

# 藏北羌塘中部日湾茶卡地区晚三叠世安山岩 与闪长质包体岩石成因及地质意义

吴 浩<sup>1,2</sup>, 李 才<sup>2</sup>, 解超明<sup>2</sup>, 范建军<sup>2</sup>, 陈景文<sup>3</sup>

WU Hao<sup>1,2</sup>, LI Cai<sup>2</sup>, XIE Chaoming<sup>2</sup>, FAN Jianjun<sup>2</sup>, CHEN Jingwen<sup>3</sup>

1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

3. 中国武警黄金部队, 黑龙江 牡丹江 157000

1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

3. Gold Geological Party of Chinese Armed Police Force, Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China

**摘要:** 龙木错-双湖-澜沧江缝合带将羌塘板块划分为南、北 2 个次级板块, 在缝合带两侧大规模发育晚三叠世岩浆作用, 并伴随大量的高压超高压变质岩。在缝合带以南的日湾茶卡地区识别出一套安山岩, 其中发育大量的暗色闪长质捕虏体, 锆石 U-Pb 测年结果在安山岩中获得了  $364.7 \pm 1.9$  Ma 和  $223.9 \pm 1.3$  Ma 两组年龄信息, 锆石原位 Hf 同位素测试结果  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别为  $+7.22 \sim +8.69$  和  $-5.94 \sim -4.14$ 。结合羌塘中部已有的研究成果, 认为闪长质捕虏体形成于晚泥盆世洋壳俯冲背景, 是地幔楔部分熔融底侵至地壳的产物; 而安山岩形成于晚三叠世碰撞后伸展背景, 是深部板片断离机制下深俯冲陆壳边缘一侧熔体混染晚泥盆世新生地壳的产物。安山岩中闪长质捕虏体的发现支持了俯冲带作为大陆生长的重要场所的观点。

**关键词:** 羌塘中部; 晚三叠世; 安山岩; 板片断离; 地壳生长

**中图分类号:** P534.51; P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2018)08-1428-11

Wu H, Li C, Xie C M, Fan J J, Chen J W. The petrogenesis and geological significance of the Late Triassic andesite and dioritic xenolith in the Riwanchaka area, central Qiangtang, northern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(8):1428-1438

**Abstract:** The Qiangtang terrane can be divided into northern and southern terranes by the Longmu-Shuanghu-Lancangjiang Suture Zone (LSLSZ). Late Triassic magmatic rocks are widely exposed on both sides of LSLSZ, coeval with exhumation of the metamorphic rocks. Recently, Late Triassic andesite and dioritic xenolith were identified in the Riwanchaka area of central Qiangtang. New U-Pb zircon ages and geochemical and Hf isotopic data for andesite and dioritic xenolith are reported in this paper. Crystallized and inherited zircons from the andesites yielded ages of  $223.9 \pm 1.3$  Ma and  $364.7 \pm 1.9$  Ma, with initial  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values being  $-5.94$  to  $-4.14$  and  $+7.22$  to  $+8.69$ , respectively. Together with recently published data, the authors hold that the dioritic xenoliths were derived from the mantle wedge in an oceanic subduction setting of Late Devonian while the andesites were derived from mixing between Southern Qiangtang crust-derived melt and Late Devonian dioritic juvenile crust under a post-collisional extension setting by slab breakoff. The presence of dioritic xenoliths in the andesites further supports the viewpoint of the existence of a subduction zone as an important site for the growth of continental crust.

**Key words:** central Qiangtang; Late Triassic; andesite; slab breakoff; crustal growth

龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带位于藏北羌塘中部, 西起龙木错, 经双湖、类乌齐、澜沧江, 延入滇西, 全长超过 2000 km<sup>[1-4]</sup>, 将羌塘板块划分为南、北 2 个次级板块(图 1-a)。受羌塘腹地艰苦自然环

收稿日期: 2018-03-12; 修订日期: 2018-04-10

资助项目: 中国博士后科学基金《西藏多不扎地区下白垩统去中拉组的发现与地质意义探讨》(编号: 2016M600353) 和江苏省青年基金项目《西藏中部拉布错蛇绿岩中斜长石的形成时代、岩石成因与大地构造意义》(编号: BK20170877)

作者简介: 吴浩(1989-), 男, 博士后, 从事青藏高原岩浆作用与构造演化研究。E-mail: wuhaojlu@126.com

境的影响,羌塘中部的地质研究相对薄弱,导致该缝合带及其所代表的古大洋相关构造演化问题一直存在较大的争议。从缝合带首次提出至今已近 30 年,从最初缝合带是否存在及能否作为冈瓦纳大陆与欧亚大陆在青藏高原的界线的质疑<sup>[1-2,6-11]</sup>,到缝合带演化时限及羌塘中部高压-超高压变质岩系的折返机制的探讨<sup>[12-19]</sup>,关于该缝合带的讨论从未停止。现在龙木措-双湖-澜沧江缝合带的研究已经吸引了国内外众多学者的关注与参与,其演化过程的研究对于探讨青藏高原早期形成和演化具有重要的指示意义。

最新在日湾茶卡地区开展地质调查过程中,在古生代火山岩中厘定出一套晚三叠世安山岩,并在安山岩中发现了晚泥盆世闪长岩捕虏体,本文对该套安山岩与闪长质捕虏体进行岩石学、年代学、全岩地球化学及 Hf 同位素研究。同时结合羌塘中部已有的研究成果,建立深部动力学演化模型,以期缝合带的构造演化提供约束。

## 1 地质概况

研究区位于羌塘中部、龙木措-双湖-澜沧江缝

合带以南的羌南板块内部的日湾茶卡地区。研究区地层岩石组合复杂,具有混杂带的特征。其中,研究区西部以古生代蛇绿岩组合为主,并出露有晚三叠世折返至地表的蓝片岩、榴辉岩等高压超高压变质岩,与北侧主缝合带上一致;研究区东部主要包括晚泥盆世一早石炭世弧形火山岩、下石炭统日湾茶卡组灰岩和下三叠统硬水泉组砂岩,其火山岩与沉积岩均可与羌北板块南缘的地层岩石组合对比。Wu 等<sup>[19]</sup>提出,日湾茶卡混杂带是从北侧主缝合带及羌北板块的南缘“逃逸”而来的构造块体,于晚三叠世就位于羌南板块的内部。本文样品采自日湾茶卡以南(图 1-b),该套火山岩与两侧古生代蛇绿岩和火山岩呈构造断层接触,局部被第四系沉积物覆盖。

安山岩野外岩石学和镜下特征描述如下:安山岩呈砖红色,斑状结构,块状构造,岩石发育大量的闪长质暗色捕虏体(图 1-c)。斑晶以斜长石斑晶为主,呈自形-半自形短柱状,含量约 20%,粒度约 1mm;辉石斑晶含量较少,小于 5%,粒度在 0.2mm 左右。基质以微晶斜长石和石英为主,呈交织结构(图 1-d)。闪长质暗色捕虏体大小为 2~15cm,多

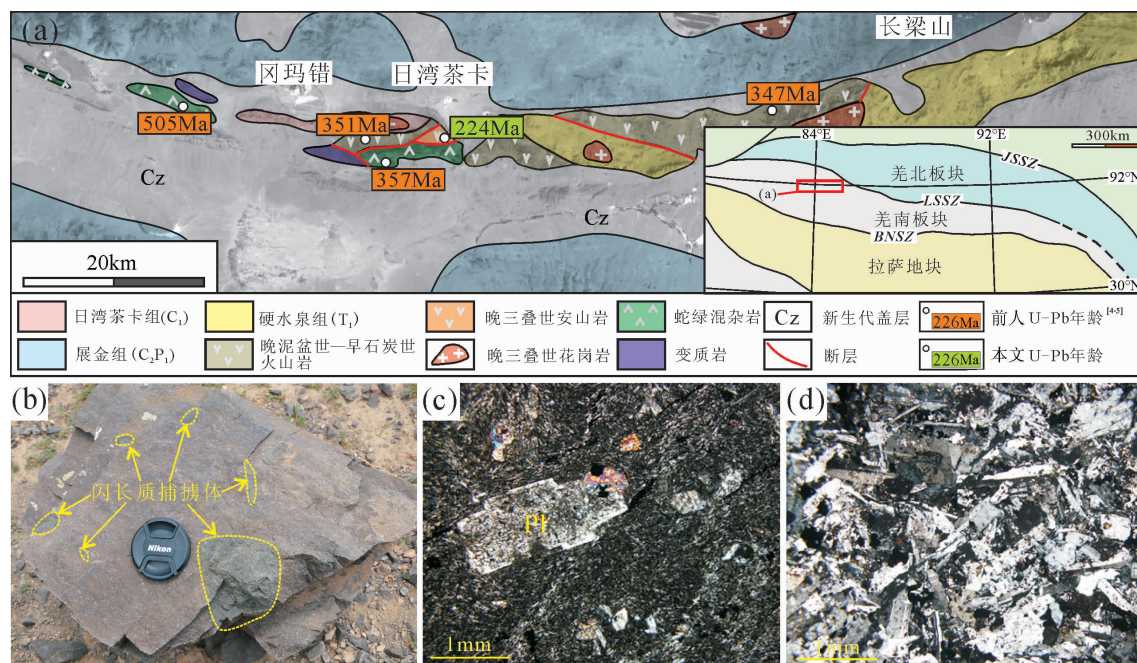


图 1 藏北羌塘中部日湾茶卡地区地质简图(a)及岩石样品野外和镜下照片(b~d)

Fig. 1 Simplified geological map of the Riwanchaka area in central Qiangtang, northern Tibet(a), field and petrographic photographs of samples(b~d)

b—安山岩野外照片(近景);c—安山岩镜下照片;d—闪长质捕虏体镜下照片

为次圆状,镜下矿物以斜长石为主,多呈自形-半自形柱状,并发育聚片双晶,粒度为0.2~1mm;单斜辉石含量约5%,多呈细小微晶展布于斜长石空隙中(图1-e)。

## 2 测试方法与测试结果

### 2.1 锆石U-Pb定年

本次对日湾茶卡地区安山岩样品(RT17)中的25颗锆石进行了U-Pb同位素分析,详细的测试结果见表1。除1颗元古宙继承锆石外,其余24颗锆石可分为2组,并获得2组谐和年龄(图2-a)。其中13颗古老的继承锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为355~375Ma,其年龄加权平均值为 $364.7 \pm 1.9\text{Ma}$ (MSWD=0.00)(图2-b)。其余11颗年轻锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为215~228Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $223.9 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD=0.15)(图2-c)。对比2组锆石的微量元素特征和阴极发光图像发现,古老继承锆石的Th含量为 $118 \times 10^{-6} \sim 435 \times 10^{-6}$ ,U含量为 $110 \times 10^{-6} \sim 261 \times 10^{-6}$ ,Th/U值在0.81~1.59之间,锆石呈不规则圆状,粒径在50~100 $\mu\text{m}$ 之间,发育明显的岩浆振荡韵律环带结构,显示典型岩浆结晶锆石的特征;年轻锆石的Th含量为 $77.3 \times 10^{-6} \sim 342 \times 10^{-6}$ ,U含量为 $154 \times 10^{-6} \sim 688 \times 10^{-6}$ ,Th/U值在0.12~0.85之间(大于0.1),锆石呈短柱状,粒径在80~150 $\mu\text{m}$ 之间,发育明显的岩浆振荡韵律环带结构,显示出典型岩浆结晶锆石的特征。尽管2组锆石的地球化学特征及锆石形态均存在一定的差异,但是均具有典型岩浆结晶锆石的特征。

考虑到安山岩中大量发育暗色捕虏体,同时捕虏体的地球化学特征与区域上晚泥盆世火成岩具有明显的一致性,且晚泥盆世锆石无明显的锆石再

生边,因此推断,安山岩中晚泥盆世锆石来自闪长质捕虏体,其中年轻的晚三叠世锆石是安山岩成岩过程中新结晶形成的,代表了安山岩的成岩时代。

### 2.2 地球化学组成

安山岩与闪长质捕虏体的全岩主量、微量元素含量见表2。安山岩样品主量、微量元素含量变化范围较大, $\text{SiO}_2$ 含量为48.3%~62.7%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为15.0%~20.0%, $\text{K}_2\text{O}$ 含量为0.66%~2.04%, $\text{Na}_2\text{O}$ 含量为2.47%~5.11%, $\text{MgO}$ 含量为3.12%~7.05%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为1.70~6.08,A/CNK值为0.75~0.89, $\text{Mg}^\#$ 值为47~66,相容元素Cr含量为 $80.0 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$ ,Ni含量为 $65.6 \times 10^{-6} \sim 92.4 \times 10^{-6}$ 。在Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(图3-a)中<sup>[20]</sup>,3个样品点落在玄武岩区域,大部分落在安山岩区域;在Co-Th图解<sup>[21]</sup>(图3-b)中,所有样品点落在钙碱性玄武安山岩与安山岩区域;在SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解<sup>[22]</sup>(图3-c)中,样品点整体落在中钾钙碱性区域。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线<sup>[23]</sup>(图4-a)中,安山岩样品呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式, $(\text{La}/\text{Yb})_N=3.95 \sim 5.67$ ,无明显的Eu异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.96 \sim 1.16$ );原始地幔标准化蛛网图<sup>[22]</sup>(图4-b)显示,大离子亲石元素K、Sr、Ba富集,高场强元素Nb、Ta、Ti亏损。尽管其中3件样品的SiO<sub>2</sub>含量较低,但是13件样品的其他主量、微量元素含量基本一致,整体显示连续演化的特征,因此文中对所有样品进行统一讨论。

闪长质捕虏体的 $\text{SiO}_2$ 含量为49.8%~55.6%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为16.9%~18.4%, $\text{K}_2\text{O}$ 含量为0.26%~0.68%, $\text{Na}_2\text{O}$ 含量为6.72%~8.35%, $\text{MgO}$ 含量为3.92%~5.84%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为9.93~29.3,A/CNK

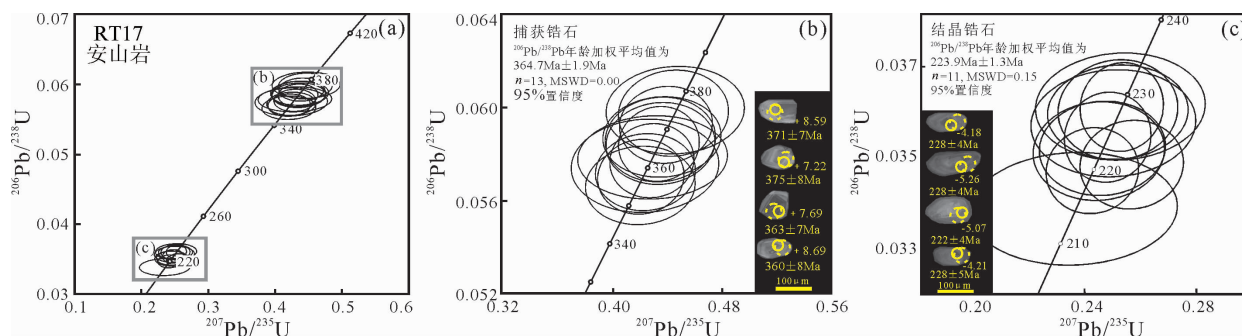


图2 安山岩与闪长质捕虏体锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和阴极发光(CL)图像

Fig. 2 Zircon  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  concordia diagrams and CL images for andesite and dioritic xenolith

表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon isotopic U-Th-Pb analyses

| 点号       | 元素含量/ $10^{-6}$ |     |      | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 同位素比值( $\pm 1\sigma$ ) |                                  |           |                                  |           | 年龄/Ma( $\pm 1\sigma$ )            |           |                                  |           |                                  |           |
|----------|-----------------|-----|------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
|          | Th              | U   | Pb   |                                   | $1\sigma$              | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ |
| 晚三叠世结晶锆石 |                 |     |      |                                   |                        |                                  |           |                                  |           |                                   |           |                                  |           |                                  |           |
| 02       | 171             | 300 | 12.0 | 0.05058                           | 0.00314                | 0.24521                          | 0.01517   | 0.03516                          | 0.00067   | 222                               | 107       | 223                              | 12        | 223                              | 4         |
| 05       | 159             | 202 | 8.53 | 0.05063                           | 0.00407                | 0.24920                          | 0.01983   | 0.03570                          | 0.00076   | 224                               | 141       | 226                              | 16        | 226                              | 5         |
| 06       | 143             | 212 | 8.97 | 0.05064                           | 0.00414                | 0.25176                          | 0.02042   | 0.03606                          | 0.00076   | 224                               | 145       | 228                              | 17        | 228                              | 5         |
| 09       | 203             | 320 | 13.2 | 0.05056                           | 0.00293                | 0.25087                          | 0.01441   | 0.03599                          | 0.00071   | 221                               | 96        | 227                              | 12        | 228                              | 4         |
| 10       | 132             | 154 | 6.43 | 0.05030                           | 0.00539                | 0.23480                          | 0.02491   | 0.03386                          | 0.00080   | 209                               | 195       | 214                              | 20        | 215                              | 5         |
| 11       | 98.0            | 671 | 23.9 | 0.05063                           | 0.00214                | 0.24713                          | 0.01042   | 0.03540                          | 0.00064   | 224                               | 64        | 224                              | 8         | 224                              | 4         |
| 12       | 195             | 326 | 13.1 | 0.05040                           | 0.00330                | 0.24389                          | 0.01581   | 0.03510                          | 0.00070   | 213                               | 111       | 222                              | 13        | 222                              | 4         |
| 13       | 85.3            | 688 | 23.7 | 0.05051                           | 0.00232                | 0.24153                          | 0.01112   | 0.03468                          | 0.00061   | 219                               | 74        | 220                              | 9         | 220                              | 4         |
| 20       | 153             | 237 | 9.75 | 0.05061                           | 0.00343                | 0.25083                          | 0.01692   | 0.03594                          | 0.00067   | 223                               | 120       | 227                              | 14        | 228                              | 4         |
| 21       | 179             | 304 | 11.8 | 0.05331                           | 0.00260                | 0.25590                          | 0.01244   | 0.03481                          | 0.00063   | 342                               | 77        | 231                              | 10        | 221                              | 4         |
| 23       | 342             | 406 | 17.6 | 0.05075                           | 0.00202                | 0.25227                          | 0.01001   | 0.03605                          | 0.00063   | 229                               | 59        | 228                              | 8         | 228                              | 4         |
| 晚泥盆世继承锆石 |                 |     |      |                                   |                        |                                  |           |                                  |           |                                   |           |                                  |           |                                  |           |
| 01       | 118             | 132 | 9.33 | 0.05351                           | 0.00458                | 0.42418                          | 0.03583   | 0.05750                          | 0.00132   | 350                               | 150       | 359                              | 26        | 360                              | 8         |
| 03       | 126             | 123 | 9.27 | 0.05406                           | 0.00410                | 0.44639                          | 0.03357   | 0.05989                          | 0.00124   | 374                               | 133       | 375                              | 24        | 375                              | 8         |
| 04       | 232             | 193 | 15.0 | 0.05391                           | 0.00356                | 0.43661                          | 0.02867   | 0.05874                          | 0.00114   | 367                               | 113       | 368                              | 20        | 368                              | 7         |
| 07       | 359             | 226 | 19.4 | 0.05402                           | 0.00328                | 0.44510                          | 0.02671   | 0.05976                          | 0.00122   | 372                               | 98        | 374                              | 19        | 374                              | 7         |
| 08       | 190             | 174 | 13.2 | 0.05387                           | 0.00458                | 0.42974                          | 0.03634   | 0.05786                          | 0.00118   | 366                               | 155       | 363                              | 26        | 363                              | 7         |
| 14       | 119             | 148 | 10.4 | 0.05402                           | 0.00331                | 0.43548                          | 0.02642   | 0.05846                          | 0.00116   | 372                               | 101       | 367                              | 19        | 366                              | 7         |
| 15       | 435             | 261 | 21.6 | 0.05393                           | 0.00257                | 0.42919                          | 0.02040   | 0.05772                          | 0.00105   | 368                               | 74        | 363                              | 14        | 362                              | 6         |
| 16       | 170             | 155 | 11.5 | 0.05379                           | 0.00309                | 0.42446                          | 0.02425   | 0.05723                          | 0.00109   | 362                               | 94        | 359                              | 17        | 359                              | 7         |
| 17       | 122             | 110 | 8.26 | 0.05387                           | 0.00336                | 0.43547                          | 0.02681   | 0.05863                          | 0.00120   | 366                               | 102       | 367                              | 19        | 367                              | 7         |
| 19       | 185             | 145 | 10.9 | 0.05385                           | 0.00343                | 0.42072                          | 0.02661   | 0.05666                          | 0.00111   | 365                               | 107       | 357                              | 19        | 355                              | 7         |
| 22       | 245             | 197 | 14.8 | 0.05355                           | 0.00269                | 0.42109                          | 0.02096   | 0.05703                          | 0.00106   | 352                               | 79        | 357                              | 15        | 358                              | 6         |
| 24       | 219             | 199 | 14.9 | 0.05391                           | 0.00245                | 0.43442                          | 0.01962   | 0.05844                          | 0.00106   | 367                               | 69        | 366                              | 14        | 366                              | 6         |
| 25       | 152             | 162 | 11.8 | 0.05379                           | 0.00278                | 0.43958                          | 0.02255   | 0.05926                          | 0.00109   | 362                               | 82        | 370                              | 16        | 371                              | 7         |

注:测试单位为中国地质大学(北京)地质实验中心

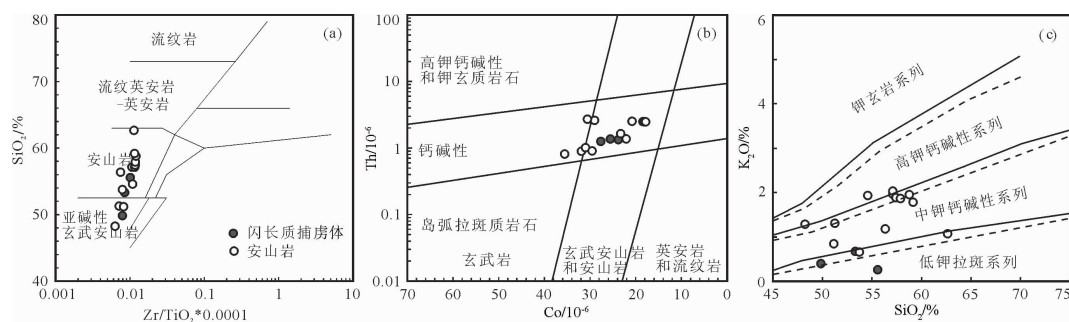


图3 安山岩与闪长质捕虏体地球化学判别图解

Fig. 3 Geochemical classification diagrams for andesite and dioritic xenolith

a— $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ — $\text{SiO}_2$ 图解;b—Co—Th图解;c— $\text{SiO}_2$ — $\text{K}_2\text{O}$ 图解

值为0.74~1.16,  $\text{Mg}^\#$ 值为47~56, 相容元素Cr含量为 $69.8 \times 10^{-6}$ ~ $75.3 \times 10^{-6}$ , Ni含量为 $24.0 \times 10^{-6}$ ~

$35.9 \times 10^{-6}$ 。在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ — $\text{SiO}_2$ 图解<sup>[20]</sup>(图3-a)中,样品点落在玄武岩与安山岩区域;在Co—Th图解<sup>[21]</sup>

表 2 安山岩与闪长质捕虏体主量和微量元素分析结果

Table 2 Major and trace element compositions of andesites and dioritic xenoliths

| 元素                             | R3T4H11 | R3T4H12 | R3T4H13 | R3T4H14 | R3T4H18 | R3T6H1 | R3T6H2 | R3T6H4 | R3T6H5 | R3T6H6 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 安山岩                            |         |         |         |         |         |        |        |        |        |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 53.0    | 57.6    | 52.5    | 49.3    | 54.9    | 57.3   | 55.5   | 61.2   | 56.2   | 55.7   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.13    | 1.01    | 0.90    | 0.93    | 0.87    | 1.01   | 1.08   | 0.74   | 1.03   | 1.05   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.5    | 15.0    | 16.3    | 19.3    | 16.0    | 16.9   | 17.1   | 14.6   | 16.8   | 17.1   |
| TF <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.87    | 7.95    | 8.35    | 8.20    | 8.04    | 7.23   | 7.97   | 6.66   | 7.84   | 7.85   |
| MnO                            | 0.13    | 0.11    | 0.11    | 0.10    | 0.11    | 0.10   | 0.10   | 0.09   | 0.09   | 0.10   |
| MgO                            | 5.49    | 4.71    | 6.88    | 4.05    | 5.05    | 3.04   | 3.14   | 3.55   | 3.14   | 3.14   |
| CaO                            | 6.65    | 5.95    | 9.37    | 8.57    | 8.53    | 5.81   | 5.79   | 6.89   | 6.08   | 5.86   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.18    | 3.04    | 2.41    | 4.92    | 2.56    | 3.87   | 4.28   | 2.72   | 3.90   | 4.10   |
| K <sub>2</sub> O               | 1.87    | 1.73    | 0.64    | 0.81    | 1.14    | 1.90   | 1.98   | 1.04   | 1.81   | 1.83   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.25    | 0.22    | 0.17    | 0.17    | 0.19    | 0.26   | 0.21   | 0.16   | 0.21   | 0.21   |
| 烧失量                            | 1.94    | 1.94    | 1.50    | 2.56    | 1.79    | 1.95   | 1.90   | 1.75   | 1.99   | 2.07   |
| 总计                             | 99.1    | 99.3    | 99.1    | 98.9    | 99.1    | 99.4   | 99.1   | 99.4   | 99.1   | 99.1   |
| Cr                             | 96.2    | 91.1    | 154     | 98.7    | 109     | 20.8   | 22.0   | 59.6   | 17.1   | 18.7   |
| Co                             | 30.6    | 29.0    | 35.5    | 23.3    | 31.9    | 20.8   | 18.0   | 22.1   | 17.8   | 18.4   |
| Ni                             | 92.1    | 87.9    | 121.6   | 24.5    | 83.8    | 11.8   | 10.2   | 35.4   | 8.4    | 9.2    |
| Cu                             | 94.1    | 86.8    | 54.4    | 49.3    | 79.1    | 121.8  | 116.4  | 55.2   | 39.1   | 132.0  |
| Zn                             | 86.1    | 76.4    | 69.8    | 73.4    | 77.8    | 88.3   | 67.5   | 76.9   | 67.1   | 69.6   |
| Ga                             | 19.1    | 17.9    | 16.9    | 17.7    | 18.8    | 22.2   | 19.0   | 18.1   | 18.6   | 19.3   |
| Rb                             | 37.4    | 33.5    | 11.4    | 17.3    | 25.3    | 36.0   | 35.2   | 20.8   | 30.9   | 32.2   |
| Sr                             | 636     | 635     | 475     | 1054    | 645     | 786    | 835    | 701    | 743    | 811    |
| Y                              | 21.0    | 19.9    | 16.1    | 16.3    | 14.9    | 21.5   | 19.0   | 15.3   | 19.2   | 19.5   |
| Zr                             | 126     | 120     | 72.8    | 79.3    | 66.3    | 124    | 118    | 85.7   | 125    | 127    |
| Nb                             | 7.29    | 6.90    | 4.72    | 4.27    | 3.67    | 7.86   | 6.04   | 4.27   | 6.07   | 6.14   |
| Cs                             | 1.76    | 1.59    | 1.07    | 1.31    | 2.35    | 3.20   | 2.52   | 1.78   | 2.48   | 2.98   |
| Ba                             | 543     | 636     | 250     | 236     | 424     | 664    | 563    | 366    | 581    | 596    |
| La                             | 15.9    | 15.1    | 8.91    | 11.6    | 9.1     | 17.0   | 15.2   | 11.7   | 15.5   | 15.4   |
| Ce                             | 33.5    | 31.8    | 19.6    | 24.6    | 20.1    | 35.7   | 31.6   | 24.5   | 32.1   | 32.2   |
| Pr                             | 4.25    | 4.04    | 2.62    | 3.15    | 2.67    | 4.42   | 3.96   | 3.15   | 4.05   | 4.03   |
| Nd                             | 17.9    | 17.1    | 11.6    | 13.5    | 12.0    | 18.7   | 16.6   | 13.5   | 16.9   | 16.9   |
| Sm                             | 4.10    | 3.90    | 2.89    | 3.17    | 2.88    | 4.26   | 3.77   | 3.13   | 3.87   | 3.88   |
| Eu                             | 1.38    | 1.33    | 1.10    | 1.10    | 1.12    | 1.36   | 1.25   | 1.15   | 1.27   | 1.28   |
| Gd                             | 4.22    | 3.98    | 3.12    | 3.25    | 3.04    | 4.39   | 3.86   | 3.21   | 3.89   | 3.95   |
| Tb                             | 0.63    | 0.59    | 0.47    | 0.48    | 0.45    | 0.68   | 0.57   | 0.46   | 0.57   | 0.58   |
| Dy                             | 3.90    | 3.69    | 3.05    | 3.03    | 2.82    | 4.01   | 3.54   | 2.89   | 3.59   | 3.65   |
| Ho                             | 0.79    | 0.75    | 0.62    | 0.61    | 0.57    | 0.84   | 0.72   | 0.59   | 0.73   | 0.74   |
| Er                             | 2.30    | 2.18    | 1.80    | 1.80    | 1.64    | 2.37   | 2.08   | 1.69   | 2.12   | 2.14   |
| Tm                             | 0.32    | 0.31    | 0.25    | 0.25    | 0.23    | 0.34   | 0.29   | 0.23   | 0.30   | 0.30   |
| Yb                             | 2.12    | 2.03    | 1.62    | 1.65    | 1.46    | 2.23   | 1.94   | 1.52   | 1.98   | 1.97   |
| Lu                             | 0.31    | 0.30    | 0.24    | 0.24    | 0.22    | 0.34   | 0.28   | 0.22   | 0.29   | 0.29   |
| Hf <sup>#</sup>                | 3.14    | 2.99    | 1.85    | 2.06    | 1.73    | 3.01   | 3.12   | 2.17   | 3.15   | 3.21   |
| Ta                             | 0.54    | 0.65    | 0.38    | 0.28    | 0.25    | 0.63   | 0.39   | 0.26   | 0.38   | 0.43   |
| Pb                             | 4.67    | 4.61    | 2.39    | 4.80    | 2.99    | 6.56   | 5.52   | 3.56   | 5.60   | 5.60   |
| Th                             | 2.70    | 2.60    | 0.81    | 1.64    | 0.89    | 2.52   | 2.40   | 1.36   | 2.47   | 2.49   |
| U                              | 0.61    | 0.61    | 0.21    | 0.47    | 0.22    | 0.70   | 0.60   | 0.33   | 0.61   | 0.63   |
| Mg <sup>#</sup>                | 59      | 58      | 66      | 53      | 59      | 49     | 48     | 55     | 48     | 48     |

续表 2

| 元素                              | R3T6H7 | R3T6H9 | R3T6H10 | R3T6H11 | R3T6H12 | R3T6H13 |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                                 | 安山岩    |        |         | 闪长质捕虏体  |         |         |
| SiO <sub>2</sub>                | 55.5   | 46.6   | 49.6    | 47.3    | 53.0    | 51.0    |
| TiO <sub>2</sub>                | 1.05   | 0.97   | 0.94    | 1.40    | 1.09    | 1.26    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 17.1   | 19.3   | 18.4    | 17.2    | 16.1    | 17.6    |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.11   | 9.25   | 8.83    | 10.59   | 8.93    | 10.41   |
| MnO                             | 0.10   | 0.13   | 0.12    | 0.18    | 0.16    | 0.18    |
| MgO                             | 3.11   | 6.23   | 5.81    | 4.08    | 3.74    | 5.59    |
| CaO                             | 5.88   | 9.70   | 8.85    | 5.40    | 4.43    | 2.12    |
| Na <sub>2</sub> O               | 4.12   | 2.91   | 2.68    | 7.93    | 7.26    | 6.43    |
| K <sub>2</sub> O                | 1.90   | 1.24   | 1.26    | 0.38    | 0.25    | 0.65    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.22   | 0.22   | 0.22    | 0.47    | 0.42    | 0.44    |
| 烧失量                             | 1.96   | 2.18   | 2.18    | 4.05    | 3.82    | 3.43    |
| 总计                              | 99.1   | 98.8   | 98.9    | 99.0    | 99.2    | 99.1    |
| Cr                              | 19.2   | 118    | 111     | 69.8    | 71.7    | 75.3    |
| Co                              | 18.0   | 29.5   | 31.0    | 23.8    | 25.5    | 27.7    |
| Ni                              | 11.2   | 87.8   | 80.1    | 24.0    | 35.3    | 35.9    |
| Cu                              | 33.3   | 73.1   | 62.8    | 62.9    | 43.8    | 31.1    |
| Zn                              | 68.5   | 63.4   | 69.5    | 85.3    | 91.9    | 96.9    |
| Ga                              | 18.5   | 17.3   | 19.0    | 21.3    | 17.5    | 21.1    |
| Rb                              | 33.1   | 23.1   | 27.0    | 6.9     | 5.0     | 13.4    |
| Sr                              | 774    | 616    | 648     | 259     | 282     | 356     |
| Y                               | 19.1   | 14.0   | 15.6    | 21.4    | 19.3    | 21.5    |
| Zr                              | 125    | 62.9   | 69.5    | 116     | 115     | 112     |
| Nb                              | 6.04   | 3.35   | 3.75    | 6.53    | 6.50    | 6.31    |
| Cs                              | 2.97   | 2.20   | 2.81    | 0.29    | 0.32    | 1.08    |
| Ba                              | 561    | 398    | 453     | 151     | 103     | 244     |
| La                              | 15.3   | 8.79   | 9.76    | 15.9    | 15.9    | 16.7    |
| Ce                              | 31.9   | 19.2   | 21.3    | 33.9    | 34.0    | 34.8    |
| Pr                              | 4.02   | 2.56   | 2.84    | 4.41    | 4.32    | 4.45    |
| Nd                              | 16.8   | 11.5   | 12.7    | 19.1    | 18.1    | 18.6    |
| Sm                              | 3.84   | 2.78   | 3.08    | 4.36    | 3.98    | 4.07    |
| Eu                              | 1.25   | 1.07   | 1.16    | 1.43    | 1.09    | 1.14    |
| Gd                              | 3.92   | 2.92   | 3.23    | 4.49    | 3.96    | 4.15    |
| Tb                              | 0.57   | 0.43   | 0.48    | 0.64    | 0.57    | 0.63    |
| Dy                              | 3.58   | 2.69   | 2.99    | 4.01    | 3.54    | 3.96    |
| Ho                              | 0.72   | 0.54   | 0.60    | 0.81    | 0.72    | 0.81    |
| Er                              | 2.13   | 1.55   | 1.73    | 2.31    | 2.12    | 2.34    |
| Tm                              | 0.29   | 0.21   | 0.24    | 0.32    | 0.29    | 0.33    |
| Yb                              | 1.94   | 1.42   | 1.54    | 2.08    | 2.01    | 2.11    |
| Lu                              | 0.28   | 0.20   | 0.23    | 0.31    | 0.30    | 0.31    |
| Hf                              | 3.16   | 1.65   | 1.80    | 2.84    | 2.79    | 2.71    |
| Ta                              | 0.38   | 0.20   | 0.23    | 0.38    | 0.38    | 0.57    |
| Pb                              | 5.52   | 2.88   | 2.84    | 6.67    | 7.81    | 9.03    |
| Th                              | 2.47   | 0.90   | 1.01    | 1.33    | 1.37    | 1.26    |
| U                               | 0.61   | 0.22   | 0.24    | 0.37    | 0.43    | 0.42    |
| Mg <sup>#</sup>                 | 47     | 61     | 61      | 47      | 49      | 56      |

注:测试单位为中国地质大学(北京)地学实验中心;主量元素含量单位为%,微量元素为10<sup>-6</sup>

(图 3-b)中,样品点落在钙碱性玄武安山岩与安山岩区域;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解<sup>[22]</sup>(图 3-c)中,样品点整体落在中钾钙碱性区域。球粒陨石标准化稀

土元素配分曲线<sup>[23]</sup>(图 4-a)显示,闪长质捕虏体呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式,(La/Yb)<sub>N</sub>=5.50~5.69,具有弱的负 Eu 异常(Eu/

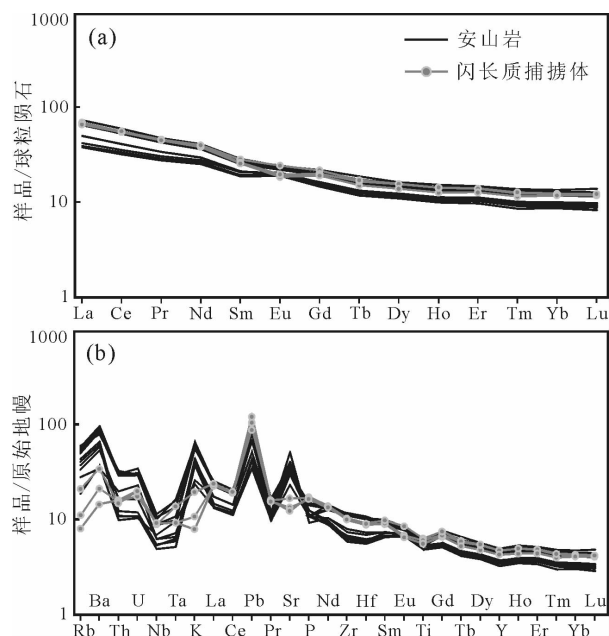


图4 安山岩与闪长质捕虏体球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (原始地幔、球粒陨石和上地壳数据据参考文献[23])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE(a) and primitive-mantle-normalized trace element patterns(b) of andesites and dioritic xenoliths

$Eu^*=0.84 \sim 0.99$ );在原始地幔标准化蛛网图<sup>[22]</sup>(图4-b)中,样品相对富集大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素。

### 2.3 Hf同位素特征

本次对安山岩中的2组锆石进行了原位Hf同位素测试分析,测试结果见表3和图5。测试结果表明,古老继承锆石测点(8件)均具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,变化范围为+7.22~+8.69,对应的一阶段模式年龄( $T_{DM}^1$ )和地壳模式年龄( $T_{DM}^C$ )分别为651~709Ma和755~837Ma。年轻锆石测点(8件)均具有负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,变化范围为-5.94~-4.14,对应的一阶段模式年龄( $T_{DM}^1$ )和地壳模式年龄( $T_{DM}^C$ )分别为1027~1091Ma和1356~1456Ma。

## 3 讨论

### 3.1 岩石成因

#### 3.1.1 闪长质捕虏体

锆石U-Pb测年结果显示,安山岩中含有大量的晚泥盆世继承锆石,并获得365Ma的继承锆石谐和

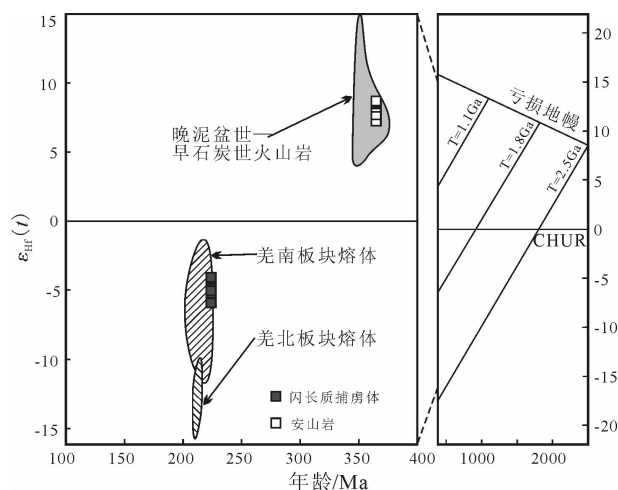


图5 安山岩与闪长质捕虏体年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 协变图

Fig. 5 Age- $\epsilon_{Hf}(t)$  diagram for andesites and dioritic xenoliths CHUR—球粒陨石均—源区

年龄。而闪长质捕虏体具有低 $TiO_2$ 、高 $Na_2O$ 、高Cr、Ni含量、高 $Mg^{\#}$ 值,以及大离子亲石元素富集和高场强元素亏损的特征,与羌塘中部晚泥盆世—早石炭世安山岩地球化学特征相似<sup>[5,24]</sup>,具有典型岛弧型钙碱性安山岩的特征。继承锆石的Hf同位素组成也与晚泥盆世—早石炭世岛弧钙碱性火山岩锆石一致<sup>[5,24]</sup>(图5)。因此,闪长质捕虏体应该是晚泥盆世洋壳俯冲过程中受俯冲物质改造的地幔楔部分熔融的产物,继承锆石年龄代表了闪长质捕虏体的形成时代。

#### 3.1.2 安山岩

安山岩的岩石成因一直存在较大的争议,Anderson<sup>[25]</sup>对岩浆混合作用进行了评述,认为基性岩浆与酸性岩浆的混合在许多安山岩的形成过程中起重要作用。那日湾茶卡地区晚三叠世安山岩是不是岩浆混合的产物?野外观察发现,日湾茶卡晚三叠世安山岩中出现大量的闪长质捕虏体,锆石U-Pb测年在安山岩中获得了大量的晚泥盆世继承锆石,表明安山岩应该是岩浆混合成因。

由于Lu-Hf同位素体系具有较高的封闭温度<sup>[26-27]</sup>,因此锆石Hf同位素比值不会随后期的部分熔融或分离结晶作用而变化。晚三叠世安山岩中2期锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值截然相反,但2组锆石的Hf同位素组成均相对均一,变化区间较小,表明岩浆混合作用并没有导致岩石Hf同位素体系均一化。同时锆石阴极发光图像显示,晚泥盆世继承锆石无明显的后

表 3 锆石 Lu-Hf 同位素组成  
Table 3 Lu-Hf isotopes of zircons

| 点号       | 年龄/Ma | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 1 $\sigma$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | 1 $\sigma$ | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | 1 $\sigma$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | 1 $\sigma$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | 1 $\sigma$ | $T_{\text{DM}}^1$ | $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|----------|-------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 晚三叠世结晶锆石 |       |                                   |            |                                   |            |                                   |            |                              |            |                              |            |                   |                            |                    |
| 3        | 224   | 0.282520                          | 0.000010   | 0.001193                          | 0.000013   | 0.030494                          | 0.000317   | -8.92                        | 0.63       | -4.18                        | 0.65       | 1041              | 1358                       | -0.96              |
| 6        | 224   | 0.282491                          | 0.000011   | 0.000413                          | 0.000008   | 0.010748                          | 0.000166   | -9.93                        | 0.65       | -5.07                        | 0.67       | 1059              | 1407                       | -0.99              |
| 7        | 224   | 0.282519                          | 0.000010   | 0.000625                          | 0.000006   | 0.015140                          | 0.000123   | -8.96                        | 0.61       | -4.14                        | 0.63       | 1027              | 1356                       | -0.98              |
| 8        | 224   | 0.282466                          | 0.000010   | 0.000339                          | 0.000009   | 0.008516                          | 0.000179   | -10.8                        | 0.62       | -5.94                        | 0.64       | 1092              | 1456                       | -0.99              |
| 9        | 224   | 0.282487                          | 0.000011   | 0.000598                          | 0.000010   | 0.015723                          | 0.000218   | -10.1                        | 0.64       | -5.26                        | 0.66       | 1071              | 1418                       | -0.98              |
| 12       | 224   | 0.282515                          | 0.000009   | 0.000357                          | 0.000006   | 0.009421                          | 0.000188   | -9.08                        | 0.61       | -4.21                        | 0.62       | 1025              | 1360                       | -0.99              |
| 13       | 224   | 0.282515                          | 0.000011   | 0.000452                          | 0.000007   | 0.011811                          | 0.000166   | -9.09                        | 0.64       | -4.23                        | 0.66       | 1027              | 1361                       | -0.99              |
| 16       | 224   | 0.282511                          | 0.000011   | 0.000401                          | 0.000001   | 0.010006                          | 0.000043   | -9.23                        | 0.65       | -4.37                        | 0.66       | 1032              | 1368                       | -0.99              |
| 晚泥盆世继承锆石 |       |                                   |            |                                   |            |                                   |            |                              |            |                              |            |                   |                            |                    |
| 1        | 365   | 0.282800                          | 0.000013   | 0.003308                          | 0.000058   | 0.087865                          | 0.001951   | 1.00                         | 0.69       | 8.23                         | 0.72       | 682               | 780                        | -0.90              |
| 2        | 365   | 0.282797                          | 0.000010   | 0.001363                          | 0.000008   | 0.034879                          | 0.000216   | 0.88                         | 0.63       | 8.59                         | 0.65       | 651               | 761                        | -0.96              |
| 4        | 365   | 0.282808                          | 0.000012   | 0.002762                          | 0.000017   | 0.073217                          | 0.000460   | 1.28                         | 0.67       | 8.64                         | 0.69       | 660               | 757                        | -0.92              |
| 5        | 365   | 0.282805                          | 0.000013   | 0.002723                          | 0.000112   | 0.072180                          | 0.002972   | 1.16                         | 0.69       | 8.53                         | 0.73       | 664               | 763                        | -0.92              |
| 10       | 365   | 0.282781                          | 0.000010   | 0.002795                          | 0.000032   | 0.074081                          | 0.001359   | 0.33                         | 0.63       | 7.69                         | 0.66       | 700               | 811                        | -0.92              |
| 11       | 365   | 0.282801                          | 0.000014   | 0.002343                          | 0.000016   | 0.063670                          | 0.000697   | 1.01                         | 0.71       | 8.48                         | 0.73       | 664               | 767                        | -0.93              |
| 14       | 365   | 0.282760                          | 0.000011   | 0.001583                          | 0.000030   | 0.041726                          | 0.000676   | -0.43                        | 0.65       | 7.22                         | 0.68       | 709               | 837                        | -0.95              |
| 15       | 365   | 0.282804                          | 0.000016   | 0.001943                          | 0.000009   | 0.052127                          | 0.000289   | 1.12                         | 0.76       | 8.69                         | 0.78       | 652               | 755                        | -0.94              |

期生长边,考虑到中基性岩石具有高于酸性岩和锆石的熔融温度,所以岩浆的混合作用应该发生于浅层低温环境。晚泥盆世继承锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,Hf同位素组成与区域上晚古生代的陆缘弧火山岩一致;晚三叠世结晶锆石具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,Hf同位素组成与羌南板块同期的侵入岩一致。考虑到闪长质捕虏体是晚泥盆世地幔楔部分熔融的产物,笔者认为,晚三叠世安山岩是羌南板块古老的下地壳熔体在上升过程中与晚泥盆世幔源岩浆底侵形成的新生地壳在浅层低温条件下发生混合的产物。

### 3.2 构造背景

安山岩中晚泥盆世和晚三叠世 2 期年龄信息分别代表了闪长质捕虏体和安山岩的形成时代。本文在新数据的基础上,结合羌塘中部已有的地质资料,分别讨论晚泥盆世和晚三叠世的区域构造环境。

最近在羌塘中部日湾茶卡及红脊山地区先后发现了晚泥盆世—早石炭世(375~345Ma)火山岩,岩性包括基性—酸性所有岩石组合,研究认为形成于大陆边缘弧环境<sup>[5,24]</sup>。该火山岩之上整合覆盖的下石炭统日湾茶卡组以海相沉积灰岩为主,并发现了贵州珊瑚等化石<sup>[28]</sup>。另一方面,区域上报道的晚

泥盆世—早石炭世蛇绿岩具有 SSZ 型特征,显示了俯冲组分的加入<sup>[29]</sup>。同时,羌塘中部冈玛错和果干加年山地区识别出俯冲洋壳熔融成因的埃达克质花岗岩,其形成时代为早石炭世(345Ma)<sup>[30]</sup>。综合以上证据,笔者认为,羌塘中部晚泥盆世—早石炭世处于洋壳俯冲的构造背景。

晚三叠世岩浆岩大规模出露于羌塘中部,具有短时期内持续爆发的特征,应该是同一构造背景下的产物。随着研究的深入,一般认为该期岩浆作用形成于碰撞后伸展背景,主要依据包括以下几个方面:①Chen 等<sup>[31]</sup>在羌塘中部雁石坪地区识别一套具有氧化环境下陆相红层特征的火山—沉积地层,对火山岩夹层的测年结果显示该套地层形成于 240Ma 左右,指示洋盆在晚三叠世早期已经闭合;②对羌塘中部上三叠统沉积环境及古地磁的研究均支持羌南板块与羌北板块在晚三叠世已经拼合为一体<sup>[32-33]</sup>;③Fu 等<sup>[34]</sup>对格拉丹东地区晚三叠世玄武岩的研究认为,该套玄武岩具有板内玄武岩的地球化学特征,形成于大陆裂谷的构造背景;④Wu 等<sup>[19]</sup>对羌塘中部晚三叠世岩浆岩的地球化学组成进行了分析,发现该期岩浆岩具有双峰式的特征,望湖

岭组流纹岩与菊花山地区的英安岩具有高温 A2 型花岗岩的特征,一般认为 A2 型岩石指示碰撞后伸展环境<sup>[35-37]</sup>;⑤羌塘中部晚三叠世同时期爆发了高压超高压变质岩系的折返事件<sup>[12,17-18,38-39]</sup>,而大规模变质岩系的折返往往形成于区域伸展背景。

### 3.3 深部动力学机制

大量的锆石 U-Pb 与单矿物 Ar-Ar 测年结果表明,羌塘中部晚三叠世同时爆发了大规模的岩浆作用与变质岩系折返事件,这与古近纪—新近纪阿尔卑斯地区的地质特征一致。在 20 世纪末,板片断离模型首次被用来解释阿尔卑斯地区的这种地质现象<sup>[40-41]</sup>。板片断离模型认为,在单向俯冲背景下,俯冲的榴辉岩相洋壳在洋盆闭合后会持续拖曳陆壳物质进入地幔深部。然而随着俯冲深度增加,大陆岩石圈与大洋岩石圈之间的密度差会造成俯冲洋壳与陆壳之间发生解耦断离,低密度的陆壳物质发生折返后撤,高密度的洋壳则会持续俯冲进入地幔深部,二者的分离将在岩石圈之下形成“板片窗”,并导致深部软流圈地幔上涌<sup>[42]</sup>。板片断离后,深部软流圈地幔沿板片断离窗口快速上涌,造成上覆岩石圈板块发生伸展作用,同时上涌的软流圈地幔为上覆岩石圈熔融提供了热源条件,形成区域上大规模的岩浆作用。

板片断离窗口通常沿洋壳与陆壳的连接部位呈线状打开,因此受深部热源形态的影响,引发的地表岩浆作用在空间上往往沿造山带大型走滑断裂呈线性展布,与羌塘中部晚三叠世岩浆作用的空间展布形态一致。同时,羌塘中部晚三叠世变质岩系中陆壳物质的识别是大陆俯冲最直接的证据<sup>[43]</sup>,为随后的板片断离提供了条件。晚三叠世洋壳熔融成因的埃达克岩<sup>[44]</sup>是板片断离后上涌软流圈地幔诱导断离洋壳边缘受热熔融的产物,为深部板片断离提供了最重要的岩石学标志。同时,日湾茶卡地区的地层岩石组合可以与缝合带和羌北板块南缘对比,Wu 等<sup>[19]</sup>认为,是板片断离后折返抬升的羌南板块携带上覆混杂带物质“逃逸”远离俯冲带的结果,也是深部板片断离在地表重要的识别标志。综上所述,板片断离模型无疑是羌塘中部晚三叠世构造-岩浆作用最合理的深部动力学解释。

日湾茶卡安山岩形成于晚三叠世岩浆爆发的早期,因此笔者认为,该套安山岩是板片断离机制下,上涌的软流圈地幔诱导深俯冲羌南板块陆壳边

缘部分熔融,并在上升过程中混染晚泥盆世新生地壳的产物。

### 3.4 对大陆地壳生长的指示

安山岩与其中的闪长质捕虏体具有正、负 2 种截然不同的 Hf 同位素组成,且二者均具有较小的变化范围,指示羌塘中部深部地壳存在多元的物质结构组成,也表明地壳物质的均一化是缓慢而漫长的地质过程。正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、相对年轻的 Hf 模式年龄和结晶年龄指示,闪长质捕虏体是羌塘中部在晚泥盆世新生的地壳,而安山岩来自古老地壳物质的再循环。

岛弧模型(island arc model)一直被认为是大陆地壳形成过程中最主要的生长机制<sup>[45-46]</sup>。闪长质捕虏体的出现表明,晚泥盆世洋壳俯冲过程中,来自地幔楔的熔体明显造成了羌塘中部地壳物质的新生长,进一步支持了俯冲带作为大陆地壳最重要的生长场所的认识。

## 4 结 论

(1)羌塘中部日湾茶卡地区新识别的安山岩中获得了 365Ma 和 224Ma 锆石 U-Pb 年龄,分别代表闪长质捕虏体和安山岩的形成时代。

(2)安山岩是晚三叠世碰撞后伸展背景下,羌南板块古老火成岩下地壳熔体混染晚泥盆世新生地壳的产物,其中闪长质捕虏体是晚泥盆世洋壳俯冲背景下地幔楔部分熔融的产物。

(3)日湾茶卡地区安山岩的发现为羌塘中部晚三叠世深部板片断离机制提供了重要的岩石学证据;闪长质捕虏体的研究表明,晚泥盆世洋壳俯冲背景下地幔楔熔体底侵导致了羌塘中部大陆地壳发生了明显的生长,支持了俯冲带作为大陆地壳主要生长场所的观点。

**致谢:**野外工作得到中国地质科学院地质研究所胡培远副研究员、闽东南地质大队江庆源助理工程师的帮助,锆石定年和全岩地球化学分析得到中国地质大学(北京)苏犁和张红雨老师的帮助,在此一并致以衷心的感谢。

## 参考文献

- [1]李才. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, 2: 155-166.
- [2]李才. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. 地质论评, 2008, 1: 105-119.

- [3]李才,程立人,胡克,等.西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M].北京:地质出版社,1995.
- [4]吴彦旺.龙木错-双湖-澜沧江洋历史记录——寒武纪—二叠纪的蛇绿岩[D].吉林大学博士学位论文,2013.
- [5]Jiang Q Y, Li C, Su L, et al. Carboniferous arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Lu-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 100: 132-144.
- [6]邓万明. 青藏古特提斯蛇绿岩带与一冈瓦纳古陆北界 || [C]//张旗. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京:地质出版社, 1996, 172-176.
- [7]邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京:地质出版社, 1999.
- [8]潘桂棠,李兴振. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 701-707.
- [9]潘桂棠,王立全,朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. 地质通报, 2004, 23(1): 12-19.
- [10]潘桂棠,朱弟成,王立全,等. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 371-382.
- [11]李才,黄小鹏,翟庆国,等. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界[J]. 地学前缘, 2006, 4: 136-147.
- [12]Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 1043-1053.
- [13]李才,翟庆国,董永胜,等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 2006, 1: 70-74.
- [14]李才,翟庆国,陈文,等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J]. 岩石学报, 2006, 12: 2843-2849.
- [15]Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleoe-Tethys Ocean[J]. *Geology*, 2008, 36: 351-354.
- [16]Wu H, Xu W, Li C, et al. Partial melting of subducted Southern Qiangtang crust in northern Tibet: evidence from the geochemistry and geochronology of the Riwanhaka granodiorite porphyry in Central Qiangtang[J]. *International Geology Review*, 2018, 17: 1-16.
- [17]Zhai Q G, Zhang R Y, John B M, et al. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: petrology, geochronology and metamorphic  $P-T$  path[J]. *Lithos*, 2011, 125: 173-189.
- [18]Zhai Q G, Jahn B M, Zhang R Y, et al. Triassic subduction of the Paleoe-Tethys in northern Tibet, China: evidence from the geochemical and isotopic characteristics of eclogites and blueschists of the Qiangtang Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 1356-1370.
- [19]Wu H, Li C, Chen J, et al. Late Triassic tectonic framework and evolution of Central Qiangtang, Tibet, SW China[J]. *Lithosphere*, 2016, 8(2): 141-149.
- [20]Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-342.
- [21]Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, et al. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48: 2341-2357.
- [22]Peccherillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- [23]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 528-548.
- [24]Wang B, Wang L, Chen J, et al. Petrogenesis of Late Devonian-Early Carboniferous volcanic rocks in northern Tibet: New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Tethyan Ocean[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 142-156.
- [25]Anderson A T. Magma mixing: petrological process and volcanological tool[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1976, 1(1): 3-33.
- [26]Patchett P J. Hafnium isotope results from mid-ocean ridges and kerguelen[J]. *Lithos*, 1983, 16(1): 47-51.
- [27]Cherniak D J. Diffusion in Zircon[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2003, 53(53): 113-143.
- [28]彭虎. 青藏高原羌塘中部下石炭统日湾茶卡组的物源分析及构造属性探讨[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2015.
- [29]Zhang T Y, Fan J J, Li C, et al. Early Carboniferous ophiolite in central Qiangtang, northern Tibet: record of an oceanic back-arc system in the Palaeo-Tethys Ocean[J]. *International Geology Review*, 2017, 60(4): 449-463.
- [30]施建荣,董永胜,王生云. 藏北羌塘中部果干加年山斜长花岗岩定年及其构造意义[J]. 地质通报, 2009, 9: 1236-1243.
- [31]Chen S S, Shi R D, Yi G D, et al. Middle Triassic volcanic rocks in the Northern Qiangtang (Central Tibet): Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2016, 666: 90-102.
- [32]李才,翟庆国,董永胜,等. 青藏高原羌塘中部果干加年山上三叠统望湖岭组的建立及意义[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1003-1008.
- [33]宋春彦,王剑,付修根,等. 青藏高原羌塘盆地晚三叠世古地磁数据及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 2: 526-535.
- [34]Fu X G, Wang J, Tan F W, et al. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet(China): Age and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(1): 135-144.
- [35]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [36]Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [37]Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(s1/2): 1-29.
- [38]李才. 西藏羌塘中部蓝片岩青闪岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年及其地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 488.

- [39]Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Blueschist—bearing metamorphic core complexes in Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 19–22.
- [40]Blanckenburg F, Davies J H. Slab breakoff: A model for syncollisional magmatism and tectonics in the Alps[J]. *Tectonics*, 1995, 14: 120–131.
- [41]Davies J H, Blanckenburg F. Slab breakoff: a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 129: 85–102.
- [42]Hunee J V, Allen M B. Continental collision and slab break-off: a comparison of 3-D numerical models with observation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1/2): 27–37.
- [43]张修政, 董永胜, 李才, 等. 从洋壳俯冲到陆壳俯冲和碰撞: 来自羌塘中西部地区榴辉岩和蓝片岩地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 2014, 10: 2821–2834.
- [44]Zhai Q G, Jahn B M, Su L, et al. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U–Pb ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 63:162–178.
- [45]Taylor S R. The origin and growth of continents[J]. *Tectonophysics*, 1967, 4(1):17–34.
- [46]Taylor S R. Island arc models and the composition of the continental crust[C]//Talwani M, Pitman III W C. Island arcs, deep sea trenches, and back-arc basins. Maurice Ewing Series, vol. 1. AGU, Washington, D.C, 1977: 325–335.

## 《地质通报》第37卷第9期要目预告

|                                                     |      |
|-----------------------------------------------------|------|
| 内蒙古扎兰屯地区龙江组孢粉组合及地质意义 .....                          | 秦 涛等 |
| 内蒙古科右中旗扎木钦地区新民组地层的厘定及其地质意义 .....                    | 周国武等 |
| 内蒙古德莫哈达白音高老组地层层序及时代研究新进展 .....                      | 林 敏  |
| 乌兰浩特古元古代变质岩系的发现及其地质意义 .....                         | 程招勋等 |
| 大兴安岭扎兰屯地区“前寒武纪变质岩系”的年代学研究及其构造意义 .....               | 那福超等 |
| 大兴安岭中部柴河-蘑菇气地区早白垩世中性火山岩岩石成因及构造背景 .....              | 施 璐等 |
| 扎鲁特盆地坤都地区满克头鄂博组流纹岩锆石 U–Pb 年代学及岩石成因 .....            | 张 超等 |
| 大兴安岭中段扎赉特旗地区满克头鄂博组火山岩年代学及地球化学特征 .....               | 臧延庆等 |
| 内蒙古阿鲁科尔沁旗坤都地区满克头鄂博组火山岩形成时代与地球化学特征 .....             | 郭建刚等 |
| 大兴安岭南段罕庙地区石英二长闪长岩地球化学、年代学特征及其地质意义 .....             | 王 晰等 |
| 内蒙古赤峰地区早二叠世花岗岩锆石 U–Pb 年龄及地球化学特征 .....               | 李 斌等 |
| 大兴安岭南段阿鲁科尔沁旗坤都地区林西组碎屑锆石 U–Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 ..... | 张渝金等 |
| 辽宁本溪连山关地区辽河群浪子山组、里尔峪组形成时代及其地质意义 .....               | 陈井胜等 |
| 乌兰浩特地区早白垩世韧性变形对嫩江-八里罕断裂的响应 .....                    | 王东星等 |
| 内蒙古巴林右旗晚二叠世埃达克质火山岩特征及地质意义 .....                     | 杨文鹏等 |
| 内蒙古扎鲁特旗嘎达苏早三叠世 A 型花岗岩的发现及地质意义 .....                 | 王之晟等 |
| 内蒙古哈拉黑地区燕山期早白垩世岩浆弧(TTG 岩系)地球化学特征、年代学及地质意义 .....     | 张庆奎等 |
| 大兴安岭中部石场山侵入体锆石 U–Pb 定年及构造意义 .....                   | 宋维民等 |
| 大兴安岭北段雅鲁河断裂晚更新世活动记录 .....                           | 钱 程等 |
| 辽西北票(金-羊)盆地北票组层序地层及沉积体系特征 .....                     | 刘 森等 |
| 内蒙古东部马鞍山地区早石炭世高镁安山岩特征及地质意义 .....                    | 杨 宾等 |