

大别造山带天柱山中生代中酸性岩成因的REE配分定量模拟

徐小军, 赵子福*, 郑永飞, 魏春生

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: 大量的同位素地质年代学和地球化学研究表明, 大别山中生代中酸性岩为俯冲扬子陆壳再循环的产物. REE配分的定量模拟计算结果表明, 与基性下地壳相似的北大别基性闪长质片麻岩部分熔融并经过结晶分异能够形成与天柱山中性岩类似的稀土元素组成, 而与中性地壳相似的北大别中性灰色片麻岩部分熔融能够形成与天柱山花岗岩类似的稀土元素组成. 残留相微量元素定量计算结果表明, 大别山现今出露的中基性麻粒岩不是部分熔融后形成的残留体. 早白垩世地幔超柱事件热扰动所引起的加厚地壳部分熔融后的残留体可能由于比重较大而拆离进入地幔, 从而发生去山根作用和造山带的大面积隆起.

关键词: 中酸性岩; 中生代; 稀土元素; 模拟计算; 大别造山带.

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2005)06-0721-08

收稿日期: 2005-07-20

Quantitative REE Modeling for Genesis of Mesozoic Intermediate-Felsic Rocks at Tianzhushan in the Dabie Orogen

XU Xiao-jun, ZHAO Zi-fu*, ZHENG Yong-fei, WEI Chun-sheng

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: A large number of studies of geochronology and geochemistry indicate that Mesozoic intermediate-felsic rocks from the Dabie orogen have originated from recycling of the subducted Yangtze continental crust itself. A REE partition simulation suggests that the Tianzhushan intermediate rocks can be generated by partial melting, in coupling with fractional crystallization, of dioritic gneiss which is similar in chemical compositions to the mafic rocks in the lower crust in North Dabie; partial melting of intermediate grey gneiss which is similar in chemical compositions to the middle crust in North Dabie can generate the Tianzhushan felsic rocks. Quantitative calculation of trace element content for the residue after partial melting suggests that intermediate-mafic granulites outcropped in the Dabie orogen are not the residue of partial melting. The residue formed by partial melting of thickened crust due to anomalous heat supply by mantle superwelling at Early Cretaceous is possibly easy to detach from the crust because of its high density, leading to the remove of mountain root and large scale uplift of the orogen.

Key words: intermediate-felsic rock; Mesozoic; REE; quantitative modeling; Dabie orogen.

0 引言

大别—苏鲁造山带不仅是世界上最大的超高压—超高压变质岩区, 而且也是陆—陆碰撞之后, 在超高压和高压岩石剥露过程中岩浆活动最为强烈的地区

之一 (Wang *et al.*, 1995; Cong, 1996; Liou *et al.*, 1996; Ma *et al.*, 1998; Jahn *et al.*, 1999, 2003; Zheng *et al.*, 2003). 前人利用各种定年技术 (U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Ar-Ar) 对大别山碰撞后岩浆岩进行了大量的同位素年代学研究, 结果表明, 碰

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40303002; 40334036).

作者简介: 徐小军 (1976—), 男, 硕士, 地球化学专业. * 通信作者: 赵子福, E-mail: zfzha@ustc.edu.cn

撞后大规模岩浆活动主要发生在(120~135)Ma,大量的中酸性岩和基性—超基性岩发育在这一时期(陈江峰等,1995; Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998, 2000; Jahn *et al.*, 1999; 李曙光等,1999; 魏春景等,2000; 王江海和邓尚贤,2002; Bryant *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2004, 2005). 大别山碰撞后岩浆岩主要包括大面积分布的中酸性岩和零星分布的基性—超基性岩,中酸性岩在大别各个构造单元均有分布,主要岩体包括主薄源、白马尖、天堂寨、天柱山等,基性—超基性岩主要分布在北大别地体. 研究这些早白垩世岩浆岩,对探讨大别造山带碰撞后深部地壳和地幔的地球化学性质以及燕山期中国东部大规模构造热事件的成因机制具有十分重要的意义.

大量的元素和放射成因同位素地球化学研究表明,大别山早白垩世岩浆岩具有以下的地球化学特征:富集轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE);亏损高场强元素(如 Nb, Ta, Ti 和 P 等);较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(Ma *et al.*, 1998; Jahn *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002; Bryant *et al.*, 2004; 赵子福等,2004; Zhao *et al.*, 2005; 徐小军等,2005). 由于同时期中酸性岩和基性—超基性岩具有类似的 REE 和微量元素分布特征以及初始 Sr-Nd 同位素组成,因此关于这些岩浆岩的成因一直存在较大争议. 基性—超基性岩的成因有 2 种观点:一种认为与扬子板块俯冲到 100~200 km 深度后断离板片在地幔内的部分熔融及其壳幔相互作用有关(Jahn *et al.*, 1999; 李曙光等,2001);另一种观点认为与俯冲扬子板块本身部分熔融有关(Zheng *et al.*, 2003). 中酸性岩的成因也存在不同看法:一是与幔源基性岩浆和花岗岩岩浆的混合(Chen *et al.*, 2002)或幔源岩浆的 AFC 过程有关(Ma *et al.*, 1998);另一是与俯冲陆壳本身的部分熔融有关(Zhang *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2004). 通过对大别山碰撞后基性—超基性岩进行系统的锆石 U-Pb 定年、元素和 C-O 同位素研究发现(Zhao *et al.*, 2005),这些基性—超基性岩具有与正常地幔完全不同的 C-O 同位素组成. 将这些中生代基性—超基性岩的元素和同位素数据与大别—苏鲁榴辉岩比较后发现,它们之间具有较为一致的地球化学特征,因此可能具有一定的成因联系. 俯冲扬子板块在造山带加厚背景下部分熔融可以形成这些基性—超基性岩. 我们通过对大别山中生代中酸性岩的锆石 U-Pb 定

年、元素和 O 同位素地球化学研究(Zhao *et al.*, 2004; 赵子福等,2004; 徐小军等,2005),发现某些锆石颗粒中存在年龄分别为中新元古代和三叠纪的继承核. 结合元素和 O 同位素结果,我们认为这些中酸性岩为俯冲扬子陆壳再循环的产物,其热源是早白垩世太平洋地幔超柱作用引起的欧亚大陆之下的地幔超级上涌(Zhao *et al.*, 2004, 2005).

Zhang *et al.* (2002) 通过对比大别山中生代花岗岩与北大别变质杂岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成认为这些花岗岩为北大别变质杂岩部分熔融的产物. 赵子福等(2004)和徐小军等(2005)也认为大别山中生代中性岩起源于加厚基性下地壳的脱水部分熔融;而花岗岩则起源于与北大别 TTG 正片麻岩具有相似化学组成的中性地壳的部分熔融. 那么由北大别变质杂岩部分熔融能否形成这些中酸性岩浆岩? 本文拟通过对天柱山中酸性岩 REE 配分进行部分熔融定量模拟,试图为这些中酸性岩的成因和演化提供进一步的证据.

1 地质背景

大别—苏鲁造山带呈东西向位于中国中东部,是南部的华南大陆板块与北部的华北大陆板块之间在三叠纪时期俯冲—碰撞所形成的超高压变质带(Cong, 1996; Zheng *et al.*, 2003). 碰撞过程中华南板块向华北板块之下俯冲超过 100 km 的深度并迅速折返出露地表,大别—苏鲁榴辉岩和片麻岩中发现的超高压相变质矿物柯石英为这种判断提供了证据. 在碰撞发生时及之前,苏鲁地体与大别地体是连为一体的,在俯冲之后由于构造运动致使大别—苏鲁超高压变质带东段的苏鲁地体沿中国东部最大的一条断裂——郯庐断裂带左行平移约 500 km,至苏鲁地区呈 NE 向延伸.

大别地体从北到南可以分为 5 个构造单元(Li *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2005):北淮阳低温/低压带(LT/LP)、北大别高温/超高压变质带(HT/UHP)、中大别中温/超高压变质带(MT/UHP)、南大别低温/超高压变质带(LT/UHP)和宿松群低温高压(LT/HP)蓝片岩岩带. 在三叠纪板块碰撞过程中各个构造单元的俯冲行为有所不同,形成了代表不同温—压条件的变质矿物集合体. 与大陆碰撞有关的超高压变质事件发生在三叠纪,超高压变质火成岩的原岩侵位时间是新元古代中期(Zheng *et*

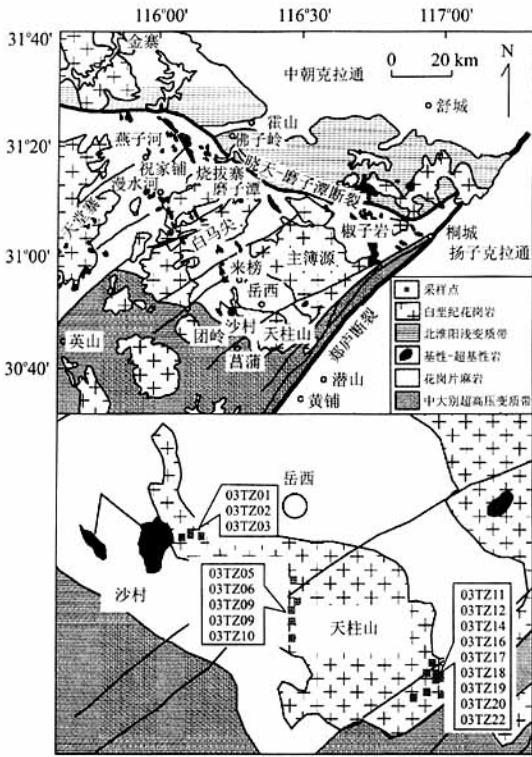


图 1 天柱山地质简图及采样点

Fig. 1 Sketch geological map of Tianzhusan and sample locations

al., 2003, 2004).

大别山早白垩世中酸性岩在 4 个构造单元均有分布 (Ma *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2002), 但在北大别出露最为广泛, 几个较大的中酸性岩基如主簿源、白马尖、天堂寨和天柱山均分布在北大别地体。天柱山岩体出露于五河—水吼断裂附近靠北大别一侧 (图 1), 东起潜山县天柱山, 西至岳西县中关一带, 出露面积约 120 km² (彭亚鸣等, 1994)。岩体与围岩呈明显的侵入接触关系, 围岩主要为北大别广泛分布的 TTG 片麻岩。岩体由含角闪石的二长岩和石英二长岩 (分布在岩体西部) 以及不含角闪石的黑云母二长花岗岩 (主要分布在岩体东部, 在岩体西部边缘也有少量分布) 组成, 后者晚于前者。二长岩和石英二长岩矿物组合为斜长石 (20%~25%)、钾长石 (15%~20%)、石英 (25%~30%)、角闪石 (8%~12%)、黑云母 (约 5%) 和少量的榍石、磁铁矿、磷灰石和锆石。黑云母二长花岗岩矿物组合为钾长石 (50%~60%)、斜长石 (10%~15%)、石英 (约

30%)、黑云母 (2%~3%) 和少量的榍石、磁铁矿、磷灰石和锆石 (彭亚鸣等, 1994)。

2 中生代中酸性岩成因定量模拟

Zhang *et al.* (2002) 根据 Sr-Nd-Pb 同位素研究推断大别山的基底是与北大别中酸性岩围岩一样的北大别杂岩 (主要是片麻岩), 而广泛分布的大别山燕山中酸性岩的源区物质就是这些北大别杂岩组成的中下地壳。Bryant *et al.* (2004) 将北大别片麻岩分为深色片麻岩和强烈变形的灰色片麻岩, 它们的 SiO₂ 含量分别为 47.5%~54.3% 和 58.6%~69.3%, 前者表现为偏基性而后者表现为中性。它们的稀土分布模式 (图 2) 与天柱山中酸性岩类似, 都具有轻稀土富集, 重稀土分布平坦的特征 (赵子福等, 2004; 徐小军等, 2005)。天柱山中酸性岩的 ε_{Nd}(*t*) 值为 -17.1~-19.7 (徐小军等, 2005), 落在北大别杂岩 ε_{Nd}(*t*) 变化范围之内 (Zhang *et al.*, 2002 及其中所引参考文献)。我们推测 Bryant *et al.* (2004) 提到的偏基性的闪长质片麻岩可能是天柱山中性岩的源岩, 中性的灰色片麻岩可能是天柱山花岗岩的源岩。为了证明这种可能性, 我们将对部分熔融和岩浆结晶分异过程中 REE 配分进行定量模拟。

在下面的讨论中将会用到平衡部分熔融和分异结晶模型对天柱山中酸性岩成因的 REE 配分进行模拟, 其公式分别为:

$$\text{平衡部分熔融: } C_L = \frac{C_0}{D + (1-D)F}, \quad (1)$$

$$\text{结晶分异: } C_L = C_0 F^{(D-1)}, D = \sum_{i=1}^n K_b^i X^i. \quad (2)$$

式中: C₀ 为某微量元素的初始浓度, C_L 为部分熔融程度为 *F* 时熔体中该微量元素的浓度, *D* 为总分配系数, X^{*i*} 为残余固相中 *i* 相 (矿物) 的质量分数, K_b^{*i*} 为微量元素在 *i* 相和熔体相之间的分配系数, *F* 为原始熔体经过分离结晶作用后残余的熔体分数 (结晶度)。

2.1 酸性岩

天柱山乃至大别山花岗岩化学成分相对较为均一 (Chen *et al.*, 2002; 赵子福等, 2004), 由北大别变质杂岩 (主要是片麻岩) 部分熔融可以形成大别山大面积分布的碰撞后花岗岩, 部分熔融后残留物为石榴石、角闪石、斜长石和单斜辉石共存的石榴石麻粒岩 (赵子福等, 2004; 徐小军等, 2005)。为验证北大

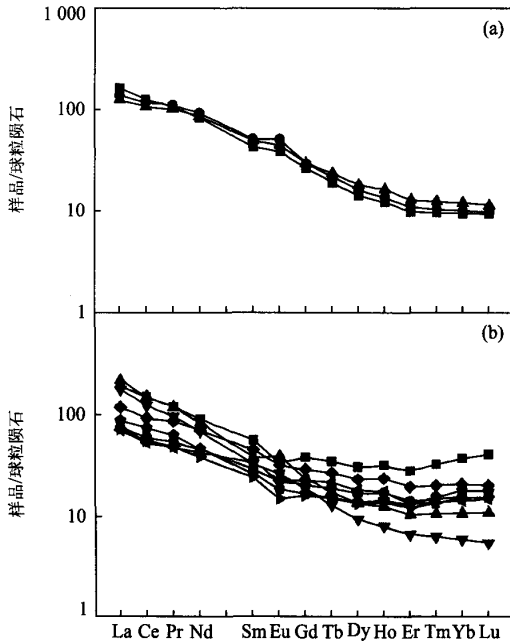


图 2 北大别片麻岩稀土分布模式(数据引自 Bryant *et al.*, 2004)

Fig. 2 Plots of chondrite-normalized REE patterns for NDC diorite gneiss (a) and first-generation NDC gneiss (b)

a 和 b 分别表示闪长质片麻岩和中性灰色片麻岩

别中性灰色片麻岩可能是天柱山花岗岩的源岩,我们用平衡部分熔融模型式(式 1)来进行模拟计算。由于岩浆期后的水-岩相互作用可能会影响某些微量元素含量,因此我们选择不受流体扰动的稀土元素来进行模拟计算。初始成分 C_0 取自 Bryant *et al.* (2004) 中的样品 RBZ-14 (中性灰色片麻岩), 其成分见表 1, 假定残留相的矿物组合为: 斜长石 50%, 单斜辉石 30%, 角闪石 10%, 石榴子石 5%, 这些矿物组成的总分配系数设为 D_A , 部分熔融程度设为 F_A 。计算结果绘制于图 3a, 图中实线 A 表示的是 $F_A=30\%$ 时模拟计算所得的稀土元素分布情况。由图 3a 可知, 模拟结果与大部分实测值基本吻合, 实测值数据取自徐小军等(2005)。

天柱山部分花岗岩样品的稀土含量明显低于其他样品(图 3a), 同时 Eu 的负异常也表现得不如其他样品明显。Wu *et al.* (2003) 指出, 磷灰石、褐帘石和榍石的分离结晶会降低稀土总含量, 增加稀土分布模型的凹度以及降低 Eu 的负异常程度。因而天柱山花岗岩中稀土含量较低的那些样品可能是在它们结晶初期经历了磷灰石、褐帘石和/或榍石的分离

表 1 天柱山中酸性岩岩石成因定量模拟数据

Table 1 Data of REE patterns modeled for intermediate-felsic rocks at Tianzhusan

分配系数 (K_D)	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Yb	Lu
石英	0.015	0.014	0.016	0.014	0.056	0.017	0.017	0.014
斜长石	0.3	0.22	0.19	0.12	2	0.16	0.1	0.1
钾长石	0.07	0.02	0.03	0.02	3.3	0.06	0.03	0.02
单斜辉石	0.52	0.84	1.4	2.1	2.5	1.41	1.14	1.28
石榴子石	0.37	0.53	0.81	3.5	1.37	11	26	23.5
角闪石	0.26	1.2	3.2	2.38	3	2	1.9	1.8
黑云母	0.2	0.21	0.21	0.21	0.28	0.26	0.35	0.4
榍石	30	50	90	75	50	100	50	45
褐帘石	1000	1050	400	700	100	500	90	75
酸性岩								
$C_0/10^{-6}$	22.9	45.7	23	4.7	1.07	4.15	3.14	0.508
D_A	0.35	0.56	0.99	1.24	1.98	1.23	2.05	1.97
D_B	78.5	97.5	105.5	106.25	52.5	101	52	46.5
$F_A=0.3$	41.99	69.67	25.2	4.38	0.6	3.52	1.94	0.33
$F_B=0.99$	19.27	26.41	8.81	1.52	0.36	1.29	1.16	0.2
中性岩								
$C_0/10^{-6}$	43.3	95.7	55.5	9.92	3.69	7.54	2.1	0.315
D_1	0.35	0.56	0.99	1.73	1.98	1.52	2.05	1.97
D_2	0.81	1.36	2.55	2.06	2.78	2.01	1.48	1.36
$F_1=0.4$	67.56	118.13	48.8	7.01	2.16	5.5	1.23	0.19
$F_2=0.8$	70.5	108.9	34.5	5.54	1.46	4.38	1.1	0.17

K_D 为分配系数, 其值取自 Schnetzler and Philpotts(1970), Nagasawa and Schnetzler(1971), Arth(1976), Hanson(1978), Irving and Frey(1976, 1978), Bacon and Druitt(1988), 干国梁(1993), Sisson(1994) 以及一些经验估计; D 表示总分配系数; C_0 为初始浓度; F 为部分熔融/结晶程度。

结晶。为验证这个观点, 我们做一个简单的模拟计算: 以实线 A 的组分为初始组成, 假定它经历了褐帘石/榍石(含量为 5:95) 相的分离结晶(总分配系数为 D_B), 这一过程的结晶度设为 F_B , 用结晶分异公式来计算, 当结晶度 $F_B=0.99$ 时所得计算结果绘制实线 B 于图 3a。如图 3a 所示, 模拟得到的实线 B 与这些稀土总量较低的样品吻合得较好。以上的模拟计算结果表明, 天柱山花岗岩可能是由北大别中性灰色片麻岩部分熔融而来, 其中一些样品稀土含量较低, 可能是由于部分熔融形成的熔体在结晶初期经历了磷灰石、褐帘石和/或榍石的分离结晶。

2.2 中性岩

天柱山中性岩的 SiO_2 含量变化范围为 61.72%~68.9%, 但有报道大别山中性岩中 SiO_2 含量最低达 54.52% (Chen *et al.*, 2002)。在 Hacker 图解上, SiO_2 和主量以及微量元素之间都有着较好的相关性 (Chen *et al.*, 2002; 赵子福等, 2004; 徐小军等, 2005), 表明其形成过程伴随有结晶分异

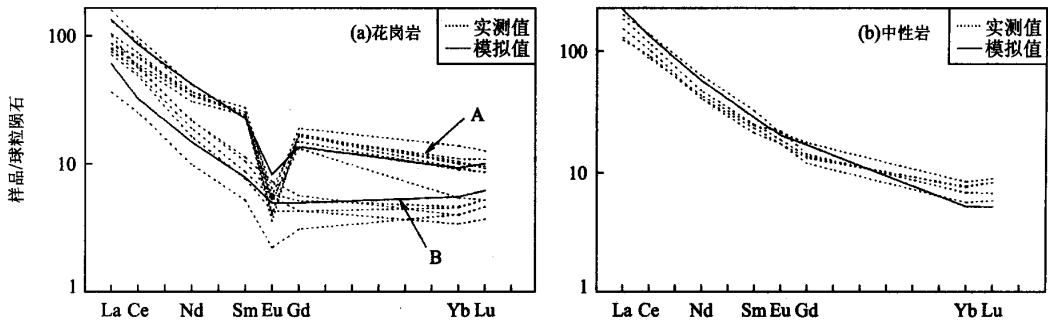


图 3 天柱山花岗岩和中性岩成因模型的稀土元素分布模式

Fig. 3 Modeled REE patterns of granites (a) and intermediate rocks (b) at Tianzhushan

作用. 结合上面的讨论, 我们推测天柱山中性岩可能是由与北大别基性闪长质片麻岩组成类似的基性下地壳经由一定程度的部分熔融并经过结晶分异形成的. 因此对中性岩的定量模拟计算分 2 步进行: 先进行部分熔融(式 1)模拟计算, 再以部分熔融计算中产生的熔体为初始成分进行结晶分异过程的模拟. 在第 1 步部分熔融的模拟计算中, 源区物质取 Bryant *et al.* (2004) 中 QLB-1 号样品(基性闪长质片麻岩), 部分熔融残留相取斜长石 15%, 单斜辉石 60%, 角闪石 10%, 石榴子石 5%. 设这一过程的总分配系数为 D_1 , 部分熔融程度为 F_1 , 计算用平衡部分熔融公式来进行; 第 2 步分异结晶过程(式 2)的模拟中, 取上一阶段部分熔融计算中所得的一组结果为这阶段计算的初始成分. Chen *et al.* (2002) 发表的北大别最基性的中性岩样品 SiO_2 为 54.52% (样品号为 D15), 根据该文中的描述取其矿物相组成为: 石英 10%、斜长石 40%、钾长石 10%、角闪石 20%、黑云母 15%、榍石 2%, 设为分离结晶相, 其总分配系数设为 D_2 , 结晶度设为 F_2 . 计算中所使用的参数列于表 1. 计算所得结果示于图 3b, 图中的实线为模拟值, 是以第 1 阶段部分熔融计算中 $F_1 = 40\%$ 时的结果为初始成分, 再在第 2 阶段结晶分异模拟计算中取结晶度 $F_2 = 80\%$ 的情况下所得. 虚线为实际测得的天柱山中性岩的稀土分布模式. 如图 3b 所示, 两者吻合得较好, 这表明天柱山中性岩可能是由北大别基性闪长质片麻岩部分熔融并经过结晶分异形成的. 部分熔融的残留相可能与赵子福等(2004)推测的石榴子石±角闪石±单斜辉石±斜长石矿物组合一致.

2.3 残留相微量元素特征

根据我们的模型以及赵子福等(2004)的推测, 北大别中基性中下地壳部分熔融形成中酸性岩的残

表 2 模拟计算所得中生代酸性岩残留相不相容元素组成
Table 2 Modeled compositions of incompatible elements in the residue of Mesozoic felsic rocks at Tianzhushan

	Rb	Ba	Nb	Ta	K
$C_0/10^{-6}$	118	753	21.5	2.59	23732
$C_L/10^{-6}$	167	174	20.85	1.6	40660
$C_S/10^{-6}$	97	1001	21.78	3.01	16477
	La	Ce	Nd	Zr	Ti
$C_0/10^{-6}$	27.7	60.8	27.7	209	3300
$C_L/10^{-6}$	32.65	59.97	20.42	331	660
$C_S/10^{-6}$	25.58	61.16	30.82	156.71	4431

C_0 表示初始浓度, C_L 表示部分熔融产生熔体浓度, C_S 表示残留相浓度.

留相矿物组合可能主要含有石榴子石、角闪石、斜长石和单斜辉石, 从岩性上来讲, 由于部分熔融出来的产物是中酸性的, 因而其残留相可能是偏中基性的岩石. 尽管北大别基性—超基性岩在岩性上符合这样的要求, 但是矿物组合与残留相所要求的不同而不太可能是部分熔融后的残留体. 北大别黄土岭中性麻粒岩和惠兰山基性麻粒岩具有与我们推测的部分熔融残留相类似的矿物组合, 但这些中基性麻粒岩是否是部分熔融后的残留相呢?

一般认为, 部分熔融产生酸性岩浆的残留相可能呈中性, 而形成中性岩浆的残留相可能为基性. 天柱山中生代酸性岩可能是由类似北大别中性片麻岩的中下地壳直接部分熔融而来, 上面的模拟计算结果表明部分熔融程度大概是 30%. 在已知初始成分 C_0 (中性片麻岩)、部分熔融熔体相成分 C_L (中生代酸性岩) 和部分熔融程度 ($F = 30\%$) 的情况下, 由质量平衡关系: $C_0 = FC_L + (1-F)C_S$ 可以求得残留相浓度 C_S , 从而可以推测残留相的微量元素分布. 选用徐小军等(2005)天柱山酸性岩样品 03TZ20 作为熔体相成分 C_L , 初始成分 C_0 取 Bryant *et al.* (2004)

表 3 模拟计算所得中生代中性岩残留相不相容元素组成

Table 3 Modeled compositions of incompatible elements in the residue of Mesozoic intermediate rocks at Tianzhushan

	计算 D 值的分配系数 K_D					$C_0/10^{-6}$	$C_L/10^{-6}$	$C_S/10^{-6}$
	Pl(0.15)	Cpx(0.6)	Gt(0.05)	Hb(0.1)	D			
Rb	0.05	0.03	0.01	0.014	0.027 4	66	158.5	434
Ba	0.9	0.05	0.02	0.044	0.170 4	1890	3763.14	641.24
Nb	0.03	0.2	0.1	4	0.529 5	9.02	12.57	6.65
K	0.15	0.037	0.01	0.08	0.053 2	19251	44571	2371.2
La	0.3	0.52	0.37	0.26	0.401 5	43.3	67.56	27.1
Ce	0.22	0.84	0.53	1.2	0.683 5	95.7	118.13	80.7
Nd	0.19	1.4	0.81	3.2	1.229	55.5	48.8	60
Zr	0.1	0.67	1.2	4	0.877	140	151.2	132.56
Ti	0.05	0.7	1.2	7	1.187 5	10200	9168.5	10888

括号内为质量分数; C_0 表示初始浓度; C_L 表示部分熔融产生熔体浓度; C_S 表示残留相浓度; K_D 值出处同表 1, 部分熔融程度为 0.4.

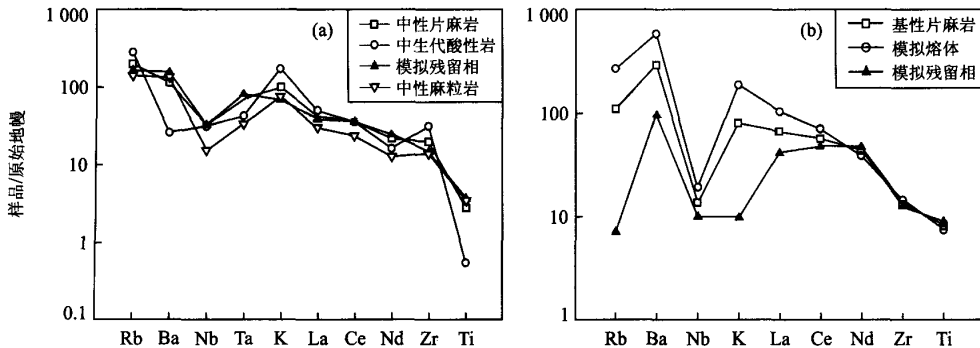


图 4 模拟计算所得中生代酸性岩(a)和中性岩(b)残留相不相容元素分布(中性片麻岩数据取自 Bryant *et al.* (2004), 中性麻粒岩数据取自 Ma *et al.* (2000))

Fig. 4 Plot of Modeled patterns of incompatible elements in the residue of Mesozoic acid rocks (a) and intermediate rocks (b) at Tianzhushan

中的中性灰色片麻岩样品 YZS-2. 计算过程中所用到的数据和计算所得的残留相微量元素浓度 C_S 列于表 2, 并绘制于图 4a. 为便于比较, 将黄土岭中性麻粒岩数据也列于图 4a 中. 由图 4a 可知, 模拟计算所得的残留相与代表部分熔融熔体相的天柱山中生代酸性岩相对于代表初始固相的北大别中性灰色片麻岩存在互补关系, 而黄土岭中性麻粒岩与天柱山中生代酸性岩相对于北大别中性片麻岩则有很多元素都不存在互补关系, Nb、Ta 表现得尤为明显, 这表明黄土岭中性麻粒岩不可能是部分熔融的残留相. 另外, 同位素地质年代学研究表明, 黄土岭麻粒岩相变质作用的时间为古元古代(陈能松等, 1996; Jian *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000; 吴元保等, 2002), 而大别造山带碰撞后大规模岩浆作用发生在早白垩世(Zhao *et al.*, 2004; 2005). 因此年代学结

果也不支持黄土岭麻粒岩为部分熔融产生中生代酸性岩浆后的残留相的假设.

对于中性岩, 依然有质量平衡关系: $C_0 = FC_L + (1-F)C_S$. 由于天柱山中生代中性岩在形成过程中不仅有部分熔融的作用, 还伴随有结晶分异的作用, 因而其成分不能代表部分熔融产生的熔体组成 C_L . 但可以将北大别闪长质基性片麻岩经 40% 部分熔融产生的熔体组成看作为 C_L , 取 Bryant *et al.* (2004) 文中 QLB-1 号样品(基性闪长质片麻岩)为初始成分, 根据这些条件对残留相不相容元素的浓度 C_S 进行估算. 计算过程中所用到的数据和计算所得的残留相微量元素浓度 C_S 列于表 3, 并绘制于图 4b. 如图 4b 所示, 惠兰山基性麻粒岩的微量元素分布(内部交流数据)与模拟计算的残留相组成之间存在较大差异, 表明惠兰山基性麻粒岩也不是部分熔

融形成天柱山中生代中性岩之后的残留体。

大别山碰撞后中酸性岩石化学特征表明其形成源区较深(35~55 km)(赵子福等,2004),表明在早白垩世大别造山带地壳仍具有较厚的山根。地球物理资料表明,大别山现今的地壳平均深度为35 km,且缺乏基性下地壳(Gao *et al.*, 1998;高山等,1999)。微量元素定量计算结果表明,大别山现今出露的中基性麻粒岩并不是早白垩世大规模部分熔融形成的残留体。因此,大别造山带在早白垩世之后发生了大规模的地壳减薄过程,早白垩世太平洋地幔超柱作用引起的欧亚大陆之下的地幔超级上涌可能提供了加厚造山带地壳发生大规模熔融所需要的热源(Zhao *et al.*, 2004, 2005)。中基性下地壳部分熔融后的残留体可能由于比重较大而有利于其拆离进入地幔,从而发生去山根作用和造山带的大面积隆起。

3 结论

同位素地质年代学和地球化学研究表明,大别山中生代中酸性岩岩浆源区是三叠纪扬子陆块俯冲产生的加厚地壳,形成机制可能与早白垩世地幔超柱事件热扰动所引起的部分熔融有关。稀土配分模拟计算结果表明,与基性下地壳相似的北大别基性闪长质片麻岩部分熔融后经过结晶分异可以形成与天柱山中性岩类似的稀土组成,而与中性地壳相似的北大别中性灰色片麻岩部分熔融后可以形成与天柱山花岗岩类似的稀土组成。大别山现今出露的中基性麻粒岩不是早白垩世部分熔融形成的残留体,这一时期大规模部分熔融产生的残留体可能由于比重较大而拆离进入地幔,从而导致去山根作用和造山带大面积隆起。

References

- Arth, J. G., 1976. Behaviour of trace elements during magmatic processes: A summary of theoretical models and their applications. *J. Res., USGS*, 4(1): 41-47.
- Bacon, C. R., Druitt, T. H., 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount-Mazama, Crater Lake, Orogen. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98(2): 224-256.
- Bryant, D. L., Ayers, J. C., Gao, S., et al., 2004. Geochemical age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze suture and evolution of the Northern Dabie complex, east central China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116: 698-717.
- Chen, B., Jahn, B. M., Wei, C., 2002. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, central China: Trace element and Nd-Sr isotope evidence. *Lithos*, 60: 67-88.
- Chen, J. F., Xie, Z., Liu, S. S., et al., 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by ^{40}Ar - ^{39}Ar and fission track techniques. *Sci. in China (Series B)*, 25(10): 1086-1092 (in Chinese).
- Chen, N. S., You, Z. D., Suo, S. T., 1996. The U-Pb zircon ages of acid granulite and deformed granite from Dabie. *Chine. Sci. Bull.*, 41(11): 1009-1012 (in Chinese).
- Cong, B. L., 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Science Press, Beijing, 224.
- Gan, G. L., 1993. Mineral-melt partition coefficients: Data and major variation regularities. *Acta Petrol. Mineral.*, 12: 144-181 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 1959-1975.
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1999. Structure and composition of the crust in East China. *Sci. in China (Series D)*, 29: 204-213 (in Chinese).
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215-230.
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *J. Geophys. Res.*, 105B: 13339-13364.
- Hanson, G. N., 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 26-43.
- Irving, A. J., Frey, F. A., 1976. Effect of composition on partitioning of rare-earth elements, Hf, Sc and Co between garnet and liquid—Experimental and natural evidence. *EOS*, 57(4): 339-339.
- Irving, A. J., Frey, F. A., 1978. Distribution of trace elements between garnet megacrysts and host volcanic liquids of kimberlitic to rhyolitic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42(NA6): 771-787.
- Jahn, B. M., Wu, F., Lo, C. H., et al., 1999. Crustal-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from

- post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chem. Geol.*, 157: 119–146.
- Jahn, B. M., Rumble, D., Liou, J. G., 2003. Geochemistry and isotope tracer study of UHP metamorphic rocks. In: Carswell, D. A., Compagnoni, R., eds., Ultrahigh pressure metamorphism. *EMU Notes Mineral.*, 5: 365–414. Eötvös Univ. Press, Budapest.
- Jian, P., Yang, W., Zhang, Z., 1999. ^{207}Pb - ^{206}Pb zircon dating of the Huangtuling hypersthene-garnet-biotite gneiss from the Dabie Mountains, Hubei Province, China: New evidence from Early Precambrian evolution. *Acta Geol. Sinica*, 73: 78–83.
- Li, S. G., Hong, J. A., Li, H. M., et al., 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusions in Dabie Mountains and their geological implications. *Geol. Jour. China Univ.*, 5: 351–355 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Huang, F., Li, H., 2001. Post-collisional lithosphere delamination of the Dabie-Sulu orogen. *Chinese Sci. Bull.*, 46(17): 1487–1491 (in Chinese).
- Li, X. P., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2004. Low- T eclogite in the Dabie terrane of China: Petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 443–470.
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., Eide, E. A., et al., 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Harrison, M. T., Yin, A., eds., The tectonics of Asia. Cambridge University Press, 300–344.
- Ma, C., Li, Z., Ehlers, C., et al., 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 45: 431–456.
- Ma, C., Ehlers, C., Xu, C., et al., 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precam. Res.*, 102: 279–301.
- Nagasawa, H., Schnetzler, C. C., 1971. Partitioning of rare earth, alkali, and alkaline earth elements between phenocrysts and acidic igneous magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35: 953–968.
- Peng, Y. M., Pan, G. Q., Ye, Y. Q., 1994. A research on the Tianzhushan granites in Dabieshan orogenic belt. *J. Nanjing Univ. (Earth Sci.)*, 6(4): 326–333 (in Chinese with English abstract).
- Schnetzler, C. C., Philpotts, J. A., 1970. Partition coefficients of rare-earth elements between igneous matrix material and rock-forming mineral phenocrysts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34(3): 331–340.
- Sisson, T. W., 1994. Hornblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe. *Chemical Geology*, 117(1–4): 331–344.
- Wang, J. H., Deng, S. X., 2002. Emplacement age for the mafic-ultramafic plutons in the northern Dabie Mts. (Hubei): Zircon U-Pb, Sm-Nd and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Sci. in China (Series D)*, 32: 1–9 (in Chinese).
- Wang, X. M., Zhang, R. Y., Liou, J. G., 1995. UHPM terrane in east central China. In: Coleman, R., Wang, X., eds., Ultrahigh pressure metamorphism. Cambridge University Press, 356–390.
- Wei, C. J., Zhang, L. F., Wang, S. G., 2001. Mesozoic high-K granitic rocks from the eastern Dabie Mountains, central China and their geological implications. *Sci. in China (Series D)*, 30(4): 355–363 (in Chinese).
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241–273.
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Xia, Q. K., et al., 2002. SIMS U-Pb dating of zircons in granulite of Huangtuling from northern Dabieshan. *Acta Petrol. Sinica*, 18(3): 378–382 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. J., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., et al., 2005. Element and isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks at Tianzhushan in the Dabie orogen. *Acta Petrol. Sinica*, 21(3): 607–622 (in Chinese with English abstract).
- Xue, F., Rowley, D. B., Tucker, R. D., et al., 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the north Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *J. Geol.*, 105: 744–753.
- Zhang, H., Gao, S., Zhong, Z., et al., 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem. Geol.*, 186: 281–299.
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2004. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks in the Dabie Mountains. *Acta Petrol. Sinica*, 20(5): 1151–1174 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2004. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental

study on Proterozoic basic dyke swarms in the Qinling orogenic belt and its adjacent block as a discussion about some questions related to them. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 22-28 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李江海,何文渊,钱祥麟,1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义. *高校地质学报*, 3(3): 273-281.

李献华,胡瑞忠,饶冰,1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. *地球化学*, 26(2): 14-31.

李献华,刘颖,涂湘林,等,2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289-294.

梁细荣,韦刚健,李献华,等,2003. 利用 MC-ICPMS 精确测

定¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91-96.

辽宁省地质矿产局,1989. 辽宁省区域地质志. 北京:地质出版社,394-520.

邵济安,张履桥,魏春景,等,2001. 北京南口中生代双峰式岩墙群的组成及其特征. *地质学报*, 74(2): 205-212.

韦刚健,梁细荣,李献华,等,2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295-299.

张招崇,陈洪新,1997. 冀北水泉沟偏碱性杂岩体的地质——地球化学特征及其构造环境. *中国区域地质*, 16(3): 275-282.

周鼎武,张成立,刘良,等,2000. 秦岭造山带及其相邻地块元古代基性岩墙群研究综述及其相关问题探讨. *岩石学报*, 16(1): 22-28.

(上接 728 页)

crust in post-collisional granitoids from the Dabie terrane in China. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L22602, doi: 10. 1029/2004GL021061.

Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in east-central China. *Lithos*, 83: 1-28.

Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci. Rev.*, 62: 105-161.

Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ¹⁸O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 4145-4165.

Zheng, Y. F., Zhou, J. B., Wu, Y. B., et al., 2005. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Inter. Geol. Rev.*, 47: 851-871.

附中文参考文献

陈江峰,谢智,刘顺生,等,1995. 大别造山带冷却年龄的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 和裂变径迹年龄测定. *中国科学 (B 辑)*, 25(10): 1086-1092.

陈能松,游振东,索书田,1996. 大别山区中酸性麻粒岩和变形花岗岩的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 41(11): 1009

-1012.

干国梁,1993. 矿物-熔体间分配系数资料及主要变化规律. *岩石矿物学杂志*, 12(2): 144-181.

高山,骆庭川,张本仁,等,1999. 中国东部地壳的结构和组成. *中国科学(D 辑)*, 29(3): 204-213.

李曙光,洪吉安,李惠民,等,1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *高校地质学报*, 5: 351-355.

李曙光,黄方,李晖,2001. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. *科学通报*, 46(17): 1487-1491.

彭亚鸣,潘国强,叶友清,1994. 大别造山带天柱山花岗岩研究. *南京大学学报(地球科学版)*, 6(4): 326-333.

王江海,邓尚贤,2002. 湖北北大别镁铁-超镁铁质侵入体的时代: 锆石 U-Pb, Sm-Nd 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果. *中国科学(D 辑)*, 32: 1-9.

魏春景,张立飞,王式洸,2000. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩质岩石及其地质意义. *中国科学(D 辑)*, 30(4): 355-363.

吴元保,陈道公,夏群科,等,2002. 北大别黄土岭麻粒岩锆石 U-Pb 离子探针定年. *岩石学报*, 18(3): 378-382.

徐小军,赵子福,郑永飞,等,2005. 大别造山带天柱山燕山期中酸性岩浆岩元素和同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21(3): 607-622.

赵子福,郑永飞,魏春生,等,2004. 大别山中生代中酸性岩浆岩锆石 U-Pb 定年、元素和氧同位素地球化学研究. *岩石学报*, 20(5): 1151-1174.