

北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据

吴才来¹ 姚尚志² 杨经绥¹ 曾令森¹ 陈松永¹ 李海兵¹ 戚学祥¹

Joseph L. Wooden³ Frank K. Mazdab³

(1. 中国地质科学院地质研究所 北京 100037; 2. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 3. 斯坦福大学, 美国 加州)

摘要:笔者主要对北祁连山中段的牛心山岩体、民乐窑沟岩体进行了锆石 SHRIMP 定年研究。结果表明:牛心山花岗岩的年龄为 476 Ma, 民乐窑沟花岗闪长岩的年龄为 463 Ma。岩石地球化学显示, 两岩体均具有大陆活动边缘的岩浆作用特征, 结合岩体产出的区域构造位置及区域地质资料, 笔者认为早古生代北祁连洋板块分别发生了向南、向北俯冲, 其中向南俯冲形成牛心山花岗岩(476 Ma), 向北俯冲, 形成了民乐窑沟花岗岩侵入体(463 Ma)。

关键词:花岗岩; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 双向俯冲; 北祁连

中图分类号: P588.12^{†1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)06-1197-12

祁连山带位于阿拉善地块与柴达木地块之间(图 1), 由北往南依次为北祁连、中祁连和南祁连等大地构造单元^[1]。不同的单元内分布着不同构造环境下形成的蛇绿岩、岛弧杂岩、俯冲杂岩及花岗岩类, 因而受到众多地质学家的关注^[2-12]。然而, 北祁连早古生代构造演化及时限, 特别是关于北祁连板块的俯冲方向问题, 存在较大的分歧。多数人认为向北俯冲^[3, 5-6, 10, 13-15], 但也有人认为向南俯冲^[16-18], 还有人认为向两边俯冲的双向俯冲^[8, 19]。所有这些模式中, 大多没有确定精确的俯冲时限。众所周知, 花岗岩的研究是确定造山带构造发展演化的重要手段之一, 特别是花岗岩的精确定年, 在确定造山带构造发展演化阶段的年代学方面具有不可替代的作用^[20]。所以, 笔者试图通过北祁连山中段的民乐窑沟、牛心山花岗岩岩石学及其锆石 SHRIMP 定年研究, 对北祁连板块俯冲的方向及时限作一探讨。

1 岩体地质特征

1.1 牛心山岩体

该岩体位于祁连县城西南约 10 km 处的陶赖山北坡, 呈北西西向延伸, 长约 27 km, 宽为 4-5 km, 出露面积约 108 km²。岩体主要由红色花岗岩和石英闪长岩组成, 沿牛心山复向斜轴部侵入, 两侧为寒武系, 在接触带附近, 明显地见到红色花

岗岩呈脉状穿插到围岩角闪岩中, 围岩具明显的片理化。岩体北侧东段的围岩以云母、角闪片麻岩为主, 具有明显的混合岩化、混染现象; 西段围岩为中酸性火山岩, 普遍具硅化。岩体斜切岩层走向和倾向, 但分布方向大体与区域构造线方向一致。石英闪长岩与红色花岗岩具有明显的侵入接触关系, 在接触带附近, 发现石英闪长岩的冷凝边及红色花岗岩的捕虏体, 反映石英闪长岩侵位晚于红色花岗岩。

红色花岗岩以中粗粒为主, 边缘为粗粒似斑状结构, 中心为中粒结构, 矿物组成为斜长石 10%~30%, 最高达 60%, 钾长石 20%, 少数达 55%, 微斜长石 20%~30%, 石英 10%~30%, 个别达 40%; 暗色矿物较少, 主要为角闪石和黑云母, 5%~10%; 副矿物为黄铁矿、磷灰石、锆石、榍石、金红石、方铅矿、辉钼矿、闪锌矿、白钨矿等。斑晶为粗大的钾长石, 呈柱状具环带构造, 双晶纹弯曲, 斜长石常被钾长石交代熔蚀, 二者接触处有净边; 石英为他形粒状, 具波状消光, 黑云母多发生绿泥石化现象。

石英闪长岩的矿物组成: 斜长石 55%~65%、微斜长石 10%~30%、石英 10%左右、黑云母 5%~20%、普通角闪石 10%~30%, 偶含透辉石 3%~5%、普通辉石 25%, 另有微量的绿泥石、绿帘石等, 副矿物为锆石、磷灰石、黄铁矿、钼石、辉钼矿、白钨矿等。

收稿日期: 2006-06-30; 改回日期: 2006-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472034)、中国地质调查局地质大调查项目(1212010611803)、国家重点自然科学基金项目(49732070)、国家 973 项目(G1998040800)和国土资源部“十五”重点科技项目(20010101)联合资助。

作者简介: 吴才来, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事岩石学研究; E-mail: wucailai@ccsd.cn。

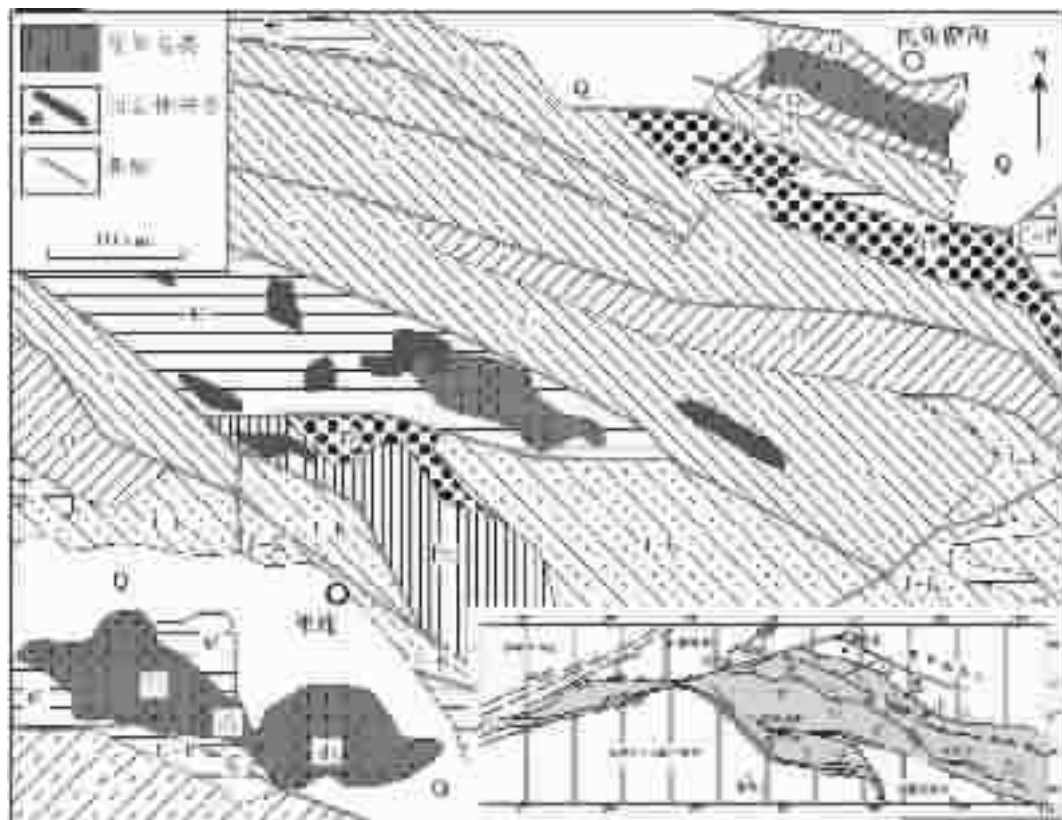


图 1 北祁连中段花岗岩分布地质简图

Pt₁—古元古代片岩及片麻岩;ε—寒武纪火山岩夹大理岩和硅质岩;O—奥陶纪中基性火山岩夹砂岩、硅质岩、千枚岩;
S—志留纪紫色及杂色粉砂岩夹中酸性火山岩;D—泥盆纪紫红色砂岩、砾岩;C—P—石炭—二叠纪灰色砂页岩;
J—K—侏罗—白垩纪陆相碎屑岩夹泥灰岩及煤、膏盐;Q—第四纪砂、砾及粘土

Fig.1 Geological sketch map of granite distribution in the central segment of the North Qilian

Pt₁—Paleoproterozoic schist and gneiss;ε—Cambrian granite with marble and siliceous rocks; O—Ordovician intermediate-basic volcanic rocks with sandstone, siliceous rocks and phyllite; S—Silurian purple and mottled siltstone with intermediate-acid volcanic rocks;
D—Devonian purplish red sandstone and conglomerate; C—P—Carboniferous-Permian gray sandy shale;
J—K—Jurassic-Cretaceous continental clastic rocks with marl, coal and evaporite; Q—Quaternary sand, gravel and clay

1.2 窑沟岩体

岩体出露在民乐县城以西的窑沟村(海潮坝),呈北西向延展,宽约 2.5 km,面积约 20 km²。岩体侵入到奥陶纪玄武质和玄武安山质火山岩中,东端和西端被新近系和古近系覆盖。从构造位置上看,岩体位于走廊南山北缘由奥陶统组成的复背斜轴的北侧,围岩为奥陶系,在泥盆系中见到该岩体的角砾。

该岩体的岩性以花岗闪长岩为主,局部岩性有一定的变化。花岗闪长岩为灰白色,中粒结构,块状构造,主要由斜长石(35%~45%)、石英(20%~30%)、钾长石(1%~10%)、角闪石(10%~25%)组成,普遍含方铅矿、磷灰石、锆石、黄铁矿、金红石、重晶石、榍石、磁铁矿等副矿物。长石具强烈的绢云母化和高岭土化,角闪石具绿泥石化。

2 分析方法

2.1 化学全分析

在研究中共选择了 7 个较新鲜的岩石样品进行了化学全分析(表 1)。由中国地质科学院测试研究所(国家地质实验测试中心)分析。氧化物用 X 荧光光谱仪 3080E 测试,执行标准分别为:Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃、FeO,按 GB/T14506.28-1993 标准;H₂O⁺按 GB/T14506.2-1993 标准;CO₂按 GB 9835-1988 标准;LOI 按 LY/T 1253-1999 标准;稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y 和微量元素 Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni 用等离子质谱 Excell 测试,执行标准为 DZ/T0223-2001;微量元素 Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga 用 X

表 1 北祁连中段花岗岩化学成分

Table 1 Chemical composition of granites in the central segment of the North Qilian

位置	牛心山岩体				民乐窑沟岩体		
样号	CL103	CL105	CL108	CL109	CL122	CL124	CL126
SiO ₂ /10 ⁻²	72.74	71.07	61.32	60.76	67.00	68.36	67.96
TiO ₂	0.15	0.41	0.66	0.66	0.63	0.61	0.61
Al ₂ O ₃	14.00	13.70	15.09	15.65	13.54	13.93	13.69
Fe ₂ O ₃	0.52	1.63	2.43	2.56	3.57	3.23	2.80
FeO	0.70	1.21	2.60	2.26	1.83	1.87	2.28
MnO	0.02	0.05	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
MgO	0.50	0.65	3.67	3.51	2.34	2.46	2.14
CaO	0.82	1.45	3.90	4.71	2.72	1.90	3.38
Na ₂ O	4.10	3.71	3.95	4.06	2.39	1.96	2.02
K ₂ O	5.36	4.02	4.28	3.94	2.74	2.41	2.59
P ₂ O ₅	0.06	0.19	0.47	0.44	0.12	0.10	0.13
H ₂ O ⁺	0.72	0.94	1.32	0.84	2.44	2.58	1.84
CO ₂	0.38	0.32	0.27	0.18	0.43	0.54	0.27
LOI	0.81	1.00	1.10	0.85	2.19	2.52	1.55
Total	100.07	99.35	100.05	99.66	99.84	100.03	99.79
ALK	9.46	7.73	8.23	8.00	5.13	4.37	4.61
K/Na	1.31	1.08	1.08	0.97	1.15	1.23	1.28
AC	0.11	1.07	0.00	0.00	2.00	4.91	1.74
Rittam	3.01	2.13	3.70	3.60	1.10	0.75	0.85
ASI	1.00	1.05	0.83	0.80	1.14	1.50	1.12
La/10 ⁻⁶	20.4	71.0	109	101	40.4	32.6	68.6
Ce	42.6	133	218	197	75.8	59.8	117
Pr	5.09	13.5	22.8	20.4	8.36	6.59	11.8
Nd	18.7	42.1	75.1	68.1	30.7	24.2	39.1
Sm	4.44	6.47	11.1	10.1	5.80	4.94	5.70
Eu	1.06	1.08	2.26	2.07	1.12	1.02	1.14
Gd	4.22	4.66	7.12	6.75	5.03	4.57	4.07
Tb	0.96	0.76	0.94	0.89	0.73	0.71	0.54
Dy	5.84	4.09	4.40	4.29	4.38	4.29	3.00
Ho	1.09	0.75	0.74	0.73	0.84	0.81	0.57
Er	2.98	2.26	2.09	2.06	2.52	2.26	1.85
Tm	0.35	0.40	0.33	0.33	0.36	0.29	0.26
Yb	1.87	1.68	1.29	1.25	2.31	1.93	1.80
Lu	0.23	0.42	0.32	0.31	0.35	0.30	0.29
REE	109.8	282.5	455.6	415.0	178.7	144.3	255.7
LREE/HREE	5.3	17.8	25.5	24.0	9.8	8.5	19.7
La/Sm	4.6	11.0	9.8	10.0	7.0	6.6	12.0
DEu	0.73	0.57	0.72	0.72	0.62	0.64	0.69
La _N /Yb _N	19.3	16.4	1.2	41.5	24.6	26.0	10.4
Tb _N /Yb _N	1.9	1.7	0.7	3.2	2.4	2.2	1.2
Y/10 ⁻⁶	31.8	23.2	21.7	20.8	23.2	18.5	15.7
Hf	2.71	7.92	10.7	9.61	6.90	6.03	6.44
Zr	69.4	256	399	348	206	180	188
Sc	3.41	2.46	10.4	10.1	14.2	13.8	5.58
Cr	3.43	4.21	89.3	86.4	39.3	35.8	51.6
Co	1.39	3.72	15.6	15.5	14.5	14.6	14.1
Ni	1.84	2.84	33.3	38.6	16.4	13.9	18.7
Cu	6.42	3.67	49.4	35.2	18.5	19.7	24.8
Zn	19.2	28.1	72.9	94.8	77.1	79.8	71.9
Ga	15.9	15.6	18.8	21.1	16.6	18.2	17.7
Rb	191	170	183	173	109	149	99.6
Nb	11.5	69.6	35.4	26.8	10.6	9.59	11.1
Cs	3.63	3.66	11.9	10.0	2.09	4.72	2.21
Ta	0.87	3.56	1.68	1.18	0.59	0.62	0.70
Pb	35.8	19.8	31.6	35.7	18.0	12.2	16.3
Th	7.39	45.6	46.9	31.6	16.9	12.6	22.1
U	4.88	9.22	6.45	4.35	1.75	2.76	2.66
Ba	479	403	1477	1393	448	244	539
Sr	117	233	854	742	210	279	290
V	12.2	33	104	102	234	170	80.1
Rb/Sr	1.6	0.7	0.2	0.2	0.5	0.5	0.3
Zr/Nb	1.7	0.4	2.1	3.5	7.3	8.3	6.5
Sm/Nd	0.24	0.15	0.15	0.15	0.19	0.20	0.15
U/Pb	0.14	0.47	0.20	0.12	0.10	0.23	0.16
Sr/Y	3.7	10.0	39.3	35.7	9.0	15.1	18.4

荧光光谱仪 2100 测试,执行 JY/T016-1996 标准。

2.2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

野外分别采集样品 CL04-105、CL04-122 各约 2 kg,破碎至 80~120 目,用水淘洗粉尘后,先用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,最后在双目镜下选出锆石。锆石的分选由河北廊坊区域地质调查院完成。将锆石和标样一起粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,并拍下正交偏光和阴极发光照片,最后在离子探针 SHRIMP-RG 上测定锆石的 U、Th、Pb 同位素含量及定年。样品制备、正交偏光和阴极发光照像以及 SHRIMP 定年均由笔者在美国斯坦福大学离子探针实验室完成。实验选择的标样为 R33(419.0±1.1 Ma),数据的误差范围±1σ。数据处理使用美国 Berkeley 地质年代学中心 Kenneth R. Ludwig 编制的计算程序。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

(1) 牛心山岩体

从牛心山岩体的化学成分(表 1)可见,SiO₂含量为 60.76%~72.74%,全碱含量为 7.73%~9.46%,其中花岗岩的 Na₂O 含量低于 K₂O 的含量(Na₂O/K₂O 的比值为 0.76~0.92),里特曼指数为 2.29~3.23,属钙碱性系列,CIPW 标准矿

物计算均出现刚玉(AC),含量为 0.11~1.07,ASI>1,为 1~1.05,反映岩石铝过饱和;而石英闪长岩的 Na₂O 含量与 K₂O 的相近(Na₂O/K₂O 的比值为 0.92~1.03),里特曼指数略高于花岗岩,为 3.60~3.70,也属钙碱性系列,AC=0,ASI<1,为 0.80~0.83。

该岩体的稀土总量变化于 109.8×10⁻⁶~455.6×10⁻⁶(表 1),其中,石英闪长岩的稀土总量、轻重稀土元素比值比花岗岩的高,前者分别为 415.0×10⁻⁶~455.6×10⁻⁶和 24~25.5,后者为 109.8×10⁻⁶~282.5×10⁻⁶和 5.3~17.8,反映了石英闪长质岩浆的分异程度较高。岩石的球粒陨石标准化配分曲线均为右倾型,并具有微弱的负铕异常(图 2),δEu 为 0.57~0.73。

岩石大离子亲石元素和高场强元素的丰度均高于原始地幔值,但在原始地幔标准化图解上,花岗岩的 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常比石英闪长岩的更明显(图 3),显示出 S 型花岗岩的特征。

(2) 民乐窑沟岩体

该岩体为花岗闪长岩,岩石的 SiO₂含量为 67%~68.36%,全碱含量较低,为 4.37%~4.13%,且 Na₂O<K₂O(Na₂O/K₂O 比值为 0.78~0.87),里特曼指数为 0.75~1.10,属钙碱性系列,CIPW 标准矿物计算出现 1.74%~4.91%的刚玉(AC),ASI 变化于 1.12~1.50,反映岩石铝过饱和。

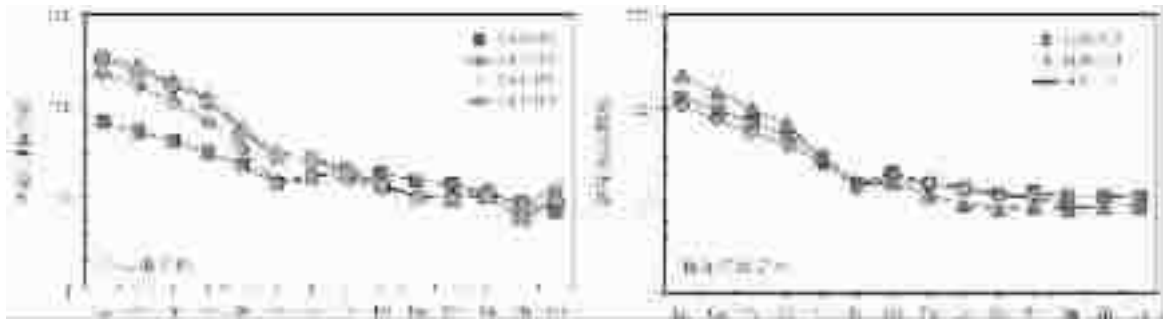


图 2 北祁连牛心山和民乐花岗岩类稀土配分模式

Fig.2 Chondrite-normalized REE distribution Pattern of granites from Niuxinshan and Minle in the North Qilian

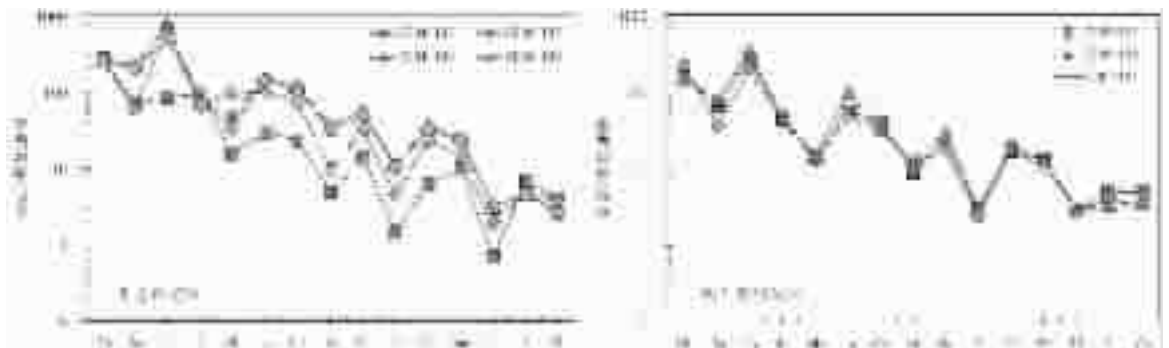


图 3 北祁连牛心山和民乐花岗岩类微量元素蛛网图

Fig.3 Mantle-normalized trace element spidergrams of the Niuxinshan and Minle granites in the North Qilian

表 2 北祁连花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb isotopic data of granites in the North Qilian

Spot Name	²⁰⁶ Pb/(%)	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	err(%)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	err(%)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	err(%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	err(%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(Age)	err
CL04-105-1	1.0	1754	671	0.40	13.39	0.32	0.0554	2.85	0.5707	2.87	0.0747	0.32	464.3	1.4
CL04-105-2	0.3	1858	721	0.40	13.13	0.29	0.0556	1.58	0.5839	1.61	0.0762	0.29	473.1	1.3
CL04-105-3	0.1	2098	782	0.38	13.02	0.27	0.0562	1.02	0.5947	1.05	0.0768	0.27	476.9	1.2
CL04-105-4	0.2	2859	1468	0.53	12.77	0.23	0.0571	0.85	0.6161	0.88	0.0783	0.23	485.9	1.1
CL04-105-5	0.8	1187	470	0.41	13.35	0.38	0.0562	2.75	0.5807	2.78	0.0749	0.38	465.6	1.7
CL04-105-6	1.7	2802	1103	0.41	13.97	0.26	0.0582	3.17	0.5744	3.18	0.0716	0.26	445.7	1.1
CL04-105-7	0.3	1088	438	0.42	13.40	0.37	0.0574	1.73	0.5903	1.77	0.0746	0.37	463.9	1.7
CL04-105-8	0.3	1890	766	0.42	13.05	0.28	0.0568	1.11	0.6002	1.15	0.0766	0.28	476.1	1.3
CL04-105-9	0.0	2975	1072	0.37	12.84	0.22	0.0561	0.87	0.6025	0.89	0.0779	0.22	483.5	1.0
CL04-105-10	2.8	2125	745	0.36	13.67	0.42	0.0570	6.74	0.5753	6.75	0.0732	0.42	455.2	1.8
CL04-105-11	2.6	3537	1145	0.33	16.45	0.23	0.0573	4.49	0.4804	4.49	0.0608	0.23	380.4	0.8
CL04-105-12	0.5	2352	1044	0.46	12.78	0.35	0.0565	1.57	0.6099	1.60	0.0783	0.35	485.7	1.6
CL04-105-13	7.0	3022	2296	0.78	15.45	0.62	0.0581	15.65	0.5184	15.66	0.0647	0.62	404.3	2.4
CL04-122-1	0.09	296	216	0.75	13.48	0.72	0.0574	1.76	0.5870	1.90	0.0742	0.72	460.7	3.3
CL04-122-1.1	4.47	124	123	1.03	2.09	1.71	0.1963	2.76	12.9235	3.25	0.4775	1.71	2423	49
CL04-122-2	0.13	181	83	0.47	13.39	0.92	0.0606	2.24	0.6238	2.42	0.0747	0.92	462.1	4.2
CL04-122-3	0.15	246	173	0.73	13.51	0.80	0.0581	1.93	0.5934	2.09	0.0740	0.80	459.4	3.7
CL04-122-4	0.44	113	79	0.72	13.41	1.20	0.0648	3.27	0.6667	3.48	0.0746	1.20	459.0	5.5
CL04-122-5	0.03	543	160	0.30	5.70	0.49	0.0731	1.38	1.7659	1.47	0.1753	0.49	1042.4	5.1
CL04-122-6	1.77	116	58	0.52	2.34	0.98	0.1589	0.80	9.3602	1.26	0.4273	0.98	2258	23
CL04-122-7	1.76	274	101	0.38	11.42	0.76	0.0712	1.67	0.8602	1.83	0.0876	0.76	532.9	4.2
CL04-122-7.1	6.26	782	466	0.61	3.88	0.40	0.1415	0.94	5.0242	1.02	0.2576	0.40	1395	12
CL04-122-8	0.01	291	284	1.01	13.13	0.75	0.0568	2.06	0.5961	2.19	0.0762	0.75	473.1	3.5
CL04-122-9	0.04	421	456	1.12	13.48	0.64	0.0536	2.62	0.5483	2.69	0.0742	0.64	462.8	2.9
CL04-122-10	0.03	327	314	0.99	13.13	0.81	0.0573	1.77	0.6016	1.94	0.0762	0.81	472.9	3.8
CL04-122-11	0.23	192	224	1.21	13.45	1.06	0.0493	9.00	0.5050	9.06	0.0743	1.06	466.1	4.3
CL04-122-12	0.16	132	95	0.75	13.56	1.32	0.0504	11.90	0.5127	11.97	0.0738	1.32	462.0	5.2
CL04-122-13	0.23	177	101	0.59	13.63	0.98	0.0557	2.89	0.5635	3.05	0.0734	0.98	456.6	4.4
CL04-122-14	0.08	287	177	0.64	6.12	0.80	0.0714	1.70	1.6087	1.88	0.1635	0.80	976.4	7.7
CL04-122-15	0.15	303	279	0.95	13.48	0.75	0.0545	2.43	0.5576	2.54	0.0742	0.75	462.1	3.4
CL04-122-16	0.45	369	356	0.99	13.27	0.66	0.0602	2.06	0.6254	2.16	0.0754	0.66	466.4	3.1
CL04-122-17	0.32	199	130	0.67	13.82	0.91	0.0532	2.76	0.5309	2.91	0.0723	0.91	451.7	4.1

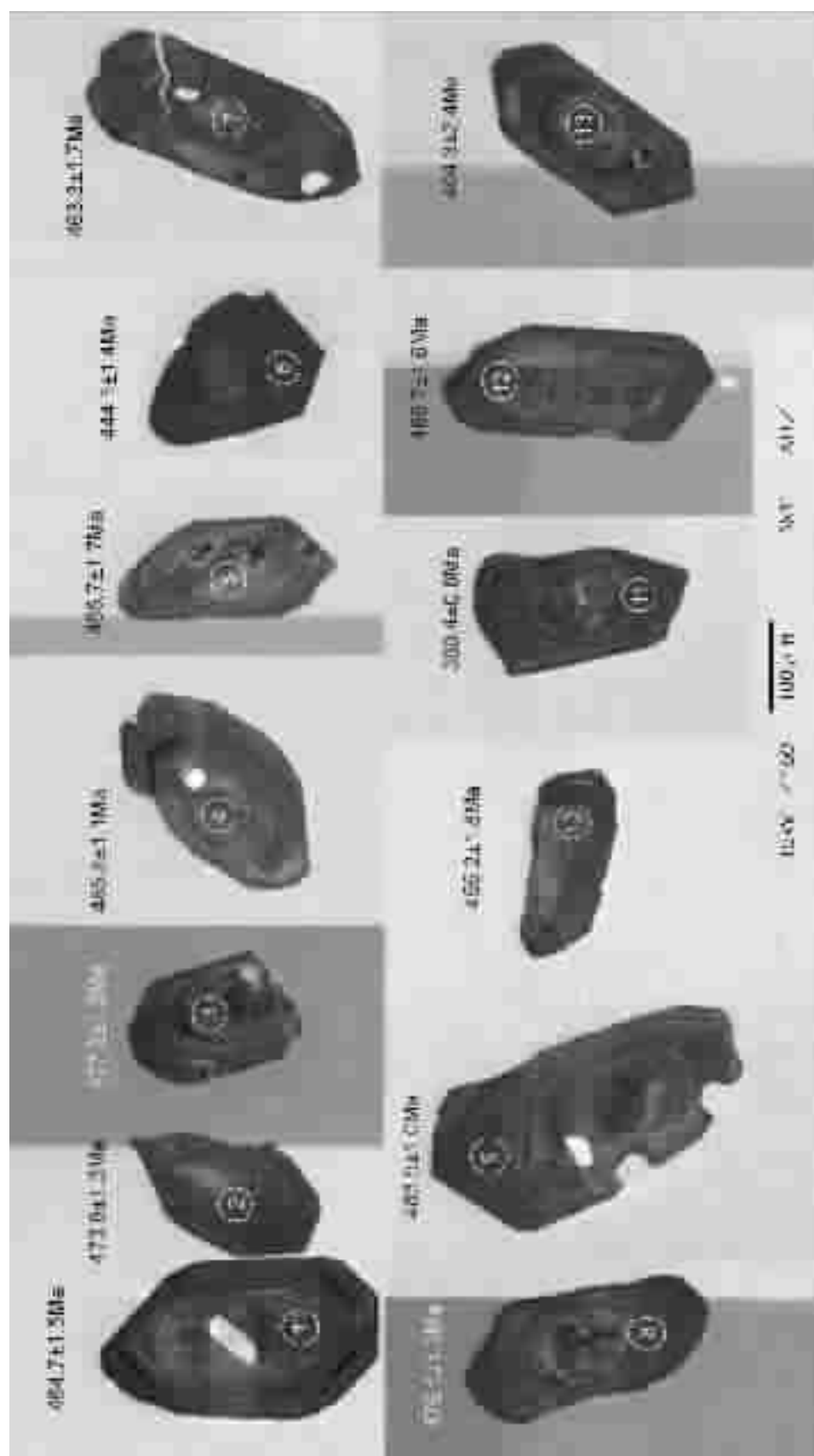


图 4 牛心山花岗岩锆石阴极发光图像
Fig.4 Cathodoluminescence images of zircons in the Liuxingshan granite, North Qilian

岩石的稀土总量为 $144.3 \times 10^{-6} \sim 255.7 \times 10^{-6}$, La_N/Yb_N 、 Tb_N/Yb_N 比值分别为 11.4~25.8、1.15~1.64, 反映了岩石的轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显。稀土元素球粒陨石标准化曲线为明显的右倾型, 具有铈的负异常 (图 2), δEu 为 0.62~0.69。

除部分高场强元素如 Ti、Y、Yb、P 外, 其余微量元素均富集原始地幔 10~100 倍, 但原始地幔标准化模式图上 (图 3), Ba、Nb、Sr、P 出现了相对弱的负异常, 显示活动大陆边缘岩浆作用的特点。

3.2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果

分别采集了牛心山岩体的花岗岩 (样品 CL04-105) 和民乐窑沟花岗闪长岩 (样品 CL04-122), 进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年测试, 结果见表 2。各样品的锆石特征如下:

样品 CL04-105: 为花岗岩, 取自牛心山岩体的中部。锆石为柱状, 长宽比一般为 2:1。阴极发光显示 (图 4) 锆石具有明显的环带构造, 部分锆石含有小的继承性锆石包裹体 (如 1 号、4 号、7 号和 9 号锆石)。所测定的 13 颗锆石 (表 2) 结果表明, 锆石的 U、Th 含量较高, 分别为 $1088 \times 10^{-6} \sim 3537 \times 10^{-6}$ 和

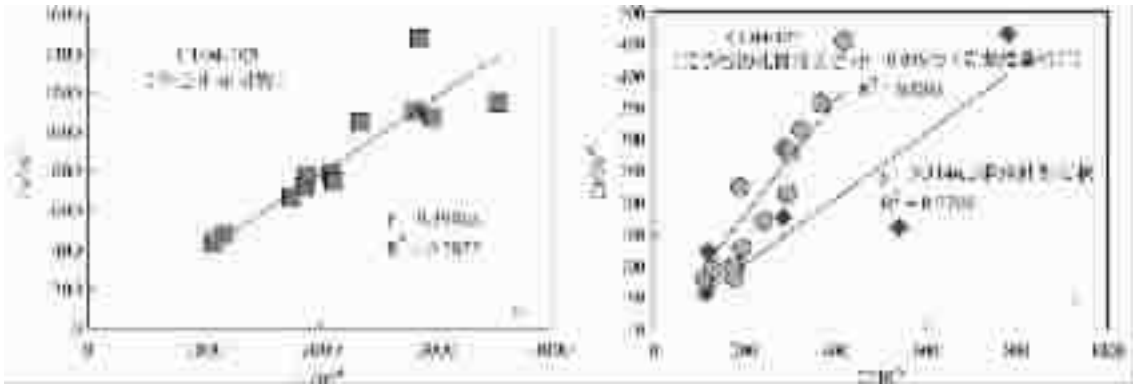


图 5 锆石 Th-U 之间的相关性

Fig.5 Diagrams of relativity between Th and U in zircons

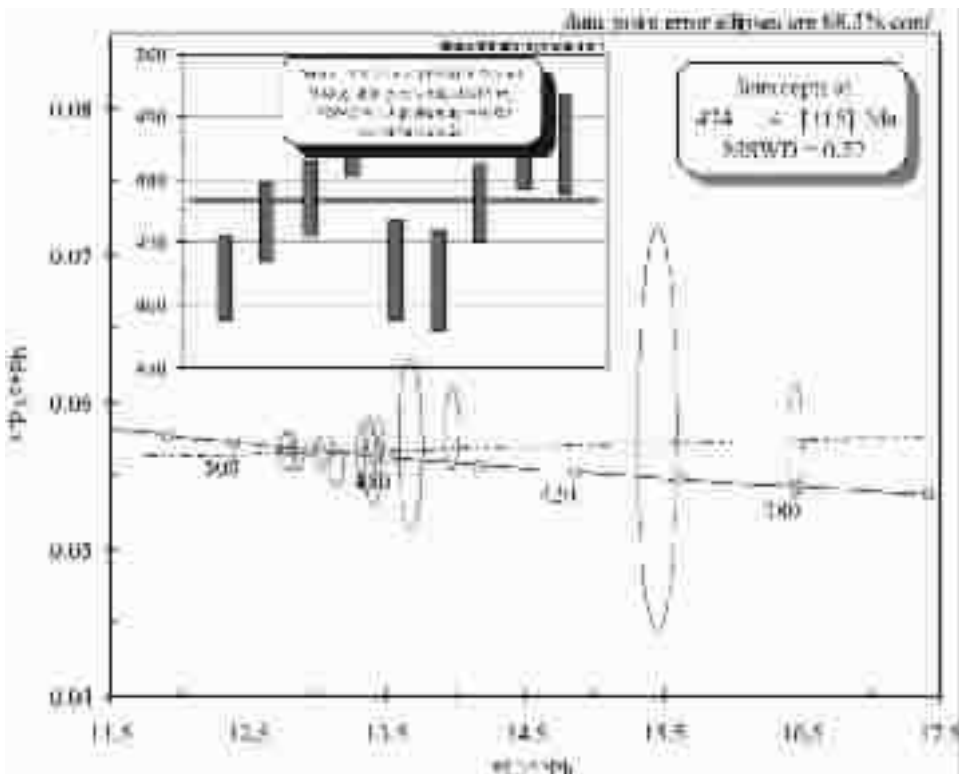


图 6 牛心山花岗岩锆石 $^{207}Pb/^{235}U-^{206}Pb/^{238}U$ 谐和曲线和平均年龄

Fig.6 Zircon $^{207}Pb/^{235}U-^{206}Pb/^{238}U$ concordia diagram and average age of the Liuxingshan granite, North Qilian

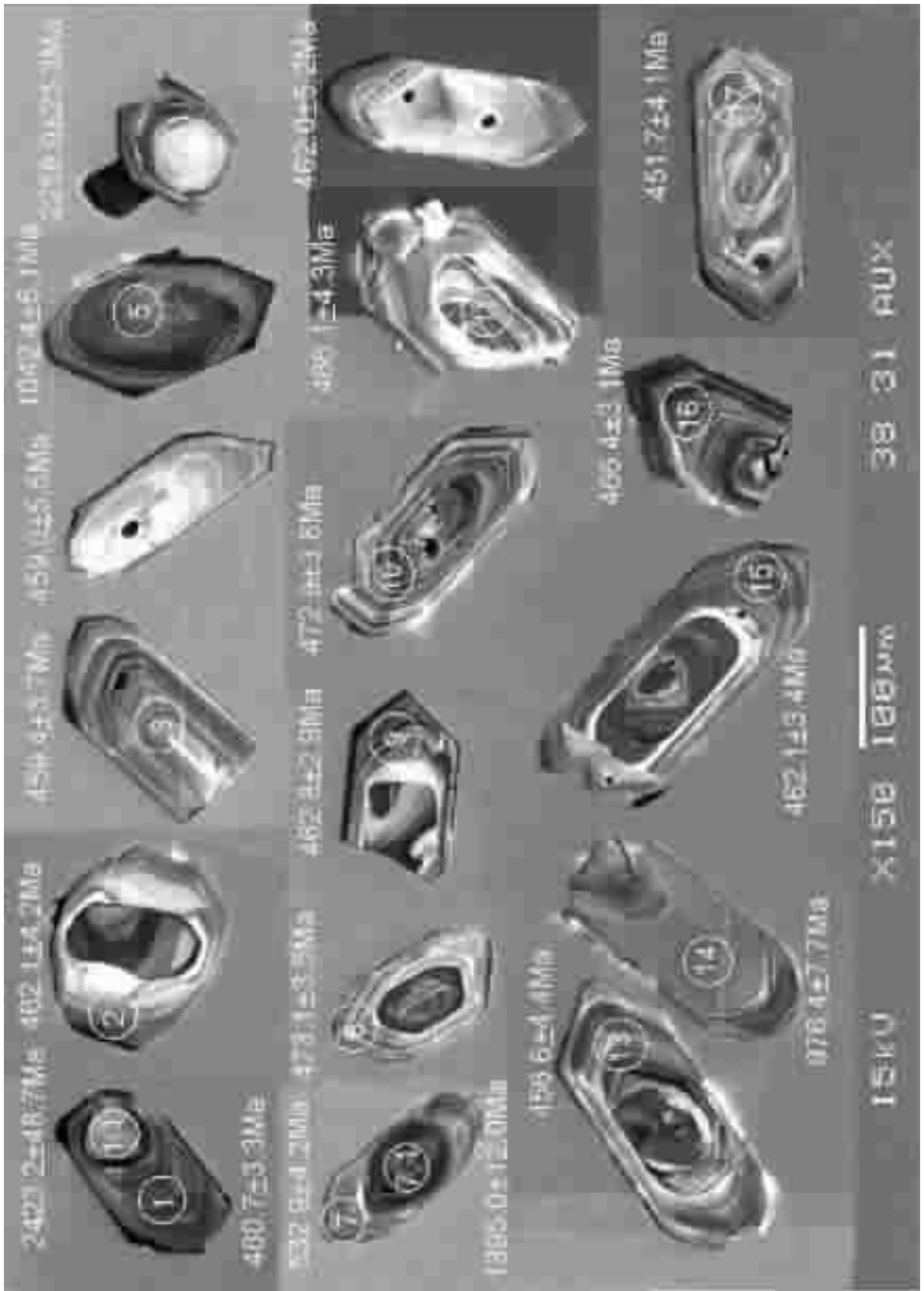


图7 民乐窑沟花岗闪长岩锆石阴极发光图像
 Fig.7 Cathodoluminescence images of zircons in the Yaogou granodiorite at Mimle, North Qilian

$438 \times 10^{-6} \sim 2296 \times 10^{-6}$, 但 Th/U 比值较稳定, 为 0.32~0.76, 平均为 0.42。Th 和 U 之间具有较好的相关性 ($R_2=0.7872$) (图 5), 这些特征表明, 该岩体的锆石是岩浆结晶形成。除 11 号 (380.4 ± 0.8) Ma 和 13 号 (404.3 ± 2.4) Ma 锆石的测定年龄偏小外, 其余的锆石年龄变化于 (455.2 ± 1.8) Ma~(485.9 ± 1.6) Ma, 平均为 (476.7 ± 6.6) Ma (图 6)。

样品 CL04-12 取自民乐窑沟花岗闪长岩, 锆石为柱状, 长宽比一般为 1.5:1~2.5:1, 为自形晶。阴极发光显示 (图 7) 锆石具有环带构造, 部分锆石含有继承性锆石的核。测定的 17 颗锆石 19 个点结果表明, U、Th 的含量变化不大, 分别为 $124 \times 10^{-6} \sim 782 \times 10^{-6}$, $58 \times 10^{-6} \sim 466 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.30~1.21, 平均为 0.74。U、Th 相关性为 0.5146 (图 5), 但其中包括岩浆结晶的锆石及其中的继承性核, 如果除去继承性锆石的核, 则相关系数为 0.8319 (图 5), 反映岩浆结晶的锆石 U、Th 之间具有良好的相关性。1.1 号、5 号、6 号、7.1 号 14 号为继承性锆石的核, 视年龄较大, 分别为 (2423 ± 49) Ma、(1042 ± 5.1) Ma、(2258 ± 23) Ma、(1395 ± 12) Ma、(976.4 ± 7.7) Ma, Th/U 比值分别为 1.03、0.30、0.52、0.61、0.64, 说明这些继承

性锆石可能来自不同时代的火成岩 [20]。7 号测点的视年龄为 (532.9 ± 4.2) Ma 属一混合年龄, 因为测点范围跨入到核部 (核部的视年龄为 1395 ± 12 Ma), 其余具有振荡环带的锆石视年龄变化于 (451.7 ± 4.1) Ma~(473.1 ± 3.5) Ma, 平均为 (463.2 ± 4.7) Ma (图 8)。

4 讨论

实验岩石学证明, 在非常宽的温度、压力条件下, 多种源岩的部分熔融均可以产生过铝的花岗质熔体 [22-27], 熔体成分的变化取决于初始熔融物质的成分、熔融的温度和压力、初始物质的含水量 [28], 如泥质的沉积岩部分熔融可以产生强烈富铝和钾的熔体, 硬砂岩的部分熔融可以产生中等到强烈富铝的花岗闪长岩/花岗岩熔体, 玄武质岩石的部分熔融可以产生云英质-奥长-花岗闪长岩质熔体 [24-27]。民乐窑沟花岗闪长岩的 $A/NCK > 1.1$, CIPW 标准矿物计算出现刚玉, 稀土元素具有弱的负 Eu 异常, 微量元素标准化出现弱的 Ba、Nb、Sr、P 负异常, 类似于活动大陆边缘岩浆岩的特征; 此外, 该岩体的锆石中富含继承性的核, 而且年龄大多位于谐和线上

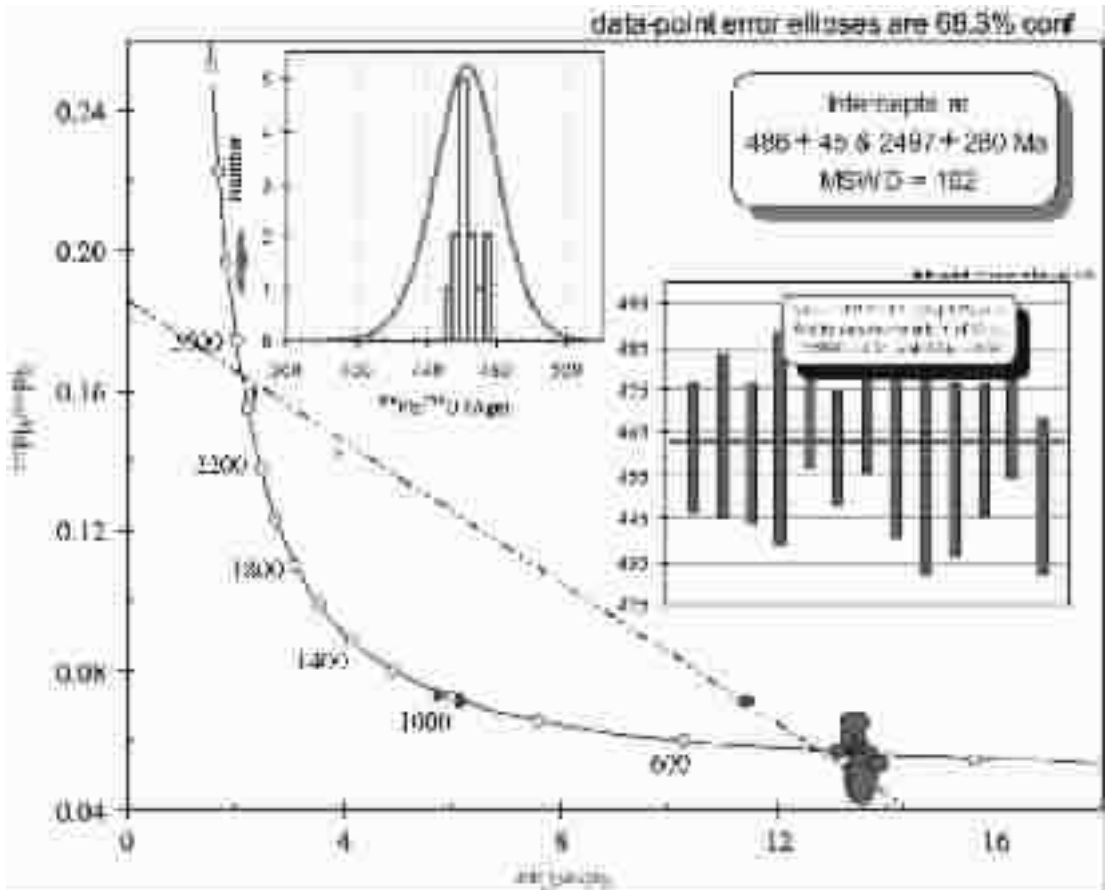


图 8 民乐窑沟花岗闪长岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和平均年龄

Fig.8 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram and average age of the Yaogou granodiorite at Minle, North Qilian

(图 7),不在谐和线上的锆石得出 U-Pb 不一致线,其上交点年龄为 2497 Ma, 这些特点也说明岩浆的源岩为沉积岩或沉积变质岩,或者说沉积岩中含有不同来源的物质组成^[29],同时也反映了这些源岩部分熔融的温度不高^[29]。众所周知,在系统不存在流体时,锆石抵抗铅丢失的温度超过 800°C,如果存在流体,则锆石抵抗铅丢失的温度大大降低^[31-33]。S 型花岗岩中存在时代较老的继承性锆石十分常见,如北 Oberpfalz S 型花岗岩^[33]、Bavarian Forest 花岗岩类和 Black Forest 花岗岩^[34],但在 I 型花岗岩中通常比较少见^[33]。可见,民乐窑沟花岗闪长岩形成于活动大陆边缘,具有 S 型花岗岩的特征。

牛心山花岗岩里特曼指数为 2.29~3.23,属典型的钙碱性系列,CIPW 标准矿物计算均出现刚玉(AC),含量为 0.11~1.07, A/CNK = 1.12~1.50,反映岩石铝过饱和,岩石的稀土配分曲线具有微弱的负铈异常,微量元素蛛网图上具有明显的 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常。而牛心山石英闪长岩具有较高的稀土元素含量,微量元素以高 Sr、低 Y 为特征,类似于埃达克质岩石的地球化学特征^[25]。因此,牛心山岩体可能形成于岛弧环境或活动大陆边缘^[36]。

北祁连造山带的形成及构造演化方面存在着较大的学术分歧,一种观点认为,北祁连曾是古特提斯洋的一部分,其构造演化应属于古特提斯构造带的范畴之内;另一种观点则认为,北祁连曾经是华北大陆板块(或中朝克拉通)南缘的一个洋盆,由陆缘拉张开始,逐渐形成大洋,然后大洋闭合形成造山带^[3,6,19,37-39]。这两种认识的根本分歧之一在于洋壳的俯冲方向问题,不少地质学家根据蛇绿岩及其与俯冲杂岩的关系来推测板块的俯冲方向,概括而论有 5 种观点:(1)向南俯冲^[16-18];(2)向北俯冲^[3,5-6,10,13-15];(3)双向俯冲^[8,19];(4)先向南俯冲,发生俯冲极性倒转后又向北^[29];(5)先向北俯冲,后转换向南俯冲^①。特别是 20 世纪 90 年代以来,夏林圻等^[4]对北祁连火山岩进行了详细的工作,认为在新元古代—寒武纪(679~514 Ma),由于地幔柱作用,导致北祁连山前寒武纪变质基底发生裂谷作用,进而形成北祁连洋;随着大陆裂解,在寒武纪末—早奥陶世(522~495 Ma),形成洋脊玄武岩;到奥陶纪(486~445 Ma),北祁连洋板块自 SW 往 NE 向华北板块之下俯冲,形成一套岛弧拉斑玄武岩和岛弧钙碱性火山岩。然而,左国朝等^[40]认为北祁连洋板块分别向南西和北东两边俯冲,主要依据是两边存在古生代花岗岩类。笔者研究则表明,早中奥陶世,北祁连洋壳向南俯冲,由于俯冲的洋壳脱水,诱导中祁连大陆壳部分熔融,形成花岗岩类(牛心山花岗岩),时代为 476 Ma,由于向南俯冲的祁连板块可能受到南部柴北缘板块向北深俯冲的影响,俯冲受阻,祁连洋板块继而转向北俯冲,形成活动大陆边缘型的民乐窑沟花岗闪长岩,时代为 463 Ma。

5 结 论

(1)花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明,牛心山花岗岩和民乐窑沟花岗闪长岩的年龄分别为(476.7±6.6) Ma 和(463.2±4.7) Ma。

(2)牛心山花岗岩具有 S 型花岗岩的特征,可能为中祁连陆壳部分熔融的产物,而石英闪长岩具有与埃达克岩相类似的地球化学特征,可能为俯冲洋壳部分熔融的产物;民乐窑沟花岗闪长岩可能为阿拉善陆块基底部分熔融的产物。

(3)根据岩体的岩石地球化学特征,结合各岩体产出的地质背景及区域地质构造分析可认为,早古生代北祁连洋板块存在南北双向俯冲,其中向南俯冲早于向北俯冲。

参考文献(References):

- [1] 冯益民. 祁连山造山带研究概况—历史、现状及展望[J]. 地球科学进展, 1997,12(4):307~314.
Feng Yimin. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect [J]. Advance in Earth Sciences, 1997,12(4):307~314(in Chinese with English abstract).
- [2] Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of bluechist belts and their tectonic implication, North Qilian Mountain, China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993,11: 523~536.
- [3] 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 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, 1994,68(1):1~15.
Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, et al. The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics [J]. Acta Geologica Sinica, 1994,68 (1):1~15(in Chinese with English abstract).
- [4] 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京:地质出版社, 1996.1~150.
Fen Yiming, He Shiping. Geotectonics and Orogeny of Qilian Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.1~150(in Chinese).
- [5] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因 [M]. 北京:地质出版社, 1996.1~109.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Petrogenesis of Marine Volcanic Rocks in the North Qilian Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.1~109(in Chinese).
- [6] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连洋壳—洋脊和弧后盆地火山作用 [J]. 地质学报, 1998, 72(4):301~312.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Early Palaeozoic mid-ocean ridge—ocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1998,72(4):301~312(in Chinese with English abstract).

① 吴汉泉, 杨宏仪. 北祁连新元古代俯冲事件及早古生代消减方向的转换. 第三届海峡两岸祁连山及邻区地质研讨会——中央造山带的演化论文集, 2002.

- [7] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山构造—火山岩浆—成矿动力学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001.1~296.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Tectonic—Volcanic Magma—ore-forming Dynamics in the North Qilian Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.1~296(in Chinese).
- [8] 左国朝, 吴汉泉. 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, 1997,12(4):315~323.
Zuo Guochao, Wu Hanquan. A bisubduction—collision orogenic model of early—Paleozoic in the middle part of north Qilian area[J]. Advance in Earth Sciences, 1997,12 (4):315~323 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张旗, 孙晓猛, 周德进. 祁连山蛇绿岩的特征、形成环境及构造意义[J]. 地球科学进展, 1997,12(4):366~393.
Zhang Qi, Sun Xiaomeng, Zhou Dejin, et al. The characteristics of north Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance[J]. Advance in Earth Sciences, 1997,12(4):366~393.
- [10] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the North Qilian Mountain, China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003,115:1510~1522.
- [11] Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21:631~344.
- [12] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 234:99~118.
- [13] 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲—增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物杂志, 1997,16:112~119.
Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, et al. A tentative discussion on the ages of the subduction—accretionary complex/volcanic arc in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997,16:112~119 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连加里东期俯冲—增生楔结构及动力学[J]. 地质科学, 1998,33:290~330.
Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Xu Hui Feng, et al. Framework of north Qilian Caledonian subduction—accretionary wedge and its deformation dynamics [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998,33:290~330(in Chinese with English abstract).
- [15] 尹安. 喜马拉雅—青藏高原造山带构造演化——显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 2001,22(3):193~230.
Yin An. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen in the context of Phanerozoic continental growth of Asia [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001,22 (3):193~230 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王荃, 刘雪亚. 祁连加里东期多旋回双变质带[A]. 见: 黄汲清等主编. 中国及邻区大地构造论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1981. 92~101.
Wang Quan, Liu Xueya. Caledonian double metamorphic belts with multicycles[A]. In: Huang Jiqing, et al (eds). Contributions to the Geotectonics of China and Its Environs[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.92~101(in Chinese).
- [17] 宋述光. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化 [J]. 地球科学进展, 1997,12(4):351~365.
Song Shuguang. Tectonic evolution of subductive complex belts in the north Qilian Mountains[J]. Advance in Earth Sciences, 1997,12 (4):351~365(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘传周, 肖文交, 袁朝, 等. 祁连山扎麻什基性杂岩体岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2005,21(1):57~64.
Liu Chuanzhou, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, et al. The petrological and geological characteristics of the Zhamashi mafic complex, Qilian Mountain and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005,21(1):57~64(in Chinese with English abstract).
- [19] 左国朝, 刘寄陈. 北祁连早古生代大地构造演化 [J]. 地质科学, 1987,(1):14~24.
Zuo Guochao, Liu Jichen. Early—Paleozoic tectonic evolution of the North Qilian [J]. Scientia Geologica Sinica, 1987,(1):14~24(in Chinese with English abstract).
- [20] Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, et al. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: evidence from Mesozoic granites [J]. Science in China (Series D), 2004, 47(5):453~462.
- [21] Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. Internal structures of zircons from Archean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U—Pb ages [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998,132: 288~299.
- [22] Patino Douce A E and Beard J S. Effects of P, fo₂ and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes [J]. J. Petrol. 1996,37:999~1024.
- [23] Patino Douce A E, McCarthy T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction [A]. In: Hacke B R, Liou J G (eds). When Continents collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh—Pressure Rocks [C]. Petrology and Structural Geology, Vol. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998,27~55.
- [24] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and origin of Archean trondhjemites and tonalities[J]. Precamb. Res., 1991,51:1~25.
- [25] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: implications for continental growth and crust—mantle recycling[J]. J. Petrol. 1995,36:891~931.
- [26] Wolf M B, Wyllie J P. Dehydration—melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time [J]. Contrib. Mineral. Petrol. 1994,115:369~383.
- [27] Winther K T, Newton R C. Experimental melting of hydrous low—K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons[J]. Bull.

- Geol. Soc. Den. 1991,39:213~228.
- [28] Jogvan H, Kjell P S, Rolf B P, et al. Crustal melting in the lower parts of island arcs: an example from the Bremanger Granitoid Complex, west Norwegian Caledonides[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002,143:316~335.
- [29] Chen F, Siebel W, Satir M. Geochemical and isotopic composition and inherited zircon ages as evidence for lower crustal origin of two Variscan S-type granites in the NW Bohemian massif [J]. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 2003,92:173~184.
- [30] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983,64:295~304.
- [31] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon[J]. *Nature*, 1997,390:159~161.
- [32] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. *Chem. Geol.*, 2000,172:5~24.
- [33] Siebel W, Chen F, Satir M. Late-Variscan magmatism revisited: new implications from Pb-evaporation zircon ages on the emplacement of redwitzites and granites in NE Bavaria [J]. *Int J Earth Sci*: 2003,92:36~53.
- [34] Propach G, Baumann A, Schulz Schmalschlger M, et al. Zircon and monazite U-Pb ages of Variscan granitoid rocks and gneisses in the Moldanubian zone of eastern Bavaria, Germany[J]. *Geol Pal*, 2000,345~377.
- [35] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990,347:662~665.
- [36] Defant M J, Kepezhinskias P. Evidence suggests slab melting in arc magmas[J]. *EOS*, 2001,82:67~69.
- [37] 王荃, 刘雪亚. 我国西部祁连山地区的古海洋地壳及大地构造意义[J]. *地质科学*, 1976,(1):42~55.
Wang Quan, Liu Xueya. Ancient ocean crust and geotectonic significance in Qilianshan area, Northwestern China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1976,(1):42~55(in Chinese with English abstract).
- [38] 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. *地质学报*, 1978,4:281~295.
Xiao Xuchang, Chen Guoming, Zhu Zhizhi. Geological and tectonic significance for the Paleo-ophiolites of the Qilian mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978,4:281~295 (in Chinese with English abstract).
- [39] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论[M]. 北京:地质出版社,1988.
Xiao Xuchang, Li Tingdong, Li Guangcen, et al. An Overview of Himalayan Lithosphere Tectonic Evolution. Beijing:Geological Publishing House, 1981(in Chinese).

Double subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China

WU Cai-lai¹, YAO Shangzhi², YANG Jing-sui¹, ZENG Ling-sen¹, CHEN Song-yong¹,
LI Hai-bing¹, QI Xue-xiang¹, Joseph L. Wooden², Frank K. Mazdab²

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

2. *Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China;* 3. *Stanford University, CA, USA*)

Abstract: This paper deals with zircon SHRIMP dating of the Niuxinshan and Minleyaogou granites in the central segment of the North Qilian Mountains, NW China. The dating results indicate that the ages of the Niuxinshan granite and Minleyaogou granite are 476 and 463 Ma respectively. Petrogeochemistry shows that both granite intrusions have the features of active continental-margin magmatism. On the basis of these features, combined with the tectonic locations of granite occurrence and field observation data, the authors think that south- and north-directed subductions of the North Qilian oceanic plate took place in the Early Paleozoic, of which the southward subduction resulted in the formation of the Nixinshan granite (476 Ma) and the northward subduction gave rise to the Minleyaogou granite (463 Ma).

Key words: granite; zircon SHRIMP U-Pb dating; double subduction; North Qilian

About the first author: WU Cai-lai, male, born in 1960, senior researcher and doctor director, engages in the study of petrology; E-mail: wucailai@ccsdcn.