

# 大别造山带深部地缝合线与地表地缝合线的解耦 及大陆碰撞岩石圈楔入模型：中生代幔源 岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素证据

李曙光 杨蔚

(中国科学技术大学地球与空间科学系, 合肥 230026. E-mail: lsg@ustc.edu.cn)

**摘要** 中国东部华北和华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩的 Nd-Pb 同位素存在显著差异: 华北陆块中生代幔源岩浆岩的  $\epsilon_{Nd}$  值可低至  $-15 \sim -21$ ,  $^{206}Pb/^{204}Pb < 17.9$ , 而华南陆块的  $\epsilon_{Nd}$  值  $> -10$ ,  $^{206}Pb/^{204}Pb > 18.3$ . 大别造山带北部发育的中生代辉石-辉长岩的  $\epsilon_{Nd}$  值可低至  $-19$ ,  $^{206}Pb/^{204}Pb < 17.3$ . 这说明北大别带深部岩石圈的地球化学特征与华北陆块岩石圈类似, 而不同于华南陆块. 因此, 虽然大别造山带华北与华南陆块地表地缝合线位于北大别带北侧, 但是切割中国东部的中生代深部岩石圈 Nd 同位素剖面显示其深部地缝合线应位于北大别带以南. 这与前人建议的郟庐断裂以东深部地缝合线南移现象是一致的, 但与华南陆块地壳向北俯冲相矛盾. 这一深部地缝合线与地表地缝合线的解耦现象可以用大陆碰撞岩石圈楔入模型来解释. 俯冲板片断离后, 两陆块的持续会聚可形成缝合带的强挤压环境, 从而导致已折返的俯冲陆壳与未折返的镁铁质地壳及岩石圈地幔分离, 并使华北陆块下地壳及岩石圈楔入扬子陆块北缘俯冲陆壳和岩石圈地幔之间. 这一构造作用导致华南陆块原俯冲陆壳向北仰冲, 而华南陆块深部岩石圈向华北陆块下俯冲. 它是导致大别山侏罗纪超高压变质岩的第 2 次快速抬升和岩石圈拆离 (delamination) 及相应岩浆作用的重要构造机制. 大别-苏鲁造山带深部地缝合线南移也为早白垩纪沿江中下游一带发生的大规模中生代岩浆-成矿作用创造了深部构造条件.

**关键词** 大别造山带 碰撞构造 中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学

根据超高压变质岩在苏鲁地区的分布, 华北与华南陆块的地表地缝合线应位于苏鲁超高压变质带北缘五莲断裂一线(见图 1 中 S1). 然而 Li<sup>[1]</sup> 根据中国东部的航磁数据, 提出郟庐断裂以东, 华北与华南陆块的深部岩石圈地缝合线应位于南京以东一线(见图 1 中 S2), 它较地表地缝合线南移了 400 km, 这与华南陆块地壳向北俯冲的认识相矛盾. 对此, Li<sup>[1]</sup> 提出在陆块拼合时俯冲陆壳上、下地壳发生分离的构造模型来给以解释. Chung<sup>[2]</sup> 通过对苏北新生代玄武岩的地球化学研究, 发现苏北六合一带玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征和华北陆块内部新生带玄武岩类似, 但与华南陆块的新生代玄武岩不同. 据此, Chung<sup>[2]</sup> 指出这里的岩石圈地幔是华北型的, 而非华南型的. 这一观测有力地支持了郟庐断裂以东深部地缝合线应位于长江一线的模式.

很显然, Li<sup>[1]</sup> 和 Chung<sup>[2]</sup> 观察到的郟庐断裂带以东地表与深部地缝合线的解耦(decoupling)现象对我们理解大别-苏鲁造山带的深部构造提供了一个新的

制约, 然而尚有如下问题需要解决: (1) 郟庐断裂以西深部地缝合线的位置尚属未知; (2) 关于俯冲上、下陆壳分离发生的时间、地点等关键问题尚需要更充分的制约和更深入的讨论; (3) 这一深部地缝合线南移对大别造山带及邻区的中生代岩浆作用所具有的地质意义尚缺乏讨论.

显然这些问题的解决对理解这一构造现象的动力学机制及其地质意义有重要的意义. 本文将根据中国东部中生代幔源岩浆岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成探讨郟庐断裂以西的深部地缝合线的位置, 并在此基础上对上述其他问题进行讨论.

## 1 数据的来源

几乎所有对中国东部中生代镁铁质岩浆岩的研究都普遍认为这些岩浆岩源于富集的岩石圈地幔, 或叠加一定程度的下地壳影响<sup>[3-19]</sup>. 因此, 华北陆块、大别山及华南陆块中生代镁铁质岩浆岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成可以指示这三大地质单元各自岩石圈地幔及下地壳的性质.

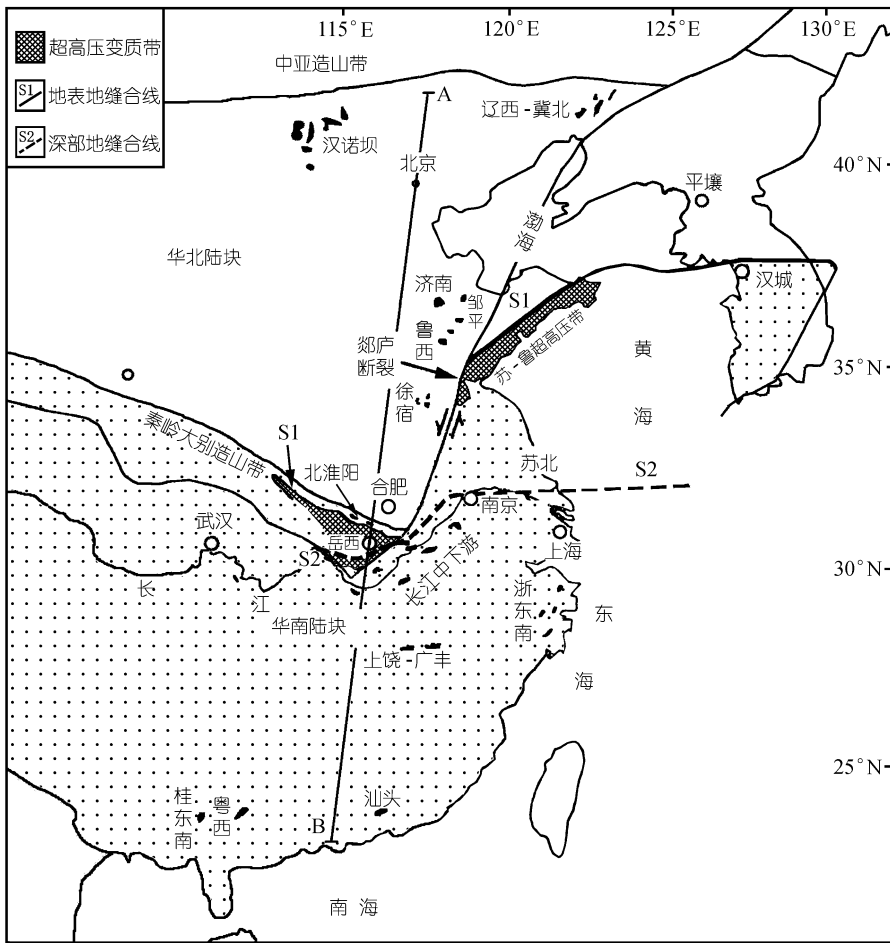


图 1 中国东部郯庐断裂以西有 Sr, Nd, Pb 同位素数据报道的中生代镁铁质岩浆岩的分布及大别-苏鲁造山带地表(S1)和深部地缝合线(S2)位置示意图  
沿 AB 方向的岩石圈 Nd 同位素剖面示于图 4

本文所用的数据为近年来已公开发表的上述三大地质单元中生代镁铁质岩浆岩(辉石岩, 辉长岩, 玄武岩及少量与玄武岩共生的橄榄安粗岩)和代表这一时期岩浆底侵作用的基性麻粒岩包体的 Sr-Nd-Pb 同位素数据<sup>[3-19]</sup>。这些岩石的分布位置见图 1。这些岩石的形成时代大多数为早白垩纪(130 ~ 110 Ma), 少量为侏罗纪(190 ~ 160 Ma)。由于这些数据是在不同的实验室获得的, 为了便于比较, 凡报道有标准样测定值的数据均对应同一标准样值(NBS-987 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710250; BCR-1 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512630; NBS981 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 0.9142 ± 0.0015)标准化。标准化后的 Sr-Nd 同位素数据经年龄校正后给出初始同位素比值并投影到 Sr-Nd 同位素图上(图 2)。因文献报道的 Pb 同位素数据多数未测 U/Pb, 因而未进行年龄校正。但大别山祝家铺辉石-辉长岩的 U-Pb 同位素地球化学研究表明这类镁铁质岩浆岩  $\mu$  值低, 年龄

较年轻, 故年龄修正量很小, 不影响讨论结果<sup>[11]</sup>。

## 2 华北与华南陆块中生代镁铁质岩浆岩源区的 Sr-Nd-Pb 同位素差异

图 2 显示华北和华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩的 Sr 同位素有类似组成, 但它们的  $\epsilon_{Nd}$  值有显著的差异。华北陆块中生代镁铁质岩浆岩的初始  $\epsilon_{Nd}$  值可低至 -15 ~ -21, 而华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩的初始  $\epsilon_{Nd}$  不小于 -10。其中  $\epsilon_{Nd} > 0$  的样品主要来自华南陆块南部, 而华南陆块北部扬子克拉通  $\epsilon_{Nd}$  值较为一致, 其最低值为 -9.2 ~ -9.8。这一差异反映了其岩浆岩源区富集端元的 Nd 同位素组成不同。图 2 还显示, 除一个样品外, 华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩主要表现为亏损地幔与 EM II 富集端元的混合趋势。与此相反, 华北陆块中生代镁铁质岩浆岩除少量鲁西富钾火山岩和煌斑岩外主要表现为亏损或少亏损

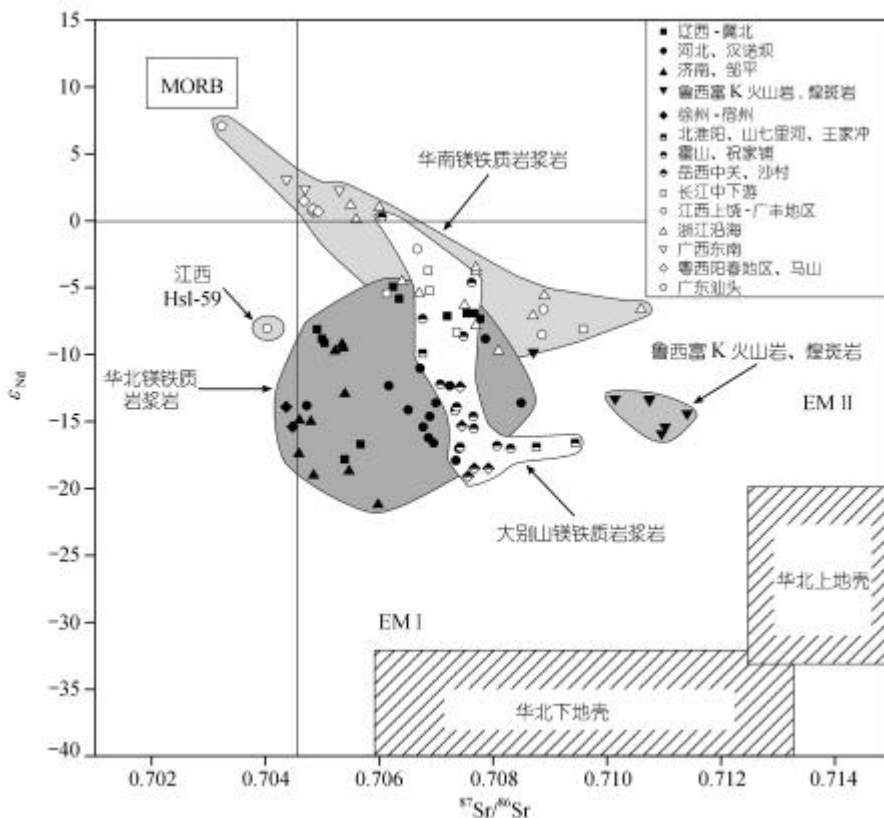


图 2 中国东部华北、华南陆块及大别造山带中生代镁铁质岩浆岩的 Sr-Nd 同位素图

所有数据为对应岩浆岩形成时代的初始值。数据来源见文献[3~10, 12~20]。华北上、下地壳 Sr-Nd 同位素范围据文献[4]。MORB 区位置据文献[21]

地幔与 EM I 富集端元的混合结果(图 2)。鲁西富钾岩浆岩具有的 EM II 特征可能反映了华北岩石圈地幔中局部受到俯冲带流体交代作用影响<sup>[8]</sup>。华北和华南陆块部分样品在较高  $\epsilon_{Nd}$  值水平上的重叠(见图 2)可能反映了它们的源区均有亏损地幔端元卷入。这与中国东部新生代玄武岩显示的同位素特征类似, 来自华北陆块的新生代玄武岩显示了具有低  $\epsilon_{Nd}$  和低  $^{206}Pb/^{204}Pb$  值的 EM I 特征, 而来自华南的新生代玄武岩具有较高  $\epsilon_{Nd}$  和  $^{206}Pb/^{204}Pb$  的 EM II 特征, 而二者样品在同位素图上的少量重叠部位反映了共同的亏损地幔端元<sup>[2]</sup>。事实上华北也有部分新生代玄武岩表现出 EM II 特征<sup>[22]</sup>。

对于中国东部中生代镁铁质岩浆岩具有的 EM I 或 EM II 的 Sr-Nd 同位素特征可以有两种解释: (1) 这些岩浆岩分别源于具有 EM I 或 EM II 特征的富集岩石圈地幔<sup>[5,6]</sup>。因此华北陆块中生代镁铁质岩石较低的  $\epsilon_{Nd}$  值可能反映了华北岩石圈地幔较华南岩石圈地幔具有更高的富集程度或更古老的交代富集时代; (2) 它们的 EM I 或 EM II 特征是幔源岩浆在底侵或侵入过程中与下地壳相互作用的结果, 因此它反映各陆块岩石圈地幔和下地壳的综合性质<sup>[3,4]</sup>。由于华

北陆块的太古代岩石较华南陆块分布广泛, 因此, 华北中生代镁铁质火成岩较低的  $\epsilon_{Nd}$  值可能反映了华北下地壳较华南下地壳有更古老的年龄。尽管本文倾向第 2 种解释, 但探讨这两种解释的优劣不是本文的目的。因为无论哪种解释, 都承认华北和华南陆块中生代幔源岩浆岩初始  $\epsilon_{Nd}$  的显著差异反映了这两大陆块中生代深部岩石圈 Nd 同位素组成的差异, 其分歧仅在于该大陆深部岩石圈是否包含下地壳部分。然而这不影响本文主要研究目标的讨论。因此, 中国东部中生代镁铁质火成岩  $\epsilon_{Nd}$  值的突然变化带就应当是华北和华南两个陆块深部岩石圈的边界或地缝合线。

已报道的中国东部中生代镁铁质岩浆岩的 Pb 同位素数据远少于 Sr-Nd 同位素数据, 但其样品仍覆盖了两大陆块的主要地区, 如华北陆块的北部和中部地区及华南陆块的北部及东部地区。已有的数据表明, 华北和华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩的 Pb 同位素组成有显著差异。图 3 显示来自华北陆块的中生代镁铁质岩浆岩具有低放射成因 Pb 同位素特征 ( $^{206}Pb/^{204}Pb < 17.9$ ), 而来自华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩显示出类似于 EM II 的较高的放射成因 Pb 特征 ( $^{206}Pb/^{204}Pb > 18.0$ )。这与大量中国东部新生代玄

武岩揭示的华北和华南陆块岩石圈地幔的 Pb 同位素特征和差异是一致的<sup>[2,13]</sup>(图 3). 因此, 大别造山带中生代镁铁质岩石的 Pb 同位素组成也可作为判断其源区属于华北还是华南岩石圈的一个指标.

### 3 郟庐断裂以西大别山区华北和华南陆块深部地缝合线位置

大别造山带自北向南可划分为四个变质-构造单元: (1) 北淮阳绿片岩相-角闪岩相变质带(简称北淮阳带); (2) 北大别杂岩带(简称北大别带); (3) 南大别

超高压变质带; (4) 红安-宿松低温高压变质带. 显然, 南大别超高压变质带及红安-宿松低温高压变质带均为华南俯冲陆壳的一部分. 大量的地质、地球化学工作<sup>[23]</sup>, 尤其是近年来北大别带三叠纪榴辉岩的发现<sup>[24,25]</sup>, 证明了北大别带也是华南俯冲陆壳的一部分; 与此相反, 在北淮阳带发现有定远组古生代岩浆弧<sup>[23]</sup>. 因此, 郟庐断裂以西大别山区地表地缝合线应位于北大别带北侧(见图 1 中 S1)<sup>[23]</sup>.

大别造山带北部地区, 包括北淮阳地体和北大别杂岩带, 均发育有许多碰撞后辉石岩和辉长岩侵

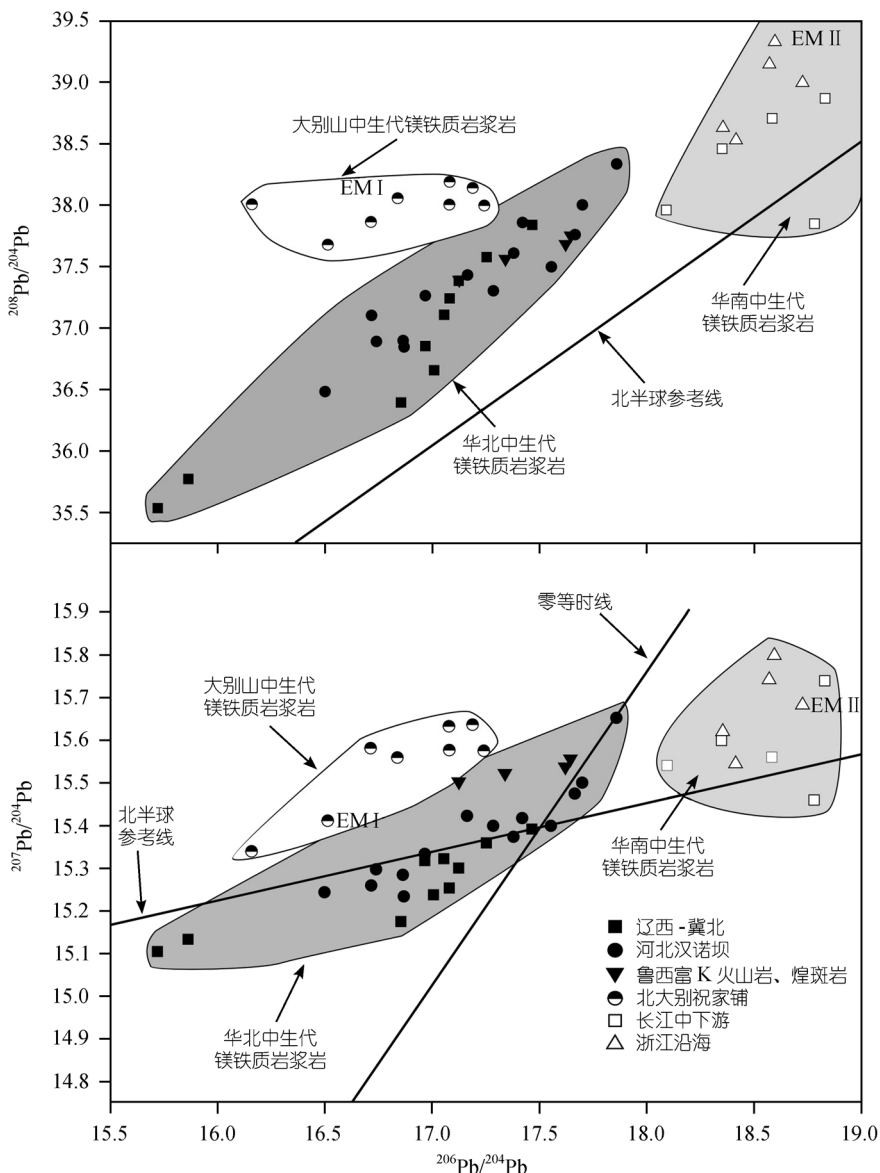


图 3 中国东部华北、华南陆块及大别造山带中生代镁铁质岩浆岩的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图 EM I, EM II 端元和北半球参考线及地球等时线位置据文献[21]. 数据来源见文献[5,8,10~13,16]

入体. 锆石 U-Pb 年龄证明它们形成在早白垩纪(130 ~ 120 Ma)<sup>[26,27]</sup>. 李曙光等人<sup>[3]</sup>和 Jahn 等人<sup>[4]</sup>报导了北淮阳的山七里河和王家冲, 北大别带北部的祝家铺、童家冲、任家湾及南部岳西中关沙村的辉石和辉长岩 Sr-Nd 同位素组成. 图 2 显示, 大别山这些中生代幔源岩石的 Sr-Nd 同位素组成与华北中生代镁铁质岩浆岩类似, 表现出亏损地幔和 EM I 富集地幔端元混合的趋势, 且大多数样品具有很低  $\epsilon_{Nd}$  值(-12 ~ -19). 最近黄方等人<sup>[11]</sup>报道了北大别带祝家铺辉石-辉长岩的 U-Pb 同位素组成. 尽管它们有较高的  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb$  值, 但它们的低放射成因 Pb 同位素组成( $^{206}Pb/^{204}Pb < 17.3$ )与华北部分(主要为辽西-冀北样品)中生代镁铁质岩浆岩类似(见图 3). 它们较高的  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和高 Th/U 可能与它们源区含有较特殊的高  $^{207}Pb/^{204}Pb$  LOMU 端元有关<sup>[11]</sup>. 这些 Sr-Nd-Pb 同位素观测结果表明, 北大别带下面的深部岩石圈应当属于华北陆块岩石圈的一部分.

将汇集的初始  $\epsilon_{Nd}$  值投影到位于郯庐断裂带以西, 并切割华北陆块, 大别山和华南陆块的纵剖面上(图 4), 可清楚地显示中国东部中生代幔源岩浆岩的  $\epsilon_{Nd}$  值在大别山南部、长江以北发生突变. 这说明在大别造山带华北和华南陆块的深部地缝合线至少位于北大别带的南缘. 因此尽管深部地缝合线的准确位置由于缺少大别山南部中生代幔源岩浆岩的 Nd 同位素数据尚不能很好的确定, 但可以肯定的是这一深部地缝合线已显然较地表地缝合线至少南移了 50 km (见图 1 中 S2).

#### 4 大别-苏鲁造山带深部地缝合线与地表地缝合线解耦的动力学机制: 碰撞岩石圈楔入模型

本文提供的证据证明郯庐断裂以西的大别山区同样存在深部地缝合线与地表缝合线的解耦现象. 它说明 Li<sup>[1]</sup>所建议的华南俯冲陆壳上、下地壳之间的分离并不是郯庐断裂以东特有的现象, 而是大别-苏鲁碰撞造山带共有的特征. 这一深部地缝合线与地表地缝合线解耦现象可以用大陆碰撞岩石圈楔入模型来解释. 该模型与 Li 提出的模型类似, 但给予如下 3 点新的制约:

(i) 已出露地表的大别山和苏鲁超高压变质岩位于该模型仰冲地壳部分. 因此, 这一俯冲陆壳与深部岩石圈分离事件应发生在超高压岩石拆返到中上地壳以后, 而不是发生在陆壳俯冲过程中. 大别山超高压变质岩冷却史研究表明, 超高压变质岩第一次被快速抬升至中地壳( $T = 500^{\circ}C$ )的时代为  $219 \pm 5$  Ma<sup>[28]</sup>. 这与该带碰撞花岗岩形成时代(210 ~ 220 Ma)<sup>[29,30]</sup>一致, 它说明这一快速抬升过程与俯冲板块断离有关<sup>[31]</sup>. 因此已折返的俯冲陆壳与深部岩石圈分离事件显然应当是晚三叠纪以后的构造事件.

(ii) 大别山深部地缝合线南移现象是依据早白垩纪镁铁质岩浆岩的同位素数据揭示的. 因此, 这一深部地缝合线南移事件应发生在早白垩纪以前. 此外, 与大别山深部地缝合线位置(岳西以南)相比, 郯庐断裂以东的深部地缝合线(南京镇江一线)至少北移了 150 km. 这显然是早白垩纪郯庐断裂大规模左

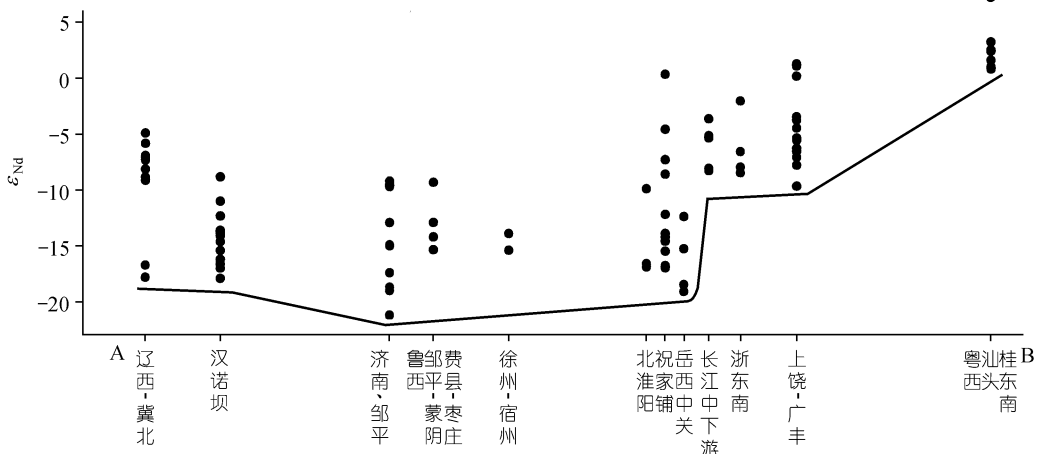


图 4 切割中国东部华北、华南的深部岩石圈 Nd 同位素剖面(剖面位置见图 1 中 A-B)  
图中  $\epsilon_{Nd}$  值为对应中生代镁铁质岩浆岩形成时代的初始值

行走滑造成的<sup>[32,33]</sup>. 因此, 这一普遍的深部地缝合线南移事件应发生在郟庐断裂大规模走滑发生(早白垩纪)以前.

(iii) 岩石学及 U-Pb 同位素地球化学研究表明大别山北部已出露地表的榴辉岩和灰色片麻岩具有中、下地壳性质<sup>[26,34]</sup>, 由于它们位于该区深部岩石圈地缝合线以北, 它们应属于华南俯冲陆壳的仰冲部分. 因此, 大别山区俯冲岩石圈的分离可能发生的部位更深一些. 它可能发生在已折返的俯冲陆壳与未折返的高密度镁铁质下地壳与岩石圈地幔之间.

基于上述三点考虑, 本文提出俯冲板片断离后华北与华南陆块相互作用的楔入模型来解释这一深部地缝合线南移现象. 华南俯冲板片断离, 俯冲陆壳折返至中地壳之后, 华北与华南陆块的会聚仍在继续. 这种俯冲板片断离后继续会聚现象已在阿尔卑斯和喜马拉雅造山带观察到<sup>[31,35]</sup>, 它可导致缝合带成强挤压环境<sup>[35]</sup>. 在此挤压条件下, 华南陆块已折返陆壳和岩石圈地幔在侏罗纪发生分离, 并使华北陆块南缘中-下地壳及岩石圈地幔沿大别-苏鲁造山带楔入华南陆块北缘岩石圈. 分离的华南俯冲陆壳向北仰冲, 而分离的华南镁铁质下地壳(榴辉岩)和岩石圈地幔则向华北陆块南缘下俯冲, 并最终拆离(delamination)沉入软流圈地幔, 从而使深部岩石圈地缝合线南移(见图 5). 与此同时, 华北陆块南缘上地壳向北推覆形成侏罗系前陆盆地(见图 5). 合肥盆地中一系列南倾侏罗纪的逆冲断层, 及中上侏罗统沉积厚度的明显增大<sup>[36]</sup>均说明这一点. 本文认为, 俯冲板片断离后的岩石圈楔入与大陆俯冲和板片断

离一样是大别-苏鲁带碰撞造山过程中的一个重要演化阶段.

### 5 构造意义

本文提出的大别山深部岩石圈地缝合线南移及碰撞后岩石圈楔入模型将有助于我们认识大别山侏罗纪(180 ~ 170 Ma)超高压变质岩的第 2 次快速抬升和岩石圈拆离的机制以及长江中下游中生代大规模岩浆事件和铜铁成矿作用发生的构造背景.

首先, 依据岩石圈楔入模型, 华南陆块北缘俯冲陆壳(包含已折返至上地壳的超高压变质岩)的仰冲和华南陆块北缘俯冲镁铁质下地壳和岩石圈地幔的拆离(见图 5), 可使大别山已上升至中地壳的超高压变质岩石在 170 Ma 时又一次快速抬升至上地壳<sup>[28]</sup>, 其中部分可在中-晚侏罗纪经剥蚀作用出露地表<sup>[37]</sup>. 而被拆离的华南陆块岩石圈地幔及榴辉岩化山根有可能沉入软流圈并引发上地幔扰动及相关岩浆事件. 大别山北部一些 170 ~ 160 Ma 左右的岩浆事件<sup>[38,39]</sup>可能是这一次拆离事件的反应<sup>[40]</sup>. 此外, 图 1 显示, 华北与扬子陆块深部地缝合线的走向轨迹可能是在郟庐断裂以西位于岳西以南, 其位置已接近长江. 郟庐断裂以东的深部地缝合线可分为两段, Li<sup>[1]</sup>已指出南京以东的深部地缝合线沿长江呈东西走向, 南京以西的地缝合线尚未很好的确定, 但它必然与南京和大别山的深部地缝合线相连接. 因此, 我们认为在郟庐断裂附近, 它有可能被郟庐断裂拖曳呈北东向走向(见图 1). 有趣的是长江中下游中生代岩浆岩铜铁成矿带也是平行这一轨迹分布. 这一中侏罗纪形

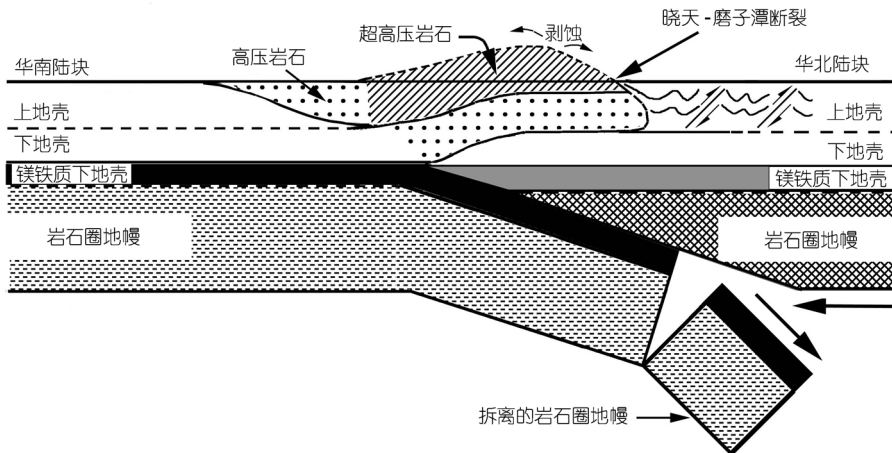


图 5 大别山碰撞后岩石圈楔入模型示意图  
侏罗纪华北陆块岩石圈向南楔入华南陆块岩石圈导致俯冲陆壳与深部岩石圈发生分离

成的深部地缝合线是岩石圈的构造薄弱带。因此,当郯庐断裂系在早白垩纪发生大规模左行走滑时,有可能导致这一深部地缝合线的引张,从而在华北与扬子陆块深部地缝合线处引发了地幔上隆及大规模岩浆事件以及相关的铜铁成矿作用<sup>[41,42]</sup>。这一平行造山带的晚期大陆引张带与碰撞拼合带的耦合关系说明大陆引张带发生的位置及走向与先期碰撞造山带的地缝合线在新的地球动力学背景下有继承转化关系。

**致谢** 在思考本文的科学问题时,曾与常印佛院士进行过讨论,颇受启发和鼓舞。Li Z -X 博士审阅了该文初稿并提出了修改建议,从而使该文得以改进。本工作受国家自然科学基金(批准号:49873006)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503)和中国科学院知识创新项目(KZCXZ-107)资助。

### 参 考 文 献

- 1 Li Z -X. Collision between the North and South China Blocks: A crustal-detachment model for the suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 1994, 22: 739 ~ 742
- 2 Chung S -L. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the Eastern Plate Boundary between North and South China. *J of Geology*, 1999, 107: 301 ~ 312
- 3 李曙光, 聂永红, Hart S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔相互作用——II. 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的 Sr, Nd 同位素地球化学. *中国科学, D 辑*, 1998, 28: 18 ~ 22
- 4 Jahn B -M, Wu F, 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
- 5 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. *地球化学*, 2001, 30: 10 ~ 23
- 6 Guo F, Fan W -M, Wang Y -L, et al. Late mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 759 ~ 771
- 7 邱检生, 王德滋, 曾家湖, 等. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学. *高校地质学报*, 1997, 3: 384 ~ 395
- 8 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及源区示踪. *科学通报*, 2001, 46(18): 1500 ~ 1508
- 9 林景仟, 谭东娟, 厉建华, 等. 华北陆块南缘早侏罗世徐州斑井侵入杂岩体. *长春科技大学学报*, 2000, 30: 209 ~ 214
- 10 张国辉, 周新华, 孙敏, 等. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石类捕虏体 Sr, Nd, Pb 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 1998, 14: 190 ~ 197

- 11 黄方, 李曙光, 周红英, 等. 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的 U-Pb 同位素地球化学: 壳-幔相互作用及 LOMU 端元. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(8): 625 ~ 634
- 12 陈江峰, 周泰禧, 张巽, 等. 长江中下游岩带含铜岩体的同位素地球化学研究. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 121 ~ 131
- 13 张理刚. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 1995. 92
- 14 廖群安, 王学名, 薛重生, 等. 江西广丰白垩纪盆地中两类玄武岩特征及其与盆地演化的关系. *岩石学报*, 1999, 15: 116 ~ 123
- 15 俞云文, 周泰禧, 陈江峰. 浙江玄坛地早白垩世晚期双峰式火山岩特征及其成因. *南京大学学报(地球科学)*, 1993, 5(4): 420 ~ 429
- 16 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元, 等. 浙闽沿海早白垩纪玄武岩锶、钕、铅同位素特征——古老富集型地幔的证据. *地质科学*, 1999, 34(1): 59 ~ 68
- 17 周泰禧, 陈江峰, 程忠其, 等. 浙东中生代玄武岩的 Sr, Nd 同位素研究, 壳幔演化与成岩成矿同位素地球化学. 北京: 地震出版社, 1993. 45 ~ 46
- 18 郭新生, 陈江峰, 张巽, 等. 桂东南富钾岩杂岩的 Nd 同位素组成: 华南中生代地幔物质上隆事件. *岩石学报*, 2001, 17(1): 19 ~ 27
- 19 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: II. 微量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学. *地球化学*, 2001, 30: 57 ~ 65
- 20 徐夕生, 周新民, O'Reilly S Y, 等. 中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索. *岩石学报*, 1999, 15: 217 ~ 223
- 21 Zindler A, Hart S R. Chemical Geodynamics. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1986, 14: 493 ~ 571
- 22 从柏林, 郭敬辉, 刘文军. 一个残留的地幔楔: 来自华北早第三纪火山岩的证据. *科学通报*, 2001, 46: 1825 ~ 1831
- 23 Li S -G, Huang F, Nie Y -H, et al. Geochemical and Geochronological Constraints on the suture location between the North and South China Block in the Dabie orogen, Central China. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 655 ~ 672
- 24 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山北部榴辉岩的发现及其岩相学特征. *科学通报*, 1999, 44(13): 1452 ~ 1456
- 25 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 大别山北部榴辉岩和角闪质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学研究. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 417 ~ 423
- 26 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 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*, 1999, 5: 351 ~ 355
- 27 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 1999, 44(19): 2110 ~ 2114
- 28 Li S -G, Jagoutz E, Chen Y, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie orogen, central China. *Geochem Cosmochem Acta*, 2000, 64: 1077 ~ 1093
- 29 孙卫东, 李曙光, Chen Y -D, 等. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地球化学*, 2000, 29(3): 209 ~ 216
- 30 刘少峰, 张国伟, 张宗清, 等. 合肥盆地花岗岩砾石的同位素年代学示踪. *科学通报*, 2001, 46: 748 ~ 753

- 31 Davies J H, Blanckenburg F V. Slab break off: A model of lithosphere detachment and its test in magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129: 85 ~ 102
- 32 徐嘉伟, 马国峰. 郟庐断裂带研究的十年回顾. *地质论评*, 1992, 28: 316 ~ 322
- 33 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郟庐断裂带走滑时代的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学研究及其构造意义. *中国科学, D 辑*, 2001, 31: 250 ~ 256
- 34 李曙光, 黄方, 周红英, 等. 大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的 U-Pb 同位素组成——对超高压岩石折返机制的制约. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(12): 977 ~ 984
- 35 Chemenda A I, Burg J P, Mattauer M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: Geopoeem based on new modeling, geological and geophysical data. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 174: 397 ~ 409
- 36 周进高, 赵宗举, 邓红婴. 合肥盆地构造泛化及含油气性分析. *地质学报*, 1999, 73: 15 ~ 24
- 37 王道轩, 刘固, 李双应, 等. 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限, 大别山北麓晚侏罗世砾岩中发现榴辉岩砾石. *科学通报*, 2001, 46: 1216 ~ 1219
- 38 Ma C -Q, Li Z -C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 1998, 45: 431 ~ 456
- 39 魏春景, 张立飞, 王式浣. 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*, 2000, 30(4): 355 ~ 363
- 40 李曙光, 黄方, 李晖. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. *科学通报*, 2001, 46(17): 1487 ~ 1491
- 41 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 194 ~ 312
- 42 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄欖安粗岩的火山特征及其成矿作用. *地质学报*, 1996, 70(1): 23 ~ 34

(2002-07-18 收稿)