

新疆温泉县别珍套山新元古代花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因

曾祥武, 赵 军, 聂晓勇

ZENG Xiangwu, ZHAO Jun, NIE Xiaoyong

原武警黄金第八支队, 新疆 乌鲁木齐 830057

No.8 Gold Geological Party of PAP, Urumqi 830057, Xinjiang, China

摘要:对新疆温泉县别珍套山新元古代花岗岩开展了相关研究。获得了3个片麻状-眼球状花岗岩4件锆石样品年龄,其中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值一致,大多集中在910~950 Ma之间。极少量继承锆石的年龄大于1000 Ma。这些花岗岩以特有的粗粒、巨大的眼球状片麻结构为特征。岩体具有高硅($\geq 70\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, 6.5%~8.9%)且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 的特征,表现出从钙碱性到钾玄岩演化的变化趋势。稀土元素特征表明其与碱性花岗岩相似。样品的微量元素蛛网图几乎完全相同,均明显亏损Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti,富集Rb、Th、U、K等元素,显示活动大陆边缘岩石特征。全岩Sr-Nd同位素特征表明具典型壳源花岗岩(S型花岗岩)的特征。Lu-Hf同位素特征表明单阶段Hf模式年龄(t_{DM1})为883~1351 Ma,平均为1133 Ma;二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})为891~1588 Ma,平均为1250 Ma,与锆石形成年龄较接近。新元古代早期(约9 Ga)片麻状花岗岩可能是与Rodinia超大陆会聚有关的格林维尔期造山作用、地壳增厚导致地壳物质部分熔融的产物。

关键词:花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 新元古代; 温泉县

中图分类号: P534.3; P588.12⁺¹ **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)02/03-0177-17

Zeng X W, Zhao J, Nie X Y. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of Neoproterozoic granitoids in the Biezhentao Mountain of Wenquan County, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(2/3): 177-193

Abstract: The Neoproterozoic granites of the Biezhentao Mountain in Wenquan County of Xinjiang were studied in this paper. Four LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of 910~950 Ma were obtained for granitic gneisses in the Biezhentao Mountain of Wenquan County of Xinjiang. These new zircon LA-ICP MS U-Pb ages, together with previously published data, indicate that the granites were emplaced during 910~950 Ma. A few inherited old zircons U-Pb ages of >1000 Ma were found in all dated samples; they may have derived from the source rocks. 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 ($\geq 70\%$), $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (6.5%~8.9%), and $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, thus defined as calc-alkaline to shoshonitic rocks. These rocks show nearly parallel REE patterns with different abundances and distinct negative Eu anomalies. All the granitoids display similar spider diagrams with obvious negative anomalies of Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti, and obvious enrichment of Rb, Th, U, K. Sr-Nd data suggest that the protoliths of Neoproterozoic granitoids belong to peraluminous S-type granites. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from +1.7 to +5.7, with model ages(t_{DM1}) of 883~1351 Ma and model ages(t_{DM2}) of 891~1588 Ma. Furthermore, with the age information on the ancient terranes of Tarim basin, the authors hold that the Tianshan ancient block probably formed a part of Rodina supercontinent during Early Neoproterozoic period and these granitoid rocks were linked to lithospheric thickening.

Key words: granite; zircon U-Pb age; geochemistry; Neoproterozoic; Wenquan County

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-07-01

资助项目: 中国地质调查局项目《西北华北重点地区地质矿产调查评价》(编号: 12120115041301)

作者简介: 曾祥武(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事多金属矿产勘查工作和区矿调工作。E-mail: tzxw126@126.com

赛里木地块位于温泉县博尔塔拉河断裂以南直至伊犁盆地北缘,发育古元古代变质基底,上覆长城系—震旦系盖层,以及早古生代和晚古生代的沉积地层。其中,古元古界温泉岩群出露区是天山造山带中仅有的几个变质基底出露区之一,是研究天山造山带元古宙陆壳形成、演化的重要场所。元古宙变质岩温泉群主要由片麻岩、片岩、大理岩、角闪岩、石英岩等组成^{[1]①},并含有火山岩和花岗岩^[2]。这些变质岩沿科古琴山—别珍套山呈近东西向出露,一直延伸到哈萨克斯坦境内,被认为是天山基底的一部分^[3-9],是研究天山地区前寒武纪地质历史的重要窗口。温泉岩群在博尔塔拉河南岸别珍套山北坡是在中国境内出露最完整的地区。在1:20万区调报告^①中,新疆温泉县别珍套山新元古代花岗岩被划为温泉岩群的变质岩系,20世纪90年代后,随着测年技术的不断进步,才逐步被识别出来。胡霁琴等^[2,10-12]对温泉岩群中的变质岩进行同位素年代学研究,不同时期采用不同方法获得了不同的年龄结果。胡霁琴等^[2]对眼球状花岗片麻岩开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得年龄值为 913 ± 13 Ma,并认为是其原岩(花岗岩)的形成年龄。胡霁琴等^[11-12]对温泉岩群中片麻状花岗岩和斜长角闪岩开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,其中,片麻状花岗岩的年龄约 920 Ma,斜长角闪岩的年龄为 450~455 Ma;另外,李孔森等^[13]对温泉岩群中的花岗片麻岩、闪长岩(同胡霁琴等研究的斜长角闪岩)、混合岩浅色体同样进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,其结果分别为 907 ± 11 Ma、 452 ± 7 Ma、 $926 \pm$

12 Ma。这些研究工作最有意义之处在于:从温泉岩群中厘定出了变质侵入岩和弱变形侵入岩,分别代表早新元古代和晚奥陶世 2 期重要的岩浆活动。这些学者对该区岩浆岩研究主要偏重于年代学和岩石地球化学方面,缺乏空间分布和野外宏观特征的调查工作,制约了对该区前寒武纪以来构造—岩浆事件的反演。

本文在详细分析前人资料的基础上,通过野外地质调查工作,对 3 个眼球状片麻状—眼球状花岗岩采集了 4 件锆石测年样品开展年代学研究,并结合主量、微量元素和 Sm、Nd、Hf 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及在研究全球 Rodinia 超大陆演化中的意义。

1 区域构造背景及岩体地质

研究区位于中亚造山带新疆境内的西天山北缘,大地构造位置为准噶尔板块(I级)伊犁—伊赛克湖微板块(Ⅱ级)赛里木地块(Ⅲ级)(参见区域地质调查报告(扎冷木特、柯克他乌、牧区医院、牙马特)^②,见图 1。

研究区处于赛里木地块的北缘,古元古界温泉岩群(Pt₁W.)的主体出露于本区,长城系特克斯岩群莫合西萨依岩组(Chm.)呈高角度构造面理与其接触,上覆少量晚古生代沉积地层。其中,温泉岩群主要为一套中深变质岩系,由长英质片麻岩和片岩、角闪岩、大理岩组成,原岩为双峰式火山岩、滨浅海相石英砂岩、长石石英砂岩夹粉砂岩、台地相

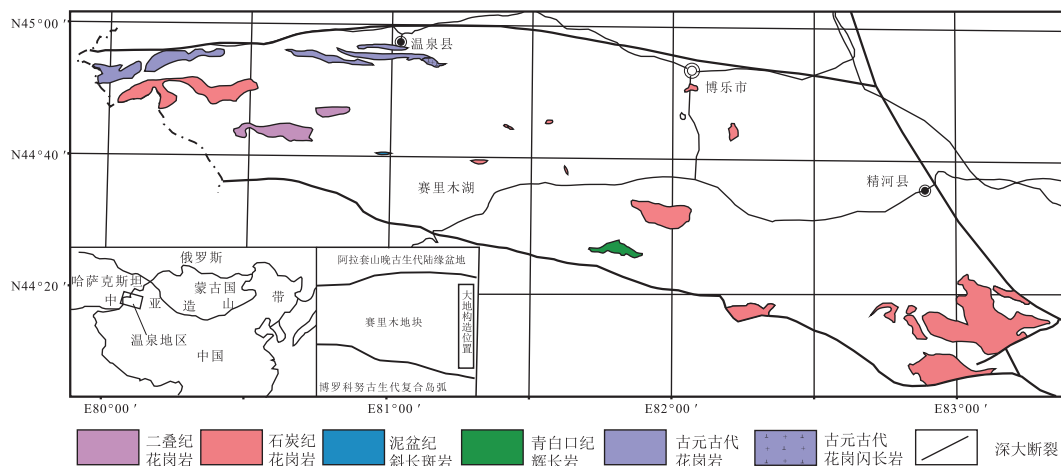


图 1 西天山温泉地区侵入岩分布简图(据参考文献②修改)

Fig. 1 Simplified intrusive rock map of the Wenquan area in West Tianshan

的碳酸盐岩、发育少量基性岩墙,整体沉积环境类似于威尔逊旋回的幼年期;陆壳拉伸、地幔物质上涌、洋盆不断扩展,具有裂陷槽的特点。特克斯岩群莫合西萨依岩组为一套低-中级变质岩系,由变碎屑岩、石英岩、石英片岩、千枚状片岩、千枚岩和碳酸盐岩组成,原岩为滨浅海相石英砂岩、泥页岩和台地相灰岩、白云岩,整体沉积环境类似被动大陆边缘、威尔逊旋回的成年期;洋盆规模不断扩大,接受稳定的陆源碎屑岩沉积。晚古生代沉积地层包括中泥盆统汗吉尕组(D_2h)、上泥盆统托斯库尔他乌组(D_3t)、下石炭统大哈拉军山组(C_1d)和阿克沙克组(C_1a)。其中,泥盆系主要为一套浅海相陆源碎屑岩,含大量植物化石和少量动物化石,沉积环境稳定,无明显海侵、海退过程;下石炭统主要为一套浅海相陆源碎屑岩、酸性火山岩及同质火山碎屑岩,夹少量灰岩,沉积环境为活动大陆边缘(图 2)。

研究区出露的新元古代侵入岩类型单一,为片麻状-眼球状二长花岗岩,主要沿牙马特南山和伊力比斯提北侧一带分布,呈脉状、透镜体状分布,长轴近东西向,与温泉岩群变质岩系呈构造面理接触,后期被奥陶纪闪长岩类侵入。该类岩体数量较多,规模不一,规模较大者包括牙马特南山片麻状-条纹状二长花岗岩和伊力比斯提片麻状-眼球状二长花岗岩。前者沿牙马特南山主脊出露,东西长约 24 km,南北宽 0.5~2 km,局部被断层错断,与温泉岩群托克赛岩组和牙马特岩组呈断层或构造面理

接触,岩体中含大量温泉岩群片岩和斜长角闪岩残留体(图 3-a);后者出露于伊力比斯提韧性剪切带以北,东西长约 13 km,南北宽 200~600 m,南侧与温泉岩群西伯提岩组呈糜棱面理接触,北侧被奥陶纪花岗闪长岩侵入(图 3-b)。

该类岩石类型相对简单,主要岩性为眼球状、条纹状黑云二长花岗片麻岩,受后期变质变形作用改造,呈明显的似层状近东西向展布。总体宏观特征为:①与温泉岩群变质岩系构造面理接触,片麻理产状与主期面理(S_n)一致;②岩性较稳定,横向上无明显变化,纵向具有明显的结构构造变化,一般情况下,从南到北从巨斑状变化为条纹状和条带状;③部分地段含少量角闪石和石榴子石;④岩石中含少量暗色细粒包体和细粒斜长角闪岩残留体,局部地段含大规模云母片岩夹石榴角闪岩残留体,多呈团块状、条带状沿片麻理展布;⑤岩层局部地段发育顺层不对称褶皱,褶皱面为片麻理,轴面近水平。

岩石主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母等组成,具典型的眼球状、条纹状和片麻状构造。眼球主要为钾长石,多呈粗大眼球状,少量为半自形短板状-他形粒状,粒径多为 1~4 cm(长轴),可见明显的卡氏双晶,部分呈条纹状沿片麻理分布。变余基质中,斜长石和钾长石多呈半自形短板状-他形粒状,偶见蠕英石,碎裂化明显,粒径多小于 3 mm,边缘细粒化,多具波状消光,定向分布,二者含量相当,共 50%~60%。石英为他形粒状,粒径 1~3 mm,

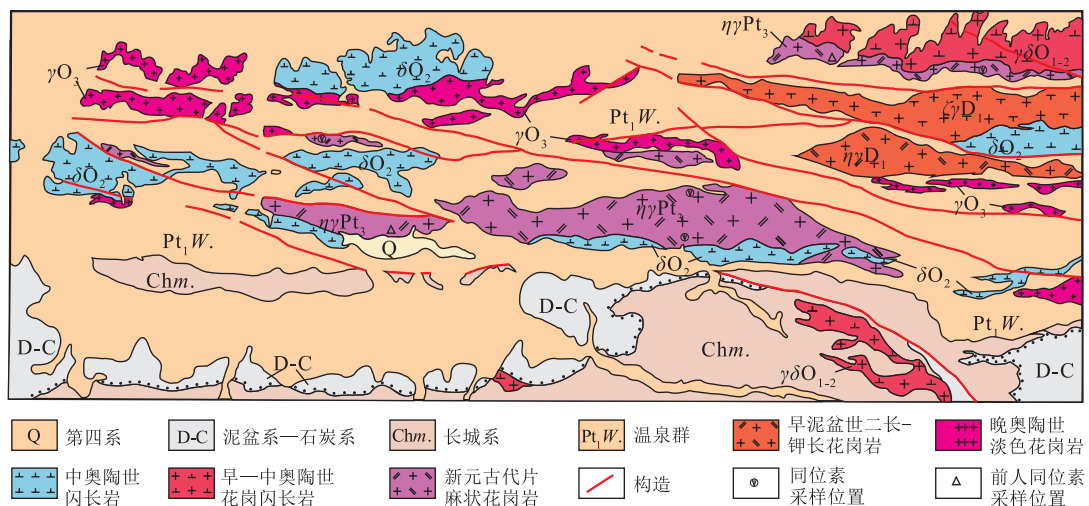


图 2 温泉县别珍套山地质简图(据参考文献②修改)

Fig. 2 Simplified geological map for the Biezhen Tao Mountain of Wenquan County

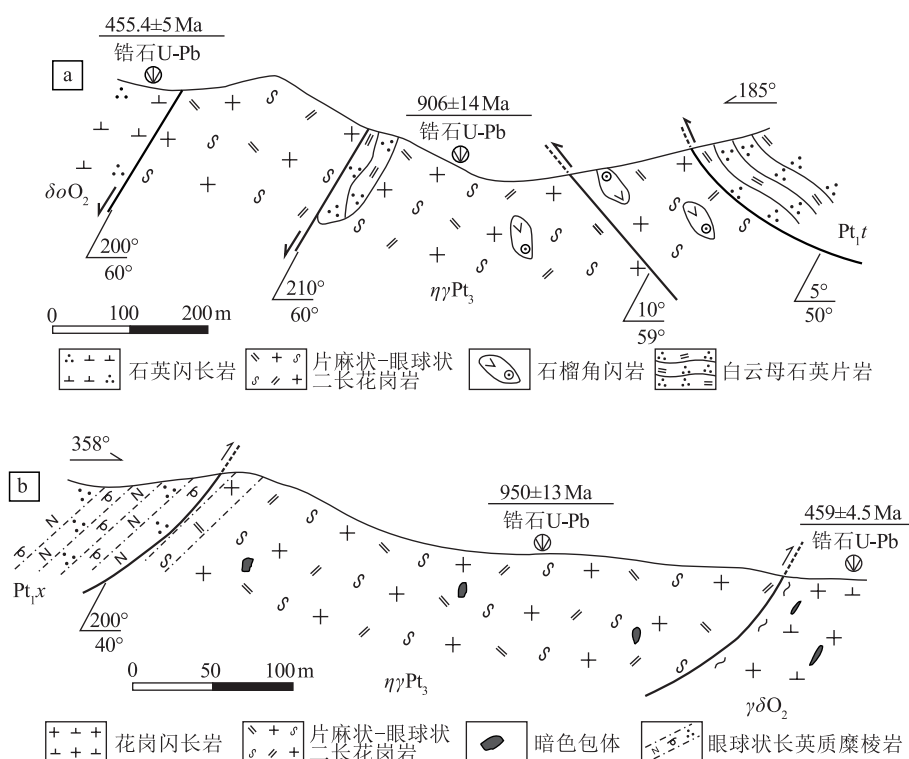


图3 新元古代片麻状-眼球状花岗岩野外特征剖面图

Fig. 3 Simplified geological map for the Biezhentao Mountain of Wenquan County

a—托克赛附近岩体特征示意图;b—夏尔依西根附近岩体特征示意图

细粒化明显,部分发生动态重结晶,具波状消光、变形纹,定向分布,含量 20%~30%。黑云母呈片状,片径多小于 2.0 mm,主要沿长石和石英旁侧不均匀定向分布,构成片麻状构造,含量 5%~10%不等。根据镜下鉴定结果,综合判断该类片麻状-眼球状花岗岩的原岩可能为二长花岗岩和花岗闪长岩。

2 样品概况及测试方法

样品均采自新鲜的岩体露头。岩石试样经锆石单矿物挑选、制备样品靶后,拍摄阴极发光(CL)、透射光图像和反射光图像,选取分析点位;用激光剥蚀等离子体质谱仪原位分析锆石微区的 U-Pb 比值($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)。锆石的 CL 图像分析在武汉上谱公司扫描电镜实验室完成。锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位 U-Pb 定年在中国地质调查局西安地质调查中心完成。

本次样品的主量、稀土及微量元素分析由西安地质调查中心完成。内检样品比例大于 20%,内检

分析原始合格率为 98%。符合相关质量规范要求。Sr-Nd 的化学分析和同位素比值测量在中国科学院地质与地球物理研究所完成,测量仪器为德国 Finnegan 公司 MAT 262 热电离质谱计。

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 New wave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,实验过程中采用氦气作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 55 μm ,测定时使用锆石标样 GJ-1 和 Plesovice 为参考物质,分析点接近 U-Pb 定年分析点位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等^[14]。

3 锆石 U-Pb 年代学

本次对区内 3 个眼球状片麻状-眼球状花岗岩采集了 4 件锆石测年样品开展年代学研究,测试结果见表 1。

表 1 新元古代片麻状花岗岩锆石 U-Th-Pb 年龄测试结果
Table 1 Zircon U-Th-Pb dating results of Neoproterozoic granitoids

测点	Pb (总量)	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度/%		
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
PM16-2-TW1															
1	122	78	688	0.11	0.0681	0.0017	1.524	0.039	0.1624	0.0024	870	50	940	16	96.9
2	172	253	948	0.27	0.0666	0.0014	1.504	0.034	0.1638	0.0023	826	44	932	14	978
3	178	159	1066	0.15	0.0674	0.0014	1.419	0.031	0.1527	0.0022	849	42	897	13	916
4	216	1387	1026	1.35	0.0669	0.0014	1.356	0.030	0.1471	0.0021	834	43	870	13	885
5	127	157	662	0.24	0.0726	0.0017	1.670	0.040	0.1668	0.0024	1003	46	997	15	995
6	507	619	3233	0.19	0.0691	0.0010	1.375	0.023	0.1444	0.0020	901	29	879	10	870
7	473	810	2945	0.28	0.0693	0.0010	1.409	0.024	0.1475	0.0020	908	30	893	10	887
8	233	180	1389	0.13	0.0671	0.0013	1.419	0.029	0.1535	0.0022	839	39	897	12	921
9	160	100	948	0.11	0.0662	0.0015	1.417	0.033	0.1553	0.0022	812	46	896	14	931
10	173	184	1040	0.18	0.0685	0.0015	1.437	0.032	0.1521	0.0022	884	43	904	13	913
12	204	617	1316	0.47	0.0716	0.0014	1.392	0.030	0.1411	0.0020	973	40	885	13	851
13	187	135	1109	0.12	0.0664	0.0014	1.425	0.032	0.1556	0.0022	820	44	899	13	932
14	139	193	749	0.26	0.0669	0.0016	1.526	0.038	0.1655	0.0024	834	49	941	15	987
15	62	120	351	0.34	0.0675	0.0024	1.432	0.051	0.1540	0.0025	853	72	903	21	923
16	182	135	1124	0.12	0.0673	0.0014	1.391	0.031	0.1500	0.0022	846	42	885	13	901
17	136	114	795	0.14	0.0679	0.0015	1.459	0.035	0.1560	0.0023	865	46	914	14	934
18	327	192	1985	0.10	0.0673	0.0011	1.420	0.026	0.1532	0.0021	846	34	897	11	919
19	234	1135	1436	0.79	0.0691	0.0013	1.427	0.028	0.1498	0.0021	902	37	900	12	900
20	149	109	872	0.13	0.0675	0.0014	1.480	0.033	0.1592	0.0023	852	43	922	13	952
PM18-61-TW1															
1	222	346	1337	0.26	0.0679	0.0014	1.407	0.032	0.1504	0.0023	866	42	892	13	903
2	206	474	1171	0.40	0.0725	0.0017	1.499	0.038	0.1502	0.0024	999	47	930	15	902
3	320	344	1889	0.18	0.0696	0.0014	1.498	0.033	0.1561	0.0024	918	41	929	14	935
4	293	338	1694	0.20	0.0699	0.0015	1.521	0.036	0.1580	0.0024	925	44	939	14	945
5	276	369	1471	0.25	0.0721	0.0018	1.652	0.043	0.1664	0.0026	987	49	990	17	992
6	598	1050	3253	0.32	0.0717	0.0013	1.588	0.033	0.1609	0.0025	977	38	966	13	962
7	237	907	1313	0.69	0.0744	0.0023	1.593	0.050	0.1556	0.0026	1051	60	968	20	932

续表 1-1

测点	Pb (总量)	²³² Th /10 ⁻⁶	²³⁸ U	Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和 度/%				
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
8	244	240	1408	0.17	0.0703	0.0018	1.546	0.042	0.1596	0.0025	937	52	949	17	955	14	99.4
9	836	2128	4386	0.49	0.0845	0.0016	1.770	0.037	0.1520	0.0023	1305	35	1035	13	912	13	113.5
10	396	511	2118	0.24	0.0737	0.0019	1.677	0.046	0.1651	0.0026	1034	51	1000	17	985	15	101.5
11	392	691	2348	0.29	0.0713	0.0015	1.467	0.035	0.1494	0.0023	966	43	917	14	898	13	102.1
12	195	344	1040	0.33	0.0769	0.0022	1.724	0.051	0.1628	0.0027	1118	56	1018	19	972	15	104.7
13	221	442	1231	0.36	0.0707	0.0019	1.518	0.042	0.1558	0.0025	949	53	938	17	934	14	100.4
14	296	413	1619	0.26	0.0696	0.0015	1.570	0.037	0.1637	0.0025	917	44	958	15	977	14	98.1
15	195	212	1065	0.20	0.0716	0.0019	1.656	0.046	0.1678	0.0027	975	53	992	18	1000	15	99.2
16	284	522	1594	0.33	0.0728	0.0016	1.573	0.038	0.1568	0.0024	1010	44	960	15	939	14	102.2
17	191	331	1064	0.31	0.0683	0.0019	1.481	0.043	0.1573	0.0027	877	55	923	18	942	15	98.0
18	416	544	2399	0.23	0.0701	0.0014	1.506	0.034	0.1557	0.0026	931	40	933	14	933	14	100.0
19	194	376	1091	0.34	0.0689	0.0020	1.474	0.045	0.1551	0.0027	896	59	920	19	930	15	98.9
20	296	460	1656	0.28	0.0688	0.0017	1.496	0.040	0.1576	0.0027	893	51	929	16	944	15	98.4
21	314	503	1621	0.31	0.0770	0.0020	1.781	0.050	0.1677	0.0029	1121	52	1039	18	999	16	104.0
22	244	368	1329	0.28	0.0694	0.0019	1.562	0.046	0.1632	0.0028	911	56	955	18	974	16	98.0
23	231	367	1217	0.30	0.0689	0.0019	1.587	0.047	0.1671	0.0029	895	57	965	19	996	16	96.9
24	269	485	1434	0.34	0.0684	0.0018	1.545	0.044	0.1637	0.0028	882	55	949	18	977	16	97.1
25	194	209	1063	0.20	0.0694	0.0021	1.585	0.049	0.1656	0.0029	910	60	964	19	988	16	97.6
PM11-30-TW1																	
1	209	380	1179	0.32	0.0714	0.0015	1.433	0.032	0.1455	0.0021	969	42	903	13	876	12	103.1
2	186	290	1081	0.27	0.0689	0.0015	1.352	0.031	0.1424	0.0020	896	45	869	13	858	11	101.3
4	57	97	302	0.32	0.0684	0.0028	1.451	0.059	0.1540	0.0026	879	82	910	24	923	14	98.6
5	120	258	609	0.42	0.0685	0.0020	1.476	0.045	0.1563	0.0024	884	60	921	18	936	13	98.4
6	89	195	471	0.41	0.0702	0.0025	1.430	0.050	0.1478	0.0023	933	70	902	21	889	13	101.5
8	62	143	321	0.44	0.0827	0.0034	1.662	0.067	0.1458	0.0025	1262	78	994	26	877	14	113.3
9	135	267	693	0.39	0.0690	0.0019	1.506	0.043	0.1582	0.0024	900	57	933	18	947	13	98.5
10	53	123	266	0.46	0.0749	0.0032	1.591	0.068	0.1541	0.0027	1066	84	967	26	924	15	104.7
11	35	120	181	0.67	0.0664	0.0039	1.345	0.077	0.1470	0.0028	818	117	865	34	884	16	97.9
12	52	139	274	0.51	0.0712	0.0031	1.454	0.063	0.1481	0.0026	963	86	911	26	890	14	102.4

续表 1-2

测点	Pb (总量)	²³² Th / ^{10⁻⁶}	²³⁸ U	Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和 度/%				
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
13	97	187	500	0.37	0.0701	0.0022	1.506	0.047	0.1559	0.0024	931	62	933	19	934	13	99.9
14	38	114	191	0.60	0.0693	0.0035	1.447	0.073	0.1516	0.0028	907	101	909	30	910	15	99.9
15	108	223	551	0.40	0.0679	0.0020	1.457	0.043	0.1557	0.0023	866	59	913	18	933	13	97.9
16	66	169	354	0.48	0.0704	0.0025	1.392	0.050	0.1435	0.0023	939	71	885	21	864	13	102.4
17	56	111	281	0.39	0.0699	0.0026	1.536	0.057	0.1595	0.0026	924	75	945	23	954	14	99.1
18	81	202	414	0.49	0.0700	0.0022	1.455	0.046	0.1507	0.0023	929	63	912	19	905	13	100.8
19	66	161	340	0.47	0.0673	0.0024	1.412	0.050	0.1522	0.0024	848	71	894	21	913	13	97.9
21	41	113	211	0.54	0.0718	0.0032	1.455	0.063	0.1471	0.0025	979	87	912	26	885	14	103.1
22	80	190	399	0.48	0.0691	0.0023	1.479	0.050	0.1554	0.0024	901	67	922	20	931	13	99.0
PM16-11-TW3																	
1	72	186	395	0.47	0.063	0.0033	1.337	0.070	0.1541	0.0029	708	108	862	31	924	16	93.3
2	154	534	807	0.66	0.0715	0.0022	1.535	0.048	0.1558	0.0026	970	61	944	19	934	14	101.1
3	110	273	605	0.45	0.0713	0.0026	1.537	0.056	0.1565	0.0027	965	72	945	23	937	15	100.9
4	96	185	516	0.36	0.0695	0.0027	1.549	0.061	0.1616	0.0029	914	78	950	24	966	16	98.3
5	123	258	712	0.36	0.0706	0.0025	1.464	0.053	0.1504	0.0026	947	71	916	22	903	15	101.4
6	69	166	375	0.44	0.0723	0.0038	1.555	0.082	0.156	0.0032	995	104	952	32	934	18	101.9
7	35	73	175	0.42	0.0747	0.0057	1.687	0.126	0.1639	0.004	1060	146	1004	48	978	22	102.7
8	40	123	218	0.57	0.0698	0.005	1.472	0.104	0.1531	0.0035	922	140	919	43	918	20	100.1
9	56	154	319	0.48	0.0684	0.0042	1.363	0.083	0.1447	0.0031	880	123	873	36	871	17	100.2
10	78	207	418	0.49	0.0696	0.0033	1.506	0.070	0.157	0.003	917	93	933	29	940	17	99.3
11	97	163	543	0.3	0.0712	0.0028	1.524	0.060	0.1553	0.0028	963	78	940	24	931	15	101.0
12	47	134	272	0.49	0.0686	0.0033	1.382	0.066	0.1462	0.0028	885	96	881	28	880	16	100.1
13	207	544	1216	0.45	0.0689	0.0016	1.382	0.035	0.1454	0.0023	897	47	881	15	875	13	100.7
15	88	229	493	0.46	0.072	0.0025	1.496	0.053	0.1507	0.0026	985	70	929	22	905	15	102.7
16	59	154	332	0.46	0.0645	0.0033	1.335	0.067	0.1501	0.0028	758	103	861	29	902	16	95.5
17	61	102	379	0.27	0.0687	0.003	1.380	0.061	0.1456	0.0027	890	88	880	26	876	15	100.5
18	119	212	717	0.29	0.0694	0.0022	1.397	0.046	0.1461	0.0025	909	65	888	19	879	14	101.0
19	45	118	250	0.47	0.0711	0.0037	1.508	0.077	0.1538	0.0031	960	102	934	31	922	17	101.3
20	61	151	336	0.45	0.0703	0.0031	1.480	0.065	0.1527	0.0028	937	88	922	27	916	16	100.7

注:谐和度= $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})$

PM16-18-TW2: 岩性为片麻状花岗岩, 锆石晶形较完好, 存在颗粒破碎的锆石晶体, 多为长柱状, 长宽比介于 1:1~3:1 之间, 呈浑圆状, 根据锆石晶体阴极发光图, 锆石由核、边结构组成, 核、边均发育岩浆成因的韵律环带, 环带清晰, 应为岩浆锆石(图 4)。本次在该样品中选取 20 个点进行年龄测试, 测试结果见表 1, Th 含量为 $73 \times 10^{-6} \sim 544 \times 10^{-6}$, U 为 $175 \times 10^{-6} \sim 1216 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.27~0.66, 应为岩浆锆石。由锆石年龄谐和图(图 5)可知, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 871~978 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 911 ± 13 Ma ($n=20$), 代表了片麻状花岗岩形成年龄。

PM16-2-TW1: 岩性为片麻状花岗岩, 锆石晶形较完好, 存在颗粒破碎的锆石晶体, 多为长柱状, 长宽比介于 1:5~3:1 之间, 呈浑圆状, 根据锆石晶体阴极发光图, 锆石由核、边结构组成, 核、边均发育岩浆成因的韵律环带, 环带清晰, 应为岩浆锆石(图 4)。本次在该样品中选取了 19 个点进行年龄测试, 测试结果见表 1, Th 含量为 $78 \times 10^{-6} \sim 1387 \times 10^{-6}$, U 为 $351 \times 10^{-6} \sim 3233 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.10~

1.35, 应为岩浆锆石。锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 851~995 Ma 之间(图 5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 920 ± 19 Ma ($n=19$), 代表了片麻状花岗岩形成年龄。

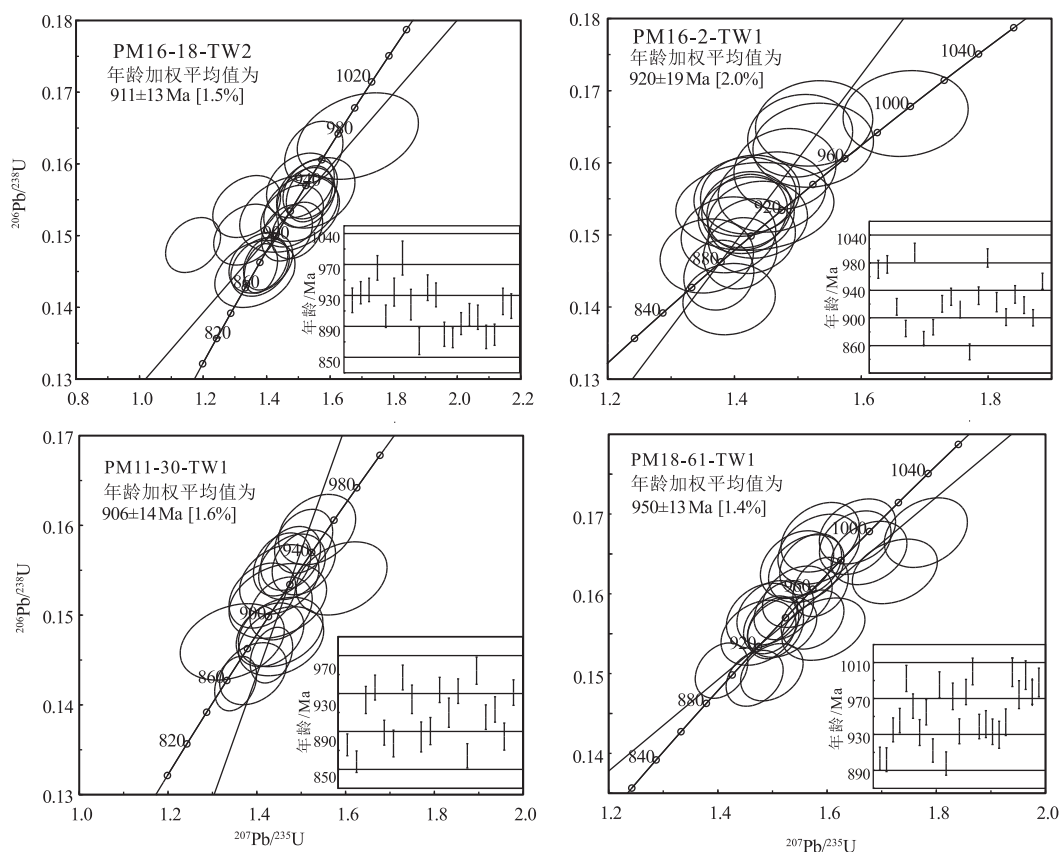
PM18-61-TW1: 岩性为片麻状花岗岩, 锆石晶形较完好, 存在颗粒破碎的锆石晶体, 多为短柱状, 长宽比介于 1:1~2.5:1 之间, 呈浑圆状, 根据锆石晶体阴极发光图, 锆石由核、边结构组成, 核、边均发育岩浆成因的韵律环带, 环带清晰, 应为岩浆锆石(图 4)。本次在该样品中选取 25 个点进行年龄测试, 测试结果见表 1, Th 的变化范围为 $209 \times 10^{-6} \sim 2128 \times 10^{-6}$, U 的变化范围为 $1040 \times 10^{-6} \sim 4386 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.17~0.69, 应为岩浆锆石。锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 898~1000 Ma 之间(图 5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 950 ± 13 Ma ($n=25$), 代表了片麻状花岗岩形成年龄。

PM11-30-TW1: 岩性为片麻状花岗岩, 锆石晶形较完好, 存在颗粒破碎的锆石晶体, 多为短柱状, 长宽比为 1:1~3:1, 呈浑圆状, 根据锆石晶体阴极



图 4 锆石阴极发光 (CL) 图像、U-Pb 年龄分析点 (实线圈) 及 Lu-Hf 同位素分析点 (虚线圈) 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 4 CL images, analytical points for U-Pb (solid circles), analytical points for Lu-Hf isotope (dashed circles) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons

图 5 花岗岩锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值图Fig. 5 U-Pb concordia diagrams and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons for the granitic gneiss

发光图, 锆石由核、边结构组成, 核、边均发育岩浆成因的韵律环带, 环带清晰, 应为岩浆锆石 (图 4)。本次在该样品中选取了 19 个点进行年龄测试, 测试结果见表 1。Th 含量为 $97 \times 10^{-6} \sim 380 \times 10^{-6}$, U 含量为 $181 \times 10^{-6} \sim 1179 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.27~0.67, 应为岩浆锆石。由锆石年龄谐和图 (图 5) 可知, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 858~954 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 906 ± 14 Ma ($n=19$), 代表了片麻状花岗岩形成年龄。

综上所述, 4 件样品的锆石 Th/U 值为 0.10~1.35, 大于 0.1 (仅 1 个为 0.10), 表明锆石为岩浆成因。呈棱柱状自形晶, 晶形较大, 大多大于 100 μm , 发育明显的振荡环带 (图 4)。对每件样品测试了 19~25 个点, 年龄值一致, 大多集中在 910~950 Ma, 与前人的研究结果一致 (表 1)。极少量继承锆石的年龄大于 1000 Ma。因此, 910~950 Ma 能代表该类花岗岩的形成时代 (图 5)。

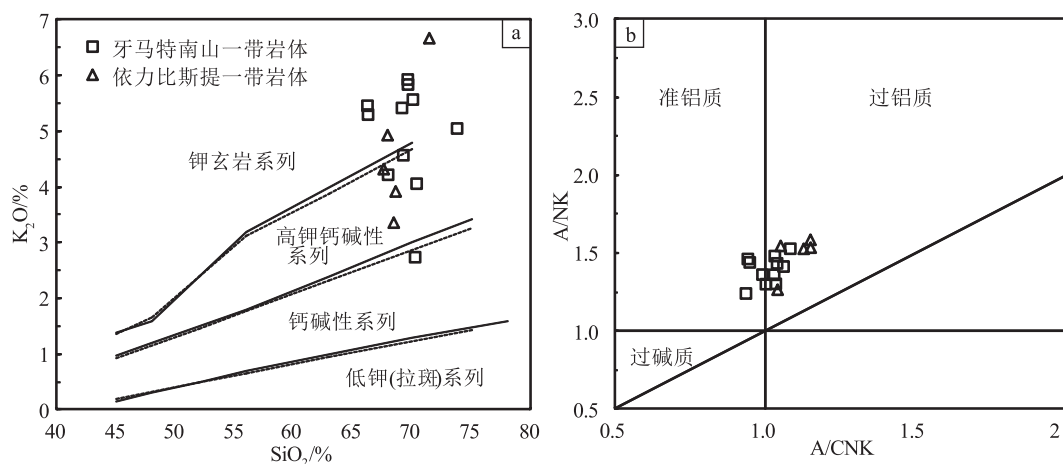
4 元素地球化学

4.1 主量和微量元素

本次在研究区 4 个岩体的不同部位分别采集了 16 件样品进行岩石地球化学分析, 分析结果见表 2、表 3、表 4。

(1) 主量元素

从分析结果看, 16 件样品的主量元素具有高硅 ($\geq 70\%$)、富碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, 6.5%~8.9%) 且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 的特征, 在 SiO_2 - K_2O 岩石系列判别图解中, 绝大多数样品均落在高钾钙碱性和钾玄岩系列, 仅 1 个样品为钙碱性, 且样品表现出从钙碱性到钾玄岩演化的变化趋势 (图 6)。在铝质判别图中, 牙马特南山一带的片麻状-眼球状花岗岩样品属于准铝质-过铝质花岗岩, A/CNK 值为 0.94~1.08; 伊力比斯提一带的片麻状-眼球状花岗岩则为过铝质花岗岩, A/CNK 值为 1.04~1.15。表明两地的片麻状-

图6 SiO_2 - K_2O 图解(a)和铝质判别图解(b)Fig. 6 The K_2O versus SiO_2 diagram(a) and Shand's index $\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})$ versus $\text{Al}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ plots(b)

眼球状花岗岩在岩石成因上有一定差别,后者主要与地壳物质重熔有关,而前者可能有更多火成岩重熔形成的岩浆参与。

(2) 稀土和微量元素

在稀土元素配分曲线中,所有样品的曲线形态相近,整体为右倾,LREE/HREE 值介于 6.2~13.22 之间, La_N/Yb_N 值介于 6.45~19.2 之间。具明显的负 Eu 异常, δEu 值介于 0.34~0.59 之间,配分曲线表现出近似“V”型曲线(图 7-a),与碱性花岗岩相似。

在微量元素蛛网图中,16 件样品的特征一致,富集 Rb、Th、U、K 等元素,贫 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素,显示活动大陆边缘岩石特征(图 7-b)。

4.2 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征

(1) 全岩 Sr-Nd 同位素特征

在岩石地球化学分析基础上,本次选择了 9 件

样品进行全岩 Sr-Nd 同位素示踪,分析结果见表 5。

从分析结果看,样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较分散,其中 2 件样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值小于 0.704,主要由于样品本身具有较高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值,导致初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值存在很大误差而不可信;另有 3 件样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于 0.712。Nd 同位素的组成整体较集中,绝大多数样品的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均小于 0,仅 1 个样品为 0.01,变化于 -5.27~0.01 之间,平均值为 -2.43,与胡霁琴等^[2]的测试结果一致。在 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关图(图 8-a)中,所有样品点的锶钕同位素呈近水平相关性,即初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值很分散,而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围较小,具典型壳源花岗岩(S 型花岗岩)的特征。所有样品的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值介于 -0.37~-0.42

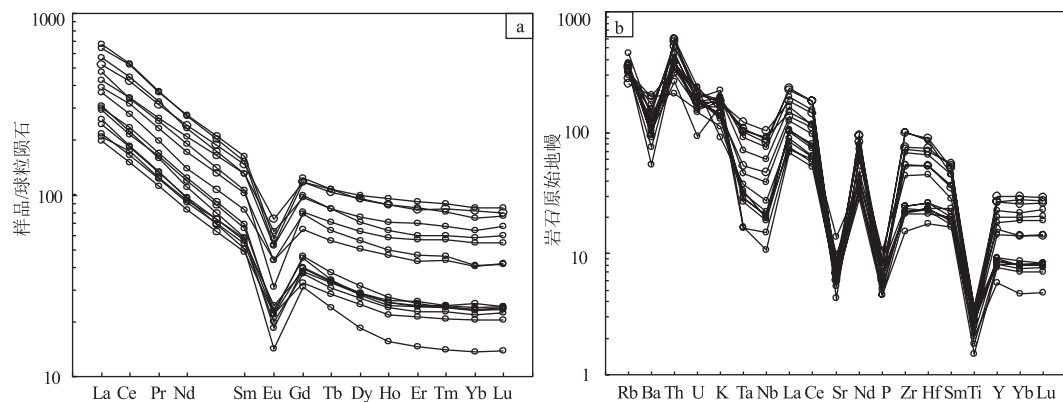


图7 稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and multi-element variation diagrams(b)

表 2 新元古代早期片麻状-眼球状花岗岩主量元素分析结果

Table 2 Abundances of major elements of Neoproterozoic granitoids

样号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	烧失量	H ₂ O ⁺	CO ₂	总量	Na ₂ O+K ₂ O	A/CNK	%
PM11-30-HQ1	片麻状-眼球状花岗岩	66.18	13.26	2.11	5.35	2.77	0.51	5.31	2	0.79	0.19	0.12	1.21	0.54	0.096	100.44	7.31		0.94
PM11-30-HQ2		69.04	12.96	2.03	3.75	1.98	0.44	5.43	2.19	0.61	0.14	0.1	1.17	0.68	0.032	100.55	7.62		0.99
PM11-30-HQ3		69.53	13.27	1.28	3.52	1.47	0.45	5.94	2.26	0.55	0.13	0.09	1.32	0.56	0.033	100.4	8.2		1.03
PM11-30-HQ4		69.96	12.85	1.7	3.42	1.64	0.55	5.58	2.31	0.6	0.13	0.08	0.99	0.58	0.082	100.47	7.89		1.00
PM11-42-HQ1		67.87	13.99	1.25	4.5	2.28	0.86	4.23	2.94	0.73	0.23	0.09	0.84	0.24	0.012	100.06	7.17		1.03
PM11-42-HQ2		69.16	13.88	1.45	3.48	2.04	0.62	4.58	2.85	0.54	0.18	0.08	0.95	0.44	<0.01	100.25	7.43		1.04
PM16-2-HQ1		73.69	12.45	1.06	1.74	1.64	0.62	5.06	2.21	0.39	0.11	0.04	0.8	0.32	0.13	100.26	7.27		1.03
PM16-2-HQ4		69.55	13.32	1.66	2.5	1.95	0.49	5.85	2.65	0.55	0.13	0.06	1.12	0.34	0.362	100.53	8.5		0.94
PM16-11-HQ1	糜棱岩化眼	70.28	14.21	1.01	2.08	1.86	1.04	4.07	3.41	0.48	0.1	0.04	1.25	0.55	0.33	100.71	7.48		1.06
PM16-11-HQ3	球状花岗岩	70.15	14.7	0.99	2.65	2.19	0.71	2.75	4.02	0.45	0.12	0.06	0.98	0.4	0.094	100.26	6.77		1.08
PM16-18-HQ2	片麻状-眼球状花岗岩	66.13	13.5	2.01	4.8	2.69	0.59	5.47	2.08	0.79	0.19	0.12	1.43	0.48	0.407	100.69	7.55		0.95
PM16-101-HQ2		68.35	13.91	1.47	3.42	1.84	1.58	3.37	3.1	0.69	0.17	0.07	1.83	<0.01	0.276	100.08	6.47		1.15
PM16-101-HQ3		67.83	14.37	1.67	2.92	1.85	1.39	4.94	2.45	0.63	0.15	0.07	1.52	0.96	0.078	100.83	7.39		1.13
PM18-61-YQ1	糜棱岩化眼球状花岗岩	71.35	13.74	0.8	1.42	1.31	0.76	6.68	2.18	0.32	0.1	0.04	1.1	0.72	0.081	100.6	8.86		1.04
PM18-61-YQ2		67.5	14.36	1.83	2.48	2.42	1.34	4.33	2.78	0.59	0.14	0.06	1.97	1.32	0.033	101.15	7.11		1.05
PM18-61-YQ3		68.51	13.92	1.76	2.72	1.68	1.54	3.93	2.91	0.62	0.14	0.06	2	1.48	0.117	101.39	6.84		1.15

表 3 新元古代早期片麻状-眼球状花岗岩稀土元素分析结果

Table 3 Abundances of rare earth elements of Neoproterozoic granitoids

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	La _N / Yb _N
10 ⁻⁶																					
PM11-30-HQ1	片麻状-眼球状花岗岩	124	259	29.6	113	22.5	4.27	24.3	3.88	24.2	5	13.7	2.13	13.8	2.02	122	641.40	552.37	89.03	6.20	6.45
PM11-30-HQ2		152	319	34.9	128	24.8	3.31	25.4	4.01	25.3	5.38	15.2	2.28	14.5	2.16	136	756.24	662.01	94.23	7.03	7.52
PM11-30-HQ3		136	274	31	108	20.1	3.06	20.3	3.12	19.2	4	11.5	1.71	10.8	1.7	103	644.49	572.16	72.33	7.91	9.03
PM11-30-HQ4		160	321	35.2	127	23.5	3.09	24.3	4.01	23.8	4.99	14.1	2.06	12.7	1.95	123	757.70	669.79	87.91	7.62	9.04
PM11-42-HQ1	片麻状-眼球状花岗岩	92.6	194	22	80.5	15.7	2.54	16.1	2.4	14.2	2.8	7.69	1.17	6.92	1.05	72.5	459.67	407.34	52.33	7.78	9.60
PM11-42-HQ2		86.4	171	18.9	65.2	12.7	2.53	13.3	2.1	12.8	2.63	7.17	1.11	6.91	1.06	65	403.81	356.73	47.08	7.58	8.97
PM16-2-HQ1		49.8	106	11.8	43.5	8.84	1.27	8.17	1.26	7.26	1.45	4.06	0.63	4.06	0.62	37.4	248.72	221.21	27.51	8.04	8.80
PM16-2-HQ4		112	206	24.2	89.2	16.2	1.81	16.5	2.66	15.9	3.3	9.36	1.45	9.31	1.38	82.8	509.27	449.41	59.86	7.51	8.63
PM16-11-HQ1	糜棱岩化眼球状花岗岩	73.2	136	15	51.2	8.89	1.07	8.12	1.25	7.28	1.48	4.28	0.63	4.28	0.62	42.2	313.30	285.36	27.94	10.21	12.27
PM16-11-HQ3		62.1	114	12.8	44.7	7.68	0.83	6.4	0.9	4.7	0.88	2.41	0.36	2.32	0.35	25.9	260.43	242.11	18.32	13.22	19.20
PM16-18-HQ2	片麻状-眼球状花岗岩	101	209	25.1	98	20	3.66	19.9	3.12	18	3.6	9.87	1.52	9.86	1.52	91.6	524.15	456.76	67.39	6.78	7.35
PM16-101-HQ2		69.1	131	15.5	55.7	9.95	1.33	9.22	1.27	7.16	1.4	4	0.62	3.96	0.61	39.9	310.82	282.58	28.24	10.01	12.52
PM16-101-HQ3		51.6	101	11.7	42.6	8.23	1.16	7.6	1.15	6.81	1.36	3.78	0.58	3.71	0.57	37	241.85	216.29	25.56	8.46	9.98
PM18-61-YQ1		47	92.4	10.6	38.4	7.38	1.28	6.77	1.06	6.32	1.24	3.52	0.53	3.49	0.52	34.7	220.51	197.06	23.45	8.40	9.66
PM18-61-YQ2	糜棱岩化眼球状花岗岩	57.8	112	12.5	45.3	8.52	1.42	7.77	1.23	7.17	1.45	4.02	0.61	3.92	0.6	39.6	264.31	237.54	26.77	8.87	10.58
PM18-61-YQ3		71.3	144	16.1	57.6	10.5	1.28	9.42	1.4	7.97	1.55	4.16	0.61	3.96	0.59	41.6	330.44	300.78	29.66	10.14	12.92

表 4 新元古代早期片麻状-眼球状花岗岩微量元素分析结果

Table 4 Abundances of trace elements of Neoproterozoic granitoids

10⁻⁶

样号	岩性	Pb	Cr	Ni	Co	Rb	Cs	Sr	Ba	V	Nb	Ta	Zr	Hf	Ge	U	Th
PM11-30-HQ1	片麻状-眼球状花岗岩	37	3.81	3.42	3.56	162	2.72	153	1410	15	73.2	5.02	1110	27.7	1.75	3.73	28.5
PM11-30-HQ2		41.2	2.73	2.07	2.7	180	1.56	126	1080	10.8	62.4	4.38	816	21.5	1.79	4.36	43.8
PM11-30-HQ3		43.5	3.45	2.25	2.95	204	2.02	156	1200	12	53.8	3.78	771	20.3	1.5	3.72	38.2
PM11-30-HQ4		39.6	3.4	3.3	3.13	217	2.82	142	1010	13.3	58.5	4.18	854	22.9	1.54	4.55	47.7
PM11-42-HQ1		26.5	20.1	8.17	5.39	226	9.97	142	647	38.3	33.7	2.2	596	16.3	1.82	3.7	50.9
PM11-42-HQ2		29.3	7.02	4.43	3.07	235	7.95	133	661	26.4	27.5	1.88	491	13.9	1.81	5	50.5
PM16-2-HQ1		42	11.4	5.63	4.06	204	4.7	185	729	28.3	10.7	0.67	275	8.06	1.45	1.94	22.6
PM16-2-HQ4		37.7	4.39	2.76	3.71	228	3.24	90.3	680	18.7	43.4	2.91	610	16.3	1.84	3.4	33.4
PM16-11-HQ1	糜棱岩化眼球状花岗岩	53	16	6.66	6.33	190	3.38	288	890	34.2	14	1.36	239	6.64	1.22	4.12	31.2
PM16-11-HQ3		31.2	7.54	3.82	4.7	211	5.75	206	383	27.1	19.6	1.52	264	6.97	1.47	4.92	31.1
PM16-18-HQ2	片麻状-眼球状花岗岩	38.8	4.61	3.02	4.44	199	3.13	180	1370	19.4	65.1	4.25	1140	26.4	1.66	3.26	18
PM16-101-HQ2		25.8	22.3	8.98	9.04	202	9.01	185	534	57.2	15.8	1.3	278	8.12	1.52	3.09	32
PM16-101-HQ3		48.3	19.5	7.94	8.43	241	8.01	152	769	52.8	14.8	1.16	248	7.36	1.43	3.42	25.9
PM18-61-YQ1	糜棱岩化眼球状花岗岩	54.6	11.2	5.49	4.1	289	2.89	130	936	22.6	7.68	0.68	171	5.42	1.66	4.05	32.4
PM18-61-YQ2		41.8	24.1	8.48	8.52	211	2.77	113	836	51.4	13.5	1.1	246	7.12	1.64	3.74	29.7
PM18-61-YQ3		36.9	22.4	8.6	9.42	209	3.31	126	732	51	14.5	1.2	251	7.36	1.42	3.96	37.8

之间,表明 Nd 同位素的测试结果可靠,第一阶段 t_{DM1} 和第二阶段 t_{DM2} 模式年龄一致,很好地印证了这一点(表 5)。所有样品的 t_{DM1} 模式年龄介于 1588~2001 Ma 之间,远大于岩体形成年龄。

(2) 锆石 Lu-Hf 同位素特征

本次对 3 件样品共 30 颗锆石测试了 Lu-Hf 同位素,其中 3 颗锆石的测试结果误差较大,予以剔除,剩余 27 个点的测试结果见表 6。绝大多数锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值小于 0.002,仅 2 颗锆石大于 0.002,

显示锆石形成后具有较低的放射性成因 Hf 的积累。样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.282285~0.282644 之间,根据锆石 U-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) 同位素年龄(858~1080 Ma)计算获得 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.64~13.59。单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 883~51351 Ma,平均为 1133 Ma;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 891~1588 Ma,平均为 1250 Ma,与锆石形成年龄较接近。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解上,所有数据点均落于亏损地幔线与球粒陨石线之间,靠近亏损地幔线一侧(图 8-b)。

表 5 新元古代片麻状花岗岩 Sr-Nd 同位素测试结果
Table 5 Abundances of Sr-Nd of Neoproterozoic granitoids

样号	PM11-30 -HQ1	PM11-30 -HQ2	PM16-2 -HQ1	PM16-2 -HQ4	PM11-42 -HQ1	PM11-42 -HQ2	PM16-101 -HQ2	PM16-101 -HQ3	PM18-61 -YQ3
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2.923055	3.389836	2.773318	6.528700	4.065300	4.572700	2.796500	4.023900	4.511800
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.755071	0.761995	0.745629	0.787613	0.755898	0.764290	0.745911	0.764920	0.766481
2σ	0.000015	0.000015	0.000013	0.000017	0.000016	0.000015	0.000011	0.000021	0.000017
I_{Sr}	0.717223	0.718102	0.709161	0.701763	0.702440	0.704160	0.708695	0.711370	0.705204
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.122363	0.117179	0.122589	0.113100	0.121200	0.116300	0.112900	0.117400	0.113800
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512140	0.512120	0.512034	0.512043	0.512183	0.512135	0.511907	0.511884	0.511856
2σ	0.000008	0.000008	0.000011	0.000010	0.000007	0.000010	0.000011	0.000010	0.000006
锆石年龄/ Ma	906	906	920	920	920	920	931	931	950
$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	-9.71	-10.10	-11.79	-11.61	-8.88	-9.81	-14.26	-14.71	-15.25
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	-1.10	-0.88	-3.07	-1.77	0.01	-0.35	-4.29	-5.27	-5.19
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.38	-0.40	-0.38	-0.43	-0.38	-0.41	-0.43	-0.40	-0.42
t_{DM1}/Ma	1685	1626	1866	1677	1594	1588	1877	2001	1971
t_{DM2}/Ma	1650	1632	1820	1715	1571	1600	1928	2007	2016

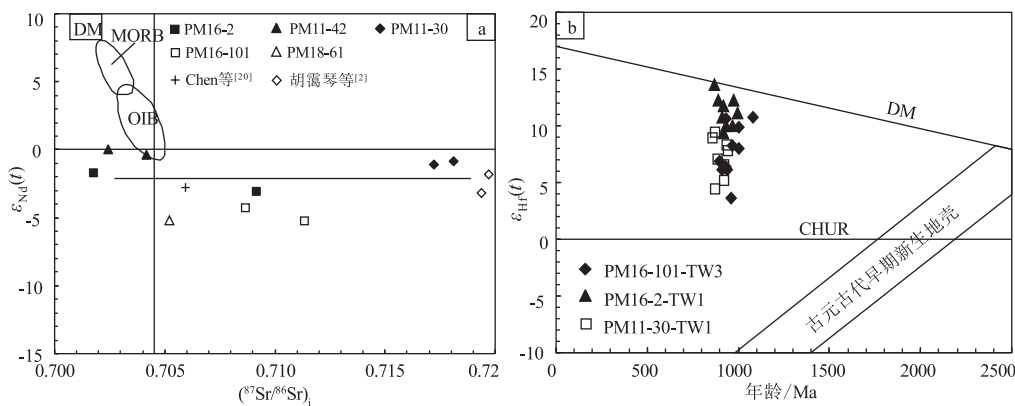


图 8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) 和锆石年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图(b)

Fig. 8 Diagrams of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (b) for the granitic gneiss

MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; DM—亏损地幔; CHUR—球粒陨石均一库

表 6 新元古代片麻状花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素测试结果
Table 6 Abundances of Lu-Hf of zircons for the Neoproterozoic granitoids

测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	U 年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	ε_{Hf}	1σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	t_{cDM}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
PM16-101-TW3												
1	0.078267	0.001728	0.282519	0.000022	934	-8.95	10.62	0.77989	1059	1129	1135	-0.95
2	0.029576	0.000610	0.282286	0.000022	960	-17.19	3.64	0.75455	1351	1588	1603	-0.98
3	0.053245	0.001114	0.282390	0.000021	1005	-13.50	7.99	0.74790	1222	1350	1360	-0.97
4	0.059385	0.001284	0.282426	0.000023	1080	-12.23	10.76	0.79838	1177	1233	1239	-0.96
5	0.061804	0.001398	0.282432	0.000023	895	-12.04	6.90	0.82005	1173	1333	1344	-0.96
6	0.049662	0.001164	0.282376	0.000019	942	-14.01	6.08	0.66361	1244	1421	1433	-0.96
7	0.057377	0.001272	0.282448	0.000024	1003	-11.47	9.88	0.82656	1146	1229	1236	-0.96
8	0.048773	0.001124	0.282397	0.000020	911	-13.27	6.17	0.68598	1214	1391	1403	-0.97
9	0.056592	0.001297	0.282425	0.000021	965	-12.29	8.21	0.72471	1180	1304	1314	-0.96
10	0.052120	0.001192	0.282393	0.000020	930	-13.39	6.43	0.69463	1220	1390	1401	-0.96
PM11-30-TW1												
1	0.039581	0.000861	0.282503	0.000023	876	-9.51	9.35	0.78829	1056	1164	1172	-0.97
2	0.065358	0.001441	0.282509	0.000025	858	-9.29	8.84	0.87680	1064	1182	1191	-0.96
4	0.024860	0.000531	0.282389	0.000025	923	-13.54	6.54	0.88984	1205	1378	1389	-0.98
5	0.041721	0.000889	0.282437	0.000025	936	-11.85	8.30	0.86826	1150	1277	1286	-0.97
6	0.036587	0.000791	0.282428	0.000029	889	-12.18	6.99	1.02444	1160	1323	1333	-0.98
8	0.034472	0.000740	0.282361	0.000028	877	-14.53	4.42	0.97299	1251	1476	1489	-0.98
9	0.038083	0.000820	0.282413	0.000025	947	-12.68	7.73	0.88871	1181	1321	1331	-0.98
10	0.029821	0.000656	0.282351	0.000028	924	-14.90	5.11	0.99569	1263	1468	1481	-0.98
PM16-2-TW1												
1	0.071121	0.001591	0.282475	0.000023	970	-10.49	9.95	0.81897	1117	1199	1207	-0.95
2	0.078792	0.001721	0.282539	0.000022	978	-8.24	12.27	0.77492	1030	1059	1063	-0.95
3	0.082549	0.001816	0.282496	0.000021	916	-9.75	9.40	0.72463	1093	1192	1200	-0.95
5	0.064821	0.001427	0.282490	0.000022	995	-9.96	11.10	0.75681	1091	1146	1151	-0.96
6	0.099852	0.001917	0.282644	0.000026	870	-4.53	13.59	0.89546	883	891	894	-0.94
7	0.104905	0.002159	0.282601	0.000024	887	-6.06	12.27	0.85205	952	988	992	-0.93
8	0.103184	0.002204	0.282568	0.000026	921	-7.22	11.78	0.92709	1001	1045	1050	-0.93
9	0.073635	0.001636	0.282503	0.000026	931	-9.52	10.05	0.89375	1079	1162	1169	-0.95
10	0.080479	0.001728	0.282535	0.000027	913	-8.39	10.74	0.94546	1036	1105	1111	-0.95

注:PM16-101-TW3 锆石 Lu-Hf 同位素数据据参考文献②

5 讨 论

从岩石地球化学分析结果看,新元古代片麻状花岗岩具有典型的大陆地壳岩石的元素地球化学特征,与 A2 型花岗岩^[15]类似。岩石的 Nd 模式年龄为 1588~2001 Ma, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -5.27~0.01 之间,锶钕同位素具水平相关性,为壳源花岗岩特征。胡霭琴等^[2]获得温泉岩群斜长角闪岩类的 ε_{Nd} (940 Ma) 值为 0.9~3.2, 与新元古代片麻状花岗岩的结果明显不同,表明这些花岗岩不可能由角闪岩

类部分熔融形成,其源区可能为成熟度很高的陆壳碎屑物质,是由古元古代温泉岩群基底硅铝质的重熔改造形成的。

在 R_1 - R_2 构造环境判别图中,所有样品点均落在同碰撞区(图 9-a),在 $\text{Rb}/30-\text{Hf}-3\text{Ta}$ 判别图(图 9-b)中,样品表现为从板内到火山弧再到碰撞环境的逐渐演变趋势。综合各种数据和判别图解,调查区的新元古代早期片麻状花岗岩主要形成于活动大陆边缘,与洋陆俯冲具有密切关系。

在东天山星星峡地区、中天山巴仑台地区、西

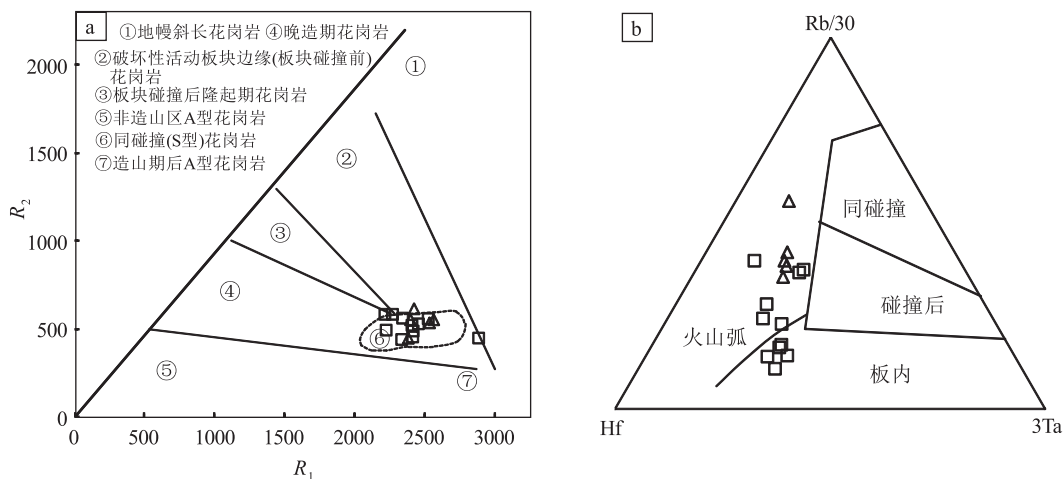


图9 新元古代片麻状花岗岩 R_1-R_2 (a) 和 $Rb/30-Hf-3Ta$ (b) 构造环境判别图

Fig. 9 Tectonic implications for granite R_1-R_2 (a) and $Rb/30-Hf-3Ta$ (b) diagrams

天山赛里木湖地区与塔里木北缘均发育新元古代 Rodinia 超大陆裂解有关的岩石记录^[16-19],一些学者提出塔里木板块曾经是 Rodinia 超大陆的一部分^[12-13, 20-28],因此天山地区前寒武纪陆壳块体(包括伊犁地块)很可能也是 Rodinia 超大陆在新元古代中—晚期裂解过程中分离、散落在古亚洲洋中的大陆碎块。温泉岩群中新元古代早期(约 9 Ga)的混合岩和片麻状花岗岩则可能是与 Rodinia 超大陆会聚有关的格林维尔期造山作用、地壳增厚导致地壳物质部分熔融的产物。

6 结 论

(1)本次对温泉县 3 个眼球状片麻状-眼球状花岗岩采集的 4 件锆石测年样品开展年代学研究,其中²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值一致,大多集中在 910~950 Ma 之间,与前人的研究结果一致。因此,910~950 Ma 能代表该类花岗岩的形成时代。

(2)岩体具有高硅($\geq 70\%$)、富碱(K_2O+Na_2O , 6.5%~8.9%)且 $K_2O>Na_2O$ 的特征,表现出从钙碱性到钾玄岩演化的变化趋势。稀土元素特征与碱性花岗岩相似。微量元素富集 Rb、Th、U、K 等,贫 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等,显示活动大陆边缘岩石特征。全岩 Sr-Nd 同位素特征表明具典型壳源花岗岩(S 型花岗岩)的特征。Lu-Hf 同位素特征表明单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 883~1351 Ma,平均为 1133 Ma;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 891~1588 Ma,平均为 1250 Ma,与锆石形成年龄比较

接近。

(3)温泉岩群中新元古代早期(约 9 Ga)的混合岩和片麻状花岗岩可能是与 Rodinia 超大陆会聚有关的格林维尔期造山作用、地壳增厚导致地壳物质部分熔融的产物。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 胡霁琴,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,2006,119-161.
- [3] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Paleozoic Collisional Tectonics and Magmatism of the Chinese TianShan, Central Asia[J]. Tectonophysics, 1993, 220: 89-115.
- [4] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 1993, 287: 213-231.
- [5] 胡霁琴,张国新,张前锋,等.天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约[J].中国科学(D 辑),1998,29(2): 104-112.
- [6] 胡霁琴,张国新,陈义兵,等.新疆大陆基底分区模式和主要地质事件的划分[J].新疆地质,2001,19(1): 12-19.
- [7] Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, et al, Zhang, Q. F. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks [J]. Tectonophysics, 2000, 328: 15-51.
- [8] Wang B, Faure M, Cluzel D, et al. Late Palaeozoic tectonic evolution of the northern West Chinese Tianshan Belt[J]. Geodinamica Acta, 2006, 19: 237-247.
- [9] Wang B, Chen Y, Zhan S, et al. Primary Carboniferous and Permian palaeomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their

- implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 263: 288-308.
- [10] 胡霭琴, 王中刚, 涂光炽, 等. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 9-105.
- [11] 胡霭琴, 韦刚健, 张积斌, 等. 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.
- [12] 胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 等. 天山 0.9Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 2010, 39(3): 197-212.
- [13] 李孔森, 王博, 舒良树, 等. 北天山温泉群的地质特征、时代和构造意义[J]. 高校地质学报, 2013, (3): 491-503.
- [14] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
- [15] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641-644.
- [16] Xu B, Jian P, Zheng HF et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations[J]. Precambrian Research, 2005, 136: 107-123.
- [17] Xu B, Xiao S H, Zou H B, et al. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China[J]. Precambrian Research, 2009, 168: 247-258.
- [18] 丁海峰, 马东升, 姚春彦, 等. 新疆果子沟埃迪卡拉纪冰碛岩沉积环境[J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3726-3737.
- [19] 王飞, 王博, 舒良树. 塔里木西北缘阿克苏地区大陆拉斑玄武岩对新元古代裂解事件的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 547-558.
- [20] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 691-703.
- [21] Huang B C, Xu B, Zhang C X, et al. Paleomagnetism of the Baiyisi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim, Northwest China: A continental fragment of Neoproterozoic Western Australia [J]. Precambrian Research, 2005, 142: 83-92.
- [22] Zhan S, Chen Y, Xu B, et al. Late Neoproterozoic paleomagnetic results from the Sugetbrak Formation of the Aksu area, Tarim basin (NW China) and their implications to paleogeographic reconstructions and the snowball Earth hypothesis[J]. Precambrian Research, 2007, 154: 143-158.
- [23] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 31-47.
- [24] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. Precambrian Research, 2008, 160: 94-107.
- [25] Wang B, Jahn B M, Lo C H, et al. Structural analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of Proterozoic rocks in Sailimu area (NW China): Implication to polyphase tectonics of the North Chinese Tianshan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 42: 839-853.
- [26] Wang B, Jahn B M, Shu L S, et al. Middle-Late Ordovician arc-type plutonism in the NW Chinese Tianshan: implication for the accretion of the Kazakhstan continent in Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 49: 40-53.
- [27] Wang B, Liu H S, Shu L S, et al. Early Neoproterozoic crustal evolution in northern Yili Block: insights for migmatite, orthogneiss and leucogranite of the Wenquan metamorphic complex in the NW Chinese Tianshan[J]. Precambrian Research, 2014, 242: 58-81.
- [28] Wang B, Shu L S, Liu H S, et al. First evidence for ca. 780 Ma intra-plate magmatism and its implications for Neoproterozoic rifting of the North Yili Block and tectonic origin of the continental blocks in SW of Central Asia[J]. Precambrian Research, 2014, 254: 258-272.
- ① 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1: 200000 地质图温泉幅(L-44-22). 1992.
- ② 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1: 50000 区域地质调查报告(扎冷木特、柯克他乌、牧区医院、牙马特). 2018.