

# 柴达木盆地西缘古近系源-汇系统U-Pb定年和重矿物分析

杨国军<sup>1,2</sup>, 伍坤宇<sup>1,2</sup>, 张博策<sup>1,2</sup>, 尹志昊<sup>1,2</sup>, 王家豪<sup>3</sup>, 王牧<sup>1,2</sup>, 何小飞<sup>3</sup>,  
邢浩婷<sup>1,2</sup>, 邓立本<sup>1,2</sup>, 章珂<sup>3</sup>, 王转转<sup>1,2</sup>

1 青海省高原咸化湖盆油气地质重点实验室; 2 中国石油青海油田公司;  
3 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室

**摘要** 受阿尔金山物源供给影响,柴达木盆地西缘的储层物性总体上差且非均质性强。为了实现有利储层分布预测,亟待开展源-汇系统精细划分。应用野外露头 and 钻井岩心样品,综合采用碎屑锆石U-Pb同位素定年、重矿物组合分析以及砂体展布分析等方法,开展了研究区古近系下干柴沟组上段的源-汇系统分析。结果表明:研究区可划分为七个泉、狮北、干柴沟、咸水泉和咸东共5个源-汇系统,不同源-汇系统表现出重矿物组合、标志重矿物含量的差异,以及不同的峰值年龄、峰值年龄组合和年龄谱图形样式;物源年龄主要在200~520 Ma之间,母岩以岩浆岩和变质岩为主。受这些物源供给,研究区相应地发育扇三角洲—湖底扇沉积体系,其规模差异较大。受多物源供给的影响,单一分析方法可能会导致源-汇系统划分的不确定性,因此采取多种分析方法相结合,并且互为验证,才能取得比较正确的认识。

**关键词** 源-汇系统; 锆石U-Pb同位素定年; 重矿物组合; 下干柴沟组; 古近系; 柴达木盆地

**中图分类号**: TE121.3 **文献标识码**: A

**引用**: 杨国军, 伍坤宇, 张博策, 等. 柴达木盆地西缘古近系源-汇系统U-Pb定年和重矿物分析[J]. 海相油气地质, 2024, 29(3): 269-279.

YANG Guojun, WU Kunyu, ZHANG Boce, et al. Application of U-Pb isotopic dating and heavy mineral assemblage to source-sink system analysis of the Paleogene in western margin of Qaidam Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(3): 269-279.

## 0 前言

沉积物源分析是指分析研究沉积物源的位置、性质和搬运路径,在揭示沉积盆地的大地构造背景和古环境恢复中具有重要意义。通过长期的探索,前人总结了重矿物组合、轻矿物组合、砂岩百分含量、古水流方向标志、地球化学、古构造与古地形等多种沉积物源分析方法<sup>[1-6]</sup>。近年来,沉积物源分析被进一步与搬运通道和沉积相类型研究连接起来,升级命名为“源-汇系统”分析。从而,物源区到汇水区被视为一个整体进行研究,研究地域也从单个的盆地扩展至盆-山尺度。随着碎屑锆石U-Pb同位素定年作为一种重要技术手段被引入,“源-汇系统”研究又取得了新进展。普遍地,沉积物所包含的源区母岩信息随着搬运距离的增加而发生不同

程度的改变,而锆石U-Pb同位素具有相对稳定的优势,从而在“源-汇系统”分析中得到了越来越多的应用<sup>[7-8]</sup>。

受玛湖凹陷三叠系砂砾岩大面积油气成藏和勘探巨大成功的启发,近年来各大油田加紧了对砂砾岩油藏的研究<sup>[9-10]</sup>。柴达木盆地的西部毗邻阿尔金山,同样具备造山带山前砂砾岩油藏发育的有利条件。但前期的勘探结果表明,该区储层砂体的物性普遍不佳且非均质性强<sup>[11]</sup>,以致油气显示层多但获工业油流少,这种情况很大程度上受到物源供给强弱差异的影响,由此提出了细分源-汇系统、落实有利储层分布的需求。因此,前人针对构造演化和油田勘探区带划分,采用重矿物组合、轻矿物组合、稀土元素、古水流恢复以及少量的锆石定年等方法开展了研究。王艳清等<sup>[12]</sup>划分了渐新世阿尔金东

收稿日期: 2024-03-12; 改回日期: 2024-07-20

本文受中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“陆相页岩油规模增储上产与勘探开发技术研究”(编号:2023ZZ15)资助

**第一作者**: 杨国军, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气藏地质研究。通信地址: 736202 甘肃省敦煌市七里镇青海油田勘探开发研究院; E-mail: 158635403@qq.com

**通信作者**: 伍坤宇, 高级工程师, 主要从事沉积储层及非常规油气地质研究。通信地址: 736202 甘肃省敦煌市七里镇青海油田勘探开发研究院; E-mail: wukunyu1986@126.com

段物源、阿尔金西段物源、阿拉尔物源等6大物源体系。赵健等<sup>[13]</sup>在阿尔金山前带西段古近系下干柴沟组识别了8个扇体分布区<sup>[14]</sup>。总体上,前人的认识还存在分歧,源-汇系统有待进一步落实。

本文基于野外露头 and 钻井资料,采取碎屑锆石U-Pb定年、重矿物组合和砂体展布等方法相结合,以下干柴沟组上段为目的层段,分析了柴达木盆地阿尔金山前西段的源-汇系统,探讨了源区母岩的岩石类型,总结了各个源-汇系统的重矿物组合和U-Pb年龄谱系特征。

## 1 地质概况

柴达木盆地位于青藏高原东北缘,是中国3大内陆盆地之一。其周边分别被昆仑山、阿尔金山和祁连山环绕(图1a),属中-新生代大型封闭型山间断陷盆地<sup>[15-16]</sup>。受中-新生代以来印度板块向欧亚板块俯冲作用,尤其是燕山晚期和喜马拉雅末期强烈构造运动的影响,柴达木盆地现今呈现“多凹多隆”的构造格局,包括西部坳陷区、东部坳陷区和北

缘块断带等3个一级构造单元<sup>[17]</sup>。本文的研究区位于西部坳陷区的西端,毗邻阿尔金山前,表现为持续发育的盆缘隆起—斜坡地貌(图1a,图1b),面积约为2 000 km<sup>2</sup>。

野外露头调查和钻井揭示,研究区新生界自下而上发育古近系古—始新统路乐河组,渐新统下干柴沟组下段和上段;新近系中新统上干柴沟组,上新统下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组;以及第四系更新统七个泉组(图1c)。下干柴沟组上段是本文研究的目的层段,也是研究区烃源岩发育和主力含油气层位。

阿尔金山前带地形坡度大,新生代持续发育扇三角洲—湖底扇沉积<sup>[18]</sup>,砂体厚度大。研究区紧临红狮、小梁山2个富烃凹陷,成藏条件优越,下干柴沟组石油估算资源量达5亿吨。目前,研究区已发现了七个泉、咸水泉、红沟子等油田<sup>[13]</sup>。2020年以来实施完成的阿探1井和阿探2井在下干柴沟组上段分别获工业油流和良好油气显示,预示着研究区具备进一步勘探的潜力。

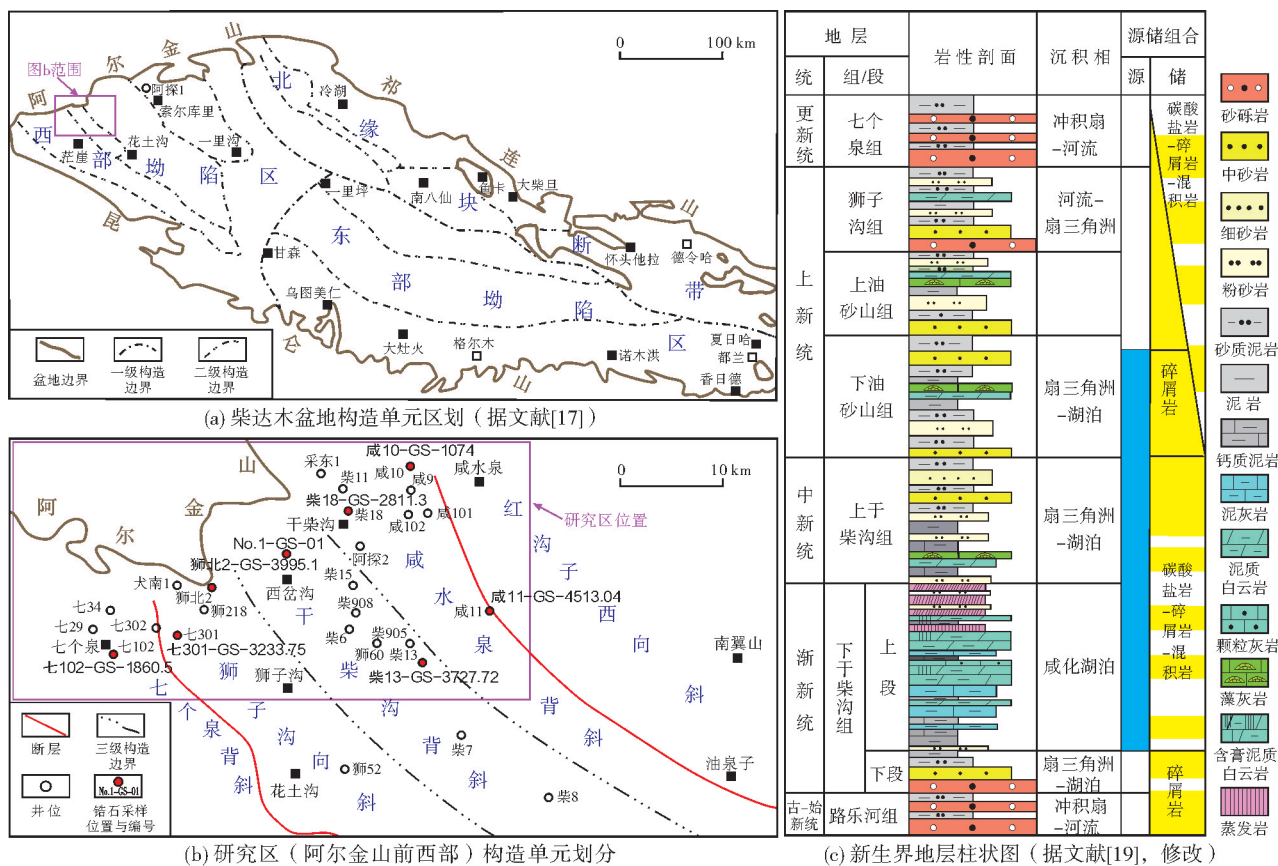


图1 研究区构造位置及地层柱状图

Fig. 1 Tectonic units and stratigraphic column of the study area

## 2 数据和方法

本文采用了碎屑锆石U-Pb同位素定年、重矿物组合和地层砂体展布(含砂率和砂岩等厚图)的方法。

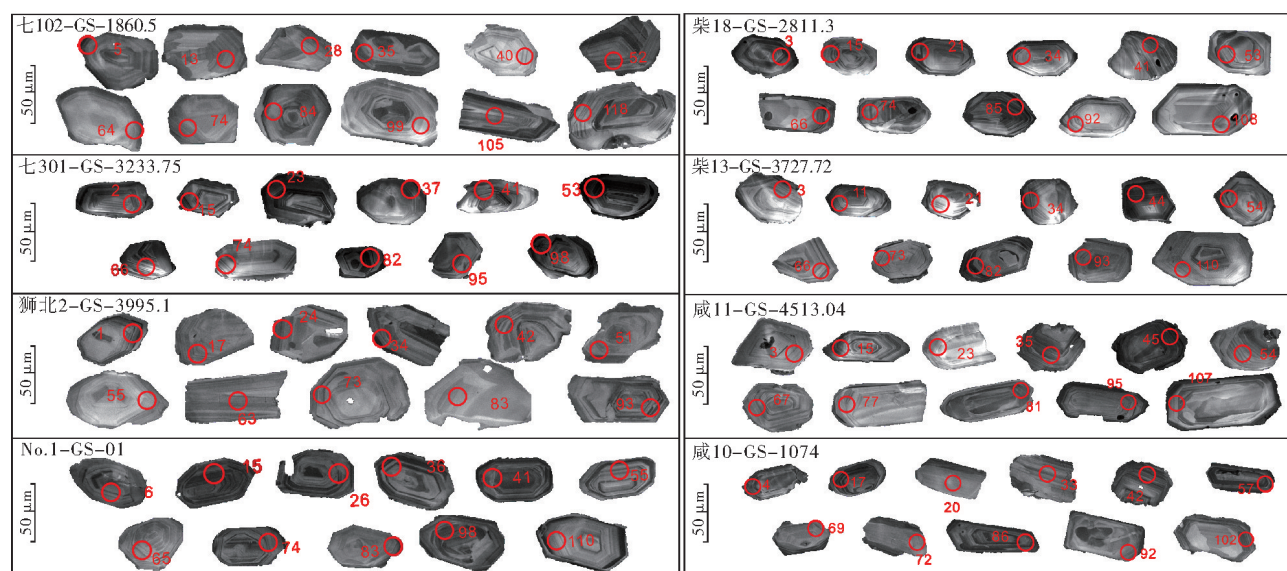
### 2.1 碎屑锆石U-Pb同位素定年方法

在众多的碎屑矿物中,锆石具有在沉积岩中分布广、抗风化能力强,U(铀)和Th(钍)元素的初始浓度高、Pb(铅)元素的初始浓度低,U-Th-Pb系统的封闭温度高(>900℃)等优点,有利于获取准确可靠的U-Pb同位素年龄<sup>[20-23]</sup>。本次研究的碎屑锆石样品来自钻井岩心和阿尔金山前野外露头,共采集了8个砂岩样品,均为灰白色细—粗砂岩,7个钻井样品

编号分别为七102-GS-1860.5、七301-GS-3233.75、狮北2-GS-3995.1、柴18-GS-2811.3、柴13-GS-3727.72、咸10-GS-1074、咸11-GS-4513.04,1个露头样品编号为No.1-GS-01(采样位置见图1b)。样品测试由四川创源微谱科技有限公司完成。

#### 2.1.1 检测流程

首先是锆石制备,包括破碎、淘洗、重液法和人工挑选获取锆石、照相等实验步骤。每个样品挑选的锆石数量为90~119个,颗粒直径为50~200 μm,镜下多呈自形—半自形,晶棱锋锐,在阴极发光(CL)下颜色明亮(图2),具有清晰的岩浆震荡环带,Th/U值普遍大于0.4,指示样品为岩浆成因<sup>[24-26]</sup>。



注:数值和红圈分别为挑选的锆石编号和打点位置。

图2 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段碎屑锆石阴极发光图像

Fig. 2 Detrital zircon cathodoluminescence images of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

随后,采用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)完成定年测试。在激光剥蚀过程中,通入少量高纯氮气5 mL/min以增强灵敏度。激光条件参数为:氮气流速为350 mL/min,光斑直径为20 μm,频率为6 Hz,能量密度为3 J/cm<sup>2</sup>。每个样品表面剥蚀5次,用于清洗表面Pb污染;然后吹扫7 s,本底收集15 s,剥蚀时间设置为20 s,最后吹扫5 s。在测年和微量元素含量处理中,采用锆石标样91500<sup>[27]</sup>和玻璃标准物质NIST 612作外标,分别进行同位素和微量元素校正;以Tanz锆石(566.16 ± 0.77 M)为盲样,检验U-Pb定年数据质量<sup>[28-29]</sup>。

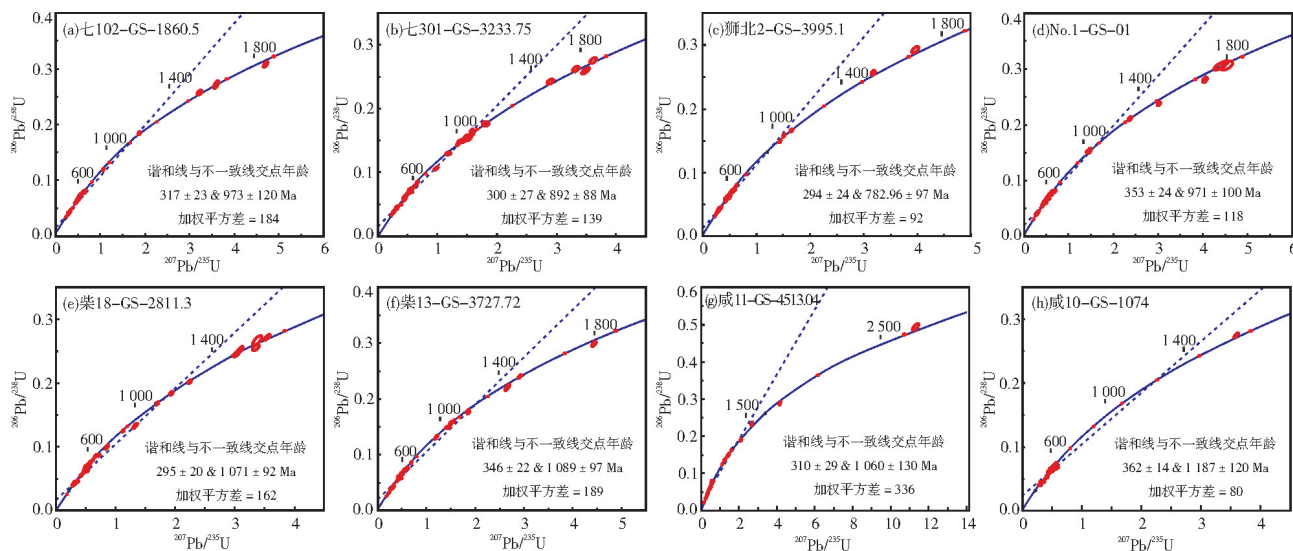
#### 2.1.2 测年结果检验

U包括<sup>235</sup>U和<sup>238</sup>U两种放射性同位素。其中,<sup>235</sup>U衰变为<sup>207</sup>Pb,<sup>238</sup>U衰变为<sup>206</sup>Pb。因此,采取U-Pb法测定一个样品可以同时获得3个年龄,习惯采用 $t_{207/235}$ 、 $t_{206/238}$ 、 $t_{207/206}$ 表示(数字分别对应上述2种同位素的相对原子质量,如 $t_{207/206}$ 表示<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb计算获得的年龄)。同一个样品所获得的这3个年龄应该在误差范围内一致,该特点可用于彼此检验<sup>[30]</sup>。检验的具体方法是:利用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U两组含量的比值绘制U-Pb谐和图,其交会点趋于一致并落在谐和线上,二者的年龄称为U-Pb谐和年龄;发生了不同程度Pb丢失的锆石,其交会点将偏离谐



和曲线而沿一条直线分布,即不一致线,它与谐和曲线出现2个交点,交点年龄被解释为锆石晶体的形成年龄,也就是造成Pb丢失的地质事件的发生时间<sup>[7]</sup>。经过检验,本次研究的测年数据点均为有效点,谐和度普遍在90%以上。样品七301-GS-

3233.75和柴18-GS-2811.3的部分锆石颗粒存在一定程度的铅丢失现象,即个别交会点落在不一致线上,这种情况下选用 $t_{206/238}$ 年龄(图3b,图3e);其他样品的谐和度高,即交会点全部落在谐和线上,采用 $t_{207/206}$ 年龄(图3a,图3c,图3d,图3f—3h)。



注:蓝色虚线为不一致线,蓝色实线为谐和线,数字为年龄/Ma;红圈为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄的交会点,红圈椭圆(误差圈)大小指示数据误差范围。

图3 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段碎屑锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 3 Harmonic plots of detrital zircon U-Pb isotopic ages of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

## 2.2 重矿物组合方法

### 2.2.1 重矿物组合与母岩的关系

重矿物是指碎屑岩中相对密度大于 $2.86\text{ g/cm}^3$ 的陆源碎屑矿物<sup>[31]</sup>。重矿物应用于物源分析的原理在于,不同类型的母岩有其特定亲疏关系的重矿物组合,这种亲疏关系在沉积物中能得到较好的保存<sup>[32-34]</sup>。例如,晶形完好的锆石、电气石、磷灰石等重矿物组合指示中酸性岩浆岩的存在;大量赤铁矿、磁铁矿、钛铁矿、角闪石以及橄榄石和辉石的出现说明基性火成岩的存在;石榴子石、绿帘石、绿泥石主要是变质成因<sup>[33]</sup>。进一步地,重矿物成熟度还可以用于分析沉积物的搬运距离,常用锆石、电气石、金红石在重矿物中所占的比例( $ZTR=(\text{锆石含量}+\text{电气石含量}+\text{金红石含量})/\text{重矿物含量}\times 100$ )来表达。随着离母岩区距离的增加,稳定重矿物的含量相对升高,成熟度越高,ZTR值越大。本文采取了重矿物组合和ZTR等值线图相结合的方法。

### 2.2.2 R型聚类分析

在重矿物组合分析中,可以采用部分稳定重矿

物或全部重矿物。本文首先尝试了部分稳定重矿物组合的方法,但结果不理想,部分稳定重矿物含量难以直观区分不同物源。随后,选取了含量较高的8种稳定重矿物(锆石、电气石、白钛矿、榍石、石榴石、褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿)和3种不稳定重矿物(绿帘石、角闪石、硅灰石),采取了统计学方法——R型聚类分析方法。该方法用于不同变量之间进行比较,根据变量之间的相似程度或亲疏关系逐步分类<sup>[35-37]</sup>。

## 3 结果与讨论

通过碎屑锆石U-Pb同位素定年、重矿物组合和地层砂体展布的综合分析,将研究区划分为七个泉、狮北、干柴沟、咸水泉和咸东共5个源-汇系统。

### 3.1 碎屑锆石U-Pb同位素年龄谱特征

测年结果显示,研究区碎屑锆石的U-Pb同位素年龄范围为100~2 600 Ma,主要分布在200~520 Ma之间(表1)。在600~2 600 Ma区间的样品数量极少,指示物源的意义小,本文未加讨论。根据峰值年龄、峰值年龄组合、年龄谱的图形样式以及样品

点的位置,上述8个样品可分为4类(图4),对应狮北、干柴沟、咸水泉和咸东等4个源-汇系统。

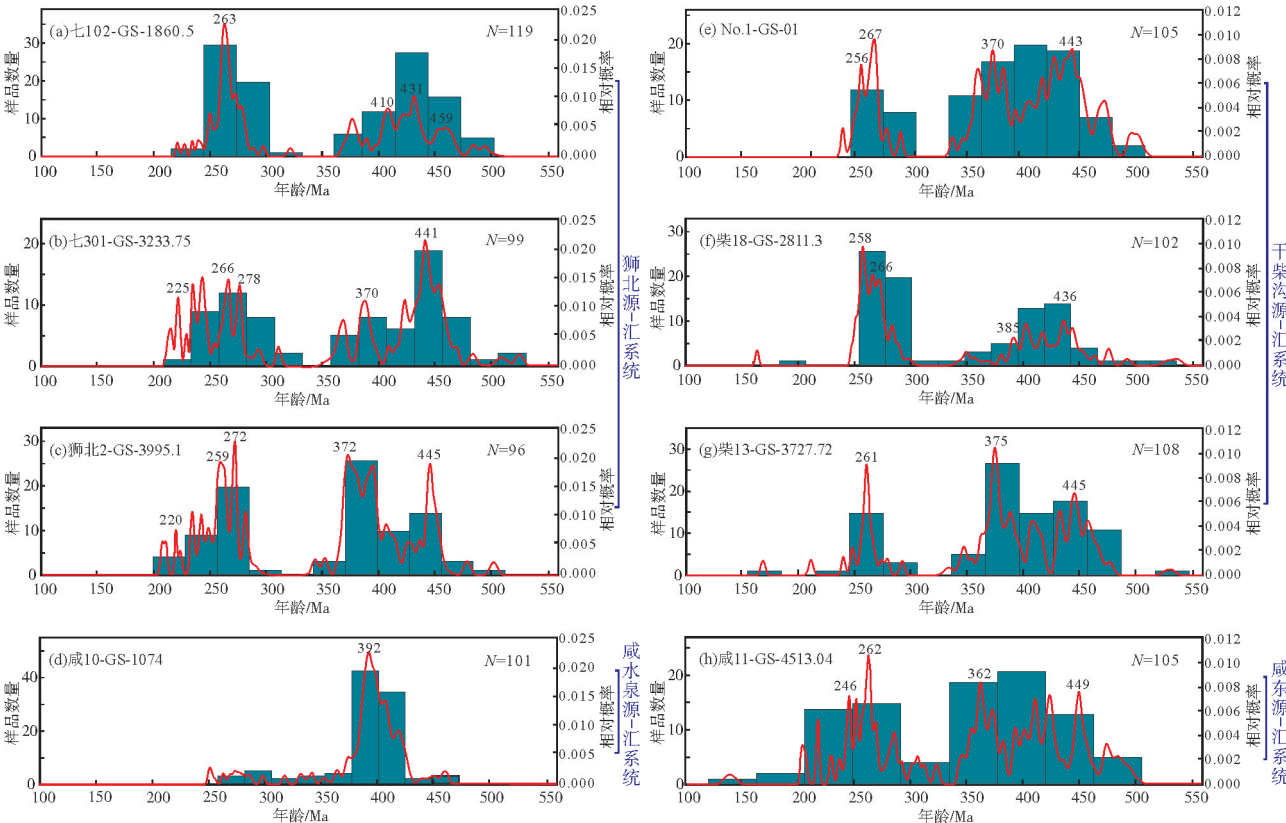
狮北源-汇系统 由七102-GS-1860.5、七301-GS-3233.75、狮北2-GS-3995.1样品指示(图4a—4c)。其中,七301-GS-3233.75、狮北2-GS-3995.1样品有3个相近的年龄峰值,分别为220~225 Ma、

370~372 Ma、441~445 Ma,尽管主峰年龄存在一定差异,但年龄谱的图形十分相似。七102-GS-1860.5样品的年龄谱有1个主峰值年龄263 Ma和2个次峰值年龄410 Ma、431 Ma,与其他2个样品的特征接近,且年龄区间和年龄谱的图形样式总体具有较大吻合度,因此,将七102井划归为狮北源-汇系统。

表1 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段碎屑锆石U-Pb同位素定年结果

Table 1 Results of detrital zircon U-Pb isotopic dating of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

样品号	点数	有效点数	主要峰值年龄/Ma	次要峰值年龄/Ma	主要年龄区间/Ma	源-汇系统
七102-GS-1860.5	120	119	263	410、431、459	220~300、360~510	狮北
七301-GS-3233.75	100	99	441	225、266、278、370	200~300、340~520	
狮北2-GS-3995.1	100	96	272	220、259、372、445	200~300、340~520	
No.1-GS-01	110	105	267	256、370、443	240~300、330~500	干柴沟
柴18-GS-2811.3	110	102	258	266、385、436	240~300、330~500	
柴13-GS-3727.72	110	108	375	261、445	200~300、340~500	
咸10-GS-1074	104	101	392	—	250~470	咸水泉
咸11-GS-4513.04	109	105	262	246、362、449	200~300、340~500	咸东



注:图上的红色曲线表示相对概率,数字指示峰值年龄/Ma;直方图指示样品数量。

图4 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段锆石U-Pb同位素年龄谱图

Fig. 4 Spectrum of detrital zircon U-Pb isotopic ages of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

千柴沟源-汇系统 由No.1-GS-01、柴18-GS-2811.3、柴13-GS-3727.72样品指示(图4e—4g)。其中,No.1-GS-01与柴13-GS-3727.72样品的年龄谱相似度高。No.1-GS-01与柴18-GS-2811.3样品虽然在350~500 Ma之间分布频率(曲线幅度值)存在差异,但在230~300 Ma之间年龄谱特征基本相同。

咸水泉源-汇系统 由咸10-GS-1074样品指示(图4d),有1个年龄峰值392 Ma,在250~350 Ma之间分布频率低,总体特征与咸10井两侧的柴18-GS-2811.3样品(图4f)、咸11-GS-4513.04样品(图4h)所指示的特征差异明显。

咸东源-汇系统 由咸11-GS-4513.04样品指示(图4h),有1个年龄主峰(262 Ma)和3个次峰(246 Ma、362 Ma、449 Ma)。与柴13-GS-3727.72样

品(图4g)在250~300 Ma之间年龄谱基本相似,但其他部分差异明显。

### 3.2 重矿物组合特点

在以上碎屑锆石U-Pb同位素定年分析的基础上,鉴于重矿物数据量多,因此进行其组合分析对前面的物源划分进一步细化和检验。本文重矿物组合分析数据来自于15口钻井(表2)。选取含量较高的11种重矿物进行R型聚类分析(图5),进行物源分区。随后,编制ZTR等值线图,揭示沉积物延伸方向和波及范围。从图6可以看出,下干柴沟组上段沉积时期研究区可划分为七个泉、狮北、干柴沟、咸水泉和咸东共5个源-汇系统,沉积物搬运呈SE、SSW方向。

表2 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段砂岩重矿物含量和参数表  
Table 2 Heavy mineral contents and parameter of sandstones of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

井号	重矿物含量/%																		ZTR
	锆石	电气石	白钛矿	榍石	石榴石	褐铁矿	赤铁矿	磁铁矿	绿帘石	角闪石	硅灰石	绿泥石	黑云母	黝帘石	透闪石	辉石	十字石	金红石	
咸7井	20.1	3.1	0.0	0.6	25.8	6.9	0.0	8.8	8.8	20.1	1.3	0.0	0.0	1.3	0.0	1.3	0.6	1.3	24.5
咸8井	26.9	1.4	9.0	4.1	4.8	0.0	11.0	33.1	2.1	4.8	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	1.4	0.0	0.7	29.0
咸10井	5.3	0.0	7.9	0.0	23.7	0.0	0.0	63.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3
柴11井	4.5	4.5	9.1	0.0	4.5	0.0	13.6	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.6	0.0	0.0	0.0	9.1
柴3井	20.8	3.3	52.6	3.3	3.3	0.0	0.8	6.7	0.8	4.2	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	24.1
柴6井	30.4	2.7	58.0	0.0	6.1	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.1
狮深15井	16.7	0.0	23.8	7.2	14.3	0.0	2.4	19.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	0.0	0.0	0.0	16.7
犬南1井	16.7	0.0	33.3	0.0	33.3	0.0	0.0	16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7
狮北1井	29.6	0.3	38.0	0.3	15.0	0.0	0.0	15.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.9
七102井	38.2	0.0	17.1	0.0	25.0	0.0	5.3	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.2
七23井	27.0	1.5	9.8	9.3	17.2	5.4	0.9	17.6	3.9	4.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	28.5
七24井	12.9	0.0	12.3	1.8	10.5	8.2	0.0	26.2	5.3	5.3	16.4	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9
七深2井	1.5	0.0	22.0	1.8	19.7	0.0	20.8	4.4	20.4	6.6	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7	0.4	0.4	0.0	1.5
七深10井	4.5	0.4	18.3	1.2	14.6	0.0	6.1	27.2	16.3	7.3	0.0	0.0	0.4	2.4	0.0	0.4	0.8	0.0	4.9
七深27井	16.7	0.0	16.7	0.0	16.7	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7

七个泉源-汇系统 包括七深10井、七深2井、七深27井和七24井,以白钛矿-石榴石-磁铁矿重矿物组合为特征,以含角闪石和绿帘石区别于邻区,所反映的母岩以岩浆岩和变质岩为主。ZTR指数从近山前(七深10井,七深2井)→远山前(七24井,七深27井)呈增大趋势,指示阿尔金山物源和向SE方向搬运沉积。如图5所示,七深27井虽然与咸10井、柴11井关系更近,但结合平面位置分析,该井不可能归属于咸10井、柴11井所在的咸水泉源-汇

系统。依据重矿物组合和ZTR指数,七深27井更多具备七个泉源-汇系统的重矿物组合特征。

狮北源-汇系统 包括七102井、七23井、犬南1井、狮深15井和狮北1井,以锆石-白钛矿-石榴石-磁铁矿组合为特征,以锆石和白钛矿高含量与邻近区分,所反映的母岩以变质岩为主,夹少量岩浆岩。ZTR指数从近山前(犬南1井,狮深15井附近)→山前(狮北1井,七23井)→远山前(七102井)呈增大趋势,指示阿尔金山物源和向SE方向的搬运沉积。

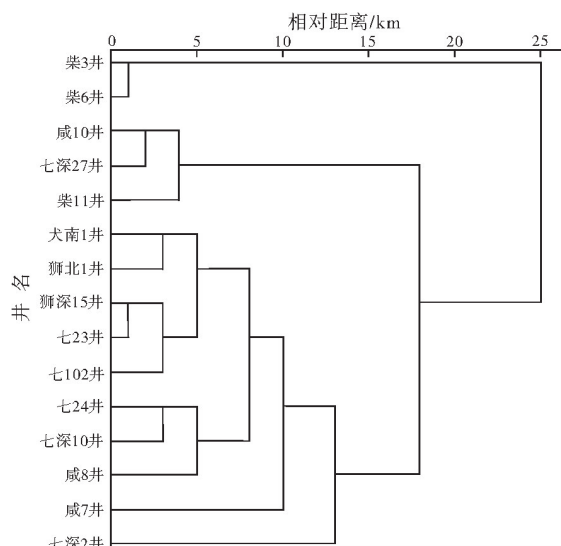


图5 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段砂岩重矿物R型聚类谱系图

Fig. 5 Heavy mineral R-type clustering diagram of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin

干柴沟源-汇系统 包括柴3井和柴6井,以锆石-白钛矿重矿物组合为特征,反映母岩以岩浆岩为主,有少量的变质岩。 $ZTR$ 指数从柴3井向柴6井呈增大趋势,指示阿尔金山物源和向SE方向的搬运沉积。

咸水泉源-汇系统 包括咸10井和柴11井,以锆石-白钛矿-石榴石-磁铁矿组合为特征,以高磁铁矿、低锆石含量区别于邻区,所反映的母岩以岩浆岩为主,夹少量的变质岩。咸7井与咸10井距离近,两者重矿物组合特征存在差别,咸7井含较多的褐铁矿和较少的磁铁矿,但两者均含较高的石榴石,由此将两者归为一类。咸10井和柴11井的 $ZTR$ 指数低,反映距离物源区近。 $ZTR$ 指数变化指示向SSW方向的搬运沉积。

咸东源-汇系统 包括咸8井,以锆石-石榴石-磁铁矿-角闪石组合为特征。以锆石高含量区别于咸水泉物源,以磁铁矿高含量区别于干柴沟物源,所反映的母岩以岩浆岩为主,夹少量的变质岩, $ZTR$ 指数指示向SSW方向的搬运沉积。如图5所示,咸8井虽然与七24井、七深10井关系更近,但结合平面位置分析,该井不可能归属于七24井、七深10井所在的七个泉源-汇系统。

### 3.3 砂体及沉积相平面展布特征

地层含砂率等值线图、砂岩等厚图是沉积相平面图的编制依据,是物源分析的方法之一,也是源-汇系统中“汇”的体现。根据研究区勘探开发的生

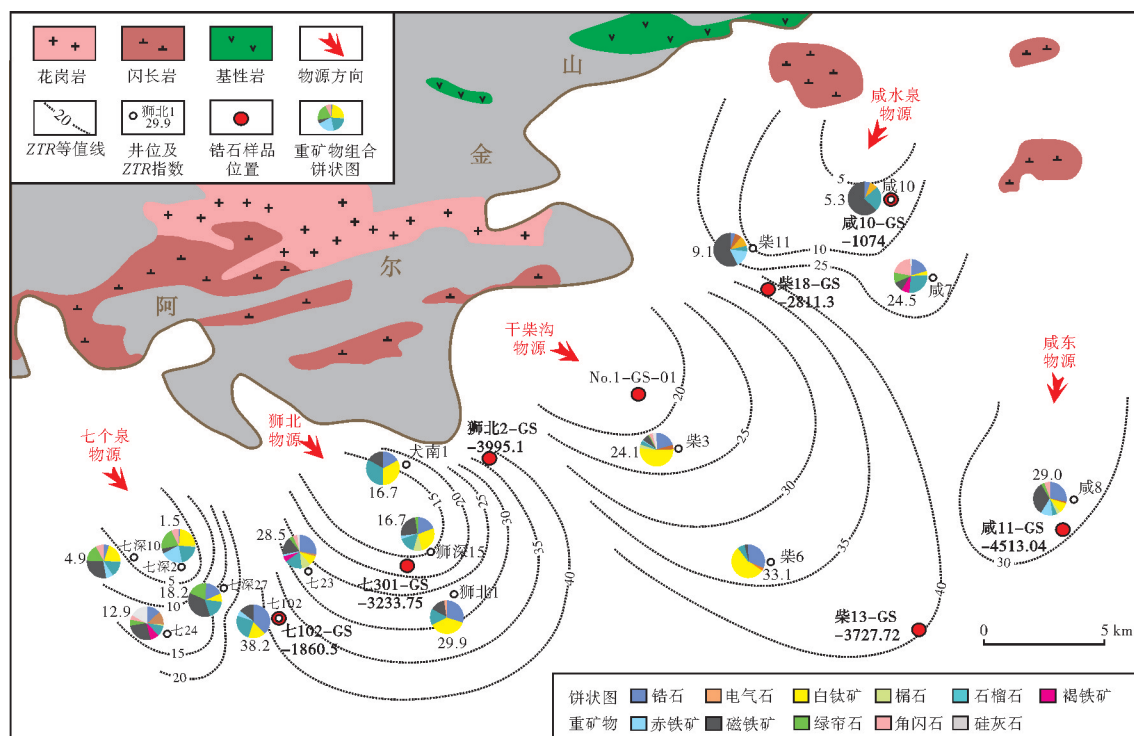


图6 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段砂岩重矿物组合饼状图分布、 $ZTR$ 等值线及沉积物源-汇系统划分

Fig. 6 Map of heavy mineral assemblage distribution,  $ZTR$  contour and sediment source-sink system division of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin



产需求,将下干柴沟组上段进一步细分为6个砂组(从下往上依次为Ⅵ—Ⅰ砂组)。其中,Ⅵ、Ⅴ、Ⅱ和Ⅰ砂组存在局部超覆或剥蚀缺失的现象,Ⅳ、Ⅲ砂组保存较完整。以Ⅳ砂组为例,依据含砂率等值线图(图7a)和砂岩等厚图(图7b),结合岩心和测井相标定,在阿尔金山山前可以厘定4个扇三角洲—湖底扇沉积体系(图7c),自西向东分别为七个泉扇三角洲、狮子沟扇三角洲、干柴沟扇三角洲和咸水泉扇三角洲。它们的发育程度存在较大差异:干柴沟扇三角洲规模大,砂岩累计最大厚度为218 m,含砂率最高达95.61%;其次是咸水泉三角洲,钻井揭示的面积小,但砂岩累计最大厚度达163 m,含砂率最大为79.2%;再次为狮子沟扇三角洲,钻井砂岩累计最大厚度为139 m,含砂率最大43%;七个泉扇三角洲的发育程度最小,砂岩累计厚度和含砂率最大分别为43 m和51.81%。湖底扇砂体厚度为0~134 m,含砂率均小于40%。此外,在下干柴沟组上段沉积时期研究区还发育碳酸盐丘滩沉积<sup>[19]</sup>。扇三角洲—湖底扇沉积体系规模的不同也被认为是造成研究区碎屑岩储层物性差异较大的原因。

### 3.4 源-汇系统分析中的不确定性

不难发现,在上述源-汇系统分析中,3种方法所获得的结果大体上是吻合的,但也出现了少量例外或不确定现象:其一,对于七102井的源-汇系统归属,锆石U-Pb同位素定年分析显示,七102-GS-1860.5测年样品的同位素年龄谱图特征与七301-GS-3233.75、狮北2-GS-3995.1(狮北源-汇系统)存在部分差异(图4a—4c),但重矿物聚类分析表明七102井明显属于狮北源-汇系统,以锆石高含量为特征(图6)。其二,在七个泉源-汇系统重矿物组合分析中,七深27井的聚类分析结果与柴11井、咸10井归在一类(图5),三者均具有磁铁矿特高含量的特点。但结合平面位置分析(图6),七深27井显然不能与咸10井和柴11井归属于一类。其三,咸8井虽然与七24井、七深10井关系更近(图5),但结合平面位置分析(图6),该井显然不能归属于后者所在的七个泉源-汇系统。其四,七24井的聚类分析结果显示与七深10井相关性强,但与七深2井的相关性弱,其较高的硅灰石含量与其他钻井不同,推测受到南部昆仑山物源的影响<sup>[13]</sup>。其五,咸7井和咸8井均具有锆石高含量和含角闪石的特点,但R型聚类分析显示的相关性并不高。

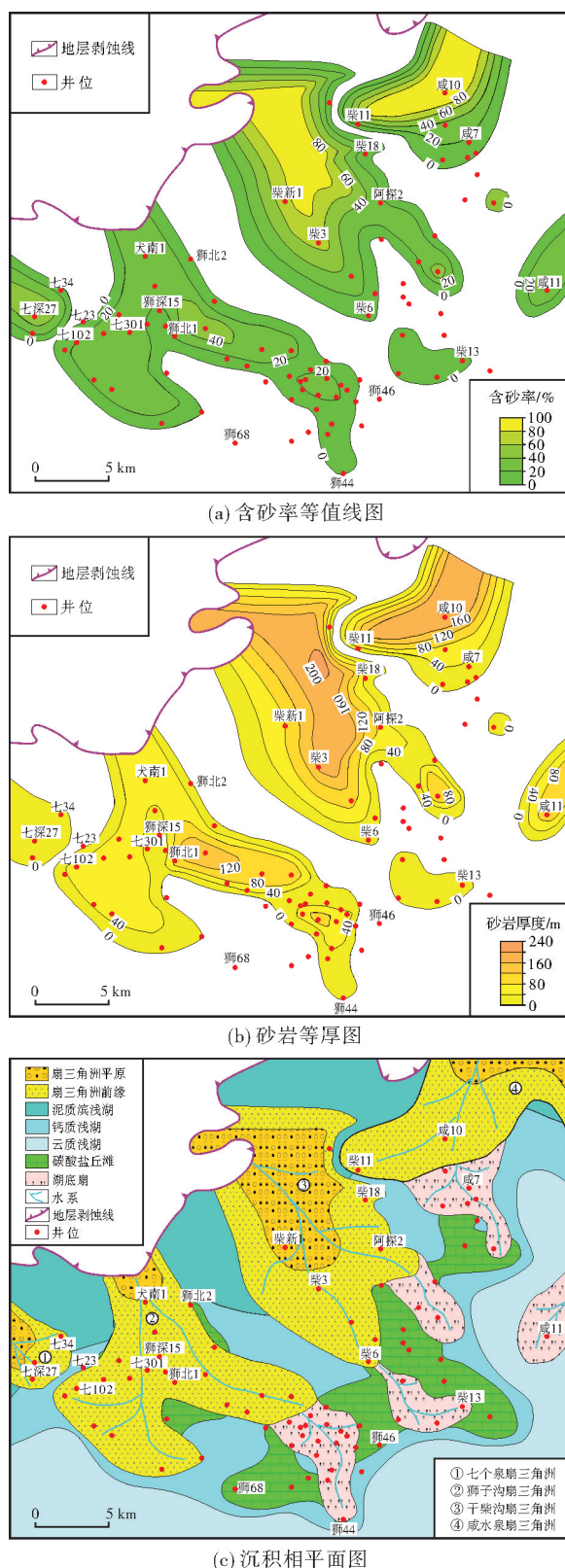


图7 柴达木盆地西缘古近系下干柴沟组上段Ⅳ砂组砂体及沉积相平面展布图

Fig. 7 Distribution maps of sandbodies and their sedimentary facies in sand-group IV of the Upper Member of Lower Ganciagou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin



以上不确定性势必造成源-汇系统划分的偏差,说明单一方法尚不能完全解决源-汇系统的划分问题,在这种情况下需要采取不同的方法相结合,才能减少偏差。本文将碎屑锆石U-Pb同位素定年与重矿物组合两者相互验证,取得了较好的效果。这种不确定性,究其原因在于,研究区物源近且数量多<sup>[13]</sup>,物源系统自身还存在迁移性,以致相邻的源-汇系统出现交叉影响。另外,上述不确定性推测还与目的层段地层厚度大、样品来自于不同的细分层位,以及同时期阿尔金山强烈走滑挤压活动有关<sup>[18,38]</sup>。

## 4 结 论

(1)依据碎屑锆石U-Pb同位素定年和重矿物组合,柴达木盆地西缘研究区下干柴沟组上段沉积时期可区分为七个泉、狮北、干柴沟、咸水泉和咸东共5个源-汇系统,沉积物搬运呈SE、SSW方向;研究区相应地发育规模差别较大的扇三角洲-湖底扇体系。

(2)物源年龄主要在200~520 Ma之间,母岩或者以岩浆岩为主夹少量的变质岩,或者以变质岩为主夹少量的岩浆岩。

(3)碎屑锆石U-Pb同位素定年、重矿物组合和砂体展布等3种方法在研究区源-汇系统划分中存在不一致或不确定性。在实际工作中,建议多方法相结合,互为补充和验证,才能取得完善的源-汇系统认识。

## 参 考 文 献

- [1] 杨忠芳,陈岳龙.陆源碎屑沉积作用对化学元素配分的制约:兼论五台地区前寒武纪碎屑沉积岩示踪源区陆壳成分的意义[J].地质评论,1997,43(6):593-600.  
YANG Zhongfang, CHEN Yue-long. Constraints of terrigenous clastic sedimentation on element partitioning: with a discussion of tracing the continental crustal composition of the provenance through Precambrian clastic sedimentary rocks in the Wutai area, Shaanxi Province[J]. Geological review, 1997, 43 (6): 593-600.
- [2] 杨守业,李从先.REE示踪沉积物物源研究进展[J].地球科学进展,1999,14(2):164-167.  
YANG Shouye, LI Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. Advances in earth science, 1999, 14 (2): 164-167.
- [3] 范代读,邱桂强,李从先,等.东营三角洲的古流向研究[J].石油学报,2000,21(1):29-33.  
FAN Daidu, QIU Guiqiang, LI Congxian, et al. Paleocurrent properties of Dongying delta in Bohai Bay Basin [J]. Acta petrolae sinica, 2000, 21(1): 29-33.
- [4] 蔺宏斌,姚泾利.鄂尔多斯盆地南部延长组沉积特性与物源探讨[J].西安石油学院学报(自然科学版),2000,15(5):7-9.  
LIN Hongbin, YAO Jingli. Depositional feature and material source analysis of Yanchang Group in Eerduosi Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (natural science edition), 2000, 15(5): 7-9.
- [5] 胡宗全,朱筱敏,彭勇民.准噶尔盆地西北缘车排子地区侏罗系物源及古水流分析[J].古地理学报,2001,3(3):49-54.  
HU Zongquan, ZHU Xiaomin, PENG Yongmin. Analysis of provenance and palaeocurrent direction of Jurassic at Chepaizi region in northwest edge of Junggar Basin [J]. Journal of palaeogeography, 2001, 3(3): 49-54.
- [6] 燕金梅,鞠江慧,王建功,等.地层倾角测井资料的地质应用[J].测井技术,2005,29(3):227-229.  
YAN Jinmei, JU Jianghui, WANG Jiangong, et al. Geologic application of diplog data [J]. Well logging technology, 2005, 29 (3): 227-229.
- [7] HE Jie, GARZANTI E, JIANG Tao, et al. Evolution of Eastern Asia river systems reconstructed by the mineralogy and detrital-zircon geochronology of modern Red River and coastal Vietnam river sand [J]. Earth-science reviews, 2023, 245: 104572.
- [8] 林旭,李玲玲,刘静,等.长江早更新世向江汉盆地输送碎屑物质:来自碎屑锆石U-Pb年龄的约束[J].地球科学,2023,48(11):4214-4228.  
LIN Xu, LI Lingling, LIU Jing, et al. Yangtze River contributed detrital materials to Jianghan Basin during Early Pleistocene: constraints from detrital zircon U-Pb ages [J]. Earth science, 2023, 48(11): 4214-4228.
- [9] 瞿建华,杨荣荣,唐勇.准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系源上砂砾岩扇一断一压三控大面积成藏模式[J].地质学报,2019,93(4):915-927.  
QU Jianhua, YANG Rongrong, TANG Yong. Large-area petroleum accumulation model of the Triassic glutenite reservoirs in the Mahu Sag, Junggar Basin: triple controls of fan, fault and overpressure [J]. Acta geologica sinica, 2019, 93(4): 915-927.
- [10] 庞小军,杜晓峰,王冠民,等.渤海海域渤中19-6构造及围区深层孔店组砂砾岩优质储层成因及孔隙演化[J].地球科学,2023,48(11):4153-4174.  
PANG Xiaojun, DU Xiaofeng, WANG Guanmin, et al. Genetic mechanism and pore evolution of high-quality glutenite reservoirs of deep Kongdian Formation in BZ19-6, Bohai Sea [J]. Earth science, 2023, 48(11): 4153-4174.
- [11] 宫清顺,刘占国,王波,等.山前冲断带砂砾岩储层发育机制及控制因素:以柴达木盆地昆北油田切12区为例[J].地球科学,2024,49(1):55-70.  
GONG Qingshun, LIU Zhanguo, WANG Bo, et al. Mechanism and controlling factors of sandy conglomerate reservoir in piedmont thrust belt: a case of Kunbei Oilfield, Qaidam Basin, NW China [J]. Earth science, 2024, 49(1): 55-70.
- [12] 王艳清,宫清顺,夏志远,等.柴达木盆地西部地区渐新世沉积物源分析[J].中国地质,2012,39(2):426-435.

- WANG Yanqing, GONG Qingshun, XIA Zhiyuan, et al. Provenance analysis of Oligocene sediments in western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 426–435.
- [13] 赵健, 王艳清, 王兆兵, 等. 阿尔金山前带西段古近系陡坡型扇体发育特征及油气勘探方向[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(4): 21–32.
- ZHAO Jian, WANG Yanqing, WANG Zhaobing, et al. Development characteristics and oil and gas exploration direction of Paleogene steep-slope fans in western segment of Altun piedmont[J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2023, 30(4): 21–32.
- [14] 曾旭, 付锁堂, 王波, 等. 柴达木盆地古近系下干柴沟组上段碎屑锆石 U-Pb 测年及盆山耦合探讨[J]. *地质学报*, 2024, 98(1): 79–105.
- ZENG Xu, FU Suotang, WANG Bo, et al. Detrital zircon U-Pb dating of the Paleogene Lower Ganchaigou Formation in the Qaidam Basin and discussion of basin-mountain coupling[J]. *Acta geologica sinica*, 2024, 98(1): 79–105.
- [15] 袁剑英, 陈启林, 陈迎宾, 等. 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*, 2006, 17(5): 640–644.
- YUAN Jianying, CHEN Qilin, CHEN Yingbin, et al. Petroleum geological character and favorable exploration domains of Qaidam Basin[J]. *Natural gas geoscience*, 2006, 17(5): 640–644.
- [16] 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探新进展[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊1): 1–10.
- FU Suotang, MA Dade, CHEN Yan, et al. New progress in oil and gas exploration in the Qaidam Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2016, 37(S1): 1–10.
- [17] 付锁堂. 柴达木盆地天然气勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(4): 1–10.
- FU Suotang. Natural gas exploration in Qaidam Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2014, 19(4): 1–10.
- [18] 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 等. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3701–3712.
- PAN Jiawei, LI Haibing, SUN Zhiming, et al. Tectonic responses in the Qaidam Basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh fault[J]. *Acta petrologica sinica*, 2015, 31(12): 3701–3712.
- [19] 朱超, 刘占国, 宋光永, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1558–1567, 1622.
- ZHU Chao, LIU Zhanguo, SONG Guangyong, et al. Sedimentary model, evolution and distribution of Paleogene lacustrine carbonate rocks in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2022, 43(11): 1558–1567, 1622.
- [20] BRADLEY D C, O'SULLIVAN P, BRADLEY L M. Detrital zircons from modern sands in New England and the timing of Neoproterozoic to Mesozoic magmatism[J]. *American journal of science*, 2015, 315(5): 460–485.
- [21] NUTMAN A P, HIESS J. A granitic inclusion suite within igneous zircons from a 3.81 Ga tonalite (w.Greenland): restrictions for Hadean crustal evolution studies using detrital zircons[J]. *Chemical geology*, 2009, 261(1/2): 77–82.
- [22] 陈道公, DELOULE E, 倪涛. 大别地体新店榴辉岩变质锆石 U-Pb 年龄和氧同位素研究[J]. *中国科学 D辑:地球科学*, 2005, 35(8): 691–699.
- CHEN Daogong, DELOULE E, NI Tao. Study on the U-Pb age and oxygen isotope of metamorphosed zircon in Xindian garnet of Dabie geobody[J]. *Science China (Part D:earth sciences)*, 2005, 35(8): 691–699.
- [23] 张凌, 王平, 陈玺赞, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学数据获取、分析与比较[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(4): 414–430.
- ZHANG Ling, WANG Ping, CHEN Xiyun, et al. Review in detrital zircon U-Pb geochronology: data acquisition, analysis and comparison[J]. *Advance in earth science*, 2020, 35(4): 414–430.
- [24] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 2009, 32(3): 161–174.
- LI Changmin. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. *Geological survey and research*, 2009, 32(3): 161–174.
- [25] VERMEESCH P. How many grains are needed for a provenance study?[J]. *Earth and planetary science letters*, 2004, 224(3/4): 441–451.
- [26] GARZANTI E, VERNEESCH P, RITTNER M, et al. The zircon story of the Nile: time-structure maps of source rocks and discontinuous propagation of detrital signals[J]. *Basin research*, 2018, 30(6): 1098–1117.
- [27] WIEDENBECK M, ALLÉ P, CORFU F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards newsletter*, 1995, 19(1): 1–23.
- [28] PATON C, HELLSTROM J, PAUL B, et al. Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. *Journal of analytical atomic spectrometry*, 2011, 26(12): 2508–2518.
- [29] HU Zhaochu, LI Xianhua, LUO Tao, et al. Tanz zircon megacrysts: a new zircon reference material for the microbeam determination of U-Pb ages and Zr-O isotopes[J]. *Journal of analytical atomic spectrometry*, 2021, 36(12): 2715–2734.
- [30] WETHERILL G W. Discordant uranium-lead ages[J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1956, 37(3): 320–392.
- [31] 和钟铎, 刘招君, 张峰. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(4): 29–32.
- HE Zhonghua, LIU Zhaojun, ZHANG Feng. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis[J]. *Geological science and technology information*, 2001, 20(4): 29–32.
- [32] 付玲, 关平, 赵为永, 等. 柴达木盆地古近系路乐河组重矿物特征与物源分析[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2867–2875.
- FU Ling, GUAN Ping, ZHAO Weiyong, et al. Mineral characteristics and provenance analysis of the Paleogene Lulehe Formation in the Qaidam Basin[J]. *Acta petrologica sinica*, 2013, 29(8): 2867–2875.
- [33] 曾方倡, 姜楷, 黄超, 等. 砂岩中重矿物的成因意义[J]. *四川地质学报*, 2020, 40(1): 26–29, 50.
- ZENG Fanglv, JIANG Kai, HUANG Chao, et al. Genetic significance of heavy minerals in sandstone[J]. *Acta geologica*

- Sichuan, 2020, 40(1): 26–29, 50.
- [34] 李旋, 赵俊峰, 王迪, 等. 柴达木盆地西部地区早—中侏罗世沉积体系与古气候环境探讨[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(7): 1060–1073.
- LI Xuan, ZHAO Junfeng, WANG Di, et al. Discussion on depositional system and paleo-climate during the Early–Middle Jurassic in the western Qaidam Basin[J]. Natural gas geoscience, 2022, 33(7): 1060–1073.
- [35] 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等. 重矿物分析物源示踪方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(2): 154–171.
- XU Miaomiao, WEI Xiaochun, YANG Rong, et al. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis[J]. Advances in earth science, 2021, 36(2): 154–171.
- [36] 潘双苹, 胡光明, 李积永, 等. 柴达木盆地扎哈泉地区新近纪物源分析[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 201–209.
- PAN Shuangping, HU Guangming, LI Jiyong, et al. Analysis of Neogene provenance in Zhahaquan area, Qaidam Basin [J]. Bulletin of geological science and technology, 2023, 42 (3): 201–209.
- [37] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用: 以涪西南凹陷古近系流三段下亚段为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 835–841.
- CAO Yingchang, SONG Ling, WANG Jian, et al. Application of heavy mineral data in the analysis of sediment source: a case study in the Paleogene lower submember of the third member of the Liushagang Formation, Weixian Depression [J]. Acta sedimentologica sinica, 2011, 29(5): 835–841.
- [38] 毛黎光, 肖安成, 王亮, 等. 柴达木盆地西北缘始新世晚期古隆起与阿尔金断裂的形成[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2876–2882.
- MAO Liguang, XIAO Ancheng, WANG Liang, et al. Uplift of NW margin of Qaidam Basin in the Late Eocene: implications for the initiation of Altyn fault [J]. Acta petrologica sinica, 2013, 29(8): 2876–2882.

编辑: 黄革萍

## Application of U–Pb isotopic dating and heavy mineral assemblage to source–sink system analysis of the Paleogene in western margin of Qaidam Basin

YANG Guojun<sup>1,2</sup>, WU Kunyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Boce<sup>1,2</sup>, YIN Zhihao<sup>3</sup>, WANG Jiahao<sup>3</sup>, WANG Mu<sup>1,2</sup>, HE Xiaofei<sup>3</sup>, XING Haoting<sup>1,2</sup>, DENG Liben<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke<sup>3</sup>, WANG Zhuanzhuan<sup>1,2</sup>

1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Saline–Lacustrine Basinal Oil & Gas Geology;

2. PetroChina Qinghai Oilfield Company; 3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan

**Abstract:** The hydrocarbon reservoirs, which formed with the sediment supply of Altun mountain, have overall poor physical properties and strong anisotropy in the western margin of Qaidam Basin. For the purpose of predicting favorable reservoir distribution, it is urgent to carry out detailed division of the source–sink system. Using field outcrop and drilling core samples, comprehensive methods such as detrital zircon U–Pb isotopic dating, heavy mineral assemblages and sand body distribution are employed to conduct source–sink system analysis of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in western margin of Qaidam Basin. As a result, five source–sink systems named as Qigequan, Shibei, Ganchaigou, Xianshuiquan, and Xiandong, respectively, are identified. They are different in heavy mineral assemblages and symbolic heavy mineral contents, and present different peak ages, peak age combinations and age spectrum patterns from each other. The age of sediment sources is mainly from 200 to 520 Ma, and the parent rocks is mainly composed of magmatic and metamorphic rocks. Affected by the supply of these sources, fan delta–sublacustrine fan systems are developed with greatly–varied scales in the study area correspondingly. It is shown that a single analytical method may lead to uncertainty in the division of source–sink systems. To achieve a more accurate understanding, multiple analytical methods should be combined and mutually validated.

**Key words:** source–sink system; detrital zircon U–Pb isotopic dating; heavy mineral assemblage; Lower Ganchaigou Formation; Paleogene; Qaidam Basin

**YANG Guojun**, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in geological research of oil and gas reservoir. Add: Exploration and Development Research Institute of PetroChina Qinghai Oilfield Company, Qili Town, Dunhuang, Gansu 736202, China. E-mail: 158635403@qq.com

**WU Kunyu**, Corresponding author: Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology–reservoir geology and unconventional oil and gas geology. Add: Exploration and Development Research Institute of PetroChina Qinghai Oilfield Company, Qili Town, Dunhuang, Gansu 736202, China. E-mail: wukunyu1986@126.com