

# 中祁连苏里地区新元古代辉绿岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

张金明, 才航加, 陈光庭, 田成秀, 雷晓清

(青海省地质调查院, 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012)

**摘要:** 中祁连西段苏里地区有大量北东和近东西向延伸的辉绿岩、辉长岩呈岩墙状侵入到元古宙地质体中。基性岩墙的  $\text{SiO}_2$  含量为 46.77% ~ 52.37%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.82% ~ 15.86%,  $\text{TiO}_2$  含量为 1.16% ~ 3.14%,  $\text{MgO}$  含量为 3.84% ~ 7.98%,  $\text{FeO}^T$  含量为 10.42% ~ 15.53%, 以贫  $\text{K}_2\text{O}$  (0.10% ~ 1.60%)、 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$  为特征, 里特曼指数  $\sigma = 0.67 \sim 2.96$ , 岩石主量元素地球化学成分与大洋拉斑玄武岩一致; 全岩稀土元素总量较低 ( $51.28 \times 10^{-6} \sim 165.11 \times 10^{-6}$ ), 轻重稀土元素之比为 2.67 ~ 4.90,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 2.04 ~ 5.03, 属轻稀土元素富集型,  $\delta\text{Eu} = 0.93 \sim 1.12$ , 无明显的 Eu 异常; 富集 Rb、Ba、Th、U, 亏损 Nb 和 K, 大离子亲石元素丰度变化范围相对较宽, 高场强元素富集程度不强, 微量元素蛛网图上具有左侧隆起、右侧相对平坦的分布型式。基性岩墙 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $819.5 \pm 5.2$  Ma, 形成时代与全球性 Rodinia 超级大陆裂解时代高度一致。岩石地球化学分析结果显示岩浆起源于亏损地幔源区, 是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物, 岩浆形成于陆内裂谷环境, 表明其可能为 Rodinia 超级大陆裂解的产物。

**关键词:** 基性岩墙群; 新元古代; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; Rodinia 超级大陆; 中祁连; 苏里

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>4; P597<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)06-0769-11

## The zircon LA-ICP-MS U-Pb age of the Late Proterozoic diabase dyke in the Suli area of middle Qilian and its geological significance

ZHANG Jin-ming, CAI Hang-jia, CHEN Guang-ting, TIAN Cheng-xiu and LEI Xiao-qing

(Qinghai Institute of Geological Survey/Qinghai Provincial Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources of Northern Tibetan Plateau, Xining 810012, China)

**Abstract:** Lots of diabase and gabbro in the Suli area of the west segment of middle Qilian invaded into the Proterozoic geological bodies in the form of dykes. The previous studies of the basic magmatic rocks in this area were relatively insufficient and hence there are rare relevant reports. The content of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  in the basic dyke are 46.77% ~ 52.37%, 12.82% ~ 15.86% and 1.16% ~ 3.14%, respectively, characterized by high  $\text{MgO}$  (3.84% ~ 7.98%) and  $\text{FeO}^T$  (10.42% ~ 15.53%), and poor  $\text{K}_2\text{O}$  (0.10% ~ 1.60%) and  $\text{P}_2\text{O}_5$  with  $\text{Na}_2\text{O}$  higher than  $\text{K}_2\text{O}$ . The total rare earth content of the whole rock is low ( $51.28 \times 10^{-6} \sim 165.11 \times 10^{-6}$ ), the ratio of light rare earth to heavy rare earth is between 2.67 and 4.90, and the  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  ratio is between 2.04 and 5.03. The rocks are of light rare earth enrichment type,  $\text{Eu} = 0.93 \sim 1.12$ , without obvious Eu anomaly. They are characterized by enrichment of Rb, Ba, Th and U and depletion of Nb and K; in addition, large ionic lithophile element abundance range is relatively wide, high field strength element enrichment degree is not strong, and trace element ratio on the cobweb diagram exhibits the pattern of an uplift on the left and relatively flat on the right, with

收稿日期: 2020-05-11; 接受日期: 2020-08-12; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 青海学者专项(QHS201802); 国家自然科学基金资助项目(41762006)

作者简介: 张金明(1982-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查相关工作, E-mail: 271883992@qq.com。

the geochemical performance exhibiting the obvious characteristics of intraplate basalt. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age is  $819.5 \pm 5.2$  Ma, and its formation age is older than that of the global Rodinia supercontinent. The results of rock geochemical analysis show that the magma originated from depleted mantle source area, probably being the product of partial melting of spinel mantle peridotite. The magma was formed in an intracontinental rift environment, indicating that it may have been the product of the breakup of Rodinia supercontinent.

**Key words:** basic rock dyke; Late Proterozoic; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Rodinia supercontinent; Middle Qilian; Suli

**Fund support:** Program for Qinghai Scholars (QHS201802); National Natural Science Foundation of China (41762006)

有关地球上超大陆生长、演化和离散的历史,尤其是大陆块汇聚和离散对于地幔动力学、岩浆作用、成矿作用、地表过程和生命演化的影响,是地学界近年来颇受关注的重大科学问题之一(Moores, 1991; Hoffman, 1991; Zheng, 2003)。中国的华南陆块、塔里木陆块等前寒武纪的构造-岩浆事件研究结果表明,其响应了中元古代晚期至新元古代早、中期 Rodinia 超大陆的汇聚和裂解过程(Wang *et al.*, 2003; 郝杰等, 2004; Yang *et al.*, 2004)。秦岭地区已厘定出中元古代晚期陆内裂谷、中元古代末期洋盆打开、新元古代早期俯冲型花岗岩形成以及洋盆闭合的一个完整的洋陆转换过程(陆松年等, 2003)。祁连陆块因蕴含有丰富的古板块构造演化信息长期以来受到国内外众多学者的高度关注,其古构造演化方面也取得了一些成果,其内发育大量新元古代岩浆-变质事件,被认为是响应全球 Rodinia 超大陆汇聚事件的物质记录:陆块东段侵入到湟源群中的 S 型花岗岩( $917 \pm 12$  Ma),北山一带陆陆碰撞阶段形成的花岗岩( $880 \pm 31$  Ma),托勒、湟源、化隆、马衔山等地识别出的大量的弧岩浆性质花岗岩( $943 \sim 875$  Ma),乌北地体中解体出的  $830 \sim 810$  Ma 花岗岩(于海峰等, 2000; 李向民等, 2006; 雍拥等, 2008; 高晓峰等, 2010; 李猛等, 2015; 王珩, 2016; 马建军等, 2018),这些均记录了祁连陆块响应全球 Rodinia 超大陆汇聚过程中长时间的后碰撞花岗岩岩浆作用历史。但陆块内缺少可靠的与新元古代裂解有关的构造-岩浆事件记录,截至目前,对祁连陆块是否记录了 Rodinia 超大陆的裂解过程以及对祁连陆块构造属性仍存在不同看法(董国安等, 2007; 王洪亮等, 2007)。本文对祁连西段苏里地区出露的辉绿岩进行了岩石地球化学、年代学的详细研究,欲对探讨祁连陆块是否响应 Rodinia 超大陆的裂解和探索祁连陆块元古宙构造演化提供重要的证据。

## 1 区域地质概况

祁连地区地理位置在中国中央山链的中心区域,大地构造位置位于华北陆块、华南陆块和塔里木陆块这 3 个主要的陆块之间。祁连地区在构造上是一个早古生代造山系,从北到南可划分为北祁连造山带、祁连陆块和柴北缘造山带这 3 个构造单元,其北部为阿拉善陆块,东部为华北陆块,南部为柴达木陆块,西部为塔里木陆块(图 1)(夏林圻等, 2016)。研究区位于祁连陆块西段。祁连陆块是一个具有古生代沉积岩系盖层和前寒武纪基底的叠瓦状逆冲带(Lu *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005)。陆块在中新元古代处于相对稳定的构造演化环境,研究区内中新元古代出露的地层有长城纪南白水河组、蓟县纪花儿地组和青白口纪龚岔群,主体为碎屑岩、碳酸盐岩组合,为一套绿片岩相为主的变质岩建造,原岩为一套稳定-次稳定型泥砂质-碳酸盐沉积组合,基本属层状有序的地层类型。晚寒武世六道沟组主体为一套由中性火山碎屑岩为主体夹火山熔岩的地层序列;早奥陶世吾力沟组以玄武岩、玄武安山岩、火山碎屑岩为主夹少量碎屑岩。晚古生代-中生代盖层沉积,下部与中新元古代地层呈角度不整合接触,至下而上由早石炭世臭牛沟组、晚石炭世羊虎沟组、二叠纪巴音河群勒门沟组、草地沟组、哈吉尔组、忠什公组、早中三叠世郡子河群下环仓组、江河组、大加连组、切尔玛沟组、晚三叠世默勒群阿塔寺组组成,总体为一套滨浅海陆棚-海陆交互碳酸盐岩、碎屑岩和含煤碎屑岩建造。

区内断裂构造发育,以北西向断裂为主构成区内的基本构造格架,控制本区岩浆活动、沉积建造形成。区内除局部有少量加里东期和燕山期的中酸性侵入岩呈岩株状分布外,还发现大量辉绿岩墙。

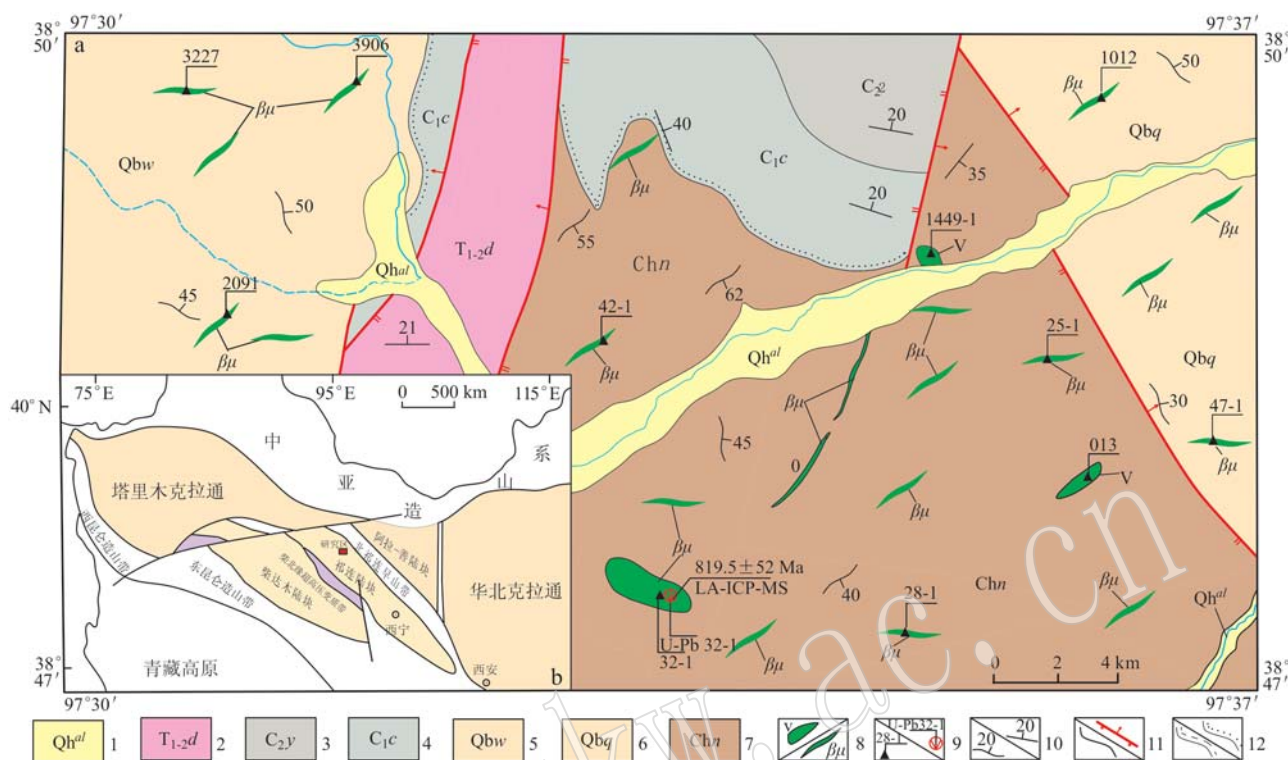


图1 祁连地块大地构造位置略图(a)及苏里地区地质图(b)

Fig. 1 Schematic map of tectonic location of Qilian block(a) and geological map of Suli area(b)

1—全新世冲洪积; 2—早中二叠世大加连组; 3—晚石炭世羊虎沟组; 4—早石炭世臭牛沟组; 5—青白口纪五个山组; 6—青白口纪其它大坂组; 7—长城纪南白水河组; 8—辉长岩/辉绿岩; 9—岩石地球化学采样点/同位素采样点; 10—片理产状/层理产状; 11—整合界线/断层界线; 12—平行不整合界线/角度不整合界线

1—Holocene alluvial-pluvial; 2—Early-Middle Permian Dajialian Formation; 3—Late Carboniferous Yanghugou Formation; 4—Early Carboniferous Chouniugou Formation; 5—Qingbaikou Wugeshan Formation; 6—Qingbaikou Qitadaban Formation; 7—Changcheng Nanbaishuihe Formation; 8—diabase/gabbro block; 9—sampling location and serial number; 10—attitude of schistosity/bedding; 11—conformity/fault boundary; 12—parallel unconformity/angular unconformity boundary

## 2 地质及岩石学特征

### 2.1 地质特征

苏里地区辉绿岩墙广泛分布, 岩石类型为辉绿岩、辉长岩, 以岩墙、岩脉形式产出, 一般宽约在 2 ~ 50 m 之间, 长 20 ~ 3 000 m, 其走向主要以北东向和近东西向为主, 近南北向次之。该套基性岩穿插侵入于长城纪南白水河组、蓟县纪花儿地组及青白口纪其它大坂组、五个山组中(图 1)。基性岩与围岩接触界线弯曲, 围岩中多见基性岩脉(枝)的穿插(图 2a), 局部在基性岩中发育板岩捕虏体, 接触部位捕虏体较为发育且向岩体内部数量有减少趋势。岩石受变质变形作用影响, 局部呈板状碎石出露, 层理面可见柱状矿物的定向排列, 岩石普遍具褐铁矿化、绿

帘石化蚀变现象。

### 2.2 岩石学特征

苏里地区基性岩岩石类型较单一, 主要由辉绿岩组成, 局部出露少量辉长岩, 岩石蚀变较强, 后期构造叠加作用明显。其岩石学特征如下(图 2b):

蚀变辉绿岩: 变余(残余)辉绿结构, 块状构造。岩石后期蚀变作用较强, 原结构有所破坏而不太清晰。辉石含量 50% ~ 55%, 还含有斜长石(40% ~ 45%)和少量角闪石、白钛石(次生), 微量磷灰石、石英、不透明矿物, 次生蚀变产物有次闪石、钠黝帘石、绿泥石、黑云母等。辉石分布较为均匀, 以单斜辉石为主, 见少量斜方辉石, 多呈他形晶, 少部分以半自形晶存在, 蚀变作用较强, 见次闪石化、绿泥石化、黑云母化(少)蚀变, 取代原矿物形成次生蚀变矿物集合体。磷灰石多呈自形晶, 零星可见。

蚀变辉长岩: 细-中粒辉长结构, 块状构造, 斜长石含量 62%, 辉石为单斜辉石(30%), 另有部分钾长石(2%)、石英(1%~2%)、白钛石(1%~2%)和其他金属矿物(2%~3%), 部分矿物蚀变强烈。

斜长石主要为基性斜长石, 多呈半自形板、柱状, 粒径多为 0.5~5 mm, 多发生强烈钠黝帘石化蚀变, 分布广泛。其他金属矿物多呈他形粒状及其集合体, 分布不均匀。



图 2 苏里地区辉绿岩野外露头及辉绿岩、辉长岩镜下特征

Fig. 2 Field and microscopic features of the Suli gabbro

a—辉绿岩野外产出特征; b—辉绿岩显微照片(正交偏光); c—辉长岩显微照片(正交偏光); Qbq—青白口纪其它大坂组; βμ—辉绿岩; Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石

a—characteristics of diabase occurrence; b—microphotograph of diabase (crossed nicols); c—microphotograph of gabbro (crossed nicols);

Qbq—Qingbaikou Qitadaban Formation; βμ—diabase; Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene

### 3 样品及其测试方法

在苏里地区辉绿岩脉、辉长岩脉中分别采集主量、微量元素分析样品, 包括辉绿岩 10 件、辉长岩 2 件, 重 3 kg 左右。在苏里地区南侧出露规模较大的辉绿岩岩株中选择岩体出露较好、远离接触带边部、蚀变较弱的岩石采集同位素测年样 1 件(U-Pb32-1), 重约 50 kg。

主量、微量元素测试由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成。制样过程中利用切乔特公式计算粗碎、中碎、细碎 3 个过程中用四分法缩分至需要的质量并保留相应的副样。主量元素使用 Phillips 4400X 荧光光谱仪测试, FeO 用容量滴定法测定, 烧失量(LOI)通过对样品加热至 1 000℃后 1 h 称量其质量变化获得, 分析误差小于 0.9%; 微量分析采用

质谱法, 使用热电公司 X7 等离子质谱仪, 分析误差小于 7.8%; 稀土元素采用等离子直读光谱仪(JY38S)分析, 分析误差小于 4.8%。

同位素测年样碎样、锆石分选、制靶和阴极发光(CL)显微照相由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 采用常规方法进行粉碎, 锆石利用常规单矿物分选技术完成, 使用环氧树脂凝固成靶后对锆石进行阴极发光(CL)显微照相。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在天津地质矿产研究所同位素实验室完成, 仪器为 ThermoFisher 公司 Neptune 型质谱仪和美国 ESI 公司 UP193-FXArF 准分子激光器, 激光剥蚀系统为 New Wave UP213, 剥蚀光斑直径 25 μm, ICP-MS 为布鲁克 M90, 锆石标准以 91500 和 Plesovice 作为外标进行校正, 普通铅以 Andersen(2002)的 3D 坐标法进行校正计算, 锆石样品的 Pb、U 含量计算采用 Skits 和 ICPMSDataCal 软件处理, 采用 Iso-



plot3.2 等程序进行锆石的谐和曲线和加权平均年龄的计算。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 定年

测年锆石的 CL 图见图 3, 所测样点经校正后的有效数据共 15 个(表 1)。CL 图显示大部分锆石晶形完整具有浅色核部和暗色的边部, 且振荡环带并不明显, 有少量破片状或是磨圆的锆石的 CL 图特征多样, 其中 6 和 9 号锆石形态与其它锆石明显不同,

呈浑圆状不显示环带构造,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分别为  $1\,734 \pm 19\text{ Ma}$ 、 $2\,152 \pm 27\text{ Ma}$ , 比其它锆石年龄老很多, 可能为捕获锆石。其余 13 颗锆石多呈次棱角状-次圆状, 锆石颗粒较大, 一般锆石晶体长轴在  $75 \sim 150\text{ }\mu\text{m}$  之间, 长宽比值介于  $1.5 \sim 3$  之间, 大部分锆石内部振荡环带较清晰, 显示岩浆锆石的特点, 锆石 U-Pb 年龄比较集中, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为  $835 \sim 806\text{ Ma}$ , 加权平均年龄为  $819.5 \pm 5.2\text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.35$ ,  $N=13$ )(图 4), 因此该年龄应为岩浆侵位年龄, 表明辉绿岩岩墙的侵入时代为新元古代早期。

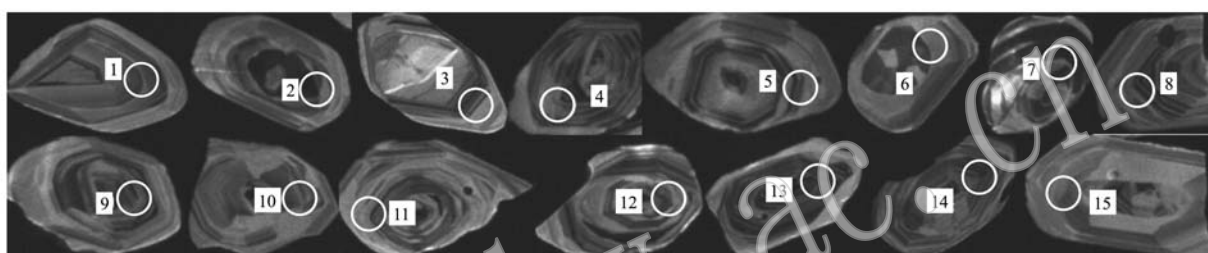


图 3 苏里地区辉绿岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of the diabase sample from Suli area

表 1 苏里地区辉绿岩(U-Pb32-1)U-Pb 同位素测年数据

Table 1 U-Pb isotope age determined results of the diabase sample (U-Pb32-1) from Suli area

样点	$w_B/10^{-6}$		同位素比值					年龄/Ma		
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	9	60	0.916 2	0.135 4	1.243 0	0.066 6	0.031 7	818	820	825
2	10	65	0.798 8	0.135 7	1.241 4	0.066 3	0.033 4	820	820	817
3	4	32	0.377 3	0.135 5	1.242 3	0.066 5	0.033 4	819	820	822
4	2	16	0.486 6	0.133 3	1.246 2	0.0678	0.025 3	806	822	863
5	8	54	0.848 6	0.135 2	1.245 5	0.066 8	0.034 2	817	821	832
6	101	289	0.702 7	0.308 7	5.183 7	0.121 8	0.082 3	1 734	1 850	1 983
7	60	338	1.586 0	0.135 6	1.243 6	0.066 5	0.036 9	819	820	823
8	6	42	0.324 2	0.135 5	1.244 7	0.066 6	0.028 2	819	821	826
9	16	36	0.835 6	0.396 3	8.280 7	0.151 6	0.087 7	2 152	2 262	2 364
10	2	17	0.474 2	0.138 2	1.272 8	0.066 8	0.028 7	835	834	831
11	4	29	0.304 4	0.135 1	1.254 2	0.067 3	0.032 7	817	825	848
12	26	194	0.390 1	0.135 2	1.243 6	0.066 7	0.031 1	818	821	828
13	6	42	0.750 9	0.135 8	1.243 3	0.066 4	0.029 8	821	820	818
14	7	47	0.740 4	0.135 8	1.240 4	0.066 3	0.029 2	821	819	815
15	15	119	0.174 6	0.136 3	1.239 9	0.066 0	0.029 9	823	819	806

### 4.2 岩石地球化学特征

#### 4.2.1 主量元素

新元古代基性侵入岩岩石化学特征见表 2。由表 2 可见, 岩石中  $\text{SiO}_2$  含量变化不大, 在  $46.77\% \sim 52.37\%$  之间, 平均值为  $48.73\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较低, 变

化在  $12.82\% \sim 15.86\%$  之间, 平均值为  $13.73\%$ ;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量在  $1.48\% \sim 3.33\%$ , 平均为  $2.37\%$ ;  $\text{TiO}_2$  分为两组, 大部分含量在  $1.16\% \sim 1.87\%$ , 少数含量较高介于  $2.02\% \sim 3.14\%$ ;  $\text{MgO}$  含量为  $3.84\% \sim 7.98\%$ ,  $\text{FeO}^T$  含量为  $10.42\% \sim 15.53\%$ , 贫  $\text{K}_2\text{O}$

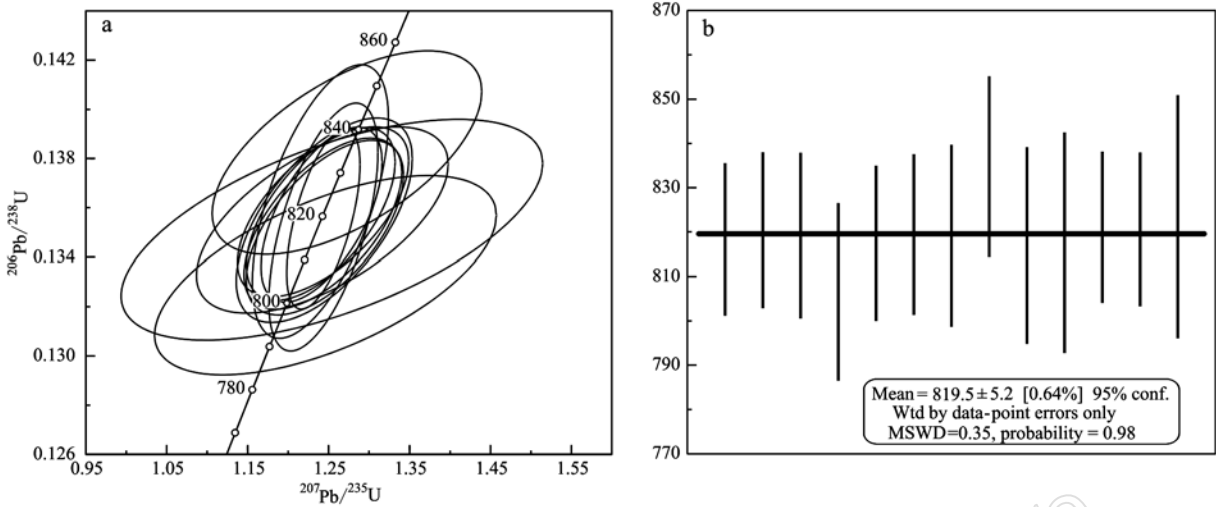


图 4 苏里辉绿岩锆石 U-Pb 年龄谱和图(a)和加权平均年龄图(b)  
Fig. 4 U-Pb concordia diagram (a) and weighted graph (b) of the diabase sample from Suli area

表 2 苏里基性岩主量元素( $w_B/\%$ )、微量元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果表

Table 2 Major element ( $w_B/\%$ ) and trace element ( $w_B/10^{-6}$ ) compositions of the diabase sample from Suli area

岩性	样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Σ	
辉绿岩	3 227	46.92	1.16	13.60	2.67	8.20	0.20	5.53	11.31	2.13	1.40	0.08	1.50	3.05	99.75	
	3 906	46.77	1.62	14.21	4.14	8.20	0.19	7.98	9.19	2.31	0.10	0.12	0.60	4.27	99.70	
	1 012	49.25	1.82	13.73	2.67	9.80	0.19	4.37	9.27	2.22	0.88	0.16	0.11	3.34	99.81	
	32-1	47.66	1.73	13.50	1.95	9.60	0.18	5.85	6.61	2.13	0.42	0.15	4.90	5.15	99.83	
	41-1	47.78	1.80	14.63	3.54	9.10	0.19	4.08	9.36	1.93	0.58	0.11	1.81	3.90	99.81	
	47-1	47.98	3.14	13.04	5.73	9.80	0.22	5.46	6.93	2.08	0.33	0.42	0.53	4.13	99.79	
	42-1	49.31	1.98	13.53	4.73	8.40	0.18	4.87	8.68	2.27	0.46	0.46	0.16	3.44	99.47	
	2 091	52.22	1.97	14.26	3.09	8.90	0.09	4.06	4.93	1.48	1.46	0.22	1.49	4.59	98.76	
	1449-1	52.37	2.02	13.24	3.38	9.65	0.21	4.74	7.83	2.20	1.60	0.21	0.15	2.24	99.84	
	25-1	49.19	1.87	12.82	6.70	6.43	0.17	3.84	5.99	2.45	0.41	0.18	2.77	3.99	99.81	
28-1	52.12	1.55	14.51	5.26	7.07	0.14	6.60	3.50	3.15	0.28	0.16	0.59	4.90	99.83		
辉长岩	2 244	50.49	2.09	12.96	3.91	9.02	0.20	5.15	7.81	3.33	0.94	0.18	0.60	3.07	99.75	
	013	45.10	2.66	15.86	4.82	5.60	0.09	7.09	4.61	3.18	0.93	0.24	4.90	4.74	99.82	
岩性	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
辉绿岩	3 227	7.02	15.90	2.30	10.21	2.82	1.12	3.27	0.56	3.31	0.69	1.88	0.28	1.67	0.24	17.11
	3 906	9.45	21.69	3.21	14.60	4.12	1.43	4.70	0.73	4.80	0.97	2.50	0.38	2.25	0.32	24.94
	1 012	11.31	25.13	3.62	16.47	4.53	1.54	5.14	0.90	5.35	1.01	2.95	0.41	2.58	0.38	27.99
	30-1	10.59	23.70	3.44	15.95	4.35	1.51	4.96	0.87	5.16	1.00	2.82	0.40	2.58	0.38	26.28
	41-1	10.07	22.18	3.03	13.71	3.67	1.33	3.97	0.67	4.15	0.84	2.41	0.35	2.20	0.33	20.73
	47-1	25.11	54.29	7.17	32.25	8.32	2.46	9.39	1.59	9.83	1.94	5.78	0.84	5.33	0.81	53.83
	42-1	9.30	21.64	3.22	15.53	4.52	1.58	5.09	0.85	5.24	0.98	2.80	0.40	2.55	0.36	26.80
	2 091	19.61	40.43	5.20	22.10	5.03	1.62	5.17	0.85	5.16	1.01	3.02	0.46	3.06	0.46	26.23
	1 449	22.14	44.27	5.78	24.10	5.73	1.67	5.93	0.96	5.72	1.22	3.25	0.50	3.16	0.48	30.35
	25-1	17.73	34.59	4.51	19.34	4.73	1.65	5.54	0.95	6.00	1.21	3.63	0.57	3.69	0.55	33.12
28-1	16.40	34.13	4.28	17.90	4.33	1.29	4.56	0.77	4.66	0.93	2.73	0.41	2.56	0.39	25.62	
辉长岩	2 244	13.82	30.65	4.26	18.72	4.92	1.66	5.47	0.91	5.64	1.16	3.05	0.47	2.81	0.43	29.00
	013	14.44	30.91	4.22	18.63	4.79	1.26	5.37	0.98	6.37	1.27	3.85	0.57	3.54	0.52	35.97
岩性	样号	Sr	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Zr	Hf	Cr	Ni	Co	V	U	Sc	Cu
辉绿岩	3 227	297.40	43.64	188.20	1.23	0.77	6.51	69.30	2.12	68.38	53.69	53.90	467.90	0.33	41.64	118.13
	3 906	483.90	4.63	125.10	1.17	0.83	8.17	96.70	3.18	85.82	31.80	37.39	236.30	0.38	42.48	204.86
	1 012	230.50	23.76	237.80	1.74	0.61	8.23	114.70	3.32	144.90	68.33	46.84	336.30	0.45	38.50	153.80
	30-1	179.50	23.30	165.30	1.95	0.66	9.03	108.80	3.06	109.60	60.47	44.91	331.40	0.43	34.86	152.40
	41-1	299.20	18.88	175.50	1.51	0.74	9.15	88.90	2.37	76.32	57.66	50.02	375.00	0.35	34.16	127.90
	47-1	227.80	8.45	213.70	3.91	1.22	16.54	228.90	3.97	136.10	32.82	46.75	425.70	0.97	46.07	37.05
	42-1	261.10	17.76	160.60	1.30	0.60	8.06	109.80	3.11	77.88	72.00	47.75	363.00	0.29	34.91	169.90
	2 091	138.30	51.88	400.80	6.45	1.03	13.04	174.50	4.51	25.14	22.62	42.87	285.60	1.73	34.07	42.92
	1 449	189.80	58.98	279.80	6.36	1.05	12.92	160.60	4.13	26.04	24.10	49.83	293.40	1.65	30.64	46.99
	25-1	159.60	21.45	343.10	2.73	0.92	12.61	130.40	3.41	29.56	30.44	36.60	374.70	0.90	29.42	85.84
28-1	175.50	9.71	139.90	5.96	1.27	11.99	131.60	3.52	41.49	34.11	47.49	291.00	1.42	31.89	54.29	
辉长岩	2 244	178.34	32.05	165.05	3.18	1.06	11.62	134.90	3.77	76.24	64.31	51.81	349.80	0.81	36.74	97.51
	013	93.20	38.33	497.40	3.44	1.36	11.19	187.50	4.42	6.64	19.06	33.30	400.80	1.01	30.22	42.55

(0.10% ~ 1.60%),  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ , 岩石里特曼指数  $\sigma = 0.67 \sim 2.96$ 。在  $\text{SiO}_2 - \text{Nb/Y}$  图解(图5)中, 样品投点多落在亚碱性玄武岩区域内; 在  $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  图解(图6)中样品投点均落在拉斑系列区域

内。综上所述, 该期基性岩整体具有拉斑玄武岩的特征。

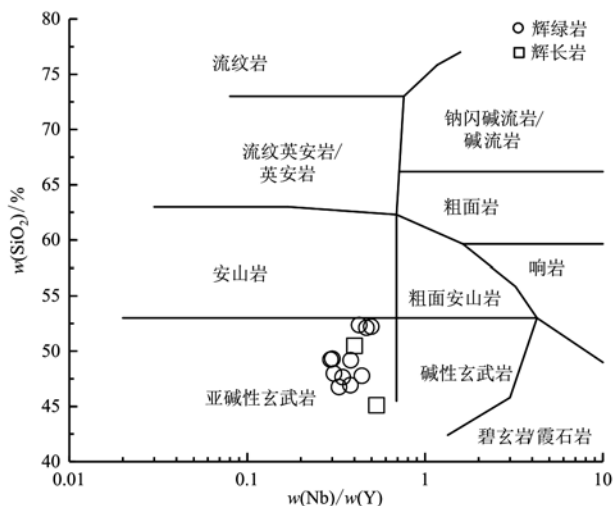


图5  $\text{SiO}_2 - \text{Nb/Y}$  图解(据 Winchester 和 Floyd, 1977)

Fig. 5  $\text{SiO}_2 - \text{Nb/Y}$  diagram (after Winchester and Floyd, 1977)

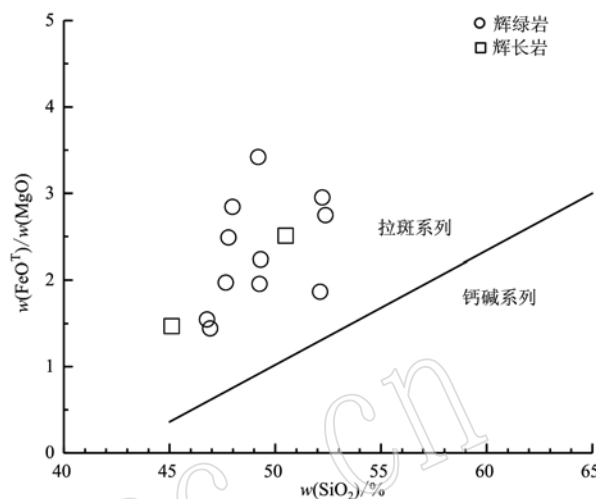


图6  $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  图解(据 Miyashiro, 1974)

Fig. 6  $\text{FeO}^T/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  diagram (after Miyashiro, 1974)

#### 4.2.2 微量元素

稀土元素含量见表1。岩石中稀土元素总量偏低, 在  $51.28 \times 10^{-6} \sim 165.11 \times 10^{-6}$  之间, 轻稀土元素含量在  $39.37 \times 10^{-6} \sim 129.60 \times 10^{-6}$  之间, 重稀土元素含量在  $11.91 \times 10^{-6} \sim 35.51 \times 10^{-6}$  之间, 轻重稀土元素之比为 3.05 ~ 4.90,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为

2.62 ~ 5.03, 均大于1,  $\delta\text{Eu} = 0.93 \sim 1.12$ , 显示 Eu 亏损不明显, 稀土元素配分曲线呈轻稀土元素相对富集型, 曲线右缓倾斜, Eu 具较弱的负异常, 表明岩浆在上升过程中受到了陆壳物质的轻度混染(图7a)。

在原始地幔标准化的微量元素配分图解(图7b)上, 富集 Rb、Ba、Th、U, 亏损 Nb、Ta 和 K, 大离子

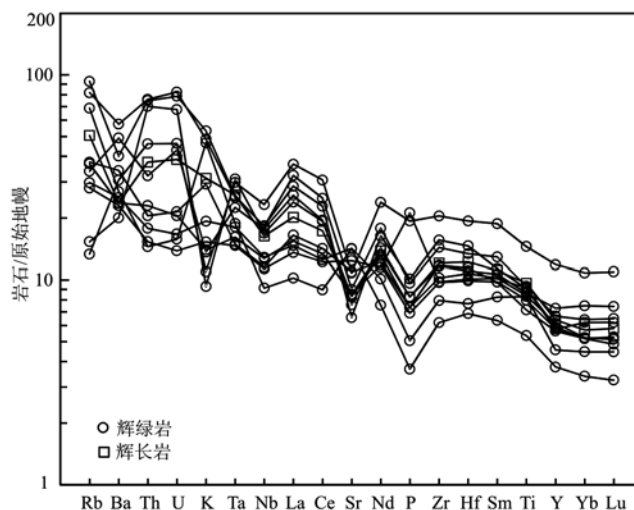
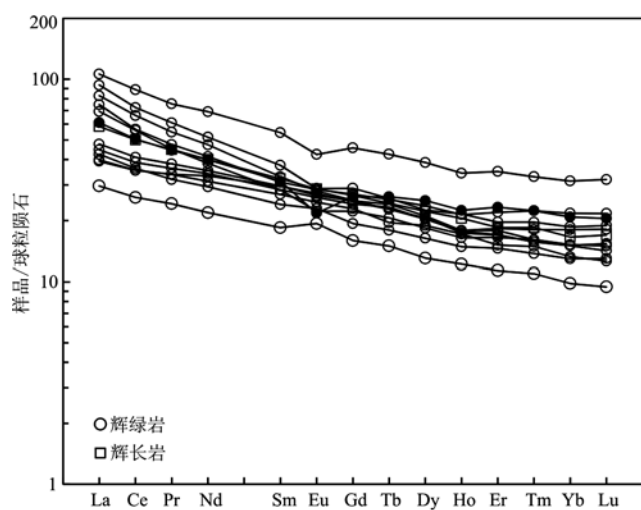


图7 苏里地区基性岩的稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化图解(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns (b) of the basic rock samples from Suli area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

亲石元素丰度变化范围相对较宽,高场强元素富集程度不强,微量元素比值蛛网图上具有左侧隆起、右侧相对平坦的分布型式。基性岩中 Nb、Ta 含量分别在  $6.51 \times 10^{-6} \sim 13.04 \times 10^{-6}$  (平均值为  $10.6 \times 10^{-6}$ ) 和  $0.60 \times 10^{-6} \sim 1.36 \times 10^{-6}$  (平均值为  $0.93 \times 10^{-6}$ ), 比典型岛弧玄武岩的亏损程度要弱,可能与地壳的混染或幔源区残留体中富 Nb、Ta 有关(高俊等, 1995); 岩石的 Th/Ta 值为 1.5~3.98 之间,与大陆拉张带或裂谷初期的玄武岩 Th/Ta 值(1.6~4)

相一致(汪云亮等, 2001), 表明苏里地区基性岩形成于大陆裂谷环境。

在 Meschede(1986)的 Nb-Zr-Y 三角图解(图 8a)中, 样点全部落入板内拉斑玄武岩区; 汪云亮等(2001)的 Th/Hf-Ta/Hf(图 8b)可以判别出基性岩的构造环境, 苏里辉绿岩样品点全部落入陆内裂谷玄武岩区域。从以上参数及图解等的分析可以初步判断, 本区新元古代基性岩形成于陆内裂谷环境。

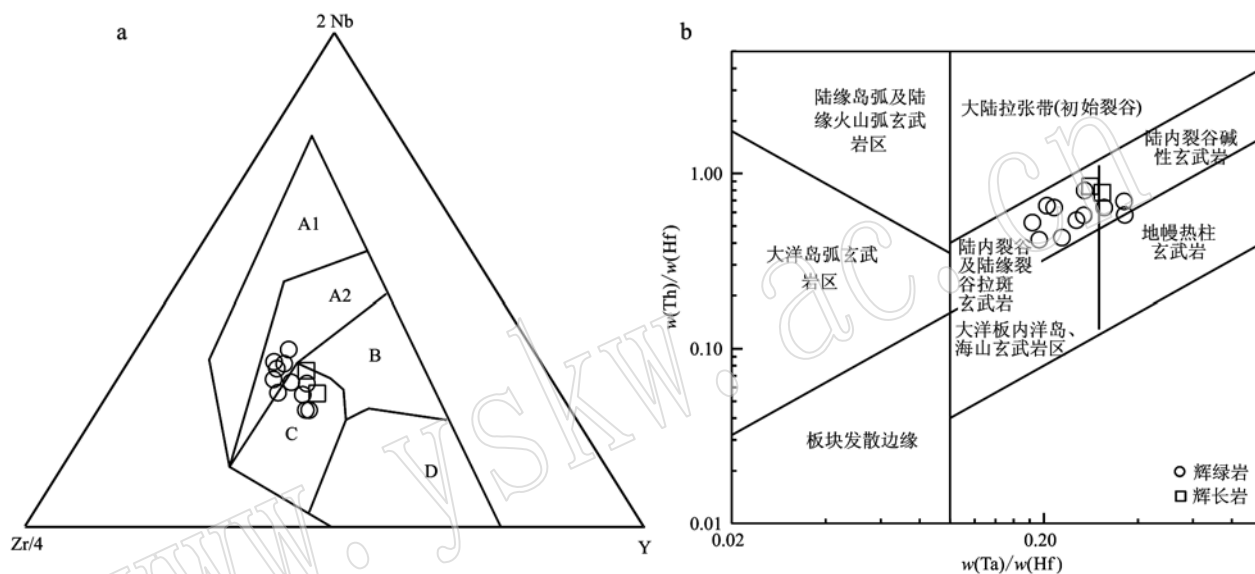


图 8 苏里地区基性岩 Nb-Zr-Y(a)和 Th/Hf-Ta/Hf(b)构造环境判别图

Fig. 8 Nb-Zr-Y(a) and Th/Hf-Ta/Hf(b) diagrams for discrimination of tectonic settings of the samples from Suli area

A1 + A2—板内碱性玄武岩; A2 + C—板内拉斑玄武岩; B—P 型 MORB; D—N 型 MORB; C + D—火山弧玄武岩

A1 + A2—intraplate alkaline basalt; A2 + C—intraplate tholeiite; B—P-type MORB; D—N-type MORB; C + D—volcanic arc basalt

## 5 地质意义

对于苏里地区新元古代基性岩墙的源区性质、组成和岩浆熔融深度等问题的认识, 往往与岩浆源区、地幔动力学机制等问题密切相关。本文根据样品的元素地球化学特征, 就相关问题做进一步的探讨。苏里基性岩墙侵位于中新元古代不同层位地层; 地球化学总体上表现为低  $\text{SiO}_2$  含量(46.77%~52.37%), 属基性岩岩浆系列;  $\text{TiO}_2$  含量大部分为 1.16%~1.87%, 其中 4 件样品  $\text{TiO}_2$  含量介于 2.02%~3.14% 之间, 平均含量为 2.86%, 较低的  $\text{MgO}$  含量(平均值为 5.21%)和  $\text{Mg}^\#$ (平均值为 49.4); 碱含量( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.41\% \sim 4.29\%$ ), 其常量元素组成与夏威夷碱性玄武岩( $\text{TiO}_2$  含量平均为

3.22%)相似, 结合野外观察及岩相学推测辉绿岩在形成过程中应经历了明显的橄榄石、单斜辉石、斜长石等矿物的分离结晶。轻、重稀土元素微弱分异, 轻稀土元素略为富集, 富集 Rb、Ba、Th、U, 亏损 Nb、Ta 和 K, 大离子亲石元素含量变化范围相对较宽, 高场强元素富集程度不强, 因此推断岩浆应起源于亏损地幔源区。Nb、Zr 和 Y 等不活泼元素不因地幔岩部分熔融程度和玄武质岩浆的分离结晶程度而发生变化, 通常同来划分岩石源区地幔类型。研究区岩石 Zr/Nb 值为 10.32~16.75, 平均值为 12.39, 低于原始地幔 Zr/Nb 值( $\text{Zr/Nb} = 18$ ), 说明苏里地区基性岩地幔源区是过渡型或者富集型(李昌年, 1992)。在 Zr/Nb-Zr/Y-Y/Nb 图解(图 9)中, 样品全部投在了过渡型地幔区域附近。因此, 研究区基性岩脉源区为过渡型地幔。通过 La/Sm-Sm/Yb 图解(图



10)对源区组成加以判定,考虑到地壳混染、结晶分异的影响,样品表现出尖晶石地幔橄榄岩部分熔融

趋势,认为岩浆应来源于尖晶石稳定域地幔,是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物。

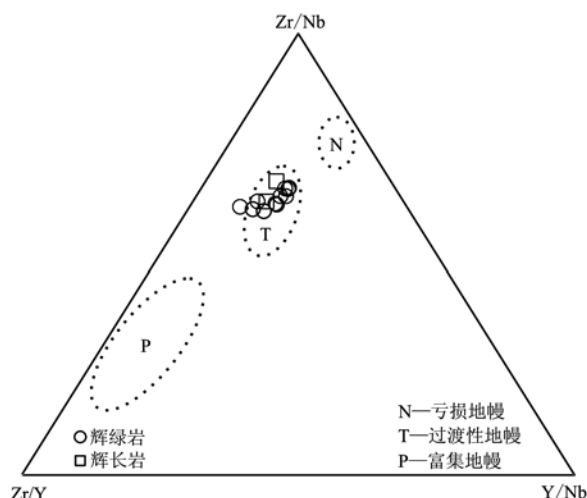


图9 苏里地区基性岩 Zr/Nb - Zr/Y - Y/Nb 图解  
(Pearce, 1996)

Fig. 9 Zr/Nb - Zr/Y - Y/Nb diagram of the basic rocks from Suli area(after Pearce, 1996)

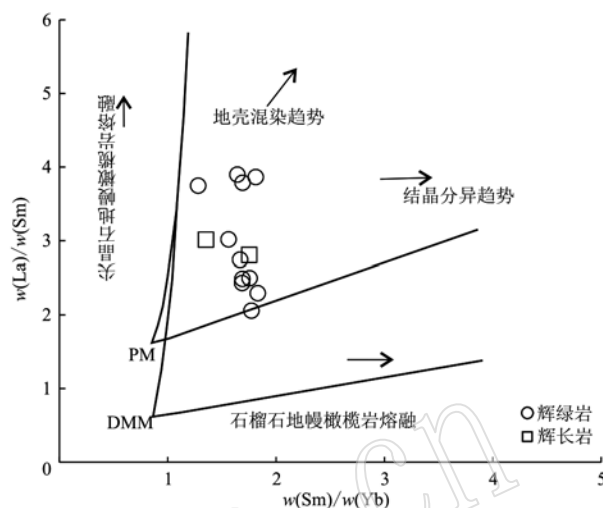


图10 苏里地区基性岩 La/Sm - Sm/Yb 图解  
(Lassiter and De Paolo, 1997)

Fig. 10 La/Sm - Sm/Yb diagram of the basic rocks from Suli area(after Lassiter and De Paolo, 1997)

Rodinia 超大陆是继 Columbia 超大陆后形成的又一超级联合古大陆,被认为是由 Columbia 超大陆裂解之后的陆块碎块在新的构造背景下的拼合产物。Rodinia 超大陆主体形成在 1.3 ~ 1.0 Ga 期间,稳定存在约 300 Ma 之后开始发生裂解( McMenamin and McMenamin, 1990; Hoffman, 1991; Dalziel, 1991; Moores, 1991)。近年来, Rodinia 超大陆的构型和演化以及中国不同陆块在其中位置的研究,受到地学界广泛的关注。

祁连陆块元古宙主要的区域性构造热事件产物有陆块西南部大柴旦地区古元古代花岗片麻岩(2.47 ~ 2.2 Ga)、浅色花岗岩(1.96 ~ 1.91 Ga)和环斑花岗岩(1.77 ~ 1.76 Ga)(陆松年, 2002; Chen *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009), 西宁地区北部的片麻岩中花岗质侵入体(940 ~ 880 Ma)(郭进京等, 1999; Tung *et al.*, 2007), 陆块东段发育的兴龙山群裂谷火山岩(824 ~ 713 Ma)、朱龙关群大陆溢流火山岩(738 ~ 604 Ma)等新元古代中晚期裂谷火山岩系(Mao *et al.*, 1997; 徐学义等, 2008)。苏里地区新元古代基性岩墙岩石类型为辉绿岩、辉长岩,岩浆起源于亏损地幔源区,是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物,岩浆形成于陆内裂谷环境,辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素获得  $819.5 \pm 5.2$  Ma( MSWD =

0.35)的加权平均年龄值,说明苏里地区新元古代基性岩墙可能与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。

## 6 结论

(1) 祁连陆块西段苏里地区基性岩墙 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为  $819.5 \pm 5.2$  Ma,表明辉绿岩形成于新元古代早期,形成时代与陆块东段兴龙山群裂谷火山岩(824 ~ 713 Ma)形成时代一致。

(2) 苏里基性岩墙岩石地球化学分析结果显示岩浆起源于亏损地幔源区,是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物,岩浆形成于陆内裂谷环境。

(3) 根据苏里基性岩墙形成时代、成因及构造环境,结合近年来对祁连陆块研究进展,表明其可能与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 192: 59 ~ 79.
- Chen N S, Gong S L, Sun M, *et al.* 2009. Precambrian evolution of the

- Quanji Block, northeastern margin of Tibet: Insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 35: 367 ~ 376.
- Dalziel I W D. 1991. Pacific margins of Laurentia and east Antarctica-Australia as a conjugate rife pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent[J]. *Geology*, 19: 598 ~ 601.
- Dong Guo'an, Yang Huai ren, Yang Hongyi, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(13): 1 572 ~ 1 585(in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Li Wen yuan, Ye Meifang, *et al.* 2010. Geochemistry of amphibolites in Hualong Group of eastern Middle Qilian massif and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 507 ~ 515(in Chinese with English abstract).
- Guo Jinjing, Zhao Fengqing and Li Huaikun. 1999. Jinningian collisional granite belt in the eastern sector of the Central Qilian Massif and its implication[J]. *Acta Geosci. Sin.*, 20: 10 ~ 15(in Chinese with English abstract).
- Hao Jie and Zhai Mingguo. 2004. Dinning movement and Sinian System in China: Their relationship with Rodinia supercontinent[J]. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 139 ~ 152(in Chinese with English abstract).
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwana land inside-outs[J]. *Science*, 252: 1 409 ~ 1 412.
- Lassiter J C and De Paolo D J. 1997. Plume lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints[A]. Mahoney J J and Coffin M F. Large Igneous Province: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism[C]. American Geophysical Union Geophysical Monography, 100: 335 ~ 355.
- Li Changnian. 1992. Trace Elements in Igneous Petrology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Li Meng, Wang Chao, Li Rongshe, *et al.* 2015. Petrogenesis and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Late Neoproterozoic granitic gneisses in western Qilian Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1 438 ~ 1 446(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Xia Linqi, Xia Zuchun, *et al.* 2006. Geochemistry and petrogenesis of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 413 ~ 422(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian. 2002. Preliminary Study of Precambrian Geology in the North Tibet-Qinghai Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Lu Songnian, Li Huaikun and Chen Zhihong. 2003. Mesoproterozoic-Neoproterozoic Geological Evolution and Its Response to Rodinia Supercontinent in Qinling[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Lu S N, Yang C L, Li H K, *et al.* 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 5: 123 ~ 131.
- Ma Jianjun, Wang Qi, He Chuan, *et al.* 2018. Neoproterozoic post-collision magmatism in south Qilian Orogen, China: Evidenced by geochronology and geochemistry[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(2): 133 ~ 154(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z C and Yang J M. 1997. Dating of single-grain zircon for Precambrian strata in western part of from North Qilian Mountains[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 42: 1 414 ~ 1 417.
- McMenamin M A S and McMenamin D L S. 1990. The Emergence of Animals: The Cambrian Breakthrough[M]. New York: Columbia University Press. 1 ~ 12.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of midocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, (56): 207 ~ 218.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins: American Separation of arc tholeiites from arc calc-alkaline volcanics[J]. *American Journal of Science*, 274: 321 ~ 355.
- Moores E M. 1991. Southwest U. S. East Antarctic(SWEAT) connection: A hypothesis[J]. *Geology*, 19: 425 ~ 428.
- Pearce J A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams[A]. Wyman D A. Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration[J]. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 79 ~ 113.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process[J]. *Ps. Geological Society. London Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Tung K A, Yang H J, Yang H Y, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 52: 2 687 ~ 2 701.
- Wang Heng. 2016. Urenville Uranitic Magmatism in North Wulan Terrane, Qinghai Province: Evidence from Geochronology and Geochemistry[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongliang, He Shiping, Chen Junlu, *et al.* 2007. LA- ICP-MS Dating of Zircon U-Pb and its tectonic significance of Maxianshan granitoid Inwaive Complex, Ganau Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 72 ~ 78(in Chinese with English abstract).

- Wang J, Li X H, Duan T Z, *et al.* 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating for the Cangshuipu volcanic rocks and its implications for the lower boundary age of the Nanhua strata in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 48: 1 663 ~ 1 669.
- Wang Q Y, Pan Y M, Chen N S, *et al.* 2009. Proterozoic polymetamorphism in the Quanji Block, northwestern China: Evidence from microtextures, garnet compositions and monazite CHIME ages[J]. J. Asian Earth Sci., 34: 686 ~ 698.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang and Xiu Shuzhi. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 413 ~ 421(in Chinese with English abstract)
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20: 325 ~ 343.
- Wu Huaichun, Zhang Shihong, Li Zhengxiang, *et al.* 2005. New paleomagnetic results from the Yangzhuang Formation of the Jixian System, North China, and tectonic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 50(14): 1 483 ~ 1 489.
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiuyan, *et al.* 2016. Mid Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. Geology in China, 43(4): 1 087 ~ 1 138(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Chen Junlu, *et al.* 2008. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of Xinglongshan Group basic volcanic rocks at eastern segment of Middle Qilian Mts. [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 827 ~ 840(in Chinese with English abstract).
- Yang Z Y, Sun Z M, Yang T S, *et al.* 2004. A long connection(750 ~ 380 Ma) between South China and Australia paleomagnetic constraints[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 220: 423 ~ 434.
- Yong Yong, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, *et al.* 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of granitic plutons from the Eastern sector of the central Qilian and their geologic implication[J]. Xinjiang Geology, 26(1): 62 ~ 70.
- Yu Haifeng, Lu Songnian, Xiu Qunye, *et al.* 2000. A Sssembly and crack events of Neoproterozoic continental blocks in western Beishan Mountain, Gansu Province, China [J]. Progress in Precambrian Research, 23(2): 98 ~ 102(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 2003. Neoproterozoic magmatic activity and global change [J]. Chinese Science Bulletin, 48: 1 657 ~ 1 662.
- SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 52(13): 1 572 ~ 1 585.
- 高俊, 汤耀庆, 赵民, 等. 1995. 新疆南山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探[J]. 岩石学报, 11(增刊): 85 ~ 97.
- 高晓峰, 李文渊, 叶美芳, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 29(5): 507 ~ 515.
- 郭进京, 赵凤清, 李怀坤. 1999. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. 地球学报, 20: 10 ~ 15.
- 郝杰, 翟明国. 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和展旦系[J]. 地质科学, 39(1): 139 ~ 152.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李猛, 王超, 李荣社, 等. 2015. 祁连山西段新元古代晚期花岗岩质麻岩成因及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 34(8): 1 438 ~ 1 446.
- 李向民, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2006. 天山地区新元古代-早寒武世火山岩地球化学和岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 25(5): 413 ~ 422.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 秦岭中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社.
- 马建军, 王琦, 何川, 等. 2018. 南祁连山带新元古代后碰撞岩浆作用年代学和地球化学证据[J]. 地球科学与环境学报, 40(2): 133 ~ 154.
- 王珩. 2016. 青海省乌北地体 Urenville 期花岗岩岩浆作用的年代学和地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 2007. 甘肃马衔山花岗岩杂岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义[J]. 地质学报, 81(1): 72 ~ 78.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 17(3): 413 ~ 421.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 43(4): 1 087 ~ 1 138.
- 徐学义, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 2008. 中祁连东段兴隆山群基性火山岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究[J]. 岩石学报, 24(4): 827 ~ 840.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 2008. 中祁连东段花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 26(1): 62 ~ 70.
- 于海峰, 陆松年, 修群业, 等. 2000. 甘肃北山西部新元古代陆块汇聚与裂解事件的岩石记录[J]. 前寒武纪研究进展, 23(2): 98 ~ 102.

## 附中文参考文献

董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 2007. 祁连地块前寒武纪基底锆石