

doi: 10.12029/gc20200720004

张超, 司庆红, 俞初安, 王善博, 程银行, 于航, 冯平, 石广顺, 奥琮, 李志丹, 高雪峰. 2023. 柴西北缘花土沟地区新近系狮子沟组沉积特征与砂岩型铀矿关系分析[J]. 中国地质, 50(5): 1327–1342.

Zhang Chao, Si Qinghong, Yu Reng'an, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, Yu Hang, Feng Ping, Shi Guangshun, Ao Cong, Li Zhidan, Gao Xuefeng. 2023. Analysis of the relationship between sedimentary characteristics and uranium deposits from the Neogene Shizigou Formation in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin[J]. Geology in China, 50(5): 1327–1342 (in Chinese with English abstract).

## 柴西北缘花土沟地区新近系狮子沟组沉积特征与砂岩型铀矿关系分析

张超<sup>1,2</sup>, 司庆红<sup>1,2</sup>, 俞初安<sup>1,2</sup>, 王善博<sup>1,2</sup>, 程银行<sup>1,2</sup>, 于航<sup>3</sup>, 冯平<sup>3</sup>,  
石广顺<sup>4</sup>, 奥琮<sup>1,2</sup>, 李志丹<sup>1,2</sup>, 高雪峰<sup>5</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 3. 四川省核工业地质局二八三大队, 四川 达州 635000; 4. 山东省建筑设计研究院有限公司, 山东 济南 250002; 5. 中国石油青海油田分公司, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:**【研究目的】柴西北缘花土沟地区发育典型砂岩型铀矿床, 铀储层为七个泉组、狮子沟组及油砂山组, 狮子沟组介于七个泉组与油砂山组之间, 正确认识狮子沟组沉积特征与砂岩型铀矿关系成为亟待解决的地质问题。【研究方法】本文基于柴达木盆地砂岩型铀矿找矿工作, 研究了狮子沟组沉积特征, 分析了狮子沟组地层层序格架、成因机制、物源特征与铀矿关系。【研究结果】跃进 2 号地区 ZK10 杂砂岩颜色为棕红色, 主体上为钙质泥砂岩, 属碳酸盐陆源碎屑杂砂岩, CIA=37.79~69.14, ICV=0.84~2.13,  $\Sigma=1.39\sim 2.14$ ,  $K_2O/Na_2O=0.90\sim 1.18$  (平均为 1.06), 说明杂砂岩中钾长石或钾矿物较多。224~240 m 处测得的 GR 为 0~30 API, RT 为 -5~45  $\Omega\cdot m$ , 测井相为箱型, 曲线的幅度较大。K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.22~0.27, Ni/Co=0.34~0.53。【结论】狮子沟组在该地区为河流相沉积环境, 其上段源岩物质为干燥寒冷的古气候环境下的首次沉积, 含有黏土物质较少。杂砂岩原岩形成于大陆岛弧环境, 其源岩为浅源的碱性长石数量较少的长英质岩石, 该组沉积环境非常有利于铀矿形成。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 沉积相系; 物源; 地球化学; 新近系; 矿产勘查工程; 柴西北缘

**创新点:** 通过研究发现, 研究区狮子沟组上段源岩物质为干燥寒冷的古气候环境下的首次沉积, 其源岩为浅源的碱性长石数量较少的长英质岩石。

中图分类号: P534 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1327-16

## Analysis of the relationship between sedimentary characteristics and uranium deposits from the Neogene Shizigou Formation in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin

ZHANG Chao<sup>1,2</sup>, SI Qinghong<sup>1,2</sup>, YU Reng'an<sup>1,2</sup>, WANG Shanbo<sup>1,2</sup>, CHENG Yinhang<sup>1,2</sup>, YU Hang<sup>3</sup>,

收稿日期: 2020-07-20; 改回日期: 2020-10-01

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190119)和国家重点研发计划项目(2018YFC0604200)联合资助。

作者简介: 张超, 男, 1987 年生, 硕士, 高级工程师, 从事沉积地球化学、矿床学研究及矿产地质调查工作; E-mail: 402709002@qq.com。

FENG Ping<sup>3</sup>, SHI Guangshun<sup>4</sup>, AO Cong<sup>1,2</sup>, LI Zhidan<sup>1,2</sup>, GAO Xuefeng<sup>5</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Uranium Geology of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. The Nuclear Industry Geological Survey 283 Brigade in Sichuan Province, Dazhou 635000, Sichuan, China; 4. Shandong Provincial Architecture Design and Research Institute, Jinan 250002, Shandong, China; 5. PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736200, Gansu, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** Typical sandstone type uranium deposits are developed in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin. The uranium reservoirs are Qigequan Formation, Shizigou Formation and Youshashan Formation, while Shizigou Formation is somewhere in between Qigequan Formation and Youshashan Formation. It is an urgent geological problem to correctly understand the relationship between sedimentary characteristics of Shizigou Formation and sandstone-type uranium deposits. **[Methods]** In this paper, the sedimentary characteristics of Shizigou Formation are studied based on the sandstone-type uranium deposit prospecting work in the Qaidam Basin, and we analyzed the stratigraphic sequence frame, cause mechanism, provenance characteristics and their relationship with uranium ore from Shizigou Formation. **[Results]** The colour of greywacke collected from ZK10 in Yuejin 2 area is brownish red, while the main body is calcareous argillaceous sandstone, which belongs to carbonate terrigenous clastic greywacke. Specific value of CIA=37.79–69.14, ICV=0.84–2.13,  $\Sigma=1.39-2.14$ ,  $K_2O/Na_2O=0.90-1.18$  (the average is 1.06), which indicated that there are relatively much more potassium feldspar or potassium minerals in the greywacke. The measuring result from a depth of 224 to 240 meter is GR=0–30 API, RT=-5–45  $\Omega \cdot m$ . The logging facies is box type, and the amplitude of the curve is large. The measuring result of greywacke is  $K_2O/Al_2O_3=0.22-0.27$ , Ni/Co=0.34–0.53. **[Conclusions]** The sediment environment of Shizigou Formation in Yuejin 2 area belongs to fluvial facies. The source rocks of the upper Shizigou Formation contain less clay material, and were deposited for the first time under the dry and cold paleoclimate environment. The source rock of greywacke in the Shizigou Formation were formed in the continental island arc environment, which the sedimentary source rock of the greywacke is the alkali feldspar with a small amount of felsic rocks. The sedimentary environment of the formation is very conducive for the formation of uranium deposits.

**Key words:** sandstone type uranium deposit; sedimentary facies; provenance; geochemistry; Neogene; mineral exploration engineering; Northwest Qaidam

**Highlights:** The study shows that the source rocks of the upper Shizigou Formation deposited for the first time under the dry and cold paleoclimate environment, which the ingredient is the felsic rocks with a small amount of alkali feldspar.

**About the first author:** ZHANG Chao, male, born in 1987, master, senior engineer, engaged in the study of sedimentary geochemistry, mineralogy and the geological survey of mineral resources; E-mail: 402709002@qq.com.

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190119) and National Key R&D Program of China (No.2018YFC0604200).

## 1 引 言

新生代地层在柴达木盆地内发育良好,连续且齐全的各级地层沉积序列得以完好保存。自新生代早期以来柴达木盆地由于地势原因发育成为一个内流汇水型盆地,周缘各期造山运动所剥蚀的各类陆源碎屑物质汇聚于此,而盆地内沉积层序特征及其各层序内部组成体系域特征是地壳沉降、湖盆水平面升降以及碎屑沉积物供给之间多种因素相互作用的产物,因此柴达木盆地的沉积地层层序可

以详细记录以往地质运动过程,提供盆地内部及周边造山带各种地形地貌构造演化,如隆升剥蚀过程等详细和完整的构造运动(Yin et al., 2002, 2007; Wang et al., 2006; 辛后田等, 2006; 惠博等, 2011; 王艳清等, 2012; 宋光永, 2020; 张超等, 2020)。前人对柴达木盆地板块归属、构造运动及沉积体系特征等方面做过很多研究,如方世虎等(2013)指出柴北缘在构造上缺乏主要滑脱层,在晚新生代强烈走滑与挤压等运动调整的控制下主要发育古老基底卷入式构造运动,形成独特的上、下构造层运动变形

较一致的“破碎型”地层构造体系;王桂宏等(2004)发现在喜马拉雅运动阶段晚期,柴西北缘英雄岭与其附近区域基底由于受近SN向的区域挤压构造作用而大幅隆升,导致英雄岭地区隆起,其南侧局部地区产生拉张构造环境,尕斯断陷湖盆也随之形成;吴因业等(2005)指出柴达木盆地的沉积层序特征由于受强烈构造活动和古气候变化等因素的影响,新近系属前陆期沉积,上新世狮子沟组沉积层序地层基本格架属新近系前陆盆地中前陆期Ⅲ级地层层序XV(SQ15)序列,发育属于盆地内湖退体系域(RST)中的沉积体系;隋立伟等(2014)认为从狮子沟组( $N_3^2$ )沉积时期开始,由于构造抬升作用强烈,沉积的地层发生剥蚀且剥蚀盖层厚度较大,构造带在该期断裂构造作用强烈。虽然前人已做过较多研究工作,但由于侧重的具体时期、区域、地层层位和研究方向不同,对该区域狮子沟组沉积相系勘查、物源特征及其与铀矿关系分析研究程度很低,狮子沟组源岩构造背景研究较为薄弱。

物源特征不仅影响铀矿储存沉积序列及铀运移路径,同时可控制含铀流体及赋铀砂体展布。本次研究中狮子沟组是指柴达木盆地西北部的一个区域,是研究柴北缘沉积特征及物源分析的重要窗口,本文通过对野外实测剖面和钻孔沉积相和精細层序地层学研究,包括对剖面编录、剖面岩性、测井岩心及室内薄片镜下鉴定等综合研究工作,对狮子沟组基本沉积特征描述、地层层序格架的构建和其成因机制解释等多个方面进行研究。在确立剖面、钻井基本层序地层特征的基础上,结合对跃进2号地区ZK10上新统狮子沟组杂砂岩的地球化学特征分析并运用主量元素及部分微量元素地球化学技术在沉积物物源分析中的应用,紧密结合区域乃至全盆地的地质构造背景开展深入的沉积地层层序研究,厘定高精度地层层序内部结构并探讨其时空展布规律,确定精确的沉积物源信息及源岩构造背景,最终确立研究区新生代狮子沟组沉积演化、物源特征及其与铀矿关系。

## 2 区域地质概况

柴达木盆地位于欧亚大陆腹地,青藏高原东北部核心部位,青海省西北部(图1a),南北宽约300 km,东西长约800 km,面积约26万 $km^2$ ,是一个巨大

的典型菱形山间盆地,其西北为阿尔金山脉,西南为昆仑山脉,东北为祁连山脉(袁剑英等,2006;付锁堂,2010)。盆地呈北西西—南东东方向展布,构造带大体呈北西向展布,为中国四大盆地之一。其大地构造位置处于古特提斯喜马拉雅构造带与古亚洲构造域的结合部位(陈世悦等,2000)。根据板块构造理论分析,其应属于塔里木—中朝板块,位于冈底斯板块、扬子板块、哈萨克斯坦板块、印度板块和西伯利亚板块之间。

柴达木盆地总体上呈现边缘高、中间低,西北高、东南低的特点,是青藏高原北东部在侏罗纪地块的基础上由于复杂构造运动发育起来的中新生代沉积盆地(戴俊生和曹代勇,2000;戴俊生等,2003;蒋荣宝等,2008),盆地内部发育较厚的新生代地层,而其中新生代地层在盆地边缘的山前斜坡地带出露较多,盆地中部主要覆盖第四系沉积地层。新生代地层自上而下发育有七个泉组( $Q_{1-2q}$ )、狮子沟组( $N_{3s}$ )、上油砂山组( $N_{3y}^2$ )、下油砂山组( $N_{3y}^1$ )、上干柴沟组( $N_{1g}$ )、下干柴沟组( $E_{3g}$ )及路乐河组( $E_{1-2l}$ )共7套地层(曹国强等,2005;郭泽清等,2005)。

研究区位于柴达木盆地西北缘(图1b),所属的盆地一级构造单元为柴西隆起;柴西隆起位于盆地西南部,基底为古生代浅变质岩系,具有相对柔性特征。西北界为阿尔金山,盆山之间深层以断裂接触,浅层为超覆接触;西南界为祁漫塔格山,盆山之间断褶带过渡,以断裂接触为主。二级构造单元主要是茫崖凹陷亚区狮子沟—油砂山构造带,构造带发育期主要为中新世,早期表现为次级小断块同沉积背斜构造,后期经压扭性构造强化,研究区位于油砂山Ⅱ号逆断层上盘,油砂山构造带油砂沟高点的西北部,加持于油砂山—干柴沟—油泉子一带与红柳泉断裂之间(图1c),狮子沟组岩石地层特征在该地区非常具有代表性,其上部为第四系七个泉组,下部为上油砂山组(图2)。

## 3 狮子沟组地层结构

本次工作,在花土沟狮子沟地区进行了狮子沟组( $N_{3s}$ )剖面测量,剖面总体方位为 $222^\circ$ ,剖面长1.25 km。四川核工业283地质大队测的狮子沟组在狮子沟地区总体厚度约994 m,从实测剖面图可



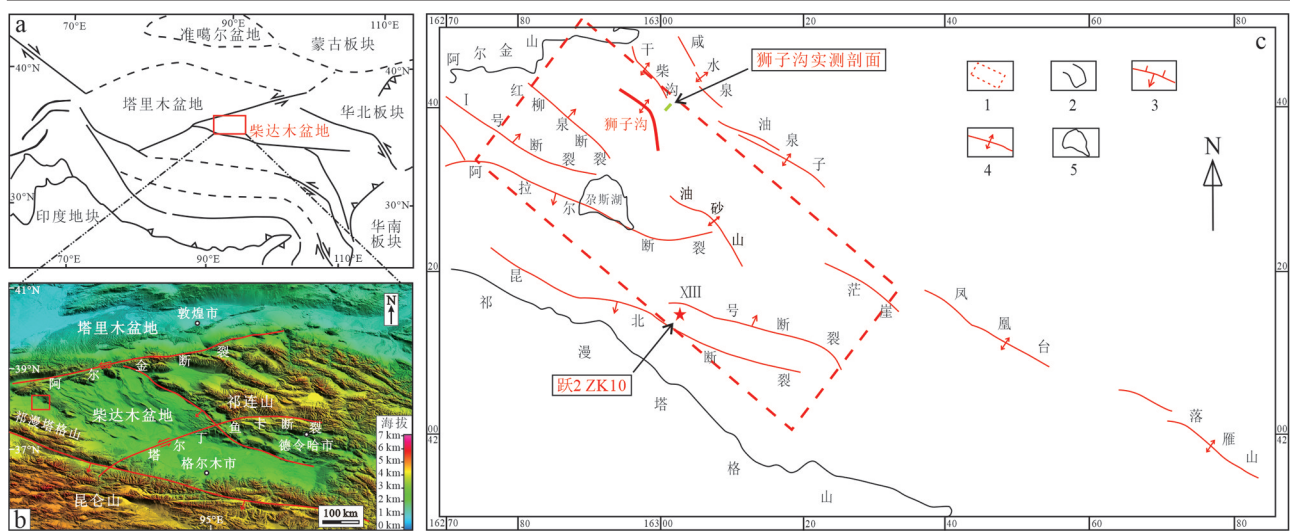


图1 青藏高原及邻区大地构造简图(a,据王亮等,2010修改),柴达木盆地简要DEM图(b,据张超等,2020修改)及柴达木盆地狮子沟地区构造位置图(c,据路琳琳等,2008修改)

1—研究区范围;2—山脉;3—断裂;4—背斜构造单元;5—湖泊

Fig.1 Simplified geological map of Tibetan Plateau and nearby area (a, after Wang Liang et al., 2010), DEM (Digital elevation model) map of Qaidam Basin (b, after Zhang Chao et al., 2020) and tectonic location map of Shizigou area, Qaidam Basin (c, after Lu Linlin et al., 2008)

1—Study area; 2—Mountain range; 3—Fault; 4—Anticlinal unit; 5—Lake

以看出,沿剖面方位,水平层理发育,岩性变化为砾岩、砂砾岩、粉砂岩、泥岩、粉砂质泥岩,岩性粒度表现为简单的从粗到细再到粗的沉积旋回(图3)。由实测剖面可知,大套粉砂质泥岩夹砂砾岩层及粉砂岩为新近系狮子沟组( $N_2s$ )的主要岩性特征(图4)。

在花土沟跃进二号地区施工的钻孔ZK10内也揭露了狮子沟组( $N_2s$ )。从钻孔中可知,狮子沟组( $N_2s$ )颜色主要以绿灰色及灰红色为主,夹少量的棕红色、棕色及灰棕色,岩性主要为粉砂质泥岩、泥岩及粉—细砂岩(图5a、b),局部夹少量的粗砂岩、含砾砂岩(图5c)。与上覆第四系下一中更新统七个泉组( $Q_{1-2q}$ )呈角度不整合接触(图4)。

狮子沟组上段岩性在显微镜下见较明显混合分层沉积特征(图5d),砂岩由砂(约80%)和填隙物(约20%)组成,杂基支撑,其中砂分选性较差,以粒度小于0.25~0.5 mm的中砂为主,含少量粒度小于0.06~0.25 mm的细砂和极少量粒度小于0.5~1.1 mm的粗砂,粒度小于0.03~0.06 mm的粉砂含量少于3%,砂磨圆整体呈次棱角状、次圆状,少量呈棱角状。成分为石英、长石、岩屑。其中石英(约31%)以单晶石英为主,含少量石英岩等多晶石英,单晶石英波状消光明显。长石(约45%)有钾长石和斜

长石,斜长石具轻微—中等程度绢云母化。岩屑(约4%)有绢云母千枚岩、灰岩、单晶方解石(Cal)、霏细岩和鳞片状白云母等(图5e)。含有极微量的重矿物如白钛石、角闪石、楣石等,零星散布。填隙物由粒度小于0.03 mm的细粉砂和泥质杂基(14%)、不均匀分布的泥晶方解石胶结物(4%)及他形晶的粒度小于0.01~0.2 mm且不均匀分布的黄铁矿及磁铁矿(2%)组成(图5f)。董桂玉等(2007)将黏土矿物与碎屑矿物统一归于陆源碎屑,花土沟狮子沟组杂砂岩主体上为钙质泥砂岩,属碳酸盐陆源碎屑杂砂岩。

#### 4 样品采集、测试方法及结果

样品采集自跃进2号地区狮子沟组ZK10 223~241 m处,该段位于狮子沟组上段,岩性较完整且为典型富铀层位,能够很好代表狮子沟组综合岩性特征,共涉及14件样品(图1,图6),样品为灰绿色及棕红色杂砂岩,岩石固结程度为较疏松,碳酸盐含量为I级,遇盐酸起泡。样品测试工作委托核工业新疆理化分析测试中心完成,包括主量元素及部分微量元素分析,其中主量元素用AxiosmAx-Icap6300型X射线荧光光谱仪测试完成,部分微量

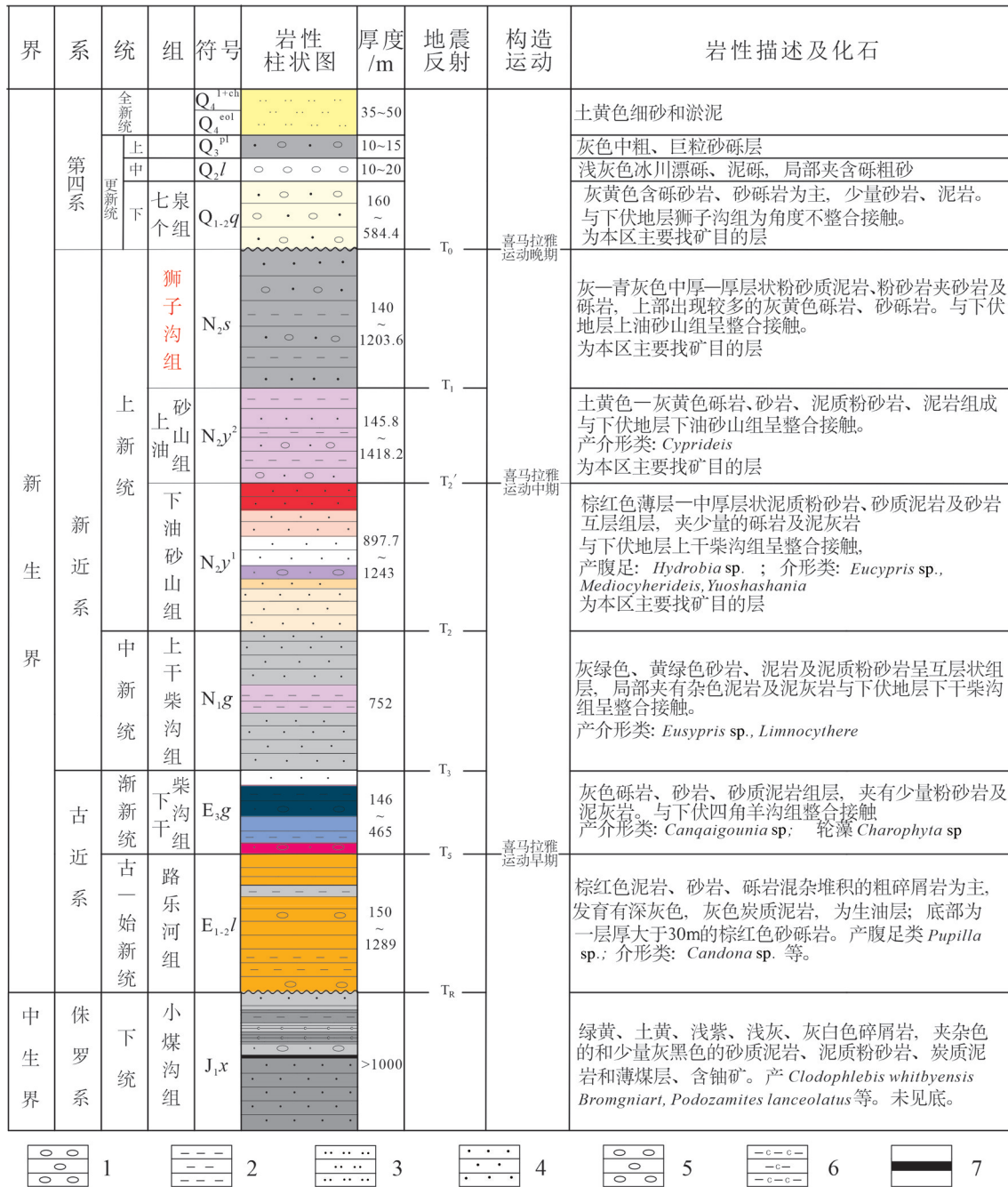


图2 柴西北地区地层综合柱状图<sup>①</sup>

1—砾岩;2—泥岩;3—细砂岩;4—中砂岩;5—含砾砂岩;6—炭质泥岩;7—煤层

Fig.2 Stratigraphic composite columnar diagram in northwest of Qaidam<sup>①</sup>

1—Conglomerate; 2—Mudstone; 3—Fine sandstone; 4—Medium sandstone; 5—Gravelly sandstone; 6—Carbonaceous mudstone; 7—Coal seam

元素用NexION 350X-Icap6300 ICP-MS原子荧光X射线荧光光谱仪进行测试,实验测试执行标准分别为为主量元素GB/T14506.1-2010和微量元素GB/T14506.30-2010,全部测试分析误差小于5%。

主量元素和微量元素测试结果(表1)显示,14

件砂岩样品常量元素化学成分SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、FeO平均含量分别为64.66%、13.05%、3.95%、3.13%、3.00%、2.02%、1.86%和1.84%,TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和MnO平均含量均小于1%,LOI=0.49%~12.50%,表明砂岩样品中可能含有

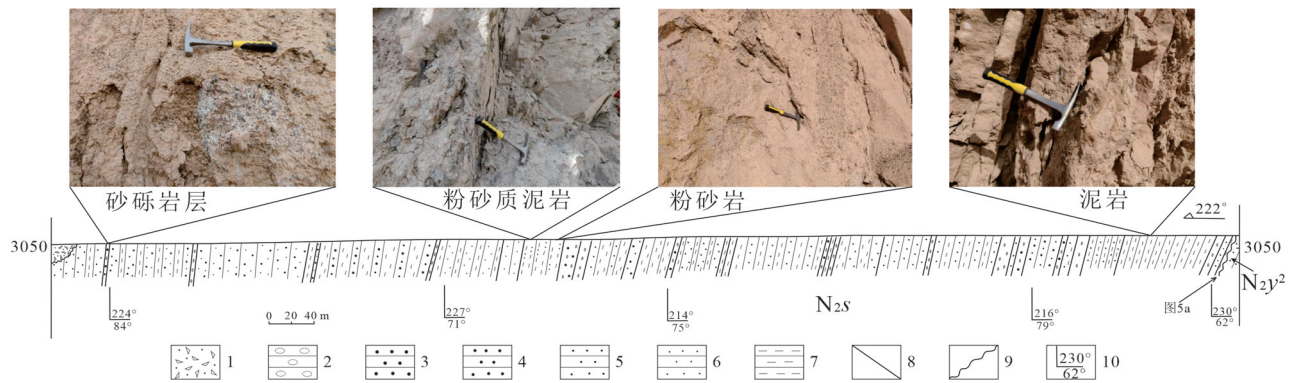


图3 花土沟狮子沟地区狮子沟组实测剖面图<sup>⑨</sup>

1—残破积物;2—砾岩;3—粗砂岩;4—中砂岩;5—细砂岩;6—粉砂岩;7—泥岩;8—地层分界线;9—角度不整合;10—地层产状

Fig.3 Measured section of the higher Shizigou Formation in Huatugou Shizigou area<sup>⑨</sup>

1—Residual deposit; 2—Conglomerate; 3—Coarse sandstone; 4—Medium sandstone; 5—Fine sandstone; 6—Siltstone; 7—Mudstone; 8—Stratigraphic boundary; 9—Angular unconformity; 10—Stratigraphic attitude

部分碳酸盐和有机质。CIA(化学蚀变指数)=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO\*+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)×100],其中CIA计算要对CaO校正扣除化学沉积的CaO摩尔分数,CaO\*=CaO-(10/3×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(Johnsson and Basu, 1993);ICV(成分变异指数)=(CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+MgO+TiO<sub>2</sub>+MnO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,为减小富钾矿物和后期成岩导致的K富集,ICV计算要对样品通过A-CN-K图解进行K校正(Nesbitt and Young, 1989; Cox et al., 1995);σ(里特曼指数)=(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)×(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/(SiO<sub>2</sub>-43);样品CIA=37.79~69.14,ICV=0.84~2.13。Σ=1.39~2.14,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O=0.90~1.18,平均为1.06,说明杂砂岩中钾长石或钾矿物较多。

## 5 讨论

### 5.1 沉积环境

喜马拉雅中期地质构造事件主要开始于新近系中新世末期(N<sub>1</sub><sup>2</sup>),结束于新近系上新世中后期(N<sub>2</sub><sup>2</sup>),此事件在研究区的最主要表现形式是古近纪张扭性构造转变为新近纪以来的压扭性构造环境,花土沟英雄岭西北地区的阿尔金山附近发生隆升作用,盆地沉积中心发生向东和向南的逐渐迁移(王桂宏等,2004)。在柴达木盆地周边表现为上新世狮子沟组与上油砂山组之间的不整合沉积现象(图5a),此不整合在盆地北部阿尔金山边缘及盆地西部咸水泉等地表现比较明显,新近纪狮子沟组角度不整合于上油砂山组或其他更老地层之上,在柴达木盆地腹部则多表现为整合接触。柴北缘喜马

拉雅期构造晚期运动十分强烈,表现在更新世以来的粒度较粗的砂砾石堆积以角度不整合形式直接覆盖在已褶皱变形的新近系狮子沟组之上(图2),其相邻区域可见单斜的七个泉组和水平产出的晚更新世生成的砂砾石层。柴北缘阿尔金山系向南逆冲推覆于新近系沉积地层之上,是该期山前构造运动的具体反映,该逆冲构造控制着盆地盖层的沉积作用。

狮子沟组是一套以较粗碎屑为主的沉积,主要发育绿灰色、棕色、棕红色及棕灰色粉砂质泥岩、泥岩、砾岩、砂砾岩夹薄层粉细砂岩组成的多个规模不等、大小不一的向上变细的正韵律旋回(图4),属低位体系域的河流相沉积或冲积扇相沉积。其下部以粒度较大的粗砂岩、含砾砂岩及少量砾石为主,下部中新世上油砂山组与之呈明显的冲刷风化侵蚀等不整合接触关系,接触部位交错层理发育(图4,图5a),砾石分选及磨圆性中等—好,表现为长石、石英及岩屑为砾石成分的砾岩相,为河床滞留沉积的主要特征;中部发育粗—中砂岩,上部发育中砂岩、细砂岩、砂质泥岩及泥岩等;沉积层序由多个上部中砂岩—细砂岩—粉砂岩及砂质泥岩—泥岩互层、中部粗—中砂岩及下部或底部粒度较大的砾岩—含砾砂岩—粗砂岩构成的沉积旋回(图4);其中底部及下部细砂岩具较明显的交错层理,中间夹粉砂岩、细砂岩水平沉积层理,层理规模向上越来越小,属于边滩沉积特征;泥岩水平层理发育,属于堤岸沉积特征。而河床滞留、堤岸、边滩沉



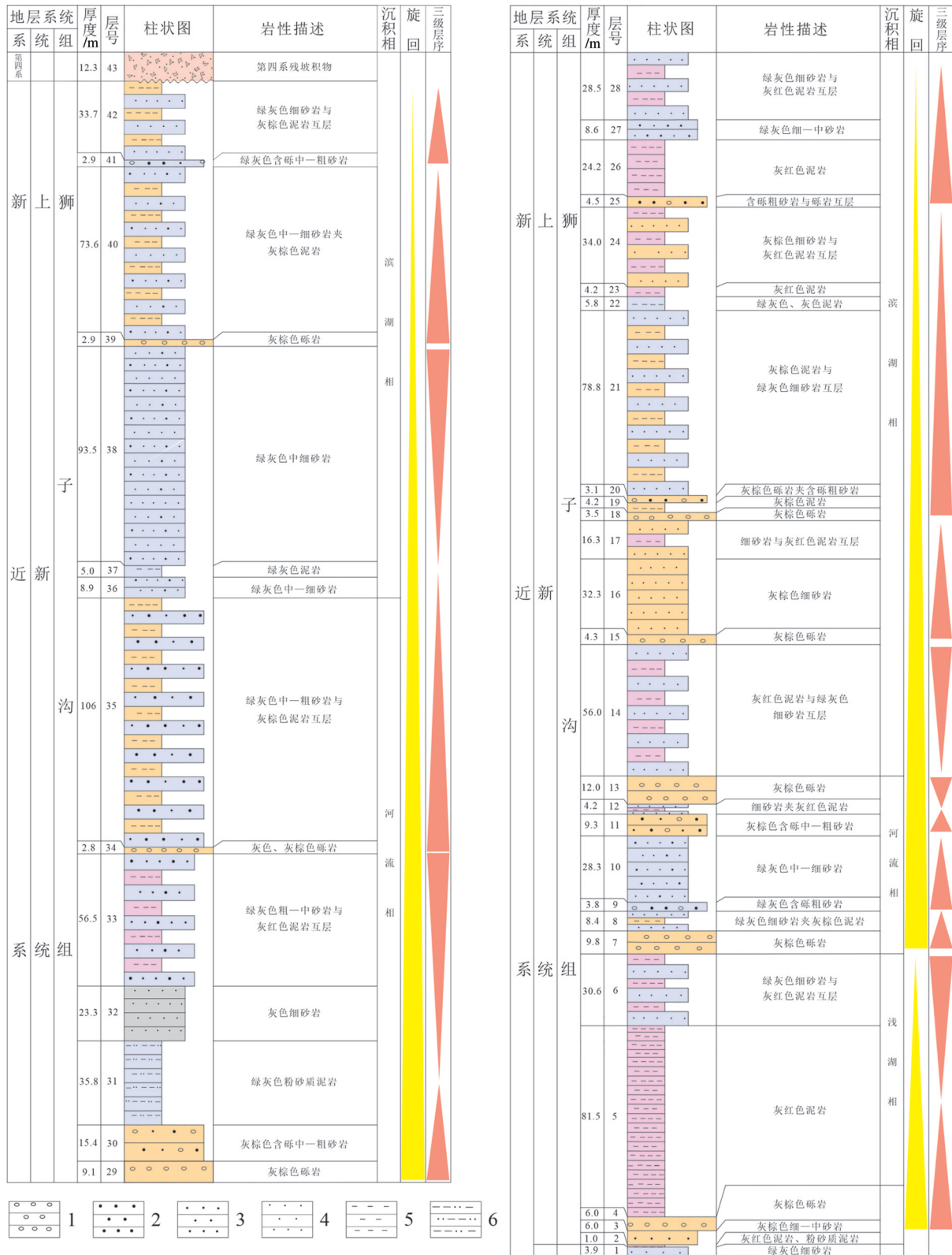


图4 花土沟狮子沟地区狮子沟组(N<sub>2s</sub>)岩性柱状图

1—砾岩;2—粗砂岩;3—中砂岩;4—细砂岩;5—泥岩;6—砂质泥岩

Fig.4 Lithologic histogram of the Shizigou Formation (N<sub>2s</sub>) in Huatugou Shizigou area

1—Conglomerate; 2—Coarse sandstone; 3—Medium sandstone; 4—Fine sandstone; 5—Mudstone; 6—Sandy mudstone

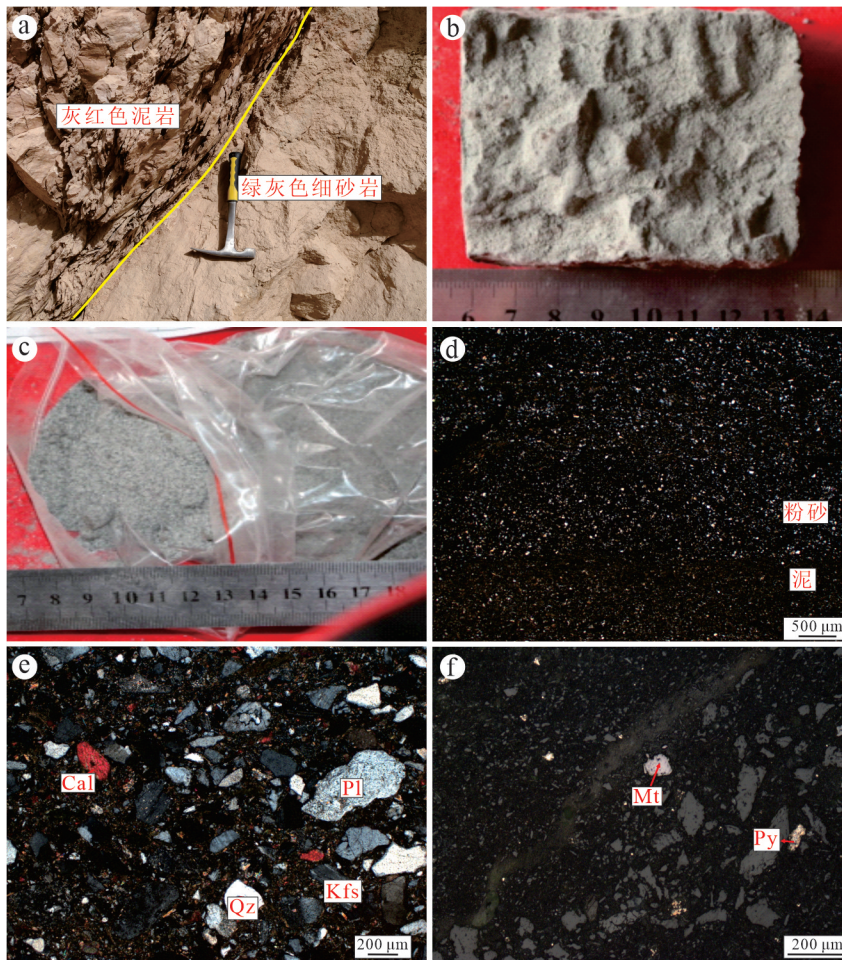


图5 狮子沟组沉积岩特征

a—狮子沟组泥岩与细砂岩分界线；b—ZK10, 231.8 m处绿灰色粉—细砂岩；c—ZK10, 229.3 m处绿灰色粗砂岩；d—粉砂岩与泥岩分界线；e—细砂岩；f—含矿砂岩； $N_{2s}$ —狮子沟组； $N_{2y}^2$ —上油砂山组；Qz—石英；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Cal—方解石；Py—黄铁矿；Mt—磁铁矿

Fig.5 Sedimentary rock characteristics of Shizigou Formation

a—Boundary between mudstone and fine sandstone; b—Green gray powder-fine sandstone from ZK10, 231.8 m; c—Green gray crude sandstone from ZK10, 229.3 m; d—Boundary between powder sandstone and mudstone; e—Fine sandstone; f—Ore-bearing sandstone;  $N_{2s}$ —Shizigou Formation;  $N_{2y}^2$ —Upper Youshashan Formation; Qz—Quartz; Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Cal—Calcite; Py—Pyrite; Mt—Magnetite

积三种微相构成一套完整河流相沉积序列。新近系中新世油砂山组和上新世狮子沟组岩石粒度均具有粗—细—粗的沉积变化特征,前者为河湖相杂色细碎屑杂砂岩,后者主要为绿灰色、棕红色粗碎屑杂砂岩,且后者在盆地内的分布范围明显减少,反映了新近纪以来柴北缘陆相盆地由湖相转化为山间河流相,即盆地逐渐收缩的演化趋势。

碎屑沉积岩结构成熟度的高低,可反映古环境下水动力条件及其对沉积地层改造作用的强弱,结构成熟度高可反映古环境为高能潜水环境,反之则代表快速堆积或者低能渗水环境。成分成熟度与结构成熟度常为正相关关系,即成分成熟度高的碎

屑沉积岩其结构成熟度往往较高,反映较强的水动力条件,如砂坝、浅滩等沉积环境;成分成熟度低往往反映较低水能古环境,如滨湖、深湖相。根据碎屑沉积岩中不同组分含量及其变化可进行结构成熟度的判断,比如泥质含量高往往可以说明沉积岩结构成熟度及成分成熟度低。对研究区内ZK10采取的杂砂岩进行薄片鉴定,其中大部分样品细砂、粉砂含量较高,泥质含量较少,碎屑物粒度分布不均匀,等粒度聚集呈条带状相间分布,使岩石局部略具层状构造(图5d)。大部分样品泥质含量较低,说明成分成熟度较高,推测为水动力较强的河流相沉积或河流体系环境。



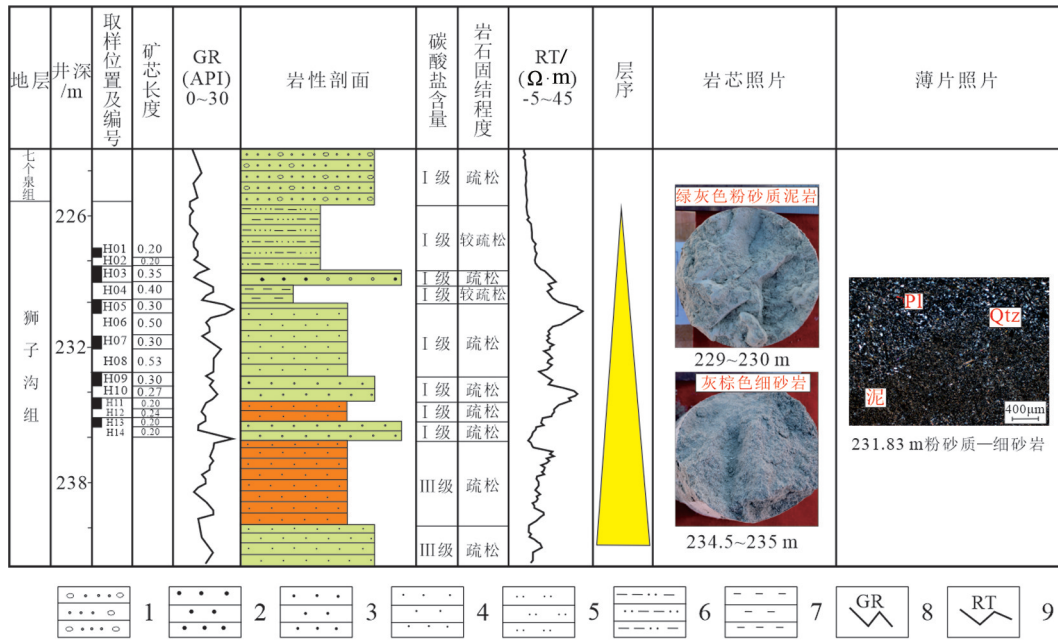


图6 跃进2号地区狮子沟组ZK10 223~241 m综合柱状图

1—含砾砂岩;2—粗砂岩;3—中砂岩;4—细砂岩;5—粉砂岩;6—粉砂质泥岩;7—泥岩;8—自然伽马;9—电阻率

Fig.6 Composite columnar diagram of Shizigou Formation of ZK10 223-241 m in Yuejin No.2 area

1—Gravelly sandstone; 2—Coarse sandstone; 3—Medium sandstone; 4—Fine sandstone; 5—Siltstone; 6—Silty mudstone; 7—Mudstone; 8—Natural gamma; 9—Resistivity

表1 狮子沟组杂砂岩样品主量元素和部分微量元素测试分析结果

Table 1 Results of major and trace element analyses of mixed rocks of the Shizigou Formation

样号	H01	H02	H03	H04	H05	H06	H07	H08	H09	H10	H11	H12	H13	H14
岩性	粉砂岩	粉砂岩	粗砂岩	泥岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	细砂岩	细砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粗砂岩	粗砂岩
SiO <sub>2</sub>	65.03	73.46	64.23	67.23	66.89	62.71	65.55	72.25	60.69	55.03	72.29	53.14	58.09	68.71
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.32	0.80	0.73	0.72	0.75	0.72	0.32	0.49	0.60	0.32	0.51	0.71	0.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.31	13.63	14.79	13.89	13.60	14.42	13.49	13.66	11.85	12.02	12.99	10.43	13.04	11.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.76	0.79	2.99	2.43	2.05	2.35	2.21	0.87	1.56	1.89	1.33	2.25	2.74	2.08
FeO	1.76	0.80	2.35	2.26	2.38	2.68	2.40	1.08	1.66	2.00	1.03	1.60	2.26	1.42
MnO	0.05	0.03	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.03	0.08	0.10	0.03	0.15	0.08	0.05
MgO	2.55	0.87	2.41	1.91	2.23	2.71	2.40	0.86	1.65	2.90	0.69	1.52	2.13	1.15
CaO	2.56	1.81	1.31	1.34	1.80	1.92	2.15	1.66	8.31	9.31	1.35	13.12	6.69	1.99
Na <sub>2</sub> O	2.70	4.01	2.68	3.03	3.11	2.82	3.05	4.14	2.77	2.35	3.71	2.22	2.38	2.97
K <sub>2</sub> O	3.09	3.69	3.27	3.16	3.17	3.22	3.10	3.75	2.91	2.72	3.53	2.42	2.80	3.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.09	0.20	0.20	0.19	0.19	0.20	0.10	0.13	0.16	0.09	0.14	0.18	0.14
LOI	5.33	0.49	4.91	3.76	3.78	6.14	4.66	1.28	7.90	10.92	2.64	12.50	8.89	6.29
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	5.78	7.70	5.95	6.19	6.28	6.03	6.15	7.88	5.68	5.07	7.24	4.64	5.18	5.98
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.14	0.92	1.22	1.04	1.02	1.14	1.02	0.90	1.05	1.16	0.95	1.09	1.18	1.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	19.65	41.99	18.37	18.96	18.94	19.12	18.79	42.86	24.33	20.12	40.41	20.36	18.39	21.71
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.27	0.22	0.23	0.23	0.22	0.23	0.27	0.25	0.23	0.27	0.23	0.22	0.26
σ	1.52	1.95	1.67	1.58	1.65	1.85	1.68	2.13	1.82	2.14	1.79	2.12	1.78	1.39
FeOT/MgO	1.67	1.73	2.09	2.33	1.90	1.77	1.83	2.17	1.86	1.28	3.23	2.38	2.22	2.86
CIA	62.30	60.67	69.14	66.82	64.62	66.43	62.83	59.99	46.84	46.04	61.53	37.79	53.32	59.38
ICV	1.08	0.85	0.91	0.91	0.97	0.96	1.02	0.85	1.50	1.65	0.84	2.13	1.34	1.01
Th	10.62	8.48	15.68	15.86	13.19	12.75	14.96	6.49	10.93	13.09	8.31	10.61	14.16	8.61
Mo	1.69	6.58	2.79	39.36	7.20	5.89	5.80	6.66	3.12	7.05	16.06	37.97	1.39	13.34
Ni	32.73	16.61	41.62	35.92	32.04	39.86	34.13	11.30	26.11	33.46	17.88	27.89	39.98	21.33
Ce	68.48	41.88	85.25	80.35	70.10	71.91	79.71	39.39	54.97	67.97	38.67	60.05	73.76	51.61
Rb	113.7	134.1	125.1	121.0	115.5	122.8	119.6	146.8	109.0	107.7	131.0	94.6	122.9	104.2
Co	11.06	7.16	14.89	14.12	12.44	15.72	13.03	5.61	11.33	12.63	9.42	11.28	15.73	7.56
Co/Ni	0.34	0.43	0.36	0.39	0.39	0.39	0.38	0.50	0.43	0.38	0.53	0.40	0.39	0.35

注:主量元素单位%,微量元素单位10<sup>-6</sup>。

钻孔测井曲线的形态纵向上的变化可反映沉积过程中沉积能量的变化过程,该过程既包括沉积物分选性及粒度的垂向变化,也包括物源供应和水动力在其沉积过程中的各种变化。曲线的幅度较大一般反映碎屑沉积物粒度粗、泥质含量比较低,分选性较好,可间接反映水流能量较高,碎屑物的沉积发生在高能环境下;反之,代表低能水流特征。由ZK10中224~240 m处测得的GR为0~30 API,RT为-5~45  $\Omega \cdot m$ ,测井相为箱型(图4),曲线的幅度较大。综上所述,狮子沟组沉积环境为典型的河流相沉积。

## 5.2 物源分析

在沉积学中,沉积物源分析包括古地貌的重塑、古侵蚀地区的判别、古河流体系的复原、物源区源岩的性质、沉积盆地构造背景以及古气候的推测判定等,物源分析是恢复古环境及判别盆地在沉积过程中大地构造背景的重要手段,对沉积盆地的研究意义重大。目前主要的研究手段包括岩相的纵向叠置和侧向变化、沉积地层的发育形态(包括不同地层沉积界面和接触关系特征等)、地球化学综合特征及其变化、不同矿物的组合特征及其成分变化等,由于碎屑沉积物性质不同,在搬运、风化及沉积过程中源岩地球化学特征、岩性等会有不同的响应。在某种程度上,沉积物成分和地球化学特征是沉积物源和沉积盆地大地构造背景及古气候古环境的变化函数,沉积物成分时空变化的不同可反映沉积盆地不同的沉积环境演化特征,而在地球化学方面,不同元素在沉积地层中的富集状况取决于碎屑沉积物的分选搬运沉积、成岩作用、风化作用、不同元素的水动力地球化学性质及物源区源岩性质等因素的综合影响。综合上述因素,地球化学与其他技术方法相结合,为实现物源研究的定性及定量分析提供了可能。

### 5.2.1 源岩风化作用与沉积环境研究

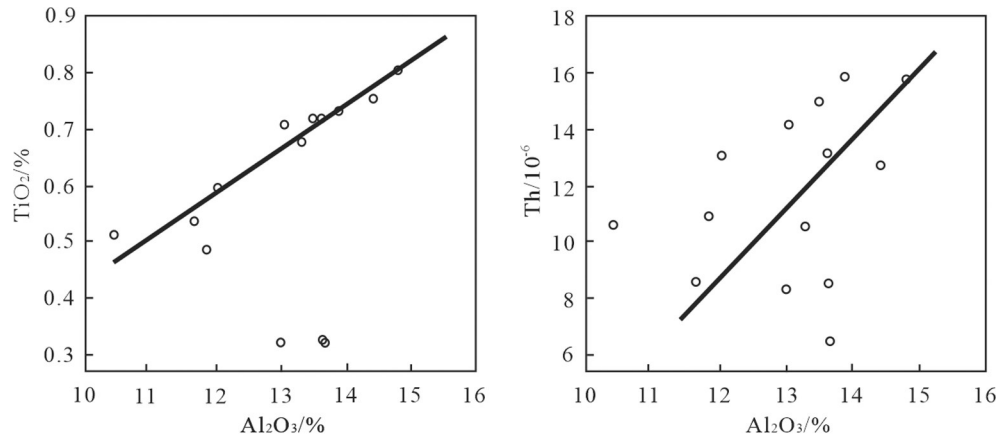
CIA(化学蚀变指数)可用来反映源岩风化程度(Nesbitt and Young, 1982;刘兵等,2007),而砂岩沉积时期的古气候可以由风化程度进行大致反演。当CIA=85~100时代表风化程度强烈,指示气候炎热潮湿;当CIA介于65~85时代表风化程度中等,指示气候湿润温暖;当CIA=50~65时代表风化程度较低,指示气候干燥寒冷(Nesbitt and Young, 1982);同

时,ICV(成分变异指数)可用来指示源岩在沉积完成之后是否参与再旋回或沉积时是否经历风化作用等(Cox et al., 1995)。其中,当ICV > 1时,指示非黏土矿物在未成熟样品中含量较高,归于地质运动过程中的首次沉积(Vandekamp and Leake, 1985)。当ICV值 < 1时,说明绢云母、蒙脱石等黏土矿物在成熟样品中含量较高,指示沉积源岩为首次沉积但经历了强烈风化作用或者经历了地质运动的再旋回作用(冯连君等,2003)。样品H01-H14的CIA=37.79~69.14,大部分介于50~65,平均值为58.41,总体上随着深度增加CIA值逐渐降低;ICV=0.85~2.13,平均值为1.14且大部分大于1,总体上随深度增加ICV值逐渐增加;CIA及ICV值的综合特征指示狮子沟组上段源岩物质为在构造活动时期干燥寒冷的古气候环境下的首次沉积,含有黏土物质较少。

沉积岩的颜色对分析沉积环境具有重要指导意义。碎屑沉积岩颜色通常会受两个因素影响,一是铁元素在沉积岩中的氧化态形式,二是有机质在沉积岩中的含量。研究区内狮子沟组主要颜色有绿灰色、红棕色及灰棕色等(图4,图5),其中棕色、灰棕色通常反映沉积环境为氧化或强氧化环境,沉积物中含有氧化铁物质染色,主要形成于海陆过渡带或大陆环境,棕红色主要是由于沉积岩中含有铁的化合物如氧化物或氢氧化物,铁元素常以 $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ 形式存在于沉积岩中,往往形成于干旱一半干旱强氧化或氧化陆地环境,绿灰色沉积岩是由于氧化铁在后期发生过还原作用,碎屑沉积物中 $Fe^{3+}$ 被还原为 $Fe^{2+}$ 所导致。ZK10常出现棕红色说明沉积环境为干旱一半干旱陆地氧化环境,与通过CIA推测的该段沉积古气候为干燥条件相吻合。

### 5.2.2 源岩构造背景

柴达木盆地属于柴达木陆块,该陆块是亲扬子陆块的大型盆地地质体(葛肖虹和刘俊来,2000;陈能松等,2007),由于古陆块都经历了漫长且较复杂的地质构造演化,如今的大地构造格局的基本定型主要在印支运动之后(郭进京等,1999),因此不能以各个(微)陆块的当今地质状态,讨论其在以往各个地质构造时期有可能的构造格局,但以现代各地质陆块和(微)陆块记录的各类地质事件作为地质线索对其发生的大地构造演化进行研究和探讨却不受影响。

图7 狮子沟组杂砂岩样品中TiO<sub>2</sub>、Th与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相关性图解Fig.7 Correlations of TiO<sub>2</sub>, Th and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in miscellaneous sandstone of the Shizigou Formation

盆地构造背景限定沉积盆地的物源属性,是进行盆地物源分析的基础。综合分析沉积杂砂岩的地球化学特征,可以在反映沉积时期源岩成分的同时反演其构造背景。前人将各盆地构造类型根据地壳综合性质分为四大类型:活动大陆边缘、大洋岛弧、被动大陆边缘及大陆岛弧(Bhatia, 1983, 1985;陈小双等,2018)。

盆地杂砂岩沉积物中Al、Ti元素的含量常被用作盆地陆源碎屑沉积岩稳定贡献量的重要指标(贺子丁等,2012),Th元素因为最难溶,性质相对稳定,而且Th元素只随陆源碎屑沉积物搬运,对沉积源区特征的分析很有价值,因而能反映源区的多种地球化学性质(McLennan and Hemming, 1993; Rollinson, 1993; 杨桐旭等,2023)。杂砂岩中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量与TiO<sub>2</sub>及Th含量呈现正相关性(图7),也印证了Th主要来自陆源碎屑,并且受到后期成岩作用的影响微弱。在杂砂岩其他主量元素中,相比与K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O在搬运过程中K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>离子的较强活动性及CaO来源的不确定性,SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgO等氧化物稳定性相对较高。微量元素如Th、Ni等活性较弱,难溶于水,在物质搬运沉积成岩及后期风化过程中该成分几乎不变(Floyd and Leveridge, 1987),保留了较完整的源岩地球化学特征,该特征可以很好地反映杂砂岩物源区性质,用来进行物源示踪及判断源岩区域地质构造背景(Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1995; 余超,2019;叶现稻和张传林,2020)。

根据Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>构造环境判别图解(图

8a)及F1'-F2'判别函数图(图8b),狮子沟组杂砂岩大部分源岩形成于大陆岛弧环境,表明新近系末期研究区碎屑物质原岩大部分来自于大陆岛弧的构造背景。

Bhatia(1983)通过采集古代及现代不同区域不同大地构造部位砂岩样品进行系统的分析测试及总结归纳,得出4种构造环境常量元素值(表2),狮子沟组杂砂岩常量元素含量与之对比发现,其与大陆岛弧常量元素含量相契合,进一步推测狮子沟碎屑杂砂岩原岩形成于大陆岛弧构造环境。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与TiO<sub>2</sub>的比值可用来指示杂砂岩沉积物来源:当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub><14时,表明杂砂岩沉积物来源于镁铁质岩石;当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>=19~28时,表明杂砂岩沉积物来源于长英质岩石(Girty et al., 1996)。狮子沟组杂砂岩Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>=18.37~42.86,平均值为24.57,绝大多数Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>=19~28,说明狮子沟组杂砂岩沉积物来源于长英质岩石。此外,K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>值可以反映杂砂岩物源区内碱性长石含量多少,当杂砂岩中K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>0.5时,表明杂砂岩母岩中碱性长石含量相对较大;K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><0.4时,表明杂砂岩母岩中碱性长石含量较少(Cox et al., 1995)。狮子沟组杂砂岩K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.22~0.27,表明狮子沟组杂砂岩母岩中碱性长石数量较少。

一般认为Ni比Co更易于在地壳较深部位富集,高的Ni/Co比值代表源岩来自深源(严炳铨等,1993),狮子沟组杂砂岩Ni/Co=0.34~0.53,小于1,说明源岩的浅源特征。前人通过对泥岩和砂岩地球化学特征研究认为不活泼微量元素Ni比较稳定,能



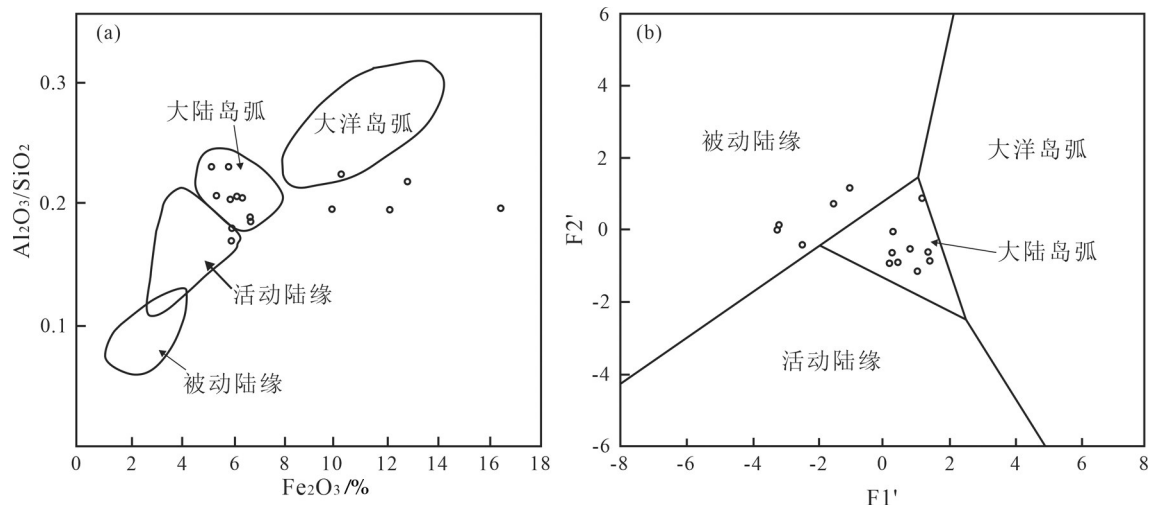


图8 柴达木盆地狮子沟组杂砂岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 构造环境判别图解(a)及 $\text{F1}'\text{-F2}'$ 判别函数图(b)(底图据Bhatia, 1983)  
Fig.8 Construction environment discrimination diagram of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (a) and discriminant function diagram of  $\text{F1}'\text{-F2}'$  (b) of miscellaneous sandstone of the Shizigou Formation in Qaidam Basin (after Bhatia, 1983)

够用来判别原始物质来源(Bhatia and Crook, 1986)。狮子沟组杂砂岩中 $\text{Ni}=11.30\times 10^{-6}\sim 41.62\times 10^{-6}$ ,可以利用Floyd et al.(1989)给出的 $\text{Ni-TiO}_2$ 图解模板(图9)进行投图,解释物源区的物质组成为长英质,与上述通过 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值判断相一致,表明狮子沟组杂砂岩沉积物源岩为浅源的碱性长石数量较少的长英质岩石。

柴达木盆地被昆仑山、阿尔金山及祁连山所环绕,刘康等(2020)通过对柴达木盆地红沟剖面碎屑锆石U-Pb及Hf同位素分析认为东昆仑在新生代成为盆地主要物源区之一,祁连山在晚中新世(10~12 Ma)为盆地重要物源区;王艳清等(2012)通过轻、重矿物组合、稀土元素分配等方面确定阿尔金为盆地渐新世主要物源区之一。结合盆地周缘出露岩石情况、源岩性质及前人研究,狮子沟组物质主要由中酸性火山岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、花

岗斑岩及部分变质岩经风化搬运沉积形成。

### 5.3 含铀前景分析

盆地中沉积体系岩性、岩相及层位空间组合特征对砂岩型铀成矿起主要控制作用(艾桂根, 2001),花土沟地区新近系狮子沟组砂岩胶结程度较差,粒度为中细粒—中粗粒,中细—中粗砂岩岩层较厚(10~38 m),含泥质相对较少且常与砂岩互层产出(图4),上部及下部泥岩段形成不透水的隔断层,砂泥比值较小,孔隙度及渗透系数较大,富含黄铁矿等还原性物质(图5f),发育河流相沉积,上述狮子沟组综合沉积特征是砂岩型铀成矿非常好的沉积单元,狮子沟组下部油砂山组也为含铀层位,其中下油砂山组以薄层—中厚层状砂岩、砾岩为主,砂岩与泥岩互层;上油砂山组以厚层状砾岩为主,夹含砾砂岩;油砂山组砂体厚度适中,存在隔水层,倾角较缓,孔隙度较大,与狮子沟组沉积环境

表2 狮子沟组杂砂岩及各种构造环境中砂岩主要常量元素含量参考值

Table.2 Reference value of major element content in greywacke of Shizigou Formation and sandstone of various tectonic environments

	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	FeO	MnO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
大洋岛弧	58.30	1.06	17.11	1.95	5.52	1.05	5.83	4.10	1.60	0.26
大陆岛弧	70.69	0.64	14.04	1.43	3.05	0.10	2.68	3.12	1.89	0.16
活动大陆边缘	73.86	0.46	12.89	1.30	1.58	0.10	2.48	2.77	2.9	0.09
被动大陆边缘	81.95	0.49	8.41	1.32	1.76	0.05	1.89	1.07	1.71	0.12
狮子沟组杂砂岩	64.66	0.59	13.05	2.02	1.84	0.07	1.86	3.95	3.00	3.13

注:大地构造数据来自(Bhatia,1983);表中所有元素数据为质量百分数。

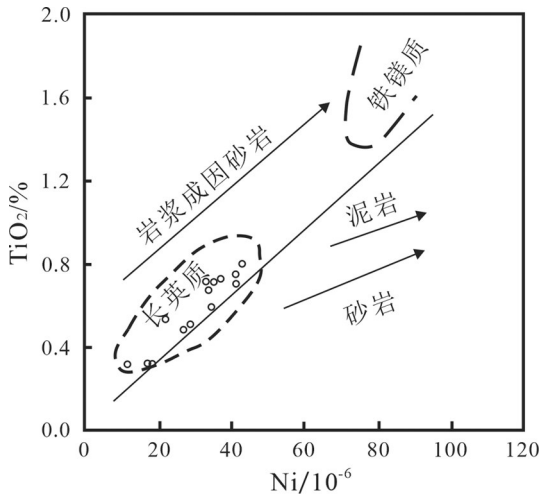


图9 狮子沟组杂砂岩Ni-TiO<sub>2</sub>判别图(底图据Floyd et al., 1989)

Fig.9 Ni-TiO<sub>2</sub> discriminant graph of greywacke of Shizigou Formation (after Floyd et al., 1989)

非常相似,有利于铀矿形成。在跃进二号地区狮子沟组上段226~240 m处API值较高(图6),在狮子沟组中发现大量铀石等铀矿物存在,证明了狮子沟组为花土沟地区重要的含铀岩系。

## 6 结 论

(1)狮子沟组剖面的杂砂岩粒度具有从粗到细再到粗的沉积旋回特征;跃2地区狮子沟组杂砂岩符合河床滞留、堤岸、边滩沉积3种沉积特征,从其分选、磨圆性、结构成熟度、测井曲线形态及沉积特征等方面综合分析,狮子沟组为河流相沉积环境。

(2)狮子沟组上段源岩物质为在构造活动时期干燥寒冷的古气候环境下的首次沉积,含有黏土物质较少;狮子沟组杂砂岩原岩形成于大陆岛弧环境,其源岩为浅源的碱性长石数量较少的长英质岩石。

(3)综合狮子沟组沉积特征,证明该组为花土沟地区重要的含铀岩系。

**致谢:**野外工作得到四川省核工业地质局二八三大队青海铀矿地质调查项目部全体同仁的大力协助,文章投稿及修改过程中得到了《中国地质》编辑部郝梓国老师、成都理工大学宋昊老师及匿名审稿专家的热心指导,为本文的修改和完善提出了宝贵的建设性意见,在此一并向他们表示诚挚的谢意。

## 注释

① 中国地质调查局天津地质调查中心. 2018. 北方重要盆地

砂岩型铀矿调查与勘查示范项目成果报告[R].

② 中国地质调查局天津地质调查中心. 2021. 鄂尔多斯、柴达木等盆地砂岩型铀矿调查成果报告[R].

## Reference

- Ai Guigen. 2001. Sequence stratigraphy features of Tertiary and its prospecting direction for in-situ leachable sandstone-type uranium deposit in northwestern part of Qaidam basin[J]. Uranium Geology, 17(4): 209-215 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 91(6): 611-627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Province and tectonic control[J]. Sedimentary Geology, 45(1): 97-113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace Element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(1): 181-193.
- Cao Guoqiang, Chen Shirui, Xu Fengyin, Peng Dehua, Yuan Wenfang. 2005. Cenozoic sedimentary and tectonic evolution in the Western Qaidam Basin[J]. Geology in China, 32(1): 33-40 (in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Wang Qinyan, Chen Qiang, Li Xiaoyan. 2007. Components and metamorphism of the basements of the Qaidam and Oulong-Buluke micro-continental blocks, and a tentative interpretation of Paleozoic evolution in NW-Central China[J]. Earth Science Frontiers, 14(1): 43-55 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shiyue, Xu Fengyin, Peng Dehua. 2000. Characteristics of basement structures and their controls on hydrocarbon in Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 21(3): 175-179 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaoshuang, Lü Ao, Song Hemin, Liu Lei, Yang Baozhong, Hou Hongxing. 2018. Geochemical characteristics and tectonic history of the Silurian sandstones in Akeqi area, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 20(2): 271-284 (in Chinese with English abstract).
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(14): 2219-2240.
- Dai Junsheng, Cao Daiyong. 2000. The type and distribution of structural style in Qaidam Basin[J]. Northwest Geoscience, 21(2): 57-63 (in Chinese with English abstract).
- Dai Junsheng, Ye Xingshu, Tang Liangjie, Jin Zhiyun, Shao Wenbin, Hu Yong, Zhang Bingshan. 2003. Tectonic units and oilgas potential of the Qaidam basin[J]. Chinese Journal of Geology, 38(3): 413-424 (in Chinese with English abstract).
- Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, Qin Zhiyong, Luo Jinxiong.

2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments[J]. *Advances in Earth Science*, 22(9): 931–939 (in Chinese with English abstract).
- Fang Shihu, Zhao Mengjun, Zhang Shuichang. 2013. Structural control on hydrocarbon accumulation and its implication for petroleum exploration Northern Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 132–138 (in Chinese with English abstract).
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, Zhang Tonggang. 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539–544 (in Chinese with English abstract).
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531–542.
- Floyd P A, Winchester J A, Park R G. 1989. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland[J]. *Precambrian Research*, 45(1): 203–214.
- Fu Suotang. 2010. Key controlling factors of oil gas accumulation in the western Qaidam Basin and its implications for favorable exploration direction[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 373–379 (in Chinese with English abstract).
- Ge Xiaohong, Liu Junlai. 2000. Broken “Western China Craton” [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C. 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107–118.
- Guo Jinjing, Zhang Guowei, Lu Songnian, Zhao Fengqing. 1999. Neoproterozoic continental block collage of China and Rodinia supercontinent[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(2): 148–156 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zeqing, Liu Weihong, Zhong Jianhua, Yang Heshan, Rao Mengyu. 2005. Overpressure in the Cenozoic of Western Qaidam Basin: Distribution, generation and effect on oil-gas migration[J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(3): 376–389 (in Chinese with English abstract).
- He Zizhen, Liu Zhifei, Li Jianru, Xie Xin. 2012. Elemental geochemical records in the Western South China Sea since 540 ka and their paleoenvironmental implications[J]. *Advances in Earth Science*, 27(3): 327–336 (in Chinese with English abstract).
- Hui Bo, Yi Haisheng, Xia Guoqing, Ma Xue. 2011. Characteristics of Cenozoic sedimentary evolution in western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 38(5): 1274–1281 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Rongbao, Chen Xuanhua, Dang Yuqi, Yin An, Wang Liquan. 2008. Apatite fission track evidence for two Phases Mesozoic-Cenozoic thrust faulting in eastern Qaidam Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(1): 116–124 (in Chinese with English abstract).
- Johnsson M J, Basu A C. 1993. Processes controlling the composition of clastic sediments[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 1–19.
- Liu Bing, Xu Bei, Meng Xiangying, Kou Xiaowei, He Jinyou. 2007. Study on the chemical index of alteration of Neoproterozoic strata in the Tarim plate and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1664–1670 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kang, Wang Weitao, Zhao Xudong, Pang Jianzhang, Yu Jingxing. 2020. Provenance identification for the Honggou section of the Qaidam basin in the northeastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 716–728 (in Chinese with English abstract).
- Lu Linlin, Ji Youliang, Liu Yuntian, Shou Jianfeng, Huang Jianyun. 2008. Distribution characteristics and controlling factors of depositional systems of the Neogene Xiayoushashan Formation in Hongliuquan-Yuedong area, Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(2): 139–149 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M, Hemming S. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(1): 1833–1839.
- McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R. 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from Metasedimentary rocks, Southwestern North America[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6): 1153–1177.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 97(2): 129–147.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation*[M]. New York: Longman.
- Song Guangyong, Gong Qingshun, Pang Hao, Xia Zhiyuan, Li Senming, Wu Jin, Tian Mingzhi, Huang Xuebing. 2020. High-precision sequence stratigraphy and sandbody architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 188–200 (in Chinese with English abstract).
- Sui Liwei, Fang Shihu, Sun Yonghe, Yang Chunyan, Meng Qingyang. 2014. The tectonic evolution and accumulation controlling characteristics of Shizigou-Yingdong structural belt of western Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 261–270 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication.



- Vandekamp P C, Leake B E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 76(4): 411–449.
- Wang E, Xu F Y, Zhou J X. 2006. Eastward migration of the Qaidam Basin and its implications for Cenozoic Evolution of the Altyn Tagh fault and associated river systems[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118: 349–365.
- Wang Guihong, Li Yongtie, Zhang Min. 2004. Cenozoic dynamics Characteristics of tectonic evolution in Yingxiongling (YL) Area in Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 417–423 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liang, Xiao Ancheng, Gong Qinglin, Liu Dong, Shen Zhongyan. 2010. The unconformity in Miocene sequence of western Qaidam Basin and its tectonic significance[J]. *Science China Earth Science*, 40(11): 1582–1590 (in Chinese).
- Wang Yanqing, Gong Qing, Xia Zhiyuan, Xiong Shaoyun. 2012. Provenance analysis of Oligocene sediments in western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 39(2): 426–435 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yinze, Song Yan, Jia Chengzao, Guo Bincheng, Zhang Qiquan. 2005. Sedimentary features in a sequence stratigraphic framework in the north area of Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 195–203 (in Chinese with English abstract).
- Xin Houtian, Wang Huichu, Zhou Shijun. 2006. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 29(4): 311–320 (in Chinese with English abstract).
- Yan Bingquan, Wu Kelong, Wang Wenteng. 1993. Study on the genetic mineralogy of magnetite from the Zhangzhou complex Massif in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 12(1): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tongxu, Yu Reng'an, Rong Hui, Li Tong, Zhu Qiang, Si Qinghong, Tu Jiarun, Peng Shenglong. 2023. Geochemical characteristics of the Middle Jurassic Zhiluo Formation in the northeastern Ordos Basin and its implications for uranium mineralization[J]. *North China Geology*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1471.P.20230510.1837.004.html> (in Chinese with English abstract).
- Ye Xiantao, Zhang Chuanlin. 2019. Advances in Meso–to Neoproterozoic stratigraphy of the southwestern Tarim[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 161–168 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Qing, Zhou Xianqiang, Wang Xiaofeng, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(1): 1257–1295.
- Yin A, Dang Y Q, Zhang M, Michael W M, Burgess W P, Chen X H. 2007. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its surrounding Regions (Part 2): Wedge tectonics in southern Qaidam Basin and the eastern Kunlun range[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 433(1): 369–390.
- Yu Chao. 2020. Geochronological and geochemical characteristics of the tonalite and its geological implication in the Qinyuan area, Northern Liaoning Province[J]. *Geological Survey and Research*, 42(1): 18–29 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianying, Chen Qilin, Chen Yingbin, Yan Cunfeng. 2006. Petroleum geological character and favorable exploration domains of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 17(5): 640–644 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, Yu Rengan, Yu Hang, Feng Ping, Ao Cong, Li Jianguo, Li Zhidan. 2020. The characteristics of sedimentary and uranium source analysis of the Neogene Youshashan Formation in Huatugou area, North Qaidam[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(9): 3427–3434 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 艾桂根. 2001. 柴达木盆地西北部第三系层序地层特征及可地浸砂岩型铀矿找矿方向[J]. *铀矿地质*, 17(4): 209–215.
- 曹国强, 陈世悦, 徐凤银, 彭德华, 袁文芳. 2005. 柴达木盆地西部中—新生代沉积构造演化[J]. *中国地质*, 32(1): 3–40.
- 陈能松, 王勤燕, 陈强, 李晓彦. 2007. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J]. *地学前缘*, 14(1): 43–55.
- 陈世悦, 徐凤银, 彭德华. 2000. 柴达木盆地基底构造特征及其控油意义[J]. *新疆石油地质*, 21(3): 175–179.
- 陈小双, 吕奥, 宋贺民, 刘磊, 杨宝忠, 侯红星. 2018. 新疆阿合奇地区志留系砂岩地球化学特征及大地构造背景[J]. *古地理学报*, 20(2): 271–284.
- 戴俊生, 曹代勇. 2000. 柴达木盆地构造样式的类型和展布[J]. *西北地质科学*, 21(2): 57–63.
- 戴俊生, 叶兴树, 汤良杰, 金之钧, 邵文斌, 胡勇, 张兵山. 2003. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. *地质科学*, 38(3): 413–424.
- 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 秦志勇, 罗进雄. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. *地球科学进展*, 22(9): 931–939.
- 方世虎, 赵孟军, 张水昌. 2013. 柴达木盆地北缘构造控藏特征与油气勘探方向[J]. *地学前缘*, 20(5): 132–138.
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 10(4): 539–544.
- 付锁堂. 2010. 柴达木盆地西部油气成藏主控因素与有利勘探方向[J]. *沉积学报*, 28(2): 373–379.
- 葛肖虹, 刘俊来. 2000. 被肢解的“西域克拉通”[J]. *岩石学报*, 16(1): 59–66.
- 郭进京, 张国伟, 陆松年, 赵凤清. 1999. 中国新元古代大陆拼合与Rodinia超大陆[J]. *高校地质学报*, 5(2): 148–156.
- 郭泽清, 刘卫红, 钟建华, 杨和山, 饶孟余. 2005. 柴达木盆地西部新

- 生界异常高压:分布、成因及对油气运移的控制作用[J]. 地质科学, 40(3): 376-389.
- 贺子丁, 刘志飞, 李建如, 谢昕. 2012. 南海西部54万年以来元素地球化学记录及其反映的古环境演变[J]. 地球科学进展, 27(3): 327-336.
- 惠博, 伊海生, 夏国清, 马雪. 2011. 柴达木盆地西部新生代沉积演化特征[J]. 中国地质, 38(5): 1274-1281.
- 蒋荣宝, 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 汪立群. 2008. 柴达木盆地东部中生代两期逆冲断层作用的FT定年[J]. 地球物理学报, 51(1): 116-124.
- 刘兵, 徐备, 孟祥英, 寇晓威, 何金有. 2007. 塔里木板块新元古代地层化学蚀变指数研究及其意义[J]. 岩石学报, 23(7): 1664-1670.
- 刘康, 王伟涛, 赵旭东, 庞建章, 俞晶星. 2020. 青藏高原东北缘柴达木盆地红沟剖面物源分析及其构造意义[J]. 地质学报, 94(3): 716-728.
- 路琳琳, 纪友亮, 刘云田, 寿建峰, 黄建军. 2008. 柴达木盆地红柳泉—跃东地区新近系下油砂山组沉积体系展布特征及控制因素[J]. 古地理学报, 10(2): 139-149.
- 宋光永, 宫清顺, 庞皓, 夏志远, 李森明, 伍劲, 田明智, 黄学兵. 2020. 柴达木盆地西部斜坡区下干柴沟组下段高精度层序地层及砂体构型分析[J]. 中国地质, 47(1): 188-200.
- 隋立伟, 方世虎, 孙永河, 杨春燕, 孟庆洋. 2014. 柴达木盆地西部狮子沟—英东构造带构造演化及控藏特征[J]. 地学前缘, 21(1): 261-270.
- 王桂宏, 李永铁, 张敏. 2004. 柴达木盆地英雄岭地区新生代构造演化动力学特征[J]. 地学前缘, 11(4): 417-423.
- 王亮, 肖安成, 巩庆霖, 刘东, 沈中延. 2010. 柴达木盆地西部中新统内部的角度不整合及其大地构造意义[J]. 中国科学:地球科学, 40(11): 1582-1590.
- 王艳清, 宫清, 夏志远, 熊绍云. 2012. 柴达木盆地西部地区渐新世沉积物源分析[J]. 中国地质, 39(2): 426-435.
- 吴因业, 宋岩, 贾承造, 郭彬程, 张启全. 2005. 柴北缘地区层序格架下的沉积特征[J]. 地学前缘, 12(3): 195-203.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 29(4): 311-320.
- 严炳铨, 吴克隆, 王文腾. 1993. 福建漳州复式岩体磁铁矿的成因矿物学特征[J]. 福建地质, 12(1): 1-16.
- 杨桐旭, 俞初安, 荣辉, 李彤, 朱强, 司庆红, 涂家润, 彭胜龙. 2023. 鄂尔多斯盆地东北部中侏罗统直罗组地球化学特征及对铀成矿的指示[J]. 华北地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1471.P.20230510.1837.004.html>.
- 叶现韬, 张传林. 2019. 塔里木西南中—新元古界研究进展[J]. 地质调查与研究, 43(2): 161-168.
- 余超. 2020. 辽北清原地区英云闪长岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质调查与研究, 42(1): 18-29.
- 袁剑英, 陈启林, 陈迎宾, 阎存凤. 2006. 柴达木盆地油气地质特征与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 17(5): 640-644.
- 张超, 王善博, 程银行, 俞初安, 于航, 冯平, 奥琮, 李建国, 李志丹. 2020. 柴西北缘花土沟地区新近系油砂山组沉积特征及铀源分析[J]. 科学技术与工程, 20(9): 3427-3434.