

# 新疆库鲁克塔格震旦系冰碛岩的地球化学特征及其对物源区的指示<sup>\*</sup>

李秋根 刘树文<sup>\*\*</sup> 韩宝福 郭召杰 张志诚 郑海飞 杨斌

造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要** 库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品的常量元素、微量元素和稀土元素(REEs)特征表明,  $\text{Na}_2\text{O}$ , Ba 和 HREE 比太古代后页岩富集, Sr, Cr, Co, Ni 和 Sc 则相对亏损; 其他元素与 NASC 和 PAAS 特征相似. 地球化学特征指示库鲁克塔格震旦系冰碛岩主要来源于以长英质岩石为主的物源区.  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  低的比值, 表明源区物质中的碱性长石含量较低. 库鲁克塔格震旦系冰碛岩的 REE 配分模式和负 Eu 异常特征表明它们的物源区中老地壳的组分占较大的比例, 发生过壳内分异作用. 高的  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量和  $(\text{La}/\text{Yb})_n > 2$  的特征说明它们的成熟度低于 PAAS 和 NASC. 化学蚀变指数(CIA 值)指示库鲁克塔格震旦系冰碛岩的物源区古风化程度较低. 一些样品表现高 K 的特征, 在  $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$  (A-CN-K) 三角图中表现为向 K 顶点方向上偏移, 表明这些冰碛岩在沉积期后发生了不同程度的钾交代.

**关键词** 库鲁克塔格 震旦系 冰碛岩 地球化学 物源区 古风化作用

新元古代和早寒武纪是地质历史上的重要时期, 主要表现为新元古代超大陆 Rodinia 的裂解<sup>[1]</sup>, 海水中化学成分变化<sup>[2,3]</sup>, 生物大辐射<sup>[4,5]</sup>, 和古气候的变迁<sup>[6]</sup>. 新元古代冰川沉积在全球广泛分布, 与之相关的研究成为地学前沿的热门话题, 特别是 Hoffman 等<sup>[6]</sup> 依据盖在冰川沉积上的碳酸盐盖帽出现  $\delta^{13}\text{C}$  负漂移特征提出“雪球假说”以来, 有关新元古代冰川沉积的研究成为前寒武地质研究的热点之一<sup>[7,8]</sup>. 在冰川沉积中最为普遍的岩石类型为混杂沉积岩(diamictite), 通常又称之为冰碛岩. 冰碛岩的特征是沉积物分选差, 通常在细粒基质中含有砾级碎屑, 存在冰溜面和冰川擦痕等. 因为冰碛岩具有分选差和化学风化较弱的特点, 所以适宜用来判别源区物质的性质<sup>[9]</sup>. 特别是冰碛岩中的泥质岩石具有粒度上的均一性、沉积期后的渗透性差和较高的微量元素丰度等优点<sup>[10,11]</sup>. 研究也表明, 泥质

岩石是风化条件的灵敏探针, 因而可以用来指示古气候条件<sup>[12,13]</sup>.

新疆塔里木地区广泛发育震旦系冰川沉积, 主要分布于塔里木地块的南北两侧的天山和昆仑山地区, 其中以天山地区的库鲁克塔格震旦纪冰碛岩发育完整、连续、多层等特点驰名中外<sup>[7,14,15]</sup>. 前人对库鲁克塔格震旦系的研究主要集中在地层学、古生物学、沉积学和古地磁方面上<sup>[14-17]</sup>, 缺少地球化学方面的研究<sup>[18]</sup>. 本文主要报道新疆库鲁克塔格震旦系泥质岩石(冰碛岩)的地球化学特征及其对物源区性质的指示.

## 1 区域构造背景

库鲁克塔格地区震旦系分布广泛, 发育齐全. 西起库尔勒以北的喀拉帖肯乌拉, 东至罗布泊以北的玉尔滚布拉克, 南到雅尔当山一带, 北至焉耆盆

2003-12-10 收稿, 2004-03-31 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40072065), 国家“九七三”(编号: 2001CB409804)和“三五”(编号: 96-915-05-02)资助项目

\*\* 通讯作者: E-mail: stliu@pku.edu.cn

地以南(图 1). 1937 年瑞典地质学家 Norin 在库鲁克塔格地区首先发现了震旦系冰碛岩, 确定了两个冰碛层, 并且与我国滇东震旦系冰碛岩进行对比<sup>[15]</sup>. Gao 等<sup>[15]</sup>的研究表明在库鲁克塔格地区震旦系地层中存在 3 个冰碛层(分别是贝义西组、特瑞爱肯组和汉格尔乔克组)和两个间冰期海洋沉积(照壁山组、阿勒通沟组和扎摩克提组、育肯沟组、水泉组). 高振家等<sup>[14]</sup>和姜常义等<sup>[17]</sup>详细地报道了有关库鲁克塔格地区震旦系的地层学、沉积学和古生物学的资料, 并指出贝义西组以角度不整合覆于帕尔岗塔格群之上, 汉格尔乔克组被下寒武地层西

山布拉克组平行不整合覆盖. 这套地层厚度  $> 3 \text{ km}$ , 主要包括冰碛岩、碎屑沉积岩和碳酸盐, 可能代表新元古代裂谷盆地沉积<sup>[19]</sup>, 其中的冰碛岩厚为几十至上百米, 其形成可能与 Rodinia 超大陆裂解相关<sup>[8]</sup>. 野外观察表明冰碛岩中通常发育细纹层状粉砂质韵律层和普遍存在冰溜面、冰川擦痕、擦痕碎屑和滴石等冰成特征. 有关库鲁克塔格震旦系地层中同位素年龄数据的报道, 仅有在雅尔当山贝义西组下部岩石中获得  $(814 \pm 90.9) \text{ Ma}$  的 Rb-Sr 全岩等时线年龄数据和在库鲁克塔格贝义西组获得  $773 \text{ Ma}$  锆石 U-Pb 年龄数据<sup>[17, 18]</sup>.

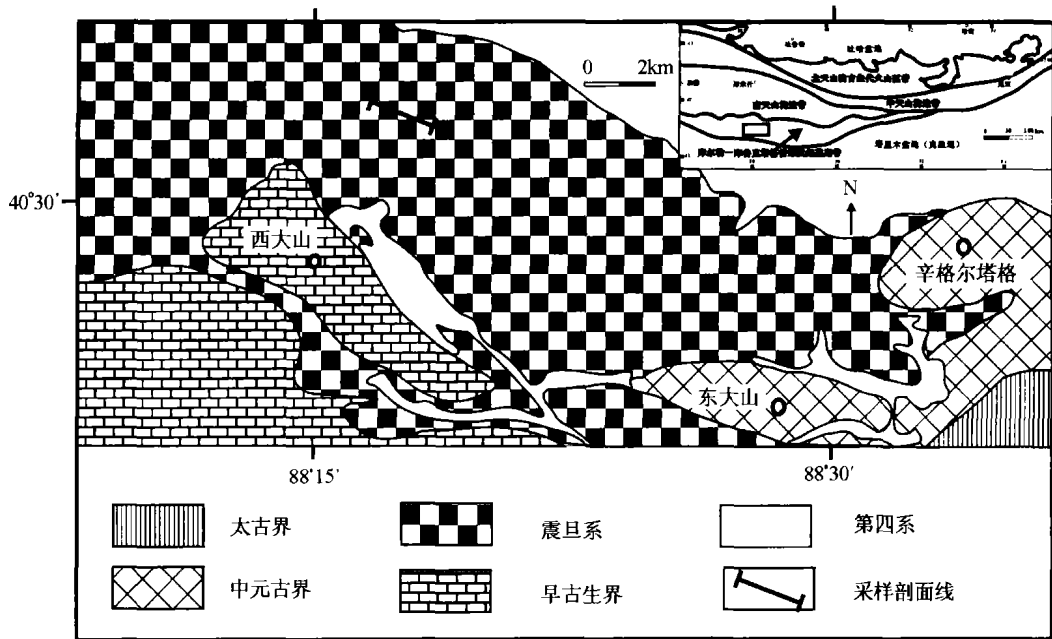


图 1 库鲁克塔格地区地质简图及取样位置(据徐备等<sup>[18]</sup>、Xiao 等<sup>[19]</sup>和 Li 等<sup>[20]</sup>修改)

## 2 分析方法

所有样品的化学分析在国家地质实验测试中心完成. 样品在研磨成粉末前用去离子水清洗. 清洗后, 研磨到 200 目以下. 常量元素用 X 荧光(XRF)方法测定, 分析在 Phillips PW1400 上进行. FeO 采用重铬酸钾滴定法测定. 微量元素和稀土元素用 ICP-MS 测定. 分析过程中采用的标样为 GSD-1 和 GSR-1, 详细的分析方法和流程见文献[21, 22]. 大部分常量元素的分析精度为 1%~5%,  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{MnO}$  的分析精度为 5%~10%. 微量元素和稀土元素的分析精度为 5%~10%.

## 3 分析结果

库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的常量元素、微量元素和稀土元素(REE)的分析结果分别列于表 1 和表 2. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩的主量元素特征总体上与北美平均页岩成分(NASC)<sup>[23]</sup>和澳大利亚太古代后页岩(PAAS)<sup>[24]</sup>相似. 其中  $\text{CaO}$  为 0.25%~2.04%, 低于 PAAS 和 NASC.  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  的含量处于 4.79%~7.56% 间(表 2).  $\text{Na}_2\text{O}$  值比 NASC 和 PAAS 高. 在沉积岩中  $\text{Na}_2\text{O}$  主要富集于钠长石中, 因而表明样品的成熟度较低<sup>[25]</sup>. 样品 TG45-1, TG45-3 和 TG45-5 的  $\text{K}_2\text{O}$  含量较高, 可能是由于

沉积期后钾交代的结果<sup>[26]</sup>。

相对于 NASC 和 PAAS 而言, 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩显示 Ba 相对富集, Sr, Cr, Co, Ni 和 Sc 则相对亏损(见表 1)。其中大离子亲石元素(LILE)中的 K, Ba 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈现明显的正相关(相关系数分别为 0.69 和 0.91), 表明这些元素主要受层状硅酸盐矿物的控制。

库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品具有与 PAAS 相似的稀土配分型式(图 2)。样品的 (La/Yb)<sub>n</sub>, (La/Sm)<sub>n</sub> 和 (Gd/Yb)<sub>n</sub> 分别在 10.74 ~ 20.34, 4.97 ~ 5.92 和 1.83 ~ 3.47 范围内变化(表 2)。负 Eu 异常明显(Eu/Eu\* 的范围为 0.38 ~ 0.65, 表 2), 低于 PAAS 和 NASC(分别为 0.65 和 0.68)。库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的 REE 含量与 SiO<sub>2</sub> 呈强烈的负相关( $r = -0.9$ ), 表明在沉积作用过程中石英含量对 REE 浓度起冲淡作用<sup>[11]</sup>; 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈强烈的正相关( $r = 0.88$ ), 表明稀土元素(REE)主要受粘土矿物吸附作用和卷入到粘土物质中的一些副矿物的制约<sup>[27]</sup>。

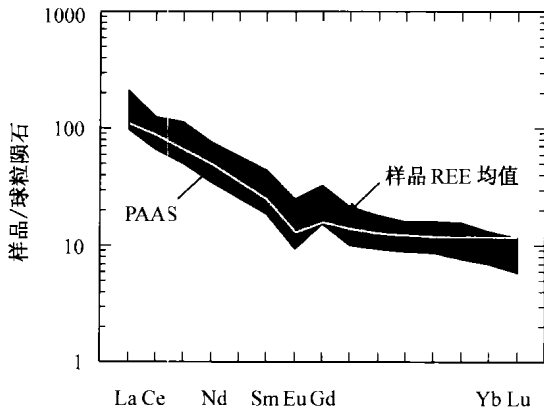


图 2 库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品的 REE 配分图  
球粒陨石标准化值和 PAAS 据 Taylor 等<sup>[24]</sup>

## 4 讨论及结论

### 4.1 古风化作用

化学风化严重影响硅质碎屑沉积物的矿物和常量元素地球化学特征<sup>[12, 28]</sup>。Nesibitt 等<sup>[12, 13]</sup>提出了化学风化指数 ( $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ ), 其中的 CaO\* 指的是岩石中硅

酸盐所含的 CaO 的物质的量)来定量研究沉积岩和沉积物遭受的化学风化程度, 其计算步骤和 CaO\* 校正方法见文献<sup>[26, 28]</sup>。CIA 值可以用绝对数来表示, 通常认为, CIA 值在 50 左右的碎屑沉积岩, 其物源区岩石未遭受化学风化, CIA 值为 100 时, 表明其物源区岩石遭受了强烈的化学风化。库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的 CIA 值处于 55 ~ 71(表 1), 均值为 65.7, 表明源区为中-低化学风化程度。

CIA 值同样可以在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (CaO\* + Na<sub>2</sub>O) - K<sub>2</sub>O (A-CN-K) 三角图中表示(图 3)。在 A-CN-K 三角图中, 物源区新鲜未风化岩石的起点位于平行 A-CN 边的趋势线上, 随着风化作用的进行, K<sub>2</sub>O 发生丢失, 成分点向 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 方向移动(图 3)。库鲁克塔格震旦纪样品点落在 A-CN-K 三角图中接近钾长石和斜长石的连线位置, 而且样品的 CIA 值为 55 ~ 71, 表明样品在物源区处于初始风化阶段<sup>[26, 29]</sup>。通过绘制一条拟合的穿过样品点的直线可以推断源区物质的成分<sup>[26]</sup>, 同时可以确定理想风化趋势<sup>[13, 30]</sup>(见图 3 中带箭头的实线)。Condie<sup>[31]</sup> 和 Fedo 等<sup>[26]</sup> 的研究表明钾交代现象是细屑岩沉积期后

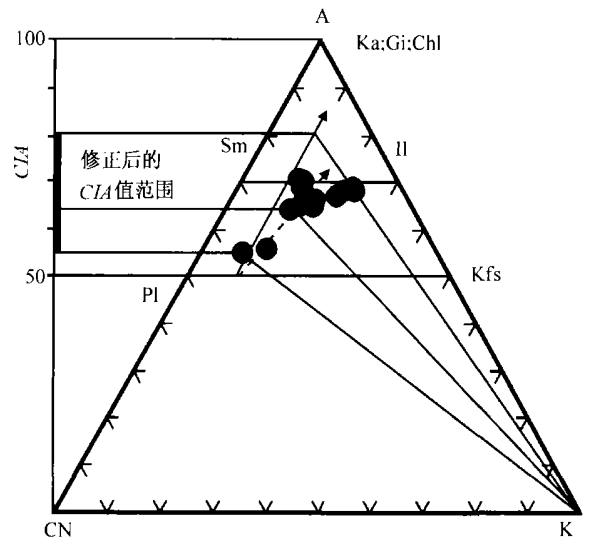


图 3 库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品 A-CN-K 三角图  
据 Zhang 等<sup>[25]</sup>; 箭头虚点线为库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品点的反向连线, 箭头实线为库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品的理想风化趋势线; A=CaO; CN=CaO\*+Na<sub>2</sub>O; K=K<sub>2</sub>O; Ka=高岭石; Chl=绿泥石; Gi=水铝矿; Sm=蒙脱石; Il=利石; Pl=斜长石; Kfs=钾长石

表 1 库鲁克塔格震旦系冰碛岩地球化学分析数据(%)

组分	样品号													NASC	PAAS
	TG42-1	TG42-2	TG43-1	TG44-1	TG44-3	TG44-5	TG45-1	TG45-11	TG45-12	TG45-3	TG45-5	TG45-7	TG45-9		
SiO <sub>2</sub>	61.4	63.2	68.9	57.3	66.8	70.6	60.7	56.1	55.4	59.8	63.1	71.6	63.3	64.8	62.4
TiO <sub>2</sub>	1.07	0.92	0.73	1.80	0.78	0.60	0.78	1.66	1.85	0.80	0.83	0.58	0.84	0.70	0.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.0	15.3	15.4	18.5	15.0	13.4	20.9	18.2	19.9	20.5	18.7	13.8	18.0	16.9	18.8
FeO	4.76	4.53	1.47	3.70	4.36	3.29	1.67	8.48	3.13	1.53	1.38	2.46	2.89		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.91	1.48	3.00	5.69	1.75	2.10	2.67	2.92	6.42	3.42	3.49	2.63	2.50		
MgO	3.11	3.40	1.37	1.50	2.15	1.81	1.51	2.11	1.51	1.71	1.38	1.29	1.89	2.86	2.19
MnO	0.11	0.07	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.11
CaO	2.04	1.14	0.45	0.68	0.37	0.37	0.37	0.58	0.53	0.34	0.39	0.25	0.36	3.63	1.29
Na <sub>2</sub> O	2.94	5.19	2.20	2.34	2.44	2.58	1.27	2.24	2.45	1.32	1.44	1.93	1.72	1.14	1.19
K <sub>2</sub> O	2.98	1.79	3.60	3.00	2.97	2.38	6.15	2.55	3.09	6.24	5.22	3.09	4.89	3.97	3.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.24	0.10	0.16	0.11	0.09	0.10	0.27	0.17	0.12	0.13	0.08	0.12	0.11	0.16
H <sub>2</sub> O	3.40	2.88	2.84	4.66	3.32	2.66	3.82	4.60	4.80	3.72	3.34	2.88	3.68		
CO <sub>2</sub>	1.04	0.80	0.39	0.45	0.45	0.36	0.27	0.08	0.31	0.32	0.09	0.27	0.45		
总计	99.93	100.90	100.45	99.86	100.57	100.30	100.26	99.86	99.60	99.80	99.58	100.85	100.64		
	(×10 <sup>-6</sup> )														
Rb	95		125	97	86		74		199		113		125	160	
Sr	118	179	78	180	68	83	59	107	185	49	53	60	56	142	200
Ba	700	621	570	1202	482	402	1665	841	1052	1561	1283	721	956	636	650
Th	11.8	10.5	11.9	15.0	9.75	3.27	12.1	14.7	3.00	18	15.4	12.9	5.69	12.3	14.6
U	1.3		2.4	1.6	1.7			1.7		3.7		1.7		3.0	3.1
Co	23	29	23	21	6.01	7.76	9.59	22	17	14.4	10.8	12.4	8.23	26	23
Ni	36	28	28	41	24	26	27	38	35	25	22	27	29	58	55
V	124	113	91	153	93	73	112	104	110	95	81	77	256	130	96
Cr	85	79	66	76	68	48	81	69	76	82	79	54	73	125	110
Sc	11.6	12.0	8.49	17	7.03	4.95	11.0	7.56	8.70	5.60	8.46	7.47	12.5	15	16
Zr	212	158	147	355	182	136	158	363	442	157	163	123	165	200	210
Hf	7.05		5.78	10.3	5.91			10.7		6.11		6.36		6.3	5.0
Nb	17		14.2	32	13.3			45		21		15.1		13	19
Ta	1.17		1.26	2.52	0.93			2.27		1.54		0.80		1.10	
Y	29	25	21	33	25	19	34	28	29	22	30	24	33	35	27
La	51	53	37	70	47	36	70	67	77	66	68	43	52	31	38
Ce	85	89	62	105	76	62	113	104	119	110	110	76	86	67	80
Pr	9.75	10.2	7.06	12.5	8.66	6.92	12.7	14	15.6	12.9	13.4	8.60	9.90		8.83
Nd	35	35	25	44	30	24	43	51	55	43	45	30	35	27	33.9
Sm	6.34	6.16	4.32	8.07	5.38	4.54	7.42	10.3	9.58	7.49	7.78	5.42	6.45	5.60	5.55
Eu	1.28	0.81	0.87	1.65	1.07	0.88	1.40	2.19	1.92	1.30	1.36	0.86	1.18	1.20	1.08
Gd	6.78	6.69	4.70	8.59	6.02	4.84	8.01	9.98	8.82	7.34	8.03	5.63	7.40	5.20	4.66
Tb	0.94	0.86	0.58	1.18	0.79	0.59	1.14	1.26	1.23	0.82	1.03	0.73	0.98	0.85	0.774
Dy	5.30	4.68	3.68	6.37	4.52	3.56	5.92	6.86	6.82	4.90	5.90	4.28	5.88		4.68
Ho	1.14	1.02	0.78	1.37	0.96	0.75	1.26	1.32	1.26	1.03	1.25	0.90	1.25		0.991
Er	3.32	2.92	2.41	4.02	2.76	2.13	3.65	3.20	3.64	2.66	3.30	2.69	3.94		2.85
Tm	0.44	0.40	0.32	0.56	0.36	0.27	0.49	0.44	0.47	0.38	0.43	0.36	0.51		0.405
Yb	2.77	2.40	2.07	3.27	2.25	1.70	3.07	2.33	2.83	2.18	2.84	2.29	3.28	3.10	2.82
Lu	0.35	0.28	0.30	0.44	0.24	0.22	0.42	0.32	0.30	0.24	0.30	0.26	0.43	0.46	0.433
REEs	210	213	151	267	186	149	271	274	303	260	269	180	214		185
HREEs	21	19	14.8	26	18	14.1	24	26	25	20	23	17	24		18

表 2 库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品数据的部分比值和 CIA 值<sup>a)</sup>

组分比	样品号														
	TG42-1	TG42-2	TG43-1	TG44-1	TG44-3	TG44-5	TG45-1	TG45-11	TG45-12	TG45-3	TG45-5	TG45-7	TG45-9	NASC	PAAS
CIA	56	55	65	69	66	64	69	71	70	68	68	66	67	57	69
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.12	0.23	0.16	0.20	0.18	0.29	0.14	0.16	0.30	0.28	0.22	0.27	0.23	0.20
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	5.92	6.98	5.80	5.34	5.41	4.96	7.42	4.79	5.54	7.56	6.66	5.02	6.61	5.11	4.87
Th/Sc	1.02	0.87	1.41	0.87	1.39	0.66	1.10	1.94	0.34	3.30	1.82	1.73	0.45	0.82	0.91
La/Sc	4.41	4.41	4.41	4.02	6.71	7.28	6.36	8.8	8.84	11.7	8.08	5.73	4.16	2.07	2.39
Eu/Eu <sup>*</sup>	0.59	0.38	0.59	0.60	0.57	0.57	0.55	0.65	0.63	0.53	0.52	0.47	0.52	0.67	0.63
(La/Yb) <sub>n</sub>	12.5	14.9	12.2	14.4	14.2	14.3	15.4	19	18	20	16	12.6	10.7	6.76	9.15
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1.98	2.26	1.84	2.13	2.17	2.31	2.11	3.47	2.53	2.73	2.29	1.99	1.83	1.36	1.34
(La/Sm) <sub>n</sub>	5.07	5.40	5.45	5.43	5.52	5.00	5.92	4.06	5.05	5.51	5.53	4.97	5.09	3.48	4.33

a) CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO<sup>\*</sup>+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]×100, 采用物质的量进行计算, CaO<sup>\*</sup>指的是岩石当中硅酸盐所含的CaO 的物质的量<sup>[12]</sup>; 下角标 n 表示球粒陨石标准化, 球粒陨石参考值据文献[24], Eu/Eu<sup>\*</sup>=(Eu)<sub>n</sub>/((Sm)<sub>n</sub>×(Gd)<sub>n</sub>)<sup>1/2</sup>

的普遍现象. 在图 3 中我们可以发现一些样品(如: TG45-1, TG45-3 和 TG45-5)趋于向 K<sub>2</sub>O 顶点方向偏移, 表明它们发生了钾交代作用现象. 钾交代前或修正后的 CIA 值可以从 K<sub>2</sub>O 顶点向单个样品点作连线, 并与理想风化趋势线相交, 交点在 CIA 尺度上的读数中获得<sup>[26]</sup>. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品在钾交代前或修正后的 CIA 值为 55~81, 大部分样品居于加拿大安大略地区古元古代冰碛岩 CIA 值的范围(48~69)<sup>[32]</sup>, 较高的 CIA 值反映物源区部分冰期前湿润气候条件下形成的化学风化程度较高的一些沉积物卷入了冰川携带的沉积物中, 引起了部分样品的高 CIA 值.

#### 4.2 物源区性质

近年来研究表明, K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 也可以用来确定细碎屑岩物源区成分<sup>[33]</sup>. Cox 等<sup>[33]</sup>指出当泥质岩石中 K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>0.5 时, 说明母岩中具有相当数量的碱性长石, K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><0.4 时, 说明母岩中只含少量的碱性长石. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品 K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的范围在 0.12~0.30 间(表 1), 平均值为 0.21, 表明母岩中碱性长石的含量较低.

Taylor 等<sup>[24]</sup>以及 McLennan 等<sup>[34]</sup>指出 REEs, Th, Sc 和 HFSE 很适合于确定物源区的性质, 因为这些元素在海水中滞留的时间短而且在沉积、成岩以及变质作用过程中不会发生明显的变化. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的稀土配分型式与 PAAS 相似(图 2), 明显的负 Eu 异常(Eu<sup>\*</sup>/Eu<0.65)(表 2). 在 Eu<sup>\*</sup>/Eu-(Gd/Yb)<sub>n</sub>图(图 4)中, 绝大部分样品落于 (Gd/Yb)<sub>n</sub>>2 的右下方区域, 表明它们

的化学成熟度较低, 来源于低化学风化的物源区<sup>[25]</sup>. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的 Zr 和 HREE 呈现正相关性(r=0.7), 表明 HREE 主要受副矿物锆石控制. Th/Sc 和 La/Sc 是最为适合用于判别物源区性质的<sup>[24, 29]</sup>, Wronkiewicz 等<sup>[35]</sup>的研究表明, 在没有沉积再循环的情况下, Th/Sc 和 La/Sc 可以用来区分物源区的镁铁质/超镁铁质和长英质组分; 在沉积再循环情况下, Th/Sc 和 La/Sc 则表现小的变化. 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的 Th/Sc(0.34~3.3)和 La/Sc(4.02~11.72)呈现较大的变化, 表明不具有沉积再循环的特征, 同时也指示了它们的物源区主要为长英质组分(图 5). 这些微量元素特征更进一步证明它们的物源区存在以长英质组分为主的老地壳<sup>[36]</sup>, 并发生过壳内分异作用<sup>[9]</sup>.

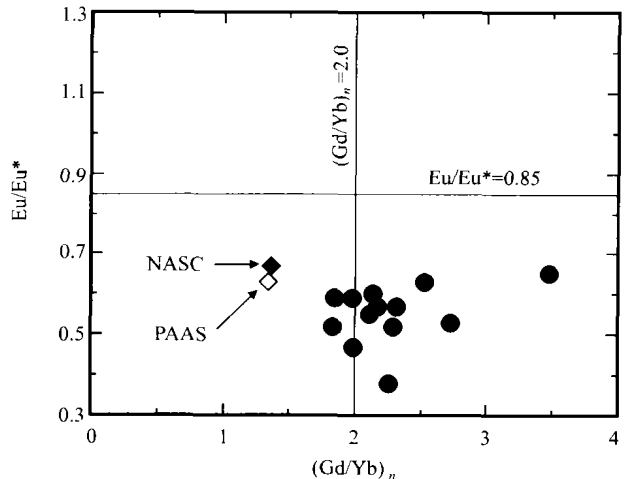


图 4 库鲁克塔格震旦系冰碛岩 Eu/Eu<sup>\*</sup>-(Gd/Yb)<sub>n</sub>图<sup>[9]</sup>

PAAS(太古代后澳大利亚页岩)<sup>[24]</sup>, NASC(北美平均页岩成分)<sup>[23]</sup>

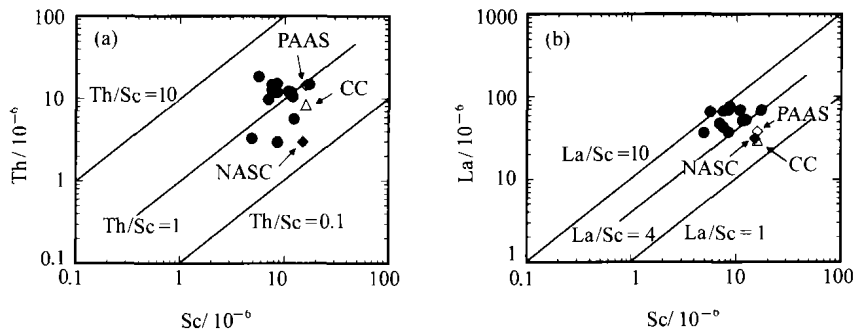


图 5 库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品物源区特征判别图

PAAS (太古代后澳大利亚页岩)<sup>[24]</sup>, NASC (北美平均页岩成分)<sup>[23]</sup> 和 CC (大陆地壳成分)<sup>[37]</sup>

(a) Th-Sc (b) La-Sc

## 5 结论

库鲁克塔格震旦系冰碛岩样品的地球化学特征表明:

(1) 库鲁克塔格震旦纪冰碛岩样品的成熟度低于 PAAS 和 NASC;

(2) 它们的物源区的古风化程度较低, 物源区不具有沉积再循环的特征, 主要是以长英质为主的老地壳, 并发生过壳内分异作用;

(3) 一些高钾的样品是沉积期后发生了不同程度的钾交代的结果。

## 参 考 文 献

- Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 1991, 252: 1409
- Anbar A D, et al. Proterozoic ocean chemistry and evolution: A bioinorganic bridge? *Science*, 2002, 297: 1137
- Hardie L A. Secular variations in Precambrian seawater chemistry and the timing of Precambrian aragonite seas and calcite seas. *Geology*, 2003, 31: 785
- 陈孟莪. 震旦纪生物大爆炸! ——浅论地史早期动物的演化. 前寒武纪研究进展, 1999, 22: 36
- Grey K, et al. Neoproterozoic biotic diversification: Snowball earth or aftermath of the Acraman impact? *Geology*, 2003, 31: 459
- Hoffman P F, et al. A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 1998, 281: 1342
- Evans D A D. Stratigraphic, Geochronological, and Paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox. *American Journal of Science*, 2000, 300: 347
- 张启锐, 等. 从“全球冰川”到“雪球假说”——关于新元古

代冰川事件的最新研究. *高校地质学报*, 2002, 8: 473

- Panahi A, et al. A geochemical investigation into the provenance of the Neoproterozoic Port Askaig Tillite, Dalradian Supergroup, western Scotland. *Precambrian Research*, 1997, 85: 81
- Wronkiewicz D J, et al. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 1537
- Chen B, et al. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geological Magazine*, 2002, 139: 1
- Nesbitt H W, et al. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715
- Nesbitt H W, et al. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 1523
- 高振家, 等. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1984. 1~151
- Gao Z J, et al. Sinian glacial deposits in Xinjiang, Northwest China. *Precambrian Research*, 1985, 29: 143
- Chen C M, et al. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: An oblique collisional orogeny. *Tectonophysics*, 1999, 302: 23
- 姜常义, 等. 南天山东段显生宙构造演化. 北京: 地质出版社, 2001. 1~160
- 徐备, 等. 塔里木板块震旦系碳同位素组成及其意义. *科学通报*, 2002, 47: 1740
- Xiao S H, et al. The Neoproterozoic Quruqtagh Group eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 2004, 130: 1
- Li Q G, et al. Nd isotopic characteristics of Proterozoic metasedimentary rocks and constraints on their provenance in the eastern seg-

- ment of Central Tianshan Belt, Xinjiang. *Progress in Natural Science*, 2003, 13: 908
- 21 Norrish K, et al. An accurate x-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33: 431
- 22 Balaram V, et al. Comparative study on the trace and rare earth element analysis of an Indian polymetallic nodule reference sample by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 1995, 120: 1401
- 23 Gromet L P, et al. The North American Shale Composite: Its composition, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 2469
- 24 Taylor S R, et al. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1985. 1~312
- 25 Zhang L F, et al. The composition of shales from the Ordos Basin, China: Effects of source weathering and diagenesis. *Sedimentary Geology*, 1998, 116: 129
- 26 Fedo C M, et al. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 1995, 23: 921
- 27 Condie K C, et al. Geochemical and detrital mode evidence for two sources of early Proterozoic sedimentary rocks from the Tonto Basin Supergroup, central Arizona. *Sedimentary Geology*, 1992, 77: 51
- 28 McLennan S M. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 1993, 101: 295
- 29 Fedo C M, et al. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition. *Precambrian Research*, 1997, 86: 210
- 30 Nesbitt H W, et al. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 1989, 97: 129
- 31 Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 1993, 104: 1
- 32 Young G M, et al. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: a chemostratigraphic approach. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111: 264
- 33 Cox R, et al. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919
- 34 McLennan S M, et al. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology*, 1991, 99: 1
- 35 Wronkiewicz D J, et al. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2401
- 36 Condie K C, et al. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97: 256
- 37 Wedepohl K H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 1217