青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现

王剑^{1,2,3*}, 王忠伟^{1,2,3}, 付修根^{1,2,3*}, 宋春彦⁴, 谭富文⁴, 韦恒叶^{1,2,3}

1. 西南石油大学, 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500;

2. 西南石油大学羌塘盆地研究院, 成都 610500;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081

* 联系人, E-mail: w1962jian@163.com; fxiugen@126.com

2021-10-09 收稿, 2021-11-29 修回, 2021-12-01 接受, 2021-12-02 网络版发表

国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91955204)和第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0803)资助

摘要 羌科-1井(QK-1)是藏北高原第一口油气地质科学探井,也是目前世界上海拔最高的科探井.通过实施羌塘盆地科探井及其配套地质浅钻,在油气封盖条件、优质烃源岩、油气显示及地层沉积序列等方面取得了一系列新发现.钻探发现了两套区域性优质盖层:雀莫错组(J_{1-2q})硬石膏层厚达353.8~365.0 m,夏里组(J_{2x})含膏泥质岩厚达230.0~252.0 m.钻井、地震资料及沉积相综合分析表明,这些盖层区域分布连续、稳定,同时油气封盖性能良好,从而证实羌塘盆地具备较好的油气封盖条件.与QK-1配套的地质浅钻揭示,北羌塘盆地边缘带上三叠统滨岸沼泽至三角洲平原相区发育了较好的烃源岩.泥质烃源岩总有机碳(total organic carbon, TOC)含量达2.0%~3.6%,厚36.0 m, TOC含量大于1%的烃源岩厚达61.0 m.有机质类型包括II₁、II₂和III型,热演化程度为高成熟-过成熟阶段,以生气为主.预测北羌塘盆地中心覆盖区前三角洲至陆棚相区可能具有比盆地边缘相带更好的优质烃源岩.因此,北羌塘盆地不仅存在优质烃源岩,而且可能还具有较大的生烃潜力.QK-1共揭示14层气测异常,结合地表露头油气显示,表明羌塘盆地有过大规模油气生成聚集与破坏过程,同时存在油气有利保存区带.QK-1钻遇了侏罗系完整连续的地层沉积序列,总体上表现为冲洪积相逐渐演化为滨至浅海相及碳酸盐台地,地层沉积序列资料为羌塘含油气盆地分析提供了新的依据.

关键词 羌科-1井(QK-1), 封盖层, 烃源岩, 油气显示, 沉积序列, 羌塘盆地

近30年来,我国油气地质工作者在藏北高原开展了系统的油气地质调查与研究,完成了从含油气盆地分析到资源潜力评价及战略选区的全过程^[1-4].近20年累计完成二维反射地震2700 km、地质浅钻17口(总进尺13688 m)、1:5万构造详查及化探3423 km²等^[5].基于此,有学者认为羌塘盆地是我国最有希望取得突破的陆地油气勘探新区^[2-9].

然而,对上述认识存在不同的看法,争论的焦点主要包括两个方面:一是保存条件,一些学者认为高原隆升与剥蚀导致地层出露遭受破坏,缺乏有效封盖层是成藏的致命弱点^[1];二是盆地生烃潜力,20世纪90年代中国石油天然气总公司获取的2400余件地表露头烃源岩样品,其总有机碳(total organic carbon, TOC)含量通常小于0.5%,因此认为羌塘盆地缺乏优质烃源岩^[10,11].

由中国地质调查局组织完成的“羌塘盆地油气资源战略调查工程”围绕上述科学问题及盆地资源潜力评价,通过科学钻探,在区域性封盖层、优质烃源岩、油气异常及启示、侏罗系地层沉积序列等方面取得了一系列新发现,对羌塘盆地保存条件差、缺乏优质烃源岩等已有认识提出了全新的看法.

羌科-1井(QK-1,下同)是藏北高原第一口以解决石油地质重大科学问题为

引用格式: 王剑, 王忠伟, 付修根, 等. 青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现. 科学通报, 2022, 67: 321-328

Wang J, Wang Z W, Fu X G, et al. New discoveries on the first petroleum scientific drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 321-328, doi: [10.1360/TB-2021-1048](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1048)

主要目标的科学探井,也是目前世界上
海拔最高的科探井。

该科探井位于藏北高原羌塘盆地北
部半岛湖地区(图1(a)). 通过对羌塘盆地

半岛湖地区、托纳木-笙根地区、隆鄂
尼-鄂斯玛地区及玛曲地区开展二维反

图 1 钻井位置及卡尼期岩相古地理图(a)和QK-1井综合地层柱状图(b)

Figure 1 Drilling locations and the Carnian paleogeography (a) and integrated stratigraphic column of Well QK-1 (b)

射地震攻关, 获得了1160 km信噪比较高、能清晰识别出地覆构造与地层层序的地震资料。在此基础上, 经多次井位论证最终确定在北羌塘盆地半岛湖地区6号背斜构造实施科学钻探, 并命名为羌参-1井(后更名为羌科-1井: QK-1)。

QK-1开孔海拔5030 m, 终孔井深4696.2 m, 钻遇了从上侏罗统索瓦组(J_{3s})至上三叠统那底岗日组(T_{3nd})的连续地层序列(图1(b))。从上至下, 上侏罗统索瓦组碳酸盐岩视厚度为59 m、中侏罗统夏里组陆源碎屑岩夹碳酸盐岩视厚度为991 m、中侏罗统布曲组碳酸盐岩视厚度为1446 m、中下侏罗统雀莫错组硬石膏层-碳酸盐岩夹碎屑岩视厚度为1561 m、上三叠统那底岗日组沉火山岩视厚度为639.2 m。同时, 还获得了包括孔隙度三要素(声波AC、密度DEN及中子CNL)、泥质岩含量三要素(自然伽马GR、自然电位SP及井径 C_{13} 和 C_{24})、电阻率四要素(深侧向电阻率LLD、浅侧向电阻率LLS、视电阻率R25及4 m电阻率)等QK-1的全部测井资料(图1(b))。

QK-1以岩屑录井为主, 全井取芯仅33.6 m。为了有效弥补岩屑录井在资料准确性及取样分析等诸多方面的不足, 在盆地合适部位还同时实施了全取芯系

列地质浅钻, 以获取与QK-1同层位岩芯及测录井资料, 主要包括羌地-17、羌资-7、羌资-8及羌资-16(图1(b))。

(1) 羌地-17。井深为2001.8 m, 该地质浅钻位于QK-1西侧6.25 km(图1(a))。其钻探目的是获取与QK-1上部同层位地层夏里组及布曲组岩芯, 同时获取侏罗纪至早白垩世燕山晚期褶皱系之上上白垩统-新生界岩石地层信息(图2)。从上到下全取芯层位包括第四系(Q, 4.4 m)、始新统喷呐湖组(E_2s , 466.5 m)、中侏罗统夏里组(J_2x , 673.3 m)及布曲组中上部地层(J_2b , 857.6 m, 未见底)。该地质浅钻还获得了喷呐湖组中部同沉积凝灰岩锆石U-Pb年龄 46.57 ± 0.30 Ma, 属始新世中期^[12]。

(2) 羌资-7及羌资-8。井深分别为402.5和501.7 m, 均位于北羌塘东部各拉丹东北部的雀莫错地区, 彼此相距仅数百米(图1(a))。其钻探目的是获取QK-1下部同层位地层巴贡组及波里拉组烃源岩足够多的岩芯样品。羌资-7从上到下全取芯层位包括第四系(Q, 3.7 m)、上三叠统巴贡组(T_3bg , 241.2 m)和上三叠统波里拉组(T_3b , 157.6 m, 未见底)(图3)。羌资-8钻探全取芯层位包括第四系(Q, 3.2 m)、上三叠统巴贡组(T_3bg ,

166.4 m)和上三叠统波里拉组(T_3b , 332.1 m, 未见底)。

(3) 羌资-16。井深为1592.7 m, 井位邻近QZ-7, 相距QK-1约200 km(图1(a))。其钻探目的是获取QK-1中下部同层位地层雀莫错组、那底岗日组、巴贡组及波里拉组岩芯样品。从上到下, 钻探全取芯层位包括中下侏罗统雀莫错组(J_{1-2q} , 855.7 m)、上三叠统那底岗日组(T_{3nd} , 22.6 m)、上三叠统巴贡组(T_3bg , 445.3 m)、上三叠统波里拉组(T_3b , 185.0 m)及上三叠统甲丕拉组(T_{3j} , 84.1 m, 未见底)。

通过QK-1及配套地质浅钻, 获得了北羌塘盆地覆盖区从始新统到上侏罗统至上三叠统所有地层单元的全部岩芯或岩屑样品及测录井资料。

QK-1及配套地质浅钻资料揭示, 盆地深部存在巨厚硬石膏及含膏泥质岩盖层, 测井及油气显示表明其封盖性能良好; 二维反射地震剖面资料及钻探资料揭示, 这些盖层在一定范围内侧向延伸连续、稳定, 具有区域性分布特征。

QK-1在井深785~1050和3358~3766 m钻遇了夏里组及雀莫错组两套优质盖层(图1(b))。雀莫错组地层累计厚度为1561.0 m, 上部为灰白色白垩化灰岩

图2 过QK-1井及QD-17井地震剖面、钻遇盖层及主要油气显示特征。岩性花纹图例见图1

Figure 2 The characteristics of seismic profile across Well QK-1 and Well QD-17, the regional seals drilled through, and the main petroleum displays. Lithologic legends see in Figure 1

夹硬石膏及粉砂质泥岩,中部为灰白色硬石膏层与灰岩互层、巨厚层状硬石膏层,下部主要为紫红色粉砂质泥岩、含砾粉砂岩及紫红色底砾岩。其中,该组中部灰白色巨厚层状硬石膏层连续厚度达365.0 m,测井曲线表现为自然伽马值低至极低,深、浅侧向电阻率数值极高,密度值接近于 2.98 g/cm^3 ,PE值高,声波时差接近于 $50 \text{ } \mu\text{s/ft}$,中子孔隙度接近于 -1.0% ,各种孔隙度测井的视孔隙度值均接近于 0% ,表明该硬石膏层是很好的盖层(图1(b))。

在相距QK-1约200 km的盆地东部实施的地质浅钻羌资-16井中(图1(a)),同样发现了雀莫错组硬石膏盖层,厚382.9 m,其测录井特征与QK-1完全相似,硬石膏层孔隙度极低,渗透率平均为 $0.265 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$,突破压力平均为9.0 MPa,封盖能力强。与此同时,露头岩相古地理分析表明,雀莫错组沉积期北羌塘中心以局限海湾至潟湖蒸发岩沉积环境为主,而坳陷周缘则为三角洲至潮坪陆源碎屑岩夹蒸发岩沉积环境^[4,5]。综合二维反射地震剖面解译及地表露头地质调查,结合QK-1及其配套地质浅钻羌资-16井钻探成果,证实了雀莫错组硬石膏盖层在区域上分布是连续稳定的(图2)。

QK-1夏里组含膏泥岩盖层厚230.0 m(图1(b)和2)。夏里组上部为灰色钙质泥岩夹泥晶灰岩、泥岩、砂岩及粉砂岩,夹硬石膏层,下部为灰色含膏泥岩、钙质泥岩夹硬石膏层,累计厚度为991.0 m,其中下部230.0 m含膏泥岩盖层测井曲线特征表现为“三高两低一平直”的特征,即高的自然伽马值、高声波时差、高中子值、低电阻率、低密度值、自然电位曲线平直,是良好的封盖层(图1(b))。与此同时,在相距QK-1约6.25 km的羌地-17井中(图1(a)和2),同样发现了夏里组含膏泥岩盖层,厚252.0 m,其测录井特征与QK-1相似,平均孔隙度为 1.42% ,渗透率为 0.0012 Md ,饱和水突破压力为18.37 MPa,具有良好的封盖性。结合露头岩相古地理分析,夏里组沉积期是羌塘盆地重要的海退期,北羌塘以潮坪-潟湖和三角洲相沉积为主,南

羌塘盆地从北到南具滨岸-三角洲-浅海-斜坡盆地相展布特征^[5,10],岩石类型以陆源细碎屑岩为主,夹少量碳酸盐岩和硬石膏。综合沉积相分析、二维反射地震剖面解译及地表露头地质调查,结合QK-1及其配套地质浅钻羌地-17钻探新发现,同样可以证实夏里组含膏泥岩盖层在区域上分布是连续稳定的(图2)。

与QK-1配套的地质浅钻揭示,北羌塘盆地边缘带上三叠统滨岸沼泽-三角洲平原相区发育了优质烃源岩。有机质类型包括II₁、II₂和III型,热演化程度为高成熟至过成熟阶段,以生气为主。沉积相预测盆地中心覆盖区前三角洲-陆棚相区应具有比盆地边缘三角洲平原相区更好的烃源岩。

地质浅钻羌资-7和羌资-8均钻遇了上三叠统暗色泥页岩及泥灰岩。其中,羌资-7钻遇巴贡组及波里拉组烃源岩TOC含量高达3.6%,TOC含量大于2%的烃源岩累计厚36.0 m,TOC含量大于1%的烃源岩累计厚61.0 m,可视为“好”和“中等”烃源岩(图3)。羌资-8距羌资-7仅数百米,钻遇的上三叠统烃源岩与羌资-7非常相似,27件泥岩样品TOC含量为 $0.30\% \sim 3.37\%$ (均值为 1.10%),其中TOC大于1%的烃源岩占比为56%。

羌资-7巴贡组烃源岩岩芯样品干酪根类型为II₂和III型,镜质体反射率 R_o 均小于2%(井深9~250 m,样品数量为14件),大于1.3%,应为高成熟(图3)。钻井资料对比分析表明,盆地内巴贡组烃源岩具有相对低的成熟度,但基本处于高成熟阶段, $R_o < 2\%$,以湿气和凝析油为主;而中央隆起带巴贡组烃源岩成熟度较高, $R_o > 2\%$,处于过成熟阶段,以生成干气为主。剖面资料综合统计分析表明^[3,10,13,14],上三叠统烃源岩干酪根显微组分主要以腐泥组为主,含量介于 $36\% \sim 90\%$ 之间,惰质组含量次之,多介于 $11\% \sim 45\%$ 之间,镜质组含量普遍偏低,仅为 $1\% \sim 2\%$,干酪根类型指数介于 $-11.5 \sim -80$ 之间。其中,I型、II₁型、II₂型和III型占样品数比例分别为8%、46%、23%和23%,说明有机质类型以II₁型为主,其次为II₂型和III型; R_o 介

于 $0.94\% \sim 3.0\%$ 之间(样品数量为62件),多数样品的 R_o 值大于1.3%,岩石最高热解峰温均值介于 $447 \sim 562^\circ\text{C}$ 之间,干酪根颜色也以棕褐色、褐黑色为主,反映有机质热演化程度为高成熟-过成熟阶段(图3)。

从卡尼期末岩相古地理格局分析可以看出(图1(a)),巴贡组-波里拉组沉积期,羌资-7、羌资-8井位于古地理滨岸沼泽-三角洲平原相区,临近古陆剥蚀区,其沉积环境受陆源碎屑改造作用强,氧化界面相对较高,有机质保存条件相对较差,而其相邻的内陆棚-外陆棚相区(覆盖区)其有机质形成与保存条件应比滨岸沼泽-三角洲平原相区要好得多。因此,预测北羌塘中北部广阔的覆盖区深水陆棚相区可能发育了比羌资-7、羌资-8所钻获样品更好的优质烃源岩^[15~17](图1(a))。

QK-1及配套地质浅钻钻探过程中,先后在始新统喷呐湖组、中侏罗统布曲组、中下侏罗统雀莫错组、上三叠统那底岗日组及巴贡-波里拉组共发现14层气测异常,气测录井全烃值(主要为甲烷气)高达10.587%。

始新统喷呐湖组油气异常显示被发现于羌地-17,井深147.9 m,该段岩芯有十分浓烈的油气味(且久置仍然长期保留此气味),含膏钙质泥岩岩芯中的硬石膏被油浸后呈黑色,荧光检测对比级别为5.2,油性指数为0.8,该油为轻质原油油苗^[12,18]。

在中侏罗统布曲组共发现6层气测异常显示,其中QK-1在井深1237.0~1249.3 m(视厚度为12.3 m)气测异常最为显著,气测全烃值(甲烷)达4.459%(图2),其成分主要为甲烷(C_1),其中 C_1 为3.577%,乙烷(C_2)为0.002%,该层硫化氢浓度达210 ppm(parts per million);羌地-17在井深1484.0~1485.0 m的布曲组地层中气测全烃值由 0.186% 迅速升至 3.901% ,后效为 10.587% ,其成分主要为甲烷(图2)。其中, C_1 为 10.197% , C_2 为 0.001% , C_3 为 0.003% 。在中下侏罗统雀莫错组也发现了6层气测异常显示,其中QK-1在井深3401.0~3407.0 m(视厚度为

图3 羌资-7井上三叠统巴贡组-波里拉组烃源岩综合评价图

Figure 3 Comprehensive source rock evaluations of the upper Triassic Bagong and Bolila formations in Well QZ-7

6 m)气测异常及后效最为活跃。

上三叠统那底岗日组气测异常显示, 在雀莫错组硬石膏层之下的4246.0~4253.7 m井段(视厚度为7.7 m), 气测全烃值由0.044%迅速升至3.544% (C_1 为3.359%, C_3 为0.048%, C_4 为0.002%, iC_4 为0.005%), 增加了80.5倍, 钻时由27.42 min/m加快至15.20 min/m, 泥浆密

度由1.25 g/cm³下降至1.23 g/cm³, 槽面出现约5%的针孔状气泡, 这是首次在羌塘盆地上三叠统那底岗日组火山碎屑岩地层中发现含气层。上三叠统巴贡组-波里拉组油气异常显示主要发现于羌资-7, 在井深250.0 m处出现大量烃类气体泄漏现象, 井口出现大量冒气并伴随浓烈的油气味, 而在360 m井段可见薄板状

油砂, 测井资料显示井深249.1~251.2 m和278.5~281.6 m存在两个重要的含气层, 其含气饱和度与含油饱和度分别为10.08%和28.41%。

此外, 羌塘盆地地表露头油气显示已达250多处, 主要类型包括沥青、含油白云岩(油砂)、油页岩及含气泥火山4种。值得指出的是, 这些露头油气显示主

要分布于构造变形相对较强的盆地边缘带及中央隆起带^[4,5]。

QK-1及地质浅钻油气显示具有一个共同的特点: 钻探突破某一有效封盖层之后都会有不同程度的气测异常或油气显示(图2)。喷呐湖组油气显示主要产于该组地层中硬石膏层之下的含膏钙质泥岩中, 表明硬石膏层及含膏泥质岩对局部油气封存起十分有效的作用。无论是QK-1, 还是羌资-16及羌地-17, 在钻穿夏里组及雀莫错组两套盖层之后, 活跃的气测异常都迅速出现了(图1(b)和2)。QK-1钻探突破夏里组封盖层之后除有显著气测异常外, 还钻遇了高浓度硫化氢气体(因而5次强制停钻)。由此可见, 两套区域性封盖层对油气保存有效并可以形成油气保存有利区。

钻井及地表露头油气显示为羌塘盆地生烃条件、油气运移、聚集与破坏等分析研究提供了丰富的信息。一方面, 广泛的油气显示表明羌塘盆地具有较好的生烃条件和曾经有过油气生成、运移聚集与破坏过程; 另一方面, 油气显示集中发现于构造变形相对强烈的盆地边缘及

中央隆起带, 而盆地中心两套区域性封盖层覆盖区是油气保存有利区, 羌塘盆地以“局部破坏、整体保存”为特征^[5]。

与特提斯演化密切相关的羌塘盆地沉积响应过程, 记录了青藏高原古特提斯洋消亡和新特提斯洋扩张的演化历史^[19,20], 但目前有关这方面的研究资料主要集中在地球物理及岩石地球化学方面^[21-25]。QK-1首次钻遇了相对完整的侏罗系地层沉积序列, 不仅突破了北羌塘缺失下侏罗统沉积地层的观点^[26], 同时还为古特提斯洋关闭与北羌塘晚三叠世末残留盆地演化模式提供了新的沉积学证据。

从上至下, QK-1钻遇的地层分别为上侏罗系统索瓦组(J_{3s})、中侏罗系统夏里组(J_{2x})和布曲组(J_2b)、中下侏罗统雀莫错组(J_{1-2q})和上三叠统那底岗日组(T_{3nd}), 厚度分别为59.0、991.0、1446.0、1561.0和639.2 m, 那底岗日组未见底(图1(b))。总体上, 侏罗系为一个向上变深的连续海侵序列, 表现为冲洪积相逐渐演化为滨-浅海相及碳酸盐台地。QK-1单井沉积相分析揭示, 北羌塘

盆地中北部地区早-中侏罗世雀莫错组(J_{1-2q})底部分支河流与那底岗日组(T_{3nd})残留盆地双模式火山岩水下沉积为连续过渡整合接触关系, 并逐渐演化为局限台地碳酸盐沉积(图1(b)); 中侏罗世布曲组(J_2b)以分布广泛的碳酸盐台地沉积为主, 夏里组(J_{2x})至晚侏罗世索瓦组(J_{3s})沉积期, 海平面下降导致盆地内主要以陆源碎屑沉积物急剧增加为特征; 上三叠统至侏罗系各组地层皆为整合接触(图1(b))。

基于羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)及配套工程的成果, 取得的结论性认识主要包括: (1) 羌塘盆地侏罗系雀莫错组及夏里组两套区域性优质封盖层的发现, 表明羌塘盆地可以形成油气保存有利区。(2) 北羌塘盆地不仅发育了上三叠统三角洲相优质烃源岩, 而且还可能具有较强的生烃潜力。(3) 油气显示表明羌塘盆地有过大规模油气生成聚集与破坏过程, 盆地中心两套区域性封盖层覆盖区是油气保存的有利区带。(4) 侏罗系地层连续沉积序列的建立为羌塘含油气盆地分析提供了新的依据。

致谢 “羌塘盆地油气资源战略调查工程”由中国地质调查局成都地质调查中心牵头组织完成, 中国石化中原石油工程公司钻井三公司、中国石化集团西南石油局第二物探大队、中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司、中国石油化工股份有限公司勘探分公司、中国地质大学(北京)及中国地质调查局油气中心等单位参加了二维地震攻关、钻井施工或综合研究工作, 三位匿名评审专家对论文修改提出了非常宝贵的意见, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- 1 Zhao Z Z, Li Y T, Ye H F, et al. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001 [赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原大地构造特征及盆地演化. 北京: 科学出版社, 2001]
- 2 Wang J, Tan F W, Li Y L, et al. The Potential of the Oil and Gas Resources in Major Sedimentary Basins on the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2004 [王剑, 谭富文, 李亚林, 等. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析. 北京: 地质出版社, 2004]
- 3 Wang J, Ding J, Wang C S, et al. Potential Analysis and Geological Survey of the Hydrocarbon Resources in Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2009 [王剑, 丁俊, 王成善, 等. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价. 北京: 地质出版社, 2009]
- 4 Wang J, Fu X G, Tan F W, et al. Geological Survey of the Hydrocarbon Resources in Qiangtang Basin (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [王剑, 付修根, 谭富文, 等. 羌塘盆地油气资源战略调查. 北京: 科学出版社, 2020]
- 5 Wang J, Fu X G, Shen L J, et al. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet) (in Chinese). Geol Rev, 2020, 66: 1091-1113 [王剑, 付修根, 沈利军, 等. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 2020, 66: 1091-1113]
- 6 Wang C S, Yi H S, Li Y. The Geological Evolution and Prospective Oil and Gas Assessment of the Qiangtang Basin in Northern Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2001 [王成善, 伊海生, 李勇. 羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社, 2001]
- 7 Qiao D W, Ren S M, Qiu H J, et al. The present situation of oil and gas resources exploration and strategic selection of potential area in China (in Chinese). Geol Bull China, 2011, 30: 187-196 [乔德武, 任收麦, 邱海峻, 等. 中国油气资源勘探现状与战略选区. 地质通报, 2011, 30: 187-196]

- 8 Liu C Y, Zheng M L, Yang X K, et al. Evolution and late modification of mesozoic marine Qiangtang Basin and its hydrocarbon occurrence (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2016, 90: 3259–3281 [刘池洋, 郑孟林, 杨兴科, 等. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存. *地质学报*, 2016, 90: 3259–3281]
- 9 Fu X, Wang J, Tan F, et al. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Tibet, China: A model for low-degree exploration. *Mar Pet Geol*, 2016, 77: 323–340
- 10 Zhao Z Z, Li Y T, Ye H F, et al. Oil and Gas Generation in Marine Source Rocks on the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001 [赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原海相烃源层的油气生成. 北京: 科学出版社, 2001]
- 11 Fan X, Mao X, Liu Z, et al. Organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Jurassic shales and mudstones in Qixiang Co area southern Qiangtang Basin, Tibet. *J Pet Sci Eng*, 2021, 193: 107377
- 12 Wang J, Zeng S Q, Fu X G, et al. New evidence for deposition age of the Suonahu Formation in the Qiangtang Basin (in Chinese). *Geol Bull China*, 2019, 38: 1256–1258 [王剑, 曾胜强, 付修根, 等. 羌塘盆地唢呐湖组地层时代归属新证据. *地质通报*, 2019, 38: 1256–1258]
- 13 Chen W B, Fu X G, Tan F W, et al. Geochemical characteristics of biomarkers of the Upper Triassic source rocks from Tumengela Formation in Qiangtang Basin of Tibet (in Chinese). *Geoscience*, 2014, 28: 216–223 [陈文彬, 付修根, 谭富文, 等. 羌塘盆地上三叠统土门格拉组烃源岩生物标志物地球化学特征. *现代地质*, 2014, 28: 216–223]
- 14 Chen W B, Fu X G, Tan F W, et al. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet (in Chinese). *Geol China*, 2015, 42: 1151–1160 [陈文彬, 付修根, 谭富文, 等. 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. *中国地质*, 2015, 42: 1151–1160]
- 15 Hu S Y, Wang J, Zhang Y Y, et al. Petroleum Geology of China • Xizang Exploration Area (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2021 [胡素云, 王剑, 张友炎, 等. 中国石油地质志•西藏探区. 北京: 石油地质出版社, 2021]
- 16 Zeng S Q, Wang J, Chen W B, et al. Organic-rich shales in the Upper Triassic Zangxiahe formation, northern Qiangtang depression, northern Tibet: Depositional environment and hydrocarbon generation potential. *J Pet Geol*, 2020, 43: 151–169
- 17 Wang Z, Wang J, Yu F, et al. Geochemical characteristics of the Upper Triassic black mudstones in the eastern Qiangtang Basin, Tibet: Implications for petroleum potential and depositional environment. *J Pet Sci Eng*, 2021, 207: 109180
- 18 Shen L J. Sedimentary evolution of the Suonahu Formation in north Qiangtang Basin and its response to the uplift of Tibetan Plateau (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020 [沈利军. 北羌塘盆地唢呐湖组沉积环境与高原隆升. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2020]
- 19 Ye J P, Hu X M, Sun G Y, et al. The disappearance of the Late Cretaceous Bangong-Nujiang residual seaway constrained by youngest marine strata in Geji area, Lhasa Terrane (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1620–1636 [叶加鹏, 胡修棉, 孙高远, 等. 革吉最高海相层约束班怒残留海消亡时间(~94 Ma). *科学通报*, 2019, 64: 1620–1636]
- 20 Fu X G, Wang J, Wen H G, et al. A Toarcian Ocean Anoxic Event record from an open-ocean setting in the eastern Tethys: Implications for global climatic change and regional environmental perturbation. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 1860–1872
- 21 Zhu R X, Zhao P, Zhao L. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 1–24 [朱日祥, 赵盼, 赵亮. 新特提斯洋演化与动力过程. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52: 1–25]
- 22 Peng Z M, Geng Q R, Wang L Q, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of granitic gneiss from Bunsumco, central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 2621–2629 [彭智敏, 耿全如, 王立全, 等. 青藏高原羌塘中部本松错花岗岩质片麻岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及地质意义. *科学通报*, 2014, 59: 2621–2629]
- 23 Hu P Y, Li C, Wu Y W, et al. Opening of the Longmu Co-Shuanghu-Lancangjiang ocean: Constraints from plagiogranites (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 1992–2003 [胡培远, 李才, 吴彦旺, 等. 龙木错-双湖-澜沧江洋的打开时限: 来自斜长花岗岩的制约. *科学通报*, 2014, 59: 1992–2003]
- 24 Zou C Q, He R Z, Gao R, et al. Deep structure of the central uplift belt in the Qiangtang terrane Tibetan Plateau from teleseismic P-wave tomography (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2012, 57: 2731–2741 [邹长桥, 贺日政, 高锐, 等. 远震P波层析成像研究羌塘中央隆起带深部结构. *科学通报*, 2012, 57: 2731–2741]
- 25 Hou Z Q, Xu B, Zheng Y C, et al. Mantle flow: The deep mechanism of large-scale growth in Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 2671–2690 [侯增谦, 许博, 郑远川, 等. 地幔通道流: 青藏高原大规模生长的深部机制. *科学通报*, 2021, 66: 2671–2690]
- 26 Fang X, Song C, Yan M, et al. Mesozoic litho- and magneto-stratigraphic evidence from the central Tibetan Plateau for megamonsoon evolution and potential evaporites. *Gondwana Res*, 2016, 37: 110–129

Summary for “青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现”

New discoveries on the first petroleum scientific drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau

Jian Wang^{1,2,3*}, Zhongwei Wang^{1,2,3}, Xiugen Fu^{1,2,3*}, Chunyan Song⁴, Fuwen Tan⁴ & Hengye Wei^{1,2,3}

¹ State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

² Qiangtang Institute of Sedimentary Basin, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

³ School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

⁴ Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China

* Corresponding authors, E-mail: w1962jian@163.com; fuxiugen@126.com

QK-1 is the first scientific drilling designed to solve the key problems in petroleum geology in the Qiangtang Basin on the northern Tibetan Plateau. Its altitude is 5030 m, and the well depth is 4696.2 m. It is also the highest-altitude scientific drilling on the globe, and is located in the Lake Bandaohu area in the northern Qiangtang Basin.

By performing the QK-1 and its affiliated shallow drillings, a series of new discoveries have been made in regard to high-quality regional seals, source rocks, petroleum displays and the Jurassic strata succession. (1) Two sets of caprocks, which could be regional high-quality seals, were discovered through drilling, i.e., an anhydrite layer in the Quemoco Formation (J_{1-2q}) (354–365 m thick) and a gypsum-bearing mudstone in the Xiali Formation (J_{2x}) (230–252 m thick). Comprehensive analyses of drilling and seismic data show that the distribution of these caprocks is regionally continuous and stable. Moreover, petroleum displays and well logging data reveal that these two caprocks are characterized by low porosity, good permeability (the mean permeability is $0.265 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and the mean breakthrough capillary pressure is 9.0 MPa), and good sealing. (2) The northern Qiangtang Basin contains high-quality hydrocarbon source rocks in Upper Triassic deltaic facies. The affiliated shallow drillings reveal a good Upper Triassic hydrocarbon source rock in a coastal swamp-deltaic plain facies on the northern Qiangtang Basin margin. The two mudstone source rock members have a thickness of 36.0 m and total organic carbon (TOC) values of 2.0%–3.6%, and a thickness of 61.0 m and TOC values of > 1.0%, respectively. The organic matter type is II_1 -, II_2 - and III -type kerogen with high to over-thermal maturation. Well logging, seismic data and facies analyses indicate that the pro-deltaic to shelf mudstones in the covered area in the central northern Qiangtang Basin are better source rocks than those in the deltaic plain on the basin margin. (3) Well logging petroleum displays provide important insights for petroleum reservoir formation and destruction. Based on petroleum displays and evidences of gas release in 250 outcrops, the QK-1 scientific drilling has also discovered 14 petroleum anomalies in the Eocene Suonahu Formation, Middle Jurassic Buqu Formation and the Upper Triassic Nadigangri Formation. One anomaly is oil-bearing, while thirteen anomalies are gas-bearing. The total hydrocarbon value of gas logging is 10%, and is mainly methane in composition. The petroleum displays of well logging occurred after drilling through the Xiali or Quemoco formations which are caprocks, while outcrop petroleum displays are mainly distributed on the basin margin or central uplift which are strong tectonic deformation zones. The widespread petroleum displays indicate good hydrocarbon-generation conditions and petroleum reservoir formation/destruction processes, while the distribution characteristics of petroleum displays indicate that the high-quality regional-seals-covered area in central basin could be favorable plays of petroleum reservoirs. (4) The QK-1 drilling cut through a sedimentary succession from the Upper Jurassic to Upper Triassic, i.e., from the upper to the bottom, the Upper Jurassic Suowa Formation (J_{3s}), Middle Jurassic Xiali (J_{2x}) and Buqu Formations (J_{2b}), Middle-Lower Jurassic Quemoco Formation (J_{1-2q}) and Upper Triassic Nadigangri Formation (T_{3nd}), in which the whole Jurassic strata is completely continuous. The Jurassic sedimentary succession shows a transition from alluvial facies to shore, shallow shelf and carbonate platform facies up section. This finding breaks the previous view that suggests a lack of Lower Jurassic strata, and provides new basics for Qiangtang Basin analysis.

Overall, the discovery of two regional high-quality seals in the Jurassic Quemoco and Xiali formations in the Qiangtang Basin refutes the previous traditional perception, which suggests poor petroleum preservation conditions. The northern Qiangtang Basin contains high-quality source rocks with great hydrocarbon generation potential in the Upper Triassic deltaic facies. Petroleum display anomalies and distribution characteristics reveal that the Qiangtang Basin not only underwent large-scale hydrocarbon generation, reservoir formation/destruction processes, but also developed favorable display of petroleum preservation. The establishment of a continuous Jurassic strata succession provides a new evidence and valid framework for petroliferous basin analysis of the Qiangtang Basin.

Well QK-1, caprocks and seals, source rocks, petroleum displays, sedimentary succession, Qiangtang Basin

doi: [10.1360/TB-2021-1048](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1048)