

# 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征

吴才来<sup>①\*</sup>, 郜源红<sup>①</sup>, 吴锁平<sup>①</sup>, 陈其龙<sup>①</sup>, Joseph L. Wooden<sup>②</sup>, Frank K. Mazadab<sup>②</sup>, Chris Mattinson<sup>②</sup>

① 中国地质科学院地质研究所火成岩研究室, 北京 100037;

② Department of Earth and Environmental Sciences, Stanford University, CA94305, USA

\* E-mail: [wucailai@hotmail.com](mailto:wucailai@hotmail.com)

收稿日期: 2008-03-28; 接受日期: 2008-05-28

国家自然科学基金(批准号: 40472034, 40672049)和中国地质调查局地质调查项目(批准号: 1212010611803, 1212010711816)资助

**摘要** 柴北缘西段出露的花岗岩主要有赛什腾山、团鱼山、噶尔河和三岔沟等岩体, 这些岩体的走向为北西向, 与区域构造线方向基本一致. 岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 它们的时代从早古生代的奥陶纪到晚古生代的泥盆纪和二叠纪. 其中, 赛什腾山岩体为(465.4±3.5) Ma, 团鱼山岩体两期侵入岩的年龄分别为(469.7±4.6)和(443.5±3.6) Ma; 它们均属早古生代奥陶纪; 而噶尔河岩体的石英闪长岩为(372.1±2.6) Ma, 属晚古生代泥盆纪; 三岔沟岩体也由两期侵入岩组成, 其年龄分别为(271.2±1.5)和(260.4±2.3) Ma, 属二叠纪. 花岗岩的岩石地球化学特征表明, 柴北缘早古生代花岗岩具有岛弧或活动大陆边缘花岗岩的属性, 原岩可能为中元古代(1.03~1.15 Ga)形成的、来源于亏损地幔的拉斑玄武质洋壳, 它们的形成与板块的俯冲作用有关; 晚古生代花岗岩继承了早古生代花岗岩的特点, 其原岩可能为中元古代(1.18~1.29 Ga)的岛弧根部下地壳, 岩浆物质成分以壳幔混合源为主, 它们的形成与造山隆起后不同块体之间的均衡调整有关.

**关键词**

花岗岩

锆石 SHRIMP

U-Pb 定年

柴北缘西段

柴北缘是指柴达木盆地北缘断裂和宗务山断裂所限定的区域(图 1), 西端被阿尔金断裂所切, 东端以哇洪山-温泉断裂为界<sup>[1-3]</sup>. 自 20 世纪 90 年代在柴北缘地区发现榴辉岩以来, 该区就成为地学界研究的热点地区之一<sup>[4,5]</sup>. 随着研究的深入, 在阿尔金、柴北缘地区的榴辉岩及其围岩片麻岩中不断地发现了指示超高压变质作用的矿物——柯石英、金刚石和指示超高压的矿物显微出溶结构<sup>[6-13]</sup>, 使该区成为继苏鲁-大别之后中国境内又一条超高压变质带<sup>[5,14]</sup>. 在该超高压带上, 分布着大量的花岗岩类, 时代分别属于早古生代、晚古生代和中生代<sup>[15]</sup>. 然而, 这些花岗

岩准确的时代是什么? 不同时代花岗质岩浆作用与超高压变质作用之间有何成因联系? 目前, 对这些问题仍不十分清楚. 近几年, 虽然也有一些花岗岩研究成果的发表, 但主要是着重区内部分单个岩体的定年方面. 如肖庆辉等<sup>[16]</sup>对区内的鹰峰岩体中的环斑花岗岩进行了定年研究, 得出其锆石 TIMS 年龄为(1776 ± 33) Ma, 并认为该岩体的年龄反映了中国西部大陆地壳基底的克拉通化及其在中元古代发生过裂解, 同时, 也说明中国古大陆在早中元古代之交的吕梁运动时曾发生过大陆的拼合<sup>[16]</sup>. 袁桂邦等<sup>[17]</sup>测定了柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为

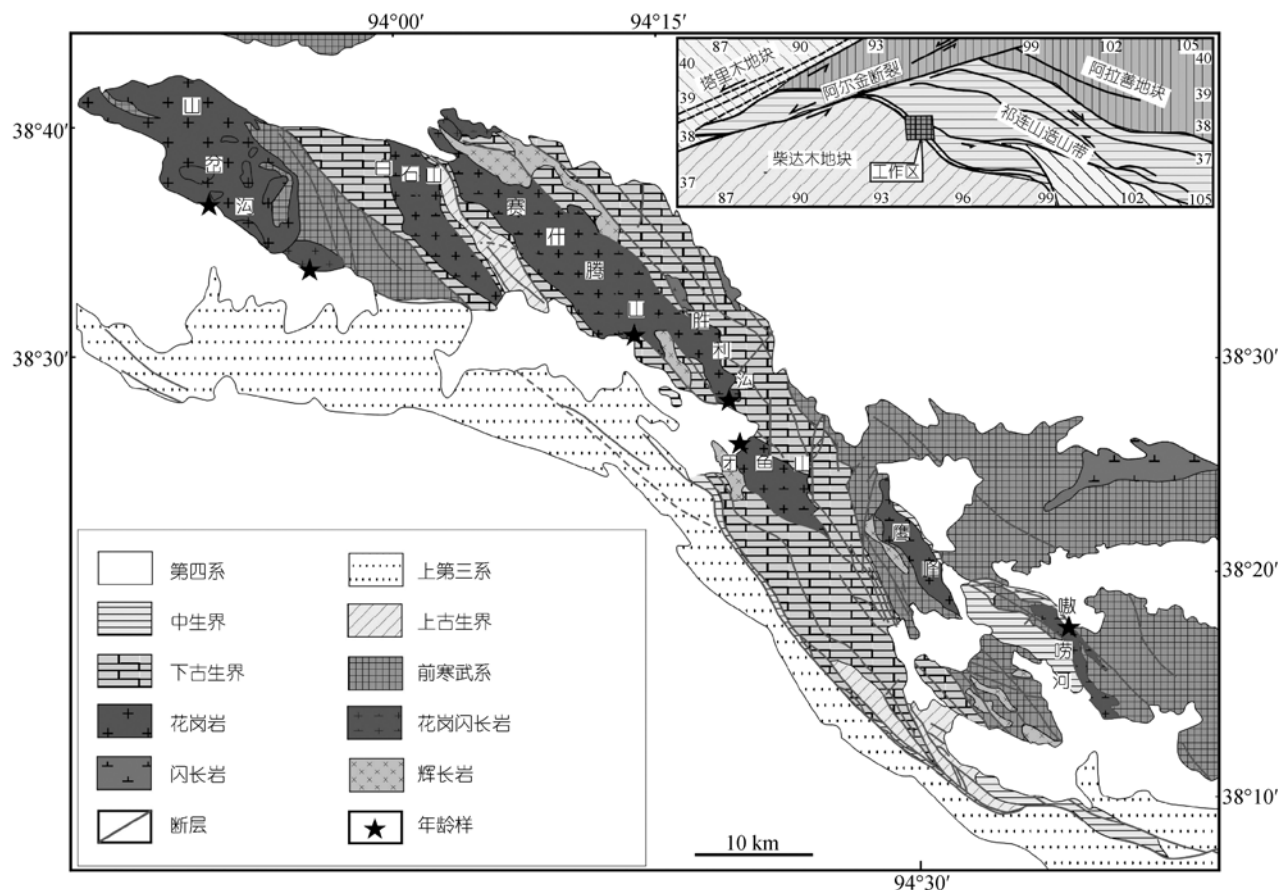


图 1 柴北缘西段花岗岩分布地质简图(据马海幅 1:20 万地质图修编)

(496±6) Ma, 属早奥陶世, 并认为区内的岛弧型火山岩(滩间山群)形成时代应早于早奥陶世; 孟繁聪等<sup>[18]</sup>研究了锡铁山花岗岩的同位素与岩石地球化学特征, 得出(428±1) Ma 单颗粒锆石 U-Pb 法 TIMS 年龄, 提出锡铁山花岗岩是早古生代碰撞后伸展环境的产物; 卢欣祥等<sup>[19]</sup>对塔塔楞河环斑花岗岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 得出其年龄为(440±14) Ma. 吴才来等<sup>[20-23]</sup>先后对喇嘛山、柴达木山和都兰野马滩等花岗岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究, 分别获得这些岩体的年龄为(473±15), (446±10) 和 (397±4) Ma, 并结合区内其他花岗岩的岩石地球化学特征, 将区内古生代花岗岩类划分为三类三期, 分别对应于古生代的洋壳俯冲、陆壳俯冲和板块的折返. 近期, 吴才来等<sup>[24]</sup>对大柴旦地区的诸花岗岩体又进行了较为详细的岩石学及锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究, 得出了三组年龄分别是: (1) (446.3±3.9) Ma, (2) (408.6

±4.4), (403.3±3.8), (401.8±3.0) Ma 和 (3) (374.5±1.6), (372±2.1) Ma. 可见, 区内尚未见到比较系统全面的花岗质岩浆活动期次及其年代学格架方面的研究成果. 尤其是柴北缘西段, 花岗岩十分发育, 它对全面讨论整个柴北缘地区花岗质岩浆活动具有重要的意义, 然而, 这些花岗岩还没有准确的定年结果. 因此, 本文在原有工作的基础上, 着重对柴北缘西段各主要岩体进行详细的岩石学研究, 并对代表性岩体开展锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 试图对区内花岗质岩浆活动期次作出详细的划分, 并对不同期次的花岗质岩浆作用与超高压变质作用之间的关系及其与造山带构造演化等重大地质问题作一探讨.

## 1 地质背景及定年样品描述

柴北缘地区的前寒武系是一套中-高级变质岩系, 主要由斜长角闪岩、云母片岩、片麻岩等组成. 早古

生代地层发育奥陶系, 主要为火山岩及砂页岩夹灰岩, 属大陆边缘海相活动型沉积; 晚古生代地层则发育上泥盆统和石炭系, 是一套陆相粗碎屑岩、火山岩及海陆交互的碎屑岩沉积。此外, 还有少量的中生代地层出露, 主要是侏罗系和白垩系的含煤沉积岩系<sup>[15]</sup>。研究表明, 该区以鱼卡-乌兰断裂为界, 可分为地质特征明显不同的南北两个地质单元<sup>[1,25]</sup>。北部单元主要是指乌兰-德令哈-欧龙布鲁克-全吉山-达肯大坂山一带, 称为欧龙布鲁克微陆块<sup>[26]</sup>, 主要由德令哈杂岩和新厘定的达肯大坂群及其不整合其上的新元古代全吉群和具有稳定大陆边缘沉积特征的寒武系-奥陶系组成<sup>[1,26,27]</sup>, 噶喇河岩体产在该地质单元内。南部单元分布于都兰以北的沙柳河-野马滩-铅石山-锡铁山-绿梁山-鱼卡-赛什腾山一带, 主要是早古生代俯冲碰撞杂岩带, 由含榴辉岩的花岗质片麻岩和具有弧火山岩特征的早古生界滩间山群所组成<sup>[1,26,27]</sup>, 泥盆纪磨拉石不整合其上, 赛什腾山、团鱼山、三岔沟岩体主要分布于该地质单元内。这些花岗岩体整体上呈北西向斜列式分布, 但单个岩体的长轴方向稍有不同, 其中赛什腾山花岗岩体和三岔沟花岗岩体呈北西向, 其余岩体均呈北北西向(图 1)。

赛什腾山岩体位于赛什腾山西段的山脊处, 沿赛什腾山向斜轴部分布, 是本区较大的岩体之一, 出露面积约 90 km<sup>2</sup>, 为一北西向的大岩株。岩体侵入到奥陶纪火山岩中, 岩体内接触带发育大小不等的暗色微粒包体, 同时, 具有较强烈的围岩混染现象。岩体为一杂岩体, 主体相为花岗岩, 局部为二长花岗岩, 边缘相为石英闪长岩。

团鱼山岩体位于赛什腾山中段的团鱼山一带, 岩体为不规则的长条状, 出露面积约 40 km<sup>2</sup>。岩体西北端在胜利沟处和赛什腾山岩体接触, 中部的公路沟一带被第四系覆盖, 但其中出露花岗岩小山丘, 岩体的东南端与泥盆系接触。岩体的岩性变化较大, 主要为花岗岩和花岗闪长岩。

噶喇河岩体位于噶喇山垭口西侧的噶喇河旁。岩体呈长条形分布, 侵入于前寒武纪片麻岩、片岩中。岩体中含有片岩、片麻岩、大理岩捕虏体及暗色微粒闪长质包体。岩体具有强烈的混染现象, 岩石类型较复杂, 主要有石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等。

三岔沟岩体呈不规则状的岩株, 出露面积约 85 km<sup>2</sup>。岩体的北部侵入到前寒武纪片麻岩中, 南部被第四系覆盖。岩体内接触带见有暗色微粒包体和围岩捕虏体, 外接触带具有混合岩化现象。岩体由 2 次侵入的花岗岩组成, 早期的岩石呈浅灰色, 中粗粒斑状结构, 局部具片麻状构造; 晚期的岩石为肉红色, 中细粒结构。

各定年样品的岩石学特征如下:

样品 CL05-98 取自赛什腾山岩体(图 1), 经纬度: N38°30'48.3", E94°14'2.5"。该样品为浅粉红色, 中细粒半自形粒状结构, 主要矿物为斜长石(50%~55%)、碱性长石(15%~20%)和石英(20%~25%), 次要矿物为角闪石(1%~3%)。斜长石呈半自形板状, 大多蚀变成绢云母的集合体, 局部地方仍见到环带结构; 碱性长石和石英为不规则他形粒状, 粒度比斜长石小, 两者呈集合体状分布于斜长石颗粒之间; 角闪石为柱状, 大多发生了绿泥石化。副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿及少量的榍石、黄铁矿、金红石和电气石等。

样品 CL05-96 取自团鱼山岩体西北端, 煤矿北部的胜利沟南(图 1)。经纬度: N38°27'46.3", E94°19'11.7"。岩石为肉红色, 中粒他形粒状结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(40%~50%)、石英(20%~30%)和碱性长石(15%~20%), 次要矿物为角闪石(1%~5%)。斜长石呈较大的板状, 大多蚀变成绢云母的集合体, 一些较大的绢云母沿长石的两组解理分布, 部分斜长石还发生了碳酸盐化和绿帘石化。碱性长石和石英呈不规则他形粒状, 分布于斜长石之间; 角闪石细粒柱状, 分布不均匀, 部分蚀变成绿泥石。副矿物有锆石、磷灰石和磁铁矿。

样品 CL05-95 取自团鱼山岩体的中部第四系中突出的小山包上(图 1), 经纬度: N38°26'24.7", E94°19'46.1"。岩石呈灰白色, 细粒他形粒状结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(45%~55%)、碱性长石(10%~15%)和石英(20%~25%), 次要矿物为角闪石(1%~5%)。斜长石为板柱状, 具有绢云母化, 少量的变成白云母; 碱性长石为粒状, 具有泥化现象; 石英为它形粒状, 部分与碱性长石交生; 角闪石为柱状, 常被斜长石包裹, 部分角闪石蚀变成绿泥石并析出多余的铁, 形成磁铁矿, 部分被绿帘石交代。副矿物

有锆石、磷灰石和榍石等。

样品 CL05-105 取自嫩江河北的石英闪长岩(图 1), 经纬度: N38°17.79', E94°38.62'。岩石为灰色, 细粒结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(55%~65%), 其次为石英(5%~10%)、角闪石(10%~15%)和黑云母(3%~5%), 少量的钾长石(1%~5%)。

样品 CL05-99 取自三岔沟岩体南缘(图 1), 经纬度: N38°37.356', E93°46.86'。岩石呈浅灰色, 中粗粒结构, 块状构造。主要矿物为斜长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、钾长石(35%~40%), 次要矿物为黑云母(3%~5%)。副矿物为榍石、锆石和磷灰石。

样品 CL05-101 取自三岔沟岩体南缘(图 1), 样品 CL05-99 的东边, 经纬度: N38°32.74', E93°54.92'。中细粒结构, 块状构造。主要矿物为钾长石(40%~45%)、石英(25%~30%), 其次为斜长石(15%~20%), 次要矿物为黑云母(2%~5%)。副矿物为锆石、磷灰石。

## 2 分析方法

### 2.1 岩石化学全分析

本研究选择了 13 个较新鲜的岩石样品(其中包括 6 个定年样品), 由中国地质科学院测试所(国家地质实验测试中心)完成其化学全分析(表 1)。氧化物用 X 荧光光谱仪 3080E 测试, 执行标准分别为: Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO, 按 GB/T14506.28-1993 标准; H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>按 GB/T14506.2-1993 标准; CO<sub>2</sub> 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 和 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 和 Ga 用 X 荧光光谱仪 2100 测试, 执行 JY/T016-1996 标准。

### 2.2 Sr 和 Nd 同位素分析

选择 6 个定年的样品进行了 Sr, Nd 同位素分析, 由中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。测试流程包括溶样、样品分离和测试 3 个阶段, 实验测得标样 Ames 的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.705062±13(2σ), <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512630±11(2σ), Sr 和

Nd 全流程本底分别为 100 和 50 pg 左右。Sr, Nd 同位素组成  $\epsilon_{Nd}(t)$ ,  $\epsilon_{Sr}(t)$  采用 McCulloch 等<sup>[28]</sup>的计算公式, 两阶段亏损地幔 Nd 模式年龄 T<sub>2</sub>DM 采用 Liew 等<sup>[29]</sup>和李献华等<sup>[30]</sup>的计算公式计算。

### 2.3 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

野外分别采集样品 CL05-95, CL05-96, CL05-98, CL05-99, CL05-101 和 CL05-105 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, 最后在双目镜下人工挑出锆石。锆石的分选由河北廊坊区调院完成。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, 并拍照反射光和阴极发光照片, 最后在离子探针 SHRIMP-RG 上测定锆石的 U, Th 和 Pb 同位素含量及定年。样品制备、反射光和阴极发光照像以及 SHRIMP 定年均由作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 Ludwig<sup>[31,32]</sup> 编制的 ISOPLOT 和 SQUID 程序。

## 3 分析结果

### 3.1 地球化学特征

(i) 主元素。柴北缘西段花岗岩类化学分析结果如表 1。由表 1 可见, 柴北缘西段花岗岩类的 SiO<sub>2</sub>(wt% 为质量分数, 下同)变化于 51.95%~77.08%, 全碱含量变化于 4.83%~11.29%, 岩石的里特曼指数变化于 1.30~7.64 之间, 主要为 1.55~3.12, 属钙碱性系列; 岩石的 CIPW 标准矿物计算结果中, 不同样品的刚玉(AC)含量为 0.00~1.03, A/NKC 比值变化于 0.77~1.03 之间, 说明岩石为准铝质到弱过铝质(图 2)。从岩石化学成分来看, 这些岩石主要为石英二长闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩, 具有 I 型花岗岩的特征(图 3)。

(ii) 稀土元素。各类花岗岩的稀土元素总量变化于 48.53×10<sup>-6</sup>~391.53×10<sup>-6</sup> 之间(表 1), 其中, 赛什腾山石英闪长岩具有较高的稀土总量, 为 391.53×10<sup>-6</sup>, δEu 为 0.68; 团鱼山花岗岩稀土总量为 48.53×10<sup>-6</sup>, 无明显的负铕异常, δEu 为 0.98, 但两者具有相似的稀土配分模式(图 4(a))。

表 1 柴北缘大柴旦地区花岗岩化学成分分析结果<sup>a)</sup>

| 样品号                            | 97-2   | 98-2   | 95-2   | 96-2   | 105-2  | 106-2 | 106-5  | 106-8  | 99-2   | 100-2  | 101-2  | 101-5  | 102-2  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 岩石名称                           | QD     | G      | G      |        | QD     | G     | QD     | G      | G      | G      | G      | G      | GD     |
| 岩体名称                           | 赛什腾山岩体 |        | 团鱼山岩体  |        | 噶喇河岩体  |       |        |        | 三岔沟岩体  |        |        |        |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 59.69  | 73.34  | 68.32  | 72.62  | 55.78  | 70.97 | 51.95  | 70.58  | 69.55  | 77.08  | 73.78  | 73.73  | 65.67  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.53   | 0.21   | 0.26   | 0.36   | 0.95   | 0.25  | 0.96   | 0.36   | 0.67   | 0.13   | 0.22   | 0.24   | 0.77   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.70  | 13.82  | 17.22  | 13.95  | 16.26  | 15.07 | 17.87  | 14.72  | 14.64  | 12.00  | 14.30  | 14.01  | 16.42  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.06   | 1.50   | 1.33   | 1.68   | 1.81   | 0.86  | 1.84   | 1.04   | 2.15   | 0.72   | 0.87   | 0.92   | 1.70   |
| FeO                            | 1.53   | 0.52   | 0.77   | 0.84   | 4.63   | 1.10  | 5.33   | 1.56   | 1.31   | 0.40   | 0.55   | 0.65   | 2.23   |
| MnO                            | 0.14   | 0.04   | 0.06   | 0.07   | 0.12   | 0.05  | 0.14   | 0.05   | 0.06   | 0.02   | 0.04   | 0.04   | 0.07   |
| MgO                            | 1.38   | 0.63   | 0.71   | 0.90   | 5.90   | 0.79  | 5.68   | 1.04   | 0.88   | 0.13   | 0.43   | 0.48   | 1.37   |
| CaO                            | 1.92   | 2.34   | 3.56   | 2.10   | 7.20   | 2.51  | 8.70   | 2.90   | 2.30   | 0.61   | 1.73   | 1.75   | 3.55   |
| Na <sub>2</sub> O              | 5.03   | 4.92   | 5.46   | 4.24   | 3.44   | 3.56  | 3.52   | 3.56   | 3.78   | 2.67   | 4.08   | 3.85   | 4.39   |
| K <sub>2</sub> O               | 6.26   | 1.35   | 1.89   | 2.54   | 1.11   | 3.43  | 1.31   | 2.98   | 4.44   | 5.90   | 3.76   | 3.72   | 2.67   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.23   | 0.06   | 0.09   | 0.09   | 0.20   | 0.07  | 0.15   | 0.09   | 0.17   | 0.02   | 0.07   | 0.06   | 0.22   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1.30   | 0.86   | 0.52   | 0.96   | 2.12   | 0.62  | 1.54   | 0.68   | 0.36   | 0.28   | 0.44   | 0.48   | 0.74   |
| CO <sub>2</sub>                | 0.21   | 0.13   | 0.13   | 0.05   | 0.13   | 0.13  | 0.38   | 0.05   | 0.13   | 0.05   | 0.05   | 0.13   | 0.05   |
| LOI                            | 1.23   | 1.23   | 0.38   | 0.85   | 1.52   | 0.56  | 1.59   | 0.43   | 0.05   | 0.16   | 0.32   | 0.25   | 0.46   |
| 总计                             | 101.21 | 100.95 | 100.70 | 101.25 | 101.17 | 99.97 | 100.96 | 100.04 | 100.49 | 100.17 | 100.64 | 100.31 | 100.31 |
| Alk                            | 11.29  | 6.27   | 7.35   | 6.78   | 4.55   | 6.99  | 4.83   | 6.54   | 8.22   | 8.57   | 7.84   | 7.57   | 7.06   |
| Na/K                           | 0.80   | 3.64   | 2.89   | 1.67   | 3.10   | 1.04  | 2.69   | 1.19   | 0.85   | 0.45   | 1.09   | 1.03   | 1.64   |
| 里特曼指数                          | 7.64   | 1.30   | 2.13   | 1.55   | 1.62   | 1.75  | 2.61   | 1.55   | 2.54   | 2.16   | 2.00   | 1.86   | 2.20   |
| A/NKC                          | 0.95   | 1.00   | 0.98   | 1.03   | 0.81   | 1.06  | 0.77   | 1.02   | 0.96   | 1.01   | 1.03   | 1.03   | 0.99   |
| AC                             | 0.00   | 0.16   | 0.00   | 0.62   | 0.00   | 1.11  | 0.00   | 0.58   | 0.00   | 0.16   | 0.54   | 0.61   | 0.38   |
| Q                              | 1.28   | 35.72  | 22.00  | 34.98  | 10.62  | 32.75 | 0.33   | 33.02  | 26.79  | 38.35  | 32.71  | 34.30  | 22.67  |
| A                              | 42.10  | 8.44   | 11.74  | 16.08  | 9.57   | 21.86 | 11.59  | 19.18  | 28.22  | 35.63  | 23.06  | 22.99  | 17.67  |
| P                              | 56.62  | 55.85  | 66.26  | 48.93  | 79.81  | 45.39 | 88.08  | 47.80  | 44.99  | 26.02  | 44.23  | 42.71  | 59.66  |
| La                             | 95.30  | 35.10  | 10.60  | 30.00  | 26.50  | 20.10 | 16.60  | 28.10  | 43.30  | 40.60  | 17.90  | 24.40  | 42.00  |
| Ce                             | 177.00 | 55.80  | 20.70  | 53.70  | 52.50  | 36.30 | 41.80  | 52.40  | 104.00 | 75.30  | 33.20  | 46.60  | 83.70  |
| Pr                             | 18.50  | 5.01   | 2.27   | 5.51   | 5.84   | 3.71  | 5.38   | 5.66   | 12.80  | 7.37   | 3.50   | 4.83   | 9.35   |
| Nd                             | 65.80  | 15.30  | 8.54   | 19.30  | 22.90  | 13.00 | 23.10  | 20.40  | 49.30  | 24.10  | 12.20  | 16.30  | 35.30  |
| Sm                             | 10.80  | 2.18   | 1.57   | 3.31   | 4.80   | 2.57  | 5.35   | 3.92   | 9.92   | 3.41   | 2.35   | 2.89   | 7.61   |
| Eu                             | 2.17   | 0.55   | 0.48   | 0.80   | 1.20   | 0.64  | 1.35   | 0.80   | 1.84   | 0.61   | 0.60   | 0.63   | 1.49   |
| Gd                             | 8.41   | 1.91   | 1.40   | 3.15   | 4.74   | 2.33  | 5.45   | 3.82   | 9.09   | 3.02   | 2.12   | 2.33   | 6.96   |
| Tb                             | 1.02   | 0.25   | 0.19   | 0.47   | 0.77   | 0.39  | 0.91   | 0.61   | 1.48   | 0.36   | 0.36   | 0.32   | 1.10   |
| Dy                             | 5.18   | 1.44   | 1.02   | 2.76   | 4.58   | 2.22  | 5.61   | 3.54   | 8.94   | 1.87   | 2.11   | 1.64   | 6.27   |
| Ho                             | 0.95   | 0.29   | 0.21   | 0.57   | 0.92   | 0.45  | 1.11   | 0.68   | 1.74   | 0.33   | 0.42   | 0.31   | 1.11   |
| Er                             | 2.95   | 0.98   | 0.66   | 1.95   | 2.72   | 1.30  | 3.36   | 2.16   | 5.30   | 1.01   | 1.36   | 0.93   | 3.16   |
| Tm                             | 0.40   | 0.15   | 0.10   | 0.30   | 0.38   | 0.20  | 0.47   | 0.31   | 0.75   | 0.13   | 0.22   | 0.14   | 0.43   |
| Yb                             | 2.64   | 1.21   | 0.68   | 2.12   | 2.45   | 1.30  | 3.01   | 2.05   | 4.62   | 0.77   | 1.45   | 0.93   | 2.51   |
| Lu                             | 0.41   | 0.21   | 0.11   | 0.36   | 0.38   | 0.19  | 0.44   | 0.33   | 0.67   | 0.11   | 0.22   | 0.16   | 0.34   |
| REE                            | 391.53 | 120.38 | 48.53  | 124.30 | 130.68 | 84.70 | 113.94 | 124.78 | 253.75 | 158.99 | 78.01  | 102.41 | 201.33 |
| HREE/LREE                      | 16.83  | 17.69  | 10.11  | 9.64   | 6.71   | 9.11  | 4.60   | 8.24   | 6.79   | 19.92  | 8.44   | 14.15  | 8.20   |
| Eu*                            | 0.68   | 0.81   | 0.98   | 0.75   | 0.77   | 0.79  | 0.76   | 0.63   | 0.59   | 0.57   | 0.81   | 0.73   | 0.62   |
| Y                              | 27.9   | 9.4    | 7.0    | 18.7   | 26.0   | 13.8  | 31.6   | 20.7   | 51.0   | 9.1    | 13.5   | 9.2    | 30.5   |
| Zr                             | 321    | 103    | 116    | 155    | 163    | 94    | 118    | 137    | 372    | 104    | 96     | 98     | 223    |
| Hf                             | 7.5    | 2.8    | 3.1    | 3.8    | 3.9    | 2.6   | 3.2    | 3.9    | 9.1    | 3.0    | 2.8    | 2.9    | 5.4    |

表 1(续)

| 样品号                  | 97-2   | 98-2  | 95-2  | 96-2  | 105-2 | 106-2 | 106-5 | 106-8 | 99-2  | 100-2 | 101-2 | 101-5 | 102-2 |
|----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 岩石名称                 | QD     | G     | G     |       | QD    | G     | QD    | G     | G     | G     | G     | G     | GD    |
| 岩体名称                 | 赛什腾山岩体 |       | 团鱼山岩体 |       | 嗽唠河岩体 |       |       |       | 三岔沟岩体 |       |       |       |       |
| Li                   | 3.4    | 1.4   | 13.2  | 3.6   | 33.4  | 24.2  | 19.4  | 23.5  | 14.0  | 6.3   | 28.8  | 29.1  | 35.2  |
| Be                   | 2.8    | 1.2   | 1.5   | 1.2   | 1.3   | 1.9   | 1.3   | 1.6   | 1.7   | 0.9   | 2.5   | 2.2   | 2.1   |
| Sc                   | 7.6    | 3.3   | 3.3   | 5.9   | 23.0  | 4.6   | 29.9  | 5.7   | 5.7   | 2.0   | 2.9   | 2.8   | 5.8   |
| Cr                   | 6.7    | 5.2   | 8.0   | 5.5   | 129.0 | 13.7  | 54.4  | 16.3  | 7.8   | 4.5   | 5.5   | 5.9   | 7.0   |
| Co                   | 11.0   | 3.7   | 3.1   | 3.4   | 26.0  | 3.4   | 28.5  | 5.5   | 4.4   | 0.5   | 1.9   | 2.3   | 8.0   |
| Ni                   | 3.8    | 2.2   | 3.7   | 2.0   | 85.8  | 4.7   | 70.3  | 7.1   | 3.7   | 0.6   | 1.8   | 2.0   | 4.1   |
| Cu                   | 59.5   | 3.7   | 5.4   | 11.8  | 38.6  | 5.7   | 43.2  | 10.7  | 10.0  | 4.8   | 6.7   | 3.4   | 9.8   |
| Zn                   | 95.7   | 20.9  | 54.8  | 31.6  | 72.9  | 35.2  | 79.6  | 45.7  | 66.2  | 22.8  | 33.9  | 35.4  | 77.2  |
| Ga                   | 22.1   | 12.1  | 18.6  | 13.3  | 18.4  | 18.2  | 20.1  | 16.5  | 20.1  | 14.7  | 15.9  | 15.6  | 21.4  |
| Rb                   | 141.0  | 44.6  | 49.5  | 42.3  | 34.6  | 108.0 | 46.5  | 89.5  | 91.1  | 114.0 | 127.0 | 105.0 | 101.0 |
| Sr                   | 340.0  | 338.0 | 902.0 | 313.0 | 399.0 | 405.0 | 273.0 | 303.0 | 215.0 | 58.7  | 178.0 | 205.0 | 368.0 |
| Nb                   | 11.1   | 5.3   | 8.4   | 9.3   | 8.0   | 7.2   | 6.2   | 8.3   | 16.0  | 3.5   | 7.8   | 5.8   | 13.0  |
| Cd                   | 0.1    | 0.0   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.0   | 0.1   | 0.0   | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Cs                   | 1.3    | 0.7   | 0.8   | 0.3   | 1.9   | 4.0   | 2.9   | 4.9   | 2.3   | 1.4   | 4.8   | 4.4   | 6.6   |
| Ba                   | 1417   | 675   | 1063  | 1244  | 280   | 1360  | 247   | 659   | 947   | 278   | 430   | 536   | 518   |
| Ta                   | 0.8    | 0.5   | 0.5   | 0.8   | 0.4   | 1.5   | 0.5   | 0.9   | 1.5   | 0.2   | 1.0   | 0.8   | 1.5   |
| Pb                   | 34.7   | 11.8  | 26.6  | 10.9  | 12.4  | 19.5  | 10.7  | 19.4  | 19.6  | 24.3  | 30.3  | 26.9  | 19.4  |
| Th                   | 33.7   | 14    | 2.4   | 9.72  | 5.62  | 17.9  | 3.92  | 9.85  | 6.42  | 7.24  | 11.4  | 12.4  | 10.8  |
| U                    | 6.84   | 2.55  | 0.92  | 1.53  | 0.92  | 1.39  | 0.56  | 1.19  | 1.31  | 0.49  | 1.71  | 1.43  | 1.5   |
| Sr/Y                 | 12.2   | 36.0  | 129.0 | 16.7  | 15.3  | 29.3  | 8.6   | 14.6  | 4.2   | 6.5   | 13.2  | 22.2  | 12.1  |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 23.4   | 18.8  | 10.1  | 9.2   | 7.0   | 10.0  | 3.6   | 8.9   | 6.1   | 34.1  | 8.0   | 17.0  | 10.8  |

a) G-花岗岩, QD-石英闪长岩, GD-花岗闪长岩. 样品号前均省略了 CL05

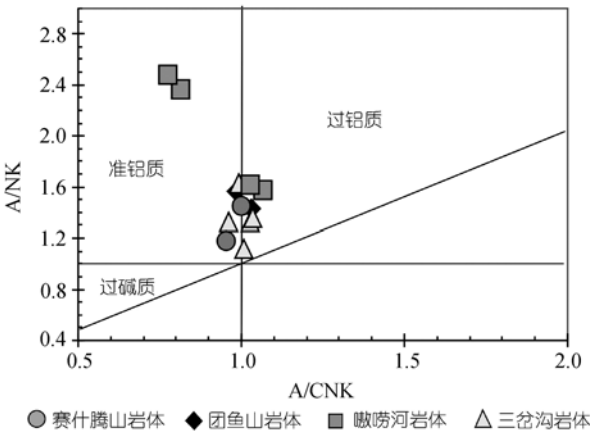


图 2 A/CNK-A/NK图解[33]

嗽唠河岩体主要有 3 种岩石类型, 即石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩. 虽然岩石类型不同, 但稀土元素的总量变化不大, 由石英闪长岩→花岗闪长岩→花岗岩, 稀土总量(平均值)从  $130.68\times10^{-6}$  →  $124.78\times10^{-6}$  →  $87.70\times10^{-6}$ , 轻重稀土比值(平均值)

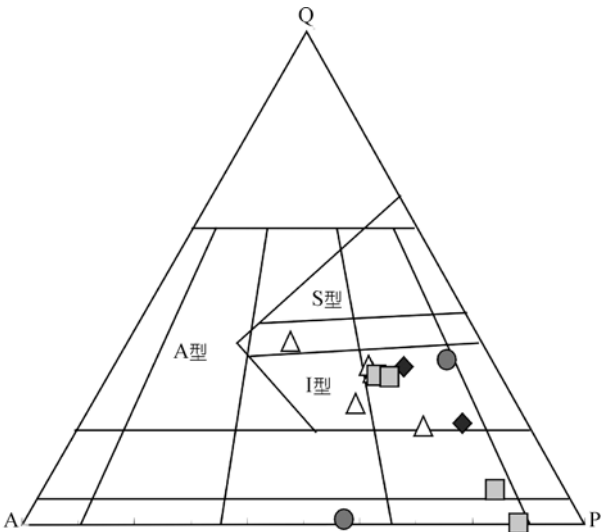


图 3 QAP图解[34](图例同图 2)

从 6.71→8.24→9.11(表 1), 岩石的球粒陨石标准化配分模式十分相似, 具有弱的负铕异常(图 4(b)),  $\delta\text{Eu}$  变化于 0.63→0.79 之间.

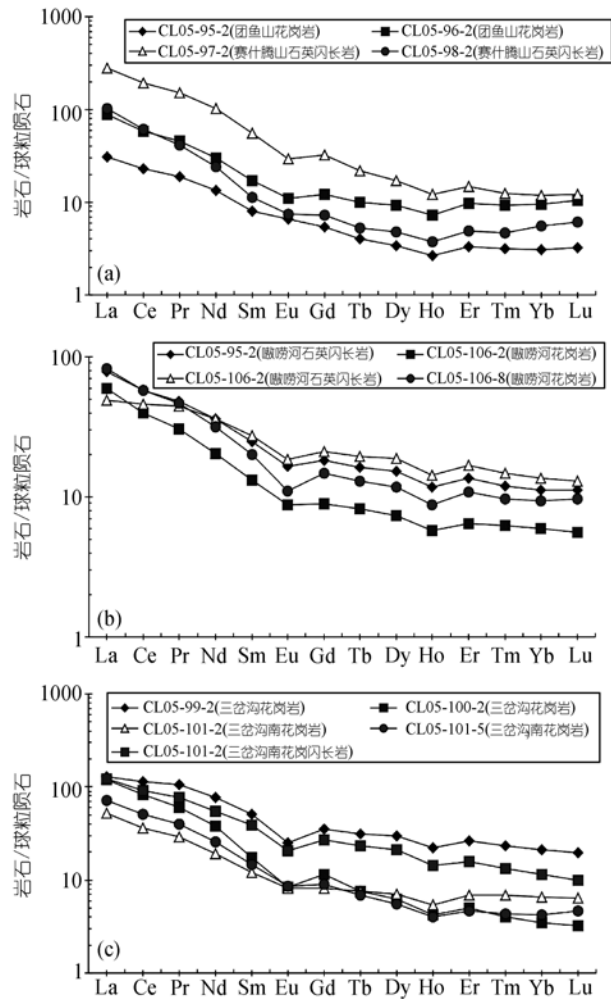


图4 柴北缘西段花岗岩类稀土配分曲线  
样品编号同表1, 球粒陨石标准化值引自文献[35]

三岔沟岩体分别由两次侵位的花岗岩组成, 早期的为二长花岗岩和花岗闪长岩, 样品号为 CL05-99-2 和 CL05-102-2, 晚期的为钾长花岗岩, 样品为 CL05-100-2, CL05-101-2 和 CL05-101-5。早期花岗岩的稀土总量 ( $201\times 10^{-6}\sim 254\times 10^{-6}$ , 平均为  $228\times 10^{-6}$ ) 比晚期的 ( $78\times 10^{-6}\sim 159\times 10^{-6}$ , 平均为  $113\times 10^{-6}$ ) 高(表 1), 但轻重稀土比值比晚期的低(早期为 7.5, 晚期为 14.2), 反映晚期侵入的岩浆分异程度较高。但早晚两期花岗岩具有相似的稀土配分模式(图 4(c)), 均具有弱的负铕异常( $\delta\text{Eu}$ : 0.6~0.7), 显示了两期花岗岩的同源性。

(iii) 微量元素。赛什腾山和团鱼山岩体的微量

元素均以富集大离子亲石元素为特征, 其中团鱼山花岗岩(CL05-95)具有Th的负异常和Sr的正异常, La, Ce的含量也较赛什腾山岩体的低。赛什腾山石英闪长岩(CL05-97)的微量元素丰度均高于其他样品。各岩石样品的原始地幔标准化模式基本相似, 具有Nb, P, Ti的相对负异常和Th, La, Zr的正异常(图 5(a))。另外, 团鱼山岩体的Sr含量高达  $902\times 10^{-6}$ , Y和Yb分别为  $6.99\times 10^{-6}$  和  $0.68\times 10^{-6}$ , 表现出埃达克质岩石高Sr低Y, Yb的特点[36~39]。

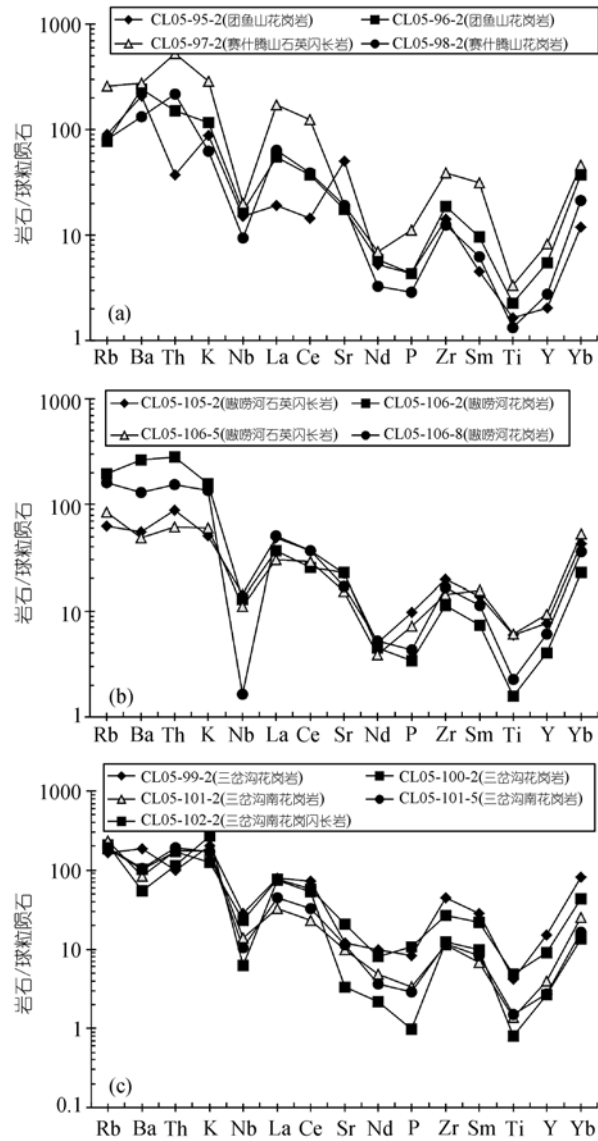


图5 柴北缘西段花岗岩类微量元素蛛网图  
样品编号同表1, 原始地幔值引自文献[40]

嗽唠河岩体的过渡族元素 Cr, Co, Ni 的含量较高, 同时也富集大离子亲石元素. 在原始地幔标准化模式图上, 除花岗岩 CL05-106-8 具有较大的负 Nb 异常外, 所有样品具有相似的分配形式(图 5(b)). 石英闪长岩具有 Nb, Nd 和 Ti 的负异常, 而花岗岩类具有 Nb, P 和 Ti 的负异常, 且石英闪长岩的负异常比花岗岩类的小.

三岔沟岩体各样品具有相似的微量元素原始地幔标准化模式(图 5(c)), 具有 Ba, Nb, P, Ti 负异常. 其中花岗闪长岩的微量元素丰度高于花岗岩类, Ba, Nb, P, Ti 负异常比花岗岩的小, 但 Y 的含量低于花岗岩类, 而 Sr 的含量高于花岗岩类.

(iv) Sr 和 Nd 同位素. 6 个定年样品的 Sr 和 Nd 同位素分析结果见表 2.

赛什腾山花岗岩样品(CL05-98-2)用年龄( $469.7 \pm 4.6$ ) Ma 计算, 得出( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>, ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub>,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ , T<sub>2</sub>DM 分别为 0.70573, 0.512068, 0.6 和 1.15 Ga; 团鱼山花岗岩两个样品(CL05-95-2, CL05-96-2)分别用年龄( $443.5 \pm 3.5$ ) 及 ( $469.7 \pm 4.6$ ) Ma 计算, 得出( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 分别为 0.70554 和 0.70481, ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> 分别为 0.512143 和 0.512142,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别为 1.5 和 2.2, T<sub>2</sub>DM 分别为 1.06 和 1.03 Ga; 嗽唠河石英闪长岩(CL05-105-2)用年龄( $372.1 \pm 2.6$ ) Ma 计算, 得出( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>, ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub>,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ , T<sub>2</sub>DM 分别为 0.708232, 0.512052, -2.1 和 1.29 Ga; 三岔沟岩体(CL05-99-2, CL05-101-2)分别用年龄( $271.2 \pm 1.5$ ) 和 ( $260.4 \pm 2.3$ ) Ma 计算, 得出( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 分别为 0.70727 和 0.70779, ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> 分别为 0.512173 和 0.512210,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别为 -2.3 和 -1.8, T<sub>2</sub>DM 分别为 1.23 和 1.18 Ga.

3.2 花岗岩锆石 SHRIMP 定年

花岗岩锆石的 SHRIMP 定年结果见表 3, 各样品

中锆石的特征如下:

样品 CL05-98(赛什腾山花岗岩). 锆石有长柱状、短柱状, 还有粒状, 其长宽比变化较大, 但主要变化于 1:1~2:1 之间. 锆石具有环带结构(图 6), U 和 Th 含量变化不大, 分别为  $205 \times 10^{-6}$ ~ $680 \times 10^{-6}$  和  $113 \times 10^{-6}$ ~ $535 \times 10^{-6}$ , Th 和 U 之间的相关系数为 0.91(图 7), 其 Th/U 比值(指  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值, 下同)一般大于 0.5, 为 0.57~0.88 之间(表 3). 除 2 号锆石外, 其余锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄比较稳定, 变化于 ( $452.6 \pm 5.3$ )~( $483.9 \pm 5.1$ ) Ma, 平均年龄为 ( $465.4 \pm 3.5$ ) Ma (图 8).

样品 CL05-95(团鱼山花岗岩). 选择 11 颗锆石进行了 12 个点的 SHRIMP U-Pb 定年分析. 锆石为柱状, 长宽比 2:1~3:1, 锆石由核部和幔部组成, 且大多数都具有明显的振荡环带(图 6), 少量的锆石核部还含有继承性的碎屑锆石(如 7 号锆石), 显然, 这是典型的岩浆结晶锆石<sup>[41]</sup>. 测定结果表明, 锆石的 U 和 Th 含量分别变化于  $79 \times 10^{-6}$ ~ $489 \times 10^{-6}$  和  $2 \times 10^{-6}$ ~ $434 \times 10^{-6}$ , 大多数锆石的 Th/U 比值大于 0.5, 但 6 号和 9 号锆石的 Th/U 比值较小, 分别为 0.01 和 0.18(表 3), 整个样品的 U 和 Th 之间的相关性较低, 相关系数仅为 0.39(图 7). 因此, 部分锆石可能受到过后期的流体改造. 然而, 所测定的锆石无论是中间部位还是其他部位,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄基本相同. 整个样品的 12 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于 ( $423.8 \pm 4.8$ )~( $476.1 \pm 4.9$ ) Ma, 去除 U 含量高的测点, 将具有振荡环带的锆石测点进行平均, 得出锆石的结晶年龄为 ( $443.5 \pm 3.5$ ) Ma (图 9). 锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  对  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  投点得出谐和年龄为 ( $444.5 \pm 9.2$ ) Ma, 在误差范围内与计算的平均年龄一致(图 9).

样品 CL05-96(团鱼山北花岗岩). 锆石为短柱状、粒状, 一般长宽比为 1:1~1.5:1, 锆石具有明显的

表 2 Sr-Nd 同位素成分

| 样品编号       | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) <sub>i</sub> | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) <sub>i</sub> | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | T <sub>2</sub> DM/Ga |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| CL05-98-2  | 0.3815                          | 0.708255                        | 0.70573                                          | 0.0861                            | 0.512331                          | 0.512068                                           | 0.6                       | 1.15                 |
| CL05-95-2  | 0.1587                          | 0.706540                        | 0.70554                                          | 0.1111                            | 0.512466                          | 0.512143                                           | 1.5                       | 1.06                 |
| CL05-96-2  | 0.3907                          | 0.707428                        | 0.70481                                          | 0.1037                            | 0.512462                          | 0.512142                                           | 2.2                       | 1.03                 |
| CL05-105-2 | 0.2507                          | 0.708232                        | 0.70690                                          | 0.1267                            | 0.512361                          | 0.512052                                           | -2.1                      | 1.29                 |
| CL05-99-2  | 1.2250                          | 0.711965                        | 0.70727                                          | 0.1216                            | 0.512387                          | 0.512173                                           | -2.3                      | 1.23                 |
| CL05-101-2 | 2.0628                          | 0.715508                        | 0.70779                                          | 0.1164                            | 0.512410                          | 0.512210                                           | -1.8                      | 1.18                 |

表 3 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果 <sup>a)</sup>

| 样品号        | <sup>206</sup> Pb <sub>C</sub> /% | U<br>/μg·g <sup>-1</sup> | Th<br>/μg·g <sup>-1</sup> | <sup>232</sup> Th<br>/ <sup>238</sup> U | <sup>206</sup> Pb <sub>R</sub><br>/μg·g <sup>-1</sup> | 总的<br><sup>238</sup> U<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差/% | 总的<br><sup>207</sup> Pb<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差<br>/% | <sup>206</sup> Pb<br>/ <sup>238</sup> U | 误差<br>/% | <sup>207</sup> Pb<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差<br>/% | <sup>206</sup> Pb<br>/ <sup>238</sup> U<br>年龄<br>/Ma | 误差<br>±1σ |
|------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------|----------|------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------|-----------|
| CL05-98-1  | 0.19                              | 629                      | 535                       | 0.88                                    | 40.7                                                  | 13.26                                         | 1.0  | 0.0576                                         | 1.0      | 13.29                                   | 1.0      | 0.0561                                   | 1.5      | 467.9                                                | 4.7       |
| CL05-98-2  | 2.77                              | 680                      | 482                       | 0.73                                    | 18.4                                                  | 31.73                                         | 2.0  | 0.0806                                         | 1.5      | 32.64                                   | 2.0      | 0.0583                                   | 5.6      | 192.6                                                | 3.8       |
| CL05-98-3  | 0.05                              | 573                      | 447                       | 0.81                                    | 36.6                                                  | 13.42                                         | 1.1  | 0.0572                                         | 1.1      | 13.43                                   | 1.1      | 0.0568                                   | 1.2      | 462.7                                                | 4.8       |
| CL05-98-4  | 0.13                              | 470                      | 267                       | 0.59                                    | 30.3                                                  | 13.34                                         | 1.1  | 0.0554                                         | 1.3      | 13.35                                   | 1.1      | 0.0544                                   | 1.6      | 466.6                                                | 4.8       |
| CL05-98-5  | 2.17                              | 440                      | 279                       | 0.66                                    | 28.4                                                  | 13.32                                         | 1.1  | 0.0678                                         | 12.6     | 13.61                                   | 1.7      | 0.0501                                   | 27.8     | 460.3                                                | 6.9       |
| CL05-98-6  | 0.00                              | 362                      | 237                       | 0.68                                    | 24.2                                                  | 12.87                                         | 1.1  | 0.0564                                         | 1.4      | 12.87                                   | 1.1      | 0.0564                                   | 1.4      | 482.5                                                | 5.4       |
| CL05-98-7  | 0.00                              | 205                      | 113                       | 0.57                                    | 12.8                                                  | 13.73                                         | 1.2  | 0.0570                                         | 2.0      | 13.73                                   | 1.2      | 0.0570                                   | 2.0      | 452.6                                                | 5.3       |
| CL05-98-8  | 0.74                              | 473                      | 343                       | 0.75                                    | 30.9                                                  | 13.15                                         | 1.0  | 0.0620                                         | 1.2      | 13.24                                   | 1.1      | 0.0561                                   | 2.7      | 469.5                                                | 4.8       |
| CL05-98-9  | 0.15                              | 428                      | 253                       | 0.61                                    | 28.7                                                  | 12.84                                         | 1.1  | 0.0561                                         | 1.5      | 12.86                                   | 1.1      | 0.0549                                   | 1.9      | 483.9                                                | 5.1       |
| CL05-98-10 | 0.08                              | 391                      | 232                       | 0.61                                    | 25.2                                                  | 13.36                                         | 1.1  | 0.0566                                         | 1.4      | 13.37                                   | 1.1      | 0.0560                                   | 1.5      | 465.2                                                | 4.9       |
| CL05-98-11 | -0.05                             | 533                      | 425                       | 0.82                                    | 34.2                                                  | 13.39                                         | 1.0  | 0.0573                                         | 1.2      | 13.38                                   | 1.0      | 0.0576                                   | 1.2      | 463.8                                                | 4.8       |
| CL05-98-12 | 0.14                              | 392                      | 261                       | 0.69                                    | 25.2                                                  | 13.37                                         | 1.1  | 0.0573                                         | 1.5      | 13.39                                   | 1.1      | 0.0561                                   | 1.8      | 464.3                                                | 4.9       |
| CL05-95-1  | 0.12                              | 254                      | 137                       | 0.56                                    | 15.4                                                  | 14.18                                         | 1.1  | 0.0562                                         | 1.7      | 14.20                                   | 1.1      | 0.0552                                   | 1.9      | 439.0                                                | 4.9       |
| CL05-95-2  | 0.46                              | 104                      | 68                        | 0.67                                    | 6.3                                                   | 14.09                                         | 1.4  | 0.0554                                         | 2.9      | 14.15                                   | 1.4      | 0.0516                                   | 4.8      | 442.2                                                | 6.0       |
| CL05-95-3  | 0.83                              | 79                       | 73                        | 0.95                                    | 4.8                                                   | 14.12                                         | 1.5  | 0.0571                                         | 3.0      | 14.24                                   | 1.5      | 0.0503                                   | 7.8      | 440.2                                                | 6.4       |
| CL05-95-4  | 0.17                              | 311                      | 184                       | 0.61                                    | 19.4                                                  | 13.76                                         | 1.1  | 0.0564                                         | 1.5      | 13.79                                   | 1.1      | 0.0550                                   | 1.9      | 451.9                                                | 4.8       |
| CL05-95-5  | 0.16                              | 308                      | 239                       | 0.80                                    | 19.1                                                  | 13.81                                         | 1.1  | 0.0563                                         | 1.6      | 13.83                                   | 1.1      | 0.0550                                   | 2.0      | 450.4                                                | 4.9       |
| CL05-95-6  | 0.07                              | 222                      | 2                         | 0.01                                    | 13.5                                                  | 14.16                                         | 1.2  | 0.0575                                         | 1.8      | 14.17                                   | 1.2      | 0.0569                                   | 2.0      | 439.0                                                | 5.0       |
| CL05-95-7  | -0.10                             | 320                      | 177                       | 0.57                                    | 19.4                                                  | 14.13                                         | 1.1  | 0.0564                                         | 1.5      | 14.12                                   | 1.1      | 0.0573                                   | 1.7      | 440.3                                                | 4.8       |
| CL05-95-8  | 0.11                              | 491                      | 434                       | 0.91                                    | 32.4                                                  | 13.03                                         | 1.1  | 0.0578                                         | 1.6      | 13.04                                   | 1.1      | 0.0570                                   | 1.8      | 476.1                                                | 4.9       |
| CL05-95-9  | 0.10                              | 489                      | 87                        | 0.18                                    | 30.7                                                  | 13.70                                         | 1.1  | 0.0572                                         | 1.3      | 13.71                                   | 1.1      | 0.0564                                   | 1.5      | 453.6                                                | 4.7       |
| CL05-95-10 | 0.05                              | 375                      | 250                       | 0.69                                    | 22.3                                                  | 14.45                                         | 1.1  | 0.0563                                         | 3.5      | 14.45                                   | 1.1      | 0.0559                                   | 3.5      | 431.0                                                | 4.7       |
| CL05-95-11 | 0.08                              | 309                      | 115                       | 0.39                                    | 18.9                                                  | 14.06                                         | 1.1  | 0.0555                                         | 1.8      | 14.07                                   | 1.1      | 0.0548                                   | 2.0      | 443.1                                                | 4.8       |
| CL05-95-12 | 0.07                              | 241                      | 115                       | 0.49                                    | 14.1                                                  | 14.69                                         | 1.2  | 0.0566                                         | 1.8      | 14.70                                   | 1.2      | 0.0560                                   | 1.9      | 423.8                                                | 4.8       |
| CL05-96-1  | 0.00                              | 342                      | 256                       | 0.77                                    | 22.2                                                  | 13.24                                         | 1.1  | 0.0585                                         | 1.9      | 13.24                                   | 1.1      | 0.0585                                   | 1.9      | 468.0                                                | 5.0       |
| CL05-96-2  | 0.05                              | 633                      | 653                       | 1.06                                    | 39.8                                                  | 13.66                                         | 1.0  | 0.0586                                         | 1.1      | 13.66                                   | 1.0      | 0.0582                                   | 1.1      | 454.1                                                | 4.6       |
| CL05-96-3  | 0.10                              | 162                      | 100                       | 0.64                                    | 10.3                                                  | 13.54                                         | 1.2  | 0.0554                                         | 2.1      | 13.55                                   | 1.2      | 0.0546                                   | 2.4      | 459.9                                                | 5.5       |
| CL05-96-4  | 0.06                              | 288                      | 214                       | 0.77                                    | 18.8                                                  | 13.14                                         | 1.1  | 0.0570                                         | 1.6      | 13.15                                   | 1.1      | 0.0565                                   | 1.7      | 472.4                                                | 5.2       |
| CL05-96-5  | 0.00                              | 174                      | 99                        | 0.59                                    | 11.2                                                  | 13.31                                         | 1.2  | 0.0562                                         | 2.0      | 13.31                                   | 1.2      | 0.0562                                   | 2.0      | 467.2                                                | 5.6       |
| CL05-96-6  | 17.85                             | 233                      | 190                       | 0.84                                    | 18.7                                                  | 10.71                                         | 1.1  | 0.1972                                         | 5.2      | 13.04                                   | 1.6      | 0.0523                                   | 30.3     | 478.9                                                | 9.2       |
| CL05-96-7  | 3.13                              | 474                      | 510                       | 1.11                                    | 27.6                                                  | 14.76                                         | 1.1  | 0.0770                                         | 1.1      | 15.24                                   | 1.1      | 0.0515                                   | 5.7      | 411.3                                                | 4.5       |
| CL05-96-8  | 0.54                              | 180                      | 123                       | 0.71                                    | 11.2                                                  | 13.89                                         | 1.2  | 0.0585                                         | 2.0      | 13.96                                   | 1.2      | 0.0542                                   | 4.0      | 446.8                                                | 5.3       |
| CL05-96-9  | 0.05                              | 344                      | 374                       | 1.13                                    | 22.6                                                  | 13.06                                         | 1.1  | 0.0560                                         | 1.4      | 13.07                                   | 1.1      | 0.0557                                   | 1.4      | 475.8                                                | 5.0       |
| CL05-96-10 | 0.19                              | 210                      | 160                       | 0.79                                    | 13.0                                                  | 13.85                                         | 1.2  | 0.0553                                         | 1.9      | 13.87                                   | 1.2      | 0.0537                                   | 2.4      | 449.9                                                | 5.2       |
| CL05-96-11 | 0.00                              | 300                      | 238                       | 0.82                                    | 18.8                                                  | 13.66                                         | 1.1  | 0.0559                                         | 1.6      | 13.66                                   | 1.1      | 0.0559                                   | 1.6      | 455.5                                                | 5.0       |
| CL05-105-1 | 0.06                              | 383                      | 173                       | 0.47                                    | 19.4                                                  | 16.98                                         | 1.1  | 0.0545                                         | 1.6      | 16.99                                   | 1.1      | 0.0541                                   | 1.7      | 368.5                                                | 4.0       |
| CL05-105-2 | 0.04                              | 791                      | 1286                      | 1.68                                    | 40.3                                                  | 16.88                                         | 1.0  | 0.0540                                         | 1.1      | 16.89                                   | 1.0      | 0.0537                                   | 1.2      | 370.9                                                | 3.8       |
| CL05-105-3 | 8.35                              | 302                      | 74                        | 0.25                                    | 16.8                                                  | 15.43                                         | 1.1  | 0.1221                                         | 1.2      | 16.84                                   | 1.4      | 0.0544                                   | 11.7     | 371.7                                                | 4.2       |
| CL05-105-4 | 0.26                              | 1603                     | 2143                      | 1.38                                    | 82.8                                                  | 16.63                                         | 1.0  | 0.0567                                         | 1.0      | 16.67                                   | 1.0      | 0.0546                                   | 1.4      | 375.4                                                | 3.7       |
| CL05-105-5 | 0.06                              | 697                      | 742                       | 1.10                                    | 35.8                                                  | 16.74                                         | 1.0  | 0.0553                                         | 1.2      | 16.75                                   | 1.0      | 0.0548                                   | 1.3      | 373.4                                                | 3.8       |
| CL05-105-6 | 10.33                             | 447                      | 400                       | 0.92                                    | 24.6                                                  | 15.64                                         | 1.1  | 0.1295                                         | 5.6      | 17.44                                   | 1.5      | 0.0449                                   | 26.4     | 363.3                                                | 5.3       |
| CL05-105-7 | 0.14                              | 940                      | 1001                      | 1.10                                    | 47.4                                                  | 17.03                                         | 1.0  | 0.0560                                         | 1.0      | 17.06                                   | 1.0      | 0.0549                                   | 1.3      | 366.8                                                | 3.6       |
| CL05-105-8 | 0.05                              | 681                      | 35                        | 0.05                                    | 35.5                                                  | 16.46                                         | 1.0  | 0.0541                                         | 1.3      | 16.46                                   | 1.0      | 0.0537                                   | 1.4      | 380.3                                                | 3.9       |
| CL05-105-9 | 0.08                              | 768                      | 443                       | 0.60                                    | 39.5                                                  | 16.68                                         | 1.0  | 0.0544                                         | 1.2      | 16.69                                   | 1.0      | 0.0537                                   | 1.3      | 375.2                                                | 3.9       |

表 3(续)

| 样品号         | <sup>206</sup> Pb <sub>C</sub> /% | U<br>/μg·g <sup>-1</sup> | Th<br>/μg·g <sup>-1</sup> | <sup>232</sup> Th<br>/ <sup>238</sup> U | <sup>206</sup> Pb <sub>R</sub><br>/μg·g <sup>-1</sup> | 总的<br><sup>238</sup> U<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差/% | 总的<br><sup>207</sup> Pb<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差/% | <sup>206</sup> Pb<br>/ <sup>238</sup> U | 误差/% | <sup>207</sup> Pb<br>/ <sup>206</sup> Pb | 误差/% | <sup>206</sup> Pb<br>/ <sup>238</sup> U<br>年龄<br>/Ma | 误差<br>±1σ |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|------------------------------------------|------|------------------------------------------------------|-----------|
| CL05-105-10 | 0.00                              | 279                      | 61                        | 0.23                                    | 14.9                                                  | 16.13                                         | 1.2  | 0.0542                                         | 2.0  | 16.13                                   | 1.2  | 0.0542                                   | 2.0  | 387.8                                                | 4.5       |
| CL05-99-1   | 0.00                              | 157                      | 131                       | 0.86                                    | 5.7                                                   | 23.69                                         | 1.0  | 0.0496                                         | 3.7  | 23.69                                   | 1.0  | 0.0496                                   | 3.7  | 267.1                                                | 2.8       |
| CL05-99-2   | 0.48                              | 182                      | 135                       | 0.77                                    | 6.7                                                   | 23.36                                         | 0.9  | 0.0519                                         | 3.2  | 23.47                                   | 1.0  | 0.0480                                   | 5.6  | 270.1                                                | 2.6       |
| CL05-99-3   | 1.38                              | 272                      | 226                       | 0.86                                    | 10.3                                                  | 22.81                                         | 0.8  | 0.0656                                         | 2.7  | 23.13                                   | 0.9  | 0.0545                                   | 7.7  | 272.0                                                | 2.2       |
| CL05-99-4   | 0.21                              | 198                      | 109                       | 0.57                                    | 7.5                                                   | 22.57                                         | 0.9  | 0.0531                                         | 5.6  | 22.62                                   | 0.9  | 0.0514                                   | 6.2  | 279.1                                                | 2.7       |
| CL05-99-5   | 5.42                              | 13                       | 10                        | 0.73                                    | 0.5                                                   | 22.64                                         | 3.4  | 0.0496                                         | 11.8 | 23.93                                   | 4.4  |                                          |      | 279.4                                                | 9.6       |
| CL05-99-6   | 0.13                              | 284                      | 185                       | 0.67                                    | 10.5                                                  | 23.32                                         | 0.8  | 0.0514                                         | 2.6  | 23.35                                   | 0.8  | 0.0503                                   | 3.0  | 270.8                                                | 2.1       |
| CL05-99-7   | 0.33                              | 128                      | 173                       | 1.40                                    | 4.3                                                   | 25.58                                         | 1.1  | 0.0515                                         | 4.0  | 25.67                                   | 1.2  | 0.0489                                   | 5.6  | 247.1                                                | 2.9       |
| CL05-99-8   | 0.12                              | 318                      | 196                       | 0.64                                    | 11.7                                                  | 23.36                                         | 0.7  | 0.0536                                         | 2.4  | 23.39                                   | 0.7  | 0.0526                                   | 2.8  | 269.6                                                | 1.9       |
| CL05-99-9   | 0.20                              | 384                      | 213                       | 0.57                                    | 14.4                                                  | 22.91                                         | 0.6  | 0.0519                                         | 2.2  | 22.96                                   | 0.7  | 0.0502                                   | 2.8  | 275.4                                                | 1.8       |
| CL05-99-10  | 0.00                              | 77                       | 68                        | 0.91                                    | 2.7                                                   | 24.03                                         | 1.5  | 0.0481                                         | 5.5  | 24.03                                   | 1.5  | 0.0481                                   | 5.5  | 263.9                                                | 4.1       |
| CL05-99-11  | 0.00                              | 228                      | 138                       | 0.62                                    | 8.5                                                   | 23.06                                         | 0.9  | 0.0516                                         | 3.0  | 23.06                                   | 0.9  | 0.0516                                   | 3.0  | 273.7                                                | 2.4       |
| CL05-99-12  | 0.20                              | 217                      | 243                       | 1.16                                    | 7.8                                                   | 23.94                                         | 0.9  | 0.0536                                         | 3.7  | 23.99                                   | 0.9  | 0.0520                                   | 4.3  | 263.1                                                | 2.4       |
| CL05-99-13  | 0.00                              | 407                      | 241                       | 0.61                                    | 15.0                                                  | 23.35                                         | 0.6  | 0.0522                                         | 2.2  | 23.35                                   | 0.6  | 0.0522                                   | 2.2  | 270.2                                                | 1.8       |
| CL05-99-14  | 0.38                              | 310                      | 195                       | 0.65                                    | 11.1                                                  | 24.02                                         | 0.8  | 0.0539                                         | 2.6  | 24.11                                   | 0.8  | 0.0508                                   | 4.1  | 262.2                                                | 2.1       |
| CL05-101-1  | 0.44                              | 227                      | 86                        | 0.39                                    | 7.9                                                   | 24.64                                         | 0.9  | 0.0527                                         | 3.0  | 24.75                                   | 0.9  | 0.0492                                   | 4.9  | 256.0                                                | 2.3       |
| CL05-101-2  | 0.32                              | 482                      | 207                       | 0.44                                    | 17.2                                                  | 24.04                                         | 0.6  | 0.0493                                         | 2.1  | 24.12                                   | 0.6  | 0.0466                                   | 3.4  | 263.4                                                | 1.6       |
| CL05-101-3  | 0.00                              | 110                      | 46                        | 0.43                                    | 3.9                                                   | 24.16                                         | 1.3  | 0.0504                                         | 4.5  | 24.16                                   | 1.3  | 0.0504                                   | 4.5  | 261.8                                                | 3.3       |
| CL05-101-4  | 0.10                              | 432                      | 241                       | 0.58                                    | 15.4                                                  | 24.11                                         | 0.6  | 0.0506                                         | 2.3  | 24.13                                   | 0.7  | 0.0498                                   | 2.6  | 262.3                                                | 1.7       |
| CL05-101-5  | 0.00                              | 174                      | 61                        | 0.36                                    | 6.1                                                   | 24.43                                         | 1.0  | 0.0528                                         | 4.1  | 24.43                                   | 1.0  | 0.0528                                   | 4.1  | 258.2                                                | 2.7       |
| CL05-101-6  | 0.15                              | 782                      | 199                       | 0.26                                    | 296.1                                                 | 2.27                                          | 0.4  | 0.1683                                         | 1.6  | 2.27                                    | 0.4  | 0.1672                                   | 1.6  | 2530*                                                | 26*       |
| CL05-101-7  | 0.06                              | 2153                     | 699                       | 0.34                                    | 77.1                                                  | 24.00                                         | 0.3  | 0.0511                                         | 1.0  | 24.02                                   | 0.3  | 0.0505                                   | 1.2  | 263.3                                                | 0.8       |
| CL05-101-8  | 0.03                              | 1292                     | 480                       | 0.38                                    | 45.5                                                  | 24.42                                         | 0.4  | 0.0505                                         | 1.3  | 24.43                                   | 0.4  | 0.0502                                   | 1.4  | 259.0                                                | 1.0       |
| CL05-101-9  | 0.31                              | 145                      | 53                        | 0.38                                    | 5.1                                                   | 24.30                                         | 1.1  | 0.0522                                         | 3.8  | 24.38                                   | 1.1  | 0.0497                                   | 5.2  | 259.7                                                | 2.9       |
| CL05-101-10 | 4.65                              | 387                      | 148                       | 0.40                                    | 14.2                                                  | 23.43                                         | 0.7  | 0.0841                                         | 1.9  | 24.57                                   | 1.0  | 0.0461                                   | 13.8 | 258.8                                                | 1.8       |
| CL05-101-11 | 0.41                              | 601                      | 302                       | 0.52                                    | 20.8                                                  | 24.83                                         | 0.5  | 0.0535                                         | 1.9  | 24.93                                   | 0.6  | 0.0502                                   | 3.2  | 253.8                                                | 1.4       |

a) \*为 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄, <sup>206</sup>Pb<sub>C</sub> 为普通铅, <sup>206</sup>Pb<sub>R</sub> 为放射性性铅

振荡环带(图 6), 部分锆石中含有小颗粒的矿物包裹体. 对 11 颗锆石进行了 SHRIMP U-Pb 测定, 结果表明, U 和 Th 含量分别变化于  $162\times10^{-6}\sim633\times10^{-6}$ ,  $99\times10^{-6}\sim653\times10^{-6}$ , Th/U 比值均大于 0.5, 为 0.59~1.13, Th 和 U 之间的相关系数为 0.96(图 7). <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄变化于  $(411.3\pm4.5)\sim(478.9\pm9.2)$  Ma, 其中 7 号锆石的内部有一层明显的黑圈(图 6), 可能是后期的流体沿裂纹进入锆石内部, 造成 Pb 的扩散丢失<sup>[42]</sup>, 所以, 该测点的年龄值偏小( $(411.3\pm4.5)$  Ma), 在计算平均年龄时予以舍去. 最后得出该样品锆石的 U-Pb 平均年龄为  $(469.7\pm4.6)$  Ma(图 10).

样品 CL05-105(嗽唠河石英闪长岩). 锆石为柱

状, 长宽比为 2:1~3:1, 内部结构很复杂, 呈不规则的条纹结构(图 11). 锆石的 U 和 Th 含量变化较大, 分别为  $279\times10^{-6}\sim1603\times10^{-6}$ ,  $35\times10^{-6}\sim2143\times10^{-6}$ . 除了 8 号锆石的 Th/U 比值较小外(0.05), 其余锆石的 Th/U 比值变化于 0.23~1.68 之间(表 3), Th 和 U 之间的相关系数为 0.82(图 7), 因此, 这些锆石是岩浆中结晶的. 测定的 10 颗锆石的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄比较稳定, 为  $(363.3\pm5.3)\sim(387.8\pm4.5)$  Ma, 平均为  $(372.1\pm2.6)$  Ma(图 12).

样品 CL05-99(三岔沟花岗岩). 锆石的粒度大小不一, 为自形柱状, 长宽比为 2:1~4:1, 从 CL 图像来看, 锆石似乎受到过后期流体的改造, 表现在部分锆

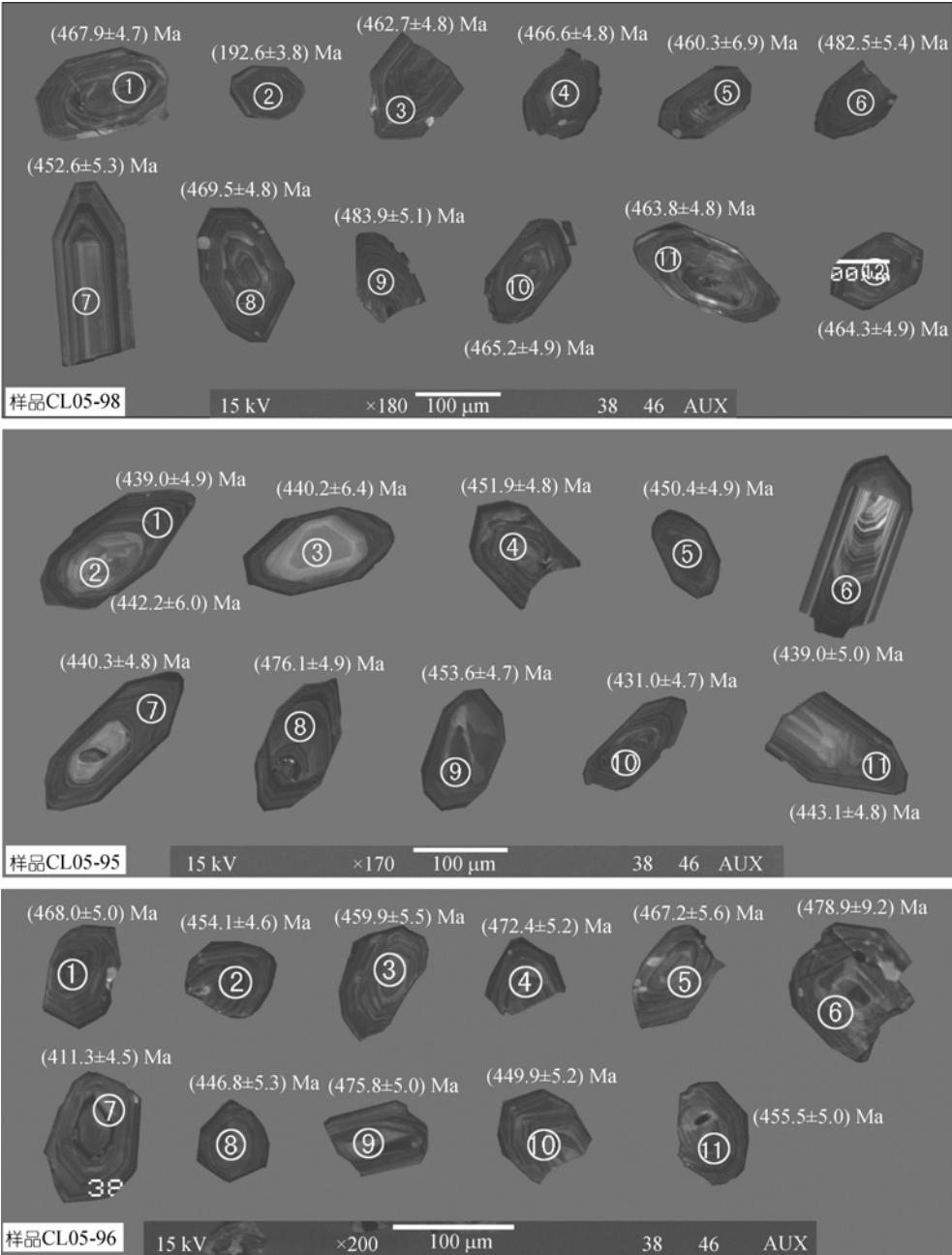


图 6 柴北缘西段花岗岩锆石阴极发光图像

石的振荡环带结构遭到破坏, 形成不规则的港湾状, 如 14 号锆石, 部分锆石的核部结构很复杂, 如 11 号锆石(图 11), 择其振荡环带部位进行测年. 结果表明, 锆石的 U 和 Th 含量分别变化于  $13\times10^{-6}\sim407\times10^{-6}$  和  $10\times10^{-6}\sim443\times10^{-6}$ , Th/U 比值大于 0.5(表 3), 变化于 0.57~1.4 之间 U 和 Th 之间的相关系数为 0.68(图 7).

CL 图像表明, 7 号锆石的内部存在一层黑圈, 可能是后期流体改造的结果, 发生了 Pb 的丢失, 年龄值偏小((247.1±2.9) Ma), 其余各测点得出的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄很稳定, 变化于 (262.2±2.1)~(279.4±9.6) Ma, 平均为 (271.2±1.5) Ma(图 13). 根据锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比值, 计算得出谐和年龄为 (269.4±5.8) Ma,

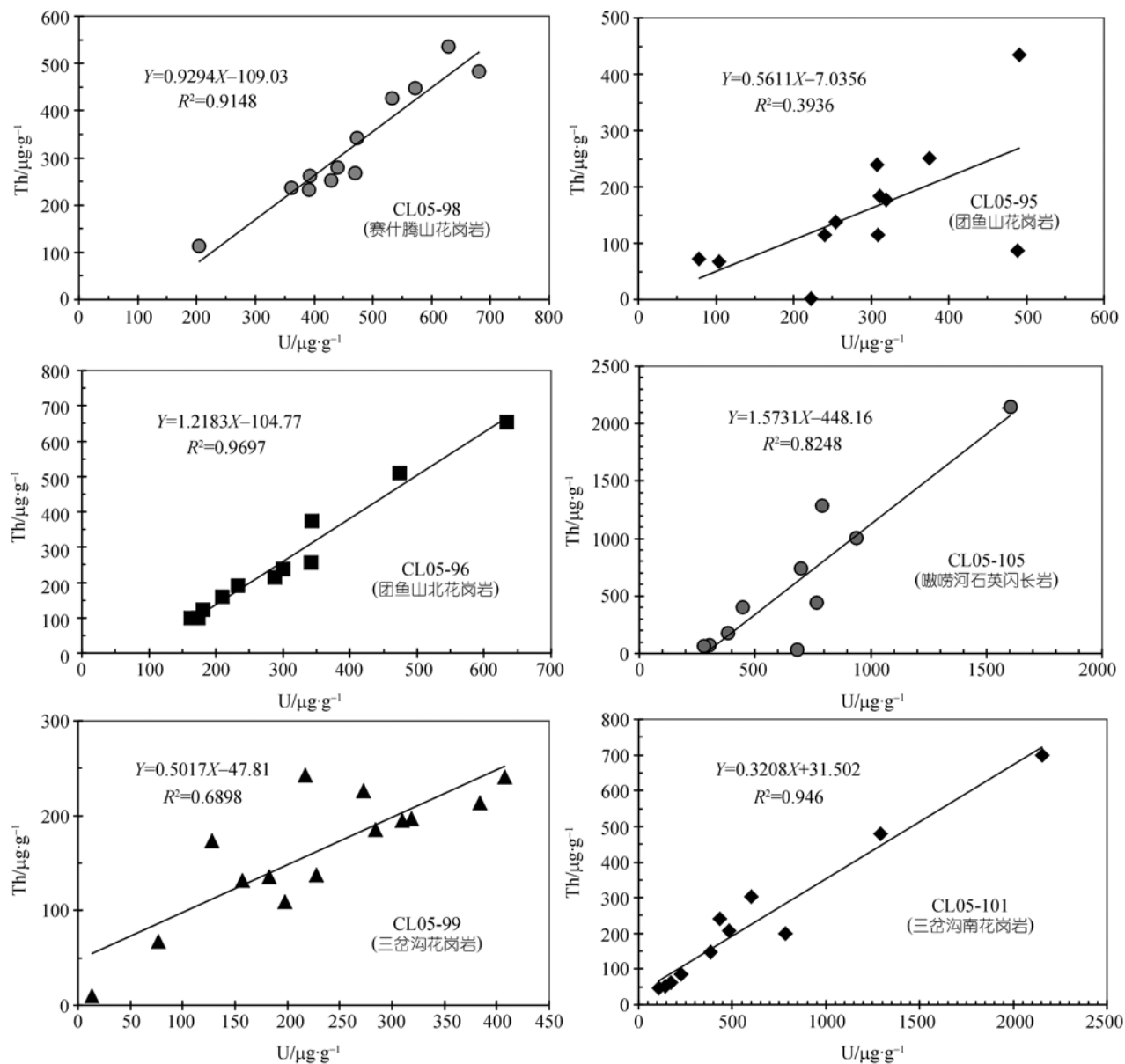


图 7 锆石的 Th-U 相关性分析

与计算的平均年龄在误差范围内是一致的(图 13).

样品 CL05-101(三岔沟南花岗岩). 锆石为柱状, 长宽比为 2:1~3:1, 从阴极发光照片来看, 部分锆石内部具有明显的同心环带结构(如 2, 5, 10, 11 号锆石), 部分锆石具有规则的条带状结构(如 3, 4, 8, 9 号锆石)(图 11). 测定的 11 颗锆石 U 和 Th 含量分别为  $110 \times 10^{-6} \sim 2153 \times 10^{-6}$  和  $46 \times 10^{-6} \sim 699 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值除 6 号锆石外(0.26), 其余的均大于 0.3, 变化于 0.34~0.58 之间(表 3), 锆石的 U 和 Th 之间的相关系

数为 0.94(图 7). 除 6 号锆石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $(2536 \pm 26)$  Ma 较大外, 其余锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄计算后, 得出平均年龄为  $(260.4 \pm 2.3)$  Ma. 根据锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比值, 计算得出谐和等时线上交点年龄为  $(2542 \pm 59)$  Ma, 下交点年龄为  $(262.9 \pm 3.6)$  Ma. 其中, 上交点年龄可解释为花岗岩的源岩时代, 下交点可解释为岩浆侵位结晶的年龄. 并且, 下交点年龄和计算的平均年龄在误差范围内基本一致(图 14).

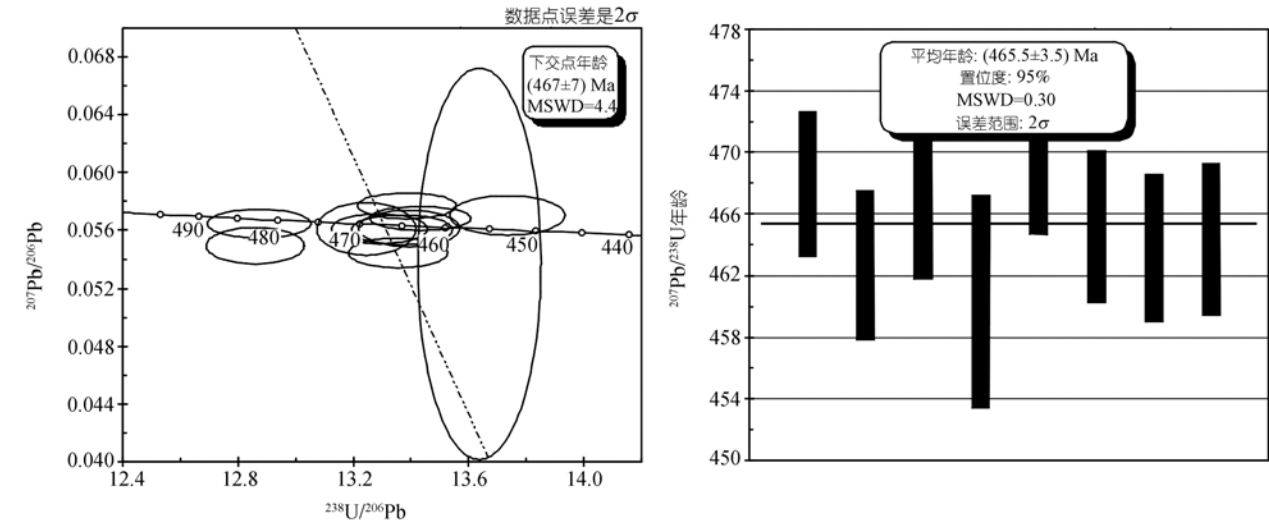


图 8 赛什腾山花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-98)

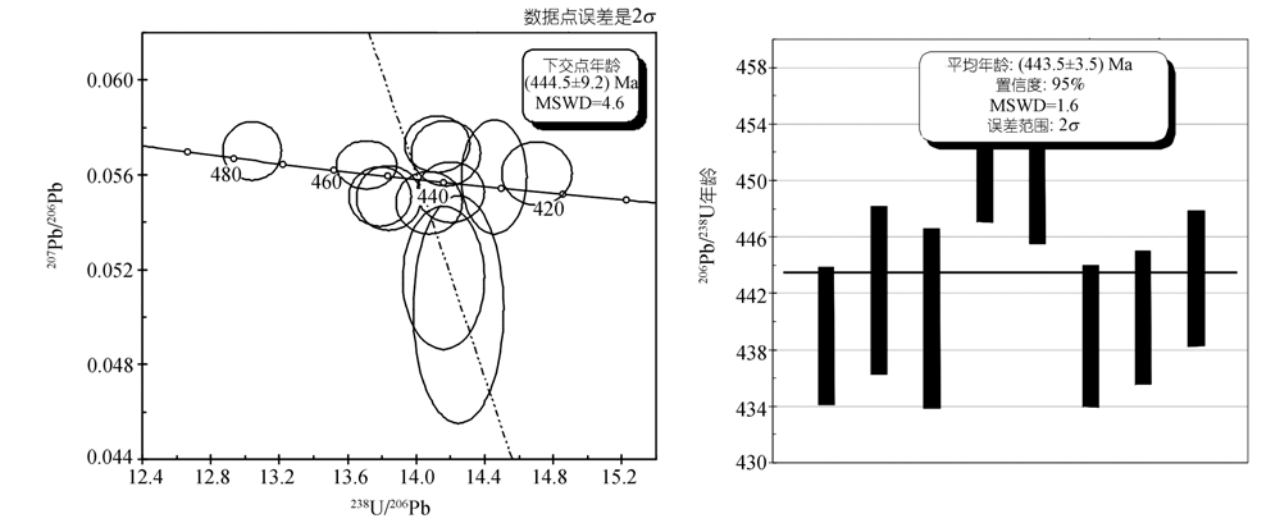


图 9 团鱼山花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-95)

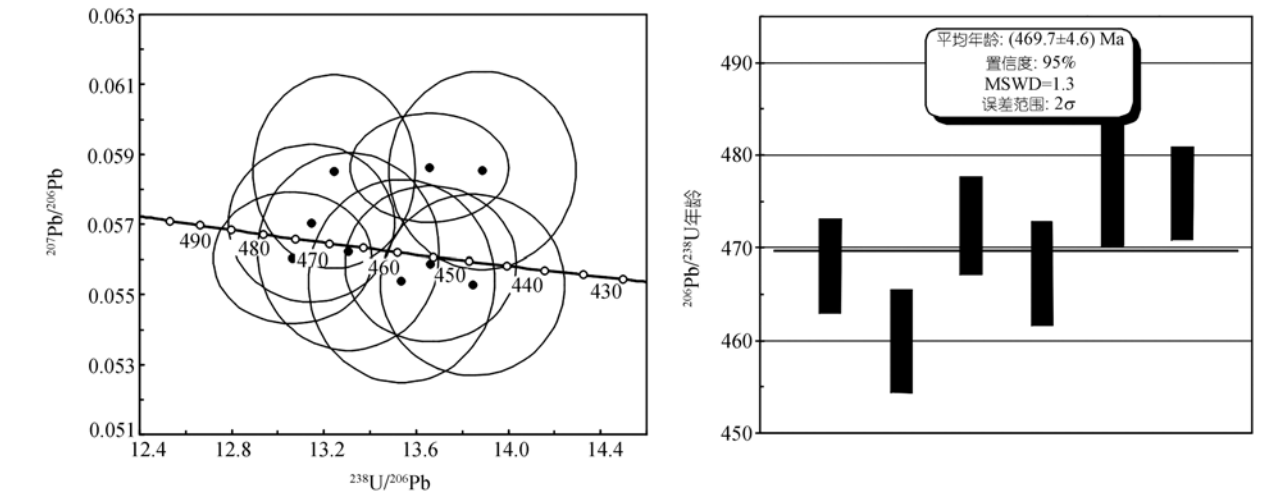


图 10 团鱼山北花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-96)

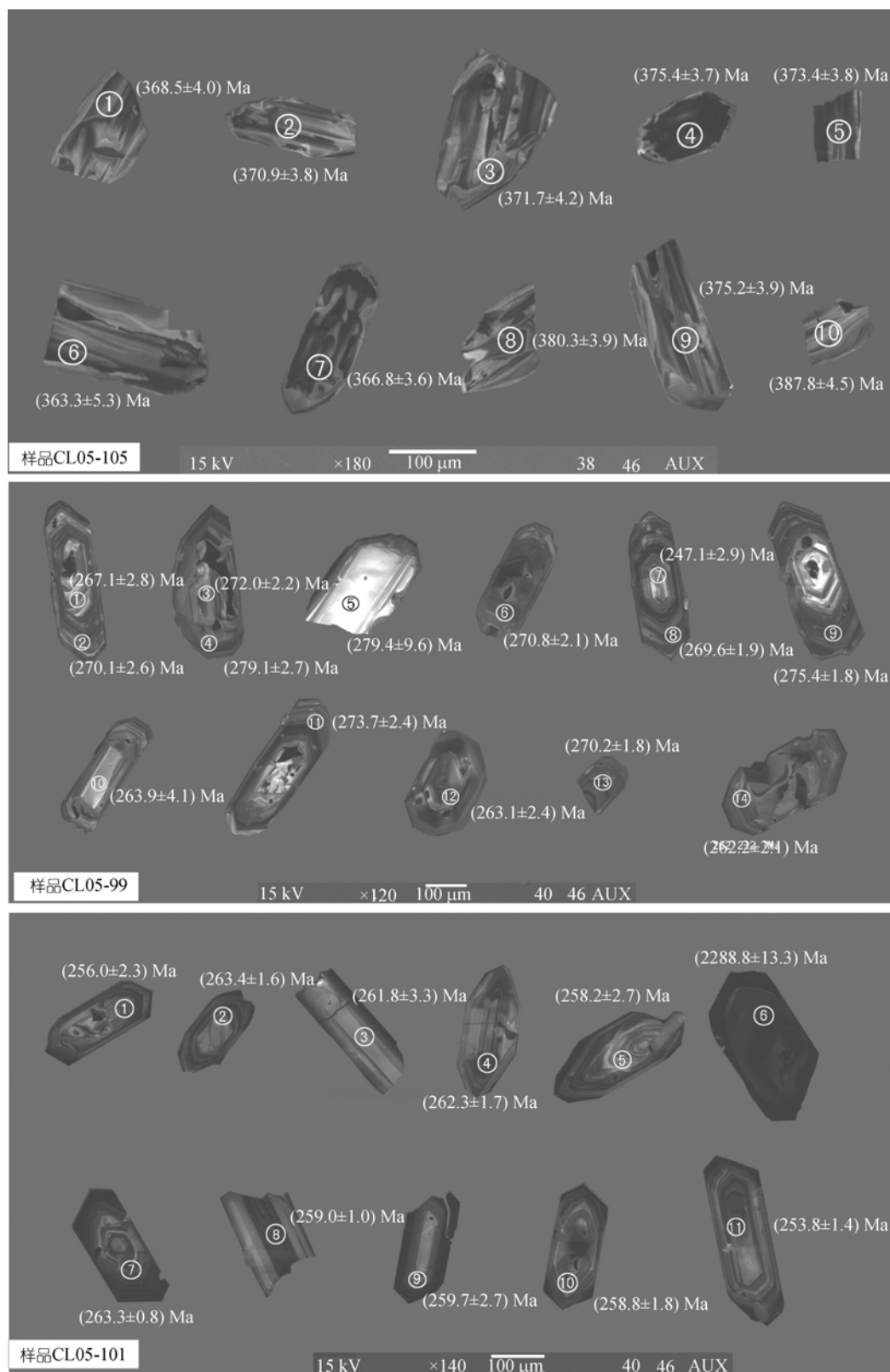


图 11 柴北缘西段花岗岩锆石阴极发光图像

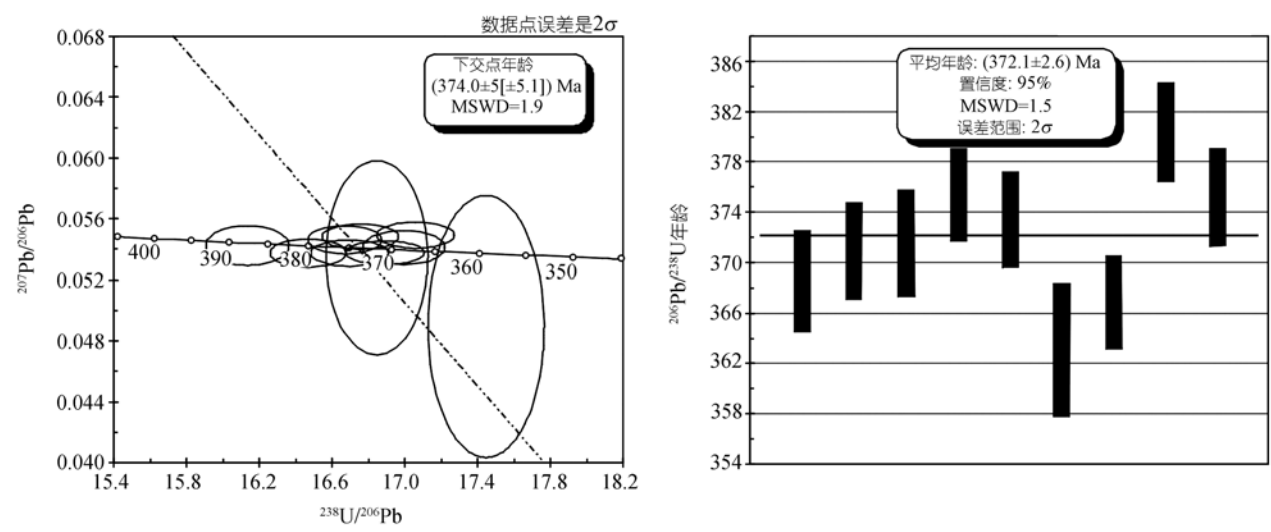


图 12 嗽唠河石英闪长岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-105)

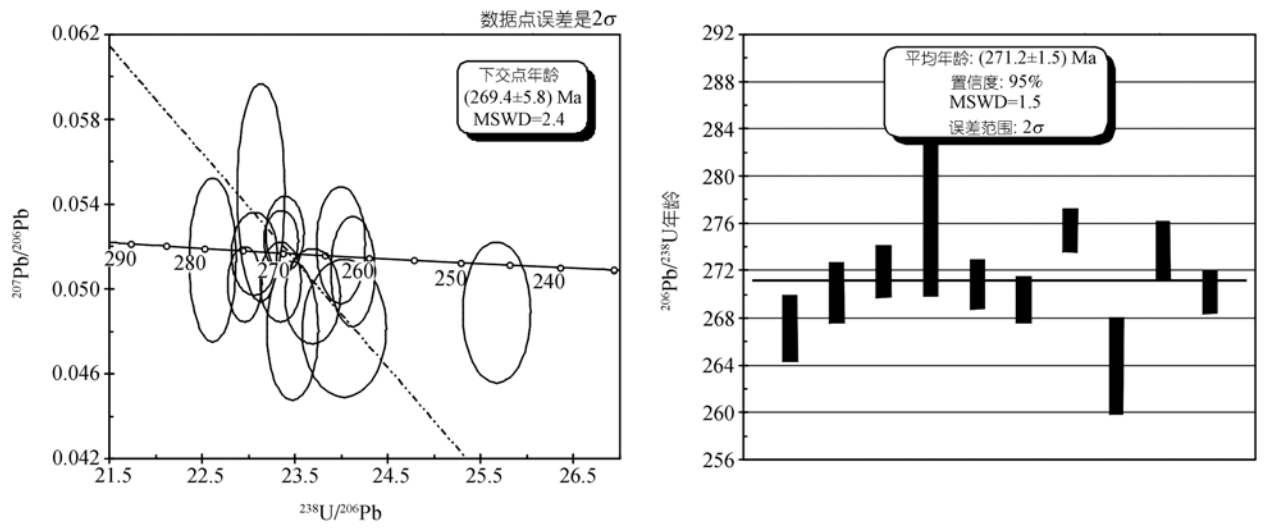


图 13 三岔沟花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-99)

## 4 问题讨论

### 4.1 部分岩体及围岩的时代

柴北缘滩间山群是一套轻微变质的火山岩、碎屑岩及部分碳酸盐岩, 以往的区域地质调查报告均将其划归晚奥陶世<sup>[15]</sup>。李峰等<sup>[43]</sup>对滩间山群的野外地质特征、古生物组合、同位素年龄、构造热事件和火山沉积演化等方面进行了综合分析后, 认为滩间山群形成于早-晚奥陶世。然而, 大量的研究表明, 滩间山群形成的时代不是晚奥陶世<sup>[17,44]</sup>。在绿梁山

地区, 辉长岩体明显地侵入到滩间山群的火山岩中, 辉长岩的单颗粒锆石U-Pb同位素年龄为 $(496.3 \pm 6.2)$  Ma<sup>[17]</sup>; 在锡铁山地区, 滩间山群的中酸性火山岩的锆石U-Pb年龄为 $(486 \pm 13)$  Ma<sup>[44]</sup>; 本文研究的赛什腾山岩体和团鱼山岩体(胜利沟处)与这套地层呈明显的侵入接触, 2个岩体的锆石SHRIMP U-Pb年龄分别为465和470 Ma, 更进一步证明滩间山群的时代至少应该是早奥陶世或更早。

1:20 万马海幅区域地质调查报告<sup>[45]</sup>中认为, 团鱼山岩体东端侵入于泥盆系中, 并被石炭系所覆盖,

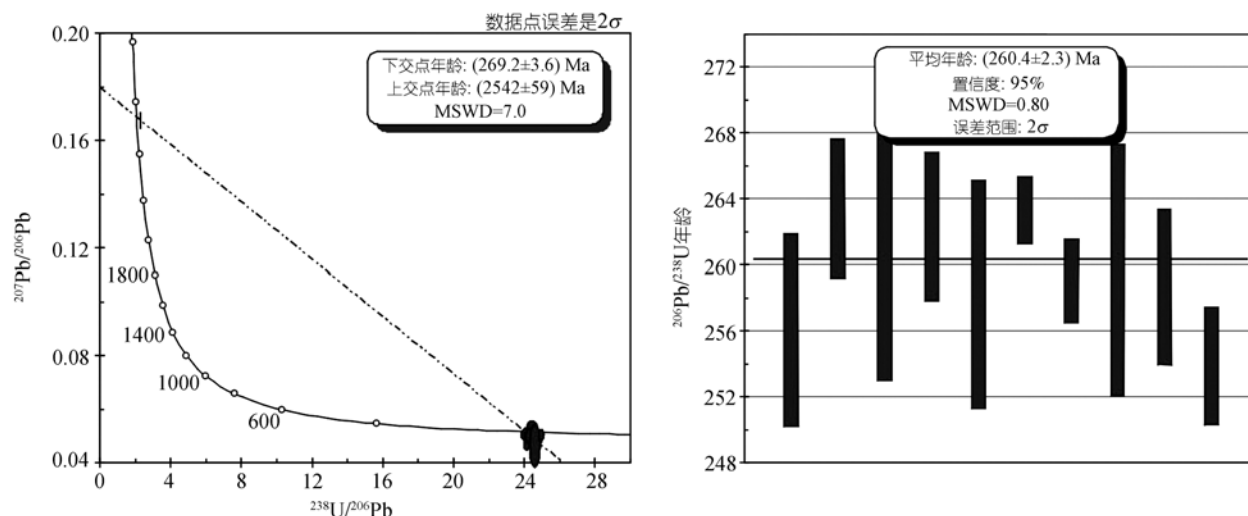


图 14 三岔沟南花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线和平均年龄(样品 CL05-101)

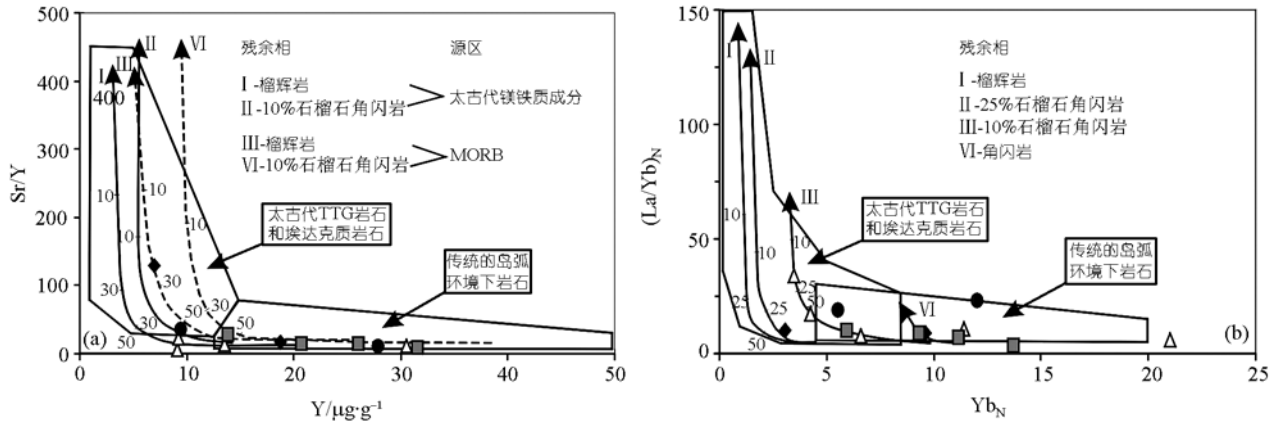
但本次锆石的 SHRIMP U-Pb 定年结果则表明, 该岩体的锆石 SHRIMP 年龄为 443 Ma, 因此, 岩体侵入的地层时代可能不是泥盆纪; 如果地层划分是正确的, 那么岩体与地层之间不是侵入关系, 而是泥盆系覆盖于岩体之上. 还有一种可能就是, 团鱼山岩体不是一次侵位形成的, 靠岩体东边又是一期时代较新的岩浆侵入体. 因此, 下一步有必要再进行详细的野外工作, 确定岩体与围岩之间的关系和不同期次侵入岩之间的关系.

原区域地质调查报告<sup>[45]</sup>认为, 嗽唠河岩体的石英闪长岩时代为早古生代, 花岗岩的时代为晚古生代. 作者曾在嗽唠河南边取样, 测得该岩体的花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄变化于 445~496 Ma, 平均为 473 Ma<sup>[20]</sup>. 虽然测定的数据偏少, 且误差略大, 但仍可指示其花岗岩的时代属早古生代. 而本次在嗽唠河北采取的石英闪长岩样品, 测定其锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 372 Ma, 指示其属晚古生代, 而不是早古生代. 因此, 该岩体是由先后不同时期岩浆侵位形成的复式岩体<sup>[46]</sup>.

## 4.2 岩浆起源

研究表明, 柴北缘地区早古生代为一活动大陆边缘火山岛弧环境<sup>[17,26,47]</sup>, 存在大洋板块和大陆板块的俯冲作用, 即中元古代的南祁连洋壳于早古生代俯冲于祁连陆壳之下, 并随着温度压力的升高, 俯冲

的块体先后经历绿片岩相-角闪岩相-榴辉岩相的变质作用. 在此过程中, 部分矿物的脱水形成流体<sup>[48~50]</sup>, 流体上升到地幔楔, 发生交代作用, 进而诱发岛弧根部的中下地壳发生部分熔融, 形成了一套岛弧环境下的火成岩组合<sup>[51,52]</sup>. 其中还有部分岩石类似于埃达克质岩石(adakitic), 如柴北缘吉绿素滩间山群火山岩中的英安岩<sup>[47]</sup>. 柴北缘古生代花岗岩类的 Sr 和 Nd 同位素成分分析结果表明, 分布在俯冲碰撞杂岩带上的早古生代花岗岩类(团鱼山和赛什腾山花岗岩)的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  比晚古生代花岗岩类(三岔沟花岗岩)的低, 前者分别变化于 0.70481~0.70573 和 0.512068~0.512142 之间, 后者分别变化于 0.70690~0.70779 和 0.512052~0.512210 之间, 反映前者的原岩主要来自地幔, 后者来自地幔与地壳的混合. 早古生代花岗岩类的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于 0.6~2.2, 为正值, 表明其原岩主要来自亏损的地幔, 可能为拉斑玄武质洋壳,  $T_2\text{DM}$  为 1.03~1.15 Ga, 说明源岩可能为中元古代晚期形成的洋壳; 晚古生代花岗岩类的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为负值, 变化于 -1.8~2.3,  $T_2\text{DM}$  分别为 1.18~1.29 Ga, 说明花岗岩的原岩可能为中元古代下地壳. 结合花岗岩类具有低 Y、高 Sr/Y 比值的特点, 可能反映熔融区残留了榴辉岩质的成分<sup>[53,54]</sup>. 微量元素 Y 和 Sr/Y 比值及  $\text{Yb}_\text{N}$  和  $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  的关系表明(图 15), 早古生代花岗岩类可能为 MORB 约 25% 的部分熔融形成, 并且源区残留榴辉岩相, 说明源区的深度相对较大; 而晚古生


 图 15 花岗岩Y-Sr/Y和Yb<sub>N</sub>-(La/Yb)<sub>N</sub>图解<sup>[55, 56]</sup>

图例同图 2

代花岗岩类的源岩类似于太古代镁铁质岩石, 可能经过>30%的部分熔融后形成, 其残留相含 10%的石榴角闪岩, 说明源区深度相对较浅。此外, 晚古生代岩体中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得一颗老的锆石年龄为 2288 Ma, 可能是源区残留的锆石, 说明古老的地壳参与了花岗质岩浆的形成过程。同时, 嫩河岩体的石英闪长岩含有较多的闪长质微粒包体, 岩石地球化学特征类似于埃达克质岩石, 可能在造山隆起后期, 随着造山带的崩塌、岩石圈的伸展和减薄, 岩石圈处于拉张状态下, 软流圈上涌, 致使本区具有较高的热流值, 中元古代的玄武质中下地壳在低压脱水条件下部分熔融, 形成了石英闪长质岩浆。

总体来看, 所有这些岩石从岛弧过渡到埃达克质, 反映了本区花岗岩的形成与板块的俯冲有关, 除岛弧的根部发生部分熔融外, 早期源区还卷入了洋壳的成分。

### 4.3 柴北缘古生代岩浆活动期次及其与超高压变质作用、构造演化的关系

在原有工作的基础上, 根据以往获得的柴北缘地区花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄<sup>[19, 20~23]</sup>和近期大柴旦地区诸岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄<sup>[24]</sup>, 结合本文的研究结果, 将柴北缘古生代花岗质岩浆活动分为 5 期。即: (1) 早中奥陶世(460~475 Ma), (2) 晚奥陶世(440~450 Ma), (3) 晚志留世-早泥盆世(395~410 Ma), (4) 晚泥盆世(370~385 Ma), (5) 二叠纪(260~275 Ma)。但柴北缘西段没有发现第三期的花岗

岩体。

区内早古生代的花岗质岩浆活动比较频繁, 第一期岩浆活动(460~475 Ma)形成的花岗岩具有岛弧或活动陆缘火成岩的特点, 同时, 花岗岩体的围岩滩间山群的火山岩一部分为岛弧火山岩, 一部分为埃达克岩, 说明早古生代岩浆作用的构造背景为岛弧环境<sup>[52]</sup>, 并且存在洋壳的俯冲, 其中, 埃达克岩是俯冲的洋壳部分熔融形成的<sup>[57]</sup>。不过, 洋壳俯冲的时代应早于第一期花岗质岩浆活动的时代。因为区内的大柴旦鱼卡榴辉岩锆石 <sup>238</sup>U-<sup>206</sup>Pb 表面年龄统计权重平均值为(494.6 ± 6.5) Ma<sup>[58, 59]</sup>, 沙柳河榴辉岩的锆石 U-Pb 年龄为(484 ± 3) Ma<sup>[25, 60]</sup>。宋述光等<sup>[61]</sup>研究了柴北缘石榴橄榄岩后认为, 柴北缘的洋壳俯冲大于 460 Ma。因此, 柴北缘洋壳俯冲发生的超高压变质时代应为 494~460 Ma。而柴北缘地区第一期花岗岩形成的时代与洋壳的俯冲有关。

区内第二期花岗质岩浆活动时代为 440~450 Ma, 而柴北缘片麻岩中含柯石英锆石的TIMS离子探针原位微区U-Pb定年获得超高压变质年龄为(452 ± 13.8) Ma, 但锆石的退变质年龄为(419 ± 6.7) Ma<sup>[7, 62, 63]</sup>, 可见, 柴北缘地区超高压变质作用的时代具有一定的变化区间。之所以出现这种情况, 作者认为, 区内不同地段板块的形状是不规则的, 也就是说部分地段还是洋壳俯冲的时候, 而另外的地段却开始了陆壳的俯冲。所以这一时期形成的花岗岩既有I型的(如团鱼山花岗岩)也有S型的(如柴达木山花岗岩<sup>[21, 24]</sup>)。可见, 本期花岗质岩浆作用也与板块的俯冲有关<sup>[21, 22]</sup>。

区内第三期花岗质岩浆活动的时代为 395~410 Ma. 据目前的研究情况来看, 属本期岩浆活动形成的岩体主要分布在柴北缘的中段和东段, 且常与超高压岩石伴生, 如都兰野马滩花岗岩体(397 Ma)与含柯石英的片麻岩及榴辉岩共生, 而含柯石英糜棱岩化花岗质片麻岩的白云母 Ar-Ar 坪年龄为  $(401.5 \pm 0.5)$  Ma<sup>[5,9]</sup>, 锡铁山花岗质糜棱岩化片麻岩中的白云母 Ar-Ar 坪年龄为  $(405.7 \pm 0.9)$  Ma<sup>[64]</sup>. 由于白云母的 K-Ar 体系封闭温度是  $(350 \pm 50)^\circ\text{C}$ , 所以这些年龄代表了经历超高压变质作用的板块折返到较浅部位(约 10 km)的年龄<sup>[64]</sup>. 因此, 许志琴等<sup>[64]</sup>认为, 这一时代为区内经受超高压变质作用的块体折返的时代. 块体在折返的过程中, 除了磨擦作用外, 由于深部的折沉(断块)使地幔物质和热能直接作用于块体的底部, 使其产生部分熔融, 形成花岗质岩浆<sup>[22,23,56]</sup>. 然而, 柴北缘西段缺少这一时期的花岗岩, 可能反映了该地段俯冲下去的块体未能折返上来.

区内 375 Ma 左右的花岗岩年龄(370~385 Ma)较多, 除本文研究的噶喇河石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 372 Ma 外, 大柴旦地区的巴嘎柴达木湖东南的小岩体和大头羊沟岩体的年龄分别为  $(374.5 \pm 1.6)$ ,  $(372.0 \pm 2.7)$  Ma<sup>[24]</sup>、都兰和乌兰地区也存在这一年龄段的岩体(另文, 待刊). 这些岩体虽然处在不同的地质单元上, 但都具有相同的年龄, 说明这一期花岗质岩浆活动在整个柴北缘地区具有普遍性, 同时, 也说明在 370 Ma 之前, 整个柴北缘地区处于相同的构造环境, 即造山后隆起阶段. 在该阶段, 造山带上不同块体之间的均衡调整而产生的滑塌、拉伸, 引起地壳的部分熔融, 形成该期花岗质岩浆作用. 众所周知, 大陆碰撞造山带拉伸滑塌期间, 花岗岩的侵位是区域温度、压力作用的结果<sup>[65]</sup>. 世界许多古老的造山带上花岗质岩浆侵入作用与拉伸滑塌是同时的, 如加里福尼亚南东部晚中生代造山带<sup>[66]</sup>, 西班牙华力西造山带<sup>[67]</sup>和格林兰元古代造山带等<sup>[68]</sup>. 当柴北缘地区经受超高压变质作用的块体折返到地壳浅部时, 导致原来的块体(未经受超高压变质作用的块体)之间不稳定, 不同块体之间通过拉伸、滑塌、伸展过程而发生重新调整, 由此产生部分熔融形成了第四次岩浆活动, 时代为 375 Ma 左右.

第四次岩浆活动结束之后, 区内地壳继续处于

拉伸阶段, 也就是说, 本区进入了古特提斯演化阶段, 形成了陆相碎屑沉积和浅海相沉积<sup>[69]</sup>. 晚石炭世-早二叠世, 随着古特提斯洋的关闭, 本区的构造应力由拉张变为收缩, 进而发生陆内俯冲, 使柴北缘隆升为古陆<sup>[69]</sup>, 同时, 深部幔源物质和能量的上侵, 导致区内的中下地壳重熔, 形成大量的花岗质岩浆, 时代约为 260~275 Ma, 如本文研究的三岔沟岩体以及都兰地区(另文, 待刊)都存在这一时期形成的花岗岩体, 这就是本区的第五次花岗质岩浆作用.

## 5 结论

(1) 柴北缘西段赛什腾山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(465.4 \pm 3.5)$  Ma, 团鱼山岩体两期侵入岩的年龄分别为  $(469.7 \pm 4.6)$  和  $(443.5 \pm 3.6)$  Ma, 它们均属早古生代奥陶纪; 噶喇河石英闪长岩体为  $(372.1 \pm 2.6)$  Ma, 属晚古生代泥盆纪; 三岔沟岩体的两期侵入岩年龄分别为  $(271.2 \pm 1.5)$  和  $(259.9 \pm 1.2)$  Ma, 属晚古生代二叠纪.

(2) 柴北缘古生代俯冲碰撞杂岩带上早古生代花岗岩类原岩可能为中元古代(1.03~1.15 Ga)形成的、来源于亏损地幔的拉斑玄武质洋壳; 晚古生代花岗岩类的原岩可能为中元古代(1.18~1.29 Ga)的下地壳, 岩浆物质成分以壳幔混合源为主.

(3) 柴北缘早古生代为火山岛弧环境, 存在洋壳和陆壳的俯冲作用, 花岗岩类岩浆可能为 MORB 约 25% 的部分熔融形成, 并且源区残留榴辉岩相; 而晚古生代该区为碰撞后环境, 造山带上不同块体的崩塌、岩石圈的伸展和减薄、软流圈的上涌, 致使成分类似于太古代镁铁质岩石的源岩经过 >30% 的部分熔融形成石英闪长质岩浆, 其残留相含 10% 的石榴角闪岩.

(4) 区内的古生代花岗质岩浆活动可划分为 5 期: 即第一期为 460~475 Ma, 第二期为 440~450 Ma, 第三期为 395~410 Ma, 第四期为 370~385 Ma, 第五期为 260~275 Ma. 其中, 第一、二期岩浆活动与板块的俯冲作用有关, 对应于超高压变质作用; 第三期与经受超高压变质作用的块体折返有关; 第四期与造山后不同块体之间的均衡调整有关; 第五期与区域构造背景由拉张转变为收缩, 进而发生陆内俯冲作用有关.

致谢 审稿专家提出修改意见, 特此致谢.

## 参考文献

- 1 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭中-新元古代地质演化及其对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 2003. 1—186
- 2 李怀坤, 陆松年, 王惠初, 等. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群. 地质调查与研究, 2003, 26(1): 27—37
- 3 林慈奎, 孙勇, 陈丹玲, 等. 柴北缘鱼卡河花岗质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年. 地球化学, 2006, 35(5): 489—505
- 4 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. 科学通报, 1998, 43(14): 1544—1549
- 5 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 青海都兰榴辉岩的发现及对中国中央造山带内高压-超高压变质带研究的意义. 地质学报, 2000, 74(2): 156—168
- 6 宋述光, 杨经绥. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报, 2001, 75(2): 179—185
- 7 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 Metamor Geol*, 2003, 21(6): 631—644 [\[DOI\]](#)
- 8 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲. 地质通报, 2004, 23(9-10): 918—925
- 9 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型的超高压矿物——柯石英. 地质学报, 2001, 75(2): 175—179
- 10 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义. 科学通报, 1996, 41(14): 1485—1488
- 11 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等. 阿尔金发现超高压 (> 3.8 Ga) 石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 2002, 47(9): 657—662
- 12 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 阿尔金英格里萨依花岗质片麻岩超高压变质. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(12): 1184—1192
- 13 张建新, 孟繁聪, 戚学祥. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义. 地质通报, 2002, 21 (3): 123—129
- 14 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的变质演化——石榴石成分环带及矿物反应结构的证据. 岩石学报, 2005, 21(4): 1039—1048
- 15 青海地质矿产局. 青海区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991. 1—662
- 16 肖庆辉, 卢欣祥, 王菲, 等. 柴达木北缘鹰峰环斑花岗岩的时代及地质意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(12): 1193—1200
- 17 袁桂邦, 王惠初, 李惠民, 等. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(1): 36—40
- 18 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据. 岩石学报, 2005, 21(1): 45—56
- 19 卢欣祥, 孙廷贵, 张雪亭, 等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄. 地质学报, 2007, 81(5): 626—634
- 20 吴才来, 杨经绥, 李海兵, 等. 祁连南缘喇嘛山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. 岩石学报, 2001, 17(2): 215—221
- 21 吴才来, 杨经绥, Wooden J L, 等. 柴达木山花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 科学通报, 2001, 46(20): 1743—1747
- 22 吴才来, 杨经绥, Wooden J L, 等. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 科学通报, 2004, 49(16): 1667—1672
- 23 Wu C L, Wooden J L, Yang J S, et al. Granitic magmatism in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Northwest China. *Int Geol Rev*, 2006, 48: 223—240 [\[DOI\]](#)
- 24 吴才来, 郝源红, 吴锁平, 等. 柴北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 2007, 23(8): 1861—1875
- 25 辛后田, 郝国杰, 王惠初, 等. 柴北缘前震旦纪地层系统的新认识. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(2): 113—119
- 26 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. 地质通报, 2002, 21(1): 19—23
- 27 王惠初, 李怀坤, 陆松年, 等. 柴北缘鱼卡地区达肯大坂岩群的地质特征与构造环境. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 253—262
- 28 McCulloch M T, Chappell B W. Nd isotopic characteristics of S and I-type granites. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 58: 51—64 [\[DOI\]](#)
- 29 Liew T C, Hofmann A W. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian Fold belt of central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study. *Mineral Petrol*, 1988, 98: 129—138 [\[DOI\]](#)
- 30 李献华, 赵振华, 桂训唐, 等. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 同位素制约. 地球化学, 1991, 3: 255—264
- 31 Ludwig K R. *Squid 1.02: A user's manual*: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 2001. 15—35
- 32 Ludwig K R. *User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 40: 1—70
- 33 Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101: 635—643 [\[DOI\]](#)
- 34 Bowden P, Batchelor R A, Chappell B W, et al. Petrological, geochemical and source criteria for the classification of granitic rocks: a discussion. *Phys Earth Planet Int*, 1984, 35: 1—11 [\[DOI\]](#)

- 35 Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry 2*. Elsevier: Amsterdam, 1984. 63—114
- 36 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, 347: 662—665 [\[DOI\]](#)
- 37 Herve´ Martin. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411—429 [\[DOI\]](#)
- 38 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236—244
- 39 张旗, 李承东, 王焰, 等. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. *岩石学报*, 2005, 21(6): 1527—1537
- 40 McDonough W F, Sun S S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-Recent basalts from southeastern Australia and implication for the sub-continental lithosphere. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49: 2051—2067 [\[DOI\]](#)
- 41 Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 132: 288—299 [\[DOI\]](#)
- 42 Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon. *Chem Geol*, 2000, 172: 5—24 [\[DOI\]](#)
- 43 李峰, 吴志亮, 李保珠, 等. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定. *西北地质*, 2006, 39(3): 83—90
- 44 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 等. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. *地质学报*, 2003, 22(7): 487—493
- 45 青海地质局. 区域地质调查报告. 1:200000 马海幅(J-46-XVII), 1981. 1—199
- 46 刘家远. 复式岩体和杂岩体-花岗岩类岩体组合的两种基本形式及其意义. *地质找矿论丛*, 2003, 18(3): 143—148
- 47 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(3): 229—236
- 48 Anderson R N, Uyeda S, Miyashiro A. Geophysical and geochemical constraints at converging plate boundaries, Part I: dehydration in the downgoing slab. *Geophys J R Astron Soc*, 1976, 44: 333—357
- 49 Peacock S M. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 1990, 248: 329—337
- 50 Sorena S S, Jeffrey N G. Accessory minerals and subduction zone metasomatism: a geochemical comparison of two mélanges. *Chem Geol*, 1993, 110: 269—297 [\[DOI\]](#)
- 51 邱家骧, 杨巍然, 夏卫华. 南祁连山早古生代海相火山岩及铜、多金属矿床成矿条件及找矿方向. 祁连山及邻区火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1998. 111—163
- 52 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 柴达木北缘奥陶纪火山作用与构造机制. *西安地质学院学报*, 1996, 18(3): 8—14
- 53 Hugh R R, John T. Adakites—the key to understanding LILE depletion in granulites. *Lithos*, 2005, 79: 61—81 [\[DOI\]](#)
- 54 Defant M J, Kepezhinskas P. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *Eos*, 2001, 82: 68—69
- 55 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemitonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J Geophys Res*, 1990, 95: 21503—21521 [\[DOI\]](#)
- 56 Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology* 1986, 14: 753—756 [\[DOI\]](#)
- 57 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. *地质学报*, 2004, 78(1): 52—64
- 58 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. *地球化学*, 2000, 29(3): 217—222
- 59 Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 2002, 14: 397—404 [\[DOI\]](#)
- 60 郝国杰, 陆松年, 李怀坤, 等. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. *前寒武纪研究进展*, 2001, 24 (3): 154—162
- 61 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 等. 大陆碰撞造山带的两类橄榄岩——以柴北缘超高压变质带为例. *地学前缘*, 2007, 14(2): 129—138
- 62 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中国碰撞造山带中两期超高压变质作用——来自含柯石英锆石的定年证据. *地质学报*, 2003, 77(4): 463—477
- 63 陈龙松, 王勤燕, 陈强, 等. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探. *地学前缘*, 2007, 14(1): 43—55
- 64 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 等. 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*, 2003, 77(2): 163—176
- 65 Leake B E. Granite magmas: their sources, initiation and consequences of emplacement. *Geol Soc J*, 1990, 147: 579—589 [\[DOI\]](#)
- 66 Kula J L, Spell T L, Wells M L. Syntectonic intrusion and exhumation of a Mesozoic plutonic complex in the Late Cretaceous, Granite Mountains, southeastern California. *Geol Soc Am Abst Prog*, 2002, 34(6): 249
- 67 Aranguren A, Tubia J M, Bouchez J L, et al. The Guitiriz Granite, Variscan Belt of northern Spain: extension-controlled emplacement of magma during tectonic escape. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 139: 165—176 [\[DOI\]](#)
- 68 Hutton D H W, Dempster T J, Brown P E, et al. A new mechanism of granite emplacement: intrusion in active extensional shear zones. *Nature*, 1990, 343: 452—455 [\[DOI\]](#)
- 69 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化. *地学前缘*, 2004, 11(3): 115—122