科学通报 2013 年 第 58 卷 第 23 期：2316 ~ 2322
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

大别造山带的去山根过程与机制：碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约

李曙光[①②*]，何永胜[①]，王水炯[①③]

① 中国地质大学(北京)科学研究院，地质过程与成矿国家重点实验室，北京 100038;
② 中国科学技术大学地球和空间科学学院，中国科学院壳幔物质与环境重点实验室，合肥 230026
③ Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA
* 联系人, E-mail: lsg@ustc.edu.cn

2013-05-10 收稿, 2013-06-18 接受, 2013-08-07 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825002)和国家自然科学基金(40773013, 91014007)资助

摘要 系统的大别山碰撞后岩浆岩年代学和地球化学研究表明，大别山加厚镁铁质下地壳在 143~131 Ma 时发生部分熔融，生成低镁埃达克质岩; 130 Ma 左右加厚下地壳拆沉，引起了地幔上涌，产生了 130 Ma 以后的大规模镁铁质和花岗质岩浆作用. 在大别山低镁埃达克岩形成同时，已折返至中地壳的北大别岩片也发生部分熔融，产生北大别混合岩. 本文论证了在山根垮塌前，诱发大别山中、下地壳发生部分熔融需要造山带加厚岩石圈地幔根先期发生了减薄. 根据克拉通岩石圈地幔的地温梯度(6.6℃/km)和玄武质地壳熔融温度(1000℃)，可估计在发生造山带加厚下地壳部分熔融时，其下的岩石圈地幔厚度应减薄到小于 45 km. 据此，提出大别山两阶段去山根过程模型. 岩石圈冷山根诱发的地幔对流导致在~145 Ma 时岩石圈地幔突出部位被先减薄. 它导致加厚镁铁质下地壳温度和地壳中下部地热增温率升高，并使其发生部分熔融. 加厚下地壳的部分熔融导致了造山带下地壳弱化，加大其重力不平衡，从而引发加厚镁铁质下地壳的拆沉和山根垮塌. 因此，软流圈对流侵蚀和加厚下地壳拆沉这两种岩石圈减薄机制具有因果关系.

关键词
碰撞后岩浆作用
去山根过程
岩石圈减薄
埃达克质岩
混合岩

碰撞造山带的去山根过程是一个重要的地球动力学过程，它可以导致地幔上涌和强烈的碰撞后岩浆作用和成矿作用. 另一方面，在去山根过程中发生的镁铁质加厚下地壳的拆沉也是导致地壳物质的演化和再循环的重要途径.

造山带的去根过程与机制已提出两种模型: (1) 加厚下地壳拆沉模型[1]: 它可以解释与此伴生的大规模岩浆作用，并伴随有陆壳物质再循环. 它面临的最大困难是最多 30 km 厚的榴辉岩下地壳连同其下 120~150 km 厚的低比重岩石圈地幔能否产生足够的负浮力以至于使干的下地壳岩石断裂，从而使加厚岩石圈整体拆离; (2) 对流地幔侵蚀模型[2]: 它可以解释岩石圈地幔山根的去除，但要求加厚地壳的减薄发生在去根之后的伸展阶段，因此不伴随有陆壳物质再循环.

大别造山带为研究这个问题提供了最好条件. 大别山的超高压变质岩证明在碰撞造山时俯冲陆壳可深达百公里以上，但现在它没有山根，地壳厚度 35~40 km. 这说明它曾发生去山根过程. 大别山是冷造山带，自早三叠世华北-华南陆块开始碰撞以来，直到早白垩世之前没有发生岩浆事件，说明此前山根保存完好. 大别山集中强烈的白垩纪岩浆作用与

引用格式: 李曙光，何永胜，王水炯. 大别造山带的去山根过程与机制：碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约. 科学通报, 2013, 58: 2316–2322
英文版见: Li S G, He Y S, Wang S J. Process and mechanism of mountain-root removal of the Dabie Orogen: Constraints from geochronology and geochemistry of post-collisional igneous rocks. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-6065-y

山根垮塌有关, 为研究去根过程与机制创造了条件.

1 大别山碰撞后花岗岩的地球化学

1.1 大别山加厚下地壳熔融的鉴别

大别山碰撞后花岗岩根据形成时代可划分为两期: 早期花岗岩侵入体(143~131 Ma)和晚期花岗岩侵入体(131~117 Ma). 已有众多作者[3~6]指出大别山早期花岗质岩石具有高 Sr/Y 和 La/Yb 特征, 而晚期没有, 认为高 Sr/Y 花岗岩为埃达克质岩. 但其他成因的普通花岗岩也可以具有高 Sr/Y 和 La/Yb 特征[7~16], 它不足以证明早期花岗质岩石的加厚下地壳熔融成因. He 等人[17]发现, 大别山的早期高 Sr/Y 花岗岩在 SiO_2-Sr 和 CaO-Sr 图上形成与普通花岗岩不同的高 Sr 演化趋势, 其$(La/Yb)_N$与 Sr/Y 和$(Dy/Yb)_N$呈正相关趋势, 和高 Nb/Ta 及与$(Dy/Yb)_N$正相关的地球化学特点(图 1). 这些特点只能用源区部分熔融时有石榴石、金红石, 而无斜长石残留相来解释, 要求地壳深度>50 km. 这指示大别山 143~131 Ma 时仍存在加厚镁铁质下地壳, 且发生部分熔融产生了低镁埃达克质岩浆[17]. He 等人[17]提出的这套新地球化学指标可以用于区分低镁埃达克质岩和具有高 Sr/Y 特征而又非高压成因的花岗岩, 对文献报道的此类非高压成因高 Sr/Y 花岗岩用该图均获得良好判别效果.

1.2 两类花岗质岩石的地球化学演化对山根垮塌时代的制约

大别山碰撞后花岗质岩浆岩自 130 Ma 以后失去高$(La/Yb)_N$, Sr/Y, $(Dy/Yb)_N$, Sr/Ca 等指示加厚下地壳熔融的特征(图 2), 说明自 130 Ma 起, 大别山不再具有加厚下地壳, 花岗岩由正常中-下地壳部分熔融产生, 残留相有斜长石存在. 这一变化发生时代, 与幔源镁铁质岩浆岩的侵入时代(131~123 Ma)吻合(图 2), 反映了在加厚下地壳拆沉时的地幔上涌响应[6,18~22]. 此外, 大别山碰撞后镁铁质岩浆岩 Sr-Nd 同位素与低镁埃达克岩的一致性也证明拆沉加厚下地壳对上涌地幔的混染作用[18]. 因此, 大别山山根垮塌发生在 130 Ma 左右[17].

山根垮塌和加厚镁铁质下地壳拆沉不仅导致地幔上涌和镁铁质岩浆事件, 还导致造山带下-中地壳的部分熔融, 产生 130 Ma 以后的大规模花岗质岩浆作用[4,5,17,23]. 尽管大别山中部由于岩浆穹窿的隆升和剥蚀使得中-下地壳出露, 矿产资源较少[24~26], 大别山北部北淮阳地区白垩纪特大型钼矿床的发现[26]显示了这一山根去根过程对成矿作用的意义. 加厚下地壳的部分熔融发生在山根垮塌前, 它导致了造山带下地壳弱化, 加大其重力不平衡, 因此是引发加厚下地壳与其上地壳拆离的重要原因. 在 143 Ma 以前, 大别山没有岩浆作用, 榴辉岩相镁铁质下地壳尽管比重大, 但因其力学强度大, 也不会发生拆沉.

2 大别山混合岩地球化学: 已折返超高压岩片在中地壳熔融的证据

前人研究表明北大别带混合岩可分为两期, 早期为遭受变形的灰白色脉体, 年龄~139 Ma; 晚期为未变形淡粉色脉体, 年龄~123 Ma[27]. 由于早期混合岩年龄与低镁埃达克岩年龄一致, 我们关注的问题是早期混合岩淡色体是否与低 Mg 埃达克岩有相同的地球化学特征和源区? Wang 等人[15]详细研究了早期混合岩的地球化学及形成条件.

2.1 淡色体的地球化学分类

根据地球化学特征混合岩早期淡色体可划分为 3 组: (1) 高$(La/Yb)_N$、中等 Sr/Y 组; (2) 低$(La/Yb)_N$、低 Sr/Y 组; (3) 高$(La/Yb)_N$、高 Sr/Y 和 Eu 正异常组. 其中第(1)和(3)组在$(La/Yb)_N$-Yb 和 Sr/Y-Y 图上落入埃达克岩区, 但都是非高压成因. 其中第(3)组在给定$(La/Yb)_N$时, 具有比埃达克质岩低的$(Dy/Yb)_N$比值和高的 Sr/Y 比值, 考虑其高的正 Eu 异常, 及淡色体在 An-Ab-Or 图上的分离结晶演化趋势, 它是斜长石堆晶产物. 第(1)组主要是叠层状混合岩脉体, 它有高$(La/Yb)_N$比值和高$(Dy/Yb)_N$比值, 表明源区有石榴石或角闪石残留; 但在给定 CaO 时, 它较埃达克质岩低的 Sr 含量和 Sr/Y 比, 以及轻微的 Eu 负异常, 说明部分熔融时源区有斜长石残留, 源区不是加厚榴辉岩相下地壳. 第(2)组具有低$(La/Yb)_N$, $(Dy/Yb)_N$ 和低 Sr/Y, 表明其源区熔融时无石榴石和角闪石残留. 它主要为斑点状混合岩脉体. 结论是混合岩淡色体不是加厚地壳熔融产物.

2.2 部分熔融发生条件

淡色体中的自形粗粒角闪石说明, 它是在熔体中结晶的, 不是残留体. 它的含斜长石+石英包裹体结构, 显示熔融过程存在如下反应:

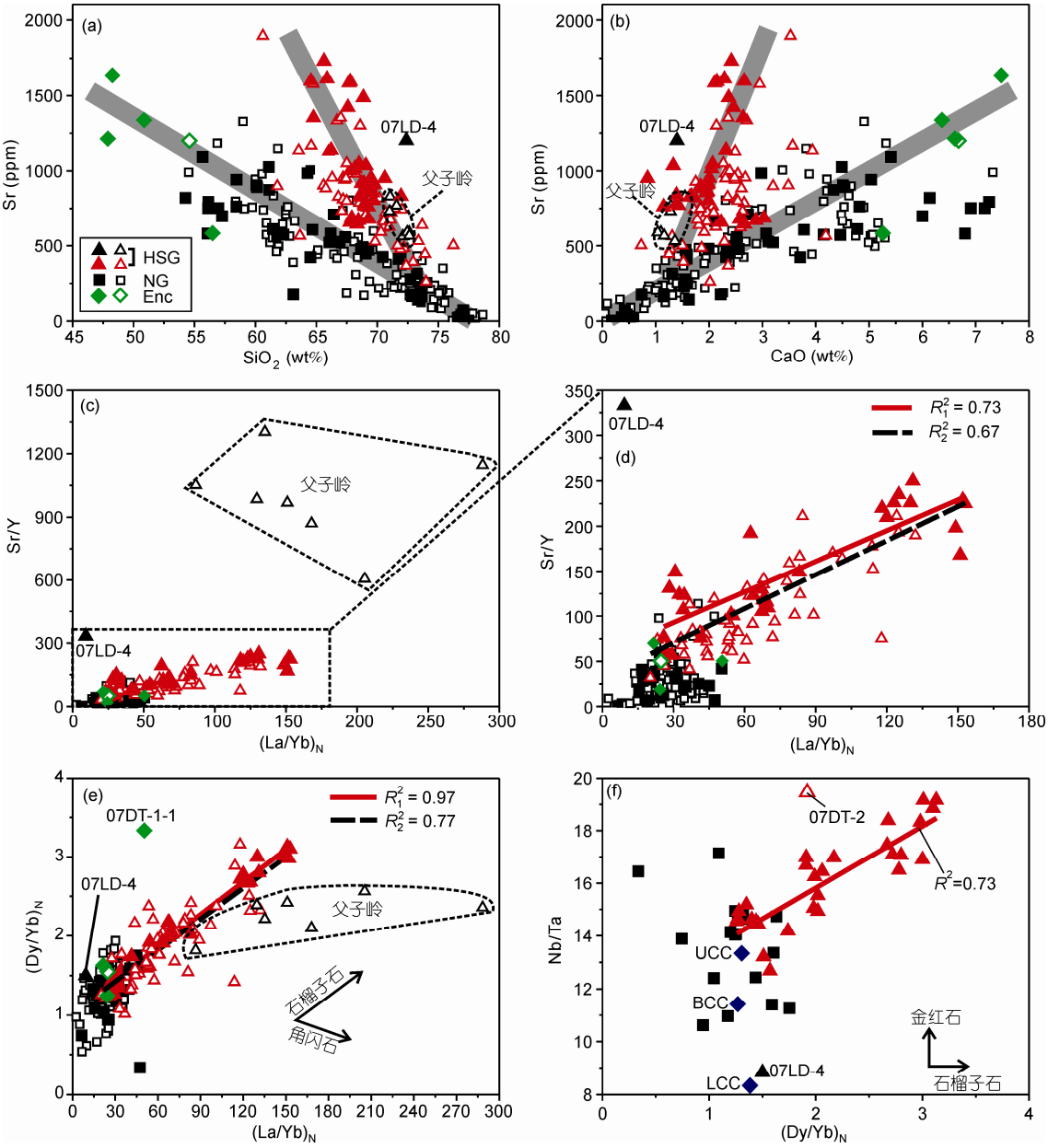


图 1　大别山低镁埃达克质岩(HSG)和普通花岗岩(NG)的微量元素判别图

(a), (b) 大别山低镁埃达克质岩(HSG)和普通花岗岩(NG)在 Sr-SiO_2 和 Sr-CaO 图上分别形成高 Sr 和低 Sr 两个演化系列[17]. Enc 为花岗岩中的基性包体(enclave). (c)~(f) 低镁埃达克质岩的 Sr/Y, $(Dy/Yb)_N$ 分别与$(La/Yb)_N$ 呈正相关, Nb/Ta 与$(Dy/Yb)_N$ 呈正相关; (f)中的 UCC, BCC, LCC 分别代表大陆上地壳、大陆地壳总体、和大陆下地壳. 图中少数具有异常值的样品(如, 父子岭、07LD-4、07DT-1-1、07DT-2)的解释见文献[17]

$$Bi + Pl + Qtz + fluid \rightarrow Hbl + melt^{[28,29]}.$$

在此反应中残留相是黑云母和斜长石, 新生矿物是角闪石. 反应矿物组合指示其源岩为长英质片麻岩. 利用 Hbl-Pl 地质温度计[30]和角闪石 Al 压力计[31], 计算其熔融条件为 706~774℃和 0.5~0.7 GPa. 其深度相当于中地壳(20~25 km). 此外, 淡色体较埃达克质岩和普通花岗岩具有低 Rb 和高 K/Rb 特征. 该特征可能受残留黑云母控制, 因为黑云母具有高 Rb、低 K/Rb 特征. 源岩含较多黑云母并在熔融时残留说明它不是加厚下地壳, 而是中地壳发生部分熔融.

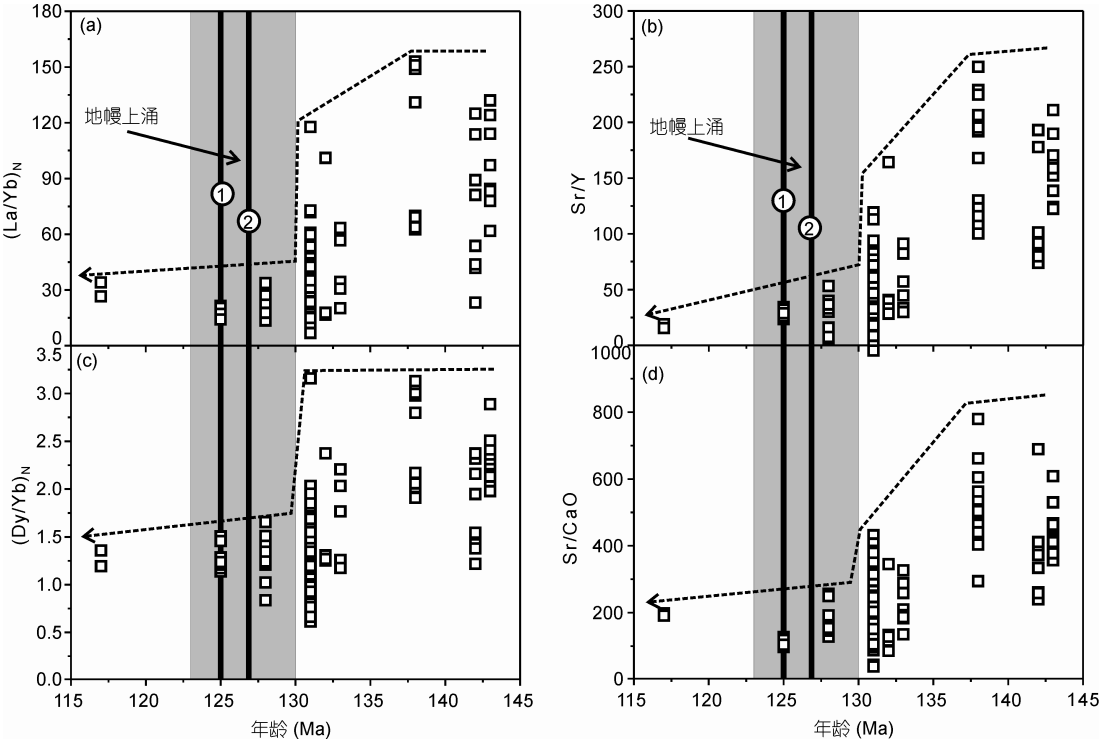


图 2　大别山碰撞后花岗质岩石的$(La/Yb)_N$(a)、Sr/Y(b)、$(Dy/Yb)_N$(c)和 Sr/CaO(d)与其形成年龄的演化曲线[17]

显示其高$(La/Yb)_N$, Sr/Y, $(Dy/Yb)_N$ 和 Sr/CaO 特征在 130 Ma 以后消失. 图中垂线①、②及灰色带分别代表大别山沙村(125 ± 2 Ma)和椒子岩(127 ± 3 Ma)基性侵入体的年龄和 2σ 误差

最近的同位素年代学研究表明, 北大别超高压岩片在 191~200 Ma 已折返至中地壳, 并经历了角闪岩相退变质作用[32]. 其对应变质温度为 400~500℃. 因此, 早白垩世北大别中地壳的部分熔融也需要一个升温事件. 中地壳混合岩化和加厚下地壳熔融产生埃达克质岩, 都是这一升温事件的响应. 我们需要回答的问题是: 为什么在山根垮塌前, 在未发生幔源岩浆事件的情况下, 而发生加厚下地壳熔融, 其热源从哪里来?

3　大别山早白垩世中-下地壳如何变热的?

以中地壳为例, 大别山中地壳早白垩世熔融温度为 700~800℃, 但中地壳一般温度在 400~500℃, 它发生部分熔融需要 300℃升温. 有 3 种可能方式导致中地壳升温变热: (1) 增厚地壳放射性元素产热; (2) 深部来源的侵入体使中地壳围岩变热; (3) 岩石圈地幔减薄, 导致中下地壳地热增温率升高的底部传导热. 下面讨论表明(1)和(2)不可能, 热源来自(3).

3.1　增厚地壳放射性元素产热不可能导致大别山中地壳早白垩世熔融

通常碰撞造山带在地壳增厚以后的最初 60 Ma, 由地壳放射性元素产生的热导致地壳温度升高; 此后, 由于剥蚀作用地壳温度下降, 回归到其初始地壳温度[33]. 大别山俯冲板片断离发生在 226 Ma, 随后发生超高压岩片折返和陆壳缩短增厚, 造山带地壳增厚应在 220~210 Ma 达到最高值. 根据上述模拟计算, 160~150 Ma 其地壳温度应该达到最高值, 但晚侏罗纪大别山没有岩浆作用, 说明大别山地壳放射产热量<2.5 μW/m^3 [33]. 造山带剥蚀速率是制约地壳增温的重要因素. 大别山侏罗纪以来的剥蚀速率较大: 合肥盆地早侏罗纪开始接受大别山剥蚀物沉积, 其中含有大量超高压变质岩石和矿物, 表明超高压岩石因剥蚀作用而出露地表[34]. 因此, 剥蚀作用导致造山带中地壳温度在 140 Ma 时应回归至正常中地壳温度(400~500℃)[33]. 因此, 地壳自身放射性产热不是导致其发生部分熔融的热源.

3.2 埃达克质岩侵入体提供热源

130 Ma 以前, 大别山没有玄武质岩浆活动. 来源深部的侵入体只有埃达克质中酸性岩浆. 它们不仅侵入到北大别地体, 也侵入到北淮阳、中大别和南大别地体. 除北大别地体外, 其他地体均无混合岩化. 因此, 不像是埃达克岩侵入体导致中地壳围岩变热而发生混合岩化.

3.3 岩石圈地幔减薄导致加厚下地壳升温

由于加厚地壳自生放射性元素产热和侵入体传热都不可能导致大别山中地壳升温至 700~800℃, 我们必须考虑来自地幔传导热的可能性. 地壳热模拟表明, 如果陆壳厚度从 35 km 加厚至 70 km, 而岩石圈地幔厚度不变(115 km), 则加厚地壳底界(Moho)温度不超过 800℃[33]. 因此, 必须使增厚地壳下的岩石圈地幔发生减薄, 才可能提升加厚镁铁质下地壳温度至 900~1000℃, 从而发生部分熔融. 但这不可能是引张减薄, 因为引张作用引发的减薄必然是岩石圈地幔和地壳的同时减薄, 这样就不会产生加厚下地壳熔融的埃达克质岩.

4 造山带岩石圈地幔减薄量估算和两阶段去山根过程模型

如果大别山早白垩世加厚地壳熔融的热源来自上地幔热传导, 我们可以对岩石圈地幔减薄量做一估算. 克拉通岩石圈地幔的地温梯度已被地幔包体数据拟合和热模拟估计为 6.6℃/km[35]. 由于岩石圈地幔产热元素含量很低, 其地温梯度主要取决于来自岩石圈与软流圈界面的热传导. 给定已发生部分熔融加厚下地壳底界温度为 1000℃[36], 岩石圈地幔底界温度为 1300℃[35], 则可估计其下的岩石圈地幔厚度应≤45 km. 如果加厚地壳厚度为 70 km, 则减薄后岩石圈总厚度为 115 km, 与正常岩石圈类似. 这要求, 在早白垩世之前大别山岩石圈地幔的加厚突出部位要被剥离. 考虑到大别山此时未发生玄武质岩浆事件, 软流圈对流剥离模型[2]较为适合.

基于上述成果与考虑, 本文提出大别山两阶段山根垮塌模型. 三叠纪-侏罗纪, 华南-华北陆块的持续汇聚, 导致大别造山带地壳及岩石圈地幔增厚(图 3(a)). 造山带增厚岩石圈向下凸入对流的软流圈地幔. 冷山根和周围热软流圈的温差造成上地幔向

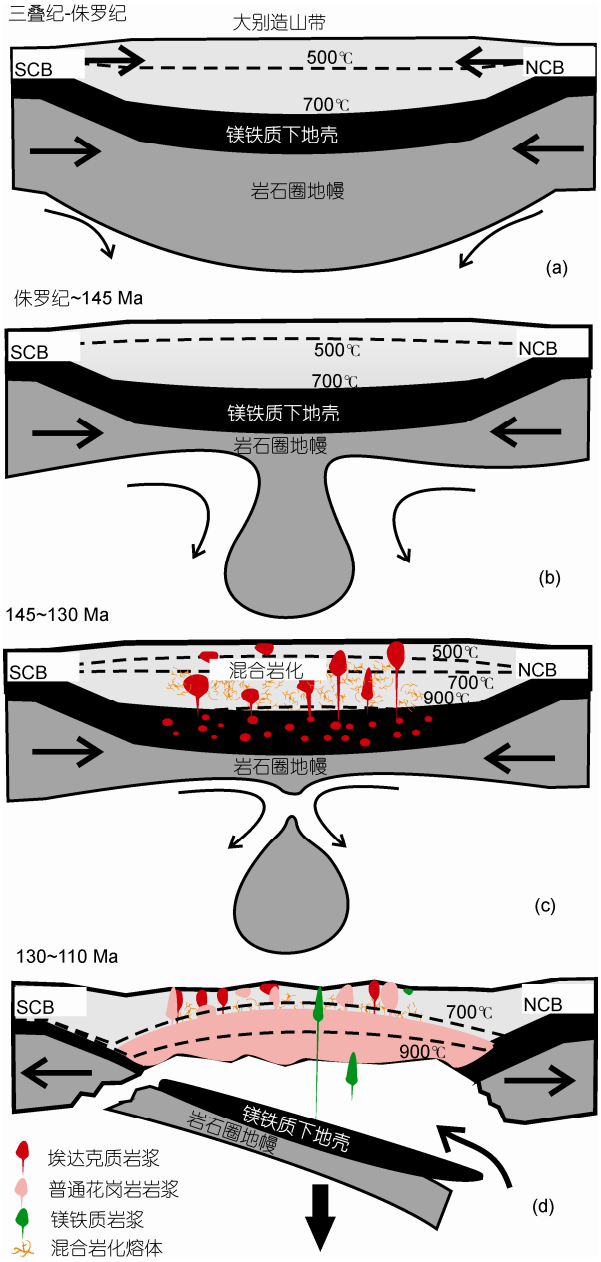


图 3 大别造山带两阶段去山根过程模型

山根的对流(图 3(b)). 这一地幔对流导致突出岩石圈山根的不稳定性, 并最终导致在~145 Ma 时岩石圈地幔突出部位被除掉[2], 使加厚下地壳以下的岩石圈地幔减薄至≤45 km (图 3(c)). 由于软流圈-岩石圈底界的抬升, 导致岩石圈下部地热增温率升高, 和下-中地壳温度的升高及部分熔融, 从而产生了低镁埃达克质岩浆和中地壳的混合岩化(图 3(c)). 加厚下地壳的部分熔融使其力学强度弱化, 残留相比重进一步增大, 从而触发了加厚镁铁质下地壳的拆沉和

山根垮塌, 它伴随有地幔上涌和未拆沉中下地壳的部分熔融, 生成碰撞后镁铁质岩浆岩和普通花岗岩(图 3(d)).

大别山去山根过程的两阶段模型对理解岩石圈减薄过程和机制可能具有更普遍的意义. 它表明软流圈对流侵蚀和加厚下地壳拆沉这两种岩石圈减薄机制并不是相互排斥的, 它们在岩石圈减薄过程中具有因果关系.

参考文献

1 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892–897

2 Molnar P, Houseman G A, Conrad C P. Rayleigh-Taylor instability and convective thinning of mechanically thickened lithosphere: Effects of non-linear viscosity decreasing exponentially with depth and of horizontal shortening of the layer. Geophys J Int, 1998, 133: 568–584

3 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 817–827

4 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2609–2636

5 Xu H J, Ma C Q, Ye K. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. Chem Geol, 2007, 240: 238–259

6 Xu H J, Ma C Q, Song Y R, et al. Early Cretaceous intermediate-mafic dykes in the Dabie orogen, eastern China: Petrogenesis and implications for crust-mantle interaction. Lithos, 2012, 154: 83–89

7 Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth Planet Sci Lett, 2006, 243: 581–593

8 Richards J R, Kerrich R. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. Econom Geol, 2007, 102: 537–576

9 Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. Contrib Mineral Petrol, 2004, 148: 489–501

10 Guo F, Nakamuru E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China. J Petrol, 2007, 48: 661–692

11 Jiang N, Liu Y S, Zhou W G, et al. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2591–2608

12 Kamei A, Miyake Y, Owada M, et al. A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. Lithos, 2009, 112: 615–625

13 Moyen J F. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the 'adakitic signature'. Lithos, 2009, 112: 556–574

14 Zhang S B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from neoproterozoic granitoids in South China. Lithos, 2009, 113: 347–368

15 Wang S J, Li S G, Chen L J, et al. Geochronology and geochemistry of leucosomes in the North Dabie Terrane, East China: Implication for post-UHPM crustal melting during exhumation. Contrib Mineral Petrol, 2013, 165: 1009–1029

16 Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. Contrib Mineral Petrol, 2009, 157: 383–409

17 He Y S, Li S G, Hoefs J, et al. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust. Geochim Cosmochim Acta, 2011, 75: 3815–3838

18 He Y S, Li S G, Hoefs J, et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Early Cretaceous granitoids from the Dabie orogen: Constraints on the recycled lower continental crust. Lithos, 2013, 156-159: 204–217

19 Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-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, 1999, 157: 119–146

20 Wang Y J, Fan W M, Peng T P, et al. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. Chem Geol, 2005, 220: 165–189

21 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. 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, 2005, 83: 1–28

22 Huang F, Li S G, Dong F, et al. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China. Lithos, 2007, 96: 151–169
23 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. Lithos, 2007, 93: 248–272
24 侯振辉, 李曙光, 陈能松, 等. 大别造山带惠兰山镁铁质麻粒岩 Sm-Nd 和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及锆石微量元素地球化学. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 1103–1111
25 王国灿, 杨巍然. 大别造山带中新生代隆升作用的时空格局——构造年代学证据. 地球科学, 1998, 23: 461–467
26 张红, 孙卫东, 杨晓勇, 等. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究. 地质学报, 2011, 85: 2039–2059
27 Wu Y B, Zheng Y F, Zhang S B, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: Constraints on partial melting. J Metamorph Geol, 2007, 25: 991–1009
28 Cruciani G, Franceschelli M, Jung S, et al. Amphibole-bearing migmatites from the Variscan Belt of NE Sardinia, Italy: Partial melting of mid-Ordovician igneous sources. Lithos, 2008, 105: 208–224
29 Slagstad T, Jamieson R, Culshaw N. Formation, crystallization, and migration of melt in the mid-orogenic crust: Muskoka domain migmatites, Grenville Province, Ontario. J Petrol, 2005, 46: 893–919
30 Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contrib Mineral Petrol, 1994, 116: 433–447
31 Schmidt M. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contrib Mineral Petrol, 1992, 110: 304–310
32 Wang S J, Li S G, An S C, et al. A granulite record of multistage metamorphism and REE behavior in the Dabie orogen: Constraints from zircon and rock-forming minerals. Lithos, 2012, 136-139: 109–125
33 Clark C, Fitzsimons I, Healy D, et al. How does the continental crust get really hot? Elements, 2011, 7: 235–240
34 李任伟, 万渝生, 陈振宇, 等. 根据碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年恢复早侏罗世大别造山带源区特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 320–328
35 Hasterok D, Chapman D S. Heat production and geotherms for the continental lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 2011, 307: 59–70
36 Rapp R, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities. Precambrian Res, 1991, 51: 1–25