

库车坳陷侏罗系-新近系砾岩特征变化 及其对天山隆升的响应

高志勇^{1,2},朱如凯^{1,2},冯佳睿^{1,2},李小陪³,赵雪松³,郭美丽³

(1. 中国石油 勘探开发研究院 实验研究中心,北京 100083; 2. 中国石油 勘探开发研究院
提高石油采收率国家重点实验室,北京 100083; 3. 中国地质大学,北京 100083)

摘要:通过对库车坳陷北部野外露头侏罗系-新近系多套砾岩中砾石成分、砾石扁度、球度、砾径及沉积相类型等的分析,半定量评价了南天山山前砾石的沉积搬运距离。研究认为,侏罗系-新近系砾石搬运距离表现为由远及近的规律。剖面点处下侏罗统阿合组-阳霞组砾石搬运距离最远,计算出其搬运距离可达110~130 km;上侏罗统喀拉扎组砾石的搬运距离约为40 km;下白垩统亚格列木组-巴什基奇克组砾石搬运距离较近,约为20~45 km。古近系砾石沉积搬运距离约为20~50 km,新近系吉迪克组砾石的搬运距离最短,在20 km左右。结合前人磷灰石裂变径迹测年数据及研究成果,认为中、新生代天山存在晚三叠世-早侏罗世、晚侏罗世-早白垩世、晚白垩世-始新世及中新世以来4个隆升阶段,隆升范围两小两大。由砾石成分、砾态特征、砾径及砾石搬运距离反映的沉积物源区迁移等变化规律表明,砾岩沉积演化对天山4个阶段隆升的构造运动强烈程度具明显的响应。

关键词:天山隆升;搬运距离;砾态;砾岩;库车坳陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Jurassic-Neogene conglomerate characteristics in Kuqa Depression and their response to tectonic uplifting of Tianshan Mountains

Gao Zhiyong^{1,2}, Zhu Rukai^{1,2}, Feng Jiarui^{1,2}, Li Xiaopei³, Zhao Xuesong³, Guo Meili³

(1. *Petroleum Geology Research and Laboratory Center of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Samples from multiple sets of the Jurassic-Neogene conglomerate outcrops in Kuqa depression were collected and analyzed for the composition, flatness, sphericity, and size of gravel, and the sedimentary facies that had made everything happened, and for a semi-quantitative study of transportation distance of gravel in front of southern Tianshan Mountain. The results show a far-to-near pattern of gravel transport distance for the Jurassic-Neogene conglomerate. Gravels in the Lower Jurassic Ahe-Yangxia Formations migrated the farthest to 110-130 km, and those from the Neogene Jidike Formation moved the shortest at only 20 km. Between them, the gravels of the Upper Jurassic Kelaza Formation moved about 40 km, that of the Lower Cretaceous Yageliebu-Bashijiike Formations ran at a distance range between 20 and 45 km and that in the Palaeogene conglomerate transported from 20 to 50 km. Combined with the previous apatite fission track data, the new results indicate that the uplift of the Tianshan Mountains can be divided into 4 stages (two of them were major uplifting and two of them were minor ones): the Triassic-Early Jurassic, Late Jurassic-Early Cretaceous, Late Cretaceous-Eocene, and Miocene-present. The composition, shape and size of the gravels as well as migration of provenance reflected by the gravel transport distance show that the sedimentary evolution of the conglomerate responded strongly to the 4 stages of uplifting process.

Key words: uplift of Tianshan Mountains; transportation distance; gravel geometry; conglomerate; Kuqa depression

砾岩是对形成条件反应最为敏感以及分布区域较为局限的岩石,对认识大规模构造运动或区域地质发展极为重要^[1]。前人对砾岩的岩石学特征、沉积环境及砾岩与构造运动关系均开展了大量的研究^[1-17]。

库车坳陷侏罗系-新近系沉积了多套砾岩,已有的报道主要集中在个别组砾岩的岩石学、砾岩结构和沉积环境等方面的研究,譬如开华^[18]对拜城县卡普沙良河剖面亚格列木组砾岩进行了分类,通过沉积特征、砾

收稿日期:2015-03-27;修订日期:2015-06-30。

第一作者简介:高志勇(1974—),男,高级工程师,沉积学、储层地质学。E-mail: gzybox@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05003-002);中国石油股份公司科技项目(2014B-0408)。

岩结构及砾石成分等研究,认为该组砾岩属于冲积扇沉积环境;彭守涛等^[19]认为库车前陆盆地早三叠世发育砾石质辫状河-冲积平原沉积体系,晚侏罗世-白垩纪发育辫状河三角洲-宽浅湖泊沉积体系,新近纪中新世发育砂砾质辫状河-冲积平原沉积体系,新近纪上新世-第四纪更新世,以冲积扇体系为主;李忠等^[20]对库车坳陷中、新生代地层中的砾岩成分、砾径及其反映的构造运动进行了研究,指出白垩纪特别是古近纪以来天山隆升和剥露深度增大显著;刘聘等^[21]对南天山西部乌鲁克恰提剖面新生代阿图什组和西域组砾岩进行了分析,认为乌鲁克恰提地区新生代晚期褶皱冲断带不断向盆地拓展,物源区距离沉积区越来越近。由上述成果可知,前人尚未对南天山前侏罗系-新近系多套砾岩开展较为系统的分析,特别是半定量评价各组砾岩中砾石的沉积搬运距离,而有关砾岩特征的变化与天山隆升响应关系方面的研究则更少涉及。

1 地质概况

库车坳陷位于南天山南麓,与南天山以断层或呈

角度不整合接触。我们选择库车河剖面(主要剖面)和卡普沙良河剖面(辅助剖面)进行砾岩岩石学、砾石砾态及沉积环境分析(图1)。砾岩在南天山前侏罗系-新近系中主要发育层段的地层情况如下。

下侏罗统阿合组在库车河剖面厚358 m左右,主要岩性为辫状河沉积的浅灰、灰白色厚层-块状砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩,局部剖面夹灰色、灰绿色中-细砂岩、灰黑色泥岩及煤线。该组底界与上三叠统塔里齐克组顶部灰黑色泥岩、粉砂岩及煤线接触,界线清楚。

下侏罗统阳霞组厚531 m左右,岩性主要为曲流河沉积的灰色、灰白色砂砾岩、砂岩、灰色泥质粉砂岩和深灰、灰黑色粉砂质泥岩、泥页岩及煤层。

上侏罗统喀拉扎组岩性主要为褐红色砂砾岩,该组与下伏的齐古组紫红色泥岩呈整合接触,该组在库车河剖面厚16 m左右。喀拉扎组砾岩胶结较差,宏观上呈软地貌,砾径小,与上覆下白垩统亚格列木组有明显界面。

下白垩统亚格列木组在库车河剖面厚约60 m,该组砾岩坚硬,地貌陡峭,似城墙状,故有城墙砾岩之称。

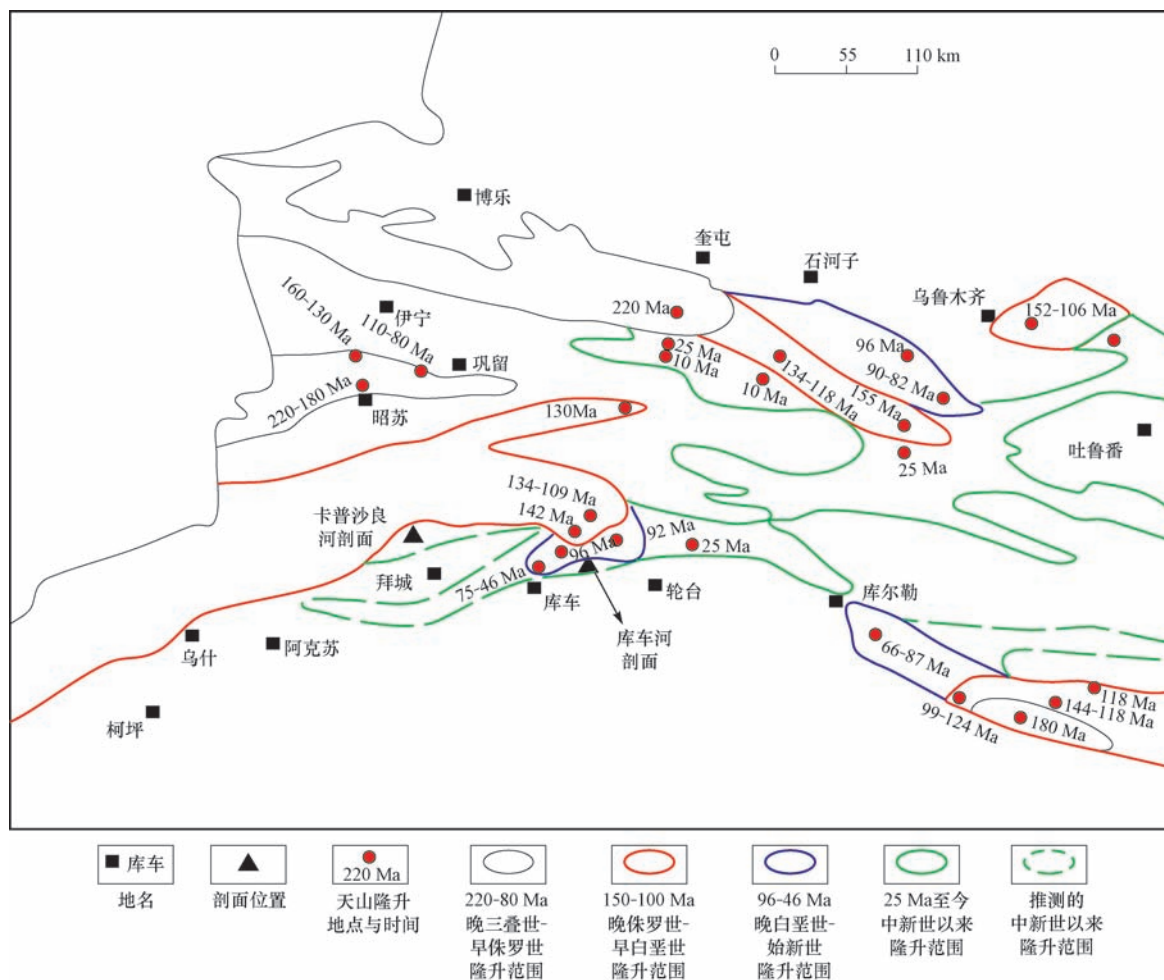


图1 库车坳陷地理位置及中生代以来天山隆升顺序平面图

Fig. 1 Location of Kuqa depression and uplift sequence of Tianshan Mountains since the Mesozoic

该组底界为浅灰紫色块状砾岩与下伏喀拉扎组褐红色砂砾岩假整合接触。亚格列木组砂砾岩胶结致密、坚硬、抗风化能力强,砾径较大。

下白垩统巴什基奇克组在库车河剖面厚 224 m 左右,主要岩性上部为粉红色厚层、块状中-细粒砂岩夹同色含砾砂岩、泥质粉砂岩、含钙质泥岩,下部为紫灰色厚层块状砾岩。

古近系库姆格列木群厚 433 m 左右,划分为上、下两个岩组:上组岩性主要为紫红色泥岩夹灰白色石膏岩、膏质泥岩;下组底部为灰色、灰白色泥灰岩、灰质砾岩,上部为紫红色砾岩、砂岩与同色泥岩、砂岩、石膏岩互层。

新近系吉迪克组较厚,该组底部发育紫红色中-厚层状中砾岩夹紫红色薄-中层状含灰含砾不等粒砂岩;下段岩性主要为紫红色薄-厚层状泥质粉砂岩、灰

质粉砂岩、砂质泥岩韵律互层;上段为灰绿、紫红色中-厚层状泥、灰质粉砂岩、粗-中粒砂岩与紫红、灰绿砂质泥岩韵律互层^[22]。

2 砾岩宏观特征及砾态

笔者对库车河剖面和卡普沙良河剖面的下侏罗统阿合组、阳霞组,上侏罗统喀拉扎组,下白垩统亚格列木组、巴什基奇克组,古近系库姆格列木群以及新近系吉迪克组砾岩中砾石的沉积特征、砾径、砾态等进行了实地测量(图2)。根据每组砾岩厚度的不同选取不同测量点,且每个测量点面积 $\geq 1\text{ m}^2$,每个点随机选取约 100 个砾石样品进行测量。分析表明砾石的砾态具有很好的分布规律(表1)。

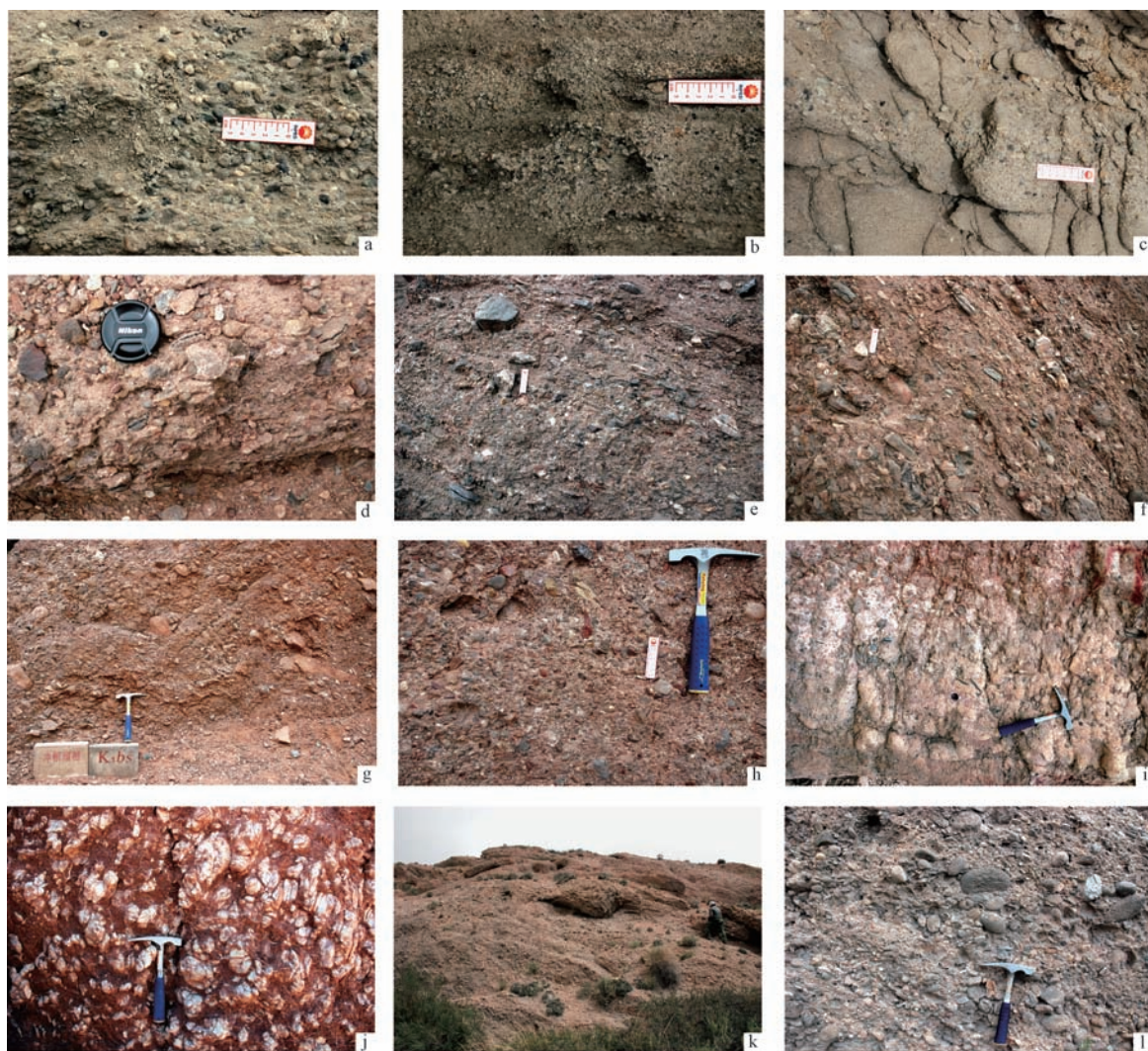


图2 库车坳陷侏罗系-新近系多套砾岩不同宏观特征与砾态

Fig. 2 Macro features and gravel geometry of the Jurassic-Neogene conglomerate samples from the Kuqa depression

- a. 下侏罗统阿合组下部辫状河道底部滞留砾岩沉积;b. 下侏罗统阿合组上部辫状河道底部滞留砾岩沉积,砾径变小;c. 下侏罗统阳霞组曲流河道底部滞留沉积;d. 上侏罗统喀拉扎组冲积扇砾岩沉积;e. 下白垩统亚格列木组(下部)冲积扇砾岩沉积,砾石具定向性;f. 下白垩统亚格列木组(上部)冲积扇砾岩沉积,砾石具定向性;g. 下白垩统巴什基奇克组底部冲积扇砾岩沉积,砾径较大;h. 下白垩统巴什基奇克组下部冲积扇顶部沉积,砾径变小,颗粒支撑;i. 古近系库姆格列木群底部滩坝灰质砾岩;j. 古近系库姆格列木群中、上部扇三角洲前缘水下分流河道膏质砾岩滞留沉积;k. 卡普沙良河剖面新近系吉迪克组底部巨厚冲积扇砾岩沉积;l. 卡普沙良河剖面新近系吉迪克组底部巨厚冲积扇砾岩,颗粒支撑,砾径较大

表 1 库车前陆盆地侏罗系 – 新近系砾岩砾态、成分及沉积相对构造运动响应特征

Table 1 The geometry and composition of gravels and sedimentary facies of the Jurassic-Neogene conglomerate in Kuqa depression and their response to relative tectonic movements

地层	砾岩颜色	砾径/mm	砾石扁度	砾石球度	砾岩结构	砾石成分	砾石搬运距离/km	砾岩沉积相	对应的天山隆升时间/Ma	天山隆升速率 ^[23] /(m·Ma ⁻¹)
新近系吉迪克组	褐色、红褐色	最大 220, 平均 58	2. 239	0. 654	颗粒支撑, 次棱角状	砂岩、硅质岩、灰岩等砾石, 少量的大理岩及脉石英	~ 24	冲积扇	25 ~ 0	114. 1 ~ 306. 1
上白垩统 – 古近系库姆格列木群	褐色、红褐色	最大 175, 平均 64	2. 196	0. 639	颗粒支撑, 棱角 – 次棱角状	主要为膏岩砾石, 少量中 – 酸性喷出岩、变质石英岩、砂岩砾石	~ 21	扇三角洲前缘水下分流河道滞留沉积	96 ~ 46	31. 9 ~ 47. 6
	灰色、褐色	最大 64, 平均 21	1. 884	0. 662	杂基支撑, 次棱角 – 次圆状	灰岩、中 – 酸性喷出岩、变质石英岩、花岗岩, 少量砂岩砾石	~ 49	冲积扇		
下白垩统巴什基奇克组	褐色、红褐色	最大 56, 平均 26	2. 209	0. 654	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状	变质石英岩、中 – 酸性喷出岩、灰岩、硅质岩, 少量砂岩砾石	~ 45	冲积扇中辫状河道		
	褐色、红褐色	最大 600, 平均 63	2. 685	0. 602	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状		~ 22	冲积扇扇根 – 扇中		
下白垩统亚格列木组	褐色、红褐色	最大 53, 平均 28	2. 201	0. 650	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状	变质石英岩、中 – 酸性喷出岩、灰岩、硅质岩, 少量千枚岩、变质砂岩、砂岩砾石	~ 43	冲积扇中辫状河道	150 ~ 100	130
	褐色、红褐色	最大 400, 平均 78	2. 476	0. 624	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状		~ 16	冲积扇扇根 – 扇中		
上侏罗统喀拉扎组	褐色、紫褐色	最大 60, 平均 30	2. 248	0. 626	杂基支撑, 次棱角 – 次圆状	中 – 酸性喷出岩、石英岩、灰岩、硅质岩、千枚岩、砂岩	~ 41	冲积扇扇根		
下侏罗统阳霞组	灰色、灰白色	最大 36, 平均 20	1. 975	0. 668	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状		~ 118	曲流河河道滞留沉积		
下侏罗统阿合组	灰色、灰白色	最大 25, 平均 11	1. 989	0. 651	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状	变质石英岩、中 – 酸性喷出岩、花岗岩、硅质岩等	~ 131	晚期辫状河河道滞留沉积	220 ~ 180	—
	灰色、灰白色	最大 80, 平均 25	1. 930	0. 667	颗粒支撑, 次棱角 – 次圆状		~ 109	早期辫状河河道滞留沉积		

2.1 下侏罗统阿合组

库车河剖面下侏罗统阿合组砾岩主要为辫状河河道底部滞留砾岩沉积,潮湿气候下滞留砾岩呈灰色、灰白色。该组下部砾岩单层厚度较薄,一般为 10 ~ 30 cm;

但砾径较大,个别砾径最大可达 80 mm,平均砾径为 25 mm;砾石主要呈次棱角 – 次圆状(图 2a)。该组上部砾岩的单层厚度大,一般为 70 ~ 90 cm;砾石颗粒支撑,砾径较小,平均砾径为 11 mm(图 2b);砾石成分主要为中 – 酸性喷出岩、变质石英岩、脉石英等,砾石呈

次棱角-次圆状;砾岩地层产状为 $174^{\circ}\angle 68^{\circ}$ 。砾石的扁度和球度是根据实地测量砾石 a 轴、 b 轴、 c 轴的长度计算求得,其中扁度 $F = \frac{1}{2}(a+b)/c$,球度 $B = 3\sqrt{abc}/a$ 。阿合组下部砾石扁度为 1.930,球度为 0.667;上部砾石扁度为 1.989,球度为 0.651。

2.2 下侏罗统阳霞组

下侏罗统阳霞组砾岩主要为曲流河河道底部滞留砾岩(图 2c),砾岩较薄,一般厚 20~40 cm。砾岩呈灰色、灰白色,地层产状为 $182^{\circ}\angle 60^{\circ}$ 。砾径较短,最大砾径约 36 mm,平均砾径为 20 mm。砾石磨圆较差,主要呈次棱角-次圆状。该组砾石扁度为 1.975,球度为 0.668。

2.3 上侏罗统喀拉扎组

上侏罗统喀拉扎组砾岩厚度较大,可达 11 m,整体呈块状,砾石排列杂乱,无定向性。该组砾岩在干旱气候下呈褐色、紫褐色,砾石最大砾径约 60 mm,砾径主要集中在 23~31 mm,平均砾径 30 mm。砾石杂乱、分选差,表现出显著的冲积扇沉积特征(图 2d)。砾岩地层产状为 $186^{\circ}\angle 53^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $193^{\circ}\angle 61^{\circ}$ 。该组砾石扁度为 2.248,球度为 0.626,主要呈次棱角-次圆状。

2.4 下白垩统亚格列木组

下白垩统亚格列木组砾岩厚 41 m,砾岩整体呈块状,砾石具定向性。该组砾岩属于干旱气候下的冲积扇沉积。下部为冲积扇扇根-扇中沉积(图 2e),最大砾径约 400 mm,平均砾径 78 mm;下部砾岩地层产状为 $204^{\circ}\angle 46^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $196^{\circ}\angle 36^{\circ}$;砾石扁度为 2.476,球度为 0.624,砾石主要呈次棱角-次圆状。该组上部则为扇中辫状河道沉积,由砾岩-含砾粗砂岩、粗砂岩正粒序组成,最大砾径 53 mm,平均砾径 28 mm;上部砾岩地层产状为 $165^{\circ}\angle 65^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $170^{\circ}\angle 46^{\circ}$;砾石扁度为 2.201,球度为 0.650,主要呈次棱角-次圆状(图 2f)。

2.5 下白垩统巴什基奇克组

下白垩统巴什基奇克组砾岩厚 65 m,砾岩整体呈褐色、红褐色,块状,砾石具定向性。该组砾岩属于干旱气候下的冲积扇沉积。下部为冲积扇扇根-扇中沉积(图 2g),最大砾径达到 600 mm,平均砾径 63 mm;砾岩地层产状为 $178^{\circ}\angle 76^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $166^{\circ}\angle 61^{\circ}$;砾石扁度为 2.685,球度为 0.602,主要呈

次棱角-次圆状。上部砾岩为冲积扇中的辫状河道沉积(图 2h),最大砾径达到 56 mm,平均砾径 26 mm;砾岩地层产状为 $177^{\circ}\angle 74^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $198^{\circ}\angle 62^{\circ}$;砾石扁度为 2.209,球度为 0.654,主要呈次棱角-次圆状。

2.6 古近系库姆格列木群

古近系库姆格列木群底部发育厚 0.6 m 左右的灰质砾岩(图 2i),该段砾岩为冲积扇砾岩沉积,杂基支撑,砾岩呈灰色、灰白色;砾岩地层产状为 $172^{\circ}\angle 61^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $194^{\circ}\angle 65^{\circ}$;最大砾径达到 64 mm,平均砾径 21 mm;砾石扁度为 1.884,球度为 0.662,灰质砾岩主要呈次棱角-次圆状。该组中、上部发育扇三角洲前缘水下分流河道滞留砾岩沉积,砾石主要为膏岩(图 2j),砾岩地层产状为 $174^{\circ}\angle 62^{\circ}$,平均砾石最大扁平面产状为 $3^{\circ}\angle 67^{\circ}$;最大砾径达到 175 mm,平均砾径 64 mm;砾石扁度为 2.196,球度为 0.639,砾石主要呈次棱角-棱角状。

2.7 新近系吉迪克组

拜城县卡普沙良河剖面新近系吉迪克组底部发育冲积扇相砾岩沉积(图 2k,l),砾岩呈褐色、红褐色,砾岩厚约 20 m;砾岩地层产状为 $135^{\circ}\angle 62^{\circ}$,砾岩中砾石颗粒支撑,平均砾石最大扁平面产状为 $131^{\circ}\angle 46^{\circ}$;最大砾径达到 220 mm,平均砾径 58 mm;砾石扁度为 2.239,球度为 0.654,主要呈次棱角状。

3 砾岩微观特征及成分

笔者在库车河剖面和拜城县卡普沙良河剖面共采集砾岩样品 38 块,并磨制岩石大薄片进行砾岩微观结构观察与砾石成分鉴定(表 1)。

3.1 下侏罗统阿合组

下侏罗统阿合组砾岩呈灰色、灰绿色,主要为辫状河河道底部滞留沉积,砾石成分较为复杂,主要为变质石英岩、中-酸性喷出岩、花岗岩、硅质岩等。砾石呈次棱角-次圆状,砾石间少量泥质、方解石充填,并见大量粗砂碎屑填充(图 3a),砂质中见灰泥岩屑。砾石间主要为线状接触,溶蚀现象不甚发育,见构造微裂缝及粗颗粒内裂纹。

3.2 上侏罗统喀拉扎组

上侏罗统喀拉扎组砾岩为红褐色、褐色,中-细粒砾状结构,块状构造,颗粒支撑,孔隙式胶结。砾石成分多样,主要为中-酸性喷出岩砾石,含量约 40%,石

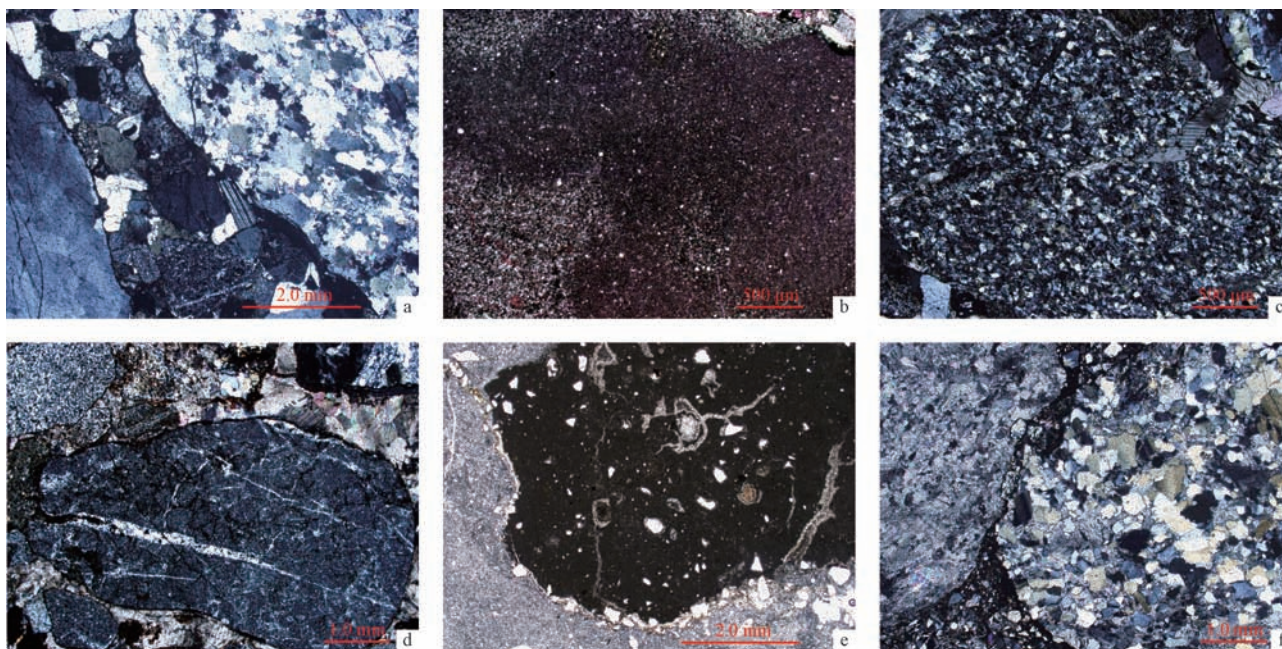


图3 库车坳陷侏罗系—古近系砾岩中不同成分砾石的微观结构特征

Fig. 3 Microstructure features of gravels with different components in the Jurassic-Neogene conglomerate samples from Kuqa depression
a. 下侏罗统阿合组,库车河剖面,辫状河河道滞留砾岩中变质石英岩砾石及其之间充填的砂质碎屑,正交光;b. 上侏罗统喀拉扎组,库车河剖面,泥晶灰岩砾石,单偏光;c. 下白垩统亚格列木组,库车河剖面,砂岩砾石,右上角与左下角为砾石间充填砂质,正交光;d. 下白垩统巴什基奇克组,库车河剖面,中-酸性喷出岩砾石,砾石间方解石胶结,正交光;e. 古近系库姆格列木群,库车河剖面,灰质砾岩中暗色灰岩砾石与灰质杂基间接接触关系,单偏光;f. 古近系库姆格列木群,卡普沙良河剖面,灰岩砾石与砂岩砾石线状接触,正交光

英岩砾石含量约30%,其他成分的砾石有灰岩(图3b)、硅质岩、千枚岩、砂岩砾石等。砾石分选差-中等,主要为次棱角-次圆状,磨圆度差,抗风化作用弱。填隙物中见方解石胶结物和少量红褐色铁泥质,并有大量褐红色、褐色的砂质。

3.3 下白垩统亚格列木组

下白垩统亚格列木组砾岩颜色为灰褐色、灰绿色。砾石成分以变质石英岩和中-酸性喷出岩砾石为主,两种砾石含量约占砾石总量的70%左右,其次为灰岩砾石,含量约8%~10%,硅质岩砾石含量约5%,此外,还有少量千枚岩、变质砂岩、砂岩砾石(图3c)。砾石以次棱角状、次圆状为主,磨圆差-中等。砾石间还充填大量石英岩、硅质岩及灰岩等砂质,砾石间方解石胶结。

3.4 下白垩统巴什基奇克组

下白垩统巴什基奇克组砾岩呈褐色、红褐色,块状构造,颗粒支撑,孔隙式胶结。砾石成分主要为变质石英岩,含量为35%~40%,其次为中-酸性喷出岩,含量为20%~30%(图3d),灰岩砾石含量有所增加,可达15%~20%,硅质岩砾石含量为10%左右,并见少量千枚岩砾石,偶见砂岩砾石。该组砾岩中砾石磨圆中等,以次圆状为主,次棱角状次之。胶结物为方解石,并见褐色铁泥质充填砾石间,岩石中还充填有大量砂级灰岩岩屑及硅质岩岩屑。

3.5 古近系库姆格列木群

古近系库姆格列木群中砾岩呈灰色、褐色,砾石成分较复杂,以灰岩砾石为主(图3e),含量为45%~70%,其次为中-酸性喷出岩砾石,含量为30%左右,变质石英岩、花岗岩等砾石较少,并见少量砂岩砾石(图3f)。砾岩中砾石呈棱角-次棱角状,砾石周缘可见粒缘缝,砾石间大量砂质、铁泥质及方解石充填。

3.6 新近系吉迪克组

拜城县卡普沙良河剖面新近系吉迪克组底部砾岩呈褐色、红褐色。砾岩中砾石成分较复杂,主要为砂岩、硅质岩、灰岩等砾石,少量的大理岩及脉石英等。砾石呈次棱角-次圆状,砾石间大量铁泥质及砂质碎屑充填。

4 砾石反映沉积物源区远近的估算

砾岩主要分布在盆地边缘并指示了物源区的存在,估算砾石搬运距离可间接反映沉积物源区的远近变化。笔者依据下侏罗统阿合组—新近系吉迪克组砾岩的沉积相类型、主要砾径范围及砾石成分的变化,对南天山前各组砾岩中砾石的沉积搬运距离进行了定量估算。

4.1 沉积搬运距离定量估算原则

1) 估算公式

万静萍^[23]通过对我国发育最好的现代洪积扇——祁连山北麓昌马洪积扇的研究,建立了冲积扇沉积中砾石直径与搬运距离的关系式:

$$H = 69.7 - 26.3 \ln G \quad (1)$$

式中: H 为搬运距离,km; G 为平均砾石直径,cm。

吴锡浩等^[24]建立了长江泸州至重庆段河流沉积砾石搬运距离关系式:

$$S = (9.5 - D)/0.064 \quad (2)$$

式中: S 为搬运距离,km; D 为平均砾石直径,cm。

2) 沉积相类型

如表1所示,下侏罗统阿合组—阳霞组砾岩为辫状河—曲流河河道滞留沉积,上侏罗统喀拉扎组主要发育冲积扇砾岩,下白垩统亚格列木组—巴什基奇克组砾岩为冲积扇沉积,古近系库姆格列木群为冲积扇—扇三角洲砾岩沉积,新近系吉迪克组砾岩同样为冲积扇沉积。

3) 砾岩结构及砾石磨圆度

如普拉姆利研究黑山河地区河流中石灰岩砾石,由源区搬运18 km乃至37 km时变成极圆状^[25]。斯利研究科罗拉多河砾石中的石英砾石,搬运不到161 km就变成极圆状。昂路格研究的杜纳耶茨河砾石中的花岗岩砾石搬运125 km达到极圆状^[25]。

4) 砾石成分

砾石母岩的硬度与其搬运距离关系较为紧密。表2统计了石灰岩和花岗岩等岩石从棱角状搬运到极圆状所需的搬运距离,从中可知石英岩的耐磨性最强,花岗岩和长石依次减弱,石灰岩磨损损失最大。若以一块边长为10 cm的石灰岩立方体为例,在流水的搬运作用下,大约经过40 km的距离,便可被磨损殆尽^[18]。

4.2 库车坳陷侏罗系—新近系砾石搬运距离估算

依据上述原则,笔者半定量评价了库车坳陷北部露头剖面侏罗系—新近系砾石的搬运距离。

表2 碎屑磨损与搬运距离的关系^[18]

Table 2 Relationship between abrasion and transport distance of debris^[18]

岩石或矿物碎屑	搬运每千米距离的重量损失/%	从棱角状搬运到极圆状所需的搬运距离/km
石灰岩	2.4~5.0	11~37
长石	0.4~1.4	64~220
花岗岩	0.4~1.0	84~330
石英	0.01	>500

1) 下侏罗统阿合组—阳霞组

该段沉积时期砾石为河流相河道滞留沉积,砾石成分主要为耐磨损的变质石英岩、中—酸性喷出岩、花岗岩及硅质岩等砾石,且砾径较短,平均砾径只有11~25 mm。采用吴锡浩等^[24]建立的河流沉积砾石搬运距离关系式公式(2),计算所得砾石沉积搬运距离可达109~131 km。其中,阿合组上部与阳霞组砾石搬运距离最远。

2) 上侏罗统喀拉扎组—下白垩统巴什基奇克组

该段沉积时期砾石搬运距离较近,此3组主要发育近源冲积扇沉积,砾石成分主要为变质石英岩、中—酸性喷出岩、灰岩、硅质岩及少量砂岩砾石,且灰岩砾石含量一般介于10%~20%,最大砾径可达600 mm,平均砾径为26~78 mm。故采用万静萍^[23]建立的冲积扇砾石沉积搬运距离的关系式公式(1),计算所得砾石搬运距离可达20~45 km。

3) 古近系库姆格列木群

古近系砾岩的沉积相类型为冲积扇—扇三角洲,砾石主要为灰岩及膏岩砾石,砾石呈棱角—次棱角状,砾径最大可达175 mm,平均砾径为21~64 mm。同样采用万静萍^[23]建立的冲积扇砾石沉积搬运距离的关系式公式(1),计算所得砾石搬运距离可达20~50 km。

4) 新近系吉迪克组

该段沉积时期砾石的搬运距离最短,该组砾石成分主要为砂岩、硅质岩及灰岩等砾石,砾径增大明显可达220 mm,平均砾径为58 mm。砾岩主要呈次棱角状,且巨厚的砾岩主要为冲积扇沉积。采用万静萍^[23]建立的冲积扇砾石沉积搬运距离的关系式公式(1),计算所得砾石搬运距离在20 km左右。

由于盆地边缘相带砾岩堆积物可反映盆地边界范围^[23],因此库车坳陷北部侏罗系—新近系的砾石搬运距离反映了沉积物源区的变化,其表现为由远及近的规律,并具有如下4个阶段性特征(表1):①距今220~180 Ma的早侏罗世,库车坳陷北部沉积物源距现今库车河剖面较远,可达109~131 km;②距今150~100 Ma的晚侏罗世—早白垩世,北部沉积物源区距现今库车河剖面较近,一般为20~45 km;③距今96~46 Ma的古近纪,北部沉积物源区距现今库车河剖面较近,但砾石搬运距离较白垩纪有所变远,达20~50 km;④距今25 Ma以来的新近纪,北部沉积物源区距现今库车河剖面最近,由砾石沉积搬运距离所反映的物源区可能只有20 km左右。

5 砾岩对天山隆升与盆地沉降的响应

5.1 中、新生代天山存在4期隆升,隆升范围两小两大

天山山脉呈近东西向或北西西向绵延耸立于新疆

中部,并夹持于准噶尔和塔里木盆地之间,山脉东西长 1 700 km,宽 250 ~ 350 km,东、西段均形成南北分枝。天山为一典型的复合型造山带,分别经历了古生代初始造山和晚中生代—新生代再造山过程^[26]。笔者对前人运用磷灰石裂变径迹测年分析天山隆升时间的数据进行了收集与整理(表 3)^[27~36],并依据表 3 的天山隆升时间编制了中生代以来的天山隆升顺序平面图(图 1)。由图 1 及前人成果^[25~38]可知,天山并非统一的隆升,是有先后时间顺序的 4 期隆升,隆升范围两小两大:①第一期隆升发生在距今 220 ~ 180 Ma 的晚三叠世—早侏罗世,最早隆升地点在昭苏—伊宁一线的中天山、奎屯南—玉希莫勒盖达坂地区以及塔里木盆地北缘的库鲁克塔格山的兴地和辛格尔地区,山体隆升范围较小;②第二期隆升发生在距今约 150 ~ 100 Ma 的晚侏罗世—早白垩世,主要的隆升地点位于中天山琼博拉森林公园、北天山玛纳斯河上游—博格达山、南天山独库公路欧西达坂等地区以及塔里木盆地北缘的库鲁克塔格山的北部地区,该时期的山体隆

升范围较大;③第三期隆升发生在距今 96 ~ 46 Ma 的晚白垩世—始新世,山体隆升范围比较小,隆升地点主要位于北天山的头屯河及乌库公路后峡地区、南天山库车坳陷北部捷斯德里克背斜等地区以及库鲁克塔格山西缘的库勒勒东部地区;④第四期隆升发生在距今 25 Ma 以来的中新世—第四纪,该时期可以说是天山全面隆升时期,并逐步形成现今的天山形态(图 1)。

5.2 砾岩对天山隆升与盆地沉降的响应特征

关于山前砾石的成因主要有两种观点:一种认为砾石主要是造山带的构造隆升导致;另一种观点认为是气候振荡所导致的剥蚀作用加强所造成^[4]。库车坳陷在早—中侏罗世主要以潮湿气候为主,中—晚侏罗世至今以干旱气候为主,其间只有在古近纪发生短暂的海侵,出现大面积的灰岩及褐红色泥岩与膏盐岩互层沉积,此时期可能出现了气候振荡变化,但在南天山前未见大规模砾岩沉积。因此,可以说南天山前下侏罗统一新近系发育的多套砾岩可能主要由构造隆升作用引起。

由图 1 和表 1 所示,天山的大规模隆升分别发生在晚三叠世—早侏罗世、晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世—始新世以及中新世。从库车河和卡普沙良河等剖面发育的多套砾岩中的砾石成分、砾态特征、砾径范围及砾石搬运距离反映的物源区迁移等的变化规律上(表 1)可以看出,库车坳陷北部砾岩沉积对天山隆升和盆地沉降具明显响应特征。

1) 晚三叠世—早侏罗世

受印支运动影响,晚三叠世—早侏罗世库车坳陷沉降加大,沉降中心位于南天山山前及其以北地带,南天山山前沉降中心沉降速率最大为 30 m/Ma^[39]。随着盆地沉降加大,引起盆地周缘隆起上升并遭受强烈剥蚀。天山的隆升主要集中在中天山和北天山西段以及库鲁克塔格山的兴地和辛格尔地区,隆升幅度较小,推测中天山与北天山可能是下侏罗统阿合组—阳霞组的物源区(图 1)。盆缘砾石成分主要为变质石英岩、中—酸性喷出岩、花岗岩及硅质岩等;砾径较短,砾石扁度较小且搬运距离较远,沉积物源距现今库车河剖面较远,可达 109 ~ 131 km。这表明构造运动相对较弱,盆地周缘古隆起、高地被剥蚀夷平,使区域古地貌趋于准平原化^[37]。

2) 晚侏罗世—早白垩世

受燕山早期运动影响,晚侏罗世—早白垩世盆地沉降中心明显南移,已从三叠纪与侏罗纪时期的靠近南天山山前及其以北的位置南移至克拉苏河以南、拜城以北至克拉 3 井一带,沉降速率均为 25 m/Ma^[39]。砾石搬运距离所反映的沉积物源区也向南迁移,距现

表 3 新疆地区天山山脉隆升年龄与地点统计

Table 3 Ages and locations of tectonic uplifting of Tianshan Mountains

山脉	具体隆升位置	隆升距今年龄/Ma	参考作者
中天山	昭苏煤矿	220 ~ 180	陈正乐等 ^[27]
	琼博拉森林公园	160 ~ 130	
	雅玛渡南	110 ~ 80	
北天山	依连哈比尔尕山 玛纳斯河上游	134 ~ 118, 65, 37, 23. 8, 10	沈传波等 ^[28]
	博格达山乌市东	152 ~ 106, 65, 45, 24	杜治利等 ^[29]
	头屯河	96	
	乌库公路后峡地区	90 ~ 82	
	乌库公路冰达坂南 乌拉斯台	155, 25	郭召杰等 ^[30]
	奎屯市南— 玉希莫勒盖达坂	220, 25, 10	
南天山	巴音布鲁克盆地	130	郭召杰等 ^[30]
	库车河独库公路 欧西达坂	134 ~ 109	杨庚等 ^[31]
	库车河剖面亚格列木组— 库姆格列木群	142, 96, 75 ~ 46	杜治利等 ^[32]
	库车坳陷北部 捷斯德里克背斜	92	周宇章等 ^[33]
	阳霞煤矿	25	杨树锋等 ^[34]
	库鲁克塔格山 兴地、辛格尔	180, 144 ~ 118, 94 ~ 82, 10	朱文斌等 ^[35]
库鲁克塔格山	库鲁克塔格山北缘	118, 101	肖晖等 ^[36]
	库鲁克塔格山 西缘库勒勒东南	124 ~ 99, 87 ~ 66, 63 ~ 28	
	库鲁克塔格山 西缘库勒勒东北	99, 87	

今库车河剖面 20~45 km。盆缘砾石成分演变为变质石英岩、中-酸性喷出岩、灰岩、硅质岩及砂岩砾石。砾径增大明显,最大可达 600 mm 左右;砾石扁度增加,一般大于 2。南天山山前砾岩主要为近源的冲积扇相沉积。天山隆升速率为 130 m/Ma(表 1),表明构造运动强度较早侏罗世强烈,中天山进一步隆升,北天山的隆升则向东扩展,南天山也出现大范围的隆起(图 1),库鲁克塔格山的北部地区也强烈隆升。

3) 晚白垩世—古近纪

受印度次大陆与欧亚大陆碰撞的喜马拉雅期运动影响^[40],晚白垩世—古近纪库车坳陷沉降中心已接近现今的拜城凹陷。与早白垩世相比,古近纪库车坳陷沉降中心进一步南移西迁,且沉降幅度明显加大^[39]。砾石搬运距离所反映的沉积物源区距现今库车河剖面 20~50 km。盆缘砾石成分主要为灰岩、膏岩、中-酸性喷出岩、变质石英岩及砂岩等砾石;砾径较小,最大只有 175 mm,砾石扁度变小,砾岩主要为冲积扇和扇三角洲分流河道滞留沉积。表 1 中天山隆升速率为 31.9~47.6 m/Ma,表明喜马拉雅早期构造活动变弱,天山的隆升主要集中在乌鲁木齐南部和库车北部地区以及库鲁克塔格山西缘的库尔勒东部地区(图 1)。

4) 古近纪—新近纪

中喜马拉雅运动发生在古近纪与新近纪之间,这次地壳运动在整个喜马拉雅期中最为强烈。新近纪中新世,库车坳陷沉降中心已南移至拜城凹陷,盆地沉降幅度有了明显的加大,沉降速率约为 200 m/Ma,比以往任何时期都高^[39]。砾石沉积搬运距离所反映的物源区距现今库车河剖面最近,只有 20 km 左右。砾径增大明显,砾石成分主要为砂岩、硅质岩及灰岩等砾石,少量的大理岩及脉石英等。这表明受印度板块与欧亚板块碰撞影响,天山进入全面隆升阶段,是构造运动强度最大、山体隆升幅度最大的阶段,天山隆升速率为 114.1~306.1 m/Ma,从而形成现今天山与库车前陆盆地的盆-山格局。

6 结论

库车坳陷下侏罗统阿合组—新近系吉迪克组发育多套砾岩。由砾岩颜色、砾石扁度和球度及砾径等砾态分析,可以进行砾石成分变化以及砾岩沉积相类型研究,并半定量估算各组砾石的沉积搬运距离。研究认为,下侏罗统阿合组—阳霞组河流相沉积砾石搬运距离较远,可达 130 km 左右;上侏罗统喀拉扎组—新近系吉迪克组砾岩主要为冲积扇沉积,砾石搬运距离一般在 20~50 km。砾石搬运距离反映了沉积物源区的变化,库车坳陷北部侏罗系—新近系物源区表现为

由北向南、由远及近的迁移。下侏罗统阿合组—新近系吉迪克组多套砾岩的沉积,对中、新生代天山 4 期构造隆升具明显的响应。该认识不但提高了关于库车坳陷侏罗系—新近系多套砾岩变化特征对天山隆升响应关系方面的认识,更为盆地原型恢复研究及油气勘探范围的拓展提供了重要的地质基础。

参 考 文 献

- [1] 余素玉. 砾岩和角砾岩的组分—成因分类[J]. 地质科技情报, 1984, (3): 37—40.
Jin Suyu. Components of conglomerate and breccia-genetic classification[J]. Geological Information Science and Technology, 1984, (3): 37—40.
- [2] 揭育金, 庄建民, 黄泉祯, 等. 闽西南“丁屋岭砾岩”地质特征及时代探讨[J]. 福建地质, 2002, 22(1): 13—20.
Jie Yujin, Zhuang Jianmin, Huang Quanzhen, et al. Discussion on the geological characteristics and the time of Dingwuling conglomerate in southwestern Fujian[J]. Geology of Fujian, 2002, 22(1): 13—20.
- [3] 曾宜君, 杨学俊, 李云泉, 等. 川西前陆盆地南部中新世代砾岩的构造意义[J]. 四川地质学报, 2004, 24(4): 198—201.
Zeng Yijun, Yang Xuejun, Li Yunquan, et al. Tectonic significance of Meso-Cenozoic conglomerate in the south of the West Sichuan Foreland Basin[J]. Sichuan Journal of Geology, 2004, 24(4): 198—201.
- [4] 林秀斌, 陈汉林, K H Wyrwoll, 等. 青藏高原东北部隆升: 来自宁夏同心小洪沟剖面的证据[J]. 地质学报, 2009, 83(4): 455—467.
Lin Xiubin, Chen Hanlin, Wyrwoll K H, et al. Uplift of the northeastern Tibetan Plateau: Evidences from the Xiaohonggou section in Tongxin, Ningxia[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(4): 455—467.
- [5] 赵希涛, 胡道功, 吴中海, 等. 青海格尔木早更新世昆仑河砾岩的发现及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 1—10.
Zhao Xitao, Hu Daogong, Wu Zhonghai, et al. Discovery of the Early Pleistocene Kunlunhe conglomerate in Golmud of Qinghai province and its geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(1): 1—10.
- [6] 贺承广, 邵兆刚, 钱程, 等. 龙门山构造带中段新近系砾岩层砾组特征及其构造意义[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1467—1476.
He Chengguang, Shao Zhaogang, Qian Cheng, et al. Gravel fabric characteristics of Neogene conglomerate layers in the middle sector of the Longmenshan structural belt and its tectonic significance[J]. Geology in China, 2011, 38(6): 1467—1476.
- [7] 高志勇, 韩国猛, 张丽华. 河流相沉积中的准层序——以四川中部须家河组为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 59—68.
Gao Zhiyong, Han Guomeng, Zhang Lihua. Parasequence of fluvial deposit: A case study of the Xujiahe Formation in Central Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(1): 59—68.
- [8] 高志勇. 河流相沉积中准层序与短期基准面旋回对比研究——以四川中部须家河组为例[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 109—118.
Gao Zhiyong. Correlation of parasequence and short-term base level cycles in river facies: A case of the Xujiahe Formation in Central Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(1): 109—118.

- [9] 高志勇,郭宏莉,安海亭,等.库车坳陷东部山前带古近系不同体系域内扇三角洲沉积砂体的对比研究[J].地质科学,2008,43(4):758-776.
Gao Zhiyong, Guo Hongli, An Haiting, et al. Paleogene fan-delta sandbodies of different system tracts in foreland of the eastern Kuqa Depression: A comparative study[J]. Earth Science, 2008, 43(4): 758-776.
- [10] Gao Zhiyong, Guo Hongli, Zhu Rukai, et al. Sedimentary response of different fan types to the Paleogene-Neogene Basin transformation in the Kuqa Depression, Xinjiang province[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2009, 83(2): 411-424.
- [11] 高志勇,白斌,朱如凯,等.大巴山与龙门山前晚三叠世构造运动的储集层沉积学响应[J].古地理学报,2012,14(6):801-812.
Gao Zhiyong, Bai Bin, Zhu Rukai, et al. Reservoir sedimentary response to tectonic movement of the Late Triassic in front of Dabashan and Longmen Mountains[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 801-812.
- [12] 高志勇,冯佳睿,李小陪,等.天山南北前陆盆地冲断带沉积砂体对构造逆冲作用响应动力学[J].石油与天然气地质,2013,34(2):248-256.
Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Li Xiaopei, et al. Kinetics of sedimentary process response to thrusting in the thrust belts of foreland basins in southern and northern Tianshan[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 248-256.
- [13] 孟万斌,吕正祥,刘家铎,等.川西坳陷孝泉-新场地区须家河组四段储层控制因素及预测地质模型[J].石油与天然气地质,2013,34(4):483-490.
Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Reservoir controlling factors and geological prediction models of the 4th member of the Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang area, the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 483-490.
- [14] 宋国奇,郝雪峰,刘克奇.箕状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律——以济阳坳陷为例[J].石油与天然气地质,2014,35(3):303-310.
Song Guoqi, Hao Xuefeng, Liu Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 303-310.
- [15] 任涛,王彦春,王仁冲.冲积扇低孔、低渗砂砾岩油藏产能指标预测——以准噶尔盆地西北缘Y地区三叠系百口泉组油藏为例[J].石油与天然气地质,2014,35(4):556-561.
Ren Tao, Wang Yanchun, Wang Renchong. Productivity index prediction of alluvial fan coarse-grained clastic reservoirs with low porosity and low permeability: a case from Triassic Baikouquan Formation reservoir in Y-region at northwestern margin of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 556-561.
- [16] 朱筱敏,吴冬,张昕,等.东营凹陷沙河街组近岸水下扇低渗储层成因[J].石油与天然气地质,2014,35(5):646-653.
Zhu Xiaomin, Wu Dong, Zhang Xin, et al. Genesis of low permeability reservoirs of nearshore subaqueous fan in Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 646-653.
- [17] 董艳蕾,朱筱敏,耿晓洁,等.泌阳凹陷东南部核桃园组近岸水下扇与扇三角洲沉积特征比较及控制因素分析[J].石油与天然气地质,2015,36(2):271-279.
Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Geng Xiaojie, et al. Sedimentary characteristics comparison and controlling factors analyses of nearshore subaqueous fan and fan delta in the Hetaoyuan Formation of southeastern Biyang Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 271-279.
- [18] 何开华.拜城县卡普沙良下白垩统亚格列木组下段冲积扇的沉积特征[J].新疆地质,1988,6(1):31-47.
He Kaihua. Sedimentary characteristics of alluvial fans in lower member of Yageliem Formation (Lower Cretaceous), Kapusalion, Baicheng[J]. Xinjiang Geology, 1988, 6(1): 31-47.
- [19] 彭守涛,宋海明.库车坳陷北部白垩系沉积速率分析[J].沉积学报,2006,24(5):641-649.
Peng Shoutao, Song Haiming. The sedimentation rates analysis of Cretaceous depositional succession in the northern Kuqa Depression, Northwest China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 641-649.
- [20] 李忠,王道轩,林伟,等.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[J].岩石学报,2004,20(3):655-666.
Li Zhong, Wang Daoxuan, Lin Wei, et al. Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa depression, northwest China: Implication for provenance types and tectonic attributes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 655-666.
- [21] 刘聃,陈汉林,林秀斌,等.南天山西部山前新生代晚期三期构造活动:来自乌鲁克恰提剖面砾石统计的证据[J].岩石学报,2012,28(8):2414-2422.
Liu Dan, Chen Hanlin, Lin Xiubin, et al. Three episodes of tectonism in western South Tian Shan during Late Cenozoic: Evidences from gravel counting in Wulukeqati sedimentary succession[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2414-2422.
- [22] 王招明,钟端,赵培荣,等.库车前陆盆地露头区油气地质[M].北京:石油工业出版社,2004:1-537.
Wang Zhaoming, Zhong Duan, Zhao Peirong, et al. Petroleum geology of outcrops areas in Kuche Foreland Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 1-537.
- [23] 万静萍,马立祥,周宗良.恢复西地区白垩系变形盆地原始沉积边界的方法探讨[J].石油实验地质,1989,11(3):245-249.
Wan Jingping, Ma Lixiang, Zhou Zongliang. Approach on the method for restoration of original sedimentary boundaries of the Cretaceous deformed basin in Jiuxi area[J]. Experimental Petroleum Geology, 1989, 11(3): 245-249.
- [24] 吴锡浩,钱方.川江徐家沱-金刚沱河段现代河床砾石粒度和形态变化的初步分析[J].地质论评,1964,22(4):289-297.
Wu Xihao, Qian Fang. Preliminary analysis of modern riverbed gravel particle size and morphology of Yangzi river[J]. Geological Review, 1964, 22(4): 289-297.
- [25] 张庆云,田德利.利用砾石形状和圆度判别第四纪堆积物的成因[J].长春地质学院学报,1986,(1):59-64.
Zhang Qingyun, Tian Deli. The identification of the origin of quaternary accumulative material by shape and roundness of gravels[J]. Journal of Changchun College of Geology, 1986, (1): 59-64.
- [26] 柳永清,王宗秀,金小赤,等.天山东段晚中生代-新生代隆升沉积响应、年代学与演化研究[J].地质学报,2004,78(3):319-331.
Liu Yongqing, Wang Zongxiu, Jin Xiaochi, et al. Evolution, chronology and depositional effect of uplifting in the eastern sector of the Tianshan mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 319-331.

- 319–331.
- [27] 陈正乐, 万景林, 刘健, 等. 西天山山脉多期次隆升–剥露的裂变径迹证据[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 97–106.
- Chen Zhengle, Wan Jinglin, Liu Jian, et al. Multi-stage uplift and exhumation of the west Tianshan mountain: evidence from the apatite fission-track dating[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(2): 97–106.
- [28] 沈传波, 梅廉夫, 张士万, 等. 依连哈比尔尕山和博格达山中新世隆升的时空分异: 裂变径迹热年代学的证据[J]. 矿物岩石, 2008, 28(2): 63–70.
- Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Zhang Shiwan, et al. Fission track dating evidence on space time difference of Mesozoic-Cenozoic uplift of the Yilianhabierga Mountain and bogeda Mountain[J]. Journal of Mineralogy Petrology, 2008, 28(2): 63–70.
- [29] 杜治利, 王清晨. 中新世天山地区隆升历史的裂变径迹证据[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1081–1101.
- Du Zhili, Wang Qingchen. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Tianshan region: Insight from apatite fission track[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1081–1101.
- [30] 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 等. 新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 1–15.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong, et al. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 1–15.
- [31] 杨庚, 钱祥麟. 新生代天山板内造山带隆升证据锆石、磷灰石裂变径迹年龄测定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1995, 31(4): 473–478.
- Yang Geng, Qian Xianglin. Mesozoic-Cenozoic uplift of the Tianshan intraplate orogenic belt: evidence from Zircon and apatite fission track dating[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1995, 31(4): 473–478.
- [32] 杜治利, 王清晨, 周学慧. 中新世库车–南天山盆山系统隆升历史的裂变径迹证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(5): 399–408.
- Du Zhili, Wang Qingchen, Zhou Xuehui. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa-South Tianshan basin-mountain system from the evidence of apatite fission track analysis[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(5): 399–408.
- [33] 周宇章, 陈汉林. 新疆库车坳陷晚白垩世隆升的裂变径迹证据[J]. 资源调查与环境, 2002, 23(3): 179–184.
- Zhou Yuzhang, Chen Hanlin. The fission track evidence of the uplift in Late-Cretaceous in the Kuiche basin, Xinjiang[J]. Resources Survey & Environment, 2002, 23(3): 179–184.
- [34] 杨树锋, 陈汉林, 程晓敢, 等. 南天山新生代隆升和去顶作用过程[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(1): 1–8.
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Cheng Xiaogai, et al. Cenozoic uplifting and unroofing of southern Tianshan, China[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2003, 39(1): 1–8.
- [35] 朱文斌, 张志勇, 舒良树, 等. 塔里木北缘前寒武基底隆升剥露史: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1671–1682.
- Zhu Wenbin, Zhang Zhiyong, Shu Liangshu, et al. Uplift and exhumation history of the Precambrian basement, Northern Tarim: Evidence from apatite fission track data[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1671–1682.
- [36] 肖晖, 任战利, 赵靖舟, 等. 新疆库鲁克塔格地区盆山构造–热演化史[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 33–41.
- Xiao Hui, Ren Zhanli, Zhao Jingzhou, et al. The tectonic-thermal evolution history in the Kuruketage uplift, Xinjiang Province[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 33–41.
- [37] 赵雪松, 高志勇, 冯佳睿, 等. 库车前陆盆地三叠系–新近系重矿物组合特征与盆山构造演化关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 68–77.
- Zhao Xuesong, Gao Zhiyong, Feng Jiarui, et al. Triassic-Neogene heavy minerals' assemblages characteristics and basin-orogen tectonic evolution relationship in the Kuqa Foreland Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 68–77.
- [38] 李小陪, 高志勇, 李书凯, 等. 库车前陆盆地上侏罗统一白垩统砾岩特征与构造演化关系[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 980–993.
- Li Xiaopei, Gao Zhiyong, Li Shukai, et al. Relationship between conglomeratic characteristics and tectonic evolution of Upper Jurassic-Lower Cretaceous in Kuqa Foreland Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 980–993.
- [39] 何光玉, 卢华复, 杨树锋, 等. 库车中新生代盆地沉降特征[J]. 浙江大学学报(理学版), 2004, 31(1): 110–113.
- He Guangyu, Lu Huafu, Yang Shufeng, et al. Subsiding features of the Mesozoic and Cenozoic Kuqa Basin, Northwestern China[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2004, 31(1): 110–113.
- [40] 贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 121–125.
- Jia Chengzao, He Dengfa, Lu Jiemin. Episodes and geodynamic setting of Himalayan movement in China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 121–125.

(编辑 李 军)