

扬子地台西南缘高家村岩体成因:岩石学、地球化学和年代学证据*

杜利林^{1,2} 杨崇辉¹ 耿元生¹ 王新社¹ 任留东¹ 周喜文¹

DU LiLin^{1,2}, YANG CongHui¹, GENG YuanSheng¹, WANG XinShe¹, REN LiuDong¹ and ZHOU XiWen¹

1. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

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

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-12-09 收稿,2009-02-10 改回.

Du LL, Yang CH, Geng YS, Wang XS, Ren LD and Zhou XW. 2009. Petrogenesis of the Gaojiacun mafic-ultramafic pluton at the southwestern margin of Yangtze Block: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1897-1908

Abstract The mineral assemblage, crystallizing sequence and ubiquitous occurrence of hornblende in the gabbro-peridotite pluton near Gaojiacun Village, Yanbian County, Sichuan Province, all indicate that the rocks formed from the hydrous magma. The obvious negative correlations between the major components Al_2O_3 , CaO and MgO imply that plagioclase is not an early cumulate phase. With the total REE contents from 5.97×10^{-6} to 221.32×10^{-6} , the LREE are moderately enriched and the LREE and HREE are weak to moderately differentiated. While the Eu anomaly is weak in gabbro and pyroxene-bearing diorite, but prominent in olive-gabbro and peridotite. As to the trace elements, negative anomalies of Nb, Ta, Zr, Hf and Ti, but positive anomalies of Ba and Sr can be observed in the gabbro and pyroxene-bearing diorite. Meanwhile the $\epsilon_{Nd}(t)$ gives the range of 0.59 ~ 1.86, which is lower than that of the contemporaneous depleted mantle, suggesting the similar feature to that of basic magma of the island arc. In addition, the Neoproterozoic age, 822 ± 8 Ma, is obtained with SHRIMP U-Pb analysis of zircon from the pyroxene bearing diorite. Summarizingly the Gaojiacun pluton was derived from the partial melting of the depleted upper mantle which had experienced alteration by the fluids from the subduction zone.

Key words Gaojiacun mafic-ultramafic pluton; Geochemistry; Island arc; Neoproterozoic

摘要 高家村岩体辉长岩-橄辉岩中矿物组合、矿物结晶顺序及岩浆成因角闪石的普遍出现,指示矿物结晶于富含水的岩浆体系。主量元素 Al_2O_3 、CaO 与 MgO 呈明显的负相关关系,表明斜长石并非早期堆晶相。稀土元素含量为 5.97×10^{-6} ~ 221.32×10^{-6} ,轻稀土元素相对富集,弱-中等程度轻重稀土元素分异,辉长岩-含辉石闪长岩无明显的 Eu 异常,而橄辉岩-橄辉岩具有较明显的正 Eu 异常。微量元素中,辉长岩-含辉石闪长岩类具有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 负异常, Ba、Sr 正异常,同时 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 0.59 ~ 1.86,低于同期的亏损地幔值,与岛弧基性岩浆特征类似。含辉石闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄结果 822 ± 8 Ma,为新元古代。综合分析认为,高家村岩体应形成于受俯冲带流体改造的亏损上地幔部分熔融。

关键词 高家村岩体;地球化学;岛弧;新元古代

中图法分类号 P588.124;P588.125;P597.3

扬子地台周围分布有大量的新元古代岩浆岩。对于这些岩浆岩的成因存在明显不同的认识:Li *et al.* (1999) 将华

南中元古代末—新元古代地质演化与 Rodinia 超大陆的研究相联系,认为扬子地台周围新元古代岩浆活动与 Rodinia 超

* 国家自然科学基金(40603001)和中国地质调查局地质调查项目(200313000061)资助。

第一作者简介:杜利林,男,1973年生,副研究员,从事前寒武纪地质研究,E-mail: dulilin7310@cags.net.cn

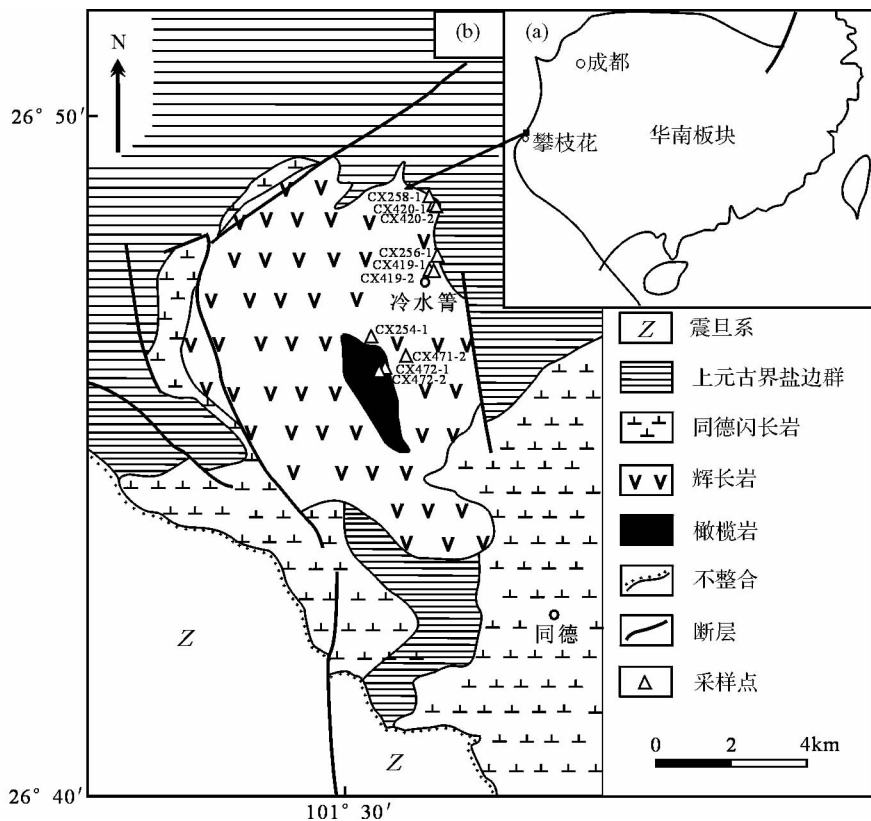


图1 高家村岩体地质略图(a,据Li *et al.*, 2006 简化;b,据1:20万盐边幅地质图①)

Fig. 1 Sketch map of Gaojiacun mafic-ultramafic pluton (a, simplified after Li *et al.*, 2006)

大陆裂解时的地幔柱有关。Zhou *et al.* (2002) 研究表明, 扬子西北缘新元古代花岗岩时间跨度大, 且具有同碰撞花岗岩特征, 认为这些岩浆岩与岛弧俯冲有关; Wang *et al.* (2006) 发现江南造山带西段出露的新元古代花岗岩具有造山带后碰撞花岗岩的特征。

沿扬子地台西缘出露一些与中酸性岩浆岩同时代的基性-超基性岩体, 高家村岩体是其中规模较大的岩体之一。李继亮(1984)、沈上越等(1986)、孙传敏(1994a, b) 认为, 高家村基性-超基性岩与盐边群玄武岩、沉积岩组成典型的蛇绿岩组合。从柏林(1988) 研究发现, 高家村岩体与盐边群地层为侵入接触关系, 两者不属于同一套组合, 并提出高家村基性-超基性岩体形成于岛弧环境。随着华南新元古代地质演化与 Rodinia 超大陆研究相联系, 高家村岩体主要存在两种成因观点: 地幔柱成因(朱维光等, 2004; Zhu *et al.*, 2006), 岛弧成因(沈渭洲等, 2003; Zhou *et al.*, 2006; Munteanu *et al.*, 2006)。对于高家村岩体的形成时代, K-Ar 年龄报道为中元古代(朱宗祥, 1983)。沈渭洲等(2003) 用单颗粒锆石 U-Pb 法得到的年龄为 936Ma, 而朱维光等(2004) 用相同方法所获得年龄为 840Ma, 两者相差近 100Ma。Zhu *et al.* (2006)、Zhou *et al.* (2006) 最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年

龄结果分别为 $825 \pm 12\text{Ma}$ 和 $806 \pm 4\text{Ma}$ 。证实高家村镁铁质-超镁铁质岩形成于新元古代, 但具体的年龄结果仍有差异。

对于高家村岩体成因存在争议的原因在于对其地球化学特征的理解和解释。地球化学数据有不同的理解, 将其与其他地质证据相结合才能得到合理的解释(Li *et al.*, 2007)。本文以岩石学为基础, 通过岩相学观察, 结合岩石地球化学分析结果和区域构造变形特征, 认为高家村岩体结晶于富含水的岩浆体系, 形成环境类似于岛弧基性火山岩; 具体的侵位时间是 $822 \pm 8\text{Ma}$, 为新元古代。

1 地质背景

高家村基性-超基性岩体位于攀枝花市同德镇北约 10km, 平面上形态不规则, 南北长约 9km, 东西宽约 7.5km。岩体侵位于上古界盐边群地层(杜利林等, 2005; Zhou *et al.*, 2006) 和同德辉长闪长岩中(图 1)(Munteanu *et al.*, 2006), 接触面向岩体倾斜, 倾角陡(沈渭洲等, 2003)。岩体靠近围岩附近有围岩地层的捕虏体, 接触带附近围岩发生明显的接触变质作用, 出现透辉石、夕线石、堇青石、石榴子石等变质矿物, 局部可见碳质板岩因热烘烤使碳质活化变质重

① 四川省地质局第一区域地质测量队. 1972. 中华人民共和国 1:20 万地质图(盐边幅)

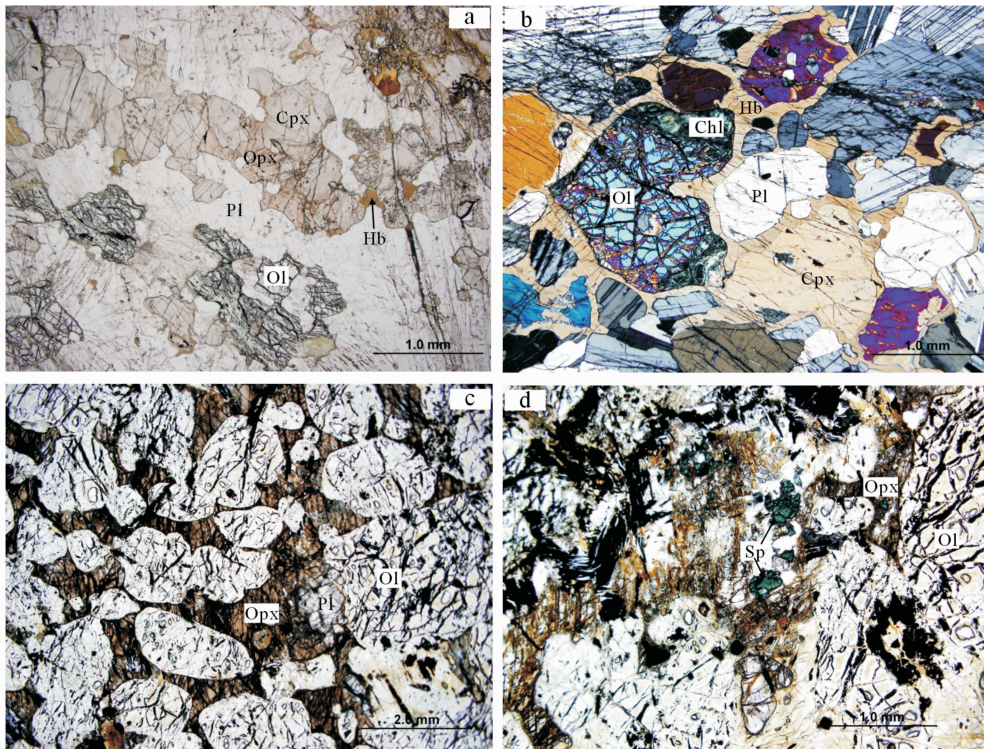


图2 高家村岩体岩相学特征

a-橄辉岩中呈他形粒状的辉石;b-橄辉岩中单斜辉石的角闪石反应边;c-橄岩中他形粒状斜方辉石;d-橄岩中细粒尖晶石

Fig. 2 Petrographic features of Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

a-anhedron pyroxene in oliver-gabbro; b-hornblende reaction rim texture in oliver-gabbro; c-anhedron orthopyroxene in peridotite; d-fine grain spinel in peridotite

结晶形成石墨片岩。

高家村岩体是一个分异良好的同心环状侵入体,各相呈渐变过渡关系。岩石类型较为复杂,由外向内大体上可划分为三个岩相带:角闪辉长岩、苏长辉长岩和橄辉岩,岩体中心出露有范围不大的超基性岩(沈渭洲等,2003)。Munteanu *et al.* (2006)将高家村岩体划分为内带和外带,内带所占比例不足整个岩体的10%,以橄岩、辉长岩为主;外带主要为辉长岩,有少量橄岩。岩体中橄岩矿物结构反映其为典型的堆晶岩(沈渭洲等,2003;朱维光等,2004),矿物结晶顺序为:橄石→单斜辉石(斜方辉石)→斜长石→(角闪石)(朱维光等,2004;Zhu *et al.*, 2006)。本文从高家村岩体边部到中心不同位置采集了20余件新鲜样品,对10件样品进行了较系统地球化学分析,分别为边缘相含辉石闪长岩: CX419-1、CX419-2(26°47.694'N, 101°31.288'E),辉长岩: CX420-1、CX420-2(26°48.351'N, 101°31.588'E), CX256-1(26°47.992'N, 101°31.627'E), CX258-1(26°48.812'N, 101°31.297'E);中间相橄辉岩: CX254-1(26°46.624'N, 101°30.087'E), CX471-2(26°46.444'N, 101°30.913'E);内部相橄岩: CX472-1、CX472-2(26°46.309'N, 101°30.655'E)。

2 岩相学特征

边缘相含辉石闪长岩:主要组成矿物为斜长石(45% ~

55%)、角闪石(30% ~ 35%)、辉石(2% ~ 10%),少量石英(5%)和磁铁矿(2%)。斜长石自形板状,粒度大小1 ~ 3mm,聚片双晶发育;角闪石自形—他形,粒度多为1 ~ 2mm;辉石粒状,以单斜辉石为主,多小于0.5mm,常被包裹于角闪石颗粒中;石英呈他形粒状,粒度多小于0.2mm;磁铁矿他形,粒度0.5 ~ 1mm。另外,个别样品中可见极少量的黑云母和碳酸盐矿物。辉长岩:主要组成矿物为斜长石(50% ~ 60%)、辉石(25% ~ 30%),少量的磁铁矿、黑云母和角闪石。斜长石自形板状—他形,粒度0.2 ~ 0.5mm;辉石以单斜辉石为主,自形柱状,粒度0.1 ~ 0.5mm。

中间相橄辉岩:主要组成矿物为斜长石(60% ~ 65%)、辉石(25% ~ 30%),橄石(5% ~ 10%),少量的角闪石和磁铁矿。斜长石自形—半自形板状,粒度大小多为0.5 ~ 1mm;辉石中单斜辉石约占70% ~ 80%,两种辉石皆呈半自形柱状、他形粒状,粒度0.5 ~ 2mm(图2a);橄石呈粒状,粒度多0.5 ~ 1mm,其中裂纹发育;角闪石他形,多围绕着辉石呈反应边结构(图2b)。

内部相橄岩:主要组成矿物为橄石(80% ~ 85%)、辉石(10% ~ 15%),斜长石、磁铁矿少量,尖晶石极少量。橄石自形粒状—圆粒状,粒度大小0.2 ~ 3mm,部分已蛇纹石化、绿泥石化,裂纹发育,裂纹中多有磁铁矿充填;辉石以斜

方辉石为主,多呈他形充填在橄榄石矿物间隙中,少数呈圆粒状,粒度小于0.5mm(图2c);斜长石呈他形粒状充填在橄榄石颗粒间;尖晶石呈绿色,粒度小于0.2mm(图2d)。

3 分析方法

主、微量元素地球化学分析在中国科学院地质与地球物理研究所元素分析实验室完成。主量元素用X荧光光谱仪(XRF-1500)分析,分析误差小于3%;稀土与微量元素用ICP-MS分析,分析误差小于6%。Sr、Nd同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。Rb-Sr和Sm-Nd用双稀释剂法分离后在TIMS(MAT262)上测定,Sr、Nd同位素分馏分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。分析流程中实验室本底为:Rb、Sr小于100pg,Sm、Nd小于50pg。

锆石U-Pb年龄测定在北京离子探针中心SHRIMP II上完成,分析原理与流程见文献(Williams, 1998; 宋彪等, 2002)。应用锆石标样SL13(年龄572Ma, U含量 238×10^{-6})标定锆石的U、Th、Pb含量,应用锆石标样TEMORA(年龄417Ma)进行年龄校正。测试过程中一次离子流 O_2^- 的强度为6~7nA。每分析4个待测样品点进行一次TEMORA标样测定,每个测点记录采用5组扫描。数据处理采用Ludwig SQUID1.02及ISPLIT程序。普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正。单个测定的数据点误差采用 1σ 。年龄结果采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值,误差为 2σ (95%的置信度)。锆石阴极发光图像在北京离子探针中心的HITACHI S3000-N型扫描电子显微镜下完成。

4 分析结果

4.1 主量元素

主量元素分析表中(表1),含辉石闪长岩-橄榄辉长岩相对高 SiO_2 (44.94%~54.94%)、 Al_2O_3 (12.49%~21.44%)、 CaO (5.04%~13.50%)、 Na_2O (0.92%~3.50%),低 MgO (4.42%~14.10%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (5.69%~13.94%)、 TiO_2 (0.36%~2.95%)变化范围较大。而橄榄岩具有明显低 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O ,高 MgO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 特征。在 MgO 与主、微量元素谐变图解中(图3), $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、Cr、Ni与 MgO 呈明显的正相关; SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 与 MgO 呈明显的负相关;而 TiO_2 、TREE、Th、Zr、Nb与 MgO 相关性不明显。

4.2 微量元素

高家村岩体稀土元素含量变化范围较大(5.97×10^{-6} ~ 221.32×10^{-6})(表1)。橄榄辉长岩-橄榄岩具有非常低的稀土元素浓度,稀土元素总量小于 11×10^{-6} 。含辉石闪长岩-辉长岩稀土元素相对较高(61.75×10^{-6} ~ 221.32×10^{-6})。

在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解中(图4a),含辉石闪长岩-辉长岩与橄榄辉长岩-橄榄岩明显分成两组,橄榄辉长岩-橄榄岩的配分曲线位于含辉石闪长岩-辉长岩下方,两者近于平行,反映分离结晶的特征。轻稀土元素弱富集,轻重稀土元素具有弱-中等程度的分异($(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}} = 2.02 \sim 12.38$)。含辉石闪长岩-辉长岩的Eu异常不明显,而橄榄辉长岩-橄榄岩具有较为明显的正Eu异常。

橄榄岩具有很高的Cr、Ni含量,而其他微量元素相对于含辉石闪长岩-辉长岩都较低,反映橄榄岩中微量元素含量主要由橄榄石和辉石(尖晶石)的分离结晶决定的。在正常大洋中脊玄武岩(N-MORB)标准化的微量元素配分图解中(图4b),橄榄辉长岩-橄榄岩具有明显的Zr、Hf、Nb(Ta)负异常和Ba、Sr、Eu正异常。含辉石闪长岩-辉长岩除具有明显的Zr、Hf、Nb(Ta)负异常外,还具有Ti负异常,与岛弧基性岩浆特征相似(Perfit *et al.*, 1980; Sun and McDonough, 1989; Yoshiyuki and Steve, 1995)。

4.3 Sr、Nd同位素

本次工作仅选取了3件辉长岩样品进行Sr、Nd同位素分析(表2),其中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (0.704330~0.704633)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$ (0.511608~0.511673)变化范围较小, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为0.59~1.86。

4.4 SHRIMP U-Pb年龄

本文选择锆石年龄测定的样品为岩体的边缘相,岩性为含辉石闪长岩。显微镜下锆石主要为圆粒状—不规则粒状,少数锆石具有长柱状晶形,锆石颗粒大小一般在 $200\mu\text{m}$ 以上。在透射光下锆石多具有岩浆型锆石的规则晶面。CL图像中部分锆石具有补丁状结构,部分隐约可见典型岩浆锆石环带特征(图5)。对16颗锆石进行了16个测点分析,其中U(14×10^{-6} ~ 53×10^{-6})和Th(9×10^{-6} ~ 34×10^{-6})含量较低,而Th/U比值相对较高(0.51~0.95)(表3)。16个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $822 \pm 8\text{Ma}$ (图6)。

5 讨论

5.1 含水的岩浆体系

含水的岩浆体系中,晶体与熔体的平衡与无水岩浆体系明显不同(Best and Christiansen, 2001);岩浆结晶过程中,矿物的结晶顺序和形成的岩石组合也有差别(Gaetani *et al.*, 1993)。在无水玄武质岩浆中,主要成岩矿物结晶顺序为橄榄石→斜长石→辉石,形成的岩石类型为:纯橄岩—橄长岩—辉长岩(Church and Riccio, 1977; Gaetani *et al.*, 1993)。含水的岩浆体系中,水中的羟基可以破坏并替换硅酸盐结构中的硅氧键(Best and Christiansen, 2001),从岛状、链状到架状的硅酸盐矿物,替换程度逐渐增强。在橄榄石-单斜辉石-

表 1 高家村岩体主量 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 1 Major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) analyses of Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

样品号	CX419-1	CX419-2	CX420-1	CX420-2	CX256-1	CX258-1	CX254-1	CX471-2	CX472-1	CX472-2
岩性	含辉石 闪长岩	含辉石 闪长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	橄 榄 辉 长 岩	橄 榄 辉 长 岩	橄 榄 岩	橄 榄 岩
SiO ₂	49.96	48.39	52.37	54.94	50.38	50.03	44.94	46.27	35.6	36.97
TiO ₂	2.95	1.25	1.02	0.72	1.25	0.88	0.36	0.21	0.26	0.24
Al ₂ O ₃	14.49	17.6	13.58	14.97	12.49	17.26	15.69	21.44	2.96	4.78
Fe ₂ O ₃ ^T	6.60	4.34	0.93	3.07	2.91	2.26	3.19	2.26	13.18	10.18
FeO	8.17	5.86	9.19	8.69	8.5	5.41	6.11	3.81	4.14	4.84
MnO	0.19	0.16	0.16	0.19	0.22	0.13	0.13	0.08	0.18	0.15
MgO	4.42	8.08	11.55	7.96	10.24	7.97	14.1	10.37	31.58	29.92
CaO	8.15	10.49	8.49	5.04	11.86	11.01	13.5	12.29	1.59	2.72
Na ₂ O	3.5	2.75	1.95	3.41	1.59	2.55	0.92	1.15	0.19	0.18
K ₂ O	0.79	0.36	0.39	0.69	0.4	0.99	0.05	0.05	0.06	0.05
P ₂ O ₅	0.66	0.28	0.42	0.53	0.24	0.43	0.02	0.02	0.04	0.03
LOI	0.45	0.48	0.31	0.15	0.5	1.49	1.72	1.83	10.28	9.86
Total	100.33	100.04	100.36	100.36	100.58	100.41	100.73	99.78	100.06	99.92
Mg [#]	0.39	0.63	0.72	0.59	0.66	0.69	0.76	0.78	0.79	0.80
La	31.24	11.04	40.06	17.23	11.10	8.77	0.79	1.12	1.15	0.73
Ce	77.84	27.09	87.58	40.49	29.60	20.40	2.18	2.64	2.75	1.76
Pr	11.10	3.86	10.51	5.51	4.51	2.83	0.36	0.42	0.40	0.25
Nd	54.75	19.97	49.08	28.88	22.70	13.90	2.15	2.62	1.93	1.45
Sm	10.27	4.02	8.85	6.72	6.07	3.41	0.68	0.71	0.38	0.32
Eu	3.39	1.85	2.53	2.09	1.68	1.41	0.45	0.62	0.20	0.24
Gd	10.80	4.46	7.65	7.85	5.92	3.43	0.84	0.73	0.39	0.38
Tb	1.51	0.65	1.04	1.26	0.92	0.53	0.12	0.13	0.07	0.06
Dy	8.67	3.74	4.85	7.55	5.42	3.05	0.73	0.65	0.37	0.32
Ho	1.70	0.74	0.86	1.55	1.06	0.60	0.14	0.12	0.07	0.06
Er	4.73	2.07	2.55	4.33	2.99	1.62	0.38	0.34	0.20	0.19
Tm	0.68	0.30	0.33	0.60	0.40	0.22	0.05	0.05	0.03	0.03
Yb	4.02	1.78	2.06	3.60	2.48	1.39	0.30	0.27	0.16	0.16
Lu	0.63	0.29	0.33	0.56	0.36	0.19	0.04	0.04	0.02	0.03
Y	40.29	17.64	20.56	35.50	26.90	15.20	3.46	2.92	1.91	1.76
Cr	18.03	153.9	615.6	202.4	324	454	527	515.8	>1000	>1000
Ni	24.21	41.21	252.5	63.79	87.50	70.60	170.0	117.5	876.8	815.7
Sc	26.40	24.48	24.35	26.36	58.30	37.80	40.10	10.48	10.07	9.91
Ga	22.51	19.14	18.13	16.54	16.40	16.70	11.80	15.33	4.73	5.15
Rb	8.91	2.11	9.17	17.21	8.09	21.20	1.09	1.17	1.38	1.51
Sr	583	762	585	606	547	641	513	725	41	72
Ba	452	231	740	552	221	444	40	55	44	40
Th	1.52	0.28	11.37	1.66	0.92	0.79	0.04	0.04	0.14	0.11
Pb	6.95	2.22	9.11	7.37	8.18	7.11	1.79	0.43	0.32	0.49
U	0.56	0.07	2.54	0.54	0.27	0.19	0.02	0.00	0.04	0.03
Nb	19.04	4.06	6.59	4.12	4.36	1.93	0.29	0.20	0.40	0.28
Ta	0.98	0.21	0.62	0.35	0.26	0.13	0.02	0.04	0.08	0.06
Zr	189.5	81.01	85.45	14.41	134.0	56.30	8.03	9.12	11.39	7.28
Hf	5.47	2.59	2.95	0.62	3.99	1.75	0.29	0.29	0.26	0.18

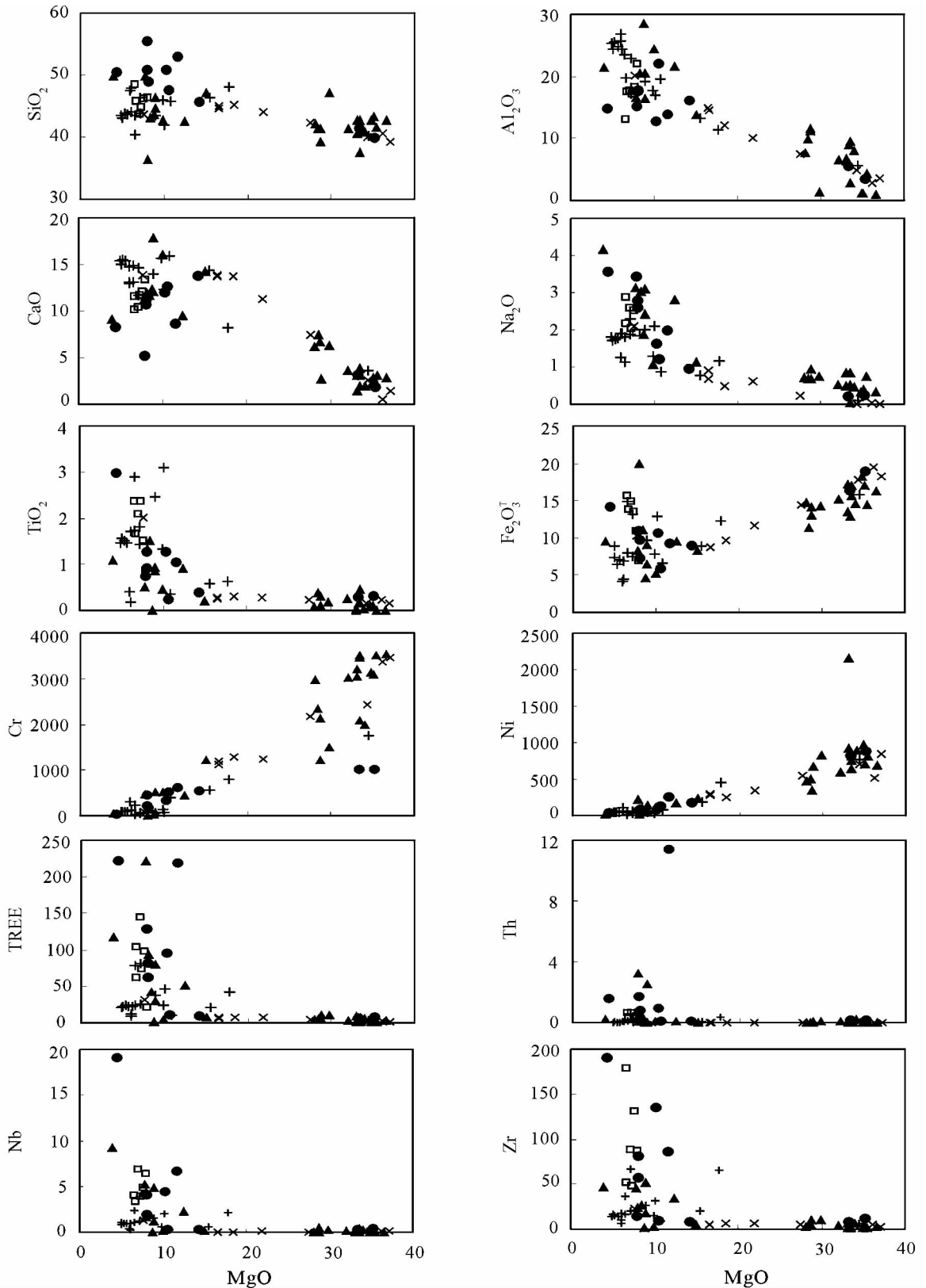


图3 主、微量元素与 MgO 谐变图

●为本文表中数据; □引自沈渭洲等(2003); ▲引自朱维光等(2004)、Zhu *et al.* (2006); +引自 Munteanu *et al.* (2006); ×引自 Zhou *et al.* (2006)

Fig. 3 Variation of major elements and trace elements vs. MgO for Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

● data from table 1 in this paper; □ data from Shen *et al.* (2003); ▲ data from Zhu *et al.* (2004, 2006); + data from Munteanu *et al.* (2006); × data from Zhou *et al.* (2006)

表 2 高家村岩体 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sr and Nd isotopes analyses on Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	(2σ)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t,822\text{Ma})}$
CX254-1	0.618	529.139	0.003379	0.704673	11	0.704633
CX256-1	7.496	532.769	0.040694	0.705003	10	0.704525
CX258-1	20.582	629.119	0.094633	0.705442	12	0.704330

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	(2σ)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t,822\text{Ma})}$	$\epsilon_{\text{Nd}(t,822\text{Ma})}$
CX254-1	0.701	2.119	0.199980	0.512686	10	0.511608	0.59
CX256-1	5.983	22.344	0.161891	0.512509	14	0.511636	1.14
CX258-1	3.406	13.784	0.149406	0.512478	14	0.511673	1.86

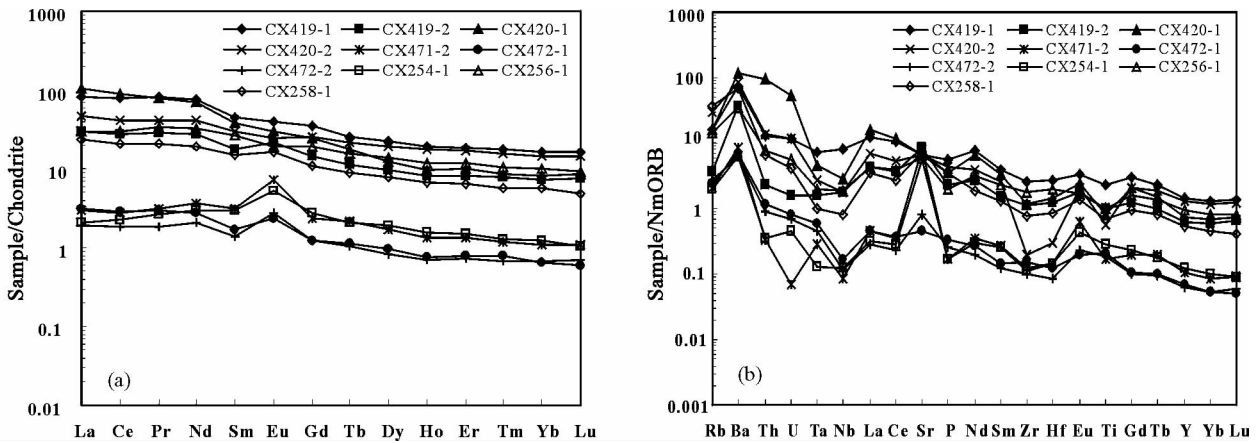


图 4 高家村岩体稀土 (a, Leedy 球粒陨石值引自 Henderson, 1984) 与微量元素 (b, N-MORB 标准化值引自 Sun and McDonough, 1989) 配分图解

Fig. 4 REE (a, chondrite data of Leedy from Henderson, 1984) and trace elements (b, N-ORMB normalization data from Sun and McDonough, 1989) patterns of Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

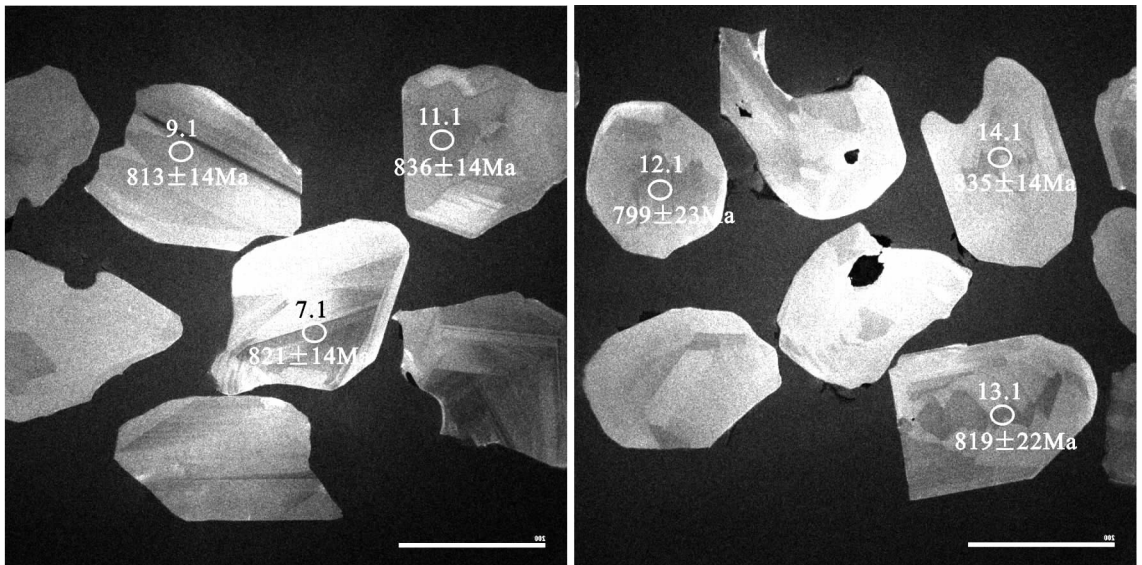


图 5 高家村岩体锆石 CL 图

Fig. 5 CL images of zircons from Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

表3 高家村岩体锆石 SHRIMP 分析表

Table 3 Zircon SHRIMP analyses on Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

测点号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$
CX419-1-1.1	2.44	18	11	2.1	0.61	795 ± 17	.0535	8.6	0.97	8.9	.1312	2.2
CX419-1-2.1	0.71	14	9	1.6	0.69	811 ± 18	.0743	5.5	1.37	6.0	.1341	2.4
CX419-1-3.1	0.54	25	21	3.0	0.87	838 ± 15	.0724	3.8	1.38	4.3	.1387	1.9
CX419-1-4.1	0.85	25	14	3.1	0.55	861 ± 16	.0655	7.0	1.29	7.2	.1429	2.0
CX419-1-5.1	1.70	24	12	2.8	0.51	799 ± 15	.0641	8.1	1.17	8.3	.1320	2.0
CX419-1-6.1	0.54	33	29	3.8	0.93	817 ± 14	.0672	4.8	1.25	5.1	.1351	1.8
CX419-1-7.1	0.55	31	27	3.7	0.90	821 ± 14	.0685	5.4	1.28	5.7	.1357	1.8
CX419-1-8.1	1.25	15	10	1.9	0.68	849 ± 19	.0743	5.6	1.44	6.1	.1408	2.3
CX419-1-9.1	1.02	27	24	3.2	0.92	813 ± 14	.0620	6.2	1.15	6.5	.1343	1.8
CX419-1-10.1	0.84	53	34	6.2	0.66	821 ± 12	.0621	4.8	1.16	5.1	.1359	1.5
CX419-1-11.1	1.24	30	27	3.6	0.95	836 ± 14	.0627	6.0	1.20	6.2	.1385	1.8
CX419-1-12.1	0.46	22	18	2.5	0.84	799 ± 23	.0733	4.0	1.33	5.0	.1320	3.1
CX419-1-13.1	0.38	27	22	3.2	0.85	819 ± 22	.0708	3.7	1.32	4.6	.1355	2.8
CX419-1-14.1	0.98	29	21	3.5	0.75	835 ± 14	.0627	5.8	1.19	6.1	.1382	1.8
CX419-1-15.1	1.22	29	26	3.4	0.95	815 ± 14	.0663	6.8	1.23	7.1	.1348	1.9
CX419-1-16.1	0.41	24	19	2.8	0.79	809 ± 25	.0694	5.1	1.28	6.0	.1337	3.2

注:误差为 1σ , Pb_c 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅;标准校正的误差为 0.26%;普通铅校正用 ^{204}Pb 的实测值

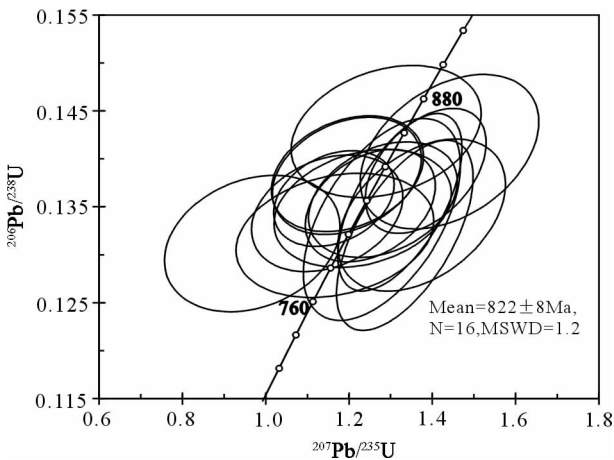


图6 高家村岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.6 SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons from Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

斜长石组成的三元相图中,含水基性岩浆体系中,辉石的稳定区域变大,而斜长石的结晶区域相对无水岩浆体系明显变小,所以,斜长石在辉石之后结晶。矿物的结晶顺序为橄榄石→辉石→斜长石,相应的岩石系列为:纯橄榄岩→辉橄岩→辉长岩(Gaetani *et al.*, 1993)。本文岩相学观察发现,高家村岩体早期分离结晶(堆晶)形成的橄榄岩中,在橄榄石之后结晶的矿物是辉石(以斜方辉石为主),橄榄岩中只出现少量斜长石。表明岩浆早期结晶过程中,矿物的结晶顺序是橄榄石→斜方辉石(单斜辉石),斜长石在辉石之后出现。这与含水岩浆体系特征一致。朱维光等(2004)、Zhu *et al.* (2006,

2007)指出高家村岩体及同期的冷水箐岩体中,橄榄岩与橄榄辉长岩的矿物结晶顺序为橄榄石→单斜辉石(斜方辉石)→斜长石→(角闪石);同时,在分离结晶形成的堆晶岩中,橄长岩也出现在橄榄岩与橄榄辉长(苏长)岩之上(朱维光等, 2004)。以上证据说明,高家村岩体在源区岩浆结晶过程中,岩浆体系是富含水的。

本文及已有研究发现(张保民等,1989;Munteanu *et al.*, 2006),高家村岩体中普遍出现角闪石,岩相学证据表明其为岩浆成因。矿物化学分析表明(张保民等,1989),从橄榄岩到辉长岩,角闪石中的镁降低而铁升高,具有岩浆演化形成的角闪石特征,而非变质成因(或蚀变)的角闪石(柴凤梅等,2006)。朱维光等(2004)、Zhu *et al.* (2007)分别从高家村岩体和冷水箐岩体的辉长岩中挑选角闪石并做 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年龄测试,获得结果为 $790 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $821 \pm 1 \text{ Ma}$ 。与本文的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及 Zhu *et al.* (2006) 的年龄结果($825 \pm 12 \text{ Ma}$)相近或近于一致,也表明该岩体中角闪石为岩浆成因。由于角闪石是典型含水矿物,基性-超基性岩中含有角闪石,表明岩浆结晶环境为含水(湿)的岩浆体系(Nicolas, 1989;邱家骧,2001)。基性岩浆中富水的来源不是来自地幔,可能来自俯冲带或橄榄石的蛇纹石化(王希斌等,2005)。本文岩相学观察及 Munteanu *et al.* (2006) 研究发现,高家村岩体中蛇纹石化并不是普遍现象,说明其中的水并非岩体侵入后蚀变时带入的,岩浆中的水很可能来自俯冲带。

镁铁质-超镁铁质堆晶岩矿物化学成分是判定岩浆结晶条件与形成环境有效的方法(Beard, 1986; Loucks, 1990; Kvassnes *et al.*, 2004)。Li *et al.* (2006) 对高家村岩体中辉长岩矿物化学进行了较详细的研究。笔者认真分析了其中

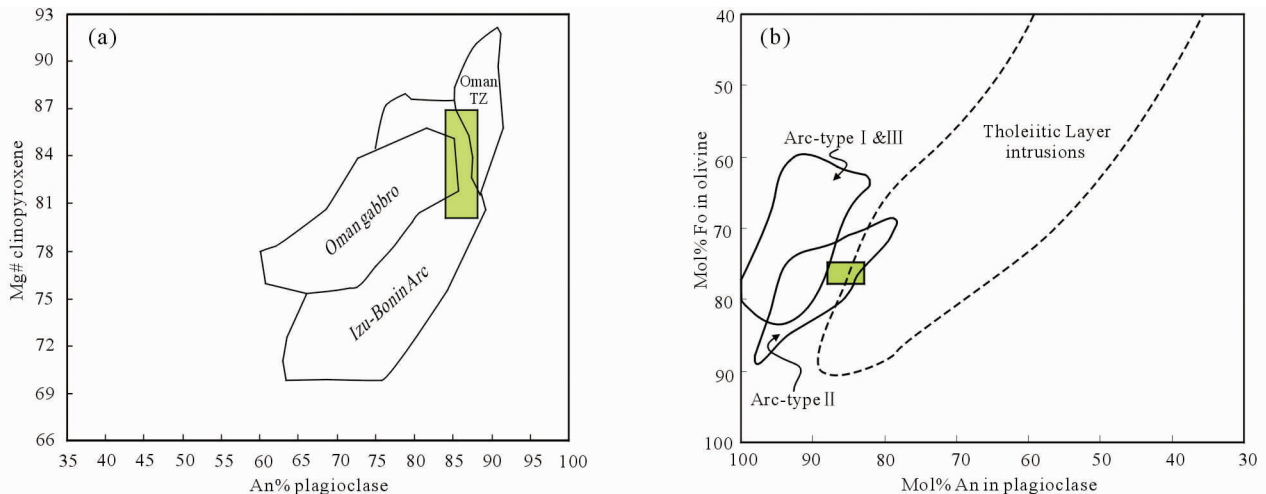


图7 高家村岩体矿物化学图解

(a) 据 Kvassnes *et al.* (2004) 简化; (b) 据 Beard (1986) 简化; 图中数据据 Li *et al.* (2006)

Fig. 7 Mineral chemistry diagrams for Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

(a) simplified after Kvassnes *et al.* (2004); (b) simplified after Beard (1986); data from Li *et al.* (2006)

的矿物成分分析结果发现: 橄榄石 Fo 变化范围 75 ~ 82, 主要集中在 75 ~ 78 之间; 斜长石牌号 $An_{80} \sim An_{95}$, 主要集中在 $An_{83} \sim An_{88}$ 之间; 单斜辉石 $Mg^{\#}$ 为 78 ~ 87, 一组主要集中在 78 ~ 83 之间, 另一组主要集中在 85 ~ 87 之间。Kvassnes *et al.* (2004) 提出用辉长岩中单斜辉石与共生斜长石 ($Mg^{\#}$ -An) 图解判定岩浆体系的含水性和结晶环境。高家村岩体辉长岩具有含水岩浆体系结晶特征, 主要位于 Izu-Bonin Arc 区域 (图 7a)。在 Beard (1986) 辉长质堆晶岩橄榄石与共生斜长石 (Fo-An) 构造环境判别图解中, 辉长岩成分主要位于 Arc-type II 辉长岩区域 (图 7b)。

5.2 地球化学特征与涵义

从表 1 及前人的研究资料分析, 高家村岩体中橄榄岩具有非常低的 CaO 、 Al_2O_3 、 Sr 含量。在 CaO 、 Al_2O_3 与 MgO 谐变图中呈现明显的负相关关系 (图 3), 表明斜长石在岩浆的早期结晶分离过程中不是堆晶矿物 (Gaetani *et al.*, 1993)。而 Cr 、 Ni 与 MgO 具有明显的正相关性, 表明有橄榄石和辉石 (尖晶石) 的分离结晶。这些与前述矿物学和岩石学的证据相符合。橄榄岩中除 Cr 、 Ni 含量较高外, 其他微量元素含量都很低, 主要原因是这些元素在橄榄石和辉石中具有非常低的分配系数 (Eggins *et al.*, 1998; Rollison, 1993)。所以, 从岩浆中最早分离结晶形成的橄榄岩, 其中的微量元素不能反映岩浆源区的特征, 不能用其来探讨岩石成因与构造环境。同时, 堆晶的橄榄岩对残留岩浆中的微量元素影响也很小。(角闪) 辉长岩微量元素含量变化范围大, 并且与 MgO 的相关性不明显, 表明其受结晶分离作用的影响很小, 更多继承了源区的特征, 可以用其探讨岩浆地幔源区的特征及成因。

由于橄榄石和辉石 (尖晶石) 的分离结晶, 高家村岩体中橄榄岩与辉长岩的稀土元素含量差别很大。橄榄辉长岩-橄

榄岩中稀土元素含量, 与稀土元素在橄榄石和辉石中很低配分系数有关 (Rollison, 1993), 而其中的正 Eu 异常可能与斜长石有关 (Henderson, 1984)。而辉长岩-含辉石闪长岩 Eu 异常不明显可能是具有负 Eu 异常稀土配分特征的角闪石和斜长石共同作用的结果 (Henderson, 1984; Rollison, 1993)。辉长岩和橄榄岩都具有轻稀土相对于重稀土元素富集特征, 与亏损地幔源的 NMORB (Sun and McDonough, 1989)、MORB 型橄榄岩和辉石岩明显不同 (Downes, 2007)。一种原因可能是岩浆源区特征, 另一种原因可能是岩浆上升过程中受到地壳 (围岩) 混染。Munteanu *et al.* (2006) 和 Zhu *et al.* (2006) 分别从野外地质和地球化学方面证实高家村岩体侵位过程中受到地壳 (围岩地层) 混染。但在稀土和微量元素配分图解中, 橄榄岩和辉长岩类配分曲线总体是相互平行的, 表明矿物分离结晶是主要因素。地壳中富集轻稀土和大离子亲石元素 (Taylor, 1964; Rudnick and Fountain, 1995; Wdipohl, 1995; Gao *et al.*, 1998), 因此地壳混染可以解释高家村岩体中轻稀土、大离子亲石元素富集和 Nb、Ta、Ti 亏损, 但无法解释其中普遍存在的 Zr、Hf 负异常。因为地壳中 Zr、Hf 是相对富集的 (Taylor, 1964; Rudnick and Fountain, 1995; Wdipohl, 1995; Gao *et al.*, 1998)。朱维光等 (2004) 和 Li *et al.* (2006) 认为, Zr (相对于 Sm) 负异常是辉石的堆晶作用产生的。Zr 在辉石中的分配系数很低, 为强烈不相容元素 (Eggins *et al.*, 1998; Rollison, 1993)。在基性岩浆中, 辉石的分离结晶 (堆晶) 使结晶相中 Zr 相对降低, 且相对于 Sm、Nd 出现明显负异常 (Coogan *et al.*, 2003), 而结晶后残余岩浆中 Zr 浓度相对会增高。如果原始岩浆 Zr 不亏损, 残余岩浆中不会出现 Zr 负异常。从前人资料 (沈渭洲等, 2003; 朱维光等, 2004; Munteanu *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2006) 和本文研究发现, 高家村岩体从橄榄

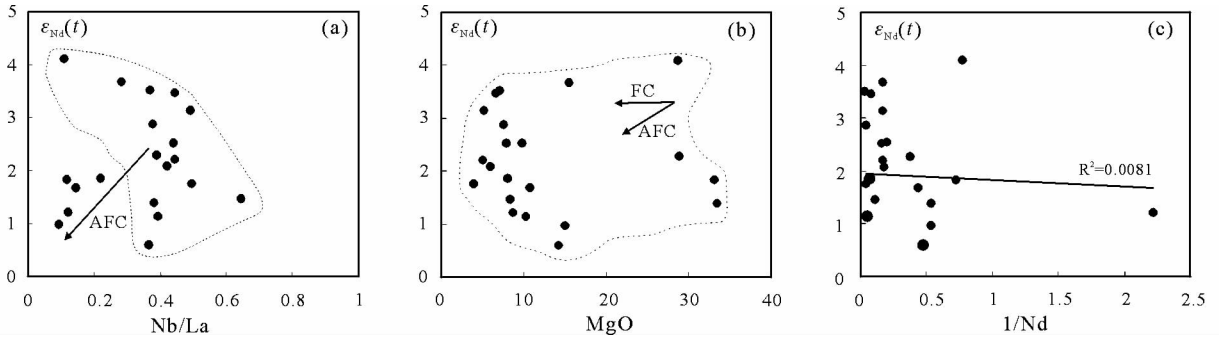


图8 高家村岩体同位素与主、微量元素变化图

FC-分离结晶, AFC-同化分离结晶;部分数据引自沈渭洲等(2003)、朱维光等(2004)、Zhou *et al.* (2006)和 Zhu *et al.* (2006)

Fig. 8 Variation of major elements and trace elements vs. isotope for Gaojiacun mafic-ultramafic pluton

FC- Fractional Crystallization; AFC- Assimilation Fractional Crystallization; Some data from Shen *et al.* (2003), Zhu *et al.* (2004, 2006) and Zhou *et al.* (2006) respectively

岩到辉长岩类基本都具有较明显的 Zr、Hf 负异常,辉石的分离结晶对此难以解释。Tsai *et al.* (2000) 研究大别造山带中与俯冲无关的镁铁质-超镁铁质堆晶岩多数并无 Zr、Hf 负异常。高家村岩体中普遍的 Zr、Hf 负异常很可能体现了岩浆源区的亏损特征。岩体富集大离子亲石元素和 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 亏损是岛弧基性火山岩特征 (Perfit *et al.*, 1980; Sun and McDonough, 1989; Yoshizuki and Steve, 1995)。在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -Nb/La 图解中 (图 8a), 高家村岩体个别样品具有地壳混染的特征,但大多数样品没有反映此特征; $\epsilon_{Nd}(t)$ -MgO 图解中 (图 8b), 未表现地壳混染特征;同时在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -1/Nd 图解中 (Faure, 1986) (图 8c), $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 1/Nd 不具有正相关性。因此,高家村岩体部分受到地壳的影响,但地球化学变化主要反映了岩浆源区特征。

5.3 盐边地区新元古代构造环境

近年来,高家村岩体为中元古代蛇绿岩的观点被逐渐否定 (从柏林, 1988; 沈渭洲等, 2003; 朱维光等, 2004)。沈渭洲等 (2003)、Zhou *et al.* (2006) 根据岩体中普遍存在岛弧火山岩的地球化学特征, 认为其形成于岛弧环境。朱维光等 (2004)、Zhu *et al.* (2006) 主要根据高家村岩体年龄与 Li *et al.* (1999) 提出的 ~825Ma 华南地幔柱时代相近, 认为其形成与地幔柱有关。Li *et al.* (2006) 认为盐边群玄武岩和高家村镁铁质-超镁铁质岩为 Rodinia 超大陆聚合与裂解过程中两次岩浆事件, 代表与四堡造山带有关的弧后盆地向大陆裂谷环境的转变。高家村岩体与区域上 820~800Ma 非造山岩浆相当, 为地幔柱活动的产物, 而岩体中高场强元素亏损是镁铁质矿物结晶和先存岛弧岩浆地球化学特征共同影响的结果 (Li *et al.*, 2006)。

本文研究发现, 高家村岩体矿物结晶顺序与矿物、岩石组合和矿物化学特征指示矿物结晶于含水的岩浆体系。而含水的岩浆体系是消减带岩浆岩的重要特征 (Loucks, 1990; Gaetani *et al.*, 1993)。所以, 高家村岩体的成因与典型的岛

弧环境基性岩特征类似, 其形成的地幔岩浆源区受到了俯冲带流体的改造, 与攀枝花附近形成于岛弧环境的角闪辉长岩成因相似 (Zhao and Zhou, 2007)。同时, 高家村岩体中普遍存在的高场强元素亏损为岩浆源区特征, 表明其为俯冲带地幔源区部分熔融 (McCulloch and Gamble, 1991)。

杜利林等 (2005) 获得盐边群玄武岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 782 ± 53 Ma, 表明其形成的时代为新元古代。最新的研究资料表明 (耿元生等, 2008; Sun and Zhou, 2008; Sun *et al.*, 2008), 盐边群的形成时代可能为 870~840Ma, 而非 920~900Ma 之间 (Li *et al.*, 2006)。所以, 盐边地区并不存在更早期 (≥ 900 Ma) 的岛弧岩浆活动 (Li *et al.*, 2006)。本文野外调查发现, 侵入盐边群的关刀山岩体边缘相石英闪长岩中也有近东西向片麻理改造, 与周围地层的构造线方向一致。显然, 其与盐边群火山-沉积岩经历了同期构造变形, 地幔柱拉张环境的模式对此是难以解释的 (李献华等, 2002), 其可能形成于岛弧环境 (Sun and Zhou, 2008)。高家村岩体的时代为 822 ± 8 Ma, 与盐边群玄武岩的时代非常接近, 表明它们可能是同一构造环境中地幔岩浆部分熔融形成的。盐边群玄武岩形成于弧后盆地环境 (杜利林等, 2005; Li *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2007), 高家村岩体是弧后盆地拉张阶段, 受俯冲带流体改造的上地幔部分熔融后分离结晶形成的。

6 结论

岩石中矿物组合、矿物结晶顺序、矿物化学和岩浆成因角闪石等证据表明, 高家村岩体结晶于富含水的岩浆体系, 具有消减带基性岩浆岩特征。岩体富集大离子亲石元素、亏损高场强元素为岩浆源区特征, 因此高家村岩体形成于岛弧环境。区域上, 高家村岩体与盐边群玄武岩的形成时代相近, 表明盐边地区在新元古代为岛弧环境。

致谢 野外地质工作、微量元素地球化学分析、Sr-Nd 同位素分析和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试过程中, 分别得到了孙桂华博士、李禾工程师、闫欣工程师、郭敬辉研究员、陈福坤研究员、储著银博士、李向辉博士、李潮峰工程师、刘敦一研究员、张玉海高级工程师、陶华工程师、王涛博士和童英博士的帮助和支持。在文章写作过程中, 与万渝生研究员、Allen P Nutman 教授和曾令森研究员进行过讨论。审稿专家对文章提出宝贵的修改意见。在此表示衷心感谢!

谨以此文献给卢良兆教授 80 华诞, 祝卢先生健康长寿!

References

- Beard JS. 1986. Characteristic mineralogy of arc-related cumulate gabbro: Implication for the tectonic setting of gabbroic plutons and for andesite genesis. *Geology*, 14: 848 – 851
- Best MG and Christiansen EH. 2001. *Igneous Petrology*. Malden: Blackwell Science, 1 – 458
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Zhang ZH, Ye HS, Wu H and Mo XH. 2006. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusion in Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 1 – 11, 25 (in Chinese with English abstract)
- Church WR and Riccio L. 1977. Fractionation trends in the Bay of Islands ophiolite of Newfoundland: Polycyclic cumulate sequences in ophiolites and their classification. *Canadian Journal of Earth Science*, 14: 1156 – 1165
- Cong BL. 1988. Formation and Evolution of Panxi Paleo-rift. Beijing: Science Press, 1 – 96 (in Chinese)
- Coogan LA, Banks GJ, Gillis KM, MacLeod CJ and Pearce JA. 2003. Hidden melting signatures recorded in the Troodos ophiolite plutonic suite: Evidence for widespread generation of depleted melts and intracrustal melt aggregation. *Contribution to Mineral and Petrology*, 144: 484 – 505
- Downes H. 2007. Origin and significance of spinel and garnet pyroxenites in the shallow lithospheric mantle: Ultramafic massifs in orogenic belts in western Europe and NW Africa. *Lithos*, 99: 1 – 24
- Du LL, Geng YS, Yang CH, Wang XS, Ren LD, Zhou XW, Shi YR and Yang ZS. 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalt from the Yanbian Group in the western Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 805 – 813 (in Chinese with English abstract)
- Eggins SM, Rudnick RL and McDonough WF. 1998. The composition of peridotites and their minerals: A laser-ablation ICP-MS study. *Earth and Planetary Science Letters*, 154: 53 – 71
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. 2nd edition. New York: John Wiley and Sons, 1 – 592
- Gaetani GA, Grove TL and Bryan WB. 1993. The influence of water on the petrogenesis of subduction related igneous rocks. *Nature*, 365: 332 – 334
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hu YK. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959 – 1975
- Geng YS, Yang CH, Wang XS, Du LL, Ren LD and Zhou XW. 2008. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 215 (in Chinese)
- Henderson P. 1984. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. New York: Elsevier, 1 – 32
- Kvassnes AS, Strand AH, Moen-Eikeland H and Pedersen RB. 2004. The Lyngen gabbro: The lower crust of an Ordovician incipient arc. *Contribution to Mineral and Petrology*, 148: 358 – 379
- Li JL. 1984. Eugeosyncline rock association of Yanbian group in western Sichuan, China. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 8: 21 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y, Liang XR and Li WX. 2003. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 46(Supp.): 73 – 83
- Li XH, Li ZX, Sinclair JA, Li WX and Carter G. 2006. Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 151: 14 – 30
- Li XH, Li ZX, Sinclair JA, Li WX and Carter G. 2007. Reply to the comment by Zhou *et al.* on: “Revisiting the” Yanbian Terrane: “Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China” [*Precambrian Res.* 151 (2006) 14 – 30] [*Precambrian Res.* 154 (2007) 153 – 157]. *Precambrian Research*, 155: 318 – 323
- Li ZX, Li XH, Kinny PD and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171 – 181
- Loucks RR. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. *Geology*, 18: 346 – 349
- McCulloch MT and Gamble JA. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102: 358 – 374
- Munteanu M, Yao Y, Wilson AH, Chunnnett G, Luo YN and Zhao QX. 2006. The Gaojiacun mafic-ultramafic complex (Sichuan, SW China): Neoproterozoic magmatic activity at the western margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 705 – 723
- Nicolas A. 1989. *Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere*. Dordrecht: Kluwer Academy Publishers, 1 – 367
- Qiu JX. 2001. *Magmatic Petrology*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 340 (in Chinese)
- Perfit MR, Gust DA, Bence AE, Arculus RJ and Taylor SR. 1980. Chemical characteristics of island arc basalts: Implications for mantle sources. *Chemical Geology*, 30: 227 – 256
- Rollison HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Group UK LTD, 1 – 344
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Review Geophysics*, 33: 267 – 309
- Shen SY, Zhang BM and Yuan YM. 1986. The petrological study on basic-ultrabasic complex in Yanbian, Sichuan Province. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 11(6): 561 – 569 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Gao JF, Xu SJ, Tan GQ, Yang ZS and Yang QW. 2003. Format on age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing body, Yanbian, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 27 – 37 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Sun CM. 1994a. Proterozoic ophiolites in Western Sichuan and the Proterozoic orogenic belt on the western border on Yangtze paleo-plate. *Journal of Chengdun Institute of Technology*, 21(4): 11 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Sun CM. 1994b. Genetic Mineralogy of pyroxenes from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan, China), and its geotectonic implications. *J. Mineral. Petrol.*, 14(3): 1 – 15 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. The Geological Society of Special Publication, 313 – 345
- Sun WH, Zhou MF and Zhao JH. 2007. Geochemistry and tectonic significance of basaltic lavas in the Neoproterozoic Yanbian Group, southern Sichuan Province, Southwest China. *International*

- Geological Review, 49:554–571
- Sun WH and Zhou MF. 2008. The ~ 860 Ma Cordilleran-type Guandaoshan dioritic pluton in the Yangtze block, SW China: Implications for the origin of Neoproterozoic magmatism. *The Journal of Geology*, 116:238–253
- Sun WH, Zhou MF, Yan DP, Li JW and Ma YX. 2008. Province and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze block (SW China). *Precambrian Research*, 167: 213–236
- Taylor SR. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28: 1273–1285
- Tsai CH, Lo CH, Liou JG and Jahn BM. 2000. Evidence against subduction-related magmatism for the Jiaoziyang Gabbro, North Dabie Shan, China. *Geology*, 28(10): 943–946
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben MA, Shanks III WC and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 7:1–35
- Wang XB, Yang JS, Chen SY and Shi RD. 2005. Origin and structural nature of Raobozhai ultramafic rock: A discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6):1593–1608 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS, Zhang WL, Liu XM and Zhang GL. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 145:111–130
- Wdiewpohl KH. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217–1232
- Yoshiyuki T and Steve E. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Cambridge: Blackwell Science, 1–211
- Zhang BM, Sheng SY and Shu JF. 1989. A mineralogical study of hornblendes from the basic-ultrabasic complexes in Yanbian, Sichuan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 9(4): 364–371 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JH and Zhou MF. 2007. Geochemistry of neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152, 27–47
- Zhou MF, Yan DP, Kennedy KA, Li YQ and Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196:51–67
- Zhou MF, Ma YX, Yan DP, Xia XP, Zhao JH and Sun M. 2006. The Yanbian Terrane (southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144: 19–38
- Zhu ZX. 1983. The features and tectonic environments of the volcanic rock series of Precambrian Yanbian Group in Sichuan. *J. Mineral. Petrol.*, 3(3):42–51 (in Chinese with English abstract)
- Zhu WG, Deng HL, Liu BG, Li CY, Qin Y, Luo YN, Li ZD and Pi DH. 2004. The age of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex in the Yanbian area, Sichuan Province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating of hornblende. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 1077–1085
- Zhu WG, Zhong H, Deng HL, Wilson AH, Liu BG, Li CY and Qin Y. 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry, and Nd-Sr isotopes of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex, Southwest China. *International Geology Review*, 48:650–668
- Zhu WG, Zhong H, Li XH, Liu BG, Deng HL and Qin Y. 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complex, SW China. *Precambrian Research*, 155: 98–124

附中文参考文献

- 从柏林. 1988. 攀西古裂谷的形成与演化. 北京: 科学出版社, 1–96
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡, 叶会寿, 吴华, 莫新华. 2006. 中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 1–11, 25
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 石玉若, 杨铸生. 2005. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. *地质学报*, 79(6):805–813
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 杜利林, 任留东, 周喜文. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化. 北京: 地质出版社. 1–215
- 李继亮. 1984. 川西盐边群的优地槽岩石组合. *中国地质科学院院报*, 第 8 号: 21–34
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣, 李武显. 2002. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义. *中国科学(D 辑)*, 32(增刊): 60–68
- 邱家骧. 2001. 岩浆岩石学. 北京: 地质出版社, 1–340
- 沈上越, 张保民, 袁炎明. 1986. 四川盐边基性-超基性杂岩体的岩石学研究. *地球科学*, 11(6): 561–569
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 谭国全, 杨铸生, 杨七文. 2003. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征. *岩石学报*, 19(1): 27–37
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26–30
- 孙传敏. 1994a. 川西元古代蛇绿岩与扬子板块西缘元古代造山带. *成都理工学院学报*, 21(4): 11–16
- 孙传敏. 1994b. 四川盐边元古代蛇绿岩中辉石的成因矿物学特征及其大地构造意义. *矿物岩石*, 14(3): 1–15
- 王希斌, 杨经绥, 陈松永, 史仁灯. 2005. 也谈饶拔寨超镁铁岩体的成因和构造类型的归属问题. *岩石学报*. 21(6):1593–1608
- 张保民, 沈上越, 束今赋. 1989. 四川盐边基性-超基性杂岩体中角闪石矿物学研究. *矿物学报*. 9(4): 364–371
- 朱维光, 邓海林, 刘秉光等. 2004. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩的形成时代: 单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. *科学通报*, 49(10): 985–992
- 朱宗祥. 1983. 四川前寒武纪盐边群火山岩系的特征及构造环境. *矿物岩石*, 3(3): 42–51