

天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义

胡霭琴^{1*}, 韦刚健¹, 江博明², 张积斌³, 邓文峰¹, 陈林丽¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东广州 510640; 2. 中央研究院地球科学研究所, 台湾台北 11529; 3. 新疆有色地质勘查局, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 天山造山带的中天山隆起带中广泛出露着新元古代花岗岩类岩石。获得了东天山星星峡和西天山温泉地区片麻状花岗岩中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄, 分别为 (942 ± 7) Ma (2σ) 和 (919 ± 6) Ma (2σ)。这些花岗岩以特有的粗粒、巨大的眼球状片麻结构为特征。主元素数据表明它们属于过铝质的二长花岗岩, 具有高 SiO_2 ($\geq 70\%$)、高 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ($7\% \sim \geq 8\%$), 且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 。这些新元古代花岗岩类岩石具有不同的 REE 含量, 但它们有近于平行的 REE 分布曲线和明显的 Eu 负异常, 同时代的星星峡混合岩具有较高的 REE 含量, 明显富集 LREE。它们的微量元素蛛网图几乎完全相同, 均有明显的 Nb、Sr、Ti、P 负异常。基于 Nd 同位素组成研究, 其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 -4 至 -0 之间, Nd 模式年龄 t_{DM} 为 $2.0 \sim 1.6$ Ga。由于放射成因 Sr 同位素组成非常高, 不可能得到精确有意义的 Sr 同位素初始值。上述特征均表明这些新元古代花岗岩形成于大陆边缘构造环境, 由古元古代地壳重熔并经历了高度的结晶分异作用而形成。综合近年来发表的关于天山各地段, 诸如温泉、赛里木湖以东、拉尔敦达坂、巴仑台和星星峡等地区较为可靠的锆石 U-Pb 年龄数据, 我们认为天山新元古代花岗岩类岩石主要形成于 $960 \sim 910$ Ma。结合塔里木盆地周边古老地块年龄的研究结果, 可以推断在早新元古代时期塔里木周边和天山的古老地块可能曾组成 Rodinia 超大陆的一部分。

关键词: 新元古代; 花岗岩类; SHRIMP U-Pb 年龄; Nd 同位素组成; 天山造山带

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2010)03-0197-16

Formation of the 0.9 Ga Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: Constraints from the SHRIMP zircon age determination and its tectonic significance

HU Ai-qin^{1*}, WEI Gang-jian¹, JAHN Bor-ming², ZHANG Ji-bin³, DENG Wen-feng¹ and CHEN Lin-li¹

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei 11529, China;

3. Xinjiang Non-ferrous Metals Geo-exploration Bureau, Ürümqi 830000, China

Abstract: Neoproterozoic granitoids occur widely in the central uplift zone of the Tianshan Orogen. Two SHRIMP zircon U-Pb ages of (942 ± 7) and (919 ± 6) Ma (2σ) have been obtained for granitic gneisses of the Xingxingxia area in East Tianshan and the Wenquan area in West Tianshan, respectively. These granitoids are characterized by a very coarse-grained and huge augen gneiss texture. Major element data indicate that they belong to peraluminous monzogranite, with SiO_2 ($\geq 70\%$), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (7% to $\geq 8\%$), and $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$. These rocks show nearly parallel REE patterns with different abundances and distinct negative Eu anomalies. Contemporaneous migmatites from Xingxingxia have high REE abundances and show more pronounced LREE enrichment. All the granitoids from West Tianshan and East Tianshan display similar spidergrams with obvious negative anomalies in Ba, Nb, Sr, P, and Ti. In terms of Nd isotopic compositions, these rocks have $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ from -4 to near zero, and t_{DM} ages from 2.0 to 1.6 Ga. Due to the highly radiogenic nature of the Sr isotopic compositions, precise or meaningful initial

收稿日期(Received): 2009-07-16; 改回日期(Revised): 2009-09-16; 接受日期(Accepted): 2009-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2001CB409805); 国家自然科学基金重点基金(40930316); 国家自然科学基金(40803009)

作者简介: 胡霭琴(1940-), 女, 研究员, 同位素年代学和地球化学专业。

* 通讯作者(Corresponding author): HU Ai-qin, E-mail: huaq@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290031

HU Ai-qin et al.: 0.9 Ga Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen

ratios cannot be obtained. Based on the chemical characteristics and Nd isotopic compositions, the Neoproterozoic granitoids were likely generated in a continental margin tectonic setting and by remelting of Paleoproterozoic rocks, followed by advanced fractional crystallization. With consideration of the available zircon U-Pb ages from several areas (Wenquan, eastern Sayram Lake, Laerdundaban, Balguntay and Xingxingxia) in the Tianshan, we conclude that the formation of the Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen took place mainly in the period of 960 to 910 Ma. Furthermore, with the age information on the ancient terranes of Tarim basin, we suppose that the Tarim-Tianshan ancient blocks probably formed a part of Rodinia during early Neoproterozoic period.

Key words: Neoproterozoic; granitoid; SHRIMP U-Pb age; Nd isotopic composition; Tianshan orogen

0 引言

天山造山带的中天山隆起带中广泛出露有各种类型的新元古代花岗岩(巨眼片麻状花岗岩、粗粒片麻状花岗岩、片麻状花岗岩等),主要分布在西天山温泉县城南前寒武纪地块、赛里木湖东“前寒武纪天窗”、独库公路以及西南天山的木扎尔特河一带;天山中段巴仑台以北地区至东天山的转井山-星星峡山一带。关于这些花岗岩的形成时代,过去的研究受到定年方法限制,只给出了 10 亿年至 7 亿年的范围^[1-7]。近年来 SHRIMP U-Pb 锆石定年结果表明,天山造山带中的新元古代岩浆活动主要发生在 960~910 Ma 期间^[8-9]。本文研究所涉及到的西天山温泉和东天山星星峡两个地区新元古代的花岗岩均具有非常独特的外观特征,虽然在专著中^[8]已初步报道过两个年龄结果,但尚未发表分析数据和详细的讨论。本文将发表两地区 3 个花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果,通过对数据的分析,给出更为合理的年龄值,以此纠正或修正过去发表的年龄结果,并结合元素和 Nd 同位素地球化学特征,探讨天山新元古代早期岩浆岩形成的构造环境以及在研究全球 Rodinia 超大陆演化中的意义。

1 地质简况

天山造山带新元古代花岗岩分布在前寒武纪基底变质岩出露的中天山隆起带内。基于 Nd 模式年龄的统计对比研究,东、西天山基底的时代有可比性,其基底岩石的 Nd 模式年龄均在 2.0~1.6 Ga 范围内^[10-11],但是出露岩石的特征又不尽相同。如果

以巴仑台作为东、西天山的地理分界,东天山的前寒武纪基底变质岩系长城系星星峡群主要出露在星星峡-尖山子-巴仑台和小布鲁斯台等地区,向东延伸至转井山一带^[12],构成中天山隆起带。东天山最老的岩石以红柳井子东北 10 km 地带最为发育,主要岩性为片麻岩、石英片岩、混合岩和大理岩等,其原岩为火山复理石建造及浅海相碎屑岩-碳酸盐岩建造。星星峡中细粒花岗闪长质片麻岩中锆石 U-Pb 年龄为 1.4 Ga^[13],是迄今在天山得到的最老的可靠年龄。西天山的基底变质岩系分为两种类型,中天山型和南天山型^[12,14,15]。中天山型的基底变质岩系包括温泉群和那拉提群,南天山型基底变质岩系以木扎尔特群为代表,分布于哈尔克山南坡木扎尔特河一带。新疆维吾尔自治区区域地质志^[12]中将它们均划为古元古界,但未得到同位素年龄的佐证。我们研究的温泉地区基底变质岩系温泉群有细粒灰黑色的斜长角闪岩或角闪石英片岩,以及混合岩、二长变粒岩、黑云母斜长片麻岩,一些地段为碳酸盐岩夹黑云母长石石英变粒岩和黑云母绿泥片岩。其原岩主要为碎屑岩、中基性火山岩和碳酸盐岩建造,在区域变质作用基础上叠加了动力变质作用形成的一套变质岩系²⁾。天山基底的分布范围、研究区和 0.9 Ga 花岗岩的出露地点和年龄值见图 1 中所示。

本研究的对象是东天山星星峡山岩体和西天山温泉县城南的粗粒片麻状花岗岩。星星峡山岩体出露在星星峡(小镇)以西星星峡山一带,为细条带状岩体,呈北东-南西方向展布,从岩石的外观特征看,它与星星峡以东的转井山岩体应该是一个岩体,只是地表没有裸露出来(图 1a)。岩体南面与中天山隆起带的前寒武纪变质岩呈断层接触,北边又被晚古生代花岗岩侵入,在 1:200000 沙泉子幅和星星

1) 姜常义等,1988,巴仑台-亦格达坂成矿带花岗质岩浆的时空演化,新疆维吾尔自治区 305 项目办公室,2~7。

2) 新疆维吾尔自治区地质矿产局地质调查大队,1992,巴斯坎山隘幅-霍城幅 1/20 万地质报告。

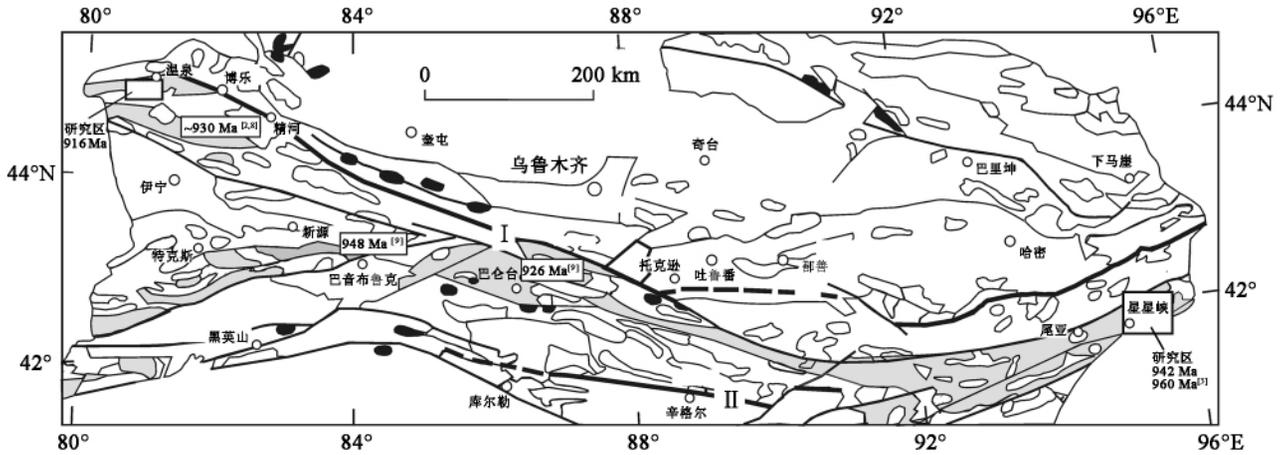


图 1 天山地质简图(据 Hu *et al.*^[11]改编)

Fig. 1 Simplified geological map of Tianshan showing Precambrian metamorphic basement rocks and study areas (modified after Hu *et al.*^[11])
图中灰色部分代表前寒武纪基底岩石分布区,黑色块体代表蛇绿岩分布区。I - 天山主干 - 沙泉子断裂; II - 辛格尔断裂。

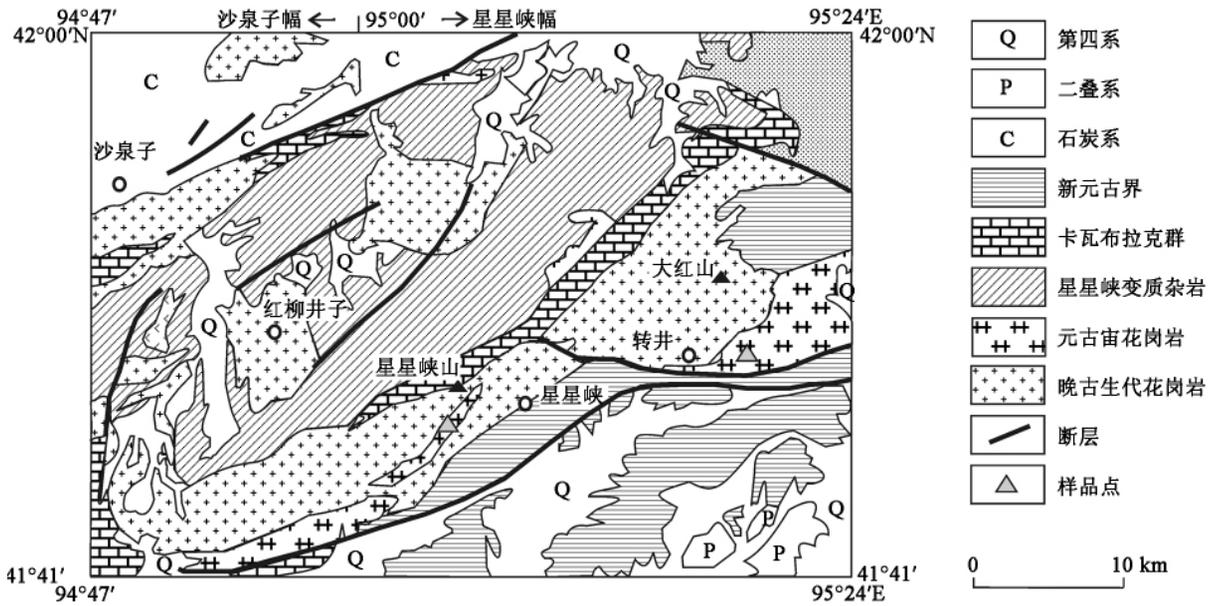


图 1a 东天山星星峡地区地质简图(据 1 : 200000 沙泉子和星星峡幅改编)

Fig. 1a Simplified geological map of Xingxingxia area in the eastern Tianshan (modified from 1 : 200000 Shaquanzi and Xingxingxia geological map)

峡幅地质图中被划为加里东期(早古生代)花岗岩。岩石为灰白色,表面有陈旧的褐色风化斑块,具有非常独特的巨大的眼球状片麻构造(俗称“巨眼球片麻状花岗岩”),在外观上与 1.4 Ga 的中细粒花岗闪长质片麻岩,以及早古生代片麻状花岗岩截然不同。主要矿物有钾长石(40%~50%),结晶粗大,构成变斑晶达 4 cm × 3 cm ~ 4.5 cm × 7 cm,有细条纹嵌晶,内含大量斜长石包体;斜长石(10%~20%);石英(30%~40%),呈细粒集晶(0.1~0.5 mm),分布不均匀,具波状消光;黑云母(~5%),少量绿泥石、方解石、绢云母和褐铁矿等。测定年龄的样品

(02XH-19b) 采于星星峡山附近(41°47'51.2"N, 95°05'25.4"E)。

西天山温泉县城以南前寒武纪地体中的粗粒片麻状花岗岩,侵入温泉群变质岩(图 1b)。1988 年执行“七五”期间国家“305”项目 V₁₁ 课题时,在新疆第一区调大队李启新工程师的帮助下,依据该队的 1 : 100000 牙马特幅地质图的划分,系统地对该区出露的变质岩系做了考察,在温泉县城西南大致 35 km 的库拉尔别景真沟中采取了该类花岗岩样品(原编号为 SBW-88-1073-1,曾用过 TS1^[11],本文用简化编号 881073-1,见图 1b)。它与该沟中广泛出露的温泉

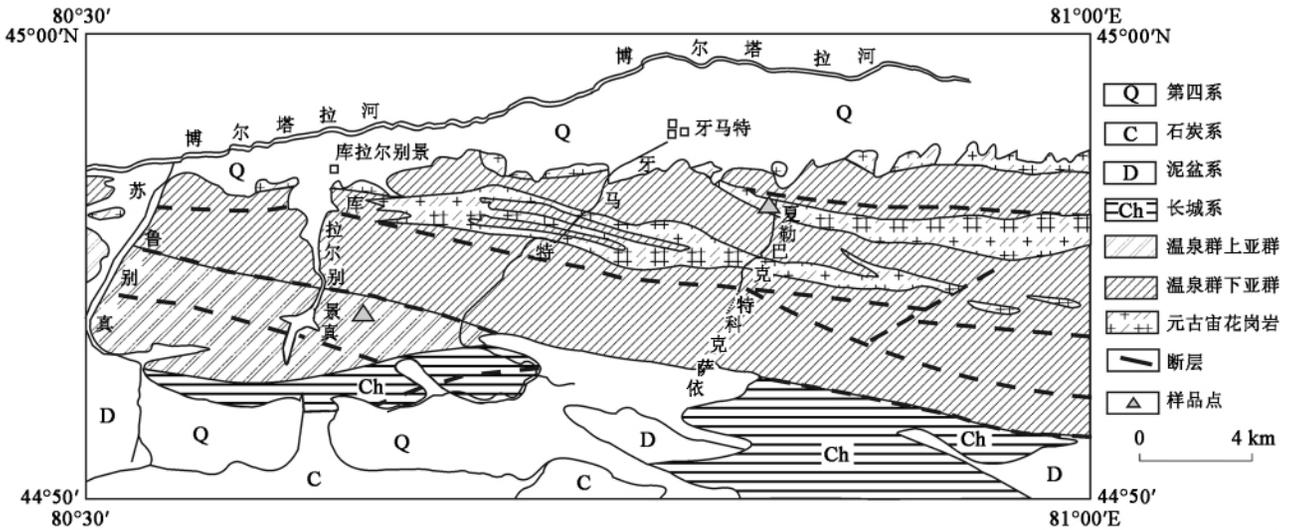


图 1b 西天山温泉县城南地区地质简图(据 1 : 100000 牙马特幅地质图改编)

Fig. 1b Simplified geological map for the southern area of Wenquan county in the western Tianshan (modified from 1 : 100000 Yamate geological map)

群白云母石英片岩呈侵入关系。2002 年地质考察期间,我们沿夏勒巴克特科克萨依沟又采集了另一个粗粒片麻状花岗岩样品(02XW-11a),一些地段可见它与细粒的灰黑色斜长角闪岩呈黑白相间的层。由于受到后期构造挤压变形,形成肠状构造,又被早古生代的粗粒斜长角闪岩脉^[16]或浅色的二长花岗岩所切穿¹⁾。10 个细粒灰黑色斜长角闪岩的 Nd 模式年龄为 1.9 ~ 1.6 Ga, Sm-Nd 等时线的年龄大约为 1.8 Ga^[8]。采集的年龄样品(44°56'05.4"N, 80°50'33.8"E)具眼球状片麻结构,眼球由钾长石和少量斜长石组成,细粒黑云母构成其边缘环带。主要矿物为石英 ~ 40%, 斜长石 25% ~ 30%, 黑云母 5% ~ 10%, 副矿物为微量自形或半自形锆石等。在一些地段见到眼球可达 2 cm × 7 cm ~ 3 cm × 7 cm, 与东天山星星峡山和转井山岩体十分相似。但是,在天山其他地区的新元古代花岗岩结构均与此不同,比如赛里木湖以东的“前寒武纪天窗”、拉尔敦达坂、巴仑台等地区的新元古代花岗岩为中细粒片麻状。本文采集年龄和岩石化学分析样品时,尽量选用眼球较小的岩石。

2 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

从手标本大小的岩石样品中分选锆石,经过单独的破碎、淘砂和电磁分选等程序,以使锆石在分选

过程中不受污染。在双目镜下对分选出的锆石晶体逐一挑选,用于年龄测定的锆石晶体均为不带包裹物、无裂隙、透明度较好的锆石颗粒。锆石阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室 JXA-8100 仪器上完成。

锆石 U、Th-Pb 年龄测定工作在北京离子探针中心 SHRIMP II 仪器上完成,分析原理和流程参照 Compston *et al.*^[17], Williams *et al.*^[18] 和宋彪等^[19]。单次测量结果列于表 1,误差均为 1σ。使用 ISOPLOT 2.0 程序^[20]处理数据和计算年龄,其加权平均年龄值具有 95% 的置信度。

2.1 西天山温泉粗粒片麻状花岗岩(02XW-11a 和 881073-1)

定年用样品(02XW-11a)采于温泉县城南偏西的夏勒巴克特科克萨依沟,分选出的锆石为浅黄褐色透明晶体,多为双锥短柱状, {100} + {110} + {111} + {311} 聚形为主,也有的晶体为 {100} + {111} 聚形,晶体长短轴之比为 1.5 : 1 ~ 2 : 1,晶面见有熔蚀坑。从锆石的阴极发光图像(图 2)中看到,所有锆石晶体均由核、幔构成,无暗色生长边缘,晶棱平直,有比较清晰的环带结构。研究中测定了 17 粒不同形状的锆石晶体和断块。

表 1 中列出了样品 02XW-11a 的 17 个锆石 U-Pb 年龄测定结果,除 E6.1 测点外,16 个锆石具有新元古代年龄。U 含量变化较大(185 ~ 881 μg/g), Th/U 比值变化范围小(0.32 ~ 0.55),单个测点的

1) 新疆维吾尔自治区地质矿产局地质调查大队,1992,巴斯坎山隘幅-霍城幅 1/20 万地质报告。

表 1 新疆温泉和星峡地区新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons of Neoproterozoic granitoids from Wenquan and Xingxia in the Xinjiang

点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (μg/g)	Th (μg/g)	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄 (Ma) ± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄 (Ma) ± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄 (Ma) ± 1σ	Discordant %	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* ± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U ± %	err corr		
西天山温泉地区(020XW-11a)														
E1.1	0.30	284	140	0.49	899	25	930	52	0.0727	2.56	1.50	0.1496	2.96	0.756
E2.1	0.78	282	145	0.51	954	26	976	108	0.0734	5.33	1.61	0.1595	2.98	0.487
E3.1	0.95	361	142	0.39	971	29	962	101	-3	0.0705	4.94	0.1625	3.24	0.548
E4.1	0.96	185	70	0.38	898	25	892	81	-2	0.0683	3.94	0.1494	3.03	0.609
E5.1	0.90	302	104	0.34	832	23	841	50	4	0.0680	3.40	0.1377	2.96	0.657
E6.1	2.78	310	251	0.81	229	7	228	67	-4	0.0505	20.1	0.0362	3.22	0.158
E7.1	0.37	431	185	0.43	906	25	924	47	6	0.0713	1.70	0.1510	2.94	0.866
E8.1	0.74	265	121	0.46	924	26	925	50	0	0.0699	3.52	0.1541	2.98	0.647
E9.1	0.33	728	317	0.44	929	25	904	68	-10	0.0672	1.53	0.1550	2.92	0.885
E10.1	0.31	881	381	0.43	898	24	905	72	3	0.0698	2.03	0.1494	2.90	0.819
E11.1	0.58	368	118	0.32	868	25	931	56	4	0.0709	3.58	0.1536	2.95	0.636
E12.1	0.90	340	166	0.49	914	25	908	66	-2	0.0688	4.18	0.1524	2.95	0.577
E13.1	0.57	357	166	0.46	925	25	929	62	1	0.0703	2.42	0.1544	2.96	0.774
E14.1	0.40	703	364	0.52	95.4	26	950	72	3	0.0714	3.22	0.1572	2.92	0.672
E15.1	0.60	308	170	0.55	40.7	25	912	66	-2	0.0690	3.14	0.1529	2.98	0.689
E16.1	0.75	293	127	0.43	39.3	26	932	58	1	0.0703	3.88	0.1550	2.97	0.608
E17.1	0.67	372	166	0.45	47.6	24	893	95	1	0.0690	3.73	0.1480	2.95	0.620
西天山温泉地区(881073-1)														
A2-1.1	0.99	399	174	0.44	893	20	855	51	-18	0.0645	3.1	0.1486	2.4	0.609
A2-2.1	0.17	426	141	0.33	822	19	826	36	2	0.0669	1.5	0.1361	2.4	0.848
A2-3.1	0.12	1383	967	0.70	911	20	904	36	-3	0.0686	0.79	0.1518	2.3	0.947
A2-4.1	0.10	1705	394	0.23	920	20	911	35	-3	0.0687	0.76	0.1534	2.3	0.951
A2-5.1	0.43	299	126	0.42	38.6	20	870	46	-13	0.0656	2.4	0.1498	2.4	0.716
A2-6.1	0.36	349	164	0.47	46.3	21	915	48	-3	0.0688	2.2	0.1542	2.4	0.737
A2-7.1	0.38	679	265	0.39	85.5	20	888	40	4	0.0695	1.6	0.1460	2.4	0.829
A2-8.1	1.33	106	98	0.92	14.2	23	903	82	-7	0.0678	5.2	0.1534	2.7	0.453
A2-9.1	1.75	102	81	0.79	13.7	23	828	114	-54	0.0598	9.0	0.1527	2.7	0.292
A2-10.1	0.09	945	570	0.60	120	27	891	47	0	0.0688	1.1	0.1481	3.2	0.946
A2-11.1	1.17	914	31	0.03	60.4	11	473	24	1	0.0566	3.4	0.0760	2.4	0.573
A2-11.2	1.27	476	344	0.72	61.1	20	865	52	-9	0.0663	3.1	0.1473	2.4	0.612
A2-7.2	0.47	909	60	0.07	66.7	14	526	25	0	0.0579	2.3	0.0850	2.7	0.756
东天山星峡山(020XH-19b)														
G1.1	0.47	635	217	0.34	86.3	26	935	59	-3	0.0697	2.6	0.1574	3.0	0.747
G2.1	0.75	361	63	0.17	48.2	25	925	74	-1	0.0698	4.1	0.1546	3.0	0.584
G3.1	0.15	699	130	0.19	97.0	26	949	52	-5	0.0696	1.7	0.1612	2.9	0.856
G4.1	0.77	315	70	0.22	44.1	27	956	88	-3	0.0702	4.9	0.1617	3.0	0.516
G5.1	0.54	622	144	0.23	84.5	26	941	59	0	0.0704	2.6	0.1573	2.9	0.744
G6.1	0.56	408	134	0.33	55.1	26	935	61	-1	0.0701	2.9	0.1563	2.9	0.714
G7.1	0.23	1122	182	0.16	156	33	946	59	-7	0.0691	1.2	0.1614	3.7	0.954
G8.1	0.73	397	89	0.22	53.1	26	944	73	6	0.0721	3.9	0.1542	3.0	0.610
G9.1	0.24	513	177	0.35	70.2	26	960	56	3	0.0717	2.1	0.1592	2.9	0.812
G10.1	0.20	691	246	0.36	95.8	26	960	54	-1	0.0709	1.9	0.1611	2.9	0.842
G11.1	0.23	1059	121	0.11	133	24	894	44	5	0.0700	1.2	0.1463	3.0	0.920
G12.1	1.17	365	94	0.26	52.9	27	944	111	-20	0.0667	6.9	0.1668	3.0	0.393
G13.1	0.79	298	235	0.79	67.3	39	1491	125	0	0.0930	2.6	0.2609	2.9	0.753
G14.1	0.53	860	145	0.17	105	23	870	41	8	0.0697	1.2	0.1409	2.9	0.926

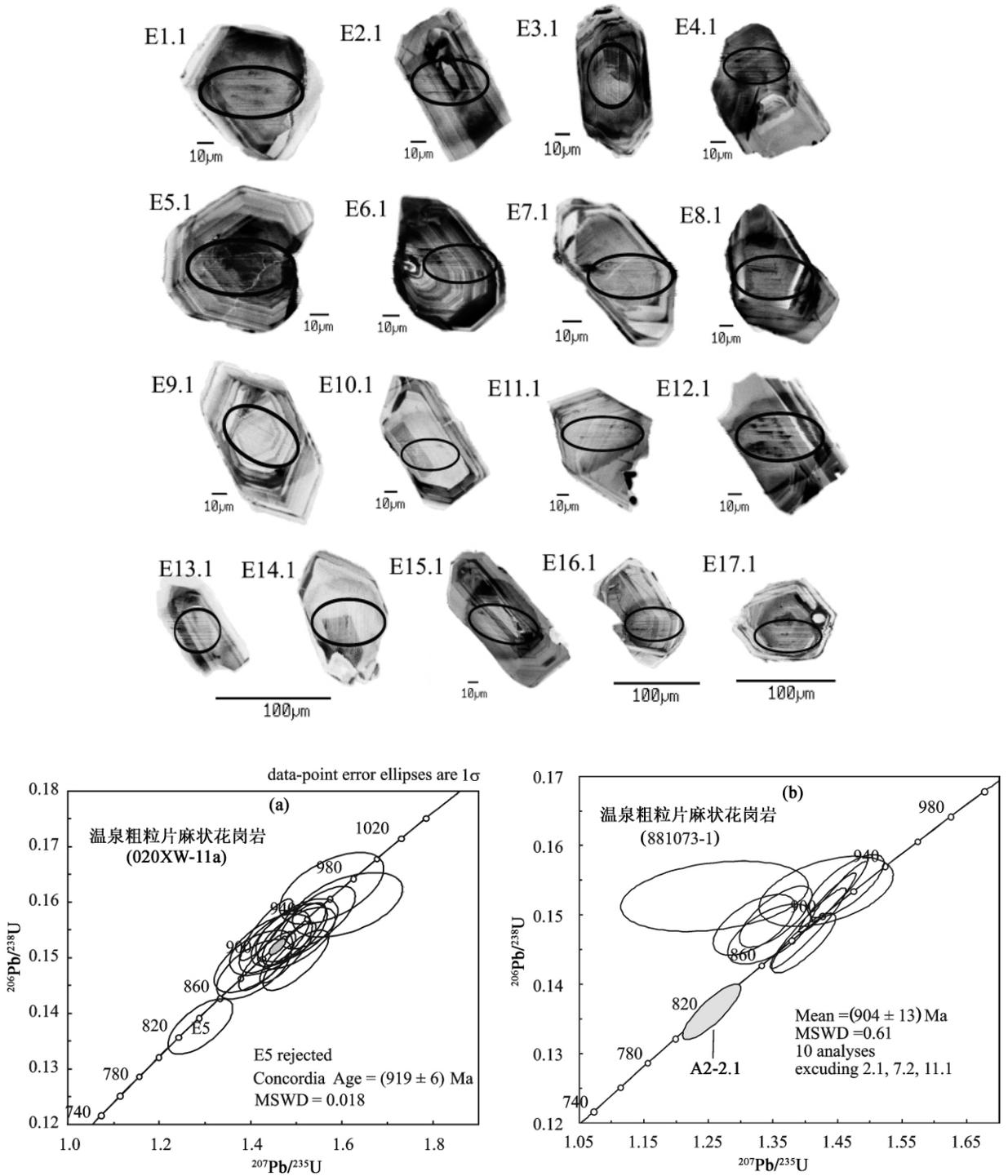


图 2 温泉粗粒片麻状花岗岩中锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图解

Fig. 2 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia plots of zircons from the Wenquan coarse-grained granitic gneisses

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 1025 ~ 843 Ma 之间, 其加权平均年龄为 (921 ± 28) Ma (2σ , MSWD = 0.89), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (913 ± 17) Ma (2σ , MSWD = 1.6)。在 CL 图中可以看到 E5.1 锆石晶体中有裂纹, 可能引起了 Pb 的丢失, 造成其年龄明显偏低。在 U-Pb 谐和图中, 除了 E5.1 测点外, 15 个锆石的数据点集中分布

在一个区域内 (图 2a), 计算得到谐和年龄为 (919 ± 6) Ma (2σ , MSWD = 0.018), 可作为该岩体的侵位年龄。分析的 17 个锆石样品中只有 1 颗锆石 (E6.1) 具有显生宙年龄 (229 ~ 220 Ma), 其 Th/U 比值 (0.81) 和普通 Pb 含量 (2.78%) 比其他具有元古宙年龄的测点明显偏高 (表 1)。

另一个粗粒片麻状花岗岩(881073-1)采于温泉县城西南大致 35 km 的库拉尔别景真沟附近。其锆石为无色、淡黄色、透明。晶形好,柱状,多为{110} + {111} 晶面组合,晶棱有的呈浑圆,粒度一般在 0.1 ~ 0.2 mm 之间,长短轴之比 1.5 : 1 ~ 2 : 1。曾用 U-Pb 同位素稀释法测定,数据点呈线性排列,但是均落在 U-Pb 谐和曲线的上方。用不同数据点的组合计算后,得到与一致线的交点年龄在 820 ~ 800 Ma 范围内^[1,81],这一年龄显然是不可信的。

最近,江博明教授在北京离子探针中心 SHRIMP II 仪器上测定了该粗粒片麻状花岗岩(881073-1)的同一份锆石样品,得到 13 个测点数据,由于 ^{207}Pb 同位素测量误差过大,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(表 1)。其中 2 个测点(A2-7.2 和 A2-11.1)的年龄明显偏低,显然是受到古生代岩浆活动的影响,计算岩体年龄时应该去掉。11 个测点给出元古宙年龄,在图 2b 中比较集中,但是测点 A2-2.1 也相对偏离了其余 10 个测点。去掉以上 3 个测点数据后,10 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (904 ± 13) Ma (2σ , MSWD = 0.61)。

上述两次采样和两次 SHRIMP U-Pb 锆石年龄的测定结果比较接近,可以十分肯定地确定温泉新元古代花岗岩应该老于 900 Ma,前一个(02XW-11a)的测定结果更可靠,因此 (919 ± 6) Ma 是西天山温泉地区粗粒片麻状花岗岩的形成年龄,过去的结果(~ 800 Ma)^[1,81]是不正确的,在此作出更正。

2.2 东天山星星峡山巨眼球片麻状花岗岩 (020XH-19b)

该花岗岩中分选出的锆石晶体呈淡黄和淡褐色,双锥短柱状,有的为长柱状或针状。具有{100} + {111} 或 {100} + {111} + {311} 聚形,长短轴比为 3 : 1 ~ 5 : 1,与转井山岩体中锆石特征完全相同。锆石的阴极发光图像(图 3)与西天山温泉粗粒片麻状花岗岩中的锆石特征有所不同。其晶体的晶棱不够平直,条带结构不很清晰,不但有核、幔结构,有的晶体(G13.1 和 G6.1 右侧的晶体)还有明显的暗色边,显示该花岗岩中锆石经受过挤压和后期的变质作用。研究中测定了 14 颗锆石,测定点多选在锆石晶体的中心部位,只有 G2.1 测点在晶体的幔部(图 3),年龄测定结果见表 1。13 个锆石具有新元古代的年龄,U 含量为 315 ~ 1122 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 比值为 0.11 ~ 0.36, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(935 \pm$

$24)$ Ma (2σ , MSWD = 2.5), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (926 ± 21) Ma (2σ , MSWD = 0.36)。其中 10 个测点(G1.1—G10.1)在 U-Pb 谐和图(图 3)中分布在谐和曲线附近,其谐和年龄为 (942 ± 7) Ma (2σ , MSWD = 1.3),可以作为该岩体形成的年龄。14 个锆石中只有一粒锆石(测点 G13.1)给出老的年龄,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (1494 ± 39) Ma, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄为 (1491 ± 125) Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (1487 ± 49) Ma,均与星星峡花岗闪长质片麻岩的年龄^[13]大体一致,应该是残留锆石。该测点的 U 含量低(298 $\mu\text{g}/\text{g}$), Th/U 比值较高为 0.79(表 1)。

位于星星峡以东的转井山岩体在外观上与星星峡山岩体无区别,它们应该是一个岩体。过去的研究^[5]获得三个组分锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 964 ~ 946 Ma,与本次获得的结果大体相一致(原测定样品为表 2 中 TS60)。胡霏琴等^[5]曾将此年龄当作岩石的变质年龄,而将一个组分锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 1271 Ma 当作岩体的形成年龄,但是经过重新处理数据后发现,这个老锆石 U-Pb 年龄数据点正好落在大约 1.4 Ga 星星峡花岗闪长质片麻岩中锆石组成的不一致线上^[8],它应该是残留锆石。顾连兴等^[6]、张遵忠等^[7]、胡霏琴等^[21]曾用全岩 Rb-Sr 等时线方法对该岩体做过定年研究,年龄在 927 ~ 850 Ma 之间。由于转井山这种巨眼球片麻状花岗岩的成分十分不均一,且受到古生代时期构造、岩浆作用的影响,我们认为岩体的 Rb-Sr 全岩等时线年龄比较难以确定岩石的形成时代。另外,星星峡地区还发育着各种混合岩,它们与 1.4 Ga 花岗闪长质片麻岩为侵入关系。曾得到 1 个混合岩样品的四个组分锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 941 ~ 986 Ma 之间^[5],也与这期岩浆活动时间大体一致。总之,本次研究得到的星星峡山岩体中锆石 SHRIMP U-Pb 谐和年龄 (942 ± 7) Ma 可以限定东天山星星峡地区新元古代花岗岩形成和混合化作用的时间。

3 元素和同位素地球化学特征

3.1 主元素组成和岩石类型

西天山温泉、赛里木湖东和东天山星星峡地区新元古代花岗岩及混合岩的主、微量元素分析结果见表 2。为了对比天山新元古代花岗岩的地球化学特征,在图 4 和图 6 中还包括了巴仑台和拉尔敦达坂的一些岩体的数据点^[3,81]。从表 2 中看到,东天山

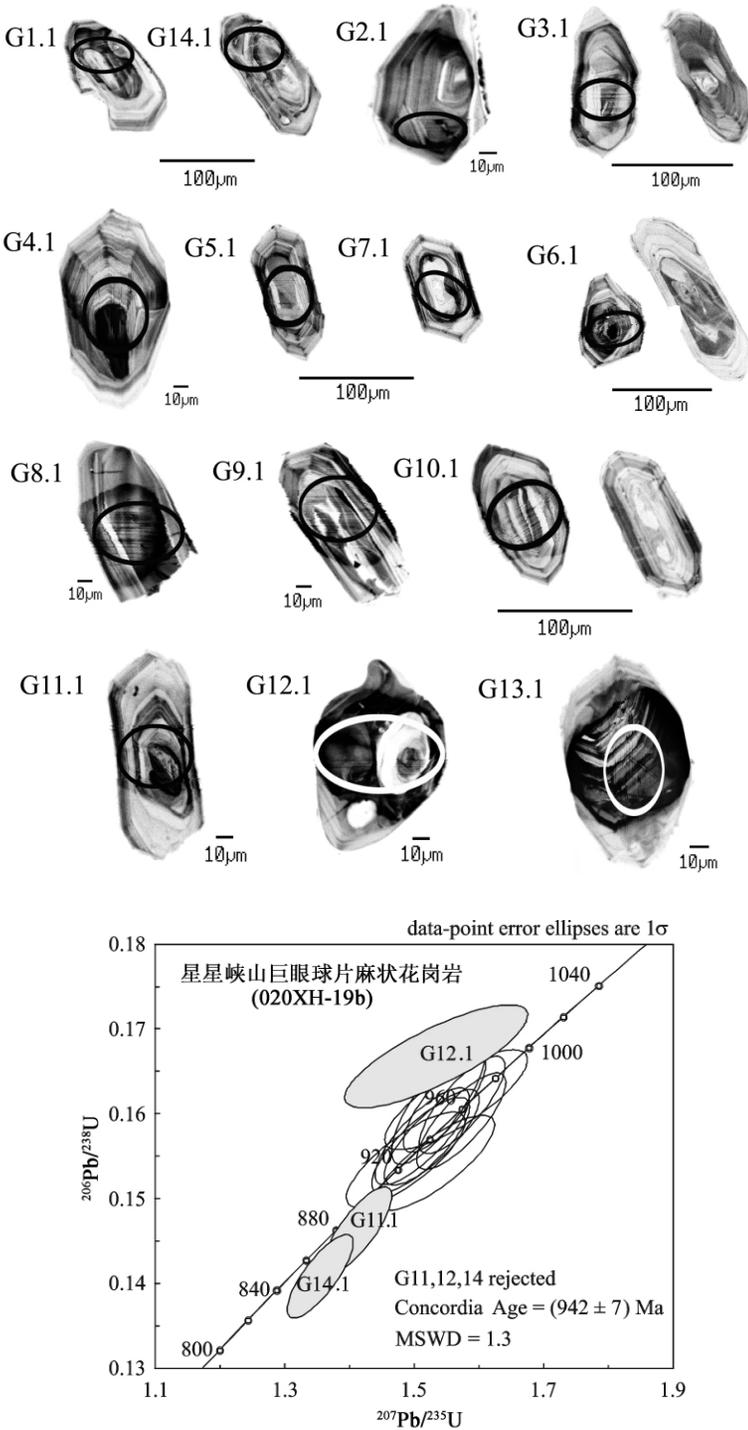


图 3 星星峡山片麻状花岗岩中锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图解
 Fig. 3 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia plot of zircons from the Xingxingxiashan granitic gneiss

星星峡山-转井山岩体和西天山温泉、赛里木湖东各种类型新元古代花岗岩均具有高 SiO₂ 含量 (≥70%)，高 K₂O + Na₂O (6.5% ~ 8.5%，半数样品 ≥8%) 且 K₂O > Na₂O 的特征，它们多数为过铝质的花岗岩类，落在 A / CNK > 1 和 A / NK > 1 的区域

内，只有东天山的 1 个混合岩 (TS64) 和西天山 1 个粗粒片麻状花岗岩 (02XW-11a) 显示了准铝质的特征 (表 2 图 4a)。在 QAP 图中 (图 4b)，东、西天山大多数新元古代花岗岩和混合岩均属二长花岗岩类。而拉尔敦达坂的片麻状花岗岩则主要属于花岗闪长岩类，它们的 SiO₂ 含量一般为 64% ~ 72%，多数 Na₂O > K₂O。

3.2 REE 和微量元素

温泉粗粒片麻状花岗岩的 REE 总量变化较大 (118 ~ 744 μg / g) (表 2)，LREE 稍显富集，(La / Sm)_N 为 2.5 ~ 4.1，具有比较大的 Eu 负异常 (多数 δEu 为 0.23 ~ 0.39，只有 96-6063 为 0.55^{[1,81])}，多数样品 (La / Yb)_N 为 2.5 ~ 6.1，只有 881073-2 为 10.2，为稍向右倾的一组近于平行的球粒陨石标准化分布曲线。赛里木湖东“前寒武纪天窗”的 3 个片麻状花岗岩的 REE 含量相近 (174 ~ 209 μg / g)，REE 分布曲线与多数温泉粗粒片麻状花岗岩特征相似 (图 5a)；东天山巨眼球片麻状花岗岩的 REE 总含量较低，变化范围 90 ~ 214 μg / g，LREE 也稍显富集 ((La / Sm)_N 为 2.5 ~ 3.4)。与温泉地区新元古代花岗岩相比，其 REE 分布曲线更为向右倾斜 ((La / Yb)_N 为 4.5 ~ 8.0)。同时代混合岩的 REE 含量明显高 (374 ~ 671 μg / g)，LREE 富集更为明显，其 (La / Sm)_N 为 3.8 ~ 6.0，曲线更为向右方倾斜 ((La / Yb)_N 为 12.3 ~ 16.2)。所有样品均具有较大至中等的负 Eu 异常 (δEu 为 0.22 ~ 0.61) (图 5b)。总体上看，温泉和星星峡地区的 0.9 Ga 花岗岩的 REE 分布曲线具有近于“V”形的特征，特别是温泉粗粒片麻状花岗岩更为明显。这些新元古代花岗岩的 REE 特征与碱性花岗岩有相似之处。在微量元素蛛网图中，东、西天山所有样品都显示出极为相似的曲线，具有 Rb、K、U、Th、Pb 等元素富集和明显的 Ba、Nb、Ti、P、Sr 负异常特征，显示大陆边缘岩石的特征 (图 5c、图 5d)。

表 2 天山新元古代花岗岩和混合岩主元素(%)及微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果

Table 2 Major (%) and trace elements ($\mu\text{g/g}$) analyses of Neoproterozoic granitoids and migmatites from the Tianshan

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样品号	881073-1	881073-2	881073-4	02XW-11a	02XW-25b	966056-2 *	92II-7 *	92II-8 *	02XH-16a	02XH-19a	02XH-19b
岩石名称	粗粒片麻状花岗岩				片麻状花岗岩				巨眼球片麻状花岗岩		
地区	温泉南				赛里木湖东				星星峡山		
位置	西天山								东天山		
SiO ₂	70.13	73.58	71.93	72.04	76.64	76.78	73.34	70.44	73.03	75.51	74.98
TiO ₂	0.37	0.38	0.37	0.41	0.22	0.15	0.25	0.29	0.27	0.24	0.23
Al ₂ O ₃	13.53	13.42	13.14	12.98	12.37	11.82	13.62	15.89	13.55	12.76	12.89
Fe ₂ O ₃	0.62	2.73	4.15	3.85	1.55	0.64	1.54	1.57	2.40	2.41	2.44
FeO	2.66					0.87	0.69	1.20			
MnO	0.07	0.06	0.11	0.07	0.02	0.01	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04
MgO	0.30	0.61	0.35	0.25	0.45	0.40	0.61	0.66	0.39	0.39	0.41
CaO	1.40	1.24	0.86	2.34	0.37	0.70	0.70	0.32	1.12	0.94	0.78
Na ₂ O	2.57	3.03	2.62	2.80	2.23	1.94	2.42	2.46	2.30	2.30	2.25
K ₂ O	5.95	4.00	5.72	4.68	5.59	5.21	4.80	5.20	5.22	4.92	5.28
H ₂ O _p	1.33					0.37	0.95	1.00			
H ₂ O _m	0.07					0.05	0.03	0.06			
P ₂ O ₅	0.09	0.07	0.07	0.02	0.08	0.13	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13
LOI		0.42	0.57	0.62	0.77				1.13	0.76	0.79
Total	99.09	99.53	99.89	100.07	100.29	99.07	99.10	99.24	99.57	100.42	100.23
A/CNK	1.02	1.16	1.09	0.93	1.19	1.17	1.3	1.55	1.18	1.18	1.19
A/NK	1.27	1.44	1.25	1.34	1.27	1.34	1.48	1.64	1.44	1.40	1.37
Sc	9.3	10.3		8.25	6.95	5.26	43.0	18.7	9.01		8.03
Ti	2735	2656		2584	1455	1240	3352	3539	1839		1627
V	11	28		21	21	7.2	15	17	26		24
Cr	10	26		12	14	4	15	14	16.8		15.8
Mn	570	459		570	177	88	476	347	330		304
Co	2	4		3	2	1	5	5	3		3
Ni	4	4		2	3	3	5	4	5		4
Cu	7	5		115	3	8	4	4	6		7
Zn	100	52		157	38	22	29	28	86		67
Ga	26	16		35	14	17	20	21	19		18
Ge	1.5	1.5		2.7	1.8	1.5	1.7	1.8	2.2		2.1
Rb	286	106		151	222	254	217	224	336		329
Sr	96	143		128	52.0	34	61	53	64.5		67.2
Y	104	31.2		194	40.0	56	45	48	39.6		41.5
Zr	478	269		698	116	143	334	187	135		145
Nb	40.9	12.5		77.2	5.31	10.6	10.1	10.5	10.5		9.33
Cs	2.9	2.1		6.5	3.5	3.4	2.8	3.3	14		15
Ba	597	766		630	272	361	563	640	405		341
La	104.3	57.5		120.4	18.87	30.98	35.26	37.28	30.2		27.5
Ce	207.1	114.4		259	46.1	63.77	80.84	82.09	64.2		60.0
Pr	24.72	13.65		35.9	5.17	8.05	10.74	10.47	7.34		6.74
Nd	90.25	49.2		147.6	19.06	29.38	38.83	37.23	28.1		26.3
Sm	17.83	8.68		33.70	4.21	6.85	8.53	8.11	6.07		5.60
Eu	1.59	0.699		4.21	0.322	0.55	1.07	0.95	0.68		0.60
Gd	17.17	7.87		33.8	4.36	6.92	8.77	8.30	6.02		5.92
Tb	2.99	1.15		6.26	0.920	1.54	1.47	1.48	1.17		1.18
Dy	18.15	6.35		39.41	6.44	9.96	8.91	9.49	7.24		7.41
Ho	3.86	1.31		8.20	1.66	2.13	1.76	1.91	1.53		1.58
Er	11.61	3.656		24.3	4.76	6.39	5.22	5.71	4.15		4.23
Tm	1.76	0.559		3.60	0.799	0.91	0.70	0.80	0.624		0.623
Yb	11.22	3.72		24.21	5.05	5.51	4.56	4.98	3.92		3.99
Lu	1.67	0.585		3.50	0.735	0.77	0.64	0.70	0.566		0.564
Hf	13.5	7.36		20.9	3.57	4.79	12.6	6.19	4.12		4.30
Ta	3.07	1.27		5.58	0.492	0.780	1.00	1.06	1.29		1.10
Pb	35.7	28.7		59.2	31.4	116	14.6	13.5	29.7		28.8
Th	38.9	33.6		36.3	18.5	20.5	30.0	31.9	22.0		22.4
U	5.93	3.62		8.05	2.38	4.62	5.47	3.65	4.81		3.61
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512104	0.512098			0.512174	0.512202	0.512048	0.51204			0.512219
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1243	0.1065			0.1336	0.1410	0.1272	0.1265			0.1289
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-2.1	-0.1			-1.6	-1.8	-3.2	-3.2			-0.02
$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.8	1.6			1.9	2.0	1.9	1.9			1.7
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.797974			0.766114		0.972779	0.838110	0.862422			0.894970
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	8.67			3.47		22.21	10.42	12.45			14.49
I_{Sr}	0.6989?			0.7205		0.7197	0.7194	0.7205			0.6999?

(续表2)

序号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
样品号	02XH-20a	02XH-20d	02XH-21a	02XH-26b	02XH-31a	TS60 *	02XH-03b	TS61 *	TS64 *	TS65 *
岩石名称	巨星球片			麻状花岗岩			混合岩			
地区	星星峡山			转井山			星星峡			
位置	东天山									
SiO ₂	75.20	77.75	75.50	76.74	73.21	70.94	69.21	69.18	70.17	68.79
TiO ₂	0.16	0.15	0.13	0.13	0.12	0.38	0.71	0.70	0.30	0.76
Al ₂ O ₃	12.24	11.16	12.54	12.49	13.35	13.00	14.39	13.71	13.35	14.10
Fe ₂ O ₃	2.05	2.26	1.52	1.77	2.08	0.79	4.69	1.18	0.37	1.79
FeO						2.48		3.44	2.89	3.07
MnO	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04
MgO	0.31	0.34	0.23	0.22	0.42	0.31	1.01	0.94	1.19	0.91
CaO	0.73	0.70	0.86	0.64	0.60	1.93	2.50	1.24	2.21	1.14
Na ₂ O	2.09	1.81	2.34	2.52	3.12	2.15	3.08	2.07	2.75	2.06
K ₂ O	5.51	4.61	5.87	5.06	5.69	4.50	3.46	5.70	5.77	6.00
H ₂ O _p						0.91		0.67		0.63
H ₂ O _m								0.03		0.08
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.14	0.10	0.14	0.11	0.17	0.16	0.08	0.16
LOI	0.79	0.74	0.44	0.71	0.94	1.87	0.51		0.50	
Total	99.23	99.68	99.59	100.43	99.72	99.41	99.81	99.08	99.62	99.53
A/CNK	1.14	1.21	1.07	1.16	1.08	1.09	1.08	1.16	0.90	1.18
A/NK	1.30	1.40	1.23	1.30	1.18	1.55	1.63	1.43	1.24	1.43
Sc			6.76		6.40	8.4	2.06	23.8	15.1	27.2
Ti			906		828	2614	3678	7537	2737	10432
V			12		21	14	24	42	5	58
Cr			17		16	16	18	6	50	49
Mn			121		266	570	359	504	576	528
Co			2		2	4	5	8	4	11
Ni			5		3	3	5	3	4	4
Cu			4		4	3	9	39	66	139
Zn			45		85	20	59	100	82	164
Ga			17		19	19	21	21	20	29
Ge			2		2.4	1.9	1.7	1.6	1.3	2.3
Rb			348		402	129	228	197	370	241
Sr			60.3		22.1	136	85.8	204	133	285
Y			32.2		32.8	36	44.0	35	41	71
Zr			113		83.5	146	129	525	297	676
Nb			7.92		8.47	8.2	31.4	20.6	18.7	29.1
Cs			5.6		12	4.2	6.0	6.7	5.0	9.5
Ba			326		166	726	1094	1164	1118	1573
La			19.9		15.34	40.35	88.67	78.53	81.35	179.1
Ce			42.3		33.96	95.67	182.1	156.9	162.3	290.1
Pr			4.80		4.04	9.71	20.71	19.04	19.05	27.21
Nd			17.1		14.6	35.81	73.5	68.40	65.24	98.22
Sm			4.34		3.74	7.32	12.76	12.65	11.54	18.21
Eu			0.317		0.289	1.39	1.191	1.99	1.38	2.80
Gd			4.53		4.21	6.90	9.60	11.73	11.25	18.20
Tb			0.98		0.912	1.09	1.420	1.63	1.54	2.58
Dy			6.39		5.96	6.38	8.31	8.36	8.52	14.71
Ho			1.159		1.154	1.30	1.591	1.50	1.64	2.84
Er			3.01		2.73	3.83	4.50	4.19	4.87	8.48
Tm			0.403		0.386	0.54	0.645	0.52	0.67	1.13
Yb			2.38		2.26	3.34	3.92	3.38	4.38	7.31
Lu			0.311		0.294	0.47	0.587	0.50	0.64	1.08
Hf			3.97		2.68	3.75	3.74	12.9	6.61	16.3
Ta			0.94		1.35	0.62	2.28	1.27	1.28	1.74
Pb			32.4		24.9	29.3	30.8	36.4	42.4	47.4
Th			21.0		17.6	19.4	26.6	24.0	24.7	32.6
U			5.09		6.27	1.73	3.27	3.04	2.13	4.63
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd			0.512175			0.511980		0.511850	0.511724	
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd			0.1535			0.1238		0.1096	0.1047	
$\epsilon_{Nd}(t)$			-3.8			-4.1		-4.9	-6.8	
$t_{DM}(Ga)$			1.9			2.0		1.9	2.0	
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr			0.921699			0.75956		0.756558		
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr			17.05			2.633		2.801		
I_{Sr}			0.6922?			0.7238		0.7188		

注: 样品号中标“*”者引自文献[8, 11]。

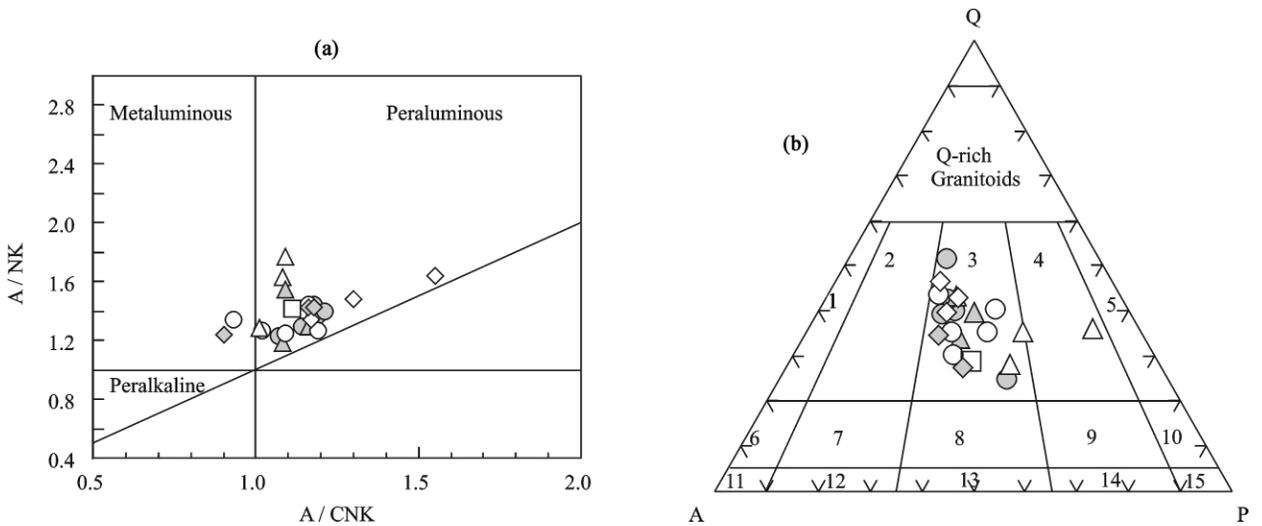


图 4 天山新元古代花岗岩的分类图

Fig. 4 Classification diagrams for Neoproterozoic granitoids from the Tianshan in the Xinjiang

○ - 温泉; ◇ - 赛里木湖东; △ - 拉尔敦达坂; ● - 星星峡山; ▲ - 转井山; ◆ - 星星峡混合岩; □ - 巴仑台。A/NK = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O), A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O), 均为摩尔比值, 也称为 ASI (铝饱和指数)。QAP 三角图中 Q、A、P 分别为 CIPW 标准化的石英、碱性长石和斜长石。1 - 碱性长石花岗岩 (alkali feldspar granite); 2 - 正长花岗岩 (syenogranite); 3 - 二长花岗岩 (monzogranite); 4 - 花岗闪长岩 (granodiorite); 5 - 英云闪长岩 (tonalite); 6 - 石英碱性长石正长岩 (qafsy); 7 - 石英正长岩 (quartz syenite); 8 - 石英二长岩 (quartz monzonite); 9 - 石英二长闪长岩 (quartz monzodiorite); 10 - 石英闪长岩 (quartz diorite); 11 - 碱性长石正长岩 (afsy); 12 - 正长岩 (syenite); 13 - 二长岩 (monzonite); 14 - 二长闪长岩 (monzodiorite); 15 - 闪长岩 (diorite)。

3.3 Nd-Sr 同位素组成

表 2 中列出一些样品的 Nd、Sr 同位素组成分析数据。除了引用文献中数据外, 均为在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室 Isoprobe MC-ICPMS 仪器上完成的。温泉和星星峡地区的新元古代花岗岩的 ¹⁴⁷Sm / ¹⁴⁴Nd 为 0.1065 ~ 0.1535, ε_{Nd}(t = 919 Ma 或 942 Ma) 为 -4.1 ~ -0.02, t_{DM} 为 2.0 ~ 1.6 Ga。东、西天山新元古代花岗岩的 ⁸⁷Rb / ⁸⁶Sr 比值分别变化于 2.63 ~ 14.5 和 3.47 ~ 22.2 之间, ⁸⁷Sr / ⁸⁶Sr 比值也很高 (0.76 ~ 0.97), 由于放射成因 Sr 同位素组成非常高, 不可能得到精确有意义的 Sr 同位素初始值。Nd 同位素组成说明在天山新元古代花岗岩原岩成分中含有不同数量天山基底古元古代物质, 这些特征也反映了形成于大陆边缘岩浆岩的特征。

3.4 构造环境判别

在 R₂-R₁ 构造判别图中, 东、西天山所有的新元古代花岗岩类岩石均落在同碰撞区内 (图 6a)。在 Rb-(Y + Nb) 构造环境判别图中 (图 6b), 东天山星星峡山 - 转井山岩体和星星峡地区混合岩类、巴仑台的片麻状花岗岩, 以及西天山温泉的粗粒片麻状

花岗岩、赛里木湖东“前寒武纪天窗”和拉尔敦达坂片麻状花岗岩等, 样品点均落在几种构造类型花岗岩的汇聚区域, 属碰撞后花岗岩 [23], 只有西天山温泉地区的 02XW-11a 和 881073-1 样品点不同程度偏离其他样品点, 向板内花岗岩方向靠近。

综合上述主、微量元素和 Nd 同位素组成特征, 天山 0.9 Ga 前形成的花岗岩虽然它们具有高的 SiO₂ 含量, 高 Na₂O + K₂O (K₂O > Na₂O), 有类似碱性花岗岩的 REE 分布曲线, 在构造环境判别图中又落在同碰撞或碰撞后花岗岩区域, 但是在微量元素蛛网图中它们具有明显的 Ba、Nb、Ti、P、Sr 负异常, 与板内形成的 A 型花岗岩的特征又截然不同。综合元素及 Nd 同位素的特征, 它们形成的构造环境可能与大陆边缘的岩浆活动有关。

4 讨论: 天山新元古代花岗岩的形成时代及其地质意义

应用锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 确定了东天山星星峡和西天山温泉地区的巨眼球片麻状花岗岩和粗粒片麻状花岗岩年龄分别为 (942 ± 7) Ma 和 (919 ± 6) Ma, 它们均为新元古代早期形成的花岗岩。

除此之外, 在天山其他地段 960 ~ 910 Ma 花岗

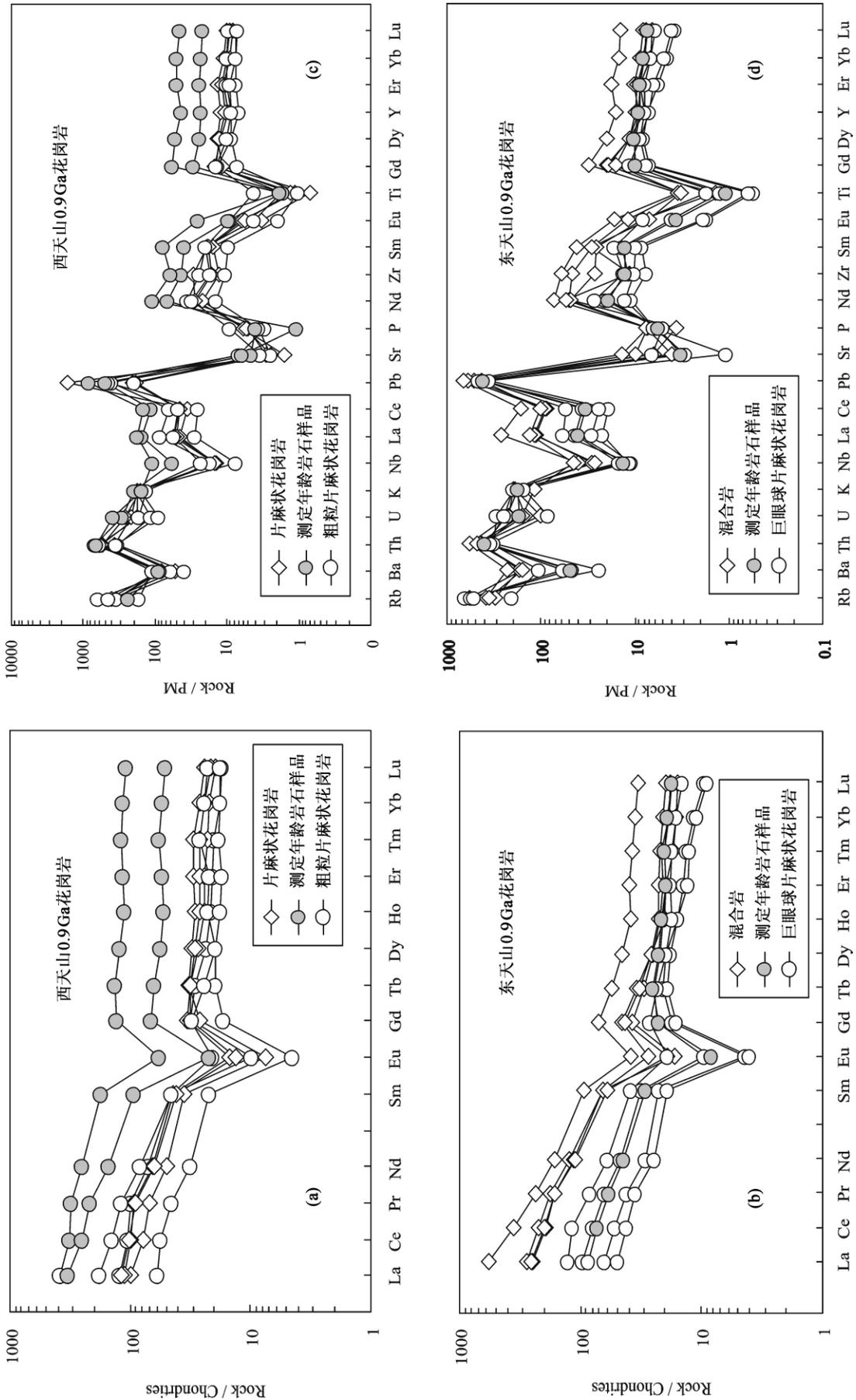


图 5 天山新元古代花岗岩 REE 分布曲线和微量元素蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and PM-normalized spidergrams of Neoproterozoic granitoids from the Tianshan in the Xinjiang

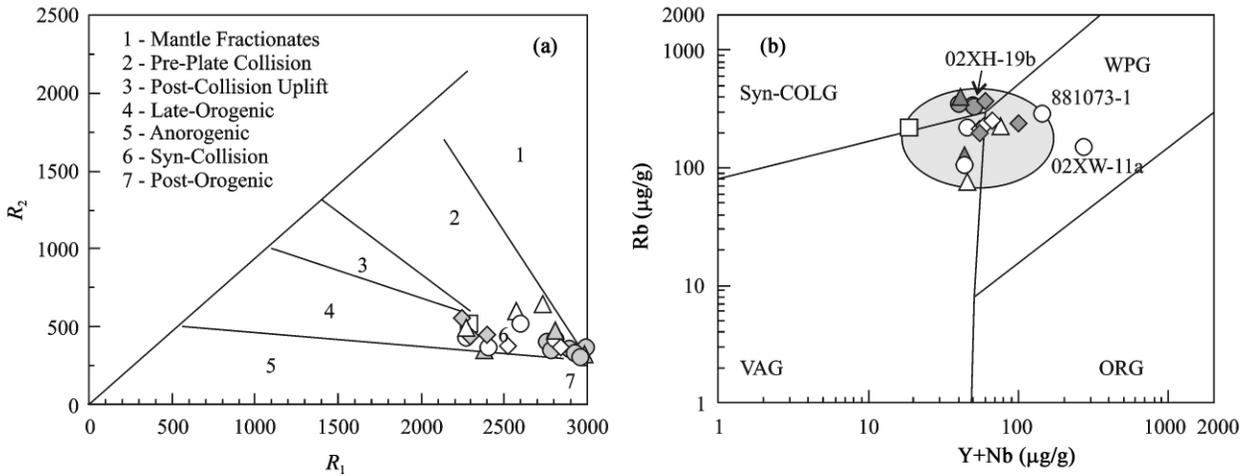


图 6 天山新元古代花岗岩形成构造环境判别图解

Fig. 6 Discrimination diagrams of the Neoproterozoic granitoids from the Tianshan in the Xinjiang

R_2 - R_1 图解据 Batchelor *et al.* [22]; $Rb-(Y+Nb)$ 图解据 Pearce *et al.* [23]. 图中各数据点符号代表的地区同图 4 中。 $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$ 。ORG - 大洋脊花岗岩; VAG - 火山弧花岗岩; Syn-COLG - 同碰撞花岗岩; WPG - 板内花岗岩; Post-COLG - 碰撞后花岗岩。

岩类岩石广泛存在。比如,西天山赛里木湖以东“前寒武纪天窗”出露的片麻状花岗岩。过去的研究曾将其中 1 个锆石组分的 U-Pb 谐和年龄 798 Ma, 当作花岗质岩浆的结晶时代 [21], 但是该片麻状花岗岩中 5 个小量组分锆石中 4 个组分锆石的 $^{207}Pb / ^{206}Pb$ 年龄在 937 ~ 851 Ma 之间, 分布在谐和线的下方, 大致构成线性排列, 对应上交点年龄约为 930 Ma [81]。因此, 该片麻状花岗岩也应该属于大约 0.9 Ga 的岩体; 独库公路南段拉尔敦达坂的北段出露大面积的片麻状花岗岩, 曾测定了 5 个小量组分锆石的 U-Pb 年龄, 其数据质量不好。 $^{207}Pb / ^{206}Pb$ 年龄在 899 ~ 862 Ma 之间, 4 个组分的 $^{206}Pb / ^{238}U$ 年龄为 1142 Ma、954 Ma、949 Ma 和 925 Ma, 其锆石的 U-Pb 上交点年龄为 $(882 \pm 33) Ma$ [31]。近来, 陈新跃等 [91] 获得了拉尔敦达坂片麻状花岗岩 (称为花岗片麻岩) 中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄, 为 $(948 \pm 8) Ma$, 数据更为可靠, 应该作为该地区新元古代花岗岩形成时代; 在天山中段巴仑台以北出露的片麻状花岗岩, 姜常义等曾得到 Rb-Sr 等时线年龄大约 730 Ma [1]。最近, 陈新跃等 [91] 发表了巴仑台北大约 50 km 处片麻状花岗岩 (称为花岗片麻岩) 锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(926 \pm 8) Ma$, 为岩体形成的可靠年龄; 在天山东段卡瓦布拉克群的花岗闪长质片麻岩中锆石也大致给出新元古代 U-Pb 年龄 [241]。由上述讨论我们认为天山各地段普遍存在着新元古代早期花岗岩, 由近年

来天山西段、中段、东段的温泉、拉尔敦达坂、巴仑台, 以及星星峡等地区的 5 个高精度 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄结果, 可以认为它们的形成时代应该主要在 960 ~ 910 Ma。

天山新元古代早期岩浆活动的广泛性, 还表现在一些早古生代的岩浆岩中仍保存有该时代的残留锆石。比如, 西南天山早古生代库勒湖蛇绿岩的辉长岩中有 7 个锆石的 $^{206}Pb / ^{238}U$ 平均年龄为 $(918 \pm 72) Ma$ [25]; 西天山温泉县城西南的早古生代斜长角闪岩中, 在一个锆石晶体的核部给出 $^{206}Pb / ^{238}U$ 、 $^{207}Pb / ^{235}U$ 和 $^{207}Pb / ^{206}Pb$ 的年龄分别为 $(900 \pm 25) Ma$ 、 $(922 \pm 38) Ma$ 和 $(973 \pm 49) Ma$ [161]。这期岩浆活动影响广泛且深远, 使更古老的岩石受到改造, 比如东天山星星峡地区形成同时代的混合岩等 [81]。

天山新元古代早期大约 960 ~ 910 Ma 的花岗岩类岩石有两种类型。本文研究的东、西天山以含有巨大的眼球和粗粒片麻状花岗岩为特征的为一类花岗岩, 它们均为具有高 SiO_2 (大于 70%) 和高 $K_2O + Na_2O$ 含量 (6.5% ~ 8.5%, 半数样品 $\geq 8\%$), 且 $K_2O > Na_2O$ 的岩石, REE 分布曲线比较平缓, 多具有非常大的负 δEu 值。但是在天山的其他地区, 如拉尔敦达坂的同时代片麻状花岗岩就是另外一种类型, 具有中-细粒花岗片麻结构, 其 SiO_2 含量为 60% ~ 70%, $K_2O < Na_2O$, REE 分布曲线明显向右倾斜, 具有典型岛弧花岗岩的特征 [31]。天山所有新元古代花岗岩均具有负 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和相当于古元古代的 Nd 模式年龄 (t_{DM} 为 2.0 ~ 1.6 Ga), 揭示了原岩中

1) 姜常义等, 1988, 巴仑台-亦格达坂成矿带花岗质岩浆的时空演化, 新疆维吾尔自治区 305 项目办公室, 2 ~ 7。

含有明显数量的古元古代地壳成分。综合上述元素和 Nd 同位素组成的特征,说明它们可能形成于大陆边缘或岛弧的构造环境。

天山新元古代花岗岩形成时间(960~910 Ma)与我国华南扬子地块东南缘浙江东北的桃红(Taohong)和西裘(Xiqiu)英云闪长岩-花岗闪长岩株的 SHRIMP U-Pb 年龄((913±15) Ma 和 (905±14) Ma)大体相一致^[26],与全球该期岩浆活动也可以对比,比如印度的 Eastern Ghats Belt^[27]和南极洲东部的 Rayner 省^[28],非洲北部的 Rahaba-Absol 地体^[29]等。新疆塔里木盆地周边古老地块中存在与天山同时代的新元古代早期花岗岩,特别是塔里木盆地北缘,也存在该时期的花岗岩,以及变质-早期隆升活动的记录。如塔里木盆地北缘辛格尔南托格拉克布拉克太古宙杂岩中斜长角闪岩的角闪石激光熔样 ⁴⁰A/³⁹Ar 等时线年龄为(866±6) Ma^[8];兴地断裂南,阔克苏地区的石英闪长岩中锆石 U-Pb 三对比值年龄(²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄)为 828 Ma、839 Ma 和 868 Ma^[21];库尔勒至阿克苏公路北侧 16 km 处的浅灰色片麻状花岗岩中锆石的三组 U-Pb 同位素年龄为 970 Ma、944 Ma 和 884 Ma^[21];阿克苏蓝片岩的 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 962 Ma 和 944 Ma^[30]。此外,塔里木盆地东南缘阿尔金山地区及柴达木盆地北缘与同造山事件有关的片麻状花岗岩或花岗岩的 15 个锆石 U-Pb 年龄数据在 1051~850 Ma 之间^[31];西南缘的北昆仑地体变质岩具有 1.0~0.9 Ga 年龄^[32]。根据以上这些资料,可以推断尽管天山与塔里木盆地周边的这些古老地块各自的基底及发育历史不同,但在新元古代早期它们都可能参与聚合,构成 Rodinia 超大陆的一部分,但其后不久大约 0.8 Ga^[8, 21, 33]天山又与塔里木北缘裂解分离,各自经历了以后的地质历史,直至晚古生代最后再次形成统一的新疆大陆。

至今,天山地区尚未见有与大约 0.9 Ga 蛇绿岩或与岛弧有关的基性-超基性岩石年龄的报道。仅在东昆仑造山带木孜塔格-鲸鱼湖缝合带中残留有新元古代早期(~1.0 Ga)蛇绿岩^[34],而秦岭造山带和华南地区新元古代蛇绿岩,以及岛弧基性岩浆岩的报道较普遍^[26, 35-38],这是今后研究中应该特别加以关注的问题。

本研究中锆石 U-Pb SHRIMP 分析中得到北京离子探针分析中心刘敦一、宋彪等的大力支持与帮助;元素分析得到中国科学院广州地球化学研究所

同位素年代学和地球化学重点实验室梁细荣、涂湘林、刘颖、胡光黔、曾文等同事热情帮助和合作;张国新、李启新、张前锋和吴国良参加了 1988 年度的国家“305”项目 V₁₁ 课题西天山温泉地区的工作;李献华在 2002 年曾参加了我们在温泉地区的野外考察工作,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 陈义兵. 西天山基底演化的同位素地球化学研究(博士学位论文)[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1999: 1-51.
Chen Yi-bing. Isotope geochemistry study on the basement of the western Tianshan, Xinjiang, northwestern China (PhD thesis) [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1999: 1-51 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 张前锋. 西天山前寒武纪天窗花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及 Nd-Sr 同位素特征[J]. 地球化学, 1999, 28(6): 515-520.
Chen Yi-bing, Hu Ai-qin, Zhang Guo-xin, Zhang Qian-feng. Zircon U-Pb age and Nd-Sr isotopic composition of granitic gneiss and its geological implications from Precambrian window of western Tianshan, NW China[J]. Geochimica, 1999, 28(6): 515-520 (in Chinese with English abstract).
- [3] Chen Yibing, Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng. Zircon U-Pb age of granitic gneiss on Duku highway in western Tianshan of China and its geological implications[J]. Chinese Sci Bull, 2000, 45(7): 649-653.
- [4] 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 张前锋. 西南天山前寒武纪基底时代和特征: 锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Sr 同位素组成[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 91-98.
Chen Yi-bing, Hu Ai-qin, Zhang Guo-xin, Zhang Qian-feng. Precambrian basement age and characteristics of Southwestern Tianshan: Zircon U-Pb geochronology and Nd-Sr isotopic compositions[J]. Acta Petrol Sinica, 2000, 16(1): 91-98 (in Chinese with English abstract).
- [5] 胡霏琴, 章振根, 刘菊英, 彭建华, 张积斌, 赵殿甲, 杨昇祖, 周位. 天山东段中天山隆起带前寒武纪变质岩系时代及演化——据 U-Pb 年代学研究[J]. 地球化学, 1986, 15(1): 23-35.
Hu Ai-qin, Zhang Zhen-gen, Liu Ju-ying, Peng Jian-hua, Zhang Ji-bin, Zhao Dian-jia, Yang Sheng-zu, Zhou Wei. U-Pb age and evolution of Precambrian metamorphic rocks of Middle Tianshan uplift zone, eastern Tianshan, China[J]. Geochimica, 1986, 15(1): 23-35 (in Chinese with English abstract).
- [6] 顾连兴, 杨浩, 陶仙聪, 严正富, 李惠民, 王金东, 刘彦东. 中天山东段花岗岩伽-铷年代学及构造演化[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1990, 10(1): 49-55.
Gu Lian-xing, Yang Hao, Tao Xian-cong, Yan Zheng-fu, Li Hui-min, Wang Jin-dong, Liu Yan-dong. Rb-Sr geochronology of granites in the east section of the mid-Tianshan belt and its tectonic

- evolution [J]. *J Guilin Coll Geol*, 1990, 10(1): 49–55 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张遵忠, 顾连兴, 杨浩, 吴昌志, 王银喜, 闵茂中. 东天山平顶山巨眼球状片麻状花岗岩特征及成因 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 889–908.
Zhang Zun-zhong, Gu Lian-xing, Yang Hao, Wu Chang-zhi, Wang Yin-xi, Min Mao-zhong. Characteristics and genesis of the Pingdingshan mega-augen gneissic granite in the eastern Tianshan Mountain areas[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(3): 889–908 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡霏琴, 张国新, 陈义兵. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 69–161.
Hu Ai-qin, Zhang Guo-xin, Chen Yi-bing. Isotope Geological and Geochemistry for Major Geological Events of Continental Crustal Evolution of Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 69–161 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈新跃, 王岳军, 孙林华, 范蔚茗. 天山冰达坂和拉尔敦达坂花岗岩片麻岩 SHRIMP 锆石年代学特征及其地质意义[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 424–431.
Chen Xin-yue, Wang Yue-jun, Sun Lin-hua, Fan Wei-ming. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the granitic gneisses from Bingdaban and Laerdundaban (Tianshan Orogen) and their geological significances[J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 424–431 (in Chinese with English abstract).
- [10] Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, Chen Yibing. Constraints on the age of basement and crustal growth in Tianshan Orogen by Nd isotopic composition[J]. *Sci China (D)*, 1998, 41(6): 648–657.
- [11] Hu Aiqin, Jahn Bor-ming, Zhang Guoxin, Chen Yibing, Zhang Qianfeng. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 15–51.
- [12] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 659–667.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Geological Memoirs of Ministry of Geology and Mineral Resources of People's Republic of China, Series 1, No. 32) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 659–667 (in Chinese).
- [13] 胡霏琴, 韦刚健, 邓文峰, 张积斌, 陈林丽. 天山东段 1.4 Ga 花岗岩长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球化学*, 2006, 35(4): 333–345.
Hu Ai-qin, Wei Gang-jian, Deng Wen-feng, Zhang Ji-bin, Chen Lin-li. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb age for zircons of granodiorite and its geological significance from the eastern segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(4): 333–345 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王作勋, 邬继易, 吕喜朝, 张经国, 刘成德. 天山多旋回构造演化及成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 9–14.
Wang Zuo-xun, Wu Ji-yi, Lü Xi-chao, Zhang Jing-guo, Liu cheng-de. The Polycyclic Tectonic Evolution and Mineralization of Tianshan Mountain[M]. Beijing: Science Press, 1990: 9–14 (in Chinese).
- [15] 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 屈迅, 李天福, 黄诚, 崔曦. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 72–166.
Wang Bao-yu, Lang Zhi-jun, Li Xiang-dong, Qu Xun, Li Tian-fu, Huang Cheng, Cui Xi. Comprehensive Survey of Geological Sections in the West Tianshan of Xinjiang, China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 72–166 (in Chinese with English abstract).
- [16] 胡霏琴, 韦刚健, 张积斌, 邓文峰, 陈林丽. 西天山温泉地区早古生代斜长角闪岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2731–2740.
Hu Ai-qin, Wei Gang-jian, Zhang Ji-bin, Deng Wen-feng, Chen Lin-li. SHRIMP U-Pb ages for zircons of the amphibolites and tectonic evolution significance from the Wenquan domain in the West Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(12): 2731–2740 (in Chinese with English abstract).
- [17] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Zichao, Ma Guogan. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *J Geol Soc*, 1992, 149(2): 171–184.
- [18] Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: 2. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 97(2): 205–217.
- [19] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26–30.
Song Biao, Zhang Yu-hai, Wan Yu-sheng, Jian Ping. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geol Rev*, 2002, 48(suppl): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- [20] Ludwig K R. ISOPLLOT 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1998, 4: 70.
- [21] 胡霏琴, 王中刚, 涂光炽. 新疆北部地质演化及其成岩成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 36–62.
Hu Ai-qin, Wang Zhong-gang, Tu Guang-chi. Geological Evolution and Diagenic and Metallogenetic Regularity in Northern Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1997: 36–62 (in Chinese).
- [22] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chem Geol*, 1985, 48(1–4): 43–55.
- [23] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J Petrol*, 1984, 25(4): 956–983.
- [24] 修群业, 于海峰, 李铨. 卡瓦布拉克群花岗岩闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 335–337.
Xiu Qun-ye, Yu Hai-feng, Li Quan. A single zircon U-Pb age for the granodiorite of Kawabulark complex, Xinjiang, China[J]. *Xinjiang Geol*, 2002, 20(4): 335–337 (in Chinese with English abstract).
- [25] 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 钱青. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学

- 特征及其年龄[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 65-73.
- Long Ling-li, Gao Jun, Xiong Xian-ming, Qian Qing. The geochemical characteristics and the age of the Kule Lake ophiolite in the southern Tianshan[J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(1): 65-73 (in Chinese with English abstract).
- [26] Ye Mei-fang, Li Xian-hua, Li Wu-xian, Liu Ying, Li Zheng-Xiang. SHRIMP zircon U/Pb geochronological and whole rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block [J]. Gondwana Res, 2007, 12(1/2): 144-156.
- [27] Mezger K, Cosca M A. The thermal history of the Eastern Ghats Belt (India) as revealed by U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of metamorphic and magmatic minerals: Implications for the SWEAT correlation[J]. Precamb Res, 1999, 94(3/4): 251-271.
- [28] Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana? [J]. Geology, 2001, 29(5): 463-466.
- [29] Küster D, Liégeois J-P, Matukov D, Sergeev S, Lucassen F. Zircon geochronology and Sr, Nd, Pb isotope geochemistry of granitoids from Bayuda Desert and Sabaloka (Sudan): Evidence for a Bayudian event (920-900 Ma) preceding the Pan-African orogenic cycle (860-590 Ma) at the eastern boundary of the Saharan Metacraton [J]. Precamb Res, 2008, 164(1/2): 16-39.
- [30] 高振家, 陈晋镰, 陆松年, 彭昌文, 秦正永. 前寒武纪地质第6号: 新疆北部前寒武系 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-171.
- Gao Zhen-jia, Chen Jin-lian, Lu Song-nian, Peng Chang-wen, Qin Zheng-yong. Precambrian Geology No. 6: The Precambrian Geology in Northern Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-171 (in Chinese).
- [31] Lu Songnian, Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Niu Guanghua. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. Precamb Res, 2008, 160(1/2): 94-107.
- [32] 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据 [J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(2): 145-154.
- Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, Ye Haimin. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology [J]. Sci China (D), 2007, 50(6): 825-835.
- [33] Zhang Chuan-lin, Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Lu Song-nian, Ye Hai-min, Li Hui-min. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications [J]. Precamb Res, 2007, 152(3/4): 149-169.
- [34] 胡霏琴, 郝杰, 张国新, 张鸿斌. 新疆东昆仑地区新元古代蛇绿岩 Sm-Nd 全岩-矿物等时线年代及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 457-462.
- Hu Ai-qin, Hao Jie, Zhang Guo-xin, Zhang Hong-bin. Whole-rock and minerals Sm-Nd isochron age of early Neoproterozoic ophiolites and its geological significance in the eastern Kunlun area, Xinjiang, China [J]. Acta Petrol Sinica, 2004, 20(3): 457-462 (in Chinese with English abstract).
- [35] 董云鹏, 周鼎武, 刘良, 张旗, 张宗清. 东秦岭松树沟蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄的地质意义 [J]. 中国区域地质, 1997, 16(1): 217-221.
- Dong Yun-peng, Zhou Ding-wu, Liu Liang, Zhang Qi, Zhang Zong-qing. Sm-Nd isotopic ages of the Songshugou ophiolite from the east Qinling and its geological significance [J]. Reg Geol China, 1997, 16(1): 217-221 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李曙光, 陈移之, 张国伟, 张宗清. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据 [J]. 地质论评, 1991, 37(3): 235-242.
- Li Shu-guang, Chen Yi-zhi, Zhang Guo-wei, Zhang Zong-qing. A 1 Ga B. P. alpine peridotite body emplaced into the Qinling group: Evidence for the existence of the Late Proterozoic plate tectonics in the North Qinling area [J]. Geol Rev, 1991, 37(3): 235-242 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李献华, 周国庆, 赵建新, Fanning C M, Compston W. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. 地球化学, 1994, 23(2): 125-131.
- Li Xian-hua, Zhou Guo-qing, Zhao Jian-xin, Fanning C M, Compston W. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications [J]. Geochimica, 1994, 23(2): 125-131 (in Chinese with English abstract).
- [38] Ling Wen-li, Gao Shan, Zhang Ben-ren, Li Hui-min, Liu Ying, Cheng Jian-ping. Neoproterozoic tectonic evolution of the north-western Yangtze craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent [J]. Precamb Res, 2003, 122(1): 111-140.