

北京西山晚中生代火山岩U-Pb锆石年代学 及地球化学研究*

袁洪林 ** 柳小明 刘勇胜 高山 凌文黎

(西北大学地质学系教育部大陆动力学重点实验室, 西安 710069; 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘要 对北京西山髻髻山组和东岭台组火山岩锆石U-Pb SHRIMP和LA-ICP-MS定年及地球化学的研究结果表明, 髻髻山组上部火山岩时代为 137.1 ± 4.5 Ma(2σ), 东岭台组中部火山岩时代为 130~134 Ma. 前者略老于后者, 但两者时代相差 <5 Ma, 证明两组火山岩的喷发是在很短的时间内完成的. 北京西山地区髻髻山组火山岩的年龄与承德盆地髻髻山组火山岩的年龄明显不同, 表明髻髻山组火山岩年龄可能存在明显区域变化. 北京西山髻髻山组中存在典型的埃达克岩(SiO_2 含量约为 56%, $\text{Na}_2\text{O} = 3.99\sim 6.17$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.2\sim 3.1$, $\text{Sr} = (680\sim 1074)\times 10^{-6}$, $\text{Y} = (13.2\sim 16.3)\times 10^{-6}$, $\text{Yb} = (1.13\sim 1.52)\times 10^{-6}$, $\text{Sr}/\text{Y} = 43\sim 66$), 高镁埃达克岩和高镁安山岩($\text{Mg\#} = 54\sim 55$). 髻髻山组埃达克岩及与其共生的其它中酸性火山岩均具有典型的Nb-Ta负异常和Pb正异常等大陆地壳特征, 表明它们是陆壳岩石部分熔融的产物. 上述结果表明, 北京西山地区髻髻山组埃达克岩代表了中生代曾存在于华北克拉通的加厚榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉至软流圈中, 榴辉岩随后发生部分熔融, 熔体上升过程中与地幔橄榄岩发生相互作用的产物. 髻髻山组火山岩的年龄制约了拆沉作用至少延续至 137 Ma. 东岭台组火山岩为Mg#正常的流纹岩和英安岩, 表明它们没有与地幔发生反应, 它们可能代表了拆沉作用导致的软流圈地幔物质上涌造成的深部地壳物质重熔的产物.

关键词 埃达克岩 榴辉岩 地球化学 华北克拉通 下地壳拆沉作用

华北克拉通中生代燕山期以强烈的构造-岩浆活动、成矿作用和盆地形成过程, 而明显不同于世界上其他太古宙克拉通, 其深部地球动力学背景可能与

岩石圈地幔的减薄、去根或置换作用或下地壳和岩石圈地幔的拆沉作用或其他地球动力学过程有关^[1~16]. 然而, 这些动力学过程发生的确切时间和机制仍然

2004-07-13 收稿, 2005-03-28 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40302015, 40472099, 40373013)

** E-mail: yhonglin@vip.sina.com

是有争议的问题^[1~16]. 火山岩的精确定年和地球化学研究是制约地球动力学过程时间和机制的重要途径. 本文对北京西山地区中生代髫髻山组和东岭台组火山岩进行了 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 原位定年和地球化学研究. 在此基础上重点讨论了髫髻山组火山岩的成因及其动力学意义.

1 地质背景和样品来源

北京西山地区是燕山运动研究的经典地区(图 1). 该区中生代地层从老至新依次为晚三叠世杏石口组, 主要由页岩、砂岩和砾岩组成; 该组被南大岭组橄榄玄武岩不整合覆盖, 之上为窑坡组、龙门组和九龙山

组砂砾岩、粉砂岩、泥岩和煤系. 它们被髫髻山组火山岩不整合覆盖. 髫髻山组主要由安山岩、英安岩、玄武岩、流纹岩和火山碎屑岩组成. 髫髻山组又被东岭台组不整合覆盖. 东岭台组主要由英安岩、流纹岩和火山碎屑岩组成.

2002 年出版的《中国地质图集》将南大岭组时代归属于早侏罗世, 髫髻山组归属于晚侏罗世, 东岭台组归属于早白垩世^[17]. 李伍平等^[18]曾获得北京西山髫髻山组下部三段底部粗安岩斜长石 Ar-Ar 坪年龄为 148 ± 3 Ma, 其等时线年龄为 147 ± 3 Ma. 汪洋等^[19]报道了北京西山髫髻山组火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 188 ± 19 Ma. 但该等时线仅有 6 个样品, 且这些

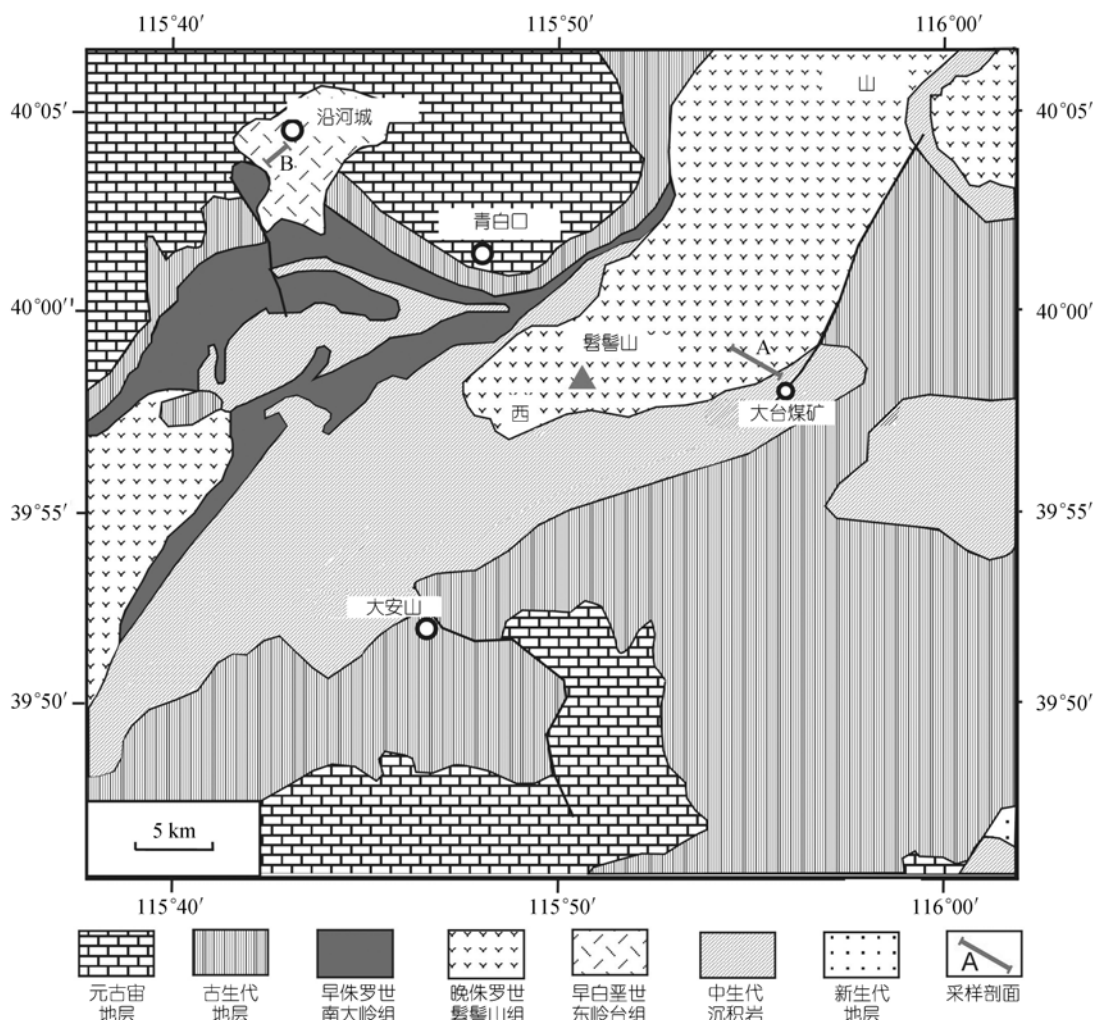


图 1 北京西山地区地质简图(据文献^[17]简化)

剖面 A 和 B 分别为髫髻山组和东岭台组火山岩采样剖面分布位置

样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 之间的相关性不高($r = 0.98$). 由于作者没有给出各样品的岩性, 也没有讨论该“等时线”是否可能是混合线, 因此该年龄的意义并不明确. Davies^[13]获得河北兴隆县黄土梁髻髻山组安山岩的Ar-Ar年龄为 148 ± 2 Ma. 牛宝贵等^[20]获得河北承德盆地髻髻山组顶部火山岩的锆石U-Pb SHRIMP年龄为 163 ± 6 Ma. 赵越等^[21]获得北京西山马兰村髻髻山组火山岩底部安山岩锆石U-Pb SHRIMP年龄为 157 ± 3 Ma, 但这一样品并非取自西山地区髻髻山组标准剖面. 对东岭台组火山岩的年龄研究较少. 汪洋和姬广义^[22]获得东岭台组火山岩的Rb-Sr等时线年龄为 131 ± 3 Ma, 但该等时线仅包括

4 个样品. 由于现有髻髻山组火山岩年龄存在很大的变化范围, 加之Ar-Ar定年方法受多种因素的影响, 如矿物的封闭温度, 过剩 ^{40}Ar 的存在或部分Ar丢失等, 可见髻髻山组和东岭台组火山岩的年龄仍需进一步研究. 由于华北克拉通中生代火山岩均产在陆相盆地中, 横向对比不易, 深入研究的重点应是对标准剖面火山岩的锆石U-Pb定年. 为此, 本研究在北京西山地区沿髻髻山组和东岭台组标准剖面分别采取了典型火山岩样品(图 1 和 2). 其中用于SHRIMP和LA-ICP-MS锆石定年的髻髻山组上部(旋回 3)英安岩样品DT-37 采自大台煤矿, GPS坐标为: 北纬 $39^\circ 58.707'$, 东经 $115^\circ 54.850'$. 东岭台组中部(三段)紫

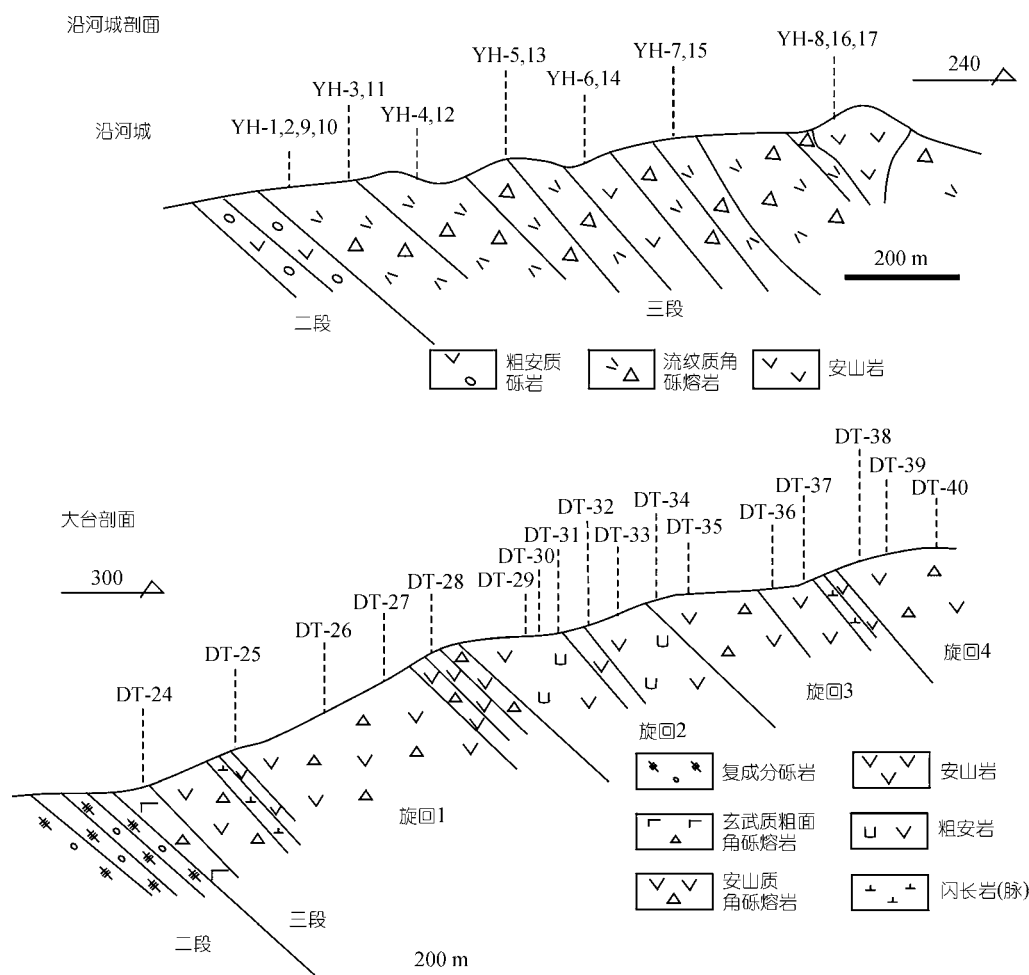


图2 北京西山地区髻髻山组和东岭台组火山岩采样剖面(据李伍平¹⁾[18])和样品分布图
剖面分布位置见图1

1) 李伍平. 燕山-辽西中生代火山岩特征及其构造北京研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 1999

红色流纹岩样品 YHC-13 采自沿河城医院大门旁, GPS 坐标为: 北纬 40°3.956', 东经 115°42.886'.

2 分析方法

本研究分析的样品均为未风化蚀变的新鲜火山岩样品. 锆石分选采用人工重砂分选, 然后在双目镜下挑纯. 用于主量和微量元素分析的样品粗碎在刚玉颚板破碎机中进行, 细碎在日本 CMT 公司生产的 T1-100 型 WC 细碎机中最终碎至 200 目. 因此样品加工均在无污染设备中进行.

主量和微量元素以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析均在西北大学教育部大陆动力学重点实验室进行. SHRIMP 锆石 U-Pb 原位定年在北京离子探针中心完成.

主量元素分析采用 XRF(Rigaku RIX 2100)玻璃熔饼法完成. 微量元素采用 ICP-MS(Perkin Elmer 公司具动态反应池的 Elan 6100 DRC)法完成, 样品溶解在 Teflon 高压溶样弹中进行. 对国际标准参考物质 BHVO-1(玄武岩)、BCR-2(玄武岩)和 AGV-1(安山岩)的分析结果表明(表 1), 主量元素分析精度和准确度优于 4%, 微量元素分析的精度和准确度一般优于 10%. XRF 粉末压饼法微量元素分析结果表明, 同一样品的 Rb, Sr, Ba, Zr 和 Nb 采用 XRF 和 ICP-MS 的两套分析结果的相对偏差 <10%.

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成, 分析方法见文献[23, 24]. 所使用的离子束直径为 30 μm .

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析所使用的 ICP-MS 为 Elan 6100 DRC, 激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 GeoLas 200M 深紫外(DUV) 193 nm ArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统. 该剥蚀体系相对常规的 266 nm 或 213 nm Nd: YAG 剥蚀系统具有明显较小的元素分馏效应[25, 26]. 这对于 U-Pb 锆石定年至关重要. 分析中采用的激光斑束直径亦为 30 μm , 以 ^{29}Si 作为外标, 哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正. 91500 锆石的同位素比值和年龄已被前人广泛研究, 是国际上常用的 3 个标准锆石之一[27~29]. 同位素比值数据处理采用 GLITTER(4.0 版)软件和本文作者的数据平滑方法进行, 年龄计算采用 ISOPLOT

(3.00 版)软件[30]进行. 详细分析方法见文献[29, 31]. 对澳大利亚国立大学标准锆石 TEMORA 和已知 SHRIMP 年龄的锆石分析结果表明, 本方法对 2.5 Ga 的太古宙至 31 Ma 的渐新世锆石获得的年龄与 SHRIMP 年龄相当[29, 31].

3 锆石 U-Pb 年龄

东岭台组流纹岩样品 YHC-13 中锆石为典型的浅褐色自形岩浆锆石, 未见有残留核部发育(图 3). 对该样品 11 个锆石颗粒的 SHRIMP 分析结果见表 2 和图 4. 由表 2 和图 4 可见, 除分析点 YHC-13-11.1 不谐和外, 其余 10 个分析点均落在谐和线上或附近. 所有 11 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 121~145 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 133.8 ± 4.7 Ma (2σ ; MSWD = 2.5), 它们的 Th/U 比值为 0.63~1.33(表 2), 属典型的岩浆锆石范围.

对该样品 12 个锆石颗粒的 LA-ICP-MS 分析结果见表 3 和图 5. 其中大部分点落在谐和线上或附近. 这些分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 130.1 ± 4.6 Ma (2σ ; MSWD = 0.38), 它们的 Th/U 比值为 0.84~1.27(表 3).

在图 4 和 5 上, 分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值变化较大是由于样品中 U 的含量低且该样品较年轻, ^{207}Pb 含量相对较低, 使得 ICP-MS 测定的离子计数很低, 导致分析不确定性较大所致.

SHRIMP 和 LA-ICP-MS 两种不同方法获得的 YHC-13 样品的年龄在误差范围内一致, 东岭台组火山岩的形成年龄为 130~134 Ma, 时代为早白垩世.

髫髻山组英安岩样品 DT-37 的锆石亦为褐色自形岩浆锆石, 亦未见有残留核部发育(图 3). 对该样品 16 个锆石颗粒的 SHRIMP 分析结果见表 2 和图 6. 由表 2 可见, 除分析点 DT37-1.1 和 DT37-8.1 明显较老, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 2331 和 1247 Ma 外, 其余 14 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 121~147 Ma, 这 14 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 137.1 ± 4.5 Ma (2σ ; MSWD = 2.4). 除 DT37-1.1 Th/U 比值为 0.28 外, 其余所有 15 个分析点的 Th/U 比值为 0.60~1.10, 为典型的岩浆锆石(表 2). 因此, 137.1 ± 4.5 Ma 应代表髫髻山组英安岩的形成年龄. 如果采用 135 Ma 作为

表 1 国际标准参考物质分析结果^{a)}

	BCR-2				BHVO-1				AGV-1			
	测定值	S/%	推荐值	N	测定值	S/%	推荐值	N	测定值	S/%	推荐值	N
SiO ₂	54.1	0.06	54.1	67	49.83	0.22	49.94	1	58.97	-0.22	58.84	1
TiO ₂	2.25	0.38	2.26	67	2.73	-0.74	2.71	1	1.01	3.81	1.05	1
Al ₂ O ₃	13.4	0.89	13.5	67	13.59	1.52	13.8	1	16.87	1.63	17.15	1
TF ₂ O ₃	13.8	-0.27	13.8	67	12.35	-0.98	12.23	1	6.81	-0.59	6.77	1
MnO	0.19	-4.01	0.18	67	0.17	0.00	0.17	1	0.09	0.00	0.09	1
MgO	3.70	-2.99	3.59	67	7.21	0.28	7.23	1	1.54	-0.65	1.53	1
CaO	7.17	-0.64	7.12	67	11.27	1.14	11.4	1	4.85	1.82	4.94	1
Na ₂ O	3.26	-3.15	3.16	67	2.19	3.10	2.26	1	4.21	1.17	4.26	1
K ₂ O	1.81	-1.10	1.79	67	0.53	-1.92	0.52	1	2.94	-0.68	2.92	1
P ₂ O ₅	0.35	-1.22	0.35	67	0.27	0.00	0.27	1	0.49	0.00	0.49	1
总量	100.00		99.85		100.14		100.53		97.78		98.04	
Li	9.46	5.21	9.98	4	4.93	-7.28	4.6	28	11.2	7.07	12	26
Be	2.2	-37.1	1.6	4	1.0	9.48	1.1	28	2.22	-5.82	2.1	26
Sc	34	-2.47	33	4	31.6	0.60	31.8	28	12.2	-0.03	12.2	30
V	437	-4.97	416	4	318	-0.17	317	28	123	-1.97	121	30
Cr	17.4	3.13	18	4	284	1.60	289	28	10.9	-7.80	10.1	26
Co	46	-24.7	37	4	45.3	-0.69	45	28	15.6	-2.04	15.3	30
Ni	13.5	-4.11	13	4	121	0.08	121	28	16.6	-3.58	16	28
Cu	35	-85.5	19	4	141	-3.35	136	28	57.5	4.19	60	27
Zn	153	-20.4	127	4	113	-7.27	105	28	84.3	4.19	88	30
Ga	22	2.72	23	4	21.3	-1.61	21	28	20.2	-1.08	20	30
Rb	53	-10.9	48	4	10.17	7.56	11	28	69.3	-3.02	67.3	30
Sr	333	3.74	346	4	400	0.69	403	28	654	1.20	662	30
Y	36	3.62	37	4	27.46	0.51	27.6	28	20.2	-1.12	20	30
Zr	187	0.32	188	4	175	2.45	179	28	228	-0.46	227	30
Nb	12.3	11.8	14	4	19.2	-0.85	19	28	14.4	3.90	15	30
Cs	1.24	-12.9	1.1	4	0.11	16.97	0.13	25	1.28	-0.13	1.28	30
Ba	723	-5.81	683	4	138	1.02	139	28	1208	1.46	1226	30
La	27	-9.46	25	4	15.8	0.00	15.8	28	38.6	-1.54	38	30
Ce	56	-5.85	53	4	38.5	1.17	39	28	68.3	-1.91	67	30
Pr	7.0	-3.13	6.8	4	5.43	4.71	5.7	28	8.18	-7.57	7.6	23
Nd	31.1	-11.0	28	4	25.9	-2.61	25.2	28	32.5	1.55	33	30
Sm	7.0	-5.19	6.7	4	6.34	-2.32	6.2	28	5.83	1.20	5.9	30
Eu	2.02	-1.11	2	4	2.03	1.50	2.06	28	1.66	-1.09	1.64	30
Gd	6.9	-1.25	6.8	4	6.11	4.55	6.4	28	5.20	-4.03	5	30
Tb	1.09	-2.01	1.07	4	0.97	-0.57	0.96	28	0.69	2.11	0.7	30
Dy	6.54	-3.20	6.34	4	5.29	-1.68	5.2	28	3.57	0.73	3.6	30
Ho	1.32	0.91	1.33	4	1.00	-0.84	0.99	28	0.67	0.66	0.67	30
Er	3.53	2.83	3.63	4	2.42	-0.86	2.4	28	1.74	-2.34	1.7	30
Tm	0.54	-0.84	0.54	4	0.34	-1.60	0.33	28	0.25	-5.79	0.24	30
Yb	3.5	0.26	3.5	4	2.09	-3.22	2.02	28	1.68	2.40	1.72	30
Lu	0.54	-5.10	0.51	4	0.30	-4.05	0.29	28	0.26	4.08	0.27	30
Hf	5.1	-6.53	4.8	4	4.46	-1.75	4.38	28	5.01	1.69	5.1	30
Ta	0.83	-2.83	0.81	4	1.24	-0.92	1.23	28	0.90	0.45	0.9	30
Pb	10.7	2.98	11	4	2.36	9.22	2.6	26	37.2	-3.46	36	30
Th	6.28	-1.24	6.2	4	1.27	-17.6	1.08	28	6.33	2.54	6.5	30
U	1.72	-1.71	1.69	4	0.42	-1.13	0.42	28	1.86	3.14	1.92	30

a) BCR-2 和 BHVO-1 为玄武岩; AGV-1 为安山岩. S 为测定值与推荐值(<http://minerals.cr.usgs.gov/geochem/>)之间的偏差. N 为分析次数

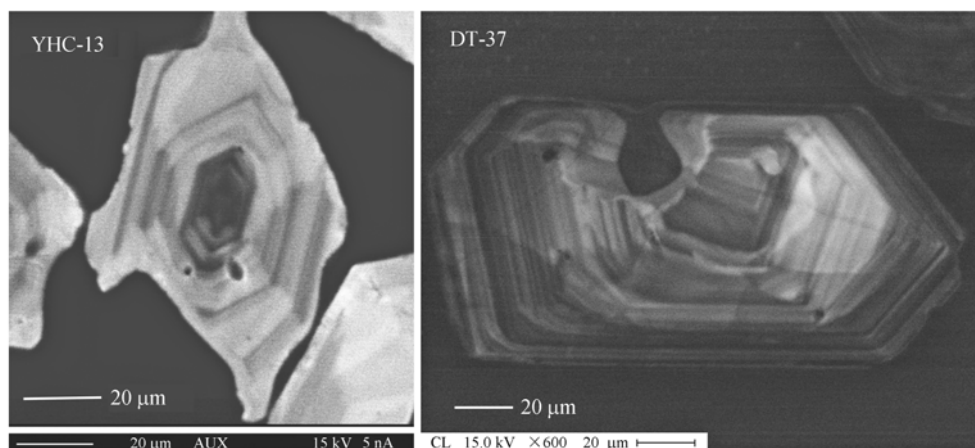


图3 东岭台组流纹岩样品 YHC-13 和髻髻山组英安岩样品 DT-37 的阴极发光图

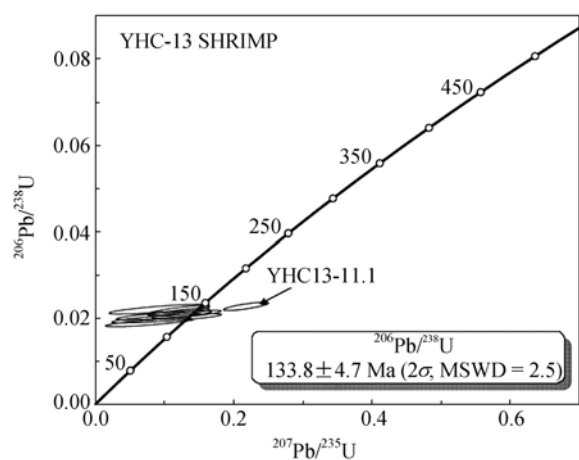


图4 东岭台组流纹岩样品 YHC-13 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图

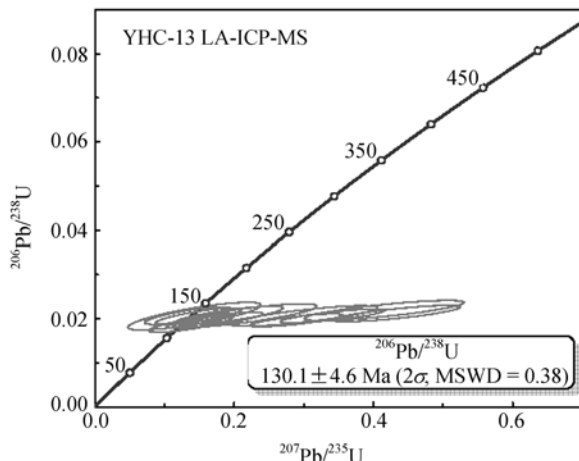


图5 东岭台组流纹岩样品 YHC-13 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图

侏罗纪与白垩纪之间的年龄分界, 则该年龄属晚侏罗世. 而明显较老的锆石颗粒 DT37-1 和 DT-37-8 为捕获锆石.

4 地球化学

髻髻山组火山岩主要由Mg#正常的安山岩、英安岩、玄武岩、流纹岩和高镁(Mg#>45)安山岩和埃达克岩组成(表 4). 其中, 高镁安山岩DT-24 和DT-26 的Cr 含量为 $104\sim111\times10^{-6}$, 是Mg#正常安山岩的 2~50 倍, 甚至高于玄武岩样品DT-19 和DT-32. 埃达克岩样品DT-34、DT-36 和DT-40 的SiO₂含量约为 56%, Na₂O = 3.99~6.17, Na₂O/K₂O = 2.2~3.1, Sr = 680~1074×10⁻⁶, Y = 13.2~16.3×10⁻⁶, Yb = 1.13~1.52×10⁻⁶, Sr/Y = 43~66, 为典型的埃达克岩^[32~37](图 7). 其中, DT-36 的Mg# = 55, 属高镁埃达克岩.

东岭台组火山岩由流纹岩和英安岩组成. 与髻髻山组中酸性火山岩相比, 东岭台组英安岩和流纹岩具有明显低的Sr/Y和La_N/Yb_N比值(图 7; 表 5). 髻髻山组和东岭台组无论是玄武岩、安山岩(包括正常Mg#及高Mg#者, 下同)、英安岩、埃达克岩, 还是流纹岩均表现出明显的Nb和Ta负异常以及明显的Pb正异常等典型的大陆地壳特征, 同时还表现出明显的轻稀土元素(LREE)富集(图 8 和 9). 髻髻山组玄武岩、安山岩和埃达克岩还表现出明显正的Sr异常, 除高镁安山岩具正Eu异常(Eu/Eu* = 1.14)外, 无明显Eu异常; 而东岭台组火山岩则表现出明显的负Sr异常, 除英安岩样品 YHC-15 和 YHC-17 外, 其余样品

表 2 北京西山髻髻山组英安岩(DT-37)和东岭台组流纹岩(YHC-13)锆石U-Pb SHRIMP定年分析结果^{a)}

分析点	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ /%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ /%	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1σ /%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	1σ /Ma	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 年龄/Ma	1σ /Ma	$^{208}\text{Pb}^*/^{232}\text{Th}$ 年龄/Ma	1σ /Ma
DT-37-1.1	213	60	0.28	67.7	0.08	0.3695	2.5	7.58	2.7	0.1487	1	2,027	43	2,331	17	2,080	69
DT-37-3.1	68	74	1.10	1.33	1.72	0.02233	3.2	0.13	24	0.042	24	142.4	4.5	-213	600	137	12
DT-37-4.1	60	58	0.97	1.41	17.57	0.0227	4.9	0.23	49	0.072	48	145	7	985	980	184	43
DT-37-5.1	67	61	0.91	1.24	2.82	0.0211	3	0.113	25	0.0387	25	134.6	4	-437	660	137	13
DT-37-6.1	55	47	0.85	1.04	3.07	0.02129	3.3	0.078	60	0.027	60	135.8	4.5	-1,540	2000	131	21
DT-37-7.1	45	38	0.85	0.841	5.70	0.02055	4.3					131.1	5.6	-5,000	17000	112	34
DT-37-8.1	292	175	0.60	54	0.12	0.2152	2.5	2.434	2.6	0.08204	0.6	1,256	29	1,247	11	1,294	34
DT-37-9.1	64	63	1.00	1.17	10.02	0.01936	4.6					123.6	5.6			84	30
DT-37-10.1	45	36	0.80	0.962	10.41	0.02231	4	0.269	27	0.087	27	142.3	5.7	1,371	520	191	36
DT-37-11.1	41	30	0.73	0.734	8.25	0.01894	4.1					121	4.9			58	32
DT-37-12.1	51	44	0.87	1.07	12.30	0.0212	4.8					135.5	6.5			101	42
DT-37-13.1	49	45	0.93	0.971	0.31	0.02298	3	0.174	19	0.055	19	146.5	4.4	409	420	152	15
DT-37-14.1	46	35	0.78	0.984	11.38	0.0222	5.1					141.7	7.2	-1,350	4000	107	52
DT-37-15.1	63	56	0.90	1.3	4.42	0.02293	3.2	0.09	52	0.029	52	146.1	4.7	-1,310	1700	132	20
DT-37-16.1	54	51	0.95	1.05	4.95	0.02165	3.6	0.09	55	0.03	55	138.1	5	-1,150	1700	126	20
DT-37-17.1	50	45	0.90	0.967	5.54	0.02118	3.8					135.1	5.1	-15,000	2E+05	99	26
YHC-13-1.1	39	28	0.73	0.761	3.54	0.02207	3.4	0.092	52	0.03	52	140.7	4.7	-1,140	1600	137	24
YHC-13-2.1	50	38	0.76	0.926	5.01	0.02063	3.4	0.099	46	0.035	46	131.6	4.4	-730	1300	111	23
YHC-13-3.1	65	60	0.93	1.09	3.31	0.01896	3.3	0.078	54	0.03	54	121.1	4	-1,170	1600	101	17
YHC-13-4.1	44	28	0.63	0.867	8.57	0.0207	5.5					132.3	7.3				
YHC-13-5.1	48	37	0.77	0.918	9.55	0.02009	4.3					128.2	5.4			49	35
YHC-13-6.1	71	62	0.87	1.36	1.76	0.0218	3.4	0.12	25	0.0399	25	139	4.7	-356	640	134	14
YHC-13-7.1	50	51	1.03	0.985	8.17	0.0212	3.1					135.2	4.1			108	14
YHC-13-8.1	82	86	1.06	1.51	1.07	0.0213	2.9	0.121	24	0.041	24	135.9	3.9	-270	620	143	11
YHC-13-9.1	55	43	0.78	1	5.68	0.01995	3.6	0.103	51	0.038	51	127.4	4.5	-520	1400	106	25
YHC-13-10.1	210	278	1.33	3.89	3.17	0.02088	3	0.132	25	0.046	25	133.2	4	-15	610	132	10
YHC-13-11.1	47	36	0.78	0.916	0.30	0.02273	2.8	0.218	9.9	0.0695	9.5	144.9	4	914	200	169.1	9.9

a) *为放射性经 ^{204}Pb 校正后的放射性成因 ^{206}Pb 含量或同位素比值。 $^{206}\text{Pb}_c = 100$ (普通 ^{206}Pb /总 ^{206}Pb)

表 3 北京西山东岭台组流纹岩(YHC-13)锆石U-Pb LA-ICP-MS定年分析结果^{a)}

分析点	U	Th	Th/U	²⁰⁶ Pb*	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	1σ	²⁰⁸ Pb*/ ²³² Th	1σ
	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)		(×10 ⁻⁶)							年龄/Ma	/Ma	年龄/Ma	/Ma	年龄/Ma	/Ma	年龄/Ma	/Ma
De01fA07	87	73	0.84	1.81	0.0212	12	0.433	61	0.149	22	135	8	365	43	2332	237	308	23
De01fA08	59	62	1.05	1.21	0.0206	21	0.143	63	0.051	23	132	13	136	56	219	804	129	24
De01fA09	49	51	1.05	1.02	0.0206	13	0.148	41	0.053	15	131	8	141	36	310	536	140	15
De01fA11	66	78	1.19	1.27	0.0188	13	0.138	40	0.053	16	120	8	131	35	339	558	130	14
De01fA12	50	63	1.27	1.06	0.0207	13	0.134	41	0.047	15	132	8	128	37	46	615	121	13
De01fA13	38	32	0.84	0.80	0.0208	14	0.193	52	0.067	19	133	9	179	44	848	487	134	19
De01fA15	42	37	0.90	0.93	0.0219	15	0.416	76	0.138	27	140	10	353	54	2200	304	263	26
De01fA16	40	37	0.92	0.86	0.0207	18	0.215	69	0.075	25	132	11	198	57	1075	550	141	23
De01fA19	48	47	0.98	0.98	0.0197	12	0.172	45	0.063	17	126	7	162	39	720	488	166	16
De01fA20	44	40	0.91	1.23	0.0207	15	0.301	69	0.106	26	132	10	267	54	1724	388	209	24
De01fA21	46	41	0.90	0.97	0.0207	10	0.342	49	0.120	18	132	6	299	37	1956	249	217	16
De01fA22	69	67	0.96	1.41	0.0197	10	0.290	44	0.107	17	126	6	258	35	1743	267	139	15

a) *为放射性经²⁰⁴Pb校正后的放射性成因²⁰⁶Pb含量或同位素比值.(普通²⁰⁶Pb/总²⁰⁶Pb)的比值采用SHRIMP对该样品所有锆石 11 次分析的平均值 0.0456

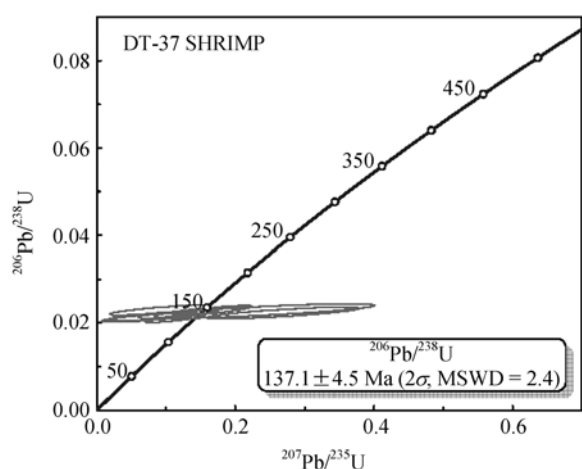


图6 髫髻山组英安岩样品 DT-37 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和图

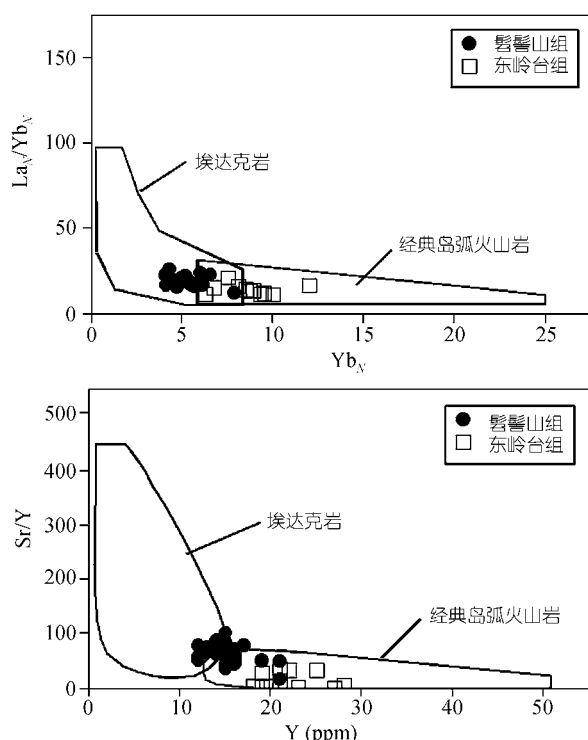


图7 髫髻山组和东岭台组中酸性火山岩的 Yb_N 对 La_N/Yb_N (据文献[35])与 Y 对 Sr/Y 图(据文献[35])

具明显 Eu 负异常(图9)。

髫髻山和东岭台组火山岩的Sr-Nd同位素分析(表6)表明, 130 Ma时的初始 ϵ_{Nd} 为-11至-20之间, 初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值为0.705~0.708, 具大陆地壳特征。

5 讨论

高山等曾根据秦岭-大别造山带和华北克拉通地质、地球物理和地球化学特征与地幔包体Re-Os同位素研究提出[7,8,38~40], 受三叠纪扬子克拉通向华北克拉通的大陆深俯冲作用影响, 上述地区早中生代形成了加厚的榴辉岩下地壳, 该榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同发生了拆沉作用。张旗等[41]根据中国东部广泛存在的燕山期埃达克质岩石提出当时曾存在中国东部高原。近年许文良等在徐淮地区年龄为132 Ma[42]的早白垩世侵入杂岩中发现了榴辉岩类包体, 该包体的石榴石-全岩Sm-Nd等时线年龄为 219 ± 5 Ma[43]。该年龄代表了包体榴辉岩相变质作用的年龄。该年龄与大别-苏鲁榴辉岩的峰期变质年龄吻和(220~240 Ma)[44~46]。郑建平等[47,48]在河南信阳地区中生代火山碎屑岩中也发现了榴辉岩包体。这些榴辉岩包体的发现以及前人和本研究确证的埃达克岩的广泛存在, 证明华北克拉通中生代确实曾存在加厚的榴辉岩下地壳。对华北克拉通地壳成分的动力学模拟结果表明, 这种加厚榴辉岩下地壳的厚度可能 >30 km[7]。吴福元等和张宏福等也曾提出华北克拉通岩石圈地幔的减薄与拆沉作用有关[4,16]。关于地壳加厚和岩石圈减薄作用的机制前者认为与古太平洋板块的俯冲有关, 而后者则认为与扬子克拉通陆壳和Monolo-Okhotsk洋壳的双向俯冲有关。

高山等[9]最近对辽西晚侏罗世兴隆沟组高镁埃达克岩、高镁安山岩和高镁英安岩的矿物学和地球化学研究, 发现这些火山岩不仅具有高镁-铬-镍-锆和低钇含量, 还含有铬铁矿, 斜方辉石斑晶具有核部低镁与幔部高镁的反环带, 含有大量25亿年华北克拉通前寒武纪岩石特征的继承锆石, 锆-钆同位素组成与徐淮下地壳榴辉岩包体一致。上述特征排除了兴隆沟组火山岩是下地壳部分熔融、含水上地幔部分熔融或俯冲洋壳部分熔融产物的可能性, 而揭示了它们是三叠纪加厚的华北克拉通太古宙榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉再循环进入软流圈, 随后榴辉岩部分熔融产生的熔体在上升喷发至地表过程中与地幔橄榄岩相互作用的结果。这一研究不仅为拆沉作用导致的下地壳再循环过程提供了重要证据,

表 4 北京西山地区髻髻山组火山岩地球化学成分

岩性	DT-05 高镁埃达克岩	DT-06 高镁安山岩	DT-09 高镁安山岩	DT-11 安山岩	DT-12 安山岩	DT-15 安山岩	DT-16 埃达克岩	DT-17 安山岩	DT-19 玄武岩	DT-24 高镁安山岩	DT-25 流纹岩
SiO ₂	60.45	60.23	58.61	56.67	58.71	60.83	63.72	55.93	50.75	53.96	70.24
TiO ₂	0.71	0.83	0.66	0.84	1.14	0.59	0.68	0.86	1.10	1.05	0.65
Al ₂ O ₃	16.68	15.93	17.84	17.87	17.13	17.45	14.94	18.81	17.25	17.16	13.29
TFe ₂ O ₃	5.93	6.87	6.24	6.87	6.99	5.65	5.90	7.29	9.21	8.32	4.07
MnO	0.11	0.10	0.10	0.14	0.08	0.10	0.08	0.12	0.13	0.10	0.06
MgO	2.83	3.23	2.73	2.60	2.42	2.15	1.54	2.80	5.27	5.40	1.27
CaO	4.22	4.01	3.68	4.93	4.68	4.00	4.89	5.66	5.01	7.01	2.59
Na ₂ O	4.81	4.10	4.54	4.23	3.37	4.72	3.91	4.04	4.39	3.69	2.97
K ₂ O	2.34	2.40	3.28	2.76	4.11	2.68	1.88	3.03	2.41	1.46	2.91
P ₂ O ₅	0.26	0.30	0.34	0.51	0.55	0.34	0.34	0.44	0.35	0.35	0.18
LOI	2.01	2.45	2.14	2.55	1.49	1.59	2.07	1.61	2.94	2.61	2.84
总量	100.35	100.45	100.16	99.97	100.67	100.10	99.95	100.59	98.81	101.11	101.07
Na ₂ O/K ₂ O	2.06	1.71	1.38	1.53	0.82	1.76	2.08	1.33	1.82	2.53	1.02
Mg#	48.60	48.23	46.43	42.85	40.68	42.98	34.09	43.21	53.13	56.25	38.20
Li	13.21	17.17	15.76	17.80	14.97	9.70	12.14	12.30	29.29	25.95	11.61
Be	1.72	1.58	1.26	1.30	1.73	1.37	1.29	1.79	0.84	0.90	1.53
Sc	6.70	11.00	2.40	4.92	8.45	3.81	5.92	6.39	15.54	14.60	7.94
V	111	132	93	110	136	78	117	111	187	166	60
Cr	26	33	19	4	12	4	4	5	22	111	37
Co	28	53	51	27	34	27	49	34	31	33	26
Ni	12	15	8	2	12	4	4	5	17	47	11
Cu	22	24	20	24	35	19	20	25	25	31	14
Zn	81	94	89	98	115	86	70	116	82	77	41
Ga	21.09	19.74	18.18	23.96	24.25	21.68	21.29	24.56	18.71	18.28	13.21
Rb	38	42	59	65	65	41	49	51	66	26	98
Sr	624	862	548	969	969	987	942	1211	531	930	361
Y	12	14	15	16	19	13	12	14	17	15	21
Zr	159	173	178	181	263	192	179	211	109	122	293
Nb	10.27	10.28	8.02	9.22	13.67	9.28	7.63	10.09	5.12	6.19	10.94
Cs	0.43	0.83	0.55	1.13	0.68	0.75	1.45	1.03	4.02	0.77	5.84
Ba	1285	1483	1368	1136	2042	1137	978	1727	841	936	1039
La	33.19	36.41	33.14	35.97	53.54	37.63	34.54	41.92	22.90	27.46	36.50
Ce	68.84	77.36	67.33	79.47	111.77	78.95	69.62	90.63	51.92	59.41	73.16
Pr	7.75	8.69	8.26	9.31	12.55	8.69	8.26	10.13	6.29	6.83	7.80
Nd	28.05	32.28	30.73	35.81	47.27	31.43	29.20	37.86	30.05	31.33	32.11
Sm	4.83	5.40	5.22	6.10	7.61	5.13	4.61	6.29	5.61	5.38	5.40
Eu	1.48	1.65	1.67	1.89	2.28	1.58	1.45	1.99	1.75	1.68	1.24
Gd	3.74	4.22	4.06	4.62	5.65	3.88	3.68	4.66	4.95	4.87	5.17
Tb	0.54	0.61	0.59	0.66	0.80	0.55	0.54	0.66	0.67	0.61	0.69
Dy	2.71	3.05	3.03	3.40	3.98	2.83	2.45	3.26	3.30	2.88	3.56
Ho	0.47	0.52	0.53	0.58	0.66	0.48	0.41	0.54	0.61	0.52	0.70
Er	1.20	1.38	1.36	1.49	1.76	1.33	1.21	1.41	1.50	1.30	1.83
Tm	0.17	0.20	0.19	0.21	0.22	0.19	0.15	0.20	0.22	0.18	0.29
Yb	1.15	1.25	1.20	1.34	1.49	1.22	1.02	1.28	1.45	1.16	1.95
Lu	0.18	0.19	0.19	0.21	0.23	0.20	0.14	0.19	0.21	0.17	0.30
Hf	3.44	3.73	3.97	3.87	5.77	4.05	3.15	4.43	2.77	2.95	7.49
Ta	0.58	0.56	0.43	0.45	0.68	0.52		0.51	0.26	0.31	0.74
Pb	12.86	13.70	6.50	12.96	13.37	12.29	9.42	11.31	7.13	7.39	22.16
Th	4.97	4.92	2.74	2.71	4.64	3.49	1.99	3.39	1.59	2.02	9.17
U	1.15	1.15	0.64	0.63	1.01	0.93	0.48	0.74	0.44	0.48	1.78
Sr/Y	52	62	37	61	51	76	79	87	31	62	17
La _N /Yb _N	19.57	19.66	18.61	18.09	24.29	20.82	22.99	22.13	10.69	15.94	12.63
Eu/Eu*	1.07	1.06	1.11	1.09	1.06	1.08	1.08	1.13	1.02	1.00	0.72

a) TFe₂O₃ 为全铁; Mg#=100Mg/(Mg+Fe)(原子数); LOI为烧失量. 主量和微量元素含量单位分别为 10⁻²和 10⁻⁶

续表

岩性	DT-26 高镁安山岩	DT-28 高镁安山岩	DT-31 玄武岩	DT-32 玄武岩	DT-33 安山岩	DT-34 埃达克岩	DT-35 安山岩	DT-36 高镁安山岩	DT-37 英安岩	DT-38 安山岩	DT-39 安山岩	DT-40 安山岩
SiO ₂	53.26	61.31	51.57	51.15	58.14	56.34	57.35	55.30	66.15	58.18	58.03	55.24
TiO ₂	1.01	0.63	1.10	1.28	1.11	0.87	0.82	1.01	0.48	0.77	0.79	1.21
Al ₂ O ₃	16.48	16.89	17.54	17.48	16.63	18.51	17.91	16.45	16.77	17.91	18.18	17.82
TF ₂ O ₃	8.09	5.30	8.82	9.03	7.29	7.16	6.98	7.81	3.77	6.56	6.72	8.05
MnO	0.13	0.09	0.12	0.15	0.10	0.13	0.12	0.12	0.08	0.11	0.08	0.09
MgO	4.81	2.55	5.61	4.96	2.19	2.64	2.50	4.81	1.32	2.29	2.29	3.14
CaO	6.75	3.40	7.89	6.54	4.81	4.83	5.16	6.05	2.40	5.25	5.61	4.30
Na ₂ O	3.42	4.56	3.27	3.31	3.32	5.47	4.41	3.99	5.13	3.56	4.17	6.17
K ₂ O	1.86	3.76	1.94	3.02	4.52	2.46	2.74	1.86	3.75	3.36	2.66	1.99
P ₂ O ₅	0.34	0.24	0.33	0.36	0.55	0.53	0.51	0.34	0.20	0.41	0.42	0.42
LOI	4.19	1.71	2.08	2.94	1.29	2.04	1.88	2.53	1.07	1.48	1.15	2.22
总量	100.34	100.44	100.27	100.22	99.95	100.98	100.38	100.27	101.12	99.88	100.10	100.65
Na ₂ O/K ₂ O	1.84	1.21	1.69	1.10	0.73	2.22	1.61	2.15	1.37	1.06	1.57	3.10
Mg#	54.08	48.80	55.75	52.11	37.31	42.21	41.51	54.96	40.96	40.88	40.30	43.59
Li	34.94	8.76	15.52	16.81	8.42	5.01	4.83	10.74	5.90	9.05	8.95	9.19
Be	0.94	1.44	0.86	0.79	1.59	1.13	1.07	1.07	1.34	1.21	1.19	1.29
Sc	13.49	8.66	17.74	18.78	9.91	7.74	7.46	14.16	4.55	7.37	8.05	11.77
V	154	82	180	216	121	111	101	152	48	95	100	100
Cr	104	17	120	49	1.0	1.6	2.7	36	6	1.4	1.8	4.8
Co	29	24	36	28	32	27	26	33	29	36	36	32
Ni	44	9	49	21	5.1	1.4	2.2	26	3.9	2.0	2.6	8.6
Cu	20	13	32	38	29	17	17	24	10	15	15	18
Zn	71	61	80	81	84	81	78	85	51	73	72	84
Ga	17.97	16.55	20.46	20.94	19.82	21.65	20.24	18.56	17.11	20.06	19.37	18.78
Rb	44	66	25	84	72	37	44	27	63	45	43	26
Sr	854	659	890	855	1048	1152	1333	892	690	1537	1269	731
Y	13	15	15	20	21	16	17	14	12	15	15	16
Zr	115	176	130	121	247	172	163	143	210	181	180	176
Nb	5.78	9.72	6.14	5.85	13.11	8.86	8.48	7.16	9.75	8.87	8.81	8.91
Cs	4.19	0.83	0.41	1.43	0.70	0.33	0.39	0.80	0.85	0.78	0.80	0.41
Ba	2054	1436	879	972	1368	1360	1292	822	1327	1493	1438	1210
La	25.69	37.56	27.45	24.49	55.70	38.71	37.30	31.03	41.48	39.14	39.37	38.92
Ce	54.10	72.62	59.15	55.19	101.17	82.80	78.43	65.61	78.94	80.38	81.70	79.20
Pr	6.23	7.88	6.93	6.66	12.48	9.33	8.89	7.34	7.94	8.85	9.06	9.16
Nd	28.56	32.63	31.72	31.86	53.02	41.33	39.47	32.90	31.06	37.69	38.53	40.92
Sm	4.85	5.13	5.59	5.83	8.10	6.61	6.41	5.54	4.38	5.83	5.89	6.62
Eu	1.73	1.60	1.73	1.82	2.29	1.98	1.92	1.65	1.30	1.82	1.83	2.00
Gd	4.46	4.82	5.03	5.19	7.30	5.83	5.57	4.85	4.11	5.15	5.29	5.96
Tb	0.54	0.59	0.65	0.70	0.86	0.72	0.69	0.60	0.46	0.60	0.63	0.72
Dy	2.55	2.80	3.12	3.36	3.99	3.41	3.28	2.81	2.13	2.81	2.92	3.27
Ho	0.45	0.51	0.57	0.61	0.68	0.60	0.58	0.49	0.37	0.49	0.51	0.57
Er	1.12	1.34	1.43	1.52	1.75	1.56	1.51	1.25	1.01	1.29	1.33	1.42
Tm	0.16	0.21	0.21	0.22	0.25	0.24	0.22	0.18	0.15	0.19	0.20	0.20
Yb	1.02	1.33	1.34	1.45	1.62	1.52	1.45	1.13	1.06	1.23	1.25	1.24
Lu	0.15	0.21	0.19	0.21	0.24	0.23	0.22	0.17	0.16	0.18	0.19	0.18
Hf	2.76	4.25	3.14	3.06	5.56	3.96	3.80	3.38	4.84	4.06	4.09	4.12
Ta	0.29	0.61	0.32	0.31	0.66	0.44	0.42	0.36	0.60	0.45	0.46	0.44
Pb	7.97	14.02	8.85	7.27	14.07	9.33	10.05	9.76	15.59	11.13	9.70	9.07
Th	1.93	5.86	2.31	2.05	4.87	2.91	2.75	2.37	5.39	3.15	3.08	3.16
U	0.45	1.36	0.56	0.46	1.01	0.66	0.63	0.51	1.15	0.63	0.65	0.66
Sr/Y	66	44	59	43	50	72	78	64	58	102	85	46
La _N /Yb _N	17.02	19.11	13.83	11.45	23.18	17.23	17.41	18.48	26.41	21.48	21.20	21.13
Eu/Eu*	1.14	0.98	1.00	1.01	0.91	0.98	0.98	0.97	0.94	1.01	1.00	0.97

表 5 北京西山地区东岭台组火山岩地球化学成分

岩性	YHC-02 流纹岩	YHC-06 英安岩	YHC-08 英安岩	YHC-10 流纹岩	YHC-11 流纹岩	YHC-12 流纹岩	YHC-13 流纹岩	YHC-14 英安岩	YHC-15 英安岩	YHC-17 英安岩
SiO ₂	76.33	65.53	65.82	78.83	78.24	76.91	70.74	64.65	65.27	65.48
TiO ₂	0.12	0.70	0.55	0.10	0.11	0.23	0.48	0.83	0.55	0.56
Al ₂ O ₃	12.78	14.75	16.90	12.45	12.46	13.14	15.37	15.63	17.08	17.07
TF ₂ O ₃	0.99	5.17	3.86	0.96	1.05	1.52	2.87	5.16	3.98	4.01
MnO	0.06	0.04	0.12	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.08	0.10
MgO	0.15	2.64	1.20	0.13	0.16	0.27	0.56	1.45	1.16	1.09
CaO	0.25	2.08	1.72	0.23	0.16	0.12	0.34	2.29	1.49	2.64
Na ₂ O	2.88	1.82	5.59	3.62	3.39	4.06	5.09	5.03	6.27	5.35
K ₂ O	5.11	3.52	3.42	4.90	4.66	4.64	4.86	3.88	3.31	3.25
P ₂ O ₅	0.02	0.17	0.22	0.01	0.01	0.04	0.09	0.24	0.24	0.24
LOI	1.05	3.72	1.24	0.69	0.64	0.81	0.79	1.73	1.26	1.12
总量	99.74	100.14	100.64	101.98	100.94	101.80	101.23	100.95	100.69	100.91
Na ₂ O/K ₂ O	0.56	0.52	1.63	0.74	0.73	0.88	1.05	1.30	1.89	1.65
Mg#	23.09	50.29	38.11	21.15	23.19	26.03	27.88	35.76	36.61	35.00
Li				15.23	14.51	26.03	17.34	20.36	14.48	26.18
Be	2.53	2.74	1.91	1.97	1.72	2.12	2.45	1.84	1.72	1.80
Sc		10.65	0.92	1.40	1.81	2.73	6.03	9.80	5.02	5.73
V	0.9	81	10	1.5	2.1	5.9	11	90	13	16
Cr		48		1.0	0.7	2.1	5.2	38	0.6	1.0
Co	51	17	26							
Ni	1.6	22	1.3	0.127	0.073	0.660	2.334	12.058	0.648	0.688
Cu	5.4	25	10	1.1	1.3	2.8	4.8	13	4.5	5.7
Zn	37	76	86	33	29	39	69	77	85	79
Ga	20.45	20.86	19.70	16.34	15.48	17.28	20.94	19.56	19.32	19.60
Rb	159	148	63	156	144	117	122	72	60	56
Sr	74	301	818	60	74	68	203	557	750	758
Y	18	21	25	23	20	19	28	19	21	22
Zr	178	202	265	144	164	193	502	375	261	254
Nb	15.63	15.54	11.21	21.94	23.75	23.80	25.42	18.96	12.13	11.14
Cs	2.32	11.14	2.14	1.64	1.27	0.82	0.67	0.36	2.22	1.46
Ba	128	623	1596	89	116	479	1679	1262	1384	1493
La	27.28	48.96	38.82	43.13	44.10	40.73	75.09	59.30	45.40	45.90
Ce	60.18	99.12	79.74	83.88	88.34	82.21	141.10	113.74	91.10	95.34
Pr	6.52	10.75	9.97	9.19	9.21	7.76	16.15	12.57	10.21	10.86
Nd	21.92	35.42	36.56	35.70	35.84	30.16	66.31	51.88	45.16	46.24
Sm	3.89	5.75	6.13	6.19	6.03	4.76	10.33	8.04	7.38	7.32
Eu	0.21	1.20	1.82	0.28	0.27	0.60	2.29	1.68	2.10	2.11
Gd	3.34	4.87	4.82	5.47	5.15	4.26	8.67	6.93	6.26	6.43
Tb	0.51	0.74	0.70	0.74	0.67	0.57	1.10	0.81	0.78	0.83
Dy	2.92	4.14	3.87	3.78	3.32	3.03	5.31	3.84	3.84	4.04
Ho	0.57	0.80	0.74	0.84	0.74	0.73	1.11	0.77	0.82	0.75
Er	1.53	2.18	1.90	2.09	1.85	1.89	2.71	1.85	2.03	2.00
Tm	0.23	0.30	0.24	0.34	0.30	0.32	0.43	0.27	0.31	0.32
Yb	1.55	2.01	1.67	2.36	2.16	2.31	2.96	1.86	2.21	2.11
Lu	0.22	0.29	0.24	0.34	0.32	0.35	0.43	0.27	0.33	0.32
Hf	6.41	5.04	5.88	5.13	5.55	5.77	11.40	8.87	6.19	5.75
Ta	0.23	1.01	0.60	1.49	1.48	1.31	1.26	1.08	0.59	0.57
Pb	17.23	19.80	13.41	19.99	15.37	25.10	23.34	17.88	13.39	14.45
Th	11.49	9.40	3.33	16.61	16.99	13.07	11.65	13.50	4.35	4.20
U	2.95	2.41	1.03	2.87	2.45	1.45	1.68	2.54	0.90	0.87
Sr/Y	4	14	33	3	4	4	7	29	36	34
La _N /Yb _N	11.88	16.48	15.75	12.37	13.81	11.91	17.13	21.49	13.91	14.72
Eu/Eu*	0.17	0.69	1.03	0.15	0.15	0.41	0.74	0.69	0.94	0.94

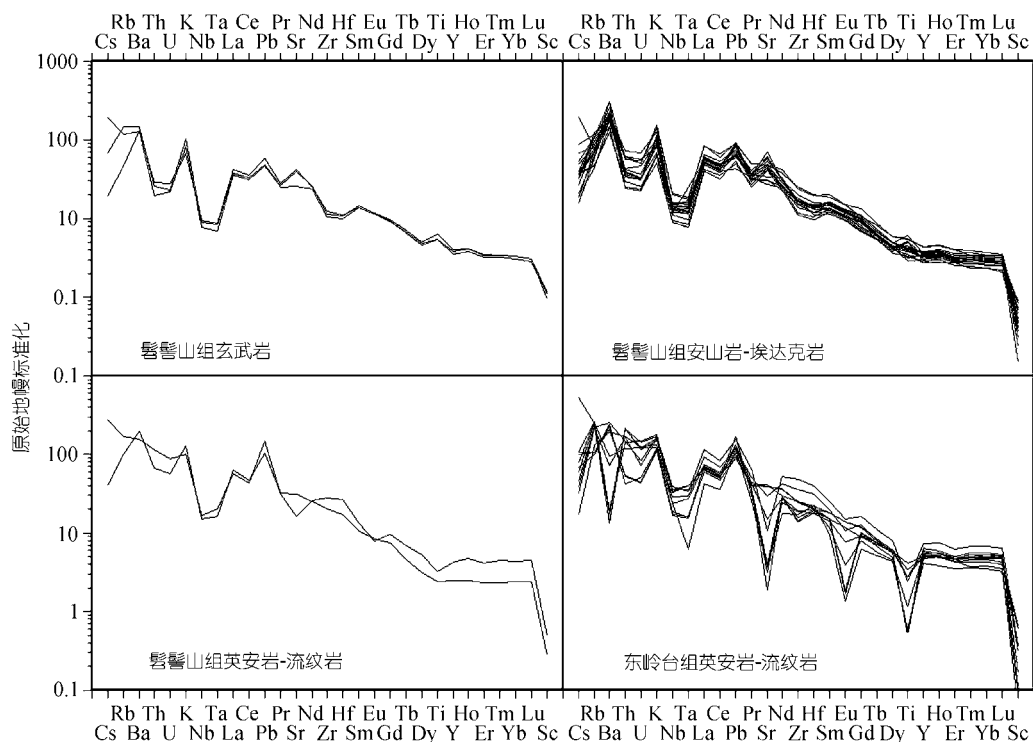


图 8 髫髻山组和东岭台组火山岩的原始地幔标准化微量元素分布图

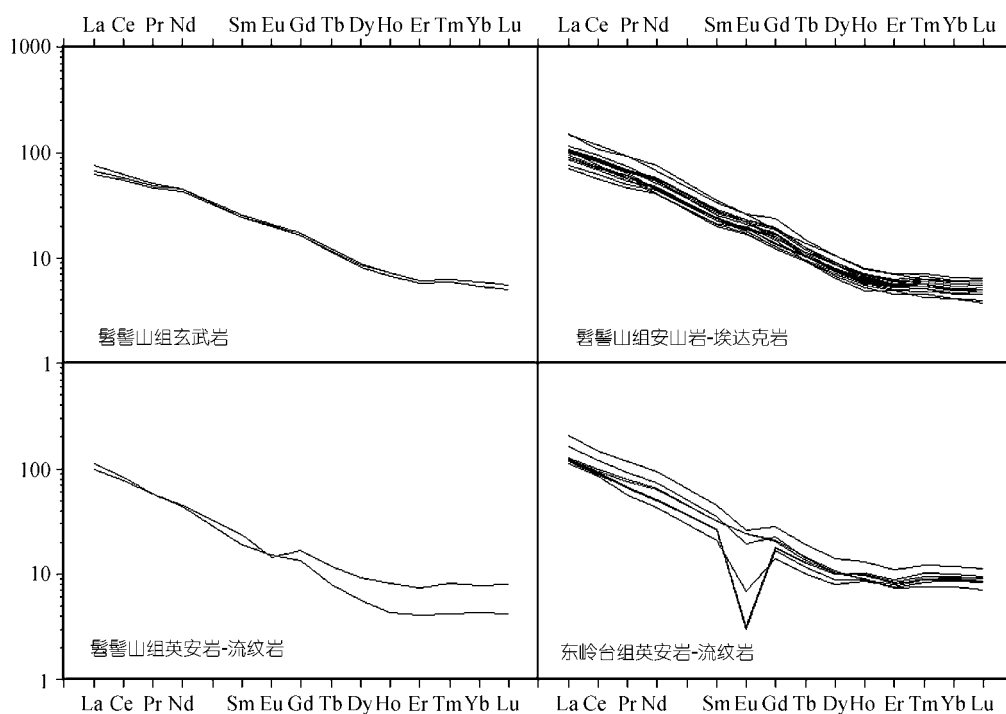


图 9 髫髻山组和东岭台组火山岩的稀土元素分布图

表 6 北京西山地区髻髻山组和东岭台组火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

岩性	髻髻山组						东岭台组
	DT-05	DT-06	DT-11	DT-15	DT-16	DT-17	YH-08
	埃达克岩	安山岩	安山岩	安山岩	埃达克岩	安山岩	英安岩
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1004	0.1078	0.1021	0.0962	0.0975	0.0974	0.0986
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511904	0.511505	0.511968	0.511815	0.511833	0.511760	0.511774
2σ	6	4	27	7	8	7	6
T_{DM} (Ga)	1.67	2.36	1.61	1.73	1.72	1.82	1816763354
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (130Ma)	0.10046	0.10793	0.10218	0.09627	0.09754	0.09749	0.09866
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (130Ma)	0.511819	0.511413	0.511881	0.511733	0.511750	0.511677	0.511690
ε_{Nd}	-14.28	-22.06	-13.03	-16.02	-15.66	-17.09	-16.82
ε_{Nd} (130Ma)	-12.69	-20.59	-11.46	-14.35	-14.02	-15.45	-15.19
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.1698	0.1482	0.1755	0.1319	0.2161	0.1195	0.3505
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70602	0.70540	0.70590	0.70552	0.70814	0.70814	0.70625
2σ	6	11	4	4	8	6	3
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (130Ma)	0.1702	0.1485	0.1758	0.1321	0.2165	0.1197	0.3512
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (130Ma)	0.70571	0.70513	0.70557	0.70528	0.70774	0.70792	0.70560
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	16.614		16.466	16.135	16.308		16.291
2σ	0.001		0.004	0.004	0.001		0.002
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.219		15.179	15.081	15.178		15.147
2σ	0.001		0.004	0.004	0.002		0.002
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	36.701		36.489	36.085	36.4		36.43
2σ	0.003		0.009	0.009	0.004		0.005

而且为中国东部中生代强烈岩浆活动和壳幔交换与大规模成矿作用提供了动力学背景，为华北克拉通岩石圈地幔减薄作用提供了时间制约。该研究还表明，虽然组成华北克拉通下地壳和岩石圈地幔拆沉作用的机制是否与古太平洋或Monolo-Okhotsk洋壳的俯冲作用有关，现有资料尚难以确定，但Sr-Nd同位素和锆石年龄研究证明下地壳加厚的机制与上述洋壳俯冲无关，而更可能与扬子克拉通向华北克拉通的俯冲有关^[9]。

如前所述，李伍平等^[18]曾获得北京西山髻髻山组下部三段底部粗安岩斜长石Ar-Ar坪年龄为 148±3 Ma，等时线年龄为 147±3 Ma。本研究获得髻髻山组上部(旋回 3)样品DT-37(图 2)的U-Pb锆石年龄为 137.1±4.5 Ma。这两个年龄应分别代表了北京西山髻髻山组标准剖面下部和上部的年龄，时代均为晚侏罗世。而上覆东岭台组火山岩年龄(130~134 Ma)为早白垩世。髻髻山组上部火山岩略老于东岭台组火山岩，但两者时代相差<5 Ma，证明北京西山地区两组

火山岩的喷发时间间隔很短。此外，本研究获得的北京西山地区髻髻山组上部火山岩的年龄比前述牛宝贵等^[20]获得的河北承德盆地髻髻山组顶部火山岩的锆石U-Pb SHRIMP年龄(163±6 Ma)年轻 26 Ma，表明髻髻山组火山岩的年龄可能存在明显的区域变化。

埃达克岩一般被认为是俯冲洋壳部分熔融的产物^[32~37]。髻髻山组埃达克岩、安山岩和高镁埃达克岩与高镁安山岩表现出与兴隆沟组火山岩类似的地球化学特征。它们均具有典型的Nb-Ta负异常和Pb正异常和演化的Sr-Nd同位素组成等大陆地壳特征。本研究及李伍平等^[18]获得的髻髻山组火山岩共 8 个样品(SiO₂>56%)的初始Sr-Nd同位素组成与SiO₂之间没有明显相关性(相关系数为 0.08~0.19)，表明上述微量元素和同位素特征不是同化混染的结果，而代表了岩浆的原始特征。因此所研究火山岩是陆壳岩石部分熔融的产物，而不是俯冲洋壳($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.5125\sim 0.5130$, $\varepsilon_{\text{Nd}} = +5\sim +10$; $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr} = 0.702\sim 0.704$ ^[49])部分熔融的产物。高Sr, Yb和Y特征说明源

区岩石含石榴石, 应为榴辉岩或石榴角闪岩^[50,51]。髫髻山组安山岩、埃达克岩、英安岩及其高镁成员的 Nb/Ta 比值变化范围为 16~20, 平均为 19。Foley 等^[51]的研究表明, 角闪岩和石榴角闪岩的部分熔融产生的熔体以低的 Nb/Ta 比值(<17.5)为特征, 而榴辉岩的部分熔融则以较高的 Nb/Ta 比值(>17.5)为特征。因此, 髫髻山组火山岩的 Nb/Ta 比值表明, 它们更可能是榴辉岩部分熔融的产物。高镁埃达克岩和高镁安山岩的存在表明, 它们曾与地幔橄榄岩发生作用^[9,52~54]。扬子克拉通宁镇地区发现的早白垩纪埃达克质侵入岩也具有高镁特征, 此外还具有富 K 的特征^[55]。与宁镇埃达克质侵入岩不同, 髫髻山组埃达克质火山岩具有典型的富 Na 特征($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2.0$)。

我们认为北京西山地区髫髻山组火山岩与辽西兴隆沟组火山岩上述相似的地球化学特征, 说明它们具有相似的成因, 即代表了早中生代曾存在于华北克拉通的加厚榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉至软流圈中, 榴辉岩随后发生部分熔融, 熔体上升过程中与地幔橄榄岩发生相互作用, 然后喷发至地表的产物^[9]。兴隆沟组火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 159 ± 3 Ma, 该年龄证明拆沉作用至少自 159 Ma 已开始^[9]。而本研究获得的髫髻山组火山岩的年龄表明, 拆沉作用至少延续至 137 Ma。东岭台组火山岩为 Mg# 正常的流纹岩和英安岩, 表明它们没有与地幔发生反应, 它们可能代表了拆沉作用导致的软流圈地幔物质上涌造成的深部地壳物质重融的产物。

致谢 野外采样和 SHRIMP 分析过程中分别得到李伍平和简平博士的帮助, 张斌辉绘制了图 1, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- Menzies A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster H M, Harris T, et al, eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. London: Geol Soc London, 1993, 71~81
- 邓晋福, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”-东亚型大陆动力学模式研究计划. *现代地质*, 1994, 8: 349~355
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. *高校地质学报*, 2000, 6: 379~388
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地学前缘*, 2003, 10: 51~59
- 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 北京: 中国地质大学出版社, 1999
- 翟明国, 樊祺诚. 华北克拉通中生代下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换. *岩石学报*, 2002, 18: 1~8
- Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust?. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 106: 303~311
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 307~322[DOI]
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 2004, 432: 892~897[DOI]
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al., eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington D C: American Geophysical Union, 1998, 107~126
- Menzies A, Xu Y. Geodynamics of the North China craton. In: *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al., eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington D C: American Geophysical Union, 1998, 155~165
- Xu Y G. Thermo-Tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel Beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 747~757
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. *Geological Society of America Memoir*, 2001, 194: 171~197
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, et al. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 2002, 62: 111~124
- Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 2003, 31: 817~820[DOI]
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 4373~4387[DOI]
- 马立芳(主编). 中国地质图集. 北京: 地质出版社, 2002, 348
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 等. 北京西山髫髻山组火山岩的地球化学特征及岩浆起源. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20: 123~133
- 汪 洋, 李家振, 孙善平, 等. 北京西山髫髻山组火山岩 Sm-Nd 等时线初步研究. *北京地质*, 2001, 13: 18~21
- 牛宝贵, 和政军, 宋 彪, 等. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义. *地质通报*, 2003, 22: 140~141
- 赵 越, 张拴宏, 徐 刚, 杨振宇, 等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. *地质通报*, 2004, 23: 854~863
- 汪 洋, 姬广义. 北京西山东岭台组和髫髻山组火山岩同位素

- 年龄探讨. 北京地质, 2003, 15: 6~12
- 23 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. in *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* (cKibben M A, Shanks III W C, Ridley W I, eds) 1~95 (Reviews in Economic Geology, Vol. 7, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, 1998)
 - 24 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及其有关现象. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26~30
 - 25 Guillon M, Horn I, Günther D. A comparison of 266 nm, 213 nm and 193nm produced from a single solid state Nd: YAG laser for laser ablation ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, 18: 1224~1230[DOI]
 - 26 Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Determination of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM glasses by LA-ICPMS. *Geostandard Newsletters*, 2002, 26: 181~195
 - 27 Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandard Newsletters*, 1995, 19: 1~23
 - 28 Wiedenbeck M, Hancher J M, Peck W H, et al. Further characterization of the 91500 zircon crystal. *Geostandard Newsletters*, 2004, 28: 9~39
 - 29 Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 2004, 28: 353~370.
 - 30 Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4, 2003, 1~70
 - 31 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 中国东部新生代侵入体的锆石激光探针年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 2003, 48: 1511~1520[摘要]
 - 32 Kay R W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific ocean crust. *J Volcanol Geotherm Res*, 1978, 4: 117~132
 - 33 Defant M, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, 347: 662~665[DOI]
 - 34 Defant M J, Kepezhinskas P M. Evidence suggests slab melting. *EOS*, 2001, 82: 65~69
 - 35 Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411~419[DOI]
 - 36 Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 1986, 14: 753~756[DOI]
 - 37 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J Geophys Res*, 1990, 95: 21503~21521
 - 38 Gao S, Zhang B R, Luo T C, et al. Chemical composition of the continental crust in the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze Cratons. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3933~3950[DOI]
 - 39 高山, 张本仁, 金振民, 等. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用. 中国科学, D 辑, 1999, 29: 532~541
 - 40 高山, Hartmut Kern, 金振民, 等. 榴辉岩的泊松比及其对造山带下地壳拆沉作用的指示. 中国科学, D 辑, 2002, 32: 881~888[摘要]
 - 41 张旗, 王焰, 王元龙. 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, 2001, 17: 236~244
 - 42 Xu W L, Wang Q H, Liu X C, et al. Chronology and sources of Mesozoic intrusive complexes in the Xuzhou-Huainan region, Central China: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 97~107
 - 43 许文良, 王冬燕, 刘晓春, 等. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩中榴辉岩类包体的发现及其地质意义. 科学通报, 2002, 47: 618~622[摘要]
 - 44 Li S, Xiao Y, Liou D, Chen Y, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89~111[DOI]
 - 45 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215~230[DOI]
 - 46 Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Triassic zircon U-Pb and monazite Th-Pb ages recorded in Maowu ultramafics and Shuanghe jadeite quartzite, Dabie Shan UHP belt, east-central China. *Chem Geol*, 2002, 186: 315~331[DOI]
 - 47 Zheng J P, Sun M, Lu F X, Pearson N. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korean Craton. *Tectonophysics*, 2002, 361: 37~60[DOI]
 - 48 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. *Geology*, 2004, 32: 229~232[DOI]
 - 49 Hoffman A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, 385: 219~228[DOI]
 - 50 Rapp R B, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J Petrol*, 1995, 36: 891~931
 - 51 Foley S F, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust in subduction zones controlled by melting of amphibolite. *Nature*, 2002, 417: 837~840[DOI]
 - 52 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem Geol*, 1999, 160: 335~356[DOI]
 - 53 Prouteau G, Pichavant M, Maury R C. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 2001, 410: 197~200[DOI]
 - 54 Kelemen P B, Hanghoj K, Greene A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick R L, ed, *The Crust, Treatise on Geochemistry*, Vol. 3. Amsterdam: Elsevier, 2003, 593~659
 - 55 Xu J F, Shinjo R, Defant M C, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust?. *Geology*, 2002, 30: 1111~1114[DOI]