

俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因

赵子福*, 郑永飞

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, 合肥 230026

* E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

收稿日期: 2009-02-14; 接受日期: 2009-05-30

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-131)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB825004)和国家自然科学基金(批准号: 40673009)资助

摘要 大别-苏鲁造山带是华南-华北陆块在三叠纪经过大陆碰撞形成的, 其中含有大量中生代岩浆岩, 形成时代上主要属于晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世。晚三叠世碱性岩和晚侏罗世花岗岩仅出露在苏鲁造山带东部, 而早白垩世岩浆岩则遍布整个大别-苏鲁造山带(包括大面积的花岗岩、零星的中基性侵入岩和火山岩)。虽然时代不同, 但是它们均富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有高的初始 Sr 同位素比值、低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和低的放射成因 Pb 同位素组成。晚侏罗世和早白垩世花岗岩锆石中含有新元古代和三叠纪 U-Pb 年龄的继承核, 大多数早白垩世基性岩中锆石具有比正常地幔锆石低的氧同位素比值, 全岩具有比正常地幔低的碳同位素比值。系统的元素和同位素对比研究发现, 大别-苏鲁造山带中生代花岗岩和基性岩分别与经过超高压变质的花岗片麻岩和榴辉岩具有相似性。尤其是若干鉴定性特征的地球化学指标证明, 它们都是华南岩石圈北缘的组成部分。由于中生代大陆深俯冲, 这些具有类似地球化学性质的岩石分别在不同时间和层位发生超高压变质和碰撞后深熔作用。因此, 这些中生代岩浆岩的形成与华南陆块俯冲/折返之后的碰撞后造山带构造垮塌有关, 是俯冲大陆岩石圈在碰撞造山带加厚背景下部分熔融的产物。

关键词

大陆深俯冲
岩石圈熔融
碰撞后岩浆岩
中生代构造
超高压变质岩
大别-苏鲁

大洋地壳俯冲过程中形成岛弧玄武岩和安山岩, 大陆地壳俯冲过程中则没有形成相应的岩浆岩。但是在深俯冲陆壳折返和碰撞后加厚造山带拉张垮塌过程中, 可以形成大量的同折返和碰撞后岩浆岩。在典型的碰撞造山带中, 广泛发育碰撞后岩浆活动^[1]。碰撞后岩浆活动是造山带岩石圈深部热状态、结构和组成的反映, 其中深俯冲大陆岩石圈有可能在上地幔顶部停滞几十乃至上百个百万年之后才发生熔融。

因此, 研究造山带碰撞后岩浆岩的形成时代、岩石类型、地球化学特征、源区物质来源及其形成的地球动力学背景, 对于认识俯冲大陆岩石圈再循环和碰撞造山带的构造演化具有十分重要的意义。

大别-苏鲁造山带是三叠纪华南陆块俯冲进入华北陆块之下形成的大陆碰撞型造山带^[2-4]。它不仅是世界上出露规模最大、保存最好的超高压变质地体之一^[5,6], 而且也是陆-陆碰撞之后在超高压岩石折返和

剥露过程中岩浆活动最为强烈的地区之一^[7-13], 因此是研究大陆板块深俯冲和折返过程中壳幔地球化学循环的理想靶区. 然而, 与大陆深俯冲有关超高压变质岩的研究程度和取得的进展^[4]相比较, 对大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩及其相关化学地球动力学问题的研究程度相对较为薄弱. 近 10 年来, 对大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的研究尽管已经取得长足进展, 但在源区物质来源、形成的地球动力学背景及其与造山带演化之间的关系等方面仍存在争议. 本文在系统总结大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的岩石学、同位素年代学、元素和同位素地球化学等方面资料的基础上, 重点探讨了这些岩浆岩的源区物质来源及其形成的地球动力学机制.

1 地质背景和年代学格架

大别-苏鲁造山带是华南陆块与华北陆块之间在三叠纪时期俯冲/碰撞所形成的超高压变质带, 造山带内超高压岩石的大面积分布引起了国内外地质学界的广泛关注, 成为近 20 年来研究超高压变质作用最为重要的靶区之一. 前人已经在超高压变质和大陆碰撞的一些重要领域取得了国际上有影响力的系列成果^[4], 特别是大量的锆石 U-Pb 定年得到超高压变质年龄为 240~225 Ma(属中三叠世). 根据变质温度-压力条件, 在露头尺度上可以将大别造山带划分成 5 个带^[14], 从北向南分别为: (1) 北淮阳低温低压绿片岩相变质带, (2) 北大别高温超高压榴辉岩相带, (3) 中大别中温超高压榴辉岩相带, (4) 南大别低温超高压榴辉岩相带, (5) 宿松低温高压蓝片岩相带. 在苏鲁造山带也存在类似等级的变质相带^[14,15], 只是空间分布上存在差别. 在苏鲁造山带西南部, 中温超高压变质带居中, 南部是张八岭低温高压变质带, 北部是五莲低温低压变质带. 在苏鲁造山带东北部为高温超高压带. 除了不同等级变质岩外, 在大别-苏鲁造山带的各个变质相带都有中生代岩浆岩出露(图 1).

大别-苏鲁造山带中生代侵入岩主体为花岗岩, 中基性岩分布规模有限, 多表现为小的侵入体或岩墙产出(图 1). 火山岩仅在局部区域有出露, 如大别造山带北淮阳浅变质带和苏鲁造山带北部的莱阳盆地^[17,18]. 前人已经对大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩进行了大量的同位素年代学研究, 包括锆石 U-Pb 年

龄、全岩或矿物 K-Ar 或 Ar-Ar 年龄以及 Rb-Sr 等时线年龄等. 由于锆石在岩浆演化过程中结晶相对较早, 而且性质稳定, U-Pb 体系不易受到后期地质过程的扰动, 因此锆石 U-Pb 年龄能够较好地代表岩浆活动的时代. 表 1 汇编了大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩有代表性的锆石 U-Pb 年龄和部分缺乏锆石 U-Pb 年龄岩体的矿物 Ar-Ar 年龄. 对于难以选出锆石的火山岩和基性岩墙, 表 1 一并列出了它们的 K-Ar 和 Ar-Ar 年龄. 如表 1 和图 2(a)所示, 大别-苏鲁造山带中生代岩浆活动可以分为 3 期: 晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世. 晚三叠世碱性岩和晚侏罗世花岗岩均分布在苏鲁造山带的东部, 而早白垩世岩浆岩则遍布大别-苏鲁造山带(图 1).

晚三叠世侵入岩体位于苏鲁造山带东端荣城附近的石岛地区(图 1). 根据侵入接触关系和岩性组成, 石岛碱性杂岩体由老到新可以划分为 4 个主要的岩石单元^[36,46]: 邢家黑云母辉长岩、甲子山辉石正长岩、人和集石英正长岩和槎山正长花岗岩. 晚期侵位的岩体中含有大量早期岩体的包体, 另外可见晚期的基性岩墙侵位到辉石正长岩中^[11]. Chen 等^[36]、Yang 等^[11]和郭敬辉等^[35]对上述岩体进行了 TIMS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄以及矿物(钾长石和角闪石) Ar-Ar 年龄测定, 结果表明: 苏鲁造山带晚三叠世碱性岩形成于 205~225 Ma(表 1, 图 2(a)). Yang 等^[11]对侵位到辉石正长岩中的一基性岩墙进行了全岩 Ar-Ar 年龄测定, 结果为 (200.6 ± 0.2) Ma. 除了石岛杂岩体之外, 晚三叠世岩浆活动还表现为侵入到片麻岩中的长英质岩墙. Wallis 等^[47]对采自苏鲁造山带东北部的长英质岩墙中的锆石进行了 SHRIMP 法 U-Pb 年龄测定, 得到锆石边部的年龄为 200~230 Ma, 核部残留锆石年龄为新元古代中期, 与三叠纪超高压变质火成岩原岩中的岩浆锆石 U-Pb 年龄一致^[48,49].

晚侏罗世花岗岩位于苏鲁造山带东部, 包括垛崮山、文登和昆崙山 3 个岩体(图 1), 岩性为花岗闪长岩, 二长花岗岩和含石榴石淡色花岗岩^[35]. 锆石 U-Pb 定年结果给出这些岩体的侵位年龄为 142~161 Ma^[35,37]. 此外, 这些侏罗纪花岗岩中含有大量的继承锆石^[35], 其 U-Pb 年龄可以分为三叠纪、新元古代和古元古代三组(图 2(b)), 且三叠纪 U-Pb 年龄的数据点具有较低的 Th/U 比值. 部分北淮阳火山岩也具有

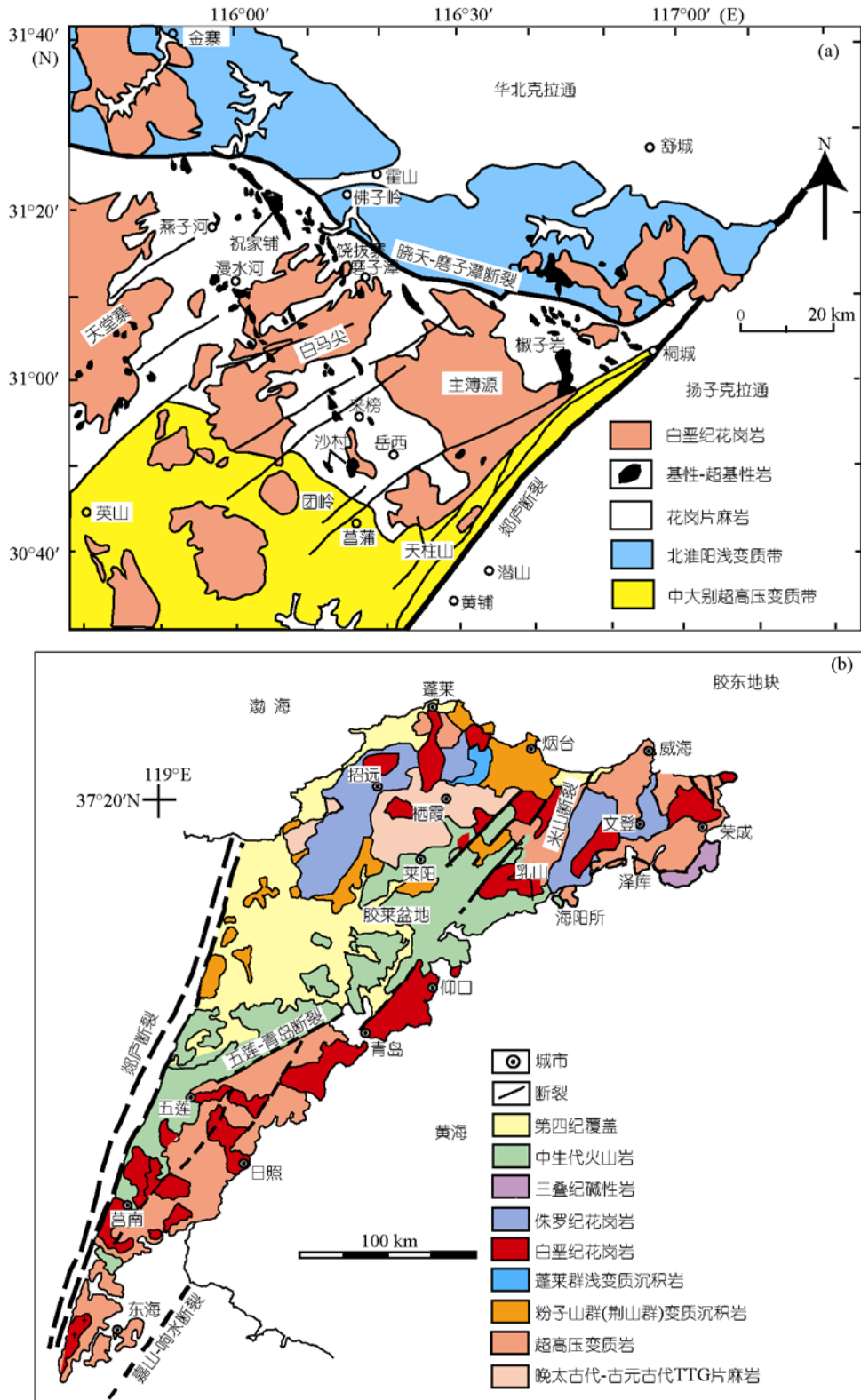


图 1 大别-苏鲁造山带地质简图

(a) 大别; (b) 苏鲁. 修改自Jahn等^[7]和Tang等^[16]

表 1 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩同位素年龄数据汇编

位置/岩体	岩性	年龄/Ma	定年方法	参考文献
大别造山带				
北淮阳	安山岩	147.5±2.3	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	安山岩	148.8±2.5	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	粗面岩	146.8±2.3	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	基性岩脉	140.7±2.2	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	粗面岩	146.5±2.3	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	粗安岩	144.8±2.3	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	粗面岩	138.3±2.2	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	安山岩	130.4±2.1	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	玄武岩	116.2±1.8	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	安山岩	132.2±2.1	全岩 K-Ar	文献[19]
北淮阳	玄武岩	130±2	SIMS 锆石 U-Pb	文献[20]
北淮阳	安山岩	133±3	SIMS 锆石 U-Pb	文献[20]
古碑	花岗闪长岩	125±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[21]
主簿源	英云闪长岩	131±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[22]
主簿源北	花岗闪长岩	125.6±0.3	TIMS 锆石 U-Pb	文献[23]
天堂寨	花岗岩	142±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[24]
天堂寨	花岗岩	143±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[24]
天堂寨	花岗岩	129±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[24]
石鼓尖	角闪石英二长岩	132.8±4.3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[25]
天堂寨	斑状二长花岗岩	132.3±1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[25]
天堂寨	钾长花岗岩	127.9±0.8	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[25]
主簿源	花岗岩	128±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[8]
主簿源	花岗岩	126±5	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[8]
主簿源	花岗岩	127±3	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[26]
主簿源	花岗岩	128±2	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[26]
天柱山	花岗岩	129±20	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[8]
天柱山	花岗岩	132±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[8]
白马尖	花岗岩	124±10	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[10]
漆柱山	辉长岩	122.9±0.6	TIMS 锆石 U-Pb	文献[27]
椒子岩	辉长岩	112.9±7.5	TIMS 锆石 U-Pb	文献[28]
小河口	闪长岩	127±6	TIMS 锆石 U-Pb	文献[28]
小河口	辉石岩	125.3±0.8	TIMS 锆石 U-Pb	文献[28]
祝家铺	闪长岩	130.2±1.4	TIMS 锆石 U-Pb	文献[28]
沙村	辉长岩	128.1±2.0	TIMS 锆石 U-Pb	文献[29]
沙村	辉长岩	125±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[9]
沙村	辉石岩	125±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[9]
椒子岩	辉长岩	127±3	TIMS 锆石 U-Pb	文献[9]
沙村	粗面岩	136.4±2.2	全岩 K-Ar	文献[30]
沙村	粗面岩	144.2±2.3	全岩 K-Ar	文献[30]
沙村	粗面岩	142.7±2.3	全岩 K-Ar	文献[30]
北大别	辉绿岩脉	128.3±0.1	全岩 Ar-Ar	文献[31]
北大别	煌斑岩	128.2±0.2	全岩 Ar-Ar	文献[31]
北大别	煌斑岩	129.6±0.2	全岩 Ar-Ar	文献[31]
北大别	辉绿岩脉	131.8±0.3	全岩 Ar-Ar	文献[31]
北大别	辉绿岩脉	127.6±0.2	全岩 Ar-Ar	文献[31]
司空山	花岗岩	125.8±1.9	黑云母 Ar-Ar	文献[32]
司空山	花岗闪长岩	129.1±0.5	角闪石 Ar-Ar	文献[32]
团岭	英云闪长岩	134±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[22]
雷家店	片麻状花岗岩	133±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[22]
刘家洼	花岗岩	135.4±2.7	TIMS 锆石 U-Pb	文献[33]
团岭	二长闪长岩	130±10	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[10]
赤土岭	闪长岩	131±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[34]
梅川	花岗岩	115.8±0.4	黑云母 Ar-Ar	文献[32]

位置/岩体	岩性	年龄/Ma	定年方法	参考文献
苏鲁造山带				
石岛	辉石正长岩	211.9±1.5	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
石岛	辉石正长岩	209.0±6.5	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
石岛	碱性辉长岩	211±5	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
石岛	碱性辉长岩	213±5	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
石岛	正长花岗岩	205.7±1.4	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
石岛	辉石正长岩	225.3±1.9	TIMS 锆石 U-Pb	文献[36]
石岛	石英正长岩	211.0±0.9	TIMS 锆石 U-Pb	文献[36]
石岛	花岗岩	205.2±4.5	TIMS 锆石 U-Pb	文献[36]
石岛	石英正长岩	215±5	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[11]
石岛	辉石正长岩	214.4±0.3	钾长石 Ar-Ar	文献[11]
石岛	辉石正长岩	214.6±0.6	角闪石 Ar-Ar	文献[11]
石岛	基性岩墙	200.6±0.2	全岩 Ar-Ar	文献[11]
垛崮山	花岗闪长岩	161±1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
文登	二长花岗岩	157±5	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
文登	二长花岗岩	160±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
昆嵛山	含石榴石花岗岩	142±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
昆嵛山	黑云二长花岗岩	144±3	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
昆嵛山	二长花岗岩	160±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[37]
六度寺	辉石闪长岩	114.5±0.8	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
泰薄顶	钾长斑状花岗岩	114±1	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
三佛山	钾长斑状花岗岩	113±1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[35]
伟德山	钾长斑状花岗岩	108±2	TIMS 锆石 U-Pb	文献[35]
莒南	石英二长岩	123.2±1.8	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
大店	石英二长岩	122.1±2.1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
莒县	花岗岩	126.9±1.9	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
五莲	花岗岩	125.0±1.1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
胶南	石英二长岩	120.3±2.1	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
莒南	辉绿岩	120.2±1.9	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
莒县	辉绿岩	119.0±1.7	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[38]
宫家	辉长闪长岩	113±2	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[39]
宫家	辉长岩	114±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[40]
宫家	辉长岩	111±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[40]
宫家	闪长岩	112±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[40]
三家金矿	煌斑岩	126.7±2.0	全岩 K-Ar	文献[41]
三家金矿	煌斑岩	122.2±1.8	全岩 K-Ar	文献[41]
哑子	煌斑岩	126.0±2.0	全岩 K-Ar	文献[41]
王格庄	煌斑岩	123.5±2.3	全岩 K-Ar	文献[41]
日照	二长花岗岩	127±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[12]
日照	基性包体	124±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[12]
五莲	二长闪长岩	122±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[12]
五莲	二长岩	122±2	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[12]
日照	二长花岗岩	123.5±0.4	角闪石 Ar-Ar	文献[12]
日照	基性包体	124.2±0.4	角闪石 Ar-Ar	文献[12]
日照	基性岩墙	111.2±0.1	全岩 Ar-Ar	文献[12]
五莲	角闪二长花岗岩	123±4	TIMS 锆石 U-Pb	文献[42]
五莲	晶洞花岗岩	116±4	TIMS 锆石 U-Pb	文献[42]
五莲	辉石二长岩	126±3	TIMS 锆石 U-Pb	文献[42]
五莲	二长花岗岩	115±1	TIMS 锆石 U-Pb	文献[42]
海阳	二长花岗岩	114.5±1.6	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[43]
李埏	二长花岗岩	122.1±5.1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[44]
抗日山	花岗闪长岩	118.5±2.3	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[44]
五莲	花岗岩	125±4	SHRIMP 锆石 U-Pb	文献[13]
五莲	花岗岩	121±3	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[13]
五莲	花岗岩	118±2	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[13]
五莲	花岗岩	118±2	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	文献[13]

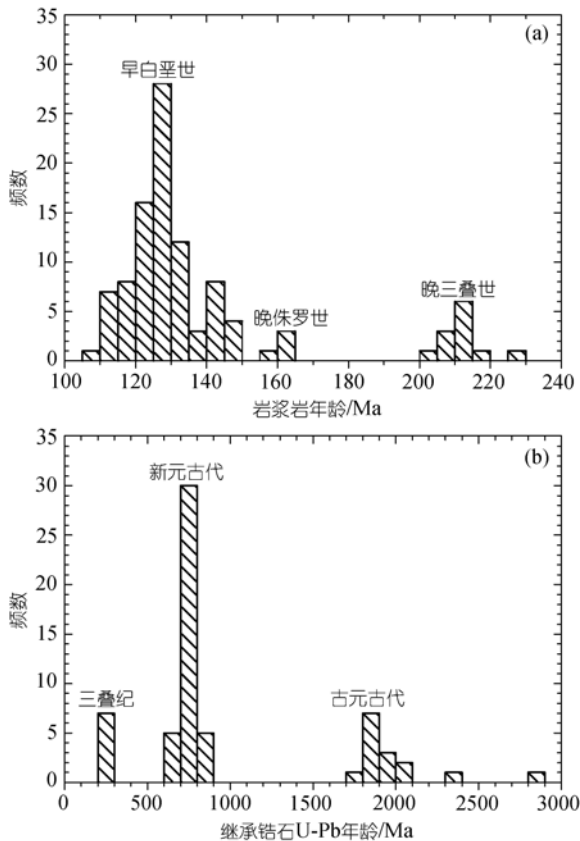


图 2 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩年龄(a)和继承锆石 U-Pb 年龄(b)统计图

(a)中的数据来源于表 1, (b)中的数据引自文献[8, 10, 12, 13, 24, 25, 35, 38, 45]

晚侏罗世的全岩 K-Ar 年龄^[27](表 1), 但鉴于该地区大多数火山岩和大别造山带侵入岩的形成年龄均为早白垩世, 因此在下文中将这部分火山岩与早白垩世岩浆岩一起讨论。

大别-苏鲁造山带出露面积最广的是早白垩世岩浆岩, 它们在各个变质相带均有出露(图 1)。早白垩世岩浆岩包括零星分布的基性岩和大面积出露的中酸性岩, 其中前者包括辉石岩-辉长岩侵入体、基性岩墙/脉(辉绿岩, 煌斑岩)和基性火山岩^[7,9,17-19,31,41,50], 后者包括少量的闪长岩和中酸性火山岩^[13,17,18,34]和面积出露的花岗岩^[8,10,12,13,26,38,51-53]。大量的年代学结果表明(表 1), 早白垩世岩浆岩形成于 111~143 Ma, 峰期在 125~130 Ma(图 2(a))。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析发现, 在部分花岗岩中存在老的继承锆石, 除了一个~2.8 Ga 的晚太古代和一个~2.3 Ga 的古元古代

年龄之外, 其他继承锆石主要为新元古代中期(~750 Ma)以及少量的三叠纪(~230 Ma)和约 1.8~2.0 Ga 的古元古代中期年龄(图 2(b))。其中三叠纪年龄的分析点均具有低的 Th/U 比值, 表明为变质成因锆石。

根据对大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩地球化学性质的详细研究, 三叠纪时期深俯冲进入地幔的是华南大陆岩石圈地幔和地壳^[4], 它们主要由新元古代岩浆岩、少量古元古代-太古代变质岩以及少量新元古代-古生代沉积岩组成^[14,49,54]。在大地构造背景上, 华南扬子陆核周边在新元古代早期是罗迪尼亚超大陆聚合所形成的弧陆碰撞造山带^[55-59], 在新元古代中期由于罗迪尼亚超大陆裂解使弧陆碰撞造山带发生构造垮塌^[58], 引起的裂谷岩浆活动和高温水岩反应^[48,60-64], 形成大面积亏损 ^{18}O 的大花岗岩省^[59]。由这些岩石经过超高压变质所形成的各种榴辉岩和片麻岩, 在大别-苏鲁造山带构成了世界上出露面积最大的超高压变质地体^[4]。根据锆石 Hf 同位素研究, 华南陆块新元古代中期岩浆岩的源岩主要由两期新生地壳组成^[59,60,65], 一是中元古代晚期至新元古代早期, 二是古元古代中期。此外, 还有少量太古代年龄地壳, 主要出露在三峡崆岭地区^[66,67]。迄今为止, 尚未在华北陆块发现新元古代中期岩浆活动^[68]。因此, 新元古代中期岩浆锆石在华南陆块的产出, 是区分华南与华北陆块的首要标志^[66]。其次是亏损 ^{18}O 岩浆岩在大别-苏鲁造山带超高压变质岩中的产出, 这也是华南陆块北缘所特有的^[4]。

不过, 华南岩石圈在放射同位素组成上存在横向和垂向不均一性。锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素研究证明^[65], 大别造山带地壳呈现三层化学结构, 中温超高压变质岩在上, 高温超高压变质岩居中, 早白垩世岩浆岩源区物质在下。中大别超高压变质火成岩原岩锆石相对亏损 Hf 同位素, 具有中元古代晚期-新元古代早期 Hf 模式年龄; 北大别超高压变质火成岩原岩锆石相对富集 Hf 同位素, 具有古元古代中期 Hf 模式年龄。这种造山带岩石圈结构是华南岩石圈垂向不均一性的构造显示。就华南岩石圈横向不均一性来说, 总体可划分出两个大的区域: (1) 华南 I, 主要分布在华南陆块西缘(康滇构造带)、东部(江南造山带东段)和中部(长江中下游及其以南地区), 新生地壳时代为中元古代晚期至新元古代早期(罗迪尼亚

超大陆聚合/裂解过程中壳幔分异的产物), 由此衍生的显生宙岩浆岩表现出相对亏损的放射成因同位素组成; (2) 华南 II, 主要分布在华南陆块南部(江南造山带西段)和北缘(大别-苏鲁造山带), 新生地壳时代为古元古代中期(哥伦比亚超大陆聚合/裂解过程中壳幔分异的产物), 由此衍生的显生宙岩浆岩表现出相对富集的放射成因同位素组成. 正是由于这些横向和垂向不均一性, 导致华南不同地区显生宙岩浆岩在放射同位素组成上出现明显差别.

2 地球化学特征

2.1 元素地球化学

苏鲁造山带晚三叠世碱性岩具有较大的成分变化范围, 从基性辉长岩到酸性正长花岗岩都有产出, 且成分呈连续演化的特征, SiO_2 含量从 46.6% 变化到 75.0% [11,46,47]. 所有岩石类型均富钾, 它们具有高的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量(图 3(a)), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上所有样品几乎都分布在橄榄玄粗岩系列区域内(图 3(b)), 是典型的富钾系列侵入岩. 它们明显富集轻稀土元素, 早期的辉长岩和辉石正长岩无明显的 Eu 异常, 而晚期的石英正长岩和正长花岗岩具有明显的 Eu 负异常(图 4(a)). 在微量元素蛛网图上(图 5(a)), 所有岩石类型均具有明显的 Nb, Ta, Ti 等高场强元素负异常和 Pb 正异常, 辉长岩和辉石正长岩富集大离子亲石元素(如, Rb, Sr, Ba), 而石英正长岩和正长花岗岩具有 Ba 和 Sr 的负异常 [11].

苏鲁造山带晚侏罗世花岗岩具有较小的成分变化范围 [77,78], 其中 SiO_2 含量为 66.4%~74.6%, Al_2O_3 含量为 13.6%~17.2%, 富碱, 贫 Fe, Mg 和 Ca(表 2). 岩石地球化学特征表明它们为亚碱性岩石(图 3(a)), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上分布在钙碱性和高钾钙碱性系列区域内(图 3(b)). A/CNK 值为 0.88~1.13, 属准铝质到弱过铝质(图 3(c)). 晚侏罗世花岗岩富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 无明显的 Eu 异常(图 4(b)); 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素(图 5(b)), 具有较高的 Sr/Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值(表 2), 在 Sr/Y-Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ 图解上分布在埃达克岩区域(图 6), 但是微量元素组成总体上具有弧型岩浆岩特点.

大别-苏鲁造山带早白垩世基性岩具有相对较高的碱含量(图 3(a)), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上分布在高钾钙

碱性和橄榄玄粗岩系列区域内(图 3(b)); 辉石岩具有高的 Mg, Fe 和 Ca 含量, 低的 Al 和碱以及大离子亲石元素含量 [50,82] (图 3(a), (b) 和 5(c)). 这些基性岩和辉石岩表现出高度的轻稀土富集(图 4(c)), 高场强元素 (Nb, Ta, Zr 和 Ti) 负异常以及 Pb 正异常(图 5(c)). 中

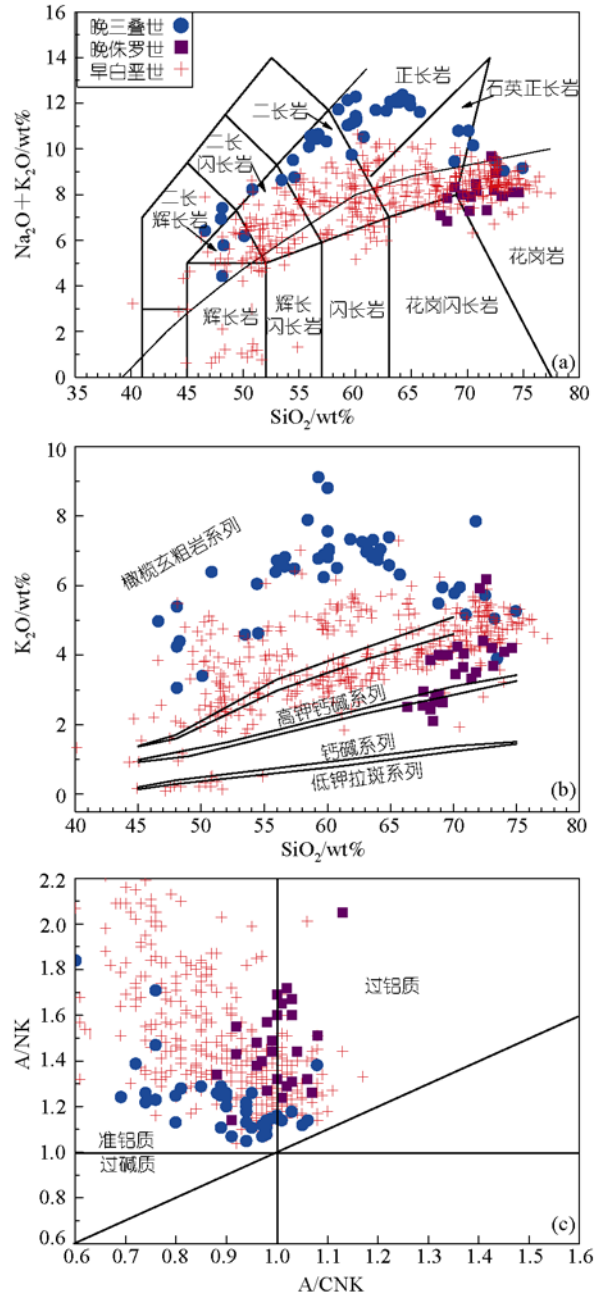


图 3

(a) 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩硅碱图(分类据文献[69, 70]), (b) $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图(分界线据文献[71]), (c) A/NK-A/CNK 图. 数据来源见表 2

表 2 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学特征汇编^{a)}

成分	晚三叠世碱性岩	晚侏罗世花岗岩	早白垩世	
			基性岩	中酸性岩
主量元素/%				
SiO ₂	46.60~74.97	66.37~74.62	40.12~55.4	56.01~78.65
TiO ₂	0.02~1.32	0.06~0.4	0.08~3.23	0.04~1.33
Al ₂ O ₃	8.37~18.79	13.58~17.21	2.97~19.63	11.41~19.17
FeO _T	0.31~9.18	1.23~3.03	5.39~16.12	0.36~7.15
MnO	0.01~0.16	0.02~0.2	0.10~0.34	0.01~0.25
MgO	0.02~12.44	0.02~1.38	3.08~28.96	0.04~5.02
CaO	0.48~14.99	1.07~3.81	2.23~15.06	0.33~6.65
Na ₂ O	1.34~5.33	2.76~4.83	0.45~4.51	2.19~7.05
K ₂ O	3.07~9.13	2.11~6.18	0.10~5.49	1.85~7.28
P ₂ O ₅	0.01~2.92	0.03~0.34	0.03~1.34	0.01~0.80
微量元素/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
La	57.47~240.5	7.71~69.11	5.4~99.1	5.07~138
Ce	96.35~457.7	12.97~108.64	13.2~197.3	8.18~245.7
Pr	9.34~48.42	1.71~12.53	2.2~21.0	0.97~27.73
Nd	26.17~154.4	5.25~37.02	9.8~87.2	3.4~102.6
Sm	3.5~23.48	1.24~5.68	2.2~14.1	0.53~17.79
Eu	0.63~5.75	0.35~1.36	0.64~3.8	0.16~3.12
Gd	2.21~16.09	0.84~3.84	2.0~12.3	0.29~11.35
Tb	0.32~2.24	0.19~0.69	0.29~1.73	0.031~1.53
Dy	1.72~10.89	0.39~3.43	0.88~8.7	0.11~8.31
Ho	0.32~1.99	0.08~0.7	0.31~1.52	0.014~1.61
Er	0.98~5.71	0.19~2.03	0.79~4.07	0.037~4.34
Tm	0.17~0.84	0.04~0.31	0.11~0.54	0.005~0.758
Yb	1.25~5.07	0.18~1.96	0.66~2.94	0.033~4.42
Lu	0.19~0.72	0.03~0.3	0.1~0.4	0.005~0.637
Rb	79~268	47~134	1~162	33.1~936
Ba	86~103700	808~3652	50~7634	53.3~3477
Th	3.8~59.8	4.1~22.3	0.48~14.3	0.41~55.9
U	0.7~15.2		0.086~14.2	0.09~14.85
Nb	5.8~64.4	2.52~17.70	2~61	1.01~45
Ta	0.5~5.54	0.2~6.0	0.1~4.43	0.023~3.5
Pb	17.8~298		2.24~25.2	8~67.23
Sr	55~3832	294~1114	75~1686	15.8~1373
Zr	19~1422	62~196	25~381	31.2~526
Hf	1.8~31.4	3.7~5.5	1.2~9.5	0.36~10.23
Y	10.05~53.7	1.88~16.5	7.08~90	0.45~45.76
A/CNK	0.25~1.28	0.88~1.13	0.11~1.06	0.61~1.17
Mg [#]	7~75	10.5~53.4	43~88	12~66
Eu/Eu*	0.39~1.34	0.74~2.25	0.74~1.32	0.18~3.17
Sr/Y	2~126	43~465	3~83	1~1303
(La/Yb) _N	19~64	9~84	3~45	7~302
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.7041~0.7073		0.7061~0.7113	0.7054~0.7113
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-16.6~-13.8		-20.1~-2.3	-27.9~-11.7
(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	16.289~16.568		15.906~18.115	15.531~17.78
(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	15.241~15.442		15.078~15.68	15.17~15.618
(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	36.536~37.101		36.528~38.449	36.376~38.248
$\delta^{18}\text{O}_{\text{锆石}}/\text{‰}$			3.85~8.57	3.19~6.43
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			-27.0~-5.8	

a) 数据来源: 文献[7~13, 17, 18, 21, 24, 25, 31, 34, 38~41, 45~47, 50~53, 77~93]

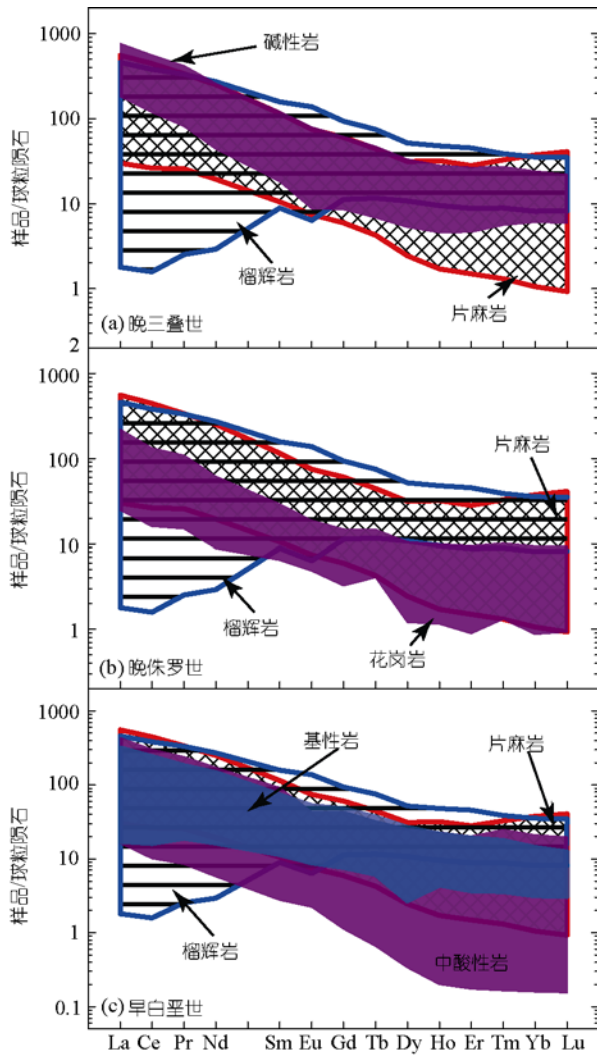


图4 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩、三叠纪榴辉岩和花岗岩片麻岩稀土元素球粒陨石标准化图
球粒陨石稀土元素含量引自文献[72], 岩浆岩数据来源见表2, 榴辉岩和片麻岩数据引自文献[45, 73~76]

酸性岩具有较大的成分变化范围(表 2), 碱含量较高(图 3(a)), 在 K_2O-SiO_2 图解上主要分布在高钾钙碱性和橄榄安粗岩系列区域内(图 3(b)), 为准铝质到弱过铝质, A/CNK 值为 0.61~1.17(图 3(c)). 稀土模式表现出明显的轻稀土富集, 其中中性岩 Eu 负异常不明显, 部分样品表现出弱的 Eu 负异常, 而花岗岩表现出明显的 Eu 负异常(图 4(c)). 在微量元素原始地幔标准化图解上(图 5(c)), 中酸性岩明显富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素(Nb, Ta 和 Ti), 具有典型的弧型岩浆岩组成.

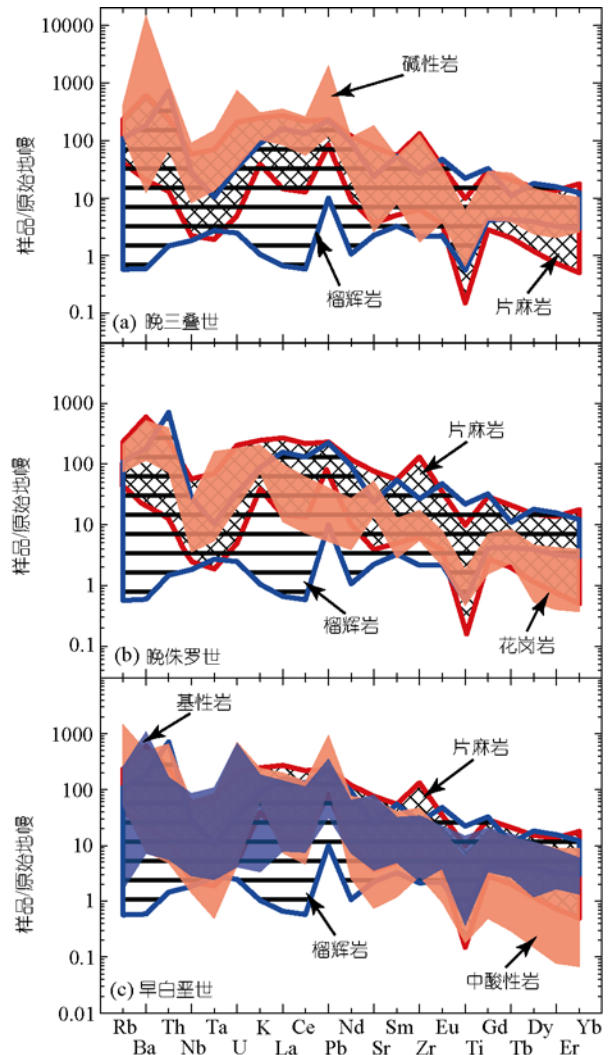


图5 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩、三叠纪榴辉岩和花岗岩片麻岩微量元素原始地幔标准化图
原始地幔微量元素含量引自文献[72], 岩浆岩数据来源见表2, 榴辉岩和片麻岩数据引自文献[45, 73~76]

进一步, 大别山早白垩世岩浆活动从侵位时间上可分为早晚两期: (1) 早期岩浆岩侵位时间集中在 130~143 Ma^[24,25,34,45], 存在不同程度的构造变形; (2) 晚期岩浆岩侵位时间集中在 120~130 Ma^[7-10,26,45], 缺乏构造变形. 部分花岗岩和闪长岩明显亏损HREE元素, 具有高的Sr含量, 无Eu异常或Eu正异常, 低的Yb和Y含量, 在Sr/Y-Y和(La/Yb)_N-Yb_N图解上分布在埃达克岩区域(图 6).

2.2 同位素地球化学

苏鲁造山带晚三叠世碱性岩不同岩石类型的

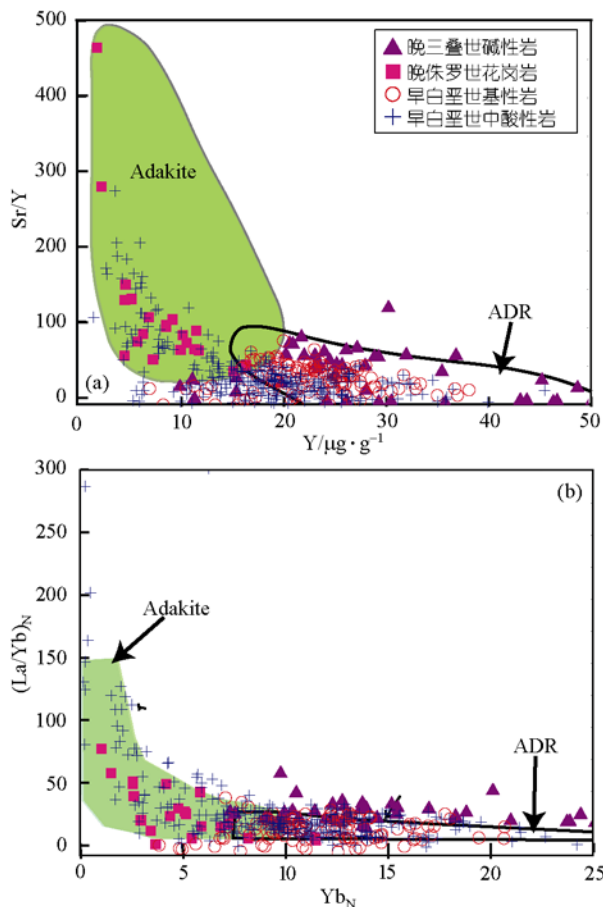


图 6

(a) 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩 Sr/Y-Y 图解^[94]; (b) (La/Yb)_N-Yb_N 图解^[95]. 图中不同区域用于区分埃达克岩(Adakite)和岛弧安山岩-英安岩-流纹岩(ADR). 数据来源见表 2

Sr-Nd 同位素组成较为类似, 具有相对富集的初始 Sr 同位素比值(0.7041~0.7073)和明显富集的低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-16.6~-13.8)^[11,46](表 2). 它们具有较低的放射成因 Pb 同位素组成, 其中 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 16.289~16.568, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 15.241~15.442, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 36.536~37.101^[46,96].

大别-苏鲁造山带早白垩世基性岩和辉石岩具有较高的初始 Sr 同位素比值(0.7061~0.7113)和低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-20.1~-2.3)(表 2), 其中绝大多数样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值介于 -10~-20 之间(图 7). 它们具有较低的放射成因 Pb 同位素组成, 其中 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 15.906~18.115, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 15.078~15.68, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 36.528~38.449(表 2, 图 8). Zhao 等^[91] 对大别山沙村和椒子岩辉石岩和辉长岩进行了 C-O 同位素分析, 发现全岩

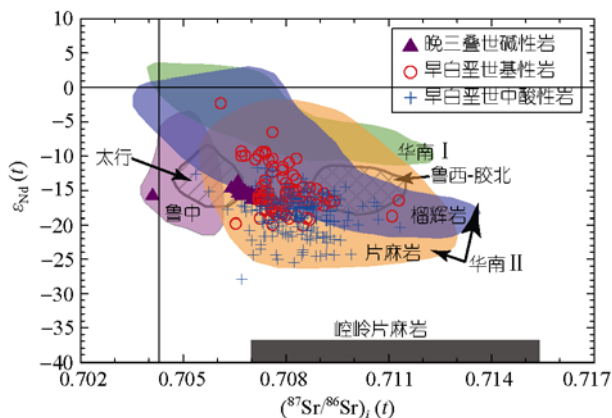


图 7 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 相关图 数据来源见表 2. 为了便于比较, 图中同时标示出了华南 I (由长江中下游及其以南地区岩石为代表) 和华北陆块(太行、鲁中和鲁西-胶北)中生代基性岩浆岩以及大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩、华南 II (以北大别花岗岩片麻岩为代表) 和崆岭片麻岩(校正到 $t=130$ Ma) 的 Sr-Nd 同位素组成变化范围. 数据引自文献[73, 75, 81, 83, 92, 97~117]

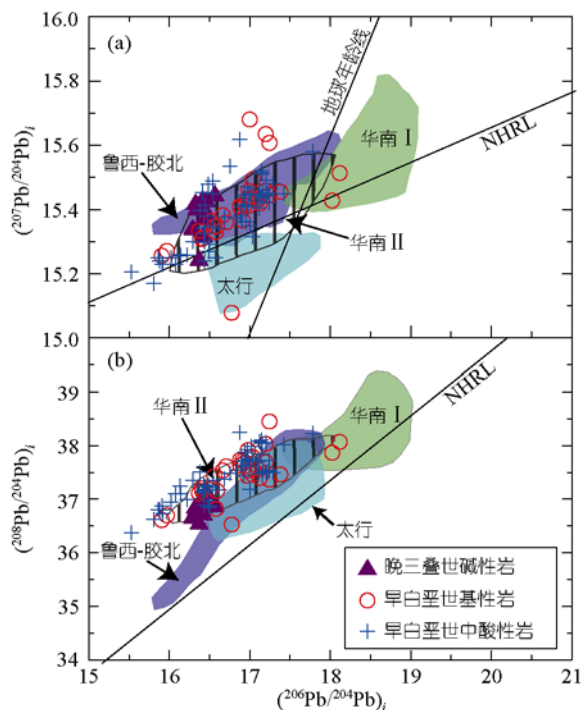


图 8 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩初始 Pb 同位素组成 数据来源见表 2. 为了便于比较, 图中同时标示出了华南 I (以长江中下游及其以南地区岩石为代表) 和华北陆块(太行和鲁西-胶北)中生代基性岩浆岩以及华南 II (以大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩和片麻岩为代表, 校正到 $t=130$ Ma) 的初始 Pb 同位素组成变化范围. 数据引自文献[53, 92, 98, 100, 105, 106, 112~114, 117~121].

$$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{NHRL}} = 0.1084 \times (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i + 13.491,$$

$$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{NHRL}} = 1.209 \times (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i + 15.627, \text{ 据文献[122]}$$

和单矿物氧同位素比值变化较大, 部分样品矿物对之间保存了氧同位素平衡分馏, 而部分样品则表现出明显的氧同位素不平衡分馏, 指示它们受到了岩浆期后亚固相水岩反应的扰动. 而锆石氧同位素组成由于不受岩浆期后亚固相水岩交换的影响, 可以示踪源区物质来源^[48,123]. 大别山辉石岩-辉长岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.85\text{‰}\sim 8.57\text{‰}$ ^[9,87], 大多数锆石具有与正常地幔锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $5.3\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ ^[123]不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 9). 全岩碳含量和碳同位素组成具有较大的变化范围, 其中碳含量为 $0.03\text{‰}\sim 0.18\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27.0\text{‰}\sim -5.8\text{‰}$, 绝大多数样品均具有低于正常地幔的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-5\text{‰} \pm 2\text{‰}$ (图 10).

大别-苏鲁造山带早白垩世中酸性岩具有较高的初始Sr同位素比值(0.7054~0.7113)和非常低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-27.9\sim -11.7$)(表 2). 它们具有与基性岩类似的Pb同位素组成, 其中 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $15.531\sim 17.78$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $15.17\sim 15.618$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $36.376\sim 38.248$ (表 2). 对大别-苏鲁造山带早白垩世花岗岩O同位素分析表明^[8,10,13,91], 全岩和单矿物O同位素组成具有较大的变化范围, 其中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $4.14\text{‰}\sim$

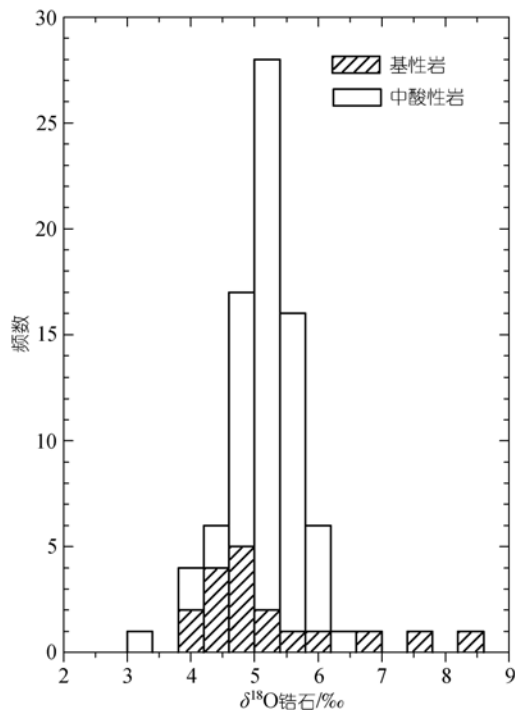


图 9 大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值统计直方图

数据来源见表 2

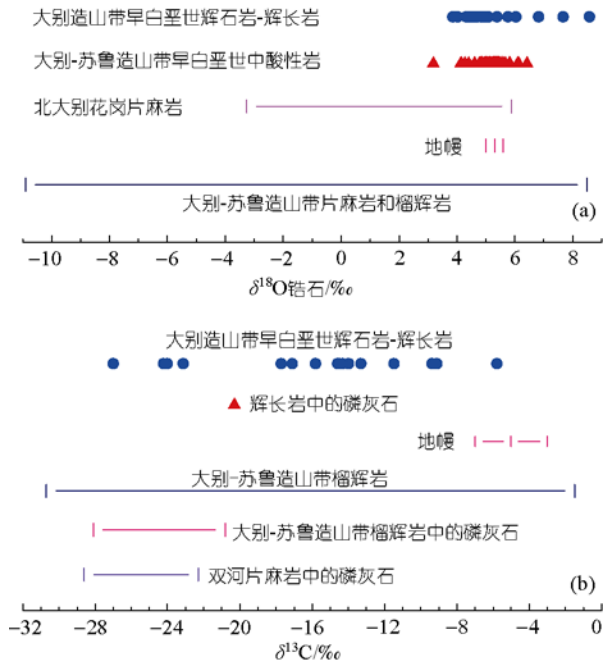


图 10 大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆岩和超高压榴辉岩-片麻岩锆石氧同位素组成(a)以及全岩和磷灰石碳同位素组成(b)比较图解

数据引自文献^[8~10, 13, 48, 49, 64, 87, 91, 124~126]

6.43‰, 绝大多数样品与正常地幔锆石值一致(图 9).

3 源区物质来源

尽管苏鲁造山带晚三叠世侵入岩具有大的化学成分变化范围和不同岩石类型, 但它们具有较为类似的Sr-Nd-Pb同位素组成(表 2), 因此岩浆源区为富集的岩石圈地幔和下地壳. 鉴于石岛碱性杂岩体形成于超高压变质峰期之后的板块折返阶段, Chen等^[36]根据Davies和von Blanckenburg^[127]的板片断离模型, 推测这些碱性岩的源区物质为华北大陆岩石圈地幔. Yang等^[11,128]根据Sr-Nd地球化学研究, 认为这些晚三叠世碱性岩来源于华南大陆岩石圈的部分熔融. 高天山等^[46]和Xie等^[96]根据全岩和长石Pb同位素组成, 认为这些碱性岩岩浆源区为华北岩石圈. 尽管这些碱性岩具有明显的富集型Sr-Nd同位素组成, 但是在富集岩石圈地幔的大地构造归属上, 仍然存在很大争议. 事实上, 这些碱性岩不但具有与大别-苏鲁造山带花岗片麻岩相似的弧型稀土和微量元素分布模式(图 4(a)和 5(a)), 而且Sr-Nd-Pb同位素组成也基本落入花岗片麻岩和榴辉岩的变化范围之内, 但是

与华北东南缘的鲁西-胶北和华北内部太行山和鲁中地区的中生代基性岩浆岩之间存在差别(图 7 和 8)。因此, 这些晚三叠世碱性岩的岩浆源区应为折返的华南大陆岩石圈北缘(华南 II)。此外, 晚三叠世长英质岩墙含有大量新元古代中期年龄的残留锆石^[47], 与三叠纪超高压变质火成岩原岩中的岩浆锆石 U-Pb 年龄^[48,49,64]一致, 说明晚三叠世长英质岩墙与中三叠世超高压变质火成岩具有相同年龄的源岩。且这些长英质岩墙的初始 Sr 同位素比值与花岗片麻岩围岩一致^[47], 因此它们的岩浆源区物质是折返的华南陆壳。至于这些晚三叠世侵入岩为什么具有强烈富钾的特点, 可能与岩石圈深部金云母或多硅白云母的分解有关。

尽管还没有苏鲁造山带晚侏罗世花岗岩同位素组成的报道, 但无论是稀土还是微量元素配分模式, 它们均与大别-苏鲁造山带花岗片麻岩非常类似(图 4(b)和 5(b))。继承锆石的新元古代和三叠纪年龄(图 2(b))分别与大别-苏鲁造山带超高压变火成岩的原岩年龄和变质年龄^[48,49]一致, 且少量约 1.8~1.9 Ga 的继承锆石年龄(图 2(b))也与华南陆块地质记录^[66]相吻合。因此, 晚侏罗世花岗岩的岩浆源区物质应为俯冲的华南陆壳北缘(华南 II)。

大别-苏鲁造山带早白垩世基性岩和辉石岩具有明显的陆壳物质特征的微量元素和同位素地球化学组成: 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素, 具有高的 Sr 同位素初始比值和低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显不同于正常地幔, 亏损 ^{13}C 。就这些基性岩的源区物质来源而言, 具有以下几种不同观点: (1) 深俯冲大陆地壳与软流圈亏损地幔物质源区混合^[7]; (2) 拆沉的俯冲陆壳部分熔融产生的熔体交代亏损上地幔或岩石圈地幔^[38,50]; (3) 岩石圈地幔与俯冲陆壳源区混合^[18]; (4) 俯冲陆壳释放的熔/流体交代岩石圈地幔^[40,41]; (5) 俯冲扬子陆壳混染华北岩石圈地幔^[31]; (6) 俯冲的华南大陆岩石圈地幔物质自身部分熔融^[9], 其中辉石岩是辉长岩浆分异的堆晶。这些观点都涉及俯冲带深部地幔, 但是有亏损的软流圈地幔与富集的岩石圈地幔之分, 其中前 5 种观点还涉及深俯冲陆壳物质。

洋壳俯冲带之上岛弧玄武岩是地幔楔受俯冲大洋板片析出的流体/熔体交代所形成, 它们在 Sr-Nd 同

位素组成上具有相对亏损的特点, 明显不同于古老岩石圈地幔熔融产物的富集特点。然而对于大别-苏鲁早白垩世基性岩来说, 无论是微量元素还是放射成因同位素组成, 我们都看不到任何从中生代软流圈地幔所衍生的地球化学信息。如果超镁铁质地幔受到长英质陆壳混染的话, 产物 Sr-Nd 同位素组成与 SiO_2 含量之间会出现明显的相关性, 但是这在大别-苏鲁早白垩世基性岩中没有见到(图 11)。这些基性岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成也与华北东南缘的鲁西-胶北和华北内部的太行山和鲁中地区的中生代基性岩浆岩存在差别(图 7 和 8), 而与大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩类似, 指示它们的源区为古老的岩石圈地幔, 与华南三峡地区太古代岩石圈地球化学组成^[67]相似。另外, 稀土和微量元素配分模式以及锆石 O 同位素和全岩 C 同位素组成也与榴辉岩类似(图 4(c), 5(c)和 10)。这些地球化学指标对于岩浆源区识别具有鉴定性特征, 证明这些早白垩世基性岩与大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩具有类似的源区物质来源, 即来自华南大陆岩石圈地幔北缘(华南 II)的部分熔融^[9]。其中低的锆石 O 同位素比值继承自新元古代基性岩^[48], 高的锆石 O 同位素比值继承自沉积泥岩^[54,126], 低的全岩 C 同位素组成继承自新元古代热液蚀变原岩^[129]。就熔融岩石圈地幔的性质来说, 主要元素组成上有橄榄岩与辉石岩之分, 微量元素组成上有弧型与 MORB 型之分, 放射成因同位素组成上有亏损与富集之分, 形成时代上有古老与新生之分。大洋板块俯冲过程中的熔体-橄榄岩反应能够产生不同元素和同位素组成的辉石岩^[130-132], 辉石岩部分熔融能够产生不同组成的玄武岩^[133,134]。因此, 进一步的研究亟待查明大别-苏鲁造山带基性岩浆岩是否是超高压变质榴辉岩或者与其原岩在地球化学性质相似的辉石岩在壳幔过渡带部分熔融的产物。

大别-苏鲁造山带早白垩世酸性岩具有与同一造山带花岗片麻岩类似的稀土和微量分布模式以及 Sr-Nd-Pb 同位素组成(图 4(c), 5(c), 7 和 8)。锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值大多与正常地幔锆石一致, 也有部分偏高和偏低的样品(图 9)。这与大别-苏鲁造山带超高压变火成岩普遍亏损 ^{18}O 不同^[48,49,64]。这种差别可以解释为这些岩浆岩的源区在新元古代时期位于地壳深部而未受到明显的水岩反应的影响, 而超高压变火成岩的原

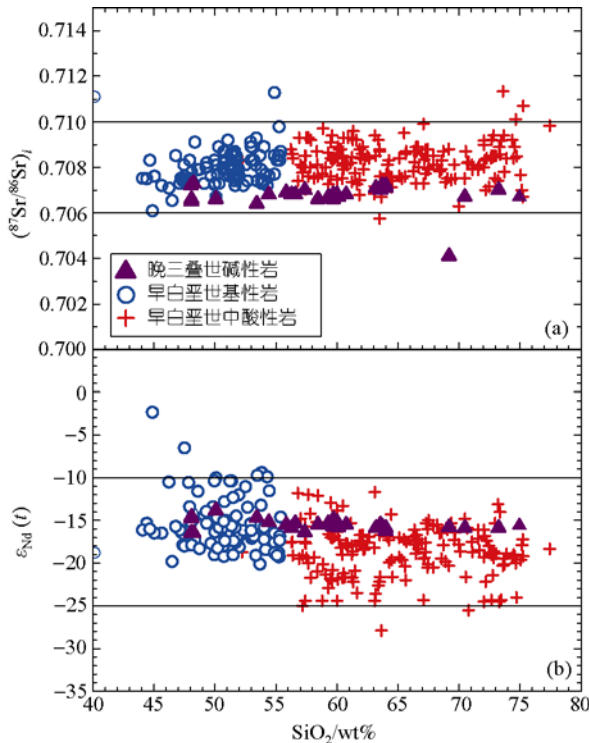


图 11 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t(a)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(b)与 SiO_2 相关图
数据来源见表 2

岩因处于地壳浅部而受到明显的大气降水热液蚀变^[10,13]。另外,花岗岩继承锆石的新元古代和三叠纪 U-Pb 年龄也表明,其源区物质为新元古代火成岩并经历了三叠纪变质作用。上述证据一致表明,早白垩世中酸性岩是俯冲华南陆壳北缘(华南 II)部分熔融的产物^[10,13],其源区物质为与北大别片麻岩类似的中下地壳^[53],但是否包含更古老的类似崆岭群的地壳物质^[45]还需要进一步的工作加以验证。在部分岩体中发现基性暗色包体,因此在局部地区可能存在基性和酸性岩浆的混合作用,形成某些闪长岩^[12,52]。

根据大别造山带早白垩世岩浆岩与华北陆块同时期岩浆岩的地球化学比较, Jahn 和 Chen^[135]推测大别造山带早白垩世岩浆源区为华北陆块,由此认为三叠纪大陆俯冲的极性是由华北向华南,而不是先前认为的由华南向华北。如上文所述,这些早白垩世花岗岩锆石中存在新元古代和三叠纪 U-Pb 年龄的继承核(图 2(b)),大多数基性岩中的锆石具有比正常地幔锆石低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和比正常地幔低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 10);早白垩世花岗岩和基性岩与经过超高压变质的花岗

片麻岩和榴辉岩分别具有相似的元素和同位素地球化学特征(图 4(c), 5(c), 7, 8 和 10)。先前的同位素年代学和地球化学研究业已证明,大别-苏鲁造山带超高压正变质岩具有如下特征^[126]: (1) 新元古代岩浆岩原岩, (2) 低 $\delta^{18}\text{O}$ 锆石和其他矿物, (3) 低 $\delta^{13}\text{C}$ 全岩和磷灰石, (4) 三叠纪变质作用。其中前 3 个特征是从俯冲的华南陆块北缘继承而来,第 4 个特征是大陆俯冲带变质的时间记录。因此,大别造山带早白垩世岩浆源区为华南陆块而不是华北陆块,三叠纪大陆俯冲的极性依然是由华南向华北。不过,现有资料指示华南大陆岩石圈北缘在早中生代具有双层化学结构,浅部以相对亏损的华南 I 源区为主,而深部以相对富集的华南 II 源区为主(与华北岩石圈相似)。作为显生宙起已经存在的大陆,华南陆块从扬子陆核开始生长,哥伦比亚超大陆聚合导致古元古代中期弧-陆碰撞得以增生并发生克拉通化^[66]。格林威尔期洋壳俯冲引起岛弧岩浆作用(图 12(a)),罗迪尼亚超大陆聚合导致新元古代早期弧-陆碰撞,使华南得以进一步增生(图 12(b))。在哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆裂解过程中,通过超大陆裂谷之下的地幔底侵分别引起新生岩石圈的生长。进一步的研究亟待查明大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩中是否含有来自华北岩石圈的物质,特别是在这个碰撞造山带北麓的板块缝合线附近区分华南 II 与华北岩石圈中的古元古代中期岩浆源区。

4 地球动力学机制

深俯冲大陆岩石圈碎片或者在高压/超高压榴辉岩相条件下经历重结晶后作为相干的变质地体折返到地表(图 12(c)),或者在碰撞加厚造山带的底部熔融形成碰撞后岩浆上升到地壳不同层位(图 12(d))。这种成对产状特征了大别-苏鲁造山带的形成和演化,只是这两类过程在形成时间上存在明显差别。因此,大陆俯冲模型不仅能够解释大别-苏鲁造山带高压/超高压变质岩的形成,而且能够解释碰撞后岩浆作用的产生。俯冲的华南陆块北缘可由长英质上地壳和镁铁质下地壳组成。当超高压变质长英质上地壳沿康拉德不连续面拆离并作为相干的高压/超高压变质地体折返回到地表时,变质镁铁质下地壳及其下覆的陆下岩石圈岩石圈拆沉进入软流圈地幔。在上地幔

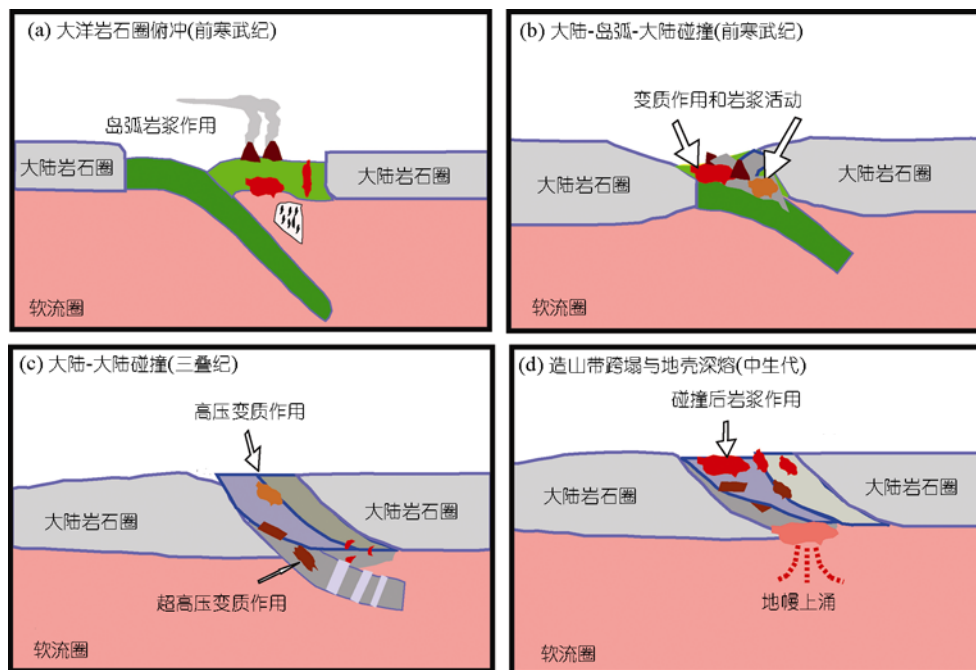


图 12 大别-苏鲁造山带碰撞后岩浆岩成因的俯冲-碰撞模型

华南前寒武纪大陆岩石圈主要通过两幕弧-陆碰撞事件形成, 一个发生在元古代中期哥伦比亚超大陆聚合期间, 另一个发生在新元古代早期罗迪尼亚超大陆聚合期间. 三叠纪大陆碰撞将华南与华北聚合到一起形成大别-苏鲁造山带. 碰撞加厚造山带在中生代发生构造垮塌, 导致碰撞后岩浆作用

顶部停滞几十乃至上百个百万年之后, 这些俯冲的大陆岩石圈发生熔融, 遵循板块-裂谷过程^[58]产生碰撞后岩浆.

苏鲁造山带晚三叠世碱性岩具有高的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量(图 3(a)), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上基本上落在橄榄安粗岩系列区域(图 3(b)), 属于富钾系列侵入岩. 虽然他们在化学成分上从辉长岩变化到花岗岩, 但是这种变化是连续的, 因此可能是岩石圈地幔和下地壳小比例熔融的产物. Davies 和 von Blanckenburg^[127]根据数字实验结果提出板片断离模型, 推测在深俯冲大陆板片与大洋板片断离并发生折返的过程中, 地幔热流穿过断离板片裂隙与仰冲大陆岩石圈底部作用形成所谓的同碰撞岩浆岩. 在对比苏鲁造山带晚三叠世碱性岩与世界其他碰撞造山带同类型岩浆岩的基础上, Chen 等^[36]和高天山等^[46]采用这个机制来解释苏鲁晚三叠世碱性岩的成因, 因此将它们物质来源归咎于华北大陆岩石圈地幔. 基于实验岩石学资料^[136,137]和深俯冲板片折返初期超高压矿物降压脱水的假设^[138], Zheng 等^[126]对这些晚三叠世碱性岩浆成因提出新的设想, 认为它们是深俯冲

板片折返初期降压脱水引发的局部熔融产物, 因此在物质来源上属于华南大陆岩石圈北缘(华南 II), 并称这类碱性岩为同折返岩浆岩. 本文综合的大别-苏鲁造山带晚三叠世岩浆岩同位素年代学和地球化学研究结果支持这一设想. 新的实验岩石学研究发现, 深俯冲陆壳折返过程能够发生脱水熔融^[139]. 对大别-苏鲁造山带超高压片麻岩和榴辉岩的岩石学和地球化学研究业已发现, 超高压岩石中的确存在局部熔融现象^[76,140]. 另一方面, 如果地幔热流的确穿过断离板片裂隙与仰冲的古老华北岩石圈地幔底部发生作用的话, 软流圈地幔本身由于压力降低也会发生部分熔融, 结果不仅形成具有富集地幔同位素特点的同折返碱性岩, 而且形成具有亏损地幔同位素特点的同折返基性岩. 但是在苏鲁造山带尚未发现具有这类特点的晚三叠世基性岩, 说明 Davies 和 von Blanckenburg^[127]断离模型中关于同碰撞岩浆岩的成因推测是有问题的.

苏鲁造山带晚侏罗世花岗岩在微量元素组成上不仅具有弧型岩浆岩特点, 而且具有高的 Sr 和 Ba 含量、低的 Y 和 Yb 含量(表 2), 在 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$

图解上分布在埃达克岩区域(图 6), 无明显的Eu负异常, 部分样品甚至表现为Eu的正异常. 这些地球化学特征表明, 晚侏罗世花岗岩的岩浆源区残留相富含石榴石+角闪石, 缺乏斜长石, 因此部分熔融深度 >40 km^[78]. 尽管这些侏罗世花岗岩也是俯冲的华南陆壳在碰撞加厚造山带背景下部分熔融的产物^[35,78], 但是对岩浆活动的地球动力学机制相对缺乏认识, 对它们在苏鲁造山带西南部和 大别造山带缺乏产出的原因也有待研究.

大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆岩源区是俯冲加厚的华南陆块北缘岩石圈(华南 II), 其中基性岩和辉石岩岩浆源区为俯冲的陆下岩石圈地幔, 中酸性岩岩浆源区为俯冲的大陆中下地壳. 关于这些岩浆活动的地球动力学机制, 业已提出是由碰撞造山带的构造垮塌所引起的^[25,26], 即大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆活动是陆-陆碰撞造山带加厚岩石圈构造垮塌过程中部分熔融的产物. 前人研究表明, 大别山早白垩世岩浆活动可分为两期. 早期岩浆岩形成时间集中在 130~143 Ma, 存在不同程度的构造变形如局部片麻理化^[24,25,34,45]. 晚期岩浆岩形成时间集中在 120~130 Ma, 缺乏构造变形^[7-10,13]. 与这两期岩浆活动相对应, 在大别山也存在两期混合岩化^[41]. 因此, ~130 Ma可能是大别造山带垮塌机制发生转折的时间^[4].

大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆岩不仅在大别-苏鲁造山带广泛出露, 而且在中国东部也广泛分布^[42]. 就中国东部中生代岩浆产生的地球动力学背景来说, 一般认为与太平洋板块俯冲有关, 在大别-苏鲁造山带也不例外^[143,144]. 但是, 至今在中国东部中生代岩浆岩中尚未发现与太平洋板块俯冲有关的新生洋壳的地球化学记录. 虽然在华南存在一些低Nd模式年龄的中生代花岗岩^[81,145], 并且这些岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为小的负或正值(-4~5), 但是它们的Nd模式年龄主要为中元古代, 少量新元古代. 这指示其源区为罗迪尼亚超大陆聚合/裂解过程中形成的新生地壳(相当于华南 I 中的相对亏损部分). 因此, 显生宙时期华南基本上没有新生地壳生长, 现在所观察到的岩石地球化学组成完全可以由前寒武纪岩石圈物质再造产生. 如果说华南在中生代时期发生过壳幔相互作用的话, 那只是太平洋板块俯冲体制下远弧后拉张引起的造

山带岩石圈构造垮塌过程中的能量交换(地幔加热导致造山带根部熔融), 而不是软流圈地幔物质加入大陆岩石圈. 这点在岩浆岩成因研究中值得注意^[9].

大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩在物质成分上同样缺乏太平洋板块新生洋壳贡献的记录(图 7). 如上文所述, 元素和同位素地球化学研究结果表明, 大别-苏鲁中生代岩浆岩在物质成分上与造山带内出露的超高压变质岩相似(图 4, 5, 7, 8 和 10), 由华南大陆岩石圈北缘物质(华南 II)熔融形成, 因此具有“就地取材”的特点. 另一方面, 长江中下游及其以南地区中生代岩浆岩也是由华南大陆岩石圈内部物质(华南 I)熔融形成, 同样具有“就地取材”的特点. 由于不同构造单元的岩石圈地球化学性质存在差异, 导致所形成的同时期岩浆岩在物质成分上表现出一定的差别. 因此, 在鉴别大别-苏鲁碰撞造山带内部及其邻区中生代岩浆岩源区大地构造属性时, 需要充分认识华南大陆岩石圈本身物质在横向和垂向上的不均一性. 尽管太平洋板块俯冲对中国东部地区的影响构成这个地区大面积中生代岩浆活动的宏观地球动力学背景, 但是这个影响是如何启动造山带加厚岩石圈在一个相对较短的时间内发生构造垮塌并形成大面积同时期的岩浆岩? 这需要一个对应时间的地幔热扰动^[8].

继 20 世纪 90 年代初提出白垩纪早中期出现过太平洋超级地幔上涌事件^[146-149]以来, 人们发现南大西洋和印度洋的打开也是早白垩世地幔超柱事件引起的超大陆裂解的结果^[150]. 新的同位素年代学资料表明, 位于西藏东南部和澳大利亚西南部的 Comei-Bunbury 大火成岩省形成于 ~132 Ma^[151], 可能与导致东岗瓦那超大陆裂解的 Kerguelen 地幔柱有关. 因此, 早白垩世地幔超柱上涌对太平洋板块的俯冲方向和速率会产生一定的影响. 根据这个假设, Zhao 等^[10]设想中国东部大面积早白垩世岩浆活动可能是西南太平洋地幔超级上涌事件的远程响应, 具体涉及到太平洋板块俯冲所引起的亚洲大陆东部之下软流圈地幔对流方向和速率的变化. Sun 等^[152]的文献资料调研表明, 早白垩世太平洋板块在亚洲板块之下的俯冲方向发生了显著变化. 这可能对应于大别-苏鲁造山带从东西向构造体制转变为环太平洋域的北北东向构造体制, 华北板块出现区域性构造拉张和岩石

圈减薄^[134], 大别-苏鲁造山带和长江中下游地区也不例外. 假设太平洋板块在俯冲方向和速率上变化与西南太平洋地幔超级上涌之间的构造耦合关系, 郑永飞^[4]推测中国东部大陆内部早白垩世造山带垮塌的构造机制涉及下列 4 个循序渐进的地球动力学过程: (1) 西南太平洋超级地幔上涌及其与太平洋板块西南端之间的相互作用, (2) 中国大陆东部太平洋板块俯冲方向发生变化, (3) 中国东部陆下软流圈地幔对流体制发生变化, (4) 造山带根部岩石圈受到扰动发生垮塌和部分熔融.

根据Zheng等^[58]的板块-裂谷模型, 弧-陆和陆-陆碰撞造山带是大陆岩石圈加厚部位, 造山带构造垮塌引起加厚地壳部分熔融, 能够形成各种成分的岩浆岩(包括埃达克质岩石). 这已经在中国东部(包括长江中下游和大别-苏鲁造山带)的早白垩世和晚侏罗世岩浆岩中观察到. 因此, 太平洋板块俯冲对中国东部大陆之下软流圈地幔的扰动可能从侏罗纪就已经开始. 也许早白垩世时期地幔对流异常对造山带岩石圈根部的扰动最为强烈, 结果形成了大别-苏鲁造山带大面积出露的同时期岩浆岩. 虽然这一时期的岩浆作用与俯冲陆壳及其下伏岩石圈地幔本身(华南 II)的部分熔融有关, 但是是否存在由同时期软流圈地幔部分熔融或者与俯冲陆壳之间相互作用所产生的岩浆岩有待查明. 根据现有的同位素地球化学资料, 在大别-苏鲁这个典型的大陆碰撞造山带尚未发现与俯冲/碰撞同时期的新生地壳, 因此大陆碰撞带不是大陆地壳净生长的位置.

在大别造山带, 业已发现的早白垩世埃达克质岩石包括大面积出露的低Mg花岗岩和少量的高Mg闪长岩^[24,25,34], 具有高的Sr/Y和(La/Yb)_N比值(图 6), 指示其岩浆形成源区较深(>50 km). 在苏鲁造山带西南部的张八岭地区也发现具有埃达克质成分的早白垩世安山岩^[89]. 苏鲁造山带东部的晚侏罗世花岗岩同样具有埃达克质成分^[35,78](图 6), 指示造山带加厚地壳的部分熔融可以回溯到晚侏罗世. 地球物理资料表明, 大别-苏鲁造山带现今的地壳平均厚度约为 35 km, 相对缺乏基性下地壳^[153]. 这表明大别-苏鲁造山带在晚侏罗世-早白垩世发生了大规模的岩石圈减薄, 从而引起去山根作用和造山带的大面积隆起. 在造山带加厚地壳部分熔融产生埃达克质熔体的同

时, 高密度、富集 HREE 的石榴石作为残留体出现. 随着埃达克质熔体的上升侵位, 部分熔融残留体的密度逐渐增加以及熔体的弱化作用, 从而有利于造山带根部物质密度提高直至拆沉进入软流圈地幔. 由于加厚造山带的构造垮塌, 造山带根部地壳及其下伏岩石圈地幔受地幔热流影响发生大规模部分熔融, 不仅形成少量低 Mg 和高 Mg 埃达克质岩浆, 而且形成大量非埃达克质花岗岩和基性岩. 如果大别-苏鲁造山带岩石圈减薄与华北岩石圈减薄同步的话, 那么是否意味着克拉通岩石圈减薄过程从侏罗纪就已经开始? 因此, 华北陆块及其南缘大别-苏鲁造山带早白垩世大规模岩浆活动, 是标志中国东部岩石圈减薄的开始还是结束?

5 结语

作为华南陆块与华北陆块在三叠纪时期发生大陆碰撞所形成的超高压变质造山带, 大别-苏鲁造山带发育大量的早白垩世、晚侏罗世和晚三叠世岩浆岩, 成分上主要为花岗质(含少量高 Mg 和低 Mg 埃达克质), 少量基性和碱性. 晚三叠世碱性岩仅出露在苏鲁造山带东端, 分布面积最小; 晚侏罗世花岗岩出露在苏鲁造山带东部, 面积增大; 早白垩世岩浆岩遍布整个大别-苏鲁造山带, 包括大面积出露的花岗岩、零星出露的中基性侵入岩和火山岩. 虽然侵位时代和化学成分不同, 但是这些中生代岩浆岩与超高压变质花岗片麻岩和榴辉岩之间具有相似的元素和同位素地球化学特征: (1) 弧型岩浆岩微量元素分布, 即富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损高场强元素; (2) 富集地幔型 Sr-Nd-Pb 同位素组成, 即高的初始 Sr 同位素比值、低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和低的放射成因 Pb 同位素组成. 此外, 早白垩世和晚侏罗世花岗岩锆石中含有新元古代和三叠纪 U-Pb 年龄的继承核, 大多数早白垩世基性岩中锆石具有比正常地幔锆石低的氧同位素比值, 全岩具有比正常地幔低的碳同位素比值, 也类似于经过超高压变质的花岗片麻岩和榴辉岩. 因此, 大别-苏鲁中生代岩浆岩源区物质与超高压变质岩原岩具有共同的地球化学和大地构造属性, 同是三叠纪俯冲的华南大陆岩石圈北缘物质(华南 II), 只是岩浆源区位于超高压岩片之下. 大陆岩石圈拉张引起的微小地幔热扰动也能够使处于负漂浮位置的造山带根部地壳及其下伏岩石圈地幔发生

部分熔融. 由于中生代大陆深俯冲, 华南岩石圈北缘物质分别在不同时间和层位发生超高压变质和碰撞后深熔作用, 结果形成具有不同岩相学性质的产物. 华南岩石圈物质在北缘相对古老, 而在长江中下游及其以南地区相对年轻, 因此在鉴别大别-苏鲁碰撞造山带内部及其邻区中生代岩浆岩源区大地构造属性时, 需要考虑这些横向和垂向地球化学不均一性. 就岩浆活动的地球动力学机制来说, 虽然都涉及碰撞加厚造山带的构造垮塌及其引发的根部熔融, 但是在具体机制上可能存在一定差别. 晚三叠世碱性岩可能与华南-华北碰撞结束后太平洋板块俯冲启动所引起的大陆边

缘拉张有关, 晚侏罗世花岗岩可能与太平洋板块在亚洲大陆东部之下的俯冲有关; 早白垩世岩浆岩可能与太平洋板块在亚洲大陆东部之下俯冲方向和速率的改变有关, 是这个时期西南太平洋地幔超柱上涌与太平洋板块之间相互作用在中国大陆东部地区的响应. 不过, 在大别-苏鲁这个典型的大陆碰撞造山带及其邻近地区, 没有发现与大陆俯冲/碰撞同时期的新生地壳生长. 因此, 中生代时期中国东部壳幔相互作用的方式不是造山带岩石圈与下覆软流圈地幔之间的物质反应, 而只是能量交换(即拉张垮塌的造山带岩石圈根部受地幔加热发生部分熔融).

致谢 感谢李献华研究员约稿以及黄方博士和匿名审稿人对本文提出的修改意见.

参考文献

- 1 Dilek Y, Altunkaynak S. Cenozoic crust evolution and mantle dynamics of post-collisional magmatism in Western Anatolia. *Int Geol Rev*, 2007, 49: 431—453[[doi](#)]
- 2 Cong B L. *Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China*. Beijing: Science Press, 1996. 224
- 3 Li S G, Jagoutz E, Lo C H, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: a retrospective view. *Int Geol Rev*, 1999, 41: 1114—1124[[doi](#)]
- 4 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. *科学通报*, 2008, 53(18): 2129—2152
- 5 Carswell D A, Compagnoni R. Ultra-high Pressure Metamorphism. *Eur Mineral Union Notes*, 2003. 1—508
- 6 Ernst W G, Tsujimori T, Zhang R Y, et al. Permo-Triassic collision, subduction-zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 73—110[[doi](#)]
- 7 Jahn B M, Wu F, Lo C H, et al. 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*, 1999, 157: 119—146[[doi](#)]
- 8 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental crust in post-collisional granitoids from the Dabie terrane in China. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L22602[[doi](#)]
- 9 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[[doi](#)]
- 10 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[[doi](#)]
- 11 Yang J H, Chung S L, Wilde S A, et al. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 2005, 214: 99—125[[doi](#)]
- 12 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning. *Chem Geol*, 2005, 222: 200—231[[doi](#)]
- 13 Huang J, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Melting of subducted continent: element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 2006, 229: 227—256[[doi](#)]
- 14 Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, et al. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: a passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 851—871[[doi](#)]
- 15 Xu Z Q, Zeng L S, Liu F L, et al. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Geol Soc Am Spec Paper*, 2006, 403: 93—113
- 16 Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating, C and O isotopes for impure marbles from the Jiaobei terrane in the Sulu orogen: implication for tectonic affinity. *Precambrian Res*, 2006, 144: 1—18[[doi](#)]

- 17 Fan W M, Guo F, Wang Y J. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu Orogenic belt in eastern China. *Phys Chem Earth*, 2001, 26: 733—746[[doi](#)]
- 18 Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie Orogen? *Chem Geol*, 2004, 209: 27—48[[doi](#)]
- 19 王岳军, 范蔚茗, 郭锋. 北淮阳晚中生代火山岩定年及火山砾石地球化学: 对大别灰色片麻岩隆升和中生代地层格架的约束. *科学通报*, 2002, 47(20): 1528—1534
- 20 夏群科, 郑永飞, Delouie E. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 163—171
- 21 赵新福, 李建威, 马昌前, 等. 北淮阳古碑花岗闪长岩侵位时代及地球化学特征: 对大别山中生代构造体制转换的启示. *岩石学报*, 2007, 23: 1392—1402
- 22 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215—230[[doi](#)]
- 23 Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the north Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *J Geol*, 1997, 105: 744—753[[doi](#)]
- 24 Wang Q, Wyman D A, Xu J, 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[[doi](#)]
- 25 Xu H, Ma C, 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[[doi](#)]
- 26 Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 214—235[[doi](#)]
- 27 王江海, 邓尚贤. 湖北北大别镁铁-超镁铁质侵入体的时代: 锆石 U-Pb, Sm-Nd 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(1): 1—10
- 28 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
- 29 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民. 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
- 30 王岳军, 范蔚茗, 郭峰, 等. 北大别中生代火山岩的地球化学特征及对北大别构造属性的启示. *地质前缘*, 2003, 10: 529—538
- 31 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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. *Chem Geol*, 2005, 220: 165—189[[doi](#)]
- 32 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹年龄测定. *中国科学 B 辑*, 1995, 25(10): 1086—1092
- 33 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
- 34 Huang F, Li S, Dong F, et al. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: implications for foundering mechanism of lower continental crust. *Chem Geol*, 2008, 255: 1—13[[doi](#)]
- 35 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 2005, 21: 1281—1301
- 36 Chen J F, Xie Z, Li H M, et al. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochem J*, 2003, 37: 35—46
- 37 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. *科学通报*, 2004, 49(12): 1191—1198
- 38 Liu S, Hu R, Gao S, et al. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, eastern China. *Lithos*, 2008, 106: 365—379[[doi](#)]
- 39 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 鲁东昆嵛山官家辉长闪长岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约. *岩石学报*, 2007, 23: 369—380
- 40 Tang H Y, Zheng J P, Yu C M. Age and composition of the Rushan intrusive complex in the northern Sulu orogen, eastern China: petrogenesis and lithospheric mantle evolution. *Geol Mag*, 2008, 146: 199—215[[doi](#)]
- 41 Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 2004, 78: 291—305[[doi](#)]
- 42 周建波, 郑永飞, 赵子福. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄. *高校地质学报*, 2003, 9: 185—194
- 43 张田, 张岳桥. 胶东半岛中生代侵入岩岩浆活动序列及其构造制约. *高校地质学报*, 2007, 13: 323—336
- 44 孟繁聪, 史仁灯, 李天福, 等. 南苏鲁晚中生代花岗岩的形成年龄及源区. *地质学报*, 2006, 80: 1867—1876
- 45 Bryant D L, Ayers J C, Gao S, et al. 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*, 2004, 116: 698—717[[doi](#)]

- 46 高天山, 陈江峰, 谢智, 等. 苏鲁超高压变质带中三叠纪石岛杂岩体的地球化学研究. 岩石学报, 2004, 20: 1025—1038
- 47 Wallis S, Tsuboi M, Fanning M, et al. Role of partial melting in the evolution of the Sulu (eastern China) ultrahigh-pressure terrane. *Geology*, 2005, 33: 129—132[[doi](#)]
- 48 Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 4145—4165[[doi](#)]
- 49 Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. *Precambrian Res*, 2008, 161: 389—418[[doi](#)]
- 50 Huang F, Li S, Dong F, et al. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China. *Lithos*, 2007, 96: 151—169[[doi](#)]
- 51 Ma C, Li Z, 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[[doi](#)]
- 52 Chen B, Jahn B M, Wei C. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: trace element and Nd-Sr isotope evidence. *Lithos*, 2002, 60: 67—88[[doi](#)]
- 53 Zhang H, Gao S, Zhong Z, et al. 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*, 2002, 186: 281—299[[doi](#)]
- 54 Wu Y B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 3743—3761[[doi](#)]
- 55 Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res*, 2006, 146: 179—212[[doi](#)]
- 56 Chen R X, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling project. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 873—894[[doi](#)]
- 57 Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, et al. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 2007, 96: 127—150[[doi](#)]
- 58 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 2008, 163: 351—383[[doi](#)]
- 59 Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 2009, 473[[doi](#)]
- 60 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158[[doi](#)]
- 61 Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, et al. Tectonic driving of Neoproterozoic glaciations: evidence from extreme oxygen isotope signature of meteoric water in granite. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 256: 196—210[[doi](#)]
- 62 Zheng Y F, Gong B, Zhao Z F, et al. Zircon U-Pb age and O isotope evidence for Neoproterozoic low- ^{18}O magmatism during supercontinental rifting in South China: implications for the snowball Earth event. *Am J Sci*, 2008, 308: 484—516[[doi](#)]
- 63 Chen R X, Zheng Y F, Gong B, et al. Oxygen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from 200—4000 m core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling. *Chem Geol*, 2007, 242: 51—75[[doi](#)]
- 64 Tang J, Zheng Y F, Gong B, et al. Extreme oxygen isotope signature of meteoric water in magmatic zircon from metagranite in the Sulu orogen, China: implications for Neoproterozoic rift magmatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 3139—3169[[doi](#)]
- 65 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Zircon U-Pb ages, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China. *Chem Geol*, 2008, 253: 222—242[[doi](#)]
- 66 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 2007, 52(1): 1—12
- 67 Zhang S B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Neoproterozoic anatexis of Archean Lithosphere: geochemical evidence from felsic to mafic intrusives at Xiaofeng in the Yangtze George, South China. *Precambrian Res*, 2008, 163: 210—238[[doi](#)]
- 68 Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Res*, 2007, 152: 48—82[[doi](#)]
- 69 Middlemost E A K. Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth Sci Rev*, 1994, 37: 215—224[[doi](#)]
- 70 Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canada J Earth Sci*, 1971, 8: 523—548
- 71 Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 1989, 22: 247—263[[doi](#)]
- 72 McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 1995, 120: 223—253
- 73 Jahn B M. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker B R, Liou J G, eds. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry*

- of Ultrahigh-pressure Rocks. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 203—239
- 74 郑祥身, 金成伟, 翟民国, 等. 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, 1999, 15(3): 350—358
- 75 Ma C, Ehlers C, Xu C, et al. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precambrian Res*, 2000, 102: 279—301
- 76 Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, et al. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 5244—5266[[doi](#)]
- 77 林景仟, 谭东娟, 迟效国, 等. 胶辽半岛中生代花岗岩. 北京: 科学出版社, 1992
- 78 张华峰, 翟民国, 何中甫, 等. 胶东昆嵛山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报, 2004, 20: 369—380
- 79 周泰禧, 陈江峰, 张巽, 等. 北淮阳花岗岩-正长岩带地球化学特征及其大地构造意义. 地质论评, 1995, 41: 144—151
- 80 彭亚鸣, 潘国强, 叶友清. 大别造山带天柱山花岗岩研究. 南京大学学报(地球科学), 1994, 6(4): 326—333
- 81 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101—133[[doi](#)]
- 82 李曙光, 聂永红, 郑双根, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——I. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的主要元素及微量元素地球化学. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27(6): 488—493
- 83 李曙光, 聂永红, Hart S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——II. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的 Sr, Nd 同位素地球化学. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28(1): 18—22
- 84 金成伟, 郑祥身. 大别岳西地区花岗岩类岩石学及其成因. 岩石学报, 1998, 14(4): 493—502
- 85 路玉林, 钱存超, 贾十军. 安徽大别山团岭花岗岩体岩石学特征及其成因. 安徽地质, 1999, 9(3): 172—177
- 86 周承福, 华仁民, 马东升, 等. 大别山地区三个花岗岩体的地球化学特征及其成因学意义. 地质找矿论丛, 2001, 16(2): 81—88
- 87 夏群科, Deloule E, 吴元保, 等. 大别山道士冲地区辉石岩锆石的氧同位素组成: 壳幔相互作用的新信息. 科学通报, 2002, 47(16): 1256—1260
- 88 杨祝良, 沈加林, 沈渭洲, 等. 大别山北缘中生代火山-侵入岩锆-钨同位素组成特征及其物质来源. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(3): 223—230
- 89 Guo F, Fan W M, Li C W. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geol Mag*, 2006, 143: 1—13[[doi](#)]
- 90 孟繁聪, 薛怀民, 李天福, 等. 苏鲁造山带晚中生代地幔的富集特征——来自辉长岩的地球化学证据. 岩石学报, 2005, 21: 1583—1592
- 91 徐小军, 赵子福, 郑永飞, 等. 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, 2005, 21(3): 607—622
- 92 Liu S, Zou H B, Hu R Z, et al. Mesozoic mafic dikes from the Shandong Peninsula, North China Craton: petrogenesis and tectonic implications. *Geochem J*, 2006, 40: 181—195[[doi](#)]
- 93 续海金, 叶凯, 马昌前. 北大别早白垩纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义. 岩石学报, 2008, 24: 87—103
- 94 Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme. *Acta Petrol Sin*, 2002, 18: 129—142
- 95 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: archaic to modern composition. *J Geophys Res*, 1990, 95: 21503—21521[[doi](#)]
- 96 Xie Z, Li Q, Gao T. Comment on “Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence” by Yang et al. *Chem Geol*, 2006, 235: 191—194[[doi](#)]
- 97 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
- 98 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
- 99 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元, 等. 浙闽沿海早白垩世玄武岩锆、钨、铅同位素特征——古老富集型地幔的证据. 地质科学, 1999, 34: 59—68
- 100 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及源区示踪. 科学通报, 2001, 46(18): 1500—1508
- 101 Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, 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 Mountains, Central China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 1077—1093[[doi](#)]
- 102 廖群安, 王京名, 薛重生, 等. 江西广丰白垩系盆地中两类玄武岩的特征及其与盆地演化的关系. 岩石学报, 1999, 15: 116—123
- 103 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
- 104 Xu Y G, Ma J L, Huang X L, et al. Early Cretaceous gabbroic complex from Yanan, Shandong Province, petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *Int J Earth Sci*, 2004, 93: 1025—1041[[doi](#)]
- 105 Xu Y G, Huang X L, Ma J L, et al. Crust-mantle interaction during the tectonothermal reactivation of the North China Craton, constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib Mineral Petrol*,

- 2004, 147: 750—767
- 106 Yang J H, Chung S L, Zhai M G, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China, evidence for vein plus peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 2004, 73: 145—160[[doi](#)]
- 107 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 等. 北大别灰色片麻岩原岩性质的探讨: Sm-Nd 同位素年龄及同位素成分特点. *岩石学报*, 2000, 16: 194—198
- 108 Chen J F, Yan J, Xie Z, et al. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in eastern China: constraints on sources. *Phys Chem Earth*, 2001, 26: 719—731[[doi](#)]
- 109 郭新生, 陈江峰, 张巽, 等. 桂东南岩浆杂岩的 Nd 同位素组成: 华南中生代地幔物质上涌事件. *岩石学报*, 2001, 17: 19—27
- 110 Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: constraints on the nature of sub-continental lithospheric mantle. *Phys Chem Earth*, 2001, 26: 759—771[[doi](#)]
- 111 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
- 112 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 华北克拉通北缘中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. *地球化学*, 2001, 30: 10—23
- 113 Zhang H F, Sun M. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes in southeastern North China craton, and tectonic implication. *Int Geol Rev*, 2002, 44: 370—382[[doi](#)]
- 114 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 144: 241—253[[doi](#)]
- 115 Zhang H F, Sun M, Zhou M F, et al. Highly heterogeneous late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geol Mag*, 2004, 141: 55—62[[doi](#)]
- 116 Chen B, Jahn B M, Zhai M. Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, North China Craton, and implication for archaic lithosphere thinning. *J Geol Soc*, 2003, 160: 707—118
- 117 Wang Y J, Fan W M, Zhang H F, et al. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton. *Lithos*, 2006, 86: 281—302[[doi](#)]
- 118 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. 见: 陈好寿, 主编. 同位素地球化学研究. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 214—229
- 119 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. 1—252
- 120 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 等. 长江中下游中生代基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据. *高校地质学报*, 2003, 9: 195—206
- 121 Li S G, Wang C X, Dong F, et al. Common Pb of UHP metamorphic rocks from the CCSD project (100—5000 m) suggesting decoupling between the slices within subducting continental crust and multiple thin slab exhumation. *Tectonophysics*, 2009[[doi](#)]
- 122 Hart S R. A large-scale isotopic anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 1984, 309: 753—757[[doi](#)]
- 123 Valley J W. Oxygen isotopes in zircon. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 343—385[[doi](#)]
- 124 Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, et al. Zircon megacrysts from kimberlite: oxygen isotope variability among mantle melts. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 133: 1—11[[doi](#)]
- 125 Deines P. Mantle carbon: concentration, mode of occurrence, and isotopic compositions. In: Schidlowski M, Golubic S, Kimberley M M, eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resource*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 133—146
- 126 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105—161[[doi](#)]
- 127 Davies J H, von Blanckenburg F. Slab breakoff: a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129: 85—102[[doi](#)]
- 128 Yang J H, Chung S L, Wilde S A, et al. “Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, east China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence” —Reply. *Chem Geol*, 2006, 235: 186—190[[doi](#)]
- 129 Zheng Y F, Gong B, Li Y L, et al. Carbon concentrations and isotopic ratios of eclogites from the Dabie and Sulu terranes in China. *Chem Geol*, 2000, 168: 291—305[[doi](#)]
- 130 Kelemen P B, Hart S R, Bernstein S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 164: 387—406[[doi](#)]
- 131 Pertermann M, Hirschmann M M. Partial melting experiments on a MORB-like pyroxenite between 2 and 3 GPa: constraints on the presence of pyroxenite in basalt source regions from solidus location and melting rate. *J Geophys Res*, 2003, 108(B2): 2125[[doi](#)]
- 132 Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, et al. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*, 2007, 316: 412—417[[doi](#)]
- 133 Kogiso T, Hirschmann M M, Pertermann M. High-pressure partial melting of mafic lithologies in the mantle. *J Petrol*, 2004, 45: 2407—2422[[doi](#)]
- 134 Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of

- Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 2009, 110: 305—326[[doi](#)]
- 135 Jahn B M, Chen B. Dabieshan UHP metamorphic terrane: Sr-Nd-Pb isotopic constraint to pre-metamorphic subduction polarity. *Int Geol Rev*, 2007, 49: 14—29[[doi](#)]
- 136 Stoltz A J, Jochum K P, Spettel B, et al. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts. *Geology*, 1996, 24: 587—590[[doi](#)]
- 137 Skjerlie K P, Patino Douce A E. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes. *J Petrol*, 2002, 43: 291—314[[doi](#)]
- 138 Zheng Y F, Fu B, Xiao Y L, et al. Hydrogen and oxygen isotope evidence for fluid-rock interactions in the stages of pre- and post-UHP metamorphism in the Dabie Mountains. *Lithos*, 1999, 46: 677—693[[doi](#)]
- 139 Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152: 125—148[[doi](#)]
- 140 Xia Q X, Zheng Y F, Zhou L G. Dehydration and melting during continental collision: constraints from element and isotope geochemistry of low-T/UHP granitic gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2008, 247: 36—65[[doi](#)]
- 141 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[[doi](#)]
- 142 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 103—119[[doi](#)]
- 143 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. What brought them up? Exhumation of the Dabie Shan ultrahigh pressure rocks. *Geology*, 1995, 23: 743—746[[doi](#)]
- 144 Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13303—13338[[doi](#)]
- 145 Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *J Geophys Res*, 1996, 101: 16137—16154[[doi](#)]
- 146 Larson R L. Latest pulse of Earth: evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 1991, 19: 547—550[[doi](#)]
- 147 Larson R L. Geological consequence of superplumes. *Geology*, 1991, 19: 963—966[[doi](#)]
- 148 Vaughan A P M. Circum-Pacific mid-Cretaceous deformation and uplift: a superplume-related event? *Geology*, 1995, 23: 491—494[[doi](#)]
- 149 Tatsumi Y, Shinjoe H, Ishizuka H, et al. Geochemical evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 1998, 26: 151—154[[doi](#)]
- 150 Golonka J, Bocharova N Y. Hot spot activity and the break-up of Pangea. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2000, 161: 49—69[[doi](#)]
- 151 Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia. *Geology*, 2009, 37: 583—586[[doi](#)]
- 152 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533—542[[doi](#)]
- 153 Gao S, Luo T C, Zhang B R. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 1959—1975[[doi](#)]