

# 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩源区地幔特征及其演化

牛漫兰, 朱 光, 宋传中, 王道轩, 刘国生

(合肥工业大学 资源与环境科学系, 安徽 合肥 230009)

摘要: 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩随时代逐渐变新, 碱性逐渐增强, 轻、重稀土元素分离程度及不相容元素的富集程度也逐渐增强, Sr、Nd 同位素组成越来越亏损。古地温线特征表明, 断裂带之下的上地幔具有高的大地热流值。老第三纪拉斑玄武岩地幔源区主要以轻微富集的 EM I 组为主, 新第三纪以来的碱性玄武岩来源于亏损地幔。研究区地幔源区随时间的演化受老第三纪软流圈上涌的影响, 大量的深源流体对上部岩石圈地幔进行广泛的交代, 从而使郯庐断裂带下面的岩石圈地幔出现不相容元素和 LREE 富集, 且由轻微富集地幔转变为亏损地幔。

关键词: 郯庐断裂带; 富集地幔; 亏损地幔; 微量元素; 同位素

中图分类号: P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8527(2001)04-0383-08

## 1 概 况

郯庐断裂带是中国东部最大的新生代火山活动带之一, 沿断裂带分布着一系列新生代幔源玄武岩类(图1)。对该套玄武岩的岩性、岩石化学、微量元素、同位素以及地幔包体等方面的特征, 前人已做过大量的研究工作<sup>[1~7]</sup>, 但关于新生代玄武岩的源区特征和演化与断裂带的关系及其成因未进行过探讨。本文在前人研究成果的基础上, 沿郯庐断裂带中南段山东、安徽一带补充采集了相关的玄武岩样品, 分别测试了其微量元素和同位素地球化学组成, 从不同时间、不同空间上结合郯庐断裂带新生代以来的活动对玄武岩的成因机制、地幔源区特征及其演化进行了较深入的研究。

多年的构造研究表明<sup>[8,9]</sup>, 郯庐断裂带的活动分为3期: 晚侏罗世末—早白垩世末为走滑期; 晚白垩世—早第三纪为伸展期; 中新世以来为挤压期。根据郯庐断裂带中南段已有的新生代玄武岩岩性特征和 K-Ar 年龄<sup>[1,3,10,11]</sup>, 可以将玄武岩演化划分为下列3个阶段: 第一阶段火山活动发生在早第

三纪, 以拉斑质玄武岩为主, 分布在嘉山明光、嘉山大横山、临朐山旺尧山脚等地, 另外在渤海湾盆地等<sup>[12]</sup>也发现了大量的该期玄武岩; 第二阶段火山活动主要发生在中新世, 以碱性橄榄玄武岩为主。具代表性的有安徽嘉山清明山、山东临朐牛山、尧山二姑山、沂水太平顶、昌乐方山、豹山及潍坊符山; 第三阶段火山活动发生在更新世以来, 以强碱性玄武岩为主, 以安徽嘉山女山碧玄岩和白榴岩等为代表。由此可见, 随着火山岩喷发时代变新, 玄武岩由拉斑质玄武岩→碱性玄武岩→强碱性玄武岩, 其碱性逐渐增强。

## 2 玄武岩源区的地幔特征

### 2.1 成分特征

郯庐断裂带中南段新生代玄武岩的稀土元素和微量元素含量见表1, 元素特征和同位素组成如下。

#### 2.1.1 稀土元素

从郯庐断裂带中南段新生代玄武岩的稀土元素含量(表1)和稀土元素配分图(图2)上可明显看出, 研究区内玄武岩的稀土元素总量为  $97.15 \times$

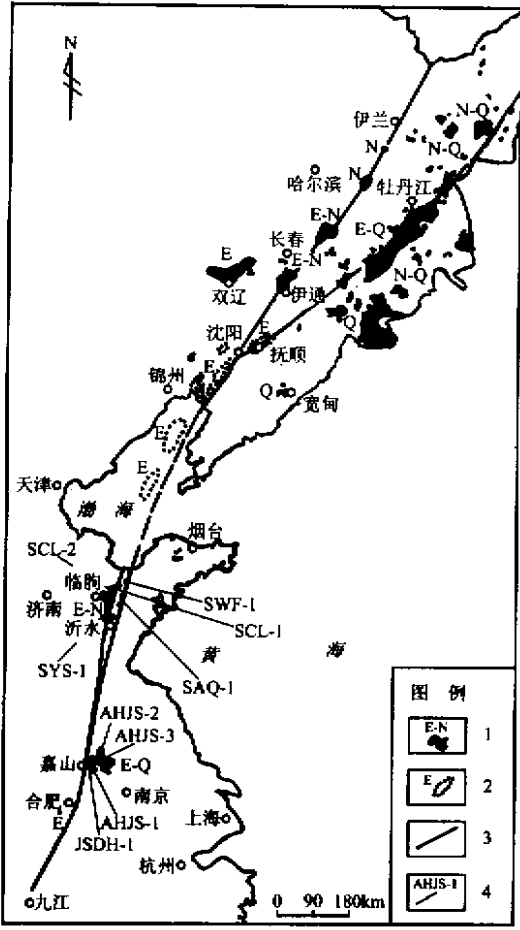


图 1 郯庐断裂带新生代火山岩分布及采样位置图

Fig.1 Distributions of Cenozoic volcanic rocks and the sampling locations in the Tan-Lu fault zone

1. 新生代玄武岩及时代; 2. 隐伏玄武岩及时代; 3. 郯庐断裂带; 4. 采样位置

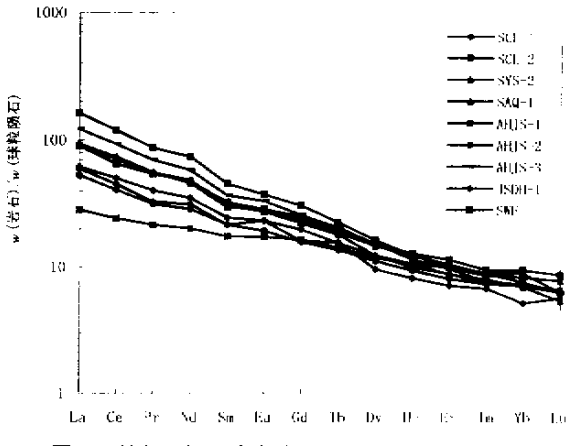


图 2 研究区新生代玄武岩的稀土元素配分型式

Fig.2 REE patterns of Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

玄武岩到碱性较强的碧玄武岩的不相容元素的含量增加, 说明形成的岩浆源区的部分熔融程度降低。同样在山东临朐—昌乐一带也显示出这一特征。

在新生代玄武岩的不相容元素的球粒陨石标准化丰度图(图 4)中, La 到 Yb 段不相容元素的丰度随不相容性的减小而减少。La 到 Rb 段元素的丰度变化较为复杂, 主要是由于 Rb、K、Ba 的含量变化所致。山东一带某样品的 Ba 含量表现出亏损, 而嘉山一带的样品 Ba 含量却略富集; Th 含量相对于 U 总体表现呈弱富集; Nb 含量处在图中的最高峰, 显示为富集, 表明断裂带内玄武岩来源的地幔源区较深。总的来看, 新第三纪以来碱性玄武岩比老第三纪拉斑玄武岩的不相容元素更加富集。

2.1.3 Sr、Nd 同位素组成

从新生代玄武岩的 Sr、Nd 初始比值(表 2)可以看出, 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩的 Sr 同位素初始比值为 0.703 27 ~ 0.704 87; Nd 同位素初始比值为 0.5124 09 ~ 0.5029 89, 均指示为幔源玄武岩。在 Sr-Nd 关系图(图 5)上, 老第三纪拉斑玄武岩的  $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$  初始比值最低, 落在 0.512 4 附近,  $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$  初始比值较大, 趋向于富集地幔端元 EM I 型。新第三纪以来的碱性、强碱性玄武岩落在第二象限亏损区, 其中中新世碱性玄武岩的  $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$  的初始比值居中, 第四纪强碱性玄武岩的  $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$  的初始比值最高。总之, 随时代由老变新新生代玄武岩的  $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$  初始比值越来越高,  $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$  初始比值越来越低, 表明玄武岩

$10^{-6} \sim 234.30 \times 10^{-6}$ ;  $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$  值为 4 ~ 11, 轻、重稀土分馏强, 均呈明显的 LREE 富集, 而 Eu 异常不明显或呈弱的正 Eu 异常。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  在 9 ~ 22 之间, 斜率很大, 这是大陆碱性玄武岩具有的特征。LREE 富集程度与玄武岩碱性密切相关, 其中老第三纪拉斑玄武岩稀土总量要低于中新世以来碱性玄武岩的稀土总量。由此可见, 随着时代变新, 郯庐断裂中南段玄武岩碱性增强, 稀土总量增高, 轻、重稀土分离程度逐渐增强。

2.1.2 不相容元素

在不相容元素和 La 的相关性图(图 3)中, Sr、Zr、Ce、Nd、Nb 等与 La 均有较好的相关性。不相容元素之间的相关性表明玄武岩原始岩浆是由成分均一的地幔源区经不同程度的部分熔融形成的。从安徽嘉山一带的玄武岩特征可看出, 拉斑玄

表1 怒江断裂带中南段新生代玄武岩的稀土及微量元素分析( $w_B/10^{-6}$ )

Table 1 Contents of REE and trace elements of Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

编号	时代	采样位置	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE/HREE	$\Sigma$ REE
SWF-1	中新世	滩坊符山	碱性玄武岩	28.05	52.97	6.68	28.85	6.43	2.13	6.57	0.93	4.99	0.93	2.43	0.31	1.99	0.29	6.78	143.55
SCL-1	中新世	吕乐五图方山	碱性玄武岩	19.29	41.09	4.96	21.26	4.86	1.73	5.15	0.74	4.00	0.72	1.87	0.24	1.50	0.21	6.46	107.62
SCL-2	中新世	昌乐团山子	碱性玄武岩	50.58	96.82	10.70	44.82	8.98	2.78	8.02	1.08	5.32	0.90	2.21	0.29	1.59	0.21	10.94	234.30
SYS-2	中新世	沂水圈里龙山	碱性玄武岩	29.16	60.07	6.84	29.44	6.04	2.04	5.82	0.86	4.02	0.77	1.85	0.26	1.46	0.18	8.78	148.81
SAQ-1	中新世	安丘红沙沟	碱性玄武岩	29.38	57.14	6.84	27.85	5.85	2.11	6.19	0.89	4.78	0.90	2.12	0.29	1.87	0.21	7.49	146.42
AHJS-1	早第三纪	嘉山明光	拉斑玄武岩	8.88	19.78	2.65	12.20	3.43	1.28	4.32	0.68	3.84	0.77	2.10	0.28	1.75	0.26	3.44	62.22
AHJS-2	中新世	嘉山清明山	碱性玄武岩	16.60	33.28	3.86	17.36	4.25	1.43	4.12	0.65	3.62	0.68	1.71	0.24	1.50	0.22	6.03	89.52
AHJS-3	更新世	嘉山女山	碧玄岩	38.96	77.03	8.77	36.62	7.57	2.50	7.26	0.95	4.93	0.83	2.11	0.24	1.54	0.22	9.48	189.53
AHJS-3	更新世	嘉山女山	碧玄岩	37.94	75.63	8.61	35.24	7.29	2.47	6.75	0.98	4.94	0.83	2.05	0.25	1.53	0.21	9.53	184.72
JSDH-1	早第三纪	嘉山大横山	拉斑玄武岩	19.23	36.73	4.36	17.86	4.92	1.52	5.17	0.63	3.32	0.66	1.62	0.14	1.31	0.21	6.48	97.68
JSDH-1	早第三纪	嘉山大横山	拉斑玄武岩	18.55	36.88	4.03	19.05	4.27	1.72	4.18	0.75	3.12	0.59	1.51	0.22	1.09	0.19	7.25	96.15

编号	时代	采样位置	岩石名称	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U
SWF-1	中新世	滩坊符山	碱性玄武岩	328.95	62.88	252.71	82.36	125.85	31.20	1148.80	28.71	167.94	37.42	1.52	0.17	294.76	3.37	3.08	2.15	0.03	3.22	0.45
SCL-1	中新世	吕乐五图方山	碱性玄武岩	280.13	59.04	244.33	86.30	105.71	18.21	534.40	19.28	162.88	34.10	1.58	0.22	228.62	3.27	1.88	1.81	0.01	1.77	0.55
SCL-2	中新世	昌乐团山子	碱性玄武岩	278.22	60.77	268.56	80.54	124.22	33.91	1021.20	24.61	267.15	84.76	1.88	0.36	393.31	5.19	4.18	3.56	0.01	5.06	1.52
SYS-2	中新世	沂水圈里龙山	碱性玄武岩	227.39	54.94	197.54	65.27	116.69	14.16	791.30	19.53	215.83	51.48	1.80	0.25	306.47	4.00	2.75	2.50	0.01	2.72	0.86
SAQ-1	中新世	安丘红沙沟	碱性玄武岩	214.32	44.48	161.96	54.27	70.39	12.40	594.82	15.46	164.01	42.01	1.66	0.19	242.04	5.83	3.24	4.85	0.01	4.38	1.28
AHJS-1	早第三纪	嘉山明光	拉斑玄武岩	216.90	50.30	181.71	98.54	106.33	7.29	310.16	21.08	88.76	6.67	1.10	0.31	210.36	2.03	0.54	1.25	0.01	0.81	0.20
AHJS-2	中新世	嘉山清明山	碱性玄武岩	255.07	51.34	237.77	78.28	92.87	11.52	498.70	17.59	127.47	23.94	1.24	0.07	300.86	2.70	1.26	2.25	0.01	1.81	0.27
AHJS-3	更新世	嘉山女山	碧玄岩	230.17	51.54	202.93	71.28	105.83	29.12	756.63	21.93	206.20	51.70	1.71	0.31	770.23	4.39	2.50	4.17	0	4.18	1.26
AHJS-3	更新世	嘉山女山	碧玄岩	221.65	50.37	202.94	70.05	109.33	28.00	753.23	21.55	199.79	47.27	1.65	0.31	761.20	4.34	2.47	3.99	0	4.02	1.21
JSDH-1	早第三纪	嘉山大横山	拉斑玄武岩	169.86	49.93	162.26	93.92	93.65	13.08	456.73	16.88	121.09	21.99	1.48	0.11	359.51	2.96	1.38	—	0.03	1.81	0.53
JSDH-1	早第三纪	嘉山大横山	拉斑玄武岩	177.47	49.88	162.52	95.69	94.20	12.58	442.00	16.82	121.19	21.71	1.12	0.11	355.34	2.94	1.66	—	0.03	1.88	0.40

注:表中数据由中国科学院地质与地球物理研究所用 ICP-MS 分析。

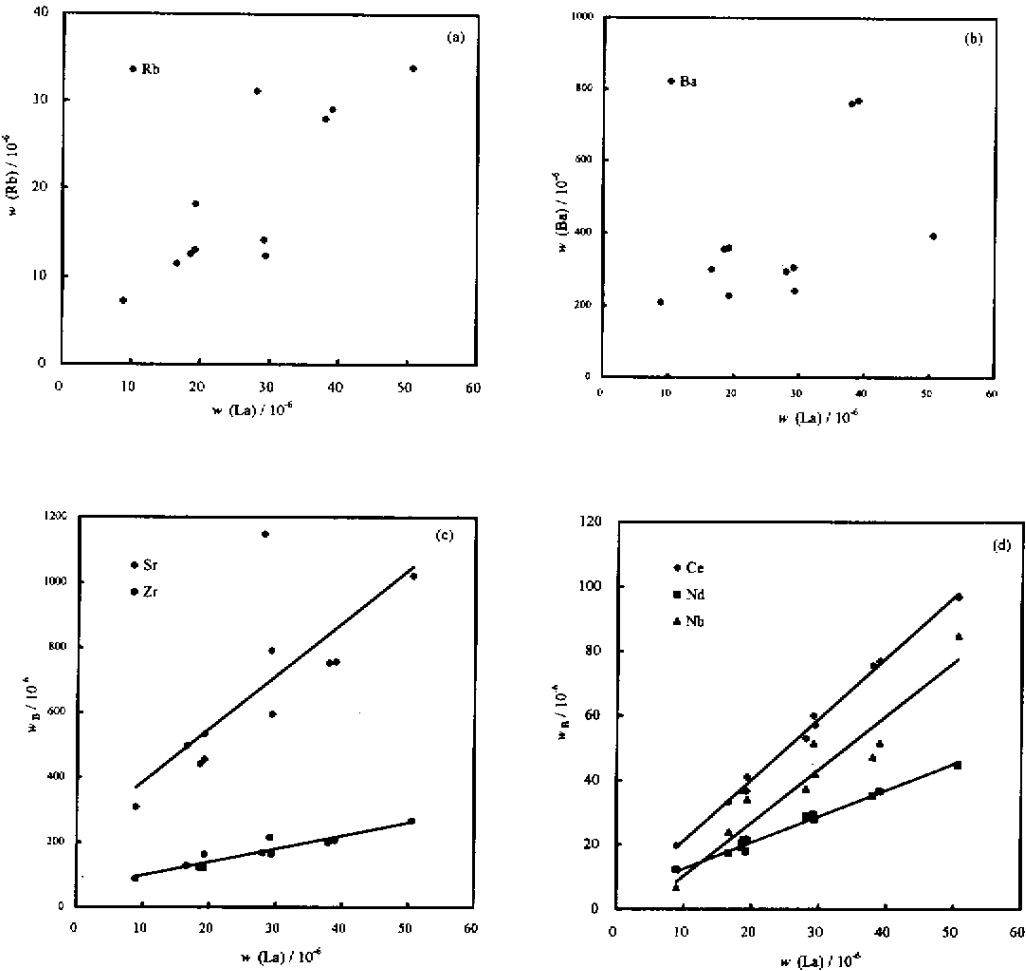


图 3 研究区新生代玄武岩的不相容元素与 La 的相关性

Fig.3 Correlation between incompatible elements and La of Cenozoic basalts from the study area  
(a) 不相容元素 Rb 和 La 的相关性 ;(b) 不相容元素 Ba 和 La 的相关性 ;(c) 不相容元素 Sr、Zr 和 La 的相关性 ;  
(d) 不相容元素 Ce、Nd、Nb 和 La 的相关性

岩浆源区随时代变新也在变化，这与陈道公<sup>[4]</sup>研究郯庐断裂带中南段新生代玄武岩所得出的结论一致。新第三纪以来的幔源包体的 Nd、Sr 同位素组成比较均匀，且具有亏损的特征<sup>[13]</sup>，更进一步说明新第三纪以来郯庐断裂带不论是位于华北板块的山东一带，还是处在扬子板块的安徽嘉山女山一带，地幔均为亏损状态。

2.2 古地温场特征

根据地幔包体的平衡温压计算结果作出的郯庐断裂带中南段上地幔古地温随压力变化的关系图(图 6)，可以将郯庐断裂带中南段上地幔地温的投影点与大洋地温线<sup>[14]</sup>以及由大地热流值(40 mW/m<sup>2</sup>和 60 mW/m<sup>2</sup>)推导的地温线<sup>[15]</sup>进行对比。郯庐断裂带内几乎所有点的地温高于大洋低温地温线，大部分点落在大洋高温地温线之上，也高于由

大地热流值 60 mW/m<sup>2</sup> 所推导的地温线。一般认为<sup>[16]</sup>，造成这种高地温特征的原因有：(1) 岩浆活动；(2) 软流圈的抬升以及岩石圈的相应减薄；(3) 岩石圈内热流的增加。郯庐断裂带第三纪以来出现大规模的岩浆活动似乎造成了高地温特征，但老第三纪伸展期软流圈的抬升和岩石圈的相应减薄以及断裂带的活动是导致随后的新第三纪以来地幔高热流值的出现以及岩浆活动加剧的重要原因，因此，可以认为郯庐断裂带中南段的高地温特征与老第三纪伸展期软流圈的抬升及岩石圈的减薄有密切的关系，也正是在这种作用下发生了大规模的岩浆活动而造成如此高的地温特征。

2.3 地幔分层

通常认为，上地幔由 3 部分组成：上部为尖晶石二辉橄榄岩相，中部为尖晶石-石榴石二辉橄榄

表 2 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩的 Sr、Nd 同位素比值

Table 2 Sr and Nd isotopic ratios of Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

样号	采样地点	岩性	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	$t/\text{Ma}$	资料来源
AJS-5	嘉山明光	拉斑玄武岩	0.5124 46	0.704 87	54.79	[2 3]
AJSD-1	嘉山大横山	拉斑玄武岩	0.5124 09	0.704 63	37.58	[2 3]
JSDH-1	嘉山大横山	拉斑玄武岩	0.5124 49	0.704 77	37.58	本文
AHFD-2	合肥大蜀山	碱性辉绿岩	0.5128 03	0.704 20	36.19	[2 3]
SWF-1	潍坊符山	碱性玄武岩	0.5126 63	0.704 65	19.04	本文
SLJ-77	昌乐方山	碱性玄武岩	0.5128 25	0.703 93	16.27	[1 3]
AJSQ-2	嘉山清明山	碱性玄武岩	0.5126 15	0.704 37	15.41	[1 3]
SYS-15	沂水太平顶	碱性玄武岩	0.5129 03	0.703 30	14.02	[1 3]
SLJ-72	临朐尧山	碱性玄武岩	0.5126 21	0.704 81	13.85	[1 4]
SYS-5	沂水太平顶	碱性玄武岩	0.5129 08	0.703 28	13.60	[1 4]
SLJ-54	临朐胸山	碱性玄武岩	0.5129 33	0.703 60	13.43	[1 4]
SLJ-74	昌乐二姑山	碱性玄武岩	0.5129 49	0.703 27	12.63	[1 4]
AJSN-1	嘉山女山	碧玄岩	0.5129 89	0.703 45	0.72	[2 3]
AJSN-3	嘉山女山	碧玄岩	0.5129 66	0.703 54	0.55	[2 3]

注：本文所测样品由中国科学院地质与地球物理研究所 Rb-Sr、Sm-Nd 实验室采用同位素质谱分析方法测试。Nd 同位素质量分馏用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$  校正，Sr 采用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\,4$ ， $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$ ， $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\,638$ ， $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196\,7$ ； $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$ ， $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}^0 = 0.704\,5$ ， $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}^0 = 0.083\,9$ 。

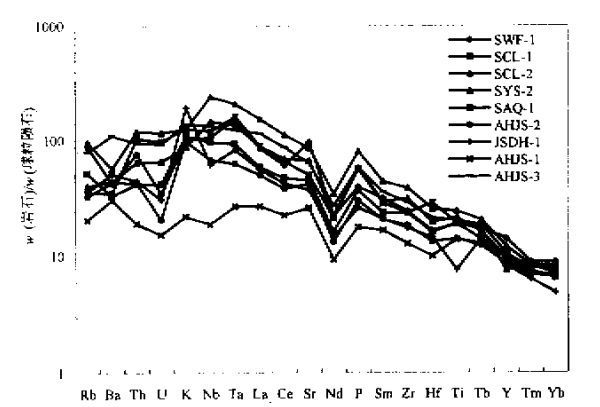


图 4 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩的球粒陨石标准化不相容元素配分图

Fig.4 Chondrite-normalized fractional diagrams of incompatible elements in Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

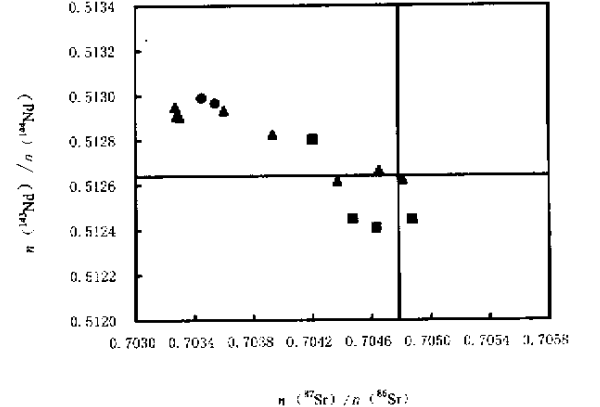


图 5 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩  $(^{143}\text{Nd})/(^{144}\text{Nd})$  与  $(^{87}\text{Sr})/(^{86}\text{Sr})$  关系图

Fig.5 Relation between  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone  
■早第三纪玄武岩 ▲中新世玄武岩 ●第四纪玄武岩

岩过渡相，下部为石榴石二辉橄榄岩相。郯庐断裂带中南段新生代玄武岩中这 3 类地幔岩包体都已被发现，由包体平衡压力反映的来源深度资料可以推断断裂带下地幔的分层。对女山地区壳源麻粒岩包体的研究表明该地区地壳厚度约为 31 km<sup>[20]</sup>。根据现代地球物理资料确定的莫霍面深度在 30 km 左

右<sup>[21]</sup>，由此向下至 60 km 处岩石主要为尖晶石相橄榄岩，60 km 以下为石榴石相橄榄岩<sup>[22]</sup>。女山玄武岩中尖晶石-石榴石二辉橄榄岩的平衡温度和压力分别为 1 100℃和 1.9 GPa，深度相当于 63 km<sup>[6]</sup>。对临朐山旺测得的尖晶石-石榴石二辉岩来源深度在 90 km 左右<sup>[7]</sup>。河北汉诺坝大麻坪尖晶石-石榴

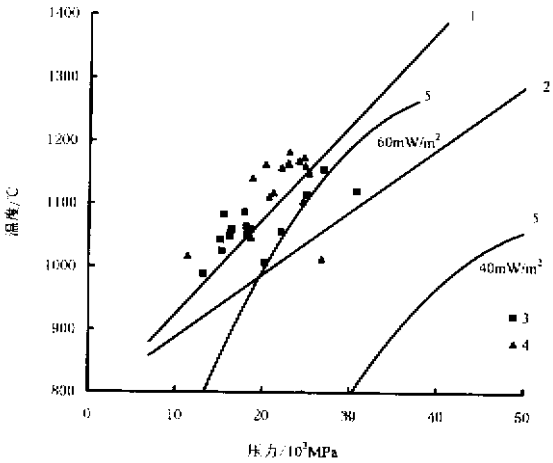


图 6 郯庐断裂带中南段上地幔古地温随压力变化的关系

Fig.6 Relations between paleogeotherm and pressure of the upper mantle in the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

1. 大洋高温地温线： $t = 775 + 0.15 p$ ；2. 大洋低温地温线： $t = 788 + 0.10 p^{[14]}$ ；3. 山东临朐尧山<sup>[17]</sup>；4. 安徽嘉山女山<sup>[17-19]</sup>；5. 大地热流值推导的地温线<sup>[15]</sup>

石二辉橄榄岩的平衡温度和压力分别为 1 002 ~ 1 100℃和 1.49 ~ 2.06 GPa，深度相当于 49 ~ 68 km<sup>[22]</sup>。福建明溪尖晶石-石榴石二辉橄榄岩的平衡温度和压力分别为 1 040 ~ 1 200℃和 1.8 ~ 2.5 GPa，深度相当于 60 ~ 78 km<sup>[23]</sup>。以上资料显示中国东部尖晶石-石榴石二辉橄榄岩过渡相在 50 ~ 80 km 内稳定存在。综合上述资料，鉴于郯庐断裂带位于新生代地幔上隆区，通过现代地球物理资料测得郯庐断裂带郯城—嘉山段岩石圈地幔的厚度约为 100 km<sup>[21]</sup>，而新生代以来至今，岩石圈地幔厚度发生显著变化的可能性不大，因而可作为参考数据。同时，不同地区岩石圈地幔的厚度也有一定的差异。根据上述资料及郯庐断裂带中南段新生代玄武岩中各类地幔岩包体平衡压所计算的深度资料<sup>[17]</sup>，总结出断裂带下岩石圈地幔的结构分层如图 7 所示。壳幔边界约在 31 km 处，代表上地幔上部的尖晶石二辉橄榄岩相的底界在 60 km 附近，60 ~ 80 km 为尖晶石-石榴石二辉橄榄岩过渡相；80 km 以下为石榴石二辉橄榄岩相；100 km 可能代表岩石圈地幔与软流圈的分界线。

3 地幔源区的演化

3.1 地幔端元

郯庐断裂带中南段新生代玄武岩显示为两个地

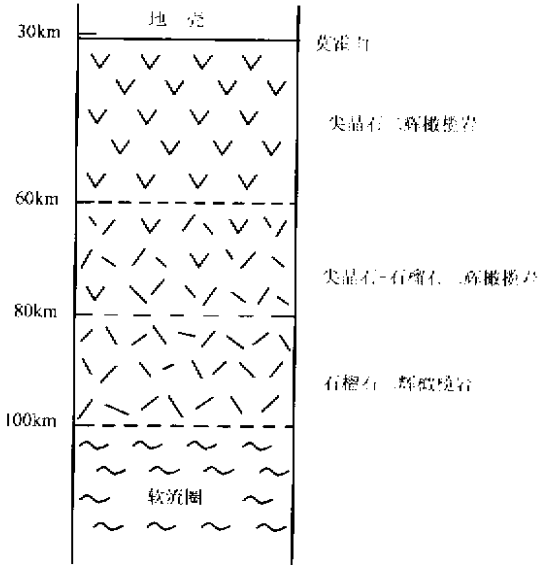


图 7 郯庐断裂带中南段上地幔组成的柱状图

Fig.7 Columnar diagram the upper mantle constitution in the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

幔端元(图 5)。新第三纪以来的碱性玄武岩 Sr、Nd 同位素组成范围与夏威夷大洋岛屿玄武岩相重叠，接近原始地幔端元，而且同位素组成较均一，暗示其可能来自同一地幔源区。老第三纪玄武岩的同位素组成与新第三纪以来的明显不同，Sr 同位素比值增高，Nd 同位素比值减小。这些同位素组成特征表明老第三纪玄武岩与新第三纪以来的玄武岩岩浆来源的地幔源区明显不同。从 Sr-Nd 同位素组成(图 5)上看，老第三纪玄武岩的源区物质也是以富集地幔端元 EM I 为主。由于老第三纪玄武岩中缺少幔源包体的资料，所以对岩浆来源深度及源区的具体特征不能加以明确的限制。但可以说明老第三纪玄武岩来源于 Sr-Nd 同位素组成相对富集的地幔源区，新第三纪以来的玄武岩来自亏损的地幔源区。

3.2 地幔演化规律及其成因

同位素组成是显示玄武岩源区的重要依据。在研究区新生代玄武岩的 Sr-Nd 组成(图 5)上显示一种分布趋势，即从位于第二象限的新第三纪以来的同位素亏损区域出发，向老第三纪 EM I 型富集地幔端元延伸。这种分布趋势是代表玄武岩岩浆形成过程中两种不同成分的地幔源区的混合作用，还是反映地幔单一源区的长期演化？本文用  $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$  对  $1/n(\text{Sr})$  和  $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$  对  $1/n(\text{Nd})$  图解(图 8)加以验证。图解中的线性趋势可

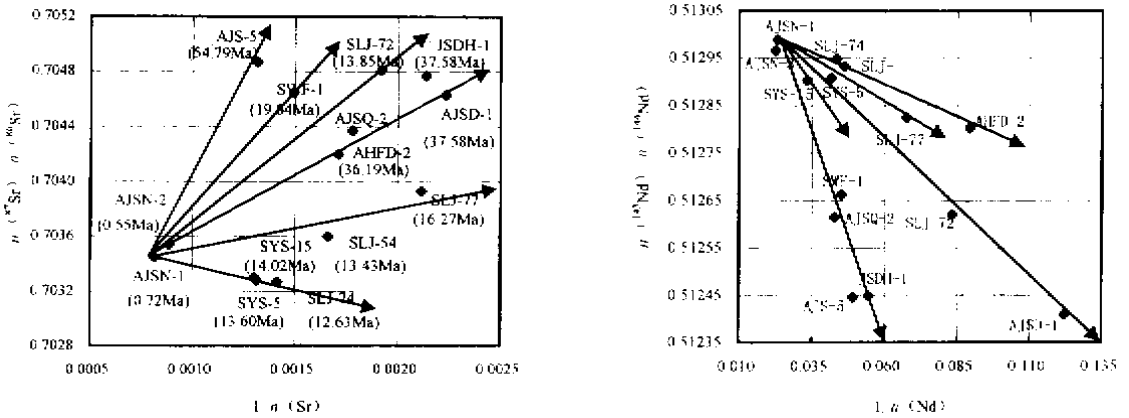


图 8 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩  $n(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$  对  $1/n(^{87}\text{Sr})$  和  $n(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$  对  $1/n(^{143}\text{Nd})$  的变化  
Fig. 8  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $1/n(^{87}\text{Sr})$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $1/n(^{143}\text{Nd})$  variations for Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone

以对二元混合作用作出限制<sup>[24]</sup>。如果说老第三纪和新第三纪以来的玄武岩为不同地幔源区混合而成，那么在图 8 中应该可以找出混合端元。然而图中样品分布比较分散，从 AJSN-1 出发可以找到 5、6 个线性分布趋势，似乎代表了多个二元混合作用，但没有一个与 Sr-Nd 同位素图（图 5）上的相同。在图 8 中构成线性分布趋势的样品及其排列次序也不能相互对应，因而除了 AJSN-1 可以作为混合作用的一个端元外，其他端元都不能明确限制。可见 Nd、Sr 同位素组成及其丰度不支持混合作用在玄武岩成因中所起的主导作用，Nd、Sr 同位素组成的变化可能是不同时代的玄武岩来自变化的地幔源区造成的，是地幔源区长期演化的结果。综上所述，郯庐断裂带中南段新生代 Sr-Nd 同位素组成可大致显示地幔源区为老第三纪的轻微富集地幔和新第三纪以来的亏损地幔，而且第四纪比中新世更加亏损。

郯庐断裂带中南段新生代地幔的演化与其所处的大地构造背景和郯庐断裂带的演化密切相关。古地温特征表明郯庐断裂带中南段新生代上地幔处在地幔高温状态，具有高的大地热流值，这主要与老第三纪区域性伸展期中国东部软流圈的上涌有关。老第三纪中国东部大陆在太平洋板块的高角度俯冲下，岩石圈上拱拉张而出现伸展断陷，郯庐断裂带在这一时期呈现为巨型伸展构造，控制了一系列断陷盆地的发育，如辽东湾—辽河盆地、渤中盆地、莱洲湾盆地、合肥盆地等。同时地幔岩在岩石圈上拱及断裂的减压作用下熔点降低，发生部分熔融，在伸展强烈的地区出现了玄武岩的喷发，如在

本区的嘉山明光、嘉山大横山以及渤海湾等地区，主要以拉斑玄武岩为主。这一时期由于软流圈的上涌带来了大量的富含挥发分的深源流体，对上部岩石圈地幔进行了交代，从而使郯庐断裂带中南段下面的岩石圈地幔出现不相容元素和 LREE 的轻微富集，这一地幔源区的演化为新第三纪以来玄武岩岩浆的来源奠定了基础。

新第三纪以来，在太平洋板块持续向西高角度俯冲下，俯冲带向东迁移，西太平洋边缘出现了弧后盆地，其发展中的弧后扩张向西推挤着中国大陆，同时印度板块与欧亚板块陆—陆碰撞中向东的构造挤出作用使中国东部总体遭受近东西向的挤压作用，使郯庐断裂带表现为逆冲活动，断裂的切割深度加大，为岩浆上升提供了便利的通道，所以在这一时期玄武岩中出现了大量的幔源包体。由于前期老第三纪软流圈的上涌带来了大量的富含挥发分的深源流体，而对上部岩石圈地幔进行广泛的交代，改变了岩石圈地幔的成分，从而使郯庐断裂带中南段下面的岩石圈地幔由原来的轻微富集型地幔转变为新第三纪以来的亏损型地幔。同时地幔剪切作用和地幔交代作用进一步加强，出现了 LREE 和不相容元素的强烈富集。随着断裂切割深度的加大，岩浆源区逐渐加深，部分熔融程度相应降低，形成了新第三纪以来以碱性、强碱性为主的玄武岩。

参考文献：

[1] 陈道公, 彭子成. 山东新生代火山岩 K-Ar 年龄和 Pb-Sr 同位素特征 [J]. 地球化学, 1985, (4): 293—303.  
[2] 陈道公, 彭子成. 皖苏若干新生代火山岩的钾氩年龄和铅

- 锶同位素特征 [ J ]. 岩石学报, 1988, 4 ( 2 ): 3—12.
- [ 3 ] 陈道公, 杨杰东, 王银喜. 苏皖鲁某些新生代火山岩的钕同位素组成及意义 [ J ]. 科学通报, 1990, 12 : 925—927.
- [ 4 ] 陈道公. 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩地球化学 [ A ]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1992. 171—200.
- [ 5 ] 支霞臣, 陈道公, 杨晶. 皖东上第三系玄武岩的地球化学特征和成因 [ J ]. 地质学报, 1995, 69 ( 2 ): 156—167.
- [ 6 ] 金淑燕, 潘顺安. 女山玄武岩中尖晶石-石榴石-辉橄岩包体及其岩石物理意义 [ J ]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23 ( 5 ): 475—479.
- [ 7 ] 王方正, 金隆裕, 徐耀荣. 山东临朐山旺新生代玄武岩中超镁铁岩包体的研究 [ J ]. 地球科学——武汉地质学院学报, 1987, 12 ( 3 ): 249—255.
- [ 8 ] 徐嘉伟, 马国锋. 郯庐断裂带研究的十年回顾 [ J ]. 地质论评, 1992, 38 ( 4 ): 316—324.
- [ 9 ] 朱光, 徐嘉伟, 孙世群. 郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据 [ J ]. 地质论评, 1995, 4 ( 5 ): 452—456.
- [ 10 ] 金隆裕. 郯(城)—庐(江)裂谷中段及其两侧新生代火山岩钾-氩年龄值 [ J ]. 山东地质情报, 1983, ( 4 ): 41—43.
- [ 11 ] 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 等. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境 [ A ]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1992. 1—43.
- [ 12 ] 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1997. 63—69.
- [ 13 ] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 地幔橄榄岩捕虏体中的流体包裹体、岩浆包裹体和玻璃 [ A ]. 杜乐天. 地幔流体与软流层(体)地球化学 [ C ]. 北京: 地质出版社, 1996. 230—271.
- [ 14 ] Mercier J-C C, Carter N L. Pyroxene geotherms [ J ]. J Geophys Res, 1975, 80 : 3349—3362.
- [ 15 ] Chapman D S, Pollack H N. Regional geotherms and lithospheric thickness [ J ]. Geology, 1977, 5 : 265—268.
- [ 16 ] 徐义刚, 林传勇, 史兰斌, 等. 中国东部上地幔地温线及其地质意义 [ J ]. 中国科学( B 辑 ), 1995, 25 ( 8 ): 874—881.
- [ 17 ] 林传勇, 史兰斌, 何永年, 等. 中国东部幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义 [ A ]. 钱祥麟. 伸展构造研究 [ C ]. 北京: 地质出版社, 1994. 87—98.
- [ 18 ] 丛柏林, 张儒瑗. 华北断块区新生代玄武岩系及其形成的大地构造环境 [ J ]. 地质论评, 1983, 29 ( 1 ): 40—48.
- [ 19 ] 邓晋福, 鄂莫岚, 路凤香. 中国东部某些地区碱性玄武岩中包体的温度、压力的计算 [ J ]. 地质论评, 1980, 26 ( 2 ): 112—120.
- [ 20 ] 周新民, 于津海, 徐夕生. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义 [ J ]. 科学通报, 1992, ( 3 ): 1198—1201.
- [ 21 ] 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等. 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. 158—164.
- [ 22 ] 樊祺诚, 刘若新. 上地幔尖晶石-石榴石复合橄榄岩与相转变研究 [ A ]. 中国矿物岩石地球化学协会, 地幔矿物岩石地球化学专业委员会. 中国上地幔特征与动力学论文集 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1990. 72—82.
- [ 23 ] 金振民, Green II H W, Rorch R S. 幔源包体和中国东部现代弧后地热标志 [ J ]. 中国科学( B 辑 ), 1993, 23 ( 4 ): 410—416.
- [ 24 ] Faure G. Principles of Isotope Geology [ M ]. New York : John Wiley & Sons, 1986. 217—237.

# FEATURES AND EVOLUTIONS OF THE MANTLE SOURCE AREA OF CENOZOIC BASALTS IN THE MIDDLE-SOUTHERN SEGMENT OF THE TAN-LU FAULT ZONE

NIU Man-lan , ZHU Guang , SONG Chuan-zhong , WANG Dao-xuan , LIU Guo-sheng

( Hefei University of Technology , Hefei , Anhui 230009 , China )

**Abstract :** With becoming young of the Cenozoic basalts from the middle-southern segment of the Tan-Lu fault zone , their alkali , the fractional degree of LREE/HREE and incompatible elements enrichment increase. The evolutions of Sr , Nd isotopic compositions with time become depleted. Paleogeotherm indicates high thermal flow of the upper mantle below the Tan-Lu fault zone. According to these features , the origin of the basalts magma and the evolutions of the mantle source areas are discussed in this paper. Paleogene basalts originated mainly from EM I components. Neogene and Quaternary basalts were derived from the depleted mantle. The upwelling of asthenosphere brought a lot of free fluids. The initial free fluid widely replaced lithospheric mantle. The lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone appeared enrichments of incompatible elements and LREE , resulting in the mantle evolution from the enrichment to depletion.

**Key words :** the Tan-Lu fault zone ; enriched mantle ; depleted mantle ; trace element ; isotope