

云南香格里拉县洛吉蛇绿混杂岩中 单斜辉石的矿物学特征

邹金沙 刘显凡 邓江红 董毅 黄玉蓬

(成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:洛吉蛇绿混杂岩分布于云南香格里拉县,由镁铁质—超镁铁质堆晶岩块、辉长—辉绿岩墙群、玄武岩及条带状硅质岩等以构造混杂方式产出。岩相学研究发现其中堆晶岩块与玄武岩中单斜辉石具有相似性,矿物化学成分研究表明洛吉蛇绿混杂岩单斜辉石种属为富镁贫铁和高钙的普通辉石,其母岩浆属亚碱性系列的拉斑玄武岩浆,辉石晶体中阳离子取代特征显示其形成于高温低压的条件,辉石形成温度为 986~1118 °C,压力为 0.18~0.22 GPa,结合矿物成分和演化特征,认为该套混杂岩为甘孜—理塘蛇绿岩带残余产物。

关键词:洛吉蛇绿混杂岩;单斜辉石;云南香格里拉;甘孜—理塘带

中图分类号:P588.12⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)06-1806-12

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蛇绿混杂岩^[1]。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,一直以来受到广泛关注,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^[2-4,6],也有学者认为属于西延带^[5];目前仅有少数学者对其中的超基性岩做过地球化学研究^[7]认为其形成于裂隙槽环境。总体来说该区的研究程度较低,前人对该混杂岩的研究大多为概括性总结,对其物质组成单元是否属于蛇绿混杂岩、是否为甘孜—理塘延伸带的残余产物等问题均未作出答复,这一系列问题的存在制约了对该区甘孜—理塘残存带的延伸及展布问题的进一步研究。

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^[8],同时其化学成分通常与构造环境密切相关^[9]。本文以洛吉蛇绿混杂岩中的基性超基性岩为研究对象,在野外调研和室内岩

相学研究的基础上,重点通过分析单斜辉石的矿物学特征,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,并对岩石和矿物的形成环境和时限提供约束,进而为甘孜—理塘延伸带在本区的存在提供证据。

1 洛吉蛇绿混杂岩地质与岩相学特征

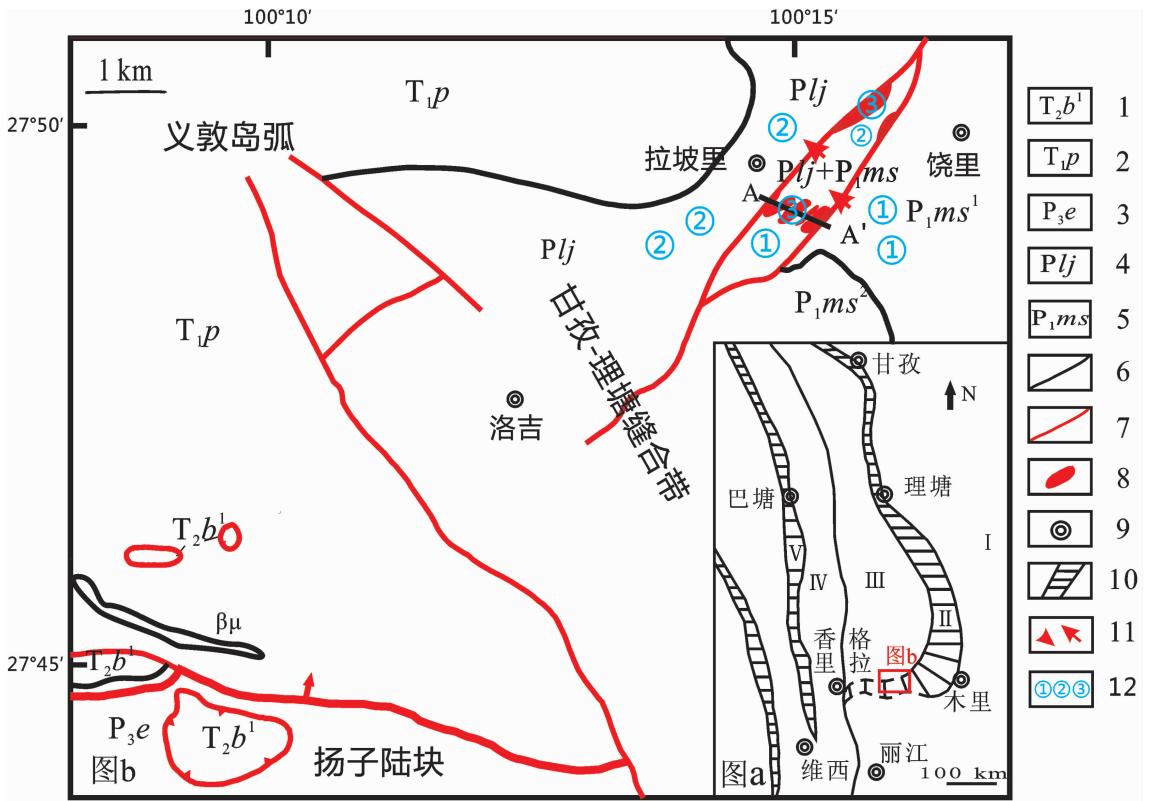
1.1 地质特征

洛吉蛇绿混杂岩分布于小金河—三江口—虎跳峡断裂以北和拉坡里—拉巴断裂之间夹持的洛吉—拉巴断片之内,该断片位于义敦岛弧南缘,西邻中咱地块及格咱深大断裂,东延为甘孜—理塘结合带,区域上出露地层为下二叠统木胜土组(P_1ms)及中—上二叠统洛吉组(P_2l)(图 1)。木胜土组以灰色泥板岩及石英杂砂岩为主,夹玄武质角砾岩屑凝灰岩、凝灰角砾岩、玄武岩、生物碎屑灰岩、硅质条带灰岩及薄层状硅质岩;洛吉组以致密块状玄武岩、枕状玄武岩、玄武质集块岩—火山角砾岩为主,夹泥岩、凝灰岩、

收稿日期:2013-01-17;改回日期:2013-10-17

基金项目:中国地质调查局地调项目(1212011120587)、国家公益性行业科研专项项目—系统矿物学研究(201011005-5)和成都理工大学矿物学岩石学矿床学国家重点(培育)学科建设项目(SZD0407)联合资助。

作者简介:邹金沙,女,1987年生,硕士生,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。



图c 云南省香格里拉县洛吉蛇绿混杂岩剖面A—A'

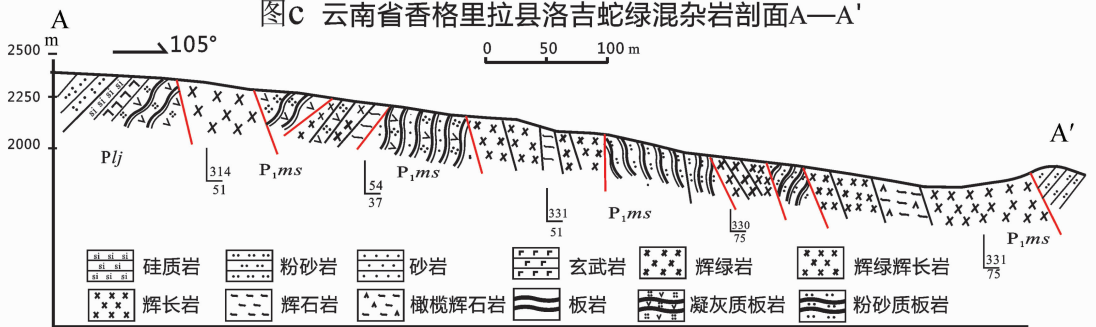


图 1 研究区大地构造及蛇绿混杂岩剖面特征示意图 (据文献[6])

a—研究区大地构造位置图; b—研究区地质简图; c—云南香格里拉县洛吉蛇绿混杂岩 A—A' 剖面图; I—扬子陆块; II—甘孜—理塘缝合带; III—义敦岛弧带; IV—中咱地块; V—金沙江结合带
 1—中三叠统北衙组; 2—下三叠统坪子组; 3—上二叠统峨眉山玄武岩组; 4—中—上二叠统洛吉组; 5—下二叠统木胜土组; 6—地质界线; 7—断层; 8—基性—超基性堆晶岩块; 9—地名; 10—构造结合带; 11—断层方向; 12—采样位置
 (①—木胜土组玄武岩; ②—洛吉组玄武岩; ③—堆晶岩块)

Fig. 1 Tectonic Map of the study area (after Reference [6])

a—Geotectonic map of the study area; b—Tectonic map of the study area; c—A—A' profile of Luoji ophiolitic mélange in Shangri-La County; Yunnan Province; I—Yangtze block; II—Ganzi—Litang suture belt; III—Yidun island arc belt; IV—Zhongza block; V—Jingshajiang suture belt

1—Middle Triassic Beiya Formation; 2—Lower Triassic Pingzi Formation; 3—Upper Permian Emeishan Formation; 4—Middle—Upper Permian Luoji Formation; 5—Lower Permian Mushengtuo Formation; 6—Geological boundary; 7—Fault; 8—Ultrabasic—basic cumulate rocks; 9—Place name; 10—Tectonic combined zone; 11—Fault direction; 12—Sampling location.
 (①—Basalts from P_{1ms}; ②—Basalts from P_{lj}; ③—Cumulate rocks)

硅质岩、硅质条纹状灰岩,见大量辉长-辉绿岩墙。

洛吉蛇绿混杂岩在区内呈北东渐转为近东西向展布,其内部岩性复杂、断裂发育、变形强烈,因后期构造叠加作用的肢解破坏,蛇绿混杂岩层序不全,缺失地幔橄榄岩,未见完整层序的蛇绿岩剖面,但蛇绿岩的其他各单元岩石均有出露,呈现整体无序、局部有限有序的混杂特征。

1.2 物质组成

洛吉蛇绿混杂岩主要由两部分组成:混杂“基质”为木胜土组(P_{1ms})和洛吉组(P_{1j})基性火山岩建造及相应的沉积碎屑-碳酸盐岩建造。蛇绿岩质部分仅见堆晶岩块,对应为典型蛇绿岩套的中一下部层序,在本区由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩等组成。不同类型岩石之间的接触关系均为韧性剪切带,本区断层片从北到南依次叠置。这些岩块产出与木胜土组与洛吉组地层混杂的断片中,呈透镜状或构造夹片状与地层呈断裂接触关系;上部层序由枕状熔岩及穿插于其中的基性岩墙杂岩群组成,岩墙岩性为辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩。

洛吉蛇绿混杂岩虽遭受构造肢解而残缺不全,未见变质橄榄岩单元^[10-13],但从本区多处蛇绿岩剖面的产出特征和岩石组合分析,大致可分为镁铁质-超镁铁质堆晶岩块、辉长-辉绿岩墙群、玄武岩及条带状硅质岩等组成单元,它们与灰岩块一起构成了洛吉蛇绿混杂岩,单元间多被断层所隔。

1.3 岩相学特征

本次研究样品为堆晶岩块及玄武岩(即木胜土组、洛吉组玄武岩),采样位置如图所示(图1)。

木胜土组中的玄武岩主要为暗绿色块状,具斑状结构,发育杏仁构造。斑晶含量约27%,主要为辉石和斜长石,其中辉石占10%,斜长石17%左右,辉石斑晶直径3~5 mm,为自形一半自形粒状或柱状(图2-a),偶见简单双晶,多见裂理,蚀变不明显,斜长石斑晶呈自形板状或长条状,蚀变严重,普遍发育钠长石双晶或聚片双晶;基质为间粒结构,主要矿物是斜长石和辉石等,斜长石呈半自形长板状,不规则分布,约占基质的60%,辉石呈细小粒状,约占基质的30%,基质中还可见少部分钛铁氧化物,有碳酸盐化、绿泥石化、硅化等热液蚀变现象。

洛吉组中的玄武岩为绿色致密块状、枕状构造,具斑状结构,含杏仁。斑晶主要为辉石和斜长石,含量约30%,辉石斑晶粒径 ≤ 0.8 mm,多呈自形一半

自形的六边形、八边形,发育简单双晶和柱面双晶(图2-b),斜长石斑晶呈半自形板状或长条状,有自碎现象;基质具间隐结构、间粒结构、间粒间片结构,矿物为微晶斜长石,少量他形细粒辉石。

堆晶岩主要为辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、辉长岩。辉石橄榄岩新鲜面为绿色,橄榄石为主,次为辉石,岩石整体蚀变较强,橄榄石已被强烈蛇纹石化,仅保留假象,辉石为自形一半自形的小颗粒,粒径0.1 mm左右,这些小颗粒辉石形成于比橄榄石更晚的结晶期次;橄榄辉石岩新鲜面为绿色-墨绿色,辉石为主,橄榄石为次,辉石晶体大小不一(图2-c),自形的大颗粒辉石(正堆积辉石)之间充填半自形一粒状的小颗粒辉石(补堆积辉石),显示出明显的堆晶结构特征,多数晶形完整,可见六边形、八边形断面,偶见简单双晶;辉长岩新鲜面为深绿色,辉石为主,次为基性长石,辉石大多为自形一半自形柱状(图2-d),暗色矿物表现出先结晶的特点,长石为半自形板柱状,以填间状补堆积结晶为主。

样品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。玄武岩中的单斜辉石斑晶大多晶形完整,表面干净,堆晶岩中的单斜辉石蚀变相对较强,部分挤压破碎,暗示堆晶岩块成岩或期后可能受到构造应力作用;两种岩石中的单斜辉石表现出类似的光性特征,它们可能经历了类似的结晶过程。

2 单斜辉石的成分特征

测试样品选取自木胜土组玄武岩中的斑晶单斜辉石和基质单斜辉石(以下简称木胜土MST-斑晶、木胜土MST-基质)、洛吉组玄武岩中的斑晶单斜辉石和基质单斜辉石(以下简称为洛吉LJ-斑晶、洛吉LJ-基质)和堆晶岩中的单斜辉石(以下简称CR-堆晶)。单斜辉石电子探针分析在成都理工大学构造与油气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 $10 \mu\text{m}$,测试误差 $< 1.0\%$ 。

单斜辉石主量元素分析结果和以6个氧原子为基准计算的阳离子数见表1。

根据Morimoto等(1988)提出的辉石分类命名方案^[14],单斜辉石均属Ca-Mg-Fe辉石族(图3-a),其中木胜土玄武岩中单斜辉石的端元组成为Wo 39.54~44.70,En 37.15~46.99,Fs 8.31~22.13,洛吉玄武岩中单斜辉石的端元组成为Wo 35.15~44.66,En

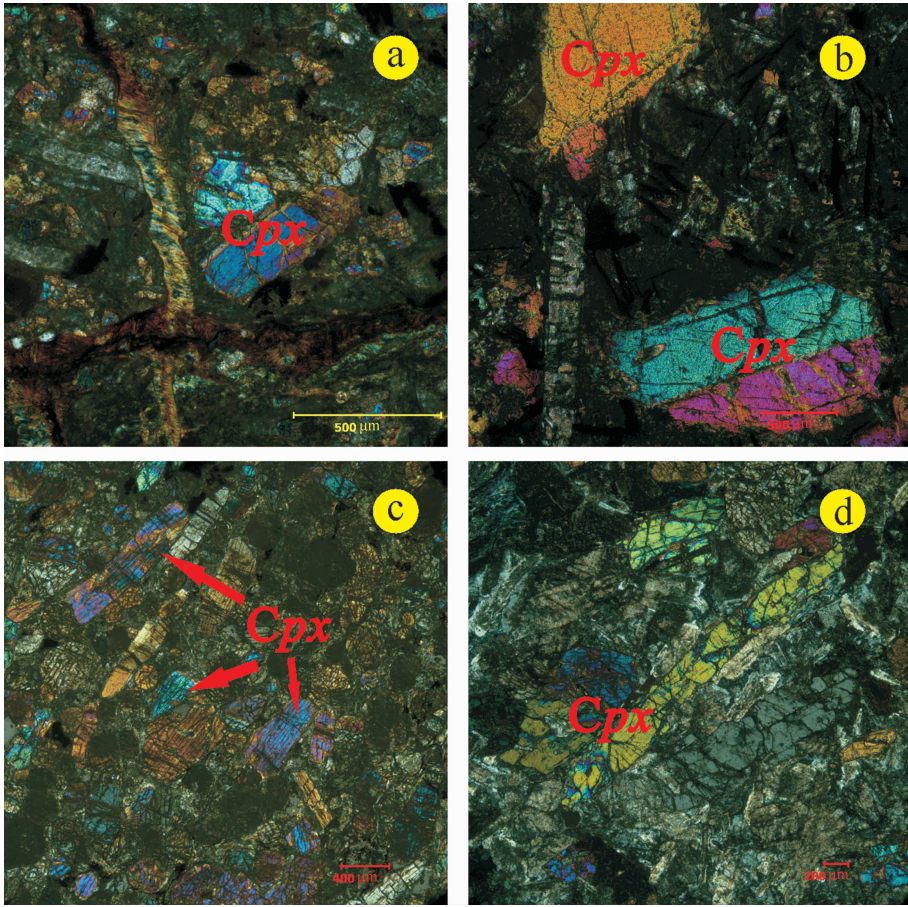


图 2 单斜辉石显微特征(正交偏光)

a—木胜土组玄武岩中的单斜辉石;b—洛吉组玄武岩中的单斜辉石柱面双晶;c—橄榄辉石岩中的单斜辉石;d—辉长岩中的填间状单斜辉石补堆积晶;Cpx—单斜辉石

Fig. 2 Characteristics of clinopyroxene phenocrysts

a—Pyroxene in basalts from P1ms; b—Pyroxene twinning in basalts from P1j; c—Pyroxene in pyroxene peridotite; d—Accumulate pyroxene in orthocumulate; Cpx—pyroxene

34.05~51.34, Fs 8.09~23.87, 堆晶岩中单斜辉石的端元组成为 Wo 44.99~46.75, En 44.58~48.71, Fs 6.68~8.68, 在 Wo—En—Fs 三角图上(图 3-b), 堆晶落入透辉石与普通辉石交界处, 其余样品全投入普通辉石区。

2.1 木胜土组玄武岩中的斑晶单斜辉石和基质单斜辉石

木胜土组玄武岩中的单斜辉石的 SiO₂ 含量为 48.32%~51.68%, 平均 49.98%, 整体表现为高 FeO (5.05%~13.75%, 平均 8.82%), 高 CaO (18.94%~21.60%, 平均 20.35%), 中 Al₂O₃ (2.18%~4.15%, 平均 3.23%), 低 TiO₂ (0.52%~1.79%, 平均 0.94%) 和低 Na₂O (0.15%~0.32%, 平均 0.23%) 特征; 其 Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Fe³⁺) 值较高, 在 0.62~1 之间, 平均 0.76, 指示

其低氧逸度的特点, Ca / (Ca + Mg + Fe) (Fe = Mn + Fe²⁺ + Fe³⁺) 值在 0.40~0.45 之间, 平均 0.42, 指示其高钙特征。木胜土斑晶与基质具有大致相当的 SiO₂、Al₂O₃ 含量 (斑晶 SiO₂ = 50.19%, Al₂O₃ = 3.22%; 基质 SiO₂ = 49.51%, Al₂O₃ = 3.27%), 前者与后者相比更富镁贫铁 (斑晶的铁辉石 Fs = 13.68%, Mg[#] = 0.81; 基质 Fs = 16.27%, Mg[#] = 0.78), 且 Na₂O + K₂O (碱度 Alk) 稍低 (斑晶 = 0.23%, 基质 = 0.24%)。

2.2 洛吉组玄武岩中的斑晶单斜辉石和基质单斜辉石

洛吉组玄武岩中的单斜辉石 SiO₂ 含量为 44.71%~52.42%, 平均 49.26%, 整体表现为高 FeO (5.31%~13.31%, 平均 9.51%), 高 CaO (17.02%~21.15%, 平均 19.82%), 中 Al₂O₃ (2.14%~6.07%, 平均 3.87%), 中 TiO₂ (0.38%~3.96%, 平均 1.62%) 和低

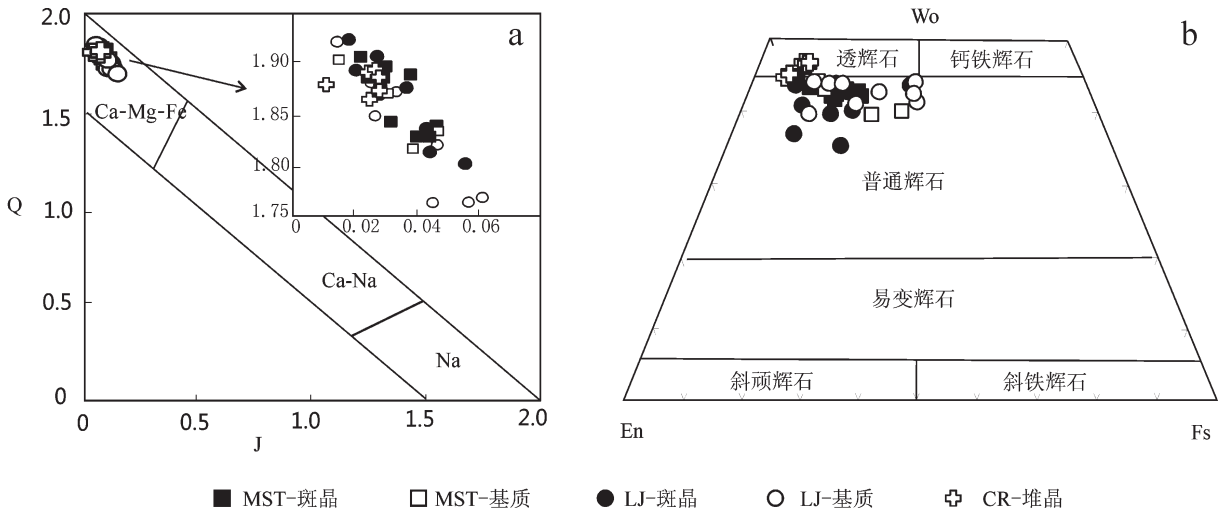


图 3 单斜辉石系列 Q—J 图解 a(Q=Ca+Mg+Fe²⁺, J=2Na)和单斜辉石分类图解 b(底图据文献[14])
 Fig. 3 Diagram of Q—J series for clinopyroxenes (a) and classification diagram for clinopyroxenes (b) (after reference [14])

Na₂O (0.12%~0.49%, 平均 0.26%) 特征; 其 Fe²⁺/(Fe²⁺+ Fe³⁺)值在 0.68~0.93, 平均 0.80, 指示其氧逸度较低, Ca/(Ca+Mg+Fe) (Fe=Mn+Fe²⁺+ Fe³⁺) 值在 0.35~0.44, 平均 0.42, 钙含量较高。洛吉斑晶比基质具有稍高的 SiO₂ 和较低的 Al₂O₃ 含量 (斑晶 SiO₂=50.21%, Al₂O₃=3.34%; 基质 SiO₂=48.31%, Al₂O₃=4.40%), 前者比后者相对富镁贫铁 (斑晶的铁辉石 Fs=14.66%, Mg[#]=0.82; 基质 Fs=17.17%, Mg[#]=0.78), Alk 稍低 (斑晶=0.24%, 基质=0.29%)。

2.3 堆晶岩中的单斜辉石

堆晶岩中的单斜辉石 SiO₂ 含量为 50.18%~52.18%, 平均 51.41%, 整体表现为高 FeO (4.09%~5.69%, 平均 5.02%), 高 CaO (21.86%~23.92%, 平均 23.03%), 低 Al₂O₃ (2.33%~3.21%, 平均 2.78%), 低 TiO₂ (0.57%~0.73%, 平均 0.63%) 和低 Na₂O (0.07%~0.20%, 平均 0.17%) 特征; 其 Alk=0.11%, Fs=7.91%, Mg[#]=0.94, 富镁贫铁, Fe²⁺/(Fe²⁺+Fe³⁺) 值在 0.35~0.84, 平均 0.44, 指示氧逸度较高, Ca/(Ca+Mg+Fe) (Fe=Mn+Fe²⁺+Fe³⁺) 值在 0.45~0.47, 平均 0.46, 暗示其具有高钙特征。

主要氧化物相关图(图 4)上, MgO 与 SiO₂ 呈较好的正相关, 与 Al₂O₃、FeO 和 TiO₂ 呈较好的负相关性, 其中堆晶以相对低 Al₂O₃、FeO、TiO₂ 和高 SiO₂ 与木胜土和洛吉单斜辉石相区别, 而木胜土和洛吉斑晶较基质单斜辉石具相对高的 SiO₂ 和较低的 Al₂O₃ 含量, 并随着堆晶→木胜土和洛吉斑晶→木胜

土和洛吉基质, SiO₂ 的含量略微降低, Al₂O₃ 含量略微升高, TiO₂ 和 FeO 的含量明显增高; MgO 与其他氧化物, 如 CaO 相关性不明显。

综上所述, 堆晶岩中的单斜辉石与玄武岩中的单斜辉石相比具有较高的 SiO₂、CaO 含量和较低的 Al₂O₃、FeO、TiO₂、Na₂O 含量, 且前者氧逸度明显较高。研究区单斜辉石整体具富镁贫铁和高钙的特征, 随着堆晶→木胜土和洛吉斑晶→木胜土和洛吉基质, Alk 持续增高, 富镁贫铁的现象减弱; 主要氧化物呈线性关系变化, 反映了这些辉石可能是同源岩浆经结晶分异作用演化的产物^[15]; 钙含量减少, 铁、钛明显增高, 可能反映了岩浆演化向着富铁、富钛的方向发展。

3 讨论

3.1 单斜辉石成分演化岩浆系列

在单斜辉石的 TiO₂-Al₂O₃ 图解上(图 5), 堆晶和大多数斑晶落入火成-Ca 辉石和变质-Ca 辉石相交区域, 基质和少部分斑晶落入火成-Ca 辉石区域, 暗示该堆晶岩在结晶成岩过程中可能伴随流体交代作用或是降温所致, 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 Wo-En-Fs 三角图(图 3-b)和 TiO₂-Al₂O₃ 图解(图 5)的投点趋势, 堆晶具有伴随岩浆结晶成岩过程中的热液交代作用, 由普通辉石向透辉石转变的特点。火成岩的 Si 和 Al 具有不相容性质,

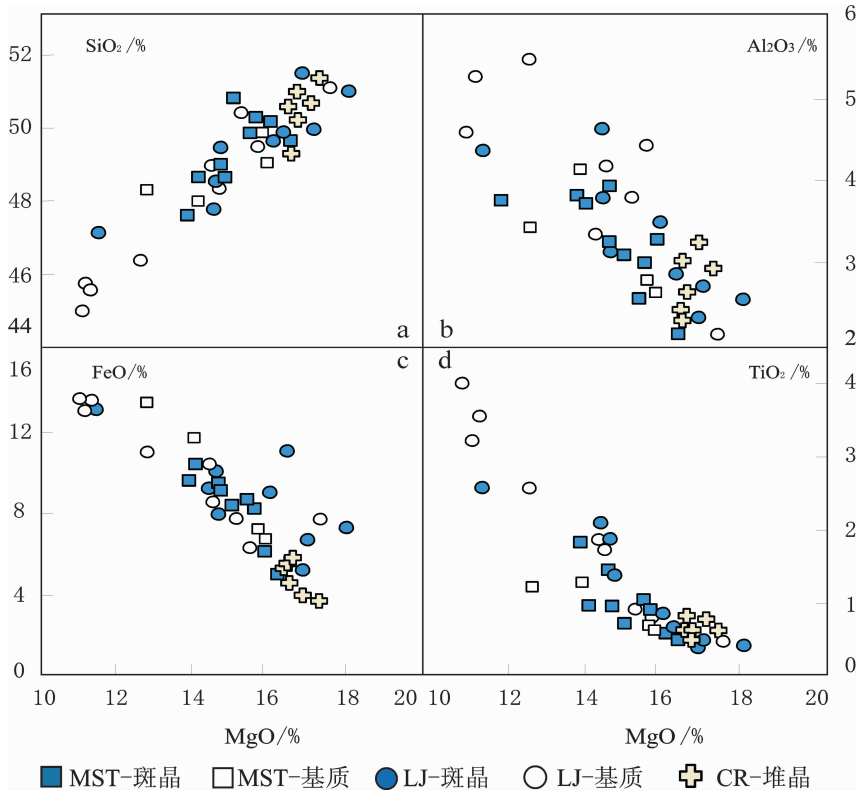


图 4 单斜辉石主要氧化物相关性图解

Fig. 4 Correlation between major oxides and MgO of clinopyroxenes

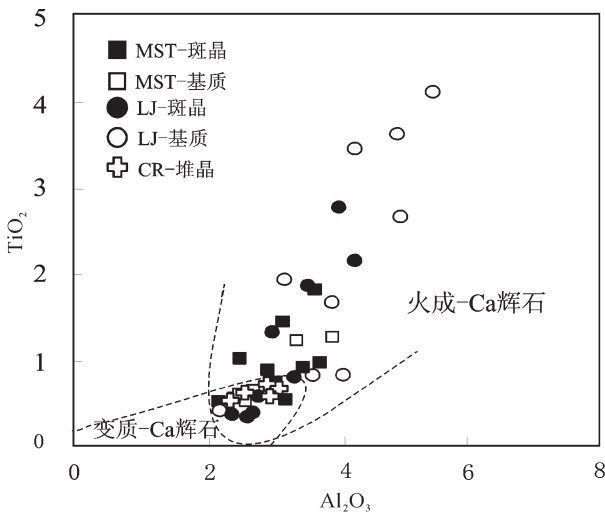


图 5 Ca-辉石的 TiO₂-Al₂O₃ 变异图(底图据文献[16])

Fig. 5 TiO₂-Al₂O₃ diagram for clinopyroxenes(after reference[16])

故其组合能反映其母岩浆性质^[17-19,21],在单斜辉石的 SiO₂-Al₂O₃ 图解中(图 6-a),除了少数洛吉基质落入碱性岩区,木胜土和洛吉单斜辉石均投于亚碱

性—碱性岩区,堆晶全落入亚碱性岩区,暗示了堆晶岩的母岩浆为亚碱性系列,木胜土和洛吉玄武岩的母岩浆存在类似的连续演化趋势,显示其可能具有亲缘关系或者同源;在单斜辉石的 Ti-(Ca+ Na)图解上(图 6-b),除了极个别样品为碱性系列,其余均属于拉斑玄武系列。两类判别图得出相对一致的结论,即这套混杂岩中的基性超基性岩起源于亚碱性—碱性系列的拉斑玄武岩浆。

如前所述,研究区单斜辉石具有较低的 TiO₂、Al₂O₃ 和 Na₂O,这是拉斑玄武系列岩浆的演化趋势^[21-22];邱家骧等对火山岩中单斜辉石研究发现,在碱性系列岩石中,单斜辉石向贫 En 富 Wo 方向演化,而在亚碱性系列中,向贫 Wo 富 Fs 方向演化^[23],本区单斜辉石演化趋势类似于亚碱性系列,且成分由富钙向贫钙演化,也说明了其母岩浆为亚碱性系列,而非碱性系列;随着堆晶→木胜土和洛吉斑晶→木胜土和洛吉基质,碱度持续增高,TiO₂ 和 Al₂O₃ 依次升高,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,或者是随着岩浆的分异导致其

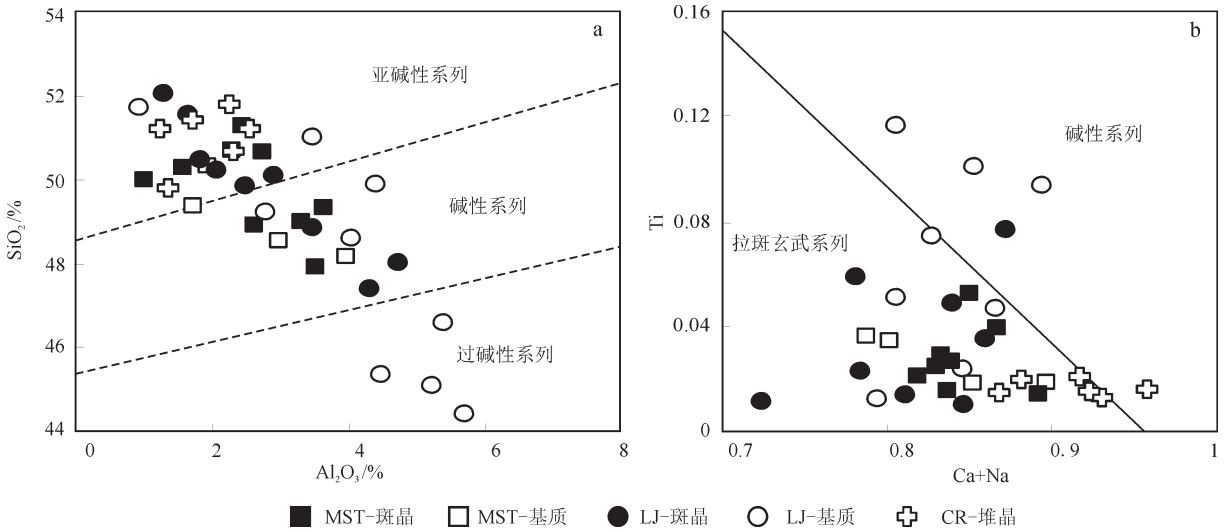


图 6 单斜辉石的 SiO₂-Al₂O₃(a)和 Ti-Ca+Na(b)图解(底图据文献[20])

Fig. 6 SiO₂-Al₂O₃ (a) and Ti-Ca+Na(b) diagrams for clinopyroxenes(after reference[20])

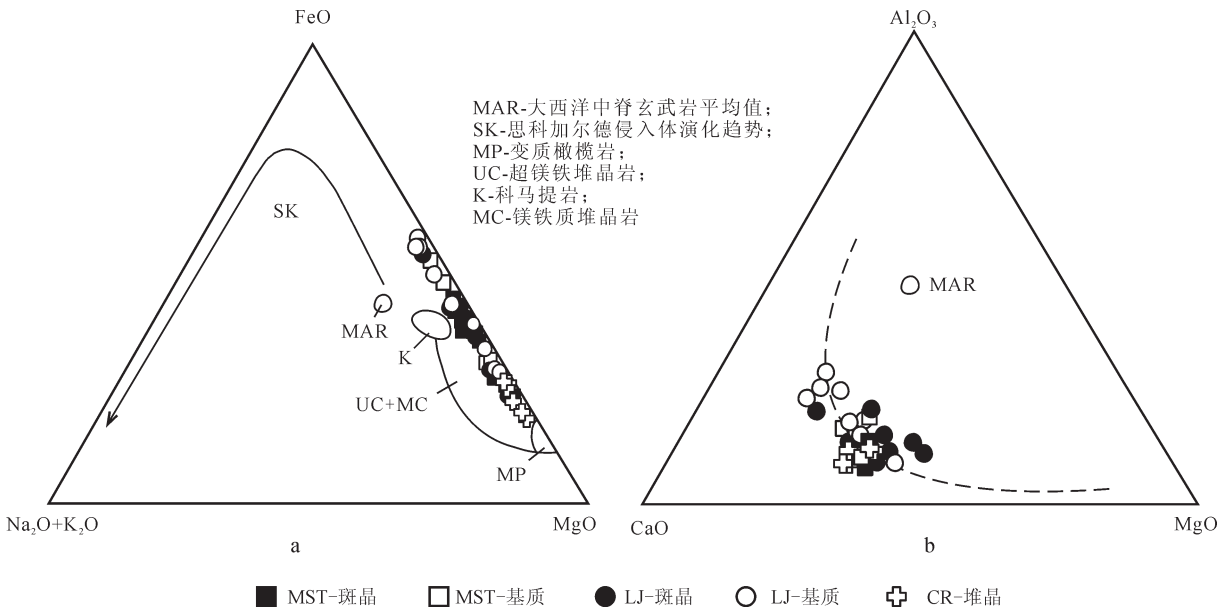


图 7 单斜辉石 AFM(a)和 ACM(b)图(底图据文献[10])

Fig. 7 AFM(a) and ACM(b) diagrams for clinopyroxenes(after reference[10])

向富硅富碱的方向演化。

在单斜辉石 AFM 图上(图 7-a),堆晶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;堆晶→木胜土和洛吉斑晶→木胜土和洛吉基质单斜辉石由富镁向富铁方向演化,这是一般堆积岩的演化趋势,这也是拉斑玄武岩浆的演化趋势,即岩浆首先结晶出相对富镁的硅酸盐矿物,导致残留岩浆相对富铁和钛^[24];该套混杂岩中基性

超基性岩的单斜辉石的演化趋势在 ACM 图上表现为总体向 Al₂O₃ 端进行(图 7-b),与一般蛇绿岩演化趋势一致,与标准洋中脊玄武岩(MAR)比较,具有富钙低铝的演化过程,暗示了该套蛇绿混杂岩是有限洋盆的产物,且没有点落于 MgO 端,即变质橄榄岩区,说明无地幔岩块,与 AFM 图结论一致。

综上所述,混杂的基性超基性岩块的母岩浆应该为亚碱性系列的拉斑玄武岩浆,随着熔融程度的

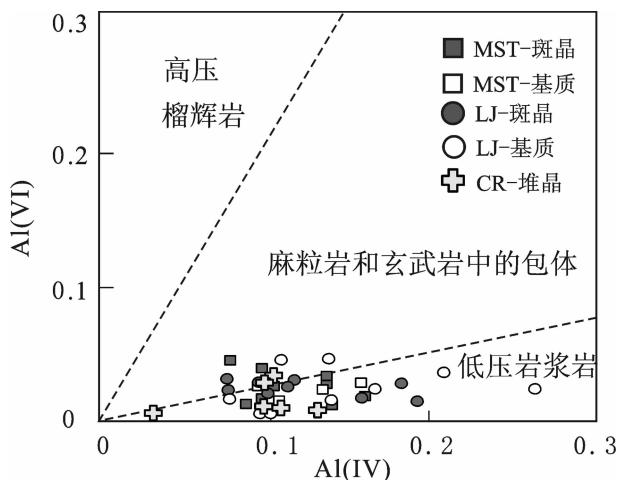
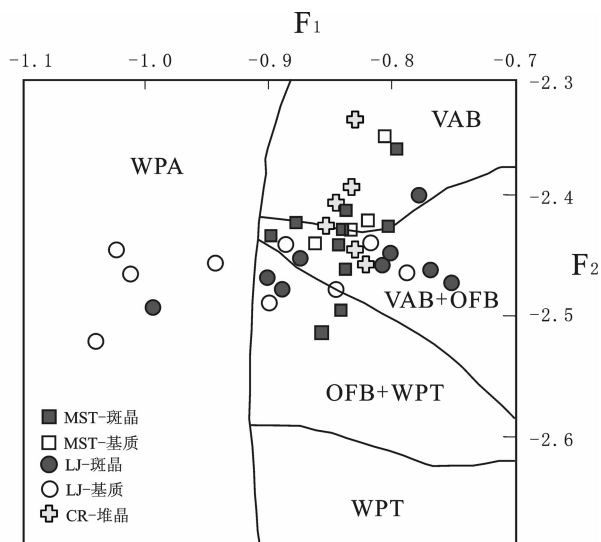


图 8 单斜辉石 Al(IV)-Al(VI)图(底图据文献[27])

Fig. 10 Al(IV)-Al(VI) diagrams of clinopyroxenes(after reference [27])



WPT-板内拉斑玄武岩; WPA-板内碱性玄武岩; VAB-火山弧玄武岩; OFB-洋底玄武岩

图 9 单斜辉石 F1-F2 图(底图据文献[32])

Fig. 9 F1-F2 diagrams for clinopyroxenes(after reference [32])

表 2 单斜辉石-熔体平衡温度、压力及对应深度
Table 2 Equilibrium temperatures and pressures between clinopyroxenes

岩性	样号	温度/℃	压力/GPa	深度/km
木胜土组玄武岩	MST-2	1045.65	0.20	6.61
	MST-5	1020.90	0.21	6.83
	MST-6	1040.12	0.20	6.66
	MST-8	1117.97	0.18	6.03
	MST#-1	1022.85	0.21	6.81
	MST#-4	1051.69	0.20	6.56
洛吉组玄武岩	LJ-2	1021.39	0.21	6.83
	LJ-3	1051.80	0.20	6.55
	LJ-7	1045.88	0.20	6.61
	LJ#-1	1068.87	0.19	6.41
	LJ#-2	1047.80	0.20	6.60
	LJ#-4	1021.75	0.21	6.82
堆晶岩	RB-4	1017.67	0.22	7.18
	RB-6	1025.86	0.21	6.78

注:深度计算所用压力梯度采用 33 km/GPa。

降低可能向碱性系列演化。

3.2 单斜辉石形成的物理化学条件

在辉石中,Al 的配位与温压关系密切, 具有重要的标型意义, 高温低压条件下有利于 Al 在四次配位中替代 Si, 而低温高压条件下有利于 Al 在六次配位中替代其他阳离子 [25-26], 样品中单斜辉石的 Al(IV)/Al(VI) 比值较高(平均 6.85), 表明该套混杂岩形成于相对高温低压环境(图 8)。

依据 Putirka (2003)等 [28]提出的辉石-熔体温压计算了单斜辉石的温压(表 2)。由表 1 可知, 个别样品中单斜辉石的烧失量稍高(最多 3.1%), 这可能使计算得到的温压因受岩石蚀变的影响而略微升高。

研究区单斜辉石的形成温度较高, 压力较低(木胜土组单斜辉石: 1 050 °C, 0.20 GPa; 洛吉组单斜辉石: 1 035 °C, 0.20 GPa; 堆晶岩单斜辉石: 1 022°C, 0.21 GPa), 温度集中在 986~1 118 °C, 压力范围主要集中在 0.18~0.22 GPa, 相应的深度为 6~7 km, 由于矿物蚀变的影响导致计算结果偏高, 再考虑到海水压力导致单斜辉石显示的形成深度偏厚, 除开这些影响因素, 单斜辉石的压力大致代表了该区洋壳平均厚度 5 km 左右。计算结果与 Al(IV)/Al(VI) 比值得出的高温低压结论相对一致, 由主量元素可知, 单斜辉石的 Al₂O₃ 值均 < 5%, 偏低 (2.14~6.06, 平均 3.47), 反映它们结晶时的压力较低 [29], 与计算结果的低压相吻合。

3.3 单斜辉石的构造环境

Nisbet 和 Pearce [9]运用单斜辉石主要氧化物含量百分数构建了 F1-F2 双因子判别图解, 以判别源岩的构造环境。将本次样品投入 F1-F2 图解(图 9), 堆晶及大部分玄武岩单斜辉石投入洋底和火山弧玄武岩区 (VAB+OFB), 木胜土组单斜辉石还有个别落入洋底和板内拉斑玄武岩区 (OFB+WPT), 洛吉

组单斜辉石部分投入板内碱性玄武岩区和洋板内拉斑玄武岩区(WPA、OFB+WPT),揭示该套混杂岩主要形成于洋底或洋壳,而玄武岩单斜辉石落入板内玄武岩构造环境,指示该时期构造环境的改变,形成环境为岛弧或活动大陆边缘。研究区靠近甘孜—理塘延伸带,区域资料显示甘孜—理塘结合带经历了两开两合,二叠纪晚期—三叠纪早期,随着扬子被动大陆边缘张裂,甘孜—理塘带首次打开形成裂谷带^[2-4,6,30-32],也有学者认为其裂开时间始于泥盆纪早期^[33],于三叠纪中期闭合,晚三叠世早期再次打开^[30-35],由东向西俯冲至晚三叠纪晚期闭合。结合区域构造背景及三江口断裂展布空间与活动时间的限制^[9],认为洛吉蛇绿混杂岩可能形成于二叠纪晚期—三叠纪早期甘孜—理塘结合带第一次弧盆系发育,在本区俯冲方向为从南东至北西。

4 结论

(1)洛吉蛇绿混杂岩由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩、玄武岩、条带状硅质岩及灰岩、碳酸岩块组成,具有蛇绿混杂岩的一般特征,未见变质橄榄岩,除局部保留有限层序外,各主要岩石单元之间呈构造混杂岩块产出。

(2)洛吉蛇绿混杂岩中的单斜辉石种属为岩浆作用的普通辉石,其中堆晶岩中的单斜辉石在后期流体作用的影响下向透辉石系列过渡。

(3)单斜辉石整体具富镁贫铁和高钙的特征,随着堆晶→木胜土和洛吉斑晶→木胜土和洛吉基质,辉石更加富镁和贫铁;堆晶岩中的单斜辉石与玄武岩中的单斜辉石相比具有较高的SiO₂、CaO含量和较低的Al₂O₃、FeO、TiO₂、Na₂O含量和较高的氧逸度;母岩浆起源于亚碱性系列的拉斑玄武岩浆,有向碱性系列演化的趋势。

(4)温压计算结果显示单斜辉石形成温度在986~1118℃,压力范围为0.18~0.22 GPa,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,也符合该套混杂岩主要形成于洋底,并向岛弧或活动大陆边缘演变的构造环境,结合区域地质背景分析,洛吉蛇绿混杂岩可能为甘孜—理塘延伸带残余产物。

致谢:野外工作得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!

参考文献(References):

- [1] 邹金沙,刘显凡,邓江红,等.云南香格里拉县洛吉蛇绿混杂岩地质特征及意义[J].矿物学报,2011,(S1):448-449.
Zou Jinxi, Liu Xianfan, Deng Jianghong, et al. Yunnan Shangri-La County Logie ophiolitic melange in the geological characteristics and significance [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (S1): 448-449 (in chinese).
- [2] 云南省地矿局.1:20万永宁幅区调报告[R].1980.
Yunnan Provincial Geology and Mineral Prospecting Bureau. 1:200000 Regional Survey Report of the Yongning Mappable Unit [R]. 1980(in chinese).
- [3] 四川省地矿局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.
Sichuan Provincial Geology and Mineral Prospecting Bureau. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in chinese).
- [4] 莫宣学.三江特提斯火山作用与成矿[M].北京:地质出版社,1993.
Mo Xuan-xue. Sanjiang Tethyan Volcanism and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 (in Chinese).
- [5] 潘桂棠,丁俊,王立全,等.青藏高原及邻区地质图(1:150万)及说明书[M].成都:成都地图出版社,2004.
Pan Guitang, Ding Jun, Wang Liquan, et al. Manual Book of 1:150000 Geological Map of the Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Region Geological Diagram Instructions [M]. Chengdu: Chengdu Mapping Publishing House, 2004 (in Chinese).
- [6] 侯增谦,杨岳清,曲晓明,等.三江地区义敦岛弧带造山带演化和成矿系统[J].地质学报,2004,78(1):110-119.
Hou Zhengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang region, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 110-119(in Chinese with English abstract).
- [7] 俞赛赢,杨仕潘.云南三江口地区超基性岩岩石化学及成因[J].云南地质,2005,24(1):83-88.
Yu Saiying, Yang Shipan. The petrochemistry and genesis of ultranasic rocks in Sanjiangkou area, Yunnan [J]. Yunnan Geology, 2005, 24(1): 83-88(in Chinese with English abstract).
- [8] Streck M J. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2008, 69: 595-622.
- [9] Nisbet E G and Pearce J A. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings [J]. Contributions to Mneralogy and Petrology, 1977, 63(2): 149-160.
- [10] Coleman R G, Bao Peisheng. Ophiolites [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 32-35.
- [11] 张旗,钱青,王焰.蛇绿岩岩石组合及洋脊下岩浆作用[J].矿物岩石学杂志,2000,19(1):1-7.

- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan. Rock assemblages of ophiolites and magmatism beneath oceanic ridges [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [12] 张旗, 周国庆, 王焰. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境[J]. *岩石学报*, 2003, 19 (1) : 128.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing, Wang Yan. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tectonic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 128(in Chinese with English abstract).
- [13] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 130-135.
- Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wanming, et al. *Ophiolites of Tibet* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 130-135 (in Chinese).
- [14] Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, et al. Pyroxene Nomenclature[J]. *Acta Mineral*, 1988, 8(4): 289-305.
- [15] 罗照华, 杨宗锋, 代耕, 等. 火成岩的晶体群与成因矿物学展望 [J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 176-181.
- Luo Zhaohua, Yang Zongfeng, Dai Geng, et al. Crystal populations of igneous rocks and their implications in genetic mineralogy [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 176-181(in Chinese with English abstract).
- [16] 张儒媛, 从柏林. 矿物温度计与压力计 [M]. 北京: 地质出版社, 1982: 45-68.
- Zhang Ruyuan and Cong Boling. *Mineral Thermometers and Pressure Gauges* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 45-68(in Chinese).
- [17] Le Bas M J. The role of aluminum in igneous rock [J]. *American Journal of Science*, 1962, 258: 548-554.
- [18] Sun C M and Bertrand J. Geochemistry of clinopyroxenes in plutonic and volcanic sequences from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan Province, China): Petrogenetic and geotectonic implications [J]. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 1991, 71: 243-259.
- [19] Seyler M and Bonatti E. Na, AlIV and AlVI in clinopyroxenes of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: A clue to different melting processes in the mantle? [J]. *Earth Planet Science Letter*, 1994, 122 : 281-289.
- [20] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 132-153.
- Qiu Jiexiang. *Petrology of Magmatic Rocks* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 132-153(in Chinese).
- [21] Leterrier J, Maury R C, Thonon P, et al. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 59: 139-154.
- [22] Carmichael I S E, Turner F J and Verhoogen J. *Igneous Petrology* [M]. McGraw-Hill, 1974: 34.
- [23] 邱家骧, 廖群安. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学[J]. *火山地质与矿产*, 1996, (1/2): 16-25.
- Qiu Jiexiang, Liao Qun'an. Petrogenesis and Cpx mineral chemistry of Cenozoic basalts from Zhejiang and Fujian of eastern China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1996, (1/2): 16-25(in Chinese with English abstract).
- [24] Irvine T N and Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal Earth Science*, 1971, 8: 523-548.
- [25] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 222-287.
- Chen Guangyuan, Sun Maosheng, Yin Huian. *Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy* [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1987: 222-287 (in Chinese with English abstract).
- [26] Shahrzad S, Fuat Y, Iraj N, et al. Mineral chemistry of Plio-Quaternary subvolcanic rocks, southwest Yazd Province, Iran [J]. *International Geology Review*, 2012, 2: 1-34.
- [27] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩中超高压矿物硅尖晶石的研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1379-1385.
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Study of the UHP mineral silicon spinel in the Yarlung Zangbo ophiolite [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (6): 1379-1385 (in Chinese with English abstract).
- [28] Putirka K D, Mikaelian H, Ryerson F, et al. 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*, 2003, 88: 1542-1554.
- [29] 李天福, 马鸿文. 中国东部几个地区新生代玄武岩中单斜辉石-熔体平衡温压——兼论幔源包体的成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(1): 11-23.
- Li Tianfu, Ma Hongwen. Clinopyroxene-melt equilibrium temperature and pressure of Cenozoic basalts with special reference to the genesis of mantle xenoliths in some areas of eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2002, 21(1): 11-23(in Chinese with English abstract).
- [30] 魏永峰, 罗森林. 甘孜—理塘结合带中段蛇绿岩的地质特征[J]. *四川地质学报*, 2003, 23(3): 134-140.
- Wei Yongfeng, Luo Senlin. Geological features of ophiolite in the middle Garzê-Litang Plate junction [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2003, 23(3): 134-140(in Chinese with English abstract).
- [31] 邹光富, 候立玮, 尹显科. 甘孜—理塘蛇绿混杂岩带特征及其构造意义[J]. *四川地质学报*, 1994, 14(1): 17-24.
- Zou Guangfu, Hou Liwei, Yin Xianke. Characteristics of Garzê-Litang ophiolite mélange zone and its tectonic implication [J]. *Acta*

- Geologica Sichuan, 1994, 14 (1): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- [32] 江元生. 甘孜—理塘结合带甘孜地区混杂岩类型及其成因分析 [J]. 四川地质学报, 1996, 16(3): 19-203.
Jiang Yuansheng. Types and genesis of mélangé Garzê area in the Garzê-Litang junction [J]. Acta Geologica Sichuan, 1996, 16 (3): 19-203(in Chinese with English abstract).
- [33] 张世涛, 冯庆来, 王义昭. 甘孜—理塘构造带泥盆系的深水沉积 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 17-20.
Zhang Shitao, Feng Qinglai, Wang Yizhao. Devonian deep-water sediments in Garzê-Litang tectonic belt [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19 (3): 17-20 (in Chinese with English abstract).
- [34] 李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 等. 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, 2010, 26(6): 1661-1671.
Li Wenchang, Yin Guanghou, Lu Yingxiang, et al., Delineation of Hongshan-Shudu ophiolite mélangé in Geza volcanic-magmatic and its significance, southwest “Jinsha-Lancang-Nu rivers” [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(6): 1661-171(in Chinese with English abstract).
- [35] 彭东, 林丽, 王全伟, 等. 甘孜—理塘结合带锰结核的发现及其地质意义 [J]. 中国地质, 2011, 38(2): 442-450.
Peng Dong, Lin Li, Wang Quanwei, et al. The discovery of manganese nodules in Garze-Litang suture zone [J]. Geology in China, 2011, 38(2): 442-450(in Chinese with English abstract).

Compositional characteristics of clinopyroxenes from the Luoji ophiolitic mélangé in Shangri-La County, Yunnan Province

ZOU Jin-xi, LIU Xian-fan, DENG Jiang-hong, DONG Yi, HUANG Yu-peng

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

Abstract: In Shangri-La County of Yunnan Province, the authors documented an ophiolitic mélangé which is composed of mafic-ultramafic cumulate rocks, diabase-gabbro dykes, basalts and banded cherts. On the basis of petrological observations and mineral compositions of clinopyroxenes from the mafic-ultramafic cumulate rocks and basalts, the clinopyroxenes were divided into two groups, one group is rich in magnesium and depleted in iron while the other group is rich in calc. Both of the two groups of clinopyroxenes belong to augites, whose parental magma was sub-alkaline tholeiitic basalt. Cation substitution features indicate that the augites were formed under the condition of high temperature and low pressure. T-P calculations show that the augites were formed at 986 to 1118 °C and 0.18 GP to 0.22 GP. It is suggested that the Luoji mélangé is probably a part of the Garzê-Litang ophiolite.

Key words: clinopyroxene; Luoji ophiolitic mélangé, Shangri-La of Yunnan Province, Garzê-Litang belt

About the first author: ZOU Jin-xi, female, born in 1987, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: zwjcccdut@126.com.