

冀北张—宣地区后城组、张家口组火山岩 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素

杨进辉¹, 吴福元¹, 邵济安², 谢烈文¹, 柳小明³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

3. 西北大学地质学系大陆动力学重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 冀北张家口—宣化地区(张—宣地区)分布着中生代后城组和张家口组火山岩。锆石的 LA-ICPMS U-Pb 年龄和 LA-MC-ICPMS Hf 同位素分析结果表明, 后城组英安岩的结晶年龄为 (130 ± 1) Ma, 为早白垩世, 而不是前人所认为的晚侏罗世。张家口组流纹岩的结晶年龄为 (126 ± 1) Ma, 也为早白垩世。后城组英安岩中锆石 Hf 同位素组成为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -18.8 \sim -25.5$, Hf 平均地壳模式年龄为 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 2.78 \sim 2.37$ Ga, 平均 2.54 Ga, 与冀北分布的基底岩石 Nd、Hf 模式年龄相同, 考虑到华北克拉通东部地壳生长的主要时期为晚太古代, 我们初步认为后城组粗安岩可能主要来源于晚太古代地壳物质的重熔作用; 而张家口组流纹岩中锆石 Hf 同位素组成为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.1 \sim -18.5$, Hf 平均地壳模式年龄为 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 2.34 \sim 2.13$ Ga, 明显比后城组火山岩年轻。张家口火山岩来源于太古代的地壳物质和部分幔源物质混合。这些年代学数据和锆石 Hf 同位素表明张—宣地区大面积的后城组和张家口组火山岩是华北克拉通东部晚中生代岩石圈强烈减薄作用的结果。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 后城组; 张家口组; 火山岩; 张—宣地区。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2006)01-0071-10

收稿日期: 2005-12-08

In-Situ U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Zircons from Volcanic Rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang-Xuan Area, Northeast China

YANG Jin-hui¹, WU Fu-yuan¹, SHAO Ji-an², XIE Lie-wen¹, LIU Xiao-ming³

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Large-scale volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou formations are developed in the Zhangjiakou-Xuanhua (Zhang-Xuan) area. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating gives the eruption age of dacite in the Houcheng Formation as (130 ± 1) Ma, indicating that the Houcheng Formation formed during the Early Cretaceous, not during the Late Jurassic as previously thought. Volcanic rocks of the Zhangjiakou Formation have a zircon LA-ICPMS U-Pb age of (126 ± 1) Ma, i. e., Early Cretaceous. In-situ zircon Hf analyses show that zircons from the Houcheng Formation dacite have $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -18.8 to -25.5 and Hf crustal model ages of 2.78 to 2.37 Ga with an average of 2.54 Ga. Their model ages are similar to those of basement rocks in the northern North China craton, representing an important stage of crustal growth in the North China craton. Thus, we suggest that the dacite was mainly derived from the partial melting of Late Archean crustal materials. Whereas, zircons from the rhyolite of the Zhangjiakou Formation have $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -15.1 to -18.5 and younger Hf crustal model ages of 2.34 to 2.13 Ga, indicating that the rhyolite was derived from Late Archean crustal materials, but with the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40325006; 40132020); 中国科学院“百人计划”项目; 教育部大陆动力学重点实验室项目。

作者简介: 杨进辉 (1971—), 男, 副研究员, 主要从事矿床学、岩石学和地球化学研究。E-mail: jinhui@mail.igcas.ac.cn

involvement of mantle materials. The age and Hf isotopic data suggest that the large-scale volcanic rocks in the Zhang-Xuan area were the result of crust-mantle interaction during the Early Cretaceous lithospheric thinning in the eastern North China craton.

Key words: zircon U-Pb age; zircon Hf isotopes; Houcheng Formation; Zhangjiakou Formation; volcanic rock; Zhangjiakou-Xuanhua area.

0 引言

燕山地区(包括北京市、河北省和辽宁省)一直被视为中国构造地质学的摇篮,在该区广泛发育着中生代强烈的构造变形、中生代火山、沉积地层,并含有著名的热河动物群化石。翁文灏(1927)根据髫髻山组火山岩与下伏强烈构造变形地层之间的角度不整合提出了中国地域独特的构造事件——燕山运动。自 20 世纪 90 年代以来,随着热河动物群及中生代火山岩研究的不断深入,辽西成为国际地学界关注的热点研究地区,并在该地区中生代火山岩的地层层序、古生物、火山岩地球化学、同位素年代学等方面已取得大量的研究成果(陈义贤和陈文寄, 1997; Chen *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 1998; Swisher *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2003; 邵济安等, 2003a, 2003b; Gao *et al.*, 2004; Davis, 2005; 张宏等, 2005)。然而,冀北地区中生代的构造、地层及火山岩年代学研究的滞后限制了对燕山地区的进一步深入、系统的研究。

冀北张—宣地区分布着大面积的后城组和张家口组,然而对其时代、地层定位及区域对比问题一直存在着争议。多数人将后城组与辽西土城子组相对应,认为它们的形成时代为晚侏罗世。河北省地质局(1996)将张家口组定义为土城子组之上和广义义县组之下的一套以(中)酸性火山岩为主的火山岩建造,为早白垩世沉积(牛宝贵等, 2003; 邵济安等, 2003b)。在张—宣地区,后城组上部发育着一套酸性火山岩,然而,这套火山岩的时代及其与上覆张家口组火山岩之间是否存在成因关系一直悬而未解,再者,张家口组火山岩的喷发时代及其与辽西张家口组火山岩之间的层位对应关系也众说纷纭。这些问题的存在严重影响区域地层对比以及张—宣地区晚中生代地球动力学背景等方面的研究。本文对冀北张—宣地区的后城组上部和张家口组的火山岩进行了单颗粒锆石 LA-ICPMS 的 U-Pb 测年,并同时利用 LA-MC-ICPMS 测定锆石的 Hf 同位素组成,以厘定后城组上部、张家口组火山岩的时代和物质来源,从而进一步探讨它们形成的地球动力学背景。

1 区域地质及样品采集

1.1 区域地质

张—宣地区位于华北克拉通的北部,属著名的燕辽构造带的西部(图 1a);区内的太古宙岩石为形成于 2 900 Ma 左右的玄武质岩石和 2 780 ~ 2 761 Ma 的英云闪长质片麻岩以及 2 561 ~ 2 503 Ma 的花岗闪长质片麻岩,这些岩石在 2 500 ~ 2 400 Ma 期间发生了区域麻粒岩相变质改造(刘敦一等, 1997),并在 18 亿年左右发生变质作用,使华北克拉通化(Zhao *et al.*, 2001)。中元古代以稳定克拉通内的沉积建造为主,缺乏明显的岩浆活动,但进入中生代以来,本区岩浆活动强烈,形成了大面积的分布于中生代张家口—滦平盆地中火山岩(图 1b)。该区出露的中生代地层由早至新为:髫髻山组、后城组、张家口组、大北沟组、大店子组、西瓜园组(陈晋镛和武铁山, 1997),与辽西地区的髫髻山组、土城子组、张家口组、义县组相对应。

宣化地区出露的后城组下段为一套厚度大于 100 m 的灰白或紫红色砾岩,砂质胶结,砾石大小一般为 5~10 cm,大者达 20~30 cm,略有磨圆,定向排列。砾岩的砾石成分单一,以下伏蓟县系白云岩为主。砾岩中夹少量灰绿色的安山岩。中段是后城组的主体,以紫红色和灰绿色砂岩、粉砂岩、页岩为主,少量含砾粗砂岩和火山岩。上段以出现火山熔岩和火山角砾岩为特征,夹细砾岩、砂岩、粉砂岩,局部夹薄煤层。火山岩有产状平缓的玄武岩层及其上部的一套中酸性火山岩。

张家口组为一套中性和中酸性火山岩、火山碎屑岩,由安山岩、英安岩和安山质或英安质角砾岩、流纹岩、凝灰岩组成。

1.2 样品采集位置

本文所采集的样品为后城组上部的英安岩和张家口组流纹岩。后城组火山岩(FW04-123)采于宣化庞家房背坡村西的后城组上部,其 GPS 位置为 N40°32'47"、E114°56'03",岩性为英安岩,主要矿物组成:斑晶为石英、钠质斜长石,基质为微晶石英、斜长石、少量辉石、角闪石和玻璃质。张家口组火山岩

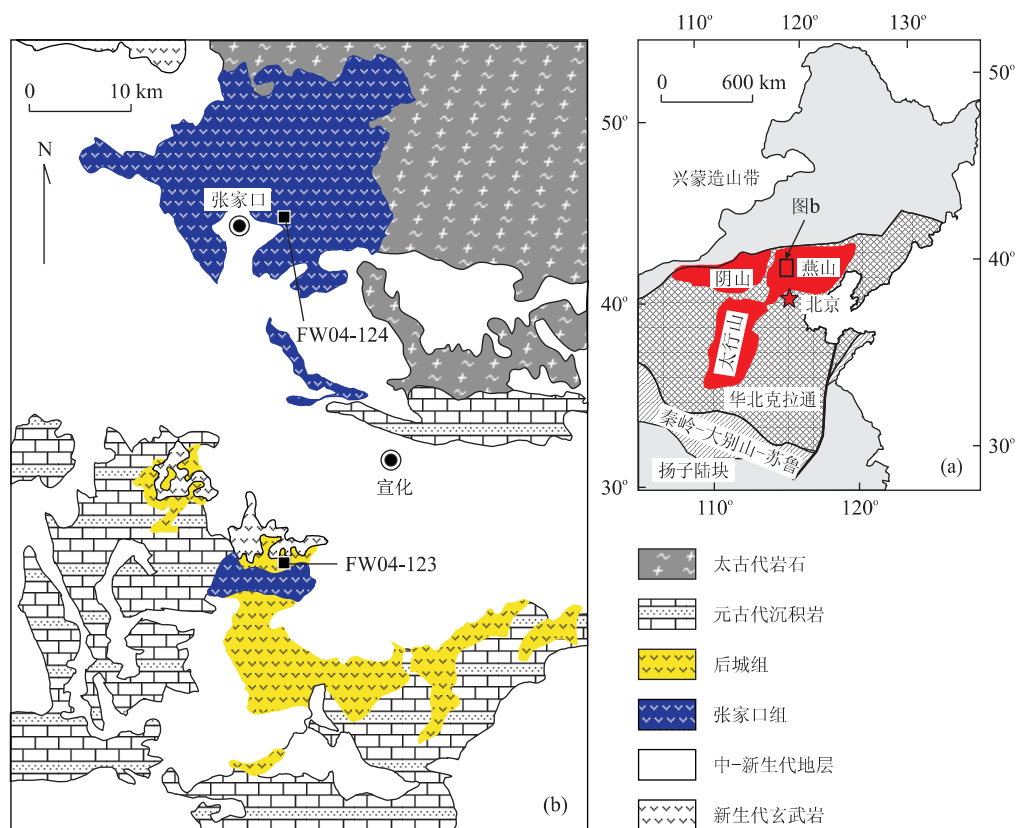


图 1 张—宣地区大地构造位置(a)及其研究区地质简图、采样位置(b)

Fig. 1 Tectonic map (a) and simplified geological map and sample locations (b) of the Zhang-Xuan area

(FW04-124)采于张家口市东张家口组二段,其 GPS 位置为 $N40^{\circ}52'28''$ 、 $E114^{\circ}54'58''$,其岩性为流纹岩,岩石由斑晶和基质组成,斑晶为石英和碱性长石,基质由微晶质或者玻璃质组成,具有典型的流纹构造。

2 分析方法

2.1 样品制备

锆石的分选是在河北区调队(廊坊)完成的,大约 10 kg 重的样品,经过手工破碎、淘洗、电磁选、重液分选,之后,在双目镜下挑选,得到含包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石,在双目镜下将锆石样品粘在双面胶上,制成靶(mount)。锆石的阴极发光(CL)图像是在中国科学院地质与地球物理研究所用 CAMECA SX-50 电子探针完成的(图 2)。

2.2 分析方法

本文的锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学地质学系教育部大陆动力学重点实验室进行(表 1),将 193 nm 的 ArF 准分子激光与 Agilent 7500a 型 ICP-MS 仪器连接,采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美

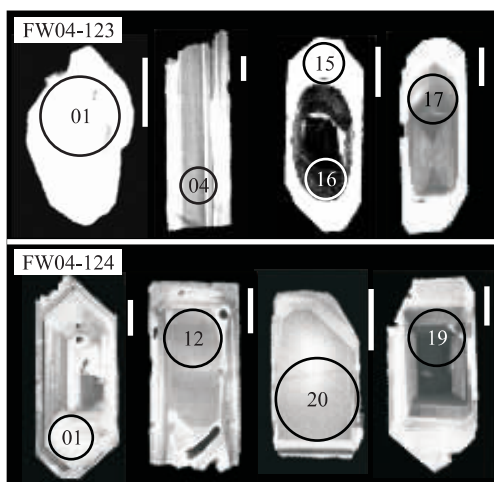


图 2 后城组和张家口组火山岩中锆石 CL 图像

Fig. 2 CL images of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou formations. Circles and numbers represent analyzed spots and spot numbers. The line scales are $\sim 50 \mu\text{m}$

圆圈及其中的数字代表分析点及点号,线比例尺长度为 $50 \mu\text{m}$

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,采用 91500

表 1 张一宣地区后城组和张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄

Table 1 U-Pb data of volcanic rocks from the Houcheng and Zhangjiakou formations in the Zhang-Xuan area

点号	Pb (10^{-6})	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/U	同位素比值				年龄(Ma)	
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}\pm\sigma$
后城组英安岩(FW04-123)										
01	4	119	95	0.80	0.0461±0.0034	0.1196±0.0087	0.01884±0.00019	120±1	115±8	129±162
02	12	336	224	0.67	0.0572±0.0040	0.1554±0.0106	0.01971±0.00024	126±1	147±9	498±158
03	2	69	59	0.85	0.0519±0.0045	0.1500±0.0126	0.02097±0.00041	134±3	142±11	279±154
04	25	997	491	0.49	0.0488±0.0009	0.1357±0.0021	0.02016±0.00012	129±1	129±2	138±24
05	3	92	101	1.10	0.0520±0.0037	0.1448±0.0100	0.02018±0.00032	129±2	137±9	285±129
06	3	86	84	0.98	0.0552±0.0074	0.1572±0.0207	0.02065±0.00046	132±3	148±18	421±301
07	43	1587	1252	0.79	0.0502±0.0012	0.1412±0.0029	0.02039±0.00014	130±1	134±3	205±35
08	77	2747	2713	0.99	0.0503±0.0011	0.1412±0.0027	0.02036±0.00013	130±1	134±2	208±32
09	3	76	61	0.80	0.0570±0.0072	0.1514±0.0189	0.01927±0.00040	123±3	143±17	490±287
10	2	61	48	0.78	0.0564±0.0089	0.1495±0.0233	0.01923±0.00048	123±3	141±21	467±353
11	3	101	110	1.09	0.0587±0.0066	0.1600±0.0178	0.01975±0.00037	126±2	151±16	558±256
12	8	240	198	0.83	0.0510±0.0016	0.1461±0.0044	0.02075±0.00017	132±1	138±4	243±55
13	9	314	124	0.40	0.0521±0.0012	0.1490±0.0031	0.02075±0.00014	132±1	141±3	288±35
14	2	57	44	0.77	0.0583±0.0061	0.1678±0.0170	0.02088±0.00051	133±3	158±15	540±181
15	2	54	43	0.78	0.0583±0.0057	0.1650±0.0158	0.02051±0.00036	131±2	155±14	542±221
16	5	138	123	0.89	0.0566±0.0045	0.1524±0.0121	0.01954±0.00025	125±2	144±11	475±183
17	32	1061	530	0.50	0.0487±0.0008	0.1392±0.0018	0.02072±0.00012	132±1	132±2	133±20
18	13	419	202	0.48	0.0501±0.0014	0.1400±0.0038	0.02027±0.00016	129±1	133±3	200±48
19	3	92	98	1.06	0.0759±0.0075	0.2141±0.0208	0.02046±0.00042	131±3	197±17	1092±207
20	6	164	129	0.78	0.0752±0.0065	0.2153±0.0181	0.02076±0.00048	132±3	198±15	1074±132
21	4	112	118	1.05	0.0634±0.0039	0.1802±0.0110	0.02060±0.00025	131±2	168±9	723±135
22	3	84	89	1.06	0.0601±0.0038	0.1700±0.0103	0.02054±0.00032	131±2	159±9	605±104
张家口组流纹岩(FW04-124)										
01	5	172	150	0.87	0.0504±0.0024	0.1354±0.0061	0.01948±0.00022	124±1	129±5	213±84
02	5	182	131	0.72	0.0486±0.0020	0.1330±0.0051	0.01985±0.00020	127±1	127±5	127±71
03	6	204	218	1.07	0.0486±0.0016	0.1321±0.0041	0.01971±0.00017	126±1	126±4	127±56
04	13	414	376	0.91	0.0571±0.0015	0.1558±0.0038	0.01980±0.00015	126±1	147±3	494±41
05	5	167	122	0.73	0.0518±0.0020	0.1421±0.0052	0.01991±0.00019	127±1	135±5	275±66
06	9	308	363	1.18	0.0479±0.0022	0.1294±0.0058	0.01960±0.00020	125±1	124±5	92±82
07	19	531	440	0.83	0.0655±0.0022	0.1760±0.0059	0.01950±0.00015	125±1	165±5	789±74
08	7	203	184	0.91	0.0595±0.0045	0.1646±0.0123	0.02008±0.00029	128±2	155±11	584±171
09	4	138	103	0.75	0.0556±0.0030	0.1523±0.0080	0.01985±0.00027	127±2	144±7	438±92
10	6	181	140	0.77	0.0623±0.0063	0.1657±0.0164	0.01928±0.00038	123±2	156±14	686±224
11	4	122	73	0.60	0.0650±0.0031	0.1728±0.0079	0.01928±0.00021	123±1	162±7	775±101
12	5	169	122	0.72	0.0573±0.0033	0.1572±0.0090	0.01989±0.00023	127±1	148±8	503±132
13	5	187	125	0.67	0.0498±0.0038	0.1335±0.0100	0.01944±0.00032	124±2	127±9	186±138
14	5	161	104	0.65	0.0515±0.0022	0.1399±0.0058	0.01972±0.00021	126±1	133±5	262±75
15	6	179	138	0.77	0.0499±0.0017	0.1389±0.0044	0.02018±0.00018	129±1	132±4	191±57
16	6	198	191	0.97	0.0504±0.0022	0.1369±0.0059	0.01970±0.00022	126±1	130±5	213±79
17	16	544	458	0.84	0.0485±0.0012	0.1334±0.0031	0.01994±0.00014	127±1	127±3	125±42
18	17	588	458	0.78	0.0525±0.0008	0.1435±0.0019	0.01981±0.00011	127±1	136±2	308±20
19	8	265	260	0.98	0.0605±0.0028	0.1654±0.0073	0.01981±0.00025	126±2	155±6	623±73
20	9	297	305	1.02	0.0515±0.0020	0.1399±0.0052	0.01970±0.00020	126±1	133±5	262±67
21	4	102	101	0.98	0.0451±0.0034	0.1210±0.0090	0.01943±0.00033	124±2	116±8	-13±129

标准锆石外部校正法进行锆石原位 U-Pb 分析。本次实验所采用的激光束斑直径为 30 μm ，普通铅校正采用 Anderson (2002) 的方法，其年龄采用 Ludwig(2003)的 ISOPLOT 程序计算。详细实验测

试过程可参见 Yuan *et al.* (2004)。样品测试过程中，TEM 标样的分析结果为： $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (416±3)Ma ($1\sigma_n, n=5$)。

锆石 Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球

物理研究所 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 193 nm 激光取样系统上进行,分析时激光束直径为 63 μm,激光剥蚀时间约 26 s. 仪器的运行条件及详细的分析过程可参见 Wu *et al.* (2005b). 本次实验测定过程中,91500 的测定结果是 0.282 315±6,该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致(Woodhead *et al.*, 2004).

相对于母岩浆而言,锆石的 Lu/Hf 高度分离,因此,锆石的 Hf 模式年龄计算应与全岩的 Nd、Hf 模式年龄不同,Lu/Hf 比值应采用锆石结晶之前源区的 Lu/Hf 比值. 表 2 中 T_{DM} 是根据锆石的 Lu/Hf 实测比值计算而得,代表了结晶出锆石的母岩浆源区的最小年龄. 平均地壳模式年龄(T_{DM}^C)则是假定其母岩浆的源区为来源于亏损地幔的平均地壳物质($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$)(Veevers *et al.*, 2005), T_{DM}^C 代表了平均地壳物质从亏损地幔中分离时的年龄. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄计算中,现今球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别采用 0.033 2、0.282 772和 0.038 4、0.283 25(Bichert-Toft and Albarède, 1997), ^{176}Lu 衰变常数采用 $\lambda=1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$. (Soderlund *et al.*, 2004).

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

后城组上部英安岩(FW04-123)中的锆石多为长柱状或短柱状晶形,CL 图像显示锆石具有典型的成分环带,其中一类成分较为均一,呈白色或灰

白色,而另外一类锆石则成分不均一,边部 Th、U 含量低,图像为白色或灰白色,而中心则 Th、U 含量高,呈现黑色或深灰色(图 2);再者,锆石的 Th/U 比值较高(0.40~1.10,表 1),表明所研究的这些锆石为典型的岩浆成因. FW04-123 样品中 22 颗锆石的 21 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(130±1)Ma(图 3),代表了后城组上部英安岩的结晶时代.

张家口组流纹岩(FW04-124)中的锆石多为长柱状或短柱状晶形,CL 图像显示,一类锆石具有典型的成分环带,其中部分锆石呈白色或灰白色,而部分锆石边部为白色或灰白色,中心则呈现黑色或深灰色;另外一类锆石成分较均一,呈灰白色(图 2);锆石的 Th/U 比值较高(0.60~1.07,表 1). 这些特征表明所研究的这些锆石为典型的岩浆成因. FW04-124 样品中 21 颗锆石的 19 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(126±1)Ma(图 3),代表了张家口组流纹岩的结晶时代.

3.2 锆石 Hf 同位素组成

锆石的 Hf 同位素分析结果如表 2 和图 4 所示. 所有颗粒锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002,显示锆石在形成以后具有较少的放射性成因 Hf 的积累.

后城组上部英安岩(FW04-123)中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.281 976~0.282 163,按照 $t=130 \text{ Ma}$ 计算, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -18.8~-25.5,平均为 -21.5±0.5(图 4);Hf 模式年龄(T_{DM})变化范围为 1 949~1 532 Ma(表 2),Hf 平均地壳模式年龄(T_{DM}^C)为 2 784~2 365 Ma,平均年龄为 2 530 Ma.

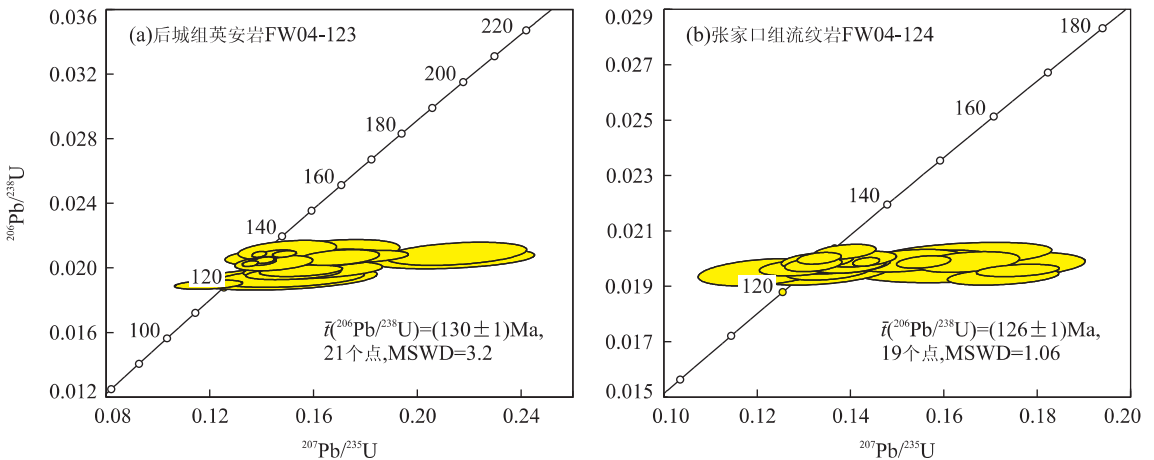


图 3 后城组和张家口组火山岩中锆石的 U-Pb 年龄

Fig. 3 Zircon U-Pb ages of volcanic rocks from the Houcheng and Zhangjiakou formations

表 2 后城组和张家口组火山岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotopic data of volcanic rocks from the Houcheng and Zhangjiakou formations

点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
后城组英安岩(FW04-123)												
01	130	0.043 311	0.001 142	0.282 113	0.000 023	0.282 110	-23.3	-20.6	0.8	1 612	2 477	-0.97
02	130	0.123 407	0.002 863	0.281 976	0.000 028	0.281 969	-28.1	-25.5	1.0	1 888	2 784	-0.91
03	130	0.022 263	0.000 584	0.282 105	0.000 022	0.282 103	-23.6	-20.8	0.8	1 600	2 491	-0.98
04	130	0.046 631	0.001 154	0.282 072	0.000 027	0.282 070	-24.7	-22.0	0.9	1 669	2 565	-0.97
05	130	0.048 750	0.001 533	0.282 036	0.000 030	0.282 032	-26.0	-23.3	1.1	1 737	2 647	-0.95
06	130	0.032 112	0.000 885	0.282 069	0.000 021	0.282 067	-24.9	-22.1	0.7	1 662	2 571	-0.97
07	130	0.050 528	0.001 323	0.282 144	0.000 019	0.282 141	-22.2	-19.5	0.7	1 575	2 408	-0.96
08	130	0.127 214	0.002 947	0.282 058	0.000 025	0.282 051	-25.2	-22.6	0.9	1 773	2 605	-0.91
09	130	0.030 498	0.000 882	0.282 120	0.000 023	0.282 118	-23.1	-20.3	0.8	1 591	2 460	-0.97
10	130	0.065 286	0.001 842	0.282 052	0.000 018	0.282 048	-25.5	-22.8	0.7	1 729	2 613	-0.94
11	130	0.029 146	0.000 807	0.282 097	0.000 015	0.282 095	-23.9	-21.1	0.5	1 619	2 508	-0.98
12	130	0.026 534	0.000 793	0.282 140	0.000 020	0.282 138	-22.4	-19.6	0.7	1 560	2 415	-0.98
13	130	0.036 505	0.001 065	0.282 076	0.000 022	0.282 073	-24.6	-21.9	0.8	1 661	2 558	-0.97
14	130	0.030 390	0.000 888	0.282 163	0.000 021	0.282 161	-21.5	-18.8	0.7	1 532	2 365	-0.97
15	130	0.095 104	0.002 894	0.281 994	0.000 037	0.281 987	-27.5	-24.9	1.3	1 863	2 745	-0.91
16	130	0.030 054	0.000 851	0.282 059	0.000 020	0.282 057	-25.2	-22.4	0.7	1 674	2 593	-0.97
17	130	0.036 986	0.001 156	0.282 148	0.000 039	0.282 145	-22.1	-19.3	1.4	1 564	2 400	-0.97
18	130	0.015 331	0.000 530	0.282 081	0.000 041	0.282 080	-24.4	-21.6	1.5	1 630	2 543	-0.98
19	130	0.039 559	0.001 162	0.282 062	0.000 021	0.282 059	-25.1	-22.4	0.8	1 684	2 588	-0.97
20	130	0.030 457	0.000 987	0.282 090	0.000 016	0.282 087	-24.1	-21.4	0.6	1 637	2 526	-0.97
21	130	0.020 546	0.000 672	0.282 100	0.000 019	0.282 098	-23.8	-21.0	0.7	1 610	2 502	-0.98
22	130	0.020 492	0.000 717	0.282 077	0.000 016	0.282 075	-24.6	-21.8	0.6	1 643	2 552	-0.98
23	130	0.017 998	0.000 686	0.282 118	0.000 019	0.282 117	-23.1	-20.3	0.7	1 585	2 462	-0.98
24	130	0.056 715	0.001 995	0.282 063	0.000 013	0.282 058	-25.1	-22.4	0.5	1 720	2 590	-0.94
25	130	0.109 770	0.003 431	0.282 108	0.000 035	0.282 100	-23.5	-20.9	1.2	1 722	2 498	-0.90
26	130	0.189 318	0.005 052	0.282 016	0.000 023	0.282 003	-26.8	-24.3	0.8	1 949	2 710	-0.85
张家口组流纹岩(FW04-124)												
01	126	0.014 017	0.000 473	0.282 219	0.000 016	0.282 218	-19.5	-16.8	0.6	1 437	2 241	-0.99
02	126	0.018 046	0.000 575	0.282 235	0.000 018	0.282 234	-19.0	-16.3	0.6	1 419	2 206	-0.98
03	126	0.040 844	0.001 257	0.282 220	0.000 017	0.282 217	-19.5	-16.9	0.6	1 467	2 245	-0.96
04	126	0.021 409	0.000 658	0.282 223	0.000 017	0.282 222	-19.4	-16.7	0.6	1 439	2 233	-0.98
05	126	0.016 587	0.000 544	0.282 253	0.000 017	0.282 252	-18.4	-15.6	0.6	1 394	2 167	-0.98
06	126	0.039 377	0.001 389	0.282 203	0.000 019	0.282 200	-20.1	-17.5	0.7	1 495	2 281	-0.96
07	126	0.020 826	0.000 605	0.282 174	0.000 024	0.282 172	-21.2	-18.5	0.8	1 506	2 342	-0.98
08	126	0.024 498	0.000 767	0.282 202	0.000 016	0.282 201	-20.1	-17.5	0.6	1 472	2 280	-0.98
09	126	0.038 381	0.001 299	0.282 215	0.000 020	0.282 212	-19.7	-17.0	0.7	1 475	2 254	-0.96
10	126	0.028 292	0.001 005	0.282 205	0.000 017	0.282 203	-20.0	-17.4	0.6	1 478	2 275	-0.97
11	126	0.017 259	0.000 600	0.282 222	0.000 017	0.282 220	-19.5	-16.8	0.6	1 439	2 236	-0.98
12	126	0.054 943	0.001 966	0.282 207	0.000 019	0.282 203	-20.0	-17.4	0.7	1 513	2 275	-0.94
13	126	0.030 276	0.001 002	0.282 236	0.000 016	0.282 234	-19.0	-16.3	0.6	1 434	2 207	-0.97
14	126	0.021 632	0.000 716	0.282 208	0.000 016	0.282 206	-19.9	-17.2	0.6	1 462	2 267	-0.98
15	126	0.025 574	0.000 888	0.282 224	0.000 018	0.282 222	-19.4	-16.7	0.6	1 447	2 234	-0.97
16	126	0.040 531	0.001 385	0.282 234	0.000 018	0.282 230	-19.0	-16.4	0.6	1 452	2 214	-0.96
17	126	0.021 972	0.000 771	0.282 251	0.000 016	0.282 249	-18.4	-15.7	0.6	1 405	2 173	-0.98
18	126	0.033 435	0.001 086	0.282 188	0.000 017	0.282 185	-20.7	-18.0	0.6	1 505	2 314	-0.97
19	126	0.022 318	0.000 815	0.282 234	0.000 015	0.282 232	-19.0	-16.3	0.5	1 430	2 210	-0.98
20	126	0.026 677	0.000 999	0.282 269	0.000 018	0.282 267	-17.8	-15.1	0.6	1 388	2 134	-0.97

$\epsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10\,000$; $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] \times 10\,000$; $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}^{-1}$; 其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$. f_{cc} , f_{s} , f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$; t 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$.

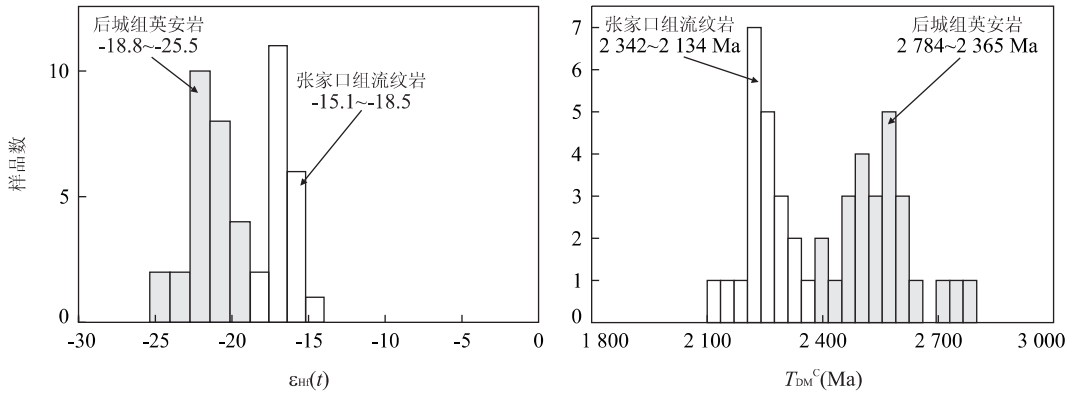


图 4 后城组和张家口组火山岩中锆石的 Hf 同位素组成

Fig. 4 Zircon Hf isotopic data of volcanic rocks from the Houcheng and Zhangjiakou formations

张家口组流纹岩(FW04—124)中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282 174~0.282 69,按照 $t=126\text{ Ma}$ 计算, $\epsilon_{\text{HF}}(t)$ 值为 -18.5~-15.1(图 4);Hf 模式年龄(T_{DM})变化范围为 1 513~1 388 Ma,Hf 平均地壳模式年龄(T_{DM}^{C})为 2 342~2 134 Ma(表 2).

4 讨论

4.1 后城组和张家口组火山岩时代及其意义

宣化地区出露的后城组年代学资料较少,邵济安等(2003a)用全岩 K-Ar 法测定玄武岩的喷发年龄为 $(144.7 \pm 2.8)\text{ Ma}$,该年龄与 Swisher 等(2002)测定的辽西地区土城子组火山岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 $(139.4 \pm 2.8)\text{ Ma}$ 基本相同.本文所测的后城组上部英安岩采自邵济安等(2003a)所测玄武岩之上,其锆石 U-Pb 年龄为 $(130 \pm 1)\text{ Ma}$.所有这些年龄表明,后城组上部的火山岩不是晚侏罗世,而是早白垩世喷发形成的.

张家口组火山岩已有较多的同位素年龄,邵济安等(2003b)利用全岩 Rb-Sr 等时线测定的张家口组火山岩年龄为 138~139 Ma,但误差较大(9~13 Ma);张宏等(2005)利用锆石 LA-ICPMS U-Pb 法测定的冀北滦平—辽西凌源地区张家口组火山岩年龄为 136~130 Ma,并认为该年龄年轻于承德地区张家口组火山岩的年龄(135~126 Ma)(牛宝贵等,2003;柳永清等,2003;Niu *et al.*, 2004).因此,张宏等(2005)认为张家口组火山岩由西向东随时间的推移有变新的趋势,即张家口组火山岩随时间的变化有一定的迁移性.但本文所测定的张家口组二段流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(126 \pm 1)\text{ Ma}$,该年龄

与承德地区张家口组顶部流纹岩锆石的 U-Pb 年龄 $(125.9 \pm 2.8)\text{ Ma}$ 相同(牛宝贵等,2003;柳永清等,2003;Niu *et al.*, 2004).考虑到年轻样品锆石的 LA-ICPMS 和 SHRIMP 测年误差,我们认为张家口组火山岩在空间和时间上没有什么变化.再者,前人测得冀北滦平地区大北沟组上部的凝灰岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(133.9 \pm 2.5)\text{ Ma}$ 、 $(130.1 \pm 2.5)\text{ Ma}$ (柳永清等,2003),与张家口组火山岩年龄相同.因此,我们认为大北沟组火山岩与张家口组火山岩同期形成,这套火山岩与张家口组火山岩只是在区域上的“同物易名”,建议将“大北沟组”解体,将其合并入张家口组.

本文的锆石 U-Pb 年代学研究以及前人研究表明,张—宣地区后城组、张家口组火山岩的喷发时代均为早白垩世.而近年来,区域构造、岩浆活动、地球物理和成矿作用等研究表明,华北克拉通东部岩石圈发生了强烈的岩石圈减薄和陆内伸展作用,而大规模岩浆作用(花岗岩侵入体,尤其是 A 型花岗岩)(Wu *et al.*, 2005a)、广泛发布的变质核杂岩(Davis *et al.*, 2001)以及大规模金成矿作用(Yang *et al.*, 2003)的年代学格架,以及岩浆岩地球化学特征、同位素组成所示踪的源区迁移等研究表明,中生代构造体制转折、岩石圈减薄作用以及地壳伸展作用的峰期为早白垩世(Yang *et al.*, 2003;翟明国等,2003;Wu *et al.*, 2005a).因此,张—宣地区早白垩世后城组、张家口组火山岩的喷发是华北克拉通东部地壳伸展、岩石圈减薄作用的结果.

4.2 火山岩岩浆源区及其变化

后城组上部英安岩富 SiO_2 、低 TiO_2 和 MgO 含量(邵济安等,2003a),锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布

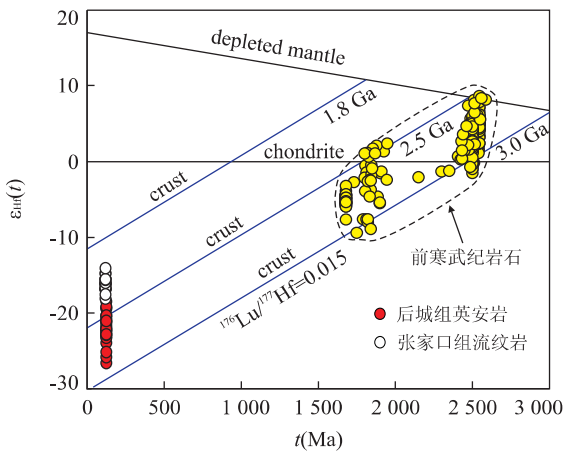


图 5 后城组和张家口组火山岩中锆石 Hf 同位素特征

Fig. 5 Zircon Hf isotopic features of volcanic rocks from the Houcheng and Zhangjiakou formations
前寒武纪岩石中锆石的 Hf 同位素引自杨进辉未发表数据

于 0.28198~0.28216, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -18.8~-25.5 (图 4), 分布于华北克拉通地壳演化范围内(图 5), 反映了后城组上部英安岩来源于地壳物质的部分熔融作用。再者, 锆石的 Hf 平均地壳模式年龄 (T_{DM}^{C}) 为 2784~2365 Ma (表 2), 与华北克拉通北部太古代花岗岩中锆石的 Hf 平均地壳模式年龄相同(杨进辉, 未发表数据)(图 5), 也与华北克拉通东部变质岩和花岗岩的全岩 Nd 模式年龄相同 (Wu *et al.*, 2005c)。因此, 我们认为后城组上部火山岩的源岩是晚太古代形成的地壳物质, 而晚太古代正是华北克拉通东部大陆地壳生长的重要时期 (Wu *et al.*, 2005c)。

张家口组流纹岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.28217~0.28227, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -18.5~-15.1 (图 4), Hf 平均地壳模式年龄 (T_{DM}^{C}) 为 2342~2134 Ma (表 2), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显高于后城组英安岩, 而 T_{DM}^{C} 明显年轻于后城组英安岩; 并且, 张家口组火山岩锆石 Hf 同位素组成明显位于华北克拉通地壳演化线之上, 而位于古元古代地壳演化范围内(图 5)。因此, 张家口组流纹岩可能来源于古元古代形成的地壳, 或者来源于晚太古代地壳物质但有新生地幔物质的加入。考虑到华北克拉通出露前寒武纪岩石的年代学谱系以及 2.3~2.1 Ga 期间华北克拉通很少有大规模的基性岩石形成 (Zhao *et al.*, 2001), 我们认为张家口组流纹岩来源于太古代地壳物质但有地幔物质的加入。

锆石 Hf 同位素研究表明, 火山岩的源区从后城组至张家口组明显发生了变化, 由古老下地壳物

质迁移至壳幔混合源区。这种源区的变化可能是张—宣地区, 乃至华北克拉通东部晚中生代期间岩石圈减薄作用逐渐加强、软流圈物质上涌以及地幔岩浆底侵作用的结果。早白垩世期间华北克拉通东部软流圈上涌与地幔岩浆底侵作用已初步被汉诺坝玄武岩中下地壳基性麻粒岩包体研究 (Zhou *et al.*, 2002; Wilde *et al.*, 2003) 以及辽西地区来源于软流圈的 100 Ma 左右火山岩发现 (邵济安等, 2004; 路凤香等, 2005) 所证实。

5 结论

(1) 张—宣地区后城组上部英安岩锆石 U-Pb 年龄为 (130 ± 1) Ma, 张家口组流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为 (126 ± 1) Ma, 都是在早白垩世喷发而成的; (2) 锆石的 Hf 同位素研究表明, 后城组上部英安岩主要来源于太古代下地壳物质的部分熔融作用, 而张家口组流纹岩则来源于太古代下地壳物质与地幔物质的混合熔融; (3) 张—宣地区后城组上部、张家口组火山岩的喷发是华北克拉通东部岩石圈减薄作用、地壳伸展作用的产物。

致谢: 锆石 U-Pb 年龄测试得到西北大学大陆动力学重点实验室全体工作人员的帮助, 锆石 Hf 同位素分析过程中得到杨岳衡、张吉衡、程瑞玉的帮助, 在 CL 图像获取过程中得到毛骞、马玉光的帮助, 在此一并表示谢意。

References

- Anderson, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Bichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243-258.
- Chen, J. B., Wu, T. S., 1997. The regional stratigraphy in North China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1-199 (in Chinese with English abstract).
- Chen, P. J., Dong, Z. M., Zhen, S. N., 1998. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 391: 147-152.
- Chen, Y. X., Chen, W. J., 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning and adjacent areas—Geochronology, geochemistry and tectonic setting. Seismic Press, Bei-

- jing, 1—279 (in Chinese with English abstract).
- Davis, G. A., 2005. The Late Jurassic “Tuchengzi/Houcheng” Formation of the Yanshan fold-thrust belt: An analysis. *Earth Science Frontiers*, 12: 331—345.
- Davis, G. A., Zheng, Y. D., Wang, C., et al., 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix, M. S., Davis, G. A., eds., Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of Central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation. *Geol. Soc. of Am. Memoir*, 194: 171—198.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897.
- Iizuka, T., Hirata, T., 2005. Improvements of precision and accuracy in in situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique. *Chemical Geology*, 220: 121—137.
- Ji, Q., Currie, P. J., Norell, M. A., et al., 1998. Two feathered dinosaurs from northeastern China. *Nature*, 393: 753—761.
- Liu, D. Y., Geng, Y. S., Song, B., 1997. Late Archean crustal accretion and reworking in northwestern Hebei Province: Isochronology evidence. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 226—232 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Li, P. X., Tian, S. G., 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of Late Mesozoic tuff (lava) in Luanping basin, northern Hebei, and its implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 237—244 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Zhang, R. S., et al., 2005. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton. *Earth Science Frontiers*, 12: 61—67 (in Chinese with English abstract).
- Niu, B. G., He, Z. J., Song, B., et al., 2003. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou Formation and its significance. *Geological Bulletin of China*, 22: 140—141 (in Chinese with English abstract).
- Niu, B. G., He, Z. J., Song, B., et al., 2004. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou and Yixian formations, northern Hebei Province, with a discussion on the age of the Xingpanling Group of the Great Hinggan Mountain and volcanic strata of the southeastern coastal area of China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78: 1214—1228.
- Shao, J. A., Li, Z. T., Zhang, L. Q., 2004. Symmetric spatio-temporal distribution of the Meso-Cenozoic volcanic rocks in Liaoning and environs and its implications. *Chinese Journal of Geology*, 39: 98—106 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Meng, Q. R., Wei, H. Q., et al., 2003a. Nature and tectonic environment of Late Jurassic volcanic-sedimentary basins in northwestern Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 22: 751—761 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Chu, Z. Y., 2003b. Early Cretaceous volcanism-sedimentation in northern Hebei and its tectonic setting: A discussion. *Geological Bulletin of China*, 22: 384—390 (in Chinese with English abstract).
- Soderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311—324.
- Sun, G., Dilcher, D. L., Zheng, S. L., et al., 1998. In search of the first flower: A Jurassic angiosperm: *Archaeof ructus*, from Northeast China. *Science*, 282: 1692—1695.
- Swisher, C. C., Wang, X. L., Zhou, Z. H., et al., 2002. Further support for a Cretaceous age for the feathered dinosaur beds of Liaoning, China; New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Yixian and Tuchengzi formations. *Chinese Science Bulletin*, 47: 135—138.
- Swisher, C. C., Wang, Y. Q., Wang, X. L., et al., 1999. Cretaceous age of the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 400: 58—61.
- Veevers, J. J., Saeed, A., Belousova, E. A., et al., 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn craton. *Earth-Science Reviews*, 68: 245—279.
- Wilde, S. A., Zhou, X. H., Nemchin, A. A., et al., 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 31: 817—820.
- Wong, W. H., 1927. Crustal movement and igneous activities in eastern China since Mesozoic time. *Bulletin of Geological Society of China*, 6: 9—36 (in Chinese).
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries and concomitant age estimation. *Chemical Geology*, 209: 121—135.
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005a. Nature and

- significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233:103–119.
- Wu, F. Y., Yang, Y. H., Xie, L. W., et al., 2005b. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology* (in review).
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005c. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24:523–545.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geology Reviews*, 23:125–152.
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostand. Newsl.*, 28:353–370.
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Liu, J. M., et al., 2004. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China block. *Science in China (Series D)*, 47:151–159.
- Zhang, H., Liu, X. M., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Zircon U-Pb ages and significance of bottom and top beds of Zhangjiakou Formation in Liaoning and Hebei provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30:387–401 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107:45–73.
- Zhou, X. H., Sun, M., Zhang, G. H., et al., 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62:111–124.
- Zhou, Z., Barrett, P. M., Hilton, J., 2003. An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem. *Nature*, 421:807–814.

附中文参考文献

- 陈晋镛, 武铁山, 1997. 华北区域地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–199.
- 陈义贤, 陈文寄, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1–279.
- 河北省地质局, 1996. 全国地层多重划分对比研究(13)——河北省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 80–82.
- 刘敦一, 耿元生, 宋彪, 1997. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造——同位素年代学证据. *地球学报*, 18(3): 226–232.
- 柳永清, 李佩贤, 田树刚, 2003. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 237–244.
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等, 2005. 华北克拉通东部显生宙地幔演化. *地学前缘*, 12: 61–67.
- 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 等, 2003. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义. *地质通报*, 22: 140–141.
- 邵济安, 李之彤, 张履桥, 2004. 辽西及邻区中—新生代火山岩的时空对称分布及其启示. *地质科学*, 39: 98–106.
- 邵济安, 孟庆任, 魏海全, 等, 2003a. 冀西北晚侏罗世火山—沉积盆地的性质及构造环境. *地质通报*, 22: 751–761.
- 邵济安, 张履桥, 储著银, 2003b. 冀北早白垩世火山—沉积作用及构造背景. *地质通报*, 22: 384–390.
- 翁文灏, 1927. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动. *中国地质学会会志*, 6: 9–36.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等, 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: 913–920.
- 张宏, 柳小明, 张晔卿, 等, 2005. 冀北滦平—辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石 U-Pb 测年及意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 30: 387–401.