

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.04.001

引用格式:闫峻.长江中下游—大别造山带中生代火山岩特征及成因[J].华东地质,2022,43(4):375-390.(YAN J. Characteristics and petrogenesis of the Mesozoic volcanic rocks from the Middle-Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen[J]. East China Geology, 2022, 43(4):375-390.)

# 长江中下游—大别造山带中生代火山岩特征及成因

闫 峻

(合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009)

**摘要:**中国中东部长江中下游地区和大别造山带广泛发生了中生代岩浆作用,火山岩均集中在中间阶段,时代分别为 135~127 Ma 和 133~125 Ma。长江中下游地区多个中生代火山盆地发育高钾钙碱性系列双峰式火山岩和中基性橄辉安粗岩系列火山岩。这些岩石富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,弱富集 Sr-Nd-Hf 同位素,具有高放射成因 Pb 同位素组成,指示地幔源区地壳组分的加入。其中,中基性火山岩起源于富集的岩石圈地幔,受到俯冲大洋板片析出的含水熔体交代,晚阶段的超碱质火山岩起源于类似交代介质交代的软流圈地幔,指示岩浆源区的加深。大别造山带中生代火山岩包括高钾钙碱性系列和超钾质系列,均富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,高度富集 Sr-Nd-Hf 同位素,具有低放射成因 Pb 同位素组成,与长江中下游地区差异显著。其中,高钾钙碱性系列火山岩起源于交代富集的岩石圈地幔,交代介质为印支期深俯冲的华南陆壳析出熔体,而晚阶段的超钾质火山岩起源更深,是深俯冲的华南陆壳在高压下,多硅白云母分解产生熔体交代的地幔源区。长江中下游地区幔源火山岩记录了俯冲的古太平洋板块的直接物质贡献,而大别造山带地幔源区记录了印支期俯冲陆壳的信息。两个构造单元火山岩早、晚阶段均表现出岩浆源区的加深,长江中下游地区对应了古太平洋板块的低角度俯冲及俯冲板片的回卷(约 130 Ma),而大别造山带在古太平洋板块俯冲回卷的动力学机制下,发生造山带的垮塌和岩石圈的拆沉。

**关键词:**中生代火山岩;同位素;地幔;俯冲;长江中下游;大别造山带

**中图分类号:**P588.14

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2022)04-375-16

中国东部晚中生代岩浆岩广泛发育,岩石类型以花岗岩为主,不同构造单元的岩石类型、岩石组合和时空分布等各具特色。位于中国中东部的长江中下游和大别造山带是空间上紧邻的两个构造单元,晚中生代岩浆作用强烈,活动时限分别为 150~102 Ma 和 143~110 Ma<sup>[1-6]</sup>。这两个构造单元的火山岩均属于中间阶段岩浆活动的产物,且喷发时代均集中在 130 Ma 左右<sup>[5-7]</sup>,相当于东南沿海地区的晚中生代下火山岩系<sup>[8-9]</sup>,但活动持续时间更短,且以中基性岩和超碱质岩为特色,多数为幔源岩浆岩,显著不同于后者以流纹质火山岩为主。另外,虽然在形成时代、岩石类型及演化序列上,长江中下游和大别造山带的火山岩具有高度的相似性,

但其地球化学特征差异显著,起源于不同性质的地幔源区<sup>[3,10]</sup>。

华南东部中生代岩浆作用具有多种构造成因模式,可以概括为两类:一类是板内造山模式,包括多板块汇聚与陆内挤压-伸展模式<sup>[11-12]</sup>,或强调华南板块和印支板块的碰撞<sup>[13]</sup>。该模式注重华南周边二叠纪板块汇聚作用引发的陆内远程效应和深大断裂的活化。另一类是活动大陆边缘模式,对应古太平洋板块向东亚大陆之下的俯冲,具体又包括:俯冲角度的改变<sup>[14-15]</sup>;平板俯冲,随之破裂(break-off)和回卷(rollback)<sup>[16]</sup>;洋脊俯冲<sup>[17]</sup>等。该模式强调俯冲板片析出流体/熔体对上覆地幔楔的交代,突出俯冲板片析出物质在岩浆中的直接贡献。

\* 收稿日期:2022-06-06 修订日期:2022-08-08 责任编辑:谭桂丽

基金项目:国家自然科学基金(编号:42030801)项目资助。

第一作者简介:闫峻,1966 年生,男,教授,博士,博士生导师,主要从事岩浆作用与金属成矿研究工作。Email:junyan@hfut.edu.cn。

也有学者提出了包括上述两大动力学模式的综合模型<sup>[13, 18-19]</sup>。不同观点争议的焦点是:俯冲古太平洋板块是否为岩浆作用提供了物质贡献,还是仅仅为动力学机制。关于岩浆作用是否与俯冲事件存在物质上的直接联系,相关信息应首先反映在幔源岩浆岩中,作为深部探针,幔源火山岩无疑是探索这一过程的重要载体。

本文从对比的角度,对长江中下游和大别造山带晚中生代火山岩的时空分布、岩石类型、地球化学特征进行全面总结;从岩石成因、源区性质和岩浆演化的角度,探索这两个构造单元火山作用对古太平洋板块俯冲的响应,并尝试理解在统一的构造动力学机制下,不同构造单元演化历史的差异对岩浆作用的影响。

## 1 长江中下游和大别造山带中生代火山岩时空分布特征

作为长江中下游中生代岩浆活动的重要组成部分,多个陆相火山岩盆地沿着长江两岸分布,自西向东分别是金牛火山岩盆地、怀宁火山岩盆地、庐枞火山岩盆地、繁昌火山岩盆地、宁芜火山岩盆地、溧水—溧阳火山岩盆地(图 1)。鄂东南金牛火

山岩盆地的火山岩自下而上划分为马家山组、灵乡组和大寺组,发育流纹质火山碎屑岩、霏细岩、玄武岩和玄武质安山岩、英安岩和流纹岩(图 2),形成时代为 130~127 Ma<sup>[20]</sup>。怀宁火山岩盆地仅残留少量火山岩,主要呈 NE 向条带状分布,自下而上划分为彭家口组和江镇组 2 个喷发旋回(图 1)。彭家口组早期以爆发作用为主,形成角砾凝灰岩,中期主要发育粗面质凝灰熔岩,晚期以沉积作用为主,形成厚度较大的钙质砂泥质岩石;江镇组以喷溢相熔岩为主,岩石组合为粗面玄武岩-玄武粗安岩-粗面岩,晚期出现钾长流纹岩(图 2)。两组火山岩的喷发时代为 130~122 Ma<sup>[21-22]</sup>。庐枞火山岩盆地为“基底拗陷型”火山盆地,经历 4 个喷发旋回:龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,每个旋回之间为喷发不整合接触。龙门院组主体为含角闪石粗面安山岩;砖桥组主要由黑云母/辉石粗面安山岩组成,夹少量粗面岩;双庙组主体为辉石粗面安山岩,少量粗面岩和粗面玄武岩;浮山组主要由粗面安山岩和粗面岩组成,晚期有少量假白榴石响岩(图 2)。四组火山岩的喷发时代为 134~127 Ma<sup>[23-25]</sup>。繁昌火山岩盆地的火山岩自下而上划分为中分村组、赤砂组、蝌蚪山组 3 个喷发旋回(图 2)。中分村组下段

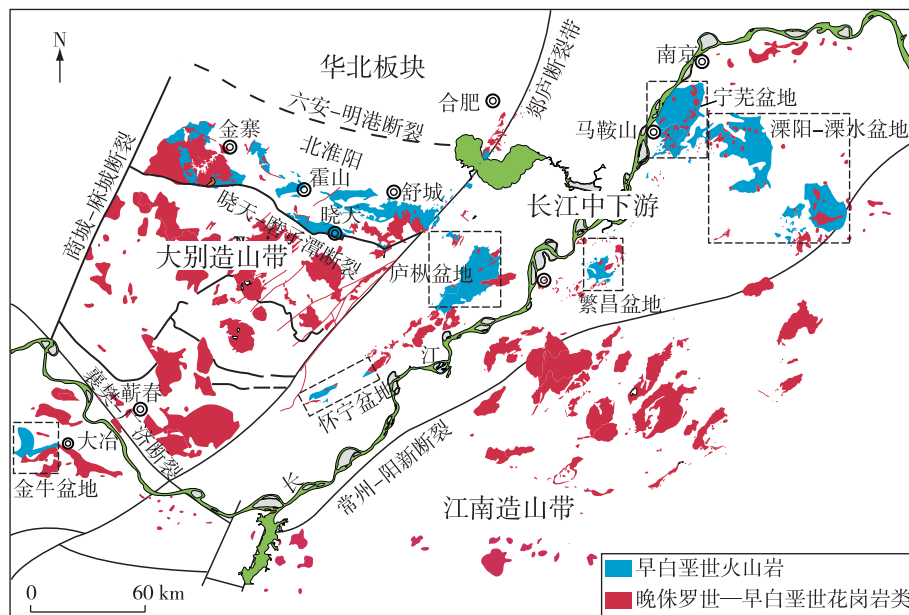


图 1 长江中下游和大别造山带构造框架及晚中生代岩浆岩分布图

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic framework of the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt and the distributions of Late Mesozoic magmatic rocks

为粉砂岩、沉凝灰岩,上段为粗安岩和流纹岩;赤砂组主要为粗面质和流纹质熔岩、火山碎屑岩;蝌蚪山组下段主要为沉火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩和正常沉积岩,中段为玄武岩和安山岩,上段为流纹岩。三组火山岩的喷发时代为 133~130 Ma<sup>[7, 26]</sup>。宁芜火山岩盆地呈 NNE 向展布,为继承式的中生代陆相盆地。火山活动自下而上划分为龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组 4 个喷发旋回(图 2)。龙王山组下部主要由浅灰色沉凝灰岩、粉砂质泥岩、火山集块岩等组成;上部以熔岩为主,主要为歪长粗面岩、橄榄安粗岩和角闪石安粗岩,夹火山角砾岩。大王山组下部以辉石安粗岩为主,含火山集块岩、火山角砾岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩;中部为紫红色安山岩,局部见凝灰质粉砂岩透镜体;上部主要为灰红色、浅灰色粗面岩和粗面质熔结凝灰岩。姑山组分布范围小,上部为灰黑色安山岩和英安岩;下部为火山碎屑岩和沉积岩。娘娘

山组仅见于盆地西侧娘娘山一带,下部主要为集块岩、黝方石响岩质熔结角砾岩;上部为响岩质熔结角砾岩和蓝方石响岩等。四组火山活动的时限为 134~130 Ma<sup>[7, 24, 27-28]</sup>。溧阳火山岩盆地与溧水火山岩盆地在空间上相邻,火山岩喷发旋回和类型都很接近,本文将这两个盆地合并,统一采用溧水盆地火山岩划分方案。溧水—溧阳火山岩盆地自下而上划分为龙王山组、大王山组、观山组和甲山组 4 个喷发旋回,地表以出露龙王山组和大王山组为主,观山组和甲山组出露较少,多数在钻孔中揭露。龙王山组以玄武岩、辉石安山岩与安山质沉角砾凝灰岩为主。大王山组下部为沉火山角砾岩、沉凝灰岩、泥质粉砂岩夹页岩;上部为辉石安山岩、粗安岩、集块角砾岩夹角砾凝灰岩。观山组发育玄武质集块角砾岩、粗安岩和玄武岩,而甲山组下部发育一套火山碎屑沉积岩,上部以英安质流纹岩为主(图 2)。溧水—溧阳火山岩盆地的火山活动时限为 135~128 Ma<sup>[29-30]</sup>。

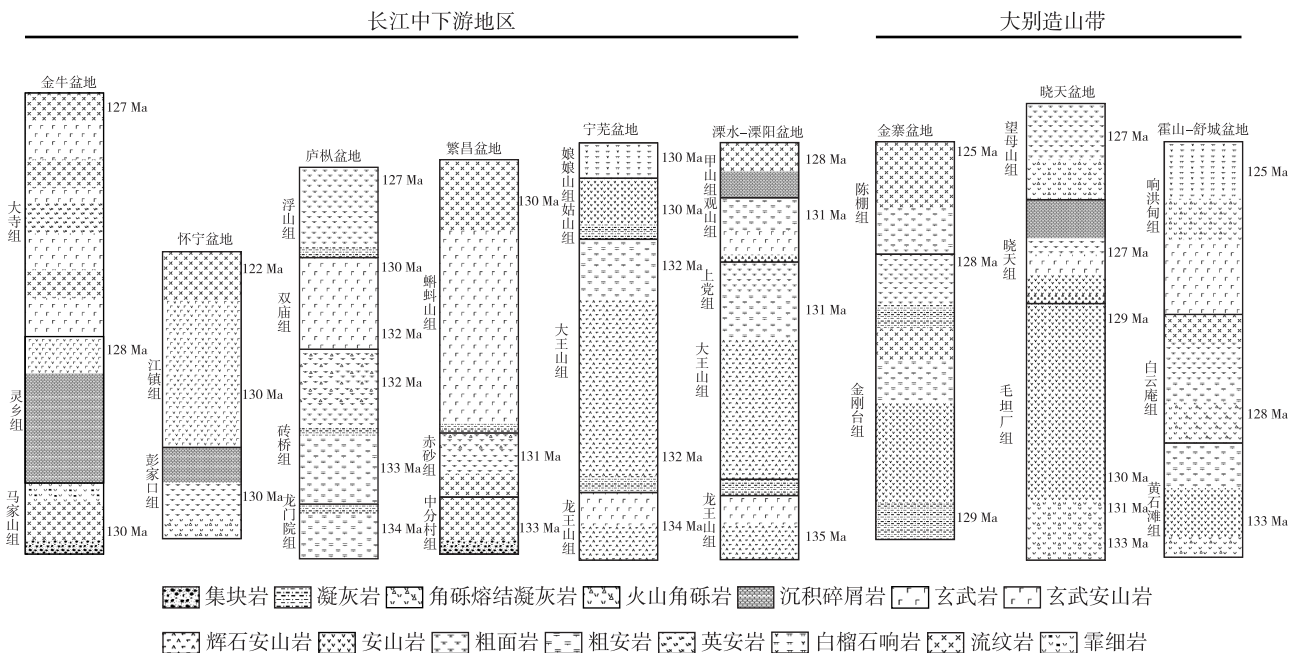


图 2 长江中下游和大别造山带中生代火山岩盆地火山岩地层柱状略图(据区调查报告资料编绘,年龄资料来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 2 Mesozoic volcanic histograms of the Middle-Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen (compilation based on field survey report, age data sources after [4] and references therein)

大别造山带广泛发育晚中生代火山岩,主要出露在北淮阳构造带,由于北大别和南大别等构造单元在燕山期发生强烈的热穹窿,目前出露的主要为侵入岩,仅在岳西桃源寨、飞旗寨一带零星发育火

山岩,主要为剥蚀残留。北淮阳晚中生代火山岩沿金寨—霍山—舒城一线发育,呈 NWW 向展布,向东止于郟庐断裂带,由西向东分布金寨、晓天、霍山—舒城 3 个火山盆地(图 1)。金寨火山盆地的火

山活动包括金刚台组和陈棚组 2 个旋回(图 2)。金刚台组下部为流纹质、粗安质和安山质熔岩及碎屑岩,上部发育粗面质、粗安质和流纹质熔岩及碎屑岩,喷发时代为 129~128 Ma<sup>[31-32]</sup>。陈棚组火山岩在金寨火山盆地西北部出露,以流纹质、英安质和粗安质碎屑岩为主,少量熔岩,喷发时代约为 125 Ma<sup>[31]</sup>。晓天盆地自下而上划分为毛坦厂组、晓天组和望母山组。毛坦厂组火山岩分布最广泛,主要为安山岩-粗安岩组合,喷发时代为 133~129 Ma<sup>[10,33]</sup>。晓天组主要为玄武岩、辉石安山岩、安山岩、粗安质熔结凝灰岩、凝灰质砾岩、凝灰质粉砂岩及页岩、泥灰岩等,形成时代约为 127 Ma(课题组未发表数据)。望母山组为一套成分单一的粗面质角砾(集块)熔岩、粗面质熔结凝灰岩及潜火山岩相粗面斑岩,形成时代约为 125 Ma(课题组未发表数据)。霍山—舒城盆地自下而上划分为黄石滩组、白云庵组和响洪甸组(图 2)。黄石滩组主要发育粗安岩、安山岩及火山碎屑岩,喷发时代约为 133 Ma(课题组未发表数据)。白云庵组为粗面质、英安质、流纹质熔岩及碎屑岩,喷发时代约为 128 Ma(课题组未发表数据)。响洪甸组为碱性玄武岩-响岩组合,下部为含假白榴石碱性(钾长)粗面质-碱玄质-白榴石响岩质凝灰岩、角砾岩、集块岩、角砾熔岩、熔岩;中部为假白榴石响岩质凝灰岩、角

砾岩、凝灰熔岩、凝灰质粉砂岩组成韵律互层;上部为假白榴石响岩质-含假白榴石碱性(钾长)粗面质集块岩、集块熔岩。目前,响洪甸组火山岩尚无精确的年代学数据,侵入其中的霓辉正长岩锆石 U-Pb 年龄为 $(125.2 \pm 2.9)$  Ma(课题组未发表数据),结合响洪甸组平行不整合接触于毛坦厂组和金刚台组之上<sup>[34]</sup>,可以将响洪甸组的喷发时代限定在 125 Ma 左右。

从现今分布来看,长江中下游和大别造山带北淮阳地区的晚中生代火山岩均为近 EW 向分布,似乎与中国东部近 SN 向燕山期岩浆岩带的分布不协调。但是,大别造山带腹地依然零星出露同时代的火山岩,江南造山带也有少量火山岩残留,因此,晚中生代的火山活动可能也是呈 SN 向或者呈面状分布。由于大别造山带腹地和江南造山带随着巨量晚中生代花岗质岩浆的上侵而发生热穹窿,经历剥蚀后火山岩仅零星残留,广泛出露花岗岩岩基(图 1)。长江中下游和北淮阳地区晚中生代火山岩受当时断陷构造限定,保存较完整。时代上,长江中下游地区火山活动主体时代为 135~127 Ma(图 3(b)),仅怀宁火山盆地晚期流纹岩喷发时代晚至 122 Ma;大别造山带北淮阳地区火山活动时代为 133~125 Ma(图 3(a)),两者均在早白垩世发育,且火山活动时限基本一致,指示均处在统一的构造动力学背景之下。

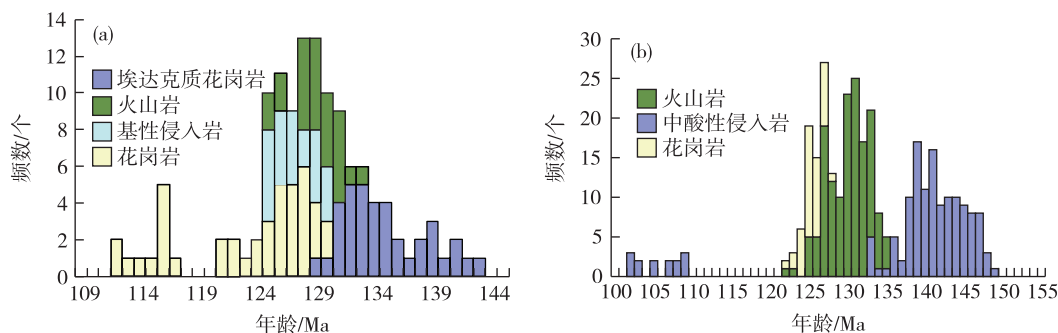


图 3 大别造山带(a)和长江中下游地区(b)中生代岩浆岩年龄直方图(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 3 Histograms of Late Mesozoic magmatic rock ages from the Dabie Orogen (a) and the Middle-Lower Yangtze River Belt (b) (data sources after [4] and references therein)

## 2 火山岩地球化学特征

不同于晚中生代侵入岩以花岗质为主,长江中下游和大别造山带早白垩世火山岩广泛发育中基性岩,反映了该时期强烈的壳幔相互作用。长江中下游包含两种类型的火山岩盆地:一类发育

双峰式火山岩,玄武岩和流纹岩先后或交互喷发,包括金牛火山岩盆地和繁昌火山岩盆地,这类火山岩多数为高钾钙碱性系列岩石(图 4);另一类主要发育碱性火山岩,属于橄榄安粗岩(shoshonite)系列(图 4),包括怀宁盆地、庐枞盆地、宁芜和溧水—溧阳盆地火山岩<sup>[22,25,27,35]</sup>。其中,庐枞盆地最



晚期浮山组、宁芜盆地最晚期娘娘山组、怀宁盆地彭家口组和江镇组火山岩最富碱(本文称之为超碱质火山岩)(图 4),岩石类型出现响岩。这些超碱质火山岩  $\text{SiO}_2$  含量多数为 50%~65%,以粗面

玄武岩、玄武粗安岩、粗面岩、粗安岩和响岩为主。这些橄榄安粗岩系列岩石并非超钾质岩石,绝大多数样品的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值  $< 2$ ,多数样品的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 0.5~1.5。

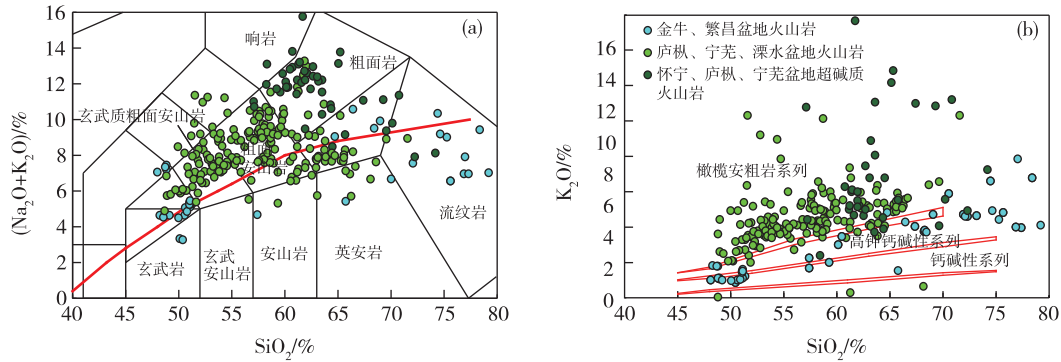


图 4 长江中下游地区早白垩世火山岩( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  (a)和  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  (b)图解(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 4 Diagrams of ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  (a) and  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  (b) for the Early Cretaceous volcanics in the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

大别造山带早白垩世火山岩也主要发育两种类型:一类是高钾钙碱性系列,包括除了响洪甸组以外的火山岩(图 5)。这类岩石  $\text{SiO}_2$  含量多数为 53%~70%,以玄武质粗面安山岩、粗面安山岩和粗面英安岩为主;另一类是以响洪甸组火山岩为代表的超钾质岩石,属于橄榄安粗岩系列,

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值多数为 2~9<sup>[6,36]</sup>。长江中下游和大别造山带早白垩世火山活动的显著特征是:二者均以高钾钙碱性岩石为主,晚期出现超碱质响岩。与东南沿海晚中生代火山岩明显不同的是,前者常见基性火山岩和中性火山岩,后者以酸性火山岩为主。

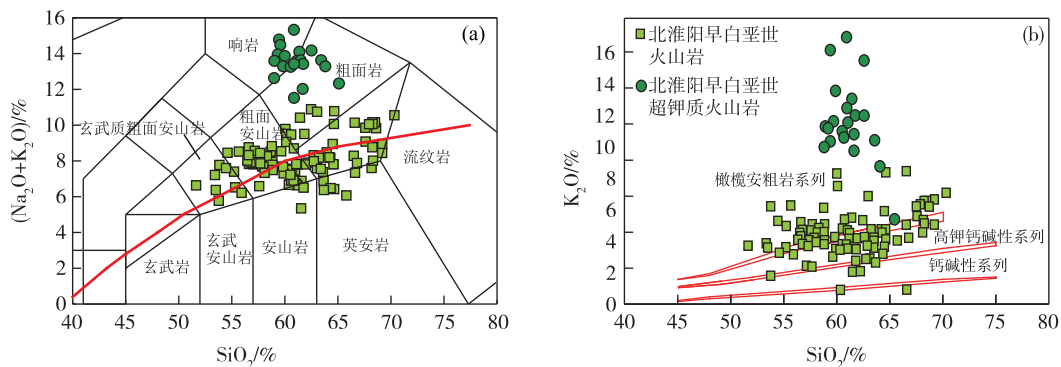


图 5 大别造山带早白垩世火山岩( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  (a)和  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  (b)图解(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 5 Diagrams of ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$  (a) and  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  (b) for the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen (data sources after [4] and references therein)

长江中下游和大别造山带早白垩世火山岩均表现出相似的稀土元素和微量元素配分型式,即富集大离子亲石元素 Th、U、Pb 和 LREE,亏损高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti 和 HREE。这种微量元素特征显著不同于洋中脊玄武岩(MORB)或洋岛玄武岩(OIB),表现出岛弧岩浆岩或壳源岩浆岩的特

征。部分火山岩具有 Eu 负异常,HREE 分异程度也不相同,其中两个地区的晚期超碱质火山岩均表现出更高的 Tb/Yb 值,指示岩浆源区深度加大。

虽然在岩石类型和元素特征上,大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩具有一定的相似性,但两者的同位素组成却存在显著差异,具体表现为:

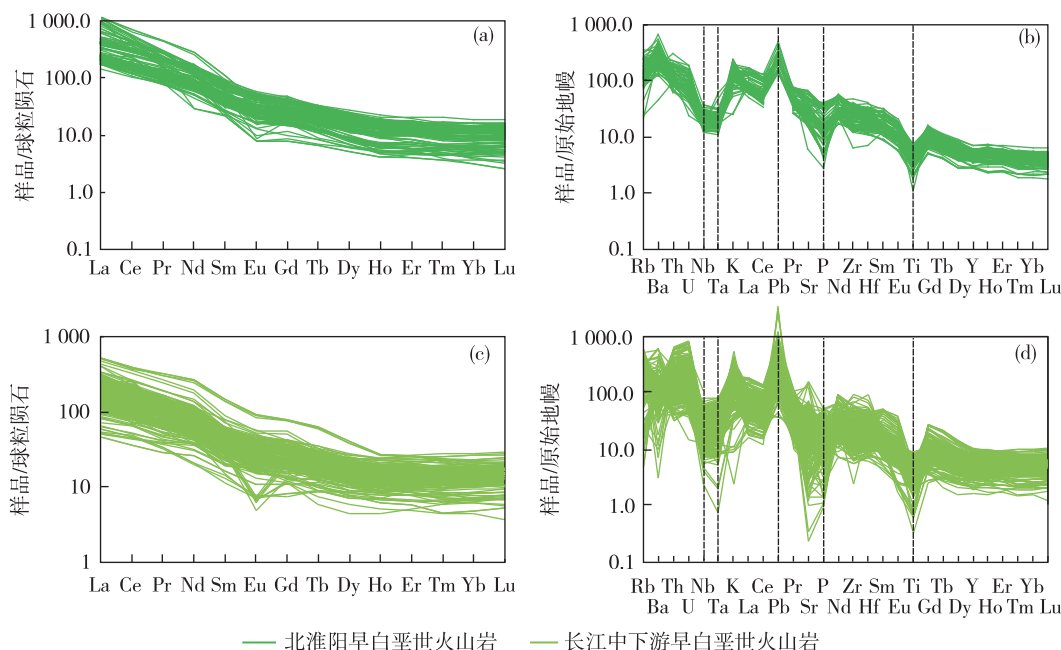


图6 大别造山带和长江中下游地区早白垩世火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a,c)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,d)(球粒陨石标准化值引自文献[37],原始地幔标准化值引自文献[38],数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns(a,c) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams(b,d) for the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (the chondrite-normalized values are from [37], the primitive mantle normalized values are from [38], data sources after [4] and references therein)

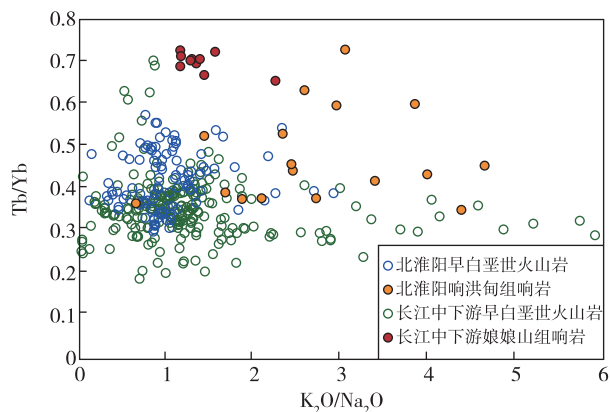


图7 大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩  $K_2O/Na_2O$ -Tb/Yb 相关图(数据来源于文献[4]及其引用文献)

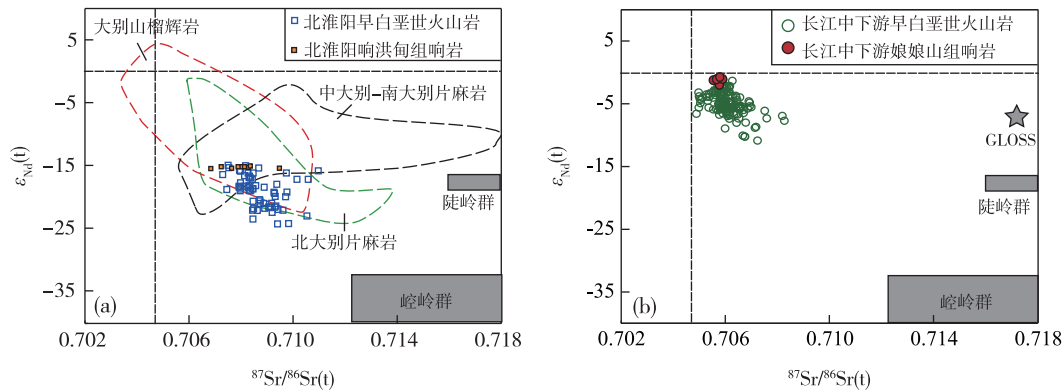
Fig. 7  $K_2O/Na_2O$ -Tb/Yb plot of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

大别造山带早白垩世火山岩具有高度富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和低放射性成因 Pb 同位素组成

(图 8(a),图 9,图 10), $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 多数为 0.707 0~0.711 0, $\epsilon_{Nd}(t)$ 多数为 -15~-25,锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -14~-37, $^{206}Pb/^{204}Pb(t)<17.5$ ;长江中下游早白垩世火山岩为弱富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和高放射性成因 Pb 同位素组成(图 8(b),图 9,图 10), $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 多数为 0.704 6~0.707 0, $\epsilon_{Nd}(t)$ 多数为 0~-10,锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 +4~-13, $^{206}Pb/^{204}Pb(t)>18.0$ 。同位素特征表明,这两个构造单元的同时期火山岩起源于性质完全不同的源区。

### 3 火山岩成因及其对源区性质的指示

长江中下游和大别造山带早白垩世火山岩以基性岩-中性岩为主,少量流纹质岩石,指示其主体为幔源岩浆成因<sup>[47-48]</sup>。而超碱质(包括超钾质)火山岩普遍认为是富集地幔低程度部分熔融的产物<sup>[49-54]</sup>。因此,长江中下游和大别造山带早白垩世火山岩反映了较强烈的地幔部分熔融和壳幔相互作用的存在。



北大别片麻岩数据来源于文献[39-42];中大别—南大别片麻岩和南大别榴辉岩数据来源于文献[40-43];崆岭群数据来源于文献[44];陡岭群数据来源于文献[45];全球大洋平均沉积物(GLOSS)数据来源于文献[46];火山岩数据来源于文献[4]及其引用文献。

图 8 大别造山带(a)和长江中下游(b)早白垩世火山岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  相关图

Fig. 8  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  plot of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen (a) and the Middle-Lower Yangtze River Belt(b)

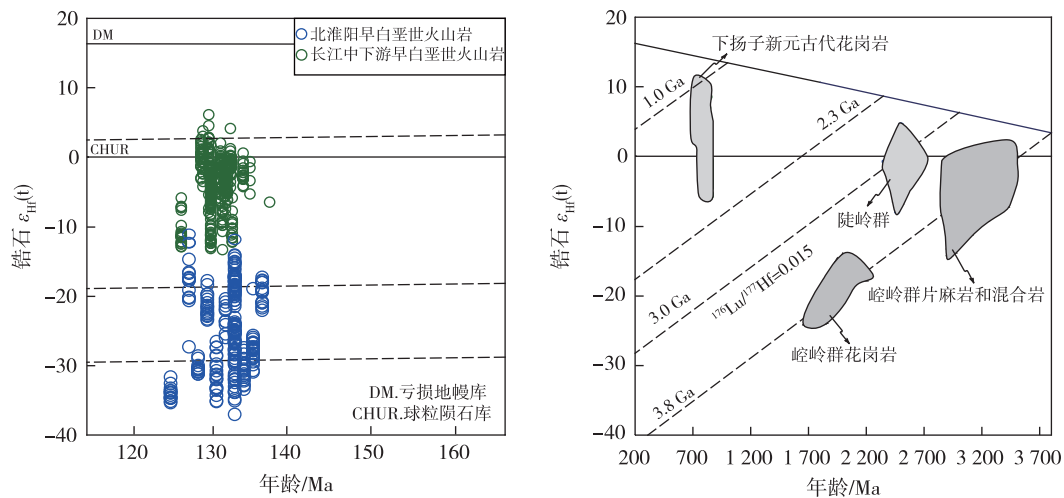


图 9 大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 9 Zircon age vs.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  diagrams of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

### 3.1 长江中下游早白垩世火山岩

长江中下游早白垩世火山岩无论是橄榄安粗岩系列岩石,还是双峰式火山岩,均表现为富集 LREE、LILE 和 Pb,亏损 Nb 和 Ta 等高场强元素,具有弱富集的 Sr-Nd-Hf 同位素和高放射成因 Pb 同位素组成的特征(图 6,图 8,图 9,图 10),是大陆地壳和弧岩浆岩的典型标志<sup>[55-57]</sup>。这种特征可以通过幔源岩浆上侵过程中的地壳混染,或者源区中地壳组分的加入而产生。然而,对于  $\text{SiO}_2 < 65\%$  的

岩石,随着  $\text{SiO}_2$  含量的变化, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值几乎无相关性的改变(图 11),表明其受地壳混染的影响较轻微。尤其是,虽然宁芜盆地娘娘山组响岩具有较高  $\text{SiO}_2$  含量(约 60%),但是却具有长江中下游地区同期岩浆岩中最亏损的 Sr-Nd 同位素组成(图 8,图 11),确切地指示了其幔源成因以及轻微的地壳混染。因此,这种具有弧岩浆性质的地球化学特征反映了源区地壳物质的加入。除了晚期的娘娘山组响岩以外,这些中基性火山岩的源区均为交代的富

集地幔,火山岩化学成分的变化更多是由于部分熔融程度和结晶分异所导致。另外,流纹质火山岩具

有相对富集的同位素组成,指示其主体为壳源或壳幔混源成因。

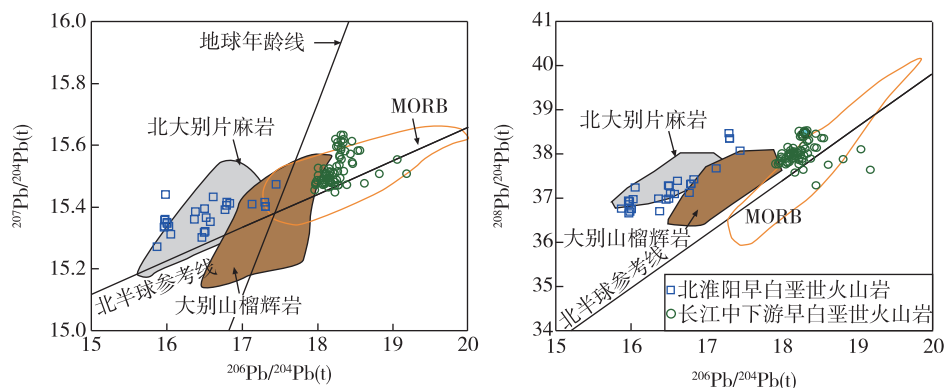


图 10 大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩 Pb 同位素相关图(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 10 Pb isotopic plots of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

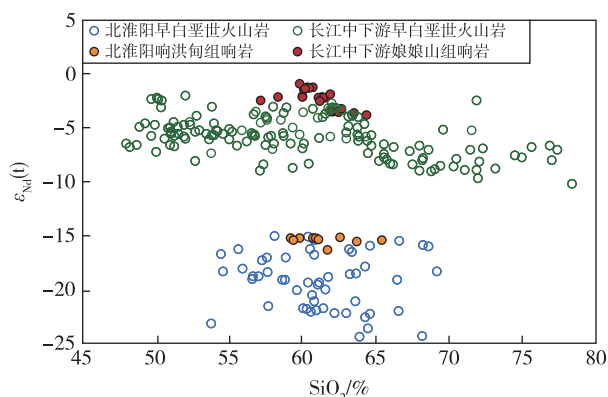


图 11 大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  相关图(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 11  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  plot of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

地壳物质加入地幔的方式主要为拆沉和俯冲<sup>[57]</sup>。拆沉地壳主要为下地壳物质,一般具有富集的 Sr-Nd 同位素组成和低放射性成因 Pb 同位素组成<sup>[58-59]</sup>,显著不同于长江中下游火山岩的弱富集 Sr-Nd 同位素和高放射性成因 Pb 同位素组成(图 8,图 11),表明火山岩的地幔源区交代物质来源于俯冲板片<sup>[60-61]</sup>。

俯冲板片析出物质交代上覆地幔楔,往往是随着俯冲深度的不同,析出交代介质以不同元素亲和

性的富水流体和含水熔体为主,其中富水流体易溶解、搬运 Pb 和 LILE,而 Th 和 LREE 则倾向进入含水熔体中<sup>[61-62]</sup>。因此,这两种交代介质对地幔源区的相对贡献程度可以通过火山岩不同活动性的元素比值来鉴别<sup>[63]</sup>。长江中下游中基性火山岩绝大多数表现为高的 Th/Yb 值和低的 Ba/Th 值,在相关图上呈现出源区主要为含水熔体交代的趋势(图 12(a))。而在含水熔体来源上,俯冲板片携带的陆源沉积物和深海沉积物具有不同程度的贡献(图 12(b))。另外,这些岩石均具有高的放射性成因 Pb 同位素组成和弱富集的 Sr-Nd 同位素组成(图 8,图 10),指示地幔交代介质主要为大洋沉积物来源的熔体,而非玄武质洋壳部分熔融的熔体。

长江中下游宁芜火山盆地娘娘山组响岩表现出不同的地球化学特征,主要因其具有该区火山岩中富集程度最低的 Nd 同位素组成(图 8),以及与宁芜火山盆地下伏各组火山岩相比最高的全碱含量和  $\text{K}_2\text{O}$  含量。因此,娘娘山组响岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量和  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  含量,指示其经历了一定程度的结晶分异,但其接近亏损的 Nd 同位素组成以及弧岩浆微量元素特征,明确地指示其起源于同样受到俯冲板片析出物质的交代地幔源区,但可能为地幔楔中的软流圈区域。这个认识还可以被娘娘山组响岩具有与下伏各组火山岩相比最高的 Tb/Yb 值所佐证(图 7),随着岩浆部分熔融深度的增加,石榴子石残留相出现,岩浆将具有更高的 Tb/Yb 值<sup>[64]</sup>。实验岩石学结果表明,泥质岩(相当



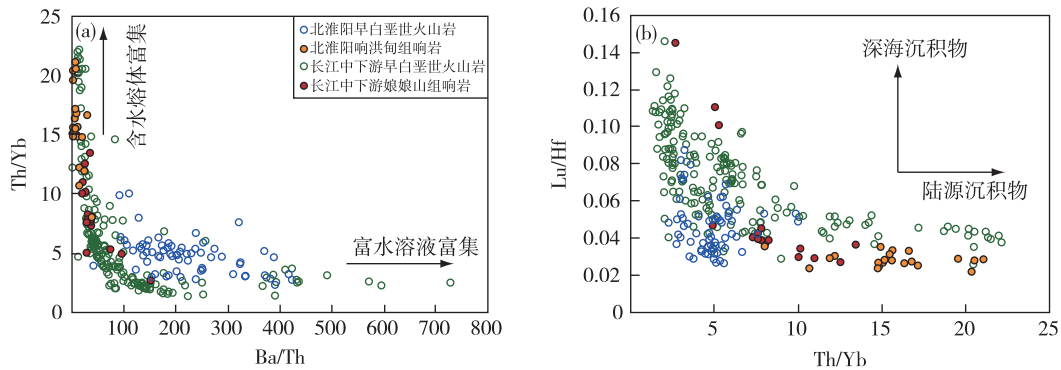


图 12 大别造山带和长江中下游早白垩世火山岩 Ba/Th-Th/Yb(a)和 Th/Yb-La/Hf(b)图解(数据来源于文献[4]及其引用文献)

Fig. 12 Ba/Th-Th/Yb (a) and Th/Yb-La/Hf (b) plots of the Early Cretaceous volcanics in the Dabie Orogen and the Middle-Lower Yangtze River Belt (data sources after [4] and references therein)

于大洋陆源沉积物)在 3.0 GPa 压力下发生部分熔融,产生  $K_2O/Na_2O$  值约为 1.5 的富钾熔体,而压力的提高会增加  $K_2O/Na_2O$  值<sup>[65]</sup>。娘娘山组响岩的  $K_2O/Na_2O$  值为 1.2~2.2,平均值为 1.4<sup>[3]</sup>,大于下伏火山岩  $K_2O/Na_2O$  值(0.4~3.3)(平均值为 1.2)<sup>[66]</sup>,也表明娘娘山组响岩起源更深,约为 90 km。

综上所述,长江中下游地区早白垩世火山岩主要起源于受俯冲大洋板块陆源沉积物来源含水熔体交代的岩石圈地幔,晚期岩浆起源于更深的受类似介质交代的软流圈地幔,考虑到软流圈在早白垩世也同样受到了交代,推断俯冲板片为古太平洋板块,而非新元古代俯冲交代事件<sup>[25, 67]</sup>。少量流纹质火山岩指示在幔源岩浆带来热或流体的影响下,地壳也发生了部分熔融。

### 3.2 大别造山带早白垩世火山岩

大别造山带早白垩世火山岩大致可分为高钾钙碱性系列和超钾质系列两类(图 5),后者主要指响洪甸组响岩,形成于该地区火山活动的晚阶段。地壳岩石部分熔融产生的熔体通常具有较高的  $SiO_2$  含量和低  $Mg^\#$  值的特征<sup>[47-48]</sup>。尽管大别造山带早白垩世高钾钙碱性系列火山岩主量及微量元素含量变化很大,但部分样品  $SiO_2$  含量低至 50%、 $Mg^\#$  值高至 63.6,同时具有高 Cr(最高含量达  $500 \times 10^{-6}$ )与 Ni(最高含量达  $132 \times 10^{-6}$ )含量<sup>[10]</sup>,且随着  $SiO_2$  含量的变化,同位素组成基本保持不变(图 11),表明这些主体为中性的火山岩主要起源于地幔岩石的部分熔融。

大别造山带高钾钙碱性系列火山岩与长江中下游地区火山岩的地球化学特征显著不同,即具有一致的弧岩浆微量元素特征(图 6(b))、高度富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成(图 8,图 9)和低放射性成因 Pb 同位素组成(图 10)。这些特征表明,地幔源区加入的交代地壳组分完全不同于长江中下游地区来自俯冲大洋板块的交代介质。一系列的证据表明,大别造山带早白垩世存在同位素高度富集的岩石圈地幔,是因为其受到了类似北大别片麻岩地壳物质的交代。印支期,地壳物质由俯冲华南陆块带入到地幔楔。① 高钾钙碱性系列火山岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成与北大别片麻岩类似(图 8,图 9),尤其是特征性的低放射性成因 Pb 同位素组成完全落入北大别片麻岩范围内(图 10),后者普遍被认为可代表华南陆块中下地壳<sup>[68-69]</sup>。② 高钾钙碱性火山岩中常见继承锆石,具有新元古代的原岩和三叠纪的变质年龄,且部分继承锆石具有显著低于地幔的  $\delta^{18}O$  值<sup>[70-71]</sup>,这些特征是大别变质岩的典型标志<sup>[72-73]</sup>。③ 大别造山带起源于岩石圈地幔的基性岩形成时代与火山岩基本一致(图 3(a)),其地球化学特征与高钾钙碱性系列火山岩具有较高的相似性,即弧岩浆的微量元素特征、高度富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成、低放射成因 Pb 同位素组成以及发育低  $\delta^{18}O$  的锆石。这些基性岩被认为起源于受俯冲华南陆壳物质交代的岩石圈地幔<sup>[74-75]</sup>。

三叠纪,在华北板块与华南板块大陆碰撞过程中,俯冲华南地壳来源(长英质熔体)可与地幔楔橄榄岩发生反应,在地幔楔橄榄岩内形成镁铁质-超镁

铁质脉体<sup>[76]</sup>。这种熔体-橄榄岩反应会产生贫橄榄石的岩石,如石榴辉石岩、石榴角闪石岩和辉石石榴石岩。这种交代岩石组比分比大陆岩石圈地幔方辉橄榄岩和纯橄岩更饱满,因此更容易发生部分熔融。根据实验岩石学结果,辉石岩部分熔融能够产生玄武质-安山质甚至英安质熔体<sup>[77]</sup>。因此,大别造山带早白垩世高钾钙碱性系列火山岩起源于受俯冲陆壳来源熔体交代的地幔楔,且相比早白垩世基性岩,源区有更多地壳组分的加入。

目前,普遍认为超钾质火山岩是富集地幔低程度部分熔融的产物<sup>[49-54]</sup>。虽然大别造山带早白垩世超钾质火山岩具有中性成分的  $\text{SiO}_2$  含量(图 5),但其高度富钾的特征是大别造山带广泛发育的壳源(早白垩世花岗岩)所不具备的。另外,与高钾钙碱性系列火山岩相比,这些超钾质火山岩具有富集程度更弱的 Sr-Nd 同位素组成,也指示其为幔源岩浆的产物。大别造山带超钾质火山岩同样具有弧岩浆微量元素特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成(图 8,图 9),指示源区有类似于高钾钙碱性系列火山岩源区的地壳组分加入。虽然地幔低程度部分熔融可以产生更高碱质的岩浆,但大别造山带超钾质火山岩的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值多数为 1.2~9.0,平均值为 5.0<sup>[6]</sup>,高度富钾,并非单纯低程度部分熔融可以解释。研究表明,多硅白云母在 2.5~5.0 GPa 压力下发生分解,可以形成富钾熔体进入地幔楔<sup>[78]</sup>。实验岩石学结果显示,当压力达到 5.0 GPa 时,泥质岩的部分熔融可形成  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 5 的熔体,对应多硅白云母的分解<sup>[65]</sup>。考虑到多硅白云母是大别造山带变质岩中的常见矿物<sup>[43]</sup>,而大别碰撞造山带俯冲陆壳深度可达 200 km<sup>[79]</sup>,因此,我们认为大别造山带超钾质火山岩起源于俯冲华南陆壳在 5.0 GPa 压力下,由于多硅白云母发生分解形成的超钾质熔体。

综上所述,大别造山带早白垩世高钾钙碱性系列火山岩形成于碰撞后环境,起源于受印支期俯冲华南中下地壳部分熔融的长英质熔体交代的岩石圈地幔,虽然交代作用发生在印支期,或许由于冷的陆壳俯冲,当时的地幔楔环境达不到交代熔融的条件。随后,在早白垩世拉张环境下,地温梯度升高,被交代的地幔楔发生部分熔融。晚阶段的超钾质火山岩同样起源于俯冲陆壳交代的地幔,但熔体起源更深,处在软流圈区域。

## 4 火山活动及其对古太平洋板块俯冲的指示

华南东部广泛发育的中生代岩浆活动与古太平洋板块俯冲有关,关于具体的俯冲方式包括:俯冲角度的改变<sup>[14]</sup>;平板俯冲,随之破裂和回卷<sup>[16]</sup>;洋脊俯冲<sup>[17]</sup>等。不同于典型的环太平洋岩浆弧,华南东部缺乏典型的火山岛弧,以花岗岩和流纹岩为主的岩浆岩中很难限定俯冲大洋板片的直接物质贡献。因此,古太平洋板块俯冲和华南东部岩浆作用之间是既有物质上也有动力上的成因联系,还是只有动力学机制,一直存在争议。据此,CHEN L 等<sup>[25, 67]</sup>认为早白垩世,长江中下游地区存在交代富集的岩石圈地幔,但交代事件发生在新元古代的大洋板片俯冲,而非古太平洋板块。显然,甄别古太平洋板块俯冲是否在晚中生代岩浆作用中存在物质贡献,对理解该时期大地构造背景和演化过程至关重要。

长江中下游早白垩世中基性火山岩的地球化学特征,证明地幔源区存在来源于俯冲大洋板块沉积物的熔体贡献,但弱富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和高放射性成因 Pb 同位素组成很难区别俯冲交代是何时发生的。仅从地球化学特征来看,新元古代和中生代大洋板块俯冲交代都有可能。然而,长江中下游地区早白垩世碱性火山岩来源于受俯冲大洋板片析出物质交代的软流圈地幔,确切地指示了俯冲交代事件发生在岩浆活动的同时期,对应了俯冲大洋板片的回卷。因此,长江中下游早白垩世火山岩记录了古太平洋板块俯冲的物质贡献,对应了古太平洋板块低角度俯冲至长江中下游地区,随后在约 130 Ma 时发生了俯冲板片的回卷。

大别造山带早白垩世火山岩具有高度富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和低放射成因 Pb 同位素组成,完全不同于俯冲大洋板片沉积物的特征。换言之,在同时期大别造山带的幔源岩浆岩中,还缺少古太平洋板片的物质信息,大别造山带早白垩世地幔源区却具有俯冲华南陆壳的强烈贡献。类似于长江中下游地区,虽然大别造山带晚中生代火山活动从早到晚也表现出起源深度的加大,从岩石圈地幔到软流圈地幔,地幔交代介质却完全不同。从造山带演化的角度,大别造山带晚中生代火山活动对应了造山后的垮塌、岩石圈根的断离,但其活动时

限与长江中下游晚中生代火山活动几乎一致,说明两者对应的构造动力学背景具有统一性。

另外,长江中下游与大别造山带火山活动的时限在东南沿海地区中生代下火山岩系的时间范围内,后者大致呈NE向分布,而长江中下游与大别造山带现今保留的火山岩均呈近EW向分布,且深入内陆地区。或许晚侏罗世,郯庐断裂带大规模左旋平移,而郯庐断裂带不经过长江,作为物质调整,断裂带两侧发育一系列近EW向分布的逆冲推覆断层。在晚侏罗世—早白垩世,该地区转为拉张的构造背景,之前长江中下游地区与大别造山带北淮阳地区存在的逆冲带转变为构造薄弱带,是这两个地区火山喷发和空间分布的控制因素。

长江中下游与大别造山带早白垩世火山岩地球化学特征及成因差异表明,虽然具有统一的构造动力学背景,但各区域的岩浆活动在类型、组合及地球化学特征上均受之前的岩石圈结构的重要影响,这或许是中国东部不同构造区晚中生岩浆活动各具特色的关键因素之一。

## 5 主要认识

(1)长江中下游地区中生代火山岩喷发时代集中在135~127 Ma,包括高钾钙碱性系列双峰式岩石与橄榄安粗岩系列中基性岩石两种类型。其中,中基性火山岩起源于受俯冲大洋板片沉积物部分熔融的熔体交代的岩石圈地幔,晚阶段的超碱质火山岩起源于类似交代介质交代的软流圈地幔,指示岩浆源区的加深,对应了俯冲板片的回卷。

(2)大别造山带中生代火山活动时限为133~125 Ma,包括高钾钙碱性系列和超钾质系列两种主要类型。前者起源于交代的岩石圈地幔,交代介质为印支期深俯冲的华南中下地壳析出的硅质熔体。晚阶段的超钾质火山岩起源更深,是深俯冲的华南陆壳在高压下,多硅白云母分解产生熔体交代的地幔源区,对应了造山带的垮塌和岩石圈的拆沉。

(3)中生代,长江中下游地区幔源火山岩记录了俯冲的古太平洋板块的物质贡献,而大别造山带地幔源区更多地记录了印支期俯冲陆壳的信息。两个构造单元的岩浆作用发生在统一的构造动力学机制下,但由于早先构造演化历史不同,虽然同为华南板块物质组分特征,但岩浆作用表现出明显的岩石圈结构物质继承性。

## 参考文献

- [1] 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 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 2609-2636.
- [2] 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 [J]. *Lithos*, 2013, 156/159: 204-217.
- [3] YAN J, LIU J M, LI Q Z, et al. In situ zircon Hf-O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution [J]. *Lithos*, 2015, 227: 57-76.
- [4] YAN J, LIU X Q, WANG S N, et al. Metallogenic type controlled by magma source and tectonic regime: Geochemical comparisons of Mesozoic magmatism between the Middle-Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 133: 104095.
- [5] 刘晓强. 大别造山带晚中生代岩浆岩成因及其构造背景[D]. 合肥:合肥工业大学, 2018.  
LIU X Q. Petrogenesis and tectonic setting of the late Mesozoic magmatic rocks in the Dabie Orogen [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [6] 代富强. 大别—苏鲁造山带和华北东南缘白垩纪岩浆岩地球化学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.  
DAI F Q. A geochemical study of Cretaceous igneous rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt and the southeastern margin of the North China Block [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [7] YAN J, LIU H Q, SONG C Z, et al. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16): 2895-2904.
- [8] 陶奎元, 邢光福, 杨祝良, 等. 浙江中生代火山岩时代厘定和问题讨论: 兼评 Lapierre 等关于浙江中生代火山活动时代的论述[J]. *地质论评*, 2000, 46(1): 14-21.  
TAO K Y, XING G F, YANG Z L, et al. Determina-

- tion of and discussion in the ages of Mesozoic volcanic rocks in Zhejiang; Comments on the argumentation of Lapierre et al [J]. *Geological Review*, 2000, 46(1): 14-21.
- [9] XING G F, LI J Q, DUAN Z, et al. Mesozoic-Cenozoic volcanic cycle and volcanic reservoirs in east China [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32: 742-765.
- [10] DAI F Q, ZHAO Z F, DAI L Q, et al. Slab-Mantle interaction in the petrogenesis of andesitic magmas; Geochemical evidence from postcollisional intermediate volcanic rocks in the Dabie orogen, China [J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57(6): 1109-1134.
- [11] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1449-1461.
- DONG S W, ZHANG Y Q, LONG C X, et al. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [12] MAO J R, LI Z L, YE H M. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(12): 2853-2877.
- [13] WANG Y J, FAN W M, SUN M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block; a case study in the Hunan Province [J]. *Lithos*, 2007, 96: 475-502.
- [14] ZHOU X M, LI W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269-287.
- [15] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29: 26-33.
- [16] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intra-continental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model [J]. *Geology*, 2007, 35: 179-182.
- [17] SUN W D, DING X, HU Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262: 533-542.
- [18] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1273-1305.
- [19] WANG Y J, ZHANG Y H, FAN W M, et al. Numerical modeling for generation of Indo-Sinian peraluminous granitoids Hunan Province: basaltic underplating vs tectonic thickening [J]. *Science in China (series D)*, 2002, 45: 1042-1056.
- [20] XIE G Q, MAO J W, LI X W, et al. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2011, 127: 144-164.
- [21] 闫峻, 史磊, 李全忠, 等. 长江中下游地区怀宁盆地火山岩锆石 LA-ICPMS 定年[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1218-1226.
- YAN J, SHI L, LI Q Z, et al. Zircon LA-ICPMS Dating of the Volcanic Rocks from Huaining Basin in the Middle-Lower Yangtze Valley [J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1218-1226.
- [22] 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 694-714.
- XUE H M, MA F, GUAN H Y, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle-lower Yangtze region [J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 694-714.
- [23] ZHOU T F, FAN Y, YUAN F, et al. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51: 1470-1482.
- [24] 薛怀民, 马芳, 曹光跃. 长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩: 年代学格架、地球化学特征及成因讨论[J]. *地质学报*, 2015, 89(8): 1380-1401.
- XUE H M, MA F, CAO G Y. Late Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in the Middle and Lower Yangtze River Reaches: ages, geochemical and genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(8): 1380-1401.
- [25] CHEN L, ZHAO Z F, ZHENG Y F. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanism in the Luzong basin, South China [J]. *Lithos*, 2014, 190/191: 220-239.
- [26] 刘春, 闫峻, 宋传中, 等. 长江中下游繁昌盆地火山岩年



- 代学和地球化学:岩石成因和地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3228-3240.
- LIU C, YAN J, SONG C Z, et al. Geochronology and geochemistry of the volcanic rocks from Fanchang basin in the lower Yangtze region: petrogenesis and geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3228-3240.
- [27] 王丽娟, 王汝成, 于津海, 等. 宁芜盆地火山-侵入岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1247-1272.
- WAGN L J, WANG R C, YU J H, et al. Geochronology, geochemistry of volcanic-intrusive rocks in the Ningwu basin and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1247-1272.
- [28] TANG Y J, ZHANG H F, YING J F, et al. Rapid eruption of the Ningwu volcanics in eastern China: Response to Cretaceous subduction of the Pacific plate [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 14: 1703-1721.
- [29] 张少琴, 王丽娟, 杨颖鹤. 长江中下游溧水盆地火山岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2015, 21(1): 15-30.
- ZHANG S Q, WANG L J, YANG Y H. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks in the Lishui Basin in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River and its Geological Implications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(1): 15-30.
- [30] 窦志娟, 杨祝良, 陈志洪, 等. 长江中下游成矿带溧水盆地(次)火山岩的年代学及其意义[J]. 矿物岩石, 2015, 35(2): 35-31.
- DOU Z J, YANG Z L, CHEN Z H, et al. Geochronology and significance of Lishui basin(sub) volcanic rocks of the Yangtze River metallogenic belt [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2015, 35(2): 35-31.
- [31] 黄皓. 北淮阳白垩纪火山岩的年代学和地球化学研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- HUANG H. Geochronological and geochemical study on the Mesozoic volcanic rocks in Beihuaiyang belt [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2012.
- [32] GAO X Y, ZHAO T P, ZHAO J H. Petrogenesis of the early Cretaceous volcanic rocks in the North Huaiyang tectono-magmatic unit of the Dabie Orogen, eastern China: Implications for crust—mantle interaction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 118: 51-67.
- [33] 夏群科, 郑永飞, DELOULE E. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成[J]. 高校地质学报, 2003, 9(2): 163-171.
- XIA Q K, ZHENG Y F, DELOULE E. U-Pb Ages and Oxygen Isotope Compositions of Zircons from Post-Collisional Volcanic Rocks of Dabieshan [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(2): 163-171.
- [34] 安徽省区域地质调查队. 1:5万万油店幅区域地质调查报告[R]. 合肥: 安徽省区域地质调查队, 1992.
- Regional Geological Survey Team of Anhui Province. 1:50 000 regional geological survey report of Wanyoudian[R]. Hefei: Regional Geological survey Team of Anhui Province, 1992.
- [35] 杜玉雕, 魏国辉. 安徽庐枞盆地枞阳地区玄武质火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 华东地质, 2019, 40(3): 188-198.
- DU Y D, WEI G H. Geochemical characteristics and geological significance of the basaltic volcanic rocks in the Zongyang area of Luzong basin, Anhui province [J]. *East China Geology*, 2019, 40(3): 188-198.
- [36] 邱检生, 王德滋, 刘洪, 等. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 319-330.
- QIU J S, WANG D Z, LIU H, et al. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt: geochemistry and petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 319-330.
- [37] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C]//HENDERSON, P. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Elsevier, 1984: 63-114.
- [38] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [39] LI S G, NIE Y H, HART S R, et al. Interaction between subducted continental crust and the mantle—II: Sr and Nd isotopic geochemistry of the syncollisional mafic-ultramafic [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41: 632-638.
- [40] LI S G, HUANG F, ZHOU H Y, et al. U-Pb isotopic

- compositions of the ultrahigh pressure metamorphic (UHPM) rocks from Shuanghe and gneisses from Northern Dabie zone in the Dabie Mountains, central China: Constraint on the exhumation mechanism of UHPM rocks [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46: 200-209.
- [41] AMES L, ZHOU G Z, XIONG B C. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China [J]. *Tectonics*, 1996, 15: 472-489.
- [42] 张宏飞, 高山, 张本仁, 等. 大别山地壳结构的 Pb 同位素地球化学示踪 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 395-401.
- ZHANG H F, GAO S, ZHANG B R, et al. Pb isotopic study on crustal structure of Dabie mountains, central China [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 395-401.
- [43] 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 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 1077-1093.
- [44] GAO S, LING W L, QIU Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for Cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 2071-2088.
- [45] 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: constrains on sources [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 2001, 26: 719-731.
- [46] PLANK T, LANGMUIR C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle [J]. *Chemical Geology*, 1998, 145: 325-394.
- [47] PATINO DOUCE A E, BEARD J S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 707-738.
- [48] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891-931.
- [49] FOLEY S. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints [J]. *Lithos*, 1992a, 28: 187-204.
- [50] FOLEY S. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas [J]. *Lithos*, 1992b, 28: 435-453.
- [51] FOLEY S F, VENTURELLI G, GREEN D H, et al. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification and constraints for petrogenetic models [J]. *Earth Science Reviews*, 1987, 24: 81-134.
- [52] MILLER C, SCHEUSTER R, KLOTZLI U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40: 1399-1424.
- [53] CONTICELLI S, AVANZINELLI R, AMMANNATI E, et al. The role of carbon from recycled sediments in the origin of ultrapotassic igneous rocks in the Central Mediterranean [J]. *Lithos*, 2015, 232: 174-196.
- [54] CONTICELLI S, MARCHIONNI S, ROSA D, et al. Shoshonite and sub-alkaline magmas from an ultrapotassic volcano: Sr-Nd-Pb isotope data on the Roccamonfina volcanic rocks, Roman Magmatic Province, Southern Italy [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 157: 41-63.
- [55] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [56] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 4: 1-51.
- [57] ZHENG Y F, CHEN Y X. Continental versus oceanic subduction zones [J]. *National Science Review*, 2016, 3: 495-519.
- [58] ZINDLER A, HART S R. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1986, 14: 493-571.
- [59] MA C Q, EHLERS C, XU C H, et al. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics [J]. *Precambrian Research*, 2000, 102: 279-301.

- [60] KELEMEN P B, HANGHOJ K, GREENE A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 593-659.
- [61] ZHENG Y F, XU Z, CHEN L, et al. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2020, 194: 104185.
- [62] ZHENG Y F. Subduction zone geochemistry [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10: 1223-1254.
- [63] KESSEL R, SCHEMIDT M W, ULMER P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120~180 km depth [J]. *Nature*, 2005, 437: 724-727.
- [64] ERSOY E Y, PALMER M R. Eocene Quaternary magmatic activity in the Aegean: Implications for mantle metasomatism and magma genesis in an evolving orogeny [J]. *Lithos*, 2013, 180/181: 5-24.
- [65] SCHMIDT M W. Melting of pelitic sediments at subarc depths: 2. Melt chemistry, viscosities and a parameterization of melt composition [J]. *Chemical Geology*, 2015, 404: 168-182.
- [66] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 565-575.  
WANG Y L, ZHANG Q, WANG Y. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 565-575.
- [67] CHEN L, ZHENG Y F, ZHAO Z F. Geochemical constraints on the origin of late Mesozoic andesites from the Ningwu basin in the Middle-Lower Yangtze Valley, South China [J]. *Lithos*, 2016, 254/255: 94-117.
- [68] ZHANG H F, 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 [J]. *Chemical Geology*, 2002, 186: 281-299.
- [69] ZHENG Y F, CHEN Y X, DAI L Q, et al. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to collisional orogens [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58: 1045-1069.
- [70] ZHAO Z F, ZHENG Y F. Remelting of subducted continental lithosphere: petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52: 1295-1318.
- [71] ZHENG Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 5-48.
- [72] 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 [J]. *Chemical Geology*, 2008, 253: 222-242.
- [73] ZHAO Z F, ZHENG Y F, WEI C S, et al. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: implications for crust-mantle interaction and crustal architecture [J]. *Lithos*, 2011, 126: 99-114.
- [74] ZHAO Z F, DAI L Q, ZHENG Y F. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3413.
- [75] ZHAO Z F, DAI L Q, ZHENG Y F. Two types of the crust-mantle interaction in continental subduction zones [J]. *Science in China (Series D)*, 2015, 58: 1269-1283.
- [76] ZHENG Y F, ZHAO Z F, CHEN Y X. Continental subduction channel processes: Plate interface interaction during continental collision [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58: 4371-4377.
- [77] LAMBART S, LAPORTE D, SCHIANO P. Markers of the pyroxenite contribution in the major-element compositions of oceanic basalts: Review of the experimental constraints [J]. *Lithos*, 2013, 160/161: 14-36.
- [78] SCHMIDT M W, POLI S. Devolatilization during subduction [C]//RUDNICK R L. *Treatise on Geochemistry* (second edition), Volume 4: The Crust [G]. Oxford: Elsevier, 2014: 669-701.
- [79] YE K, CONG B, YE D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km [J]. *Nature*, 2000, 407: 734-736.

## Characteristics and petrogenesis of the Mesozoic volcanic rocks from the Middle-Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen

YAN Jun

(School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** Mesozoic magmatic rocks are widely distributed in the Middle-Lower Yangtze River Belt (MLYRB) and the Dabie Orogen (DB), with the active stages of 135~127 Ma and 133~125 Ma respectively for the volcanic rocks. High potassium calc-alkaline bimodal volcanics and shoshonitic volcanic rocks crop out in the several Mesozoic volcanic basins of the MLYRB. These rocks have consistent characteristics of enriched large ion lithophile elements, depleted high field-strength elements, weak enriched Sr-Nd-Hf isotopies and high radiogenic Pb isotopic components, indicating crustal materials involved into the mantle sources. Among them, the intermediate-basic volcanic rocks derived from enriched lithospheric mantle, which was metasomatized by hydrous melt released from subducted oceanic slab. The late stage super alkaline volcanic rocks originated from the asthenospheric mantle, which suffered matasomatism of the similar metasomatic agent, inferring deepening of the magma source. The Mesozoic volcanic rocks in the DB dominantly include two rock series of high potassium calc-alkaline and super potassic. These rocks show quite different geochemical features from those in the MLYRB, by enriched large ion lithophile elements, depleted high field-strength elements, strongly enriched Sr-Nd-Hf isotopies and low radiogenic Pb isotopic components. The high potassium calc-alkaline volcanic rocks in the DB also derived from enriched lithospheric mantle, but the metasomatic agent was melted form the Indosinian deep subducted continental crust of South China. The late stage super potassic volcanic rocks originated from deeper mantle source, where phengite in the deep subducted continental crust of South China broken down under high pressure. Direct materials contribution from the subducted paleo-Pacific plate imprinted in the mantle-derived volcanic rocks in the MLYRB, but the late Mesozoic magma sources in the DB only recorded information of the Indosinian deep subducted continental crust. The volcanic activities in the two tectonic units indicate a similar process of deepening of magmatic source from early to late, corresponding to low angle subduction and then rollback (ca. 130 Ma) of the paleo-Pacific plate beneath the MLYRB. Due to dynamic triggering of the subduction and rollback of the paleo-Pacific plate, orogenic collapse and lithospheric delamination took place in the DB.

**Key words:** volcanic rock; isotope; mantle; subduction; Middle-Lower Yangtze River Belt; Dabie Orogen