

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.712>



西藏聂荣微陆块奥陶纪和侏罗纪岩浆事件的年龄证据

陆露^{1,2}, 钱程³, 赵珍⁴, 吴珍汉⁴, 刘玉双^{1,2}, 周亮⁵, 王岩¹

1. 沈阳师范大学古生物学院, 辽宁沈阳 110034

2. 国土资源部东北亚古生物演化重点实验室, 辽宁沈阳 110034

3. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁沈阳 110000

4. 中国地质科学院, 北京 100081

5. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要: 为了加深对班公湖—怒江缝合带构造演化过程的认识, 选择聂荣微陆块内的花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩中的锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 结果主要显示两组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄: 一组为 453.7 ± 2.5 Ma; 另一组为 176.6 ± 1.1 Ma 和 178.04 ± 0.8 Ma. 花岗质片麻岩中黑云母和花岗闪长质片麻岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年结果显示, 坪年龄分别为 161.8 ± 1.1 Ma 和 178.9 ± 1.2 Ma. 上述年龄结果表明, 聂荣微陆块主要经历了晚奥陶世和早侏罗世两期岩浆事件, 这两期岩浆事件分别与冈瓦纳大陆北缘早古生代的造山作用和班公湖—怒江洋壳的俯冲闭合存在密切的动力学关系.

关键词: 青藏高原; 聂荣微陆块; 锆石 U-Pb 年龄; $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄; 班公湖—怒江缝合带; 地质年代学.

中图分类号: P56

文章编号: 1000-2383(2018)04-1110-15

收稿日期: 2017-12-20

Geochronological Evidence of Ordovician and Jurassic Magmatic Events in Nyainrong Microcontinent, Tibet

Lu Lu^{1,2}, Qian Cheng³, Zhao Zhen⁴, Wu Zhenhan⁴, Liu Yushuang^{1,2}, Zhou Liang⁵, Wang Yan¹

1. *Paleontological College, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China*

2. *Key Laboratory of Evolution of Past Life in Northeast Asia, Ministry of Land and Resources, Shenyang 110034, China*

3. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110000, China*

4. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

5. *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China*

Abstract: In order to deepen our knowledge and understanding about the tectonic evolution of the Bangonghu-Nujiang suture zone(BNS), zircon U-Pb dating was conducted for granitic gneiss and granodioritic gneiss of Nyainrong microcontinent by LA-ICP-MS in this study. Results show two groups of average zircon U-Pb ages, with one of 453.7 ± 2.5 Ma, and the other of 176.6 ± 1.1 Ma and 178.04 ± 0.8 Ma. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating was conducted for biotite from granitic gneiss and muscovite from granodioritic gneiss in Nyainrong microcontinent. The $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ plateau ages yield 161.8 ± 1.1 Ma and 178.9 ± 1.2 Ma, respectively, showing that the study area experienced the Late Ordovician and the Early Jurassic magmatic events. Combined with field condition and study results, it is suggested that the Ordovician magmatic event was related to the Early Paleozoic orogeny which could be caused by proto-Tethyan oceanic subduction along Gondwana continental margin, and the Jurassic magmatic event was related to the subduction and closure of the Bangong-Nujiang oceanic crust.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.31672332); 中国地质调查局项目(No.DD20160161); 沈阳师范大学博士、引进人才科研项目启动基金项目(No.BS201705).

作者简介: 陆露(1985—), 女, 讲师, 博士, 主要从事青藏高原区域地质调查、大陆动力学研究及相关教学工作. ORCID: 0000-0002-0974-5012.
E-mail: yangchunyoulu@163.com

引用格式: 陆露, 钱程, 赵珍, 等, 2018. 西藏聂荣微陆块奥陶纪和侏罗纪岩浆事件的年龄证据. 地球科学, 43(4): 1110-1124.

Key words: Tibetan plateau; Nyainrong microcontinent; zircon U-Pb age; ^{40}Ar - ^{39}Ar age; Bangonghu-Nujiang suture zone; geochronology.

0 引言

班公湖—怒江缝合带位于青藏高原的中部,是青藏高原在特提斯演化过程中形成的一条巨型缝合带,记录了其演化过程中的主要岩浆—变质事件,一直以来是国内外地质学家研究青藏高原隆升和特提斯洋演化的热点地区之一。班公湖—怒江缝合带近东西向展布,从东向西绵延长约2 000多千米(常承法和郑锡澜,1973),缝合带内除了发育复理石、蛇绿岩套以及混杂岩之外(Yin and Harrison,2000),在其中段存在一特殊地质体——聂荣微陆块。前人对班公湖—怒江缝合带内出露的蛇绿岩、混杂岩及岩浆岩等都做了大量研究工作(叶培盛等,2004;夏斌等,2008;Wang *et al.*,2008;Shi *et al.*,2008,2012)。但是,由于班公湖—怒江缝合带复杂的构造演化过程以及中部聂荣微陆块这一特殊地质体的存在,关于缝合带的闭合时限、俯冲方向、演化过程等重要地质问题仍存在许多争议(Kapp *et al.*,2003;潘桂棠等,2004;陈国荣等,2004;朱弟成等,2006,2008a,2008b;曲晓明等,2009;Zhu *et al.*,2009,2011,2016;杜德道等,2011;Qu *et al.*,2012;Sui *et al.*,2013;Chen *et al.*,2014;Liu *et al.*,2014,2017;胡隽等,2014;Wei *et al.*,2017;丁帅等,2017;密文天等,2017)。尤其是对聂荣微陆块的研究较为薄弱,这严重制约了对班公湖—怒江缝合带构造地质演化历史的深入认识。

由于聂荣微陆块特殊的构造位置,近年来其越来越受到国内外地质学家的关注,虽然部分学者通过对研究区出露的大规模中生代岩浆岩的年代学、岩相学、地球化学等方面的研究,对其成因及动力学背景提出了一些重要的认识和模式(Guynn *et al.*,2006;朱弟成等,2008a;刘敏等,2010,2011),但由于构造岩浆事件方面年代学研究的不足,对该区的构造演化过程问题仍存在许多争议。如:Guynn *et al.*(2006)以聂荣微陆块内中生代花岗质岩石为主要研究对象,根据其年代学和地球化学研究结果提出中生代聂荣微陆块经历了“先与羌塘地块碰撞,后又与拉萨地块碰撞”两次碰撞作用。朱弟成等(2008b)通过对研究区聂荣岩体的年代学与地球化学的研究指出,聂荣岩体的形成与中生代班公湖—怒江洋壳南向俯冲于聂荣微陆块之下有关;刘敏等(2010)通过

对侏罗纪花岗质岩石及其包体的同位素研究结果指出,侏罗纪时期班公湖—怒江洋壳北向俯冲引起了聂荣微陆块和羌塘地块间碰撞。近年来,随着聂荣微陆块内高压麻粒岩的发现与研究,Zhang *et al.*(2014)指出大约190 Ma左右,聂荣微陆块发生了向北俯冲于羌塘地块之下50 km的构造运动,之后并迅速抬升至地壳20 km处。另外,也有学者针对聂荣微陆块内出露的变质岩进行了年代学研究,通过对片麻岩中锆石的U-Pb年龄测定,识别出了新元古代(843~820 Ma,解超明等,2010;863±10 Ma,辜平阳等,2012)和寒武纪—奥陶纪的岩浆事件(530~420 Ma,Xu *et al.*,1985;488.0±4.2 Ma,解超明等,2010;540~460 Ma,Guynn *et al.*,2012;507 Ma,王明等,2012),同时还得到了少量的中生代岩浆—变质事件的年龄信息(Xu *et al.*,1985;张晓冉等,2010;解超明,2013),这些年龄信息的获得对于限定聂荣微陆块乃至班公湖—怒江缝合带构造演化过程起到了重要作用。

整体而言,目前关于聂荣微陆块中片麻岩岩浆事件的年代学数据仍然较少,这限制了学者深入理解该地块构造岩浆过程及其与青藏高原演化关系。因此,本文在野外调查研究的基础上,选择对聂荣微陆块内出露的花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩进行锆石U-Pb和云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究,获得了与其古生代和中生代期间构造岩浆作用相关的新地质年龄数据,希望能为深入认识班公湖—怒江缝合带的中生代演化过程提供新依据。

1 区域地质背景

聂荣微陆块地处青藏高原中部,呈透镜体状夹持于班公湖—怒江缝合带中部(图1),研究区以北是由古老的变质基底和中新生代的海相碳酸盐、碎屑岩及火山岩组成的羌塘地块(黄继钧,2001),以南是由前寒武纪的变质基底、古生代—中生代沉积岩和中新生代的岩浆岩组成的拉萨地块(潘桂棠等,2006)。绵延1 200 km的班公湖—怒江缝合带从西向东以改则、丁青可为界分为西、中、东三段,中段以出露侏罗纪—白垩纪的蛇绿岩、中生代的碎屑岩与碳酸盐岩及少量火山岩为主(中国地质大学(北京)地质调查研究院,2005,1:25万安多幅地质报告)。

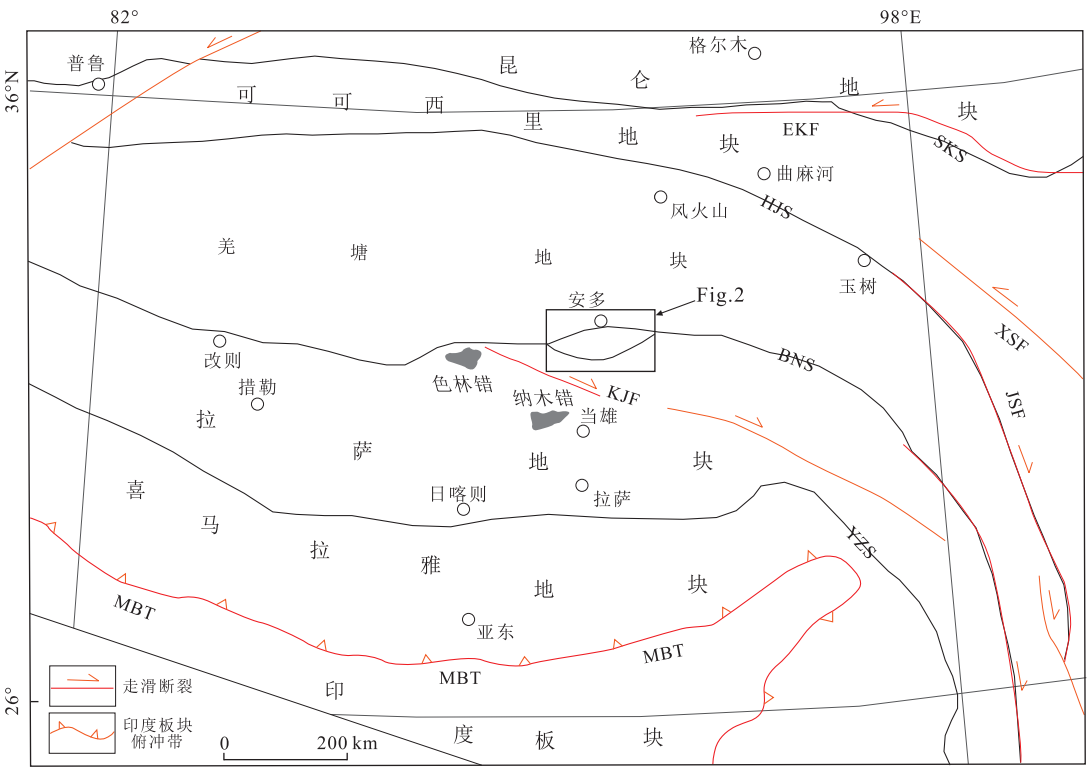


图 1 青藏高原地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau

MBT.主边界断裂;YZS.雅鲁藏布江缝合带;BNS.班公湖—怒江缝合带;HJS.可可西里—金沙江缝合带;SKS.昆南缝合带;KJF.喀喇昆仑—嘉黎断裂;JSF.金沙江断裂;XSF.鲜水河断裂;EKF.东昆仑断裂.据吴珍汉等(2009)修改

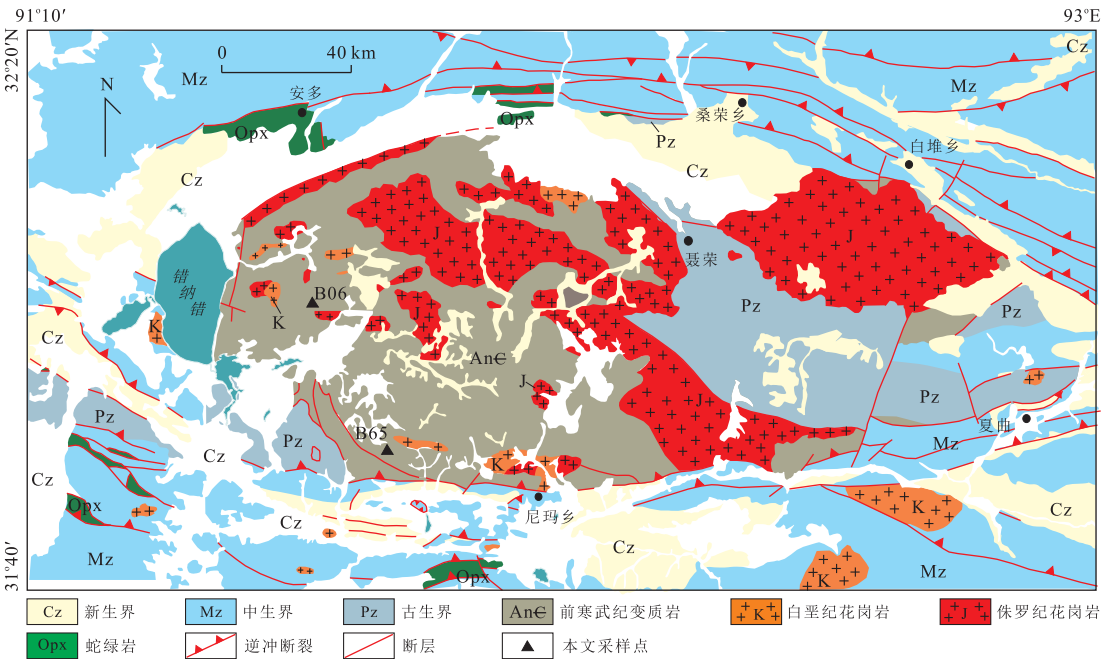


图 2 聂荣微陆块地质简图

Fig.2 The geological map of Nyainrong microcontinent

据 1 : 25 万安多幅(中国地质大学(北京)地质调查研究院,2005,1 : 25 万安多幅地质报告)和 1 : 25 万那曲幅(西藏自治区地质调查院,2005,1 : 25 万那曲幅地质报告)修编

聂荣微陆块呈近东西向展布,面积约 5 200 km²,其南北两侧均发育近东西走向的班公湖—怒江洋壳的残余——蛇绿混杂岩带(解超明等, 2010).研究区主要由新太古代—奥陶纪结晶变质基底、古生代地层、大规模早—中侏罗世花岗岩和少量的白垩纪花岗岩,以及新生代碎屑岩组成,微陆块内断裂构造十分发育(图 2).变质基底出露于研究区的中、西部地区,主要由花岗质片麻岩、斜长角闪片麻岩、花岗闪长质片麻岩、片岩、变粒岩、石英岩、大理岩等组成(中国地质大学(北京)地质调查研究院, 2005, 1: 25 万安多幅地质报告;西藏自治区地质调查院, 2005, 1: 25 万那曲幅地质报告).

2 年代学样品及其特征

此次的年代学分析样品共有两件,分别是取自聂荣微陆块西部错日阿和生雀地区出露的变质岩中,以往的研究中将该变质岩的时代定为新元古代.具体取样点位置见图 2.样品的具体特征描述如下.

样品 B06(32°00′31.7″N, 91°42′57.7″E)为花岗质片麻岩,岩石呈灰黑色,片麻状构造(图 3a),片状粒状变晶结构.岩石主要由斜长石(55%)、石英

(30%)和黑云母(15%)组成(图 3b).斜长石粒度为 0.5~1.5 mm,具弱环带构造,普遍具聚片双晶,少数具卡斯巴双晶,个别斜长石聚片双晶存塑性弯曲现象.石英呈他形粒状,波形消光,粒度为 1.0~1.5 mm.黑云母颗粒较大,呈片状,黄褐色,粒度多为 2.0~3.0 mm,分布不均匀,集合体呈条带状,形成片麻状构造,个别(001)解理存塑性弯曲现象,局部可见云母鱼.

样品 B65(31°48′24.9″N, 91°46′39.4″E)为花岗闪长质片麻岩,岩石呈灰白色,片麻状构造(图 3c),片状粒状变晶结构.岩石主要由斜长石(50%)、钾长石(15%)、石英(25%)和白云母(10%)组成(图 3d).斜长石呈柱粒状,少数保留半自形板柱状,粒度大小不等,一般为 2.0~3.0 mm,常见聚片和卡斯巴双晶,双晶纹发生塑性弯曲.钾长石见条纹构造,粒度粗,常有细粒斜长石包体,粒度大小为 3.0~4.0 mm,个别最大为 7.5 mm,呈斑状.白云母颗粒细小,沿(001)面延伸呈带状展布,干涉色鲜艳,少数颗粒较大,呈片状,多见被绿泥石交代集合体,条纹状不规则.石英波状消光显著,部分已细粒化沿长石粒间分布.

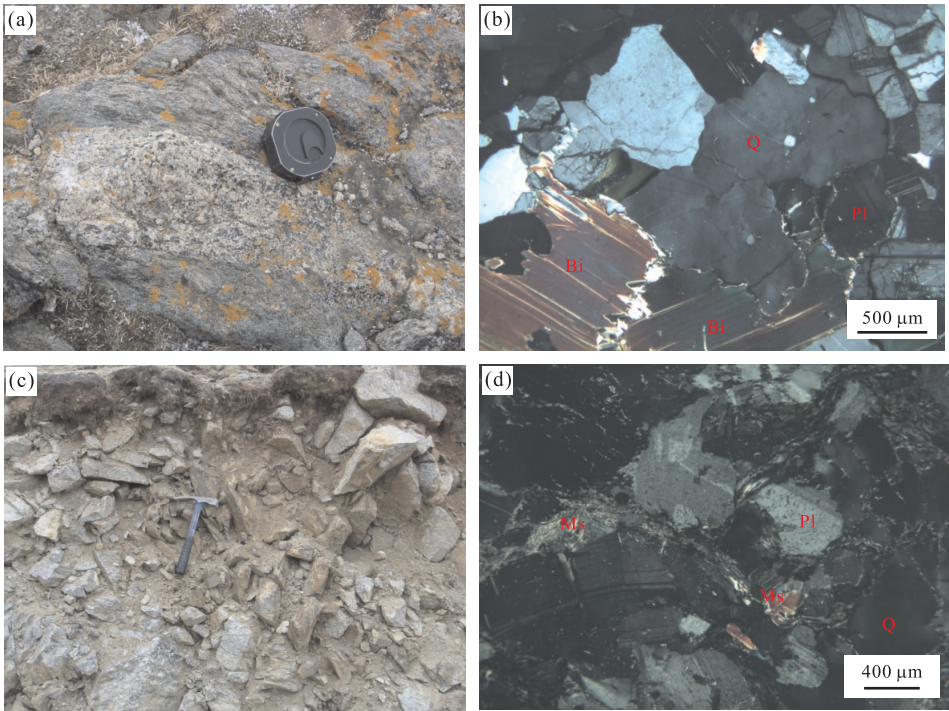


图 3 研究区片麻岩样品野外特征及镜下特征

Fig.3 Field and microscopic characteristics of gneisses in study area

a.样品 B06 野外特征;b.样品 B06 镜下特征;c.样品 B65 野外特征;d.样品 B65 镜下特征.Q.石英;Pl.斜长石;Bi.黑云母;Ms.白云母

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

样品送由河北省廊坊市地源矿物测试分选技术服务有限公司进行锆石颗粒挑选,每件样品用浮选和电磁选的方法选出 150~500 粒锆石,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒用于年龄测定.锆石样品制靶和阴极发光照相在中国地质科学院完成,将样品锆石在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,然后进行透射光、反射光和阴极发光照相以确定单颗粒锆石的晶体形态和内部结构.锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所的 LA-ICP-MS 上完成.激光剥蚀系统为配备有 193 nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005.ICP-MS 为日本 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a.应用澳大利亚国家地质标准局锆石 TEM(417 Ma)进行元素分馏校正,应用标准锆石 91500(1 062.4 Ma)标定样品的 U、Th、Pb 含量.根据实测的²⁰⁴Pb 进行普通 Pb 校正.年龄计算和图解使用 ISOPLOT3.0(Ludwig, 2001)程序.

3.2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年

黑云母和白云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年在中国地质科学院地质矿产研究所同位素地质重点实验室常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年系统完成.

选取样品中纯的黑云母和白云母矿物(纯度>99%)用超声波清洗.清洗后的样品被封进石英瓶中,送核反应堆中接受中子照射.照射工作是在中国原子能科学研究院的“游泳池堆”中进行的,使用 B4 孔道,中子流密度约为 2.65×10¹³ cm⁻² s⁻¹.照射总时间为 1 444 min,积分中子通量为 2.30×10¹⁸ cm⁻²;同期接受中子照射的还有用作监控样的标准样:ZBH-25 黑云母标样,其标准年龄为 132.7±1.2 Ma,K 含量为 7.6%.

样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段加热 30 min,净化 30 min.质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的,每个峰值均采集 20 组数据.所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正.中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K₂SO₄ 和 CaF₂ 来获得,其值为:(³⁶Ar/³⁷Ar)_{Ca} = 0.000 238 9, (⁴⁰Ar/³⁹Ar)_K = 0.004 782, (³⁹Ar/³⁷Ar)_{Ca} = 0.000 806.³⁷Ar 经过放射性衰变校正;⁴⁰K 衰变常数 λ = 5.543×10⁻¹⁰ a⁻¹;用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig,

2001).坪年龄误差以 2σ 给出.详细实验流程见有关文章(陈文等,2006;张彦等,2006).

4 分析结果及解释

4.1 U-Pb 定年

2 件片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果见表 1.

样品 B06(花岗质片麻岩)中的锆石形态大小各异,晶体形态为自形程度发育较好的中、长柱状晶体,其长轴为 70~200 μm,短轴为 50~100 μm,CL 图像显示锆石颜色多为灰黑色(图 4),锆石的 Th、U 含量相对较高,其 Th/U 比值变化范围在 0.11~2.22 之间(除点 13 和 23 外),且测点锆石均发育振荡环带结构,显示出岩浆成因锆石的特点,大多数锆石内部可见在结晶过程中捕获的继承锆石核(图 4).

使用 LA-ICP-MS 测年方法对该岩石样品的 22 颗锆石的 23 个测点进行了锆石 U-Pb 同位素定年,数据结果见表 1 和图 5.数据显示有两组年龄测点皆位于谐和曲线上或邻近谐和曲线(图 5),一组 7 个锆石(测点 5、12、16、18、19、20、21)²⁰⁶Pb/²³⁸U 的表面年龄变化于(178.5±2.1)~(175.1±1.0) Ma 之间,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权年龄平均值为 176.6±1.1 Ma(图 5a);另一组 6 个锆石(测点 2、6、8、10、11、22)²⁰⁶Pb/²³⁸U 的表面年龄变化于(457.7±4.2)~(451.5±2.4) Ma 之间,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权年龄平均值为 453.7±2.5 Ma(图 5c).剩余 10 个测点中,除测点 3、9、13、23 具有明显的 Pb 丢失外,其余 6 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄集中在 400.9±2.0 Ma(测点 4)、241.5±1.8 Ma(测点 14)、(180.0±0.9)~(179.5±0.8) Ma(测点 7、15、17)、171.8±1.2 Ma(测点 1),它们可能分别代表了不同阶段的岩浆结晶事件.

样品 B65(花岗闪长质片麻岩)中的锆石自形程度较好,晶体形态多为中、长柱状,少数为椭圆状,CL 图像(图 6)上显示锆石颜色多为灰黑色,表明锆石的 Th、U 相对较高,除 16 号测点的 Th/U 比值(=0.04)小于 0.1 外,其余测点锆石的 Th/U 比值变化于 0.29~5.88 之间,且测点锆石均发育振荡环带结构,显示出岩浆成因锆石的特点,另外,大多数锆石内部结构复杂,可见在岩浆结晶过程中捕获的继承锆石核(图 6).

使用 LA-ICP-MS 测年方法对该岩石样品的 22 颗锆石的 22 个测点进行了锆石 U-Pb 同位素定年,数据结果见表 1 和图 7.22 个锆石 U-Pb 同位素年

表 1 聂荣微陆块片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果

Table 1 LA-ICP-MS data of zircons from gneisses in Nyainrong microcontinent

点号	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ
花岗岩质片麻岩(样品 B06)											
1	0.106 1	0.027 0	0.000 2	0.185 0	0.002 1	0.049 8	0.000 5	171.8	1.2	172.4	1.8
2	2.136 5	0.072 9	0.000 4	0.597 9	0.005 0	0.059 5	0.000 4	453.4	2.6	475.9	3.2
3	5.476 5	0.014 2	0.000 1	0.434 8	0.003 4	0.222 9	0.001 2	90.6	0.6	366.6	2.4
4	1.373 9	0.064 2	0.000 3	0.502 5	0.003 6	0.056 8	0.000 3	400.9	2.0	413.4	2.5
5	0.228 7	0.028 1	0.000 1	0.197 5	0.001 2	0.051 1	0.000 2	178.4	0.8	183.0	1.1
6	1.353 6	0.073 0	0.000 7	0.584 4	0.005 9	0.058 1	0.000 3	454.0	4.2	467.3	3.8
7	0.635 9	0.028 3	0.000 1	0.204 8	0.003 4	0.0525	0.000 9	180.0	0.9	189.2	2.9
8	1.092 7	0.072 6	0.000 4	0.569 2	0.003 6	0.056 9	0.000 2	451.5	2.4	457.5	2.3
9	2.226 1	0.022 4	0.000	0.190 4	0.009 6	0.061 5	0.002 9	143.0	1.6	177.0	8.2
10	0.456 7	0.073 4	0.000 6	0.577 0	0.007 7	0.057 0	0.000 6	456.7	3.5	462.5	5.0
11	1.407 4	0.073 6	0.000 7	0.585 5	0.006 0	0.057 8	0.000 3	457.7	4.2	468.0	3.8
12	0.143 4	0.027 7	0.000 2	0.191 7	0.001 8	0.050 3	0.000 4	176.0	0.9	178.1	1.6
13	6.093 1	0.043 9	0.000 2	0.433 8	0.002 7	0.071 7	0.000 3	276.8	1.2	365.9	1.9
14	0.150 4	0.038 2	0.000 3	0.281 8	0.004 3	0.053 5	0.000 6	241.5	1.8	252.1	3.4
15	0.168 7	0.028 2	0.000 1	0.196 1	0.001 2	0.050 4	0.000 2	179.5	0.8	181.9	1.0
16	0.160 4	0.027 8	0.000 1	0.190 6	0.001 1	0.049 8	0.000 1	176.7	0.9	177.1	0.9
17	0.717 5	0.028 3	0.001 0	0.204 6	0.006 8	0.052 5	0.000 4	179.8	6.6	189.0	5.7
18	0.165 9	0.027 7	0.000 1	0.189 1	0.001 1	0.049 6	0.000 2	175.9	0.7	175.8	0.9
19	0.650 2	0.028 1	0.000 3	0.196 9	0.002 2	0.050 9	0.000 6	178.5	2.1	182.5	1.9
20	1.678 9	0.027 9	0.000 6	0.201 7	0.004 4	0.052 4	0.001 2	177.6	3.7	186.6	3.7
21	0.164 2	0.027 5	0.000 2	0.189 9	0.001 5	0.050 0	0.000 3	175.2	1.0	176.5	1.2
22	1.394 4	0.072 8	0.000 6	0.595 5	0.004 6	0.059 5	0.000 3	453.1	3.6	474.3	2.9
23	5.921 5	0.047 9	0.000 5	0.478 9	0.007 5	0.072 6	0.000 8	301.8	3.3	397.3	5.1
花岗岩闪长质片麻岩(样品 B65)											
1	0.290 3	0.066 5	0.000 7	6.080 7	0.057 1	0.663 7	0.002 5	415.0	4.2	1 987.5	8.2
2	1.984 8	0.075 9	0.001 6	6.345 5	0.189 1	0.599 3	0.006 1	471.4	9.8	2 024.8	26.1
3	5.887 7	0.028 2	0.000 5	1.803 3	0.026 0	0.466 4	0.003 4	179.2	3.3	1 046.7	9.4
4	3.381 7	0.028 0	0.000 2	0.198 8	0.002 7	0.051 5	0.000 6	178.2	1.2	184.1	2.3
5	3.136 8	0.029 8	0.000 2	1.361 2	0.012 2	0.331 1	0.002 4	189.4	1.0	872.4	5.3
6	0.433 3	0.028 2	0.000 2	0.202 2	0.002 2	0.052 0	0.000 5	179.5	1.1	187.0	1.9
7	0.701 5	0.081 7	0.000 4	0.656 0	0.004 1	0.058 2	0.000 2	506.2	2.5	512.2	2.5
8	2.606 6	0.059 5	0.000 8	4.638 2	0.062 8	0.565 1	0.001 7	372.7	4.9	1 756.2	11.3
9	0.435 2	0.027 7	0.000 2	0.198 1	0.003 9	0.051 7	0.000 9	176.4	1.1	183.5	3.3
10	2.440 3	0.028 0	0.000 2	1.977 5	0.013 4	0.511 6	0.002 3	178.3	1.2	1 107.9	4.6
11	1.898 1	0.028 1	0.000 1	0.195 6	0.002 2	0.050 5	0.000 5	178.5	0.9	181.4	1.8
12	3.116 1	0.028 2	0.000 3	0.670 7	0.010 1	0.173 3	0.003 0	179.0	1.6	521.2	6.2
13	2.409 7	0.031 6	0.000 5	1.141 4	0.022 6	0.261 4	0.002 3	200.9	3.3	773.2	10.7
14	1.628 7	0.057 7	0.001 8	5.065 0	0.160 7	0.636 9	0.002 4	361.4	11.0	1 830.3	26.9
15	0.508 0	0.027 9	0.000 1	0.201 5	0.001 0	0.052 3	0.000 1	177.6	0.8	186.4	0.8
16	0.038 6	0.027 8	0.000 3	0.190 7	0.002 2	0.049 7	0.000 3	176.9	1.7	177.2	1.9
17	5.200 0	0.032 2	0.000 7	2.626 7	0.038 4	0.595 4	0.005 4	204.2	4.2	1 308.1	10.7
18	2.416 2	0.028 1	0.000 2	0.192 4	0.001 8	0.049 7	0.000 3	178.5	1.2	178.7	1.5
19	1.052 8	0.108 8	0.001 6	5.329 5	0.256 1	0.333 7	0.012 4	665.7	9.5	1 873.6	41.1
20	5.160 5	0.101 0	0.001 5	9.157 6	0.178 8	0.652 4	0.003 7	620.4	9.1	2 353.9	17.9
21	0.428 9	0.025 2	0.001 1	0.933 2	0.055 8	0.480 7	0.214 2	160.7	6.7	669.3	29.3
22	3.723 9	0.040 9	0.009 5	2.533 3	0.110 0	0.594 3	0.014 6	258.2	58.8	1 281.6	31.6

龄结果中 7 个测点(4、6、9、11、15、16、18)皆位于谐和曲线上,或邻近谐和曲线(图 7),它们的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的表面年龄变化于(179.5±1.1)~(176.4±1.1) Ma 之间,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权年龄平均值为 178.0±0.8 Ma.除测点 7 外,其余测点 1、2、3、5、8、10、12、13、14、17、19、20、21、22 均有明显的 Pb 丢失.测点 7 锆石的 CL 图像显示其内部存在继承锆石

核,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 的表面年龄为 506.2±2.5 Ma,该年龄可能代表了继承锆石的年龄.

4.2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年

分别对样品 B06(花岗质片麻岩)中的黑云母和样品 B65(花岗闪长质片麻岩)白云母进行了⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年同位素测定,测试结果见表 2.

对样品 B06(花岗质片麻岩)中的黑云母进行了

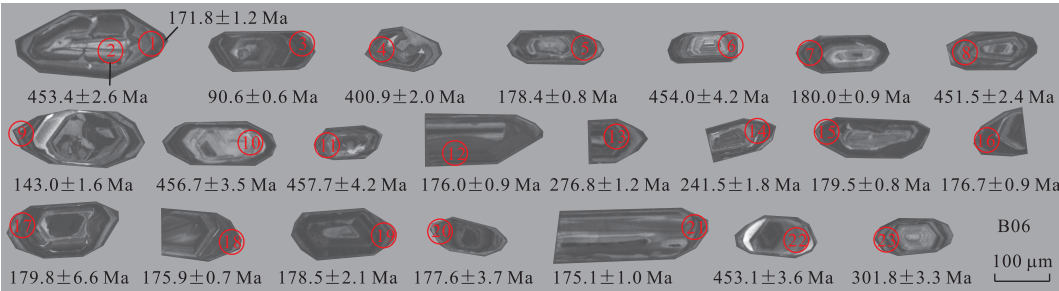


图 4 样品 B06 锆石阴极发光图像
Fig.4 CL images of zircons from sample B06

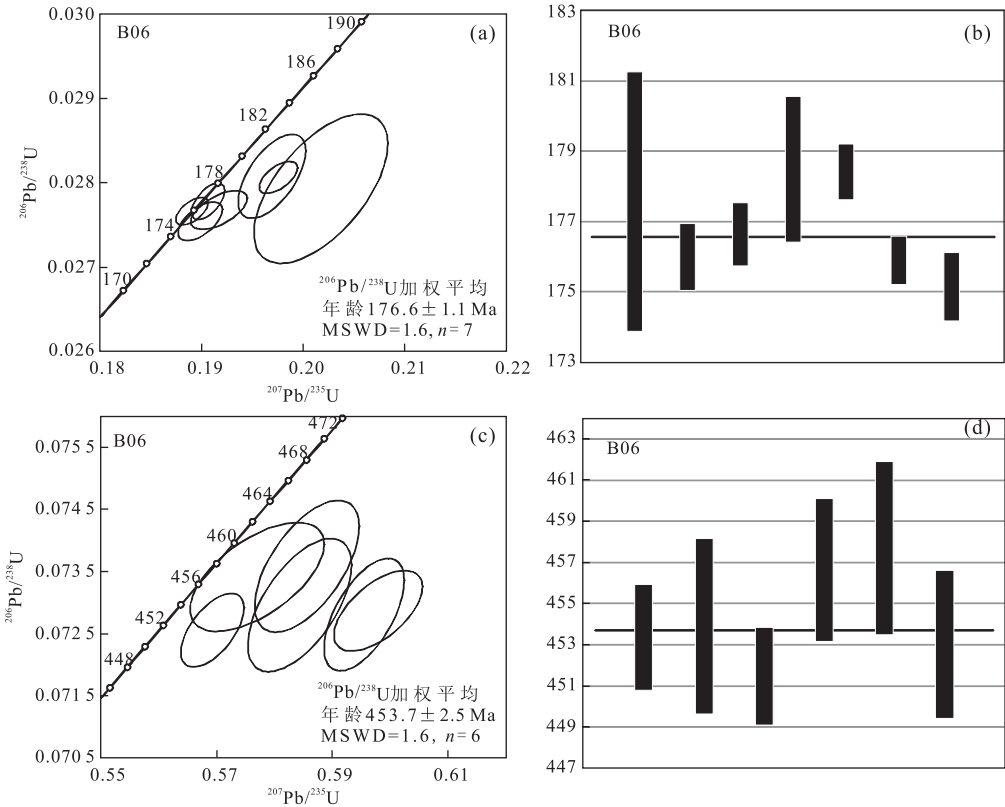


图 5 样品 B06 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.5 The zircon U-Pb concordia diagrams of sample B06

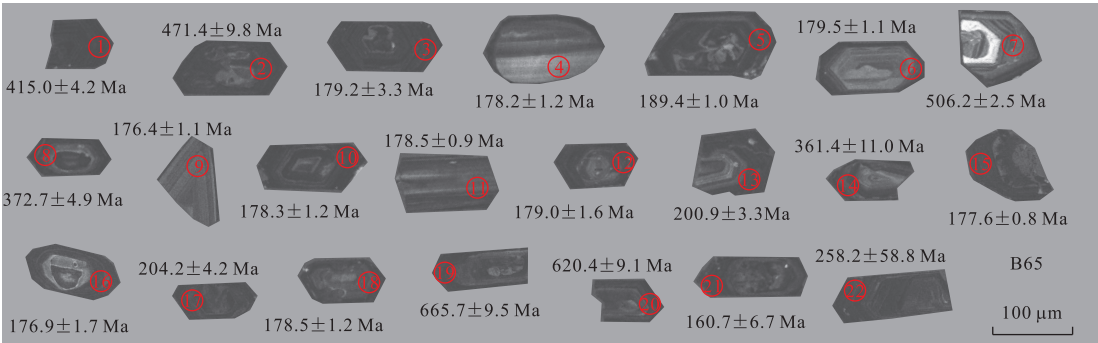


图 6 样品 B65 锆石阴极发光图像
Fig.6 CL images of zircons from sample B65

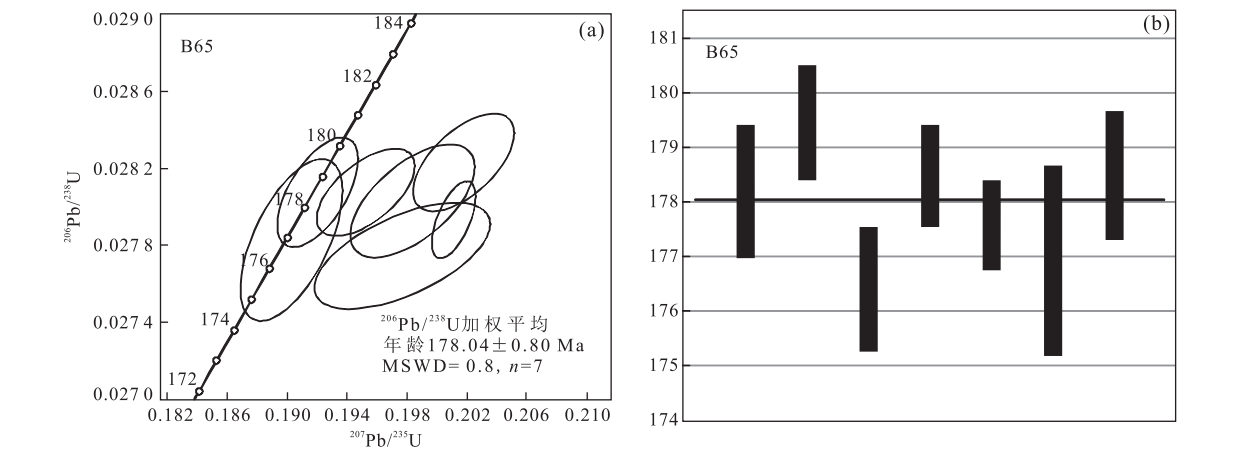


图 7 样品 B65 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.7 The zircon U-Pb concordia diagrams of sample B65

表 2 聂荣微陆块花岗质片麻岩黑云母和花岗闪长质片麻岩白云母常规⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果

Table 2 Conventionally ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic age analyses of biotite and muscovite

T(℃)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar(%)	F	³⁹ Ar(10 ⁻¹⁴ mol)	³⁹ Ar(Cum.)(%)	Age(Ma)	±1(Ma)
样品 B06(花岗质片麻岩)黑云母 W=28.03 mg J=0.004 267										
700	56.020 7	0.151 9	8.741 9	0.043 7	20.96	11.8233	0.19	0.49	88.8	2.8
750	26.404 5	0.016 4	0.269 1	0.016 0	81.69	21.574 1	3.33	9.06	158.9	1.5
790	23.095 3	0.002 7	0.154 6	0.013 3	96.55	22.300 6	6.08	24.73	164.0	1.6
830	22.700 9	0.001 3	0.276 4	0.013 0	98.32	22.323 5	6.21	40.73	164.1	1.6
870	22.721 8	0.001 6	0.181 9	0.013 1	97.95	22.259 1	2.84	48.04	163.7	1.6
910	22.990 2	0.003 9	0.858 4	0.013 4	95.21	21.903 0	1.64	52.27	161.2	1.6
950	22.954 2	0.004 7	0.658 3	0.013 4	94.15	21.622 3	1.47	56.05	159.2	1.6
1 000	22.579 1	0.002 9	0.373 0	0.013 6	96.28	21.746 7	3.13	64.13	160.1	1.5
1 050	22.627 6	0.001 5	0.237 2	0.013 1	98.04	22.188 1	5.89	79.31	163.2	1.6
1 080	26.087 2	0.014 8	0.254 4	0.015 2	83.24	21.718 6	3.37	87.99	159.9	1.5
1 120	23.158 5	0.003 1	0.181 3	0.013 2	96.13	22.265 0	3.91	98.07	163.7	1.6
1 400	126.013 0	0.410 7	1.920 1	0.084 4	3.79	4.789 6	0.75	100.00	36.5	1.1
样品 B665(花岗闪长质片麻岩)白云母 W=27.40 mg J=0.004 301										
700	20.958 2	0.015 6	6.004 6	0.015 3	80.03	16.853 6	0.22	0.56	126.2	2.9
750	22.734 0	0.004 2	1.643 3	0.013 2	95.02	21.630 0	0.71	2.39	160.5	1.7
800	23.079 3	0.002 2	1.306 9	0.012 8	97.62	22.554 9	1.43	6.07	167.0	1.6
850	23.584 9	0.001 6	0.723 0	0.012 7	98.24	23.183 9	2.40	12.27	171.5	1.7
890	24.330 9	0.001 6	0.235 4	0.012 8	98.05	23.861 3	4.47	23.79	176.2	1.7
930	24.430 3	0.000 7	0.082 3	0.012 6	99.17	24.229 6	4.82	36.21	178.8	1.7
970	24.757 4	0.001 1	0.345 5	0.012 6	98.81	24.470 2	4.77	48.52	180.5	1.7
1 010	24.624 2	0.001 1	0.156 1	0.012 6	98.69	24.304 2	2.68	55.42	179.4	1.7
1 050	24.713 4	0.001 4	0.376 0	0.012 8	98.43	24.332 2	4.11	66.03	179.6	1.7
1 090	24.616 5	0.001 2	0.253 1	0.012 7	98.60	24.276 7	6.55	82.92	179.2	1.7
1 130	24.592 5	0.000 8	0.234 4	0.012 5	99.11	24.379 0	6.16	98.81	179.9	1.7
1 180	26.853 2	0.010 5	3.263 8	0.012 7	89.30	24.044 0	0.39	99.81	177.5	2.0
1 400	75.442 2	0.210 9	24.901 3	0.050 8	19.74	15.195 3	0.07	100.00	114.2	7.0

注:W.实验参数;J.照射参数.

⁴⁰Ar/³⁹Ar定年,温度从700~1 400℃,连续12个加热阶段分析,分析结果见表2,其坪年龄谱图和等时线见图8a、8b、8c.在初始的低温加热阶段700~750℃,坪年龄由88.8±2.8 Ma迅速升高至158.9±1.5 Ma,期间³⁹Ar的释放量低于20%.随后从第3温

度阶段(790℃)到第11温度阶段(1 120℃),保持了连续稳定的年龄坪,期间³⁹Ar的累积析出量为98.1%,构成的稳定坪年龄为161.8±1.1 Ma,经过数据拟合后得到的正、反等时线年龄分别为162.0±2.6 Ma、162.0±2.8 Ma,与坪年龄结果相一致.

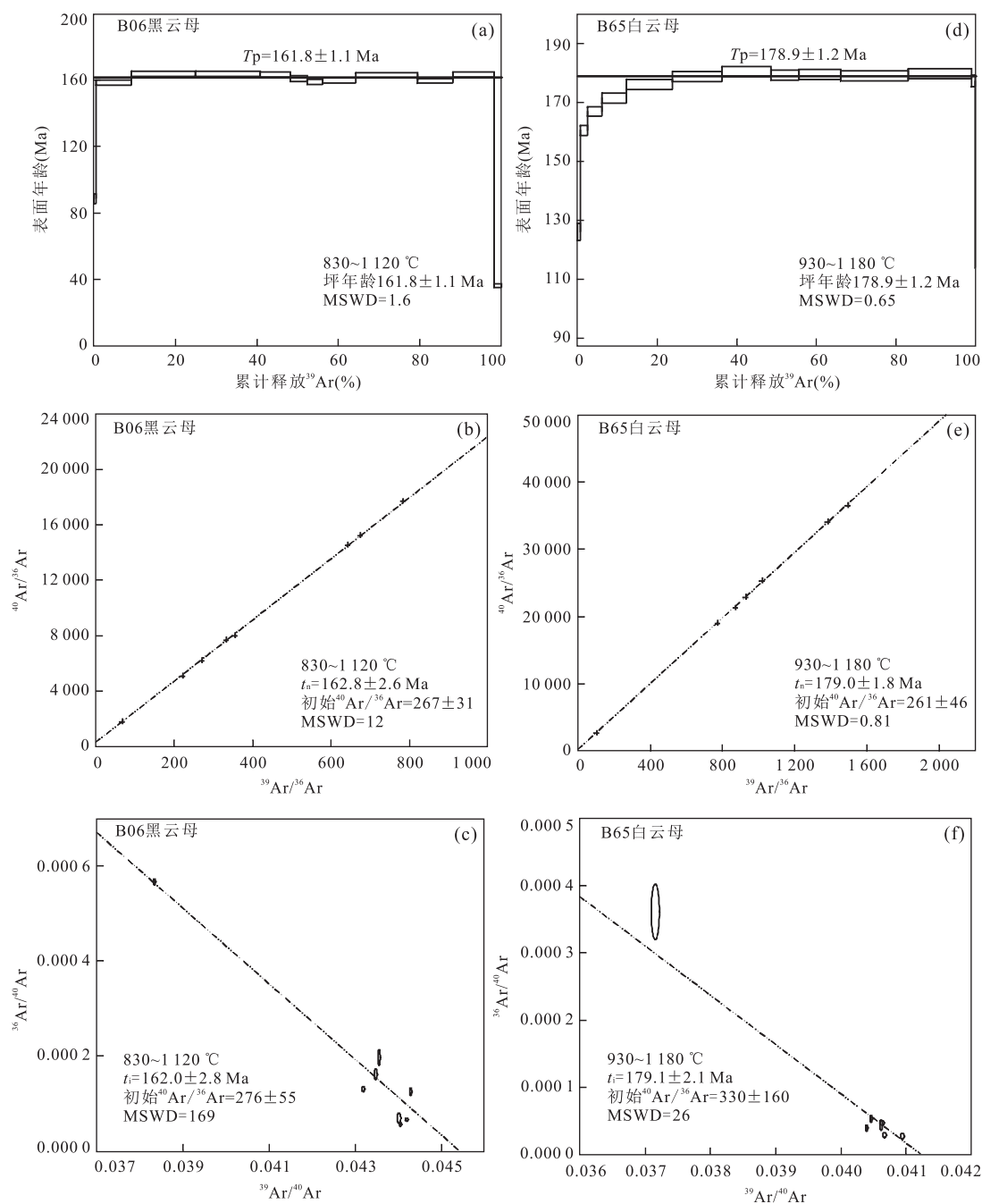


图 8 聂荣微陆块花岗岩质片麻岩(B06)黑云母(a~c)和花岗闪长质片麻岩(B65)白云母(d~f) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄

Fig.8 The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age plateaus and isochrones for biotite from granitic gneiss (a~c) and muscovite from granodioritic gneiss (d~f) of Nyainrong microcontinent

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值分别为 267 ± 31 和 276 ± 55 ,在误差范围之内(与大气初始氩比值 295.5 比较)。

对样品 B65(花岗闪长质片麻岩)中的白云母进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,温度从 $700 \sim 1400^\circ\text{C}$,连续 13 个加热阶段分析,分析结果见表 2,其坪年龄谱图和等时线见图 8d、8e、8f。如表 2 所示,在 1~2 加热阶段($700 \sim 750^\circ\text{C}$),坪年龄由 126.2 ± 2.9 Ma 迅速升高至 160.5 ± 1.7 Ma,一直持续到第 5 加热阶段

(890°C),期间 ^{39}Ar 的释放量低于 20%。随后到从第 6 温度阶段(930°C)一直持续到第 12 温度阶段(1180°C),保持了连续稳定的年龄坪,期间 ^{39}Ar 的累积析出量为 99.8%,其组成的稳定坪年龄为 178.9 ± 1.2 Ma,经过数据拟合后得到的正、反等时线年龄分别为 179.9 ± 1.8 Ma 和 179.1 ± 2.1 Ma,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值分别为 276 ± 55 Ma、 330 ± 160 Ma,正、反等时线年龄与坪年龄基本相一致。

5 讨论

5.1 聂荣微陆块古生代岩浆事件的讨论

聂荣微陆块花岗质片麻岩(B06) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果中明显存在一组 $(457.7 \pm 4.2) \sim (451.5 \pm 2.4)$ Ma 的年龄数据,这些锆石点的 Th/U 比值 $= 0.46 \sim 2.14 (> 0.4)$, CL 图像上均发育振荡环带结构,显示出了岩浆锆石的特点,另外,从 CL 图像上(图 4)可以看到,这 6 个锆石测年数据点均位于中心继承锆石的边部,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权年龄平均值为 453.7 ± 2.5 Ma,代表了花岗质片麻岩原岩的形成时代,时代为晚奥陶世。另外,花岗闪长质片麻岩(B65) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果中也获得了奥陶纪的继承锆石年龄 $(506.2 \pm 2.5$ Ma, 测点 7)。解超明等(2010)、Guynn *et al.* (2012) 和 Lu *et al.* (2014) 均在该研究区正片麻岩锆石 U-Pb 定年研究中获得了奥陶世的岩浆结晶年龄,与本文的年龄结果基本一致。因此,上述年代学研究结果表明聂荣微陆块在早古生代存在一期显著的岩浆活动。

泛非事件是指大约发生在 550 ± 100 Ma 前的一次重要的构造热事件(Kenedy, 1964),其影响范围较广,造成了东、西冈瓦纳汇聚形成统一的冈瓦纳大陆,青藏高原就是受泛非事件影响的地区之一(许志琴等, 2005)。近年来随着研究的深入,在青藏高原喜马拉雅地区、拉萨地块、羌塘地块等地区均识别出了 $500 \sim 460$ Ma 的构造—岩浆事件年龄(胡培远等, 2010; 王晓先等, 2011; Guynn *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2012; 朱弟成等, 2012; 董美玲等, 2012; 李再会等, 2012),以往大多数学者多将这些年代数据解释为泛非造山运动的记录,然而晚奥陶世的岩浆结晶年龄明显小于冈瓦纳大陆的形成时限。Cawood and Buchan (2007) 指出泛非事件主要发生于冈瓦纳大陆内部不同块体之间,在冈瓦纳大陆边缘发生的造山作用应不属于泛非事件的范畴,其进一步通过对沿冈瓦纳原太平洋边缘的俯冲作用和冈瓦纳大陆内部的泛非造山事件的研究发现,原太平洋边缘发生俯冲开始的时间($580 \sim 550$ Ma)和泛非造山事件结束的时间大体一致,因此提出冈瓦纳大陆内部造山作用的结束必然会导致冈瓦纳大陆边缘洋壳的俯冲作用。综合岩浆作用、变质变形作用和地层学等资料,发现印度大陆北缘存在古生代早期的岩浆事件,并提出这期岩浆事件可能与原特提斯洋壳的俯冲作用有关(Cawood and Buchan, 2007)。最新研究资料表明,在沿着冈瓦纳大陆北部边缘的 Turkey、Iran

地区同样存在寒武纪—奥陶纪的岩浆事件(Cawood and Buchan, 2007; Guynn *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2012), Zhu *et al.* (2012) 指出在冈瓦纳大陆形成后,北部的原特提斯洋向南俯冲于冈瓦纳大陆的边缘部分形成了一系列安第斯型的岩浆弧(Zhu *et al.*, 2012)。本文获得的奥陶纪锆石 U-Pb 年龄明显小于泛非造山事件的时代,另外,前人通过研究指出聂荣微陆块在早古生代同拉萨地块、羌塘地块一起位于冈瓦纳大陆的北部边缘(Cawood and Buchan, 2007; Zhu *et al.*, 2012), Lu *et al.* (2014) 通过对聂荣微陆块内寒武—奥陶纪片麻岩的地球化学研究发现,其原岩属于过铝质钙碱性的 S 型花岗岩。综上所述,根据岩浆事件时间、其成因及其构造环境以及研究区所处的构造地理位置可以推断,聂荣微陆块变质基底经历的奥陶纪岩浆事件与原特提斯洋壳向冈瓦纳大陆北部边缘的俯冲与造山作用有关。因此,这期岩浆活动应该是冈瓦纳大陆北缘早古生代造山作用的产物。

5.2 聂荣微陆块侏罗纪岩浆事件的讨论

本文通过 LA-ICP-MS 定年获得了 176.6 ± 1.1 Ma(样品 B06)和 178.04 ± 0.8 Ma(样品 B65)的锆石 U-Pb 加权平均年龄,这些锆石数据点的 Th/U 比值与 CL 图像均显示出岩浆成因,代表了岩浆结晶年龄。另外,区域地质调查结果表明(刘敏等, 2010, 2011),研究区分布大规模的侏罗纪花岗岩体(图 2),这些都表明研究区普遍存在侏罗纪岩浆活动。前人研究认为,班公怒江缝合带发生俯冲闭合的时限大致为早侏罗世—早白垩世(肖序常和李廷栋, 2000; Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等, 2004; 陈国荣等, 2004; 莫宣学等, 2005),朱弟成等(2008a)、Guynn *et al.* (2006) 和刘敏等(2010, 2011)对研究区侏罗纪花岗岩体的研究均提出聂荣微陆块侏罗纪岩浆活动是由班公湖—怒江洋壳的俯冲所引起的。因此,可以推断由于受班公湖—怒江洋壳俯冲的影响,聂荣微陆块变质基底普遍遭受了侏罗纪岩浆活动的改造。

对研究区花岗质片麻岩(B06)中的黑云母和花岗闪长质片麻岩(B65)中的白云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分别获得了 161.8 ± 1.1 Ma 和 178.9 ± 1.2 Ma 的坪年龄。矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄既可以代表变质年龄,也可以代表冷却年龄,这主要取决于矿物的封闭温度,如果变质的温度高于封闭温度则代表变质事件以来的冷却年龄,反之则代表变质事件年龄(杨红等, 2013)。研究表明,黑云母的封闭温度为 $300 \sim$

350 °C (Zeitler, 1985), 白云母的封闭温度为 350 °C (Jager, 1979). 张修政等 (2010) 估算研究区片麻岩中麻粒岩透镜体的麻粒岩相变质峰期 $T = 790 \sim 840$ °C, 角闪岩相退变质阶段 $T = 720 \sim 730$ °C; 张晓冉等 (2010) 估算研究区片麻岩中高压麻粒岩透镜体的高压麻粒岩相峰期 $T = 860 \sim 920$ °C, 早期退变质阶段 $T = 820 \sim 890$ °C, 晚期退变质阶段 $T = 550 \sim 670$ °C. 上述研究中获得的变质温度均高于黑云母和白云母的封闭温度, 所以只有当温度降到封闭温度时, 云母中的 K-Ar 体系才能呈现封闭状态, 计时才能开始. Guynn *et al.* (2006) 通过对聂荣微陆块内片麻岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄研究获得了 167 ± 6.8 Ma 的变质年龄, 最新研究表明, Xie *et al.* (2014) 在聂荣微陆块正片麻岩中获得了 $176 \sim 166$ Ma 的 Ar-Ar 年龄, 提出聂荣微陆块存在侏罗纪的变质作用. 因此, 本文研究中所获得的片麻岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 可能代表了侏罗纪岩浆—变质事件之后地块抬升过程中的冷却年龄.

6 结论

(1) 聂荣微陆块内花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩中锆石 U-Pb 定年结果分别为 453.7 ± 2.5 Ma、 176.6 ± 1.1 Ma 和 178.04 ± 0.8 Ma, 表明研究区存在晚奥陶世和早侏罗世两期岩浆事件.

(2) 聂荣微陆块内花岗质片麻岩中黑云母和花岗闪长质片麻岩中白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年结果分别为 161.8 ± 1.1 Ma 和 178.9 ± 1.2 Ma, 可能代表了侏罗纪岩浆—变质事件之后地块抬升过程中的冷却年龄.

(3) 研究区发生的这两期岩浆事件分别与冈瓦纳大陆北缘早古生代的造山作用和班公湖—怒江洋壳的俯冲闭合存在密切的动力学关系.

致谢: 本文在成文过程中得到中国地质科学院项目团队的支持和帮助, 衷心感谢评审专家对本文提出的学术指导和帮助, 老师们的真知灼见让笔者受益匪浅, 在此深表谢意!

References

Cawood, P. A., Buchan, C., 2007. Linking Accretionary Orogenesis with Supercontinent Assembly. *Earth-Science Reviews*, 82 (3–4): 217–256. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.03.003>

Chang, C.F., Zheng, X.L., 1973. The Geological Structure Characteristics of Everest in Southern of Tibet and the Formation

of the East-West Striking Mountains in Tibet Plateau, China. *Science in China*, (2): 190–201 (in Chinese).

Chen, G.R., Liu, H.F., Jiang, G.W., et al., 2004. Discovery of the Shamuluo Formation in the Central Segment of the Bangong Co-Nujiang River Suture Zone, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 23 (2): 193–194 (in Chinese with English abstract).

Chen, W., Zhang, Y., Zhang, Y.Q., et al., 2006. Late Cenozoic Episodic Uplifting in Southeastern Part of the Tibetan Plateau—Evidence from Ar-Ar Thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 867–872 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2014. Slab Break off Triggered ca. 113 Ma Magmatism around Xainza Area of the Lhasa Terrane, Tibet. *Gondwana Research*, 26 (2): 449–463. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.005>

Ding, S., Tang, J.X., Zheng, W.B., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Naruo Porphyry Cu(Au) Deposit in Duolong Ore-Concentrated Area, Tibet, and Their Geological Significance. *Earth Science*, 42 (1): 1–23 (in Chinese with English abstract).

Dong, M.L., Dong, G.C., Mo, X.X., et al., 2012. Geochronology and Geochemistry of the Early Palaeozoic Granitoids in Baoshan Block, Western Yunnan and Their Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (5): 1453–1464 (in Chinese with English abstract).

Du, D.D., Qu, X.M., Wang, G.H., et al., 2011. Bidirectional Subduction of the Middle Tethys Oceanic Basin in the West Segment of Bangonghu-Nujiang Suture, Tibet: Evidence from Zircon U-Pb LA-ICP-MS Dating and Petrogeochemistry of Arc Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (7): 1993–2002 (in Chinese with English abstract).

Gu, P.Y., Li, R.S., He, S.P., et al., 2012. The Amphibolite from Nyainrong Rock Group in Northern Nagqu: Geological Records of Break-up of the Supercontinent Rodinia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31 (2): 145–154 (in Chinese with English abstract).

Guynn, J.H., Kapp, P., Gehrels, G.E., et al., 2012. U-Pb Geochronology of Basement Rocks in Central Tibet and Paleogeographic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43 (1): 23–50. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.003>

Guynn, J.H., Kapp, P., Pullen, A., et al., 2006. Tibetan Basement Rocks near Amdo Reveal "Missing" Mesozoic Tectonism along the Bangong Suture, Central Tibet. *Geology*, 34 (6): 505–508.

Hu, J., Wan, Y.W., Tao, Z., et al., 2014. New Geochemistry and Geochronology Evidences Related to Southward Subduction

- of Tethys Ocean Basin in West Segment of Bangonghu-Nujiang Suture Belt. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41 (4): 505—515 (in Chinese with English abstract).
- Hu, P. Y., Li, C., Su, L., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating of Granitic Gneiss in Wugong Mountain Area, Central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau: Age Records of Pan-African Movement and Indo-China Movement. *Geology in China*, 37(4): 1050—1061 (in Chinese with English abstract).
- Huang J. J., 2001. Tectonic Characteristics and Evolution of the Qiangtang Basin. *Regional Geology of China*, 20 (2): 178—186 (in Chinese with English abstract).
- Jager, E., 1979. Introduction to Geochronology. In: Jager, E., Hunziker, J. C., eds., *Lectures in Isotope Geology*. Springer-Verlag, Berlin, 1—12.
- Kapp, P., Murphy, M. A., Yin, A., et al., 2003. Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution of the Shiquanhe Area of Western Tibet. *Tectonics*, 22 (4): 1—24. <https://doi.org/10.1029/2001tc001332>
- Knenedy, W. Q., 1964. The Structural Differentiation of Africa in the Pan-African (500 m. y.) Tectonic Episode. Research Institute African Geology University Leeds 8th Ann. Report, 48.
- Li, Z. H., Lin, S. L., Cong, F., et al., 2012. U-Pb Ages of Zircon from Metamorphic Rocks of the Gaoligongshan Group in Western Yunnan and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1529—1541 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. L., Huang, Q. S., Fan, S. Q., et al., 2014. Subduction of the Bangong-Nujiang Ocean: Constraints from Granites in the Bangong Co Area, Tibet. *Geological Journal*, 49 (2): 188—206. <https://doi.org/10.1002/gj.2510>
- Liu, D. L., Shi, R. D., Ding, L., et al., 2017. Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Compositions of Mesozoic Granitoids in Southern Qiangtang, Tibet: Implications for the Subduction of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean. *Gondwana Research*, 41: 157—172. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.04.007>
- Liu, M., Zhao Z. D., Guan, Q., et al., 2011. Tracing Magma Mixing Genesis of the Middle Early-Jurassic Host Granites and Enclaves in Nyainrong Microcontinent, Tibet from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1931—1937 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., Zhu, D. C., Zhao Z. D., et al., 2010. Magma Mixing of Late Early Jurassic Age from Nyainrong, Northern Tibet and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 3117—3130 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L., Wu, Z. H., Zhao, Z., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Dating, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Granitic Gneisses in Amdo, Tibet. *Journal of Earth Science*, 25 (3): 473—485. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0448-0>
- Ludwig, K. R., 2001. Squid 1.02: A User Manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley, 2: 19.
- Mi, W. T., Zhu, L. D., Yang, W. G., et al., 2017. Provenance of the Niubao Formation and Its Geological Implications in the North Depression of the Nima Basin in the Tibet. *Earth Science*, 42(2): 240—257 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11 (3): 281—290 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-Temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Zhu, D. C., 2004. Thoughts on Some Important Scientific Problems in Regional Geological Survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 12—19 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Wang, R. J., Xin, H. B., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks Related to the Subduction of the Tethys Oceanic Plate along the Bangong Lake Arc Zone, the Western Tibetan Plateau. *Geochimica*, 38(6): 523—535 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Wang, R. J., Xin, H. B., et al., 2012. Age and Petrogenesis of A-Type Granites in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, Tibetan Plateau. *Lithos*, 146—147: 264—275. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.006>
- Shi, R. D., William, L. G., Suzanne, Y. O., et al., 2012. Melt/Mantle Mixing Produces Podiform Chromite Deposits in Ophiolites: Implications of Re-Os Systematics in the Dongqiao Neo-Tethyan Ophiolite, Northern Tibet. *Gondwana Research*, 21: 194—206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.05.011>
- Shi, R. D., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2008. The Bangong Lake Ophiolite (NW Tibet) and Its Bearing on the Tectonic Evolution of the Bangong-Nujiang Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5—6): 438—457. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2007.11.011>
- Sui, Q. L., Wang, Q., Zhu, D. C., et al., 2013. Compositional Diversity of ca. 110 Ma Magmatism in the Northern

- Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the Magmatic Origin and Crustal Growth in a Continent-Continent Collision Zone. *Lithos*, 168—169; 144—159. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.012>
- Wang, M., Li, C., Xie, C.M., et al., 2012. LA-ICP-MS U-Pb Dating of Zircon from Granitic Gneiss of the Nierong Microcontinent: The Discovery of the Neoproterozoic Basement Rock and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4101—4108 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W.L., Aitchison, J.C., Lo, C.H., et al., 2008. Geochemistry and Geochronology of the Amphibolite Blocks in Ophiolitic Mélanges along Bangong-Nujiang Suture, Central Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1—2): 122—138. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.10.022>
- Wang, X. X., Zhang, J. J., Yang, X. Y., et al., 2011. Zircon SHRIMP U-Pb Ages, Hf Isotopic Features and Their Geological Significance of the Greater Himalayan Crystalline Complex Augen Gneiss in Gyirong Area, South Tibet. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 127—139 (in Chinese with English abstract).
- Wei, S.G., Tang, J.X., Song, Y., et al., 2017. Early Cretaceous Bimodal Volcanism in the Duolong Cu Mining District, Western Tibet: Record of Slab Break off That Triggered ca.108—113 Ma Magmatism in the Western Qiangtang Terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138: 588—607. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.12.010>
- Wu, Z.H., Wu, Z.H., Hu, D.G., et al., 2009. Uplift and Tectonic Evolution of the Cenozoic in the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xia, B., Xu, L. F., Wei, Z. Q., et al., 2008. SHRIMP Zircon Dating of Gabbro from the Dongqiao Ophiolite in Tibet and Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 528—531 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X.C., Li, T.D., 2000. The Tectonic Evolution and Uplift of the Tibet Plateau. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 239—268 (in Chinese).
- Xie, C.M., 2013. Tectonic Evolution of the Nyainrong Microcontinent, Tibet—Constraints from Geochronology and Geochemistry (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xie, C.M., Li, C., Su, L., et al., 2010. LA-ICP-MS U-Pb Dating of Zircon from Granite-Gneiss in the Amdo Area, Northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1737—1744 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C.M., Li, C., Wu, Y.W., et al., 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochronology Constraints on Jurassic Tectonothermal Event of Nyainrong Microcontinent. *Journal of Earth Science*, 25(1): 98—108. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0403-0>
- Xu, R. H., Schärer, U., Allègre, C. J., 1985. Magmatism and Metamorphism in the Lhasa Block (Tibet): A Geochronological Study. *The Journal of Geology*, 93(1): 41—57. <https://doi.org/10.1086/628918>
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Liang, F.H., et al., 2005. Pan-African and Early Paleozoic Orogenic Events in the Himalaya Terrane: Inference from SHRIMP U-Pb Zircon Ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Liu, F.L., Liu, P.H., et al., 2013. ^{40}Ar - ^{39}Ar Dating for Muscovite in Garnet Muscovite-Felsic Schists of the Dahongshan Group in Southwestern Yangtze Block and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2161—2170 (in Chinese with English abstract).
- Ye, P.S., Wu, Z.H., Hu, D.G., et al., 2004. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Ophiolite of Dongqiao, Tibet. *Geoscience*, 18(3): 309—315 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Zeitler, P.K., 1985. Cooling History of the NW Himalaya, Pakistan. *Tectonics*, 4(1): 127—151. <https://doi.org/10.1029/tc004i001p00127>
- Zhang, X.R., Shi, R.D., Huang, Q.S., et al., 2010. Finding of High-Pressure Mafic Granulites in the Amdo Basement, Central Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 55(27—28): 2702—2711 (in Chinese).
- Zhang, X.R., Shi, R.D., Huang, Q.S., et al., 2014. Early Jurassic High-Pressure Metamorphism of the Amdo Terrane, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology of Mafic Granulites. *Gondwana Research*, 26(3—4): 975—985. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.003>
- Zhang, X.Z., Dong, Y.S., Xie, C.M., et al., 2010. Identification and Significance of High-Pressure Granulite in Anduo Area, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2106—2112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Chen, W., Chen, K. L., et al., 2006. Study on the Ar-Ar Age Spectrum of Diagenetic I/S and the Mechanism of ^{39}Ar Recoil Loss—Examples from the Clay Minerals of P-T Boundary in Changxing, Zhejiang Province. *Geological Review*, 52(4): 556—561 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Li, S.M., Cawood, P. A., et al., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by Divergent Double Subduction. *Lithos*, 245: 7—17.

- <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.023>
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al., 2009. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks along an East-West Traverse throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet, *Chemical Geology*, 268(3): 298–312.
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2008a. Spatial-Temporal Distribution and Tectonic Setting of Jurassic Magmatism in the Gangdise Belt, Tibet, China, *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458–468 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2008b. Tempo-Spatial Variations of Mesozoic Magmatic Rocks in the Gangdise Belt, Tibet, China, with a Discussion of Geodynamic Setting-Related Issues, *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535–1536 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Mo, X. X., et al., 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous Geodynamic Setting in Middle-northern Gangdise: New Insights from Volcanic Rocks, *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534–546 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth, *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2012. Cambrian Bimodal Volcanism in the Lhasa Terrane, Southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-Type Magmatic Arc in the Australian Proto-Tethyan Margin, *Chemical Geology*, 328: 290–308. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.12.024>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2012. Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane, *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 常承法, 郑锡澜, 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨, *中国科学*, (2): 190–201.
- 陈国荣, 刘鸿飞, 蒋光武, 等, 2004. 西藏班公湖—怒江结合带中段沙木罗组的发现, *地质通报*, 23(2): 193–194.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等, 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据, *岩石学报*, 22(4): 867–872.
- 丁帅, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2017. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿含矿岩体年代学、地球化学及地质意义, *地球科学*, 42(1): 1–23.
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 等, 2012. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义, *岩石学报*, 28(5): 1453–1464.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等, 2011. 西藏班公湖—怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据, *岩石学报*, 27(7): 1993–2002.
- 辜平阳, 李荣社, 何世平, 等, 2012. 西藏那曲县北聂荣微地块聂荣岩群中斜长角闪岩——Rodinia 超大陆裂解的地质纪录, *岩石矿物学杂志*, 31(2): 145–154.
- 胡隼, 万永文, 陶专, 等, 2014. 班公湖—怒江缝合带西段特提斯洋盆南向俯冲的地球化学和年代学证据, *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(4): 505–515.
- 胡培远, 李才, 苏犁, 等, 2010. 青藏高原羌塘中部蜈蚣山花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 定年——泛非与印支事件的年代学记录, *中国地质*, 37(4): 1050–1061.
- 黄继钧, 2001. 藏北羌塘盆地构造特征及演化, *中国区域地质*, 20(2): 178–186.
- 李再会, 林仕良, 丛峰, 等, 2012. 滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义, *岩石学报*, 28(5): 1529–1541.
- 刘敏, 赵志丹, 管琪, 等, 2011. 西藏聂荣微陆块早侏罗世中期花岗岩及其包体的岩浆混合成因: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素证据, *岩石学报*, 27(7): 1931–1937.
- 刘敏, 朱弟成, 赵志丹, 等, 2010. 藏北聂荣地区早侏罗世末期的岩浆混合作用及构造意义, *岩石学报*, 26(10): 3117–3130.
- 密文天, 朱利东, 杨文光, 等, 2017. 西藏尼玛盆地北部古近系牛堡组物源及地质意义, *地球科学*, 42(2): 240–257.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息, *高校地质学报*, 11(3): 281–290.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化, *岩石学报*, 22(3): 521–533.
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成, 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考, *地质通报*, 23(1): 12–19.
- 曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 等, 2009. 西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学, *地球化学*, 38(6): 523–535.
- 王明, 李才, 解超明, 等, 2012. 聂荣微陆块花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年——新元古代基底岩石的发现及其意义, *岩石学报*, 28(12): 4101–4108.
- 王晓先, 张进江, 杨雄英, 等, 2011. 藏南吉隆地区早古生代大喜马拉雅片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义, *地学前缘*, 18(2): 127–139.
- 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等, 2009. 青藏高原新生代构造演化与隆升过程, 北京: 地质出版社.
- 夏斌, 徐力峰, 韦振权, 等, 2008. 西藏东巧蛇绿岩中辉长岩锆

- 石 SHRIMP 定年及其地质意义.地质学报,82(4): 528—531.
- 肖序常,李廷栋,2000.青藏高原的构造演化与隆升机制.广州:广东科技出版社,239—268.
- 解超明,李才,苏黎,等,2010.藏北安多地区花岗片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年.地质通报,29(12): 1737—1744.
- 解超明,2013.青藏高原聂荣微陆块构造演化——年代学与地球化学制约.长春:吉林大学.
- 许志琴,杨经绥,梁凤华,等,2005.喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录.岩石学报,21(1): 1—12.
- 杨红,刘福来,刘平华,等,2013.扬子地块西南缘大红山群石榴白云母—长石石英片岩的白云母⁴⁰Ar—³⁹Ar 定年及其地质意义.岩石学报,29(6): 2161—2170.
- 叶培盛,吴珍汉,胡道功,等,2004.西藏东巧蛇绿岩的地球化学特征及其形成的构造环境.现代地质,18(3): 309—315.
- 张晓冉,史仁灯,黄启帅,等,2010.青藏高原安多高压基性麻粒岩的发现及其地质意义.科学通报,55(27—28): 2702—2711.
- 张修政,董永胜,解超明,等,2010.安多地区高压麻粒岩的发现及其意义.岩石学报,26(7): 2106—2112.
- 张彦,陈文,陈克龙,等,2006.成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例.地质论评,52(4): 556—561.
- 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等,2006.冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境:火山岩约束.岩石学报,22(3): 534—546.
- 朱弟成,潘桂棠,王立全,等,2008a.西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境.地质通报,27(4): 458—468.
- 朱弟成,潘桂棠,王立全,等,2008b.西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论.地质通报,27(9): 1535—1536.
- 朱弟成,赵志丹,牛耀龄,等,2012.拉萨地体的起源和古生代构造演化.高校地质学报,18(1): 1—15.