

皖东地区燕山期高镁中酸性侵入岩 地球化学特征及动力学意义

童劲松^{1,3} 路玉林² 管运才³ 储东如³ 耿小光³

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 皖东地区中酸性侵入岩为一套石英闪长岩-石英二长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩组合, 主要属于高钾钙碱性岩系列, 具有高 Al_2O_3 、Sr、Sr/Y、(La/Yb)_N、富集 LREE 和 LILE、亏损 HREE 和 Y、Yb、Eu 弱负异常—正异常、岩石高 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i、低 $\epsilon Nd(t)$ 等特征。与中国东部多数埃达克岩相比, 岩石具有较高的 $Mg^{\#}$ 值和相容元素 Cr、Ni 含量。研究表明: (1) 皖东地区中酸性侵入岩可能是拆沉的下地壳基性物质经部分熔融作用及岩浆在上升过程中与地幔橄榄岩相互反应的产物, 石榴石作为残留相存在。(2) 燕山早期皖东地区存在受特提斯构造域挤压构造控制的地壳加厚过程, 早白垩世受太平洋构造域影响的郯庐断裂带大规模左行平移活动是触发下地壳拆沉的主要因素。皖东地区中酸性侵入岩是两大构造体制域发生转换的岩浆岩石记录。

关键词: 高镁中酸性侵入岩; 拆沉作用; 下地壳; 燕山期; 构造体制转换; 皖东地区

中图分类号: P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)01-0018-14

皖东地区位于扬子陆块北缘, 郯庐断裂带东侧。自三叠纪末期扬子陆块与华北陆块碰撞、拼接以来, 以发育大型逆冲、推覆构造和郯庐断裂带大规模走滑平移为标志, 该区经历了复杂的构造变形, 并产生了系列的岩浆作用。对皖东地区的中生代岩浆岩, 前人^[1-4]进行了一定程度的工作, 然而对于该带花岗岩普遍具有的富集 Sr、Ba, 亏损重稀土, 并具有较高 $Mg^{\#}$ 和相容元素含量等地球化学特征并未引起重视。近年来, 诸多研究者^[5-11]对邻近地区如大别造山带、庐枞沙溪、铜陵、宁镇安基山等地的燕山期花岗岩进行了研究, 将其中部分花岗岩厘定为增厚下地壳或拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩或类似埃达克岩, 这对于深入理解这些地区的岩石大地构造背景和壳幔作用关系有重要意义。笔者基于对几个代表性岩体(管店、屯仓、马厂等岩体)地球化学特征和 Sr、Nd 同位素组成等的研究, 对皖东地区燕山期中酸性侵入岩的成因进行分析,

并探讨其地球动力学背景与意义。

1 地质背景与岩体地质

研究区(图 1)以郯庐断裂带为界, 断裂带以西为合肥盆地覆盖, 盆地基底为新太古代五河杂岩, 合肥盆地是发育于华北陆块南缘长期隆起带上的燕山期盆地, 最早盆地沉积物记录为早侏罗世。断裂带以东分别是张八岭构造带和下扬子前陆褶冲带, 其间以黄栗树—破凉亭断裂为界, 前者出露青白口纪变细碧—石英角斑岩和蓝闪石片岩组合, 后者出露地层为南华系—三叠系。根据岩体分布与展出特征, 中生代花岗岩可以分为东、西两个岩带:

西带管店岩体平行于郯庐断裂带呈北北东向产出, 岩带从北到南可分为 3 段, 岩带总长约 70 km, 总面积 200 余平方千米。岩体东侧侵入于张八岭岩群中, 西侧或为郯庐断裂带切割, 或为晚白垩世张桥组不整合覆盖。岩体可分 3 个相带, 根据实际

收稿日期: 2007-06-20; 改回日期: 2007-09-20

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(200413000017)资助。

作者简介: 童劲松, 男, 1968 年生, 博士生, 高级工程师, 从事区域地质调查和研究工作; E-mail: ahjts@163.com。

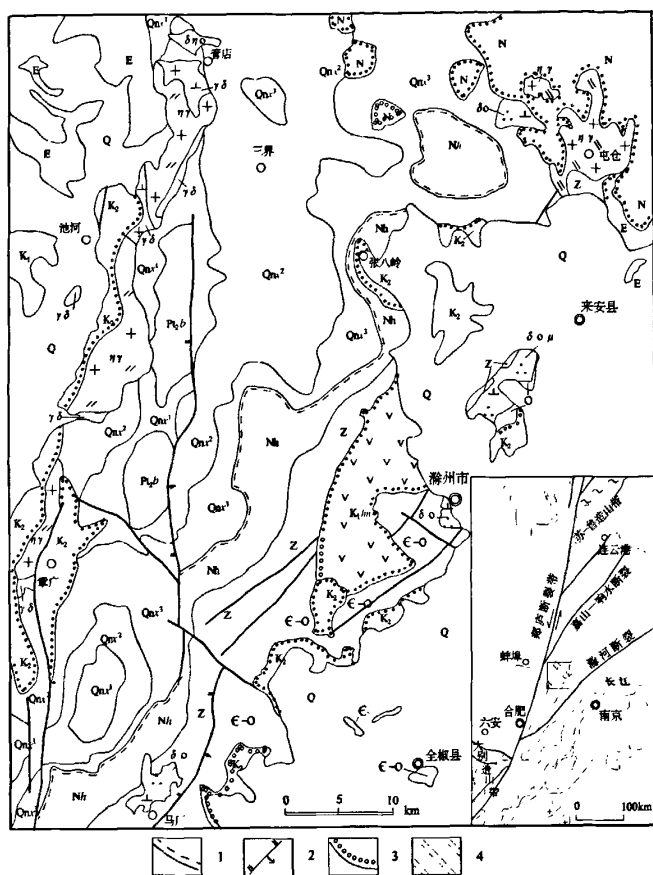


图 1 研究区地质简图

Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K₂—上白垩统;K₁—下白垩统;K_{1hm}—下白垩统黄岗岭组;E—O—寒武—奥陶系;
Z—震旦系;Nh—南华系;Qnx—青白口系西冷岩组;Pt_{2b}—中元古代北将军岩组;ηγ—二长花岗岩;γδ—花岗闪长岩;
δηo—石英二长闪长岩;δo—石英闪长岩;1—韧性剪切带;2—断层;3—角度不整合;4—研究区

Fig.1 Geological sketch map of the study area

Q—Quaternary;N—Paleogene;E—Neogene;K₂—Upper Cretaceous;K₁—Lower Cretaceous;K_{1hm}—Lower Cretaceous Huangshiba Formation;
E—O—Cambrian—Ordovician;Z—Sinian;Nh—Nanhuan System;Qnx—Xileng Formation of the Qingbaikouan System;
Pt_{2b}—Mesoproterozoic Beijianguan Formation;ηγ—monzogranite;γδ—granodiorite;δηo—quartz monzodiorite;δo—quartz diorite;
1—Ductile shear zone;2—Fault;3—Unconformity;4—Study area

矿物QAP含量分类定名,其边缘相为细粒石英二长闪长岩,过渡相为似斑状花岗闪长岩,内部相为中粗粒二长花岗岩,岩相带分布不对称,内部相偏于西南一侧,边缘相、过渡相则主要分布于北、北东接触带,各相带间没有明显的侵入接触关系。管店花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(128 \pm 1)\text{Ma}$ ^[1],石英二长闪长岩和二长花岗岩的黑云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄分别是 $(127.87 \pm 0.46)\text{Ma}$ 和 $(120 \pm 0.50)\text{Ma}$ ^[9]。

东带侵入体呈北东向沿黄栗树一破凉亭断裂产出,自北向南主要包括屯仓岩体、黄道山岩体、滁洲

岩体和马厂岩体,各岩体均呈面积较小的岩株状。屯仓岩体位于来安县屯仓一带,侵入于震旦纪灯影组和张八岭岩群中,因被上新世桂五组玄武岩覆盖而出露不全,面积约 25 km²,根据实际矿物含量,主要岩性为中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩,边缘部位见有细粒石英闪长岩;滁洲岩体侵入于早奥陶—晚寒武世地层中,出露面积约 2 km²,主要岩性为石英闪长(玢)岩,围岩大理岩化、砂卡岩化等蚀变强烈;马厂岩体位于最南端,出露面积约 18 km²,平面上近似长轴近南北向的椭圆形,围岩为震旦纪和寒

武纪地层,蚀变也很强烈,主要岩石类型为石英闪长岩,岩体中心部位为花岗闪长岩。根据前人资料,滁州石英闪长玢岩的 K-Ar 同位素年龄为 134 Ma^[2],屯仓岩体全岩-角闪石-斜长石 Rb-Sr 年龄为 (128.4±4.7)Ma,角闪石 ³⁹Ar/⁴⁰Ar 年龄为 (125.51±0.50)Ma^[4]。同位素年龄数据显示以上岩体均侵位于燕山晚期的早白垩世。

2 地球化学特征

2.1 主元素

皖东地区主要岩体的主元素、微量元素稀土元素含量见表 1。

西带管店岩体石英二长闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩的 SiO₂ 含量较相邻地区同类岩石普遍偏低,变化范围较窄(平均分别为 60.38%、65.12%和 67.00%),总碱 Na₂O+K₂O 含量变化于 6.64%~8.75%,与 SiO₂ 呈正相关关系,反映岩浆向富钾、硅质方向演化。Na₂O/K₂O 仅在 SiO₂ <64%时大于 1(1.09~1.26),其余均小于 1(0.56~0.97)。Al₂O₃ 含量为 14.14%~15.42%,ACNK 平均值 0.9;东带从石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩, SiO₂ 变化范围为 56.98%~66.27%,其中马厂岩体 Al₂O₃ 含量为 15.1%~16%,总碱含量为 7.03%~9.09%,ACNK 平均值 0.70~1.03,Na₂O/K₂O 比大多数大于 1。屯仓岩体 Al₂O₃ 含量 14.82%~15.29%,Na₂O+K₂O 含量 7.72%~

7.96%,Na₂O/K₂O 均小于 1。

皖东地区中酸性侵入岩均属准铝质系列(图 2),在 SiO₂-Na₂O+K₂O 关系图上几乎都属于亚碱性系列。在 SiO₂-K₂O 图(图 3)中。岩石主要位于高钾钙碱性岩区内,少数属钾玄岩系列。绝大多数岩石都具有较高的 MgO 含量和 Mg[#],管店岩体石英二长闪长岩和花岗闪长岩 MgO 含量为 2.76%~4.02%,Mg[#] 为 53~64,平均 57,二长花岗岩略低,MgO 含量 1.34%~1.98%,Mg[#] 为 36~57,平均 49;东带屯仓、马厂岩体 MgO 含量为 1.57%~5.69%,Mg[#] 为 52~64,平均 59,这与由俯冲板片部分熔融形成的典型的 adakite 类似,而明显高于由含水玄武岩在石榴石稳定域部分熔融形成的熔体和太古宙 TTD 的 MgO 含量(图 4)。

2.2 稀土元素和微量元素

部分岩石的稀土元素和微量元素含量见表 1。

研究区岩石具中等稀土总量,ΣREE 为 113.25×10⁻⁶~204.65×10⁻⁶,多数岩石具 Eu 的弱负异常,少数略具正异常,δEu 为 0.77~1.51,Eu 异常不明显说明了成岩过程中没有明显的斜长石的分离。轻重稀土分异明显,ΣLREE/ΣHREE=7.02~13.48,(La/Yb)_N=16.87~28.15,Yb 含量为 0.88×10⁻⁶~1.76×10⁻⁶。在球粒陨石标准化分配图中(图 5),均呈右倾的 LREE 富集模式,重稀土低于 10 倍球粒陨石丰度,并明显亏损暗示源区有较多富含重稀土矿物(如石榴石等)的残

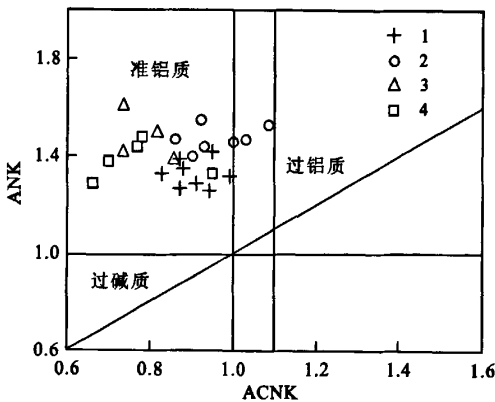


图 2 ANK-ACNK 图

1—二长花岗岩;2—花岗闪长岩;3—石英二长闪长岩;4—石英闪长岩

Fig.2 ANK-ACNK diagram

1—Monzogranite; 2—Granodiorite; 3—Quartz monzodiorite; 4—Quartz diorite

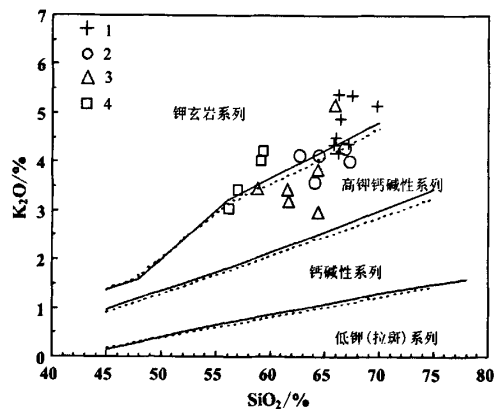


图 3 SiO₂-K₂O 图解^[14]

1—二长花岗岩;2—花岗闪长岩;3—石英二长闪长岩;4—石英闪长岩

Fig.3 SiO₂-K₂O diagram

1—Monzogranite; 2—Granodiorite; 3—Quartz monzodiorite; 4—Quartz diorite

表 1 皖东地区中酸性侵入岩的主元素、稀土元素和微量元素成分

Table 1 Major and trace element and REE compositions of intermediate-acid intrusive rocks in eastern Anhui

岩体	管 店 岩 体										
岩石类型	二长花岗岩							花岗闪长岩			
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样号	B2108	D3107	D3112	D1579	D1576	WWL-1	WWX-1	B1641	D3108	CP10G7-1	agd-1
SiO ₂	66.08	66.22	66.41	67.17	65.84	67.50	69.80	64.12	62.79	67.27	66.91
TiO ₂	0.42	0.40	0.35	0.40	0.40	0.33	0.36	0.20	0.55	0.40	0.47
Al ₂ O ₃	13.96	14.48	14.36	14.27	14.40	14.38	13.65	15.04	15.01	14.78	14.36
Fe ₂ O ₃	1.42	1.25	2.13	1.47	1.98	1.20	1.62	1.67	2.09	2.26	1.41
FeO	1.55	1.90	0.88	1.60	1.27	1.19	1.03	2.03	2.03	1.43	1.93
MnO	0.05	0.03	0.05	0.07	0.09	0.07	0.07	0.09	0.04	0.02	0.07
MgO	1.98	1.44	0.88	1.58	1.34	1.66	1.65	3.46	2.64	2.25	2.61
CaO	2.80	3.14	3.58	2.53	3.38	2.12	1.89	3.63	4.02	1.94	3.01
Na ₂ O	3.75	3.00	3.35	3.82	3.45	3.39	2.92	3.54	3.51	3.25	3.26
K ₂ O	4.49	5.38	4.87	4.38	4.36	5.36	5.14	3.57	4.12	4.00	4.27
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.14	0.14	0.15	0.13	0.13	0.20	0.22	0.12	0.21
烧失量	1.37	2.59	3.09	2.26	2.76	2.26	1.18	0.94	2.41	1.60	1.22
总量	98.04	99.99	100.09	99.69	99.42	99.59	99.44	98.49	99.43	99.32	99.73
Na ₂ O/K ₂ O	0.84	0.56	0.69	0.87	0.79	0.63	0.57	0.99	0.85	0.81	0.76
Mg [#]	56	46	36	49	44	57	54	64	55	54	59
La	37.33	31.30	28.50	31.83	29.49	31.21	25.54	32.11	37.40	28.71	32.99
Ce	60.43	55.30	45.50	54.60	50.94	53.78	49.70	60.54	62.40	47.14	55.73
Pr	7.05	5.59	5.00	6.17	6.23	5.10	5.44	7.46	6.40	5.99	5.44
Nd	21.95	19.90	14.20	20.10	20.19	18.06	19.71	25.15	25.40	20.34	19.01
Sm	3.66	4.32	3.60	3.72	3.82	2.39	3.35	4.89	5.32	3.93	3.98
Eu	0.95	0.90	0.90	0.90	0.93	1.01	1.22	1.22	1.21	0.91	1.76
Gd	2.58	2.55	2.75	2.57	2.69	2.67	2.88	3.49	3.47	2.74	2.93
Tb	0.39	0.32	0.31	0.47	0.48	0.35	0.38	0.61	0.45	0.49	0.31
Dy	2.00	1.70	1.61	1.73	1.77	1.28	1.74	2.49	2.40	1.89	1.65
Ho	0.36	0.36	0.32	0.37	0.38	0.28	0.33	0.52	0.51	0.40	0.31
Er	1.00	0.91	0.85	1.05	1.07	0.85	0.93	1.43	1.28	1.12	1.08
Tm	0.16	0.15	0.14	0.18	0.18	0.08	0.15	0.23	0.19	0.19	0.19
Yb	1.01	0.96	0.94	0.88	0.90	0.68	0.88	1.14	1.14	0.90	0.90
Lu	0.16	8.20	0.13	0.14	0.15	0.09	0.14	0.17	0.18	0.14	0.17
ΣREE	139.03	132.46	104.75	124.71	119.22	117.83	112.39	141.45	147.75	114.89	126.45
δEu	0.90	0.77	0.84	0.84	1.22	1.17	1.17	0.86	0.81	0.81	1.51
(La/Yb) _N	24.98	22.03	20.49	24.44	22.14	31.01	19.61	19.03	22.17	21.56	24.77
Rb	111.00	126.50	121.10	103.40	78.80	109.63	107.32	74.10	97.70	103.20	59.20
Sr	545.00	524.70	433.60	471.20	417.30	527.45	605.87	713.10	646.50	537.70	627.81
Ba	1318.00	1789.20	1296.90	1213.80	1110.10	2130.80	1731.20	1555.20	1564.00	1242.50	1524.50
Th	8.10					10.30	15.41				10.54
Nb	11.80	8.60	11.90	11.40	15.00	7.11	10.05	12.00	10.40	11.00	8.75
Ta	1.20					1.50	1.19				0.97
Y	8.43	8.20	8.50	8.10	8.52	8.15	8.97	11.52	11.30	18.06	8.20
Hf	5.10					3.67	3.84				4.34
Zr	149.00	150.40	139.80	163.90	199.90	107.25	118.81	229.00	177.60	188.70	149.81
Cu		22.40	27.60	614.40	165.90	11.28	8.97	231.90	78.80	467.80	8.83
Pb		34.20	25.40	29.40	91.30	26.79	24.36	30.80	25.30	24.70	14.54
U	2.10					1.42	3.59				1.53
Zn	51.90	63.40	47.80	63.10	62.60	23.68	37.73	41.40	70.38	41.40	18.62
Co	11.20	7.60	6.90	9.00	6.80	8.31	8.80	11.50	12.00	11.50	10.55
Ni	37.30	29.70	31.80	38.90	44.00	35.23	32.74	43.70	49.50	43.70	45.85
Cr	60.70	73.30	80.00	84.10	108.80	51.57	68.23	141.90	111.90		100.38
V		66.10	61.30	69.50	73.10			80.08	87.40	80.08	
Li	29.00	22.00	20.30	23.60	28.10			24.90	21.90	24.40	

续表 1

岩体	管 店 岩 体				屯 仓 岩 体			马 厂 岩 体			
岩石类型	花岗 闪长岩	石英二长闪长岩			二长 花岗岩	石英闪长岩		花岗闪长岩	石英闪长岩		
序号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
样号	B2127	B2102	B2423	JP10G6	B01111-1	B0111-2	B0111-3	B1246	SJ-1	B2212	B2117
SiO ₂	64.49	61.74	58.84	64.38	66.27	59.17	59.28	61.65	65.90	56.12	56.98
TiO ₂	0.55	0.85	0.60	0.52	0.52	0.66	0.67	0.70	0.45	0.90	0.78
Al ₂ O ₃	14.39	15.17	14.14	14.35	15.29	14.82	14.88	15.49	16.00	15.55	15.10
Fe ₂ O ₃	1.28	2.46	1.51	0.57	1.23	2.37	1.57	3.02	2.09	1.58	0.52
FeO	2.62	2.48	4.24	3.67	2.42	3.21	3.78	2.44	0.45	5.18	4.82
MnO	0.06	0.08	0.09	0.07	0.07	0.13	0.11	0.05	0.03	0.04	0.08
MgO	2.95	3.89	3.56	2.76	2.38	5.36	5.65	3.14	1.57	5.21	5.32
CaO	3.10	4.63	5.11	3.54	2.95	4.95	4.94	2.71	2.62	5.94	6.22
Na ₂ O	3.56	4.00	3.76	3.72	3.78	3.46	3.49	4.21	3.92	4.87	4.85
K ₂ O	4.12	3.18	3.45	3.84	4.18	4.02	4.23	3.42	5.17	3.03	3.43
P ₂ O ₅	0.22	0.25	0.31	0.21	0.22	0.30	0.31	0.29	0.17	0.38	0.34
烧失量	1.45	0.88	4.42	1.78	0.92	1.51	1.54	2.30	1.73	0.55	1.19
总量	98.79	99.61	100.03	99.41	100.23	99.96	100.45	99.42	100.10	99.35	99.63
Na ₂ O/K ₂ O	0.86	1.26	1.09	0.97	0.90	0.86	0.83	1.23	0.76	1.61	1.41
Mg [#]	58	60	53	54	55	64	66	52	55	58	64
La	39.52	39.30	43.80	45.70	45.50	39.10	39.00	40.60	27.10	39.55	39.32
Ce	67.82	69.60	82.30	101.00	81.60	72.80	69.50	72.30	49.00	75.95	71.75
Pr	8.28	7.90	8.89	8.34	8.73	8.10	8.18	7.59	477.00	8.98	9.96
Nd	26.80	30.00	29.40	20.80	31.60	31.60	30.80	30.60	18.70	34.10	32.78
Sm	4.37	5.20	5.48	5.31	5.11	5.13	5.04	5.80	3.56	7.18	5.71
Eu	1.15	1.49	1.58	1.15	1.31	1.50	1.27	1.64	1.00	1.66	1.65
Gd	3.19	3.40	3.20	3.11	3.85	4.08	3.68	4.10	3.12	4.58	4.24
Tb	0.48	0.47	0.55	0.60	0.49	0.55	0.48	0.50	0.42	0.56	0.59
Dy	2.41	2.20	2.40	2.65	2.49	2.98	2.85	2.77	2.20	3.09	2.83
Ho	0.45	0.43	0.49	0.49	0.49	0.59	0.57	0.54	0.43	0.62	0.51
Er	1.08	1.10	1.29	1.22	1.29	1.63	1.51	1.28	1.18	1.49	1.32
Tm	0.15	0.16	0.20	0.19	0.20	0.25	0.23	0.17	0.17	0.23	0.19
Yb	0.90	1.00	1.16	1.25	1.16	1.55	1.31	1.05	0.97	1.33	1.08
Lu	0.13	0.17	0.16	0.17	0.16	0.24	0.29	0.17	0.16	0.20	0.15
ΣREE	156.73	162.42	180.90	191.98	183.98	170.10	164.71	169.11	585.01	179.52	172.08
δEu	0.90	1.02	1.06	0.80	0.87	0.97	0.86	0.98	0.90	0.83	0.98
(La/Yb) _N	29.67	26.56	25.52	24.71	26.51	17.05	20.12	26.13	18.88	20.09	24.60
Rb	81.70	90.50	53.80	127.20	97.20	122.10	96.80	82.50	94.00	65.20	82.60
Sr	743.00	798.70	910.20	687.20	737.00	505.00	572.00	885.20	778.50	1297.00	1107.00
Ba	1479.00	1507.60	1315.60	1359.20	1757.00	1143.00	1129.00	1722.70	1328.10	1473.70	1405.00
Th	14.60	9.95	10.56		11.50	9.60	9.80	13.20			6.30
Nb	10.80	9.55	7.30	11.80	11.70	12.80	12.00	8.40	8.87	9.70	8.70
Ta	0.90	0.89	1.14		1.47	1.27	1.62	0.96			0.50
Y	9.80	11.00	10.40	12.30	12.09	14.38	13.09	12.00	10.10	14.10	11.01
Hf	6.50	5.83	5.15		5.34	5.23	5.99	5.41			6.80
Zr	182.00	203.45	182.20		162.00	146.00	178.00	218.90	167.60	218.70	199.00
Cu		64.40	72.80	5.60	13.60	119.70	235.50	91.40		50.60	81.10
Pb		40.95	34.50	47.40				24.70		17.60	16.70
U	2.30	1.59	1.87		2.50	1.30	2.60	1.92		1.50	1.40
Zn	44.10	82.15	81.80	82.50	49.80	74.00	67.00	95.00	35.80	90.90	71.40
Co	14.40	20.05	21.30	18.80	12.90	20.30	21.70	10.50	12.90	21.50	24.60
Ni	47.90	78.10	85.10	71.10	44.00	160.00	138.00	57.90	28.20	82.30	103.00
Cr	117.00	77.80	229.30	152.30	455.00	461.00	394.00	130.40	70.90	208.30	253.00
V		83.70	100.80	91.00	70.00	106.20	102.80	115.60	62.80	135.30	102.35
Li	16.30	12.90	14.61	24.70	14.61	14.51	21.52	56.20	17.60	85.90	17.60

注：常量元素含量单位为 10⁻²，微量元素和稀土元素含量单位为 10⁻⁶；1、8、12-14、16-19、21-22 号样品来自本文，由武汉综合岩矿测试中心测试；6、7、11 引自参考文献[3]；其余数据引自 1:5 万施家集、池河等幅区调报告。

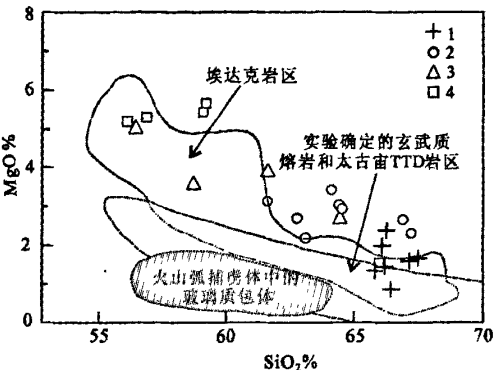


图 4 埃达克岩与玄武质实验熔体 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ 图解^[13]
1—二长花岗岩;2—花岗闪长岩;3—石英二长闪长岩;
4—石英闪长岩

Fig.4 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ diagram for adakite and experimental basaltic melts

1—Monzogranite;2—Granodiorite;3—Quartz monzodiorite;
4—Quartz diorite

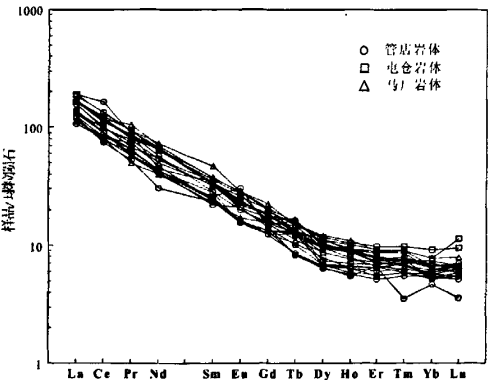
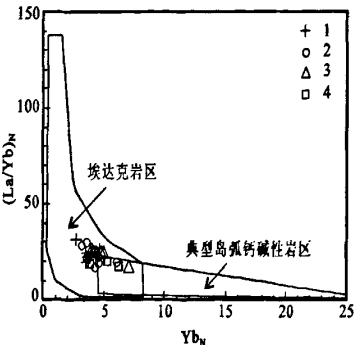


图 5 稀土元素球粒陨石标准化分布图
Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns



留。不同岩体和岩石类型的相似的分配曲线和特征值表明它们具有近似一致的源岩组成和成岩方式。

岩石的 Sr、Ba 含量较高, Sr 含量为 417.30×10^{-6} ~ 1107×10^{-6} , 平均含量为 685.87×10^{-6} , Ba 一般为 1110.1×10^{-6} ~ 2130.8×10^{-6} , 平均为 1458.91×10^{-6} , Y 含量低, 为 8.1×10^{-6} ~ 18.06×10^{-6} , 平均 11.14×10^{-6} , Sr/Y 比值为 48.98~100.54。在原始地幔标准化比值图上(图 6), 岩石以高场强元素(HFSE, Nb、Ta、Zr、Y、Yb)的明显亏损为特征, 而大离子亲石元素(LILE, Rb、Th、Ba、Sr)相对富集, 这些都暗示岩浆源区有较多的陆壳物质参与。岩石所表现出的高的 Sr/Y、(La/Yb)_N 比值和较低的 Y、Yb 含量, 使其绝大多数均位于埃达克岩区内(图 7)。

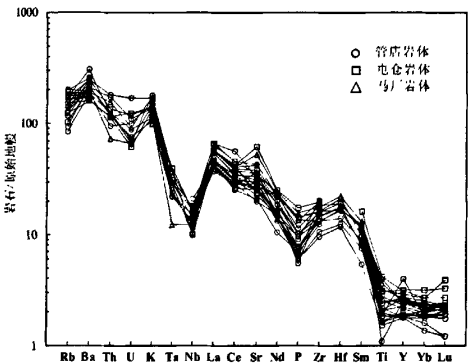


图 6 微量元素原始地幔标准化分布图
Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element distribution patterns

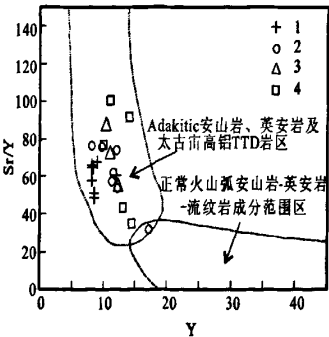


图 7 $(\text{La}/\text{Yb})_N\text{-Yb}_N$ 和 $\text{Sr}/\text{Y-Y}$ 图解^[14,15]
1—二长花岗岩;2—花岗闪长岩;3—石英二长闪长岩;4—石英闪长岩
Fig.7 $(\text{La}/\text{Yb})_N\text{-Yb}_N$ and $\text{Sr}/\text{Y-Y}$ diagrams
1—Monzogranite;2—Granodiorite;3—Quartz monzodiorite;4—Quartz diorite

岩石的过渡族元素含量较高,其中以 Cr、Ni 尤为明显,石英闪长岩-花岗闪长岩中 Cr 为 $70.9 \times 10^{-6} \sim 461 \times 10^{-6}$, Ni 为 $49.5 \times 10^{-6} \sim 160 \times 10^{-6}$,在二长花岗岩中 Cr 为 $51.57 \times 10^{-6} \sim 108.38 \times 10^{-6}$, Ni 为 $29.7 \times 10^{-6} \sim 44.00 \times 10^{-6}$,这既明显高于安徽省沿江地区中生代岩浆岩同类岩石^[2](Cr = $12.7 \times 10^{-6} \sim 382.5 \times 10^{-6}$, Ni = $4 \times 10^{-6} \sim 15.2 \times 10^{-6}$),也高于宁镇安基山地区的富镁中酸性侵入岩体^[7](Cr = $19.6 \times 10^{-6} \sim 35.4 \times 10^{-6}$, Ni = $12.0 \times 10^{-6} \sim 64.6 \times 10^{-6}$)。Cr、Ni-Mg[#]图上, Cr、Ni 与 Mg[#]之间呈现出一定的正相关性,这显示这两种异常具相似的形成机制和演化过程。

3 Sr、Nd 同位素组成

在 8 个样品的 Sr、Nd 同位素组成的分析(表 2)中,有部分样品数据是根据过去的测定结果按 128 Ma 的平均年龄值进行重新计算得出的,B3256 是滁洲火山岩盆地中与侵入岩的时代相近的早白垩世黄石坝组安山岩,列入以供参考。数据采用路远发^[10]编写的 Geokit 软件进行处理,几组数据分析、处理结果总体较为接近,表明不同的测试结果是可信的。

根据分析结果,研究区岩石具有中等的 Sr 初始比和较低的 $\epsilon Nd(t)$, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 值变化为 0.70607~0.70679, $\epsilon Nd(t)$ 值则为 -18.2~-13.8, 这种 Sr、Nd 同位素组成明显不同于由俯冲大洋板片部分熔融形成的熔体的成分^[14],肖庆辉等^[17]认为 Sr 的初始比在 0.706~0.719 的花岗岩主要为壳源,但受到幔源物质的混染, $\epsilon Nd(t)$ 的低值也表明岩浆源区仍以壳源物质为主。

4 成因讨论

4.1 岩浆源区

在 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图(图 8)上,皖东地区岩浆岩与扬子陆块上、下地壳具有一定的差异,因而岩浆直接由陆壳部分熔融形成的可能性很小,图上样品投影点分布区域斜线分布于地幔演化趋势线下方,一般认为是岩浆起源于太古宙下地壳的特点^[18],而投影点上方与地幔源区重合,下方接近扬子下地壳,则暗示了下地壳壳源岩浆与富集型幔源岩浆之间的混染作用,换言之,区内中酸性岩浆岩中既有古老陆壳物质、也有幔源物质的参与。这也与岩石中相对富含 K₂O、LILE 和亏损 HFSE 的特征相符。

岩石 Nd 的二阶段模式年龄 T_{DM} 为 2.04~2.4

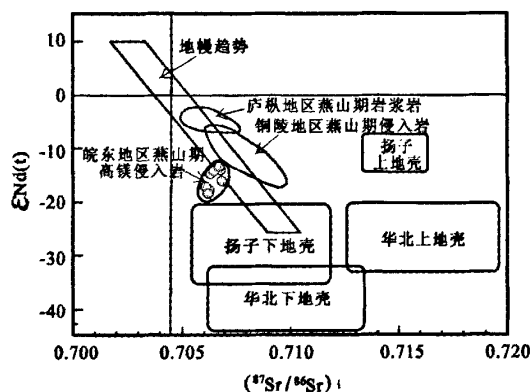


图 8 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解

华北、扬子上、下地壳转引自参考文献[19], 庐枞、铜陵地区转引自参考文献[2, 20]

Fig.8 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram.

Data of the upper and lower crust under North China and Yangtze from reference [19]; data of the Luzhong and Tongling areas from reference [2, 20]

Ga, 其中管店岩体瓦屋刘二长花岗岩的 $\epsilon Nd(t)$ 最小(-18.2), 壳源物质最多, Nd 的模式年龄最老(2.4 Ga)。在皖东南黄地区新元古代张八岭岩群之下上交点年龄(2493 ± 19) Ma TTG 质片麻岩的发现^[21]显示扬子陆块北缘东部地区存在较为广泛的新太古—古元古代基底, 这与上述 Nd 的模式年龄相吻合。因此以古老下地壳物质为主要源岩, 并受到富集型幔源岩浆的混染可能是皖东地区岩浆岩形成的主要形式。图 8 还显示, 皖东地区岩浆岩与庐枞、铜陵等沿江地区燕山期侵入岩在 Sr、Nd 同位素组成上差异明显, 这也说明它们之间在物源组成、成岩方式等方面有着较大差异。

4.2 岩石成因

如前所述, 皖东地区中酸性侵入岩表征出许多与埃达克岩相似的地球化学特征, 如较高的 Al_2O_3 含量(>14%)、高 Sr(> 400×10^{-6})、低 Y(< 18.00×10^{-6})和 Yb(< 1.9×10^{-6}), 富集 LREE 而亏损 HREE, 不具明显的 Eu 异常等。埃达克岩最初定义为产于岛弧环境, 由年轻、热的俯冲大洋板片在高压环境下部分熔融产生的一套富 Al_2O_3 、 Na_2O 和高 Sr、低 Y 和亏损 HREE 的中酸性岩石, 其源区残留相包括辉石、石榴石、角闪石和金红石等^[14]。但随着对埃达克岩研究的不断进展, 发现具有与埃达克岩相似化学成分的岩石可以形成于多种构造环境。近年来对中国东

部地区燕山期岩浆岩的研究表明^[5-7,22-24],它们中许多岩石也与埃达克岩相似,被称为埃达克质岩、C 型埃达克岩或亏损重稀土和 Y 型花岗岩等,这其中的多数岩石属于高钾钙碱性岩类。尽管这些岩石的成因和动力学背景存在差异,部分元素含量和同位素组成也不尽相同,但它们都具有共同的特征,即岩浆源区有石榴石作为残留相存在,因此必须形成于较高的压力条件下。

具有与埃达克岩相类似地球化学特征的中酸性侵入岩成因有:俯冲板片的部分熔融^[14];玄武质基性岩浆的混染-分离结晶(AFC)作用^[25];增厚下地壳的镁铁质岩石的部分熔融和拆沉下地壳的部分熔融等^[26-30]。从地理位置上看,皖东地区位于太平洋西岸,现有研究表明中生代太平洋板块曾向欧亚大陆低角度俯冲、消减,因此通过俯冲板片的部分熔融并受到楔状地幔的混染是形成高 $Mg^\#$ 、富 Sr、低 Y 中酸性侵入岩的一种可能形式,但皖东地区较高的 K_2O 含量、相对富集 LILE、LREE 以及明显不同于消减板片的 Sr、Nd 同位素说明这些侵入体不可能由俯冲板片的 MORB 玄武岩部分熔融形成。其次皖东地区也没有发现有较大规模的中生代的镁铁质岩浆岩出露,而岩体较高的 $Mg^\#$ 和远高于地壳平均含量的 Cr、Ni 等过渡族元素也不是由基性岩浆分异并受地壳物质混染所能解释的,这与菲律宾的 Camiguim 岛由玄武质岩浆经 AFC 作用所形成的具 Adakite 成分特征的酸性火山岩^[20]明显不同。

与中国东部地区大多数埃达克质岩石不同的是,皖东地区中酸性侵入岩具有较高的 $Mg^\#$ 和 Cr、Ni 等相容元素, Al_2O_3 和 SiO_2 也较同类岩石略显偏低。一般认为,大洋中脊玄武岩的 $Mg^\#$ 约为 60,由其部分熔融产生的熔体 $Mg^\#$ 小于 45^[31],因此镁值大于 50 的埃达克质岩石说明其形成演化时应受到更基性的、相对富镁的幔源物质如橄榄岩的混染。实验岩石学显示^[3],埃达克质岩若与橄榄岩发生 10% 的混染,便可导致熔体的 $Mg^\#$ 从 44 提高到 55,并导致熔体中的 FeO、Ni、Cr 显著的提高和 SiO_2 、 Al_2O_3 含量的降低,使埃达克质熔浆由过铝性质转变为偏铝质,但其他微量元素的基本特征和型式则改变不大,因此 $Mg^\#$ 及 Cr、Ni 等元素含量是基性熔体(源于洋壳或基性下地壳)是否受幔源物质混染的一项重要指标。皖东地区中酸性侵入岩高 $Mg^\#$ 、富含 Cr、Ni 说明它们不可能完全是下地壳中基性物质直接部分熔融的

产物,类似高镁安山岩是岩浆通过地幔楔与橄榄岩反应导致镁含量增高机制,皖东地区的这些高镁中酸性侵入岩很有可能是拆沉下地壳的基性岩石经脱水熔融产生埃达克质初始熔浆,在熔浆上升过程中经历了与地幔橄榄岩的反应,最后形成了高 $Mg^\#$ 、富 Cr、Ni 的具埃达克质成分特征的岩石,这一成因模式也与同位素组成相吻合。

4.3 构造岩浆动力学背景

如前所述,皖东地区具埃达克岩特征的中酸性侵入岩亏损重稀土和 Y、Eu 异常不明显的特征,指示它们是在下地壳基性物质部熔融过程中,角闪石脱水分解,斜长石发生熔融,同时石榴石作为残留相存在。实验岩石学研究证实^[32-35],玄武质岩石部分熔融过程中石榴石与熔体达到平衡的压力要大于 1.2 GPa,即相当于地壳 40 km 以下的深度进行,同时必须在高温条件下进行(850~1150℃)。多数岩石呈现较高的镁值也暗示熔体受地幔橄榄岩的混染作用,因此下地壳拆沉进入地幔环境并发生部分熔融是最可能的成因机制。

张旗^[36]在最近的研究中阐述了大陆下地壳拆沉的成因模式,提出下地壳拆沉必须满足 3 个条件:(1)地壳加厚,使下地壳或下地壳底部达到榴辉岩相;(2)下地壳发生部分熔融作用使其密度进一步增加;(3)下伏的岩石圈地幔转变为软流圈地幔。皖东地区地处大别造山带张八岭构造带和下扬子前陆褶冲带,印支期受陆-陆俯冲碰撞造山作用,在张八岭岩群中形成了蓝闪石片岩相的低温高压变质作用^[37,38]($T=250\sim 550^\circ C$, $P=0.6\sim 1.2$ GPa),与大别山高压-超高压变质带形成由北向南的榴辉岩-白片岩-蓝片岩相变质分带,代表了张八岭地区地壳相对较浅部位的变质作用。印支末期—燕山早期,受特提斯构造域南北陆块持续挤压的影响,在郯庐断裂带发生同造山走滑构造^[39-41],并在造山带两侧发生强烈的前陆构造变形,在断裂带东侧的扬子陆块北缘形成系列 NE 向逆冲断层、叠瓦扇和逆掩-推覆构造,标志着扬子陆块北缘大陆岩石圈的进一步缩短以及地壳的增厚。此外,基性玄武质岩浆底侵作用可能也是地壳增厚的一个重要因素,中国东南部在中生代可能发育有广泛的底侵玄武质岩浆事件^[42],对大别造山带及邻区的岩浆岩石研究揭示在 J_3 — K_1 存在基性岩浆底侵及拆沉作用^[43]。深地震反射资料也显示在郯庐断裂带东侧的长江中下游地区下地壳存在强烈的

表 2 皖东地区中生代岩浆岩 Sr、Nd 同位素比值

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions for Mesozoic magmatic rocks in eastern Anhui province

样品号	岩体名称	岩石类型	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	T_{DM}	资料来源
D2117	马厂岩体	石英闪长岩	85.62	1058.00	0.2341	0.706760	16.00	0.70633	4.8791	35.912	0.08219	0.511790	8	0.511721	-16.5	2114	本文
D3258	屯仓岩体	二长花岗岩	134.50	591.70	0.6576	0.707627	16.00	0.70643	4.2225	28.217	0.09051	0.511782	10	0.511706	-16.7	2138	本文
D3256	黄石坝组	安山岩	84.14	719.50	0.3383	0.707218	13.00	0.70658	6.0080	45.490	0.07989	0.511806	5	0.511736	-16.2	2086	本文
GD-X	管店岩体	花岗闪长岩	58.30	175.50	0.1435	0.706330	6.00	0.706100	4.7700	28.820	0.10010	0.511681	5	0.511681	-15.5	2310	参考文献[2]
C-1	管店岩体	石英闪长岩	55.51	1253.00	0.1288	0.706940	3.00	0.706500	3.1200	17.180	0.10980	0.511858	18	0.511762	-13.7	2043	参考文献[2]
WWL-1	管店岩体	石英二长岩	139.30	571.00	0.7047	0.707592	12.00	0.706311	2.9310	18.350	0.09660	0.511621	6	0.511540	-18.2	2400	参考文献[3]
WWX-1	管店岩体	二长花岗岩	110.40	599.20	0.5320	0.707758	17.00	0.706851	3.2190	19.430	0.10020	0.511171	7	0.511627	-16.8	2270	参考文献[3]
GD-1	管店岩体	石英二长岩	71.33	724.90	0.2841	0.706750	10.00	0.706750	3.5480	22.150	0.09688	0.511655	7	0.511574	-17.6	2346	参考文献[3]

注:样品均由中国地质科学院地质研究所同位素室测试;计算 Sr-Nd 同位素初始比值和 T_{DM} 时,D3256 采用 133 Ma,其余均采用平均年龄 128 Ma。

反射面,被解释为镁铁质岩浆侵入体^[46]。女山玄武岩内中性麻粒岩包体的同位素年代学研究也显示受到中生代岩浆热事件的影响而发生Pb丢失^[49],这与中国东部较大规模的基性岩浆底侵事件一致。因此由于碰撞挤压和基性岩浆底侵导致皖东地区地壳增厚是完全可能的。

拆沉前的下地壳部分熔融在皖东地区表现并不明显,滁洲火山岩盆地内黄石坝组中的粗安质-英安质火山岩可能是这一机制的代表,地球化学显示该套火山岩中多数岩石同样具重稀土亏损和富Sr低Y的特点,但与中酸性侵入岩比,其Mg[#]值要低的多,表明它们是未受幔源物质污染的、加厚下地壳底部基性物质“正常”部分熔融产物,Sr、Nd同位素分析(表2)表明它们也源于古老的下地壳,锆石SHRIMP年龄测试结果是134 Ma(待刊),稍早于中酸性侵入岩,看起来因下地壳底部基性物质的部分熔融及岩浆的抽取使密度进一步增大而导致拆沉似乎是可能的机制,但是滁洲火山岩盆地的范围仅92 km²,难以想象如此小规模岩浆活动能使皖东地区下地壳榴辉岩相物质向更进一步的基性成分转变。因此,部分熔融后岩浆的抽取也不太可能是导致皖东地区下地壳拆沉的前提条件,至少不是主要的影响因素。

下地壳拆沉一定伴有一个突发机制^[50],笔者认为郯庐断裂带大规模的左行平移活动是触发下地壳拆沉的主要因素。早白垩世受太平洋Izumi板块的高速NNW向俯冲影响,中国东部区域处于NW-SE向挤压环境,这一挤压构造应力场产生的分量使郯庐断裂带再次发生了强烈的左行平移运动^[46,47],同位素年代学研究显示大规模左行平移发生在132~120 Ma^[48],这与岩浆活动的时间一致。地下深部大规模的剪切必然使下地壳乃至岩石圈的整体性发生破坏,并产生相应的重力失衡。另一方面,太平洋板块的持续俯冲使中国东部地区产生强烈的岩石圈伸展和软流圈物质的上涌,上涌的软流圈对岩石圈底部进行热机械侵蚀和化学侵蚀作用,使岩石圈的组成、渗透率和流变学性质发生改变,使其被软流圈同化^[49]。路风香等^[50]也认为刚性的岩石圈地幔在条件适当,特别是水存在的条件下可以发生弱(软)化,由刚性转化为塑性,从而加强了地壳与弱化岩石圈间的相互作用。因此深断裂的破坏、岩石圈地幔的软流圈化或弱化必然导致榴辉岩化下地壳与地幔间产生密度

差异和重力失稳,最终引发下地壳的拆沉和随后在地幔环境中发生的部分熔融作用。

地球物理资料显示,郯庐断裂带东侧的现代地壳厚度为30~32 km^[51,52],而且软流圈上升明显,最浅处仅70 km,比断裂带西侧的灵璧抬升了40 km左右^[53]。从早白垩世早期地壳大于40 km的厚度,到现代的约30 km厚度,这期间地壳发生了明显的减薄,这一过程应该与中国东部中生代以来岩石圈大规模的减薄事件背景一致,从这个意义上说下地壳的拆沉作用也是东部地区岩石圈减薄的重要机制之一。早白垩世早期下地壳拆沉并产生岩浆作用后,从早白垩世晚期开始,皖东地区进入NW-SE向的伸展构造环境,这以形成NE向的来安盆地、沿江盆地和合肥盆地的进一步NE向断陷化为标志,因此,从晚三叠一早、中侏罗世受特提斯构造域控制的同时山挤压、增厚,到早白垩世早期因太平洋构造域的叠加、改造使先期加厚的下地壳发生拆沉和部分熔融,皖东地区中酸性侵入岩事件既是两大构造体制域发生转换的岩浆岩石记录,也是由陆内挤压构造环境向伸展背景转换的先导。

5 结论

(1)皖东地区早白垩世形成的中酸性岩石组合高Sr低Y、亏损重稀土,具有类似adakite的成分特征;Sr、Nd同位素组成和较高的Mg[#]、富含Cr、Ni等相容元素指示它们是拆沉的古老下地壳基性物质部分熔融并在熔浆上升过程中与地幔橄榄岩发生反应的产物,石榴石作为残留相存在。

(2)晚三叠一早、中侏罗世受特提斯构造域挤压作用控制,皖东地区存在持续的陆壳加厚过程,早白垩世早期郯庐断裂带大规模平移活动触发了下地壳的拆沉作用,下地壳的拆沉作用是东部地区中生代岩石圈减薄的主导机制之一。皖东地区中酸性侵入岩是两大构造体制域发生转换的岩浆岩石记录。

参考文献(references):

- [1] 李学明,李彬贤,张翼,等.安徽管店岩体的同位素年龄和郯庐断裂的动力变质作用[J].中国科技大学学报,1985,15(增刊):254~261.
- Li Xueming, Li Binxian, Zhang Yun, et al. Geochronology of Guandian rock mass in Anhui province and dynamic metamorphism in Tancheng-Lujiang fracture zone [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1985, 5 (Supp.):254~261 (in

- Chinese with English abstract).
- [2] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽扬子岩浆岩带与成矿[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 1999: 1-170.
Xin Fengming, Xu Xiang. Yangtze Magmatic Belt and Metallogenesis [M]. Hefei: Anhui People's Publishing House, 1999: 1-170 (in Chinese).
 - [3] 牛漫兰, 朱光, 刘国生, 等. 郑庐断裂带中-南段中生代岩浆活动的构造背景与深部过程[J]. 地质科学, 2002, 37(4): 393-494.
Niu Manlan, Zhu Guang, Liu Guosheng, et al. Tectonic setting and deep processes of Mesozoic magmatism in middle-South segment of the Tan-Lu fault [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(4): 393-494 (in Chinese with English abstract).
 - [4] 陈江峰, 谢智, 郑永飞, 等. 皖东侵入岩矿物 Rb-Sr 和 Ar-Ar 年代学及其与氧同位素平衡之间的关系 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(2): 172-183.
Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Zheng Yongfei, et al. The relation between Rb-Sr, Ar-Ar geochronometers and oxygen isotopic equilibrium of intrusions from eastern Anhui Province, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(2): 172-183 (in Chinese with English abstract).
 - [5] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 551-564.
Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 551-564 (in Chinese with English abstract).
 - [6] 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长岩的证据[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 353-362.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, et al. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite -porphyrites, Anhui Province, China [J]. Geochimica, 2001, 30(4): 353-362 (in Chinese with English abstract).
 - [7] 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制 [J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 576-584.
Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, et al. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 576-584 (in Chinese with English abstract).
 - [8] 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 Guoqiang, Lu Xiancai, Yu Hangbo. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 541-550 (in Chinese with English abstract).
 - [9] 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 297-314.
Wang Yang, Deng Jinfu, Ji Guangyi. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 297-314 (in Chinese with English abstract).
 - [10] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 326-338.
Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, et al. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 326-338 (in Chinese with English abstract).
 - [11] 钱存超, 路玉林, 刘丽利. 大别山超高压变质带燕山期花岗岩地球化学特征及成因探讨[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 147-154.
Qian Cunchao, Lu Yulin, Liu Lili. Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian granite in the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt [J]. Geology in China, 2004, 31(2): 147-154 (in Chinese with English abstract).
 - [12] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
 - [13] Rapp RP, Shimizu N, Norman MD, et al. Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa [J]. Chemical Geology, 1999, 160: 335-356.
 - [14] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
 - [15] Drummond M J, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95 (B13): 21503-21521.
 - [16] 路远发. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
Lu Yuanfa. Geokit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
 - [17] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 71-101.
Xiao Qinhuai, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The Ways of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 71-101 (in Chinese with English abstract).
 - [18] 邢凤鸣. 皖中下地壳重熔型花岗岩类 [J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(33): 230-236.
Xing Fengming. The anatectic granitoids of lower crust in Central Anhui [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997, 16(33): 230-236 (in Chinese with English abstract).
 - [19] Jahn B, Wu F, Lo C, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collision mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. Chemical

- Geology, 1999, 157:119-146.
- [20] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 扬子地块东部燕山期埃达克岩(adakite-like)岩与成矿[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(增刊): (127-136).
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian dakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block [J]. Science in China (Series D), 2003, 46(Supp.): (127-136) (in Chinese).
- [21] 涂荫玖, 杨晓勇, 郑永飞, 等. 皖东南黄片麻岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2001, 17(1):157-160.
Tu Yinjiu, Yang Xiaoyong, Zheng Yongfei, et al. U-Pb dating of zircon from gneiss at Nanhuang in East Anhui [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1):157-160(in Chinese with English abstract).
- [22] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2):236-244.
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 236-244.
- [23] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境 [J]. 大地构造与成矿学, 2003, (2):3-10.
Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. On the relationship between adakite and its tectonic setting [J]. Geotectonica Et Metallogenia[J]. 2003, (2):3-10(in Chinese with English abstract).
- [24] 张旗, 李承东, 王焰, 等. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1527-1537.
Zhang Qi, Li Cendong, Wang Yan, et al. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: comparison and geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6):1527-1537(in Chinese with English abstract).
- [25] Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134:33-51.
- [26] Atherton M P, Peiford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underperated basaltic crust[J]. Nature, 1993, 362:144-146.
- [27] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 121:227-144.
- [28] Gao S, Rundick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432: 892-897.
- [29] Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust [J]. Geology, 2002, 30: 1111-1114.
- [30] Kay R W, Kay S M. Andean adakites: three ways to make them. [J]. Acta Petro. Sinica, 2002, 18:303-311.
- [31] Rapp R P. Heterogenous source regions for Archean granitoids[C] // Wit M J, Ashal L D (ed.). Greenstone Belt. Oxford:Oxford University Press, 1997:35-37.
- [32] Rapp R P and Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology. 1995, 36:891-931.
- [33] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities[J]. Precambrian Research. 1991, 51:1-25.
- [34] Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. Experimental Constraints on the origin of Potassium-rich Adakites in Eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18 (3):293-302.
- [35] Winther K T, Newton R C. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons [J]. Bull Geological Society of Denmark, 1991, 39:213-228.
- [36] 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等. 大陆下地壳拆沉模式初探[J]. 岩石学报, 2006, 22(2):265-276.
Zhang Qi, Jin Weijun, Wang YuanLong, et al. A model of delamination of continental lower crust [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2):265-276(in Chinese with English abstract).
- [37] 荆延仁, 梁万通, 张树业, 等. 张八岭蓝片岩带基本特征[C]//中国变质地质图编制与研究论文集 (第二辑). 北京: 地质出版社, 1988:238-245.
- [38] 荆延仁, 汤加富, 高天山, 等. 安徽张八岭蓝片岩带的矿物分带 [J]. 中国区域地质, 1996, 59(4):289-294.
Jing Yanren, Liang Wantong, Zhang Shuye, et al. Basic feature of blue schist in Zhangbaling [C]// Contributions to the Compilation and Research of Metamorphic Geological Maps (2). Beijing: Geological Publishing House, 1988:238-245 (in Chinese with English abstract).
- [39] 荆延仁, 汤加富, 高天山, 等. 安徽张八岭蓝片岩带的矿物分带 [J]. 中国区域地质, 1996, 59(4):289-294(in Chinese with English abstract).
- [40] 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的同造山运动[J]. 地学前缘, 2004, 11(3):169-182.
Zhu Guang, Wang Yongsheng, Niu Manlan; et al. Synorogenic movement of the Tan-Lu fault zone [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3):169-182 (in Chinese with English abstract).
- [41] 朱光, 王勇生, 王道轩, 等. 前陆沉积与变形对郯庐断裂带同造山运动的制约[J]. 地质科学, 2006, 41(1):102-121.
Zhu Guang, Wang Yongsheng, Wang Daoxuan, et al. Constraints of foreland sedimentation and deformation on synorogenic of the Tan-Lu fault zone [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(1): 102-121(in Chinese with English abstract).
- [42] 侯明金, 吴跃东, 汤加富. 大别造山带中上地壳变形特征——皖中张八岭地区印支—燕山早期构造变形研究 [J]. 中国地质, 2004, 31(2):123-131.
Hou Mingjin, Wu Yuedong, Tang Jiafu. Deformation features of the mid-upper crust of the Dabie orogenic belt—a case study of the Indosinian-early Yanshanian tectonic deformation in the Zhangbaling area [J]. Geology in China, 2004, 31(2): 123-131(in Chinese with English abstract).
- [42] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in

- Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269–287.
- [43] 戴圣潜, 邓晋福, 吴宗翼, 等. 大别造山带燕山期造山作用的岩浆岩石学证据[J]. *中国地质*, 2003, 30(2): 159–165.
- Dai Shengqian, Deng Jinfu, Wu Zongxu, et al. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen [J]. *Geology in China*, 2003, 30 (2): 159–165 (in Chinese with English abstract).
- [44] 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 等. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(9): 783–794.
- Lu Qingtian, Hou Zengqian, Yang Zhusen, et al. Magma underplating and geodynamic model in the middle and lower Yangtze River: evidence from geophysics[J]. *Science in China (D)*, 2004, 34(9): 783–794 (in Chinese).
- [45] 黄小龙, 徐义刚, 王汝成, 等. 安徽女山麻粒岩包体: 矿物学特征、下地壳地温曲线及其成因意义[J]. *岩石学报*, 2002, 18(3): 383–391.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Wang Rucheng, et al. The Nushan granulite xenoliths from Anhui Province, China: mineralogical characteristics, the lower crustal geotherm and their implications for genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18 (3): 383–391 (in Chinese with English abstract).
- [46] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 36–49.
- Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, et al. Evolution of the Tan–Lu fault zone and its responses to plate movements in west pacific basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 36–49 (in Chinese with English abstract).
- [47] 侯明金, 王永敏, Jacques Mercier, et al. 郯庐断裂带(安徽部分)动力学演化及其构造意义[J]. *地质通报*, 2003, 22(2): 105–112.
- Hou Mingjin, Wang Yongmin, Jacques M, et al. Dynamic evolution and tectonic significance of the Tanlu fault zone (Anhui segment)[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(2): 105–112 (in Chinese with English abstract).
- [48] 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(3): 250–256.
- Zhu Guang, Song Chuanzong, Wang Daoxuan, et al. Studies on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of strike-slip time of the Tan–Lu fault zone and their tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(3): 250–256 (in Chinese).
- [49] 徐义刚. 岩石圈的热–机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1999, 18(1): 1–5.
- Xu Yigang. Roles of thermo–mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1999, 18 (1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [50] 路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期–新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 86–92.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Shao Jian, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous–Cenozoic in eastern North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 86–92 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王谦生. 中国东南浙皖地区的区域重磁场特征与地壳构造的研究 [C]//李继亮主编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 287–294.
- Wang Qiansheng. Research on characteristics of regional gravity field and geomagnetic field and crustal structure in ZheWan area of Southeast China[C]//Li Jiliang (ed.), *Investigation on the Structure and Evolution of Oceanic and Continental Lithosphere in Southeast China*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992: 287–294 (in Chinese).
- [52] 陈沪生, 张永鸿. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–286.
- Cheng Husheng, Zhang Yonghong. The Lithospheric Textural and Structural Features as Well as Oil and Gas Evaluation in the Lower Yangtze Area and Its Adjacent Region, China [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1999: 1–286 (in Chinese).
- [53] 孙武城, 徐杰, 杨主恩, 等. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质学断面[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- Sun Wucheng, Xu Jie, Yang Zhuen, et al. Geoscience transect of Fengxian, Shanghai to Alashanzuoqi, Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.

Geochemical characteristics of Yanshanian high-Mg intermediate-acid intrusive rocks in eastern Anhui and their dynamic significance

TONG Jin-song^{1,3}, LU Yu-lin², GUAN Yun-cai³, CHU Dong-ru³, GENG Xiao-guang³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

3. Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: Early Cretaceous intermediate-acid intrusive rocks in eastern Anhui are composed of a quartz diorite, quartz monzodiorite, granodiorite and monzogranite association, belonging to the high-K calc-alkaline series. They are characterized by higher Al_2O_3 , Sr, Sr/Y and La/Yb ratios enrichment in LREE and LILE, depletion in HREE, Y and Yb, weak Eu negative or positive anomalies, higher $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and lower $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$. Compared with most adakitic rocks in eastern China, these rocks have higher $\text{Mg}^\#$ values, MgO and Cr and Ni contents. Our study suggests that: (1) intermediate-acid intrusive rocks in eastern Anhui might be derived from partial melting of the delaminated lower continent crust and its subsequent interaction with mantle peridotite during the rise of the magma, leaving garnet as a residual phase; and (2) the area of eastern Anhui experienced a crustal thickening process controlled by compressional structure of the Tethyan tectonic domain in the early Yanshanian, and, large-scale sinistral strike-slip movement of the Tanlu fault influenced by Pacific tectonic domain in the Early Cretaceous was the main factor responsible for delamination of the lower crust. Intermediate-acid intrusive rocks in eastern Anhui are petrological records of transition from the Tethyan tectonic regime to Pacific tectonic regime during the Mesozoic.

Key words: high-Mg intermediate-acid intrusive rocks; delamination; lower crust; Yanshanian; transition of tectonic regime; eastern Anhui

About the first author: TONG Jin-song, male, born in 1968, Ph.D candidate and senior engineer, mainly engages in regional geological survey and study; E-mail: ahtjs@163.com.