

苏鲁造山带五莲新元古代花岗岩类成因的 Sr Nd 同位素证据

薛怀民, 刘福来, 孟繁聪

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 五莲新元古代花岗岩类分布于五莲断裂以北, 动力变形强, 但变质程度弱, 仅达到绿片岩相。岩性以黑云正长花岗岩为主, 少数为石英正长质。岩石中 Sr 同位素初始值的变化范围很广, 从 0.697 306~0.753 765。除了部分是由于源区的不均一或多源不同比例混合外, 岩浆侵位过程中或固结后的次生扰动可能也起着一定的作用。而它们的 $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})$ 均为负值且变化范围广(-3.1~-24.3), Nd 同位素二阶段模式年龄从 1.7~3.4 Ga, 均显示它们的源区以古老的地壳为主, 但具有多源混合的特征。推测五莲新元古代花岗岩类最可能的成因是太古代的 TTG 片麻岩(主要是其中的英云闪长质组分)在压力约 0.8 GPa(相当于~25 km 的中下地壳)条件下发生部分熔融, 并混入了不同比例的年轻地幔来源物质。地幔来源物质的加入对于五莲新元古代花岗岩类的成因有重要的影响。

关键词: 花岗岩类; Sr Nd 同位素; 部分熔融; 五莲; 苏鲁造山带。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2006)04-0497-08

收稿日期: 2006-04-08

Petrogenesis of Neoproterozoic Granitoids from the Wulian Region in the Sulu Orogen: Sr Nd Isotopic Constraints

XUE Huai min, LIU Fu lai, MENG Fan cong

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

Abstract: The Neoproterozoic granitoids in Wulian region are located north of the Wulian fault. They have undergone strong dynamic deformation but are slightly metamorphosed (green schist facies). The granitoids are mainly biotite syenogranitic in composition with minor quartz syenitic. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (I_{Sr}) are wide, ranging from 0.697 306 to 0.753 765. This may partially be ascribed to the inhomogeneity of magma source material or multi source mixing with different proportions. Secondary disturbed after the granitic body's intrusion and concretion may also play a role, to some degree. The $\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$ values of the granitoids are all lower than 0 and with wide ranges (-3.1 to -24.3), and the model ages (T_{DM}) of two stages ranges from 1.7 to 3.4 Ga. This indicates that the parental magma of the Neoproterozoic granitoids in the Wulian region was primarily derived from crustal materials but with the mixed features of multi sources. Therefore, the Neoproterozoic granitoids in Wulian have most probably been generated by partial melting of Archaean TTG gneisses (major tonalitic component thereinto) at pressures of about 0.8 GPa (i. e. within the middle or the lower crust), and the addition of different proportions of mantle derived juvenile materials. The addition of mantle derived materials has been an important influence on the genesis of the Neoproterozoic granitoids in the Wulian region.

Key words: granitoid; Sr and Nd isotope; partial melting; Wulian; Sulu orogen.

苏鲁-大别造山带内广泛分布有新元古代的变质花岗岩类, 据统计, 它们占了造山带内整个片麻岩

出露面积的 70%~80%(Zhai *et al.*, 1994; 郑祥身等, 1999; Xue *et al.*, 2001; 薛怀民等, 2005a), 成分包括奥长花岗质、二长花岗质、碱长花岗质、花岗闪长质以及英云闪长质等多种类型。但由于造山带内的这些花岗岩类普遍遭受过超高压变质及随后退变质作用的改造, 原岩的地球化学特征已发生了不同程度的改变, 为讨论扬子板块北缘晚元古代大规模岩浆作用特征、成因、岩浆作用的构造背景与动力学机制等带来诸多不便。近几年, 在造山带北缘的山东五莲和安徽北淮阳地区(周建波等, 2001; 薛怀民等, 2005b; 黄洁等, 2005) 陆续发现了一些原属扬子基底的浅变质岩块, 它们是扬子板块三叠纪向华北板块俯冲过程中被刮削下来的构造岩块。五莲新元古代花岗岩类与苏鲁超高压变质带内的正片麻岩在岩石组合和形成时代上均有可比性。虽然动力变形较强, 但变质程度微弱, 仅达到绿片岩相。这些浅变质的扬子板块基底岩块不仅为研究扬子板块北缘新元古代的岩浆作用提供了直接研究对象, 对于恢复超高压变质杂岩的原岩性质、研究超高压变质作用过程中元素的地球化学行为也提供了难得的参照物。本文主要是研究五莲杂岩中片麻岩的 Sr、Nd 同位素组成特征, 探讨岩浆的成因。

1 区域地质背景

在苏鲁造山带的五莲断裂以北发育了一套浅变质(总体为绿片岩相)杂岩, 包括变质花岗岩类、变质中基性岩(岩性以斜长角闪岩为主)、变质沉积岩(石英岩-千枚岩-大理岩组合)等, 各套岩石组合之间多为断层接触, 在以前的地质文献中统称为五莲群。该杂岩并非连续的变质岩系, 而是呈大小不等的断块沿五莲断裂呈 NE 向断续分布, 宽 10~14 km, 主体长约 20 km, 向西南端(莒南县桑园附近) 断续延伸至郯庐断裂边(图 1)。

对于这套浅变质岩系的时代, 赵达等(1995)在五莲杂岩上部的石英岩和大理岩中发现有丰富的管孔藻, 类似于三峡地区陡山沱组和灯影组中的化石, 认为时代为震旦纪—早寒武世。Zhou *et al.* (2003) 测得杂岩中变质花岗岩类的锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 (672 ± 4) Ma、 (742 ± 9) Ma 和 (747 ± 14) Ma。Wu *et al.* (2004) 用 LA-ICP-MS 对锆石 U-Pb 原位定年获得 (738 ± 10) Ma ~ (758 ± 5) Ma 的结果。据此, 五莲杂岩的时代总体可限定为晚元古代, 这也成为五莲杂岩归属于扬子基底的主要证据之一。

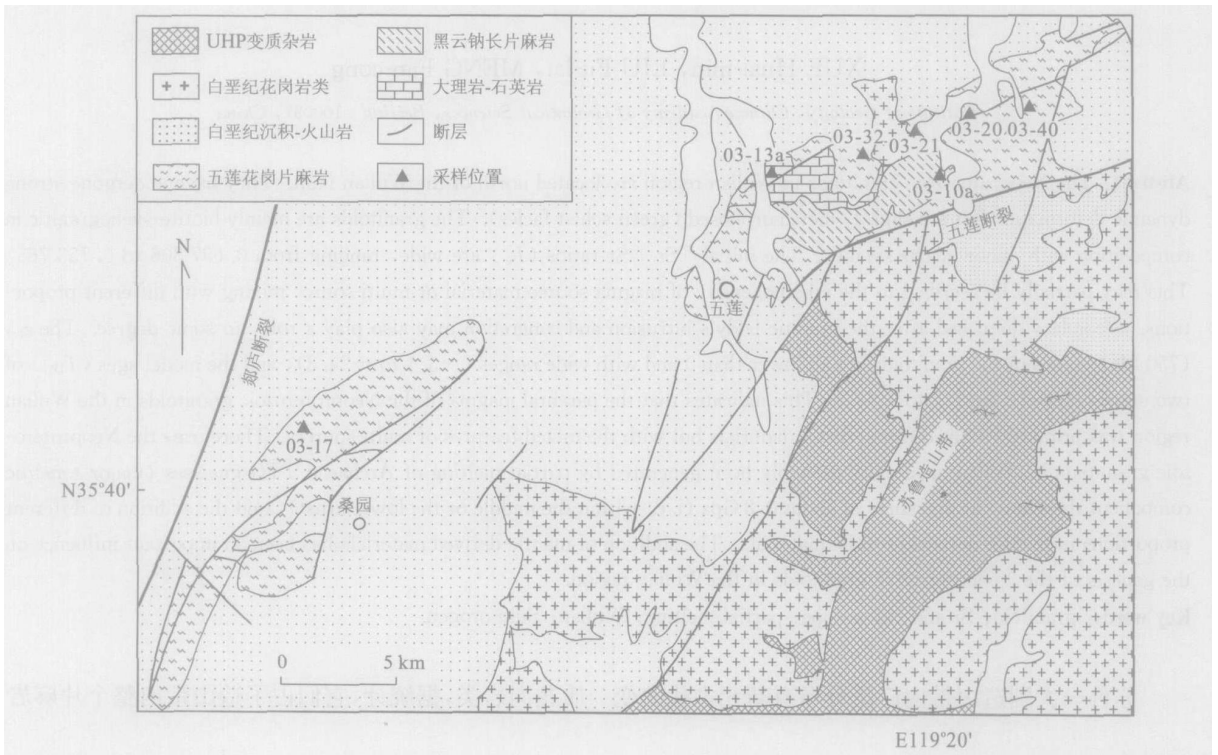


图 1 五莲地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Wulian

2 岩石地球化学特征概况

五莲新元古代花岗岩类以黑云正长花岗岩为主, 少数为石英正长岩. 在石英(Q)与碱性长石(A)和斜长石(P)三角分类图解上, 它们主要介于正长花岗岩与碱性花岗岩分界线附近, 演化趋势介于 Lameyre and Bonin(1991)的强碱性和适度碱性之间(图 2a). 它们在岩石化学上普遍表现为富碱、高 K₂O、低 MgO 和强烈贫 CaO 的特征. 与 SiO₂ 含量类似的普通花岗岩类相比, 五莲地区新元古代花岗岩类的 CaO 含量要低 1% 以上. 从图 2b 可见, 除极少数样品为亚铝质外, 大多数样品表现出明显过铝的特性. 这些花岗岩类具有低 Nb 和 Y 含量、相对高 La/Yb 和 Th/Yb 比, 在微量元素构造环境判别图上均投影在大陆边缘岩浆弧范围内(图 2c, 2d), 地球化学特征总体与太古代后的岩浆弧花岗岩类(Martin, 1993, 1994)具可比性. 此外, 五莲新元古代花岗岩类所表现出的较强的轻、重稀土元素分馏程度、明显的负 Eu 异常以及平坦的重稀土元素模式(图 2e)也类似于现代的活动大陆边

缘钙碱性花岗岩类, 如美国加利福尼亚 Cascades 地区的酸性火成岩(Borg and Clyne, 1998).

在原始地幔标准化蛛网图上, 五莲新元古代花岗岩类均表现出强烈亏损 P 和 Sr 的特征. 高场强元素 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta 的特征不尽相同, 其中 Ti、Nb、Ta 呈显著的负异常, Zr、Hf 虽然在部分样品中也表现出一定程度的负异常, 但大多数样品无异常甚至明显的正异常(图 2f), 这可归因于锆石的结晶分异(薛怀民等, 2005b). 岩石中强烈亏损 Sr 和显著的负 Eu 异常部分可归因于斜长石的分离结晶, 明显的 P 负异常指示磷灰石和/或角闪石的分离可能也起着一定的影响作用, 而强烈的 Ti 负异常可用钛-磁铁矿的分离结晶加以解释.

3 Sr、Nd 同位素组成

3.1 样品描述与分析方法

样品 03-21 和 03-32 均为钾长花岗岩, 不等粒状结构, 弱片麻状构造, 主要矿物钾长石(~50%)呈大的他形晶, 内部常见不规则的出溶条

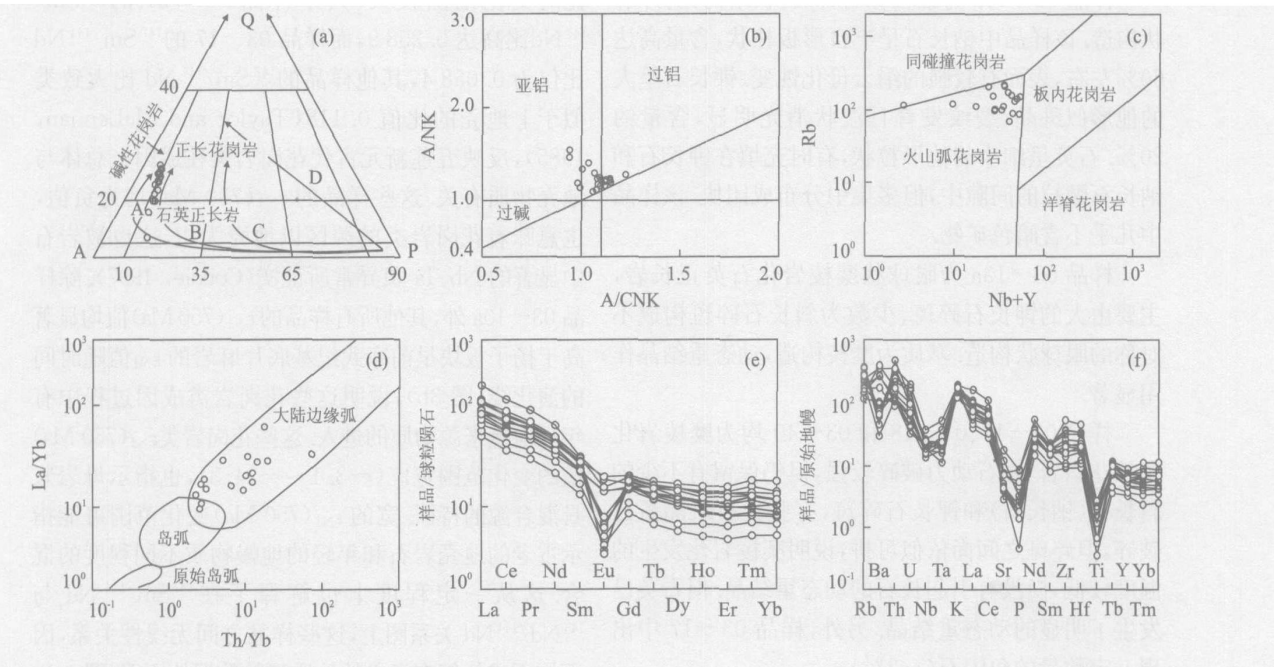


图 2 五莲片麻岩的地球化学成分图解

Fig. 2 Geochemical compositions of representative samples from the Wulian gneisses

a. 石英(Q) - 碱性长石(A) - 斜长石(P)三角分类图解(Le Maitre, 1989); b. A/NK A/CNK 关系图; c. (Nb+Y) Nb 构造环境判别图(Pearce et al., 1984); d. La/Yb ~ Th/Yb 判别图(Condie, 1989); e. 稀土元素球粒陨石标准化曲线(球粒陨石数值据 Boynton, 1984); f. 不相容元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔数值据 McDonough and Sun, 1995); 侵入岩系列的演化趋势据 Lameyre and Bonin(1991); A. 强碱性; B. 适度碱性; C. 二长质; D. 钙碱性. 资料来源: 薛怀民等(2005b); 黄洁等(2005)

表 1 五莲新元古代花岗岩类的 Rb Sr 和 Sm Nd 同位素组成

Table 1 Rb Sr and Sm Nd isotopic compositions of Neoproterozoic granitoids from Wulian

样号	03-13a	03-17	03-18	03-21	03-32	03-40	03-10a	03-20c
SiO ₂	64.79	69.73	64.48	74.20	73.71	73.24	73.60	75.46
Sm	8.467	4.841	31.24	15.37	8.127	7.596	0.674	1.332
Nd	46.68	50.15	141.3	35.94	40.16	41.12	4.77	6.884
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1098	0.0584	0.1339	0.2589	0.1225	0.1118	0.0856	0.1171
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(±2σ)	0.511703(10)	0.511799(10)	0.511590(13)	0.512054(15)	0.511605(11)	0.511189(15)	0.510848(18)	0.511596(19)
ε _{Nd} (750 Ma)	-9.9	-3.1	-14.5	-17.4	-13.1	-20.1	-24.3	-12.7
f _{Sm/Nd}	-0.44	-0.7	-0.32	0.32	-0.38	-0.43	-0.56	-0.4
Sr	365.9	51.67	66.74	91.29	82.98	123.6	306	121.7
Rb	90.93	129.2	90.12	176.8	161.5	99.11	119.2	149.3
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.7146	7.2193	3.8883	5.5788	5.6066	2.316	1.1187	3.5317
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(2σ)	0.714953(14)	0.777339(13)	0.746612	0.764793(15)	0.771502(15)	0.77944(13)	0.726098(13)	0.747204(15)
Sr(750 Ma)	0.707031	0.697306	0.703506	0.702946	0.709347	0.753765	0.714296	0.708052
T _{DM} (Ga)	2.1	1.3	3.0		2.6	2.9		2.4
T _{2DM} (Ga)	2.2	1.7	2.6	2.8	2.5	3.1	3.4	2.5

T_{DM}为相对于亏损地幔的单阶段演化的模式年龄; T_{2DM}为相对于平均陆壳的两阶段演化的模式年龄(t=750 Ma)。

带。斜长石(~25%)呈自形-半自形柱状,表面多已发生明显的绢云母化。石英(<25%)呈细小的他形粒状,边缘歪曲不规则,显示有一定程度的动态重结晶。暗色矿物为黑云母,在样品 03-21 中还出现角闪石,但含量均不高。

样品 03-10a 为细粒脉岩,似斑状结构,弱片麻状构造。该样品中钠长石呈半自形板柱状,含量高达 60%左右,表面有较强的绢云母化蚀变。钾长石呈大的他形似斑晶,裂纹发育且波状消光明显,含量约 20%。石英呈细小的他形粒状,有时充填在钾长石和钠长石颗粒的间隙中,但多集中分布成团块。该样品中几乎不含暗色矿物。

样品 03-13a 为眼球状糜棱岩化石英正长岩,主要由大的钾长石碎斑、少数为斜长石碎斑构成不对称的眼球状构造。基质为糜棱构造,动态重结晶作用显著。

样品 03-17、03-18 和 03-40 均为糜棱岩化二长花岗岩,岩石动力破碎较强,但仍保留有不少的斜长石(钠长石)和钾长石碎斑,有些长石斑晶虽已破碎,但碎斑之间尚依似可拼,说明糜棱岩化发生的温度较低,尚没有引起长石的动态重结晶。但石英已发生了明显的动态重结晶。另外,样品 03-17 中出现一定数量的角闪石(~2%)。

样品 03-20c 为二云二长糜棱岩,岩石中石英均已发生强的动态重结晶而呈长条状,原岩结构几乎没有保留,仅见少量的钾长石碎斑。片状矿物中出现 2 种云母,这在五莲新元古代花岗岩类样品中仅见。

Sm Nd 和 Rb Sr 同位素是在中国地质科学院地

质与地球物理研究所用常规方法测定的,具体流程参见 Cohen *et al.* (1988); Chavagnac and Jahn(1996)及 Jahn *et al.* (1996)的有关描述。分析结果列于表 1。

3.2 分析结果

表 1 可见,五莲新元古代花岗岩类¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比的变化范围较大,其中样品 03-21 的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比高达 0.2589,而样品 03-17 的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比仅为 0.0584,其他样品的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比大致类似于上地壳的比值 0.118(Taylor and McLennan, 1985),反映五莲新元古代花岗岩类在成因上总体与地壳物质有关。这些样品的 ε_{Nd}(750 Ma)均为负值,也意味着花岗岩类的源区以地壳为主,这也被岩石中显著的 Nb、Ta 负异常所证实(Condie, 1997)。除样品 03-10a 外,其他所有样品的 ε_{Nd}(750 Ma)值均显著高于扬子板块早前寒武纪基底片麻岩的 ε_{Nd} 值随时间的演化线(图 3b),说明这些花岗岩类成因过程中有年轻地幔来源物质的进入。这些花岗岩类 ε_{Nd}(750 Ma) 值的变化范围宽广(-3.1~-24.3),也指示母岩浆具混合源的特征。宽的 ε_{Nd}(750 Ma) 变化范围可能指示古老的地壳岩石和年轻的地幔物质不同程度的混合。这从一定程度上也解释了在¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 与¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 关系图上,这些样品之间无线性关系,因而构不成任何有意义的地质年龄数据的原因(图 3a)。

这些样品的 Nd 模式年龄 T_{DM} 也指示母岩浆中混合作用的存在。如各样品的单阶段模式年龄差别很大,且有 2 个样品不能获得合理的模式年龄,二阶段模式年龄的变化范围也很广,从 1.7~3.4 Ga (表 1)。其中最年轻的模式年龄(1.7Ga)对应的

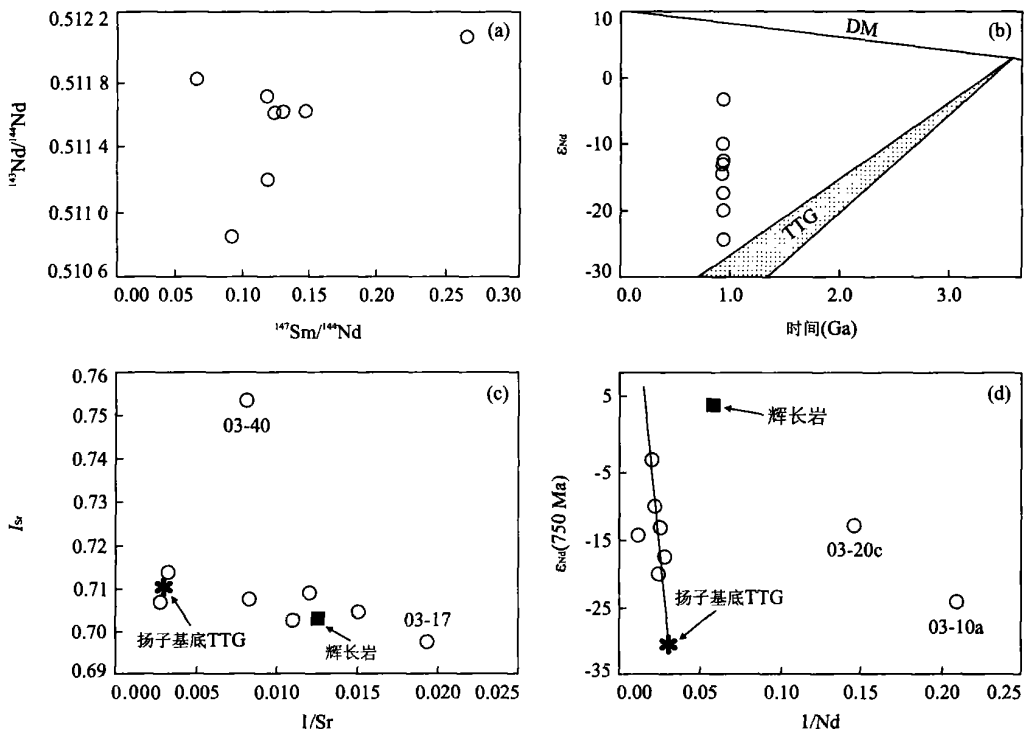


图 3 五莲新元古代花岗岩类的同位素组成

Fig. 3 Sr and Nd isotopic compositions of the Neoproterozoic granitoid from Wulian

a. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 关系图; b. Nd 同位素初始值投影在 ϵ_{Nd} - 时间演化图上(扬子基底 TTG 演化趋势据 Gao *et al.*, 1999); c. Sr 同位素初始值与 $1/\text{Sr}$ 关系图; d. Nd 同位素初始值与 $1/\text{Nd}$ 关系图. 扬子基底 TTG 片麻岩资料据 Gao *et al.* (1999)

$\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$ 值负得最小(- 3. 1), 而最大的模式年龄(3. 4 Ga) 对应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$ 值为 - 24. 3. 一种自然的解释是区内新元古代的花岗岩类主要是由太古代的中下地壳物质部分熔融形成的, 其中混合了不同比例的年轻地幔物质.

五莲地区新元古代花岗岩类 Sr 同位素初始值的变化范围也很大, 与具最大的 $\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$ 值相对应, 样品 03 - 17 的 I_{Sr} 值最低(0. 697 306), 不仅小于地幔岩的初始值(~ 0. 704), 甚至低于玄武质无球粒陨石的初始值(0. 698 97), 说明体系在岩浆侵位过程中或者结晶以后受到过次生扰动(黄洁等, 2005), 当然也可能是由于该样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比高(7. 2), 使计算所得到的 I_{Sr} 不确定性大(Chen *et al.*, 2004). 样品 03 - 40 比较特殊, 其 Sr 同位素初始值高达 0. 753 765, 具有中上地壳的同位素特征.

4 讨论

火山弧环境下高钾钙碱性中酸性岩浆的成因机制主要有 2 种: 一是镁铁质母岩浆(可能由地幔派

生)通过同化混染+分离结晶(AFC)或岩浆混合与大陆地壳相互作用; 另一种机制玄武质岩浆仅仅是为地壳物质的部分熔融提供热源, 相对硅质的岩浆可通过下地壳组分的脱水熔融及随后的分离结晶演化而来. 五莲地区新元古代花岗岩类低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值、普遍过铝的特性以及显著的 Nb、Ta 负异常都表明其岩浆源区以大陆地壳为主.

自然地, 源区物质必然比部分熔融所形成的母岩浆更富镁铁质而贫硅, 因此下地壳的镁铁质组分是五莲新元古代花岗岩类的一种可能源区. 但通常的玄武质岩石是亚铝型的, 大气降水或热液蚀变可使其中的 A/CNK 值($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 摩尔分子数) 显著增加(Koprubasi and Aldanmaz, 2004). Wyllie (1984) 的实验结果也表明, 变质玄武质组分的脱水熔融可形成花岗质岩浆, 并可通过 AFC 演化成高硅质的组分. 五莲地区新元古代花岗岩类平坦的重稀土元素模式(图 2e)和相对高的 Y 和 Yb 丰度, 指示部分熔融的残留相中不含石榴石. 而岩石中强的 Eu 和 Sr 负异常除部分可归因于斜长石的分离结晶(薛怀民等, 2005b)外, 其中最偏基

性的岩石也显示出明显的 Eu 和 Sr 负异常,说明部分熔融的残留相中有大量的斜长石存在. Rapp and Watson(1991)所作的无水熔融实验结果表明,高压下(≥ 1.5 Gpa) 镁铁质岩石脱水熔融所形成的熔体成分相当于高铝的奥长花岗质,残留相中不含斜长石而含大量的角闪石和石榴石. 当压力小于 0.8 Gpa 时,熔体中一般不出现石榴石而出现大量的斜长石. 在此压力条件下,无论水是饱和还是不饱和,所形成的熔体成分都是强过铝质的(Holloway and Burnham, 1972; Beard and Lofgren, 1991)而类似于本区的花岗岩类. 因此,区内新元古代花岗岩类的成因是在压力 ~ 0.8 Gpa, 大约相当于 25 km 深度的环境下由中、下地壳岩石部分熔融形成的.

但正如 Roberts and Clemens(1993)所指出的,蚀变玄武岩中的 K_2O 含量通常很低,并不适宜作为高 K 花岗岩类的源区. 他们进而认为高钾的 I 型花岗岩起源于变质的含水中性钙碱性岩. 另一方面, Corrol and Wyllie(1989)的实验结果表明,英云闪长质岩石的部分熔融可形成高钾的花岗质熔浆. 基于本区晚元古代可能具活动大陆边缘的构造属性(薛怀民等, 2006),我们认为受俯冲板片脱水交代的中、下地壳(~ 25 km) 太古代的 TTG 片麻岩(主要是其中的英云闪长质组分)是这些高钾 I 型花岗岩最可能的源区. 但花岗岩类中大的 $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})$ 变化范围($-3.1 \sim -24.3$)可能意味着这些古老的地壳岩石部分熔融过程中有不同比例的年轻地幔物质混入.

为具体估算这些花岗岩类形成过程中年轻的地幔物质加入比例,我们利用 Nd 和 Sr 同位素资料计算了地壳和地幔之间二元混合的关系. 计算结果表明,仅有部分样品点(03-13a, 03-32 和 03-20c)沿混合线分布,由这些点获得年轻地幔派生物质加入的比例大约 40%~50%(图 4). 至于其他点偏离二元混合线的原因,一种可能是这些花岗岩类的成因本身并不符合壳幔二元混合模型. 我们更倾向于认为岩浆侵位过程中或者结晶以后, Sr 同位素体系受到过次生扰动. 如果仅考虑混合过程中 Nd 同位素的组成特征,五莲新元古代花岗岩类形成过程中,年轻的地幔来源物质加入的比例为 10%~50%不等. 样品 03-17 可能包含了更多的地幔物质(70%),而样品 03-40 则继承的主要是中上地壳的同位素组成.

需要说明的是,所选地壳和地幔组成的不同对计算结果有较大的影响,我们检验了多种可能适合

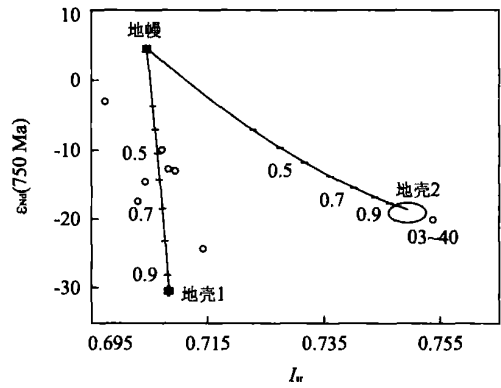


图 4 五莲新元古代花岗岩类的 $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})$ 与 I_{Sr} 关系图解

Fig. 4 $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})$ vs. I_{Sr} diagram showing mixing correlation between the presumed mantle component and crustal components for the Neoproterozoic granitoid from Wulian

将扬子地台北缘随州地区晚元古代末期的辉长岩($Sr=166 \mu\text{g/g}$, $I_{Sr}=0.7045$, $Nd=14.16 \mu\text{g/g}$, $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})=+4.6$)代表地幔组分. 2 个地壳组分,地壳 1 为崆岭地区太古代的 TTG 片麻岩(Ames *et al.*, 1996; $Sr=143 \mu\text{g/g}$, $I_{Sr}=0.708456$, $Nd=9.05 \mu\text{g/g}$, $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})=-33.9$),地壳 2 为韩国的一类地壳组分(Kwon *et al.*, 1999)

于本区的地壳和地幔组成,发现计算所得到的混合比例的差异最大可达 30%. 另外,图 4 计算过程中所选的地幔端元可能并不合适,这从图 3d 中辉长岩偏离扬子基底 TTG 片麻岩与花岗岩类之间所拟就的直线也可看出. 但地幔来源物质的加入对于五莲新元古代花岗岩类的成因无疑有着重要的影响.

5 结论

五莲新元古代花岗岩类 Sr 和 Nd 同位素组成的变化范围较大,其中 $\epsilon_{Nd}(750 \text{ Ma})$ 值从 $-3.1 \sim -24.3$, 二阶段的模式年龄从 1.7~3.4 Ga, 均显示混合源的特征. 其最可能的成因是太古代的 TTG 片麻岩(主要是其中的英云闪长质组分)在压力约 0.8 Gpa(相当于 ~ 25 km 的中下地壳)条件下发生部分熔融,并混入了不同比例的年轻地幔来源物质. 地幔来源物质的加入对于五莲新元古代花岗岩类的成因起着重要作用.

References

- Ames, L., Zhou, G., Xiong, B., 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh pressure metamorphism with

- implications for collision of the Sino Korean and Yangtze cratons central China. *Tectonics*, 15; 472 – 489.
- Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1991. Dehydration melting and water saturated melting of basaltic and andesitic green stones and amphibolites at 1, 3 and 6. 9kb. *J. Petrol.*, 32; 465 – 501.
- Borg, L. E., Clynnø, M. A., 1998. The petrogenesis of felsic calcalkaline magmas from the southernmost cascades, California: Origin by partial melting of basaltic lower crust. *J. Petrol.*, 39; 1197 – 1222.
- Boynnton, W. V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson, P, ed., Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63 – 114.
- Chavagnac V., Jahn, B. M., 1996. Coesite bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China; Sm Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem. Geol.*, 133; 29 – 51.
- Chen, B., Jahn, B. M., Arakawa, Y., et al., 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China craton; Elemental and Sr Nd Pb isotopic constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148; 489 – 501.
- Cohen, A. S., O'Nions R. K., Siegenthaler, R., et al., 1988. Chronology of the pressure temperature history recorded by a granulite terrain. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98; 303 – 311.
- Condie, K. C., 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean Proterozoic boundary; Identification and significance. *Lithos* 23; 1 – 18.
- Condie, K. C., 1997. Plate tectonics and crustal evolution. Butterworth Heinemann Press.
- Corroll M. J., Wyllie, P. J., 1989. Experimental phase relations in the system tonalite peridotite H₂O at 15 kbar; implications for assimilation and differentiation processes near the crust mantle boundary. *J. Petrol.*, 30; 1351 – 1382.
- Gao S., Ling, W. L., Qiu, Y. M., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high grade terrain of the Yangtze craton; Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63; 2071 – 2088.
- Holloway, J. R., Burnham, C. W., 1972. Melting relations of basalt with equilibrium water pressure less than total pressure. *J. Petrol.*, 13; 1 – 29.
- Huang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2005. Geochemistry of elements and isotopes in igneous rocks from the Wulian region in the Sulu orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 21; 545 – 568 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Cornicher, J., Cong, B., et al., 1996. Ultrahigh ϵ_{Nd} eclogites from a UHP metamorphic terrane of China. *Chem. Geol.*, 127; 61 – 79.
- Koprubasi N., Aldanmaz, E., 2004. Geochemical constraints on the petrogenesis of Cenozoic I-type granitoids in northwest Anatolia, Turkey; Evidence for magma generation by lithospheric delamination in a post collisional setting. *International Geology Review*, 46; 705 – 729.
- Kwon, S. T., Lan, C. Y., Lee, T., 1999. Rb Sr and Sm Nd isotopic study of the Seoul granitic batholith in middle Korea. *Geosci. J.*, 3; 107 – 114.
- Lameyre, J., Bonin, B., 1991. Granites in the main plutonic series. In: Didier, J., Barbarin, B., eds., Endaves and granite petrology. Elsevier, Amsterdam, Netherlands 3 – 17.
- Le Maitre, R. W., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford, UK, 193.
- Martin, H., 1993. The mechanism of petrogenesis of the Archean continental crust—Comparison with modern processes. *Lithos* 30; 373 – 388.
- Martin, H., 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: Condie, K. C., ed., The Archean crustal evolution. Elsevier, Amsterdam, 46 – 48.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120; 223 – 253.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25; 956 – 983.
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1991. Dehydration melting of metabasalt at 8 – 32 kbar; Implications for continental growth and crust mantle recycling. *Journal of Petrology*, 87; 193 – 203.
- Roberts, M. P., Clemens, J. D., 1993. Origin of high potassium, calc alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21; 825 – 828.
- Streckeisen, A., Le Maitre, R. W., 1979. A chemical approximation of the model QAPE classification of the igneous rocks. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen*, 136; 169 – 206.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust; Its composition and evolution—An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell Scientific Oxford 312.
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhou, J. B., 2004. Neoproterozoic granitoid in northwest Sulu and its bearing on the North China South China blocks boundary in east China. *Geophysical Research Letters*, 31, L07616. doi: 10. 1029/

2004GL019785.

- Wyllie, P. J., 1984. Constraints imposed by experimental petrology on possible magma sources and products. *Transactions of the Royal Society of London*, A310: 439–456.
- Xue, H. M., Dong, S. W., Liou, X. C., 2001. Geochemical characteristics and their genesis of the granitic gneisses from southeastern Dabie Mountain. *Acta Geologica Sinica*, 14: 175–183.
- Xue, H. M., Liu, F. L., 2005a. Geochemical characteristics and genesis of plagiogneiss from the 0–2 000 m main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 355–368 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Liu, F. L., Xu, Z. Q., 2005b. Geochemical characteristics of weakly metamorphosed orthogneisses outside the Wulian boundary fault along the northwestern margin of the Sulu UHP metamorphic belt and their protolith petrogenesis. *Geology in China*, 32(2): 249–258 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Liu, F. L., Meng, F. C., 2006. Major and trace element geochemistry of granitic gneisses from Sulu orogen, eastern Shandong Peninsula Sulu orogen: Evidence for a Neoproterozoic active continental margin in the northern margin of the Yangtze craton. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese with English abstract in press).
- Zhai, M. G., Cong, B. L., Zhang, Q., et al., 1994. The northern Dabieshan terrain: A possible andean type arc. *Inter. Geo. Rev.*, 36: 867–883.
- Zhao, D., Cheng, L. R., Liu, M. X., 1995. The discovery of selenopora in the Wulian Group in the Jiaonan area, Shandong and its significance. *Regional Geology of China*, 14: 379–384 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. S., Jin, C. W., Zhai, M. G., et al., 1999. Petrochemistry and tectonic background of the grey gneisses in north Dabie terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 350–358 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Zheng, Y. F., Li, L., et al., 2001. Accretionary wedge of the subduction of the Yangtze plate. *Acta Geol. Sinica*, 75: 338–352 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., 2003. Zircon U/Pb ages for Wulian granites in northwest Sulu and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 48: 379–384.

附中文参考文献

- 黄洁, 郑永飞, 吴元保, 等, 2005. 苏鲁造山带五莲地区岩浆岩元素和同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21: 545–568.
- 薛怀民, 刘福来, 2005a. 中国大陆科学钻探工程主孔 0–2 000 米斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究. *岩石学报*, 21(2): 355–368.
- 薛怀民, 刘福来, 许志琴, 2005b. 苏鲁超高压变质带西北缘五莲断裂外侧浅变质花岗片麻岩的地球化学特征与原岩成因研究. *中国地质*, 32(2): 249–258.
- 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪, 2006. 苏鲁造山带胶东区段花岗片麻岩类的常量与微量元素地球化学: 扬子克拉通北缘新元古代活动大陆边缘的证据. *岩石学报* (待刊).
- 赵达, 程立人, 刘茂修, 1995. 胶南地区五莲群中管孔藻类的发现及其意义. *中国区域地质*, 14: 379–384.
- 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 等, 1999. 北大别灰色片麻岩的岩石化学特征及大地构造背景. *岩石学报*, 15(3): 350–358.
- 周建波, 郑永飞, 李龙, 等, 2001. 扬子大陆板块俯冲的构造加积楔. *地质学报*, 75: 338–352.