

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.02.002

引用格式:张靖怡,张舒,张赞赞,等.北淮阳东端牛王寨岩体年代学及地球化学研究:对大别造山带早白垩世深部地质过程的制约[J].华东地质,2022,43(2):141-153.(ZHANG J Y, ZHANG S, ZHANG Z Z, et al. Geochronology and geochemistry of Niuwangzhai pluton in east end of North Huaiyang: constraints on deep geological process of Dabie Orogen in Early Cretaceous [J]. East China Geology, 2022, 43(2):141-153.)

## 北淮阳东端牛王寨岩体年代学及地球化学研究: 对大别造山带早白垩世深部地质过程的制约

张靖怡<sup>1,2</sup>, 张舒<sup>1,2,3</sup>, 张赞赞<sup>1,2</sup>, 汪晶<sup>1,2</sup>

(1. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 2. 安徽省地质科学研究所, 安徽 合肥 230001;  
3. 自然资源部覆盖区深部资源勘查工程技术创新中心, 安徽 合肥 230001)

**摘要:**牛王寨岩体位于大别造山带北部北淮阳构造带东端,岩性主要为花岗岩。LA-ICP MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,牛王寨花岗岩形成于  $(119.4 \pm 1.5)$  Ma,属于大别造山带早白垩世晚阶段岩浆活动的产物。牛王寨花岗岩具有高硅( $\text{SiO}_2$  含量为 71.98%~77.96%)、高碱(全碱含量为 7.66%~9.30%)、低钙( $\text{CaO}$  含量为 0.19%~0.68%)、高  $\text{FeO}_T/\text{MgO}$  值(平均值为 12.83)和  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  值(2.63~2.82)的特点。岩石富集高场强元素,  $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  平均含量为  $294 \times 10^{-6}$ ,富 Rb、贫 Ba 和 Sr,具有显著的 Eu 负异常,指示牛王寨花岗岩具有 A 型花岗岩的特点。牛王寨花岗岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值为 0.708 28~0.708 41,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -18.77~-19.15,判断其源区物质可能为大别山中下地壳片麻岩。约 130 Ma 时,大别造山带加厚下地壳拆沉引发的软流圈上涌,为源区的部分熔融提供了热源。牛王寨岩体的形成受控于约 130 Ma 之后中国东部统一的伸展构造事件。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄;地球化学;牛王寨岩体;北淮阳;大别造山带

**中图分类号:** P581;P595;P597

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2022)02-141-13

大别山乃至中国东部早白垩世深部地质过程及其引发的构造体制转换时限和机制,一直是国内外学者研究的热点<sup>[1-9]</sup>。北淮阳构造带是大别造山带的重要组成部分,在早白垩世发生了强烈的构造-岩浆活动,在特定的构造背景下形成了大量中酸性火山岩-侵入岩<sup>[2-3,5-11]</sup>,查明这些岩浆岩的成岩时代及形成机制,对于进一步研究大别山中生代深部地质过程、厘定区域构造体制转变时限具有重要意义。

牛王寨岩体地处北淮阳构造带最东端,紧邻庐断裂带,侵位于毛坦厂组火山岩中,是形成于早白垩世的酸性侵入体。本文应用 LA-ICP MS 锆

石 U-Pb 测年法,精确测定了牛王寨岩体的形成年龄;通过开展岩浆岩主量元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素特征研究,分析了岩石的类型及成因;结合区域岩浆岩研究进展,对大别山早白垩世岩浆作用及深部过程进行了探讨,这对理解区域早白垩世构造体制转换及岩浆作用过程具有重要参考意义。

### 1 区域地质背景

大别山位于华北板块与扬子板块之间,是早中生代形成的陆-陆碰撞造山带。大别造山带由南向北可划分为 4 个构造单元,分别是宿松绿片岩/

\* 收稿日期:2021-04-12 修订日期:2021-07-27 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:**安徽省重点研发计划项目“铜陵大型资源基地接替资源勘查研究(编号:201904a07020077)”和安徽省公益性地质调查“安徽省庐枞地区与碱性岩有关的铀(钍)矿调查评价(编号:2016-g-1-7)”、“安徽省稀有、稀散元素矿产远景调查(编号:2016-g-2-16)”项目联合资助。

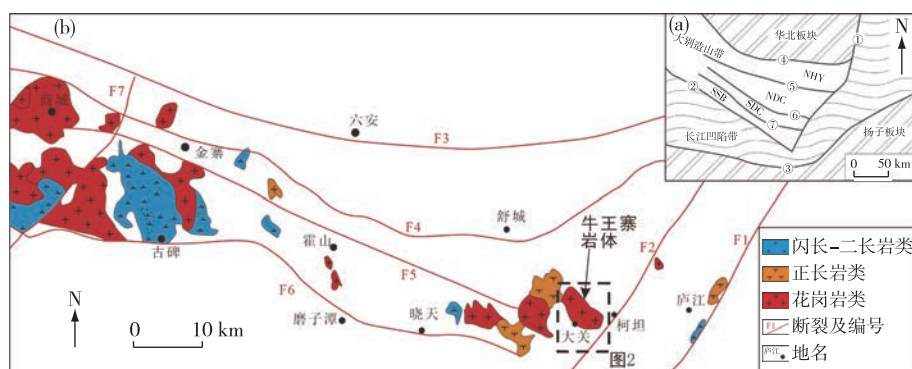
**第一作者简介:**张靖怡,1987 年生,女,工程师,学士,主要从事地质调查与矿产勘查工作。Email:438646550@qq.com。

**通信作者简介:**张舒,1986 年生,男,高级工程师,博士,主要从事岩浆作用与金属矿床成矿机制研究。Email:zs-1638610@163.com。

蓝片岩带(SSB)、南大别高压-超高压变质带(SDC)、北大别正片麻岩带(NDC)和北淮阳构造带(NHY),各个构造带之间通过深大断裂区分<sup>[11]</sup>(图1)。北淮阳构造带位于六安—确山断裂带与晓天—磨子潭断裂带之间,东以郯庐断裂带与长江凹陷带相接,西至南阳盆地,北临华北陆块,南与北大别正片麻岩带毗邻。北淮阳构造带以EW向断裂与NE向断裂为主,形成格子状构造体系。以商城—麻城断裂为界,北淮阳构造带划分为东段(安徽省内)和西段(河南省内),其中东段岩石地层由老到新为新元古代庐镇关岩群、新元古

代—早古生代佛子岭岩群、石炭纪杨山群、中生代以来的陆相盆地沉积物。

北淮阳构造带早白垩世岩浆活动极为发育,形成了大量中酸性侵入岩及火山岩。侵入岩主要分布于晓天—柯坦地区和金寨—商城地区,包括闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、石英正长岩、花岗岩、碱长花岗岩及花岗斑岩,响洪甸地区零星分布霓辉正长岩与霞石正长岩(图1)。火山岩主要分布于信阳火山岩盆地、光山—商城火山岩盆地、金刚台地区、晓天—磨子潭火山盆地及霍山—舒城火山岩盆地<sup>[5,8]</sup>。



①.郯庐断裂带;②.襄樊—广济断裂带;③.阳兴—常州断裂带;④.六安—确山断裂带;⑤.晓天—磨子潭断裂带;⑥.五河—水吼断裂带;⑦.马庙—太湖断裂带;F1.滁河断裂;F2.郯庐断裂带;F3.六安—确山断裂;F4.舒城—信阳断裂;F5.龟山—梅山断裂;F6.晓天—磨子潭断裂;F7.商城—麻城断裂;SSB.宿松片岩带;SD.南大别高压-超高压变质带;NDC.北大别正片麻岩带;NHY.北淮阳构造带

图1 北淮阳地区大地构造位置(a)及早白垩世侵入岩分布图(b)<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Simplified map of the tectonic location (a) and the distribution of Early Cretaceous intrusive rocks (b) in North Huaiyang<sup>[11]</sup>

## 2 岩石学特征

牛王寨岩体位于柯坦以西,紧邻郯庐断裂带,侵位于早白垩世毛坦厂组火山岩内,西侧与华盖山石英正长岩体呈侵入接触关系。岩体岩性主要为花岗岩(图2),新鲜岩石呈肉红色,半自形粒状结构,块状构造;主要的造岩矿物为钾长石(含量约55%)、石英(含量约30%)、斜长石(含量约10%)及少量角闪石(含量3%~5%);副矿物主要为榍石、锆石、磷灰石等(图3)。钾长石呈半自形短柱状,粒度为1~1.5 mm;斜长石呈半自形—自形长柱状,粒度为(0.5×1~1×2)mm;石英呈他形粒状,粒度为0.5~3 mm;角闪石呈自形—半自形长柱状,粒度0.5×1.5 mm。

## 3 样品采集及测试方法

### 3.1 样品采集

本次共采集了牛王寨岩体3件新鲜岩石样品,用于主量元素、微量元素及Sr-Nd同位素分析,样品编号及采样位置分别为:DG-1(31°13'20" N, 117°5'5" E)、DG-2(31°13'27" N, 117°3'7" E)、DG-3(31°14'31" N, 117°2'6" E),DG-1同时用于锆石U-Pb同位素定年(图2)。

### 3.2 测试方法

样品经破碎、淘洗、重选、磁选等标准重矿物分离后,于双目镜下挑选出透明、自形程度较高的锆石制成环氧树脂样品靶,磨至锆石颗粒中心部分后

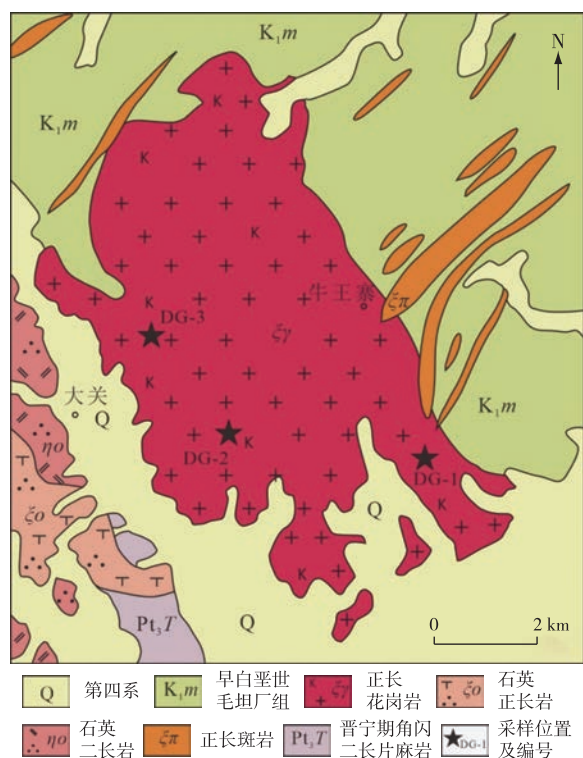
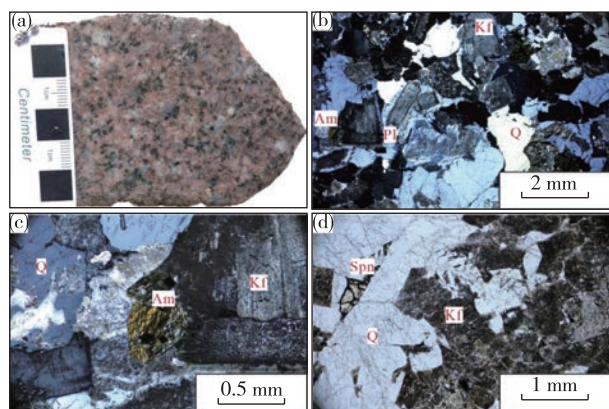


图 2 牛王寨岩体地质简图

Fig. 2 Geological sketch of Niuwangzhai pluton



Q. 石英; Am. 角闪石; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Spn. 榍石

图 3 牛王寨花岗岩手标本照片(a)和显微镜下照片(b, c, d)

Fig. 3 Hand specimen photo (a) and micrographs (b, c, d) of Niuwangzhai granite

抛光,再进行阴极发光及透反射拍照,选择合适的点位进行激光 U-Pb 年龄测试。锆石的分选工作在河北省廊坊诚信地质服务有限公司完成,制靶、阴极发光及透反射拍照在中科院地质与地球物理研究所电子探针和扫描电镜实验室完成。锆石 U-Pb

同位素测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪上完成。相关分析测试流程及实验仪器参数详见文献[12],分析数据的离线处理及作图分别采用 ICPMSDataCal 程序<sup>[13]</sup>和 Isoplot 程序<sup>[14]</sup>完成。

全岩主量元素分析测试在核工业北京地质研究所分析测试研究中心完成,实验仪器为 Philips PW2404 XRF,测试相对误差 $<5\%$ 。全岩微量元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,实验仪器为 ICP-MS,具体实验流程、仪器参数和数据准确度详见文献[15]。Sr-Nd 同位素在中国科学技术大学放射性成因同位素地球化学实验室完成,实验仪器为 MAT-262 质谱仪,分析流程及仪器参数详见文献[16],Sr-Nd 同位素的质量分馏分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,Sr-Nd 同位素分析精度优于 $0.003\%$ 。

## 4 测试结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次测试选择的锆石均为无色透明或略显淡黄色,粒度为 $100\sim150\mu\text{m}$ ,呈自形柱状,长宽比为 $2:1\sim3:1$ 。阴极发光照片(图 4)中,锆石具有明显的岩浆振荡环带,无明显的流体蚀变及蜕晶质化现象。锆石 Th/U 值为 $1.3\sim4.9$ ,平均值为 $2.8$ (表 1)。上述特征指示,本次测试的锆石均为岩浆成因,其结晶年龄可以代表岩体的形成时代。11 个锆石测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 $(117.1\pm1.7)\sim(122.6\pm4.6)\text{Ma}$ (表 1),加权平均年龄为 $(119.4\pm1.5)\text{Ma}$ (MSWD=0.51)(图 5)。野外地质特征上,牛王寨岩体侵位于毛坦厂组火山岩中,前人对北淮阳地区火山岩年龄测定结果显示其形成于早白垩世<sup>[17]</sup>,证明了本次测年结果具有一定的可靠性。

### 4.2 主量元素

牛王寨岩体主量元素分析结果见表 2。岩石 $\text{SiO}_2$  含量为 $71.98\%\sim77.96\%$ ,其他主量元素含量较均一,总体具有低钛(平均含量 $0.15\%$ )、贫钙(平均含量 $0.44\%$ )、贫镁(平均含量 $0.16\%$ )、富碱(平均含量 $8.79\%$ )的特点,显示出岩浆具有较高的分异演化程度。在 TAS 图解(图 6(a))中,样品投影点落在花岗岩区;在 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$  图解(图 6(b))中,样品主要投影点落在准铝质—弱过铝质区。

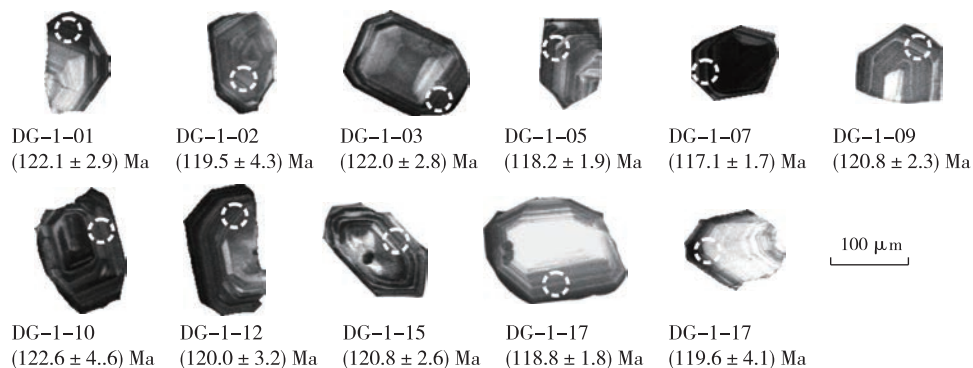


图 4 牛王寨花岗岩典型锆石阴极发光照片

Fig. 4 CL images of the typical zircons from Niuwangzhai granite

表 1 牛王寨花岗岩锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 1 Zircon U-Pb dating result of Niuwangzhai granite

分析点	含量/ $10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U	比值	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$
DG-1-01	1 133	265	4.3	0.164 3	0.013 1	0.019 1	0.000 5	154.4	11.4	122.1	2.9
DG-1-02	683	173	4.0	0.218 9	0.023 5	0.018 7	0.000 7	201.0	19.6	119.5	4.3
DG-1-03	3 316	944	3.5	0.136 8	0.007 5	0.019 1	0.000 4	130.2	6.7	122.0	2.8
DG-1-05	2 973	1 327	2.2	0.118 7	0.007 4	0.018 5	0.000 3	113.9	6.7	118.2	1.9
DG-1-07	1 912	1 132	1.7	0.130 7	0.008 2	0.018 3	0.000 3	124.7	7.3	117.1	1.7
DG-1-09	957	728	1.3	0.127 8	0.008 0	0.018 9	0.000 4	122.1	7.2	120.8	2.3
DG-1-10	454	200	2.3	0.208 3	0.017 8	0.019 2	0.000 7	192.1	15.0	122.6	4.6
DG-1-12	613	235	2.6	0.251 7	0.018 7	0.018 8	0.000 5	228.0	15.2	120.0	3.2
DG-1-15	1 532	613	2.5	0.137 5	0.009 3	0.018 9	0.000 4	130.8	8.3	120.8	2.6
DG-1-17	1 304	944	1.4	0.128 5	0.007 3	0.018 6	0.000 3	122.7	6.5	118.8	1.8
DG-1-20	664	135	4.9	0.232 7	0.020 2	0.018 7	0.000 7	212.4	16.6	119.6	4.1

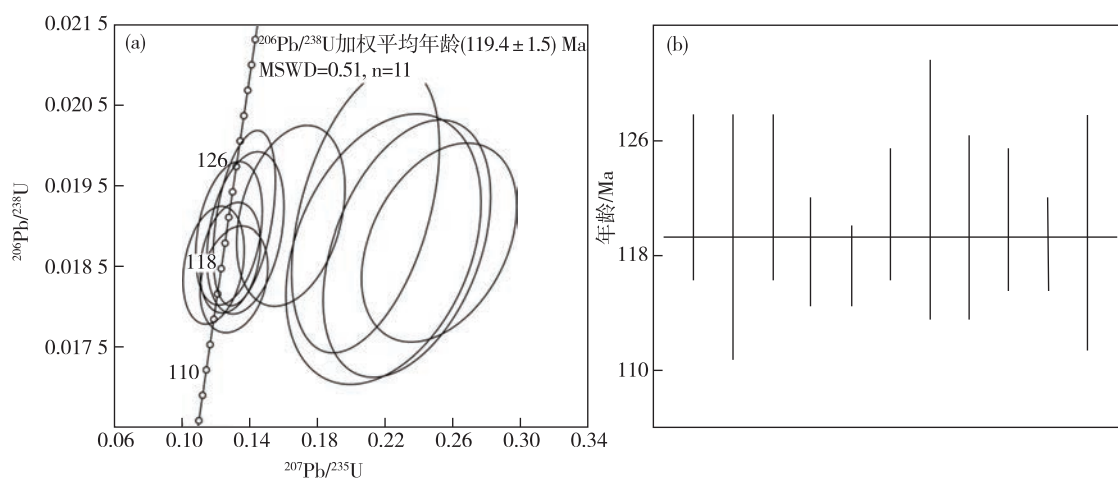


图 5 牛王寨花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 5 Concordia diagram (a) and weighted mean age diagram (b) of zircon U-Pb ages of Niuwangzhai granite

表 2 牛王寨岩体主量元素、微量元素及稀土元素含量及特征参数

Table 2 Contents and characteristic parameters of major, trace, and rare earth elements in Niuwangzhai granite

样品编号	主量元素含量/%													
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>T</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总量
DG-01	74.93	0.15	12.83	1.03	0.92	0.10	0.05	0.13	0.36	4.15	4.73	0.02	1.54	98.37
DG-02	75.05	0.15	12.93	0.98	0.83	0.13	0.06	0.11	0.41	4.31	4.83	0.02	1.05	98.83
DG-03	75.15	0.15	13.06	1.05	0.83	0.20	0.06	0.14	0.37	4.23	4.82	0.02	0.86	99.02
GS2058H	75.63	0.14	12.46	2.41	0.60	1.63	0.08	0.16	0.64	3.92	4.95	0.02	0.18	100.23
GSⅡ P7/12	72.72	0.16	13.55	3.02	0.70	2.09	0.08	0.16	0.31	3.94	5.36	0.03	0.77	99.10
GS2369/1H	71.98	0.21	14.32	2.47	0.96	1.36	0.13	0.32	0.54	4.02	5.05	0.04	1.25	98.93
GS2460	74.86	0.13	12.15	3.12	0.69	2.19	0.08	0.08	0.45	3.74	4.96	0.03	0.76	99.36
4405	77.96	0.12	11.83	0.80	0.39	0.37	0.02	0.13	0.19	4.12	4.33	0.02	0.48	99.48
4411	75.75	0.17	12.88	0.97	0.67	0.27	0.05	0.24	0.68	2.67	4.99	0.03	1.36	98.40
样品编号	微量及稀土元素含量/10 <sup>-6</sup>													
	Li	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
DG-01	3.66	18.6	226	51.0	17.9	184	33.9	165	45.6	69.2	6.69	18.3	2.89	0.28
DG-02	4.61	19.0	228	58.1	22.3	167	34.1	166	56.7	92.5	8.42	23.6	3.48	0.31
DG-03	—	—	—	—	—	—	—	—	36.1	70.1	5.71	16.1	2.42	0.17
GS2058H	—	—	169	93.3	17.1	163	35.1	86	69.5	97.2	9.37	27.1	3.80	0.50
GSⅡ P7/12	—	—	162	117	21.3	268	34.6	212	48.0	111	7.21	23.1	4.12	0.38
GS2369/1H	—	—	—	—	—	—	—	—	77.7	150	14.2	49.0	8.65	1.50
GS2460	4.40	—	163	205	20.6	176	20.0	507	64.6	124	11.2	34.7	7.13	1.11
4405	7.50	16.5	158	80.8	9.2	91	28.8	462	24.3	40.1	4.02	10.2	1.60	0.19
4411	6.60	19.2	202	109	22.9	158	33.9	223	66.4	123	12.7	45.7	6.90	1.40
样品编号	微量及稀土元素含量/10 <sup>-6</sup>													
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	总量
DG-01	2.04	0.35	2.25	0.49	1.71	0.29	2.22	0.37	6.51	1.96	26.5	47.7	5.90	153
DG-02	2.60	0.45	2.89	0.62	1.98	0.34	2.54	0.40	5.93	1.94	27.9	45.7	4.84	197
DG-03	1.75	0.29	1.87	0.41	1.33	0.22	1.65	0.24	—	—	—	—	—	138
GS2058H	3.02	0.45	2.80	0.62	1.73	0.38	2.47	0.43	—	—	—	—	—	219
GSⅡ P7/12	3.36	0.49	3.21	0.74	2.41	0.40	2.82	0.50	—	—	—	—	—	208
GS2369/1H	6.19	0.78	3.86	0.84	2.12	0.37	2.50	0.37	—	—	—	—	—	318
GS2460	4.00	0.63	3.22	0.70	2.07	0.37	2.33	0.34	—	—	—	—	—	257
4405	1.22	0.20	1.20	0.30	1.01	0.20	1.59	0.30	3.10	1.66	—	22.8	4.10	86
4411	5.10	0.78	4.40	0.87	2.40	—	2.40	0.38	5.40	1.79	—	32.7	5.50	272
样品编号	特征参数													
	Sr/Y	(La/Yb) <sub>N</sub>	LREE/HREE	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	A/CNK	A/NK	FeO <sub>T</sub> /MgO	Zr+Nb+Ce+Y	10 000 Ga/Al	δEu	T <sub>Zr</sub> /℃		
DG-01	2.85	14.74	14.69	10.18	0.76	1.02	0.93	8.24	305	2.74	0.34	800		
DG-02	2.61	15.98	15.64	10.52	0.85	0.99	0.95	8.66	316	2.77	0.30	788		
DG-03	—	15.72	16.84	9.63	0.88	1.02	0.93	7.66	—	—	0.24	—		
GS2058H	5.46	20.18	17.43	11.81	1.01	0.96	0.95	15.07	—	—	0.44	782		
GSⅡ P7/12	5.50	12.20	13.92	7.51	0.99	1.05	0.91	18.89	—	—	0.30	834		
GS2369/1H	—	22.30	17.65	5.80	2.05	1.10	0.84	7.72	—	—	0.60	—		
GS2460	9.94	19.89	17.78	5.85	1.42	0.98	0.95	39.04	341	—	0.58	791		
4405	8.82	10.94	13.36	9.79	0.63	1.00	0.97	6.16	169	2.63	0.40	742		
4411	4.76	19.85	15.68	6.21	1.76	1.17	0.76	4.04	338	2.82	0.69	801		

注:DG-1、DG-2、DG-3 样品数据为本文数据;其他样品数据来源于文献[50];“—”代表未分析出;δEu=2×Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)。



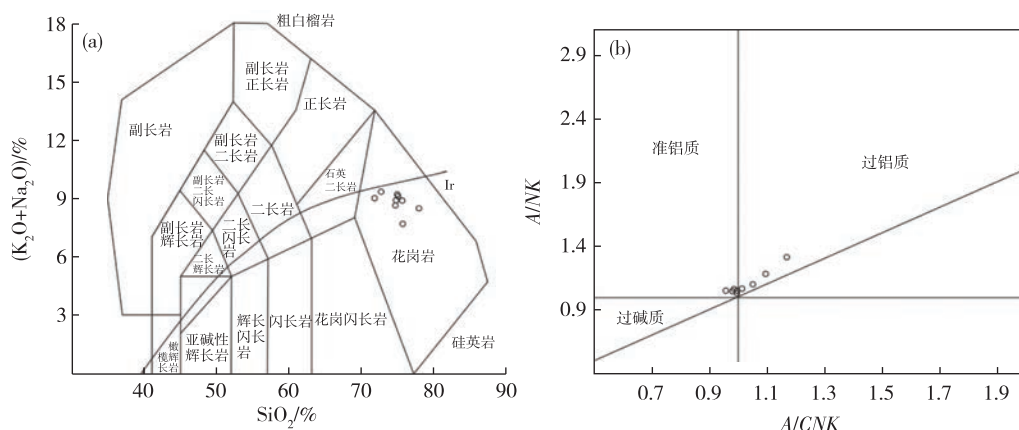


图 6 牛王寨花岗岩 TAS 图解(a)<sup>[18]</sup>和 A/CNK 图解(b)<sup>[19]</sup>  
Fig. 6 Diagrams of TAS (a)<sup>[18]</sup> and A/CNK (b)<sup>[19]</sup> of Niuwangzhai granite

### 4.3 稀土元素

牛王寨岩体稀土元素分析结果见表 2。岩石稀土元素总量 $\Sigma$ REE 平均为  $205 \times 10^{-6}$ ;  $(La/Yb)_N$  值为 10.94~22.30, LREE/HREE 值为 13.36~17.78,  $(La/Sm)_N$  值为 5.80~11.81,  $(Gd/Yb)_N$  值为 0.63~2.05, 显示出岩石相对富集轻稀土元素。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 7(a))上, 表现为右倾的轻稀土元素配分曲线和平直的重稀土元素配分曲线, 说明轻稀土元素分馏较强, 重

稀土元素分馏不明显。 $\delta Eu$  值为 0.24~0.69, 平均值为 0.43, 说明 Eu 负异常较强。

### 4.4 微量元素

牛王寨岩体微量元素分析结果见表 2。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7(b))上, 岩体富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, Ba、Sr 显示负异常特征。岩石富集高场强元素 Th、U、Zr、Hf 显示轻微正异常, Nb、Ta 显示轻微亏损。

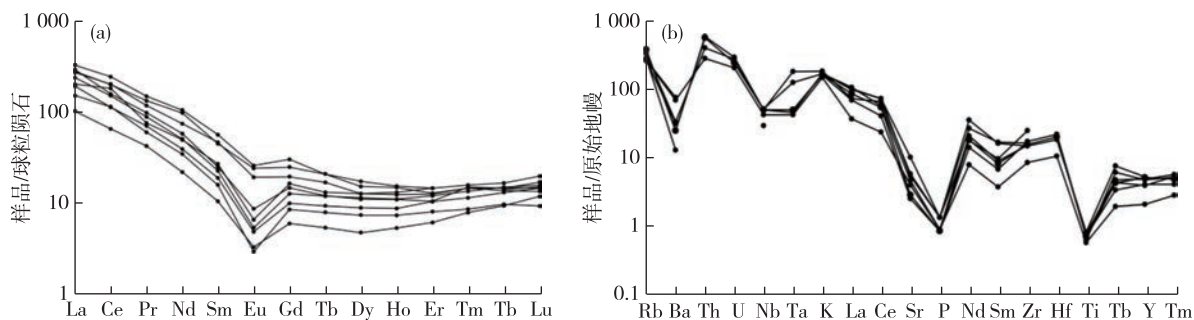


图 7 牛王寨花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)<sup>[20]</sup>  
Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of Niuwangzhai granite<sup>[20]</sup>

### 4.5 Sr-Nd 同位素

牛王寨岩体 Sr-Nd 同位素组成分析结果见表 3。岩体初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$  值为 0.708 28~0.708 41, 平均值为 0.708 35;  $\epsilon_{Nd}(t)$  值为 -18.77~-19.15, 平均值为 -18.96。牛王寨花岗岩 Sr-Nd 同位素组成与

大别造山带燕山期不具备埃达克岩性质的花岗岩一致<sup>[3,8-9, 21-22]</sup>, 显示出其具有相似的源区性质。牛王寨花岗岩 Nd 同位素模式年龄为 1.9~2.0 Ga, 两阶段模式年龄为 2.4~2.5 Ga, 暗示岩浆源区物质具有古老的形成年龄。

表 3 牛王寨岩体 Sr-Nd 同位素组成分析结果  
Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of Niuwangzhai granite

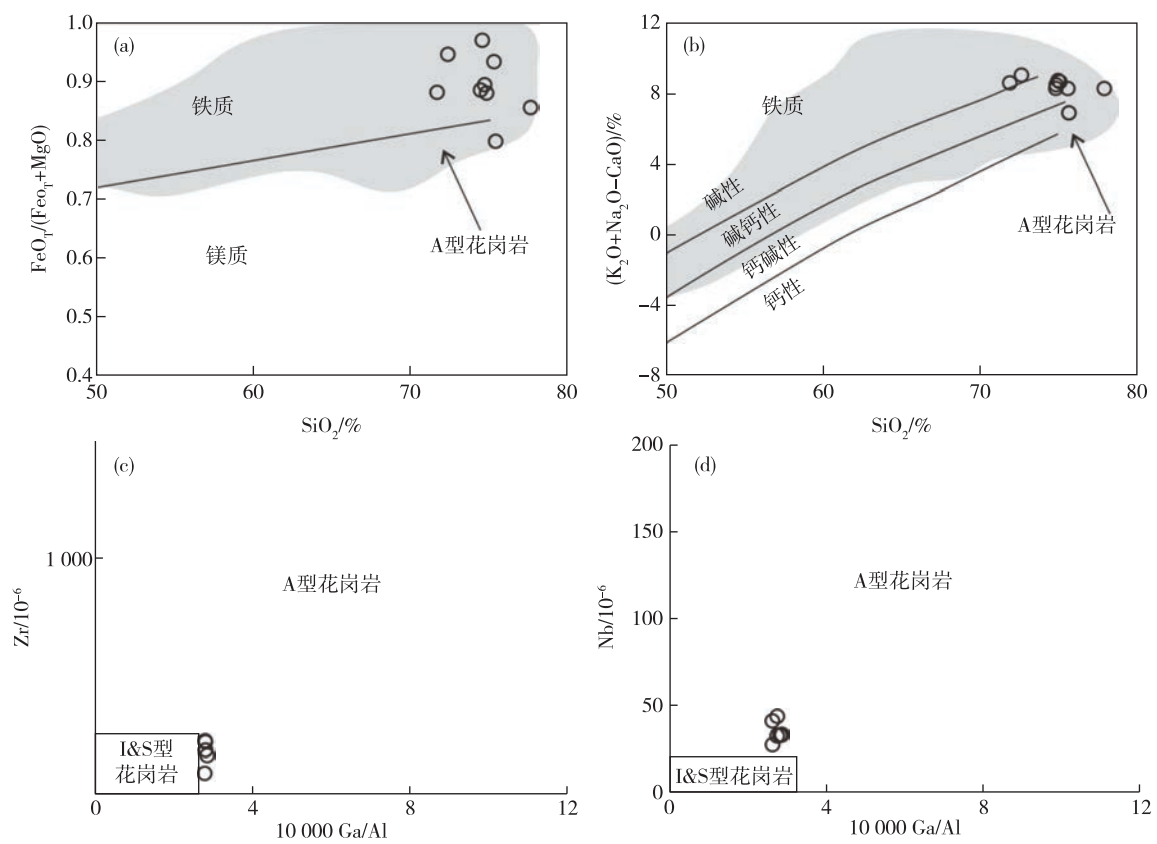
样品编号	Rb/ $10^{-6}$	Sr/ $10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm/ $10^{-6}$	Nd/ $10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$T_{\text{DM2}}/\text{Ga}$
DG-01	226	51.0	12.860 0	0.730 1	2.89	18.2	0.095 8	0.511 6	0.708 28	-19.15	2.0	2.5
DG-02	228	58.1	11.370 0	0.727 7	3.48	23.6	0.089 0	0.511 6	0.708 41	-18.77	1.9	2.4

5 讨论

5.1 岩石类型

I-S-A-M 型花岗岩分类方案是目前使用最广泛、最有效的花岗岩成因分类体系,可准确区分花岗质岩石的成因类型,有助于识别岩浆源区、重建岩浆演化过程、理解区域大地构造背景及岩石圈的演化特征。在主量元素特征上,A 型花岗岩普遍富集 Na、K,亏损 Mg、Ca、P、Ti,具有较高的 Fe/Mg 值和 A/NK 值<sup>[23]</sup>。牛王寨花岗岩总体贫钙镁,富碱

( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  含量为 7.66%~9.30%),A/NK 值为 0.76~0.97,FeO<sub>T</sub>/MgO 值为 4.04~39.04(平均值为 12.83)。在微量元素特征上,牛王寨花岗岩富集高场强元素,(Zr+Nb+Ce+Y)含量主要为  $(305\sim341)\times10^{-6}$ ;富集大离子亲石元素 Rb,亏损 Ba、Sr; $10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$  值为 2.63~2.82。牛王寨花岗岩稀土元素含量较高,稀土元素配分曲线呈典型的右倾“V”型,上述特征符合 A 型花岗岩的判别标准。在岩石成因类型判别图解(图 8)上,牛王寨花岗岩投影点均位于 A 型花岗岩区。



(a).FeO<sub>T</sub>/(FeO<sub>T</sub>+MgO)-SiO<sub>2</sub> 图;(b).(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-CaO)-SiO<sub>2</sub> 图;(c).Zr-10 000 Ga/Al 图;(d).Nb-10 000 Ga/Al 图

图 8 牛王寨花岗岩成因类型判别图解<sup>[23-24]</sup>

Fig. 8 Petrogenesis discrimination diagrams of Niuwangzhai granite<sup>[23-24]</sup>

除特定的地球化学指标外,相对 I 型花岗岩和 S 型花岗岩,A 型花岗岩具有更高的结晶温度<sup>[23-24]</sup>。本文采用 WASTON E B<sup>[25]</sup>提出的锆石溶解度—饱和温度模拟公式,计算锆石饱和晶出温度集中于 782~834 °C,近似代表牛王寨花岗岩结晶时的温度,该温度与 A 型花岗岩形成温度较接近<sup>[26]</sup>。综上所述,认为牛王寨花岗岩属于 A 型花岗岩。

## 5.2 岩石成因

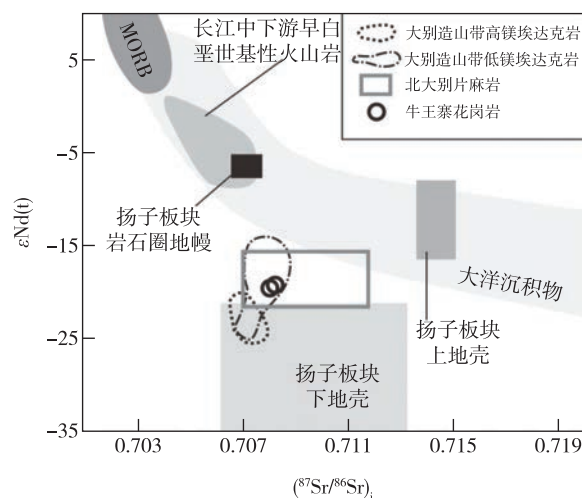
A 型花岗岩的成因主要有以下类型:幔源玄武质岩浆的分异结晶<sup>[27-28]</sup>;花岗质岩浆抽取后,下地壳岩石的低度部分熔融<sup>[23,26]</sup>;壳幔混合<sup>[29]</sup>;中基性结晶基底或是变沉积岩的部分熔融<sup>[24,30]</sup>。

牛王寨花岗岩具有较高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值,而扬子板块岩石圈地幔具有相对较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(图 9),因此,牛王寨花岗岩不太可能直接通过幔源玄武质岩浆的分异结晶作用而形成。幔源岩浆在地壳上升过程中,同化混染壳源物质,可以明显降低原始岩浆的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值,但壳幔混合的岩浆普遍发育暗色微粒包体和继承锆石。牛王寨花岗岩不发育暗色微粒包体和继承锆石,说明其不是由岩石圈地幔来源的铁镁质岩浆与壳源物质的混合作用形成。

牛王寨岩体 Sr-Nd 同位素组成与中下地壳熔融形成的大别造山带早白垩世低镁埃达克岩相似<sup>[3,9,22]</sup>。结合牛王寨岩体古元古代亏损地幔 Nd 模式年龄,推测其可能来源于古老的中下地壳部分熔融。地球化学及变质岩岩石学研究<sup>[31-33]</sup>表明,大别山中下地壳岩石主要出露于北大别山,岩石类型以条带状片麻岩为主,含少量麻粒岩相岩石。岩石  $I_{\text{Sr}}$  值为 0.707 59~0.712 62,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和亏损地幔 Nd 模式年龄分别为 -15.8~-21.9 和 1.9~2.5 Ga<sup>[9,21]</sup>。在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图 9)中,牛王寨花岗岩全部落入北大别片麻岩区,暗示牛王寨花岗岩可能来源于大别山中下地壳的部分熔融。

微量元素特征方面,牛王寨花岗岩具有较低的 Sr/Y 值和  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值、较高的重稀土元素含量,说明岩浆源区残留相缺少石榴子石;亏损 Ba 和 Sr,具有较强的 Eu 负异常,反映源区可能残留有斜长石<sup>[34]</sup>。在中酸性源区熔融时,石榴子石稳定压力低于 1.2 GPa,而斜长石稳定压力为 1.5 GPa<sup>[35]</sup>,因此,牛王寨花岗岩的形成压力应 < 1.2 GPa,对应岩浆源区深度应 < 40 km,这与早白垩世大别山地壳

减薄后的厚度(< 35 km)一致<sup>[4]</sup>。实验岩石学研究<sup>[36]</sup>表明,与北大别片麻岩相似的英云闪长质-花岗质组分作为初始物质,在压力 ≤ 1.0 GPa、温度 ≤ 950 °C 时,产生熔体的地球化学组分与牛王寨花岗岩吻合。通常,中低压条件下地壳熔融产生的 A 型花岗岩具有准铝质特征,而高压条件下地壳熔融产生的 A 型花岗岩具有过铝质特征<sup>[37]</sup>,牛王寨花岗岩准铝质—弱过铝质特征也暗示其源区可能为中下地壳。综上所述,认为牛王寨花岗岩可能是大别造山带中下地壳片麻岩部分熔融的产物。



大别造山带低镁及高镁埃达克质岩石数据引自文献[2-3,5-7];北大别片麻岩数据引自文献[9,21];所有数据均回算至牛王寨花岗岩形成时( $t = 119.4 \text{ Ma}$ )的同位素组成

图 9 牛王寨花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解<sup>[33]</sup>

Fig. 9  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram of Niuwangzhai granite<sup>[33]</sup>

## 5.3 早白垩世大别造山带深部过程

大别造山带的形成始于早中三叠世华北板块和扬子板块陆陆碰撞拼合,强烈的挤压及陆内俯冲造成了大别造山带地壳和岩石圈地幔的增厚<sup>[1]</sup>。研究<sup>[5-7]</sup>表明,大别造山带内不存在三叠纪及侏罗纪岩浆岩,大别山山前盆地花岗质砾石、碎屑锆石中也未发现三叠纪—侏罗纪结晶年龄,这否定了大别山白垩纪之前的岩浆岩在碰撞造山隆升过程中被强烈剥蚀的假设<sup>[8,38]</sup>。碰撞造山带的去“山根”过程普遍伴随强烈的岩浆-成矿活动,白垩纪以前岩浆岩缺失,说明大别造山带的“山根”在早白垩世之前得到保存<sup>[1,3]</sup>。大别山碰撞后岩浆活动始于约 145 Ma,



根据大别山早白垩世侵入岩  $\text{Sr}/\text{Y}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  与形成年龄演化曲线图(图 10),可以划分为 145~130 Ma 与 130~114 Ma 两个阶段<sup>[1,3,5-7,12,50-54]</sup>。两阶段的岩浆活动很好的记录了大别造山带深部的去“山根”过程。

大别山早阶段岩浆岩(145~130 Ma)以石英闪长岩-二长闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩为主,岩石具有低 Mg、高 Sr 低 Y、亏损 HREE、高  $\text{Sr}/\text{Y}$  值和  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值(图 10)、缺少 Eu 负异常的特点,呈现类似埃达克岩的特征<sup>[2,8,22,43]</sup>。早阶段岩浆岩地球化学属性指示其源区部分熔融时存在石榴子石、金红石的残留相,不存在斜长石的残留<sup>[1,3,44]</sup>。大别造山带加厚(>50 km)的榴辉岩相铁镁质下地壳是早阶段类埃达克质岩石的主要源区<sup>[1,3,22]</sup>;加厚的岩石圈地幔突出部位的去除及岩石圈底界的抬升,导致岩石圈地热率升高,为加厚下地壳的部分熔融提供了热源<sup>[1]</sup>。此时,虽然大别山还存在较厚的地壳,但软流圈的上升造成岩石圈的松弛和伸展作用的开始,因此,约 145 Ma 埃达克质岩浆侵位活动的爆发即代表大别山构造体制已由造山挤压汇聚向伸展转换<sup>[8,10]</sup>。

大别山晚阶段岩浆岩(130~114 Ma)以铁镁质-超铁镁质岩、碱性岩、花岗质侵入岩及安山质火山岩为主<sup>[5-7]</sup>。与早阶段岩石相比,包括牛王寨花岗岩在内的晚阶段中酸性侵入岩,具有更高的 Si 和 K 含量, $\text{Sr}/\text{Y}$  和  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值显著降低(图 10),Eu、Sr、Ti 呈明显的负异常,HREE 含量相对升高<sup>[1,5-6,39,41]</sup>。结合 Sr-Nd 同位素特征分析,晚阶段中酸性侵入岩是大别造山带地壳减薄到<35 km 时,中下地壳中酸性片麻岩部分熔融的产物<sup>[1,9,21-22]</sup>。此时(130~114 Ma),大别造山带已不发育埃达克质岩浆活动,暗示加厚的下地壳已发生拆沉<sup>[1-2,44]</sup>。拆沉引发的软流圈上涌,为晚阶段壳源岩浆的活动提供了热源。同时,上涌的富集地幔部分熔融,形成了大别造山带 130~114 Ma 广泛分布的幔源铁镁质-超铁镁质岩、碱性岩以及安山质火山岩<sup>[17,41-42,45,47]</sup>。不仅在大别山地区,大别山东南侧的庐枞地区、沿江地区、江南古陆及华南海域均存在 130~120 Ma 伸展体制下形成的 A 型花岗岩、碱性岩<sup>[48-49]</sup>,暗示大别山在 130 Ma 之后可能已脱离了碰撞造山构造旋回,而受控于中国东部统一的伸展构造事件<sup>[8]</sup>。

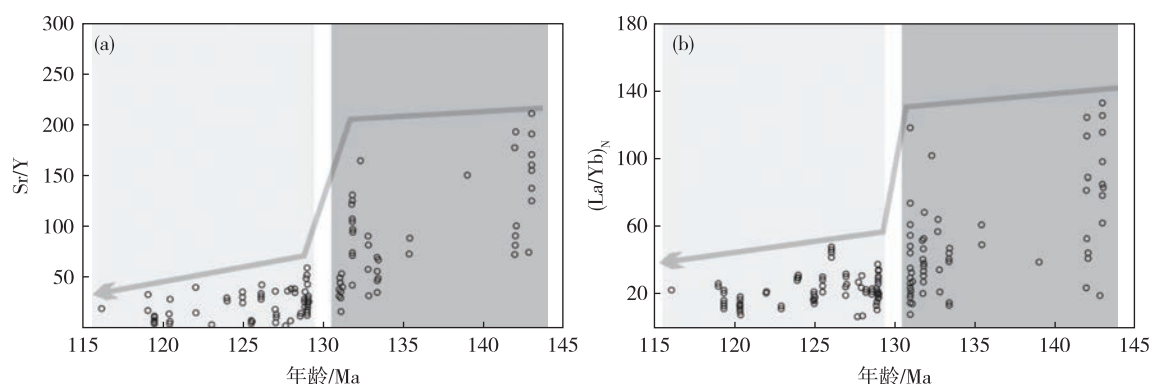


图 10 大别山早白垩世侵入岩  $\text{Sr}/\text{Y}$  (a) 和  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  (b) 与形成年龄演化曲线图<sup>[5,8,10,22,39-49,51-54]</sup>

Fig. 10 Evolution of  $\text{Sr}/\text{Y}$  (a) and  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  (b) ratios of Early Cretaceous intrusive rocks in Dabie Orogen with crystallization ages<sup>[5,8,10,22,39-49,51-54]</sup>

## 6 结论

(1) LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,北淮阳东端牛王寨花岗岩形成于  $(119.4 \pm 1.5) \text{ Ma}$ ,属于大别造山带早白垩世晚阶段岩浆活动的产物。

(2) 牛王寨花岗岩高硅、富碱,富集高场强元

素,富 Rb、贫 Ba 和 Sr,具有显著的 Eu 负异常,  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  值为 2.63~2.82,表明其属于 A 型花岗岩。

(3) 牛王寨花岗岩起源于中下地壳中酸性片麻岩的部分熔融。约 130 Ma 时大别造山带加厚下地壳拆沉引发的软流圈上涌,为中下地壳的部分熔融提供了热源。

## 参考文献

- [1] 李曙光,何永胜,王水炯.大别造山带的去山根过程与机制:碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约[J].科学通报,2013,58(23):2316-2322.  
LI S G, HE Y S, WANG S J. Process and mechanism of mountain-root removal of the Dabie Orogen: Constraints from geochronology and geochemistry of post-collisional igneous rocks[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23):2316-2322.
- [2] 何永胜.大别造山带碰撞后花岗质岩浆作用地球化学:对去山根过程及山根结构的制约[D].合肥:中国科学技术大学,2013.  
HE Y S. Geochemistry of post-collisional granitic magmatism from the Dabie orogen: constraints on removal processes and architecture of the mountain root [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [3] HE Y S, LI S G, HOEFS J, et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Early Cretaceous granitoids from Dabie orogen: Constrains on the recycled lower continental crust[J]. Lithos, 2013, 156/159:204-217.
- [4] 刘福田,徐佩芬,刘劲松,等.大陆深俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震宽角反射/折射研究[J].地球物理学报,2003,46(3):366-372.  
LIU F T, XU P F, LIU J S, et al. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt: study on the eastern Dabie Orogen by seismic wide-angle reflection/refraction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3):366-372.
- [5] 商力.安徽北淮阳地区燕山晚期岩浆岩成因及其大地构造背景[D].南京:南京大学,2012.  
SHANG L. Petrogenesis of late Mesozoic igneous rocks, Beihuaiyang, Anhui Province: implication for tectonic evolution[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [6] 刘晓强.大别造山带燕山期岩浆岩成矿作用与岩石成因[D].合肥:合肥工业大学,2014.  
LIU X Q. Mineralization and petrogenesis of Yanshanian magmatic rocks, Dabie orogen[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [7] 刘晓强.大别造山带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.
- [8] 赵新福,李建威,马昌前,等.北淮阳古碑花岗岩闪长岩侵入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.  
ZHAO X F, LI J W, MA C Q, et al. Geochronology and geochemistry of the Gubei granodiorite, north Huaiyang: Implications for Mesozoic tectonic transition of the Dabie orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6):1392-1402.
- [9] 续金海,叶凯,马昌前.北大别早白垩纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其地质意义[J].岩石学报,2008,24(1):87-103.  
XU J H, YE K, MA C Q. Early Cretaceous granitoids in the North Dabie and their tectonic implications: Sr-Nd and zircon Hf isotopic evidences[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(1):87-103.
- [10] 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.  
MA C Q, YANG K G, MING H L, et al. The time of the tectonic transition from compression to extension of the Mesozoic continental crust, Dabie orogen: evidences from the granitoids[J]. Science in China(Series D), 2003, 33(9):817-827.
- [11] 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.  
PAN G Q, LU X C, YU H B. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from North Huaiyang and discussion on its genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4):541-550.
- [12] 汪晶,吴明安,李小东,等.庐枞盆地早白垩世闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成矿指示意义[J].地质学报,2014,88(4):547-561.  
WANG J, WU M A, LI X D, et al. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of Early-Cretaceous diorite-porphyrites in Luzong basin and their implications for mineralization [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4):547-561.
- [13] LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15):1535-1546.
- [14] LUDWIG K R. Mathematical-statistical treatment of data and errors for  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  geochronology[J]. Geochemistry-series Geochemistry, 2003, 52(1):631-656.
- [15] LIU Y S, ZONG K Q, KELEMEN P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic

- rocks from the Chinese continental scientific drill hole; subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2):133-153.
- [16] CHEN F, LI X H, WANG X L, et al. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96:1179-1194.
- [17] ZHANG F F, CAWOOD P A, DONG Y P. Geochronological and geochemical constraints on the subduction-modified lithospheric origin of the early Cretaceous volcanic rocks in the western North Huaiyang Belt of Dabie Orogen, China[J]. *Journal of the Geological Society*, 2020, 177:170-188.
- [18] WILSON M. *Igneous Petrogenesis, A Global Tectonic Approach*[M]. London: Oxford University Press, 1989.
- [19] MIDDLEMOST E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System[J]. *Earth-science Reviews*, 1994, 37(3/4):215-224.
- [20] 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.
- [21] 郑祥身,金成伟,翟明国,等.北大别灰色片麻岩原岩性质的探讨:Sm-Nd 同位素年龄及同位素成分特点[J]. *岩石学报*, 2000, 16(2):194-198.
- ZHENG X S, JIN C W, ZHAI M G, et al. Approach to the source of the gray gneisses in North Dabie Terrain: Sm-Nd isochron age and isotope composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(2):194-198.
- [22] XU J H, MA C Q, YE K. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-PB dating and geochemistry [J]. *Chemical Geology*, 2007, 240: 238-259.
- [23] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95:407-419.
- [24] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11):2033-2048.
- [25] WATSON E B. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental data and applications to trace element geochemistry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 70(4):407-419.
- [26] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371-391.
- [27] TURNER S P, FODEN J D, MORRISON R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 1992, 28:151-179.
- [28] BONIN B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problem and prospects [J]. *Lithos*, 2007, 97:1-29.
- [29] YANG J H, WU F Y, CHUNG S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 2006, 89:89-106.
- [30] HUANG H Q, LI X H, LI W X, et al. Formation of high  $^{18}\text{O}$  fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China[J]. *Geology*, 2011, 39:903-906.
- [31] 李曙光,黄方,周红英,等.大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的 U-Pb 同位素组成-对超高压岩石折返机制的制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(12):977-984.
- LI S G, HUANG F, ZHOU H Y, et al. The U-Pb isotopic characteristics of ultra-metamorphic rock and northern gneisses of Shuanghe, Dabie orogen: constraints to the mechanism of the exhumation of the UHP rocks[J]. *Science in China(Series D)*, 2001, 31(12):977-984.
- [32] 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.
- [33] 薛怀民,董树文,马芳.安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的制约 [J]. *地质学报*, 2010, 84(5): 664-681.
- XUE H M, DONG S W, MA F. Geochemistry of shoshonitic volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province (Eastern China): constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the lower Yangtze region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(5):664-681.
- [34] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662-665.
- [35] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration melting of

- metabasalt at 8~32kbar; Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4):891-931.
- [36] PATIÑO DOUCE A E, BEARD J S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 5 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(3): 707-738.
- [37] FROST C D, FROST B R. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(1): 39-53.
- [38] LI R, WAN Y, CHENG Z, et al. Provenance of Jurassic sediments in the Hefei Basin, east-central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(3/4): 279-294.
- [39] 赵子福,郑永飞,魏春生,等.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[J].*岩石学报*,2004,20(5):1151-1174.
- ZHAO Z F, ZHENG Y F, WEI C S, et al. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks in the Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5): 1151-1174.
- [40] XIE Z, ZHENG Y F, ZHAO Z F, et al. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie Orogen[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(3):214-235.
- [41] 谢智,郑永飞,闫峻,等.大别山沙村中生代 A 型花岗岩和基性岩的源区演化关系[J].*岩石学报*,2004,20(5): 1175-1184.
- XIE Z, ZHENG Y F, YAN J, et al. Source evolution relationship between A-type granites and mafic rocks from Shacun in Dabieshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5):1175-1184.
- [42] CHEN L, MA C Q, SHE Z B, et al. Petrogenesis and tectonic implications of A-type granites in the Dabie orogenic belt, China: geochronological and geochemical constraints[J]. *Geological Magazine*, 2009, 146(5): 638-651.
- [43] HUANG F, LI S G, DONG F, et al. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(1/2):1-13.
- [44] 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(10): 2609-2636.
- [45] 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.
- PENG Z, DU J G, CHEN F, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Tongxingsi alkaline intrusion in the Eastern North Huaiyang and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(4):701-714.
- [46] 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.
- CHEN F, PENG Z, DONG T T, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of Zhangchong diorite porphyrite in the east part of North Huaiyang and their geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(6):1289-1298.
- [47] 刘晓强,闫峻,王爱国.北淮阳采洞冲闪锌矿区石英正长斑岩成因[J].*地质学报*,2018,92(1):41-64.
- LIU X Q, YAN J, WANG A G. Petrogenesis of quartz syenite porphyry in the Gongdongchong Pb-Zn deposit, north Huaiyang belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(1):41-64.
- [48] WU F Y, JI W Q, SUN D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province China [J]. *Lithos*, 2012, 150: 6-25.
- [49] LI X H. Cretaceous magmatism and lithosphere extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 293-305.
- [50] 安徽省地质调查院.1:250 000 六安市幅区域地质调查报告[R].合肥:安徽省地质调查院,2011:103-112.
- GEOLOGICAL SURVEY OF ANHUI PROVINCE. Regional geological survey report of Luan City (1:250 000) [R]. Hefei: Geological Survey of Anhui Province, 2011:103-112.
- [51] 彭智,邱军强,杨义忠,等.北淮阳东段山七岩体地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].*华东地质*,2018,39(1):1-10.
- PENG Z, QIU J Q, YANG Y Z, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Shanqi intrusion in eastern North Huaiyang and their geological significance[J]. *East China*

- Geology, 2018, 39(1):1-10.
- [52] 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.
- YANG Y Z, WANG H, CAI Y, et al. Geochemical characteristics and isotope chronology study of the Banqiao granodiorite in the eastern part of North Huaiyang[J]. East China Geology, 2018, 39(4):241-251.
- [53] 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.
- LU X Z, ZHOU B W, PENG Z, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Hepeng intrusion in the eastern section of North Huaiyang and their geological significance[J]. East China Geology, 2017, 38(2):81-90.
- [54] 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.
- QIU J Q, PENG Z, CHEN F, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb dating of the Yangjiawan pluton in the eastern part of North Huaiyang and their geological significance[J]. East China Geology, 2016, 37(2):89-96.

## Geochronology and geochemistry of Niuwangzhai pluton in east end of North Huaiyang: constraints on deep geological process of Dabie Orogen in Early Cretaceous

ZHANG Jingyi<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zanzan<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China;

2. Anhui Institute of Geological Sciences, Hefei 230001, Anhui, China;

3. Engineering Technology Innovation Center for Deep Resource Exploration in Covered Area, Ministry of Natural Resources, Hefei 230001, Anhui, China)

**Abstract:** Niuwangzhai granite is located in the east end of North Huaiyang in Dabie Orogen. LA-ICP MS zircon U-Pb dating indicates that the Niuwangzhai granite was emplaced at  $(119.4 \pm 1.5)$  Ma and belongs to the late-stage Early Cretaceous magmatism of Dabie Orogen. The granites are characterized with high  $\text{SiO}_2$  (71.98%~77.96%) and high alkali (7.66%~9.30%) contents, low CaO contents (0.19%~0.68%), and high  $\text{FeO}_T/\text{MgO}$  (4.04~39.04, mean value of 12.83) and  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  ratios (2.63~2.82). The granites are also enriched in high field strength elements (average content of  $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$  is  $294 \times 10^{-6}$ ) and Rb, but are depleted in Ba and Sr with apparent low  $\delta\text{Eu}$  values. Geochemical features suggest that the Niuwangzhai granites can be classified into A-type granites. Combined with Sr-Nd isotopic compositions, the granites were probably derived from the gneiss in middle-lower crust of Dabie Orogen. The upwelling of asthenosphere caused by 130 Ma thickened lower crust delamination probably provided heat to melt the intermediate-acid gneiss. The formation of Niuwangzhai granite was possibly associated with extensional tectonic event of eastern China in post 130 Ma.

**Key words:** zircon U-Pb ages; geochemistry; Niuwangzhai pluton; North Huaiyang; Dabie Orogen