

库车坳陷三叠系碎屑重矿物成分及其物源属性

王松,李双应,杨栋栋,程成

合肥工业大学,合肥,230009

内容提要:库车坳陷三叠系发育良好,出露齐全,主要由陆相碎屑岩组成。本文运用电子探针微区成分分析方法,对库车坳陷北部三叠系砂岩中石榴子石、电气石、铬尖晶石进行了矿物化学成分分析。结果显示,碎屑石榴子石主要富含铁铝榴石,其次为镁铝榴石、锰铝榴石,钙铝榴石含量较低,他们主要来自于低级—高级变质岩和花岗岩;电气石主要来自于变质沉积岩和花岗岩;铬尖晶石则主要源自岛弧玄武岩、洋岛玄武岩和与俯冲相关的橄榄岩。综合石榴子石与电气石研究结果表明,上三叠统碎屑物质更多地来自高级变质岩和花岗岩,而下三叠统碎屑物质主要源自低级变质岩和花岗岩。通过对比西南天山榴辉岩、片麻岩中石榴子石成分,本文所研究的高镁石榴子石以低钙铝榴石含量与榴辉岩中石榴子石相区别,而与片麻岩中石榴子石成分相似。西南天山榴辉岩在三叠纪时期可能尚未剥露至地表,但片麻岩已有相当范围的出露。上三叠统的碎屑铬尖晶石可能主要来自中天山及南天山的岛弧岩浆岩及蛇绿岩,部分源自洋岛玄武岩,为南天山多岛海造山提供了沉积学证据。

关键词:南天山;库车;三叠系;重矿物;物源

沉积岩包含了大陆地壳的成分、构造演化及生长历史等重要信息(Dickinson and Suczek, 1979; Roser and Korsch, 1986, 1988; Cox et al., 1995; Gao et al., 1999; Garzanti et al., 2007)。物源分析可以重现沉积物或沉积岩沉积前的历史,包括搬运距离、方向、源区的背景、气候以及源岩的类型(Pettijohn et al., 1987),进而为物源区的构造演化历史提供制约(Bhatia, 1983; Weltje and Eynatten, 2004; Li R W et al., 2004; Li Z et al., 2004; Li S Y et al., 2006; 李双应等, 2004, 2005)。

塔里木盆地北缘库车坳陷紧邻天山造山带,不少学者开展了该地区中—新生代沉积物源的研究,以揭示库车坳陷与天山造山带的盆山耦合特征。这些研究主要包括岩石学、地球化学以及部分单矿物颗粒分析等(Graham et al., 1993; Hendrix, 2000; Li Z et al., 2004; Li and Peng, 2010; 李忠等, 2004; 李双建等, 2006a, 2006b, 2007; 刘磊等, 2011)。岩石学和地球化学方法在研究单一物源的情况下可以取得良好的效果,但是在多重物源的情况下,由于平均效应,使得这两种方法均不能取得理想的效果(王建刚等, 2008),碎屑重矿物单颗粒分析方法在这

方面具有独特的优势。但是,对于库车坳陷沉积物单矿物的研究也仅限于上三叠统至新近系,此外,上三叠统碎屑矿物成分分析也仅见长石及多硅白云母。随着碎屑重矿物物源分析方法的广泛运用(Morton, 1985, 1986; Henry and Guidotti, 1985; 王建刚等, 2008; 李双建等, 2006a; 雷刚林等, 2011),使得这些分析方法日趋成熟,因此,本文拟通过对库车河剖面三叠系碎屑石榴子石、电气石以及铬尖晶石成分分析,试图弥补前人对该地区沉积记录信息提取的不完整,并揭示其物源属性以及揭示天山造山带三叠纪时期的隆升及剥蚀状态。

1 区域地质背景

天山造山带作为世界上规模最大的造山带之一,东西长 2500 km,南北宽几百千米,经由塔里木陆块、中天山岛弧与准噶尔陆块古生代的拼合形成(Xiao et al., 2008; Gao et al., 2009)。天山中—新生代的隆升为地处塔里木盆地北缘、天山南麓的库车坳陷提供物质来源。目前,南天山出露的主要是古生代未变质或浅变质的沉积岩、蛇绿岩、岩浆侵入体和火山岩,以及中—新生代沉积盆地;而中天山

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40972082 和 41172097)资助成果。

收稿日期:2013-06-19;改回日期:2013-11-04;责任编辑:周健。

作者简介:王松,男,1987 年生,博士研究生,沉积学专业,Email: wsong0564@163.com。通讯作者:李双应,男,教授,沉积学专业,Email: lsysteven@126.com。

具有明显的岛弧属性,发育一系列古生代岛弧火山岩及结晶基底(图 1)。

库车坳陷位于塔里木盆地北部,呈东西向展布,长 450 km,东起库尔勒,西至阿合奇,南北宽 20~60 km,南界在库车—喀什公路一线,北到天山南麓。库车坳陷由晚二叠世开始发育,是经历了多期构造运动叠加于古生代被动陆缘之上的中—新生代叠合前陆盆地(贾承造等,1997)。库车坳陷是由南天山多次逆冲形成的不对称箕形盆地,其地层以中—新元古界变质岩和震旦系—下二叠统沉积岩为基底,其上覆盖厚达万米的中—新生代陆相碎屑岩沉积。

库车坳陷三叠系发育良好,从下到上依次为俄霍布拉克组、克拉玛依组、黄山街组和塔里奇克组。俄霍布拉克组主要发育灰绿、紫红色中厚层砂岩、泥岩,底部为浅灰绿—灰白色厚层块状砾岩、砂岩,厚 118.0~541.0 m;克拉玛依组下部为紫红色泥岩,上部为灰色泥岩、灰绿色中厚层细砾岩与灰色泥岩互层,厚 200.0~885.0 m;黄山街组为灰色厚层块状泥岩、灰绿色中厚层砂岩互层,底部为灰绿色中厚层块状含砾砂岩夹砾岩透镜体,厚 30.0~559.0 m;塔里奇克组下部为灰白色中厚层砾岩、粗砂岩夹煤层,上部为灰绿色砂岩、泥岩、砾岩夹煤层,厚 26.0~497.0 m。已有研究表明,库车坳陷三叠纪沉积体系演化主要分为两个阶段:①早三叠世的河流—冲积沉积体系;②中—晚三叠世的湖泊—三角洲沉积体系(贾进华等,2002;黄克难等,2003;纪云龙等,

2003;李忠等,2004)。结合岩石学、地层学、沉积学、古流分析,表明库车坳陷三叠系碎屑物质主要来自北侧的天山造山带,具有明显的再旋回造山带构造属性(Hendrix et al., 1992; Hendrix, 2000; 李忠等,2004)。

2 采样与分析方法

本文共选取库车坳陷北部库车河剖面俄霍布拉克组 T083、克拉玛依组 T088 和塔里奇克组 T106 三个样品。T083 为俄霍布拉克组下部含砾砂岩, T088 为克拉玛依组中部粗粒岩屑砂岩, T106 为塔里奇克组上部含砾砂岩。所采集样品重量约 1.5 kg, 先将样品破碎至 100 μm 左右,通过磁法、重液分选,然后在双目镜下手工挑选出不同的单矿物颗粒。重矿物单颗粒电子探针分析在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成,仪器型号为 JXA-8100 型电子探针,工作条件:加速电压 15 kV,束流 20 nA,束斑直径 5 μm。分析结果见表 1~3。

3 结果与讨论

3.1 石榴子石

石榴子石常见于各种变质岩中,同时也见于岩浆岩中(Mange and Morton, 2007)。石榴子石主要分为两个系列即铝质系列和钙质系列,铝质系列包括镁铝榴石、铁铝榴石和锰铝榴石,钙质系列包括钙

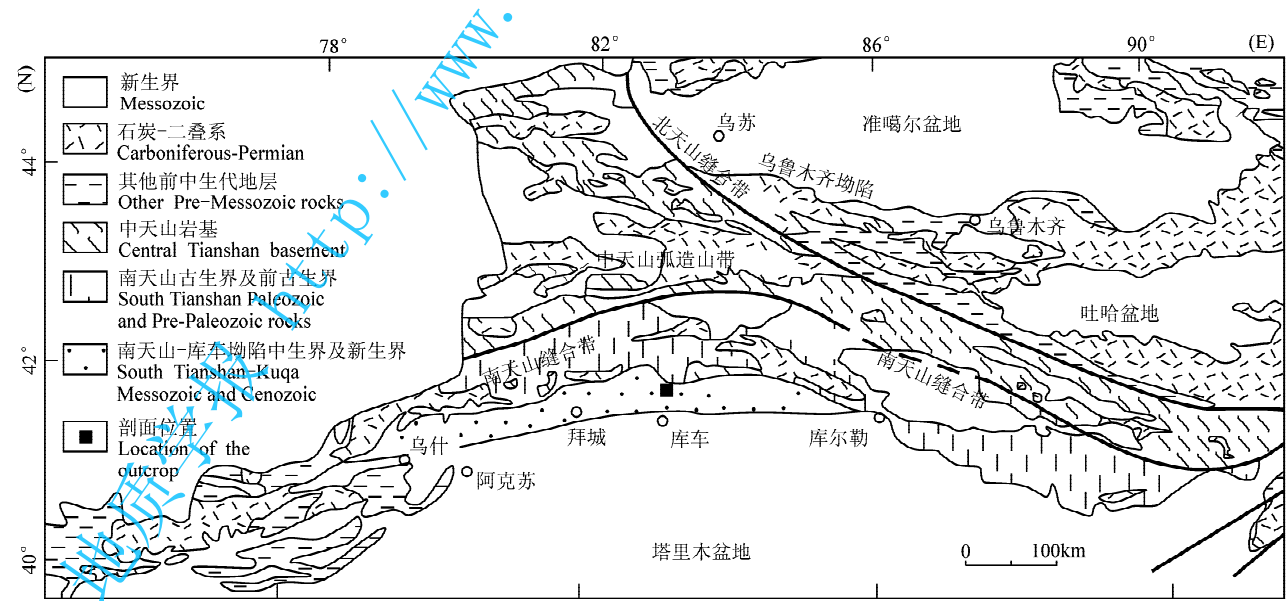


图 1 天山及邻区构造格架与采样剖面位置(据李忠等,2004)

Fig. 1 Geological map showing tectonic units in the Tianshan and adjacent regions and the location of sampling profile (after Li Zhong et al., 2004)

表 1 天山南缘三叠系砂岩中石榴子石电子探针分析结果(%)

Table 1 The electron microprobe analyses (%) of garnets in the Triassic sandstones in the southern margin of the Tianshan

样品	库车河克拉玛依组 T088														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	38.14	39.89	37.95	38.31	37.51	38.60	37.41	37.55	37.89	39.89	37.62	39.82	38.13	38.63	37.47
TiO ₂	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.08	0.01	0.09	0.00	0.05	0.03	0.00	0.06
Al ₂ O ₃	22.33	22.95	21.90	22.09	22.12	22.36	21.76	21.41	21.85	23.23	21.86	22.81	22.03	22.27	21.72
FeO	30.29	27.05	30.83	31.59	29.32	29.87	28.53	28.44	31.04	26.58	28.67	25.12	28.33	30.00	30.20
MnO	6.53	0.54	6.57	1.91	8.52	2.13	8.78	8.99	6.29	0.78	8.68	0.49	4.78	1.35	7.16
MgO	2.58	10.06	2.69	5.37	2.45	6.50	2.60	2.23	2.47	10.10	2.42	11.04	5.01	6.33	2.37
CaO	2.29	1.23	1.34	1.09	1.50	1.52	1.63	1.74	1.93	1.20	1.68	1.22	1.22	2.08	1.51
Na ₂ O	0.05	0.00	0.11	0.05	0.04	0.04	0.08	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03	0.12	0.10
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.02	0.04	0.00
NiO	0.00	0.02	0.00	0.05	0.01	0.04	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.04	0.05	0.01	0.02	0.04	0.05	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.07	0.04	0.03	0.00
Total	102.27	101.83	101.39	100.48	101.54	101.15	100.88	100.52	101.60	101.99	100.98	100.65	100.61	100.85	100.59
Si	2.998	3.000	3.013	3.015	2.981	2.993	2.988	3.018	3.006	2.991	3.005	3.005	3.004	3.000	3.005
TAl	0.002	0.000	0.000	0.000	0.019	0.007	0.012	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al(O)	2.066	2.032	2.048	2.047	2.051	2.035	2.035	2.026	2.042	2.042	2.056	2.027	2.044	2.037	2.051
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.004	0.005	0.001	0.005	0.000	0.003	0.002	0.000	0.004
Cr	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.003	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.004	0.002	0.002	0.000
Fe ²⁺	1.992	1.701	2.047	2.079	1.949	1.937	1.906	1.911	2.060	1.667	1.915	1.585	1.933	1.948	2.025
Mg	0.302	1.128	0.318	0.630	0.290	0.751	0.310	0.267	0.292	1.129	0.288	1.242	0.588	0.733	0.283
Mn	0.435	0.034	0.442	0.127	0.573	0.140	0.594	0.612	0.423	0.050	0.587	0.031	0.319	0.089	0.486
Ca	0.193	0.099	0.114	0.092	0.128	0.126	0.139	0.150	0.164	0.096	0.144	0.099	0.103	0.173	0.130
Na	0.008	0.000	0.017	0.008	0.006	0.006	0.012	0.011	0.011	0.010	0.005	0.004	0.005	0.018	0.016
K	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.004	0.001	0.000	0.002	0.001	0.003	0.000	0.002	0.004	0.000
Alm	68.165	57.424	70.074	70.999	66.278	65.560	64.627	65.006	70.090	56.660	65.267	53.608	65.667	66.202	69.249
And	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Gross	6.475	3.195	3.870	3.075	4.216	4.119	4.730	5.095	5.487	3.187	4.900	3.124	3.372	5.787	4.436
Pyrope	10.350	38.069	10.899	21.514	9.872	25.431	10.499	9.086	9.942	38.379	9.820	41.998	19.995	24.900	9.687
Spess	14.883	1.161	15.125	4.348	19.506	4.735	20.144	20.812	14.385	1.684	20.013	1.059	10.839	3.017	16.628
Uvaro	0.128	0.150	0.032	0.064	0.128	0.156	0.000	0.000	0.096	0.091	0.000	0.212	0.127	0.094	0.000

样品	库车河克拉玛依组 T088														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
SiO ₂	37.45	37.40	37.38	38.17	37.44	37.26	37.33	37.35	37.42	38.04	37.29	39.78	37.26	38.44	37.85
TiO ₂	0.00	0.15	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.08	0.04	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	21.65	21.47	21.72	22.26	22.12	21.80	22.01	21.50	21.57	22.09	21.78	23.01	21.99	22.09	21.86
FeO	28.87	29.73	31.31	28.59	29.88	29.69	29.87	29.70	30.17	30.29	29.06	25.88	28.87	30.58	31.41
MnO	7.57	7.93	6.42	3.16	7.67	8.16	7.10	8.13	7.16	3.02	8.59	0.63	9.29	1.98	6.47
MgO	2.40	2.31	2.54	5.21	2.60	2.48	2.52	2.65	2.45	5.27	2.39	10.37	2.31	6.45	2.59
CaO	2.64	1.62	1.16	3.42	1.69	1.39	1.58	1.04	1.73	1.72	1.30	1.15	1.38	1.00	1.69
Na ₂ O	0.15	0.02	0.00	0.08	0.01	0.02	0.13	0.09	0.00	0.01	0.06	0.01	0.03	0.09	0.02
K ₂ O	0.05	0.00	0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.03	0.04	0.00	0.03	0.02	0.02
NiO	0.00	0.03	0.03	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.06	0.05	0.00
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.03	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.05	0.04	0.06	0.00
Total	100.82	100.66	100.63	101.03	101.43	100.83	100.60	100.57	100.57	100.50	100.60	100.90	101.27	100.75	101.92
Si	2.989	3.004	3.001	2.976	2.974	2.984	2.987	2.997	3.004	2.993	2.994	3.007	2.975	2.997	2.996
TAl	0.011	0.000	0.000	0.024	0.026	0.016	0.013	0.003	0.000	0.007	0.006	0.000	0.025	0.003	0.004
Al(O)	2.024	2.031	2.034	2.020	2.044	2.039	2.061	2.029	2.039	2.039	2.053	2.049	2.043	2.025	2.034
Fe ³⁺	0.001	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.002	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.001
Cr	0.002	0.001	0.002	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.000
Fe ²⁺	1.926	1.997	2.102	1.859	1.985	1.988	1.999	1.993	2.025	1.993	1.951	1.636	1.928	1.994	2.079
Mg	0.286	0.277	0.304	0.606	0.308	0.296	0.301	0.317	0.293	0.618	0.286	1.169	0.275	0.750	0.306
Mn	0.512	0.539	0.437	0.209	0.516	0.553	0.481	0.553	0.487	0.201	0.584	0.040	0.628	0.131	0.434
Ca	0.226	0.139	0.100	0.286	0.144	0.119	0.135	0.089	0.149	0.145	0.112	0.093	0.118	0.084	0.143
Na	0.023	0.003	0.000	0.012	0.002	0.003	0.020	0.014	0.000	0.002	0.009	0.001	0.005	0.014	0.003
K	0.005	0.000	0.002	0.004	0.001	0.003	0.001	0.003	0.000	0.003	0.004	0.000	0.003	0.002	0.002
Alm	65.304	67.638	71.441	62.822	67.224	67.239	68.545	67.515	68.560	67.391	66.520	55.684	65.369	67.410	70.198
And	0.070	0.000	0.000	0.282	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Gross	7.490	4.690	3.294	9.187	4.839	4.033	4.645	3.029	5.004	4.776	3.715	3.017	3.875	2.637	4.839
Pyrope	9.684	9.368	10.331	20.468	10.427	10.012	10.308	10.738	9.925	20.901	9.752	39.773	9.324	25.345	10.318
Spess	17.355	18.272	14.836	7.054	17.477	18.717	16.502	18.718	16.479	6.805	19.915	1.373	21.304	4.421	14.645
Uvaro	0.096	0.032	0.097	0.187	0.032	0.000	0.000	0.000	0.032	0.126	0.097	0.153	0.128	0.188	0.000

续表 1

样品	库车河塔里奇克组 T106													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	37.77	37.73	38.07	37.75	39.05	39.18	38.86	37.58	38.53	38.10	37.68	39.03	38.85	37.69
TiO ₂	0.00	0.05	0.00	0.05	0.01	0.04	0.03	0.00	0.01	0.05	0.02	0.05	0.00	0.04
Al ₂ O ₃	22.10	21.59	21.92	21.86	22.37	22.64	22.19	21.79	22.22	22.28	22.26	22.43	22.80	21.93
FeO	30.14	35.01	26.90	34.16	31.34	31.25	29.44	29.38	31.97	35.38	31.59	30.72	27.40	28.26
MnO	6.14	2.99	10.15	1.22	0.87	0.90	0.31	7.09	1.31	0.78	1.77	0.20	1.44	9.92
MgO	2.95	2.72	3.66	3.34	6.90	6.91	8.19	3.36	5.54	4.04	5.42	7.27	8.43	2.64
CaO	2.03	0.69	0.80	2.37	1.25	1.21	0.97	1.52	1.67	0.99	1.37	0.94	1.29	1.12
Na ₂ O	0.06	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01	0.03	0.00	0.07	0.06	0.04
K ₂ O	0.00	0.04	0.02	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.05	0.02
NiO	0.02	0.00	0.06	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.05	0.03	0.06	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Total	101.20	100.83	101.61	100.84	101.92	102.20	100.03	100.78	101.34	101.66	100.15	100.70	100.33	101.70
Si	2.995	3.024	3.004	2.998	3.002	3.002	3.013	2.989	3.003	2.995	2.973	3.022	2.991	2.991
TAl	0.005	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.005	0.027	0.000	0.009	0.009
Al(O)	2.059	2.038	2.037	2.043	2.025	2.043	2.026	2.030	2.040	2.058	2.042	2.045	2.058	2.041
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.003	0.000	0.003	0.001	0.002	0.002	0.000	0.001	0.003	0.001	0.003	0.001	0.002
Cr	0.000	0.001	0.000	0.003	0.002	0.004	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Fe ²⁺	1.999	2.347	1.775	2.269	2.015	2.002	1.909	1.954	2.081	2.326	2.085	1.989	1.764	1.876
Mg	0.349	0.325	0.431	0.395	0.791	0.789	0.947	0.398	0.644	0.473	0.638	0.839	0.967	0.312
Mn	0.412	0.203	0.678	0.082	0.057	0.058	0.020	0.478	0.086	0.052	0.118	0.013	0.094	0.667
Ca	0.172	0.059	0.068	0.202	0.103	0.099	0.081	0.130	0.139	0.083	0.116	0.078	0.106	0.095
Na	0.009	0.000	0.008	0.003	0.004	0.000	0.000	0.011	0.002	0.005	0.000	0.011	0.009	0.006
K	0.000	0.004	0.002	0.002	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.005	0.002
Alm	68.162	79.985	60.140	76.962	67.950	67.891	64.567	66.026	70.556	79.256	70.514	68.136	60.169	63.580
And	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Gross	5.882	1.987	2.291	6.681	3.380	3.183	2.632	3.376	4.628	2.841	3.918	2.671	3.598	3.196
Pyrope	11.892	11.077	14.586	13.414	26.668	26.760	32.019	13.460	21.795	16.133	21.566	28.744	32.999	10.588
Spess	14.064	6.919	22.983	2.784	1.910	1.980	0.689	16.138	2.928	1.770	4.002	0.449	3.203	22.604
Uvaro	0.000	0.032	0.000	0.160	0.092	0.185	0.093	0.000	0.094	0.000	0.000	0.000	0.031	0.032

样品	库车河塔里奇克组 T106													
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
SiO ₂	38.82	39.47	38.54	39.15	38.96	39.08	37.78	37.95	37.76	38.95	36.96	38.04	39.43	37.50
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.07	0.02	0.03	0.05	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	22.54	23.09	22.31	22.22	22.32	22.92	21.56	22.08	21.89	22.63	21.47	22.32	22.74	21.86
FeO	28.63	25.33	32.13	29.28	28.08	29.51	28.11	29.03	33.98	28.73	29.85	32.78	24.98	31.77
MnO	1.27	0.30	0.43	0.69	0.67	0.95	9.04	5.45	2.21	0.73	9.48	1.42	1.43	7.78
MgO	7.13	11.26	6.30	7.64	8.78	7.62	2.66	4.91	3.17	8.21	1.66	5.05	10.75	1.96
CaO	2.29	1.08	0.94	1.69	1.21	1.29	1.63	0.99	1.84	1.50	0.84	1.18	0.91	0.44
Na ₂ O	0.06	0.08	0.07	0.05	0.03	0.04	0.09	0.09	0.04	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03
K ₂ O	0.05	0.01	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00
NiO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
Cr ₂ O ₃	0.03	0.04	0.05	0.01	0.00	0.04	0.01	0.03	0.03	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00
Total	100.82	100.66	100.79	100.77	100.06	101.51	100.88	100.57	100.99	100.82	100.30	100.89	100.36	101.36
Si	2.998	2.972	3.004	3.020	3.004	2.994	3.015	2.993	3.000	2.992	2.997	2.989	2.991	3.004
TAl	0.002	0.028	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.007	0.000	0.008	0.003	0.011	0.009	0.000
Al(O)	2.047	2.020	2.048	2.019	2.027	2.063	2.026	2.044	2.048	2.039	2.047	2.054	2.023	2.063
Fe ³⁺	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.004	0.001	0.002	0.003	0.002	0.000
Cr	0.002	0.002	0.003	0.001	0.000	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.003	0.000
Fe ²⁺	1.849	1.585	2.095	1.889	1.811	1.891	1.876	1.915	2.258	1.845	2.024	2.154	1.585	2.129
Mg	0.821	1.264	0.732	0.879	1.009	0.870	0.316	0.577	0.376	0.940	0.201	0.592	1.216	0.234
Mn	0.083	0.019	0.028	0.045	0.044	0.062	0.611	0.364	0.149	0.047	0.651	0.095	0.092	0.528
Ca	0.189	0.087	0.079	0.140	0.100	0.106	0.139	0.084	0.157	0.123	0.073	0.099	0.074	0.038
Na	0.009	0.012	0.011	0.007	0.004	0.006	0.014	0.014	0.006	0.001	0.002	0.003	0.006	0.005
K	0.005	0.001	0.002	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000
Alm	62.840	53.627	71.400	63.982	61.097	64.562	63.748	65.133	76.832	62.421	68.642	73.281	53.425	72.688
And	0.000	0.532	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Gross	6.346	2.296	2.519	4.700	3.373	3.492	4.704	2.750	5.234	4.052	2.475	3.380	2.342	1.290
Pyrope	27.897	42.776	24.956	29.760	34.054	29.717	10.753	19.637	12.777	31.797	6.805	20.124	40.984	7.994
Spess	2.823	0.648	0.968	1.527	1.476	2.105	20.764	12.384	5.061	1.606	22.079	3.215	3.098	18.028
Uvaro	0.093	0.121	0.158	0.031	0.000	0.124	0.032	0.095	0.096	0.123	0.000	0.000	0.152	0.000

表 2 天山南缘三叠系砂岩中电气石电子探针分析结果(%)

Table 2 The electron microprobe analyses (%) of tourmalines in the Triassic sandstones in the southern margin of the Tianshan

样品	库车河俄霍布拉克组 T083														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B ₂ O ₃	10.74	10.68	10.69	10.60	10.56	10.46	10.74	10.63	10.30	10.63	10.29	10.38	10.70	10.44	10.59
SiO ₂	36.18	35.86	35.79	36.89	36.11	35.58	36.34	36.11	33.52	35.74	35.42	34.48	36.87	35.31	35.73
TiO ₂	0.47	0.50	0.50	0.29	0.45	0.39	0.57	0.82	1.12	0.64	1.35	0.75	0.28	0.94	0.75
Al ₂ O ₃	35.27	33.85	34.79	32.08	32.67	34.74	34.48	33.83	34.29	34.61	26.51	34.50	34.81	31.23	34.25
FeO	5.22	5.44	4.45	4.84	5.35	10.40	6.26	6.69	10.41	5.94	8.14	10.93	6.06	7.85	6.72
MnO	0.00	0.04	0.02	0.01	0.08	0.10	0.04	0.00	0.02	0.07	0.02	0.05	0.08	0.09	0.06
MgO	6.17	7.02	6.78	7.96	7.25	2.42	5.89	5.74	2.82	5.62	9.29	2.63	5.57	6.61	5.28
CaO	0.67	1.31	1.17	0.41	0.89	0.13	0.70	0.18	1.28	0.77	3.21	0.32	0.25	1.26	0.51
Na ₂ O	1.73	1.83	1.70	2.29	1.89	1.78	2.02	2.24	1.52	1.81	1.14	1.83	1.43	1.98	1.94
K ₂ O	0.06	0.09	0.08	0.03	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.06	0.08	0.07	0.02	0.07	0.09
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.07	0.01	0.02	0.00	0.08	0.01	0.06	0.14	0.07	0.00	0.02	0.06	0.09
Total	96.53	96.65	96.02	95.39	95.32	96.10	97.19	96.30	95.42	96.03	95.52	95.94	96.09	95.85	96.04
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Si	5.854	5.834	5.819	6.045	5.943	5.911	5.882	5.905	5.655	5.845	5.982	5.772	5.990	5.880	5.863
Ti	0.057	0.061	0.061	0.036	0.056	0.049	0.069	0.101	0.142	0.079	0.171	0.095	0.034	0.117	0.093
Al	6.723	6.488	6.665	6.193	6.337	6.801	6.574	6.519	6.816	6.669	5.274	6.806	6.663	6.127	6.624
Fe	0.707	0.740	0.606	0.663	0.736	1.445	0.847	0.915	1.469	0.813	1.149	1.531	0.823	1.093	0.923
Mn	0.000	0.005	0.002	0.001	0.011	0.014	0.006	0.000	0.003	0.009	0.003	0.007	0.011	0.013	0.008
Mg	1.488	1.701	1.643	1.945	1.780	0.599	1.422	1.400	0.709	1.371	2.339	0.655	1.350	1.642	1.291
Ca	0.117	0.228	0.204	0.072	0.157	0.023	0.122	0.081	0.232	0.135	0.582	0.057	0.044	0.226	0.090
Na	0.544	0.576	0.534	0.727	0.603	0.574	0.634	0.709	0.495	0.573	0.374	0.595	0.451	0.640	0.616
K	0.013	0.019	0.016	0.005	0.011	0.013	0.013	0.009	0.017	0.013	0.018	0.014	0.005	0.015	0.018
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.002	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.005
Cr	0.003	0.004	0.009	0.001	0.003	0.000	0.011	0.002	0.007	0.019	0.009	0.000	0.002	0.008	0.012

样品	库车河俄霍布拉克组 T083														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
B ₂ O ₃	10.57	10.42	10.41	10.60	10.51	10.57	10.56	10.45	10.47	10.43	10.47	10.34	10.29	10.45	10.46
SiO ₂	35.14	35.68	34.48	36.10	35.98	35.78	36.49	35.30	35.69	35.56	34.98	35.29	34.10	34.91	36.06
TiO ₂	1.07	1.11	0.92	0.41	0.89	0.88	1.00	0.69	0.70	0.62	0.80	1.66	1.14	1.22	0.25
Al ₂ O ₃	34.26	30.68	34.00	33.31	31.09	33.94	30.80	33.32	32.43	33.33	34.58	28.08	32.98	33.74	31.10
FeO	5.72	7.57	10.10	5.27	5.92	5.62	5.99	7.39	7.50	9.21	7.92	7.21	11.28	10.53	6.71
MnO	0.04	0.02	0.09	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.03	0.04	0.03	0.02	0.14	0.15	0.00
MgO	6.01	6.90	3.47	6.91	7.85	6.48	7.87	5.41	5.89	4.04	4.25	8.38	3.05	3.18	7.57
CaO	1.15	0.53	0.74	0.78	0.90	1.29	0.92	0.31	0.73	0.33	0.49	3.13	0.89	0.29	0.47
Na ₂ O	1.48	2.43	1.81	2.12	2.15	1.57	2.19	2.13	1.99	1.96	1.88	1.20	1.85	2.10	2.61
K ₂ O	0.10	0.03	0.10	0.05	0.07	0.08	0.04	0.06	0.04	0.02	0.07	0.04	0.10	0.07	0.04
NiO	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.08	0.06	0.00	0.03	0.09	0.01	0.04	0.06	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
Total	95.64	95.45	96.12	95.62	95.47	95.64	95.95	95.16	95.48	95.57	95.48	95.37	95.83	96.67	95.27
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Si	5.775	5.950	5.757	5.921	5.951	5.784	6.004	5.871	5.925	5.927	5.804	5.930	5.756	5.804	5.993
Ti	0.132	0.140	0.116	0.050	0.111	0.108	0.123	0.087	0.088	0.077	0.100	0.209	0.145	0.153	0.031
Al	6.636	6.928	6.689	6.436	6.059	6.575	5.973	6.529	6.342	6.545	6.760	5.559	6.561	6.609	6.089
Fe	0.786	1.056	1.411	0.723	0.820	0.773	0.824	1.028	1.041	1.283	1.099	1.013	1.592	1.464	0.933
Mn	0.003	0.003	0.013	0.003	0.000	0.003	0.003	0.000	0.005	0.006	0.004	0.002	0.020	0.021	0.000
Mg	1.473	1.715	0.863	1.690	1.936	1.589	1.930	1.342	1.458	1.003	1.052	2.100	0.769	0.789	1.876
Ca	0.203	0.094	0.133	0.137	0.160	0.228	0.163	0.056	0.131	0.060	0.087	0.565	0.162	0.052	0.085
Na	0.472	0.786	0.585	0.672	0.690	0.501	0.700	0.685	0.640	0.634	0.604	0.390	0.606	0.676	0.840
K	0.020	0.007	0.021	0.011	0.016	0.016	0.009	0.013	0.007	0.005	0.015	0.009	0.022	0.016	0.008
Ni	0.003	0.002	0.000	0.004	0.003	0.000	0.003	0.006	0.001	0.002	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
Cr	0.011	0.008	0.000	0.004	0.012	0.001	0.005	0.007	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001

续表 2

样品	库车河三叠系塔里奇克组 T106														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B ₂ O ₃	10.36	10.59	10.46	10.13	10.58	10.76	10.64	10.43	10.35	10.56	10.82	10.74	10.34	10.73	10.53
SiO ₂	35.17	37.03	35.98	34.90	36.54	36.55	37.20	35.84	34.94	35.33	36.49	35.87	34.61	35.67	36.32
TiO ₂	0.30	0.69	0.36	1.97	0.98	0.57	0.33	0.37	0.64	0.21	0.60	0.98	0.87	0.51	0.33
Al ₂ O ₃	34.72	29.98	31.99	26.21	31.16	35.57	31.61	34.09	33.27	35.55	34.28	34.63	33.47	35.05	35.13
FeO	12.63	5.00	6.44	13.79	6.48	6.84	7.53	12.71	14.30	9.81	4.96	4.99	11.98	5.22	13.52
MnO	0.14	0.01	0.03	0.08	0.00	0.05	0.06	0.25	0.19	0.04	0.01	0.10	0.11	0.04	0.21
MgO	0.83	8.96	6.46	5.39	7.26	4.70	6.82	1.25	1.18	2.92	7.24	6.60	2.42	6.47	0.10
CaO	0.31	1.49	1.70	2.44	1.34	0.50	0.03	0.05	0.14	1.06	1.44	1.38	0.36	1.41	0.06
Na ₂ O	1.61	2.05	1.53	1.42	1.80	1.58	2.78	1.80	2.25	1.28	1.51	1.39	1.95	1.52	1.48
K ₂ O	0.03	0.07	0.08	0.10	0.03	0.05	0.03	0.05	0.09	0.03	0.07	0.08	0.08	0.07	0.05
NiO	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.05	0.06	0.04	0.02	0.10	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.07	0.01	0.01	0.04	0.00
Total	96.14	95.93	95.10	96.49	96.30	97.18	97.05	96.85	97.35	96.81	97.51	96.75	96.19	96.74	97.72
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Si	5.900	6.076	5.976	5.986	6.000	5.903	6.074	5.972	5.867	5.866	5.860	5.805	5.818	5.780	5.997
Ti	0.037	0.085	0.044	0.254	0.121	0.069	0.041	0.047	0.080	0.026	0.073	0.119	0.110	0.063	0.041
Al	6.864	5.795	6.261	5.297	6.029	6.768	6.082	6.693	6.583	6.896	6.485	6.603	6.630	6.692	6.834
Fe	1.773	0.686	0.895	1.978	0.890	0.924	1.029	1.770	2.008	1.350	0.667	0.675	1.684	0.707	1.867
Mn	0.020	0.002	0.005	0.011	0.000	0.007	0.008	0.035	0.026	0.005	0.001	0.013	0.016	0.006	0.029
Mg	0.207	2.191	1.601	1.379	1.776	1.133	1.660	0.311	0.295	0.717	1.733	1.592	0.606	1.563	0.025
Ca	0.055	0.262	0.303	0.450	0.236	0.086	0.005	0.009	0.025	0.187	0.248	0.239	0.064	0.246	0.010
Na	0.522	0.651	0.491	0.473	0.573	0.494	0.879	0.582	0.733	0.408	0.470	0.437	0.636	0.479	0.473
K	0.007	0.014	0.018	0.023	0.006	0.010	0.006	0.010	0.019	0.006	0.014	0.015	0.017	0.015	0.011
Ni	0.000	0.000	0.003	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.006	0.008	0.006	0.003	0.014	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.008	0.001	0.001	0.005	0.000

样品	库车河三叠系塔里奇克组 T106														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
B ₂ O ₃	10.74	10.62	10.56	10.57	10.76	10.75	10.75	10.72	10.73	10.56	9.90	10.62	10.65	10.65	
SiO ₂	36.84	36.43	35.69	36.40	37.04	36.69	37.26	37.44	36.58	36.03	33.07	35.88	35.71	35.23	
TiO ₂	0.68	0.60	0.08	1.03	0.58	0.82	0.42	0.12	0.51	0.58	0.63	0.50	0.67	0.81	
Al ₂ O ₃	33.98	33.32	36.19	32.60	34.01	33.57	31.62	32.17	34.28	33.82	32.60	32.64	33.75	35.64	
FeO	7.07	8.65	12.28	8.58	5.22	4.96	2.17	5.54	6.10	9.40	12.23	6.68	6.01	8.10	
MnO	0.00	0.02	0.30	0.10	0.03	0.01	0.04	0.00	0.04	0.04	0.08	0.05	0.01	0.10	
MgO	5.69	4.99	0.77	4.93	3.65	7.01	10.19	7.84	5.94	4.04	1.51	7.06	6.66	4.07	
CaO	0.29	0.40	0.10	0.39	0.31	0.74	1.09	0.08	0.93	0.38	0.65	1.36	1.20	0.90	
Na ₂ O	1.98	1.91	1.71	1.96	1.86	2.20	2.24	2.82	1.76	1.94	1.65	1.89	1.75	1.57	
K ₂ O	0.01	0.05	0.03	0.05	0.03	0.06	0.13	0.05	0.04	0.04	0.04	0.08	0.06	0.08	
NiO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.02	0.05	0.07	0.00	
Total	97.31	97.00	97.71	96.64	96.59	96.80	95.89	96.80	96.99	96.83	92.40	96.84	96.57	97.14	
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	
Si	5.961	5.963	5.872	5.987	5.985	5.933	6.027	6.070	5.923	5.927	5.803	5.869	5.827	5.750	
Ti	0.083	0.074	0.010	0.127	0.071	0.099	0.051	0.015	0.063	0.072	0.083	0.062	0.082	0.099	
Al	6.478	6.426	7.015	6.318	6.475	6.397	6.025	6.145	6.539	6.555	6.741	6.291	6.489	6.853	
Fe	0.957	1.184	1.690	1.181	0.706	0.671	0.293	0.751	0.826	1.293	1.796	0.914	0.820	1.105	
Mn	0.000	0.003	0.042	0.014	0.003	0.002	0.005	0.000	0.006	0.005	0.011	0.007	0.001	0.014	
Mg	1.373	1.217	0.188	1.208	1.602	1.689	2.456	1.895	1.434	0.991	0.395	1.722	1.619	0.989	
Ca	0.031	0.070	0.017	0.069	0.054	0.128	0.189	0.013	0.161	0.067	0.122	0.239	0.209	0.158	
Na	0.619	0.607	0.547	0.626	0.582	0.690	0.703	0.886	0.551	0.617	0.561	0.598	0.553	0.496	
K	0.002	0.010	0.007	0.010	0.006	0.012	0.027	0.010	0.008	0.008	0.010	0.018	0.012	0.017	
Ni	0.001	0.000	0.001	0.000	0.006	0.000	0.000	0.006	0.000	0.001	0.002	0.001	0.005	0.000	
Cr	0.002	0.003	0.000	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.003	0.007	0.008	0.000	

表 3 天山南缘三叠系塔里奇克组砂岩中铬尖晶石电子探针分析结果(%)

Table 3 The electron microprobe analyses (%) of chromian spinels in the sandstone of the Triassic Talique Formation in the southern margin of the Tianshan

Comment	库车河塔里奇克组 T106													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Na ₂ O	0.00	0.00	0.05	0.00	0.07	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.14	0.03	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.12	0.06	0.01	0.06
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
TiO ₂	0.40	0.23	0.53	0.27	0.09	1.51	2.22	0.24	0.09	0.26	0.17	1.01	1.24	1.03
Al ₂ O ₃	14.76	7.28	10.64	5.74	7.02	18.74	10.45	14.28	7.30	5.32	5.25	19.83	17.89	24.32
Cr ₂ O ₃	51.46	56.03	39.73	55.52	60.39	33.32	39.73	49.50	58.73	50.72	60.49	37.32	37.86	35.04
FeO	18.50	26.52	38.95	30.50	20.89	36.11	40.21	25.99	25.60	37.50	25.25	27.52	33.64	25.42
MnO	0.41	0.54	0.59	0.53	0.39	0.40	0.46	0.38	0.33	0.51	0.29	0.25	0.37	0.25
MgO	14.44	7.43	7.52	6.21	8.92	6.92	6.74	7.87	6.29	5.22	7.77	13.09	7.05	12.94
NiO	0.25	0.04	0.08	0.00	0.09	0.11	0.22	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.21	0.11
Total	100.23	98.07	98.04	98.76	97.79	97.10	100.02	98.25	98.35	99.54	99.30	99.03	98.25	99.12
Na	0.000	0.000	0.003	0.000	0.005	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000
Si	0.004	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.004	0.002	0.000	0.002
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.009	0.006	0.013	0.007	0.002	0.038	0.056	0.006	0.002	0.007	0.004	0.024	0.031	0.024
Al	0.543	0.296	0.423	0.236	0.284	0.732	0.412	0.561	0.299	0.218	0.213	0.727	0.694	0.877
Cr	1.271	1.531	1.061	1.530	1.638	0.873	1.051	1.304	1.614	1.395	1.643	0.918	0.986	0.848
Fe ³⁺	0.159	0.159	0.492	0.220	0.075	0.319	0.426	0.125	0.082	0.376	0.130	0.304	0.258	0.225
Fe ²⁺	0.324	0.607	0.609	0.669	0.524	0.682	0.699	0.600	0.662	0.715	0.596	0.412	0.668	0.426
Mn	0.011	0.016	0.017	0.016	0.011	0.011	0.013	0.011	0.010	0.015	0.008	0.006	0.010	0.006
Mg	0.672	0.383	0.379	0.323	0.456	0.342	0.336	0.391	0.326	0.271	0.398	0.607	0.346	0.590
Ni	0.006	0.001	0.002	0.000	0.003	0.003	0.006	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.006	0.003
Cr [#]	0.701	0.838	0.715	0.867	0.852	0.544	0.718	0.699	0.844	0.865	0.885	0.558	0.587	0.492
Mg [#]	0.675	0.387	0.384	0.326	0.465	0.334	0.325	0.395	0.330	0.275	0.401	0.596	0.341	0.581
Fe ²⁺ / Fe ³⁺	2.039	3.815	1.239	3.033	6.965	2.135	1.641	4.816	8.057	1.900	4.601	1.354	2.591	1.896

注:FeO 为全铁含量,Cr[#] = Cr/(Cr+Al), Mg[#] = Mg/(Mg+Fe)。

铝榴石、钙铁榴石和钙铬榴石。石榴子石化学成分
的多样性及其在风化、搬运、沉积和成岩过程中的稳
定性使其成为物源分析的理想对象(Morton, 1991;
Preston et al., 2002; Sabeen et al., 2002)。Morton (1985,1986)指出,低钙石榴子石较高钙石
榴子石稳定,特别是在酸性流体的参与下,高钙石榴
子石易向低钙石榴子石转化,同时,如果磷灰石与石
榴子石共存,则石榴子石很可能未被改变。本文所
分析的样品中均有磷灰石存在,因此,文中低钙石榴
子石组合能够反映物源区母岩特征。本次研究共获
得了 58 颗碎屑石榴子石的化学组成数据,其中克拉
玛依组 30 颗,塔里奇克组 28 颗。图 2 表示了 T088
和 T106 中石榴子石组成的分析结果(图 2b,c)以及
西南天山超高压榴辉岩和片麻岩中石榴子石组成特
征(图 2a)(高俊,1997;Gao and Klemd, 2000; 张立
飞等,2002;李强等,2004;苏文等,2006)。

克拉玛依组砂岩样品(T088)中的碎屑石榴子

石多为富铁铝榴石、镁铝榴石、锰铝榴石和钙铝榴
石,含量分别为 53.6%~71.4%、9.1%~42.0%、
1.1%~21.3%、2.6%~9.2%。塔里奇克组砂岩样
品(T106)中石榴子石同样为富铁铝榴石(53.4%~
80.0%),镁铝榴石(6.8%~42.8%),锰铝榴石
(0.4%~23.0%)和钙铝榴石(1.3%~6.7%)。

T088 的 30 颗石榴子石中,锰铝榴石含量超过
10%的占 66.7%(20 颗);T106 中 28 颗石榴子石,
锰铝榴石含量大于 10%的占 28.6%(8 颗)。锰铝
榴石主要见于花岗岩、花岗伟晶岩和一些低级变质
岩(如千枚岩)中。由此可见,天山南缘三叠系碎屑
物质有一定量的低级变质岩或花岗岩类贡献。中三
叠统至上三叠统中石榴子石的锰铝榴石含量明显降
低,低级变质岩或花岗岩类对碎屑物质的贡献有所
减少。

本文所研究的石榴子石中镁铝榴石含量具有较
大变化范围。T106 中石榴子石的镁铝榴石、铁铝榴

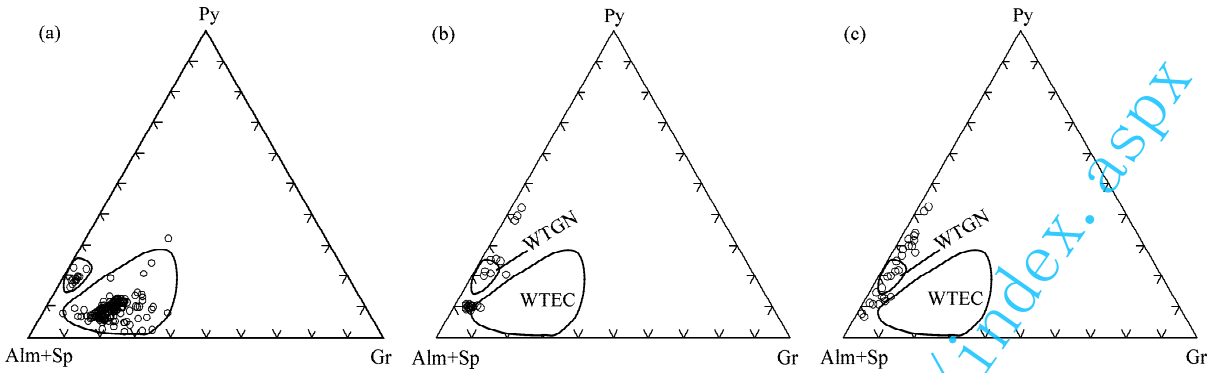


图 2 天山南缘三叠系碎屑石榴子石组成与西南天山变质岩中石榴子石组成的对比

Fig. 2 Comparison of the compositions of detrital garnets from the Triassic sandstones in the southern margin of the Tianshan with those from metamorphic rocks in the Southwest Tianshan

(a)—西南天山榴辉岩和片麻岩石榴子石组成(数据据高俊,1997;Gao and Klemd, 2000; 张立飞等,2002;李强等,2004;苏文等,2006);(b)—克拉玛依组碎屑石榴子石组成;(c)—塔里奇克组碎屑石榴子石组成;Py、Alm、Sp、Gr 分别为镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石和钙铝榴石;WTEC—西南天山榴辉岩;WTGN—西南天山麻粒岩相片麻岩

(a)—The garnet compositions of gneiss and eclogite in the Southwest Tianshan (data from Gao,1997; Gao and Klemd, 2000; Zhang et al. , 2002; Li Qiang et al. , 2004; Su et al. , 2006); (b)—compositions of the detrital garnets in the Kelamayi Formation; (c)—compositions of the detrital garnets in the Taliqi Formation; Py, Alm, Sp and Gr are the abbreviations of pyrope, almandine, spessartine and grossular, respectively; WTEC—eclogite in the Southwest Tianshan; WTGN—gneiss in the Southwest Tianshan

石和锰铝榴石具有一个连续的变化范围,镁铝榴石含量超过 20% 的占 57.1%(16 颗),其中两颗高达 41.0%、42.8%。而 T088 中石榴子石根据镁铝榴石含量可以明显分为 3 组,9.1%~10.9%(19 颗)、20.0%~25.4%(7 颗)、38.1%~42.0%(4 颗),高于 20% 的占 33.3%。两个样品中钙铝榴石含量均不超过 10.0%,最高为 T088 的 9.2%。高镁低钙的石榴子石一般被认为存在于高级变质沉积岩(麻粒岩相)、紫苏花岗岩或中酸性火成岩捕掳体中(Hamer and Moyes, 1982; Sabeen et al. , 2002; Morton et al. , 2004)。Sabeen 等(2002)研究了印度南部河流、海滩和凤城沙丘中的石榴子石组成,几乎所有的石榴子石都具有高镁铝榴石(>20%)和低钙铝榴石(<10%)的含量特征,认为其主要来自于基底麻粒岩相变质沉积岩和紫苏花岗岩。但是,由于物源区基底紫苏花岗岩分布有限,因此,这部分高镁低钙的碎屑石榴子石可能主要来源于高级变质沉积岩,而且塔里奇克组碎屑石榴子石更多的来源于高级变质岩。

高俊(1997)首次报道了在中天山南缘断裂带南侧的蓝片岩层中发现了榴辉岩。通过对石榴子石成分测定表明,西南天山榴辉岩中石榴子石主要为铁铝榴石(53.15%~79.25%)、钙铝榴石(5.00%~29.79%)、镁铝榴石(4.20%~23.63%)、锰铝榴石(0.39%~12.92%)(高俊,1997;Gao and Klemd,

2000; 张立飞等,2002;苏文等,2006)。显然,西南天山榴辉岩中石榴子石的钙铝榴石含量与天山南缘三叠系碎屑石榴子石中钙铝榴石含量具显著差异。本文测定的石榴子石组成与西南天山榴辉岩中石榴子石组成对比发现,只有 T088 中的两颗石榴子石组成落于西南天山榴辉岩中的石榴子石组成区域的边缘(图 2),指示天山南缘三叠系碎屑石榴子石并非来自西南天山超高压变质榴辉岩,而可能来自于较现今保存的榴辉岩更浅的层位。

李强等(2004)通过对西南天山低压麻粒岩相片麻岩的研究表明,其中石榴子石含铁铝榴石 65.94%~77.28%,镁铝榴石 16.5%~22.44%,钙铝榴石 1.32%~5.06,锰铝榴石 2.45%~6.35%。T088 和 T106 分别有 3 颗、6 颗石榴子石组成与西南天山麻粒岩相片麻岩中石榴子石组成相似,这与 Sabeen 等(2002)关于高镁低钙石榴子石来源的认识一致,指示了三叠系碎屑石榴子石中高镁低钙部分可能部分来源于西南天山的片麻岩。因此,西南天山片麻岩在中三叠世时期已抬升至地表并遭受剥蚀。

3.2 电气石

电气石可以存在于成分多变、各种级别的变质岩中,也可以存在于花岗质侵入岩及其伟晶岩、细晶岩和热液接触带中(Henry and Guidotti, 1985; Henry and Dutrow, 1992)。电气石在物理风化和化学风化中具有较强的稳定性,是碎屑沉积岩中最

稳定的重矿物,因此是沉积岩中常见的副矿物。电气石化学成分多变,具有 3 个连续的固溶体系列即锂电气石、黑电气石、镁电气石/钙镁电气石,使其成为碎屑物源的良好指示矿物。Henry and Guidotti (1985)将电气石化学成分与母岩岩石类型联系起来,定义了 Al-Fe(tot)-Mg 和 Ca-Fe(tot)-Mg 三角图解,能够清晰地判定电气石母岩特征。

本文共取得天山南缘三叠系 59 颗碎屑电气石化学成分数据,其中俄霍布拉克组(T083)30 颗,塔里奇克组(T106)29 颗,并对它们进行 Al-Fe(tot)-Mg 和 Ca-Fe(tot)-Mg 投点。在 Al-Fe(tot)-Mg 三角图中,T083 中的电气石有 8 颗落于 B 区(贫 Li 花岗岩及花岗伟晶岩、细晶岩),14 颗落入 D 区(饱和铝的变泥质岩和变砂屑岩),6 颗位于 E 区(贫铝的变泥质岩和变砂屑岩),只有 2 颗落入 F 区(富 Fe³⁺ 的石英电气石岩、钙质硅酸盐岩和变泥质岩)(图 3a);T106 的电气石中有 9 颗落于 B 区(贫 Li 花岗岩、花岗伟晶岩、细晶岩),11 颗位于 D 区(饱和铝的变泥质岩和变砂屑岩),5 颗落入 E 区(贫铝的变泥质岩和变砂屑岩),分别有 2 颗落入 F 区(富 Fe³⁺ 的石英电气石岩、钙质硅酸盐岩和变泥质岩)和未定义区域(图 3c)。在 Ca-Fe(tot)-Mg 三角图中具有类似的特征(图 3b,d),几乎所有电气石均落于贫 Li 的花岗岩、花岗伟晶岩、细晶岩区域和贫钙的变泥质岩、变砂屑岩和石英电气石岩区域,只有 T083 中有两颗电气石落于富钙的变泥质岩、变砂屑岩和钙质硅酸盐岩石区域。因此,天山南缘三叠系碎屑电气石中有近三分之一可能来自于贫锂花岗岩,其余则多来自富铝、贫钙或富钙、贫铝的变质沉积岩,极少数来自石英电气石岩。除此之外,上三叠统来自花岗岩的组分增加,这与石榴子石研究结果相悖,因此,前文高锰铝榴石含量的石榴子石可能并非全部来自花岗岩,而可能更多地来自低级变质岩。

3.3 铬尖晶石

铬尖晶石普遍存在于镁铁—超镁铁质岩石中,由于其稳定的物理化学性质,也常以副矿物形式存在于沉积岩中。碎屑铬尖晶石化学成分常被用来辨别源岩的构造背景(Barnes and Roeder, 2001)。

电子探针分析结果显示,天山南缘三叠系塔里奇克组碎屑铬尖晶石含 5.25%~24.32% 的 Al₂O₃, 33.32%~60.49% 的 Cr₂O₃, 5.22%~14.44% 的 MgO, 18.50%~40.21% 的 FeO, TiO₂ 含量大多数大于 0.2%(0.09%~2.22%),Cr[#] 具有较大的变化范围,为 0.49~0.89,Mg[#] 介于 0.27~0.68 之间,

Fe²⁺/Fe³⁺ 为 1.24~8.06(表 3)。

铬尖晶石特征参数 TiO₂、Cr[#]、Mg[#]、Fe²⁺/Fe³⁺ 等具有较大的变化范围,指示了塔里奇克组碎屑铬尖晶石具有多种不同的来源。Kamenetsky 等(2001)指出地幔尖晶石较火山尖晶石一般具有较低的 TiO₂ 含量(<0.2%)和较高的 Fe²⁺/Fe³⁺ (>2),但是在玻安岩和岛弧拉斑玄武岩中也存在含较低 TiO₂ 和较高 Fe²⁺/Fe³⁺ 的尖晶石。Lenaz 等(2000)根据地幔岩中尖晶石和火山岩中尖晶石 TiO₂ 含量和 Fe²⁺/Fe³⁺ 的不同,以 TiO₂<0.2%,Fe²⁺/Fe³⁺>3 和 Fe²⁺/Fe³⁺<4 为限,将尖晶石划分为橄榄岩中的尖晶石和火山岩中的尖晶石两类。塔里奇克组中铬尖晶石 TiO₂ 含量绝大多数大于 0.2%(0.23%~2.22%,11 颗),其中 >1% 的有 5 颗,只有 3 颗小于 0.2%(0.09%~0.17%),因此,所分析的碎屑铬尖晶石应多数来自于火山岩,而少数可能来自于橄榄岩(图 4a)。铬尖晶石中 Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量与母岩浆成分密切相关,因此可以以此来判别尖晶石是来自何种地球动力学背景的岩浆岩(Kamenetsky et al., 2001)。天山南缘三叠系塔里奇克组中的铬尖晶石大多数来自岛弧背景的岛弧玄武岩和与俯冲相关的阿尔卑斯型橄榄岩,其次来源于洋岛玄武岩,极少数与洋中脊玄武岩中尖晶石成分相似(图 4b、c、d)。

此外,本文还收集了已发表的从南天山晚古生代镁铁—超镁铁岩中分离出来的尖晶石数据。榆树沟蛇绿岩中铬尖晶石 Cr[#] 为 0.16~0.30,Mg[#] 为 0.63~0.80,TiO₂ 含量为 0~0.16%,Al₂O₃ 为 39.7%~46.58%,具有深海橄榄岩中尖晶石的特点(王焰等,1999;徐向珍等,2011);东德沟橄榄岩中铬尖晶石 Cr[#] 为 0.41~0.87,Mg[#] 为 0.21~0.61,TiO₂ 含量为 0.01%~0.11%,Al₂O₃ 为 5.05%~30.08%,其宿主岩石具有 SSZ 型橄榄岩特征(孔凡梅等,2011);满德勒克蛇绿岩中铬尖晶石 Cr[#] 为 0.47~0.65,Mg[#] 为 0.44~0.52,TiO₂ 含量为 0~0.44%,Al₂O₃ 为 18.01%~28.86%,同时具备了 SSZ 型橄榄岩和深海橄榄岩中尖晶石特征(张炜斌等,2011)(图 4b、d)。对比发现,本文研究的少部分碎屑铬尖晶石成分与南天山东德沟镁铁—超镁铁岩中部分铬尖晶石成分相似,而与其他镁铁—超镁铁岩中铬尖晶石成分具显著差别,因此,这部分铬尖晶石可能代表来自俯冲体系的橄榄岩的尖晶石。虽然目前研究区基性、超基性火山岩中的尖晶石数据匮乏,无法对比,但大量研究表明,南天山及中天山存在大量古生代岛弧型火山岩,可以作为天山南缘三

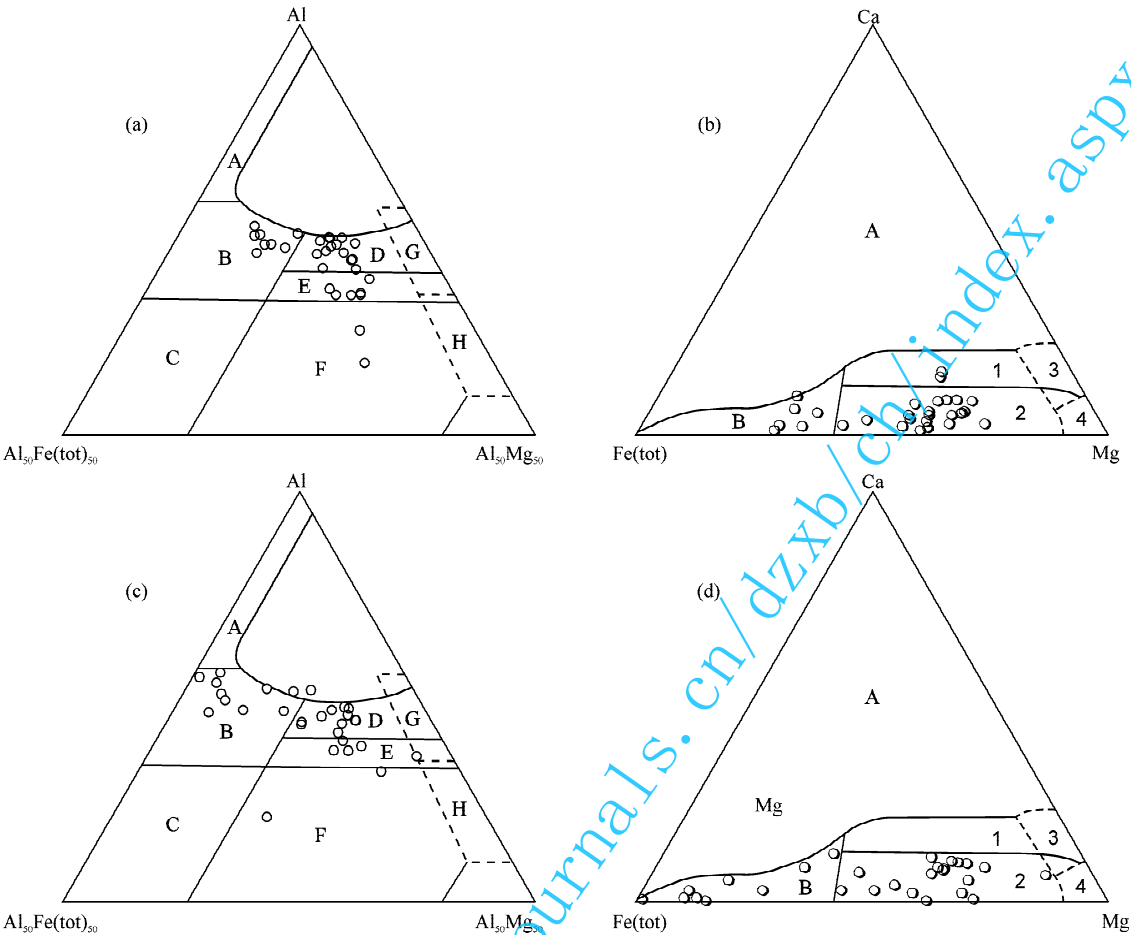


图 3 天山南缘三叠系碎屑电气石组成特征(据 Henry and Guidotti, 1985)
Fig. 3 Compositions of detrital tourmalines from the Triassic sandstones
in the southern margin of the Tianshan (after Henry and Guidotti, 1985)

(a)—俄霍布拉克组碎屑电气石 Al-Fe-Mg 判别图;(b)—俄霍布拉克组碎屑电气石 Ca-Fe-Mg 判别图;(c)—塔里奇克组碎屑电气石 Al-Fe-Mg 判别图;(d)—塔里奇克组碎屑电气石 Ca-Fe-Mg 判别图;A—富 Li 花岗伟晶岩和细晶岩;B—贫 Li 花岗岩及花岗伟晶岩、细晶岩;C—富 Fe³⁺ 石英电气石岩(热液蚀变的花岗岩);D—饱和铝的变泥质岩和变砂屑岩;E—贫铝的变泥质岩和变砂屑岩;F—富 Fe³⁺ 的石英电气石岩、钙质硅酸盐岩和变泥质岩;G—低钙的变质超镁铁岩和富 Cr、V 变质沉积岩;H—变质碳酸盐岩和变质辉石岩;1—富钙变泥质岩、变砂屑岩和钙质硅酸盐岩;2—贫钙变泥质岩、变砂屑岩和石英电气石岩;3—变质碳酸盐岩;4—变质超镁铁岩

(a)—Al-Fe-Mg diagram for the detrital tourmalines in the Ehuobulake Formation; (b)—Ca-Fe-Mg diagram for the detrital tourmalines in the Ehuobulake Formation; (c)—Al-Fe-Mg diagram for the detrital tourmalines in the Taliqike Formation; (d)—Ca-Fe-Mg diagram for the detrital tourmalines in the Taliqike Formation; A—Li-rich granitoid pegmatites and aplites; B—Li-poor granitoids and their associated pegmatites and aplites; C—Fe³⁺-rich quartz-tourmaline rocks (hydrothermally altered granites); D—metapelites and metapsammities coexisting with an Al-saturating phase; E—metapelites and metapsammities not coexisting with an Al-saturating phase; F—Fe³⁺-rich quartz-tourmaline rocks, calc-silicate rocks, and metapsilites; G—low-Ca metaultramafics and Cr, V-rich metasediments; H—metacarbonates and meta-pyroxenites; 1—Ca-rich metapelites, metapsammities, and calc-silicate rocks; 2—Ca-poor metapelites, metapsammities, and quartz-tourmaline rocks; 3—metacarbonates; 4—metaultramafics

叠系碎屑铬尖晶石的潜在物源(Ai et al., 2006;高俊等,2009;高睿等,2009;蒲晓菲等,2011;茹艳娇等,2012)。目前,对于南天山的构造格局主要有 3 种观点,或者认为其为一简单的弧-陆碰撞造山带(郝杰等,1993),或者认为其为多岛海造山(Xiao et al., 2012),或者为宽大的增生楔(卢华复等,1996;李曰俊等,2009)。本文研究结果表明,天山南缘上

三叠统塔里奇克组中部分尖晶石与大洋岛弧玄武岩中尖晶石成分类似,推断其来源于洋岛玄武岩,这为南天山为多岛海造山提供了沉积学证据。

4 碎屑重矿物成分对物源区隆升剥蚀状态的指示

碎屑重矿物在沉积岩中普遍存在,是不可或缺

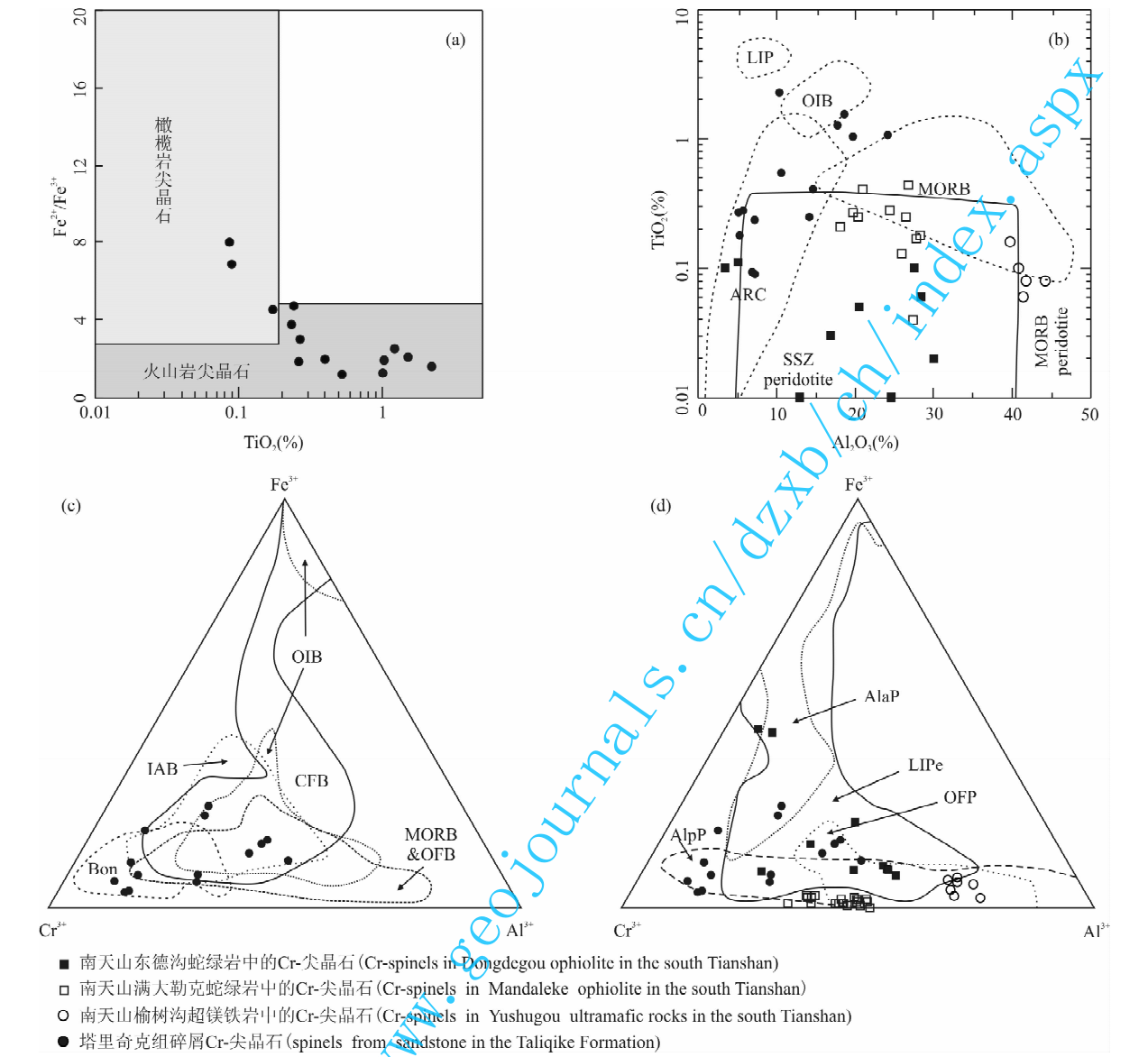


图 4 天山南缘上三叠统塔里奇克组碎屑 Cr-尖晶石组成特征及源岩判别(据 Lenaz 等, 2000; Kamenetsky 等, 2001; Barnes and Roeder, 2001; 基性—超基性岩尖晶石数据引自王焰等, 1999; 徐向珍等, 2011; 孔凡梅等, 2011; 张炜斌等, 2011)

Fig. 4 Chemical characteristics and discriminations for detrital Cr-spinels in upper Triassic Taliqike Formation in the southern margin of the Tianshan (after Lenaz et al. , 2000; Kamenetsky et al. , 2001; Barnes and Roeder, 2001.

Data of spinel compositions of mafic-ultramafic rocks in the South Tianshan from Wang et al. , 1999;

Xu et al. , 2011; Kong et al. , 2011; Zhang et al. , 2011)

(a) —不同来源尖晶石 Fe^{2+}/Fe^{3+} - TiO_2 判别图; (b) —Cr-尖晶石 TiO_2 - Al_2O_3 构造背景判别图; (c) —火山岩尖晶石三价离子 Fe^{3+} - Cr^{3+} - Al^{3+} 母岩判别图; (d) —橄榄岩尖晶石三价离子 Fe^{3+} - Cr^{3+} - Al^{3+} 母岩判别图; LIP—大火成岩省; OIB—洋岛玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; ARC—岛弧弧岩; MORB—洋中脊玄武岩; OFB—洋底玄武岩; CFB—大陆溢流玄武岩; Bon—玻安岩; AlpP—阿尔卑斯型橄榄岩; AlaP—阿拉斯加型橄榄岩; LIpE—层状侵入体橄榄岩; OFP—洋壳橄榄岩; SSZ peridotite—俯冲带之上的橄榄岩; MORB peridotite—深海橄榄岩

(a)— Fe^{2+}/Fe^{3+} - TiO_2 diagram for discriminating different type source rocks of Cr-spinel; (b)— TiO_2 - Al_2O_3 relationships of Cr-spinels from different tectonic settings; (c)— Fe^{3+} - Cr^{3+} - Al^{3+} diagram for discriminating different type volcanic spinels; (d)— Fe^{3+} - Cr^{3+} - Al^{3+} diagram for discriminating different type peridotite spinels; LIP—large igneous province; OIB—ocean-island basalt; IAB— island arc basalt; ARC— island arc magmas; MORB—mid-ocean ridge basalt; OFB—ocean floor basalt; CFB—continental flood basalt; Bon—boninite; AlpP—Alpine-type peridotite; AlaP—Alaskan-type peridotite; LIpE—layered intrusions peridotite; OFP—ocean floor peridotite; SSZ peridotite—suprasubduction zone peridotite; MORB peridotite—MORB-type peridotite

的组成部分,也是对沉积盆地中沉积物源进行定位的有效工具,同时可以反演物源区的隆升剥蚀状态。

由于具有较高锰铝榴石含量的石榴子石主要来自花岗岩、花岗伟晶岩和低级变质岩,因此,天山作为库车坳陷三叠纪主要的物源区,应该具有一定规模的低级变质岩和花岗岩出露。从中三叠世至晚三叠世,锰铝榴石含量较高的石榴子石含量明显降低,但是,来自电气石物源的证据表明,从早三叠世到晚三叠世,花岗岩的物源供给是增加的。所以,早三叠世高锰铝榴石含量的石榴子石可能主要来源于低级变质岩。高镁低钙石榴子石含量从中三叠世到晚三叠世显著增加,指示蚀源区高级变质岩出露增多。因此,我们可以推断,从早三叠世到晚三叠世,天山造山带花岗岩分布范围增大,低级变质岩分布减少,高级变质岩出露增加,反映的是由浅及深的正常的剥露过程。此外,我们通过西南天山超高压变质榴辉岩和麻粒岩相片麻岩中石榴子石成分对比发现,本文所研究的碎屑石榴子石具较低的钙铝榴石含量与西南天山榴辉岩中石榴子石相区别,但部分与片麻岩中石榴子石成分相似。而刘磊等(2011)研究表明,在晚三叠世一早侏罗世时期,已有高压变质岩遭受剥蚀。因此,三叠纪时期,西南天山麻粒岩相片麻岩可能已经抬升至地表,超高压变质榴辉岩在三叠纪时期可能尚未有出露,而只是剥露了较浅层次的高压变质岩。

铬尖晶石成分分析表明,库车坳陷北部晚三叠世碎屑铬尖晶石主要来自南天山或中天山岛弧型火山岩,少量源于洋岛玄武岩和SSZ型橄榄岩。这一研究揭示了南天山或者中天山三叠纪至少在晚三叠世时期有一定范围的岛弧火山岩存在,并且产生于俯冲上板片地幔橄榄岩可能已部分剥露、抬升至地表,但是由于缺乏研究区火山岩尖晶石数据,所以对岛弧火山岩究竟是出露于南天山还是中天山未能进行精确定位。

5 结论

(1)碎屑石榴子石、电气石及铬尖晶石地球化学组成分析结果表明,天山南缘三叠系物源主要为低级—高级变质岩、酸性岩浆岩、岛弧及洋岛玄武岩。从早三叠世到晚三叠世,低级变质岩供应减少,花岗岩及高级变质岩供给增加。

(2)通过对比西南天山榴辉岩、片麻岩中石榴子石成分并结合前人研究认为,三叠纪时期,西南天山高压变质岩已出露地表,但并未剥蚀至榴辉岩形成

之深度,而西南天山片麻岩在早三叠世时期已抬升至地表并遭受剥蚀。

(3)上三叠统部分碎屑铬尖晶石成分与南天山东德沟镁铁—超镁铁岩中铬尖晶石成分相似,说明其可能来自俯冲体系的蛇绿岩。此外,部分来自洋岛玄武岩的铬尖晶石为南天山为多岛海造山提供了沉积学证据。

致谢:本文电子探针数据测试得到了中国科学院地质与地球物理研究所毛騫、马玉光两位老师的大力支持,在此一并深表谢意!

参考文献

- 高俊. 1997. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. 科学通报, 42(7): 737~740.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 张喜, 李继磊, 苏文. 2009. 西天山的增生造山过程. 地质通报, 28(12): 1804~1816.
- 高睿, 肖龙, 王国灿, 曹树钊, 罗彦军, 袁静, 何琦. 2009. 南天山阔克萨勒岭地区晚古生代玄武岩地球化学特征、成因及意义. 矿物岩石, 29(2): 96~107.
- 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.
- 黄克难, 詹家祯, 邹义声, 王智, 周春梅, 肖继南. 2003. 新疆库车河地区三叠系和侏罗系沉积环境及古气候. 古地理学报, 5(2): 197~208.
- 纪云龙, 丁孝忠, 李喜臣, 于开宁. 2003. 塔里木盆地库车坳陷三叠纪沉积相与古地理研究. 地质力学学报, 9(3): 268~274.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 348~365.
- 贾进华, 薛良清. 2002. 库车坳陷中生界陆相层序地层格架与盆地演化. 地质科学, 37(增刊): 121~128.
- 孔凡梅, 李旭平, 李守军, 吴苏. 2011. 西南天山东德沟镁铁—超镁铁岩中尖晶石的矿物学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 30(5): 951~960.
- 雷刚林, 廖林, 师俊, 杜治利, 罗俊成, 程晓敢, 陈汉林. 2011. 西昆仑中新世晚期—上新世早期隆升活动的沉积记录: 来自塔西南棋北3井沉积重矿物的证据. 地质学报, 85(8): 1334~1342.
- 李强, 张立飞. 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用P-T轨迹及其地质意义. 岩石学报, 20(3): 583~594.
- 李双建, 石永红, 王清晨. 2006a. 碎屑重矿物组成对南天山白垩纪—新近纪剥蚀去顶过程的指示. 地质学报, 80(2): 217~226.
- 李双建, 王清晨, 李忠, 王道轩. 2006b. 砂岩碎屑组分变化对库车坳陷和南天山盆地演化的指示. 地质科学, 41(3): 465~478.
- 李双建, 石永红, 王清晨, 李忠. 2007. 白垩纪以来库车坳陷碎屑重矿物组成变化. 地质科学, 42(4): 709~721.
- 李双应, 李任伟, 岳书仓, 王道轩, 刘因, 孟庆任, 金福全. 2004. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约. 岩石学报, 20(3): 667~676.
- 李双应, 李任伟, 孟庆任, 王道轩, 刘因. 2005. 大别山东南麓中新代碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约. 岩石学报, 21(4): 1157~1166.

- 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 罗俊成, 郑多明, 刘亚雷. 2009. 南天山区域大地构造与演化. 大地构造与成矿学, 33(1): 94~104.
- 李忠, 王道轩, 林伟, 王清晨. 2004. 库车坳陷中—新生界碎屑组对物源类型及其构造属性的指示. 岩石学报, 20(3): 655~666.
- 刘磊, 张长厚, 何登发, 魏波, 李程明. 2011. 新疆库车盆地晚三叠世—早侏罗世沉积碎屑矿物成分及其物源区示踪与构造意义. 岩石学报, 27(1): 310~320.
- 卢华复, 贾东, 蔡东升, 吴世敏. 1996. 塔里木与西天山板块构造演化. 见: 童晓克, 梁狄刚, 贾承造主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 235~245.
- 蒲晓菲, 宋述光, 张立飞, 魏春景. 2011. 西南天山超高压变质带中志留纪岛弧火山岩岩片及其构造意义. 岩石学报, 27(6): 1675~1687.
- 茹艳娇, 徐学义, 李智佩, 陈隽璐, 白建科, 李婷. 2012. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造环境. 地质通报, 21(1): 50~62.
- 苏文, 高俊, Klemd R, 熊贤明. 2006. 西天山榴辉岩石榴石中的水及其分布特征. 岩石学报, 22(5): 1380~1386.
- 王建刚, 胡修棉. 2008. 砂岩副矿物的物源区分析新进展. 地质论评, 54(5): 670~678.
- 王焰, 王润三, 周鼎武, 王居里. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩地体的尖晶石研究. 岩石矿物学杂志, 18(3): 247~254.
- 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 李天福, 任玉峰, 陈松永. 2011. 新疆天山地区榆树沟-铜花山蛇绿岩特征和构造背景. 岩石学报, 27(1): 96~120.
- 张立飞, David J E, 艾永亮, 姜文波, 魏春景. 2002. 新疆西天山超高压变质榴辉岩. 岩石矿物学杂志, 21(4): 371~386.
- 张炜斌, 张东阳, 张招崇, 黄河, 赵莉. 2011. 南天山满德勒克蛇绿岩铬铁矿矿物学特征及其意义. 岩石矿物学杂志, 30(2): 243~258.
- Ai Y L, Zhang L F, Li X P, Qu J F. 2006. Geochemical characteristics and tectonic implications of HP-UHP eclogites and blueschists in southwestern Tianshan, China. Progress in Natural Science, 16(6): 624~632.
- Barnes S J, Roeder P L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. Journal of Petrology, 42(12): 2279~2302.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 91(6): 611~627.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 2919~2940.
- Dickinson W R, Suczek G A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63: 2164~2182.
- Gao J, Long L L, Klemd R, Qian Q, Liu D Y, Xiong X M, Su W, Liu W, Wang Y T, Yang F Q. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks. International Journal of Earth Sciences, 98: 1221~1238.
- Gao J, Klemd R. 2000. Eclogite occurrences in the Southern Tianshan High-Pressure Belt, Xinjiang, Western China. Gondwana Research, 3(1): 33~38.
- Gao S, Ling W L, Qiu Y M, Lian Z, Hartmann G, Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Arhean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 2071~2088.
- Garzanti E, Doglioni C, Vezzoli G, Ando S. 2007. Orogenic belts and orogenic sediment provenance. The Journal of Geology, 115: 315~334.
- Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, Carroll A R. 1993. Collisional successor basin of western China: impact of tectonic inheritance on sand composition. Geological Society of America Bulletin, 105: 323~344.
- Hamer R D, Moyes A B. 1982. Composition and origin of garnet from the Antarctic Peninsula Volcanic Group of Trinity Peninsula. Journal of Geological Society of London, 139: 713~720.
- Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, Sobel E R, McKnight C L, Schulein B J, Wang Z X. 1992. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, northwest China. Geological Society of America Bulletin, 104: 53~79.
- Hendrix M S. 2000. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, northwest China: a detrital record of the ancestral Tian Shan. Journal of Sedimentary Research, 70: 520~532.
- Henry D J, Dutrow B L. 1992. Tourmaline in a low grade clastic metasedimentary rock: an example of the petrogenetic potential of tourmaline. Contributions to Mineralogy and Petrology, 112: 203~218.
- Henry D J, Guidotti C V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. American Mineralogist, 70: 1~15.
- Kamenetsky V S, Crawford A J, Meffre S. 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. Journal of Petrology, 42(4): 655~671.
- Lenaz D, Kamenetsky V S, Crawford A J, Princivalle F. 2000. Melt inclusions in detrital spinel from the SE Alps (Italy-Slovenia): a new approach to provenance studies of sedimentary basins. Contribution to Mineralogy and Petrology, 139: 748~758.
- Li R W, Li S Y, Jin F Q, Wan Y S, Zhang S K. 2004. Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonics significance: constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircons. Sedimentary Geology, 166: 245~264.
- Li S Y, Li R W, Meng Q R, Wang D X, Liu Y. 2006. Radiometric dating sediments derived from metamorphic rocks of the Dabie orogenic belt in the Jurassic and Early Cretaceous. Progress in Natural Science, 16(Special Issue): 194~202.
- Li Z, Peng S T. 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.
- Li Z, Song W J, Peng S T, Wang D X, Zhang Z P. 2004. Mesozoic-Cenozoic tectonic relationships between the Kuqa Subbasin and

- Tian Shan, northwest China: constraints from depositional records. *Sedimentary Geology*, 172: 223~249.
- Mange M A, Morton A C. 2007. Geochemistry of heavy minerals. *Developments in Sedimentology*, 58: 345~391.
- Morton A C. 1985. An new approach to provenance studies; electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. *Sedimentology*, 32: 553~566.
- Morton A C. 1986. Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones; implication for the generation of secondary porosity. *Clay Minerals*, 21: 711~733.
- Morton A C. 1991. Geochemical studies of heavy minerals and their application to provenance research. *Geological Society of London (Special Publication)*, 57: 31~45.
- Morton A C, Hallsworth C, Chalton B. 2004. Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: a framework for interpretation of North Sea sandstone provenance. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 393~410.
- Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. 1987. *Sand and sandstone*. Springer, New York, 553pp.
- Preston J, Hartley A, Mange M R, Hole M, May G, Buck S, Vaughan L. 2002. The provenance of Triassic sandstones from the Beryl field, northern North Sea: mineralogical, geochemical, and sedimentological constraints. *Journal of Sedimentary Research*, 72(1): 18~29.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. *Journal of Geology*, 94: 635~650.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67: 119~139.
- Sabeen H M, Ramanujam N, Morton A C. 2002. The provenance of garnet; constraints provided by studies of coastal sediments from southern India. *Sedimentary Geology*, 152: 279~287.
- Weltje G J, Eynatten H V. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments; review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171: 1~11.
- 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.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, Han C M. 2012. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gandwana Research*, in press (doi: 10.1016/j.gr.2012.01.012).

Provenance of the Triassic Sandstones in the Kuqa Depression: Constraints from Heavy Minerals Chemistry

WANG Song, LI Shuangying, YANG Dongdong, CHENG Cheng

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract

The Triassic in the Kuqa depression is well exposed and composed mainly of terrestrial clastic rocks. Our research focuses on chemical characteristics of detrital heavy minerals in the Triassic sandstones using electron microprobe. Chemical compositions of the detrital garnets suggest that they mainly comprise almandine, pyrope, spessartine and grossular garnets. They derive from the low-grade to high-grade meta-sedimentary rocks and granitoid. The detrital tourmalines source from meta-sedimentary rocks and granitoid and the parent rocks of the detrital chrome spinels are arc basalt, ocean island basalt and subduction related peridotite. The detrital component of the upper Triassic derive from high-grade meta-sediments and granitoid is much more than that of the lower Triassic. Compared with the garnets from eclogite and gneiss in the Southwest Tianshan, the detrital garnet compositions have remarkable differences in grossular content with those from eclogite and are similar to those in gneiss, which suggest that the eclogite has not been exhumed at surface yet while the gneiss is well exposed at Triassic time. The detrital chrome spinels in the upper Triassic mainly derive from arc magmatic rock and ophiolite in the Central Tianshan and the South Tianshan, some of which source from ocean island basalts, which provide sedimentary evidence for the archipelagic orogenesis of the South Tianshan.

Key words: the South Tianshan; Kuqa; Triassic; heavy mineral; provenance