜烷以 C₂₃为主峰, 呈上升型分布, 部分样品以 C₂₁为主峰, 呈山峰型分布。三环萜烷含量非常低, 三环萜烷/17-α藿烷值为0.03~0.09, 平均为0.05。Ts 含量变化较大, Ts/Tm 值为0.15~0.82, 平均为0.34, 表明扎河坝型烃源岩受火山作用的影响较滴水泉型烃源岩明显减弱。不同岩性的烃源岩伽马蜡烷含量存在一定差异, 如扎河坝剖面 ZHB03, ZHB16 和 ZHB17 碳质泥岩与滴中1井埋深为3765 m煤岩的伽马蜡烷/C₃₀藿烷值为0.13~0.22, 平均为0.18, 反映为半咸水沉积环境; 而邻层的泥岩伽马蜡烷含量非常低, 伽马蜡烷/C₃₀藿烷值为0.03~0.09, 平均为0.06, 反映为淡水沉积环境, 推测水体盐度升高与短期内水体蒸发量变大, 或与火山矿物质混入有关^[36]。该类烃源岩的另一

显著特点是高 C₂₄ 四环萜烷含量, C₂₄ 四环萜烷/(C₂₄ 四环萜烷+C₂₆ 三环萜烷)值为0.41~0.91, 平均为0.77。陆相裂谷盆地的烃源岩 δ¹³C 值最重, 单体正构烷烃(nC₁₂-nC₃₃)的 δ¹³C 值为-28.00‰~-24.86‰, 随着正构烷烃碳数的增加, 单体烃 δ¹³C 值呈现先变轻后变重的特点, 呈“S”型分布(图7c)。扎河坝型烃源岩整体形成于淡水-微咸水、还原湖沼沉积环境, 烃源岩母质以高等植物来源为主, 混有一定量的低等水生生物(图7c), 与侏罗系淡水、氧化煤系烃源岩形成环境不同^[31]。

第4种以滴西8井巴塔玛依内山组烃源岩为代表(简称滴西8井型烃源岩), 形成于陆相裂谷盆地氧化水体环境。该类烃源岩的饱和烃气相色谱具有明显的姥鲛烷优势, Pr/Ph 值为2.06~6.60, 平均为3.83; 芳烃化合物中氧芴系列化合物含量丰富, 为64.1%~74.2%, 平均为69.1%, 硫芴系列化合物含量较低, 仅为0.7%~18.7%, 平均为9.7%, 表明烃源岩形成于氧化沉积水体环境。αα20R-C₂₇-C₂₈-C₂₉ 规则甾烷中以 C₂₇甾烷为主, 碳质泥岩与泥岩相比, C₂₉甾烷含量更高一些, 规则甾烷相对含量为 C₂₈ < C₂₉ < C₂₇ 或 C₂₈ < C₂₇ < C₂₉, 呈不对称“V”型分布。滴西8井

型烃源岩的典型特点是,虽然 C_{27} 重排甾烷含量较低,但未知结构甾烷的含量较高;具有高 $17\alpha, 21\beta-C_{29}$ 降藿烷和低 T_s 含量特征, T_s/T_m 值仅为 $0.17 \sim 0.25$,平均为 0.21 。 $C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{23}$ 三环萜烷以 C_{19}, C_{20} 或 C_{21} 为主峰(图 6d,图 6e)。该类烃源岩由于形成于浅水氧化淡水沉积环境,烃源岩母质以高等植物供给为主, C_{24} 四环萜烷含量丰富, C_{24} 四环萜烷/ $(C_{24}$ 四环萜烷+ C_{26} 三环萜烷)值为 $0.81 \sim 0.91$,平均为 0.87 。同时,伽马蜡烷含量甚低,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值仅为 0.04 。滴西 8 井型烃源岩与滴水泉型烃源岩相比,姥鲛烷优势更加明显, C_{24} 四环萜烷相对含量更高,伽马蜡烷含量更低,淡水氧化沉积环境陆源高等植物优势输入特征更加明显。

第 5 种以五彩城、白碱沟剖面 and 彩深 1、城 1 井 巴塔玛依内山组烃源岩为代表(简称五彩城型烃源岩),形成于瀉湖或海相裂谷环境。五彩城型烃源岩发育于还原沉积水体环境,与滴西 8 井型氧化沉积水体环境的烃源岩存在显著差异,与乌参 1 井型烃源岩具有一定的相似性。其饱和烃气相色谱具有植烷优势, Pr/Ph 值为 $0.44 \sim 0.92$,平均为 0.60 。 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷相对含量为 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$,以 C_{27} 甾烷为主,呈不对称“V”型或“L”型分布。 C_{27} 重排甾烷含量较乌参 1 井型烃源岩明显偏高, C_{27} 重排甾烷/ $(C_{27}$ 规则甾烷+ C_{27} 重排甾烷)值为 $0.20 \sim 0.39$,平均为 0.26 。 $C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{23}$ 三环萜烷以 C_{21} 或 C_{23} 为主峰,呈山峰型或上升型分布,三环萜烷/ $17-\alpha$ 藿烷值为 $0.23 \sim 1.50$,平均为 0.73 ; C_{24} 四环萜烷相对含量较低, C_{24} 四环萜烷/ $(C_{24}$ 四环萜烷+ C_{26} 三环萜烷)值为 $0.32 \sim 0.43$,平均为 0.37 ; T_s 含量较乌参 1 井型烃源岩也偏高, T_s/T_m 值为 $0.50 \sim 1.31$,平均为 0.94 ;伽马蜡烷含量较高,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值为 $0.14 \sim 0.29$,平均为 0.23 。残留洋(海)环境的烃源岩 $\delta^{13}C$ 值相对较重,排 66、排 67 等井烃源岩样品的单体正构烷烃($nC_{14}-nC_{33}$)的 $\delta^{13}C$ 值为 $-30.54\text{‰} \sim -26.51\text{‰}$,随着正构烷烃碳数的增加呈轻微下降型分布(图 7d)。上述地化特征反映五彩城型烃源岩形成于半咸水、还原沉积水体环境,其母源具有低等水生生物与高等植物混合输入特点(图 6f)。

4 烃源岩生烃能力差异分析

准噶尔盆地石炭系烃源岩样品总有机碳含量、岩石热解、氯仿沥青“A”含量及金管-高压釜生烃热模拟结果综合对比表明,不同沉积环境发育的烃源

岩的生烃能力存在明显差异:弧后盆地烃源岩生烃能力最强,弧内盆地烃源岩生烃能力较强,残留洋(海)烃源岩生烃能力较差,陆相裂谷盆地烃源岩生烃能力最差。例如,处于弧后盆地深水区的乌参 1 井埋深为 $5\,460 \sim 5\,470$ m 深灰色凝灰质泥岩样品的 TOC 值为 1.05% , (S_1+S_2) 值为 2.34 mg/g,干酪根的 TOC 值为 63.7% ,金管-高压釜生烃热模拟实验结果显示最大产油率为 245.28 mg/gTOC,最大产烃率为 286.78 mg/gTOC;处于弧内盆地相对浅水区的滴水泉剖面滴水泉组深灰色凝灰质泥岩样品的 TOC 值为 1.67% , (S_1+S_2) 值为 1.87 mg/g,干酪根 TOC 值为 60.3% ,最大产油率为 52.68 mg/gTOC,最大产烃率为 149.11 mg/gTOC;处于残留洋(海)较浅水环境的车排子地区排 66 井埋深为 $2\,127.3 \sim 2\,731$ m 和排 67 井埋深为 $1\,119.6$ m 灰黑色泥岩样品的产烃率较低,最大产烃率在 100 mg/gTOC 以下;处于陆相裂谷盆地较深水的扎河坝剖面碳质泥岩样品的生烃能力较差,最大产烃率在 50 mg/gTOC 以下(图 8)。此外,相同沉积环境不同岩性的烃源岩样品的生烃能力也存在一定差异,例如乌参 1 井埋深为 $5\,666 \sim 5\,696$ m 深灰色泥岩样品的 TOC 值为 3.03% , (S_1+S_2)

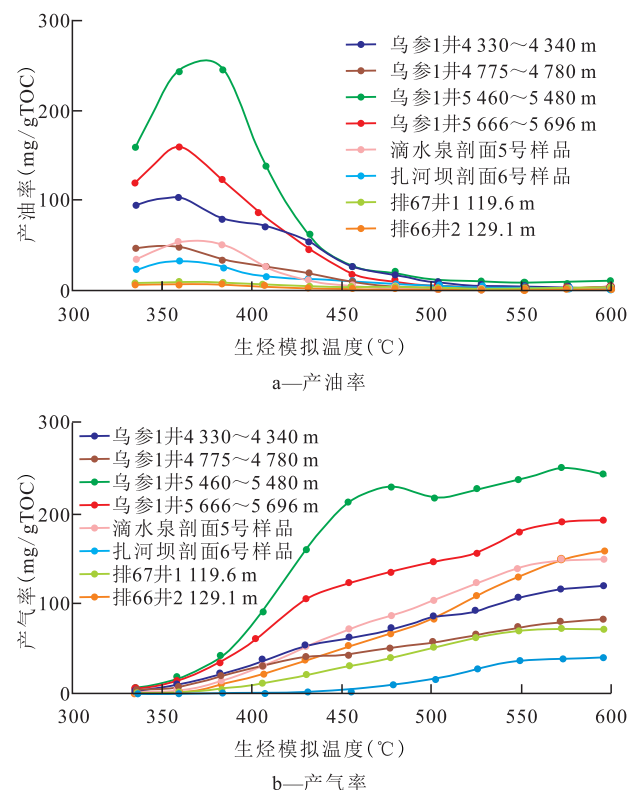


图 8 准噶尔盆地石炭系烃源岩金管-高压釜生烃热模拟产烃率曲线

Fig.8 Hydrocarbon generation rate curves of Carboniferous source rocks in Junggar Basin based on hydrocarbon generation thermal simulation in gold tube-autoclave

值为 11.32 mg/g,干酪根的 TOC 值为 31.7%,最大产油率为 258.21 mg/gTOC,最大产烃率为 195.90 mg/gTOC,其生烃能力较凝灰质泥岩样品有一定程度的减小,同时,其他样品金管-高压釜生烃热模拟结果也存在凝灰质泥岩的生烃能力高于泥岩的情况。研究认为,火山作用为烃源岩的发育提供了有利条件,对烃源岩品质及生烃能力的影响主要表现在原始沉积期和生烃演化期 2 个阶段。火山作用有利于形成缺氧还原的沉积水体条件,易于有机质保存。火山灰对沉积有机质具有明显的富集效应,火山喷发造成微生物的大量死亡,有利于提高有机质丰度;火山喷发产生的气体以及火山灰在水体中释放的大量营养元素和微量元素可促使藻类、细菌大量繁盛,大大提高沉积水体的古生产力^[37-38]。火山物质含有 V, Cr, Co, Fe, Zn, Ni, Mo 等元素,在烃源岩干酪根降解生烃过程中与其发生催化作用,当火山物质(凝灰质)含量为 20%~40% 时,对烃源岩生烃能力的催化作用最强;当火山物质含量较低时,可能对烃源岩生烃能力的催化作用不明显;当火山物质含量过高时,其对烃源岩中有机质具有一定的“稀释”作用,致使催化作用也不明显,甚至造成烃源岩生烃能力大幅度降低。

准噶尔盆地石炭系凝灰质泥岩、泥岩、碳质泥岩和沉凝灰岩烃源岩品质分析结果表明,就有机质丰度而言,碳质泥岩最高,其次为凝灰质泥岩和泥岩,沉凝灰岩最低;就生烃能力而言,凝灰质泥岩产烃率最高,但受火山作用剧烈影响的沉凝灰岩由于火山物质含量过高,其产烃率明显低于泥岩的产烃率,碳质泥岩产烃率最低。因此,准噶尔盆地石炭系烃源岩以凝灰质泥岩、泥岩、碳质泥岩烃源岩占主导,而沉凝灰岩和煤岩厚度较薄,仅可以作为局部地区的烃源岩^[37-38]。

5 结论

石炭纪为准噶尔盆地海陆转换的关键期,经历了“早海晚陆、南海北陆”古地理演化过程。构造-沉积环境控制了火山岩-沉积岩充填样式差异,形成了弧后盆地广盆、残留洋(海)广盆、海相裂谷环境区域、弧内盆地局限和陆相裂谷盆地局限 5 种烃源岩发育模式。不同环境发育的烃源岩地球化学特征存在明显差异,可分为乌参 1 井型烃源岩、五彩城型烃源岩、滴水泉型烃源岩、扎河坝型烃源岩和滴西 8 井型烃源岩 5 种类型。沉积环境与火山作用、火山物质对烃源岩的生烃具有重要影响。弧后

盆地和弧内盆地烃源岩受火山作用影响,具有较强的生烃能力,为优质烃源岩,残留洋(海)、海相裂谷环境烃源岩生烃能力次之,陆相裂谷盆地烃源岩生烃能力最差。

参考文献

- [1] 吴小奇,刘德良,魏国齐,等.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩地球化学特征及其构造背景[J].岩石学报,2009,25(1):55-66.
WU Xiaoqi, LIU Deliang, WEI Guoqi, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Ludong-Wucuiwan area, Junggar basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 55-66.
- [2] 张元元,郭召杰.准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究[J].岩石学报,2010,26(2):421-430.
ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie. New constraints on formation ages of ophiolites in northern Junggar and comparative study on their connection [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 421-430.
- [3] 徐新,周可法,王煜.西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究[J].岩石学报,2006,26(11):3 206-3 214.
XU Xin, ZHOU Kefa, WANG Yu. Study on extinction of the remnant oceanic basin and tectonic setting of West Junggar during Late Paleozoic [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3 206-3 214.
- [4] 吴晓智,齐雪峰,唐勇,等.新疆北部石炭纪地层、岩相古地理与烃源岩[J].现代地质,2008,22(4):549-557.
WU Xiaozhi, QI Xuefeng, TANG Yong, et al. Carboniferous strata and lithofacies paleogeography & source rock in northern Xinjiang [J]. Geoscience, 2008, 22(4): 549-557.
- [5] 王启宇,牟传龙,陈小炜,等.准噶尔盆地及周缘地区石炭系岩相古地理特征及油气基本地质条件[J].古地理学报,2014,16(5):655-671.
WANG Qiyu, MOU Chuanlong, CHEN Xiaowei, et al. Palaeogeographic characteristics and basic geological conditions of petroleum of the Carboniferous in Junggar Basin and its adjacent areas [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 655-671.
- [6] 王清晨,阳孝法,陶辉飞.准噶尔盆地东部石炭纪富火山岩海相油气盆地原型:一个工作假说[J].地质科学,2012,47(4):921-940.
WANG Qingchen, YANG Xiaofa, TAO Huihui. Prototype of a Carboniferous petroliferous volcano sedimentary basin in the eastern Junggar Basin: A working hypothesis [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(4): 921-940.
- [7] 靳军,张朝军,刘洛夫,等.准噶尔盆地石炭系构造沉积环境与生烃潜力(为庆祝塔里木油田石油会战 20 周年而作)[J].新疆石油地质,2009,30(2):211-214.
JIN Jun, ZHANG Chaojun, LIU Luofu, et al. Structural/sedimentary environment and hydrocarbon-generating potentials of Carboniferous in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(2): 211-214.

- [8] 何登发,陈新发,况军,等.准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统[J].石油勘探与开发,2010,37(4):397-408.
HE Dengfa, CHEN Xinfu, KUANG Jun, et al. Distribution of Carboniferous source rocks and petroleum systems in the Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 397-408.
- [9] 林会喜,官亚军,赵乐强,等.火山岩风化壳发育规律及油气地质意义——以准西车排子地区石炭系火山岩为例[J].油气地质与采收率,2019,26(6):11-18.
LIN Huixi, GONG Yajun, ZHAO Leqiang, et al. Volcanic weathering crust development pattern and its petrogeological significance: A case study of Carboniferous volcanic crust of Chepaizi area in West Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 11-18.
- [10] 张明洁,杨品.准噶尔盆地石炭系(油)气藏特征及成藏条件分析[J].新疆石油学院学报,2000,12(2):8-13.
ZHANG Mingjie, YANG Pin. The characteristic and analysis of reservoir-forming conditions of the Carboniferous oil and gas pools in Junggar Basin [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2000, 12(2): 8-13.
- [11] 杨迪生,陈世加,李林,等.克拉美丽气田油气成因及成藏特征[J].天然气工业,2012,32(2):27-31.
YANG Disheng, CHEN Shijia, LI Lin, et al. Hydrocarbon origins and their pooling characteristics of the Kelameili Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 27-31.
- [12] 张焕旭,倪帅,王力,等.准噶尔盆地滴南凸起中段南支天然气混源比例研究[J].断块油气田,2014,21(2):176-180.
ZHANG Huanxu, NI Shuai, WANG Li, et al. Mixing source ratio of nature gas in south branch of Dinan salient, Zhunggar Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(2): 176-180.
- [13] 贺凯,王菁,谭强.五彩湾凹陷石炭系油气成藏控制因素及勘探建议[J].新疆石油学院学报,2002,14(4):4-7.
HE Kai, WANG Jing, TAN Qiang. The controlling factors of the oil and gas reservoir forming in Carboniferous, Wucaiwan Depression and some suggestions for exploration [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2002, 14(4): 4-7.
- [14] 王东良,林潼,杨海波,等.准噶尔盆地滴南凸起石炭系气藏地质特征与控制因素分析[J].石油实验地质,2008,30(3):242-246, 251.
WANG Dongliang, LIN Tong, YANG Haibo, et al. Analysis of geologic features and control factors of Carboniferous gas reservoir in Dinan Uplift, the Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 242-246, 251.
- [15] 王屿涛,蒋少斌.准噶尔盆地腹部陆南凸起油气的深源成因及勘探[J].石油实验地质,1999,21(1):34-40.
WANG Yutao, JIANG Shaobin. Deep origin and exploration for the hydrocarbon of the Lunan Salient on the hinterland of the Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1999, 21(1): 34-40.
- [16] 杨斌,严志民,尤绮妹,等.准东石炭系原油地球化学特征[J].新疆石油地质,2002,23(6):478-481.
YANG Bin, YAN Zhimin, YOU Qimei, et al. Geochemical characteristics of Carboniferous crude oil in Jundong area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(6): 478-481.
- [17] 徐兴友.准噶尔盆地东部克拉美丽地区石炭系烃源岩研究[J].油气地质与采收率,2005,12(1):38-41.
XU Xingyou. Study on the Carboniferous source rocks in Kelameili area, eastern Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(1): 38-41.
- [18] 王绪龙,赵孟军,向宝力,等.准噶尔盆地陆东-五彩湾地区石炭系烃源岩[J].石油勘探与开发,2010,37(5):523-530.
WANG Xulong, ZHAO Mengjun, XIANG Baoli, et al. Carboniferous source rocks in the Ludong-Wucaiwai area, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 523-530.
- [19] 贺凯,庞瑶,何治亮,等.准东地区石炭系烃源岩评价及重要意义[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(6):41-45.
HE Kai, PANG Yao, HE Zhiliang, et al. The evaluation and significance of the Carboniferous source rocks in the east Junggar area [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(6): 41-45.
- [20] 曲彦胜,王圣柱,李艳丽,等.乌伦古地区石炭系烃源岩生烃潜力评价[J].特种油气藏,2016,23(2):31-35.
QU Yansheng, WANG Shengzhu, LI Yanli, et al. Hydrocarbon potential evaluation of carboniferous source-rocks in Wulungu [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 31-35.
- [21] 程世伟,林会喜,李艳丽,等.新疆北部石炭系烃源岩发育模式及潜力研究[J].特种油气藏,2018,25(6):55-59.
CHENG Shiwei, LIN Huixi, LI Yanli, et al. Development patterns and potential of the Carboniferous source-rock in northern Xinjiang [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 55-59.
- [22] 徐兴友,朱日房,王岫岩,等.准噶尔盆地准东滴水泉组烃源岩生烃物理模拟研究[J].大庆石油地质与开发,2003,22(4):9-11.
XU Xingyou, ZHU Rifang, WANG Xiuyan, et al. Hydrocarbon generation simulation of hydrocarbon source rocks in Dishuiquan Formation, east Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(4): 9-11.
- [23] 秦黎明,张枝焕,刘洪军,等.准噶尔盆地东北部恰库尔特草原北下石炭统南明水组烃源岩有机地球化学特征及其地质意义[J].天然气地球科学,2008,19(6):761-769.
QIN Liming, ZHANG Zhihuan, LIU Hongjun, et al. Geochemical characteristics of Lower Carboniferous Nanmingshui Formation source rock and their geologic implications, Qiakuerte prairie, northeastern Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 761-769.
- [24] 刘洪军,张枝焕,秦黎明.准噶尔盆地滴北1井区油气成藏分析[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(3):1-5.
LIU Hongjun, ZHANG Zhihuan, QIN Liming. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions in Dibeil wellblock of Junggar Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2011, 26(3): 1-5.
- [25] 张海祥,牛贺才,于学元,等.准噶尔板块东北缘富铌玄武岩的发现及其地质意义[J].地质找矿论丛,2003,18(1):71-72.
ZHANG Haixiang, NIU Hecai, YU Xueyuan, et al. Discovery of Nb-rich basalt at the northeast margin of Junggar plate and the

- geological significance [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2003, 18(1): 71-72.
- [26] 代春萌, 曾庆才, 李波, 等. 准噶尔盆地滴南凸起石炭系古火山机构地震特征及有利区预测 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(6): 739-749.
- DAI Chunmeng, ZENG Qingcai, LI Bo, et al. Seismic characteristics of Carboniferous ancient volcanic edifices and prediction of favorable zones in the Dinan bump of the Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(6): 739-749.
- [27] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题 [J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 1-12.
- HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 1-12.
- [28] DRAUT A E, CLIFT Peter D. Differential preservation in the geologic record of intraoceanic arc sedimentary and tectonic processes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 116(1): 57-84.
- [29] 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 311-322.
- CHEN Zhelong, LIU Guangdi, WEI Yanzhao, et al. Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 311-322.
- [30] 韩雨樾, 冉波, 李智武, 等. 四川盆地北缘下寒武统页岩生物标志化合物特征及其地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 435-442.
- HAN Yuyue, RAN Bo, LI Zhiwu, et al. Characteristics of biomarker compounds and their implications for Lower Cambrian black shale on the northern margin of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 435-442.
- [31] 包建平, 倪春华, 朱翠山, 等. 黔北拗陷高演化烃源岩中正构烷烃单体烃碳同位素组成 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 838-848.
- BAO Jianping, NI Chunhua, ZHU Cuishan, et al. Carbon isotope compositions of individual alkanes in highly mature source rocks from Northern Guizhou Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 838-848.
- [32] 李剑, 姜正龙, 罗霞, 等. 准噶尔盆地煤系烃源岩及煤成气地球化学特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 365-374.
- LI Jian, JIANG Zhenglong, LUO Xia, et al. Geochemical characteristics of coal-measure source rocks and coal-derived gas in Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 365-374.
- [33] 胡朝伟, 胡广, 张玺华, 等. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 202-214.
- HU Chaowei, HU Guang, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 202-214.
- [34] 齐跃春, 高红梅, 鲍志东, 等. 漠河盆地依列克得组火山活动间歇期烃源岩有机地球化学特征研究 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 164-172.
- QI Yuechun, GAO Hongmei, BAO Zhidong, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks from Yiliekedede Formation in the intermittent stages of volcanic activity in Mohe basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 164-172.
- [35] 杨斌, 李建新. 准噶尔盆地东部油区石炭系原油探讨 [J]. *新疆石油地质*, 1992, 13(2): 171-178.
- YANG Bin, LI Jianxin. An approach to the Carboniferous crude oil from eastern petroliferous area in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1992, 13(2): 171-178.
- [36] 刘舵, 谢春勤, 陈治军, 等. 正构烷烃分布在确定烃源岩生源构成中的有效性 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(1): 42-47.
- LIU Duo, XIE Chunqin, CHEN Zhijun, et al. Effectiveness of n-alkanes distribution on determining parent material composition of hydrocarbon source rock [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(1): 42-47.
- [37] 王鹏, 潘建国, 魏东涛, 等. 新型烃源岩——沉凝灰岩 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 26(4): 19-22.
- WANG Peng, PAN Jianguo, WEI Dongtao, et al. A new type of hydrocarbon source rock—sedimentary tuff [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2011, 26(4): 19-22.
- [38] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式 [J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1 077-1 087.
- WANG Shurong, SONG Daofu, HE Dengfa. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and the evolutionary pattern of tuffaceous source rocks [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1 077-1 087.

编辑 邹澂滢