

华北北缘固阳二叠纪闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套 SHRIMP 年代学

张 维 简 平

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

提要:应用岩石地球化学方法,笔者在内蒙古二叠纪索伦山蛇绿岩缝合带南 100~180 km、华北克拉通北缘固阳地区,识别出了一个闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套。这些花岗质岩石为钠质,与岛弧深成岩在化学成分上一致。SHRIMP 年代学研究表明:2 件闪长岩的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄为 (293 ± 4) Ma 和 (266 ± 4) Ma;1 件石英闪长岩的锆石年龄为 (272 ± 7) Ma;1 件英云闪长岩的锆石年龄为 (277 ± 3) Ma。这些二叠纪花岗质岩石因此在形成时代上没有间断,它们与索伦山 SSZ (supersubduction zone) 型蛇绿岩 (299~290 Ma) 大致同时或略晚。基于其特定的构造背景及其与索伦山蛇绿岩的时代关系,所研究的二叠纪钠质深成岩套 (293~266 Ma) 与大致同时代的安山质火山岩一起,构成一个大陆边缘岛弧。

关键词:大陆边缘岛弧;钠质深成岩套;锆石年龄;固阳

中图分类号: P597;P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1593-11

活动大陆边缘或安第斯型大陆弧形成特征的火山岩和深成岩套。岛弧火山岩通常为钙碱性玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩,其中,安山岩最发育^[1-3];深成岩套则为钠质,通常由闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩和奥长花岗岩组成^[3-5]。大陆弧和洋内弧具有相似的岩石组合,但是,前者由于构建于陆壳基底之上,因而,其岩石地球化学性质在很多方面与大陆地壳具有相似性^[6]。然而,研究钠质深成岩与消减带的时空关系,不失为识别大陆岛弧的一个途径。

1 区域地质背景,前人研究和主要地质问题

1.1 区域地质背景

研究区距中亚造山带二叠纪索伦山缝合带^[7]南 100~180 km,位于华北克拉通北缘(图 1-a)。华北克拉通北缘的一个显著地质特征是,大量的安山质火山岩,即二叠纪苏吉组沿白云鄂博-赤峰大断裂断续分布(图 1-b;内蒙古地质局,1982)。

白云鄂博-渣尔泰山构造岩浆岩区主要由太古宙-元古宙花岗质岩石及中新元古界白云鄂博群杂岩组成,与中亚造山带以白云鄂博-赤峰大断裂为分界(图 1-a)。在索伦山缝合带和白云鄂博-赤峰大断裂之间主要出露的是早古生代火山-沉积岩系和钠质花岗质岩石(图 1-b),构成中亚造山带的一个早古生代岛弧,即巴特岛弧,解释为古亚洲洋早古生代俯冲消减的产物^[8-11]。中亚造山带位于西伯利亚和华北克拉通之间,索伦山缝合带是这一造山带的最终缝合带^[8-11]。

1.2 二叠纪花岗质岩石和相关的主要地质问题

前人^[12]在固阳地区原太古宙花岗岩-绿岩地体中识别出数个早二叠世 (282~277 Ma;ICP-MS 锆石测年)高钾钙碱性^[12]或钠质 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>1$)^[14]花岗质侵入体。这些早二叠世花岗质岩石的全岩 Nd-Sr 同位素和锆石 Hf 同位素组成表明,其源区主要是前寒武纪大陆基底。它们的侵位曾被归因于一个二叠纪的被动大陆边缘的岩浆事件^[12]。应该指出的是,前

收稿日期:2012-09-23;改回日期:2012-11-09

基金项目:中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121071)资助。

作者简介:张维,女,1979 年生,博士后,地球化学专业,主要从事同位素地质年代学研究;E-mail:zhangwei@bjshrimp.cn。

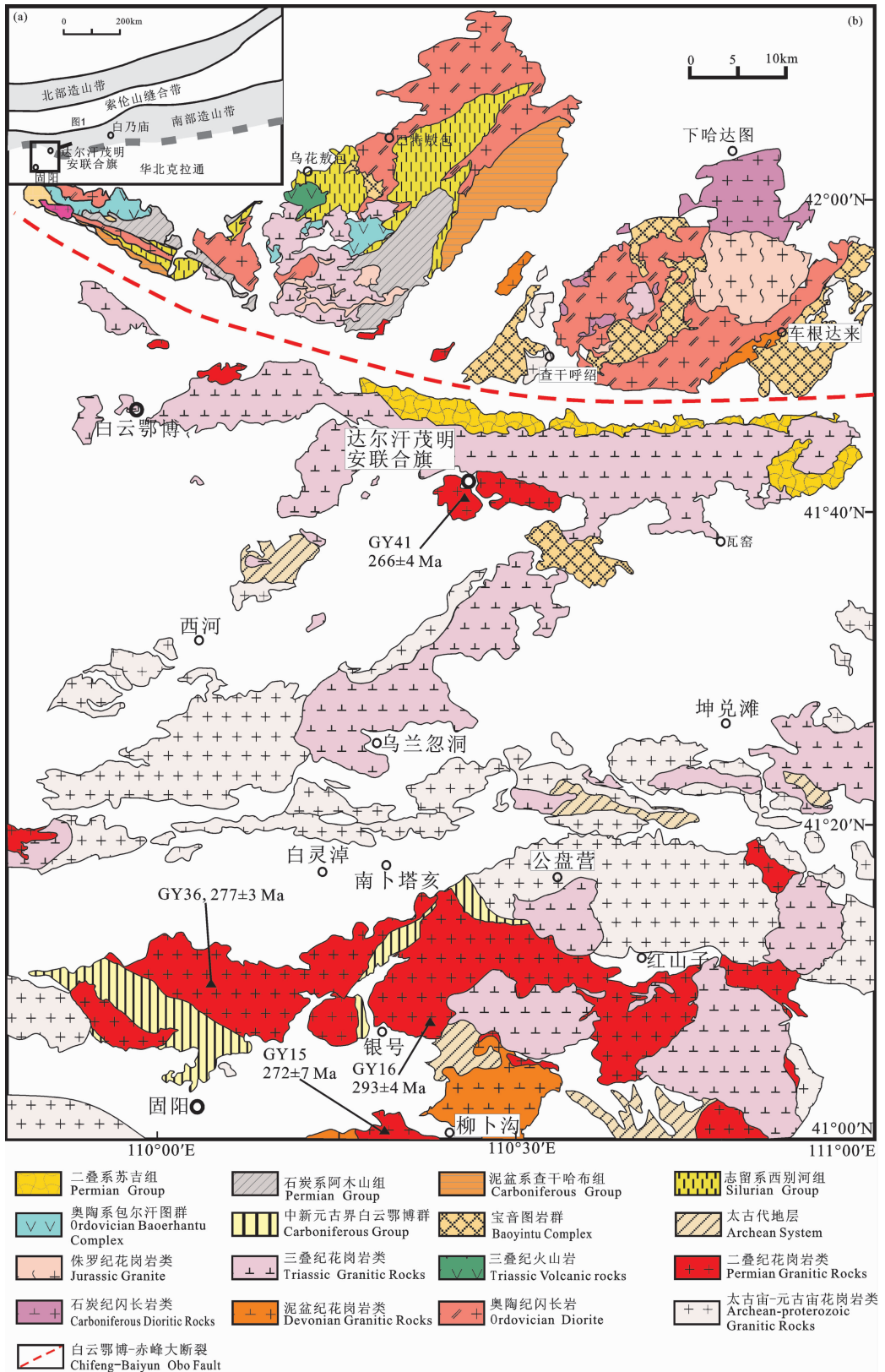


图 1 中亚造山带南缘构造略图 (a) (据 Jian et al., 2010) 和内蒙古固阳地区地质略图 (b) (据内蒙古自治区地质调查院, 2002 和 张维等, 2008^[11]修改) (示采样位置)

Fig.1 (a) Tectonic sketch map of the southern margin of the Central Asian orogenic Belt; (b) simplified geological map of Guyang area, showing sampling sites

人采用的 ICP-MS 锆石测年方法,不能测定 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 比值,因而不能有效地校正锆石的普通铅,难以得到相对准确的年龄,特别是对于显生宙的岩石。

笔者注意到,前人研究的二叠纪花岗质岩石包括闪长岩和花岗闪长岩^[12]。而且,同时代的火山岩以安山岩为主(苏吉组,图 1-b)。很明显,固阳地区二叠纪岩浆岩组合,与被动大陆边缘的不一致。被动大陆边缘(又称裂解大陆边缘)的岩浆岩岩石组合以反映张性机制的双峰式火山岩^[13]或大陆溢流玄武岩^[14]为特征。

为进一步限定钠质深成岩的形成时代和岩石地球化学特征,笔者以固阳地区弱变形及未变形的花岗质岩石为研究对象,进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定,以及锆石 Hf 同位素组成和岩石地球化学研究。这些花岗质岩石与本地区广泛存在的太古宙 TTG^[15]岩系在化学成分上相似,地质关系复杂,在野外难以有效地区分。因此,在前人的区调工作中,它们没有能识别出来。

2 野外调查和样品描述

2.1 闪长岩 GY16-3 和 GY16-6

这两个样品采自固阳东北约 26 km、银号东偏北约 5 km 处,采样位置坐标:东经 $110^{\circ}23.211'$,北纬 $41^{\circ}6.384'$ 。该岩体近东西向延伸,侵入太古宙地层、中新元古界白云鄂博群、泥盆纪花岗岩以及太古宙花岗岩体之中,并被三叠纪花岗岩侵入。样品为细粒半自形粒状结构,主要矿物有斜长石(~65%)、褐色角闪石(~35%),其他少量不透明矿物(~5%),可见斜长石聚片双晶,部分斜长石发生轻微蚀变、绢云母化,部分角闪石绿泥石化。

2.2 闪长岩 GY41

此样品采自达尔汗茂明安联合旗百灵庙镇西南一岩体,采样位置坐标:东经 $110^{\circ}27.139'$,北纬 $41^{\circ}40.603'$ 。前人将该岩体划归古元古界宝音图岩群(白云鄂博幅 1:20 万地质图,内蒙古自治区地质调查院,2002)。呈中-细粒半自形粒状结构,主要矿物有斜长石(~65%)、黄褐色角闪石(~30%)、石英(~3%),副矿物可见榍石、磷灰石及磁铁矿。可见斜长石聚片双晶,部分斜长石绢云母化,部分角闪石绿泥石化。

2.3 石英闪长岩 GY15

此样品采自固阳东南约 19 km、柳卜沟西约 7 km 处,采样位置坐标:东经 $110^{\circ}21'43$,北纬 $41^{\circ}0'$

22。该岩体侵入泥盆纪花岗岩体。中-细粒半自形粒状结构,主要矿物有斜长石(~70%)、褐色角闪石(~20%)、石英(~5%),及其他暗色矿物(~5%)。可见斜长石聚片双晶,少量斜长石绢云母化,部分角闪石绿泥石化。

2.4 英云闪长岩 GY36

此样品采自固阳县城北约 15 km 处,采样位置坐标:东经 $110^{\circ}3.145'$,北纬 $41^{\circ}10.449'$ 。该岩体侵入中新元古界白云鄂博群中,前人将该岩体时代定为太古宙(内蒙古自治区地质调查院,2002)。呈中细粒半自形粒状结构,主要由斜长石(~55%)、石英(~30%)、黄褐色角闪石(~5%)以及少量黑云母(~5%)组成。斜长石可见聚片双晶,石英具波状消光,角闪石可见 60° 交角的解理。角闪石部分绿泥石化。显微镜下可见锆石颗粒。

3 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成

锆石 SHRIMP U-Th-Pb 分析(表 1)在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成。Compston 等^[16](1992)和 Williams 等^[17](1996)详细介绍了应用 SHRIMP 测定锆石 U-Th-Pb 年龄的原理和方法。在测定过程中,锆石样品和与置于同一样品靶上的澳大利亚地调局标准锆石 TEM 的测定交替进行,每测定 2 个样品,测定 1 次标准锆石。每次分析记录 5 次扫描的平均值。应用澳大利亚地调局标准锆石 TEM (417 Ma)^[18]进行元素间的分馏校正(interelement fractionation)。Pb/U 校正公式采用 $\text{Pb}/\text{U}=\text{A}(\text{UO}/\text{U})^2$ ^[17]。应用于调试靶(Test)上的另一标准锆石 SL13(年龄,572 Ma;U 含量, 238×10^{-6})标定锆石的 U、Th 和 Pb 含量。应用澳大利亚国立大学 PRAWN 程序^[17]进行数据处理。普通铅根据实测 ^{204}Pb 校正。表 1 中所列单个数据点的误差均为 1σ 。采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ 。方差(x^2)用于检验一组用于加权平均计算的年龄值是否符合统计要求^[17]。当 $x^2=1$,加权平均值的误差与单个分析值的误差完全一致。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土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 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,激光剥蚀直径为 $55 \mu\text{m}$,测定时使用锆石国际标样 GJ1

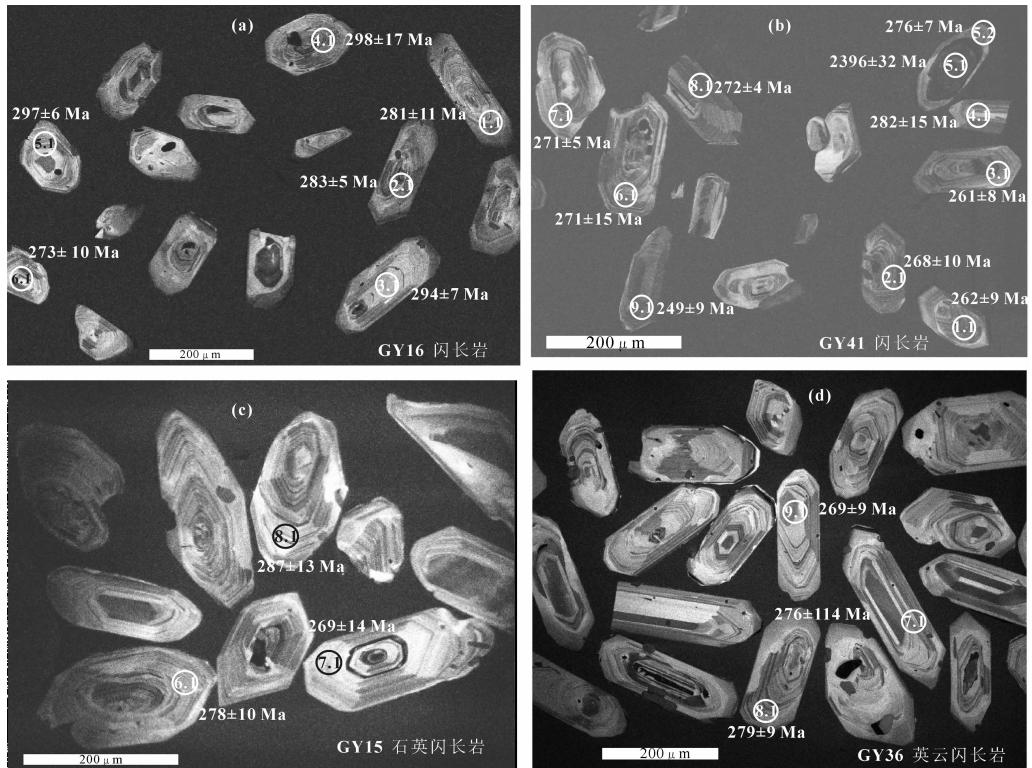


图 2 部分锆石阴极发光照片(a-闪长岩(GY16); b-闪长岩(GY41); c-石英闪长岩(GY15); d-英云闪长岩(GY36)
Fig.2 CL images of representative zircons from (a) diorite (GY16);(b) diorite (GY41);(c) quartz diorite (GY15);(d) tonalite (GY36)

作为参考物质,分析点与U-Pb定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等^[19](2007)。分析过程中锆石标准GJ1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\ 008 \pm 31$ (2SD, $n=11$),与文献报道值^[19-20]在误差范围内完全一致。锆石Hf同位素分析结果见表2。

3.1 闪长岩 GY16

闪长岩(GY16)样品中锆石组成比较均匀,呈短柱状或长柱状(0.1~0.2 mm),自形晶,发育韵律环带结构(图2-a)。15个分析点给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为(273±10)Ma~(312±6)Ma(1 σ 误差),集中分布于一致曲线上(图3-A), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为(293±4)Ma ($n=15$, $x^2=1.62$,解释为该闪长岩的侵位年龄。 $x^2>1$,说明这一组年龄值不严格地、但基本上符合加权平均的统计条件。在实际工作中,一般通过删除离群值,将 x^2 控制在2以内。

3.2 闪长岩 GY41

闪长岩(GY41)中存在2组锆石:一组呈短柱状(0.1~0.2 mm)自形晶,发育清晰的韵律环带结构,为岩浆成因锆石;另一组呈椭圆状,边部有溶蚀,为继

承锆石(图2-b)。岩浆锆石年龄数据点集中分布于一致曲线上或其附近(图3-b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为(266±4)Ma ($n=16$, $x^2=1.63$),解释为该闪长岩的侵位年龄。1个继承锆石核的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄为(2396±32)Ma。

3.3 石英闪长岩 GY15

石英闪长岩样品中锆石组成均匀,呈等粒状、短柱状或长柱状(0.1~0.3 mm)自形晶,发育清晰的韵律环带结构(图2-c)。10个分析点给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为244~287 Ma。除1个最小的离群值(244 Ma)外(图3-c),9个分析点给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(272±7)Ma ($n=9$, $x^2=0.78$),解释为该石英闪长岩的侵位年龄。

该样品的锆石Hf同位素分析结果显示 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为0.020 424~0.032 949、0.000 809~0.001 061, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 均小于0.002,表明这些锆石形成以后仅具有较少的放射成因Hf的积累,因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值比较均一,分布于0.282 163~0.282 255, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-15.58~-12.93,模

表 1 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Th-Pb analytical data

点号 ²³⁸ U/10 ⁻⁶	²³² Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*/10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/0%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma ±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma ±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma ±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma ±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb* 年龄/Ma ±			
闪长岩 (GY16)																
1.1	98	63	0.65	—	0.0445	0.0018	0.312	0.038	0.0508	0.0056	281	11	276	30	232	234
2.1	190	105	0.56	—	0.0449	0.0009	0.326	0.018	0.0527	0.0026	283	5	287	14	316	114
3.1	143	75	0.52	—	0.0467	0.0012	0.295	0.028	0.0458	0.0041	298	7	262	22	0	0
4.1	158	109	0.69	0.01	0.0474	0.0027	0.324	0.032	0.0496	0.0037	298	17	285	25	178	174
5.1	107	63	0.59	—	0.0471	0.0010	0.325	0.024	0.0500	0.0034	297	6	285	18	194	163
6.1	157	82	0.52	—	0.0432	0.0016	0.297	0.026	0.0498	0.0037	273	10	264	20	183	178
7.1	104	63	0.61	—	0.0444	0.0020	0.357	0.035	0.0583	0.0047	280	12	310	26	542	187
8.1	133	102	0.77	—	0.0475	0.0012	0.349	0.023	0.0534	0.003	299	7	304	17	344	134
9.1	243	210	0.87	—	0.0469	0.0018	0.343	0.021	0.0530	0.0024	296	11	299	16	329	105
10.1	146	70	0.48	—	0.0464	0.0011	0.362	0.024	0.0567	0.0034	292	7	314	18	479	137
11.1	229	188	0.82	—	0.0459	0.0012	0.357	0.021	0.0564	0.0029	289	7	310	16	468	119
12.1	120	103	0.86	—	0.0441	0.0020	0.338	0.028	0.0556	0.0036	278	13	296	22	434	150
13.1	151	104	0.69	—	0.0456	0.0013	0.340	0.029	0.0540	0.0042	287	8	297	23	372	186
14.1	177	136	0.77	—	0.0469	0.0017	0.342	0.025	0.0528	0.0031	295	11	298	19	321	139
14.2	104	61	0.59	0.01	0.0475	0.0014	0.320	0.039	0.0489	0.0056	299	9	282	30	143	249
15.1	163	120	0.74	—	0.0496	0.0010	0.355	0.025	0.0520	0.0035	312	6	308	19	284	160
闪长岩 (GY41)																
1.1	316	147	0.46	—	0.0416	0.0014	0.322	0.027	0.0562	0.004	262	9	283	21	460	167
2.1	254	111	0.44	—	0.0424	0.0016	0.311	0.028	0.0532	0.0041	268	10	275	22	336	185
3.1	196	76	0.39	—	0.0413	0.0013	0.317	0.020	0.0557	0.0029	261	8	280	16	442	120
4.1	184	94	0.51	—	0.0447	0.0024	0.338	0.024	0.0548	0.0023	282	15	295	18	402	96
5.1	413	229	0.55	—	0.4456	0.0092	9.49	0.281	0.1544	0.0029	2376	41	2387	28	2396	32
5.2	325	82	0.25	—	0.0437	0.0012	0.338	0.019	0.0561	0.0027	276	7	295	15	455	109
6.1	237	101	0.43	—	0.0429	0.0024	0.334	0.025	0.0564	0.0024	271	15	292	19	469	96
7.1	223	97	0.43	—	0.0430	0.0008	0.299	0.014	0.0505	0.0020	271	5	266	11	219	92
8.1	311	190	0.61	—	0.0432	0.0007	0.328	0.017	0.0551	0.0025	272	4	288	13	415	106
9.1	324	140	0.43	—	0.0394	0.0015	0.266	0.015	0.0489	0.0018	249	9	239	12	145	88
10.1	250	105	0.42	—	0.0415	0.0015	0.352	0.023	0.0614	0.0030	262	9	306	17	653	109
11.1	267	107	0.4	—	0.0404	0.0010	0.298	0.014	0.0535	0.0020	255	6	265	11	352	85
12.1	182	81	0.45	0.01	0.0404	0.0022	0.330	0.035	0.0592	0.0051	255	13	289	27	573	200

续表 1

点号	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/10^{-6}$	$^{206}\text{Pb}/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄/Ma	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	\pm
13.1	221	94	0.43	9	—	0.0382	0.0015	0.296	0.023	241	9	263	18
14.1	299	264	0.88	15	—	0.0435	0.0012	0.352	0.021	275	8	306	16
15.1	227	124	0.54	10	—	0.0407	0.0015	0.321	0.025	257	9	282	19
16.1	254	107	0.42	11	—	0.0434	0.0012	0.330	0.024	274	7	290	18
石英闪长岩 (GY15)													
1.1	193	102	0.53	8	—	0.0397	0.0020	0.325	0.025	251	12	286	19
2.1	146	112	0.76	6	0.02	0.0386	0.0017	0.246	0.049	244	11	223	41
3.1	139	72	0.52	6	0.01	0.0415	0.0016	0.310	0.047	262	10	274	37
4.1	138	70	0.51	6	0.01	0.0436	0.0024	0.343	0.035	275	15	299	27
5.1	111	99	0.89	6	0.01	0.0441	0.0017	0.312	0.032	278	11	276	25
6.1	125	65	0.52	6	—	0.0440	0.0016	0.378	0.026	278	10	326	20
7.1	100	57	0.57	5	—	0.0426	0.0022	0.395	0.040	269	14	338	29
8.1	171	103	0.60	8	0.01	0.0455	0.0020	0.315	0.023	287	13	278	18
9.1	151	74	0.49	7	0.02	0.0438	0.0017	0.288	0.030	276	11	257	24
10.1	90	53	0.59	4	0.01	0.0429	0.0015	0.370	0.066	271	9	320	50
英云闪长岩 (GY36)													
1.1	70	36	0.51	3	0.04	0.0463	0.0017	0.301	0.123	292	10	267	101
2.1	62	34	0.55	3	0.02	0.0438	0.0024	0.304	0.076	276	15	270	61
3.1	54	31	0.58	3	0.02	0.0454	0.0024	0.314	0.068	286	15	278	54
4.1	42	22	0.53	2	0.01	0.0449	0.0012	0.445	0.057	283	7	374	41
5.1	59	31	0.51	3	0.02	0.0445	0.0017	0.335	0.065	281	10	294	51
6.1	98	40	0.40	4	0.03	0.0445	0.0014	0.274	0.076	281	8	246	63
7.1	59	39	0.65	3	0.01	0.0437	0.0023	0.374	0.046	276	14	322	35
8.1	106	59	0.56	5	0.01	0.0443	0.0015	0.292	0.046	279	9	260	36
9.1	80	58	0.73	4	0.01	0.0427	0.0015	0.277	0.047	269	9	248	38
10.1	68	36	0.53	3	0.02	0.0418	0.0011	0.237	0.048	264	7	216	40

表 2 锆石 Hf 同位素组成分析结果
Table 2 Zircon Hf isotopic composition

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Hf})$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$
石英闪长岩 (GY15)										
1.1	251	0.025588	0.000823	0.282255	0.000016	-18.30	-0.98	-12.93	1402	0.282251
2.1	244	0.028406	0.000956	0.282229	0.000018	-19.19	-0.97	-13.98	1442	0.282225
3.1	262	0.020424	0.000612	0.282194	0.000023	-20.43	-0.98	-14.78	1477	0.282191
4.1	275	0.027263	0.000909	0.282165	0.000021	-21.46	-0.97	-15.58	1529	0.282161
5.1	278	0.030631	0.000897	0.282176	0.000023	-21.09	-0.97	-15.15	1514	0.282171
6.1	278	0.027113	0.000812	0.282177	0.000023	-21.04	-0.98	-15.10	1509	0.282173
7.1	269	0.032949	0.000932	0.282205	0.000023	-20.06	-0.97	-14.33	1475	0.282200
8.1	287	0.024772	0.000809	0.282163	0.000020	-21.54	-0.98	-15.40	1529	0.282159
9.1	276	0.030767	0.001061	0.282203	0.000022	-20.13	-0.97	-14.26	1483	0.282197
10.1	271	0.031602	0.000883	0.282170	0.000017	-21.30	-0.97	-15.52	1522	0.282165
英云闪长岩 (GY36)										
1.1	292	0.020535	0.000540	0.282024	0.000011	-26.46	-0.98	-20.16	1709	0.282021
2.1	276	0.034088	0.000892	0.282028	0.000014	-26.33	-0.97	-20.43	1720	0.282023
3.1	286	0.015474	0.000445	0.281876	0.000015	-31.69	-0.99	-25.49	1907	0.281874
4.1	283	0.021575	0.000593	0.282045	0.000019	-25.71	-0.98	-19.62	1683	0.282042
5.1	281	0.018326	0.000546	0.282054	0.000019	-25.38	-0.98	-19.32	1667	0.282052
6.1	281	0.017630	0.000517	0.281977	0.000017	-28.10	-0.98	-22.04	1772	0.281975
7.1	276	0.028670	0.000862	0.282017	0.000017	-26.71	-0.97	-20.83	1733	0.282012
8.1	279	0.028547	0.000906	0.281989	0.000018	-27.68	-0.97	-21.72	1773	0.281985
9.1	269	0.039481	0.001228	0.282020	0.000018	-26.60	-0.96	-20.92	1746	0.282014
10.1	264	0.028267	0.000775	0.282011	0.000019	-26.90	-0.98	-21.25	1737	0.282008

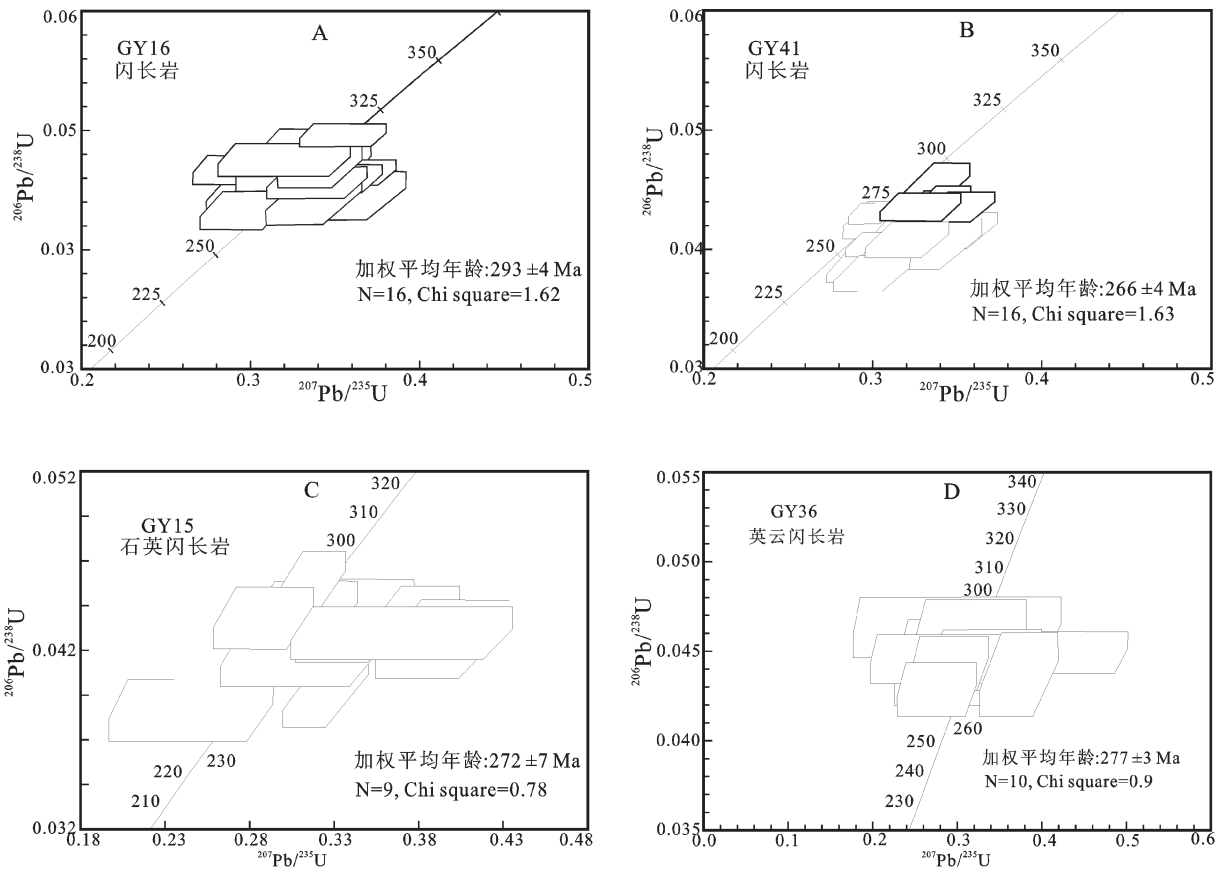


图 3 锆石 U-Pb 一致曲线图。(a) 闪长岩(GY16);(b) 闪长岩(GY41);(c)石英闪长岩(GY15);(d)英云闪长岩(GY36)
Fig.3 U-Pb concordia diagrams of zircons from (a) diorite (GY16);(b)diorite (GY41);(c) quartz diorite (GY15);(d) tonalite (GY36)

式年龄为 1 402~1 529 Ma,说明岩浆源区为古老的陆壳或陆壳下的富集地幔(subcontinental mantle)。

3.4 英云闪长岩 GY36

该样品中的锆石组成均匀,为短柱状或长柱状(0.1~0.3 mm)自形晶,发育韵律环带结构(图 2-d)。10 个分析点集中分布于一致曲线上(图 3-d),²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为 (277±3)Ma (n=10,x²=0.9),解释为该英云闪长岩的侵位年龄。

该样品 10 个 锆石 Hf 同位素数据(表 2)表明,锆石中 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值分别为 0.015474~0.039 481、0.000 445~0.001 228, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值比较均一,介于 0.281 876~0.282 054, ε_{Hf}(t) 值为 -25.49~-19.32,模式年龄为 1667~1907 Ma,指示岩浆源区为大陆岩石圈。

在 t-ε_{Hf}(t)图上(图 4)石英闪长岩和英云闪长

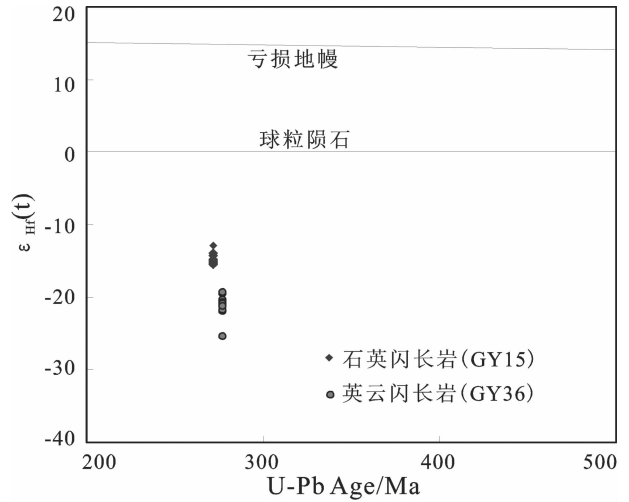


图 4 石英闪长岩和英云闪长岩 ε_{Hf}(t)-锆石年龄图
Fig.4 ε_{Hf}(t) versus zircon age for quartz diorite and tonalite

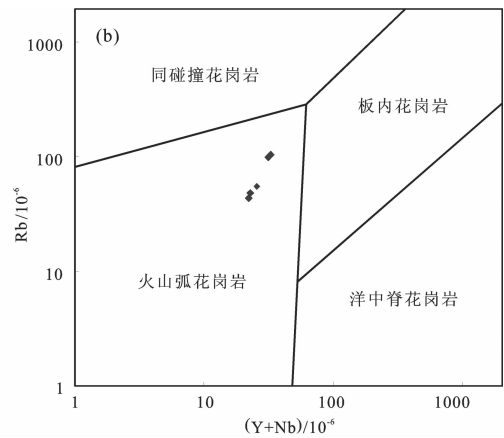
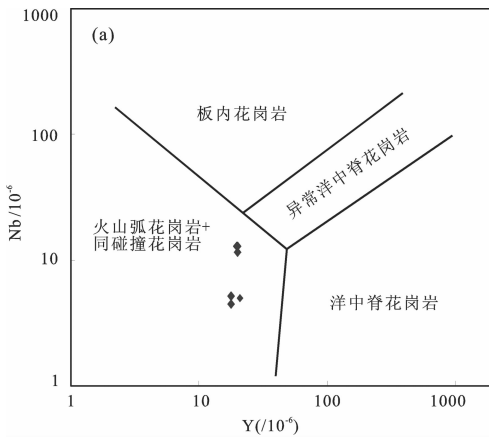


图 5 固阳-达茂旗地区花岗岩类(a) Nb-Y 图解;(b)Rb-Y+Nb 图解^[22]

Fig.5 Plots of (a) Nb versus Y and (b) Rb versus Y+Nb for granitic rocks in Guyang-Damaoqi area

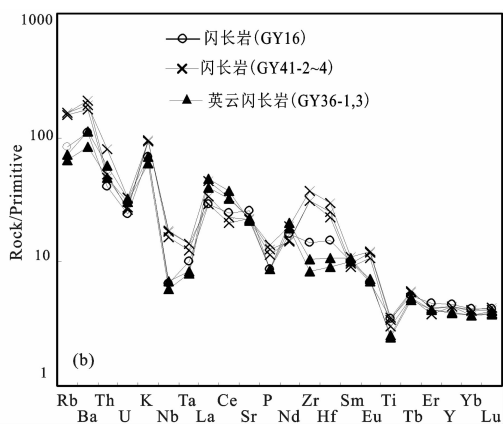
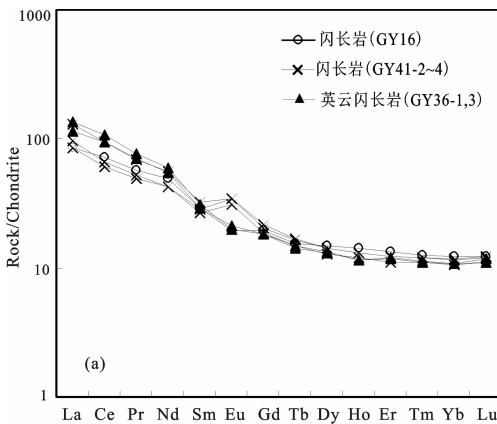


图 6 固阳地区花岗岩类稀土元素配分模式图 (a) 和微量元素蛛网图 (b)(球粒陨石和原始地幔值据[23])

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and spider diagrams of trace elements (b) for granitic rocks in Guyang-Damaoqi area

表 3 固阳二叠世花岗岩质岩石主量元素氧化物(%)、微量元素和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 3 Whole rock analyses of major (%), trace and rare earth elements (10^{-6}) for Permian granitic rocks in Guyang area

样品号	GY16-1	GY36-1	GY36-3	GY41-2	GY41-3	GY41-4
岩性	闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
SiO ₂	56.37	62.36	62.45	58.98	59.77	57.80
TiO ₂	0.75	0.55	0.53	0.74	0.65	0.77
Al ₂ O ₃	17.62	16.76	17.33	18.39	18.57	18.82
TFe ₂ O ₃	8.08	6.38	6.38	7.35	6.35	7.60
MnO	0.14	0.12	0.12	0.12	0.11	0.13
MgO	3.4	2.06	2.09	1.57	1.42	1.66
CaO	6.5	4.95	5.31	4.59	4.60	4.70
Na ₂ O	3.66	3.71	4.06	4.04	4.11	4.05
K ₂ O	2.13	2.12	1.87	2.84	2.86	2.82
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.19	0.28	0.25	0.30
H ₂ O ⁺	0.92	0.78	0.68			
CO ₂	0.25	0.08	0.08			
LOI	0.67	0.45	0.33	0.65	0.85	0.92
总量	100.68	100.51	101.42	99.55	99.54	99.57
Na ₂ O/K ₂ O	1.72	1.75	2.17	1.42	1.44	1.44
La	20.1	32.1	27.2	20.0	22.9	31.0
Ce	44	66	57.7	36.9	40.5	57.9
Pr	5.42	7.24	6.7	4.69	4.97	6.56
Nd	22.8	27.7	25.4	19.8	20.0	26.2
Sm	4.49	4.74	4.45	4.32	4.07	4.89
Eu	1.14	1.16	1.22	2.01	1.78	2.01
Gd	4.03	3.73	3.79	4.14	3.85	4.43
Tb	0.58	0.55	0.53	0.62	0.55	0.63
Dy	3.78	3.36	3.33	3.57	3.24	3.60
Ho	0.8	0.65	0.65	0.74	0.67	0.74
Er	2.23	1.96	1.98	2.04	1.83	2.01
Tm	0.32	0.28	0.29	0.30	0.28	0.30
Yb	2.07	1.82	1.83	1.97	1.81	2.00
Lu	0.31	0.28	0.3	0.30	0.28	0.31
(La/Yb) _N	6.97	12.65	10.66	7.29	9.10	11.12
(La/Sm) _N	2.9	4.4	3.9	3.0	3.6	4.1
(Gd/Yb) _N	1.61	1.70	1.71	1.74	1.76	1.83
δ Eu	0.80	0.81	0.89	1.43	1.36	1.30
Σ REE	112.07	151.57	135.37	101.40	106.82	142.59
Sc	21.1	10.5	11.2	13.8	13.0	14.0
V	158	71.4	75.9	67.8	63.8	70.8
Cr	26	15.1	11.6	10.3	9.54	12.6
Co	22.3	12.9	13.1	10.2	9.07	10.4
Ni	18.7	10.4	6.88	4.66	4.23	5.43
Rb	55.4	48.2	43.4	103	98.7	104
Sr	547	451	473	468	462	475
Y	20.8	17.8	17.7	19.7	20.0	19.9
Zr	159	118	94.5	345	345	421
Nb	4.8	5	4.3	12.6	11.3	12.7
Ba	772	785	589	1379	1182	1281
Hf	4.55	3.31	2.81	7.76	7.10	9.19
Ta	0.41	0.34	0.33	0.57	0.51	0.58
Pb	11.5	10.5	9.96	13.6	13.1	14.4
Th	3.41	5.08	4.01	4.27	4.01	6.88
U	0.51	0.68	0.64	0.55	0.58	0.69
Rb/Sr	0.10	0.11	0.09	0.22	0.21	0.22
Rb/Ba	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08
Th/Ta	8.32	14.94	12.15	7.47	7.87	11.93
Rb/Zr	0.35	0.41	0.46	0.30	0.29	0.25
Sr/Y	26.30	25.34	26.72	23.72	23.13	23.86

岩样品均落在地幔演化趋势线下方,且亦在球粒陨石线之下,指示岩浆来源于大陆岩石圈。

4 岩石地球化学

全岩地球化学分析(表 3)在西北大学大陆动力学实验室完成。二叠纪花岗岩质岩石 SiO₂ 含量变化范围为 56%~63%,在闪长岩至英云闪长岩的范畴;K₂O、Na₂O 分别为 1.8%~2.9%、3.6%~4.2%;Na₂O/K₂O 为 1.4~2.5,为钠质花岗岩质岩石(Marin et al., 2005)。在 Y-Nb 构造环境判别图上(图 5-a),这些岩石样品点落在火山弧花岗岩-同碰撞花岗岩区域;在(Y+Nb)-Rb 判别图上(图 5-b),投入火山弧花岗岩区域。岩石富集轻稀土(LREE)(图 6-a),并具有 Nb-Ta 负异常(图 6-b),其岩石地球化学特征反映岛弧岩石的基本特征^[21]。因此,笔者认为,固阳二叠纪闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩构成一个岛弧深成岩套^[3-5],而不可能是前人认为的被动大陆边缘岩浆岩^[12]。

5 地质意义

本次研究结果表明,固阳闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套形成于(293±4)Ma~(266±4)Ma,即早中二叠世。与 Zhang et al. (2011) 报导的同一地区的化学成分类似的钠质花岗岩质岩石的时代(282~277 Ma)大致相当,但年龄变化范围略大。应该指出的是,前人的研究地区局限于固阳县附近一个很小的范围,所采用 ICP-MS 锆石测年方法正处于发展阶段。笔者研究的固阳地区二叠纪花岗岩质岩石在化学成分具有相似性,在形成时代上具有连续性,可归为同一岩套。这一钠质岩套的侵位与索伦山 SSZ 型蛇绿岩(299~290 Ma;Jian et al., 2010)基本同时或稍晚。与固阳闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套在空间上共生的是二叠纪安山质火山岩(图 1-b),二者共同构成一个大陆边缘岛弧。这一大陆边缘岛弧位于索伦山 SSZ 型蛇绿岩南侧,二者相距 100~180 km。根据 Stern (2002),岩浆弧至海沟的平均距离为(166±60)km。索伦山古消减带与华北北缘二叠纪固阳大陆岛弧之间的时间和空间关系,证明了二者之间的成因联系。

致谢:诚挚感谢两位匿名审稿人和编辑李亚萍博士,他们对本文的撰写提出重要的、建设性意见和建议。

参考文献 (References):

- [1] Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. *Chemical Geology*, 1981, 32:139-154.
- [2] Macdonald R, Hawkesworth C J, Heath E. The Lesser Antilles volcanic chain;a study in arc magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49:1-76.
- [3] Barton M D, Battles D A, Debois G E, et al. Mesozoic contact metamorphism in the western United States [C]//Ernst W G. *Metamorphism and Crustal Evolution of the Western United States (Rubey volume)*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1988:110-178.
- [4] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79:1-24.
- [5] Ducea M N, Otamendi J E, Bergantz J, et al. Timing constraints on building an intermediate plutonic arc crustal section:U-Pb zircon geochronology of the Sierra Valle Fértil-La Huerta, Famatinian arc, Argentina [J]. *Tectonics* 29, TC4002, doi:10.1029/2009TC002615, 2010.
- [6] Stern R J. Subduction zones [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40:1-40.
- [7] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118:169-190.
- [8] 尚恒胜, 陶继雄, 宝音乌力吉, 等. 内蒙古白云鄂博地区早古生代弧-盆体系及其构造意义[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(3):160-168.
Shang Hengsheng, Tao Jixiong, Bao Yinwuliji, et al. The arc-basin system and tectonic significance of Early Paleozoic in Bayan Obo area Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(3):160-168 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陶继雄, 许立权, 贺锋, 等. 内蒙古巴特敖包地区早古生代洋壳消减的岩石证据 [J]. *地质调查与研究*, 2005, 28(1):1-8.
Tao Jixiong, Xu Liqian, He Feng. Petrological evidence for subduction of the Early Paleozoic oceanic crust in Bateobao, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [10] 许立权, 邓晋福, 陈志勇, 等. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义 [J]. *现代地质*, 2003, 17(4):428-434.
Xu Liqian, Deng Jinfu, Chen Zhiyong, et al. The identification of Ordovician adakites and its significance in northern Damao, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 2003, 17(4):428-434 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张维, 简平, 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学 [J]. *地质学报*, 2008, 82(6):778-787.
Zhang Wei, Jian Ping. SHRIMP dating of Early Paleozoic granites from north Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6):778-787 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, et al. Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calc-alkaline plutons within a metacratonic passive margin: The Early Permian Guyang batholith from the northern North China Craton [J]. *Lithos*, 2011, 125:569-591.
- [13] Condie K C. *Earth as an Evolving Planetary System* [M]. Elsevier, Amsterdam, 2005:1-447.
- [14] Farmer G L. *Continental Basaltic Rocks* [J]. *Treatise On Geochemistry*, 2007, ISBN (set):0-08-043751-5:1-39.
- [15] Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, et al. Archean crustal evolution in China: the Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle [J]. *Precambrian Research*, 1998, 38:381-403.
- [16] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1992, 149:171-184.
- [17] Williams I S, Buick I S, Cartwright I. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14:29-47.
- [18] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2003, 200:155-170.
- [19] 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.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10):2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [20] Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, (supp.):A158.
- [21] Kelemen P B, Shimizu N, Dunn T. Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: partitioning of K, Nb, La and Ce during melt/rock reaction in the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120:111-134.
- [22] Pearce J A, Harris S W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25:956-983.
- [23] Sun S S, Mc Donough W. F. *Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes* [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in ocean basins*. Geological Society (London) Special Publication, 1989, 42:313-345.

SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite-quartz diorite-tonalite suite in the northern margin of the North China Craton

ZHANG Wei, JIAN Ping

(SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Using a petrogeochemical means, we recognize a diorite-quartz diorite-tonalite suit in the northern margin of the North China craton, some 100–180 km south of the Permian Solonker ophiolite-decorated suture. The granitoid rocks are all sodic, consistent in composition with a plutonic arc. SHRIMP dating of zircons from two diorites yielded weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 293 ± 4 Ma and 266 ± 4 Ma. A quartz diorite and a tonalite are dated at 272 ± 7 Ma and 277 ± 3 Ma respectively. These Permian granitoid rocks were thus emplaced continuously. They are nearly coeval with, or slightly younger than, the Solonker SSZ (supersubduction zone)-type ophiolite. On the basis of a specific tectonic setting and an age relationship with the Permian Solonker SSZ-type ophiolite, we interpret the sodic granitoid suit investigated, together with near-contemporaneous andesites of the area, to form a continental margin arc.

Key words: continental margin arc; sodic plutonic suite; zircon age; Guyang

About the first author: ZHANG Wei, female, born in 1979, post-doctoral, engages in the study of isotopic geochronology; E-mail: zhangwei@bjshrimp.cn.