

北羌塘坳陷南部胜利河油浸白云岩

吴珍汉¹⁾, 季长军¹⁾, 赵 珍¹⁾, 康少伟²⁾, 赵荣涛¹⁾, 雷云龙²⁾

1)中国地质科学院, 北京 100037; 2)陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西西安 710021

摘 要: 北羌塘坳陷南部胜利河上游出露油浸白云岩, 层位为中侏罗统布曲组上部, 近水平产状, 下伏 TOC 含量高的黑色泥页岩。油浸白云岩呈灰黑色, 原岩为生物碎屑灰岩, 经历了白云岩化作用; 表面覆盖烟灰状沥青, 内含易于挥发的轻质油; 地表样品含油率为 765×10^{-6} , 远高于南羌塘坳陷隆鄂尼—昂达尔错古油藏地表出露的白云岩油砂(含油率 $(12 \sim 236) \times 10^{-6}$)。胜利河油浸白云岩裂隙发育, 孔隙度为 6.49%、渗透率为 3.81 mD, 属于羌塘盆地有利储层。油气地球化学及油源对比结果显示, 胜利河油浸白云岩原油来源于中下侏罗统富有机质泥页岩。胜利河油浸白云岩对北羌塘坳陷油气勘查评价具有重要指示意义。

关键词: 油浸白云岩; 优质储层; 油气勘探前景; 胜利河地区; 北羌塘坳陷

中图分类号: P618.13 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.061801

Oil-soaked Dolomite in Upper Reach of the Shenglihe River, Northern Qiangtang

WU Zhen-han¹⁾, JI Chang-jun¹⁾, ZHAO Zhen¹⁾, KANG Shao-wei²⁾, ZHAO Rong-tao¹⁾, LEI Yun-long²⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 2) Shaanxi Coal Geology Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021

Abstract: Oil-soaked dolomite discovered recently in the upper reach of the Shenglihe River, south of the Northern Qiangtang Depression, belongs to the upper section of the Middle Jurassic Buqu Formation. The dolomite is dark gray, gently dipping, and overlies dark mudstone and shale of higher total organic carbon content. Microscopic observation of the dolomite revealed dolomitization of bioclastic limestone. The oil-soaked dolomite is covered by ashy asphalt near the surface, and the light crude oil in fractures of the dolomite is volatile. The oil content of the dolomite sampled in the Shenglihe area reaches 765×10^{-6} , which is much higher than the oil content of the dolomite oil sand outcropping in the Long'eni-Andarco Belt $((12 \sim 236) \times 10^{-6})$ in the Southern Qiangtang Depression. The oil-soaked dolomite is a favorable reservoir with a porosity of 6.49% and permeability of 3.81 mD. Petroleum geochemistry and biomarker parameters indicate that the crude oil of the dolomite in the Shenglihe area was derived from the Early-Middle Jurassic dark shale and mudstone enriched in organic matter. The oil-soaked dolomite in the Shenglihe area indicates a potential for petroleum resources in the Northern Qiangtang Depression.

Key words: oil-soaked dolomite; favorable reservoir; potential for petroleum exploration; Shenglihe area; Northern Qiangtang Depression

羌塘盆地处于富含油气资源的特提斯构造域, 发育我国陆上规模最大的侏罗纪海相沉积盆地, 形成了厚达数千米的侏罗系海相地层, 具有良好的油气成藏条件(赵政璋等, 2001; 王成善和伊海生,

2001; 李亚林等, 2008; 王剑等, 2009; Fu et al., 2016; 吴珍汉等, 2019a); 南羌塘坳陷北部大面积出露古油藏, 说明羌塘盆地经历过大规模油气成藏过程(王成善等, 2004; 王剑等, 2009; 季长军, 2015)。由

本文由中国地质调查局项目“羌塘盆地阿木错凹陷油气地质调查”(编号: DD20221855)和“羌塘北部龙尾错地区油气地质调查”(编号: DD20211343)、陕西省煤田地质集团科研项目“羌塘重点区块油气地质选区评价”(编号: SMDZ-2021ZD-1)和中国地质科学院基本科研业务费项目“羌塘盆地古油藏调查及成藏机理研究”(编号: JKY202209)联合资助。

收稿日期: 2022-06-09; 改回日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2022-06-21。责任编辑: 闫立娟。

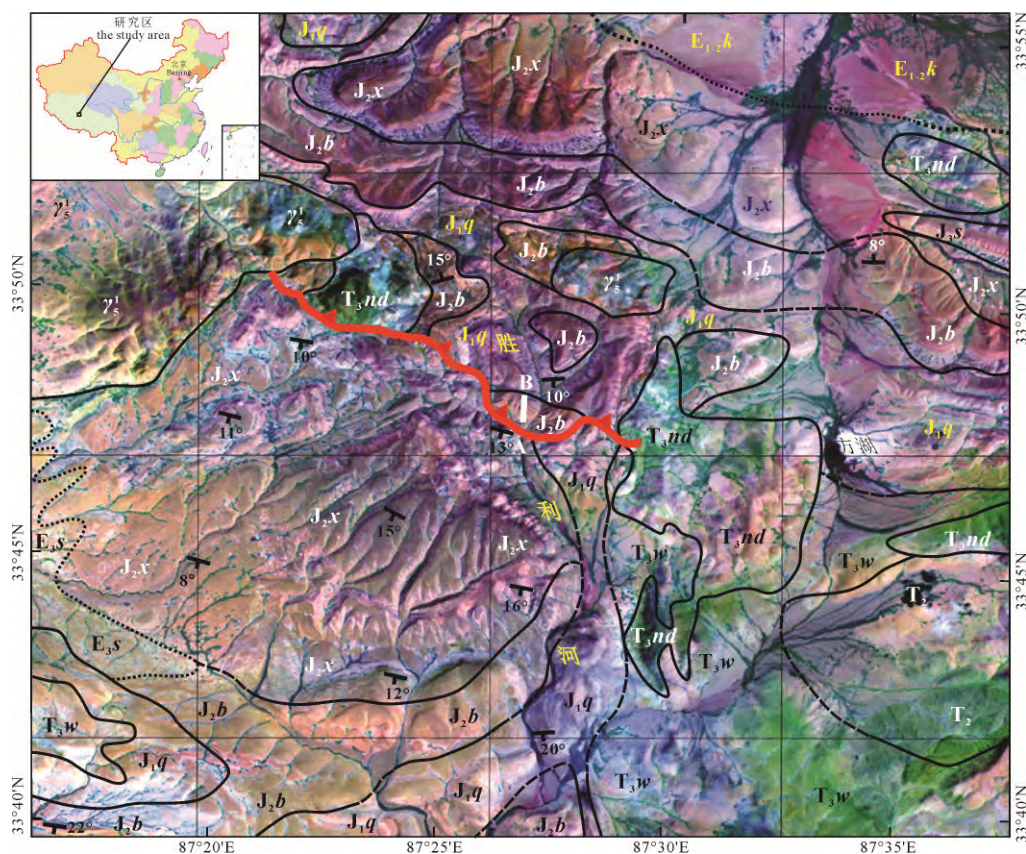
第一作者简介: 吴珍汉, 男, 1965 年生。博士, 研究员。长期从事青藏高原区域地质、构造地质及羌塘盆地油气地质研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zhenhanwu@cags.ac.cn。

于印度大陆与欧亚大陆板块碰撞及造山作用,导致羌塘盆地及邻区发生构造变形和断裂活动(Gao et al., 2013),对油气保存条件产生了重要影响(郭祖军等, 2008; 吴珍汉等, 2019b)。如羌中隆起南侧、南羌塘拗陷北部,新生代早期碰撞造山作用导致昂达尔错—比洛错古油藏(BAPS)发生自北向南长距离逆冲推覆构造运动,形成南北宽 20~30 km、长达百余 km、强烈变形的侏罗系推覆体,下伏上白垩统一古近系红层,逆冲推覆及构造隆升对 BAPS 古油藏产生了严重破坏(吴珍汉等, 2016, 2019b; 季长军等, 2019)。

羌塘北部碰撞造山期构造改造相对较弱,但迄今尚未发现类似 BAPS 的含油白云岩;羌科 1 井(钻探深度 4 696.18 m)与羌地 17 井(钻探深度 2 001.8 m)穿透了侏罗系海相地层(王剑等, 2020),没有发现含油储层。近期我们在北羌塘拗陷南部胜利河上游发现油浸白云岩,其地层时代、油源与 BAPS 相近,对羌塘北部油气资源勘查评价具有重要指示意义。

1 区域地质构造

羌塘北部胜利河地区中生代经历了多期海浸、海退及环境变化过程。三叠纪中晚期发育海陆交互相沉积环境,形成泥页岩、灰岩、砂岩,夹煤线(T_{2-3});三叠纪晚期发生了大规模火山喷发,形成那底岗日组(T_{3nd})中酸性火山岩、凝灰岩,上覆沃若山组(T_{3w})暗紫色河湖相砂砾岩、粉砂岩、泥岩沉积(吴珍汉等, 2021)。侏罗纪处于滨浅海沉积环境,早侏罗世形成雀莫错组(J_{1q})砂岩、泥岩、泥灰岩、粉砂岩,中侏罗世先后形成布曲组(J_{2b})灰岩、生物碎屑灰岩、白云岩和夏里组(J_{2x})泥页岩、膏泥岩、砂岩、泥灰岩,晚侏罗世形成索瓦组(J_{3s})灰岩、礁灰岩及白龙冰河组(J_{3b})泥岩、砂岩、灰岩。早白垩世开始转变为陆相环境,以风化剥蚀为主,部分地区处于三角洲及滨海环境,沉积雪山组(K_{1x})泥岩、砂岩、含砾砂岩;晚白垩世—古近纪早期发育河湖相红色砾岩、含砾砂岩、杂砂岩(红层),古近纪晚期发育喷呐湖组(E_{3s})



E_{3s} —渐新世喷呐湖组泥砂岩; E_{1-2k} —古近系康托组红层; J_{3s} —上侏罗统索瓦组灰岩; J_{2x} —中侏罗统夏里组泥岩、砂岩、泥灰岩; J_{2b} —中侏罗统布曲组灰岩; J_{1q} —下侏罗统雀莫错组泥岩、砂岩、灰岩; T_{3w} —上三叠统沃若山组暗紫色碎屑岩; T_{3nd} —上三叠统那底岗日组火山岩; T_2 —中三叠统泥页岩、砂岩、灰岩,夹煤线; γ_5^1 —三叠纪岩浆岩; 红色粗线表示逆冲断层; A—B, 剖面及位置。

E_{3s} —Oligocene mudstone and sandstone of the Suonahu Formation; E_{1-2k} —Paleocene—Eocene redbeds of the Kangtuo Formation; J_{3s} —Upper Jurassic limestone of the Suowa Formation; J_{2x} —Middle Jurassic mudstone, sandstone, and marl of the Xiali Formation; J_{2b} —Middle Jurassic limestone of the Buqu Formation; J_{1q} —Lower Jurassic mudstone, sandstone, and limestone of the Quemocuo Formation; T_{3w} —Upper Triassic dark-violet clastic rocks of the Woruoshan Formation; T_{3nd} —Late Triassic volcanic rocks of the Nadigangri Formation; T_2 —Middle Triassic shale, mudstone, sandstone, and limestone intercalated with coal seams; γ_5^1 —Triassic magmatic rocks; the red coarse line represents a thrust fault; A—B, cross section from A to B.

图 1 羌塘北部胜利河地区遥感地质图

Fig. 1 Remote sensing image and geological map of the Shenglihe area, Northern Qiangtang Basin



图2 胜利河上游逆冲推覆及构造变形照片(镜头向北)

Fig. 2 Photograph of thrust fault and deformation in the upper reaches of the Shenglihe River (northward view)

棕色泥岩、砂岩、砾岩, 第四纪发育冲洪积和湖相沉积(图 1)。

胜利河地区侏罗系发育有利的生储盖组合和良好的油气成藏条件。下侏罗统雀莫错组(J_1q)泥页岩和中侏罗统布曲组(J_2b)黑色泥页岩为生油层, 中侏罗统布曲组(J_2b)白云岩和生物碎屑灰岩为储集层, 中侏罗统夏里组(J_2x)石膏和膏泥岩为盖层。胜利河地区构造变形较弱, 侏罗系地层产状平缓, 总体向南倾斜, 倾角为 $8^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (图 1), 油气保存条件较好。胜利河上游发育小型逆冲断层, 走向北西西—近东西向(图 1), 断层倾向北、倾角为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$; 靠近逆冲断层, 中侏罗统布曲组灰岩构造变形增强, 地层弯转、产状变陡(图 2); 远离断层百余米, 侏罗系地层产状渐趋平缓。

2 油浸白云岩

在胜利河流域, 中侏罗统布曲组(J_2b)厚度 420~680 m; 上段为灰黑色灰岩、油浸白云岩、生物碎屑灰岩, 中段为黑色泥岩、页岩夹生物碎屑灰岩, 下段为灰黑色灰岩、生物碎屑灰岩、泥灰岩。在胜利河中下游大部分地区, 布曲组被中侏罗统夏里组覆盖, 局部出露布曲组顶部灰岩(图 1)。在胜利河上游, 布曲组上段油浸白云岩出露地表, 产状近于水平(图 3, 图 4a), 简称“胜利河油浸白云岩”; 下伏布曲组中段黑色泥页岩(图 4b), TOC 含量 2.75%~9.71%(平均 5.60%), 产油潜率为 2.96~

30.52 mg/g(平均 20.28 mg/g), $T_{\max}$ 为 $436\sim 444^{\circ}\text{C}$, 属优质烃源岩; 布曲组下段灰岩、生物碎屑灰岩、泥灰岩总体向南倾斜, 地层倾角向北变陡(图 3)。

胜利河上游地表出露的布曲组油浸白云岩位于逆冲断层面上盘, 东侧为胜利河, 南侧为北西向支流, 地貌表现为平缓台地, 北侧为 J_2b 灰岩山地(图 4a)。油浸白云岩呈黑色, 保留生物碎屑残余结构, 岩层表面被烟灰状沥青覆盖(图 4c); 新鲜样品染手、散发浓重油味, 荧光照射发黄色、浅蓝色。布曲组中段夹于黑色泥页岩之间的生物碎屑灰岩, 部分层位也发生了白云岩化, 岩层表面残留烟灰状沥青, 岩层内部裂隙含轻质原油, 敲击样品散发很重油味。

对胜利河上游 J_2b 布曲组油浸白云岩采样, 制作茜素红染色薄片, 进行显微观测和岩矿鉴定; 制成标准柱塞样品开展孔渗分析, 采用氯仿沥青抽提法测试样品含油率。显微观测表明, 油浸白云岩是生物碎屑灰岩白云岩化的产物, 未白云岩化的腕足化石碎片保留方解石残余结构, 具有波状消光特征, 发育贯穿裂缝(图 4d); 白云石晶粒细小, 晶型不规则, 晶间缝隙多被沥青质充填。孔渗分析表明, 胜利河油浸白云岩孔隙度为 6.49%, 渗透率为 3.81 mD, 好于羌塘盆地低孔低渗储集层, 属有利储层。通过抽提法测得胜利河上游油浸白云岩地表样品含油率为 0.076 5%(765×10^{-6}), 高于隆鄂尼古油藏地表砂糖状白云岩油砂含油率(0.001 2%~0.020 7%,

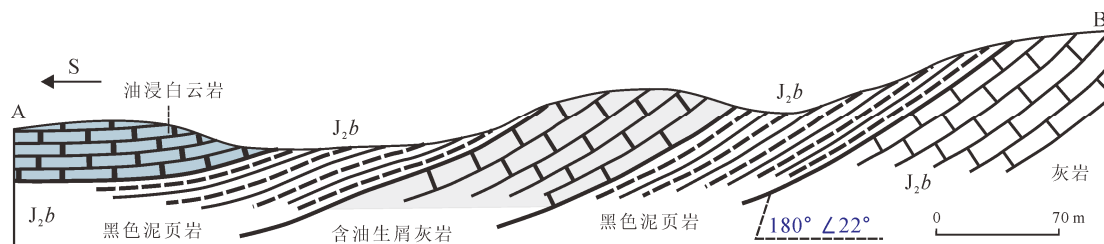
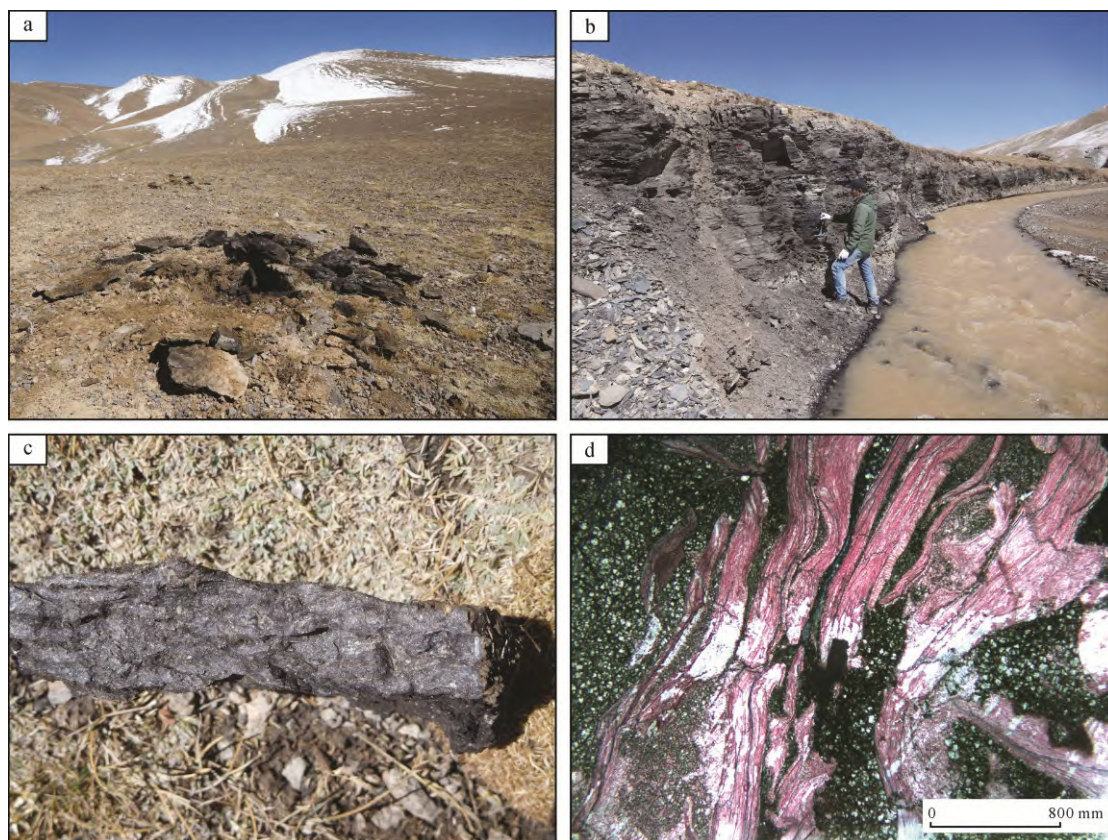


图3 胜利河上游中侏罗统布曲组 A-B 油气地质剖面图

Fig. 3 Cross section A-B of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Shenglihe area



a—中侏罗统布曲组油浸白云岩(镜头向北); b—中侏罗统布曲组黑色泥页岩(镜头向北);
c—布曲组油浸白云岩标本; d—布曲组油浸白云岩显微照片。

a—northward view of Middle Jurassic oil-soaked dolomite of the Buqu Formation; b—northward view of dark-gray mudstone and shale of the Middle Jurassic Buqu Formation; c—sample of oil-soaked dolomite of the Buqu Formation;
d—photomicrograph of oil-soaked dolomite of the Buqu Formation.

图 4 胜利河上游油浸白云岩照片

Fig. 4 Photos of the oil-soaked dolomite in Upper Reach of the Shenglihe River

或 $(12\sim 207)\times 10^{-6}$)和塞仁区块地表油砂含油率 $(0.001\ 8\%\sim 0.023\ 6\%, \text{或}(18\sim 236)\times 10^{-6})$, 远高于昂达尔错古油藏地表砂糖状白云岩油砂含油率 $(0.002\ 5\%\sim 0.004\ 2\%, \text{或}(25\sim 42)\times 10^{-6})$ (季长军, 2015)。

3 生物标志化合物与油源对比

对胜利河油浸白云岩开展油气有机地球化学特征研究, 样品测试分析在长江大学地球化学实验室完成。含油白云岩经前处理粉碎至 100 目后, 用氯仿索式抽提 72 h, 抽提得到可溶有机物, 再进行族组分分离得到饱和烃、芳烃、非烃和沥青质馏分, 将抽提所得的饱和烃组分进行气相色谱-质谱(GC-MS)分析(唐友军, 2009), 实验所用仪器是 HP6890N/5975IMSD 气相色谱-质谱联用仪。

根据 GC-MS 测试分析资料, 胜利河油浸白云岩色谱正构烷烃相对完整, 且相对丰度整体较高, 正构烷烃碳数分布 $nC_{10}\sim nC_{34}$, 主峰碳数 nC_{25} ; 原油短链正构烷烃丰度相对中长链正构烷烃丰度普遍较低, 正构烷烃分布具有后单峰特征, $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22}^{+}$ 比值和 $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$ 比值分别为 0.71 和

1.63; 碳优势指数(CPI)和奇偶指数(OEP)比值接近 1, 不具有奇偶优势。样品中检测出了丰富的姥鲛烷和植烷, 所测样品中 Pr/Ph 比值为 0.67, 表现出一定植烷优势, 反应生油母质可能沉积于还原环境。

胜利河油浸白云岩样品中萜烷类化合物主要为三环萜烷、五环三萜烷和少量四环萜烷, $Ts/(Ts+Tm)$ 比值为 0.63; $C_{31}22S/(22S+22R)$ -升藿烷和 $C_{30}\alpha\beta/(\alpha\beta+\beta\alpha)$ -藿烷比值分别为 0.58 和 0.92, 反应有机质成熟度相对较高, 升藿烷系列 $C_{31}\sim C_{35}$ 相对比较完整。规则甾烷及其重排甾烷(C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29})丰度特征在质谱图 M/Z217 上最为典型, 油浸白云岩规则甾烷中 $\alpha\alpha\alpha$ -20RC $_{27}/C_{29}$ 比值为 0.89, $C_{29}\alpha\beta/(\alpha\beta+\alpha\alpha)$ 和 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 比值分别为 0.45 和 0.44。油浸白云岩生物标志化合物具有低三环萜烷、高孕甾烷的特征(图 5), 饱和烃生物标志化合物参数 $C_{23}\sim C_{26}/C_{19}\sim C_{22}$ -三环萜烷为 1.12, $C_{23}\sim C_{26}/C_{28}\sim C_{29}$ -三环萜烷为 1.85; C_{21} 孕甾烷/ C_{29} - $\alpha\alpha\alpha$ 规则甾烷为 0.43(表 1), 表明沉积水体具有一定的咸化度。

依据类异戊二烯烃相对丰度(李守军, 1999;

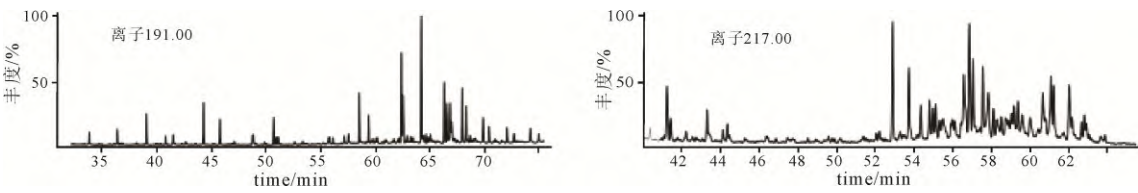


图 5 胜利河油浸白云岩 BD9299 饱和烃气相质谱图

Fig. 5 Mass spectrum of saturated hydrocarbons from Shenglihe oil-soaked dolomite BD9299

表 1 胜利河油浸白云岩与侏罗系烃源岩饱和烃生物标志化合物参数表

Table 1 Hydrocarbon biomarkers from the oil-saturated Shenglihe dolomite and Jurassic source rocks

样品	Ph/nC ₁₈	Pr/nC ₁₇	C ₂₃ ~C ₂₆ / C ₁₉ ~C ₂₂ -三环萜烷	C ₂₃ ~C ₂₆ /C ₂₈ ~C ₂₉ -三环萜烷	三环萜烷 /藿烷	C ₂₇ /C ₂₉ -ααα-20R	C ₂₁ 孕甾烷 /C ₂₉ -ααα
BD9299	0.28	0.36	1.11	1.85	1.48	0.89	0.43
索瓦组(J _{3s})	0.58~1.17 /0.85	0.36~0.93 /0.66	0.92~2.88 /1.88	4.18~8.26 /6.11	0.73~6.19 /2.22	0.76~1.03 /0.86	0.43~1.18 /0.85
夏里组(J _{2x})	0.11~0.60 /0.34	0.06~0.95 /0.38	0.75~1.12 /0.92	6.83~9.60 /8.24	2.51~8.34 /5.03	1.02~1.10 /1.06	1.08~2.18 /1.75
布曲组(J _{2b})	0.45~0.70 /0.54	0.73~1.04 /0.84	1.00~2.34 /1.71	2.42~6.38 /4.71	0.70~2.86 /1.70	0.78~0.95 /0.87	0.21~0.82 /0.56
色哇组(J _{2s})	0.74~1.18 /1.04	0.53~0.86 /0.76	1.02~1.86 /1.53	0.74~1.18 /1.04	3.25~7.03 /5.32	0.89~1.08 /1.00	1.02~1.86 /1.53
曲色组(J _{1q})	1.18~1.20 /1.36	0.64~0.71 /0.75	0.90~1.76 /1.42	1.18~1.55 /1.36	4.63~5.69 /5.25	0.28~0.31 /0.30	0.34~0.38 /0.36
土门格拉组 (T _{3t})	0.39~0.65 /0.51	0.72~1.45 /0.97	0.77~2.15 /1.24	2.86~10.0 /5.43	0.25~5.46 /2.08	0.10~1.40 /0.76	0.30~0.69 /0.47
毕洛错	0.32~0.56 /0.47	0.20~0.55 /0.34	1.38~2.19 /1.85	1.56~3.65 /2.46	0.32~1.35 /0.90	0.65~1.20 /0.83	0.11~0.44 /0.25
胜利河黑色 泥页岩	0.61~0.85 /0.72	0.44~0.62 /0.52	0.92~0.94 /0.93	3.30~3.37 /3.33	1.56~1.66 /1.60	1.69~1.71 /1.70	0.57~0.60 /0.59

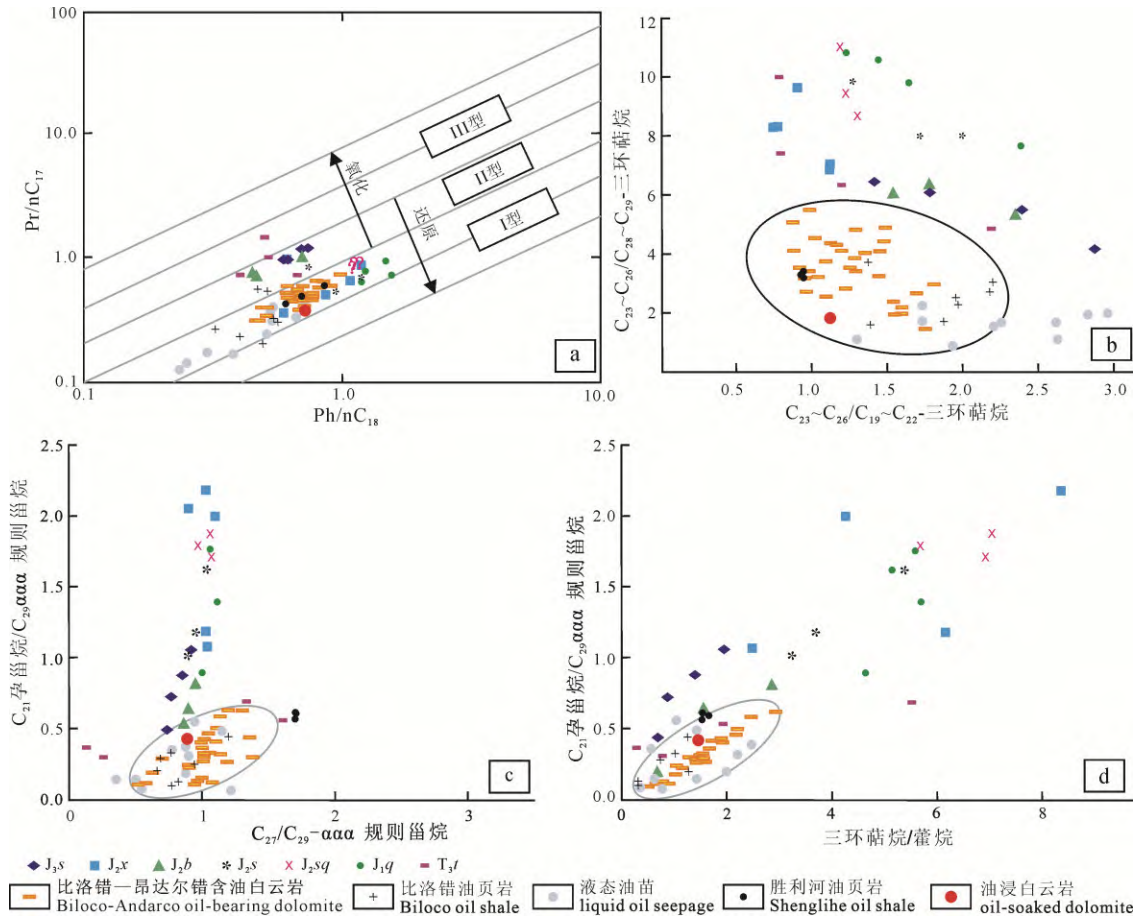


图 6 羌塘盆地侏罗系烃源岩和原油饱和烃生物标志化合物图解(地层 J_{3s}, J_{2x}, J_{2b}, T_{3t} 等符号含义同表 1)

Fig. 6 Biomarker diagrams of Jurassic source rocks and oil-saturated dolomite in the Qiangtang Basin (the formations J_{3s}, J_{2x}, J_{2b}, T_{3t}, etc., are the same as those in Table 1)

程鹏等, 2014)、三环萜烷相对丰度(国朋飞等, 2015; 陈哲龙等, 2017; 肖洪等, 2019; 游君君等, 2020)、规则甾烷丰度(易传俊等, 2019; 张敏和程青松, 2021)和孕甾烷相对丰度(黄第藩等, 1989; 毛新军等, 2007; 母国妍等, 2008)等生物标志化合物参数, 可对比分析油源。季长军(2015)采用生物标志化合物参数图解(图 6), 对比分析了羌塘南部比洛错—昂达尔错古油藏(BAPS)原油与侏罗系不同层位烃源岩的亲缘关系, 进而判别油气来源, 取得良好效果, 表明比洛错富有机质页岩是 BAPS 古油藏主力烃源岩(Ji et al., 2018)。

北羌塘胜利河油浸白云岩生物标志化合物与南羌塘 BAPS 古油藏存在良好可对比性, 图解显示胜利河油浸白云岩与 BAPS 白云岩油砂、下侏罗统毕洛错富有机质页岩(亦称“比洛错油页岩”)、中侏罗统胜利河富有机质泥页岩(亦称“胜利河油页岩”)样品点分布于相同或相近区间, 具有亲缘关系(季长军, 2015), 指示中下侏罗统富有机质泥页岩是胜利河油浸白云岩油的主要来源(图 6)。羌塘盆地中生代早期其它层位, 如上侏罗统索瓦组(J_{3s})、中侏罗统夏里组(J_{2x})、莎巧木组(J_{2sq})、色洼组(J_{2s})、下侏罗统曲色组(J_{1q})及三叠系土门格拉组(T_{3t}), 烃源岩具有高三环萜烷和高孕甾烷特征(Ji et al., 2018), 样品点散布于油源区之外, 与胜利河油浸白云岩、BAPS 古油藏之间不具有亲缘关系(图 6)。

4 结论与讨论

通过研究得出如下主要认识: (1)胜利河上游油浸白云岩是北羌塘坳陷首次发现的含油白云岩储层, 层位为中侏罗统布曲组; 生物标志化合物指示胜利河油浸白云岩油源为中下侏罗统富有机质泥页岩, 与南羌塘北部 BAPS 白云岩油砂具有良好的可对比性。(2)相对于 BAPS 古油藏, 胜利河油浸白云岩构造改造与变形较弱, 含油率更高, 储层物性如孔隙度和渗透率优于 BAPS 白云岩油砂, 是北羌塘坳陷油气勘探的重要目标。

尽管如此, 对胜利河油浸白云岩原油主要来源于中侏罗统布曲组黑色泥页岩、还是来源于类似于比洛错油页岩的下侏罗统烃源岩, 现有资料难以给出定论; 对胜利河油浸白云岩的厚度及空间分布, 目前尚缺乏二维地震与钻探控制, 有待于更多勘查与研究工作。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20221855 and DD20211343), Shaanxi Coal Geology Group Co. Ltd. (No.

SMDZ-2021ZD-1), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JKY202209).

参考文献:

- 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 高岗, 任江玲, 杨帆, 马万云. 2017. 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, 38(2): 311-322.
- 程鹏, 肖贤明, 田辉, 周秦, 陈吉, 潘磊. 2014. 成熟度对陆相烃源岩可溶有机质 Pr/Ph 比值的影响[J]. 沉积学报, 32(1): 182-188.
- 郭祖军, 李永铁, 南征兵, 叶和飞. 2008. 羌塘盆地变形构造与油气聚集保存关系[J]. 石油勘探与开发, 35(5): 563-568.
- 国朋飞, 何生, 朱书奎, 柴德蓉, 殷世艳. 2015. 利用三环萜烷对比泌阳凹陷生物降解油源[J]. 石油实验地质, 37(1): 80-87.
- 黄第藩, 张大江, 李晋超. 1989. 论 4—甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. 石油勘探与开发, (3): 8-15.
- 季长军, 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍. 2019. 羌塘盆地逆冲推覆构造特征及油气资源效应[J]. 地质力学学报, 25(S1): 66-71.
- 季长军. 2015. 南羌塘坳陷油藏带生物标志化合物特征及油源对比研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-139.
- 李守军. 1999. 正烷烃、姥鲛烷与植烷对沉积环境的指示意义——以山东济阳坳陷下第三系为例[J]. 石油大学学报(自然科学版), 23(5): 14-16.
- 李亚林, 王成善, 李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏[J]. 石油学报, 29(2): 173-178.
- 毛新军, 黄立良, 樊向东. 2007. 准噶尔盆地乌夏地区稠油生物降解特征[J]. 新疆石油地质, 28(4): 444-447.
- 母国妍, 钟宁宁, 刘宝. 2008. 辽河断陷西部凹陷原油地球化学特征及其成因类型[J]. 石油实验地质, 30(6): 611-616.
- 唐友军. 2009. 塔里木盆地塔东 2 井寒武系稠油地球化学特征与成藏[J]. 沉积学报, 27(6): 1208-1215.
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 李亚林, 邹艳荣, 伍新和, 邓斌, 杨兴科. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 25(2): 139-143.
- 王成善, 伊海生. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社: 180-233.
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文. 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: 1-424.
- 王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景[J]. 地质论评, 66(5): 1091-1113.
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 杨易卓. 2019a. 羌塘盆地半岛湖—东湖地区主力烃源岩及油气资源潜力[J]. 地质学报, 93(7): 1738-1753.
- 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 季长军, 叶培盛. 2016. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升[J]. 地质学报, 90(4): 615-627.

- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 陈程. 2021. 北羌塘凹陷沃若山及邻区海相烃源岩形成时代[J]. 地质学报, 95(2): 352-361.
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 刘志伟, 杨艳. 2019b. 西藏羌塘逆冲推覆构造及油气资源效应图集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1-115.
- 肖洪, 李美俊, 杨哲, 朱志立. 2019. 不同环境烃源岩和原油中 $C_{19} \sim C_{23}$ 三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. 地球化学, 48(2): 161-170.
- 易传俊, 张敏, 滕梨. 2019. 热力作用对塔里木盆地海相原油中甾烷类化合物组成和分布的影响[J]. 现代地质, 33(4): 853-862.
- 游君君, 杨希冰, 雷明珠, 梁刚, 汪紫菱. 2020. 珠江口盆地珠三坳陷不同沉积环境下烃源岩和原油中中链三环萜烷、二倍半萜烷分布特征及地球化学意义[J]. 天然气地球科学, 31(7): 904-914.
- 张敏, 程青松. 2021. 塔里木盆地古生界原油中高丰度 C_{29} 规则甾烷的分布及意义[J]. 长江大学学报(自然科学版), 18(1): 11-29.
- 赵政璋, 李永铁, 叶如飞, 张昱文. 2001. 青藏高原羌塘盆地石油地质[M]. 北京: 科学出版社: 1-398.

References:

- CHEN Zhe-long, LIU Guang-di, WEI Yan-zhao, GAO Gang, REN Jiang-ling, YANG Fan, MA Wan-yun. 2017. 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, 38(2): 311-322(in Chinese with English abstract).
- CHENG Peng, XIAO Xian-ming, TIAN Hui, ZHOU Qin, CHEN Ji, PAN Lei. 2014. Effects of maturity on the Pr/Ph ratio of the soluble organic matters in the terrestrial source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(1): 182-188(in Chinese with English abstract).
- FU Xiu-gen, WANG Jian, TAN Fu-wen, CHEN Ming, LI Zhong-xiong, ZENG Yu-hong, FENG Xing-lei. 2016. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Tibet, China: A model for low-degree exploration[J]. Marine and Petroleum Geology, 77: 323-340.
- GAO Rui, CHEN Chen, LU Zhan-wu, BROWN L D, XIONG Xiao-song, LI Wen-hui, DENG Gong. 2013. New constraints on crustal structure and Moho topography in Central Tibet revealed by SinoProbe deep seismic reflection profiling[J]. Tectonophysics, 606: 160-170.
- GUO Peng-fei, HE Sheng, ZHU Shu-kui, CHAI De-rong, YIN Shi-yan. 2015. Application of tricyclic terpanes in biodegraded oil-source correlation in Biyang Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 37(1): 80-87(in Chinese with English abstract).
- GUO Zu-jun, LI Yong-tie, NAN Zheng-bing, YE He-fei. 2008. Relationship between deformation structure and petroleum accumulation and preservation, Qiangtang Basin, Tibet[J]. Petroleum Exploration and Development, 35(5): 563-568(in Chinese with English abstract).
- HUANG Di-fan, ZHANG Da-jiang, LI Jin-chao. 1989. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes[J]. Petroleum Exploration and Development, (3): 8-15(in Chinese with English abstract).
- JI Chang-jun, WU Zhen-han, LIU Zhi-wei, ZHAO Zhen. 2019. Structural features of thrust Nappes in the Qiantang Basin and hydrocarbon resources effect[J]. Journal of Geomechanics, 25(S1): 66-71(in Chinese with English abstract).
- JI Chang-jun, XIA Guo-qing, WU Zhen-han, YI Hai-sheng. 2018. Study of crude oil-source rocks correlation in the paleo-oil reservoirs of the southern Qiangtang Depression, China[J]. Oil Shale, 35(3): 195-213.
- JI Chang-jun. 2015. Biomarker characteristics and oil-source correlation research of the reservoirs in southern Qiangtang Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-139(in Chinese with English abstract).
- LI Shou-jun. 1999. Sedimentary environmental significance of normal alkane and the ratio of pristane to phytane[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 23(5): 14-16(in Chinese with English abstract).
- LI Ya-lin, WANG Cheng-shan, LI Yong-tie. 2008. Characteristics of the Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang Basin of Tibet area[J]. Acta Petrolei Sinica, 29(2): 173-178(in Chinese with English abstract).
- MAO Xin-jun, HUANG Li-liang, FAN Xiang-dong. 2007. A study on biodegradation of heavy oil in Wu-Xia Area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 28(4): 444-447(in Chinese with English abstract).
- MU Guo-yan, ZHONG Ning-ning, LIU Bao. 2008. The geochemical characteristic and genetic type of crude oil in the western sag of the Liaohs Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 30(6): 611-616(in Chinese with English abstract).
- TANG You-jun. 2009. Geochemical characteristics and reservoir formation of Cambrian heavy oil of Well Tadong 2 in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(6): 1208-1215(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng-shan, YI Hai-sheng, LIU Chi-yang, LI Ya-lin, ZOU Yan-rong, WU Xin-he, DENG Bin, YANG Xing-ke. 2004. Discovery of paleo-oil-reservoir in Qiangtang basin in Tibet and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 25(2): 139-143(in Chinese with English abstract).

- WANG Cheng-shan, YI Hai-sheng. 2001. Evolution of geology and assessment for hydrocarbon potential of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House: 183-233(in Chinese).
- WANG Jian, DING Jun, WANG Cheng-shan, TAN Fu-wen. 2009. Investigation and evaluation of strategic petroleum area in Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House: 227-270(in Chinese).
- WANG Jian, FU Xiu-gen, SHEN Li-jun, TAN Fu-wen, SONG Chun-yan, CHEN Wen-bin. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang(Tibet)[J]. Geological Review, 66(5): 1091-1113(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, JI Chang-jun, ZHAO Zhen, YANG Yi-zhuo. 2019a. Main source rock and oil resource potential of the Bandaohu-Donghu area in the northern Qiangtang Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 93(7): 1738-1753(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, LIU Zhi-wei, ZHAO Zhen, JI Chang-jun, YE Pei-sheng. 2016. Thrust and uplift of the Lung'erni-Angdarco paleo-oil reservoirs in the Qiangtang Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 90(4): 615-627(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, ZHAO Zhen, JI Chang-jun, CHEN Cheng. 2021. Geological time of marine source rocks in the Woruoshan Mountain and its adjacent areas, northern Qiangtang depression[J]. Acta Geologica Sinica, 95(2): 352-361(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, ZHAO Zhen, JI Chang-jun, LIU Zhi-wei, YANG Yan. 2019b. Atlas of nappe structure and its effect to petroliferous sequence in Central Qiangtang Block, northern Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1-115(in Chinese).
- XIAO Hong, LI Mei-jun, YANG Zhe, ZHU Zhi-li. 2019. Distribution patterns and geochemical implications of C₁₉-C₂₃ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments[J]. Geochimica, 48(2): 161-170(in Chinese with English abstract).
- YI Chuan-jun, ZHANG Min, TENG Li. 2019. Influence of thermal action on composition and distribution of steranes in marine crude oil, Tarim Basin[J]. Geoscience, 33(4): 853-862(in Chinese with English abstract).
- YOU Jun-jun, YANG Xi-bing, LEI Ming-zhu, LIANG Gang, WANG Zi-ling. 2020. The characteristics and significances of cheilanthane tricyclic terpanes and bicyclic sesquiterpanes in source rocks and oils under different depositional environments in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 31(7): 904-914(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Min, CHENG Qing-song. 2021. Distribution and significance of high abundance C₂₉ regular sterane in the crude oil of Lower Paleozoic in Tarim Basin[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 18(1): 11-29(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zheng-zhang, LI Yong-tie, YE He-fei, ZHANG Yu-wen. 2001. Petroleum geology of Qiangtang basin in the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science Press: 1-398(in Chinese).