

攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学及其成因探讨*

赵正^{1,2} 漆亮^{2**} 黄智龙² 严再飞² 许成³

ZHAO Zheng^{1,2}, QI Liang^{2**}, HUANG ZhiLong², YAN ZaiFei² and XU Cheng³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550002

3. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

3. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, MOE, Peking University, Beijing 100871, China

2011-11-10 收稿, 2012-04-08 改回.

Zhao Z, Qi L, Huang ZL, Yan ZF and Xu C. 2012. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1915-1927

Abstract The Jijie alkaline complex is located in the southern part of Panxi rift, Yunnan Province. Jijie alkaline-ultramafic rocks complex body mainly is composed of melteigites, ijolites and urtites. They all have similar primitive mantle-normalized trace element spider diagram and REE (Rare Earth Element) patterns. The complex show relative enrichment of large-ion lithophile, such as K, Rb, Sr, Ba and relatively low contents of Sc, Cr and Ni. The Nb/Ta and Zr/Hf ratios are spread within the range of mantle-derived rocks. Sr and Nd isotope distribute along the "mantle array". Whereas, the contents of all the incompatible elements are relatively lower than OIB (Ocean Island Basalts) and other alkaline rocks, and comparable with E-MORB (Enriched-Mid Ocean Ridge Basalts). The low contents of $\Sigma\text{REE} = 32.86 \sim 70.07$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.03 \sim 4.47$ and strongly negative HREE, suggest that the peridotite mantle source have garnet residual and depleted incompatible elements. The primitive magma of Jijie alkaline-ultramafic rocks was underwent low-degree (< 10%) partial melt at high pressure, mainly experienced olivine, clinopyroxene and a slight magnetite crystal fractionation during the magma evolution. Melteigite, ijolite and urtite were derived from the same mantle source. The depleted mantle source of Jijie alkaline-ultramafic rocks may be related to the large volumes of Emeishan basalt magmas derived from mantle during Middle-Late Permian in this area. As the multi-stage activities of Panxi rift has provide a channel for Emeishan mantle plume, the alkaline magma originated from the lithosphere mantle or mixed mantle low degree partial melting during the early or late stages of Emeishan mantle plume activity invaded along Panxi rift.

Key words Alkaline-ultramafic rock; Mantle array; Crystal fractionation; Partial melt; Jijie; Southern part of Panxi rift

摘要 鸡街碱性超基性杂岩体产出攀西古裂谷南段, 地处云南省境内的罗茨地区, 空间上与峨嵋山玄武岩紧密伴生。岩体的主体由霓霞钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩组成, 三类岩石具有相似的微量元素和稀土元素(REE) 配分, 富集大离子亲石元素 K、Rb、Sr、Ba, 过渡族元素 Sc、Cr 和 Ni 相对亏损, Nb/Ta、Zr/Hf 比值在幔源岩的范围内, Sr-Nd 同位素沿“幔源趋势”线分布。鸡街碱性超基性岩中不相容元素总体亏损, 含量与 EMORB 相当, 稀土总量 $\Sigma\text{REE} = 32.86 \sim 70.07$ 偏低, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.03 \sim 4.47$, HREE 亏损, 指示源区的适度亏损。微量元素和同位素信息共同指示鸡街碱性超基性岩为地幔岩高压条件下低程度部分熔融的产物(< 10%)。岩浆演化过程中经历了橄榄石、辉石和少量磁铁矿的结晶分异。霓霞钠辉岩、霓霞岩与磷霞岩来自

* 本文受中国科学院“百人计划”(KZCX2-YW-BR-09)、国家自然科学基金(40773070、40573049)、国家自然科学基金青年基金(41103015)和中国博士后科学基金(20100480359)联合资助。

第一作者简介: 赵正, 男, 1984 年生, 博士, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: kevin8572@hotmail.com

** 通讯作者: 漆亮, 男, 研究员, 主要从事元素与同位素地球化学研究, E-mail: qiliangku@hotmail.com

同一地幔源区, 岩浆源区的相对亏损, 可能与中-晚二叠纪大量的玄武质岩浆从深部地幔抽取有关。攀西古裂谷的多期次活动为峨嵋地幔柱提供了岩浆通道, 地幔柱活动的早期阶段或晚期阶段岩石圈地幔(或混合地幔)低程度部分熔融的碱性岩浆沿此构造薄弱带上侵, 形成了攀西古裂谷内呈带状分布的各碱性杂岩体。

关键词 碱性超基性岩; 幔源趋势; 结晶分异; 部分熔融; 鸡街; 攀西裂谷南段

中图法分类号 P588.125

1 引言

超基性碱性岩是稳定大陆裂谷带或深大断裂活动的产物, 在国外主要分布在德国莱茵、挪威的奥斯陆、苏联的科拉半岛、亚洲的东萨颜岭、贝加尔、东非、格陵兰、巴西等地。该类岩体在我国出露较少, 研究程度低、规模不大, 零星分布于山东、山西、鄂西和川滇南北带。此类岩体是特定条件下幔源岩浆活动的产物, 并常伴生 Fe、P 及丰富的稀土和稀有矿产等, 是岩石学、矿床学和地球动力学研究的理想对象。

扬子板块西缘广泛分布的镁铁-超镁铁质侵入岩、峨眉山玄武岩和沿攀西裂谷带分布的碱性岩, 构成了峨眉山大火成岩省“三位一体”岩石组合(张云湘等, 1988)。近年来, 峨眉山大火成岩省的研究受到国内外学者的广泛关注, 关于峨眉山玄武岩及相关超镁铁质侵入岩的研究成果丰硕(如: Xu *et al.*, 2001; Zhang and Wang, 2002; Zhou *et al.*, 2002, 2008; Zhong and Zhu, 2006; Qi *et al.*, 2008; Qi and Zhou, 2008; Song *et al.*, 2008), 但有关峨眉山大火成岩省地区的碱性岩, 特别是碱性侵入岩的研究相对薄弱(Huang *et al.*, 1996; 夏斌等, 2004; Luo *et al.*, 2007; Zhong *et al.*, 2009)。峨眉山地区大规模的岩浆活动与攀西地区的多期张性构造演化有着密切的关系(从柏林, 1988; 张云湘等, 1988; Liu and Liu, 2000; Xu *et al.*, 2001; 胡瑞忠等, 2005; Shellnutt and Zhou, 2008), 碱性岩作为张性构造环境中的特征产物可能为这种耦合关系提供一定信息。超基性碱性岩来源较深, 这种深源浅成的属性带来了地球深部的物质组成、演化、构造和物理化学等重要信息, 通过它的研究来探索地球深部奥秘是一个重要的途径(涂光炽, 1990)。鸡街碱性杂岩体位于攀西裂谷南段, 受安宁河-易门断裂控制, 该区碱性岩成带状分布, 在年代学研究上虽具争议, 但基本确立为晚海西-印支期的产物(Huang *et al.*, 1996; 夏斌等, 2004; Luo *et al.*, 2007), 略晚于峨眉山玄武岩的形成(Xu *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2002), 本文旨在通过对鸡街杂岩体中各类岩石的微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究, 探索其源区特征及演化规律, 并期望对大火成岩省的研究提供新的“探针”线索。

2 区域地质与岩体地质

攀西地区的环状碱性杂岩体主要分布在攀西裂谷的中南段, 由北向南有: 德昌大向坪中心式环状碱性超基性复合杂岩体, 宁南流沙坡、会理猫猫沟环状霓霞正长岩杂岩体和

云南禄丰鸡街不对称中心式环状碱性超基性杂岩体, 断续展布达 260km 以上。岩体严格受安宁河-易门断裂带和东部的普雄河-普渡河断裂带控制(张云湘等, 1988)。空间上, 碱性杂岩体在裂谷带展布、多呈孤立点式同心环状小岩体或小的岩株群产出, 出露面积从不足 1km² 到 32km²。

鸡街碱性超基性岩出露于云南省禄丰县罗茨地区, 川滇古裂谷南段, 岩石类型多, 岩体结构复杂, 在国内外很具典型性。岩体在平面上为椭圆形, 长轴为北北东向, 长约 800m, 中部宽约 400m, 出露面积为 0.29km², 侵位于前震旦昆阳群美党组板岩夹白云质大理岩透镜体地层, 地层总体上走向近南北, 向东倾(图 1)。组成岩体的各类岩石呈不规则同心环状展布, 可分出三个带, 环带核部位于岩体北部, 由斑状霓霞钠辉岩为主的岩石组成, 中间环主要为细粒霓霞钠辉岩, 外环主要由不同粒度的霓霞岩组成, 其次是磷霞岩, 分布在岩体的西南角, 它们组成岩体的主体。主要组成矿物为辉石和霞石, 其次为橄榄石、角闪石、钠长石、磷灰石等, 霞石在霓霞钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩中含量递增, 反之辉石减少(赵正等, 2010a)。除此之外, 还有各种脉岩, 它们是钠霞正长岩、霓辉钠长斑岩和碳酸岩等, 约占 0.5%。

3 分析方法

微量元素(包括 REE)的测定在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。仪器为 ELAN-DRC-e ICP-MS, 仪器灵敏度调整到 1ng/mL ¹¹⁵In 约 30000cps。称取 200 目 50mg 样品于带不锈钢外套的 Teflon 密封溶样装置中, 加入亚沸蒸馏提纯的 HF(38%) 和 HNO₃(68%) 各 1mL, 加盖密封, 在烘箱中于 190℃ 加热消解 30h, 取出冷却后, 在电热板上低温蒸干, 加入 1mL HNO₃ 再蒸干。最后加入 2mL HNO₃、1mL 500ng/mL Rh 内标和 3mL H₂O, 重新盖上盖, 放入烘箱中于 140℃ 加热 5h 溶解残渣, 取出后转移至 50mL 离心管中, 进行 ICP-MS 测定。方法以多元素标准溶液(AccuStandard Inc, USA)作为外标, 以国际标样 AMH-1(安山岩)和 OU-6(板岩)作为标准参考物质。大部分元素的相对误差优于 ±5%, 具体步骤和全流程实验空白值见(Qi *et al.*, 2000)。分析结果见表 1。

Sr、Nd 同位素的全岩测试、化学分离和同位素比值测定在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成, 测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计。分别采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 和 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 对 Nd 和 Sr 同位素比值进行质量分馏校正。Rb-Sr 和 Sm-Nd

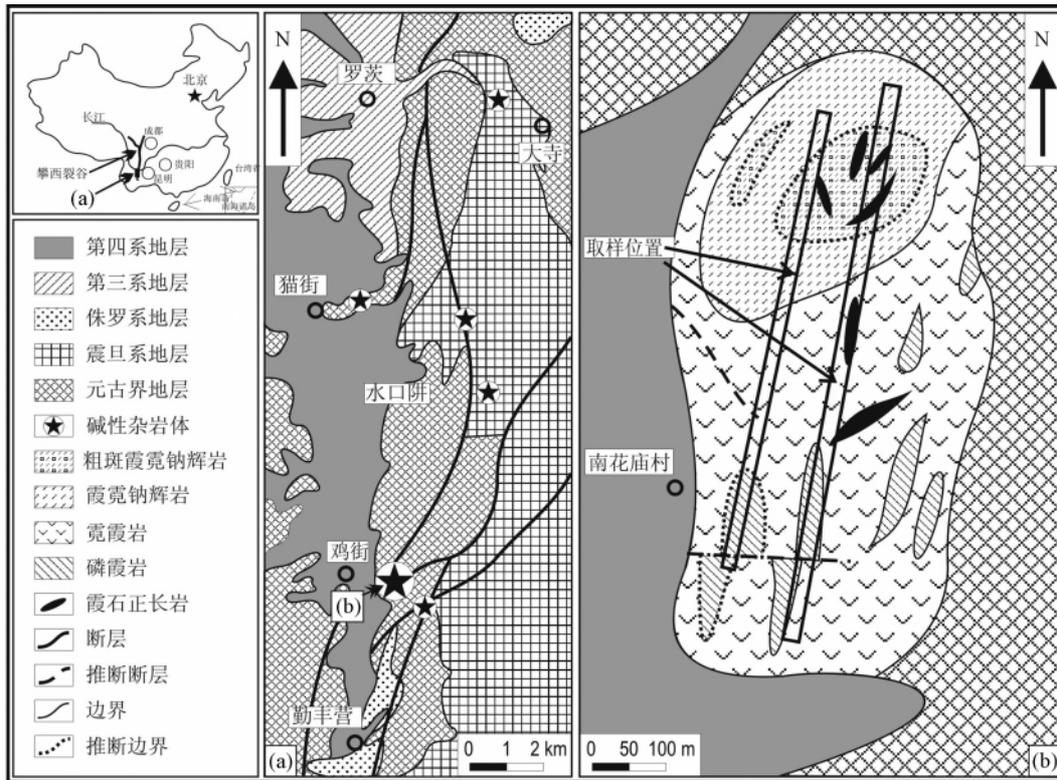


图 1 云南鸡街碱性超基性岩区域地质图 (a) 与岩体地质图 (b)

Fig. 1 Regional geological map of Jijie area (a) and geological scheme map of the alkaline-ultramafic complex of Jijie (b) in Yunnan Province

的全流程本底分别为 100pg 和 50pg 左右。浓度($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值) 误差小于 0.5%。化学流程和同位素比值测试可参见 (Pin and Zalduegui, 1997; Chen *et al.*, 2002)。Rb/Sr 和 Sm/Nd 比值的不确定度分别小于 $\pm 2\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。测试过程中分别对 Sr 标准溶液 (NBS 987) 测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710227 \pm 10$ ($2\sigma, n = 8$), Nd 标准溶液 (Jndi-1) 测得 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512113 \pm 11$ ($2\sigma, n = 8$), 均与参考值吻合。对 USGS 标准物质 BCR-2 进行了测试, 结果分别与参考值基本一致 (表 2)。

4 分析结果

4.1 稀土元素

霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩稀土元素球粒陨石标准化配分如图 2, 三类岩石具有相似的右倾稀土标准化曲线。稀土总量偏低, 变化范围不大, ΣREE 分别为 $32.86 \times 10^{-6} \sim 58.09 \times 10^{-6}$ (霞霓钠辉岩) (不含 Y, 下同), $36.73 \times 10^{-6} \sim 70.07 \times 10^{-6}$ (霓霞岩), $30.89 \times 10^{-6} \sim 43.5 \times 10^{-6}$ (磷霞岩); 其中轻稀土 (LREE) 分别为 $25.09 \times 10^{-6} \sim 46.23 \times 10^{-6}$ (霞霓钠辉岩), $28.67 \times 10^{-6} \sim 57.4 \times 10^{-6}$ (霓霞岩), $25.16 \times 10^{-6} \sim 34.97 \times 10^{-6}$ (磷霞岩); 重稀土 (HREE) 分别为

$7.74 \times 10^{-6} \sim 11.86 \times 10^{-6}$ (霞霓钠辉岩), $8.06 \times 10^{-6} \sim 12.67 \times 10^{-6}$ (霓霞岩), $5.73 \times 10^{-6} \sim 8.53 \times 10^{-6}$ (磷霞岩)。可见, 三类岩石的 LREE 和 HREE 间均有明显分馏, 其中 LREE/HREE 分别为 3.23 ~ 4.05 (霞霓钠辉岩), 3.56 ~ 4.53 (霓霞岩), 4.08 ~ 4.47 (磷霞岩), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 3.03 ~ 4.32 (霞霓钠辉岩), 3.36 ~ 5.87 (霓霞岩), 4.21 ~ 4.86 (磷霞岩)。三类岩石都表现为弱的 Eu 正异常和 Ce 的负异常, δEu 和 δCe 分别为 1.05 ~ 1.39 (大部分在 1.1 ~ 1.2 之间) 和 0.91 ~ 0.98。

4.2 过渡族元素

鸡街碱性超基性岩中过渡族元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni 和 Cu 经球粒陨石 CI 标准化后呈现以 Cr、Ni 为谷的明显的“W”型, 从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩过渡族元素含量逐渐降低, “W”形状愈明显 (图 3)。

三类岩石均亏损 Sc、Cr 和 Ni, 相对富集 Ti、Ni 和 Cr 的含量在霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩中表现为递减趋势。超基性岩中 Ni 主要赋存在橄榄石中, Cr 主要赋存于单斜辉石和石榴石, Ti、V 主要赋存在磁铁矿、单斜辉石和角闪石中, 三类岩石间过渡族元素的变化与以上矿物的结晶分异作用有关。

表1 鸡街碱性超基性岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)成份Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements of Jijie alkaline-ultramafic rocks

样品号	JJ08	JJ11	JJ13	JJ15	JJ16	JJ17	JJ18	JJ20	JJ23	JJ24	JJ32	JJ33	JJ52
岩性	霞霓钠辉岩												
SiO ₂	40.68	40.45	38.87	43.09	41.73	43.44	43.62	40.74	40.89	41.65	40.56	40.49	41.07
TiO ₂	2.46	2.32	2.29	2.13	1.85	2.05	1.93	2.34	2.48	2.33	2.32	2.21	2.55
Al ₂ O ₃	9.44	12.18	10.21	11.27	9.95	10.53	10.84	10.84	10.18	9.93	10.95	11.28	11.27
Fe ₂ O ₃	15.11	15.03	18.06	13.03	13.86	13.19	12.38	14.93	15.08	14.66	15.42	15.16	15.11
MnO	0.19	0.25	0.23	0.18	0.17	0.19	0.18	0.20	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19
MgO	9.99	7.59	8.55	8.81	10.02	9.34	9.46	8.49	8.39	9.23	8.59	8.78	7.81
CaO	16.13	13.42	15.10	13.14	14.96	13.48	12.92	14.87	14.50	14.14	14.50	14.52	14.54
Na ₂ O	3.29	5.16	3.90	5.08	3.87	4.61	4.83	4.87	4.16	4.48	4.15	3.87	4.02
K ₂ O	0.86	1.65	0.89	1.63	1.28	1.43	1.54	1.33	1.13	1.25	1.53	1.39	1.55
P ₂ O ₅	1.35	0.88	1.02	0.87	1.23	0.84	0.87	0.68	1.11	0.89	0.81	0.82	0.51
LOI	0.47	1.04	0.92	0.67	1.01	0.79	1.29	0.68	1.83	1.16	0.93	1.24	1.34
Total	99.99	99.96	100.04	99.89	99.94	99.89	99.87	99.97	99.96	99.95	99.97	99.96	99.96
Sc	43.1	28.6	39.3	32.6	38.5	34.0	30.9	33.1	32.5	37.6	37.1	36.2	39.2
V	346	327	162	251	264	269	238	271	296	302	285	266	355
Cr	67.5	44.5	28.6	174	201	313	237	87.6	105	168	48.2	48.8	41.7
Co	54.4	50.2	63.6	45	51.9	46.6	41.4	50.7	49.4	53.6	57.3	57.5	55
Ni	75	50.5	48.1	82.1	93.6	104	84.1	64.1	61.9	87.4	49.4	48.6	48.6
Cu	76.2	210	13.8	116	118	123	111	265	158	177	56.7	76.6	104
Rb	10.5	13.9	10.1	20.6	16.2	22.0	20.4	12.2	13.6	10.4	11.8	12.0	15.0
Sr	241	395	265	352	240	353	604	297	426	345	301	325	228
Y	16.2	13.4	12.1	15.6	12.8	16.5	13.8	13.2	17.2	16.6	11.0	10.8	11.4
Zr	50.6	37.1	41.6	60.9	37.2	69.9	56.0	45.7	48.1	53.7	31.3	31.2	41.0
Nb	5.71	1.79	1.05	10.7	2.84	14	11.1	2.39	3.5	3.79	0.62	0.50	4.92
Ba	62.0	27.2	16.7	162	54.1	219	304	24.9	87.2	42.5	44.2	52.3	78.8
Ta	0.40	0.16	0.13	0.58	0.22	0.73	0.63	0.24	0.23	0.27	0.09	0.070	0.33
Pb	1.02	0.25	0.20	2.59	0.49	3.42	2.82	3.17	1.68	1.48	0.54	0.67	2.20
Th	0.48	0.20	0.20	0.94	0.44	1.25	0.90	0.31	0.57	0.51	0.12	0.11	0.35
U	0.12	0.03	0.02	0.22	0.08	0.31	0.21	0.06	0.08	0.09	0.04	0.02	0.10
La	7.77	6.23	5.1	8.12	5.72	8.32	6.27	5.25	8.53	7.37	3.95	3.82	3.98
Ce	17.8	13.5	12.0	17.8	13.6	18.1	14.0	12.1	18.6	16.1	9.4	9.05	9.55
Pr	2.66	1.97	1.85	2.55	2.00	2.60	2.02	1.90	2.65	2.35	1.52	1.46	1.51
Nd	13.3	9.22	9.32	12	9.92	12.1	9.79	9.42	12.1	11.1	7.57	7.65	7.37
Sm	3.42	2.78	2.61	3.15	2.59	3.19	2.48	2.67	3.34	3.03	2.25	2.08	2.26
Eu	1.28	1.09	1.11	1.19	0.98	1.23	1.07	1.14	1.19	1.19	1.02	1.03	0.97
Gd	3.76	2.74	2.71	3.45	2.94	3.29	2.83	2.93	3.52	3.31	2.54	2.45	2.38
Tb	0.60	0.46	0.44	0.52	0.46	0.55	0.44	0.47	0.56	0.53	0.39	0.37	0.38
Dy	3.43	2.76	2.51	3.14	2.72	3.34	2.59	2.72	3.35	3.19	2.25	2.23	2.18
Ho	0.70	0.57	0.50	0.63	0.50	0.70	0.56	0.57	0.70	0.68	0.45	0.45	0.5
Er	1.69	1.39	1.18	1.57	1.24	1.77	1.37	1.41	1.79	1.73	1.13	1.10	1.08
Tm	0.20	0.18	0.16	0.20	0.18	0.22	0.18	0.18	0.23	0.22	0.15	0.14	0.16
Yb	1.29	1.27	0.94	1.36	1.1	1.48	1.23	1.15	1.51	1.57	0.93	0.90	0.94
Lu	0.19	0.17	0.15	0.21	0.15	0.23	0.17	0.16	0.19	0.2	0.14	0.14	0.14
ΣREE	58.1	44.3	40.6	55.9	44.1	57.1	45.0	42.1	58.3	52.6	33.7	32.9	33.4
LREE	46.2	34.8	32.0	44.8	34.8	45.5	35.6	32.5	46.4	41.1	25.8	25.1	25.6
HREE	11.9	9.54	8.59	11.1	9.3	11.6	9.38	9.59	11.9	11.4	7.99	7.77	7.74
LREE/HREE	3.9	3.65	3.72	4.05	3.74	3.93	3.8	3.39	3.91	3.6	3.22	3.23	3.31
(La/Yb) _N	4.32	3.52	3.89	4.28	3.73	4.03	3.66	3.27	4.05	3.37	3.04	3.06	3.03
δEu	1.09	1.19	1.27	1.1	1.08	1.15	1.23	1.24	1.05	1.14	1.3	1.39	1.27
δCe	0.96	0.94	0.96	0.95	0.98	0.95	0.96	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.95

续表 1

Continued Table 1

样品号	JJ19	JJ22	JJ26	JJ27	JJ28	JJ29	JJ30	JJ31	JJ02	JJ03	JJ04	JJ05	JJ06	JJ07	JJ09	JJ10
岩性	霓霞岩								磷霞岩							
SiO ₂	41.56	41.44	40.75	42.19	41.18	41.10	40.36	41.00	44.60	44.48	44.40	44.16	44.31	44.06	44.21	44.22
TiO ₂	2.37	2.02	2.38	2.26	2.33	2.34	2.53	1.98	0.99	1.08	1.06	1.11	1.24	1.36	1.43	1.48
Al ₂ O ₃	11.77	12.36	11.54	11.89	11.87	11.72	14.20	13.50	24.26	23.22	23.19	22.97	21.89	20.55	20.49	19.99
Fe ₂ O ₃	14.38	13.42	14.80	13.89	14.87	14.60	12.43	13.25	6.91	6.85	6.90	6.98	7.45	8.00	8.71	8.68
MnO	0.23	0.17	0.21	0.21	0.21	0.23	0.21	0.15	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14
MgO	7.24	7.70	7.95	7.17	7.25	8.09	5.93	7.00	1.93	2.02	2.06	2.11	2.76	3.58	3.24	3.35
CaO	12.23	13.75	13.78	13.24	13.25	13.32	12.60	13.26	5.13	5.31	5.27	5.40	6.55	7.53	7.45	7.70
Na ₂ O	5.56	5.45	5.06	5.71	5.00	5.07	6.17	5.56	11.52	12.03	12.06	11.72	10.60	9.84	10.19	9.95
K ₂ O	1.74	1.68	1.77	1.92	1.90	1.74	2.42	2.00	2.68	2.46	2.46	2.49	2.44	2.28	2.19	2.17
P ₂ O ₅	1.05	1.12	0.94	0.84	0.88	0.86	1.82	0.99	0.56	0.70	0.68	0.67	0.71	0.73	0.71	0.74
LOI	1.79	0.83	0.77	0.61	1.22	0.87	1.29	1.23	1.00	1.45	1.51	1.99	1.66	1.69	0.99	1.33
Total	99.93	99.93	99.97	99.93	99.95	99.95	99.95	99.93	99.70	99.71	99.71	99.71	99.73	99.75	99.76	99.76
Sc	27	29.4	30.8	32	30.9	30.4	16.9	28.7	9.34	9.2	11.5	9.68	12.6	15.8	13.5	14.1
V	257	256	292	316	300	334	357	280	102	108	105	115	156	174	177	171
Cr	64.7	83.9	81.6	78.5	71.5	117	15.6	18.6	4.53	2.39	5.96	2.14	3.25	25	4.16	1.87
Co	46.2	44.7	53.2	46.3	48.2	51.9	44.7	47.9	17.6	16.6	16.8	17.6	20.9	24.4	23	23.3
Ni	47.8	55.8	62.5	56.3	57.1	63.3	20.8	33.9	8.89	6.45	14.9	6.95	9.7	26.6	13.7	11.8
Cu	122	115	272	198	91.8	247	352	146	101	140	142	155	106	146	144	134
Rb	22.9	20.5	15.0	20.9	17.1	17.2	21.2	21.9	31.7	32.4	36.1	33.4	36.2	35.1	32.3	34.4
Sr	448	247	431	511	440	410	437	310	405	420	424	420	385	370	430	427
Y	18.6	12.9	15.1	16.1	16.3	15.0	17.6	11.3	8.1	10.0	9.17	9.86	10.7	11	11.5	11.9
Zr	67.9	32.1	39.1	63.3	46.4	41.2	33.8	36.3	29.9	41.1	41.3	39.7	46.9	51.8	46.2	54.5
Nb	10.4	2.32	3.47	18.3	7.66	3.75	3.96	2.55	11.0	14.5	15.2	13.9	14.8	15.7	14.8	17.4
Ba	162	36.9	45.0	157	141	49.0	98.1	74.5	193	250	261	252	251	233	251	266
Ta	0.51	0.15	0.26	1.04	0.43	0.29	0.32	0.22	0.57	0.81	0.90	0.78	0.80	0.88	0.77	0.97
Pb	3.36	0.64	0.88	4.70	1.74	1.48	1.03	1.10	2.91	4.73	4.49	4.83	4.24	4.36	3.92	4.26
Th	1.30	0.36	0.32	0.78	0.38	0.25	0.46	0.29	0.88	1.33	1.28	1.28	1.46	1.41	1.18	1.41
U	0.29	0.08	0.05	0.16	0.070	0.050	0.070	0.060	0.20	0.32	0.33	0.30	0.33	0.34	0.25	0.32
La	9.1	6.01	7.66	7.31	7.64	7.17	10.4	4.59	5.27	6.43	6.12	6.28	6.78	6.46	6.79	7.06
Ce	19.5	13.6	16.1	15.2	16.0	15.1	22.9	10.7	10.3	13.0	12.2	12.8	13.5	13.2	14	14.2
Pr	2.77	2.02	2.34	2.20	2.29	2.19	3.23	1.66	1.42	1.71	1.62	1.70	1.78	1.79	1.85	1.93
Nd	12.8	9.56	10.4	9.78	10.6	9.75	15.5	8.39	6.12	7.42	7.06	7.60	7.98	7.99	8.24	8.73
Sm	3.45	2.66	2.96	2.68	2.94	2.75	3.73	2.29	1.43	1.85	1.81	1.85	1.93	1.94	2.06	2.16
Eu	1.25	0.94	1.23	1.19	1.25	1.13	1.64	1.04	0.62	0.80	0.72	0.79	0.82	0.86	0.86	0.89
Gd	3.60	2.81	3.19	2.83	3.13	2.85	4.28	2.57	1.64	1.97	1.76	2.07	2.12	2.17	2.31	2.35
Tb	0.60	0.43	0.51	0.49	0.50	0.49	0.65	0.39	0.26	0.33	0.32	0.33	0.36	0.38	0.41	0.39
Dy	3.52	2.62	2.93	2.99	3.02	2.96	3.63	2.25	1.56	1.9	1.86	1.97	2.14	2.09	2.41	2.43
Ho	0.75	0.5	0.63	0.65	0.7	0.6	0.73	0.46	0.33	0.44	0.38	0.43	0.47	0.48	0.49	0.51
Er	1.96	1.29	1.49	1.68	1.65	1.52	1.72	1.14	0.91	1.07	1.03	1.15	1.14	1.17	1.20	1.35
Tm	0.27	0.16	0.19	0.24	0.21	0.19	0.21	0.14	0.13	0.15	0.14	0.16	0.16	0.15	0.18	0.17
Yb	1.73	1.11	1.23	1.53	1.45	1.33	1.27	0.98	0.78	0.99	0.98	1.07	1.08	1.04	1.11	1.15
Lu	0.25	0.15	0.2	0.2	0.2	0.18	0.18	0.13	0.11	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18
ΣREE	61.5	43.9	51.1	49.0	51.6	48.3	70.1	36.7	30.9	38.2	36.1	38.3	40.4	39.9	42.1	43.5
LREE	48.9	34.8	40.7	38.4	40.7	38.1	57.4	28.7	25.2	31.2	29.5	31.0	32.8	32.2	33.8	35.0
HREE	12.7	9.12	10.4	10.6	10.8	10.2	12.7	8.06	5.73	6.99	6.62	7.32	7.62	7.64	8.28	8.53
LREE/HREE	3.86	3.81	3.93	3.62	3.76	3.75	4.53	3.56	4.39	4.47	4.46	4.24	4.3	4.22	4.08	4.1
(La/Yb) _N	3.77	3.88	4.47	3.43	3.78	3.87	5.87	3.36	4.86	4.68	4.47	4.21	4.5	4.46	4.39	4.4
δEu	1.08	1.04	1.22	1.31	1.25	1.22	1.25	1.31	1.23	1.28	1.21	1.22	1.23	1.27	1.2	1.2
δCe	0.94	0.95	0.92	0.92	0.93	0.93	0.96	0.95	0.91	0.94	0.93	0.94	0.93	0.94	0.95	0.93

表 2 鸡街碱性超基性岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素成份

Table 2 Sm-Nd and Rb-Sr isotopic compositions of Jijie alkaline-ultramafic rocks

样品号	岩性	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}} + 2\sigma$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$ ($\times 10^{-6}$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}} + 2\sigma$	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
G-6-1	霓霞钠辉岩	10.21	317.70	0.9300	0.704858 \pm 10	0.7045	5.05	18.88	0.1619	0.512554 \pm 8	0.5123	-0.73
G-21-1	霓霞钠辉岩	24.03	288.20	0.2413	0.705799 \pm 11	0.7050	4.18	16.85	0.1500	0.512431 \pm 11	0.5122	-2.82
JJ-11	霓霞钠辉岩	13.86	462.16	0.0868	0.704371 \pm 11	0.7041	3.09	11.52	0.1623	0.512636 \pm 12	0.5124	0.85
G-24-1	霓霞岩	27.91	386.80	0.2088	0.704774 \pm 11	0.7041	3.24	12.36	0.1584	0.512599 \pm 5	0.5124	0.24
G-46-1	霓霞岩	22.58	364.60	0.1792	0.705033 \pm 12	0.7044	1.91	6.40	0.1808	0.512599 \pm 4	0.5123	-0.35
JJ-28	霓霞岩	18.16	479.43	0.1096	0.704500 \pm 9	0.7042	3.17	12.00	0.1597	0.512598 \pm 14	0.5124	0.20
JJ-31	霓霞岩	22.70	327.92	0.2003	0.705212 \pm 15	0.7046	2.53	9.14	0.1672	0.512686 \pm 12	0.5125	1.71
JJ-2	磷霞岩	34.53	390.99	0.2555	0.704844 \pm 11	0.7041	1.37	5.52	0.1496	0.512602 \pm 15	0.5124	0.53
JJ-4	磷霞岩	36.64	473.73	0.2238	0.704751 \pm 28	0.7041	1.77	7.40	0.1448	0.512577 \pm 15	0.5124	0.16
JJ-9	磷霞岩	33.57	463.87	0.2094	0.704704 \pm 11	0.7041	2.34	9.75	0.1452	0.512599 \pm 14	0.5124	0.59
BCR-2	标样	46.5	340.9	0.3947	0.705011 \pm 11		6.57	28.9	0.1375	0.512633 \pm 11		
NBS987	标样				0.710227 \pm 10							
NBS987	标样				0.710241 \pm 11							
Jndi-1	标样									0.512113 \pm 11		
Jndi-1	标样									0.512101 \pm 12		

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 同位素初始比值计算参照夏斌等(2004); 样品 G-6-1, G-21-1, G-24-1, G-46-1 为黄智龙未发表数据

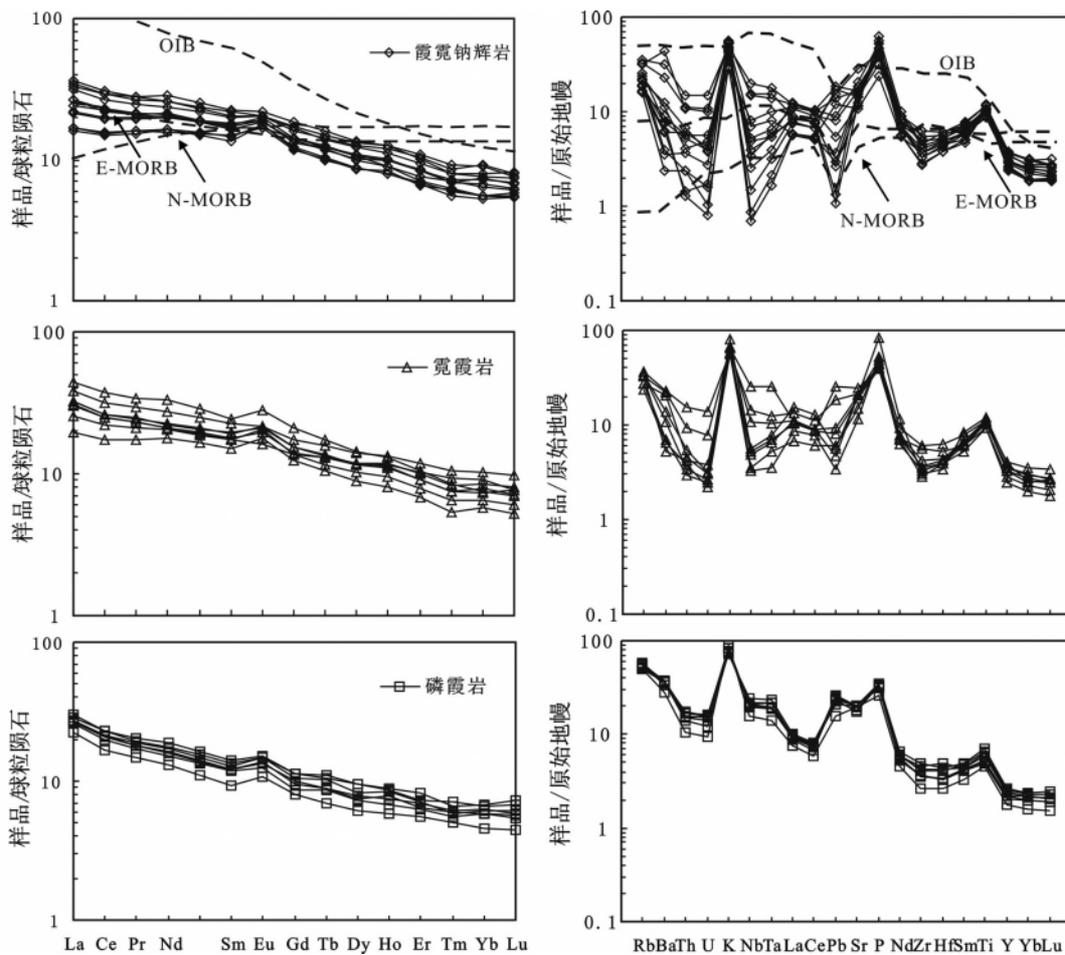


图 2 鸡街碱性超基性岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图及原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值、EMORB、NMORB 和 OIB 值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 2 The chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized trace element patterns of Jijie alkaline-ultramafic rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

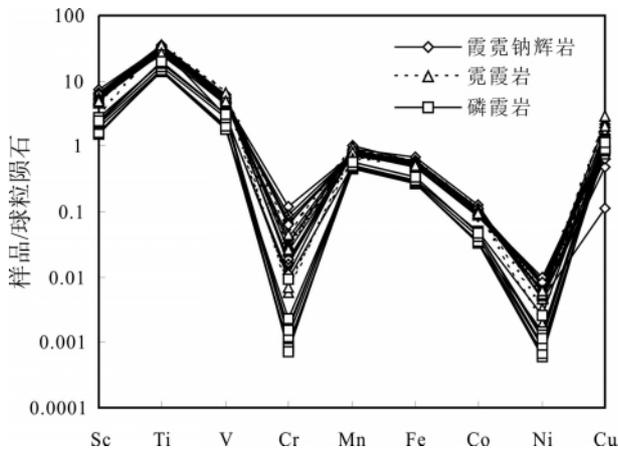


图3 鸡街碱性超基性岩过度族元素球粒陨石标准化配分图(标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized transitional elements patterns of Jijie alkaline-ultramafic rocks (normalization values after Sun and Mcdonough, 1989)

4.3 大离子亲石和高场强元素

相对其它微量元素,大离子亲石元素 K、Rb、Sr、Ba 在三类岩石中均明显富集(图2)。在部分熔融过程中大离子亲石元素极容易进入流体相而迁移,地幔岩浆演化过程中熔融程度越低富集越明显。不相容元素的整体偏低,凸显了大离子亲石元素在蛛网图中以峰值出现(图2),可以指示源区的相对亏损和低的部分熔融程度。

高场强元素 Nb、Ta 含量相对稳定(表1),从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩有增高趋势,变化范围减小。磷霞岩中 Nb (11~17.4)、Ta (0.57~0.97) 含量和比值 Nb/Ta (16.8~19.2) 表现出理想的幔源岩特征,霞霓钠辉岩和霓霞岩中 Nb (0.5~11.1)、Ta (0.07~1.04) 含量变化较大,但 Nb/Ta 值基本在原始地幔和球粒陨石变化范围(17.5±2.0)内。

Zr、Hf 同属中等不相容的高场强元素,鸡街各类碱性超基性岩中 Zr、Hf 的含量都比较稳定,Zr/Hf 比值从霞霓钠辉岩(27.1~37.8)、霓霞岩(26.8~38.6)、磷霞岩(35~40.9)略渐升高而趋近原始地幔比值(36.36)(Sun and McDonough, 1989)。霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩中的 Th 和 U 含量也有增高趋势,Th/U 比值从霞霓钠辉岩(3.37~7.22)-霓霞岩(4.55~6.98)-磷霞岩(3.91~4.7)变化范围逐渐缩小,而趋近原始地幔值(4.05)(Sun and McDonough, 1989)。在蛛网图中,高场强元素 P 表现为仅次于大离子亲石元素的峰值,这与 P 在强碱性岩浆中的溶解度有关(侯增谦, 1992)。

4.4 Sr, Nd 同位素

鸡街霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩的 Sr-Nd 同位素分布相对集中,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 变化范围为 0.7043~0.7057,计算的初始值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.7041~0.7051,而 $\epsilon_{Nd}(t) = -2.25 \sim$

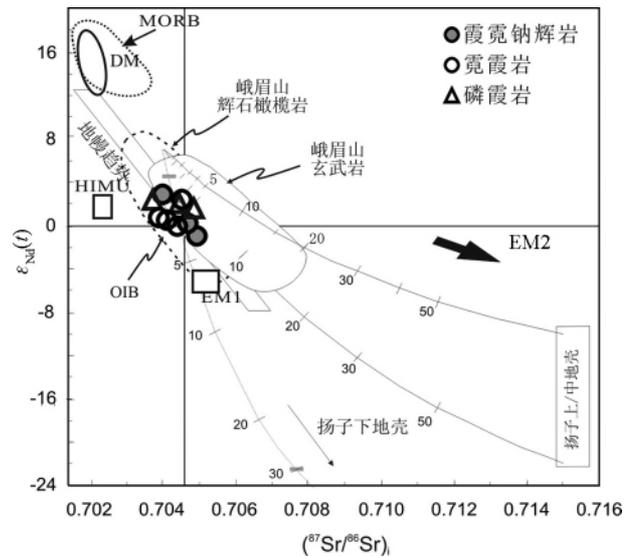


图4 鸡街碱性超基性岩 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$; 图解(底图引自 Qi and Zhou, 2008)

DM (depleted mantle 亏损地幔) 和地幔趋势引自 Zindler and Hart (1986); MORB, HIMU, EM1 和 EM2 据 Hart et al. (1992); OIB 据 Wilson (1989); 峨眉山玄武岩据 Xu et al. (2001)、Xiao et al. (2004); 扬子上/中地壳和下地壳据 Gao et al. (1999)、Ma et al. (2000) 和 Chen and Jahn (1998); 图内数据标示地壳矿物参与比例

Fig. 4 $\epsilon_{Nd}(t)$ ($t = 204\text{Ma}$) values versus initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr diagram for Jijie alkaline-ultramafic rocks (after Qi and Zhou, 2008)

5.27 变化范围相对宽泛。Nd 同位素比值 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 变化范围较小(0.5124~0.5127) $\epsilon_{Nd}(t) = -2.82 \sim 1.71$ 其中两个霞霓钠辉岩和一个霓霞岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为负(表2)。Sr 同位素与 Nd 同位素表现为很好的负相关关系,沿着“地幔趋势”分布。所有样品均落在 OIB 与峨眉山玄武岩的交集范围内。四象限图中,三类岩石集中在原始地幔附近的狭小区域,具有弱亏损特征,但远未达到 MORB 的亏损程度,并有向 EM1 延伸的趋势(图4)。

5 讨论

5.1 地壳混染

在微量元素蛛网图中,如果样品出现 Nb、Ta 负异常和 Pb 正异常,反映了其可能受到地壳物质混染。研究表明,无论是上、下地壳混染均会造成 Pb 的正异常和 Ti、Sr 的负异常成对出现(Taylor and McLennan, 1985)。鸡街岩体具有 Ti 的正异常和轻微的 Sr 正异常,与地壳混染造成的结果不一致,说明鸡街超基性岩的地壳混染作用还需要进一步讨论。

高场强元素 Nb 和 Ta 具有非常相似的离子半径,在岩浆演化过程中通常具有一致的行为,因此被称为地球化学孪生

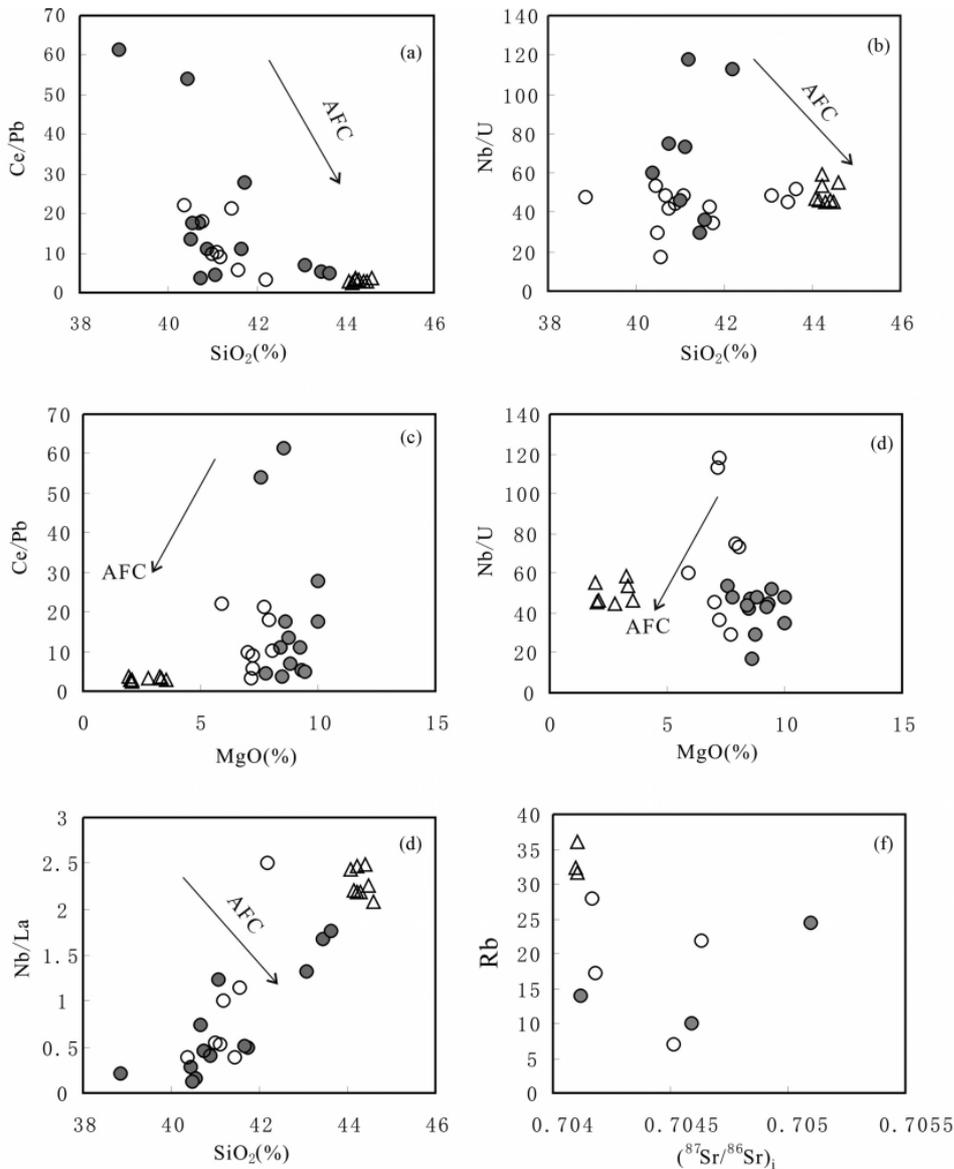


图5 鸡街碱性超基性岩 MgO、SiO₂ 对 Ce/Pb、Nb/U 及 Nb/La-SiO₂、Rb-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 图例同图4

Fig. 5 Plots of MgO, SiO₂ versus Ce/Pb, Nb/U and Nb/La versus SiO₂, Rb versus initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr

子 (geochemical twins) (Munker *et al.*, 2003), 目前研究认为, 在特定的地质条件下, 如金红石和榍石等富钛矿物的析出或加入会导致 Nb/Ta 比值变化, 在大多数岩浆过程中 Nb/Ta 比值的变化范围很小。Nb/Ta 球粒陨石值为 19.9 ± 0.6 (Munker *et al.*, 2003), 而地壳的 Nb/Ta 比值约为 11~12, 两者差异显著。因此 Nb/Ta 比值是示踪岩石物源的一个有效参数, 本区绝大部分霞霓钠辉岩、霓霞岩和全部的磷霞岩 Nb/Ta 值均在 15~19 之间, 与地幔值非常相近。霞霓钠辉岩和霓霞岩中 Nb/Ta 值偏低且相对亏损 Nb 和 Ta, 在部分熔融时, Ta 比 Nb 更容易进入熔体, 故在低度部分熔融形成岩石中 Nb/Ta 比值减小, 钛铁矿等富钛矿物的早期晶出也会导

致 Nb、Ta 的解耦 (Munker *et al.*, 2003), 霞霓钠辉岩-霓霞岩浆演化过程中存在磁铁矿的结晶分异, 也会引起 Nb-Ta 体系分布的不均匀。在 Nb/La-SiO₂ 相关图中 (图 5e), 其演化趋势与同化混染结晶作用 (AFC) 恰恰相反, 说明鸡街碱性超基性岩 Nb-Ta 元素体系未受地壳混染作用制约。

除 Nb, Ta 外, 微量元素比值 Nd/U 和 Ce/Pb 等更能反映源区的特征 (Hofmann *et al.*, 1986; Munker *et al.*, 2003)。Rehkamper and Hofmann (1997) 将 Nb/U (Ta/U), Ce/Pb (Nd/Pb) 视为地幔中发生地壳物质混染的灵敏指示剂。地壳中 Nb/U, Ce/Pb 值明显比幔源岩低 (Rehkamper and Hofmann, 1997), 若岩石样品受到地壳混染则 Nb/U, Ce/Pb

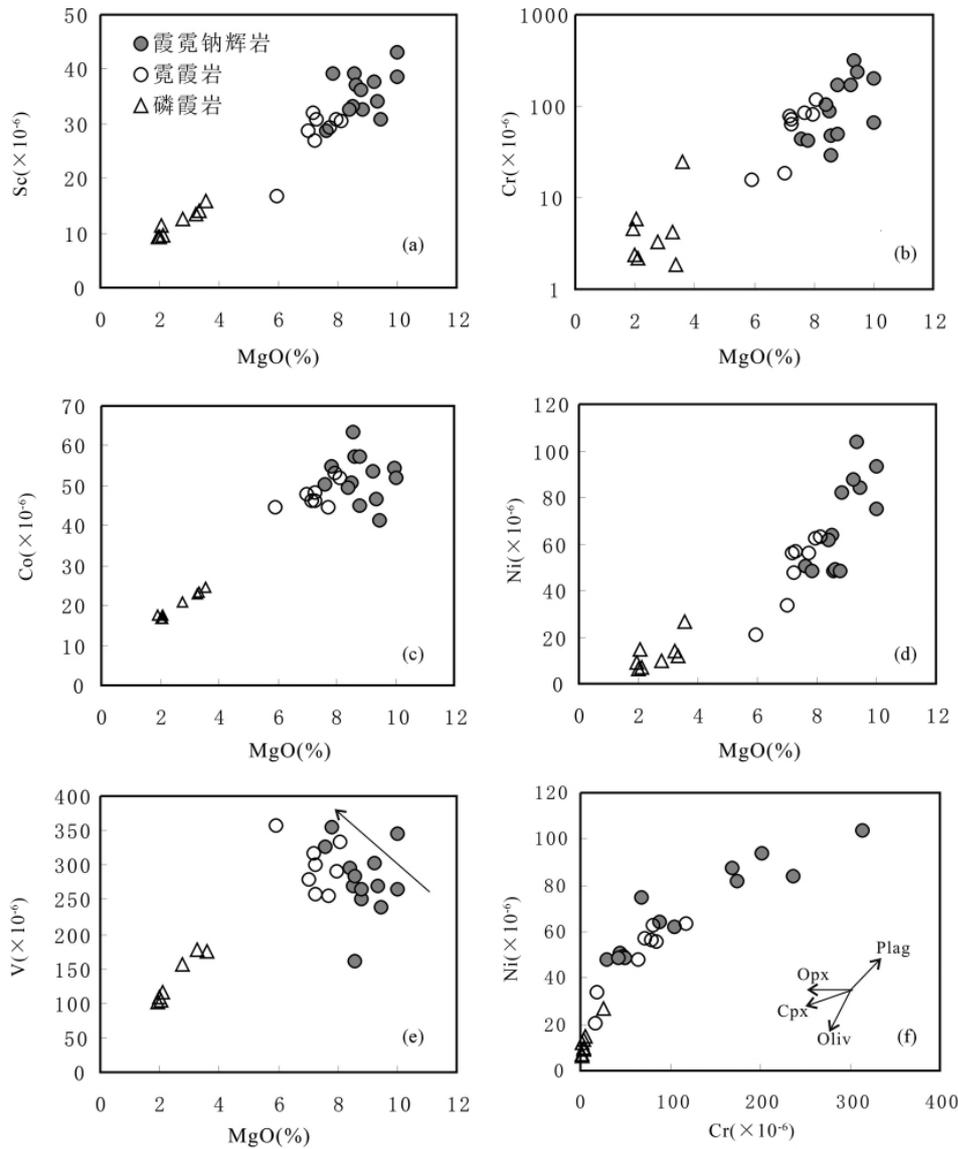


图6 鸡街碱性超基性岩 MgO 与过渡族元素 Sc、Cr、Co、Ni、V 及 Cr-Ni 相关图

Fig. 6 Plots of MgO versus Sc, Cr, Co, Ni, V and Cr versus Ni of Jijie alkaline-ultramafic rocks

会与 SiO_2 或 MgO 有明显相关关系。鸡街碱性超基性岩中 Nb/U 、 Ce/Pb 与 SiO_2 、 MgO 没有明显的相关关系(图 5a-d), 并非沿地壳同化混染结晶(AFC)趋势演化, 指示鸡街碱性超基性岩浆未经历明显的地壳混染作用。

由于地壳有高 Rb/Sr 比值和低 Sm/Nd 比值, 故地壳中有高的 Sr 同位素比值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的 Nd 同位素比值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 。鸡街霓霞钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 相关图上沿地幔趋势线呈良好负相关展布, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 与 Rb 也没有明显的相关关系(图 5f), 说明鸡街碱性超基性杂岩主要来自地幔单一源区。

5.2 结晶分异与部分熔融作用

鸡街碱性超基性岩具有弱的 Eu 正异常, 富集大离子亲

石元素 Sr, 可见岩浆演化过程中没有经历斜长石的分离结晶, 因为 Sr 在斜长石中是强相容元素, Eu^{2+} 与 Sr^{2+} 半径相似, 常以类质同象形式替代。

超基性岩中 Ni 和 Co 主要赋存于橄榄石, Cr 主要赋存在单斜辉石和石榴石, Ti、V 主要赋存在单斜辉石、磁铁矿、和角闪石中, Sc 强相容于石榴石和辉石, 考虑到光薄片鉴定中并未发现石榴石, 除少数含角闪石外, 整体趋势中 Sc 的降低可能是由于单斜辉石强烈分离的结果。MgO 与 Sc、Cr、Co 和 Ni 呈现良好的正相关(图 6a-d), 指示岩浆演化过程中经历了橄榄石和单斜辉石的结晶分异作用, Cr-Ni 相关图(图 6f)中霓霞钠辉岩和霓霞岩沿 Cpx(单斜辉石)趋势分布, 附以橄榄石结晶, 磷霞岩中 Cr、Ni 含量很低, 在演化趋势的延长线上分布。霓霞钠辉岩-霓霞岩中 V 主要赋存于磁铁矿中,

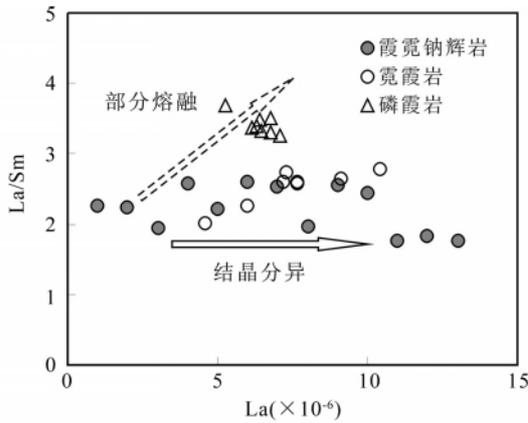


图7 鸡街碱性超基性岩 La-La/Sm 图
Fig.7 Plots of La versus La/Sm of Jijie alkaline-ultramafic rocks

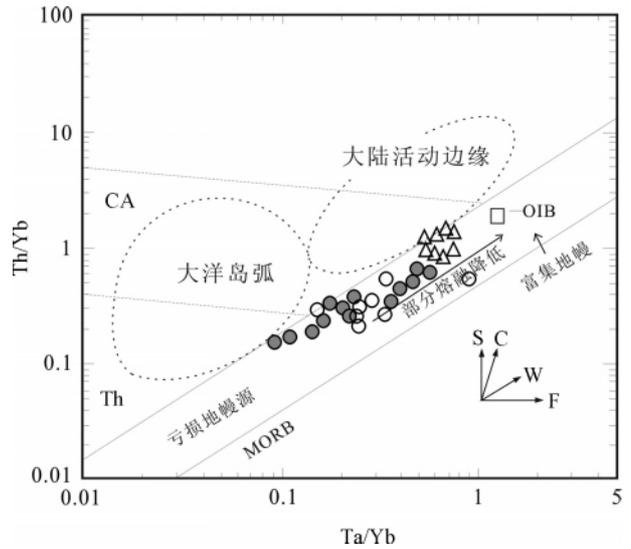


图9 鸡街碱性超基性岩 Th/Yb-Ta/Yb 图
Th, CA, S 分别为拉板玄武岩, 钙碱性玄武岩和橄榄粗玄武岩; 矢量箭头分别表示俯冲组分(S), 板内富集(W), 结晶分异(F)和地壳混染(C)的影响. 图例同图7

Fig.9 Plots of Ta/Yb versus Th/Yb of Jijie alkaline-ultramafic rocks

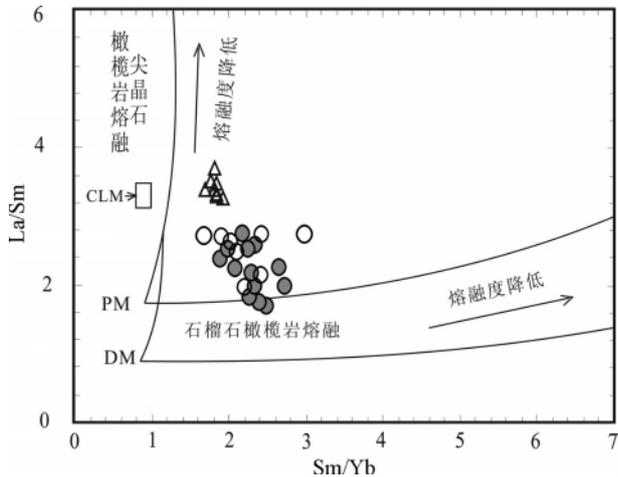


图8 鸡街碱性超基性岩 Sm/Yb-La/Sm 图
石榴石和尖晶石橄榄岩熔融趋势据 Lassiter and DePaolo (1997); 大陆岩石圈地幔组成据 McDonough (1990). 图例同图7

Fig.8 Plots of Sm/Yb versus La/Sm of Jijie alkaline-ultramafic rocks

MgO 与 V 呈负相关关系(图 6e) 指示霞霓钠辉岩-霓霞岩岩浆侵入结晶过程中随着氧逸度的升高,发生了磁铁矿的分离结晶,这与镜下鉴定的矿物组合相一致。

在 MgO 与 Sc、Cr、Co 和 Ni 的相关图上(图 6a-d), 磷霞岩与霞霓钠辉岩和霓霞岩间具有一致的演化趋势,但成分并不连续, MgO 与 V 呈正相关,指示磷霞岩岩浆可能也经历了少量的橄榄石和单斜辉石的结晶分异,但岩浆中 Fe、Ti 含量低,并无富余,因而没有磁铁矿晶出。在 La-La/Sm 图中(图 7), 鸡街碱性超基性岩既有水平分布趋势也有倾斜分布趋势,磷霞岩的 La-Sm 分异程度较高,指示部分熔融和结晶分异作用可能对岩浆的演化均有一定的影响。La/Sm-Sm/Yb(图 8)

和 Th/Yb-Ta/Yb 图解中(图 9), 磷霞岩落于部分熔融程度较低的区域。磷霞岩脉体与岩体的穿插关系显示(图 1), 磷霞岩是在霞霓钠辉岩和霓霞岩主体岩浆活动之后侵入。从霞霓钠辉岩和霓霞岩的演化趋势上来看,单斜辉石是分离结晶的主体,而 Sm 相对于其它稀土元素在辉石中具有较高的相容性, $D_{La}^{Cpx/melt} = 0.056 \ll D_{Sm}^{Cpx/melt} = 0.445$ (Fujimaki *et al.*, 1984), 因而岩浆(特别是超基性岩)中大量辉石的分离结晶会使残余岩浆中 La/Sm 比值升高,磷霞岩可能作为霞霓钠辉岩岩浆经历了大量辉石分异后残余岩浆的产物而后期侵入。铂族元素地球化学的研究也支持这一推论(赵正等 2010b)。

5.3 岩浆源区

鸡街杂岩体中霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩具有相似的微量元素蛛网图配分,基本一致的稀土元素标准化曲线, Sr-Nd 同位素沿幔源趋势落在原始地幔附近的同一区域, Zr/Hf、Nb/Ta 比值也基本落在原始地幔范围之内,微量元素和同位素地球化学特征共同指示鸡街杂岩(霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩)来自同一地幔源区。Ni ($6.45 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$), Cr ($1.87 \times 10^{-6} \sim 313 \times 10^{-6}$) 相对亏损(图 3), 低的 MgO (1.93% ~ 10.02%) 值(表 1) 指示鸡街碱性超基性岩的母岩浆并非幔源原生岩浆,而是由幔源岩浆派生作用演化而来。

三类岩石中稀土元素均相对亏损, REE 总量远低于洋岛玄武岩(OIB), 其中 LREE 略高于正常大洋中脊玄武岩(N-MORB), 与富集洋中脊玄武岩(E-MORB)相当, HREE 更

是低于 OIB 和 MORB(图 1), 可见其原始岩浆中 HREE 亏损较强烈, 大部分 HREE 残留于地幔源区。地幔岩中 HREE 强相容于石榴石相 (Eggins *et al.*, 1998; McDonough *et al.*, 1992; Xu *et al.*, 2000; Zack *et al.*, 1998), 推断部分熔融过程中石榴石为源区残留矿物。过渡族元素 Sc 在地幔中也主要赋存于石榴石 (Bodinier *et al.*, 1996), 鸡街杂岩体中 Sc 的亏损也指示了石榴石的残留。

大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Sr 和高场强元素 P 相对富集 (图 2) 达到 OIB 水平。 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 四象限图中各样品围绕原点分布 (图 4), 落在 OIB 与峨眉山玄武岩的交叉区域内, 源区有弱亏损的迹象, 但远没有达到 MORB 的亏损程度。稀土元素 La/Sm-Sm/Yb 源区判别图上显示 (图 8), 霓霞钠辉岩和霓霞岩发源于石榴石橄榄岩地幔部分熔融, 而磷霞岩有相对高的 La、Sm 的分异。在地幔部分熔融的过程中, 微量元素 Th/Yb 和 Ta/Yb 比值呈正相关关系, 且比值随熔融程度降低而增大, 在 Th/Yb-Ta/Yb 图解中 (图 9), 鸡街碱性超基性岩落在板内钙碱系列, 源区落于富集与亏损的过渡地幔区间。

实验岩石学研究表明, 化学成分相对均一的地幔能产生不同的玄武岩浆, 碱性玄武岩浆较拉斑玄武岩浆有更深的熔融深度和更小的部分熔融程度 (Green *et al.*, 1971; Jaques and Green, 1980; Kushiro, 2001)。Kushri (2001) 通过橄榄岩熔融试验得出在压力 > 12 ~ 15kbar 时, 生成含标准矿物 Ne < 10% 的碱性玄武岩浆, 而当压力 > 25kbar, 部分熔融程度 < 10% 时, 生成含 Ne > 10% 的硅酸不饱和的霞石岩浆。鸡街碱性超基性岩霞石含量超过 16%, 磷霞岩中最高可达 50% (赵正等 2010a)。颜以彬 (1985)、Huang *et al.* (1996) 在鸡街及其邻区岩体的岩相学研究中发现了二辉橄榄岩和尖晶石橄榄岩包体, 指示鸡街母岩浆源于尖晶石橄榄岩稳定区或更深的地幔源区部分熔融。

5.4 岩石成因

攀西地区作为扬子板块的组成部分, 活动构造发育、岩浆活动频繁, 从元古代到新生代经历了复杂的构造演化, 尤其是海西-印支期的峨眉山地幔柱活动和古特提洋闭合对本区岩浆活动和构造格局分布具有一定的控制作用。攀西裂谷带内猫猫沟环状碱性杂岩体、攀枝花地区的碱性花岗岩和本区碱性超基性岩恰形成于这一构造动力背景之下。区内碱性中酸性岩研究成果表明, 峨嵋大火成岩省内碱性杂岩形成于峨嵋地幔柱活动中晚期阶段, 是地幔柱头部与岩石圈地幔或下地壳相互作用的产物 (夏斌等 2004; Luo *et al.*, 2007; Zhong *et al.*, 2009)。鸡街岩体的形成时代虽有争议, 但基本界定为晚海西-早印支期的产物 (Huang *et al.*, 1996; 夏斌等 2004; Luo *et al.*, 2007), 这一点与地层接触关系相一致 (颜以彬, 1985) 而扬子西缘地区在中晚二叠纪发生大规模大陆溢流玄武岩的喷发作用, 现有的研究成果表明其高 Ti 玄武岩浆源于较深的石榴石橄榄岩地幔低度部分熔融, 低 Ti

玄武岩源于较浅的尖晶石橄榄岩的较高程度部分熔融 (Hofmann, 1997; Stracke *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2008) 这种大陆溢流玄武岩的大规模喷发, 特别是高 Ti 玄武岩浆的抽取很可能是形成较深的石榴石稳定地幔源区亏损的主要原因。鸡街母岩浆来源较深, 可能为石榴石稳定区地幔橄榄岩高压条件下低程度部分熔融 (< 10%) 产生的霞石碱性岩浆演化而来。原始岩浆形成后开始上行, 初级阶段经历了橄榄石为主的重力结晶作用, 形成霓霞钠辉岩岩浆。鸡街岩体霓霞钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩经历了以单斜辉石为主的结晶分异作用, 霓霞钠辉岩-霓霞岩为连续的两期岩浆侵入, 其分异程度并不高, 磷霞岩则经历了辉石的大量分离结晶, 作为残余岩浆后期侵入, 在岩体表面结构中表现为体积较大的脉体。全程未经历明显的地壳混染作用。

6 结论

鸡街杂岩体中霓霞钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩具有相似的稀土元素和微量元素配分, Sr-Nd 同位素沿“幔源趋势”分布, 指示各类碱性超基性岩来自同一略亏损的地幔源区, 源区地幔的亏损很可能是由于中-晚二叠纪大规模玄武岩浆的抽取所致。微量元素及其比值特征和尖晶石橄榄岩包体信息, 指示鸡街碱性超基性岩浆源于石榴石橄榄岩地幔的低程度部分熔融作用。成岩过程受地幔部分熔融作用和岩浆结晶分异作用的共同制约, 全程未经历明显的地壳混染作用。霓霞钠辉岩和霓霞岩岩浆经历了早期以橄榄石和单斜辉石为主的结晶分异作用, 随着岩浆上升过程中压力的降低、氧逸度的升高, 有少部分磁铁矿结晶, 磷霞岩浆的 Si、Al 含量高、岩浆粘度大, 作为末期岩浆侵入于霓霞岩和霓霞钠辉岩主体。鸡街碱性超基性岩形成于攀西古裂谷与峨嵋地幔柱的耦合动力背景之下, 地幔柱活动的晚期阶段, 略亏损的岩石圈地幔低程度部分熔融 (< 10%) 的霞石碱性岩浆沿深大断裂上侵, 与区内碱性中酸性岩共同形成了攀西古裂谷内的各碱性杂岩带, 构成了峨嵋大火成岩省内玄武岩、镁铁-超镁铁侵入岩和碱性杂岩的“三位一体”组合。

致谢 感谢中国地质科学院地质研究所杨经绥研究员和中国地质大学(武汉)赵军红教授在本文成文过程中给予的指导和帮助!

References

- Bodinier J, Merlet C, Bedini R *et al.* 1996. Distribution of niobium, tantalum, and other highly incompatible trace elements in the lithospheric mantle: The spinel paradox. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(3): 545-550
- Chen F, Siebel W, Satir M *et al.* 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 469-481

- Chen JF and Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1-2): 101-133
- Cong BL. 1988. The Formation and Evolution of Panzhihua-Xichang Ancient Rift. Beijing: Science Press, 1-424 (in Chinese)
- Eggs S, Rudnick R and McDonough W. 1998. The composition of peridotites and their minerals: A laser-ablation ICP-MS study. *Earth and Planetary Science Letters*, 154(1-4): 53-71
- Fujimaki H, Tatsumoto M and Aoki K. 1984. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between phenocrysts and groundmasses. *Journal of Geophysical Research*, 33(2): 662-664
- Gao S, Ling WL, Qiu YM *et al.* 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13-14): 2071-2088
- Green DH, Ware NG, Hibberso W *et al.* 1971. Experimental petrology of Apollo-12 basalts. 1. sample 12009. *Earth and Planetary Science Letters*, 13(1): 85-90
- Hart SR, Hauri EH, Oschmann LA *et al.* 1992. Mantle plumes and entrainment-isotopic evidence. *Science*, 256(5056): 517-520
- Hofmann A, Jochum K, Seufert M *et al.* 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79(1-2): 33-45
- Hofmann A. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385(6613): 219-229
- Hou ZQ. 1992. Magma chemistry, melt structure and phosphorus potential of the P-rich (potassic) alkaline complexes in some areas of northern China. *Acta Petrologica Sinica*, 8(3): 222-223 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Tao Y, Zhong H, Huang ZL and Zhang ZW. 2005. Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province, Southwest China. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 042-054 (in Chinese with English abstract)
- Huang ZL, Yan YB and Wu J. 1996. Geochemistry of alkaline-ultrabasic rocks in the Jijie complex, Lufeng, Yunnan. *Chinese Journal of Geochemistry*, 15(1): 61-71
- Jaques AL and Green DH. 1980. Anhydrous melting of peridotite at 0-15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 287-310
- Kushiro I. 2001. Partial melting experiments on peridotite and origin of mid-ocean ridge basalt. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29: 71-107
- Lassiter J and DePaolo D. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalt. In: John JM and Millard FC (eds.). *Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. American Geophysical Union, 335-355
- Liu JH and Liu FT. 2000. Study of seismic tomography in Panxi paleorift area of southwestern China: Structural features of crust and mantle and their evolution. *Science in China (Series D)*, 30(B12): 9-15
- Luo ZY, Xu YG, He B *et al.* 2007. Geochronologic and petrochemical evidence for the genetic link between the Maomaogou nepheline syenites and the Emeishan large igneous province. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 949-958
- Ma CQ, Ehlers C, Xu CH *et al.* 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precambrian Research*, 102(3-4): 279-301
- McDonough WF. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, (1): 1-18
- McDonough W, Stosch H and Ware N. 1992. Distribution of titanium and the rare earth elements between peridotitic minerals. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2): 321-328
- Munker C, Pfander JA, Weyer S *et al.* 2003. Evolution of planetary cores and the earth-moon system from Nb/Ta systematics. *Science*, 301(5629): 84-87
- Pin C and Zalduegu J. 1997. Sequential separation of light rare-earth elements, thorium and uranium by miniaturized extraction chromatography: Application to isotopic analyses of silicate rocks. *Analytica Chimica Acta*, 339(1-2): 79-89
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507-513
- Qi L and Zhou MF. 2008. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China. *Chemical Geology*, 248(1-2): 83-103
- Qi L, Wang CY and Zhou MF. 2008. Controls on the PGE distribution of Permian Emeishan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longzhoushan, Sichuan Province, SW China. *Lithos*, 106(3-4): 222-236
- Rehkamper M and Hofmann A. 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Science Letters*, 16: 93-106
- Shellnutt JG and Zhou MF. 2008. Permian, rifting related fayalite syenite in the Panxi region, SW China. *Lithos*, (1-2): 54-73
- Stracke A, Hofmann A and Hart S. 2005. FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 6: 1-20
- Song XY, Qi HW, Robinson PT *et al.* 2008. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: Evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, southwestern China. *Lithos*, 100(1-4): 93-111
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313-345
- Taylor S and McLennan S. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. New York: Oxford Press, 1-328
- Tu GC. 1990. Regarding to alkali-rich intrusive rocks. *Geological Science and Technology Information*, Jiangsu Province, (2): 1-3 (in Chinese)
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Kluwer Academic Publisher, 1-423
- Xia B, Liu HY and Zhang YQ. 2004. SHRIMP dating of agpaite alkaline rocks in Panxi rift zone and its geological implications: Examples from Hongge, Baima and Jijie intrusives. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2): 149-154 (in Chinese with English abstract)
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ *et al.* 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3-4): 525-546
- Xu YG. 2000. Distribution of trace elements in spinel and garnet peridotites. *Science in China (Series D)*, 43(2): 166-175
- Xu YG, Chung SL, Jahn BM *et al.* 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58(3-4): 145-168
- Yan YB. 1985. The ancient rift zone magma series in the central of Yunnan Province. *Yunnan Geology*, 4(4): 353-372 (in Chinese)
- Zack T, Foley S and Jenner G. 1998. A consistent partition coefficient set for clinopyroxene, amphibole and garnet from laser ablation microprobe analysis of garnet pyroxenites from Kakanui, New Zealand. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie Abhandlungen*, 172: 23-41
- Zhang YX, Luo YN and Yang CX. 1988. Contribution to Panzhihua-Xichang Rift. Beijing: Geological Publishing House, 1-325 (in Chinese)
- Zhang ZC and Wang FS. 2002. Geochemistry of two types of basalts in the Emeishan basaltic province: Evidence for mantle plume-lithosphere interaction. *Acta Geologica Sinica*, 76: 229-238
- Zhao Z, Qi L, Huang ZL, Yan ZF and Xu C. 2010a. A study of mineralogy and petrochemistry of Jijie alkaline-ultramafic rocks southern part of Panxi rift. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 320-335 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z, Qi L, Huang ZL, Yan ZF and Xu C. 2010b. The geochemical characteristics of Platinum-group elements of Jijie alkaline-ultramafic rocks, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 938-946 (in Chinese with English abstract)

- Zhong H and Zhu WG. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 41(6): 599 - 606
- Zhong H, Zhu WG, Hu RZ *et al.* 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, Southwest China and implications for growth of juvenile crust. *Lithos*, 110(1-4): 109 - 128
- Zhou MF, Malpas J, Song XY, *et al.* 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, (3-4): 113 - 122
- Zhou MF, Arndt NT, Malpas J, Xu YG *et al.* 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103(3-4): 352 - 368
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 14(10): 493 - 571
- 侯增谦. 1992. 华北某些富磷碱性-偏碱性杂岩岩浆成分和熔体结构与. *岩石学报*, 8(3): 222 - 223
- 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 张正伟. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例. *地学前缘*, 12(1): 42 - 54
- 涂光炽. 1990. 关于富碱侵入岩. *江苏地质科技情报*, (2): 1 - 3
- 夏斌, 刘红英, 张玉泉. 2004. 攀西古裂谷钠质碱性岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义——以红格, 白马和鸡街岩体为例. *大地构造与成矿学*, 28(2): 149 - 154
- 颜以彬. 1985. 滇中古裂谷带岩浆系列. *云南地质*, 4(4): 353 - 372
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社, 1 - 325
- 赵正, 漆亮, 黄智龙, 严再飞, 许成. 2010a. 攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩矿物学与岩石化学. *地学前缘*, 17(2): 320 - 335
- 赵正, 漆亮, 黄智龙, 严再飞, 许成. 2010b. 云南鸡街碱性超基性岩铂族元素地球化学特征. *岩石学报*, 26(3): 938 - 946

附中文参考文献

从柏林. 1988. 攀西古裂谷的形成与演化. 北京: 科学出版社, 1 - 424