

文章编号: 1671-1505(2025)04-0870-16 DOI: 10.7605/gdxb.2025.019

## 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系物源与沉积相\*

黎立<sup>1,2,3</sup> 孙春燕<sup>1,2,3</sup> 董尧<sup>4</sup> 罗强<sup>1,2,3</sup> 屈洋<sup>1,2,3</sup> 朱世发<sup>4</sup>

1 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

2 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000

3 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000

4 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

**摘要** 塔里木盆地西南山前地区甫沙断陷甫沙 8 井侏罗系砂岩油气勘探取得了突破, 但该地区侏罗系整体勘探程度低, 物源特征以及沉积体系尚不清楚, 明显制约了其油气勘探进程。利用测井、岩心与地震等资料, 本研究在系统分析甫沙断陷侏罗系物源特征的基础上, 明确了侏罗系沉积相类型及其展布规律。研究认为, 甫沙断陷侏罗系存在南、北两大物源体系, 南部西昆仑山物源供给能力强, 北部斜坡区供源能力较弱, 母岩主要为元古界变质岩、古生界岩浆岩和二叠系沉积岩。侏罗纪甫沙断陷发育一个完整的裂陷旋回, 先后经历了初始断陷期、强烈断陷期和断-拗转换期 3 个演化阶段。共识别出扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊 3 种沉积相类型, 南部陡坡带主要发育冲积扇—扇三角洲—湖泊沉积体系, 北部缓坡带主要发育辫状河三角洲—湖泊沉积体系, 且该沉积相展布具有继承性发育的特征, 受控于古地貌、物源供给、盆地的裂陷活动等因素。综合以上研究, 认为初始断陷期(莎里塔什组沉积时期)南部构造转换带控制的辫状河三角洲砂体可作为甫沙断陷有利勘探目标。

**关键词** 物源分析 沉积相 甫沙断陷 侏罗系 塔里木盆地**第一作者简介** 黎立, 女, 1988 年生, 工程师, 从事油气地质研究。E-mail: lili2-tlm@petrochina.com.cn。**通讯作者简介** 朱世发, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事储集层地质学与沉积学的教学与科研工作。E-mail: zhushifa\_zsf@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

## Provenance and sedimentary facies of the Jurassic in Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin

LI Li<sup>1,2,3</sup> SUN Chunyan<sup>1,2,3</sup> DONG Yao<sup>4</sup> LUO Qiang<sup>1,2,3</sup> QU Yang<sup>1,2,3</sup> ZHU Shifa<sup>4</sup>

1 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Xinjiang Korla 841000, China

2 R &amp; D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Xinjiang Korla 841000, China

3 Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Korla 841000, China

4 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

**Abstract** A significant breakthrough in the exploration of Jurassic sandstone oil and gas was

\* 中国石油天然气集团有限公司科技项目“超深层碎屑岩油气分布规律与区带目标优选”(编号: 2023ZZ14YJ02)资助。[Financially supported by the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation “Oil and gas distribution and zone target optimization of ultra-deep elastic rock” (No. 2023ZZ14YJ02)]

收稿日期: 2024-07-03 改回日期: 2024-09-09

achieved in well Fusha 8, located in the piedmont area of the southwestern Tarim Basin. However, the overall exploration level of the Jurassic remains low. The characteristics of the provenance and the sedimentary systems within the basin are still unclear, which hinders the process of exploration. This paper uses logging data, core samples, and seismic data to clarify the types and distribution of sedimentary facies through a systematic analysis of the Jurassic provenance characteristics in the Fusha fault depression. It is concluded that there are two major provenance systems in the Jurassic strata of the Fusha fault depression: the western Kunlun Mountains in the south exhibit a strong provenance supply capacity, while the northern slope area displays a weaker provenance. The provenance areas are mainly composed of Proterozoic metamorphic rocks, Paleozoic magmatic rocks and Permian sedimentary rocks. The Jurassic basin underwent a complete rifting cycle, which can be categorized into three evolution stages: the initial rifting stage, the intense rifting stage, and the rifting-depression transition stage. In the study area, three sedimentary facies were identified: fan delta, braided river delta and lacustrine facies. The southern steep slope zone mainly develops an alluvial fan-fan delta-lacustrine sedimentary system, while the northern gentle slope zone is mainly characterized by a braided river delta-lacustrine sedimentary system. The distribution of the Jurassic sedimentary system in the Fusha fault depression, located in the piedmont area of the southwestern Tarim Basin, exhibits vertical inheritance development, and is influenced by factors such as palaeogeomorphology, provenance supply, and basin rifting activities. Based on this research, it is proposed that the braided river delta sandbodies controlled by the southern tectonic transition zone during the sedimentary period of the Shalitashi Formation (initial rifting stage) represent favorable exploration targets within the region.

**Key words** provenance analysis, sedimentary facies, Fusha fault depression, Jurassic, Tarim Basin

**About the first author** LI Li, born in 1988, is an engineer. She specializes in oil and gas geology. E-mail: lili2-tlm@petrochina.com.cn.

**About the corresponding author** ZHU Shifa, born in 1982, is a Ph.D. supervisor and professor. He is mainly engaged in teaching and researches on reservoir geology and sedimentology. E-mail: zhushifa\_zsf@163.com.

塔里木盆地西南山前地区（简称：塔西南山前地区）地域辽阔，地表油苗发育，具备良好的石油地质条件，其中山前冲断带是当前油气勘探的重要区域（刘楼军和袁文贤，2002）。塔西南山前地区油气资源丰富，第4次油气资源评价结果显示该地区天然气资源量约  $1900 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，石油资源量约  $4 \times 10^8 \text{ t}$ ，已发现柯克亚凝析油气藏（新近系西河甫组）、柯东1凝析气藏（白垩系）、甫沙8油藏（侏罗系）等（图1-A）（何登发和李洪辉，1998；金之钧和吕修祥，2000；王招明等，2005；王清华等，2023）。然而，探明储量与预测资源量并不匹配，地震资料品质差、非构造圈闭识别难度大、基础研究薄弱等因素仍然制约着该地区油气勘探进程（刘楼军和袁文贤，2002；计红，2012）。

2021年，在塔西南山前地区甫沙8井下侏罗统莎里塔什组砂岩中发现油气显示，日产油  $20.6 \text{ m}^3$ （王清华等，2023），展现出良好的勘探前景，也标志着一个全新勘探层系的发现。

前人对于塔西南山前侏罗系的研究大多集中在阿克陶地区和喀什北缘的沉积相类型（李文厚，1998；张春生等，2000；孙铭赫，2013）、古环境（钟大康等，2002，2003）以及侏罗纪原型盆地（夏惠平等，2002；秦都，2005；曾昌民等，2007）等方面，对于甫沙断陷侏罗系的研究却仍是空白。甫沙8井勘探获得突破之后，侏罗系的物源研究引起石油地质工作者的关注，但目前对于侏罗系砂体物源方向、砂体成因及其展布特征的认识仍存在不足，使得油气勘探工作陷入瓶颈。

本研究以塔西南山前甫沙断陷侏罗系为研究对象，在充分利用钻井、分析化验资料基础之上，结合地震资料，通过古流向、重矿物组合、岩屑、石英阴极发光特征以及源区构造背景分析，开展侏罗系物源体系的研究工作，明确沉积相类型及沉积体系展布特征。研究成果对断陷湖盆演化以及砂体展布规律具有一定的理论和现实意义，同时也为甫沙断陷下一步油气勘探工作提供沉积地质依据。

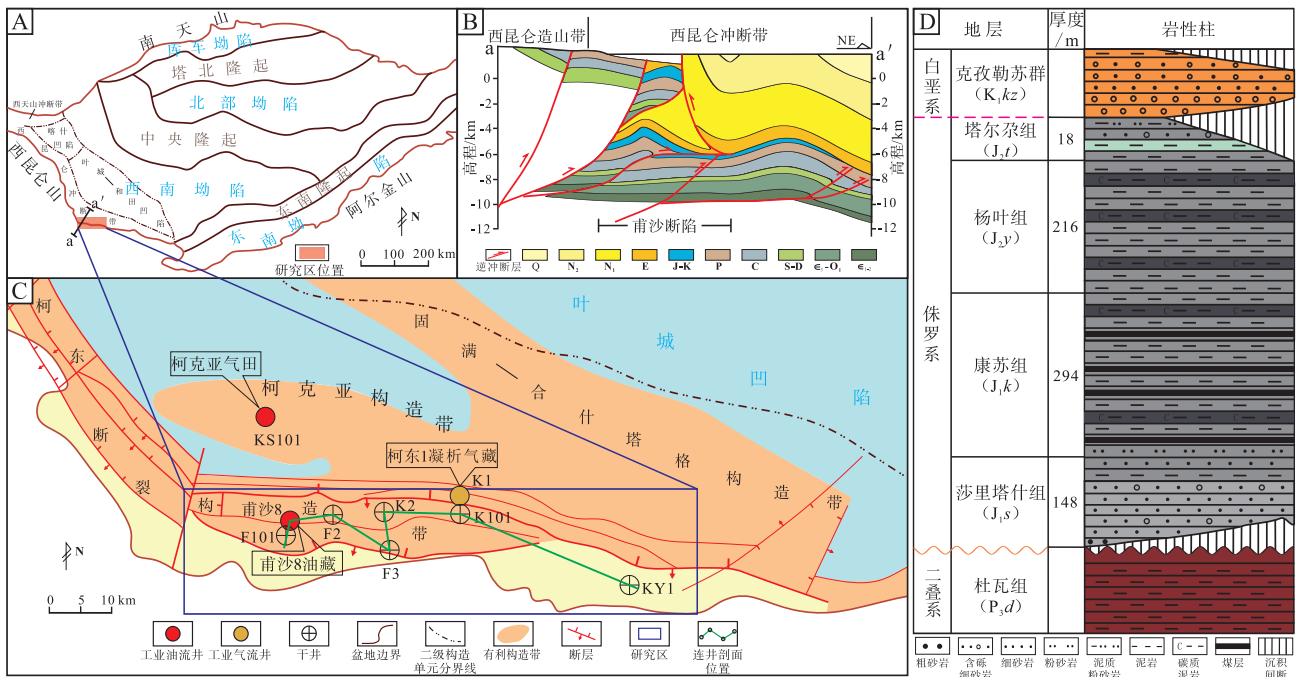
### 1 区域地质概况

塔西南山前地区位于塔里木盆地西南缘，包括西昆仑冲断带、西天山冲断带、喀什凹陷、叶城—和田凹陷(图 1-A)(王清华等, 2023)。研究区位于西昆仑冲断带东段的柯东断裂构造带，南邻西昆仑山造山带，北接柯克亚构造带，面积为 1320 km<sup>2</sup>，走向为近东西向(图 1-B, 1-C)(孙迪等, 2024)。甫沙断陷为研究区侏罗系的原型沉积盆地，其性质为“南断北超”的箕状断陷(陈延贵等, 2018; 吴鸿翔, 2018)。

前震旦纪，塔里木板块被视为一个统一的陆块。震旦纪，板块南缘发生破裂形成原特提斯洋

(潘裕生, 1990; Wang *et al.*, 2020)，塔西南山前地区由古陆演变为水下低隆起，广泛发育海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积(吴世敏等, 1996; 孙铭赫, 2013)。早古生代，受原特提斯消亡的影响，研究区由被动大陆边缘转变为活动大陆边缘(孙铭赫, 2013)。晚古生代，随着古特提斯洋的形成和消亡，研究区又经历了由被动大陆边缘向活动大陆边缘的转变，沉积环境也发生了由陆相到海相再到陆相的演化(陈汉林等, 2006; Chang *et al.*, 2024)。

三叠纪末期的甜水海—羌塘板块与塔里木板块碰撞对塔西南山前地区的侏罗纪沉积产生了重大影响，造成侏罗系不整合于元古界—古生界之上。同时，西昆仑山造山带的走向也发生了变化，由原来的东西向转变为现今的北西—南东向(杨克明, 1994; Xiao *et al.*, 2002; Cao *et al.*, 2015)。早侏罗世，受特提斯造山带后伸展作用的影响，塔里木盆地南缘应力环境由挤压转向拉张，发育一系列独立分割的小断陷(廖林等, 2010; 程晓敢等, 2019)。塔西南山前在沉积响应上呈山前快速堆积充填、地层向塔里木盆地内部超覆的现象，表明控陷断层多位于山前地区。中侏罗世该地区逐渐向深水沉积过渡，显示出箕状断陷盆地的典型沉积特征



A—塔里木盆地构造单元划分; B—北东—南西方向地层格架剖面图; C—研究区位置图; D—甫沙 8 井侏罗系柱状图

图 1 塔西南山前地区甫沙断陷区域地质概况及地层发育特征 (据陈汉林等, 2018; 王清华等, 2023; 有修改)

Fig. 1 Regional geological outline and stratigraphic development characteristics of the Fusha fault depression in the piedmont area of southwestern Tarim Basin (modified from Chen *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2023)

(张春生等, 2000; 吴鸿翔, 2018)。

甫沙断陷侏罗系发育下侏罗统莎里塔什组 ( $J_1s$ )、康苏组 ( $J_1k$ ) 和中侏罗统杨叶组 ( $J_2y$ )、塔尔尕组 ( $J_2t$ )，上侏罗统库孜贡苏组 ( $J_3k$ ) 整体缺失(图 1-D)。莎里塔什组以细砂岩、含砾细砂岩及粗砂岩为主，与下伏二叠系杜瓦组深褐色泥岩呈角度不整合接触；康苏组主要发育泥岩、碳质泥岩夹薄层煤层，构成了塔西南山前地区中生代首次煤系沉积，而湖盆边缘靠近物源区局部发育细砾岩、含砾粗砂岩和粗砂岩；杨叶组沉积了厚层泥岩和碳质泥岩，为优质烃源岩发育层系；塔尔尕组主要为灰色和褐色泥岩，与上覆白垩系褐灰色含砾细砂岩平行不整合接触。

## 2 样品与测试方法

研究样品采自于塔西南山前地区柯东构造带的甫沙 8 井、F101 井、F2 井、F3 井、K2 井、K101 井和 KY1 井的砂岩，其中测试样品累计 171 件，取样层位包括了侏罗系每一个组。本研究对砂岩样品分别进行岩石薄片鉴定、重矿物分析测试和阴极发光薄片分析。

依据砂岩薄片鉴定方法 (SY/T 5368-2016)，采用偏光显微镜对 87 张岩石薄片进行砂岩碎屑组分分析和沉积结构观察，每张薄片统计的碎屑颗粒均在 70~100 颗之间，其中薄片制作和鉴定工作在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成。根据重矿物分离方法(Q/HXJ 1033.1-93)和重矿物鉴定方法(Q/HXJ 1033.2-93)对 123 件砂岩样品进行重矿物分离与鉴定，此工作在北京木石天成科技有限公司完成。阴极发光薄片制作和分析依据岩石矿物阴极发光鉴定方法(SY/T 5916-2013)，应用美国 RELIOTRON 公司的阴极发光 (CL) 仪器对 9 件砂岩样品进行测试，其中测试工作在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成。

## 3 物源分析

### 3.1 周缘古陆特征

前人研究表明，研究区南部北昆仑地体存在大量元古界变质岩，岩性主要为片岩、片麻岩和大理岩 (Zhu *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2024)；早古生代

西昆仑山发生多次造山运动，有大量花岗岩形成 (隋清霖, 2021)。研究区北部在三叠纪末强烈的造山活动下于山前形成多排冲断带，在垂直于西昆仑山造山带方向形成背斜和向斜构造 (吴鸿翔, 2018)，其中背斜核部主要出露二叠系杜瓦组和普司格组沉积岩，暴露地表遭受风化剥蚀后可为沉积盆地提供物源。

### 3.2 物源方向

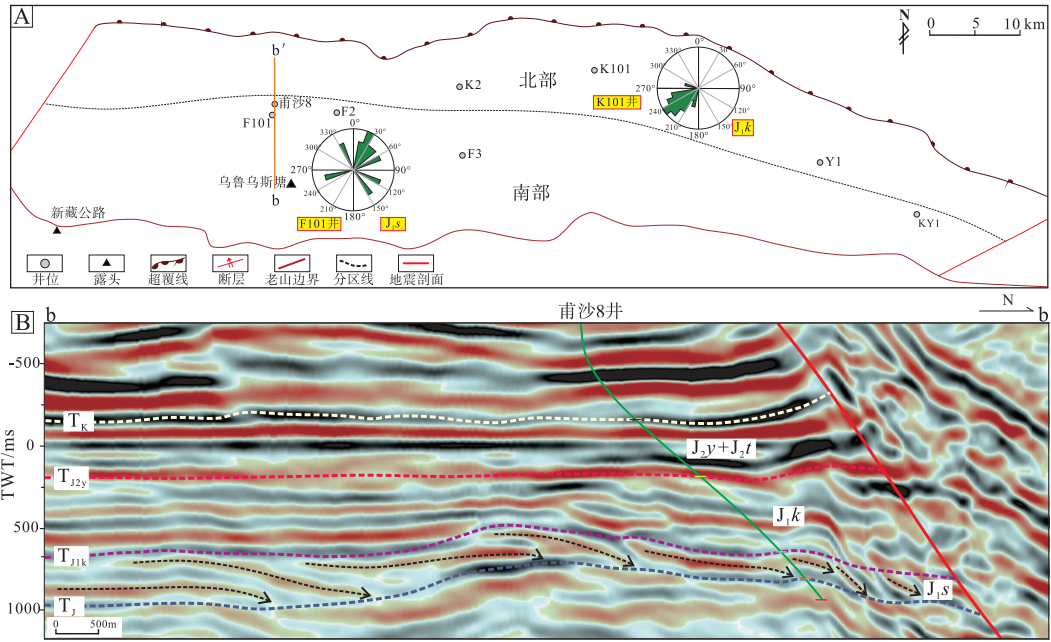
#### 3.2.1 古流向特征

古流向分析是确定物源方向的重要方法之一 (Martini *et al.*, 2016; 徐杰和姜在兴, 2019)。本研究采用 Techlog 软件对厚层砂岩成像测井资料进行构造倾角矫正，根据砂岩的沉积纹层确定古水流方向。由图 2-A 可知，K101 井康苏组的古水流方向为南西，F101 井莎里塔什组古水流方向为北北东。另外，过甫沙 8 井莎里塔什组南北向地震剖面 (图 2-B) 的前积反射特征指示古水流方向为由南向北。综上分析，研究区侏罗系存在南部和北部两大物源体系。

#### 3.2.2 重矿物组合特征

重矿物分析法主要是通过沉积岩中的重矿物组合和化学成分来判断物源方向和搬运距离 (赵红格和刘池洋, 2003; 徐亚军等, 2007; 赵红格等, 2012)。重矿物组合通常采用重矿物比值和重矿物之和 (即特征指数) 来反映物源特征 (Morton and Hallsworth, 1994; 徐杰和姜在兴, 2019)。笔者主要选择了莎里塔什组、康苏组和杨叶组粒度较粗的砂岩样品进行重矿物分析测试，在剔除了一些不稳定的重矿物和次生重矿物后，选定锆石、电气石、白钛石、石榴石和磷灰石进行物源分析 (朱筱敏, 2020)。

整体上来看，甫沙断陷重矿物主要由白钛石、锆石和电气石组成，三者平均含量分别为 60.6%、28.0%、7.5%，多数样品白钛石含量高于锆石 (图 3)，反映母岩类型可能为酸性岩浆岩 (如花岗岩等) (朱世发等, 2021)。南部地区，甫沙 8 井和 F101 井的重矿物组合特征和 ZTR 指数相似，推测为南部同源同水系供源，而 F2 井白钛石含量高 (72.3%)，可能为同源不同水系供源。F3 井样品中白钛石含量高 (85.4%)、锆石含量相对较低 (1.9%)、ZTR 指数低 (15.2%)，与之相反，KY1



A—古水流玫瑰图；B—甫沙 8 井侏罗系近南北向地震剖面（层拉平杨叶组最大湖泛面，平面位置见图 2-A）

图 2 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系古流向及甫沙断陷甫沙 8 井侏罗系近南北向地震剖面

Fig. 2 Jurassic palaeocurrents and near north-south trending seismic section in Well Fusha 8, Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin

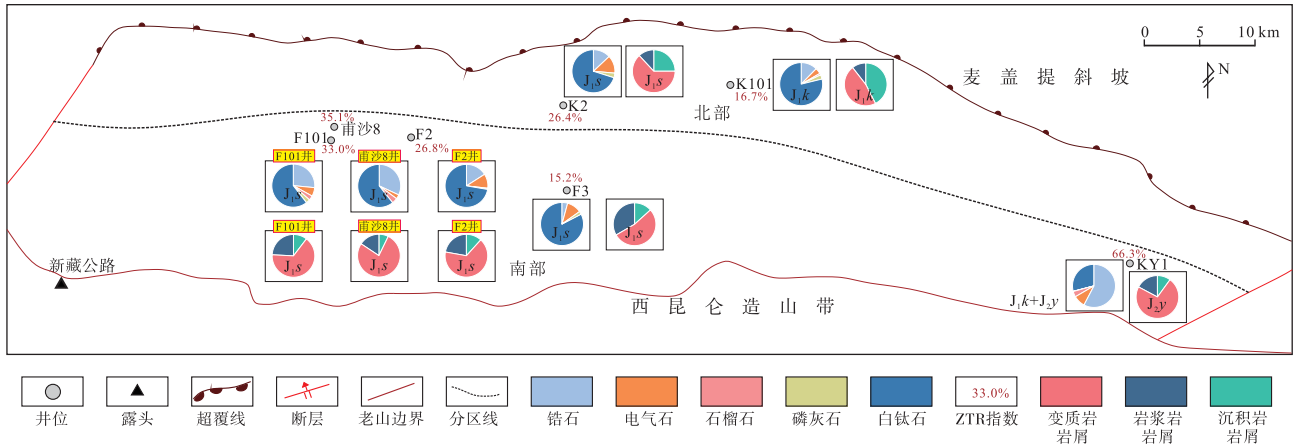


图 3 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系岩屑和重矿物组合平面分布

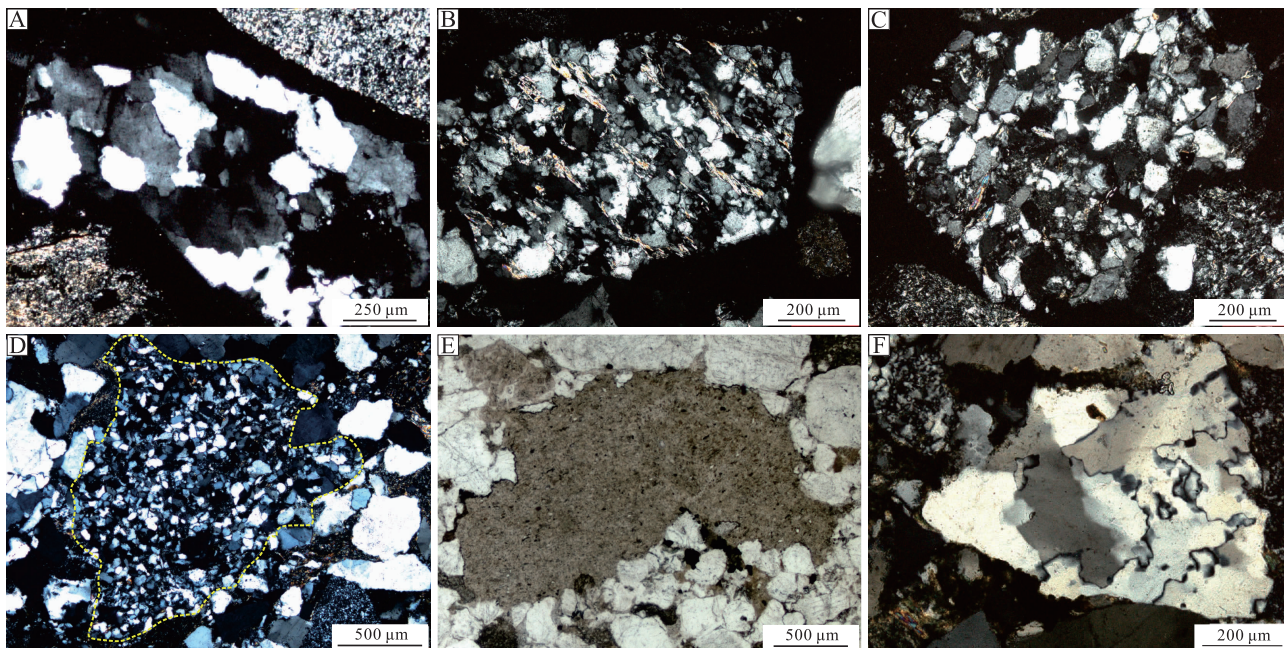
Fig. 3 Plane distribution map of the Jurassic rock debris and heavy minerals assemblage in Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin

井的锆石含量较高（57.4%）、白钛石的含量较低（28.9%）、ZTR 指数高（66.3%），表明 F3 井和 KY1 井分别为不同的水系供源。北部地区的 K101 井重矿物以白钛石和锆石为主，二者含量分别为 70.6% 和 19.4%，其中白钛石的含量明显高于南部地区，进一步体现了南北物源的差异，而 K2 井和 F2 井的重矿物组合具有一定的相似性，ZTR 指数分别为 26.4% 和 26.8%，认为其可能受南北物源的共同影响。

### 3.3 母岩类型

#### 3.3.1 岩屑特征

砂岩中的岩屑类型可直观反映母岩特征。本次研究选取了 7 口井的莎里塔什组、康苏组和部分杨叶组中厚层砂体的岩石薄片和岩屑薄片鉴定资料对母岩类型进行恢复(图 3)。统计数据表明，研究区的岩屑类型主要为变质岩(图 4-A, 4-B)，岩浆岩和沉积岩岩屑(图 4-C) 相对较少，三者平均含量



A—石英岩岩屑，甫沙 8 井，3956 m， $J_1s$ ，正交偏光；B—片麻岩岩屑，甫沙 8 井，3915 m， $J_1s$ ，正交偏光；C—粉砂岩岩屑，甫沙 8 井，3985 m， $J_1s$ ，正交偏光；D—粉砂岩岩屑，K101 井，4316.15 m， $J_1k$ ，正交偏光；E—泥岩岩屑，K101 井，4315.85 m， $J_1k$ ，单偏光；F—石英岩岩屑，K101 井，4316.55 m， $J_1k$ ，正交偏光

图 4 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系岩屑类型

Fig. 4 Types of the Jurassic rock debris from Fusha fault depression in piedmont area of southwestern Tarim Basin

分别为 54.1%、26.3%、19.6%。

南部甫沙 8 井区(包括甫沙 8 井、F101 井和 F2 井)的岩屑含量特征相似，可能属于同一物源体系；相比之下，F3 井含有更多的岩浆岩岩屑(21.2%)，沉积岩岩屑含量较少(17.9%)，表明 F3 井与甫沙 8 井区受控于不同的物源体系；而 KY1 井变质岩岩屑的含量为 72.6%，与前两者的物源体系均不相同(图 3)。与南部地区相比，北部地区沉积岩岩屑平均含量为 33.1%，普遍较高(图 4-D, 4-E)，变质岩岩屑平均含量为 48.3%，相对较低(图 4-F)，K101 井的沉积岩岩屑含量较 K2 井更高，故认为北部地区的 2 口井分别来自不同的物源区(图 3)。结合周缘古陆特征，认为研究区侏罗系母岩类型主要包括元古界变质岩、古生界岩浆岩和二叠系沉积岩，其中元古界变质岩为侏罗系提供了大量沉积物质，而古生界岩浆岩以及二叠系沉积岩提供的沉积物质较少。南部地区物源主要来自元古界变质岩和古生界岩浆岩，而北部地区主要为元古界变质岩和二叠系沉积岩供源。

### 3.3.2 石英阴极发光特征

在碎屑岩组成矿物中，石英具有很强的稳定

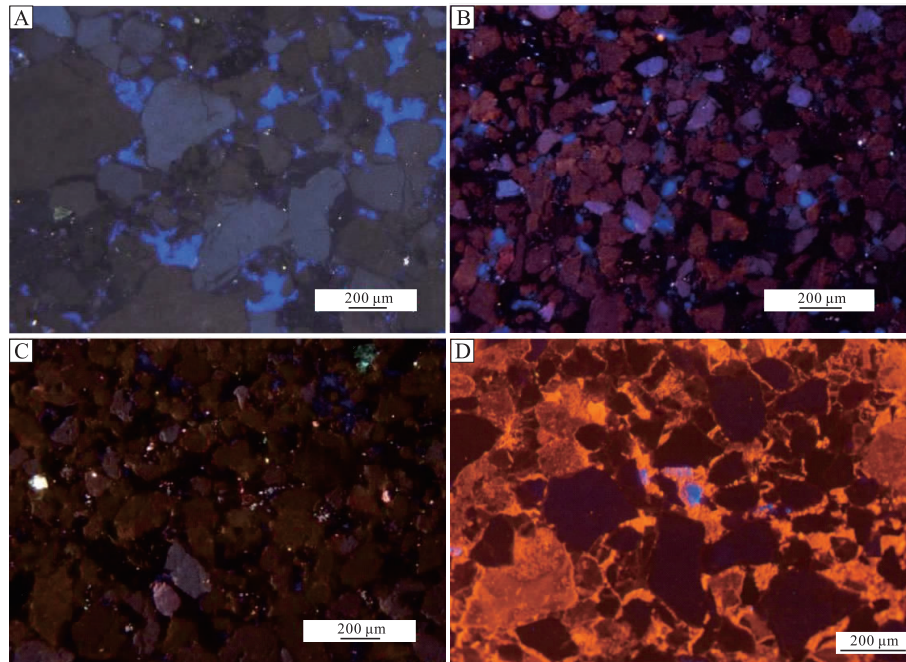
性，能够保留源岩的性质，因此石英的阴极发光被广泛应用于物源分析。在研究区砂岩样品的阴极发光中，石英主要以棕色和暗褐色为主，少量呈蓝紫色(图 5)，表明石英主要来源于变质岩和少量岩浆岩，进一步印证了母岩为变质岩和岩浆岩。

### 3.4 源区构造背景判别

利用投点计数法将研究区砂岩碎屑组分数数据进行 Dickinson 三角图投点(图 6)，分析不同地区构造背景特征及其差异。从 Qt-F-L 和 Qm-F-Lt 图解(图 6-A, 6-B)可以看出，研究区的样品点主要分布在再旋回造山带物源区内；在 Qp-Lv-Ls 图解(图 6-C)中，北部地区的大多数样品点分布在碰撞缝合线及褶皱—逆掩带物源区，而南部地区的样品点则主要位于混合造山带砂岩物源区。因此，研究区南部的物源区属于混合造山带，与西昆仑山造山带的构造背景一致；而北部主要由碰撞缝合线及褶皱—逆掩带物源区提供物源，与北部存在褶皱冲断带的构造背景相吻合。

### 3.5 物源分析讨论

通过对古流向、重矿物组合、岩屑、石英阴极



A—石英暗褐色为主，部分蓝紫色，K101井，康苏组，4315.85 m；B—石英棕褐色为主，部分蓝紫色，K2井，杨叶组，2271.95 m；  
C—石英棕褐色为主，K2井，杨叶组，2272.25 m；D—石英暗褐色为主，KY1井，康苏组，830 m

图 5 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系石英阴极发光特征

Fig. 5 Characteristics of the Jurassic quartz cathodoluminescence from Fusha fault depression in piedmont area of southwestern Tarim Basin

发光特征和源区构造背景综合分析，认为甫沙断陷侏罗系存在南、北两大物源体系。南部物源体系的甫沙 8 井、F101 井重矿物组合特征及含量相似，岩屑含量差异小，ZTR 指数普遍大于 30%，为远源水系供源；F3 井 ZTR 指数为 15.2%，为近源搬运堆积产物；KY1 井的 ZTR 指数为 66.3%，但其沉积物多为细砾岩，ZTR 指数受母岩影响较大。F2 井和 K2 井的重矿物组合特征和 ZTR 指数相似，但岩屑含量有所不同，推测 K2 井主要受北部物源的影响，而 F2 井为南部供源，其靠近湖盆中心，受湖浪的改造作用强；K101 井 ZTR 指数为 16.7%，岩屑中含有大量沉积岩岩屑，表明其距离物源区较近，主要受到北部斜坡区物源的影响。

#### 4 沉积相类型划分

通过对研究区测井、录井、取心井的岩心观察与描述、岩石薄片镜下观察以及沉积相标志分析，认为侏罗系主要发育 3 种沉积相，分别为辫状河三角洲相、扇三角洲相和湖泊相。

##### 4.1 辫状河三角洲相

辫状河三角洲相是沉积物在地势较低、坡度较

缓的地貌背景下进入稳定水体中形成的，通常发育在断陷湖盆的缓坡带。根据泥岩颜色以及煤层发育特征，研究区辫状河三角洲相可划分为辫状河三角洲平原和辫状河三角洲前缘 2 个亚相，前辫状河三角洲亚相因难以与湖相泥岩区分，故不单独进行划分。

辫状河三角洲平原亚相可划分为分流河道和分流河道间 2 个微相。取心井 K101 位于北部湖盆边缘地区，岩性粒度较粗，以灰色细砾岩、灰白色细砂岩、灰色泥岩和黑色煤层为主，其中分流河道底部冲刷面特征显著，发育递变层理砂砾岩(图 7-A, 7-B)，砾石直径介于 2~5 mm 之间，分选中等，次棱角一次圆状(图 7-C)，而分流河道间发育黑色煤层(图 7-D)。

辫状河三角洲前缘亚相可分为水下分流河道、支流间湾、河口坝等沉积微相。甫沙 8 井莎里塔什组具典型的辫状河三角洲前缘沉积特征，可进一步分为 3 段(图 8-A)：下段岩性主要为褐灰色粉砂岩和泥质粉砂岩，自然伽马测井曲线呈箱状，为前缘水下分流河道的沉积特征；中段发育灰黑色碳质泥岩、灰色细砂岩和含砾细砂岩，表现为下细上粗的反旋回，依漏斗形的测井曲线形态判断为前缘河口

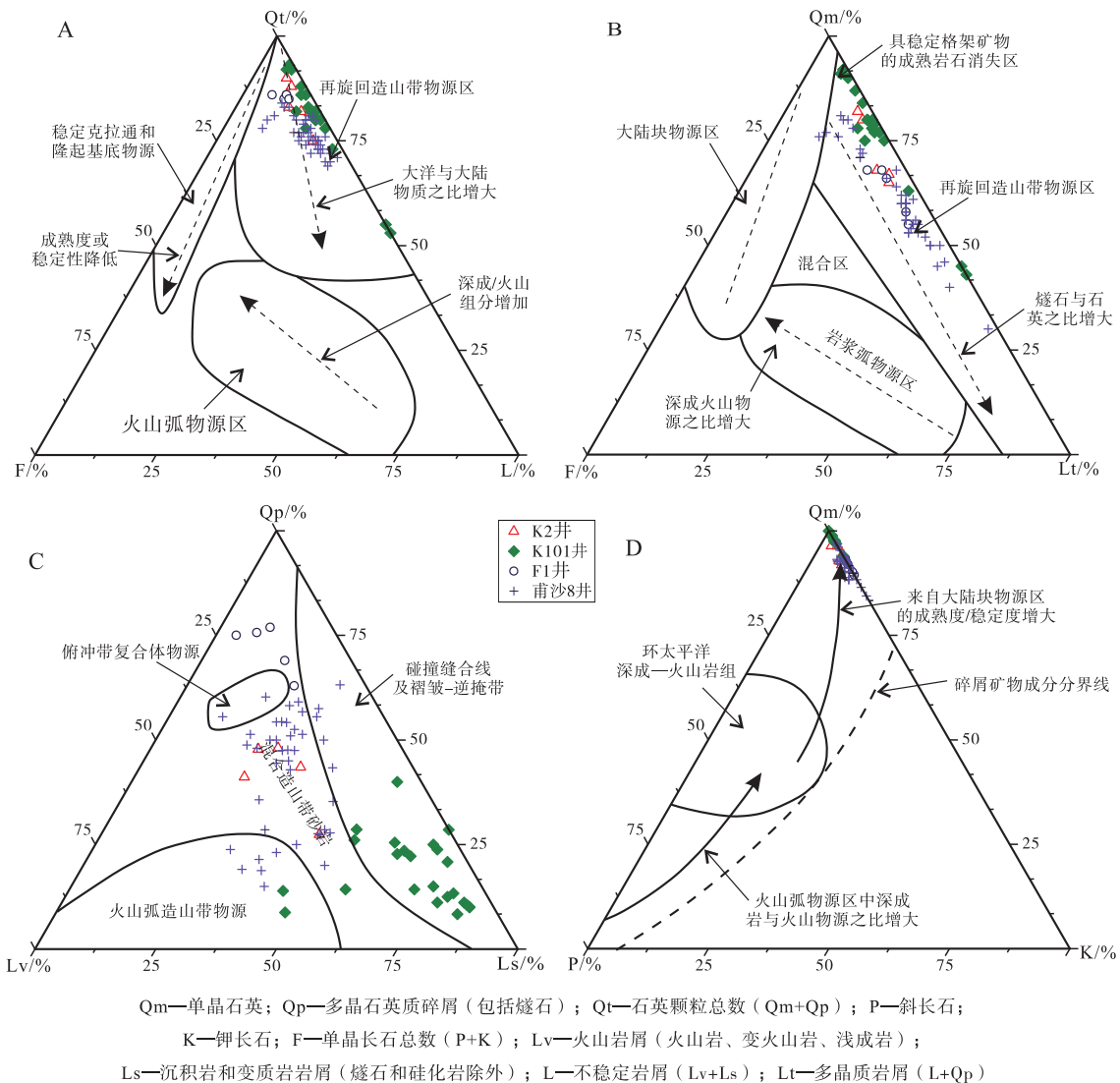


图 6 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系砂岩组物源判别三角形图解（底图据 Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson et al., 1983）  
 Fig.6 Provenance discrimination triangle diagram for the Jurassic sandstone component of the Fusha fault depression in southwestern Tarim Area (base map according to Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson et al., 1983)

坝沉积，而岩性以灰黑色碳质泥岩为主、自然伽马测井曲线呈微齿化平直形的沉积体为前缘支流间湾微相的典型特征；上段大套砂岩对应的自然伽马测井曲线箱状特征明显，表明泥质沉积物较少，为河道沉积特征，而灰黑色泥岩则指示水下沉积环境。莎里塔什组在地震剖面上可见明显的前积反射结构（图 2-B），同时镜下颗粒分选中等，次棱角状—次圆状（图 7-E），表明其结构成熟度高，为长距离搬运产物。

#### 4.2 扇三角洲相

扇三角洲相是冲积扇进入稳定水体中形成的，通常发育在断陷湖盆的陡坡带和同沉积断层发育

区。研究区仅在 F3 井莎里塔什组识别出扇三角洲前缘亚相，其可进一步识别出水下分流河道微相，岩性为灰色细砂岩，成分和结构成熟度较低、分选中等、次棱角状（图 7-F），测井曲线以箱状为主（图 8-B）。

#### 4.3 湖泊相

研究区湖泊相可划分为滨浅湖亚相和半深湖亚相。滨浅湖亚相进一步划分为滨浅湖泥、滨岸沼泽和滩坝微相。滨浅湖泥形成于物源供给能力弱环境中，沉积物主要为厚层灰色泥岩，自然伽马测井曲线呈现微齿化平直形（图 8-C）。当湖盆沉积水体较浅、气候较为湿润、植被较为发育时，可形成范



A—灰色细砾岩，递变层理，辫状河三角洲平原分流河道， $J_1k$ ，K101井，4315.95 m；B—灰色砂砾岩，见冲刷界面，辫状河三角洲平原分流河道， $J_1k$ ，K101井，4316.80 m；C—颗粒次棱角一次圆状，辫状河三角洲平原分流河道， $J_1k$ ，K101井，4315.85 m，单偏光；D—灰色含砾粗砂岩夹煤层，辫状河三角洲平原分流河道， $J_1k$ ，K101井，4316.3 m；E—颗粒分选中等，磨圆为次棱角一次圆状，辫状河三角洲前缘水下分流河道， $J_1s$ ，K1井，3985.00 m，正交偏光；F—颗粒分选差，磨圆为次棱角状，扇三角洲前缘水下分流河道， $J_1s$ ，F3井，5124.00 m，单偏光；G—灰黑色碳质泥岩，见植物叶片化石，滨岸沼泽， $J_1k$ ，F2井，5006.6 m；H—灰黑色碳质泥岩夹薄层粉砂岩，砂纹交错层理，滨浅湖泥， $J_1k$ ，F2井，5003.30 m；I—灰黑色碳质泥岩夹薄层粉砂岩，砂纹交错层理，滨浅湖泥， $J_1k$ ，F2井，5003.30 m

图 7 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系岩心和薄片典型照片

Fig. 7 Typical photos of the Jurassic cores and thin sections of Fusha fault depression in piedmont area of southwestern Tarim Basin

围较广的滨岸沼泽沉积，以灰色、灰黑色泥岩、碳质泥岩夹煤层为典型特征(图 7-G)。当物源供给较为充足、湖浪改造作用较强时，在滨浅湖地区可形成滩坝沉积，岩性主要为薄层粉砂岩和细砂岩，砂纹交错层理及过渡层理发育(图 7-H, 7-I)。半深湖泥岩主要呈灰黑色、黑色，煤层不发育，厚度较滨浅湖小。

## 5 沉积相展布及沉积模式

### 5.1 连井相分析

选取近东西向的 F101—甫沙 8—F2—F3—K2—

K101—KY1 井侏罗系连井沉积相对比剖面进行沉积体系纵向演化特征研究，连井剖面位置见图 1-C。从图 9 可以看出，侏罗系厚度存在明显差异，整体呈现出“西厚东薄”的特点。在 K101 井以西地区(西区)地层发育齐全，而以东地区(东区)缺失莎里塔什组，地层厚度仅为 186 m。总体来看，甫沙 8 井沉积厚度大，为侏罗系沉积中心。莎里塔什组地层厚度逐渐向东减薄，主要发育辫状河三角洲和扇三角洲沉积，三角洲前缘水下分流河道沉积非常发育，整体砂地比高，单层砂体厚度大。康苏组沉积时期，地层逐渐向东超覆，沉积体系由

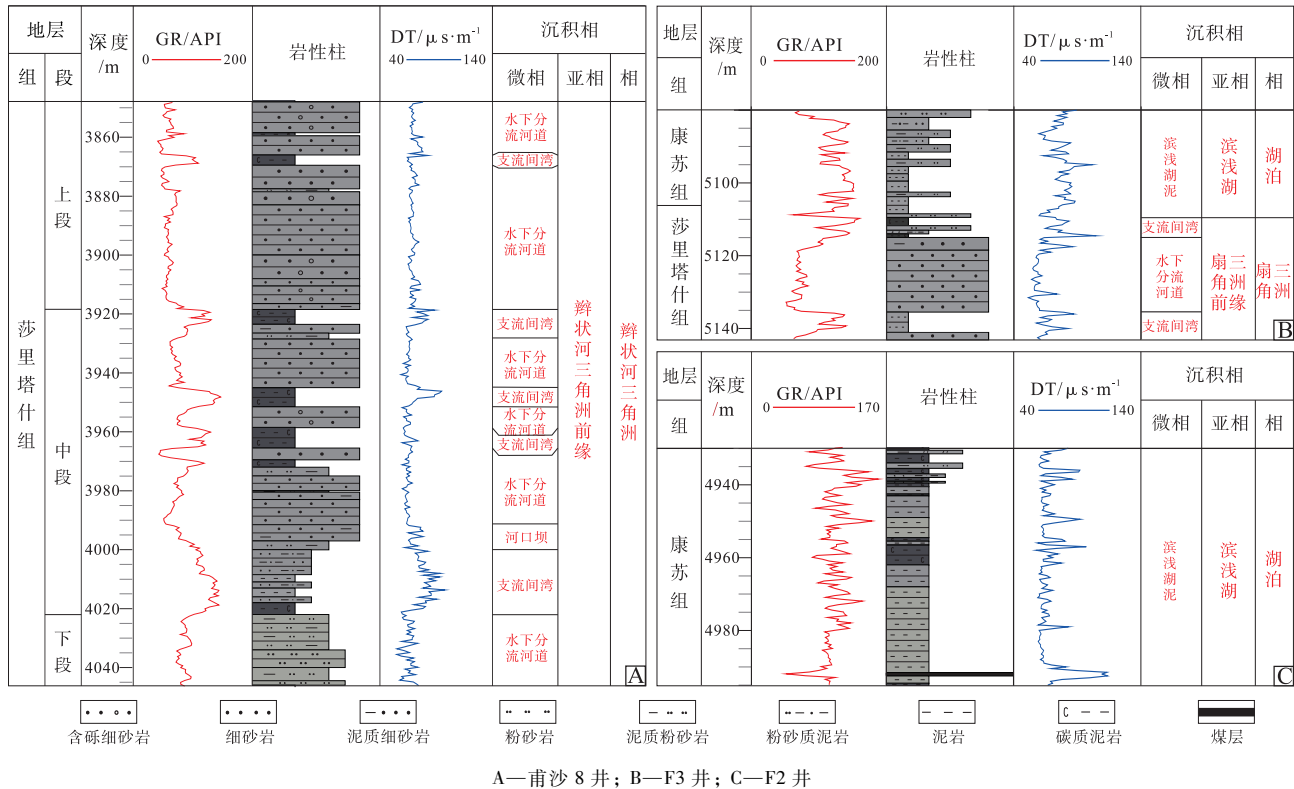


图 8 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系测井相特征

Fig. 8 Logging facies characteristics of the Jurassic of Fusha fault depression in piedmont area of southwestern Tarim Basin

三角洲向湖泊过渡，湖盆水体浅，植被较为发育，F101 井-甫沙 8 井-F3 井为滨岸沼泽沉积环境，而靠近西昆仑山前的 KY1 井则发育近源的冲积扇，K101 井主要发育北部供源的辫状河三角洲。杨叶组沉积时期，随着湖平面上升，研究区广泛发育灰色及灰黑色泥岩和碳质泥岩，主体沉积环境由滨浅湖过渡为半深湖，北部地区的 K2 井-K101 井仍保持滨浅湖的沉积特征。塔尔尕组沉积时期，湖平面下降，研究区主要发育灰色、褐色滨浅湖泥岩。

### 5.2 沉积相展布

在明确沉积相类型以及相标志的基础之上，结合区域地质背景、钻井资料，以单井—连井相分析为基础，利用三维地震区莎里塔什组均方根振幅属性对砂体边界进行刻画(图 10)。在此基础上，绘制塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系各组的沉积相平面图(图 11)，分析侏罗系沉积体系展布特征，明确沉积体系演化规律。

莎里塔什组沉积时期，湖盆面积小，水体总体处于低水位时期，西区裂陷活动强，地层沉积厚度大(图 11-A)。南部西昆仑山为盆地提供大量物

源，陡坡带沉积物搬运距离短、地形高差大，发育冲积扇—扇三角洲沉积体系，仅在甫沙 8 井区发育转换带控制的辫状河三角洲，并推进至湖盆中心形成大规模的三角洲前缘砂体。北部缓坡带物源供给相对较弱，辫状河三角洲零星发育。综合分析认为，莎里塔什组为初始裂陷期沉积。

康苏组沉积时期，湖盆范围逐渐扩大，裂陷活动逐渐向东延伸至 KY1 井附近，水体集中在陡坡带和深注带(图 11-B)，发育区内第 1 次湖相细粒碎屑岩—泥岩沉积。该时期南部西昆仑山仍然为主要的物源区，陡坡带沉积相继承了莎里塔什组的沉积格局，发育近源退积型冲积扇和扇三角洲，转换带控制的辫状河三角洲迅速萎缩。受气候影响，北部缓坡地区湖水波动频繁，广泛发育滨岸沼泽，形成了含煤碎屑岩建造。推测康苏组沉积时期研究区处于强烈断陷早期阶段。

杨叶组沉积时期，湖相沉积大面积分布。随着湖平面的持续上升，大部分地区进入湖进体系的沉积过程，发育区内第 2 次湖相细粒碎屑岩—泥岩沉积(图 11-C)。南部陡坡带延续康苏组沉积格局，扇体萎缩，而北部缓坡带的辫状河三角洲呈点状分



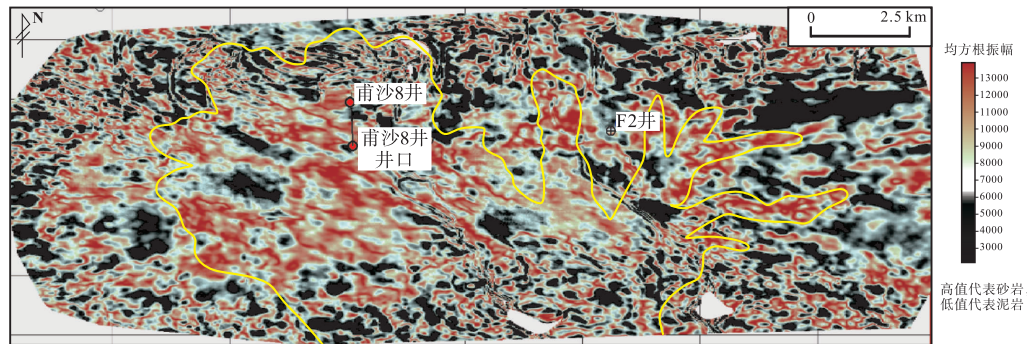


图 10 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系沙里塔什组均方根振幅属性

Fig. 10 Root-mean-square amplitude attribute map of the Jurassic Shalitashi Formation in Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin

布。该时期出现明显的湖侵过程，表明研究区处于强烈断陷发育晚期。

塔尔尕组沉积时期，裂陷活动趋于停止，沉积基准面下降，湖盆水体萎缩(图 11-D)。扇体规模有所扩大，湖泊相带分布范围减小，以滨浅湖杂色泥岩沉积为主，为断-拗转换期的沉积特征。

通过对沉积体系平面展布研究，认为甫沙断陷侏罗系沉积演化具有显著的规律性：初始断陷期，东区裂陷活动并未开始，湖盆范围小，沉积水体浅，发育进积型冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲沉积；随着构造活动持续增强，东段裂陷活动开始发育，湖盆范围不断扩大，沉积水体集中在陡坡带，发育退积型冲积扇-(扇/辫状河)三角洲沉积体系，在强烈断陷期湖盆范围达到最广；断-拗转换期，湖盆范围缩小，湖平面下降，发育进积型冲积扇-(扇/辫状河)三角洲沉积体系。这种纵向演化规律反映了一个完整的裂陷旋回演化。

### 5.3 沉积模式

基于上述物源特征和沉积体系的研究，建立了甫沙断陷重点勘探层系沙里塔什组的沉积模式(图 12)。研究区裂陷主控断裂呈东西向展布，盆地沉积体系的发育主要受南部物源的影响。地震和录井资料研究发现，沙里塔什组在西区逐渐向东超覆，直至减薄尖灭。沙里塔什组的下段、中段和上段分别对应沙里塔什组沉积初期、中期和后期(图 9)，其中沙里塔什组沉积初期地层仅分布在 F3 井及其以西地区，西区西部控陷断层最先活动，湖盆水体较浅，扇体规模较小；到沙里塔什组沉积中期，湖盆规模进一步扩张，地层逐渐向东超覆，水体加深，南部物源供给能力增强，扇体规模扩

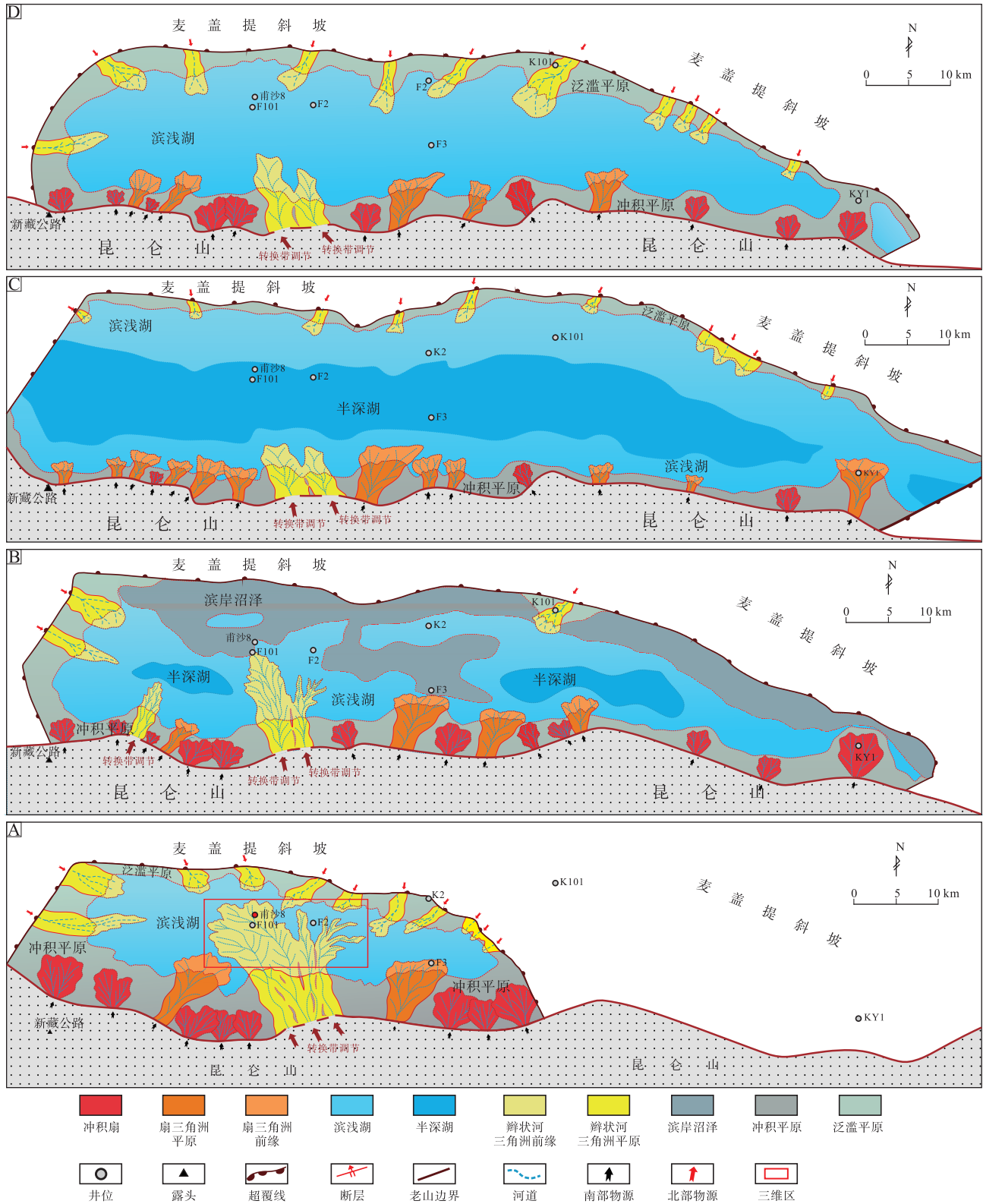
大；沙里塔什组沉积后期，湖盆范围继续向东延伸，扇体规模进一步扩大(图 12)。

### 5.4 沉积体系展布的控制因素

断陷湖盆的沉积充填以及砂体展布受控于物源供给、盆地的裂陷活动、气候变化等因素(朱筱敏等, 2022)。研究发现，甫沙断陷侏罗纪沉积体系展布主要受控于古地貌，即三叠纪末的造山运动对侏罗系的沉积影响很大，逆冲推覆作用在研究区形成了多排平行于造山带方向的古隆起，这些古隆起形成的洼凸相间的构造格局进一步限制了沙里塔什组的砂体展布和康苏组缓坡带滨岸沼泽的分布。受山前地震品质的影响，目前对于研究区侏罗纪古地貌的精细刻画仍然存在一定的难度，对有利砂体的预测较为困难。物源供给对沉积体系的影响尤为关键，表现为研究区存在南北两大物源体系，其中南部物源供给能力强，沉积物向湖盆中心延伸较远，为优质储集层的发育提供了物质基础，而北部远源扇体规模小且分布较为分散，难以形成有效的勘探砂体。此外，湖盆面积、沉积体系类型及其展布还受构造活动的控制，由初始断陷期到断-拗转换期，裂陷活动经历了由弱到强再到弱，湖盆沉积范围也随之变化；由于断层活动的差异性，南部陡坡带控陷断层连接处形成的构造转换带为辫状河三角洲的发育提供了优势沉积物搬运通道。

## 6 结论

在系统分析塔里木盆地西南山前甫沙断陷侏罗系物源特征的基础之上，明确了沉积相类型及其展布规律。



A—沙里塔什组；B—康苏组；C—杨叶组；D—塔尔尔组

图 11 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系沉积相平面分布

Fig. 11 Plane distribution of the Jurassic sedimentary facies of Fusha fault depression in piedmont area of southwestern Tarim Basin



1) 对古流向、重矿物组合、岩屑、阴极发光特征和源区构造背景分析表明,塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系以南部西昆仑山供源为主,北部地区供源较弱;母岩主要为元古界变质岩、古生界岩浆岩和二叠系沉积岩,其中南部物源主要为元古界变质岩和古生界岩浆岩,而北部地区多为元古界变质岩和二叠系沉积岩供源。

2) 岩心、钻井、测井等资料综合研究表明,甫沙断陷侏罗系主要发育扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊 3 种沉积相类型,沉积相展布具有继承性发育的特征;侏罗纪经历了一个完整的裂陷旋回,可分为初始断陷期、强烈断陷期和断-拗转换期 3 个演化阶段。南部陡坡带主要发育冲积扇—扇三角洲—湖泊沉积体系,北部缓坡带主要发育辫状河三角洲—湖泊沉积体系。总体上来看,有利砂体集中发育在初始断陷期。

3) 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系沉积体系展布受控于古地貌、物源供给、盆地的裂陷活动等因素。

### 参考文献 (References)

- 陈汉林,杨树锋,王清华,罗俊成,贾承造,魏国齐,厉子龙,何光玉,胡安平. 2006. 塔里木板块早—中二叠世玄武岩岩浆作用的沉积响应. 中国地质,33(3): 545-552. [Chen H L, Yang S F, Wang Q H, Luo J C, Jia C Z, Wei G Q, Li Z L, He G Y, Hu A P. 2006. Sedimentary response to the Early-Mid Permian basaltic magmatism in the Tarim plate. *Geology in China*, 33(3): 545-552]
- 陈汉林,李康,李勇,吴鸿翔,程晓敢,曾昌民,师骏,张欲清. 2018. 西昆仑山前冲断带的分段变形特征及控制因素. 岩石学报,34(7): 1933-1942. [Chen H L, Li K, Li Y, Wu H X, Cheng X G, Zeng C M, Shi J, Zhang Y Q. 2018. The segmentation deformation of the thrust belt in front of Western Kunlun, western China, and its controlling factors. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1933-1942]
- 陈延贵,吴鸿翔,张亮,程晓敢,陈才,张欲清,任凭,章凤奇,陈汉林. 2018. 西昆仑山前晚三叠世古构造特征及对侏罗—白垩纪沉积的控制. 地质科学,53(4): 1405-1418. [Chen Y G, Wu H X, Zhang L, Cheng X G, Chen C, Zhang Y Q, Ren P, Zhang F Q, Chen H L. 2018. Characteristics of the Late Triassic paleo-structure in the mountain front region of western Kunlun and its control of Jurassic-Cretaceous deposition. *Chinese Journal of Geology*, 53(4): 1405-1418]
- 程晓敢,吴鸿翔,李勇,陈汉林,章凤奇,师骏. 2019. 西昆仑山前印支运动期构造对后期构造和沉积的影响. 新疆石油地质,40(1): 27-33. [Cheng X G, Wu H X, Li Y, Chen H L, Zhang F Q, Shi J. 2019. Influences of Indosinian structures on later structural deformation and sedimentation in piedmont of western Kunlun Mountains. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(1): 27-33]
- 何登发,李洪辉. 1998. 塔西南拗陷油气勘探历程与对策. 勘探家,3(1): 37-42, 7. [He D F, Li H H. 1998. History and counter measures of petroleum exploration in Tarim Southwest Depression. *Petroleum Explorationist*, 3(1): 37-42, 7]
- 计红. 2012. 塔西南昆仑山前中生界石油地质综合研究. 西安石油大学硕士学位论文. [Ji H. 2012. Comprehensive petroleum geology study of Mesozoic formations in the front area of Kunlun Mountain, southwestern Tarim. Masteral dissertation of Xi'an Shiyou University]
- 金之钧,吕修祥. 2000. 塔西南前陆盆地油气资源与勘探对策. 石油与天然气地质,21(2): 110-113, 117. [Jin Z J, Lü X X. 2000. Hydrocarbon resources and exploration strategy of foreland basins in southwest Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 21(2): 110-113, 117]
- 李文厚. 1998. 塔西南拗陷侏罗系的扇三角洲沉积. 沉积学报,16(2): 150-154. [Li W H. 1998. Fan delta deposits in Jurassic in the depression of the SW Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 150-154]
- 廖林,程晓敢,王步清,陈汉林,罗俊成,师骏. 2010. 塔里木盆地西南缘中生代沉积古环境恢复. 地质学报,84(8): 1195-1207. [Liao L, Cheng X G, Wang B Q, Chen H L, Luo J C, Shi J. 2010. Reconstruction of Mesozoic sedimentary paleoenvironment in the southwestern Tarim Basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1195-1207]
- 刘楼军,袁文贤. 2002. 塔里木盆地西南地区油气勘探回顾与展望. 新疆地质,20(S1): 1-5. [Liu L J, Yuan W X. 2002. Retrospect and prospect of oil-gas exploration in southwestern Tarim Basin. *Xinjiang Geology*, 20(S1): 1-5]
- 潘裕生. 1990. 西昆仑山构造特征与演化. 地质科学,25(3): 224-232. [Pan Y S. 1990. Tectonic features and evolution of the Western Kunlun Mountain region. *Chinese Journal of Geology*, 25(3): 224-232]
- 秦都. 2005. 塔里木盆地西南地区侏罗纪原型盆地类型与特征. 石油与天然气地质,26(6): 831-839. [Qin D. 2005. Types and characteristics of Jurassic prototype basins in southwestern Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(6): 831-839]
- 隋清霖. 2021. 西昆仑岩体成因及其对原—古特提斯洋演化的指示. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文. [Sui Q L. 2021. Genesis of magmatic rocks in Western Kunlun Orogenic Belt and implications on the evolution of Proto-PalaeoTethys Ocean. Doctoral dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences]
- 孙迪,张立强,黎立,贾彤,屈洋,陈才. 2024. 塔西南拗陷东构造带白垩系沉积古环境及沉积特征研究. 中国科技论文,19(7): 741-751. [Sun D, Zhang L Q, Li L, Jia T, Qu Y, Chen C. 2024. Study on Cretaceous sedimentary paleoenvironment and sedimentary characteristics of Kedong tectonic belt in southwestern depression of Tarim Basin. *China Sciencepaper*, 19(7): 741-751]
- 孙铭赫. 2013. 塔西南侏罗系中下统层序地层格架与沉积体系研究. 新疆大学硕士学位论文. [Sun M H. 2013. The study on sequence stratigraphy and sedimentary system of Mid-Lower Jurassic in southwestern Tarim. Masteral dissertation of Xinjiang University]
- 王清华,杨海军,李勇,蔡振忠,杨宪彰,徐振平,陈才,孙春燕. 2023. 塔西南山前地区恰探 1 井石炭系—二叠系重大突破与勘探前景. 中国石油勘探,28(4): 34-45. [Wang Q H, Yang H J, Li Y, Cai Z Z, Yang X Z, Xu Z P, Chen C, Sun C Y. 2023. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(4): 34-45]
- 王招明,赵孟军,张水昌,宋岩,肖中尧,王清华,秦胜飞. 2005. 塔里木盆地西部阿克莫木气田形成初探. 地质科学,40(2): 237-247. [Wang Z M, Zhao M J, Zhang S C, Song Y, Xiao Z Y, Wang Q H, Qin S F. 2005. A preliminary study on formation of Akemo Gas Field in the Kashi sag, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*,

- 40(2): 237-247]
- 吴鸿翔. 2018. 塔西南山前古构造—古地貌特征及对侏罗—白垩系沉积的控制. 浙江大学硕士学位论文. [Wu H X. 2018. Characteristics of paleostructure in the mountain front region of southwestern Tarim Basin and its control of Jurassic-Cretaceous deposition. Masteral dissertation of Zhejiang University]
- 吴世敏, 马瑞士, 卢华复, 施央申, 贾承造, 汪新. 1996. 西昆仑早古生代构造演化及其对塔西南盆地的影响. 南京大学学报(自然科学版), 32(4): 104-111. [Wu S M, Ma R S, Lu H F, Shi Y S, Jia C Z, Wang X. 1996. The Western Kunlun Paleozoic tectonic evolution and its effect on SW Tarim Basin. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 32(4): 104-111]
- 夏惠平, 刘增仁, 袁文贤. 2002. 齐姆根—桑株河地区侏罗纪沉积盆地及沉积相. 新疆地质, 20(S1): 67-71. [Xia H P, Liu Z R, Yuan W X. 2002. Sedimentary Basin and facies of the Jurassic in Qimugen-Sangzhu area. Xinjiang Geology, 20(S1): 67-71]
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379-396. [Xu J, Jiang Z X. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(3): 379-396]
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 2007. 沉积物物源分析研究进展. 地质科技情报, 26(3): 26-32. [Xu Y J, Du Y S, Yang J H. 2007. Prospects of sediment provenance analysis. Geological Science and Technology Information, 26(3): 26-32]
- 杨克明. 1994. 论西昆仑大陆边缘构造演化及塔里木西南盆地类型. 地质论评, 40(1): 9-18. [Yang K M. 1994. The formation and evolution of the Western Kunlun continental margin. Geological Review, 40(1): 9-18]
- 曾昌民, 马德民, 冯晓军, 敬兵, 张春莲, 玛丽克, 李勇. 2007. 喀什坳陷侏罗纪沉积环境及其对油气成藏的意义. 新疆石油地质, 28(3): 327-331. [Zeng C M, Ma D M, Feng X J, Jing B, Zhang C L, Ma L K, Li Y. 2007. Jurassic sedimentary environment and its significance for oil-gas accumulation in Kashi Depression, Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 28(3): 327-331]
- 张春生, 肖安成, 李景义, 施冬, 周延军. 2000. 塔西南坳陷侏罗系断陷盆地沉积特征. 矿物岩石, 20(3): 41-45. [Zhang C S, Xiao A C, Li J Y, Shi D, Zhou Y J. 2000. Depositional feature of Jurassic fault basin in Southwest Tarim Depression. Mineralogy and Petrology, 20(3): 41-45]
- 赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3): 409-415. [Zhao H G, Liu C Y. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. Acta Sedimentologica Sinica, 21(3): 409-415]
- 赵红格, 刘池洋, 王海然, 乔建新, 王建强, 冯晓博. 2012. 贺兰山北段晚三叠世沉积物源分析. 沉积学报, 30(4): 654-660. [Zhao H G, Liu C Y, Wang H R, Qiao J X, Wang J Q, Feng X B. 2012. Analysis of Late Triassic sedimentary provenance in the north of Helan Mountain. Acta Sedimentologica Sinica, 30(4): 654-660]
- 钟大康, 朱筱敏, 王贵文, 谢庆宾. 2002. 塔里木盆地喀什凹陷侏罗纪古环境. 古地理学报, 4(4): 47-54. [Zhong D K, Zhu X M, Wang G W, Xie Q B. 2002. Paleoenvironments of Jurassic of Kashi sag in Tarim Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 4(4): 47-54]
- 钟大康, 朱筱敏, 沈昭国, 陈景山, 周路. 2003. 塔里木盆地喀什凹陷侏罗系沉积特征及其演化. 地质科学, 38(3): 385-391. [Zhong D K, Zhu X M, Shen Z G, Chen J S, Zhou L. 2003. Sedimentation and evolution of the Jurassic in the Kashi Depression, Tarim Basin. Chinese Journal of Geology, 38(3): 385-391]
- 朱世发, 崔航, 陈嘉豪, 骆高俊, 王文禹, 杨祎, 施翌. 2021. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征: 以鄂尔多斯盆地西部地区山一—盒8段为例. 沉积学报, 39(1): 126-139. [Zhu S F, Cui H, Chen J H, Luo G J, Wang W Y, Yang Y, Shi Y. 2021. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow water delta: case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 126-139]
- 朱筱敏. 2020. 沉积岩石学(第五版). 北京: 石油工业出版社, 44-46. [Zhu X M. 2020. Sedimentary Petrology (The fifth edition). Beijing: Petroleum Industry Press, 44-46]
- 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 谈明轩, 刘强虎, 张自力, 张亚雄. 2022. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征. 石油与天然气地质, 43(4): 746-762. [Zhu X M, Chen H H, Ge J W, Tan M X, Liu Q H, Zhang Z L, Zhang Y X. 2022. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins. Oil & Gas Geology, 43(4): 746-762]
- Cao K, Wang G C, Bernet M, van der Beek P, Zhang K X. 2015. Exhumation history of the West Kunlun Mountains, northwestern Tibet: evidence for a long-lived, rejuvenated orogen. Earth and Planetary Science Letters, 432: 391-403.
- Chang J, Liu K Y, Yuan W F, Liu J L, Zhang L Q, Chen C. 2024. Tectono-sedimentary evolution of the southwestern Tarim Basin in the Cretaceous in response to basin-range coupling: new insights from basin and landscape dynamics modeling. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 637: 112017.
- Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone composition. AAPG Bulletin, 63(12): 2164-2182.
- Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, Erjavec J L, Ferguson R C, Inman K F, Knepp R A, Lindberg F A, Ryberg P T. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. Geological Society of America Bulletin, 94(2): 222-235.
- Luo H W, Xiong F H, Huang H, Yan D D, Zhang D L, Li F R, Hou M C. 2024. Provenance of Late Carboniferous-Triassic clastic rocks in the Western Kunlun Orogenic Belt, western China: implications for the tectonic evolution of the paleo-Tethys Ocean. Journal of Asian Earth Sciences, 267: 106162.
- Martini M, Ramírez-Calderón M, Solari L, Villanueva-Amadoz U, Zepeda-Martínez M, Ortega-Gutiérrez F, Elías-Herrera M. 2016. Provenance analysis of Jurassic sandstones from the Otlaltepec Basin, southern Mexico: implications for the reconstruction of Pangea breakup. Geosphere, 12(6): 1842-1864.
- Morton A C, Hallsworth C. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 90(3): 241-256.
- Wang P, Zhao G C, Han Y G, Liu Q, Yao J L, Yu S, Li J H. 2020. Timing of the final closure of the Proto-Tethys Ocean: constraints from provenance of early Paleozoic sedimentary rocks in West Kunlun, NW China. Gondwana Research, 84: 151-162.
- Xiao W J, Windley B F, Chen H L, Zhang G C, Li J L. 2002. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the Western Kunlun, China: implications for the collisional and accretory tectonics of the northern Tibetan Plateau. Geology, 30(4): 295-298.
- Zhu G Y, Liu W, Wu G H, Ma B S, Damian Nance R, Wang Z C, Xiao Y, Chen Z Y. 2021. Geochemistry and U-Pb-Hf detrital zircon geochronology of metamorphic rocks in terranes of the West Kunlun Orogen: protracted subduction in the northernmost proto-Tethys Ocean. Precambrian Research, 363: 106344.