

引用格式:朱雪清,刘圣乾,朱青,等. 2026. 东道海子凹陷下侏罗统物源分析及沉积物源响应特征[J]. 沉积学报, 44(3): 1031-1047.

ZHU XueQing, LIU ShengQian, ZHU Qing, et al. 2026. Provenance Analysis of the Lower Jurassic Dongdaohaizi Sag and Sediment Provenance Response Characteristics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(3): 1031-1047.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.104

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.104

东道海子凹陷下侏罗统物源分析及沉积物源响应特征

朱雪清¹, 刘圣乾¹, 朱青¹, 刘彬¹, 曾治平², 李松涛²

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

摘要 【目的】明确准噶尔盆地东道海子凹陷下侏罗统八道湾组和三工河组的物源组成及演化, 对东道海子凹陷下侏罗统沉积充填响应特征具有重要的指导意义。【方法】基于砂岩碎屑组成、全岩元素地球化学特征及碎屑锆石 U-Pb 年龄特征, 对八道湾组和三工河组物源特征及演化过程展开了详细的分析。【结果】研究区下侏罗统砂岩样品以长石质岩屑砂岩为主, 薄片岩屑平均含量为 37.7%, 以凝灰岩岩屑、玄武岩岩屑为主, 少量变质岩岩屑; 泥岩样品经过北美页岩标准化后, 八道湾组样品表现出轻、重稀土分异并不明显的特征, 而三工河组则为轻微的轻稀土富集、重稀土亏损的特征; 砂岩样品中的碎屑锆石年龄分布则表现为: 八道湾组碎屑锆石年龄主要集中在 280~330 Ma, 400~440 Ma 及 490~520 Ma 三个区间, 而三工河组则以 280~350 Ma, 380~430 Ma 及 460~520 Ma 三个峰值区间为主, 年龄组成较为相似。【结论】东道海子凹陷八道湾组物源主要源自准噶尔盆地东部克拉美丽物源体系, 西部乌尔禾及克拉玛依物源影响较小。三工河组时期, 西部开始供源, 而东部克拉美丽物源体系仍是研究区最主要的物质来源; 至中侏罗统, 西部物源影响增强, 车—莫古隆起形成, 东道海子凹陷受两大物源体系共同影响。东道海子凹陷下侏罗统物源区母岩以中—酸性岩浆岩及基性岩浆岩为主, 物源主要来自再循环造山带的过渡再旋回带, 构造背景以大陆岛弧为主, 与准噶尔盆地周缘受洋—陆俯冲以及洋盆关闭后形成的混杂物源背景显示较为一致。在此大地构造背景下, 八道湾组沉积时期, 东道海子凹陷受东部克拉美丽物源体系影响, 形成了浅水三角洲—湖泊的沉积体系, 分流河道砂体大面积发育, 但物性较差, 有利砂体较少; 三工河组沉积时期, 东道海子凹陷受到东西两大物源体系影响, 发育了浅水三角洲—湖泊体系, 发育了以中砂岩—细砂岩为主的水下分流河道微相及少量河口坝微相, 其物性较好。

关键词 东道海子凹陷; 下侏罗统; 物源分析; 碎屑锆石; 沉积物源响应特征

第一作者 朱雪清, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, 沉积学, E-mail: 2022710511@yangtzeu.edu.cn

通信作者 刘圣乾, 男, 沉积学, E-mail: liusq@yangtzeu.edu.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)03-1031-17

0 引言

物源分析是源—汇系统分析中重要的组成环节, 主要分析源区组成和沉积物搬运路径等, 对查明沉积盆地充填历史以及恢复源区构造背景都有指示意义(高抒, 2005; Alexander *et al.*, 2010; 林畅松等, 2015; 徐长贵等, 2017; 操应长等, 2018)。准噶尔盆地东道海子凹陷下侏罗统分为八道湾组和三工河组, 属同一沉积旋回, 其中八道湾组自上而下分为三段(J_1b^1 、 J_1b^2 及 J_1b^3), 三工河组也分为三段(J_1s^1 、 J_1s^2 及 J_1s^3)。针对东道海子凹陷下侏罗统, 前人

的研究主要集中在地层分布、层序格架、古气候演化以及沉积体系等方面。东道海子凹陷侏罗纪整体处于伸展拗陷阶段, 在构造稳定及物源供应充足的条件下, 东道海子凹陷形成了一套稳定的浅水三角洲体系(鲍志东等, 2005; 李维锋等, 2006; 何登发等, 2018; 夏彤彤, 2018)。

针对准噶尔盆地侏罗纪的物源体系, 前人提出了乌尔禾、克拉美丽、克拉玛依、德伦山、博格达山、四棵树、红沟、乌伦古 8 大物源体系(张敏等, 2014; 孙靖等, 2020; 朱钊等, 2024)。由于研究区域不同, 以及资料丰度和研究手段的差异, 造成不同学者对东

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-09-18; 录用日期: 2024-10-25; 网络出版日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902117)

道海子凹陷下侏罗统八道湾组及三工河组物源来源及影响范围认识上的分歧。部分学者认为东道海子凹陷受到东部克拉美丽物源与西部乌尔禾及克拉玛依物源两大物源体系的影响(郑胜, 2019; 焦国华, 2023; 朱青等, 2024), 而另一部分学者认为物源主要来自克拉美丽物源体系(张海峰等, 2007; 张曰静, 2012; 翟晓薇, 2013; 徐硕, 2014), 受西部物源影响较少。在针对东道海子凹陷下侏罗统的物源分析中, 前人多从沉积体系及古地貌恢复角度来展开研究, 主要基于钻井地层厚度、古地貌恢复及沉积相分析对比等方法, 手段较为单一, 在综合利用其他物源分析手段如稀土元素分析、碎屑锆石年代学分析等方面较为薄弱, 且对物质来源方向及其影响范围的研究不够清晰, 同时对物源构造背景的关注较少。因此, 有必要对东道海子凹陷下侏罗统八道湾组和三工河组物源组成及演化开展进一步研究, 明确物源来源及影响范围, 对分析东道海子凹陷下侏罗统沉积充填响应特征具有重要的地质意义。

本研究从物源分析角度出发, 系统分析准噶尔盆地东道海子凹陷八道湾组和三工河组的岩石学特征、稀土元素特征以及碎屑锆石年龄特征, 旨在明确

源区的物源组成、物源演变以及刻画东道海子凹陷下侏罗统沉积物源响应特征。

1 区域地质背景

准噶尔盆地位于新疆北部, 处于阿尔泰山和天山之间, 是受海西、印支、燕山和喜山构造运动影响的大型含油气叠合盆地。研究区位于准噶尔盆地中央拗陷带的中部东道海子凹陷, 夹在莫索湾凸起、莫北凸起、滴南凸起和白家海凸起之间, 南部为阜康凹陷, 东部为五彩湾凹陷(图1)。

准噶尔盆地下侏罗统整体沉积背景为盆大、水浅、坡缓的拗陷型湖泊, 从盆地尺度来看, 盆大、水浅、坡缓、物源供给充足。而准噶尔盆地中部东道海子凹陷下侏罗统主要形成于这种浅水坡缓条件下, 并以发育三角洲、湖泊以及冲积平原沉积相为主。

东部克拉美丽物源体系以克拉美丽山为主, 克拉美丽山位于东准噶尔山南部, 是中亚造山带的重要组成部分, 为增生混杂岩带, 由古生代海相碎屑岩、火山碎屑岩、火山岩及蛇绿岩组成(黄岗等, 2012; 李涤等, 2012; Zhang *et al.*, 2013, 2015; 宋利宏

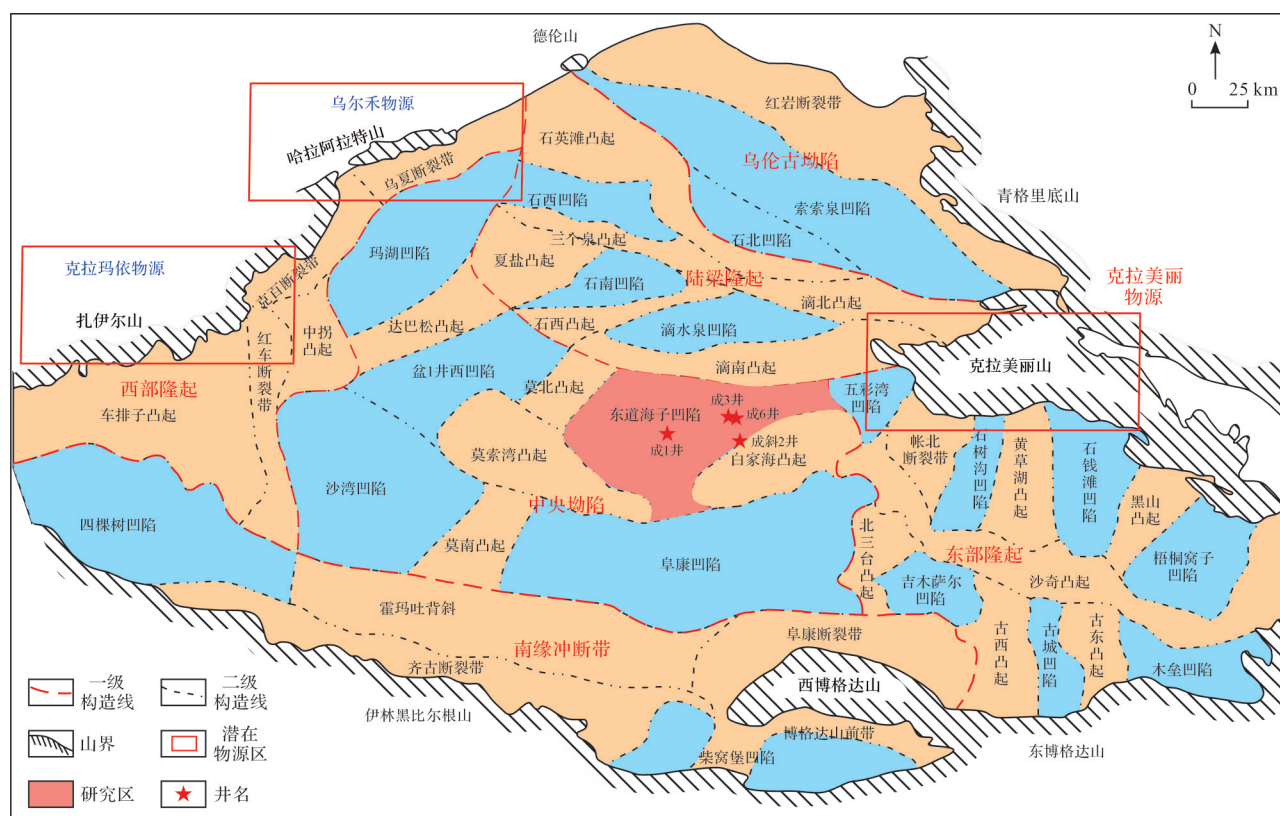


图1 准噶尔盆地东道海子凹陷构造位置及潜在物源区图

Fig.1 Structural location and potential provenance area of the Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin

等,2015;刘啸虎,2016;白建科等,2018;杨凯凯等,2018;姜颜良等,2021)。区域上主要受控于克拉美丽断裂,呈NWW向展布,长约400 km,宽10~15 km。克拉美丽地区断裂构造极为发育,主要发育克拉美丽断裂(田晓莉等,2019)、清水—苏吉泉深大断裂和库普断裂。而西部乌尔禾及克拉玛依物源体系主要包括哈拉阿拉特山(以下简称哈山)以及扎伊尔山(刘政,2012;Yang *et al.*, 2012;倪敏婕,2019;徐倩,2020),位于中亚造山带的西南缘,由蛇绿混杂岩、岛弧,增生杂岩和古生代洋内俯冲和增生形成的海底山共同组成的复合地体。

2 样品和测试方法

样品来自东道海子凹陷3口钻井下侏罗统八道湾组(J₃b)及三工河组(J₃s),共采样品38件,其中岩心薄片分析样品13件,全岩地球化学分析样品23件(主量元素9件,微量、稀土元素14件),碎屑锆石U-Pb年代学分析样品2件(图2)。其中,岩心分析样

品岩性以砂岩为主,全岩地球化学分析样品为泥岩,碎屑锆石U-Pb年代学分析样品为砂岩。

2.1 碎屑骨架成分统计法

对岩心分析样品采取的方法有镜下观察以及Gazzi-Dickinson碎屑骨架成分统计法(Dickinson and Suczek, 1979; Dickincom, 1988)。采集的岩心样品13个,磨制岩石薄片后,在显微镜下观察、描述砂岩薄片13个,进行碎屑颗粒计点统计。为保证碎屑骨架组成统计结果的可靠性,采用薄片线计法结合镜下正方网格交点点计法统计组分含量,砂岩样品统计骨架颗粒数不少于200个,网格间距视砂岩平均粒度而定,一般取平均粒度的两倍值(和政军,1990;马驰和王守敬,2023)。

2.2 全岩地球化学测试方法

全岩地球化学测试在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成。主量元素测试使用波长色散X射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II)完成测试,微量和稀土元素测试使用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700e)完成测试,测试结果如表1和表2。

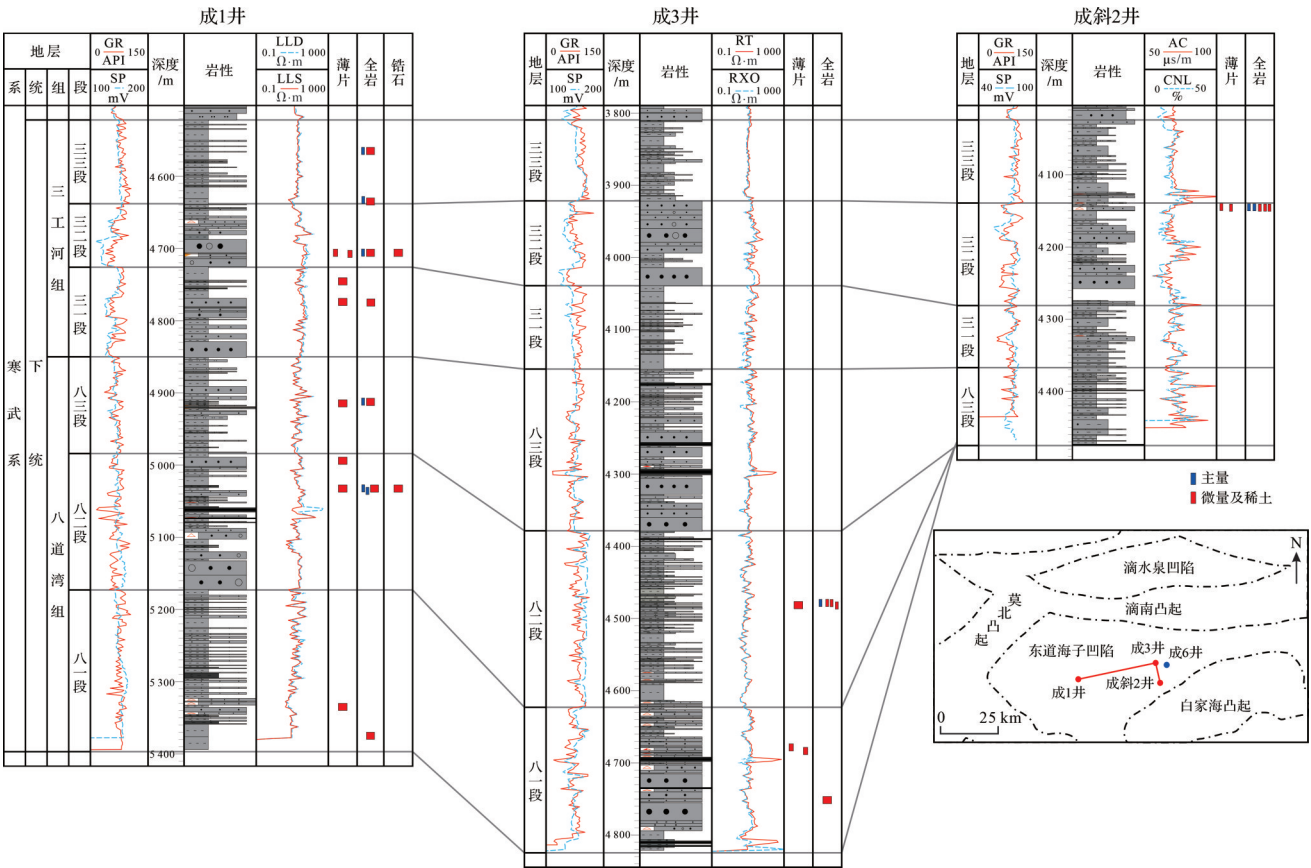


图2 样品位置及岩性柱状图
Fig.2 Sample location and lithology histogram

表1 东道海子凹陷下侏罗统砂岩颗粒含量

Table 1 Particle content of sandstone in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag

样品 编号	层位	深度/m	Q/%	F/%	R/%	岩浆岩岩屑/%	变质岩岩屑/%	沉积岩岩屑/%	成分成熟度(Q/(F+R>))
C3-1	J ₁ b ¹	4 688.44	46.82	12.73	40.45	57.42	27.74	14.84	0.88
C3-2	J ₁ b ¹	4 683.85	45.45	17.68	36.87	68.00	14.00	18.00	0.83
C3-3	J ₁ b ²	4 486.50	43.27	18.16	38.57	54.27	24.49	21.24	0.76
C1-4	J ₁ b ²	5 340.00	39.32	21.73	38.95	41.51	49.96	7.42	0.65
C1-5	J ₁ b ²	5 037.74	56.00	13.78	30.22	74.00	19.00	6.00	1.27
C1-6	J ₁ b ²	4 999.10	54.27	11.23	34.50	63.33	21.22	15.45	1.19
C1-7	J ₁ s ¹	4 919.45	43.27	16.61	40.12	44.67	37.64	17.69	0.76
C1-8	J ₁ s ¹	4 778.94	39.32	21.73	38.95	41.51	49.96	7.42	0.65
C1-9	J ₁ s ¹	4 750.48	45.27	18.13	36.60	51.74	32.27	15.99	0.83
C1-10	J ₁ s ²	4 712.73	42.74	21.12	36.14	48.67	27.76	23.57	0.75
C1-11	J ₁ s ²	4 710.90	46.57	15.79	37.64	54.67	28.17	17.16	0.87
CX2-12	J ₁ s ²	4 151.50	45.29	13.45	41.26	71.43	19.05	9.52	0.83
CX2-13	J ₁ s ²	4 149.50	44.23	15.46	40.31	65.19	23.47	11.34	0.79

表2 东道海子凹陷下侏罗统泥岩主量元素含量(μg/g)

Table 2 Main element content of mudstone in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag (μg/g)

样品 编号	层位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI(烧失量)	SUM
C3-14	J ₁ b ²	29.74	0.37	6.88	4.40	0.19	0.99	28.42	0.99	1.21	6.75	19.29	99.23
C1-15	J ₁ b ²	49.23	0.80	15.87	6.60	0.11	1.60	0.90	1.88	2.56	0.28	10.68	90.51
C1-16	J ₁ b ²	62.49	0.91	19.43	3.93	0.04	1.88	0.27	1.70	3.45	0.17	5.99	100.26
C1-17	J ₁ b ³	60.69	1.09	21.56	4.24	0.02	1.61	0.11	1.66	3.70	0.04	5.53	100.25
C1-18	J ₁ s ²	61.57	0.93	18.46	7.88	0.11	1.94	0.18	1.16	3.45	0.11	4.70	100.49
C1-19	J ₁ s ³	60.83	0.96	18.45	5.51	0.06	1.56	0.65	1.80	3.16	0.10	7.30	100.38
C1-20	J ₁ s ³	58.03	0.78	17.70	6.17	0.12	1.86	0.55	1.71	3.59	0.20	8.99	99.70
CX2-21	J ₁ s ²	62.09	0.82	18.67	6.82	0.02	1.64	0.12	1.67	3.64	0.04	4.78	100.31
CX2-22	J ₁ s ²	61.92	0.83	18.75	6.85	0.02	1.63	0.13	1.69	3.65	0.04	4.75	100.26

2.3 碎屑锆石U-Pb年龄测试方法

锆石挑选、制靶以及CL图像拍摄工作均在廊坊诚信地质服务有限公司完成,利用电感耦合等离子质谱仪进行LA-ICP-MS U-Pb同位素锆石年代学测试。锆石挑选在重矿物处理工作的基础上,借助双目镜手工提纯至300~500颗粒,再随机选择100颗锆石制成标靶,并在扫描电镜下拍摄CL图像。在U-Pb同位素年龄计算与校正中,使用标准锆石Plesovice作为外标进行同位素比值校正,使用标准锆石91500、NIST 610、NIST 612和NIST 614作为元素含量校正中的标样。年龄计算和年龄谱的绘制使用Excel 2010加载项进行处理,并采用软件ICP-MS-Data-Cal完成(Willner *et al.*, 2003; Moecher and Samson, 2006)。

3 岩石学特征

碎屑组分组可反映物源的来源方向,根据镜下颗粒矿物成分分类统计,对研究区的砂岩薄片进行砂岩岩石成分统计及三角投点图解。结果显示,东道海子凹陷下侏罗统以长石质岩屑砂岩为主,少量岩屑质长石砂岩及岩屑砂岩(图3)。总体上,骨架碎屑成分以石英和岩屑为主(表1),八道湾组岩屑含量介于30.22%~40.45%,平均为36.59%,三工河组岩屑含量介于36.6%~41.2%,平均为38.72%,总体岩屑平均含量37.7%,两套地层的成分成熟度普遍均较低。

通过对砂岩镜片的镜下观察,东道海子凹陷下侏罗统八道湾组和三工河组以岩屑组分居多,其中

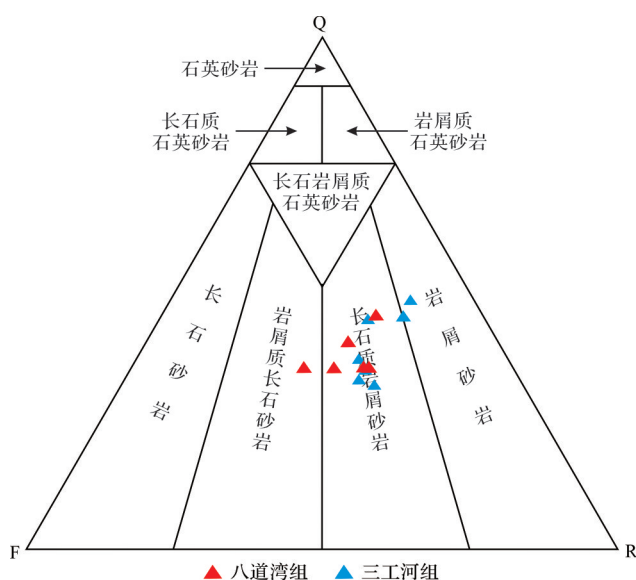


图3 东道海子凹陷下侏罗统砂岩类型分类图

Q. 石英; F. 长石; R. 岩屑

Fig.3 Classification of sandstone types in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag

Q. quartz; F. feldspar; R. rock fragments

不稳定矿物含量较高,砂岩骨架碎屑组分较为复杂,而三工河组与八道湾组整体上成分成熟度较低,表明下侏罗统八道湾组和三工河组搬运距离较短,距离物源区较近。对岩屑进一步观察显示,岩屑组分中以岩浆岩及变质岩岩屑居多,沉积岩岩屑含量均较低(表1)。其中,八道湾组岩屑组成以中酸性岩浆岩岩屑为主,凝灰岩岩屑及玄武岩岩屑大量出现,存在少量酸性喷出岩岩屑,而沉积岩和变

质岩岩屑分布较少,偶见泥岩、板岩、千枚岩、石英片岩岩屑等(图4),表明八道湾组物源母岩类型主要为中—酸性岩浆岩、玄武岩和少量变质岩等。三工河组碎屑组分中岩屑占比也较高,岩屑中岩浆岩和变质岩岩屑成分居多,其中成1井石英含量较高,岩屑中有大量凝灰岩岩屑,也分布少量玄武岩岩屑等,表明三工河组母岩以基性岩浆岩、中酸性火山岩为主。

研究区样品以钻井岩心为主,故基于钻井岩心及测录井资料的分析,对沉积岩相展开研究,进而对东道海子凹陷下侏罗统八道湾组和三工河组沉积充填特征展开分析。

东道海子凹陷八道湾组时期,下部岩性以厚层泥岩、砂岩为主,中部以泥岩、砂砾岩为主,而上部发育数米厚的泥岩夹薄层砂岩沉积,常见冲刷面,发育平行层理、槽状交错层理、波状交错层理等构造,测井曲线以钟形及箱形为主,泥岩测井相表现为低幅或中幅的齿化指形自然伽马,主要发育湖泊—浅水三角洲相,并以浅水三角洲平原亚相为主(图5)。

而三工河组时期,气候向干旱转变,湖泊范围扩大,下部岩性以互层的中细砂岩与泥质粉砂岩为主,中部以暗色泥岩与灰色粉砂岩为主,上部则以互层的细砂岩、泥质粉砂岩与泥岩为主。发育平行层理、槽状交错层理、波状交错层理构造,测井曲线以齿状箱形以及微齿状为主,以浅水三角洲前缘亚相为主(图6)。

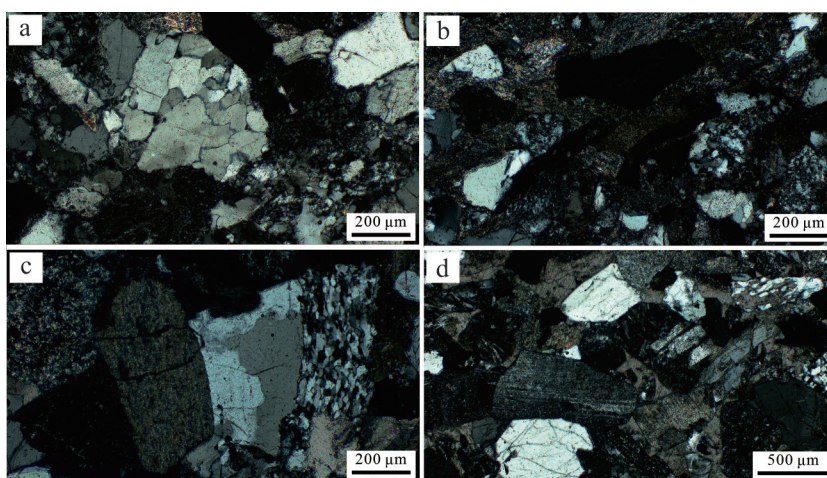


图4 东道海子凹陷八道湾组及三工河组砂岩组成微观特征

(a)成1井,4 999.40 m, J_1b^3 , 多晶石英,正交偏光;(b)成3井,4 688.44 m, J_1b^1 , 凝灰岩岩屑,正交偏光;(c)成1井,4 712.73 m, J_1s^2 , 凝灰岩岩屑,正交偏光;(d)成斜2井,4 149.50 m, J_1s^2 , 玄武岩岩屑,正交偏光

Fig.4 Microscopic characteristics of sandstone in the Badaowan Formation and Sangonghe Formation, Dongdaohaizi Sag

(a) well Cheng 1, 4 999.40 m, J_1b^3 , polycrystalline quartz, cross polarized light (XPL); (b) well Cheng 3, 4 688.44 m, J_1b^1 , tuff lithic debris, XPL; (c) well Cheng 1, 4 712.73 m, J_1s^2 , tuff lithic debris, XPL; (d) well Cheng oblique 2, 4 149.50 m, J_1s^2 , basalt lithic debris, XPL

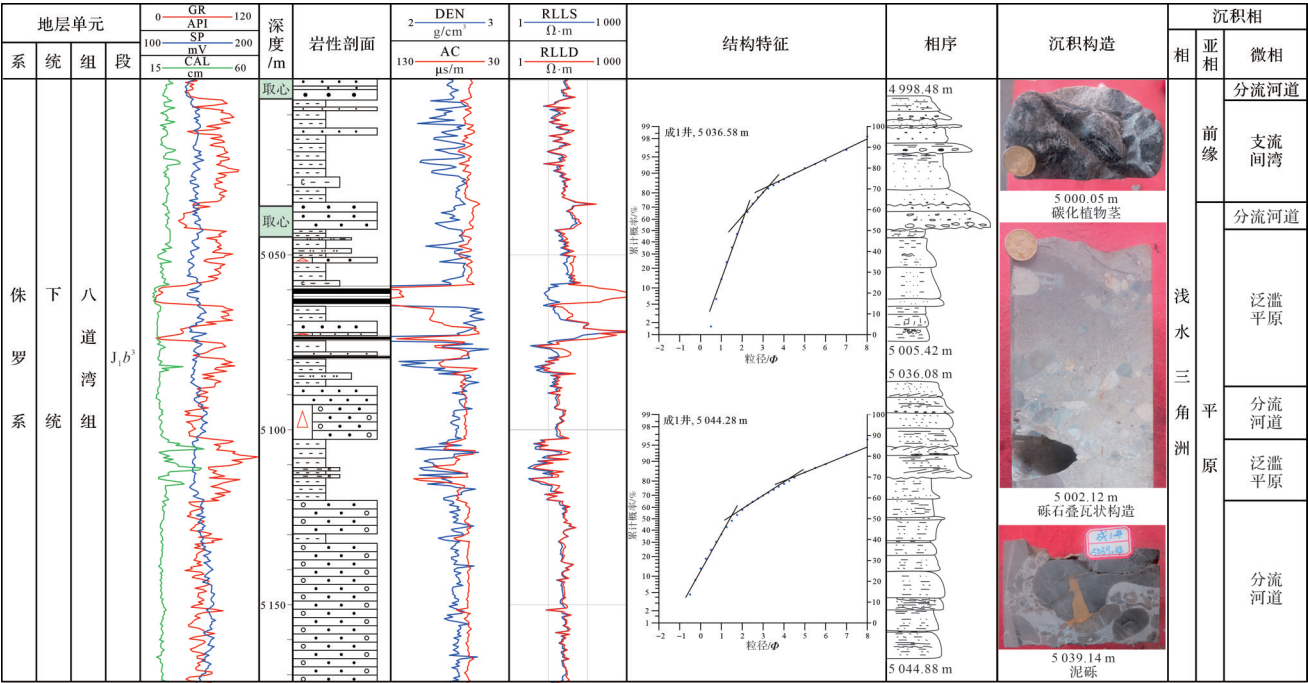


图5 八道湾组浅水三角洲平原沉积特征
Fig.5 Sedimentary characteristics of shallow-water delta plain in the Badaowan Formation

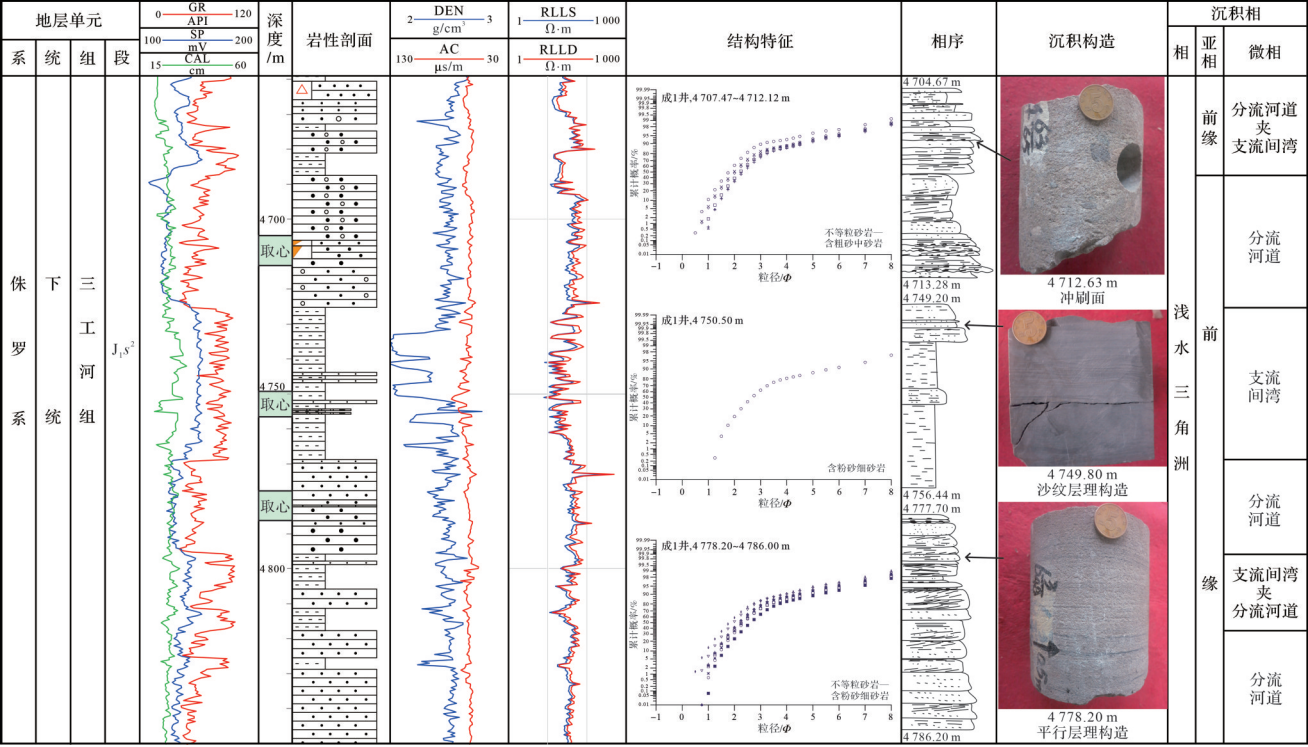


图6 三工河组浅水三角洲前缘沉积特征
Fig.6 Sedimentary characteristics of shallow-water delta front in the Sangonghe Formation

4 元素地球化学特征

4.1 主量元素特征

通过对主量元素含量进行统计发现(表2),八道

湾组样品中存在一个钙含量极高的样品(C3-14);其余样品钙含量极少,镁、钠、钾、磷含量较少,铝、铁含量较多,表明八道湾组存在钙质泥岩;三工河组样品整体泥岩钙含量极少(表2),镁、钠、钾、磷含量也较

少,铝、铁含量也较多。

而从两组的平均含量来看(表3),八道湾组 SiO_2 和 Al_2O_3 含量低于三工河组,而 CaO 平均含量高于三工河组,其余元素平均含量相差无几。整体来看,八道湾组与三工河组元素特征较为相似,两者仅 CaO 和 P_2O_5 存在较大的差异。

4.2 微量元素特征

4.2.1 稀土元素

对稀土元素含量进行统计发现(表4),八道湾组碎屑岩的稀土元素总量(ΣREE)介于 94.88~201.97 $\mu\text{g/g}$,平均为 132.49 $\mu\text{g/g}$,样品个体之间稀土元素总量差异大,对比北美页岩(NASC)的稀土含量(160.12 $\mu\text{g/g}$),有轻微亏损;而三工河组碎屑岩的稀土元素总量(ΣREE)介于 101.84~192.68 $\mu\text{g/g}$,样品个体之间稀土元素总量差异较小,平均值为 165.06 $\mu\text{g/g}$,略高于北美页岩的稀土含量(胡诚, 2011)。总体上,八道湾组和三工河组稀土元素含量均接近大陆上地壳的平均稀土元素总量值 148.10 $\mu\text{g/g}$ 。

轻、重稀土元素比值 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 能够反映样品轻、重稀土的分异状况,该比值越大,则说明 LREE 越富集, HREE 越亏损。八道湾组稀土元素的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 7.69,略高于北美页岩的比值 7.44(即轻、重稀土分异现象不明显),表明八道湾组稀土元素轻、重稀土分异不明显;三工河组的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 8.62,表现为轻微的轻稀土富集、重稀土亏损的特征。 La_N/Yb_N 是稀土元素北美页岩标准化图解中分布曲线的斜率,可以反映曲线的倾斜程度,进而分析轻重稀土的分异现象。八道湾组的 La_N/Yb_N 值介于 0.96~1.24,平均为 1.07,表明八道湾组稀土元素分布曲线近于平坦;三工河组的 La_N/Yb_N 值介于 0.82~2.02,平均为 1.21,三工河组稀土元素分布曲线斜率较低,结合 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 表现为轻微的轻稀土富集、重稀土亏损的特征。

δEu 是以数值的形式来表示 Eu 异常的程度,是稀土元素值经过北美页岩组合样品标准化得出的结果($\delta\text{Eu}=\text{Eu}_N/\text{Eu}^*=\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N\times\text{Gd}_N)^{1/2}$)。八道湾组样品的 δEu 值介于 1.05~2.85,平均为 1.63,其中个别样品

的 δEu 超过 2.00,表现出明显的 Eu 正异常;三工河组样品的 δEu 值介于 1.01~1.14,平均为 1.1,具体到各个样品则有轻微的偏差,绝大部分样品显示 δEu 值基本正常。八道湾组稀土元素 Eu 表现出明显的正异常(表4),轻重稀土分异现象并不明显;而三工河组不存在明显的稀土元素异常富集现象,稀土元素特征为轻微的轻稀土富集,重稀土亏损。自八道湾组到三工河组, Eu 元素从富集到正常,存在明显差异。Eu 正异常一般是由热液流体、斜长石和重矿物的存在引起的。根据准噶尔盆地沉积背景及岩石学特征,八道湾组的 Eu 正异常是继承原岩中斜长石正 Eu 异常特征而来。相较于中酸性岩浆岩,基性—超基性岩更易发生斜长石堆晶作用从而导致 Eu 元素常表现为正异常(郑方顺和宋国学, 2023)。结合东道海子凹陷下侏罗统岩石学特征,八道湾组源岩中存在玄武岩,与稀土元素的显示也相符。自八道湾组至三工河组, δEu 值明显下降,说明玄武岩成分减少。

δCe 是以数值的形式来表示 Ce 异常的程度,是稀土元素值经过北美页岩组合样标准化得出的结果($\delta\text{Ce}=\text{Ce}_N/\text{Ce}^*=\text{Ce}_N/(\text{La}_N\times\text{Pr}_N)^{1/2}$)。八道湾组样品的 δCe 值介于 0.96~1.01,平均为 0.99, δCe 值基本正常;三工河组样品的 δCe 值介于 0.89~1.13,平均为 0.97,具体到各个样品则有轻微的偏差, δCe 值也基本正常。

对本次选取泥岩样品进行稀土元素北美页岩标准化,并将分析结果投于分布型式图(图7)。结果显示,八道湾组存在两个 Eu 正异常较为明显的样品,其他样品则与三工河组整体上无较大差异,稀土元素配分模式显示,八道湾组样品个体之间差异较大,而三工河组样品的差异较小。

4.2.2 其他微量元素

沉积物中的某些特征微量元素化学性质较为稳定,主要受物源影响,相对独立于沉积环境和成岩作用,在风化剥蚀、搬运、沉积、成岩过程中其含量基本保持不变,可以用于进行物源分析(Moecher and Samson, 2006)。对东道海子凹陷下侏罗统微量元素进行统计(表5),可作构造环境判别图解从而判断物源构造背景。

表3 东道海子凹陷下侏罗统泥岩主量元素平均含量($\mu\text{g/g}$)

Table 2 Average major element content of mudstone in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag

平均含量/%	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI(烧失量)
三工河组	60.89	0.86	18.39	6.65	0.07	1.73	0.33	1.61	3.50	0.10	6.10
八道湾组	50.54	0.79	15.94	4.79	0.09	1.52	7.43	1.56	2.73	1.81	10.37

表4 东道海子凹陷下侏罗统泥岩稀土元素含量(μg/g)

Table 4 REE content of mudstone in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag (μg/g)

样品 编号	层位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	La _N / Yb _N	δEu	δCe
C3-23	J ₁ b ²	15.70	31.20	3.53	13.30	2.92	1.59	3.07	0.45	2.66	0.49	1.40	0.18	1.19	0.17	77.78	68.17	21.14	8.56	1.20	1.05	0.96
C3-24	J ₁ b ¹	18.80	38.80	4.54	17.90	3.51	0.79	3.20	0.54	3.04	0.65	1.82	0.28	1.85	0.28	96.01	84.35	15.79	8.41	1.04	1.10	1.01
C3-25	J ₁ b ¹	18.60	38.80	4.54	17.30	3.26	0.83	3.18	0.50	2.99	0.68	1.78	0.28	1.82	0.27	94.88	83.38	20.48	7.58	1.00	2.85	0.98
C1-26	J ₁ b ³	40.50	82.20	10.20	38.50	7.81	1.58	6.37	0.92	5.53	1.02	3.18	0.46	3.17	0.48	201.97	180.83	9.61	7.09	1.24	2.48	0.99
C1-27	J ₁ b ³	29.70	61.70	7.10	28.00	5.14	1.08	4.10	0.69	4.06	0.87	2.58	0.40	2.70	0.39	148.50	132.72	11.66	7.23	0.96	1.10	1.00
C1-28	J ₁ b ²	34.00	69.60	8.30	32.30	7.18	3.97	5.94	0.90	5.32	1.04	3.13	0.47	3.20	0.48	175.83	155.34	11.50	7.25	0.96	1.22	1.00
C1-29	J ₁ s ³	38.60	77.00	9.29	34.80	7.15	1.53	6.24	0.96	6.07	1.20	3.55	0.54	3.71	0.57	191.30	168.45	23.00	6.40	0.82	1.13	0.96
C1-30	J ₁ s ²	33.60	66.90	8.05	30.70	6.46	1.51	6.05	0.94	6.14	1.21	3.70	0.55	3.86	0.57	170.18	147.18	12.19	7.45	0.95	1.14	1.03
C1-31	J ₁ s ²	20.00	42.60	4.78	19.10	3.50	0.82	3.27	0.55	3.26	0.64	1.92	0.29	1.98	0.29	102.96	90.77	23.18	6.88	0.96	1.12	0.96
C1-32	J ₁ s ²	35.60	71.50	8.81	34.50	7.50	1.66	6.38	1.02	6.40	1.21	3.66	0.50	3.49	0.52	182.73	159.56	13.52	13.25	2.02	1.09	0.89
C1-33	J ₁ s ¹	38.70	76.30	9.18	34.70	6.72	1.27	5.14	0.81	5.51	1.14	3.57	0.53	3.72	0.56	187.88	166.90	22.85	7.37	0.98	1.08	0.96
CX-34	J ₁ s ²	49.20	81.10	9.25	33.30	5.22	0.98	3.33	0.56	3.63	0.73	2.28	0.34	2.30	0.34	192.68	179.16	13.59	13.05	2.01	1.10	0.90
CX-35	J ₁ s ²	48.80	80.80	9.16	32.40	5.17	0.99	3.41	0.57	3.70	0.73	2.20	0.34	2.29	0.35	190.89	177.30	13.43	6.59	0.97	1.13	1.13
CX-36	J ₁ s ²	16.40	42.20	4.77	19.50	4.39	1.12	4.87	0.66	3.43	0.65	1.73	0.24	1.59	0.25	101.84	88.41	20.99	7.95	0.98	1.01	0.96

注：N系指稀土元素采用北美页岩标准化。

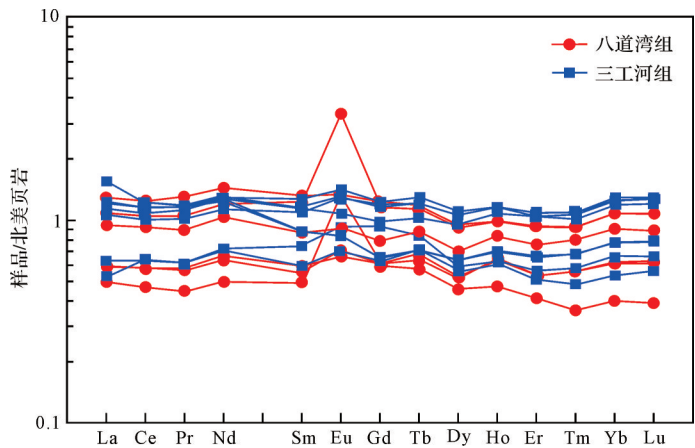


图7 八道湾组及三工河组泥岩北美页岩标准化稀土元素配分模式

Fig.7 REE allocation model of North American shale standardized in mudstone of the Badaowan Formation and Sangonghe Formation

从La-Th-Sc三相判别图解可以看出(图8),研究区下侏罗统八道湾组和三工河组样品点投点较为集中,均集中在大陆岛弧的区域,表明东道海子凹陷下侏罗统构造背景以大陆岛弧为主。而Th-Co-Zr/10三相判别图解进一步表明,下侏罗统样品投点主要集中在大陆岛弧区。两个图件在物源区构造背景的显示上表现出较好的一致性,证明东道海子凹陷下侏罗统物源区具有大陆岛弧的构造背景。

5 碎屑锆石U-Pb年代学特征

锆石在盆地沉积物中分布广泛,稳定性强,可以保存大量物源信息。碎屑锆石U-Pb测年法能够有效

地限定沉积物源的年龄范围,有助于分析本区物源年龄组成(陈登超等,2010;胡诚,2011;郑德顺和宋国学,2023),从而分析八道湾组及三工河组物源组成。

选取成1井下侏罗统八道湾组及三工河组各1个砂岩样品进行碎屑锆石单矿物挑选、制靶、CL照相,并对其中100颗碎屑锆石进行了U-Pb同位素分析测试,共获得100个测点年龄数据,剔除1个谐和度低于90%的锆石数据,最终获得99个有效数据。对于锆石年龄大于1 000 Ma的颗粒,由于大量放射性成因Pb的存在而采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄;对于小于1 000 Ma的颗粒,由于可用于测量放射性成因Pb含量较低和普通Pb校正的不确定性,因而采用更为可靠的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄(Sircombe, 1999)。

表5 东道海子凹陷下侏罗统泥岩微量元素含量(μg/g)

Table 5 Trace element content of mudstone in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag (μg/g)

样品 编号	层位	Zn	Co	Ni	Ba	V	Cu	Sr	Mo	Zr	Cr	Ga	Sc	U	La
C3-23	J ₁ b ²	36.90	8.02	15.70	609.00	51.70	12.30	913.00	3.58	136.00	29.40	9.61	6.50	0.82	15.70
C3-24	J ₁ b ¹	45.20	8.86	16.10	410.00	55.40	9.95	176.00	5.02	179.00	39.80	13.70	7.11	1.50	18.80
C3-25	J ₁ b ¹	47.10	9.01	15.60	419.00	55.60	10.10	178.00	4.98	182.00	38.50	13.60	7.08	1.49	18.60
C1-26	J ₁ b ³	110.00	19.20	50.60	629.00	140.00	45.80	216.00	10.60	195.00	85.70	25.60	18.10	3.23	40.50
C1-27	J ₁ b ³	36.10	14.60	27.50	336.00	76.20	7.35	192.00	7.53	186.00	54.60	17.00	10.50	2.07	29.70
C1-28	J ₁ b ²	156.00	18.00	38.10	47 550.00	147.00	48.80	362.00	9.14	201.00	116.00	21.60	17.00	3.08	34.00
C1-29	J ₁ s ³	90.50	17.30	47.00	472.00	145.00	52.10	181.00	12.50	221.00	72.80	24.40	18.00	3.70	38.60
C1-30	J ₁ s ²	92.80	15.50	38.50	430.00	143.00	41.10	131.00	10.30	234.00	78.40	24.90	20.90	3.54	33.60
C1-31	J ₁ s ²	39.80	9.64	17.90	317.00	48.40	8.45	178.00	5.49	174.00	54.70	12.30	6.55	1.62	20.00
C1-32	J ₁ s ²	101.00	15.20	44.60	331.00	137.00	48.00	110.00	9.79	199.00	85.70	23.20	20.30	2.91	35.60
C1-33	J ₁ s ¹	95.30	18.50	42.80	515.00	171.00	47.80	170.00	12.40	226.00	90.40	27.70	22.50	3.55	38.70
CX-34	J ₁ s ²	82.00	15.30	27.40	544.00	114.00	24.70	422.00	11.80	208.00	59.20	23.50	15.10	3.12	49.20
CX-35	J ₁ s ²	74.90	15.10	26.80	543.00	113.00	24.90	414.00	11.80	207.00	58.90	23.40	14.80	3.12	48.80
CX-36	J ₁ s ²	32.10	9.39	18.50	316.00	44.20	6.01	717.00	3.86	105.00	19.30	10.08	6.67	1.37	16.40

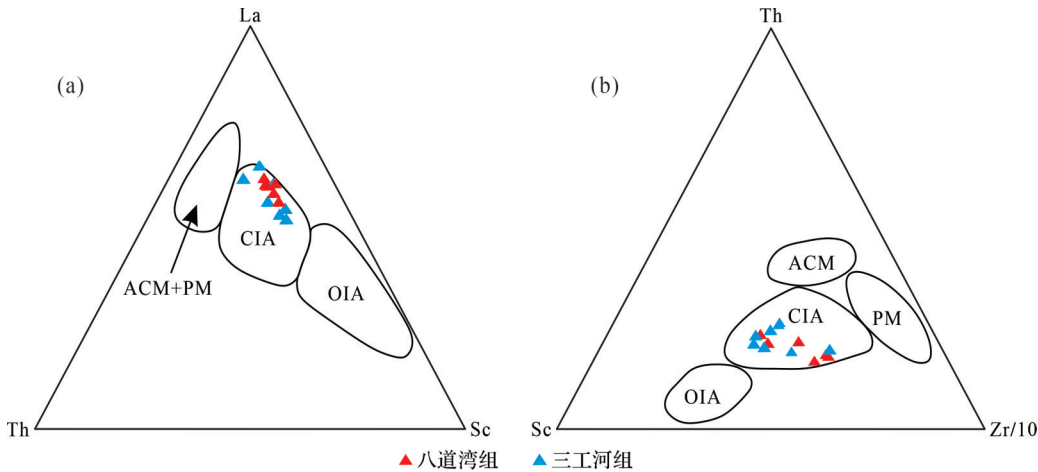


图8 La-Th-Sc (a) 和 Th-Co-Zr/10 (b) 构造环境判别图解

ACM. 活动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘; CIA. 大陆岛弧; OIA. 大洋岛弧

Fig.8 Environmental discrimination diagrams constructed for (a) La-Th-Sc; and (b) Th-Co-Zr/10

ACM. active continental margin; PM. passive continental margin; CIA. continental island arc; OIA. oceanic island arc

碎屑锆石的CL图像可以清楚地揭示内部带和变质生长等信息,有利于分析母岩的成因;同时,碎屑锆石的内部结构、Th/U 比值以及稀土元素含量也是确定锆石成因的重要条件(呼其图等,2024)。成1井锆石颗粒主要呈自形一半自形(图9),以短柱状和不规则粒状为主,完整度较好。多数锆石内部结构以振荡环带为主,且结晶环带较宽。岩浆锆石阴极发光的强度较弱,具有十分明显的振荡环带特征,而变质锆石的阴极发光强度较强,具有无分带或弱分带的特点(图9中22和14)。岩浆锆石的Th/U 值,一般大于0.1,变质锆石的Th/U 值较小,一般小于0.1(钟玉芳等,2006)。八道湾组及三工河组碎屑

锆石样品都具有较高的Th/U 比值,介于0.4~1.8,说明本区下侏罗统绝大多数锆石为岩浆锆石,少数为变质锆石。

锆石测点年龄数据基本位于U-Pb 谐和图中的谐和线上或其附近(图10),表明所测锆石在形成后U-Pb 同位素体系是封闭的,八道湾组基本没有U 或Pb 的加入或丢失,整体谐和性较好,三工河组有个别点落在谐和线外。八道湾组碎屑锆石表面年龄值分布范围较宽(200~2 100 Ma),主要集中在200~520 Ma,具有3 个峰值区间,主要有280~330 Ma,400~440 Ma 及490~520 Ma 三个区间,主峰介于280~330 Ma;三工河组碎屑锆石表面年龄值分布范围较

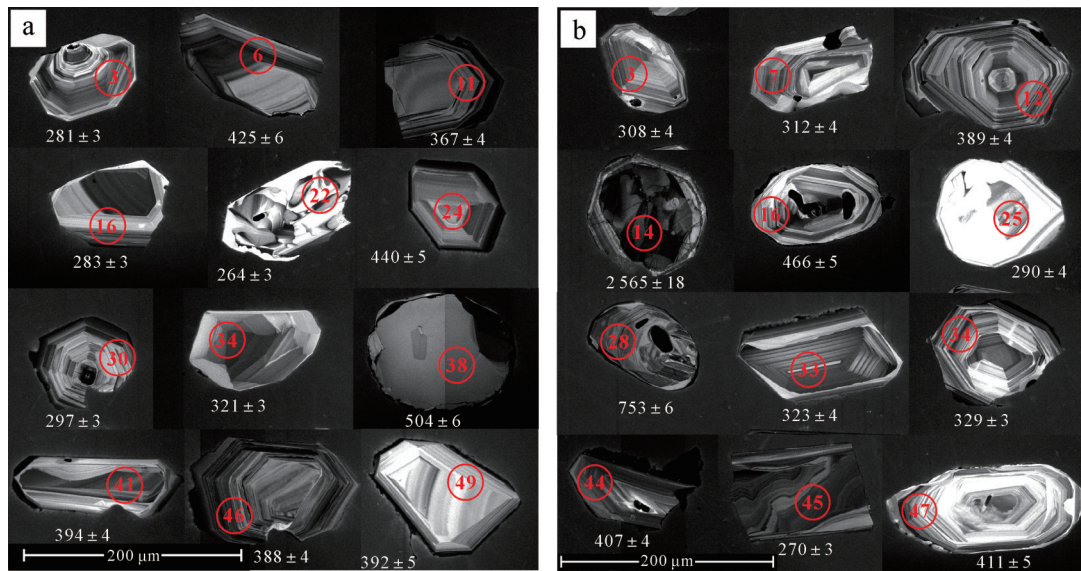


图9 八道湾组(a)及三工河组(b)砂岩碎屑锆石阴极发光图像

Fig.9 Cathodoluminescence images of detrital zircon from sandstone in the (a) Badaowan Formation and (b) Sangonghe Formation

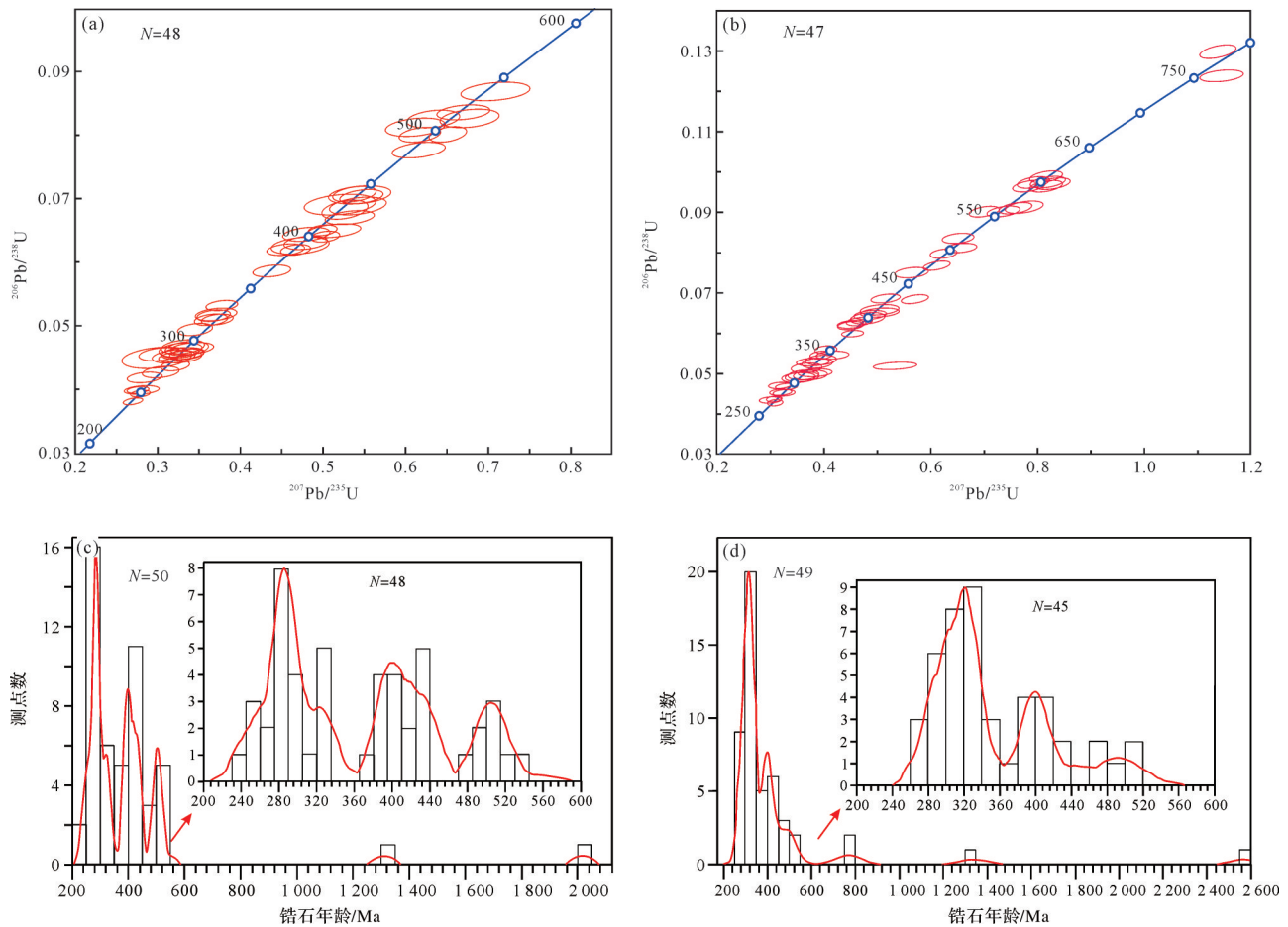


图10 成1井锆石 U-Pb 年龄协和图及年龄分布直方图

(a)八道湾组样品碎屑锆石 U-Pb 协和图;(b)三工河组样品碎屑锆石 U-Pb 协和图;(c)八道湾组样品碎屑锆石年龄直方图 (d)三工河组样品碎屑锆石年龄直方图

Fig.10 Concordia diagram and distribution histogram of detrital Zircon U-Pb ages, well Cheng 1

(a) U-Pb concordia diagram detrital zircon from the Badaowan Formation samples; (b) U-Pb concordia diagram detrital zircon from the Sangonghe Formation samples; (c) histogram of detrital zircon sample U-Pb ages of the Badaowan Formation samples; (d) histogram of detrital zircon sample U-Pb ages of the Sangonghe Formation samples

宽(200~2 100 Ma),峰值区间主要有280~350 Ma,380~430 Ma及460~520 Ma三个峰值区间,主峰为280~350 Ma。八道湾组—三工河组,三个主峰特征延续,二者具有一致性,说明物源方向大致保持一致。同时,相较于八道湾组,三工河组460~520 Ma主峰不明显,表明两组之间物源也有所差异。

6 物源分析及沉积充填响应特征

6.1 下侏罗统八道湾组及三工河组物源来源分析

碎屑锆石年龄可以反映物源区的岩石年龄组成。通过对比研究区下侏罗统碎屑锆石年龄数据,发现八道湾组—三工河组,三个主峰特征延续,物源来源基本保持一致,同时八道湾组与三工河组碎屑锆石年龄峰值分布区间存在细微的差异,八道湾组—三工河组,石炭纪碎屑锆石增加,二叠纪—三叠纪的碎屑锆石减少。为明确东道海子凹陷下侏罗统具体物源来源,将其碎屑锆石年龄谱与盆地周缘的岩浆岩以及变质岩碎屑锆石年龄谱(Dickinson *et al.*, 1983; 周天琪等, 2019; 张磊, 2020; 甄宇等, 2024)进行对比(图11a)。发现研究区下侏罗统的碎屑锆石年龄谱与东部克拉美丽山较为相似,且具有东部克拉美丽山的特征年龄峰段490~520 Ma,表明下侏罗统物源主要来自东部克拉美丽山,而三工

河组460~520 Ma主峰不明显,表明其物源有所改变。

同时将西部克拉玛依凹陷下侏罗统的碎屑锆石年龄谱(倪敏婕, 2019)与本研究区进行对比(图11b),发现研究区八道湾组的碎屑锆石年龄谱与西部克拉玛依凹陷八道湾组的有明显差异,而三工河组则与西部克拉玛依凹陷较为相似,说明三工河组可能存在来自准噶尔盆地西部的物源。根据前人研究,早侏罗世晚期三工河组二段和三段沉积期,车—莫古隆起初始发育稍有抬升,至中侏罗世,西部物源影响增强,车—莫古隆起快速隆起形成(孔家豪等, 2022),表明三工河组时期,西部对东道海子凹陷开始了物源输入。

早侏罗世沉积期为印支运动后的应力松弛期(王小军等, 2022),准噶尔盆地整体处于弱伸展构造背景,以大型拗陷盆地为主。早侏罗世八道湾组时期,东道海子凹陷连续沉积,具有一致的沉积构造背景和沉积格局,古地貌东高西低,此时研究区以东部克拉美丽物源为主;而早侏罗世三工河组时期,中亚地区受西伯利亚板块、塔里木板块、图兰地块陆内汇聚作用影响(王小军等, 2022),盆地发生整体隆升,西部物源的输入增加,车莫古隆起开始隆升,气候向干旱转变,湖泊面积大幅扩大,研究区开始受东西两大物源影响。

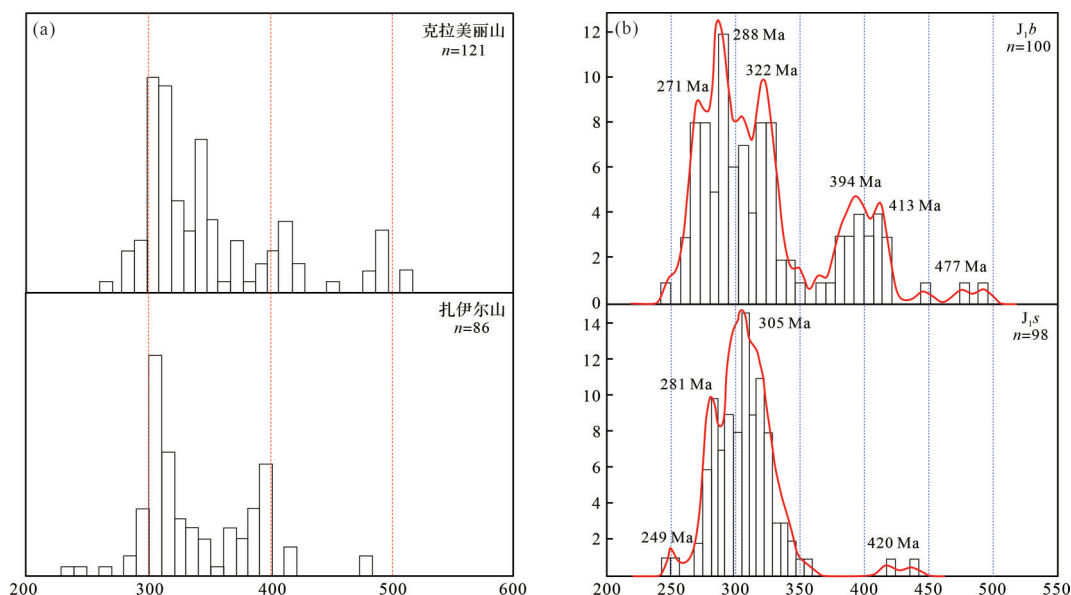


图11 碎屑锆石年龄谱

(a)潜在物源区母岩;(b)克拉玛依凹陷下侏罗统砂岩

Fig.11 Detrital Zircon age spectrum

(a) parent rock of potential provenance area; (b) Lower Jurassic sandstone in Karamay Sag

6.2 下侏罗统八道湾组—三工河组物源构造背景及演化

汇聚区碎屑组分特征可以表现出物源区的构造背景,根据东道海子凹陷下侏罗统砂岩碎屑成分统计结果(周天琪等,2019),利用Dickinson物源判别图解(图12),八道湾组及三工河组砂岩碎屑组分投点全部集中在再旋回造山带的过渡再旋回,指示本区下侏罗统沉积物来源于板块俯冲带的混杂岩、碰撞山的推覆体及前陆隆起。

结合微量及稀土元素特征,东道海子凹陷下侏罗统玄武岩组分主要源于洋陆俯冲带的大陆岛弧构造背景,与准噶尔盆地周缘晚古生代板块碰撞、陆内造山运动的构造活动背景相符。碎屑组分指示物源主要来自混合造山带砂岩,也表明东道海子凹陷下侏罗统洋陆成分混杂,以来自洋陆俯冲带的

大陆岛弧物源为主。综合碎屑锆石年龄谱显示,东道海子下侏罗统物源演化表现为:从八道湾组到三工河组,二叠纪—三叠纪物源组分减少,石炭纪物源组分增加,物源发生明显变化。八道湾组沉积物主要源自东部克拉美丽山隆升物源以及洋陆俯冲演化过程中形成的物源,三工河组则以东部及西部洋陆俯冲混杂的物源为主,也存在少量洋盆演化过程中形成的物源。

6.3 下侏罗统八道湾组及三工河组沉积充填响应特征

基于东道海子凹陷下侏罗统物源的讨论,结合地震相、单井相及分析,阐明其沉积充填响应特征,并对其砂体类型与展布特征进行刻画。东道海子凹陷下侏罗统物源转换从以东部克拉美丽物源影响为主转换为开始受东西两大物源体系影响,八道湾组

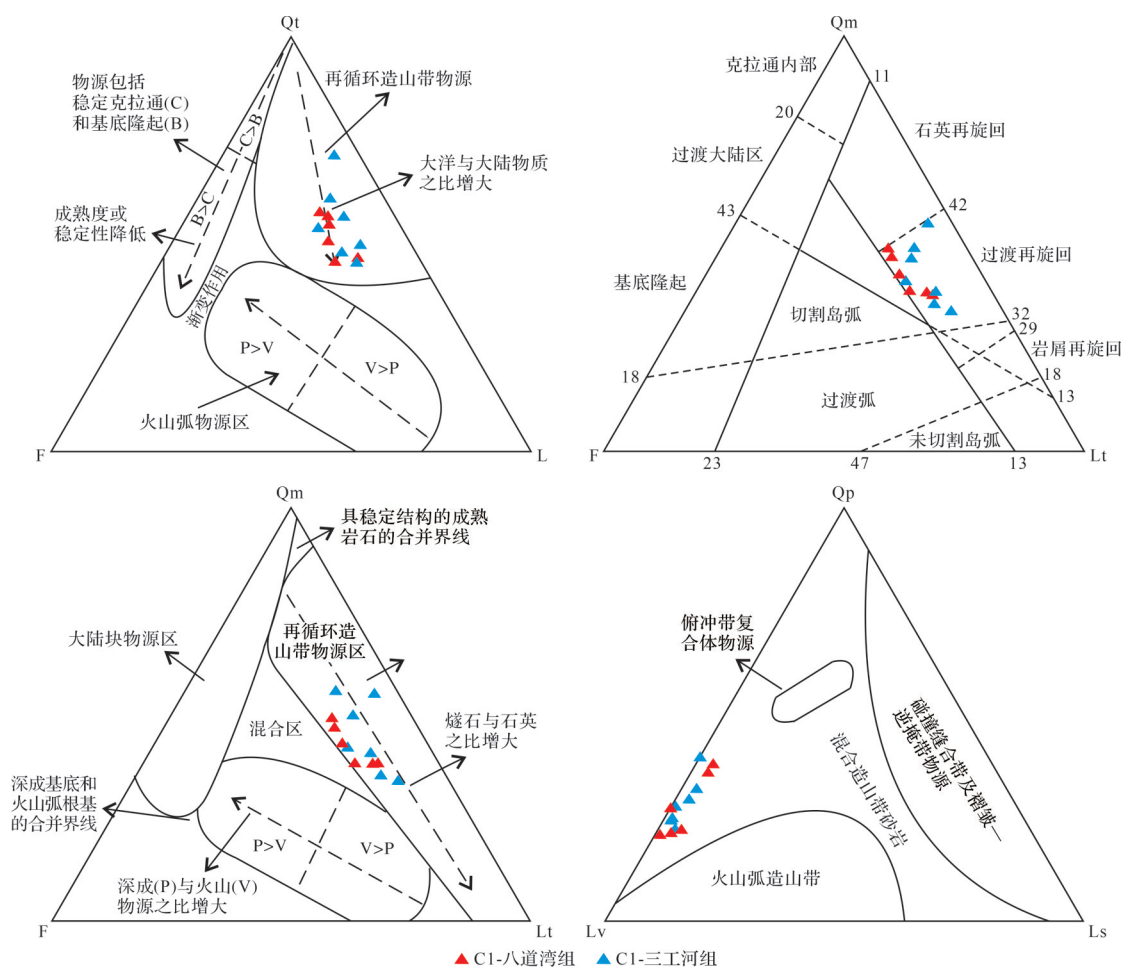


图12 下侏罗统碎屑组分 Dickinson 物源判别图解

Qp. 多晶石英颗粒; Qm. 单晶石英颗粒; F. 长石($F=P+K$); Lt. 岩屑总量($Lt=L+Qp$); L. 不稳定岩屑($Lv+Ls$); Lv. 火山岩岩屑; Ls. 沉积岩和变质岩岩屑

Fig.12 Dickinson source discrimination diagram of detrital components in the Lower Jurassic

Qp. Polycrystalline quartz grains; Qm. Monocrystalline quartz grains; F. Feldspar($F=Plagioclase+K\text{-feldspar}$); Lt. Total lithic fragments ($Lt=L+Qp$); L. Unstable lithic fragments ($Lv+Ls$); Lv. Volcanic lithic fragments; Ls. Sedimentary and metamorphic lithic fragments

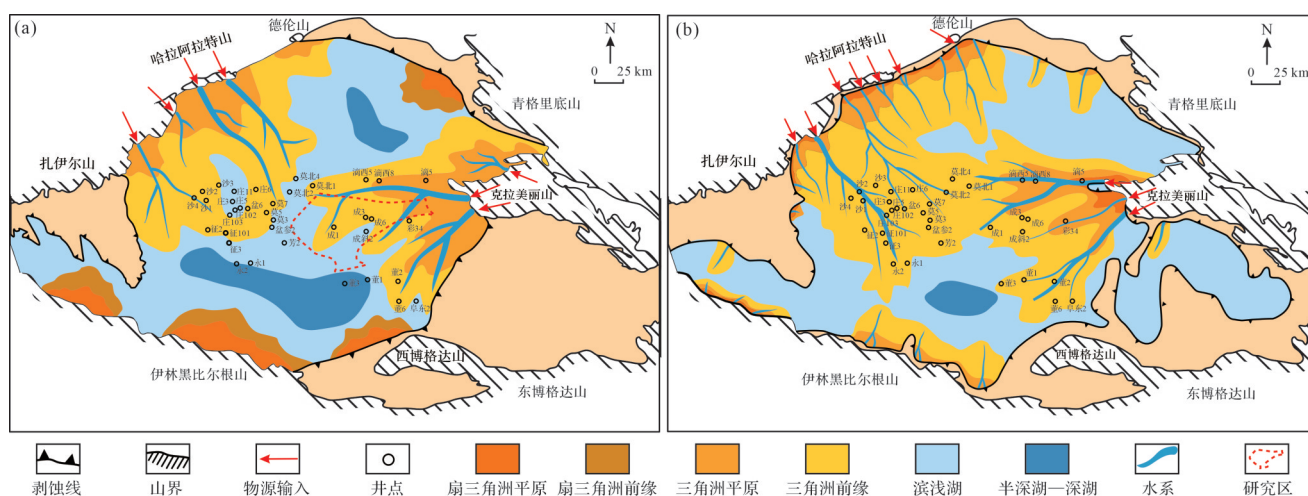


图13 东道海子凹陷下侏罗统沉积物源体系

(a)八道湾组;(b)三工河组

Fig.13 Sedimentary provenance systems in the Lower Jurassic, Dongdaohaizi Sag

(a) Badaowan Formation; (b) Sangonghe Formation

与三工河组沉积充填响应特征有所差异(图13)。

八道湾组沉积时期,主要受东部克拉美丽物源体系影响,东道海子凹陷主要发育了滨浅湖相以及浅水三角洲相。平面上,三角洲平原面积辽阔,煤层发育,分流河道砂体厚度巨大,前缘相对较小。剖面上,三角洲以分流河道和水下分流河道砂体为骨架,多期河道之间相互叠置,泥质夹层少,砂体连通性强,分流河道砂体大面积发育,但物性较差,有利砂体较少。

三工河组沉积时期,主要发育浅水三角洲—湖泊体系,受东西部物源的共同影响。由于地形十分平缓,湖泊面积大幅扩张,气候向干旱转变,三角洲快速后退,湖泊对三角洲砂体的改造作用也更强,三角洲平原面积较小,主要发育泛滥平原沉积,前缘水下分流河道以粉砂岩、细砂岩沉积为主,厚度在10 m左右,含泥质较多,凹陷内发育了以中砂岩—细砂岩为主的水下分流河道微相及少量河口坝微相,其物性较好。

7 结论

(1) 东道海子凹陷下侏罗统砂岩以长石质岩屑砂岩为主,镜下见到大量的岩浆岩及变质岩岩屑,其中以凝灰岩及玄武岩岩屑居多,表明下侏罗统岩石主要来自中—酸性岩浆岩、基性岩浆岩及变质岩。八道湾组稀土元素表现出轻、重稀土分异不明显的特征,三工河组表现出轻微的轻稀土富集、重稀土亏

损的特征。八道湾组碎屑锆石年龄主要集中在二叠纪、泥盆纪,而三工河组则以石炭纪为主。

(2) 东道海子凹陷下侏罗统物源发生了改变,八道湾组时期主要受东部克拉美丽物源体系的影响,三工河组时期受到东西两大物源体系影响。八道湾组主要源自克拉美丽洋演化过程中形成的物源以及洋盆闭合后洋—陆俯冲残余物源,三工河组则以石炭纪克拉美丽洋闭合后的物源为主,也存在少量洋—陆俯冲残余物源。东道海子凹陷下侏罗统八道湾组—三工河组,石炭纪物源增加,二叠纪—三叠纪物源减少。

(3) 八道湾组沉积时期,东道海子凹陷受东部克拉美丽物源体系影响,形成了浅水三角洲—湖泊的沉积体系,此时分流河道砂体大面积发育,但物性较差,有利砂体较少。三工河组沉积时期,东道海子凹陷受到东西两大物源体系影响,发育了中砂岩—细砂岩为主的水下分流河道微相及少量河口坝微相,其物性较好,形成了浅水三角洲—湖泊体系。

参考文献(References)

- 白建科,陈隽璐,朱小辉,等. 2018. 准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组物源区特征:碎屑岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约[J]. 地球科学, 43(12): 4411-4426. [Bai Jianke, Chen Junlu, Zhu Xiaohui, et al. 2018. Provenance characteristics of Kalamaili Formation in northeastern margin of Junggar Basin: Constraints of geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology[J]. Earth Science, 43(12): 4411-4426.]
- 鲍志东,刘凌,张冬玲,等. 2005. 准噶尔盆地侏罗系沉积体系纲要

- [J]. 沉积学报, 23(2): 194-202. [Bao Zhidong, Liu Ling, Zhang Dongling, et al. 2005. Depositional system frameworks of the Jurassic in Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 23(2): 194-202.]
- 操应长, 徐琦松, 王健. 2018. 沉积盆地“源—汇”系统研究进展[J]. 地学前缘, 25(4): 116-131. [Cao Yingchang, Xu Qisong, Wang Jian. 2018. Progress in “Source-to-Sink” system research[J]. Earth Science Frontiers, 25(4): 116-131.]
- 陈登超, 赵省民, 邓坚. 2010. 新疆东部博格达山北侧石炭系碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 84(12): 1770-1780. [Chen Dengchao, Zhao Xingmin, Deng Jian. 2010. U-Pb dating of Carboniferous sandstone detrital zircon from the north of the Bogda mountains, eastern Xinjiang, and its geological significances [J]. Acta Geologica Sinica, 84(12): 1770-1780.]
- 高抒. 2005. 美国《洋陆边缘科学计划 2004》述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005. 25(1): 119-123. [Gao Shu. 2005. Comments on the “NSF MARGINS Program Science Plans 2004”[J]. Marinegeology & Quaternarygeology, 5(1): 119-123.]
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. 石油与天然气地质, 39(5): 845-861. [He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, et al. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 39(5): 845-861.]
- 和政军. 1990. 砂岩碎屑组分与板块构造位置关系的研究现状[J]. 地质科技情报, 19(4): 7-12. [He Zhengjun. 1990. Review on the research of the relation between sandstone detritus and plate structural setting[J]. Geological Science and Technology Information, 19(4): 7-12.]
- 胡诚. 2011. 四川盆地川中地区须家河组物源区分析及岩相古地理特征[D]. 成都: 成都理工大学. [Hu Cheng. 2011. Provenance analysis and lithofacies palaeogeographic characteristics of Xujiahe Formation in middle of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 呼其图, 关平, 王大华, 等. 2024. 柴达木盆地北缘东段中侏罗统物源分析: 来自重矿物、元素地球化学及碎屑锆石年代学的证据[J]. 沉积学报, 42(2): 466-485. [Hu Qitu, Guan Ping, Wang Dahua, et al. 2024. Provenance analysis of the Middle Jurassic in northeastern Qaidam Basin: Evidence from heavy minerals, elemental geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(2): 466-485.]
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限: 来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质通报, 31(8): 1267-1278. [Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, et al. 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 31(8): 1267-1278.]
- 姜颜良, 吴孔友, 李天然, 等. 2021. 克拉美丽断裂带构造变形特征及其成因演化[J]. 断块油气田, 28(6): 792-799. [Jiang Yanliang, Wu Kongyou, Li Tianran, et al. 2021. Structural deformation characteristics and its genetic evolution of Kelameili fault zone[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 28(6): 792-799.]
- 焦国华, 张卫平, 谢利华, 等. 2023. 准噶尔盆地南部下侏罗统三工河组沉积体系及其控制因素[J]. 古地理学报, 25(3): 628-647. [Jiao Guohua, Zhang Weiping, Xie Lihua, et al. 2023. Depositional systems and their controlling factors of the Lower Jurassic Sangonghe Formation in southern Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 25(3): 628-647.]
- 孔家豪, 张关龙, 许淑梅, 等. 2025. 准噶尔盆地侏罗纪车—莫古隆起的发育阶段及其对沉积体系的制约[J]. 中国地质, 52(2): 631-649. [Kong Jiahao, Zhang Guanlong, Xu Shumei, et al. 2025. Development stage of Jurassic Che-Mo paleouplift in the Junggar Basin and its constraints on sedimentary system[J]. Geology in China, 52(2): 631-649.]
- 李涛, 何登发, 樊春, 等. 2012. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系玄武岩的地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 28(3): 981-992. [Li Di, He Dengfa, Fan Chun, et al. 2012. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous basalt in the Karamaili gas field of Junggar Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 981-992.]
- 李维锋, 刘辰生, 颜琳娜. 2006. 准噶尔盆地腹部侏罗纪沉积演化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 37(增刊1): 53-57. [Li Weifeng, Liu Chensheng, Yan Linna. 2006. Sedimentary evolution of Jurassic Era in hinterland of Junggar Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 37(Suppl. 1): 53-57.]
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 2015. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘, 22(1): 9-20. [Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. Earth Science Frontiers, 22(1): 9-20.]
- 刘啸虎. 2016. 准噶尔盆地克拉美丽山前构造及演化特征分析研究[D]. 成都: 西南石油大学. [Liu Xiaohu. 2016. Study on Jurassic provenance system in central the Junggar Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]
- 刘政. 2012. 准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山推覆构造形成演化与构造建模[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-83. [Liu Zheng. 2012. Formation and evolution and its structural modeling of Hala'alate thrust Nappe at the northwestern margin of Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-83.]
- 马驰, 王守敬. 2023. 我国矿物含量定量测定的研究进展[J]. 冶金分析, 43(6): 47-54. [Ma Chi, Wang Shoujing. 2023. Research progress of quantitative determination of mineral content in China[J]. Metallurgical Analysis, 43(6): 47-54.]
- 倪敏婕. 2019. 准噶尔盆地西北缘中下中生界物源分析及其构造意义: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄证据[D]. 北京: 中国石油大学(北京). [Ni Minjie. 2019. Source analysis and tectonic significance of Middle-Lower Mesozoic in northwest margin of Junggar Basin: Evidence from detrital zircon U-Pb Age[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).]
- 宋利宏, 朱光, 顾承串, 等. 2015. 卡拉麦里断裂带造山期活动规律及

- 其对造山过程的指示[J]. 地质论评, 61(1): 79-94. [Song Li-hong, Zhu Guang, Gu Chengchuan, et al. 2015. Orogeny-related activities of Kalamaili fault zone and their indications to the orogenic processes[J]. Geological Review, 61(1): 79-94.]
- 孙靖, 薛晶晶, 厚刚福, 等. 2020. 莫北区块三工河组浅水三角洲储层特征及勘探前景[J]. 特种油气藏, 27(3): 34-39. [Sun Jing, Xue Jingjing, Hou Gangfu, et al. 2020. Shallow-water delta reservoir characterization and exploration prospect in the Sangonghe Formation of Mobei block[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 27(3): 34-39.]
- 田晓莉, 李振生, 聂峰, 等. 2019. 卡拉麦里东段下古生界的形成时代和演化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 42(3): 321-331, 354. [Tian Xiaoli, Li Zhensheng, Nie Feng, et al. 2019. Depositional age and evolution of Early Paleozoic strata in eastern Kalamaili tectonic belt[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 42(3): 321-331, 354.]
- 王小军, 宋永, 郑孟林, 等. 2022. 准噶尔西部陆内盆地构造演化与油气聚集[J]. 地学前缘, 29(6): 188-205. [Wang Xiaojun, Song Yong, Zheng Menglin, et al. 2022. Tectonic evolution of and hydrocarbon accumulation in the western Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 29(6): 188-205.]
- 夏彤彤. 2018. 准噶尔盆地中部侏罗系八道湾组储层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东). [Xia Tongtong. 2018. Reservoir characteristics of the Badaowan Formation in central Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China).]
- 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 2017. 沉积盆地“源—汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 38(1): 1-11. [Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. 2017. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin[J]. Oil & Gas Geology, 38(1): 1-11.]
- 徐倩. 2020. 新疆东、西准噶尔泥盆纪—石炭纪火山岩对比研究[D]. 西安: 长安大学. [Xu Qian. 2020. Comparative study of Devonian-Carboniferous volcanic rocks between east and west Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University.]
- 徐硕. 2014. 准噶尔盆地中部2区块八道湾组岩相古地理[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学. [Xu Shuo. 2014. Lithofacies palaeogeography of Badaowan Formation (Jurassic), Zhong 2 block, Junggar Basin [D]. Urumqi: Xinjiang University.]
- 杨凯凯, 边伟华, 王千军, 等. 2018. 东准噶尔巴塔玛依内山组火成岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(11): 3341-3358. [Yang Kaikai, Bian Weihua, Wang Qianjun, et al. 2018. Zircon U-Pb age and its geological significance of the igneous rocks from Batamayineishan Formation in east Junggar[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3341-3358.]
- 翟晓薇. 2013. 准噶尔盆地中部地区侏罗系物源体系研究[J]. 长江大学学报(自科版), 10(10): 15-17. [Zhai Xiaowei. 2013. Study on Jurassic provenance system in central the Junggar Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 10(10): 15-17.]
- 张海峰, 张建中, 边雪梅, 等. 2007. 准噶尔盆地腹部侏罗系层序地层特征[J]. 地层学杂志, 31(增刊2): 573-580. [Zhang Haifeng, Zhang Jianzhong, Bian Xuemei, et al. 2007. Features of the Jurassic sequence stratigraphy in the center of Junggar Basin, Xinjiang [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(Suppl. 2): 573-580.]
- 张磊. 2020. 准噶尔地区石炭纪盆地地质结构、充填及成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Zhang Lei. 2020. Geological architecture, sedimentary filling, formation and mechanism of the Carboniferous basin in the Junggar area, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 张敏, 修金磊, 陈林, 等. 2014. 准噶尔盆地中部2、4区块侏罗系头屯河组物源体系及沉积演化特征[J]. 石油天然气学报, 36(6): 45-50. [Zhang Min, Xiu Jinlei, Chen Lin, et al. 2014. The pro-venance systems and characteristics of sedimentary evolution of Jurassic Toutunhe Formation in the 2nd and 4th blocks of central Junggar Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 36(6): 45-50.]
- 张曰静. 2012. 准噶尔盆地腹部下侏罗统三工河组物源体系分析[J]. 新疆石油地质, 33(5): 540-542. [Zhang Yuejing. 2012. Pro-venance analysis of Jurassic Sangonghe Formation in hinterland of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 33(5): 540-542.]
- 甄宇, 陈旋, 焦立新, 等. 2024. 东疆地区石炭纪—二叠纪构造古地理与原型盆地演化[J]. 古地学报, 26(1): 78-99. [Zhen Yu, Chen Xuan, Jiao Lixin, et al. 2024. Carboniferous-Permian tectono-palaeogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China[J]. Journal of Palaeogeography, 26(1): 78-99.]
- 郑方顺, 宋国学. 2023. 铕异常在地质学中的应用[J]. 岩石学报, 39(9): 2832-2856. [Zheng Fangshun, Song Guoxue. 2023. Application of Eu anomaly in geology[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(9): 2832-2856.]
- 郑胜. 2019. 准中地区三工河组浅水三角洲沉积模式及油气勘探意义[J]. 特种油气藏, 26(1): 87-93. [Zheng Sheng. 2019. Sedimentary pattern of the shallow-water delta in the Sangonghe Formation of central Junggar Basin and its significance for hydrocarbon exploration[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 26(1): 87-93.]
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 2006. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. 地质科技情报, 25(1): 27-34, 40. [Zhong Yufang, Ma Changqian, She Zhenbing. 2006. Geochemical characteristics of zircon and its applications in geosciences[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(1): 27-34, 40.]
- 周天琪, 吴朝东, 袁波, 等. 2019. 准噶尔盆地南缘侏罗系重矿物特征及其物源指示意义[J]. 石油勘探与开发, 46(1): 65-78. [Zhou Tianqi, Wu Chaodong, Yuan Bo, et al. 2019. New insights into multiple provenances evolution of the Jurassic from heavy minerals characteristics in southern Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(1): 65-78.]
- 朱青, 刘圣乾, 朱雪清, 等. 2024. 准噶尔盆地东道海子凹陷下侏罗统

- 浅水三角洲沉积演化及主控因素[J]. 古地学报, 26(3): 567-583. [Zhu Qing, Liu Shengqian, Zhu Xueqing, et al. 2024. Sedimentary evolution and main controlling factors of shallow water delta of the Lower Jurassic in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 26(3): 567-583.]
- 朱铨, 刘云华, 高晓峰, 等. 2024. 准噶尔盆地南缘下侏罗统三工河组地球化学、沉积环境及源区特征分析[J]. 新疆地质, 42(1): 33-40. [Zhu Xing, Liu Yunhua, Gao Xiaofeng, et al. 2024. Geochemistry, sedimentary environment and source characteristics of the Lower Jurassic Sangonghe Formation in the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 42(1): 33-40.]
- Alexander C R, Walsh J P, Orpin A R. 2010. Modern sediment dispersal and accumulation on the outer poverty continental margin[J]. Marine Geology, 270(1/2/3/4): 213-226.
- Dickinson W R. 1988. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins[M]// Kleinspehn K L, Paola C. New perspectives in basin analysis. New York: Springer: 3-25.
- Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. GSA Bulletin, 94(2): 222-235.
- Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. AAPG Bulletin, 63(12): 2164-2182.
- Moecher D P, Samson S D. 2006. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 247(3/4): 252-266.
- Sircombe K N. 1999. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. Sedimentary Geology, 124(1/2/3/4): 47-67.
- Willner A P, Sindern S, Metzger R, et al. 2003. Typology and single grain U/Pb ages of detrital zircons from Proterozoic sandstones in the SW Urals (Russia): Early time marks at the eastern margin of Baltica[J]. Precambrian Research, 124(1): 1-20.
- Yang G X, Li Y J, Gu P Y, et al. 2012. Geochronological and geochemical study of the Darbut ophiolitic complex in the west Junggar (NW China): Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. Gondwana Research, 21(4): 1037-1049.
- Zhang Y Y, Guo Z J, Pe-Piper G, et al. 2015. Geochemistry and petrogenesis of Early Carboniferous volcanic rocks in east Junggar, north Xinjiang: Implications for post-collisional magmatism and geodynamic process[J]. Gondwana Research, 28(4): 1466-1481.
- Zhang Y Y, Pe-Piper G, Piper D J W, et al. 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, north Xinjiang, and its implications: Evidence from molasse deposits[J]. GSA Bulletin, 125 (5/6): 932-944.

Provenance Analysis of the Lower Jurassic Dongdaohaizi Sag and Sediment Provenance Response Characteristics

ZHU XueQing¹, LIU ShengQian¹, ZHU Qing¹, LIU Bin¹, ZENG ZhiPing², LI SongTao²

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Exploration and Development Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China

Abstract: [Objective] Clarifying the provenance composition and evolution of the Lower Jurassic Badaowan Formation and Sangonghe Formation in the Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin, has important guiding significance for studies of the sedimentary filling response in this region of the Lower Jurassic. [Methods] A detailed analysis was conducted on the source characteristics and evolutionary processes of the Badaowan Formation and Sangonghe Formation based on the composition of sandstone debris, the geochemical characteristics of whole-rock elements, and U-Pb ages of detrital zircons. [Results] It was found that the sandstone samples from the Lower Jurassic in the study area were mainly composed of feldspathic lithic sandstone, with an average content of 37.7% of tuff and basalt lithic debris in the thin sections, along with a small amount of metamorphic rock debris. After standardization of shale samples in North America, the Badaowan Formation samples showed no significant differentiation between light and heavy rare earth elements. The Sangonghe Formation exhibited slight enrichment of light rare earths and depletion of heavy rare earths. The age distribution of detrital zircons in the sandstone samples in the Badaowan Formation is mainly concentrated in

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41902117

Corresponding author: LIU ShengQian, E-mail: liusq@yangtzeu.edu.cn

three ranges: 280-330 Ma, 400-440 Ma and 490-520 Ma; the Sangonghe Formation is dominated by three peak age ranges: 280-350 Ma, 380-430 Ma and 460-520 Ma, with similar age compositions. [Conclusions] A comprehensive analysis of provenance characteristics indicated that the Badaowan Formation in the Dongdaohaizi Sag is mainly sourced from the Kela Meili provenance system in the eastern Junggar Basin, and the western Urho and Karamay provenance regions had little influence. During the depositional period of the Sangonghe Formation, the western region began to supply resources, but the eastern Kela Meili provenance system remained the main source of materials in the study area. In the Middle Jurassic, the influence of the western provenance increased, and the Che-Mo paleo-uplift was formed. The Donghaizi Sag was jointly influenced by two major provenance systems. The parent rocks in the Lower Jurassic provenance area of the Dongdaohaizi Sag are mainly intermediate acid magmatic rocks and basic magmatic rocks, and the provenance is mainly from the transitional and recirculating zones of the recycled orogenic belt. The tectonic setting is dominated by continental island arcs, which is consistent with the mixed-source background formed by oceanic continental subduction around the Junggar Basin, and following closure of the ocean basin. In the context of this tectonic setting, during the sedimentation period of the Badaowan Formation the Dongdaohaizi Sag was influenced by the East Kela Meili source, forming a shallow-water delta lake sedimentary system. Distributary channel sand bodies were extensively developed, but the physical properties were poor, with few favoring hydrocarbon accumulation. During the sedimentation period of the Sangonghe Formation, the Dongdaohaizi Sag was influenced by two major source systems, east and west, and a shallow-water delta lake system developed together with underwater distributary channel microfacies composed mainly of medium and fine sandstones, as well as a small amount of estuarine dam microfacies with physical properties favorable to hydrocarbon reservoir development.

Key words: Dongdaohaizi Sag; Lower Jurassic; provenance analysis; detrital zircon; sediment provenance response characteristics