

滇西北中甸甬哥碱性杂岩体岩相学和矿物学 特征及其地质意义

黄玉蓬¹, 邹金沙², 刘清强³, 吴春章³, 刘显凡⁴, 邓江红⁴, 任科法⁴

(1. 四川旅游学院, 四川 成都 610100; 2. 眉山市东坡区自然资源和规划局, 四川 眉山 6200004; 3. 四川省冶金地质勘查局成都地质调查所, 四川 成都 610203; 4. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 6100593)

摘要:滇西北甬哥碱性杂岩体主要由正长岩、正长斑岩、煌斑岩以及角闪岩、闪长岩、煌斑岩等包体岩石组成, 经历了复杂的岩浆—流体作用过程。其寄主岩及包体岩相学和矿物学分析表明, 杂岩体存在岩浆混合、混染及交代作用特征。岩体不同岩石类型中浅色矿物基本为正长石, 个别代表混合及交代作用残留的样品存在斜长石。暗色矿物均显示出富 Si、Mg, 贫 Al 及碱质的特征, 不同岩石类型的岩浆来源也不同, 其中正长岩类与晚三叠世甘孜理塘洋片俯冲作用有关, 为壳幔混合来源, 而煌斑岩则是新生代印度—欧亚板块碰撞引发的幔源钾质—超钾质岩浆作用产物。两种不同性质的岩浆处于一个封闭体系, 并伴随运移和成岩过程发生相应的岩浆混合、混染及交代作用。因此, 甬哥碱性杂岩体的成岩作用受制于晚三叠世到新生代以洋壳俯冲为主的岩浆—流体—构造作用的多期叠加过程。

关键词: 岩相学及矿物学特征; 岩浆混合; 钾质-超钾质; 交代作用; 多期叠加; 中甸甬哥

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.012

中图分类号: TD95 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)01-0089-15

1 地质背景

滇西北中甸地区位于三江并流区域东侧, 大地构造位置上临近欧亚板块和冈瓦纳板块的结合部位, 古特提斯-喜马拉雅构造域东缘^[1], 隶属于三江构造-成矿带中北段。其东南部是甘孜—理塘结合带, 西侧为乡城—格咱深大断裂, 该断裂向 SSE 方向延伸, 与甘孜—理塘深大断裂相接, 从而在南部封闭了中甸弧^[2]。该区既是义敦岛弧带的南缘, 又是广泛出露于滇西地区的新生代富碱斑岩带北端, 记录了自晚三叠世到新生代以来, 三江地区以及青藏高原岩浆和构造演化的重要信息, 同时也是喜山期铜金成矿作用的重要远景区^[2-5], 因而备受地质学家及矿床学家的关注。尤其出露于小中甸甬哥地区的碱性杂岩体, 以其特殊的构造背景及岩相学和矿物学特征, 为研究该

区复杂的构造演化及岩浆—成矿作用提供了天然窗口。

2 岩体地质特征

甬哥碱性杂岩体主要呈岩株、岩枝集群出露, 位于乡城—格咱河与纳帕海—土官村两组深大断裂“Y”字型交汇部位^[6](图1), 岩体整体呈南北向展布, 与区域构造线方向基本一致, 单一岩体侵入规模较小且深度不一, 平面上出露多呈椭圆状、透镜状、次圆状。已采集并鉴定出的主要岩石类型有: 正长岩、正长斑岩及玢岩、煌斑岩, 以正长岩居多; 不同岩石类型间相互穿插或包嵌, 且接触界面不规则, 似乎表明它们是在统一的岩浆体中又呈相互独立的不混溶体系同步上升侵位的结果。正长岩体普遍遭受后期表生

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 中国地调局地调项目(1212011120587); 国家公益性行业科研专项项目-系统矿物学研究(201011005-5); 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)

作者简介: 黄玉蓬(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿物学、岩石学和矿床地球化学研究。

淋滤而致褐铁矿化。岩体围岩为上三叠统图姆沟组中段 (T_3t^2)，主要为弱碎裂岩化粉砂质板岩、弱千枚岩化粉砂岩，局部有变形及碳化特征，原始层序已受到构造置换，岩体与围岩接触界线清晰，围岩蚀变较明显，主要有黄铁矿化，绢云母

化，硅化等，未见明显蚀变分带特征。大量石英脉的发育表明成岩期后硅质热液活动强烈，其中见有金属硫化物矿物，表明硅质热液携带有成矿物质。此外，岩体中可见伴随有强烈金属矿化、伟晶岩化的钾长石脉。

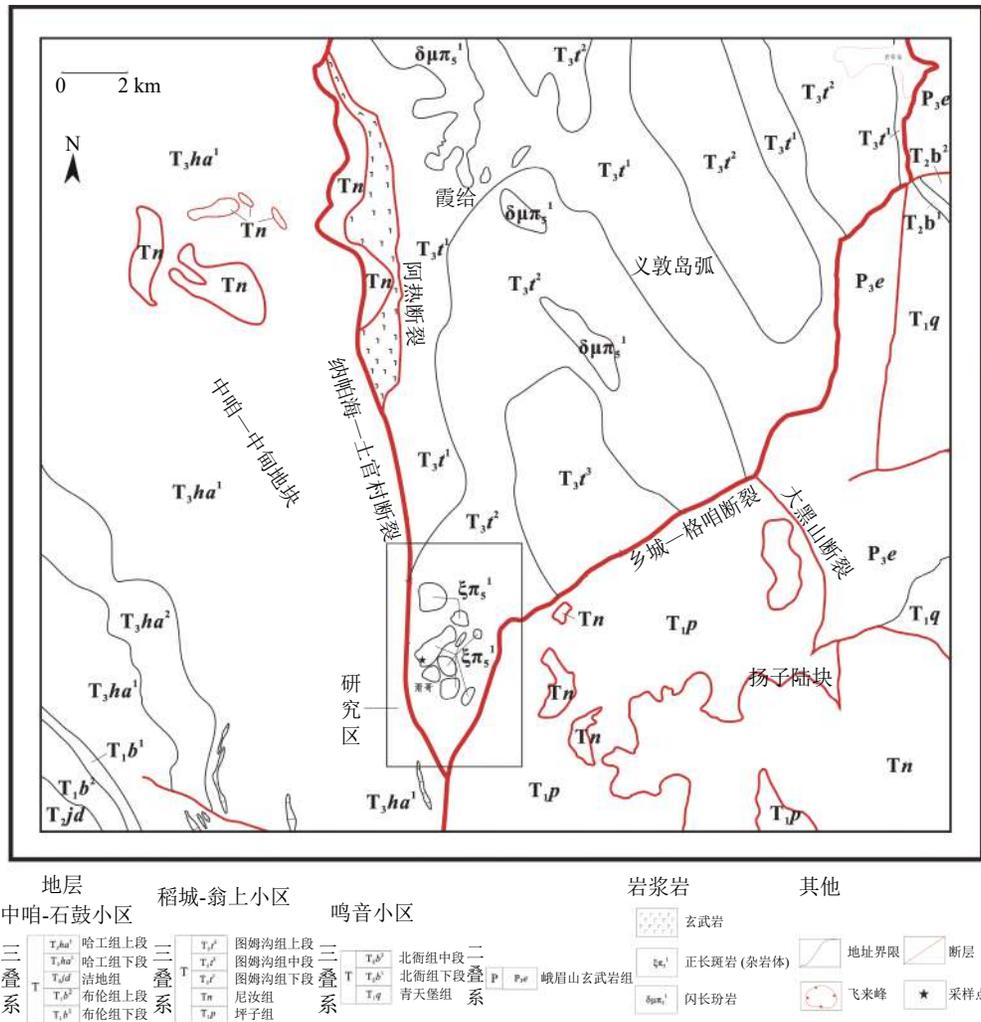


图 1 甬哥岩体区域地质背景简图

Fig.1 Regional geologic sketch map of Bengge area

3 岩相学特征

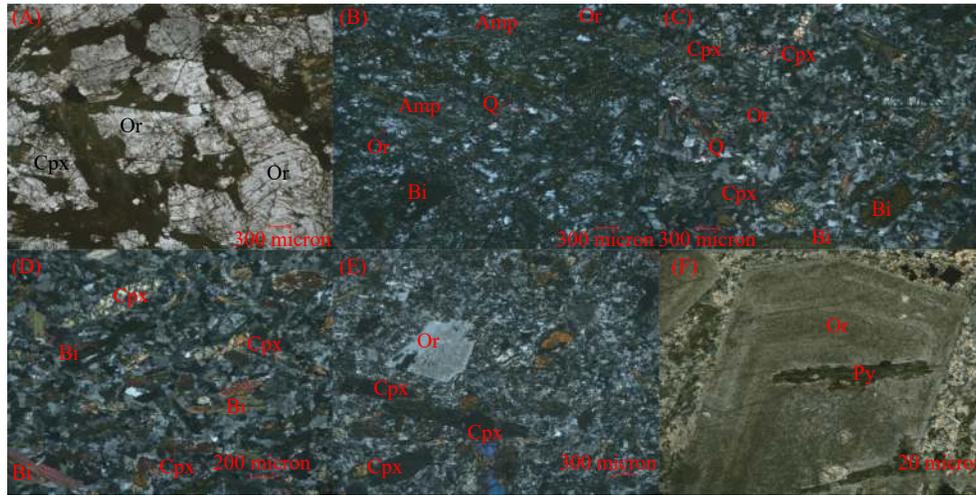
甬哥碱性杂岩体岩石类型较为复杂，且相互之间混杂包嵌，没有明显的分带特征。经室内鉴定，主要有蚀变辉石正长岩、黑云角闪正长（玢）岩、云辉正长斑岩、黑云闪辉正煌岩、云辉正煌岩。此外，正长斑岩中还见到很多暗色包体（部分可能为析离体或分凝体），大小在 1~3 cm，次圆状~圆状，个别呈水珠状，表明包体可能呈液态不混溶的体系存在于寄主岩浆中。经显微镜下鉴定，包体主要类型有角闪石岩、煌斑

岩及黑云变粒岩。

3.1 碱性杂岩体岩相学特征

3.1.1 蚀变辉石正长岩

该类岩石较为常见，呈灰色，细—中粒不等粒结构，矿物组合主要为正长石及辉石，可能含有少量角闪石（图 2A）。正长石含量约占 60%~70%，多为白~灰白色，自形-半自形粒状，颗粒大小不均，边缘不够平整，有碎裂现象，裂隙十分发育，可见一组解理，少数颗粒发育卡氏双晶。辉石基本上已全部遭受次生蚀变，仅保持原有矿物晶形，大多数被支解呈残片状、碎粒状，



(A)：蚀变辉石正长岩(-)；(B)：黑云角闪正长岩(+); (C)：黑云闪辉正煌岩(+); (D)：云辉正煌岩(+); (E)：正长石斑晶被交代蚕食(+); (F)：正长石斑晶环带结构及辉石嵌晶(+)

图2 甯哥碱性杂岩体主要岩石类型岩相学特征

Fig.2 Characteristics of petrography of main rock types in Bengge alkaline igneous complex

少量呈长柱状。少数颗粒局部有残留，正交偏光下显示不均匀二级蓝干涉色，发育辉石式节理，可见次变边结构。次生蚀变主要为绿帘石化及弱硅化，个别颗粒也有向角闪石退变的趋势。辉石含量约占15%~20%。另外，可见少量暗绿色矿物，突起和干涉色较辉石低，解理不明显或仅见一组不完全解理，弱多色性，呈破碎残片状零星分布，且蚀变强烈，原生特征已基本被掩盖，可能为角闪石，含量低于5%。岩石中还有少量石英细脉充填于粒间裂隙中，同时沿破碎残片状暗色矿物裂隙中有熔融状金属氧化物或硫化物充填。

3.1.2 黑云角闪正长岩

岩石呈暗灰色，斑状结构，基质为细粒—微晶不等粒结构（图2B）。矿物组合主要为正长石（40%~50%）、石英（约7%~10%）、黑云母（约20%~30%）、角闪石（约10%）。未见明显的辉石类矿物。正长石为灰白色，呈不规则他形粒状，粒径小于0.1 mm，作为基质均匀分布，粒间裂隙发育，多充填有石英细脉。此外，局部颗粒有硅化及碳酸盐化。石英为次生矿物，呈他形不规则粒状充填于其他矿物粒间空隙。黑云母为浅棕色~棕绿色，半自形长板状，拉长带状，呈斑晶均匀分布于长石基质中，多色性明显，可见一组完全解理，颗粒大小一般在1~2 mm左右，发育交代蚕食结构，少数颗粒可见极细的亮色次变边，局部有绿泥石化。角闪石呈暗绿色，多遭受次生蚀变，但保持原有晶形，呈短柱状，

颗粒大小在0.1~0.5 mm之间，也有受后期构造破碎而成碎片状，解理不发育，少数颗粒有向黑云母退变的趋势。此外，长石基质中还有磁铁矿、磷灰石等副矿物，但含量很低，约2%左右。

3.1.3 云辉正长斑岩

岩石斑状结构十分明显，基质具有他形-半自形微晶结构。矿物成分主要有正长石、辉石和黑云母，可能含有角闪石。正长石作为斑晶及基质浅色矿物出现，含量约在30%~40%。正长石斑晶为自形粒状，结晶较好，大小一般在1~2 mm，大部分颗粒发育环带结构，偶见辉石或云母细粒嵌晶，并发育有交代蚕食结构（图2E、2F）。基质中的正长石多为细粒—微晶他形颗粒，边缘不平整，发育粘土化，分布均匀，亦可见卡式双晶。辉石主要为单斜辉石，粒状~长柱状半自形结构，大多数颗粒具有向角闪石及黑云母退变的趋势，大小一般在0.1~0.5 mm，辉石解理缝充填有黑色不透明物质，含量约在30%左右。黑云母为宽板状~长条状，部分为残片状，发育一组完全解理，含量约在20%。主要金属矿物为黄铁矿，星散分布于黑云母的解理缝中。

3.1.4 黑云闪辉正煌岩

岩石为暗黑色，煌斑结构，暗色矿物主要为角闪石、黑云母、辉石，浅色矿物主要为正长石，还可见极少量石英呈他形颗粒充填于其他矿物颗粒之间（图2C）。正长石为不规则他形等粒状，呈基质均匀分布，粒径一般小于0.1 mm，少

数颗粒可见卡氏双晶及三联晶，颗粒发育微裂隙，含量约 50%；辉石为暗绿色—黑色，自形—半自形粒状、长柱状，颗粒大小不均，一般在 0.1~0.3 mm，最大可达 0.5 mm，大多数遭到支解破碎，并发育熔蚀、交代结构，少部分颗粒可见交代反应边、蚀变边及正长石嵌晶，含量约 20%~30%；角闪石多为浅绿色，自形—半自形粒状及短柱状，粒径约 0.1~0.2 mm，多色性明显，局部绿泥石化、阳起石化、纤闪石化，含量约 5%~10%；黑云母为浅~深棕色，含铁质高者呈暗棕色，宽板状~长板状及薄片状，颗粒大小不均，有支解破碎，强多色性，可见一组完全解理。后期蚀变明显，多绿泥石化，少量颗粒可见长石嵌晶，发育熔蚀结构，含量约 5% 左右。此外，可见少量磁铁矿、黄铁矿、方铅矿等金属氧化物或硫化物零散分布，含量很少，约 5%。

3.1.5 云辉正煌岩

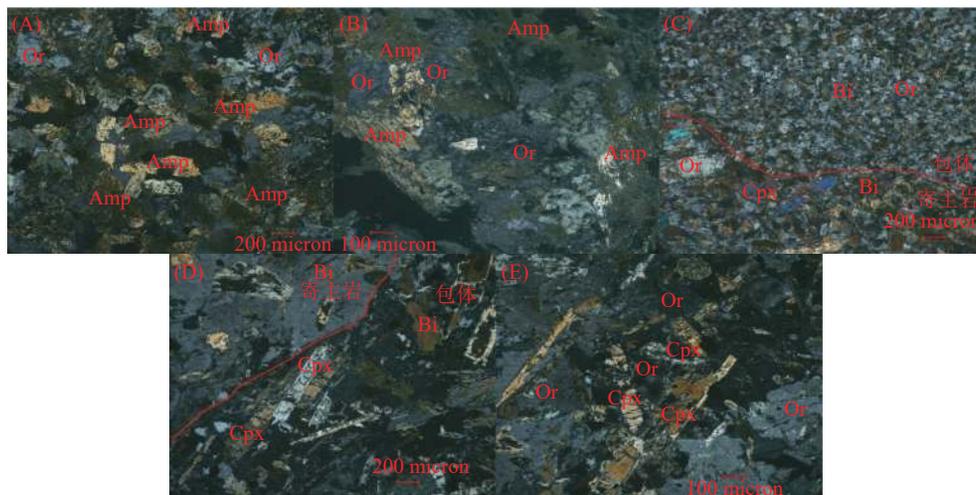
该类岩石是煌斑岩的主要类型，其暗色矿物主要为辉石和黑云母（图 2D），可能含有少量角闪石，浅色矿物均为正长石，可含极少量石英颗粒。正长石多为半自形—他形细粒—微粒结构，呈基质均匀分布，颗粒一般小于 0.1 mm，局部有弱硅化蚀变及碳酸盐化现象，含量约 50%~60%；石英呈他形充填状，边缘不规则，发育波状消光，颗粒大小约 0.1~0.5 mm，含量<5%；辉石为绿灰色，自形-半自形粒状、长柱状，可见辉石式解理，颗粒大小在 1~2 mm 左右，个别可达 3 mm，

大多数颗粒遭受构造应力支解破碎，且个别颗粒发育膝折构造，交代反应边等交代结构也较为明显，含量约 20%~30%。黑云母为浅棕——棕褐色，板状——长条状，含铁质较高者颜色较深，多色性明显（浅棕-深棕-深褐色），发育一组完全解理，反应边等交代特征清晰，亦受构造应力作用而支解破碎，含量约 10%~15%。此外，似角闪石类矿物已基本遭受次闪石化等蚀变，呈放射状及纤维状；还可见磁铁矿、黄铁矿等金属氧化物或硫化物。

3.2 包体岩相学特征

3.2.1 角闪石岩

包体宏观上多呈椭圆状-浑圆状，暗绿色-墨绿色，与寄主岩石接触界线清晰，大小一般在 2~3 cm，类似于角闪石析离体。其矿物成分以角闪石为主（图 3A），浅色矿物主要为正长石及石英，可含有少量斜长石。角闪石一般为深绿色—暗绿色，含量约 60%，绝大部分呈揉碎集合团块状，其余为自形—半自形不等粒粒状及短柱状，局部可呈纤维状。多色性明显，后期蚀变强烈。个别可见中心熔蚀特征。正长石多为半自形—他形不等粒粒状，平行消光，可见一组或两组完全解理，沿解理缝发育交代作用特征（图 3B）。此外还可见熔离及出溶结构，含量约 20%~30%。包体中还含有金属氧化物或硫化物，主要为黄铁矿、方铅矿、磁铁矿等，均有硅酸盐交代蚀变特征，含量约 10%。



(A)：角闪石岩包体(+)；(B)：角闪石岩包体中沿长石解理缝的交代特征(+)；(C)：黑云变粒岩包体及其与寄主岩的接触边缘特征(+)；(D)：正长石斑晶环带结构及辉石嵌晶(+)；(E)：正长石斑晶被交代蚕食(+)；

图 3 甬哥碱性杂岩体主要包体类型岩相学特征

Fig.3 Characteristics of petrography of main xenolith types in Bengge alkaline igneous complex

3.2.2 黑云变粒岩

包体呈圆状~次圆状，浅灰褐色，颗粒明显较细，与寄主岩接触界线清晰，尤其是在镜下，接触边缘粒度突变特征十分明显（图3C）。其矿物组合主要有黑云母、角闪石、长石及少量辉石。所有矿物均呈自形~半自形等粒粒状结构，粒度极细， $<0.1\text{ mm}$ ，相互之间混杂均匀分布。这类包体可能代表了深源流体或岩浆上升过程中造成下地壳深熔后未被寄主岩浆混染的残留熔体，经快速冷凝而成。

3.2.3 煌斑岩

该类包体较为常见，多为次圆状，大小在2~3 cm，个别可达4 cm。其寄主岩主要为正长斑岩。包体矿物成分类似于主岩体中的云辉正煌岩及闪辉正煌岩，区别在于暗色矿物相对稍微减少，且辉石存在明显的反应边（图3D）。包体与寄主岩石接触边缘过渡自然（图3D），不存在明显冷凝边及淬火边，表明该煌斑岩包体并非岩浆上升时捕获的围岩碎块，而可能是存在于寄主岩浆中的水珠状不混溶体系。结合两种不同类型的岩石化学具有组分趋近（即正长岩组分偏向于基性，煌斑岩组分偏向于酸性）这一特征，进一步说明正长岩岩浆与煌斑岩岩浆可能属于同时存在的相互独立体系，但在一定程度上却又相互发生混合或混染。此外，该煌斑岩包体中可见到一

种“反辉绿结构”（图3E），即正长石呈他形充填于辉石组成的三角格架中心。此种结构可能反映了煌斑岩的形成与不同性质的岩浆混合或混染有关。

此外，甬哥岩体中还发现伟晶岩化钾长石脉（图4A）及二长岩包块（图4B）。前者手标本呈深灰色~黑色，可见粗大的不规则钾长石晶面，颗粒均 $>2\text{ cm}$ ，最大可达5 cm，褐铁矿化明显且强烈，局部还可见暗银灰色铜、钼、镍等金属矿化。显微镜下钾长石脉全由钾长石巨晶组成。钾长石形态不规则，大部分颗粒发育弱微纹长石化（图4C），客晶特征不明显，可能由出溶作用或交代作用形成，同时沿颗粒间裂隙有大量金属硫化物充填。二长岩包块为白色~浅灰色，大小在1~5 cm不等，呈不规则状，可见大小约1 mm的长石结晶颗粒，有碳酸盐细脉穿插。镜下矿物组合主要为角闪石和长石，可能含有少量云母。暗色矿物已全部遭受碳酸盐蚀变（图4D），仅保留原来晶形。浅色矿物主要为呈半自形~自形粒状的正长石，约占30%~40%，可见卡式双晶；斜长石呈自形-半自形粒状或短柱状，含量约20%~30%，聚片双晶发育（图4E），少数颗粒有熔蚀特征，颗粒大小一般在0.1~0.5 mm。此外还可见少量石英及方解石颗粒，含量分别约5%和10%，均属成岩期后次生矿物。同时还见到碳酸盐脉穿



(A)：伟晶岩化钾长石脉野外特征；(B)：蚀变二长岩包块野外特征；(C)：伟晶岩化钾长石脉；(D)：蚀变二长岩暗色矿物碳酸盐化；(E)：蚀变二长岩中正长石及斜长石微晶；(F)：蚀变二长岩中凝灰石特征

图4 甬哥碱性杂岩体伟晶岩化钾长石脉及蚀变二长岩包块特征

Fig.4 Characteristics of pegmatitization K-feldspar vein and altered monzonite mass in Bengge alkaline igneous complex

插及金属矿化现象。该岩块也是在甬哥岩体中发现的唯一明显存在斜长石的样品。比较特别的是，该岩块中出现约 10% 左右的磷灰石，呈较自形的短柱状（图 4F），颗粒大小一般在 1 mm 左右，分布均匀。较多磷灰石的出现似乎代表了富含挥发分的深部流体的强烈活动。

甬哥碱性杂岩体所有岩石类型结晶程度较高，反映了甬哥岩体深部较好的冷凝固晶条件，而同时均表现出受到不同程度的硅化及碳酸盐蚀变，表明了后期岩浆—流体—构造作用改造的复杂过程。

4 矿物学特征

本文矿物化学测试分析是在成都理工大学构造与成矿成藏国土资源部重点实验室 EPMA-1720 型电子探针仪上完成，分析条件：加速电压 15 kV，电流 10 nA，电子束直径 10 μm，测试误差 <

1.0%。相应的矿物晶体化学计算结果由 Geokit 软件完成^[7]。

4.1 黑云母

甬哥碱性杂岩体中代表性黑云母电子探针测试分析数据及计算结果见表 1。相比于藏东与滇西碱性钾玄岩中黑云母成分^[8]，除黑云变粒岩包体与角闪石岩包体中黑云母 TFeO 含量明显偏高外，其余组分基本相当。在黑云母成分分类图解中（图 5），个别煌斑岩黑云母成分点落在金云母区域边缘，其余煌斑岩及角闪石岩均落在镁黑云母区域，而黑云变粒岩包体及其寄主正长斑岩落在铁黑云母区域。这表明甬哥碱性杂岩体成分来源复杂，或者其受到后期不同来源的流体/熔体改造。

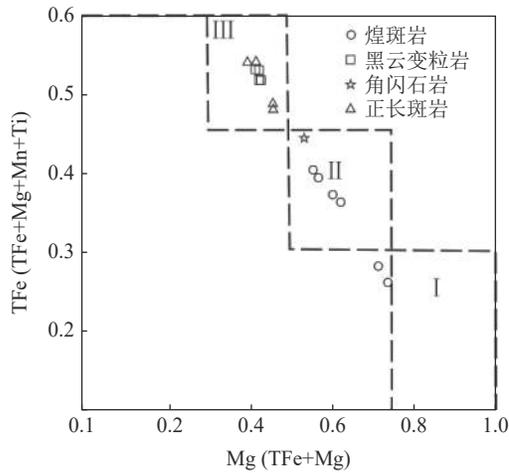
4.2 长石

在甬哥碱性杂岩体中，除煌斑岩及蚀变钠长岩包块含有斜长石外，其余全为正长石。其代表性电子探针测试分析数据及相应的计算结果见

表 1 甬哥碱性杂岩体寄主岩及包体黑云母代表性电子探针分析结果/%

Table 1 Representative EPMA results for biotite in host-rocks and xenoliths of Bengge alkaline igneous complex

样品号	05b1#3	05b1#4	04b2#2	08b2 #1	08b2 #2	01-a#2	04-a #1	04-a #2	04-a #5	04-a #6	04-b #1	04-b #2	04-b #3	04-b #4
岩石名称	煌斑岩				角闪石岩		黑云变粒岩				正长斑岩			
SiO ₂	38.01	36.19	34.74	35.80	36.17	34.47	35.02	34.99	36.59	35.80	35.82	33.90	35.42	34.64
TiO ₂	1.51	1.91	4.43	4.27	4.29	2.50	4.68	4.35	3.87	3.93	4.79	4.60	4.87	5.04
Al ₂ O ₃	12.48	12.57	12.38	12.41	12.48	14.34	12.39	12.61	12.12	12.61	11.94	12.44	11.76	12.09
FeO	12.06	12.69	17.42	16.04	16.52	19.25	23.27	22.48	22.44	22.35	22.04	22.94	21.21	21.37
MnO	0.12	0.04	0.21	0.06	0.08	0.45	0.23	0.14	0.16	0.18	0.16	0.16	0.14	0.12
MgO	18.02	17.46	12.39	14.00	13.71	12.11	8.97	8.64	9.63	9.13	8.86	8.42	9.98	10.19
CaO	0.07	0.05	0.01	0.06	0.03	0.12	0.02	0.03	0.04	0.11	0.13	0.12	0.03	0.03
Na ₂ O	0.19	0.08	0.02	0.07	0.08	0.03	0.04	0.03	0.00	0.03	0.16	0.05	0.05	0.04
K ₂ O	9.07	8.99	8.74	8.51	9.18	7.63	9.25	9.06	9.25	9.38	8.60	8.58	8.60	8.72
Total	91.52	89.97	90.34	91.22	92.56	90.89	93.86	92.33	94.09	93.52	92.48	91.21	92.05	92.25
阳离子数（以 11 个氧原子为基础）														
Si	2.91	2.84	2.79	2.82	2.82	2.76	2.79	2.82	2.88	2.85	2.87	2.78	2.84	2.78
Al ^{IV}	1.09	1.16	1.17	1.15	1.15	1.24	1.16	1.18	1.12	1.15	1.13	1.20	1.11	1.14
Al ^{VI}	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.09	0.11	0.27	0.25	0.25	0.15	0.28	0.26	0.23	0.23	0.29	0.28	0.29	0.30
Fe ³⁺	0.11	0.08	0.20	0.21	0.18	0.19	0.18	0.22	0.21	0.19	0.27	0.21	0.24	0.21
Fe ²⁺	0.67	0.75	0.97	0.84	0.90	1.10	1.37	1.30	1.27	1.29	1.21	1.36	1.18	1.23
Mn	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	2.06	2.04	1.48	1.64	1.59	1.44	1.07	1.04	1.13	1.08	1.06	1.03	1.19	1.22
Ca	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Na	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
K	0.89	0.90	0.90	0.85	0.91	0.78	0.94	0.93	0.93	0.95	0.88	0.90	0.88	0.89



I: 金云母区, II: 镁黑云母区, III: 铁黑云母区

图5 黑云母成分分类图解^[9]

Fig.5 Diagram for the chemical composition classification of micas

表2。从表2中可以看出，绝大部分长石以富K，贫Na、Ca为特征（ $K_2O=13.0\% \sim 15.6\%$ ， $Na_2O=0.17\% \sim 1.73\%$ ， $CaO=0\% \sim 0.23\%$ ），其Or分子端员为83.0~98.3，均为钾长石。样品ZDBG（蚀变钠长岩）中出现的斜长石以富钠为特征，其Ab分子端员高达99.2，属典型的钠长石（图6），

而其中同时出现的正长石却有二种不同的端员组分，一种是与整个岩体正长石相同的以富钾贫钠的钾长石，另一种正长石钾钠含量均较高（ $Na_2O=4.82\%$ ， $K_2O=9.37\%$ ），其端员分子组成为 $Ab_{43.9}An_{0.1}Or_{56.1}$ ，在长石分类图解中（图6），落在正长石区域。这似乎暗示碱质流体尤其是钾质流体在该区有过强烈活动，而不同的长石分子端员组分则可能表明不同性质和不同强度的流体交代作用。蚀变钠长岩较高的Ab分子端员则表明斜长石为透长石出溶形成。

4.3 角闪石

甯哥碱性杂岩体中仅有煌斑岩中的角闪石保存较为新鲜，正长岩及正长斑岩中的角闪石已基本遭受后期蚀变，少量颗粒由辉石退变质而来。其代表性电子探针测试分析及相应计算结果列于表3。从表中可以看出，煌斑岩中角闪石成分并不均匀，不同样品其成分具有明显差异，04B2明显较07B1低 Al_2O_3 、FeO，高 SiO_2 、MgO。这种异常的成分组合差异可能暗示岩浆内部成分并不均匀，并可能代表了镁铁质组分与硅铝质组分的不均匀混合。但从杂岩体整体成分来看，对比滇

表2 甯哥碱性杂岩体及包体长石代表性电子探针分析结果/%

Table 2 Representative EPMA results for feldspar in host-rocks and xenoliths of Bengge alkaline igneous complex

样品号	BG-03#4	06B2-a #4	06B2-b #1	06B2-b #2	06B2-b #3	06B2-b #4	BG-S #1	08B2 #3	08B2 #4	04-a #4	ZDBG#1	ZDBG#2
岩石名称	正长斑岩	钾长石脉					煌斑岩		黑云变粒岩	蚀变钠长岩		
SiO ₂	63.08	64.00	63.49	63.67	63.56	63.37	63.67	63.44	63.44	63.45	66.27	62.38
TiO ₂	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01		
Al ₂ O ₃	17.89	17.80	17.84	17.84	17.68	17.87	17.47	17.49	18.07	18.11	19.83	18.57
FeO	0.13	0.19	0.59	0.51	0.26	0.15	0.92	0.72	0.45	0.12		
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03		
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01		
CaO	0.23	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02
Na ₂ O	0.19	0.17	1.71	1.65	0.23	0.18	0.48	0.85	1.73	0.25	11.47	4.82
K ₂ O	15.59	15.43	13.36	13.55	15.26	15.51	15.14	14.50	13.00	15.26	0.11	9.37
Total	97.13	97.62	97.02	97.24	97.01	97.11	97.71	97.04	96.75	97.24	97.71	95.16
阳离子数（以22个氧原子为基础）												
Si	3.00	3.02	3.01	3.01	3.02	3.01	3.03	3.02	3.01	3.01	2.96	2.97
Al	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	0.98	0.98	1.01	1.01	1.05	1.04
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.02	0.02	0.16	0.15	0.02	0.02	0.04	0.08	0.16	0.02	0.99	0.44
K	0.95	0.93	0.81	0.82	0.92	0.94	0.92	0.88	0.79	0.92	0.01	0.57
An	1.19	0.05	0.00	0.05	0.13	0.07	0.03	0.07	0.18	0.11	0.21	0.09
Ab	1.75	1.63	16.28	15.59	2.20	1.70	4.55	8.13	16.80	2.38	99.19	43.85
Or	97.06	98.33	83.72	84.37	97.67	98.23	95.42	91.80	83.03	97.51	0.60	56.07

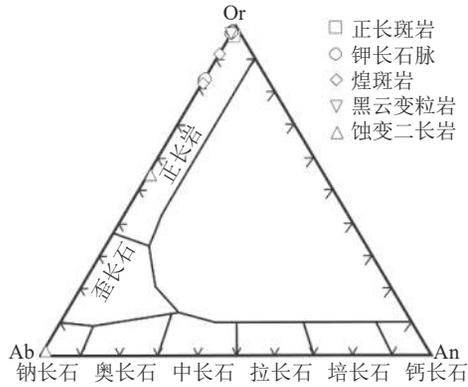


图 6 长石分类图解^[10]

Fig.6 Diagram for classification of feldspar

西新生代富碱侵入岩及深源包体中的角闪石组分^[11]，其 SiO₂，MgO 明显较高，而 Al₂O₃，Na₂O，K₂O 则不同程度地偏低。这似乎同样暗示煌斑岩并非正常岩浆演化而来，而可能经历了不同性质、不同程度的流体交代及混合或混染作用。在角闪石成分分类图中（图 7），成分点全部落在钙质角闪石区域，而在钙质角闪石分类图中

（图 8），它们均属于硅质浅闪石。另外，角闪石 Al 代 Si 数量很少，均低于 0.5，这表明角闪石形成的环境温度较低，且 SiO₂ 活性很强^[14]，暗示在岩浆成岩期或成岩期后富硅碱流体在该区的强烈活动。采用 Ridolfi 等^[15] 提出的角闪石温压计，算出其形成温度范围在 647~707℃，压力为 24~47 MPa。

4.4 辉石

根据岩相学特征，本区所见辉石均为单斜辉石，文中选取的用于测试分析的单斜辉石颗粒来自正长斑岩及煌斑岩，相对较新鲜，少量颗粒发育细的硅化（石英）及角闪石化次变边。其测试及计算结果见表 4。从表中可以看出，正长斑岩（02-b 与 04-b）与煌斑岩（05B1）中辉石成分基本一致，以高 MgO，低 Al₂O₃ 和 TiO₂ 为特征，除 SiO₂（51.08%~53.91%）外，其余成分均变化较大：Al₂O₃ 为 0.48%~1.19%，FeO 为 2.91%~9.56%，MgO 为 12.26%~17.97%，其 Mg# 变化范

表 3 甯哥碱性杂岩体煌斑岩角闪石电子探针分析结果/%
Table 3 EPMA results for amphibole in lamprophyre of Bengge alkaline igneous complex

样品编号	04B2-1 #1	04B2-1 #2	07B1-b #3	07B1-c #4	07B1-d #4
岩石名称	黑云角闪正煌岩		角闪黑云正煌岩		
SiO ₂	55.19	53.06	50.66	53.85	50.86
TiO ₂	0.19	0.14	0.40	0.16	0.40
Al ₂ O ₃	1.03	0.82	3.62	1.31	3.14
FeO	9.90	9.54	14.79	12.42	13.68
MnO	0.20	0.30	0.22	0.22	0.27
MgO	17.78	18.18	13.94	16.10	14.76
CaO	11.55	11.61	12.06	11.63	11.56
Na ₂ O	0.77	0.84	0.53	1.46	0.91
K ₂ O	0.19	0.23	0.25	0.18	0.27
Total	96.80	94.73	96.46	97.34	95.85
阳离子数（计算数据以 23 个氧原子和 16 个阳离子为基准）					
Si	7.90	7.80	7.51	7.80	7.55
Al ^{IV}	0.10	0.14	0.49	0.20	0.45
Al ^{VI}	0.07	0.00	0.14	0.02	0.10
Ti	0.02	0.02	0.04	0.02	0.05
Fe ³⁺	0.88	0.74	0.77	0.71	0.71
Fe ²⁺	0.30	0.43	1.07	0.80	0.99
Mn	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
Mg	3.79	3.98	3.08	3.48	3.27
Ca	1.77	1.83	1.91	1.80	1.84
Na	0.21	0.24	0.15	0.41	0.26
K	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05

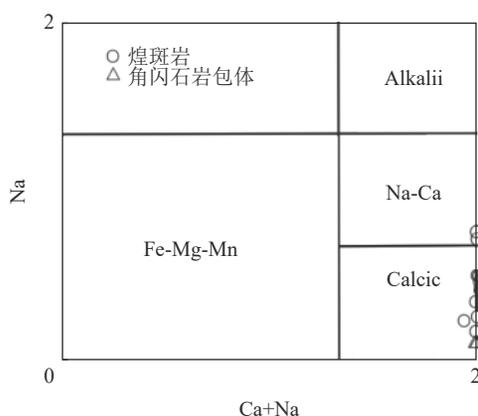


图7 角闪石分类图解^[12]

Fig.7 Diagram for classification of amphibole

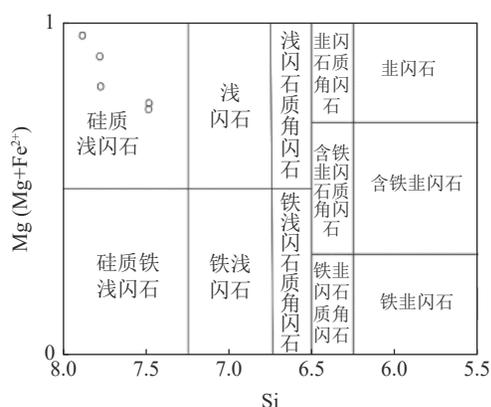


图8 钙质角闪石分类图解^[13]

Fig.8 Diagram for classification of calc-amphibole

表4 甬哥碱性杂岩体辉石代表性电子探针分析结果/%

Table 4 Representative EPMA results for pyroxene in Bengge alkaline igneous complex

样品号	05B1 #1	05B1 #2	02-b #1	02-b #2	02-b #3	02-b #4	04-b #5	04-b #6	04-b #7	04-b #8
岩石名称	煌斑岩		正长斑岩				正长斑岩			
SiO ₂	52.70	51.08	51.59	52.92	51.46	51.61	50.84	51.33	53.91	52.42
TiO ₂	0.24	0.18	0.37	0.26	0.32	0.21	0.28	0.27	0.16	0.25
Al ₂ O ₃	0.67	0.86	1.13	0.63	1.18	0.68	1.19	1.19	0.48	0.84
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.02	0.12	0.04	0.05	0.01	0.02	0.43	0.01
FeO	7.66	9.51	9.56	6.89	9.55	9.09	8.08	8.07	2.91	8.41
MnO	0.24	0.42	0.35	0.27	0.31	0.42	0.26	0.31	0.03	0.44
MgO	14.76	12.26	12.99	14.70	12.58	13.27	14.21	14.63	17.97	13.93
CaO	22.17	22.56	22.26	23.18	22.56	22.86	22.13	22.36	22.23	22.81
Na ₂ O	0.35	0.47	0.42	0.25	0.42	0.44	0.23	0.38	0.18	0.49
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01
Total	98.80	97.35	98.69	99.22	98.43	98.63	97.23	98.57	98.31	99.59
阳离子数 (以6个氧原子为基础)										
Si	1.98	1.98	1.96	1.98	1.97	1.97	1.95	1.94	1.99	1.97
Al(IV)	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05	0.01	0.01	0.03
Al(VI)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.03	0.05	0.05	0.02	0.04	0.08	0.07	0.10	0.00	0.07
Fe ²⁺	0.21	0.25	0.25	0.19	0.26	0.21	0.19	0.15	0.09	0.19
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Mg	0.83	0.71	0.74	0.82	0.72	0.75	0.81	0.83	0.99	0.78
Ca	0.89	0.93	0.91	0.93	0.92	0.93	0.91	0.91	0.88	0.92
Na	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.04
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	44.80	46.81	45.61	46.67	46.52	46.18	45.36	44.81	44.59	45.67
En	41.49	35.40	37.03	41.18	36.09	37.30	40.52	40.80	50.15	38.81
Fs	12.44	16.02	15.80	11.24	15.82	14.91	13.27	13.01	4.61	13.76
Ac	1.27	1.76	1.56	0.91	1.57	1.61	0.86	1.39	0.66	1.76

围也较宽 (69.8~91.7)。同一颗辉石不同部位的成分差异 (04-b#7) 可能表明辉石并非在岩浆正常的演化过程中结晶而来, 可能是突然的岩浆混合或混染导致其非平衡结晶, 也可能暗示有交代作用的参与使其成分发生改变。将本区辉石成分与滇西新生代富碱斑岩及其深源包体中的辉石成分^[11]进行对比, 除 MgO 明显偏高, Al₂O₃ 明显偏低以外, 其余组分基本相当, 个别样品各成分之间有不同程度的差异。在单斜辉石成分分类图解中 (图 9), 所有辉石成分投影点均落入透辉石区。本文采用 Putirka (2008) 单斜辉石温压计^[17]计算出煌斑岩中辉石形成温度为 1171.3℃, 压力为 14.1 kbar (1410 MPa), 换算成深度为 46.5 km, 略大于滇西地区地壳厚度 (42 km), 处于下地壳与上地幔的过渡带^[18], 因此煌斑岩原始岩浆可能起源于上地幔。另外, 曹殿华等^[1]在甬哥正长岩体中发现少量放射状碱性暗色矿物霓辉石, 但本文没有见到此类碱性暗色矿物的出现, 结合本区岩石的过碱性特征^[6], 表明岩浆本身并不十分富集碱质, 而可能是受富碱质流体作用使岩体富碱高钾。在辉石化学成分类型图解中 (图 10), 该区辉石均落在非碱性区附近, 表明它们可能为原始上地幔组成矿物^[12]。

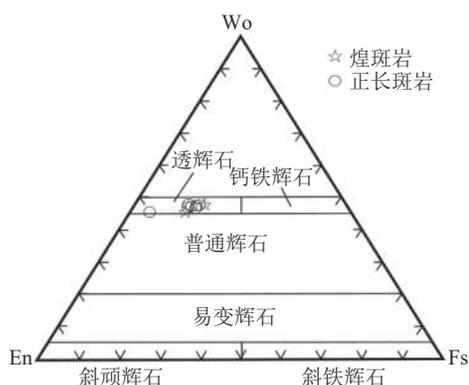
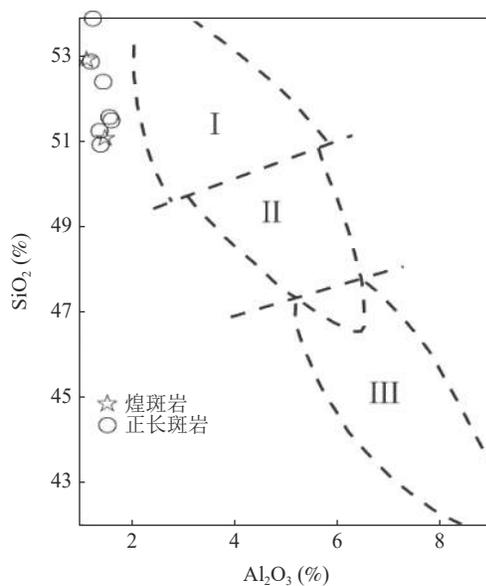


图 9 单斜辉石 Wo-En-Fs 分类图解^[16]
Fig.9 Wo-En-Fs diagram for classification of clinopyroxene

5 讨论

5.1 岩体成岩作用

甬哥碱性杂岩体岩石类型复杂, 成分来自不同源区, 并经历了一系列的岩浆及岩浆期后深部地质作用过程, 对原岩改造破坏较强烈。从已有的资料来看, 甬哥碱性杂岩体具有从晚三叠~渐新世的年龄信息 (锆石 U-Pb 220~200



I: 非碱性区, II: 碱性区, III: 过碱性区
图 10 辉石化学成分类型图解^[19]

Fig.10 Diagram for chemical composition classification of pyroxene

Ma, 锆石 U-Pb 192 Ma, 锆石 U-Pb 167~87 Ma, 全岩 K-Ar 89 Ma, 锆石 U-Pb 35 Ma, 全岩 K-Ar 28.2 Ma)^[1-2,5,20-21]。这些年龄数据虽然是采用不同测试方法获得。结合岩相学、矿物学及岩石地球化学特征, 本文认为这代表了从晚三叠到新生代多期次多阶段的岩浆或流体活动。曹殿华等^[1]在甬哥正长岩体中发现放射状霓石 (霓辉石), 但含量不高。而本文在研究过程中并未发现明显的碱性暗色矿物, 这表明原始熔浆并不富碱或含碱质很低, 或者在暗色矿物结晶前富碱岩浆中已经发生了碱质流体分异。而分异出来的碱质流体, 是与杜乐天提出的幔汁 (HACONS) 成分及性质类似的一种超临界性质的流体^[22], 以富硅碱, 高挥发分为特征。此种流体呈不混溶状态与岩浆同步上升运移, 并随着岩浆作用参与从高温→低温的系列交代作用。曹殿华等^[1]认为甬哥正长岩体并非幔源玄武岩浆分异而来, 且源区不含斜长石, 而是甘孜理塘洋片向西俯冲在深部形成正长岩原始岩浆后沿伸展构造快速上升而成, 在此过程中存在多期次的分离结晶作用。曾普胜等^[3]认为中甸地区的甬哥碱性岩体为上地幔部分熔融后的熔体结晶分异并受地壳物质强烈混染而成。葛良胜等^[4]认为滇西北岩体 (脉) 是同源岩浆演化的产物, 是源区岩石较低温度部分熔融形成, 源区具有壳幔混合性质, 并可能以下地壳下部或上

地幔上部为主，岩体的形成具有明显的多次活动特征且结晶分异程度较低。本文在前人研究基础上，综合青藏高原东缘及整个滇西三江地区钾质与超钾质火成岩及富碱斑岩等时空分布特征，认为甬哥碱性杂岩体为多期岩浆活动产物。磷灰石裂变径迹指示的热年代学特征表明甬哥岩体存在一个缓慢的冷凝固晶过程^[23]，这与正长石斑晶结晶粗大，晶形完整且自形程度高，发育生长环带等特征相吻合。然而，包体的存在表明岩浆上升速率较快。看似矛盾的情况实际上是代表了不平衡的封闭体系下多期次的分离结晶，而这种不平衡的封闭体系是由于镁铁质岩浆与长英质岩浆混合后造成。

众所周知，正长岩岩浆是无法经过地幔岩石部分熔融作用直接产生，一般被认为是由幔源碱性玄武岩岩浆分异而来。上文已表明甬哥正长岩不具幔源玄武岩岩浆分异作用特征，因此其成因无法用单一机制来解释。甬哥岩体正长岩 201.4 Ma 的年龄数据暗示其原始岩浆的形成与晚三叠世印支期甘孜理塘洋片西向俯冲有关。此外，该地区以北发育一条北西向印支期中酸性侵入岩带^[24-25]，其中部分岩体也表现出高钾的特征^[25]，而且均已被证实系甘孜理塘洋片俯冲的产物。因此，甬哥岩体与其相邻的印支期中酸性岩体在晚三叠时期有着相同或相似的岩浆作用机制，蚀变钠长岩包块代表了这期岩浆作用的残留。该阶段岩浆形成后，在碰撞挤压环境下^[1-2]并没有较好的上升通道和动力源，而是在离源区（下地壳或壳幔过渡带）很近的部位缓慢冷凝固晶，在此过程中不断有新的岩浆加入。直到新生代，印度-欧亚两大板块强烈碰撞，导致青藏高原隆升^[11]，同时作为对这次碰撞的响应及调节，先后沿冈底斯带，中昆仑-藏北可可西里，羌塘-囊谦-滇西发育大量包括煌斑岩在内的高钾—超钾质火山岩^[11,26]，且已证实此类高钾—超钾质火成岩均来自于受俯冲流体交代的富集地幔^[26]。因此，该区煌斑岩很可能与青藏高原附近发育的高钾—超钾质火山岩来源相同，系地壳缩短加厚，岩石圈拆沉引发软流圈上涌，受洋片俯冲流体交代的富集地幔发生部分熔融而成。原始岩浆在伸展环境中沿通道快速上升，沿途经过复杂的岩浆作用分异出碱质流体。当运移至晚三叠时期的中酸性侵入体缓慢冷凝的聚集部位时，由于镁铁质岩浆温度远远高于中酸

性岩浆，使得该侵入体发生重熔并一起继续上升运移。在两种岩浆同步上升过程中发生混合混染及碱质流体交代作用。然而，与甬哥碱性杂岩体临近的印支期中酸性阿热侵入体并没有遭受相同的岩浆作用过程，很可能是因为甬哥地区深部存在不同的构造体系使得下地壳管流作用^[23]受到限制，也可能是甬哥地区深部岩石圈不均衡，甘孜理塘洋向西俯冲时发生板片弯折撕裂造成俯冲深度不一致所致。

5.2 混染与交代作用

甬哥碱性杂岩体及其包体岩相学及矿物学分析表明了岩浆混合及混染作用的存在。这种混染与混合作用直接导致甬哥岩体不同岩石类型成分趋于一致，非平衡分离结晶等现象。由于镁铁质岩浆在温度、密度、粘度等物化性质上与中酸性岩浆差异较大，因此这两种岩浆发生混合时并不能达到均一化，也就是说它们之间不能完全相熔，但存在一定的物质能量交换，两者在同一封闭体系中又呈互不混溶状态独立存在。另一方面，该封闭体系中还存在一种富硅碱质的流体，该流体参与了甬哥碱性杂岩体的成岩成矿作用。杜乐天^[27]指出流体碱质主要来源于地幔、岩浆分异、混合岩化、地壳膏盐层、火山喷发大量脱酸、各种热卤水及浓海水。结合甬哥岩体岩相学及矿物学特征，该富硅碱质流体应主要来自地幔及岩浆分异。由于不同矿物结晶温度深度不同，该流体参与的交代作用过程也经历了从高温到低温的变化。煌斑岩中角闪石则表明流体交代作用从碱交代向硅交代变化。

5.3 对金成矿作用的制约

前述岩相学及矿物学分析表明，甬哥岩体在岩浆期及成岩期后受到过富硅碱流体作用，该流体就是一种具透岩浆流体属性的含矿地幔流体，在其与岩浆耦合与解耦的运移过程中，以其超强的化学活性沿途活化迁移围岩中的物质成分以促进壳幔混染叠加成矿。综合物化探及遥感资料显示，甬哥岩体所在区域有明显的 Au、Ag 矿化异常^[28]。从岩体剥蚀较浅，含金脉体多与石英脉密切伴生，岩体钾化强烈并出现大量含金属硫化物钾长石脉等野外地质特征来看，出露地表的矿脉很可能是二氧化硅熔体或碱质流体沿裂隙上升到浅部时所携带的少部分金属成矿物质，并在地表

水如大气降水的影响下使得围岩中的金属元素进一步富集而成,而大量成矿物质应定位在深部的物理化学边界层或混沌边缘(如含有丰富可交换离子的膏盐层或使流体流速减小的断裂构造膨大部) [29]。事实上,当岩浆孔隙度较高,渗透压力足够大时,这种情况是可能发生的。罗照华等 [30] 指出,当岩石冷凝速率较慢,渗透率较大时,含矿流体将会与岩浆体成功分离,受岩浆热的驱动而远离岩浆体,并在合适的物化条件部位(混沌边缘或物理化学边界层)停留聚集成矿。该含矿流体在某种程度上就是一类富含挥发分和硅碱的深源流体 [31]。

此外,区域上与富碱侵入岩有关的大型超大型典型矿床如北衙金矿 [32]、长安金矿 [33] 等矿体赋存部位均与碳酸盐岩地层紧密相关。然而出露于地表的甬哥碱性杂岩体侵位围岩为上三叠统砂板岩等碎屑岩类,这类岩石渗透压较小,化学性质不活泼,且较易发生塑性变形,因此不利于含金成矿流体趋向于它们运移。但是,区域地质背景显示,上三叠统图姆沟组砂板岩下伏为中三叠统尼汝组,是一套以灰岩及大理岩为主的碳酸盐岩层。因此,可以预测在甬哥碱性杂岩体侵位深部与碳酸盐岩地层接触带附近很可能存在富矿体。

6 结 论

(1) 甬哥碱性杂岩体岩石类型复杂,代表了多期次岩浆作用的结果。煌斑岩与正长岩并非同源演化产物,正长岩为晚三叠甘孜理塘洋片向西俯冲的结果,源区可能为下地壳或壳幔过渡带;而煌斑岩则为新生代印度—欧亚板块强烈碰撞引发的钾质—超钾质火山岩,源区可能为受俯冲流体影响的富集地幔。它们的原始岩浆在同一封闭体系共存,并相互发生不均一的混合,同时伴随地壳物质混染及交代作用。

(2) 碱性杂岩体存在明显的交代作用特征,富硅碱质交代流体很可能与煌斑岩同源,或者本身就由煌斑岩的原始岩浆分异而来,并在同一岩浆体系中与主岩浆呈独立的不混溶状态,伴随成岩过程和成岩后进行交代作用。

(3) 岩体中两类特殊岩石——伟晶岩化钾长石脉和蚀变钠长岩包块,前者代表富钾质流体的

残余结晶,后者代表晚三叠中酸性岩石受到新生代钾质—超钾质岩浆及流体活动的残留。

(4) 甬哥碱性杂岩体与其邻近的晚三叠中酸性侵入体有着截然不同的岩相学及矿物学特征,很可能是由于甬哥地区深部岩石圈不均衡,甘孜理塘洋向西俯冲时发生板片弯折撕裂造成俯冲深度不一,进而导致深部构造体系发生差异使得富碱质流体或钾质—超钾质流体的下地壳管流作用受到限制。

(5) 岩相学和矿物学研究表明甬哥岩体存在明显的富硅碱流体交代叠加改造作用,这些富硅碱流体实质上很可能是一类含金地幔流体,对先形成岩体进行交代和成矿。结合矿体特征和围岩及构造性质,推测其深部具有较大成矿潜力。

参 考 文 献:

- [1] 曹殿华,王安建,修群业,等. 中甸地区甬哥正长岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(7):995-1003.
- CAO D H, WANG A J, XIU Q Y, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Noge syenite in Zhongdian area[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 81(7):995-1003.
- [2] 杨岳清,侯增谦,黄典豪,等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 2002, 23(1):17-24.
- YANG Y Q, HOU Z Q, HUANG D H, et al. Zhongdian arc collision orogeny and magmatic metallogenic system[J]. Chinese Journal of Geosciences, 2002, 23(1):17-24.
- [3] 曾普胜,杨伟光,喻学惠. 滇西富碱斑岩带及其与金矿化的关系[J]. 地球学报, 1999, 20(S1):367-372.
- ZENG P S, YANG W G, YU X H, et al. The alkali-rich porphyry belt in western Yunnan and its relationship with gold mineralization[J]. Chinese Journal of Geosciences, 1999, 20(S1):367-372.
- [4] 葛良胜,邹依林,邢俊兵,等. 滇西北与喜马拉雅期富碱斑岩有关的金矿成矿系统[J]. 黄金地质, 2004, 10(1):39-47.
- GE L S, ZOU Y L, XING J B, et al. Gold metallogenic system related to Himalayan alkali-rich porphyry in northwestern Yunnan[J]. Gold Geology, 2004, 10(1):39-47.
- [5] 武玉海,葛良胜,邢俊兵,等. 滇西北与新生代富碱斑岩体(脉)有关的金矿床区域成矿模式[J]. 地质找矿论丛, 2004, 19(3):159-167.
- WU Y H, GE L S, XING J B, et al. The regional metallogenic model of gold deposits related to cenozoic alkali-rich porphyry

- bodies (veins) in northwestern Yunnan[J]. *Journal of Geological Prospecting*, 2004, 19(3):159-167.
- [6] 黄玉蓬, 刘显凡, 邓江红, 等. 滇西北甬哥岩体成岩与成矿地质地球化学特征分析[J]. *矿物学报*, 2011, 31(S):349-350.
- HUANG Y P, LIU X F, DENG J H, et al. Analysis of the diagenesis and metallogenic geological and geochemical characteristics of the Bengge pluton in Northwestern Yunnan[J]. *Acta Mineralogy*, 2011, 31(S):349-350.
- [7] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004(5):459-464.
- LU Y F. GeoKit: a package of geochemical tools constructed with VBA[J]. *Geochemistry*, 2004(5):459-464.
- [8] 谢应雯, 梁华英, 张玉泉. 藏东及邻区钾玄岩系岩石云母特征及其岩石学意义[J]. *岩石学报*, 2002, 18(2):205-211.
- XIE Y W, LIANG H Y, ZHANG Y Q. Mica characteristics and petrological significance of shoshonite rocks in eastern Tibet and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Petrology*, 2002, 18(2):205-211.
- [9] 程启芬, 毛建仁, 苏郁香, 等. 长江中下游中酸性侵入岩中的黑云母及其地质意义[J]. *中国科学院南京地质科学院地质矿产研究所所刊*, 1987, 8(3):56-70.
- CHENG Q F, MAO J R, SU Y X, et al. Biotite in medium-acid intrusive rocks in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its geological significance[J]. *Journal of Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing Academy of Geological Sciences, Chinese Academy of Sciences*, 1987, 8(3):56-70.
- [10] 林培英. 光性矿物学试验教程[M]. 北京: 武汉地质学院北京研究生院内部教材, 1986: 1-100.
- LIN P Y. Optical mineralogy experiment course [M]. Beijing: Internal Textbook of Beijing Graduate School of Wuhan Institute of Geology, 1986: 1-100.
- [11] 莫宣学 主编. 青藏高原新生代碰撞——后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 2009, 231-238.
- MO X X Editor-in-chief. Cenozoic collision of the Qinghai-Tibet Plateau —post-collision igneous rocks [M]. Beijing: Geological Press, 2009, 231-238.
- [12] Leake B E, Woolley A R and Youzhi G, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61:295-321.
- [13] Leake B E. Nomenclature amphiboles[J]. *Mineralogical Magazine*, 1978, 42:533-563.
- [14] Compton J S, Oberti R and Ghose S. Crystal-chemistry of a complex Mn-bearing alkali amphiboles (“tirodite”) on the verge of exsolution[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1993, 5(6):1153-1160.
- [15] Filippo Ridolfi, Alberto Renzulli, Matteo Puerini. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 2010, 160(1):45-66.
- [16] Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 1988, 52:431-435.
- [17] Putirka K. Thermometers and barometers for volcanic systems[J]. *Minerals, Inclusions and Volcanic Processes, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Soc. Am., 2008, 69:61-120.
- [18] Barton M, Bergen M J. Green clinopyroxenes and associated phases in a potassium-rich lava from the Leucite Hills, Wioming[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1981, 77:101-114.
- [19] 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1989, 1-544.
- WANG K R. Mineralogy of the earth and the origin of the universe [M]. Hefei: Anhui Education Press, 1989, 1-544.
- [20] 姜丽莉. 云南甬哥金矿床地质特征及含矿岩体成岩研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 1-60.
- JIANG L L. Geological characteristics of the Bengge gold deposit in Yunnan and research on the diagenesis of the ore-bearing rock mass [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 1-60.
- [21] 刘晓. 云南中甸地区甬哥金矿正长岩研究及其与成矿作用关系 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 1-49.
- LIU X. Research on syenite in the Bengge gold deposit in Zhongdian, Yunnan and its relationship with mineralization [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014: 1-49.
- [22] 杜乐天. 幔汁 (HACONS 流体) 地球内动因探索 [J]. *地球学报*, 2009, 30(6):739-748.
- DU L T. Exploration of intra-earth drivers of mantle juice (HACONS Fluid)[J]. *Chinese Journal of Earth Sciences*, 2009, 30(6):739-748.
- [23] 李春辉. 藏东南 (中甸) 区域隆升动力模型: 地球化学和热年代学 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 1-53.
- LI C H. Dynamic model of uplift in Southeast Tibet (Zhongdian): geochemistry and thermochronology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 1-53.

- [24] A J Reid, C J L Wilson, Shun Liu, et al. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotopic signature[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31:88-106.
- [25] 任涛, 钟宏, 陈金法, 等. 云南中甸地区浪都高钾中酸性侵入岩的地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2011, 31(1):43-54.
- REN T, ZHONG H, CHEN J F, et al. Geochemical characteristics of high-potassium medium-acid intrusive rocks in Langdu, Zhongdian, Yunnan[J]. *Mineralogy*, 2011, 31(1):43-54.
- [26] 李献华, 周汉文, 韦刚健, 等. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约[J]. *地球化学*, 2002, 31(1):9-13.
- LI X H, ZHOU H W, WEI G J, et al. Elemental and Sr-Nd isotopic characteristics of cenozoic ultrapotassic lamprophyre in Western Yunnan and its constraints on the composition of the lithospheric mantle[J]. *Geochemistry*, 2002, 31(1):9-13.
- [27] 杜乐天. 碱交代作用地球化学原理[J]. *中国科学 B 辑*, 1986(1):81-90.
- DU L T. The Geochemical principle of alkaline metasomatism[J]. *Science of China Series B*, 1986(1):81-90.
- [28] 李文昌, 卢映祥, 尹光候, 等. 西南三江南段找矿重大疑难问题研究报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院, 2006.
- LI W C, LU Y X, YIN G H, et al. Research report on major difficult problems in prospecting in the south section of three rivers in Southwest China [R]. Kunming: Yunnan Geological Survey Institute, 2006.
- [29] 於崇文. 矿床在混沌边缘分形生长(上)[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2006: 1-789.
- YU C W. Fractal growth of ore deposits on the edge of chaos (Part 1) [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2006: 1-789.
- [30] 罗照华, 卢欣祥, 郭少丰, 等. 透岩浆流体成矿体系[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12):2669-2678.
- LUO Z H, LU X X, GUO S F, et al. Transmagmatic fluid metallogenic system[J]. *Chinese Journal of Petrology*, 2008, 24(12):2669-2678.
- [31] 刘显凡, 蔡永文, 卢秋霞, 等. 滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1):114-135.
- LIU X F, CAI Y W, LU Q X, et al. The traces of mantle fluids in alkali-rich porphyries in Western Yunnan and their significance for mineralization[J]. *Frontiers of Geosciences*, 2010, 17(1):114-135.
- [32] 和文言. 滇西北衙超大型金多金属矿床岩浆作用与成矿模式[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 1-142.
- HE W Y. Magmatism and metallogenic model of the Ya ultra-large gold polymetallic deposit in northwestern Yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 1-142.
- [33] 田广, 张长青, 彭惠娟, 等. 哀牢山长安金矿成因机制及动力学背景初探: 来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和黄铁矿原位微量元素测定的证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1):125-138.
- TIAN G, ZHANG C Q, PENG H J, et al. A preliminary study on the genetic mechanism and dynamic background of the Chang'an gold deposit in Ailaoshan: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and in-situ trace element determination of pyrite[J]. *Chinese Journal of Petrology*, 2014, 30(1):125-138.

Petrographical and Mineralogical Characteristics of Bengge Alkaline Igneous Complex in Zhongdian, Western Yunnan and Its Geological Significance

Huang Yupeng¹, Zou Jinxi², Liu Qingqiang³, Wu Chunzhang³, Liu Xianfan⁴, Deng Jianghong⁴, Ren Kefa⁴
 (1.Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan, China; 2.Natural Resources and Planning Bureau of Dongpo District, Meishan, Sichuan, China; 3.Chengdu Geological Survey, Sichuan Bureau of Metallurgical Geology and Exploration, Chengdu, Sichuan, China; 4.Institute of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Bengge alkaline igneous complex in Zhongdian, Western Yunnan has the variety of rock types, which is production after a complex magma—fluid process. The petrographical and mineralogical analysis of the host rock and its xenolith suggests that the igneous complex has magma mixing and contamination, and metasomatism features. The light-colored minerals in different rock types of Bengge pluton are orthoclase,

and individual sample which represent s magma mixing and metasomatism residual has the plagioclase. The dark minerals show the characters of rich-Si, Mg, and poor-Al, alkali. The magmatic source of different rock types is different. The production of syenite was related to Ganze-Litang oceanic flat subduction in late Triassic, and its origin was crust-mantle mixing source. While the lamprophyre was the production that the mantle source of potassic-ultrapotassic magmatism was caused by India-Eurasia plate collision in Cenozoic. The two magmas with different properties coexisted in the same closed system, and magma mixing, contamination, metasomatism had occurred in the magma transfer and petrogenetic process. Therefore, the petrogenesis of Bengge alkaline igneous complex subjects to the multi-stages overlying process of magma-fluid-tectonism which is mainly oceanic crust subduction.

Keywords: Petrographical and mineralogical characteristics; Magma mixing; Potassic- ultrapotassic; Metasomatism; Multi-stages overlying; Bengge alkaline igneous complex



(上接第 73 页)

High-density Electrical Exploration Test of Hidden Fault Zone in Southern Rare Earth Mining Area

Chen Shu¹, Shu Rongbo², Min Gang¹, Liu Kang¹, Yuan Huilin¹, Cheng Rong²

(1.Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 2.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The current mining mode of rare earth mines in southern China is still the in-situ leaching mode. For this mining mode, the fractured structures, underground rivers, karst and other unfavorable geological bodies developed underground in the mine will seriously reduce the recovery rate of the leaching liquid. The leaching liquid leaking along the bad geological bodies will cause serious pollution to the environment, so it is of great significance to investigate the development status of the bad underground geological bodies in the mine. Based on the stratum distribution and structural characteristics of the C2 mining area of a rare earth mine in the south, this article first carried out high-density electrical method parameter experiments, selected appropriate measurement parameters and the Wenner-Schlumberg 2 device measurement mode, and completed the high-density of 4 survey lines Electrical measurement; the hidden electrical structure model of the study area is obtained through inversion calculation, the thickness of the weathered layer (stratum rich in rare earth minerals) and the spatial distribution characteristics of the hidden fault structure are delineated, the results are interpreted and the drilling of the study area layout The results are consistent. The exploration results provide important reference materials for the reserve evaluation of ionic rare earth ore, the plugging of seepage channels, and the layout of liquid collection roadways.

Keywords: Ionic rare earth ore; High-density electrical method; Leakage channel; Fracture structure