

# 塔里木板块新元古代地层化学蚀变指数研究及其意义<sup>\*</sup>

刘兵<sup>1</sup> 徐备<sup>1\*\*</sup> 孟祥英<sup>2</sup> 寇晓威<sup>2</sup> 何金有<sup>1</sup> 卫巍<sup>1</sup> 米合<sup>3</sup>

LIU Bing<sup>1</sup>, XU Bei<sup>1</sup>, MENG XiangYing<sup>2</sup>, KOU XiaoWei<sup>2</sup>, HE JinYou<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup> and MI He<sup>3</sup>

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

2. 吉林省第三地质调查所, 四平 136000

3. 河北省地勘局第三地质大队, 张家口 075000

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Jilin Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Siping 136000, China

3. The Third Geological Team of Geology and Exploration Bureau in Hebei Province, Zhangjiakou 075000, China

2006-12-16 收稿, 2007-04-17 改回.

**Liu B, Xu B, Meng XY, Kou XW, He JY, Wei W and Mi H. 2007. Study on the chemical index of alteration of Neoproterozoic strata in the Tarim plate and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1664–1670**

**Abstract** The method of Chemical Index of Alteration (CIA) is applied to the researches of Neoproterozoic strata in Quruktagh and the discussion of paleoclimate changes. The experimental data show that samples of the Beiyixi Formation are characterized by low CIA value, ranging from 51 to 56, implicating the glacier environment. The CIA values of the samples of the Zhaobishan Formation are about 60, showing a warmer paleoclimate. The CIA values of most samples of the Aletonggol Formation range from 48 to 61 and abruptly rise to 69~71 in the top, showing another cold event during the Altonggol period ended by a warm environment. The CIA values range from 49 to 53 in the following Tereeken Formation, implying the third cold period. The average CIA value of the Zhamoketi, Yukengou and Shuiquan formations is 65, suggesting a warm sedimental condition. The CIA values of the Hankalchough Formation fall to about 56, implicating the forth cold event during the terminal Neoproterozoic. The evidences above show that there were four warm-cold conversions in the Neoproterozoic in Quruktagh, Xinjiang. Among these, the key issue is the cold-warm conversion abruptly happened within the Aletonggol period, which indicates a distinct process from cold to warm and can be regarded as another independent ice age between the Beiyixi and the Tereeken ice ages. This research supports the hypothesis of quartered ice age in the Tarim plate in the Neoproterozoic. By a correlation of the Neoproterozoic ice ages between Tarim and Yangtze plates, the former three of the four ice ages in the Tarim plate can be traced in Yangtze plate.

**Key words** Neoproterozoic, Chemical Alteration Index, Tarim plate, paleoclimate

**摘要** 本文应用化学蚀变指数(CIA)方法,研究新疆库鲁克塔格地区新元古代地层,并探讨沉积时期的气候环境。贝义西组总体 CIA 值较低,介于 51~56 之间,具冰期环境特征。照壁山组 CIA 值为 60 左右,表明气候有所变暖。阿勒通沟组的 CIA 值变化范围在 48~61 之间,顶部突变为 69~71,说明阿勒通沟期经历了另一次寒冷事件,并以温暖环境结束。其上的特瑞爱肯组 CIA 值介于 49~53 之间,说明第三次经历寒冷干燥的气候环境。扎莫克提组,育肯沟组和水泉组的 CIA 均值为 65,反映温暖条件下的沉积环境。新元古代末期汉格乐乔克组 CIA 值下降为 56,暗示第四次出现寒冷气候环境。以上特征表明新疆库鲁克塔格地区新元古代的气候环境出现四次冷热交替变化。其中尤为重要是阿勒通沟组中下部应为寒冷气候环境,而顶部突变为温暖气候环境,因此该组反映了一次明确的从冷到暖的气候变化过程,可以作为贝义西冰期和特瑞爱肯冰

\* 受国家自然科学基金项目(40572133,40032010)的资助。

第一作者简介:刘兵,男,1979年生,在读硕士生,构造地质学专业, E-mail: beareva@sina.com

\*\* 通讯作者:徐备, E-mail: bxu@pku.edu.cn

期之间的另一次独立冰期。本文的研究成果从地球化学角度支持塔里木板块新元古代四次冰期的划分方案。通过与扬子板块新元古代冰期划分方案的对比,认为塔里木板块新元古代四次冰期的前三次均已在华南板块以冰期或寒冷环境沉积形式出现。

**关键词** 新元古代; 化学蚀变指数; 塔里木板块; 古气候

**中图法分类号** P594.2; P534.3

## 1 引言

近年来,新元古代冰川和全球气候变化关系成为地质学界的研究热点(Zheng, 2003; 张同钢等, 2003; 张启锐等, 2002)。如 Hoffman 等通过对非洲纳米比亚和阿曼等地的研究,认为新元古代地球上曾发生过多次全球性冰川事件,地球从两极到赤道都被厚厚的冰雪覆盖,形成“雪球地球”(Hoffman *et al.*, 1998; 2002)。Jiang, Kennedy 等通过对 Marinoan 冰期后盖碳酸盐岩中特殊的沉积构造和低至  $-41\text{‰}$  的碳同位素值研究,认为甲烷释放可能导致冰期后的全球变暖。(Kennedy, 2001; Jiang *et al.*, 2003; 2006)。Donnadieu *et al.* (2004) 采用气候-地球化学耦合模型模拟 Rodinia 裂解的大陆位置与大气  $\text{CO}_2$  消耗的关系,结果表明,裂解大陆边缘和大量玄武岩的剧烈风化作用会造成大气  $\text{CO}_2$  浓度的降低,使全球气候由“温室”转变为“冰室”。Zheng 根据火山岩中低  $\delta^{18}\text{O}$  的锆石研究推断新元古代曾存在寒冷气候。(Zheng *et al.* 2007)

新疆塔里木板块库鲁克塔格地区发育世界罕见的多套冰成杂砾岩。前人曾从杂砾岩沉积特征、SHRIMP 年代学、碳氧同位素地层学等方面开展了沉积相和冰期对比工作(高振家等, 1984; 高振家等, 1985; Xu *et al.*, 2003; 2005; 陈鹏等, 2004; Xiao *et al.*, 2004; He *et al.*, 2007)。

化学蚀变指数(chemical index of alteration, 简称 CIA)最早由 Nesbitt 提出(Nesbitt *et al.*, 1982),起初用于判别物源区风化程度。随着研究的深入,它被应用于沉积物沉积时气候环境的判定(Nesbitt *et al.*, 1984; Young, 1999)。我国学者利用化学蚀变指数(CIA)对扬子板块新元古代地层研究的结果证明南华纪经历了两次由干燥寒冷到温暖潮湿的气候变化过程(Feng *et al.*, 2004; 王自强等, 2006)。李秋根(2004)等利用库鲁克塔格地区新元古代冰成杂砾岩中的 CIA 值和微量元素等地球化学特征,认为物源区古风化程度较低,不具有沉积再循环的特征。本文试图通过对新疆库鲁克塔格地区新元古代各地层组化学蚀变指数的分析,揭示各个冰期和间冰期沉积环境和气候特征的变化规律,以便探讨该地区新元古代的古气候环境特征和冰期期次。

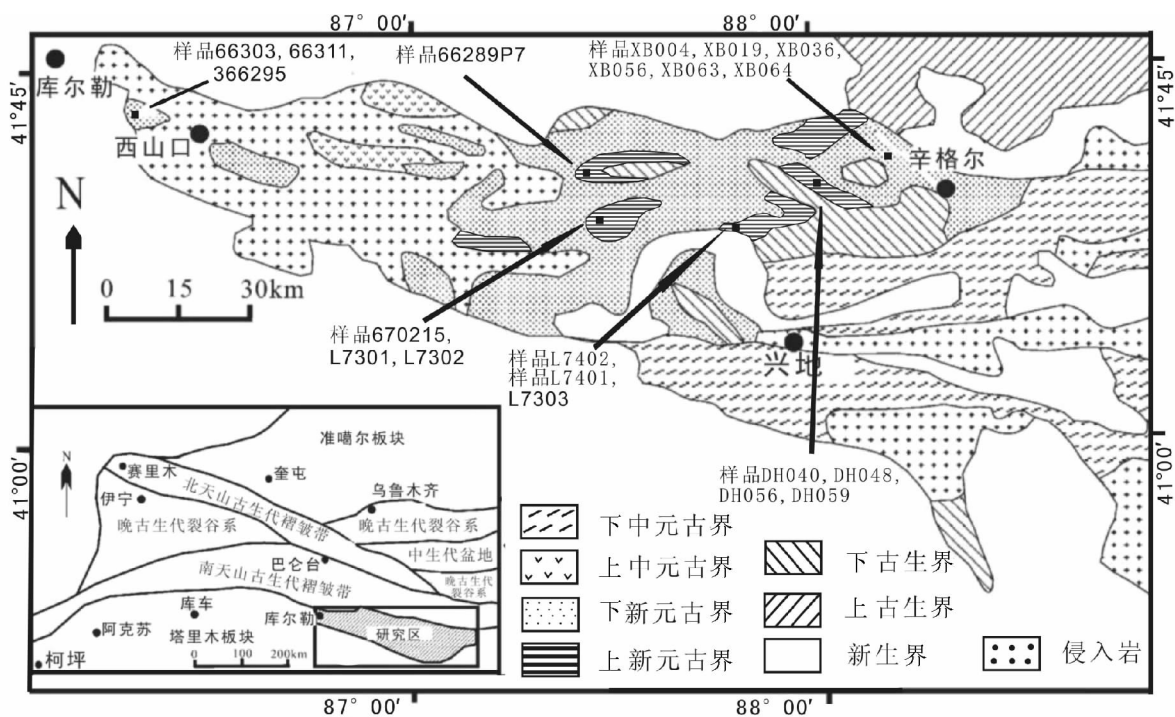


图1 新疆库鲁克塔格地区地质简图

Fig.1 Sketch geologic map of Quruqtagh area, Xinjiang

## 2 区域地质概况及采样

研究区位于塔里木板块东北缘的库鲁克塔格地区(图1)。高振家等(1985)将该区新元古界划分为8个组,从下至上依次为贝义西组、照壁山组、阿勒通沟组、特瑞爱肯组、扎莫克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔乔克组。其中贝义西、阿勒通沟组、特瑞爱肯和汉格尔乔克组为冰川沉积,分别与Sturtian冰期, Marinoan冰期和Post-Marinoan冰期对比(Xiao, 2004; Xu, 2005)。各组岩性特征和采样情况如下:

本次研究共采集上述八个组的样品36个,岩性为灰绿色泥岩,黑色页岩或冰成杂砾岩基质。样品分别采自库鲁克塔格地区的艾日斯克斯达坂、恰克马克铁什和西山口地区(图1)。

贝义西组与下伏青白口系北塞纳尔塔格组为角度不整合接触,顶部与照壁山组为平行不整合接触。底部为厚约25m的砾岩,下部以火山岩和砂砾岩沉积为主,中部为砂岩、粉砂岩,夹少量冰成杂砾岩和页岩,上部主要为冰成杂砾岩、碧玉岩和页岩。该组共采页岩样品5个。照壁山组以砂岩页岩为主,下部砂岩较多,上部为页岩、砂页互层沉积。共采样品8个,岩性为灰绿色泥岩。阿勒通沟组主要为冰成杂砾岩夹碎屑岩沉积,底部与照壁山组、顶部与特瑞爱肯组均为平行不整合接触。可分为上、下两段,下段为冰成杂砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩;上段为页岩、砂岩,顶部为厚2~3m的白云岩。共采泥岩、页岩类样品9个。特瑞爱肯组以厚层黑色冰成杂砾岩为特征,夹少量页岩、白云岩,厚度巨大,顶部发育厚2~5m的白云岩。该组采泥岩、页岩类样品3个。扎莫克提组下部为鲍马序列组成的浊积岩,上部为火山岩沉积。顶、底界面分别与育肯沟组、特瑞爱肯组整合接触。在该组采样3个,岩性为泥岩。育肯沟组岩性单一,是灰绿色泥岩或页岩组成的泥质细粒沉积物,共采泥岩样品4个。水泉组下部为粉晶白云岩或微晶灰岩,夹少量薄层泥、页岩,上部发育厚度不大的银灰色微层状粉砂质泥岩,共采样品2个,岩性为页岩。新元古代最上部的汉格尔乔克组是浅灰色和灰绿色冰成杂砾岩,顶部见厚约4m的灰色泥灰岩。共采冰成杂砾岩基质的样品2个。

## 3 样品分析

样品的化学分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。所有样品先用清水洗净,粗碎后再用去离子水清洗,研磨至200目以下。准确称取4g硼酸锂,偏硼酸锂和氟化锂混合溶剂,加入0.4g样品,放入铂金坩锅中搅拌均匀。加入3~4滴饱和溴化胺溶液在高频熔样机中熔样,制备成均匀的玻璃片。全部样品在XRF型X射线荧光光谱仪上进行主成分测试。分析过程中采用的标样为GSR5。常量元素的分析精度为2%。测试结果见表1。

另外,考虑到老地层中细屑岩的再循环沉积会改变其原始成分,需用另一个化学指数即成分变异指数ICV(index of compositional variability)判断物源区物质是否经历再循环沉积。成分变异指数定义为 $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$  (Cox, 1995) 主要成分指摩尔份数,  $CaO^*$  为硅酸盐中的CaO。当ICV值大于1时,表明其含粘土矿物较少,属构造活动时期的初始沉积;当ICV值小于1时,表明其含较多粘土矿物,可能经历了再沉积作用或是强烈风化条件下的初始沉积(Cullers *et al.*, 2000, 2002)。本研究中计算的ICV值绝大多数大于1,表明样品几乎未受到再沉积作用的影响,因而其CIA值是原始沉积环境的真实记录(表1)。

## 4 数据解释和讨论

### 4.1 研究区新元古代化学蚀变指数特征及气候环境分析

化学蚀变指数CIA的表达式为:  $CIA = [(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)) \times 100]$ 。主要成分指摩尔份数。 $CaO^*$  为硅酸盐中的CaO,即全岩中的CaO扣除掉化学沉积的CaO的摩尔份数。对于 $CaO^*$ 的计算和校正,McLennan *et al.* (1993)提出:  $CaO^* = CaO - (10/3 \times P_2O_5)$ ,且如果校正后的CaO摩尔数小于 $Na_2O$ 摩尔数,则采用校正后的CaO摩尔数作为 $CaO^*$ 的摩尔数;反之,则采用 $Na_2O$ 摩尔数作为 $CaO^*$ 的摩尔数。现代沉积物CIA值反映的气候条件大致如下(Nesbitt *et al.*, 1982; 1989): CIA值介于50~65之间,反映寒冷、干燥的气候条件下低等化学风化程度; CIA值介于65~85之间,反映温暖、湿润条件下中等化学风化程度; CIA值介于85~100之间,反映炎热、潮湿的热带亚热带条件下强烈的化学风化程度。

库鲁克塔格地区新元古代各组的化学蚀变指数投影于图2。贝义西组总体CIA值较低,介于51~56之间,具冰期环境特征。照壁山组CIA值为60左右,表明气候有所变暖。阿勒通沟组的CIA值变化范围在48~61之间,顶部突变为69~71,说明阿勒通沟期经历了另一次寒冷事件,并以温暖环境结束。其上的特瑞爱肯组CIA值介于49~53之间,说明第三次经历寒冷干燥的气候环境。扎莫克提组,育肯沟组和水泉组的CIA均值为65,反映温暖条件下的沉积环境。新元古代末期汉格尔乔克组CIA值下降为56,暗示第四次出现寒冷气候环境。以上特征表明新疆库鲁克塔格地区新元古代的气候环境出现四次冷暖交替变化。

新疆库鲁克塔格地区新元古代发育世界罕见的三次冰期,即贝义西冰期,特瑞爱肯冰期和汉格尔乔克冰期(高振家等,1984; Xiao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2005)。但曹仁关等(1991)又提出在特瑞爱肯组与阿勒通沟组之间新建一个黄羊沟组间冰期的意见,这样就分出了特瑞爱肯与阿勒通沟两个冰期,因此原来的三次冰期就变为四次冰期。高振家等(2003)最近也认为阿勒通沟组上部含碳酸盐较多,代表了一

表1 库鲁克塔格地区新元古界样品全岩常量元素化学分析(wt%)及其CIA、ICV值

Table 1 whole rock chemical analysis (wt%) and CIA, ICV values in the Neoproterozoic strata in Qumurtagh area

地层组	层位	序号	样品号	岩性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	烧失量	总量	CIA	ICV	
汉格尔乔克组	顶部	1	670215-1	杂砾岩基质	26.00	3.70	0.75	14.68	21.54	0.44	1.39	0.21	0.04	0.18	30.94	99.89	56	11.0	
	顶部	2	670215-3	杂砾岩基质	43.90	10.42	1.92	8.1	13.32	0.54	2.65	0.30	0.03	0.03	0.34	17.60	99.82	69	2.7
水泉组	顶部	3	L7402-1	黑色页岩	74.32	14.76	0.47	0.51	0.07	0.92	3.37	0.05	0.00	0.77	4.62	99.87	74	0.5	
	顶部	4	L7402-2	黑色页岩	81.08	10.67	0.21	0.26	0.33	1.39	2.15	0.04	0.00	0.56	3.22	99.90	68	0.6	
	顶部	5	L7401-1	灰绿色泥岩	64.76	16.37	6.26	1.69	0.22	3.11	2.67	0.10	0.01	0.01	0.90	3.77	99.86	67	1.1
	顶部	6	L7401-3	灰绿色泥岩	60.66	16.52	7.88	2.04	0.86	4.63	2.11	0.12	0.04	0.04	0.92	4.08	99.87	60	1.4
育肯沟组	上部	7	L7303-1	灰绿色泥岩	50.61	19.10	17.00	3.21	0.47	2.54	1.44	0.23	0.03	2.10	3.11	99.83	76	1.5	
	上部	8	L7303-5	灰绿色泥岩	54.89	19.91	10.31	1.64	0.60	3.57	2.91	0.24	0.02	0.02	1.23	4.48	99.80	68	1.1
扎莫克提组	底部	9	66289P7-1	灰绿色泥岩	60.48	17.67	4.92	2.71	0.53	4.33	3.68	0.16	0.02	0.02	0.79	4.53	99.82	60	1.3
	底部	10	66289P7-3	灰绿色泥岩	63.66	15.83	5.01	2.45	0.33	5.04	3.45	0.16	0.02	0.02	0.78	3.10	99.84	56	1.4
	底部	11	66289P7-6	灰绿色泥岩	60.27	17.69	5.63	2.66	0.26	4.39	4.34	0.17	0.02	0.02	0.87	3.52	99.80	60	1.3
特瑞爱肯组	顶部	12	DH040	泥质岩	60.29	14.43	6.41	2.41	2.49	4.49	3.21	0.21	0.04	1.11	4.70	99.80	49	1.8	
	上部	13	DH048	灰绿色页岩	60.05	14.97	7.45	3.61	0.32	6.59	2.11	0.17	0.04	0.04	0.95	3.59	99.86	53	1.9
	上部	14	DH056	页岩	61.76	14.78	5.70	2.60	1.05	5.59	2.71	0.21	0.05	0.05	0.86	4.52	99.84	52	1.7
	上部	15	66303-1	黑色页岩	61.39	14.60	7.36	4.07	0.13	0.08	5.33	0.06	0.01	0.90	5.95	99.88	71	1.5	
阿勒通沟组	上部	16	66303-3	黑色页岩	65.43	14.04	8.35	2.66	0.12	0.14	5.47	0.05	0.01	0.87	2.72	99.87	69	1.4	
	上部	17	66303-5	黑色页岩	65.74	14.94	5.59	3.63	0.18	0.10	5.50	0.06	0.01	0.90	3.22	99.87	70	1.4	
	下部	18	66311-1	灰绿色泥岩	67.33	12.95	4.98	1.92	1.09	5.86	1.94	0.17	0.03	0.68	2.89	99.84	49	1.7	
	下部	19	66311-4	灰绿色泥岩	66.85	12.66	4.65	2.20	2.23	4.73	2.43	0.16	0.03	0.54	3.40	99.87	47	1.8	
	下部	20	66311-5	灰绿色泥岩	62.63	15.01	4.73	2.58	1.83	6.23	2.68	0.22	0.03	0.71	3.19	99.84	48	1.8	
	下部	21	66311-6	灰绿色泥岩	59.75	16.01	5.99	3.39	1.49	6.17	2.56	0.22	0.05	0.74	3.46	99.83	51	1.8	
	底部	22	L7302-4	灰绿色泥岩	67.47	15.26	4.86	1.61	0.24	5.27	2.79	0.12	0.01	0.69	1.53	99.85	56	1.3	
	底部	23	L7302-6	绿色泥岩	60.65	18.71	5.27	1.87	0.26	4.57	4.02	0.15	0.01	0.84	3.49	99.84	61	1.1	
	顶部	24	L7301-1	灰绿色泥岩	69.43	14.10	3.05	0.51	0.58	5.98	2.46	0.17	0.01	0.68	2.90	99.86	52	1.2	
	顶部	25	L7301-2	灰绿色泥岩	66.76	15.70	4.02	0.63	0.39	4.95	3.24	0.14	0.02	0.02	0.70	3.31	99.85	57	1.1
照壁山组	顶部	26	L7301-3	灰绿色泥岩	65.83	16.24	3.77	0.68	0.39	5.84	2.86	0.15	0.02	0.73	3.34	99.87	55	1.1	
	顶部	27	L7301-4	灰绿色泥岩	67.38	15.22	3.13	0.55	0.40	4.89	2.89	0.14	0.01	0.66	4.57	99.85	57	1.0	
	上部	28	66295-1	灰绿色泥岩	60.68	18.09	5.75	1.85	2.32	2.29	4.51	0.19	0.03	0.65	3.37	99.74	59	1.2	
	上部	29	66295-2	灰绿色泥岩	60.63	18.22	5.53	1.72	2.31	2.78	4.56	0.22	0.03	0.65	3.10	99.74	58	1.2	
	上部	30	66295-5	灰绿色泥岩	62.05	16.22	4.91	1.85	2.11	6.72	2.17	0.35	0.06	0.80	2.58	99.82	50	1.6	
	上部	31	66295-7	灰绿色泥岩	76.25	12.48	1.57	0.91	1.46	0.96	3.31	0.06	0.02	0.20	2.56	99.77	65	0.8	
	顶部	32	XB064	页岩	65.88	15.18	3.89	1.72	0.48	6.13	2.87	0.14	0.01	0.66	2.87	99.84	53	1.4	
	顶部	33	XB063	页岩	68.08	13.83	3.72	1.87	0.38	5.94	2.66	0.12	0.02	0.58	2.65	99.85	51	1.5	
贝义西组	中部	34	XB036	页岩	61.22	16.01	5.92	3.03	0.80	4.21	3.40	0.58	0.02	0.84	3.78	99.82	60	1.5	
	下部	35	XB019	页岩	61.45	14.49	5.74	2.90	1.74	4.86	2.49	0.71	0.02	0.77	4.66	99.83	54	1.7	
	底部	36	XB004	绿色页岩	52.28	11.27	4.07	2.76	12.36	2.01	2.05	0.14	0.04	0.59	12.23	99.82	56	1.7	

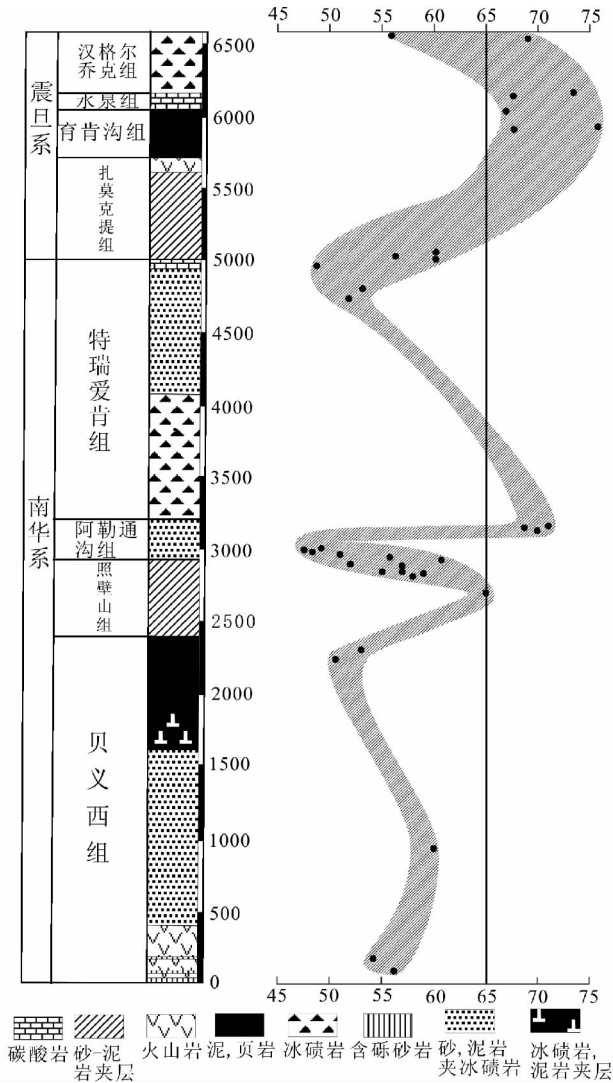


图2 新疆库鲁克塔格地区新元古代地层及 CIA 值  
Fig. 2 the Neoproterozoic strata and CIA values from Quruqtagh area, Xinjiang

表2 新疆与华南新元古代冰期对比

Table 2 the Neoproterozoic ice age correlation between Xinjiang and South China

长江三峡层型地区	贵州东部	湖南石门杨家坪	广西北部	新疆库鲁克塔格地区
灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	?
陡山沱组 (635.2 ± 0.6Ma) <sup>①</sup>	陡山沱组	陡山沱组	陡山沱组	汉格爾乔克组* 水泉组 育肯沟组 扎莫克提组 特瑞爱肯组*
南沱组*	南沱组*	南沱组*	泗里口组*	
莲沱组顶部*	大塘坡组 <sup>③</sup> (663 ± 4Ma)	大塘坡组	铁丝坳组*	阿勒通沟组顶部
莲沱组中上部	铁丝坳组*	古城组*	富祿组	阿勒通沟组中下部*
莲沱组下部* <sup>②</sup> (748 ± 12Ma)		(758 ± 23Ma) <sup>④</sup>	长安组* <sup>⑤</sup> (761 ± 8Ma)	照壁山组 贝义西组* <sup>⑥</sup> (755 ± 15Ma)
黄陵花岗岩 > 800Ma	两界河组 板溪群	青白口系老山崖组	丹洲群	北塞纳尔塔格组

注: \* 含寒冷环境沉积层 ||||| 地层缺失; ①数据引自 Condon et al. (2005); ②引自 Ma et al. (1984); ③引自 Zhou et al. (2004); ④引自尹崇玉等(2003); ⑤引自王自强等(2006); ⑥引自 Xu et al. (2005)

次间冰期的沉积,而阿勒通沟组下部可作为一次独立冰期与特瑞爱肯冰期分开(高振家等,2003)。本文的研究成果表明,阿勒通沟组中下部应为寒冷气候环境,而顶部突变为温暖气候环境,因此该组反映了一次明确的从冷到暖的气候变化过程,可以作为贝义西冰期和特瑞爱肯冰期之间的另一次冰期。这种认识从地球化学角度支持塔里木板块新元古代四次冰期的划分方案。

#### 4.2 库鲁克塔格地区与华南地区的冰期对比

我国南方扬子地区冰期地层的划分对比一直存在较大争议。关于上冰期的对比,随着南沱组年龄数据的获得,看法已趋于一致。目前主要分歧来自对下冰期和间冰期的认识。如张启锐等(2006)把下冰期的长安组、富祿组及与之相关的地层单元称为江口群,作为下冰期沉积的统一地层单元,相应地称为“江口冰期”,以与国际上的 Sturtian 冰期对应。也有学者主张在南沱冰期之前还有两次冰期,即较早的长安冰期与随后的铁丝坳(或古城、东山峰)冰期(表2),认为长安组( $<761 \pm 8\text{Ma}$ )和莲沱组下部( $748 \pm 12\text{Ma}$ )应为最早的寒冷环境沉积记录(Zhou et al., 2004; 王自强等, 2006; 冯连君等, 2003; Feng et al., 2004)。第二期以古城组和铁丝坳组冰成沉积为标志,其时限早于  $663 \pm 4\text{Ma}$ (Zhou et al., 2004)。最近冯连君等认为莲沱组中上部为寒冷环境沉积(冯连君等, 2006)。库鲁克塔格地区贝义西组底部火山岩的 SHRIMP 年龄为  $755 \pm 15\text{Ma}$ (Xu et al., 2005),这与南华系的底界年龄十分相近(Chu et al., 2005; Zhang et al., 2005),也说明贝义西冰期可以与华南长安冰期相对比(表2)。因此可以推测,贝义西组之上发育的阿勒通沟冰期可与长安冰成杂砾岩之上的铁丝坳冰期(古城冰期)对比,而根据碳同位素地层学所做的地层对比,特瑞爱肯冰期可与南沱冰期建立对应关系(He et al., 2007)。如果上述对比成立,则塔里木板块新元古代四次冰期的前三次均已在华南板块以冰期或寒冷环境沉积形式出现(对比结果见表2)。

国外一些研究表明新元古代全球可能存在四次冰期 (Hoffman *et al.*, 2002; MacGabhann, 2005; Stern, *et al.*, 2006), 从老到新分别为 Kaigas ( $\approx 735 \sim 770$ Ma), Stutian ( $\approx 680 \sim 715$ Ma), Marinoan ( $\approx 635 \sim 660$ Ma) 和 Gaskiers ( $\approx 582 \sim 585$ Ma)。本文从化学蚀变指数研究角度似乎支持这种观点。然而,塔里木板块新元古代冰期划分及其与全球冰期的对比显然需做大量研究。

## 5 结论

新疆库鲁克塔格地区新元古代地层的化学蚀变指数 (CIA) 研究表明,贝义西组总体 CIA 值较低,介于 51 ~ 56 之间,具冰期环境特征。照壁山组 CIA 值为 60 左右,表明气候有所变暖。阿勒通沟组的 CIA 值变化范围在 48 ~ 61 之间,顶部突变为 69 ~ 71,说明阿勒通沟期经历了另一次寒冷事件,并以温暖环境结束。其上的特瑞爱肯组 CIA 值介于 49 ~ 53 之间,说明第三次经历寒冷干燥的气候环境。扎莫克提组,育肯沟组和水泉组的 CIA 均值为 65,反映温暖条件下的沉积环境。新元古代末期汉格乐乔克组 CIA 值下降为 56,暗示第四次出现寒冷气候环境。

以上结果表明新疆库鲁克塔格地区新元古代的气候环境出现四次冷热交替变化。其中尤为重要是阿勒通沟组中下部应为寒冷气候环境,而顶部突变为温暖气候环境,因此该组反映了一次明确的从冷到暖的气候变化过程,可以作为贝义西冰期和特瑞爱肯冰期之间的另一次独立冰期。

本文的研究成果不但从地球化学角度支持塔里木板块新元古代四次冰期的划分方案,而且通过与扬子板块新元古代冰期划分方案的对比,认为塔里木板块新元古代四次冰期的前三次均已在华南板块以冰期或寒冷环境沉积形式出现。

**致谢** 实验室测试工作得到造山带与地壳演化教育部重点实验室杨斌老师的大力支持。本研究受国家自然科学基金项目 (40572133, 40032010) 的资助。

## References

Chen P, Xu B and Zheng HF. 2004. The snowball earth hypothesis and the Neoproterozoic glacial events in Tarim Block. *Xinjiang Geology*, 22(1):87-93 (in Chinese with English abstract)

Chu XL, Wolfgang T, Zhang QR, Chen FK and Huang J. 2005. U-Pb zircon age for the Nanhua-Sinian boundary. *Chinese Science Bulletin*, 50(7): 600-602

Condon D, Zhu MY and Bow ring S. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308: 95-98

Cox R, Lowe DR and Cullers RL. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica*, 59(14):2919-2940

Cullers RL and Podkovyrov VN. 2002. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic U group,

southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117:157-183

Cullers RL and Podkovyrov VN. 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling. *Precambrian Research*, 104:77-93

Donnadieu Y, Godderis Y, Ramstein G, Nedelec A and Meert J. 2004. A "snow ball Earth" climate triggered by continental break-up through changes in runoff. *Nature*, 428(18):303-306

Feng LJ, Chu XL, Zhang QR and Zhang TG. 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539-544 (in Chinese with English abstract)

Feng LJ, Chu XL, Zhang QR, Zhang TG, Li H and Jiang N. 2004. New evidence of deposition under cold climate for the Xieshuihe Formation of the Nanhua System in northwestern Hunan, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1420-1427

Gao ZJ, Zhu CS and Peng CW. 1984. Prechambrain Geology in Xinjiang. Urumqi: People's Press, 1-151 (in Chinese with English abstract)

Gao ZJ, Wang WY and Peng CW. 1985. The sinian system of xinjiang, Urumqi: People's Press, 1-173 (in Chinese with English abstract)

Gao ZJ and Chen KQ. 2003. The Nanhua System of Xinjiang and some geological issues of Nanhua System in China. *Geological Survey and Research*, 26(1):8-14 (in Chinese with English abstract)

He XB, Xu B and Yuan ZY. 2007. C isotope composition and correlation of the Upper Neoproterozoic strata in Keping area, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 504-511

Hoffman PF, Kaufman AJ, Halverson GP and Schrag DP. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 281: 1342-1346

Hoffman PF and Schrag DP. 2002. The snowball earth hypothesis: Testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14:129-155.

Jiang GQ, Kennedy MJ and Christie BN. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426:822-826

Jiang GQ, Kennedy MJ, Christie BN, Wu HC and Zhang SH. 2006. Stratigraphy, Sedimentary structures, and Textures of the Late Neoproterozoic Doushantuo cap carbonate in south China. *Journal of Sedimentary Research*, 76:978-995

Kennedy MJ, Christie BN and Sohl LE. 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals. *Geology*, 29:443-446

Li QG, Liu SW, Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zheng HF and Yang B. 2004. The Geochemistry Features of Sinian tillite and its provenance implications in Qurqutagh in Xinjiang. *Progress in Natural Science*, 14(9): 999-1005 (in Chinese with English abstract)

Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangze orogen, South China and correlation with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122:85-109

MacGabhann BA. 2005. Age constraints on Precambrian glaciations and the subdivision of Neoproterozoic time. IUGS Ediacaran Subcommission Circular, August 21

Ma G, LEE H and Zhang Z. 1984. An investigation of the limits of the Sinian System in South China. *Bulletin of the Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 8:1-29

Mc L and Scott M. 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101:295-303

Nesbitt HW and Young GM. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(21):715-717

Nesbitt HW and Young GM. 1984. Prediction of some weathering trends

- of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48:1523 – 1534
- Nebitt HW and Young GM. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2):129 – 147
- Stern RJ, Avigad D, Miller NR and Beyth M. 2006. Evidence for the snowball Earth hypothesis in the Arabian-Nubian Shield and the East African Orogen. *Journal of African Earth Sciences*, 44:1 – 20
- Wang ZQ, Yin CY, Gao LZ, Tang F, Liu YQ and Liu PJ. 2006. The character of the chemical Index of alteration and discussion of subdivision and correlation of the Nanhua System in Yichang Area. *Geological Review*, 52(5): 577 – 585 (in Chinese with English abstract)
- Xiao SH, Bao HM, Wang HF, Kaufman AJ, Zhou CM, Li GX, Yuan XL and Ling HF. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan; Evidence for a post-Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 130:1 – 26
- Xu B, Zheng HF, Yao HT and Li YA. 2003. C-isotope composition and significance of the Sinian on the Tarim plate. *Chinese Science Bulletin*, 48(4):385 – 390
- Xu B, Jian P, Zheng HF, Zou HB, Zhang LF and Liu DY. 2005. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China; Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations. *Precambrian Research*, 136:107 – 123
- Young GM and Nesbitt HW. 1999. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada; A chemostratigraphic approach. *GSA Bulletin*, 111(2):264 – 274
- Zhang QR, Chu XL, Zhang TG and Feng LJ. 2002. From global glaciation to snowball Earth; Recent researches on the Neoproterozoic glaciation events. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 473 – 481 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Jiang GQ, Zhang JM, Song B, Kennedy MJ and Christie BN. 2005. U-Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China; Constrains on late Neoproterozoic glaciations. *Geology*, 33(6): 473 – 476
- Zhang TG, Chu XL, Feng LJ, Zhang QR and Guo JP. 2003. The Effects of the Neoproterozoic snowball Earth on carbon and sulfur isotopic Compositions in Seawater. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6):487 – 493 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF. 2003. Neoproterozoic magmatic activity and global change. *Chinese Science Bulletin*, 48(16):1639 – 1656
- Zheng YF, Yuan BW, Bing G, Ren XC, Jun T and Zhao ZF. 2007. Tectonic driving of Neoproterozoic glaciations; Evidence from extreme oxygen isotope signature of meteoric water in granite. *Earth and Planetary Science Letters*, 256: 196 – 210
- Zhou CM, Tucker R, Xiao SH, Peng ZX, Yuan XL and Chen Z. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. *Geological Society of America*, 32(5):437 – 440

### 附中文参考文献

- 陈鹏,徐备,郑海飞. 2004. “雪球”假说与塔里木板块新元古代冰川事件. *新疆地质*, 22(1):87 – 93
- 曹仁关. 1991. 新疆南雅尔当山震旦系的新观察. *地质通报*, (01): 30 – 34
- 冯连君,储雪蕾,张启锐,张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地学前缘(中国地质大学,北京)*, 10(4): 539 – 544
- 冯连君,储雪蕾,张同钢,黄晶. 2006. 莲沱砂岩:南华大冰期前气候转冷的沉积记录. *岩石学报*, 22(9):2387 – 2393
- 高振家,朱诚顺. 1984. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1 – 151
- 高振家,王务严,彭昌文. 1985. 新疆阿克苏—乌什地区震旦系. 乌鲁木齐:新疆人民出版社
- 高振家,陈克强. 2003. 新疆的南华系及我国南华系的几个地质问题:纪念恩师王曰伦先生诞辰一百周年. *地质调查与研究*, 26(1):8 – 14
- 李秋根,刘树文,韩宝福,郭召杰,张志诚,郑海飞,杨斌. 2004. 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. *自然科学进展*, 14(9): 999 – 1005
- 王自强,尹崇玉,高林志,唐烽,柳永清,刘鹏举. 2006. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论. *地质论评*, 52(5): 577 – 585
- 尹崇玉,刘敦一,高林志. 2003. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP II 定年证据. *科学通报*, 48(16):1721 – 1725
- 张启锐,储雪蕾,张同钢,冯连君. 2002. 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*, 8(4): 473 – 481
- 张启锐,储雪蕾. 2006. 扬子地区江口冰期地层的划分对比与南华系层型剖面. *地层学杂志*, 30(4)306 – 314
- 张同钢,储雪蕾,冯连君,张启锐,郭建平. 2003. 新元古代“雪球”事件对海水碳、硫同位素组成的影响. *地球学报*, 24(6):487 – 493