

北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨*

蔡剑辉^{1,2} 阎国翰¹ 牟保磊¹ 任康绪¹ 宋彪³ 李凤棠¹

CAI JianHui^{1,2}, YAN GuoHan¹, MU BaoLei¹, RENG Kangxu¹, SONG Biao³, LI FengTang¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. Faculty of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2005-02-25 收稿, 2005-05-02 改回.

Cai JH, Yan GH, Mu BL, Reng KX, Song B and Li FT. 2005. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3) 776-788

Abstract In this paper zircon SHRIMP U-Pb age (130.7 ± 1.4 Ma) of granodiorite from Fangshan complex in Beijing is reported for the first time, which suggesting that the main intrusion is a product of early Cretaceous magmatic activity. Based on the characteristics of major element, trace element, REE, isotope and tectonic setting of two-stage intrusive rocks from Fangshan complex, they have the similar petrological and geochemical characteristics to those of adakites, but obviously different from those of typical adakites (O-type) defined by Defant and Drummond (1990). They should belong to C-type adakites in eastern China, or named Yanshanian high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks in eastern China. Systematical studies on Sr, Nd and Pb isotopic characteristics in this paper, in combination with previous O and C isotopic data, indicate that the source rocks of Fangshan intrusives have a close connection to material from the upper mantle and lower crust. Furthermore, a comparison of $\epsilon_{Nd}(t)$ values of two-stage rocks from Fangshan complex ($-13.6 \sim -14.2$), granulite xenolith from Hannuoba basalts ($-8 \sim -18$) and the old Archean lower crust of the North China craton ($-32 \sim -44$) shows that the material source of Fangshan intrusive rocks are derived from the young lower crust of the North China Craton instead of the old one. Finally, this paper concludes the two-period genetic mode of Fangshan complex.

Key words Zircon U-Pb age, C-type adakites (high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks), Sr, Nd and Pb isotopes, Trace element, Petrogenesis, Fangshan complex in Beijing

摘要 本文首次用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年法获得房山岩体主期侵入岩-花岗闪长岩的年龄为 130.7 ± 1.4 Ma, 证明房山岩体主体岩石形成于早白垩世。综合该岩体两期侵入岩的常量、微量、稀土元素和同位素及构造环境特征, 发现房山岩体侵入岩具有许多与埃达克岩(adakite)极其相似的独特的岩石地球化学特征, 但又与 Defant 和 Drummond (1990) 定义的典型埃达克岩(O型)有明显差别, 与中国东部C型埃达克岩更为接近, 或也称之为中国东部燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩。本文通过房山岩体Sr、Nd、Pb同位素的系统研究, 发现在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \sim ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解上, 两期岩石投影点均落在EM I型富集地幔范围之内, 暗示其物质来源与富集地幔有关; 钾长石Pb同位素特征也说明房山岩体岩浆来源与EM I型富集地幔和下地壳关系密切。结合前人的碳、氢、氧同位素研究成果, 认为房山岩体物质来源较深, 与上地幔和下地壳有关。此外, 发现房山岩体两期侵入岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值($-13.6 \sim -14.2$)远高于华北地台区古老下地壳的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值($-32 \sim -44$), 而与汉诺坝二辉麻粒岩包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值($-8 \sim -18$)近似。由于现有的研究已确证汉诺坝二辉麻粒岩包体是由幔源基性岩浆在晚古生代-中生代时底侵到地壳底部构成的年青下地壳的一部分, 故推测房山岩体的物质来源与华北地台古老下地壳关系不大, 而可能与年青

* 地矿部直管局项目和国家教委博士点基金(99000141)资助项目

第一作者简介: 蔡剑辉, 女, 1966年出生, 博士, 副研究员, 矿物岩石学专业, E-mail地址: caijh_cags@163.com

下地壳关系密切。在此基础上,提出房山岩体两期岩石形成的两阶段模式:第一阶段可能发生于中生代早期,由于软流体(层)上涌导致富集岩石圈地幔部分熔融生成带有富集地幔印记的玄武岩浆,该岩浆底侵到地壳底部,冷却成为年青下地壳的一部分;第二阶段发生于中生代晚期,由于当时软流圈呈蘑菇云状大规模上升,热侵蚀面抬升到壳-幔过渡带,导致早中生代新底侵的玄武质下地壳在榴辉岩-麻粒岩相条件下部分熔融生成 C 型埃达克质岩浆(也即高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩浆)并上侵而成为房山岩体。

关键词 锆石 U-Pb 年龄;C 型埃达克岩(高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩);Sr、Nd 和 Pb 同位素;微量元素;岩石成因;北京房山岩体

中图法分类号 P588.12;P597.3

1 引言

北京房山岩体地处著名的周口店北京猿人洞旁,历年来一直是我国重要的野外地质教学基地,故该岩体早已蜚声海内外。虽然房山岩体是我国研究历史最为悠久的岩体之一,但其研究工作尚在不断完善中,研究程度还有待于进一步提高。

前人及本文作者在该岩体的岩体地质特征、矿物学、岩石学、岩石化学、稀土元素、碳氢氧同位素、K-Ar 和 Ar-Ar 同位素年代学及岩浆侵位的动力学机理等方面已开展过大量的研究工作(杨增威,1928;何作霖,1935;王述平,1950;张德全,1981;黄福生等,1985;马昌前,1988;舒桂明等,1991;阎国翰等,1995)。然而,房山岩体同位素年龄是前人在 1964 和 1982 年分别用 K-Ar 和 Ar-Ar 法测定的,目前尚缺乏高精度的同位素年代学研究成果,此外,该岩体 Sr、Nd、Pb 同位素和微量元素的研究工作也一直未开展。本文针对房山岩体研究中的薄弱环节开展相关的研究工作,对于探讨房山岩体及相同类型岩石的成因具有重要的理论意义。

2 岩体地质概况

房山岩体在大地构造上位于欧亚板块内部华北地台北缘太行山中生代构造岩浆带上。该岩体地面出露为近等轴状,面积约 54 平方公里。岩体与围岩呈侵入接触关系,近接触带的地层为太古宙老变质岩系,向外依次为震旦、寒武、奥陶、石炭-二叠系及早、中侏罗世地层,房山岩体侵入的更新地层为中侏罗世九龙山组。

房山岩体是一个两期侵入的同心环状岩株,第一期侵入的为石英闪长岩,呈不连续的环链状分布于岩体的最外缘,第二期(主期)侵入的为花岗闪长岩,位于岩体的内部构成房山岩体的主体。第二期侵入的花岗闪长岩从边缘到内部划分为五个岩相带,分别为 $\gamma\delta_1$ 、 $\gamma\delta_2$ 、 $\gamma\delta_3$ 、 $\gamma\delta_4$ 和 $\gamma\delta_5$,各相带之间为渐变过渡关系(图 1)。该岩体中不论是第一期的石英闪长岩,还是第二期的花岗闪长岩,其矿物组合完全相同,都是由石英、钾长石、斜长石、角闪石、黑云母及副矿物磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石组成(黄福生等,1985;阎国翰等,1995)。

3 房山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 法年龄测定

花岗闪长岩是房山岩体的主体岩石,用黑云母钾氩法测得的花岗闪长岩最大年龄值为 142.9Ma,深度为 357 米的花岗闪长岩芯为 138.9Ma(李璞等,1964),岩体中心最后冷凝的粗粒巨斑花岗闪长岩的黑云母 Ar^{40}/Ar^{39} 等时线年龄为 133.6 ± 0.7 Ma,角闪石为 132.8 ± 2.4 Ma(王松山,1982)。为进一步精确厘定房山岩体的年龄,本文选取位于房山岩体中心部位的花岗闪长岩(即岩体中形成较晚的岩石)进行锆石 SHRIMP 年代学研究。

SHRIMP 锆石 U-Pb 测年法是目前世界上最先进的一种测年技术,其最大的技术优势在于锆石微区原位定年,能在 $30\mu m$ 的范围内进行分析,不需要任何化学处理,可以对一粒锆石的不同部分直接进行定年。

岩石样品经人工破碎、分选、富集,在双目镜下挑选锆石样品。锆石样品在 SHRIMP 测定前连同标样一起用环氧树脂粘合在样品座上,磨至一半,然后抛光、清洗,分别在偏光显微镜和反光显微镜下照相(图 2),以使 SHRIMP 测点位于最佳部位。最后在其表面镀金,使表面具有最大的导电性。在样品测试过程中,尽可能选取较少裂隙和包裹体的颗粒和区域进行定点分析,通常每测 2~3 次样品后需要测定一次标样,以控制仪器的稳定性和离子计数统计的准确性。本次样品的制备和离子质谱探针分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心进行,采用澳大利亚的高分辨二次离子质谱计 SHRIMP II,更详细的分析方法和过程可参见相关文献(Compston *et al.*, 1984;1992;宋彪等 2002)。

本文研究中共对 13 个锆石颗粒进行了 13 次测定,分析结果列于表 1 中,在 U-Pb 谐和图(图 3)上,11 个分析点构成密集一簇,并切割一致曲线,获得 130.7 ± 1.4 Ma 的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄,其 χ^2 检验值为 0.98。其中分析点 ZKD-4.1 和 ZKD-6.1 分别测出较年轻的非一致年龄 113.4 ± 0.6 Ma 和 125.6 ± 0.4 Ma,和较高的普通铅含量 9.60 和 3.38,因此认为这两个分析点可能发生过放射成因铅丢失,而被排除在统计之外。11 个分析结果获得的谐和线年龄值为 130.7 ± 1.4 Ma,代表了房山岩体花岗闪长岩侵位的较晚年龄。

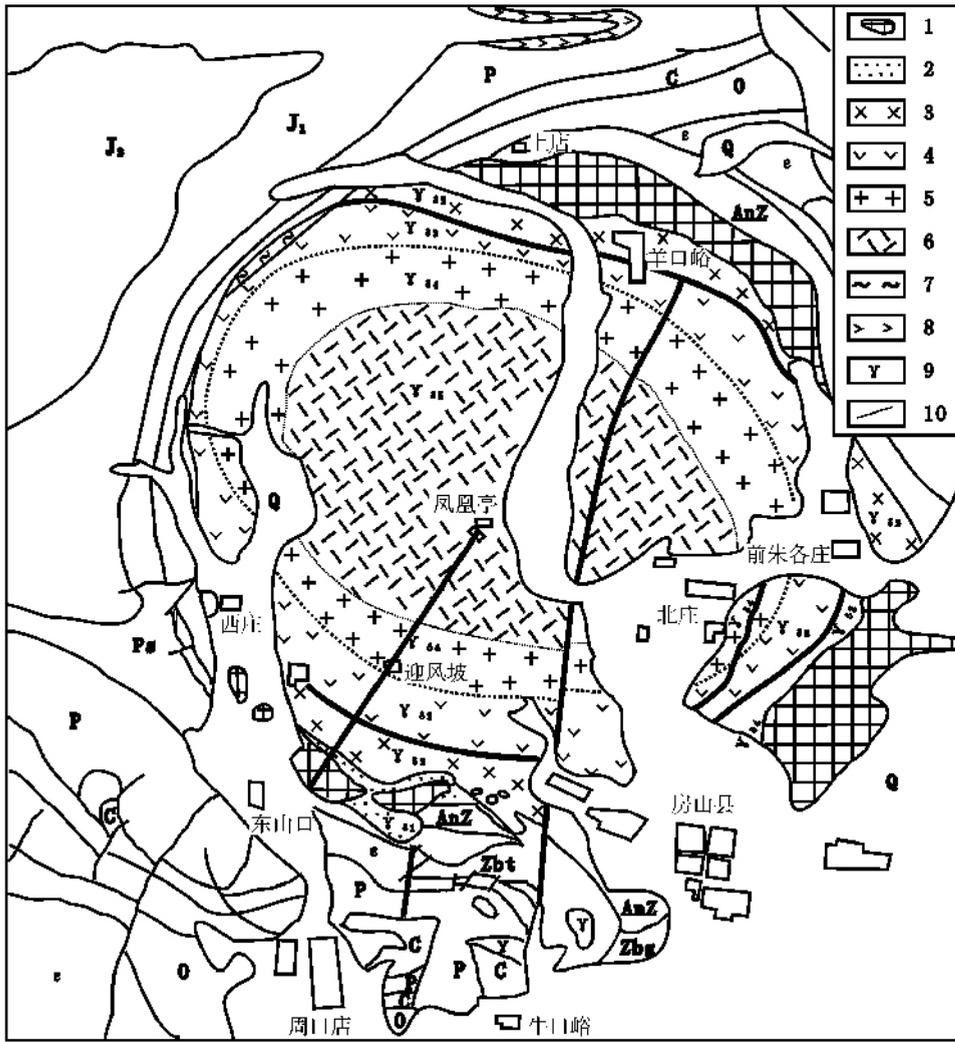


图1 房山岩体岩相带分布图

1. 石英闪长岩 2. 中粒花岗岩闪长岩(第一岩相带); 3. 团块状花岗岩闪长岩(第二岩相带) 4. 似斑状花岗岩闪长岩(第三岩相带) 5. 角闪石似斑状花岗岩闪长岩(第四岩相带) 6. 粗斑似斑状花岗岩闪长岩(第五岩相带) 7. 边缘片麻岩带; 8. 南大岭玄武岩; 9. 花岗岩; 10. 岩相带界线

Fig.1 Distribution of lithofacies belt of Fangshan complex

4 房山岩体常量、稀土和微量元素特征

4.1 常量元素特征

从已公开发表的全岩化学分析数据来看(表2), 房山岩体 $\text{SiO}_2 > 56\%$ (59.26% ~ 66.20%), $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ (15.33% ~ 17.06%), $\text{MgO} < 3\%$ (1.11% ~ 2.80%), $\text{Na}_2\text{O} > 3.38\%$ (3.38% ~ 5.65%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.92 ~ 1.65。从早至晚即从岩体的边缘至内部, SiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 含量增大; 而 MgO 、 Fe_2O_3 、 FeO 和 CaO 含量减少; Al_2O_3 含量无明显变化。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解中(图4), 绝大多数样品的投影点均落在高钾钙碱性系列岩区, 只有个别样品落入钾玄岩系列区域内。

4.2 稀土元素特征

由表3可以看出, 房山岩体稀土元素丰度较高, 总量变化在 152.39 ~ 258.98ppm 之间。La/Yb 比值较大 (26.81 ~ 148.89), 在稀土球粒陨石标准化配分图解上(图5), 配分曲线向右陡倾斜, 岩石富集 LREE 而明显亏损 HREE ($\text{Yb} < 1.66$), 无铕异常或显示轻微的负铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.90 \sim 1.16$)。由此暗示房山岩体的岩浆熔出后, 源区残留物中有石榴石而无斜长石, 斜长石几乎全部进入熔浆, 这与实验岩石学的结论是一致的。在 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ 图解(图6)上, 房山岩体主期花岗岩闪长岩投影点全部落在埃达克岩区, 第一期石英闪长岩投影点则刚好落于埃达克岩与典型的岛弧钙碱性岩的过渡区边缘, 表明房山岩体两期岩石具有与埃达克岩 (Defant *et al.*, 1990; 1993; 张旗等 2001a; 2001b) 或中国

表 1 房山岩体花岗岩闪长岩锆石 U-Pb SHRIMP 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons from the granodiorite in the Fangshan complex

点号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{206}\text{Pb}_c$ (ppm)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄 (Ma)
ZKD-1.1	6.27	223	207	4.15	0.96	0.0600 ± 28	0.02030 ± 2.3	0.169 ± 29	129.5 ± 2.9	616 ± 610	130 ± 14
ZKD-2.1	1.76	321	274	5.80	0.88	0.0461 9.5	0.02066 1.7	0.131 0.6	131.8 ± 2.2	0.4 ± 230	135.4 ± 6.1
ZKD-3.1	2.34	316	282	5.62	0.92	0.0377 15	0.02021 1.8	0.105 15	129.0 ± 2.3	-507 ± 390	121.1 ± 6.9
ZKD-4.1	9.60	80	55	1.35	0.71	0.01775 4.1	0.01775 4.1		113.4 ± 4.6		65 ± 35
ZKD-5.1	1.74	242	236	4.36	1.01	0.0429 ± 5.5	0.02060 ± 1.7	0.1218 ± 5.7	131.4 ± 2.3	-174 ± 140	126.8 ± 4.0
ZKD-6.1	3.38	251	175	4.39	0.72	0.0263 29	0.01968 ± 2.0	0.071 ± 29	125.6 ± 2.4	-1 588 ± 980	108 ± 11
ZKD-7.1	2.29	316	217	5.69	0.71	0.0392 ± 13	0.02048 ± 1.7	0.111 ± 13	130.7 ± 2.3	-403 ± 340	121.5 ± 8.2
ZKD-8.1	1.46	361	330	6.63	0.94	0.0408 ± 10	0.02107 ± 1.7	0.119 ± 10	134.4 ± 2.2	-300 ± 250	104.7 ± 5.2
ZKD-9.1	0.49	277	292	5.04	1.09	0.0531 ± 6.4	0.02110 ± 1.7	0.154 ± 6.6	134.6 ± 2.3	333 ± 140	106.4 ± 4.3
ZKD-10.1	1.97	290	264	5.13	0.94	0.0385 ± 13	0.02019 ± 1.8	0.107 ± 13	128.8 ± 2.2	-450 ± 330	112.4 ± 6.7
ZKD-11.1	3.12	218	228	3.92	1.08	0.0333 ± 27	0.02024 ± 2.1	0.093 ± 28	129.2 ± 2.7	-851 ± 790	107.7 ± 9.4
ZKD-12.1	—	325	295	5.58	0.94	0.0543 ± 2.9	0.02004 ± 1.7	0.1500 ± 3.4	127.9 ± 2.1	383 ± 66	141.1 ± 3.6
ZKD-13.1	1.21	289	290	5.09	1.04	0.0435 ± 8.5	0.02029 ± 2.1	0.122 ± 8.7	129.5 ± 2.7	-139 ± 210	129.4 ± 5.0

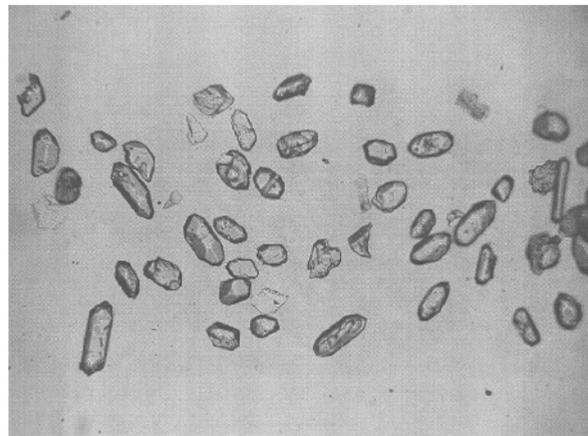
注：单个测点的分析误差为 1σ，标样校正误差为 0.4%。Pb_c 和 Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅的比值

图 2 房山岩体花岗岩闪长岩中锆石显微镜下图像

Fig. 2 Microscopic image for zircons of the granodiorite from the Fangshan complex

东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩(李伍平等 2001; 葛小月等 2002)非常相似的稀土元素地球化学特征。

4.3 微量元素特征

房山岩体微量元素中相容元素 Cr、Ni、Co 含量较低; 富集大离子亲石元素 Sr(1113 ~ 1640 ppm) 和 Ba(996 ~ 4206 ppm), 而贫 Y(6.44 ~ 15.60 ppm)(表 3)。在原始地幔标准化不相容元素配分图解(图 5)中, 显示 Ba、Sr、K 正异常和 Rb、Nb、Ta、Hf、P、Ti 负异常。

综合房山岩体上述常量、稀土和微量元素分析数据, 并结合下节将要表述的 Sr、Nd 同位素特征与典型埃达克岩(即 O 型埃达克岩)和 C 型埃达克岩(也有学者称之为中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性岩)加以比较(表 4), 可以看出, 在 SiO₂、Al₂O₃、MgO、Sr、Y 和 Yb 含量、LREE 和 HREE 特征以及 La/Yb 和 Sr/Y 比值等方面房山岩体岩石与 O 型和 C 型埃达克岩均具有极其相似的、独特的地球化学共性。但是, 其 Na₂O/K₂O 比、I_{Sr} 和 ε_{Nd}(t) 值以及构造环境则明显不同于 O 型埃达克岩, 而与 C 型埃达克岩(高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩)一致。由此可以认为房山岩体侵入岩属于 C 型埃达克岩(也即高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩)。

5 房山岩体钨、锶、铅同位素特征

本文中所有钨、锶、铅同位素样品均在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室采用 VG354 大型质谱仪测定。Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 校正。国际标样 NBS987 的测定结果为 0.710254 ± 16 (n = 8, 2σ), NBS607 的测定结果为 1.20032 ± 30 (n = 2)。Rb-Sr 全流程空白本底约为 2 ~ 5 × 10⁻¹⁰ g。Nd 同位素分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正。国际标样 La Jolla 的测定结果为 0.511862 ± 7 (n = 6, 2σ), BCR-1 的测定结果为 0.512626 ± 9 (n = 2)。Sm-Nd 全

表2 北京房山岩体常量元素分析结果

Table 2 The chemical analysis data of major elements (wt%) of the Fangshan complex

期次 岩性 岩相带 样品号	第一期				第二期								
	石英闪长岩				花岗闪长岩								
	未分				$\gamma\delta_1$	$\gamma\delta_2$	$\gamma\delta_3$			$\gamma\delta_4$	$\gamma\delta_5$		
	A-65	A-1	3-2	A-16	3-13	A-17	A-4	3-4	3-12	3-5	A-50	3-6	3-11
SiO ₂	59.26	59.34	60.18	62.15	60.76	61.56	61.00	62.72	63.91	63.30	65.26	66.20	66.23
TiO ₂	0.63	0.70	0.74	0.53	0.65	0.68	0.65	0.60	0.60	0.65	0.60	0.57	0.90
Al ₂ O ₃	16.83	16.59	16.86	16.23	16.87	15.61	16.70	17.06	15.33	16.19	16.16	16.54	15.64
Fe ₂ O ₃	2.91	2.20	2.38	2.78	2.36	2.56	2.19	2.33	2.82	1.84	1.49	1.47	1.35
FeO	3.54	3.59	3.80	2.87	3.00	3.46	2.96	2.78	2.34	3.31	1.89	1.94	1.92
MnO	0.11	0.10	-	0.10	0.09	0.12	0.05	-	0.09	-	0.03	-	0.06
MgO	2.39	2.55	2.65	2.05	2.04	2.80	2.10	2.10	2.03	2.25	1.11	1.26	1.33
CaO	5.27	5.15	5.20	4.21	4.69	4.58	4.44	3.96	4.14	3.83	2.63	2.86	2.83
Na ₂ O	4.37	3.89	4.14	3.93	4.00	3.38	4.34	4.70	3.96	4.51	4.75	5.65	4.10
K ₂ O	2.65	3.33	3.78	4.14	3.32	3.67	3.24	3.71	3.41	3.97	4.04	3.61	3.54
P ₂ O ₅	0.36	0.29	0.44	0.29	0.32	0.33	0.35	0.35	0.30	0.30	0.27	0.23	0.33
TOTAL	98.32	97.73	100.17	99.28	98.10	98.75	98.02	100.31	98.93	100.15	98.23	100.33	98.23

资料来源: 样品 A-引自黄福生等, 1985; 3-引自何作霖, 1936, 王述平, 1950

表3 北京房山岩体稀土和微量元素分析结果

Table 3 The chemical analysis data of REE and trace elements ($\mu\text{g/g}$) of the Fangshan complex

期次 岩性 岩相带 样品号	第一期		第二期			
	石英闪长岩		花岗闪长岩			
	未分		$\gamma\delta_2$	$\gamma\delta_3$		$\gamma\delta_5$
	A-1	3-2	A-17	3-4	3-12	3-6
La	44.50	32.72	42.10	65.40	49.79	67.00
Ce	78.60	65.46	77.30	111.00	94.81	107.00
Pr	10.20	7.60	10.00	13.90	11.62	13.00
Nd	36.80	26.28	35.60	47.40	40.57	43.10
Sm	6.06	5.99	5.45	7.48	7.65	5.96
Eu	1.81	1.59	1.78	2.03	2.09	1.71
Gd	4.03	4.48	3.53	4.64	5.50	3.37
Tb	0.54	0.58	1.09	0.60	0.70	0.36
Dy	2.70	3.28	2.17	2.79	3.44	1.41
Ho	0.52	0.63	0.41	0.53	0.64	0.22
Er	1.32	1.69	0.99	1.30	1.63	0.49
Tm	0.23	0.24	0.17	0.22	0.22	0.09
Yb	1.66	1.59	1.22	1.45	1.34	0.45
Lu	0.30	0.26	0.23	0.24	0.20	0.09
Y	15.60	14.54	12.00	14.90	13.62	6.44
Σ REE	189.27	152.39	182.04	258.98	220.20	244.25
LREE	177.97	139.64	172.23	247.21	206.53	237.77
HREE	11.30	12.75	9.81	11.77	13.67	6.48
L/H	15.75	10.95	17.56	21.00	15.11	36.69
La/Yb	26.81	20.58	34.51	45.10	37.16	148.89
δ Eu	1.05	0.90	1.16	0.98	0.94	1.07
Sc	1.02	10.13	2.11	3.21	8.75	5.92
Rb	25.18	78.90	75.56	78.52	66.60	69.90
Sr	1640.00	1113.00	1431.00	1114.00	1287.00	1429.00
Ba	996.00	1561.00	2420.00	1842.00	1780.00	4206.00
Nb	9.51	10.67	10.63	9.95	9.64	6.72
Ga	36.88	53.15	72.22	57.22	54.92	110.40

续表 3

Continued Table 3

期次	第一期		第二期			
岩性	石英闪长岩		花岗闪长岩			
岩相带	未分		$\gamma\delta_2$	$\gamma\delta_3$	$\gamma\delta_5$	
样品号	A-1	3-2	A-17	3-4	3-12	3-6
Ta	0.45	0.91	0.86	0.92	0.73	0.59
Zr	116.00	224.00	231.00	199.00	380.00	229.00
Hf	2.00	1.86	1.45	1.29	1.25	1.35
U	0.79	3.13	1.54	1.92	2.00	0.84
Th	2.42	10.18	4.68	9.08	8.23	4.15
Cr	102.20	2.15	124.70	109.20	2.71	113.70
Ni	10.66	3.63	6.39	5.33	3.58	3.10
Co	47.36	9.84	27.14	20.96	8.83	19.74
Sr/Y	105.13	76.55	119.25	74.77	94.49	221.89

资料来源：样品 A-1、A-17、3-4、3-6 稀土元素数据引自舒桂明等, 1991；其余稀土元素和微量元素分析结果为本文数据，均由北京大学地球与空间科学学院教育部重点实验室古丽冰和邵宏翔高级工程师分别用 ICP-AES 和 ICP-MS 系统分析。

表 4 北京房山岩体岩石与两类埃达克岩岩石地球化学特征对比

Table 4 Comparison between the granitoids from the Fangshan complex and the adakites

	典型埃达克岩 (O 型埃达克岩)	房山岩体	中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩 (C 型埃达克岩)
岩石组合	安山岩、英安岩、流纹岩、 花岗闪长岩和英云闪长岩	石英闪长岩和 花岗闪长岩	安粗岩、粗安岩、粗面岩、闪长岩、花岗闪长岩、 石英二长岩和正长岩
岩石系列	钙碱性，次为低钾拉斑系列	高钾钙碱系列	高钾钙碱系列，次为钙碱性和橄榄粗玄系列
SiO ₂	≥56%	59% ~ 66%	> 56%
Al ₂ O ₃	≥15%	15.3% ~ 7.1%	> 15%
MgO	< 3%	1.11% ~ 2.80%	< 3%
Na ₂ O/K ₂ O	> 2	0.92 ~ 1.57	= 1 或 > 1 或 < 1
Sr	> 400ppm	1113 ~ 1640	> 400ppm
Y	≤ 18ppm	6.44 ~ 15.60	≤ 18ppm
Yb	< 1.9ppm	0.45 ~ 1.66	< 1.9ppm
REE 分布	LREE 富集	LREE 富集	LREE 富集
σEu	正异常	0.90 ~ 1.16	无铕异常或负铕异常不明显
La/Yb	> 20	20.58 ~ 148.89	24 ~ 76
I _{Sr}	< 0.7050	0.7054 ~ 0.7055	> 0.704
ε _{Nd} (t)	> 0	-14.2 ~ -13.6	< 0 很少 > 0
部分熔融残余物	Cpx + Gt	Cpx + Gt	Cpx + Gt
构造环境	俯冲带	板块内部	板块内部
Sr/Y	> 20 ~ 40	74.77 ~ 221.89	46 ~ 132
数据来源	Defant <i>et al.</i> , 1990; 1993; Drummond M S <i>et al.</i> , 1990; Martin H, 1993; 1999	本文	张旗等 2001b; 葛小月等 2002; 李伍平等 2001

表5 房山岩体 Rb-Sr 同位素测定结果及主要参数

Table 5 The Rb-Sr isotopic determination data and some major parameters from the Fangshan complex

侵入期次	样品号	岩石名称	Rb(ppm)	Sr(ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	I_0	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	$T(\text{Ma})$
第一期	3-2	石英闪长岩	78.9	1113.3	0.2050	0.705858 ± 18	19.3	0.705468	15.5	130.7
第二期	3-12	花岗闪长岩	66.6	1287.3	0.1496	0.705671 ± 18	16.6	0.705362	14.4	130.7

表6 房山岩体 Sm-Nd 同位素测定结果及主要参数

Table 6 The Sm-Nd isotopic determination data and some major parameters from the Fangshan complex

样品号	岩石名称	Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	T_{CHUR}	T_{DM}	I_0	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T(\text{Ma})$
3-2	石英闪长岩	6.66	37.01	0.1088	0.511858 ± 11	-15.2	-0.45	1351	1874	0.511755	-13.6	130.7
3-12	花岗闪长岩	6.49	38.28	0.1025	0.511819 ± 11	-16.0	-0.48	1323	1822	0.511722	-14.2	130.7

表7 房山岩体钾长石 Pb 同位素测定结果及主要参数

Table 7 The Pb isotopic determination data and some major parameters of K-feldspar from the Fangshan complex

样品号	岩石名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$
A-1	关地石英闪长岩	16.679176 ± 302	15.138938 ± 932	36.445267 ± 618
3-2	东山口石英闪长岩	16.538767 ± 234	15.210026 ± 1222	36.508154 ± 711
A-17	$\gamma\delta_2$ 花岗闪长岩	16.577975 ± 218	15.205119 ± 600	36.483231 ± 461
3-12	$\gamma\delta_3$ 花岗闪长岩	16.520734 ± 213	15.266430 ± 1683	36.605716 ± 1670
3-6	$\gamma\delta_5$ 花岗闪长岩	16.671770 ± 497	15.067185 ± 1282	35.513109 ± 730

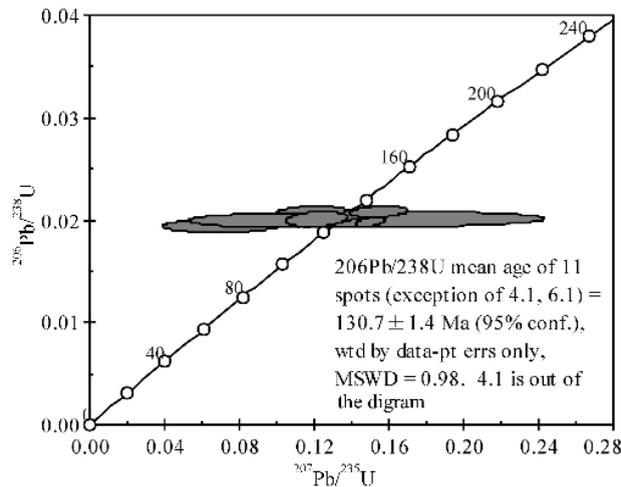
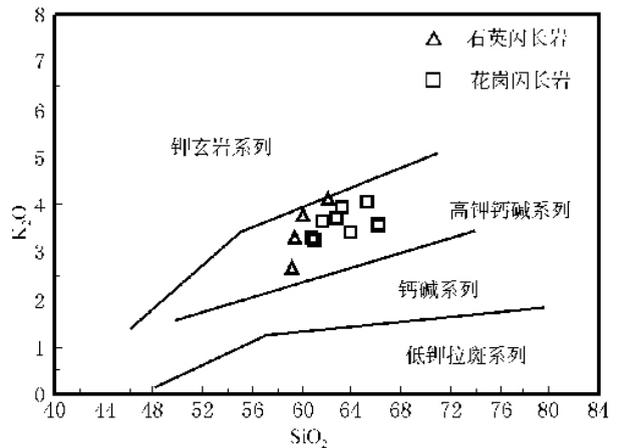


图3 房山岩体花岗闪长岩中锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 SHRIMP U-Pb zircon concordia diagram for the granodiorite from the Fangshan complex

流程空白本底约为 5×10^{-11} g。Pb 全流程空白值 < 1 ng。国际标样 NBS981 的测定结果 ($n = 6, 2\sigma$) 为: 0.059003 ± 0.000084 0.91439 ± 0.00017 2.16441 ± 0.00097 。

分析测试结果分别列于表5、表6和表7中。

图4 北京房山岩体岩石 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图式引自 Le Bas *et al.*, 1986)Fig. 4 Diagram of K_2O vs. SiO_2 from the Fangshan complex (after Le Bas *et al.*, 1986)

5.1 Rb-Sr 同位素特征

由表5得知在房山岩体中, 两期侵入岩(第一期石英闪长岩和第二期花岗闪长岩)的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 均为正值, 变化范围在 14.4 ~ 15.5 之间, 平均值为 14.9。 I_{Sr} 值较低, 变化于 0.7053

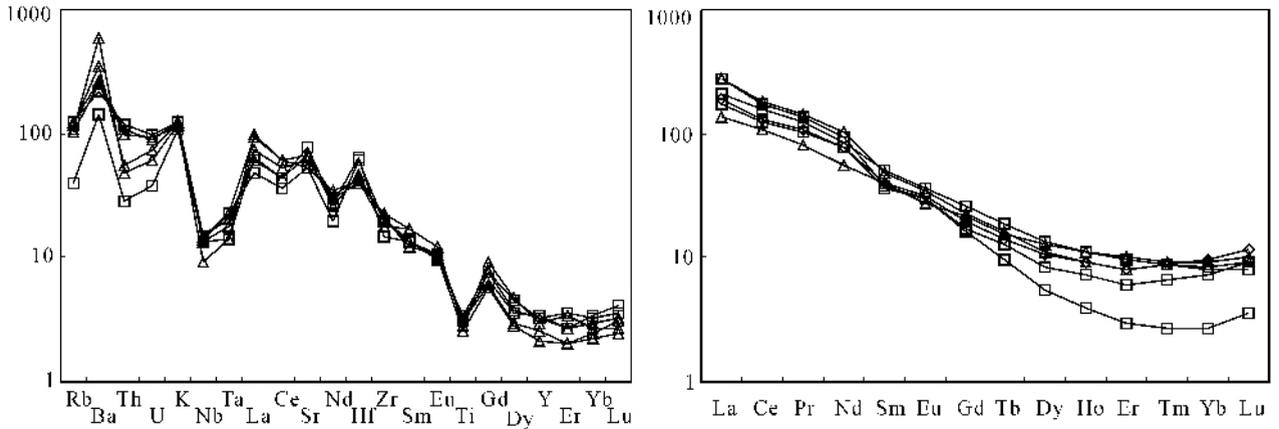


图5 房山岩体岩石稀土元素球粒陨石标准化配分图解和原始地幔标准化不相容元素配分图解(图例同图4,球粒陨石和原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized distribution pattern of incompatible elements for the granitoids from the Fangshan complex. Normalization values after Sun and McDonough (1989)

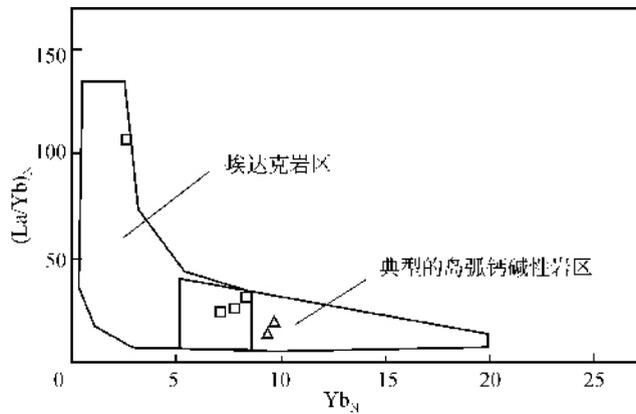


图6 房山岩体 $(La/Yb)_N - Yb_N$ 相关图解(图式引自 Martin, 1986; 1999; 图例同图4; 球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Diagram of Chondrite-normalized $(La/Yb)_N$ vs. Yb_N (after Martin, 1986; 1999). Normalization values after Sun and McDonough (1989)

~0.7055 之间,落在公认的幔源火成岩的 I_{Sr} 值(0.7020 ~ 0.7060)范围之内。

5.2 Sm-Nd 同位素特征

房山岩体两期岩石的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值较低(表6),变化范围为 0.5118 ~ 0.5119,且岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为负值,分别为 -14.2 和 -13.6,该比值远高于 Jahn 等(1999)归纳出的华北克拉通古老下地壳的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-44 ~ -32),而与汉诺坝二辉麻粒岩包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-18 ~ -8)比较接近(张国辉等,1998)。这表明房山岩体的岩浆来源可能与汉诺坝二辉麻粒岩的相近,而与华北克拉通古老下地壳的关系较远。

5.3 钾长石 Pb 同位素特征

房山岩体两期岩石的钾长石 Pb 同位素组成以 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值低为特征(表7),5个钾长石样品的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值变化范围分别为 16.5207 ~ 16.6792、15.0672 ~ 15.2664 和 35.5131 ~ 36.6057。

综上所述,房山岩体两期岩石 Sr、Nd、Pb 同位素变化不大,第一、二期岩石的 I_{Sr} 值分别为 0.7055 和 0.7054; $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为 -13.6 和 -14.2; $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 与 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值的平均值分别为 16.6090 和 16.5902、15.1745 和 15.1795 与 36.4767 和 36.2007,两者十分接近,表明房山岩体两期岩石可能来自相同的岩浆源区。

6 房山岩体成因初探

6.1 房山岩体物质来源

锶、钕、铅同位素是探讨岩石物质来源的非常有效的示踪剂。近年来的研究表明,岩浆一般都能继承其源岩的同位素成分,并且在岩浆形成后封闭体系内发生分异作用过程中也保持不变。在目前采用的各种同位素衰变对中,尤以 Sm-Nd 同位素对包括高级变质作用和地表风化作用在内的各种后期叠加过程表现得最为稳定,因此,大陆火成岩可以记录下深部同位素成分的精确信息(洪大卫,1999)。

在 $^{143}Nd/^{144}Nd - ^{87}Sr/^{86}Sr$ 图解(图7)上,房山岩体两期岩石的锶、钕同位素投影点均落在 EM I 型富集地幔区域内,表明其物质来源均与 EM I 型富集地幔有关。而近年来有关华北克拉通区金伯利岩、火成碳酸岩和碱性岩的锶、钕、铅同位素研究成果均表明古生代-中生代华北克拉通区岩石圈地幔具富集性特征(邱家骧等,1993;池际尚等,1996;王德

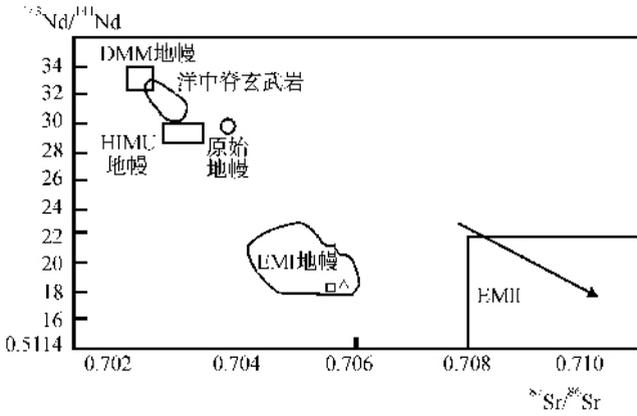


图7 房山岩体侵入岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图

(图例同图4; DMM、EM I、EM II、HIMU 和原始地幔为 Hart(1984) 与 Zindler(1986) 定义的地幔端元)

Fig. 7 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ correlation diagrams of the granitoids from the Fangshan complex

(DMM, EM I, EM II, HIMU and primary mantle are mantle end-members defined by Hart and Zindler, 1984; 1986)

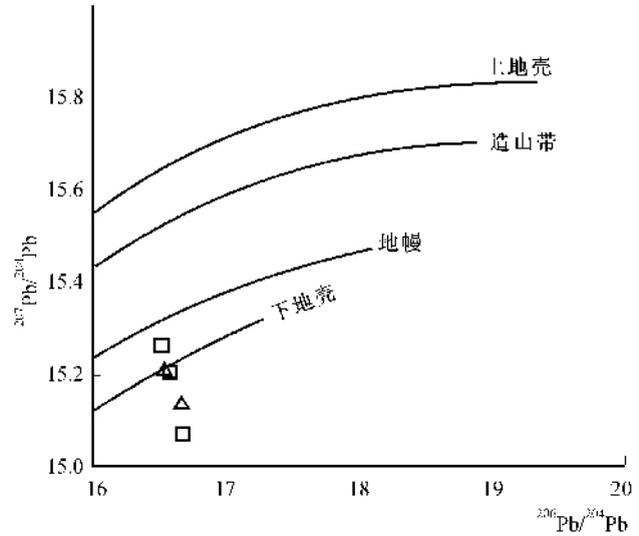


图9 地球不同区域铅的结构模式图解

(图式引自 Zartman R. Z. *et al.*, 1981; 图例同图4)

Fig. 9 Diagram of Pb isotopic composition of K-feldspar in the granitoids from the Fangshan complex

(after Zartman R. Z. *et al.*, 1981)

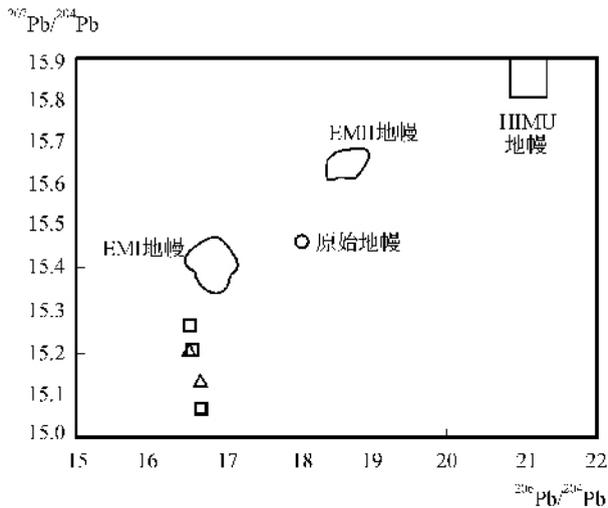


图8 房山岩体侵入岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图

(图例同图4; DMM、EM I、EM II、HIMU 和原始地幔为 Hart(1984) 与 Zindler(1986) 定义的地幔端元)

Fig. 8 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ correlation diagrams of the granitoids from the Fangshan complex

(DMM, EM I, EM II, HIMU and primary mantle are mantle end-members defined by Hart and Zindler, 1984; 1986)

滋等, 1996; 谭东娟等, 1999; 阎国翰等, 2000, 2002; 英基丰等, 2001)。可以推断, 房山岩体岩浆来源与岩石圈地幔密切相关。

钾长石的铅同位素比值可以代表岩石的初始值, 并可用以确定花岗质岩石的起源(李昌年, 1992)。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图8)中, 相对于其它类型的地幔, 房山岩体岩

石的钾长石铅同位素组成投影点均更趋近于 EM I 型富集地幔区。但在 Zartman 等(1981)的地球不同区域铅的结构模式图解(图9)上, 房山岩体两期岩石钾长石的投影点则落于地幔和下地壳模式曲线附近。从钾长石铅同位素特征来看, 房山岩体两期岩浆活动物质来源除与 EM I 型富集地幔密切相关之外, 可能还与下地壳有关。

有关房山岩体岩石的碳、氢、氧同位素研究成果(郑斯成等, 1987)也表明其岩浆可能源自上地幔和下地壳源区。该岩体 $\delta^{13}\text{C} = -4 \sim -8$, 与火成碳酸岩和金伯利岩的 $\delta^{13}\text{C}$ ($-5 \sim -8$)相吻合(松尾禎士, 1985), 属于深源碳。由于火成碳酸岩和金伯利岩源于上地幔是被公认的事实, 故可说明房山岩体的物质来源与上地幔有关。房山岩体中含水矿物氢同位素 $\delta\text{D} = -30 \sim -70$, 与 Sheppard 和 Epstein(1970)确定的地幔原生水 $\delta\text{D} = -48$ 比较接近, 这也表明房山岩体的物质来源与上地幔有关。一般来说, 火成岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化于 $5 \sim 15$ 之间, 房山岩体的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ ($8.5 \sim 10$)正好在 Taylor(1978)给出的正常花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ ($6 \sim 10$)范围之内, 但却高于幔源火成岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($5.5 \sim 7$) (牟保磊, 1988), 这暗示房山岩体可能源于下地壳。

实验岩石学研究表明, 由地幔橄辉岩直接熔融而衍生花岗质岩浆的可能性极小(Green *et al.*, 1980; Defant *et al.*, 1990), 所以, 虽然房山岩体中酸性岩的物质来源与 EM I 型富集地幔关系密切, 但可能并不是直接来源于富集地幔的部分熔融。尽管区域内也存在早侏罗世幔源玄武质岩浆活动, 如房山岩体附近出露的起源于富集型地幔部分熔融的南大岭组玄武岩(图1, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.5 \sim -5.2$, 李晓勇等, 2004),

但受其微量元素地球化学特征(Yb 和 Y 含量较高,平均值分别为 2.74 ppm 和 28.29 ppm; Sr 平均含量仅 996 ppm; La/Yb 和 Sr/Y 平均比值分别为 20.77 和 35.21 (汪洋等, 1994) 的制约, 很难用玄武质岩浆的分离结晶或岩浆混合来解释具亏损重稀土元素 Yb (0.45 ~ 1.66 ppm) 和 Y (6.44 ~ 15.60 ppm)、高 Sr 含量 (1113 ~ 1640 ppm)、高 La/Yb (20.58 ~ 148.89)、 Sr/Y (74.77 ~ 221.89) 比值等独特地球化学特征的房山岩体岩石的成因。

根据房山岩体氧同位素和钾长石铅同位素特征推测其岩浆来源与下地壳有关, 那么房山岩体岩石是否起源于华北克拉通古老下地壳呢? 从 $\epsilon_{Nd}(t)-I_{Sr}$ 图解(图 10) 来看, 房山岩体岩石的投影点离 Jahn 等 (1999) 所归纳出的中朝古老下地壳区域甚远, 而正好落在汉诺坝二辉麻粒岩包体范围内 (张国辉等, 1998)。现有的研究已经确证, 汉诺坝二辉麻粒岩包体是由幔源基性岩浆在晚古生代-中生代底侵到下地壳底部构成的年青下地壳的一部分 (樊祺诚, 1996, 1998, 2001; 张国辉等, 1998)。新生代时被汉诺坝玄武岩浆以包体形式带到了地表。由此可以推测房山岩体岩浆并非来自于古老的华北下地壳, 而可能是中生代或更早时期由幔源玄武质岩浆底侵作用增生于华北古老下地壳底部的、新生的年青基性下地壳部分熔融形成的。据翟明国等 (2002) 研究, 现在华北克拉通最下部古老地壳的部分或大部分已被中生代新生的下地壳置换, 这暗示在华北克拉通底部由幔源玄武质岩浆的底侵作用形成的、新的年青下地壳已经较为普遍地存在。这就为房山岩体的岩浆直接来自年青的基性麻粒岩下地壳提供了前提条件。由于中生代华北克拉通岩石圈地幔为富集型 (Yan *et al.*, 2000a, b; 蔡剑辉等 2004; 路凤香等 2005), 故不难解释由富集型幔源玄武质岩浆底侵形成的基性下地壳在较高压力 (如地壳加厚条件) 下发生部分熔融形成的房山侵入岩同时带有富集地幔和下地壳物质的印记。

6.2 房山岩体形成的过程和机制

房山岩体的形成过程大致上可以分为两个阶段:

第一阶段: 由于上地幔软流体 (层) 的上涌, 导致岩石圈下部富集地幔部分熔融形成带有富集地幔同位素和微量元素印记的玄武质岩浆, 该岩浆底侵到下地壳底部, 冷凝成为古老下地壳的一部分。根据近年来在太行山南段平顺县西安里 (蔡新平, 1981)、太行山北段涞源 (常兆山等, 1998; 蔡剑辉等, 2003)、北京地区的南大岭 (汪洋等, 1994; 李晓勇等, 2004)、八达岭复式岩体 (王焰等, 2001; 钱青等, 2002) 以及内蒙古喀喇沁旗 (邵济安等, 1999) 等地都发现有早中生代幔源玄武质岩浆活动, 同时在燕辽—阴山地区也发现大量的早中生代的碱性岩浆活动 (阎国翰等, 2000; 2002) 的事实, 推测该阶段可能发生于早中生代。

第二阶段: 主要发生于中生代晚期, 该阶段华北地台区岩浆活动达到高潮, 当时上地幔软流体 (层) 以蘑菇云式大规模上涌 (路凤香等, 2000), 热侵蚀面已抬升到壳—幔过渡带,

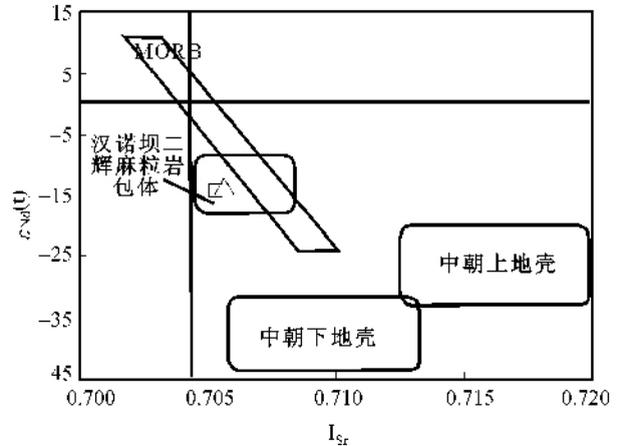


图 10 房山岩体 $\epsilon_{Nd}(t)-I_{Sr}$ 图解

(图例同图 4; 图中汉诺坝二辉麻粒岩的范围据张国辉等, 1998; 中朝下地壳、中朝上地壳的范围据 Jahn *et al.*, 1999)

Fig. 10 diagram of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} for the granitoids from the Fangshan complex

导致早中生代新底侵的带有富集地幔同位素和微量元素印记的玄武质地壳在榴辉岩—麻粒岩相条件下发生部分熔融, 形成 C 型埃达克岩浆 (或称高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩浆 (Atherton *et al.*, 1993; Martin, 1999; 张旗等, 2003), 因为这种岩石是经过下地壳这个中间环节再次部分熔融形成的产物, 所以, 房山岩体侵入岩必然兼具富集地幔和下地壳的同位素和微量元素特征。

7 结论

(1) 房山岩体主期花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得的年龄为 130.7 ± 1.4 Ma, 应属于早白垩世。根据区域资料推测, 第一期石英闪长岩可能形成于晚侏罗世。

(2) 根据房山岩体侵入岩常量、微量、稀土元素、同位素及构造环境特征, 发现房山岩体属于 C 型埃达克岩 (或也称为高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩) 体。

(3) 根据房山岩体铈、钕、铅同位素特征, 并结合前人关于该岩体的碳、氢、氧同位素的研究成果, 认为房山岩体物质来源较深, 主要与岩石圈下部富集地幔及下地壳关系密切。

(4) 房山岩体虽然带有富集地幔的同位素和微量元素特征, 但并非直接来自地幔, 而可能是经过年青基性下地壳这个中间环节再次部分熔融而形成, 为此提出房山岩体的两阶段成因模式。

致谢 诚挚地感谢审稿人为本文提出了宝贵的意见和建议, 使笔者获益匪浅。也感谢中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室乔广生、张任祜、许荣华和储著银在同位素测试方面的帮助。

References

- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144–146
- Cai JH, Yan GH and 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 (in Chinese with English abstract)
- Cai JH, Yan GH and Xiao CT *et al.* 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt and their source region. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1225–1242 (in Chinese with English abstract)
- Cai XP. 1981. Trial discussion on tectonic implication of Mesozoic-Cenozoic igneous rock assemblage, petrochemical characteristics and magma evolution in North China block. Master Dissertation of Peking University. (in Chinese with English abstract)
- Chang ZS, Feng ZY and Chen TL. 1998. The geological characteristics and origin of the Yaogou hornblendeite, Hebei Province. In: Department of Geology, Peking University (eds.). Collected works of international symposium on geological science held at Peking University, Beijing China. Beijing: Seismological Press, 615–623 (in Chinese with English abstract)
- Chi JS, Lu FX, Zhao L *et al.* 1996. Kimberlite and Paleozoic lithospheric mantle of North China Platform. Beijing. Sciences Press: 215–275. (in Chinese with English abstract)
- Compston W, Williams IS, Mayer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a Sensitive High Resolution Ion Microprobe. Proc. XIV Lunar Planetary Science Conference. J. Geophys. Res., 89(suppl.): B525–B534
- Compston W, Williams IS, Kirschvink JL, Zhang ZC, Ma GG. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *J. Geol. Soc. London*, 149: 171–184
- Defant MJ, Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Defant MJ, Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted Lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547–550
- Fan QC, Liu RX, Li HM *et al.* 1998. The Zirconite Chronology of granulite axnolith in Hannuoba. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133–137 (in Chinese)
- Fan QC and Liu RX. 1996. The High temperature granulite axnolith from basalts in Hannuoba. *Chinese Science Bulletin*, 41(3): 235–238 (in Chinese)
- Fan QC, Sui JL and 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 (in Chinese with English abstract)
- Ge XY, Li XH, Chen ZG *et al.* 2002. The geochemical characteristics and petrogenesis of Yanshanian high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks in eastern China: constraints on the thickness of crust in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474–480 (in Chinese)
- Green TH. 1980. Island arc and continent-building magmatism: A review for petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63: 367–385
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*. 309: 753–757
- He ZL. 1935. The granite intrusive from the Western Mountain. The state-run central academia sinica cluster publishes, 5. Beijing (in Chinese)
- Hong DW, Xie XL, Zhang JS. 1999. An exploration on the composition, nature and evolution of Mid-lower crust in south China based on the Sm-Nd isotopic data of granites. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 361–371 (in Chinese with English abstract)
- Huang FS, Jiang CY. 1985. Geological and geochemical characteristics of Fangshan complex and discussion on its genesis. *Journal of Xi'an Engineering university*, 3: 13–21 (in Chinese)
- Jahn BM, Wu FY and Luo CH *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusion of the northern Dabie complex, central China. *Chem. Geol.* 157: 119–146
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A Chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27(3): 745–750
- Li CN. 1992. Petrology of trace element of igneous. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences (in Chinese)
- Li P, Dai TM, Qiu CY *et al.* 1964. Report on absolute ages of rocks and minerals using K-Ar method. *Scientia Geologica Sinica* (1): 24–34 (in Chinese)
- Li WP, Li XH and Lu FX. 2001. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, northeaster China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 523–532 (in Chinese with English abstract)
- Li XY, Fan WM and Guo F. 2004. Modification of the lithospheric mantle beneath the north China Block by Paleo-Asian Ocean: Geochemical evidence from mafic volcanic rocks of the Nandaling Formation in Xishan area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 557–566 (in Chinese with English abstract)
- Lu FX, Zheng JP, Li WP *et al.* 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the "Mushroom cloud" model. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing). 7(1): 97–107 (in Chinese with English abstract)
- Lu FX, Zheng JP and Zhang RS *et al.* 2005. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton. *Earth Science Frontier*, 12(1): 61–67 (in Chinese with English abstract)
- Ma CQ. 1988. The intrusions and magma kinetic mechanism of compositional zoning of stock of Zhoukuodian, Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 4: 329–341 (in Chinese)
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753–756
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Mu BL, Jiang PM, Zeng YS *et al.* 1988. : 92–104. Beijing: Publishing House of Peking University (in Chinese)
- 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*, 18(3): 275–292
- Qiu JX, Li CN, Zeng GC *et al.* 1993. Alkaline rocks in Qinglin and Dabashan. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Shao JA, Han QJ, Zhang LQ *et al.* 1999. Found of the xenoliths from Early Mesozoic accumulative complex in the eastern Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44(5): 478–485 (in Chinese)
- Sheppard S M F and Epstein S. 1970. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 9: 232–239
- Shu GM, Huang FS. 1991. Characteristics of dioritic inclusions in Fangshan complex and discussion on its genesis. In: Li ZT (eds.). The thesis gathers about the North China granites and its mineralization. Beijing: Geological Publishing House: 139–147 (in Chinese)
- Song B, Zhang Y H, Wan Y S. 2002. Mounting and analytical procedure of zircon SHRIMP dating. *Geol. Rev.*, 48: 26–30 (in Chinese with English abstract)

- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes. In : Saundern A. D. and Norry M. J. (eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Pub. ,42 : 313 - 345
- Tan DJ, Lin JQ, Shan XL. 1999. Genesis of alkaline volcanic-intrusive complex in Saima-Bolinchuan. *Geological Review* , 45(suppl.) : 474 - 481
- Taylor HP. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. *Earth Plan. Sci. Lett.* , 38 : 177 - 210
- Wang DZ, Ren QJ, Qiu JS. 1996. Characteristics of volcanic rocks from shoshonite province in eastern China and its mineralization. *Acta Geologica Sinica*. 70(1) : 23 - 34
- Wang SP. 1950. Petrogenesis study on the Fangshan intrusions. *Geological Review* , 15 : 13 - 32
- Wang SS. 1982. Collection of the 2th national symposium of isotopic geochemistry. Beijing : Seismic Publishing House (in Chinese)
- Wang Y, Zhang Q. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China : composition , geochemical characteristics and its implications. *Acta Petrologica Sinica* , 17(4) : 533 - 540 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Sun JS. 1994. Trace elements characteristics and genesis of basalts in the early Jurassic Nandaling Formation , Western Hills , Beijing. *Beijing Geology* , 4 : 16 - 24
- Yan GH, Mu BL, Xu BL *et al.* 1995. Geochemical characteristics of trace elements and the genesis of the dioritic inclusions in Fangshan complex. *Science in China(Series B)* , 25(2) : 219 - 224
- Yan GH, Mu BL, Xu BL *et al.* 2000a. Triassic alkaline intrusive in the Yanliao-Yinshan area : their chronology , Sr , Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. *Science in China(Series D)* , 30(4) : 383 - 387(in Chinese)
- Yan GH, Mu BL, Xu BL *et al.* 2002. Characteristics and implications of Sr , Nd , Pb isotopes in Mesozoic alkaline-rich intrusive in North China and their chronology. *Geological Review* , 48(suppl.) : 69 - 77(in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Xu BL and Mu BL *et al.* 2000b. Alkaline intrusive at the East foot of the Taihang-Da Hinggan Mountains : chronology , Sr , Nd and Pb isotopic characteristics and their implications. *Acta Geologica Sinica*. 74(4) : 774 - 781
- Yang ZW. 1928. Zhoukoudian granite in the Western Mountain of Beijing. *Academical record of Geology department of Peking University* , 3 (in Chinese)
- Ying JF and Zhou XH. 2001. Characterization of trace elements and Sr , Nd isotopes of carbonatites in the western Shandong province. *Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry* , 20(4) : 309 - 312(in Chinese with English abstract)
- Zartman RZ and Doe BR. 1981. Plumbotectonic-the model. *Tectonophys.* 75 : 135 - 162
- Zhai MG and Fan QC. 2002. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton : anorogenic mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica* , 18(1) : 1 - 8(in Chinese with English abstract)
- Zhang DQ. 1981. Characteristics of dioritic inclusions of Fangshan intrusion and discussion on its genesis. *Geology Review* , 27 : 143 - 149 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GH, Zhou XH and Sun M *et al.* 1998. Sr , Nd and Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts , Hebei Province , and their implications for geologic processes. *Acta Petrologica Sinica* , 14(2) : 190 - 197(in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y and Qian Q *et al.* 2001a. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica* , 17(2) : 236 - 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, and Wang YL. 2001b. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshan Period : Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. *Acta Petrologica Sinica* , 17(4) : 505 - 513 (in Chinese with English abstract)
- Zheng SC, Huang FS, Jiang CY *et al.* 1987. The oxygen , hydrogen and carbon isotopes studies of Fangshan granite. *Acta Petrologica Sinica* , 3(1) : 13 - 21 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 14 : 493 - 571
- ### 附中文参考文献
- 蔡剑辉 阎国翰 常兆山 王晓芳 邵宏翔 储著银. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报* , 19(1) : 81 - 92
- 蔡剑辉 阎国翰 肖成东等. 2004. 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及物质来源探讨. *岩石学报* , 20(5) : 1225 - 1242
- 蔡新平. 1981. 试论华北断块区中-新生代岩浆岩组合、岩石化学特征及岩浆演化规律的大地构造意义. 北京大学硕士论文
- 常兆山 冯钟燕 陈廷礼. 1998. 河北涞源窑沟超基性岩体的地质特征和成因. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京 地震出版社 615 - 624
- 池际尚 路凤香 赵磊等. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京 科学出版社 215 - 275
- 樊祺诚 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报* , 41(3) : 235 - 238
- 樊祺诚 刘若新 李惠民等. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. *科学通报* , 43(2) : 133 - 137
- 樊祺诚 隋建立 刘若新等. 2001. 汉诺坝榴辉岩石榴石岩-岩浆底侵作用新证据. *岩石学报* , 17(1) : 1 - 6
- 葛小月 李献华 陈志刚 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因 : 对中国东部的壳厚度的制约. *科学通报* , 47(6) : 474 - 480
- 何作霖. 1935. 西山花岗岩侵入体. 国立中央研究院丛刊 , 北平 5
- 洪大卫 谢锡林 张季生. 1999. 从花岗岩的 Sm-Nd 同位素探讨华南中下地壳的组成、性质和演化. *高校地质学报* , 5(4) : 361 - 371
- 黄福生 姜常义. 1985. 房山岩体的地质 - 地球化学特征及其成因探讨. *西安地质学院学报* , 3(7) : 13 - 32
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉 中国地质大学出版社
- 李璞 戴瞳谟 邱纯一等. 1964. 钾-氩测定岩石矿物绝对年龄数据报导. *地质科学* , 1 : 24 - 34
- 李伍平 李献华 路凤香. 2001. 辽西中侏罗世高 Sr 的 Y 型火山岩的成因及其地质意义. *岩石学报* , 17(4) : 523 - 532
- 路凤香 郑建平 李伍平等. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式 : “蘑菇云”型. *地学前缘(中国地质大学 , 北京)* , 7(1) : 97 - 107
- 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(1) : 61 - 67
- 马昌前. 1988. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理. *地质学报* , 4 : 329 - 341
- 牟保磊 江培谟 曾贻善等. 1988. 矾山杂岩体磷-铁矿床. 北京大学出版社 92 - 104
- 钱青 钟孙霖等. 2002. 八达岭基性岩和高 Sr-Ba 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(3): 275-292
- 邱家骧, 李昌年, 曾广策等. 1993. 秦巴碱性岩. 北京: 地质出版社: 136-154
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥等. 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩体捕虏体的发现. 科学通报, 44(5): 478-485
- 舒桂明, 黄福生. 1991. 房山岩体闪长质包体的特征及成因探讨. 中国北方花岗岩及其成矿作用论文集. 李之彤主编. 地质出版社. 139-147
- 宋彪, 张玉海, 万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品把制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊) 26-30
- 松尾禎士. 1985. 地幔中挥发分的分布及其化学形式. 地震地质译丛, 7(3): 25-29
- 谭东娟, 林景仟, 单玄龙. 1999. 赛马-柏林川碱性火山-侵入杂岩成因. 地质论评, 45(增刊) 474-481
- 王德滋, 任启江, 邱检生. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1): 23-34
- 王松山. 1982. 第二届全国同位素地球化学会议汇编
- 王述平. 1950. 房山侵入体岩石成因研究. 地质论评, 15: 13-32
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗杂岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(4): 533-540
- 汪洋, 孙金声. 1994. 北京西山早侏罗世南大岭组玄武岩微量元素特征及成因. 北京地质, 4: 16-24
- 阎国翰, 许保良, 牟保磊. 1995. 房山岩体中闪长质包体的矿物稀土元素地球化学及其包体成因. 中国科学(B 辑), 25(2): 219-224
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良等. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学特征及意义. 中国科学(D 辑), 30(4): 383-387
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良等. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其意义. 地质论评, 48(增刊) 69-77
- 杨增威. 1928. 北京西山周口店花岗岩. 北京大学地质系学会志, 第三卷
- 英基丰, 周新华. 2001. 鲁西地区中生代火成碳酸盐类的微量元素和锶钨同位素地球化学. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 309-312
- 翟明国, 樊祺诚. 2002. 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, 18(1): 1-8
- 张国辉, 周新华, 孙敏等. 1998. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 14: 190-197
- 张旗, 王焰, 钱青等. 2001a. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 张旗, 王焰, 钱青等. 2001b. 燕山期的中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. 岩石学报, 17(4): 505-513
- 张旗, 王焰, 刘洪涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景. 地学前缘, 10: 385-400
- 郑斯成, 黄福生, 姜常义等. 1987. 房山花岗岩体氧氢碳同位素研究. 岩石学报, 3: 13-21