

北祁连黑石山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

赵国斌¹, 杨合群¹, 任华宁¹, 贾 健¹, 王永和¹, 李金超¹, 周 宏²
ZHAO Guo-bin¹, YANG He-qun¹, REN Hua-ning¹, JIA Jian¹,
WANG Yong-he¹, LI Jin-chao¹, ZHOU Hong²

1. 西安地质矿产研究所, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 甘肃有色地质调查院, 甘肃 兰州 730000

1. MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Gansu Institute of Geological Survey for Nonferrous Metals, Lanzhou 730000, Gansu, China

摘要: 北祁连黑石山地区的基性—酸性火山岩中, 从南向北依次产出郝泉沟、白马洼、黑石山沟、放符崖等花岗岩体, 其中在郝泉沟斜长花岗岩体中发现了郝泉沟金矿床。采用 LA-ICP-MS 同位素测定技术, 获得白马洼英云闪长岩和郝泉沟斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 (440.2 ± 2.4) Ma 和 (431.8 ± 2.4) Ma, 表明岩体形成时代为晚奥陶世末—早志留世; 同时测定白马洼花岗岩体的全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成, 计算的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.70535, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 1.11, 推断其源于增厚的下地壳。本次研究表明, 在早古生代晚期, 随着祁连洋盆闭合, 中祁连地块与北祁连奥陶纪岛弧发生碰撞, 导致地壳加厚, 引起下地壳玄武质岩石部分重熔, 黑石山地区的花岗岩体形成于这一背景下。

关键词: 斜长花岗岩; 英云闪长岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 黑石山; 北祁连

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)10-1575-09

Zhao G B, Yang H Q, Ren H N, Jia J, Wang Y H, Li J C, Zhou H. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Heishishan granite bodies in north Qilian and their geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(10): 1575-1583

Abstract: The Haoquangou, Baimawa, Heishishangou and Fangfuya granite bodies are exposed from the south to the north in the basic-acidic volcanic rocks of Heishishan area of north Qilian, and the Haoquangou gold deposit was found in the Haoquangou plagiogranite body. Based on LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronologic study, the authors obtained the age of (440.2 ± 2.4) Ma (MSWD=0.052) for Baimawa tonalite and the age of (431.8 ± 2.4) Ma (MSWD=0.042) for Haoquangou plagiogranite, suggesting that these intrusive bodies were formed in late Ordovician-early Silurian period. Based on the whole rock Rb-Sr and Sm-Nd isotope composition of Baimawa tonalite, the authors calculated the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value and the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value, which are 0.70535 and 1.11 respectively. These data show that Baimawa granite body might have originated in the thickened lower crust. This study has revealed that the north Qilian probably experienced the tectonic evolution of the closure of the Qilian Ocean, the collision of the central Qilian block with the north Qilian Ordovician island arc, the thickening of the crust, and then the partial remelting of basaltic rocks in the lower crust during the late Early Paleozoic; as a result, the granite bodies of Heishishan area were formed.

Key words: plagiogranite; tonalite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Heishishan; north Qilian

在北祁连黑石山地区的基性—酸性火山岩中, 从南向北依次产出郝泉沟、白马洼、黑石山沟和放符崖等中酸性侵入岩体, 其中郝泉沟岩体中发现了郝泉沟金矿床, 显示出该类侵入岩体具有形成金矿的

收稿日期: 2013-05-31; 修订日期: 2013-07-11

资助项目: 中国地质调查局项目 (编号: 1212011085083, 12120113047300)

作者简介: 赵国斌 (1978-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事成矿规律与矿产预测研究。E-mail: zhaoguo12345@sina.com

潜力。前人对该地区花岗岩体的分布规律、地质地球化学特征、矿床地质特征、成因等进行研究探讨^[1-5],但很少见到有关岩体成岩成矿年代学方面的研究,在一定程度上制约了该地区今后的金矿找矿工作。

为了准确地厘定黑石山地区花岗岩体的形成时代,笔者选择白马洼英云闪长岩体和郝泉沟斜长花岗岩体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素研究,同时结合岩体地球化学、全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成及区域地质资料,探讨岩浆起源及岩体形成的地质背景,对于本地区今后开展与中酸性侵入岩有关的找矿工作具有重要的意义。

1 地质背景

黑石山地区地处甘肃省白银铜多金属矿区西南部,大地构造位置属北祁连加里东褶皱带东段,北西西向的石青铜-苏家湾大断裂及其次生断裂控制了区内火山岩、侵入岩的分布和产状。区内花岗岩体沿石青铜-苏家湾大断裂北东侧的次级近 EW 向平行断裂分布,呈岩枝、岩墙及岩株状产出。由南向北逐渐远离大断裂,其出露规模有逐渐增大的趋势^[1]。以距大断裂最近的郝泉沟岩体(I—III号)最小,距离最远的放符崖岩体规模最大(图1)。这些岩体均侵入于寒武系—奥陶系海相酸性—基性火山岩系地层中^[6-9]。

2 岩相学及地球化学特征

2.1 岩相学特征

白马洼花岗岩体岩性为英云闪长岩,岩石呈块状构造,花岗结构,主要矿物组成为斜长石(62%)、石英(25%)和黑云母(12%)。斜长石晶体形态呈板状或粒状,粒径大小在 1.2~2.5mm 之间,次生蚀变明显,多被绢云母交代。石英晶体普遍产生重结晶现象,使晶体粒径增大,常呈波状消光。黑云母受变质作用影响,晶体多发生弯曲,并产生绿泥石化及碳酸盐化,被方解石交代。岩石中还含有少量白云母,由交代斜长石的绢云母转变而来。岩石中副矿物有少量磷灰石,呈微小粒状晶体,常作为黑云母的包裹物出现。岩石有轻微碳酸盐化,并有少量方解石脉。

郝泉沟花岗岩体岩性为斜长花岗岩,岩石为块状构造,变余花岗结构。主要矿物成分为斜长石和石英(>25%),含少量云母。岩石次生蚀变强烈,原生矿物斜长石大多已次生分解,被绢云母及白云母代替,

仅有少部分斜长石残留体。石英呈等轴粒状晶体,多发生重结晶。原岩中的黑云母均被绿泥石交代。岩石中云英岩化蚀变强烈,新生成了许多细小的石英及云母晶体(图版 I)。

2.2 地球化学特征

王光宁^[1]认为黑石山地区的 4 个中酸性侵入岩体均属 I 型花岗岩,为同一岩浆房演化的产物。王金荣等^[9]认为,黑石山花岗岩富 Si、Na,高 Sr,低 Y、Yb,富集 LREE,无 Eu 负异常,显示出埃达克岩的地球化学特征。本次测得白马洼英云闪长岩中 SiO₂ 含量为 70.28%,Al₂O₃ 含量为 13.88%,MgO 含量为 1.93%,K₂O 含量为 1.90%,Na₂O 含量为 3.52%,Nb 含量 5.49×10⁻⁶,Y 含量 4.58×10⁻⁶。郝泉沟斜长花岗岩中 SiO₂ 含量为 70.88%,Al₂O₃ 含量为 14.08%,MgO 含量为 1.16%,K₂O 含量为 2.35%,Na₂O 含量为 3.44%,Nb 含量 11.1×10⁻⁶,Y 含量 4.93×10⁻⁶。在花岗岩 K₂O-SiO₂ 图解(图 2)中,2 个岩体均落入钙碱性系列。

3 测试方法和结果

3.1 测试方法

本次测试样品分别采自白马洼岩体和郝泉沟 I 号岩体(采样位置示于图 1)。2 件花岗岩样品的锆石

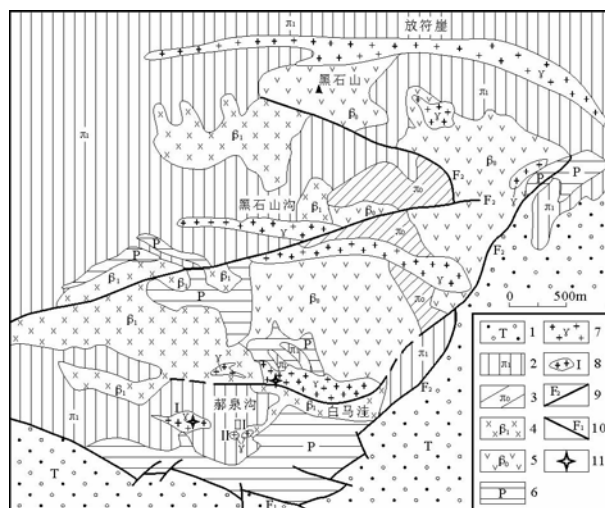


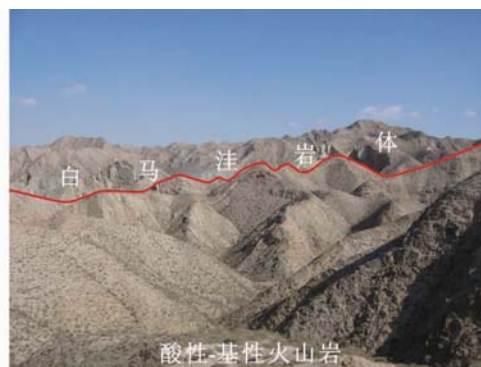
图 1 黑石山地区地质略图(据参考文献[1]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Heishishan area
1—三叠系砂砾岩;2—酸性火山岩;3—酸性次火山岩;4—基性火山岩;5—基性次火山岩;6—沉积岩;7—斜长花岗岩—花岗闪长岩;8—郝泉沟岩体及其编号;9—断层及其编号;10—石青铜—苏家湾大断裂;11—本次采样位置

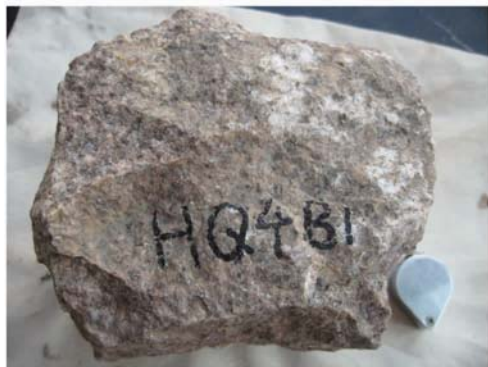
图版 I Plate I



郝泉沟斜长花岗岩体



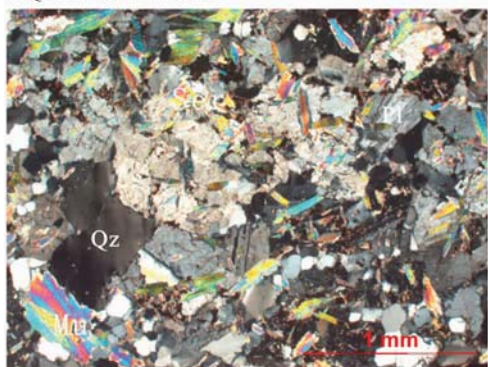
白马洼英云闪长岩体



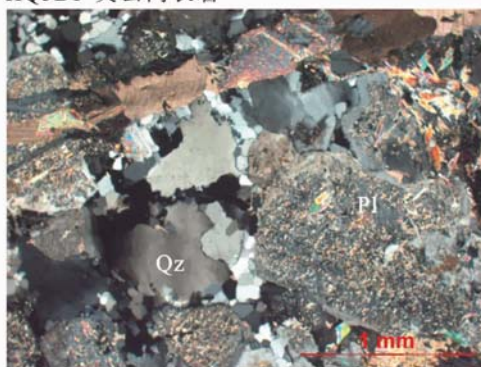
HQ4B1 斜长花岗岩



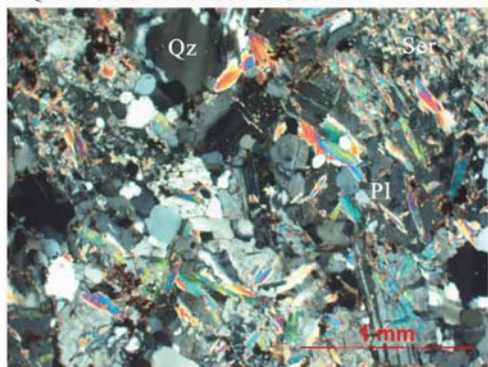
HQ5B1 英云闪长岩



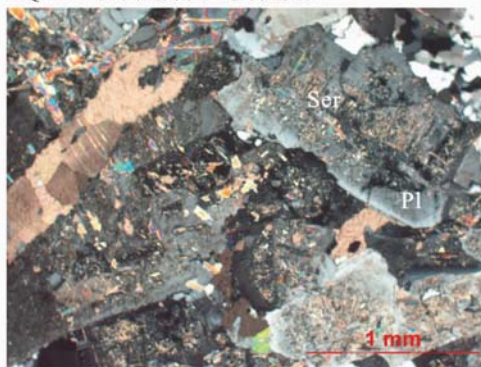
HQ4B1 变余花岗结构(正交偏光)



HQ5B1 花岗结构(正交偏光)

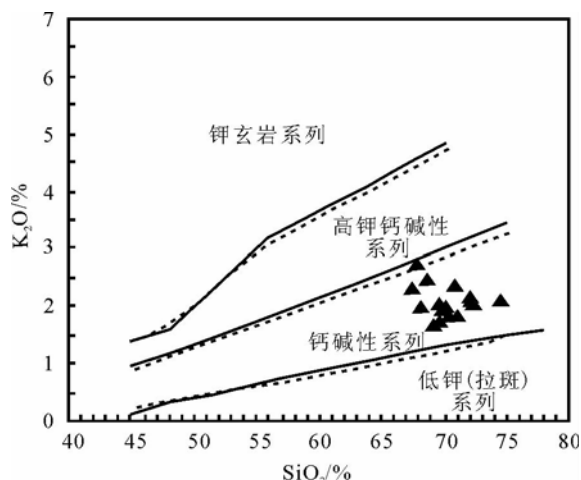


HQ4B1 斜长石被绢云母交代(正交偏光)



HQ5B1 斜长石被绢云母交代(正交偏光)

Qz—石英;Pl—斜长石;Ser—绢云母

图2 花岗岩 SiO_2 - K_2O 判别图解(据参考文献[23])Fig. 2 SiO_2 - K_2O discrimination diagram of granites

分选工作在廊坊市峰泽源岩矿检测技术实验室完成,各得 1000 余粒锆石。制靶、阴极发光照相和锆石 U-Pb 同位素测定在西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室进行。在双目镜下挑选晶形完好、具有代表性的锆石颗粒,镶嵌于环氧树脂中抛光使锆石内部暴露,对待测锆石进行透射光和反射光显微照相,然后镀膜膜,并通过扫描电镜进行阴极发光照相,选定最佳的锆石待测部位并进行数据解释,进而进行光学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析。LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子体质谱法)的锆石微区 U-Pb 同位素测定采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex 102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193nm)及 Micro Las 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用氦作为剥蚀物质的载气。用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,使仪器达到最高灵敏度、最小的氧化物产率、最低的背景值和稳定的信号。采用标准锆石 91500 作为外标标准物质,普通铅采用 Andersen Tom 的 3D 坐标法进行校正,元素含量采用 NISTSRM610 作为标准, ^{29}Si 作为内标元素。样品的同位素比值及元素含

量计算采用 GLITTER(ver4.0,Macquarie University)程序,年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver2.49)完成。详细分析步骤和数据处理方法参见文献[10-12]。

3.2 测试结果

根据锆石阴极发光图像(图 3、图 4)和镜下特征,选择晶形完整、自形程度高、颗粒较大、具有明显岩浆震荡环带的锆石颗粒进行 U-Pb 同位素分析。本次测试的所有锆石 Th/U 值均大于 0.4(表 1、表 2),具岩浆结晶锆石的特征^[13],因此锆石的结晶年龄可以代表花岗岩体的成岩年龄。

2 件样品均测试了 30 个点,各有 25 个点参与年龄加权平均值计算。经普通铅校正后,测试结果列于表 1 和表 2。白马洼英云闪长岩样品中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $440.2\text{Ma}\pm 2.4\text{Ma}$ (图 5),相当于晚奥陶世末;郝泉沟斜长花岗岩样品中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $431.8\text{Ma}\pm 2.4\text{Ma}$ (图 6),相当于早志留世。

4 花岗岩源区同位素示踪

白马洼花岗岩体全岩样品的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成在宜昌地质矿产研究所测试中心测定。根据 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成及锆石年龄,计算 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,以此来示踪花岗岩源区的性质。

白马洼花岗岩体样品(HQD5B1)测试结果: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.5774, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.70897\pm$

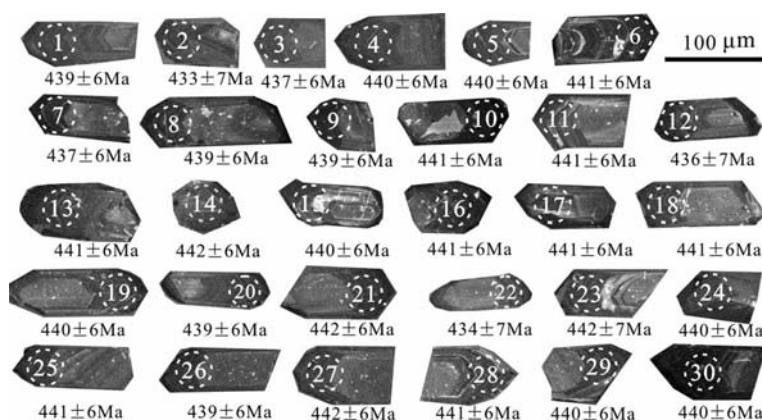


图3 白马洼岩体英云闪长岩锆石阴极发光图像、

分析点位及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄Fig. 3 CL images, measuring points and age data($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of zircons from tonalite of Baimawa intrusive body

表 1 白马洼花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb analytical results of zircons from Baimawa granite body

测点 编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	比值	误差/ 1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	比值	误差/ 1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	比值	误差/ 1σ	^{238}U / 10^{-6}	Th / U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 / 1σ	年 ^{207}Pb / ^{238}U	误差 / 1σ	年龄 ^{206}Pb / ^{238}U	误差 / 1σ	^{208}Pb / ^{232}Th	误差 / 1σ	谐和 度/%		
1	0.05442	0.00166	0.52947	0.00883	0.07055	0.00105	0.02106	0.02106	0.00029	273.39	16.60	20.93	516.85	967.68	0.54	388	17	431	6	421	6	98
2	0.07243	0.00220	0.70481	0.01144	0.07056	0.00106	0.02142	0.02142	0.00034	333.51	27.89	32.54	645.12	1143.90	0.60	644	89	468	11	433	7	108
3	0.05516	0.00168	0.53376	0.00880	0.07016	0.00105	0.02142	0.02142	0.00029	242.88	14.78	16.42	399.66	852.20	0.47	419	16	434	6	437	6	99
4	0.05571	0.00175	0.54209	0.00915	0.07056	0.00106	0.02181	0.02181	0.00030	232.14	14.17	16.28	394.21	809.43	0.47	441	17	440	6	440	6	100
5	0.05659	0.00171	0.55138	0.00944	0.07065	0.00106	0.02179	0.02179	0.00030	226.46	14.05	17.33	410.91	780.49	0.51	476	17	446	6	440	6	101
6	0.05511	0.00169	0.53812	0.00904	0.07080	0.00106	0.02163	0.02163	0.00030	282.36	17.25	23.64	576.48	997.44	0.56	417	17	437	6	441	6	99
7	0.05530	0.00172	0.53507	0.00929	0.07015	0.00105	0.02177	0.02177	0.00031	193.81	11.98	16.31	394.34	695.94	0.57	424	17	435	6	437	6	100
8	0.05495	0.00171	0.53460	0.00931	0.07054	0.00106	0.02168	0.02168	0.00031	202.12	12.28	15.02	364.63	710.53	0.51	410	17	435	6	439	6	99
9	0.05481	0.00171	0.53257	0.00929	0.07046	0.00106	0.02111	0.02111	0.00030	198.83	12.17	17.22	436.71	716.09	0.61	404	17	434	6	439	6	99
10	0.05700	0.00178	0.55675	0.00986	0.07083	0.00107	0.02288	0.02288	0.00034	224.60	14.04	14.78	339.00	763.76	0.47	492	18	449	6	441	6	102
11	0.05489	0.00173	0.53598	0.00969	0.07081	0.00107	0.02203	0.02203	0.00032	160.79	9.77	12.03	291.93	566.75	0.53	408	18	436	6	441	6	99
12	0.07865	0.00240	0.78342	0.01278	0.07223	0.00108	0.02944	0.02944	0.00044	442.04	34.34	45.78	876.43	1372.30	0.60	409	110	432	16	436	7	99
13	0.05731	0.00178	0.56005	0.00968	0.07086	0.00106	0.02307	0.02307	0.00033	229.33	14.88	16.69	385.16	808.98	0.47	503	17	452	6	441	6	102
14	0.05604	0.00176	0.54875	0.00970	0.07101	0.00107	0.02243	0.02243	0.00033	180.74	11.21	13.14	317.80	640.23	0.49	454	18	444	6	442	6	100
15	0.05739	0.00180	0.55868	0.00988	0.07060	0.00106	0.02142	0.02142	0.00031	186.46	12.05	15.39	391.15	672.34	0.57	507	17	451	6	440	6	103
16	0.05607	0.00174	0.54771	0.00942	0.07084	0.00106	0.02233	0.02233	0.00032	217.30	13.48	17.74	429.36	766.35	0.55	455	17	443	6	441	6	100
17	0.05640	0.00180	0.55038	0.01019	0.07077	0.00107	0.02167	0.02167	0.00032	152.36	9.54	11.72	293.92	538.99	0.54	468	19	445	7	441	6	101
18	0.05580	0.00176	0.54522	0.00969	0.07086	0.00107	0.02187	0.02187	0.00033	222.78	13.72	14.97	372.46	785.64	0.51	444	18	442	6	441	6	100
19	0.05591	0.00174	0.54481	0.00937	0.07066	0.00106	0.02197	0.02197	0.00032	223.61	13.84	17.05	429.74	800.40	0.52	449	17	442	6	440	6	100
20	0.05575	0.00174	0.54166	0.00936	0.07045	0.00106	0.02131	0.02131	0.00031	330.77	20.70	25.28	663.96	1212.30	0.53	442	17	440	6	439	6	100
21	0.05544	0.00175	0.54247	0.00971	0.07096	0.00107	0.02244	0.02244	0.00033	195.57	11.93	15.45	382.91	688.02	0.57	430	18	440	6	442	6	100
22	0.06754	0.00209	0.65904	0.01101	0.07076	0.00108	0.02588	0.02588	0.00037	287.00	20.95	28.69	631.05	1023.10	0.56	415	97	431	11	434	7	99
23	0.05681	0.00183	0.55643	0.01053	0.07103	0.00108	0.02302	0.02302	0.00035	154.68	9.65	12.30	287.75	531.25	0.53	484	19	449	7	442	6	102
24	0.06575	0.00206	0.64075	0.01114	0.07067	0.00106	0.02723	0.02723	0.00040	247.66	18.12	20.32	413.85	893.77	0.45	298	16	503	7	440	6	114
25	0.05680	0.00178	0.55403	0.00960	0.07073	0.00106	0.02255	0.02255	0.00033	252.37	15.64	19.34	477.03	887.70	0.54	484	17	448	6	441	6	102
26	0.05588	0.00178	0.54328	0.00981	0.07050	0.00106	0.02248	0.02248	0.00034	184.32	11.35	14.94	373.17	659.80	0.57	448	18	441	6	439	6	100
27	0.05659	0.00178	0.55322	0.00964	0.07090	0.00107	0.02295	0.02295	0.00034	231.75	14.55	17.85	438.54	818.46	0.52	476	17	447	6	442	6	101
28	0.06683	0.00211	0.65317	0.01118	0.07088	0.00107	0.02673	0.02673	0.00040	211.19	14.15	18.16	363.02	732.02	0.48	382	16	510	7	441	6	116
29	0.05601	0.00178	0.54579	0.00983	0.07067	0.00107	0.02277	0.02277	0.00034	184.35	11.36	15.39	378.41	650.18	0.57	453	18	442	6	440	6	100
30	0.05660	0.00180	0.55103	0.00991	0.07060	0.00107	0.02303	0.02303	0.00035	213.78	13.07	14.12	339.93	739.55	0.47	476	18	446	6	440	6	101

注:带删除线的数值为未参加图 5、图 6 中谐和年龄和加权平均值计算的数据

表 2 郝泉沟花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb analytical results of zircons from Haoquangou granite body

测点 编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		^{206}Pb /10 ⁻⁶	^{207}Pb /10 ⁻⁶	^{208}Pb /10 ⁻⁶	^{232}Th /10 ⁻⁶	^{238}U /10 ⁻⁶	Th /U	^{207}Pb 误差 /1σ	年 误差/1σ	年龄 ^{206}Pb /ε38U	Ma 误差/1σ	^{208}Pb /ε32Th	谐和 度/%			
1	0.05790	0.00194	0.55337	0.01146	0.06931	0.00106	0.02305	0.00038	94.76	5.79	5.89	144.78	342.06	0.44	526	22	447	7	432	6	461	8	103
2	0.05616	0.00176	0.53765	0.00937	0.06942	0.00104	0.02187	0.00031	205.73	12.47	18.05	455.04	743.32	0.61	459	17	437	6	433	6	437	6	101
3	0.05780	0.00185	0.54327	0.00944	0.06439	0.00097	0.02227	0.00034	206.77	13.64	14.67	352.23	802.10	0.39	522	18	421	6	402	6	445	7	105
4	0.05628	0.00178	0.53451	0.00947	0.06888	0.00103	0.02185	0.00032	181.95	11.12	15.45	391.55	660.54	0.59	463	18	435	6	429	6	437	6	101
5	0.05552	0.00175	0.53030	0.00986	0.06927	0.00104	0.02160	0.00032	182.15	11.17	14.74	370.83	655.74	0.57	433	19	432	7	432	6	432	6	100
6	0.05548	0.00178	0.52837	0.00929	0.06907	0.00103	0.02160	0.00031	233.32	14.25	18.43	468.97	848.76	0.55	432	18	431	6	431	6	432	6	100
7	0.05658	0.00180	0.54104	0.00979	0.06934	0.00104	0.02204	0.00033	188.88	11.65	13.45	332.02	678.68	0.49	475	18	439	6	432	6	441	7	102
8	0.05784	0.00184	0.55176	0.00997	0.06917	0.00104	0.02224	0.00033	197.77	12.38	16.21	399.02	709.34	0.56	524	18	446	7	431	6	445	7	103
9	0.05659	0.00189	0.54043	0.01126	0.06925	0.00106	0.02177	0.00035	91.73	5.67	6.59	166.81	333.89	0.52	476	22	439	7	432	6	435	7	102
10	0.05600	0.00176	0.53623	0.00947	0.06944	0.00104	0.02176	0.00032	203.20	12.52	16.48	419.83	735.41	0.56	452	18	436	6	433	6	435	6	101
11	0.05618	0.00180	0.53813	0.01000	0.06946	0.00104	0.02201	0.00033	158.96	9.79	14.01	349.43	575.55	0.61	459	19	437	7	433	6	440	7	101
12	0.05904	0.00200	0.58927	0.01264	0.07228	0.00111	0.02429	0.00044	100.02	6.93	9.57	228.07	387.94	0.64	569	23	470	8	450	7	485	8	104
13	0.05615	0.00179	0.53855	0.00980	0.06956	0.00104	0.02226	0.00034	171.78	10.67	11.47	286.38	625.06	0.46	458	18	437	6	434	6	445	7	101
14	0.05564	0.00174	0.53141	0.00918	0.06926	0.00103	0.02217	0.00032	206.23	12.63	15.84	398.67	754.67	0.53	438	17	433	6	432	6	443	6	100
15	0.05548	0.00175	0.53088	0.00948	0.06939	0.00104	0.02211	0.00033	217.28	13.68	17.32	421.13	782.16	0.54	432	18	432	6	432	6	442	7	100
16	0.05590	0.00177	0.53291	0.00957	0.06913	0.00104	0.02239	0.00033	161.67	9.95	14.60	364.13	593.11	0.61	448	18	434	6	431	6	448	7	101
17	0.05581	0.00175	0.53339	0.00926	0.06931	0.00104	0.02193	0.00032	206.20	12.68	18.42	468.79	755.48	0.62	445	17	434	6	432	6	438	6	100
18	0.05655	0.00178	0.53981	0.00958	0.06922	0.00104	0.02217	0.00033	222.10	14.00	18.83	464.67	806.42	0.57	474	18	438	6	431	6	443	7	102
19	0.05650	0.00182	0.53964	0.01024	0.06926	0.00104	0.02314	0.00036	161.27	9.91	12.62	303.05	579.52	0.53	472	19	438	7	432	6	462	7	101
20	0.05665	0.00181	0.53993	0.00999	0.06912	0.00104	0.02309	0.00036	199.32	12.48	11.81	275.56	706.90	0.40	478	19	438	7	431	6	461	7	102
21	0.05535	0.00174	0.53024	0.00933	0.06946	0.00104	0.02269	0.00033	189.70	11.44	17.42	425.77	680.73	0.61	426	18	432	6	433	6	453	7	100
22	0.05596	0.00176	0.53568	0.00947	0.06942	0.00104	0.02264	0.00033	197.99	12.18	15.54	378.25	712.23	0.53	451	18	436	6	433	6	453	7	101
23	0.05824	0.00194	0.57661	0.01136	0.07179	0.00109	0.02424	0.00038	141.24	8.84	11.88	270.68	481.04	0.58	539	20	462	7	447	7	484	7	103
24	0.07167	0.00228	0.55893	0.01412	0.05655	0.00085	0.01253	0.00019	210.33	17.09	18.82	966.02	1004.10	0.89	977	17	454	7	355	5	252	4	127
25	0.05917	0.00185	0.56205	0.00979	0.06888	0.00103	0.02180	0.00032	185.32	12.16	15.94	401.36	659.40	0.58	573	17	453	6	429	6	436	6	106
26	0.08239	0.00254	0.78778	0.01309	0.06934	0.00104	0.02823	0.00044	184.59	12.80	14.90	368.44	727.17	0.60	542	106	439	16	449	7	446	6	105
27	0.05606	0.00177	0.53465	0.00959	0.06915	0.00104	0.02216	0.00033	168.83	10.53	16.86	422.83	610.55	0.67	455	18	435	6	431	6	443	7	101
28	0.05499	0.00173	0.52671	0.00933	0.06946	0.00104	0.02236	0.00034	188.29	11.52	13.49	334.02	676.34	0.49	412	18	430	6	433	6	447	7	99
29	0.05658	0.00182	0.54140	0.01029	0.06939	0.00105	0.02236	0.00033	212.88	13.34	23.30	575.28	765.98	0.75	475	19	439	7	432	6	447	7	102
30	0.05581	0.00175	0.53064	0.00933	0.06895	0.00103	0.02274	0.00034	217.46	13.51	14.84	368.53	802.28	0.47	445	18	432	6	430	6	454	7	100

注: 同表 1

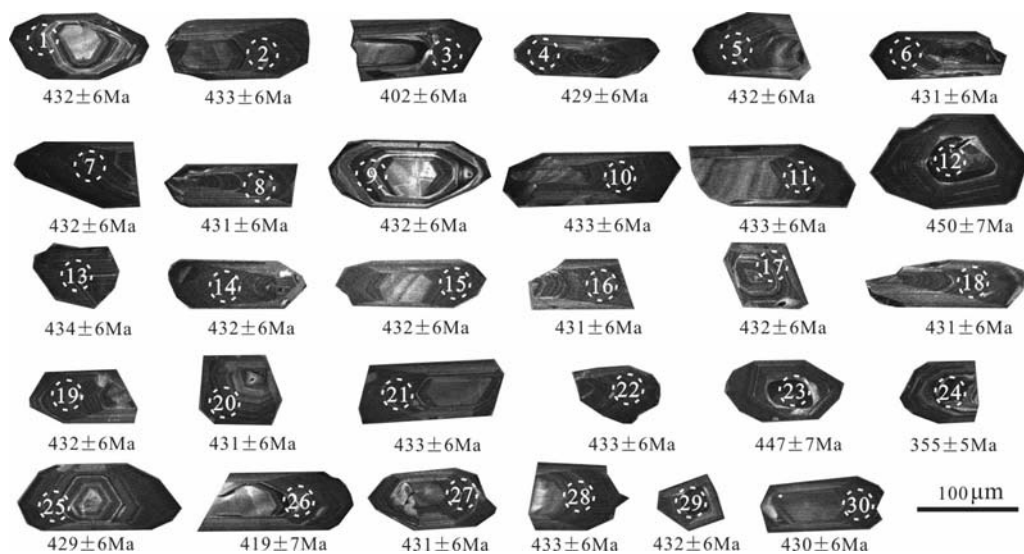


图 4 郝泉沟岩体斜长花岗岩锆石阴极发光图像、分析点位及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 4 CL images, measuring points and age data ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) of zircon from plagiogranite of Haoquangou intrusive

0.00004, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.0919, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.512393 ± 0.000002 (表 3)。按年龄 $440.2\text{Ma} \pm 2.4\text{Ma}$ 计算, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.70535, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 1.11。

自从 Chappell 等^[14-15]最早提出 I 型和 S 型花岗岩之后,许多学者对其 Sr、Nd 同位素特征进行了研究。邢凤鸣^[16]认为 I 型花岗岩的 Sr 初始值在 0.704~0.706 之间, S 型花岗岩的 Sr 初始值大于 0.708。张旗

等^[17]认为 I 型花岗岩 Nd 初始值较高, Sr 初始值较低, 源岩主要为玄武质岩石, 主要源于下地壳的部分熔融; S 型花岗岩 Nd 初始值较低, Sr 初始值较高; 还认为花岗岩都是壳源的, 并按照 Nd-Sr 同位素比值将花岗岩大致分为玄武岩源区(B 区)、陆壳源区(C 区)、玄武岩源区和陆壳源区之间的过渡源区(BC 区), 前者以高的 ε_{Nd} 和低的 ε_{Sr} 为特征, ε_{Nd} 主

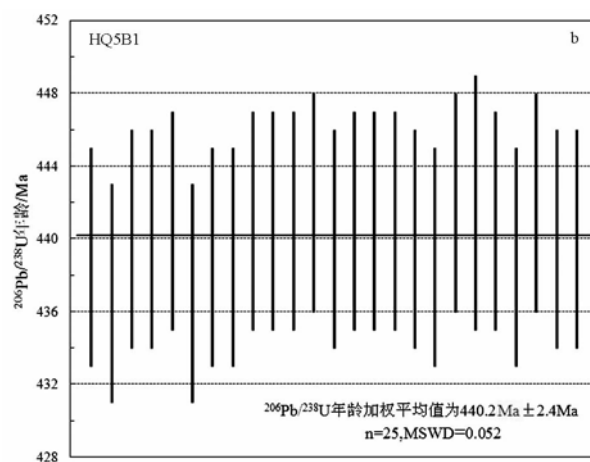
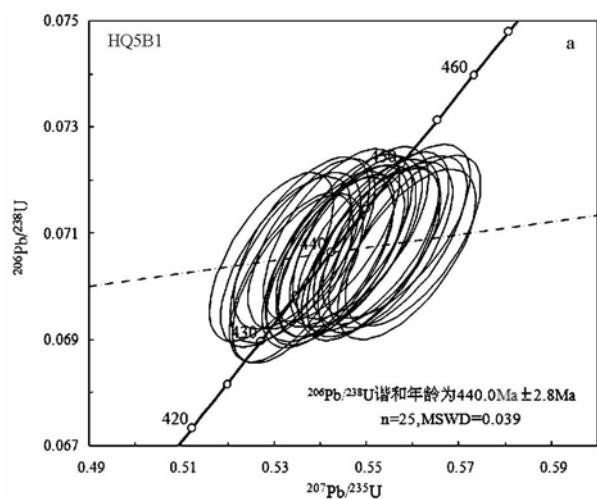


图 5 白马洼花岗岩体锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectrum of Baimawa granite body

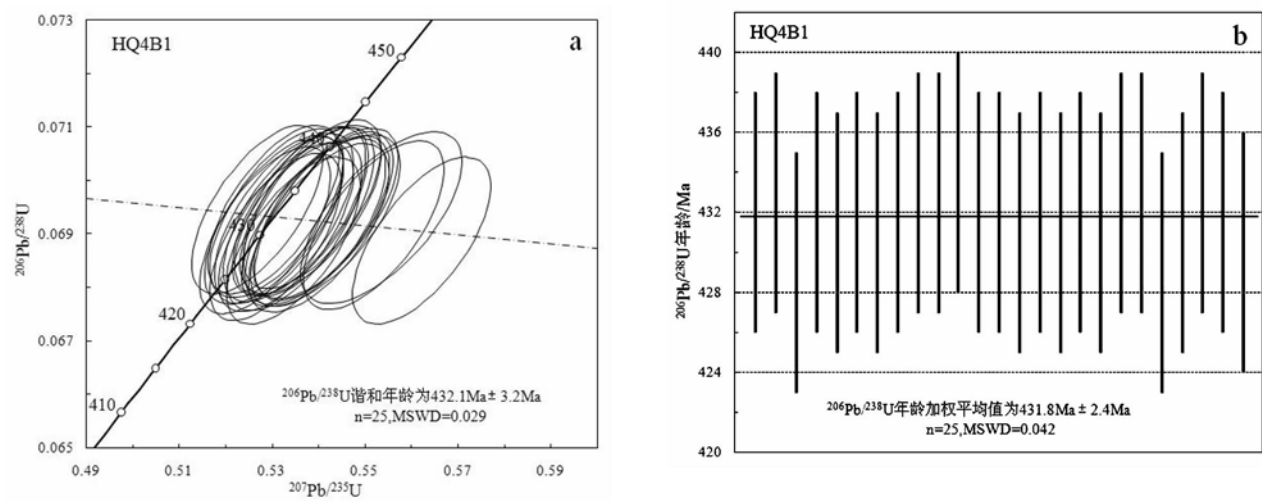


图 6 郝泉沟花岗岩体锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄
Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
age spectrum of Haoquangou granite body

要 为 正 值, ε_{Sr} 很 少 超 过 0.710。本 次 白 马 洼 岩 体 计 算 的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 为 1.11, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 为 0.70535, 具 有 I 型 花 岗 岩 特 征, 属 于 玄 武 岩 源 区, 源 于 下 地 壳 部 分 熔 融。

5 成 岩 环 境 及 岩 浆 起 源 讨 论

祁 连 山 及 其 邻 区 在 前 震 旦 纪 形 成 统 一 陆 块; 晚 震 旦 世—早 寒 武 世, 进 入 大 陆 裂 谷 体 制 阶 段; 晚 寒 武 世—早 中 奥 陶 世, 为 洋 盆 扩 张 阶 段; 从 中 奥 陶 世 开 始, 一 直 持 续 到 中 新 生 代, 进 入 了 造 山 阶 段, 其 间 经 历 了 俯 冲 造 山 (中 奥 陶 世—晚 奥 陶 世)、碰 撞 造 山 (早 志 留 世—晚 泥 盆 世) 及 碰 撞 后 陆 内 造 山 (早 石 炭 世—现 代) 几 个 阶 段^[18]。北 祁 连 山 奥 陶 纪 岛 弧 火 山 岩 系 沿 走 廊 南 山 分 布, 东 起 白 银 厂 地 区, 中 经 永 登 县 石 灰 沟、民 乐 县 西 道 流, 西 迄 祁 连 县 边 马 沟 以 西, 呈 SE—NW 向 展 布, 长 度 已 超 过 800km^[19]。现 今 北 祁 连 造 山

带 志 留 系 地 层 分 布 区 的 南 侧 出 露 有 2 条 奥 陶 系 俯 冲 杂 岩 带, 是 中 晚 奥 陶 世 俯 冲 造 山 作 用 最 直 接 的 证 据。在 肃 南—民 乐 童 子 坝 河 一 带 的 下 志 留 统 下 部 发 育 有 一 层 巨 厚 的 砾 岩 层, 具 磨 拉 石 建 造 特 征, 预 示 志 留 纪 残 留 海 盆 南 侧 存 在 着 因 俯 冲 作 用 而 形 成 的 山 体^[20]。

通 常 情 况 下, 具 正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 的 花 岗 岩 被 认 为 和 地 壳 生 长 事 件 有 关^[21-22]。本 次 采 用 LA-ICP-MS 同 位 素 测 定 技 术, 获 得 郝 泉 沟 斜 长 花 岗 岩 和 白 马 洼 英 云 闪 长 岩 锆 石 U-Pb 年 龄 分 别 为 $431.8\text{Ma} \pm 2.4\text{Ma}$ 和 $440.2\text{Ma} \pm 2.4\text{Ma}$, 白 马 洼 花 岗 岩 体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 为 1.11, 表 明 晚 奥 陶 世 末—早 志 留 世, 随 着 北 祁 连 洋 盆 闭 合, 中 祁 连 地 块 与 北 祁 连 奥 陶 纪 岛 弧 发 生 碰 撞, 导 致 地 壳 增 厚, 引 起 下 地 壳 玄 武 质 岩 石 部 分 重 熔, 黑 石 山 一 带 的 中 酸 性 侵 入 岩 就 形 成 于 该 背 景 下。

表 3 白 马 洼 花 岗 岩 体 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同 位 素 分 析 结 果
Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotope analytical results of Baimawa granite body

样 品 编 号	Rb /10 ⁻⁶	Sr /10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 1 σ	Sm /10 ⁻⁶	Nd /10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 1 σ	T _{DM} /Ma ± 1 σ
HQD5B1	62.14	310.3	0.5774	0.70897 ± 0.00004	1.736	11.43	0.0919	0.512393 ± 0.000002	948 ± 2

注: 国 土 资 源 部 中 南 矿 产 资 源 监 督 检 测 中 心 同 位 素 地 球 化 学 研 究 室 测 试

6 结 论

(1)白马洼和郝泉沟花岗岩体的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $440.2\text{Ma}\pm 2.4\text{Ma}$ 和 $431.8\text{Ma}\pm 2.4\text{Ma}$, 表明其形成时代为晚奥陶世末—早志留世。

(2)白马洼花岗岩体的全岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.70535, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 1.11, 具有 I 型花岗岩特征, 表明其源于下地壳玄武岩部分熔融。

(3)晚奥陶世—早志留世, 随着北祁连洋盆闭合, 中祁连地块与北祁连奥陶纪岛弧发生碰撞, 导致地壳增厚, 引起下地壳玄武质岩石部分重熔, 北祁连黑石山地区的花岗岩体就形成于该背景下。

致谢: 野外工作期间得到甘肃有色地质调查院周宏等同志的支持和帮助, 测试过程中得到了西北大学大陆动力学实验室和宜昌地质矿产研究所同位素室的大力支持, 审稿人提出了许多建设性的意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]王光宁. 白银黑石山东部侵入岩体特征及其含矿性[J]. 西北地质, 1999, 32(1): 5-10.
- [2]王光宁. 甘肃白银地区金矿成矿规律及找矿方向[J]. 黄金科学技术, 2000, 8(3): 24-28.
- [3]张照志, 王志远. 甘肃白银郝泉沟金矿控矿构造研究[J]. 黄金地质, 2002, 8(1): 6-10.
- [4]付善明, 周永章, 郭原生, 等. 甘肃黑石山埃达克岩金矿床成矿模式初析[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 669-675.
- [5]王金荣, 郭原生, 付善明, 等. 甘肃黑石山早古生代埃达克质岩的发现及其构造动力学意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 977-985.
- [6]郭原生, 王金荣, 谢宪利, 等. 白银厂矿田早中寒武世火山岩地球化学及成因分析[J]. 岩石学报, 2000, 16: 337-344.
- [7]王金荣, 郭原生, 翟新伟, 等. 甘肃白银厂矿田早—中寒武世火山岩形成的构造环境[J]. 高校地质学报, 2003, 9: 89-98.
- [8]何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年——白银式块状硫化物矿床形成时代新证据[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 401-411.
- [9]李向民, 马中平, 孙吉明, 等. 甘肃白银矿田基性火山岩的 LA-ICP-MS 同位素年代学[J]. 地质通报, 2009, 28(7): 901-906.
- [10]柳小明, 高山, 袁洪林. 193nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主元素和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 408-418.
- [11]Gao Shan, Liu Xiao-ming, Yuan Hong-lin. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS[J]. Geostand News, 2002, 22: 181-19.
- [12]袁洪林, 吴福元, 高山. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [13]李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 161-174.
- [14]Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. Pac. Geol., 1974, 8: 173-174.
- [15]Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci., 1992, 83: 1-26.
- [16]邢凤鸣. 锶同位素初始比值在划分花岗岩成因类型上的应用讨论[J]. 岩石学报, 1987, 2: 75-79.
- [17]张旗, 王焰, 潘国强, 等. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1193-1204.
- [18]冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 84-94.
- [19]夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山构造——火山岩浆演化动力学[J]. 西北地质科学, 1995, 16(1): 1-28.
- [20]夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 北祁连山构造—火山岩浆—成矿动力学[M]. 北京: 中国大地出版社, 2001: 21-101.
- [21]洪大卫, 王式广, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 441-456.
- [22]江思宏, 聂凤军. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约[J]. 地质学报, 2006, 80(6): 826-842.
- [23]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.