南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束

李双应,杨栋栋,王松,万秋,王道轩
合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥,230009

内容提要:晚古生代是天山构造带发生变革的关键时期,对南天山层序清楚尚未变质的晚古生代沉积记录进行研究,对于恢复南天山晚古生代的构造古地理、并对其构造演化史提供约束,具有重要地质意义。南天山中段上石炭统阿依里河组砂岩主要为含砾砂岩、岩屑砂岩、次岩屑砂岩、长石砂岩和含铁岩屑砂岩,砂岩中石英颗粒含量67.41%,岩屑25.07%,长石7.52%,Q/(F+L)平均为2.07,岩石具有低的结构成熟度和成分成熟度。碎屑岩SiO_2平均为64.78%,Al_2O_3 10.22%,TiO_2 0.35%,TFe_2O_3 4.23%,MgO 1.37%,CaO 7.16%,K_2O 2.13%,Na_2O 0.93%。稀土总量∑REE平均为130.1×10^{-6},δEu异常0.74,La_N/Yb_N 9.4。砂岩中重矿物组合主要为锆石、白钛石、赤褐铁矿和黄铁矿,其次有电气石、磷灰石、金红石、石榴子石、铬铁矿和锐钛矿。阿依里河组的源岩主要为中-酸性火成岩、低级-中级变质岩和沉积岩,还有少量基性岩等。根据QFL判别,砂岩物源区主要为消减杂岩源区,其次是弧造山带和碰撞造山带源区。根据稀土元素、微量元素特征,以及Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10和Ti/Zr-La/Sc判别图,阿依里河组碎屑岩物源区属于大陆岛弧区和活动大陆边缘区,与上地壳源区相比,有铁镁质的叠加。校正后的碎屑岩化学风化指数CIAcorr.平均为71.25(52.25~89.40),指示源区主要经历了中等程度的化学风化。砂岩碎屑LA-ICP-Ms锆石U-Pb年龄测定表明,锆石年龄分为两期,主要为404~542 Ma,其次是1797~2436 Ma,表明物源区地质体时代主要为早古生代和古元古代,它们和南天山早古生代消减带弧和塔里木北缘库鲁克塔格古元古代基底比较吻合。同时,进一步将南天山造山带开始碰撞的时间限制在早泥盆世末—中泥盆世,俯冲汇聚在早古生代,大规模的隆升剥露在二叠纪以后。

关键词:碎屑岩成分;碎屑锆石年代学;物源分析;构造演化;上石炭统;南天山

晚古生代是天山构造带发生变革的关键时期,重大地质事件纷繁发育,板块的俯冲碰撞、盆山系统的转换、岩浆侵入和喷发、岩石的变形与变质、地质单元的变格与变位等等(Windley et al., 1990; Allen et al., 1991)。因此,恢复该时期的古地理和地质发展演化历史,具有重要意义。但是,由于天山构造带在中—新生代遭受了大规模的改造作用,强烈的逆冲和推覆、剧烈的隆升和剥蚀,使得造山带本身的记录已经残缺不全,导致对造山带的认识出现多解性(Gao et al., 1998; Xiao et al., 2008; 何国琦等,2001)。然而,造山带周缘盆地沉积物比较准确的记录着物源区的成分特征,记录着造山带的构造演化历史。所以,对由碰撞带产生的沉积物源区进行研究,常常能够成功的辨认出不同时段被侵蚀的岩石类型,发现由于遭受剥蚀而在现今造山带已经完全消逝的构造单元,能够比较真实地恢复造山带的古地理格局,再造造山带隆升剥蚀历史。

塔里木盆地与南天山相邻,盆地边缘沉积物记录着天山的隆升和剥蚀历史,因此,塔里木盆地构造古地理和物源研究近年来已经成为热点之一,如盆地演化对天山构造带演化的制约(Allen et al., 1991)、中-新生代沉积记录及其对天山造山带隆升剥蚀历史的约束等(Li Zhong et al., 2010)。但是,人们对南天山石炭系的专门研究却很少,而晚古生代特别是石炭纪被认为是南天山构造演化的重要阶段(Allen et al., 1991;高俊等,2006);此外,研究区位于塔里木北缘断裂以北的南天山中段(图1),沉积地层应该是晚古生代南天山构造演化的直接响应;三是在研究区发育一套层序完整、时代清楚、尚未变质的上石炭统阿依里河组碎屑岩,为沉积—构

注:本文为国家自然科学基金项目(编号40972082和41172097)和中石化海相前瞻性项目资助的成果。
收稿日期:2013-04-18;改回日期:2013-12-01;责任编辑:黄敏。
作者简介:李双应,男,1956年生。博士,教授,沉积地质学专业。通信地址:230009,合肥工业大学资源与环境工程学院;E-mail:lsysteven@126.com。

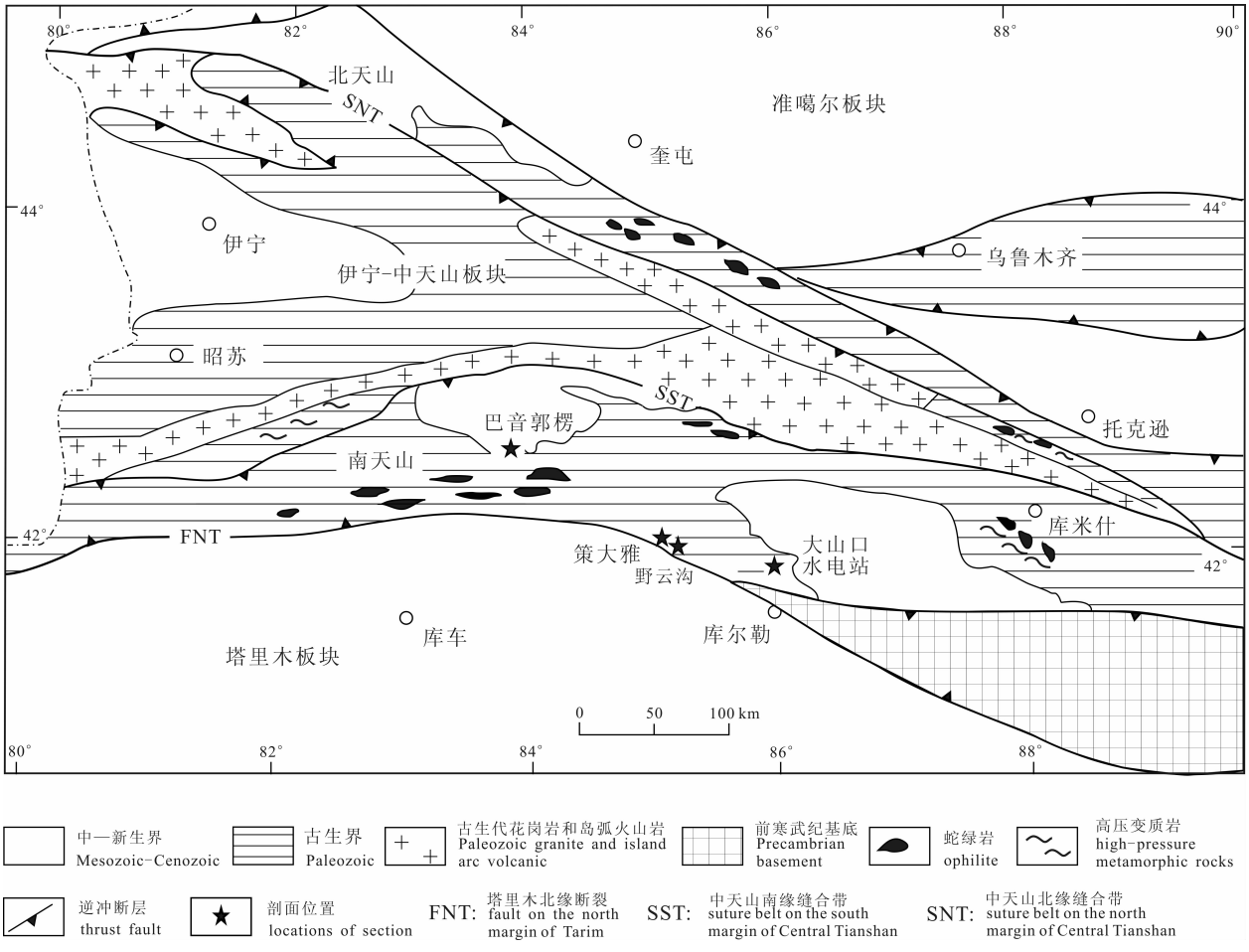

图 1 西南天山区域地质和剖面位置(据高俊等,2006 修改)

Fig. 1 Regional geology of Southwest Tianshan and profile locations (Revised from Gao Jun et al., 2006)

造响应研究奠定了基础。虽然,王家生等(1999)通过轮台野云沟石炭系研究,发现了深海扇浊流沉积,并根据砂岩碎屑组分和地球化学成分判别,认为构造背景属于再循环造山带物源区或被动大陆边缘物源区,但是,还有许多问题需要进一步回答。构成南天山石炭系的物源主要地质体的物质组成特征是什么?如何具体的限制物源类型并且与塔里木以及南天山不同构造地层单元建立对应关系?南天山古生代俯冲、碰撞隆升时代的确定是否可以通过沉积记录进行约束?

沉积岩物源研究不仅能够确定物源区的岩石类型、构造背景、搬运方式,而且能够揭示盆山耦合关系、对重建物源区构造演化历史模型提供制约,因此,得到人们的广泛关注(Dickinson et al., 1979; Bhatia, 1983; Li Renwei et al., 2004; Zhang KaiJun et al., 2008)。随着近年来物源研究的进展,单一的方法由于相互之间缺少验证基本上已经被舍弃,更多的是采用综合的研究方法(Hallsworth et al., 2000)。矿物学、地球化学和同位素年代学相结合是限定沉积岩物源区的强有力的工具,矿物学和地球化学资料提供了源区岩石学的信息,同位素年代学资料确定了地质体的年代和地壳形成过程中的主要事件,两者结合有助于确定物源区地质体的年代和性质。本文通过对南天山中段上石炭统碎屑岩碎屑组分特征、地球化学特征和重矿物研究,结合碎屑锆石年代学分析,恢复物源区的主要物质组成和风化作用,确定物源区的构造背景以及地质时代属性,并试图通过沉积记录对南天山晚古生代的古海洋闭合以及碰撞时代进行限定。

1 区域地质及地层

天山造山带东西长约 2500 km,南北宽数百公里,是世界上规模巨大的造山带之一(Allen et al., 1991)。它南接塔里木盆地,北邻准噶尔盆地,而且本身被南北两条缝合带分成三部分,分别称为南天山、中天山和北天山。中国境内的南天山是指塔里

木盆地北缘山前断裂(FNT)以北,中天山南缘缝合带(SST)以南的山系,向西延入中亚(Allen et al.,1991;夏林圻等,2002;高俊等,2006)(图 1)。在南天山东南部的库鲁克塔格,主要出露前寒武纪基底,其余部分为古生代未变质的沉积岩、蛇绿岩、侵入岩和火山岩,以及中—新生代沉积物。

综合研究区现有的研究成果(贾承造等,2004;朱志新等,2005[1]),南天山出露的古生代及其更老的地层有太古界—古元古界兴地塔格群、中新元古界阿克苏群,上奥陶统伊南里克组、上志留统科克铁克达坂组,下泥盆统阿尔腾柯斯组、中泥盆统萨阿尔明组,下石炭统干草湖组和野云沟组、上石炭统阿依里河组和二叠系康克林组。

南天山普遍缺失早石炭世岩关早期沉积。干草湖组属于早石炭世岩关晚期和大塘早期,为钙质砾岩、砂岩及粉砂岩夹灰岩,分布局限。野云沟组属于早石炭世大塘中—晚期沉积,广泛分布于阔克沙勒岭南坡、哈尔克山、虎拉山和克孜勒塔格等地,厚度 200～812 m,由碳酸盐岩和碎屑岩组成,含丰富的底栖生物化石,如珊瑚、腕足类、蜓类等。野云沟组与下伏下、中泥盆统呈超覆不整合关系,与上覆上石炭统阿依里河组为整合连续沉积。阿依里河组在南天山北部地区分布广泛,整合于野云沟组之上或者超覆在不同时代地层之上,东西方向相变明显,西部以碳酸盐岩为主,向东部碎屑岩比例增加。在西部哈尔克山一带,下部以碎屑岩为主,上部是碳酸盐岩,中部虎拉山和开都河中游主要为碎屑岩类,东部克孜勒塔格一带缺失。厚 199.4～753.4 m。

周洪瑞等(1998)将南天山的地层分区自北向南划分为四个地层小区,那拉提—巴仑台地层小区,哈尔克山北坡地层小区,哈尔克山南坡地层小区和塔里木北缘地层小区。研究区位于南天山中段的哈尔克山地区和和静—库米什地区,本次研究的三条剖面包括轮台西北的策大雅、和静大山口水电站以及巴音郭楞南侧独库公路剖面,是后三个小区的代表(图 1)。该地区石炭系地层特征基本类似,在虎拉山和松树达坂至柳树沟一带,石炭系出露完整。开都河大山口水电站剖面位于虎拉山北缘,露头良好,层序完整,界限清楚,可以作为阿依里河组代表。

上石炭统阿依里河组,主要为灰黑色板岩、页岩、细粒石英长石砂岩、砾岩,夹微晶灰岩,厚度为 886.5 m,未见顶,自上而下为:

⑥ 黑色炭质泥岩、页岩夹砂岩和砾岩,页/砾岩比为 10∶1,厚 362.1 m;

⑤ 青灰色,灰黄色薄层粉砂质页岩,夹中层状细砾岩,厚 321.2 m;

④ 青灰色次岩屑砂岩,底部为砾岩,砾石主要为石英岩,厚 35.0 m;

③ 灰色、深灰色生物碎屑灰岩、粉晶灰岩和粉砂岩、细砂岩构成旋回沉积,厚 27.8 m;

② 灰白色厚层到块状中粒岩屑石英砂岩,含砾粗砂岩,砾石成分主要为石英,颗粒大小为 3～8 cm,圆状到次圆状。厚 58.2 m;

① 灰黄色、灰色薄层－中层细粒－中粒岩屑砂岩、含砾砂岩和灰色微晶灰岩构成旋回沉积。厚 82.2 m;

下伏地层:野云沟组深灰色、灰黑色中层到薄层砾状灰岩、瘤状灰岩、生物碎屑灰岩和微晶灰岩。

2 碎屑岩成分特征

2.1 砂岩碎屑组分特征

南天山中段上石炭统阿依里河组碎屑岩发育,约占剖面厚度的 50%以上。砂岩颗粒大小一般为 0.1～0.25 mm,属细粒结构,颗粒大者可达 0.5～1 mm,分选较差。磨圆度较低,多为次棱角状～棱角状,杂基含量偏高,一般在 10%～20%。砂岩的众数丰度通过薄片中颗粒的点统计来确定,每个薄片颗粒 400～500 个,为了缩小颗粒大小变化的影响,岩屑采用 Gazzi-Dickinson 方法。22 个砂岩样品分析表明(表 1),阿依里河组砂岩石英含量平均为67.41% (49.3%～85.8%),长石平均含量为 7.52%(0%～27.9%),岩屑平均含量为 25.07% (8.2%～43.5%)。岩屑中,变质岩岩屑平均 53.84%(6.4%～90.2%),火山(成)岩岩屑平均 24.39%(3.8%～71.9%),沉积岩岩屑平均21.77% (6.5%～57.4%)。

2.2 碎屑岩地球化学特征

大山口水电站、巴音郭楞和野云沟 3 条剖面 13 个砂岩样品平均含量为 SiO_2 66.01%,Al_2O_3 8.37%、TiO_2 0.37%、TFe_2O_3 4.35%、MgO 1.24%、CaO 7.95%、K_2O 1.63%、Na_2O 0.92%。与全球古生代造山带砂岩(Ronov et al.,1991)相比,SiO_2 含量明显偏高,Al_2O_3、CaO 和 Na_2O 含量明显偏低。6 个页岩样品平均含量为 SiO_2 62.11%、$Al_2O_3$14.22%、TiO_2 0.65%、TFe_2O_3 3.96%、MgO 1.66%、CaO5.45%、K_2O 3.28%、Na_2O 0.94%,与 PAAS(Taylor et al.,1985)相比,Al_2O_3 和 TFe_2O_3 含量偏低,CaO 含量偏高,其余氧化物含量基本相

表 1 南天山上石炭统统阿依里河组砂岩碎屑组分统计数据

Table 1 Data of detrital compositions of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan

位置	样品号	QFL(%)			LmLvLs(%)			QmFLt(%)			Q/(F+L)
		Q	F	L	Lm	Lv	Ls	Qm	F	Lt	
轮台策大雅	T022	71.2	11.8	17	33.3	32.1	34.6	55.7	11.8	32.5	2.47
	T023	60	27.9	12.1	13	50	37	50.1	27.9	22	1.50
	T025	64	9.1	26.9	39.3	31.3	29.5	51.1	9.1	39.8	1.78
	T027	72.2	12.2	15.6	12.5	71.9	15.6	46.8	12.2	41	2.60
	T028	63.6	10.2	26.2	36.9	40.5	22.5	45.6	10.2	44.2	1.75
	T029	52.8	10.1	37	52.7	32	15.3	40.2	10.1	49.6	1.12
	T030	61.5	12	26.4	34.5	10.9	54.5	57.7	12	30.3	1.60
	T031	57.6	9.1	33.3	38.3	43.8	17.9	43.2	9.1	47.7	1.36
和静大山口水电站	T578	50.7	5.8	43.5	13.2	31.6	55.2	49.7	5.8	44.5	1.03
	T655	74.7	0	25.3	78.6	8.5	12.8	27.7	0	72.3	2.95
	T656	80.2	2.2	17.6	62.5	6.3	31.3	73.3	2.2	24.5	4.05
	T658	69.6	1.2	29.2	71.1	23.1	5.8	68	1.2	30.8	2.29
	T660	78.4	0.3	21.3	85.5	7.9	6.6	74.2	0.3	25.5	3.63
	T661	70.2	0.5	29.3	86.1	1.6	12.3	62.3	0.5	37.2	2.36
	T666	70.8	0	29.2	90.2	7.2	2.6	20.6	0	79.4	2.43
	T671	73.6	0	26.4	73.7	15	11.3	25.4	0	74.6	2.79
	T678	73	6.8	20.3	67.7	22.9	9.4	50.2	6.8	43	2.69
巴音郭楞	T689	61.8	12.7	25.5	86.8	3.8	9.4	46.9	12.7	40.4	1.62
	T690	49.3	9.4	41.2	6.4	36.2	57.4	47.6	9.4	43	0.97
	T705	74.6	10.6	14.9	71	19.4	9.7	62.6	10.6	26.9	2.93
	T706	85.8	6.1	8.2	77.4	16.1	6.5	72.1	6.1	21.8	6.00
平均值		67.41	7.52	25.07	53.84	24.39	21.77	51.00	7.52	41.48	2.07

似(表 2)。碎屑岩 ∑REE 平均为 130.1×10^{-6}($49.1\times10^{-6}\sim220.4\times10^{-6}$),Eu 异常为 0.74(0.61～1.10)。轻稀土略有富集,La/Yb 为 13.97(10.3～18.1),La_N/Yb_N 为 9.4。只有大山口水电站一个砂岩样品(T678)的稀土值表现异常,∑REE 高达 348.6×10^{-6},轻稀土特别富集,La/Yb 为 85.2,La_N/Yb_N 为 57.4(表 3)。

空间上,从轮台野云沟到大山口水电站再到巴音郭楞,∑REE 逐渐降低,$187.5\times10^{-6}\rightarrow131.2\times10^{-6}\rightarrow85.95\times10^{-6}$;Eu 异常在野云沟和大山口水电站剖面比较一致,δEu 平均值总体较低为 0.60～0.66,但是在巴音郭楞剖面明显增高,δEu 平均值为 0.91;轻稀土富集程度也比较类似,在野云沟和大山口水电站剖面基本一致,La/Yb 平均值为 13～12.97,在巴音郭楞剖面稍高为 16.6;La_N/Yb_N 有类似的特征,分别为 8.7、8.7 和 11.2;Ce 异常刚好相反,在野云沟剖面 δCe 平均值为 1.0,在大山口水电站和巴音郭楞剖面比较一致,δCe 平均值稍低,均为 0.87。

阿依里河组碎屑岩样品特征微量元素 Tu、U、Hf、Sc、Zr、Y 平均含量分别为 7.78×10^{-6}、2.44×10^{-6}、3.23×10^{-6}、6.82×10^{-6}、121.8×10^{-6} 和 17.5×10^{-6},Rb/Sr、Th/U、La/Y、La/Sc、Th/Sc 比值分别为 0.28、3.14、1.27、3.55 和 1.19(表 4)。

2.3 重矿物特征

8 个重砂样品中,赤褐铁矿和黄铁矿主要为沉积成因,不作为物源分析。碎屑重矿物主要为锆石和白钛石(表 5)。锆石,平均为 20.6%,并且分布在所有剖面的样品中。锆石主要为粉黄色、深玫瑰色、浅玫瑰色,次滚圆—次棱角粒状、柱状,晶体表面较光滑,裂纹比较发育,个别晶体内可见固相包裹体和气液包裹体。锆石磨圆度较低,分选一般,属于近距离搬运;白钛石,灰白、黄色,次滚圆粒状,平均 14.5%,主要分布在策大雅和大山口剖面,在巴音郭楞剖面很少。其次有电气石、磷灰石、金红石、石榴石、铬铁矿和锐钛矿,平均含量 1.0%～2.6%。此外,在和静县大山口剖面发现辉石和角闪石,在轮台县策大雅剖面发现绿泥石和褐帘石。

2.4 砂岩碎屑锆石年龄

由于碎屑锆石年龄结构不受沉积循环过程各种分异作用的影响,它为判断物源区特征以及位置提供了有效的直接证据(Morton et al., 1996)。本次锆石年龄测定由西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成,分析条件和实验程序见第五春荣等(2008)。

表 2　南天山上石炭统阿依里河组砂岩主元素含量(%)以及 K_2O 和 CIA 校正计算

Table 2　Major element concentrations in the sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan (%) and K_2O and CIA correction calculation

No.	位置	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	总量	C	N	P	C*	A	CN=C*+N	K	Kcorr.	CIA	CIAcorr.
T578-ss	大山口水电站	62.46	0.30	6.55	3.49	0.13	1.06	12.13	1.03	1.16	0.07	11.73	100.1	0.216	0.017	0.00049	0.017	0.064	0.0336	0.0123	0.0069	58.22	61.22
T657-ss		44.08	0.18	4.76	2.77	0.015	1.24	22.29	0.36	0.85	—	23.21	99.8	0.397	0.006	—	0.006	0.047	0.0118	0.0090	0.0042	69.29	74.62
T666-ss		83.35	0.17	5.12	3.34	0.002	0.52	1.74	0.26	0.66	0.1	4.95	100.2	0.031	0.004	0.00070	0.004	0.050	0.0082	0.0070	0.0041	76.69	80.22
T671-ss		56.39	0.50	7.67	8.97	0.015	1.25	12.52	0.48	1.16	0.044	11.01	100.0	0.223	0.008	0.00031	0.008	0.075	0.0157	0.0123	0.0064	72.77	77.17
T678-ss		79.06	0.23	6.30	3.67	0.005	0.55	2.31	0.48	0.87	0.006	7.01	100.5	0.041	0.008	0.00004	0.041	0.062	0.0488	0.0092	0.0079	51.65	52.25
T690-ss	巴音郭楞	55.48	0.18	4.68	2.86	0.08	1.92	17.02	1.05	0.77	0.06	16.04	100.1	0.303	0.017	0.00042	0.017	0.046	0.0339	0.0082	0.0057	52.20	53.73
T695-s		44.11	0.49	11.21	4.43	0.07	2.15	17.01	0.93	2.3	0.12	17.23	100.1	0.303	0.015	0.00085	0.015	0.110	0.0300	0.0244	0.0099	66.90	73.36
T700-ss		53.05	0.59	13.32	5.2	0.07	3.23	9.02	1.52	2.55	0.15	11.53	100.2	0.161	0.025	0.00106	0.025	0.131	0.0495	0.0271	0.0128	63.10	67.76
T703-s		43.03	0.51	11.26	4.98	0.08	4.44	13.5	0.98	2.73	0.15	18.35	100.0	0.241	0.016	0.00106	0.016	0.110	0.0318	0.0290	0.0101	64.41	72.43
49R1-s	轮台野云沟(王家生等,1999)	70.66	0.93	20.60	1.11	0.003	0.48	0.14	0.46	5.05	0.04		99.5	0.002	0.007	0.00028	0.002	0.202	0.0090	0.0536	0.0150	76.35	89.40
49R2-s		74.43	0.6	11.72	4.49	0.002	0.26	0.42	0.8	2.81	0.1		95.6	0.007	0.013	0.00070	0.005	0.115	0.0180	0.0298	0.0094	70.60	80.71
56R3-s		62.96	0.93	20.86	5.47	0.02	1.38	0.32	1.09	4.59	0.11		97.7	0.006	0.018	0.00077	0.003	0.205	0.0207	0.0487	0.0160	74.70	84.81
43R1-s		77.48	0.42	9.65	3.28	0.05	1.24	1.32	1.4	2.17	0.08		97.1	0.024	0.023	0.00056	0.023	0.095	0.0456	0.0230	0.0100	58.06	63.10
44R1-ss		64.91	0.18	4.98	2.95	0.10	0.7	13.27	0.73	0.89	0.06		88.8	0.237	0.012	0.00042	0.012	0.049	0.0238	0.0094	0.0052	59.59	62.87
47C1-ss		80.51	0.38	9.50	2.63	0.04	0.94	0.38	1.11	2.56	0.06		98.1	0.007	0.018	0.00042	0.005	0.093	0.0233	0.0272	0.0083	64.83	74.68
48S1-ss		66.06	0.74	14.85	7.43	0.10	1.68	0.57	1.19	2.54	0.09		95.3	0.010	0.019	0.00063	0.008	0.146	0.0273	0.0270	0.0123	72.92	78.69
48S2-ss		68.02	0.43	10.33	4.94	0.13	0.7	5.22	1.37	2.06	0.06		93.3	0.093	0.022	0.00042	0.022	0.101	0.0441	0.0219	0.0103	60.49	64.99
54R1-ss		77.21	0.52	12.13	2.68	0.04	0.81	0.3	1.08	3.51	0.06		98.3	0.005	0.017	0.00042	0.004	0.119	0.0214	0.0373	0.0100	66.99	79.16
56R1-ss		67.49	0.36	8.65	5.68	0.37	1.5	6.61	1.28	1.63	0.06		93.6	0.118	0.021	0.00042	0.021	0.085	0.0417	0.0173	0.0090	59.05	62.67
Pz 造山带*		58.48	0.54	10.62	4.29	0.13	2.16	9.73	2.48	1.73	0.14	9.87	100.0										
PAAS**		62.8	0.99	18.9	7.18	0.11	2.19	1.29	1.19	3.68	0.16		98.5										

s—页岩;ss—砂岩;*—全球 古生代造山带数据来自 Ronov et al.(1991);**—PAAS—澳大利亚后太古代页岩数据来自 Taylor et al.(1985)。分析测试由中国科学院地质与地球物理研究所完成,常量元素为 X 荧光光谱分析,表 3 和表 4 微量元素与稀土元素采用等离子质谱仪分析。

表 3 南天山上石炭统阿依里河组砂岩稀土元素含量($\times10^{-6}$)

Table 3 REE concentrations of sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan ($\times10^{-6}$)

位置	巴音郭楞				和静大山口水电站					轮台野云沟*			平均
样号	T703	T700	T695	T690	T578	T657	T666	T671	T678	R1	R2	R3	值**
La	33.14	36.51	30.64	12.23	17.68	19.10	11.50	24.30	90.3	41.7	31.7	44.6	27.6
Ce	62.50	68.70	57.71	22.03	31.37	39.40	19.30	46.00	161.0	85.9	64.9	98.9	54.3
Pr	7.65	8.27	7.07	2.78	3.80	4.78	2.44	5.82	18.9	9.99	7.01	10.7	6.39
Nd	27.85	30.34	26.61	10.99	13.97	18.00	9.12	22.20	61.2	34.2	26.3	37.6	23.38
Sm	5.43	5.70	5.17	2.29	2.65	3.65	1.43	4.10	5.57	6.36	4.77	7.3	4.44
Eu	1.12	1.08	1.02	0.57	0.63	0.83	0.52	1.43	1.18	1.20	0.81	1.36	0.96
Gd	5.06	5.03	4.69	2.11	2.44	3.44	1.45	3.74	4.93	5.01	3.77	5.92	3.88
Tb	0.78	0.79	0.75	0.35	0.39	0.60	0.23	0.61	0.50	0.75	0.59	0.89	0.61
Dy	4.42	4.45	4.26	2.02	2.30	3.62	1.19	3.59	1.99	2.39	3.3	5.37	3.35
Ho	0.90	0.93	0.88	0.40	0.48	0.66	0.22	0.62	0.32	0.89	0.67	1.04	0.70
Er	2.47	2.56	2.43	1.10	1.35	2.35	0.79	2.15	1.39	2.39	1.88	2.8	2.02
Tm	0.37	0.40	0.37	0.17	0.21	0.22	0.10	0.23	0.11	0.41	0.29	0.47	0.29
Yb	2.42	2.53	2.40	1.09	1.39	1.85	0.72	1.89	1.06	2.52	1.75	2.97	1.96
Lu	0.37	0.39	0.36	0.16	0.21	0.27	0.11	0.36	0.19	0.42	0.25	0.47	0.31
∑REE	154.5	167.7	144.3	58.3	78.9	98.8	49.1	117.0	348.6	194.1	148.0	220.4	130.1
δEu	0.64	0.60	0.62	0.78	0.74	0.71	1.09	1.10	0.67	0.63	0.56	0.61	0.74
La/Yb	13.72	14.41	12.79	11.21	12.73	10.32	15.97	12.86	85.19	16.55	18.11	15.02	13.97
La_N/Yb_N	9.25	9.72	8.62	7.56	8.58	6.96	10.77	8.67	57.43	11.16	12.21	10.12	9.42
δCe	0.89	0.89	0.88	0.83	0.86	0.94	0.81	0.87	0.90	0.98	0.97	1.05	0.91
∑REE	154.5	167.7	144.3	58.3	78.9	98.8	49.1	117.0	348.6	194.1	148.0	220.4	130.1

注:$\delta Eu=(Eu/0.087)/(((Sm/0.231)+(Gd/0.306))/2)$; $\delta Ce=3\times(Ce_{样品}/66.7)/(2\times(La_{样品}/31.1)+(Nd_{样品}/27.4))$; 球粒陨石标准化数据根据 Boynt(1984); * 数据来自王家生等(1999); * * 不包括样品 T678。

表 4 南天山上石炭统阿依里河组砂岩微量元素含量($\times10^{-6}$)

Table 4 Trace element concentrations of the sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan ($\times10^{-6}$)

位置	巴音郭楞				和静大山口水电站					平均
样号	T703	T700	T695	T690	T578	T657	T666	T671	T678	值**
Li	26.98	55.28	42.82	4.66	14.98	7.76	15.00	58.40	43.00	29.88
Be	2.09	2.18	1.87	0.79	0.87	0.64	0.69	1.91	1.07	1.34
Sc	11.89	13.01	12.24	3.65	4.55	3.40	3.05	6.53	3.09	6.82
V*	79.62	84.63	77.87	21.00	36.03	/	/	/	/	59.83
Cr	59.99	63.51	62.16	30.19	55.54	/	9.82	37.10	29.10	43.43
Co	20.19	11.87	9.69	4.72	7.35	3.15	2.71	7.17	2.95	7.76
Ni	36.36	36.22	33.49	11.78	17.02	22.10	101.0	22.50	15.50	32.89
Cu	31.87	30.38	30.24	12.27	20.73	7.68	17.90	13.80	19.50	20.48
Zn	79.99	89.25	82.43	37.62	28.62	12.80	18.50	46.20	3.32	44.30
Ga	14.94	17.18	14.48	5.06	7.58	4.63	7.60	10.40	6.24	9.79
Rb	121.2	111.9	103.5	36.0	42.9	29.2	31.9	56.9	38.2	63.5
Sr	188.5	230.8	426.6	315.9	456.1	950.0	98.6	274.0	111.0	339.1
Y	24.62	24.28	23.29	11.40	13.02	21.50	7.73	20.40	10.90	17.46
Zr	131.0	133.5	124.8	113.5	166.3	60.4	168.0	116.0	83.0	121.8
Nb	10.65	12.66	10.58	4.47	6.78	4.36	4.63	10.70	6.14	7.89
Cs	9.84	9.64	7.69	2.15	1.75	0.94	0.82	2.12	1.35	4.03
Ba	472.6	408.9	367.7	191.2	540.7	121.0	416.0	1538	339.0	488.3
Hf	3.74	3.99	3.58	3.07	4.64	1.55	3.18	3.43	1.91	3.23
Ta	0.82	1.02	0.84	0.38	0.59	0.32	0.31	0.49	0.11	0.54
Tl	0.67	0.61	0.55	0.21	0.24	0.90	0.59	1.23	0.90	0.66
Pb	27.59	21.35	20.33	10.45	11.86	12.40	7.43	10.20	6.73	14.26
Bi	0.55	0.47	0.32	0.08	0.09	0.06	0.03	0.20	0.09	0.21
Th	11.47	14.52	11.60	4.10	6.59	5.86	3.35	7.23	5.26	7.78
U	2.88	3.10	2.84	1.65	3.39	1.75	2.44	2.34	1.59	2.44
Th/U	3.98	4.68	4.08	2.48	1.94	3.35	1.37	3.09	3.31	3.14

续表 4

La/Th	2.89	2.51	2.64	2.98	2.68	3.26	3.43	3.36	17.17	4.55
Th/Sc	0.96	1.12	0.95	1.12	1.45	1.72	1.10	1.11	1.70	1.25
La/Y	1.35	1.50	1.32	1.07	1.36	0.89	1.49	1.19	8.28	2.05
La/Sc	2.79	2.81	2.50	3.35	3.89	5.62	3.77	3.72	29.22	3.56
Rb/Sr	0.64	0.48	0.24	0.11	0.09	0.03	0.32	0.21	0.34	0.28

表 5 南天山上石炭统阿依里河组砂岩重矿物成分

Table 5 Heavy mineral compositions of the sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan

位置	轮台策大雅			和静大山口水电站			巴音郭楞	
样号	T004	T030	T033	T578	T655	T660	T690	T706
锆石	17.0	25.0	9.0	37.2	2.9	33.1	19.9	20.8
磷灰石	3.0	4.0	0.0	1.4	0.6	0.8	0.0	2.1
锐钛矿	3.0	3.0	0.4	0.9	0.0	0.3	0.0	0.0
白钛矿	24.0	16.0	13.0	13.6	7.9	41.0	0.5	0.1
电气石	5.0	0.5	0.2	6.3	2.0	6.9	0.0	0.0
黄铁矿	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.7	70.6	72.9
金红石	1.0	1.0	0.2	5.0	0.9	3.8	0.0	0.0
赤褐铁矿	45.0	40.0	66.0	0.0	52.2	0.0	0.0	0.0
绿泥石	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
榍石	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
褐帘石	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
角闪石	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
石榴石	0.0	0.0	0.0	8.3	0.7	0.0	0.0	0.0
磁铁矿	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
重晶石	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
辉石	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0
铬铁矿	0.0	0.0	0.0	3.3	3.5	0.5	0.0	0.7
其它	1.0	10.0	10.0	21.8	27.4	12.6	9.1	3.4

样品采自轮台县策大雅剖面阿依里河组,选取不谐和度小于 20%的碎屑锆石颗粒样品 79 个(表 6),其中 55 个颗粒同位素年龄为 404～542 Ma(相当于早泥盆世中晚期 Pragian-Emsian——寒武纪底界 397.5～542 Ma),占总数的 69.6%;4 个颗粒同位素年龄为 616～843 Ma(相当于新元古代成冰期 630～850 Ma),占总数的 5.1%;20 个颗粒同位素年龄为 1797～2436 Ma,介于古元古代内(1600～2500 Ma),占总数的 25.3%。

3 物源区物质组成和构造背景

在判断源区物质组成过程中,砾石和岩屑是最直接的证据。根据剖面测量结果,在砾石中发现有泥岩、灰岩、硅质岩、石英岩和火山岩等砾石。砂岩碎屑组分统计作为源区岩石类型及其构造背景的研究,已经得到较广泛的应用。研究区阿依里河组砂岩中岩屑含量平均 25.07%,主要为变质岩岩屑,其次是火山岩和沉积岩岩屑,分别为 53.8%、24.4%和 21.8%。岩屑成分和砾岩的砾石成分基本一致。变质岩岩屑有石英岩、云母片岩等,火成岩岩屑有英安岩和晶屑凝灰岩等,沉积岩岩屑有硅质岩、泥岩和灰岩等。三条剖面中,岩屑含量基本一致,但是在策大雅剖面,火山岩岩屑含量占优势,为 39.1%,在另外两条剖面,变质岩岩屑含量优势明显,分别为 65.7%和 60.4%。因此根据砾石和岩屑组分分析,南天山上石炭统阿依里河组碎屑岩主要源岩应该是沉积岩、低－中级变质岩和中性火山岩等。

根据 Pettijohn 等(1987)的砂岩分类,岩石类型主要为岩屑砂岩和亚岩屑砂岩,少许长石砂岩(图 2)。根据 Herron (1988)碎屑岩判别图,阿依里河组砂岩主要为岩屑砂岩,其次有含铁砂岩、长石砂岩(图 3)。其中含铁砂岩的判别与重矿物分析结果是吻合的,重矿物分析表明,不少砂岩样品中含丰富的赤褐铁矿和黄铁矿。砂岩的成分成熟度和结构成熟度均较低,Q/(F+L)平均值为 2.07。

砂岩碎屑组分 QFL 图解显示,南天山上石炭统阿依里河组的碎屑样品主要来源于再旋回造山带源区(图 4),在 QpLvLs 图解中,进一步表明它们的物源区主要属于消减杂岩源区,少许属于碰撞造山带和弧造山带源区。表明在石炭纪碎屑岩沉积之前,

表 6 南天山上石炭统阿依里河组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据

Table 6 Data of clastic zircon LA-ICP-MS U-Pb ages from the sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in South Tianshan

样品	U238	Th232	Pb*	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		谐和年龄(Ma)	1σ	不谐和度
						1s		1s		1s		1s			
T004-01	674	266	53	0.40	405	13	462	5	473	6	471	6	473	6	−2.4
T004-02	948	889	90	0.94	734	13	522	5	475	6	483	6	475	6	9.4
T004-03	181	91	16	0.50	489	82	477	13	475	6	474	6	475	6	0.4
T004-04	34	28	14	0.82	1787	61	1803	24	1818	23	1821	24	1787	61	−0.8
T004-05	515	378	45	0.73	546	84	483	13	470	6	468	6	470	6	2.7
T004-06	244	157	20	0.64	921	13	544	6	459	6	548	7	459	6	16.9
T004-07	296	222	26	0.75	492	13	479	5	476	6	484	6	476	6	0.6
T004-08	281	147	24	0.52	859	65	497	11	422	6	412	5	422	6	16.3
T004-09	383	251	32	0.65	352	14	459	5	481	6	489	6	481	6	−4.7
T004-10	288	197	147	0.68	2284	10	2300	12	2317	25	2314	26	2284	10	−0.7
T004-11	236	93	20	0.40	621	13	501	6	476	6	487	6	476	6	5.1
T004-12	148	135	13	0.91	472	15	460	5	457	6	453	6	457	6	0.7
T004-13	75	122	39	1.63	1907	11	1947	11	1984	22	1985	23	1907	11	−1.9
T004-14	99	89	41	0.90	1961	10	1987	11	2011	22	1947	22	1961	10	−1.2
T004-15	611	266	50	0.44	561	13	490	5	475	6	485	6	475	6	3.1
T004-16	662	421	57	0.64	515	13	488	5	482	6	477	6	482	6	1.2
T004-17	288	203	35	0.71	597	15	466	6	440	6	441	6	440	6	5.7
T004-18	80	63	7	0.79	677	15	492	6	453	6	461	6	453	6	8.3
T004-19	277	71	22	0.26	434	13	466	5	472	6	483	6	472	6	−1.3
T004-20	306	224	29	0.73	541	13	519	5	514	6	523	6	514	6	1.0
T004-21	393	369	38	0.94	503	13	504	5	504	6	459	6	504	6	0.0
T004-22	135	64	51	0.47	1833	11	1857	11	1879	21	1839	21	1833	11	−1.2
T004-23	538	374	49	0.69	619	13	515	5	491	6	499	6	491	6	4.8
T004-24	575	638	54	1.11	464	13	474	5	476	6	464	6	476	6	−0.4
T004-25	185	123	17	0.67	388	14	468	5	485	6	478	6	485	6	−3.6
T004-26	135	129	12	0.96	510	14	461	5	451	6	437	5	451	6	2.2
T004-27	111	73	9	0.66	656	80	457	12	418	5	413	5	418	5	8.9
T004-28	24	16	10	0.69	1868	11	1885	12	1900	21	1965	24	1868	11	−0.8
T004-29	149	137	72	0.92	2089	10	2087	11	2085	22	2029	23	2089	10	0.1
T004-30	84	55	8	0.66	652	13	525	5	497	6	498	6	497	6	5.5
T004-31	130	65	11	0.49	505	14	471	5	464	6	463	6	464	6	1.5
T004-32	236	156	21	0.66	637	13	502	5	473	6	464	6	473	6	5.9
T004-33	173	219	16	1.26	564	115	449	18	426	6	423	5	426	6	5.3
T004-34	417	101	60	0.24	835	12	840	7	843	10	821	10	843	10	−0.4
T004-35	509	356	46	0.70	529	13	493	5	486	6	491	6	486	6	1.4
T004-36	406	164	35	0.40	463	62	482	9	486	6	486	6	486	6	−0.8
T004-37	263	200	141	0.76	2258	10	2279	11	2302	24	2244	26	2258	10	−1.0
T004-38	42	13	21	0.32	2408	10	2407	12	2406	25	2450	30	2408	10	0.0
T004-39	362	271	36	0.75	652	84	501	14	468	6	463	5	468	6	6.8
T004-40	186	85	15	0.45	555	13	468	5	450	5	461	6	450	5	3.9
T004-41	1252	1232	158	0.98	700	12	635	6	616	7	605	7	616	7	3.0
T004-42	289	234	28	0.81	685	83	521	15	485	6	479	6	485	6	7.2
T004-43	761	407	63	0.53	714	66	482	11	434	5	428	5	434	5	10.5
T004-44	454	166	189	0.36	2285	10	2024	11	1778	19	1599	19	2285	10	12.9
T004-45	145	58	73	0.40	2343	10	2330	11	2316	24	2412	28	2343	10	0.6
T004-46	343	50	26	0.14	499	13	468	5	462	5	549	7	462	5	1.3
T004-47	399	251	34	0.63	546	13	478	5	464	5	448	5	464	5	3.0
T004-48	199	160	19	0.80	538	13	489	5	478	6	485	6	478	6	2.3
T004-49	1098	41	467	0.04	2207	10	2192	11	2175	23	2867	34	2207	10	0.8
T004-50	180	76	16	0.42	637	59	532	10	508	6	504	6	508	6	4.6

续表 6

T004-51	561	293	48	0.52	668	12	504	5	469	6	462	6	469	6	7.2
T004-52	968	633	83	0.65	534	12	463	5	449	5	475	6	449	5	3.1
T004-53	315	237	28	0.75	503	13	465	5	457	5	452	6	457	5	1.7
T004-54	672	206	89	0.31	827	12	767	7	746	9	695	8	746	9	2.8
T004-55	188	155	18	0.83	615	13	497	5	472	6	475	6	472	6	5.2
T004-56	32	21	15	0.68	1869	11	1921	12	1969	21	2108	27	1869	11	−2.5
T004-57	244	226	26	0.93	564	96	476	16	458	6	456	5	458	6	3.9
T004-58	129	84	11	0.65	439	14	450	5	452	5	443	6	452	5	−0.4
T004-59	793	481	70	0.61	569	12	485	5	467	5	472	6	467	5	3.8
T004-60	75	48	31	0.64	1797	10	1832	11	1864	20	1875	23	1797	10	−1.7
T004-61	51	2	22	0.03	2307	30	2244	11	2176	22	2160	33	2307	30	3.1
T004-62	126	47	11	0.37	731	13	497	5	448	5	437	6	448	5	10.4
T004-63	110	57	10	0.52	521	84	453	13	439	6	437	5	439	6	3.1
T004-64	617	145	51	0.23	493	13	482	5	479	6	500	6	479	6	0.6
T004-65	284	217	127	0.77	1910	10	1923	11	1935	20	1920	23	1910	10	−0.6
T004-66	1358	321	116	0.24	459	12	530	5	546	6	491	6	546	6	−3.0
T004-67	35	20	3	0.56	968	21	521	8	425	5	546	8	425	5	20.3
T004-68	121	87	70	0.71	2267	10	2295	11	2325	23	2379	28	2267	10	−1.3
T004-69	61	39	5	0.64	544	15	470	6	455	5	458	6	455	5	3.2
T004-70	32	28	12	0.89	1817	11	1766	12	1722	19	1668	21	1817	11	2.5
T004-71	373	359	35	0.96	846	12	478	5	404	5	408	5	404	5	16.8
T004-72	539	503	50	0.93	375	13	440	5	452	5	426	5	452	5	−2.7
T004-73	49	32	4	0.64	619	15	471	6	440	5	385	5	440	5	6.8
T004-74	135	114	13	0.85	576	13	505	5	490	6	472	6	490	6	3.0
T004-75	398	219	216	0.55	2264	10	2286	11	2310	23	2325	28	2264	10	−1.0
T004-76	394	368	39	0.93	439	97	453	15	456	6	456	5	456	6	−0.7
T004-77	274	169	25	0.62	511	13	481	5	475	5	491	6	475	5	1.3
T004-78	361	156	32	0.43	433	64	446	9	449	5	449	5	449	5	−0.7
T004-79	571	332	47	0.58	656	74	454	11	415	5	410	5	415	5	9.0
T004-80	120	25	67	0.21	2436	10	2462	12	2492	25	2449	30	2436	10	−1.2

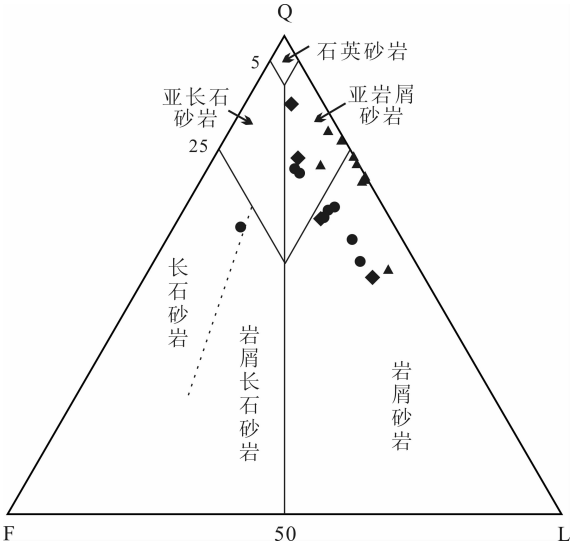

图 2 上石炭统阿依里河组砂岩分类
(根据 Pettijohn et al., 1987)

Fig. 2 Classification of sandstones from Upper Carboniferous Ayilihe Formation (after Pettijohn et al., 1987)

Q—石英(quartz); F—长石(feldspar);L—岩屑(lithic fragment)

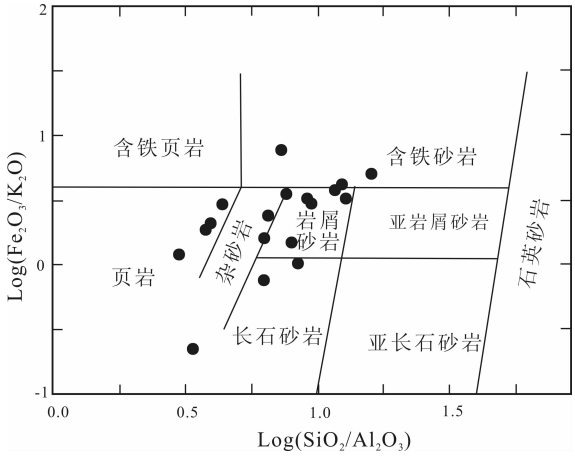

图 3 上石炭统阿依里河组砂岩类型主元素判别
(根据 Herron, 1988)

Fig. 3 The distinction of sandstone types based on major elements in from Upper Carboniferous Ayilihe Formation (after Herron, 1988)

Q—石英(quartz); F—长石(feldspar); L—岩屑(lithic fragment); Qp—多晶石英(polycrystal quartz);Lv—火山岩岩屑(volcanic fragment); Ls—沉积岩岩屑(sedimentray rock fragment)

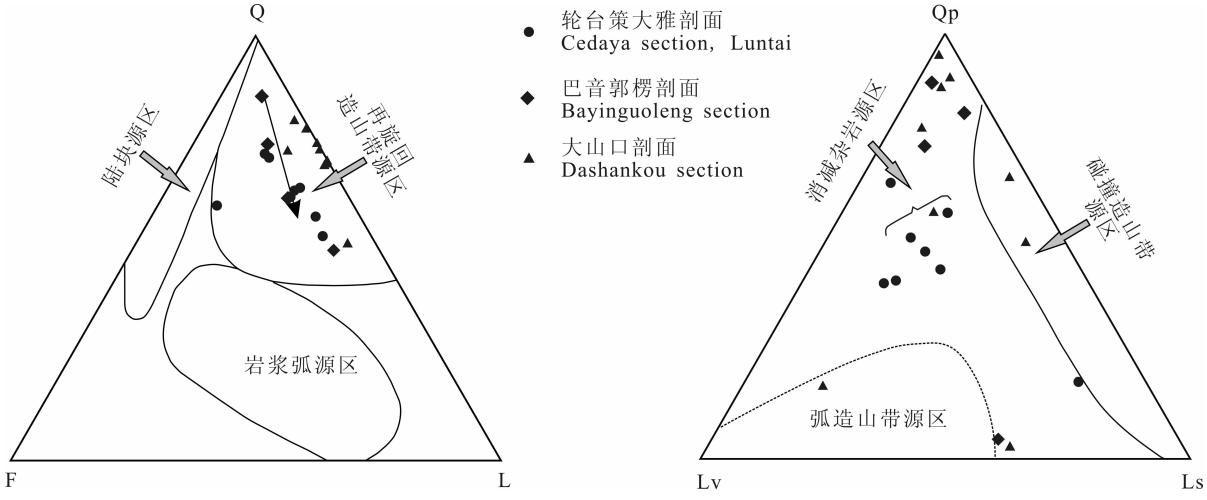

图 4 上石炭统阿依里河组砂岩 QFL 判别图(根据 Dickinson et al., 1979)

Fig. 4 QFL distinction of sandstones from Upper Carboniferous Ayilihe Formation (after Dickinson et al., 1979)

南天山地区存在俯冲汇聚事件,结合锆石年代学数据 50%以上集中在 400～500 Ma,事件的时代主要为早—中古生代。这显然比前人关于物源区构造背景属于再循环造山带的认识更进一步。

对天山南缘上石炭统阿依里河组碎屑岩研究表明,砂岩碎屑颗粒多呈次棱角状,重矿物也以次棱角状居多,磨圆度较低,分选性较差,成分成熟度和结构成熟度较低,属于近源沉积;石英等颗粒不见次生加大现象,表明深埋藏成岩作用并不显著;化学风化指数 CIA 平均为 65.20,碎屑岩经历了弱到中等程度的风化作用。这表明,虽然风化作用对阿依里河组砂岩中重矿物有所影响,但是沉积和成岩作用的影响相对较弱,重矿物及其组合可以用于物源区判别。

根据重矿物聚类分析结果,策大雅剖面可以识别出两类:锐钛矿、金红石、锆石和磷灰石组合为一类,属于稳定—超稳定组合,可能为沉积物源区;电石气、绿泥石和白钛石为第二类,物源可能来自低级变质岩。巴音布鲁克剖面样品较少,大致可以识别出两类:黄铁矿、铬铁矿、锆石和磷灰石为第一类,反映源岩的性质不够清楚;白钛石为第二类,反映源岩主要为低级变质岩。大山口剖面重矿物组合可以分为三类:赤褐铁矿、辉石、角闪石、铬铁矿组合第一类,为不稳定组合,源岩可能为中—基性岩浆岩;锆石、黄铁矿、电气石、金红石、磁铁矿、重晶石、榍石组合为第二类,其源岩可能为沉积岩;石榴子石、磷灰石、锐钛矿组合为第三类,反映源岩主要为中—高级变质岩源区;白钛石单独作为一类,反映母岩可能来自低级变质岩。由于分组后,每条剖面的样品数有限,可能其组合特征反映源岩类型有其局限性。如果将三条剖面综合分析,可大致分为四类:第一类为榍石、磁铁矿、重晶石、石榴石组合,反映源岩主要为中—高级变质岩;第二类为电气石、金红石、锆石组合,属于超稳定组合,反映源岩主要为沉积岩。这种沉积岩的物源在砾岩的砾石和砂岩的岩屑中已经得到了验证;第三类为角闪石、辉石、铬铁矿组合,代表不稳定组合,反映源岩主要为基性—中性岩浆岩;第四类赤褐铁矿、褐帘石组合,反映源岩不够清楚;第五类为锐钛矿、白钛石、磷灰石、绿泥石组合,反映物源主要为低级变质岩,这与砾岩中所见的石英岩砾石的结论是一致的。因此,重矿物分析不仅验证了砾石和岩屑分析所揭示的沉积岩的源岩,而且揭示了存在新的源岩,即基性岩和高级变质岩。因此,根据砾石、岩屑和重矿物特征,上石炭统碎屑岩的物源主要是沉积岩、中—低级级变质岩和中性火成岩,其次是基性火成岩和高级变质岩。

研究区稀土元素分析结果表明,可以明显的分为相对贫稀土和相对富稀土两组。第一组贫稀土类,包括 5 个样品,主要集中在大山口水电站,其次在巴音郭楞。该组样品 La 含量为 11.5×10^{-6}～24.3×10^{-6},Ce 为 22.0×10^{-6}～44.0×10^{-6},$\sum$REE 为 49.1×10^{-6}～117.0×10^{-6},有较高的 Eu 异常 0.71～1.10,相对低的轻稀土富集 La/Yb 为 12.8,La_N/Yb_N 为 8.7;第二组富稀土类,包括 6 个样品,主要集中在轮台野云沟和巴音郭楞。La 为 30.6×10^{-6}～44.6×10^{-6},Ce 为 57.7×10^{-6}～98.9×10^{-6},$\sum$REE 为 144.3×10^{-6}～220.4×10^{-6},有低的 Eu 异常 0.56～0.64,相对高的轻稀土富集 La/Yb 为 15.1,La_N/Yb_N 为 10.2。将这些数据与不

同构造背景的稀土元素特征相对比(表 6),第一组样品比较类似于大陆岛弧,部分数据具有海洋岛弧的特征;而第二组样品与活动大陆边缘非常类似。

将阿依里河组砂岩的微量元素含量和比值与不同的构造背景物源区相比较(表 7),微量元素 Th,U,Hf 含量和 Rb/Sr,Th/U 比值介于大陆岛弧和海洋岛弧,而 La/Y、La/Sc、Th/Sc 比值介于活动大陆边缘与大陆岛弧之间。

相容和不相容元素的比率可以用于区分长英质和镁铁质的源岩,如 Th/Sc 比率是火成岩化学分异的指标,因为 Th 和 Sc 在火成岩系统中分别是不相容和相容的(McLennan et al., 1993)。依次,Zr/Sc 比率是锆石富集的有用标志,因为 Zr 强烈的集中在锆石中,而 Sc 通常保存着物源区的特征(McLennan, 1989; McLennan et al., 1993)。通常情况下,仅仅根据化学特征是难以区分沉积岩的岛弧区和再旋回大陆壳来源,因为大陆壳化学成分显示类似于岛弧的特征(Bock et al.,2000)。然而,微量元素比率如 Ti/Zr, La/Sc 和 La/Th 已经被成功的用于区分海洋岛弧、大陆岛弧、大陆边缘弧和被动大陆边缘环境 (Bhaia et al., 1986; Floyd et al., 1987)。

在 Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 判别图中,阿依里河组砂岩明显投在大陆岛弧区和活动大陆边缘区(图 5)。在 Ti/Zr-La/Sc 图中,阿依里河组碎屑岩投在大陆边缘弧区域以及大陆边缘弧和大陆岛弧重叠的区域(图 6),结合稀土元素分析结果,处于重叠区域的样品应该属于大陆岛弧构造背景。类似的结果显示在 Hf-La/Th 图中,样品投在酸性弧来源区以及长英质和基性混合来源区(图 7),与上地壳源区相比,可能有铁镁质的叠加。

综合上述砂岩碎屑组分,常量元素、稀土元素、微量元素地球化学特征,以及重矿物判别,南天山上石炭统碎屑岩的物源区主要有低级—中级变质岩、中—酸性的火成岩、沉积岩,以及少许的基性岩和高级变质岩,物源区具有大陆岛弧和活动大陆边缘构造背景。

4 物源区的风化和沉积循环

风化作用是物源区的重要特征之一,风化类型和强度不仅影响到物源区的地形地貌,而且也影响到物源区的物质供给,对沉积盆地的物质组分会产生重要影响。目前广泛使用的确定物源区风化程度的指数是化学蚀变指数(CIA)(Nesbitt et al., 1982),而且它不仅被用于页岩,而且也被用于砂岩(Fedo et al., 1995),例如 Bauluz 等(2000)对西班牙西北部前寒武纪—古生代碎屑岩物源区的研究,Rahman 等(2007)对印度 Blangladesh 中新世 Surma 群砂岩的研究。

表 6 阿依里河组碎屑岩与不同构造背景沉积盆地砂岩的 REE 特征比较(据 Bhatia,1985 修改)

Table 6 Comparison of the detrital rocks of Ayilihe Formation with the rare earth element characteristics of sandstones under various tectonic settings (Revised from Bhatia, 1985)

构造背景	源区类型	REE 参数						
		La ($\times10^{-6}$)	Ce ($\times10^{-6}$)	∑REE ($\times10^{-6}$)	La/Yb	La_N/Yb_N	∑LREE /∑HREE	Eu/Eu*
海洋岛弧	未切割的岩浆弧	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27±4.5	59±8.2	146±20	11.0±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
安第斯型大陆边缘	上隆的基底	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	克拉通内部构造高地	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
本次研究	第一类(n=5)	17	31.6	80.4	12.6	8.5	7.7	0.90
	第二类(n=6)	36.4	73.1	171.5	15.1	10.2	9.7	0.60

表 7 阿依里河组碎屑岩与各种构造背景杂砂岩微量元素特征比较(据 Bhatia et al., 1986 修改)

Table 7 Comparison of the detrital rocks of Ayilihe Formation with the trace element characteristics in sandstones under various tectonic settings (Revised from Bhatia et al., 1986)

构造背景	海洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	本次研究(n=8)
Th($\times10^{-6}$)	2.27±0.7	11.1±1.1	18.8±3.0	16.7±3.5	7.78(3.35~14.5)
U($\times10^{-6}$)	1.09±0.21	2.53±0.24	3.90±0.5	3.20±0.8	2.44(1.59~3.39)
Hf($\times10^{-6}$)	2.1±0.6	6.3±2.0	6.8	10.1	3.23(1.55~4.64)
Rb/Sr	0.05±0.05	0.65±0.33	0.89±0.24	1.19±0.40	0.28(0.03~0.64)
Th/U	2.1±0.78	4.6±0.45	4.8±0.38	5.6±0.7	3.14(1.37~4.68)
La/Y	0.48±0.12	1.02±0.07	1.33±0.09	1.31±0.26	1.27(0.89~1.50)
La/Sc	0.55±0.22	1.82±0.3	4.55±0.8	6.25±1.35	3.55(2.50~5.62)
Th/Sc	0.15±0.08	0.85±0.13	2.59±0.5	3.06±0.8	1.19(0.95~1.72)

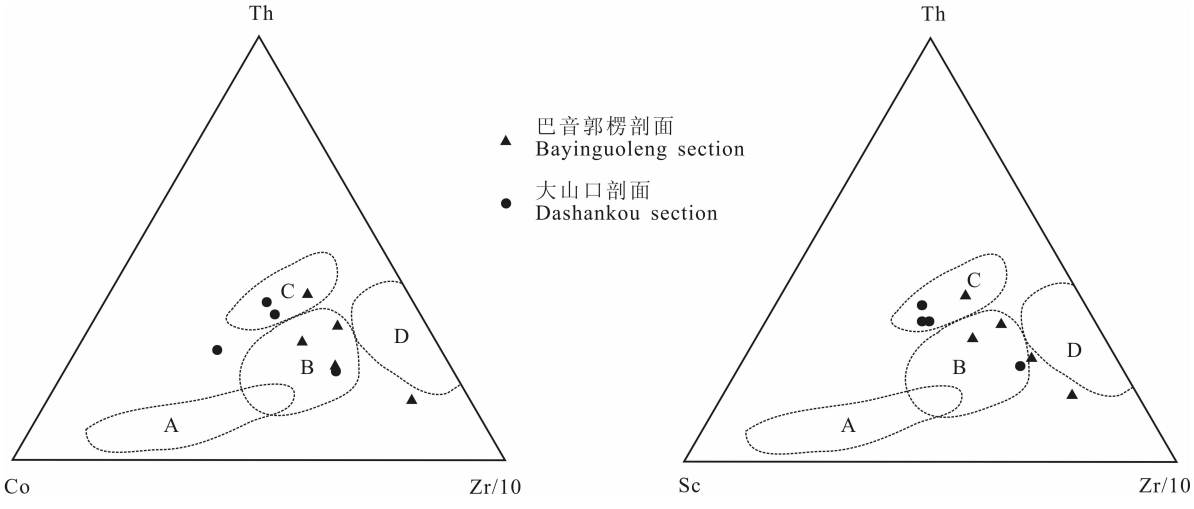

图 5 上石炭统阿依里河组碎屑岩构造背景微量元素判别图(据 Bhatia et al., 1986)

Fig. 6 Trace element discriminant diagrams of Upper Carboniferous Ayilihe Formation sandstones (after Bhatia et al., 1986)

A—海洋岛弧(oceanic island arc);B—大陆岛弧(continental island arc);C—活动大陆边缘(active continental margin);D—被动大陆边缘(passive margin)

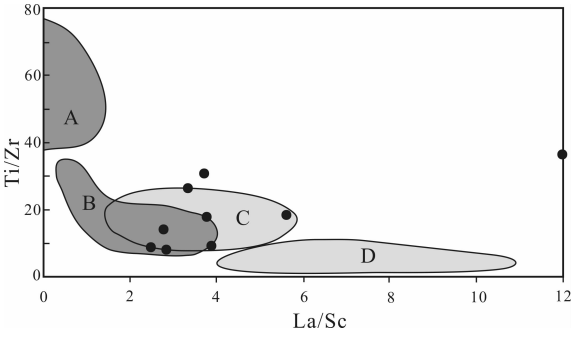

图 6 La/Sc-Ti/Zr 判别图(根据 Bhatia et al., 1986)

Fig. 6 La/Sc-Ti/Zrdiagram (after Bhatia et al., 1986)

A—海洋岛弧(oceanic island arc);B—大陆岛弧(continental island arc);C—活动大陆边缘(active continental margin);D—被动大陆边缘(passive margin)

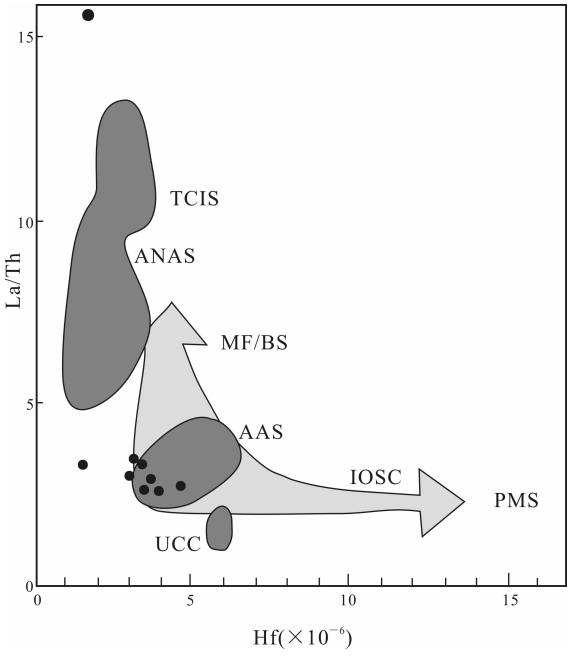

图 7 La/Th-Hf 判别图(根据 Floyd et al., 1987)

Fig. 7 La/Th-Hf diagram (after Floyd et al., 1987)

UCC—上地壳(upper continental crust);PMS—被动大陆边缘(passive margin source);AAS—酸性弧(acidic arc source);IOSC—古老的沉积物成分增加(increasing old sediment);MF/BS—混合的长英质/基性来源(mixed felsic/intermediate source);ANAS—安山质弧来源(andesitic arc source);TCIS—拉斑质洋岛来源(tholeiitic ocean island source)

化学蚀变指数(CIA)指示了物源区的风化程度(Nesbitt et al.,1982),CIA 记录了斜长石和钾长石到粘土矿物的进级蚀变。化学风化指数的测量方法是通过使用公式(分子比例):$CIA=(Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)\times 100$,计算化学风化指数而获得(CIA;Nesbitt et al., 1982),这里 CaO^* 是岩石中与硅酸盐相结合的 CaO 含量。Nesbitt et al.(1982)认为,高岭石和绿泥石的 CIA 值接近 100,页岩的平均 CIA 值为 70～75。根据 Fedo et al.(1995)分类,CIA=50～60 指示物源区初始化学风化,CIA=60～80 指示中等化学风化,而 CIA>80 指示强烈的化学风化。阿衣里河组碎屑岩 CIA 值为 52.24～76.46,平均 65.20。考虑到由于物源区的搬运、沉积和成岩作用导致 K 的富集,需要对样品进行 K 的校正(Fedo et al., 1995)。添加到每个风化样品中的 K_2O 能够按照公式计算(Panahi et

al., 2000): $K_2O_{corr.} = [m \cdot A + m \cdot (C^* + N)]/(1-m)$,而且根据母岩样品,$m = K/(A+C^*+N+K)$。校正后的 CIAcorr. 值为 52.25～89.40,平均为 71.25(表 8)。大部分样品 CIAcorr. 集中在 61.22～80.71 之间,表示物源区具中等程度的化学风化特征;来自大山口水电站和巴音郭楞的两个砂岩样品 CIAcorr. 值分别为 52.25 和 53.73,显示源区属于化学风化的初始期。另外两个页岩样品来自轮台野云沟,CIAcorr. 值分别为 84.81 和 89.40,显示源区强烈化学风化特征(表 8)。图 8 表明,研究区碎屑岩物源区的化学风化程度低于和类似于 PAAS。

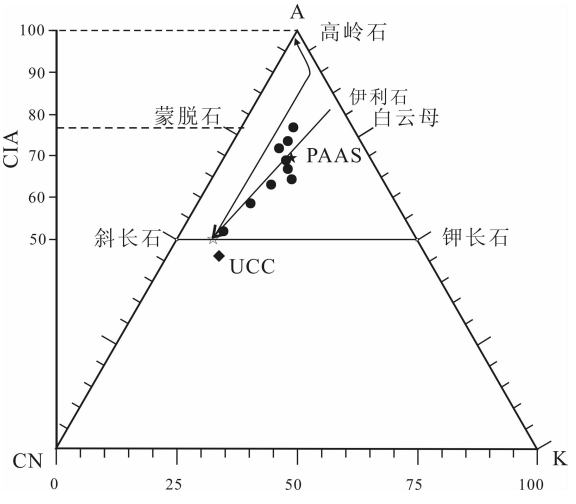

图 8 上石炭统阿依里河组碎屑岩 A-CN-K 三角图
(据 Panahi et al., 2000)

Fig. 8 A-CN-K ternary diagram for samples of the Upper Carboniferous Ayilihe Formation (after Panahi et al., 2000)

A—Al_2O_3; CN—($CaO^* + Na_2O$); K—K_2O; CIA—化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration); UCC—上大陆壳(upper continental crust); PAAS—后澳大利亚太古代页岩(Post Archean Shales of Australia)

5 物源区的对比与构造演化

5.1 地质体年代学比较

根据南天山轮台策大雅剖面上石炭统样品的碎屑锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果,获得的年龄数据主要分为三期:69.6%的碎屑颗粒锆石年龄为 404～542 Ma(相当于早泥盆世中晚期—寒武纪 397.5～542 Ma);25.3%的碎屑颗粒锆石年龄为 1797～2436 Ma(古元古代);少许锆石年龄为 616～843 Ma(相当于新元古代成冰期 630～850 Ma)(图 9)。不同成因锆石常常有不同的 Tu,U 含量以及 Th/U 比值:岩浆锆石的 Th,U 含量高,Th/U 比值较大(一般大于 0.4);变质锆石的 Th,U 含量低,Th/U 比值小(一般小于 0.1)(吴元保等,2004)。本次样品的碎屑锆石具有较高的 Th,U 含量,平均为 203×10^{-6} 和 345×10^{-6},Th/U 比值为 0.64,81%的锆石 Th/U 比值大于 0.4。大致可以认为这些碎屑锆石主要来自岩浆岩,少量变质岩,当然不能排斥一些来自沉积岩中的再旋回的锆石。

对比南天山和塔里木北缘的地质体,我们发现与早古生代年龄相当的地质体主要集中在南天山(图 9),如库勒湖蛇绿岩锆石 SHRIMP 定年为 425±8 Ma(龙灵利等,2006),西南天山侵入于巴音布鲁克群中的石英闪长岩体 446.8±1.2 Ma(徐学义等,2006),巴音布鲁克西南的艾尔宾山花岗闪长岩为 442±7 Ma(胡霭琴等,2006),库尔勒—野云沟以北的霍拉山一带的艾西买依根糜棱质花岗岩 475.2±2.6 Ma,库米什镇以北阿克塔西附近的灰白色片麻状花岗岩为 457.5±1.8 Ma,拉尔墩达坂钾长花岗岩为 457±27 Ma(韩宝福等,2004);中天山天格尔山脉乌库公路糜棱岩化花岗岩 441.6±3.8 Ma(朱永峰等,2006)。南天山西段乌帕塔尔坎群安山岩的坪年龄 427.70 士 0.60Ma(龚福华等,2003)。中天山和南天山造山带 65 个 U-Pb 年龄统计分析表明,两个造山带年龄分布大至相似,主要存在三组年龄,300～230 Ma、380～320 Ma、460～390 Ma,还有一些老的基底(彭守涛等,2009)(图 9)。460～390 Ma 这组年龄被认为记录了南天山洋向伊犁—中天山板块俯冲的过程,380～320 Ma 记录了塔里木板块与伊犁—中天山板块碰撞事件(高俊等,2006)。马中平等(2008)对南天山北部上志留统巴音布鲁克组火山岩系研究表明,它们以中基性喷出岩为主,并有辉长岩侵入,地球化学特征反映了岛弧岩浆岩性质,是南天山洋盆于晚志留世时发生的俯冲—消减所引发的岛弧火山—岩浆作用的地质记录。类似的,朱志新等(2008)认为由于南天山洋盆向北俯冲,晚志留—早泥盆世哈尔克山北缘和额尔宾山南缘形成岛弧带火山岩,主要为中基性火山岩与中酸性火山岩。南天山石炭纪的花岗岩基本为富铝的同碰撞花岗岩,和该区石炭纪残余海盆的发展基本同步,时限为 300～340 Ma(早石炭世—晚石炭世),而二叠纪的花岗岩为后造山花岗岩,时限为 250～290 Ma。因此,无论是从年龄特征还是从岩石学特征或者构造背景,上石炭统碎屑岩的早古生代物源与天山及其南缘的早古生代岛弧地质体相吻

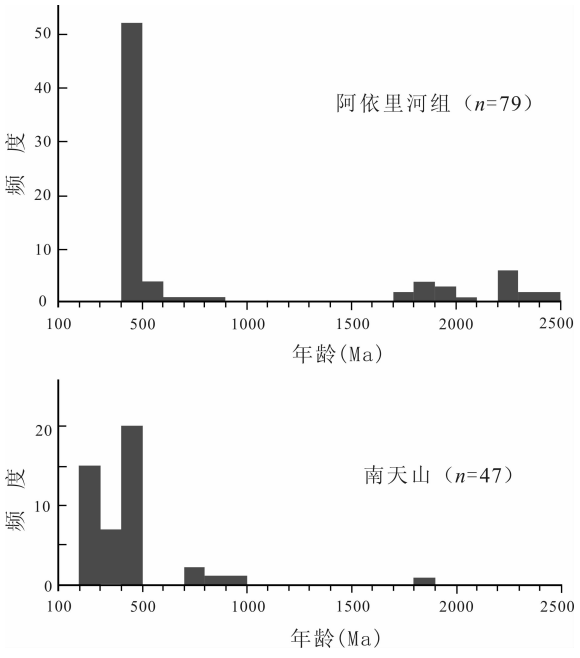

图 9 阿依里河组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分布直方图(南天山数据根据彭守涛等,2009 修改)

Fig. 9 Frequency spectrum of clastic zircon LA-ICP-MS U-Pb ages from Ayilihe Formation (Data of South Tianshan are revised from Peng Shoutao et al., 2009)

合,特别是物源具有弧消减带的特征。

为了确定古元古代碎屑锆石(1797～2436 Ma)的来源,对比了新疆地区的大陆基底。塔里木古大陆为太古宙—古元古代基底区(3200～2200 Ma),昆仑—阿尔金造山带为古元古代基底区(2000～1800 Ma),天山为古中元古代基底区(2100～1700 Ma)(胡霭琴等,2001)。根据同位素年龄数据和地理位置,可以排除昆仑—阿尔金地块作为物源区。天山基底变质岩系形成 2100～1700 Ma,峰值年龄为 1800 Ma。天山变质岩系在 1400 Ma、900～700 Ma 期间发生地壳重熔、再次重熔和岩浆分异作用,西天山温泉群那拉提群和木扎尔特群混合岩化片麻岩锆石 U-Pb 年龄分别为 821±11 Ma、798±8 Ma、882±83 Ma 和 707±7 Ma。由于天山基底区包含大量中、新元古代的年龄,和石炭系碎屑岩的锆石年龄有较大差距,因此,基本也可以被排除作为物源区。塔里木北缘除了具有太古宙的基底外,还有古元古代的基底,如红卫庄花岗片麻岩结晶年龄为 1943±6 Ma,斜长角闪岩锆石生成年龄 2492±19 Ma,托格灰色片麻岩锆石结晶年龄为 2337±6 Ma(郭召杰等,2003)。胡霭琴等(2006)认为,塔里木北缘出露的一套双峰式太古宙的基底岩石形成于新太古代,在元古宙早期大约 2.3 Ga 和 2.0～1.8 Ga 时期它们遭受强烈的构造、变质和岩浆活动的改造,在新元古代的晚期至早古生代(850～500 Ma)前的地质历史时期,塔里木北缘各地段先后发生了构造隆升。因此,如果以塔里木盆地北缘的古元古代的基底—库鲁克塔格地块作为南天山石炭系碎屑岩物源的一部分,可以得到同位素年代学的支持。

根据构造属性,库鲁克塔格地区北部托格斜长角闪岩的原岩与现代洋脊玄武岩类似,而南部阔克苏斜长角闪岩的原岩与现代岛弧玄武岩类似(张志诚等,1998)。实际上古元古代的地层在塔里木以及整个华北,都经历了岩浆活动、变质作用和构造作用,广泛的拼合和隆升(造山作用),形成了稳定的基底,上部的中—新元古代沉积为基底之上的第一套克拉通盖层。所以,库鲁克塔格地区前寒武纪基底也被称为"碰撞造山带物源区",这种构造属性与上石炭统碎屑岩的物源区岩石学特征信息是吻合的。

至于少量相当于新元古代成冰期的碎屑年龄(616～843 Ma,4 颗锆石),在塔里木北缘库鲁克塔格地区和南天山都有相对应的产物(胡霭琴等,2001;陆松年等,2003),被认为是 Rodinia 超大陆裂解的产物。

将研究区石炭系碎屑锆石和塔里木盆地志留纪—泥盆纪地层碎屑锆石年龄相比较,也可以获得一些有用的信息。塔里木北缘志留系碎屑岩碎屑锆石年龄主要集中在 400～600 Ma、700～900 Ma、1400～1600 Ma 和 1700～2400 Ma 四期(邬光辉等,2009)。不难发现,南天山石炭系物源缺失塔北地区地层中相当于中元古代的碎屑(1400～1600 Ma),而中元古代地层被称为是塔里木基底之上的第一套克拉通沉积盖层。该地块的开始隆升可能在新元古代的晚期至早古生代(胡霭琴等,2006),到晚古生代,隆升的幅度以及剥蚀加强,导致古老地块上覆的中元古代地质体,已经基本消失,所以,它只出现在志留系中,而在石炭系中很少见及。相反,下伏的古元古代地质体则成为晚石炭世的主要源区之一,这符合物源区和盆地沉积层序物质组分之间的反序列特征。同时,石炭系碎屑岩中大量变质岩岩屑也是很好的证据之一。与塔里木盆地相比,石炭系碎屑岩中中—新元古代的碎屑明显减少,表明中新元古代两次裂解事件对于塔里木盆地影响较大,而对南天山影响较小。在塔里木盆地北缘,志留系碎屑岩中早古生代(奥陶纪)的物源被认为是来自阿尔金(邬光辉等,2009)。但是根据南天山石炭系碎屑岩

的近源堆积、再旋回沉积特征并不明显,很难想象它是来自越过塔里木盆地的东部阿尔金或者是塔里木北缘志留系沉积物的再旋回。因此,有理由相信南天山晚石炭世碎屑岩古生代的物源主要来自南天山的岛弧和俯冲带。

根据以上分析,可以得出结论:南天山中段上石炭统碎屑岩的物源一部分来自南天山具有大陆岛弧性质的早古生代的俯冲消减带,另一部分来自东南部的塔里木北缘的前寒武纪古老地块,主要是由古元古代地质体组成的库鲁克塔格地块。

5.2 碰撞时间的制约

虽然,多数学者将南天山造山带视为一个经历了新生代再变形改造的晚古生代碰撞造山带(高俊等,2006),但还存在较大的分歧。总结目前对南天山造山带开始碰撞时间的各种认识,有早—中泥盆世、晚泥盆世—早石炭世、石炭纪—二叠纪、或者印支期等多种观点(李日俊等,2010)。这些认识主要来自蛇绿岩、玄武岩、花岗岩、麻粒岩、榴辉岩等岩浆岩和变质岩年代学以及微古化石(放射虫)的研究结果。那么,根据沉积记录是否可以对南天山构造带的碰撞时间提供制约?

南天山中段上石炭统碎屑岩的早古生代物源具有弧消减属性,最年轻的一组碎屑锆石年龄为 404～542 Ma,这表明在晚石炭世之前,南天山已经俯冲消减,碰撞已经开始,根据出现的最年轻的碎屑锆石年龄,可以进一步将开始碰撞时间限定在早泥盆世末—中泥盆世以后。它缺失中泥盆世到早石炭世(397～318 Ma)的锆石年龄,有两种可能的解释,一是物源区缺乏该阶段的岩浆活动和变质活动,无法提供这一阶段的碎屑锆石,这已经被天山岩石年代学数据和白垩系地层中碎屑锆石年代学所否定。库车拗陷北缘早白垩世砂岩中最集中的碎屑锆石年龄为 403～300 Ma(中泥盆世—晚石炭世),被解释为主要记录了塔里木板块与伊犁—中天山板块主碰撞阶段,晚泥盆世—早石炭世花岗岩与此相关(彭守涛等,2009);二是岩浆活动和变质作用形成的产物还没有遭受大规模的隆升和剥露,从而无法成为晚石炭世碎屑岩的物源。显然,后一种解释更为合理。白垩系碎屑岩中最丰富的是中泥盆世—石炭纪(403～300 Ma)的物源,其次是晚奥陶世－早泥盆世(467～409 Ma)的物源,前者在石炭纪沉积记录中没有任何反映,这表明它们大规模的隆升剥露应该在二叠纪及其后。而后者在晚石炭世碎屑岩中是最主要的物源,如果碰撞和隆升及其剥露是相伴随的,那么,将南天山造山带开始碰撞的时间限定到早泥盆世末—中泥盆世以后是合适的,至少是在南天山的中段及其东部,俯冲已经基本结束,碰撞业已开始。这一认识也获得蛇绿岩同位素年代学的支持(郝杰等,1993;龙灵利等,2006)。周鼎武等(2004)获得南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 392±7 Ma,并且认为记录了该地体经历高压麻粒岩相变质改造的峰期变质年龄,被认为代表着南天山洋在早泥盆世开始向北俯冲。事实上,我们认为它更代表着俯冲结束的年龄而不是俯冲开始的年龄,即在早泥盆世末,南天山洋向北的俯冲结束,碰撞已经开始。

上述认识同样能够获得沉积学的支持。根据贾承造等(2004)地层资料,在南天山地区下泥盆统与志留系基本上是连续沉积,东阿赖山、阔克沙勒岭等地发育巨厚的浊积岩,哈尔克山地区下泥盆统阿尔腾柯斯组发育碎屑岩、硅质岩、火山岩夹碎屑岩,它们应该属于深水盆地相;中泥盆统萨阿尔明组主要为中厚层碳酸盐岩夹碎屑岩,含珊瑚、腕足类化石,属于浅水相,被 Allen 等(1991)解释为海丘沉积;上泥盆统在南天山西部为碳酸盐岩、碎屑岩夹石膏沉积,东部大部分地区缺失,在萨阿尔明山为碳酸盐岩,在克孜勒塔格为中酸性火山岩、碎屑岩和灰岩(贾承造等,2004),这表明海盆接近消亡。南天山泥盆纪属于比较典型的海退层序,转折点应该在早泥盆世末。

能够进一步佐证碰撞作用开始时间是地层的接触关系,而且它也是构造事件最直接的反映。在南天山哈尔克山地区,下泥盆统阿尔腾柯斯组被下石炭统野云沟组不整合覆盖,在不整合面上可见底砾岩[1]。而且在南天山,早石炭世地层不整合超覆在从元古宙到下泥盆统不同时代地层之上,属于区域性不整合(贾承造等,2004)。此外,它与中天山的沉积特征可以相呼应。对巴仑台北至骆驼沟道班一带地质调查表明,相当于野云沟组的下石炭统马鞍桥组为沉积—火山岩建造,下部发育厚层巨砾岩、砾岩(砾石为基底岩石),与中天山巴仑台微地块的元古宙花岗片麻岩呈角度不整合或断层接触(夏林圻等,2002)。近年的研究认为,造山带的磨拉石建造发育和造山作用发生在时间上常常有滞后效应(Miall,1996),所以,综合上述分析,将南天山造山带开始碰撞的时间限定在早泥盆世末—中泥盆世是合适的。

6 结论

南天山中段上石炭统阿依里河组砂岩主要为含

砾砂岩、岩屑砂岩、次岩屑砂岩和含铁岩屑砂岩，砂岩成为主要有石英 67.41%(49.3%～85.8%)，其次是岩屑 25.07%(8.2%～43.5%)，少量长石 7.52%(0%～27.9%)。岩石具有低的结构成熟度和成分成熟度。碎屑岩 SiO_2 含量平均为 57.89%，Al_2O_3 7.87%，MgO 1.82%，具有较高的 CaO 11.95%，TFe_2O_3 4.41%，K_2O 1.45% 和 Na_2O 0.79%(0.26%～1.52%)。稀土总量∑REE 平均为 130.1×10^{-6}(49.1×10^{-6}～220.4×10^{-6})，Eu 异常为 0.74(0.61～1.10)，轻稀土略有富集，La/Yb 为 13.97(10.3～18.1)，La_N/Yb_N 为 9.4。砂岩中重矿物组合主要为锆石和白钛石，其次有电气石、磷灰石、金红石、石榴石、铬铁矿和锐钛矿。根据碎屑岩的砾石、砂岩碎屑、地球化学和重矿物组分特征，阿依里河组源岩主要为中—酸性火成岩，低级和中级变质岩和沉积岩，以及少量基性岩等。

砂岩碎屑组分 QFL 和 QpLvLs 图解表明，南天山上石炭统阿依里河组的碎屑样品的物源区主要属于消减杂岩源区，少许属于碰撞造山带和弧造山带源区。稀土元素分析表明，物源区主要为大陆岛弧以及活动大陆边缘。微量元素特征支持上述结论。根据 Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 和 Ti/Zr-La/Sc 判别图，阿依里河组砂岩物源区属于大陆岛弧区和活动大陆边缘区。Hf-La/Th 判别图进一步指出，物源区属于酸性弧来源区以及长英质和基性混合来源区，与上地壳源区相比，有铁镁质的叠加。上石炭统阿衣里河组碎屑岩 CIA 值为 52.24～76.46，校正后的 CIAcorr. 值为 52.25～89.40，平均 71.25。大部分样品 CIAcorr. 集中在 61.22～80.71 之间，表示物源区主要为中等程度的化学风化特征。

砂岩碎屑锆石 LA-ICP-Ms 锆石 U-Pb 年龄以及物质组分特征对比表明，南天山中段晚石炭世碎屑岩有两个主要源区，可能分别属于南天山早古生代岩浆弧及其消减带，以及塔里木北缘类似于库鲁克塔格的古元古代基底。南天山造山带开始碰撞的时间应该在早泥盆世末期—中泥盆世，俯冲汇聚应该在早古生代，碰撞带大规模的隆升剥露可能在二叠纪以后。

致谢：地球化学样品分析得到中国科学院地质与地球物理研究所靳新娣和李禾高级工程师的帮助，碎屑锆石年代学样品测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室第五春荣博士的支持。两位审稿人认真审阅文稿并提出宝贵意见。作者在此谨致谢意！

注 释

❶朱志新. 2005. 1∶25 万喀赞其幅(K44C002004)区域地质调查报告.

参 考 文 献

第五春荣，孙勇，袁洪林，王洪亮，钟兴平，柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 科学通报，53(16)：1923～1934.

高俊，龙灵利，钱青，钱青，黄德志，苏文，Reiner Klemd. 2006. 南天山：晚古生代还是三叠纪碰撞造山带？岩石学报，22(5)：1049～1061.

龚福华，李曰俊，王清华，胡世玲，黄智斌，罗俊成. 2003. 南天山西段古生代火山岩 Ar－Ar 年龄新资料. 高校地质学报，9(3)：494～498.

郭召杰，张志诚，刘树文，李惠民. 2003. 塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合：颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据. 岩石学报，19(3)：537～542.

韩宝福，何国琦，吴泰然，李惠民. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义. 新疆地质，22(1)：4～11.

郝杰，刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义. 地质科学，28(1)：93～95.

何国琦，李茂松，韩宝福. 2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究. 新疆地质，19(1)：7～11.

胡霭琴，韦刚健. 2006. 塔里木盆地北缘新太古代辛格尔灰色片麻岩形成时代问题. 地质学报，80(1)：126～134.

胡霭琴，张国新，陈义兵，张前锋. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地质事件的划分. 新疆地质，19(1)：12～19.

贾承造，张师本，吴绍祖. 2004. 塔里木盆地及周边地层. 北京：科学出版社. 25～77.

李日俊，张洪安，钱一雄，孟庆龙，赵岩，刘亚雷. 2010. 关于南天山碰撞造山时代的讨论. 地质科学，45(1)：57～65.

龙灵利，高俊，熊贤明，钱青. 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄. 岩石学报，22(1)：65～73.

陆松年，袁桂邦. 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据. 地质学报，77(1)：61～68.

马中平，夏林圻，徐学义，夏祖春，李向民，王立社. 2008. 南天山北部巴音布鲁克早古生代火成岩的地球化学特征与岩石成因. 岩石学报，24(10)：2289～2300.

彭守涛，李忠，许承武. 2009. 库车坳陷北缘早白垩世源区特征：来自盆地碎屑锆石 U-Pb 年龄的信息. 沉积学报，27(5)：956～966.

王家生，刘本培，张传恒，周洪瑞，王自强. 1999. 南天山野云沟石炭系研究新进展. 新疆地质，3(1)，40～46.

邬光辉，张宝收，郭春利，王成林，高辉. 2009. 塔里木盆地北部志留系碎屑锆石测年及其地质意义. 大地构造与成矿学，33(3)：418～426.

吴元保，郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报，49(16)：1589～1604.

夏林圻，夏祖春，徐学义，李向民，马中平，王利社. 2002. 天山古

生代洋陆转化特点的几点思考. 西北地质, 35(4): 9～20.

徐学义, 夏林圻, 马中平, 王彦斌, 夏祖春, 李向民, 王立社. 2006. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究. 岩石学报, 22(1): 83～94.

张志诚, 刘树文. 郭召杰, 郑海飞. 1998. 新疆库鲁克塔格斜长角闪岩岩石地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 17(2): 128～135.

周鼎武, 苏犁, 简平, 王润三, 柳小明, 陆关祥, 王居里. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义. 科学通报, 49(14):1411～1415.

周洪瑞, 张传恒, 王自强, 王家生. 1998. 南天山造山带综合地层学研究. 新疆地质, 16(4): 291～298.

朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩石学报, 22(1): 135～144.

朱志新, 李锦秩, 董莲慧, 张晓帆, 胡建卫, 王克卓. 2008. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限定. 岩石学报, 24(12): 2761～2766.

Allen M B, Windley B F, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1991. Basin evolution within and adjacent to the Tianshan Range, NW China. Journal of the Geological Society, London, 148: 369～378.

Bauluz B, Mayayo M J, Constanza F N, Lopez J M G. 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range(NE Spain): implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting. Chemical Geology, 168: 135～150.

Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 91(6): 611～627.

Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Province and tectonic control. Sedimentary Geology, 45:97～113.

Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92: 181～193.

Bock B, Bahlburg H, Wörner G, Zimmermann U. 2000. Tracing crustal evolution in the southern central Andes from late Precambrian to Permian with geochemical and Nd and Pb isotope data. Journal of Geology, 108:515～535.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meterorite studies. In Henderson P. eds., Rare earth element geochemistry. Development in geochemistry, 2. Elsevier Amsterdam, 63～107.

Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. AAPG Bulletin, 63(12): 2164～2182.

Fedo C M. Nesbitt H W. Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23:921～924.

Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. Journal of the Geological Society of London 144, 531～542.

Gao Jun, Li Maosong, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, He Guoqi. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogen, northwestern China. Tectonophysics, 287: 213～231.

Hallsworth C R, Morton C R, Claoue-Long J C, Fanning C M. 2000. Carboniferous sand provenance in the Pennine Basin, UK: constraints from heavy mineral and SHRIMP zircon age data. Sedimentary Geology, 137: 147～185.

Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. Journal of Sedimentary Petrology, 58: 820～829.

Li RenWei, Li Shuangying, Jin Fuquan, Wan Yusheng, Zhang Shukun. 2004. Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonic significance: constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircons. Sedimentary Geology, 166:245～264.

Li Zhong, Peng Shoutao. 2010. Detrital zircon geochronology and its provenance implications: responses to Jurassic through Neogene basin-range interactions along northern margin of the Tarim Basin, Northwest China. Basin Research, 22:126～138.

MacLean W H, Barrertt T J. 1993. Lithogeochemical techniques using immobile elements. Journal of Geochemical Exploration, 48:109～133.

McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, 21: 169～200.

Miall A D. 1996. The geology of fluvial deposits. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Morton A C, Claoue-Long J C, Berge C. 1996. Shrimp constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Stratigraphy Formation, North Sea. Journal of Geological Society, 153:915～929.

Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299: 715～717.

PanahiA, Young G M, Rainbird R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of Archean granite near Ville Marie, Que′bec, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(13): 2199～2220.

Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. 1987. Sand and sandstone. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 533

RahmanM J J, Suzuki S. 2007. Geochemistry of sandstones from the Miocene Surma Group, Bengal Basin, Bangladesh: Implications for Provenance, tectonic setting and weathering. Geochemical Journal, 41(6): 415～428.

Ronov B, Yaroshevskiy A A, Migdisov A A. 1991. Chemical constitution of the Earth's crust and geochemical balance of the major elements. International Geology Review, 33(10): 941

～1097.

Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312.

Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tianshan Range, central Asia. Geology, 18: 128～131.

Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 102～117.

Zhang Kaijun, Li Bing, Wei Qingguo, Cai Jianxin, Zhang Yuxiu. 2008. Proximal provenance of the western Songpan-Ganzi turbidite complex (Late Triassic, eastern Tibetan plateau): Implications for the tectonic amalgamation of China. Sedimentary Geology, 208: 36～44.

Characteristics of Petrology, Geochemistry, Heavy Minerals and Isotope Chronology of Upper Carboniferous Detrital Rocks in the Middle Segment of South Tianshan and Constraints to the Provenance and Tectonic Evolution

LI Shuangying, YANG Dongdong, WANG Song, WAN Qiu, WANG Daoxuan

College of Natural Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract

We can restore Late Paleozoic paleogeography and reveal tectonic evolution history of South Tianshan, based on the study of Carboniferous sedimentary records, when was in Late Paleozoic that Tianshan tectonic zone happened to great changes. The sandstones of Upper Carboniferous Ayilihe Formation in the middle segment of South Tianshan are mostly composed of pebbly sandstone, litharenite, sublitharenite, arkose and ferruginous sandstone. The component of the sandstones includes mostly quartz 67.41%, next lithic fragment 21.8%, and a little feldspar 7.52%. The sandstones have average of 2.07 for Q/F+L, and low textural and compositional maturity. The detrital rocks have average contents of SiO_2 64.78%, Al_2O_3 10.22%, TiO_2 0.35%, TFe_2O_3 4.23%, MgO 1.37%, CaO 7.16%, K_2O 2.13%, Na_2O 0.93%, and average 130.1×10^{-6} of $\sum$REE, 0.7 of δEu and 9.4 of La_N/Yb_N. Heavy mineral assemblage of the sandstones includes mostly zircon, leucoxene, limonite and pyrite, next tourmaline, apatite, rutile, garnet, chromite and anatase. The source rocks of the Ayilihe Formation are mostly composed of acidic igneous rock, lower-medium metamorphism rocks and sedimentary rocks, and a little basic rock. The provenance of the sandstones had tectonic settings of mostly subduction complex, next arc orogen and collision orogen, based on the QFL discriminant diagrams. According to the REE, trace elements, and Th-Co-Zr/10, Th-Sc-Zr/10, Ti/Zr-La/Sc discriminant diagrams, the provenance of detrital rocks had the tectonic settings of continental island arc and active continental margin, and with some femic constituents compared with the source region of the upper crust. The chemical index of alteration corrected (CIAcorr.) of the detrital rocks has an average of 71.25 (52.25～89.40), which indicates that provenance had mostly gone moderate chemical weathering. According to the U-Pb ages of LA-ICP-MS of 79 detrital zircon grains, the source rocks of Upper Carboniferous detrital rocks came from terrains with two different geological times, most 404～542 Ma, second 1797～2436 Ma, which indicates that source rocks came mostly from Early Paleozoic and paleo-Proterozoic. They are equivalent to magma arc of Early Paleozoic subduction zone in the northern of South Tianshan, and southeastern Proterozoic basement of Kulukedage in the northern of Tarim. Hence, it also indicates that the collision time of South Tianshan Orogen may be limited in the end of Early Devonian to Middle Devonian, subduction and converge happened during Early Paleozoic, and large-scale uplifting and exhumation happened after Permian.

Key words: composition of clastic rocks; chronology of detrital zircon; provenance; tectonic evolution; Upper Carboniferous; South Tianshan