

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.04.001

引用格式:杨义忠,王徽,蔡杨,等.北淮阳东段板桥岩体地球化学特征及同位素年代学研究[J].华东地质,2018,39(4):241-251.

北淮阳东段板桥岩体地球化学特征 及同位素年代学研究

杨义忠,王徽,蔡杨,柳丙全

(安徽省地质调查院,合肥 230001)

摘要:位于北淮阳东段的板桥岩体为凌家冲杂岩体的重要组成部分,岩石类型为花岗闪长岩。该岩体偏铝质、富碱、高钾、贫钙,属于高钾钙碱性系列岩石;稀土元素含量中等, $(La/Yb)_N$ 与 HREE/LREE 值较高,重稀土元素相对亏损,钕弱负异常,属轻稀土元素富集型;大离子亲石元素 Rb、Ba、K、La、Nd 富集,高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 亏损。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得板桥岩体 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 129.0 ± 1.9 Ma,表明该岩体形成于燕山晚期,是早白垩世岩浆活动的产物。板桥花岗闪长岩形成于后碰撞的伸展构造环境。

关键词:地球化学;锆石 U-Pb 年龄;板桥岩体;北淮阳;安徽

中图分类号:P588.12;P597

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2018)04-241-11

大别超高压变质带是世界上规模最大的超高压变质带之一^[1],出露大面积白垩纪花岗岩。前人对大别地区的研究主要集中于扬子板块与华北板块陆-陆碰撞造山以及高压-超高压变质作用等热点问题^[2-3]。随着光山县千鹅冲、商城汤家坪、新县大银尖、罗山县母山、肖畈和金寨县沙坪沟等大型钼矿床的相继发现,区内钼矿及其与成矿有关的花岗岩受到越来越多学者的关注^[4-7]。

大别造山带东北缘北淮阳地区中生代花岗岩类沿金寨、霍山、舒城一线呈 NW 向广泛出露^[8],研究其地球化学特征及同位素年代学特征,探讨岩石成因及构造环境,对于进一步研究北淮阳地区乃至大别造山带岩浆活动具有重要意义。众多学者对北淮阳东段岩浆活动进行了岩石成因及同位素年代学研究^[9-15],但研究对象基本集中于东(舒城)和西(金寨)两侧,而对中部(霍山—晓天)出露的侵入岩研究相对较少。本文以晓天地区板桥岩体为研究对象,在野外地质调查和岩相学观察的基础上,对岩石主量元素、微量元素和稀土元素进行分析,

采用高精度激光等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术,对板桥花岗闪长岩体中的单颗粒锆石进行 U-Pb 同位素年龄测定,探讨该区岩浆活动构造背景,为进一步研究该区成矿作用及成矿规律提供参考。

1 区域地质概况

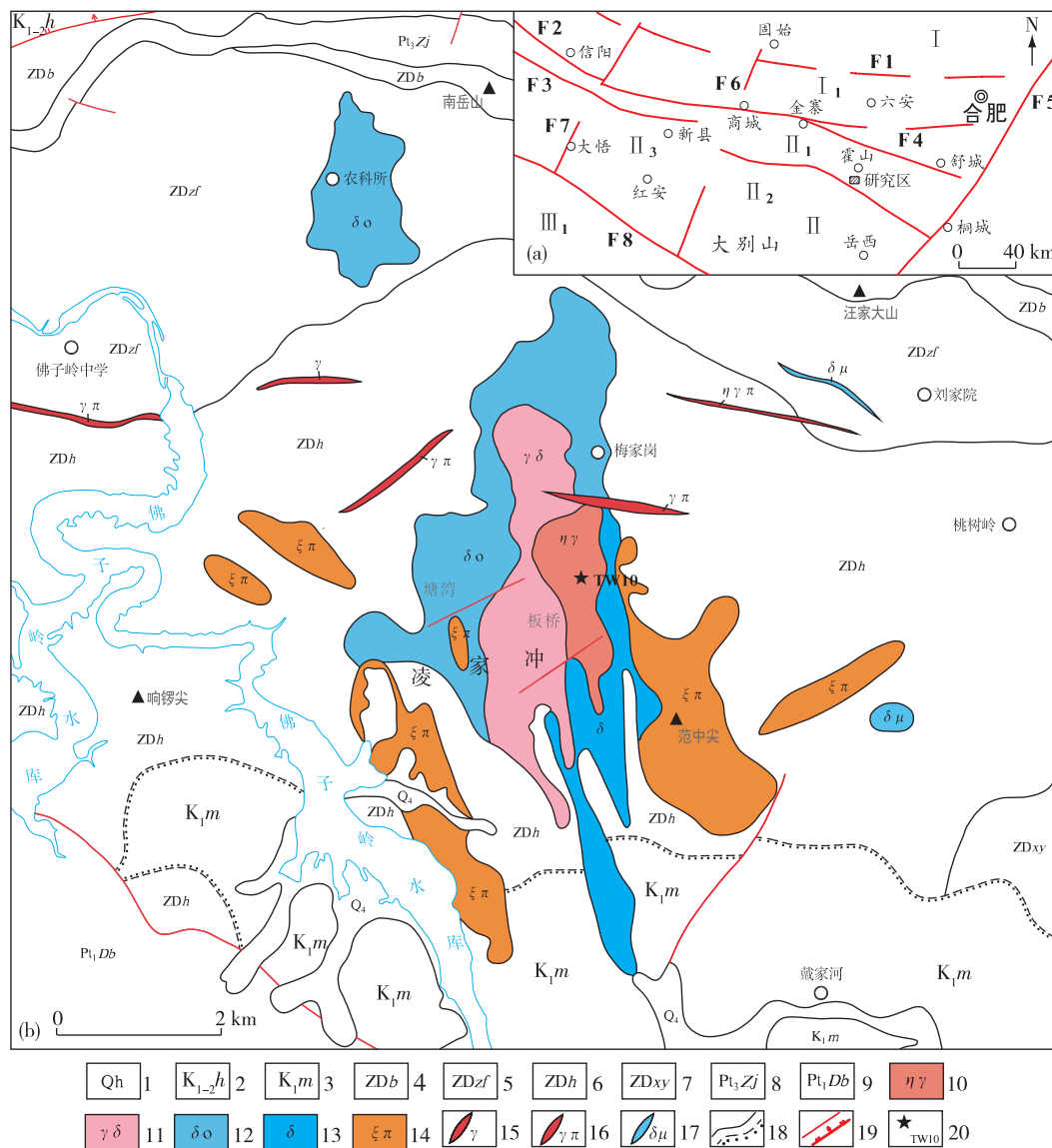
安徽北淮阳地区位于大别造山带东北缘,东临郯庐断裂,总体为断裂围限的褶皱带,构造位置重要,习惯称之为北淮阳构造带^[16-17]。扬子板块和华北板块于印支期发生碰撞^[18-19],导致随后的陆内俯冲或陆壳叠覆。北淮阳构造带属于仰冲板块的一部分^[16-17],现已强烈缩短,宽仅几十千米,大体上分布在桐柏—桐城断裂以北、信阳—六安断裂以南地区,向西延入湖北省和河南省界内,东止于郯庐断裂带(图 1),通常以商城—麻城断裂为界,将北淮阳构造带分为东段(安徽界内)和西段(河南界内)。

根据北淮阳构造带岩石、地层、构造演化特征,自下而上划分为 4 个(构造)岩石地层单位,分别为新元古代庐镇关岩群(苏家河群、红安群)、新元古

* 收稿日期:2017-12-07 修订日期:2018-03-12 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“安徽北淮阳地区成矿规律与资源潜力调查(编号:1212011220547)”项目资助。

第一作者简介:杨义忠,1965 年生,男,高级工程师,主要从事岩石学和地球化学研究。



(a): I. 华北板块; I₁. 华北板块南缘逆冲构造带; II. 桐柏—大别构造带; II₁. 北淮阳裂陷复合褶皱带; II₂. 桐柏—大别裂解岛基底; II₃. 桐柏—大别中元古代岛弧海盖层; III₁. 扬子板块北缘逆冲构造带; F1. 固始—合肥断裂; F2. 信阳—六安断裂; F3. 桐(柏)—桐(城)断裂; F4. 龟(山)—梅(山)断裂; F5. 郟城—庐江断裂; F6. 商城—麻城断裂; F7. 大悟断裂; F8. 浠水断裂。(b): 1. 第四系; 2. 白垩纪黑石渡组; 3. 白垩纪毛坦厂组; 4. 泥盆纪—震旦纪八道尖岩组; 5. 泥盆纪—震旦纪诸佛庵岩组; 6. 泥盆纪—震旦纪黄龙岗岩组; 7. 泥盆纪—震旦纪祥云寨岩组; 8. 新元古代郑家冲片麻岩; 9. 古元古代大别变质杂岩; 10. 二长花岗岩; 11. 花岗闪长岩; 12. 石英闪长岩; 13. 闪长岩; 14. 正长斑岩; 15. 花岗岩脉; 16. 花岗斑岩脉; 17. 闪长玢岩脉; 18. 实测整合/不整合岩层界线; 19. 性质不明断层/正断层; 20. 采样位置及编号。

图 1 北淮阳地区区域构造位置图(a, 据文献[20]改编)及板桥地区地质简图(b, 据 1:5 万霍山县、磨子潭幅地质图改编)

Fig. 1 Map showing regional structural position of the North Huaiyang area (a) and geology of the Banqiao area (b)

代—古生代佛子岭岩群(信阳群)、石炭纪杨山群和中生代—新生代未变质的陆相盆地堆积^[20]。带内新元古代、中生代岩浆岩发育,与成矿关系密切的主要为燕山期岩浆岩。沿金寨—霍山—舒城一线,

晚中生代侵入岩、火山岩呈 NWW 向出露,其分布方向与大别造山带构造线一致,并严格受深大断裂带控制^[21]。

板桥花岗闪长岩体分布于霍山县板桥、佛兴庵

一带,为凌家冲杂岩体的组成部分,出露面积约 2.70 km^2 ,主要以岩瘤形式侵入到佛子岭岩群黄龙岗岩组石英片岩中。岩体呈近 SN 向展布,明显受近 SN 向断裂控制。岩体周围广泛分布与金矿密切相关的中生代火山岩,东西两侧分布若干金矿及多金属矿^[22-24]。

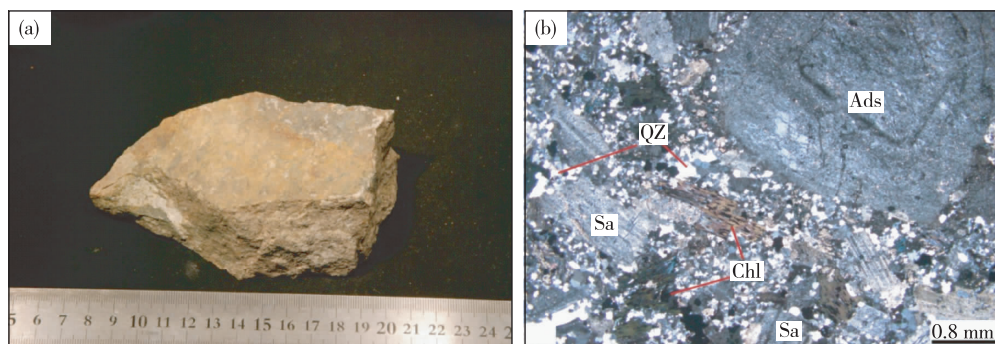
2 样品特征及分析测试

2.1 样品特征

样品 TW10(坐标: $31^{\circ}19'43'' \text{ N}$, $116^{\circ}19'25'' \text{ E}$) 为地表样,采于板桥附近,采样位置如图 1 所示,手标本及薄片见图 2。岩石类型为花岗闪长岩,灰白

色,中粒不等粒花岗结构。主要矿物为斜长石 $45\% \sim 50\%$,钾长石 $15\% \sim 25\%$,石英 $20\% \sim 23\%$,角闪石 $3\% \sim 10\%$,黑云母 $4\% \sim 8\%$;副矿物为磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石。斜长石多为更中长石,自形一半自形,粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$,具环带和双晶;石英和钾长石呈他形粒状,粒径为 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ 。

电子探针(EPMA)分析显示,板桥岩体主要矿物为正长石、中长石和石英。正长石 $\text{Or} = 73.9 \sim 90.6$, $\text{Ab} = 9.1 \sim 25.8$, $\text{An} = 0.1 \sim 0.4$; 中长石 $\text{An} = 31 \sim 33$, $\text{Ab} = 61.4 \sim 65.4$, $\text{Or} = 2.9 \sim 3.8$ 。由二长石温度计公式^[25]计算得到板桥岩体形成的压力为 $0.5 \sim 0.7 \text{ GPa}$,温度为 $628 \sim 689^{\circ}\text{C}$,推测板桥岩体形成深度可能为 $15 \sim 20 \text{ km}$ 。



Ads. 中长石; Chl. 绿泥石(黑云母假象); Qz. 石英; Sa. 正长石

图 2 板桥花岗闪长岩手标本照片(a)与显微照片(b)

Fig. 2 Hand specimen photo (a) and microscopic characteristics (b) of the Banqiao granodiorite

2.2 分析测试

样品 TW10 的主量元素、稀土元素和微量元素在安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源检测中心)完成测试。主量元素采用原子吸收法、容量法分析,除 SiO_2 采用碱熔法外,其他氧化物采用酸熔法测定,分析精度优 2% 。稀土元素、微量元素采用美国 Thermo X Series 2 电感耦合等离子体质谱联用仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 3% 。

锆石单矿物分选在河北省廊坊市地科勘探技术服务有限公司完成。将岩石样品破碎至自然粒度,经摇床、淘洗、电磁分选及重液分选后分离出锆石单矿物,在双目镜下挑纯,在北京锆年领航科技有限公司完成制靶、照相。

锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。以 He 为载气,激光剥蚀斑束直径为 $25 \mu\text{m}$,

频率为 10 Hz ,能量密度约 2.5 J/cm^2 。信号较小的 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{204}Pb 、 ^{204}Hg 、 ^{202}Hg 用离子计数器接收, ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 信号用法拉第杯接收。均匀锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度约 2% ,锆石标准定年精度和准确度约 1% 。LA-ICP-MS 剥蚀采样采用单点剥蚀方式,分析前用锆石激光 GJ-1 调试仪器,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127 为外标校正。采用 ICPMS DataCal 程序进行数据处理^[26],绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测,计算时剔除 ^{204}Pb 含量异常高的分析点,详细测试流程参见文献^[27]。样品分析过程中, Plesovice 锆石标准作为未知样品的分析结果为 $336.5 \pm 1.5 \text{ Ma}$,其对应的 U-Pb 年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$ ^[28]。

3 测试结果

3.1 主量元素地球化学

板桥花岗闪长岩主量、微量及稀土元素地球化学分析结果见表1。花岗闪长岩 SiO_2 含量为 63.41%~67.66%, 平均含量 65.51%; Al_2O_3 含量为 14.63%~15.37%, 平均含量为 15.00%。 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 7.08%~7.65%, 平均含量为 7.41%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 0.82~1.07, 平均含量为 0.91, 属 Na 质系列; 分异指数(DI)为 71.46~

83.05, 平均值为 76.26; 里特曼指数(σ)为 2.33~2.43, 平均值为 2.39, 属钙碱性岩; 铝指数(A/CNK)为 0.91~1.28, 平均为 1.01, 属偏铝质型; 碱度率(AR)为 2.19~2.92, 平均值为 2.46。在 SiO_2 -AR 变异图(图 3(a))中样品多数落入钙碱性系列区, 少数样品位于碱性系列区, 总体属钙碱性系列; 在硅-碱图(图 3(b))中样品落入亚碱质区; 在硅-钾图(图 3(c))中样品落入高钾钙碱性系列区; 在 A/NK-A/CNK 图解(图 3(d))中样品落入准铝质区和过铝质区, 总体属偏铝质型。因此, 板桥岩体为偏铝质、高钾钙碱性系列岩石。

表1 板桥花岗闪长岩主量、微量及稀土元素地球化学分析结果

Table 1 Chemical compositions, REE and trace element compositions of the Banqiao granodiorite

样品编号	$\omega_{\text{B}}/\%$														σ	AR	
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	LOI	Total			
凌 GS3	65.95	0.56	15.20	1.86	2.49	0.09	1.87	3.37	3.94	3.40	0.17	0.76	0.16	99.82	2.33	2.31	
h41	65.10	0.54	15.09	2.35	1.87	0.06	2.01	2.02	3.92	3.51	0.20	1.62	2.79	101.11	2.43	2.54	
h42	63.41	0.53	15.26	2.53	1.83	0.07	2.20	3.68	3.89	3.19	0.21	1.32	2.75	100.87	2.37	2.19	
h43	64.13	0.54	15.37	2.66	1.91	0.06	2.02	2.65	3.81	3.31	0.21	1.52	2.62	100.83	2.33	2.31	
h44	67.66	0.52	14.90	2.42	1.62	0.05	1.88	0.71	3.7	3.95	0.19	1.47	1.73	100.79	2.33	2.92	
h45	64.06	0.50	14.63	2.29	1.76	0.06	2.07	3.31	3.79	3.47	0.19	1.39	3.23	100.74	2.41	2.36	
样品编号	A/CNK	Mg [#]	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$										K/Rb	Rb/Sr	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$		
			Rb	Sr	Ba	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf	La			Ce	Pr	
凌 GS3	0.93	44.46	93.10	444.7	566.0	10.2	1.80	—	—	160.0	6.90	303.2	0.21	51.46	93.34	10.07	
h41	1.08	47.39	104.19	501.9	1 213.3	12.2	1.97	11.7	0.86	224.4	5.92	279.9	0.21	45.62	75.04	8.52	
h42	0.92	48.86	94.73	624.5	1 287.9	10.2	1.52	12.0	0.96	245.3	5.63	279.9	0.15	53.49	87.04	9.70	
h43	1.05	45.52	89.20	508.8	1 484.4	9.87	1.63	9.29	0.49	268.9	5.86	308.3	0.18	49.34	84.19	9.38	
h44	1.28	46.92	115.85	384.1	1 274.5	11.3	1.80	11.3	0.87	252.3	6.14	283.1	0.30	43.37	68.73	7.49	
h45	0.91	49.06	99.64	475.4	1 081	11.2	1.78	11.4	0.83	251.7	6.13	288.8	0.21	43.93	75.84	8.40	
样品编号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$												ΣREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y					
凌 GS3	35.67	6.81	1.39	5.03	0.71	3.64	0.75	1.94	0.3	2.20	0.34	16.23	213.65	13.33	16.78	0.69	
h41	31.96	5.01	1.12	4.41	0.64	3.28	0.62	1.77	0.29	1.83	0.27	17.09	180.39	12.75	17.87	0.71	
h42	35.87	5.62	1.33	5.06	0.71	3.69	0.71	2.00	0.32	1.99	0.30	20.02	207.81	13.07	19.29	0.75	
h43	35.35	5.58	1.33	5.03	0.71	3.79	0.72	2.06	0.32	2.02	0.30	19.62	200.12	12.38	17.5	0.75	
h44	27.59	4.49	1.03	3.95	0.59	3.06	0.6	1.73	0.28	1.75	0.27	16.75	164.95	12.48	17.73	0.73	
h45	31.97	5.05	1.17	4.47	0.65	3.36	0.66	1.86	0.30	1.86	0.28	18.01	179.78	12.39	16.91	0.74	

注: $\text{AR}=(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/[\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$; $\text{A/CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$

3.2 稀土元素及微量元素地球化学

板桥花岗闪长岩稀土元素总量 ΣREE 为 $(164.95\sim 213.65)\times 10^{-6}$, 平均值为 191.12×10^{-6} ; LREE/HREE 为 12.38~13.33, 平均值为 12.75; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 16.78~19.29, 平均值为 17.67, 稀土元素分馏程度较高; δEu 为 0.70~0.75, 平均值为 0.73,

铕具弱负异常。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 4(a))上呈右倾的平滑曲线, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 铕弱负异常。

板桥花岗闪长岩微量元素 K/Rb 为 295.0, Rb/Sr 为 0.20, Sr/Ba 为 0.43。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4(b))上, Ba、K、La、Nd、Zr、Hf

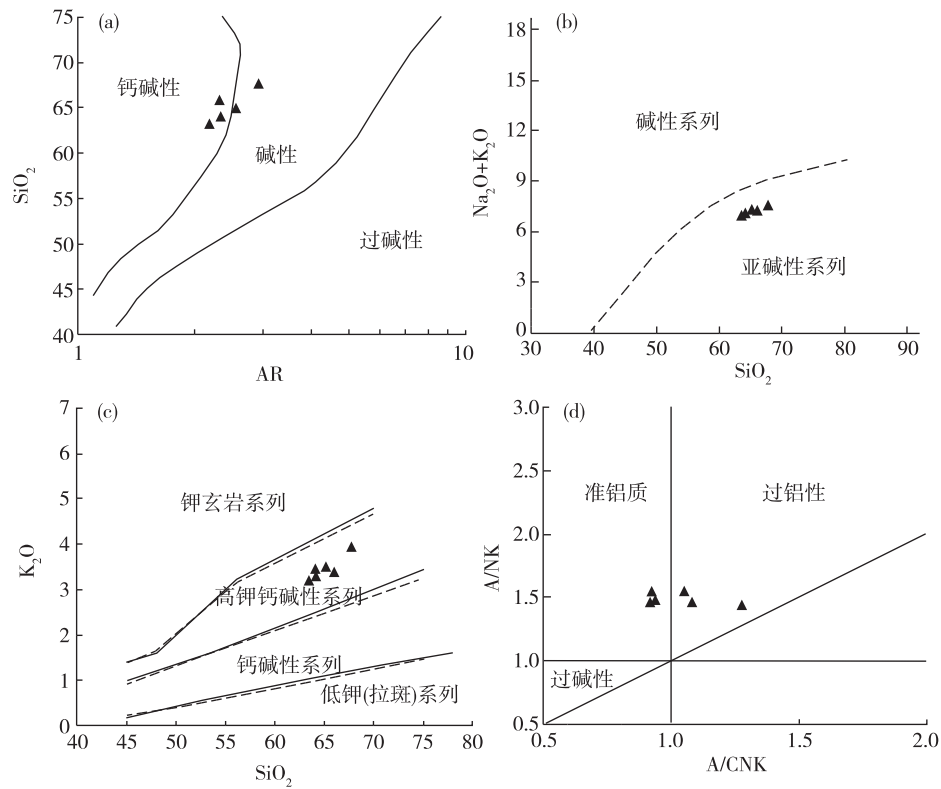


图 3 板桥岩体 AR-SiO₂ (a)、SiO₂-(Na₂O+K₂O) (b)、SiO₂-K₂O (c) 和 A/NK-A/CNK (d) 图解
 Fig. 3 Diagrams of AR-SiO₂ (a), SiO₂-(Na₂O+K₂O) (b), SiO₂-K₂O (c) and A/NK-A/CNK (d) of the Banqiao granodiorite

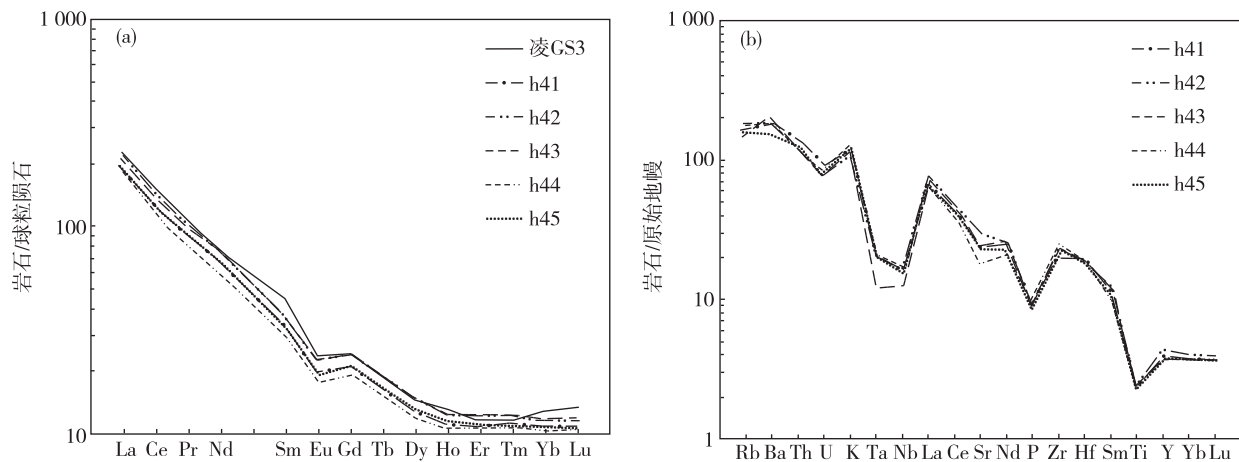


图 4 板桥花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a, 标准化值据文献[29])和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据文献[30])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace-element spider diagram (b) of the Banqiao granodiorite

明显富集, U、Nb、Ta、Sr、P、Ti 明显亏损, P、Ti 的亏损暗示存在磷灰石和钛铁矿的结晶分离作用。

总之, 板桥花岗闪长岩具有大离子亲石元素(LILE)富集、高场强元素(HFSE)亏损的特点。

在花岗岩 Rb-Sr-Ba 三角图(图略)中,样品均落入高 Ba-Sr 花岗岩区,说明板桥岩体属高钡—锆花岗岩类^[31]。随着岩体 SiO₂ 含量增加,呈现由相对富 Sr 向富 Ba 演化的趋势,与微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4(b))表现的特征一致,即随着岩浆演化,不相容元素趋于富集,相容元素逐渐亏损。

3.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学

板桥花岗闪长岩中的锆石均无色透明,以自形

短柱状为主。锆石阴极发光图像(图 5)显示,绝大多数锆石结晶良好,内部结构清晰,具有典型的岩浆振荡环带。锆石的 Th/U 值可以指示锆石成因^[32],岩浆锆石的 Th/U 值一般 >0.1 ,变质锆石的 Th/U 值一般 <0.1 ^[33]。由 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据(表 2)可知,锆石 Th/U 值为 0.80~2.62,均远 >0.1 ,说明锆石为岩浆成因,其结晶年龄可以代表板桥岩体的成岩年龄。

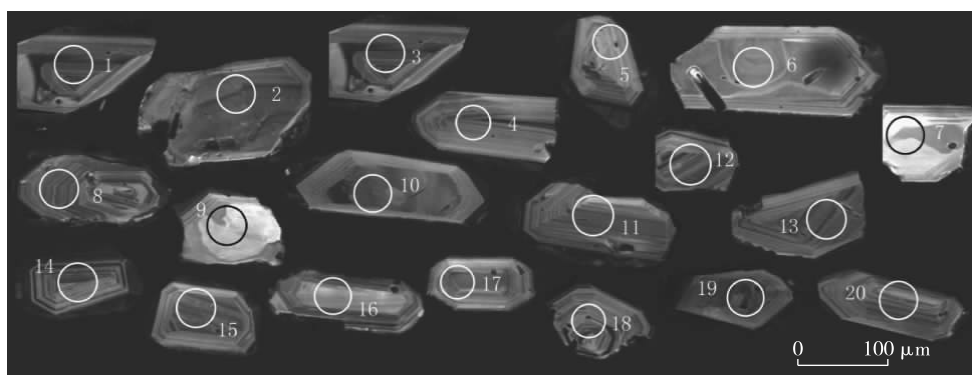


图 5 板桥岩体(TW10)锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 5 Cathodoluminescence images and testing positions of zircons from the Banqiao granodiorite (TW10)

表 2 板桥岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Banqiao granodiorite

点号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
TW10-1	0.91	0.052 2	0.014 3	0.137 6	0.033 5	0.019 9	0.001 0	294.5	538.8	127.3	6.2
TW10-2	0.98	0.049 8	0.009 2	0.156 2	0.022 6	0.023 4	0.001 9	187.1	385.1	149.4	11.7
TW10-3	1.37	0.054 4	0.007 2	0.145 8	0.013 7	0.020 2	0.001 5	387.1	300.0	128.9	9.7
TW10-4	1.12	0.050 2	0.002 7	0.137 9	0.007 2	0.020 1	0.000 3	205.6	124.1	128.3	1.6
TW10-5	1.03	0.054 3	0.032 1	0.145 7	0.075 7	0.020 7	0.002 1	383.4	962.9	132.0	13.6
TW10-6	1.19	0.057 3	0.010 0	0.162 1	0.026 7	0.020 8	0.001 1	505.6	392.5	132.5	6.8
TW10-7	1.35	0.050 7	0.009 0	0.153 7	0.028 5	0.021 9	0.000 8	233.4	357.4	139.9	5.3
TW10-8	1.23	0.053 9	0.007 1	0.148 6	0.017 9	0.020 4	0.000 6	368.6	298.1	130.3	4.1
TW10-9	1.03	0.083 3	0.009 9	0.227 1	0.027 5	0.020 7	0.002 2	1 275.9	229.2	132.1	13.6
TW10-10	1.43	0.053 5	0.004 5	0.142 1	0.011 5	0.019 4	0.000 4	353.8	190.7	123.8	2.6
TW10-11	2.62	0.147 6	0.004 9	0.404 3	0.013 9	0.020 0	0.000 4	2 318.2	56.3	127.4	2.5
TW10-12	0.99	0.051 6	0.005 5	0.145 1	0.044 4	0.019 9	0.004 1	264.9	47.2	127.0	25.9
TW10-13	0.80	0.057 9	0.010 1	0.138 3	0.017 0	0.018 4	0.001 2	524.1	395.3	117.4	7.6
TW10-14	1.33	0.068 4	0.004 1	0.191 1	0.010 8	0.020 7	0.000 4	879.6	124.8	132.0	2.3
TW10-15	1.29	0.050 4	0.008 0	0.142 5	0.021 1	0.020 9	0.001 4	213.0	329.6	133.1	8.9
TW10-16	1.59	0.049 9	0.003 2	0.139 3	0.008 5	0.020 4	0.000 3	190.8	148.1	130.1	2.1
TW10-17	1.99	0.117 8	0.009 0	0.359 3	0.026 4	0.022 5	0.000 5	1 924.1	132.4	143.3	3.3
TW10-18	1.50	0.053 5	0.003 5	0.152 9	0.009 7	0.020 8	0.000 4	350.1	150.9	132.5	2.5
TW10-19	1.21	0.054 2	0.007 9	0.151 5	0.021 3	0.020 7	0.000 8	376.0	333.3	132.0	5.3
TW10-20	1.25	0.049 4	0.004 3	0.142 7	0.030 0	0.020 5	0.002 8	168.6	192.6	131.0	17.8

测试的 20 粒锆石样品,除测点 6、9、11、13、14、17 具有明显偏老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄外,其余测点的 U-Pb 年龄和 Pb-Pb 年龄基本一致。在余下的 14 个测点中,测点 2 和测点 7 相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值明显超出了误差范围,故将其剔除。剔除以上 8 个测点,剩余 12 个测点的年龄谐和度较好,整体落在谐

和曲线上(图 6(a))。由表 2 和图 6 可知,板桥岩体 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄的范围为 $123.8 \pm 2.6 \text{ Ma} \sim 133.1 \pm 8.9 \text{ Ma}$,在 U-Pb 年龄谐和图上组成密集的一簇(图 6(a)), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $129.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (MSWD=0.64)(图 6(b)),代表板桥岩体的结晶年龄为早白垩世。

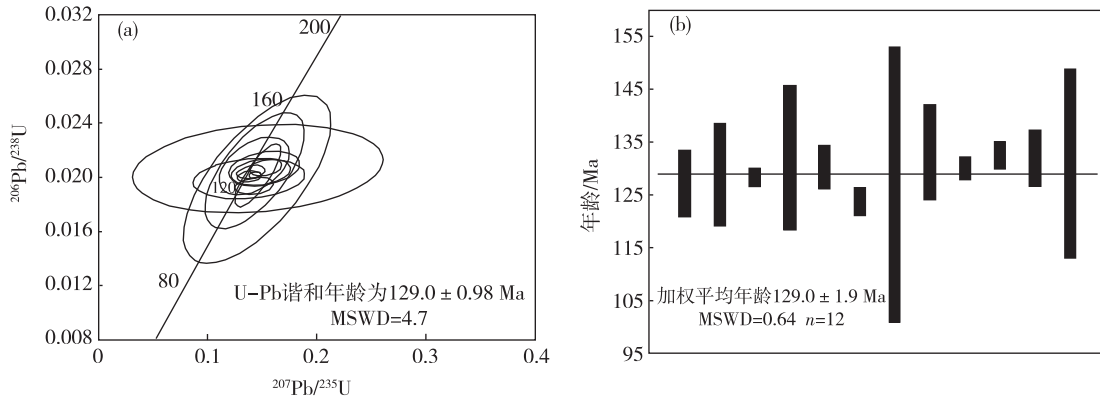


图 6 板桥岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 6 U-Pb concordia diagram (a) and weighted age (b) of zircons from the Banqiao granodiorite

4 讨论

4.1 形成时代

板桥花岗闪长岩(TW10)参与有效年龄计算的 12 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $123.8 \pm 2.6 \text{ Ma} \sim 133.1 \pm 8.9 \text{ Ma}$,跨度 $< 10 \text{ Ma}$,误差为 $1.6 \sim 25.9 \text{ Ma}$,由此得到岩体(TW10)的成岩年龄为 $129.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$,表明该岩体形成于燕山晚期,为早白垩世岩浆活动的产物。

北淮阳地区中生代岩浆活动均发生在早白垩世,成岩年龄集中于 $138 \sim 111 \text{ Ma}$ ^[2,13,34],岩浆活动分为 2 个旋回,分别为第一旋回钙碱性、钾玄岩系列和第二旋回碱性系列^[10,20]。中生代早期岩浆作用以大规模喷发伴随深成作用为特征,属高钾钙碱性和钾玄岩系列,是金、银、铅、锌多金属矿化的主要时期;晚期岩浆活动以深成岩为主,属碱性系列,是钼矿化的主成矿期^[10]。板桥花岗闪长岩为高钾钙碱性侵入岩,周边地区分布一系列金、铅锌多金属矿床(点),如东溪、郎岭湾、隆兴等金矿。因此,板桥岩体可能属于北淮阳中生代第一旋回侵入岩。

4.2 岩石成因

板桥花岗闪长岩具有较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含

量,富碱质,强烈富集 LILE 与 LREE,亏损 HFSE 与 HREE, Eu 负异常较弱,这些地球化学特征与该区西部古碑花岗闪长岩体^[34]类似。板桥花岗闪长岩具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值,平均值为 47.03,与古碑花岗闪长岩体的 $\text{Mg}^\#$ 相似。基性岩石的部分熔融实验表明熔体一般具有较低的 $\text{Mg}^\# (< 45)$ ^[35-36],因此,板桥花岗闪长岩不太可能由增厚的玄武质下地壳熔融而成。

与古碑岩体地球化学特征相似的板桥花岗闪长岩具有较高的 Cr、Ni 含量和较高的 $\text{Mg}^\#$ 值,具有明显的幔源特征。板桥花岗闪长岩的地球化学特征与毛坦厂组火山岩相似,二者主量元素含量在同一变化范围,微量元素也具有一致的变化趋势。有学者认为毛坦厂组火山岩是包裹扬子中下地壳残片的富集地幔部分熔融形成的^[37],因此,该区花岗闪长岩可能也形成于类似的富集地幔,在侵位过程中可能受到少量中上地壳物质的混染以及分离结晶作用改造。板桥岩体的另一个显著特征是具有强烈的 Nb、Ta、Ti 负异常并富集 LILE,这种地球化学特征通常是岛弧岩浆作用的标志,表明岩浆源区受到俯冲板片流体或熔体的交代作用^[38-39]。北淮阳和北大别镁铁—超镁铁岩研究表明,该区地幔为受到古老地壳物质强烈交代的富集地幔,这种交代

作用改造的富集地幔由于富含水等挥发分,部分熔融时岩浆的 Si 显著富集产生中性岩浆^[40],比如岛弧地区广泛发育的安山岩通常认为主要源于受板片流体或熔体交代的地幔楔的部分熔融^[39]。上述分析表明,富集地幔的部分熔融在北淮阳地区早白垩世岩浆活动中可能扮演了重要作用。

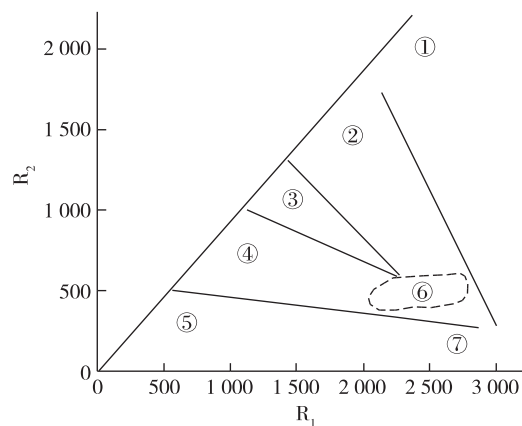
4.3 构造环境

自 20 世纪 80 年代起,秦岭—大别造山带普遍引起国内外学者的关注,认为该造山带是华北板块和扬子板块碰撞造山运动的产物,在约 230.9~243.9 Ma 两大板块碰撞拼合,最终形成秦岭—大别造山带^[41]。晚三叠世末—早中侏罗世,强烈的挤压和陆内俯冲导致地壳和岩石圈缩短增厚^[42],至晚侏罗世仍是造山挤压的构造环境。高钾质岩石尤其是钾玄岩系列花岗岩的侵位,标志着从挤压到伸展的构造转换^[43]。板桥花岗闪长岩成岩年龄 129.0 ± 1.9 Ma,是晚期岩浆活动的产物,说明其形成的构造背景为后碰撞伸展环境。

在 R_2 - R_1 构造环境判别图(图 7)上,样品主要位于碰撞后隆起区,说明板桥岩体的形成与大别造山带碰撞后隆起的构造环境有关。

在 Rb -($Yb+Ta$)判别图解(图 8(a))上,样品位于火山弧花岗岩(VAG)区上部,比典型的同碰撞花岗岩 Rb 含量略低,相当于碰撞后钙碱性侵入体^[46];在 Rb -($Y+Nb$)判别图解(图 8(b))上,样品位于后碰撞花岗岩区,表明板桥岩体形成于后碰撞的伸展构造环境。

大别地区有若干高 Sr/Y 值和亏损重稀土元素

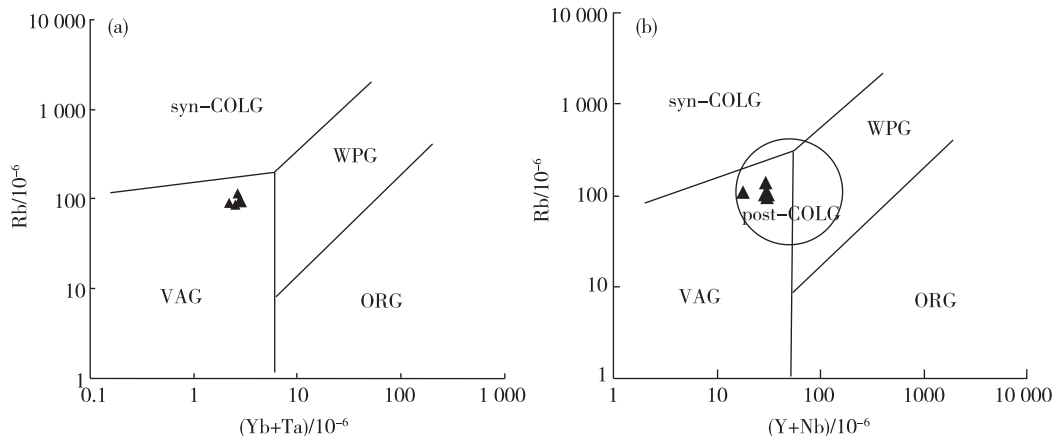


① 地幔斜长花岗岩;② 破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩;③ 板块碰撞后隆起期花岗岩;④ 晚造山期花岗岩;⑤ 非造山区碱性花岗岩;⑥ 同碰撞深熔型花岗岩;⑦ 造山期后 A 型花岗岩。

图 7 板桥岩体 R_2 - R_1 图(底图据文献[44])

Fig. 7 R_2 - R_1 diagram of the Banqiao granodiorite

(埃达克质)的岩石侵位,其 U-Pb 年龄介于 135~129 Ma^[43,47-48],被认为是增厚的玄武质下地壳部分熔融的产物,表明大别地区在 130 Ma 以前的地壳厚度可能达到 40~50 km。随后该区广泛发育了一套镁铁—超镁铁质岩、基性岩和碱性岩,U-Pb 年龄多数介于 125~115 Ma^[8,40,49],这些基性岩和碱性岩与岩石圈伸展环境下富集地幔的部分熔融有关。地壳的部分熔融需要增温、加热,软流圈地幔物质上涌最有可能为地壳大面积熔融提供持久的热源,而软流圈上升必然引起岩石圈的伸展减薄。因此,



WPG. 板内花岗岩;ORG. 洋中脊花岗岩;VAG. 岛弧花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩;post-COLG. 后碰撞花岗岩。

图 8 板桥岩体 Rb -($Yb+Ta$)图(a)及 Rb -($Y+Nb$)图(b)(底图据文献[45])

Fig. 8 Rb -($Yb+Ta$) (a) and Rb -($Y+Nb$) (b) diagrams of the Banqiao granodiorite

地壳内部大规模熔融预示岩石圈的松弛和伸展作用的开始,而大量镁铁—超镁铁岩和碱性岩的侵位,代表伸展作用达到高峰。综上所述,大别地区从挤压向伸展转换可能始于135 Ma左右^[43],强烈的岩石圈伸展发生在125~115 Ma^[34]。

需要指出的是,这种构造体制转换可能与大别造山带发生碰撞造山旋回无关^[34]。因此,北淮阳地区早白垩世岩浆活动可能是整个东部岩浆活动的一部分,与三叠纪碰撞造山旋回无关。

5 结 论

(1)板桥花岗闪长岩为偏铝质、富碱的高钾钙碱性系列岩石。稀土元素含量中等,(La/Yb)_N与HREE/LREE较高,重稀土元素相对轻稀土元素亏损明显,铈弱负异常。大离子亲石元素(LILE)明显富集,高场强元素(HFSE)亏损。

(2)首次获得板桥岩体²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄范围为123.8±2.6 Ma~133.1±8.9 Ma,成岩年龄为129.0±1.9 Ma,表明板桥岩体形成于燕山晚期,是早白垩世岩浆活动的产物。

(3)板桥花岗闪长岩形成于后碰撞伸展构造环境。

参考文献

- [1] Yin A, Harris T M. The Tectonics of Asia[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 345-370.
- [2] Harker B R, Ratschbacher L W, Webb L, et al. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161(1/4): 215-230.
- [3] Liu X C, Jahn B M, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an Block), China, and its tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2004, 394(3/4): 171-192.
- [4] 杨泽强. 河南商城县汤家坪钨矿辉钨矿铼—钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 289-295.
- [5] 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 等. 大别北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1550-1562.
- [6] 李毅, 李偲, 杨永飞, 等. 大别山北麓钨矿床地质特征和地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 95-106.
- [7] 陈红瑾, 陈衍景, 张静, 等. 安徽省金寨县沙坪沟钨矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 131-145.
- [8] 周泰禧, 陈江峰, 张翼, 等. 北淮阳花岗岩—正长岩带地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质论评, 1995, 41(2): 144-151.
- [9] 周泰禧, 陈江峰, 李学明, 等. 安徽舒霍正长岩带侵入体的⁴⁰Ar/³⁹Ar法同位素地质年龄[J]. 安徽地质, 1992, 2(1): 4-11.
- [10] 王根节, 张怀东, 项斌, 等. 北淮阳构造带东段中生代岩浆活动与多金属成矿作用[J]. 安徽地质, 2010, 20(4): 267-272.
- [11] 周伟伟, 蔡剑辉, 阎国翰, 等. 安徽金寨响洪甸碱性侵入岩年代学、岩石地球化学及其意义[J]. 矿床地质, 2014, 33(1): 104-122.
- [12] 彭智, 杜建国, 陈芳, 等. 北淮阳东段同兴寺碱性岩体地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2015, 89(4): 701-714.
- [13] 陈芳, 彭智, 董婷婷, 等. 北淮阳东段张冲闪长玢岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1289-1298.
- [14] 邱军强, 彭智, 陈芳, 等. 北淮阳东段杨家湾岩体地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 华东地质, 2016, 37(2): 89-96.
- [15] 鹿献章, 周博文, 彭智, 等. 北淮阳东段河棚岩体地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 华东地质, 2017, 38(2): 81-90.
- [16] 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. 地质学报, 1992, 66(1): 1-14.
- [17] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山的构造格局和演化[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-175.
- [18] Li S G, Xiao Y, Liu D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. Chemical Geology, 1993, 109(1/4): 89-111.
- [19] Cong B L, Wang Q C, Zhai M G, et al. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, China: Their formation and exhumation[J]. Island Arc, 1994, 3(3): 135-150.
- [20] 张怀东, 王波华, 郝越进, 等. 安徽沙坪沟斑岩型钨矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 41-51.
- [21] 彭智. 北淮阳东段基础地质评述[J]. 安徽地质, 2004, 14(3): 172-176.
- [22] 杜建国. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000: 1-176.
- [23] 彭智, 陆三明, 徐晓春. 北淮阳构造带东段金多金属矿床区域成矿规律[J]. 合肥工业大学学报(自然科学

- 版), 2005, 28(4): 364-368.
- [24] 陆三明, 徐晓春, 彭智. 北淮阳构造带东段隐爆角砾岩型多金属矿床的地质特征及成因[J]. 地质与勘探, 2005, 41(3): 7-11.
- [25] Benisek A, Dachs E, Kroll H. A ternary feldspar-mixing model based on calorimetric data: development and application [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(3): 327-337.
- [26] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2009, 51(1/2): 537-571.
- [27] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
- [28] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249(1/2): 1-35.
- [29] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [31] Tarney J, Jones C E. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models[J]. Journal of Geological Society of London, 1994, 151(5): 855-868.
- [32] 吴元宝, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [33] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [34] 赵新福, 李建威, 马昌前, 等. 北淮阳古碑花岗闪长岩侵位时代及地球化学特征: 对大别山中生代构造体制转换的启示[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1392-1402.
- [35] 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(4): 891-931.
- [36] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolites at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 117(4): 394-409.
- [37] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Late Mesozoic Volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: Partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie Orogen? [J]. Chemical Geology, 2004, 209(1/2): 27-48.
- [38] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [39] Wilson M. Igneous petrogenesis [M]. London: Springer, 1998.
- [40] Jahn B M, Wu F Y, Loc C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. Chemical Geology, 1999, 157(1/2): 119-146.
- [41] 李曙光, Hart S R, 郑双根, 等. 中国华北、华南陆块碰撞时代的钐—钕同位素年龄证据[J]. 中国科学(B辑), 1989, 19(3): 312-319.
- [42] Li C, Chen Y J, He S D. Age, mechanism and direction of East Qinling-Dabieshan lithosphere delamination: Petrological evidence and stipulation [J]. Acta Geochemistry, 2001, 20(1): 59-72.
- [43] 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(9): 817-827.
- [44] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43-55.
- [45] Pearce J. Source and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [46] Hammarstrom J M, Zen E A. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer [J]. American Mineralogist, 1986, 71(11): 1297-1313.
- [47] 潘国强, 陆现彩, 于航波. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 541-550.
- [48] 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 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, 2002, 31(5): 455-463.
- [49] Wang Y, Fan W, Peng T, et al. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks[J].

Chemical Geology, 2005, 220(3/4): 165-189.

Geochemical characteristics and isotope chronology study of the Banqiao granodiorite in the eastern part of North Huaiyang

YANG Yi-zhong, WANG Hui, CAI Yang, LIU Bing-quan

(Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China)

Abstract: The Banqiao granodiorite in the eastern part of North Huaiyang, which consists mainly of granodiorite, is an important component of the Lingjiachong complex. The Banqiao granodiorite is characterized by meta-aluminum, rich alkali, high K and low Ca, suggesting that it belongs to the high K calc-alkalic series. Medium REE content, high $(La/Yb)_N$ and HREE/LREE ratios, distinct HREE depletion relative to LREE, and weak negative Eu anomalies indicate that the Banqiao granodiorite belongs to a LREE-enriched plutonic rock. Large-ion lithophile elements (LILE), such as Rb, Ba, K, La and Nd, are significantly enriched, while high field strength elements (HFSE), such as Nb, Ta, Ti and P, are depleted. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a $^{206}Pb/^{238}U$ age $(129.0 \pm 1.9 \text{ Ma})$ for the Banqiao granodiorite, indicating that it formed in the Late Yanshanian and likely was the product of the Early Cretaceous magmatic activity. Based on the regional geological background of the study area and geochemical tectonic environment discrimination in this study, it can be concluded that the Banqiao granodiorite formed in the post-collision extensional tectonic setting.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb dating; Banqiao granodiorite; North Huaiyang; Anhui Province