

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

## 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据

史仁灯<sup>1)</sup> 杨经绥<sup>1)</sup> 吴才来<sup>1)</sup> J. WOODEN<sup>2)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

2) 美国斯坦福大学地质与环境科学系, 加利福尼亚, 94305

**内容提要** 玉石沟蛇绿岩位于青藏高原东北缘的北祁连山中部, 由地幔橄榄岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、枕状熔岩以及夹杂在其中的硅质岩组成。地幔橄榄岩主要是方辉橄榄岩, 其主要氧化物成分较为单一, 具 LREE 富集、Eu 亏损的 U 形 REE 配分模式, 亏损强不相容元素; 枕状熔岩具典型 MORB 特征, 在构造判别图解上位于 MORB 和 IAT 区域, 指示蛇绿岩可能形成于类似于洋中脊的构造环境, 并受到火山弧岩浆作用的影响。堆晶辉长岩具明显的 Eu 正异常, 其锆石离子探针 (SHRIMP)<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为  $550 \pm 17$  Ma, Th/U 值为 0.53~1.85, 大于 0.23, 为岩浆成因锆石, 其年龄代表辉长岩的成岩时代, 推断玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世。

**关键词** SHRIMP 蛇绿岩 玉石沟 北祁连山

蛇绿岩被认为是就位于俯冲带 (SSZ) 的大洋岩石圈残留物 (Dewey and Bird, 1971; Miyashiro, 1975; Leitch, 1984; Pearce et al., 1984; Coleman, 1984), 它原为古大洋岩石圈的组成部分, 由于海底扩张向大陆迁移, 发生仰冲作用构造侵入于大陆地壳中, 所以造山带中由地幔橄榄岩、堆晶岩、枕状熔岩以及硅质岩组成的蛇绿岩套代表古大洋岩石圈与大陆岩石圈之间相互作用带的位置或是板块碰撞带的标志, 因此, 蛇绿岩的研究对重建古构造环境具有重要的地质意义 (Dewey and Bird, 1971; Graham et al., 1996, 张旗等, 2000)。

北祁连山是我国最早研究蛇绿岩的造山带之一 (王荃等, 1976; 黄汲清等, 1977; 肖序常等, 1978), 其中的玉石沟蛇绿岩以发育较为完整的岩石组合为特征, 前人主要从岩石学和常规的地球化学方面对其做了些研究, 表明蛇绿岩上覆火山岩具 MORB 的特征 (冯益民等, 1995; 夏林圻等, 1996; 宋述光, 1997), 而关于其年代学的研究较少。肖序常等 (1978) 根据覆盖在基性熔岩上板岩夹层灰岩中的化石, 认为玉石沟蛇绿岩形成于寒武纪, 夏林圻等 (1996) 根据基性熔岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄  $522 \sim 495$  Ma 和沉

积在火山岩上的硅质岩中放射虫时代 (冯益民等, 1996), 认为玉石沟蛇绿岩形成于晚寒武世—早奥陶世, 而冯益民 (1997) 认为玉石沟蛇绿岩是早、中奥陶世形成的, 即玉石沟蛇绿岩的形成年龄还有较大争议, 因此, 有必要对玉石沟蛇绿岩进一步开展同位素年代学研究。

蛇绿岩中由原始地幔岩经部分熔融形成的洋壳 (主要由堆晶纯橄岩、辉长岩、橄长岩、辉绿岩和玄武岩等组成) 与熔融残留的地幔橄榄岩具有互补性, 但是原始地幔岩通过部分熔融不能直接形成玄武岩 (Niu et al., 1991, 1993, 1997; 白文吉等, 1999), 即玄武岩与地幔橄榄岩在地球化学上并没有直接的互补性。因此, 蛇绿岩上部的玄武岩可能难以代表蛇绿岩开始形成的年龄。所以由原始地幔岩部分熔融形成的岩浆经分离结晶形成的堆晶辉长岩的年龄可能比玄武岩更能代表蛇绿岩形成时代。目前单颗粒锆石阴极发光照相和高分辨率离子探针 (SHRIMP) U-Pb 法测年的综合利用已成为研究单个地质事件强有力的手段 (Gebauer, 1996; Gebauer et al., 1997; Vavra et al., 1996; Williams et al., 1996), 所以本文首次尝试对玉石沟蛇绿岩堆晶岩辉长岩中的

注: 本文为国土资源部国际合作和科技司“十五”重点项目 (编号 20010201)、地调项目 (编号 DKD2001003) 和国家自然科学基金重大国际合作项目 (编号 49732070) 资助成果。

收稿日期: 2003-11-09; 改回日期: 2004-02-21; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 史仁灯, 男, 1969年生。中国地质科学院地质所副研究员、在职博士生。主要从事青藏高原和造山带蛇绿岩及火山岩研究。通讯地址: 100037, 北京阜外百万庄26号, 中国地质科学院地质所; 电话: 010-68999716; Email: shirendeng@yeah.net; shirendeng@ccsd.org.cn。

锆石利用 SHRIMP 方法进行精确测年。

### 1 产出背景

玉石沟蛇绿岩位于北祁连俯冲-碰撞杂岩带中部,该带是阿拉善板块(北中国板块西段)和祁连微板块的分界线(Xu et al., 2000; 许志琴等,2003)。蛇绿岩片出露在走廊南山南缘祁连县玉石沟一带(图1a),南北最宽约5~5.5 km,东西最长约14.5 km。南北均以断裂为界,在构造上呈一个巨大的外来移置体(冯益民等,1995)。组成蛇绿岩的岩石组合除了席状岩墙群之外,变质橄欖岩、堆晶岩、枕状熔

岩均较发育,在枕状熔岩中夹有团块状的含放射虫的硅质岩。蛇绿岩块逆冲推覆于含寒武纪三叶虫化石的浊积岩组合上。

### 2 岩石学和地球化学特征

出露在玉石沟的超镁铁岩主要由南岩体、中岩体、北岩体和小岩体组成(图1b),岩体产状和岩石类型均很复杂,有的超镁铁岩可能不属于熔融残留的地幔橄欖岩(有待详细研究),但岩性主要是方辉橄欖岩和纯橄岩以及少量的含辉纯橄岩,其中南岩体、北岩体和小岩体均强烈蛇纹石化,中岩体主要由方

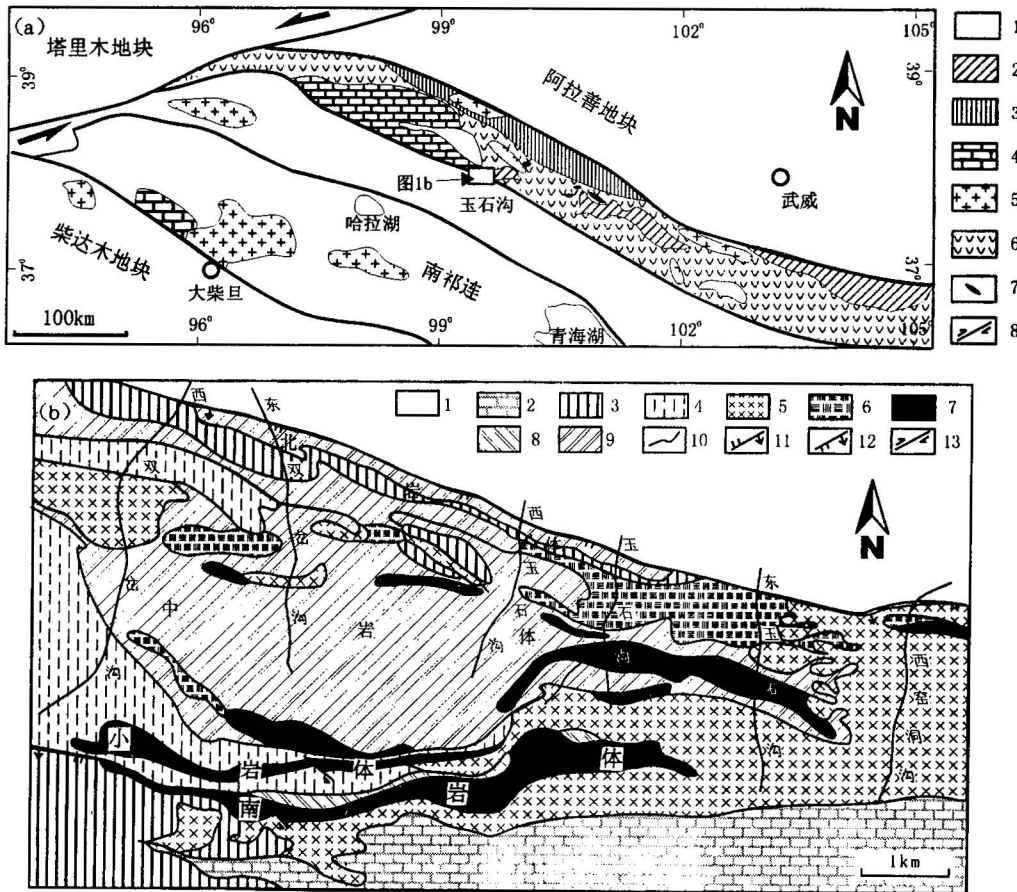


图 1 北祁连玉石沟蛇绿岩大地构造位置图(a)和岩块分布图(b)

Fig. 1 Geotectonic map (a) and distribution map (b) of Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

(a): 1—白垩纪陆相沉积; 2—石炭纪—三叠纪陆相沉积和泥盆纪磨拉石; 3—志留纪盆地沉积; 4—前寒武纪变质基底; 5—早古生代花岗岩; 6—寒武—奥陶纪火山岩; 7—超基性岩; 8—走滑断层; (b): 1—二叠纪砂岩; 2—奥陶纪灰岩、板岩及中基性火山岩; 3—中寒武世砂板岩夹灰岩; 4—震旦纪白云岩、石英片岩等; 5—辉长岩; 6—滑石菱镁片岩等; 7—纯橄岩; 8—蛇纹岩; 9—方辉橄欖岩; 10—地质体界线; 11—逆断层; 12—正断层; 13—走滑断层

(a): 1—Cretaceous continental deposit; 2—Carboniferous—Triassic continental deposit and Devonian molasse; 3—Silurian basin deposit; 4—Precambrian metamorphic basement; 5—the Early Palaeozoic granite; 6—Cambrian—Ordovician volcanic rocks; 7—ultrabasic rocks; 8—strike-slip fault; (b): 1—Permian sandstone; 2—Ordovician limestone, slate and intermediate-basic volcanic rocks; 3—Mid-Cambrian sandstone, slate and limestone; 4—Sinian dolomite and quartz-schist; 5—gabbro; 6—talc-magnesite; 7—dunite; 8—serpentinite; 9—harzburgite; 10—boundaries of geological bodies; 11—thrust fault; 12—normal fault; 13—strike-slip fault

辉橄榄岩(约92%)组成,其边缘为蛇纹石化的纯橄榄岩,中心部位的方辉橄榄岩较新鲜,并被晚期的纯橄榄岩岩脉穿插<sup>①</sup>。采自中岩体中心部位的方辉橄榄岩由橄榄石、斜方辉石以及少量的尖晶石组成。橄榄石晶体自形一半自形,部分橄榄石具有肯克带(kink band)现象,并发育三联点结构;斜方辉石她形充填于自形橄榄石之间,部分斜方辉石具出熔现象,少数斜方辉石中包裹自形橄榄石;另外,方辉橄榄岩中发育细粒的橄榄石与斜方辉石的结合体充填于粗粒橄榄石和斜方辉石中,说明方辉橄榄岩是原始地幔岩部分熔融的残余物。堆晶岩包括堆晶纯橄榄岩、辉长岩和异剥辉石岩,其中堆晶辉长岩部分已钠黝帘石化、闪石化和异剥钙榴岩化,部分可见斜长石的残留斑晶,在显微镜下,根据辉石和斜长石的残留假象,可判断岩石为粗粒等粒结构和辉长结构。辉绿岩脉与枕状熔岩均发生绿片岩相蚀变作用。

岩石化学分析方法见史仁灯等(2004)。玉石沟蛇绿岩的分析结果(表1)表明方辉橄榄岩的烧失量较小(0.10%~0.74%),说明方辉橄榄岩较新鲜,这与岩相观察结果一致。基性熔岩的烧失量较高,达到2.36%~4.44%,这与岩石普遍绿泥石化有关,这些蚀变或变质作用可能会影响部分活动元素的地球化学行为,例如:K、Cs、Rb、Sr、Ba、Eu等相对较活动的大离子亲石元素(LILE),所以本文在讨论基性熔岩的地球化学行为时尽可能避免上述几种元素,主要利用一些活动性较弱的高场强元素(HFSE),例如:Y、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti等,进行元素地球化学行为讨论,因为这几种高场强元素的丰度主要由源区和岩浆演化过程控制(Rollinson, 1993; 张本仁等, 2002)。

方辉橄榄岩的SiO<sub>2</sub>为44%~45%,MgO为45.55%~45.97%,FeO为6.6%~6.88%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为0.62%~1.17%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为0.52%~0.72%,介于中岩体方辉橄榄岩的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的变化范围0.4%~0.8%<sup>①</sup>,CaO、K<sub>2</sub>O以及Na<sub>2</sub>O等氧化物的含量极低,Mg<sup>#</sup>为91.58~91.67,为高镁橄榄岩。在稀土元素配分模式图上(图2a),方辉橄榄岩显示典型的U形REE型式,这种REE配分模式是高度亏损的残余地幔-蛇绿岩、造山带二辉橄榄岩和地幔包体最常见的型式(McDonough and Frey, 1989),也是中国造山带中各类地幔橄榄岩的主要型式(王希斌等, 1995),ΣREE低于球粒陨石,均显示Eu负异常,δEu为0.45~0.75。在MORB标准化的微量元素蛛网图上(图2b),明显亏损强不相容元素(例如:Nb、

Ta、Ce等),这种方辉橄榄岩代表了高度亏损的地幔残余,但是,明显富集Zr、Hf强不相容元素,这可能是方辉橄榄岩中含有尖晶石的原因,有研究表明Zr、Hf在尖晶石中的分配系数较高,故易于富集(Casey, 1997)。玉石沟方辉橄榄岩的高Mg<sup>#</sup>特征、REE配分模式和岩石的熔融残余结构说明方辉橄榄岩是由原始地幔经部分熔融后的残余物。

枕状熔岩的SiO<sub>2</sub>含量介于49.01%~51.77%之间,变化范围较小,不易受到蚀变作用的影响,这与Si元素在矿物中以Si-O四面体形态存在有关,而其他元素(除部分Al以及一些相容元素之外)以离子形态存在于Si-O四面体之间,所以相对于Si易于受到蚀变作用的影响,导致其含量变化较大。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为12.78%~15.14%,MgO和Σ(FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)含量分别为5.67%~8.24%和10.26%~13.97%,其变化程度不及CaO、Na<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O,这可能与后期蚀变的程度有关,TiO<sub>2</sub>为1.26%~1.94%,相对于Ca、Na、K等常量元素较为稳定,这与Ti较弱的活动性相关,其平均1.67%,与MORB的TiO<sub>2</sub>含量1.5%较为接近(Bervins et al., 1984)。堆晶辉长岩的SiO<sub>2</sub>为48.05%~48.91%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO的含量较高,分别为17.72%~20.25%和10.38%~13.08%,这与岩石含有大量的斜长石有关,TiO<sub>2</sub>的含量为0.2%~0.24%,Na<sub>2</sub>O为1.7%~2.33%均明显低于枕状熔岩,说明辉长岩和枕状熔岩并不是同一岩浆房的产物,其Mg<sup>#</sup>(Mg/(Mg+Fe))为70.30~77.50,介于印度洋辉长岩的Mg<sup>#</sup>值0.32~0.88之中(Pedersen et al., 1996),而高于东太平洋赤道附近辉长岩的Mg<sup>#</sup>值0.32~0.50(Von Herzen et al., 1991)。两个辉绿岩脉的主要氧化物SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量极其不一致,TiO<sub>2</sub>为1.18%和0.54%,介于辉长岩和枕状熔岩之间。在Nb/Y-SiO<sub>2</sub>(图3a)和TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub>(图3b)图解上,它们均属于亚碱性拉斑系列岩石。

枕状熔岩球粒陨石标准化后的ΣREE为球粒陨石的10~11倍,配分模式为平坦型(图2a),与MORB较为相似,这与依据TiO<sub>2</sub>含量判断结果较为一致。HREE与LREE无分馏现象和无Eu异常,δEu值介于0.92~1.0,平均0.96,接近1,说明岩浆未经过结晶分离作用。堆晶辉长岩球粒陨石标准化后的ΣREE是球粒陨石的2~3倍,配分模式为平坦型,Eu正异常,δEu值为1.98~2.61,说明有斜长石的结晶,这与岩石高CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量相一致。辉绿岩ΣREE介于辉长岩和枕状熔岩之间,配分模式

表1 北祁连玉石沟蛇绿岩化学分析结果

Table 1 The chemical analysis for Yushigou ophiolite, North Qilian Mountains

岩石样品号	枕状熔岩					辉绿岩		辉长岩		方辉橄辉岩	
	00Y-602	00Y-603	00Y-613	00Y-615	00Y-617	00Y-614	00Y-618	00Y-622	00Y-623	00Y-624	00Y-627
(%)											
SiO <sub>2</sub>	49.01	50.87	50.73	51.77	51.65	54.91	47.60	48.91	48.05	45.00	43.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.14	12.78	14.77	14.06	13.62	16.25	14.57	17.72	20.25	0.72	0.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.28	6.77	2.81	4.48	5.33	2.50	1.65	2.69	1.39	0.62	1.17
FeO	6.90	7.20	7.45	8.15	7.88	6.72	6.60	4.05	3.40	6.88	6.60
CaO	7.04	9.05	5.03	4.61	3.43	2.56	8.86	13.08	10.38	0.55	0.53
MgO	7.03	5.67	8.24	6.05	6.02	5.64	10.15	8.24	8.72	45.55	45.97
Na <sub>2</sub> O	3.53	1.97	5.13	5.26	4.54	6.51	3.67	1.70	2.33	<0.01	0.03
TiO <sub>2</sub>	1.36	1.94	1.26	1.92	1.89	1.18	0.57	0.24	0.20	<0.01	<0.01
MnO	0.14	0.20	0.17	0.14	0.20	0.14	0.14	0.14	0.11	0.13	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.14	0.10	0.19	0.22	0.13	0.09	0.05	0.05	<0.05	<0.05
K <sub>2</sub> O	0.88	0.14	0.10	0.10	0.14	0.25	0.46	0.29	1.55	0.12	0.12
LOI	2.71	2.38	3.53	2.63	4.44	2.51	4.92	2.36	3.69	<0.10	0.74
总量	99.10	99.11	99.32	99.36	99.36	99.30	99.28	99.47	100.12	99.57	99.76
(×10 <sup>-6</sup> )											
La	7.83	8.22	4.28	7.49	8.63	6.45	2.97	0.54	0.94	240.00	200.00
Ce	19.53	20.59	10.85	19.89	22.18	14.84	7.11	1.34	2.34	199.00	350.00
Pr	2.37	2.54	1.50	2.53	2.79	1.81	0.95	0.19	0.28	19.00	42.00
Nd	10.15	11.23	7.83	11.77	13.62	8.22	4.70	1.09	1.35	77.00	136.00
Sm	3.05	3.48	2.56	3.62	4.04	2.69	1.40	0.50	0.41	17.00	30.00
Eu	1.07	1.16	0.93	1.37	1.38	0.94	0.50	0.39	0.42	2.50	8.40
Gd	3.49	3.64	3.66	5.01	5.15	3.26	1.63	0.72	0.59	17.00	39.00
Tb	0.65	0.69	0.69	0.86	0.91	0.59	0.31	0.14	0.11	2.70	6.40
Dy	4.13	4.03	4.36	5.59	5.88	3.70	1.91	0.88	0.78	19.00	29.00
Ho	0.91	0.86	0.92	1.32	1.30	0.88	0.46	0.20	0.15	4.00	5.10
Er	2.39	2.49	2.43	3.80	3.74	2.45	1.16	0.58	0.42	13.00	14.00
Tm	0.36	0.36	0.38	0.54	0.57	0.37	0.17	0.08	0.06	3.20	3.40
Yb	2.25	2.30	2.24	3.62	3.84	2.20	1.12	0.46	0.45	19.00	22.00
Lu	0.36	0.41	0.37	0.60	0.62	0.40	0.18	0.08	0.07	4.60	5.30
Y	26.09	30.09	29.02	41.57	41.45	29.14	13.48	7.83	5.58	117.00	127.00
Ba	568.30	64.96	31.45	25.64	28.15	61.07	75.96	32.98	218.10	3.02	4.35
Co	35.15	32.44	30.47	34.47	32.31	23.53	41.78	47.45	29.03	97.67	102.00
Cr	191.00	90.00	165.00	28.00	19.00	26.00	368.00	313.00	412.00	1778.90	1710.48
Ni	70.00	55.00	62.00	25.00	19.00	20.00	165.00	103.00	136.00	1807.36	1885.94
Sr	113.10	223.70	87.37	50.65	77.00	73.12	247.80	183.20	214.80	1.68	1.70
V	330.70	392.50	281.00	438.40	421.00	247.90	179.30	152.60	121.50	19.03	20.64
Sc	41.93	37.81	38.64	36.43	33.95	25.42	34.50	35.94	30.92	12.73	12.73
Zr	80.00	84.00	64.00	105.00	112.00	93.00	32.00	8.20	6.30	6.80	6.30
Hf	3.10	3.00	2.00	3.30	3.50	3.00	1.10	0.30	0.30	0.10	0.10
Nb	1.80	9.80	3.10	8.90	8.00	5.60	2.00	0.50	0.40	<0.1	<0.1
Rb	20.00	4.60	0.90	0.60	0.40	2.20	5.00	8.40	60.00	0.40	0.60
Ta	<0.1	1.10	0.20	0.90	0.80	0.50	0.10	0.10	0.10	<0.1	<0.1
Th	2.40	2.30	0.30	1.50	1.20	1.00	0.20	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
U	0.40	0.40	0.20	0.30	0.50	0.30	0.10	0.10	0.20	<0.1	<0.1
Mg <sup>#</sup>	52.96	44.47	60.22	47.88	46.90	53.54	69.55	70.30	77.50	91.67	91.58
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.58	1.46	1.03	1.27	1.32	1.48	1.31	0.67	1.41	8.70	4.11
(Sm/Yb) <sub>N</sub>	1.46	1.62	1.23	1.07	1.13	1.31	1.34	1.17	0.98	0.96	1.46

注:国土资源部国家地质测试分析中心测定。

与枕状熔岩较为相似,低 TiO<sub>2</sub>含量(0.57%)的辉绿岩 REE 总量低于枕状熔岩和高 TiO<sub>2</sub>辉绿岩。

熔岩的 REE 配分模式和微量元素蛛网图(图2)

显示其具有典型 MORB 特征,在 TiO<sub>2</sub>-MnO×10-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>×10(图4a)和 Ni-Ti/Cr(图4b)构造环境判别图解上,大部分投落在MORB区域,少数投落在

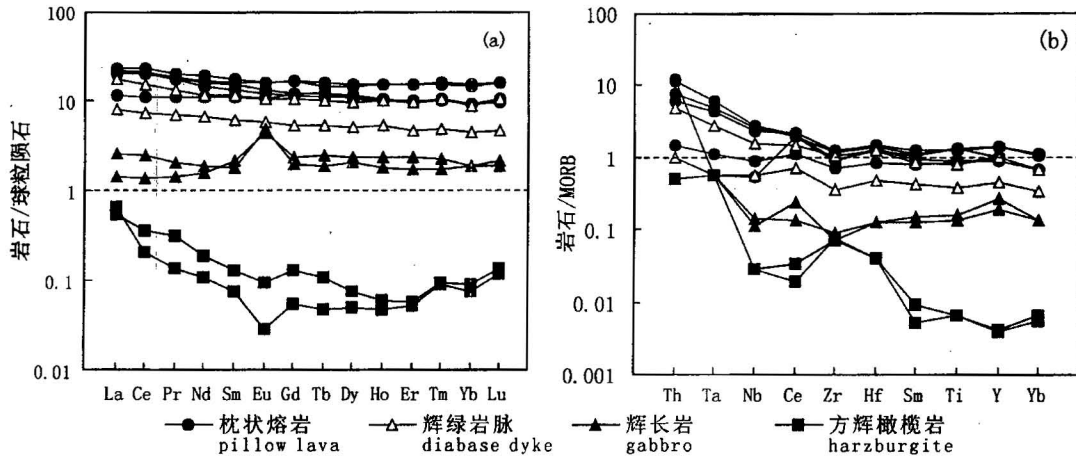


图 2 北祁连玉石沟蛇绿岩稀土元素、微量元素标准化图解

Fig. 2 Rare earth and trace element normalized diagram for Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

(a) 蛇绿岩稀土元素配分模式(C1球粒陨石的的数据来自 Taylor and McLennan, 1985);

(b) 蛇绿岩微量元素 N-MORB 标准化蛛网图(N-MORB 数据来自 Saunders and Tarney, 1984)

(a) Rare earth element normalized to C1 chondritic meteorite values plotted against atomic number for Yushigou ophiolite(C1 chondritic meteorite data are from Taylor and McLennan, 1985);

(b) trace element concentrations normalized to the composition of N-MORB and plotted from left to right in order of increasing compatibility for Yushigou ophiolite (N-MORB normalizing values are from Saunders and Tarney, 1984)

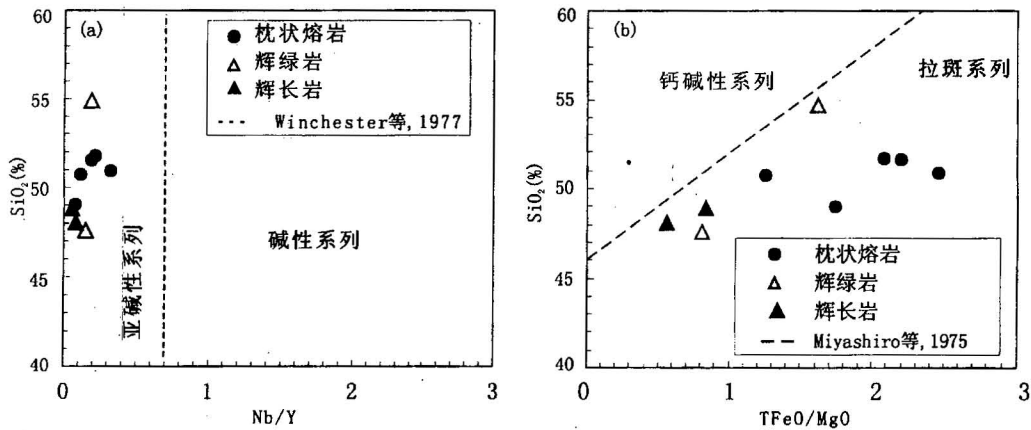


图 3 北祁连玉石沟蛇绿岩中火山岩系列划分图解(转引自夏林圻等, 2000)

Fig. 3 The discrimination diagram for the volcanic rock series in Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains (after Xia et al. , 2000)

(a) Nb/Y-SiO<sub>2</sub>图解,用于区别碱性和亚碱性系列火山岩;(b) TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub>图解,用于区别亚碱性中的钙碱性和拉斑系列火山岩

(a) The diagram of Nb/Y-SiO<sub>2</sub> discriminating the alkaline series and sub-alkaline series volcanic rocks;

(b) the diagram of TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> discriminating the calc-alkaline series and tholeiitic series volcanic rocks

IAT 区域,说明玉石沟蛇绿岩形成于洋底环境,并受到火山弧岩浆作用的影响,这与基性岩中残留单斜辉石成分判断结果一致(冯益民等,1995)。

### 3 SHRIMP 分析结果

用于分析测试的锆石是从发生蚀变的堆晶辉长

岩中挑选出的,11颗锆石的分析结果见表2,锆石阴极发光照片及对应<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄谱和图分别见图5和6。从图5锆石的透射光照片和阴极发光图片上可以看出,锆石1、8、10为长柱状;锆石2、9、11为短柱状;锆石4、7为次浑圆状,从外形看可能为横截面。这11粒锆石内部结构相对比较均匀,内部无残留老核,

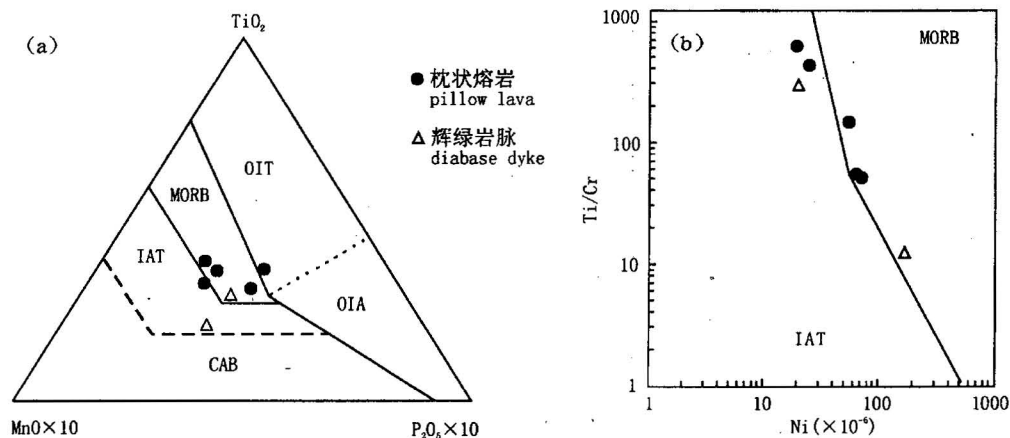


图4 北祁连玉石沟蛇绿岩构造环境判别图解

Fig. 4 Tectonic discrimination diagram for the volcanic rocks from Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

(a)—蛇绿岩  $TiO_2$ - $MnO \times 10$ - $P_2O_5 \times 10$  构造环境判别图解; (b)—蛇绿岩  $Ni$ - $Ti/Cr$  构造环境判别图解;

OIT—洋岛拉斑玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩

(a)—The discrimination diagram of  $TiO_2$ - $MnO \times 10$ - $P_2O_5 \times 10$  for Yushigou ophiolite;

(b)—the discrimination diagram of  $Ni$ - $Ti/Cr$  for Yushigou ophiolite;

OIT—oceanic island tholeiitic basalt; MORB—middle ocean ridge basalt; IAT— island arc tholeiitic basalt; CAB—calc alkaline basalt; OIA—oceanic island alkaline basalt

外部无变质边,具有典型的岩浆锆石特点。

一般认为岩浆成因锆石的  $Th/U$  值大于 0.1 (Claesson et al., 2000),同时 Kinny 等(1999)在研究苏格兰加里东造山带混合岩中的锆石年龄时认为,岩浆成因锆石的  $Th/U$  值大于 0.23,本地区堆晶辉长岩中锆石的  $Th/U$  值范围为 0.53~1.85(表2),均大于 0.23,可以认为是岩浆成因,这与根据锆石的阴极发光照片判断的结果是一致的。

因此,锆石的结晶年龄能代表辉长岩的成岩时代。锆石的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄变化于  $524.2 \pm 12.40$  Ma

至  $596.6 \pm 11.75$  Ma 之间,其  $^{207}Pb/^{235}U$ - $^{206}Pb/^{238}U$  谐和图(图6)显示 11 个点均接近于谐和线,加权平均年龄为  $550 \pm 17$  Ma,其  $MSWD=3.2$ ,说明测试结果较为可靠。

#### 4 讨论

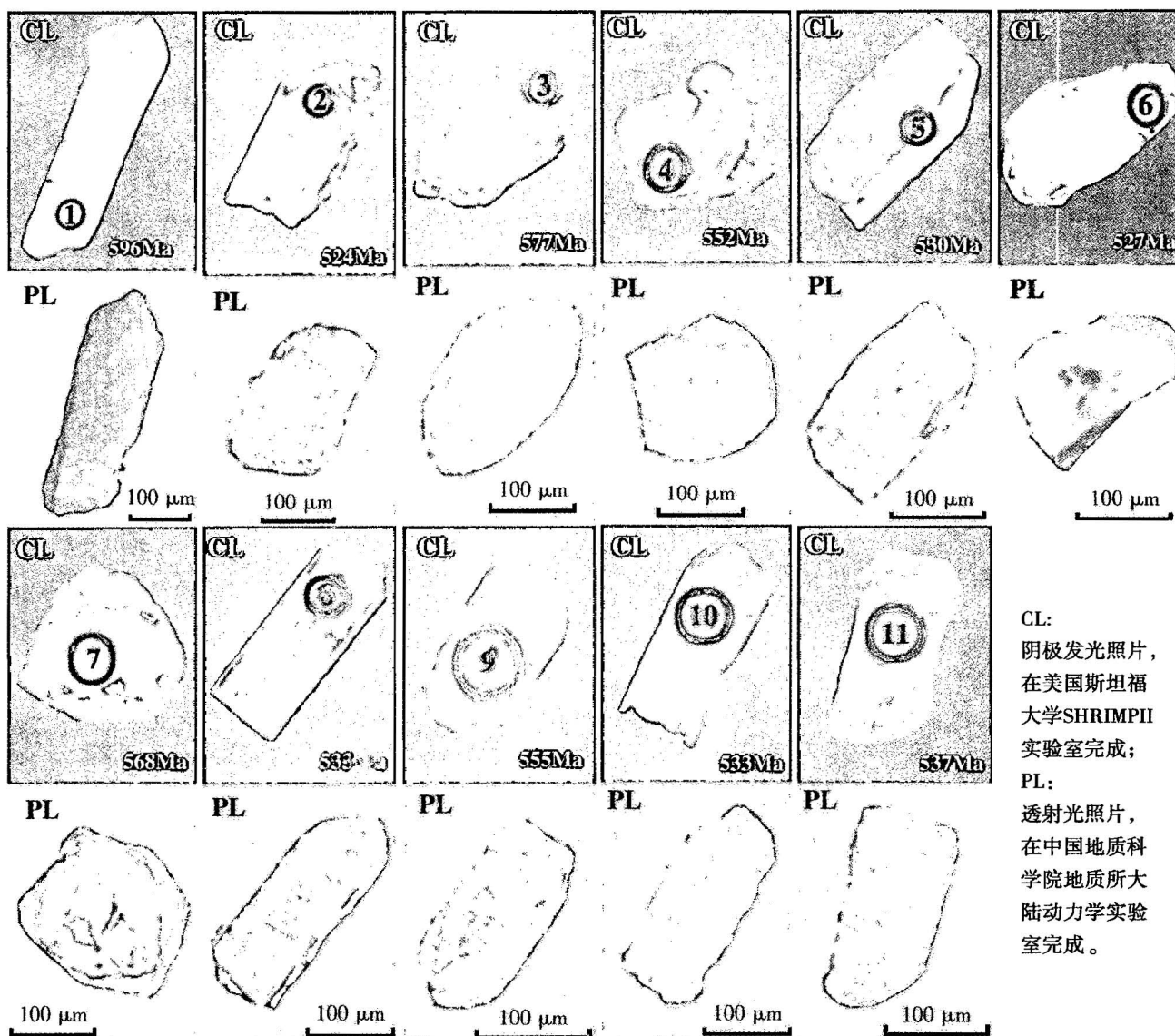
玉石沟蛇绿岩堆晶辉长岩的地球化学特征显示其与方辉橄榄岩的互补性强于上部枕状熔岩,说明辉长岩比枕状熔岩更能代表原始地幔熔融的产物,所以堆晶辉长岩更能代表玉石沟蛇绿岩的形成时

表2 北祁连山玉石沟蛇绿岩辉长岩锆石 SHRIMP 分析结果

Table 2 SHRIMP data of zircons from the gabbro within Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

测点	U( $\times 10^{-6}$ )	Th( $\times 10^{-6}$ )	$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	误差	$^{207}Pb/^{235}U$	误差	$^{206}Pb/^{238}U$	误差	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)
1	55	28	0.53	0.0591	0.00927	0.7897	0.01785	0.0970	0.00200	$596.6 \pm 11.75$
2	99	78	0.82	0.0514	0.00700	0.6005	0.04454	0.0847	0.00209	$524.2 \pm 12.40$
3	142	102	0.74	0.0534	0.00638	0.6898	0.05296	0.0938	0.00400	$577.8 \pm 23.60$
4	110	87	0.81	0.0571	0.00287	0.7052	0.02628	0.0895	0.00213	$552.8 \pm 12.60$
5	82	102	1.29	0.0416	0.00167	0.4921	0.08314	0.0858	0.00210	$530.4 \pm 12.47$
6	195	190	1.01	0.0561	0.00264	0.6595	0.02257	0.0853	0.00185	$527.5 \pm 11.00$
7	15	15	0.96	0.0555	0.00342	0.7053	0.04789	0.0922	0.00202	$568.7 \pm 11.95$
8	6	6	0.88	0.0439	0.00408	0.5219	0.04915	0.0862	0.00642	$533.1 \pm 38.24$
9	6	5	0.94	0.0569	0.00873	0.7061	0.01139	0.0900	0.00309	$555.7 \pm 18.27$
10	8	7	0.89	0.0418	0.00186	0.4969	0.02240	0.0862	0.00344	$533.1 \pm 20.44$
11	11	20	1.85	0.0628	0.00684	0.7532	0.09089	0.0870	0.00348	$538.0 \pm 20.68$

注:在美国斯坦福大学 SHRIMP 开放实验室测试分析。



CL:  
阴极发光照片,  
在美国斯坦福  
大学SHRIMP II  
实验室完成;  
PL:  
透射光照片,  
在中国地质科  
学院地质所大  
陆动力学实验  
室完成。

图 5 北祁连玉石沟蛇绿岩辉长岩中锆石透射光和阴极发光照片

Fig. 5 Polarized light (PL) and Cathodoluminescence images of zircons in the gabbro from Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

间。测试结果给出了堆晶辉长岩结晶年龄为 $550 \pm 17$  Ma, 老于用 Sm-Nd 等时线法测得的基性熔岩的年龄 522~495 Ma (夏林圻等, 1996), 推测蛇绿岩在 550±17Ma 前就可能开始形成, 这与出露在玉石沟西边的朱龙关蛇绿岩的形成时代较为一致 (肖序常等, 1978), 推测朱龙关蛇绿岩可能是玉石沟蛇绿岩的西延部分。

Basden 等人 (1987) 在研究澳大利亚东部 Tumut 地区的蛇绿岩时, 测得角闪石化层状堆晶辉长岩中的角闪石的 K-Ar 年龄为  $425 \pm 6$  Ma 和  $426 \pm 6$  Ma, 而 Graham 等人 (1999) 在研究同一地区蛇

绿岩时, 用 SHRIMP U-Pb 法测得斜长花岗岩的年龄为 400 Ma (Warner et al., 1992), 后者据此推测该地区蛇绿岩的形成历经了约 20 Ma。Warner 等 (1992) 据堆晶辉长岩的结晶年龄推测 Tumut 地区的古洋盆在蛇绿岩形成之前, 即在志留世就开始裂开 (Warner et al., 1992)。Bruhn 等 (1978) 和 de Wit 等 (1981) 认为洋盆的发育始于在地壳比较薄的局部地区地幔底侵作用, 洋盆的裂开过程伴随由深部地壳变质沉积岩经部分熔融产生的大量的岩浆活动, 当洋盆扩张到足够宽的时候, 开始形成大面积的洋壳玄武岩。

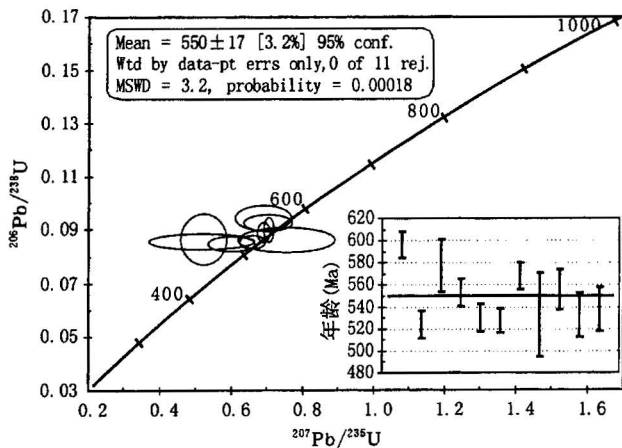


图6 北祁连玉石沟蛇绿岩堆晶辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 谱和图解

Fig. 6 The concordia diagram showing  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  ratios dating by SHRIMP in zircon grains in the gabbro from Yushigou ophiolite in the North Qilian Mountains

玉石沟蛇绿岩与上述 Tumut 地区蛇绿岩有相似之处,即底部堆晶辉长岩的年龄要老于上部的熔岩。推测在  $550 \pm 17$  Ma 之前,由于地幔底侵上隆造成的局部熔融形成的岩浆开始形成堆晶辉长岩,同时局部比较薄的地壳就已经开始裂开形成洋盆并接受沉积物,这与本地区有中寒武世的浊积岩沉积现象是相符合的。随着洋盆的进一步扩张,到  $522 \sim 495$  Ma 左右,洋盆已经具有一定的规模,并形成了大面积的具 MORB 特征的基性熔岩,并在基性熔岩之上沉积含晚寒武世一早奥陶世放射虫的硅质岩。推测玉石沟古洋盆至少在  $550 \pm 17$  Ma 之前就已经开启,并且从开始裂开到初具规模经历了约 30 Ma。

### 注 释

① 中国地质科学院地质研究所, 1975. 地质科学研究报告.

### 参 考 文 献

- 白文吉, 方青松, 张仲明, 等. 1999. 西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带罗布莎地幔橄辉岩的成因. 岩石矿物学杂志, 18(3): 193~206.
- 冯益民, 何世平. 1995. 北祁连蛇绿岩地质地球化学特征. 岩石学报, 11(增刊): 125~146.
- 冯益民, 何世平. 1996. 蛇绿岩与造山作用——北祁连造山带例析. 见: 张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 135~138.
- 冯益民. 1997. 祁连山造山带研究概况——历史、现状及展望. 地球科学进展, 12: 307~314.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 1977. 中国大地构造基本轮廓. 地质学报, 2: 117~135.

- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. 地质学报(出版中).
- 宋述光. 1997. 北祁连俯冲杂岩的构造演化. 地球科学进展, 12: 340~350.
- 王荃, 等. 1976. 我国西部的古海洋地壳及其大地构造意义. 地质科学, (1): 14~24.
- 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 1995. 中国蛇绿岩中变质橄辉岩的稀土元素地球化学. 岩石学报, 11(增刊): 24~41.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社.
- 夏林圻, 夏祖春, 赵江天, 徐学义, 杨合群, 赵东宏. 2000. 北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定. 中国科学(D辑), 30(1): 1~8.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. 地质学报, 54(1): 287~295.
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 等. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(2): 163~176.
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 韩吟文, 等. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社.
- 张旗, 钱青, 王焰. 2000. 蛇绿岩岩石组合及洋脊下岩浆作用. 岩石矿物学杂志, 19(1): 1~7.

### References

- Basden H, Franklin B J, Marshall B, Waltho A E. 1987. Terranes of the Tumut District, Southeastern New South Wales, Australia. In: Leitch E C, Scheibner E, eds. Terrane accretion and orogenic belts. American Geophysical Union Geodynamics Series, 19: 57~66.
- Bervins R E, Kokelaar B P, Dunkley P N. 1984. Petrology and geochemistry of Lower to Middle Ordovician igneous rocks in Wales: a volcanic arc to marginal basin transition. Proc. Geol. Ass., 95: 337~347.
- Bruhn R L, Stern C R, de Wit M J. 1978. The bearing of new field and geochemical data on the origin and development of a Mesozoic volcano-tectonic rift zone and back-arc basin in southernmost South America. Earth and Planetary Science Letters, 41: 32~46.
- Casey J F. 1997. Comparison of major- and trace- element geochemistry of abyssal peridotites and mafic plutonic rocks with basalts from the mark region of the mid- Atlantic ridge. In: Karson J A, et al., ed. Proc. ODP. Sci. Results 153: 181~241.
- Claesson S V, Vertin T, Bayanova H D. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaen to the Palaeozoic. Lithos, 51: 95~108.
- Coleman R G. 1984. The diversity of ophiolites. Geol. Mijnbouw, 63: 144~150.
- de Wit M J, Stern C R. 1981. Variation in the degree of crustal extension during formation of a back-arc basin. Tectonophysics, 72: 229~260.
- Dewey J F, Bird J. 1971. Origin and emplacement of the ophiolite suite; Appalachian ophiolites in Newfoundland. Journal of Geophysical Research, 76: 3179~3206.
- Gebauer D. 1996. A P-T-t path for a (ultra-) high pressure ultramafic/mafic rock-associations and their felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of Magmatic and metamorphic zircon



- domains. Example: Alpe Arami (Central Swiss Apls). In: Basu A, Hart S, eds. *Earth Processes; Reading the isotopic Code*. Geophysical Monographs. AGU, Washington, DC, 307~329.
- Gebauer D, Schertl H P, Brix M, Schreyer W. 1997. 35 Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dorá Maira Massif, Western Apls. *Lithos*, 41: 5~24.
- Graham I T, Franklin B J, Marshall B, Leitch E C, Fanning M. 1996. Tectonic significance of 400 Ma zircon ages for ophiolitic rocks from the Lachlan fold belt. *Geology*, 24(12): 1111~1114.
- Kinny P D, Friend C R L, Strachan R A, Watt G R, Burns I M. 1999. U-Pb geochronology of regional mimatites in East Sutherland, Scotland: evidence for crustal melting during the Caledonian orogeny. *Journal of Geological Society, London*. 156: 1143~1152.
- Leitch E C. 1984. Island arc elements and arc-related ophiolites. *Tectonophysics*, 106: 177~203.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology*, 83: 249~281.
- Niu Yaoling, Batiza R. 1991. An empirical method for calculating melt compositions produced beneath mid-ocean ridges: application for axis and off-axis (seamount) melting. *J. Geophys. Res.*, 96: 21753~21777.
- Niu Yaoling, Batiza R. 1993. Chemical variation trends at fast and slow spreading ridges. *J. Geophys. Res.*, 98: 7887~7902.
- Niu Yaoling, Roger Hekinian. 1997. Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, 385: 326~329.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar B P, Howells M F, eds. *Marginal basin geology*. Geological Society of London Special Publication 16; London, Blackwell Scientific Publications, 77~94.
- Pedersen R B, Malpas J, Fallon T. 1996. Petrology and geochemistry of gabbroic and related rocks from site 894, Hess Deep. In: Mevel C, Gillis K M, Allan J F, Meyer P S, eds. *Proc. ODP. Sci. Results* 147: 3~19.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evolution. Presentation, Interpretation*. First published in 1993, Produced by Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd.
- Vavra G, Gebauer D, Schmidt R. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea zone (Southern Apls.): An ion microscope (SHRIMP) study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122: 337~358.
- Warner P J, Marshall B, Franklin B J. 1992. The Mooney fault system and Coolac ophiolite suite in the tectonics of the Tumut Trough, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 39: 127~140.
- Williams I, Buick S, Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 29~47.
- Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Li Haibin. 2000. Architecture and orogeny of the northern Qilian orogenic belt, northwestern China. *Journal of "the Geological Society of China" (Taipei)*, 34(1): 125~141.

## First SHRIMP Dating for the Formation of the Late Sinian Yushigou Ophiolite, North Qilian Mountains

SHI Rendeng<sup>1)</sup>, YANG Jingsui<sup>1)</sup>, WU Cailai<sup>1)</sup>, J. WOODEN<sup>2)</sup>

1) *Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *Department of Geological and Environment Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA*

### Abstract

The Yushigou ophiolite, consisting mainly of mantle peridotite, cumulate gabbro, basic dykes, pillow lava and cherts, crops out in the middle part of the North Qilian Mountains in the northeastern Tibetan Plateau. The mantle peridotite is composed mainly of harzburgite, which shows a narrow range in the major elements, enriched light rare earth elements (LREE), U-type REE patterns with negative Eu anomaly, and strongly depleted incompatibility elements. The pillow lava, with affinity of MORB, plots in the field of MORB and IAT, suggesting that the Yushigou ophiolite formed in a tectonic setting like the Middle Ocean Ridge (MOR) and then were changed by volcanic arc magmatism. The cumulate gabbro is characterized by a positive Eu anomaly, in which magmatically derived zircons, with Th/U=0.53~1.85 (>0.23), give <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages ranging from 524.2 to 596.6 Ma, and a weighted average age of 550±17 Ma (MSWD=3.2). Thus, we conclude that the Yushigou ophiolite was formed in the Late Sinian.

**Key words:** SHRIMP; ophiolite; Yushigou; North Qilian Mountains