

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用

王德滋 任启江 邱检生 陈克荣 徐兆文 曾家湖
(南京大学地球科学系)



中国东部橄榄安粗岩省以大范围内(约80000km²)分布晚侏罗世-早白垩世(165—100Ma)橄榄安粗岩系为主、高钾钙碱岩系为次的火山岩组合为特征,它形成以拉张为主的区域构造应力场中。与国外岛弧及活动大陆边缘同类岩石相比,其火山岩的岩石-矿物-地球化学特征及有关的矿床组合均有一定的特殊性,这些特殊性是本区壳幔成分与结构及中生代区域构造背景特殊性的综合体现。

关键词 橄榄安粗岩省 区域构造背景 同位素组成 矿物-岩石-地球化学特征 中国东部

中国东部橄榄安粗岩省^①以大范围内(约80000km²)分布晚侏罗世-早白垩世(165—100Ma)橄榄安粗岩系为主、高钾钙碱岩系为次的火山岩组合为特征。深入研究这一火成岩省对于认识中生代以来我国东部构造背景及其演化、火山岩系的形成条件以及矿床的时空分布规律等,均具有十分重要意义。

橄榄安粗岩系多发育于岛弧区,形成时间较晚、空间上远离海沟的岛弧火山岩系之一^[1,2],亦见于活动大陆边缘及地缝合线两侧,少数产于裂谷带^[2,3]。但是,至今在国内外未见有关大范围橄榄安粗岩省的报道。中国东部中生代橄榄安粗岩省火山岩形成的地质构造背景、岩石-矿物-地球化学特征及有关的成矿作用等均有一定的特殊性,本文重点在于揭示这些特殊性。

1 橄榄安粗岩省形成的地质背景

橄榄安粗岩省的中生代火山岩分布于华北与扬子两大板块拼贴带的南、北两侧,且受郯庐断裂带及长江断裂带的控制,远离这一构造区此类火山岩组合即不发育或消失(图1)。进一步研究表明,中生代时橄榄安粗岩省所在部位受三大构造动力体制作用^②,即华北板块与扬子板块对接碰撞后的陆内造山作用及晚期的伸展作用;伊泽奈崎板块(古太平洋板块)向欧亚板块俯冲消减伴随的弧后拉张作用;与白垩纪以后特提斯构造体制有关的碰撞-挤出作用(collison-

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 9488010)。

① Dezi Wang et al., Geological - geochemical characteristics and genesis of Mesozoic shoshonite series in East China, Abstract of 29th IGC, 1992, 2: 544.

② 邱检生. 中国东部橄榄安粗岩省火山岩-次火山岩特征及有关金(铜)矿床成矿作用研究. 南京大学地球科学系博士论文. 1992.

本文1994年2月收到,10月改回,刘淑春编辑。

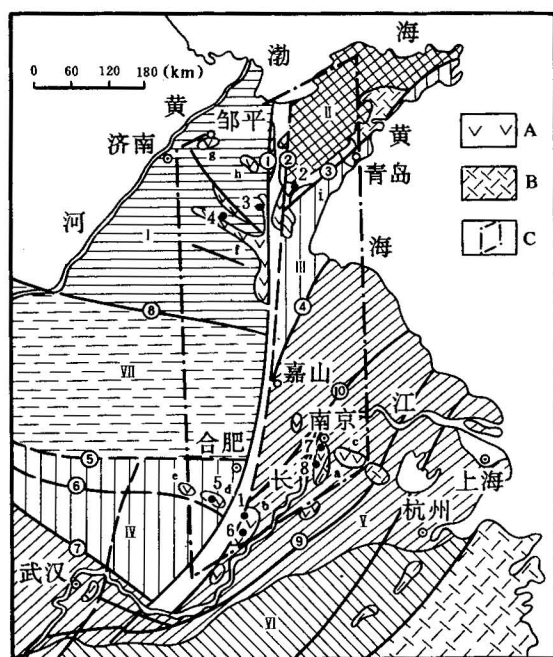


图1 橄榄安粗岩省所涉及的构造单元及火山岩盆地、深断裂带和重要矿床分布略图

Fig. 1 Schematic map showing the distribution of volcanic basins, deep fault belts, tectonic units and important deposits in the shoshonite province

I 鲁西地体; II 鲁东地体; III 胶南-苏北地体; IV 大别地体; V 下扬子断陷带; VI 江南古陆; VII 淮阴地体. ① 郯庐-葛沟断裂(郯庐西界断裂); ② 昌邑-大店断裂(郯庐东界断裂); ③ 五莲-荣成断裂; ④ 嘉山-响水断裂; ⑤ 确山-肥东断裂; ⑥ 信阳-舒城断裂; ⑦ 襄樊-广济断裂; ⑧ 封兰断裂; ⑨ 崇阳-常州断裂; ⑩ 巢湖-泰州断裂. 1. 沙溪铜(金)矿; 2. 七宝山金(铜)矿; 3. 沂南金(铜)矿; 4. 归来庄金矿; 5. 东溪金矿; 6. 天头山金(铜)矿; 7. 铜井金(铜)矿; 8. 梅山铁矿. a 宁芜盆地; b 庐枞盆地; c 溧水盆地; d 晓天盆地; e 金寨盆地; f 平邑-费县火山岩带; g 邹平盆地; h 蒙阴盆地; i 五莲-诸城火山岩带. A 橄榄安粗岩系火山岩; B 钙碱性岩系火山岩; C 橄榄安粗岩省大致范围

I Western Shandong terrain; II eastern Shandong terrain; III southern Shandong-Northern Jiangsu terrain; IV Dabie terrain; V Lower Yangtze valley fault-depression belt; VI Jiangnan oldland; VII Huaiyin block. ① Tangwu-Gegou fault (the west boundary fissure of the Tanlu deep fault); ② Changyan-Dadian fault (the east boundary fissure of the Tanlu deep fault); ③ Wulian-Rongcheng fault; ④ Jiashan-Xiangshui fault; ⑤ Queshan-Feidong fault; ⑥ Xinyang-Shucheng fault; ⑦ Xiangfan-Guangji fault; ⑧ Fenglan fault; ⑨ Chongyang-Changzhou fault; ⑩ Chaohu-Taizhou fault. 1. Shaxi porphyry Cu-Au deposit; 2. Qibaoshan porphyry-breccia Cu-Au deposit; 3. Yinan skarn Cu-Au deposit; 4. Guilaizhuang Au deposit; 5. Dongxi Au deposit; 6. Tiantoushan Au-Cu deposit; 7. Tongjia Cu-Au deposit; 8. Meishan Fe deposit. a Ningwu basin; b Luzong basin; c Lishui basin; d Xiaotian basin; e Jinzhai basin; f Pingyi-Feixian volcanic zone; g Zouping basin; h Mengyin basin; i Wulian-Zhucheng volcanic rock zone. A volcanic rocks of shoshonite series; B volcanic rocks of calc-alkali series; C boundary of the shoshonite province

extrusion tectonics)^[4]。作为三大动力体制共同作用结果的郯庐断裂在此时发生了较大规模的左行平移。橄榄安粗岩省的火山活动主要出现于以张应力为主的区域应力场中。

控制火山岩带和火山岩盆地的深断裂可划分为3种类型(图1): (1)接近地缝合线的深断裂带,如五莲-荣城、信阳-舒城断裂,控制了伸展型断堑火山岩盆地的形成; (2)郯庐断裂带,控制了断裂带内拉分火山盆地的形成(如鲁中潍坊-安丘一带); (3)基底深断裂,如平邑-费县断裂、长江中下游断裂,控制了火山构造洼地和火山断陷盆地的形成(如庐枞及宁芜火山断陷盆地、平邑-费县火山岩带等)。

橄榄安粗岩省穿越了不同的构造单元,包括华北板块、扬子板块北部的长江中下游断裂拗陷带,大别地体及胶南-苏北地体。区内火山岩带和火山岩盆地,按基底岩石的性质可划分为两类,一类火山岩基底岩石为晚太古代一早元古代变质岩系,或其上覆有元古界至古生界较薄的沉积岩系,称其为“抬升型”,如晓天-金寨火山盆地;另一类火山岩的基底岩石主要由古生代—中生代碎屑岩和碳酸盐岩系组成,称其为“拗陷型”,如庐枞火山-断陷盆地(火山-构造洼地)。

2 橄榄安粗岩系主要特征

2.1 岩石化学成分及岩石组合

根据区内火山岩化学成分的

统计资料(表 1)以及在 TAS 分类图^[5]上的投影结果(图 2),可以看出橄榄安粗岩省的中生代火山岩主要为玄武粗安岩-粗安岩-安粗岩-粗面岩组合,该组合约占全区火山岩的 70%以上。但各分区岩石组合类型仍存在一定差别,表现在:(1)溧水、鲁中地区有少量流纹岩类(<10%),而鲁东有较多流纹岩类(约 25%)出露;(2)宁芜、庐枞有少量火山岩的投影点落入响岩质碱玄岩-碱玄质响岩-响岩范围内;(3)溧水、鲁东、鲁西有少量玄武安山岩-安山岩-英安岩分布。在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上(图 3),火山岩的投影点主要落在富钾的橄榄安粗岩系范围内,其次落在高钾钙碱岩系区。火山岩的化学成分具有硅适度饱和,富碱富钾、富铝贫钛,高氧化系数的特点,可归为 Morrison 划分的橄榄安粗岩系。本区火山岩组合以缺少典型的钙碱系列火山岩而有别于岛弧区和活动大陆边缘区,与裂谷带不同处是缺少典型的双峰式火山岩组合,因而表现出一定的特殊性。与岛弧及活动大陆边缘区类似岩石^[1,7-11]相比(表 2),本区橄榄安粗岩系略偏酸性,相对富钠, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值略低(主要变化于 0.60—1.66 之间),CIPW 计算的标准矿物中常有少量 Q 分子出现,并具较高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值,氧化系数(W)主要变化于 0.54—0.93 之间(而国外岛弧及活动大陆边缘区的岩石的氧化系数则主要变化于 0.37—0.64 之间),显示了本区橄榄安粗岩系火山岩形成于明显偏高的氧化条件下。这与本区该岩系火山岩中辉石的 Fs 摩尔分数低,缺少铁普通辉石和铁次透辉石,以及黑云母 MF 值高的特点相一致。

表 1 橄榄安粗岩省典型地区火山岩岩石化学成分及主要岩石化学参数

Table 1 Petrochemical compositions and dominant petrochemical parameters of volcanic rocks at the typical occurring areas in the shoshonite province

地 区		鲁 东		鲁 中		鲁 西		溧 水		宁 芜		庐 枞		大 别		全 区	
统计数		128		87		96		22		40		98		12		483	
统计参数		X	δ	X	δ	X	δ	X	δ	X	δ	X	δ	X	δ	X	δ
化 学 成 分 (%)	SiO ₂	65.27	8.17	59.75	6.08	57.48	4.35	60.09	6.25	56.98	1.99	57.27	4.22	61.71	4.40	59.73	6.40
	TiO ₂	0.56	0.35	0.78	0.35	0.80	0.23	0.62	0.29	0.64	0.21	0.77	0.24	0.55	0.23	0.71	0.30
	Al ₂ O ₃	14.92	1.90	16.13	1.45	15.99	1.65	16.47	1.63	17.97	2.34	17.57	1.03	16.00	1.81	16.29	1.91
	Fe ₂ O ₃	3.36	2.12	4.54	1.94	4.39	1.93	3.48	1.46	3.91	1.94	4.36	1.86	3.46	1.17	4.09	1.99
	FeO	0.94	0.94	1.44	1.35	2.33	1.58	2.18	1.34	2.29	1.32	1.64	1.36	1.44	1.51	1.69	1.40
	MnO	0.061	0.043	0.092	0.058	0.11	0.09	0.10	0.05	0.15	0.12	0.17	0.09	0.033	0.024	0.11	0.09
	MgO	1.67	1.66	2.68	1.76	3.46	2.05	1.53	1.13	1.81	1.12	1.73	1.31	1.66	0.91	2.31	1.79
	CaO	2.68	2.37	3.13	2.03	5.23	2.07	4.60	2.64	3.29	2.46	3.19	2.00	2.63	1.55	3.62	2.40
	Na ₂ O	3.26	1.28	4.18	1.41	3.66	0.86	3.44	0.69	4.13	1.49	4.33	1.30	4.12	0.37	3.97	1.17
	K ₂ O	3.94	1.24	4.24	1.83	3.59	1.24	4.15	2.07	5.21	2.90	5.93	2.34	5.20	2.23	4.41	2.02
	P ₂ O ₅	0.27	0.26	0.40	0.21	0.40	0.17	0.30	0.12	0.23	0.13	0.35	0.22	0.16	0.17	0.34	0.22
岩 化 参 数	K ₂ O+	7.55	1.43	8.42	1.74	7.26	1.66	7.58	1.87	9.34	2.75	10.26	2.03	9.32	2.09	8.38	2.15
	Na ₂ O																
	K ₂ O/ Na ₂ O	1.07	0.48	1.68	3.44	1.04	0.52	1.49	1.91	1.63	1.67	1.88	2.31	1.30	0.68	1.32	1.38
	A/NKC	1.12	0.36	0.97	0.18	0.84	0.14	0.91	0.17	1.01	0.23	0.93	0.15	0.94	0.11	0.94	0.18
	σ	3.20	1.43	4.72	1.86	3.99	1.82	3.77	1.63	6.59	3.19	7.84	2.43	5.23	3.11	4.92	2.72

注: X: 均值; δ : 方差; σ : 里特曼指数。

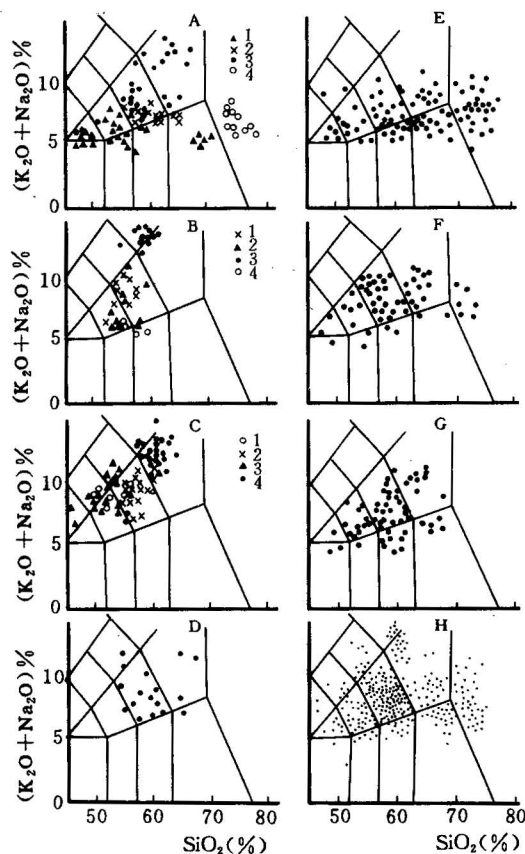


图2 橄榄安粗岩省火山岩的TAS分类图
(据文献[5])

Fig. 2 TAS diagram of volcanic rocks in the shoshonite province (after reference [5])

A 溧水盆地: 1. 龙王山旋回, 2. 大王山旋回, 3. 观山旋回, 4. 甲山旋回; B 宁芜盆地: 1. 龙王山旋回, 2. 大王山旋回, 3. 姑山旋回, 4. 娘娘山旋回; C 庐枞盆地: 1. 龙门院旋回, 2. 砖桥旋回, 3. 双庙旋回, 4. 浮山旋回; D 大别地区; E 鲁东地区; F 鲁中地区(郯庐内部); G 鲁西地区; H 研究区

A Lishui basin: 1. Longwangshan cycle, 2. Dawangshan cycle, 3. Guanshan cycle, 4. Jiashan cycle; B Ningwu basin: 1. Longwangshan cycle, 2. Dawangshan cycle, 3. Gushan cycle, 4. Niangniangshan cycle; C Luzong basin: 1. Longmenyuan cycle, 2. Zhuangqiao cycle, 3. Shuangmiao cycle, 4. Fushan cycle; D Dabie; E eastern Shandong; F central Shandong (interior of the Tanlu deep fault zone); G western Shandong; H the whole studied area

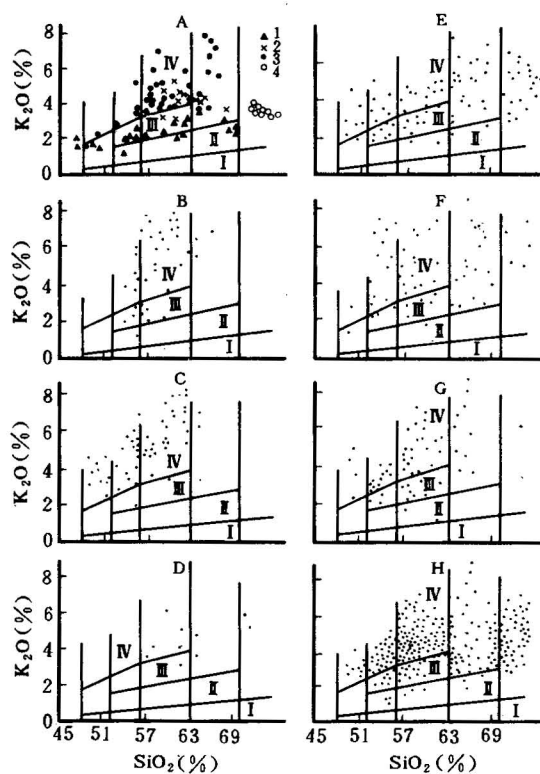


图3 橄榄安粗岩省火山岩的SiO₂-K₂O图
(据文献[6])

Fig. 3 K₂O versus SiO₂ diagram of volcanic rocks in the shoshonite province (after reference [6])

I 岛弧拉斑玄武岩系; II 钙碱性岩系; III 高钾钙碱性岩系; IV 橄榄安粗岩系. A 溧水盆地: 1. 龙王山旋回, 2. 大王山旋回, 3. 观山旋回, 4. 甲山旋回; B 宁芜盆地; C 庐枞盆地; D 大别地区; E 鲁东地区; F 鲁中地区(郯庐内部); G 鲁西地区; H 研究区

I Island arc tholeiite series; II calc-alkali rock series; III high potassic calc-alkali rock series; IV shoshonite series. A Lishui basin: 1. Longwangshan cycle, 2. Dawangshan cycle, 3. Guanshan cycle, 4. Jiashan cycle; B Ningwu basin; C Luzong basin; D Dabie; E eastern Shandong; F central Shandong (interior of the Tanlu deep fault zone); G western Shandong; H the whole area studied

表2 不同岩系火山岩化学成分及其主要变化范围对比表

Table 2 Chemical compositions of volcanic rocks of different series

岩系	高钾钙碱性岩系						橄榄安粗岩系					
地区	研究区						国外岛弧及活动大陆边缘**					
统计数	92			391			56					
统计参数	均值	方差	主要变化范围	均值	方差	主要变化范围	均值	方差	主要变化范围			
SiO ₂	68.40	5.82	63.0—75.0	58.54	4.90	51.05—65.47	56.63	5.32	48.38—60.00			
TiO ₂	0.38	0.26	0.08—0.66	0.79	0.26	0.30—1.16	0.77	0.51	0.27—1.06			
Al ₂ O ₃	13.95	1.77	10.96—16.05	16.07	1.47	13.34—18.01	16.68	1.63	14.18—18.51			
Fe ₂ O ₃	2.73	1.39	0.85—3.18	4.39	1.82	2.45—6.69	3.23	1.05	1.21—4.54			
FeO	1.21	0.60	0.67—1.52	1.83	1.19	0.85—3.55	3.33	1.56	1.27—4.76			
MnO	0.047	0.026	0.01—0.066	0.094	0.074	0.01—0.134	0.053	0.039	0.01—0.123			
MgO	1.55	0.81	0.65—1.84	3.02	1.89	1.13—4.42	3.52	2.34	1.37—5.93			
CaO	2.01	0.98	1.02—2.48	4.39	2.27	2.17—5.75	5.79	2.73	3.60—7.61			
Na ₂ O	3.12	0.86	2.78—4.34	3.74	0.86	2.77—4.71	3.35	0.91	1.88—4.22			
K ₂ O	3.78	1.17	2.72—5.41	4.05	1.20	2.90—5.32	4.47	1.44	2.30—5.39			
P ₂ O ₅	0.24	0.08	0.08—0.27	0.42	0.21	0.12—0.79	0.18	0.11	0.09—0.62			
W*	0.71	0.16	0.68—0.89	0.72	0.20	0.54—0.93	0.51	0.15	0.37—0.64			
K ₂ O+Na ₂ O	6.85	1.16	5.74—8.09	7.60	1.66	5.88—9.13	7.82	2.04	5.09—8.67			
K ₂ O/Na ₂ O	1.23	0.46	0.98—1.64	1.08	0.18	0.60—1.66	1.39	0.50	0.77—1.76			
A/NKC	1.06	0.14	0.90—1.19	0.91	0.18	0.65—1.07	0.81	0.23	0.52—0.91			

* W=Fe₂O₃/(Fe₂O₃+FeO)。 ** 据文献[1,7—11]发表的数据统计。

2.2 地球化学特征

本区橄榄安粗岩系火山岩的稀土总量较高,ΣREE 值为 213.16×10^{-6} — 602.22×10^{-6} ;轻重稀土分馏显著,LREE/HREE 值变化于12.48—26.06之间;铈异常不明显,δEu 为0.64—0.89(表3)。这些特点与中国黑龙江省五大莲池新生代富钾玄武岩^[12]及鲁西等地金伯利岩^[13]的稀土组成极为相似。与国外岛弧-活动大陆边缘及裂谷带中类似岩石^[10,14]相比,本区橄榄安粗岩系的 La/Sm 值及 La/Yb 值介于二者之间(表4),这在一定程度上反映了本区构造位置的过渡性。其 Ti, Mn 和 Co 含量较高;Cr(32.1×10^{-6} — 113.5×10^{-6}),Ni(5.1×10^{-6} — 113.90×10^{-6})丰度偏低;Sc 含量变化范围较小(9.0×10^{-6} — 229×10^{-6}),这些均与其他构造背景下形成的橄榄安粗岩系有一定区别。

2.3 同位素组成

本区橄榄安粗岩系火山岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值为0.7060—0.7092,此值不仅高于洋脊玄武岩和洋岛玄武岩,也高于中国东部新生代钠质玄武岩^[15,16],而与东非裂谷的钾质火山岩(0.7056—0.7095)接近^[17]。高钾钙碱性岩系火山岩-次火岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值为0.7090—0.7116。橄榄安粗岩系火山岩的ε_{Nd}值为-2.19—-19.30,高钾钙碱岩系火山岩的ε_{Nd}值为-12.80—-17.50(表5)。火山岩及次火山岩的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值远低于洋脊玄武岩、洋岛玄武岩及中国东部新生代钠质玄武岩^[18,19],与美国怀俄明、东非裂谷及意大利等地的钾质火山岩接

表 3 中国东部中生代橄榄安粗岩系火山岩稀土元素含量($\times 10^{-6}$)Table 3 REE contents($\times 10^{-6}$) of Mesozoic shoshonite rocks in eastern China

样号	岩性	产地	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LR/HR	δ Eu
P-18	粗安岩	鲁东诸城	63.79	82.93	11.18	37.71	6.20	1.18	4.83	0.66	3.35	0.72	1.72	0.25	1.51	0.23	216.26	15.30	0.64
P-72	安粗岩	鲁东诸城	55.75	94.13	11.86	44.85	8.23	2.10	6.66	0.83	4.51	0.86	2.19	0.31	1.76	0.26	234.30	12.48	0.85
FB-6	安粗岩	鲁东五莲	81.30	144.00	16.00	56.30	9.00	1.90	5.90	0.84	5.00	0.96	2.70	0.46	2.50	0.39	327.25	16.45	0.76
FLS-4	安粗岩	鲁东五莲	80.80	147.00	16.50	57.10	9.20	1.80	6.00	0.84	5.20	1.00	2.80	0.42	2.60	0.40	331.66	16.22	0.70
313-2	安粗岩	鲁东五莲	138.50	259.00	24.70	75.40	15.45	2.86	9.80	1.28	6.44	5.01	3.48	0.01	3.14	0.49	545.55	17.41	0.67
A06-1	安粗岩	鲁中安丘	111.00	193.00	22.50	79.90	11.60	2.50	7.10	0.84	4.30	0.77	1.90	0.27	1.60	0.27	437.55	24.66	0.79
A13-1	粗面岩	鲁中安丘	82.00	127.00	13.80	47.00	6.70	1.60	3.80	0.52	2.60	0.54	1.30	0.19	1.10	0.18	288.33	27.18	0.89
A07-1	安粗岩	鲁中安丘	94.90	165.00	19.00	66.00	10.00	2.00	6.20	0.84	4.20	0.81	2.00	0.28	1.60	0.24	373.07	22.07	0.73
M03-2	粗面玄武岩	鲁西蒙阴	56.20	112.00	14.20	56.70	10.10	2.30	6.80	0.91	4.60	0.78	2.00	0.28	1.60	0.25	268.72	14.61	0.81
M04-1	粗面玄武岩	鲁西蒙阴	89.90	187.00	22.40	85.80	14.00	3.10	8.10	0.96	4.90	0.83	2.00	0.27	1.60	0.25	421.11	21.27	0.82
M16-1	橄榄安粗岩	鲁西蒙阴	139.00	272.00	31.00	115.00	18.10	3.90	10.40	1.20	5.60	0.90	2.00	0.28	1.60	0.24	601.22	26.06	0.80
M09-1	粗面岩	鲁西蒙阴	75.30	130.00	15.70	55.90	8.20	1.70	4.90	0.79	2.90	0.53	1.20	0.17	0.94	0.15	298.38	14.77	0.76
D-40	安粗岩	大别	55.90	105.00	11.50	43.40	7.30	1.60	4.80	0.65	3.70	0.67	1.60	0.22	1.30	0.19	237.83	17.11	0.78
D-44	安粗岩	大别	50.20	93.60	10.10	37.30	6.50	1.50	4.40	0.67	4.00	0.77	2.00	0.28	1.60	0.24	213.16	14.27	0.82
D-47	安粗岩	大别	53.90	99.80	10.30	37.10	6.10	1.30	3.90	0.56	3.50	0.70	1.80	0.26	1.60	0.24	221.06	16.60	0.77
LZ-1	粗面岩	庐枞	59.00	153.00	15.00	49.00	8.60	1.60	3.90	1.00	3.40	0.83	1.90	0.22	2.20	0.34	299.99	20.75	0.73
LZ-2	辉石粗安岩	庐枞	56.46	104.00	11.68	42.61	7.41	1.47	5.20	0.99	3.84	0.82	2.09	0.24	2.18	0.39	239.38	15.20	0.68
LZ-3	粗面玄武岩	庐枞	113.90	232.20	25.80	93.60	14.10	3.49	9.36	2.06	5.29	1.40	2.30	0.17	1.90	0.32	505.89	22.19	0.87
LZ-4	粗面岩	庐枞	54.00	130.00	14.00	48.00	8.50	1.80	5.00	1.30	4.80	1.00	2.70	0.28	2.60	0.28	274.26	15.27	0.77
LZ-5	粗面岩	庐枞	47.00	120.00	15.00	44.00	8.10	1.80	5.10	1.40	4.80	1.10	2.70	0.29	2.60	0.40	254.29	13.83	0.79

测试单位:南京大学地球科学系中心实验室

近^[17,20,22]。图4显示了本区橄榄安粗岩系岩石 Sr, Nd 同位素组成的特殊性。

表4 不同构造环境中橄榄安粗岩系稀土元素对比表

Table 4 REE contents of shoshonite rocks from different geological setting

构造环境	统计变量	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	La/Sm	La/Yb	资料来源
裂谷(7)	均值	111	217	11.7	2.70	1.16	2.44	0.35	9.41	43.20	[14]
	方差	25	41	1.0	0.30	0.19	0.33	0.07	1.35	6.36	
岛弧及大陆边缘(12)	均值	56.75	101	8.2	2.50		1.59	0.25	6.88	38.42	[10]
	方差	22.37	42	3.0	1.05		0.69	0.11	0.27	8.60	
中国东部橄榄安粗岩省的过渡环境(25)	均值	75.59	138.93	9.83	2.18	0.88	1.86	0.29	8.54	40.64	本文
	方差	28.82	55.30	3.14	0.59	0.19	0.45	0.07	2.21	7.48	

注: 括号中数字为样品统计数。

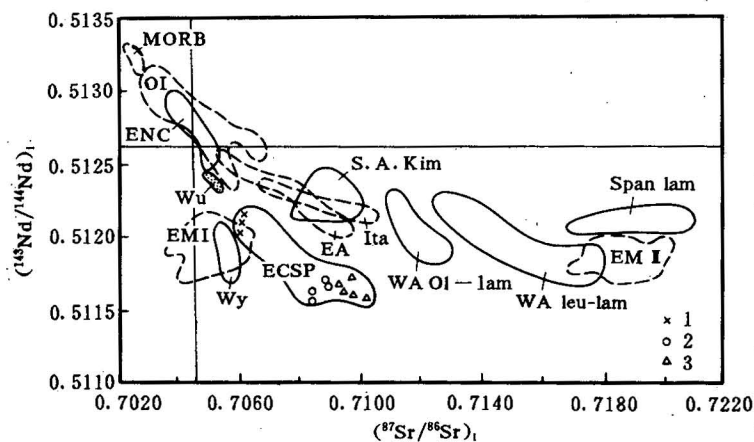


图4 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图

Fig. 4 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram

MORB 洋脊玄武岩^[18]; OI 洋岛玄武岩^[18]; ENC 中国东部新生代钠质玄武岩^[19]; Wu 五大莲池钾质火山岩^[19]; Wy 美国怀俄明州钾质玄武岩^[20]; EA 东非裂谷钾质火山岩^[17]; Ita 意大利钾质火山岩^[21]; WA ol-lam 澳大利亚西部含橄榄石的煌斑岩^[23,24]; WA leu-lam 澳大利亚西部含白榴石的煌斑岩^[23,24]; Span lam 西班牙煌斑岩^[24]; S. A. Kim 南非金伯利岩^[23]; EM I、EM II 富集型地幔端员^[25]; ECSP 中国东部中生代橄榄安粗岩系火山岩; 1. 庐枞盆地样品; 2. 山东样品; 3. 大别地区样品

MORB Mid-ocean ridge basalt^[18]; OI ocean island basalt^[18]; ENC the Cenozoic sodium basalt in eastern China^[19]; Wu potassium volcanic rocks in Wudalianchi^[19]; Wy potassium basalt in Wyoming, U. S. A. ^[20]; EA potassium volcanic rocks in East Africa Rift^[17]; Ita potassium volcanic rocks in Italy^[21]; WA ol-lam olivine-bearing lamprophyre in western Australia^[23,24]; WA leu-lam leucite-bearing lamprophyre in western Australia^[23,24]; Span lam lamprophyre in Spanish^[24]; S. A. Kim kimberlites in South Africa^[23]; EM I, EM II enriched mantle components^[25]; ECSP the Mesozoic shoshonite rocks in eastern China; 1. samples from Luzong basin; 2. samples from Shandong; 3. samples from Dabie

表 5 研究区火山岩-次火山岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 5 Sr-Nd isotopic compositions of volcanic and subvolcanic rocks in studied areas

岩系	样号	岩性	产地	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	Rb/Sr	Sm/Nd	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	t (Ma)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	ϵ_{Sr}^t	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	ϵ_{Nd}^t
高钾 钙碱 岩系	P ₂ Bb027	流纹质熔	山东	167.4	224.6	8.012	54.12	0.745	0.1480	2.1687	0.71275	0.511790	0.08956	120.7	0.7090	65.88	0.511719	-14.90
	P ₂ Bb035	结凝灰岩	诸城			6.987	48.36		0.1445			0.511813	0.08740	120.7			0.511744	-14.41
	D-6	霏细斑岩	沂南	101.91	744.78	4.67	32.65	0.137	0.1430	0.396	0.71179	0.511873	0.0865	150.8	0.7109	93.95	0.511788	-12.80
	Yn-33		金场	103.75	682.39	4.45	30.74	0.152	0.1448	0.440	0.71249	0.511633	0.0876	150.8	0.7116	102.55	0.511547	-17.50
橄 榄 安 粗 岩 系	P ₂ Bb006	粗安玢岩	山东 诸城	60.24	571.5	6.112	32.45	0.105	0.1884	0.3059	0.70957	0.511579	0.1139	130.0	0.7090	66.02	0.511482	-19.30
	P ₂ Bb062	橄橄安粗岩		50.68	798.4	6.819	45.78	0.064	0.1490	0.1783	0.70873	0.511635	0.09012	111.4	0.7084	57.78	0.511569	-18.07
	P ₂ Bb078	橄橄安粗岩		41.95	750.6	8.134	45.26	0.056	0.1797	0.1445	0.70860	0.511675	0.1087	111.4	0.7084	56.75	0.511596	-17.55
	Q-5	辉石二长岩	山东 七宝山	75.89	2486.45	10.37	78.24	0.031	0.1325	0.088	0.70916	0.511742	0.0801	116.5	0.7090	66.00	0.511681	-15.75
	D-2		123.84	1451.03	16.31	115.48	0.0853	0.1412	0.246	0.70964	0.511706	0.0854	116.5	0.7092	69.15	0.511641	-16.53	
	Fs-010-1	石英正长斑岩	庐枞 石马滩	360.66	162.89	6.712	45.01	2.214	0.1491	6.410	0.71791	0.512206	0.0902	129.6	0.7061	24.75	0.512130	-6.65
	Fs-010-5	正长斑岩				7.99	48.16		0.1658			0.512443	0.1003	129.6			0.512358	-2.19
粗 岩 系	B-44	辉石二长岩	庐枞	102.1	1137	7.80	40.36	0.260	0.1933	0.2599	0.70652	0.512212	0.119589	150.1	0.7060	23.41	0.512095	-6.84
	B-58	黑云母二长岩	巴家滩	159.1	1613	5.61	33.17	0.285	0.1692	0.2852	0.70656	0.512152	0.101734	150.1	0.7060	23.17	0.512052	-7.67
	Ls-1	粗安玢岩类	溧水			4.023	22.136		0.1817			0.512162	0.109929	125.3			0.512072	-7.90
	Ls-2	粗安玢岩类	溧水			4.023	19.07		0.2110			0.512368	0.127599	162.3			0.512232	-4.00

本区橄榄安粗岩系火山岩的铅同位素组成 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.91\text{--}18.61$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.45\text{--}15.72$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.10\text{--}39.04$) 与来自富集型地幔的煌斑岩或金伯利岩^[23,24]的铅同位素组成十分接近(图5)。

上述研究表明,中国东部中生代橄榄安粗岩省的火山岩及次火山岩与国外岛弧、活动大陆边缘和裂谷带的橄榄安粗岩系火山岩在岩石组合、矿物-岩石化学成分、稀土-微量元素地球化学特征及同位素组成等方面均有一定区别,这些区别是本区壳幔成分与结构、区域性应力场及区域性构造动力体制等多种因素综合作用的结果。

3 橄榄安粗岩省中的金属矿床

中国东部中生代橄榄安粗岩省的火山岩与次火山岩具有一定的特殊性,与其有关的金属成矿作用亦具有一定的特殊性。本区与火山-次火山作用有关的矿床可分为七大类,即:火山沉积-热液叠加改造型铁-黄铁矿,如安徽庐江盘石岭;斑岩铜金矿床,如安徽庐江沙溪;热液角砾岩型铅锌(银、金)矿床,如安徽鲜花岭;接触交代型金铜矿床,如山东沂南;玢岩铁矿,如江苏梅山、安徽凹山和罗河;脉状铜矿,如安徽石门庵、井边;浅成低温热液金铜矿(江苏铜井、安徽天头山)和浅成低温热液金矿(安徽东溪、南关岭)。

按照矿床形成的地质背景及有关火山岩-次火山岩性质,橄榄安粗岩省内存在3个成矿系列(图6):

成矿系列 A 出现于基底拗陷型火山盆地中。矿床在成因上与橄榄安粗岩系火山-次火山作用有关,主要成矿元素为铁、铜、金。矿床类型以玢岩铁矿为最重要,其次是与火山作用有关的浅成低温热液铜金矿床。

成矿系列 B 出现在基底隆起型或拗陷型火山盆地的边缘及外围。成矿作用主要与高钾钙碱性岩系火山-次火山作用有关,斑岩铜金矿床、角砾岩筒型铜金矿床,接触交代型铜金矿床、浅成低温热液型金矿床是主要矿床类型,主要成矿元素为铜、金。

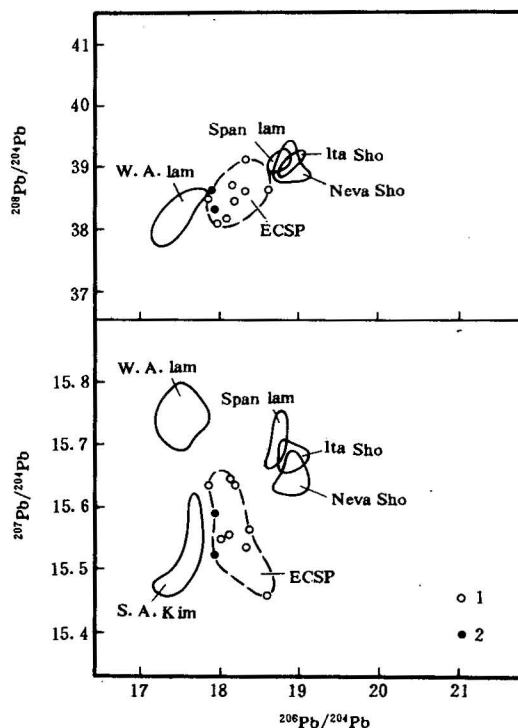


图5 中国东部橄榄安粗岩系岩石与国外钾质火山岩、金伯利岩和煌斑岩铅同位素组成对比图

Fig. 5 Comparison diagram of Pb isotopic compositions between the shoshonite rocks in eastern China and the potassic volcanic rocks, kimberlites as well as lamprophyre abroad

W. A. lam 澳大利亚西部煌斑岩^[23,24]; Ita Sho 意大利中部钾质火山岩^[21]; Neva Sho 美国内华达州钾质火山岩^[24]; Span lam 西班牙煌斑岩^[24]; ECSP 中国东部中生代橄榄安粗岩系火山岩; S. A. Kim 南非金伯利岩^[23]; 1. 庐枞盆地样品; 2. 宁芜盆地样品

W. A. lam Lamprophyre in western Australia^[23,24]; Ita Sho potassic volcanic rocks in central Italy^[21]; Neva Sho potassic volcanic rocks in Nevada, U. S. A. ^[24]; Span lam lamprophyre in Spanish^[24]; ECSP the Mesozoic shoshonite rocks in eastern China; S. A. Kim kimberlites in South Africa^[23]; 1. samples from Luzong basin; 2. samples from Ningwu basin

(Ma)	E	E E	E V P	P					
105				V CR M					
115		V			V	B CR			
125		Fe Fe Fe Fe			PP				
135	V V	V P		V		CR	EE V CR-B	E V BB	
145	Fe Fe Fe								
155	M M			V		EEE CR			
165				P P P					
地区	庐枞	宁芜	邹平盆地 外围	庐枞盆地 外围	五莲	沂南	平邑	晓天	金寨
系列	成矿系列 A			成矿系列 B			成矿系列 C		

图 6 橄榄安粗岩省矿床组合的时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of ore deposit assemblages in the shoshonite province

V 脉状矿床; M 层状矿床(沉积-火山沉积、热液叠加改造);
Fe 玢岩铁矿; P 斑岩铜金矿床; CR 接触交代矿床; B 角砾
岩筒型; E 浅层低温热液矿床
V Vein type; M bedded ore deposit; Fe porphyry iron de-
posit; P porphyry copper-gold deposit; CR contact replacement
deposit; B breccia pipe; E epithermal deposit

Sr 和 Nd 同位素以 ϵ_{Nd} 值低和 ϵ_{Sr} 值较高为特征, 接近 EMI 源区(即 I 型富集型地幔)^[25], 而与 DMM I (亏损地幔端员)、PREMA (通用地幔组分)、BSE (原始未分异地幔端员) 有明显区别, 显示其源区为富集型地幔, 并有地壳物质加入。

由于中生代时本区受三大构造动力体制的制约, 从晚侏罗世起出现了以拉张为主的区域地质背景, 致使区内热体制得到调整, 出现了区域范围的地幔热异常。由于地壳减薄及深断裂活动的结果, 导致富集型地幔的部分熔融, 形成橄榄安粗岩系的原始岩浆房及相应的火山岩浆活动。若岩浆房主要位于下地壳, 则形成高钾钙碱岩系火山岩浆活动。

金属成矿作用的制约因素虽远较火山岩浆活动复杂, 但亦明显受到壳幔成分与结构及区域地质构造背景的影响。

成矿系列 C 出现于基底隆起型火山盆地或火山岩带中及其外围。成矿与橄榄安粗岩系火山-次火山活动有关, 矿床类型有热液角砾岩型铅锌金银矿床及浅成低温热液型金矿床。

橄榄安粗岩省矿床组合与裂谷带火山岩-次火山区和南、北美洲活动大陆边缘火山岩区的矿床组合有明显区别, 与西南太平洋岛弧区的金属矿化虽有相似处(如铜、金矿化较强, 矿化有关岩体多为闪长岩类、粗安岩类), 但也存在一定差别。表现在: 中国东部橄榄安粗岩省具有较强的铁成矿作用, 缺少区域性的矿床分带性, 不出现与铁镁质-超铁镁质火成岩有关的矿床组合, 成矿过程与成矿环境十分复杂。此外, 成矿时代二者也不同, 西南太平洋岛弧区为新生代。

4 橄榄安粗岩省的成因

中国东部中生代橄榄安粗岩省特殊的火山岩-次火山岩组合及其有关的金属成矿作用是本区壳幔成分与结构及区域构造背景特殊性的综合体现。前述资料表明, 本区火山岩的主要元素富钾; 微量元素中富不相容元素; 轻稀土及稀土总量较高; 过渡元素钛含量高, 而较贫铬、镍; 其铅同位素组成接近钾质火山岩、金伯利岩和煌斑岩,

参 考 文 献

- 1 Norrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos.*, 1980, 13(1): 97—108.
- 2 Varne R. Ancient subcontinental mantle: A source for K-rich orogenic volcanics. *Geology*, 1985, 23: 405—408.
- 3 Thompson R N. Asthenospheric source of Ugandan ultrapotassic magma? *J. Geol.*, 1985, 93: 603—608.
- 4 Kimura G. Mesozoic collision-extrusion tectonics in eastern Asia. *Tectonophysics*, 1990, 181: 15—23.
- 5 Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 1986, 27: 745—750.
- 6 Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Min. Petrol.*, 1976, 58: 68—81.
- 7 Joplin G A, Kiss E, Ware N G, Winddowson J R. Some chemical data on members of the shoshonite association. *Mineralogical Magazine*, 1972, 38: 936—945.
- 8 Keller J. Petrology of some volcanic rock series of the Aeolian arc, Southern Tyrrhenian sea: calc-alkaline and shoshonitic association. *Contrib. Min. Petrol.*, 1974, 46: 29—47.
- 9 Baker P E. Evolution and classification of orogenic volcanic rocks. In: Andesites, R. S. Thorpe (editors). John Wiley & sons. 1982, 11—23.
- 10 Thompson R N, Fowler M B. Subduction-related shoshonitic and ultrapotassic magmatism: a study of siluro-Ordovician syenites from the Scottish Caledonides. *Contrib. Min. Petrol.*, 1986, 94: 507—522.
- 11 Meen J K. Formation of shoshonites from calc-alkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality. *contrib. Min. Petrol.*, 1987, 97: 333—351.
- 12 邱家骧. 五大莲池-科洛-二克山富钾火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 85—99 页.
- 13 周秀仲, 杨建民, 黄蕴慧, 秦淑英. 山东和辽宁金伯利岩的稀土元素地球化学特征. *岩石矿物学杂志*, 1990, (4): 300—308.
- 14 Mitchell R H, Bell K. Rare earth element geochemistry of potassic lavas from the Birunga and Toro-Ankole regions of Uganda, Africa. *Contrib. Min. Petrol.*, 1976, 58: 293—310.
- 15 Zhou Xinghua, Armstrong R L. Cenozoic volcanic rocks of eastern China—Secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1982, 58(3): 301—329.
- 16 陈道公, 彭子成. 山东新生代火山岩 K-Ar 年龄和 Rb-Sr 同位素特征. *地球化学*, 1985, (4): 293—303.
- 17 Vollmer R, Norry M J. Possible origin of K-rich volcanic rocks from virunga, East Africa, by metasomatics of continental material; Pb, Nd and Sr isotopic evidence. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1983, 64: 374—386.
- 18 White W M, Hofmann A W. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 1982, 296(5869): 821—825.
- 19 王俊文, 解广轰, Tatsumoto M, Basu A R. 五大莲池钾质火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学及岩浆的化学演化. *地球化学*, 1988, (4): 310—317.
- 20 Vollmer R, Ogden P, Schilling J G, Kingsley R H, Waggoner D G. Nd and Sr isotopes in ultrapotassic volcanic rocks from the Leucite Hills, Wyoming. *Contrib. Min. Petrol.*, 1984, 87: 359—368.
- 21 Hawkesworth C J. Crustal contamination versus enriched; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ evidence from the Italian volcanics. *Contrib. Min. Petrol.*, 1979, 69(2): 151—165.
- 22 Hawkesworth C J, Rogers N W, Calsteren P W C, Menzies M A. Mantle enrichment processes. *Nature*, 1984, 311: 331—335.
- 23 Fraser K J, Hawkesworth C J, Erlank A J, Mitchell R H, Scott-Smith B H. Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1985, 86: 57—70.
- 24 Nelson D R, McCulloch M T, Sun S S. The origin of ultrapotassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 1986, 50: 231—245.
- 25 Hart S R. Heterogeneous mantle domains: Signatures, genesis and mixing chronologies, *Earth Planet Sci. Lett.*, 1988, 90: 273—296.

CHARACTERISTICS OF VOLCANIC ROCKS IN THE SHOSHONITE PROVINCE, EASTERN CHINA, AND THEIR METALLOGENESIS

Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, Chen Kerong, Xu Zhaowen and Zen Jiahu

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu)

Abstract

The shoshonite province in eastern China is characterized by extensive distribution of Mesozoic (165—100 Ma) volcanic rocks consisting of shoshonite series with subordinate high-K calc-alkali series. The formation of the shoshonite province is the result of the combined action of three tectonic dynamic systems in the dominantly tensile stress field. In comparison with similar volcanic rocks in island arcs and active continental margins in other countries, volcanic rocks in the shoshonite province have higher SiO_2 contents, lower ratios of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and higher $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ratios. Their contents of Ti, Mn and Co are relatively high, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ values (0.7060—0.7092) are close to that of potash-rich volcanic rocks in the East African rift, ϵ_{Nd} values are similar to that of the high-potash basalts in Wyoming, United States, the lead isotopic composition is alike to that of the lamproites and kimberlites derived from "enrichment-type" mantle. The mineralizations of the shoshonite province are dominated by those of copper, gold and iron, which is different from the case with island arcs and active continental margins. The special association of volcanic and subvolcanic rocks and related mineralization are the integrated manifestation of the special composition and structure of the mantle and crust of the province, and the special Mesozoic regional tectonic setting.

Key words: shoshonite province, regional tectonic setting, isotopic composition, mineralogical, petrological and geochemical characteristics; eastern China

作 者 简 介

王德滋, 生于 1927 年 6 月。1950 年毕业于南京大学地质系。现为南京大学地球科学系教授, 从事岩石学方面的研究和教学工作, 发表《火山岩岩石学》、《光性矿物学》等著作及论文 80 余篇。通讯处: 南京大学地球科学系, 邮政编码: 210093。