

北淮阳早白垩世金刚台组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

黄 皓, 薛怀民

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 金刚台组火山岩是大别造山带北缘北淮阳晚中生代火山岩带的重要组成部分, 选取金刚台组的粗面安山岩、熔结凝灰岩以及紧邻火山岩的正长斑岩, 用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法进行了年龄测定, 结果显示: 两个火山岩样品的年龄分别为 128.8 ± 0.7 Ma 和 127.6 ± 0.5 Ma, 紧邻火山岩的正长斑岩的年龄为 129.8 ± 0.7 Ma, 这 3 组年龄值在误差范围内近于一致, 说明金刚台组火山岩和紧邻火山岩的正长斑岩是在很短的时间内形成的。这些年龄与整个苏鲁-大别造山带内早白垩世岩浆活动年龄的峰值区间一致, 可能意味着它们形成于相同的动力学条件下。

关键词: 锆石年龄; 金刚台组; 早白垩世; 北淮阳; 大别造山带

中图分类号: P588.14; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)03-0371-11

LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Early Cretaceous volcanic rocks from Jingangtai Formation in Beihuaiyang belt on the northern margin of the Dabie Orogen and their geological implications

HUANG Hao and XUE Huai-min

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Jingangtai Formation constitutes an important component part of the Beihuaiyang Late Mesozoic volcanic rock belt. In this paper, the zircon U-Pb age of an ignimbrite sample was determined, and a trachyan-desite sample from the Jingangtai Formation and an orthophyre sample collected near the volcanic rocks were dated by LA-ICP-MS method. According to the results, the ages of the 3 sample are almost identical within the error range, which means that the volcanic rocks of Jingangtai Formation and the orthophyre were formed in a very short period. Meanwhile, these ages are very close to the concentrated ages of the Cretaceous magmatism in Sulu-Dabie orogen, which implies that they might have been generated under the same dynamic condition.

Key words: zircon geochronology; Jingangtai Formation; Early Cretaceous; Beihuaiyang; Dabie Orogen

出露于大别造山带北缘(北淮阳地区)的火山岩与南缘(长江中下游)的火山岩一起,构成了两条大致平行于大别造山带、与滨西太平洋大陆边缘呈高角度相交的火山岩带,这在整体呈北北东向沿大陆边缘

展布)显得别具特色,对于理解碰撞加厚造山带的演化、早中生代(印支期)构造体制与晚中生代(燕山期)构造体制的转换和叠加具有重要意义。但与长江中下游火山岩带相比,到目前为止,对北淮阳火山岩带的研究程度还很低,已有的研究也主要侧重于

收稿日期: 2012-03-20; 修订日期: 2012-04-12

基金项目: 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-05); 中国地质调查局地质调查项目(1212010711814); 地质矿产调查评价专项(1212011121116)

作者简介: 黄皓(1987-), 男, 硕士研究生, 岩石学专业, E-mail: cagshh@163.com; 通讯作者: 薛怀民, E-mail: huaiminx@sina.com

带的东段。对于西段的火山岩,只是从岩性上与东段进行了对比,尚缺乏精确的同位素年龄资料。本文在对研究程度较低的北淮阳西段大量出露的晚中生代火山岩及与其有成因联系的侵入岩进行详细野外研究的基础上,选取金刚台组火山岩作为研究对象,用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测定了火山岩及紧邻火山岩产出的正长斑岩的年龄,并通过与大别造山带内晚中生代岩浆岩及带内其他地区火山活动时代的对比,探讨岩浆作用的动力学机制。

1 区域地质背景

北淮阳火山岩带位于大别造山带的最北缘,受南侧的晓天-磨子潭断裂和北侧的六安(合肥)-确山断裂所限,呈近东西向的狭长带状展布(图 1)。该火山岩带东止于郟庐断裂,西段被南阳盆地不整合覆盖,带内火山岩的分布主要集中在东段的桐城-舒城一带和西段的金寨-商城一带,中段仅有零星出露。前人把北淮阳地区的中生代火山岩划分为 5 个火山

构造单元,自东向西依次为舒城-霍山火山沉积盆地^①、磨子潭-晓天火山沉积盆地^②、金刚台锥形火山群^③、光山-商城火山沉积盆地和信阳火山沉积盆地(张鹏,1998)。

金刚台组的火山岩仅出露于北淮阳中生代火山岩带的西段,地跨河南、安徽两省,其南部以晓天-磨子潭断裂为界与北大别高压变质带相隔,西侧为桐柏-商城深大断裂,关庙铺-大马店断裂从火山岩区北部穿过(图 2)。金刚台组的火山岩主要呈面状分布,露头形态呈马鞍状,出露面积超过 250 km²。其西北部少量出露陈棚组火山岩,两组火山岩均覆盖于侏罗纪沉积地层之上,且周围有大量的燕山期花岗岩体分布,例如呈岩基侵入的商城花岗岩。它们具有多期次侵位的特征。

金刚台组火山岩周围出露的地层包括前中生代的基底和晚侏罗世—白垩纪的红色盆地沉积(杨坤光等,1999)。其中,晚侏罗世—白垩纪红色盆地沉积出露于研究区的东北侧,由一套红色砂岩、砂砾岩、砾岩组成^④。而前中生代基底岩群包括变质基底

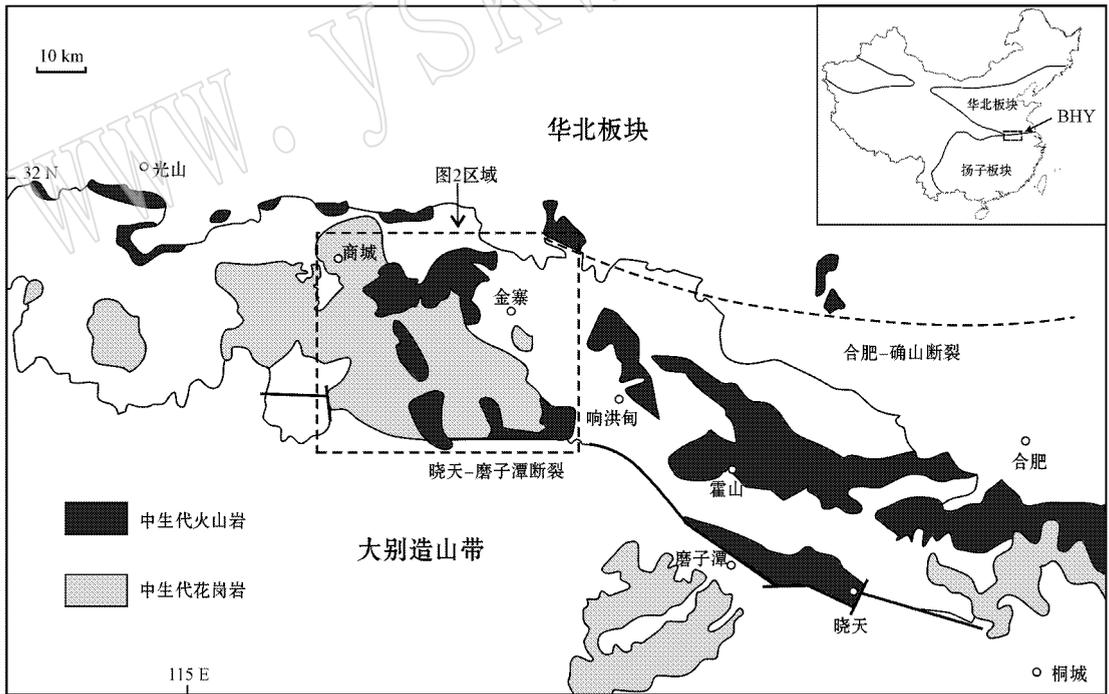


图 1 北淮阳中生代火山岩分布图

Fig. 1 Distribution of Mesozoic volcanic rocks in Beihuaiyang belt

- ① 安徽区调队. 1992. 1:5 万油店等四幅区调报告.
- ② 安徽地质矿产局 313 地质队. 1992. 1:5 万磨子潭幅、晓天幅区调报告.
- ③ 中国地质大学(北京). 1995. 1:5 万金寨幅、苏仙石幅区调报告.
- ④ 河南省区调队. 1980. 1:20 万商城幅区调报告.

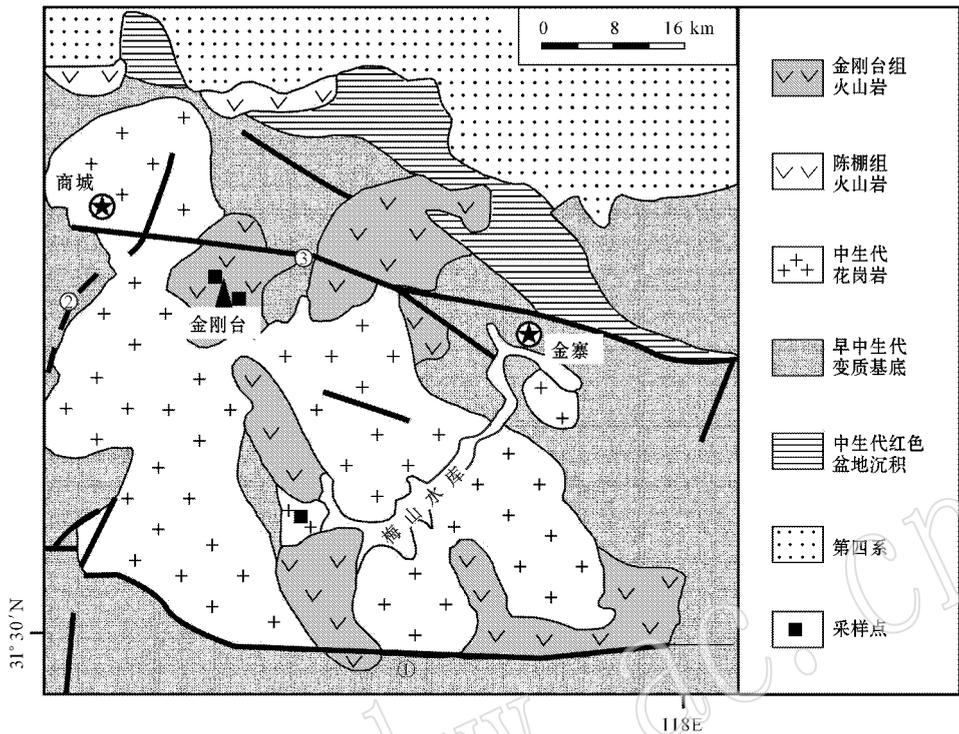


图2 金刚台组火山岩地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of Jingangtai Formation

①—晓天-磨子潭断裂;②—桐柏-商城断裂;③—关庙铺-大马店断裂

①—Xiaotian-Mozitan fault;②—Tognbai-Shangcheng fault;③—Guanmiaopu-Damadian fault

和晚古生代地层两部分,其中石炭系为一套山前类磨拉石建造,泥盆系佛子岭-信阳群是一套泥砂质类复理石沉积。变质基底主要是新元古代的一套深变质的火山-沉积岩系。

2 火山岩相和样品

金刚台组火山岩主要形成于中心式喷发,发育典型的爆发式火山地貌,以上陡下缓锥形火山的分布最为广泛。区内最高峰金刚台高达1384 m,为典型的锥形火山喷发遗迹。金刚台周围有众多锥形火山地貌,构成金刚台锥形火山群。经过科学的考察与评估,在该火山群基础上建立了金刚台国家地质公园。在火山岩的组成上,河南区调队1:20万商城幅区域地质调查报告(1980)^①根据火山岩的岩浆结构,认为金刚台组主要由中酸性熔岩组成,火山碎屑岩较少(张鹏等,1997)。中国地质大学(北京)^②基于大量火山碎屑的存在,确定金刚台组为一套爆发相

岩石组合(刘文灿等,1997)。杨泽强等(2006)对金刚台国家地质公园周边的火山岩进行研究发现,地质公园周边火山岩主要为潜火山岩,属于火山管道岩系。基于前人研究和笔者的野外工作,我们倾向于认为金刚台组火山岩主要形成于剧烈的中心式火山喷发,火山岩由主要一套中酸性的熔岩、火山碎屑岩组成。在喷发中心的锥形火山口处,出现大量的潜火山岩,同时也分布着熔岩。近火山口处以熔岩为主,含少量火山碎屑岩。沿着喷发中心往外推移,熔岩含量减少,而火山碎屑岩逐渐增多。

本次野外工作共采集了3组岩石样品用于锆石定年,分别为BHY433B、BHY435B和BHY438B,样品新鲜,风化蚀变较弱。

样品BHY433B为巨斑晶正长斑岩,紧邻火山岩产出。岩石呈肉红色,似斑状结构。斑晶主要为钾长石,自形程度好,颗粒粗大,可达1~2 cm。斑晶含量约为20%。基质主要由正长石、微斜长石微晶组成;黑云母较少,呈片状分布;石英含量极少。岩石

① 河南省区调队. 1980. 1:20万商城幅区调报告.

② 中国地质大学(北京). 1995. 1:5万金寨幅、苏仙石幅区调报告.

整体新鲜, 蚀变较弱。

样品 BHY435B 为熔结凝灰岩, 采集自金刚台主峰山腰。岩石呈灰黑色, 由斑晶、基质和碎屑物质组成, 由于靠近通道, 碎屑物质较多。斑晶主要为长石和石英, 基质为隐晶质结构, 碎屑物质为外来角砾和少量晶屑。样品内基质矿物定向排列, 形成熔结条带, 条带绕角砾不连续, 具典型的假流纹构造。

样品 BHY438B 为粗面安山岩, 采集自金刚台后山山底。岩石呈深灰色, 致密块状, 粗面结构和斑状结构, 主要由斑晶和基质组成。斑晶主要为斜长石和角闪石, 约占 15%, 晶体破碎, 完整性差, 基质为隐晶质。

3 分析方法

用于年代学测试的样品新鲜, 具有很好的代表性。样品在河北廊坊诚信地质技术服务公司用常规方法分选锆石, 在中国地质科学院矿产资源所资源评价重点实验室完成锆石制靶。测试前分别拍摄了

可视光和阴极发光 (CL) 照片, 为后续测试挑选晶形标准、表面干净的锆石。这些样品中的锆石颗粒普遍呈短柱状或板状, 并发育震荡环带, 显示其岩浆成因的特点 (Hoskin and Schaltegger, 2003; Wu and Zheng, 2004)。锆石的 U-Pb 年龄测定在北京大学造山带与地壳演化实验室完成。分析仪器为激光等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS)。本次分析激光器工作频率为 10 Hz, 剥蚀物质载气为高纯度 He 气, 流量为 0.7 L/min, 测试点束斑直径为 36 μm , 锆石 U/Pb 比值及年龄校准选用标准锆石 pleso; 数据处理采用 Glitter 4.42。年龄值选用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 单个数据点误差均为 1σ , 加权平均值误差为 2σ 。详细分析步骤和数据处理方法可参考袁洪林等 (2003) 的相关论述。

4 分析结果

本文对 3 个样品的锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试, 代表性锆石的阴极发光图像见图 3, 年代学分析结果见图 4 和表 1。

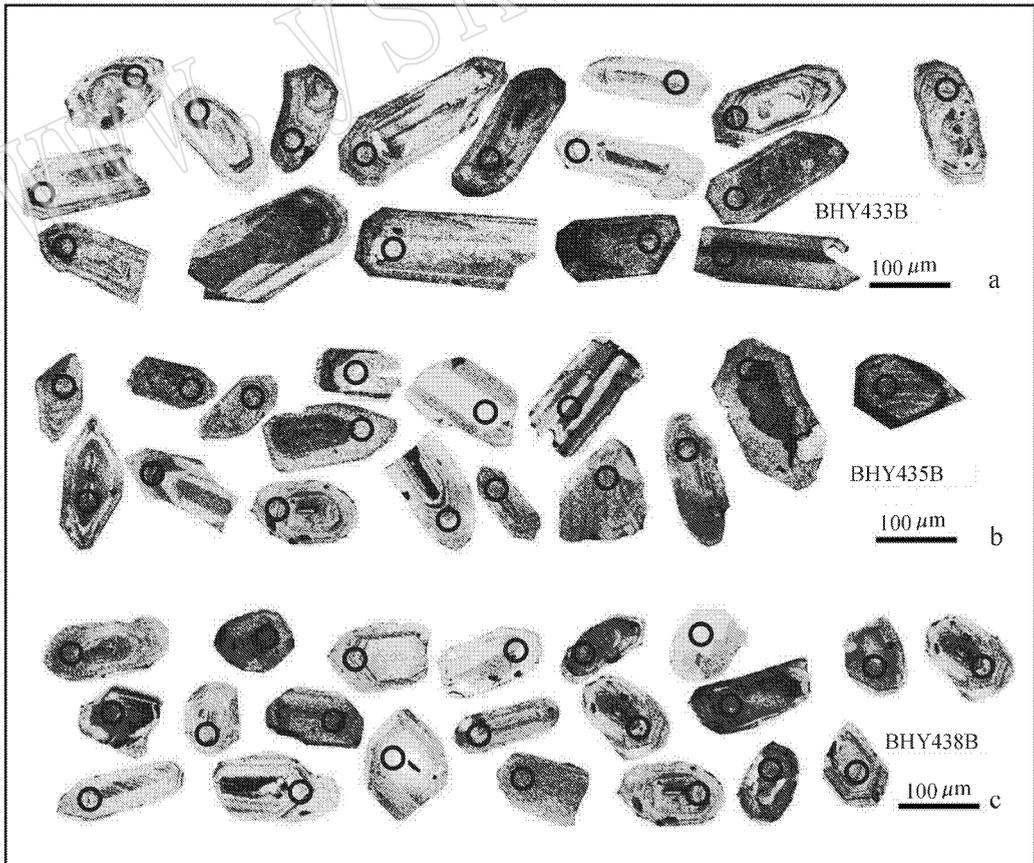


图 3 锆石阴极发光照片

Fig. 3 CL images of selected zircons

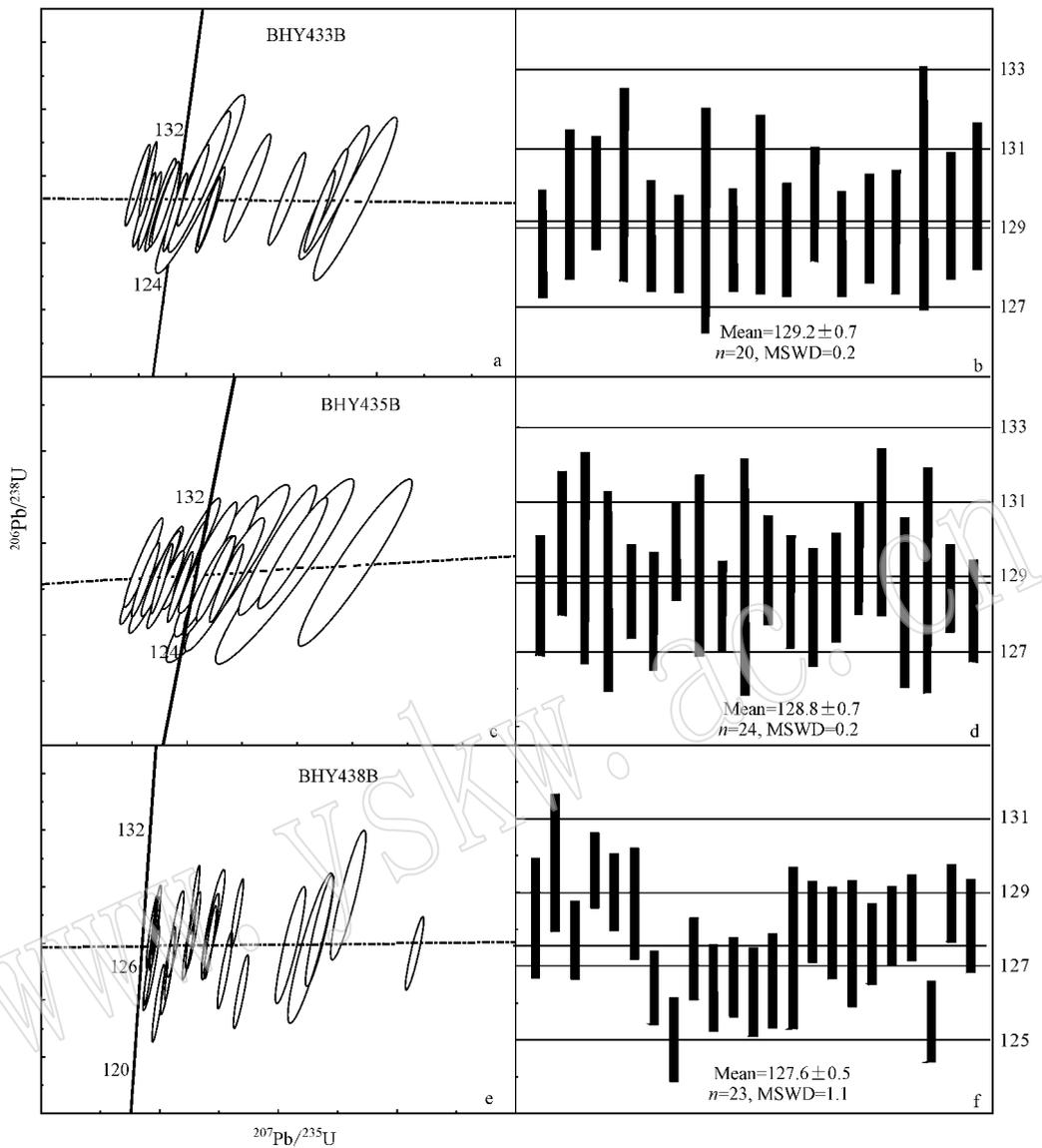


图 4 锆石 U-Pb 谐和线图和加权平均年龄图

Fig. 4 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagrams of volcanic rocks from Jingangtai Formation

样品 BHY433B(正长斑岩)的锆石颗粒大,自形程度好,形态稳定,主要呈板状,长宽比约 3:1,长度集中在 120~180 μm 之间,大部分锆石发育振荡环带,为典型的岩浆锆石,个别锆石阴极发光不明显(图 3a)。样品 BHY435B(熔结凝灰岩)的锆石主要呈柱状,长宽比约 2:1,长度集中在 90~150 μm ,由于为喷出岩,锆石较小且比较破碎,大部分锆石发育振荡环带,约 1:3 的锆石环带不明显,个别锆石发育宽环带(图 3b)。样品 BHY438B(粗安岩)锆石与 BHY435B 锆石相似,但粒度普遍较小,呈短柱状、粒状,长宽比约 3:2,长度集中在 60~110 μm 。大部分

锆石发育振荡环带,少量锆石阴极发光较弱(图 3c)。

本次分析每个样品均测定了 25 个点,剔除了偏离较大的实验点。由于锆石中 ^{207}Pb 的含量较小,在实验过程中难以精确测量,本文的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值缺乏有效精度,致使实验结果普遍偏离谐和线(图 4a、c、e)。因此,本文采用精度较为可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 加权平均年龄计算(Compson *et al.*, 1992)。样品 BHY433B 剔除了明显偏离其他数据点的 5 个点,剩余 20 个点的加权年龄为 129.2 ± 0.7 Ma, MSWD = 0.2(图 4b);样品 BHY435B 剔除了 1 个明显偏离点,剩余 24 个点的加权平均年龄为 128.8 ± 0.7 Ma,

表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

测点	$w_B/10^{-6}$			元素比值				年龄值/Ma			
	U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
正长斑岩 BHY433B											
B433B-01	439.15	416.32	43.7	0.123 99	0.003 34	0.020 15	0.000 21	118.7	3.02	128.6	1.35
B433B-02	446.18	500.55	51.39	0.275 3	0.008 05	0.020 3	0.000 3	246.9	6.41	129.6	1.87
B433B-03	549.36	560.47	55.07	0.118 88	0.003 49	0.020 36	0.000 22	114.1	3.17	129.9	1.42
B433B-04	149.55	132.33	16.304	0.145 26	0.008 75	0.020 39	0.000 38	137.7	7.76	130.1	2.43
B433B-05	314.54	219.96	31.956	0.129 86	0.004 02	0.020 19	0.000 22	124	3.61	128.8	1.38
B433B-06	301.84	969.1	39.597	0.149 41	0.003 2	0.020 14	0.000 19	141.4	2.82	128.6	1.22
B433B-07	244.35	202.14	26.82	0.211 95	0.011 74	0.020 25	0.000 44	195.2	9.83	129.2	2.81
B433B-08	446.69	436.46	45.71	0.121 67	0.003 2	0.020 16	0.000 2	116.6	2.9	128.7	1.28
B433B-09	171.64	205	22.01	0.202 75	0.009 84	0.020 3	0.000 36	187.4	8.31	129.6	2.25
B433B-10	587.48	483.41	58.86	0.149 93	0.004 05	0.020 16	0.000 23	141.8	3.57	128.7	1.43
B433B-11	306.68	175.61	56.69	0.288 55	0.005 57	0.038 48	0.000 37	257.4	4.39	243.4	2.3
B433B-12	216.01	228	24.716	0.200 77	0.005 23	0.020 31	0.000 23	185.8	4.42	129.6	1.43
B433B-13	434.58	544.18	46.6	0.134 88	0.003 44	0.020 14	0.000 21	128.5	3.08	128.6	1.33
B433B-14	240.4	271.71	26.051	0.130 87	0.003 89	0.020 22	0.000 22	124.9	3.5	129	1.36
B433B-15	398.1	258.44	39.57	0.128 55	0.004 3	0.020 2	0.000 25	122.8	3.87	128.9	1.55
B433B-16	109.26	44.57	14.47	0.145 57	0.012 6	0.020 37	0.000 48	138	11.17	130	3.05
B433B-17	123.18	140.46	82.24	1.137 11	0.013	0.129 85	0.001 1	771.1	6.17	787	6.29
B433B-18	301.69	204.68	31.56	0.182 59	0.005 22	0.020 25	0.000 25	170.3	4.48	129.3	1.59
B433B-19	194.47	196.47	22.688	0.165 64	0.006 6	0.020 34	0.000 29	155.6	5.75	129.8	1.84
B433B-20	86.98	82.47	13.442	0.263 27	0.008 81	0.022 93	0.000 29	237.3	7.08	146.2	1.85
B433B-21	439.59	493.42	68.541	0.123 24	0.002 64	0.020 41	0.000 2	118	2.39	130.2	1.24
B433B-22	86.73	78.96	13.115	0.255 38	0.008 47	0.022 98	0.000 27	230.9	6.85	146.5	1.73
B433B-23	281.54	544.32	33.39	0.196 68	0.004 33	0.020 15	0.000 22	182.3	3.68	128.6	1.38
B433B-24	199.13	665.3	28.052	0.142 51	0.004 48	0.020 36	0.000 22	135.3	3.98	129.9	1.39
B433B-25	339.63	236.56	48.99	0.210 9	0.004 55	0.03	0.000 3	194.3	3.82	190.5	1.88
熔结凝灰岩 BHY435B											
B435B-01	109.3	194.31	15.103	0.139 08	0.004 83	0.020 13	0.000 25	132.2	4.3	128.5	1.6
B435B-02	453.66	389.36	45.73	0.133 83	0.005 71	0.020 36	0.000 3	127.5	5.11	129.9	1.91
B435B-03	131.81	231.86	16.108	0.182 5	0.011 15	0.020 29	0.000 45	170.2	9.57	129.5	2.83
B435B-04	156.19	448.19	24.48	0.284 19	0.012 98	0.020 15	0.000 42	254	10.26	128.6	2.68
B435B-05	355.12	262.62	33.176	0.120 39	0.002 71	0.020 15	0.000 2	115.4	2.46	128.6	1.25
B435B-06	142.84	322.61	16.315	0.139 05	0.005 08	0.020 07	0.000 25	132.2	4.53	128.1	1.58
B435B-07	425.41	256.76	38.61	0.133 61	0.003 36	0.020 32	0.000 21	127.3	3.01	129.7	1.33
B435B-08	209.28	326.79	25.7	0.141 23	0.008 15	0.020 26	0.000 38	134.1	7.26	129.3	2.41
B435B-09	564.43	679.35	54.72	0.130 71	0.002 48	0.020 09	0.000 19	124.7	2.23	128.2	1.2
B435B-10	45.23	62.02	7.071	0.161 63	0.013 48	0.020 22	0.000 5	152.1	11.79	129	3.16
B435B-11	159.22	176.97	15.314	0.125 6	0.003 93	0.020 24	0.000 23	120.1	3.54	129.2	1.45
B435B-12	399.24	368.65	40.55	0.118 59	0.003 78	0.020 15	0.000 24	113.8	3.43	128.6	1.5
B435B-13	179.09	318.73	19.308	0.122 57	0.004 7	0.020 09	0.000 25	117.4	4.25	128.2	1.58
B435B-14	402.21	334.47	40.07	0.141 3	0.003 82	0.020 16	0.000 23	134.2	3.4	128.7	1.45
B435B-15	380.52	437.12	37.08	0.119 71	0.003 79	0.020 29	0.000 24	114.8	3.44	129.5	1.5
B435B-16	246	71.79	24.059	0.159 42	0.007 64	0.020 39	0.000 35	150.2	6.69	130.2	2.22
B435B-17	182.72	348.57	21.335	0.143 92	0.007 75	0.020 11	0.000 36	136.5	6.88	128.3	2.28
B435B-18	73.79	86.83	9.958	0.144 74	0.012 01	0.020 2	0.000 48	137.3	10.66	128.9	3.02
B435B-19	413.6	483.36	38.76	0.125 26	0.002 14	0.020 16	0.000 19	119.8	1.94	128.7	1.17
B435B-20	166.27	297.72	17.921	0.126 3	0.003 59	0.020 07	0.000 21	120.8	3.23	128.1	1.36
B435B-21	121.24	117.5	12.463	0.163 91	0.006 85	0.020 37	0.000 3	154.1	5.97	130	1.91
B435B-22	79.38	36.31	16.548	0.350 09	0.010 98	0.042 57	0.000 47	304.8	8.26	268.7	2.91
B435B-23	192.83	275.02	20.81	0.138 8	0.005 78	0.020 33	0.000 3	132	5.15	129.8	1.87
B435B-24	255.1	224.54	24.651	0.144 38	0.003 29	0.020 12	0.000 21	136.9	2.92	128.4	1.32

续表 1
Continued Table 1

测点	$w_B/10^{-6}$			元素比值				年龄值/Ma			
	U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
B435B-25	226.44	129.75	20.274	0.124 89	0.003 84	0.020 2	0.000 23	119.5	3.47	128.9	1.46
粗面安山岩 BHY438B											
B438B-01	191.48	352.33	25.93	0.285 51	0.007 94	0.020 09	0.000 26	255	6.27	128.3	1.62
B438B-02	124.89	69.95	14.868	0.143 49	0.003 39	0.019 43	0.000 17	136.1	3.01	124	1.08
B438B-03	155.42	85.97	23.2	0.309 35	0.009 7	0.020 34	0.000 3	273.7	7.52	129.8	1.86
B438B-04	495.64	890.46	56.12	0.193 2	0.003 46	0.020 01	0.000 17	179.4	2.94	127.7	1.06
B438B-05	486.52	1 182.49	59.55	0.179 9	0.002 86	0.020 31	0.000 16	168	2.46	129.6	1.01
B438B-06	247.58	566.24	31.97	0.215 6	0.003 39	0.020 21	0.000 16	198.2	2.84	129	1.03
B438B-07	161.27	242.11	19.465	0.195 45	0.006 58	0.020 16	0.000 24	181.3	5.59	128.7	1.5
B438B-08	329.25	736.33	39.81	0.141 27	0.002 66	0.019 81	0.000 16	134.2	2.37	126.4	0.99
B438B-09	248.86	239.18	25.88	0.198 25	0.004 95	0.021 23	0.000 21	183.6	4.19	135.4	1.31
B438B-10	200.05	181.88	21.471	0.148 88	0.003 57	0.019 58	0.000 18	140.9	3.16	125	1.13
B438B-11	213.91	396.38	27.28	0.364 85	0.005 26	0.019 93	0.000 17	315.8	3.91	127.2	1.1
B438B-12	325.87	613.61	36.96	0.205 15	0.004 21	0.019 81	0.000 18	189.5	3.55	126.4	1.17
B438B-13	309.09	230.38	33.56	0.159 18	0.003 08	0.019 86	0.000 17	150	2.7	126.7	1.06
B438B-14	207.74	401.5	28.42	0.157 02	0.003 96	0.019 79	0.000 19	148.1	3.47	126.3	1.18
B438B-15	108.96	152.29	14.867	0.143 45	0.004 55	0.019 83	0.000 2	136.1	4.04	126.6	1.27
B438B-16	57.88	60.91	7.406	0.277 43	0.012 64	0.019 97	0.000 35	248.6	10.04	127.5	2.19
B438B-17	433.74	447.66	44.52	0.143 73	0.003 15	0.020 08	0.000 17	136.4	2.8	128.2	1.09
B438B-18	208.88	381.67	30.94	0.193 26	0.004 93	0.020 05	0.000 2	179.4	4.19	127.9	1.24
B438B-19	117.44	219.88	16.569	0.260 83	0.008 4	0.019 99	0.000 27	235.3	6.76	127.6	1.7
B438B-20	426.37	494.21	44.19	0.175 17	0.003 58	0.02	0.000 17	163.9	3.09	127.6	1.09
B438B-21	282.34	202.58	30.91	0.146 47	0.003	0.020 07	0.000 17	138.8	2.65	128.1	1.05
B438B-22	245.66	456.19	32.31	0.178 63	0.004 04	0.020 09	0.000 18	166.9	3.48	128.3	1.16
B438B-23	232.34	164.04	24.9	0.219 15	0.004 09	0.019 66	0.000 17	201.2	3.41	125.5	1.1
B438B-24	209.4	152.52	26.31	0.146 91	0.002 96	0.020 17	0.000 16	139.2	2.62	128.7	1.04
B438B-25	155.31	65.92	17.8	0.163 66	0.004 68	0.020 07	0.000 2	153.9	4.08	128.1	1.25

MSWD = 0.2 (图 4d) 样品 BHY438B 剔除了 2 个明显偏离点, 剩余 23 个点的加权平均年龄为 127.6 ± 0.5 Ma, MSWD = 1.1 (图 4f)。

5 讨论

5.1 金刚台组火山活动的时间

有关金刚台组火山岩的年代学资料相对匮乏, 在此以前, 仅有王岳军等(2002)获得了一个该组粗面岩的 K-Ar 年龄 146.8 ± 2.3 Ma 和一个基性岩脉的 K-Ar 年龄 140.7 ± 2.2 Ma。对于与这套火山岩伴生的燕山期岩体, 赵新福等(2007)测得古碑花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 125 ± 3 Ma, 徐晓春等(2009)用黑云母和角闪石单矿物的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测得金寨银山矿区内的中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩和细晶闪长岩脉的年龄分别为 136.8 ± 1.6 Ma、 130.4 ± 1.2 Ma 和 125.4 ± 1.0 Ma。本文测得两个火山岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别

为 128.8 ± 0.7 Ma 和 127.6 ± 0.5 Ma, 测得紧邻火山岩产出的正长斑岩的年龄为 129.2 ± 0.7 Ma。这 3 组年龄结果在误差范围内近于一致, 说明金刚台组火山岩和紧邻火山岩的正长岩是在很短的时间内形成的。该年龄值处在大别-苏鲁造山带内晚中生代岩浆活动峰值区间内(128 Ma)(Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Ge *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 1998; Bryant *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 陈廷愚等, 1991; 陈江峰等, 1995; 魏春景等, 2000; 刘敦一等, 2002; 薛怀民等, 2002, 2011; 马昌前等, 2003; 谢智等, 2004; 赵新福等, 2007; 赵子福等, 2004, 2009; 周红升等, 2009), 可能意味着它们是在相同的动力学条件下形成的。

5.2 与北淮阳东段毛坦厂组火山岩的对比

河南地调院在 80 年代初进行 1:20 万商城幅填图工作时, 曾用金刚台组火山岩与毛坦厂组火山岩进行了岩性上的对比, 并因它们岩性的相似性而确

定了金刚台组火山岩“晚侏罗世”的年龄^①。在岩石化学成分上,毛坦厂组火山岩主要由粗安质、粗面质、安山质、流纹质的中偏碱性火山岩组成(邱检生等,2002,2004),这与金刚台组火山岩的化学类型相似(据作者未发表资料)。在岩相学上,毛坦厂组火山岩由熔岩、火山碎屑岩、火山通道相和火山沉积相的岩石组成,与金刚台组相比,毛坦厂组火山岩的火山沉积相岩石更为发育,而金刚台组火山岩的火山通道相更为发育。在喷发类型上,金刚台组和毛坦厂组火山岩的喷发类型十分相似,均以中心式的剧烈喷发为主。在各自的形成年龄上,毛坦厂组火山岩的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为 124.1 ± 0.7 Ma(周泰信等,1992),本文获取的两个金刚台组火山岩年龄分别为 128.8 ± 0.7 Ma、 127.6 ± 0.5 Ma。综合分析可以发现,北淮阳金刚台组火山岩和毛坦厂组火山岩在岩石组合、火山活动类型以及成岩年龄上都十分吻合,由此可以推测在早白垩世,北淮阳地区发生过一次大规模的火山活动,此次火山活动以中心式喷发为特征,范围绵延区内东西部,直接导致了金刚台组和毛坦厂组火山岩的形成。但由于两者构造环境的差异,位于大别造山带前陆盆地的毛坦厂组火山岩分布区,接受了来自大别造山带抬升剥蚀所形成的碎屑物质沉积(张明利等,2002;张艳等,2006),而位于造山带腹地的金刚台组,则更多地保留了锥形火山群地貌,造成了两者在火山地貌上的差异。

5.3 区域岩浆作用年代学格架

大别-苏鲁造山带在晚中生代经历了大规模的岩浆活动,近年来越来越多的年代学资料证明活动的时间集中在早白垩世115 Ma~148 Ma之间约30 Ma年间(陈江峰等,1995;葛宁洁等,1999;李曙光等,1999;王岳军等,2002;Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2007)。赵子福等(2009)总结前人资料发现,大别-苏鲁的早白垩世岩浆岩形成于111~143 Ma,峰期在125~130 Ma。北淮阳地区的5个火山构造单元中,东段的舒城-霍山火山沉积盆地和晓天-磨子潭火山沉积盆地积累了若干年代学资料,如周泰信等(1992)测得毛坦厂组火山岩黑云母粗面岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为 124.1 ± 0.7 Ma,杨祝良等(1999)测得响洪甸组碱长正长岩

的锆石 U-Pb 年龄为 122.3 Ma,碱长正长岩的 U-Pb 年龄为 136.1 Ma;王岳军等(2002)测得毛坦厂组 5 组火山岩样品的 K-Ar 年龄分别为 148.8 ± 2.5 Ma、 146.5 ± 2.3 Ma、 144.8 ± 2.3 Ma、 138.3 ± 2.2 Ma、 132.2 ± 2.1 Ma,测得晓天组 2 组火山岩样品的 K-Ar 年龄分别为 130.4 ± 2.1 Ma、 116.2 ± 1.8 Ma,测得金刚台组 2 组火山岩样品的 K-Ar 年龄分别为 146.8 ± 2.3 Ma、 140.7 ± 2.2 Ma,夏群科等(2003)测得晓天组玄武岩的锆石 U-Pb SIMS 年龄为 130 ± 2 Ma,安山岩锆石 U-Pb SIMS 年龄为 133 ± 3 Ma。从以上年龄不难看出,限制于 K-Ar 法测年的精确性,K-Ar 法得到的区内各组火山岩年龄比较分散,而精度较高的 Ar-Ar 法、锆石 U-Pb 法和 SIM 锆石 U-Pb 法所得到的年龄较为集中,大致分布在大别-苏鲁中生代岩浆活动的峰值年龄 125~130 Ma 附近。本文测得两个金刚台组火山岩年龄分别为 128.8 ± 0.7 Ma 和 127.6 ± 0.5 Ma,紧邻火山岩产出的正长斑岩脉年龄为 129.2 ± 0.7 Ma,与大别-苏鲁中生代岩浆活动年龄峰值一致,且与北淮阳东部地区的火山岩年龄数据十分接近。

虽然近年来对北淮阳地区中生代岩浆活动机制的研究尚存争议,特别是中生代以来太平洋板块对中国东部大陆的持续俯冲对远离东部沿海的北淮阳中生代火山岩形成演化的影响未明,但是本文测年结果再次表明,在华北-扬子碰撞后期,北淮阳东、西部地区广泛发育的火山活动,在时间与苏鲁-大别碰撞后中生代岩浆活动有高度一致性,因此北淮阳中生代火山岩在成因上可能主要受到华北-扬子板块碰撞后的弧后拉张作用控制。

6 结论

(1) 本文测得两个北淮阳金刚台组火山岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 128.8 ± 0.7 Ma 和 127.6 ± 0.5 Ma,紧邻火山岩产出的正长斑岩的年龄为 129.2 ± 0.7 Ma,表明该组火山岩是在早白垩世较短的时间内喷发形成的,喷发过程伴随着大规模的岩浆侵入。

(2) 金刚台组火山岩和东部的毛坦厂组火山岩在岩石组合、成岩年龄上十分接近,仅在火山地貌存

① 河南省区调队,1980,1:20 万商城幅区调报告。

在明显差异,推测两组火山岩形成于同一期岩浆活动,仅因所处构造环境的不同而划分为两组火山岩。

(3) 本文测得的金剛台组火山岩成岩年龄与北淮阳东部地区的火山岩年龄十分接近,且与近年来测得的大别-苏鲁岩浆作用的年龄峰值一致,说明北-扬子板块碰撞后的弧后拉张作用是北淮阳中生代火山岩在主要成因。

致谢 锆石的 U-Pb 定年是在北京大学地球与空间科学学院马芳老师的指导下完成的,在此表示衷心的感谢。

References

- Bryant D L, Ayers J C, Gao S, *et al.* 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and evolution of the Northern Dabie Complex, east central China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116: 698~717.
- Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Liu Shunsheng, *et al.* 1995. Dabie orogenic belt cooling ages determined by the ^{40}Ar - ^{39}Ar and fission track dating [J]. *Science in China (Series B)*, 25(10): 1086~1092 (in Chinese).
- Chen Tingyu, Niu Baogui, Liu Zhigang, *et al.* 1991. Geochronology of Yanshanian magmatism and metamorphism in the hinterland of the Dabie mountains and their geologic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 6(4): 329~336 (in Chinese).
- Compson W, Williams S, Kirschvink L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. *Geol. Soc. London*, 149: 171~184.
- Ge Ningjie, Hou Zhenhui, Li Huimin, *et al.* 1999. Zircon U-Pb ages of mafic-ultramafic rocks from Shacun, Yuexi Dabi [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(19): 2110~2114 (in Chinese).
- Ge N, Wu W, Liu B, *et al.* 1998. U-Pb zircon ages of Tianzhushan granites in the eastern Dabie orogen and their geological implications [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 7(4): 521~525.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215~230.
- Hoskin P and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic Petrogenesis [A]. Hancher J M and Hoskin P W O. *Zircon* [C]. Washington D C: Rev. Mineral. Geochem Mineralogical Society of America, 53: 27~62.
- Huang Fang, Li Shuguang, Dong Feng, *et al.* 2007. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China [J]. *Lithos*, 96: 151~169.
- Li Shuguang, Hong Ji'an and Li Huimin. 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite gabbro intrusions in dabie mountains and their geological implication [J]. *Geological Jour. of Chinese Universities*, 5(3): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- 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(2): 217~221 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wencan, Sun Shanping and Li Jiazhen. 1997. Tectonic characteristics of Late Jurassic Jingangtai Formation volcanic rocks in the north of Dabie mountains and its lithic facies [J]. *Geoscience*, 11(2): 108~114 (in Chinese).
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. *Lithos*, 45: 431~456.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, *et al.* 2003. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites [J]. *Science in China (Series D)*, 33(9): 817~827 (in Chinese).
- Qiu Jiansheng, Jiang Shaoyong, Zhang Xiaolin, *et al.* 2004. Petrogenesis of K-rich volcanic rocks on the northern and southern Sides of the Dabie-Sulu orogenic belt, eastern China: constraints from trace elements and Sr-Nd-Pb isotopes [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 255~262 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Liu Hong, *et al.* 2002. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie Orogenic belt: geochemistry and petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 319~330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 2609~2636.
- Wang Yuejun, Fan Weiming and Guo Feng. 2002. K-Ar dating of late Mesozoic volcanism and geochemistry of volcanic gravels in the North Huaiyang Belt, Dabie orogen: Constraints on the stratigraphic framework and exhumation of the northern Dabie orthogneiss complex [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(20): 1528~1534 (in Chinese).
- Wei Chunjing, Zhang Lifei and Wang Shiguang. 2000. Mesozoic high-K granitic rocks and its geological implication of Dabie mountains, Anhui province [J]. *Science in China (Series D)*, 30(4): 335~363 (in Chinese).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U/Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554~1569.
- Xia Qunke, Zheng Yongfei and Delouie E. 2003. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dabieshan [J]. *Geological Jour. of Chinese Universities*, 9(2): 163~171 (in Chinese).
- Xie Zhi, Gao Tianshan and Chen Jiangfeng. 2004. Multi-stage evolution of gneiss from north Dabie: Evidence from zircon U-Pb chronology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1963~1969 (in Chinese).
- Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, *et al.* 2006. Mineral isotope evidence for

- the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen [J]. *Chem. Geol.*, 231 : 214~235.
- Xu H, Ma C and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry [J]. *Chem. Geol.*, 240 : 238~259.
- Xu H, Ma C and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry [J]. *Chem. Geol.*, 240 : 238~259.
- Xu Xiaochun, Lou Jinwei, Lu Sanming, *et al.* 2009. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 28(5) : 621~632 (in Chinese with English abstract).
- Xue F, Rowley D B, Tucker R D, *et al.* 1997. U-Pb zircon ages of granitoids rocks in the north Dabie complex, eastern Dabie Shan, China [J]. *Journal of Geology*, 105 : 744~753.
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Liu Xiaochun. 2002. U/Pb zircon dating for Cretaceous adakitic volcanic rocks in eastern part of the North Dabie Mountains [J]. *Geochimica*, 31(5) : 455~463 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Zhao Xun, *et al.* 2011. Characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Tianzhushan granitoid intrusive body, southeastern Dabie orogen [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5) : 935~950 (in Chinese with English abstract).
- Yang Kunguang, Ma Changqian, Xu Changhai, *et al.* 1999. Different uplifting between Beihuaiyang tectonic belt and Dabie orogen [J]. *Science in China (Series D)*, 29(2) : 97~103 (in Chinese).
- Yang Zeqiang, Peng Yi, Wan Shouquan, *et al.* 2006. Structure and facies of the volcanic rocks in Jingangtai National Geo-Park, Dabie Mountain [J]. *Geological Survey and Research*, 29(2) : 86~91 (in Chinese).
- Yang Zhuliang, Shen Weizhou, Shen Jialin, *et al.* 1999. Isotopic chronology of Xianghongdian complex in northern Dabie Mountain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(4) : 378 (in Chinese).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14) : 2411~2421 (in Chinese).
- Zhang Mingli, Jin Zhijun, Tang Liangjie, *et al.* 2002. The review and outlook of the study of foreland basin [J]. *Geological Review*, 48(2) : 214~220 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng. 1998. The Mesozoic volcanic activity and its tectonic background in Beihuaiyang Area [J]. *Geology of Anhui*, (3) : 12~17 (in Chinese).
- Zhang Peng, Zhang Aimin and Liu Wencan. 1997. The petrochemistry, geochemistry and tectonic environment of Late Jurassic volcanic rocks in Beihuaiyang [J]. *Geoscience*, 11(2) : 115~123 (in Chinese).
- Zhang Yan, Wang Pujun, Cheng Rihui, *et al.* 2006. Geochemistry of Late Jurassic volcanic rocks of Maotanchang Formation and its indication to Hefei Basin [J]. *Global Geology*, 25(3) : 237~244 (in Chinese).
- Zhao Xinfu, Li Jianwei, Ma Changqian, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of the Gubei granodiorite, north Huaiyang: Implications for Mesozoic tectonic transition of the Dabie orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6) : 1392~1402 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zifu and Zheng Yongfei. 2009. Remelting of subducted continental lithosphere: The genesis of Mesozoic magmatic rocks in Sulu-Dabie Orogen [J]. *Science in China (Series D)*, 39(7) : 888~909 (in Chinese).
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, *et al.* 2004. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks in the Dabie Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5) : 1051~1174 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongsheng, Ma Changqian and Chen Ling. 2009. Petrogenesis and tectonic implication of Yanzigang alkali pluton in the Dabie orogenic belt: Constraints from the zircon U-Pb ages and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5) : 1079~1091 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taixi, Chen Jiangfeng and Li Xueming. 1992. ^{39}Ar - ^{40}Ar isotopic age of the intrusion from Shuhuo Syenite Belt, Anhui [J]. *Geology of Anhui*, (1) : 4~11 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 1995. 大别造山带冷却年龄的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和裂变径迹年龄测定 [J]. *中国科学(B辑)*, 25(10) : 1086~1092.
- 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 等. 1991. 大别山腹地燕山期岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义 [J]. *地质学报*, 64(4) : 329~336.
- 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 1999. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄 [J]. *科学通报*, 44(19) : 2110~2114.
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *高校地质学报*, 3(3) : 351~355.
- 刘敦一, 汤加富, 周存亭, 等. 2002. 大别造山带核部桃源火山岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *地质学报*, 76(2) : 217~221.
- 刘文灿, 孙善平, 李家振. 1997. 大别山北麓晚侏罗世金剛台组火山岩地质及岩相构造特征 [J]. *现代地质*, (2) : 108~114.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 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*, 33(9) : 817~827.
- 邱检生, 蒋少涌, 张晓琳, 等. 2004. 大别-鲁苏造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩的成因: 微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素制约 [J]. *地球学报*, 25(2) : 255~262.
- 邱检生, 王德滋, 刘洪, 等. 2002. 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*, 18(3) : 319~330.
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋. 2002. 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 J]. 科学通报, (20): 1528~1534.
- 魏春景, 张立飞, 王式洸. 2000. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩及其地质意义[J]. 中国科学, 30(4): 355~363.
- 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]. 高校地质学报, (2): 163~171.
- 谢智, 高天山, 陈江峰. 2004. 北大别片麻岩的多阶段演化: 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 科学通报, 49(16): 1653~1659.
- 徐晓春, 楼金伟, 陆三明, 等. 2009. 安徽金寨银山钼-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定[J]. 矿床地质, 28(5): 621~632.
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学[J]. 地球化学, 31(5): 455~463.
- 薛怀民, 马芳, 赵逊, 等. 2011. 大别山造山带东南部天柱山花岗岩类侵入体的特征及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 935~950.
- 杨坤光, 马昌前, 许长海, 等. 1999. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (2): 97~103.
- 杨泽强, 彭翼, 万守全, 等. 2006. 大别山金剛台国家地质公园的火山岩相构造[J]. 地质调查与研究, (2): 86~91.
- 杨祝良, 沈渭洲, 沈加林, 等. 1999. 大别山北缘响洪甸碱性杂岩体同位素地质年代学[J]. 地质学报, 74(4): 378.
- 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[J]. 科学通报, 48(14): 2411~2421.
- 张明利, 金之钧, 汤良杰, 等. 2002. 前陆盆地研究的回顾与展望[J]. 地质论评, 48(2): 214~220.
- 张鹏. 1998. 北淮阳地区中生代火山活动及其构造背景[J]. 安徽地质, (3): 12~17.
- 张鹏, 张爱民, 刘文灿. 1997. 北淮阳晚侏罗世金剛台组火山岩岩石化学和地球化学特征及构造环境[J]. 现代地质, (2): 115~123.
- 张艳, 王璞珺, 程日辉, 等. 2006. 合肥盆地上侏罗统毛坦厂组火山岩地球化学特征及其对盆地性质的指示作用[J]. 世界地质, 25(3): 237~244.
- 赵新福, 李建威, 马昌前, 等. 2007. 北淮阳古碑花岗岩闪长岩就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[J]. 岩石学报, 23: 1392~1402.
- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (7): 888~909.
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 等. 2004. 大别山中生代中酸性岩浆岩锆石 U-Pb 定年、元素和氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 20(5): 1151~1174.
- 周红升, 马昌前, 陈玲. 2009. 大别造山带研子岗碱性岩体成因及其构造意义: 锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约[J]. 岩石学报, 25(5): 1079~1091.
- 周泰儒, 陈江峰, 李学明. 1992. 安徽霍舒正长岩带侵入体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法同位素地质年龄[J]. 安徽地质, (1): 4~11.