

云南香格里拉洛吉乡基性-超基性岩中单斜辉石 矿物成分特征及其地质意义

邹金汐, 刘显凡, 邓江红, 李春辉, 黄玉蓬, 董毅, 易立文

(成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059)

摘要: 云南香格里拉洛吉乡出露一套基性-超基性岩块, 前人对其属性的认识有分歧。岩相学研究发现该岩块具有正堆积结晶和补堆积结晶的特点, 岩石化学特征具有贫碱、高钙和低氧逸度的特征, 其母岩浆为亚碱性系列, 并且显示出堆晶层状岩系演化特征。对其中的单斜辉石进行了矿物成分及化学成分研究, 结果表明辉石种属为透辉石, 晶体中类质同像替代现象普遍, 阳离子取代特征显示出形成于高温低压的条件。温压计算结果表明透辉石形成平均温度为 $1\ 084^{\circ}\text{C}$, 平均压力为 $0.15\ \text{GPa}$ 。结合岩石的成分和演化特征, 认为该岩石形成于洋中脊, 属洋壳组成的基性-超基性堆晶岩系, 为甘孜-理塘延伸带的残余产物。

关键词: 基性-超基性岩; 单斜辉石; 堆晶岩系; 云南香格里拉

中图分类号: P578.954

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)05-0701-11

Mineralogical composition characteristics and geological significance of the clinopyroxene from ultrabasic-basic rocks at Luoji Village, Shangri-La County, Yunnan Province

ZOU Jin-xi, LIU Xian-fan, DENG Jiang-hong, LI Chun-hui, HUANG Yu-peng,
DONG Yi and YI Li-wen

(Institute of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: There exists a suite of ultrabasic-basic rock blocks in Luoji Village of Shangri-La County, whose nature is in debate. Petrologic studies show that this suite of rock blocks can be divided into two categories, one is of orthocumulate texture, and the other is of adcumulate texture. Petrologic geochemistry suggests that the rock blocks are low in alkali and oxygen fugacity, but high in calcium content. The original magma is proved to be of the sub-alkaline series with layer cumulate rock characteristics. Mineral composition and chemical composition of the clinopyroxene from ultrabasic-basic rocks suggest that the clinopyroxene is diopside and cation isomorphism is common. Temperature-pressure calculation implies that crystallization occurred under the condition of high temperature ($1\ 084^{\circ}\text{C}$) and low pressure ($0.15\ \text{GPa}$). The ultrabasic-basic rock blocks in the study area are products of mid-ocean ridge with the composition of oceanic crust, probably being the relics of Garze-Litang suture belt.

Key words: ultrabasic-basic rocks; clinopyroxene; cumulate rocks; Shangri-La County, Yunnan Province

收稿日期: 2012-03-02; 修订日期: 2012-08-02

基金项目: 中国地调局地调资助项目(1212011120587); 国家公益性行业科研专项资助项目(201011005-5); 成都理工大学矿物学岩石学矿床学国家重点(培育)学科建设资助项目(SZD0407)

作者简介: 邹金汐(1987-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向为成因与应用矿物岩石学, E-mail: zwjcccdut@126.com。

位于西南“三江”造山带东侧义敦岛弧南段的香格里拉县发育一套基性-超基性岩块。该区构造和岩浆活动强烈,特别是二叠纪-三叠纪的岩浆活动倍受关注,前人研究认为该区属于甘孜-理塘结合带的延伸范围,大部分学者认为其属于南延带(云南省地矿局,1980^①;四川省地矿局,1991;莫宣学,1993;侯增谦等,2004),也有学者认为是西延带(潘桂棠等,2004)。除个别学者对其中的超基性岩做过地球化学及成因研究以外(俞赛赢等,2005),并没有对该基性-超基性岩块进行过其他详细的研究,总体来说该区的研究程度较浅,前人研究大多为概括性总结,对其是否属于蛇绿岩分子、是否存在堆晶岩系等问题,均未做出明确的答复,这些问题制约了人们对甘孜-理塘结合带的存在及展布的进一步认识。

众所周知,单斜辉石是基性超基性岩中常见的造岩矿物,其成分和结构记录了岩浆起源及演化的物理化学条件等重要信息(Streck, 2008),其化学成分通常与构造环境密切相关(Nisbet and Pearce, 1977)。本文研究了位于香格里拉县洛吉乡电站附近的两处基性-超基性岩,在岩相学观察的基础上,重点运用单斜辉石的矿物学特征分析方法,探讨岩浆演化过程的物理化学条件以及岩石所属系列和成因特征,并为其形成的构造环境提供约束条件。

1 地质背景和岩相学特征

1.1 地质背景

研究区位于义敦岛弧南缘的小金河-三江口-虎跳峡断裂以北与拉坡里-拉巴断裂之间,西邻中咱地块及格咱深大断裂,东延为甘孜-理塘结合带,采样区域如图1a所示。区域上出露地层为下二叠统木胜土组(P_1ms)、中上二叠统洛吉组(P_{1j})基性火山岩及相应的碎屑岩和沉积岩、下三叠统坪子组(T_{1p})沉积岩夹碎屑岩。

1.2 岩相学特征

该基性-超基性岩块呈透镜状或构造夹片状,与地层呈断裂接触关系(图1b、1c),基性岩与超基性岩相邻产出并且有后期构造改造。根据野外特征及其薄片镜下鉴定,岩性分述如下:

1.2.1 超基性岩

分为橄榄岩类和辉石岩类。① 橄榄岩类:主要

为单辉橄榄岩、闪辉橄榄岩。岩石新鲜面呈墨绿色,为块状和碳酸盐化网脉角砾状(图2a)。岩石主要由辉石和橄榄石组成,整体蚀变较强,橄榄石已被强烈蛇纹石化,但仍保留橄榄石假像,辉石主要为自形-半自形的小颗粒(图2d),粒径0.1 mm左右,相对比橄榄石显示出晚结晶的特征,形成于更晚的结晶期次。② 辉石岩类:主要为橄榄单辉岩、含长橄榄二辉岩。岩石新鲜面绿色,呈强烈破碎的透镜状(图2b),主要由辉石和橄榄石组成。辉石晶体大小不一(图2e),多数晶形完整,可见六边形、八边形断面,偶见简单双晶;自形的大颗粒辉石之间充填半自形-粒状的小颗粒辉石,显示出明显的堆晶结构特征,大颗粒辉石为正堆积辉石,小颗粒辉石为补堆积辉石。

1.2.2 基性岩

主要为辉长岩、苏长辉长岩。岩石新鲜面为绿-深绿色,呈层状产出(图2c),主要由辉石和长石组成,辉石大多为自形-半自形柱状(图2f),可见六边形、八边形断面,偶见简单双晶;暗色矿物表现出先结晶的特点,长石为半自形-他形板块或柱状,属充填状,以补堆积结晶为主。

两类岩石中的辉石根据光性特征判断大多为单斜辉石,斜方辉石少见,基性岩中的正堆积辉石和超基性岩中的补堆积辉石表现出类似的光性特征,可能为同一岩浆结晶期次的产物。

2 单斜辉石的化学成分特征

测试样品取自基性岩中的正堆积辉石和超基性岩中的补堆积辉石,意在查明辉石结晶系列的演化特征。单斜辉石的电子探针分析在成都理工大学构造与成矿成藏国土资源部重点实验室完成,测试仪器为EPMA-1720型电子探针仪,加速电压15 kV,电流10.1 nA,束斑直径5~10 μm ,测试误差<1.0%。

本区单斜辉石主量元素分析及以6个氧原子为基准计算的阳离子数见表1。

本区单斜辉石 Na_2O (0.11%~0.32%)和 Al_2O_3 含量(2.25%~3.37%之间,平均为2.80%)较低, TiO_2 含量(0.44%~1.74%之间,平均为0.86%)相对较高, Cr_2O_3 (0.01%~0.95%之间,平均值为0.40%)变化范围广。根据Morimoto等(1988)

① 云南省地矿局, 1980. 1:20万永宁幅区调报告.

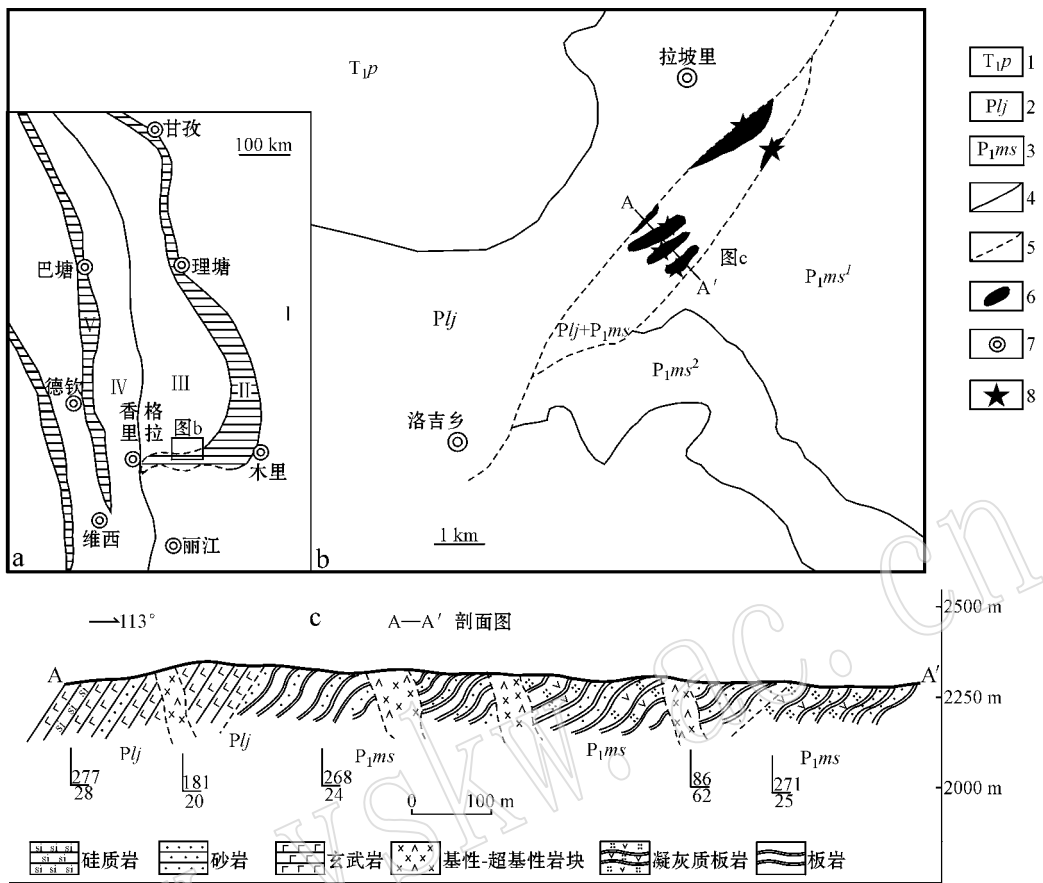


图 1 研究区大地构造位置图(a 据李文昌等 2010)、地质简图(b)和剖面图(c)

Fig. 1 Tectonic map (a, after Li Wenchang *et al.*, 2010), geological sketch map (b) and section map (c) of the study area

I—扬子陆块；II—甘孜-理塘结合带；III—义敦岛弧带；IV—中咱地块；V—金沙江结合带；1—坪子组；2—洛吉组；3—木里组；4—地质界线；5—断层；6—基性-超基性堆晶岩块；7—地名；8—采样位置

I—Yangtze block；II—Garze-Litang suture belt；III—Yidun island arc belt；IV—Zongza block；V—Jingshajiang suture belt；1—Pingzi Formation；2—Luoji Formation；3—Mushengtuo Formation；4—geological boundary；5—fault；6—ultrabasic-basic cumulate rocks；7—place name；8—sampling location

提出的辉石分类命名方案, 本区单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族 (图 3a), 其中正堆积辉石的端员组成为 $Wo_{42.12} \sim 46.86 En_{41.21} \sim 47.71 Fs_{7.38} \sim 16.67$, 补堆积辉石的端员组成为 $Wo_{44.80} \sim 45.24 En_{47.43} \sim 48.31 Fs_{6.89} \sim 7.33$, 在 $Wo-En-Fs$ 三角图 (图 3b) 上, 单斜辉石投入透辉石与普通辉石交界处。正堆积辉石的 $Mg^{\#}$ (平均 0.86) 近于或略小于原始地幔值 (McDonough and Sun, 1995), 补堆积辉石的 $Mg^{\#}$ (平均 0.91) 则高于原始地幔, 表明随着辉石从正堆积结晶到补堆积结晶的顺序, 岩浆为正向演化。

在主要氧化物相关图 (图 4) 上, MgO 与 TiO_2 和 FeO 呈较好的负相关性, 与 SiO_2 和 CaO 呈较好的正相关, 与钙碱性岩浆演化趋势类似, 且随着堆晶系的

演化, SiO_2 的含量略微增高, TiO_2 和 FeO 的含量则降低。 MgO 与其他氧化物 (如 Al_2O_3) 的相关性不明显。

3 讨论

3.1 单斜辉石成分演化岩浆系列

在单斜辉石的 $TiO_2-Al_2O_3$ 图解 (图 5) 上, 样品大多落入火成-Ca 辉石和变质-Ca 辉石相交区域, 暗示该岩块在结晶成岩过程中可能伴随流体交代所致的变质作用。火成岩的 Si 和 Al 具有不相容性质, 故其组合能反映其母岩浆性质 (Le Bas, 1962), 在单斜辉石的 $SiO_2-Al_2O_3$ 图解 (图 6) 中, 样品绝大部分

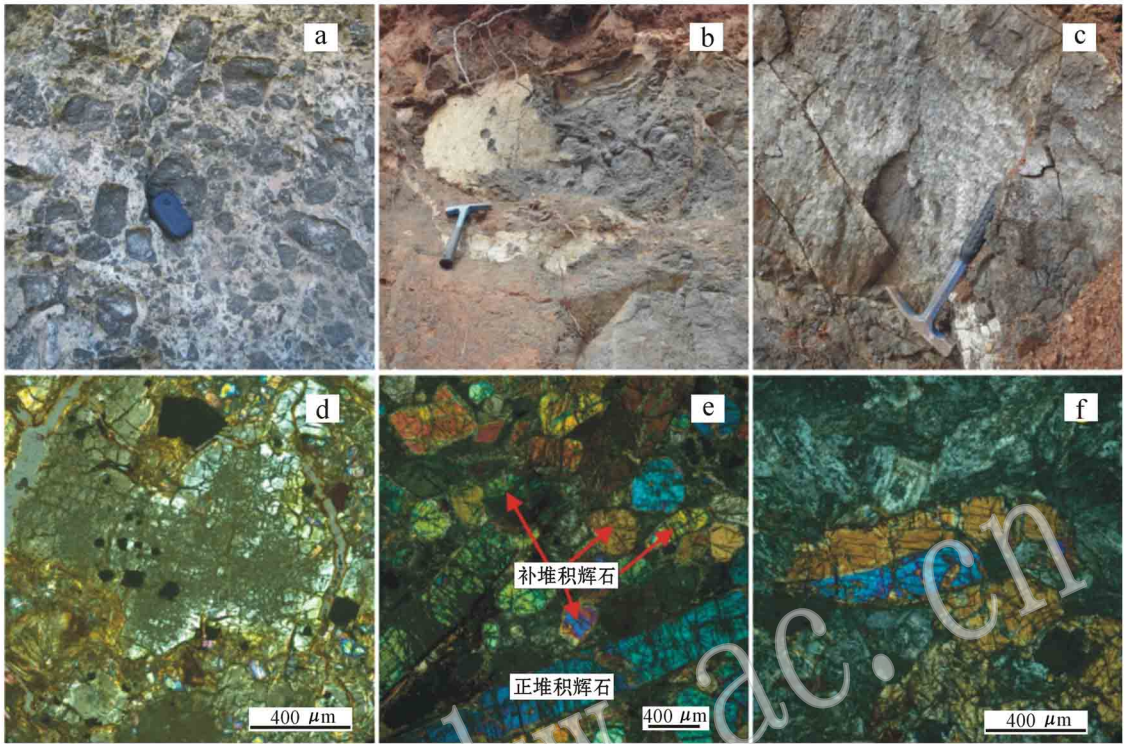


图 2 基性-超基性岩野外照片及其中的单斜辉石镜下特征(正交偏光)

Fig. 2 Characteristics of clinopyroxene phenocrysts (crossed nicols)

a—碳酸盐化角砾状单辉橄榄岩; b—透镜状橄榄单辉岩; c—层状辉长岩; d—辉石橄榄岩中的小颗粒(补堆积)辉石;
e—辉石岩中的正堆积和补堆积辉石; f—辉长岩中的正堆积辉石

a—carbonation brecciated clinopyroxene peridotite; b—lenticular olivine clinopyroxenite; c—layered gabbro; d—adcumulate pyroxene in pyroxene peridotite; e—adcumulate and orthocumulate pyroxene in pyroxenite; f—orthocumulate pyroxene in gabbro

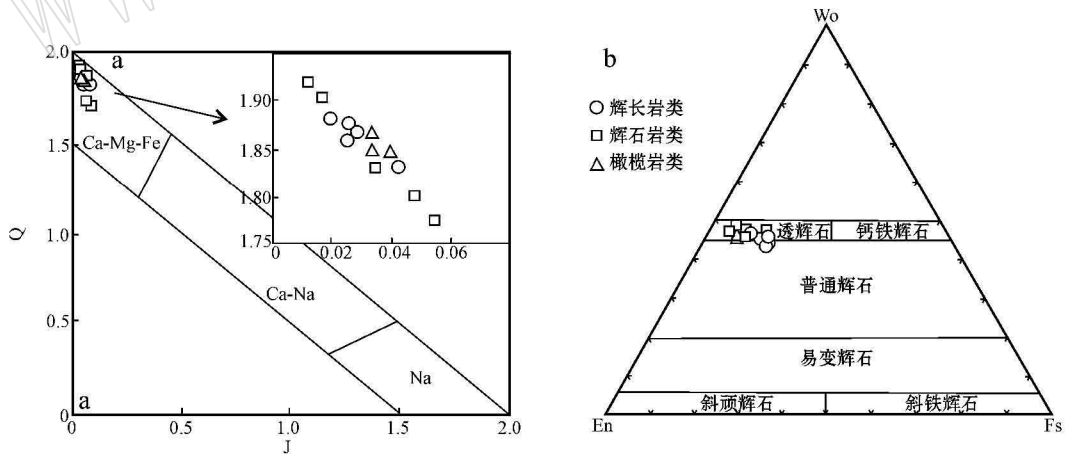


图 3 单斜辉石系列 Q-J 图解(a)和单斜辉石分类图解(b) (据 McDonough 和 Sun, 1995)

Fig.3 Diagram of Q-J series for clinopyroxenes (a) and diagram of classification for clinopyroxenes (b) (after McDonough and Sun, 1995)

落入亚碱性岩区, 仅个别样品落入亚碱性岩与碱性岩区的交界处, 暗示其母岩浆可能为亚碱性岩浆, 且岩浆可能有从亚碱性系列向碱性系列演化的趋势;

在单斜辉石的 Ti-(Ca + Na)图解(图 7)上, 除了极个别样品为碱性系列外, 其余均属于拉斑玄武系列, 这两类判别图解得出的结论相对一致。

表1 单斜辉石的电子探针成分(w_B%)及晶体化学式和部分特征参数计算
Table 1 Electron microprobe analyses of clinopyroxenes(w_B%) and crystal chemical coefficients and end-member components

岩石 样品号	辉长岩类						辉石岩类						橄榄岩类	
	PM33004E2H2	PM33009B1H1	PM33015B2H2	PM33015B1H1	D1702B3H3	PM33028B1H1	PM33024E2H2	PM33024E2H2	D1702B2H2	PM23012B1H1				
SiO ₂	49.66	50.23	50.84	49.79	49.02	51.93	52.20	50.98	51.90	51.57				
TiO ₂	1.13	0.56	0.80	1.51	1.76	0.45	0.58	0.73	0.65	0.44				
Al ₂ O ₃	3.37	2.34	2.65	2.78	3.41	2.25	2.62	3.10	3.11	2.30				
Cr ₂ O ₃	0.01	0.06	0.04	0.18	0.22	0.83	0.49	0.50	0.75	0.95				
FeO	9.16	5.63	6.81	9.97	8.63	4.53	4.75	5.47	4.20	4.48				
MnO	0.18	0.09	0.17	0.22	0.20	0.08	0.13	0.13	0.13	0.14				
MgO	14.58	16.34	15.37	14.07	14.68	16.72	16.67	16.12	16.99	16.70				
CaO	21.10	23.93	23.06	20.01	21.70	21.91	23.59	23.29	21.92	22.16				
Na ₂ O	0.21	0.18	0.14	0.32	0.32	0.11	0.18	0.13	0.19	0.19				
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02				
总量	99.40	99.35	99.89	98.87	99.95	98.90	101.20	100.45	99.84	98.94				
Si	1.87	1.88	1.89	1.89	1.84	1.93	1.90	1.88	1.90	1.91				
Al ^{IV}	0.13	0.02	0.11	0.11	0.05	0.08	0.10	0.12	0.10	0.09				
Al ^{VI}	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01				
Ti	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01				
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03				
Fe ³⁺	0.09	0.18	0.10	0.05	0.13	0.01	0.08	0.10	0.03	0.05				
Fe ²⁺	0.19	0.00	0.11	0.27	0.14	0.13	0.06	0.07	0.10	0.09				
Mn	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Mg	0.82	0.91	0.85	0.80	0.82	0.92	0.90	0.89	0.93	0.92				
Ca	0.85	0.96	0.92	0.81	0.87	0.87	0.92	0.92	0.86	0.88				
Na	0.02	0.013	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Mg [#]	0.81	1.00	0.88	0.75	0.85	0.88	0.94	0.93	0.90	0.91				
Wo	43.38	46.86	46.26	42.12	44.32	44.92	46.65	46.52	44.80	45.24				
En	41.71	44.52	42.90	41.21	41.74	47.71	45.87	44.81	48.31	47.43				
Fs	14.90	8.62	10.85	16.67	13.95	7.38	7.48	8.67	6.89	7.33				

注: 辉石的晶体化学式及阳离子占位以6个氧原子和4个阳离子为基准; Wo—硅灰石, En—顽火辉石, Fs—顽火辉石, Mg[#] = Mg/(Mg + Fe²⁺)。

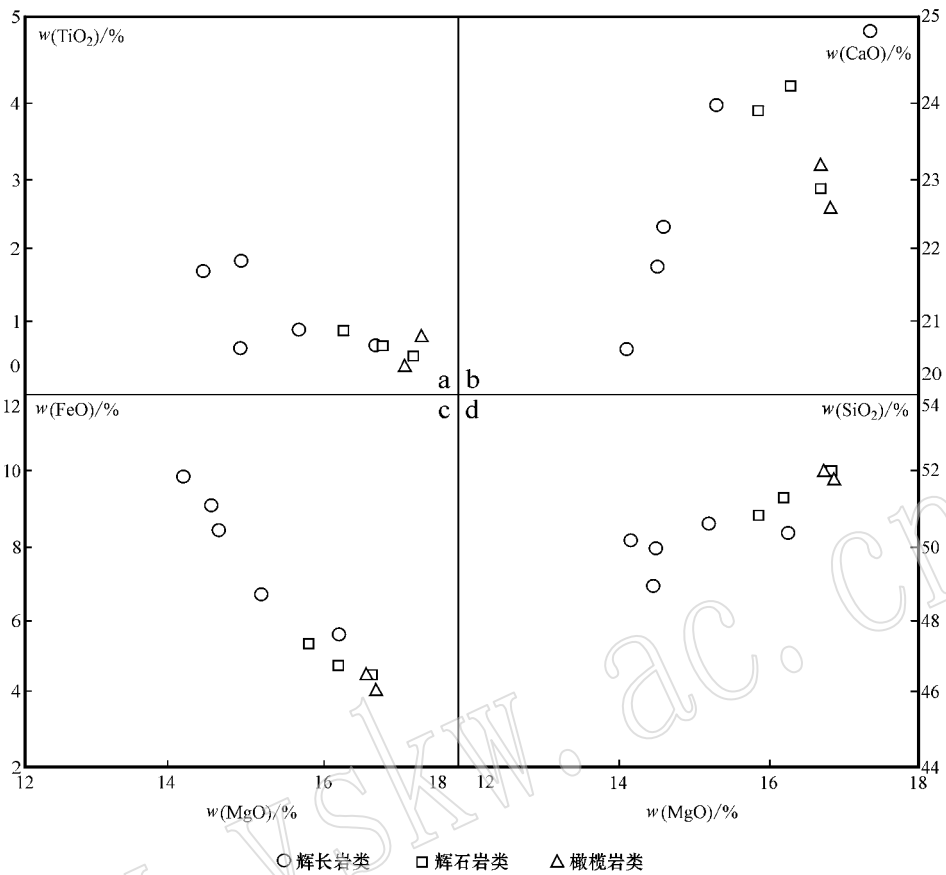


图 4 单斜辉石主要氧化物相关性图解

Fig. 4 Correlation between major oxides and MgO in clinopyroxenes

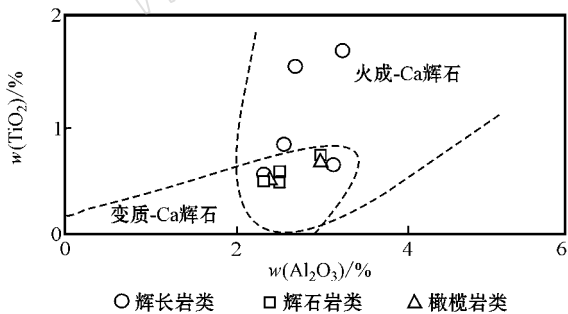


图 5 Ca-辉石的 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 变异图(据张儒瑗等, 1982)

Fig. 5 Diagram of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ series for Ca-pyroxenes (after Zhang Ruyuan *et al.*, 1982)

如前所述,单斜辉石 Na_2O 和 Al_2O_3 含量较低, 显示出拉斑玄武系列岩浆的演化趋势(Carmichael *et al.*, 1974), 正堆积辉石比补堆积辉石具有相对稍高的 TiO_2 含量, 表明有向碱性岩浆演化的趋势, 暗示地幔的部分熔融程度降低。在单斜辉石 AFM 图(图 8)上, 样品全部落入镁铁质和超镁铁质堆晶岩区, 显

示出堆晶层状岩系演化特征, 表明该岩块为非地幔岩块, 且辉石由富镁向富铁方向演化, 这也是拉斑玄武岩浆的演化趋势。

综上所述, 研究区基性-超基性岩的母岩浆应该是亚碱性系列, 可能随着熔融程度的降低和起源深度由深至浅变化而向碱性系列演化。

3.2 单斜辉石中元素类质同像置换关系

辉石中阳离子间的类质同像置换现象十分常见且广泛而复杂, 其主要受电价平衡控制, 其次受阳离子半径和温度控制(Campbell and Borley, 1974; Hode *et al.*, 1988)。辉石类质同像置换过程的分析, 对进一步理解辉石化学组分之间的关系和研究辉石的成因有着重要的意义。本区单斜辉石均不同程度发育铝代硅现象, 具有岩浆作用成因的普通辉石特点; 结合前述 $\text{Wo} - \text{En} - \text{Fs}$ 三角图(图 3b)和 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 5)的投点趋势, 本区单斜辉石具有伴随岩浆结晶成岩过程中的流体交代作用, 由普通辉石向透辉石转化的特点。

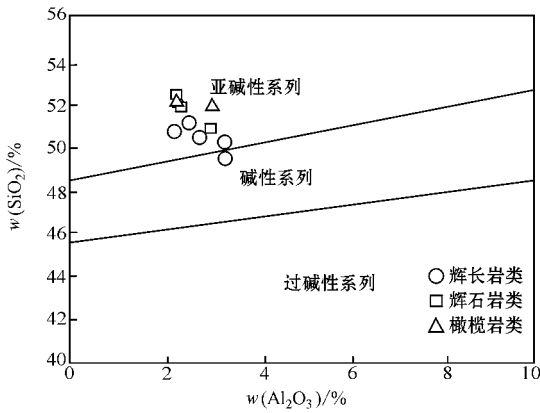


图 6 单斜辉石的 SiO₂ - Al₂O₃ 图(据邱家骧, 2001)

Fig. 6 SiO₂ - Al₂O₃ diagrams of clinopyroxenes (after Qiu Jiaxiang, 2001)

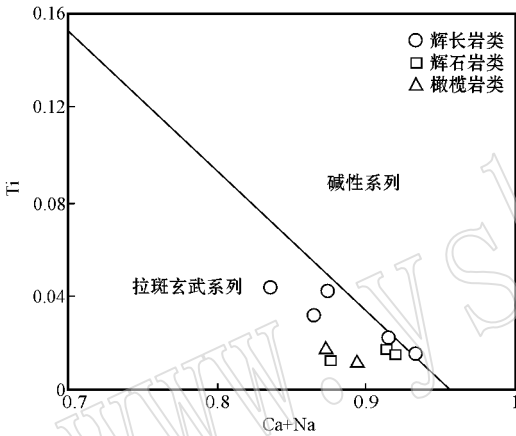
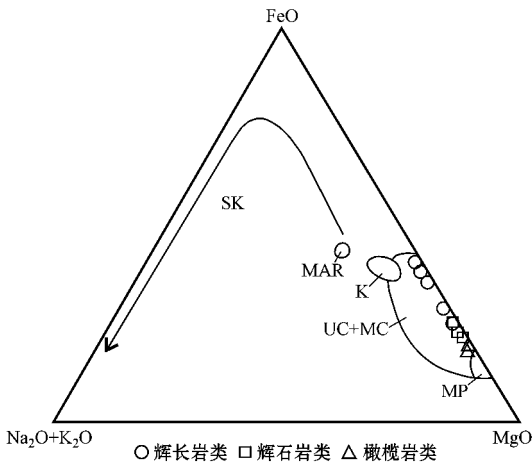


图 7 单斜辉石的 Ti - Ca + Na 图解(据 Leterrier 等, 1982)

Fig. 7 Ti - Ca + Na diagrams of clinopyroxenes (after Leterrier *et al.*, 1982)



MAR—大西洋中脊玄武岩平均值; MP—变质橄榄岩; UC—超镁铁堆晶岩; K—科马提岩; SK—思科加尔德侵入体演化趋势; MC—镁铁质堆晶岩

图 8 单斜辉石 AFM 图(据 Coleman, 1977)

Fig. 8 AFM diagrams of clinopyroxenes(after Coleman, 1977)

Al³⁺ 既可代替八面体中的 Mg 和 Fe, 亦可代替硅氧四面体中的 Si(王濮等, 1982), 在 Al - Si 相关图解(图 9a)上, Al 与 Si 呈较好的负相关, 指示主要由 Al^{IV} 进入四面体来充填其位置上 Si 的不足所引起的空缺, 同时, 需要 Al^{VI} 进入八面体来平衡由于 Al^{IV} 充填空缺而导致的电荷不平衡, 即通过 Mg + Si = Al^{VI} + Al^{IV} 的替代反应方式形成契尔马克分子 Ca(Mg, Al^{VI})(Al^{IV}, Si)₂O₆] 进入到八面体的 Al^{VI} 占有所有 Al 的 0~26%, 平均为 11%。由 Fe³⁺ - S(图 9b)和 Ti - S(图 9c)相关图解表明, Fe³⁺ 和 Ti 与 Si 均呈负相关, 说明 Al^{IV} 对 Si 的替代引起的电荷不平衡还需要 Fe³⁺ 和 Ti 进入八面体位置才能达到平衡。Fe³⁺ 比 Ti 优先进入到八面体, 以 Mg + Si = Fe³⁺ + Al^{IV} 的反应形式形成钙铁铝辉石, 即 Ca(Fe²⁺, Fe³⁺)(Al, Si)₂O₆], 而进入单斜辉石八面体中的 Ti 只有少部分用于补偿多余电荷, 大多数与平衡电荷无关, 而是以 Ca + Mg = Na + Mg_{0.5}Ti_{0.5} 的替代反应形式形成钛辉石, 即 Na(Mg_{0.5}Ti_{0.5}) [Si₂O₆]。在 Na - Si(图 9d)相关图解上, Na 与 Si 也呈负相关, 表明在单斜辉石的形成和演化过程中伴随着 Na 与 Fe³⁺ 发生 Ca + Mg = Na + Fe³⁺ 替代, 使矿物中含有霓辉石成分, 即 NaFe³⁺Si₂O₆; 或以 Ca + Mg = Na + Al³⁺ 替代, 使矿物中含硬玉成分, 即 NaAl³⁺Si₂O₆。辉石含 Na 并具有高 Ti 特征, 显示岩浆的形成环境可能为洋底或洋中脊(王濮等, 1982)。

在辉石中, Al 的配位与温压关系密切, 具有重要的标型意义(陈光远等, 1987), 岩浆结晶分异的演化过程, 伴随高温向低温变化, 是六次配位 Al 增加的过程; 由地幔到地壳, 伴随高压向低压变化, 是 Al 由六次配位向四次配位转化的过程。本区单斜辉石中 Al^{IV} 在 0.0157~0.1301 之间, 平均 0.0898; 而 Al^{VI} 在 0.0000~0.0345 之间, 平均 0.0123; Al^{IV}/Al^{VI} 比值较高(2.79~13.06, 平均 7.46), 表明该套岩石形成于相对高温低压环境(Shahrzad *et al.*, 2012)。

本区基性-超基性岩的氧逸度较低 [Fe²⁺/(Fe²⁺ + Fe³⁺)] 在 0.4~0.8 之间, 平均值为 0.5, 所以 Fe³⁺ 的主要作用是平衡电荷, 这与单斜辉石主量元素 SiO₂ - MgO 和 FeO - MgO 相关性图解(图 4)结论一致。因此主要是 Al^{VI} 和 Fe³⁺ 起到平衡电荷的作用, 而 Ti 大部分与 Na, Mg 结合形成 Na(Mg_{0.5}Ti_{0.5}) [Si₂O₆]。岩浆结晶成岩过程中, 单斜辉石的 Na 含量主要由 Fe³⁺、Al³⁺ 和 Ti⁴⁺ 共同决定。结合辉石的高 Al^{IV}/Al^{VI} 比值及含 Na 和高 Ti 特征, 该套基性-超

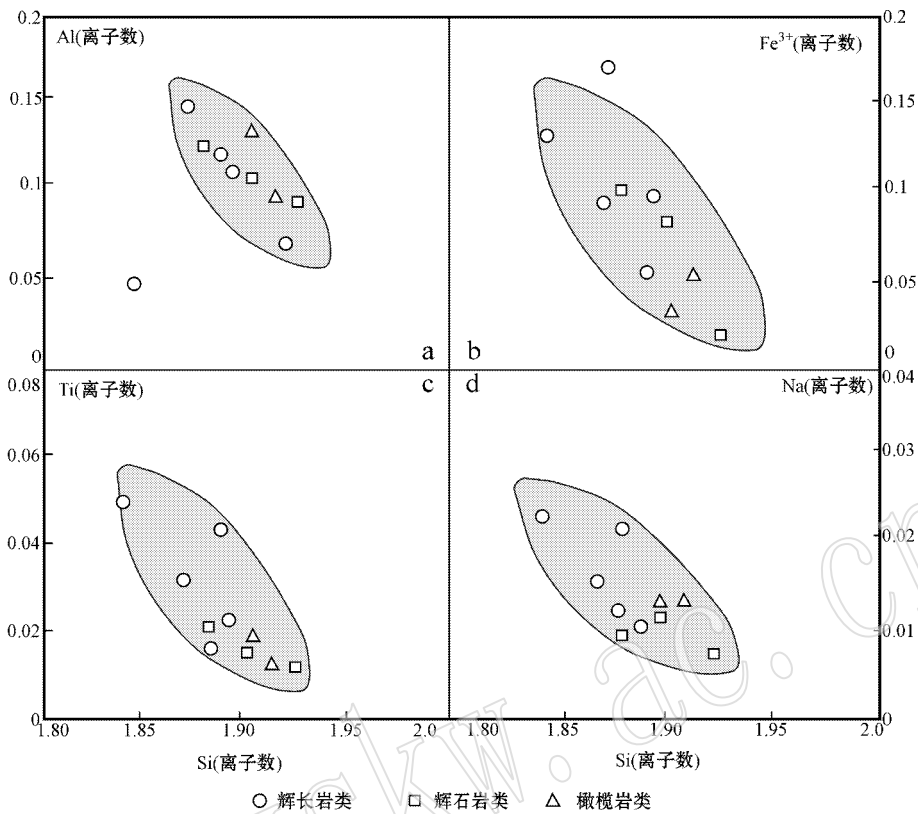


图 9 单斜辉石的 Al-Si (a), Fe³⁺-Si (b), Ti-Si (c) 和 Na-Si (d) 相关性图解

Fig. 9 Correlations of Al-Si (a), Fe³⁺-Si (b), Ti-Si (c) and Na-Si (d) in clinopyroxenes

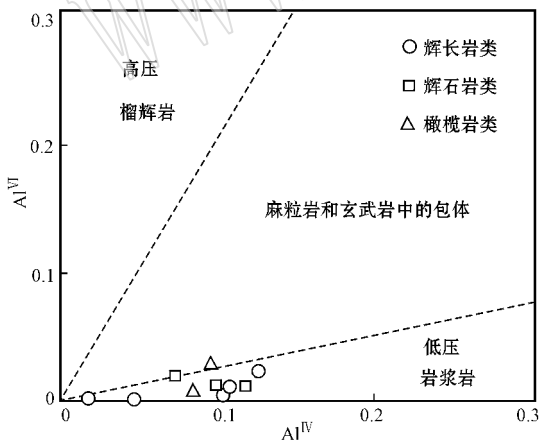


图 10 单斜辉石 Al^{VI}-Al^{IV} 图(据 Shahrzad 等, 2012)

Fig. 10 Al^{VI}-Al^{IV} diagrams of clinopyroxenes (after Shahrzad et al., 2012)

3.3 单斜辉石平衡温度与压力

依据 Putirka 等(2003)提出的辉石-熔体温计计算了该套岩石中单斜辉石的温度和压力, 计算公式如下:

$$p = -88.3 + 2.82 \times 10^{-3} T \ln [Jd^{cpx} / Na^{liq} Al^{liq} (Si^{liq})^2] + 2.19 \times 10^{-2} T - 25.1 \ln (Ca^{liq} Si^{liq}) + 7.03 Mg^{liq} + 12.4 \ln (Ca^{liq})$$

$$10^4 / T = 4.60 - 0.437 \ln (Jd^{cpx} Ca^{liq} Fm^{liq} / DiHd^{cpx} Na^{liq} Al^{liq}) - 0.654 \ln (Mg^{liq}) - 0.326 \ln (Na^{liq}) - 6.32 \times 10^{-3} p - 0.92 \ln (Si^{liq}) + 0.274 \ln (Jd^{cpx})$$

其中 Jd^{cpx} 是单斜辉石中的硬玉摩尔分数, DiHd^{cpx} 取单斜辉石的端员组分透辉石和钙铁辉石的摩尔分数之和, Fm^{liq} = MgO^{liq} + FeO^{liq}, Mg^{liq} = MgO^{liq} / (MgO^{liq} + FeO^{liq}), p 的单位为 0.1 GPa, T 的单位为 K。计算结果见表 2、表 3。

由表可知, 单斜辉石形成温度较高(平均 1084°C), 压力很低(平均 0.15 GPa), 与前文所述 Al^{IV}/Al^{VI} 比值得出的高温低压结论相对一致, 由主

基性杂岩形成于相对开放的环境, 可能为洋底或洋中脊。

表 2 单斜辉石-熔体平衡温度、压力计算式中各变量值

Table 2 Variables in the model of equilibrium temperatures and pressures of clinopyroxenes-melt

样品号	Jd ^{cpx}	DiHd ^{cpx}	Na ^{liq}	Al ^{liq}	Ca ^{liq}	Si ^{liq}	MgO ^{liq}	FeO ^{liq}	Fm ^{liq}	Mg ^{liq}
PM33004B2H2	0.015 2	0.787 9	0.015 2	0.148 3	0.067 2	0.464 1	0.203 1	0.194 0	0.397 1	0.511 4
PM33015B2H2	0.008 3	0.865 1	0.010 3	0.115 3	0.054 5	0.469 5	0.211 6	0.114 7	0.326 4	0.648 4
PM33015B1H1	0.011 8	0.754 3	0.023 4	0.123 5	0.058 8	0.470 2	0.198 1	0.265 4	0.463 5	0.427 5
PM33028B1H1	0.007 6	0.828 3	0.007 6	0.098 0	0.057 5	0.480 7	0.230 7	0.125 6	0.356 3	0.647 5
PM33024B2H2b1	0.012 3	0.862 8	0.012 5	0.111 7	0.057 1	0.471 9	0.224 6	0.061 6	0.286 1	0.784 8
PM33024B2H2b3	0.009 1	0.851 8	0.009 1	0.133 5	0.069 9	0.465 7	0.219 6	0.070 4	0.290 0	0.757 2
D1702B2H2	0.013 5	0.811 1	0.013 5	0.133 9	0.071 3	0.474 2	0.231 5	0.099 6	0.331 0	0.699 2
PM23012B1H1	0.013 8	0.824 3	0.013 8	0.100 0	0.057 3	0.476 6	0.230 1	0.088 8	0.318 9	0.721 5

表 3 单斜辉石-熔体平衡温度、压力

Table 3 Equilibrium temperatures and pressures between clinopyroxenes

样品号	岩石名称	温度/°C	压力/GPa	深度/km
PM33004B2H2	辉长岩	1 101	0.187	6.2
PM33015B2H2	辉长岩	1 065	0.197	6.5
PM33015B1H1	辉长岩	1 110	0.186	6.1
PM33028B1H1	辉石岩	1 051	0.200	6.6
PM33024B2H2b1	辉石岩	1 085	0.192	6.3
PM33024B2H2b3	辉石岩	1 074	0.194	6.4
D1702B2H2	橄榄岩	1 101	0.188	6.2
PM23012B1H1	橄榄岩	1 088	0.191	6.3

注 按照 1 GPa 相当于 33 km 深度计算。

量元素可知, CaO/Al₂O₃ 值较低(6.2~10.2, 平均 8.2), 反映其压力较低, 与计算结果的低压相吻合。

3.4 单斜辉石与构造环境

Pearce 和 Camr(1973)研究了已知的不同构造环境火山岩成分后提出, 由 8 个主要氧化物质量分数多元统计分析得到 F₁、F₂、F₃ 函数图, 以判别源岩的构造环境。在研究区单斜辉石 F₂-F₃ 图解(图 11)上, 样品全投入洋底(洋中脊)玄武岩的延伸区, 这可能与本区单斜辉石受到后期流体作用的影响有关, 所以单由 F₂-F₃ 图来判断构造环境并不理想, 而在 Ti₂O-MnO-Na₂O 图解(图 12)上, 虽有个别样品投入全部玄武岩区, 但其余都投入洋底玄武岩区。综合这两个判别图的结果则较为理想, 可以判断该岩块形成于洋底(洋中脊)环境。

综上所述, 该岩块中辉石的岩相学显示出堆晶结构特征, 钙碱性岩浆演化趋势也指示了该岩块属堆晶层状岩系, 非地幔岩块成因, 辉石含 Na 且具有高 TiO₂ 特征, 表明具有富 TiO₂ 流体, 也暗示了本套杂岩不属于地幔岩成因; CaO/Al₂O₃ 的低比值和类质同像离子 Al^{IV}/Al^{VI} 的高比值所指示的高温低压条

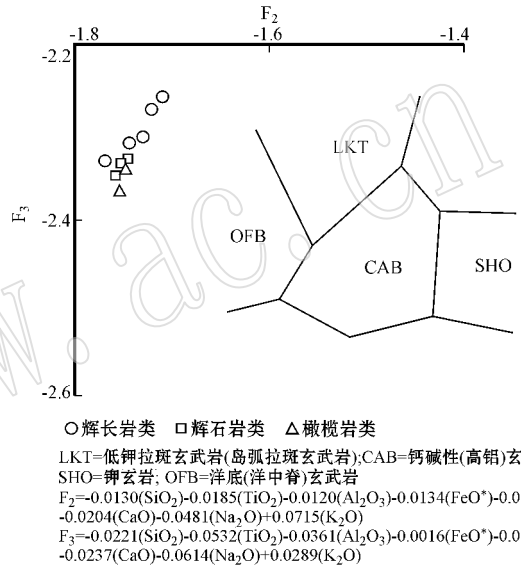


图 11 单斜辉石 F₂-F₃ 图(据 Nisbet 和 Pearce, 1977)

Fig. 11 F₂-F₃ diagrams of clinopyroxenes (after Nisbet and Pearce, 1977)

件, 和温压计算结果显示的单斜辉石形成温度较高(平均 1084°C), 压力很低(平均 0.15 GPa)基本吻合, 暗示了该岩块形成于相对开放的环境。结合构造环境判别图, 表明岩块的母岩浆形成于大洋中脊, 认为研究区基性-超基性岩块属于洋壳俯冲所形成的堆晶岩系。

4 结论

(1) 洛吉乡基性-超基性岩中的单斜辉石种属为岩浆作用的普通辉石, 在后期流体作用的影响下向透辉石系列过渡, 辉石有正堆积结晶和补堆积结晶两种类型, 反映了岩系具有堆晶层状演化的特征。

(2) 单斜辉石具有贫碱、高钙和低氧逸度的特征, 并且整体具低 Na₂O、Al₂O₃ 和高 TiO₂ 特点, 岩浆

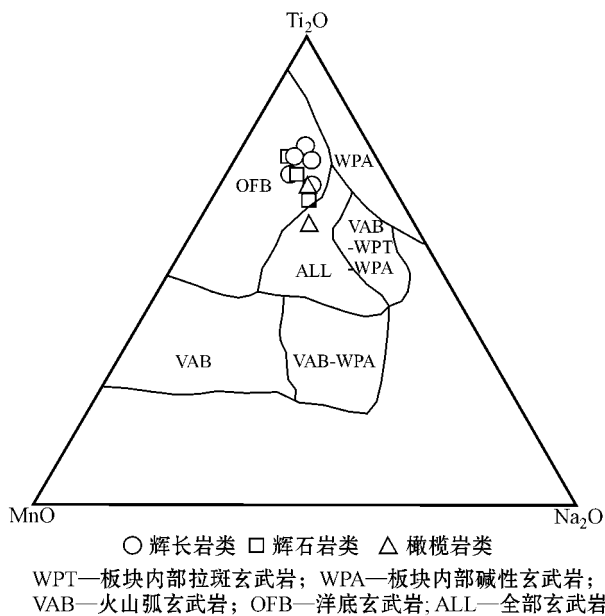


图 12 单斜辉石 $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Na}_2\text{O}$ 判别三角图

(据 Pearce 和 Cann, 1973)

Fig. 12 Ternary plot of clinopyroxenes expressed in terms of $\text{TiO}_2 - \text{MnO} - \text{Na}_2\text{O}$

(after Pearce and Cann, 1973)

演化显示出堆晶层状岩系特征,随着堆晶岩系由富镁向富铁演化, SiO_2 含量增高,其母岩浆为亚碱性系列,有向碱性系列岩浆演化的可能。

(3) 单斜辉石中离子间的类质同像替代显示出该套岩石形成于高温低压的条件,而非地幔岩成因。

(4) 温压计算结果与化学特征及离子取代特征所指示的高温低压条件相吻合,形成环境为洋中脊。综上所述,该岩块形成于洋中脊,为洋壳组成的基性-超基性堆晶岩系,结合区域地质背景,认为该堆晶岩块可能为甘孜-理塘延伸带的残余产物。

致谢 在野外工作中到项目组各位老师的指导和同学的帮助;室内研究得到成都理工大学显微镜实验室卢秋霞老师和电子探针室任科法老师的热情指导和帮助,在此表示衷心感谢!

References

Campbell I H and Borley G D. 1974. The geochemistry of pyroxenes from the lower layered series of the Jimberlana intrusion, Western Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 47: 281

~297.

- Carmichael I S E, Turner F J and Verhoogen J. 1974. Igneous Petrology [M]. McGraw-Hill, 34.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing Publishing House, 222~287 (in Chinese with English abstract).
- Coleman R C. 1977. Ophiolites [M]. Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hode V J, Halenius U, Whit Ehouse M J, et al. 1988. Compositional variations (major and trace elements) of clinopyroxene and Ti andradite from pyroxenite, jiolite and nepheline syenite, Alno Island, Sweder [J]. Lithos, 81: 55~77.
- Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al. 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang region, China [J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 110~119 (in Chinese with English abstract).
- Le Bas M J. 1962. The role of aluminium in igneous rocks [J]. American Journal of Science, 258: 548~554.
- Letterrier J, Maury R C, Thonon P, et al. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinity in rocks of paleo-volcanic series [J]. Earth and Planetary Science Letters, 59: 139~154.
- Li Wenchang, Yin Guanghou, Lu Yingxiang, et al. 2010. Delineation of Hongshan-Shudu ophiolite mélangé in Geza volcanic-magmatic and its significance, southwest "Jinsha-Lancang-Nu rivers" [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1661~1671 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. Chem. Geol., 120: 223~253.
- Mo Xuanxue. 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, et al. 1988. Pyroxene nomenclature [J]. Acta Mineral., 8(4): 289~305.
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 63(2): 149~160.
- Pan Guitang and Ding Jun. 2004. Qinghai-Tibet Plateau 1:5 Million Geological Diagram Instructions [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. Earth and Planetary Science Letters, 19: 290~300.
- Putirka K D, Mikaelian H, Ryerson F, et al. 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho [J]. American Mineralogist, 88: 1542~1554.

- Qiu Jiexiang. 2001. Petrology of Magmatic Rocks [M]. Beijing : Geological Publishing House. 132~153 (in Chinese).
- Shahrazad Sherafat , Fuat Yavuz , Iraj Noorbehesht , *et al.* 2012. Mineral chemistry of Plio-Quaternary subvolcanic rocks , southwest Yazd Province , Iran [J]. International Geology Review , 2 : 1~34.
- Sichuan Provincial Geology and Mineral Bureau. 1991. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Streck M J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry , 69 : 595~622.
- Wang Pu , Pan Zhaolu , Weng Lingbao , *et al.* 1982. System Mineralogy [M]. Beijing : Geological Publishing House , 266~301 (in Chinese).
- Yu Saiying and Yang Shipan. 2005. The petrochemistry and genesis of ultranasic rocks in sanjiangkou area , Yunnan [J]. Yunnan Geology , 24 (1) : 83~88 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruyuan and Cong Bolin. 1982. Mineral Thermometers and Pressure Gauges [M]. Beijing : Geological Publishing House , 45~68 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈光远,孙岱生,殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆:重庆出版社,222~287.
- 侯增谦,杨岳清,曲晓明,等. 2004. 三江地区义敦岛弧带造山带演化和成矿系统 [J]. 地质学报, 78 (1) : 110~119.
- 李文昌,尹光侯,卢映祥,等. 2010. 西南三江"格咱"火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义 [J]. 岩石学报, 26 (6) : 1661~1671.
- 莫宣学. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿 [M]. 北京:地质出版社.
- 潘桂棠,丁俊. 2004. 青藏高原150万地质图说明书 [M]. 北京:地质出版社.
- 邱家骥. 2001. 岩浆岩岩石学 [M]. 北京:地质出版社,132~153.
- 四川省地矿局. 1991. 四川省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社.
- 王濮,潘兆掄,翁玲宝,等. 1982. 系统矿物学(中册) [M]. 北京:地质出版社,266~301.
- 俞赛赢,杨仕潘. 2005. 云南三江口地区超基性岩岩石化学及成因 [J]. 云南地质, 24 (1) : 83~88.
- 张儒瓌,从柏林. 1982. 矿物温度计与压力计 [M]. 北京:地质出版社,45~68.