

八达岭花岗岩的年龄、地球化学特征及其地质意义*

焦守涛^{1,2} 颜丹平¹ 张旗² 李承东³ 万博² 田忠华²

JIAO ShouTao^{1,2}, YAN DanPing¹, ZHANG Qi², LI ChengDong³, WAN Bo² and TIAN ZhongHua²

1. 中国地质大学, 北京 100083

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2013-01-08 收稿, 2013-02-24 改回

Jiao ST, Yan DP, Zhang Q, Li CD, Wan B and Tian ZH. 2013. Zircon U-Pb age, geochemistry characteristics of Badaling granitoid complex and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 769–780

Abstract The Badaling granitoid complex is composed of different ages and types of plutons and is located in the northern margin of the North China Craton. In this study, three plutons, Huanghuacheng granite porphyry, Fenshuiling granite and Tieluzi monzonitic granite, are dated using LA-MC-ICP-MS zircon U/Pb technique and analyzed to obtain whole-rock compositions. The Tieluzi monzonitic granite pluton is dated to be 137 ± 1.2 Ma and belongs to adakite-like granite with $Sr = 312 \times 10^{-6}$ ($> 300 \times 10^{-6}$) and $Yb = 0.98 \times 10^{-6}$ ($< 2.5 \times 10^{-6}$). The Huanghuacheng granite porphyry body is dated to be 133 ± 1.3 Ma and belongs to Himalaya-type granite with $Sr = 193 \times 10^{-6}$ ($< 300 \times 10^{-6}$) and $Yb = 1.43 \times 10^{-6}$ ($< 2 \times 10^{-6}$). The Fenshuiling granite pluton is dated to be 128.5 ± 1.2 Ma and belongs to Nanling-type granite with very low $Sr = 10.2 \times 10^{-6}$ ($< 100 \times 10^{-6}$) and low Al_2O_3 ($Al_2O_3 = 13.66\%$) and $Yb = 0.98 \times 10^{-6}$ and very negative Eu anomalies ($Eu/Eu^* = 0.32$). The compositions of these plutons in different ages and different Sr, Yb signatures indicate that the northern East China plateau may have been uplifted before 137 Ma and then started to collapse at 133 Ma and ended at 130 Ma.

Key words Badaling granitoid complex; Geochemistry characteristics; Zircon U-Pb age; East China Plateau

摘要 八达岭花岗岩基是由不同时代、不同类型的花岗岩侵入体组成的,对八达岭花岗岩中的黄花城花岗斑岩、分水岭北西花岗岩和铁炉子二长花岗岩的岩石学、岩相学、地球化学特征及锆石 U-Pb 年代学研究的结果表明,铁炉子二长花岗岩具有高 Sr (312×10^{-6})、低 Yb (0.98×10^{-6}) 和高 Sr/Yb 值(318),属于埃达克型花岗岩,其侵位年龄 137 Ma;黄花城花岗斑岩具低 Sr (193×10^{-6})、低 Yb (1.43×10^{-6}) 的特征,属喜马拉雅型花岗岩,其侵位年龄为 133 Ma;分水岭花岗岩 Sr 含量很低(10.2×10^{-6})、低 Yb (0.98×10^{-6})、贫铝 ($Al_2O_3 = 13.66\%$),且 REE 图上具明显的负铕异常($Eu/Eu^* = 0.32$),属于南岭型花岗岩,侵位年龄为 128.5 Ma。研究表明,137 Ma 的埃达克型花岗岩代表了中国东部高原存续的时间,133 Ma 的喜马拉雅型花岗岩指示高原可能开始垮塌了,而 128 Ma 的南岭型花岗岩表明高原已经垮塌了。因此,八达岭花岗岩不同类型花岗岩的时代及其 Sr、Yb 特征可能反映了中国东部高原北部经历了从形成到垮塌的全过程。

关键词 八达岭花岗岩杂岩体;地球化学特征;锆石 U-Pb 年龄;中国东部高原

中图法分类号 P588.121; P597.3

八达岭花岗岩位于北京的北部,是中国东部具有代表性 的岩体之一,可是研究程度并不高。从 20 世纪 50 年代初

* 本文受国家自然科学基金重大研究计划项目(91014001)资助。

第一作者简介:焦守涛,男,1988 年生,硕士生,构造地质学专业,E-mail: jupiter.jst@163.com

期,在池际尚教授的带领下,北京地质学院曾经对八达岭花岗岩作了开创性的研究。随后北京市地质局和北京地质研究所对八达岭花岗岩作了大量详细的区域地质和岩石学研究,取得了丰硕的成果(白志民等, 1991; 郁建华等, 1994)。

在 21 世纪初期,王焰和张旗(2001)、钱青(2001)、钱青等(2002)、Qian *et al.* (2003)发现八达岭花岗岩中有埃达克岩(或高 Ba-Sr 花岗岩)出露,但是,他们只对岩体进行了地球化学研究,而没有开展同位素定年工作,从而限制了对八达岭花岗岩成因和地球动力学背景的认识。Su *et al.* (2007)对薛家石梁杂岩体进行了详细的研究,根据锆石 SHRIMP 定年为 132.8 ~ 123.3Ma,认为形成于早白垩世早期,并经历了岩浆混合作用和结晶分异作用形成的杂岩体,并讨论了岩浆源区,认为中国东部岩石圈减薄的机制是岩石圈的拆沉作用。汪洋(2009)考察了侵位于八达岭岩基中的白查岩体,认为白查岩体起源于华北克拉通下地壳铁镁质源岩在相对贫水、高温、低氧逸度条件下的低程度部分熔融,侵位年龄为 127Ma 的白查岩体的形成标志着燕山西段崩塌阶段的到来。

本文通过对八达岭花岗杂岩详细的野外调查、室内的薄片鉴定、地球化学分析及精确的年代学工作,发现八达岭花

岗岩存在不同时代不同类型的花岗岩,并初步探讨了其地球动力学意义。

1 地质概况

八达岭花岗杂岩是指露于北京以北,八达岭至长园一带,长约 90km,宽约 10 ~ 20km,出露面积约 540km²,总体呈北东向带状展布,是燕山期多期次岩浆侵入活动的典型代表。现已查明,八达岭花岗岩由 121 个侵入体组成,并区分为 8 个超单元(白志民等, 1991; 郁建华等, 1994)。八达岭花岗杂岩主要是由辉长岩、闪长岩、石英二长岩、二长闪长岩、二长花岗岩、花岗岩、碱性花岗岩和石英正长岩等组成的一个复式岩基(图 1)。出露地层主要为中、上元古界地层,零星分布太古界,下古生界,中生界,新生界地层。

2 岩相学特征

本次研究对八达岭岩基中的黄花城、分水岭、铁炉子岩体作了详细的研究(图 1)。各岩体主要岩相学特征如下:

黄花城岩体主要由红色中粗粒似斑状花岗岩(图 2a, b)

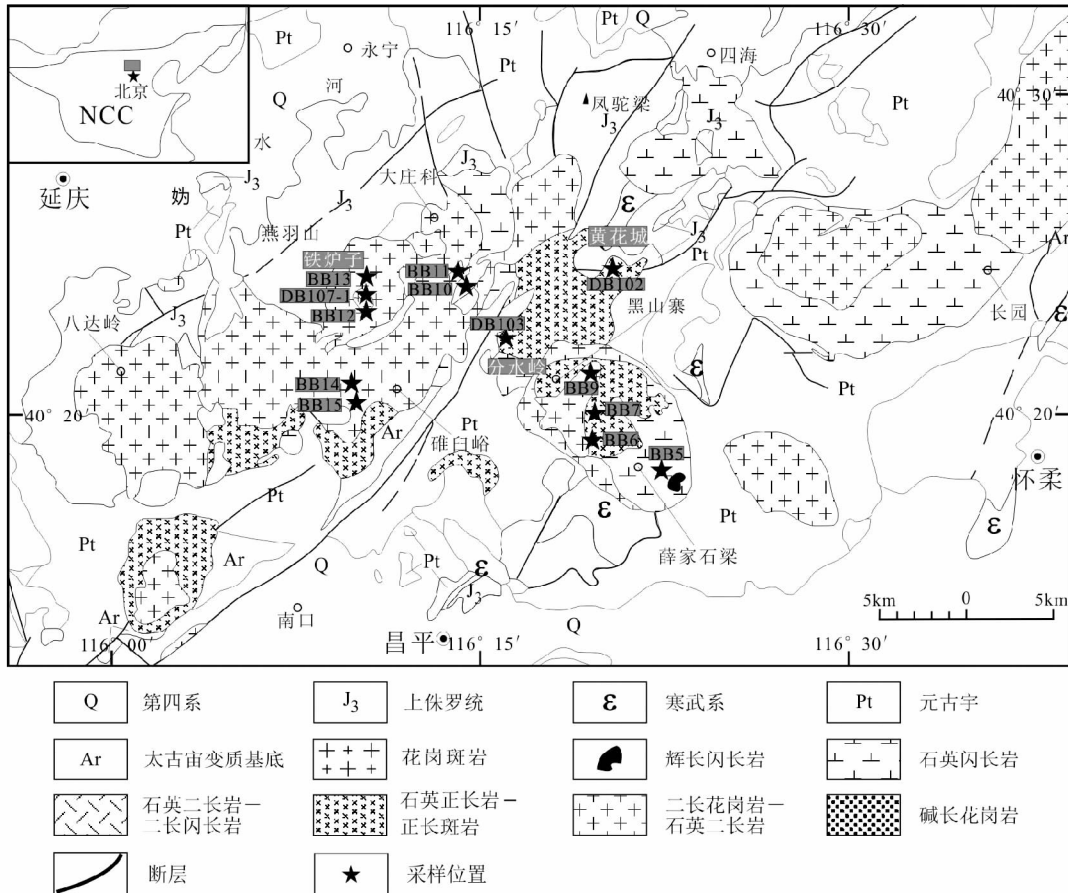


图 1 北京八达岭花岗杂岩地质略图(据郁建华等, 1994)

Fig. 1 Sketch geological map of granitoid rocks in Badaling area, Beijing (after Yu *et al.*, 1994)

表1 八达岭花岗杂岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb data of Badaling granitoid complex

测点号	含量($\times 10^{-6}$)				同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
DB101.1	1	60	0.0491	0.0111	0.1416	0.0204	0.0209	0.0004	1.6071	0.0329	152	530	134	19	133	3
DB101.2	2	90	0.0640	0.0091	0.1784	0.0164	0.0202	0.0003	1.4971	0.0244	743	299	167	15	129	2
DB101.3	2	89	0.0642	0.0064	0.1748	0.0154	0.0197	0.0004	1.5976	0.0117	749	211	164	14	126	2
DB101.4	1	60	0.0800	0.0122	0.2390	0.0224	0.0217	0.0004	1.5982	0.0373	1198	302	218	20	138	3
DB101.5	2	86	0.0564	0.0074	0.1646	0.0220	0.0212	0.0003	1.7133	0.0080	468	290	155	21	135	2
DB101.6	2	89	0.0535	0.0075	0.1540	0.0168	0.0209	0.0003	1.3417	0.0080	348	317	145	16	133	2
DB101.7	1	31	0.0693	0.0065	0.2023	0.0301	0.0212	0.0007	1.6070	0.0808	907	194	187	28	135	4
DB101.8	3	123	0.0556	0.0059	0.1629	0.0240	0.0213	0.0006	0.8694	0.0028	436	237	153	23	136	4
DB101.9	2	75	0.0629	0.0091	0.1816	0.0206	0.0209	0.0004	1.4353	0.0362	705	308	169	19	134	2
DB101.10	3	119	0.0681	0.0059	0.2054	0.0180	0.0219	0.0003	2.5961	0.0176	872	180	190	17	139	2
DB101.11	3	121	0.0563	0.0057	0.1615	0.0158	0.0208	0.0003	2.0468	0.0420	463	224	152	15	133	2
DB101.12	4	161	0.0550	0.0047	0.1589	0.0135	0.0210	0.0004	1.2092	0.0068	412	189	150	13	134	2
DB101.13	2	99	0.0653	0.0067	0.1857	0.0196	0.0206	0.0004	1.5031	0.0202	783	217	173	18	132	2
DB101.14	2	88	0.0831	0.0080	0.2392	0.0221	0.0209	0.0003	1.4710	0.0303	1272	187	218	20	133	2
DB101.15	2	81	0.0497	0.0049	0.1459	0.0124	0.0213	0.0003	1.6553	0.0302	182	229	138	12	136	2
DB101.16	2	76	0.0559	0.0094	0.1588	0.0158	0.0206	0.0004	1.4576	0.0091	448	373	150	15	131	2
DB101.17	2	89	0.0530	0.0082	0.1509	0.0129	0.0207	0.0003	1.4690	0.0696	328	351	143	12	132	2
DB101.18	2	63	0.0793	0.0049	0.2237	0.0271	0.0205	0.0005	1.4442	0.0127	1180	122	205	25	131	3
DB101.19	1	61	0.0641	0.0164	0.1889	0.0230	0.0214	0.0007	1.5574	0.0047	745	540	176	21	136	5
DB101.20	2	81	0.0709	0.0100	0.2026	0.0216	0.0207	0.0003	1.5688	0.0666	956	288	187	20	132	2
DB101.21	5	212	0.0589	0.0051	0.1664	0.0149	0.0205	0.0003	1.2524	0.0082	563	188	156	14	131	2
DB101.22	1	36	0.0674	0.0119	0.1965	0.0185	0.0211	0.0010	1.8164	0.0102	851	366	182	17	135	7
DB101.24	1	25	0.0552	0.0070	0.1615	0.0204	0.0212	0.0014	1.4649	0.0170	419	284	152	19	135	9
DB101.25	2	71	0.0465	0.0134	0.1325	0.0163	0.0207	0.0005	1.2525	0.0019	24	692	126	15	132	3
DB104.1	50	1727	0.0481	0.0005	0.1340	0.0014	0.0202	0.0002	0.5814	0.0122	105	24	128	1	129	1
DB104.2	32	1175	0.0525	0.0007	0.1479	0.0018	0.0204	0.0002	0.7384	0.0040	305	30	140	2	130	1
DB104.3	46	1489	0.0510	0.0006	0.1431	0.0024	0.0203	0.0002	0.5123	0.0124	243	29	136	2	130	1
DB104.4	66	2640	0.0519	0.0007	0.1469	0.0022	0.0205	0.0002	0.8744	0.0293	283	29	139	2	131	1
DB104.5	45	1566	0.0498	0.0009	0.1358	0.0027	0.0198	0.0002	0.6264	0.0136	184	40	129	3	126	1
DB104.6	54	1766	0.0500	0.0005	0.1414	0.0017	0.0205	0.0002	0.5472	0.0079	197	23	134	2	131	1
DB104.7	89	2858	0.0535	0.0009	0.1469	0.0014	0.0199	0.0003	0.6225	0.0014	350	36	139	1	127	2
DB104.8	85	2946	0.0473	0.0004	0.1368	0.0013	0.0210	0.0002	0.6941	0.0065	64	18	130	1	134	1
DB104.9	56	2381	0.0514	0.0008	0.1418	0.0016	0.0200	0.0002	0.8956	0.0176	258	34	135	2	128	1
DB104.10	71	2372	0.0519	0.0004	0.1442	0.0013	0.0201	0.0002	0.5904	0.0010	282	19	137	1	129	1
DB104.11	52	1918	0.0498	0.0005	0.1392	0.0013	0.0203	0.0002	0.7464	0.0067	187	23	132	1	129	1
DB104.12	89	3134	0.0563	0.0007	0.1480	0.0022	0.0191	0.0002	0.6848	0.0113	463	27	140	2	122	1
DB104.13	88	3026	0.0531	0.0004	0.1494	0.0012	0.0204	0.0002	0.6494	0.0092	331	15	141	1	130	1
DB104.14	89	3398	0.0551	0.0009	0.1490	0.0020	0.0196	0.0002	0.8467	0.0066	416	36	141	2	125	1
DB104.15	78	2812	0.0517	0.0020	0.1404	0.0028	0.0197	0.0003	0.7810	0.0049	274	90	133	3	126	2
DB104.16	68	2627	0.0513	0.0008	0.1414	0.0016	0.0200	0.0002	0.6257	0.0113	255	34	134	2	128	1
DB104.18	72	2777	0.0491	0.0007	0.1362	0.0016	0.0201	0.0002	0.7255	0.0020	151	33	130	2	128	1
DB104.19	79	2749	0.0493	0.0007	0.1352	0.0017	0.0199	0.0002	0.5845	0.0040	163	34	129	2	127	1
DB104.20	60	2088	0.0487	0.0008	0.1382	0.0014	0.0206	0.0002	0.6201	0.0007	134	38	131	1	131	1
DB104.21	70	2555	0.0504	0.0005	0.1405	0.0019	0.0202	0.0002	0.6881	0.0035	214	23	133	2	129	1
DB104.22	76	2422	0.0485	0.0007	0.1301	0.0015	0.0195	0.0002	0.5446	0.0018	121	35	124	1	124	1
DB104.23	88	3204	0.0485	0.0011	0.1291	0.0023	0.0193	0.0002	0.8491	0.0074	122	56	123	2	123	1
DB104.24	92	3347	0.0492	0.0006	0.1388	0.0013	0.0205	0.0002	0.6813	0.0098	155	30	132	1	131	1
DB104.25	59	2066	0.0504	0.0007	0.1430	0.0022	0.0206	0.0002	0.5696	0.0157	215	31	136	2	131	1

续表 1

Continued Table 1

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
DB107-2.1	10	348	0.0607	0.0020	0.1765	0.0063	0.0211	0.0002	0.7421	0.0042	628	72	165	6	135	1
DB107-2.2	2	77	0.0625	0.0087	0.1836	0.0219	0.0213	0.0002	1.3996	0.0129	693	297	171	20	136	2
DB107-2.3	3	128	0.0479	0.0065	0.1404	0.0126	0.0212	0.0002	1.6458	0.0245	96	321	133	12	136	1
DB107-2.4	3	79	0.0502	0.0087	0.1511	0.0167	0.0218	0.0003	0.5055	0.0021	206	403	143	16	139	2
DB107-2.5	4	111	0.0424	0.0045	0.1253	0.0185	0.0214	0.0003	0.3541	0.0015	-203	267	120	18	137	2
DB107-2.6	12	444	0.0567	0.0024	0.1698	0.0065	0.0217	0.0002	0.9729	0.0083	481	93	159	6	138	1
DB107-2.7	5	167	0.0597	0.0056	0.1703	0.0178	0.0207	0.0003	0.6729	0.0293	593	204	160	17	132	2
DB107-2.8	2	95	0.0498	0.0078	0.1455	0.0278	0.0212	0.0004	1.0910	0.0048	187	363	138	26	135	3
DB107-2.9	1	38	0.0583	0.0093	0.1620	0.0277	0.0201	0.0005	1.0517	0.0192	542	349	152	26	129	3
DB107-2.10	1	32	0.0689	0.0087	0.2089	0.0248	0.0220	0.0006	0.8589	0.0150	896	262	193	23	140	4
DB107-2.11	1	41	0.0457	0.0054	0.1344	0.0181	0.0213	0.0005	0.8038	0.0047	-20	284	128	17	136	3
DB107-2.12	1	29	0.0479	0.0059	0.1421	0.0207	0.0215	0.0009	1.7981	0.0506	93	292	135	20	137	5
DB107-2.13	11	449	0.0504	0.0015	0.1513	0.0046	0.0218	0.0002	0.9275	0.0050	215	68	143	4	139	1
DB107-2.14	9	230	0.0474	0.0029	0.1447	0.0088	0.0221	0.0002	0.4015	0.0072	69	143	137	8	141	1
DB107-2.15	19	515	0.0502	0.0017	0.1525	0.0062	0.0220	0.0003	0.4412	0.0027	204	79	144	6	140	2
DB107-2.16	1	47	0.0468	0.0071	0.1435	0.0217	0.0222	0.0004	0.7284	0.0173	41	361	136	21	142	2
DB107-2.17	7	305	0.0515	0.0029	0.1482	0.0082	0.0208	0.0002	1.7955	0.0149	265	130	140	8	133	1
DB107-2.18	2	67	0.0516	0.0101	0.1555	0.0198	0.0219	0.0004	0.8411	0.0105	266	451	147	19	139	2
DB107-2.19	10	352	0.0500	0.0018	0.1487	0.0056	0.0216	0.0002	0.6536	0.0068	193	85	141	5	138	1
DB107-2.20	2	41	0.0676	0.0059	0.2023	0.0280	0.0217	0.0006	0.5712	0.0187	856	181	187	26	138	4
DB107-2.21	6	164	0.0467	0.0047	0.1379	0.0132	0.0214	0.0002	0.3973	0.0099	33	242	131	13	137	2
DB107-2.22	3	95	0.0490	0.0070	0.1429	0.0200	0.0211	0.0003	0.7824	0.0123	149	333	136	19	135	2
DB107-2.23	4	130	0.0499	0.0039	0.1498	0.0122	0.0218	0.0002	0.6504	0.0106	191	182	142	12	139	1
DB107-2.24	5	149	0.0501	0.0045	0.1552	0.0138	0.0225	0.0003	0.6219	0.0048	198	210	146	13	143	2
DB107-2.25	4	143	0.0538	0.0054	0.1595	0.0204	0.0215	0.0004	0.7749	0.0062	364	227	150	19	137	2

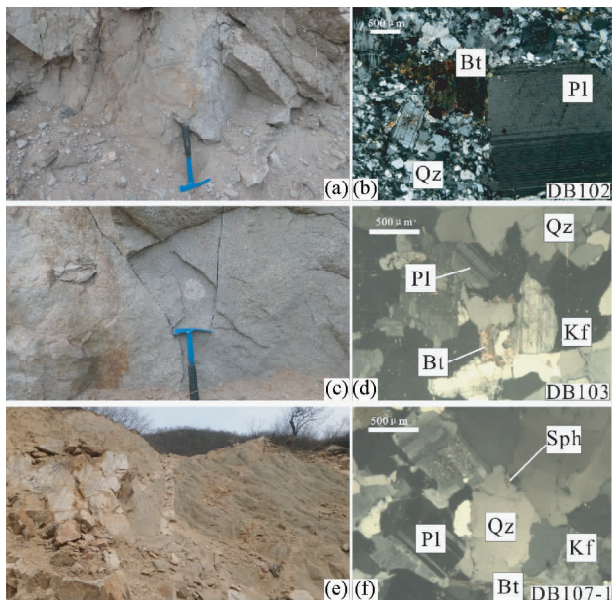


图2 样品野外照片及显微照片

Fig. 2 Field photo and micro photo of samples

组成,具似斑状结构,斜长石发育环带结构,主要造岩矿物为斜长石 30% ~ 35%、钾长石 35 ~ 45%、石英 20% ~ 27%,暗色矿物以黑云母为主 3% ~ 5%,副矿物有锆石、磁铁矿等。分水岭岩体主要为灰色中粒花岗岩(图 2c, d),块状构造,主要矿物斜长石 25% ~ 34%、钾长石 35% ~ 40%、黑云母 3% ~ 9%、石英 22% ~ 30%,部分黑云母蚀变为绿泥石。铁炉子岩体主要为灰色中粒二长花岗岩(图 2e, f),块状构造,主要矿物斜长石 27 ~ 38%、钾长石 28% ~ 35%、石英 15% ~ 20%,黑云母和白云母 15% 左右,副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿等。

3 锆石年代学

锆石单矿物分离在河北省区域地质调查研究所完成,首先清洗样品表面以防外界的杂质污染,然后将样品粉碎,进行重选和电磁选后再双目镜下挑选锆石。然后将待测锆石制靶、打磨抛光和照相。首先,将锆石排列在载玻片的双面胶上,放上 PVC 杯,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合

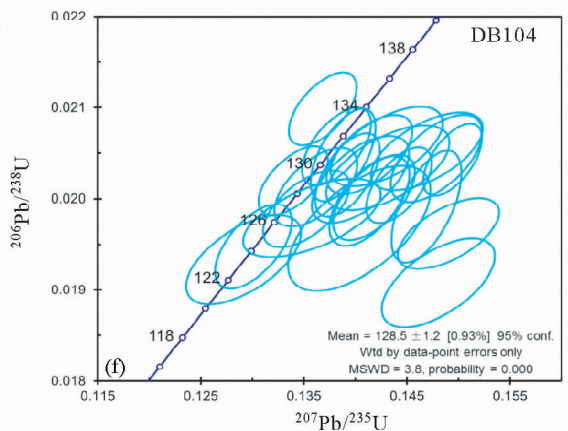
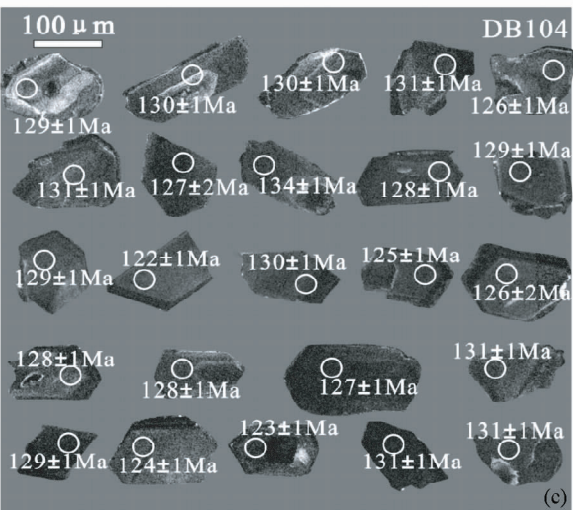
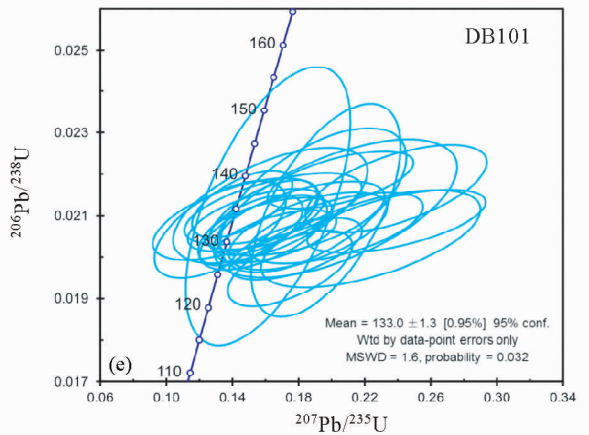
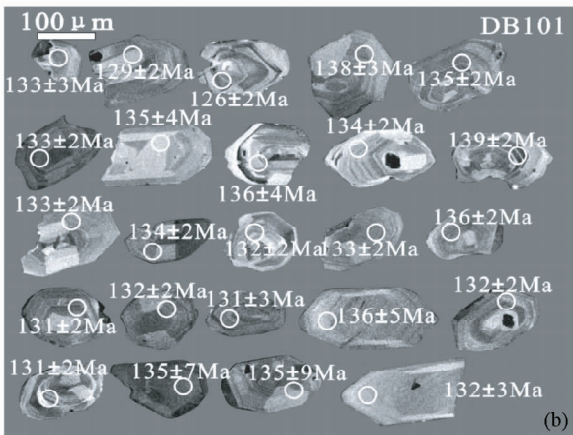
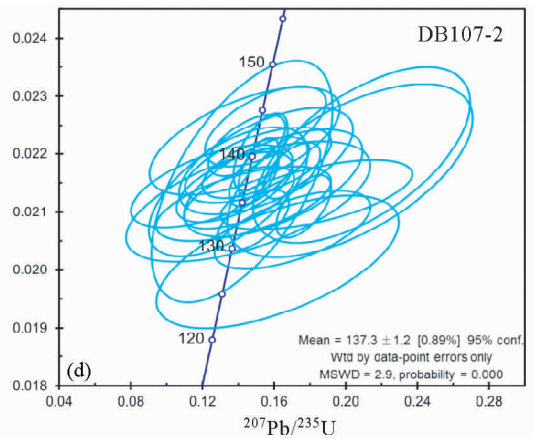
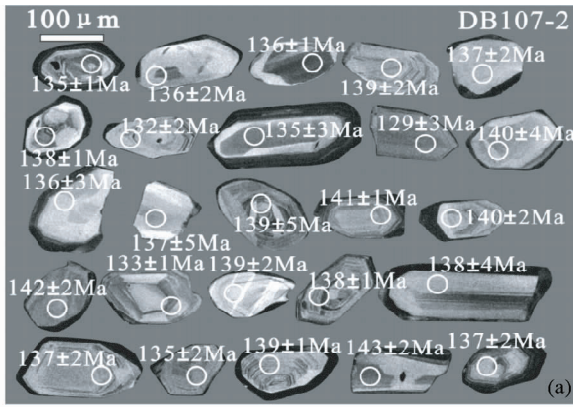


图3 锆石的阴极发光图像、测点位置及谐和曲线

Fig. 3 CL images, testing point locations and U-Pb concordia diagrams of the zircon

后注入 PVC 杯,待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,并对其进行抛光,抛光后进行反射光和透射光照相,再在表面镀金,然后进行阴极发光 (CL) 照相,查明锆石内部结构和表面裂隙的分布情况,确保上机实验时挑选合适的区域。锆石透射光和反射光观察与照相,阴极发光 (CL) 照相在中国地质调查局天津地质矿产研究所完成。

锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质调查局天津地质矿产

研究所同位素实验室完成。使用仪器为 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统 (LA-MC-ICP-MS)。样品测试时的激光束斑直径为 30 μm,能量密度为 13 ~ 14 J/cm²,频率为 8 Hz。激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune,利用动态变焦扩大色散同时接受质量数相差很大的 U-Pb 同位素,从而进行锆石 U-Pb 同位素原位测定。本文测试使用的标准锆石为 TEMORA (GJ-1) 作为外部锆石年龄

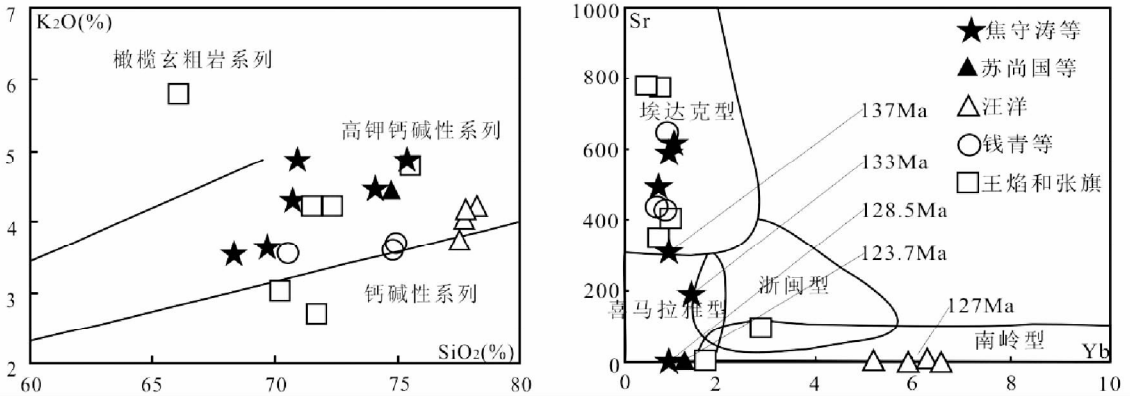


图4 八达岭花岗杂岩的 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图(a)和 Sr-Yb 图(b)

资料来源:五角星-本文;正方形-王焰和张旗(2001);圆形-钱青等(2002);空心三角形-汪洋(2009);实心三角形-Su *et al.* (2007). 图4b的界线据张旗等(2010)

Fig. 4 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (a) and Sr-Yb (b) diagrams of Badaling granitoid complex

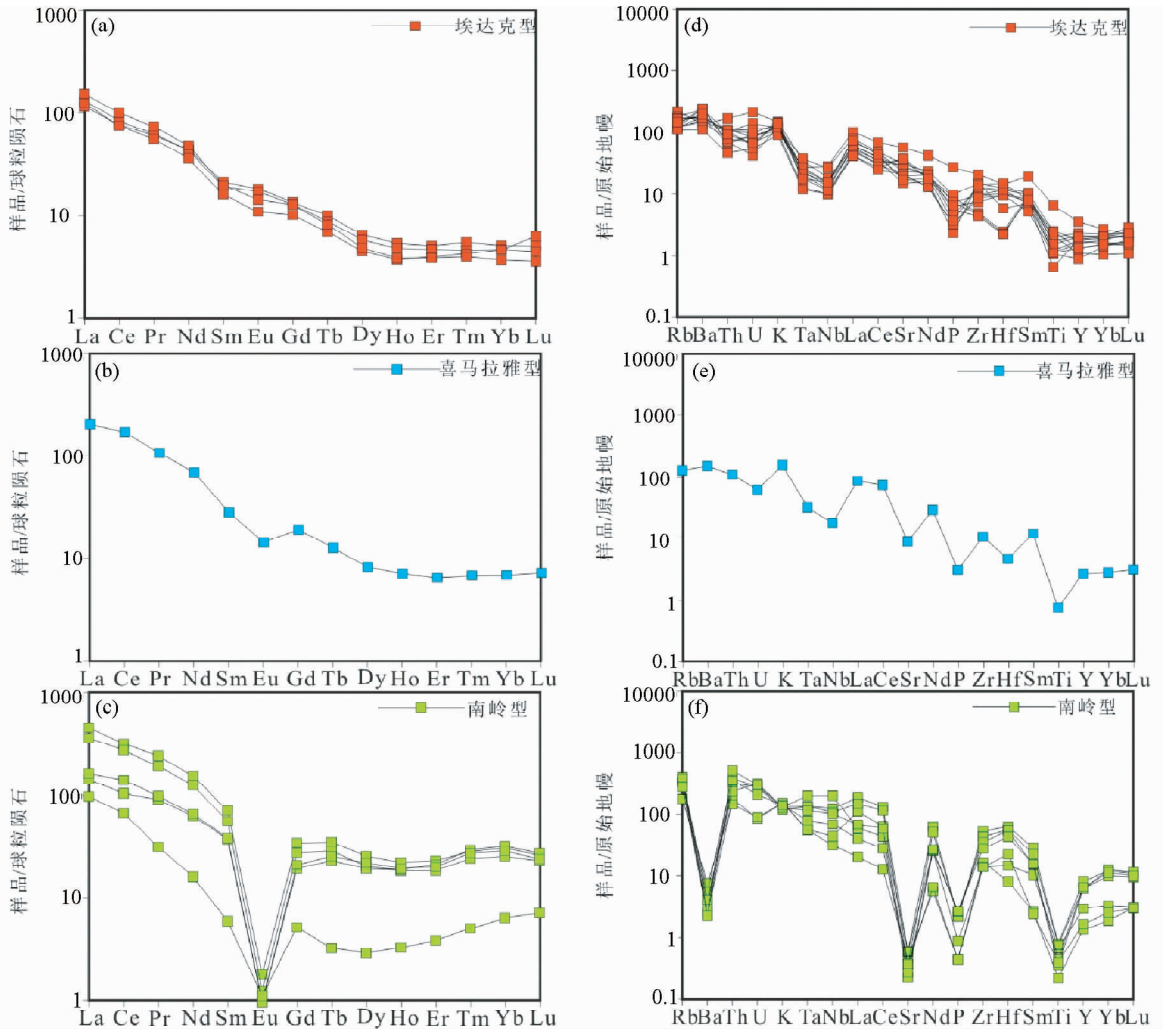


图5 稀土元素球粒陨石标准化分配型式图(标准化值据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distributions patterns (normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized spider diagrams (normalization values after Sun and McDonough, 1989) for trace elements

表2 样品的主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)含量
Table 2 Major (wt%), trace and rare earth ($\times 10^{-6}$) elements contents of the samples

样品号	DB102	DB103	DB105	DB106	DB107-1	DB108
SiO ₂	70.82	75.26	68.26	69.60	73.96	70.66
TiO ₂	0.17	0.05	0.42	0.37	0.14	0.27
Al ₂ O ₃	15.25	13.56	14.87	15.21	13.66	14.65
Fe ₂ O ₃	1.43	0.27	1.60	1.32	0.54	1.10
FeO	0.34	0.19	1.48	1.22	0.55	0.93
MnO	0.061	0.029	0.049	0.061	0.039	0.046
MgO	0.32	0.06	1.29	0.84	0.26	0.58
CaO	1.04	0.54	2.92	2.12	1.15	1.92
Na ₂ O	4.83	4.59	4.17	4.29	3.99	4.32
K ₂ O	4.84	4.84	3.55	3.62	4.44	4.30
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.19	0.16	0.05	0.12
LOI	0.60	0.27	0.51	0.58	0.51	0.44
TOTAL	99.78	99.67	99.31	99.38	99.29	99.35
Li	16.2	48.4	13.9	28.4	26.5	24.4
Be	1.8	4.7	2.0	1.8	2.9	2.4
Sc	4.4	4.9	6.3	4.7	3.7	4.3
V	19.8	6.2	56.6	39.5	11.9	28.0
Cr	6.5	6.3	16.7	9.9	6.1	8.3
Co	1.4	0.5	7.4	4.6	1.3	3.2
Ni	1.2	1.1	7.5	2.3	1.3	1.9
Cu	11.3	11.8	12.8	14.0	12.7	12.4
Zn	42.5	14.8	33.2	72.1	34.8	50.1
Ga	15.7	19.2	16.5	17.0	17.3	17.9
Rb	84.0	218	77.2	86.1	137	114
Sr	195	10.2	614	587	313	495
Zr	122.6	193.0	55.1	52.6	166.5	48.7
Nb	13.2	23.5	9.4	8.3	13.0	11.1
Mo	0.29	0.17	0.70	0.34	0.16	0.25
Cs	1.32	3.23	1.39	1.37	1.47	2.28
Ba	1079	17.3	1229	1668	962	1602
Hf	1.50	2.63	0.76	0.70	1.80	0.68
Ta	1.36	2.39	0.96	0.86	1.45	1.01
W	0.34	0.30	0.39	0.37	0.30	0.18
Tl	0.45	1.23	0.44	0.58	0.60	0.66
Pb	23.9	44.6	11.7	23.8	32.5	27.6
Th	9.61	15.89	5.66	5.98	14.19	8.88
U	1.34	1.86	1.82	0.88	4.43	1.29
Y	12.60	6.41	10.41	9.47	8.26	7.73
La	61.71	14.63	35.90	41.26	38.83	48.02
Ce	135.12	23.75	63.02	68.72	61.30	81.84
Pr	12.71	2.82	7.49	7.76	6.88	9.12
Nd	40.75	7.92	26.67	26.28	21.90	29.21
Sm	5.43	1.23	4.19	3.79	3.16	3.87
Eu	1.05	0.13	1.35	1.26	0.81	1.06
Gd	4.89	1.16	3.53	3.37	2.65	3.34
Tb	0.60	0.19	0.48	0.42	0.33	0.39
Dy	2.65	0.96	2.11	1.88	1.47	1.58
Ho	0.51	0.21	0.39	0.35	0.27	0.28
Er	1.36	0.65	1.08	1.00	0.84	0.82
Tm	0.22	0.13	0.18	0.15	0.14	0.13
Yb	1.43	0.98	1.08	0.99	0.98	0.78
Lu	0.24	0.23	0.17	0.15	0.21	0.12

标样,利用 NIST610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量,采用²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正。年龄数据计算处理采用国际标准程序 Isoplot。

锆石形态大多自形,少见残留核部发育,锆石大小长约 100~300 μm ,宽约 50~150 μm ,长宽比值 1~2,CL 图像中可见锆石内部显示典型的岩浆震荡环带结构,DB104 样品由于 U、Pb 含量高图像偏暗,锆石的 Th/U 比值为 0.35~2.60,为典型的岩浆锆石。

如图 3 所示,为各样品锆石的阴极发光图像、²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄测试结果和它们的年龄谱和曲线,具体数据见表 1。测试结果表明,三个岩体的年龄不同:铁炉子二长花岗岩的侵位年龄为 137 \pm 1.2Ma,黄花城似斑状花岗岩的侵位年龄为 133 \pm 1.3Ma,分水岭花岗岩的侵位年龄为 128.5 \pm 1.2Ma。

4 地球化学特征

样品为新鲜的花岗岩样品,样品加工在无污染的设备中进行,主量、微量和稀土元素分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。本文分析了八达岭 6 件岩浆岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素,分析结果见表 2。三个花岗岩均富钾,主要落入高钾钙碱性系列(图 4a),大多是准铝质岩石,少数过铝质岩石。十分有意义的是,三个侵入体的地球化学特征不同,分属于 3 种不同的花岗岩类型(图 4b、图 5)。铁炉子二长花岗岩富 Sr 贫 Yb($\text{Sr} = 312.6 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} = 0.98 \times 10^{-6}$),属于埃达克型花岗岩。黄花城似斑状花岗岩具低 Sr 低 Yb($\text{Sr} = 193 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} = 1.43 \times 10^{-6}$)的特征,为喜马拉雅型花岗岩。分水岭花岗岩 Sr 含量很低($\text{Sr} = 10.2 \times 10^{-6}$),贫铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.66\%$), $\text{Yb} = 0.98 \times 10^{-6}$,REE 具明显的负铕异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32$),属于南岭型花岗岩。

5 讨论

一个大花岗岩体或岩基往往是由许多不同时代的花岗岩体组成的,它们之间的关系是一个值得关注的问题。张旗等(2006)根据花岗岩与其残留相的关系将其划分为 4 类,它们主要体现在 Sr-Yb 含量变化上以及 REE 的分布型式上(张旗等, 2010),分别是高 Sr 低 Yb 的埃达克型花岗岩,残留相为石榴石+金红石,压力通常 >1.5GPa;低 Sr 和 Yb 的喜马拉雅型花岗岩,残留相为斜长石+石榴石,压力大约在 1.0~1.5GPa;低 Sr 高 Yb 的浙闽型花岗岩(相当于岛弧安山岩-英安岩-流纹岩组合),残留相为斜长石+角闪石,压力 <1.0GPa;Sr 含量非常低和 Yb 含量较高的南岭型花岗岩(相当于 A 型花岗岩),残留相为斜方辉石+高钙斜长石,压力 <0.8GPa(张旗等,2008a)。

本文的三类花岗岩,铁炉子二长花岗岩属于埃达克型花岗岩,黄花城似斑状花岗岩属于喜马拉雅型花岗岩,分水岭花岗岩属于南岭型花岗岩。笔者通过研究和对比,下面着重

讨论一下埃达克岩和南岭型花岗岩形成的压力问题。

5.1 埃达克岩形成的压力

埃达克岩是不是在高压下形成的,学术界有不同的认识。埃达克岩是 Defant and Drummond (1990) 提出来的,他们认为俯冲洋壳熔融产生的埃达克/TTG 的形成深度为 70 ~ 90km,这是根据角闪岩向榴辉岩过渡过程中角闪石脱水熔融的压力上限 2.2 ~ 2.5GPa 确定的。埃达克岩独特的微量元素特征提供了其源区矿物学和形成条件的最好限制。俯冲洋壳熔融产生的埃达克/TTG 岩石与 MORB 相比具有高 Sr, 低 HREE 以及负 Nb-Ta 异常(图 5d)。普遍认为具有高 HREE 分配系数的石榴石是其岩浆产生时一个必要的残留相,而具有高 Sr 和 Eu 分配系数的斜长石在残留体中是微量或不存在的;俯冲洋壳 MORB 没有负 Nb-Ta 异常,实验(Xiong *et al.*, 2005)表明金红石是残留相之一,可以解释 TTG/埃达克岩的负 Nb-Ta 异常。最近 Nair 和 Chacko (2008) 的实验和 HREE 模拟计算表明,残留石榴子石含量能指示埃达克/TTG 岩浆产生深度,熔融深度大于 48km 才能产生足够的残留石榴子石(>20%)导致 TTG 岩浆的 HREE 亏损程度或高 La/Yb 比值,这一实验限定的深度与 Xiong *et al.* (2005) 由金红石稳定的压力限定的最小深度(>50km)基本一致。

据熊小林等(2011)研究,埃达克岩的 Nb/La 比值总体比下地壳岩石低,下地壳岩石 Nb/La 介于 0.2 ~ 1.0 之间,平均 0.60,而埃达克岩介于 0.1 ~ 0.5 之间,平均 0.20。八达岭埃达克型花岗岩 12 件样品的 Nb/La 比值平均为 0.27,与熊小林等(2011)得出的华北埃达克岩平均 0.2 一致,表明八达岭埃达克岩的负 Nb 异常总体比下地壳岩石要显著,可能与源区残留相有金红石出现有关,指示在 133Ma 时华北北缘地壳厚度应当超过 50km。熊小林等(2011)指出,大别地区大部分埃达克岩 La/Yb > 50, Nb/La < 0.2, 指示该区地壳厚度最大,可能大大超过 50km。八达岭埃达克岩平均的 La/Yb = 48, Nb/La = 0.27, 略高于大别地区,说明地壳厚度应当 >50km。有学者(He *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013)认为大别地区高 Sr/Y 花岗岩具有的高 Sr 和 Sr/Ca, 高 (Dy/Yb)_N, (La/Yb)_N 和 Nb/Ta 以及 Sr/Y, (Dy/Yb)_N, (La/Yb)_N 和 Nb/Ta 之间明显的正相关关系的地球化学特征可以用来区分加厚下地壳部分熔融形成的高 Sr/Y 花岗岩。

5.2 A 型花岗岩形成的压力

对于 A 型花岗岩形成的压力有不同的认识,但是,大多数学者认为 A 型花岗岩形成在构造伸展的环境(Loiselle and Wones, 1979; Eby, 1992)。实验研究表明, A 型花岗岩可能是在低压下形成的(Patiño Douce, 1997; Anderson and Bender, 1989; Breiter, 2012)。Patiño Douce (1997) 的实验在压力为 8kb 时,残留相为单斜辉石,脱水熔融形成的花岗岩类似 A 型花岗岩的特征;而在更低的压力下(<4kb),残

留相为斜长石 + 斜方辉石时,形成的花岗岩更具有 A 型花岗岩的典型特征。他认为,过分强调 A 型花岗岩源区物质的组分有所偏颇,而熔融过程中压力与源区物质组分具有同等重要的作用,提出同一种源岩组分更容易在相对低压条件下熔融生成富硅准铝质的 A 型花岗岩,即 A 型花岗岩岩浆更易于产出于地壳浅部。

贾小辉等(2009)总结了 A 型花岗岩的若干实验研究成果,实验大多是在低压下进行的,在大多数情况下压力可能低于 8kb (Patiño Douce, 1997; Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnston, 1992, 1993; Anderson, 1983; Clemens *et al.*, 1986; Dal' Agnol *et al.*, 1999; Klimm *et al.*, 2003; Scaillet and Macdonald, 2001, 2003)。大部分熔融实验留下的残留相为斜长石 + 斜方辉石(Litvinovsky *et al.*, 2000; Patiño Douce, 1997; Skjerlie and Johnston, 1992, 1993)。典型的脱水熔融方程式可以简化为:黑云母 + Ca(来自斜长石) + 石英 = 斜方辉石 + 斜长石 + 副矿物 + 熔体。这些矿物相的残留使得熔体亏损 Al₂O₃、Na₂O、CaO、Sr、Eu 及 Ga/Al 值。Ga/Al 值受控于斜长石, MgO 及 Fe/Mg 值受控于斜方辉石,高场强元素主要受控于一些副矿物。实验研究印证了斜方辉石相在 A 型花岗岩的成因中的重要作用(Rutter and Wyllie, 1988; Patiño Douce, 1997; Skjerlie and Johnston, 1992, 1993; 贾小辉等, 2009)。

通常认为, A 型花岗岩形成在地壳减薄环境,出现在碰撞后(造山后)和板内构造背景。地壳拉张减薄的构造背景下可能同时满足形成 A 型花岗岩所必须的低压、相对贫水和高温等物理化学条件。原因是由于地壳减薄导致的地幔上涌带来的热使下地壳发生了部分熔融,在减薄的背景下,不论源岩是基性岩、中酸性岩还是沉积岩,只要能够发生部分熔融,形成的花岗岩即为 A 型花岗岩。因此, A 型花岗岩的形成可能只与压力有关,与源岩无关。由于 A 型花岗岩无水,因此,还需要高温的条件。在下地壳底部最具备这种高温条件,因此, A 型花岗岩是减薄的地壳部分熔融的产物。典型的 A 型花岗岩即张旗命名的南岭型花岗岩。八达岭岩基中已经多处发现 A 型花岗岩,如本文的分水岭、白查、薛家石梁等(汪洋, 2009; Su *et al.*, 2007),代表地壳厚度减薄的产物。

5.3 八达岭花岗岩的地球动力学意义

八达岭花岗岩位于中国东部,在华北克拉通的北缘。中国东部中生代的科学问题很多,如大规模的岩浆活动和大规模成矿作用,岩石圈减薄,大陆深俯冲,华北克拉通破坏以及中国东部高原等。许多学者对这些问题作了很有意义的探讨(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Gao *et al.*, 2002; 任纪舜等, 1990; 邓晋福等, 1996, 2006; 董树文等, 2000; 张旗等, 2001a, 2008a, b)。其中华北克拉通破坏和中国东部高原是两个争论的热点问题。许多人认为,华北克拉通破坏是在侏罗-白垩纪时期发生的,与华北大规模

岩浆活动的时间一致(吴福元等, 2000; Wu *et al.*, 2005; Deng *et al.*, 2004; 翟明国等, 2003)。中国东部高原也与大规模岩浆活动有关。中国东部高原是张旗等(2001a)提出来的, 一经提出就引发了激烈的争论, 有的学者持赞成的态度, 有的持反对意见(详见张旗等, 2008b 及其所附的参考文献)。笔者认为, 中国东部高原是一个新提出来的问题, 还有许多科学问题需进一步研究。

八达岭花岗岩杂岩位于华北克拉通的北缘, 该区最近还报道了许多埃达克岩的出露, 如刘翠等(2004)报道的云蒙山二长花岗岩, 其 SHRIMP 年龄是 145Ma, 与 Davis *et al.* (1996) 报道的锆石 U-Pb 年龄(141 ~ 143Ma)一致。北京房山埃达克岩是 134 ~ 136Ma, 与八达岭花岗岩大体同时(Yan *et al.*, 2010)。冀西木吉村斑岩的时代为 143 ± 2 Ma(L), 斑岩铜矿的时代为 142.5 ± 1.4 Ma(Re)(Gao *et al.*, 2012a); 木吉村周边的髻髻山组英安岩的时代为 145Ma(Gao *et al.*, 2012b)。华北北缘时代较新的埃达克岩有赤峰地区对面沟花岗岩(128Ma, Fu *et al.*, 2012), 涞源花岗岩(126Ma, SHRIMP 法, 陈斌等, 2005)。山西中生代岩浆岩分布零星, 发表的资料较少, 可能属于埃达克岩的有弧堰山碱性花岗岩(130 ± 2.3 Ma)和二峰山碱性花岗岩(134 ~ 128Ma, Ying *et al.*, 2011)以及晋南运城地区的 3 个小花岗岩株(139 ~ 141Ma, 张旗未发表的资料)。

华北北缘还有一些非埃达克岩分布, 它们大多位于上述埃达克岩分布区以北, 主要是张家口组流纹岩和英安岩以及一些偏碱性的花岗岩。如汪洋和程素华(2010)报道的张家口地区的张家口组的时代在 143 ~ 136Ma 之间, 与八达岭-云蒙山地区的花岗岩大体是同时代的, 地球化学研究认为属于 A 型花岗岩。张振强(2007)报道的河北涞源-多伦地区的张家口组含轴火山岩, 资料不是很完整, 但是, 根据 REE 资料出现强烈的负铈异常推测可能是南岭型的。沈光银和薛清波(2011)研究了涞源张家口组次流纹斑岩, 他们给出的时代是 131Ma(K-Ar 法), 只有 REE 资料, 也可能是南岭型的。李创举和包志伟(2012)报道的冀西北东坪金矿东侧北栅子碱性花岗岩的侵位年龄为 130 ± 1.5 Ma, 地球化学特征大体类似浙闽型的特征。此外, 邵济安等(2003)报道的冀北张家口组火山岩也具有南岭型和浙闽型的特征。总之, 北京以北和河北北部的张家口组火山岩及早白垩世的花岗岩大多具有浙闽型和南岭型的特征, 代表正常地壳和较薄的地壳厚度。

张旗等(2001a, b)提出在中国的华北东部可能存在一个中国东部高原, 其时代大概是从 165Ma 至 130Ma 或 125Ma。高原是 125Ma 以后垮塌的。中国东部高原的北界在张家口-赤峰-沈阳一带。

八达岭花岗岩位于中国东部高原的偏北部。八达岭花岗岩属于高钾钙碱性系列(图 4a), 推测部分熔融的源岩可能为下地壳底部变质的中基性含角闪石榴辉岩。137Ma 的埃达克型花岗岩指示在 137Ma 以前, 高原可能已经存在了, 高原地壳厚度 > 50km。133Ma 的喜马拉雅型花岗岩指示的

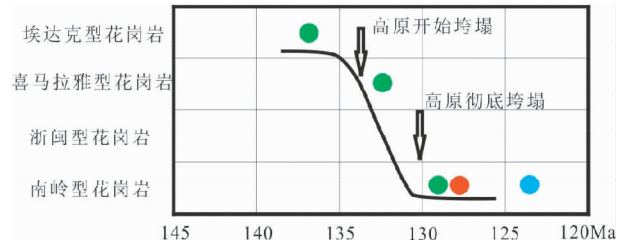


图 6 中国东部高原北部随时间演化图

绿色圆代表本文结果; 红色圆代表白查岩体(据 Deng *et al.*, 2004); 蓝色圆代表薛家石梁杂岩中的花岗岩(据 Su *et al.*, 2007)

Fig. 6 The evolution of the northern East China Plateau

地壳厚度在 40 ~ 50km 范围, 与 137Ma 相比, 地壳厚度降低了, 可能是高原开始垮塌的信号。至于 128Ma 的南岭型花岗岩, 则代表了减薄的地壳, 可以解释为高原已经垮塌的信息。早先认为高原垮塌在 125 ~ 130Ma 范围, 我们的资料表明为 128Ma, Deng *et al.* (2004) 研究了八达岭花岗岩中的白查 A 型花岗岩, 其时代为 127Ma (SHRIMP 方法), Su *et al.* (2007) 研究了八达岭花岗岩中的薛家石梁杂岩, 其中的花岗岩也具有南岭型特征, 其时代为 123.7Ma (SHRIMP 方法), 与我们的结果可以对比。我们推测, 高原的垮塌可能在 133Ma 之后和 128Ma 之前, 可能在 130Ma 左右, 高原垮塌的过程见图 6。

6 结论

(1) 八达岭花岗岩杂岩出露面积大, 是由不同时代和不同岩性的花岗岩类岩石组成的。本次研究发现八达岭岩体存在有三种类型的花岗岩: 铁炉子埃达克型的二长花岗岩(137Ma), 黄花城喜马拉雅型似斑状花岗岩(133Ma)和分水岭南岭型花岗岩(128Ma)。

(2) 关于埃达克型花岗岩、喜马拉雅型花岗岩和南岭型花岗岩的形成条件、构造背景及成因学术界存在争论, 本文根据花岗岩的地球化学资料认为, 埃达克岩代表地壳加厚的产物, 南岭型花岗岩(A 型花岗岩)代表了地壳减薄的产物。于是, 埃达克岩的出现应当反映八达岭地区地壳加厚了, 属于高原(或山脉)范围。喜马拉雅型花岗岩地壳厚度比埃达克岩薄一些, 可能预示地壳开始减薄了, 可能是高原开始垮塌的信号。而南岭型花岗岩代表减薄的地壳, 表明高原已经消失了。

(3) 综合华北北缘早白垩世中酸性岩浆岩的资料, 本文认为, 在华北北缘地壳加厚的范围可能在北京以北至赤峰一带, 张家口至涞源一带的地壳厚度很低, 大体相当于正常地壳厚度或更薄。

(4) 华北北缘埃达克岩主要是 165 ~ 130Ma 期间的, 个别地方可以持续到 127Ma(赤峰对面沟)和 126Ma(涞源)。在埃达克岩分布区, 南岭型花岗岩出现的最早时间是

128Ma,一直持续到117Ma,代表地壳减薄的时间。看来,128~126Ma可能是华北北缘地壳减薄的时间。八达岭地区地壳可能比较早即开始减薄,涞源地区地壳减薄可能晚一些。

本文的认识是根据我们的研究成果和周边地区的研究成果对比得出来的,由于资料的不足,不同方法得出的年龄数据可能还存在一些差别,因此,还有许多问题需要今后继续深入研究。

致谢 诚挚的感谢审稿专家提供的宝贵意见和建议,使笔者受益匪浅;也感谢中国地质调查局天津地质矿产研究所同位素实验室全体人员实验过程中给予的帮助和支持。

References

- Anderson JL. 1983. Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America. In: Medaris LG Jr, Byers CW, Mickelson DM and Shanks WC (eds.). Proterozoic Geology: Selected Papers from an International Proterozoic Symposium. Geological Society of America, Memoir, 161: 133–152
- Anderson JL and Bender EE. 1989. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America. Lithos, 23(1–2): 19–52
- Bai ZM, Xu SZ and Ge SW. 1991. The Badaling Granitoids. Beijing: Geological Publishing House, 1–169 (in Chinese)
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Breiter K. 2012. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe. Lithos, 151: 105–121
- Chen B, Tian W, Zhai MG and Arakawa Y. 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China Craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 13–24 (in Chinese with English abstract)
- Clemens JD, Holloway JR and White AJR. 1986. Origin of A-type granites; Experimental constraints. American Mineralogist, 71: 317–324
- Creaser RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. Geology, 19(2): 163–166
- Dall'Agno R, Scaillet B and Pichavant M. 1999. An experimental study of a Lower Proterozoic A-type granite from the eastern Amazonian Craton, Brazil. Journal of Petrology, 40(11): 1673–1698
- Davis GA, Qian XL, Zheng YD *et al.* 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A and Harrison M (eds.). The Tectonic Evolution of Asia, Rubey Volume. Cambridge: Cambridge University Press, 253–280
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347(6294): 662–665
- Deng JF, Zhao HL, Mo XX *et al.* 1996. China Continental Roots-plume Tectonics; Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1–110 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Wu ZX, Luo ZH and Su SG. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics'. Earth-Science Reviews, 65(3–4): 223–275
- Deng JF, Su SG, Liu C *et al.* 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: Delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism? Earth Science Frontiers, 13(2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Wu XH, Wu ZH, Deng JF, Gao R and Wang CS. 2000. On tectonic seesawing of the East Asia continent: Global implication of the Yanshanian Movement. Geological Review, 46(1): 8–13 (in Chinese with English abstract)
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20(7): 641–644
- Fu LB, Wei JH, Kusky TM, Chen HY, Tan J, Li YJ, Shi WJ, Chen C and Zhao SQ. 2012. The Cretaceous Duimianguo adakite-like intrusion from the Chifeng region, northern North China Craton: Crustal contamination of basaltic magma in an intracontinental extensional environment. Lithos, 134–135: 273–288
- Gao S, Rudnick RL, Carlson RW *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth and Planetary Science Letters, 198(3–4): 307–322
- Gao YF, Santosh M, Wei RH, Ma GX, Chen ZK and Wu JL. 2012a. Origin of high Sr/Y magmas from the northern Taihang Mountains: Implications for Mesozoic porphyry copper mineralization in the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, doi: 10.1016/j.jseas.2012.10.040
- Gao YF, Santosh M, Hou ZQ, Wei RH, Ma GX, Chen ZK and Wu JL. 2012b. High Sr/Y magmas generated through crystal fractionation: Evidence from Mesozoic volcanic rocks in the northern Taihang orogen, North China Craton. Gondwana Research, 22(1): 152–168
- Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH *et al.* (eds.). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Am. Geophys. Union. Geodyn. Ser., 27: 107–126
- He YS, Li SG, Hoefs J, Huang F, Liu SA and Hou ZH. 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(13): 3815–3838
- Jia XH, Wang Q and Tang GJ. 2009. A-type granites: Research progress and implications. Geotectonica et Metallogenia, 33(3): 465–480 (in Chinese with English abstract)
- Klimm K, Holtz F, Johannes W and King PL. 2003. Fractionation of metaluminous A-type granites: An experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia. Precambrian Research, 124(2–4): 327–341
- Li CJ and Bao ZW. 2012. Geochemical characteristics and geodynamic implications of the Early Cretaceous magmatism in Zhangjiakou region, northwest Hebei Province, China. Geochimica, 41(4): 343–358 (in Chinese with English abstract)
- Litvinovsky BA, Steel IM and Wickham SM. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: Melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. Journal of Petrology, 41(5): 717–737
- Liu C, Deng JF, Su SG, Xiao QH, Luo ZH, Wang QH and Xu LQ. 2004. Zircon SHRIMP dating of Yunmengshan gneissic granite and its geological significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(2): 141–146 (in Chinese with English abstract)
- Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America Abstract Progressing, 11: 468
- Menzies A, Fan WM and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard HM, Alabaster HM, Harris T *et al.* (eds.). Magmatic Processes and Plate Tectonics. London: Geological Society Special Publication, 76: 73–81
- Nair R and Chacko T. 2008. Role of oceanic plateaus in the initiation of subduction and origin of continental crust. Geology, 36(7): 583–586
- Patiño Douce AE. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25(8):

743 - 746

- Qian Q. 2001. Adakite: Geochemical characteristics and genesis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 297 - 306 (in Chinese with English abstract)
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275 - 292 (in Chinese with English abstract)
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2003. Mesozoic high-Ba-Sr granitoids from North China: Geochemical characteristics and geological implications. *Terra Nova*, 15(4): 272 - 278
- Ren JS, Chen TY, Niu BG *et al.* 1990. The Tectonic Evolution of Continental Lithosphere and Mineralization in Eastern China and Adjacent Regions. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Rutter MJ and Wyllie PJ. 1988. Melting of vapour-absent tonalite at 10kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust. *Nature*, 331(6152): 159 - 160
- Scaillet B and Macdonald R. 2001. Phase relations of peralkaline silicic magmas and petrogenetic implications. *Journal of Petrology*, 42(4): 825 - 845
- Scaillet B and Macdonald R. 2003. Experimental constraints on the relationships between peralkaline rhyolites of the Kenya Rift Valley. *Journal of Petrology*, 44(10): 1867 - 1894
- Shao JA, Zhang LQ and Chu ZY. 2003. Early Cretaceous volcanism-sedimentation in northern Hebei and its tectonic setting: A discussion. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 384 - 390 (in Chinese with English abstract)
- Shen GY and Xue QP. 2011. Geological and geochemical characteristics of Yanshanian perthite rhyolite porphyry in Guyuan volcanic basin. *Mineral Resources and Geology*, 25(5): 412 - 416 (in Chinese with English abstract)
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1992. Vapor-absent melting at 10kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20(3): 263 - 266
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1993. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of anorogenic granites. *Journal of Petrology*, 34(4): 785 - 815
- Su SG, Niu YL, Deng JF, Liu C, Zhao GC and Zhao XG. 2007. Petrology and geochronology of Xuejiashiliang igneous complex and their genetic link to the lithospheric thinning during the Yanshanian orogenesis in eastern China. *Lithos*, 96(1-2): 90 - 107
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 - 345
- Wang SJ, Li SG, Chen LJ, He YS, An SC and Shen J. 2013. Geochronology and geochemistry of leucosomes in the North Dabie Terrane, East China; Implication for post-UHPM crustal melting during exhumation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, doi: 10.1007/s00410-012-0845-2
- Wang Y and Zhang Q. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China; Composition, geochemical characteristics and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533 - 540 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 2009. Geochemistry of the Baicha A-type granite in Beijing Municipality: Petrogenetic and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 13 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Chen SH. 2010. Element geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks of Zhangjiakou Formation in the Zhangjiakou area, North China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(1): 75 - 82 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Zhang GL *et al.* 2000. Deep geodynamics of Yanshan Movement. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 379 - 388 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103 - 119
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3-4): 339 - 359
- Xiong XL, Liu XC, Zhu ZM *et al.* 2011. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton: Evidence from experimental petrology and geochemistry. *Science China (Earth Sciences)*, 54(6): 858 - 870
- Xu YK. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 747 - 757
- Yan DP, Zhou MF, Zhao DG, Li JW, Wang GH, Wang CL and Qi L. 2010. Origin, ascent and oblique emplacement of magmas in a thickened crust: An example from the Cretaceous Fangshan adakitic pluton, Beijing. *Lithos*, 123(1): 102 - 120
- Ying JF, Zhang HF and Tang GJ. 2011. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: Evidence from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi Province. *Lithos*, 125(1-2): 449 - 462
- Yu JH, Fu HQ, Zhang FL *et al.* 1994. The Plutonism of Beijing Area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF and Liu W. 2003. The key time of the eastern North China Mesozoic tectonic regime transformation. *Science in China (Series D)*, 33(10): 913 - 920 (in Chinese)
- Zhang Q, Qian Q, Wang EQ, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001a. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248 - 255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y and Wang YL. 2001b. Preliminary study on the components of the lower crust in East China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 505 - 513 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249 - 2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008a. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 1 - 344 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang YL, Jin WJ and Li CD. 2008b. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: Evidence, problems and implication. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1404 - 1430 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Jin WJ, Li CD and Wang YL. 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985 - 1015 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ. 2007. Geochemistry of Mesozoic uranium-bearing volcanic rocks in Guyuan-Duolun area, Hebei Province. *Resources Survey and Environment*, 28(4): 256 - 262 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白志民, 许淑贞, 葛世伟. 1991. 八达岭花岗岩杂岩. 北京: 地质出版社, 1 - 169
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. *岩石学报*, 21(1): 13 - 24

- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学等. 1996. 中国大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1-110
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠等. 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代. 地学前缘, 13(2): 105-119
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义. 地质论评, 46(1): 8-13
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 465-480
- 李创举, 包志伟. 2012. 冀西北早白垩世岩浆岩的地球化学特征及其地球动力学背景. 地球化学, 41(4): 343-358
- 刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 肖庆辉, 罗照华, 王启航, 许立权. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 23(2): 141-146
- 钱青. 2001. Adakite 的地球化学特征及成因. 岩石矿物学杂志, 20(3): 297-306
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 温大仁. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩的地球化学特征及成因探讨——华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. 岩石学报, 18(3): 275-292
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵等. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社
- 邵济安, 张履桥, 储著银. 2003. 冀北早白垩世火山-沉积作用及构造背景. 地质通报, 22(6): 384-390
- 沈光银, 薛清波. 2011. 沽源火山盆地燕山期次流纹斑岩地质地球化学特征. 矿产与地质, 25(5): 412-416
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗杂岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(4): 533-540
- 汪洋. 2009. 北京白查 A 型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义. 岩石学报, 25(1): 13-24
- 汪洋, 程素华. 2010. 张家口地区张家口组火山岩元素地球化学特征及成因. 矿物岩石, 30(1): 75-82
- 吴福元, 孙德有, 张广良等. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 6(3): 379-388
- 熊小林, 刘星成, 朱志敏, 李元, 肖万生, 宋茂双, 张生, 吴金花. 2011. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据. 中国科学(D辑), 41(5): 654-667
- 郁建华, 付会芹, 张凤兰等. 1994. 北京地区岩浆深成作用. 北京: 地质出版社
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑), 33(10): 913-920
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001a. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248-255
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001b. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. 岩石学报, 17(4): 505-513
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008a. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 1-344
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 李承东. 2008b. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示. 地质通报, 27(9): 1404-1430
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志. 岩石学报, 26(4): 985-1015
- 张振强. 2007. 河北沽源-多伦地区中生代含铀火山岩地球化学. 资源调查与环境, 28(4): 256-262