第 29 卷 第 5 期
2010 年 9 月

岩 石 矿 物 学 杂 志
ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA

Vol. 29, No. 5:507~515
Sep., 2010

中祁连东段化隆群中斜长角闪岩地球化学特征及构造意义

高晓峰,李文渊,叶美芳,郭周平

(西安地质矿产研究所,陕西 西安 710054

摘 要:中祁连东段化隆群中斜长角闪岩岩相学特征及主、微量元素地球化学分析结果显示,其原岩为碱性玄武岩。斜长角闪岩表现出轻稀土元素富集、Nb-Ta 不亏损,与典型洋岛玄武岩(OIB)的微量元素分布模式和特征元素比值(Nb/La=1.24~1.48,Th/Ta=1.19~1.40)类似,但与典型 OIB 相对亏损高场强元素(如 Th、Nb)不同,且在大地构造环境判别图上落入板内大陆玄武岩区,反映了化隆群斜长角闪岩原岩来源于软流圈地幔交代大陆岩石圈地幔熔融源区,为 Rodinia 超大陆在新元古代汇聚过程中局部裂解或 Rodinia 大陆整体上汇聚未完成局部地区就开始裂解的产物。

关键词:地球化学;岩石成因;斜长角闪岩;化隆群;中祁连

中图分类号:P588.3;P595 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-6524(2010)05-0507-09

Geochemistry of amphibolites in Hualong Group of eastern Middle Qilian massif and its tectonic significance

GAO Xiao-feng, LI Wen-yuan, YE Mei-fang and GUO Zhou-ping

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: Petrologic characteristics and analyses of major and trace elements of the amphibolites in Hualong Group within the eastern segment of Middle Qilian massif are reported in this paper. The amphibolites consist mainly of amphibole (52%) and plagioclase (40%), with the accessory minerals comprising ilmenite (6%), aprtite (2%), quartz and sphene. In the rocks, SiO_2=43.78%~48.09 %, TiO_2=2.26%~2.5%, Al_2O_3=14.99%~16.64%, P_2O_5=0.38%~0.43%, CaO=8.11%~10.93%, FeO_t=11.83%~12.54%, and $Mg^{\#}$=0.53~0.54. The amphibolites in Hualong Group crop out in layers, and their protoliths are alkalic basalts characterized by significant LREE[$(La/Yb)_{cn}$=4.3~8.3)] and HFSE (e.g., Nb, Ta) enrichment (Nb/La=1.2~1.5, Th/Ta=1.2~1.4) and insignificant Eu anomalies (Eu/Eu^*=0.90~1.11, with an average of 1.04), as well as trace element patterns similar to those of ocean island basalts. Various geochemical diagrams indicate that these amphibolites mainly formed in an intraplate environment. Compared with OIB, amphibolites have slightly lower LILE (e.g., Th) concentrations, implying an effect of asthenosphere-lithosphere interactions. The formation of the amphibolites was probably related to the partial breakup of the Neoproterozoic Rodinia Supercontinent in the Qilianshan region or the breakup of Neoproterozoic Rodinia Supercontinent in part of the Qilianshan region.

Key words: geochemistry; petrogenesis; amphibolites; Hualong Group; Middle Qilian massif

收稿日期 2010-02-02;**修订日期**:2010-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40772062);中国地质调查局资助项目(1212010911032)

作者简介:高晓峰(1979-),男,助理研究员,岩石地球化学专业,E-mail:xfgao2000@163.com。

祁连造山带是中央造山带的重要组成部分，由北向南可分为北祁连、中祁连和南祁连 3 个构造单元(李春昱等，1978)。前人对显生宙(震旦纪以来)大地构造格局与演化过程开展了相对较多的工作，并取得了大量的研究成果(许志琴等，1994；冯益民等，1996；夏林圻等，1996)，但对显生宙造山带中出露的前震旦纪基底物质组成、年代学、构造与演化过程等方面的研究却相对较少，并存在认识上的分歧(万渝生等，2003；张宏飞等，2006；徐旺春等，2007)。对祁连造山带中前震旦纪基底的深入研究，不仅对于确定祁连造山带发育的地质背景具有重要意义，而且对于恢复重建中国大陆前震旦纪构造格局与拼贴过程也起着关键性的作用。本文通过对中祁连地块东段化隆群中斜长角闪岩的地质和地球化学特征分析，初步探讨了其原岩岩石成因及其形成地质构造意义。

1 地质概况和岩相学特征

中祁连块体是夹持于祁连造山带南祁连块体和北祁连块体之间的一个前寒武纪中间块体(青海省地质矿产局，1991)。该块体的东段南侧以青海湖南山-古雷断裂为界与西秦岭造山带相接，北侧以中祁连北缘断裂为界与北祁连加里东褶皱带相邻(图 1)。化隆岩群位于中祁连地块东段，从下到上划分为智尕昂组、关藏沟组和鲁满山组，与上覆第三系呈角度不整合接触，局部为断层接触。化隆群主体由(含石榴子石)黑云母斜长片麻岩和黑云母钾长片麻岩组成，含少量(含石榴子石)斜长角闪岩和石英岩，总体变质程度达高角闪岩相。斜长角闪岩呈团块或似层状分布于片麻岩类中，而石英岩呈层状产出，分布较为有限。另外在野外露头上，化隆群岩石常见有混合岩化现象和流变构造(青海省地质矿产局，1991；徐旺春等，2007)。

本文斜长角闪岩样品采自化隆县合群水库西南侧化隆群关藏沟组，地理坐标为：N：36°03′12″，E：102°16′28″。岩石为块状构造，粒状变晶结构。岩石主要矿物成分为角闪石 52%、斜长石 40%、副矿物钛铁矿 6%、磷灰石 2%以及少量石英、榍石。其中角闪石晶体形态呈粒状或他形粒状，晶体粒径在 0.25～0.6 mm 之间，具有明显多色性，Ng 为褐绿色，Np 浅黄褐色，斜交节理常见，消光角($Ng \wedge c$)约

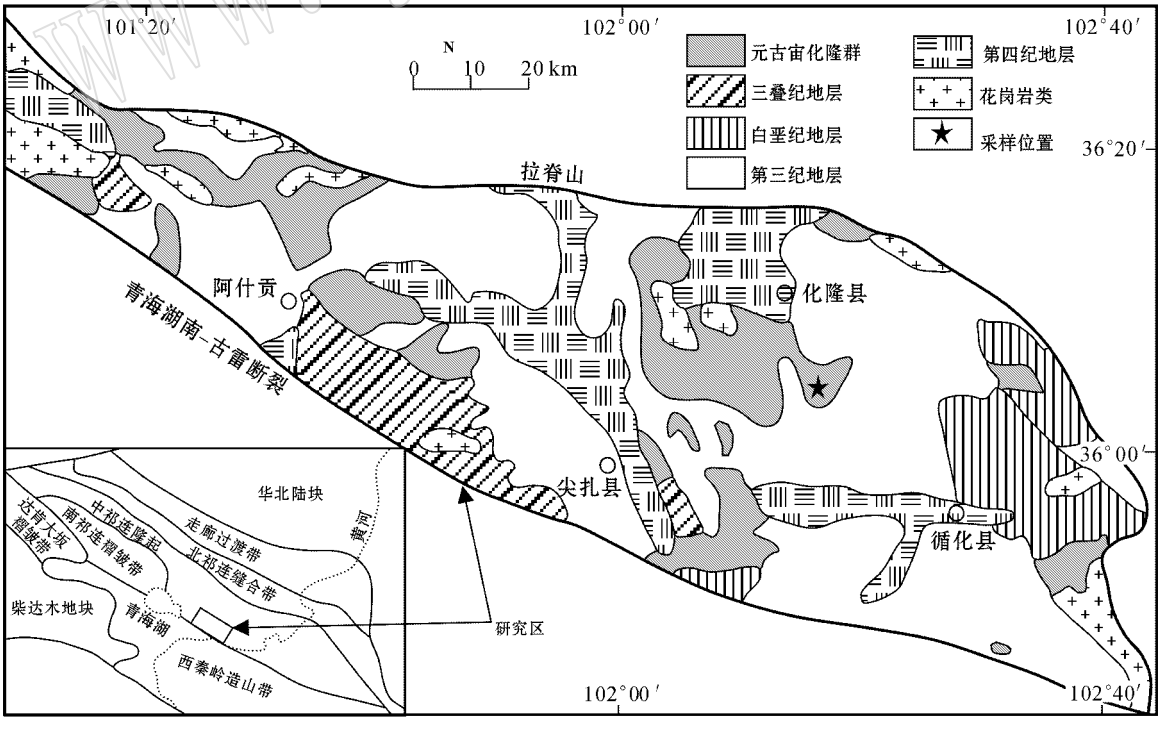

图 1 祁连山化隆岩群分布图[据徐旺春等(2007)修改]

Fig. 1 Distribution of Hualong Group Complex in the Qilian Mountains (modified after Xu Wangchun *et al*., 2007)

为 13°，干涉色达二级蓝，种属为普通角闪石；斜长石晶体为他形粒状，晶体粒径一般在 0.2 ～ 0.5 mm 之间，多数晶体产生次生蚀变被绢云母、黝帘石或绿泥石替代；磷灰石多为细小粒状，晶体粒径一般 <0.1 mm；钛铁矿呈小板状或他型粒状，粒径在 0.1 ～0.4 mm 之间。

2　分析测试方法

样品用颚式刚玉对滚机粉碎到厘米级大小，经过超声波清洗后，在玛瑙钵中研磨到过 160 目筛，然后用来进行主量和微量元素的测试。主、微量元素在国土资源部西安地质矿产所实验测试中心完成。主量元素利用 X 射线荧光光谱（XRF）测试，分析精度优于 5%，其中 FeO 含量通过湿化学方法测定。微量元素利用等离子光谱质谱法（ICP-MS）测定，分析误差总体上低于 5%，其中 Cr、Ni 和 V 元素的分析误差在 5%～10%左右。

3　地球化学特征

3.1　原岩恢复及分类

化隆群斜长角闪岩钛铁矿含量达到 6%。一般认为斜长角闪岩钛铁矿含量高，其原岩为火成岩，而不是沉积岩。在 $MnO-TiO_2$ 图解和 $MgO-CaO-FeO_t$ 图解（Misra，1971）上，样品均落入正斜长角闪岩区（图 2）。另外，利用过渡元素之间的相关性也可以区分正副角闪岩（赵振华等，1997），化隆群斜长角闪岩 Cr 和 Ni 元素具弱的正相关性（R = 0.78～0.96）也表明其原岩为火成岩。

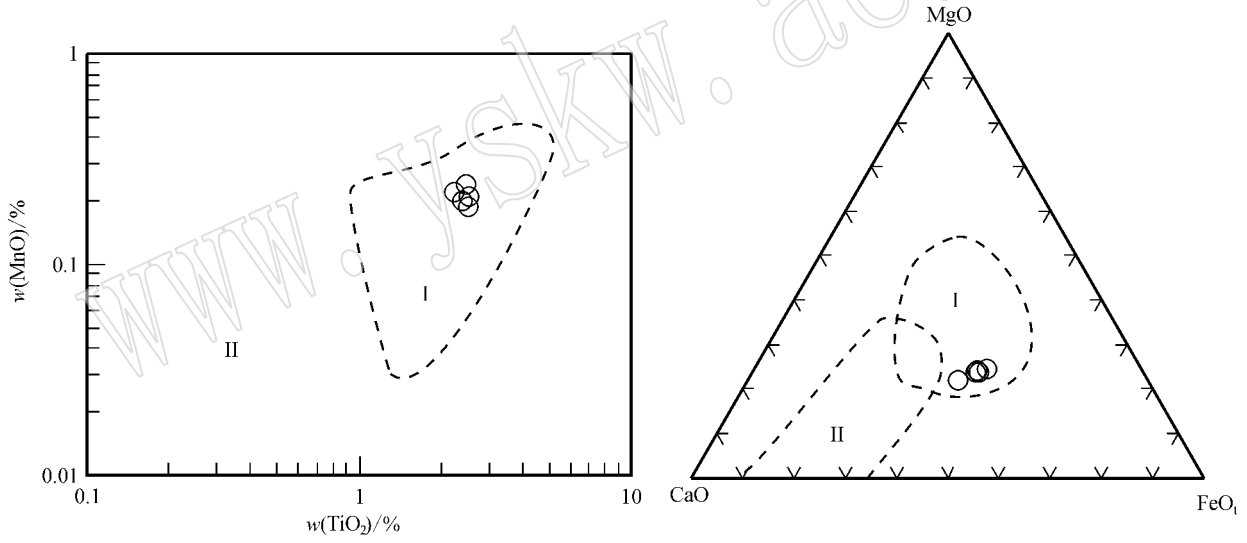

图 2　化隆群斜长角闪岩 $MnO-TiO_2$ 和 $MgO-CaO-FeO_t$ 图

Fig. 2　MnO versus TiO_2 and $MgO-CaO-FeO_t$ diagram of amphibolites in Hualong Group

Ⅰ—正斜长角闪岩；Ⅱ—副斜长角闪岩

Ⅰ—ortho-plagioclase amphibolite；Ⅱ—para-plagioclase amphibolite

考虑到岩石在较强的变质变形作用过程中，一些活泼元素（如 K、Ba、Rb、U 和 Pb）会受到严重影响，因此在本文的地球化学特征描述和讨论中，避免使用这些元素及比值讨论岩石成因，而主要讨论在变质作用中受影响较小的 REE 和高场强元素（HFSE）的地球化学特征。在 TiO_2-Zr/P_2O_5 图解（Winchester and Floyd，1976）上，化隆群斜长角闪岩落入碱性系列区（图 3a），而在 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 比值图（Winchester and Floyd，1977）上，也落入碱性玄武岩区（图 3b）。综上所述，可认为化隆群斜长角闪岩的原岩为碱性玄武岩。

3.2　主量元素特征

化隆群斜长角闪岩主、微量元素分析结果见表 1。其中 SiO_2 含量为 43.78%～48.09%，TiO_2 = 2.26%～2.5%，Al_2O_3 = 14.99%～16.64%，P_2O_5 = 0.38%～0.43%，CaO = 8.11%～10.93%，FeO_t =

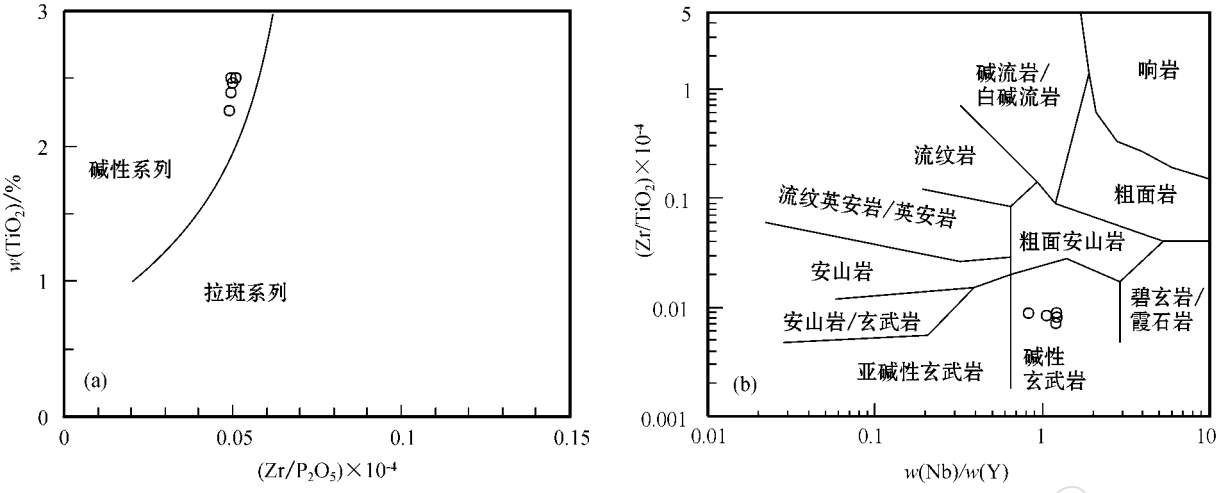

图 3 化隆群斜长角闪岩分类图

Fig. 3 Classification of amphibolites in Hualong Group

11.83%～12.54%。化隆群斜长角闪岩具有相对一致的 MgO 含量(6.49%～6.87%),$Mg^{\#}$ 在 0.53～0.54 之间,CaO/Al_2O_3 比值在 0.49～0.73 之间,暗示着斜长角闪岩不是原始岩浆,Al_2O_3 和 MgO 之间负相关性及 Eu 弱负异常到弱正异常(Eu/Eu^{*} = 0.90～1.11)暗示着不存在斜长石分离结晶作用或较弱,CaO/Al_2O_3 和 CaO 正相关性与 CaO/TiO_2 和 TiO_2 负相关关系以及 MgO 和 CaO 相对较小的比值变化范围(0.59～0.82),都说明在岩浆形成过程中存在一定程度镁铁质矿物的分离结晶。

3.3 微量元素特征

在 REE 配分模式图(图 4a)上,斜长角闪岩样品均表现出富集 LREE 的右倾型分布模式,轻重稀土元素分馏明显。斜长角闪岩的 $\Sigma REE = 134.5\times10^{-6}\sim199\times10^{-6}$,$(La/Yb)_{CN} = 4.3\sim8.3$,$(La/Sm)_{CN} = 2.0\sim2.6$,$(Dy/Yb)_{CN} = 1.3\sim1.6$,HREE 内部分馏作用较弱。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b)上,所有样品都表现出类似于 OIB 的

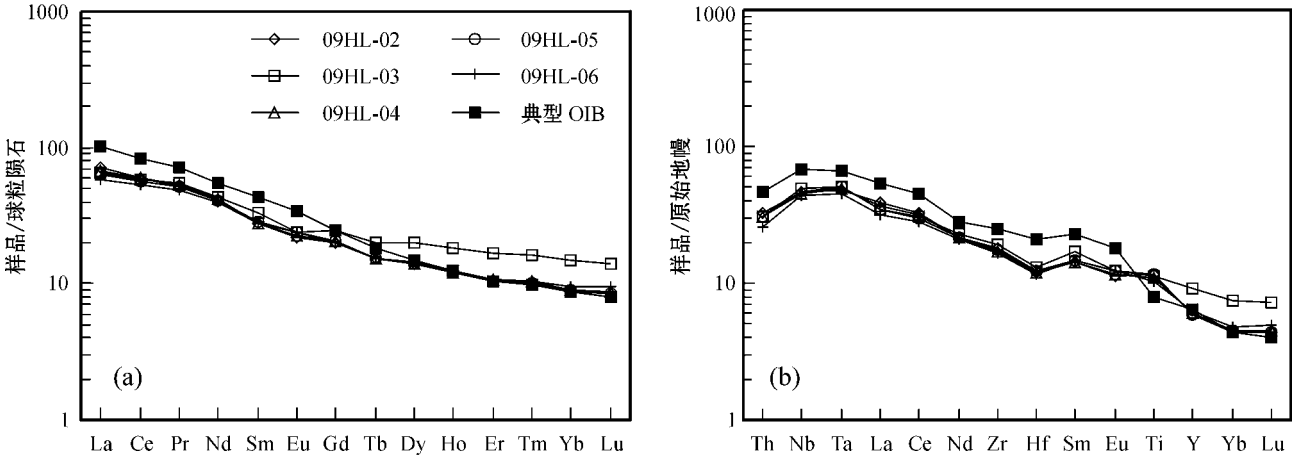

图 4 化隆群斜长角闪岩球粒陨石标准化 REE 配分模式图(a)和原始地幔标准化不相容元素蛛网图(b)[球粒陨石和原始地幔标准化值分别引自 Taylor & McLennan (1985)和 Sun & McDonough (1989)]

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle (PM) normalized spidergrams (b) of amphibolites in Hualong Group [values of trace elements for chondrite are from Taylor and McLennan (1985) and for PM from Sun and McDonough (1989), respectively]

表 1　化隆岩群斜长角闪岩主量元素（w_B/%）和微量元素（w_B/10^{-6}）分析结果

Table 1　Major（w_B/%）and trace element（w_B/10^{-6}）concentrations of amphibolites in Hualong Group

样品号	09HL-02	09HL-03	09HL-04	09HL-05	09HL-06
SiO_2	44.7	45.89	43.78	44.78	48.09
TiO_2	2.50	2.47	2.40	2.50	2.26
Al_2O_3	16.02	16.64	15.01	16.52	14.99
Fe_2O_3	1.74	1.80	1.94	2.20	1.95
FeO	10.97	10.60	10.37	10.29	10.07
MnO	0.19	0.24	0.20	0.21	0.22
MgO	6.87	6.65	6.49	6.66	6.57
CaO	9.39	8.11	10.93	8.92	8.67
Na_2O	0.58	0.57	0.56	0.55	0.58
K_2O	2.57	3.03	2.20	2.84	2.41
P_2O_5	0.40	0.43	0.39	0.40	0.38
Los	4.45	3.93	6.55	5.04	4.60
Total	95.93	96.43	94.27	95.87	96.19
$Mg^{\#}$	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54
Cr	49	50.4	50.1	48	50.9
Ni	55.4	54.1	64.1	50.2	53.1
Co	49.7	47.3	49.9	47.1	45.8
Rb	197	261	199	271	215
Sr	291	218	238	280	200
Ba	304	488	311	398	266
V	243	242	241	236	226
Nb	32.9	35.1	32.6	32.8	30.8
Ta	1.98	2.1	2.01	2.08	1.85
Zr	204	215	193	198	186
Hf	4.59	4.87	4.38	4.52	4.26
Pb	16.4	15.2	15.9	13.4	10.8
U	0.77	1.37	0.9	0.98	1.31
Th	2.78	2.64	2.64	2.64	2.21
Y	26.7	41.9	27.4	27.1	28.7
La	26.5	23.7	24.9	23.6	21.5
Ce	57	55.2	56.6	53.4	50.3
Pr	7.17	7.47	7.32	6.98	6.67
Nd	29.2	31	29.4	28.8	28.1
Sm	6.37	7.59	6.34	6.49	6.44
Eu	1.91	2.08	.97	2.08	2.08
Gd	6.12	7.62	6.29	6.3	6.14
Tb	0.9	1.17	0.9	0.9	0.89
Dy	5.3	7.52	5.34	5.34	5.57
Ho	1.05	1.57	1.04	1.02	1.05
Er	2.62	4.16	2.65	2.62	2.7
Tm	0.36	0.59	0.38	0.36	0.38
Yb	2.16	3.7	2.25	2.2	2.34
Lu	0.32	0.53	0.33	0.32	0.36
REE	146.98	153.90	145.71	140.41	134.52
$Eu/^{*}Eu$	1.02	0.90	1.05	1.10	1.11
Zr/Hf	44.44	44.15	44.06	43.81	43.66
Nb/Ta	16.62	16.71	16.22	15.77	16.65
Nb/La	1.24	1.48	1.31	1.39	1.43
Th/Ta	1.40	1.26	1.31	1.27	1.19

不相容元素配分型式（Sun and McDonough，1989），没有明显高场强元素负异常（Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti），与典型 OIB(Sun and McDonough，1989)具有一致的特征元素比值（Nb/La = 1.24～1.48，Th/Ta = 1.19～1.40）。总体上，化隆群斜长角闪岩具轻稀土元素富集、与典型 OIB 微量元素组成相似的特征。

在大地构造环境判别图解上（图 5），所有样品均落入板内玄武岩区（图 5a、5b 和 5c）或大陆玄武岩区（图 5d）内。

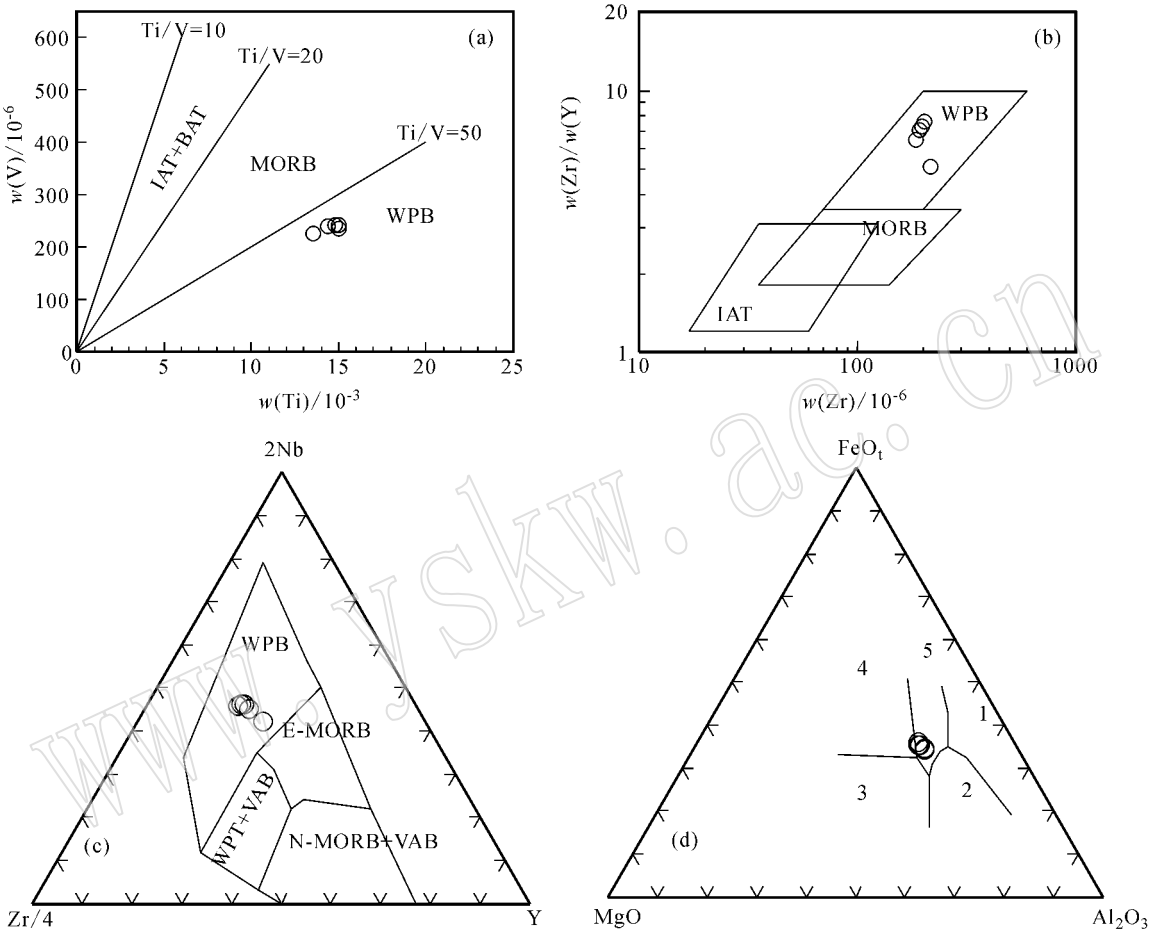

图 5 化隆群斜长角闪岩构造环境判别图

Fig. 5 Tectonic discrimination of amphibolites in Hualong Group

a—V－Ti 图解（Shervais *et al*.，1982），IAT＋BAT：岛弧和弧后盆地拉斑玄武岩，MORB：洋中脊玄武岩，WPB：板内玄武岩；b—Zr/Y－Zr 图解（Pearce and Norry，1979），IAT：岛弧拉斑玄武岩，MORB：洋中脊玄武岩，WPB：板内玄武岩；c—Nb－Zr－Y 图解（Meschede *et al*.，1986），WPB：板内玄武岩；WPT＋VAB：板内和火山弧；N-MORB＋VAB：洋中脊玄武岩和火山弧；E-MORB：富集型洋中脊玄武岩；d—FeO_t－MgO－Al_2O_3 图解（Pearce 和 Gale，1977），1：扩张中心岛；2：岛弧和活动大陆边缘；3：洋中脊玄武岩；4：洋岛玄武岩；5：大陆玄武岩

a—V－Ti discrimination diagram (Shervais *et al*.，1982)，IAT：island-arc tholeiite；BAT：back-arc basin tholeiite；MORB：mid-ocean ridge basalt；WPB：intraplate basalt；b—Zr/Y－Zr discrimination diagram (Pearce and Norry，1979)，IAT：island-arc tholeiite；MORB：mid-ocean ridge basalt；WPB：intraplate basalt；c—Nb－Zr－Y discrimination diagram (Meschede *et al*.，1986)，VAB：volcanic-arc basalt；E-MORB：E-type MORB；N-MORB：N-type MORB；WPB：intraplate basalt；WPT：intraplate tholeiite；d—FeO_t－MgO－Al_2O_3 discrimination diagram (Pearce and Gale，1977)，1：spreading center island；2：island-arc and active continental margin；3：midocean ridge basalt；4：ocean island basalt；5：continental basalt

4　岩石成因及构造意义

4.1　岩石成因

大陆玄武岩的成因受到多种地质因素的制约，如源区性质（软流圈、岩石圈地幔）和岩浆过程（结晶分异、地壳混染），如何确定熔融源区性质和岩浆过程是大陆玄武岩研究的关键（Sun and McDonough，1989；徐义刚，1999）。单斜辉石和橄榄石是玄武岩岩浆演化过程中常见的结晶分离结晶矿物，由于单斜辉石和橄榄石都能导致玄武岩浆中 CaO、MgO、Cr 和 Ni 的丰度降低，因此不能有效区分单斜辉石和橄榄石分离结晶。Pfänder 等（2007）研究表明高场强元素（如 Zr、Hf、Nb 和 Ta）在橄榄石和硅质熔体具有极低的分配系数，橄榄石的结晶分离不能导致高场强元素对比值（Zr/Hf、Nb/Ta）具有明显变化，然而 Zr/Hf 比值对单斜辉石分离结晶极为敏感，Nb/Ta 比值变化基本可以忽略。化隆群斜长角闪岩 Zr/Hf 比值范围在 43.66～44.44 之间，Nb/Ta 比值为 15.77～16.71，与典型 OIB 相比具有高 Zr/Hf 比值和相对一致 Nb/Ta 比值（典型 OIB 的 Zr/Hf＝35.9；Nb/Ta＝17.78），似乎说明单斜辉石为岩浆形成过程中主要分离结晶矿物，但是化隆群斜长角闪岩相对均一的岩石地球化学成分以及单斜辉石分离结晶将导致岩石的 MREE 亏损，因此，我们认为分离结晶作用在化隆群斜长角闪岩原岩形成过程中不明显，其表现出的地球化学特征很可能反映了熔融源区性质，高 Zr/Hf 比值是由于源区经历了富碳酸盐交代作用引起的（Guo *et al*.，2004a，2004b）。另外，国家大陆科学钻探计划对大别-苏鲁造山带 540～600 m 深度的石榴子石辉石岩研究表明，高压-超高压变质作用几乎不对基性火成变质岩石的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值产生影响，其 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值代表了原岩形成时的比值（Münker *et al*.，2003；Zeng *et al*.，2009）。

大陆玄武质岩浆的形成需要穿过相对较厚的岩石圈，因此幔源岩浆在上升过程中受到壳源物质混染的可能性是存在的。但化隆岩群斜长角闪岩具有与典型 OIB 具相似的微量元素比值（Nb/La＝1.24～1.48，Th/Ta＝1.19～1.40）和分布模式，说明地壳物质在玄武质岩浆形成过程中影响较弱。另外，地壳物质的混染会导致岩浆成分发生相当大的变化（徐义刚，1999；Guo *et al*.，2004a），但是化隆岩群斜长角闪岩相对均一的地球化学成分也证实了玄武质岩浆形成过程中地壳物质混染可以忽略不计。由于缺乏详细的同位素地球化学资料，难以精确确定化隆群斜长角闪岩熔融源区性质，但是，化隆群斜长角闪岩具有典型 OIB 相似地球化学特征，其又与典型 OIB 具相对亏损的高场强元素（如 Th、Nb）不同，且在大地构造环境判别图上落入板内大陆玄武岩区，因此，我们推测其来源于岩石圈地幔和软流圈地幔混合熔融源区。化隆群斜长角闪岩轻重稀土元素分馏明显，HREE 含量很低且变化范围很小，暗示岩浆源区有石榴子石残留。一般认为，霞石岩-碱性橄榄玄武岩-石英拉斑玄武岩的来源深度是逐渐递减的，碱性玄武岩的来源深度压力＞3.0 GPa，拉斑玄武岩的来源深度压力为 1.5 ～ 2.5 GPa（Falloon *et al*.，1988）。因此我们认为化隆群斜长角闪岩原岩起较深，为大陆裂谷初期软流圈地幔上涌交代岩石圈地幔的熔融产物。

4.2　构造意义

前人关于祁连山东段化隆群研究取得了大量成果，如：①青海省地质矿产局（1987）❶通过对区域 1∶5 万区域地质调查研究认为，化隆群可以与柴北缘达肯达坂群和邻区马衔山群对比，认为形成时代为早元古代；②郭进京等（2000）对区域上湟源群年代学研究认为其形成时代在 900 Ma 左右，并根据化隆群岩石组合相对于湟源群具有更强烈的变质变形作用，推测化隆群形成应该早于 900 Ma；③徐旺春等（2007）通过对化隆群黑云母斜长片麻岩和侵入化隆群弱片麻状花岗岩锆石年代学研究认为，化隆群形成时代为 891～875 Ma，其形成与 Rodinia 大陆聚合事件相关；④何世平等（未发表数据）对化隆群二云斜长片麻岩和斜长角闪岩年代学研究认为化隆群形成时代为 902～882 Ma。

化隆群斜长角闪岩地球化学特征研究表明，其原岩为一套具有类似于典型 OIB 元素地球化学特征、代表大陆裂谷初期拉张环境的碱性玄武岩。何世平等（未发表数据）研究表明化隆群斜长角闪岩形成时代为 882 Ma 左右，结合徐旺春等（2007）和何世平等（未发表数据）对区域上化隆群副片麻岩碎屑锆石 U-Pb 年代学研究，我们认为化隆群主体形成于新

❶ 青海省地质矿产局. 1987. 上加合幅和化隆回族自治县幅 1/5 万区域地质调查报告.

元古代。值得一提的是,郭进京等(2000)提出化隆群岩石组合相对于湟源群具有更强烈的变质变形作用,推测化隆群形成应该早于湟源群。我们经过详细的地层剖析,发现湟源群和化隆群变质程度均达到角闪岩相,认为二者应为同期变质作用的产物。

目前关于祁连山基底性质存在认识上的分歧:万渝生等(2003)通过变质泥砂质岩石和花岗岩研究认为祁连山基底主体为 0.8~1.0 Ga,晋宁期以前属于华北克拉通构造体系;张宏飞等(2006)根据祁连山基底和花岗岩类 Pb-Nd 同位素地球化学研究,认为祁连山块体应具有扬子型块体的构造属性。虽然祁连山基底性质的确定需要进一步开展区域上的研究工作,但是目前可以确定的是中祁连地区基底形成与 Rodinia 超大陆在新元古代聚合密切相关。考虑到锆石测年过程中的误差,我们推测化隆群具有 OIB 特征的斜长角闪岩为 Rodinia 超大陆在新元古代汇聚过程中局部裂解或 Rodinia 大陆整体上汇聚未完成局部地区就开始裂解的产物。总之,化隆群斜长角闪岩形成构造环境需要进一步研究工作来确定。

5 小结

化隆群斜长角闪岩原岩为类似于典型 OIB 元素地球化学特征的碱性玄武岩,来源于大陆裂谷初期软流圈地幔上涌交代岩石圈地幔熔融源区,为 Rodinia 超大陆在新元古代汇聚过程中局部裂解或 Rodinia 大陆整体上汇聚未完成局部地区就开始裂解的产物。

致谢 感谢王永和研究员和何世平研究员与作者在本文成稿过程中的有益探讨以及两位审稿人对本文提出的建设性意见。

References

Falloon T J, Green D H, Hatton C J, *et al*. 1988. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kb and application to basalt petrogenesis[J]. J. Petrol., 29(6): 1 257~1 282.

Feng Yimin and He Shiping. 1996. Geotectocline and Orogenesis of Qilian Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~50(in Chinese).

Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, *et al*. 2004a. Upper Paleozoic basalts in the southern Yangtze Block: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence for asthenosphere-lithosphere interaction and opening of the Paleo-Tethyan Ocean[J]. International Geology Review, 46: 332~346.

Guo F, Fan W M, Wang Y J, *et al*. 2004b. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu belt: implications for enrichment process beneath continental orogens[J]. Lithos, 78: 291~305.

Guo Jinjing, Zhao Fengqing, Li Huaikun, *et al*. 2000. New chronological evidence of the age of Huangyuan Group in the eastern segment of Mid-Qilian massif and its geological significance[J]. Regional Geology of China, 19: 26~31(in Chinese).

Li Chunyu, Liu Yangwen, Zhu Baoqing, *et al*. 1978. The tectonic developmental history of the Qinling Ranges and Qilian Mountains[A]. Science Papers on Geology for International Exchange[C]. Beijing: Geological Publishing House, 174~187(in Chinese).

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and contienetal tholeiites with Nb-Zr-Y diagram[J]. Chem. Geol., 56: 207~218.

Misra S N. 1971. Chemical distinction of high-grade ortho- and paraametabasite[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 51: 311~316.

Münker C, Pfänder J A, Weyer S, *et al*. 2003. Evolution of planetary cores and the Earth-Moon system from Nb/Ta systematics[J]. Science, 301: 84~87.

Pearce J A and Gale G H. 1977. Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks[J]. Geol. Sac. Spec. Publ., 7: 14~24.

Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 69: 33~47.

Pfänder J A, Münker C, Stracke A, *et al*. 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts -Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. Earth and Planetary Science Letters, 254: 158~172.

Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Qinghai Provinces[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~752(in Chinese).

Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. Earth. Planet Sci. Lett., 31: 457~484.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [A]. Sauders A D & Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.

Taylor S R and McLemann S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 312.

Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al*. 2003. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: its ages and compositions[J]. Acta Geoscientia Sinica, 24(4): 319~324(in Chinese).

Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 28: 459~469.

Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 20：325～343.

Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, *et al*. 1996. The Origin of Marine Volcanic Rocks in the North Qilian Mountains[M]. Beijing：Geological Publishing House(in Chinese).

Xu Wangchun, Zhang Hongfei, Liu Xiaoming, *et al*. 2007. U-Pb zircon ages of high-grade metamorphic rocks from the Qilianshan mountains, China：Constraints on era and tectonic affinity[J]. Chinese Sciences Bulletin, 52(10)：1 174～1 180 (in Chinese).

Xu Yigang. 1999. Basaltic magmatism in continental extensional setting：Nature and dynamic processes[A]. Zheng Yongfei. Chemical Geodynamic[C]. Beijing：Science Press, 119～167(in Chinese).

Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, *et al*. 1994. The Zoulangnanshan Caledonian subductive complex in the North Qilian mountains and its dynamics[J]. Acta Geologica Sinica, 68(1)：1～15(in Chinese).

Zeng L S, Liang F H, Chen Z Y, *et al*. 2009. Metamorphic garnet pyroxenite from the 540～600 m main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling(CCSD) Project[J]. Tectonophysics, 475：396～412.

Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, *et al*. 2006. Pb and Nd Isotopic compositions of basement and granitoid in the Qilianshan：constraints on tectonic sffinity[J]. Earth Sciences, 31：57～65(in Chinese).

Zhao Zhenhua. 1997. Principle of Trace Element Geochemistry[M]. Beijing：Science Press, 65～68(in Chinese).

附中文参考文献

冯益民,何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京：地质出版社.

郭进京, 赵凤清, 李怀坤, 等. 2000. 中祁连东段湟源群的年代学新证据及其地质意义[J]. 中国区域地质, 19：26～31.

李春昱,刘仰文,朱宝清,等. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史[A]. 国际交流地质学术论文集[C]. 北京：地质出版社. 174～187.

青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京：地质出版社, 1～752.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京 地质出版社.

徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义[J]. 科学通报, 52(10)：1 174～1 180.

徐义刚. 1999. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用：性质及动力学过程[A]. 郑水飞. 化学地球动力学[C]. 北京：科学出版社, 119～167.

万渝生,许志琴,杨经绥,等. 2003. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. 地球学报, 24(4)：319～324.

许志琴,徐惠芬,张建新,等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. 地质学报, 68(1)：1～15.

张宏飞,靳兰兰,张　利,等. 2006. 基底岩系和花岗类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性[J]. 地球科学, 31：57～65.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京：科学出版社, 65～68.