

北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义

相振群¹, 陆松年¹, 李怀坤¹, 李惠民¹, 宋彪², 郑健康³

XIANG Zhen-qun¹, LU Song-nian¹, LI Huai-kun¹,
LI Hui-min¹, SONG Biao², ZHENG Jian-kang³

1. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037;

3. 青海省区域地质调查研究院, 青海 西宁 810012

1. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*

2. *Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China;*

3. *Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, Qinghai, China*

摘要:从北祁连熬油沟辉长岩中选出的锆石的外部形态、内部结构单一。SHRIMP测年共测定8个点,每个点的Th/U值都非常高,大都在0.8以上。8个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄在误差范围内完全一致,加权平均值为503.7 Ma±6.4 Ma,这一结果与前人在同一地点采集的辉绿岩墙样品的锆石SHRIMP U-Pb测年结果有较大的差异。结合研究区内已有的研究成果认为:①熬油沟地区的辉长辉绿岩形成于早古生代,并不是中元古代早期。②辉长岩中的锆石成因单一,其测试年龄结果的地质意义明确;而同源岩浆侵入体的辉绿岩往往容易从围岩中捕获大量锆石,使得锆石成因复杂,年龄测试结果复杂。因此,与辉绿岩相比,辉长岩锆石SHRIMP U-Pb年代学研究可以获得更为可靠的、地质意义明确的年龄信息。

关键词:北祁连山;熬油沟;辉长岩;锆石SHRIMP U-Pb年龄

中图分类号:P588.12⁺4;P597⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2007)12-1686-06

Xiang Z Q, Lu S N, Li H K, Li H M, Song B, Zheng J K. SHRIMP U-Pb zircon age of gabbro in Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains, China and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(12): 1686-1691

Abstract: SHRIMP U-Pb zircon ages of gabbro at Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains are reported in this paper. The zircon crystals separated from the gabbro have a euhedral-subhedral shape and a loosely striped inner structure on cathodoluminescence (CL) images. A total of eight spots were analyzed by SHRIMP U-Pb dating and the Th/U ratios at all the analyzed spots are very high, mostly >0.8. The apparent ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of all the eight analyses are consistent within errors, with a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 503.7 ± 6.4 Ma. The results are significantly different from the SHRIMP U-Pb zircon age data of diabase dike samples collected from the same site reported by previous researchers. Based on the available research results obtained in the area, the authors conclude that: (1) gabbro and diabase in the Aoyougou area were formed in the early Paleozoic rather than the early Mesoproterozoic; and (2) the zircons separated from diabase are usually very complex in origin and much caution is needed in the interpretation of their age data, but, on the contrary, zircons from gabbro are generally of simple and unequivocal origin and consequently their U-Pb ages are more reliable with unambiguous geological significance.

Key words: North Qilian Mountains; Aoyougou; gabbro; zircon SHRIMP U-Pb age

收稿日期:2007-02-06;修订日期:2007-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40032010-C、40373032)及国土资源调查项目(编号:200313000060、1212010560801-04)成果。

作者简介:相振群(1977-),男,助理研究员,从事前寒武纪地质与同位素地质年代学研究。E-mail:tjxzhengqun@cgs.gov.cn

北祁连缝合带北濒阿拉善-龙首山地块,南接中祁连-全吉地块,西端被阿尔金南缘走滑断裂所截,主体自西往东沿走廊南山、托赖山、大通北山、大坂山、白银等地展布。缝合带总体走向北西,带内发育了多条蛇绿岩带^[1-7],国内最早报道的蛇绿岩就位于该区^[1]。北祁连缝合带是中国研究程度最高的蛇绿混杂岩带之一,长期以来,许多中外学者就区内的地层、岩浆岩、蛇绿岩、蓝片岩、榴辉岩、大地构造等问题进行了大量的专题研究,硕果累累,认识颇丰,其中对蛇绿岩的研究尤为突出,因此有人将其称为中国大陆板块构造研究的摇篮^[7]。多数学者认为带内的蛇绿岩主要是晚寒武世—早奥陶世形成的^[2,5,8],但对于熬油沟蛇绿岩(亦称朱龙关蛇绿岩)的形成时代则出现较大争议,肖序常等^[2]根据灰岩中的藻灰结核,认定其时代为震旦纪,冯益民等^[9]根据区域对比认为是早—中奥陶世,毛景文等^[9-10]、张招崇等^[11-15]根据辉绿岩锆石U-Pb测年结果认为熬油沟蛇绿岩形成于中元古代早期,徐晓春等^[16]也曾在北大河托赖峡谷采得初始岛弧带上的枕状细碧岩,利用Sm-Nd等时线测得年龄值为 $1770\text{ Ma} \pm 333\text{ Ma}$ 。

有研究认为,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,而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的形成时代^[7]。近些年来,随着锆石阴极发光照相、锆石内部包裹体激光拉曼探针分析等技术的应用,在锆石成因研究领域取得了较大的进展,这使得所得到的锆石U-Pb年龄的地质解释更加科学和可靠^[18]。本文报道熬油沟辉长岩的最新测年结果,重新厘定熬油沟蛇绿岩的时代。

1 地质背景

熬油沟位于北祁连造山带西段(图1),托赖南山北坡,著名的玉石沟蛇绿岩所在地的西北侧,镜铁山矿区东南,行政区划上属于甘肃省肃南县祁青乡。如剖面(图2)所示,熬油沟内的岩石组合为超镁铁岩、辉长岩、辉绿岩、基性火山熔岩(玄武岩)、硅质岩、白云质大理岩、白云质粒屑灰岩和竹叶状灰岩等,基性火山熔岩中有大量的杏仁体和气孔构造。笔者对该岩石组合底部的辉长岩开展了年代学研究工作,采

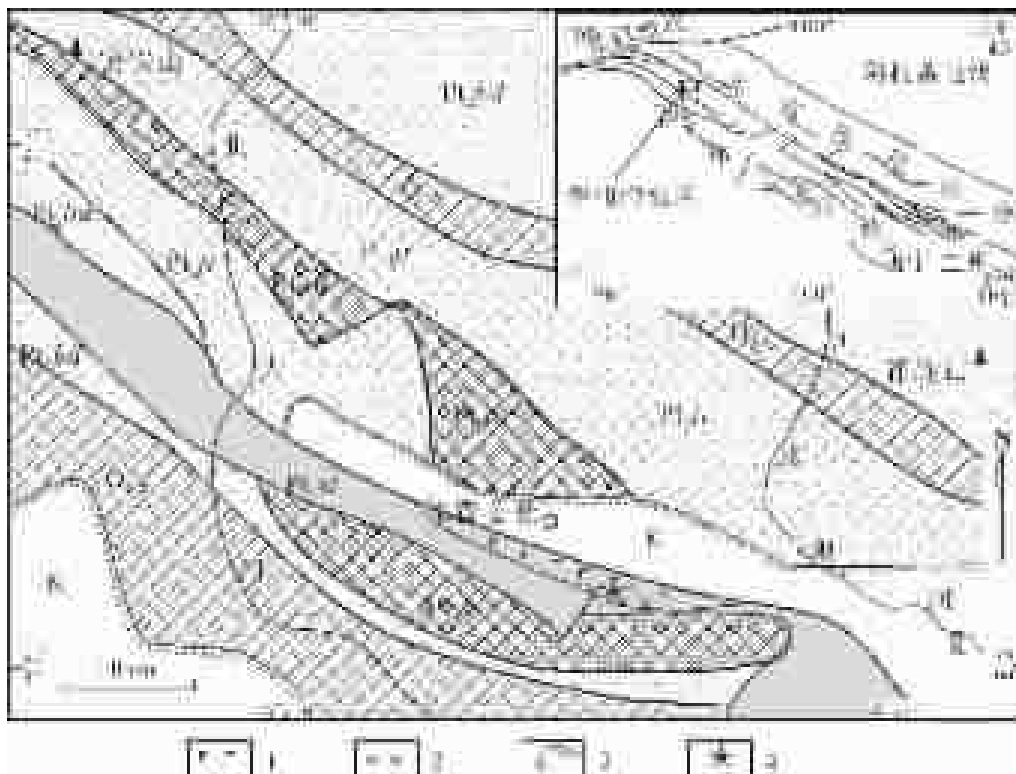


图1 熬油沟地区地质略图(据甘肃省区域地质志(1989)修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the Aoyoungou area

Pt₂bd—北大河群;Pt₂zl—朱龙关群;Pt₂jt—镜铁山群;Pt₂dl—大柳沟群;O₁₋₂—奥陶系;K—白垩系;1—基性火山岩;2—基性侵入岩;3—不整合界面;4—采样位置

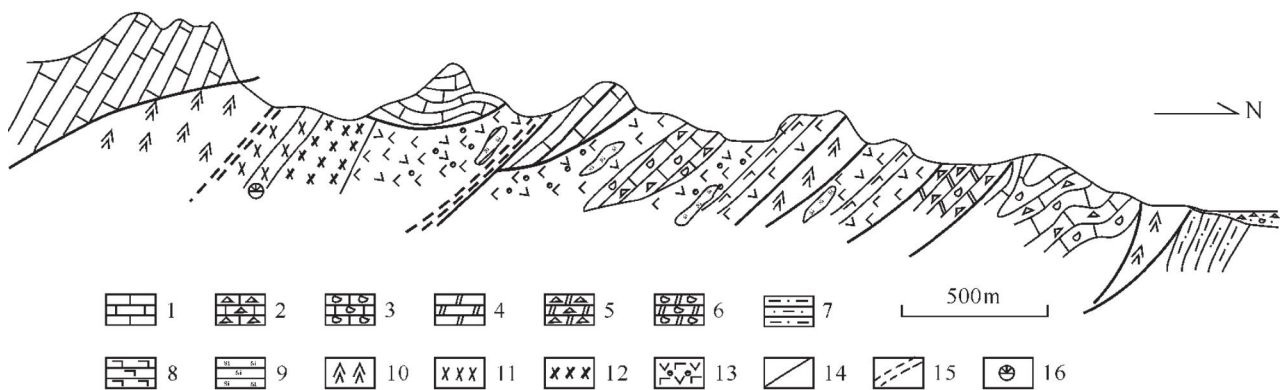


图2 熬油沟地层剖面示意图

Fig. 2 Stratigraphic section of the Aoyougou area

1—灰岩;2—角砾状灰岩;3—竹叶状灰岩;4—白云岩;5—角砾状白云岩;6—竹叶状白云岩;7—泥砂岩;8—碧玉岩;9—硅质岩;
10—超镁铁岩;11—辉长岩;12—辉绿岩;13—含气孔杏仁体的基性火山熔岩;14—断层;15—韧性剪切带;16—辉长岩采样点

样位置如图1、图2所示,经纬度坐标为北纬 $39^{\circ}03'52''$ 、东经 $98^{\circ}12'50''$ 。采样点所见为橄榄岩+辉长岩+辉绿岩组合,橄榄岩已经强烈蛇纹石化;辉长岩为中细粒块层状,宽约25 m。

2 样品特征和分析方法

辉长岩呈灰黑色,变余中细粒辉长结构,块状构造,主要矿物组成为斜长石(55%~60%)、单斜辉石(40%~45%),有少量磁铁矿。斜长石有弱的绢云母化,辉石周围有阳起石化蚀变,有些辉石颗粒中间有斜长石包裹体,形成含长结构。

锆石分选工作在河北省区域地质调查研究院实验室进行,常规碎样120目后手工淘洗,锆石含量较多,20 kg样品选出锆石大于1000粒。所分选出来的锆石呈浅黄棕色短柱状或不规则状,长度大都在100 μm 以上。

锆石制靶工作在北京离子探针中心进行,阴极荧光(CL)照相在北京大学物理系扫描电镜室完成。锆石U-Pb测年在北京离子探针中心利用高灵敏度高分辨率的离子探针(SHRIMP II)完成,详细分析流程及原理参见Compston^[19]、Williams^[20]、宋彪^[21]等人的文章。测试过程中采用标样锆石TEM(参考年龄为417 Ma)进行同位素分馏校正,使用标准锆石SL13(参考年龄为572 Ma,U含量为 238×10^{-6})标定所测锆石的U、Th、Pb的含量。应用SQUID 1.0和Isoplot 3.0程序进行数据处理,采用锆石样品中实际测得的 ^{204}Pb 进行普通铅校正。

3 结果与讨论

锆石阴极发光图像较灰暗,显示内部生长环带不发育或不规则分带或呈比较宽的分带状(图3),Th、U含量和Th/U比值均较高,分别为Th:96~1160 $\mu\text{g/g}$,U:224~829 $\mu\text{g/g}$,Th/U比值为0.45~1.93,显示出典型的基性岩浆锆石特征。

SHRIMP锆石U-Pb测年共测得8个点(表1),测点虽然较少,但非常集中,且都落在谐和线上, ^{204}Pb 校正后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄都集中在500 Ma左右,没有其他时代的任何年龄信息,每个点的Th/U都非常高,只有1个点为0.45,其余都在0.8以上,有的甚至达到1.8~1.9。8个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $503.7 \text{ Ma} \pm 6.4 \text{ Ma}$ (MSWD=1.00)(图4)。

毛景文等^[9]、张招崇等^[15]曾对熬油沟辉绿岩墙中的锆石开展了热电离质谱计逐级蒸发沉积法和离子探针法(SHRIMP)测年工作:①蒸发法测试得到3个单颗粒锆石U-Pb年龄,分别为 $1840 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$ 、 $1783 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$ 、 $1784 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$ 。②SHRIMP法数据共有16个测点,其中1个点为 $2561 \text{ Ma} \pm 39 \text{ Ma}$,Th/U比值为1;10个点集中在1664~1955 Ma之间,其加权平均年龄值为 $1777 \text{ Ma} \pm 28 \text{ Ma}$,Th/U比值大都在0.22~0.77之间,有1个点为0.08;3个点集中在1433~1498 Ma之间,加权平均年龄值为 $1466 \text{ Ma} \pm 26 \text{ Ma}$,Th/U比值为0.35~0.75;还有2个点为 $514 \text{ Ma} \pm 9 \text{ Ma}$ 、 $501 \text{ Ma} \pm 8 \text{ Ma}$,加权平均为 $507 \text{ Ma} \pm 9 \text{ Ma}$,Th/U为0.76~1.05。原作者把 $2561 \text{ Ma} \pm 39 \text{ Ma}$ 解释为捕获的本



图3 熬油沟辉长岩锆石CL图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Aoyougou gabbro

表1 熬油沟辉长岩锆石SHRIMP U-Pb同位素年龄测定结果

Table 1 SHRIMP U-Pb zircon age data of gabbro in Aoyougou

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	w _B /μg·g ⁻¹			w(Th) w(U)	表面年龄/Ma		同位素原子比率					误差 相关	
		²⁰⁶ Pb*	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U		±%
1.1	0.52	19.4	286	199	0.72	488±11	452±69	0.0560	3.1	0.607	3.9	0.0787	2.3	0.595
2.1	0.23	33.6	479	833	1.80	505.8±8.3	518±36	0.05768	1.7	0.649	2.4	0.0816	1.7	0.720
3.1	0.30	36.1	508	920	1.87	510.0±8.4	550±37	0.0585	1.7	0.664	2.4	0.0823	1.7	0.706
4.1	0.07	45.1	646	1160	1.86	503.2±8.2	498±28	0.05716	1.3	0.640	2.1	0.0812	1.7	0.799
5.1	0.26	40.0	562	1049	1.93	511.3±9.3	497±38	0.05713	1.7	0.650	2.6	0.0825	1.9	0.741
6.1	0.26	19.1	283	220	0.80	486.5±9.9	617±43	0.0604	2.0	0.653	2.9	0.0784	2.1	0.726
7.1	0.19	58.2	829	807	1.01	505.6±8.3	577±36	0.05928	1.7	0.667	2.4	0.0816	1.7	0.717
8.1	0.55	15.9	224	96	0.45	511.2±9.8	623±86	0.0606	4.0	0.689	4.5	0.0825	2.0	0.446

注:同位素比值误差为1σ绝对误差,年龄误差为1σ相对误差;²⁰⁶Pb_c和Pb*分别指示²⁰⁶Pb中属于普通²⁰⁶Pb和放射成因Pb,用²⁰⁴Pb进行了普通Pb校正

区未出露的太古宙基底锆石的年龄,把1777 Ma±28 Ma解释为熬油沟蛇绿岩的形成年龄,把1466 Ma±26 Ma、507 Ma±9 Ma解释为2次变质事件的年龄。据此,他们认为北祁连山西段熬油沟蛇绿岩形成于中元古代早期,即1777 Ma左右,为当时(2001年)报道的中国最古老的蛇绿岩,这引起了国内外地质界广泛的关注。笔者认为,他们的测试数据准确可信,但他们对数据的地质解释值得商榷。从他们的数据资料来看,2个500 Ma左右的锆石数据点Th/U比值非常高,分别为0.763、1.049,也没有配以相应的锆石

CL图像,笔者对把507 Ma±9 Ma解释为变质事件的年龄表示怀疑。

辉绿岩墙是侵入体,岩浆在侵位时侵入到较冷的围岩中,冷凝速度较快,不易结晶形成原生锆石,在岩浆侵位过程中还经常捕获围岩中的锆石,如果围岩为富含锆石的岩石(如花岗岩、碎屑岩等)则会使得辉绿岩中的锆石数量增多,成因类型复杂。因此,从辉绿岩墙中分选得到的锆石往往绝大多数是捕获锆石,原生锆石很少甚至没有,锆石年龄测试结果会很复杂。这种现象在近几年的研究工作中屡有

报道^[22-24],这种复杂性使得对测试结果的地质解释出现很大的争议。因此,对于辉绿岩的锆石测年结果,一定要在利用显微镜、阴极发光、背散射图像分析等手段鉴别锆石成因的基础上进行科学的判断^[24],而不能简单地以多数年龄数据的平均值来确定基性岩墙的侵位时代。

辉长岩是在岩浆房中形成的堆晶岩。岩浆房中的岩浆冷却速度较慢,在岩浆结晶早期,岩浆相对贫硅,可能生成的是斜锆石;在岩浆结晶晚期,岩浆硅不饱和程度降低,往往可以生成粒度相对较大、结构比较单一的岩浆锆石。因此,经常可以从辉长岩中分选出大量类型单一的岩浆结晶锆石,甚至斜锆石^[25-26],其锆石阴极发光、背散射等图像的特征单一,年龄测试结果比较一致,是进行基性岩同位素年代学研究的理想对象。

另外,对本区及邻区前寒武纪基底的研究表明^[27-32],北祁连造山带周边的地块存在丰富的新太古代—新元古代的年龄信息,甚至在敦煌地块发现年龄大于3.6 Ga的继承性锆石^[29-30]。其中北大河群白云母石英片岩碎屑锆石的年龄谱^[27]显示了很大的年龄分布范围,从3035~863 Ma(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄)都有分布,可见该群碎屑锆石蚀源区的复杂性,在所测定的26个数据点中包括1个3035 Ma的数据点、1个2810 Ma的数据点、3个2620 Ma左右的数据点、1个2457 Ma的数据点、7个1700~1400 Ma的数据点、1个863 Ma的数据点,另外12个点具有比较一致的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄,其中6个点拟合的一条不一致线与谐和线的上交点年龄为1806 Ma±18 Ma(2σ)。除²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄为863 Ma的锆石具有非常低的Th/U比值(0.06)外,其余的92%以上的锆石Th/U比值大于0.2,有的甚至大于1.0。可见,在张招崇等^[15]所获得的辉绿岩锆石SHRIMP U-Pb年龄信息中,除507 Ma±9 Ma这组年龄外,其余锆石年龄与笔者所获得的北大河群碎屑锆石年龄具有一致性,也就是说可能除了年龄为507 Ma±9 Ma锆石外,辉绿岩中其他锆石可能都是捕获锆石。

综合上述资料分析,笔者认为张招崇等^[15]对熬油沟辉绿岩墙的测试结果中2561 Ma±39 Ma、1664~1955 Ma、1433~1498 Ma 3组年龄可能都是捕获锆石的年龄,这些捕获锆石可能即来源于北大河群碎屑岩。本文辉长岩的年龄值503.7 Ma±6.4 Ma与张招崇等^[15]所测得的辉绿岩墙的“第二期变质年龄”

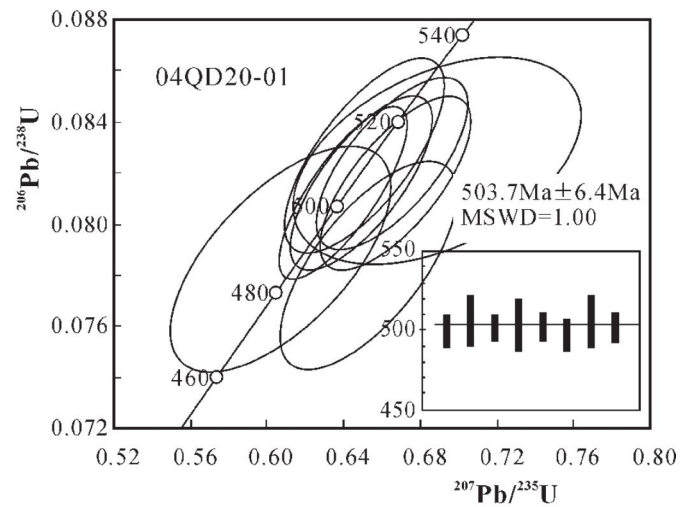


图4 熬油沟辉长岩锆石SHRIMP U-Pb谐和图

Fig. 4 Zircon SHRIMP U-Pb concordia diagram of gabbro in Aoyougou

507 Ma±9 Ma在误差范围内完全一致,笔者认为这应该代表辉长岩和辉绿岩形成的时间,亦是熬油沟蛇绿岩的形成时间。

顺便指出,根据辉绿岩中富含捕获锆石、朱龙关群熬油沟剖面岩石组合中富含碳酸盐岩、玄武岩气孔和杏仁构造十分发育等特征分析,熬油沟朱龙关群不是典型的大洋蛇绿混杂岩,可能发育于大陆弧(后)环境。由于本文着重讨论的是锆石U-Pb年龄的意义和相关岩石的测年过程中应该注意的问题,所以不对这一问题进行展开讨论。

4 结论

(1)北祁连缝合带是中国研究程度最高的蛇绿混杂岩带,带内发育经典的标志汇聚板块边界的蛇绿岩、蓝片岩、榴辉岩等。越来越多的资料显示,北祁连蛇绿岩的形成时代应该是晚寒武世—中奥陶世。表征北祁连洋形成的其他海相火山岩的形成年龄也大都集中在480~550 Ma之间^[17,30,32-34],其中,玉石沟蛇绿岩中堆晶辉长岩的年龄为550 Ma^[17],玉石沟—川刺沟基性火山熔岩的年龄为521~495 Ma^[33],清水沟北弧火山岩的年龄为466~481 Ma^[34],熬油沟地区的辉长辉绿岩墙形成于早古生代(503.7~507 Ma),现有资料表明,北祁连存在500 Ma左右的古生代早期的大洋,并不存在中元古代早期的洋壳物质。

(2)在开展辉绿岩墙锆石U-Pb同位素年代学研究时,首先要利用阴极发光、背散射图像等技术手段

进行锆石的成因判别,正确地区分基性岩浆结晶形成的原生锆石和从围岩中捕获而来的继承性锆石是非常重要的,是正确解释测年结果的关键;而选取同源深成的辉长岩中的锆石作为测年对象往往可以得到更加可靠和地质意义明确的年龄数据。

致谢:北京离子探针中心刘敦一教授和张玉海、张巧大高级工程师,河北省区域地质调查研究院实验室李林庆主任,北京大学物理系扫描电镜室陈莉博士等给予诸多帮助,在成文过程中与陈志宏研究员进行了有益的讨论,审稿人仔细阅读文稿并提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1]肖序常,陈国铭,朱志直.关于北祁连古板块构造的几点认识[J].地质科技,1974,(3):73-78.
- [2]肖序常,陈国铭,朱志直.祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J].地质学报,1978,54(1):287-295.
- [3]吴汉泉.东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩[J].地质学报,1980,(3):195-207.
- [4]冯益民,何世平.北祁连山蛇绿岩地质和地球化学研究[J].岩石学报,1995,11(增刊):125-146.
- [5]冯益民,何世平.蛇绿岩与造山作用——北祁连造山带例析[C]//张旗.蛇绿岩与地球动力学研究.北京:地质出版社,1996:134-138.
- [6]张旗,孙晓猛,周德进,等.北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J].地球科学进展,1997,12:366-393.
- [7]张旗,周国庆.中国蛇绿岩[M].北京:科学出版社,2001:1-120.
- [8]夏林圻,夏祖春,任有祥,等.祁连秦岭山系海相火山岩[M].武汉:中国地质大学出版社,1991:3-289.
- [9]毛景文,张招崇,杨建民,等.北祁连西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及其地质意义[J].科学通报,1997,42(13):1414-1417.
- [10]毛景文,张招崇,杨建民,等.北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M].北京:地质出版社,2003:1-437.
- [11]张招崇,毛景文,杨建民,等.北祁连熬油沟蛇绿岩岩石成因的地球化学研究[J].地质学报,1998,72(1):42-51.
- [12]张招崇,毛景文,左国朝,等.北祁连山西段早元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造背景[J].矿物岩石,1998,18(4):22-30.
- [13]张招崇,毛景文,左国朝,等.北祁连山西段中元古代岩浆作用与构造演化[C]//北京大学国际地质科学讨论会论文集.北京:地震出版社,1998:605-614.
- [14]张招崇,毛景文,左国朝,等.北祁连山西段熬油沟蛇绿岩岩石成因的矿物学研究[J].矿物学报,1999,19(1):77-82.
- [15]张招崇,周美付,Paul T Robinson,等.北祁连山西段熬油沟蛇绿岩SHRIMP分析结果及其地质意义[J].岩石学报,2001,17(2):222-226.
- [16]徐晓春,岳书仓,刘因,等.甘肃走廊南山朱龙关群的时代及其火山岩的岩石化学特征[J].安徽地质,1996,6(4):1-6.
- [17]史仁灯,杨经绥,吴才来,等.北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的SHRIMP年龄证据[J].地质学报,2004,78(5):650-658.
- [18]吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16):1589-1604.
- [19]Compston W, Williams I S, Krivshink J L, et al. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale [J]. J. Geol. Soc. Lond., 1992, 149: 171-184.
- [20]Williams I S, Claesson S. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high-grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1987, 97: 205-217.
- [21]宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石SHRIMP样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J].地质论评,2002,5(增刊):26-30.
- [22]王彦斌,刘敦一,蒙义峰,等.安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石SHRIMP年代学及其意义[J].中国地质,2004,31(2):169-173.
- [23]杨进辉,吴福元,张艳斌,等.辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石[J].科学通报,2004,49(18):1878-1882.
- [24]侯贵廷,刘玉琳,李江海,等.关于基性岩墙群的U-Pb SHRIMP地质年代学的探讨——以鲁西莱芜辉绿岩岩墙为例[J].岩石矿物学杂志,2005,24(3):179-185.
- [25]李惠民,相振群,李怀坤,等.秦岭富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石U-Pb同位素年龄的差异及其地质意义[J].地球化学,2005,26(增刊):57-60.
- [26]李惠民,陈志宏,相振群,等.秦岭造山带商南—西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石U-Pb同位素年龄的差异[J].地质通报,2006,25(6):1-7.
- [27]李怀坤,陆松年,相振群,等.北祁连西段北大河岩群碎屑锆石SHRIMP U-Pb年代学研究[J].地质论评,2007,53(1):132-140.
- [28]梅华林,于海峰,陆松年,等.甘肃敦煌太古宙英云闪长岩:单颗粒锆石U-Pb年龄和Nd同位素[J].前寒武纪研究进展,1998,21(2):41-45.
- [29]李惠民,陆松年,郑健康,等.阿尔金山东端花岗片麻岩中3.6Ga锆石的地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):259-262.
- [30]陆松年.青藏高原北部前寒武纪地质初探[M].北京:地质出版社,2002:1-125.
- [31]陆松年,于海峰,李怀坤,等.中国前寒武纪重大地质问题研究——中国西部前寒武纪重大地质事件群及其全球构造意义[M].北京:地质出版社,2006:1-206.
- [32]陆松年,于海峰,李怀坤,等.“中央造山带”早古生代缝合带及其构造分区概述[J].地质通报,2006,25(12):1368-1379.
- [33]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,1996:5-146.
- [34]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].岩石矿物学杂志,1997,(2):112-119.