

# 砂岩重矿物组合与碎屑组分特征分析及 对物源通道的指示: 以库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组为例\*

郭泽坤<sup>1</sup> 高志勇<sup>2</sup> 冯信苹<sup>1</sup> 李怡佳<sup>1</sup> 周 坤<sup>1</sup>  
刘剑忠<sup>1</sup> 何 羽<sup>2</sup> 王柏智<sup>1</sup>

1 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘 要** 由于受强烈构造挤压作用, 库车坳陷山前带白垩系巴什基奇克组巨厚砂岩变形强烈、地震成像复杂且多解性强, 导致克深天然气富集区沉积物源通道精细研究的方法少、成果更少。针对此问题, 开展了克深地区巴什基奇克组 40 余口钻井 400 多块砂岩样品的重矿物组合分析, 26 口钻井 600 余块样品的砂岩碎屑组分与阴极发光等实验分析, 结果表明: (1) 该区各井中锆石、电气石、石榴子石、磁铁矿等重矿物稳定存在, 金红石、磷灰石、榍石等稳定重矿物与绿帘石、绿泥石、云母等不稳定重矿物是否存在及含量的差异导致各井区重矿物组合不同, 辅以 ZTR 指数大小可判断各井区物源输送通道的差异; (2) 巨厚砂岩的沉积物源母岩主要来自于前石炭系高级变质岩、低级变质岩、中酸性火成岩、基性火成岩与沉积岩, 自东向西可细分为 9 个重矿物组合区; (3) 由于砂岩碎屑组分的含量受原始沉积作用控制, 砂岩碎屑组分中钾长石、斜长石及变质岩岩屑平均含量平面变化特征显示存在 5~7 个物源输送通道; (4) 综合分析重矿物组合与砂岩碎屑组分分别指示的物源通道特征, 认为巴什基奇克组沉积时期自东向西至少存在 7 条物源输送通道, 其中 II 区和 V 区可能是河道延伸较远的通道。以上认识为克深地区大比例尺沉积微相及有利砂体展布分析提供依据, 支撑了该区气藏精细研究与评价。

**关键词** 库车坳陷 克深地区 深层厚层砂岩 重矿物组合 砂岩碎屑组分 物源输送通道

**第一作者简介** 郭泽坤, 男, 1997 年生, 硕士, 工程师, 主要从事开发地质研究工作。E-mail: gzkun-tlm@petrochina.com.cn。

**通讯作者简介** 高志勇, 男, 1974 年生, 高级工程师, 主要从事沉积学与储层地质学、开发地质研究。E-mail: gzybox@163.com。

中图分类号: P588.21 文献标志码: A

## Analysis of heavy mineral assemblages and clastic components in sandstones and their implications for provenance transport pathways: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa Depression

\* 中国石油天然气股份有限公司科技项目课题 (编号: 2024DJ8606) 资助。[Financially supported by the Science and Technology Project Topic of PetroChina (No. 2024DJ8606)]

收稿日期: 2025-11-22 改回日期: 2026-01-12

GUO Zekun<sup>1</sup> GAO Zhiyong<sup>2</sup> FENG Xinluo<sup>1</sup> LI Yijia<sup>1</sup> ZHOU Kun<sup>1</sup>  
LIU Jianzhong<sup>1</sup> HE Yu<sup>2</sup> WANG Baizhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Petroleum Exploration and Development Center for Tarim Oilfield Company, PetroChina,  
Xinjiang Korla 841000, China

<sup>2</sup> Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract** Due to intense tectonic compression, the massive sandstone of the Bashijiqike Formation in the Cretaceous within the piedmont belt of the Kuqa Depression exhibit severe deformation, complex seismic imaging, and high ambiguity, resulting in limited methods and even fewer achievements in the detailed study of provenance transport pathway in the Keshen natural gas accumulation area. In response to this issue, a comprehensive study was conducted on the heavy mineral assemblages of over 400 sandstone samples from more than 40 wells in the Bashijiqike Formation of the Keshen area, as well as experimental analyses including sandstone clastic components and cathodoluminescence on over 600 samples from 26 wells. The results show that: (1) Zircon, tourmaline, garnet, and magnetite are consistently present as heavy minerals in the wells of this area. The presence and variations in the content of stable heavy minerals such as rutile, apatite, and titanite, along with unstable heavy minerals like epidote, chlorite, and mica, lead to differences in heavy mineral assemblages across well zones. Combined with the ZTR index, these variations can help determine the differences in sedimentary provenance pathways among the well zones. (2) The sedimentary source rocks of the thick sandstone mainly come from pre Carboniferous high-grade metamorphic rocks, low-grade metamorphic rocks, intermediate acidic igneous rocks, basic igneous rocks, and sedimentary rocks, which can be subdivided into nine heavy mineral combination zones from east to west. (3) Due to the control of the content of sandstone debris components by primitive sedimentation, the planar variation characteristics of the average content of potassium feldspar, plagioclase, and metamorphic rock debris in sandstone debris components indicate the existence of 5–7 source transport pathways. (4) Based on a comprehensive analysis of the characteristics of source pathways indicated by heavy mineral assemblages and sandstone debris components, it is believed that there were at least seven source transport pathways from east to west during the sedimentation period of the Bashijiqike Formation, among which Zone II and Zone V may have been channels with longer river extensions. The above understanding provides a basis for the analysis of large-scale sedimentary microfacies and favorable sand body distribution in the Keshen area, supporting the fine research and evaluation of gas reservoirs in this area.

**Key words** Kuqa Depression, Keshen area, deep thick sandstone, heavy mineral assemblage, sandstone detrital component, provenance transport pathway

**About the first author** GUO Zekun, born in 1997, is a master's degree holder and engineer. He is mainly engaged in development geology research work. E-mail: gzkun-tlm@petrochina.com.cn.

**About the corresponding author** GAO Zhiyong, born in 1974, is a senior engineer. He is mainly engaged in sedimentology and reservoir geology, development geology. E-mail: gzybox@163.com.

关于库车坳陷物源方向及古水流特征、沉积母岩性质等已经有较多研究。宏观上中生代天山四阶段隆升与南北疆各盆地的统一及分异关系紧密(高志勇等, 2016a), 白垩系巴什基奇克组沉积时

的物源主要来自北部的天山、西南部的温宿凸起和东南部的库鲁克塔格, 塔拉克、大北、克拉、迪那、野云等是来自北部古天山的 5 个次级物源区(陈戈等, 2012; 张荣虎等, 2015)。该时期的沉

积古水流方向以南向为主，北西—南东向、北东—南西向次之（陈戈等，2012；张荣虎等，2015）。古近纪早期，库车坳陷北部山前带发育吐孜、克拉和大北 3 个主要物源通道（赵雪松等，2014）。库车坳陷砂砾岩沉积物母岩性质丰富，坳陷东部上三叠统一中侏罗统物源以岩浆岩和变质岩母岩为主，沉积岩较少（许兴斌等，2020）。三叠系—侏罗系石英含量增大，白垩系降低，新近系最低（李忠等，2004）。白垩系—新近系物源区主要为“沉积岩—高级变质岩—酸性岩浆岩”的母岩组合（李双建等，2007）。

沉积物源分析的技术方法较多，主要有重矿物组合分析、碎屑岩骨架颗粒组分分析、黏土矿物学方法、全岩元素地球化学、同位素地球化学分析法等（杨仁超等，2013；马收先等，2014；舒雨婷等，2015；徐杰和姜在兴，2019；张倩，2025）。目前，应用传统方法联合分析物源区构造背景、母岩性质是重要的研究手段（徐杰和姜在兴，2019；何杰等，2020；张倩，2025），主要有重矿物组合、砂岩碎屑组分分析等综合分析物源区构造背景、母岩性质等，或利用石英、长石、岩屑等多矿物组合判别物源区的构造背景，亦或通过石英单矿物的阴极发光分析、氧同位素分析等判别母岩性质等（杨仁超等，2013；马收先等，2014；程明等，2021）。而传统方法联合与碎屑锆石 U/Pb 测年、金红石及磷灰石等特定矿物的同位素分析等新方法结合，是今后物源分析的重要发展方向（简星等，2012；杨仁超等，2013；马收先等，2014；徐杰和姜在兴，2019）。

前人的研究主要集中于库车坳陷整体的物源方向及母岩类型等方面，但关于坳陷内部克深地区、博孜一大北地区等天然气富集区的沉积物源通道精细研究的方法少、成果更少。由于库车坳陷白垩系巴什基奇克组砂岩具有埋藏深度大、地震成像复杂及多解性强特征，受后期构造挤压与强烈改造作用，利用地震等手段刻画砂体前积特征等判断物源通道的方法难度大。因此，加强重矿物组合分析、砂岩碎屑组分特征分析并结合古水流特征，重建区域物源体系（黎立等，2025；张釜源等，2025）、判断沉积物源方向、母岩性质，精细分析物源通道分布特征，可为大比例尺沉积微相及有利砂体展布

研究提供重要依据。

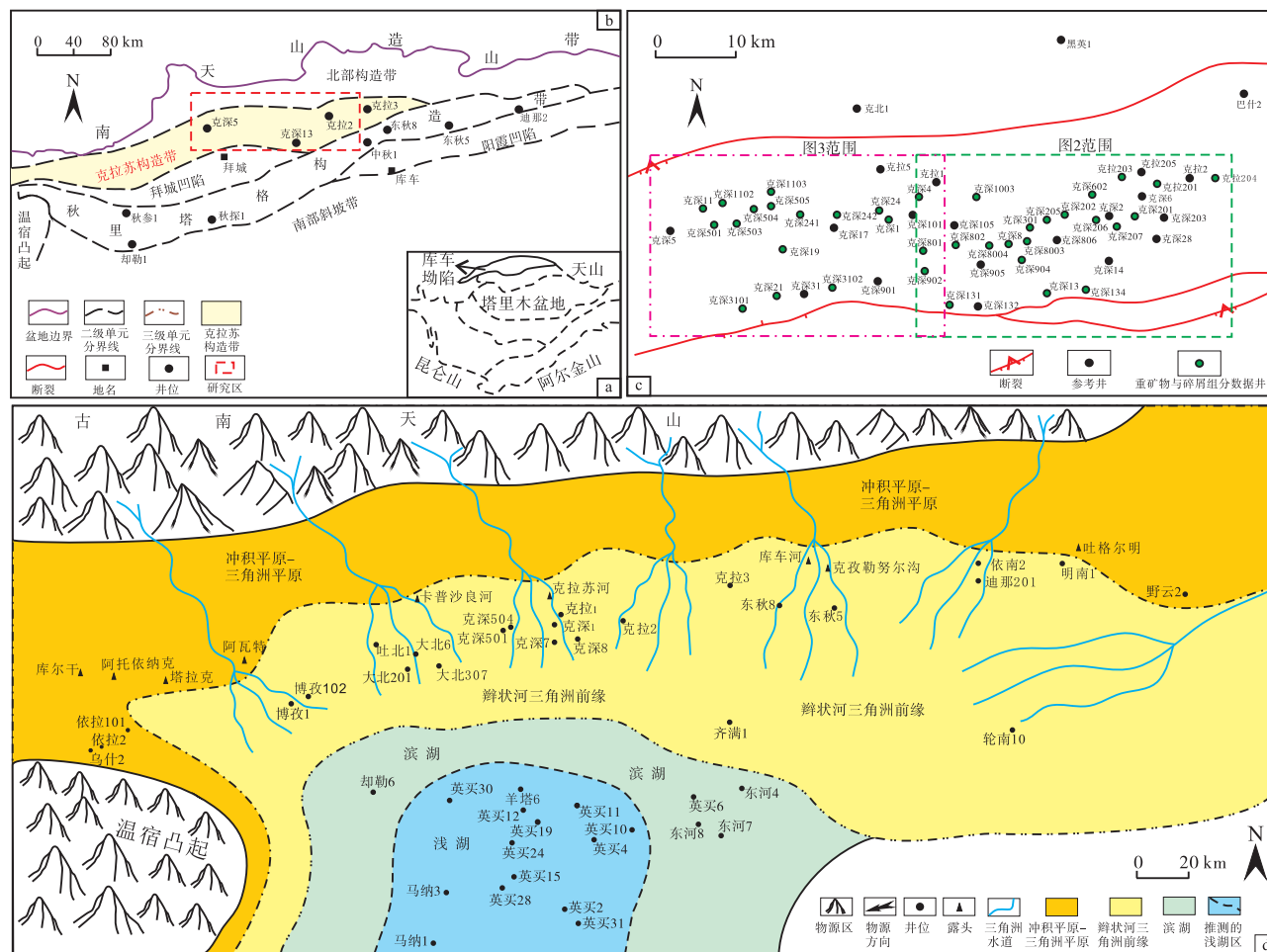
## 1 地质概况

塔里木盆地库车坳陷北部为南天山造山带，坳陷内部自北向南细分为北部构造带、克拉苏构造带、拜城凹陷、秋里塔格构造带、阳霞凹陷及南部斜坡带等构造单元（图 1-a，1-b）。研究区包括克拉气田和克深气田，位于克拉苏构造带的中东部（图 1-b）（王招明，2014；王翠丽等，2018）。克拉—克深气田内部由多个气藏组成（图 1-c），其主力含气层系为白垩系巴什基奇克组的巨厚砂岩（高志勇等，2014；王招明，2014；杨海军等，2021）。巴什基奇克组由下至上细分为巴三段、巴二段和巴一段，埋深在 5500~8500 m，厚度为 260~310 m，岩性主要为红褐色中砂岩、中细砂岩、细砂岩、粉细砂岩等夹薄层褐色泥岩（王招明，2014；孙海涛等，2018；史超群等，2020；王珂等，2021；杨海军等，2021）。

克拉—克深气田物源主要来自于北部的古南天山，物源输送通道主要为大北、克拉 2 条通道（陈戈等，2012；张荣虎等，2015），而位于二者之间的克拉苏河剖面可能也代表 1 条通道（图 1-d）。巴什基奇克组沉积时期，在北部古南天山多条物源体系的供给下，坳陷内形成大面积连片分布的红褐色巨厚砂岩沉积，山前带发育干旱气候下季节性河流—辫状河三角洲平原沉积，克拉—克深地区主体发育辫状河三角洲前缘等沉积（图 1-d）（高志勇等 2014，2016b；张荣虎等，2015；贾进华，2000）。该套红褐色巨厚砂岩经历了燕山晚期—喜山期的 4 次古构造运动，在强烈的构造挤压作用下，形成现今逆冲叠瓦状构造（王翠丽等，2018；杨海军等，2021；莫涛等，2025）。

## 2 重矿物组合特征

前人关于重矿物组合特征开展了较多研究（赵红格和刘池洋，2003；李双建等，2006a，2006b；刘嵘等，2007；李双应等，2014），运用重矿物组合方法分析物源区特征对母岩性质有要求，火山岩和变质岩作为母岩时，受后期影响小，可以较好地反映物源区性质（赵红格和刘池洋，2003）。



a-塔里木盆地库车坳陷位置平面图; b-克拉苏构造带位置平面图; c-研究区克拉-克深气田重点钻井分布图;  
d-库车坳陷白垩系巴什基奇克组沉积相平面图

图 1 库车坳陷克拉苏构造带与克拉-克深气田重点气藏分布平面图

Fig. 1 Plan view of Kela-Su structural belt in Kuqa Depression and key gas reservoirs in the Kela-Keshen gas field

## 2.1 重矿物种类与母岩性质关系

笔者对克拉-克深气田内 40 余口钻井 (图 1-c) 的巴什基奇克组 400 余块砂岩样品, 依据石油与天然气行业标准《沉积岩重矿物分离与鉴定方法》SY/T 6336-2019 (高志勇等, 2019), 开展沉积岩重矿物及组合特征实验分析。由表 1、表 2 和表 3 可知, 本区的稳定重矿物包括锆石、电气石、金红石、石榴子石、磷灰石、磁铁矿、白钛石 (白钛矿)、榍石、赤褐铁矿等。不稳定重矿物主要为绿帘石、绿泥石和云母等。由于赤褐铁矿主要来自于沉积 (成岩) 成因, 不能反映沉积物源特征 (李双建等, 2006b; 李双应等, 2014; 高志勇等, 2021)。

在稳定重矿物中, 锆石主要来自于酸性岩浆

岩、沉积岩; 磁铁矿、白钛矿来自于中性及基性岩浆岩; 电气石主要来自于酸性岩浆岩中 (李双建等, 2006a); 石榴子石主要来自于岩浆岩和变质岩 (李双建等, 2006a; 刘嵘等, 2007)。不稳定重矿物如绿帘石、硬绿泥石主要来自于变质岩 (李双建等, 2006a; 刘嵘等, 2007)。李双建等 (2006b) 通过分析库车坳陷克孜勒努尔沟剖面重矿物组合特征, 认为母岩类型与主要重矿物组合对应关系如下: 高级变质岩 (前石炭纪, 主要早古生代) 中含石榴石、绿帘石、角闪石、磁铁矿; 低级变质岩 (前石炭纪, 主要晚古生代) 中含电气石、白钛石; 中酸性火成岩 (前三叠纪) 中含锆石、磷灰石、角闪石; 基性火成岩 (前二叠纪) 中含金红石、辉石、钛铁矿等; 沉积岩 (三叠纪以来, 主要沉积成因) 主要含赤褐铁矿、重晶石等 (李忠等,

表 1 克拉 203 井与克深 902 井巴什基奇克组砂岩重矿物数据

Table 1 Heavy mineral content of the Bashijiqike Formation sandstones in wells Kela 203 and Keshen 902

| 井名          | 层位          | 井深<br>/m | 重矿物类型及含量/% |       |      |      |       |       |      |       |      |      |       | 重矿物组合                                                         |
|-------------|-------------|----------|------------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|---------------------------------------------------------------|
|             |             |          | 锆石         | 电气石   | 金红石  | 石榴子石 | 磷灰石   | 磁铁矿   | 云母   | 绿泥石   | 绿帘石  | 榍石   | 白钛石   |                                                               |
| 克拉<br>203 井 | 巴<br>二<br>段 | 3837.49  | 3.30       | 4.60  | /    | 4.30 | 9.30  | 56.90 | /    | 0.60  | /    | 1.70 | /     | 锆石+电气石+金红石+<br>石榴子石+磷灰石+磁<br>铁矿+云母+绿泥石+榍<br>石+绿帘石             |
|             |             | 3835.22  | 2.70       | 5.60  | /    | 5.60 | 5.60  | 52.80 | /    | 8.30  | 8.30 | 2.70 | /     |                                                               |
|             |             | 3840.79  | 3.10       | 2.50  | 0.60 | 1.20 | 16.00 | 36.40 | /    | 3.10  | /    | 3.70 | /     |                                                               |
|             |             | 3844.71  | 4.90       | 3.50  | /    | 3.80 | 7.00  | 51.20 | 0.70 | 0.30  | 0.30 | 2.10 | /     |                                                               |
|             |             | 3848.12  | 4.20       | 2.10  | 0.20 | 0.80 | 8.90  | 59.60 | 1.90 | 1.50  | /    | 0.80 | /     |                                                               |
|             |             | 3850.58  | 6.90       | 1.60  | /    | 0.60 | 17.00 | 54.70 | 1.20 | 2.10  | /    | 1.80 | /     |                                                               |
|             |             | 3853.62  | 10.70      | 2.90  | 0.10 | 0.40 | 9.60  | 57.60 | 0.50 | 0.70  | /    | 1.00 | /     |                                                               |
|             |             | 3855.55  | 6.00       | 2.50  | 0.20 | /    | 1.00  | 49.10 | /    | 1.20  | /    | 1.70 | /     |                                                               |
|             |             | 3856.55  | 3.10       | 2.10  | /    | 0.50 | 3.90  | 25.60 | 1.30 | 3.70  | /    | 0.30 | /     |                                                               |
|             |             | 3858.65  | 2.90       | 40.00 | /    | /    | 3.40  | 19.00 | 0.60 | /     | /    | 1.10 | /     |                                                               |
|             | 巴<br>三<br>段 | 4014.20  | 1.30       | 1.50  | 0.10 | 8.70 | 4.40  | 34.20 | /    | 10.10 | /    | 0.80 | /     | 锆石+电气石+石榴子<br>石+磁铁矿+白钛石,无<br>金红石、磷灰石、云母、<br>绿帘石,个别绿泥石、榍<br>石等 |
|             |             | 4014.88  | 0.90       | 0.90  | /    | 2.40 | 8.30  | 10.10 | /    | 42.70 | /    | 0.50 | /     |                                                               |
|             |             | 4016.21  | 0.90       | 1.00  | 0.10 | 8.90 | 5.50  | 24.00 | 0.30 | 12.20 | /    | 0.80 | /     |                                                               |
| 克深<br>902 井 | 巴<br>二<br>段 | 7926.72  | 7.17       | 2.71  | /    | 0.19 | /     | 68.22 | /    | /     | /    | /    | 9.30  |                                                               |
|             |             | 7927.41  | 2.13       | 2.89  | /    | 0.61 | /     | 23.71 | /    | /     | /    | /    | 9.88  |                                                               |
|             |             | 7929.31  | 6.33       | 3.09  | /    | /    | /     | 61.56 | /    | /     | /    | /    | 12.37 |                                                               |
|             |             | 7930.09  | 3.55       | 1.87  | /    | /    | /     | 50.28 | /    | /     | /    | /    | 8.22  |                                                               |
|             |             | 7931.35  | 1.14       | 2.51  | /    | 0.23 | /     | 43.96 | /    | /     | /    | /    | 25.28 |                                                               |
|             |             | 7932.02  | 3.11       | 5.26  | /    | /    | /     | 65.55 | /    | /     | /    | /    | 13.16 |                                                               |
|             | 巴<br>二<br>段 | 7972.43  | 2.92       | 2.77  | /    | 0.58 | /     | 38.25 | /    | /     | /    | /    | 11.39 |                                                               |
|             |             | 7973.27  | 3.58       | 2.83  | /    | 0.30 | /     | 46.20 | /    | /     | /    | 0.15 | 8.49  |                                                               |
|             |             | 7973.98  | 1.60       | 1.60  | /    | 0.96 | /     | 32.37 | /    | /     | /    | /    | 5.45  |                                                               |
|             |             | 7975.84  | 2.89       | 1.93  | /    | 0.24 | /     | 30.12 | /    | 0.24  | /    | /    | 3.61  |                                                               |

2004)。由此判断,克深地区白垩系巴什基奇克组巨厚砂岩的物源母岩主要来自于前石炭纪高级变质岩、低级变质岩、中酸性火成岩、基性火成岩与沉积岩等。

## 2.2 重矿物种类及含量差异与物源通道关系判断

位于克拉—克深气田东部的克拉 203 井(图 1-c)巴二段与巴三段砂岩重矿物主要有锆石、电气石、金红石、石榴子石、磷灰石、磁铁矿、云母、绿泥石、榍石等,无白钛石,个别的绿帘石(表 1)。可见,该井垂向上巴二段与巴三段重矿物类型一致,只是含量有差异。位于克拉 203 井西南部直线距离约 30 km 的克深 902 井(图 1-c),巴二段砂岩重矿物仅有锆石、电气石、石榴子石、磁铁矿、白钛石,无金红石、磷灰石、榍石、绿泥石、云母等,各井段重矿物类型一致,仅是含量有

差异(表 1)。由此可知,无论是位于东部的克拉 203 井还是中西部的克深 902 井,各井垂向上砂岩的重矿物种类一致,只是各井段含量有差异;平面上,虽 2 口井距离只有约 30 km,而重矿物种类却有明显差异,具有不同的重矿物组合特征(表 1)。由此推断,是物源砂质输送通道的不同导致了不同井区重矿物组合的差异,也就是说,依据各井中砂岩重矿物组合的不同,可判断出物源砂质输送通道存在差异。由表 1、表 2 和表 3 可知,克拉—克深气田各井中锆石、电气石、石榴子石、磁铁矿等重矿物较稳定存在,金红石、磷灰石、榍石等稳定重矿物与绿帘石、绿泥石、云母等不稳定重矿物是否存在以及含量差异,是判断各井区物源输送通道差异的重要依据。再者,可利用 ZTR 指数来评价砂岩物源方向与搬运距离远近(赵雪松等, 2014; 高志勇等, 2021)。

表 2 克深地区东部克拉 2-克深 2-克深 8-克深 9-克深 13 气藏巴什基奇克组砂岩重矿物平均含量与 ZTR 指数数据

Table 2 Average heavy mineral content and ZTR index of sandstones from the Bashijiqike Formation in Kela 2-Keshen 2-Keshen 8-Keshen 9-Keshen 13 gas reservoirs in eastern Keshen area

| 井名/样品数       | 主要重矿物平均含量/% (赤褐铁矿平均含量为 11.8%~53.69%,不计入) |     |     |      |     |      |      |     |     |     |     |     |      | ZTR 指数   |
|--------------|------------------------------------------|-----|-----|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|----------|
|              | 锆石                                       | 电气石 | 金红石 | 石榴子石 | 磷灰石 | 磁铁矿  | 云母   | 绿泥石 | 绿帘石 | 榍石  | 辉石  | 十字石 | 白钛石  |          |
| 克拉 2 井/46    | 3.9                                      | 0.7 | 0.4 | 0.4  | 3.9 | 25.1 | 0.6  | 1.7 | 0.7 | /   | /   | /   | /    | 5.0      |
| 克拉 201 井/24  | 4.6                                      | 1.8 | 0.6 | 2.6  | 7.8 | 30.6 | 0.9  | 2.9 | /   | 1.4 | /   | /   | 0.5  | 7.0      |
| 克拉 203 井/12  | 3.9                                      | 2.7 | 0.2 | 3.4  | 7.7 | 40.9 | 0.9  | 7.2 | 4.3 | 1.5 | /   | /   | /    | 6.8      |
| 克拉 204 井/4   | 1.8                                      | 1.7 | 0.6 | 7.2  | 7.5 | 30.0 | /    | 5.2 | /   | 2.0 | /   | /   | /    | 4.1      |
| 克深 201 井/8   | 4.3                                      | 1.6 | /   | 0.4  | /   | 42.6 | /    | /   | /   | /   | 0.3 | /   | 7.6  | 5.9      |
| 克深 202 井/11  | 8.9                                      | 3.7 | /   | 5.3  | 2.0 | 55.1 | 0.2  | 5.2 | /   | /   | /   | /   | 5.0  | 12.6     |
| 克深 205 井/16  | 2.6                                      | 3.0 | /   | 0.4  | 0.2 | 44.3 | 0.5  | 1.5 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 12.7 | 5.6      |
| 克深 206 井/10  | 2.3                                      | 2.4 | 0.3 | 0.2  | /   | 25.1 | 0.9  | 0.7 | /   | /   | /   | /   | 10.7 | 5.0      |
| 克深 207 井/49  | 3.4                                      | 2.6 | 0.3 | 0.3  | 0.4 | 52.0 | 0.3  | 0.4 | 0.2 | 0.2 | /   | /   | 13.2 | 6.3      |
| 克深 1003 井/23 | 6.4                                      | 2.0 | /   | 2.6  | 1.0 | 46.0 | 2.0  | 1.5 | /   | 0.5 | /   | /   | 9.0  | 8.4      |
| 克深 8 井/24    | 3.7                                      | 2.3 | 0.2 | 0.2  | 0.6 | 39.3 | 0.4  | 0.5 | 0.3 | 0.2 | /   | /   | 9.9  | 6.2      |
| 克深 801 井/12  | 1.4                                      | 1.8 | /   | 0.9  | /   | 48.7 | /    | 0.5 | 0.4 | 0.3 | /   | /   | 9.9  | 3.2~6.4  |
| 克深 802 井/10  | 1.6                                      | 2.8 | /   | 0.3  | /   | 49.7 | 31.1 | 0.3 | /   | 0.3 | /   | /   | 14.2 | 4.4      |
| 克深 8004 井/9  | 2.5                                      | 2.0 | /   | 0.8  | /   | 41.5 | 0.5  | 0.3 | /   | 0.3 | /   | /   | 7.9  | 4.5      |
| 克深 902 井/11  | 3.5                                      | 2.7 | /   | 0.4  | /   | 48.3 | /    | 0.2 | /   | 0.2 | /   | /   | 10.7 | 6.2      |
| 克深 904 井/27  | 2.4                                      | 2.1 | 0.2 | 0.5  | /   | 52.2 | /    | 0.3 | /   | 0.2 | /   | /   | 13.4 | 4.5      |
| 克深 12 井/9    | 4.2                                      | 3.0 | /   | 0.7  | /   | 56.0 | /    | /   | 0.2 | /   | /   | /   | 17.6 | 7.2      |
| 克深 13 井/10   | 1.9                                      | 2.3 | /   | 0.2  | /   | 39.5 | /    | 0.2 | /   | 0.1 | /   | /   | 14.4 | 4.2~7.8  |
| 克深 131 井/3   | 6.0                                      | 1.9 | /   | 0.5  | /   | 58.9 | /    | /   | 0.2 | /   | /   | /   | 7.3  | 7.9      |
| 克深 134 井/24  | 4.8                                      | 1.5 | /   | 0.5  | 1.6 | 69.7 | 0.4  | 0.6 | /   | /   | /   | /   | 5.7  | 6.3~10.2 |

表 3 克深地区西部克深 11-克深 5-克深 24-克深 31 气藏巴什基奇克组砂岩重矿物平均含量与 ZTR 指数数据

Table 3 Average heavy mineral content and ZTR index of sandstones from Bashijiqike Formation in Keshen 11-Keshen 5-Keshen 24-Keshen 31 gas reservoirs in western Keshen area

| 井名/样品数       | 主要重矿物平均含量/% (赤褐铁矿平均含量为 8.5%~33.6%,不计入) |     |     |      |     |      |     |     |     |     |     |     |      | ZTR 指数   |
|--------------|----------------------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----------|
|              | 锆石                                     | 电气石 | 金红石 | 石榴子石 | 磷灰石 | 磁铁矿  | 云母  | 绿泥石 | 绿帘石 | 榍石  | 锡石  | 十字石 | 白钛石  |          |
| 克深 1101 井/6  | 4.3                                    | 0.9 | /   | 0.9  | 2.6 | 54.2 | 0.4 | 0.4 | /   | /   | /   | /   | 3.6  | 5.2      |
| 克深 1102 井/7  | 2.6                                    | 1.7 | /   | 8.5  | 3.5 | 42.1 | /   | 7.1 | /   | /   | /   | /   | 4.0  | 4.3      |
| 克深 1103 井/19 | 2.7                                    | 0.5 | /   | 1.0  | 1.3 | 41.3 | /   | 0.3 | 0.4 | /   | /   | /   | 2.0  | 3.2      |
| 克深 501 井/39  | 2.4                                    | 1.8 | 0.2 | 1.0  | /   | 41.5 | 0.7 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | /   | /   | 17.6 | 4.4      |
| 克深 503 井/20  | 2.8                                    | 1.2 | 0.2 | 0.3  | /   | 56.6 | /   | 0.2 | 0.6 | 0.1 | /   | /   | 12.1 | 4.2      |
| 克深 504 井/27  | 2.0                                    | 1.5 | 0.2 | 0.7  | /   | 36.8 | 0.3 | 0.7 | 0.2 | 0.2 | /   | /   | 10.8 | 3.7      |
| 克深 505 井/43  | 2.2                                    | 1.6 | 0.2 | 1.1  | /   | 50.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | /   | /   | 15.1 | 4.0      |
| 克深 241 井/18  | 5.8                                    | 2.5 | 0.2 | 0.3  | 6.0 | 51.1 | 0.4 | 0.4 | /   | /   | /   | /   | 12.1 | 8.5      |
| 克深 242 井/17  | 4.5                                    | 2.2 | /   | 0.6  | 2.5 | 56.2 | /   | 1.1 | /   | /   | /   | /   | 6.8  | 6.7      |
| 克深 24 井/6    | 2.3                                    | 0.8 | /   | /    | 6.6 | 62.0 | /   | /   | /   | /   | /   | /   | 2.3  | 3.1      |
| 克深 19 井/12   | 13.8                                   | 1.7 | /   | /    | 1.8 | 61.4 | /   | 0.2 | /   | /   | /   | /   | 8.3  | 15.5     |
| 克深 4 井/13    | 2.0                                    | 1.9 | 0.2 | 10.2 | 0.3 | 51.9 | /   | 0.3 | 0.3 | 0.5 | /   | /   | 5.4  | 4.1      |
| 克深 1 井/7     | 9.9                                    | 4.5 | 0.8 | 1.6  | /   | 28.9 | /   | 1.3 | /   | 1.5 | 3.0 | /   | 25.0 | 15.2     |
| 克深 3101 井/15 | 2.1                                    | 1.4 | /   | 2.1  | 1.6 | 46.1 | 0.7 | /   | /   | /   | /   | /   | 8.0  | 3.5~6.2  |
| 克深 3102 井/16 | 7.3                                    | 1.1 | /   | 0.2  | 1.7 | 70.2 | /   | /   | 0.2 | /   | /   | /   | 8.1  | 8.4~14.8 |

克深地区西部克深 11、克深 5、克深 24、克深 31 等 4 个气藏(图 1-c)重矿物组合自东向西细分为 F 类、G 类、H 类和 I 类等 4 类(图 3)。其中, F 类的典型井为克深 4 井、克深 1 井, 重矿物组合为锆石+电气石+金红石+石榴子石+磁铁矿+绿

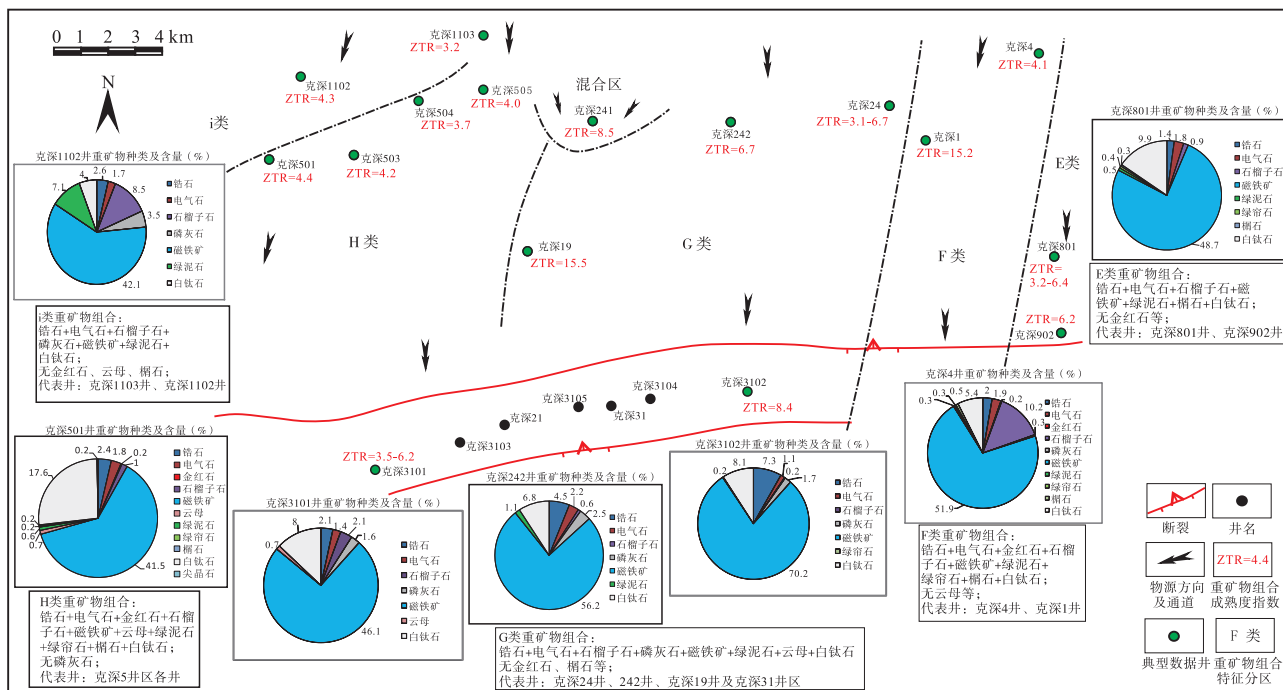


图 3 克深地区西部克深 11-克深 5-克深 24-克深 31 气藏砂岩重矿物组合与 ZTR 指数分布特征平面图  
Fig. 3 Heavy mineral assemblages and ZTR index distribution characteristics of the Keshen 11-Keshen 5-Keshen 24-Keshen 31 gas reservoir in western Keshen area

泥石+绿帘石+榍石+白钛石,有金红石、无云母(图 3);G 类的典型井为克深 242 井、克深 3102 井,重矿物组合为锆石+电气石+磷灰石+磁铁矿+绿泥石+云母+白钛石,无金红石、榍石;H 类的重矿物组合为锆石+电气石+金红石+石榴子石+磁铁矿+云母+绿泥石+绿帘石+榍石+白钛石,无磷灰石,典型井主要为克深 5 井区的克深 501 井、克深 504 井和克深 505 井等;位于最西部的 I 类典型井为克深 1102 井、克深 1103 井,重矿物组合为锆石+电气石+石榴子石+磷灰石+磁铁矿+绿泥石+白钛石,无金红石、云母、榍石(图 3)。

基于上述分析,将克深地区西部巴什基奇克组沉积时期物源通道自东向西细分为 F 类区、G 类区、H 类区和 I 类区等 4 个区。各物源通道内各井的 ZTR 指数大多同样具有自北向南的增大特点,如 G 类区内克深 24 井—克深 242 井—克深 19 井—克深 3102 井区,ZTR 指数主要由 6.7 向南变化为 8.4~15.5。还有,由于位于最南端的克深 3101 井石榴子石含量比克深 3102 井高,且 2 口井的云母和绿帘石含量有差别,可能表示此 2 口井位于不同的物源通道。克深 241 井区可能是克深 5 与克深 24 井区的混合区(图 3)。

## 2.5 重矿物组合指示的物源通道分布特征

综合分析克深地区东部、西部各井巴什基奇克组重矿物组合与物源通道特征,将整个克深地区自东向西划分为 9 个区,分别为 I 类区-IX 类区(图 4),对应图 2 和图 3 中细分的重矿物组合 A 类至 I 类(图 4)。由此认为,最东部 I 类区重矿物组合指示了克拉 203 井、克拉 204 井、克拉 201 井等的物源通道;II 类区重矿物组合指示了克深 206、克深 207 井、克深 201 井等的物源通道;III 类区重矿物组合指示了克深 202 井、克深 205 井、克深 12 井、克深 134 井等的物源通道;IV 类区重矿物组合指示了克深 8 井、克深 8003 井、克深 205 井、克深 904 井、克深 13 井等的物源通道;V 类区重矿物组合指示了克深 1003 井、克深 802 井、克深 8004 井、克深 902 井、克深 131 井等的物源通道;VI 类区重矿物组合指示了克深 4 井、克深 1 井向南至克深 901 井的物源通道;VII 类区重矿物组合指示了克深 24 井、克深 242 井、克深 19 井并向南至克深 3102 井等的物源通道,克深 241 井区处于混合区;VIII 类区重矿物组合指示了克深 5 井区各井向南至克深 3101 井区一线物的源通道;IX 类区重矿物

依据图 4 以重矿物组合特征划分的巴什基奇克组物源通道分布特征,统计西部、中部和东部物源通道内自北向南各井砂岩碎屑组分的种类及含量变化(图 6)。西部物源通道内克深 11 井—克深 1101 井—克深 5 井—克深 505 井—克深 19 井—克深 21

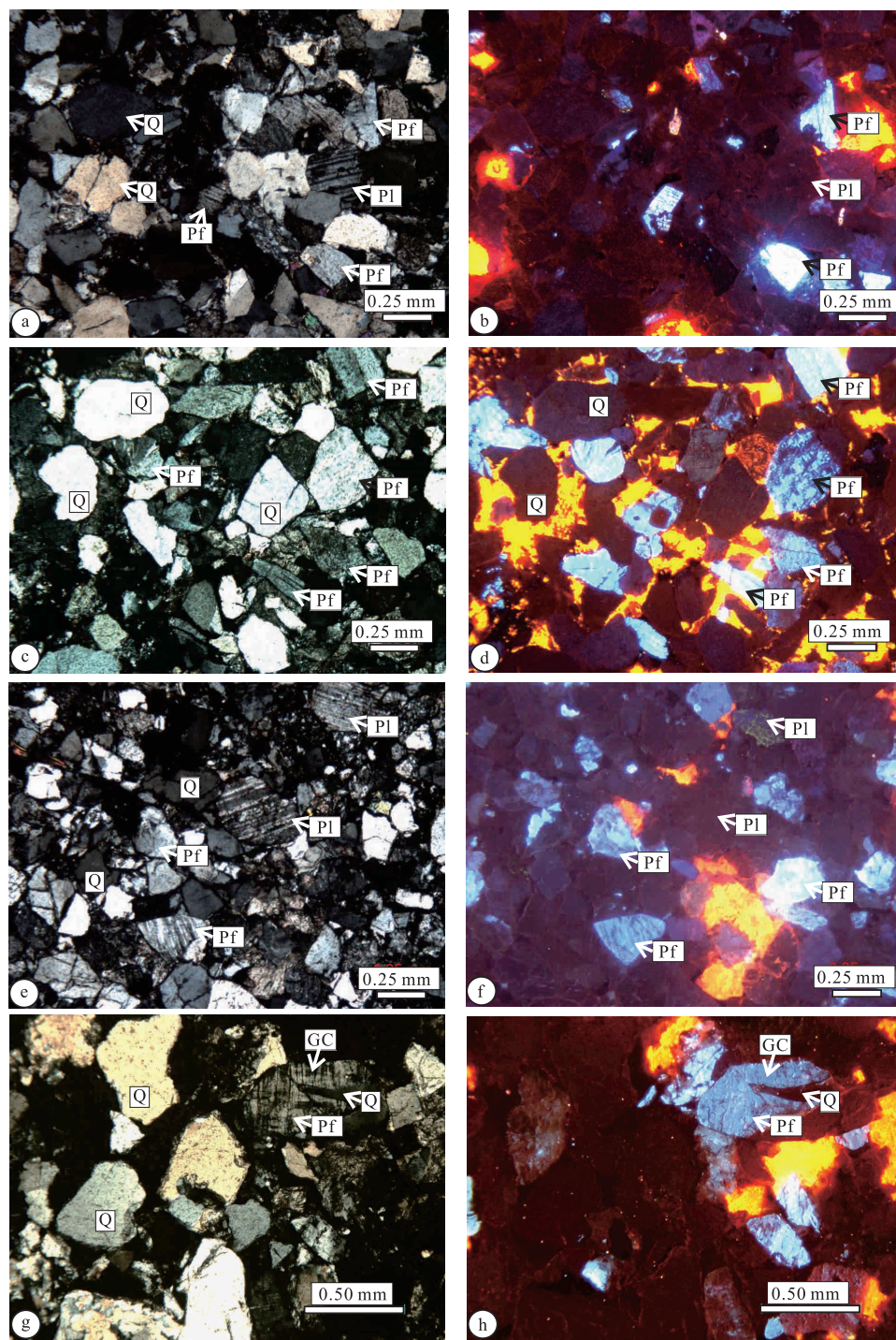
表 4 克深地区重点井巴什基奇克组砂岩碎屑组分平均含量统计

Table 4 Average content of sandstone detrital components in the Bashijiqike Formation of key wells in Keshen area

| 井名/样品数       | 井深/m            | 石英/% | 长石/% |      | 岩屑/% |      |      |
|--------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
|              |                 |      | 钾长石  | 斜长石  | 沉积岩  | 变质岩  | 岩浆岩  |
| 克拉 201 井/35  | 3650.00~3744.00 | 41.2 | 12.9 | 1.3  | 17.4 | 21.5 | 6.5  |
| 克拉 2-13 井/5  | 4971.10~4986.99 | 50.2 | 14.0 | 5.2  | 4.0  | 18.2 | 8.2  |
| 克深 601 井/60  | 6080.08~6157.82 | 46.3 | 18.7 | 10.6 | 3.1  | 14.1 | 7.3  |
| 克深 602 井/65  | 6006.59~6021.12 | 44.9 | 16.4 | 9.3  | 2.6  | 17.3 | 9.4  |
|              | 6082.27~6096.52 | 50.0 | 15.7 | 9.3  | 2.6  | 13.7 | 8.5  |
| 克深 205 井/45  | 6931.07~6934.63 | 41.2 | 21.7 | 9.2  | 3.5  | 12.2 | 12.2 |
|              | 7085.06~7092.98 | 40.8 | 25.8 | 10.4 | 2.3  | 10.8 | 9.9  |
|              | 7182.00~7219.00 | 42.2 | 20.6 | 8.3  | 2.5  | 8.8  | 17.8 |
| 克深 208 井/14  | 6597.33~6615.14 | 41.2 | 25.6 | 12.3 | 3.6  | 7.6  | 9.7  |
| 克深 301 井/15  | 6836.01~6948.43 | 41.3 | 20.3 | 17.6 | 2.3  | 8.5  | 10.0 |
| 克深 8 井/52    | 6728.07~6740.82 | 41.7 | 22.3 | 9.9  | 2.2  | 13.8 | 10.1 |
|              | 6825.87~6826.98 | 42.8 | 21.4 | 12.4 | 3.6  | 12.0 | 7.8  |
|              | 6872.05~6873.64 | 39.0 | 20.5 | 14.3 | 7.0  | 9.8  | 9.5  |
| 克深 904 井/48  | 7724.44~7740.96 | 44.0 | 18.1 | 15.2 | 2.8  | 9.0  | 10.8 |
|              | 7849.07~7853.59 | 44.9 | 19.4 | 15.7 | 2.4  | 7.3  | 10.3 |
| 克深 134 井/5   | 7632.66~7635.07 | 52.0 | 14.2 | 7.4  | 6.4  | 14.0 | 6.0  |
| 克深 4 井/28    | 3387.29~3395.27 | 36.9 | 26.1 | 1.4  | 5.4  | 14.5 | 16.1 |
| 克深 1003 井/37 | 6469.75~6572.52 | 44.1 | 20.5 | 7.5  | 3.9  | 16.2 | 7.5  |
| 克深 24 井/12   | 6178.20~6185.86 | 46.0 | 23.0 | 7.2  | 2.8  | 16.5 | 4.0  |
| 克深 242 井/18  | 6440.45~6464.94 | 47.4 | 17.1 | 6.4  | 4.1  | 15.7 | 9.1  |
|              | 6562.17~6568.95 | 45.7 | 13.3 | 15.4 | 3.1  | 13.1 | 9.3  |
| 克深 801 井/22  | 7201.96~7229.35 | 42.3 | 22.5 | 17.8 | 1.8  | 7.1  | 8.5  |
|              | 7291.34~7294.18 | 40.6 | 21.0 | 17.6 | 1.6  | 10.4 | 8.8  |
|              | 7323.4~7327.24  | 42.2 | 22.0 | 17.6 | 2.0  | 9.4  | 6.8  |
| 克深 902 井/20  | 7816.15~7940.40 | 48.8 | 18.2 | 14.4 | 2.4  | 6.7  | 9.5  |
|              | 7972.43~7975.84 | 45.8 | 19.0 | 16.5 | 1.7  | 8.5  | 8.2  |
| 克深 7 井/2     | 7992.00~7994.00 | 40.0 | 30.0 | 10.0 | 3.0  | 5.0  | 12.0 |
| 克深 11 井/20   | 6266.10~6273.06 | 43.4 | 15.2 | 10.8 | 3.0  | 16.0 | 11.7 |
| 克深 1101 井/50 | 6596.73~6637.73 | 49.5 | 21.5 | 3.0  | 4.1  | 15.9 | 6.9  |
| 克深 5 井/7     | 6726.00~6805.00 | 50.7 | 15.2 | 11.0 | 3.3  | 14.3 | 14.7 |
| 克深 505 井/80  | 6755.11~6793.37 | 47.2 | 16.1 | 11.8 | 4.1  | 11.5 | 9.1  |
| 克深 19 井/16   | 7873.20~7878.83 | 43.4 | 20.5 | 8.7  | 2.8  | 15.4 | 9.2  |
| 克深 21 井/20   | 7935.00~8072.00 | 44.9 | 21.0 | 17.9 | 2.2  | 9.9  | 4.7  |
| 克深 3101 井/40 | 7836.11~7845.30 | 42.3 | 20.0 | 12.1 | 3.2  | 14.8 | 7.5  |
| 克深 3103 井/7  | 8016.00~8102.00 | 44.7 | 25.7 | 6.0  | 2.7  | 13.9 | 7.1  |

井—克深 3101 井—克深 3103 井自北向南各井中钾长石骨架颗粒含量增加较明显(图 6-a),斜长石骨架颗粒含量有起伏但变化不明显,沉积岩岩屑含量变化不大,变质岩岩屑含量有起伏但规律不明显,岩浆岩岩屑含量有明显降低趋势。在中部物源通道内克深 4 井—克深 1003 井—克深 24 井—克深

242 井—克深 801 井—克深 902 井—克深 7 井中钾长石骨架颗粒含量有较弱变化(图 6-b),斜长石骨架颗粒含量有明显增加,沉积岩岩屑含量小幅降低,变质岩岩屑含量有明显降低趋势,岩浆岩岩屑含量较为稳定。在东部物源通道内克拉 2-13 井—克深 601 井—克深 602 井—克深 205 井—克深 208



a—克深301井，井深6842.16 m，中粒岩屑长石砂岩，钾长石（Pf）与斜长石（Pl）及石英（Q）；b—与a同一视域阴极发光，钾长石（Pf）发亮蓝色光，斜长石（Pl）发棕色光，石英（Q）发棕色光；c—克深601井，井深6095.78 m，中粒岩屑长石砂岩，钾长石（Pf）及石英（Q）；d—与c同一视域阴极发光，钾长石（Pf）发亮蓝色光，石英（Q）发棕色光；e—克深904井，井深7850.8 m，中粒岩屑长石砂岩，钾长石（Pf）与斜长石（Pl）及石英（Q）；f—与e同一视域阴极发光，钾长石（Pf）发亮蓝色光，斜长石（Pl）发棕色光、淡绿色光，石英（Q）发棕色光；g—克深4井，井深3393.3 m，中粗粒长石岩屑砂岩，钾长石（Pf）、石英（Q）及花岗岩岩屑（GC）；h—与g同一视域阴极发光，钾长石（Pf）发亮蓝色光，石英（Q）发棕色光，花岗岩岩屑（GC）是二者结合体

图5 克深地区砂岩中钾长石、斜长石显微镜与阴极发光下微观结构特征

Fig. 5 Microstructural characteristics of K-feldspar and plagioclase in sandstones of the Keshen area under microscope and cathodoluminescence

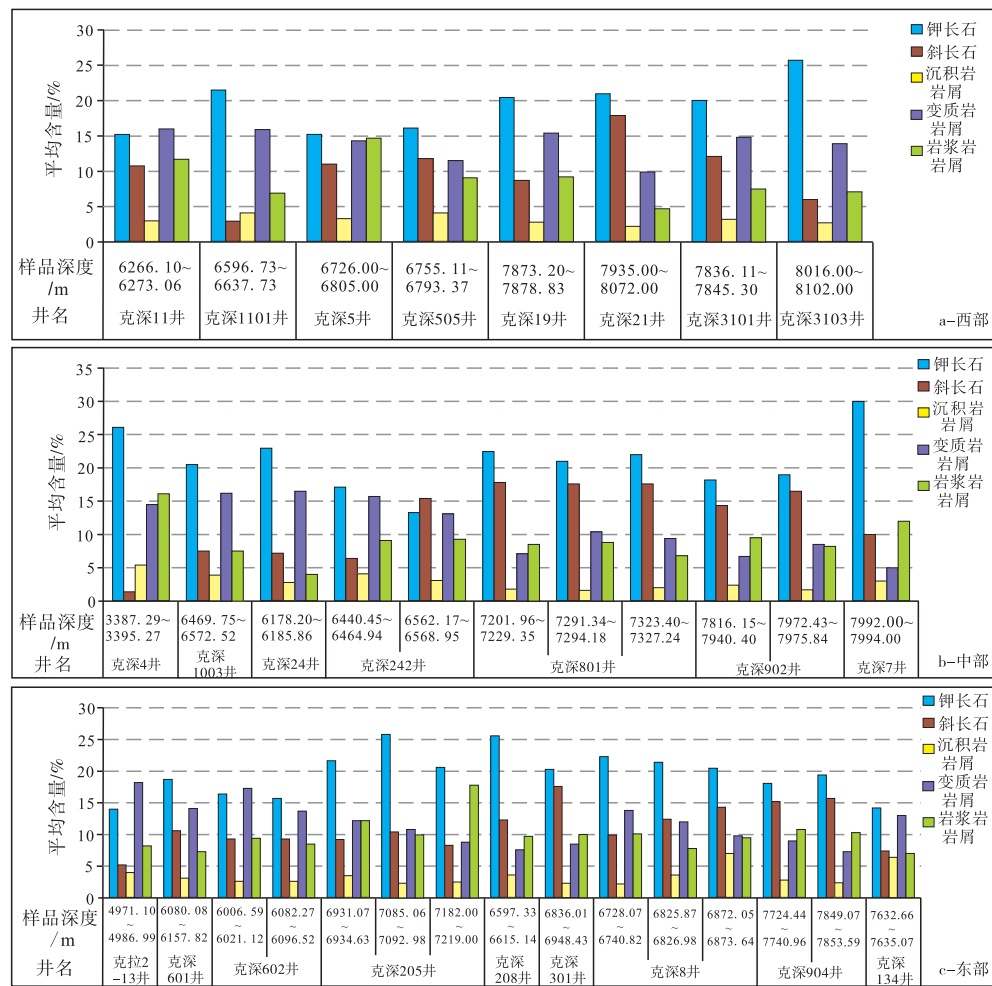


图 6 克深地区巴什基奇克组各井砂岩碎屑组分含量变化特征对比

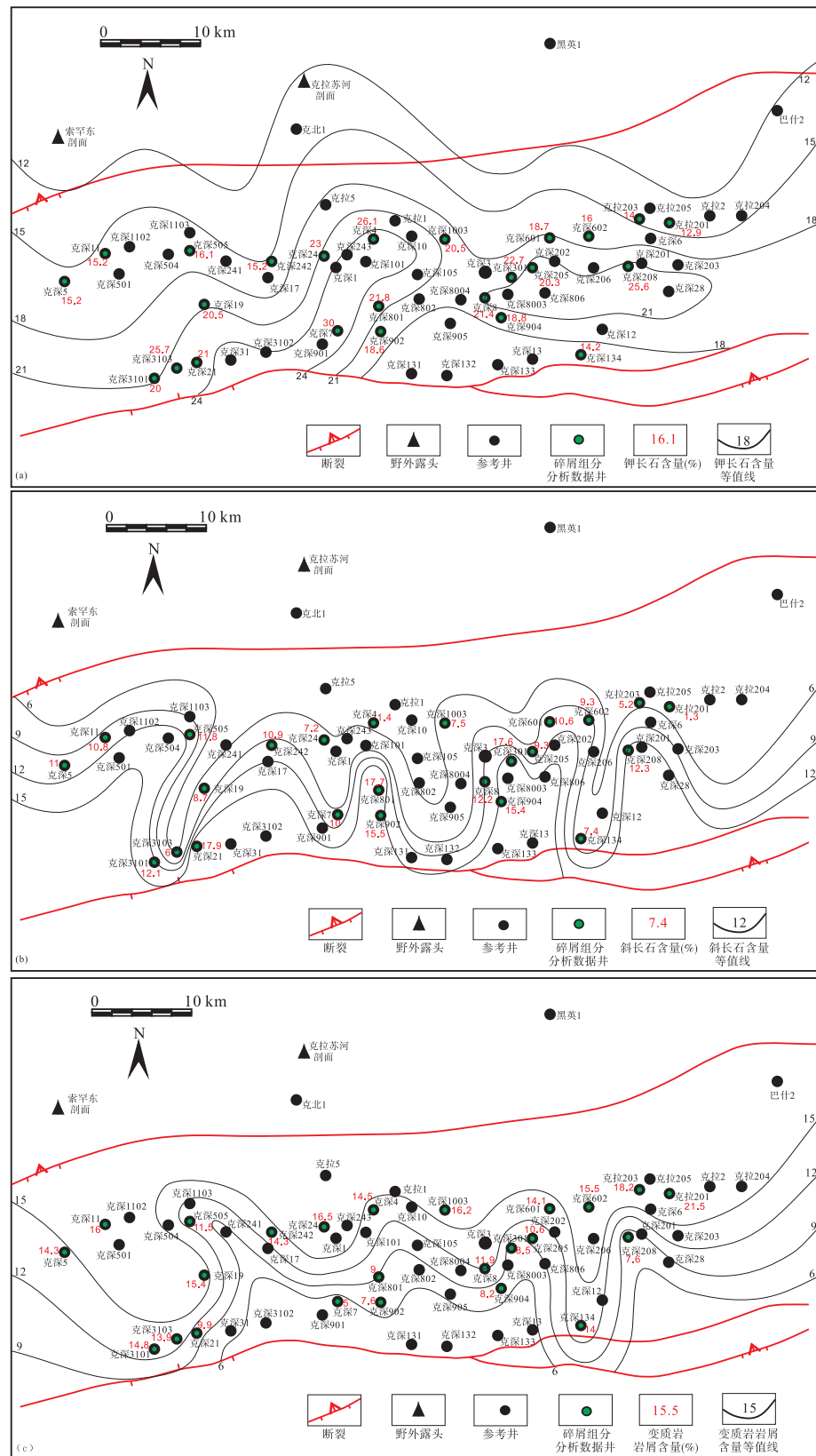
Fig. 6 Comparison of variations in detrital component contents of the Bashijiqike Formation sandstones in different wells in Keshen area

井—克深 301 井—克深 8 井—克深 904 井—克深 134 井中钾长石骨架颗粒含量有较弱变化 (图 6-c), 斜长石骨架颗粒含量有明显增加, 沉积岩岩屑含量有小幅增加, 变质岩岩屑含量有明显降低趋势, 岩浆岩岩屑含量较为稳定。

### 3.2 碎屑组分平面变化特征及指示的物源通道分布

由克深地区西部、中部和东部各井碎屑组分平均含量变化可知, 碎屑骨架颗粒斜长石含量自北向南有较明显增加特征, 变质岩岩屑含量有明显减少特征, 钾长石、岩浆岩岩屑、沉积岩岩屑含量整体上虽有增减但变化趋势小。由此, 编制了巴什基奇克组厚层砂岩中易溶蚀骨架颗粒钾长石、斜长石以及变质岩岩屑平均含量平面分布特征图 (图 7)。克

深地区巴什基奇克组厚层砂岩中易溶蚀骨架颗粒钾长石含量自北向南有增加趋势 (图 7-a), 西部钾长石平均含量由 12% 增加至 24%, 东部则由 12% 增加至 21%, 向南又有降低。厚层砂岩中易溶蚀骨架颗粒斜长石平均含量自北向南有明显增大趋势, 西部的克深 5 井区, 克深 505 井—克深 3102 井, 克深 24 井—克深 7 井, 克深 4 井—克深 902 井—克深 31 井, 克深 205 井—克深 904 井, 克拉 2-13 井—克深 208 井等斜长石平均含量均有增大特征 (图 7-b)。钾长石与斜长石是花岗岩类的最主要造岩矿物, 由于巴什基奇克组砂岩碎屑组分中花岗岩岩屑随着搬运距离增加逐步磨碎、分解为钾长石与斜长石单一矿物 (图 5), 从而导致了长石类矿物含量的增加, 此结果正与图 6-a 中火成岩类岩屑含量自北向南降低的变化趋势相吻合。变质岩岩



a—钾长石平均含量等值线图；b—斜长石平均含量等值线图；c—变质岩岩屑平均含量等值线图

图 7 克深地区巴什基奇组各碎屑组分平均含量平面分布

Fig. 7 Average content of various clastic components in Bashijiqi Formation in Keshen area

屑平均含量自北向南具有减小趋势(图 7-c), 如克深地区克深 11 井—克深 21 井, 克深 24 井—克深 7 井, 克深 1003 井—克深 904 井, 克深 602 井—克深 134 井, 克拉 201 井—克深 208 井等均有较明显减小趋势。

由上述分析可知, 克深地区巴什基奇克组物源碎屑组分平均含量自北向南变化规律较为清晰, 其中变化最为明显的碎屑组分为易溶蚀矿物斜长石、变质岩岩屑(图 7-b, 7-c), 此 2 种碎屑组分在克深地区有 5~7 个变化区域。由于砂岩碎屑组分的含量受原始沉积相控制, 推测克深地区存在 5~7 个物源碎屑输送通道。

#### 4 碎屑组分与重矿物组合分区指示物源通道分布

结合砂岩重矿物组合特征分区指示的克深地区自东向西可能存在 9 个物源通道的认识, 综合分析砂岩碎屑组分与重矿物组合指示的物源通道(图 4; 图 7-b、图 7-c), 由于重矿物显示的 II 类区位于 I 类区南部, 且碎屑组分具有自北向南的统一变化特征, 可将此 2 类区合并为一个物源通道, 即最东部的克深 2 与克拉 2 区块合并; 再者, 由图 7-b 克深 4—克深 7、克深 242—克深 3102 等井的碎屑组分显示了较一致特征, 故将重矿物显示的 VI 类区与

Ⅶ类区(图 4) 合并成统一物源通道, 并将整体的物源通道进行优化, 认为克深地区白垩系巴什基奇克组沉积时期自东向西至少存在 7 条物源输送通道, 即 I 区至Ⅶ区(图 8)。这 7 条通道由东至西、自北向南分别为: I 区克拉 201 井—克深 201 井—克深 206 井—克深 207 井—克深 28 井等区域; II 区克深 602 井—克深 202 井—克深 205 井—克深 12 井—克深 134 井等区域; III 区克深 3 井—克深 8003 井—克深 904 井—克深 13 井等区域; IV 区克深 1003 井—克深 8004 井—克深 902 井—克深 905 井—克深 131 井—克深 132 井等区域; V 区克深 24 井—克深 4 井—克深 19 井—克深 1 井—克深 21 井—克深 3102 井—克深 901 井等区域; VI 区克深 505 井—克深 241 井—克深 3101 井; VII 区克深 1102 井—克深 504 井—克深 501 井—克深 5 井等区域。

另外, 由图 7-b 和图 7-c 中斜长石含量降低、变质岩岩屑含量增大, 在平面图中最远分别延伸至西部的克深 3103 井、克深 3101 井以及东部的克深 134 井的变化程度可知, 推测图 8 中的 II 区和 V 区是河道延伸较远的物源输送通道, 可能 V 区的上游物源通道来自于克拉苏河或者该剖面所在部位。

再者, 由图 4 所示的克深地区重矿物组合特征宏观上可划分为两大类: 第 1 类为东部的重矿物组

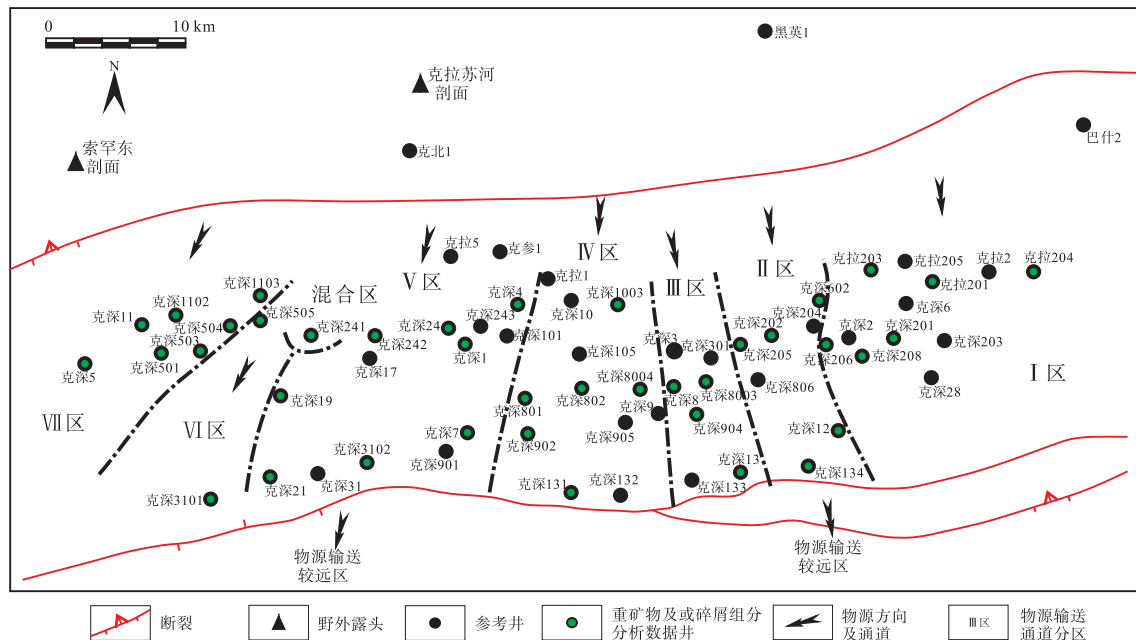


图 8 克深地区巴什基奇克组物源输送通道精细分区平面分布

Fig. 8 Division of provenance transport channels in the Bashijiqi Formation in Keshen area

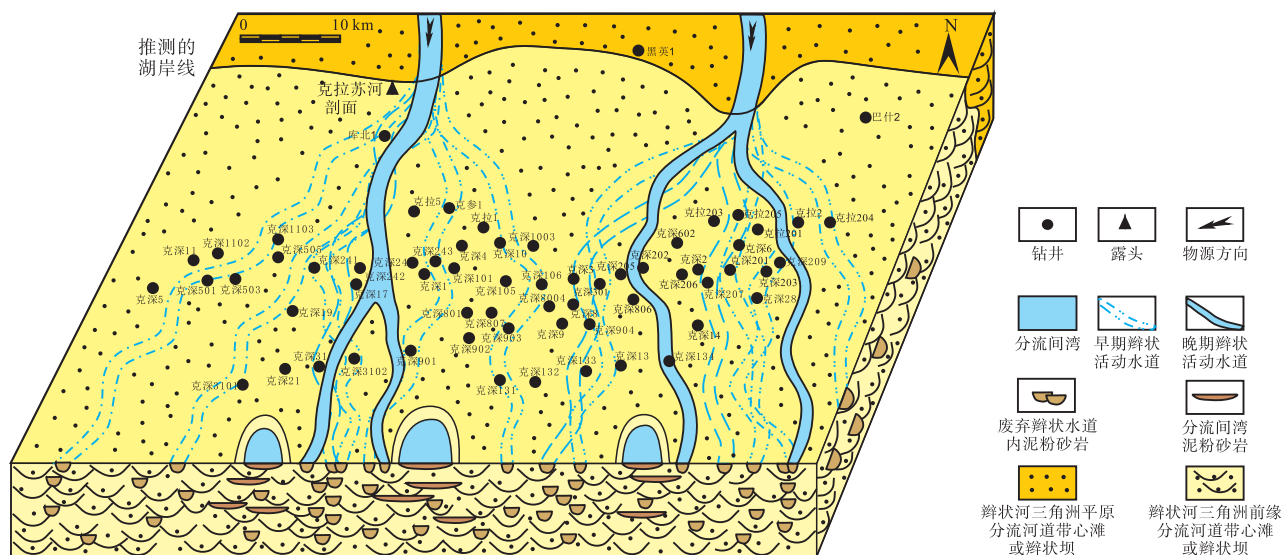


图 9 克深地区巴什基奇组河控辫状河三角洲沉积模式

Fig. 9 Sedimentary model of fluvial-dominated braided delta in the Bashijiqike Formation in Keshen area

合 I 类区—IV 类区（物源通道的 I 区—III 区），其重矿物组合为锆石、电气石、石榴子石、磷灰石、磁铁矿、金红石、云母、绿泥石、绿帘石、白钛石、榍石等，种类比较齐全且含量较高；第 2 类为西部的重矿物组合 V 类区—IX 类区（物源通道的 IV 区—VII 区），其重矿物组合较第 1 类中的云母、绿泥石、绿帘石等含量降低且较多并无金红石、榍石甚至无磷灰石矿物，差别较大（图 4；表 2，表 3）。由此，在克深地区两大类物源区、7 个细分沉积物源通道基础上，结合前人认为克深地区巴什基奇组主要发育辫状河三角洲平原—前缘沉积特征的认识（贾进华，2000；张荣虎等，2015；高志勇等，2014，2016b），建立了巴什基奇组沉积相模式图（图 9）。克深地区主要发育 2 个河控辫状河三角洲朵叶体，延伸的主分流河道分别位于物源通道 II 区和 V 区，V 区的主分流河道可能来自于古克拉苏河，其他物源输送通道则以各分流河道为主。据此，获得的物源输送通道精细划分的认识（图 8），可为克深地区大比例尺沉积微相及有利砂体展布分析提供依据。钾长石、斜长石等易溶蚀骨架颗粒含量平面分布特征（图 7），可为储集层非均质性评价研究提供基础。

## 5 结论

### 1) 库车坳陷克深地区巨厚砂岩中稳定重矿物

有锆石、电气石、金红石、石榴子石、磷灰石、磁铁矿、白钛石、榍石、赤褐铁矿等，不稳定重矿物主要为绿帘石、绿泥石和云母等，沉积物源母岩主要来自于前石炭系高级变质岩、低级变质岩、中酸性火成岩、基性火成岩与沉积岩。

2) 综合分析深层砂岩重矿物组合特征与分区差异，以及碎屑组分中钾长石、斜长石和变质岩岩屑平均含量平面变化特征，认为克深地区巴什基奇组沉积时期自东向西至少存在 7 条物源输送通道，其中 II 区和 V 区可能是河道延伸较远的通道，V 区物源通道可能来自于古克拉苏河。

3) 在深层巨厚砂岩受后期构造挤压改造作用强烈、难以用地震手段判断物源通道的情况下，加强砂岩重矿物组合与碎屑组分特征分析，可精细地分析物源通道分布特征，为大比例尺沉积微相及有利砂体展布等研究提供依据。

## 参考文献 (References)

- 陈戈, 黄智斌, 张惠良, 张荣虎, 闫晓芳. 2012. 塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇组物源精细分析. 天然气地球科学, 23(6): 1025–1033. [Chen G, Huang Z B, Zhang H L, Zhang R H, Yan X F. 2012. Provenance analysis of clastic rocks in the Cretaceous Bashijiqike Formation at Kuqa Depression. Natural Gas Geoscience, 23(6): 1025–1033]
- 程明, 刘永福, 刘运宏, 孙琦, 周思宇, 蒋俊. 2021. 塔里木盆地羊塔 11 井区白垩系亚格列木组物源分析. 中国石油勘探, 26(2): 77–84. [Cheng M, Liu Y F, Liu Y H, Sun Q, Zhou S Y, Jiang J. 2021. Provenance analysis of Cretaceous Yageliemu Formation in the Yang-

- ta 11 well block, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(2): 77-84]
- 冯洁, 宋岩, 姜振学, 李宝帅, 李峰. 2017. 塔里木盆地克深区巴什基奇克组砂岩成岩演化及主控因素. *特种油气藏*, 24(1): 70-75. [Feng J, Song Y, Jiang Z X, Li B S, Li F. 2017. Diagenetic evolution and major controlling factors for sandstone in Bashijiqike Formation of the Keshen Area in the Tarim Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 24(1): 70-75]
- 高志勇, 冯佳睿, 周川闽, 崔京钢, 李小陪, 赵雪松, 郭美丽, 吴昊. 2014. 干旱气候环境下季节性河流沉积特征: 以库车河剖面下白垩统为例. *沉积学报*, 32(6): 1060-1071. [Gao Z Y, Feng J R, Zhou C M, Cui J G, Li X P, Zhao X S, Guo M L, Wu H. 2014. Arid climates seasonal rivers deposition: a case of Lower Cretaceous in Kuche river outcrop. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(6): 1060-1071]
- 高志勇, 周川闽, 冯佳睿, 吴昊, 李雯. 2016a. 中新世天山隆升及其南北盆地分异与沉积环境演化. *沉积学报*, 34(3): 415-435. [Gao Z Y, Zhou C M, Feng J R, Wu H, Li W. 2016a. Relationship between the Tianshan mountains uplift and depositional environment evolution of the basins in Mesozoic-Cenozoic. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(3): 415-435]
- 高志勇, 周川闽, 冯佳睿, 吴昊, 李雯. 2016b. 库车坳陷白垩系巴什基奇克组泥砾的成因机制与厚层状砂体展布. *石油学报*, 37(8): 996-1010. [Gao Z Y, Zhou C M, Feng J R, Wu H, Li W. 2016b. Mechanism and sedimentary environment of the muddy gravel concomitant with thick layer sandstone of Cretaceous in Kuqa Depression. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 996-1010]
- 高志勇, 张锡新, 张东峰, 贺银军, 郭鹏超, 南珏祥, 高波, 方正伟, 谢巍, 张磊, 黄向剩, 臧春艳, 宋梅芳, 柳娜. 2019. 石油与天然气行业标准《沉积岩重矿物分离与鉴定方法》SY/T 6336-2019, 1-12. [Gao Z Y, Zhang X X, Zhang D F, He Y J, Guo P C, Nan J X, Gao B, Fang Z W, Xie W, Zhang L, Huang X S, Zang C Y, Song M F, Liu N. 2019. The method of separation and examination of heavy minerals for sedimentary rock: SY/T 6336-2019, 1-12]
- 高志勇, 王华建, 冯佳睿, 罗忠, 张宇航, 李晓红. 2021. 燕辽海盆中元古界下马岭组沉积期的物源性质与古地理环境. *地质学报*, 95(12): 3606-3628. [Gao Z Y, Wang H J, Feng J R, Luo Z, Zhang Y H, Li X H. 2021. Provenance and paleogeographic environment of the Middle Proterozoic Xiamaling Formation in the Yanliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3606-3628]
- 何杰, 王华, Eduardo Garzanti. 2020. 砂岩(砂)的岩相分析和分类标准. *地球科学*, 45(6): 2186-2198. [He J, Wang H, Eduardo G. 2020. Petrographic analysis and classification of sand and sandstone. *Earth Science*, 45(6): 2186-2198]
- 贾进华. 2000. 库车前陆盆地白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究. *地学前缘*, 7(3): 133-143. [Jia J H. 2000. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa foreland basin. *Earth Sciences Frontiers*, 7(3): 133-143]
- 简星, 关平, 张巍. 2012. 碎屑金红石: 沉积物源的一种指针. *地球科学进展*, 27(8): 828-846. [Jian X, Guan P, Zhang W. 2012. Detrital rutile: a sediment provenance indicator. *Advances in Earth Science*, 27(8): 828-846]
- 李双建, 王清晨, 李忠, 王道轩. 2006a. 砂岩碎屑组份变化对库车坳陷和南天山盆地演化的指示. *地质科学*, 41(3): 465-478. [Li S J, Wang Q C, Li Z, Wang D X. 2006a. Detrital modes sandstones and their implications for basin-mountain evolution between the Kuqa depression and south Tian Shan Mountains. *Chinese Journal of Geology*, 41(3): 465-478]
- 李双建, 石永红, 王清晨. 2006b. 碎屑重矿物分析对库车坳陷白垩—第三纪物源变化的指示. *沉积学报*, 24(1): 28-35. [Li S J, Shi Y H, Wang Q C. 2006b. The analysis of detrital heavy minerals in Cretaceous-Tertiary sandstones, Kuqa depression and their implications for provenance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(1): 28-35]
- 李双建, 石永红, 王清晨, 李忠. 2007. 白垩纪以来库车坳陷碎屑重矿物组成变化. *地质科学*, 42(4): 709-721. [Li S J, Shi Y H, Wang Q C, Li Z. 2007. Changes of detrital heavy minerals' composition in the Kuqa depression from Cretaceous. *Chinese Journal of Geology*, 42(4): 709-721]
- 李双应, 杨栋栋, 王松, 万秋, 王道轩. 2014. 南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束. *地质学报*, 88(2): 167-184. [Li S Y, Yang D D, Wang S, Wan Q, Wang D X. 2014. Characteristics of petrology, geochemistry, heavy minerals and isotope chronology of Upper Carboniferous detrital rocks in the middle segment of South Tianshan and constraints to the provenance and tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 167-184]
- 李忠, 王道轩, 林伟, 王清晨. 2004. 库车坳陷中—新生界碎屑组分对物源类型及其构造属性的指示. *岩石学报*, 20(3): 655-666. [Li Z, Wang D X, Lin W, Wang Q C. 2004. Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa Depression, northwest China: implication for provenance types and tectonic attributes. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 655-666]
- 黎立, 孙春燕, 董尧, 罗强, 屈洋, 朱世发. 2025. 塔西南山前地区甫沙断陷侏罗系物源与沉积相. *古地理学报*, 27(4): 870-885. [Li L, Sun C Y, Dong Y, Luo Q, Qu Y, Zhu S F. 2025. Provenance and sedimentary facies of the Jurassic in Fusha fault depression, piedmont area of southwestern Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 870-885]
- 刘嵘, 董月霞, 谭靖, 张素新. 2007. 沉积岩中稳定重砂矿物的成岩蚀变特征及其指示意义. *地质科技情报*, 26(6): 10-16. [Liu R, Dong Y X, Tan J, Zhang S X. 2007. Diagenesis alteration of heavy minerals of garnet, zircon, rutile, apatite, tourmaline and titanite during diagenesis and its geological significance. *Geological Science and Technology Information*, 26(6): 10-16]
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2014. 轻矿物物源分析研究进展. *岩石学报*, 30(2): 597-608. [Ma S X, Meng Q R, Qu Y Q. 2014. Development on provenance analysis of light minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 597-608]
- 莫涛, 王珂, 王俊鹏, 金文正. 2025. 库车坳陷白垩系沉积前古地貌及对沉积的控制作用. *海相油气地质*, 30(2): 167-176. [Mo T, Wang K, Wang J P, Jin W Z. 2025. Pre-Cretaceous paleogeomorphology and its control effect on sedimentation in Kuqa Depression.

- Marine Origin Petroleum Geology, 30(2): 167-176]
- 史超群, 张慧芳, 周思宇, 王佐涛, 蒋俊, 章学岐, 左小军, 娄洪, 王振鸿, 陈常超. 2020. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带—秋里塔格构造带白垩系巴什基奇克组深层、高产储层特征及控制因素. 天然气地球科学, 31(8): 1126-1138. [ Shi C Q, Zhang H F, Zhou S Y, Wang Z T, Jiang J, Zhang X Q, Zuo X J, Lou H, Wang Z H, Chen C C. 2020. Comparative study on deep and high yielding reservoir characteristics and controlling factors of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu structural belt and Qiulitage structural belt of Kuqa Depression, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 31(8): 1126-1138]
- 舒雨婷, 郑玉龙, 许冬, 初凤友. 2015. 西菲律宾海盆 18 孔黏土矿物的物源分析. 海洋学研究, 33(4): 61-69. [ Shu Y T, Zheng Y L, Xu D, Chu F Y. 2015. The provenance of clay minerals in core 18 from the west Philippine Basin. Journal of Marine Sciences, 33(4): 61-69]
- 孙海涛, 钟大康, 李勇, 毛亚昆, 杨宪彰. 2018. 超深低孔特低渗砂岩储层的孔隙成因及控制因素: 以库车坳陷克深地区巴什基奇克组为例. 吉林大学学报(地球科学版), 48(3): 693-704. [ Sun H T, Zhong D K, Li Y, Mao Y K, Yang X Z. 2018. Porosity origin and controlling factors of ultra-deep, low porosity and ultra-low permeability sandstone reservoirs: a case study of Bashijiqike formation in Keshen area of Kuqa Depression, Tarim Basin. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 48(3): 693-704]
- 王翠丽, 李红波, 陈东, 陈宝新, 刘磊, 罗明高. 2018. 克深气田巴什基奇克组致密砂岩储层孔隙结构特征及影响因素分析. 地质科技情报, 37(5): 70-77. [ Wang C L, Li H B, Chen D, Chen B X, Liu L, Luo M G. 2018. Porosity structure characteristics and influencing factors analysis of Bashijiqike tight sandstone reservoir in Keshen Gasfield. Geological Science and Technology Information, 37(5): 70-77]
- 王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 孙雄伟, 杨学君. 2021. 超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因: 以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例. 石油与天然气地质, 42(2): 338-353. [ Wang K, Zhang R H, Wang J P, Sun X W, Yang X J. 2021. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: a case study of Keshen gas field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 42(2): 338-353]
- 王招明. 2014. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律. 天然气地球科学, 25(2): 153-166. [ Wang Z M. 2014. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 25(2): 153-166]
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379-396. [ Xu J, Jiang Z X. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. Journal of Palaeogeography( Chinese Edition), 21(3): 379-396]
- 许兴斌, 王昌勇, 刘满仓, 林世国, 李德江, 高志勇. 2020. 塔里木盆地库车坳陷东部上三叠统一中侏罗统物源特征及其地质意义. 地球科学与环境学报, 42(2): 172-187. [ Xu X B, Wang C Y, Liu M C, Lin S G, Li D J, Gao Z Y. 2020. Provenance characteristics of Upper Triassic-Middle Jurassic in the eastern Kuqa depression of Tarim Basin, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 42(2): 172-187]
- 杨海军, 李勇, 唐雁刚, 雷刚林, 周鹏, 周露, 许安明, 邹志鹏, 朱文慧, 陈维力, 胡春雷, 杨敬博. 2021. 塔里木盆地克深气田成藏条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 42(3): 399-414. [ Yang H J, Li Y, Tang Y G, Lei G L, Zhou P, Zhou L, Xu A M, Xun Z P, Zhu W H, Chen W L, Hu C L, Yang J B. 2021. Accumulation conditions, key exploration and development technologies for Keshen gas field in Tarim Basin. Acta Petrolei Sinica, 42(3): 399-414]
- 杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 宗敏, 张涛. 2013. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势. 沉积学报, 31(1): 99-107. [ Yang R C, Li J B, Fan A P, Zong M, Zhang T. 2013. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks. Acta Sedimentologica Sinica, 31(1): 99-107]
- 赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3): 409-415. [ Zhao H G, Liu C Y. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. Acta Sedimentologica Sinica, 21(3): 409-415]
- 赵雪松, 高志勇, 冯佳睿, 李小陪, 郭美丽. 2014. 库车前陆盆地三叠系—新近系重矿物组合特征与盆地构造演化关系. 沉积学报, 32(1): 68-77. [ Zhao X S, Gao Z Y, Feng J R, Li X P, Guo M L. 2014. Triassic-Neogene heavy minerals' assemblages characteristics and basin-orogen tectonic evolution relationship in the Kuqa foreland basin. Acta Sedimentologica Sinica, 32(1): 68-77]
- 张倩. 2025. 多方法约束的复杂物源示踪: 以渤海湾盆地东营凹陷古近系孔店组—沙河街组四段下亚段为例. 石油与天然气地质, 46(2): 599-616. [ Zhang Q. 2025. Multi-method-constrained tracing of complex provenance: a case study of the sequence from the Paleogene Kongdian Formation to the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the dongying sag. Oil & Gas Geology, 46(2): 599-616]
- 张釜源, 祝海华, 张本健, 王明磊, 林思臣, 张芮, 杨希琳, 李育聪, 王兴志. 2025. 四川盆地中侏罗统凉高山组物源特征及沉积演化模式. 古地理学报, 27(4): 886-902. [ Zhang F Y, Zhu H H, Zhang B J, Wang M L, Lin S C, Zhang R, Yang X L, Li Y C, Wang X Z. 2025. Provenance characteristics and sedimentary evolutionary model of the Middle Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography( Chinese Edition), 27(4): 886-902]
- 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 陈戈, 曾庆鲁, 周晨光. 2015. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制. 天然气地球科学, 26(4): 667-678. [ Zhang R H, Wang J P, Ma Y J, Chen G, Zeng Q L, Zhou C G. 2015. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried Cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China. Natural Gas Geoscience, 26(4): 667-678]

(责任编辑 郑秀娟 李新坡)