# 大别山北缘西段双桥中生代火山岩地球化学 及锆石 U-Pb 同位素年代学

# 杨梅珍12,曾键年2,任爱琴3,陆建培2,覃永军2,李法岭3

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学,湖北武汉 430074; 3. 河南省地质矿产勘查开发局 第三地质调查队,河南信阳 464000)

摘 要:首次对大别山北缘西段(河南省境内)中生代火山岩进行了锆石原位 U-Pb 同位素测年。结果表明,罗山县 双桥火山岩集中区石英安山岩锆石 LA-ICP-MS U/Pb 年龄为  $133.1\pm1.5$  Ma,与大别东段中生代火山岩主体毛坦厂组的时代一致,属早白垩世 稍早于或与大别山区大规模花岗岩岩基侵位时代相同;与长江中下游地区的宁芜和庐 枞盆地火山岩喷发时间同步,可能同属中国东部中生代巨量岩浆活动的重要组成部分,与太平洋板块斜向俯冲引起的大陆岩石圈重力不稳而产生的拆沉导致岩石圈强烈减薄深部动力学过程相联系。大别山西段早白垩世火山岩属高钾钙碱性系列粗安岩—英安岩—流纹岩组合。中酸性火山岩显示轻稀土元素富集、重稀土元素强烈亏损、弱或基本无负 Eu 异常的稀土元素配分模式以及高 Sr 低 Yb 特征,反映岩浆部分熔融源区残余有石榴石,说明当时存在加厚的成熟陆壳。高( $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr)( $^{10}$ ,707 56)、极低的  $^{10}$ ,707 56),和大离子亲石元素富集、高场强元素 Nb、Ta 明显亏损。显示岩浆源区的壳源性质。以上特征反映大别山地区该时期岩石圈伸展程度和软流圈上涌规模远不如长江中下游同时期以幔源为主的中基性火山岩发育的宁芜和庐枞地区。

关键词:火山岩 , 結石 U-Pb 年龄 , 地球化学 , 岩石圈伸展 ; 大别山北缘西段 ; 中国东部

中图分类号:P595;P597 文献标识码:A 文章编号:1000-6524(2012)02-0133-12

# Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Mesozoic Shuangqiao volcanic rocks in the western segment of northern Dabie Mountain

YANG Mei-zhen<sup>1,2</sup>, ZENG Jian-nian<sup>2</sup>, REN Ai-qin<sup>3</sup>, LU Jian-pei<sup>2</sup>, QIN Yong-jun<sup>2</sup> and LI Fa-ling<sup>3</sup> (1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. No. 3 Geological Survey Party, Henan Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** In-situ LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of dacite from the Chenpeng Formation volcanic suite in Shuangqiao area, Luoshan County, Henan Province, demonstrates that the Mesozoic volcanic rocks from the western segment of northern Dabie Mountain were formed at ca.  $133 \pm 1.5$  Ma, being coeval with the main volcanism in the eastern segment of the Dabie Mountain, which is represented by the Early Cretaceous Maotanchang Formation volcanic rocks. The Mesozoic volcanism in western North Dabie is also coeval with, or slightly earlier than the large-scale intrusion of granodioritic plutons in the Dabie Mountain and the large-scale volcanism in the Lu-Zong and Ning-Wu volcanic basins along the middle and lower reaches of the Yangtze River. Thus, the results obtained by the authors suggest that the volcanic rocks in western North Dabie probably represent one

收稿日期:2011-05-29;修订日期:2011-11-14

基金项目:地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题资助项目(GPMR201014);河南省国土资源厅2007年度省"两权价款"地质科研计划资助项目(2882)

作者简介:杨梅珍(1965-),女,博士,副教授,矿物学岩石学矿床学专业,主要从事矿床学研究和教学工作,E-mail:ymzkitty@163.com。

of the large scale Mesozoic magmatic activities in eastern China, which has commonly been thought as results of strong lithosphere thinning and delamination caused by continental gravity instability, which was likely induced by the oblique subduction of Pacific plate. Detailed bulk-geochemistry of granodioritic rocks of the Mesozoic volcanic suite in western North Dabie exhibits REE patterns with strong LREE enrichment, HREE depletion, and weak or almost no Eu negative anomaly. These volcanic rocks also display high Sr- and low Yb-concentration, suggesting the existence of garnet, which might have been a major residual phase during partial melting. Such geochemical features imply that the magma resulted from the partial melting of a highly-thickened mature continental crust during the Mesozoic volcanism, just like that of the entire Dabie Mountain. In contrast with the volcanics in the Ning-Wu and Lu-Zong basins and eastern Dabie Mountain, the western North Dabie volcanic rocks are characterized by somewhat higher  $\binom{87}{5}$  Sr/ $\binom{86}{5}$  Sr)<sub>i</sub> (0.707.56) and remarkably lower  $\varepsilon$ Nd(t) (-20.1), and more enriched LILE and depleted Nb and Ta. These geochemical features suggest that western Dabie volcanic rocks have experienced lower degree of metasomatism of mantle-derived materials than volcanic rocks in eastern China, which further suggests a westward decrease in the Mesozoic lithosphere stretching and asthenosphere upwelling.

**Key words:** volcanics; zircon U-Pb dating; geochemistry; lithosphere stretching; western segment of Northern Dabie Mountain; eastern China

大别山北缘发育的一条北西西向延伸达 330 km 的中生代火山岩带 ,可能是中国东部中生代巨量 岩浆活动的重要组成部分,是了解中国东部岩石圈 演化、壳幔相互作用的重要窗口。大别山北麓已经 发现的多个银铅锌矿床、包括河南皇城山银矿床、白 石坡银多金属矿床、安徽境内汞洞冲、银山小型铅锌 矿床,特别是在新一轮找矿工作中发现的多个钼多 金属矿床 如安徽金寨的沙坪沟大型钼矿床、河南商 城汤家坪钼矿床等均与中生代火山-侵入岩浆活动 密切相关。因此,对大别山北缘规模宏大的中生代 火山岩带岩浆活动精细的年代学和地球化学研究, 对于了解大别山地区中生代岩浆与成矿关系、建立 岩浆-成矿时间序列、厘定区域岩浆-构造-成矿时空 结构具有重要意义。近些年来,前人在大别山东段 (商-麻断裂以东)安徽省境内获取了较多的高精度 火山岩同位素年龄数据,包括黑云母40 Ar-39 Ar 年龄 和少量锆石 U-Pb 年龄( 杨祝良等 ,1999 ;刘敦一等 , 2002 :夏群科等 ,2003 )。但大别山西段中生代火山 岩尚缺少精确同位素年代学数据制约,目前仅有少 量精度较低的未发表的全岩 K-Ar 数据可供参考。 这种状况不利于确定大别山北麓中生代火山岩时空 分布范围,进而制约区域成矿规律的研究。本文基 于区域地质调查成果 在详细岩相学观察、岩石地球 化学分析的基础上,选取大别山北缘西段陈棚组火 山岩样品 运用 LA-ICP-MS 微区原位定年技术进行 锆石 U-Pb 同位素年代学研究。同时,还报道了火山

岩全岩地球化学数据,包括常量、稀土、微量元素含量,以及 Sr-Nd 同位素数据。这些数据对构建大别山北缘中生代火山-侵入岩浆活动序列和区域岩浆活动规律、厘定火山-次火山热液银铅锌矿床成矿时代、探讨火山岩岩浆作用动力学背景提供了重要的年代制约,同时也为大别山北缘东西两段中生代火山活动的区域性对比研究提供了基础资料。

## 1 地质概况

大别山北缘中生代火山岩带,也称信阳-霍山中生代火山岩带(图1)处在华北板块与大别造山带结合部位,也是潢川凹陷(覆盖区)与北秦岭褶皱带(出露区)的衔接部位。其分布范围总体与北淮阳构造带相吻合,呈北西西-南东东向带状断续展布。火山岩带西起河南省信阳游河尧凹冲,东至安徽舒城县柯坦 覆于郯庐断裂上,依稀与庐枞火山盆地相连。东西长达330 km,在河南境内长达190 km。南界为桐柏-商城-磨子潭断裂,北为第四纪覆盖。地表出露东宽西窄,最宽在金寨县,达48 km。西段在尧凹冲呈一楔形尖灭。分布面积约500 km²。信阳-霍山火山岩带以商-麻断裂为界分为西段(河南境内)和东段(安徽境内)。西段火山岩带由信阳、石山口、泼河3个火山盆地和双桥、陈棚、双柳树3个火山群组成。

大别山北缘西段火山岩直接覆盖在前中生代岩

石之上。构成研究区火山岩基底地层为中元古界龟山岩组斜长角闪片岩、云母石英片岩、上侏罗统段集组砾岩以及早古生代花岗闪长岩-石英闪长岩。火

山岩与基底呈喷发不整合接触关系。火山岩上覆为上白垩统周家湾组( $K_{2z}$ )紫红色、紫灰色、灰白色砂砾岩和含砾凝灰质砂岩。

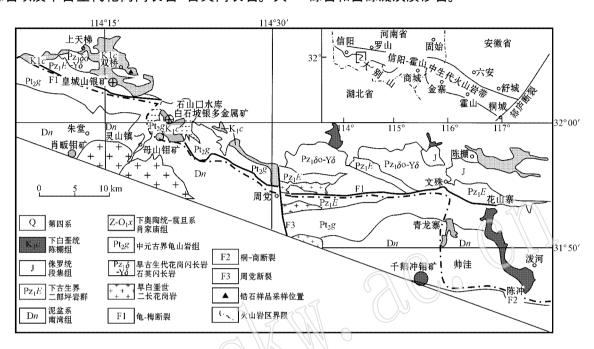


图 1 大别山北缘中生代火山岩地质简图 ●

Fig. 1 Geological map showing the distribution of Mesozoic volcanic rocks in northern Dabie Mountain<sup>10</sup>

河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队在 1990 年开展豫南大别山北部中生代火山岩地质与银 金多金属矿产研究❶时 将该套火山岩细分为下白垩 统陈棚组和上天梯组。后来又在1:5万区域地质调 查●时 将其统一划为陈棚组( K₁c )。综合前人积累 的火山岩基础地质资料 根据岩性、岩相和喷发特征 (表1)将陈棚组火山岩划分为两个喷发旋回5个火 山岩段。早期火山岩浆活动以中酸性火山喷发-沉 早期为粗安岩-粗面英安岩-流纹岩组合,晚期为流 纹质火山碎屑岩-流纹岩组合。其建造类型具有流 纹岩建造的一般特征:① 酸性岩发育、中性岩次之, 无基性岩 注要岩石类型以流纹岩、英安岩和流纹质 熔结凝灰岩为主 并伴有粗安岩和粗面岩等 :酸性次 火山岩发育;②早期裂隙式喷发,晚期中心式喷发; ③ 各种类型火山碎屑岩为火山岩主体 特别是流纹 质熔结凝灰岩相当发育 火山熔岩只占很小部分。

火山喷发发生在早期褶皱隆起的基础上。火山

岩层与下伏地层之间的不整合接触关系显示典型的上叠式陆相火山盆地喷发环境。火山岩氧化度普遍较高(0.43~0.89) 可见明显的红色氧化顶;火山碎屑岩占较大的比例,且分选差、相变大;火山岩中产有硅化木和东方叶肢介化石。珍珠岩和熔结凝灰岩柱状节理发育。

## 2 火山岩岩石学特征

大别山北缘西段双桥-泼河一带中生代火山岩主要熔岩类型有流纹岩、珍珠岩、英安岩、粗面岩,少量粗安岩。火山碎屑岩主要为流纹质熔结凝灰岩。主要岩石类型的岩石学特征如下:①流纹岩:灰白色、灰色、肉红色、紫灰色等。以流纹构造为特征。也见块状构造、杏仁构造、石泡构造。上天梯一带流纹岩具无斑玻璃质结构,罗山县的双桥、光山县花山寨、青龙寨一带则为少斑斑状结构(含量<10%),斑晶主要为石英、透长石、斜长石(中更长石)和黑云

❶ 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队. 1990. 豫南大别山北麓中生代火山岩地质特征与银金多金属矿产研究报告.

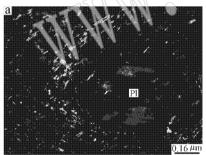
❷ 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队,2001,1:5 万文殊寺幅、千斤河棚幅、泼陂河镇幅、新县幅、两路口幅区域地质调查报告,

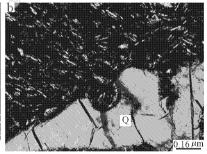
表 1 大别山北缘西段中生代陈棚组火山岩层序
Table 1 Mesozoic volcanic sequence of Chenpeng Formation in the western segment of northern Dabie Mountain

in the western segment of northern Dable Mountain									
岩性段	岩性特征	岩相							
	流纹岩和珍珠岩、膨润土、沸石矿	溢流相							
V 上天梯段 184~350 m	膨润土凝灰岩、晶屑玻屑凝灰岩、凝 灰质页岩夹粉砂岩	喷发-沉积相							
	灰白色流纹质晶屑玻屑凝灰岩	爆发相							
<b>Ⅳ皇城山段</b>	上为熔结流纹质含角砾弱熔结凝灰岩、流纹质熔结含砾浆屑凝灰岩(88~438 m)	爆发相							
88~432 m	下为灰白色凝灰质泥砂岩和紫红色、 灰白色晶屑凝灰岩、含硅化木化石和 火山球体	喷发-沉积相							
Ⅲ喻楼段 >312 m	自下而上为凝灰质粉砂岩、凝灰质砂岩、凝灰质砂岩、凝灰质砾岩、凝灰质巨砾岩互层	喷发-沉积相							
双桥段   >200 m	紫红色、灰红色石英安山岩、英安岩、 流纹岩	喷溢相							
/200 m	紫红色安山质火山碎屑岩	喷发-沉积相							
Ⅰ孙洼段	紫红色、灰白色粗安岩、粗面岩	喷溢相							
293~306 m	安山质火山碎屑岩	喷发−沉积相							

母、磁铁矿,少数出现角闪石。斑晶溶蚀和自碎现象明显。基质为玻璃质结构和霏细结构;②珍珠岩:多与流纹岩共生。岩石为灰色、深灰色、青灰色。以珍珠构造为特征。上天梯一带为无斑玻璃质结构,

青龙寨一带为斑状结构,含斑晶10%。斑晶主要为 石英、斜长石(中-更)黑云母、磁铁矿。基质为玻璃 质结构 原生裂纹发育 ,以平行于流动方向为主 ,弧 形者次之 弧形裂纹套叠形成珍珠构造 ③ 英安岩: 主要分布于双桥和泼河火山盆地内。岩石呈紫色、 紫灰色。斑状结构(图 2a),基质具有微细结构。块 状构造、杏仁构造、流动构造、纹层状构造。斑晶含 量在20%以下,主要为斜长石(中-更)黑云母、石 英。石英斑晶自碎和溶蚀现象明显(图 2b)。黑云母 暗化边发育(图 2c); 组 粗安岩、粗面岩主要分布于 光山的陈棚和泼河一带 岩石呈紫灰色和深灰色 块 状构造和流动构造。斑状结构,斑晶含量在25%~ 30%之间。斑晶主要为斜长石(中长石)和角闪石, 其次有辉石、黑云母和磁铁矿。基质结构为微晶交 织结构、隐晶质结构:流纹质熔结凝灰岩分布广泛。 岩石颜色较杂,呈紫红色-暗红色-灰白色。岩石具 有熔结凝灰结构、假流纹构造,也有块状和气孔构 造。岩石主要由火山灰和及浆屑组成,其次有晶屑、 玻屑和岩屑。晶屑主要为石英、透长石、斜长石、黑 云母等。晶屑一般与熔岩的斑晶相同。本区火山熔 结凝灰岩的晶屑组合类型符合钙碱性流纹质凝灰岩





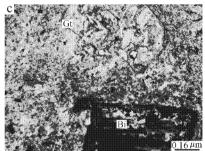


图 2 大别山北缘西段双桥陈棚组英安岩(XY-1)结构

Fig. 2 Microphotographs showing the texture of dacite from Shuangqiao area, the western segment of northern Dabie belt a—具聚片双晶结构斜长石斑晶被微晶斜长石晶体包绕,微晶长石长轴具有方向性(正交偏光); b—具溶蚀和自碎结构的石英(正交偏光); c—黑云母斑晶具有暗化边结构(单偏光); 矿物代号: Pl—斜长石; Q—石英; Gt—石榴石; Bi—黑云母

a—plagioclase phenocryst with polysynthetic twin surrounded by microcrystalline plagioclase , note that the tiny plagioclase grains are in preferred orientation; b—quartz phenocryst with corroded and autoclastic texture; c—biotite phenocryst with darkened margin; Pl—plagioclase; Q—quartz; Gt—garnet; Bi—biotite

晶屑组合特征。岩屑多为同源碎屑。

# 3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学

用于 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试样品采自双桥 火山岩集中区陈棚组双桥段暗紫色、新鲜英安岩 (XY-1)。采样位置为双桥镇东南,地理座标:北纬32°03′36.2″,东经114°18′06.4″(GPS定位)。单矿物锆石在河北省区域地质调查队实验室,采用人工破碎重砂淘洗以及磁选法分离,后在双目镜下挑纯(纯度达99%以上)。共得锆石700余颗。在双目镜下挑出晶形和透明度较好的锆石颗粒约132颗置于

环氧树脂靶上,凝固后磨至近一半并抛光,使锆石颗粒的内部暴露,用于锆石形态、阴极发光图象研究和 LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子质谱)锆石 U-Pb 年龄测定。单矿物锆石样品制靶和锆石阴极发光照相以及锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。使用的激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 深紫外(DUV)193 nm UArF 准分子激光剥蚀系统,分析中采用的激光束斑直径为 30 μm。采用哈佛大学标准锆石91500 作为外标校正,将分析未知点与标样交叉分析。使用的 ICP-MS 为 Agilent 7500a 型,仪器参数和分析流程参见袁洪林等(2003)。同位素比值数据处理采用 GLITTER(4.0 版)软件。

锆石 U-Pb 同位素分析之前在显微镜下利用透

射光和反射光系统观察锆石晶体形态并进行粒度统计。然后选择晶形好、包裹体和裂隙少的锆石颗粒进行阴极发光照相。锆石晶体呈柱锥聚形(110)面发育。其中 31 颗晶形完好的锆石长度一般在 129~329 μm ,宽 53~117 μm ,长宽比 1.8:1~3.5:1。无色~浅肉红色 ,透明~半透明 ,玻璃~金刚光泽。颗粒晶面完整、平直光滑。阴极发光图像(图 3 )显示锆石发育较典型的密集、平直振荡环带 , 应为岩浆成因。样品测试过程中尽量选择生长环带明显、无包裹体和裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。普通铅根据实测的<sup>204</sup>Pb 采用 ComPbCorr ‡ 3-151 程序进行校正。加权平均年龄计算以及谐和曲线绘制采用 Isoplot 程序完成。

锆石U-Pb年龄LA-ICP-MS测定结果列于表4。



Fig. 3 CL image of zircons from dacite

除个别测试点锆石 U、Th 含量明显偏高外 ,绝大多数测试点变化于  $123 \times 10^{-6} \sim 631 \times 10^{-6}$ 和  $10.5 \times 10^{-6} \sim 529 \times 10^{-6}$  ,Th/ U 变化于  $0.08 \sim 2.9$  ,除一个分析点外 ,其他均大于 0.1 ,也显示岩浆成因锆石特征( Belousova et al., 2002 )。对 16 颗锆石进行了 16 个点分析。除了 XY-1-1 年龄数据明显偏低 ,其余 15 个点在误差范围内基本给出一致的206 Pb/238 U 年龄( 为  $140 \sim 128$  Ma ),这些分析点年龄谐和度均在 90% 以上,206 Pb/238 U 加权平均年龄为  $133.1 \pm 1.5$  Ma(  $1\sigma$  ,MSWD = 1.3 ,95% 置信度  $\chi$  图 4 。该年龄被解释为火山岩形成年龄。

# 4 火山岩岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素特征

本文报道的 16 件火山岩样品的岩石化学数据, 其中5件样品分析了常量、稀土、微量元素含量。针

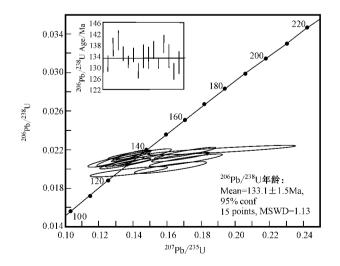


图 4 双桥英安岩锆石 U-Pb 谐和曲线和<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia plot of dacite from Shuangqiao , Luoshan County

表 2	罗山县双桥火山岩群英安岩 LA-ICP-MS 锆石	U-Pb 分析结果

	T . TOD 3.50 .	*****		
Table 2	LA-ICP-MS zircon	ı U-Pb dating results of	dacite from Chenneng Formation	, Luoshan County

点号	$w_{ m B}$ /	$10^{-6}$	71 /II	<sup>207</sup> Pb/	<sup>/206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb	∕ <sup>238</sup> U	<sup>208</sup> Pb/	<sup>232</sup> Th	<sup>207</sup> Pb	<sup>/235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/	<sup>238</sup> U	<sup>208</sup> Pb/	<sup>232</sup> Th	<b>北</b> 和帝
2000	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	- Th∕U	比值	± 1σ	比值	± 1σ	比值	± 1σ	比值	± 1σ	年龄	± 1σ	年龄	± 1σ	年龄	± 1σ	谐和度
XY-1-1	5 095	3 481	1.46	0.0547	0.0034	0.0765	0.0048	0.0106	0.0002	0.0025	0.0001	74.8	4.5	68.2	1.2	49.5	1.4	0.9
XY-1-2	212	253	0.84	0.0486	0.0030	0.1357	0.0078	0.0206	0.0004	0.0067	0.0002	129	7	131	2	136	4	0.9
XY-1-3	529	183	2.90	0.0495	0.0044	0.1443	0.0125	0.0215	0.0004	0.0064	0.0002	137	11	137	2	129	3	0.9
XY-1-4	529	198	2.67	0.0603	0.0099	0.1851	0.0332	0.0219	0.0004	0.0072	0.0002	172	28	140	3	146	4	0.9
XY-1-5	348	268	1.30	0.0572	0.0035	0.1681	0.0109	0.0211	0.0003	0.0065	0.0002	158	9	135	2	132	4	0.9
XY-1-6	332	437	0.76	0.0480	0.0021	0.1383	0.0062	0.0206	0.0003	0.0066	0.0002	132	6	132	2	133	4	0.9
XY-1-7	163	265	0.61	0.0477	0.0025	0.1380	0.0068	0.0211	0.0003	0.0069	0.0003	131	6	134	2	140	5	0.9
XY-1-8	249	181	1.37	0.0662	0.0037	0.1847	0.0099	0.0202	0.0003	0.0069	0.0002	172	8	129	2	138	4	0.83
XY-1-9	241	172	1.40	0.0453	0.0042	0.1308	0.0112	0.0210	0.0005	0.0070	0.0003	125	10	134	3	141	6.4	0.9
XY-1-10	344	160	2.15	0.0615	0.0056	0.1715	0.0141	0.0209	0.0005	0.0064	0.0002	161	12	133	3	129	4	0.9
XY-1-11	216	355	0.61	0.0474	0.0024	0.1401	0.0073	0.0213	0.0004	0.0072	0.0003	133	6	136	2	146	5	0.9
XY-1-12	2 439	631	0.70	0.0501	0.0020	0.1419	0.0058	0.0206	0.0002	0.0066	0.0002	135	5	131	4	133	3	0.9
XY-1-13	3 449	191	2.35	0.0585	0.0042	0.1710	0.0117	0.0217	0.0004	0.0070	0.0002	160	10	138	2	141	4	0.9
XY-1-14	178	253	0.70	0.0469	0.0033	0.1350	0.0101	0.0210	0.0005	0.0060	0.0002	129	9	134	3	120	5	0.9
XY-1-15	5 199	123	1.63	0.0591	0.0051	0.1621	0.0137	0.0201	0.0004	0.0062	0.0002	153	12	128	_2 3	125	4	0.9
XY-1-16	5 10.5	139	0.08	0.0499	0.0045	0.1399	0.0125	0.0206	0.0005	0.0130	0.0016	133	. 11_	132	3	261	32	0.9

对挑选锆石的样品,还分析了全岩 Sr-Nd 同位素比值。首先对待测样品进行无污染破碎并研磨至 200 目。主量元素分析由国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成。主量元素 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 采用 AXIOS X 射线荧光光谱仪(XRF)分析,FeO 和烧失量(LOI)采用标准湿法化学分析法分析,分析误差<5%。稀土、微量元素和 Sr-Nd 同位素由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。其中稀土、微量元素分析仪器为电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS,Agilent 7500A);Rb-Sr、Sm-Nd 同位素比值采用MAT-261 表面热电离同位素比值质谱仪分析。结果见表 3 和表 4。

硅-碱和硅-钾图解(图 5)显示,研究区熔岩以酸性流纹岩和中酸性粗安岩、英安岩和粗面岩为主,爆发相主要以流纹质火山熔结凝灰岩为主。 $SiO_2$  含量在  $62.8\%\sim82.6\%$  之间。属高钾钙碱性火山岩系列。

其中流纹岩及流纹质熔结凝灰岩以高硅、富钾、相对贫钠和钙为特征  $_SiO_2$  含量在  $_75.0\% \sim 82.6\%$  之间  $_CaO$  含量较低且变化较大  $_AE$   $_1E$   $_2E$   $_2E$   $_3E$   $_3E$   $_3E$   $_4E$   $_3E$   $_4E$   $_4E$ 

岩。英安岩的  $SiO_2$  含量变化于  $64.83\% \sim 71.70\%$ ,全碱  $K_2O + Na_2O$  含量为  $6.46\% \sim 8.06\%$ ,且  $K_2O$  含量明显大于  $Na_2O$  含量( $K_2O/Na_2O$  一般变化于  $1.1\sim3.6$ )  $\mathcal{L}_{aO}$  含量一般在  $1.56\% \sim 2.64\%$  之间,个别在 0.5% 以下。铝饱和指数在  $1.06\sim1.92$  之间,也属准铝—强过铝质亚碱性火山岩系列。粗面岩和粗安岩类  $SiO_2$  含量变化于  $62.84\% \sim 68.48\%$ ,  $K_2O + Na_2O$  含量为  $6.97\% \sim 8.77\%$ ,且  $K_2O$  含量多低于  $Na_2O$  含量( $Na_2O = 0.81\sim1.14$ )  $Na_2O$  含量相对较高,一般在  $2.02\% \sim 3.77\%$  之间。铝饱和指数在  $0.76\sim1.07$  之间。因而,研究区火山岩属于高钾钙碱性系列,准铝质—过铝质亚碱性系列、图 5 )。

不同火山岩具有不同的稀土总量。流纹岩和流纹质熔结凝灰岩稀土总量低于中酸性英安岩、粗安岩、粗面岩,且变化较大,在  $90 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$ 之间。流纹岩和流纹质熔结凝灰岩的稀土配分模式曲线相似,总体呈现为 LREE 分馏明显、HREE 相对平坦、具明显负 Eu 异常的向右陡倾型(图 6a ,6b),(La/Yb)、变化于  $9.78 \sim 38.3$  之间,多在 20 以上,轻稀土分异较明显(La/Sm)、达  $4.5 \sim 7.9$  ;重稀土也存在一定分异(Gd/Yb)、变化于  $1.05 \sim 3.12$  之间。负铕异常中等, $\delta$ Eu 集中在  $0.36 \sim 0.48$  之间。负铕异常中等, $\delta$ Eu 集中在  $0.36 \sim 0.48$  之间。这与流纹岩和流纹质熔结凝灰岩的高硅、低  $Al_2O_3$ 、高  $Rb/S_r$  比值( $2.15 \sim 4.87$ )特征显示的长石分异特征一致。

表 3 大别山北缘西段陈棚组火山岩主量元素( $w_B$ /%)和稀土元素( $w_B$ /10 $^{-6}$ )含量分析结果

Table 3 Analytical results of major ( $w_B/\%$ ) and REE ( $w_B/10^{-6}$ ) elements of volcanic rocks of Chenpeng Formation in the western segment of the Mesozoic northern Dabie volcanic belt

++ <b>-</b>	3/37.4	-						lesozoic					10	12	1.4	1.7
样号	XY-1	1	2	3	4	5 <b>***</b> 年	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
岩石 类型	央女石	央女石	英安岩	央女石	<b>流</b> 纹石		流纹质 熔结凝 灰岩		<b>珍珠</b> 石	<b>流</b> 纹石	央安石	珍珠流 纹岩	流纹质 熔结凝 灰岩		粗面岩	租囬石
位置	双桥东	双桥下 张楼	双桥响 东湾	双桥	上天梯	皇城山	双桥杨 岗	光山陈 棚、文殊	青龙寨	青龙寨	花山寨	花山寨	花山寨	花山寨	泼河	泼河南
SiO <sub>2</sub>	69.46	66.52	64.14	69.73	74.15	77.77	70.9	61.15	72.4	77.1	63.0	72.34	78.5	78.78	63.56	66.54
${\rm TiO_2}$	0.536	0.72	1.05	0.55	0.17	0.25	0.31	0.85	0.15	0.15	1.08	0.25	0.25	0.28	0.80	0.36
$Al_2O_3$	15.2	15.7	15.46	14.74	12.3	14.06	13.5	16.26	12.62	10.78	15.94	12.27	10.52	9.42	15.33	14.5
$\mathrm{Fe_2O_3}$	2.84	5.05	4.4	2.28	0.91	1.06	1.16	4.88	0.66	0.68	5.98	1.03	0.71	0.54	6.14	2.64
FeO	0.198	0.45	0.46	0.61	0.85	0.32	0.53	0.82	0.4	0.38	0.2	0.6	0.23	1.23	1.00	0.91
MnO	0.051	0.05	0.03	0.01	0.06	0.03	0.05	0.09	0.04	0.02	0.16	0.03	0.02	0.03	0.07	0.07
MgO	0.349	0.3	0.97	0.33	0.29	0.13	0.56	1.07	0.25	0.25	0.67	0.44	0.4	0.32	0.58	1.15
CaO	1.96	0.45	1.56	1.52	1.02	0.2	0.93	3.67	0.75	0.25	2.57	0.72	0.26	0.34	1.95	2.27
$K_2O$	4.27	5.58	4.81	4.34	4.23	0.10	4.63	3.62	3.72	7.00	3.8	4.00	6.00	6.00	3.60	4.19
Na <sub>2</sub> O	3.69	0.61	1.32	2.89	2.83	0.08	1.91	4.49	3.28	1.36	3.46	2.82	0.18	1.00	3.14	4.34
$P_2O_5$	0.201	0.19	0.66	0.19	0.05	0.08	0.05	0.41	0.04	0.03	0.32	0.02	0.01	0.03	0.57	0.20
LOI	0.967	4.20	5.66	2.01	3.11	5.22	4.67	2.21	4.78	1.04	1.8	4.84	1.52	1.62	2.38	2.10
Total	99.73	99.43	100.52	99.12	99.97	99.69	99.20	99.52	99.01	99.04	98.98	99.36	98.60	99.59	99.12	99.27
A/CNK	1.06	1.92	1.36	1.12	1.07	21	1.34	0.76	1.14	1.04	0.95	1.16	1.43	1.06	1.07	0.83
La	55.10	55.0	100.00	52.05	20.00	48.00	28.0	57.76			61.8	45.2	28.6	39.5		
Се	92.200		146.00	90.30	32.00	82.00	40.00	112.8			95.9	100	66.5	65.6		
Pr	9.72	11.00	18.00	10.31	4.37	7.90	6.00	13.48			9.81	6.63	3.43	5.81		
Nd	32.30	44.00	67.00	37.20°	10.90	34.00	13.00	44.5			42.8	25.7	15.6	20.00		
Sm	5.05	6.80	11.00	6.48	2.27	6.30	2.30	8.13			8.11	6.06	4.1	4.09		
Eu	1.26	1.70	2.20	1.72	0.30	1.30	0.30	2.12			1.51	0.71	0.35	0.48		
Gd	3.44	4.70	6.10	5.04	2.00	3.40	1.90	5.50			4.56	2.31	1.3	2.1		
Tb <	0.42	0.57	0.83	0.57	0.24	0.30	0.10	0.85			0.74	0.42	0.24	0.38		
Dy	2.12	3.60	3.80	3.23	1.73	1.20	1.00	4.14			4.74	3.05	1.72	2.7		
Но	0.40	0.60	0.65	0.56	0.38	0.20	0.30	0.80			1.04	0.6	0.38	0.56		
Er	1.01	1.80	1.50	2.00	1.55	1.00	1.40	2.11			2.22	1.25	1.06	1.41		
Tm	0.14	0.28	0.20	0.37	0.313	0.30	0.30	0.30			0.34	0.19	0.16	0.22		
Yb	0.87	1.60	1.10	1.66	1.65	0.90	1.50	2.07			1.69	1.1	0.72	1.41		
Lu	0.13	0.21	0.16	0.26	0.24	0.10	0.20	0.31			0.32	0.17	0.14	0.2		
Y	11.70	14	14.0	15.40	11.9	4.4	9.30	19.70			6.53	11.00	8.18	12		
REE	215.9	229	373	227	90	191	106	275			242.1	204.4	132.5	156.5		
δEu	0.87	0.87	0.75	0.89	0.42	0.78	0.43	0.92			0.69	0.48	0.36	0.45		
(La/Yb) <sub>N</sub>	45.4	24.7	65.2	27.7	9.78	38.3	13.4	20.0			26.2	29.5	28.5	20.1		
(La/Sm) <sub>N</sub>	7.0	5.2	5.9	5.3	5.7	4.9	7.9	4.6			4.9	4.8	4.5	6.2		
(Gd/Yb) <sub>N</sub>		2.42	4.58	2.83	1.05	3.12	1.05	2.19			2.23	1.73	1.49	1.23		

注 表中主量元素为原始分析数据 文中讨论引用的数据是经归一化处理的。

中酸性英安岩、粗安岩、粗面岩具有相对稳定且较高的稀土总量,一般变化于  $215 \times 10^{-6} \sim 275 \times 10^{-6}$  ,个别达到  $373 \times 10^{-6}$  。(La/Yb  $)_{N}$  变化于  $20.0 \sim 65.2$  (La/Sm  $)_{N}$  和(Gd/Yb  $)_{N}$  分别变化于  $4.6 \sim 7.0$  和  $2.19 \sim 3.26$  , $\delta$ Eu 集中在  $0.69 \sim 0.92$  ,多在 0.75 以上。稀土元素配分模式为 LREE 强烈分馏、HREE 中等偏弱分馏、基本无或弱 Eu 异常的右倾型(图 6c )。 Eu 弱负异常或基本无亏损说明斜长石的

分异程度非常弱 ,与其相对较低的 Rb/Sr 和  $SiO_2$  含量特征相一致。

火山岩微量元素原始地幔标准化图解总体显示大离子亲石元素强烈富集和较为明显的 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素亏损(图 6d)。英安岩样品显示高 Si( $486 \times 10^{-6} \sim 720 \times 10^{-6}$ )低 Yb( $0.87 \times 10^{-6} \sim 1.64 \times 10^{-6}$ )特征,具有埃达克质岩浆的地球化学特点;结合LREE富集、HREE强烈亏损、弱或基本无

表 4 大别山北缘西段陈棚组火山岩微量元素含量 w<sub>B</sub>/10 Table 4 Trace element concentrations of volcanic rocks from the western segment of the Mesozoic northern Dabie

volcanic belt											
样号	XY-1	10	11	12	13						
岩石类型	英安岩	英安岩	流纹岩	流纹质 熔结凝 灰岩	流纹质 熔结凝灰						
Cr	55.2	120	27	52	239						
Ni	5.87	31	3	5	8						
Co	17.1	19.4	4.9	5.3	5.1						
Li		13	4	44	29						
Rb	119	95	560	146	131						
Cs	4.55	3.6	327	3.3	2.9						
Sr	486	720	210	30	61						
Ba	1 245	1 870	850	220	530						
V	54.2	120	4.5	3.5	5.5						
Nb	9.41	12	15	12	12						
Ta	0.63	0.83	1.4	1.1	1.1						
Pb	74.8										
Zr	171	180	170	130	120						
Hf	4.4	3.9	5.8	4.5	3.8						
U	0.91	2.4	4.2	1.6	<\7.3						
Th	17	10.4	15.2	9.5	11.8						
Sc	5.53	14	2.2	2.2	2.5						
Rb/Sr	0.24	0.13	2.67	4.87	2.15						

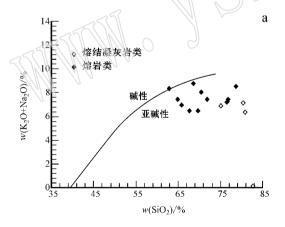
负 Eu 异常的稀土配分模式 ,反映岩浆源区残余有石榴石 ,说明当时存在厚的成熟陆壳( 张旗等 2006 )。

英安岩样品( XY-1 )全岩 Rb-Sr 分析结果<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr为 0.709, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr( 2 倍误差 )为 0.708 903( 3 );根据英安岩锆石 U-Pb 同位素年龄( 133.1 Ma )计算的( <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ),为 0.707 56;全岩 Sm-Nd 分析结果  $^{147}$ Sm/ $^{144}$ Nd为 0.094 5,  $^{143}$ Nd/ $^{144}$ Nd( 2 倍误差 )为 0.511 519( 5 ),计算的  $\epsilon$ Nd( t=133.1 Ma )为 -20.1,  $t_{2DM}=2$  567 Ma。结果显示,火山岩具有较高的(  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr )( >0.705)和极低的  $\epsilon$ Nd( t )。

#### 5 讨论

#### 5.1 大别山北缘火山岩形成时代

本文获得的大别山北缘西段双桥地区英安岩锆石 U-Pb 同位素年龄 133.1±1.5 Ma 属早白垩世。此年龄值与东段的火山岩主体毛坦厂组中酸性火山岩时代一致。夏群科等(2003)测得晓天盆地毛坦厂组玄武岩和粗面安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄分别为 130±2 Ma和 133±3 Ma。杨祝良等(1999)



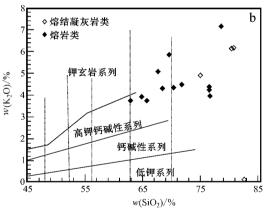


图 5 大别山北缘西段陈棚组火山岩硅碱 a |和硅-钾( b |图解 据 Le Bas et al., 1986 )

Fig. 5 TAS diagram(a) and K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> diagram(b) of Chenpeng Formation volcanic rocks from the western segment of the northern Dabie volcanic belt (after Le Base *et al.*, 1986)

等测得大别山北缘东段六安牌楼粗面岩的锆石 TIMS 年龄为 131 Ma。刘敦一等(2002)测得岳西桃园寨英安岩的锆石 SHRIMP <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 136 ±3 Ma。由此可见大别东段与西段火山活动时间基本一致,火山喷发时限在 130~136 Ma间,属早白垩世。因此,前人(杜建国 2000)提出的西段火山活动晚于东段的认识值得商榷。张超等(2008)对大别山

中生代花岗质侵入岩锆石 SHRIMP 和 LA ICP-MS 法年龄数据统计结果显示花岗质岩浆活动的峰期年龄为 131.5 Ma,显示火山喷发与大规模酸性岩浆侵入作用基本同期。区域上火山岩与花岗侵入岩之间的接触关系也清楚显示大规模深成侵入岩浆活动与火山岩同期或稍晚。如陈棚组火山岩之下有同期或稍晚的商城岩体(<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄为 133.03~128.04 Ma)

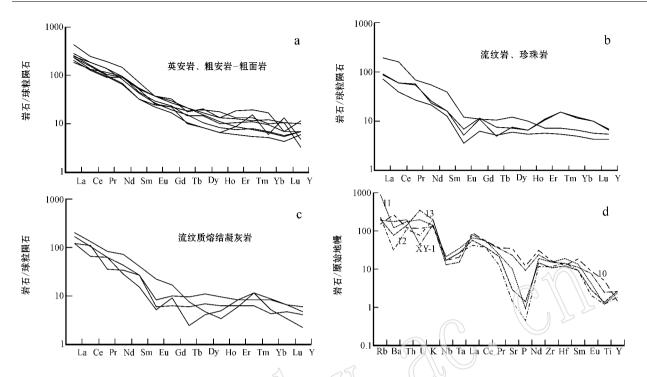


图 6 大别山北缘西段陈棚组火山岩稀土元素配分模式(a~c)和微量元素蛛网图(d) 球粒陨石值据 Boynton, 1984; 原始地幔值据 McDonough and Sun, 1985)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a c) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (d) of Chenpeng Formation volcanic rocks from the western segment of the northern Dabie Mesozoic volcanic belt (chondrite values after Boynton, 1984; primitive mantle values after McDonough and Sun, 1985)

(马昌前等 2003 :刘文斌等 ,2003 )。双桥火山岩区南部灵山黑云母二长花岗岩岩体的锆石 LA-ICP-MS 年龄为 129.3 ± 2.5 Ma(周红升等 ,2009 ),也略晚于火山岩喷发年龄。因此 ,大别山北缘大型火山喷发岩带是大别山地区巨量花岗质岩浆活动重要组成部分。

#### 5.2 与邻区长江中下游火山活动时代对比

以往认为包括东西向大规模火山喷发岩带在内的大别山巨量花岗质岩浆活动是典型的印支期碰撞后阶段的产物(谢芳贵等,2000;夏群科等,2003),并作为大别造山带燕山期存在一次强烈造山作用的重要证据(杜建国,2000)。但最新的年代学研究结果对这一认识提出了质疑。在时间上,巨量岩浆活动的峰期在130 Ma 左右(张超等,2008),滞后于超高压变质的峰期年龄 228 ± 2 Ma(锆石 U-Pb,Li Shuguang et al.,1998)所代表造山带碰撞造山时间近100 Ma,而世界其他造山带从碰撞到造山后伸展延续时间仅约20~50 Ma(马昌前等,2006);大别山地区岩浆活动峰期与长江中下游地区的宁芜和庐枞盆地火山岩喷发时间同步,如,宁芜盆地主期火山喷

发龙王山和大王山旋回其火山岩锆石 U-Pb 同位素 年龄集中在 130.3~132.3 Ma( 张旗等 ,2003 ;侯可 军等 2010) 庐枞盆地的主期火山喷发龙门院~双 庙旋回火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄集中在 130.5 ~134.8 Ma( 周涛发等 ,2008 )。它们与中国东部岩 浆-成矿作用大爆发时间一致(马昌前等 2006)。这 意味着大别山北缘火山岩带与长江中下游火山盆地 同属中国东部中生代巨量岩浆活动的重要组成部 分 受共同的构造体制控制 代表古特提斯构造体制 向环太平洋构造体制和古太平洋板块的俯冲的根本 性转折。大别山地区北西西向花岗质火山-侵入岩 带中各火山活动集中区和侵入体明显受北西西和北 东向断裂构造联合控制,显示早白垩世岩浆活动迁 就和利用了早前古特提斯构造体系断裂构造 ,与中 国东部早白垩世巨量岩浆作用和深部动力学过程相 联系。

#### 5.3 火山岩成因及地质意义

通过对大别山北缘西段陈棚组火山岩地球化学和 Sr-Nd 同位素的研究,结合大别山北缘东段相同层位毛坦厂组火山岩地球化学研究成果(谢芳贵等,

2000 认为 大别山北缘早白垩世火山岩是一套高钾 钙碱性系列中酸性火山岩系。东段火山岩以中性-中酸性安山岩、粗安岩、粗面岩为主,相对偏基性,而 西段以中酸性-酸性的粗安岩、英安岩、流纹岩为主, 且伴大量的爆发相流纹质熔结凝灰岩发育,显示酸 性火山岩建造特征。因此,由东至西,大别山北缘中 生代火山岩具有酸度逐渐变高,岩浆源区逐渐由深 变浅的变化趋势。另外,大别山西段这种强烈的酸 性火山岩浆活动为该区与浅成或近地表火山气液石 英岩化低温银矿床形成创造了独特的成矿条件,这 也是大别山北缘西段皇城山银矿床为整个大别山北 缘火山岩区唯一独立银矿床的重要原因(杨梅珍等, 2011)。在更大范围与长江中下游地区宁芜、庐枞盆 地同期火山岩对比也存在明显的成分变化。如 庐 枞和宁芜盆地火山岩以相对低硅、富钾中基性火山 岩为主,SiO。平均含量分别为 55.08% 和 57.24% (邱家骧等,1981;孙冶东等,1994),橄榄玄粗岩系的 粗面玄武岩-粗安岩-粗面岩火山岩组合为特征。

本文获得大别山北缘西段英安岩的(87Sr/86Sr)为 0.707 56 aNd(t = 133.1 Ma)为-20.1 该值在大 别山东段晓天、舒城、毛坦厂一带的火山岩的 ( $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr ) ( $^{0.708}$  31 $\sim$ 0.710 14)和 $\epsilon$ Nd  $^{t}$  )  $^{-15.2}$ ~-21.6)变化范围之内(杨祝良等,2002),也与北 大别沙村地区的晚中生代火山岩的  $\epsilon Nd(t)$ ( -18.73 ~ -24.15 )和  $^{87}$  Sr/ $^{86}$  Sr( 0.707 0 ~ 0.708 5 ) 一致 王岳军等 2003 )。 其两阶段 Nd 同位 素模式年龄(2567 Ma)表明源区为古老的地壳物 质。Sr-Nd 同位素联合示踪结果显示大别山北缘中 生代火山岩源区为壳源。与同期的下扬子宁芜和庐 枞地区火山岩 Sr-Nd 同位素特征(87Sr/86Sr) 0.705  $\sim 0.707$  にNd( t )-3.9~-10 【 邢凤鸣 ,1996 ;邢凤 鸣等,1999;王元龙等,2001;刘洪等,2002;谢智等, 2007 袁峰等 ,2008 )显示的岩浆中的初生幔源物质 主导地位的特征明显不同。结合前面的讨论,说明 大别山地区早白垩世岩浆来源相对较浅,以壳源为 主 成分偏酸性 伴随岩浆活动以银铅锌钼多金属成 矿为特色。而与其相邻的长江中下游宁芜、庐枞盆 地同时期岩浆来源深,以幔源为主,成分偏基性,成 矿以铁铜金多金属成矿作用为特征。以上特征对比 结果说明大别山区与相邻长江中下游同时期火山岩 岩浆性质和成因机制上的差异。

大别山北缘地区中生代火山岩是中国东部火成 岩省的重要组成部分,其形成受中国东部中生代燕

山期地球动力学背景制约。三叠纪以来扬子与华北 两大板块碰撞造山和大陆俯冲作用形成了以超高压 变质为特征的秦岭-大别造山带。晚侏罗-早白垩世 中国东部完成了古特斯构造体制向环太平洋构造体 制的大转换和古太平洋板块俯冲(吴利仁等,1985; 邓晋福等 1996 )。包括大别山地区在内的中国东部 处在亚洲大陆东缘,中生代处于古太平洋板块与欧 亚板块强烈相互作用的地带,西太平洋的斜向俯冲 造成大陆岩石圈重力不稳而产生拆沉 ,直接导致了 岩石圈强烈减薄和软流圈上涌(邓晋福等,1996),导 致大规模岩浆活动。大别山北缘地区和长江中下游 地区属具成熟陆壳构造受太平洋板块俯冲影响的活 动大陆边缘区(耿文辉等,2006)。太别山北缘地区 与宁芜、庐枞盆地火山岩类型及地球化学对比结果 反映岩石圈伸展程度和软流圈地幔上涌规模的不 同。大别山地区该时期岩石圈伸展程度和软流圈上 涌规模远不如宁芜、庐枞地区 软流圈上涌仅提供地 壳物质重熔的热量使之达到低共熔点 形成壳源物 质为主的中酸性岩浆。而长江中下游地区在该时期 进入快速伸展阶段 尽管未进入真正的裂谷 已经进 入前裂谷阶段(孙冶东 1994) 郯庐断裂和长江断裂 引张,超壳断裂减压作用导致地幔熔融形成以幔源 物质为主的火山岩。因此,中国东部尽管不存在东 太平洋安第斯型岩浆岩成分极性,但也显示出分段 性差异特征,很可能反映古太平洋潜没于欧亚板块 的动力学过程制约因素的影响(吴利仁等,1985)。

## 6 结论

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明 ,大别山北缘西段火山岩浆活动时间与东段金寨-晓天主体毛坦厂组中酸性火山岩时间一致 ,两者一起组成了早白垩世大别山北缘火山岩带 ,与长江中下游同时期火山岩盆地一起是中国东部火成岩省的重要组成部分。其形成受中国东部中生代燕山期地球动力学背景制约 ,与太平洋板块的斜向俯冲造成大陆岩石圈重力不稳而产生拆沉导致岩石圈强烈减薄深部动力学过程相联系。将其与长江中下游地区盆地火山岩岩石地球化学对比发现 ,大别山地区早白垩世岩石圈 ,及此形成以壳源物质为主的中酸性岩浆和相关的钼银铅锌多金属矿床 ,与长江中下游地区强烈伸展作用形成以幔源为主的中基性岩浆伴随大规模

的铁铜金多金属成矿作用明显不同,这很可能反映 古太平洋潜没于欧亚板块的动力学过程制约因素的 影响。

致谢 本研究得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的资助,开放课题编号为 GPMR201014。在样品处理、测试过程中得到了赵来时、胡兆初、周炼3位教授的帮助。同时匿名评审专家为论文提出了非常宝贵、富有建设性的修改意见。在此一并向他们表示衷心感谢!

#### References

- Belousova E A , Griffin W L , O Reilly S Y , et al. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology , 143:602~622.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies A. 1. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry C. 1. Developments in Geochemistry, 2:63~114.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing and Mo Xuanxue. 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics M.J. Beijing: Geological Publishing House in Chinese with English abstract.)
- Du Jianguo. 2000. Mesozoic Magmatism and Geochemistry of Mineralization of Dabie Orogenic Bell D J. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Geng Wenhui, Yao Jinyan, Ma Wenrong, et al. 2006. Subvolcanic Type Copper-Silver Polymetallic Deposit From Eastern China[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press(in Chinese).
- Hou Kejun and Yuan Shunda. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and subvolcanic rocks in the Ningwu basin and their geologica limplications J.J. Acta Petrologica Sinica, 26(3):888~90% in Chinese with English abstract).
- Le Bas M J , Le Maitre R W , Streckeisen A , et al. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total silica diagram [J] Journal of Petrology , 27:745 $\sim$ 750.
- Li Shuguang , Nie Yonghong , Hart S R , et al. 1998. Interaction between subdueted continental crust and the mantle: II , Sr and Nd isotopic geochemistry of the syn-collisional mafie-ultramarie intrusions in Dabie Mountain J J. Science in China: Series DX English edition), 41(6):632~638.
- Liu Dunyi , Tang Jiafu , Zhou Cunting , et al. 2002. U-Pb zircon dating and its geological significance of the Taoyuanzhai volcanic rock , central Dabie organic belt J ]. Acta Geologica Sinica , 76:217  $\sim$  221( in Chinese with English abstract ).
- Liu Hong , Qiu Jiansheng , Luo Qinghua , et al. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin , Anhui Province: Geochemical constraint [J]. Geochimica , (8): 129~140 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenbin, Liu Zhenhong and Zhang Shijiao. 2003. Geological and geochemical features of Shangcheng granite body and its genetic im-

- plication , Henar[ J ]. Geology and Mineral Resources of South China , (4):  $17 \sim 23$  (in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian , She Zhenbing , Zhang Jinyang , et al. 2006. Crustal roots , orogenic heat and matmtisn [J]. Earth Science Frontiers , 13 (2):130~139 (in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian , Yang Kunguang and Ming Houli. 2003. Evidence of granite on the shift of Mesozoic crust of Dabie Mountains from compression to extension [J]. Science in China Series D , 33(9):817  $\sim$  826 in Chinese with English abstract ).
- McDonough W F and Sun S S. 1985. Isotopic geochemical and systematics in Tertiary-Recent basalts from southeastern Australia and implication for the sub-continental lithosphere [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 49:2051~2067.
- Qiu Jiaxiang, Wang Renjing, Wang Fangzheng, et al. 1981. The petrochemical characteristics and petrogenetic analysis of Mesozoic volcanics along the lower reaches of Yangzi Rivel J J. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), (1):170~182(in Chinese with English abstract).
- Sun Yedong, Yang Rongyong, Ren Qijiang, et al. 1994. Discussion the characteristics and tetonic setting of the Mesozoic volcanics sequence in Lujiang-Zongyang area. J. 1. Acta Petrologica Sinica, 9(4):95~102(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Zhang Qi and Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance J. Acta Petrologica Sinica, 17(4):565~575(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, et al. 2003. Geochemical characteristics of late Mesozoic volcanic rocks in the hinterland of north Dabie terrane and their tectonic implications J. Earth Science Frontiers, 10(4):529~538 in Chinese with English abstract).
- Wu Liren and Qi Jinying. 1985. The Meaozoic volcanic rocks along the lower reach of Yangtze River region Al. Institute of Geology, Academia Sinica. Petrological Research Cl. Beijing: Science Press, 1 ~10 in Chinese).
- Xia Qunke , Zheng Yongfei and Deloule E. 2003. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dabieshar[ J ]. Geological Journal of China Universities ,  $\Re$  2): 163  $\sim$  172 in Chinese with English abstract ).
- Xie Fanggui , Yang Zhuliang and Shen Jialin. 2000. The geochemical feature of Mesozoic volcanic-intrusive complex in northern Dabieshan [J]. Volcanology & Mineral Resources , 21(3):179~188(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhi, Li Quanzhong and Chen Jiangfeng. 2007. The geochemical characteristics of the Early-Cretaceous volcanics in Luzhong region and their source significances J. Geological Journal of China Universities, 13(2):235~249 in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming and Xu Xiang. 1999. Hig-K calc-alkaline intrusion in Tongling region J. Geochemistry, 25(1):29~38(in Chinese with English abstract).
- Yang Meizhen, Zeng Jiannian, Ren Aigin, et al. 2011. Identifying charac-

- teristics of high-sulfidation epithermal Huangchengshan silver deposit in Henan Province and their ore-search implication [J]. Geology and Exploration , 47 6):  $1\,059 \sim 1\,060$  in Chinese with English abstract).
- Yang Zhuliang , Shen Jialin and Shen Weizhou. 1999. Isotopic geochronology of Mesozoic volcanics and intrusions in Beihuaiyang [J]. Geological Review , 45( Sup. ): 674  $\sim$  680( in Chinese with English abstract ).
- Yang Zhuliang , Shen Jialin and Shen Weizhou. 2002. Sr and Nd isotopic composition and material sources of Mesozoic volcano-intrusive rocks in the northern margin of Dabie Mountains [J]. Acta Petrologica et Mineralogica , (3):223~231(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng , Zhou Taofa , Fan Yu , et al. 2008. Source , evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin , Anhui Province J J. Acta Petrological Sinica , 24(8):  $1691 \sim 1702$  (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin , Wu Fuyuan , Gao Shan , et al. 2003. Age determination and REE analysis of Cenozoic intrusion in northeastern China by zircon U-Pb Laser probe[J]. Chinese Science Bulletin , 48(14): 1511~1520(in Chinese).
- Zhang Chao and Ma Changqian. 2008. Large-scale late Mesozoic magmatism in the Dabie Mountain: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotopes J. J. Mineral Petrol., 28(4):71~79 in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, et al. 2003. Zircon SHRIMP dating and significance of Ningwu volcanics J. Science in China Series D. 33(4):309~314(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi , Wang Yan and Li Chengdong. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implication [J] Acta Pertologica Sinica , 22(9): 2249 2269 in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongsheng , Su Hua and Ma Changqian. 2009. Formation-age , tectonic setting and ascertainment of A-type granite on the Lingshan pluton in Dabie orogenic belf J ]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 22(2):222~226(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa , Fan Yu , Yuan Feng , et al. 2008. Chronology of volcanics and its significance from Luzong basin , Anhui Province J ] Science in China Series D , 38(11):1342~1353(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 邓晋福 赵海岭 莫宣学. 1996. 中国中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙 M]. 北京:地质出版社.
- 杜建国. 2000. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究 [D1. 合肥:合肥工业大学.
- 耿文辉 姚金炎 冯文荣 等. 2006. 中国东部次火山岩型铜银多金属矿 冠 M ]. 北京:冶金工业出版社.
- 侯可军 袁顺达. 2010. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报,26(3):888~902.
- 刘敦一 汤加富 周存亭 等. 2002. 大别造山带核部桃园寨火山岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报 (2):217~221.
- 刘 洪 邱检生 罗清华 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因

- 的地球化学制约[]]. 地球化学,31(2):129~140.
- 刘文斌,刘振宏,张世佼. 2003. 河南商城岩体地质地球化学特征及成因意义[]. 华南地质与矿产,(4):17~23.
- 马昌前,佘振兵,涨金阳,等. 2006. 地壳根、造山热与岩浆作用[J]. 地学前缘,13(2):130~139.
- 马昌前 杨坤光 明厚利. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间花岗岩的证据 J]. 中国科学(D),23(9):817~827.
- 邱家骧,王人镜,王方正,等.1981.长江下游中生代火山岩岩石化学特征及成因分析[]].地球科学,(1):170~182.
- 孙冶东,杨荣勇,任启江,等.1994.安徽庐枞中生代火山岩系列特征及其形成的构造背景[]].岩石学报,10(1):95~102.
- 王岳军 范蔚茗 郭 锋 等. 2003. 北大别晚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 [1] 地学前缘,10(4):529~538.
- 吴利仁,齐进英. 1985. 长江下游中生代火山岩[A]. 中国科学院地质研究所. 岩石学研究 第五辑 [C]. 北京:科学出版社.
- 夏群科,郑永飞,Deloule E. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成 J.1. 高校地质学报,9(2):163~172.
- 谢芳贵 杨祝良 沈加林. 2000. 大别山北缘中生代火山侵入杂岩地球化学特征 ] ]. 火山地质与矿产,21(3):179~188.
- 谢 智 李全忠 陈江峰. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. 高校地质学报,13(2):235~249.
- 邢凤鸣. 1996. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因——岩石学与 Nd、Sr、 Pb 同位素证据 J ]. 岩石矿物学杂志,1(2):126~137.
- 邢凤鸣,徐 祥. 1999. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩[J]. 地球化学, 25(1): 29~38.
- 杨梅珍,曾键年,任爱琴,等. 2011. 河南省皇城山高硫化型浅成低温热液型银矿床识别特征及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 47(6): 1059~1066.
- 杨祝良 沈加林 沈渭洲 ,等. 1999. 北淮阳中生代火山岩-侵入岩同位素年代学研究 J]. 地质论评 ,45(增刊):674~680.
- 杨祝良 沈加林 沈渭洲. 2002. 大别山北缘中生代火山-侵入岩锶-钕同位素组成特征及其物质来源[J]. 岩石矿物学杂志,(3): 223~231.
- 袁 峰 周涛发 范 裕 ,等. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、 演化及形成背景 J ]. 岩石学报 , 24(8):1691~1702.
- 袁洪林 ,吴福元 ,高 山 ,等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激 光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[ $_{
  m J}$ ]. 科学通报 ,48 (14):1511~1520.
- 张 超 冯昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动:花岗岩 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[1] 矿物岩石,28(4):71~79.
- 张 旗 简 平 刘敦一 等. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年 及其意义[]] 中国科学(D),33(4):309~314.
- 张 旗 王 焰 李承东. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [ ] ] 岩石学报,2x(9):2248~2269.
- 周红升 苏 华,马昌前. 2009. 灵山岩体的形成时代、构造背景及其 A型花岗岩的厘定[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版,22 (2):222~226.
- 周涛发 范 裕 袁 峰 等. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的 年代 学 及 其 意 义 [ J ]. 中 国 科 学 ( D ), 38 ( 11 ): 1342~1353.