

张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用

孙德有¹ 吴福元¹ 林强¹ 路孝平²

SUN DeYou, WU FuYuan, LIN Qiang and LU XiaoPing

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 吉林省地质调查局区域地质矿产调查研究所, 长春 130022.

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Institute of Regional Geology and Mineral Resources Survey of Jilin Province, Changchun 130022, China.

2000-03-14 收稿, 2000-07-15 改回.

Sun DY, Wu FY, Lin Q and Lu XP. 2001. Petrogenesis and crust-mantle interaction of early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguangcai Range. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 227-235

Abstract The Baishishan pluton, located in Zhangguangcai Range, NE China, has a whole-rock-mineral Rb-Sr isochron of 196 ± 4 Ma, which suggests that this pluton emplaced at early stage of Mesozoic Yanshanian period, but not the Indosinian as previously thought. The rocks and their dioritic enclaves are characterized by low I_{Sr} (≈ 0.705) and positive $\epsilon_{Nd}(t)$ ($+1.7 \sim +2.2$), suggesting that the generation of this pluton was closely related to the mantle. The detail studies of geology, petrology and geochemistry conclude that the pluton was the mixing product of crustal- and mantle-derived magmas. The dioritic enclaves were the quenched fragment of mantle-derived magma when it entered the host granitic magma, whose source was mainly a newly formed juvenile crust. Dynamic analyses indicate that, after the collision of North China and Siberian Cratons, the subduction of eastern ocean plate and the following lithospheric delamination resulted in the upwelling of asthenospheric mantle and the underplating of mantle-derived magma, which led to the partial melting of pre-existed and juvenile crusts and following the mixing of these different magmas. The underplated juvenile crust was formed in the post-orogenic evolution of Xing'an Mongolian Orogenic Belt. Therefore, the Palaeozoic-Mesozoic was a main stage of crust growth in this region, and at the same time, this crustal growth was conducted in vertical tectonic regime.

Key words Crust-mantle interaction, Crustal growth, Early Yanshanian, Baishishan pluton, Zhangguangcai Range.

摘要 出露于东北地区张广才岭的白石山岩体, 其全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 196 ± 4 Ma, 表明形成于中生代的燕山早期, 而非传统认识上的印支期。岩体主岩和闪长质包体均具有低 I_{Sr} (≈ 0.705) 和正 $\epsilon_{Nd}(t)$ ($+1.7 \sim +2.2$) 值的特点, 反映岩体成因与地幔具有密切的联系。地质学、岩石学和地球化学的详细研究表明该岩体具有壳幔混合成因, 闪长质包体是较基性的地幔岩浆进入主岩浆中淬火结晶而成, 花岗岩岩浆的源区主要为新生的地壳物质。动力学分析表明, 本区在华北板块和西伯利亚板块碰撞拼合后, 由于东侧大洋板块的俯冲及后续的岩石圈折沉效应, 导致软流圈地幔上隆及幔源岩浆的板底垫托, 并进而造成先存和新生地壳的部分熔融和不同源区岩浆的混合作用。底垫的新生地壳是兴蒙造山带造山后晚期形成的。因此, 古生代-中生代是本区地壳生长的重要时期, 且这种地壳生长是在垂向构造机制下进行的。

关键词 壳-幔相互作用; 地壳增生; 燕山早期; 白石山岩体; 张广才岭

中图分类号 P588.121

横亘中国北方的北疆-兴蒙造山带中出露大面积显生宙花岗岩, 近年来有关其成因及以此来探讨地壳增生时间和方式的研究引起了有关学者的广泛关注 (Wu *et al.*, 1998; 吴福元等, 1999; 韩宝福等, 1998)。同时中国东部晚中生代时期

的壳幔相互作用及地球动力学过程也一直是地质学家研究的重要问题 (邓晋福等, 1996; 林强等, 1998; 吴福元和孙德有, 1999)。张广才岭位于兴蒙造山带的东段, 是显生宙花岗岩极为发育的地区。近几年来该区地质研究的突出进展是确

• 国家自然科学基金(49872031)、高等学校博士点基金(951087)、教育部优秀青年教师基金资助项目。

第一作者简介: 孙德有, 男, 1965 年出生, 博士, 副教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业。

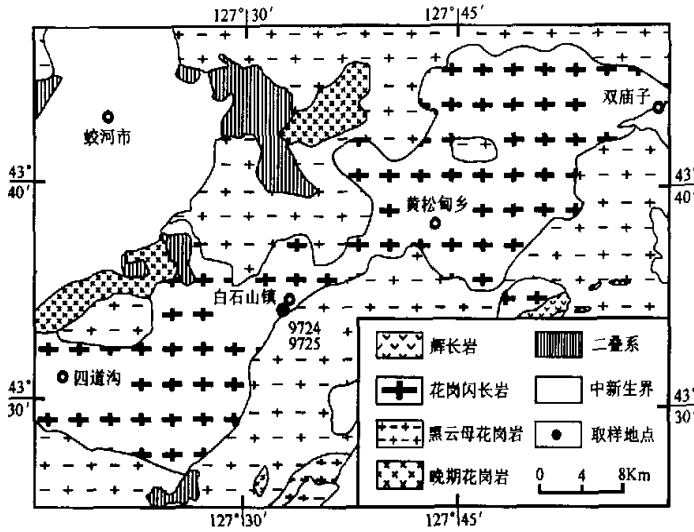


图1 白石山岩体地质略图(根据1:20万地质图^①修编)
Fig. 1 Simplified geological map of Baishishan pluton

定出大面积印支期花岗岩的存在(方文昌,1992;黑龙江省地矿局,1993),但大多数岩体的同位素年龄还有待于进一步确定(吴福元等,1999)。同时,对这些花岗岩形成的动力学背景还存在认识上的分歧(黑龙江省地矿局,1993;赵春荆等,1996)。然而作者最近的研究结果却显示,除少数岩体的年龄有待于进一步确定外,该区原定的印支期花岗岩大多形成于早-中侏罗世,属于更广泛的中国东部中生代构造-岩浆岩带的一部分(吴福元等,1998,1999)。因此,白石山岩体,作为该期花岗岩的典型代表,其时代的准确厘定和成因研究对确定中国东部燕山早期大地构造演化和壳幔相互作用具有十分重要的意义。

1 地质-岩石学特征

白石山岩体位于吉林省蛟河市白石山镇一带,岩体延长大于60 km,岩体两端宽为18~20 km,中部窄为2~4 km,呈近东西向哑铃形带状展布^①。主要岩性为灰白色中细粒-中粒角闪黑云母花岗岩闪长岩,局部地段见有石英闪长岩。岩体边缘细、中心粗,其内分布有大量(含量约10%~15%)的暗色微粒-细粒闪长质包体。岩体外围被稍晚的黑云母花岗岩、黑云母花岗岩闪长岩环绕,在岩体的东部有一些辉长岩岩体^②(图1)。岩体具有片麻状构造,但产状多变,片麻理由暗色矿物角闪石、黑云母定向排列及拉长定向的暗色闪长质包体组成。闪长质包体形态多样,如椭圆形、透镜状、倒水滴状、长条状等,最大者达24×15cm²,小者为2×1cm²。片麻理面上闪长岩包体长宽比为6:1~2:1,垂直线理面上包体长宽比为2:1~1.5:1。虽然岩石片麻理构造十分发育,但显微镜下

观察不论主岩还是包体,其矿物均不见变形现象,这说明岩体的片麻理并非构造变形成因,而是岩浆就位时形成的原生片麻理构造。

1.1 花岗岩闪长岩

岩石呈灰白色,新鲜无蚀变,中细粒-中粒半自形结构,片麻状构造。主要由斜长石(35%~40%)+石英(20%~25%)+黑云母(10%~12%)+角闪石(5%~8%)+钾长石(10%~15%)组成。副矿物有绿帘石、褐帘石、锆石、榍石、磁铁矿、磷灰石等,其总含量约2%。斜长石:半自形板状,An=20~25(费氏台测定),聚片双晶、卡钠联合双晶、环带结构发育,基本无蚀变,多为2~3mm,大者5mm。石英:0.2~4mm不等,多为不规则填隙状。角闪石:黄绿色自形柱状0.3~1.5mm,化学成分属钙质角闪石。黑云母:黄褐-淡黄色多色性,片状0.4~1.5mm,少数发生轻微的绿泥石化。钾长石:淡红色,主要为不规则的板状晶体,粒度多为5mm,少数达9mm。常包裹较多的斜长石、黑云母、角闪石及副矿物,与斜长石接触边界处常出现交代蠕虫结构,这些特点说明钾长石结晶结束较晚。褐帘石呈褐红色,可见环带结构。磷灰石呈短柱状,最大长宽比为6:1。

1.2 闪长质包体

黑色,微粒-细粒半自形结构,片麻状构造。主要由斜长石(45%~50%)+黑云母(30%~35%)+角闪石(10%~

^① 吉林省地质矿产局,1981.蛟河县幅1:20万区域地质调查报告。

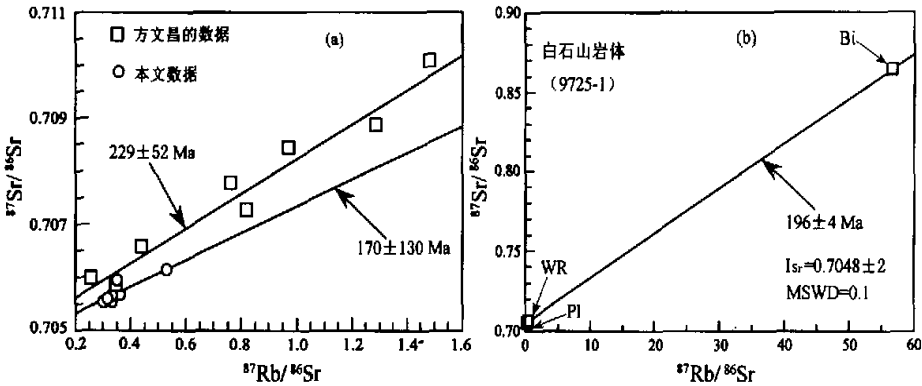


图2 白石山岩体全岩 (a) 与矿物 (b) Rb-Sr 等时线
Fig.2 Rb-Sr isochrons of whole-rock (a) and minerals (b) of Baishishan pluton

15%)组成,有少量石英($\leq 5\%$)和钾长石($< 5\%$),副矿物有磁铁矿、榍石、绿帘石和磷灰石等。斜长石:半自形长条板状者为主,0.2~0.5mm,发育聚片双晶、卡钠联合双晶,An=32~35(费氏台测定),偶见环带结构,有的斜长石包裹了小片状黑云母。石英为不规则填隙状(0.1~0.2mm);角闪石:黄绿色柱状,长约0.2~0.7mm,长宽比可达10:1~13:1。黑云母呈片状0.1~0.3mm,黄褐-淡黄色多色性。磷灰石为针柱状,长宽比可达13:1。值得注意的是某些闪长质包体中存在大颗粒斜长石和石英捕虏晶,斜长石捕虏晶与寄主岩石中斜长石特点一致,粒径为1.5~3mm,边缘多不平整或呈圆滑现象,且具有明显的内核(An=23)和外环(An=31)(费氏台测定),二者间由一个熔蚀环界线分开,内核蚀变明显、包体矿物多,而外环干净无蚀变。有的斜长石甚至能见到两个熔蚀环。石英捕虏晶(1~2mm)的特点与寄主岩石中的石英一致,表明为闪长质岩浆从寄主岩石中捕获的晶体。

此外,在闪长岩包体中还见有角闪岩暗色斑点,大小约2~6mm,主要由角闪石+黑云母组成,其成因有待于进一步研究。

2 岩体形成时代

据1:20万区调报告(吉林地矿局,1981),白石山岩体侵入晚二叠世地层,并在晚侏罗世地层中见有该岩体的砾石,黑云母K-Ar年龄为190Ma。尽管如此其仍被确定为海西晚期第二侵入期。李之彤等在该岩体的不同露头上取样测得Rb-Sr全岩等时线年龄为227±20Ma(方文昌,1992),因而被确定为印支期。但由于样品采自不同位置,难以保证其同源性,且经作者对原数据用ISOPLOT程序重新处理后发现,由于所有全岩样品具有大体近似的Rb/Sr比值,使该等时线成为一条误差等时线(图2a)。因此,该年龄值得怀疑。

鉴于此,笔者在白石山镇南采石场采集了该岩体的主岩和细粒闪长岩包体,对其中2件包体、4件主岩和主岩中的矿物黑云母、斜长石进行了Rb,Sr同位素测定,结果列于表1。

等时线年龄计算应用Ludwig(1990)的ISOPLOT程序,年龄误差用 2σ ,输入的误差为: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 2\%$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.05\%$ 。结果5个全岩不构成等时线(图2a),而采用全岩(9725-1)和其单矿物黑云母、斜长石的Rb-Sr内部等时线处理,获得的年龄是196±4Ma, $I_{\text{Sr}} = 0.7048 \pm 2$,MSWD = 0.1(图2b)。由于该岩石未遭受任何后期蚀变,因此该年龄应代表黑云母的冷却年龄。同时,最近由澳大利亚科廷技术大学S. Wilde教授对该岩石进行的锆石U-Pb离子探针分析,获得190±4Ma的年龄(面告),该年龄应代表岩体侵位年龄。由此可见白石山岩体既非形成于海西期,也不属于印支期,而是形成于早侏罗世的燕山期。

3 岩体的地球化学特征

白石山岩体的主元素、微量元素和稀土元素含量列于表2和表3。

3.1 主元素

主岩的SiO₂含量为67.4%~68.8%,TiO₂=0.4%~0.6%,Al₂O₃=15.6%~16.0%,FeO* = 2.6%~3.1%,MgO=1.0%~1.2%,CaO=3.0%~3.4%,Na₂O=4.3%~5.0%,K₂O=2.4%~2.9%, $\sigma = 1.96 \sim 2.14$,CIPW标准矿物偶见刚玉和透辉石,且含量均小于1,无橄榄石。而闪长质包体的SiO₂=55.1%~57.9%,TiO₂=1.1%~1.4%,Al₂O₃=17.2%~19.1%,FeO* = 5.3%~7.3%,MgO=2.1%~3.6%,CaO=5.0%~6.1%,Na₂O=4.8%~5.4%,K₂O=2.0%~2.6%, $\sigma = 3.74 \sim 4.94$,CIPW标准矿物不出现刚玉而出现透辉石和橄榄石(表2)。

表1 白石山岩体 Sr、Nd 同位素分析结果

Table 1 Sr and Nd isotopic compositions of Baishishan pluton

样品号	白-1	9724-1	9724-2	9725-1	9725-1	9725-1	9725-2	9725-3	9725-5
岩石名称	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	斜长石	黑云母	花岗闪长岩	闪长岩包体	闪长岩包体
Rb($\mu\text{g/g}$)	60.03	62.92	61.08	60.36	30.51	448.1	66.75	64.92	103.7
Sr($\mu\text{g/g}$)	549.4	508.8	526.4	528.9	767.4	22.92	546.5	616.8	565.4
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.3164	0.3580	0.3360	0.3305	0.1151	56.59	0.3537	0.3048	0.5309
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.705574	0.705689	0.705552	0.705632	0.705109	0.864432	0.705916	0.705546	0.706115
$2\sigma_m$	18	12	17	14	12	33	18	13	13
I_{Sr}	0.7047	0.7047	0.7046	0.7047	0.7048	0.7051	0.7049	0.7047	0.7046
Sm($\mu\text{g/g}$)	3.494	3.306		3.115				5.584	4.123
Nd($\mu\text{g/g}$)	19.480	19.280		17.071				32.059	22.770
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1085	0.1037		0.1104				0.1054	0.1095
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512609	0.512603		0.512611				0.512626	0.51264
$2\sigma_m$	7	5		6				8	14
$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	784	758		795				737	746
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	1.64	1.65		1.64				2.05	2.22

注: 测试工作由中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成。参数计算方法参见吴福元等(1997)。

表2 白石山岩体主要元素分析数据及 CIPW 标准矿物计算结果(%)

Table 2 The major element compositions and CIPW modal minerals of Baishishan pluton

样品号	9724-2	9724-1	9725-1	白-1	9725-2	9724-4	9725-3	9725-4	9725-5
岩性	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	闪长质包体	闪长质包体	闪长质包体	闪长质包体
SiO ₂	68.82	68.44	67.74	67.39	67.40	55.12	57.85	55.56	55.50
TiO ₂	0.43	0.49	0.52	0.55	0.54	1.41	1.05	1.12	1.21
Al ₂ O ₃	15.69	15.59	15.89	16.00	15.93	17.18	18.85	17.87	19.08
Fe ₂ O ₃	0.68	0.80	0.83	0.94	0.81	2.33	1.65	1.91	1.52
FeO	2.02	2.18	2.30	2.15	2.38	5.18	3.85	5.43	4.92
FeO*	2.63	2.90	3.05	3.00	3.11	7.28	5.33	7.15	6.29
MnO	0.10	0.10	0.11	0.09	0.10	0.25	0.16	0.25	0.17
MgO	0.95	1.07	1.13	1.14	1.16	3.64	2.12	3.59	2.83
CaO	3.02	3.11	3.35	3.42	3.36	6.07	5.43	4.98	4.95
Na ₂ O	4.31	4.38	4.46	4.77	4.50	4.80	5.41	4.90	5.24
K ₂ O	2.92	2.68	2.60	2.44	2.72	2.20	2.04	2.56	2.62
P ₂ O ₅	0.13	0.16	0.17	0.18	0.18	0.44	0.36	0.34	0.38
H ₂ O ⁻	0.55	0.65	0.55	0.60	0.56	1.21	0.78	1.27	1.09
H ₂ O ⁺	0.21	0.15	0.23	0.23	0.19	0.29	0.21	0.24	0.23
LOI	0.21	0.17	0.23	0.40	0.23	0.60	0.35	0.62	0.44
Total	99.93	99.90	99.98	99.98	99.93	99.86	99.90	99.81	99.88
σ	2.02	1.96	2.01	2.13	2.14	4.04	3.74	4.43	4.94
ACNK	1.00	0.99	0.98	0.96	0.97	0.81	0.90	0.90	0.93
Q	24.08	23.89	22.34	21.06	21.30	0.78	3.64	0.00	0.00
Or	17.43	16.01	15.52	14.57	16.24	13.19	12.22	15.37	15.75
Ab	36.77	37.39	38.04	40.69	38.39	41.14	46.29	42.04	45.00
An	14.36	14.65	15.76	15.14	15.34	19.06	21.35	19.45	21.09
Di	0.00	0.00	0.01	0.76	0.36	7.23	3.12	2.96	1.32
Hy	5.04	5.44	5.75	4.95	5.77	11.50	8.15	13.62	7.86
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	3.56
C	0.21	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	1.00	1.17	1.21	1.38	1.19	3.43	2.42	2.81	2.24
Il	0.82	0.94	1.00	1.05	1.04	2.72	2.02	2.16	2.34
Ap	0.29	0.35	0.37	0.40	0.40	0.97	0.80	0.75	0.84

注: 数据由湖北地质实验测试中心采用 XRF 方法测定, FeO 和 Fe₂O₃ 由传统湿法分析。

表3 白石山岩体微量元素和稀土元素分析数据($\mu\text{g/g}$)

Table 3 The trace and REE data of Baishishan pluton

样品号	9724-2	9724-1	9725-1	白-1	9725-2	9724-4	9725-3	9725-4	9725-5
岩性	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	闪长岩包体	闪长岩包体	闪长岩包体	闪长岩包体
Ba	847.68	989.90	573.99	455.16	557.40	325.20	393.26	360.55	350.17
Rb	43.35	98.98	59.24	48.24	62.33	90.31	64.91	116.08	89.48
Sr	403.95	630.87	542.72	405.28	540.87	454.38	605.29	477.82	548.00
Zr	111.37	120.16	121.78	174.12	122.92	187.95	191.60	134.33	247.31
Nb	5.43	7.00	4.64	7.92	5.13	24.89	15.45	9.41	13.96
Th	4.14	6.83	5.02	7.47	6.15	6.92	8.69	3.66	9.25
Ga	18.44	22.74	18.78	20.12	18.49	28.57	27.70	28.89	26.79
V	41.49	45.35	56.02	49.35	47.89	138.92	96.52	147.53	96.41
Cr	29.34	36.66	2.01	26.49	2.09	未分析	21.31	未分析	23.14
Hf	3.14	3.14	4.28	4.86	4.13	6.16	6.42	3.41	6.60
Cs	2.68	3.08	1.36	3.03	1.36	10.77	2.05	7.02	4.57
Ta	0.50	0.76	0.73	0.76	0.72	1.72	1.07	0.35	0.81
Be	1.57	1.72	1.97	1.69	1.68	2.88	2.55	2.41	2.45
U	1.87	1.10	1.99	1.76	1.29	3.77	2.98	1.35	2.54
Ti	2422.13	1754.38	4552.69	3265.29	4715.25	8578.42	8275.96	6750.51	6882.64
La	12.59	25.13	14.87	23.07	21.93	32.01	34.88	18.70	23.73
Ce	27.49	51.17	33.44	37.17	44.39	96.19	77.97	41.09	55.25
Pr	3.22	5.97	4.25	5.39	5.18	12.72	8.90	4.79	6.04
Nd	13.81	22.58	18.57	22.54	20.91	49.56	33.36	18.26	25.75
Sm	2.55	4.10	3.75	3.76	3.92	9.56	5.26	3.55	4.47
Eu	0.88	1.10	0.99	1.11	0.97	2.44	1.52	0.98	1.28
Gd	1.92	3.25	2.79	2.63	2.89	7.50	4.69	2.90	3.51
Tb	0.26	0.47	0.40	0.36	0.40	0.98	0.56	0.36	0.48
Dy	1.30	2.45	2.16	1.78	2.20	5.24	3.00	1.94	2.31
Ho	0.24	0.47	0.38	0.32	0.39	0.95	0.49	0.35	0.42
Er	0.67	1.34	0.87	0.90	0.88	2.50	1.23	0.91	1.17
Tm	0.10	0.21	0.15	0.13	0.15	0.37	0.21	0.14	0.17
Yb	0.65	1.36	0.84	0.81	0.85	2.43	1.25	0.83	1.09
Lu	0.10	0.21	0.13	0.13	0.13	0.40	0.20	0.15	0.18
Y	6.99	13.78	11.23	9.31	11.86	27.39	15.09	9.86	12.51
ΣREE	72.78	133.59	94.82	109.41	117.05	250.26	188.61	104.79	136.36
Eu*	1.17	0.89	0.89	1.02	0.84	0.85	0.92	0.90	0.95

注:数据由中国科学院广州地球化学研究所用 ICP-MS 方法测定。

3.2 微量元素

主岩相对包体岩石富集 Ba, 贫 Zr、Nb、V、Ga、Hf、U、Ti 等(表 3)。在蛛网图上它们均具有相同的曲线分布型式(图 3),特别是表现为亏损 Nb、Ta、P、Ti,说明岩浆经历了含磷、钛等矿物的分离结晶作用,但同时表明岩浆为地壳来源或曾受到地壳物质的强烈混染。

3.3 稀土元素

主岩的 $\Sigma\text{REE}=72.8\sim 133.6$ 、 $\text{Eu}^*=0.84\sim 1.17$ 。包体岩石的 $\Sigma\text{REE}=104.8\sim 250.3$ 、 $\text{Eu}^*=0.85\sim 0.95$ (表 2)。稀土元素配分型式均为轻稀土富集的右倾型式,基本无 Eu 异常,包体岩石与主岩的型式一致,但包体岩石的稀土含量较

高(图 4),这可能是主岩曾发生过富稀土矿物或稀土元素分配系数大于 1 的矿物的分离结晶作用的结果。

4 岩石成因—岩浆混合作用

由于岩石中出现较多的角闪石、榍石、磁铁矿等矿物,且 CIPW 标准矿物中出现 Di 和 $C<1$,同时 $\text{ANCK}\leq 1$ 、 $I_s<0.707$,所有这些都表明白石山岩体具有 I 型花岗岩的特点。

前已述及,白石山岩体含有大量微粒-细粒闪长岩包体,包体中发育针柱状角闪石和磷灰石,其长宽比可达 13:1。这种针状角闪石、磷灰石的存在是岩浆快速冷凝淬火的重要矿物学标志(Vernon,1984,1990,1991;Hibbard,1991;Sparks *et al.*, 1986)。并且包体岩石中含有来自主岩的大颗粒斜长

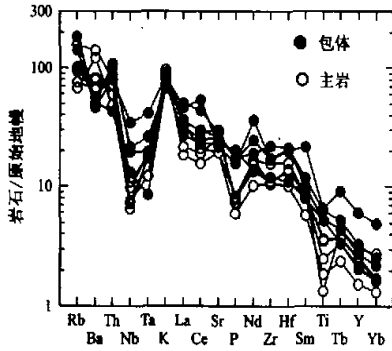


图3 白石山岩体微量元素原始地幔标准化图
(标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element patterns of rocks from Baishishan pluton

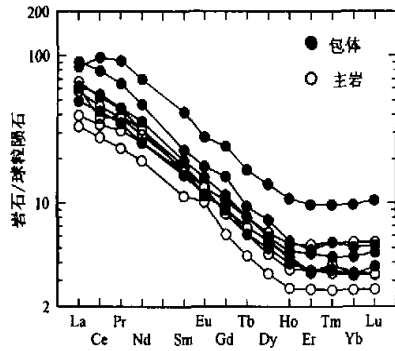


图4 白石山岩体稀土元素配分型式图

(标准化值为 Leedy 的数值除 1.2, Masuda et al., 1973)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of rocks from Baishishan pluton

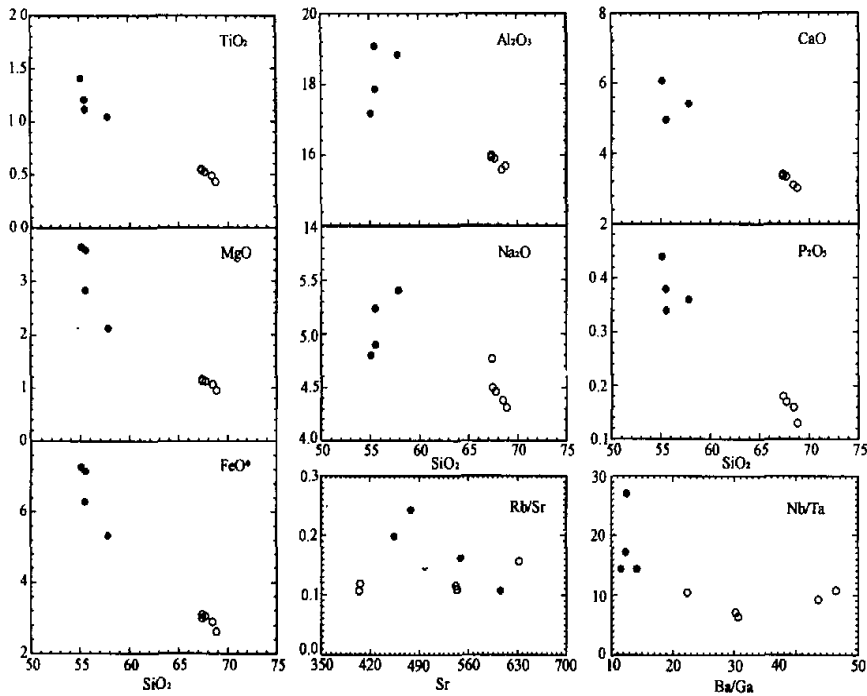


图5 白石山岩体化学成分变异图

● 闪长质包体 ○ 花岗闪长岩(主岩) (图中氧化物为%, Sr 为 μg/g)

Fig. 5 The chemical compositional variations of Baishishan pluton

石和石英捕虏晶,其中斜长石捕虏晶具有熔蚀环,熔蚀环内侧号码低($An=23$),外侧号码高($An=31$)且与包体中非捕虏晶斜长石号码($An=32\sim 35$)相近,由此表明这种具有反环带结构和熔蚀环的斜长石,内核应为寄主岩浆结晶的产物,而外环则是主岩中斜长石被温度较高的闪长质岩浆捕获,边缘熔蚀后再生长的产物。上述特征表明形成闪长岩包体和花岗闪长岩主岩的是两种岩浆,温度较高偏基性的闪长质岩浆

进入到温度相对较低偏酸性的花岗质岩浆中时发生了淬火作用,同时因其温度较高熔蚀了从主岩浆中捕获的斜长石等矿物,其后的结晶作用在熔蚀环的外侧又生长出号码较高的斜长石。

地球化学特点也表明包体与主岩的非同源性。在化学成分变异图解上(图5),主岩和包体具有明显的成分间断和各自不同或相同的演化趋势,虽然这种关系受到样品的空间位

置和数量的限制,但结合地质学和岩石学特征,表明它们可能是来自不同源区的两种岩浆,其较基性岩浆来源于地幔,而中酸性的花岗岩岩浆应来源于深部地壳。在 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 、 $\text{FeO}^*\text{-CaO-P}_2\text{O}_5$ 等图解上包体和主岩还构成线性关系,而在 Nb/Ta-Ba/Ga 和 Sr-Rb/Sr 图解上,它们又具有不同的演化趋势或曲线演化关系(图 5),表明两种岩浆的相对独立性及二者间的混合作用过程,同时混合的岩浆又经历了分离结晶作用,即岩浆的演化经历了 AFC 过程,从而使闪长质包体和主岩显示出某些地球化学特征的相似性。尽管有少数研究显示花岗岩中的包体具有与寄主岩石不同的同位素组成(Holden *et al.*, 1987; Eberz *et al.*, 1990)。但白石山岩体的同位素分析结果显示,主岩和包体并没有明显的同位素组成差异,而是具有相同的 Sr、Nd 同位素组成(表 1),表明岩浆混合过程中同位素与其它主、微量元素具有不同的扩散系数,即 Sr、Nd 同位素具有很大的扩散系数,容易均一化;且由于质量效应,岩石的同位素组成主要继承花岗岩岩浆同位素特点,这一点已被众多的研究所证实(Pin *et al.*, 1990; Fourcade and Javoy, 1991; Elburg, 1996)。因此,形成白石山岩体的酸性岩浆应具有低的 I_{Sr} (≈ 0.705) 和高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($+1.7 \sim +2.2$) 值。然而,具有这样特点的岩浆不可能仅仅由亏损地幔来源的岩浆和来自古老地壳物质部分熔融形成的岩浆的简单混合,因为计算表明这样则需要 80%~90% 以上地幔物质的参与。所以,这一特征要求该岩浆源区物质主要应是刚从地幔中分离出不久的新生地壳,并由其和原有古老地壳物质部分熔融产生的岩浆与来自亏损地幔岩浆相互混合,才能形成具有上述 Sr、Nd 同位素特点的白石山岩体。

5 地球动力学过程与壳幔相互作用

在东北地区,华北板块与西伯利亚板块至少在二叠纪时已碰撞拼合成一体,这已为众多研究者所公认(赵春荆等, 1996; 李锦轶, 1998; 吴福元和曹林, 1999)。但白石山岩体的形成时代约为 190 Ma 左右,明显与古亚洲构造域的演化无关,而应属中国东部燕山期岩浆活动的一部分。但关于中国东部特别是东北地区东部该时期大面积岩浆活动产生的构造机制目前存在众多争论(任纪舜等, 1990; 邓晋福等, 1996; 陶奎元, 1998; 李武显和周新民, 1999)。而形成于早侏罗世的白石山岩体标志着在张广才岭乃至中国东北地区燕山运动至少在 190 Ma 左右即已开始。岩体锆石和 Rb-Sr 矿物内部等时线年龄、黑云母 K/Ar 年龄的基本一致,说明岩浆结晶冷却速度较快。但根据不同学者提出的角闪石压力计(Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Schmidt, 1992)计算岩体的侵位深度,结果表明,花岗闪长岩结晶压力为 0.35~0.40 GPa,即侵位深度约为 11~13 km 左右。在这样的深度下,岩体不应有较快的冷却速度,这只能说明岩体曾经历过快速的抬升剥蚀过程。而目前的研究发现,

地壳的快速抬升剥蚀多发生在造山后岩石圈的拆沉崩塌时期(Platt, 1993; Kay and Kay, 1993),活动大陆边缘岩浆弧型花岗岩基的形成也与此机制有关(Pitcher, 1993)。

因此,从本文的研究结果推论,燕山早期由于东侧大洋板块的俯冲作用使本区岩石圈加厚,引起岩石圈板块的拆沉,从而导致大规模的软流圈地幔上隆,大量幔源岩浆下垫于地壳底部,并导致先存底垫物质(新生地壳)和原有老地壳的部分熔融形成花岗岩岩浆,这种幔源岩浆与先存底垫物质和原有老地壳部分熔融形成的花岗岩岩浆相互混合及结晶作用形成目前本文讨论的白石山岩体。

6 白石山岩体成因与显生宙地壳增生

关于陆壳的形成时间大多认为是在早前寒武纪,在 1000 Ma 以后的时间里地壳的增长量可以忽略不计,并且陆壳的生长主要是通过汇聚板块边界上的岩浆作用完成的(Taylor and McLennan, 1995; 吴福元, 1999c),而白石山岩体的研究却揭示出另一种完全不同的情况。研究显示该岩体具有复杂的成因演化过程,部分物质在花岗岩形成时的中生代直接来自地幔,另一部分物质则来自古老地壳,但主体岩浆源区物质应是刚从地幔中分离出不久的新生地壳。结合与此区相邻的兴蒙造山带中其它地区花岗岩具有类似的情形(Wu *et al.*, 1998; 韩宝福等, 1998),该新生地壳可能是晚古生代该造山带造山后晚期因岩石圈伸展作用而形成的岩浆底垫作用产物,因而反映出该区晚古生代以来的显著地壳增生。岩体岩石所具有的年轻 Nd 模式年龄(740~800 Ma)代表了原有的老地壳和新生的年轻地壳物质及地幔的混合平均年龄。上述推论暗示,这种地壳增生主要和岩石圈拆沉背景下的拉张作用有关,是垂向体制下幔源岩浆板底垫托作用的结果,而传统认为的地壳大多形成于早前寒武纪和通过岛弧环境下的岩浆作用而实现的观点需要重新加以认识和修正。

7 结论

本文通过深入的同位素年代学研究,确定出露于张广才岭的白石山岩体形成于 190 Ma 左右,属燕山早期。地质学、岩石学和地球化学的详细研究表明该岩体具有壳幔混合成因,微粒-细粒闪长质包体是较基性的地幔岩浆进入主岩浆中淬火结晶而成。岩体经历了快速抬升剥蚀过程,这是由于东侧大洋板块的俯冲及后续的岩石圈拆沉效应,导致地幔上隆及幔源岩浆板底垫托的结果。地幔上隆及幔源岩浆的板底垫托造成古老地壳和新生地壳的部分熔融,由此所形成的花岗岩岩浆与来自地幔的底垫岩浆发生混合作用。年轻的 Nd 模式年龄显示古生代-中生代也是本区地壳垂向生长的重要时期。

References

- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue *et al.* 1996. Continental Roots-plume Tectonics of China — Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House. 5—55 (in Chinese)
- Eberz G W, Noholls I A, Maas R, McCulloch M T and Whiteford D J. 1990. The Nd- and Sr-isotopic compositions of I-type microgranitoid enclaves and their host rocks from the Swifts Creek pluton, southeast Australia. *Chem. Geol.*, 85: 119—134
- Elburg M A. 1996. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton Granodiorite, Lachlan Fold belt, Australia. *Lithos.*, 38: 1—22
- Fang Wenchang. 1992. The Granitoids and Their Mineralizations in Jilin Province. Changchun: Jilin Publishing House of Science and Technology, 12—215 (in Chinese)
- Fourcade S and Javoy M. 1991. Sr-Nd-O isotopic features of mafic microgranular enclaves and host granites from the Pyrenees, France: Evidence for their hybrid nature and inference on their origin. In: *Enclaves and Granite Petrology*, ed. by J. Didier and B. Barbarin, Elsevier, Amsterdam, 345—364
- Hammarstrom J M, Zen E. 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Am. Mineral.*, 71: 1297—1313
- Han Baofu, He Guoqi and Wang Shiguang. 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in North Xinjiang. *Geological Review*, 44(4): 396—405 (in Chinese with English abstract)
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province* (in Chinese with English abstract). Beijing: Geological Publishing House, 347—418
- Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In: *Enclaves and Granite Petrology*, ed. by J. Didier and B. Barbarin, Elsevier, Amsterdam, 431—444
- Holden P, Halliday A N and Stephens W E. 1987. Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. *Nature*, 330: 53—56
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Am. Mineral.*, 72: 231—239
- Kay R W and Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177—189
- Li Jinyi. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339—347 (in Chinese with English abstract)
- Li Wuxian and Zhou Xinmin. 1999. Preliminary study on subduction zone in southeastern China. *J. Univ. Geol.*, 5: 164—169 (in Chinese with English abstract)
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou, Wu Fuyuan *et al.* 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in Northeastern China. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 129—137 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K R. 1990. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic isotopes data, for IBM-PC compatible computers. USGS Open-file report 88—557, Version 2.12, 31pp
- Masuda A, Nakamura N and Tanaka T. 1973. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37: 239—244
- Pin C, Binin M, Belin J M, Barbarin B and Clemens J D. 1990. Origin of microgranular enclaves in granitoids: Equivocal Sr-Nd evidence from Hercynian rocks in the Massif Central (France). *J. Geophys. Res.*, 95 (B11): 17821—17828
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite*. Blackie Academic & Professional, 321pp
- Platt J P and England P C. 1993. Convective removal of lithosphere beneath mountain belts: Thermal and mechanical consequences. *Am. J. Sci.*, 293: 307—336
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, Liu Zhigang and Liu Fengren. 1990. Lithospheric Tectonic Evolution and Mineralization in Eastern China and Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 73—103 (in Chinese)
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-hornblende barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 111: 304—310
- Sparks R S J and Marshall L A. 1986. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 29: 99—124
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Saunders AD and Norry MJ (ed.), Magmatism in Ocean Basins*. *Geol. Soc. Pub.*, 42: 313—345
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Yang Zhuliang *et al.* 1998. Mesozoic petro-tectonic associations and records of the geodynamic processes in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 183—192 (in Chinese with English abstract)
- Taylor S and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33: 241—265
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves: Globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature*, 304: 483
- Vernon R H. 1991. Interpretation of microstructures of microgranitoid enclaves. In: *Enclaves and Granite Petrology*, ed. by J. Didier and B. Barbarin, Elsevier, Amsterdam, 277—291
- Vernon R H. 1990. Crystallization and hybridism in microgranitoid enclave magma: Microstructural evidence. *J. Geophys. Res.*, 95(B11): 17849—17859
- Wu Fuyuan and Cao Lin. 1999. Some important problems of Geology in Northeastern Asia. *World Geology*, 18(2): 1—13 (in Chinese)
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China. *J. Changchun Univ. Sci. Tech.*, 29(4): 313—318 (in Chinese with English abstract)
- Wu Fuyuan, Jahn Bor-ming and Lin Qiang. 1998. Isotopic characteristics of the postorogenic granites in orogenic belt of

- northern China and their implications in crustal growth. *Chinese Sci. Bull.*, 43: 420-424
- Wu Fuyuan, Lin Qiang, Ge Wenchun and Sun Deyou. 1998. The petrogenesis and age of Xinhuatun pluton in Zhangguangcailing. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17: 226-234 (in Chinese with English abstract)
- Wu Fuyuan, Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181-187 (in Chinese with English abstract)
- Wu Fuyuan. 1999. Formation time and mechanism of continental crust. In: *Chemical Geodynamics*, Y. F. Zheng (ed.), Beijing: Science Press, 224-261 (in Chinese)
- Zhao Chunjing, Peng Yujing, Dang Zengxin, Zhang Yunping *et al.* 1996. Tectonic framework and crust evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces. Shenyang, Liaoning University Press: 67-136 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学等. 1996. 中国大陆根-柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 5-55
- 方文昌. 1992. 吉林省花岗岩类及成矿作用. 长春: 吉林科学技术出版社, 12-215
- 韩宝福, 何国琦, 王式沈. 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长. *地质论评*, 44(4): 396-406
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 347-418
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. *地质论评*, 44(4): 339-347
- 李武显, 周新民. 1999. 中国东南部晚中生代俯冲带探索. *高校地质学报*, 5: 164-169
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元等. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. *地质科学*, 33(2): 129-137
- 任纪舜, 陈廷恩, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 73-103
- 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良等. 1998. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录. *地学前缘*, 5(4): 183-192
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质理论问题. *世界地质*, 18(2): 1-13
- 吴福元, 林强, 葛文春, 孙德有. 1998. 张广才岭新华火岩体的形成时代与成因研究. *岩石矿物学杂志*, 17(3): 226-234
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2): 181-189
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4): 313-318
- 吴福元. 1999. 大陆地壳的形成时间及增生机制. 见: 郑永飞主编, *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 224-261
- 赵春荆, 彭玉麟, 党增欣, 张允平等. 1996. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社: 67-136