

文章编号: 1671-1505(2024)04-0763-16 DOI:10.7605/gdxb.2024.04.059

# 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系层序特征 与沉积古地理演化\*

贾进华

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 为阐明塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系的沉积特征、层序格架及沉积古地理, 根据陆相层序地层学和湖盆沉积学研究思路, 利用钻井、岩心、地震等基础资料, 提出了井震结合层序划分、物源与沉积特征、沉积古地理分布与演化等研究新认识。将阿瓦提凹陷三叠系俄霍布拉克组和克拉玛依组划分了 7 个三级层序, 俄霍布拉克组分为 5 个层序 (SQ1—SQ5), 克拉玛依组分为 2 个层序 (SQ6—SQ7)。各层序自下而上由低位体系域 (LST)、湖侵体系域 (TST) 和高位体系域 (HST) 组成。研究认为阿瓦提凹陷三叠系发育多物源控制下的扇三角洲相、辫状河三角洲相和滨浅湖亚相等沉积。凹陷周边存在 4 大物源, 主要来自西南部巴楚隆起和西部柯坪断隆, 其次是北部塔北隆起和东南部塔中隆起。辫状河三角洲平原亚相主要分布在凹陷的南部—西南部边缘, 以辫状分流河道微相的粗粒砂岩和砂砾岩体为主。湖盆主体位于凹陷东部地区, 向凹陷内为辫状河三角洲前缘亚相和湖泊相, 以水下分流河道、滩坝砂体为主。三叠纪湖盆经历了从初始形成、发育鼎盛、到充填消亡的过程。早三叠世早期 (SQ1—SQ2), 即俄霍布拉克组下段时期, 是三叠纪阿瓦提湖盆的初始形成期。物源主要来自南部的巴楚隆起和西部的柯坪断隆地区, 沉积相带从南向北呈不对称带状分布, 发育辫状河三角洲平原—辫状河三角洲前缘—滨浅湖亚相等, 湖盆呈南浅北深、西浅东深。早三叠世中—晚期 (SQ3—SQ5), 即俄霍布拉克组上段时期, 是湖盆扩张发育鼎盛期。伴随着西南部和西部物源不断向盆地进积, 形成扇三角洲相沉积。同时, 湖盆向北部和北东部扩展, 形成自南向北不断进积的辫状河三角洲平原和前缘亚相, 北东部为滨浅湖—半深湖亚相。中三叠世早—中期 (SQ6—SQ7), 即克拉玛依组沉积时期, 是湖盆充填消亡期。沉降中心向北东方向迁移, 物源不断进积造成湖盆迅速萎缩, 直至消亡。

**关键词** 塔里木盆地 阿瓦提凹陷 三叠系 层序 沉积古地理演化

**作者简介** 贾进华, 男, 1965 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事沉积学、储层地质学和油气地质学研究。E-mail: jjh@petrochina.com.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

## Sequence characteristics and sedimentary palaeogeography evolution of the Triassic in Awati sag, Tarim Basin

JIA Jinhua

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract** In order to clarify the sedimentary-palaeogeography characteristics and sequence frame-

\* 国家科技重大专项 (编号: 2016ZX05046-001) 资助。[Financially supported by the National Science and Technology Major Project of China (No. 2016ZX05046-001)]

收稿日期: 2023-10-13 改回日期: 2024-01-12

work of the Triassic in Awati sag, Tarim Basin, based on the research ideas of terrigenous sequence stratigraphy and lake-basin sedimentology, and using basic data consisting of drilling core and seismic data, this paper puts forward new understanding on sequence division, sediment provenance, and sedimentary-palaeogeography distribution and evolution. In this study, the Ohobluk Formation and Karamay Formation of the Triassic in Awati sag are divided into seven third-order sequences, among which the Lower Triassic Ohobluk Formation is divided into five (SQ1-SQ5) and the Middle Triassic Karamay Formation is divided into two sequences (SQ6-SQ7). Each sequence is composed of the lowstand system tract (LST), transgressive system tract (TST), and highstand system tract (HST). It is suggested that the Triassic in Awati sag is characterized by fan deltas, braided river deltas, and shore-shallow lacustrine facies controlled by multiple sources. There are four major sources around the sag and the sediment supply is mainly from the southwestern Bachu Uplift and the western Keping Fault Uplift, then from the northern Tabei Uplift and the southeastern Tazhong Uplift. The braided river delta plain subfacies are mainly distributed at the southern and southwestern edge of the sag, mainly composed of coarse grained sandstone and sandy gravel sandbodies of braided distributary channel microfacies. The center of the lake basin is located in the eastern part of the sag. Within the sag, there are braided delta front subfacies and lacustrine facies, mainly composed of underwater braided distributary channels and beach bar sandbodies. During the Triassic, the lake basin experienced stages of early initiation, intermediate growth and peak, and finally filling and extinction. The early stage of the Lower Triassic (SQ1-SQ2 period), corresponding to the development of the lower part of the Ohobluk Formation, is the initiation stage of the Awati lake basin in the Triassic. Sediments mainly came from the Bachu Uplift in the south and the Keping Fault Uplift in the west. The sedimentary facies were distributed in an asymmetric belt from south to north, with the development of braided delta plain and front subfacies and shore-shallow lacustrine subfacies. Moreover, during that stages, the lake basin is shallow in the south and deep in the north, shallow in the west and deep in the east. The middle to late stage of the Lower Triassic (SQ3-SQ5 period), corresponding to the development of the upper member of the Ohobluk Formation, is the growth and peak period of lake basin. With the continuous progradation of sources from the southwest and west towards the basin, fan delta facies were formed. At the same time, the lake basin expanded to the north and northeast, forming a braided delta plain and front subfacies that continuously migrated from south to north, while the northeast is a shore-shallow to semi-deep lacustrine subfacies. The early-middle period of the Middle Triassic (SQ6-SQ7 period), corresponding to the development of the Karamay Formation, is the filling and extinction period of the lake basin. The migration of the subsidence center to the northeast region resulted in the continuous progradation of the sources, causing the lake basin to rapidly shrink and eventually died out.

**Key words** Tarim Basin, Awati sag, Triassic, sequence, sedimentary palaeogeography evolution

**About the author** JIA Jinhua, born in 1965, Ph. D., is a professor of engineering. He is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and petroleum geology. E-mail: jjh@petrochina.com.cn.

阿瓦提凹陷位于塔里木盆地北部坳陷西段, 西北以沙井子断裂带与柯坪断隆和温宿凸起相临, 西南以阿恰断裂带和吐木休克断裂带与巴楚隆起相连, 东部经满西低隆向满加尔凹陷过渡, 东北部和东南部分别与塔北隆起西南倾没端和塔中隆起西北倾没端相接, 面积约  $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在阿瓦提凹陷周边的巴楚隆起、塔北隆起、温宿凸起均已发现规模油气

藏(田军, 2019; 张君峰等, 2019, 2022; 田军等, 2021)。由于凹陷内地层埋深较大, 钻井基本围绕在周边的较浅构造带上, 总体勘探程度较低。阿瓦提凹陷全区已完成 1:20 万重力普查, 1:100 万航磁, 盆地内部地震测网多为  $8 \times 8 \text{ km}$ , 在盆地西北边缘的沙南构造带和南部的阿恰构造带及乌鲁桥构造带局部测网密度达  $2 \times 2 \text{ km}$  和  $4 \times 4 \text{ km}$ 。不同年份的地震资

料也较差。迄今,阿瓦提凹陷及周边已钻井10口,阿参1、阿参2、阿1、阿满1、阿满2、丰南1、胜利1、满西2、沙南1、沙南2等井,钻井分布不均,多在凹陷边缘,凹陷中央仅有阿参1井。目前已在沙南1井和沙南2井三叠系、丰南1井二叠系火成岩和满西2井石炭系生屑灰岩等见到油气显示。其中,沙南1井和沙南2井在三叠系获得可动油,在乌鲁桥构造带也发现地表油苗(王文革等,2001;卢玉红等,2008)。

阿瓦提凹陷作为塔里木盆地最大的凹陷之一,与东部的满加尔凹陷遥相呼应,在构造单元上统一划分为北部拗陷。多年来,由于阿瓦提凹陷地质特点复杂,地质研究程度也较低,勘探家们一直期望阿瓦提凹陷能有大的勘探突破。前人从不同角度,对该地区及周缘的构造与断裂体系(田作基等,1996;赵靖舟和贾承造,2002;刘志宏等,2004;李曰俊等,2013;刘亚雷等,2013)、烃源岩与成藏(萧德铭和冯子辉,1999;卢玉红等,2008;席勤等,2016;姚尧等,2020)、地层与沉积相(顾家裕,1996;王龙樟,2000;吕雪雁等,2002;顾家裕等,2003;王超等,2008)、石油地质(王文革等,2001;吕修祥等,2007;顾忆等,2012)等已做了较好的研究总结。普遍认为凹陷内烃源岩以下寒武统和中上奥陶统为主,勘探目的层有寒武系—奥陶系碳酸盐岩和志留系—三叠系碎屑岩等多套目的层,具有有利的油气成藏条件。勘探实践表明,在凹陷周边的沙南构造带和阿恰构造带以三叠系为主、在凹陷南边的乌鲁桥构造带以三叠系、二叠系和石炭系为主。阿瓦提凹陷三叠系可能是最现实的勘探目的层,埋深相对较浅,以砂岩储集层为主,三叠系砂体具备形成岩性地层油气藏的地质背景。但仍存在一些制约勘探的基础地质问题,对三叠系目的层的沉积相、层序划分、沉积相分布与演化等研究较少,对三叠系砂体的展布不清楚,从而影响了三叠系下一步的岩性地层圈闭的评价和预测。

根据陆相层序地层学和湖盆沉积学研究思路,利用钻井、岩心、地震等基础资料,分析了阿瓦提凹陷三叠系沉积相,厘定了层序划分与对比,恢复了层序格架下的沉积古地理分布与演化。

## 1 地质背景

阿瓦提凹陷隶属塔里木盆地的二级构造单元,

现今构造表现为“向东南抬升、向西北缓倾斜”的大斜坡,具有西南高、东北低的类似箕状凹陷特征。凹陷的西南部与南部地形向北东倾斜,地势相对平缓。阿瓦提凹陷的北、西和南三面均为隆起,北部为塔北隆起西段向西南延伸的长期发育的大型鼻状隆起,西部的柯坪断隆和西南部的巴楚隆起是在晚海西期—早印支期开始隆升形成的。东面与满加尔凹陷相连,形成周边被柯坪断隆、巴楚隆起、塔北隆起围限的大范围凹陷沉积区。在盆地性质上,阿瓦提凹陷是受盆缘断裂控制的长期发育的克拉通边缘伸展拗陷,西部、南部、西南部分别被沙井子断裂、吐木休克断裂和阿恰断裂等周边断裂所控制围限并发育局部构造带,内部主要有西部洼陷和中东部斜坡构造单元组成,凹陷内断裂不发育或局部发育(图1)。

阿瓦提凹陷地层充填从震旦系至新生界,除侏罗系缺失外,其他均有发育。地层最大埋深达13000 m,发育有石炭系底、中生界底、新生界底等多个区域性角度不整合面,具有多套生储盖组合。由于区内侏罗系普遍缺失,中生代阿瓦提凹陷充填主要为三叠系和白垩系。受燕山晚期构造运动影响,白垩系被削截,上覆古近系呈超覆特征。阿瓦提凹陷三叠系自下而上为俄霍布拉克组( $T_{1eh}$ )和克拉玛依组( $T_{2k}$ ),缺失上三叠统黄山街组( $T_{3h}$ )和塔里奇克组( $T_{3t}$ ),上覆为下白垩统卡普沙良群,呈平行不整合接触。

早—中三叠世,阿瓦提凹陷是整个塔里木拗陷的一部分,向东与塔北—塔中地区连为一体,总体是在拉张伸展背景下形成的超级大型陆内拗陷湖盆,形成东西长近1000 km、南北宽130~600 km的范围。塔北隆起东部的轮南凸起地区发育克拉玛依组、黄山街组和部分俄霍布拉克组。从阿瓦提凹陷向塔北隆起的轮南凸起,俄霍布拉克组和克拉玛依组逐渐上超,厚度减薄。黄山街组从轮南凸起向阿瓦提凹陷削蚀尖灭。总体上,阿瓦提凹陷三叠系分布具有“东厚西薄、中间厚南北薄”的趋势(图1),由东向西逐渐减薄尖灭。区内最大残余厚度位于阿满低梁带的阿满2井—满西2井之间,大于1000 m。地层厚度最薄的位于阿恰断裂带和沙井子断裂带附近,地层被削蚀尖灭。在柯坪断隆和巴楚隆起上缺失三叠系,仅在巴楚隆起东部的巴东2井有分布,厚度为511.5 m。

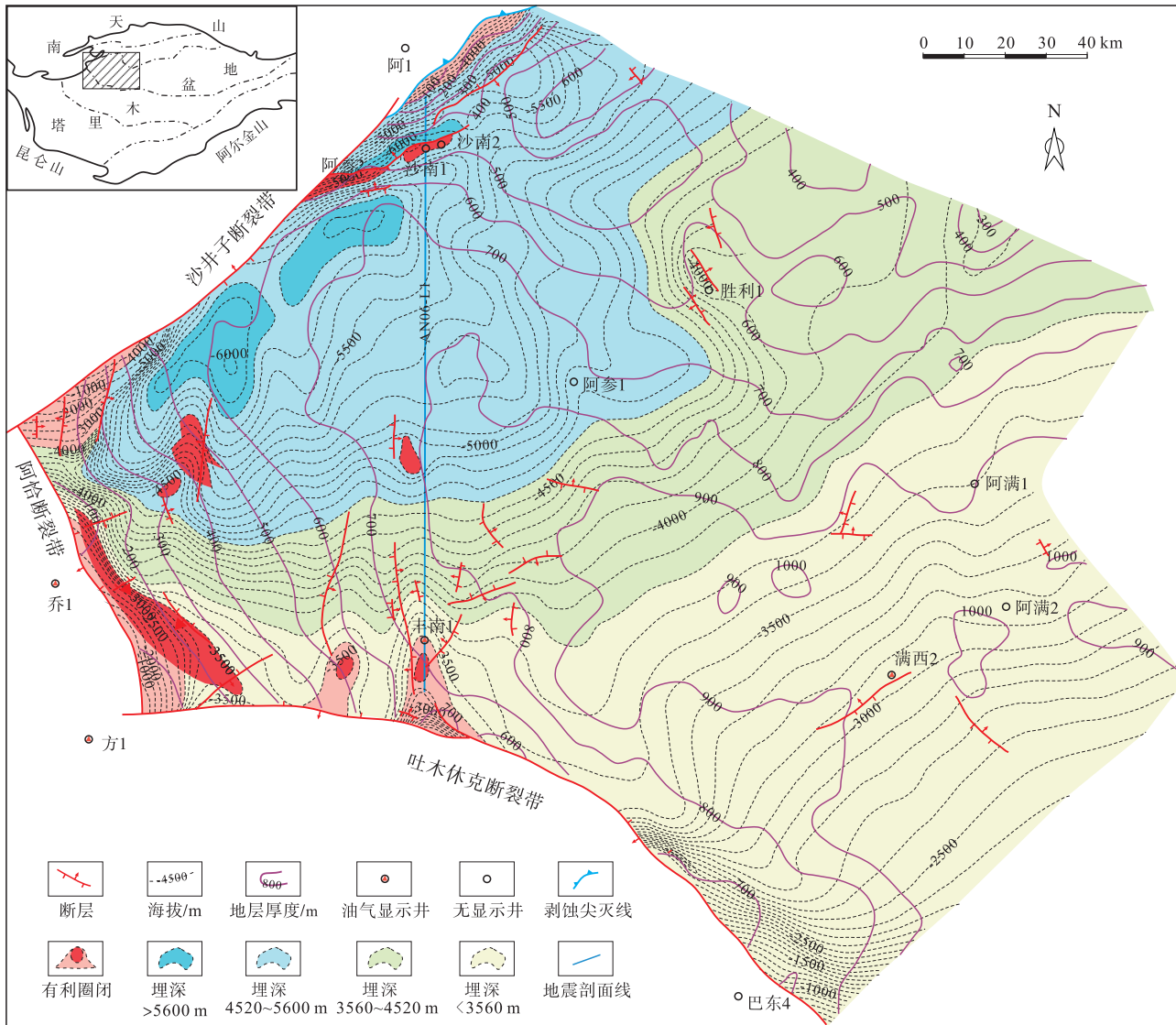


图 1 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系底界 (Tg) 构造图与地层厚度图

Fig. 1 Structure of bottom boundary (Tg) and contour of thickness of the Triassic in Awati sag, Tarim Basin

从构造演化看,塔里木盆地在震旦纪—早奥陶世为克拉通内伸展拗陷盆地、中晚奥陶世—志留纪—泥盆纪为克拉通内挠曲拗陷盆地,石炭纪—二叠纪为克拉通内伸展拗陷盆地(贾承造,1997)。早古生代,阿瓦提凹陷与柯坪断隆连为一体,为广阔的陆表海环境,向西柯坪方向水体变深,沉积了下寒武统玉尔吐斯组、中上奥陶统萨尔干组、上奥陶统印干组为代表的海湾—半深海相烃源岩。晚古生代,随着柯坪断隆的隆升,阿瓦提凹陷与巴楚地区统一发展,呈向北倾斜变深的斜坡,形成了以东河砂岩为代表的滨岸海滩相优质储集层。二叠纪末的海西晚期运动在本区表现显著,它不仅造成上二叠

统的剥蚀,还造成周边断裂—褶皱带的活动。自此,阿瓦提凹陷进入与周边构造单元差异演化阶段。中生代开始,巴楚地区隆升显著,断裂持续活动(何文渊等,2000),隆起区范围不断扩大。阿瓦提凹陷形成中生代拗陷湖盆环境。周边的沙井子断裂形成始于海西早期,海西晚期持续活动,控制了中生代沉积(周园园等,2011),燕山晚期—喜山期—现今仍在强烈活动。吐木休克断裂早期就有活动,海西晚期—印支期有较强烈活动,导致阿瓦提凹陷与巴楚隆起的构造分异,强烈活动发生在喜山晚期(朱德丰等,2008;周慧等,2021)。阿恰断裂形成于晚海西期至印支期,后期持续活动,断

裂两侧升降差异大，之后仍存在同沉积活动。新生代，阿瓦提凹陷与周边构造带呈对立发展之势。阿恰断裂、吐木休克断裂的剧烈运动，巴楚隆起强烈抬升，巴楚隆起在新近纪时由斜坡反转成为断块隆起（谢晓安等，1998）。阿瓦提凹陷则强烈快速沉降和沉积物充填。西侧的柯坪断隆也在古近纪强烈隆升变形，并发生逆冲推覆变形，成排成带褶皱发育。东侧的阿瓦提凹陷沉降中心即位于该断裂带下降盘，沉积厚度可达 6000~7000 m，形成向东南方向抬升的类前陆盆地。其中，中新世末构造运动最为强烈，使前期地层发生几乎同步挠曲变形，造成中新世与上新世间的不整合面十分清楚，并使得沿断裂带形成一系列断层—褶皱构造，从而形成阿瓦提凹陷的现今构造格局。

## 2 三叠系井震结合层序划分与对比

### 2.1 层序界面特征

阿瓦提凹陷三叠系顶底分别对应 T8-2 和 Tg 共 2 个地震反射界面，根据地震反射界面追踪，通过井震联合对比，可以在地震剖面上识别出三叠系的横向变化关系。三叠系内部可识别出 SB1—SB8 等 8 个较明显的层序界面（图 2）。地震剖面上可见三叠系底界面 SB1（Tg）明显削蚀下伏地层，并向北超覆尖灭，为区域性角度不整合界面；三叠系顶界面 SB8 被上覆白垩系底界面（T8-2）削蚀，并向南削蚀尖灭，为区域性角度不整合界面；内部的 SB6 界面代表了克拉玛依组与俄霍布拉克组界面。

三叠系层序界面上下有明显的岩性和电性变化，界面之下一一般为高位体系域的泥岩和砂岩，之上为低位体系域的砂岩和砂砾岩。电性上，在层序

界面上下的自然伽马曲线和电阻率曲线有明显突变。同时，层序界面还表现为沉积结构的转换面，具有明显的岩性和沉积序列结构的突变。

### 2.2 层序与体系域划分

在地震层序格架下，根据钻井层序地层研究，阿瓦提凹陷三叠系可划分为 7 个层序（图 3），相当于 Vail 等（1977）划分的三级层序。俄霍布拉克组可分为 5 个层序（SQ1—SQ5），从北向南增厚。克拉玛依组可分为 2 个层序（SQ6—SQ7），在丰南 1 井尖灭，被白垩系和古近系削蚀。

各层序具有“下粗上细”的“二元”层序结构（吴嘉鹏等，2014），自下而上由低位体系域（LST）、湖侵体系域（TST）和高位体系域（HST）组成（图 4），个别层序只有低位体系域和湖侵体系域，缺失高位体系域。不同体系域的砂泥岩互层，构成多套储盖组合。体系域的划分主要依据是准层序与准层序组以及沉积微相的纵向变化。低位体系域代表了层序最底部的沉积体，是湖平面位于最低时的沉积物。湖侵体系域代表了层序中部的沉积体，是初始湖泛面之上到最大湖泛面之间的沉积。高位体系域代表了层序上部的沉积体，是湖平面下降时期的一套沉积物。

## 3 三叠系沉积特征

根据沙南 1 井、胜利 1 井和周缘的满西 1 井 3 口井岩心观察和描述，结合钻井和测井相研究，对阿瓦提凹陷丰南 1 井、阿参 1 井、阿参 2 井、阿满 1 井、阿满 2 井三叠系等 8 口井进行了单井沉积相分析，认为阿瓦提凹陷三叠系受周边多物源控制，主要发育有扇三角洲相、辫状河三角洲相、湖泊相。

### 3.1 扇三角洲相

分布于阿瓦提凹陷西北端阿参 2 井和沙南 1 井一带，发育在俄霍布拉克组上段。沙南 2 井见有扇三角洲前缘亚相沉积，邻近沙井子断裂带，属于陡坡带靠山型扇三角洲（吴崇筠和薛叔浩，1993；陈景山等，2007）。微相主要为辫状分流河道和水下重力流微相。向扇三角洲的近源方向（即阿参 2 井方向），重力流沉积增多，相反，向扇三角洲边缘，河口坝沉积增多。推测北西方向应存在有扇三

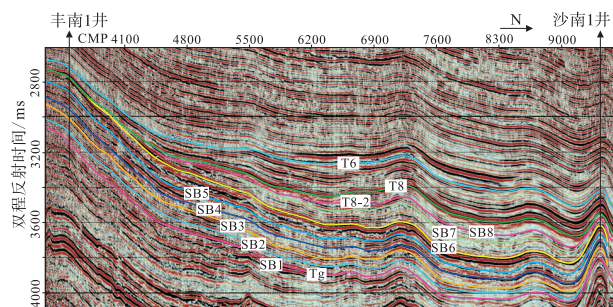


图 2 过丰南 1—沙南 1 井的 AN06-L1 地震剖面层序划分对比（剖面位置见图 1）

Fig. 2 Sequence division and comparison of AN06-L1 seismic profile from Well FN 1 to SN 1 (profile seen in Fig. 1)

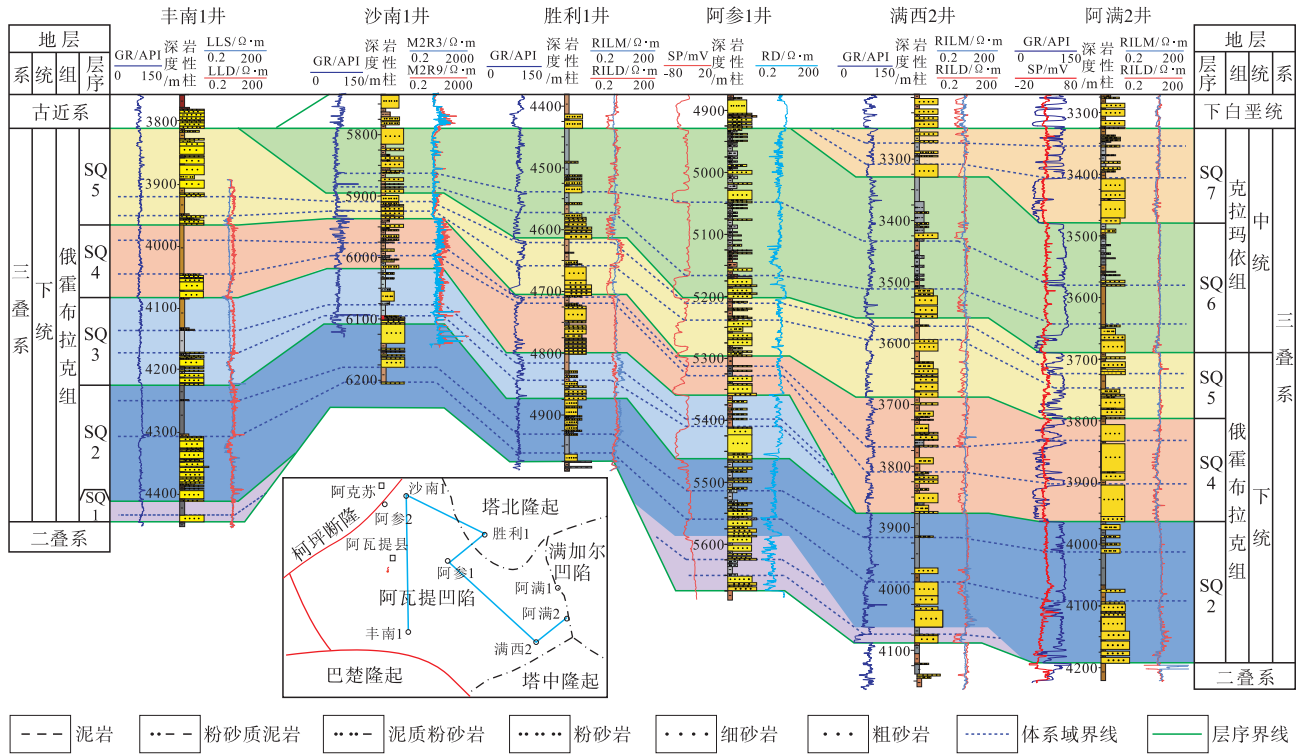
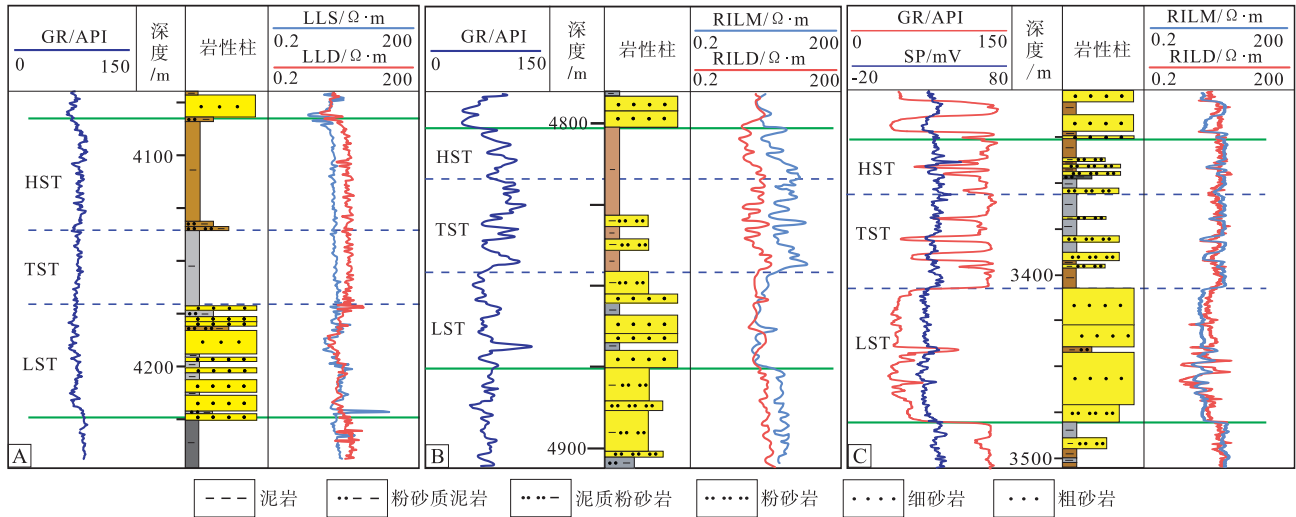


图 3 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系层序地层划分与对比

Fig. 3 Sequence division and correlation of the Triassic in Awati sag, Tarim Basin



A—丰南1井；B—胜利1井；C—阿满2井

图 4 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系层序和体系域类型

Fig. 4 Triassic sequence and system tract types in Awati sag, Tarim Basin

角洲平原亚相。根据沙南 1 井 6100~6108.25 m 岩心观察和岩心柱状图(图 5), 从自然伽马曲线特征看, 总体上为一进积型扇三角洲相。以下为扇三角洲前缘亚相的微相类型:

1) 辫状分流河道微相。由灰绿色砂砾岩、砾

质砂岩、含砾中粗粒岩屑砂岩组成多个下粗上细的正粒序韵律结构, 发育板状交错层理(图 6-b), 有的含油为油浸砂砾岩(图 6-a)。砾石成分有石英、变质岩和火山岩等, 呈次圆状, 砾径一般为 0.5~0.8 cm, 大者达 1.7 cm, 分布不均, 每个半

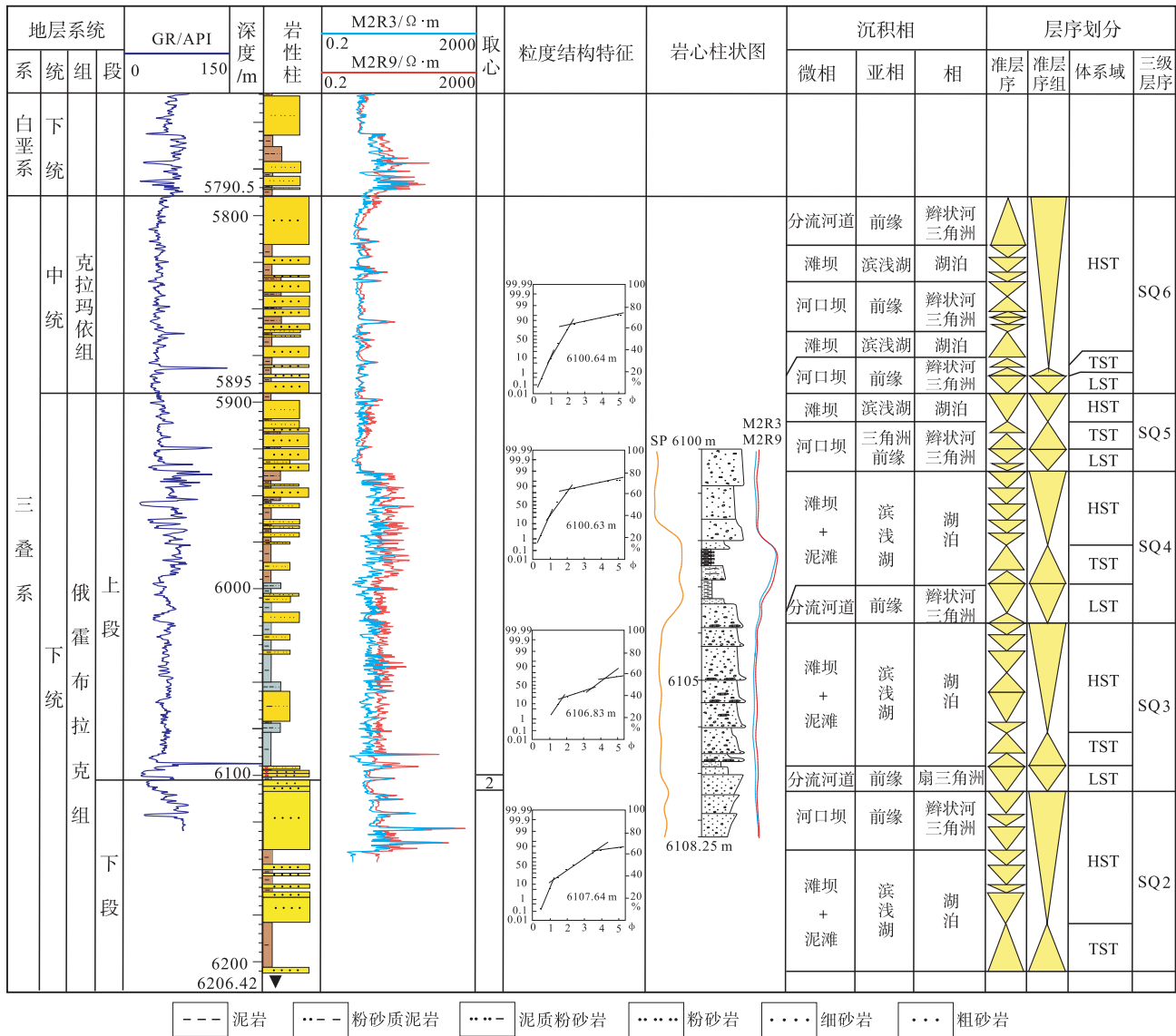


图 5 塔里木盆地阿瓦提凹陷沙南 1 井三叠系精细沉积相与层序分析柱状图

Fig. 5 Detailed sedimentary facies and sequence analysis histogram of the Triassic in Well SN 1 in Awati sag, Tarim Basin

旋回的底部(图 6-c),砾石常集中成砂砾岩透镜体,大致平行层理分布,但总的趋势是向上减少变小(图 6-d)。

2) 水下重力流微相。在此岩性段的顶部,浅褐色砾质粗粒岩屑砂岩、含砾粗粒岩屑砂岩中,砾石含量明显增多(图 6-f),达 30%~40%,分布杂乱,极不均匀,分选较差,砾径相差甚大,一般为 1~1.5 cm,最大者达 4 cm×2.5 cm×1.5 cm,小者仅 0.4~0.5 cm,次圆状,具有水下重力流沉积特点(图 6-g)。

### 3.2 辫状河三角洲相

辫状河三角洲平原亚相:主要见于丰南 1 井俄

霍布拉克组下段和阿参 2 井克拉玛依组下段,微相主要是辫状分流河道,岩性由杂色、紫褐色、褐色、灰色砂砾岩、含砾砂岩及岩屑砂岩组成,自然伽马曲线呈加积型的齿化箱型(丰南 1 井)和退积型的齿化钟型(阿参 2 井)。其间为分流间湾微相的杂色泥岩夹深灰色、灰黑色碳质泥岩、煤线,自然伽马曲线呈齿状或尖齿状。辫状河三角洲前缘亚相:主要见于北部的胜利 1 井、东部的阿满 2 井、满西 2 井等,发育水下分流河道、河口坝、远沙坝、席状砂和分流间湾等微相。阿满 2 井 4194~4094 m 可见退积型沉积序列,一般发育于不整合面(或假整合面)之上的初次湖侵期;加积型



a—沙南 1 井, 油浸含砾粗砂岩, 6100.2 m; b—沙南 1 井, 6106.9 m, 中细砂岩, 板状交错层理; c—沙南 1 井, 油浸含砾砂岩, 6106.6 m; d—沙南 1 井, 砾岩, 砾石向上变小, 6105.4 m; e—沙南 1 井, 6102.6 m, 细砂岩夹薄层泥岩; f—沙南 1 井, 油浸砂砾岩, 6100.2 m; g—沙南 1 井, 灰绿色中粗粒砂岩, 6104.8 m; h—沙南 1 井, 6106.7 m, 泥质粉砂岩, 层面含云母片; i—沙南 1 井, 灰绿色泥岩夹粉砂岩条带, 6102.3 m; j—胜利 1 井, 4659.02 m, 含泥砾中粗粒岩屑砂岩; k—胜利 1 井, 4659.07 m, 含泥砾中粗粒砂岩, 冲刷面; l—胜利 1 井, 4855.47 m, 中粗粒岩屑砂岩, 楔状交错层理, 钙质团块; m—胜利 1 井, 4663.77 m, 含泥砾砂岩, 反粒序; n—沙南 1 井, 6108.1 m, 中粗砂岩, 平行层理; o—胜利 1 井, 4855.82 m, 中粗粒岩屑砂岩, 楔状交错层理; p—满西 1 井, 3482.8 m, 中粗粒岩屑砂岩, 正粒序; q—满西 1 井, 3588 m, 粉砂质泥岩, 水平层理; r—胜利 1 井, 4909.87 m, 泥质粉砂岩, 水平层理; s—胜利 1 井, 4910.27 m, 粉砂质泥岩, 透镜状层理; t—胜利 1 井, 4909.17 m, 粉砂岩, 层面见植物碎片; u—胜利 1 井, 4660.57 m, 砂岩层面见芦木化石; v—满西 1 井, 3591 m, 泥质粉砂岩, 水平层理; w—满西 1 井, 3588 m, 泥质粉砂岩, 层间滑动构造

图 6 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系典型沉积特征

Fig. 6 Typical sedimentary characteristics of the Triassic in Awati sag, Tarim Basin

(如满西2井3688~3595 m)和不明显的进积型(如阿满2井3963.5~3806 m),反映了湖水退缩期的沉积。

1) 水下分流河道微相。岩性主要为灰色、灰褐色、棕色小砾岩、砂质砾岩、含砾细粒岩屑砂岩、细粒岩屑砂岩等(阿满2井)。胜利1井主要由灰色含泥砾中—细粒岩屑砂岩和绿灰色细粒岩屑砂岩组成,泥砾呈深灰色,大多呈扁平透镜体顺层分布,底部见冲刷面(图6-j, 6-k),发育楔状交错层理(图6-l)。满西1井俄霍布拉克组也有发育(图6-p),有的砂岩中可见植物化石碎片(图6-t, 6-u)。

2) 河口坝微相。在胜利1井4856.82~4855 m取心段发育明显,自下而上由浅灰色中细粒岩屑砂岩、中粒岩屑砂岩、中粗粒岩屑砂岩和含泥砾粗砂岩组成反粒序(图6-l, 6-o)。岩石成分含钙质,见生物潜穴、生物扰动构造和楔状交错层理等,自然伽马曲线呈漏斗型。在沙南1井6100~6108.25 m取心段,河口坝微相自下而上由灰绿色细—中粗粒岩屑砂岩和含砾不等粒砂岩组成,也具有反粒序特征(图6-n)。砾石成分有石英、浅色酸性火山岩等,向顶部含量10%左右,砾径一般为2~3 mm,个别达4~5 mm,呈次圆状,分选中等—较好,可见小型楔状交错层理(图6-n)。

3) 远沙坝微相:位于河口坝的末端,粒度更细。胜利1井4909~4910 m的远沙坝岩性由粉砂岩—细粒岩屑砂岩组成,具反粒序特征,可见楔状交错层理及生物扰动构造,层面上见云母和植物碎片顺层分布(图6-t)。对应的自然伽马曲线呈缓的小齿状,略显漏斗型。在沙南1井6100~6108.25 m取心段,远沙坝微相由绿灰色极细粒—粗粉砂岩组成,分选较好,可见平行层理和低角度交错层理(图6-h)。

4) 席状砂微相:一般为河口坝等砂体被较强的波浪改造,发生横向迁移并连成片。一般为粒度较细的砂岩、粉砂岩和浅湖相泥岩互层,颗粒分选性和磨圆度较好,垂向上呈反粒序或均质。在沙南1井6107.02~6107.22 m岩心见到和远沙坝相连,由绿灰色极细粒—粗粉砂岩组成,分选好,其间云母碎片聚集顺层分布(图6-e, 6-i)。

### 3.3 湖相

滨浅湖亚相:分布较广泛,主要为泥岩、粉砂

质泥岩和泥质粉砂岩、粉砂岩及少量细砂岩的不等厚互层,可分为滨浅湖泥、滨湖滩坝和滨湖沼泽3个微相。半深湖亚相,可分为半深湖泥和水下浊扇2个微相。

1) 滨浅湖泥微相:由灰色、绿灰色及棕红色、棕褐色等泥岩、粉砂质泥岩组成(图6-e, 6-i, 6-s),自然伽马曲线表现为小齿状夹小尖峰状。

2) 滨湖滩坝微相:一般夹于滨浅湖泥岩中的砂岩层,表现为细砂岩、粉砂岩和泥岩的薄互层,自然伽马曲线呈大齿状或尖齿状。可见厘米级韵律层理、波状层理、脉状层理和沙纹层理(图6-r, 6-s),泥岩层面见波痕。在适合的条件下,可形成较厚的叠加型滩坝体,砂体可达50%以上,如沙南1井俄霍布拉克组上段(SQ4)最为发育,自然伽马曲线既有漏斗型,也有钟型。

3) 滨湖沼泽微相:一般由棕红色、褐色、深灰—黑灰色泥岩夹粉砂岩、泥质粉砂岩、碳质泥岩及煤线构成,岩石颜色不均匀,灰色泥岩中可见炭屑。

4) 半深湖泥微相:主要由深灰色泥岩组成,有时可见少量粉砂质泥岩和粉砂岩夹层。阿参1井水下分流河道之间夹有2.75 m厚的油页岩。周缘的满西1井3585~3593.6 m岩心为深灰色泥岩,发育毫米级水平纹层,表现为黑灰色泥岩和深灰色粉砂质泥岩纹层相间(图6-q, 6-v),可见滑动构造(图6-w)。

5) 水下浊积扇微相:见于英买31井俄霍布拉克组底部,该井4751.5~4766 m为半深湖微相的灰色、深灰色厚层泥岩,夹有水下浊积扇微相的薄层杂色小砾岩层。小砾岩呈灰绿、红、灰色等杂色,主要以泥屑和火山岩屑为主,石英砾石和砂岩岩屑次之;砾石直径为3~5 mm,最大65 mm,分选差,次棱角状,砂泥质胶结。

## 4 区域沉积相对比

在单井沉积相精细分析基础上,进行了研究区连井沉积相对比。结果表明,三叠系主要为多物源控制下的扇三角洲相、辫状河三角洲相与滨浅湖亚相交替。在靠近陆源位置,以扇三角洲相和辫状河三角洲平原亚相等为主,在湖岸附近主要为辫状河三角洲前缘—滨浅湖亚相沉积。

根据南北向连井剖面(图7)对比,物源主要来自南部的丰南1井以南地区,其次是北部的胜利

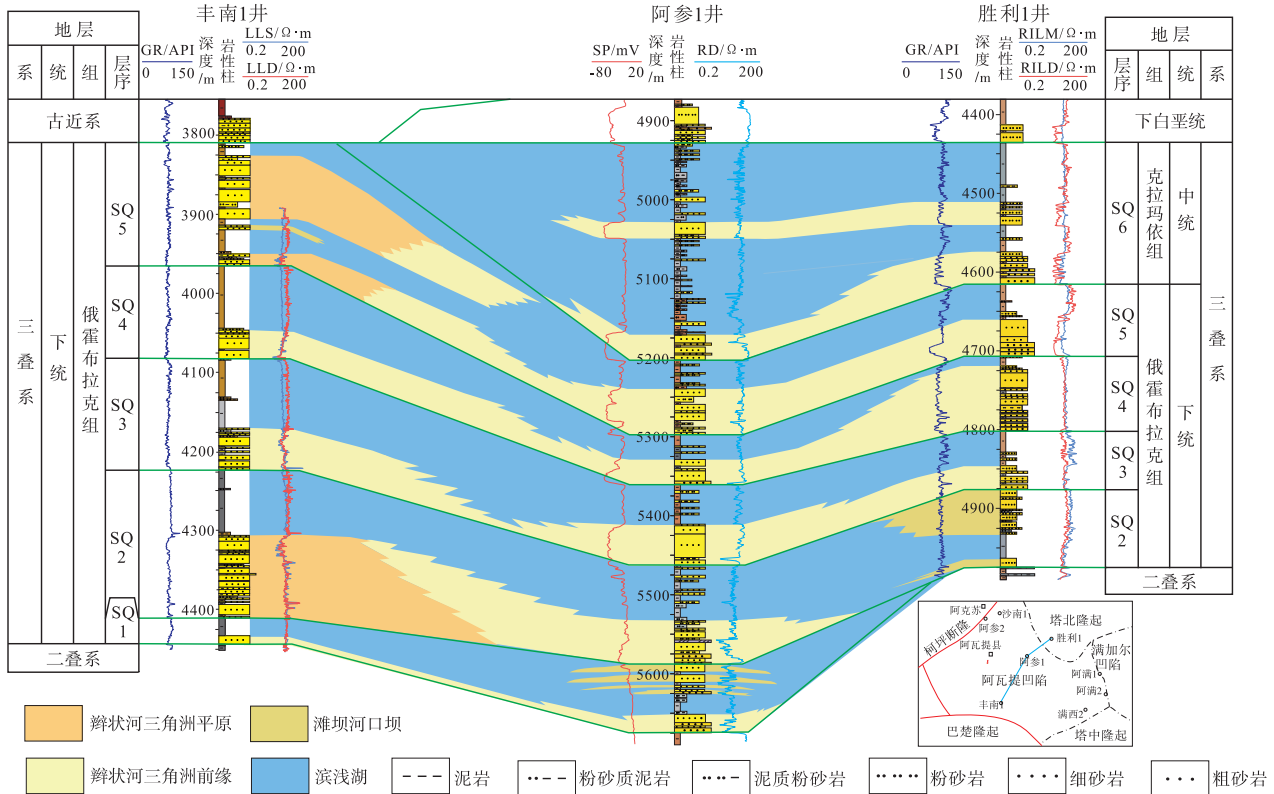


图 7 塔里木盆地阿瓦提凹陷过丰南 1-阿参 1-胜利 1 井南北向连井沉积相剖面

Fig. 7 Sedimentary facies profile of Wells FN 1-AC 1-SL 1 in north-south direction in Awati sag, Tarim Basin

1 井以北地区。沉积物表现为辫状河三角洲平原亚相、前缘亚相和滨浅湖亚相的交替，砂砾岩厚度也较大。凹陷中部的阿参 1 井为砂泥岩的互层，其砂体来源有可能受南北 2 大物源的控制。

根据东西向连井剖面(图 8)对比，物源主要来自西部阿参 2 井以西地区，北部胜利 1 井以北和东南部的阿满 2 井一带。西部的阿参 2 井发育扇三角洲前缘亚相和辫状河三角洲相，为靠近物源的陡坡带粗碎屑沉积；西部的沙南 1 井发育有滨浅湖和辫状河三角洲前缘亚相的交替，储盖组合发育，且以 SQ2—SQ3 储盖组合发育最优。胜利 1 井以北的塔北隆起地形坡度较缓，为缓坡带的辫状河三角洲前缘亚相和滨湖沼泽微相沉积；东部的阿满 2 井砂体发育，厚度相对较大，可能受来自东南部物源的控制。湖盆主体位于阿满 1 井一带，在 SQ2 发育半深湖亚相。

### 5 古物源区分析

阿瓦提凹陷三叠系砂岩表现出明显的多物源沉

积特点，存在西南部、东南部、西部和北部等 4 大物源，并以西南部、东南部和西部物源为主。

1) 根据重矿物组合分析(图 9)，西北部的沙南 1 井具有较高的石榴石含量，稳定矿物中的石榴石含量占明显优势，占比 38.4%~69.2%，平均占比 57.7%；锆石含量较少，占比 0.6%~2.6%，平均占比 1.4%；反映沙南 1 井物源为长期风化，沉积物具有经历了长期搬运的特征。北部的胜利 1 井稳定重矿物中石榴石含量相对偏低，占比 4.8%~26.5%，平均占比 12.8%；磁铁矿含量最高，占比 65.5%~84.4%，平均 76.6%；与邻区马纳 1 井、马纳 3 井、英买 2 井具有相似的重矿物组合，可见与沙南 1 井区相比应分属不同物源。凹陷东南部周缘的满西 1 井，稳定矿物含量最少，但次稳定矿物中的绿帘石含量居优，占比 24%~36.6%，平均 32.2%，与塔中隆起的塔中 1 井具有相似的重矿物组合，说明满西 1 井距物源较近，没有经历长期的搬运，推测物源可能来自塔中隆起。

2) 根据砂岩岩石化学特征分析，沙南 1 井的  $Fe_2O_3 + MgO$ 、 $TiO_2$ 、 $Al_2O_3/SiO_2$ 、 $K_2O/Na_2O$ 、 $Al_2O_3/CaO+$

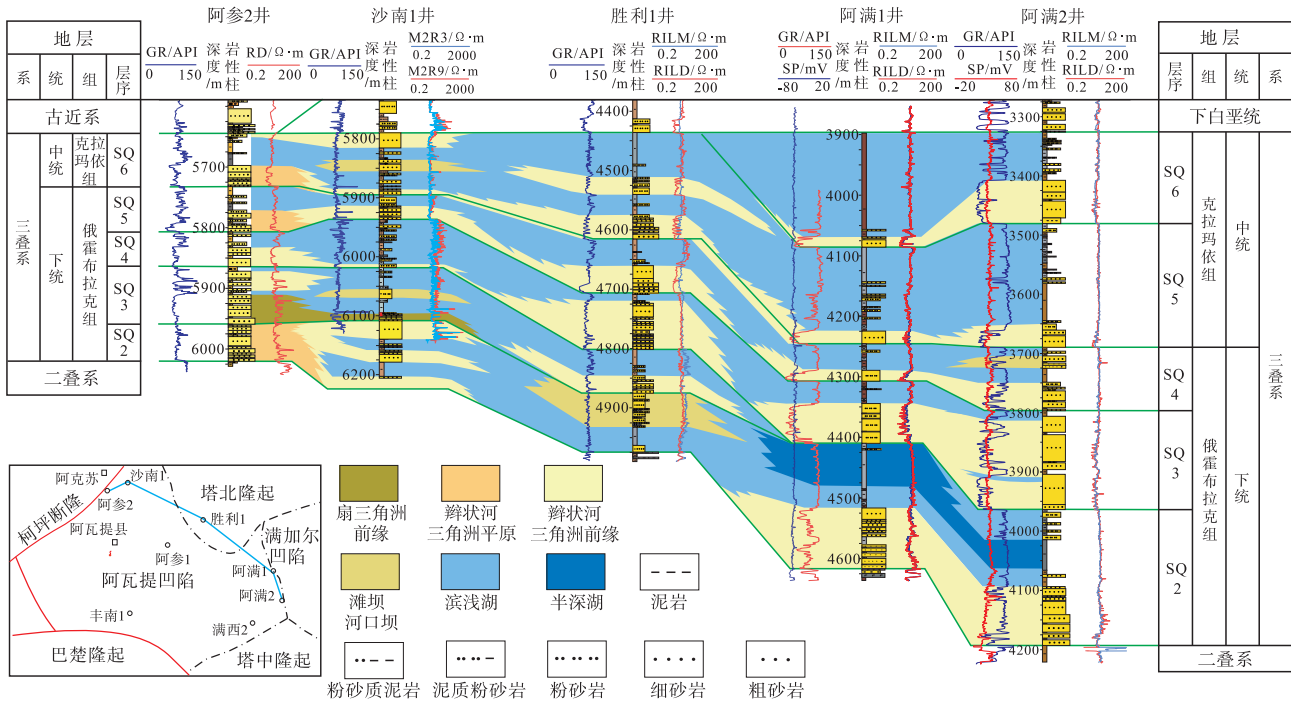


图 8 塔里木盆地阿瓦提凹陷阿参 2-沙南 1-胜利 1-阿满 1-阿满 2 井东西向连井沉积相剖面图

Fig. 8 Sedimentary facies profile of Wells AC 2-SN 1-SL 1-AM 1-AM 2 in east-west direction in Awati sag, Tarim Basin

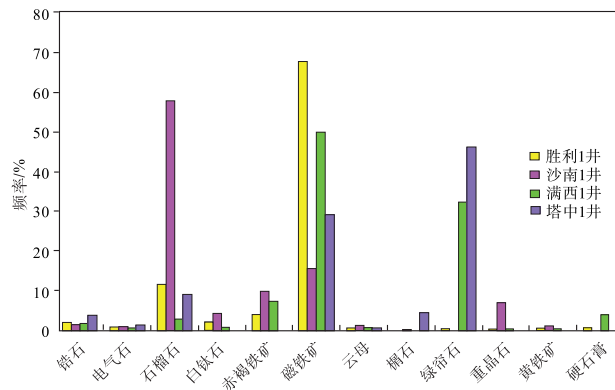


图 9 塔里木盆地阿瓦提凹陷重点井三叠系重矿物组合特征  
Fig. 9 Characteristics of the Triassic heavy mineral assemblages of key wells in Awati sag, Tarim Basin

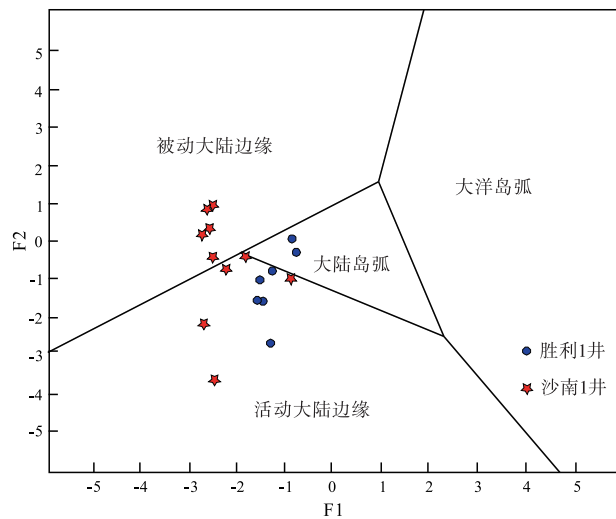


图 10 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系砂岩物源区构造环境判别图 (据 Bhatia, 1983)

Fig. 10 Identification of tectonic environment of the Triassic sandstone source area in Awati sag, Tarim Basin (after Bhatia, 1983)

Na<sub>2</sub>O 为 3.09%、0.26%、0.08、1.76、2.24；胜利 1 井的为 4.67%、0.47%、0.15、0.96、2.48。利用 Bhatia (1983) 的判别因子分析方法，揭示这 2 口井表现为明显不同的物源区构造背景 (图 10)。沙南 1 井多数点位于为被动大陆边缘区，个别点位于活动大陆边缘区，说明物源区具有被动大陆边缘的性质，其物源有可能受温宿凸起的控制，温宿凸起为长期发育的古隆起，发育太古界—元古界变质岩基底 (贾进华等，2004)，与塔北隆起的构造属

性不同 (刘亚雷等，2022)。胜利 1 井多数点位于活动大陆边缘区，个别位于大陆岛弧区，推测物源可能主要来自北部的塔北隆起。塔北隆起主要由古生界海相碳酸盐岩和碎屑岩系，其中二叠系发育大面积的火山岩，具相对活动大陆边缘的性质。

## 6 层序格架下沉积古地理演化

根据阿瓦提凹陷钻井层序及沉积相与物源分析,结合地震相研究(党青宁等,2009),利用井震资料确定盆地的边界,以层序为单元,恢复了不同层序时期的沉积古地理分布。

三叠纪,阿瓦提凹陷是受边界断层控制的箕状凹陷盆地,发育多物源控制下的扇三角洲相、辫状河三角洲相和滨浅湖亚相等沉积。扇三角洲相主要发育在 SQ3 时期的沙南 1 井区,辫状河三角洲平原亚相主要分布在凹陷周边,向凹陷内为辫状河三角洲前缘亚相—滨浅湖亚相。湖盆主体在凹陷东部地区,沉积中心位于盆地南部—西南部。纵向上,三叠纪湖盆演化经历了从初始形成、发育鼎盛到充填消亡的过程。不同层序时期湖盆的扩张—收缩、沉积—沉降中心的变迁、砂体的多期横向变化为岩性地层圈闭的发育提供了有利地质条件。

### 6.1 早三叠世早期 (SQ1—SQ2)

地层厚度约 200 m,砂体最厚的位于盆地南部,厚度大于 50 m,砂地比大于 0.5。北部胜利 1 井区和东北部砂体厚度较薄,为 10~30 m。凹陷腹地泥岩厚度 100~160 m,最大厚度位于阿满 1 井区一带。

SQ1 时期沉积分布局限在凹陷中南部的丰南 1 井—满西 2 井—阿参 1 井区,湖盆规模较小,为湖盆形成初期。物源主要来自南部的巴楚隆起和东南部的塔中隆起,南部边缘发育辫状河三角洲平原和前缘亚相,湖盆中心位于凹陷北部地区,以滨浅湖亚相为主(图 11-A)。SQ2 沉积范围扩大,遍及全区。南部和西部受盆缘断裂控制,物源主要来自巴楚隆起和柯坪断隆,沿断裂边缘发育多个辫状河三角洲相沉积。北部物源主要来自西北缘的温宿凸起和北部的塔北隆起,发育辫状河三角洲前缘亚相和滨湖沼泽微相。阿满 1 井以北地区可能发育有半深湖环境,在靠北部的英买 31 井还见到水下浊积扇,其他地区以滨浅湖亚相为主(图 11-B)。

据前人研究(唐开疆,1993;张希明等,1995),早三叠世早期湖水是从塔里木盆地西南部经塔中地区东部涌入塔北地区并逐渐扩大,是三叠纪阿瓦提湖盆的初始形成阶段。该时期,是在湖侵背景下,湖盆经历了从形成到湖侵扩大的过程。

当时,位于西南部的巴楚隆起和西北部的柯

坪断隆经历了晚海西运动后,强烈隆升,遭受风化剥蚀;而北部的塔北隆起尚处于沉积基准面或湖平面附近。因此,陆源碎屑物主要来自南部和西部。沉积相带从南向北呈不对称带状发育。南部沉积充填主要为辫状河三角洲平原—辫状河三角洲前缘—滨浅湖亚相;西北部受断裂控制发育陡坡带靠山型扇三角洲相沉积;北部为滨湖沼泽微相—辫状河三角洲前缘亚相—滨浅湖亚相,在东北部发育滨浅湖—半深湖亚相。在周边物源区隆升初期,风化剥蚀强烈,陆源碎屑物充足而丰富,物源区和沉积区距离不很远。因此,发育的辫状河三角洲前缘砂体多为厚度大且分布广,呈朵状或鸟足状。在湖侵过程中,辫状河三角洲前缘常被湖相沉积覆盖,呈退积型。整个湖盆呈南浅北深、西浅东深的特点。

### 6.2 早三叠世中—晚期 (SQ3—SQ5)

地层厚度一般在 200~300 m 之间,砂体厚度达 100~150 m,砂地比大于 0.5,最厚的位于凹陷西部和西南部、北部胜利 1 井区、东南部阿满 2 井区等,反映了物源主体来自西部和西南部;凹陷腹地砂岩厚度较薄,泥岩厚度相对较大,砂地比最小,代表了湖盆的主体位置。

SQ3 时期,湖盆有所收缩,物源主要来自西侧,发育扇三角洲相、滨浅湖亚相和辫状河三角洲前缘亚相(图 11-C);东南侧的塔中隆起开始扩大,使得该区的阿满 1 井、阿满 2 井和满西 2 井缺失该层序。湖盆主体仍位于东部地区,半深湖环境的范围也较 SQ2 收缩。SQ4 时期,湖盆范围又开始扩大,物源除来自西南侧外,还有来自西北侧、北部和东南侧,形成多物源供源的辫状河三角洲相—滨浅湖亚相环境。此时期,西南侧的物源区向盆地推进扩展,东南侧的塔中隆起已被湖水覆盖,发育辫状河三角洲前缘亚相,并一直延伸到阿满 1 井—阿满 2 井区。东北部的塔北隆起有小范围向凹陷内扩大,半深湖环境仍位于盆地东北侧(图 11-D)。SQ5 时期,湖盆范围又进一步扩大,是三叠纪时期湖盆范围最大的时期(图 11-E)。物源主体来自西南侧的巴楚隆起,并继续向凹陷内推进扩展,其次是西北侧物源,向凹陷内发育辫状河三角洲前缘亚相,腹地主要是滨浅湖亚相环境。北部发育滨湖沼泽亚相,半深湖环境仍位于盆地的东北

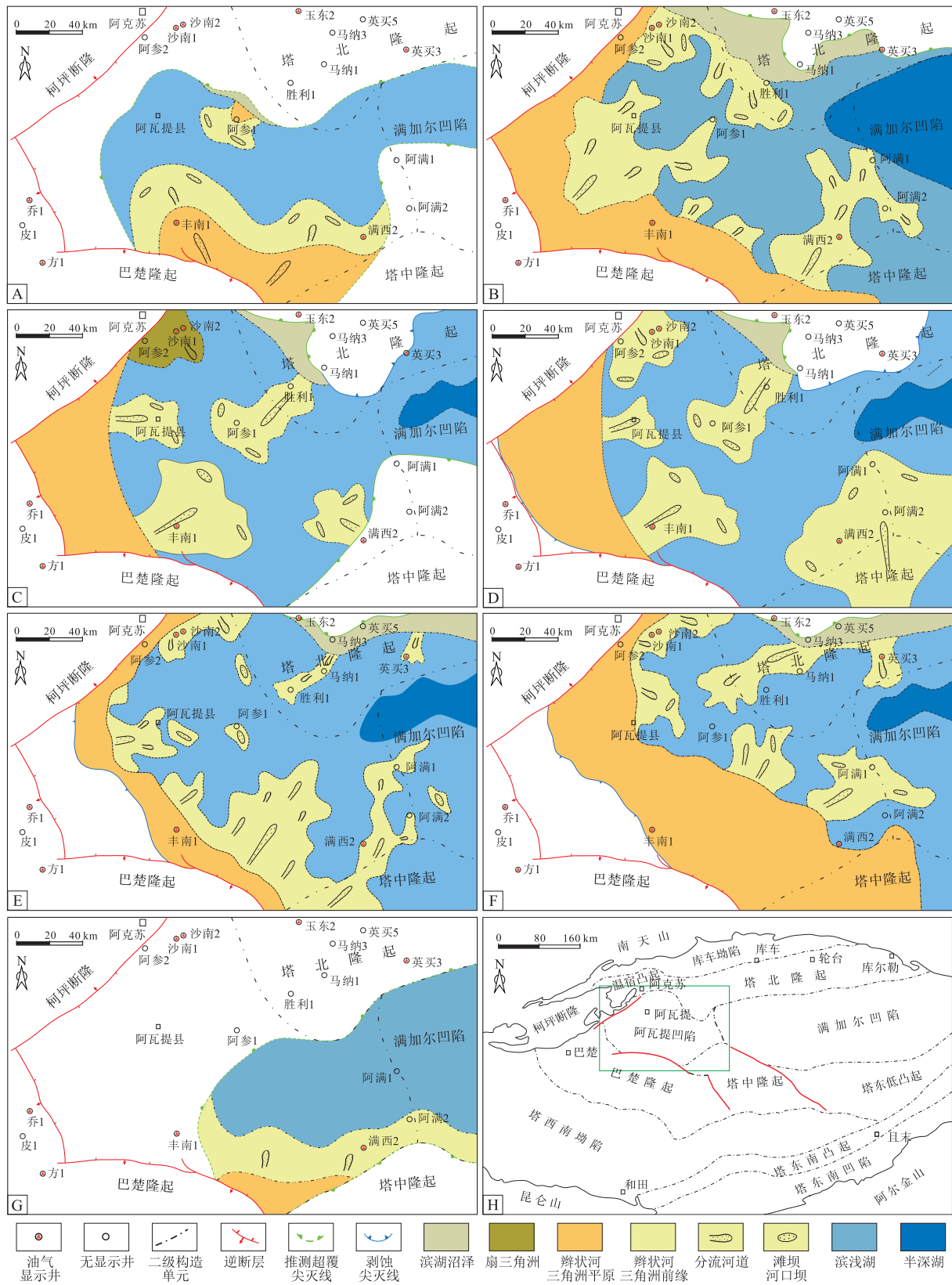


图 11 塔里木盆地阿瓦提凹陷三叠系 SQ1—SQ7 时期的沉积古地理分布

Fig. 11 Sedimentary palaeogeography distribution of the Triassic SQ1-SQ7 period in Awatisag, Tarim Basin

一带。

该时期是湖盆的扩张发育鼎盛期。伴随着西部和西南部的物源区沉积物不断向湖盆推进填充,湖水向北部和北东部扩展。在西部和西南部,形成不断进积的扇三角洲相、辫状河三角洲平原和前缘亚相,向北部和东北部形成滨浅湖—半深湖沉积。

此阶段,西南部和西部物源持续向盆地进积,有不断增多的趋势,辫状河三角洲前缘向盆内多呈狭长的鸟足状,陆源碎屑以中细砂岩和粉砂岩为主。盆地北缘,随着塔北隆起的抬升,也开始向盆地提供陆源碎屑物,出现零星分布的辫状河三角洲相。随着湖水不断向塔北隆起侵漫,沉积地层向塔北隆起上超。之后隆起遭剥蚀夷平化,向盆地提供的陆源碎屑物数量逐渐减少,碎屑粒径变小。半深湖也逐渐向东北隅迁移缩小。

### 6.3 中三叠世早—中期 (SQ6—SQ7)

地层厚度 0~375 m,砂体普遍较薄,为 50~80 m,砂地比为 0.1~0.5,凹陷腹地除阿参 1 井外,其他广大地区砂岩厚度较薄,一般小于 20 m。凹陷腹地泥岩厚度普遍在 200~300 m 之间,最大厚度仍位于阿满 1 井以北的东北区,大于 300 m,北部斜坡区泥岩厚度为 50~150 m。湖盆走向呈近东西向,物源主体来自西南部和南部地区。

SQ6 时期,湖盆又开始收缩,来自西南部和西北部物源的沉积物持续向凹陷推进,辫状河三角洲平原亚相的范围不断扩大,在西侧和南侧形成多个辫状河三角洲前缘亚相沉积。北部地势较缓,发育有滨湖沼泽微相和辫状河三角洲前缘亚相。盆地东北侧发育有滨浅湖—半深湖亚相环境(图 11-F)。SQ7 时期,湖盆中心向东部的塔中—塔北地区迁移,阿瓦提凹陷范围内的湖盆萎缩到最小,主体为滨湖沼泽微相环境(图 11-G),物源来自南部的巴楚隆起和塔中隆起。

该时期是湖盆的消亡期。湖盆延续早期呈继承性发展,湖水向北东方向扩张。西南部的大量物源向盆内推进充填,物源不断进积的结果造成湖盆迅速萎缩,直至消亡。

此阶段,巴楚隆起出现明显的构造隆升,而阿瓦提凹陷南缘则相对沉降。南部物源的隆升为盆地提供了丰富的陆源碎屑,使阿瓦提凹陷南缘形成了巨厚的沉积层(达 300 多米),成了盆地局部的沉

积中心。该时期形成的辫状河三角洲平原亚相的砂岩与之前相比,碎屑粒径较粗,分布面积大。前缘的朵状砂体,在不断向北东进积作用下相互叠置,厚度一般在 40 m 左右。之后,北部塔北隆起西侧持续隆升,进一步加速了湖盆中心向东迁移,致使阿瓦提凹陷湖盆逐渐消亡。

## 7 结论

1) 阿瓦提凹陷是受边界断层控制的箕状凹陷盆地,三叠系发育多物源控制下的扇三角洲相、辫状河三角洲相和滨浅湖亚相等沉积。物源主要来自西南部巴楚隆起和西部柯坪断隆,其次是北部塔北隆起和东南部塔中隆起。湖盆主体在凹陷东部地区,沉积中心位于盆地南部—西南部。辫状河三角洲平原亚相主要分布在凹陷周边,向腹地为辫状河三角洲前缘—滨浅湖亚相。

2) 阿瓦提凹陷三叠系划分为 7 个层序。俄霍布拉克组分为 5 个层序(SQ1—SQ5),从北向南增厚;克拉玛依组分为 2 个层序(SQ6—SQ7),在丰南 1 井尖灭,被古近系削蚀。各层序自下而上由低位体系域、湖侵体系域和高位体系域组成。

3) 通过沉积相与物源区分析,明确了不同时期以层序为单元的沉积古地理分布与演化特征。阿瓦提三叠纪湖盆经历了湖盆收缩—扩张的轮回。早三叠世早期(SQ1—SQ2 时期),是湖盆形成到湖侵扩大时期;早三叠世中—晚期(SQ3—SQ5),是湖盆扩张发育鼎盛期;中三叠世早—中期(SQ6—SQ7),是湖盆萎缩消亡期。

## 参考文献 (References)

- 陈景山,唐青松,代宗仰,谭秀成,刘景环. 2007. 特征不同的两种扇三角洲识别与对比. 西南石油大学学报, 29(4): 1-6. [Chen J S, Tang Q S, Dai Z Y, Tan X C, Liu J H. 2007. Recognition and correlation of two distinct types of fan delta facies. Journal of Southwest Petroleum University, 29(4): 1-6]
- 党青宁,赵宽志,孙雄伟,朱长见,刘永福,向东,崔永福,赵崑. 2009. 阿瓦提凹陷三叠系地震相特征及有利探区预测. 新疆石油地质, 30(2): 208-210. [Dang Q N, Zhao K Z, Sun X W, Zhu C J, Liu Y F, Xiang D, Cui Y F, Zhao W. 2009. Prediction of seismic facies and favorable prospecting areas of Triassic in Awati Sag, Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 30(2): 208-210]
- 顾家裕. 1996. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化. 北京: 石油工业出版社, 1-361. [Gu J Y. 1996. Sedimentary Character and Evolution in Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-361]

- 顾家裕,朱筱敏,贾进华. 2003. 塔里木盆地沉积与储层. 北京: 石油工业出版社, 1-400. [Gu J Y, Zhu X M, Jia J H. 2003. Sedimentary Reservoir in Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-400]
- 顾忆,赵永强,贾存善,何光玉,罗宇,王斌,路清华. 2012. 塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析. 石油实验地质, 34(3): 257-266. [Gu Y, Zhao Y Q, Jia C S, He G Y, Luo Y, Wang B, Lu Q H. 2012. Analysis of hydrocarbon resource potential in Awati Depression of Tarim Basin. Petroleum Geology & Experiment, 34(3): 257-266]
- 何文渊,李江海,钱祥麟,张臣. 2000. 塔里木盆地巴楚断隆中新世代的构造演化. 北京大学学报(自然科学版), 36(4): 539-546. [He W Y, Li J H, Qian X L, Zhang C. 2000. The Meso-Cenozoic evolution of Bachu Fault-Uplift in Tarim Basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 36(4): 539-546]
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1-438. [Jia C Z. 1997. Tectonics Characteristics and Petroleum Tarim Basin China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-438]
- 贾进华,周东延,张立平,刘泽斌,周兴熙. 2004. 塔里木盆地乌什凹陷石油地质特征. 石油学报, 25(6): 13-18. [Jia J H, Zhou D Y, Zhang L P, Liu Z B, Zhou X X. 2004. Petroleum geologic characteristics of Wushi Sag in Tarim Basin. Acta Petrolei Sinica, 25(6): 13-18]
- 李曰俊,孙龙德,杨海军,张光亚,齐英敏,桑洪,王月然,刘亚雷,张强,文磊. 2013. 塔里木盆地阿瓦提凹陷周缘的晚新生代张扭性断层带. 地质科学, 48(1): 109-123. [Li Y J, Sun L D, Yang H J, Zhang G Y, Qi Y M, Sang H, Wang Y R, Liu Y L, Zhang Q, Wen L. 2013. The late Cenozoic tensor-shear fault zones around Awati Sag, NW Tarim Basin. Chinese Journal of Geology, 48(1): 109-123]
- 刘亚雷,齐英敏,刘云翔,王月然,赵岩,张强,文磊,胡秀芳,李曰俊. 2013. 塔里木盆地阿恰构造带断裂构造分析. 现代地质, 27(1): 158-164. [Liu Y L, Qi Y M, Liu Y X, Wang Y R, Zhao Y, Zhang Q, Wen L, Hu X F, Li Y J. 2013. Tectonic analysis on Aqia fault belt in the Western Tarim Basin. Geoscience, 27(1): 158-164]
- 刘亚雷,高永进,张君峰,白忠凯,程明华,张远银,杨有星. 2022. 塔里木盆地温宿凸起构造特征新认识. 岩石学报, 38(9): 2665-2680. [Liu Y L, Gao Y J, Zhang J F, Bai Z K, Cheng M H, Zhang Y Y, Yang Y X. 2022. New understanding of tectonic characteristic of the Wensu salient in Tarim Basin. Acta Petrologica Sinica, 38(9): 2665-2680]
- 刘志宏,王孔伟,迟元林,王文革,林东成,张立国,葛百成. 2004. 塔里木盆地阿瓦提—巴楚地区褶皱构造特征. 地质科学, 39(2): 251-259. [Liu Z H, Wang K W, Chi Y L, Wang W G, Lin D C, Zhang L G, Ge B C. 2004. Folding characteristics of Awati—Bachu area in the Tarim Basin. Chinese Journal of Geology, 39(2): 251-259]
- 卢玉红,钱玲,张海组,黄龙藏,吴建国,何芬贤. 2008. 塔里木阿瓦提凹陷乌鲁桥油苗地化特征及来源. 海相油气地质, 13(2): 45-51. [Lu Y H, Qian L, Zhang H Z, Huang L C, Wu J G, He F X. 2008. Origin and geochemical characteristics of Wuluqiao oil seepage in Awati sag, Tarim Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 13(2): 45-51]
- 吕修祥,李建交,赵风云,肖中尧,陈新卫. 2007. 塔里木盆地西部环阿瓦提凹陷区油气勘探前景再认识. 海相油气地质, 12(3): 10-14. [Lü X X, Li J J, Zhao F Y, Xiao Z Y, Chen X W. 2007. Recognition on petroleum exploration prospect of marine carbonates in western Tarim Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 12(3): 10-14]
- 吕雪雁,朱筱敏,申银民,高雷. 2002. 塔里木盆地台盆区三叠系层序地层研究和有利勘探区预测. 石油勘探与开发, 29(1): 32-35. [Lü X Y, Zhu X M, Shen Y M, Gao L. 2002. The Triassic sequence stratigraphy and the prediction of the favourable exploration targets in Tarim Basin. Petroleum Exploration and Development, 29(1): 32-35]
- 唐开疆. 1993. 塔里木盆地三叠系沉积特征及生烃潜力. 石油实验地质, 15(2): 128-137. [Tang K J. 1993. Sedimentary features and hydrocarbon potential in the Triassic system of the Tarim Basin. Experimental Petroleum Geology, 15(2): 128-137]
- 田军. 2019. 塔里木盆地油气勘探成果与勘探方向. 新疆石油地质, 40(1): 1-11. [Tian J. 2019. Petroleum exploration achievements and future targets of Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 40(1): 1-11]
- 田军,王清华,杨海军,李勇. 2021. 塔里木盆地油气勘探历程与启示. 新疆石油地质, 42(3): 272-282. [Tian J, Wang Q H, Yang H J, Li Y. 2021. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 42(3): 272-282]
- 田作基,罗志立,罗蛰潭,彭大钧,于汇津,宋建国. 1996. 新疆阿瓦提陆内前陆盆地. 石油与天然气地质, 17(4): 282-286. [Tian Z J, Luo Z L, Luo Z T, Peng D J, Yu H J, Song J G. 1996. Awati intracontinental forland basin in Xinjiang. Oil & Gas Geology, 17(4): 282-286]
- 王超,黄智斌,谭泽金. 2008. 塔里木盆地北部坳陷阿瓦提凹陷三叠系划分对比. 新疆地质, 26(2): 133-136. [Wang C, Huang Z B, Tan Z J. 2008. The classification and correlation of Triassic in Awati Depression, north depression, Tarim Basin. Xinjiang Geology, 26(2): 133-136]
- 王龙樟. 2000. 塔里木盆地阿瓦提—满加尔坳陷三叠—侏罗纪沉积物源变迁. 地球科学: 中国地质大学学报, 25(1): 39-43. [Wang L Z. 2000. Provenance evolution and migration of Triassic and Jurassic Awati-Manjiaer Depression, Tarim Basin. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 25(1): 39-43]
- 王文革,刘俊峰,张全文. 2001. 塔里木盆地阿瓦提凹陷石油勘探前景预测. 大庆石油地质与开发, 20(3): 18-20. [Wang W G, Liu J F, Zhang Q W. Prediction of the petroleum exploration prospect of Awati Depression in Tarim Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 20(3): 18-20]
- 吴崇筠,薛叔浩. 1993. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1-484. [Wu C Y, Xue S H. 1993. Sedimentology of Petroleum Basins of China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-484]

- 吴嘉鹏,陆金波,王英民,万丽芬,周兴海,夏广胜. 2014. 塔里木盆地北部三叠系“二元”层序结构特征及演化模式. 沉积学报, 32(2): 325-333. [Wu J P, Lu J B, Wang Y M, Wan L F, Zhou X H, Xia G S. 2014. Dual feature of sequence architecture and sequence evolution model of Triassic Northern Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 325-333]
- 席勤,余和中,顾乔元,钱玲,李新生,李毓丰. 2016. 塔里木盆地阿瓦提凹陷主力烃源岩探讨及油源对比. 大庆石油地质与开发, 35(1): 12-18. [Xi Q, Yu H Z, Gu Q Y, Qian L, Li X S, Li Y F. 2016. Main hydrocarbon source rocks and contrasts for Awati sag in Tarim basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 35(1): 12-18]
- 萧德铭,冯子辉. 1999. 塔里木盆地大庆区块烃源岩演化史与油气成藏期研究. 石油实验地质, 21(1): 28-33. [Xiao D M, Feng Z H. 1999. Study on the evolutionary history of source rock and the pool-forming periods of hydrocarbon in the Daqing Block of the Tarim Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 21(1): 28-33]
- 谢晓安,胡素云,卢华复. 1998. 探讨塔里木盆地巴楚断隆的正反转构造. 地质论评, 44(1): 1-6. [Xie X A, Hu S Y, Lu H F. Positive inversion structure in the Bachu fault-uplift in the Tarim Basin. *Geological Review*, 44(1): 1-6]
- 姚尧,何治亮,李慧莉,张瑜,高晓鹏,王康宁,焦存礼. 2020. 塔里木盆地阿瓦提断陷中—上奥陶统萨尔多组沉积地质模型与烃源岩分布预测. 石油与天然气地质, 41(4): 763-775. [Yao Y, He Z L, Li H L, Zhang Y, Gao X P, Wang K N, Jiao C L. 2020. Sedimentary geological model and distribution prediction of source rocks in the Saergan Formation (Middle-Upper Ordovician) in Awati fault depression, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 763-775]
- 张君峰,高永进,杨有星,周新桂,张金虎,张远银. 2019. 塔里木盆地温宿凸起油气勘探突破及启示. 石油勘探与开发, 46(1): 14-24. [Zhang J F, Gao Y J, Yang Y X, Zhou X G, Zhang J H, Zhang Y Y. 2019. Oil exploration breakthrough in the Wensu salient, northwest Tarim Basin and its implications. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 14-24]
- 张君峰,张远银,高永进. 2022. 塔里木盆地沙井子构造带志留系油气勘探突破及启示. 石油勘探与开发, 49(1): 203-214. [Zhang J F, Zhang Y Y, Gao Y J. 2022. Silurian hydrocarbon exploration breakthrough and its implications in the Shajingzi structural belt of Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 203-214]
- 张希明,刘青芳,王贵全. 1995. 塔里木盆地北部三叠—侏罗系砂岩碎屑组分与板块构造位置关系的研究. 新疆地质, 13(3): 251-255. [Zhang X M, Liu Q F, Wang G Q. 1995. Triassic-Jurassic sandstone fragment components related with plate tectonic position in the Northern Tarim basin. *Xinjiang Geology*, 13(3): 251-255]
- 赵靖舟,贾承造. 2002. 塔里木盆地阿瓦提—满加尔低梁构造特征和形成演化. 地质论评, 48(1): 68-73. [Zhao J Z, Jia C Z. 2002. Structural characteristics and tectonic evolution of the Awati-Manjia'er ridge, the Tarim Basin. *Geological Review*, 48(1): 68-73]
- 周慧,陈永权,李洪辉,李保华,黄理力,刘亚雷,龚洪林,文磊. 2021. 塔里木盆地巴楚隆起北缘的吐木休克断裂与巴东断裂. 地质科学, 56(1): 1-18. [Zhou H, Chen Y Q, Li H H, Li B H, Huang L L, Liu Y L, Gong H L, Wen L. 2021. The Tumuxiuke and Badong faults on the northern boundary of the Bachu Rise, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 56(1): 1-18]
- 周园园,吕修祥,齐英敏,白忠凯,朱海燕,李毓丰. 2011. 阿瓦提凹陷沙井子断裂带特征及控油气作用. 新疆石油地质, 32(6): 605-608. [Zhou Y Y, Lü X X, Qi Y M, Bai Z K, Zhu H Y, Li Y F. 2011. Shajingzi fault belt and its controlling effect on hydrocarbons in Awati sag in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(6): 605-608]
- 朱德丰,刘和甫,吴根耀. 2008. 塔里木盆地西部吐木休克断裂带的主要特征和构造演化. 地质科学, 43(2): 209-227. [Zhu D F, Liu H F, Wu G Y. 2008. Main characteristics and structural evolution of the Tumuk fault zone in the western Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 43(2): 209-227]
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
- Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: Payton C E (ed). *Seismic Stratigraphy: applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa: AAPG Memoir, 26: 83-97.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)