

中祁连西段晚寒武世埃达克岩的发现及地质意义

黄增保^{1,2}, 郑建平¹, 李葆华³, 魏志军², 漆 玮², 许廷龙²

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 731000;
3. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 乌尔格拉特岩体位于中祁连西段, 由花岗闪长岩和二长花岗岩组成。花岗闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 490.5 ± 1.4 Ma (MSWD = 0.85), 侵位时代为晚寒武世。岩石中 SiO_2 含量为 65.10% ~ 71.21%, Al_2O_3 含量为 14.94% ~ 16.82%, MgO 含量为 0.23% ~ 1.24%, A/NKC 为 0.9 ~ 1.0, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.01 ~ 2.33, 属准铝质花岗岩类; 富集轻稀土元素和大离子亲石元素(Ba、U 和 Sr), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 P)和重稀土元素, 其中 Sr 含量为 345×10^{-6} ~ 541×10^{-6} (平均 402×10^{-6}), Yb 为 0.72×10^{-6} ~ 1.19×10^{-6} (平均 0.97×10^{-6}), Y 为 6.09×10^{-6} ~ 11.3×10^{-6} (平均 8.67×10^{-6}), 无铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.91 \sim 1.27$), 高 Sr/Y 值 (32.6 ~ 74.3), 具埃达克岩地球化学特征。结合区域地质背景, 认为乌尔格拉特岩体形成于俯冲环境, 为晚寒武世北祁连洋向中祁连地块俯冲的产物。

关键词: 中祁连; 晚寒武世; 锆石 U-Pb 年龄; 埃达克岩; 乌尔格拉特岩体

中图分类号: P588.12⁺ 1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1008-11

The discovery of Late Cambrian adakite in the western Central Qilian Mountain and its geological implications

HUANG Zeng-bao^{1,2}, ZHENG Jian-ping¹, LI Bao-hua³, WEI Zhi-jun², QI Wei² and XU Yan-long²

(1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 731000, China; 3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Located in the western Central Qilian Mountain, the Wuergelate pluton is mainly composed of granodiorite and monzonitic granite. In this paper, the authors studied its zircon LA-ICPMS U-Pb age and major and trace elements. The results show that the zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age is 490.5 ± 1.4 Ma (MSWD=0.85), indicating that the pluton was formed in the Late Cambrian. Compositionally, SiO_2 values range from 65.10% to 71.21%, Al_2O_3 from 14.94% to 16.82%, MgO from 0.23% to 1.24%, A/NKC from 0.9 to 1.0, and $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ from 1.01 to 2.33, suggesting metaluminous rocks. In addition, the rocks are enriched in LILE(Ba, U, Sr) and LREE, and depleted in HREE and HFSE (Nb, Ta, Ti and P). The Sr values range from 345×10^{-6} to 541×10^{-6} , averaging 402×10^{-6} , Yb from 0.72×10^{-6} to 1.19×10^{-6} , averaging 0.97×10^{-6} , and Y from 6.09×10^{-6} to 11.30×10^{-6} , averaging 8.67×10^{-6} , with no negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.91 \sim 1.27$). The geochemical characteristics imply that the Wuergelate pluton could represent adakite, and was formed in a subduction orogenic setting. Combined with the tectonic location of the granite and regional geology, the authors hold that the North Qilian oceanic plate subducted southward under the Central Qilian blocks in the late Cambrian, which resulted in the formation of Wuergelate pluton.

Key words: Central Qilian Mountain; Late Cambrian; zircon U-Pb dating; adakite; Wuergelate pluton

收稿日期: 2014-06-02; 修订日期: 2014-09-20

基金项目: 中国地质调查局地调项目(1212010781070); 国家自然科学基金资助项目(41372094)

作者简介: 黄增保(1978-), 男, 博士生, 岩石学专业, E-mail: gsddyhzb@126.com。

中祁连地块挟持于北祁连造山带和南祁连裂谷之间,东与秦岭造山带相连,西为阿尔金走滑断裂所截,与塔里木板块相接,为一前寒武纪变质地体(冯益民等,1996)。该地体内分布有大量古生代花岗岩类,从西段的肃北野马南山,中段的兰州什川和湟源董家庄、新店,到东段天水陇山均有出露。不少学者对这些岩体的年代学和岩石成因做过研究,识别出大量早古生代花岗岩体,如中祁连西段的石包城花岗岩体、肃北县花岗闪长岩体侵位时代分别为 435 Ma 和 415 Ma(李建锋等,2010),黑沟梁子花岗岩体和野马南山花岗闪长岩体就位时代分别为 444 ± 17 Ma(苏建平等,2004a) 和 444 ± 38 Ma(苏建平等,2004b),巴嘎德尔基二长花岗岩体形成时代为 462.9 Ma(齐瑞荣,2012)。陈隽璐等(2007, 2008)报道了中祁连中段的什川二长花岗岩和东段陇山王家岔石英闪长岩侵位时代分别为 444.6 Ma 和 454.7 Ma;雍拥等(2008)获得中祁连中段湟源董家庄和新店二长花岗岩年龄为 446 Ma 和 454 Ma,被解释为同碰撞年龄;贾群子等(2007)测得马家沟二长花岗岩就位时代为 472.75 Ma,认为形成于俯冲环境。截至目前,发现中祁连地块内早古生代岩体多形成于中奥陶世—晚奥陶世,少数为志留纪和泥盆纪,有关寒武纪中酸性岩体的研究鲜有报道,制约了人们对中祁连加里东早期岩浆作用过程和构造属性的认识,从而对北祁连洋是否曾向南俯冲、俯冲时代和俯冲机制等关键性的问题仍存有争议(左国朝等,1997; 夏林圻等,1998; 吴才来等,2006; Song, 2009)。

笔者在参加 1:5 万大道尔吉幅矿调过程中,对野马南山一带中酸性侵入岩进行了调查和研究,从前人划分的晚奥陶世花岗岩岩基中厘定出一套晚寒武世花岗岩体,即乌尔格拉特岩体。本文通过地质、岩石学、锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学和地球化学的研究,探讨岩体成因和构造环境,以期为祁连造山带构造演化研究提供新资料。

1 地质背景

乌尔格拉特岩体位于中祁连地块西段北缘、甘肃省肃北县城东南 100 km 处的野马南山一带(图 1a)。中祁连地块西段出露一套前寒武系变质地层,即下元古界和中新元古代地层。其中,下元古界地层为北大河岩群,由斜长片麻岩、云母石英片岩、斜

长角闪片岩和大理岩等岩石组成,为一套低角闪岩相结晶基底岩系。中新元古代地层依次为长城纪朱龙关群、蓟县纪花儿地组、青白口纪龚岔群和震旦纪白杨沟群。朱龙关群下部为浅变质的中基性火山熔岩夹碳酸盐岩,上部为浅变质碎屑岩夹铁矿层;花儿地组为灰岩、白云岩夹泥质板岩;龚岔群由碎屑岩和碳酸盐岩组成;白杨沟群主要为厚层砾岩,局部见有中基性火山岩。区内中酸性侵入岩发育,呈岩基产出,绝大多数形成于奥陶纪(苏建平,2004a, 2004b; 齐瑞荣,2012),个别形成于志留纪和泥盆纪(李建锋等,2010)。因中祁连地质特征与阿拉善地块南缘的中新元古代出露区可对比,被认为是加里东期北祁连洋扩张过程中从华北板块裂离出的中间地块(冯益民等,1996)。早古生代中期,北祁连洋向北东和南西两侧双向俯冲,中祁连地块北缘具活动陆缘性质(左国朝等,1997)。至早古生代末,北祁连洋俯冲殆尽,中祁连地块与阿拉善地块发生碰撞(夏林圻等,1998; 宋述光,2009),祁连山地区进入陆内演化阶段。

2 岩体地质

乌尔格拉特岩体出露于野马南山南坡的乌尔格拉特、夏乌特沟一带,呈岩株产出,面积 12 km^2 (图 1b),侵入于蓟县系花儿地组结晶灰岩和泥质板岩中,沿接触带见红柱石等热变质矿物,局部为奥陶纪花岗闪长岩侵入。岩体由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,二者呈渐变侵入接触,其中前者位于岩体外部,后者则构成岩体核部,呈不规则同心环带状。岩相学特征如下

2.1 花岗闪长岩

花岗闪长岩呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。主要由斜长石($50\% \sim 60\%$)、正长石($10\% \sim 15\%$)、石英($20\% \sim 30\%$)、角闪石($1\% \sim 5\%$)和黑云母($1\% \sim 5\%$)组成,副矿物为磁铁矿、锆石、榍石等,含量均不足 1%。斜长石呈半自形板状,粒径 $1 \sim 2 \text{ mm}$,发育环带结构;正长石呈他形粒状,粒径 $1 \sim 6 \text{ mm}$,内包裹斜长石;石英呈他形粒状;角闪石为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 半自形柱状晶体,局部具绿泥石化。

2.2 二长花岗岩

二长花岗岩呈浅肉红色,中细粒花岗结构,块状构造。主要矿物组成:斜长石($40\% \sim 50\%$)、正长石($20\% \sim 30\%$)、石英($25\% \sim 30\%$)、角闪石($1\% \sim 5\%$)

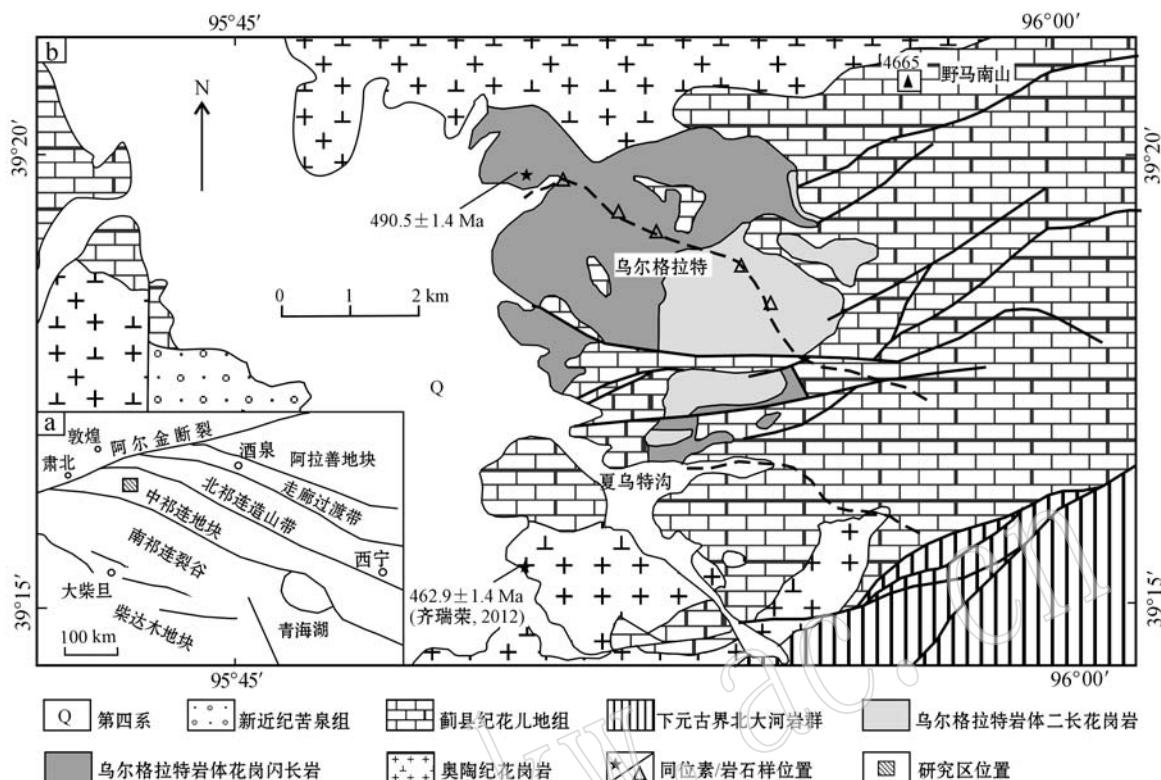


图1 乌尔格拉特岩体地质图

Fig. 1 Geological map of the Wuergelate pluton

和黑云母(1%~5%),副矿物为磁铁矿、榍石、锆石等,含量均小于1%。斜长石多为1~2 mm半自形板状晶体,表面粘土化;正长石一般小于2 mm,呈它形粒状,发育正条纹结构;石英呈他形粒状。

3 样品及分析方法

本文挑选5件代表性样品进行了全岩地球化学分析。测试在国土资源部宜昌地质矿产研究所进行,除H₂O用重量法和FeO用容量滴定法测定外,其余主量元素用AXIOS X射线萤光光谱仪测定,分析精度(相对误差)优于1%,微量元素和稀土元素采用X Series II等离子体质谱仪,分析误差小于5%。

同时,采集了远离裂隙、新鲜无蚀变的细粒花岗闪长岩30 kg作为同位素分析样品。锆石挑选在河北区域地质调查队实验室进行。首先按常规方法粉碎,用磁选、电选方法得到重砂矿物,再淘洗获得无磁或弱磁性锆石单颗粒,最后在双目镜下挑选出晶形较好、透明锆石晶体,并进行矿物学和形态学鉴定。选择无裂缝和包裹体,且具有明显的岩浆震荡环带自形岩浆锆石晶体进行测试。锆石U-Pb年龄

在国土资源部天津地质矿产研究所进行,通过激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)上测定。质谱仪为Thermo Fisher公司制造的Neptune,激光剥蚀系统为ESI公司生产的UP193-FX ArF准分子激光器,利用193 nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光斑束35 μm,采用Adersen(2002)方法对普通铅进行校正,详细分析方法及仪器参数见李怀坤等(2010)。原始数据数据处理、年齡计算和绘图使用ICPMSCal程序(Liu et al., 2008)和ISOPLOT程序(Ludwig, 2003)进行。同位素比值误差为1σ,年齡值选²⁰⁶Pb/²³⁸U,加权平均年齡的误差为95%置信度。

4 测试结果

4.1 锆石U-Pb年代学

乌尔格拉特岩体(TW36-1)花岗闪长岩锆石在透反射光下,颜色呈无色-极浅色,自形程度较好,为细长柱状、板状或短柱状,表面光滑,一般长200~300 μm之间,个别500~700 μm,宽50~100 μm,长宽之比为2:1~4:1,柱面{110}、{100}和锥面{111}

均发育。本文通过透射光、反射光图像研究, 对 20 粒锆石进行分析, 年龄结果列于表 1。

从表 1 中可以看出: 锆石 U 含量为 $174 \times 10^{-6} \sim 1634 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $76 \times 10^{-6} \sim 2060 \times 10^{-6}$, 且二者呈明显正相关性。Th/U 值较高(0.16 ~ 1.26), 不同于变质锆石(Th/U < 0.1), 属于典型

的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000)。所有测点显示一致的分析结果, 其中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化于 489 ~ 493 Ma 之间, 并在谐和线上形成一个年龄集中区(图 2), 加权平均年龄为 490.5 ± 1.4 Ma (MSWD = 0.85)。

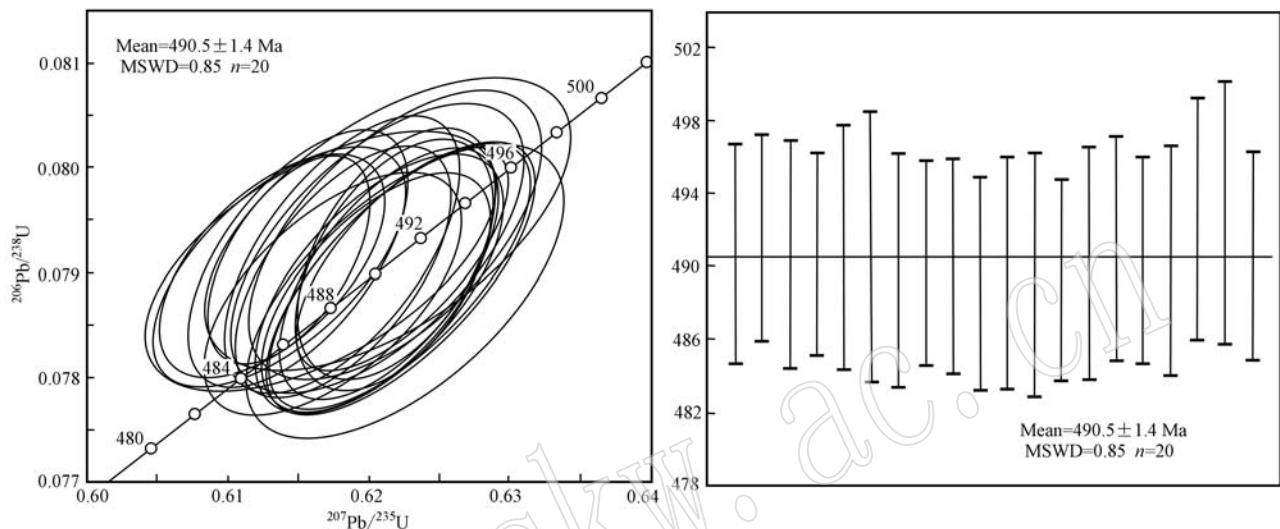


图 2 乌尔格拉特岩体锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和曲线年龄计算

Fig. 2 Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ concordia diagram and average age of the Wuergelat pluton

4.2 地球化学

4.2.1 主量元素

岩石主量元素、稀土和微量元素分析数据见表 2。结果显示, SiO_2 含量为 65.10% ~ 71.21%, K_2O 含量为 2.27% ~ 4.09%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.01 ~ 2.33 之间, 里特曼指数(δ)为 1.3 ~ 2.4 之间, 在 K_2O - SiO_2 关系图(图 3a)上, 多数落入钙碱性系列区, 个别落入高钾钙碱性系列区; Al_2O_3 含量为 14.94% ~ 16.82%, 过铝质指数(A/NKC)为 0.9 ~ 1.0, 均小于 1.1, 几乎不含标准矿物刚玉分子(0% ~ 0.4%), 反映铝不饱和, 属准铝质花岗岩, 具大陆弧花岗岩特征(图 3b)。 MgO 和 $\text{Mg}^{\#}$ 较低, 分别为 0.23% ~ 1.24% 和 20 ~ 30。以上特征表明, 乌尔格拉特岩体为富钠贫钾的钙碱性准铝质花岗岩。

4.2.2 微量元素特征

从表 2 可以看出, 乌尔格拉特岩体稀土元素总量介于 $30.2 \times 10^{-6} \sim 122 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 59.0×10^{-6} , 为球粒陨石值(3.29×10^{-6} , Boynton and Bowdon, 1984)10 ~ 30 倍。其中 LREE = $24.9 \times 10^{-6} \sim 114 \times 10^{-6}$, HREE = $4.13 \times 10^{-6} \sim 8.65 \times 10^{-6}$,

LREE/HREE = 4.68 ~ 13.1, (La/Yb)_N = 3.76 ~ 19.8, 反映轻稀土元素富集, 且轻重稀土元素分馏明显, 无-正铕异常($\delta\text{Eu} = 0.91 \sim 1.27$)特征。稀土元素配分模式除个别样品(PM36w2)外, 其余具有相似的曲线形态, 即右倾模式(图 4a), PM36w2 样品稀土配分曲线也为右倾模式, 但较陡, 轻稀土元素较富集, 可能为后期蚀变所致。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)上, 表现为 Ba、U、Sr 等大离子亲石元素富集, Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的相对亏损。同时, 样品 Sr 含量高($\text{Sr} = 345 \times 10^{-6} \sim 541 \times 10^{-6}$), Yb、Y 含量低($\text{Yb} = 0.72 \times 10^{-6} \sim 1.19 \times 10^{-6}$, $\text{Y} = 6.09 \times 10^{-6} \sim 11.3 \times 10^{-6}$), 高 Sr/Y 值(32.6 ~ 74.3), 显示其具埃达克岩地球化学特征(Defant and Drummond, 1990)。

5 讨论

5.1 岩石成因

乌尔格拉特岩体由花岗闪长岩和二长花岗岩组成, 二者呈渐变侵入接触, 其岩石地球化学特征与典

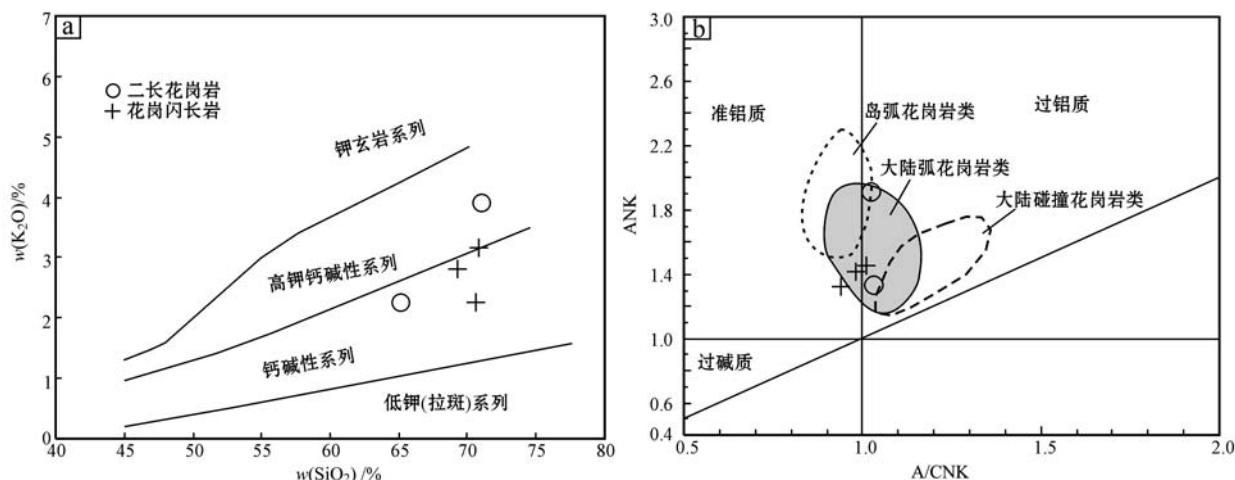
表 1 乌尔格拉特岩体花岗闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据

Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb isotopic data of granodiorite from the Wuergele pluton

样品号 PM36IW	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值			年龄/ Ma									
	Pb	U	Th	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ			
1	75	988	175	0.18	0.0791	0.0005	0.6214	0.0026	0.0570	0.0002	491	3	491	2	491	9
2	57	758	123	0.16	0.0792	0.0005	0.6215	0.0029	0.0569	0.0002	492	3	491	2	487	9
3	25	322	113	0.35	0.0791	0.0005	0.6165	0.0052	0.0565	0.0004	491	3	488	4	473	16
4	39	494	214	0.43	0.0791	0.0004	0.6141	0.0036	0.0563	0.0003	491	3	486	3	465	12
5	81	1038	374	0.36	0.0792	0.0005	0.6183	0.0033	0.0567	0.0002	491	3	489	3	478	8
6	21	274	80	0.29	0.0792	0.0006	0.6188	0.0050	0.0567	0.0004	491	4	489	4	480	14
7	26	319	146	0.46	0.0790	0.0005	0.6214	0.0037	0.0571	0.0004	490	3	491	3	495	14
8	151	1634	2060	1.26	0.0790	0.0005	0.6138	0.0025	0.0563	0.0002	490	3	486	2	466	8
9	87	940	1187	1.26	0.0790	0.0005	0.6220	0.0032	0.0571	0.0003	490	3	491	3	496	11
10	35	437	195	0.45	0.0788	0.0005	0.6174	0.0037	0.0568	0.0003	489	3	488	3	485	11
11	40	511	221	0.43	0.0789	0.0005	0.6210	0.0035	0.0571	0.0002	490	3	490	3	495	10
12	41	513	228	0.44	0.0788	0.0006	0.6224	0.0046	0.0573	0.0003	489	4	491	4	502	10
13	38	483	206	0.43	0.0789	0.0004	0.6207	0.0032	0.0571	0.0003	489	3	490	3	495	11
14	53	676	231	0.34	0.0790	0.0005	0.6211	0.0030	0.0570	0.0003	490	3	491	2	492	10
15	51	659	167	0.25	0.0791	0.0005	0.6149	0.0032	0.0563	0.0002	491	3	487	3	466	9
16	35	447	171	0.38	0.0790	0.0005	0.6127	0.0034	0.0562	0.0003	490	3	485	3	461	11
17	27	353	100	0.28	0.0790	0.0005	0.6222	0.0038	0.0571	0.0003	490	3	491	3	495	11
18	36	455	144	0.32	0.0794	0.0005	0.6219	0.0042	0.0568	0.0003	493	3	491	3	483	11
19	14	174	76	0.44	0.0795	0.0006	0.6212	0.0053	0.0567	0.0005	493	4	491	4	480	18
20	49	616	254	0.41	0.0791	0.0005	0.6184	0.0030	0.0567	0.0002	491	3	489	2	481	10

表2 乌尔格拉特岩体主量元素($w_B/\%$)和稀土、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析数据Table 2 Analyses of major elements ($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the Wuergelate pluton

岩性 样号	花岗闪长岩			二长花岗岩		岩性 样号	花岗闪长岩			二长花岗岩	
	PM361w1	PM361w2	PM361w3	PM36w1	PM36w2		PM361w1	PM361w2	PM361w3	PM36w1	PM36w2
SiO ₂	69.24	70.66	70.62	71.21	65.10	Zr	101	106	95.8	68.9	132
TiO ₂	0.18	0.18	0.13	0.16	0.40	Hf	3.41	3.71	3.37	3.22	4.18
Al ₂ O ₃	16.17	14.94	16.24	15.01	16.82	Sn	1.00	1.25	3.20	1.50	6.65
Fe ₂ O ₃	1.52	1.09	0.89	1.33	1.31	U	0.87	0.86	1.03	2.40	1.17
FeO	1.03	1.63	0.85	0.97	4.00	Th	2.87	2.64	3.09	2.76	9.62
MgO	0.44	0.41	0.23	0.37	1.24	Ti	1 061	1 067	761	929	2 415
MnO	0.03	0.03	0.01	0.03	0.08	P	118	111	85	98	419
CaO	2.80	2.35	2.81	1.89	4.74	K	11 663	15 191	9 422	16 976	9 380
Na ₂ O	5.11	4.45	5.29	4.15	3.12	La	10.6	9.84	10.7	6.16	28.6
K ₂ O	2.81	3.66	2.27	4.09	2.26	Ce	20.0	17.5	19.9	11.0	52
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.04	0.05	0.09	Pr	2.48	2.13	2.46	1.35	6.34
H ₂ O ⁻	0.12	0.11	0.24	0.25	0.21	Nd	8.72	7.49	8.66	4.93	21.8
H ₂ O ⁺	0.45	0.23	0.36	0.41	0.58	Sm	1.58	1.35	1.77	1.04	3.74
LOI	0.27	0.20	0.12	0.59	0.42	Eu	0.56	0.50	0.54	0.44	1.06
Total	100.21	99.98	100.11	100.50	100.38	Gd	1.38	1.18	1.66	1.09	3.26
TFeO	2.40	2.61	1.66	2.16	5.18	Tb	0.22	0.18	0.27	0.22	0.46
Mg [#]	25	22	20	24	30	Dy	1.25	1.06	1.64	1.43	2.26
A/CNK	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	Ho	0.25	0.19	0.33	0.31	0.40
A/NK	1.4	1.3	1.5	1.3	2.2	Er	0.71	0.59	0.96	0.87	1.02
δ	2.4	2.4	2.1	2.4	1.3	Tm	0.13	0.11	0.18	0.17	0.16
Na ₂ O+K ₂ O	7.92	8.11	7.56	8.24	5.38	Yb	0.91	0.72	1.19	1.08	0.95
Na ₂ O/K ₂ O	1.82	1.22	2.33	1.01	1.38	Lu	0.13	0.10	0.18	0.15	0.14
CaO/Na ₂ O	0.55	0.53	0.53	0.46	1.52	Y	7.28	6.09	9.86	8.84	11.3
F	417	415	376	486	542	LREE/HREE	8.82	9.40	6.87	4.68	13.1
Cr	10.7	15.2	12.6	11.0	16.4	Σ REE	48.9	42.9	50.4	30.2	122
Li	14.1	17.5	11.3	25.4	17.6	(La/Yb) _N	7.67	9.00	5.92	3.76	19.82
Rb	75.8	87.2	63.3	148	94.3	δ Eu	1.14	1.19	0.96	1.27	0.91
Cs	1.72	1.96	2.55	3.19	2.46	(La/Yb) _N	3.85	4.27	2.87	1.84	6.70
Sr	541	345	375	381	368	Sr/Y	74.31	56.65	38.03	43.10	32.57
Ba	1 060	1 090	692	795	352	Rb/Sr	0.14	0.25	0.17	0.39	0.26
Sc	4.92	5.13	5.82	4.97	7.26	La/Ce	0.53	0.56	0.54	0.56	0.55
Nb	8.23	7.19	6.16	10.6	13.0	Nb/U	9.46	8.36	5.98	4.42	11.11
Ta	0.41	0.38	0.50	0.71	0.72	Gd/Yb	1.22	1.31	1.12	0.81	2.75

图3 K₂O-SiO₂图解(a, 据 Richter, 1989)和A/NK-A/CNK图解(b, Maniar 和 Piccoli, 1989)Fig. 3 K₂O versus SiO₂(a, after Richter, 1989) and A/NK versus A/CNK (b, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams of the Wuergelate pluton

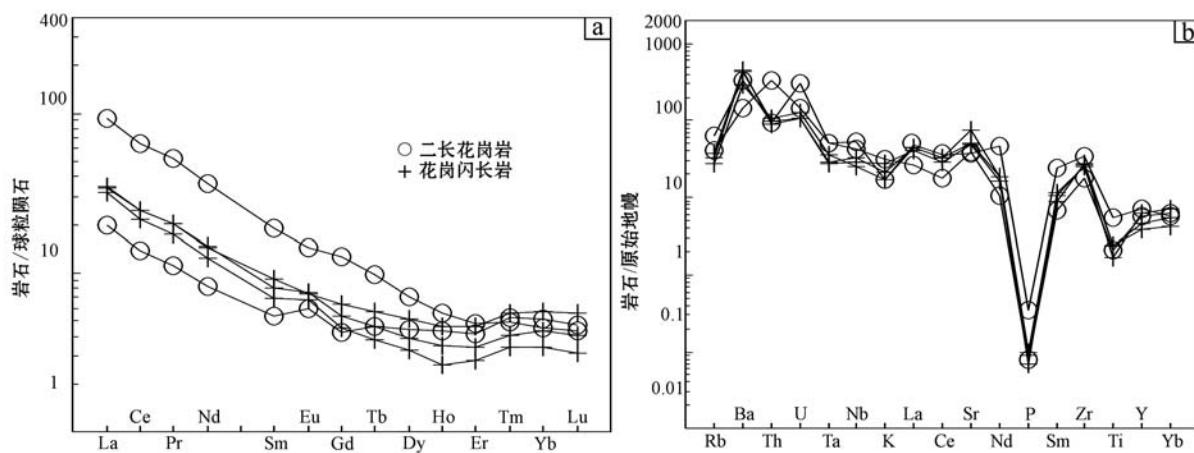


图4 球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalized values after Boynton, 1984) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b, normalized values after Sun and McDonough, 1989)

型的埃达克质岩相似(Defant and Drummond, 1990; 王焰等, 2000)。具体表现为主量元素 $\text{SiO}_2 > 56\%$ (平均 69.37%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (平均 15.84%)、 $\text{MgO} < 3\%$ (平均 0.54%)；微量元素为 $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ (平均 402×10^{-6})； $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ (平均 0.97×10^{-6})； $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ (平均 8.67×10^{-6})， $\text{Sr/Y} > 20$ ($32.6 \sim 74.3$)，以及具正 Eu 和 Sr 异常等特征。在目前鉴别埃达克岩的地球化学图解 Sr/Y-Y (图 5a) 和 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ (图 5b) 上，均落入埃达克岩区。

埃达克质岩成因模式目前主要有：俯冲洋壳板片发生部分熔融(Defant and Drummond, 1990)、增厚下地壳的部分熔融(Chung *et al.*, 2003)、玄武质岩浆底侵作用导致下地壳的部分熔融(Atherton and Petford, 1993)、幔源岩浆在厚地壳底部岩浆库中发生结晶分异作用(Feeley and Hacker, 1995)、拆沉作用导致下地壳部分熔融(Gao *et al.*, 2004)等模式。

乌尔格拉特岩体具富钠贫钾的特征($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.1 \sim 2.3$ ，平均 1.55)，不同于中国东部加厚下地

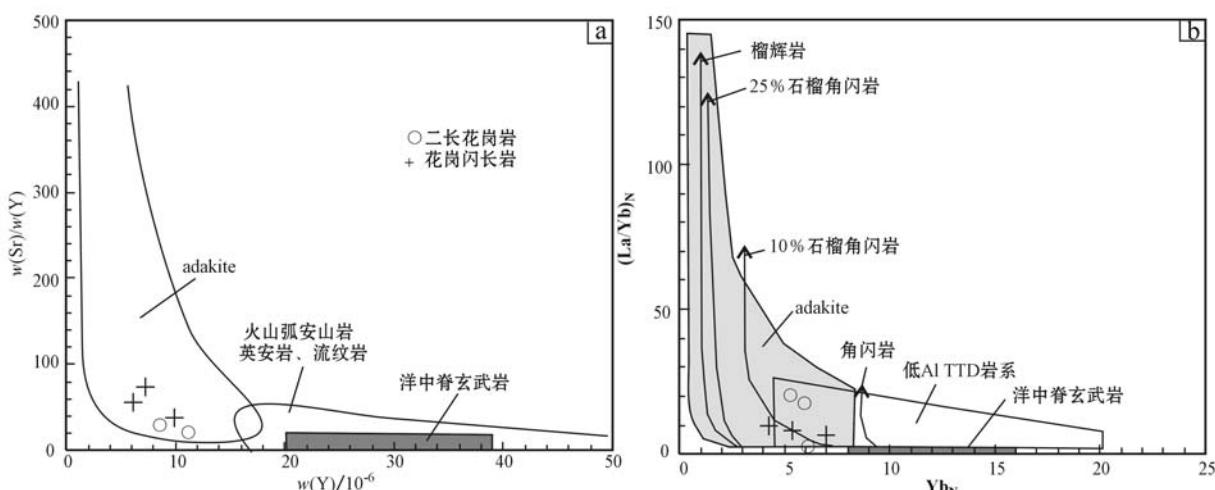


图5 乌尔格拉特岩体 Sr/Y-Y 图解(a)和 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ 图解(b)(据 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 5 Sr/Y versus Y (a) and $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ versus Yb_{N} (b) diagrams of the Wuerglate pluton (after Drummond and Defant, 1990)

壳部分熔融形成的富钾贫钠C型埃达克岩(张旗等, 2001; Chung *et al.*, 2003), 同时, 样品具较低的Mg[#](20~30, 平均24)和Cr含量(10.7×10^{-6} ~ 16.4×10^{-6}), 且不含中基性暗色包体, 与玄武质岩浆底侵作用导致下地壳部分熔融以及拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩不同, 一般后者具高Mg[#], 富Cr富Ni等幔源岩浆(Martin *et al.*, 1999; Gao *et al.*, 2004), 而且发育有中基性暗色包体。同样岩石无明显Eu异常及正Sr异常, 也有别于幔源岩浆在厚地壳底部岩浆库中发生结晶分异作用形成的埃达克岩。

乌尔格拉特岩体Nb = 6.16×10^{-6} ~ 13.0×10^{-6} , Nb/Ta = 12.3~20.1, 平均16.9, 高于大陆地壳值(10~14, 赵振华等, 2008), 与现代岛弧环境下形成的埃达克岩Nb/Ta值接近(17.3~17.6, Kamber *et al.*, 2002)。此外, 岩石富钠贫钾, 具较低的Mg[#]值以及与环太平洋新生代埃达克岩相当的Rb/Sr值(0.14~0.39)和La/Ce(0.53~0.56)值, 暗示其成因可能为俯冲板片熔融形成的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999; Drummond *et al.*, 1996)。这与祁连山早古生代板块构造格局相符合(宋述光, 2009; 张建新等, 1997; 冯益民等, 1996; 左国朝等, 1997; 夏林圻等, 1998; 汤中立等, 2001), 在晚寒武世末, 研究区北侧的北祁连洋开始发生俯冲作用(夏林圻等, 1998; 宋述光, 2009), 而南侧的南祁连也处裂解阶段(邱家骥等, 1998), 因而不存在因碰撞造山的地壳增厚, 也不可能产生增厚的下地壳部分熔融形成埃达克岩。最有可能是北祁连洋向中祁连地块俯冲, 俯冲板片熔融形成埃达克岩。

岩石具Sr正异常和Eu正异常及高Sr/Y比值, 反映岩浆源区残留相不存在或很少有斜长石(Defant and Drummond, 1990), 在(La/Yb)_N-Yb_N图解上(图5b), 样品点全部落在10%石榴角闪岩部分熔融曲线附近, 说明其源区残留相主要为石榴石+角闪石。

5.2 地质意义

乌尔格拉特岩体花岗闪长岩锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为 490.5 ± 1.4 Ma(1σ), 根据最新国际地质年代代表时代划分方案(国际地层委员会, 2013), 侵位年代为晚寒武世。这一结果明显早于中祁连西段所报道的早古生代岩体, 如野马南山花岗闪长岩(444 ± 38 Ma, 苏建平等, 2004b)、黑沟梁子花岗岩

(444 ± 17 Ma, 苏建平等, 2004a)、巴嘎德尔基二长花岗岩(462.9 Ma, 齐瑞荣, 2012)以及石包城片麻状花岗岩(435 Ma)和肃北花岗闪长岩(415 Ma, 李建峰等, 2010), 也早于中祁连中东段的早古生代侵入岩, 如董家庄和新店二长花岗岩体(446~454 Ma, 雍拥等, 2008)和什川二长花岗岩(444.6 Ma, 陈隽璐等, 2008), 属早古生代早期侵入岩。

研究表明, 北祁连高压变质带变质岩年龄为489~442 Ma, 其中榴辉岩锆石SHRIMP U-Pb年龄介于489~463 Ma之间(Song *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2007), 蓝片岩³⁹Ar-⁴⁰Ar年龄集中460~440 Ma(张建新等, 1997; Liu *et al.*, 2006), 前者代表了北祁连洋壳俯冲至最深处(≥ 60 km)时的峰期变质年龄, 而后者可能代表了高压变质岩上升折返阶段所形成的年龄(董顺利等, 2013)。由此可以推测, 北祁连洋盆在晚寒武世—早奥陶世即发生俯冲作用, 并达到最深处, 中晚奥陶世俯冲洋壳发生折返作用。然而, 对北祁连洋的俯冲方向目前仍存在较大分歧。多数地质学家认为北祁连洋在晚寒武世—早奥陶世是向北俯冲的, 证据是北祁连俯冲-增生杂岩北侧存在大量岛弧火山岩系, 且岩浆活动的时限与超高压变质带榴辉岩变质年龄一致(490~460 Ma, 张旗等, 1997; 张建新等, 1997; 夏林圻等, 1998; 宋述光, 2009); 左国朝等(1997)、周德进等(1997)和王永和等(2008)则基于北祁连俯冲增生杂岩南侧存在早古生代花岗岩类的地质事实, 认为早古生代北祁连洋分别向西南和北东两侧俯冲, 即双向俯冲; 近年来, 吴才来等(2004, 2006, 2010)根据北祁连花岗岩研究, 进一步提出了北祁连洋晚寒武世—早奥陶世向南俯冲, 中奥陶世受柴北缘板块向北俯冲的影响, 俯冲受阻, 转向北俯冲的认识。作者认为造成这种分歧最根本的原因是对中祁连地块乃至北祁连造山带南缘早古生代岩浆作用研究不足。

乌尔格拉特岩体侵位年代为 490.5 ± 1.4 Ma, 形成于晚寒武世, 与北祁连高压变质带中最早的榴辉岩变质年龄(489 Ma, Zhang *et al.*, 2007)相当, 且具俯冲洋壳板片部分熔融形成的埃达克岩地球化学特征。由此可以推测, 晚寒武世北祁连洋曾向中祁连地块发生俯冲, 造成洋壳板片部分熔融, 形成具埃达克岩地球化学特征的乌尔格拉特岩体。

结合前人对北祁连构造演化的认识, 作者认为北祁连洋在新元古代—寒武纪(552~495 Ma)开启后, 于寒武纪末—早奥陶世形成洋盆(夏林圻等,

1998),同时发生双向俯冲,很可能向南俯冲时,由于中祁连岩石圈较厚,洋壳俯冲角度缓,而使中祁连北缘不发育岛弧火山岩系和弧后盆地,并以中酸性岩浆的侵入记录了这一过程。

6 主要认识

(1) 乌尔格拉特岩体由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,花岗闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 490.5 ± 1.4 Ma(MSWD = 0.85),形成于晚寒武世。

(2) 乌尔格拉特岩体具有埃达克质岩地球化学特征,源区残留相主要为石榴石+角闪石,其为俯冲洋壳部分熔融产物。

(3) 结合区域地质特征和岩体地球化学特征及形成时代,初步认为北祁连洋在形成后,于晚寒武世向中祁连地块俯冲发生过俯冲消减作用。

致谢 感谢为填制本文所依赖的 1:5 万基础地质资料而付出艰辛劳动的甘肃地调院 308 项目组地质人员;感谢国土资源部天津地质矿产研究所李怀坤研究员在锆石年龄测试方面的支持和帮助,感谢审稿人和编辑老师为提高本文质量提出的建设性的意见和建议。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192(1~2): 59~79.
- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 362: 144~146.
- Boynton W V and Bowden P. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite study[A]. Hendrson P. Rare Earth Element Geochemistry[C]. Elsevier, 63~114.
- Chen Junlu, Li Haobin, Wang Hongliang, et al. 2007. LA-ICPMS Zircon U-Pb Dating of a Quartz Diorite pluton from Wangjiacha, the junction area between the Qling and Qilian orogenic belts and its tectonic significance[J]. Journal of Jilin University(Earth Science edition), 37(3): 423~431(in Chinese).
- Chen Junlu, Xu Xueyi, Zeng Zuoxun, et al. 2008. Geochemical characters and LA-ICPMS zircon U-Pb dating constraints on the petrogenesis and tectonic setting of the Shichuan intrusion, east segment of the Central Qilian, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 841~854(in Chinese).
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. Geology, 31: 1 021~1 024.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magms by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 34: 662~665.
- Dong Shunli, Li Zhong, Gao Jian, et al. 2013. Progress of studies on early Paleozoic tectonic framework and crystalline rock geochronology in Altun-Qilian-Kunlun Orogen[J]. Geological Review, 59(4): 731~746(in Chinese).
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonatites-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparasons[J]. J. Geophys., 95(B13): 21 503~21 521.
- Drummond M S, Defant M J and Kepezhinska P K. 1996. Petrogenesis of slab derived trondhjemite-tnalite-dacite/adakite magmas[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science, 87(1): 205~215.
- Feeley T C and Hacker M D. 1995. Intracrustal deriveation of Na-rich andeside and dacite magmas: an example from Volcan Ollage Andean Central Volcanic Zone[J]. Journal of Geology, 103: 213~225.
- Feng Yimin and He Shiping. 1996. Geotectonics and Orogeny of Qilian Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. Nature, 432: 892~897.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 18(4): 423~439.
- International Commission on Stratigraphy. 2013. International chronostratigraphic chart (2013)[J]. Journal of Stratigraphy, 37(3): 257~258.
- Jia Qunzi, Yang Zhongtang, Xiao Chaoyang, et al. 2007. The Metallogenetic Regularity and Metallo Genic Prognosis of the Copper, Gold, Tungsten, Lead, Zinc Deposits in Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, et al. 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archean crustal growth models[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144: 38~56.
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, et al. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Bei-

- jing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(08): 2 131~2 340(in Chinese).
- Li Jianfeng, Zhang Zhicheng and Han Baofu. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic plutons from Subei and Shibaoceng areas, the western segment of Central Qilian and their Geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 431~2 344(in Chinese).
- Liu Y J, Neubauer F, Genser J, et al. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist facies delitic schists from Qingshuigou in the northern Qilian Mountains, western China[J]. *Island Arc*, 15(1): 187~198.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICPMS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46(3): 411~429.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Qi Ruirong. 2012. LA-ICPMS Zircon U-Pb ages and geological implication for the Bagadeerji granitic plutons in the central Qilian Mountains, Gansu[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 86~93(in Chinese).
- Qiu Jiaxiang, Zeng Guangce, Zhu Yunhai, et al. 1998. Characteristics and Lantitudinal Comparative Research on the Early Palaeozoic Volcanic Rocks of Rifted Orogenic Belt and Small Ocean Basin Ophiolite Suit from Northern Qiling Mountains and Southern Qilian Mountains[M]. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 393~405(in Chinese).
- Richter F M. 1989. Simple models for trace element fractionation during melt segregateon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(3~4): 333~344.
- Song Shuguang. 2009. High-pressure metamorphic rocks in the North Qilian oceanic subduction zone, China: A review[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1 769~1 778(in Chinese).
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites from the North Qilian Mountains in NW China and their tectonic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 848~852.
- Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, et al. 2004a. U-Pb Zircon dating and genesis of Heigouliangzi granitic intrusion in the west segment of the middle Qilian Mountains[J]. *Geoscience*, 18(1): 70~75(in Chinese).
- Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, et al. 2004b. Geochemical characteristics and genesis of adakite-like granites at Yemanashan in the western segment of the Central Qilian Mountains[J]. *Geology in China*, 31(4): 365~371(in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and process [A]. Saundar A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society of London Special Publication, 42(1): 313~345.
- Tang Zhongli and Bai Yunlai. 2001. The two types of the tectonic foundation block and its metallogenetic systems in the northern Qilianshan orogenic belt[J]. *Acta Geologica Gansu*, 10(2): 1~11(in Chinese).
- Wang Yan, Zhang Qi and Qian Qing. 2000. Adakite: Geochemical Characteristic and tectonic significances[J]. *Chinese Journal of Geology*, 35(2): 251~256(in Chinese).
- Wang Yonghe, Jiao Yangquan, Li Jianxin, et al. 2008. Ordovician magmatic arc stratum of the middle Qilian Block[J]. *Geoscience*, 22(5): 724~732(in Chinese).
- Wu Cailai, Xu Xueyi, Gao Qianming, et al. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1 027~1 044(in Chinese).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yang Hongyi, et al. 2004. Dating of two types of granite from noth Qilian, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 425~432(in Chinese).
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Yang Jingsui, et al. 2006. Double subduction of the Earth Paleozoic North Qilian oceanic plate: evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China[J]. *Geology in China*, 33(6): 1 196~1 208(in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, et al. 1998. The Volcanism and Mineralization from Qilian Mountains and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yong Yong, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic Plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855~866(in Chinese).
- Zhang J X, Meng F C and Wan Y S. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3): 285~304.
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, et al. 1997. A tentative discuss-

- sion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arc in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. Acta petrologica et Mineralogica, 16: 112~119(in Chinese).
- Zhang Qi, Sun Xiaomeng, Zhou Dejin, et al. 1997. The characteristic of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance[J]. Advance in Earth Sciences, 12(4): 366~393(in Chinese).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 234~244 (in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. 2008. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta[J]. Geochimic, 37(4): 304~320 (in Chinese).
- Zhou Dejin, Chen Yu, Zhang Qi, et al. 1997. The founding of Alaska-type mafic-ultramafic complex from Qilian county and constraints on Qilian Mt. tectonic evolution[J]. Scientia Geologica Sinica, 31(1): 122~127(in Chinese).
- Zuo Guochao and Wu Hanquan. 1997. A bisubduction-collision orogenic model of early Paleozoic in the middle part of north Qilian area[J]. Advance in Earth Sciences, 12(4): 315~323(in Chinese).
- ## 附中文参考文献
- 陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 等. 2007. 秦祁结合部王家岔石英闪长岩体锆石 LA-ICPMS 定年及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 23~431.
- 陈隽璐, 徐学义, 曾佐勋, 等. 2008. 中祁连东段什川杂岩基的岩石化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报, 24(4): 841~854.
- 董顺利, 李忠, 高剑, 等. 2013. 阿尔金-祁连-昆仑造山带早古生代构造格架及结晶岩年代研究进展[J]. 地质论评, 59(4): 731~747.
- 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.
- 国际地层委员会. 2013. 国际地质年代表(2013)[J]. 地层学杂志, 37(3): 257~258.
- 贾群子, 杨忠堂, 肖朝阳, 等. 2007. 祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社.
- 李怀坤, 朱士兴, 向振群, 等. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 26(8): 2131~2140.
- 李建峰, 张志诚, 韩宝福. 2010. 中祁连西段肃北、石包城地区早古生代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(8): 2431~2444.
- 齐瑞荣. 2012. 中祁连西段巴嘎德尔基岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 32(3): 86~93.
- 邱家骥, 曾广策, 朱云海, 等. 1998. 北秦岭-南祁连早古生代裂谷造山带: 火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比[J]. 高校地质学报, 4(4): 393~405.
- 宋述光. 2009. 北祁连山古大洋俯冲带高压变质岩研究评述[J]. 地质通报, 28(12): 1769~1778.
- 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 2004a. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因[J]. 现代地质, 18(1): 70~75.
- 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 2004b. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 31(4): 365~371.
- 汤中立, 白云来. 2001. 北祁连造山带两种构造基底岩块及成矿系统[J]. 甘肃地质学报, 10(2): 1~11.
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 35(2): 251~256.
- 王永和, 焦养泉, 李建星, 等. 2008. 中祁连北缘奥陶纪岩浆弧地层[J]. 现代地质, 22(5): 724~732.
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 等. 2010. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 26(4): 1027~1044.
- 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪, 等. 2004. 北祁连东部两类 I型花岗岩定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 20(3): 425~432.
- 吴才来, 姚尚志, 杨经绥, 等. 2006. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质, 33(6): 1196~1208.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 1998. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 2008. 中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 24(4): 855~866.
- 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 16: 112~119.
- 张旗, 孙晓猛, 周德进. 1997. 祁连蛇绿岩的特征、形成环境及构造意义[J]. 地球科学进展, 12(4): 366~393.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(4): 234~244.
- 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 2008. 锰与钽的某些地球化学问题[J]. 地球化学, 37(4): 304~320.
- 周德进, 陈雨, 张旗, 等. 1997. 北祁连山南侧阿拉斯加型岩体的发现及地质意义[J]. 地质科学, 31(1): 122~127.
- 左国朝, 吴汉泉. 1997. 北祁连山中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析[J]. 地球科学进展, 12(4): 315~323.