

东昆仑花石峡北部上二叠统格曲组源区特征:来自碎屑组成和岩石地球化学的证据

黄晓宏^{1,2} 张海军¹ 王训练¹ 王 勋¹ 沈智军³ 黄宇飞¹

(1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院 北京 100083;2.中国人民武装警察部队黄金第九支队 海口 571127;

3.中国人民武装警察部队黄金第三支队 黑龙江牡丹江 157000)

摘要 东昆仑南缘上二叠统(乐平统)格曲组为一套由砾岩、砂岩和钙质泥岩构成的扇三角洲—浅海碳酸盐台地相沉积组合,记录了东昆仑造山带海西—印支过渡期构造演化过程,是解析该构造演化过程的理想对象。通过分析花石峡北坦地克借地区格曲组碎屑岩的碎屑组成与主量、微量和稀土元素特征,探讨了其物源区属性。结果显示,砂岩类型为长石砂岩和岩屑长石砂岩,石英、长石和岩屑平均含量分别为50.9%、36.8%、12.4%,长石以钾长石为主,岩屑和砾石成分复杂。砂岩的SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、TFe₂O₃、MgO、K₂O和Na₂O平均百分含量分别为62.06%、13.26%、0.44%、4.53%、3.02%、2.42%和3.18%;微量元素比值Th/Sc和Th/U较高,平均为1.06和7.71;稀土元素总量 Σ REE平均120.43 $\times 10^{-6}$,LREE/HREE和(La/Yb)_n均值分别为9.34和12,轻稀土相对富集, δ Eu平均为0.96,Eu异常不明显,REE特征与大陆岛弧背景区杂砂岩相似,与东昆仑地体加里东期俯冲—碰撞型火山弧花岗岩具有亲缘性。碎屑组分和主量、微量元素特征与判别图揭示,格曲组砂岩物源区为海西旋回早期从东昆仑地体裂离的东昆南微地块,源岩以花岗岩为主,变质岩、沉积岩和酸性—基性火山岩较少,其中花岗岩形成构造背景为加里东期的大陆岛弧。结合区域地质和前人研究成果,认为格曲组为前陆盆地系统的隆后盆地沉积。

关键词 上二叠统格曲组 东昆仑 物源分析 构造演化

第一作者简介 黄晓宏 男 1988年出生 硕士研究生 助理工程师 古生物学与地层学 E-mail:huangxh_cugh@163.com

中图分类号 P534.46 P595 **文献标识码** A

0 引言

昆仑造山带演化过程具有多岛洋、软碰撞、多旋回、构造迁移等特殊性和复杂性^[1],受到地学界的广泛关注。一般认为青白口纪的汇聚作用使东昆仑形成统一的块体,此后东昆仑经历了两个主要洋陆转化阶段,即南华纪—早古生代洋陆转化阶段和晚古生代—早中生代的洋陆转化阶段^[2-6]。对于后一洋陆转化阶段的晚期造山过程,不同学者理解不尽一致。姜春发等^[2]认为,中二叠世末的汇聚作用使昆仑南北联为一体,阿尼玛卿蛇绿岩代表了晚二叠世沿东昆南地块南缘再次开裂形成的印支期洋壳。张克信等^[3]认为阿尼玛卿洋在中二叠世晚期开始向北俯冲,形成上二叠统格曲组、下三叠统洪水川群和中二叠统闹仓坚沟组复理石、磨拉石建造为代表的弧后前陆盆地(相对于阿尼玛卿造山带)沉积。许志琴等^[5]认为海

西期的碰撞造山带主要存在青藏高原的外部(天山—内蒙古—兴安—一线),晚二叠世的灰岩披盖不整合于弧前加积楔之上。李荣社等^[6]和陈守建等^[7]认为格曲组与下伏地层的角度不整合、岩相及生物礁的变化说明晚二叠世为海西旋回结束后新的构造旋回的开始。刘战庆等^[8]和李瑞保等^[9]认为格曲组磨拉石组合为阿尼玛卿洋晚二叠世开始向北俯冲在东昆仑南缘的沉积响应。

显然,前人对海西期与印支期过渡时期东昆仑南缘所处的构造背景的认识存在较大分歧,从而导致对这一关键时期沉积的地层——格曲组的构造意义及其物源产生不同的认识,这些认识亦缺乏碎屑组成和岩石地球化学的证据。因此,在分析格曲组沉积特征的基础上,结合砂岩碎屑组成和岩石地球化学特征,对其物源区特征和构造背景进行研究,为该区的构造演化提供沉积学信息。

1 区域地质背景

东昆仑造山带位于中央造山系西部, 昆仑造山带最东端(图 1a, b), 其北为柴达木盆地, 东邻共和盆地与西秦岭相望, 南为巴颜喀拉造山带。从北向南划分为东昆北构造带、东昆中蛇绿混杂岩带和东昆南构造带, 各带之间均为断层接触^[4]。

东昆仑造山带前寒武基底岩系包括古元古界白沙河岩群、中元古界小庙岩群、苦海岩群和新元古代

万保沟群, 变形变质强烈, 多以岩片形式产出(图 1c)^[4]。此后东昆仑地区经历新元古代晚期—早古生代和晚古生代—中生代早期两期主要洋陆转化过程, 发育早古生代纳赤台群砂板岩, 泥盆系牦牛山组磨拉石, 上石炭统一中二叠统灰岩与碎屑岩夹火山岩, 上二叠统一中三叠统为一套砾岩、砂岩、灰岩组合, 中三叠世以后东昆仑造山带内进入陆内调整期^[4]。

东昆中蛇绿混杂岩带由乌妥、清水泉和塔妥三条

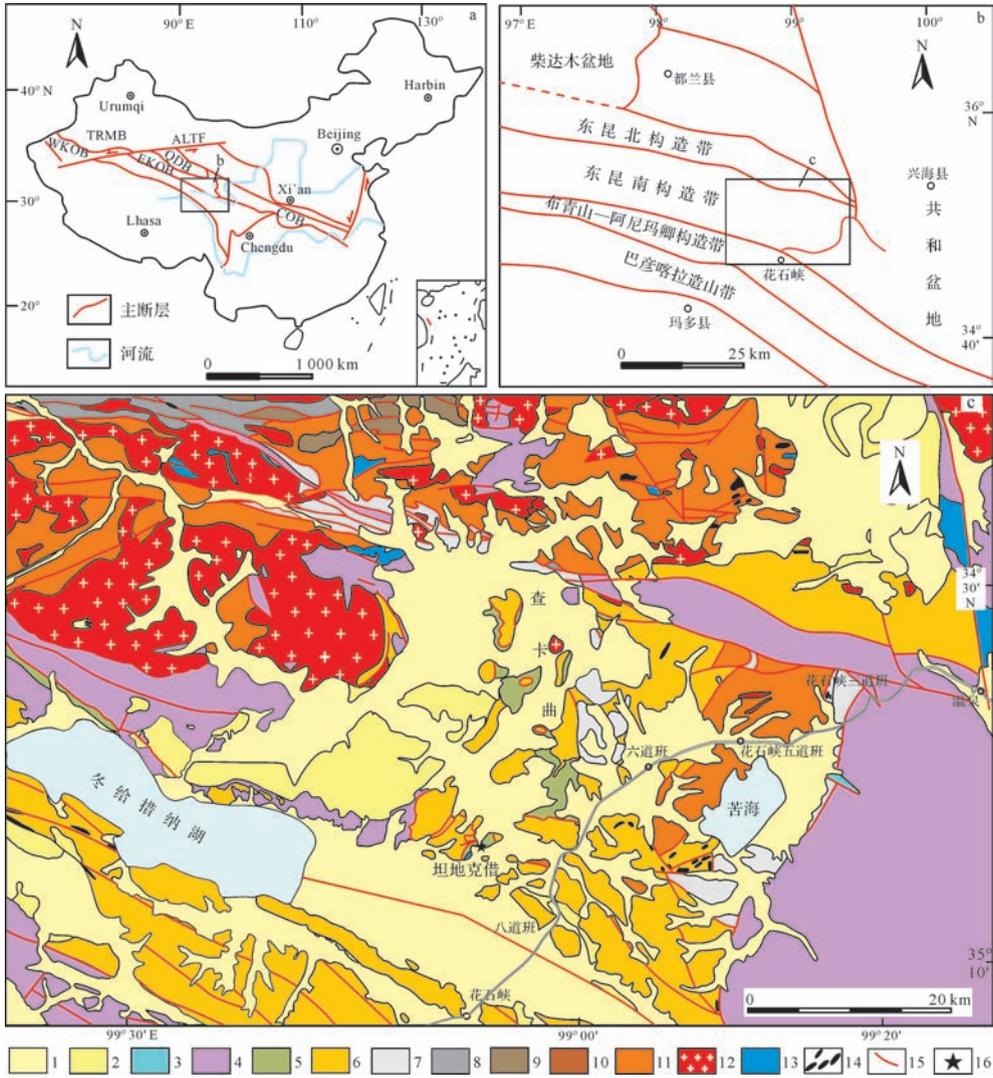


图 1 东昆仑构造位置图和研究区地质简图

(a 和 b 据李瑞保等^[9]修改; c 据殷鸿福等^[4]和文献^①修改)

COB. 中央造山系; EKOB. 东昆仑造山带; WKOB. 西昆仑造山带; QDB. 柴达木盆地; TRMB. 塔里木盆地; ALTF. 阿尔金断裂。1. 第四系; 2. 古近系—新近系; 3. 侏罗系; 4. 三叠系; 5. 上二叠统格曲组; 6. 二叠系; 7. 石炭—二叠系; 8. 石炭系; 9. 泥盆系; 10. 新元古界—下古生界; 11. 元古宇; 12. 酸性侵入岩; 13. 中性侵入岩; 14. 基性—超基性岩块; 15. 断层; 16. 剖面位置及采样点。

Fig.1 Simplified tectonic map of the East Kunlun Mountains and geological sketch map of the study area

(a and b modified from Li, *et al.*^[9]; c modified from Yin, *et al.*^[4] and ^①)

①青海省地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告: 兴海县幅 147C001003(含地质图). 2001.

蛇绿岩带组成,代表了中元古代、加里东期和海西期多期洋陆转化阶段^[10]。布青山—阿尼玛卿复合型蛇绿混杂岩带包含了早古生代、早石炭—早二叠世和晚二叠—中三叠世三个时代的蛇绿岩^[8,11-12]。晋宁期、加里东期、海西—印支期和燕山期等不同造山旋回的侵入岩均有出露^[13-14],其中形成于海西—印支期造山过程不同阶段的岩浆岩出露最广,加里东晚期的侵入岩多与板块俯冲和碰撞相关^[4,15-16]。

2 格曲组层序特征

上二叠统格曲组分布于东昆仑山—阿尼玛卿山,分为上下两段。下段为碎屑岩段,与下伏地层呈断层接触,或不整合于下一中二叠统马尔争组、树维门科组等老地层之上^[4,17]^②;上段为灰岩段,与下三叠统洪水川组呈平行不整合接触^[4]。根据格曲组所含化石^[18-19]^{①②③④},将其时代归为晚二叠世,即国际上的二叠纪乐平世。

东昆仑最东端花石峡北坦地克借剖面的格曲组主要出露碎屑岩段(图2),下未见底,下部由厚层一块状砾岩、复成分砾岩(图3a)夹少量中细砂岩、钙质胶结细—粉砂岩组成;上部主要为粗—细粒钙质胶结长石砂岩、中细粒岩屑长石砂岩、钙质胶结长石岩屑砂岩,局部含顺层产出砾石(图3b)。砾岩砾石磨圆好,成分成熟度高,具底砾岩性质,为典型的磨拉石组合。砂岩发育交错层理、平行层理(图3b,c)。顶部出现少量灰岩段地层,由钙质粉砂岩、钙质细砂岩夹生物碎屑泥晶灰岩组成,含大量腕足化石,上被树维门科组推覆体所压盖。总体上,从下向上砾岩厚度变薄、砾石粒径减小,砂岩比例增加,呈现出扇三角洲—浅海碳酸盐台地相组合特征^[9]。在东部的玛沁地区和西部的马尔争山,均可见格曲组上部灰岩段块状生物礁灰岩^[18]。

马尔争组为一套沉积于被动大陆边缘构造环境的大陆斜坡相深海—半深海浊积岩,由于后期的构造置换及变质作用的影响而表现出“整体无序而局部有序”的特征^[17]。树维门科组在东段阿拉克湖和冬给措纳湖地区以生物礁相为主,碎屑岩亦发育^[4]^③。洪水川组在洪水川地区发育较典型,下部为砂砾岩,中部为灰岩夹砂岩,上部为砂板岩,总体为冲积扇—

河流—滨海—浅海陆棚相—大陆斜坡的陆缘沉积演化序列^[20-21]。

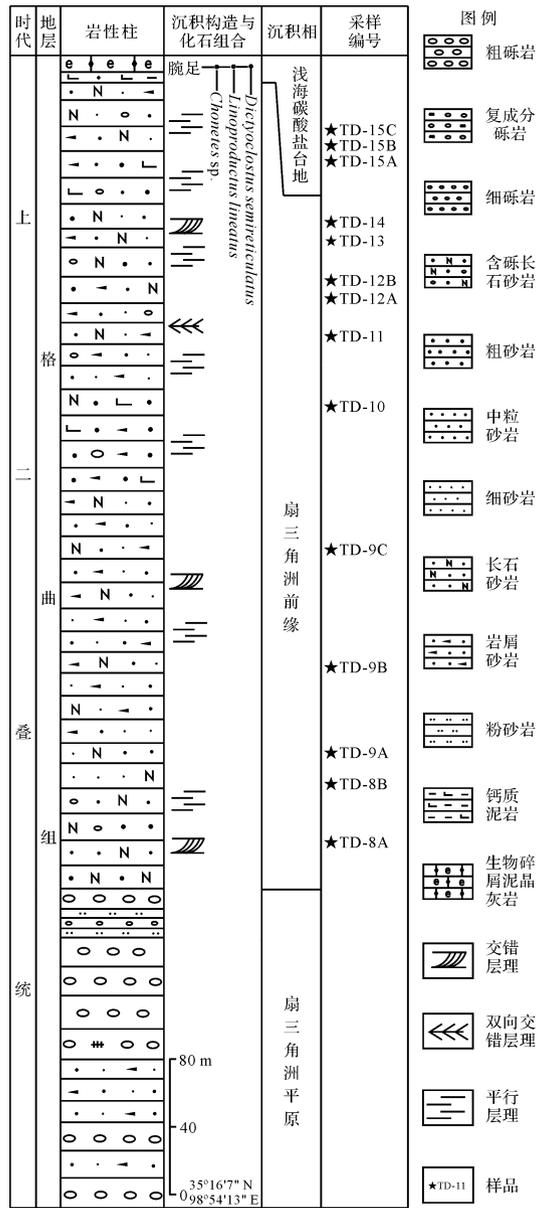


图2 坦地克借地区格曲组地层柱状图

(据殷鸿福等^[4]和李瑞保等^[9]绘制)

Fig.2 Stratigraphic column of the Gequ Formation in Tandikejie area (drawing after Yin, et al.^[4] and Li, et al.^[9])

3 样品采集与分析方法

分析样品均采自青海省花石峡北坦地克借地区,具体采样位置和层位见图1和图2。砂岩碎屑组

①青海省第一区域地质测量队. 东温泉幅 1-48-(8) 1/20 万区域地质调查报告(地质部分).1983.

②中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 中华人民共和国区域地质调查报告:阿拉克湖幅 I47C001001. 2004.

③中国地质大学(北京). 东昆仑成矿带显生宙若干关键层段综合地层学研究. 2015.

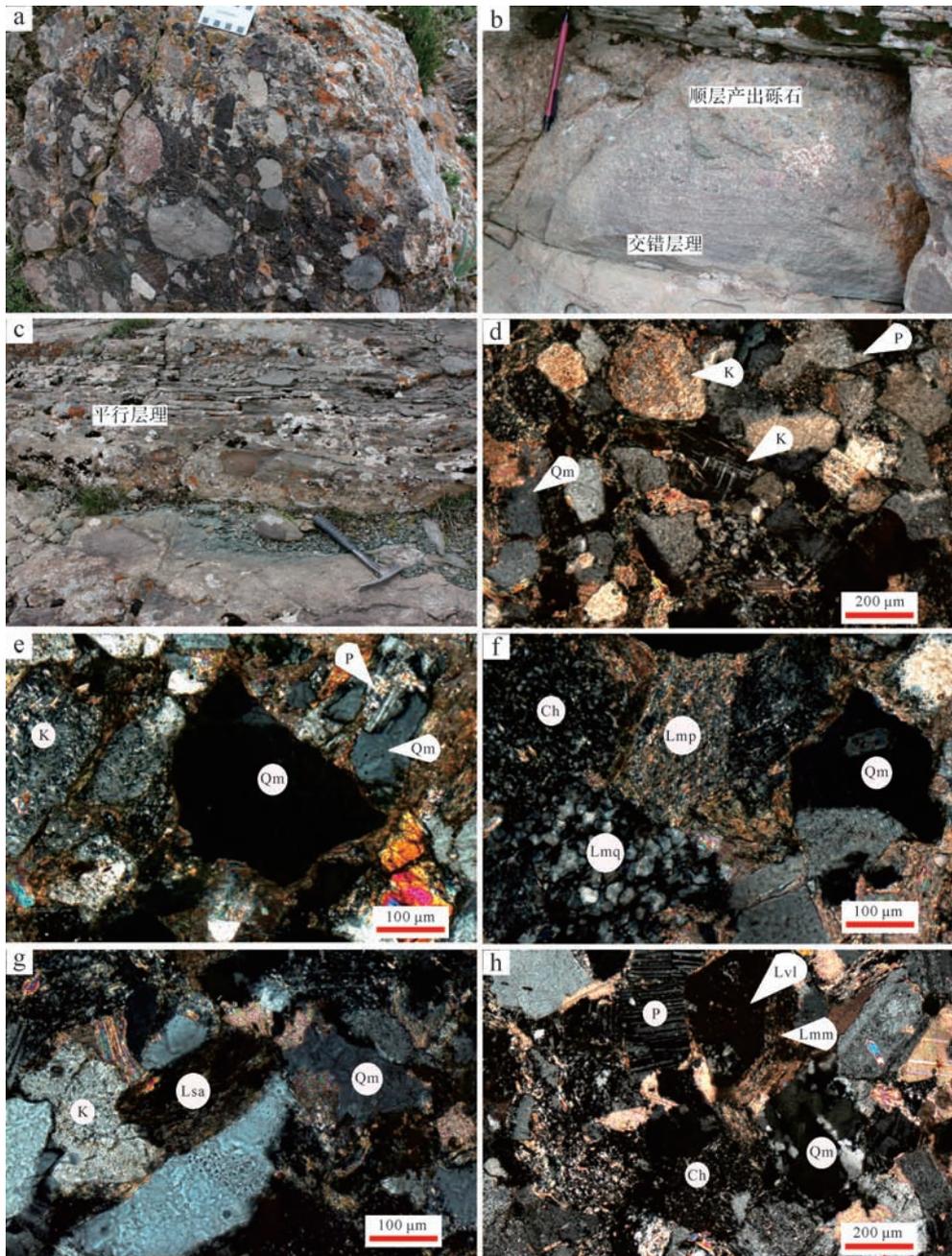


图3 格曲组碎屑岩野外照片和砂岩碎屑类型显微照片(正交光)

a. 格曲组下部砾岩; b. 砂岩中交错层理; c. 砂岩中平行层理; d, e. 长石砂岩; f, g, h. 岩屑长石砂岩; Qm. 单晶石英; P. 斜长石; K. 钾长石; Ch. 燧石; Lmm. 云母片岩岩屑; Lmp. 千枚岩岩屑; Lmq. 石英岩岩屑; Lsa. 泥岩岩屑; Lvl. 基性火山岩岩屑。

Fig.3 Photomicrographs of grain types of sandstones in Gequ Formation

分统计与分析在普通偏光显微镜下完成,选取的14件样品杂基含量均小于25%^[22],统计过程中为了减小碎屑颗粒大小变化的影响,采用Gazzi-Dickinson点计法^[23],每个样品统计碎屑颗粒数不少于400个,对于发育不规则裂纹的石英颗粒归为单晶石英^[24]。考虑到砂岩与含灰岩砾石的砾岩共生,且格曲组碎屑岩段无共生的灰岩层,统计过程中,将盆外来源的灰岩

碎屑归入沉积岩屑。统计结果见表1。

6件细砂岩样品的主量、微量元素的分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。主量元素采用压片法X射线荧光光谱(XRF)分析,微量(含稀土)元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析完成。主量元素分析精度和准确度优于5%,微量元素的分析精度和准确度优于10%。分析结果见表2。

表1 坦地克借地区上二叠统格曲组碎屑组统计表(%)

Table 1 Recalculated parameters of point-count data from sandstones of the Gequ Formation (%)

样品号	TD-8A	TD-8B	TD-9A	TD-9B	TD-9C	TD-10	TD-11	TD-12A	TD-12B	TD-13	TD-14	TD-15A	TD-15B	TD-15C
Qm	49.9	48.8	57.0	50.0	46.5	50.6	47.4	39.1	52.7	43.8	48.2	47.7	55.9	46.6
Qp	1.1	2.3	0.9	3.3	2.8	3.8	1.8	1.8	1.6	1.4	1.2	0.8	2.7	2.3
P	5.5	10.8	7.0	5.1	7.4	7.9	11.3	4.4	7.8	12.7	9.4	6.7	4.1	6.3
K	37.2	30.5	26.4	20.4	29.2	22.7	28.7	36.3	26.6	26.8	30.2	32.7	29.5	30.8
Ls	4.4	6.1	6.5	17.1	10.0	7.9	7.1	10.3	6.4	10.1	6.6	6.7	5.2	10.0
Lv	1.8	1.4	2.1	4.1	4.2	7.2	3.7	8.1	4.9	5.2	4.4	5.3	2.5	4.1
Qt	51.0	51.2	57.9	53.3	49.3	54.4	49.2	40.9	54.4	45.2	49.4	48.5	58.6	48.9
F	42.8	41.3	33.4	25.5	36.6	30.5	40.0	40.7	34.4	39.5	39.6	39.4	33.6	37.1
L	6.2	7.6	8.6	21.2	14.1	15.0	10.8	18.3	11.3	15.3	11.0	12.0	7.7	14.0
Qm	49.9	48.8	57.0	50.0	46.5	50.6	47.4	39.1	52.7	43.8	48.2	47.7	55.9	46.6
F	42.8	41.3	33.4	25.5	36.6	30.5	40.0	40.7	34.4	39.5	39.6	39.4	33.6	37.1
Lt	7.4	9.9	9.6	24.5	16.9	18.9	12.6	20.2	12.9	16.7	12.2	12.8	10.5	16.3
Qp	15.6	23.6	9.8	13.5	16.4	20.3	14.5	9.0	12.7	8.5	9.6	6.2	26.1	13.9
Lv	25.0	14.5	22.0	16.7	24.7	38.0	29.1	40.0	38.2	31.0	36.5	41.5	23.9	25.0
Ls	59.4	61.8	68.3	69.8	58.9	41.8	56.4	51.0	49.1	60.6	53.8	52.3	50.0	61.1
Qm	53.8	54.2	63.0	66.2	56.0	62.4	54.2	49.0	60.5	52.5	54.9	54.8	62.4	55.7
P	6.0	12.0	7.8	6.8	8.9	9.7	12.9	5.6	8.9	15.3	10.7	7.7	4.6	7.6
K	40.2	33.8	29.2	27.0	35.1	27.9	32.9	45.5	30.5	32.2	34.4	37.6	33.0	36.8
Qp/Q	0.02	0.05	0.02	0.06	0.06	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.05
K/P	6.75	2.82	3.77	4.00	3.94	2.88	2.55	8.18	3.42	2.11	3.23	4.88	7.22	4.86
Lv/L	0.30	0.19	0.24	0.19	0.30	0.48	0.34	0.44	0.44	0.34	0.40	0.44	0.32	0.29

注:Qm.单晶石英;Qp.多晶石英;Qt.总石英(Qm+Qp);P.斜长石;K.钾长石;F.长石(P+K);Lv.火山岩屑和变火山岩屑;Ls.沉积岩屑和变沉积岩屑;L.不稳定岩屑(Lv+Ls);Lt.总岩屑(L+Qp)。

表2 格曲组砂岩地球化学数据(主量元素:wt%,微量元素:×10⁻⁶)

Table 2 Geochemical data of sandstones from the Gequ Formation (Major element: wt%; Trace element: ×10⁻⁶)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total	K/N	La	Ce	Pr	Nd	Sm
TD-9A	61.19	13.15	0.53	5.03	5.29	2.97	2.42	2.97	0.07	0.12	6.06	99.8	0.82	31.39	57.3	6.7	24.27	4.52
TD-11	64.8	13.3	0.38	3.69	3.6	3.33	2.2	3.25	0.04	0.1	5	99.7	0.68	23.26	44.72	5.61	20.14	3.71
TD-12B	61.71	12.85	0.42	4.16	5.88	2.81	2.44	2.99	0.06	0.1	6.39	99.81	0.82	28.92	52.61	6.23	22.78	4.26
TD-13	64.31	13.83	0.37	3.92	3.44	2.89	2.5	3.64	0.05	0.09	4.8	99.83	0.69	28.15	44.39	5.46	19.89	3.54
TD-14	61.3	13.72	0.41	4.56	4.8	3.34	2.52	3.2	0.06	0.1	5.81	99.8	0.79	22.55	39.68	4.61	17.12	3.26
TD-15A	59.05	12.72	0.53	5.84	6.31	2.76	2.43	3.04	0.08	0.12	6.92	99.79	0.8	30.65	59.18	7.05	26.15	4.77
样品	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Zr	Nb
TD-9A	1.26	4.03	0.65	3.3	0.65	1.91	0.33	1.8	0.28	17.58	17.94	165.12	16.15	58.98	56.46	309.5	186.5	10.8
TD-11	1.19	3.06	0.48	2.62	0.49	1.47	0.24	1.41	0.23	13.44	14.61	84.05	12.16	40.66	56.44	319.7	108.51	6.63
TD-12B	1.17	3.47	0.55	2.92	0.54	1.63	0.26	1.52	0.24	15.35	15.63	100.03	13.05	43.02	56.53	340.3	140.13	9.01
TD-13	1.13	3.09	0.52	2.78	0.56	1.67	0.28	1.65	0.23	15.43	12.5	83.78	12.43	40.26	56.41	245.4	101	6.44
TD-14	1.07	2.55	0.43	2.34	0.44	1.32	0.21	1.31	0.2	11.66	12.54	103.73	15.13	56.35	45.63	306.5	120.62	6.52
TD-15A	1.19	4.01	0.62	3.02	0.56	1.75	0.28	1.63	0.27	16.43	16.98	156.6	18.65	55.37	60.76	441.5	309.39	12.5
样品	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U	δEu	La/Th	La/Sc	Ti/Zr	Th/U	Co/Th	Th/Sc (Ba/La) _N	La/Yb (La/Yb) _N	ΣREE	LREE/HREE		
TD-9A	3.75	733	5.46	0.88	13.2	2.1	0.89	2.37	1.75	17.09	6.3	1.22	0.74	1.27	17.47	11.78	137.78	9.13
TD-11	3.08	1 661	3.3	0.54	10	1.42	1.05	2.32	1.59	20.73	7.07	1.21	0.69	3.9	16.53	11.15	108.15	9.09
TD-12B	3.18	863	4.95	0.81	13.7	1.88	0.9	2.11	1.85	17.91	7.27	0.95	0.87	1.63	19.07	12.86	126.61	9.73
TD-13	3.3	794	3.46	0.66	9.99	1.52	1.02	2.82	2.25	22.04	6.56	1.24	0.8	1.54	17.1	11.53	112.82	8.9
TD-14	2.99	839	4.04	0.66	9.98	1.36	1.1	2.26	1.8	20.35	7.34	1.52	0.8	2.03	17.24	11.62	96.67	9.21
TD-15A	4.47	1081	9.65	1.16	42.3	3.6	0.81	0.73	1.81	10.23	11.74	0.44	2.49	1.92	18.81	12.68	140.56	10.01

注:表中标准化数据引自文献^[27]球粒陨石数据;K/N=K₂O/Na₂O;δEu=2Eu_N/(Sm_N+Gd_N)。

4 结果

4.1 砂岩碎屑组成

格曲组砂岩样品主要由石英、长石和岩屑组成,平均含量分别为 50.9%、36.8%、12.4%。石英以次棱角状为主,有的发育不规则裂纹、波状消光和包裹体(图 3d~4b),有时与长石紧密伴生(图 3e)。多晶石英较少,以燧石、变质燧石为主,石英岩和脉石英少见(图 3f,h),燧石多具“小米粒结构”,变质燧石具弱定向性;石英岩粒状或镶嵌状;脉石英呈不规则镶嵌状;Qp/Q 小于 0.07。长石以钾长石为主,K/P 平均 4.33。

样品中岩屑类型较为复杂,其中沉积岩岩屑有泥岩、粉砂岩和灰岩(图 3g)。火山岩岩屑有玄武岩和酸性火山岩屑,玄武岩屑具玻基斑状结构、间隐结构(图 3h,4a,b),酸性火山岩屑具隐晶质结构(图 4b)。花岗岩岩屑由钾长石、斜长石和石英组成(图 4c),花岗结构,其中长石绢云母化,石英发育不规则裂纹和波状消光;另一种花岗岩屑由长石和石英共同组成,具有“梳状”结构(图 4d)。变质岩岩屑主要有石英云母片岩、云母片岩、千枚岩(图 3f,h,图 4a),明显具定向构造。火山岩屑(包括变质火山岩屑)含量明显低于沉积岩屑(包括变质沉积岩屑),Lv/L 平均为 0.34。依据 Folk 的砂岩分类方案^[25],将多晶石英归入岩屑(L)端元中,格曲组砂岩归为长石砂岩和岩屑长石砂岩(图 5)。

砾岩呈砾质支撑,砾石多为次圆状—圆状,分选中等—较差(图 3a),砾石成分复杂,以生物碎屑灰岩、砂岩和硅质岩为主,少量泥岩、板岩和玄武岩,灰岩砾石最大粒径可达 30 cm。

4.2 砂岩岩石地球化学

主量元素方面,SiO₂含量 59.05%~61.19%,Al₂O₃含量为 12.72%~13.83%,TiO₂含量较低,为 0.37%~0.53%,TF_{e2}O₃含量较高,为 3.69%~5.84%,MgO、K₂O 和 Na₂O 含量分别为 2.76%~3.34%、2.2%~2.52%和 2.97%~3.64%。K₂O/Na₂O 值较高,平均 0.76。

样品的微量元素与上地壳平均含量^[26]相比较(图 6),Rb、Yb、Y 和 Ce 含量均较低,Ba 含量较高;Co、La、Cs、Ni、Sc 和 Cr 的含量变化较小,分别为(12.16~18.65)×10⁻⁶、(22.55~31.4)×10⁻⁶、(2.99~4.47)×10⁻⁶、(40.26~58.98)×10⁻⁶、(12.5~17.94)×10⁻⁶和(83.78~165.1)×10⁻⁶,Co、La 和 Cs 平均值均小于上地壳平均含量;Ni、Sc 和 Cr 平均值大于上地壳平均含量;Hf、Zr 和 Th 含量变化较大,分别为(3.3~9.65)×10⁻⁶、(101~309.39)×10⁻⁶和(10~42.3)×10⁻⁶;其他元素含量接近上地壳。La/Sc 和 Th/Sc 比值平均为 1.84 和 1.06。

稀土元素方面,样品的∑REE 平均 120.43×10⁻⁶,略低于上地壳∑REE 值(约 146×10⁻⁶)^[26],主要因为 Ce 含量较低。REE 配分模式图解中(图 7a),轻稀土元素配分曲线均较陡,重稀土元素配分曲线较缓,但

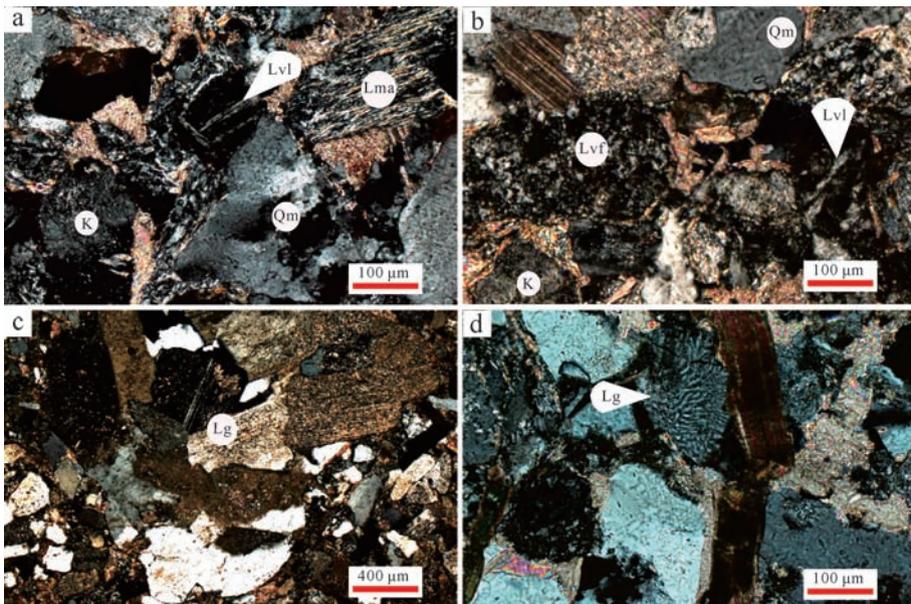


图 4 格曲组砂岩碎屑类型显微照片(正交光)

a,b,c.长石砂岩;d.岩屑长石砂岩;Qm.单晶石英;K.钾长石;Lmm.云母片岩岩屑;Lma.云母石英片岩岩屑;Lg.花岗岩岩屑;Lvl.基性火山岩岩屑;Lv.酸性火山岩岩屑。

Fig.4 Photomicrographs of grain types of sandstones in Gequ Formation

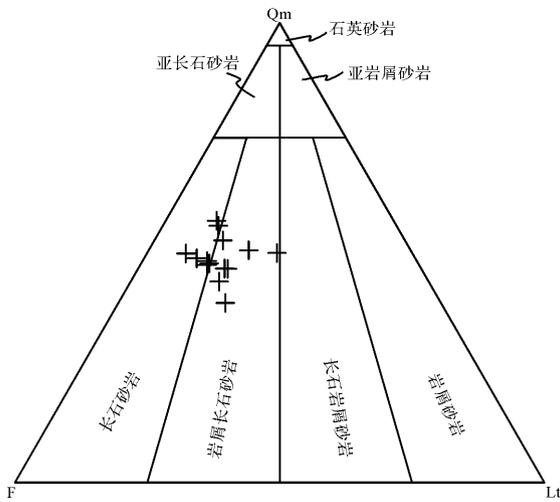


图5 格曲组砂岩分类图解(底图据 Folk^[25])

Fig.5 Sandstones classification(Base diagram after Folk^[25])

都呈现“右倾”型,说明轻稀土比重稀土分馏程度高。LREE/HREE、La/Yb 和 $(La/Yb)_N$ 平均为 9.34、17.7 和 12,轻稀土元素相对富集。 δEu 均值为 0.96, Eu 异常不明显。各样品REE配分曲线形态相似,反映沉

积物具有同源性。

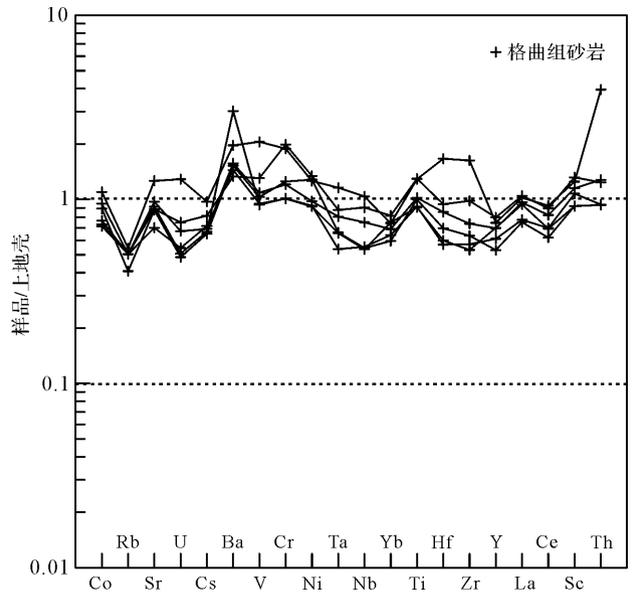


图6 格曲组细砂岩微量元素上地壳标准化蛛网图

(上地壳标准化数据引自 McLennan^[26])

Fig.6 Upper crust-normalized trace element patterns of analyzed samples (Upper crust data from McLennan^[26])

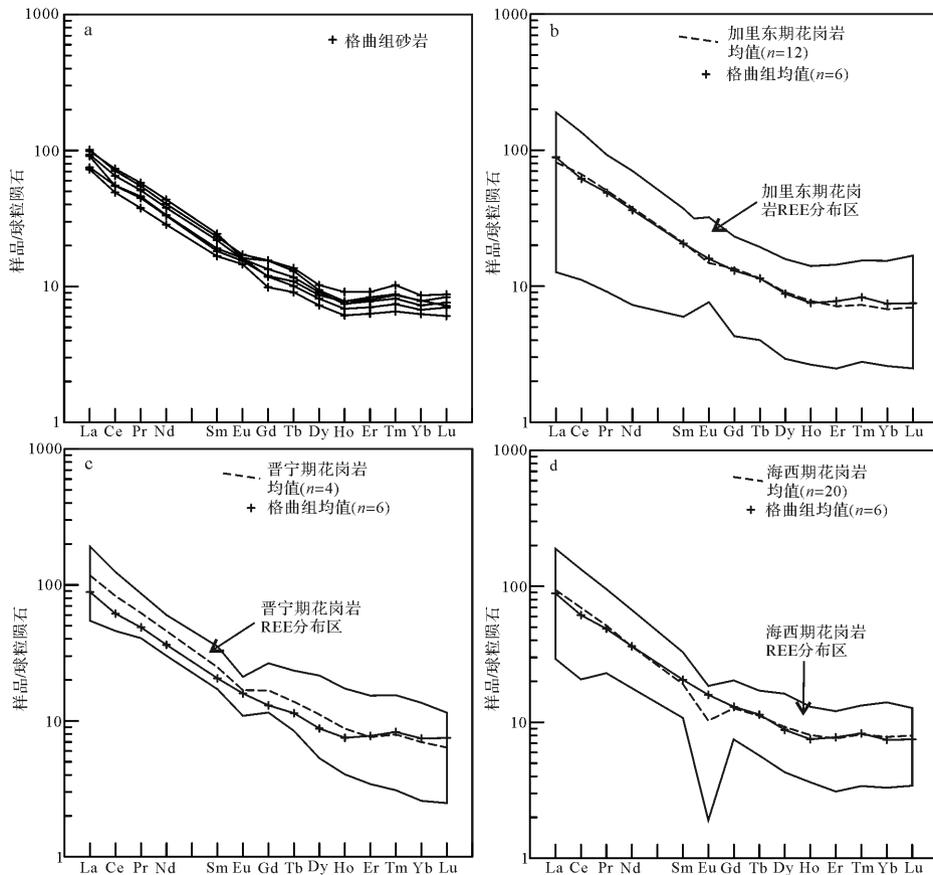


图7 格曲组砂岩和东昆仑不同时期花岗岩 REE 球粒陨石标准化配分图

(花岗岩数据引自殷鸿福等^[4];球粒陨石数据引自 Boynton^[27])

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of sandstone of Gequ Formation and different periods granites in the East Kunlun Orogen (Data of granite from Yin, et al.^[4]; chondrite data from Boynton^[27])

5 物源区属性分析

5.1 砂岩碎屑组成模式

碎屑组成研究表明,格曲组砂岩类型为长石砂岩和岩屑长石砂岩,具高的长石含量和 K/P 比值,且砂岩中可见花岗岩岩屑,这些特征反映格曲组沉积物源岩以花岗岩为主。样品中岩屑含量较低(平均 12.4%),但种类复杂,以石英云母片岩、云母片岩等变质岩屑为主,还有少量泥岩、灰岩、粉砂岩、硅质岩等沉积岩屑以及基性、酸性火山岩和花岗岩岩屑,与砾岩的砾石成分一致,直接表明物源区有这些岩石出露。

在源区构造背景 Qt-F-L 判别图(图 8a)上,样品分布比较分散,4 件样品落入“陆块”物源区的“隆升基底”一侧;1 件样品落入“切割岩浆弧”;1 件落入

“再旋回造山带”物源区大洋/大陆物质较高一侧,其他 8 件投于三者间的混合区。在更强调源岩类型的 Qm-F-Lt 判别图上(图 8b),11 件样品落入“陆块”源区的“隆升基底”一侧,3 件落入“混合”区和“切割岩浆弧”。碎屑组份分析表明格曲组砂岩物源主要为花岗岩和部分变质岩、沉积岩、酸性—基性火山岩,它们主要属于“隆升基底”构造环境。

5.2 砂岩地球化学成分判别

前人总结出了一系列用于识别沉积岩物源区构造环境、源岩组成和盆地形成构造环境的特征元素、判别系数和判别图解^[28-36],并得到了广泛运用。在主要元素系数判别图解(图 9a)上,分析样品 1 件落入中性岩浆岩区,1 件落入沉积岩区,其他全落入长英质岩浆岩区。在 La/Th-Hf 源岩判别图上(图 9b),

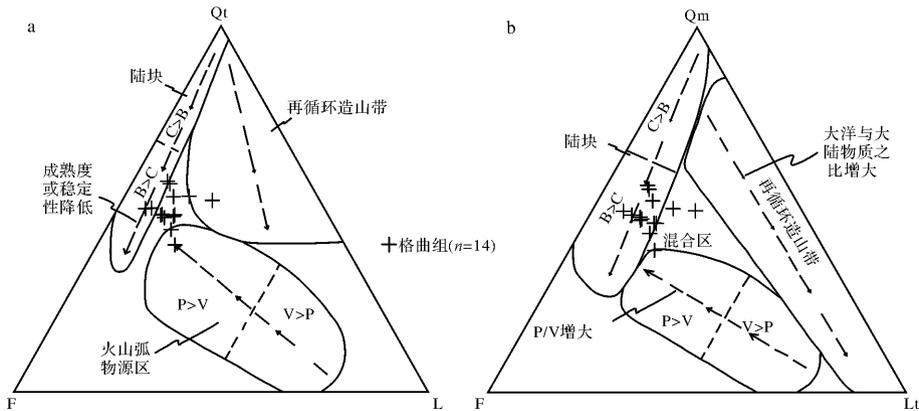


图 8 格曲组砂岩源区构造背景判别图(底图据 Dickinson^[24])
B.隆起基底;C.稳定克拉通;P.深成岩;V.火山岩

Fig.8 Tectonic setting discrimination diagram of the source region for Gequ Formation sandstones(after Dickinson^[24])

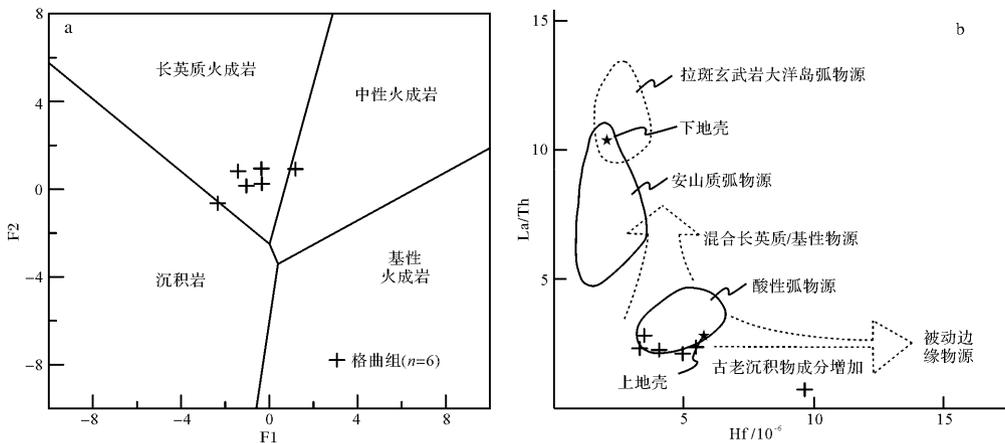


图 9 格曲组砂岩源区性质主要元素函数和 La/Th-Hf 判别图
(底图 a 据 Roser and Korsch^[28], b 据 Floyd and Leveridge^[29])

$$F1 = -1.773TiO_2 + 0.607Al_2O_3 + 0.76TFe_2O_3 - 1.5MgO + 0.616CaO + 0.509Na_2O - 1.224K_2O - 9.09,$$

$$F2 = 0.445TiO_2 + 0.07Al_2O_3 - 0.25TFe_2O_3 - 1.142MgO + 0.438CaO + 1.475Na_2O + 1.426K_2O - 6.861$$

Fig.9 Discrimination diagrams for the provenance signature of sandstone using major elements and La/Th-Hf

(a. after Roser and Korsch^[28]; b. after Floyd and Leveridge^[29])

样品具有酸性弧物源区背景,个别样品显示出含较多古老沉积物成分的特征。样品的 Th/Sc, Th/U 比值较高,也指示古老上地壳物源的存在^[30]。Bhatia^[31]分析了形成于不同构造背景的杂砂岩 REE 特征(表3),对比发现,格曲组砂岩与大陆岛弧背景杂砂岩稀土元素特征值最接近。样品中 $(Ba/La)_N > 1$, 亦显示出源区具有岩浆弧的特征^[30]。在 $TFe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/SiO_2$ 判别图(图 10a)中,个别样品落在大洋岛弧和大陆岛弧间的区域,其余均落入大陆岛弧区;在 $La/Sc - Ti/Zr$ 判别图(图 10b)中,样品全落入大陆岛弧区,说明源区岩浆弧具有大陆岛弧性质。

主量、微量元素特征表明,格曲组细砂岩源岩以长英质岩浆岩为主,中性岩浆岩和沉积岩较少,它们具有大陆岛弧构造背景。

物源区岩石 REE 特征能被可靠的保存在近源沉积物中^[31,34-36]。据此,通过对比目标砂岩与可能的源岩 REE 平均值,判断其是否有成因联系,从而确定物源,该方法取得了很好效果^[37-38]。格曲组砂岩结构

成熟度和成分成熟度均较低,反映搬运距离不长,其 REE 能反映源岩特征。REE 配分曲线对比显示(图 7b, c, d),格曲组砂岩 REE 配分曲线与加里东期俯冲碰撞型火山弧花岗岩高度吻合,而与晋宁期的板内花岗岩区别较大,海西期的俯冲碰撞型花岗岩以显著地 Eu 负异常区别于格曲组细砂岩。此外,采自坦地克借剖面格曲组下部砾岩段中的砂岩 69 个碎屑锆石谐和年龄显示,最小谐和年龄为 412 ± 2 Ma,加里东期年龄区间出现最大峰值 489 Ma(图 11,具体碎屑锆石年龄数据及分析另文报道)。显然,格曲组砂岩与加里东期俯冲碰撞型火山弧花岗岩具有亲缘性,即加里东期俯冲碰撞型火山弧花岗岩为格曲组砂岩主要物源。

6 讨论

详细的区域地质调查研究表明,加里东末期的碰撞造山作用使东昆仑地区焊结为统一块体。晚古生代洋陆转化阶段,东昆南微陆块群从东昆北地体脱离,并形成由东昆中洋、阿尼玛卿洋和分布于其间的

表 3 格曲组与不同构造背景沉积盆地杂砂岩 REE 特征对比(据 Bhatia^[31])

Table 3 The REE characteristics of graywackes in sedimentary basins of different tectonic settings

	La ($\times 10^{-6}$)	Ce ($\times 10^{-6}$)	$\Sigma REE (\times 10^{-6})$	La/Yb	$(La/Yb)_N$	LREE/HREE	δEu
OIA	8 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	2.8 ± 0.9	3.8 ± 0.9	1.04 ± 0.11
CIA	27 ± 4.5	59 ± 8.2	146 ± 20	11 ± 3.6	7.5 ± 2.5	7.7 ± 1.7	0.79 ± 0.13
ACM	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.6
PM	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
格曲组	27.49	49.64	120.43	17.70	11.99	9.34	0.96

注:OIA.大洋岛弧,CIA.大陆岛弧,ACM.活动陆缘,PM.被动陆缘。

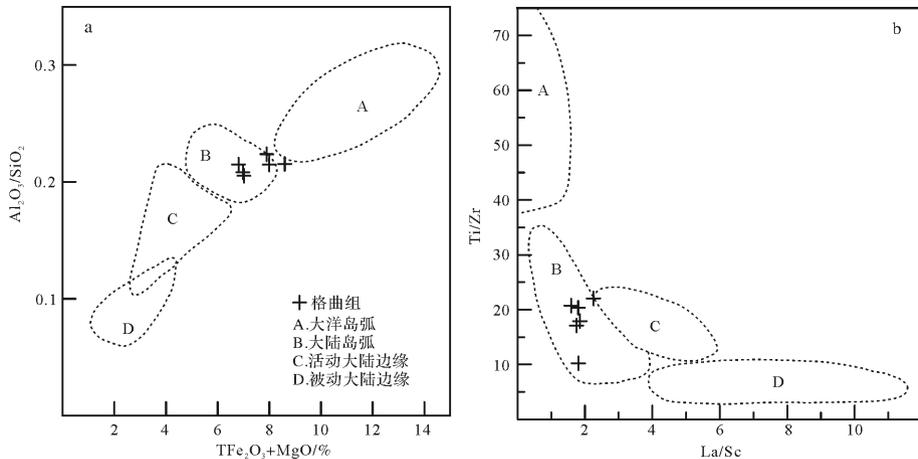


图 10 格曲组砂岩形成构造环境 $TFe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/SiO_2$ 和 $La/Sc - Ti/Zr$ 判别图解

(底图 a 据 Bhatia^[32]; b 据 Bhatia and Crook^[33])

Fig.10 Tectonic setting discrimination diagrams for the sandstones of the Gequ Formation

(a, after Bhatia^[32]; b, after Bhatia and Crook^[33])

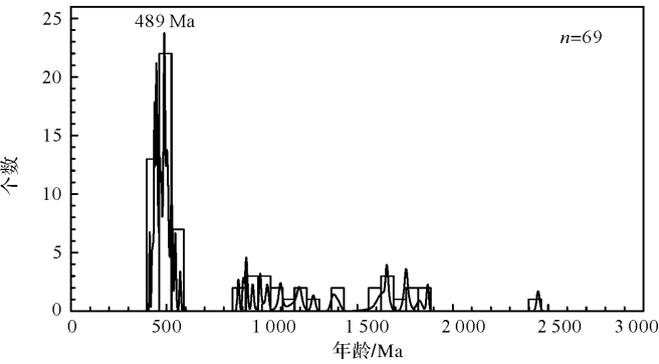


图 11 格曲组砂岩碎屑锆石年龄分布图
Fig.11 Age distribution of detrital zircons from the Gequ Formation sandstone

东昆南古陆块群构成的多岛洋格局^[4]。中二叠世晚期以塔妥—拉玛托洛胡为代表的昆中洋发生碰撞闭合^[9]，而南侧阿尼玛卿洋晚二叠世开始向北俯冲(图 12a)^[3-4, 15, 39]。在 Dickinson 的砂岩碎屑组份构造环境判别模型中,典型的隆升基底物源属于初始裂谷或转换断层构造背景^[22, 24],与上述构造背景显然不符。砂岩的主量和微量元素分析进一步表明源岩主要为加里东期具大陆岛弧背景的俯冲造山型花岗岩,而非海西旋回的岩浆岩。结合区域地质,认为海西旋回早期从东昆仑地体裂离的东昆南微地块群由卷入古造山带的加里东期大陆岛弧组成,晚二叠世时已被侵蚀至根部,作为“陆块”区的“隆升基底”为微地块南缘

的格曲组提供沉积物(图 12b),这就不难解释个别点在 Qt-F-L 判别图(图 8a)上投入或靠近“切割岩浆弧”区。上述分析还体现了造山带周缘盆地的陆缘沉积物中,砂岩地球化学特征具有源区构造属性的继承性,类似于苏鲁造山带北侧的早白垩世胶莱盆地^[40]和大别山南麓中生代盆地^[41]沉积。

同时,基于晚二叠世东昆仑南缘构造叠加、干涉的复杂构造背景,有的学者认为格曲组及下一中三叠统为前陆盆地沉积^[3-4, 42],有的则认为是弧前盆地沉积^[43-45]。碎屑锆石出现最小谐和年龄为 412 ± 2 Ma (图 11),结合碎屑组分和岩石地球化学证据表明,东昆仑南缘上二叠统没有与海西期俯冲—碰撞造山作用直接相关的火成岩物源沉积记录,这一特征同样出现在马尔争组中^[17, 46]。显然,格曲组沉积盆地不受区域性火山活动的影响,具有前陆盆地“冷盆地”的特征^[47]。

事实上,东昆仑地体存在大量晚海西—印支期与造山作用相关的岩浆活动产物,但主要出露于东昆中蛇绿混杂岩带以北(图 12a)^[4, 15, 48],相关的物源信息直至早三叠世才出现在洪水川组中^[21, 49]。这意味着晚二叠世格曲组沉积盆地与东昆北地体之间不存在物源转移的通道,格曲组沉积的构造位置很可能相当于 Decelles *et al.*^[50]提出的前陆盆地系统中的隆后盆地(图 12b)。也就是说中二叠世末东昆中洋的碰撞造山使东昆南微地块形成前陆隆起和北侧的前渊,

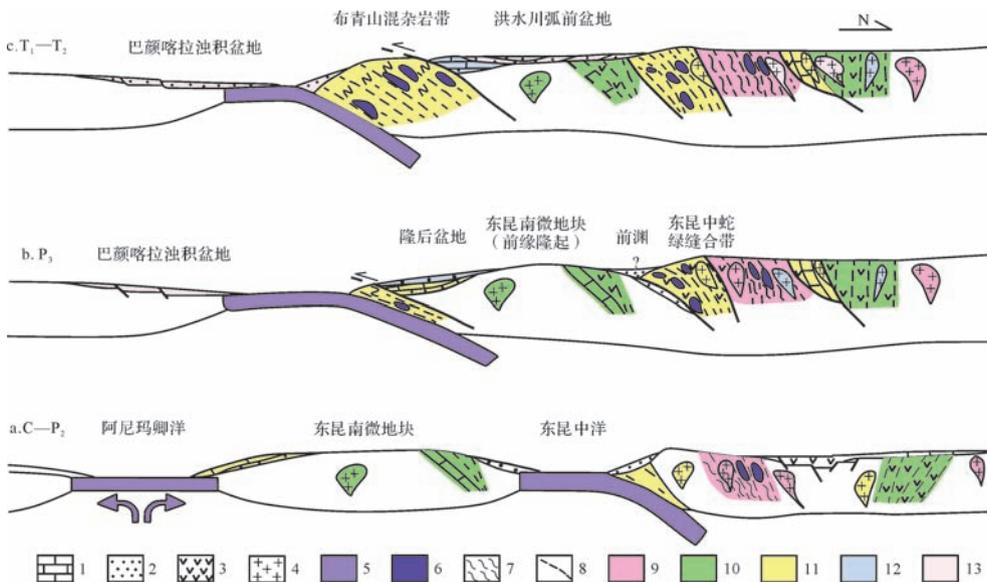


图 12 东昆仑石炭纪—中三叠世构造演化示意图(据殷鸿福等^[4]修改)

- 1.碳酸盐岩;2.碎屑岩;3.火山岩;4.花岗岩;5.洋壳;6.蛇绿岩;7.变质岩面理;8.韧性剪切带;9.古—中元古界;10.新元古界—下古生界;11.上古生界;12.上二叠统;13.三叠系

Fig.12 The tectonic evolution of the East Kunlun during Carboniferous and Middle Triassic(modified from Yin, *et al.*^[4])

二者有效的阻断了北侧物源向南输送的通道。但是,东昆仑微地块并非典型的大陆块,格曲组隆后盆地南侧并非克拉通而是向北俯冲的阿尼玛卿洋。前隆的剥蚀导致格曲组与石炭系一下中二叠统被动陆缘沉积间的不整合的形成。格曲组砾岩砾石成分以灰岩、砂岩和硅质岩为主,主要来自盖层沉积,而上部砂岩的主要物源为加里东期花岗岩,自下而上碎屑组成的变化体现了典型的物源区削顶过程。

格曲组上部礁灰岩的发育,代表造山作用减弱,环境趋于稳定^[7]。而洪水川组砂砾岩段的发育及砂岩中火山碎屑的大量出现,指示东昆仑构造活动又趋于活跃。更多的研究^[21,49,51]认为,洪水川组为一套弧前盆地沉积,其物源不仅来自北侧的东昆仑地体,还有南侧的弧前增生楔(图 12c)。这说明晚二叠世的隆后盆地到早三叠世时已演化为受阿尼玛卿洋俯冲造山控制的弧前盆地,二叠系和三叠系间的不整合^[4]代表的构造运动不仅改变了物源输送通道,还改变了东昆仑的盆山格局,具有重要的构造意义。

7 结论

(1) 砂岩碎屑组份统计显示,格曲组砂岩类型为长石砂岩和岩屑长石砂岩,Qt/(F+L)平均为 1.03,石英主要为单晶石英,长石以钾长石为主,岩屑含量少,包括沉积岩、变质岩、火山岩和花岗岩岩屑。Qt-F-L 与 Qm-F-Lt 图解共同说明物源区属于“隆升基底”构造环境。

(2) 格曲组砂岩主量、微量元素特征及相关判别图解表明,源岩以长英质岩浆岩为主,具有大陆岛弧构造背景。LREE 相对富集, Eu 异常不明显, REE 特征显示格曲组砂岩与加里东期俯冲碰撞型火山弧花岗岩具有亲缘性。

(3) 砾石成分、砂岩碎屑组份和元素地球化学综合分析揭示,格曲组碎屑岩物源区为海西旋回早期从东昆仑地体裂离的东昆南微地块,源岩以花岗岩为主,变质岩、沉积岩和酸性—基性火山岩较少,花岗岩形成构造背景为加里东期的大陆岛弧。结合区域地质和前人研究成果,认为中二叠世末东昆中洋的碰撞造山导致了格曲组沉积盆地——隆后盆地的形成。二叠系和三叠系间的不整合代表重要的构造运动,导致弧前盆地的形成。

致谢 衷心感谢周洪瑞教授、王振涛、沈阳和吴晨博士在写作过程中给予的宝贵意见和建议。感谢张立军硕士在野外工作中给予的帮助。

参考文献 (References)

- 1 殷鸿福,张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学, 1997, 22(4): 339-342. [Yin Hongfu, Zhang Kexin. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt[J]. Earth Science, 1997, 22(4): 339-342.]
- 2 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社,1992:1-221. [Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. Opening-Closing Tectonics of the Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-221.]
- 3 张克信,殷鸿福,朱云海,等. 造山带混杂岩区地质填图理论、方法与实践[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2001:1-165. [Zhang Kexin, Yin Hongfu, Zhu Yunhai, et al. Theory, Method and Practice to Geological Mapping in Mélange Region of Orogenic Belts[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001: 1-165.]
- 4 殷鸿福,张克信,陈能松,等. 中华人民共和国区域地质调查报告:冬给措纳湖幅(147C001002);比例尺 1:250000 [M]. 武汉:中国地质大学出版社,2003:1-457. [Yin Hongfu, Zhang Kexin, Chen Nengsong, et al. Report of Regional Geological Survey of the People's Republic of China (1:250000) (Map of Dongjiuona Lake) [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2003, 1-457.]
- 5 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及升降机制[M]. 北京:地质出版社,2007:1-458. [Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateau; Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1-458.]
- 6 李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2008:1-400. [Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng, et al. The Geology in Kunlun and Its Adjacent Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-400.]
- 7 陈守建,李荣社,计文化,等. 昆仑造山带二叠纪岩相古地理特征及盆山转换探讨[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 374-393. [Chen Shoujian, Li Rongshe, Ji Wenhua, et al. The Permian lithofacies paleogeographic characteristics and basin-mountain conversion in the Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 374-393.]
- 8 刘战庆,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的地质特征及大地构造意义[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1182-1195. [Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geological characteristics of the Buqingshan tectonic mélange belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(8): 1182-1195.]
- 9 李瑞保,裴先治,李佐臣,等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 244-254. [Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 244-254.]
- 10 朱云海,张克信,潘 Yuanming,等. 东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义[J]. 地球科学, 1999, 24(2): 134-138. [Zhu Yunhai, Zhang Kexin, Pan Yuanming, et al. Determination of different ophiolitic belts in eastern Kunlun orogenic zone and their tectonic

- significance[J]. *Earth Science*, 1999, 24(2): 134-138.]
- 11 边千韬,罗小全,李红生,等. 阿尼玛卿山早古生代和早石炭—早二叠世蛇绿岩的发现[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 523-524. [Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Hongsheng, et al. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous-Early Permian ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai province, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(4): 523-524.]
 - 12 Bian Qiantao, Li Dihui, Pospelov I, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, north Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(4): 577-596.
 - 13 朱云海, Pan Yuanming, 张克信. 东昆仑造山带东段晋宁期岩浆活动及其演化[J]. *地球科学*, 2000, 39(8): 231, 266. [Zhu Yunhai, Pan Yuanming, Zhang Kexin. Activity and evolution of Jinningian magma in the eastern section of the eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Earth Science*, 2000, 39(8): 231, 266.]
 - 14 陈能松, 孙敏, 张克信, 等. 东昆仑变闪长岩体的⁴⁰Ar - ³⁹Ar 和 U - Pb 年龄: 角闪石过剩 Ar 和东昆仑早古生代岩浆岩带证据[J]. *科学通报*, 2000, 45(21): 2337-2342. [Chen Nengsong, Sun Min, Zhang Kexin, et al. ⁴⁰Ar - ³⁹Ar and U - Pb ages of metadiorite from the East Kunlun Orogenic Belt: evidence for Early-Paleozoic magmatic zone and excess argon in amphibole minerals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 45(21): 2337-2342.]
 - 15 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. *现代地质*, 1998, 12(3): 344-352. [Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, et al. Late Palaeozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the eastern Kunlun Mountains of northwestern China [J]. *Geoscience*, 1998, 12(3): 344-352.]
 - 16 袁万明, 莫宣学. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. *地质论评*, 2012, 46(2): 203-211. [Yuan Wanming, Mo Xuanxue. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of eastern Kunlun Mountains[J]. *Geological Review*, 2012, 46(2): 203-211.]
 - 17 裴先治, 胡楠, 刘成军, 等. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔争组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析[J]. *地质论评*, 2015, 61(2): 307-323. [Pei Xianzhi, Hu Nan, Liu Chengjun, et al. Detrital composition, geochemical characteristics and provenance analysis for the Maerzheng Formation sandstone in Gerizhuotuo area, southern margin of East Kunlun region[J]. *Geological Review*, 2015, 61(2): 307-323.]
 - 18 刘广才, 李向红. 党河南山组与格曲组的建立[J]. *青海地质*, 1994, 3(2): 1-7. [Liu Guangcai, Li Xianghong. The establishment of the Danghenanshan Formation and Gequ Formation[J]. *Qinghai Geology*, 1994, 3(2): 1-7.]
 - 19 孙崇仁, 陈国隆, 李璋荣, 等. 青海省岩石地层(全国地层多重划分对比研究)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-340. [Sun Chongren, Chen Guolong, Li Zhangrong, et al. Stratigraphy (Lithostratic) of Qinghai Province (Multiple Classification and Correlation of the Stratigraphy of China) [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1997: 1-340.]
 - 20 田军, 张克信, 龚一鸣. 东昆仑造山带东段下中三叠统研究进展[J]. *地球科学*, 2000, 25(3): 290-294. [Tian Jun, Zhang Kexin, Gong Yiming. Advances in Lower and Middle Triassic stratigraphic research in east of eastern Kunlun orogenic belt [J]. *Earth Science*, 2000, 25(3): 290-294.]
 - 21 岳远刚. 东昆仑南缘三叠系沉积特征及其对阿尼玛卿洋闭合时限的约束[D]. 西安: 西北大学, 2014: 1-63. [Yue Yuangang. Sedimentary characteristic of Triassic in the southern of the East Kunlun and the constraints on the closing time of A' nimaqing Ocean [D]. Xi'an: Northwest University, 2014: 1-63.]
 - 22 Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164-2182.
 - 23 Ingersoll R V, Bullard T F, Ford R L, et al. The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1984, 54(1): 103-116.
 - 24 Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]//Zuff G G. Provenance of Arenites. Netherlands: Springer, 1985: 333-361.
 - 25 Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Austin: Hemphill Publishing Company, 1974: 1-184.
 - 26 McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4), doi: 10.1029/2000GC000109.
 - 27 Boynton W V. Geochemistry of the rare-earth elements: meteorite studies [C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1984: 63-114.
 - 28 Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119-139.
 - 29 Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
 - 30 McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd - Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7): 2015-2050.
 - 31 Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
 - 32 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
 - 33 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
 - 34 Fleet A R. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements [C]//Henderson P, Fyfe W S. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1984: 331-373.
 - 35 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy*

- and Geochemistry, 1989, 21: 169-200.
- 36 Girty G H, Hanson A D, Knaack C, et al. Provenance determined by REE, Th, and Sc analyses of metasedimentary rocks, Boyden Cave roof Pendant, central Sierra Nevada, California[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64B(1): 68-73.
- 37 李双应,李任伟,岳书仓,等. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 667-676. [Li Shuangying, Li Renwei, Yue Shucang, et al. Geochemistry of Mesozoic detrital rocks and its constraints on provenance in Feixi area, Anhui province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 667-676.]
- 38 李双应,李任伟,岳书仓,等. 大别山北缘暨邻区中生代砂岩稀土元素的地球化学特征及对源区的制约[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(4): 512-517. [Li Shuangying, Li Renwei, Yue Shucang, et al. Geochemistry of rare earth elements of Mesozoic-Cenozoic sandstones in the north margin of Dabie Mountains and adjacent areas: constraints to source rocks[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(4): 512-517.]
- 39 孙雨,裴先治,丁仁平,等. 东昆仑哈拉杂吐岩浆混合花岗岩:来自锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地质学报, 2009, 83(7): 1000-1010. [Sun Yu, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. Halagatu magma mixing granite in the East Kunlun Mountains—evidence from zircon U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(7): 1000-1010.]
- 40 李双应,孟庆任,李任伟,等. 山东胶莱盆地下白垩统莱阳组物质组分特征及其对源区的制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2395-2406. [Li Shuangying, Meng Qingren, Li Renwei, et al. Characteristics of material components from the Lower Cretaceous Laiyang Formation in Jiaolai Basin, Shandong province, eastern China and constraints to the provenance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2395-2406.]
- 41 李忠,李任伟,孙枢,等. 大别山南麓中生代盆地充填记录对造山作用属性的反映[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2002, 32(6): 469-478. [Li Zhong, Li Renwei, Sun Shu, et al. Mesozoic basin-fill records in south foot of the Dabie Mountains: implication for Dabie orogenic attributes[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(6): 469-478.]
- 42 田军,张克信,龚一鸣,等. 东昆仑造山带海西—印支期东昆南前陆盆地构造岩相古地理[J]. 现代地质, 2001, 15(1): 21-26. [Tian Jun, Zhang Kexin, Gong Yiming, et al. Hercynian-Indosinian tectonic lithofacies paleogeography of the south of Eastern Kunlun foreland basin of Eastern Kunlun orogenic belt[J]. Geoscience, 2001, 15(1): 21-26.]
- 43 刘战庆. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带地质特征及区域构造研究[D]. 西安:长安大学, 2011: 1-180. [Liu Zhanqing. Study on the geological characteristics and tectonic of Buqingshan Melanges belt, the south margin of East Kunlun Mountains[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011: 1-180.]
- 44 李瑞保. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代造山作用研究[D]. 西安:长安大学, 2012: 1-185. [Li Ruibao. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic orogeny in East Kunlun orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012: 1-185.]
- 45 李瑞保,裴先治,胡波,等. 东昆仑造山带东段晚二叠世-早中三叠世弧前盆地确立[C]//第六届地质构造与地球动力学学术研讨会论文集, 长春:中国地质学会, 2013: 332-333. [Li Ruibao, Pei Xianzhi, Hu Bo, et al. Determination of Late Permian-Middle Triassic fore-arc basin in eastern part of the East Kunlun orogenic belt[C]//The 6th National Symposium on Structure Geology & Geodynamics: Collection of Abstracts. Changchun: Geological Society of China, 2013: 332-333.]
- 46 胡楠. 东昆仑南缘布青山地区马尔争组地质特征、物源分析与构造演化[D]. 西安:长安大学, 2014: 1-112. [Hu Nan. Geologic features, provenance analysis and structural evolution of Maerzheng Formation at the Buqingshan area in the southern margin of the East Kunlun region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 1-112.]
- 47 王成善,李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 1-378. [Wang Chengshan, Li Xianghui. Sedimentary Basin: from Principles to Analyses[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 1-378.]
- 48 刘成东. 东昆仑造山带东段花岗岩岩浆混合作用[M]. 北京:地质出版社, 2008: 1-142. [Liu Chengdong. Granitoid Magma Mixing in Eastern Part of the East Kunlun Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-142.]
- 49 闫臻,边千韬, Korchagin O A, 等. 东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区特征:来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(5): 1068-1078. [Yan Zhen, Bian Qiantao, Korchagin O A, et al. Provenance of Early Triassic Hongshuichuan Formation in the southern margin of the East Kunlun Mountains: constraints from detrital framework, heavy mineral analysis and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(5): 1068-1078.]
- 50 DeCelles P G, Giles K A. Foreland basin systems[J]. Basin Research, 1996, 8: 105-123.
- 51 杨忠智. 东昆仑造山带东段下三叠统洪水川组地质特征及构造环境研究[D]. 西安:长安大学, 2012: 1-64. [Yang Zhongzhi. A study on geologic feature and structural setting of the Lower Triassic Hongshuichuan Formation in eastern section of the East Kunlun orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012: 1-64.]

Provenance of the Upper Permian Gequ Formation in the Southern Margin of the East Kunlun Mountains: Constraints from Detrital Composition and Geochemistry

HUANG XiaoHong^{1,2} ZHANG HaiJun¹ WANG XunLian¹ WANG Xun¹
SHEN ZhiJun³ HUANG YuFei¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. 9th Gold Team of Chinese People's Armed Police, Haikou 571127, China;

3. 3rd Gold Team of Chinese People's Armed Police, Mudanjiang, Heilongjiang 157000, China)

Abstract: The Upper Permian (Lopingian) Gequ Formation in the southern margin of the East Kunlun Mountains is composed of conglomerates, sandstones and calcareous mudstones of fan delta-sea carbonate plateau. It recorded the tectonic evolution of the East Kunlun orogenic belt during Late Hercynian-Early Indosinian. This paper studies the detrital modes and the compositions of major, trace and rare earth elements for sandstones of the Gequ Formation in Tandikejie area, north of Huashixia, and investigates the tectonic attributes and provenance types. Sandstone detrital modes show that the Gequ Formation consists of arkose and lithic arkose. The QtFL averages of sandstones are Qt 50.9%, F 36.8%, L 12.4%, feldspars are mainly K-feldspar, the composition of gravel and lithic is complex. Geochemistry analysis shows that average concentrations of SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, TFe₂O₃, MgO, K₂O and Na₂O are 62.06%, 13.26%, 0.44%, 4.53%, 3.02%, 2.42% and 3.18%, respectively. Trace elements ratios such as Th/Sc, Th/U have high averages of 1.06, 7.71. The Gequ Formation sandstones have REE gross of 120.43×10⁻⁶. In the sandstones, LREE is relatively rich, the LREE/HREE ratio is 9.34, the (La/Yb)_N ratio is 12, δEu is 0.96 and the anomaly of δEu is not obvious. According to the REE features, the Gequ Formation show similarities to the greywackes from continental island arc and affinity to the Caledonian subduction-collision arc type granites of the East Kunlun terrane. Based on the features and discriminant diagrams of clastic composition, major elements and trace elements, the provenance of the Gequ Formation sandstones came from the south microblock of East Kunlun, which was rifted from the East Kunlun terrane during Early Hercynian. The source rocks consisted of mainly granites and little sedimentary rocks, metamorphic rocks and acid-basic volcanic rocks, and the granites belong to the Caledonian continental island arc. Combined with regional geological background and previous basin studies, the Gequ Formation formed in back-bulge of foreland basin system.

Key words: Upper Permian Gequ Formation; East Kunlun Mountains; provenance; tectonic evolution