

doi: 10.12029/gc20220621

张小葛, 谢财富, 张昭, 陈凯, 南争路, 袁永盛, 张宏辉, 靳国栋, 彭苹, 朱玉雯. 2022. 广东冷水地区花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代: 对华南内陆~100 Ma 构造环境的制约[J]. 中国地质, 49(6): 2002-2028.

Zhang Xiaoge, Xie Caifu, Zhang Zhao, Chen Kai, Nan Zhenglu, Yuan Yongsheng, Zhang Honghui, Jin Guodong, Peng Ping, Zhu Yuwen. 2022. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of granites in Qiashui area, Guangdong Province: Constraints on the ~100 Ma tectonic setting of interior of South China[J]. Geology in China, 49(6): 2002-2028(in Chinese with English abstract).

广东冷水地区花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代: 对华南内陆~100 Ma 构造环境的制约

张小葛^{1,2}, 谢财富^{1,2}, 张昭^{1,2,3}, 陈凯⁴, 南争路⁴, 袁永盛⁵,
张宏辉⁵, 靳国栋⁶, 彭苹¹, 朱玉雯^{1,2}

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013; 3. 巴林右旗巴彦塔拉苏木人民政府, 内蒙古赤峰 025150; 4. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南海口 570100; 5. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南昆明 650100; 6. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016)

提要:【研究目的】东南沿海地区发育大量~100 Ma 的岩浆岩, 在华南内陆该期岩浆作用虽报道较少但往往与成矿有关。查明该期岩浆作用在华南内陆的分布, 将为该区晚燕山期构造背景的研究及相关找矿勘查提供科学依据。【研究方法】基于 1:5 万区域地质调查和详细的岩相学研究, 对位于华南内陆的郴州—临武断裂附近的冷水地区花岗岩, 划分为 5 个侵入次: (1) 粗—中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩; (2) 中—细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩; (3) 中—细粒斑状黑云母二长花岗岩; (4) 中—细粒含斑黑云母二长花岗岩; (5) 细粒含斑黑云母正长花岗岩。然后系统地对不同侵入次的代表性岩石进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。【研究结果】获得第一到第五侵入次的年龄为 102~97 Ma, 均属早—晚白垩世之交(~100 Ma) 侵入岩。【结论】综合分析对比华南内陆及东南沿海地区~100 Ma 的岩浆事件, 认为华南内陆该期岩浆活动的动力学机制是: 古太平洋板块俯冲后撤引发的弧后及陆内岩石圈伸展, 导致郴州—临武等古深大断裂重新活化拉张, 引起软流圈上涌和岩石圈减薄, 进而产生较强烈的幔源和壳源岩浆活动。

关键词: 构造环境; 锆石 U-Pb 定年; 燕山晚期; 连阳花岗岩体; 广东冷水地区; 华南; 地质调查工程

创新点: 提出华南内陆~100 Ma 的岩浆活动与古太平洋板块俯冲后撤引发陆内岩石圈伸展, 导致郴州—临武等古深大断裂活化有关。

中图分类号: P597; P588.121 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-2002-27

Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of granites in Qiashui area, Guangdong Province: Constraints on the ~100 Ma tectonic setting of interior of South China

ZHANG Xiaoge^{1,2}, XIE Caifu^{1,2}, ZHANG Zhao^{1,2,3}, CHEN Kai⁴, NAN Zhenglu⁴,
YUAN Yongsheng⁵, ZHANG Honghui⁵, JIN Guodong⁶, PENG Ping¹, ZHU Yuwen^{1,2}

收稿日期: 2020-06-05; 改回日期: 2020-12-22

基金项目: 中国地质调查局项目“重要矿产资源调查评价”(12120114083071)资助。

作者简介: 张小葛, 男, 1996 年生, 硕士生, 矿产普查与勘探专业; E-mail: 1475728793@qq.com。

通讯作者: 谢财富, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事岩浆岩研究; E-mail: cfxie@ecit.cn。

(1. *Collage of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*; 2. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*; 3. *People's Government of Bayantala Town, Chifeng 025150, Inner Mongolia, China*; 4. *Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570100, Hainan, China*; 5. *Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, CGS, Kunming 650100, Yunnan, China*; 6. *Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] A large amount of ~100 Ma magmatic rocks are developed in the southeast margin of South China. Shifting to interior of South China, although the period of magmatism has been reported sparingly, they were often related to metal mineralization. Determination of the distribution of magmatism of ~100 Ma in the interior of South China would provide a scientific basis for the study of the late Yanshanian tectonic setting, and related ore prospecting and exploration. **[Methods]** Based on the 1:50000 regional geological survey and detailed petrographic study, the granites in Qiashui area, which are located near the Chenzhou-Linwu fault in the interior of South China, were divided into five intrusive episodes, including (1) porphyritic coarse-medium-grained amphibole-biotite monzogranite, (2) porphyritic medium-fine-grained amphibole-bearing biotite monzogranite, (3) porphyritic medium-fine-grained biotite monzogranite, (4) medium-fine-grained biotite monzogranite with rare porphyrites and (5) fine-grained biotite syenogranite with rare porphyrites, respectively. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating was carried out systematically for the representative rocks of these intrusions. **[Results]** U-Pb dating yield ages of the first to fifth intrusive episodes ranges from 102 Ma to 97 Ma, which is at the transition of the Early and Late Cretaceous. **[Conclusions]** According to comprehensive analysis and comparison of the ~100 Ma magmatic events in the interior and southeast coastal regions of South China, it shows that the geodynamic mechanism of the magmatism of ~100 Ma in the interior of South China might be related to back arc and intracontinental lithospheric extension resulting from Paleo-Pacific plate subduction retreat. It led to reactivation and extension of ancient deep faults such as the Chenzhou Linwu fault, and then the intensive mantle and crust magmatism.

Key words: tectonic setting; zircon U-Pb dating; Late Yanshanian; Lianyang granite pluton; Qiashui region, Guangdong Province; South China; geological survey engineering.

Highlights: It is proposed that the ~100 Ma magmatism in the interior of South China is related to reactivation of ancient deep faults such as the Chenzhou-Linwu fault, which is caused by intracontinental lithosphere extension resulting from the roll-back of the subducted Paleo-Pacific plate.

About the first author: ZHANG Xiaoge, male, born in 1996, master candidate, majors in mineral resource prospecting and exploration; E-mail: 1475728793@qq.com.

About the corresponding author: XIE Caifu, male, born in 1965, doctor, professor, mainly engaged in study of magmatic rocks; E-mail: cfxie@ecit.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. 12120114083071).

1 引言

华南广泛发育的中生代岩浆岩(图1a)长期受到地质学家的关注(Jahn, 1974; Zhou et al., 2000; 王强等, 2005; 孙涛, 2006; 周新民, 2007; Li and Li, 2007; 杨明桂等, 2009; 徐先兵等, 2009; 舒良树, 2012; Wang et al., 2013; 郑永飞等, 2013; 崔建军等, 2013; 李三忠等, 2018; 苑新晨等, 2021)。尤其对华南晚中生代花岗岩类进行了较深入的研究,对其时空分布格局、岩石成因、形成构造背景及与成矿关系等方面取得了一系列的进展(Zhou and Li, 2000;

王强等, 2005; 孙涛, 2006; 周新民, 2007; 付建明等, 2007; 柏道远等, 2008; 肖庆辉等, 2010; 舒良树, 2012; 阳杰华等, 2017; 贾丽辉, 2018; Chen et al., 2019; 袁永盛等, 2020; 李宏卫等, 2021)。其中,发现100 Ma左右的岩浆岩在东南沿海地区大量发育(王德滋和沈渭洲, 2003; 肖娥等, 2007; 李良林等, 2013; Chen et al., 2014; Zhao et al., 2016; Yan et al., 2016; 贾丽辉, 2018),而华南腹地(特别是南岭地区)该时期的岩浆活动较少(王强等, 2005; 蔡明海等, 2006; 贾小辉等, 2014; Wang et al., 2018)。对其成因及形成的构造环境仍存在争议,提出了如活动

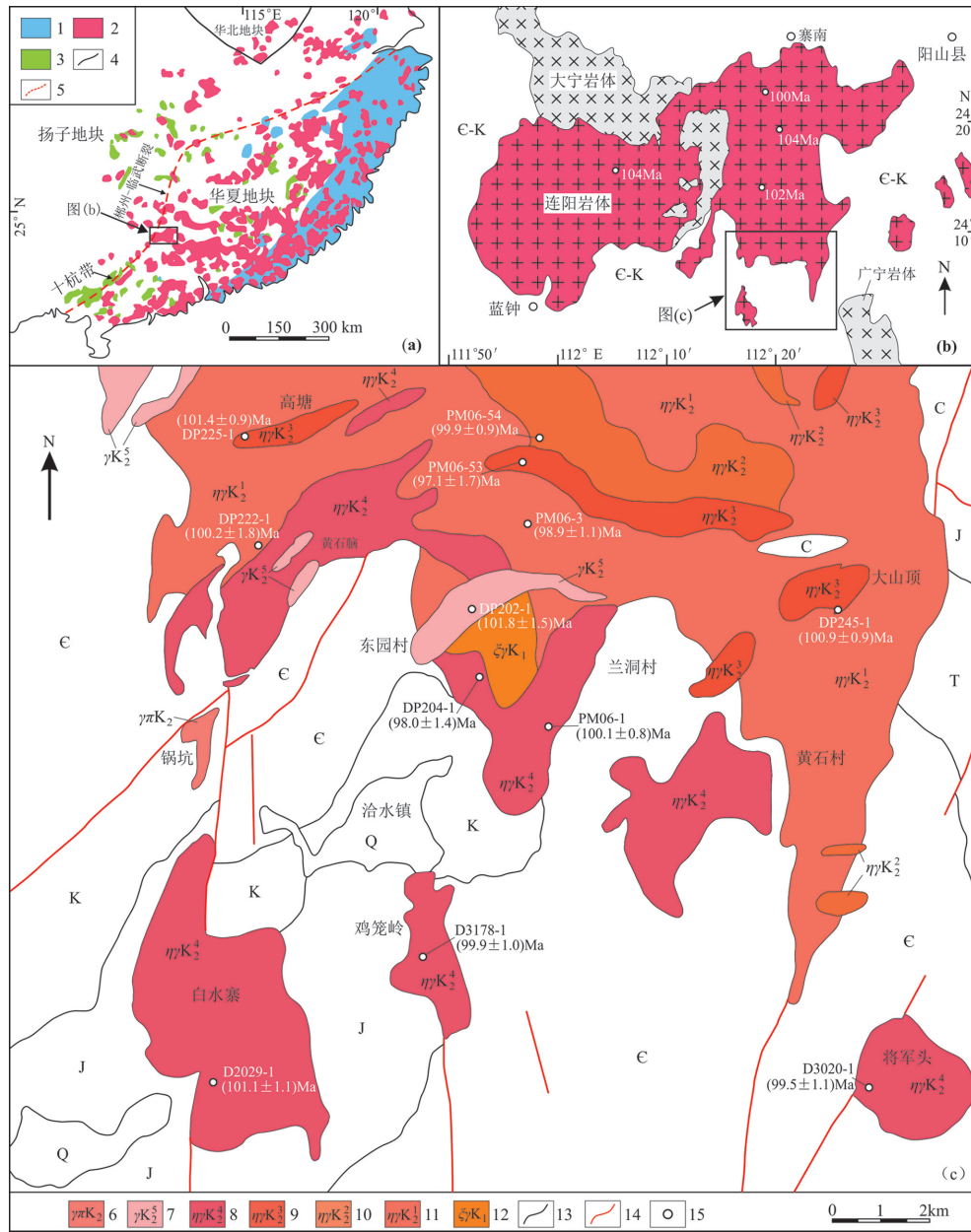


图1 华南主要构造单元和中生代岩浆岩分布图(a, 据 Zhou and Li, 2000; Wang et al., 2013 修改)、连阳岩体地质简图(b, 据高剑峰等, 2005 修改; 同位素年龄数据引自马星华等, 2014)及研究区地质简图与采样位置图(c, 据袁永盛等, 2020 修改)

1—燕山期火山岩; 2—燕山期侵入岩; 3—印支期侵入岩; 4—大地构造单元界线; 5—深大断裂; 6—晚白垩世花岗斑岩; 7—晚白垩世第五侵入次花岗岩; 8—晚白垩世第四侵入次二长花岗岩; 9—晚白垩世第三侵入次二长花岗岩; 10—晚白垩世第二侵入次二长花岗岩; 11—晚白垩世第一侵入次二长花岗岩; 12—早白垩世正长花岗岩; 13—地质界线; 14—断层; 15—采样位置; Q—第四系; K—白垩系; J—侏罗系; T—三叠系; C—石炭系; E—寒武系; E-K—寒武系—白垩系

Fig.1 Geological sketch map of main tectonic units and Mesozoic igneous rocks in South China (a, modified from Zhou and Li, 2000; Wang et al., 2013), geological sketch of the Lianyang pluton (b, modified from Gao Jianfeng et al., 2005; isotopic age from Ma Xinhua et al., 2014), geological sketch and sampling location of the investigated area (c, modified from Yuan Yongsheng et al., 2020)

1—Yanshanian volcanics; 2—Yanshanian intrusives; 3—Indosinian intrusives; 4—Boundary between tectonic block; 5—Deep fault; 6—Late Cretaceous granite porphyry; 7—The fifth intrusive episodes granite in Late Cretaceous; 8—The fourth intrusive episodes monzogranite of Late Cretaceous; 9—The third intrusive episodes monzogranite in Late Cretaceous; 10—The second intrusive episodes monzogranite in Late Cretaceous; 11—The first intrusive episodes monzogranite in Late Cretaceous; 12—Early Cretaceous syenogranite; 13—Geological boundary; 14—Fault; 15—Sampling location; Q—Quaternary; K—Cretaceous; J—Jurassic; T—Triassic; C—Carboniferous; E—Cambrian; E-K—Cambrian—Cretaceous

大陆边缘构造-岩浆作用(Jahn, 1974; Zhou et al., 2006)、大陆伸展-裂解(Gilder et al., 1991)、阿尔卑斯型碰撞造山(Hsu et al., 1990)等不同的认识。

位于南岭西段的连阳花岗岩体曾被认为是复式侵入体,主要由晚侏罗世产出的粗-中粒花岗岩主体和早白垩世晚期侵位的中-细粒花岗岩补体构成(高剑峰等, 2005; 马星华等, 2014; 袁永盛等, 2020)。连阳岩体虽然位于南岭成矿带南部,但此前因为与其相关的矿产发现较少,所以对其研究在过去未得到足够重视。随着近年的矿产勘查与1:5万地质调查工作的开展,在岩体与围岩接触带附近新发现了多处矽卡岩型磁铁矿、铁多金属矿以及矽卡岩型-热液脉型多金属矿床等。李晶等(2010)曾对连阳岩体北侧姓坪矽卡岩型钼多金属矿进行铷钼矿Re-Os法定年,获得其模式年龄范围为99.7~92.1 Ma,等时线年龄为97.9 Ma,与连阳花岗岩体侵位年龄相一致,表明成矿与岩体的形成密切相关。

由于此前位于冷水地区的连阳岩体南部及南侧的白水寨、鸡笼岭、将军头等花岗岩体缺乏精确的年代学资料,曾被认为是晚侏罗世岩浆活动的产物(高剑峰等, 2005; 广西壮族自治区地质调查院, 2005^①)。笔者近年来在粤西北冷水地区开展了1:5万区域地质调查,在详细的野外地质调查及岩相学工作的基础上,对岩体进行侵入期次划分,并通过系统的LA-ICP-MS锆石U-Pb法精确测年,厘定上述岩体为100 Ma左右岩浆活动的产物。结合前人对华南同期(110~90 Ma)岩浆岩类的研究成果,进一步探讨连阳及其南侧一些花岗岩体的成因和华南晚中生代岩石圈伸展过程的地球动力学机制。

2 区域地质背景及岩体地质概况

华南陆块紧邻太平洋板块西缘,由华夏地块和扬子地块于新元古代沿NE向的江-绍断裂带(大致与十一杭带重合)发生碰撞-拼贴形成(图1a),并在显生宙主要经历了早古生代、早中生代和晚中生代3期强烈的构造-岩浆活动的改造(Wang et al., 2012)。自中侏罗世开始,华南陆块逐渐转变成以伸展为主的构造环境,岩浆事件频繁。晚侏罗世-早白垩世形成了大规模呈NE-NNE向展布的穹隆构造和断陷火山-沉积盆地,并发育大量流纹质岩石、I型、A型花岗岩和少量玄武质岩石等火山-侵

入岩类,岩浆岩以广泛分布的钙碱性岩石为主,并呈现出向洋年轻化的分布规律(王德滋和沈渭洲, 2003; Zhou et al., 2006; 周新民, 2007; Chen et al., 2008)。晚白垩世岩浆活动主要分布在浙闽粤沿海区域,受余姚-丽水-政和-大埔断裂、温州-镇海断裂及长乐-南澳断裂所控制,以I型、A型花岗岩、流纹质-玄武质岩石等双峰式火山岩为主,呈NE向分布(Chen et al., 2008; Zhao et al., 2015)。

连阳岩体地处粤西北,位于郴州-临武大断裂东侧、华夏地块西部的南岭纬向构造-岩浆岩带南带(花山-连阳-佛冈-新丰江岩带)的西段,出露面积约1600 km²,为一大型花岗质岩基(高剑峰等, 2005; 马星华等, 2014; 袁永盛等, 2020),与加里东期大宁岩体和广宁岩体在空间上密切共生(图1b)。本文报道的冷水地区花岗岩体,包括连阳岩基南部及其南侧的白水寨、鸡笼岭、将军头等岩株,以100 Ma左右的岩浆活动为主,可划分为5个侵入次(图1c,详见后述)。另见很少量114 Ma的细粒少斑黑云母正长花岗岩($\zeta\gamma K_1$)(另文发表)。区内地层主要为寒武系、石炭系、三叠系、侏罗系及白垩系,除寒武系岩性以变质砂岩、板岩等变质岩为主外,其他地层岩性主要为灰岩、白云质灰岩、砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩等。岩体主要受近SN向及NE-NNE向断裂控制。围岩与岩体接触带附近发生一定程度的角岩化、矽卡岩化、大理岩化等接触变质或接触交代变质作用,并新发现了多处矽卡岩型磁铁矿、铁多金属矿以及矽卡岩型-热液脉型多金属矿床等。

3 岩石学特征

依据岩性特征的不同及野外穿切关系,冷水地区(连阳岩体南部及南侧的白水寨、鸡笼岭、将军头小岩体)约100 Ma花岗岩体从早到晚可分为5个侵入次(图1c),分别为第一侵入次粗-中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_1^1$)、第二侵入次中-细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_2^1$)、第三侵入次中-细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_3^1$)、第四侵入次中-细粒含斑黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_4^1$)和第五侵入次细粒含斑黑云母正长花岗岩(γK_5^1)。各侵入次之间均具有较为明显的接触界线,并呈侵入接触关系(图2a、b)。

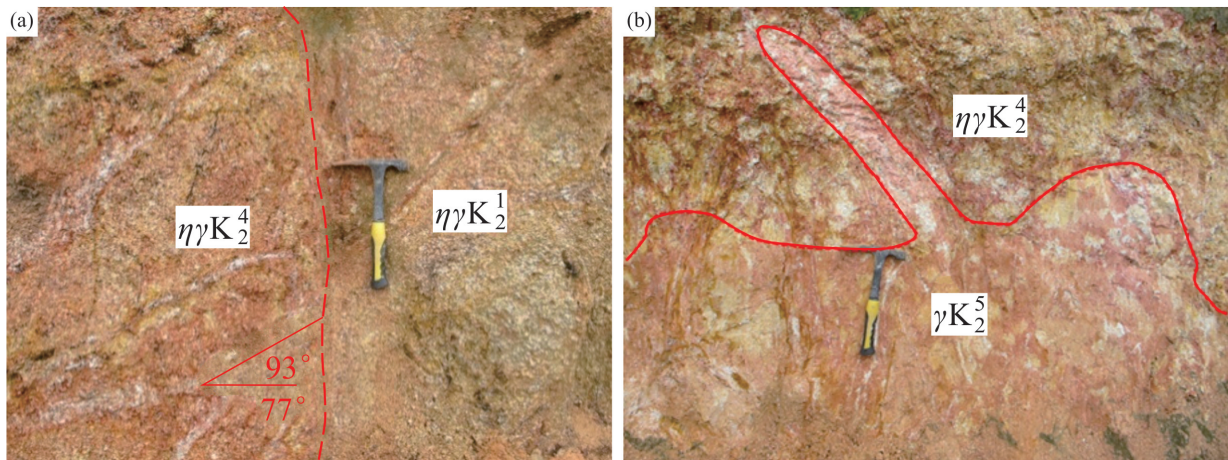


图2 冷水地区第一和第四侵入次、第四和第五侵入次花岗岩的接触特征

a—第四侵入次花岗岩(左)侵入到第一侵入次花岗岩中;b—第五侵入次花岗岩侵入到第四侵入次花岗岩中

Fig.2 Contacts between the first and fourth, and the fourth and fifth intrusive episodes granites in Qiashui region

a—The fourth episode(left) intruded into the first intrusive episode granite; b—The fifth episode intruded into the fourth intrusive episode granite

第一侵入次粗—中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_2^1$):块状构造,似斑状结构(图3a、b)。主要由钾长石斑晶(7%~25%)和基质钾长石(20%~26%)、斜长石(26%~35%)、石英(25%~28%)、黑云母(4%~8%)及角闪石(0.5%~2%)等组成。副矿物主要有磁铁矿、褐帘石、钛铁矿、榍石、锆石、磷灰石和绿帘石,含少量黄铁矿和萤石。钾长石斑晶粒径8~40 mm,以半自形—他形为主,具条纹结构,常见有斜长石、黑云母、石英等包裹体,部分边缘可见有浅色斜长石围绕形成的“环斑”结构。基质主要为粗—中粒花岗结构,粒径2~6 mm为主,斜长石半自形板柱状,少量见环带结构,据电子探针分析结果(附表略,下同),其斜长石牌号An值为19.6~32.7;黑云母,鳞片状为主,局部丛状,据电子探针分析结果(附表略,下同),MF值0.30~0.39,属铁质黑云母(图4a);角闪石,半自形长柱状,据电子探针分析结果(附表略,下同),按 Leake et al.(1997)的分类方案,属铁角闪石(图4b)。该次侵入岩中常见有浑圆状、椭圆状、不规则状暗色微粒包体(MME),大小一般为1 cm×2 cm~12 cm×15 cm,与主岩界线多较截然,个别为渐变,部分可见暗色矿物团粒(双包体)及长石、石英混染“斑晶”,其中有的石英“斑”具有眼斑结构(图3a),即石英“斑”遭受熔蚀并与岩浆反应生成角闪石、黑云母等暗色矿物环边。MME的基质为微细粒结构,粒径一般为0.01~0.5 mm,矿物组成:角闪石约25%,黑云母约20%,斜长石约52%,副矿物主要有磁铁矿、榍

石、磷灰石。斜长石常为自形长板条状,磷灰石常为针状。

第二侵入次中—细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_2^2$):块状构造,似斑状结构(图3c、d)。斑晶粒径多在6~40 mm,以钾长石(10%~20%)为主,常见斜长石、黑云母、石英等包裹体,部分边缘可见有浅色斜长石围绕形成的“环斑”结构,偶见角闪石斑晶,局部见少量石英、斜长石斑晶。基质为中—细粒花岗结构,主要由粒径0.3~4 mm的钾长石(20%~25%)、斜长石(25%~33%)、石英(25%~29%)、黑云母(5%~6%)和角闪石(1%~2%)等组成,副矿物主要有磁铁矿、褐帘石、钛铁矿、榍石和锆石,含少量黄铁矿、磷灰石及绿帘石。斜长石,半自形板柱状,少量见环带结构,An值绝大多数为15~27.9,个别35.5;黑云母,鳞片状—丛状,MF值0.24~0.38,属铁质黑云母;角闪石,半自形长柱状,属铁角闪石。该次侵入岩中也常见浑圆状、椭圆状、不规则状暗色微粒包体(MME),与第一侵入次中的MME特点类似。

第三侵入次中—细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_2^3$):块状构造,似斑状结构(图3e、f)。主要由粒径8~30 mm的钾长石斑晶(7%~15%)和粒径0.3~4 mm的钾长石(20%~25%)、斜长石(23%~33%)、石英(28%~32%)和黑云母(4%~6%)等基质组成。钾长石斑晶部分边缘可见有浅色斜长石围绕形成的“环斑”结构,常见有斜长石、黑云母、石英等包裹

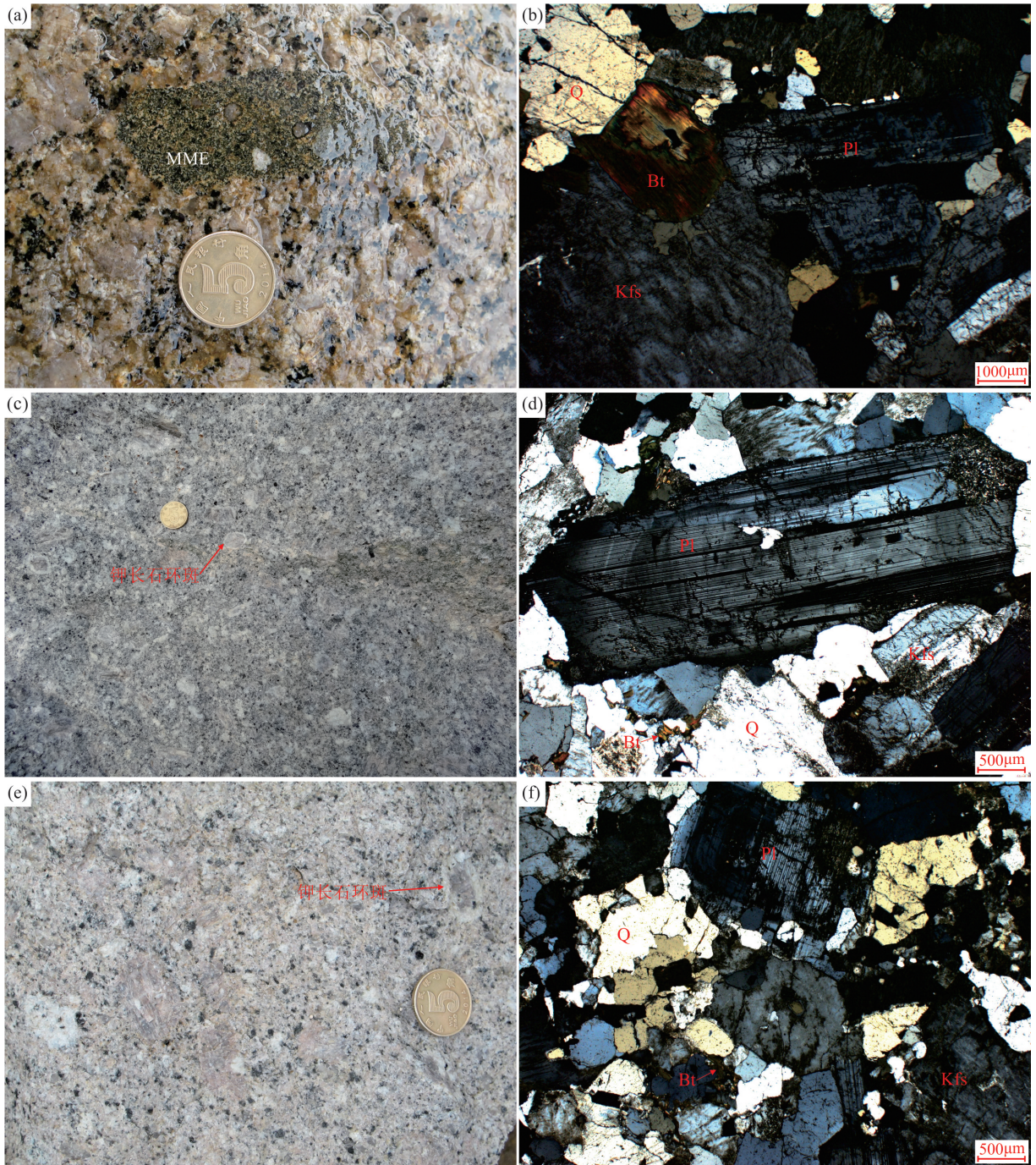


图3 冷水地区第一、第二和第三侵入次花岗岩野外与显微照片
 第一侵入次花岗岩(含MME)露头(a)及镜下特征(b);第二侵入次花岗岩露头(c)及镜下特征(d);第三侵入次花岗岩露头(e)及镜下特征(f);Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母;MME—暗色微粒包体

Fig.3 Field and microscope photos of the first, second and third intrusive episodes granites in Qiashui region
 Outcrop (a) and microscopic characteristics (b) of the first intrusive episode (MME-bearing); Outcrop (c) and microscopic characteristics (d) of the second intrusive episode; Outcrop (e) and microscopic characteristics (f) of the third intrusive episode; Q—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; MME—Mafic magmatic enclave

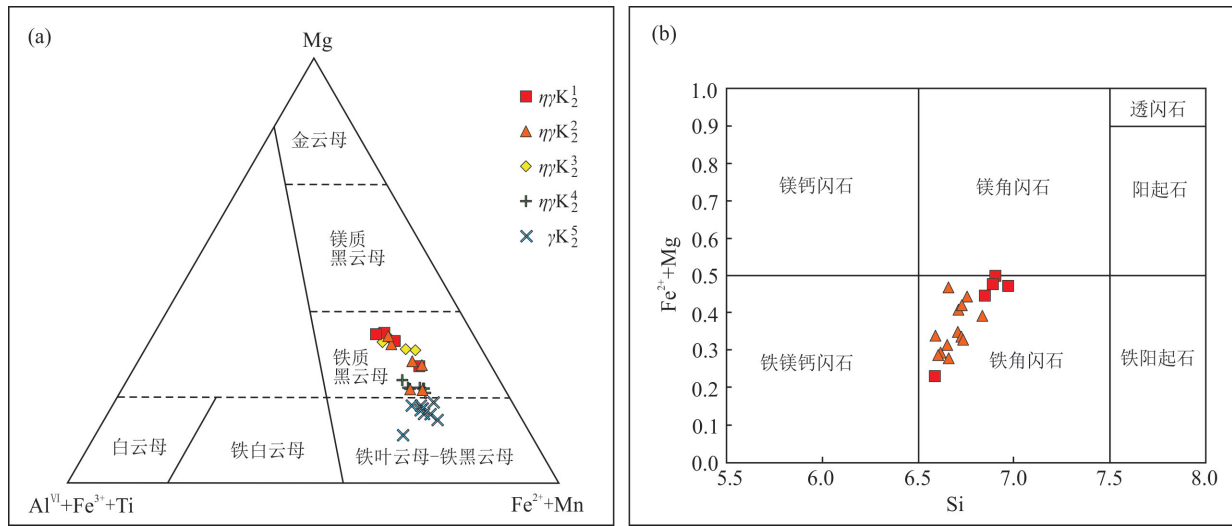


图4 冷水地区花岗岩的黑云母成分分类图(a, 底图据Foster, 1960)和角闪石成分分类图(b, 底图据Leake et al., 1997)
Fig.4 Composition classification diagrams for biotite (a, after Foster, 1960) and amphibole (b, after Leake et al., 1997) from the granites in Qishui area

体。钾长石,具条纹结构,半自形板柱状—他形粒状;斜长石,半自形板柱状,少量见环带结构,An值为15.1~29.9;黑云母,鳞片状—丛状,MF值0.24~0.37,属铁质黑云母。副矿物主要有磁铁矿、褐帘石、榍石、锆石、钛铁矿和磷灰石,含少量萤石和绿帘石。该次侵入岩见少量MME,特点与第一侵入次中的类似。

第四侵入次中—细粒含斑黑云母二长花岗岩($\eta\gamma K_2^4$):块状构造,似斑状结构(图5a、b)。主要由粒径6~18 mm的钾长石斑晶(1%~5%)和粒径0.3~3.5 mm的钾长石(35%~42%)、斜长石(21%~29%)、石英(29%~33%)和黑云母(4%~5%)等基质组成。副矿物主要有磁铁矿、钛铁矿、独居石、褐帘石、锆石和绿帘石,含少量黄铁矿、榍石及磷灰石。钾长石斑晶中见有斜长石、黑云母、石英等包裹体。基质为中—细粒花岗结构,钾长石,具条纹结构,半自形板柱状—他形粒状,常高岭土化;斜长石,半自形板柱状,少量见环带结构,An值多为10.2~24.7,个别28~36.2,常绢云母化、黝帘石化;黑云母,鳞片状—丛状,MF值一般0.20~0.35,多属铁质黑云母,少部分属铁黑云母。靠近MME的主岩中个别黑云母MF值达0.53~0.74,可能是从MME中混染的黑云母。该次侵入岩局部可见少量MME。

第五侵入次细粒含斑黑云母正长花岗岩(γK_2^3):块状构造,似斑状结构(图5c、d)。斑晶粒径多在2~13 mm,以钾长石(1%~3%)为主,少量石英、斜长石斑晶,偶见黑云母斑晶,斑晶钾长石中可见细小斜长石、黑云母、石英等包裹体。基质主要为细粒花岗结构,常见显微文像结构,主要由粒径0.2~1.5 mm的钾长石(39%~45%)、斜长石(14%~21%)、石英(30%~34%)和黑云母(2%~5%)等组成。副矿物主要有磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿、独居石和锆石,含少量萤石、磷灰石。钾长石,具条纹结构,半自形板柱状—他形粒状,常泥化;斜长石,半自形板柱状,少量见环带结构,An值1.0~27.8,且多低于17,常绢云母化;黑云母,鳞片状—丛状,MF值绝大多数0.13~0.21,个别0.28,绝大多数属铁黑云母。

5个侵入次岩石的岩性特征表明,冷水地区(连阳岩体南部和南侧小岩体)花岗岩从早期侵入次到晚期侵入次,矿物颗粒粒度、暗色矿物含量总体逐渐降低,表现为黑云母含量逐渐下降,其MF值逐渐降低,从铁质黑云母变为铁黑云母。角闪石从有到无,斜长石牌号(An值)逐渐降低。岩石副矿物含量变化较大,其中早期侵入体的副矿物含量较高,晚期副矿物含量逐渐减少,主要表现为磁铁矿、榍石含量随岩浆演化不断降低,但钛铁矿和独居石有所增加,晚期还常出现萤石,总体副矿物组合为典型

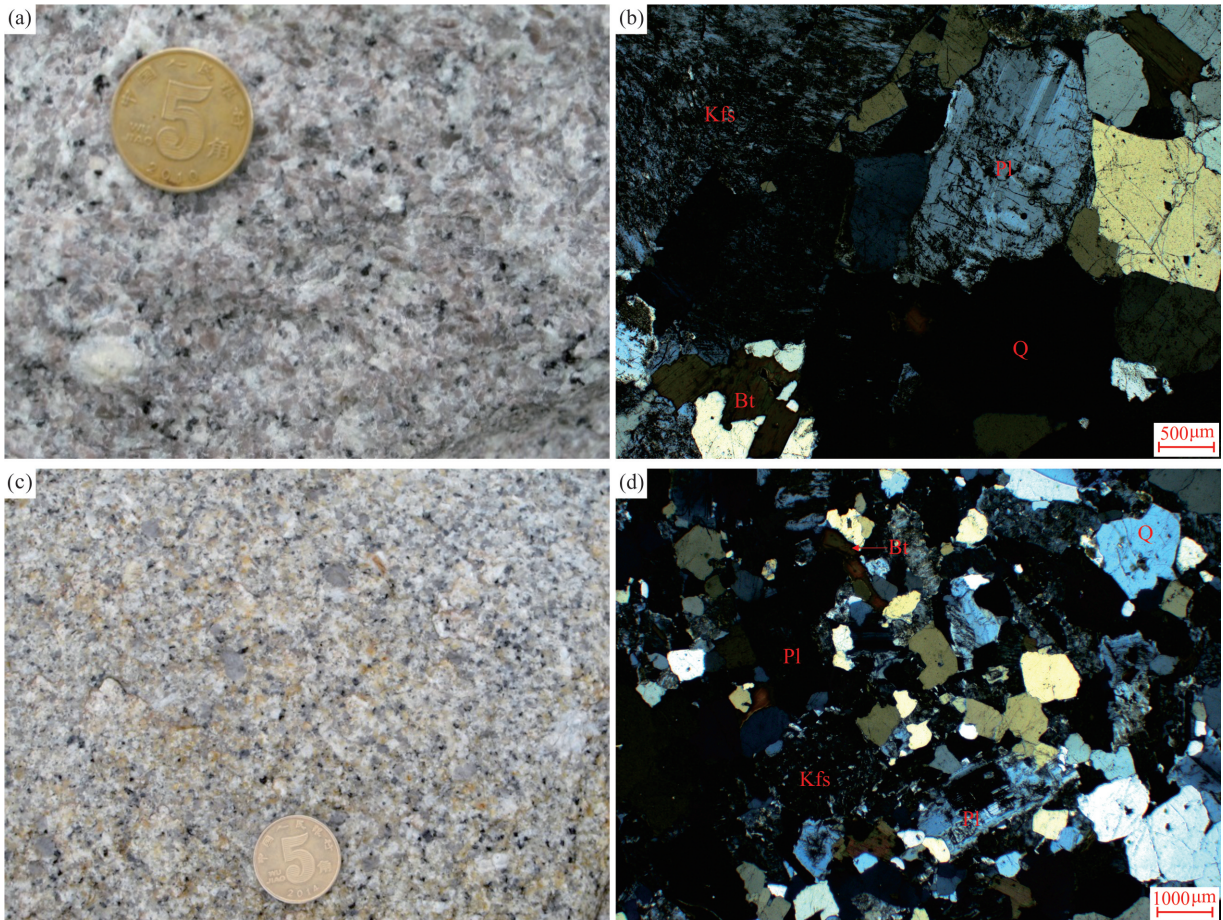


图5 冷水地区第四、第五侵入次花岗岩野外与显微照片

第四侵入次花岗岩露头(a)及镜下特征(b);第五侵入次花岗岩露头(c)及镜下特征(d);Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母

Fig.5 Field and microscope photos of the fourth and fifth intrusive episodes granites in Qiashui region

Outcrop (a) and microscopic characteristics (b) of the fourth intrusive episode; Outcrop (c) and microscopic characteristics (d) of the fifth intrusive episode; Q—Quartz; Kfs—K—Feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite

的磁铁矿—钛铁矿—榍石—锆石组合系列。第一和第二侵入次岩石中常见有MME,第三和第四侵入次岩石中含少量MME。MME多呈椭圆状或浑圆状,具有石英“眼斑”结构及斜长石自形长板条结构、磷灰石针状结构等岩相学特征,表明其为幔源岩浆与壳源岩浆(主岩)发生混合的产物(Xie et al., 2020)。第一至第三侵入次的主岩中常见钾长石斑晶的“环斑”结构(幔状长石结构),也反映了壳—幔岩浆混合作用(Narayana et al., 2000; 王超等, 2008)。综合分析表明,冷水地区壳源花岗质岩浆经历了较明显的分离结晶作用和一定程度的壳幔岩浆混合作用(袁永盛等, 2020)。

4 采样位置与测试方法

本次工作在冷水地区的连阳岩体南部及其南

侧的白水寨、鸡笼岭、将军头花岗岩体共采集了12件新鲜的锆石U-Pb年代学样品。其中DP222-1、PM06-3采自第一侵入次粗—中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩,PM06-54采自第二侵入次中—细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩,PM06-53、DP225-1和DP245-1采自第三侵入次中—细粒斑状黑云母二长花岗岩,PM06-1、DP204-1、D2029-1、D3178-1和D3020-1采自第四侵入次中—细粒含斑黑云母二长花岗岩,DP202-1采自第五侵入次细粒含斑黑云母正长花岗岩(图1c)。

野外在岩体新鲜未蚀变位置采集样品5 kg,采用人工重砂法分选出锆石。锆石颗粒用环氧树脂固定并抛光露出核部(宋彪等, 2002),然后进行透射光和反射光照相,并使用JXA 8100型电子探针进行阴极发光(CL)照相(图6)。锆石LA-ICP-MS

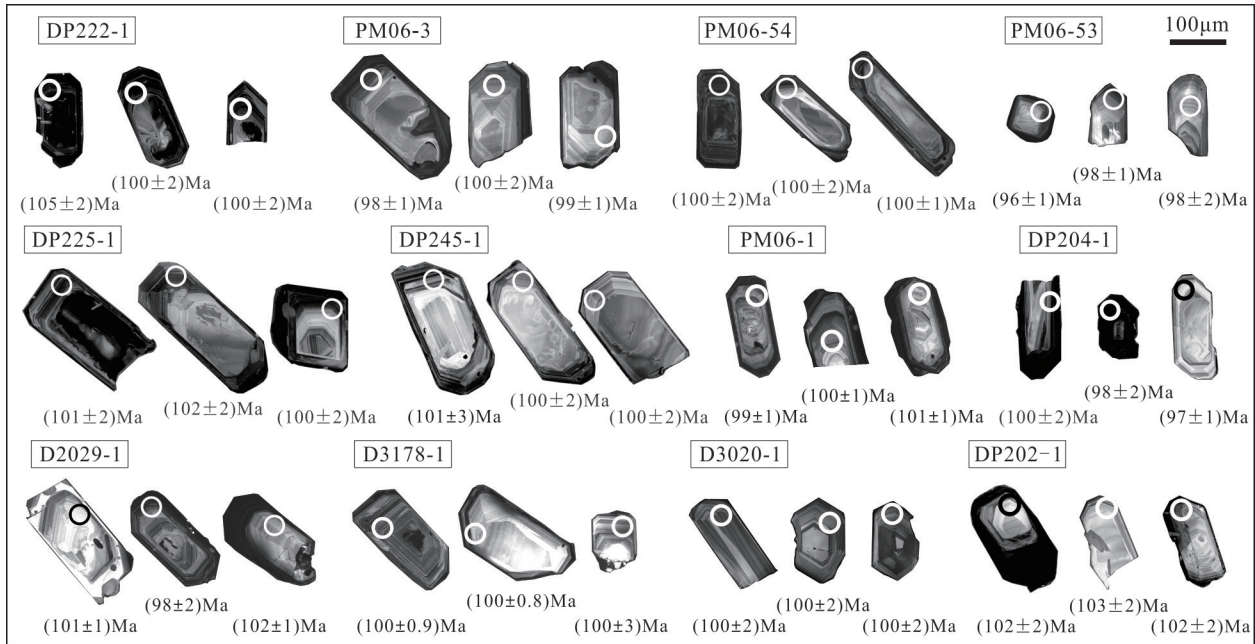


图6 冷水地区第一至第五侵入次花岗岩的代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig.6 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the first to fifth intrusive episodes granites in Qiashui region

U-Pb 定年工作在北京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,使用 Agilent 7500a ICP-MS 连接起来的 New Wave 213 nm 激光剥蚀系统完成。分析过程中,激光束斑直径 32 μm ,频率 5 Hz。U-Pb 分馏采用澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 (608.5 ± 1.5) Ma, Jackson et al., 2004) 进行校正,以 Mud Tank ((732 ± 5) Ma, Black and Gulson, 1978) 作为内标控制分析精度。U-Pb 年龄计算由 GLITTER 软件 (4.4) 在线获得。使用 ComPbCorr#3-15G 程序 (Andersen, 2002) 进行普通铅校正。年龄数据处理采用 ICPMS Data Cal (8.9) (Liu et al., 2008) 和 Isoplot (3.0) (Ludwig, 2003) 软件进行。详细测试方法和流程见 Griffin et al. (2004)。

5 分析结果

12 件样品中锆石以无色或浅黄色、黄粉色、褐粉色为主,透明一半透明,金刚光泽,多呈自形一半自形双锥柱状、柱状,晶内裂纹较发育,部分可见黑色包体,柱面以 (110) 占绝对优势,表明锆石形成温度较高。在阴极发光 (CL) 图像上 (图 6), 大部分锆石具有典型酸性岩浆锆石的振荡环带,且 Th/U 比值较高 (为 0.1~3.9, 平均值为 0.9, 表 1), 均显著 > 0.1 ,

表明锆石为岩浆成因 (周剑雄和陈振宇, 2007)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果分别如下所述:

第一侵入次: 样品 DP222-1 共分析了 21 个测点, 结果见表 1 和图 7a。其中 19 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 106~95 Ma, 且全落在 U-Pb 年龄谱和线上或附近, 计算其加权平均年龄为 (100.2 ± 1.8) Ma ($n=19$, MSWD=4.0)。16 号点明显偏离谱和线, 15 号点给出了 112 Ma 的谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄, 且该点的 CL 图像具有典型岩浆锆石振荡环带, 为捕获锆石, 因此上述测点在计算年龄时未统计在内。样品 PM06-3 共分析了 22 个测点, 结果见表 1 和图 7b。其中 21 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 105~95 Ma, 且全落在 U-Pb 年龄谱和线上或附近, 计算其加权平均年龄为 (98.9 ± 1.1) Ma ($n=21$, MSWD=4.3)。10 号点给出了 126 Ma 的谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄, 且该点的 CL 图像具有典型岩浆锆石振荡环带, 为捕获锆石, 计算年龄时未统计在内。

第二侵入次: 样品 PM06-54 共分析了 24 个测点, 结果见表 1 和图 7c。其中 22 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 105~96 Ma, 且全落在 U-Pb 年龄谱和线上或附近, 计算其加权平均年龄为 (99.9 ± 0.9) Ma ($n=22$, MSWD=2.6)。8 号点明显偏离谱和线, 14 号点

表1 冷水地区第一至第五次花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb测年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the first to fifth episodes granites in Qiashui region

分析样点	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(1σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(1σ)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(1σ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U/Ma	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th/Ma
样品DP222-1(粗一中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	546	925	0.6	0.1004±0.0031	0.0152±0.0003	0.0056±0.0006	97±3	97±2	113±12
2	377	439	0.9	0.1091±0.0061	0.0164±0.0004	0.0056±0.0007	105±6	105±2	112±14
3	934	1538	0.6	0.1092±0.0042	0.0165±0.0003	0.0049±0.0007	105±4	105±2	99±14
4	691	1030	0.7	0.1078±0.0061	0.0162±0.0004	0.0055±0.0012	104±6	104±2	110±24
5	376	514	0.7	0.1042±0.0047	0.0158±0.0003	0.0054±0.0008	101±4	101±2	108±16
6	702	458	1.5	0.1034±0.0044	0.0156±0.0003	0.0053±0.0007	100±4	100±2	107±14
7	583	806	0.7	0.1062±0.0036	0.0160±0.0003	0.0049±0.0004	102±3	102±2	98±8
8	1008	1327	0.8	0.1036±0.0023	0.0156±0.0002	0.0052±0.0004	100±2	100±2	105±7
9	467	723	0.6	0.1011±0.0031	0.0153±0.0002	0.0048±0.0004	98±3	98±2	98±9
10	357	515	0.7	0.1075±0.0060	0.0162±0.0004	0.0056±0.0008	104±5	104±2	113±15
11	316	352	0.9	0.1004±0.0036	0.0152±0.0003	0.0050±0.0004	97±3	97±2	100±8
12	431	464	0.9	0.1052±0.0058	0.0159±0.0004	0.0058±0.0008	102±5	102±2	117±16
13	550	616	0.9	0.1061±0.0036	0.0160±0.0003	0.0054±0.0005	102±3	102±2	108±11
14	251	381	0.7	0.0954±0.0047	0.0150±0.0003	0.0059±0.0007	93±4	96±2	119±14
15	399	517	0.8	0.1166±0.0041	0.0175±0.0003	0.0053±0.0006	112±4	112±2	106±11
16	1373	2280	0.6	0.1155±0.0065	0.0154±0.0004	0.0052±0.0012	111±6	98±2	104±24
17	2738	2467	1.1	0.0984±0.0023	0.0149±0.0002	0.0052±0.0005	95±2	95±1	104±10
18	605	924	0.7	0.1037±0.0032	0.0157±0.0003	0.0048±0.0006	100±3	100±2	96±12
19	843	1601	0.5	0.1074±0.0023	0.0162±0.0002	0.0052±0.0004	104±2	104±2	104±7
20	728	976	0.7	0.1044±0.0038	0.0158±0.0003	0.0053±0.0006	101±3	101±2	107±13
21	483	478	1.0	0.1099±0.0036	0.0166±0.0003	0.0055±0.0004	106±3	106±2	110±8
样品PM06-3(粗一中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	384	249	1.5	0.0998±0.0035	0.0151±0.0002	0.0048±0.0003	97±3	96±1	96±5
2	451	591	0.8	0.1008±0.0024	0.0152±0.0002	0.0051±0.0003	98±2	98±1	103±5
3	665	964	0.7	0.1012±0.0021	0.0153±0.0002	0.0049±0.0002	98±2	98±1	98±5
4	439	301	1.5	0.1037±0.0055	0.0157±0.0003	0.0042±0.0003	100±5	100±2	84±6
5	239	232	1.0	0.1064±0.0035	0.0160±0.0002	0.0052±0.0003	103±3	103±2	104±6
6	222	211	1.1	0.1014±0.0041	0.0153±0.0003	0.0048±0.0003	98±4	98±2	96±7
7	323	313	1.0	0.1006±0.0034	0.0152±0.0002	0.0052±0.0004	97±3	97±1	104±8
8	307	457	0.7	0.1060±0.0037	0.0160±0.0003	0.0054±0.0005	102±3	102±2	109±10
9	323	310	1.0	0.1033±0.0044	0.0156±0.0003	0.0052±0.0006	100±4	100±2	104±11
10	1150	1290	0.9	0.1327±0.0028	0.0198±0.0003	0.0049±0.0004	126±2	126±2	99±8
11	380	428	0.9	0.1036±0.0036	0.0157±0.0003	0.0046±0.0004	100±3	100±2	93±8
12	155	169	0.9	0.1064±0.0055	0.0161±0.0003	0.0049±0.0003	103±5	103±2	99±7
13	639	648	1.0	0.0994±0.0022	0.0150±0.0001	0.0049±0.0003	96±2	96±1	99±6
14	226	221	1.0	0.1014±0.0040	0.0153±0.0002	0.0052±0.0004	98±4	98±1	104±7
15	199	228	0.9	0.1023±0.0031	0.0155±0.0002	0.0050±0.0003	99±3	99±1	102±6
16	510	795	0.6	0.1023±0.0032	0.0155±0.0002	0.0057±0.0006	99±3	99±1	116±12
17	197	266	0.7	0.1058±0.0045	0.0160±0.0002	0.0050±0.0005	102±4	102±1	100±9
18	436	446	1.0	0.1009±0.0025	0.0152±0.0001	0.0050±0.0004	98±2	97±1	101±7
19	85	81	1.0	0.0980±0.0083	0.0148±0.0004	0.0039±0.0005	95±8	95±2	78±10
20	230	230	1.0	0.1042±0.0043	0.0157±0.0002	0.0051±0.0005	101±4	101±1	102±10
21	728	1115	0.7	0.1063±0.0021	0.0161±0.0001	0.0050±0.0004	103±2	103±1	101±8
22	799	1158	0.7	0.1086±0.0048	0.0164±0.0003	0.0048±0.0008	105±4	105±2	96±16
样品PM06-54(中一细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	206	281	0.7	0.1054±0.0048	0.0159±0.0003	0.0053±0.0005	102±4	102±2	107±10
2	260	388	0.7	0.1041±0.0028	0.0157±0.0002	0.0049±0.0003	101±3	100±1	99±6
3	406	1168	0.3	0.1031±0.0044	0.0156±0.0003	0.0044±0.0006	100±4	100±2	89±11
4	197	194	1	0.1074±0.0055	0.0162±0.0003	0.0052±0.0005	104±5	104±2	104±9

续表 1

分析样点	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(1 σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(1 σ)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(1 σ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U/Ma	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th/Ma
5	521	524	1	0.0989±0.0029	0.0150±0.0002	0.0047±0.0004	96±3	96±1	95±8
6	412	580	0.7	0.1033±0.0026	0.0156±0.0002	0.0043±0.0003	100±2	100±1	87±5
6b	134	133	1	0.1011±0.0047	0.0153±0.0003	0.0045±0.0004	98±4	98±2	92±7
7	620	646	1	0.1015±0.0047	0.0153±0.0003	0.0057±0.0009	98±4	98±2	115±18
8	886	1158	0.8	0.1350±0.0042	0.0169±0.0003	0.0063±0.0008	129±4	108±2	127±17
9	504	541	0.9	0.1027±0.0026	0.0155±0.0002	0.0042±0.0003	99±2	99±1	84±6
10	536	989	0.5	0.1063±0.0026	0.0161±0.0002	0.0044±0.0003	103±2	103±1	88±7
11	490	1129	0.4	0.1086±0.0029	0.0164±0.0002	0.0054±0.0006	105±3	105±2	108±12
12	772	775	1	0.1036±0.0026	0.0156±0.0002	0.0048±0.0002	100±2	100±1	97±5
13	251	207	1.2	0.1030±0.0047	0.0156±0.0003	0.0054±0.0004	100±4	99±2	110±8
14	762	1466	0.5	0.1418±0.0029	0.0211±0.0003	0.0048±0.0003	135±3	135±2	96±5
15	805	1320	0.6	0.1038±0.0040	0.0157±0.0003	0.0048±0.0005	100±4	100±2	97±11
16	454	659	0.7	0.1020±0.0025	0.0154±0.0002	0.0050±0.0003	99±2	99±1	100±6
17	288	371	0.8	0.1036±0.0031	0.0157±0.0002	0.0049±0.0003	100±3	100±1	100±6
18	271	379	0.7	0.1035±0.0031	0.0156±0.0002	0.0051±0.0003	100±3	100±1	102±6
19	966	823	1.2	0.1084±0.0061	0.0162±0.0003	0.0051±0.0011	104±6	103±2	103±22
20	739	1261	0.6	0.1026±0.0024	0.0155±0.0002	0.0049±0.0004	99±2	99±1	98±7
21	1965	874	2.2	0.1012±0.0023	0.0153±0.0002	0.0043±0.0003	98±2	98±1	88±5
22	397	498	0.8	0.1072±0.0053	0.0162±0.0003	0.0038±0.0004	103±5	104±2	76±8
23	561	734	0.8	0.1073±0.0047	0.0162±0.0003	0.0051±0.0007	103±4	103±2	103±13
样品 PM06-53(中—细粒斑状黑云母二长花岗岩), 连阳岩体南部									
1	440	639	0.7	0.0994±0.0027	0.0150±0.0002	0.0053±0.0003	96±3	96±1	107±6
2	1113	1154	1	0.0959±0.0020	0.0145±0.0002	0.0050±0.0003	93±2	93±1	100±5
3	378	538	0.7	0.1040±0.0037	0.0157±0.0003	0.0056±0.0004	100±3	101±2	112±8
4	615	1136	0.5	0.1029±0.0026	0.0154±0.0002	0.0052±0.0004	99±2	99±1	104±8
5	271	441	0.6	0.1030±0.0044	0.0156±0.0003	0.0054±0.0005	100±4	100±2	108±9
6	435	655	0.7	0.1052±0.0055	0.0159±0.0003	0.0059±0.0008	102±5	102±2	119±15
7	252	292	0.9	0.1014±0.0032	0.0153±0.0002	0.0051±0.0003	98±3	98±1	102±6
8	293	321	0.9	0.0989±0.0030	0.0149±0.0002	0.0050±0.0003	96±3	95±1	101±6
9	241	255	0.9	0.1018±0.0039	0.0154±0.0002	0.0049±0.0003	98±4	98±2	99±7
10	225	195	1.2	0.1009±0.0047	0.0153±0.0003	0.0051±0.0004	98±4	98±2	102±8
11	179	216	0.8	0.0988±0.0042	0.0159±0.0003	0.0048±0.0004	96±4	102±2	96±7
12	154	175	0.9	0.0992±0.0052	0.0150±0.0003	0.0047±0.0005	96±5	96±2	95±9
样品 DP225-1(中—细粒斑状黑云母二长花岗岩), 连阳岩体南部									
1	188	258	0.7	0.1085±0.0046	0.0164±0.0003	0.0057±0.0005	105±4	105±2	115±10
2	233	309	0.8	0.1055±0.0036	0.0159±0.0003	0.0057±0.0005	102±3	102±2	115±9
3	492	665	0.7	0.1083±0.0032	0.0163±0.0003	0.0058±0.0006	104±3	104±2	116±13
4	360	434	0.8	0.1057±0.0038	0.0160±0.0003	0.0056±0.0006	102±3	102±2	113±11
5	568	969	0.6	0.1045±0.0030	0.0158±0.0003	0.0060±0.0005	101±3	101±2	122±10
6	301	270	1.1	0.1042±0.0042	0.0157±0.0003	0.0054±0.0003	101±4	101±2	110±7
7	349	138	2.5	0.1033±0.0067	0.0156±0.0003	0.0058±0.0004	100±6	100±2	116±8
8	460	848	0.5	0.1062±0.0027	0.0160±0.0003	0.0055±0.0004	102±2	102±2	110±8
9	468	819	0.6	0.1048±0.0024	0.0158±0.0002	0.0051±0.0003	101±2	101±2	102±6
10	242	426	0.6	0.1059±0.0049	0.0160±0.0003	0.0052±0.0006	102±5	102±2	104±12
11	415	1029	0.4	0.1055±0.0044	0.0159±0.0003	0.0053±0.0008	102±4	102±2	107±15
12	305	420	0.7	0.1069±0.0065	0.0161±0.0004	0.0053±0.0009	103±6	103±2	107±18
13	351	340	1.0	0.1066±0.0037	0.0161±0.0003	0.0052±0.0004	103±3	103±2	105±8
14	476	808	0.6	0.1031±0.0035	0.0156±0.0003	0.0051±0.0006	100±3	100±2	104±12
15	468	846	0.6	0.1057±0.0045	0.0159±0.0003	0.0046±0.0006	102±4	102±2	93±13
16	253	407	0.6	0.1036±0.0056	0.0156±0.0003	0.0053±0.0009	100±5	100±2	106±17
17	645	984	0.7	0.1009±0.0029	0.0152±0.0003	0.0044±0.0003	98±3	97±2	88±6
18	350	478	0.7	0.1053±0.0033	0.0159±0.0003	0.0047±0.0003	102±3	102±2	94±6

续表 1

分析样点	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(1σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(1σ)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(1σ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U/Ma	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th/Ma
19	368	403	0.9	0.1028±0.0046	0.0155±0.0003	0.0044±0.0004	99±4	99±2	89±8
20	451	647	0.7	0.1030±0.0029	0.0156±0.0002	0.0045±0.0003	100±3	99±2	90±6
样品 DP245-1(中—细粒斑状黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	507	866	0.6	0.1036±0.0026	0.0156±0.0002	0.0059±0.0004	100±2	100±2	118±7
2	1063	1133	0.9	0.1068±0.0036	0.0161±0.0003	0.0051±0.0006	103±3	103±2	103±11
3	196	217	0.9	0.1040±0.0056	0.0157±0.0003	0.0054±0.0005	100±5	100±2	108±9
4	195	205	1.0	0.1047±0.0057	0.0158±0.0003	0.0053±0.0005	101±5	101±2	106±10
5	414	504	0.8	0.1044±0.0046	0.0157±0.0003	0.0054±0.0005	101±4	101±2	108±10
6	531	874	0.6	0.1062±0.0035	0.0160±0.0003	0.0053±0.0006	102±3	102±2	107±11
7	536	887	0.6	0.1067±0.0022	0.0161±0.0002	0.0054±0.0004	103±2	103±1	109±7
8	756	1324	0.6	0.1055±0.0021	0.0159±0.0002	0.0053±0.0004	102±2	102±1	107±7
9	490	870	0.6	0.1068±0.0067	0.0161±0.0004	0.0049±0.0009	103±6	103±2	99±18
10	185	200	0.9	0.1037±0.0070	0.0157±0.0004	0.0056±0.0008	100±6	100±2	112±15
11	330	684	0.5	0.1003±0.0028	0.0152±0.0002	0.0051±0.0005	97±3	97±1	102±10
12	270	500	0.5	0.1050±0.0085	0.0158±0.0005	0.0056±0.0015	101±8	101±3	113±30
13	328	475	0.7	0.1031±0.0033	0.0156±0.0003	0.0047±0.0003	100±3	100±2	94±6
14	218	205	1.1	0.1052±0.0055	0.0159±0.0003	0.0053±0.0004	102±5	102±2	107±9
15	326	418	0.8	0.1035±0.0041	0.0156±0.0003	0.0046±0.0004	100±4	100±2	93±9
16	341	529	0.6	0.1037±0.0050	0.0157±0.0003	0.0052±0.0005	100±5	100±2	105±11
17	353	803	0.4	0.1058±0.0047	0.0160±0.0003	0.0047±0.0007	102±4	102±2	94±13
18	267	333	0.8	0.1065±0.0059	0.0161±0.0003	0.0057±0.0007	103±5	103±2	115±14
19	662	763	0.9	0.1036±0.0025	0.0156±0.0002	0.0049±0.0004	100±2	100±2	99±8
20	550	689	0.8	0.1031±0.0027	0.0156±0.0002	0.0049±0.0004	100±2	100±2	98±8
样品 PM06-1(中—细粒含斑黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	1357	1668	0.8	0.1358±0.0024	0.0203±0.0003	0.0057±0.0004	129±2	129±2	115±8
2	1158	1125	1	0.1291±0.0023	0.0193±0.0003	0.0057±0.0003	123±2	123±2	115±6
3	421	298	1.4	0.1017±0.0028	0.0154±0.0002	0.0052±0.0003	98±3	98±1	106±6
4	501	412	1.2	0.1061±0.0028	0.0160±0.0002	0.0058±0.0004	102±3	102±1	117±8
5	557	498	1.1	0.1022±0.0024	0.0154±0.0002	0.0058±0.0004	99±2	99±1	117±8
6	560	547	1	0.1040±0.0023	0.0157±0.0002	0.0059±0.0004	100±2	100±1	118±8
7	445	338	1.3	0.1145±0.0044	0.0172±0.0003	0.0062±0.0007	110±4	110±2	124±14
8	322	195	1.7	0.1111±0.0107	0.0152±0.0005	0.0046±0.0011	107±10	98±3	92±21
9	1297	1205	1.1	0.4228±0.0073	0.0239±0.0003	0.0184±0.0017	358±5	152±2	369±33
10	1511	1349	1.1	0.1461±0.0048	0.0206±0.0003	0.0076±0.0014	138±4	132±2	152±29
11	1054	611	1.7	1.4136±0.0384	0.0251±0.0005	0.0245±0.0066	84±12	87±1	490±130
12	1489	2202	0.7	0.1351±0.0026	0.0202±0.0003	0.0061±0.0005	129±2	129±2	123±9
13	2439	4021	0.6	0.2462±0.0040	0.0197±0.0003	0.0113±0.0006	223±3	126±2	227±12
14	1067	1038	1	0.7670±0.0246	0.0216±0.0004	0.0252±0.0069	97±6	101±2	503±135
15	417	541	0.8	0.1053±0.0037	0.0159±0.0003	0.0049±0.0005	102±3	102±2	100±9
16	991	1475	0.7	0.3681±0.0057	0.0237±0.0003	0.0156±0.0008	318±4	151±2	312±16
17	183	157	1.2	0.1061±0.0052	0.0160±0.0003	0.0052±0.0004	102±5	102±2	105±8
18	2526	4748	0.5	0.2917±0.0047	0.0196±0.0003	0.0152±0.0011	260±4	125±2	306±22
19	332	359	0.9	0.1025±0.0028	0.0155±0.0002	0.0050±0.0003	99±3	99±1	100±6
20	509	536	0.9	0.1065±0.0048	0.0161±0.0003	0.0053±0.0008	103±4	103±2	107±16
21	734	913	0.8	0.1051±0.0022	0.0159±0.0002	0.0051±0.0003	101±2	101±1	102±7
22	1224	1195	1	0.1343±0.0028	0.0200±0.0003	0.0049±0.0004	128±2	128±2	99±8
23	1499	12239	0.1	0.1132±0.0015	0.0170±0.0001	0.0051±0.0003	109±1	109±1	103±6
24	594	846	0.7	0.1031±0.0018	0.0156±0.0001	0.0048±0.0002	100±2	100±1	97±4
25	258	278	0.9	0.1050±0.0030	0.0158±0.0002	0.0049±0.0003	101±3	101±1	100±5
样品 DP204-1(中—细粒含斑黑云母二长花岗岩),连阳岩体南部									
1	1074	2345	0.5	0.1031±0.0022	0.0149±0.0002	0.0051±0.0004	100±2	95±1	102±7
2	445	605	0.7	0.1002±0.0043	0.0152±0.0003	0.0045±0.0005	97±4	97±2	90±10
3	580	823	0.7	0.1045±0.0034	0.0158±0.0003	0.0049±0.0004	101±3	101±2	98±9

续表 1

分析样点	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}(1\sigma)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(1\sigma)$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}(1\sigma)$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}/\text{Ma}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}/\text{Ma}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}/\text{Ma}$
4	311	310	1.0	0.1057±0.0036	0.0160±0.0003	0.0053±0.0004	102±3	102±2	106±7
5	450	625	0.7	0.1060±0.0040	0.0160±0.0003	0.0055±0.0005	102±4	102±2	110±10
6	1373	1894	0.7	0.1017±0.0041	0.0154±0.0003	0.0056±0.0008	98±4	99±2	112±16
7	857	784	1.1	0.1033±0.0029	0.0156±0.0003	0.0049±0.0004	100±3	100±2	99±8
8	266	245	1.1	0.1034±0.0058	0.0156±0.0003	0.0052±0.0006	100±5	100±2	104±13
9	1247	2639	0.5	0.0980±0.0040	0.0148±0.0003	0.0056±0.0011	95±4	95±2	112±23
10	1581	2087	0.8	0.0972±0.0032	0.0147±0.0003	0.0055±0.0009	94±3	94±2	110±17
11	305	419	0.7	0.1013±0.0036	0.0153±0.0003	0.0052±0.0006	98±3	98±2	104±11
13	1306	2509	0.5	0.1046±0.0021	0.0152±0.0002	0.0057±0.0004	101±2	97±1	114±8
14	950	1116	0.9	0.1049±0.0023	0.0159±0.0002	0.0052±0.0003	101±2	101±2	105±6
16	871	1674	0.5	0.1043±0.0022	0.0158±0.0002	0.0051±0.0003	101±2	101±2	103±6
17	1041	1431	0.7	0.1035±0.0038	0.0156±0.0003	0.0049±0.0006	100±4	100±2	100±11
18	242	245	1.0	0.1090±0.0075	0.0164±0.0004	0.0053±0.0007	105±7	105±3	108±14
19	287	292	1.0	0.0991±0.0066	0.0150±0.0004	0.0052±0.0006	96±6	96±2	105±13
20	187	265	0.7	0.1172±0.0049	0.0176±0.0003	0.0063±0.0005	113±4	113±2	127±11
12	1604	4316	0.4	0.0890±0.0027	0.0135±0.0002	0.0053±0.0009	87±2	87±1	107±18
15	1627	4775	0.3	0.0898±0.0022	0.0136±0.0002	0.0054±0.0006	87±2	87±1	109±12
样品D2029-1(中一细粒含斑黑云母二长花岗岩),白水寨岩体									
1	410	452	0.9	0.1077±0.0029	0.0163±0.0002	0.0056±0.0003	104±3	104±1	112±6
2	278	260	1.1	0.1016±0.0041	0.0153±0.0003	0.0049±0.0003	98±4	98±2	99±6
3	345	233	1.5	0.1099±0.0054	0.0165±0.0003	0.0055±0.0004	106±5	106±2	111±8
4	219	224	1	0.1070±0.0049	0.0161±0.0003	0.0051±0.0004	103±5	103±2	103±8
5	1497	1529	1	0.1706±0.0232	0.0225±0.0004	0.0070±0.0001	160±20	144±2	142±3
6	176	192	0.9	0.1058±0.0040	0.0160±0.0003	0.0050±0.0003	102±4	102±2	100±6
7	347	508	0.7	0.1141±0.0033	0.0172±0.0002	0.0054±0.0004	110±3	110±2	109±8
8	271	272	1	0.1057±0.0038	0.0160±0.0002	0.0048±0.0003	102±3	102±2	97±6
9	348	365	1	0.1032±0.0064	0.0156±0.0003	0.0049±0.0006	100±6	100±2	99±13
10	763	621	1.2	0.1068±0.0039	0.0157±0.0003	0.0048±0.0005	103±4	100±2	96±9
11	209	202	1	0.1042±0.0036	0.0157±0.0002	0.0047±0.0003	101±3	101±1	94±6
12	159	150	1.1	0.1037±0.0051	0.0157±0.0003	0.0048±0.0004	100±5	100±2	96±8
13	837	760	1.1	0.0631±0.0057	0.0099±0.0001	0.0035±0.0003	62±5	64±1	70±6
14	2257	2839	0.8	0.1429±0.0032	0.0183±0.0002	0.0056±0.0005	136±3	117±1	113±10
15	168	226	0.7	0.1059±0.0044	0.0160±0.0003	0.0057±0.0004	102±4	102±2	114±8
16	908	635	1.4	0.1027±0.0023	0.0155±0.0002	0.0052±0.0003	99±2	99±1	105±5
17	2373	1434	1.7	0.0533±0.0102	0.0084±0.0001	0.0060±0.0009	53±10	54±1	121±19
18	316	365	0.9	0.1012±0.0052	0.0153±0.0003	0.0049±0.0005	98±5	98±2	99±11
19	278	273	1	0.1020±0.0069	0.0154±0.0004	0.0052±0.0006	99±6	99±2	105±13
20	405	598	0.7	0.1132±0.0025	0.0170±0.0002	0.0056±0.0004	109±2	109±1	113±7
21	834	1015	0.8	0.0972±0.0252	0.0153±0.0003	0.0058±0.0011	94±23	98±2	117±22
22	761	1457	0.5	0.1188±0.0032	0.0178±0.0003	0.0053±0.0006	114±3	114±2	107±11
23	229	481	0.5	0.1135±0.0030	0.0171±0.0002	0.0054±0.0004	109±3	109±1	108±8
24	260	295	0.9	0.1052±0.0036	0.0159±0.0002	0.0059±0.0005	102±3	102±1	118±10
样品D3178-1(中一细粒含斑黑云母二长花岗岩),鸡笼岭岩体									
1	1879	482	3.9	0.1072±0.0106	0.0153±0.0005	0.0012±0.0003	103±10	98±3	23±5
2	605	871	0.7	0.1037±0.0024	0.0156±0.0001	0.0043±0.0003	100±2	100±1	87±6
3	316	287	1.1	0.1070±0.0039	0.0162±0.0002	0.0052±0.0004	103±4	103±1	105±7
4	9547	17639	0.5	0.1137±0.0013	0.0171±0.0001	0.0053±0.0003	109±1	109±1	107±6
5	271	271	1	0.1126±0.0047	0.0169±0.0002	0.0050±0.0004	108±4	108±1	101±9
6	352	307	1.1	0.1046±0.0076	0.0157±0.0004	0.0047±0.0006	101±7	101±2	94±12
7	2309	2677	0.9	0.1430±0.0033	0.0195±0.0002	0.0051±0.0005	136±3	124±1	103±10
8	438	791	0.6	0.1080±0.0064	0.0163±0.0003	0.0049±0.0009	104±6	104±2	99±17
9	308	339	0.9	0.1064±0.0069	0.0161±0.0003	0.0045±0.0008	103±6	103±2	91±15
10	225	248	0.9	0.1029±0.0060	0.0155±0.0003	0.0051±0.0005	99±6	99±2	103±10

续表 1

分析样点	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(1σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(1σ)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(1σ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U/Ma	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th/Ma
11	385	721	0.5	0.1042±0.0018	0.0157±0.0001	0.0049±0.0002	101±2	101±1	99±4
12	321	427	0.8	0.1007±0.0034	0.0152±0.0002	0.0046±0.0003	97±3	97±1	93±7
13	284	346	0.8	0.1012±0.0027	0.0153±0.0001	0.0049±0.0002	98±2	98±1	98±5
14	17151	25858	0.7	0.1165±0.0017	0.0175±0.0001	0.0058±0.0005	112±2	112±1	116±9
15	2618	1314	2	0.1800±0.0047	0.0164±0.0002	0.0023±0.0002	168±4	105±1	47±4
16	371	369	1	0.1006±0.0032	0.0152±0.0002	0.0050±0.0003	97±3	97±1	100±7
17	223	259	0.9	0.1045±0.0042	0.0158±0.0002	0.0051±0.0004	101±4	101±1	103±8
18	376	405	0.9	0.1023±0.0027	0.0155±0.0002	0.0053±0.0003	99±3	99±1	107±7
19	167	171	1	0.1041±0.0039	0.0157±0.0002	0.0054±0.0003	101±4	101±1	109±6
20	578	1083	0.5	0.1057±0.0095	0.0157±0.0005	0.0052±0.0017	102±9	100±3	104±33
21	286	372	0.8	0.1119±0.0035	0.0169±0.0002	0.0054±0.0005	108±3	108±1	108±9
22	552	550	1	0.1121±0.0041	0.0169±0.0002	0.0052±0.0005	108±4	108±1	106±10
23	544	1325	0.4	0.1058±0.0031	0.0160±0.0002	0.0050±0.0005	102±3	102±1	100±10
24	601	725	0.8	0.2323±0.0045	0.0174±0.0002	0.0091±0.0006	212±4	111±1	183±12
25	669	1116	0.6	0.1013±0.0016	0.0153±0.0001	0.0049±0.0003	98±1	98±1	98±5
26	145	154	0.9	0.1062±0.0047	0.0160±0.0002	0.0050±0.0003	103±4	102±1	100±7
27	205	145	1.4	0.1074±0.0058	0.0162±0.0003	0.0047±0.0004	104±5	104±2	96±8
样品 D3020-1(中—细粒含斑黑云母二长花岗岩),将军头岩体									
1	450	193	2.3	0.1031±0.0036	0.0156±0.0002	0.0053±0.0002	100±3	100±2	107±5
2	465	266	1.8	0.1041±0.0066	0.0157±0.0004	0.0055±0.0005	101±6	100±2	110±10
3	392	243	1.6	0.1037±0.0042	0.0157±0.0003	0.0057±0.0003	100±4	100±2	115±7
4	469	254	1.8	0.1035±0.0035	0.0156±0.0002	0.0051±0.0003	100±3	100±2	103±5
5	374	184	2	0.1044±0.0043	0.0158±0.0003	0.0052±0.0003	101±4	101±2	106±6
6	289	165	1.8	0.1064±0.0058	0.0161±0.0003	0.0052±0.0004	103±5	103±2	105±7
7	321	178	1.8	0.1017±0.0043	0.0154±0.0003	0.0048±0.0003	98±4	98±2	97±6
8	809	327	2.5	0.1033±0.0050	0.0156±0.0003	0.0051±0.0005	100±5	100±2	104±9
9	818	284	2.9	0.1063±0.0083	0.0155±0.0004	0.0024±0.0003	103±8	99±3	49±6
10	373	138	2.7	0.1213±0.0055	0.0153±0.0003	0.0049±0.0003	116±5	98±2	99±7
11	443	176	2.5	0.1043±0.0056	0.0157±0.0003	0.0043±0.0004	101±5	101±2	87±7
12	369	226	1.6	0.1128±0.0067	0.0153±0.0004	0.0043±0.0005	109±6	98±2	87±10
13	206	149	1.4	0.0974±0.0066	0.0147±0.0003	0.0044±0.0003	94±6	94±2	89±7
14	302	143	2.1	0.1052±0.0046	0.0159±0.0003	0.0044±0.0002	102±4	101±2	88±4
样品 DP202-1(细粒含斑黑云母正长花岗岩),连阳岩体南部									
1	224	206	1.1	0.1021±0.0053	0.0154±0.0003	0.0052±0.0005	99±5	99±2	104±10
2	543	727	0.7	0.1110±0.0032	0.0167±0.0003	0.0052±0.0005	107±3	107±2	105±9
3	431	527	0.8	0.1018±0.0038	0.0154±0.0003	0.0053±0.0006	98±4	99±2	106±11
4	267	311	0.9	0.1037±0.0049	0.0157±0.0003	0.0059±0.0008	100±4	100±2	119±16
5	216	377	0.6	0.1016±0.0040	0.0153±0.0003	0.0054±0.0004	98±4	98±2	109±8
6	306	344	0.9	0.1057±0.0040	0.0159±0.0003	0.0055±0.0004	102±4	102±2	111±8
7	235	255	0.9	0.1071±0.0046	0.0162±0.0003	0.0052±0.0004	103±4	103±2	105±7
8	365	312	1.2	0.1073±0.0066	0.0162±0.0004	0.0061±0.0009	103±6	103±2	123±17
9	237	225	1.1	0.1062±0.0051	0.0160±0.0003	0.0049±0.0003	102±5	103±2	99±7
10	518	935	0.6	0.1090±0.0027	0.0164±0.0003	0.0054±0.0004	105±2	105±2	109±8
11	169	227	0.7	0.1101±0.0107	0.0166±0.0005	0.0050±0.0009	106±10	106±3	100±19
12	130	225	0.6	0.1103±0.0101	0.0167±0.0005	0.0069±0.0015	106±9	106±3	140±30
13	645	697	0.9	0.1061±0.0076	0.0161±0.0004	0.0051±0.0010	102±7	103±3	102±21
14	278	253	1.1	0.1084±0.0048	0.0163±0.0003	0.0054±0.0005	105±4	104±2	109±10
15	415	858	0.5	0.1104±0.0032	0.0167±0.0003	0.0064±0.0007	106±3	106±2	128±15
16	200	206	1	0.1055±0.0054	0.0159±0.0003	0.0061±0.0007	102±5	102±2	124±14
17	830	1858	0.4	0.1083±0.0021	0.0163±0.0003	0.0056±0.0004	104±2	104±2	113±7
18	411	615	0.7	0.1026±0.0039	0.0155±0.0003	0.0054±0.0005	99±4	99±2	109±10
19	399	530	0.8	0.1063±0.0032	0.0160±0.0003	0.0058±0.0005	103±3	103±2	116±10
20	1699	2629	0.6	0.1020±0.0029	0.0149±0.0003	0.0055±0.0005	99±3	96±2	110±10
21	107	100	1.1	0.1075±0.0088	0.0150±0.0003	0.0055±0.0005	104±8	96±2	111±9
22	568	1003	0.6	0.0790±0.0021	0.0098±0.0002	0.0032±0.0003	77±2	63±1	65±5

注:普通铅已用²⁰⁴Pb校正。

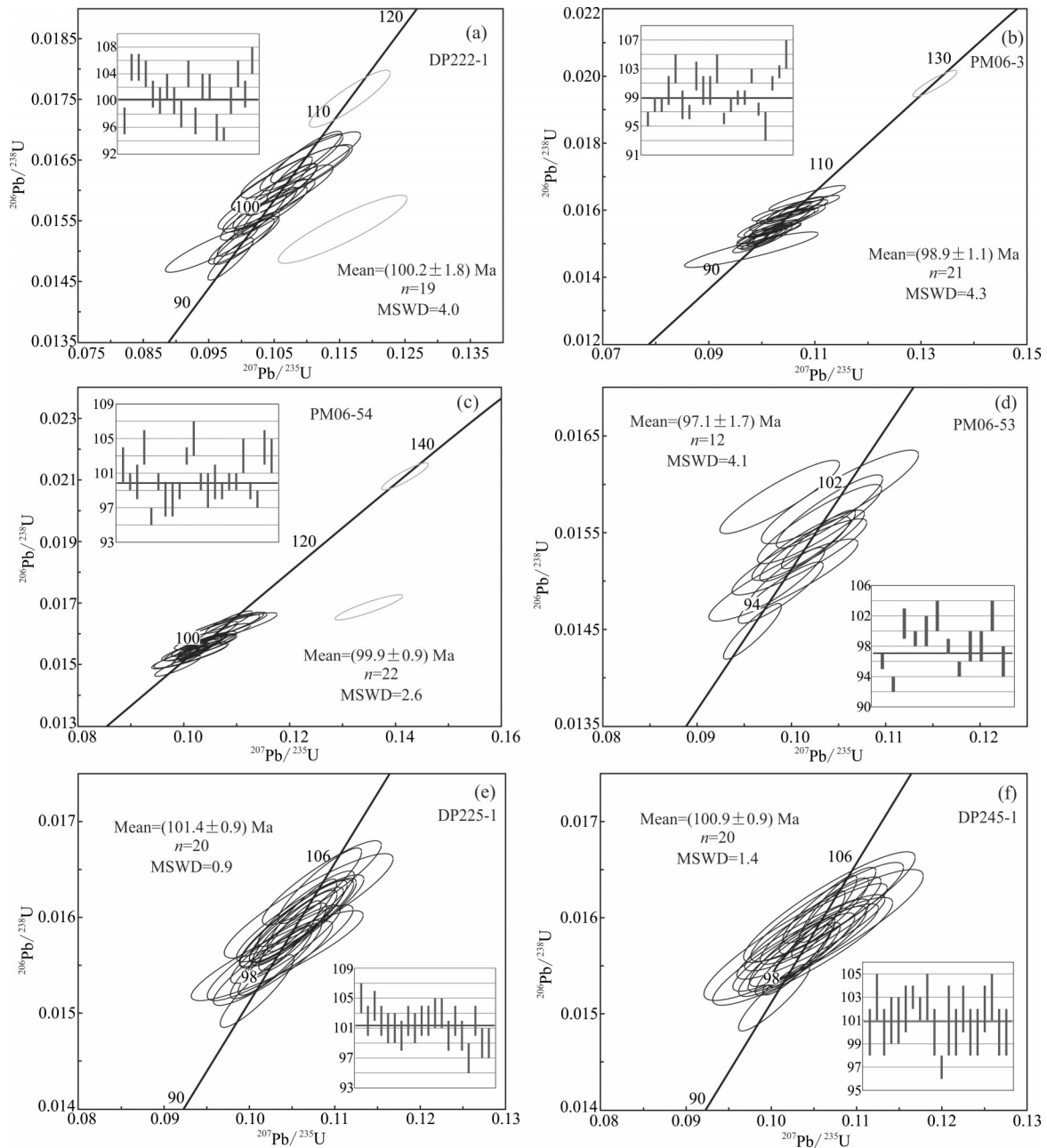


图7 冷水地区第一、第二和第三侵入次花岗岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.7 Zircon U-Pb concordia diagrams of the first, second and third episodes granites in Qishui region

为捕获锆石(135 Ma),计算年龄时未统计在内。

第三侵入次:样品PM06-53共分析了12个测点,结果见表1和图7d。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在102~93 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(97.1\pm 1.7)\text{Ma}$ ($n=12$, $\text{MSWD}=4.1$)。样品DP225-1共分析了20个测点,结果见表1和图7e。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在105~97 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计

算其加权平均年龄为 $(101.4\pm 0.9)\text{Ma}$ ($n=20$, $\text{MSWD}=0.9$)。样品DP245-1共分析了20个测点,结果见表1和图7f。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在103~97 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(100.9\pm 0.9)\text{Ma}$ ($n=20$, $\text{MSWD}=1.4$)。

第四侵入次:样品PM06-1共分析了25个测点,结果见表1和图8a。其中13个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在103~98 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线

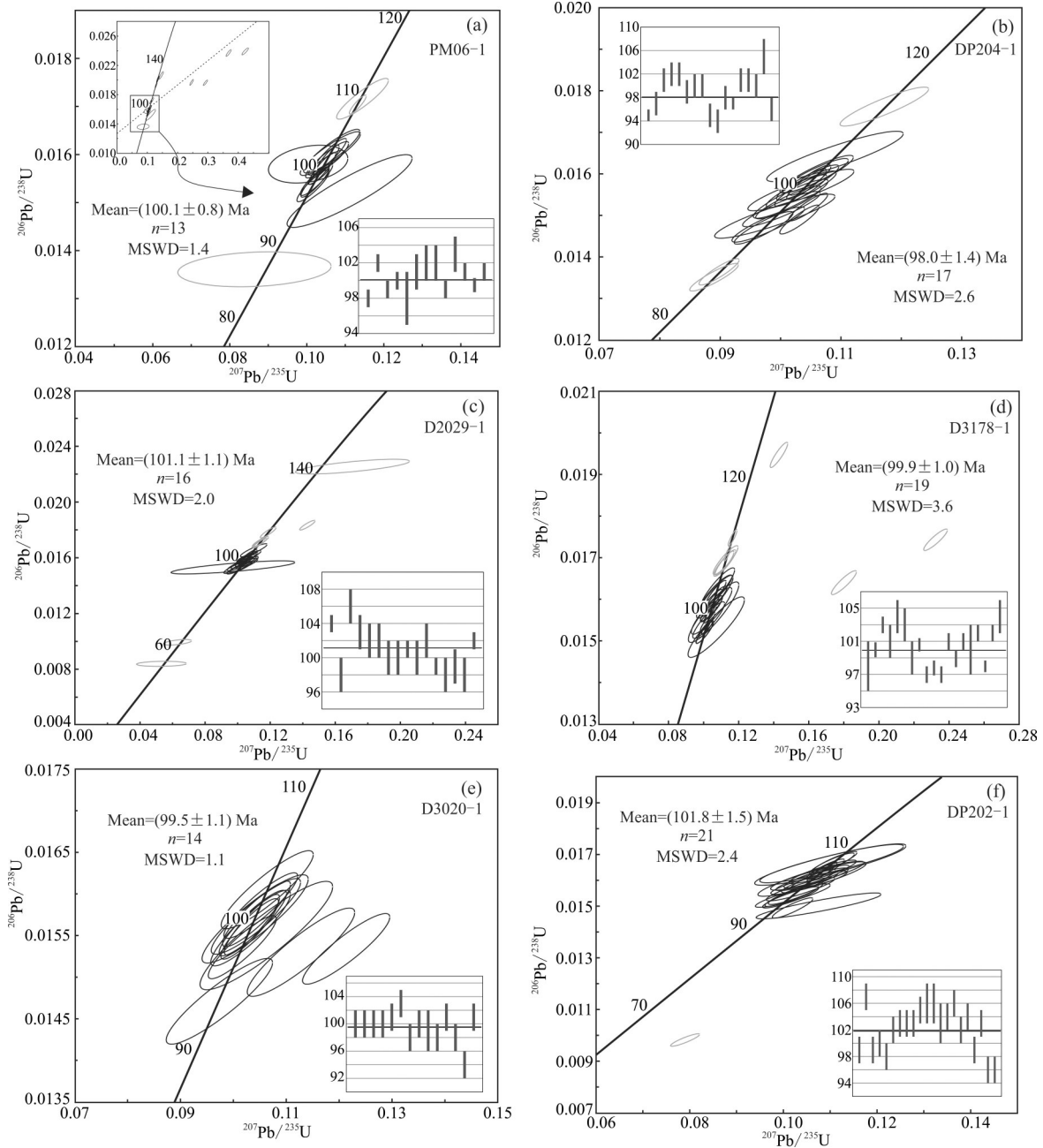


图8 冷水地区第四、第五侵入次花岗岩锆石U-Pb年龄谱和图
Fig.8 Zircon U-Pb concordia diagrams of the fourth and fifth episodes granites in Qiashui region

上或附近,计算其加权平均年龄为 (100.1 ± 0.8) Ma ($n=13$, MSWD=1.4)。9、13、16和18号点明显均偏离谐和线;11号点给出了87 Ma的谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,且该点的CL图像具有典型岩浆锆石振荡环带,表明可能为另一期岩浆活动产物;1、2、7、10、12、22和23号点均位于锆石核部,为捕获锆石(132~109 Ma),因此上述测点在计算年龄时未统计在

内。样品DP204-1共分析了20个测点,结果见表1和图8b。其中17个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在105~94 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 (98.0 ± 1.4) Ma ($n=17$, MSWD=2.6)。20号点给出了113 Ma的谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,可能为捕获锆石;12、15号点给出了87 Ma的表面年龄,且该点的CL图像具有典

型岩浆锆石振荡环带,表明可能为另一期岩浆活动产物,因此上述测点在计算年龄时未统计在内。样品D2029-1共分析了24个测点,结果见表1和图8c。其中16个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在106~98 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(101.1\pm 1.1)\text{Ma}$ ($n=16$, MSWD=2.0)。14号点明显偏离谐和线,5、7、20、22和23号点为捕获锆石(144~109 Ma),13、17号点给出了63.8 Ma、53.9 Ma的谐和表面年龄,可能为另一期岩浆细脉混入。因此上述测点在计算年龄时未统计在内。样品D3178-1共分析了27个测点,结果见表1和图8d。其中19个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在104~97 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(99.9\pm 1.0)\text{Ma}$ ($n=19$, MSWD=3.6)。7、15和24号点明显偏离谐和线,4、5、14、21和22号点可能为捕获锆石(112~108 Ma),因此上述测点在计算年龄时未统计在内。样品D3020-1共分析了14个测点,结果见表1和图8e。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在103~94 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(99.5\pm 1.1)\text{Ma}$ ($n=14$, MSWD=1.1)。

第五侵入次:样品DP202-1共分析了22个测点,结果见表1和图8f。其中21个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在107~96 Ma,且全落在U-Pb年龄谐和线上或附近,计算其加权平均年龄为 $(101.8\pm 1.5)\text{Ma}$ ($n=21$, MSWD=2.4)。22号点获得明显偏年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 $(63\pm 1)\text{Ma}$,可能为另一期岩浆细脉混入。

总体而言,12件样品的有效测点数据均落在U-Pb年龄谐和线上或附近,具有非常一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,总体集中在107~93 Ma,其加权平均年龄变化于 $(101.8\pm 1.5)\sim(97.1\pm 1.7)\text{Ma}$,在误差范围内基本一致。上述年龄可代表冷水地区(连阳岩体南部和南侧小岩体)第一到第五侵入次花岗岩体的结晶(侵位)时代。

6 讨 论

6.1 冷水地区花岗岩体的形成时代

对于冷水地区(连阳岩体南部及南侧白水寨、鸡笼岭、将军头小岩体)花岗岩体的形成时代,由于缺乏精确的同位素年龄,前人曾认为其均是晚侏罗

世岩浆活动的产物(高剑峰等,2005;广西壮族自治区地质调查院,2005^①)。前人曾获得连阳岩体黑云母K-Ar年龄为99~98 Ma和130~125 Ma(全国同位素地质年龄数据汇编第四集,1986;广东省地质矿产局,1988),全岩Rb-Sr年龄为104~100 Ma(广西壮族自治区地质调查院,2005^①)。由于上述方法获得的年龄有可能是受热事件改造的年龄,无法确凿地解释为连阳岩体的形成时代。近年来,利用更高精度及地质解释更明确的LA-ICP-MS锆石U-Pb法获得连阳岩体中北部部中一细粒花岗岩同位素年龄为104~81 Ma(马星华等,2014;中国地质调查局武汉地质调查中心,2015^②),连阳岩体南部粗一中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩的同位素年龄为 $(99.4\pm 0.7)\text{Ma}$ (袁永盛等,2020)。本次采用LA-ICP-MS锆石U-Pb法获得冷水地区第一侵入次粗一中粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩、第二侵入次中一细粒斑状含角闪石黑云母二长花岗岩、第三侵入次中一细粒斑状黑云母二长花岗岩、第四侵入次中一细粒含斑黑云母二长花岗岩和第五侵入次细粒含斑黑云母正长花岗岩的成岩年龄分别为 $(100.2\pm 1.8)\sim(98.9\pm 1.1)\text{Ma}$ 、 $(99.9\pm 0.9)\text{Ma}$ 、 $(101.4\pm 0.9)\sim(97.1\pm 1.7)\text{Ma}$ 、 $(101.1\pm 1.1)\sim(98.0\pm 1.4)\text{Ma}$ 和 $(101.8\pm 1.5)\text{Ma}$,年龄在误差范围内基本一致,代表连阳岩体南部及其南侧的白水寨、鸡笼岭、将军头花岗岩体的形成时代属早一晚白垩世之交(100 Ma \pm)。

值得一提的是,此次在冷水地区12件样品中获得了21颗捕获锆石,其年龄主要集中于114~108 Ma($n=13$),剩余在144~123 Ma($n=8$)(表1,图7,图8),显示研究区曾存在过这些时代范围的岩浆活动。另外,作者还获得连阳岩体南部的寨坳细粒少斑黑云正长花岗质岩株的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $(114.4\pm 1.0)\text{Ma}$ (另文发表)。据此,结合本次获得的连阳岩体南部及南侧小岩体的同位素年龄综合分析,认为高剑峰等(2005)所报道的144 Ma的粗一中粒花岗岩可能仅为整个连阳岩基的局部产物,表明144 Ma左右的岩浆活动在冷水地区不是主要期次,连阳岩体应该主要于~100 Ma形成。

6.2 华南燕山晚期岩浆活动时空分布

综合已有资料,华南燕山期岩浆活动的时间可大致归纳为“两期3阶段”,分别是燕山早期(190~

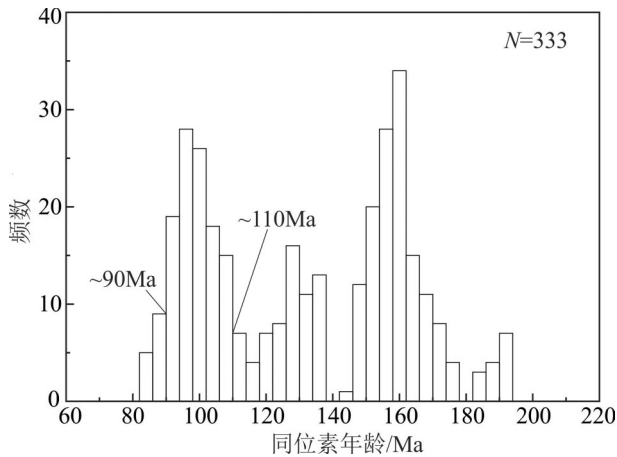


图9 华南燕山期火成岩同位素年龄统计图(据Li et al., 2010; 贾丽辉, 2018修改)

Fig. 9 Histograms of isotopic ages for Yanshanian igneous rocks in South China (modified from Li et al., 2010; Jia Lihui, 2018)

140 Ma)、燕山晚期第1阶段(140~120 Ma)和燕山晚期第2阶段(120~80 Ma)(图9)。空间上,燕山早期花岗质岩浆活动主要分布于华南内陆地区,如闽西南、赣南、粤北及湘南等地,主体呈NE向分布,而在南岭地区为近EW向分布;燕山晚期的岩浆活动则广泛发育在长江中下游、浙闽沿海、琼南等一带,以NNE向展布(孙涛, 2006)。

近年来发表的一系列年代学成果(表2)显示早一晚白垩世之交(110~90 Ma)是华南重要的构造-岩浆活动时期之一(图9),该时期岩浆岩的空间分布与燕山晚期岩浆活动范围基本一致,集中分布于政和一大埔断裂以东的东南沿海地区,内陆则产出局限,且大部分岩体以岩株形式产出(图10)。该时期东南沿海地区形成了大量中酸性岩浆岩(I型、A型花岗岩)及少量玄武质岩石(王德滋和沈渭洲, 2003),如浙闽沿海地区的普陀山一大洞岙碱长花岗岩(98~96 Ma)(Zhao et al., 2016)、蜡江一东埔黑云母花岗岩(110.1~105.3 Ma)与石湖黑云母二长花岗岩((105.1±0.5)Ma)(丁聪, 2013)、粤东三饶花岗闪长岩((102±1.9)Ma)、新圩花岗闪长岩(106~105 Ma)和石英闪长岩((103.5±1.2)Ma)(贾丽辉, 2018),云开地区的天堂二长花岗斑岩((104.5±0.4)Ma)、石菘花岗闪长岩((103.7±0.5)Ma)和石英闪长岩(104.1~103.2 Ma)(郑伟, 2016)等I型花岗岩,大青山一桃花岛一虾峙岛过碱性花岗岩(89~86 Ma)

(Zhao et al., 2016)、瑶坑碱性花岗岩((91.3±2.5)Ma)(肖娥等, 2007)、太姥山一鼓山黑云母花岗岩(99.4~96.6 Ma)(李良林等, 2013)、石牛山正长花岗斑岩((93.8±1.3)Ma)(邢光福等, 2009)、洪山花岗岩(99 Ma)(黄泉祯, 1998)等A型花岗岩,以及少量主要受长乐一南澳断裂所控制的中基性脉岩、玄武质岩石,如福建永泰玄武岩(~85 Ma)(Meng et al., 2012)等。

而华南腹地该期岩浆活动范围较窄,主要以零星状态分布,除本文及前人报道的连阳花岗岩体((106.4±0.7)~(97.6±1.5)Ma)(高剑峰等, 2005; 马星华等, 2014; 袁永盛等, 2020)外,尚有广西大厂黑云母花岗岩((93±1)Ma)和斑状花岗岩((91±1)Ma)(蔡明海等, 2006)、米场角闪黑云母花岗闪长岩(110~109 Ma)、三叉冲黑云母花岗岩((103±1)Ma)、油麻坡花岗闪长岩((105±1)Ma)(Wang et al., 2018),湘南界牌岭花岗斑岩((92.0±1.6)Ma)(卢友月等, 2013),粤北新坪花岗闪长岩((104.6±1.8)Ma)(李宏卫等, 2021)、雪山嶂花岗斑岩((103.4±1.2)Ma)(贾小辉等, 2014)等。

综上所述,早一晚白垩世之交(110~90 Ma)发生了华南燕山晚期一次重要的构造-岩浆事件,广泛发育了碱性花岗岩、A型花岗岩、I型花岗岩、中基性脉岩、玄武质岩石等双峰式岩浆岩及一系列断陷拉张盆地等(Li, 2000; 杨振等, 2014)。

6.3 构造环境

关于华南燕山期花岗岩形成的大地构造背景及深部动力学机制已先后提出了如活动大陆边缘(Zhou and Li, 2000)、岩石圈伸展减薄与拆沉(张旗等, 2001)、板内伸展-裂谷环境(陈志刚等, 2003)、弧后环境(孙涛等, 2003)、平板俯冲(Li and Li, 2007)等不同模式。目前普遍认为,自燕山期以来华南腹地已经逐渐转变成以伸展拉张为主的构造环境,并经历了多期重要的伸展事件,古太平洋板块俯冲/后撤背景下幔源玄武质岩浆的底侵作用可能是导致华南晚中生代花岗质岩浆活动的重要原因(Zhou and Li, 2000; Zhou et al., 2006; Wang et al., 2012; Duan et al., 2017; 李三忠等, 2018)。

大地构造位置上,研究区位于郴州一临武深大断裂附近(图10)(高剑峰等, 2005; 马星华等, 2014),该断裂被认为是华夏地块与扬子地块的岩

表2 华南110~90 Ma花岗岩类年代学资料
Table 2 Geochronological data of the 110~90 Ma granitoids in South China

岩体名称	岩性	测年方法	年龄/Ma	资料来源
宝山	花岗斑岩	LA-ICP MS	90.1~91.3	毕诗健等, 2015
银坑	花岗斑岩	SHRIMP	110±1.1	王晨昇, 2012
肖厝	二长花岗岩	SIMS	103.3~106.5	李晔, 2015
石碇	中细粒斑状石英闪长岩	LA-ICP MS	104.1±0.4	郑伟, 2016
	中细粒花岗闪长岩		103.7±0.5	
	细粒石英闪长岩		103.2±0.6	
天堂	二长花岗斑岩		104.5±0.37	
石狮	黑云母花岗岩	LA-ICP MS	96.1~106.2	丁聪, 2015
	黑云母二长花岗岩		103.9~105.1	
太姥山	花岗岩	LA-ICP MS	96.6±1.6	李良林等, 2013
鼓山	黑云母花岗岩		99.4±2.3	
蜡江	黑云母花岗岩	LA-ICP MS	105.3~110.1	丁聪, 2013
东埔				
石湖	黑云母二长花岗岩		105.1±0.5	
霞洋	黑云母花岗岩	LA-ICP MS	100~109	周伟强, 2016
龙山	黑云母二长花岗岩	LA-ICP MS	105.1±0.8	李真等, 2009
石陂	花岗闪长岩	LA-ICP MS	109.3±1.1	王国昌, 2016
德庆	二长花岗岩	LA-ICP MS	99±2	耿红燕等, 2006
杏花	花岗闪长岩		101±7	
新圩	花岗闪长岩	LA-ICP MS	105.1~106.1	贾丽辉, 2018
	石英闪长岩		103.5±1.2	
三饶	花岗闪长岩		102.0±1.9	
曹门	花岗岩	LA-ICP MS	102±1	李艳军等, 2010
雪山嶂	花岗斑岩	LA-ICP MS	103.4±1.2	贾小辉等, 2014
马其岗	石英二长斑岩	LA-ICP MS	90.2±1.5	王晓地等, 2017
青田	碱性花岗岩	单颗粒锆石	101.2±2.1	邱检生等, 1999
猫狸岭	石英二长闪长岩	LA-ICP MS	105.6±1.0	刘亮等, 2013
	细粒花岗岩		104.8±0.9	
瑶坑	碱性花岗岩	LA-ICP MS	91.3±2.5	肖娥等, 2007
外北山	碱长花岗岩	LA-ICP MS	96.2±0.8	段政等, 2017
南山坪	斑状石英二长岩	LA-ICP MS	99.5±1.2	Li and Jiang, 2014
	斑状正长岩		97.3±1.2	
	正长岩		92.7±1.0	
四方	花岗闪长岩	LA-ICP MS	109.5±0.8	Duan et al., 2017
萝卜岭	花岗闪长斑岩		105.4~107.1	
蓬壶	正长花岗岩	LA-ICP MS	108.8±0.4	Zhao et al., 2017
白石山	碱长花岗岩	LA-ICP MS	91.0±1.0	Zhao et al., 2015
乌山			91.7~92.1	
洪山	花岗岩	单颗粒锆石	99	黄泉祯, 1998
上营	黑云母花岗岩	LA-ICP MS, SIMS	95~99	Chen et al., 2014
诏安	二长花岗岩	LA-ICP MS	90±2	
米场	角闪黑云母花岗闪长岩		109~110	
三叉冲	中粒黑云母花岗岩	LA-ICP MS	103±1	Wang et al., 2018
油麻坡	花岗闪长岩		105±1	

续表2

岩体名称	岩性	测年方法	年龄/Ma	资料来源
黄檀阳 康谷	石英二长岩	LA-ICP MS	108.4±1.5 104.6~109.0	Liu et al., 2016
马头 达赖	石英二长闪长岩	LA-ICP MS	99.6~101.0 100.3±0.6	Liu et al., 2014
普陀山一大洞岙	碱长花岗岩		98~96	
大青山一桃花岛 一虾峙岛	过碱性花岗岩	LA-ICP MS	89~86	Zhao et al., 2016
云峰	石英二长岩	LA-ICP MS	104.2±1.9	Pan et al., 2018
雁荡山	流纹质凝灰岩/流纹岩	SHRIMP, LA-ICP MS	98~104	Yan et al., 2016
魁歧	碱长花岗岩	LA-ICP MS	97±1	Chen et al., 2019
	钠铁闪石花岗岩	SIMS	96±1	
笔架山	碱长花岗岩	SIMS, LA-ICP MS	97~98	
鸡山	斑状花岗岩	SIMS	98±1	蔡明海等, 2006
福州		SIMS	97±1	
大厂	黑云母花岗岩	SHRIMP	93±1	蔡明海等, 2006
	斑状花岗岩		91±1	
大沅村	霓辉石钠铁闪石花岗岩	SHRIMP	95±2	王强等, 2005
新村	花岗岩	单颗粒锆石	103±1.1	Shen et al., 2000
石牛山	正长花岗岩斑岩	SHRIMP	93.8±1.3	邢光福等, 2009
界牌岭	花岗岩斑岩	SHRIMP	92.0±1.6	卢友月等, 2013
博白	花岗岩斑岩	LA-ICP MS	92.6±4.2	中国人民武装警察部 队黄金第九支队, 2016 ^⑥
龙头山	流纹斑岩	SHRIMP	103.3±2.4	陈富文等, 2008
	花岗岩斑岩	SHRIMP	100.3±1.4	
连阳	黑云母花岗岩	LA-ICP MS	100~104	马星华等, 2014
冷水地区(连阳南部及南 侧小岩体)	角闪黑云二长花岗岩		98.9~100.2	本文; 袁永盛等, 2020
	角闪黑云二长花岗岩		99.9±0.9	
	黑云母二长花岗岩	LA-ICP MS	97.1~101.4	本文
	黑云母二长花岗岩		98.0~101.1	
	黑云母正长花岗岩		101.8±1.5	

石圈尺度缝合线(即十一杭带)(Gilder et al., 1996), 是一个反复活化、深达软流圈的古构造薄弱带(Xie et al., 2020), 沿该断裂带分布有大量的燕山期幔源玄武质岩石(178~63 Ma), 如湖南宁远一道县玄武岩(Li et al., 2004)、回龙圩煌斑岩(Wang et al., 2003)、长城岭斜斑玄武岩(Zhao et al., 1998; 杨帆等, 2018)、衡阳玄武岩和赣西北禾埠玄武岩(Meng et al., 2012)等, 与同期花岗岩近于同时产出。华南内陆同期基性岩浆整体上具有更加亏损的Sr-Nd同位素组成, 表现出从岛弧玄武岩向板内玄武岩逐步转变的趋势(杨帆等, 2018), 暗示华南内陆在燕山期(特别是燕山晚期)可能经历了持续的伸展拉张作用, 致使深部的软流圈幔源物质向上迁移。前人

曾在华南识别出多条具低 T_{DM} -高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的燕山期花岗岩带, 其中华夏地块 $T_{DM} < 1.7$ Ga, $\epsilon_{Nd}(t) > -7.0$ 被认为是幔源物质参与岩浆演化过程的重要体现(Chen et al., 1998; 陈江峰等, 1999)。连阳花岗岩体具相对较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-10.6~-4.2)、较年轻的二阶段Nd模式年龄(T_{DM2})(1.79~1.24 Ga)和较大变化范围的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-10.5~+1.2)(高剑峰等, 2005; 马星华等, 2014; 袁永盛等, 2020; 作者未发表数据), 在空间上正处于华南内陆的杭州—诸广山—花山低 T_{DM} -高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值带附近(Chen and Jahn, 1998), 这进一步明确了幔源岩浆不仅提供了源区岩石熔融所需的热, 也一定程度为区内花岗岩提供了成岩物质。该结论与前述根据岩相学特征认为MME发生

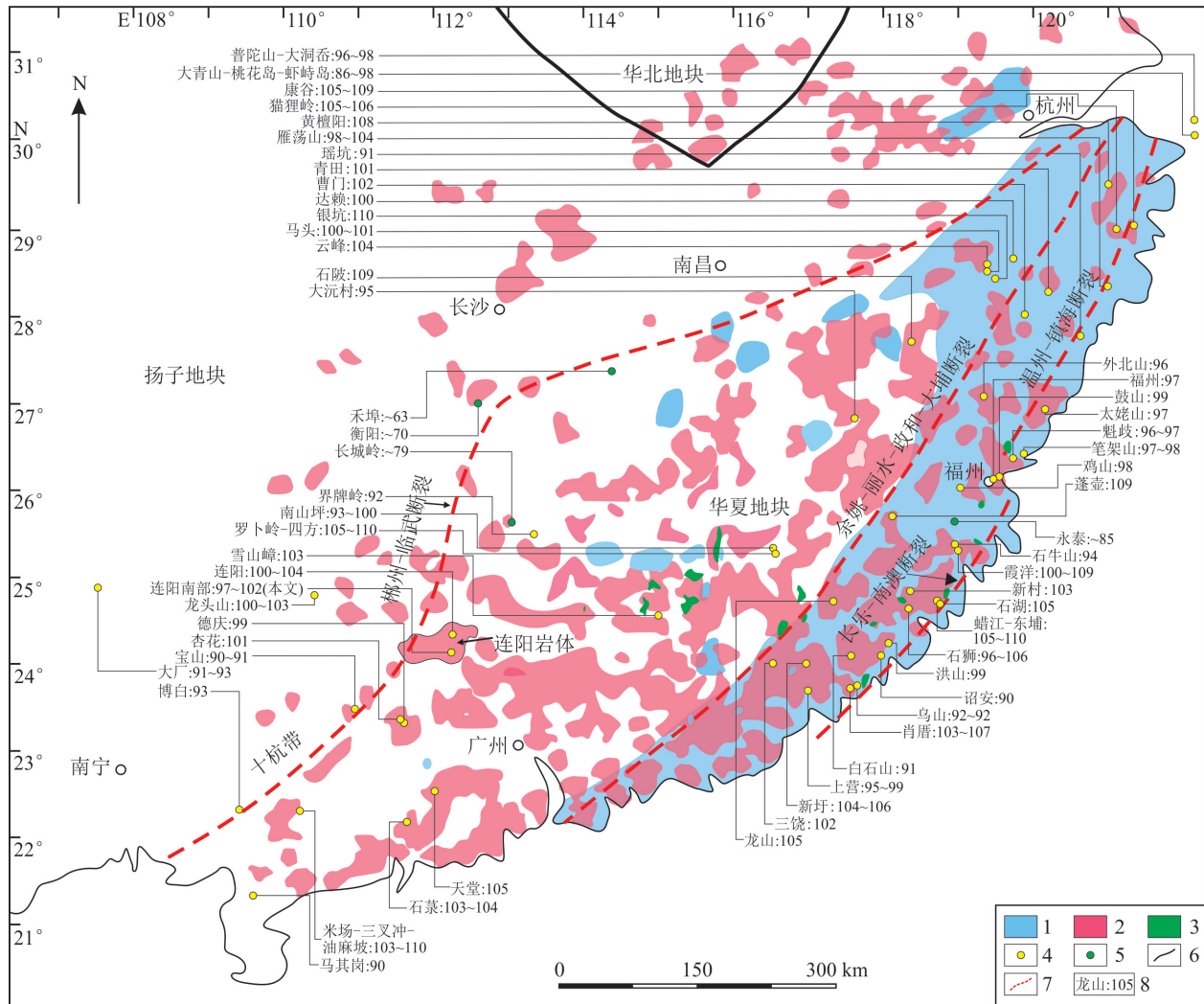


图10 华南110~90 Ma花岗岩类和玄武质岩石分布图(底图据 Zhou and Li, 2000; Wang et al., 2013 修改)

1—燕山期火山岩;2—燕山期侵入岩;3—燕山期玄武质岩石;4—代表性花岗岩体;5—代表性玄武岩体;6—地质块体边界;7—深大断裂;8—岩体名称及年龄/Ma(资料来源见表2)

Fig.10 Distribution of the 110~90 Ma granitoids and basaltic rocks in South China (modified from Zhou and Li, 2000; Wang et al., 2013)

1—Yanshanian volcanics; 2—Yanshanian intrusives; 3—Yanshanian basaltic rocks; 4—Representative granitoid pluton; 5—Representative basaltic pluton; 6—Geological block boundary; 7—Deep fault; 8—Name and isotopic age /Ma of pluton (See Table 2 for data source)

了幔源与壳源岩浆的混合作用的推论相一致。

相对于燕山晚期东南沿海发育大面积与俯冲相关的陆缘弧岩浆活动,同时期岩浆作用在华南内陆地区表现较为微弱(周新民, 2007)。燕山期华南内陆地区的构造-岩浆活动同东南沿海地区并不一致。笔者认为连阳岩体的形成并非直接起源于大洋板块或其上覆地幔楔,而可能与古太平洋板块不规则反复俯冲/后撤所导致的陆内或弧后剪切拉张

环境相关,伴随该后撤作用发育大量的伸展构造活动(Li and Li, 2007; 郑永飞等, 2013),伸展活动影响华南内陆原先存在的郴州—临武等深大断裂,使其重新活化,软流圈地幔流沿这些薄弱带向上侵蚀上涌,导致岩石圈减薄,引起软流圈及上覆的富集岩石圈地幔发生部分熔融,形成幔源玄武质岩浆,并底侵华南中元古代陆壳基底岩石使其部分熔融形成花岗质岩浆,随后,花岗质岩浆可与玄武质岩浆

发生岩浆混合。

7 结 论

(1)冷水地区(连阳岩体南部及南侧白水寨、鸡笼岭、将军头小岩体)花岗岩体的岩性主要为粒度不等的(角闪)黑云母二长花岗岩,少量黑云正长花岗岩,依据岩性特征及穿切关系的不同可划分为5个侵入次。

(2)通过锆石LA-ICP-MS U-Pb定年,新获得冷水地区第一到第五侵入次的年龄分别为102~97 Ma,均属燕山晚期早一晚白垩世之交(100 Ma±)的岩浆产物。认为连阳岩体主要于~100 Ma形成,144~123 Ma和~114 Ma的岩浆活动在冷水地区仅局部产出。

(3)综合分析表明,早一晚白垩世之交是华南一次重要的构造-岩浆活动时期。同期古太平洋板块向欧亚板块的俯冲/后撤所诱发的伸展作用,导致华南内陆的郴州—临武等古深大断裂重新活化,并引起软流圈上涌和岩石圈减薄,进而导致较强烈的幔源和壳源岩浆活动。连阳岩体的形成与此密切相关。

致谢: 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室武兵老师为锆石LA-ICP-MS U-Pb定年提供了帮助;饶世成等人协助了部分资料整理;付建明研究员、朱清波研究员对初稿进行认真细致审核并提出大量建设性修改意见,在此一并表示感谢。

注释

①广西壮族自治区地质调查院. 2005. 1:250 000贺州市幅区域地质调查报告.

②中国地质调查局武汉地质调查中心. 2015. 1:50 000南乡、上程、福堂圩、小三江等4幅区域地质矿产调查报告.

③中国人民武装警察部队黄金第九支队. 2016. 1:50 000博白县幅、六万山幅区域地质矿产调查报告.

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.
Black L P, Gulson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory[J]. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 3: 227-232.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province. 1988. *Regional Geology of Guangdong Province*[M]. Beijing:

Geological Publishing House, 1-941 (in Chinese).

- Bai Daoyuan, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2008. Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains-Summary of major achievements of the 1: 250, 000 geological survey in southeastern Hunan[J]. *Geology in China*, 35(3): 436-455 (in Chinese with English abstract).
Bi Shijian, Yang Zhen, Li Wei, Liang Pei, Tang Kefei. 2015. Discovery of late cretaceous Baoshan porphyry copper deposit in Dayaoshan, Qinhang metallogenic Belt: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. *Earth Science*, 40(9): 1458-1479 (in Chinese with English abstract).
Cai Minghai, He Longqing, Liu Guoqing, Wu Decheng, Huang Huimin. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang Tin-Polymetallic ore field, Guangxi and their geological significance[J]. *Geological Review*, 52(3): 409-414 (in Chinese with English abstract).
Chen Chenghong, Lee C Y, Shinjo R. 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: Constraints from ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts[J]. *Lithos*, 106(1/2): 83-92.
Chen Zhigang, Li Xianhua, Li Wuxian, Liu Dunyi. 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China[J]. *Geochimica*, 3: 223-229 (in Chinese with English abstract).
Chen Fuwen, Li Huaqin, Mei Yuping. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Chronology of diagenetic mineralization of the Longtoushan Porphyry gold ore field, Gui County, Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 921-926 (in Chinese with English abstract).
Chen Jiangfeng, Guo Xinheng, Tang Jiafu, Zhou Taixi. 1999. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of southeastern China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 16(6): 649-658 (in Chinese with English abstract).
Chen Jiangfeng, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1/2): 101-133.
Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng. 2019. Origin of Cretaceous aluminous and peralkaline A-type granitoids in northeastern Fujian, coastal region of southeastern China[J]. *Lithos*, 340-341: 223-238.
Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng, Sun Jinfeng. 2014. Geochemical transition shown by Cretaceous granitoids in southeastern China: Implications for continental crustal reworking and growth[J]. *Lithos*, 196-197: 115-130.
Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Jahn Borming, Xu Xianbing, Ma Licheng, Li Jianhua, Su Jinbao, Li Yong. 2013. Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance[J]. *Geology in China*, 40(1): 86-105 (in

- Chinese with English abstract).
- Ding Cong. 2013. Geochronology and Geochemistry of Granitoids and Dikes in Quanzhou–Jinjiang Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Ding Cong. 2015. Geochronology and Geochemistry of the Late Mesozoic Igneous Rocks in the Southeastern Coast Area of Quanzhou, Fujian Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Duan Gan, Chen Huayong, Pete Hollings, Qi Jinping, Xu Chao, Zhang Shuang, Xiao Bing, Liu Guangyong, Liu Jianmin. 2017. The Mesozoic magmatic sources and tectonic setting of the Zijinshan mineral field, South China: Constraints from geochronology and geochemistry of igneous rocks in the Southeastern Ore Segment[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 800–827.
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Xilin, Jin Guodong. 2017. The petrogenesis of Waibeishan aluminous A₁-type granite in Zhejiang Province: Constraints from mineralogy, zircon U–Pb dating, geochemistry and Hf isotope[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 180–197 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas[M]. *Geological Survey Professional Paper*, 354: 11–49.
- Fu Jianming, Li Huaqin, Qu Wenjun, Yang Xiaojun, Wei Junqi, Liu Guoqing, Ma Liyan. 2007. Re–Os isotope dating of the Da’ao tungsten–tin deposit in the Jiuyi Mountains, Southern Hunan Province[J]. *Geology in China*, 34(4): 651–656 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jianfeng, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Lu Jianjun, Zhang Min, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. 2005. Geochemistry and petrogenesis of Lianyang granite composite, west Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1645–1656 (in Chinese with English abstract).
- Geng Hongyan, Xu Xisheng, S. Y. O’Reilly, Zhao Ming, Sun Tao. 2006. Volcanic–intrusive magmatism in western Guangdong Province and its geological significance[J]. *Science in China (Series D)*, 36(7): 601–617 (in Chinese).
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao Xixi, Liu Zhongwei, Wang Genxian, Yuan Kuirong, Liu Wenlong, Kuang Guodun, Wu Haoruo. 1996. Isotopic, paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137–16154.
- Gilder S A, Keller G R, Luo Ming, Goodell P C. 1991. Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial–distribution of rifting in China[J]. *Tectonophysics*, 197(2/4): 225–243.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O’Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U–Pb and Hf–isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231–282.
- Hsu K J, Li Jiliang, Chen Haihong, Pen H P, Sengor A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 183: 9–39.
- Huang Quanzhen. 1998. Directions on Geological Map at Scale of 1:500,000 of Fujian Province[M]. Fuzhou: Fujian Map Publishing House, 1–120 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1/2): 47–69.
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in Southeast China[J]. *Nature*, 248(5448): 480–483.
- Jia Lihui. 2018. Petrogenesis of Late Mesozoic Granitoids and Evaluation of Metallogenic Potential in Eastern Guangdong, Coastal Area of SE China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Jia Xiaohui, Wang Xiaodi, Yang Wenqiang, Niu Zhijun. 2014. Formation age, geochemistry and petrogenesis of Xueshanzhang A–type granite in Northern Guangdong[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 34(3): 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J, Mandarino J A, Maresch W V, Nickel E H, Rock N M S, Schumacher J C, Smith D C, Stephenson N C N, Ungaretti L, Whittaker E J W, Guo Youzhi. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219–246.
- Li Bin, Jiang Shaoyong. 2014. Geochronology and geochemistry of Cretaceous Nanshanping alkaline rocks from the Zijinshan district in Fujian Province, South China: Implications for crust–mantle interaction and lithospheric extension[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 253–274.
- Li Hongwei, Qu Shangxia, Lin Xiaoming, Xiao Guangming, Huang Jianhua, Liao Bingbing. 2021. Petrogeochemistry, zircon U–Pb age and Hf isotope of Xiping granodiorite (104 Ma) in Xinfeng area, Guangdong Province[J]. *Geology in China*, 48(5): 1524–1539 (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Sun Yali, He Ke, Xian Weisheng, Qiu Jianjun, Zhang Xu. 2010. The improved molybdenite Re–Os dating method and its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 642–648 (in Chinese with English abstract).
- Li Lianglin, Zhou Hanwen, Chen Zhihua, Wang Jinrong, Chen Zhenghua, Xiao Yi. 2013. Comparison of A–type granites from Taimushan, Gushan Regions in Fujian Province, their geodynamic significance[J]. *Geoscience*, 27(3): 509–524 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Li Xiyao, Wang Yongming, Cao Xianzhi, Wang Pengcheng, Guo Lingli, Yu Shengyao, Lan Haoyuan, Li Shaojun, Zhao Shujuan, Zhou Zaizheng, Zhang Zhen, Zhang Guowei. 2018. Mesozoic plate subduction in West Pacific and

- tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550-1593 (in Chinese).
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305.
- Li Xianhua, Chung Sunlin, Zhou Hanwen, Lo Chinghua, Liu Ying, Chen Changhua. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China[J]. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 193-215.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, Li Qiuli, Liu Yu, Tang Guoqiang, Gao Yuya, Wu Fuyuan. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River metallogenic belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*, 119(3/4): 427-438.
- Li Yanjun, Wei Junhao, Yao Chunliang, Yan Yunfei, Tan Jun, Peng Lina, Xiao Guanglin, Ye Zefu. 2010. Genetic relationship of the Huaixi copper-gold deposit, the Caomen alkaline granite, Southeastern Zhejiang Province, China: Constraint from geochronologies[J]. *Journal of China University of Geoscience*, 35(4): 585-596 (in Chinese with English abstract).
- Li Ye. 2015. The Early Cretaceous Evolution of SE China and Its Tectonic Implications: Insight from Magmatism and Metamorphism in Changle-Nan'ao Metamorphic Belt[D]. Wuhan: China University of Geoscience (in Chinese with English abstract).
- Li Zhen, Qiu Jianshen, Jiang Shaoyong, Xu Xisheng, Hu Jian. 2009. Petrogenesis of the Jinshan granitic composite pluton in Fujian Province: Constraints from elemental and isotopic geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(4): 516-527 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxiang, LiXianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogeny and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Gunther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34-43.
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Yang Zeli. 2013. Petrogenesis of the Maoliling pluton in Linhai County, Zhejiang Province: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4069-4086 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Zhao Jiaolong. 2016. A hybrid origin for two Cretaceous monzonitic plutons in eastern Zhejiang Province, Southeast China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 183-203.
- Liu Liang, Qiu Jiansheng, Zhao Jiaolong, Yang Zeli. 2014. Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of Cretaceous monzonitic plutons in western Zhejiang Province, Southeast China: New insights into the petrogenesis of intermediate rocks[J]. *Lithos*, 196-197: 242-260.
- Lu Youyue, Fu Jianming, Cheng Shunbo, Ma Liyan, Zhang Kun. 2013. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the ore-bearing granite porphyry in the Jiepailing Tin-polymetallic deposit, Southern Hunan province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(3): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Centre, Special Publication, 4: 1-71.
- Ma Xinghua, Chen Bin, Wang Zhiqiang, Gao Lin, Sun Keke. 2014. Petrogenesis of the Lianyang composite granite, Nanling region: U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes constraints[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 264-280 (in Chinese with English abstract).
- Meng Lifeng, Li ZhengXiang, Chen Hanlin, Li Xianhua, Wang Xuance. 2012. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model[J]. *Lithos*, 132-133: 127-140.
- Narayana B L, Rao J M, Rao M V S, Murthy N N, Rao V D. 2000. Geochemistry and origin of early proterozoic dongargarh rapakivi granite complex, central india-an example for magma mixing and differentiation[J]. *Gondwana Research*, 3(4): 507-520.
- Pan Fabin, Liu Rong, Jin Chong, Jia Baojian, He Xiaobo, Gao Zhong, Tao Lu, Zhou Xiaochun, Zhang Liqi. 2018. Petrogenesis of Early Cretaceous granitoids from southwest Zhejiang, NE South China Block and its geodynamic implication[J]. *Lithos*, 308-309: 196-212.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Brent I A McInnes. 1999. Geochemistry and petrogenesis of the I- and A-type composite granite masses in the coastal area of Zhejiang and Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237-246 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Liu Hongfei, Li Huimin, Li Wuxian, Wang Dezi. 2000. The thermal evolution history of Xincun miarolite granite, Fujian Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1538-1542.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26-30 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332-335 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, Li Huimin, Zhou Hongying, Wang Zhicheng, Shen Weizhou. 2003. Strongly peraluminous

- granites in Mesozoic, Eastern Nanling Range of Southern China: petrogenesis and implications for tectonics[J]. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209–1218 (in Chinese).
- Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, Yang Wenqiang, Cao Yuting. 2008. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2809–2819 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chenshen. 2012. The Relationship between Magmatic Rocks and Mineralization of the Yinkeng Porphyry Mo Deposit, West Zhejiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209–220 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guochang. 2016. Petrogenesis of Mesozoic Intrusive Rocks in Northwest Fujian and South Jiangxi Province and Their Geodynamic Implications[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Li Xianhua, Jia Xiaohui, Derek Wyman, Tang Gongjian, Li Zhengxiang, Ma Lin, Yang Yueheng, Jiang Ziqi, Gou Guoning. 2012. Late Early Cretaceous adakitic granitoids and associated magnesian and potassium-rich mafic enclaves and dikes in the Tunchang-Fengmu area, Hainan Province (South China): Partial melting of lower crust and mantle, and magma hybridization[J]. *Chemical Geology*, 328: 222–243.
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Jian Ping, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Dai Tongmo, Xu Jifeng, Ma Jinlong. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795–808 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaodi, Zhang Liguoguo, Jia Xiaohui. 2017. A study of geochronology, geochemistry and genesis of Maqigang beschtuite pluton, southeastern Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 761–771 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Yang Zhen, Chen Nengsong, Liu Rui. 2018. Petrogenesis and ore genesis of the Late Yanshanian granites and associated porphyry-Skarn W-Mo deposits from the Yunkai Area of South China: Evidence from the Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Sulfide S-Fe Isotopes[J]. *Journal of Earth Science*, 29(4): 939–959.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *International Geology Review*, 45(3): 263–286.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Guowei, Zhang Yanhua. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 23: 1273–1305.
- Wang Yuejun, Wu Chunming, Zhang Aimei, Fan Weiming, Zhang Yanhua, Zhang Yuzhi, Peng Touping, Yin Changqin. 2012. Kwanghsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites[J]. *Lithos*, 150: 227–242.
- Xiao E, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Hu Jian, Li Zhen. 2007. Geochronology, geochemistry of the Yaokeng alkaline granite pluton in Zhejiang Province: Petrogenetic, tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1431–1440 (in Chinese with English abstract).
- Xin Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, Zhou Yuzhang, Li Longming, Jiang Yang, Chen Zhihong. 2009. Characteristics and tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 77–91 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang, Qiu Ruizhao, Zhang Yu. 2010. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. *Geology in China*, 37(4): 1092–1101 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuexin, Ma Liyan, Zhao Guochun, Xie Caifu, Han Yigui, Li Jianhua, Liu Qian, Yao Jinlong, Zhang Yunying, Lu Yuanfa. 2020. Origin of the Heping granodiorite pluton: Implications for syn-convergent extension and asthenosphere upwelling accompanying the early Paleozoic orogeny in South China[J]. *Gondwana Research*, 85: 149–168.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 36(03): 573–593 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiehua, Liu Liang, Liu Jia. 2017. Current Progresses and Prospect for Genesis of Extensive Mesozoic Granitoid and Granitoid-Related Multi-Metal Mineralization in Southern China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 791–800 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Weixin, Mao Subin. 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 36(3): 528–543 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Liu Rui, Wang Xinyu, Zhou Guofa. 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China: evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1258–1276 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Huang Xiaolong, Li Jie. 2018. Magma processes and petrogenesis of the Late Cretaceous plagioclase-phyric basalt in the Changchengling area, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 157–171 (in Chinese with English abstract).

- Yan Lili, He Zhenyu, Jahn Borming, Zhao Zhidan. 2016. Formation of the Yandangshan volcanic-plutonic complex (SE China) by melt extraction and crystal accumulation[J]. *Lithos*, 266-267: 287-308.
- Yuan Xinchun, Yang Qijun, Qin Ya, Wu Yanbin, Zheng Chaojie, Xu Fang. 2021. Formation age and geochemical characteristics of supah granite pluton in Longling Area, Yunnan Province: Magmatic response to Pan-African Movement[J]. *Northwestern Geology*, 54(1):55-71(in Chinese with English abstract).
- Yuan Yongsheng, Zhang Honghui, Lou Yuanlin. 2020. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, rock genesis and tectonic environment of southern Lianyang intrusive body in western Guangdong[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(4): 523-537(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erchie, Wang Yan, Zhao Taiping, Hao Jie, Guo Guangjun. 2001. An east China plateau in Mide-late Yanshanian period: implication from adakites[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2: 248-256 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiaolong, Qiu Jiansheng, Liu Liang, Wang Ruiqiang. 2015. Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of Late Cretaceous A-type granites from the southeastern coast of Fujian Province, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 338-359.
- Zhao Jiaolong, Qiu Jiansheng, Liu Liang, Wang Ruiqiang. 2016. The Late Cretaceous I- and A-type granite association of southeast China: Implications for the origin and evolution of post-collisional extensional magmatism[J]. *Lithos*, 240-243: 16-33.
- Zhao Xilin, Yu Shengyao, Jiang Yang, Mao Jianren, Yu Minggang, Chen Zhihong, Xing Guangfu. 2017. Petrogenesis of two stages of Cretaceous granites in southwest Fujian Province: Implications for the tectonic transition of South-east China[J]. *Geological Journal*, 54(1): 221-244.
- Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Zhang Boyou. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province[J]. *Science China Earth Sciences*, 41: 102-112.
- Zheng Wei. 2016. The Yanshanian Minerogenetic Series and Mineralization of Polymetallic Deposit in the Yangchun Basin of Yunkai Area, South China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Chen Yixiang. 2013. Continental subduction channel processes: Plate interface interaction during continental collision[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2233-2239 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianxiong, Chen Zhenyu. 2007. Study on Cathodoluminescence of Zircon under Electron Probe [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press (in Chinese).
- Zhou Weiqiang. 2016. Geochronology and Geochemistry and Petrogenesis of the Granites in Putian Area, Fujian Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin. 2007. Late Mesozoic Granites and Lithospheric Dynamic Evolution in Nanling Area[M]. Beijing: Science Press, 1-691 (in Chinese).
- Zhou Xinmin, Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269-287.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.

附中文参考文献

- 柏道远, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 2008. 南岭中段中生代构造-岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. *中国地质*, (3): 436-455.
- 毕诗健, 杨振, 李巍, 梁培, 唐克非. 2015. 钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床: 锆石U-Pb定年及Hf同位素制约[J]. *地球科学*, 40(9): 1458-1479.
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与Nd同位素模式年龄[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 16(6): 649-658.
- 陈志刚, 李献华, 李武显, 刘敦一. 2003. 赣南全南正长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄及其对华南燕山早期构造背景的制约[J]. *地球化学*, 3: 223-229.
- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 吴德成, 黄惠明. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其意义[J]. *地质论评*, 52(3): 409-414.
- 陈富文, 李华芹, 梅玉萍. 2008. 广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石SHRIMP U-Pb年代学研究[J]. *地质学报*, 82(7): 921-926.
- 崔建军, 张岳桥, 董树文, 江博明, 徐先兵, 马立成, 李建华, 苏金宝, 李勇. 2013. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义[J]. *中国地质*, 40(1): 86-105.
- 丁聪. 2013. 泉州-晋江地区白垩纪花岗岩与岩脉的年代学与地球化学[D]. 北京: 中国地质大学.
- 丁聪. 2015. 福建东南沿海泉州地区晚中生代岩浆岩年代学与地球化学[D]. 北京: 中国地质大学.
- 段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋. 2017. 浙江外北山铝质A1型花岗岩成因: 矿物学、年代学、地球化学及Hf同位素制约[J]. *地质学报*, 91(1): 180-197.
- 付建明, 李华芹, 屈文俊, 杨晓君, 魏君奇, 刘国庆, 马丽艳. 2007. 湘南九嶷山大坳钨锡矿的Re-Os同位素定年研究[J]. *中国地质*, 34(4): 651-656.
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1-941.
- 高剑峰, 凌洪飞, 沈渭洲, 陆建军, 张敏, 黄国龙, 谭正中. 2005. 粤西连阳复式岩体的地球化学特征及其成因研究[J]. *岩石学报*, 21(6): 1645-1656.
- 耿红燕, 徐夕生, S. Y. O' Reilly, 赵明, 孙涛. 2006. 粤西白垩纪火山-侵入岩浆活动及其地质意义[J]. *中国科学D辑——地球科学*, 36(7): 601-617.

- 黄泉祯. 1998. 1: 500 000 福建省区域地质图说明书[M]. 福州: 福建地图出版社, 1-120.
- 贾丽辉. 2018. 东南沿海粤东地区晚中生代花岗质岩石成因研究与含矿性评价[D]. 北京: 中国地质大学.
- 贾小辉, 王晓地, 杨文强, 牛志军. 2014. 粤北雪山嶂A型花岗岩的形成时代、地球化学特征及其成因[J]. 矿物岩石, 34(3): 40-49.
- 李宏卫, 屈尚侠, 林小明, 肖光铭, 黄建桦, 廖冰冰. 2021. 广东新丰新坪铜钨矿化花岗闪长岩(104 Ma)岩石地球化学、锆石U-Pb年龄和Hf同位素研究[J]. 中国地质, 48(5): 1524-1539.
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 王锦荣, 陈正华, 肖依. 2013. 福建太姥山地区和鼓山地区A型花岗岩对比及其地球动力学意义[J]. 现代地质, 27(3): 509-524.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 王永明, 曹现志, 王鹏程, 郭玲莉, 于胜尧, 兰浩圆, 李少俊, 赵淑娟, 周在征, 张臻, 张国伟. 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应[J]. 科学通报, 63(16): 1550-1593.
- 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 鄢云飞, 谭俊, 彭丽娜, 肖广玲, 叶泽富. 2010. 浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 35(4): 585-596.
- 李晔. 2015. 华南东南部早白垩世演化及其地质意义: 来自长乐-南澳地区变质和岩浆作用的启示[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 李晶, 孙亚莉, 何克, 洗伟胜, 仇建军, 张旭. 2010. 辉钨矿Re-Os同位素定年方法的改进与应用[J]. 岩石学报, 26(2): 642-648.
- 李真, 邱检生, 蒋少涌, 徐夕生, 胡建. 2009. 福建金山花岗质复式岩体的元素和同位素地球化学及其成因研究[J]. 地质学报, 83(4): 516-527.
- 刘亮, 邱检生, 杨泽黎. 2013. 浙江临海猫狸岭岩体的成因: 年代学、地球化学与Sr-Nd-Hf同位素制约[J]. 岩石学报, 29(12): 4069-4086.
- 卢友月, 付建明, 程顺波, 马丽艳, 张鲲. 2013. 湘南界牌岭锡多金属矿床含矿花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年代学研究[J]. 华南地质与矿产, 29(3): 199-206.
- 马星华, 陈斌, 王志强, 高林, 孙克克. 2014. 南岭连阳复式岩体成因: 锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素约束[J]. 地学前缘, 21(6): 264-280.
- 邱检生, 王德滋, Brent I. A. McInnes. 1999. 浙闽沿海地区I型-A型复合花岗岩体的地球化学及成因[J]. 岩石学报, 15(2): 237-246.
- 全国同位素地质年龄数据汇编小组. 1986. 全国同位素地质年龄数据汇编(第四集)[M]. 北京: 地质出版社, 634-717.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石SHRIMP样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(S1): 26-30.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 332-335.
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 李惠民, 周红英, 王志成, 沈渭洲. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(Q辑), 33(12): 1209-1218.
- 王超, 刘良, 张安达, 杨文强, 曹玉亭. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 24(12): 2809-2819.
- 王晨昇. 2012. 浙西银坑斑岩矿床岩浆岩与成矿关系研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 10(3): 209-220.
- 王国昌. 2016. 闽西北与赣南地区中生代侵入岩成因及其地球动力学意义研究[D]. 南京: 南京大学.
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴植漠, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪A型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约[J]. 岩石学报, 21(3): 795-808.
- 王晓地, 张利国, 贾小辉. 2017. 桂东南马其岗石英二长斑岩年代学、地球化学特征及成因[J]. 地质通报, 36(5): 761-771.
- 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 周宇章, 李龙明, 姜杨, 陈志洪. 2009. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 25(1): 77-91.
- 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌, 胡建, 李真. 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义[J]. 岩石学报, 23(6): 1431-1440.
- 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 邱瑞照, 张昱. 2010. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. 中国地质, 37(4): 1092-1101.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 573-593.
- 杨帆, 黄小龙, 李洁. 2018. 华南长城岭晚白垩世斜斑玄武岩的岩浆作用过程与岩石成因制约[J]. 岩石学报, 34(1): 157-171.
- 阳杰华, 刘亮, 刘佳. 2017. 华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用研究进展与展望[J]. 矿物学报, 37(6): 791-800.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 528-543.
- 杨振, 刘锐, 王新宇, 周国发. 2014. 云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义: 锆石U-Pb年龄及Hf同位素证据[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(9): 1258-1276.
- 苑新晨, 杨启军, 秦亚, 吴彦彬, 郑超杰, 徐放. 2021. 云南龙陵地区苏帕河花岗岩形成时代与地球化学特征: 泛非运动的岩浆响应[J]. 西北地质, 54(1): 55-71.
- 袁永盛, 张宏辉, 娄元林. 2020. 粤西连阳岩体南段LA-ICP-MS锆石U-Pb测年、岩石成因及构造环境[J]. 地质通报, 39(4): 523-537.
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, (2): 248-256.
- 郑伟. 2016. 云开地区阳春盆地燕山期多金属矿床成矿系列[D]. 北京: 中国地质大学.
- 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用[J]. 科学通报, 58(23): 2233-2239.
- 周剑雄, 陈振宇. 2007. 电子探针下锆石阴极发光的研究[M]. 成都: 电子科技大学出版社.
- 周伟强. 2016. 福建莆田地区晚中生代花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[D]. 北京: 中国地质大学.
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 1-691.