

塔里木盆地沙雅隆起北部三道桥地区前震旦纪基底 岩浆岩特征与锆石 U-Pb 年龄研究*

韩强¹ 朱允辉² 朱传玲² 王超³ 陈振林⁴ 费剑伟¹

HAN Qiang¹, ZHU YunHui², ZHU ChuanLing², WANG Chao³, CHEN ZhenLin⁴ and FEI JianWei¹

1. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011

2. 中国石化西北油田分公司勘探处, 乌鲁木齐 830011

3. 西北大学地质学系, 西安 710069

4. 中国地质大学资源学院, 武汉 470074

1. Institute of Exploration and Development of Northwest Oil Branch, Sinopec, Urumqi 830011, China

2. Exploration Department of Northwest Oil Branch, Sinopec, Urumqi 830011, China

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 4700174, China

2015-01-03 收稿, 2015-10-01 改回.

Han Q, Zhu YH, Zhu CL, Wang C, Chen ZL and Fei JW. 2016. Petrological characteristics and zircon U-Pb age for magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area of Shaya Rise in Tarim Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5):1493–1504

Abstract Petrological characteristics and zircon U-Pb chronology of Pre-Sinian magmatic rocks from the Sandaoqiao (SDQ) area in the northern Shaya Rise of the Tarim Basin was reported in this paper. The Pre-Sinian magmatic rocks are composed of K-feldspar granite, adamellite and hornblende-websterite in this area. The cataclastic rock was formed from the local K-feldspar granite as fracture effect. Four core samples of Qg2, Qg3, S53 and Qg4 in 4 wells drilling have been studied on U-Pb zircon geochronology by LA-ICP-MS. The zircon U-Pb dating results gave ages of $1846 \pm 1\text{Ma}$, $1791 \pm 1\text{Ma}$, $1824 \pm 2\text{Ma}$ for K-feldspar granite (sample from Qg2), adamellite (sample from S53) and fragmentation K-feldspar granite (sample from Qg3), respectively, representing the Paleoproterozoic metamorphic age of magmatic protoliths. The age of $879 \pm 4\text{Ma}$ from hornblende-websterite (sample from Qg4) is interpreted as the Neoproterozoic igneous intrusive time. These data suggest the existence of the Pre-Sinian ancient basement in Shaya Rise in the northern Tarim Basin, and these results supply significant constrains on Precambrian tectonic evolution of Tarim Craton.

Key words Tarim basin; Pre-sinian period; Basement; Magmatic rocks; Zircon U-Pb age

摘要 对塔里木盆地北部三道桥地区前震旦纪基底的岩浆岩进行岩石学分析及时代限定研究。研究区前震旦纪基底的岩浆岩主要由钾长花岗岩、石英二长岩及角闪二辉岩组成。钾长花岗岩局部受断裂影响,发生碎裂化作用,形成碎裂化钾长花岗岩。通过对 Qg2、Qg3、S53 及 Qg4 井 4 口钻井的 4 个岩心样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,获得钾长花岗岩、石英二长岩及碎裂钾长花岗岩年龄分别为 $1846 \pm 1\text{Ma}$ 、 $1791 \pm 1\text{Ma}$ 、 $1824 \pm 2\text{Ma}$,代表了古元古代岩浆岩的变质年龄;角闪二辉岩年龄为 $879 \pm 4\text{Ma}$,代表了中新元古代火山侵入年龄。说明塔里木盆地沙雅隆起北部存在前震旦纪古老基底,这些结果也为塔里木克拉通的前寒武纪构造演化提供了新的限定。

关键词 塔里木盆地;前震旦纪;基底;岩浆岩;锆石 U-Pb 年代

中图法分类号 P588.12; P597.3

* 本文受中国石化先导项目(2010xbkt07)和中石化西北油田分公司局控科研项目(2011xbkt04)联合资助。

第一作者简介:韩强,男,1980年生,硕士,高级工程师,石油地质专业,E-mail: hanqiang105289562@qq.com

塔里木盆地三道桥地区油气成藏条件优越,周围已发现雅克拉、牙哈及英买力等油气田(贾承造, 1997; 梁狄刚等, 1998)。1997年中石化西北石油局于该区钻探的S53井在前震旦纪基底岩浆岩潜山中获得少量油气,日产气 $1.087 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、油少量,显示了良好的勘探潜力。2005年中石化西北油田分公司在工区内部署三维地震,通过Qg2、Qg3及Qg4三口井的钻探,扩大了岩浆岩潜山的油气成果。本文是在这一背景下开展三道桥地区前震旦纪基底岩浆岩岩石学与时代限定研究。

1 地质背景与岩石学特征

1.1 地质背景

三道桥地区位于塔里木盆地库车县-新和县境内,隶属于沙雅隆起二级构造单元雅克拉断凸的西段,北邻库车坳陷,南接沙西凸起(图1a)。

雅克拉断凸具有基底隆起的特征,最初形成时期可以追溯到塔里木运动,相当于华南的晋宁运动(汤良杰, 1997)。加里东期该隆起继承性发育,海西早期运动在该区表现强烈,隆起幅度加大,造成古生界地层遭受强烈剥蚀,海西晚期运动,又以断块活动和强烈剥蚀为特征,古生界地层被剥蚀殆尽,隆起基本定型。中生代仍保持隆起状态,在构造高部位缺失三叠-侏罗系。白垩纪开始,库车前陆盆地往南扩展,转化为一个向北倾斜的斜坡(何登发等, 2005; 崔军文和唐哲民, 2011; 汤良杰等, 2012; 李日俊等, 2012)。

通过三维地震资料的解释刻画,研究区前中生界潜山现今的构造面貌是一个古生界残余古隆起,整体上表现为北东向抬升的大型背斜,在构造高部位缺失碳酸盐岩地层,白垩系直接与前震旦系基岩接触,寒武系-震旦系分布于工区北部三道桥断裂以北及工区东南部(图1b)。地震剖面上潜山以逆断层、调节性的走滑断层等构造样式为特征,形成逆冲褶皱,平面上呈北东东向、北东向及近东走向的断块、断背斜。从北向南依次为三道桥断裂带、齐满断裂带、托乎拉断裂、Qg1井南断裂,其中Qg1井南断裂可能存在沿碳酸盐岩顶面拆离滑脱断层,导致部分基岩压在碳酸盐岩地层之上。岩浆岩主要分布于齐满-托乎拉断裂带之间(图1b)。地震剖面上,Qg4井钻遇岩浆岩为穹窿状反射,内部杂乱,振幅整体较强,与围岩界线清楚;沙53井和Qg2井钻遇的岩浆岩呈丘型反射特征(罗静兰等, 2006),具有一定成层性,频率低、振幅强,同样与围岩界线清晰(图1c)。Qg3井附近岩浆岩因受齐满断裂带挤压,断裂发育,地震剖面也表现为低频、强振幅、杂乱反射特征(图1b)。

1.2 样品岩石学特征

Qg2、S53、Qg3及Qg4井不同程度的钻遇岩浆岩,深度在5600~6000m之间,分别在各井的取芯段中采集样品,用以岩相学分析及锆石测年,具体深度位置、岩石学特征及测井

电性特征如下(图2、图3)。

钾长花岗岩(样品Qg2-1)采样深度5694.19~5694.56m(图2),岩石浅灰色,他形-半自形粒状结构(图3a)。由石英(30%~35%)、钾长石(50%~54%)和少量副矿物组成。薄片石英显示雨滴状,钾长石、石英大颗粒发生破裂,并被石英充填(图3b),局部可见黑云母绿泥石化现象(图3b)。从测井曲线来看,整体上具高放射性、高电阻特征,自然伽马值大于120API,电阻率值在 $400 \Omega \cdot \text{m}$ 左右(图2)。

石英二长岩(样品S53-1)采样深度5688.00~5689.40m(图2),岩石为灰色(图3d),主要由钾长石(25%)、斜长石(35%)、石英(10%)和黑云母(10%)、白云母,次要矿物有绿泥石、方解石、不透明矿物、绢云母。石英、斜长石和钾长石显示了后期动态重结晶性质(纪沫等, 2008),矿物之间被小颗粒的石英和黑云母等矿物充填,大颗粒矿物较为碎裂(图3e, f)。放射性特征与样品Qg2-1较接近,自然伽马值110API左右,电阻率相对较低,值为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。

钾长花岗岩(样品Qg3-1)采样深度5930.40~5931m,岩石破碎强烈(图3),其细粒化作用仅发生在矿物颗粒的边缘,未达到糜棱岩化阶段,原岩的特征部分被保存下来。具有碎斑结构、碎粒结构,岩石主要矿物为石英(25%)、钾长石(40%)、斜长石(10%)、黑云母、绿泥石、方解石、不透明矿物、绢云母等组成(图3h),可见斜长石双晶扭折,大颗粒长石错断等特征(图3i)。自然伽马、电阻率曲线形态与Qg2井相似,只因云母等矿物含量比样品Qg2-1含量高,其放射性、电阻率更高,自然伽马值在160API左右,电阻率 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 。

角闪二辉岩(样品Qg4-1)采样深度5818.90~5821.40m(图2),绿灰色,局部因浅变质,呈墨绿色,细粒结构,块状构造(图3g)。主要组成矿物有单斜辉石(40%)、斜方辉石(30%),次要矿物有角闪石(23%)、斜长石(5%),副矿物见有楣石。单片光镜下斜方辉石无色、表面粗糙,正高突起。单斜辉石表面粗糙、正高突起,二级蓝干涉色(图3k, l)。该岩石具低放射性、低电阻电性特征,自然伽马在20API左右,电阻率 $20 \Omega \cdot \text{m}$,与上述三个岩样的电性差异明显。

岩相学研究表明,钾长花岗岩及石英二长岩样品均发生过浅变质作用,角闪二辉岩未见变质矿物或明显变质现象。

2 锆石测年

2.1 测试方法

锆石的同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。锆石优选与CL图像采集在电镜实验室完成,采用常规方法将样品粉碎至80~100目,经淘选和电磁方法分离后,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒。锆石制靶先将锆石粘在双面胶上,然后用环氧树脂固定,最后打磨抛光至锆石暴露,结构图像系应用透射光、反射光和阴极发光(CL)采集。锆石U-Pb定年所用激光剥蚀系统为Geolas 2005, ICP-MS为Agilent

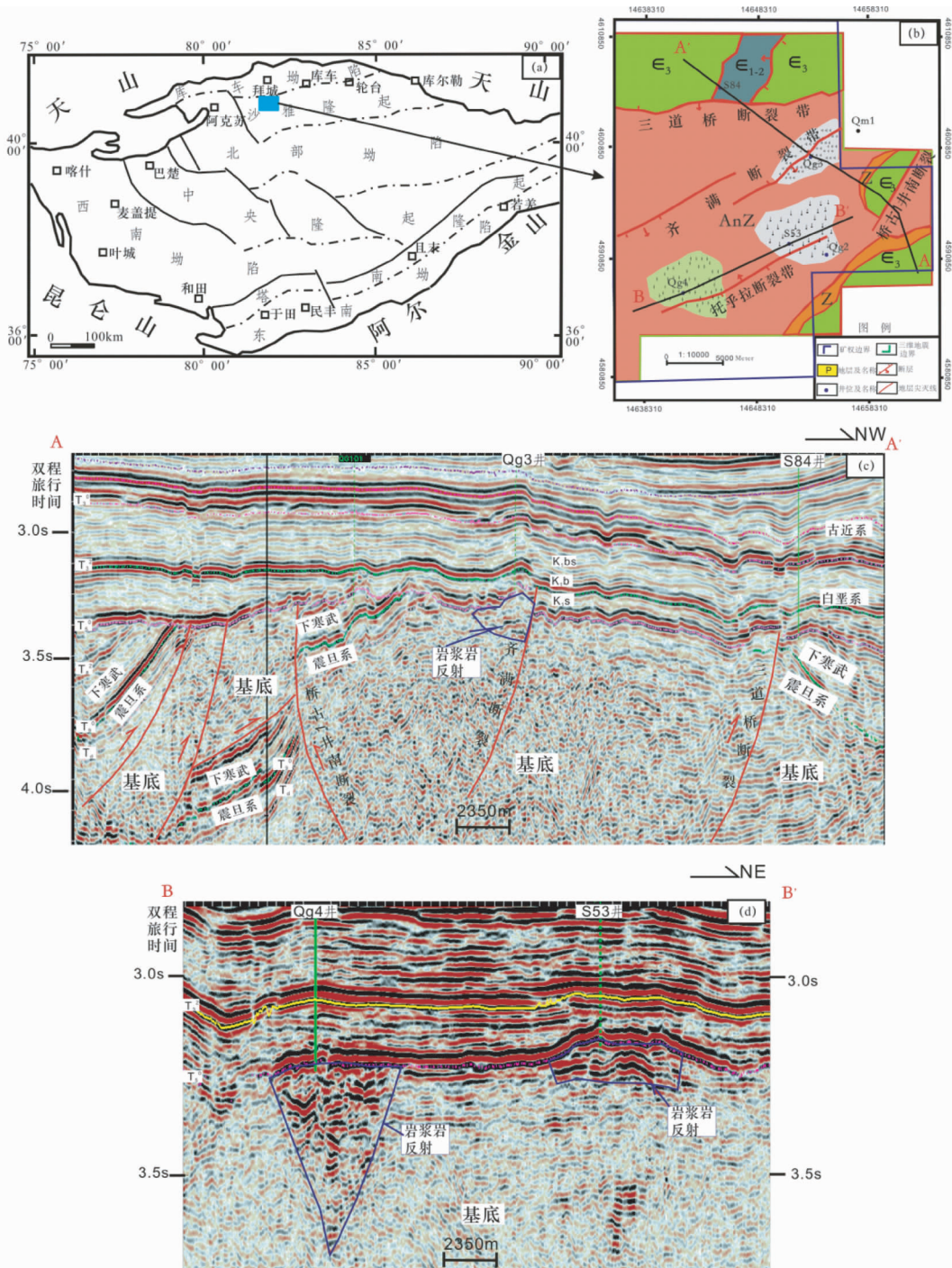


图 1 塔里木盆地沙雅隆起北部三道桥地区地质构造简图及主要地震剖面图

(a) 库车县三道桥地区构造位置图; (b) 三道桥地区前中生界侵蚀面古地质图; (c) 过 Qg3-Qg1-S84 东南-西北方向地震剖面 (A-A'); (d) 过 Qg4-S53 井北东向地震剖面 (B-B')

Fig. 1 Simplified geological map and seismic profiles of the study area

(a) tectonic location map of the study area; (b) geological map of Pre Mesozoic erosion surface SDQ area; (c) an across wells of Qg3, Qg1 and S84 SE-NW trending seismic profile A-A'; (d) an across wells of Qg4 to S53 NE trending seismic profile B-B'

7500a, 试验所采用的激光束斑直径为 32 μ m, 激光剥蚀过程中采用氦气作载体, 氩气为补偿气以调节灵敏度。在等离子体中新气流 (Ar + He) 中加入少量氮气, 以提高仪器灵敏度、

降低检出限和改善分析精密度的 (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Wu *et al.*, 2006)。每个分析数据包括大约 20 ~ 30s 的空白信号和 50s 的样品信号。采用国际标准锆石 91500 做外

表1 三道桥地区前震旦基底岩浆岩锆石 U-Pb 同位素分析数据表

Table 1 U-Pb data for zircons of magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area

测点号	Pb Th U			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	($\times 10^{-6}$)				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
钾长花岗岩(Qg2-1)																
Qg2-1-1	53.7	23.5	54.1	0.43	0.1045	0.0039	4.9978	0.1884	0.3467	0.005	1706	68	1819	32	1919	24
Qg2-1-2	153	70.2	122	0.58	0.1105	0.0032	5.3765	0.1683	0.3493	0.0046	1809	52	1881	27	1931	22
Qg2-1-3	78	38.4	57.1	0.67	0.1047	0.0038	4.9947	0.1833	0.3448	0.0053	1710	67	1818	31	1910	25
Qg2-1-4	137	67.4	77.9	0.87	0.1112	0.0041	5.3865	0.2104	0.3496	0.0057	1820	68	1883	33	1933	27
Qg2-1-5	92	43.7	62.7	0.70	0.1106	0.0047	5.1115	0.2202	0.3335	0.0049	1809	76	1838	37	1856	23
Qg2-1-6	77	43.6	36.3	1.20	0.1099	0.0053	5.2027	0.2543	0.3424	0.0066	1798	87	1853	42	1898	32
Qg2-1-7	107	52.4	65.9	0.80	0.1115	0.0042	5.3588	0.1974	0.3477	0.0048	1824	69	1878	32	1924	23
Qg2-1-8	118	59.7	78.4	0.76	0.118	0.0039	5.7296	0.1924	0.3491	0.004	1926	60	1936	29	1930	19
Qg2-1-9	371	127	437	0.29	0.1105	0.0027	5.3013	0.1338	0.3439	0.0031	1807	45	1869	22	1906	15
Qg2-1-10	86	41.7	60.7	0.69	0.1126	0.0044	5.6878	0.226	0.3637	0.0049	1843	71	1930	34	1999	23
Qg2-1-11	1291	551	1030	0.54	0.1221	0.0034	5.4805	0.1539	0.3216	0.0032	1987	48	1898	24	1798	16
Qg2-1-12	74.1	31.3	79.6	0.39	0.1142	0.0037	5.5936	0.1825	0.352	0.0046	1933	59	1915	28	1944	22
Qg2-1-13	83	38.6	60.1	0.64	0.1148	0.0039	6.1113	0.2085	0.3847	0.0055	1877	63	1992	30	2098	26
Qg2-1-14	78	28.8	62.8	0.46	0.1218	0.0042	5.9609	0.2057	0.3528	0.0045	1983	61	1970	30	1948	22
Qg2-1-15	113	56.2	64.2	0.88	0.1117	0.0038	5.6927	0.1923	0.3674	0.0047	1828	68	1930	29	2017	22
石英二长岩(S53-1)																
S53-1-1	431	219	361	0.61	0.1136	0.0032	5.4186	0.1531	0.3385	0.0039	1858	51	1888	24	1879	19
S53-1-2	495	262	272	0.96	0.1126	0.0034	5.6259	0.1575	0.3555	0.0039	1843	54	1920	24	1961	18
S53-1-3	225	109	209	0.52	0.1137	0.0035	5.3584	0.1614	0.3339	0.0044	1861	56	1878	26	1857	21
S53-1-4	490	260	389	0.67	0.1122	0.0036	5.3215	0.1636	0.3344	0.0042	1836	58	1872	26	1859	20
S53-1-5	490	244	400	0.61	0.1123	0.0041	5.5318	0.1885	0.347	0.0046	1837	66	1906	29	1920	22
S53-1-6	215	101	218	0.46	0.1093	0.0041	5.3153	0.2038	0.3422	0.0062	1787	68	1871	33	1897	30
S53-1-7	234	116	185	0.63	0.1087	0.0035	5.4408	0.1737	0.3536	0.0043	1777	60	1891	27	1952	20
S53-1-8	256	130	222	0.59	0.1046	0.0031	5.0465	0.1463	0.3425	0.004	1709	54	1827	25	1899	19
S53-1-9	274	136	249	0.55	0.1062	0.0032	5.1151	0.1506	0.3434	0.0042	1736	55	1839	25	1903	20
S53-1-10	157	68	147	0.46	0.1072	0.0037	5.2325	0.181	0.3492	0.0049	1754	63	1858	29	1931	23
S53-1-11	218	102	182	0.56	0.1049	0.0036	5.1834	0.176	0.3554	0.0047	1713	63	1850	29	1960	22
S53-1-12	146	67	145	0.46	0.1057	0.0033	5.2304	0.1656	0.3548	0.0047	1728	57	1858	27	1958	22
S53-1-13	304	149	269	0.55	0.1077	0.0029	5.1387	0.1415	0.3428	0.0044	1761	50	1843	23	1900	21
S53-1-14	257	130	214	0.61	0.1122	0.0032	5.2172	0.1508	0.3329	0.004	1836	51	1855	25	1852	19
S53-1-15	183	85	189	0.45	0.1101	0.0033	5.0939	0.1482	0.3325	0.004	1802	54	1835	25	1851	19
钾长花岗岩(Qg3-1)																
Qg3-1-1	427	279	395	0.71	0.1135	0.0026	5.0922	0.1132	0.3233	0.0032	1857	41	1835	19	1806	16
Qg3-1-2	117	71.7	101	0.71	0.119	0.0035	5.726	0.1709	0.3475	0.0045	1943	53	1935	26	1923	22
Qg3-1-3	172	122	163	0.75	0.1162	0.0031	4.894	0.1386	0.3031	0.0035	1898	48	1801	24	1707	18
Qg3-1-4	202	130	199	0.65	0.1147	0.0031	5.0672	0.1366	0.3185	0.0036	1876	49	1831	23	1782	17
Qg3-1-5	227	162	140	1.16	0.1144	0.0036	5.179	0.1625	0.327	0.0044	1872	57	1849	27	1824	21
Qg3-1-6	167	109	141	0.77	0.1133	0.0035	5.1596	0.1583	0.3294	0.0044	1854	57	1846	26	1835	21
Qg3-1-7	134	91.6	109	0.84	0.1157	0.0034	5.2387	0.1572	0.3272	0.0039	1891	52	1859	26	1825	19
Qg3-1-8	206	146	147	0.99	0.117	0.0027	5.3996	0.1386	0.3319	0.0043	1922	42	1885	22	1848	21
Qg3-1-9	229	158	216	0.73	0.1127	0.0022	4.9736	0.1024	0.3179	0.0029	1844	36	1815	17	1779	14
Qg3-1-10	103	70.6	95.5	0.74	0.1114	0.0027	4.9436	0.122	0.3195	0.0032	1822	44	1810	21	1787	16
Qg3-1-11	232	151	200	0.76	0.1071	0.0017	5.0533	0.0983	0.3373	0.0028	1751	29	1828	16	1874	13
Qg3-1-12	176	109	129	0.85	0.1061	0.0025	5.2447	0.1229	0.3556	0.0038	1733	38	1860	20	1961	18
Qg3-1-13	273	166	256	0.65	0.1077	0.0025	5.1865	0.1202	0.3447	0.0033	1761	43	1850	20	1909	16
Qg3-1-14	311	184	276	0.67	0.109	0.0031	5.3236	0.1426	0.3491	0.0032	1783	53	1873	23	1930	15
Qg3-1-15	163	98.8	124	0.80	0.1062	0.0038	5.2003	0.1782	0.3485	0.0045	1736	65	1853	29	1928	21
Qg3-1-16	217	138	142	0.97	0.109	0.0039	5.2794	0.1782	0.3463	0.0046	1783	65	1866	29	1917	22
Qg3-1-17	209	133	147	0.91	0.1125	0.0036	5.3649	0.1644	0.3412	0.004	1840	58	1879	26	1893	19

续表 1

Continued Table 1

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th	U	Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
					$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	
Qg3-1-18	206	132	184	0.72	0.1097	0.0032	5.0508	0.1412	0.3297	0.0034	1794	53	1828	24	1837	16
Qg3-1-19	301	185	312	0.59	0.1066	0.0027	4.9559	0.1262	0.3324	0.0032	1743	46	1812	22	1850	16
Qg3-1-20	229	165	153	1.08	0.1119	0.0036	5.0907	0.1623	0.3267	0.0041	1831	58	1835	27	1823	20
Qg3-1-21	122	74.9	90.5	0.83	0.1173	0.0039	5.5133	0.1798	0.3393	0.0044	1917	59	1903	28	1883	21
Qg3-1-22	157	95.4	117	0.82	0.1165	0.0036	5.7314	0.1778	0.3543	0.0045	1903	55	1936	27	1955	22
Qg3-1-23	181	101	182	0.56	0.1081	0.0028	5.3667	0.1384	0.3577	0.0039	1769	48	1880	22	1971	19
Qg3-1-24	532	320	476	0.67	0.1096	0.0026	5.2931	0.1281	0.3466	0.0033	1792	44	1868	21	1919	16
Qg3-1-25	298	183	298	0.61	0.1081	0.003	4.9351	0.1354	0.3283	0.0037	1769	50	1808	23	1830	18
Qg3-1-26	124	78.7	114	0.69	0.1114	0.0034	5.159	0.1534	0.3343	0.0042	1822	55	1846	25	1859	20
Qg3-1-27	234	145	189	0.77	0.1127	0.0029	5.3074	0.1363	0.3396	0.004	1843	46	1870	22	1885	19
Qg3-1-28	239	139	209	0.67	0.1128	0.0028	5.5093	0.1401	0.3519	0.0038	1856	50	1902	22	1944	18
角闪二辉岩 (Qg4-1)																
Qg4-1-1	97	101	261	0.39	0.0697	0.0026	1.4187	0.0549	0.1456	0.0021	920	77	897	23	876	12
Qg4-1-2	53	52	133	0.39	0.0719	0.0028	1.4557	0.0585	0.1451	0.0021	983	80	912	24	873	12
Qg4-1-3	77	104	168	0.62	0.0715	0.0034	1.3682	0.0629	0.138	0.002	972	96	875	27	833	11
Qg4-1-4	38	37	122	0.30	0.0654	0.0032	1.3671	0.0652	0.1494	0.002	787	102	875	28	898	11
Qg4-1-5	47	63	115	0.55	0.0699	0.0035	1.3048	0.0645	0.1339	0.0019	928	106	848	28	810	11
Qg4-1-6	46	49	74	0.66	0.0816	0.005	1.7363	0.118	0.1528	0.0029	1235	121	1022	44	917	16
Qg4-1-7	37	43	79	0.54	0.0745	0.0038	1.4169	0.0681	0.1394	0.0024	1055	102	896	29	841	14
Qg4-1-8	41	45	108	0.42	0.0753	0.004	1.5084	0.0893	0.1419	0.0024	1076	112	934	36	856	14
Qg4-1-9	50	57	141	0.40	0.0635	0.0027	1.2552	0.0505	0.1433	0.0019	728	89	826	23	863	11
Qg4-1-10	51	56	164	0.34	0.0672	0.0035	1.3093	0.0682	0.1417	0.0024	843	109	850	30	854	14
Qg4-1-11	64	75	152	0.49	0.0725	0.0032	1.4094	0.0624	0.1409	0.002	1000	91	893	26	850	11
Qg4-1-12	67	88	519	0.17	0.0738	0.0025	0.9535	0.0365	0.0916	0.0012	1036	69	680	19	565	7
Qg4-1-13	53	63	159	0.40	0.0645	0.0026	1.2286	0.0468	0.1382	0.0018	759	85	814	21	834	10
Qg4-1-14	74	70	178	0.39	0.0765	0.0031	1.6538	0.0696	0.1559	0.0025	1109	80	991	27	934	14

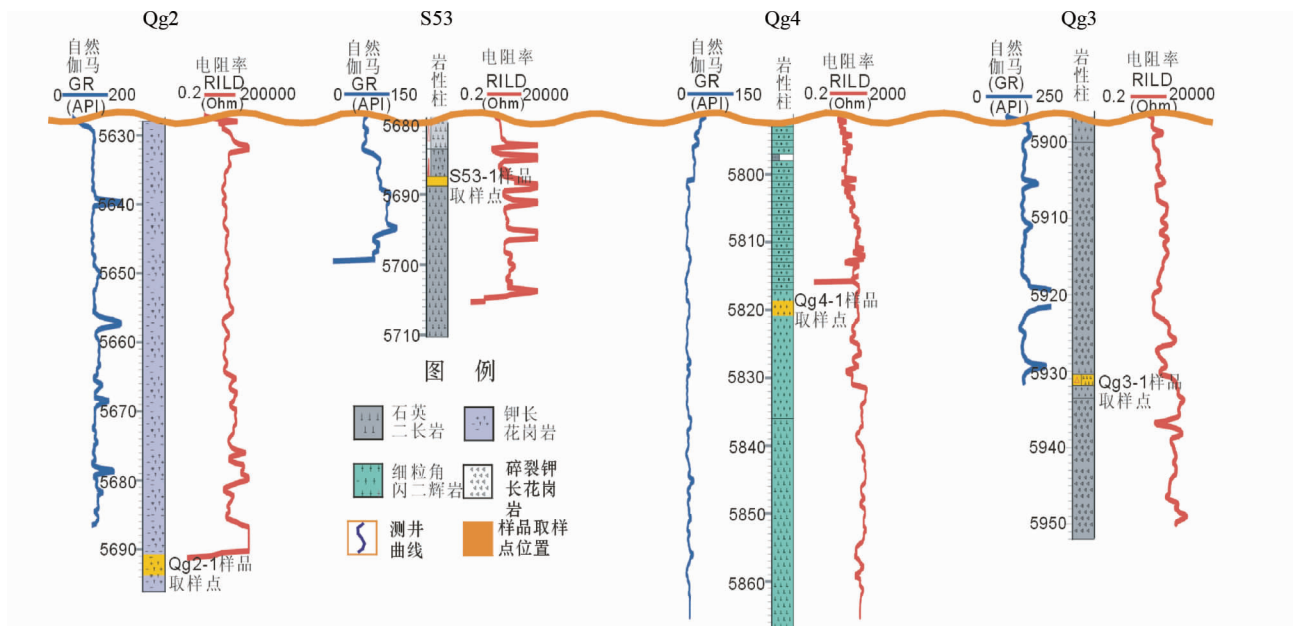


图 2 三道桥地区前震旦纪基底岩浆岩地层对比及采样点位置

Fig. 2 The strata correlation and the sampling locations of magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area

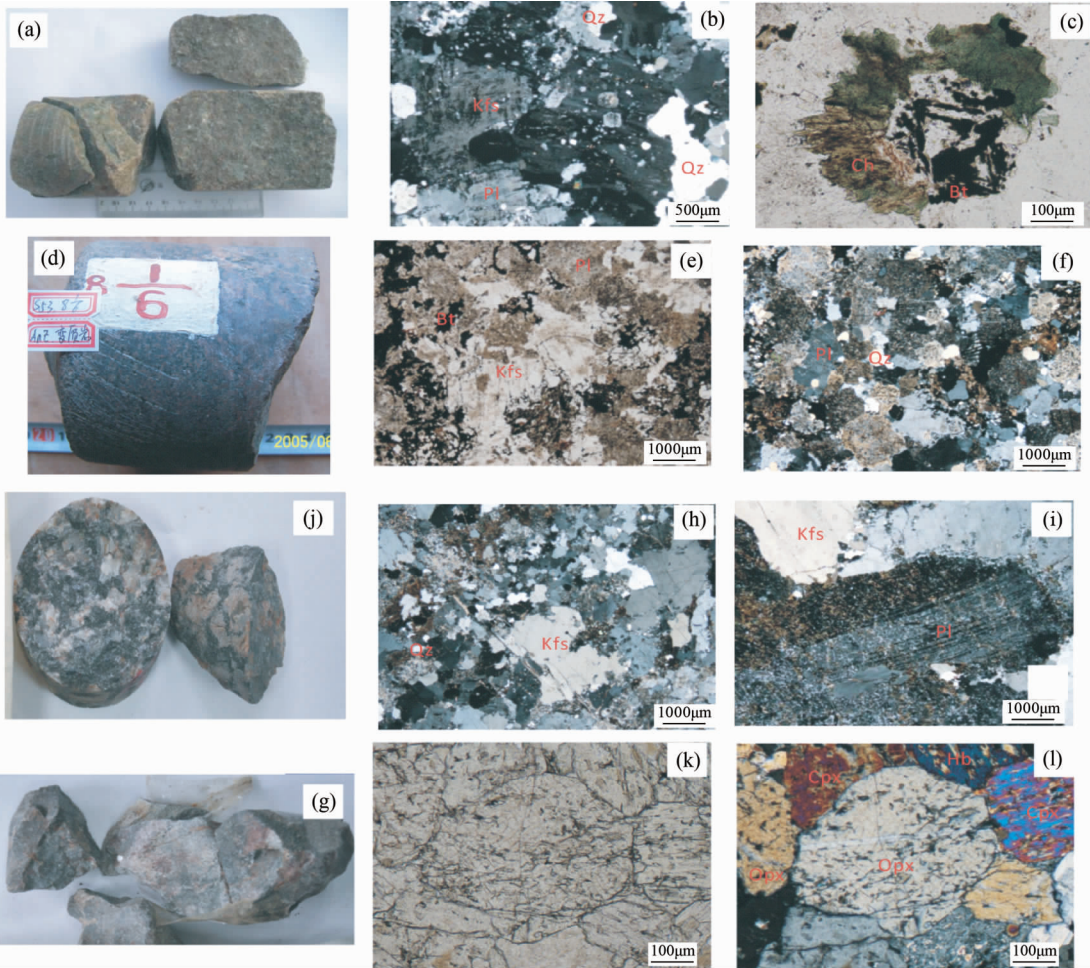


图3 三道桥地区前震旦纪岩浆岩的岩心和显微照片

(a-c) 钾长花岗岩(样品 Qg2-1); (d-f) 石英二长岩(样品 S53-1); (j, h, i) 钾长花岗岩(样品 Qg3-1); (g, k, l) 角闪二辉岩(样品 Qg4-1). 图中矿物缩写据 Whitney and Evans (2010); Bt-黑云母; Ch-绿泥石; Kfs-钾长石; Qz-石英; Pl-斜长石

Fig. 3 Microphotographs for magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area

(a-c) K-feldspar granite (sample for Qg2-1); (d-f) adamellite (sample for Qg53-1); (j, h, i) K-feldspar granite (sample for Qg3-1); (g, k, l) -Hornblende-websterite (sample for Qg4-1). Mineral symbols: Bt-biotite; Chl-chlorite; Kfs-K-feldspar; Qz-quartz; Pl-plagioclase (after Whitney and Evans, 2010)

标进行同位素质量分馏校正。普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法, U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重均采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)。

2.2 结果分析

本次锆石的原位 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果见表 1。

钾长花岗岩(样品 Qg2-1) 中锆石呈长柱状, 长可达 $200\mu\text{m}$, 长宽比 $2:1 \sim 3:1$, CL 图像显示锆石发育明显的核边结构。锆石核部为灰黑色, 可见灰白色残留核, 边部 ($<10\mu\text{m}$) 为明亮的发光特征, 无岩浆生长环带, 局部可见亮色边溶蚀暗色锆石核部(图 4a)。钾长花岗岩(样品 Qg2-1) 15 个锆石样品的 U 和 Th 含量分别为 $54.1 \times 10^{-6} \sim 1030 \times 10^{-6}$, $23.5 \times 10^{-6} \sim 551 \times 10^{-6}$, 相应的 Th/U 比值为 0.29 ~ 1.20, 平均为 0.66(表 1)。15 颗锆石分析点, 除 2 个分析点

(Qg2-1-11、Qg2-1-13) 谐和度较差外, 其余分析点均落在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上及以下, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄从 1987Ma 到 1706Ma, 得到一致的谐和年龄 $1846 \pm 1\text{Ma}$ (图 5a)。因锆石明亮边部太窄, 没有测试点来获取其年龄。

石英二长岩(样品 S53-1) 中锆石粒度在 $100\mu\text{m}$ 左右, 长宽比 $1:1 \sim 2:1$, 锆石以椭圆状为主, CL 图像显示锆石内部呈布丁状结构(图 4b)。石英二长岩(样品 S53 井) 15 个锆石样品 U 和 Th 含量分别为 $145 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, $67 \times 10^{-6} \sim 262 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.44 ~ 0.96, 平均为 0.58。15 个分析点给出的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄从 1858Ma 到 1709Ma, 得到一致的谐和年龄为 $1791 \pm 1\text{Ma}$ (图 5b)。

钾长花岗岩(样品 Qg3-1) 锆石呈柱状或长柱状, 长径大者可达 $250\mu\text{m}$, 长宽比 $2:1 \sim 3:1$, CL 图像显示锆石发育清晰的岩浆生长环带, 部分核部具有不发光的矿物包裹体(图

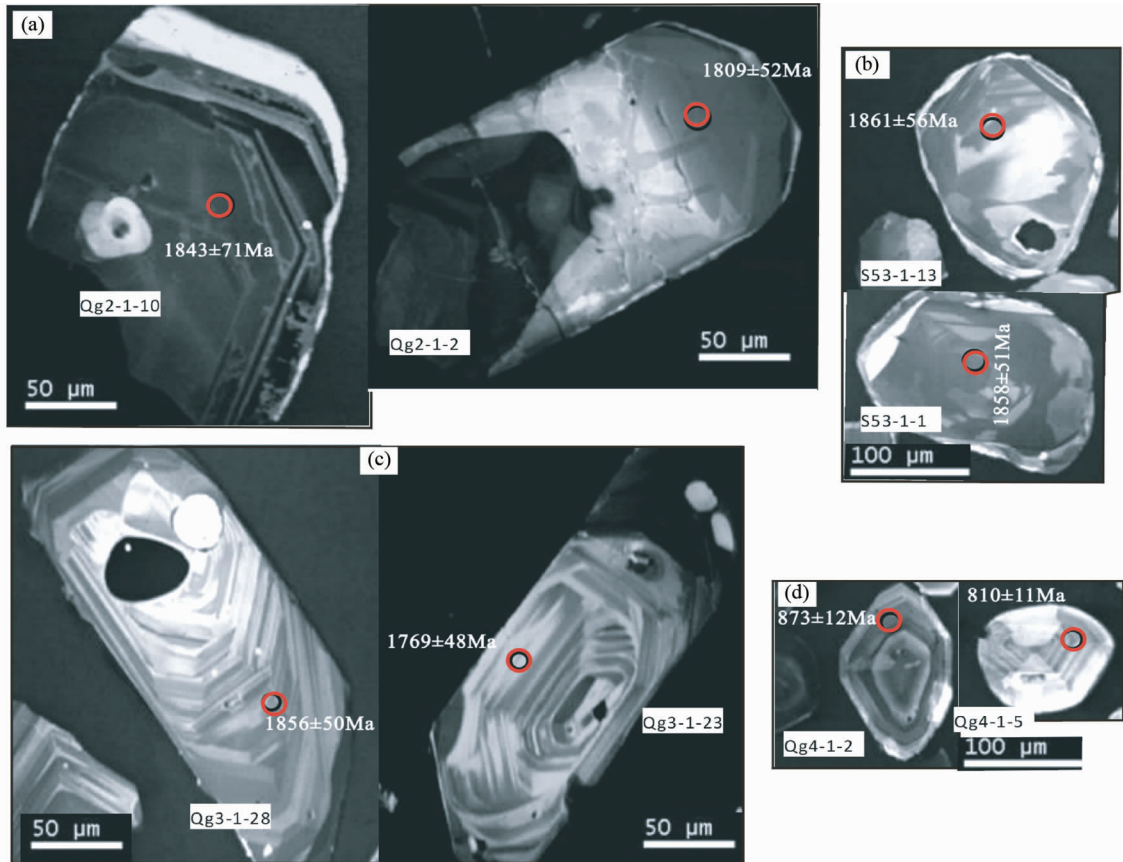


图4 三道桥地区基底岩浆岩锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircon for magmatic rocks from Pre-Sinian basement in the SDQ area

4c)。钾长花岗岩(样品 Qg3-1)28 个锆石样品 U 和 Th 含量分别为 $90.5 \times 10^{-6} \sim 476 \times 10^{-6}$, $70.6 \times 10^{-6} \sim 320 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.66 ~ 1.15, 平均为 0.77。28 个分析点,除 (Qg3-1-3) 谐和度差外,其余分析点在谐和图上表现出较好的谐和性(图 5c), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 1943 ~ 1733Ma, 得到一致的谐和年龄为 $1824 \pm 2\text{Ma}$ 。

角闪二辉岩(样品 Qg4-1) 锆石呈柱状或纺锤状, 粒径 $100\mu\text{m}$ 左右, 长宽比 $1:1 \sim 2:1$, CL 图像显示锆石具有清晰的岩浆振荡生长环带, 为典型岩浆锆石特征(图 4d)。角闪二辉岩(样品 Qg4-1) 14 个锆石样品的 U 和 Th 含量分别为 $74 \times 10^{-6} \sim 519 \times 10^{-6}$, $37 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$, 相应的 Th/U 比值为 0.17 ~ 0.66, 平均为 0.43(表 1), 为岩浆结晶成因。分析点 Qg4-1-12 可能由于 Pb 丢失, 测得年龄 565Ma。此外, 除分析点 Qg4-1-6 谐和度较差外, 其余 12 个点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值从 934Ma 到 810Ma, 得到一致的谐和年龄为 $879 \pm 4\text{Ma}$ (图 5d)。

3 讨论

要合理解释所测年龄代表的地质意义, 需要以系统实验观察结果和区域地质基本事实为基础。前人在塔里木盆地

周缘的库鲁克塔格、阿克苏-柯坪、阿尔金-敦煌、铁克里克-西昆仑等地区, 对前寒武纪地质体的岩石学及年代学做了大量研究, 获得了一些重要的元古代同位素年龄数据(表 2), 这为我们分析本次所获年龄提供依据。

3.1 样品(Qg2-1、S53-1 和 Qg3-1) 年龄

根据本次钻井提供的锆石样品岩石学及锆石内部结构特征, 样品(Qg2-1、S53-1、Qg3-1) 为浅变质的花岗岩类, 样品 Qg2-1 的锆石边部和样品 S53-1 的整个锆石具有变质锆石的特征, 样品 Qg3-1 具有岩浆锆石特征(钱一雄等, 2007)。获得的三组年龄 $1846 \pm 1\text{Ma}$ 、 $1791 \pm 1\text{Ma}$ 、 $1824 \pm 2\text{Ma}$ 可能是岩石成岩年龄, 也可能是岩浆岩的变质年龄。

在库鲁克塔格地区, 古元古代变质岩分布广泛, 岩浆活动不发育, 库尔勒铁门关、辛格爾等地方报道的古元古代变质岩, 变质锆石年龄多集中在 2.0 ~ 1.8Ga 之间(陆松年, 1992; 郭召杰等, 2003; Long *et al.*, 2010, 2012; 董昕等, 2011; Ge *et al.*, 2013; 见表 2)。在塔里木西南地区, 赫罗斯坦群是一套变质的侵入杂岩, 其岩石组成主要为斜长角闪岩-花岗闪长岩-含角闪石二长花岗岩-二云母花岗岩, 显示 A-S 型地球化学特征, 形成时代为 2.4 ~ 2.3Ga, 锆石的增生边年龄为 1.9Ga, 代表了岩石的变质年龄(Zhang *et al.*, 2007;

表2 塔里木盆地前震旦基底年龄统计表

Table 2 Compilation of the Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geochronological data from the Tarim Craton

时代	地点	岩石类型	测试方法	年龄 (Ma)	参考文献
古元古代- 中元古代	库鲁克塔格	花岗片麻岩	TISM	2071 ± 37	陆松年等, 1992
	铁门关	角闪岩	TISM	1836 ± 25	郭召杰等, 2003
	红卫庄	花岗片麻岩	TISM	1943 ± 6	郭召杰等, 2003
	库尔勒	正片麻岩	LA-ICP-MS	1789 ± 12	Long <i>et al.</i> , 2010
	辛格儿	片麻状花岗岩	LA-ICP-MS	1915 ± 13	Long <i>et al.</i> , 2012
	铁门关	云母片岩	LA-ICP-MS	1889.7 ± 6.1	董昕等, 2011
	铁门关	云母片岩	LA-ICP-MS	1878 ± 26	董昕等, 2011
	铁门关	云母片麻岩	LA-ICP-MS	1852 ± 42	董昕等, 2011
	兴地	英闪岩	SHRIMP	1855 ± 14	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	兴地	奥长花岗岩	SHRIMP	1819 ± 13	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	库尔勒	黑云母片麻岩	LA-ICP-MS	1800 ± 19	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	库尔勒	花岗岩	LA-ICP-MS	1807 ± 28	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	库尔勒	黑云母片岩	LA-ICP-MS	1856 ± 12	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	库尔勒	黑云母片麻岩	LA-ICP-MS	1864 ± 14	Zhang <i>et al.</i> , 2012a
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1845 ± 16	Ge <i>et al.</i> , 2013
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1853 ± 17	Ge <i>et al.</i> , 2013
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1842 ± 18	Ge <i>et al.</i> , 2013
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1854.3 ± 8.9	Ge <i>et al.</i> , 2013
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1838 ± 11	Ge <i>et al.</i> , 2013
	库尔勒	云母片岩	LA-ICP-MS	1853 ± 15	Ge <i>et al.</i> , 2013
	阿克塔什塔格	奥长花岗岩	SHRIMP	1978 ± 50	陆松年和袁桂邦, 2003
	阿克塔什塔格	石英闪长质片麻岩	SHRIMP	2104.5 ± 9	辛后田等, 2011
	阿克塔什塔格	石英闪长质片麻岩	SHRIMP	1906 ± 78	辛后田等, 2011
	阿克塔什塔格	片麻状石英闪长岩	SHRIMP	2151.9 ± 9.9	辛后田等, 2011
	阿克塔什塔格	片麻状石英正长岩	SHRIMP	2050 ± 32	辛后田等, 2011
	阿克塔什塔格	片麻状石英正长岩	SHRIMP	1968 ± 22	辛后田等, 2011
	敦煌什宝城	高压麻粒岩	LA-ICP-MS	1834 ± 12	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	敦煌什宝城	高压麻粒岩	LA-ICP-MS	1842 ± 5	Zhang <i>et al.</i> , 2012b
	敦煌什宝城	高压麻粒岩	SHRIMP	1818 ± 16	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	敦煌什宝城	英云闪长质片麻岩	LA-ICP-MS	1885 ± 32	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	敦煌好布拉	英云闪长质片麻岩	LA-ICP-MS	1829 ± 7	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	敦煌红柳河	花岗片麻岩	LA-ICP-MS	1825 ± 11	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	敦煌红柳河	花岗片麻岩	LA-ICP-MS	1853 ± 12	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	敦煌红柳河	花岗片麻岩	LA-ICP-MS	1838 ± 25	Zhang <i>et al.</i> , 2013
	Qg2 井	钾长花岗岩	LA-ICP-MS	1822 ± 1	本文
	Qg3 井	钾长花岗岩	LA-ICP-MS	1822 ± 1	本文
沙53 井	石英二长岩	LA-ICP-MS	1791 ± 1	本文	
中-新元 古代	西昆仑, 塔里木西南	变质火山岩	Ar-Ar	1050 ± 0.93	Zhang <i>et al.</i> , 2003
	西昆仑, 塔里木西南	变质火山岩	Ar-Ar	1021 ± 1.02	Zhang <i>et al.</i> , 2003
	阿尔金	斑状花岗岩	TISM	922 ± 6	Gehrels <i>et al.</i> , 2003
	阿尔金	花岗岩	TISM	922 ± 5	Gehrels <i>et al.</i> , 2003
	阿尔金	变质流纹岩	SHRIMP	920 ± 20	张志诚等, 2010
	兴地东	片麻状花岗岩	LA-ICP-MS	933 ± 11	Shu <i>et al.</i> , 2011
	兴地西	片麻状花岗岩	LA-ICP-MS	1048 ± 19	Shu <i>et al.</i> , 2011
	中库鲁克塔格	黑云花岗岩	LA-ICP-MS	798 ± 3	Long <i>et al.</i> , 2011
	中库鲁克塔格	石英闪长岩	LA-ICP-MS	754 ± 4	Long <i>et al.</i> , 2011
	辛格尔	流纹岩	SHRIMP	740 ± 7	Xu <i>et al.</i> , 2009
	赛马山	火山岩	SHRIMP	732 ± 7	Xu <i>et al.</i> , 2009
	兴地	花岗闪长石	SHRIMP	820 ± 10	Zhang <i>et al.</i> , 2007
	阿克苏	辉长岩岩脉	SHRIMP	759 ± 7	Zhang <i>et al.</i> , 2009
	兴地	花岗岩岩脉	LA-ICP-MS	798 ± 7	邓兴梁等, 2008
	兴地	辉绿岩岩脉	LA-ICP-MS	816 ± 15	邓兴梁等, 2008
	兴地	花岗岩	LA-ICP-MS	806 ± 8	Shu <i>et al.</i> , 2011
	兴地	花岗岩	LA-ICP-MS	798 ± 7	Shu <i>et al.</i> , 2011
	塔参1 井	闪长岩	Ar-Ar	1199 ± 8	李曰俊等, 2003
	塔参1 井	闪长岩	Ar-Ar	933 ± 7	李曰俊等, 2003
	塔参1 井	闪长岩	Ar-Ar	891 ± 32	李曰俊等, 2003
	Qg4 井	角闪二辉岩	LA-ICP-MS	879 ± 4	本文

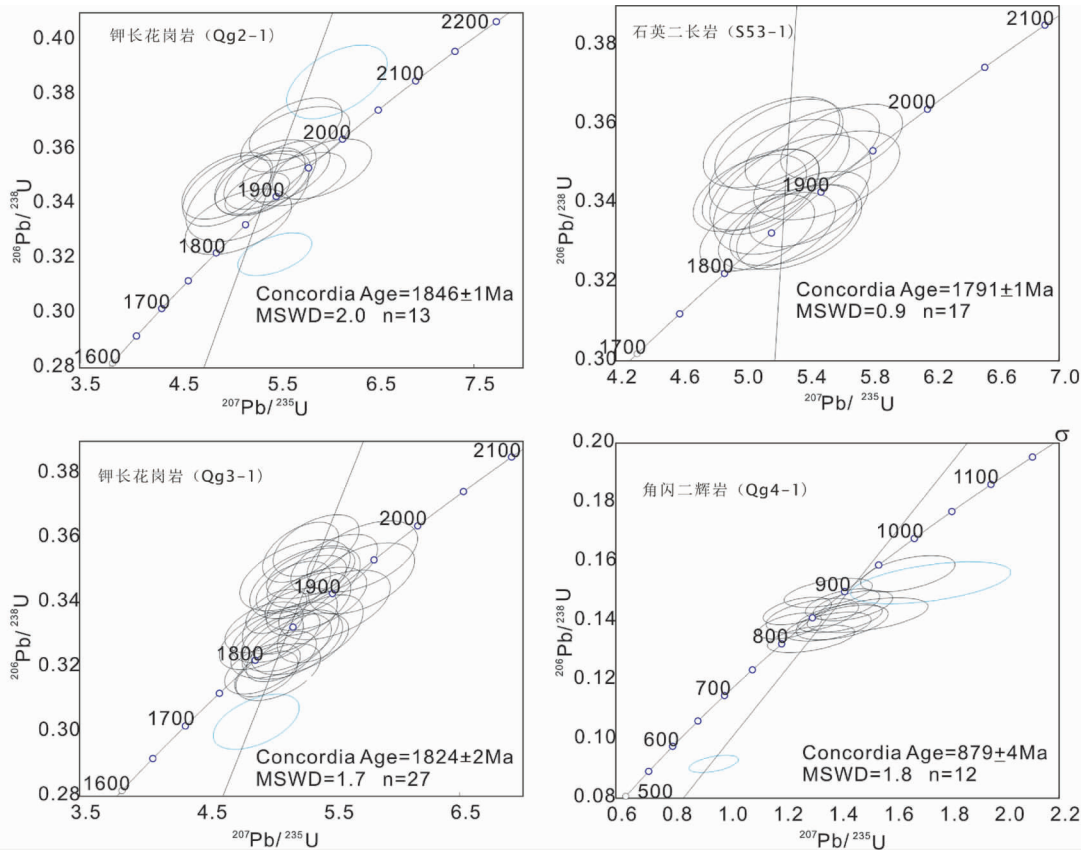


图5 三道桥地区前震旦纪基底岩浆岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Concordia diagrams showing U-Pb analyses of zircons for magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area

Wang *et al.*, 2014)。在阿尔金地区,存在 2.3Ga 的变质基性岩墙及相关的片麻状花岗岩,也具有板内玄武岩地球化学特征(陆松年和袁桂邦, 2003)。阿克塔什塔格地区石英闪长质片麻岩、片麻状石英闪长岩及片麻状石英正长岩所记录的变质年龄在 2.05 ~ 1.93Ga 之间(辛后田等, 2011; 表 2)。同时,在东塔里木敦煌地区,新近报道的早元古代基性高压麻粒岩, ~ 2.5Ga 的英云闪长片麻岩和 ~ 2.3Ga 的花岗闪长片麻岩的变质年龄在 1850 ~ 1820Ma 之间(Zhang *et al.*, 2012b, 2013; 表 2)。本次变质岩浆岩获得的三组年龄 1846 ± 1Ma、1791 ± 1Ma、1824 ± 2Ma 与北塔里木库鲁克塔格、库尔勒及敦煌地区新近报道的变质年龄(1.9 ~ 1.79Ga)吻合较好,比南塔里木的阿尔金地区古元古代晚期变质时间(2.05 ~ 1.93Ga)略晚一些,表明塔里木变质基底古元古代(2.0 ~ 1.8Ga)普遍存在变质事件。本次获得的这三组年龄可能为岩石变质年龄,虽然没有证据来推测本区的岩浆岩的形成是否与 2.4 ~ 2.3Ga 的岩浆事件有关,但至少可以证实钻井揭示的浅变质花岗岩、石英二长岩结晶年龄在 2.0Ga 以上,在古元古代中晚期(1850 ~ 1791Ma)遭受变质作用,说明塔里木盆地沙雅隆起北部存在前震旦纪古老基底。

综上所述,古元古代中晚期(2.0 ~ 1.8Ga)的这次变质事件不仅使早期古元古代沉积岩发生中高级的变质作用,形成

了一套类似孔兹岩系的变质岩系统,而且使太古代 TTG 以及少量的古元古代早期的侵入岩也发生全面的变质作用(董昕, 2011; Zhang *et al.*, 2012a, b, 2013; Ge *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)。这可能也是本次研究中不论其外观为变质锆石,还是岩浆锆石,所测得的年龄均为岩石变质年龄的原因。另外,从区域地质背景分析,在库鲁克塔格地区中元古界角度不整合在古元古代兴地塔格群高级变质岩之上,代表了古元古代末期强烈的造山事件(陆松年等, 2006)。研究表明,全球 Columbia 超级大陆各组成陆块是在 2.0 ~ 1.8Ga 的碰撞事件中拼合在一起的(Zhao *et al.*, 2003, 2004)。Li *et al.* (1996)根据元古代基底岩石的对比认为,在古元古代至早寒武纪,塔里木地块与澳大利亚北部 Kimberley 地块是有关联的。敦煌地区发现的高压麻粒岩记录了等温降压(ITD)顺时针的 *P-T* 演化轨迹(Zhang *et al.*, 2013),一般认为,这种类型的 *P-T* 轨迹发生于俯冲碰撞快速隆升的造山过程中,反映大陆碰撞的构造环境。塔里木陆块保留了 2.0 ~ 1.8Ga 的构造-岩浆-变质记录,说明 Columbia 超大陆汇聚是完全可能的。因此,本文所获得的古元古代晚期的变质作用可能与哥伦比亚超大陆的形成有关。

3.2 样品 Qg4-1 年龄

角闪二辉岩样品 Qg4-1 的锆石为岩浆锆石特征,879 ±

4Ma 年龄可能代表了岩石的侵入年龄,与前人在塔里木盆地周缘所获得的中新元古代年龄是可对比的。中-新元古代塔里木造山运动使塔里木地块从相对活动到相对稳定状态的转变。塔里木北缘各地段先后发生了构造隆升(许志琴等, 2005)。这期构造热事件也是塔里木克拉通及其周缘地块岩浆和变质作用的峰期(高振家等, 1993; Zhang *et al.*, 2003; Gehrels *et al.*, 2003; 陆松年等, 2006; Shu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013)。

在塔里木盆地北缘的库鲁塔格地区,新元古代侵入岩极其发育。据不完全统计,出露面积达 6000km² 以上,和这些侵入岩相关的中基性火山岩在新元古代地层中也广泛发育侵入岩,岩石类型复杂,形成的时代跨越时间长,且表现出明显的阶段性(Zhang *et al.*, 2007; 邓兴梁等, 2008; Xu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011; Ge *et al.*, 2013)。在库鲁克塔格以西的柯坪-阿克苏地区,新元古界直接不整合在阿克苏群之上,变质基底为阿克苏群,由含蓝闪石片岩、阳起石片、绿帘阳起片岩和钠长石英片岩组成,其原岩为火山岩和火山碎屑岩,报道的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 962 ± 12Ma 和 944Ma (高振家等, 1993),辉长岩岩脉的年龄为 759 ± 7Ma (Zhang *et al.*, 2009; 张健等, 2014)。在阿尔金地区,报道了类似年龄的中元古代末期-新元古代早期岩浆事件(Gehrels *et al.*, 2003; 陆松年等, 2006; 张志诚等, 2010; 张建新等, 2011),已有一些研究显示这些岩浆活动具有同碰撞的性质(王超等, 2006)。在塔里木西南缘的铁克里克,对卡拉卡什群和塞拉加兹塔格群中的变质火山岩及火山碎屑岩锆石 SHRIMP 测定显示,其锆石存在 1000Ma 左右年龄(Zhang *et al.*, 2003; 表 2)。同时也获得了 900 ~ 870Ma 的板内双峰式火山岩年龄(Wang *et al.*, 2015)。值得注意的是,在塔里木盆地内的塔参 1 井底部花岗岩闪长岩中角闪石的 Ar-Ar 测定曾获得 1199 ~ 891Ma 的年龄(李日俊等, 2003, 2005)。这些岩浆事件被认为是与罗迪尼亚超大陆形成有关的造山事件,也正是这次事件(塔里木运动或晋宁运动)造成了塔里木基底最终固结(Lu *et al.*, 2008)。本文中样品(Qg4)获得的 879 ± 4Ma 是中元古代末期-新元古代早期构造热事件的在盆地内部塔北地区的记录。

4 结论

(1) 根据地震、钻井资料分析,塔里木盆地沙雅隆起北部三道桥地区前震旦系基底岩浆岩发育,岩性由浅变质的钾长花岗岩、石英二长岩和未发生变质的角闪二辉岩组成。不同岩浆岩表现出了不同电性、地震反射特征。钾长花岗岩、石英二长岩及碎裂钾长花岗岩分布于齐满断裂带、托乎拉断裂带的东部,测井曲线上表现为高放射性、高电阻率的特征,自然伽马值在 110 ~ 160API,电阻率值 50 ~ 1000Ω · m。角闪二辉岩分布在托乎拉断裂带西段的 Qg4 井区,具低放射性、低电阻电性特征,自然伽马值在 20API 左右,电阻率值 20Ω ·

m,为穹窿状反射,内部杂乱,振幅整体较强,与围岩界线清楚。

(2) 锆石 U-Pb 年代学研究表明,本次所获得年龄四组年龄与前人在塔里木盆地周缘取得的研究结果是可对比的。沙雅隆起北部三道桥地区的浅变质的钾长花岗岩、石英二长岩基底在古元古代中晚期(1850 ~ 1791Ma)经历了一次的变质作用,可能与哥伦比亚大陆形成有关;在新元古代早期(879 ± 4Ma)经历了岩浆活动,可能为罗迪尼亚超大陆的汇聚作用在塔里木地块的响应。

致谢 本文研究过程中得到了中石化勘探开发研究院翟晓先教授,中石化西北油田分公司陈惠超、云露、黄太柱等领导专家的指导和鼓励;审稿专家和编辑部俞良军老师提出了宝贵修改意见;在此一并表示衷心感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Cui JW and Tang ZM. 2011. Tectonic framework of the Tarim basin and its tectonic stress field analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 231-242 (in Chinese with English abstract)
- Deng XL, Shu LS, Zhu WB, Ma DS and Wang B. 2008. Precambrian tectonism, deformation and geochronology of igneous rocks in the Xingdi fault zone, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2800-2808 (in Chinese with English abstract)
- Dong X, Zhang ZM and Tang W. 2011. Precambrian tectono-thermal events of the northern margin of the Tarim Craton: Constraints of zircon U-Pb chronology from high-grade metamorphic rocks of the Korla, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 47-58 (in Chinese with English abstract)
- Gao ZJ, Chen JB, Lu SN, Peng CW and Qin ZY. 1993. The Precambrian geology in northern Xinjiang. In: Editorial Board of Precambrian Geology of Ministry of Geology and Mineral Resources (ed.). *Precambrian Geology No. 6*. Beijing: Geological Publishing House, 1-171 (in Chinese)
- Ge RF, Zhu WB, Wu HL, He JW and Zheng BH. 2013. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Korla Complex, NW China: Implications for metamorphic zircon formation and geological evolution of the Tarim Craton. *Precambrian Research*, 231: 1-18
- Gehrels GE, Yin A and Wang XF. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9): 2423
- Guo ZJ, Zhang ZC, Liu SW and Li HM. 2003. U-Pb geochronological evidence for the Early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 537-542 (in Chinese with English abstract)
- He DF, Jia CZ, Li DS, Zhang CJ, Meng QR and Shi X. 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 64-77 (in Chinese with English abstract)
- Ji M, Hu L, Liu JL and Cao SY. 2008. Dynamic recrystallization and metamorphic conditions of main rock-forming minerals. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 226-233 (in Chinese with English abstract)
- Jia CZ. 1997. *Tectonic Characteristics and Petroleum Tarim Basin China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-438 (in Chinese)

- Li YJ, Sun LD, Hu SL, Song WJ, Wang GL and Tan ZJ. 2003. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of the granite and diorite revealed at the bottom of Tacan 1, the deepest well in China. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (3): 530–536 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Song WJ, Wu GY, Wang YF, Li YP and Zheng DM. 2005. Jinning granodiorite and diorite deeply concealed in the central Tarim Basin. *Science in China (Series D)*, 48(12): 2061–2068
- Li YJ, Yang HJ, Zhang GY, Zheng DM, Liu YX, Zhao Y, Li GH and Liu YL. 2012. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2466–2478 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Zhang L and Powell CM. 1996. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic Supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 593–604
- Liang DG, Gu QY and Pi XJ. 1998. Distribution law of the condensate gas reservoirs in Tabei uplift. *Natural Gas Industry*, 18(3): 5–9 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Yuan C, Sun M, Zhao GC, Xiao WJ, Wang YJ, Yang YH and Hu AQ. 2010. Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints. *Precambrian Research*, 180(3–4): 272–284
- Long XP, Yuan C, Sun M, Kröner A, Zhao GC, Wilde S and Hu AQ. 2011. Reworking of the Tarim Craton by underplating of mantle plume-derived magmas; Evidence from Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China. *Precambrian Research*, 187: 1–14
- Long XP, Sun M, Yuan C, Kröner A and Hu AQ. 2012. Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim Craton, NW China; Implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222–223: 474–487
- Lu SN. 1992. Geological evolution of Proterozoic in Kuruktage, Xinjiang. *Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 26–27: 279–292 (in Chinese)
- Lu SN and Yuan GB. 2003. Geochronology of Early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, East Altyn Tagh. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 61–68 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yu HF, Li HK, Guo KY, Wang HC, Jin W, Zhang CL and Liu YS. 2006. Research on Precambrian Major Problems in China. Beijing: Geological Publishing Press, 1–206 (in Chinese)
- Lu SN, Li H, Zhang C and Niu G. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160: 94–107
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 4: 1–70
- Luo JL, Zhai XX, Pu RH, He FQ, Zhao HT, Yu RL and Zhou JJ. 2006. Horizon, petrology and lithofacies of the volcanic rocks in the Tahe oilfield, northern Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 41(3): 378–391 (in Chinese with English abstract)
- Qian YX, He ZL, Cai XY, Chen Y and Zhang JT. 2007. Characteristics of and U-Pb ages of zircons and its implication from zircon of Donghe sandstones of the Upper Devonian and Silurian sandstones in Tazhong area, Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 3003–3014 (in Chinese with English abstract)
- Santosh M, Sajeev K, Li JH, Liu SL and Itaya T. 2009. Counterclockwise exhumation of a hot orogen; The Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton. *Lithos*, 110(1–4): 140–152
- Shu LS, Deng XL, Zhu WB, Ma DS and Xiao WJ. 2011. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China; New geochronological insights from the Quruqtagh domain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 774–790
- Tang LJ. 1997. An approach to major tectogenesis of Tarim Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 19(2): 108–114 (in Chinese with English abstract)
- Tang LJ, Qi LX, Qiu HJ, Yun L, Li M, Xie DQ, Yang Y and Wan GM. 2012. Poly-phase differential fault movement and hydrocarbon accumulation of the Tarim Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2569–2583 (in Chinese with English abstract)
- Wang C, Liu L, Che ZC, Chen DL, Zhang AD and Luo JH. 2006. U-Pb geochronology and tectonic setting of the granitic gneiss in Jianggaleisayi eclogite belt, the southern edge of Altyn Tagh. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 74–82 (in Chinese with English abstract)
- Wang C, Liu L, Yang WQ, Cao YT, Zhu XH, Chen SF, Li RS and He SP. 2013. Provenance and ages of the Altyn complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic evolution of northwestern China. *Precambrian Research*, 230: 193–208
- Wang C, Wang YH, Liu L, He SP, Li RS, Li M, Yang WQ, Cao YT, Meert J, Shi C and Yu HY. 2014. The Palaeoproterozoic magmatic-metamorphic events and cover sediments of the Tiekelik belt along the southwestern margin of the Tarim Craton, northwestern China. *Precambrian Research*, 254: 210–225
- Wang C, Zhang JH, Li M, Li RS and Peng Y. 2015. Generation of ca. 900–870 Ma bimodal rifting volcanism along the southwestern margin of the Tarim Craton and its implications for the Tarim-North China connection in the Early Neoproterozoic. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 610–625
- Whitney DL and Evans BW. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Xin HT, Zhao FQ, Luo ZH, Liu YS, Wan YS and Wang SQ. 2011. Determination of the Paleoproterozoic geochronological framework in Aqtashtagh area in southeastern Tarim, China, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 1977–1993 (in Chinese with English abstract)
- Xu B, Xiao SH, Zou HB, Chen Y, Li ZX, Song B, Liu DY, Zhou CM and Yuan XL. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168(3–4): 247–258
- Xu ZQ, Yang JS, Liang FH, Qi XX, Liu FL, Zeng LS, Liu DY, Li HB, Wu CL, Shi RD and Chen SY. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Dong YG, Zhao Y, Wang AG and Guo KY. 2003. Geochemistry of Meso-Proterozoic volcanites in Western Kunlun Mountains; Evidence for the plate tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 71: 532–542
- Zhang CL, Li ZX, Li XH, Yu HF and Ye HM. 2007. An Early Paleoproterozoic high-K intrusive complex in southwestern Tarim Block, NW China: Age, geochemistry, and tectonic implications. *Gondwana Research*, 12(1–2): 101–112
- Zhang CL, Li ZX, Li XH and Ye HM. 2009. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China; Age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2): 167–179
- Zhang CL, Li HK, Santosh M, Li ZX, Zou HB, Wang H and Ye H. 2012a. Precambrian evolution and cratonization of the Tarim Block, NW China: Petrology, geochemistry, Nd-isotopes and U-Pb zircon geochronology from Archaean gabbro-TTG-potassic granite suite and Paleoproterozoic metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 5–20
- Zhang J, Zhang CL, Li HK, Ye XT, Geng JZ and Zhou HY. 2014. Revisit to time and tectonic environment of the Aksu blueschist terrane in northern Tarim, NW China; New evidence from zircon U-Pb age and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3357–3365 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Gong JH and Yu SY. 2012b. 1. 85Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China; Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites.

Journal of the Geological Society, 169(5): 511–514

- Zhang JX, Yu SY, Gong JH, Li HK and Hou KJ. 2013. The latest Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. *Precambrian Research*, 226: 21–42
- Zhang ZC, Guo ZJ, Feng ZS and Li JF. 2010. SHRIMP U-Pb age of zircons from Suoerkuli rhyolite in the Altyn Tagh mountains and its geological significations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 597–606 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6(3): 417–434
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1–2): 91–123

附中文参考文献

- 崔军文, 唐哲民. 2011. 塔里木盆地构造格架和构造应力场分析. *岩石学报*, 27(1): 231–242
- 邓兴梁, 舒良树, 朱文彬, 马东升, 王博. 2008. 新疆兴地断裂带前寒武纪构造-岩浆-变形作用特征及其年龄. *岩石学报*, 24(12): 2800–2808
- 董昕, 张泽明, 唐伟. 2011. 塔里木克拉通北缘的前寒武纪构造热事件——新疆库车勒门关高级变质岩的锆石 U-Pb 年代学限定. *岩石学报*, 27(1): 47–58
- 高振家, 陈晋谦, 陆松年, 彭昌文, 秦正永. 1993. 新疆北部前寒武系. 见: 地质矿产部《前寒武纪地质》编辑委员会编. 前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1–171
- 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
- 何登发, 贾承造, 李德生, 张朝军, 孟庆任, 石昕. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化. *石油与天然气地质*, 26(1): 64–77
- 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 曹淑云. 2008. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件. *地学前缘*, 15(3): 226–233
- 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, 1–438
- 李曰俊, 孙龙德, 胡世玲, 宋文杰, 王国林, 谭泽金. 2003. 塔里木盆地塔参1井底部花岗闪长岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究. *岩石学报*, 19(3): 530–536
- 李曰俊, 宋文杰, 吴根耀, 王艺芬, 李宇平, 郑多明. 2005. 塔里木盆地中部隐伏的晋宁期花岗闪长岩和闪长岩. *中国科学(D*

辑), 35(2): 97–104

- 李曰俊, 杨海军, 张光亚, 郑多明, 刘云祥, 赵岩, 李国会, 刘亚雷. 2012. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元. *岩石学报*, 28(8): 2466–2478
- 梁狄刚, 顾乔元, 皮学军. 1998. 塔里木盆地塔北隆起凝析气藏的分布规律. *天然气工业*, 18(3): 5–9
- 陆松年. 1992. 新疆库鲁克塔格地区前寒武纪地质演化. 前寒武纪地质研究, (26–27): 1–15
- 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
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 郭坤一, 王惠初, 金巍, 张传林, 刘永顺. 2006. 中国前寒武纪重大地质问题研究——中国西部前寒武纪重大地质事件群及其全球构造意义. 北京: 地质出版社, 1–206
- 罗静兰, 翟晓先, 蒲仁海, 何发歧, 赵会涛, 俞任连, 周家驹. 2006. 塔里木盆地塔北隆起塔里木火山的层位归属、火山岩岩石学与岩相学特征. *地质科学*, 41(3): 378–391
- 钱一雄, 何治亮, 蔡习尧, 陈跃, 张军涛. 2007. 塔中地区上泥盆统东河砂岩和志留系砂岩的锆石特征、SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 23(11): 3003–3014
- 汤良杰. 1997. 略论塔里木盆地主要构造运动. *石油实验地质*, 19(2): 108–114
- 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 云露, 李萌, 谢大庆, 杨勇, 万桂梅. 2012. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理. *岩石学报*, 28(8): 2569–2583
- 王超, 刘良, 车自成, 陈丹玲, 张安达, 罗金海. 2006. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨. *高校地质学报*, 12(1): 74–82
- 辛后田, 赵凤清, 罗照华, 刘永顺, 万渝生, 王树庆. 2011. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区古元古代精细年代格架的建立及其地质意义. *地质学报*, 85(12): 1977–1993
- 许志琴, 杨经绥, 梁风华, 戚学祥, 刘福来, 曾令森, 刘敦一, 李海兵, 吴才来, 史仁灯, 陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. *岩石学报*, 21(1): 1–12
- 张健, 张传林, 李怀坤, 叶现韬, 耿建珍, 周红英. 2014. 再论塔里木北缘阿克苏蓝片岩的时代和成因环境: 来自锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素的新证据. *岩石学报*, 30(11): 3357–3365
- 张志诚, 郭召杰, 冯志硕, 李建锋. 2010. 阿尔金索尔库里地区元古代流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 26(2): 597–602