

太行山北段中生代岩基及其包体锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义*

陈智超 陈斌** 田伟

CHEN ZhiChao, CHEN Bin and TIAN Wei

北京大学地球与空间学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2006-09-27 收稿, 2006-12-30 改回.

Chen ZC, Chen B and Tian W. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: a case study of Mesozoic batholiths and mafic enclaves in North Taihang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):295–306

Abstract Extensive Mesozoic magmatic rocks were emplaced in the northern part of the Taihang Mountains, which are dominated by intermediate to felsic rocks with minor but widespread mafic microgranular enclaves, accompanied by subordinate mafic bodies. Zircon SHRIMP U-Pb dating yields a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of ca. 126Ma for the injection of mafic enclaves, which is identical to the emplacement age of their host rocks. LA-MC-ICPMS in-situ Hf isotopic analysis of zircons suggests that the mafic rocks basically originated from partial melting of an enriched mantle, contaminated by crustal components en route to crustal levels, whereas the dominant intermediate to felsic batholiths formed from a mixing/mingling process between enriched mantle-derived mafic magma and crustal-derived granitic magma. The mafic macrogranular enclaves in the batholith represent mafic magma that were injected into felsic magma chamber, followed by interaction with the latter.

Key words zircon Hf isotopic analysis; mafic enclaves, Mesozoic magmatism, Taihang Mountains

摘要 太行山北段出露大规模中生代岩浆岩带,以中性岩为主,普遍含有基性微粒包体。锆石的 SHRIMP U-Pb 年代学研究表明,包体形成于 126Ma 左右,与寄主岩石大致同时形成。锆石的 LA-MC-ICPMS Lu-Hf 同位素原位测量研究表明,基性岩来自富集地幔的部分熔融,并遭受了一定程度的地壳混染;主要的中性岩岩基形成于壳幔岩浆混和过程,而岩基中微粒基性包体是经历分离结晶的基性岩浆注入酸性岩浆房中形成。

关键词 锆石 Hf 同位素测量;基性包体;中生代岩浆作用;太行山

中图法分类号 P597.3

1 引言

华北克拉通自早中生代以来重新活化,发育一系列伸展盆地,伴有规模巨大的岩浆作用与成矿作用,并同时伴有岩石圈地幔减薄和化学性质的变化(吴福元等,2000;樊祺诚等,2001;邓晋福等,2003;路凤香等,2006)。华北中生代岩浆作用成因及地球动力学背景涉及到壳幔相互作用、岩石圈拆沉、地幔演化等基本地学问题,一直备受学术界关注(邓晋

福等,2006;高山等,2003;陈斌等,2002;Chen *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2004; Zhang *et al.* 2005; Yang *et al.* 2006; Tang *et al.* 2006)。

太行山北段有规模巨大的中生代岩浆岩带出露,侵位于前寒武纪岩石中(图 1)。中生代岩浆岩类型复杂,从基性岩到中性岩都有出露,但以中性岩分布占绝对优势。太行山中生代岩浆岩普遍含有基性微粒包体(mafic microgranular enclaves, MMEs)。以前的岩石学和 Nd-Sr 同位素工作(陈斌, 2002; Chen *et al.*, 2004)表明太行山中生代岩体的形成

* 由国家自然科学基金(No. 40625005, 40502009)资助。

第一作者简介:陈智超,男,1982年生,硕士研究生,岩石学和地球化学专业, E-mail: czc0924@163.com

** 通讯作者:陈斌, E-mail: binchen@pku.edu.cn

可能与壳幔岩浆混和有关;最近,陈斌等(2006)报道太行山中生代石英二长岩的包体及寄主岩石中存在斜长石和角闪石的成分结构不平衡现象,也将其解释为壳幔岩浆混合过程的记录。为了更深入了解太行山中生代岩浆作用的成因,我们在这些研究工作的基础上进一步对太行山北段中生代侵入岩及其包体进行锆石 Hf 同位素研究,以便揭示岩浆源区性质和岩浆演化过程的特征。

锆石作为一种常见的副矿物,是岩石中 Hf 的主要载体,其高 Hf 同位素体系封闭温度使得 Hf 同位素成分容易保留,而低 Lu/Hf 比值使得锆石形成之后没有太多放射性同位素子体积累,因此锆石 Hf 同位素示踪研究对岩石成因具有不可替代的重要性(Griffin *et al.*, 2002; Vervoort *et al.*, 1996; Blichert-Toft and Albarède, 1997; Amelin *et al.*, 2000),成为讨论岩浆起源和演化,揭示源区特征的有力工具。

2 地质背景和岩石学特征

华北克拉通基础地质已被前人多描述(Jahn *et al.*, 1987; Xu *et al.*, 2001; 洪大卫等, 2003)。本文只简要概括太行山北段的地质背景。太行山北段中生代深成岩岩基的代表性岩体是大河南岩体和王安镇岩体,侵位于前寒武纪岩石中。中酸性岩分布占绝对优势,主要岩石类型包括石英闪长岩,花岗闪长岩,二长闪长岩,石英二长岩,二长花岗岩等,中基性岩类主要是辉长闪长岩-闪长岩类,分布局限,主要以小型岩基和基性微粒包体(MME)形式出现(图1)。本文研究对象为两个石英二长岩样品(DH-9,采自大河南岩体; WA-14,采自王安镇岩体;图1)、两个辉长闪长岩样品(WA-3和

XZ-6,采自王安镇岩体;图1)和四个以石英二长岩为寄主岩石的包体样品(LY-1, LY-2, CW-2 和 CW-15,采自王安镇岩体;图1)。其主要岩石学特征如下:

太行山北段地区石英二长岩为淡肉红色,粗粒花岗结构或斑状结构,块状构造。主要矿物组成为石英(15~20%)、钾长石(20~25%)、斜长石(40%)、角闪石(10~15%)和黑云母(5%)。副矿物为锆石、榍石、铁钛矿等。钾长石和斜长石多呈自形板状晶体。

辉长闪长岩出露面积小,岩石具中细粒结构,块状构造,主要由斜长石(45%)、辉石(35%)、角闪石(15%)和少量钾长石组成,以及微量锆石、榍石、铁钛氧化物和磷灰石等。

太行山北段中生代岩浆岩以普遍含有基性微粒包体为特征(图2)。包体呈水滴状、椭圆状等,大小从几厘米到几米,但以几十厘米最为常见。包体与围岩的接触关系复杂,通常为截然关系,但也可见模糊的逐渐过渡界限。包体中经常可见大的钾长石晶体,其特征与成分与寄主岩石中的钾长石晶体无异,有的钾长石位于包体与寄主岩石的边界处,一部分进入包体,一部分留在寄主岩石中(图2),直观地表明当时包体和寄主岩石仍处于塑性流动状态。包体一般为灰黑色-黑色,细粒块状,还可见到复合包体,即包体中包裹率更高、粒度更细的包体(图2),典型火成结构,斑状结构,矿物种类与寄主岩石相似,但比寄主岩石更富铁镁矿物,矿物组成为斜长石、黑云母、角闪石,以及少量的石英和钾长石,副矿物主要为铁的氧化物、锆石、榍石、磷灰石等。

3 实验方法

锆石样品的制备 锆石的挑选经过手工破碎、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、无明显裂隙且晶型完好的锆石。将锆石置于环氧树脂内研磨,再抛光清洗制成样本。锆石的阴极发光(CL)图象在北京大学物理学院电镜室完成。

锆石 SHRIMP 定年 锆石定年在北京离子探针中心(SHRIMP II)完成,标样锆石 TEM($t = 417\text{Ma}$)用于元素间分馏校正。U, Th 和 Pb 含量的测定用标准斯里兰卡锆石 SL13($U = 238 \times 10^{-6}$, $t = 572\text{Ma}$)校正。详细的分析流程见宋彪等(2002)。

LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测量 参照锆石阴极发光(CL)图象进行锆石 Hf 同位素原位测量。实验在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193nm 激光取样系统的 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪上进行,激光斑束直径为 63 μm 或 31 μm ,激光剥蚀时间为 26s,激光脉冲频率 4~8Hz,激光脉冲能量 100mJ,测定时采用锆石国际标样 91500 做外标。详细的分析流程见 Xu *et al.* (2004) 和 Wu *et al.* (2006)。

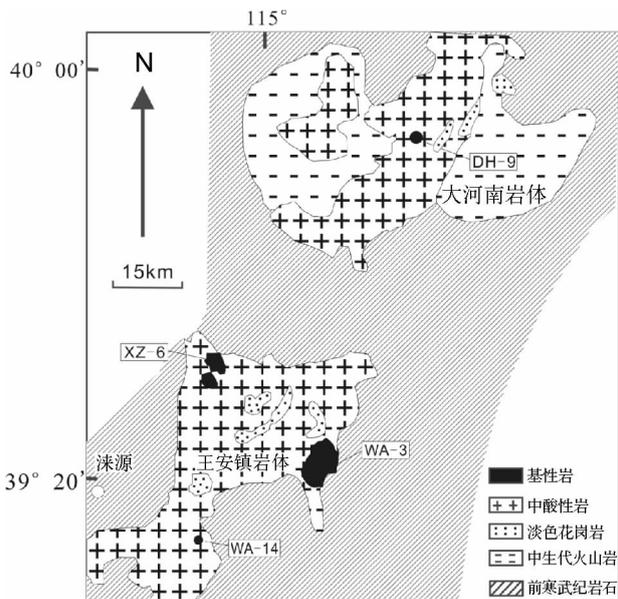


图1 太行山北段地质简图(据陈斌, 2002)

Fig. 1 Sketch geological map of the northern Taihang orogen (After Chen *et al.*, 2002)



图2 王安镇岩体二长花岗岩中基性微粒包体的野外照片

Fig.2 Field photographs of microgranular mafic enclaves in the Wanganzhen magmatic complex

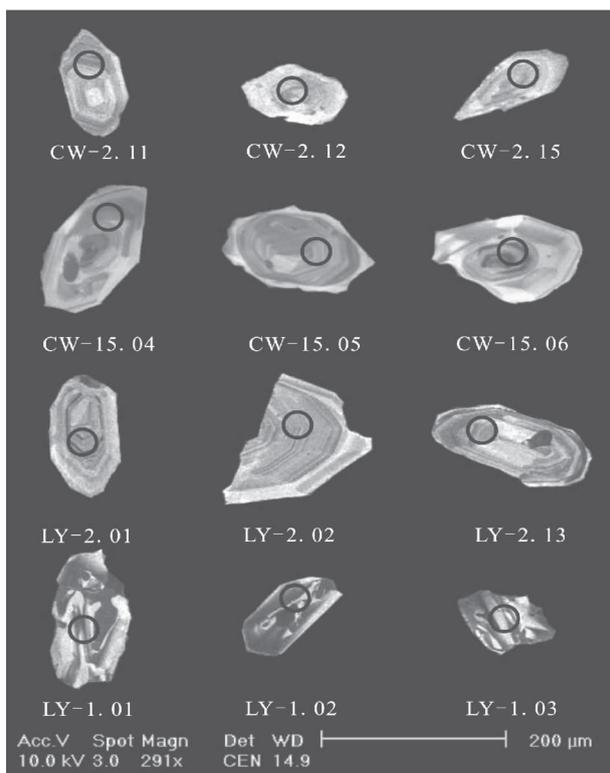


图3 锆石阴极发光图象(黑色圆圈为激光剥蚀位置)

Fig.3 Cathodoluminescence images of zircon grains; the black circles are the positions of laser points

4 实验结果

4.1 锆石 SHRIMP 年代学

根据陈斌等(2005)用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法的测定结果,文中涉及的中酸性岩基和基性岩的年代分别为:样品 DH-9 为 127 ± 2.7 Ma, 样品 WA-3 为 138 ± 2 Ma, 样品 WA-14

为 132 ± 2 Ma, 样品 XZ-6 为 129 ± 2.6 Ma。

图3是包体样品的代表性锆石阴极发光(CL)图象。CW-2 和 LY-2 锆石一般多为浑圆状或短柱状,具有明显的岩浆振荡生长环带,而 LY-1 的锆石一般晶体较小,晶形较差,且成分环带不清晰,显示其形成于更为基性的结晶环境,这也与野外观察一致(图2)。值得注意的是,该基性包体中的锆石具有熔蚀现象(LY-1.01 和 LY-1.03; 图3),这可能与岩浆混合有关。

我们对同一地区的一个包体样品(CW-15)作了锆石 U-Pb SHRIMP 定年,定年数据列于表1,并表示于图4。有两个分析点分别给出了晚太古-早元古的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 2036 ± 17 Ma 和 2045 ± 22 Ma, 可能为古老下地壳源区的捕获晶,表明古老的 TTG 岩石可能对岩浆源区有一定贡献。其它 15 个点给出加权平均的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 126.1 ± 2.5 Ma, 在误差范围内与寄主岩石年代相同。由于锆石具有明显的岩浆振荡生长环带(图3),因此该年龄应该代表太行山北段中生代

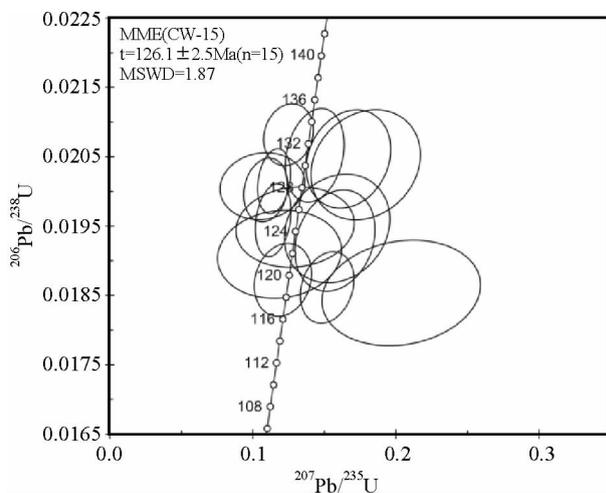


图4 锆石 SHRIMP U-Pb 年代数据

Fig.4 zircon SHRIMP U-Pb isotopic data

岩体中包体的岩浆结晶年龄。这一结果表明基性岩浆和酸性岩浆几乎是同时活动的,与野外基性微粒包体的缺乏冷凝边、含有寄主岩石斑晶等特征一致,支持该区中生代岩基属于壳幔岩浆混合成因,因为同深成的包体和寄主岩石是岩浆混合的必要前提(Xu *et al.*, 1999; Neves *et al.*, 1995)。

4.2 锆石 Hf 同位素数据

我们对 2 个石英二长质岩基样品(DH-9 和 WA-14)、2 个

辉长闪长岩体样品(WA-3 和 XZ-6)和 4 个基性微粒包体(LY-1, LY-2, CW-2 和 CW-15)的锆石进行了 Hf 同位素分析,分析结果列于表 2,并图示于图 5。代表性锆石的阴极发光(CL)图象见图 3。除少数点外,大部分颗粒锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值均小于 0.002,显示锆石在形成之后放射性成因 Hf 的积累极为有限。表 2 中还给出了 Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM1} (Hf)和二阶段模式年龄 T_{DM2} (Hf),后者用硅铝质地壳($f_{Lu/Hf} = -0.72$; Vervoort *et al.*, 1996)的 Lu/Hf 比计算。

表 1 锆石 U-Pb SHRIMP 分析结果

Table 1 Zircon U-Pb SHRIMP data

点号	含量(ppm)			²³² Th/ ²³⁸ U	比值(±% err)						年龄 Ma(±1σ) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U
	Pb* ^{a)}	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	% err	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	% err	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	% err	
CW-15-1.1	1.5	80	70	0.91	.0195	2.7	0.16	15.0	0.0605	14.8	134.6 ± 3.9
CW-15-2.1	6.1	342	126	0.38	.0200	1.5	0.11	9.2	0.0399	9.1	132.8 ± 2.0
CW-15-3.1	617.7	1935	1052	0.56	.3716	1.0	8.18	1.0	0.1597	0.3	2036.5 ± 17.2
CW-15-4.1	6.1	337	137	0.42	.0202	1.5	0.12	6.5	0.0417	6.3	132.4 ± 2.1
CW-15-5.1	3.4	176	106	0.62	.0195	2.0	0.13	20.4	0.0497	20.3	137.5 ± 3.3
CW-15-6.1	7.7	408	528	1.33	.0208	1.4	0.13	9.1	0.0440	8.9	137.2 ± 2.1
CW-15-7.1	6.1	326	151	0.48	.0201	1.6	0.11	17.9	0.0394	17.9	136.3 ± 2.2
CW-15-8.1	3.9	220	55	0.26	.0187	1.9	0.12	10.7	0.0478	10.5	128.3 ± 2.5
CW-15-9.1	4.6	270	148	0.57	.0196	1.8	0.11	7.2	0.0424	7.0	125.1 ± 2.2
CW-15-10.1	2.1	116	100	0.89	.0193	2.5	0.16	11.6	0.0599	11.3	128.8 ± 3.5
CW-15-11.1	2.0	102	56	0.57	.0204	2.6	0.18	13.9	0.0648	13.6	141.7 ± 3.8
CW-15-12.1	2.8	149	80	0.56	.0191	2.2	0.12	23.3	0.0466	23.1	137.9 ± 3.2
CW-15-13.1	1.8	97	83	0.88	.0186	2.7	0.21	17.6	0.0813	17.4	129.4 ± 4.7
CW-15-14.1	111.9	288	279	1.00	.4556	1.1	10.18	1.3	0.1621	0.8	2405.4 ± 21.9
CW-15-15.1	2.5	129	98	0.79	.0205	2.3	0.17	11.5	0.0601	11.3	135.4 ± 4.1
CW-15-16.1	3.7	217	185	0.88	.0186	1.8	0.15	8.0	0.0600	7.8	126.6 ± 2.3
CW-15-17.1	2.8	150	90	0.62	.0205	2.2	0.14	9.4	0.0511	9.1	136.5 ± 2.9

a) 用测得的²⁰⁴Pb 做普通铅校正

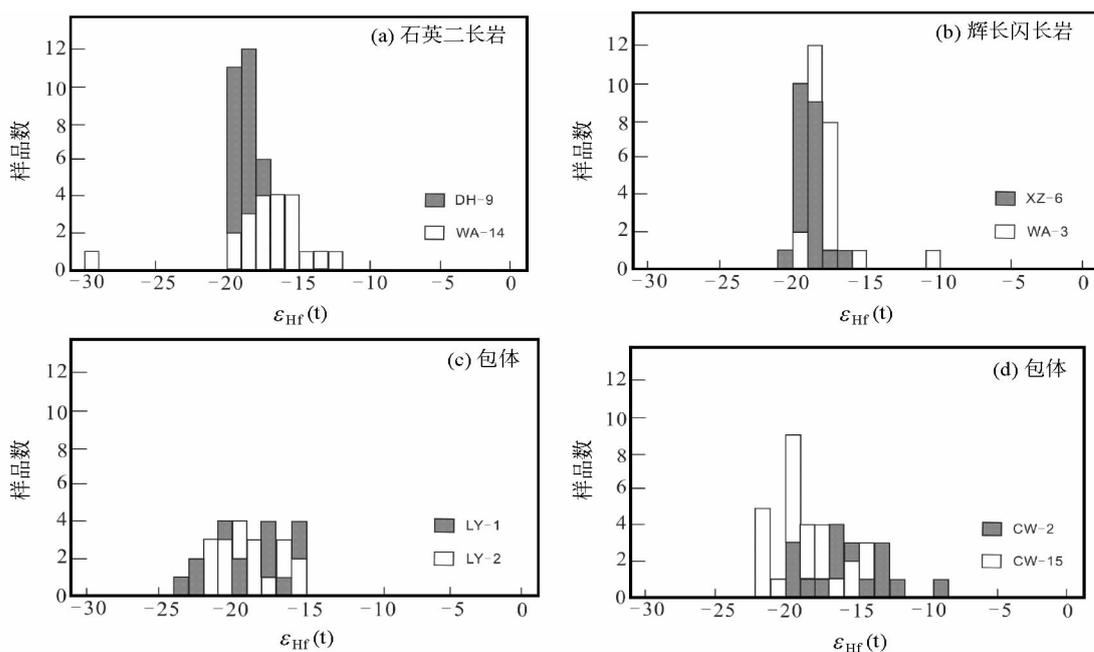


图 5 王安镇岩体中包体和寄主岩石的锆石 Hf 同位素组成直方图

Fig. 5 Histograms of $\epsilon_{Hf}(t)$ values for zircons from MMEs and host rocks

表 2 LA-MC-ICPMS 锆石 Lu-Hf 同位素原位测量数据

Table 2 LA-MC-ICPMS in-situ analysis of zircon Lu-Hf isotopes

样品号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^\#$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\lambda = 1.865$ $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DMI}}(\text{Hf})$	$f = -0.72$ $T_{\text{DM2}}(\text{Hf})$	$f_{\text{La/Hf}}$
DH9-01	127	0.017153	0.000694	0.282138	0.282156	22	-21.78	-19.06	1533	1947	-0.98
DH9-02	127	0.018114	0.000694	0.282164	0.282182	24	-20.87	-18.15	1498	1902	-0.98
DH9-03	127	0.016036	0.000624	0.282140	0.282158	20	-21.70	-18.97	1527	1943	-0.98
DH9-04	127	0.015830	0.000629	0.282184	0.282202	23	-20.15	-17.43	1467	1865	-0.98
DH9-05	127	0.015106	0.000590	0.282172	0.282190	21	-20.57	-17.84	1482	1886	-0.98
DH9-06	127	0.027393	0.001098	0.282127	0.282145	22	-22.16	-19.47	1565	1968	-0.97
DH9-07	127	0.015066	0.000619	0.282176	0.282194	20	-20.45	-17.72	1478	1880	-0.98
DH9-08	127	0.020669	0.000827	0.282166	0.282184	22	-20.79	-18.08	1500	1898	-0.98
DH9-09	127	0.017045	0.000673	0.282171	0.282189	19	-20.62	-17.90	1487	1889	-0.98
DH9-10	127	0.058928	0.002262	0.282194	0.282212	21	-19.80	-17.21	1518	1853	-0.93
DH9-11	127	0.012096	0.000502	0.282168	0.282186	20	-20.73	-17.99	1485	1894	-0.98
DH9-12	127	0.011757	0.000499	0.282136	0.282154	19	-21.85	-19.11	1528	1950	-0.98
DH9-13	127	0.015863	0.000637	0.282144	0.282162	23	-21.59	-18.86	1524	1938	-0.98
DH9-14	127	0.009464	0.000403	0.282125	0.282143	19	-22.25	-19.50	1540	1970	-0.99
DH9-15	127	0.014056	0.000587	0.282129	0.282147	18	-22.12	-19.39	1542	1964	-0.98
DH9-16	127	0.022373	0.000930	0.282156	0.282174	21	-21.14	-18.44	1518	1916	-0.97
DH9-17	127	0.016550	0.000696	0.282168	0.282186	19	-20.73	-18.00	1492	1894	-0.98
DH9-18	127	0.021868	0.000846	0.282166	0.282184	19	-20.80	-18.09	1501	1899	-0.97
DH9-19	127	0.014408	0.000548	0.282141	0.282159	17	-21.67	-18.94	1523	1942	-0.98
DH9-20	127	0.016936	0.000698	0.282140	0.282158	18	-21.70	-18.98	1530	1943	-0.98
DH9-21	127	0.012271	0.000508	0.282122	0.282140	18	-22.37	-19.63	1549	1977	-0.98
DH9-22	127	0.016101	0.000638	0.282139	0.282157	21	-21.74	-19.01	1529	1945	-0.98
DH9-23	127	0.013258	0.000584	0.282136	0.282154	22	-21.86	-19.13	1532	1951	-0.98
DH9-24	127	0.013510	0.000569	0.282134	0.282152	20	-21.92	-19.19	1534	1954	-0.98
DH9-25	127	0.016974	0.000702	0.282140	0.282158	18	-21.71	-18.99	1531	1944	-0.98
DH9-26	127	0.015852	0.000618	0.282114	0.282132	24	-22.64	-19.91	1564	1991	-0.98
DH9-27	127	0.018630	0.000755	0.282127	0.282145	23	-22.17	-19.45	1551	1967	-0.98
DH9-28	127	0.017564	0.000715	0.282163	0.282181	22	-20.91	-18.19	1500	1903	-0.98
DH9-29	127	0.019069	0.000796	0.282149	0.282167	21	-21.38	-18.67	1522	1928	-0.98
WA14-01	132	0.050282	0.002131	0.282256	0.282274	29	-17.63	-14.92	1424	1741	-0.94
WA14-02	132	0.030745	0.001341	0.282228	0.282246	35	-18.60	-15.83	1433	1788	-0.96
WA14-03	132	0.091511	0.003585	0.281847	0.281865	35	-32.09	-29.51	2092	2475	-0.89
WA14-04	132	0.028869	0.001231	0.282175	0.282193	32	-20.47	-17.69	1504	1882	-0.96
WA14-05	132	0.090270	0.003504	0.282193	0.282211	40	-19.82	-17.24	1572	1858	-0.89
WA14-06	132	0.022200	0.000928	0.282177	0.282195	25	-20.41	-17.60	1489	1877	-0.97
WA14-07	132	0.054638	0.002162	0.281382	0.281400	80	-48.52	-45.83	2670	3290	-0.93
WA14-08	132	0.014781	0.000620	0.282124	0.282142	24	-22.27	-19.43	1549	1970	-0.98
WA14-09	132	0.034376	0.001339	0.282217	0.282235	34	-18.98	-16.21	1448	1807	-0.96
WA14-10	132	0.039450	0.001643	0.282326	0.282344	54	-15.15	-12.41	1306	1614	-0.95
WA14-11	132	0.048644	0.002159	0.282222	0.282240	41	-18.81	-16.11	1474	1801	-0.93
WA14-12	132	0.043505	0.001951	0.282159	0.282177	66	-21.03	-18.31	1555	1913	-0.94
WA14-13	132	0.044646	0.001954	0.282194	0.282212	33	-19.79	-17.07	1505	1850	-0.94
WA14-14	132	0.023354	0.000933	0.282154	0.282172	53	-21.22	-18.41	1521	1918	-0.97
WA14-15	132	0.082948	0.002943	0.282152	0.282170	83	-21.29	-18.66	1609	1930	-0.91
WA14-16	132	0.042777	0.001799	0.282229	0.282247	35	-18.57	-15.84	1450	1788	-0.95

续表 2

Continued Table 2

样品号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^\#$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\lambda = 1.865$ $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Hf)	$f = -0.72$ T_{DM2} (Hf)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
WA14-17	132	0.045849	0.001898	0.282205	0.282223	37	-19.40	-16.67	1487	1830	-0.94
WA14-18	132	0.033920	0.001508	0.282287	0.282305	36	-16.52	-13.76	1356	1683	-0.95
WA14-19	132	0.035428	0.001441	0.282228	0.282246	43	-18.61	-15.85	1438	1789	-0.96
WA14-20	132	0.036684	0.001460	0.282241	0.282259	46	-18.13	-15.37	1419	1764	-0.96
WA14-21	132	0.052546	0.002172	0.282135	0.282153	33	-21.88	-19.19	1599	1957	-0.93
WA14-22	132	0.058134	0.002357	0.282215	0.282233	27	-19.08	-16.39	1493	1816	-0.93
WA3-01	138	0.013055	0.000549	0.282085	0.282103	29	-23.64	-20.67	1600	2038	-0.98
WA3-02	138	0.019421	0.000762	0.282386	0.282404	20	-13.01	-10.06	1192	1500	-0.98
WA3-03	138	0.051358	0.002018	0.282160	0.282178	26	-20.99	-18.16	1556	1910	-0.94
WA3-04	138	0.021658	0.000870	0.282140	0.282158	21	-21.73	-18.78	1538	1942	-0.97
WA3-05	138	0.030311	0.001206	0.282112	0.282130	24	-22.71	-19.80	1591	1993	-0.96
WA3-06	138	0.049043	0.001912	0.282145	0.282163	21	-21.54	-18.69	1574	1937	-0.94
WA3-07	138	0.027866	0.001125	0.282134	0.282152	19	-21.92	-19.00	1556	1953	-0.97
WA3-08	138	0.015273	0.000628	0.282171	0.282189	18	-20.63	-17.66	1486	1886	-0.98
WA3-09	138	0.018025	0.000748	0.282146	0.282164	20	-21.50	-18.54	1524	1930	-0.98
WA3-10	138	0.016487	0.000680	0.282156	0.282174	19	-21.14	-18.18	1508	1912	-0.98
WA3-11	138	0.029320	0.001204	0.282247	0.282265	27	-17.92	-15.01	1401	1751	-0.96
WA3-12	138	0.026458	0.001031	0.282193	0.282211	22	-19.83	-16.91	1470	1847	-0.97
WA3-13	138	0.033212	0.001354	0.282174	0.282192	19	-20.51	-17.61	1510	1883	-0.96
WA3-14	138	0.027583	0.001125	0.282155	0.282173	17	-21.17	-18.25	1527	1915	-0.97
WA3-15	138	0.021810	0.000894	0.282170	0.282188	17	-20.64	-17.70	1497	1887	-0.97
WA3-16	138	0.022086	0.000920	0.282176	0.282194	19	-20.44	-17.50	1490	1877	-0.97
WA3-17	138	0.015984	0.000671	0.282137	0.282155	17	-21.81	-18.85	1534	1946	-0.98
WA3-18	138	0.046375	0.001845	0.282179	0.282197	17	-20.35	-17.49	1523	1876	-0.94
WA3-19	138	0.013235	0.000568	0.282159	0.282177	22	-21.02	-18.06	1499	1905	-0.98
WA3-20	138	0.015327	0.000679	0.282148	0.282166	19	-21.42	-18.46	1519	1926	-0.98
WA3-21	138	0.014511	0.000612	0.282185	0.282203	22	-20.12	-17.15	1465	1860	-0.98
WA3-22	138	0.015585	0.000669	0.282167	0.282185	22	-20.76	-17.80	1493	1893	-0.98
WA3-23	138	0.015893	0.000685	0.282142	0.282160	19	-21.64	-18.69	1528	1937	-0.98
WA3-24	138	0.018032	0.000779	0.282145	0.282163	23	-21.55	-18.60	1528	1933	-0.98
WA3-25	138	0.015900	0.000674	0.282168	0.282186	20	-20.71	-17.75	1491	1890	-0.98
WA3-26	138	0.016987	0.000709	0.282158	0.282176	21	-21.07	-18.11	1506	1908	-0.98
XZ6-01	129	0.013203	0.000572	0.282198	0.282216	30	-19.65	-16.87	1445	1838	-0.98
XZ6-02	129	0.024177	0.000969	0.282156	0.282174	22	-21.16	-18.42	1520	1917	-0.97
XZ6-03	129	0.013622	0.000571	0.282155	0.282173	18	-21.17	-18.40	1505	1916	-0.98
XZ6-04	129	0.027274	0.001111	0.282108	0.282126	23	-22.83	-20.10	1592	2002	-0.97
XZ6-05	129	0.018425	0.000715	0.282140	0.282158	21	-21.70	-18.94	1531	1943	-0.98
XZ6-06	129	0.016042	0.000669	0.282134	0.282152	18	-21.92	-19.15	1538	1954	-0.98
XZ6-07	129	0.023523	0.000939	0.282134	0.282152	20	-21.93	-19.19	1549	1956	-0.97
XZ6-08	129	0.019548	0.000799	0.282158	0.282176	19	-21.09	-18.34	1511	1912	-0.98
XZ6-09	129	0.027721	0.001078	0.282173	0.282191	20	-20.56	-17.83	1501	1887	-0.97
XZ6-10	129	0.017564	0.000729	0.282138	0.282156	20	-21.79	-19.03	1535	1948	-0.98
XZ6-11	129	0.015534	0.000649	0.282136	0.282154	18	-21.87	-19.10	1535	1951	-0.98
XZ6-12	129	0.016721	0.000701	0.282154	0.282172	20	-21.21	-18.45	1511	1918	-0.98
XZ6-13	129	0.015359	0.000665	0.282138	0.282156	19	-21.77	-19.01	1532	1946	-0.98
XZ6-14	129	0.014028	0.000594	0.282135	0.282153	18	-21.90	-19.13	1534	1953	-0.98

续表 2

Continued Table 2

样品号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^\#$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\lambda = 1.865$ $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$	$f = -0.72$ $T_{\text{DM2}}(\text{Hf})$	$f_{\text{Lw/Hf}}$
XZ6-15	129	0.025787	0.001139	0.282143	0.282161	19	-21.59	-18.86	1544	1939	-0.97
XZ6-16	129	0.022527	0.000962	0.282132	0.282150	23	-22.00	-19.25	1553	1959	-0.97
XZ6-17	129	0.017704	0.000732	0.282152	0.282170	21	-21.30	-18.54	1516	1923	-0.98
XZ6-18	129	0.017240	0.000718	0.282145	0.282163	20	-21.54	-18.78	1525	1935	-0.98
XZ6-19	129	0.016724	0.000686	0.282158	0.282176	20	-21.09	-18.32	1506	1912	-0.98
XZ6-20	129	0.028010	0.001111	0.282135	0.282153	23	-21.89	-19.16	1555	1954	-0.97
XZ6-21	129	0.026626	0.001063	0.282120	0.282138	20	-22.41	-19.67	1573	1980	-0.97
XZ6-22	129	0.018804	0.000758	0.282126	0.282144	18	-22.21	-19.45	1553	1969	-0.98
LY1-1	126	0.023276	0.000922	0.282186	0.282204	32	-20.10	-17.42	1476	1864	-0.97
LY1-2	126	0.020853	0.000985	0.282117	0.282135	26	-22.53	-19.86	1575	1987	-0.97
LY1-3	126	0.059654	0.002713	0.282013	0.282031	33	-26.19	-23.66	1800	2178	-0.92
LY1-4	126	0.056264	0.002203	0.282231	0.282249	31	-18.49	-15.91	1462	1787	-0.93
LY1-5	126	0.026978	0.001191	0.282181	0.282199	38	-20.27	-17.61	1494	1873	-0.96
LY1-6	126	0.027134	0.001088	0.282087	0.282105	32	-23.59	-20.92	1621	2041	-0.97
LY1-7	126	0.014830	0.000637	0.282230	0.282248	43	-18.55	-15.84	1405	1784	-0.98
LY1-8	126	0.018574	0.000813	0.282180	0.282198	38	-20.28	-17.60	1480	1873	-0.98
LY1-9	126	0.021058	0.000925	0.282049	0.282067	37	-24.94	-22.26	1667	2108	-0.97
LY1-10	126	0.016897	0.000781	0.282177	0.282195	30	-20.42	-17.73	1484	1879	-0.98
LY1-11	126	0.018715	0.000834	0.282125	0.282143	31	-22.25	-19.56	1557	1972	-0.97
LY1-12	126	0.027114	0.001105	0.282237	0.282255	36	-18.29	-15.62	1412	1773	-0.97
LY1-13	126	0.014284	0.000697	0.282111	0.282129	26	-22.75	-20.05	1571	1997	-0.98
LY1-14	126	0.030945	0.001279	0.282087	0.282105	31	-23.57	-20.92	1628	2040	-0.96
LY1-15	126	0.055023	0.002205	0.282050	0.282068	42	-24.88	-22.31	1723	2110	-0.93
LY1-16	126	0.009032	0.000429	0.282085	0.282103	25	-23.68	-20.95	1596	2043	-0.99
LY1-17	126	0.018037	0.000748	0.282232	0.282250	32	-18.46	-15.76	1405	1780	-0.98
LY1-18	126	0.009864	0.000500	0.282199	0.282217	21	-19.63	-16.92	1442	1838	-0.98
LY2-1	126	0.013574	0.000655	0.282076	0.282094	28	-23.97	-21.26	1617	2058	-0.98
LY2-2	126	0.012349	0.000535	0.282121	0.282139	30	-22.38	-19.67	1551	1978	-0.98
LY2-3	126	0.011770	0.000492	0.282078	0.282096	30	-23.92	-21.21	1608	2055	-0.99
LY2-4	126	0.012406	0.000644	0.282230	0.282248	17	-18.52	-15.81	1404	1782	-0.98
LY2-5	126	0.022760	0.001041	0.282152	0.282170	36	-21.30	-18.63	1529	1925	-0.97
LY2-6	126	0.033791	0.001316	0.282112	0.282130	36	-22.71	-20.07	1596	1997	-0.96
LY2-7	126	0.010822	0.000466	0.282185	0.282203	43	-20.14	-17.42	1461	1864	-0.99
LY2-8	126	0.012516	0.000569	0.282208	0.282226	29	-19.31	-16.60	1432	1822	-0.98
LY2-9	126	0.016343	0.000728	0.282138	0.282156	33	-21.80	-19.10	1535	1949	-0.98
LY2-10	126	0.013763	0.000657	0.282126	0.282144	27	-22.22	-19.52	1549	1970	-0.98
LY2-11	126	0.019378	0.000824	0.282168	0.282186	11	-20.73	-18.04	1497	1895	-0.98
LY2-12	126	0.016875	0.000728	0.282160	0.282178	33	-21.02	-18.32	1505	1909	-0.98
LY2-13	126	0.023716	0.000950	0.282074	0.282092	23	-24.06	-21.38	1633	2064	-0.97
LY2-14	126	0.057407	0.002494	0.282245	0.282263	32	-18.00	-15.45	1454	1763	-0.92
LY2-15	126	0.015590	0.000658	0.282139	0.282157	27	-21.76	-19.06	1531	1947	-0.98
LY2-16	126	0.019272	0.000785	0.282215	0.282233	35	-19.06	-16.37	1431	1811	-0.98
LY2-17	126	0.017508	0.000789	0.282108	0.282126	24	-22.86	-20.17	1580	2003	-0.98
LY2-18	126	0.019085	0.000879	0.282209	0.282227	26	-19.28	-16.60	1443	1822	-0.97
LY2-19	126	0.022340	0.000971	0.282111	0.282129	24	-22.75	-20.08	1583	1998	-0.97
CW2-1	126	0.033355	0.001421	0.282135	0.282153	38	-21.91	-19.27	1568	1957	-0.96
CW2-2	126	0.018956	0.000833	0.282244	0.282262	35	-18.05	-15.36	1393	1759	-0.97

续表 2
Continued Table 2

样品号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^\#$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\lambda = 1.865$ $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Hf)	$f = -0.72$ T_{DM2} (Hf)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
CW2-3	126	0.031085	0.001253	0.282299	0.282317	46	-16.07	-13.42	1329	1661	-0.96
CW2-4	126	0.018867	0.000800	0.282260	0.282278	35	-17.46	-14.76	1368	1729	-0.98
CW2-5	126	0.026391	0.001081	0.282164	0.282182	37	-20.88	-18.21	1513	1904	-0.97
CW2-6	126	0.033199	0.001309	0.282115	0.282133	36	-22.58	-19.93	1590	1991	-0.96
CW2-7	126	0.019417	0.000816	0.282250	0.282268	38	-17.82	-15.13	1383	1748	-0.98
CW2-8	126	0.014554	0.000811	0.282212	0.282230	56	-19.15	-16.46	1435	1815	-0.98
CW2-9	126	0.015863	0.000769	0.282398	0.282416	64	-12.57	-9.88	1175	1481	-0.98
CW2-10	126	0.022283	0.000955	0.282187	0.282205	28	-20.05	-17.37	1476	1861	-0.97
CW2-11	126	0.015722	0.000781	0.282209	0.282227	35	-19.27	-16.58	1439	1821	-0.98
CW2-12	126	0.017018	0.000735	0.282219	0.282237	30	-18.92	-16.23	1423	1803	-0.98
CW2-13	126	0.017862	0.000805	0.282223	0.282241	30	-18.79	-16.10	1420	1797	-0.98
CW2-14	126	0.019156	0.000798	0.282243	0.282261	29	-18.09	-15.39	1393	1761	-0.98
CW2-15	126	0.050305	0.001977	0.282135	0.282153	37	-21.87	-19.28	1590	1957	-0.94
CW2-16	126	0.019479	0.000830	0.282314	0.282332	28	-15.57	-12.88	1295	1633	-0.98
CW2-17	126	0.046910	0.001879	0.282302	0.282320	33	-16.00	-13.39	1349	1659	-0.94
CW2-18	126	0.013935	0.000596	0.282282	0.282300	31	-16.68	-13.98	1330	1689	-0.98
CW15-1	126	0.011756	0.000501	0.282106	0.282124	32	-22.91	-20.19	1569	2004	-0.98
CW15-2	126	0.025581	0.001088	0.282077	0.282095	29	-23.95	-21.28	1635	2059	-0.97
CW15-3	126	0.026508	0.001091	0.282180	0.282198	24	-20.31	-17.65	1491	1875	-0.97
CW15-4	126	0.019842	0.000842	0.282170	0.282188	38	-20.66	-17.97	1495	1891	-0.97
CW15-5	126	0.037975	0.001561	0.282132	0.282150	30	-21.99	-19.36	1577	1961	-0.95
CW15-6	126	0.045610	0.001883	0.282232	0.282250	64	-18.46	-15.86	1449	1784	-0.94
CW15-7	126	0.024468	0.001022	0.282167	0.282185	29	-20.74	-18.07	1506	1896	-0.97
CW15-8	126	0.023071	0.000948	0.282145	0.282163	25	-21.54	-18.86	1534	1937	-0.97
CW15-9	126	0.016729	0.000694	0.282136	0.282154	26	-21.86	-19.16	1536	1952	-0.98
CW15-10	126	0.020000	0.000832	0.282269	0.282287	32	-17.16	-14.47	1357	1714	-0.97
CW15-11	126	0.042785	0.001686	0.282256	0.282274	34	-17.60	-14.98	1406	1740	-0.95
CW15-12	126	0.027793	0.001114	0.282060	0.282078	50	-24.54	-21.87	1659	2089	-0.97
CW15-13	126	0.021753	0.000899	0.282132	0.282150	45	-21.99	-19.30	1550	1959	-0.97
CW15-14	126	0.035349	0.001473	0.282064	0.282081	33	-24.42	-21.79	1670	2084	-0.96
CW15-15	126	0.032061	0.001297	0.282188	0.282206	78	-20.01	-17.36	1488	1861	-0.96
CW15-16	126	0.025243	0.001045	0.282128	0.282146	33	-22.14	-19.47	1562	1967	-0.97
CW15-17	126	0.034887	0.001425	0.282132	0.282150	30	-22.00	-19.36	1572	1962	-0.96
CW15-18	126	0.033600	0.001411	0.282129	0.282147	28	-22.09	-19.46	1575	1966	-0.96
CW15-19	126	0.025906	0.001021	0.282080	0.282098	26	-23.83	-21.16	1628	2053	-0.97
CW15-20	126	0.031300	0.001276	0.282160	0.282178	29	-21.02	-18.37	1527	1912	-0.96
CW15-21	126	0.047689	0.001907	0.282128	0.282146	27	-22.14	-19.55	1598	1971	-0.94
CW15-22	126	0.021761	0.000849	0.282169	0.282187	27	-20.69	-18.01	1497	1893	-0.97
CW15-23	126	0.042489	0.001670	0.282231	0.282249	41	-18.48	-15.86	1441	1784	-0.95
CW15-24	126	0.020241	0.000859	0.282117	0.282135	24	-22.54	-19.86	1570	1987	-0.97
CW15-25	126	0.019726	0.000838	0.282129	0.282147	24	-22.10	-19.42	1552	1965	-0.97
CW15-26	126	0.025362	0.001065	0.282277	0.282295	61	-16.87	-14.20	1354	1700	-0.97
CW15-27	126	0.028379	0.001173	0.282188	0.282206	36	-20.03	-17.37	1484	1861	-0.96
CW15-28	126	0.025312	0.001009	0.282199	0.282217	31	-19.63	-16.96	1461	1840	-0.97
CW15-29	126	0.030284	0.001183	0.282083	0.282101	34	-23.74	-21.08	1631	2048	-0.96

本次实验测定的锆石标样 91500 的平均 Hf 同位素比值为 0.282284, 所测样品锆石的 Hf 同位素成分 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^*$) 用该值校正 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^\#$); (2) 表中锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}$, 球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ (Blichert Toft and Albarade, 1997), 亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000); 硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 -0.72 (Vervoort *et al.*, 1996)

由于锆石的 Lu/Hf 比($f_{Lu/Hf} = -0.97$)显著小于大陆地壳,因此二阶段模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔被抽取的地壳平均存留年龄。

4.2.1 石英二长岩质岩基

样品 DH-9(采自大河南岩体)和 WA-14(采自王安镇岩体)是太行山北段中酸性岩基的代表。分析了 DH-9 样品中 29 个锆石样品,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282132 ~ 0.282212,比较均一,相当于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-17.21 \sim -19.91$,二阶段 Hf 模式年龄为 1.9 ~ 2.0Ga。

对样品 WA-14 中的 22 颗锆石进行 Hf 同位素测量,获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化较大,大部分锆石的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282142 ~ 0.282344,相当于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-20 \sim -12$ 。有两个锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为分别为 -45 和 -29 ,表明有古老地壳物质的捕获或在源区的参与(见表 2)。如此不均一的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值说明该花岗岩体决不可能来自单一源区。大部分锆石的二阶段 Hf 模式年龄在 1.62 ~ 1.97Ga 之间,比 DH-9 偏小,暗示有更多年轻地幔物质的加入。

4.2.2 辉长闪长岩样品

对样品 WA-3(采自王安镇岩体)中的 26 颗锆石样品进行了 Hf 同位素测量,获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值有较大的变化范围,其中 WA-3 的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282103 ~ 0.282404 之间,相当于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-10.04 \sim -20.67$,二阶段 Hf 模式年龄为 1.5 ~ 2.0Ga。分析了 XZ-6(采自王安镇岩体)的 22 颗锆石样品,获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围也较大,初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282126 ~ 0.282216 之间,相当于 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-16.87 \sim -20.10$,二阶段 Hf 模式年龄为 1.83 ~ 2.01Ga。

4.2.3 微粒基性包体

包体 LY-1 和 LY-2(图 2)在野外时空关系密切,属于同一期基性岩浆注入,只是前者稍早,后者演化较充分。对 LY-1 的 18 颗锆石样品和 LY-2 的 19 颗锆石样品进行了 Hf 同位素测量,结果表明它们的 Hf 同位素特征没有本质差别,但变化范围较大,它们的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别变化于 0.282031 ~ 0.282255 和 0.282092 ~ 0.282263 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别相当于 $-15.6 \sim -23.7$ 和 $-15.4 \sim -21.4$,二阶段 Hf 模式年龄分别为 1.77 ~ 2.18Ga 和 1.76 ~ 2.06Ga。对 CW-2 的 18 颗锆石样品和 CW-15 的 29 颗锆石样品进行了分析,结果表明它们的 Hf 同位素特征比值变化更大, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别变化于 0.282133 ~ 0.282416 和 0.282078 ~ 0.282295 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别相当于 $-9.9 \sim -20$ 和 $-14.2 \sim -21.9$,二阶段 Hf 同位素模式年龄为分别为 1.5 ~ 2.0Ga 和 1.7 ~ 2.0Ga。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 这样大的变化范围说明这些包体不太可能来自单一源区。

5 讨论和结论

5.1 包体的形成时代和成因

对太行山中生代岩基岩体已有不少高精度同位素年代

学数据(陈斌等,2005;周凌和陈斌,2005;彭头平等,2004)。但是,对于在花岗质岩体中广泛分布的微粒镁铁质包体(MME),一直缺乏高精度的测年数据,这限制了我们的对于太行山中生代岩浆作用成因的理解。我们的包体锆石 U-Pb SHRIMP 年代学数据表明,太行山北段中生代岩基中的包体形成于 ~126Ma,大致与寄主岩石同期形成。由于这些锆石具有明显的振荡生长环带(图 2),因此属于岩浆成因,测年结果代表了岩浆结晶年龄。由于包体与寄主岩石的锆石 Hf 同位素特征差别较大(前者比后者更加富集放射性成因 Hf;图 5,6,表 2),排除了包体是早期堆积体或源区残留体的可能(Didier,1991)。因此,包体可能代表来自富集地幔的基性岩浆注入到酸性岩浆房并与后者相互作用(岩浆混和)而形成,这得到包体的锆石 Hf 同位素的有力支持。从图 4 和图 5 可以看出,同一个基性微粒包体样品中的不同锆石颗粒显示很大的 Hf 同位素变化范围。这么大的锆石 Hf 同位素变化表明包体的源区不可能是单一的,而应该是壳幔岩浆混合的结果。在图 6 中,包体的锆石 Hf 同位素数据点主要分布在富集地幔和古老下地壳(太古代 TTG 为主)的 Hf 同位素演化线之间,并且比较靠近富集地幔,表明基性微粒包体的来源主要是富集地幔起源的基性岩浆,但有部分来自下地壳部分熔融形成的花岗质岩浆的混合。

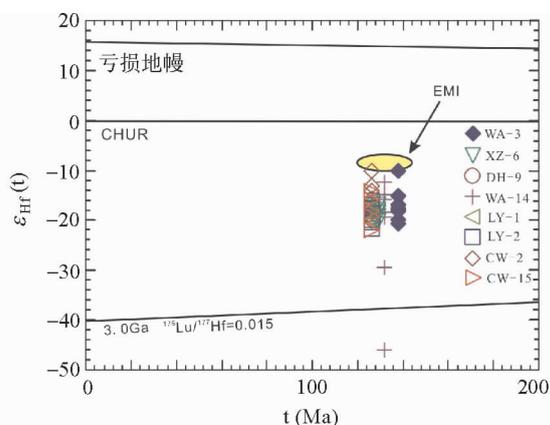


图 6 锆石 Hf 同位素数据。富集地幔 Hf 同位素区来自 Chen *et al.* (2006), 3.0Ga 地壳 Hf 同位素演化线来自 Yang *et al.* (2006)。

Fig. 6 Plot of intrusive ages vs. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values. Field for enriched mantle is from Chen *et al.* (2006); the Hf isotopic evolution line of the 3.0 Ga crustal rocks is from Yang *et al.* (2006)。

5.2 太行山中生代岩基的源区性质和成因

根据对太行山地区中生代岩浆岩的地球化学性质的研究(周凌和陈斌,2005;邱检生等,2005;李伍平等,2004),这些中生代岩基岩具有几个共同特征:(1) LREE 富集, HREE 亏损,且 Eu 异常不明显;(2)高 Mg#,高 Sr、Ba 含量,

高 Sr/Y、La/Yb 比值; (3) 具有相当富集的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素性质。华北克拉通中生代岩浆作用的成因机制一直存在争议, 目前主要观点有两种: (1) 来自加厚的基性下地壳的部分熔融 (Gao *et al.*, 2004; 李伍平等, 2004; 王晓蕊等, 2005; 蔡剑辉等, 2003) (2) 壳幔岩浆混合作用 (Chen *et al.*, 2004, 2006; 钱青等, 2006; Yang *et al.*, 2006)。

基性岩的低硅特征 ($\text{SiO}_2 < 54\%$) 表明它们无疑源自地幔的部分熔融, 而高 LREE, Sr 和 Ba 的特征无法用地壳混染来解释 (陈斌等, 2005), 因此, 这些地球化学特征来自地幔源区, 也就是说, 这些基性岩主要来自非常富集的地幔的部分熔融。然而, 富集地幔并不是这些基性岩的唯一源区。在图 5 和图 6 中可以看出, 同一个基性岩中锆石 Hf 同位素组成变化很大, 特别是样品 WA-3, 其锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-10.23 \sim -20.85$ 之间, 而富集地幔的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大约为 $-8 \sim -10$ (Yang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2006), 这说明基性岩中还有部分来自下地壳 (主要为相当亏损放射性成因 Hf 因而具有很低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的 TTG 岩石) 的组分。后者的卷入是通过下地壳起源的花岗质岩浆与幔源基性岩浆混合而实现的, 这与基性包体所反映的壳幔岩浆混合性质一致。本文报道的太行山基性岩 Hf 同位素性质支持 Chen *et al.* (2003) 从基性岩 Nd-Sr 同位素获得的结论: 样品 WA-3 和 XZ-6 的 Nd-Sr 同位素成分分别是 $I_{\text{Sr}} = 0.70610$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -14.8$ 和 $I_{\text{Sr}} = 0.70614$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -11.7$, 代表来自富集地幔的基性岩浆 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8$; Chen and Zhai, 2003) 被下地壳物质 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -30$; Jahn *et al.* 1987) 混染。

根据 Chen *et al.* (2003, 2004) Nd-Sr 同位素和陈斌等 (2006) 对斜长石成分和结构不平衡现象的研究, 太行山地区的中生代中酸性岩基可能是壳幔岩浆混合作用的产物。这一结论同样得到我们新的锆石 Hf 同位素数据的支持。从图 5 和图 6 可以发现, 石英二长质岩基的锆石 Hf 同位素成分变化范围较大, 其数据点主要位于富集地幔和太古代 TTG 之间, 反映这两个源区可能都对岩浆的源区有贡献。与前述的基性岩相比, 石英二长质岩基具有明显低的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (主要在 $-17 \sim -20$; 表 2), 表明其源区有相当比例的来自古老克拉通陆壳 (很可能是下地壳 TTG) 物质的再循环。从表 2 和图 6 可以看出, 样品 WA-14 中还发现两粒 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -30 和 -45 的锆石, 这进一步表明古老下地壳的参与。但同时我们也发现, 大部分数据点都明显靠近富集地幔的 Hf 同位素演化线, 表明地幔物质的贡献也是很显著的。本文新的 Hf 同位素数据与先前 Chen *et al.* (2003) 报道的样品 WA-14 ($I_{\text{Sr}} = 0.70696$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -14.9$) 和 DH-9 ($I_{\text{Sr}} = 0.70637$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -14.8$) 的 Nd-Sr 同位素数据是一致的, 后者较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值也显示古老下地壳和富集地幔在源区的重要贡献。

5.3 地质意义

太行山中生代岩浆岩的大多数样品具有比玄武岩熔融实验熔体 (Rapp and Watson, 1995) 高得多的含镁指数, 这表

明太行山中酸性岩基不可能直接来自基性下地壳的部分熔融, 相反, 其高镁指数可能表明幔源物质在岩浆岩形成过程中的显著贡献 (陈斌等, 2002, 2005; Chen *et al.* 2004)。这也得到了稀土元素标准分配型式图解的支持 (陈斌等, 2002), 在这些图解上 Eu 异常不明显, 这与纯壳源的花岗岩明显的 Eu 负异常形成鲜明对比, 因为在正常地壳环境下部分熔融过程中斜长石是源区重要的残余物。太行山中生代岩浆作用的成因很可能是这样的: 太行山地区下覆有长期富集的 EMI 型岩石圈地幔 (Chen *et al.*, 2003, 2004), 中生代期间华北克拉通处于张性环境之下, 这些富集的岩石圈地幔部分在上涌的软流圈物质的作用下发生部分熔融产生基性岩浆, 底侵的基性岩浆在下地壳聚集, 巨大的热流促使下地壳物质 (主要是太古代 TTG) 发生部分熔融产生生长英质岩浆, 长英质岩浆与已经充分演化的基性岩浆混合形成混浆, 再发生一定程度的分离结晶作用, 从而形成太行山地区类型复杂、成分变化大的岩浆岩体。该模式也得到了太行山中生代岩体中广泛存在的微粒镁铁质包体 (MME) 的支持 (Didier, 1991; Elburg, 1996; Cole *et al.*, 2001; 李昌年, 2002)。微粒镁铁质包体很可能记录了注入花岗岩质岩浆中的基性岩浆演化的过程 (成中梅, 2003)。实际上在辽东 (Yang *et al.* 2006) 和胶东 (Yang *et al.* 2005; 胡芳芳等, 2005) 的中生代岩体中也广泛分布闪长质包体。Yang *et al.* (2005, 2006) 和胡芳芳等 (2005) 的锆石 Hf 同位素研究也表明, 辽东和胶东的中生代岩基同样在成岩过程中发生了镁铁质岩浆和长英质岩浆的混合作用。

感谢 锆石 SHRIMP 测年过程中得到中国地质科学院离子探针中心宋彪研究员的热心帮助, 锆石 Hf 同位素测定过程得到中国科学院地质与地球物理所谢烈文、杨岳衡的帮助, 锆石 CL 图象的完成得到了北京大学物理学院电镜室陈莉的指导, 在此深表感谢。

References

- Amelin Y, Lee DC, Halliday AN. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4205–4225
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1998. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243–258
- Cai JH, Yan GH, Chang ZS *et al.* 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81–92
- Chen B, Zhai MG. 2003. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140: 87–93
- Chen B, Jahn BM, Zhai MG. 2003. Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, NCC, and implications for Archean lithosphere thinning. *J. Geol. Soc.*, London, 160: 963–970
- Chen B, Jahn BM, Arakawa Y, Zhai MG. 2004. Petrogenesis of the

- Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 489–501
- Chen B, Liu CQ, Tian W. 2006. Magma-mixing between mantle- and crustal-derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan: constraints from petrology and Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 140–147
- Chen B, Tian W, Chen ZC. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusive complex in the South Taihang orogen, north China craton: evidence for hybridization between mantle- and crust-derived magmas. *Lithos*, (in review)
- Cheng ZM, Lu FX, Li CN *et al.* 2003. Genesis of microgmmular enclaves in Shouwangfen granodiorites, Hebei province. *Geoscience*, 1: 20–26
- Cole JW, Gamble JA, Burt RM *et al.* 2001. Mixing and mingling in the evolution of andesite-dacite magmas: evidence from co-magmatic plutonic enclaves, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Lithos*, 59: 25–46
- Deng JF, Su SG, Zhao HL *et al.* 2003. Deep processes of Mesozoic Yanshanian lithosphere thinning in North China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41–50
- 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
- Didier J, Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite petrology. Amsterdam: Elsevier, 445–463
- Elburg MA. 1996. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton granodiorite, Lachlan Fold Belt, Australia. *Lithos*, 38: 1–22
- Fan QC, Sui JL, Liu RX *et al.* 2001. Eclogite facies garnet-pyroxenolite xenolith in Hannuoba area: New evidence of magma underplating. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 1–6
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(6): 892–897
- Gao S, Rudnick RL, Richard WC *et al.* 2003. Removal of lithospheric mantle in the North China Craton; Re-Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 61–67
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE *et al.* 2002. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analyses of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133–147
- Hong DW, Wang T, Tong Y *et al.* 2003. Mesozoic granitoids from North China Block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231–256
- Hu FF, Fan HR, Yang JH *et al.* 2005. Magma mixing for the origin of granodiorite: Geochemical, Sr-Nd isotopic and zircon Hf isotopic evidence of dioritic enclaves and host rocks from Changshannan granodiorite in the Jiaodong Peninsula's eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 569–586
- John BM, Auvray B, Cornichet J *et al.* 1987. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei province, China: field occurrence, petrology, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precamb. Res.*, 34: 344–346
- Li WP, Li XH. 2004. Petrogenesis and its implication for the middle-late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 501–510
- Lu FX, Zheng JP, Shao JA *et al.* 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 86–92
- Neves SP, Vauchez A. 1995. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil. *Lithos*, 34: 275–299
- Peng TP, Wang YJ, Fan WM *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the diorites for southern Taihang mountains in the North China interior and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1253–1262
- Qian Q, Chung SL, Li TY *et al.* 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
- Qiu JS, Hu J, Jiang SY *et al.* 2005. Mesozoic-Cenozoic mafic magmatism in Western Shandong province and its implication for the chemical evolution of the mantle. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 646–657
- Rapp RP, Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–12 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891–931
- Tang YJ, Zhang HF, Ying JF. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton. *Chemical Geology*, 233: 309–327
- Vervoort JD, Pachett PJ, Gehrels GE, Nutman AP. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379: 624–627
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 234: 105–126
- Xu P, Wu FY, Xie LW, Yang YH. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Sci. Bull.*, 49: 1643–1648
- Xu X, Dong CW, Li WX *et al.* 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association. *Lithos*, 46: 299–315
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth(A)*, 26: 747–757
- Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde S, Chu MF, Lo CH, Song B. 2005. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning. *Chemical Geology*, 222: 200–231.
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246: 336–352
- Yang JH, Wu FY, Shao JA *et al.* 2006. 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. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 71–80
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH *et al.* 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. *Lithos*, 81: 297–317
- Zheng JP, Griffin WL, Suzanne Y *et al.* 2004. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: evolution of the lower crust beneath the North China Craton. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 79–103

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山等. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报*, 19: 81–92
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. *中国科学(D辑)*, 32: 896–907
- 陈斌, 田伟, 翟明国等. 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: 13–24

- 陈斌,刘超群,田伟. 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据. 地学前缘, 13: 140-147
- 成中梅,路凤香,李昌年等. 2003. 河北寿王坟花岗闪长岩中暗色微粒岩石包体的成因. 现代地质, 1: 20-26
- 邓晋福,苏尚国,赵海玲等. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘, 10: 41-50
- 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: 105-119
- 樊祺诚,隋建立,刘若新等. 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据. 岩石学报, 17: 1-6
- 高山,Roberta. L. Rudnick, Richard W. Carlson 等. 2003. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据. 地学前缘, 10: 61-67
- 洪大卫,王涛,童英等. 2003. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程. 地学前缘, 10: 231-256
- 胡芳芳,范宏瑞,杨进辉等. 2005. 胶东文登长山南花岗闪长岩体的岩浆混合成因: 闪长质包体及寄主岩石的地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据. 岩石学报, 21: 569-586
- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述. 地质科技情报, 21: 49-54
- 李伍平,李献华. 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义. 岩石学报, 20: 501-510
- 路凤香,郑建平,邵济安等. 2006. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. 地学前缘, 13: 86-92
- 彭头平,王岳军,范蔚茗等. 2004. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究. 岩石学报, 20: 1253-1262
- 钱青,钟孙霖,李通艺等. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩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: 275-292
- 邱检生,胡建,蒋少涌等. 2005. 鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化. 地球科学-中国地质大学学报, 30: 646-657
- 宋彪,张玉海,万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30
- 王晓蕊,高山,柳小明等. 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学 D 辑, 35: 700-709
- 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: 379-388
- 杨进辉,吴福元,邵济安等. 2006. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 31: 71-80
- 周凌,陈斌. 2005. 南太行洪山正长岩体的成因和意义: 锆石 SHRIMP 年代学、化学成分和 Sr-Nd 同位素特征. 自然科学进展, 15: 1357-1365