

攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩矿物学与岩石化学

赵正^{1,2}, 漆亮^{1,*}, 黄智龙^{1,*}, 严再飞¹, 许成¹

1. 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, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

Zhao Zheng^{1,2}, Qi Liang^{1,*}, Huang Zhilong^{1,*}, Yan Zaifei¹, Xu Cheng¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Zhao Zheng, Qi Liang, Huang Zhilong, et al. A study of mineralogy and petrochemistry of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 320-335

Abstract: This paper reports the lithofacies, mineral-chemistry and petrochemistry of alkaline-ultramafic rock complex in Jijie, the southern part of Panxi rift, Yunnan Province. Clinopyroxene and nepheline are the main component minerals, which have negative correlations in melteigite, ijolite and urtite. The Fo value of xenocryst olivine(75.43-77.42) is obviously higher than that of the phenocryst olivine(72.02-72.95) in melteigite, which suggests that the parent magma had undergone a previous olivine crystal differentiation. The prevalent zone structure in clinopyroxene, and the package structure and reaction edge structure between clinopyroxene and olivine indicate a relatively rapid ascent and crystallization progress of the parent magma. The characteristics of the major elements and related parameters (M, CA, AR, SI, DI) suggest that the parent magma of Jijie complex was strongly Si-undersaturated, Na-rich alkaline magma. The well linear correlation between MgO and other oxides in Harker diagram indicates that olivine and clinopyroxene were the main crystalline phase during the magma fractionation. The well linear correlation between lgSI and the compositions of major oxides suggests that there was no or little crustal contamination during the magma evolution.

Key words: Panxi rift; alkaline-ultramafic rock; zone structure; parent magma; crust contamination

摘要:对攀西裂谷南段云南鸡街碱性超基性岩的岩相学、矿物化学和岩石化学进行了详细研究。单斜辉石和霞石是该岩体的主要造岩矿物,两者互为消长,在霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩中以不同比例组合。辉石多见环带结构,辉石包裹橄榄石的包裹结构和反应边结构发育,共同指示岩浆的快速侵入结晶过程。橄榄石捕虏晶的 Fo=75.43~77.42,明显高于同期结晶橄榄石的 Fo 值(72.02~72.95),可初步判定母岩浆经历了早期的橄榄石分异。通过对全岩主要化学成分及相关组合参数(M、CA、AR、SI、DI)的研究,判定母岩浆系钠质强碱性 Si 不饱和岩浆。在 Harker 图解上 MgO 与其他氧化物均呈良好的相关关系,指示岩浆演化过程中经历了橄榄石和单斜辉石控制的分离结晶作用。lgSI 与主量氧化物成分间具有良好的相关关系,指示岩浆演化过程中很少或未受到大陆地壳混染作用。

关键词:攀西裂谷;碱性超基性岩;环带结构;母岩浆;地壳混染

中图分类号:P588.125 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2010)02-0320-16

收稿日期:2010-02-21;修回日期:2010-03-05

基金项目:中国科学院“百人计划”项目(KZCX2-YW-BR-09);国家自然科学基金项目(40773070,40573049);国家重点基础研究发展计划“973”项目(2007CB411402);中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-05)

作者简介:赵正(1984—),男,博士研究生,主要从事岩石地球化学研究。E-mail: kevin8572@hotmail.com

*通讯作者:漆亮, E-mail: qilianghku@hotmail.com;黄智龙, E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn

0 引言

碱性岩作为岩石学研究的重点,得到了老一辈地质学家的重视,涂光炽院士长期以来很关心富碱侵入岩的研究工作,他曾强调:碱性岩来源较深,是深部地球动力学过程在浅部地壳的直接表现和历史记录,如他形成时的地球深部组成和地球动力学状态、地壳上层结构和物理化学环境、熔体稀有金属浓度及成矿特征等^[1-2]。碱性超基性杂岩体被认为是稳定大陆裂谷带或深大断裂活动的产物^[3],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,因此对它的研究是探索地球深部奥秘的一个重要途径。典型的碱性超基性岩出露较少,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、阿尔丹区、东非、格陵兰、巴西等地区^[3-6]。该类岩体在我国出露较少,并且规模不大,零星分布于山东、山西、鄂西、川北及川滇南北带^[7-9]。

在碱性超基性岩的成因上一直存在较大争议。归纳起来,可分为两大学派:交代成因说和岩浆成因说。交代成因说认为辉石岩和超基性岩经霓石化和霞石化作用,可形成霓霞岩-霓霞钠辉岩型的碱性岩。近年来,随着高温高压实验在成因岩石学中的广泛应用^[10-14],地幔橄榄岩在高压条件下低程度部分熔融可形成霞石碱性超基性岩浆,交代成因的观点遭到越来越多人的反对。但是,单一的岩浆成因说,在解释多样的碱性超基性岩石组合、复杂的矿物组成时存在困难^[5,15]。目前,碱性超基性岩的幔源成因得到了越来越多学者的认同^[4,5,10-16],但其源区属性(富集地幔? 亏损地幔? 交代地幔?)和岩浆演化过程尚无统一的认识。本次工作选择攀西裂谷南段典型的碱性超基性岩带中出露较好、较典型的鸡街岩体作为研究对象,开展了岩相学特征结合微区矿物化学和岩石化学方面的研究工作,深入探讨这类特殊岩石的岩浆演化和源区特征。

1 区域地质与岩体地质

攀西地区的环状碱性超基性杂岩体主要分布在攀西裂谷的中南段,断续展布达 260 km 以上,岩体沿安宁河—易门断裂带和东部的普雄河—普渡河断裂带分布。在空间上,本区碱性杂岩体在裂谷带展

布上多呈孤立点式同心环状小岩体或小的岩株群产出(图 1A),单个岩体出露面积从不足 1 km² 到 32 km²^[7-8,16]。

鸡街碱性超基性岩出露于云南省禄丰县罗茨地区,川滇裂谷带南段^[7-8],岩石类型多,岩体结构复杂,具有典型性。岩体在平面上为椭圆形,长轴为北北东向,长约 800 m,中部宽约 400 m,出露面积为 0.29 km²,其围岩为前震旦纪昆阳群美党组板岩夹白云质大理岩,总体上走向近南北,向东倾(图 1B)。组成岩体的各类岩石呈不规则同心环状展布,可分为 3 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。霓霞钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩组成岩体的主体。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%。岩体围岩蚀变弱,与岩体接触的昆阳群美党组板岩可见轻微的烘烤现象,大理岩有接触变质晕,不见“长霓岩化”。岩体中岩石风化强烈,但蚀变较弱。岩体向东陡倾,倾角为 70°~80°,岩体西部大部分岩石的产状向东倾,倾角在 60°左右,结合地表观察,可初步证实岩体空间形态为一向东偏斜的不规则漏斗,与国外同类型环状岩浆杂岩体产状相似^[3-5]。

2 样品采集及分析

本次采样工作起自岩体北部核心,由北向南依次沿两个剖面(图 1B),穿越整个岩体采集具有代表性的、新鲜的露头样品。样品在室内进行表面剥皮处理,碎至 2 cm×2 cm 左右碎块后,粉碎为 200 目以下粉末以备化学分析,磨制薄片进行镜下鉴定,探针片进行矿物化学分析。

矿物化学分析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,采用日本岛津公司 EPMA-1600 型电子探针,加速电压为 25 kV,束流为 4.5 nA(能谱)、10 nA(波谱),波谱定量分析斑束为 10 μm,电子束流稳定性好于 1.5×10⁻³/H,二次电子像分辨率为 6 nm。

主量元素氧化物含量采用熔融玻璃 X 射线荧光光谱法分析,样品在香港大学 Philips PW2400 型光谱仪上测定。SiO₂ 分析精度相对误差为 ±1%,其他氧化物浓度在 0.5% 以上的相对误差为 ±2%,

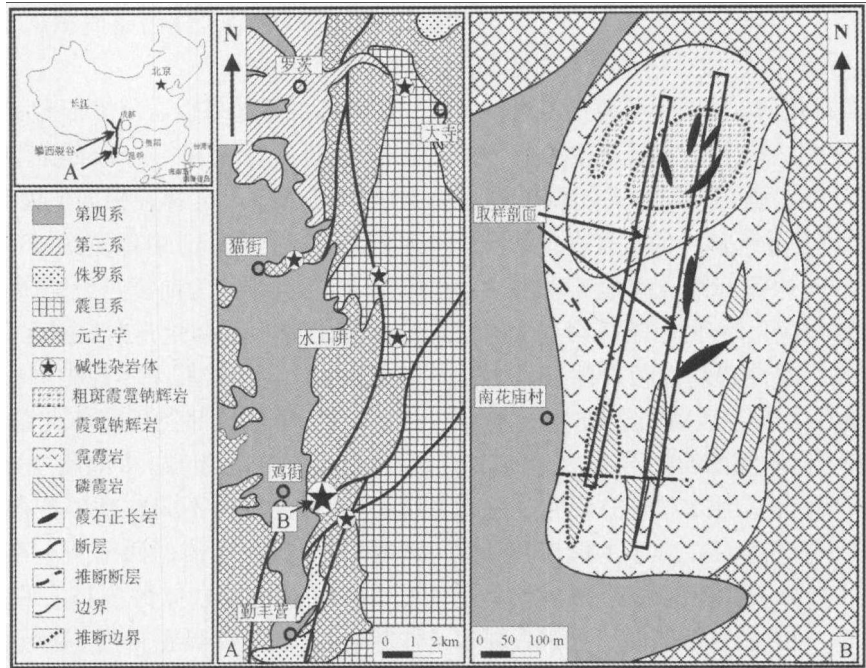


图1 云南鸡街碱性超基性岩区域地质图(A)与岩体地质图(B)
 Fig. 1 Regional geological map of the Jijie area (A) and schematic geological map of the alkaline-ultramafic complex of Jijie (B), Yunnan Province

浓度在 0.1%~0.5% 的氧化物测试相对误差为 ±5%。

3 矿物学

3.1 矿物组合与结构

鸡街碱性超基性岩的造岩矿物有辉石、霞石、磁铁矿、磷灰石、斜长石、角闪石和黑云母,其中辉石和霞石为主要造岩矿物,两者在矿物组合中此消彼长。依据它们在岩石中比例差异结合岩石化学组分,将组成鸡街岩体主体的碱性超基性岩分别定名为霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩。主要方法是在 10×5 倍双目镜下,沿薄片横、纵、对角线 4 个方向分别对矿物组合做线性分析鉴定,综合计算后投图定名(图 2)。从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩,辉石逐渐减少而霞石逐渐增多,其分界比例分别为 70% 和 30%。

霞霓钠辉岩可见不等粒结构、斑状结构和细粒结构,主要由单斜辉石和霞石组成。辉石自形,粒径在 0.1~10 mm,发育环带结构,环外偶见霓石化。副矿物为磁铁矿、角闪石、黑云母和少量磷灰石。霓霞岩为中、细粒结构,矿物组合特征与霞霓钠辉岩相似。霞石从他形逐渐发育为半自形,单斜辉石从自

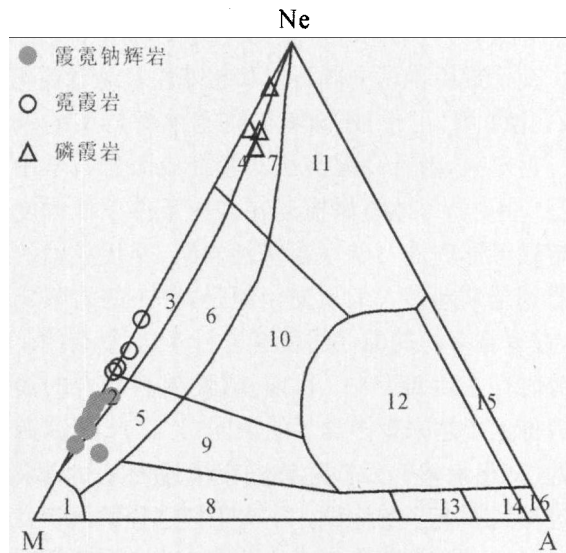


图2 碱性岩定量矿物分类命名图
 (据 Sorensen^[17])

Fig. 2 The naming chart of quantitative mineral category for alkaline series rocks

1—钛铁霞辉岩; 2—霞霓钠辉岩; 3—霓霞岩; 4—磷霞岩; 5—含长霞霓钠辉岩; 6—含长磷霞岩; 7—含长磷霞岩; 8—碱性辉长岩; 9—暗色暗霞正长岩; 10—暗霞正长岩; 11—正霞正长岩; 12—霞石正长岩; 13—暗色含霞正长岩; 14—中色含霞正长岩; 15—浅色霞石正长岩; 16—浅色含霞正长岩。

形发育为半自形。辉石粒径逐渐减小,为 1~3 mm。磷霞岩多为中粒结构。霞石从半自形发育为自形,辉石半自形,副矿物磷灰石与斜长石胶结。斜长石在霓

霞岩和磷霞岩中少量出现, 且均为钠长石。

3.2 橄榄石

鸡街碱性超基性岩中的橄榄石以斑晶形式少量存在, 可分为普通橄榄石和橄榄石捕获晶。橄榄石捕获晶发育反应边结构, 判断其为早期岩浆房结晶被母岩浆携带而来。早生成的橄榄石与岩浆发生反应, 当反应不彻底时, 环绕早生矿物形成一个新矿物边, 在该岩体中表现为辉石反应边和磁铁矿反应边(图 3c,d)。

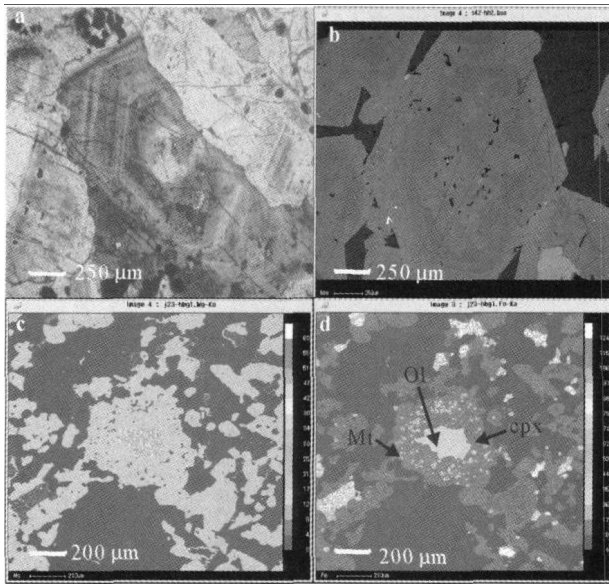


图 3 辉石环带结构和橄榄石反应边结构
Fig. 3 Ring structure of pyroxene and reaction edge structure of olivine

a—辉石环带结构显微镜下照片; b—辉石环带结构背散射照片;
c—橄榄石-辉石反应边结构 EMP-Mg 值面分析; d—橄榄石-辉石反应边结构 EMP-Fe 值面分析。

霞岩钠辉岩中的橄榄石 Fo 值分布在 72.02~72.95、75.43~77.22 两个区间, 且橄榄石内部均存在化学分带现象(表 1), 低 Fo 值橄榄石由外到内逐渐富 Mg, Fo 值呈递增趋势, 但差值较小, 橄榄石结晶过程中从核向外生长可导致这种成分上微弱差别。高 Fo 值橄榄石分带现象较明显, 外环约为 75, 内环则达到 77 以上, 且样品 JJ23 中 $w(\text{MgO}) = 8.39\%$, 低于 JJ16 及其他霞岩钠辉岩样品, 本文认为这种分带现象是捕获晶内部 MgO 与 FeO 等成分扩散作用的体现。吴静等^[16]在该岩体霞岩中发现了具有显著化学分带的橄榄石捕获晶, 其 Fo 值由外至内为 73.8~86.7, 与普通橄榄石成分上不连续。结合 JJ23 中发育的辉石-橄榄石反应边结构, 判断该系列高 Fo 值的橄榄石并非母岩浆结晶分异

表 1 鸡街碱性超基性岩中橄榄石斑晶电子探针分析结果

Table 1 The olivine composition of Jijie alkaline-ultramafic rocks analyzed by EMP

岩性	点号	$w_B/\%$														以 4 个氧为基础计算的阳离子数				橄榄石端员组分			
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	CaO	Si	Ti	Al	Cr	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Ca	Total	Fo	Fa	Tp
霞岩钠辉岩	JJ16-1	38.59	0.05	0.35	0.47	23.49	0.70	34.93	0.12	0.38	1.0207	0.0009	0.0110	0.0098	0.5196	0.0156	1.3771	0.0025	0.0107	2.9679	72.02	27.17	0.81
	JJ16-2	37.89	0.02	0.00	0.11	23.27	0.63	35.69	0.06	0.36	1.0133	0.0004	0.0000	0.0024	0.5204	0.0143	1.4229	0.0014	0.0102	2.9852	72.69	26.58	0.73
	JJ16-3	39.25	0.00	0.01	0.15	23.21	0.75	36.26	0.12	0.35	1.0243	0.0000	0.0004	0.0032	0.5067	0.0165	1.4106	0.0026	0.0097	2.9739	72.95	26.20	0.85
	JJ16-4	38.12	0.03	0.00	0.02	23.61	0.72	35.66	0.08	0.41	1.0142	0.0007	0.0000	0.0005	0.5253	0.0162	1.4147	0.0018	0.0116	2.9849	72.32	26.86	0.83
	JJ16-5	39.28	0.05	0.02	0.26	23.16	0.66	35.37	0.07	0.33	1.0335	0.0009	0.0007	0.0054	0.5095	0.0147	1.3873	0.0014	0.0093	2.9626	72.58	26.66	0.77
	JJ16-6	39.27	0.06	0.00	0.05	22.82	0.65	35.44	0.06	0.26	1.0368	0.0012	0.0000	0.0011	0.5039	0.0145	1.3952	0.0013	0.0074	2.9614	72.91	26.33	0.76
	JJ16-7	38.86	0.06	0.00	0.05	23.24	0.67	35.65	0.08	0.28	1.0268	0.0011	0.0000	0.0010	0.5136	0.0149	1.4043	0.0017	0.0079	2.9715	72.66	26.57	0.77
	JJ23-1	38.32	0.06	0.00	0.23	20.44	0.70	38.22	0.03	0.17	1.0092	0.0012	0.0000	0.0048	0.4502	0.0156	1.5006	0.0007	0.0049	2.9871	76.31	22.89	0.79
	JJ23-2	39.59	0.02	0.00	0.06	21.04	0.73	37.51	0.08	0.27	1.0298	0.0004	0.0000	0.0013	0.4577	0.0161	1.4546	0.0018	0.0074	2.9692	75.43	23.74	0.84
	JJ23-3	40.35	0.01	0.00	0.14	19.82	0.58	38.82	0.15	0.09	1.0344	0.0002	0.0000	0.0029	0.4249	0.0126	1.4834	0.0031	0.0026	2.9640	77.22	22.12	0.66
JJ23-4	39.65	0.00	0.01	0.02	20.73	0.81	37.75	0.06	0.11	1.0312	0.0000	0.0004	0.0004	0.4508	0.0179	1.4634	0.0013	0.0030	2.9684	75.74	23.33	0.92	
磷霞岩	JJ9-1	34.35	0.05	0.30	0.23	42.02	1.43	19.18	0.05	0.39	1.0178	0.0012	0.0105	0.0053	1.0414	0.0359	0.8473	0.0013	0.0123	2.9731	44.02	54.11	1.87
	JJ9-2	34.06	0.01	0.00	0.00	50.66	2.04	12.85	0.01	0.08	1.0363	0.0001	0.0000	0.0000	1.2891	0.0525	0.5828	0.0001	0.0027	2.9636	30.28	66.99	2.73

的产物,是从深部岩浆房携带而来的橄榄石堆晶。综合两者对橄榄石捕虏晶的研究,可估算堆晶橄榄石平均 Fo 值约为 80。低 Fo 值的橄榄石化学分带是在压力和温度降低较快的条件下,矿物由内至外非平衡结晶生长的结果。磷霞岩中橄榄石的 Fo 值仅为 30~44,且粒径相对较小。

对橄榄石-辉石反应边结构进行了电子探针 Mg、Fe 的元素面分析,橄榄石捕虏晶中 Mg 值高达 60 以上色律,Fe、Mg 的面上浓度差距明显,边界清晰。橄榄石的典型浑圆晶形边缘已模糊,取而代之的是一近环形的磁铁矿反应边(图 3c,d)。

3.3 辉石

辉石以斑晶和基质形式在 3 类岩石中作为主要矿物存在,霞霓钠辉岩和霓霞岩中的单斜辉石斑晶发育环带结构(图 3a,b),粒径在 1~10 mm 不等,由内向外表现韵律纹理。根据辉石的电子探针分析结果(表 2),计算其端员组分 $Wo=43.1\sim49.2$, $En=31.6\sim39.7$, $Fs=9.5\sim17.8$,3 类岩石中的辉石均为透辉石(图 4)。霞霓钠辉岩和霓霞岩中辉石的成分变化不大,磷霞岩中辉石 MgO 值明显降低、FeO 含量升高, Fs 端员增加(表 2)。在辉石 $N(Na)-N(MgO)-N(Fe^{2+}+Mn)$ 趋势图上(图 5),从斑晶到基质,从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩,化学成分由富

Mg 向富 Fe-Mn 方向演化,基质辉石更富 Na,而磷霞岩中 Na 变化不明显,指示霞霓钠辉岩和霓霞岩浆具有一定程度演化。在 Rock^[15] 的辉石 $M-w(SiO_2)/w(Al_2O_3)$ 图中(图 6),本区辉石均落于碱性岩和碱性岩与超基性岩的交集区间。

样品 JJ31 霓霞岩中辉石斑晶较大,环带明显,从外带到内带呈多层次韵律生长, Si、Mg、Fe、Ca 等元素及 M 值随环带呈韵律变化(表 2),构成多个化学分带。其他固溶体矿物如 Mg-Fe 橄榄石系也有环带结构出现。固溶体矿物从中心向边缘具有不同的端员组成而形成环带,镜下显示不同的消光位。这是由于二元连续固溶体体系,在快速冷却的不平衡结晶条件下,温压降低速度很快时先晶出的 a 端员来不及与熔体反应达到新的平衡,而直接在其残余晶体周围晶出 b 端员。鸡街单斜辉石的这种环带结构,指示了这种碱性超基性岩浆在演化过程中的不平衡结晶过程。

4 岩石化学特征

霞霓钠辉岩和霓霞岩中 $w(SiO_2)=38\%\sim43.5\%$, $w(K_2O+Na_2O)=4\%\sim9\%$, 磷霞岩 $w(SiO_2)=44\%\sim45\%$, $w(K_2O+Na_2O)=12\%\sim15\%$ 。TAS 图

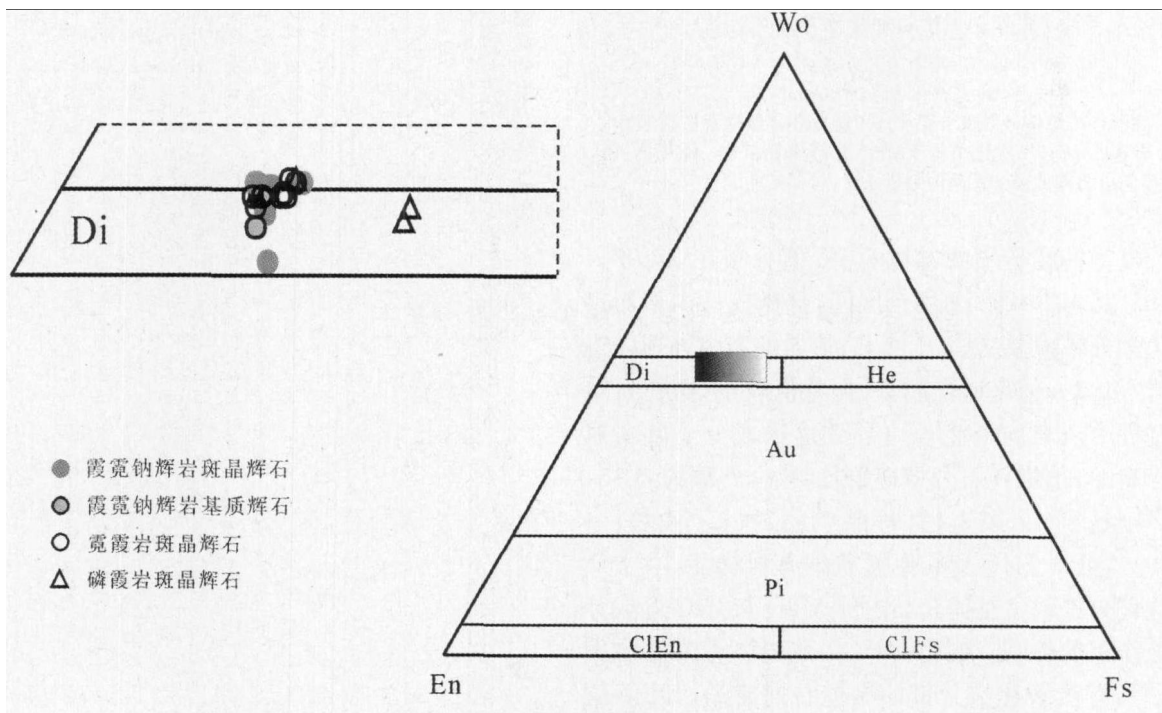


图 4 辉石的分类图解

Fig. 4 Classification diagram for pyroxene

Di—透辉石; He—钙铁辉石; Au—普通辉石; Pi—易变辉石; ClEn—斜顽辉石; ClFs—斜铁辉石。

表 2 鸡街碱性超基性岩中辉石电子探针分析结果

Table 2 The pyroxene composition of Jijie alkaline-ultramafic rocks analyzed by EMP

岩性	点号	产状	以6个氧为基础计算的阳离子数(按郑巧荣[8]方法进行的铁调整)													单斜辉石端员组分								
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Si	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	Wo	En	Fs	M	
w _B /%																								
霞石 辉岩	JJ16-1	斑晶	51.32	1.36	2.46	0.00	6.13	0.10	13.71	23.56	0.69	0.01	1.917	0.046	0.144	0.003	0.763	0.943	0.050	48.34	39.15	9.94	80.38	
	JJ16-2	斑晶	50.23	1.60	3.62	0.01	6.05	0.09	13.30	23.25	0.71	0.01	1.885	0.045	0.144	0.002	0.744	0.935	0.051	48.64	38.71	9.98	78.37	
	JJ16-3	斑晶	51.39	1.32	2.86	0.02	6.25	0.08	13.26	23.65	0.80	0.00	1.914	0.041	0.152	0.002	0.736	0.944	0.057	48.78	38.07	10.17	77.47	
	JJ16-4	斑晶	51.29	1.43	2.71	0.00	6.44	0.14	13.51	22.97	0.83	0.00	1.916	0.041	0.158	0.004	0.752	0.919	0.060	47.46	38.84	10.58	79.01	
	JJ16-5	斑晶	50.33	1.63	3.68	0.01	6.38	0.02	13.45	23.63	0.73	0.02	1.874	0.075	0.121	0.000	0.747	0.943	0.052	48.59	38.49	10.21	78.49	
	JJ16-6	斑晶	52.54	0.72	1.52	0.34	6.50	0.07	13.38	22.46	0.92	0.02	1.974	0.002	0.202	0.002	0.749	0.904	0.067	46.91	38.88	10.72	78.62	
	JJ23-1	斑晶	51.74	1.33	2.72	0.00	5.85	0.08	13.62	23.99	0.65	0.01	1.917	0.028	0.152	0.002	0.752	0.952	0.046	49.23	38.88	9.47	79.40	
	JJ23-2	斑晶	49.63	2.06	3.92	0.17	7.17	0.09	12.57	23.44	0.98	0.03	1.856	0.096	0.125	0.002	0.700	0.939	0.071	48.51	36.18	11.64	73.23	
	JJ23-3	斑晶	51.31	1.23	3.10	0.01	5.91	0.05	13.17	23.13	0.61	0.00	1.924	0.000	0.185	0.001	0.736	0.929	0.044	48.98	38.80	9.87	77.61	
	JJ23-4	斑晶	53.76	1.12	1.35	0.00	7.09	0.18	13.48	20.74	1.58	0.12	1.996	0.007	0.212	0.005	0.745	0.825	0.113	43.20	39.05	11.81	77.98	
	JJ23-5	斑晶	52.55	1.34	2.09	0.00	6.39	0.12	13.76	22.17	1.02	0.00	1.952	0.003	0.195	0.003	0.762	0.882	0.073	45.96	39.69	10.53	80.04	
	JJ23-6	斑晶	50.67	1.27	2.65	0.05	6.27	0.08	13.32	23.19	0.79	0.00	1.914	0.054	0.142	0.002	0.750	0.939	0.057	48.23	38.54	10.27	78.85	
1	基质	53.01	0.95	0.79	0.02	7.10	0.26	13.46	20.63	1.53	0.02	2.004	0.021	0.202	0.008	0.758	0.835	0.111	43.11	39.13	11.99	79.27		
2	基质	53.30	1.33	1.65	0.00	6.47	0.19	13.36	22.06	1.39	0.01	1.974	0.008	0.192	0.005	0.737	0.875	0.099	45.62	38.43	10.75	77.45		
JJ31-1	斑晶	51.47	1.39	1.97	0.15	6.25	0.14	13.86	23.28	0.61	0.00	1.927	0.030	0.165	0.004	0.773	0.933	0.044	47.85	39.65	10.23	81.34		
JJ31-2	斑晶	49.57	1.90	3.43	0.24	6.75	0.11	12.35	22.87	0.85	0.01	1.884	0.036	0.177	0.003	0.700	0.931	0.062	48.74	36.62	11.37	73.28		
JJ31-3	斑晶	51.23	1.15	1.65	0.12	6.96	0.09	13.40	23.69	0.59	0.00	1.932	0.054	0.164	0.002	0.753	0.957	0.043	48.46	38.15	11.20	78.81		
JJ31-4	斑晶	52.49	1.30	2.75	0.14	6.25	0.11	13.67	23.68	0.64	0.01	1.924	0.004	0.187	0.003	0.747	0.930	0.045	48.50	38.96	10.17	78.62		
JJ31-5	斑晶	50.37	1.89	3.27	0.47	6.81	0.12	12.84	22.86	0.88	0.01	1.886	0.040	0.172	0.003	0.716	0.917	0.064	47.92	37.44	11.30	75.05		
JJ31-6	斑晶	49.98	1.46	3.10	0.22	5.91	0.10	13.67	23.35	0.84	0.00	1.884	0.097	0.087	0.003	0.768	0.943	0.061	48.10	39.18	9.59	81.00		
JJ31-7	斑晶	51.57	1.26	2.25	0.23	6.72	0.12	13.10	23.46	0.70	0.01	1.929	0.022	0.187	0.003	0.730	0.940	0.050	48.59	37.76	11.03	76.57		
JJ31-8	斑晶	50.12	1.73	3.09	0.20	6.58	0.12	12.52	23.19	0.79	0.00	1.898	0.028	0.179	0.004	0.707	0.941	0.057	49.07	36.87	11.04	74.11		
JJ9-1	斑晶	49.94	1.32	3.71	0.03	6.74	0.14	12.39	23.04	0.70	0.00	1.896	0.025	0.187	0.004	0.701	0.937	0.051	49.14	36.75	11.42	73.38		
JJ9-2	斑晶	52.04	1.07	2.29	0.13	10.07	0.32	10.53	22.00	0.84	0.00	1.967	0.000	0.320	0.010	0.593	0.891	0.061	47.48	31.63	17.60	61.23		
JJ9-3	斑晶	51.45	0.79	1.63	0.00	10.30	0.33	10.96	21.91	0.73	0.00	1.974	0.000	0.331	0.010	0.626	0.901	0.053	46.85	32.59	17.76	64.57		

注: M=100N(Mg)/(N(Mg)+Fe²⁺)。

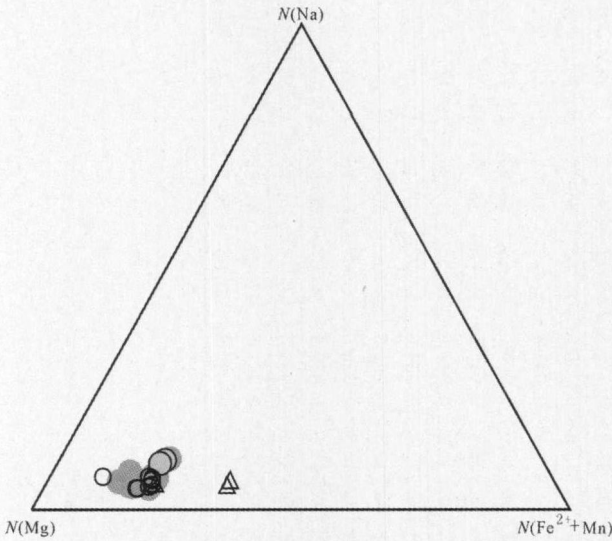


图5 辉石的 $N(\text{Na})-N(\text{Mg})-N(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ 图
Fig. 5 $N(\text{Na})-N(\text{Mg})-N(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ correlogram of pyroxene
图例同图4。

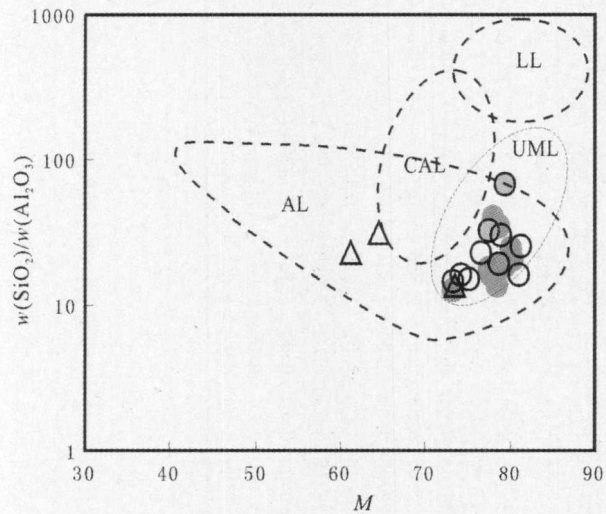


图6 辉石的 $M-w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图
Fig. 6 $M-w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ correlogram of pyroxene
CAL—钙碱性系列; AL—碱性系列; UML—超碱性系列; LL—钾镁系列。 $M=100 N(\text{Mg})/N(\text{Mg}+\text{Fe}^{3+})$ 。

上均落在碱性超基性岩区间(图7), $w(\text{Na}_2\text{O})-2 > w(\text{K}_2\text{O})$, 属钠质碱性系列。MgO 含量变化较大, 从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩, 由 10.02%~1.93% 依次降低, CaO 含量(质量分数)也由 16.13%~5.13% 随之递减, Al_2O_3 , K_2O 和 Na_2O 含量逐渐升高。与研究程度较高的俄罗斯 Kola 半岛碱性超基性岩^[4-5], 及前人统计的碱性超基性岩岩石化学平均数据相比^[6], 鸡街碱性超基性岩富 Mg、Fe, 贫 K、Na、Al。

鸡街碱性超基性岩主要元素含量及相关参数计

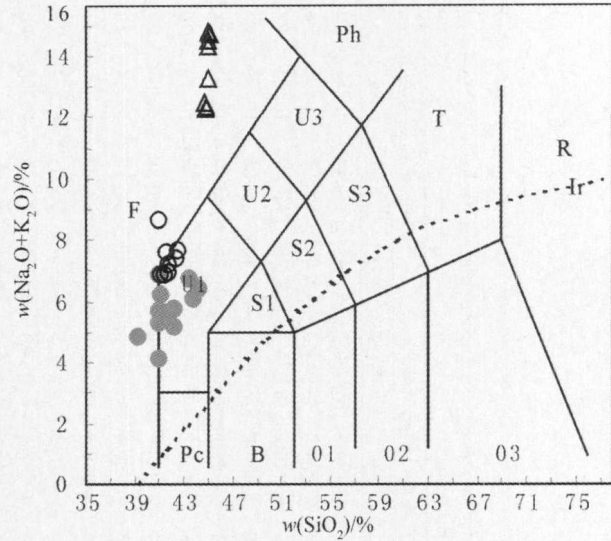


图7 鸡街岩体霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩 TAS 图解
(据 Le Maitre 等, 1989^[21])
Fig. 7 The total alkalis-silica(TAS) classification diagram of Jijie melteigite, ijolite and urtite

Pc—苦橄质玄武岩; B—玄武岩; 01—玄武安山岩; 02—安山岩; 03—英安岩; R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩; U1—碱玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄响岩; Ph—响岩; F—似长岩; Ir—碱性与亚碱性分界线。图例同图2。

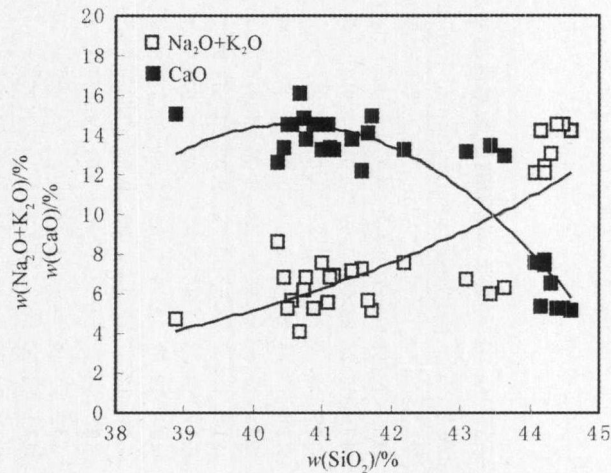


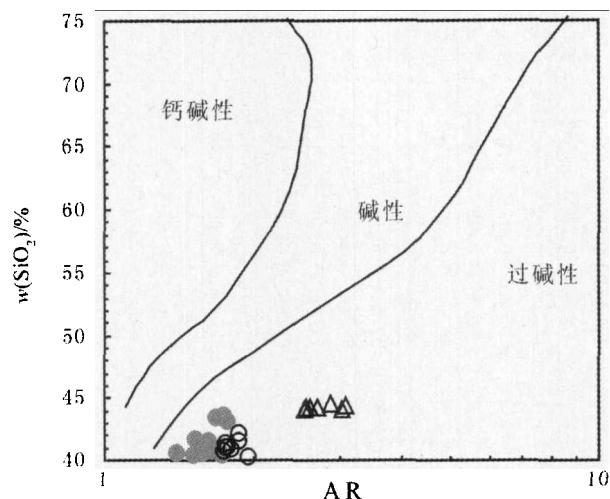
图8 钙碱指数 CA 值计算图解
Fig. 8 Calculation scheme of calcium-alkali index

算见表3, 钙碱指数 $CA \approx 43.5 (< 51)$ (图8), 为典型碱性岩系。里特曼指数 σ_{43} 值分别在 -1.018.69~ -7.5 和 25.3~90.61 两个区间内, 同 Rittmann^[20] 划分的碱性岩系中的极强和强碱性大西洋型钠质岩系 σ 值相对应。碱度率(AR)为 1.39~2.69, SiO_2 -AR 图解显示该岩体所有碱性超基性岩均为过碱性, 且霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩中 SiO_2 与 AR 呈正消长趋势(图9)。

表3 鸡街碱性超基性岩石化学成分及相关参数计算
Table 3 Major elements and petrological parameters of Jijie alkaline-ultramafic rocks

岩性	样品号	$w_B/\%$														标准化参数						
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	M	DI	SI	AR	σ_{43}	F ₁	F ₂	F ₃	
霞石 辉岩	JJ08	40.68	2.46	9.44	15.11	0.19	9.99	16.13	3.29	0.86	1.35	0.47	99.99	47.28	19.37	35.68	1.39	-10.98	0.23	-1.63	-2.35	
	JJ11	40.45	2.32	12.18	15.03	0.25	7.59	13.42	5.16	1.65	0.88	1.04	99.96	40.85	32.02	26.90	1.72	-29.85	0.27	-1.57	-2.45	
	JJ13	38.87	2.29	10.21	18.06	0.23	8.55	15.10	3.90	0.89	1.02	0.92	100.04	39.06	22.52	28.57	1.47	-7.50	0.25	-1.62	-2.32	
	JJ15	43.09	2.13	11.27	13.03	0.18	8.81	13.14	5.08	1.63	0.87	0.67	99.89	48.14	31.46	32.04	1.76	53.04	0.28	-1.59	-2.48	
	JJ16	41.73	1.85	9.95	13.86	0.17	10.02	14.96	3.87	1.28	1.23	1.01	99.94	49.65	24.20	35.92	1.52	-81.32	0.25	-1.61	-2.39	
	JJ17	43.44	2.05	10.53	13.19	0.19	9.34	13.48	4.61	1.43	0.84	0.79	99.89	49.26	28.97	33.96	1.67	29.33	0.28	-1.60	-2.45	
	JJ18	43.62	1.93	10.84	12.38	0.18	9.46	12.92	4.83	1.54	0.87	1.29	99.87	51.21	31.22	34.77	1.73	25.40	0.28	-1.60	-2.47	
	JJ20	40.74	2.34	10.84	14.93	0.20	8.49	14.87	4.87	1.33	0.68	0.68	99.97	43.70	29.05	29.88	1.64	-27.15	0.24	-1.62	-2.44	
	JJ23	40.89	2.48	10.18	15.08	0.21	8.39	14.50	4.16	1.13	1.11	1.83	99.96	43.13	25.08	30.48	1.55	-35.90	0.25	-1.61	-2.39	
	JJ24	41.65	2.33	9.93	14.66	0.21	9.23	14.14	4.48	1.25	0.89	1.16	99.95	46.23	26.94	32.47	1.62	-102.87	0.25	-1.62	-2.41	
	JJ32	40.56	2.32	10.95	15.42	0.19	8.59	14.50	4.15	1.53	0.81	0.93	99.97	43.16	26.74	30.21	1.58	-22.06	0.26	-1.58	-2.40	
	JJ33	40.49	2.21	11.28	15.16	0.19	8.78	14.52	3.87	1.39	0.82	1.24	99.96	44.07	24.82	31.39	1.51	-19.74	0.27	-1.58	-2.40	
	JJ52	41.07	2.55	11.27	15.11	0.19	7.81	14.54	4.02	1.55	0.51	1.34	99.96	41.35	26.30	28.65	1.55	-39.15	0.27	-1.56	-2.41	
	霓 辉岩	JJ19	41.56	2.37	11.77	14.38	0.23	7.24	12.23	5.56	1.74	1.05	1.79	99.93	40.89	34.71	26.09	1.87	-341.34	0.29	-1.56	-2.47
		JJ22	41.44	2.02	12.36	13.42	0.17	7.70	13.75	5.45	1.68	1.12	0.83	99.93	44.02	33.43	28.34	1.75	-72.36	0.26	-1.58	-2.49
JJ26		40.75	2.38	11.54	14.80	0.21	7.95	13.78	5.06	1.77	0.94	0.77	99.97	42.36	32.02	28.02	1.74	-33.93	0.26	-1.57	-2.45	
JJ27		42.19	2.26	11.89	13.89	0.21	7.17	13.24	5.71	1.92	0.84	0.61	99.93	41.49	35.68	26.00	1.87	-1018.69	0.27	-1.56	-2.49	
JJ28		41.18	2.33	11.87	14.87	0.21	7.25	13.25	5.00	1.90	0.88	1.22	99.95	40.06	32.52	26.07	1.76	-62.38	0.28	-1.54	-2.44	
JJ29		41.10	2.34	11.72	14.60	0.23	8.09	13.32	5.07	1.74	0.86	0.87	99.95	43.12	31.95	28.57	1.75	-46.89	0.27	-1.57	-2.46	
JJ30		40.36	2.53	14.20	12.43	0.21	5.93	12.60	6.17	2.42	1.82	1.29	99.95	39.65	40.41	22.88	1.94	-45.61	0.27	-1.50	-2.55	
JJ31		41.00	1.98	13.50	13.25	0.15	7.00	13.26	5.56	2.00	0.99	1.23	99.93	42.04	35.56	26.19	1.79	-58.87	0.28	-1.54	-2.51	
JJ02		44.60	0.99	24.26	6.91	0.12	1.93	5.13	11.52	2.68	0.56	1.00	99.70	28.31	71.17	8.60	2.87	86.57	0.42	-1.55	-2.94	
JJ03		44.48	1.08	23.22	6.85	0.11	2.02	5.31	12.03	2.46	0.70	1.45	99.71	29.39	72.77	8.84	3.06	88.18	0.40	-1.59	-2.95	
JJ04		44.40	1.06	23.19	6.90	0.12	2.06	5.27	12.06	2.46	0.68	1.51	99.71	29.68	72.83	8.98	3.08	90.61	0.40	-1.59	-2.95	
JJ05		44.16	1.11	22.97	6.98	0.12	2.11	5.40	11.72	2.49	0.67	1.99	99.71	29.89	71.74	9.27	3.01	88.42	0.40	-1.58	-2.94	
JJ06		44.31	1.24	21.89	7.45	0.12	2.76	6.55	10.60	2.44	0.71	1.66	99.73	34.24	65.86	12.16	2.69	73.74	0.39	-1.56	-2.88	
JJ07		44.06	1.36	20.55	8.00	0.13	3.58	7.53	9.84	2.28	0.73	1.69	99.75	38.53	60.91	15.51	2.52	69.95	0.38	-1.57	-2.83	
JJ09		44.21	1.43	20.49	8.71	0.14	3.24	7.45	10.19	2.19	0.71	0.99	99.76	34.29	61.75	13.71	2.59	77.65	0.37	-1.58	-2.82	
JJ10	44.22	1.48	19.99	8.68	0.14	3.35	7.70	9.95	2.17	0.74	1.33	99.76	35.09	60.91	14.27	2.56	69.36	0.37	-1.58	-2.81		

注: M=MgO/(MgO+FeO) (%), 铁含量采用 Le Maitre^[9]方法进行修整;
 分子指数(DI)=Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp; 固结指数(SI)=MgO×100/(MgO+FeO+F₂O₃+Na₂O+K₂O) (%);
 碱度率(AR)=[Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)] (%); 当 SiO₂ > 50, K₂O/Na₂O 大于 1 而小于 2.5 时, Na₂O+K₂O=2Na₂O;
 组合指数(σ): $\sigma_{43} = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$;
 F₁ = 0.008 8SiO₂ - 0.007 74TiO₂ + 0.010 2Al₂O₃ + 0.006 6(0.9Fe₂O₃ + FeO) - 0.001 7MgO - 0.014 3CaO - 0.015 5Na₂O - 0.000 7K₂O (%);
 F₂ = -0.0135O₂ - 0.018 5TiO₂ - 0.012 9Al₂O₃ - 0.013 4(0.9Fe₂O₃ - FeO) - 0.03MgO - 0.020 4CaO - 0.048Na₂O + 0.071 5K₂O (%);
 F₃ = -0.022 15SiO₂ - 0.053 2TiO₂ - 0.036 1Al₂O₃ - 0.001 6(0.9Fe₂O₃ - FeO) - 0.031MgO - 0.023 7CaO - 0.061 4Na₂O - 0.028 9K₂O (%).

图9 SiO₂-AR 碱性系列判别图Fig. 9 SiO₂-AR alkaline series discrimination graph
图例同图2。

5 认识与讨论

5.1 母岩浆性质

区分岩体是原始岩浆直接结晶的产物, 还是派生岩浆结晶产物是研究岩浆源岩及成因的前提。原始岩浆是指在源区产生后未经变异改造(分异、熔融、同化、混染、混合等作用)的岩浆, 许多学者曾对原始岩浆的性质作过研究^[22-23], 提出了识别原始岩浆的准则, 主要有: 岩石的 M 值为 68~75; 固结指数(SI)为 40±; MgO 含量为 12%±; Ni 含量为 290×10^{-6} ±; 橄榄石的 Fo 为 90±; 并含有幔源包体等。本区碱性超基性岩相应数值列于表 3, 各类岩石都不同程度偏离原始岩浆的标准, 霞霓钠辉岩的最高固结指数(SI)为 35.92, MgO 含量为 10.02%, 表明组成岩体各类岩石均系原始岩浆经过分馏的派生岩浆产物, 且随着岩浆活动过程从早到晚, 其偏离程度增大, 即岩体早期的霞霓钠辉岩成分更接近原始岩浆。鸡街碱性超基性岩为典型的 Ol-Di-Ne 矿物组合, 与 Hyndman^[24] 玄武质岩浆四面体分类中的碱性玄武岩区类似(图略)。霞霓钠辉岩和霓霞岩中发育橄榄石捕掳晶, 黄智龙等^[7] 和颜以彬^[8] 在鸡街及其邻区岩石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幔岩部分熔融。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质岩浆, 碱性玄武质岩浆较拉斑玄武质岩浆有更深的熔融深度和更小的部分熔融程度^[11-12, 25]。Kushiro^[12] 通

过橄榄岩熔融试验得出在压力 >12~15 kbar 时, 生成含标准矿物 Ne<10% 的碱性玄武质岩浆; 而当压力 >25 kbar, 部分熔融程度 <10% 时, 生成含 Ne>10% 的硅酸盐不饱和的霞石岩浆。鸡街碱性超基性岩霞石含量超过 16%, 磷霞岩中最高可达 90%。综上, 鸡街母岩浆来源较深, 为高压条件下地幔橄榄岩低程度部分熔融(<10%) 产生的碱性岩浆演化而来。

5.2 岩浆演化

5.2.1 部分熔融与结晶分异作用

单斜辉石的环带结构和橄榄石的化学分带现象指示, 鸡街主岩体的形成是一个快速侵入结晶、固结成岩的过程。反应边结构和橄榄石捕掳晶的发育可推断其母岩浆经历了早期的橄榄石结晶分异作用或者深部岩浆房中橄榄石的堆晶作用。而钠长石仅在霓霞岩和磷霞岩中极少出现, 可见鸡街碱性超基性岩浆中由于 Si 的强烈不饱和, 基本未经历斜长石的结晶分异过程。

Harker 图解中(图 10), MgO 与 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O+K₂O、CaO、 Σ Fe₂O₃、TiO₂、MnO、P₂O₅ 呈良好的线性相关, 指示霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩的岩浆演化和成岩过程由结晶分异作用主导。在幔源岩浆演化初期阶段, Mg 主要赋存于橄榄石中, Ca 则主要赋存于辉石中, MgO-CaO 相关图(图 10d) 指示霞霓钠辉岩-霓霞岩岩浆演化阶段以辉石的分离结晶为主, 霞霓钠辉岩岩浆演化阶段有少量橄榄石分离结晶。(MgO+Fe₂O₃)/TiO₂-SiO₂/TiO₂ 比值图解(图 11)中霞霓钠辉岩与霓霞岩主要沿 1:2 的单斜辉石控制线分布, 少量霞霓钠辉岩靠近 1:1 的橄榄石趋势线, 磷霞岩成分则主要受霞石+少量辉石(与长石族成分相当)控制。霞霓钠辉岩中 MgO- Σ Fe₂O₃(图 10c)、MnO(图 10f)、TiO₂(图 10h) 相关图有近似负相关趋势, MnO 主要赋存于磁铁矿和橄榄石中, Σ Fe₂O₃、TiO₂ 赋存于磁铁矿中, 以辉石为主的分离结晶作用中磁铁矿含量很少且有逐渐增多的趋势, 母岩浆结晶分异作用产生的橄榄石不多, 不足以影响此趋势, 个别样品的偏离与光薄片中的橄榄石捕掳晶的存在相对应。可见, 霞霓钠辉岩-霓霞岩岩浆演化过程中以辉石和少量的橄榄石分离结晶为主, 随着氧逸度的升高有少量的磁铁矿晶出, 磷霞岩岩浆演化受霞石和少量辉石控制。这与镜下观察结果一致。

3 类岩石的分异指数 DI 与 M 值呈明显的负相

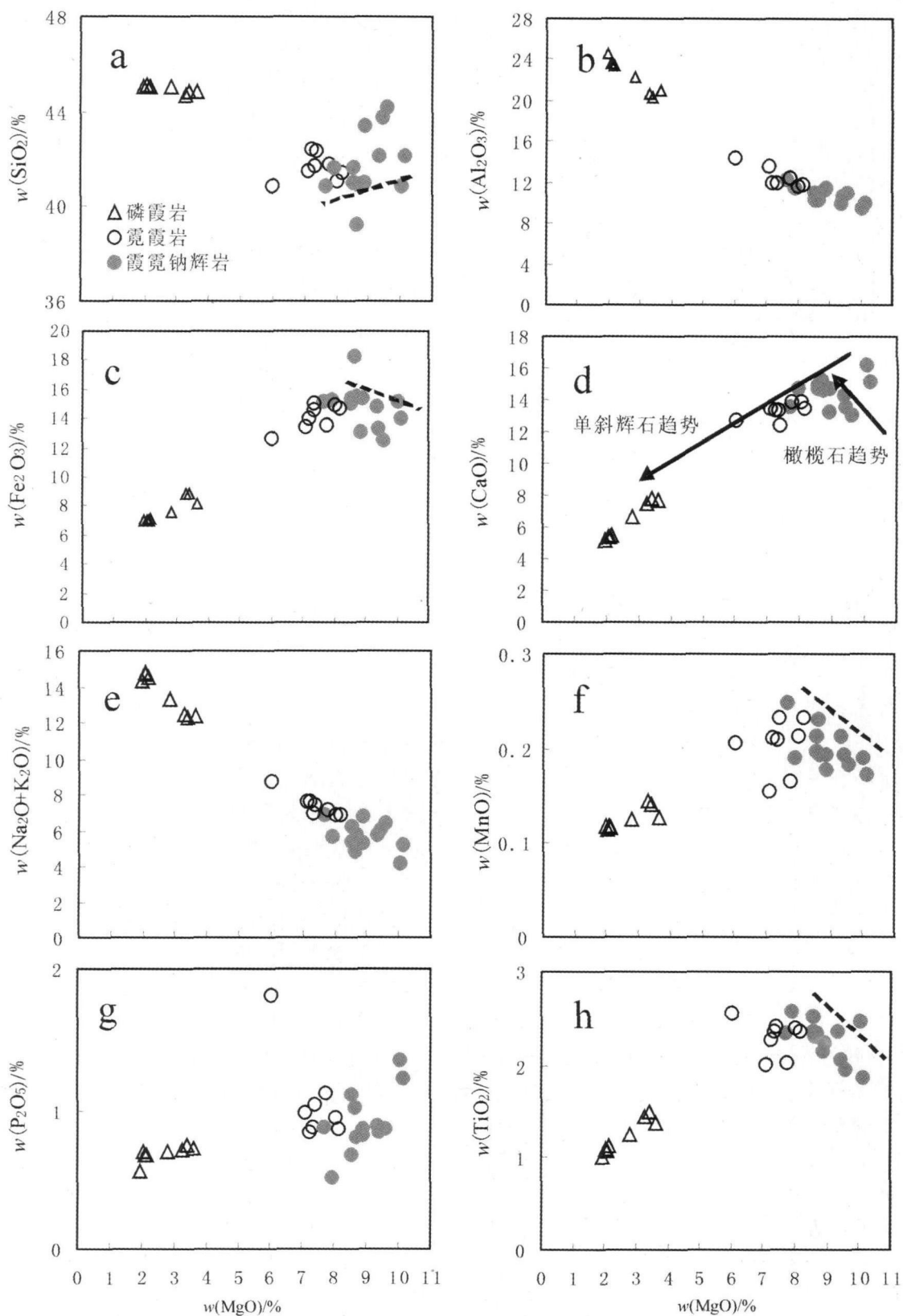


图 10 鸡街碱性超基性岩 Harker 图解
 Fig. 10 Harker correlograms of Jijie alkaline-ultramafic rocks

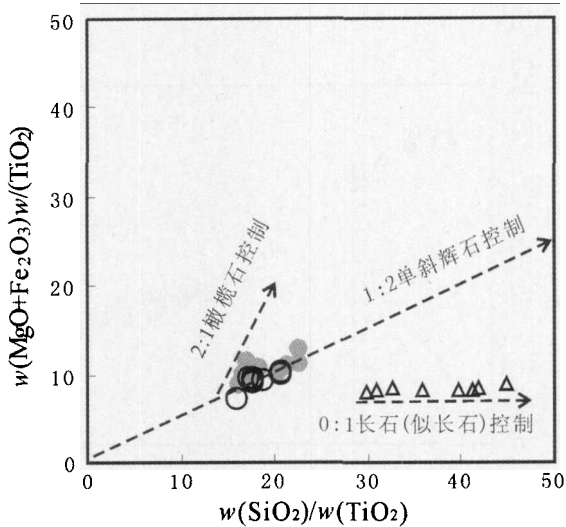


图 11 (MgO+Fe₂O₃)/TiO₂-SiO₂/TiO₂ 比值图解 (据 Pearce, 1968^[26])

Fig. 11 (MgO+Fe₂O₃)/TiO₂-SiO₂/TiO₂ ratio correlogram 图例同图 10。

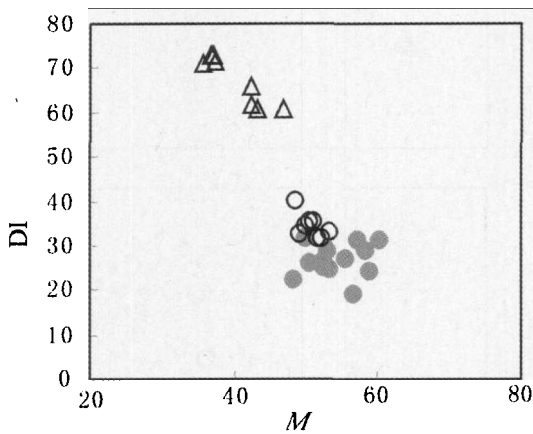


图 12 鸡街碱性超基性岩 DI-M 值相关图

Fig. 12 The DI-M correlogram of Jijie alkaline-ultramafic rocks 图例同图 10。

关系(图 12), 指示随着岩浆演化 M 值逐渐降低, 结晶分异程度增强。辉石与霞石的共生组合是该组岩石的代表, 且随着岩浆的演化此消彼长, 而 CaO 主要赋存于辉石中, Al₂O₃ 则为霞石的主要组分, 两者很好的负相关关系(图 13)符合这种碱性岩浆的演化规律。

MgO-SiO₂ 相关图(图 10a)中霞霓钠辉岩段呈现近似正相关趋势, 结合矿物组合特征可以发现, 鸡街霞霓钠辉岩中橄榄石和辉石为主要的富 Mg 矿物, 且橄榄石含量相对很少, 其全岩 Mg 含量(质量分数)由辉石主导。透辉石中 SiO₂ 含量为 50% 左右, 而霞石中的 SiO₂ 含量仅为 43%~44%, 全岩的 SiO₂ 含量不超过 45%。在霞霓钠辉岩岩浆固结之初, 以相对高比例的辉石晶出而控制全岩中 Mg-Si

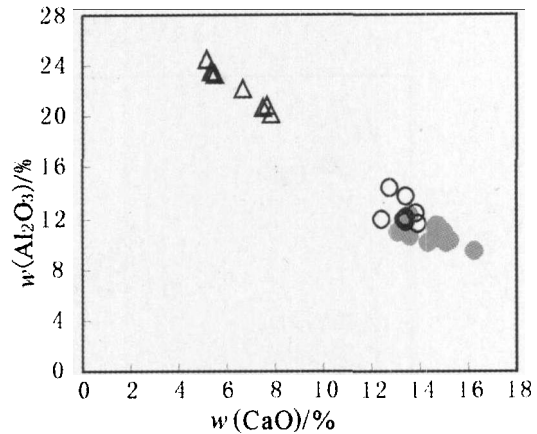


图 13 鸡街碱性超基性岩 Al₂O₃-CaO 相关图

Fig. 13 The Al₂O₃-CaO correlogram of Jijie alkaline-ultramafic rocks 图例同图 10。

比例, 随着结晶分异作用的进行, 残余岩浆逐渐贫镁富硅, 而后岩浆的碱性程度愈强, 霞石逐渐增多, 这种辉石分离结晶过程中的正相关关系在普通玄武质岩浆的演化过程中是不存在的, 因为正常玄武质岩浆中辉石-长石结晶序列中, 残余岩浆是一直向着富 Si 方向演化的。

值得注意的是, 磷霞岩与霓霞岩的化学成分虽具有良好的线性相关, 但成分不连续, Fo 值明显低于霞霓钠辉岩和霓霞岩, 表现为碱性岩浆侵入期次间断的同时, 磷霞岩岩浆在母岩浆房可能经历了大量橄榄石和辉石的分离结晶, 而作为残余岩浆后期侵入。这一点与岩体的穿插关系相吻合(图 1B)。

5.2.2 地壳混染

氧化物含量-IgSI 图解能清楚地反映岩浆的演化性质和规律^[9,27], 在未经受大陆型地壳物质混染的情况下, 火成岩系的主要氧化物与固结指数对数值呈线性关系。本区基底为变质岩、震旦纪灯影组灰岩和昆阳群美党组板岩, 总的特点是富 Al、Si、Ca, 而贫 Mg、Na、K。若鸡街岩浆演化过程中经历了地壳物质混染, 则 Al、Si 和 Ca 与 IgSI 会明显偏离线性关系。鸡街碱性超基性岩中主要氧化物(Si、Al、Mg、Ca、Na+K)与 IgSI 均呈良好的线性相关(图 14), 表明岩浆演化过程中很少或未经受大陆地壳物质混染。同时, 岩体中罕见斜长石, 也说明 Si 强烈不饱和的鸡街强碱性岩浆, 在上升过程中基本没有地壳高 Si 物质加入。

5.3 构造环境

碱性岩普遍产于岩石圈的拉张环境, 这一观点已得到基本共识, 但是对碱性岩构造环境的判别,

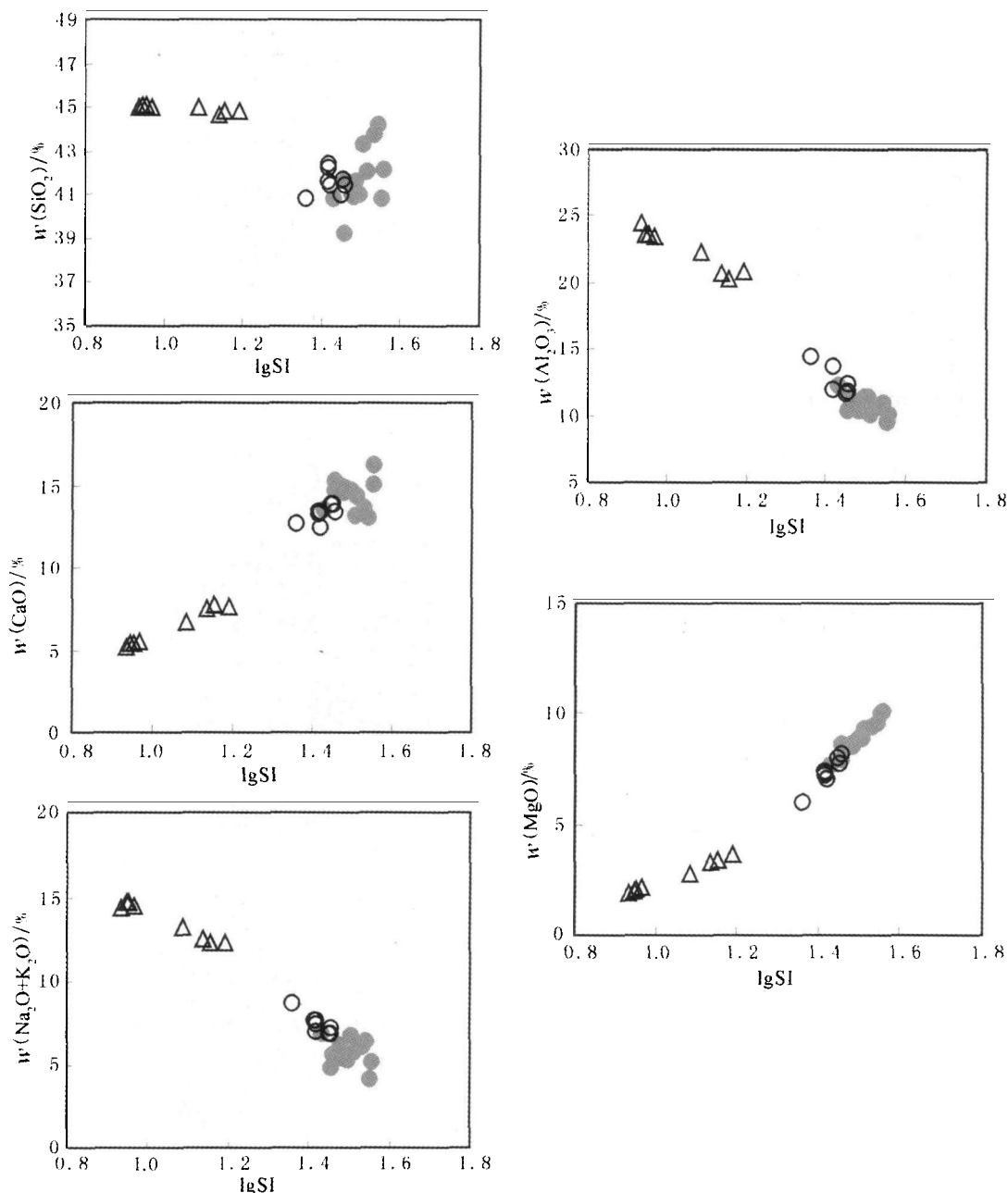


图 14 鸡街碱性超基性岩主要氧化物含量- $\lg SI$ 相关图
 Fig. 14 $\lg SI$ -oxide correlogram of Jijie alkaline-ultramafic rocks
 图例同图 10。

用常规判别方法往往并不理想。Ernst 等^[28]、赵振华^[29]通过大量的实例研究指出,在应用前人总结的地球化学相关构造环境的判别图时,要根据判别图建立原理、参数特征而选择性地使用或提取有效信息。

罗茨地区碱性超基性岩带居于攀西裂谷的轴部南端,沿安宁河断裂带分布。历来认为,该断裂带是本区地质和地球物理场的分界线,从古元古代到新生代经历多次拉张和挤压作用。Pearce 等^[30]依据

$TiO_2-P_2O_5-K_2O$ 图解,有效地判别大洋与陆内玄武岩岩浆,在该判别图上鸡街碱性超基性岩均位于陆内区间(图 15a)。在 TiO_2-FeOt/MgO 图解^[31]中鸡街霞霓钠辉岩和霓霞岩与磷霞岩位于洋岛玄武岩与洋中脊的交集附近(图 15b)。Pearce^[32]的 F_1-F_2 和 F_2-F_3 图中,鸡街碱性超基性岩位于洋中脊玄武岩(OFB)与板内玄武岩(WPB)、洋中脊玄武岩(OFB)与高铝钙碱性玄武岩(CAB)的交汇处(图 15c),具

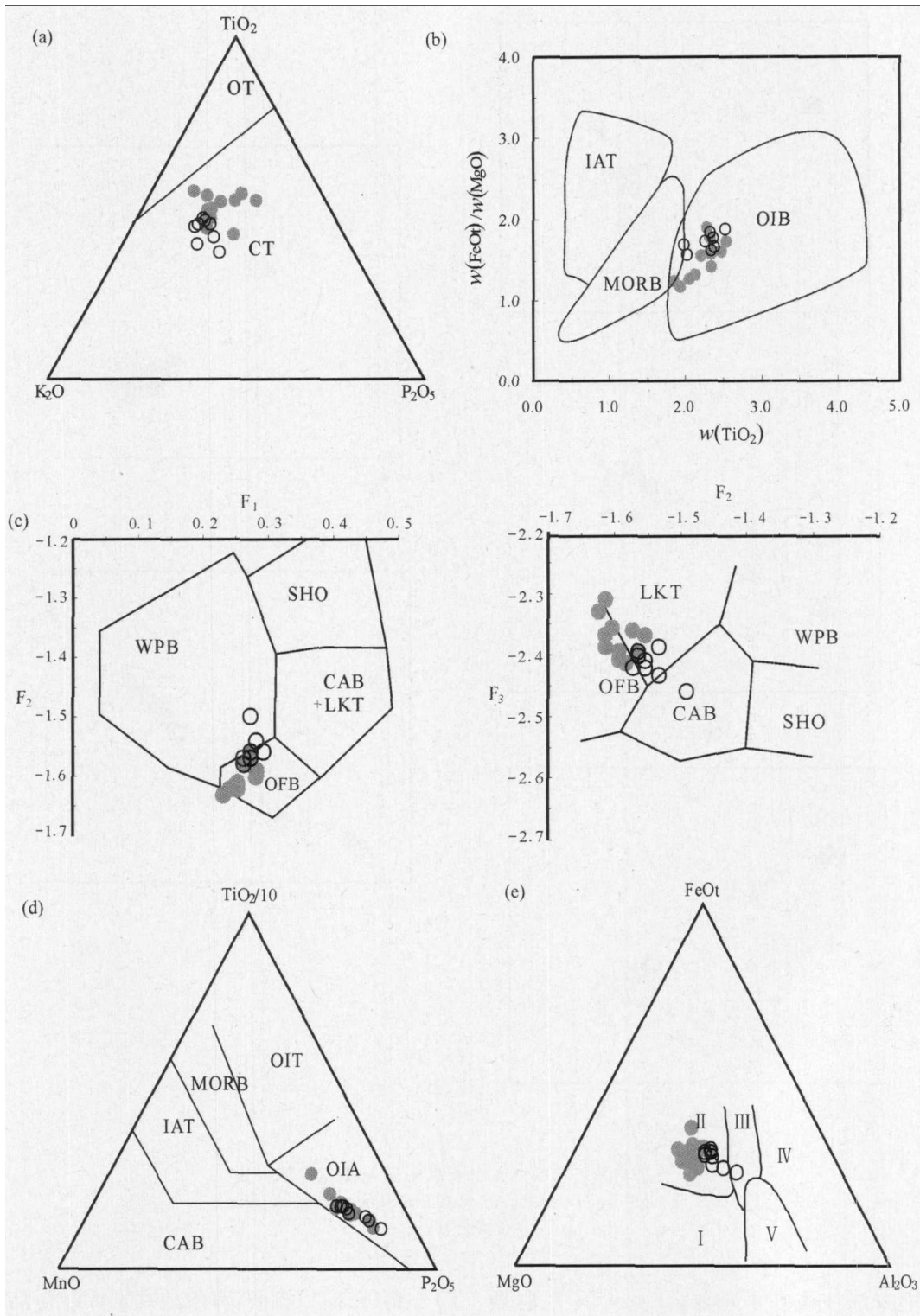


图 15 鸡街碱性超基性岩主量元素构造环境判别图

Fig. 15 Structure environment discrimination graphs of Jijie alkaline-ultramafic rocks

a—原图据 Pearce 等^[30]; OT—大洋玄武岩; AT—陆内玄武岩。b—原图据 Glassiey^[31]; IAT—岛弧拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩。c—原图据 Pearce^[32]; WPB—板内玄武岩; LKT—低钾(岛弧)拉斑玄武岩; CAB—钙碱性(高铝)玄武岩; SHO—钾玄武岩; OFB—洋中脊(洋底)玄武岩。d—据 Mullen^[33]; OIT—洋岛拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩。e—据 Pearce 等^[34]; I—洋中脊或洋底; II—洋岛; III—大陆; IV—扩张性中央岛; V—造山带。图例同图 10。

有板内拉张环境碱性岩的性质。TiO₂-MnO-P₂O₅图解^[33]中所有鸡街碱性超基性岩均落于洋岛碱性玄武岩区间(图 15d)。在 Pearce 等^[34]的 FeO_T-MgO-Al₂O₃ 图解上, 鸡街霞霓钠辉岩和霓霞岩与磷霞岩分别位于洋岛与扩张性大陆区间(图 15e)。

上已述及, 本文推断磷霞岩为残余岩浆的产物, 判断构造环境时主要考虑霞霓钠辉岩和霓霞岩。需要指出的是, 以上构造环境的判别图中, 并未圈定出大陆溢流玄武岩区间, 而是以洋岛、洋中脊或洋壳、弧后和拉斑、钙碱玄武岩系列为主要端员。利用主量元素判别构造环境发展较早, 依靠大量数据的收集来圈定背景区域。现有研究认为大陆溢流玄武岩与大洋洋岛玄武岩有着类似的地幔岩浆动力学机制, 均与地幔柱活动有关, 峨眉山玄武岩的 Sr-Nd 同位素特征也与 OIB 型一致^[35-39]。因此, 依据以上判别图中提供的信息, 我们可以提取其中最有效的部分, 即鸡街碱性超基性岩产出背景为大陆型板内拉张环境, 有大陆溢流型碱性玄武质岩浆的性质, 但主量亲石元素(如 K₂O)有向 MORB 发展的略亏损趋势, 源区具一定复杂性。鸡街岩体时限定为晚海西期—早印支期^[40-41], 晚于峨眉山玄武岩的主喷发阶段, 推断其形成可能与地幔柱活动后的略亏损型地幔低程度部分熔融有关。

6 结论

(1) 鸡街碱性超基性岩杂岩体主要由霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩组成, 透辉石和霞石作为主要造岩矿物互为消长, 偶见霓辉石, 橄榄石、磁铁矿、磷灰石、角闪石和黑云母作为副矿物存在, 霓霞岩和磷霞岩中出现少量钠长石。

(2) 橄榄石捕掳晶发育反应边结构, 其 Fo 值明显高于普通结晶橄榄石; 辉石常见环带结构, 化学成分上呈多个韵律环带; 从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩 Fo 值明显降低, 辉石向富 Fe、Na 方向发展。

(3) 从霞霓钠辉岩-霓霞岩-磷霞岩, 逐渐贫 Mg、Ca, 富 Al、K 和 Na, 碱度率(AR)逐渐升高; 钙碱指数(CA)、里特曼指数(σ_{43})指示鸡街碱性超基性岩浆属钠质强碱性系列。

(4) 结合矿物学和岩石化学研究可初步判断: 地幔橄榄岩的低程度部分熔融作用形成了碱性超基性霞石岩浆, 原始岩浆演化过程中经历了橄榄石(Fo \geq 80)为主要的分异作用; 母岩浆在活动大断裂提供的

良好通道条件下迅速上侵, 母岩浆演化过程中经历了橄榄石和单斜辉石及少量磁铁矿的分离结晶作用; 很少或没有受到大陆地壳的同化混染作用; 磷霞岩岩浆经历了母岩浆房阶段的橄榄石、辉石堆晶作用, 作为残余岩浆在后期侵入; 主量元素对构造环境的约束显示, 鸡街碱性超基性岩携带一定的陆内拉张环境下溢流碱性玄武岩信息, 推断其源区亏损与中一晚二叠世峨眉山幔柱活动有关。

鸡街杂岩体中霞霓钠辉岩、霓霞岩和磷霞岩的矿物学和岩石化学相关性及其演化特征明显, 但仍有些模糊的认识和疑问, 还需要微量元素和同位素的研究来进一步寻找证据。

衷心感谢审稿人对本文提出的建设性修改意见, 中国科学院地球化学研究所钟宏研究员、毕献武研究员和香港大学高剑峰博士, 在论文工作过程中参与了有益探讨, 在此一并感谢。

References

- [1] Tu G C. Regarding to alkali-rich intrusive rocks[J]. Geological Science and Technology Information, Jiangsu Province, 1990(2): 1-3(in Chinese).
- [2] Tu G C, Zhang Y Q, Zhao Z H, et al. Preliminary study of two alkali-rich intrusive rock belt in the south of China[C]// Xu K Q, Tu G C. Granite Geology and Mineralization. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1986: 31-37(in Chinese).
- [3] Petro W, Vogel T, Wilband J. Major-element chemistry of plutonic rock suites from compressional and extensional plate boundaries[J]. Chemical Geology, 1979, 26(3/4): 217-235.
- [4] Verhulst A, Balaganskaya E, Kirnarsky Y, et al. Petrological and geochemical (trace elements and Sr-Nd isotopes) characteristics of the Paleozoic Kovdor ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion (Kola Peninsula, NW Russia)[J]. Lithos, 2000, 51(1/2): 1-25.
- [5] Downes H, Balaganskaya E, Beard A, et al. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: A review[J]. Lithos, 2005, 85: 48-75.
- [6] Nockolds S R. Average chemical compositions of some igneous rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1954, 65(10): 1007-1032.
- [7] Huang Z L, Yan Y B, Wu J. Study of the petrology of Jijie alkaline-ultrabasic rock complex body in Lufeng, Yunnan[J]. Journal of Kunming Institute of Technology, 1993, 18(4): 9-

- 19(in Chinese).
- [8] Yan Y B. The ancient rift zone magma series in the central of Yunnan Province[J]. *Yunnan Geology*, 1985, 4(4): 353-372 (in Chinese).
- [9] Qiu J X, Lin J Q. Petrochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese).
- [10] Green D H, Ware N G, Hibberso W, et al. Experimental petrology of Apollo-12 basalts sample 12009 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 13(1): 85.
- [11] Jaques A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0-15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, 73(3): 287-310.
- [12] Kushiro I. Partial melting experiments on peridotite and origin of mid-ocean ridge basalt[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29: 71-107.
- [13] Kogiso T, Hirschmann M M, Pertermann M. High-pressure partial melting of mafic lithologies in the mantle[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(12): 2407-2422.
- [14] Gupta A K, Chattopadhyay S, Chattopadhyay B, et al. Experimental study of the system diopside-nepheline-sanidine at 0.1, 1 and 2 GPa $P(H_2O) = P(Total)$: Its significance in the genesis of alkali-rich basic and ultrabasic rocks[J]. *Lithos*, 2006, 86(1/2): 91-109.
- [15] Rock N. The nature and origin of lamprophyres; An overview[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1987, 30(1): 191-226.
- [16] Wu J, Huang Z L, Yan Y B. Zoned olivine from Jijie alkaline-ultrabasic rock complex in Yunan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 23(1): 40-44(in Chinese).
- [17] Sorensen H. The Alkaline Rocks[M]. London: John Wiley & Son, 1974.
- [18] Zheng Q R. Calculating the value of Fe^{3+} and Fe^{2+} by electron microprobe analysis data[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1983(1): 55-62(in Chinese).
- [19] Le Maitre R. Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classifications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 56(2): 181-189.
- [20] Rittmann A. Volcanoes and Their Activity[M]. New York: Interscience Publishers, 1962.
- [21] Le Maitre R, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks International Union of Geological Sciences, 1989.
- [22] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19(3): 463-513.
- [23] Deng J F. Rock Facies Balance and Petrogenesis[M]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1987(in Chinese).
- [24] Hyndman D. Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks [M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [25] Takahashi E, Shimazaki T, Tsuzaki Y, et al. Melting study of a peridotite k1b-1 to 6.5 GPa, and the origin of basaltic magmas[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1993, 342: 105-120.
- [26] Pearce T. A contribution to the theory of variation diagrams [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1968, 19 (2): 142-157.
- [27] Wang D Z, Zhou X M. Volcanic Petrology[M]. Beijing: Science Press, 1982(in Chinese).
- [28] Ernst R E, Fowler A D, Pearce T H. Modelling of igneous fractionation and other processes using Pearce diagrams[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 100(1): 12-18.
- [29] Zhao Z H. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 92-103(in Chinese).
- [30] Pearce T, Gorman B, Birkett T. The $TiO_2-K_2O-P_2O_5$ diagram: A method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 24(3): 419-426.
- [31] Glassiey W. Geochemistry and tectonics of the Crescent volcanic rocks, Olympic Peninsula, Washington[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1974, 85(5): 785.
- [32] Pearce J. Statistical analysis of major element patterns in basalts[J]. *Journal of Petrology*, 1976, 17(1): 15.
- [33] Mullen E. $MnO/TiO_2/P_2O_5$: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62: 53-62.
- [34] Pearce T, Gorman B, Birkett T. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36: 121-132.
- [35] Qi L, Wang C Y, Zhou M F. Controls on the PGE distribution of Permian Emeishan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longzhoushan, Sichuan Province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 106(3/4): 222-236.
- [36] Qi L, Zhou M F. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(1/2): 83-103.
- [37] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 2004, 32(10):

917-920.

- [38] Song X Y, Qi H W, Robinson P T, et al. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: Evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China [J]. *Lithos*, 2008, 100: 93-111.
- [39] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103(3/4): 352-368.
- [40] Huang Z L, Yan Y B, Wu J. Geochemistry of alkaline-ultrabasic rocks in the Jijie Complex, Lufeng, Yunnan [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1996, 15(1): 61-71.
- [41] Xia B, Liu H Y, Zhang Y Q. SHRIMP U-Pb dating of agpaitic alkalic rocks in Panxi rift zone and its geological implications—examples for Hongge, Baima and Jijie rock bodies [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(2): 149-154 (in Chinese).
- [1] 涂光焯. 关于富碱侵入岩 [J]. *江苏地质科技情报*, 1990(2): 1-3.
- [2] 涂光焯, 张玉泉, 赵振华, 等. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究 [C] // 徐克勤, 涂光焯. 花岗岩地质与成矿关系. 南京: 江苏科技出版社, 1986: 31-37.
- [7] 黄智龙, 颜以彬, 吴静. 云南禄丰鸡街碱性超基性岩杂岩体的岩石学研究 [J]. *昆明工学院学报*, 1993, 18(4): 9-19.
- [8] 颜以彬. 滇中古裂谷带岩浆系列 [J]. *云南地质*, 1985, 4(4): 353-372.
- [9] 邱家骧, 林景任. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [16] 吴静, 黄智龙, 颜以彬. 云南鸡街碱性超基性岩杂岩体中橄榄石的矿物化学 [J]. *矿物学报*, 2004, 23(1): 40-44.
- [18] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. *矿物学报*, 1983(1): 55-62.
- [23] 邓晋福. 岩石相平衡与岩石成因 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1987.
- [27] 王德滋, 周新民. 火山岩岩石学 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [29] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题 [J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 92-103.
- [41] 夏斌, 刘红英, 张玉泉. 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 [J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(2): 149-154.

参考文献