

甘肃敦煌党河水库 TTG 地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义*

张志诚 郭召杰 邹冠群 冯志硕 李建锋

ZHANG ZhiCheng, GUO ZhaoJie, ZOU GuanQun, FENG ZhiShuo and LI JianFeng

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

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2008-12-09 收稿, 2009-02-01 改回.

Zhang ZC, Guo ZJ, Zou GQ, Feng ZS and Li JF. 2009. Geochemical characteristics and SHRIMP U-Pb age of zircons from the Danghe reservoir TTG in Dunhuang, Gansu Province, and its significations. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (3):495–505

Abstract The Danghe reservoir intrusive rocks are compositionally comparable to the tonalite-trondjemite-granodiorite association (TTG), which of the principle component is the granodiorite, and have the SiO₂ contents ranging from 57.02 to 72.75%. The SHRIMP U-Pb age of zircons from TTG is 440 ± 12Ma (MSWD = 2.5), which is the intrusive age of TTG magma. The concentrations of TiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, FeO and P₂O₅ decrease with the increase in the SiO₂ contents, showing negative correlations, and implying a magmatic differentiation model for the origin of the TTG controlled by hornblende and plagioclase fractionation. The TTG have lower contents of ΣREE with strong fractionation of LREE/HREE ((La/Yb)_N = 4.70 ~ 58.88) and no or slightly Eu anomaly. On Cl chondrite-normalized REE fractional diagram, the subparallel patterns indicate a cogenetic relation for all samples. The concentrations of large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, K, Th, Sr are enriched, whereas the high field strength elements (HFSE) (e. g. Nb and Ta) as well as P and Ti contents are depleted. On Rb/30-Hf-3 × Ta and Rb/30-Hf-0.25 × Nb diagrams, all plots set in the area from island arc type to post collision type. All of these imply that the TTG is of the calc-alkaline association forming in a volcanic arc. The regional geological setting, tectonic setting and formation times of the TTG, and contrasting analysis of igneous rocks from the south and north fringe of the Dunhuang terrain indicate that TTG rocks didn't form in island arc tectonic environment, but was produced by partial melting of the hornblende-rich lower crust under the condition of plate collisions along the northern and (or) southern margins of Dunhuang block in Late Caledonian (440Ma).

Key words Dunhuang; Danghe reservoir; TTG; SHRIMP U-Pb data of zircon

摘要 甘肃敦煌党河水库岩体以花岗闪长岩为主, 并构成英云闪长岩-花岗闪长岩-奥长花岗岩的 TTG 组合。锆石 SHRIMP U-Pb 年为 440 ± 12Ma (MSWD = 2.5), 代表 TTG 系列岩石的侵位时代。岩石化学成分中 SiO₂ 含量约为 57.02% ~ 72.75%, 随着 SiO₂ 含量的增加, TiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO 和 FeO 等的含量相应下降, 这表明该套岩石具岩浆成因, 是角闪石和斜长石的分离作用控制下岩浆分异的产物。岩石的稀土元素总量较低, 轻重稀土分异明显, (La/Yb)_N = 4.70 ~ 58.88, 无或略具微弱的 Eu 异常, 近于平行的稀土元素配分曲线表明所有岩石具有同成因的亲缘关系。岩石富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、Sr 等, 亏损 Nb 和 Ta 等高场强元素以及 P 和 Ti。在 Rb/30-Hf-3 × Ta 和 Rb/30-Hf-0.25 × Nb 图解上, 所有岩石的投影点落到岛弧到后碰撞区。但从区域地质背景、TTG 的产出环境、形成时代及与敦煌地块南北缘火成岩对比分析, 认为该 TTG 系列岩石并非形成于岛弧构造环境, 而是加里东造山作用晚期 (约 440Ma) 红柳河缝合带和 (或者) 阿尔金北缘红柳沟-拉配泉俯冲碰撞带, 引发富含角闪石的地下壳源岩部分熔融形成岩浆, 上侵过程中同化部分陆壳物质形成具有岛弧性质的岩浆岩。

关键词 敦煌; 党河水库; TTG; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

中图法分类号 P597.3; P588.122

* 国家自然科学基金 (40032010, 40672130) 和北京大学大型仪器开放测试基金的联合资助。

第一作者简介: 张志诚, 男, 1963 年生, 博士, 副教授, 构造地质学专业, E-mail: zczhang@pku.edu.cn

1 引言

甘肃敦煌地块位于塔里木板块东部,广泛出露一套早前寒武纪岩石。自1938年孙健初先生将其划归为元古宙敦煌系以来,由于没有精确年代学资料,1989年出版的《甘肃省区域地质志》其统归为前长城系(甘肃省地矿局,1989)。近年来,该区1:5万地质填图,在敦煌系岩石中获得一批太古宙Nd模式年龄和Sm-Nd等时线年龄(李志琛,1994)。敦煌地块早前寒武纪岩石主要由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩和副变质岩系组成,从敦煌地块南部靠近阿尔金断裂的石包城北侧获得的英云闪长岩单颗粒锆石2.67Ga U-Pb年龄和2.68Ga的Nd模式年龄,反映敦煌存在着太古宙岩石信息(梅华林等,1997,1998)。敦煌西部党河水库一带发育有酸性岩侵入体,1:20万肃北幅区域调查报告将其称为党河口-大泉岩体,由片麻状黑云母斜长花岗岩组成,划为中元古代蓟县期。梅华林等(1997)认为党河剖面主要由TTG系列侵入岩和黑云变粒岩、石英岩、大理岩及其斜长角闪岩等表壳岩组成,根据周边地区年代学资料,推测属于太古宙。准确测定TTG形成时代和厘定其构造属性在敦煌地块研究中具有十分重要意义,因此作者在系统的野外地质调查基础上,重点对党河水库一带出露的TTG系列岩石进行岩石地球化学、锆石U-Pb年代学研究,探讨其成因类型、形成时代及其地质意义,为敦煌地块构造岩浆演化体系的确立提供依据。

2 地质背景

甘肃敦煌三危山-鸣沙山,地处沙漠戈壁,自然条件恶劣。鸣沙山,东起莫高窟崖顶,西接党河水库,东西绵延40km,南北宽20km,高达数十米。该区主要出露中高级变质的火山-沉积岩组合,岩石为大理岩夹斜长角闪岩、黑云变粒岩夹石英岩、黑云片麻岩及二云石英片岩等,其间发育TTG系列侵入岩。表壳岩遭受了中等到强烈的构造变形,发育紧闭等斜小规模褶皱,轴面与片麻理面一致,产状 $120^{\circ}\sim 140^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。TTG系列侵入岩具有弱到中等程度的变形,具有似片麻状构造。该带北侧以三危山断裂和中新生代敦煌盆地邻,南部被新生代地层及现代沙漠戈壁覆盖。

党河口-大泉岩体,由十几个小块组成,但把这些分割的小块联系起来,则明显构成一东西向延伸的较大的岩基(图1),为TTG系列组成(梅华林等,1997,1998)。岩体全长70km,平均出露宽度7km,最宽十余千米,侵入于前震旦系敦煌群黑云斜长片麻岩中,在其接触带附近,往往产生边缘混合岩。岩石普遍具有似片麻状构造,其片麻理方向与围岩的片麻理一致,均作东西向分布,沿片麻理有大量伟晶岩和长英质岩脉灌入。党河水库岩体北界主要以大理岩夹斜长角闪岩与英云闪长岩呈侵入接触关系,在沙枣园采石场附近,可见岩体与云母片岩呈侵入接触关系。岩体南部边界与石英云母片岩和片麻岩呈侵入接触,由南向北岩石从云母片岩过渡到片麻岩,TTG岩石呈脉状穿插出现,直至出现TTG主体,而且在岩体内部的TTG岩石中常见片岩、片麻岩类包裹体,可以推断岩体是在围岩发生变质作用后侵入的。

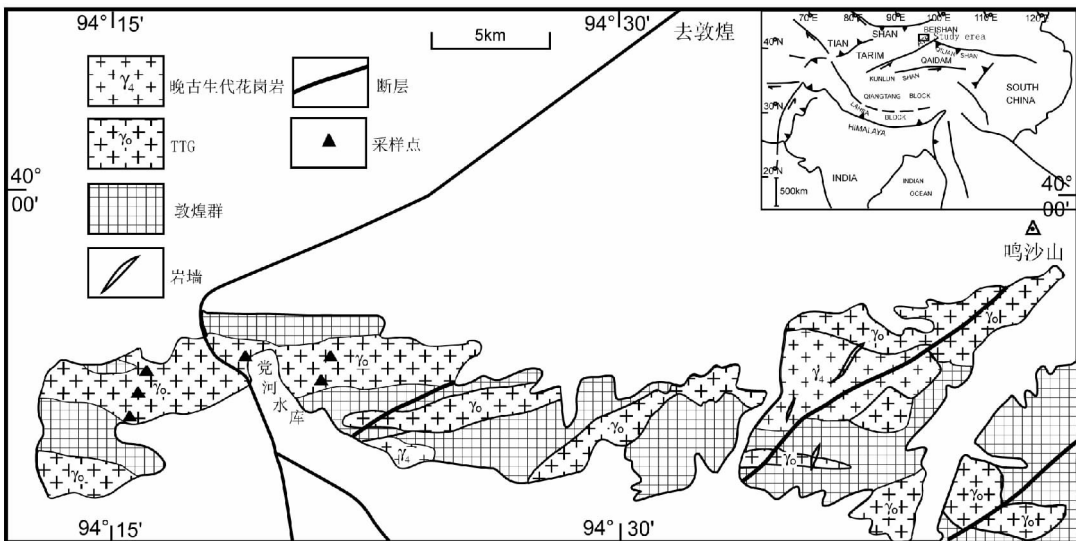


图1 党河水库TTG岩浆岩带地质略图(据甘肃省地质局,1976①)

Fig. 1 Schematic geological map of the Danghe TTG magmatic zone

① 甘肃省地质局. 1976. 中华人民共和国区域地质报告肃北幅(1:20万)

3 岩石地球化学特征

3.1 岩石学特征

岩石为灰色或浅灰色,结构变化较大,一般为中粗粒花岗岩结构,矿物颗粒一般为 0.5 ~ 3mm,典型的矿物组合为石英 + 斜长石 + 黑云母 ± 钾长石 ± 角闪石,副矿物较少,有少量的磷灰石、锆石。斜长石:少数半自形、板状、聚片双晶发育,普遍具有绢云母化,含量 60% ~ 65%; 石英:均为他形粒状,含量 20% ~ 35%。黑云母:多强烈绿泥石化,红褐色,边缘常析出铁质,含量 5% ~ 15%,其含量的增多不仅改变了岩石的颜色,而且决定了岩石的化学成分。偏酸性的片麻岩中黑云母含量较低,一般只有 5% ~ 10%。

3.2 地球化学组成

从 70 个岩石标本中选择了 14 件新鲜的有代表性的样品测定了岩石地球化学成分。主元素含量在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室实验室以 X 光荧光光谱 (XRF) 分析,稀土元素和微量元素利用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 测定。在整个测量过程中,以标样和平行样对测量进行严格的质量监控和检验,以保证数据的准确性。主元素精度可达到 1% 以内,除了 Nb、Ta 在 9% 以内,其它微量元素通常在 5% 以内。分析结果见表 1。

从总体上看,本区样品的 SiO₂ 含量变化范围较大 (57% ~ 73%),相当于中酸性岩浆成分。根据标准矿物分子计算,在 An-Ab-Or 图上,该区岩石组合为以花岗闪长岩为主的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩 (TTG) (图 2),结合手标本和薄片实际矿物含量统计结果,我们将本区这套中酸性岩石分别定名为英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,即

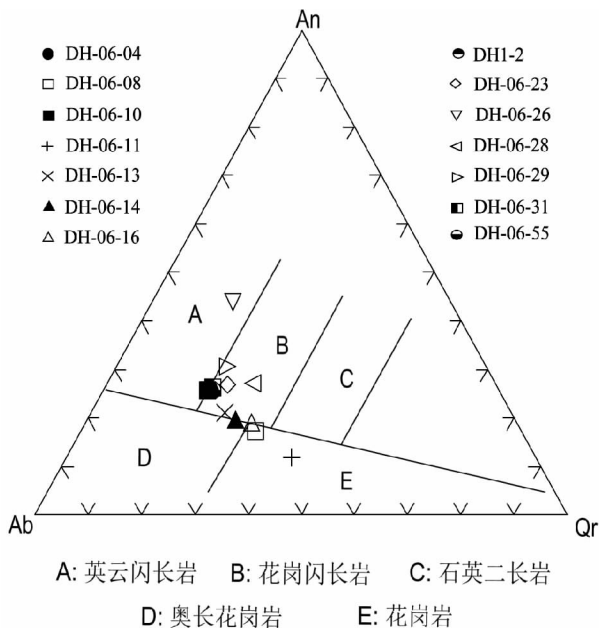


图 2 An-Ab-Or 三角图区分 TTG 岩套 (图中分区据 O'Conner, 1965)

Fig. 2 An-Ab-Or diagram for the Danghe acidic magmatic rocks (division is after O'Conner, 1965)

TTG 系列岩石。

岩石的 Al₂O₃ 含量主要变化介于 14.85% ~ 17.92% 之间,铝饱和指数 (ACNK) 为 1.0 ~ 1.2, ANK 在 1.4 ~ 2.3 之间,在铝饱和指数图解上 (图 3a) 多数样品位于过铝质花岗岩区。K₂O + Na₂O 变化于 4.94% ~ 7.78% 之间,除 DH-06-6 和 DH-06-11 外,Na₂O/K₂O 比值都大于 1,以富钠质系列为主。在 SiO₂-ALK 图 (图略) 上,投影在亚碱性区域内; 在 AFM

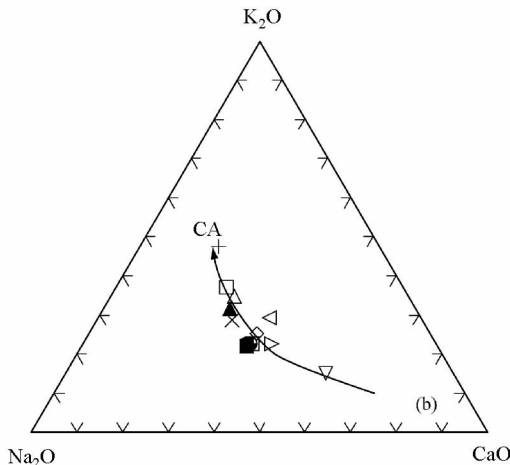
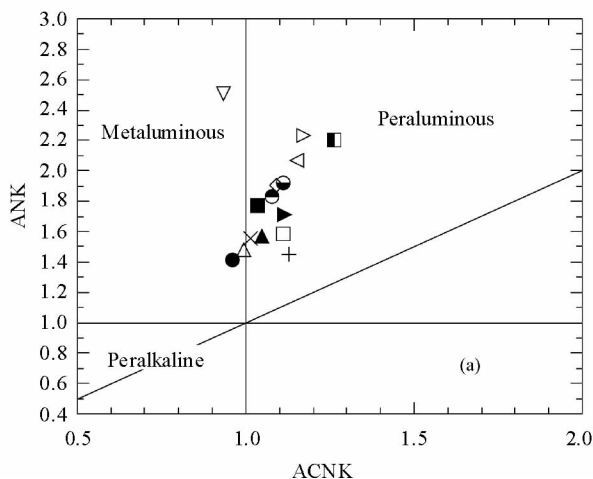


图 3 铝饱和指数图解 (a, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 和 K-Na-Ca 三角图 (b) 确定岩石系列 图例同图 2

Fig. 3 ANF-ACNK plot (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K-Na-Ca plot (b) of the Danghe acidic magmatic rocks Symbols are the same as those in Fig. 2

表1 敦煌党水库 TTG 地球化学分析结果(主量元素: wt%; 稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)
 Table 1 The geochemical composition of the Danghe TTG rocks (Major element: wt%; Trace element: $\times 10^{-6}$)

样品号	DH-06-04	DH-06-08	DH-06-10	DH-06-11	DH-06-13	DH-06-14	DH-06-16	DH-06-23	DH-06-26	DH-06-28	DH-06-29	DH-06-31	DH-06-55	DH1-2
SiO ₂	67.72	70.79	65.88	72.75	69.87	71.68	68.20	65.95	57.02	61.90	64.77	62.82	62.05	65.92
TiO ₂	0.46	0.35	0.68	0.20	0.36	0.32	0.42	0.59	0.93	0.82	0.67	0.73	0.77	0.60
Al ₂ O ₃	15.75	15.14	16.50	14.85	15.33	15.16	15.86	16.84	17.92	17.47	16.93	17.46	17.84	16.82
Fe ₂ O ₃	3.32	2.34	4.36	1.36	2.85	1.91	3.01	4.23	6.49	5.71	4.21	5.15	5.74	4.25
MnO	0.06	0.05	0.07	0.02	0.04	0.03	0.06	0.07	0.12	0.08	0.06	0.06	0.11	0.07
MgO	1.04	0.68	1.28	0.42	0.74	0.57	0.80	1.25	3.51	2.07	1.53	1.65	1.86	1.24
CaO	2.89	2.24	3.65	1.60	2.91	2.64	2.88	3.63	6.62	3.70	3.77	3.25	3.72	3.55
Na ₂ O	4.84	3.58	4.23	3.32	4.14	3.91	4.10	3.76	3.21	3.27	3.27	3.53	4.15	4.13
K ₂ O	2.94	3.40	2.19	4.42	2.81	3.00	3.68	2.45	1.73	2.84	2.04	1.95	2.28	2.20
P ₂ O ₅	0.14	0.10	0.17	0.11	0.10	0.09	0.13	0.17	0.24	0.27	0.20	0.23	0.26	0.17
LOI	0.70	1.19	0.83	0.83	0.70	0.53	0.71	0.88	2.05	1.69	2.35	2.95	1.08	0.90
Total	99.86	99.86	99.84	99.89	99.85	99.84	99.85	99.81	99.83	99.81	99.80	99.78	99.86	99.85
Na ₂ O/K ₂ O	1.65	1.05	1.93	0.75	1.47	1.30	1.11	1.53	1.86	1.15	1.60	1.81	1.82	1.88
Mg [#]	38.29	36.53	36.77	37.96	33.97	37.15	34.49	36.92	51.72	41.80	41.86	38.83	39.10	36.63
Sc	7.04	3.50	5.16	3.20	4.38	4.18	6.80	7.89	16.00	12.50	6.01	8.31	14.10	8.08
V	32	34	62	15	28	9	31	54	118	79	52	60	52	51
Rb	126	118	122	140	97.7	97.2	137	95.9	52.5	122	69.4	78.1	126	107
Sr	292	287	332	239	293	349	318	335	521	290	414	412	281	344
Y	14.9	7.64	9.27	6.81	6.25	5.88	16.5	10.6	20.8	13.3	9.59	9	16.3	10.1
Zr	203	159	214	139	120	153	194	197	43.2	141	100	209	150	168
Nb	16.6	12.8	14.7	9.59	12.9	9.39	15.7	16.1	14.2	17	15.4	17.3	38.1	16.6
Ba	681	793	572	767	601	824	779	1011	598	848	1151	875	554	608
Hf	5.39	4.29	5.02	3.68	3.39	3.81	5.13	4.53	1.44	2.92	2.72	4.67	3.25	3.86
Ta	1.3	1.37	1.28	0.654	1.16	1.11	1.73	0.991	0.758	1.01	1.05	0.784	3.19	0.91
W	0.28	0.53	0.42	1.79	0.30	0.19	0.23	0.09	0.39	0.39	0.37	0.49	0.42	0.11
Pb	35.1	39.2	26.5	53.2	27.9	37.9	38.8	24.5	15.7	23.7	17.5	18.7	25	22.3
Th	10.2	12.8	12.9	14.5	5.44	11.5	10.9	11.5	2.25	7.25	8.08	10.9	16.6	9.02
U	1.92	1.52	2.11	2.61	1.71	1.37	2.33	1.33	1.77	1.35	2.47	1.41	1.73	1.47
La	25.7	24.8	42.2	33	15.3	37.3	23	36.8	13.1	33	20.4	31.8	53.8	27.3
Ce	46.1	43.7	72.6	62	28.8	67.6	40.9	65.8	32.4	57.9	39.4	58.5	96.6	49.4
Pr	5.43	5.09	8.26	7.22	3.48	8	5.08	7.71	5.48	6.73	5.1	7.15	11.3	5.81
Nd	20.9	18.7	29.9	25.8	13.2	29.6	19.4	27.3	25.2	24.9	19.5	25.7	39.7	20.6
Sm	3.93	3.39	4.69	4.5	2.48	4.31	4.03	4.33	5.95	3.88	3.68	4.13	6.19	3.35
Eu	0.99	0.96	1.13	0.93	1.07	1.17	1.09	1.23	1.53	1.34	1.14	1.27	1.00	1.17
Gd	3.78	2.75	3.66	3.52	2.10	3.08	3.62	3.56	5.51	3.51	3.14	3.42	4.92	3.02
Tb	0.528	0.334	0.44	0.396	0.253	0.33	0.564	0.45	0.766	0.478	0.406	0.422	0.61	0.382
Dy	2.94	1.62	2.04	1.72	1.27	1.37	3.18	2.28	4.40	2.79	2.18	2.02	3.35	2.05
Ho	0.569	0.284	0.367	0.258	0.235	0.211	0.622	0.43	0.814	0.554	0.372	0.369	0.635	0.394
Er	1.57	0.768	0.934	0.572	0.611	0.522	1.76	1.14	2.23	1.49	1.05	0.961	1.68	1.04
Tm	0.234	0.1	0.118	0.066	0.084	0.057	0.247	0.158	0.314	0.189	0.135	0.126	0.223	0.141
Yb	1.5	0.677	0.797	0.402	0.574	0.363	1.63	0.943	2	1.1	0.874	0.766	1.37	0.842
Lu	0.217	0.093	0.112	0.056	0.088	0.05	0.245	0.137	0.283	0.146	0.136	0.121	0.201	0.03
Σ REE	114.39	103.27	167.25	140.44	69.55	153.96	105.37	152.27	99.98	138.01	97.51	136.76	221.58	115.53
(La/Yb) _N	12.19	26.28	37.98	58.88	19.12	73.71	10.12	27.99	4.7	21.52	16.74	29.78	28.17	23.26
δEu	0.77	0.94	0.8	0.69	1.4	0.93	0.86	0.93	0.8	1.09	1	1	0.54	1.1

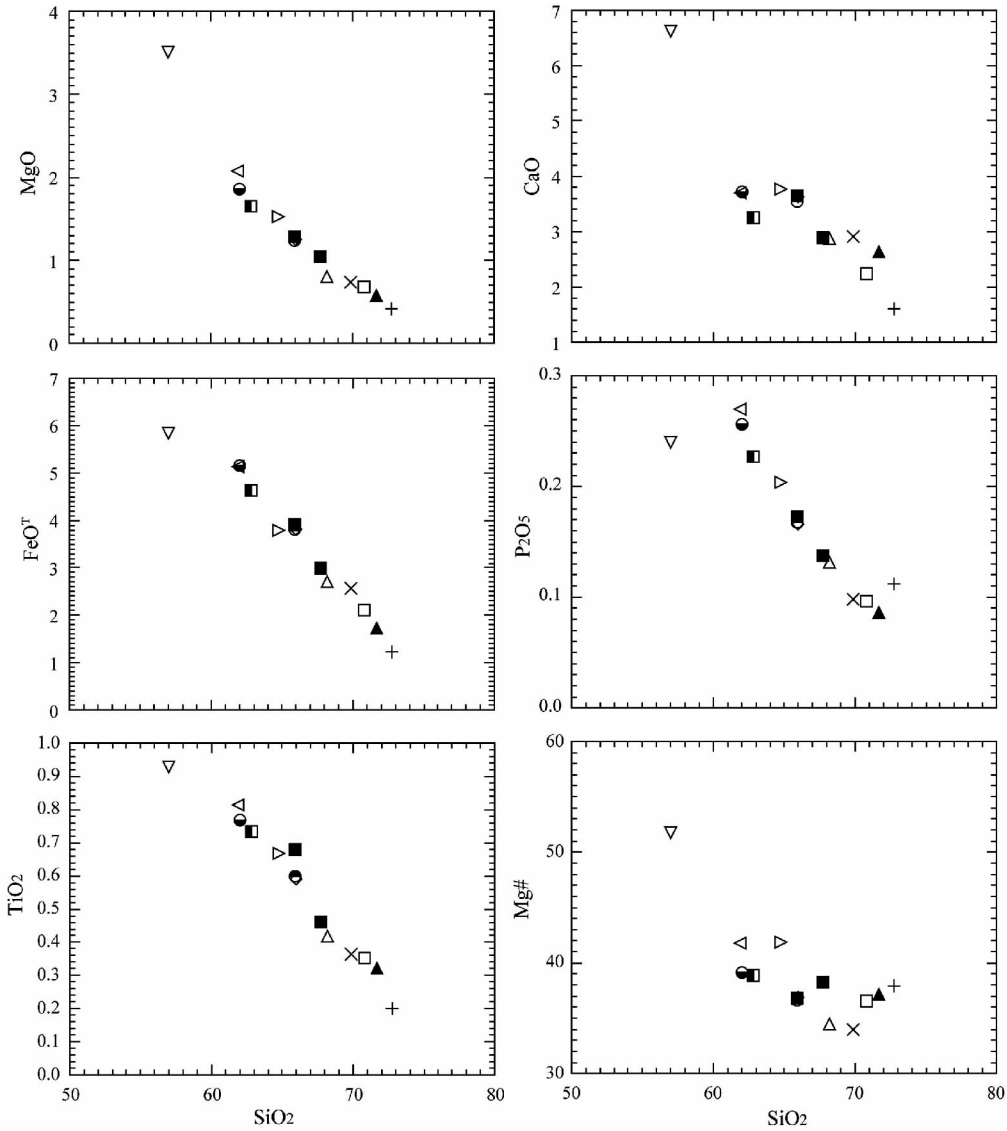


图 4 SiO₂对主要元素的 Harker 图解

图例同图 2

Fig. 4 Selected elements versus SiO₂ variation diagrams for the Danghe acidic magmatic rocks

Symbols are the same as those in Fig. 2

图(图略)上,所有岩石的投影点均落到钙碱性区内并且非常规律地沿着 TTG 岩套的演化趋势分布;在 K-Na-Ca 图解上(图 3b),显示出钙碱性演化趋势,表明本区这套 TTG 岩石具有钙碱性岩系特征。镁指数中等 $Mg^{\#} = 34.49 \sim 51.72$ 。随着 SiO₂ 含量的增加, TiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO 和 FeO^T 的含量相应下降(图 4),这表明该套岩石具有亲缘关系,应该是岩浆分异的结果。P₂O₅ 含量也随着 SiO₂ 含量增加而减少,表明有磷灰石的分离,由于磷灰石的分离可以抵消因斜长石分离而产生的 Eu 亏损,上述的变化特点也说明党河水库 TTG 岩石为正常岩浆岩结晶成分演化趋势。在以 MgO 为横坐标的哈克图上(图略), CaO、FeO^T 同 MgO 构成了非常规律的相关曲线,进一步证明可能是角闪石和斜长石的分离作用控制了岩

浆的分异过程。Na₂O + K₂O + FeO^T + MgO + TiO₂ - (K₂O + Na₂O) / (FeO^T + MgO + TiO₂) 图解上显示分离结晶作用特征(图 5),而且本区 TTG 落入含角闪石的源岩范围内或其附近,表明该岩相的形成可能与含角闪石的源岩部分熔融有关(Rapp *et al.*, 1991)。

总体上看,岩石的稀土元素总量较低,为 $69.55 \times 10^{-6} \sim 221.58 \times 10^{-6}$,轻重稀土分异明显, $(La/Yb)_N = 4.70 \sim 58.88$,一般在 10 ~ 30 之间,在球粒陨石标准化稀土配分模式图上为向右陡倾的斜线(图 6a)。除了样品 DH-06-11 和 DH-06-55 外, (Eu 在 0.69 ~ 1.10 之间,属于基本无异常型,反映岩石具有稀土总量较低,轻稀土富集,分馏程度较大,重稀土分馏程度较低及 Eu 轻度亏损或无亏损的特征。δEu 值

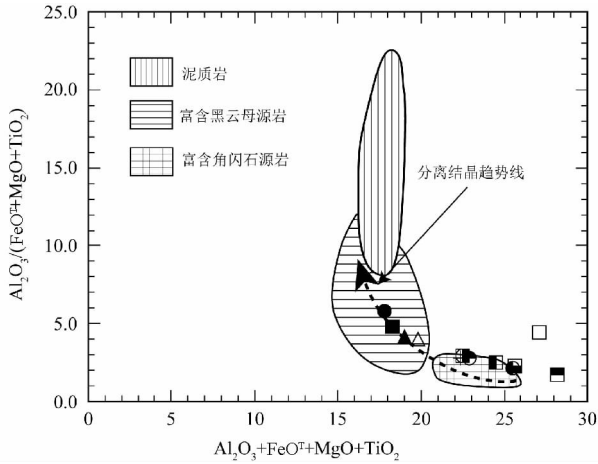


图5 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 图解 (据 Patino, 1999)

图例同图2

Fig. 5 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ versus $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ variation diagrams (after Patino, 1999)

Symbols are the same as those in Fig. 2

与 ΣREE 之间存在较弱的负相关关系, δEu 最低值出现在稀土总量最高的 DH-06-11 样品, 而最高值出现稀土元素总量最低的样品中。在球粒陨石标准化配分图上相似的曲线分布形式显示出岩石具有同源的特点。

表2 党河水库花岗岩样品中锆石 U-Pb 的 SHRIMP 年龄分析结果

Table 2 U-Pb data of zircon SHRIMP dating of TTG in the Danghe Reservoir

测点	$^{206}\text{Pb}_c$ (%) ^{a)}	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	^{232}Th ^{238}U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$) ^{a)}	年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)			比值			误差相 关系数	
						^{206}Pb ^{238}U ^{b)}	^{206}Pb ^{238}U ^{c)}	^{206}Pb ^{238}U ^{d)}	$^{207}\text{Pb}^*$ ^{235}U ^{b)}	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*$ ^{238}U ^{b)}		$\pm\%$
						DH1-2-1	2.33	187	178	0.98	10.5		397.6 \pm 9.5
DH1-2-2	0.59	192	79	0.43	25.4	922 \pm 20	919 \pm 21	918 \pm 22	1.526	3.3	0.1537	2.4	0.712
DH1-2-3	1.32	1679	235	0.14	99.0	422.4 \pm 9.4	422.5 \pm 9.5	423.2 \pm 9.8	0.515	3.4	0.0677	2.3	0.687
DH1-2-4	0.94	550	232	0.44	31.8	416.6 \pm 9.4	416.3 \pm 9.6	416 \pm 10	0.513	4.8	0.0668	2.3	0.487
DH1-2-5	0.58	372	103	0.29	24.2	468 \pm 11	467 \pm 11	464 \pm 11	0.598	3.6	0.0753	2.3	0.654
DH1-2-6	0.61	807	236	0.30	58.8	522 \pm 12	521 \pm 12	525 \pm 12	0.694	4.1	0.0844	2.3	0.566
DH1-2-7	1.30	731	389	0.55	45.1	441.4 \pm 9.9	441.2 \pm 10	446 \pm 11	0.548	4.0	0.0709	2.3	0.584
DH1-2-8	0.32	611	179	0.30	38.3	452 \pm 10	453 \pm 10	453 \pm 11	0.552	3.0	0.0727	2.3	0.770
DH1-2-9	0.55	1727	266	0.16	116	483 \pm 11	484 \pm 11	481 \pm 11	0.589	2.8	0.0778	2.3	0.847
DH1-2-10	—	266	104	0.40	15.9	432.5 \pm 9.9	430.2 \pm 10	432 \pm 11	0.572	2.9	0.0694	2.4	0.815
DH1-2-11	1.05	2311	527	0.24	163	503 \pm 11	504 \pm 11	505 \pm 12	0.638	2.7	0.0812	2.3	0.833
DH1-2-12	0.54	402	178	0.29	25.0	448 \pm 10	449 \pm 10	448 \pm 11	0.534	3.6	0.0720	2.3	0.649
DH1-2-13	0.18	540	79	0.34	100.0	1,259 \pm 26	1,243 \pm 28	1,251 \pm 28	2.791	2.5	0.2157	2.3	0.912
DH1-2-14	0.43	1011	235	0.03	35.2	255.4 \pm 5.8	255.8 \pm 5.8	255.9 \pm 5.8	0.2790	3.2	0.04042	2.3	0.720
DH1-2-15	0.60	417	232	0.75	25.5	440.8 \pm 10.0	441 \pm 10	438 \pm 11	0.534	4.1	0.0708	2.3	0.567
DH1-2-16	1.14	213	103	0.29	13.3	449 \pm 11	450 \pm 11	449 \pm 11	0.537	6.7	0.0722	2.4	0.365

a) Pb_c 和 Pb^* 分别指普通铅和放射成因铅。标准标定的误差为 0.50%, 但不包括在上述误差中, 只在比较不同靶的数据时使用; b) 以实测 ^{204}Pb 校正的普通铅; c) 假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄一致的普通铅; d) 假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = ^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄一致校正的普通铅

和原始地幔相比, 岩石普遍富集 Rb、K、Th、Sr 等大离子亲石元素 (LILE), 在原始地幔标准化图解 (图 6b) 上, 相对亏损 Nb、Ta、和 P 等高场强元素 (HFSE), Ti 具有明显的负异常, Ba 相对于 Rb 和 Th 略有亏损, Pb 含量高 ($15.7 \times 10^{-6} \sim 53.2 \times 10^{-6}$, 平均值为 30.53×10^{-6}), 在原始地幔标准化蛛网图上呈现尖峰 (图 6b), 这可能与放射性异常铅的积累有关。

4 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

4.1 分析方法

在廊坊诚信地质技术服务公司用常规方法从样品中分离锆石。按照宋彪等 (2002) 描述的制靶, SHRIMP 锆石 U-Pb 分析是在中国地质科学院北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。分析流程和方法见文献 Compston *et al.* (1992), 使用标准样品 SL13 (572Ma) 标定标样 TEMORA1 (417Ma) 和待测锆石的 U、Th、Pb 含量, 而锆石 U-Th-Pb 同位素比值用 TEMORA1 标定。数据处理、年龄计算和绘图使用的是 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 2003)。表 2 列出的 SHRIMP 分析数据是每个锆石点连续 5 次分析的平均值, 误差为 1σ , 但 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄的误差为 95% 置信度的结果。

4.2 锆石特征及定年结果

从 DH1-2 样品中分选出来的锆石大部分呈柱状, 粒度在 0.1 ~ 0.2mm 之间, 长宽比 2.5 : 1, 个别可达 3.5 : 1, 晶型为半自形-自形, 多数可见较完整的晶棱或晶锥, 晶面整洁光滑。在阴极发光照片上, 大多数锆石都显示出环带结构

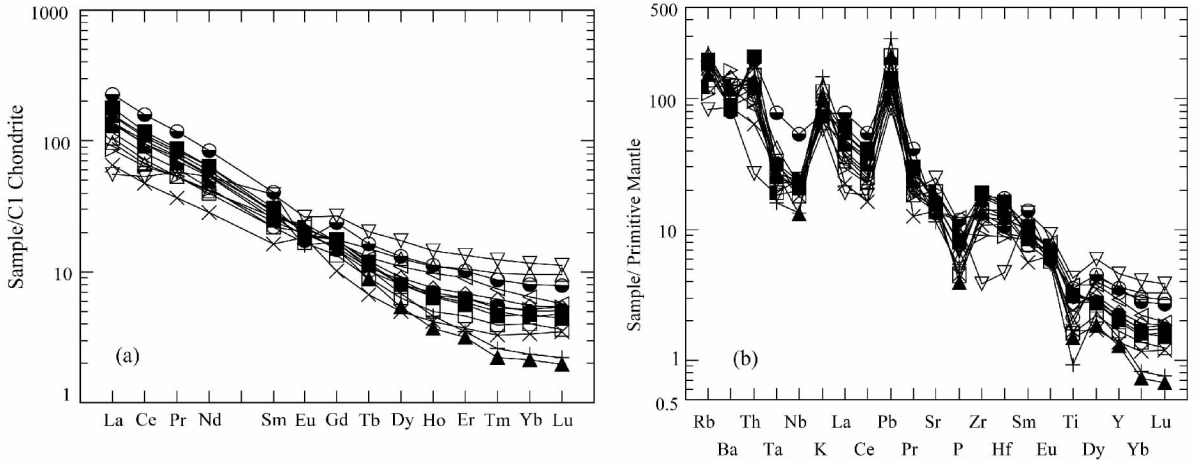


图 6 原始地幔标准化的稀土元素 (a) 和微量元素 (b) 配分图
球粒陨石数据值和原始地幔数据值据 Sun and McDonough, 1989. 图例同图 2

Fig. 6 C1 Chondrite-normalized REE (a) and primary mantle-normalized trace element (b) fractional diagrams
C1 chondrite data and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989. Symbols are the same as those in Fig. 2

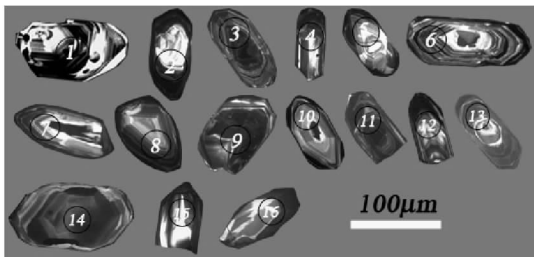


图 7 锆石阴极发光图像
Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircons

(图 7), 表明它们是岩浆结晶形成的。只有少量锆石具有明显的核部, 如 2 和 13 号点。16 颗锆石的离子探针测试结果见表 2。从表中可以看出, U、Th 含量变化范围分别为 $187 \times 10^{-6} \sim 2311 \times 10^{-6}$ 和 $79 \times 10^{-6} \sim 527 \times 10^{-6}$ 。锆石 Th/U 比值平均 0.37, 除 DH1-2-3、DH1-2-9 和 DH1-2-14 外都大于或接近 0.3。一般来说岩浆成因锆石的 Th/U 比值大于 0.5, 变质重结晶的锆石则小于 0.1, 本文锆石展示出岩浆锆石 U、Th 成分特征 (Hanchar and Miller, 1993; Sue et al., 1999; Claesson et al., 2000; Belousova et al., 2002; Hoskin, 2001)。

锆石 SHRIMP U-Pb 定年的大部分数据点落在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上 (图 8a), 但也有个别数据点落在谐和线上方或下方, 反映可能存在部分 U 或 Pb 丢失。2 号和 13 号测点锆石阴极发光图像具有明显的核部, 其 U-Pb 年龄为 922 和 1251Ma, 远大于测试点集中区 440Ma 的年龄值, 可能是岩浆上侵或就位过程中同化了部分围岩造成的, 属于继承性锆石年龄。6 号点锆石具有明显的振荡环结构, 且具有较小的核部, 其 U-Pb 年龄为 522Ma, 也大于测试点集中区, 有可能是受到了核部继承性锆石的影响。锆石 9、11 测定年龄为 483、503Ma, 其 Th/U 比值介于 0.16 ~ 0.24 之间, 可能

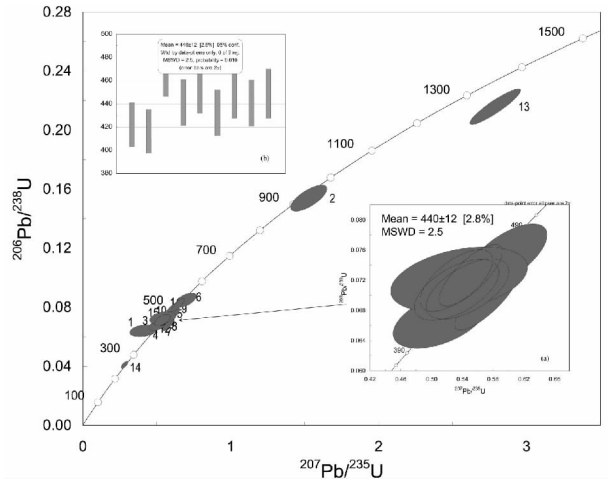


图 8 TTG (DH1-2) 中锆石 SHRIMP U-Pb 谐和线图 (a) 及加权平均年龄图 (b)
Fig. 8 SHRIMP U-Pb concordia diagram (a) and average age (b) of zircons from TTG rock (DH1-2)

反映了后期流体的影响 (Pidgeon et al., 1998), 流体对锆石的影响主要表现在外来放射性 Pb* 的加入或者 Pb* 的流失, 使测定的年龄偏大或者偏小。同时, 它们的 U 含量较大, 最大为 2311×10^{-6} , 计算年龄时存在一定的误差, 故不参加平均年龄计算 (Anthi and Dieter, 1999)。其余的锆石除 DH1-2-1 和 DH1-2-14 外, 测定的年龄均较稳定, 集中分布于 440Ma 附近, 其平均值为 $440 \pm 12\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 2.5$ (图 8)。而这些锆石具有明显的环带结构, MSWD 值合理, 它们的年龄应代表 TTG 岩浆的侵位时代 (Vavra, 1990; Paterson et al., 1992)。锆石 DH1-2-1 数据点位于谐和线以外, 可能产生了 Pb 的丢失, 因而年龄值偏小 (397Ma), 另外 ^{204}Pb 较高, 也不参加平均年龄计算。而锆石 DH1-2-14 年龄仅为 255Ma, 其

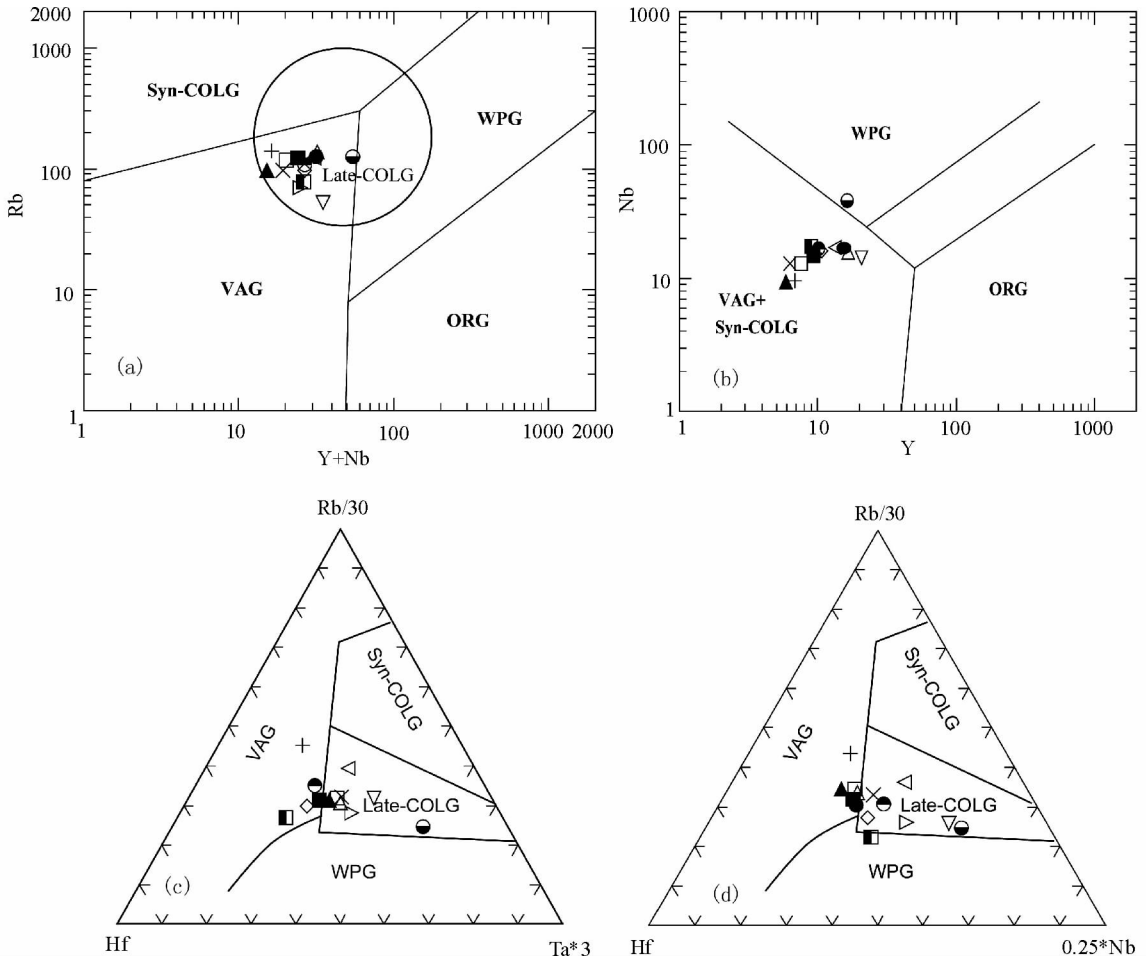


图9 敦煌党河水库 TTG 岩石的 Rb-Y + Nb 图解 (a), Nb-Y 图解 (b) (据 Pearce *et al.*, 1984), Hf-Rb-Ta (c) 和 Hf-Rb-Nb 图解 (d) (据 Harris *et al.*, 1986)

WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; Late-COLG-后碰撞花岗岩

Fig. 9 Rb-Y + Nb (a), Nb-Y (b) (after Pearce *et al.*, 1984), Hf-Rb-Ta (c) and Hf-Rb-Nb (d) (after Harris *et al.*, 1986) plots for TTG rocks from the Danghe reservoir, Dunhuang

Th/U 比值更是仅有 0.03, 远小于其它的锆石颗粒中的比值, 应属于变质成因 (Hanchar and Miller, 1993; Sue *et al.*, 1999; Claesson *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002; Hoskin, 2001)。该点落在在谐和线上, 结合该样品的 Ar-Ar 年龄资料 (云母坪年龄为 247Ma, 张志诚未发表资料), 该年龄可能代表了一个非常重要的变质事件。

5 讨论

5.1 TTG 岩体形成时代

在 1:200000 肃北幅区域调查报告中 (甘肃省地质局, 1976), 将党河水库附近的 TTG 岩石称为党河口-大泉岩体, 划为中元古代蓟县期的产物。梅华林等 (1997) 根据周边地区等年代学资料, 认为党河水库地区主要由 TTG 系列侵入岩

和黑云变粒岩、石英岩、大理岩及其斜长角闪岩等表壳岩组成, 推测属于太古宙。由于本区缺乏后期的地质体的发育, 很难从地质体野外相互关系来确定地质发育历史。本次研究表明 TTG 系列岩石侵入于敦煌群大理岩夹斜长角闪岩以及云母片岩和片麻岩中, 而且在 TTG 岩体内部常见片岩、片麻岩类包裹体, 推断 TTG 岩体是在围岩发生变质作用后侵入的。本项研究还表明锆石颗粒结晶完好, 具有岩浆锆石的特征, 仅少量锆石存在继承性核和新生环边。鉴于此, 党河水库 TTG 岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $440 \pm 12\text{Ma}$ 代表该岩体形成时代, 结合区域地质分析认为该年龄代表了岩浆岩带岩浆活动的时代, 说明该地区在这一时期发生过一次重要的构造岩浆活动。这一年龄结果的获得改变了以往对党河水库地区 TTG 形成时代的认识, 表明该区的 TTG 并非太古宙或者中元古代的产物, 而是早古生代侵入形成的。

5.2 地质意义

英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩不仅是太古宙大陆地壳的主要组成部分,同时也是后太古宙大陆造壳作用的主要组成物质 (Martin *et al.*, 2005; Condie, 2005)。目前认为 TTG 岩浆是由镁铁质岩石部分熔融而形成的观点已被大多数人接受,但对于形成时的构造背景却存在着较大分歧。一种观点认为通过俯冲洋壳的板片部分熔融而成 (Drummond and Defant, 1990; Defant and Drummond, 1990; Martin, 1993, 1994, 1999; Martin and Moyen, 2002; Foley *et al.*, 2002, 2003), 另一种观点认为通过加厚地壳底部含水玄武质岩石部分熔融而成 (Smithies *et al.*, 2000)。

党河水库 TTG 岩石富集大离子亲石元素 Ba 和 K, 并且 LILE 富集和 Nb、Ta 亏损, 在 Pearce *et al.* (1984) 的 Y-Nb, (Y + Nb)-Rb 图解 (图 9a, b) 中这些岩石投图落入岛弧区域或者后造山区域。Forster *et al.* (1997)、张旗等 (2007) 通过对 Pearce *et al.* (1984) 微量元素判别图解的分析, 认为花岗岩的地球化学特征主要受源区岩石成分和岩浆演化过程等因素的制约, 而构造环境的影响相对于源区组成而言要小得多。党河水库 TTG 岩石地球化学特征, 尤其是稀土元素和微量元素特征虽然反映出类似的岛弧型花岗岩性质, 但这与区域地质背景明显不符。该地区在早前寒武纪形成后, 并未经历后期裂解、汇聚过程, 本区 TTG 岩石的形成时代远小于其围岩, 并不具有类似岛弧的环境。此外, 在 Rb/30-Hf-3 × Ta 和 Rb/30-Hf-0.25 × Nb 图解上, 位于岛弧到后碰撞区 (图 9c, d)。显然本区 TTG 岩石不是形成于岛弧构造环境, 也并非因为俯冲到地下深处板片中部分矿物脱水形成流体而诱发地幔楔部分熔融而成, 而是其源岩具有类似岛弧花岗岩性质, 由加厚的地壳底部含水玄武质岩石部分熔融形成 (Smithies *et al.*, 2000)。

近年来的研究表明在敦煌地块北缘红柳河地区发育早古生代的缝合带, 蛇绿岩中辉长岩的形成时代为 516Ma 前 (郭召杰等, 2006; 赵泽辉等, 2007; 张元元和郭召杰, 2008); 而且在甘肃柳园地区分布大量的花岗岩类岩石, 锆石年龄为 $436 \pm 9\text{Ma}$ 到 $397 \pm 7\text{Ma}$, 属于后碰撞构造背景下的岩浆产物, 岩浆形成可能与俯冲板片脱离有关。敦煌地块南部阿尔金山北缘的红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂带形成于早古生代 (郝杰等, 2006), 也发育大量花岗质类岩石, 时代有两组: 481 ~ 467Ma 的花岗岩类与板块的俯冲和岛弧活动有关 (戚学祥等, 2005; 郝杰等, 2006; 吴才来等, 2007); 446 ~ 431Ma 的花岗岩类为后碰撞环境的产物 (陈宣华等, 2003; 吴才来等, 2005, 2007)。这些年龄资料表明, 党河水库 TTG 岩石与敦煌地块南北缘广泛发育的后碰撞岩浆活动事件是一致的。TTG 岩石可能是早古生代红柳河缝合带和 (或者) 阿尔金山北缘红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂带作用所引发的富含角闪石的地下壳源岩部分熔融作用形成的。

6 结论

(1) 党河水库花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 $440 \pm 12\text{Ma}$, 表明该花岗岩体侵位于晚奥陶-早志留世; 这一年龄结果的获得改变了以往对党河水库地区 TTG 形成时代的认识, 表明该区的 TTG 并非太古宙或者中元古代的产物, 而是早古生代侵入形成的。

(2) 党河水库花岗岩类的岩石组合以花岗闪长岩为主, 并构成英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩的 TTG 组合, 岩石地球化学上富集大离子亲石元素而亏损高场强元素, 贫碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 而富铁 ($\text{FeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$), 其成因可能与早古生代红柳河缝合带和 (或者) 阿尔金山北缘红柳沟-拉配泉俯冲碰撞杂带所引发的富含角闪石的地下壳源岩部分熔融作用有关。

致谢 感谢北京离子探针中心宋彪、石玉若和陶华等老师在 SHRIMP U-Pb 测年工作给予的大力支持。研究工作过程中也得到了韩宝福和刘树文教授有益的指导和在此深表感谢!

References

- Anthi L and Dieter G. 1999. Constraining the prograde and retrograde *P-T-t* path of Eocene HP rocks by SHRIMP dating of different zircon domains: Inferred rates of heating, burial, cooling and exhumation for central Rhodope, northern Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135: 340–354
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602–622
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1989. Regional geology of Gansu Province. Beijing: Geological publishing House, 1–681 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Gehrels G, Wang XF, Yang F and Chen ZL. 2003. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22 (4): 294–298 (in Chinese with English abstract)
- Claesson VS, Vetrin T and Bayanova HD. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51: 95–108
- Compston W, Williams IS, Kirschvink, Zichao Z and Ma GG. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *Journal of Geological Society of London*, 149: 171–184
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 79: 33–44
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-

- dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archaean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95: 21503–21521
- Foley SF, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417(20): 837–840
- Foley SF, Buhre S and Jacob Dorrit E. 2003. Evolution of the Archaean crust by delamination and shallow subduction. *Nature*, 421(16): 249–252
- Forster HJ, Tischendorf G and Trumbull RB. 1997. An evaluation of Rb vs (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40: 261–293
- Guo ZJ, Shi HY, Zhang ZC and Zhang JJ. 2006. The tectonic evolution of the south Tianshan paleo-oceanic crust inferred from the spreading structures and Ar-Ar dating of the Hongliuhe ophiolite, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 95–102 (in Chinese with English abstract)
- Hao J, Wang EQ, Liu XH and Sang HQ. 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun mountains: Evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic melange. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2743–2752 (in Chinese with English abstract)
- Hanchar JM and Miller CF. 1993. zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images. *Implic. Geology*, 110: 1–13
- Harris NB, Pearce JA and Yindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Reis AC (eds.). *Collision Tectonics*. Lond: Spec Publ Geol Soc, 19: 67–81
- Hoskin PWO. 2001. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627–630
- Li ZC. 1994. New speculation of the age of the metamorphic rock series of the Dunhuang massif. *Regional Geology of China*, (2): 131–134 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.0-A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1–70
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643
- Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust: Comparison with modern processes. *Lithos*, 30: 373–388
- Martin H. 1994. The Archaean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: Condie KC (ed.). *The Archaean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 205–259
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Martin H and Moyen JF. 2002. Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of Earth. *Geology*, 30(4): 319–322
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1–24
- Mei HL, Yu HF, Li Q and Zuo GC. 1997. Preliminary litho-tectonic framework of Early Precambrian rocks in Dunhuang-Beishan area, Gansu, West China. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 47–54 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Yu HF, Lu SN, Li HM, Li Q, Lin YX and Zuo YC. 1998. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province: Age from the U-Pb single zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21(2): 41–45 (in Chinese with English abstract)
- O'Connor JT. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pao. 525-B*: 79–84
- Paterson BA, Stephens WE, Rogers G, Williams IS, Hinton RW and Herd DA. 1992. The nature of zircon inheritance in two granite plutons. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth sciences*, 83: 459–471
- Patino DAE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Understanding granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geological Society London, Special Publications, 168: 55–75
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956–983
- Pidgeon RT, Nemchin AA and Hitchen GJ. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132: 288–299
- Qi XX, Li HB, Wu CL, Yang JS, Zhang JX, Meng FC, Shi RD and Chen SY. 2005a. SHRIMP U-Pb zircon dating for Qiashikansayi granodiorite, the Northern Altyn Tagh Mountains and its geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(5): 440–445
- Qi XX, Wu CL and Li HB. 2005b. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Altyn Tagh mountains and its significations. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 859–866 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities. *Precambrian Research*, 51: 1–25
- Smithies RH, Champion DC and Cassidy KF. 2003. Formation of Earth's early Archaean continental crust. *Precambrian Research*, 127: 89–101
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract)
- Sue K, David S and William C. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 137: 323–341
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 42: 313–345
- Vavra G. 1990. On the kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: A cathodoluminescence study. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 106: 90–99
- Wu CL, Yao SZ, Zeng LS, Yang JS, Wooden JL, Chen SY and Mazdab FK. 2006. Bashikaogong-Shimierbulake granitic complex, north Altyn, NW China: Geochemistry and zircon SHRIMP ages. *Science in China (Series D)*, 49(12): 1233–1251
- Wu CL, Yao SZ, Zeng LS, Yang JS, Wooden JL, Chen SY and Mazdab FK. 2007. Characteristics of Bashikaogong-Shimierbulake granitic complex, north Altyn Tagh and zircon SHRIMP ages. *Science in*

China (Series D), 37(1): 10-26 (in Chinese)

Zhang Q, Pan GQ, Li CD, Jin WJ and Jia XQ. 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2683-2698 (in Chinese with English abstract)

Zhang YY and Guo ZJ. 2008. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu provinces and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 803-809 (in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Guo Zj and Wang Y. 2007. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu Province, northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1847-1860 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 杨风, 陈正乐. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 22(4): 294-298

郭召杰, 史宏宇, 张志诚, 张进江. 2006. 新疆甘肃交界红柳河蛇绿岩中伸展构造与古洋盆演化过程. *岩石学报*, 22(1): 95-102

甘肃省地矿局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-681

郝杰, 王二七, 刘小汉, 桑海清. 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究的证据. *岩石学报*, 22(11): 2743-2752

李志琛. 1994. 敦煌地块变质岩系时代新认识. *中国区域地质*, (2):

131-134

梅华林, 于海峰, 李铨, 左国朝. 1997. 甘肃敦煌-北山早前寒武纪岩石组合-构造初步框架. *前寒武纪研究进展*, 20(4): 47-54

梅华林, 于海峰, 陆松年, 李惠民, 李铨, 林源贤, 左义成. 1998. 甘肃敦煌太古宙英云闪长岩: 单颗粒锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素. *前寒武纪研究进展*, 21(2): 41-45

戚学祥, 李海兵, 吴才来, 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 陈松永. 2005a. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *科学通报*, 50(6): 571-576

戚学祥, 吴才来, 李海兵. 2005b. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 859-866

宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质评论*, 48(增刊): 26-30

吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, Wooden JL, Mazdab FK. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 21(3): 846-858

吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden JL, 陈松永, Mazdab FK. 2007. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *中国科学(D辑)*, 37(1): 10-26

张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三. *岩石学报*, 23(11): 2683-2698

张元元, 郭召杰. 2008. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义. *岩石学报*, 24(4): 803-809

赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 2007. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义. *岩石学报*, 23(8): 1847-1860