https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.279



攀枝花大田地区前震旦纪斜长角闪岩 地球化学特征及构造意义

郑玉文1,陈友良1,2*,彭渤洋3,胡 漾1,郭 锐1,邓 舟1

1. 成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059

2. 成都理工大学地学与核技术四川省重点实验室,四川成都 610059

3. 核工业二九〇研究所,广东韶关 512029

摘 要: 对攀枝花大田地区斜长角闪岩进行了系统的主微量地球化学特征、锆石 LA-ICP-MS U-Pb年代学以及 Lu-Hf 同位素特征研究.结果表明:斜长角闪岩的 SiO₂含量为47.88%~50.05%,原岩为亚碱性一碱性玄武岩.斜长角闪岩稀土总量(ΣREE)较高,稀土元素配分模式为轻稀土富集的右倾型,与洋岛玄武岩相似.微量元素原始地幔标准化蛛网图为"隆起"型,与板内玄武岩特征类似.Zr/Nb、Hf/Th等比值均表明其与板内玄武岩类似,而与岛弧玄武岩具有明显的差异.锆石 U-Pb定年结果表明岩浆结晶年龄为816.0~833.6 Ma,同期岩浆结晶锆石的 ε_{Hf}(*t*)值在-6.8~+3.8之间,其岩浆源区为与OIB类似的富集地幔源区且受到了地壳物质的混染.综合上述资料,认为其形成于 Rodinia 超级地幔柱活动导致的大陆裂谷环境.
关键词:斜长角闪岩;地球化学;锆石 U-Pb定年和 Lu-Hf 同位素;构造意义;大田地区.
中图分类号: P581;P597
文章编号: 1000-2383(2021)01-059-14

Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of the Neoproterozoic Amphibolites from Datian Area, Panzhihua City

Zheng Yuwen¹, Chen Youliang^{1,2*}, Peng Boyang³, Hu Yang¹, Guo Rui¹, Deng Zhou¹

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Sichuan Key Laboratory of Applied Nuclear Techniques in Geosciences, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China

3. No.290 Research Institute of Nuclear Industry, Shaoguan 512029, China

Abstract: The amphibolites are widespread in the Kangding complex in Miyi-Panzhihua area, south Sichuan. The petrological, geochemical, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope characteristics from the amphibolites in the Datian area have been studied in this work. The results show that: (1) The SiO₂ contents range from 47.88% to 50.05%, falling into the range of subalkaline-alkaline basalt in the discrimination diagrams of TAS and Zr/TiO₂-Nb/Y; (2) The total REE contents (ΣREE) range from 121.59×10^{-6} to 230.43×10^{-6} , which is characterized by LREE-rich pattern((La/Yb)_N=2.73-7.52) and is similar to oceanic island basalt; (3) The primitive mantle-normalized trace elements spider diagram is similar to that of intra-plate basalt. (4) The ratios of Zr/Nb, Hf/Th indicate that they are similar to intraplate basalt, while have obvious differences with arc basalt; (5) Zircon

引用格式:郑玉文,陈友良,彭湖洋,等,2021.攀枝花大田地区前震旦纪斜长角闪岩地球化学特征及构造意义.地球科学,46(1):59-72.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41472073);中国核工业地质局科研项目"康滇地轴新元古代构造一岩浆演化与铀成矿作用耦合关系研究"、"康滇地轴前寒武纪混合岩中铀成矿远景预测评价"(No. 201807-03).

作者简介:郑玉文(1995-),女,硕士研究生,从事构造地质学及矿床地球化学研究工作.ORCID:0000-0002-2227-987X.E-mail: 309722182@qq.com

^{*}通讯作者:陈友良, ORCID: 0000-0001-6844-3105. E-mail:chenyouliang09@cdut.cn

LA-ICP-MS U-Pb dating demonstrates that the crystallization age of amphiboliteis is 816.0-833.6 Ma, which is contemporary to the large-scale Neoproterozoic mafic magmatism in the west margin of Yangtze block (860-750 Ma), the $\epsilon_{Hf}(t)$ of zircons is $-6.8 \sim +3.8$, indicating that the basalts were derived from enriched mantle and has been contaminated by crustal materials. Thus, the amphibolites may formed in the continental rift environment caused by the breakup of Rodinia supercontinent.

Key words: amphibolites; geochemistry; zircon U-Pb data and Lu-Hf isotope; tectonic significance; Datian area.

0 引言

四川省西部的康定到云南省元谋一带,分布 有一长达800 km、宽50~205 km的南宽北窄的狭 长构造带,前人称之为康滇地轴.区内出露有变质 程度不同的多套变质岩系,它们构成了扬子板块 西缘的前震旦系基底.前人根据变质程度、变形特 征和形成时代等将该区的前震旦系基底划分为下 部的结晶基底和上部的褶皱基底.康滇地轴的结 晶基底被称为康定杂岩,是由一套变质杂岩及与 其在空间上紧密伴生的花岗质杂岩体共同组成. 其中变质杂岩为一套沉积变质岩、火山岩以及火山 碎屑变质岩的岩石组合,亦称为康定群,从下至上 可划分为咱里组、冷竹关组和五马箐组.

长期以来,有关康定杂岩的成因及形成时代一 直存在较大的争议. 袁海华等(1985)研究同德和冕 宁沙坝地区的混合片麻岩分别得到了2957± 304 Ma的 Pb-Pb等时线年龄和 2 404±189 Ma的 Rb-Sr等时线年龄,认为结晶基底的形成时代为太 古代一古元古代.丛柏林(1988)获得冕宁沙坝麻粒 岩和斜长角闪片麻岩的 Rb-Sr 等时线年龄分别为 1 185.6 Ma 和 1 088.8 ± 44.7 Ma, 同时计算麻粒岩 的 Nd 模式年龄为1462.8 Ma. 徐士进等(2002) 根据 沙坝麻粒岩矿物 Sm-Nd 等时线结果认为,其原岩 应形成于中元古代.随着同位素定年技术的发展, 尤其是锆石原位微区U-Pb年代学分析结果表明, 这套岩石形成于新元古代(郭春丽等,2007;赖绍 聪等,2015),改变了其为扬子克拉通太古宙基底 的认识.目前,对这套岩石的成因主要有两种观 点:(1)是由新元古代 Rodinia 超级大陆存在的超 级地幔柱活动引起的广泛的非造山岩浆活动和大 陆裂谷形成的(李献华等, 2002a, 2002b; Li et al., 2003; 林广春等, 2006; 郭春丽等, 2007); (2) 岩石成因与岛弧和造山作用有关(颜丹平等, 2002; Zhou et al., 2002; 赖绍聪等, 2015).

前人对康定杂岩的成因和构造环境判别主要 是通过对花岗岩、苏雄组双峰式火山岩及变质核杂 岩中的花岗质片麻岩、片麻状花岗岩等岩石进行地 球化学特征及年代学特征研究而来,而对变质杂 岩中分布较广的变质基性火山岩研究较少.但花 岗质岩石的地球化学特征主要受源区的物质组成 和岩浆的结晶演化等因素的影响,而构造环境的 影响次之(Frost *et al.*, 2001),与花岗岩不同的是 玄武质岩石具有明显的岩石构造组合关系,对判 别火成岩的构造组合具有很好的效果(Zhang *et al.*, 2019).笔者在近年来的区域地质调查中,发 现在四川米易至攀枝花一带的康定群变质杂岩中 普遍分布有斜长角闪岩存在,经研究其原岩属于 玄武岩.因此,研究该地区斜长角闪岩的地球化 学及年代学特征对了解扬子板块西缘康定杂岩的 成因及构造环境具有重要的意义.

1 区域地质背景与样品描述

攀枝花大田地区地处青藏高原东南缘,在大 地构造位置上处于扬子准地台西缘的康滇地轴中 南段(图1a).研究区北部出露晋宁期石英闪长岩、 黑云母花岗岩,南部出露晋宁期石英闪长岩,局部 分布有印支期黑云母花岗岩与二云母花岗岩岩 脉.区内中部大面积分布康定群咱里组变质一混 合岩系,根据其原岩特征可划分为下中上3段:咱 里组一段(Pt₁zl¹):为一套斜长角闪岩、角闪斜长片 麻岩、混合岩化斜长角闪岩和英云闪长岩质混合岩 组合,原岩为火山岩;咱里组二段(Pt₁zl²):为一套 含石墨黑云母片岩、石榴砂线石片麻岩、混合岩化 云母片麻岩和条带状混合岩组合,原岩为沉积碎 屑岩;咱里组三段(Pt₁zl³):以眼球状混合片麻岩、 花岗片麻岩为主,原岩为酸性火山岩.大田地区经 历了多次构造变形,构造十分复杂,总体上以发育 强烈钾长石化、绿泥石化蚀变的NE向大断裂为主 体构造,近EW向节理、裂隙带为主要次级构造, 另发育少量的NW向断裂(图1b).

本文研究的斜长角闪岩样品均采于攀枝花大 田地区康定群咱里组一段中,样品采自新近施工的 钻孔(ZK4001、ZK4101、ZK2405)以及河沟处的基



图1 (a)研究区大地构造位置; (b)攀枝花大田地区区域地质简图

Fig.1 Tectonic setting map (a) and geological map of Datian area, Panzhihua City (b) 1. 第四系浮土; 2. 侏罗系长石石英砂岩; 3. 咱里组三段; 4. 咱里组二段; 5. 咱里组一段; 6. 印支期黑云母花岗岩; 7. 印支期二云母花岗岩; 8. 晋 宁期石英闪长岩; 9. 晋宁期含角闪石黑云母花岗岩; 10. 辉绿岩脉; 11. 断层; 12. 钾长石化、绿泥石化蚀变带; 13. 锆石采样位置; 14. 研究区



图 2 斜长角闪岩野外露头(a)和镜下显微照片(b) Fig.2 Photographs of the representative (a) and amphibolites in the Datian area (b) Hbl. 角闪石; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石

岩(图 2a),岩石样品新鲜,且未遭受明显的混合岩 化.用于锆石U-Pb定年的样品(样品号:DT1802、 ZK4001-11)亦采自区内河沟底的新鲜基岩及新近 施工的钻孔,具体采样位置见图1b.斜长角闪岩一 般呈灰黑色,致密坚硬,在野外呈层状分布,延伸 较为稳定,可见变余气孔构造及杏仁构造,其原岩 应为基性火山岩.在显微镜下呈片、柱状变晶结构, 矿物成分主要由角闪石(32%~59%),斜长石 (30%~40%),黑云母(10%~15%),石英(0%~5%)组成,副矿物主要有榍石、磷灰石等.

2 分析方法

2.1 主、微量及稀土元素分析测试

样品全岩主、微量和稀土元素分析测试均在核 工业北京地质研究院分析测试中心完成,主量元素 采用 AxiosmAX X 射线荧光光谱仪,依据 GB/ T14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16个主次成分量测定》进行测定.微量和 稀土元素依据 GB/T14506.30-2010《硅酸盐岩石 化学分析方法第 30 部分:44个元素量测定》, 采用 ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪进行 分析.主量元素的分析精度优于 1%,微量和稀 土元素的分析精度优于 5%.

2.2 锆石 U-Pb 同位素定年

采用重液浮选和电磁分离方法从中分选出 锆石,将具有代表性的锆石样品用双面胶粘在 载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固 化剂进行充分混合后注人 PVC 环中,待树脂充 分固化后将样品座从载玻片上剥离,并对其进 行抛光使其曝露一半晶面,完成后进行锆石的 阴极发光图像和背散射图像分析,以检查锆石 的内部结构、帮助选择适宜的测试点位,最后将 样品靶在真空下镀金以备分析.

锆石 U-Pb 同位素在南京聚谱检测科技有限 公司利用 LA-ICP-MS 进行分析.激光剥蚀系统 (LA)为 Analyte Excite,四极杆型电感耦合等离 子体质谱仪(ICP-MS)为 Agilent 7700x,激光束 斑直径为 35 μm,激光剥蚀过程中采用氦气作载 气、氩气为补偿气,U-Pb 同位素定年中采用标准 锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 7 个样品点,交替分析 2 次标准锆石 (包括 91500、NIST SRM610、GJ-1),用标准锆石 GJ-1 作为盲样检验 U-Pb 定年数据质量.对分析数据 的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪 器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素 比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal完成. 锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平 均计算均采用 Isoplot/Exver4.15 软件完成.

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素亦在南京聚谱检测科技有限 公司利用 LA-MC-ICP-MS 进行分析.激光剥蚀系 统(LA)为 Analyte Excite,多接收器型电感耦合等 离子体质谱仪(MC-ICP-MS)为 NuPlasma II.激光 束斑直径为 50 μ m,氦气和氩气作为载气,每分析 10个样品点,交替分析 2次标准锆石(包括 GJ-1、 91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai),详细实验流 程及仪器运行条件参见 Hu *et al.*(2011).采用 Lu 同 位素衰变常数 1.867±0.008×10⁻⁵ Ma⁻¹(Söderlund *et al.*, 2004)、球粒陨石库(CHUR)¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值 0.282 772 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值 0.033 2(Blichert-Toft and Albarède, 1997)计算(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i和 Epsilon Hf, Hf单阶段模式年龄(T_{DM1})计算采用现今亏损地 幔(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.038 40 和(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}= 0.283 25(Griffin *et al.*, 2000);Hf亏损地幔两阶段 模式年龄(T_{DM2})计算采用平均地壳(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_c比 值为0.015(Griffin *et al.*, 2002).

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

已有研究表明,低场强元素(LFSE)K、Na、 Cs、Rb、Sr、Ba等在变质过程中容易发生迁移,而 主量元素中的MgO、Al₂O₃和TiO₂,高场强元素 (HFSE)Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf、Th等和稀土元素 (REE)在变质过程中很难发生迁移.考虑到大田 地区的岩石已遭受角闪岩相变质作用,因此本文 主要通过这些在变质过程中相对不活动元素来综 合判别岩石的成因和构造环境.

攀枝花大田地区斜长角闪岩样品的化学成 分分析结果见附表1.从附表1可以看出,区内斜 长角闪岩样品的SiO₂含量为47.88%~50.05%, 表明其原岩为基性岩.样品Al₂O₃含量为 11.16%~15.15%, Fe₂O₃^T含量为10.22%~ 13.83%,MgO含量为5.61%~11.63%,CaO含量 为7.51%~10.86%,全碱(Na₂O+K₂O)含量为 2.79%~4.44%,MnO含量为0.17%~0.24%, TiO₂含量为0.67%~2.15%,P₂O₅含量为0.12%~



图 3 大田地区斜长角闪岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解

Fig.3 Zr/TiO₂ vs. Nb/Y diagrams of the amphibolites in Datian area

据 Winchester and Floyd(1977)

63

0.36%. Mg[#]为44.80~67.73, 平均值为56.69,低 于原始岩浆(68~75),反映岩浆可能经历了一定 程度的结晶分异作用或地壳同化混染作用.在 Zr/TiO₂-Nb/Y图解中(图3),斜长角闪岩样品可 分为两组:第1组(样品号ZK4001-11、ZK4001-15、ZK4101-11)3个样品Nb/Y值较高,落于碱性 玄武岩区;第2组(样品号ZK4001-2、ZK4101-5、 ZK4101-9、ZK2405-02、DT1802)5个样品具有较 低的Nb/Y值,落入亚碱性玄武岩区.

总体来看,大田地区斜长角闪岩的总稀土含量 较高,两组样品稀土元素配分模式相似, $\Sigma REE(不$ 含 Y)含量范围在121.59×10⁻⁶~230.43×10⁻⁶之间,平均值为151.36×10⁻⁶,明显高于大洋中脊玄武岩(N-MORB=39.11×10⁻⁶,E-MORB=49.09×10⁻⁶),与洋岛玄武岩(198.96×10⁻⁶)较为接近,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 4a)为轻稀土相对富集的右倾型,与洋岛玄武岩类似.第1组碱性玄武岩样品中等富集LREE((La/ $Yb)_N=7.52~7.14),没有明显Eu负异常(<math>\delta Eu$ = 0.86~1.12);第2组亚碱性玄武岩样品的LREE 富集程度略低,且部分样品(DT1802、ZK2405-02)具明显Eu负异常(δEu =0.32~0.36),可能 与斜长石分离结晶有关.

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图4b)两组 样品总体为"隆起"状,与板内玄武岩富集不相容 元素的特征相似,其中的Sr明显负异常可能是后 期的蚀变导致的.第1组样品富集不相容元素,与 OIB较相似;第2组样品的分布形式与第1组大致 类似,但是普遍出现Zr-Hf、Ti负异常,同时大部分 样品也有 Nb-Ta 负异常,表现出部分岛弧玄武岩的特征,但总体特征与 OIB 类似.

3.2 锆石 U-Pb 年代学

本次对亚碱性斜长角闪岩(DT1802)和碱 性斜长角闪岩(ZK4001-11)两个样品进行了锆 石 U-Pb 年代学研究.

3.2.1 亚碱性斜长角闪岩(DT1802)锆石U-Pb年 代学 亚碱性斜长角闪岩(DT1802)锆石的阴极发 光图像如图5所示,锆石大多数为短柱状至长柱状 或粒状,颗粒大小差异不大:柱状锆石宽约70~ 100 µm, 长约 120~200 µm, 长宽比约为 1.2:1.0~ 2.0:1.0, 晶型为自形一半自形, 晶棱较为圆滑, 晶面 整洁光滑. 锆石基本都具有明显的核一边结构, 晶 核多为灰黑色具有振荡环带的岩浆锆石, 应为斜长 角闪岩原岩结晶时形成的岩浆锆石,少数锆石晶 核为亮白色无分带结构;锆石边部多具有灰黑色、 灰白色的变质增生边或变质重结晶边,为后期变 质作用过程中沿继承锆石晶核继续成长所形成. 通常情况下, 锆石韵律环带发育, Th/U比值较高 (>0.4), 一般属于岩浆成因锆石; 但若 Th/U 比 值低(一般<0.1)且无环带或弱环带的锆石,则被 认为是变质成因锆石.本次测试的26颗锆石测年 结果如附表2所示,26颗锆石Th/U比值大多大于 0.1, 且大部分大于 0.4, 只有 DT1802-08、DT1802-25 两颗锆石的 Th/U 分别为 0.08 和 0.07, 但其形 态具有明显的岩浆锆石特征,且表面年龄也接近其 余锆石年龄,推测也属于岩浆成因锆石.

26组年龄数据谐和度均大于90%,故以其所 测得的表面年龄作为真实年龄.由锆石U-Pb定年



Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) for the amphibolites in Datian area

球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989);俯冲带玄武岩范围据 Tatsumi and Eggins(1995)





结果所作的谐和图见图 6,从附表 2 和图 6 可以看 出,有15颗锆石的206Pb/238U年龄比较集中,在 801.9~859.1 Ma区间内,其²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平 均值为833.6±9.0 Ma(MSWD=2.4),代表了其 主体岩浆结晶时间,亦代表了斜长角闪岩其原岩 (玄武岩)的形成时代.DT1802-26测点的²⁰⁷Pb/ ²⁰⁶Pb年龄为1650.9±23.20 Ma, 且为粒状, 可能为 继承锆石或岩浆捕获锆石; DT1802-16 测点 的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为898.5±14.2 Ma,其锆石 CL 特 征与其他锆石明显不同,具有明显振荡环带的内 核,应为捕获的岩浆锆石;DT1802-18、DT1802-19 测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分别为918.3±13.2 Ma、 906.5±16.0 Ma, 其锆石 CL 特征 与其他锆石相 似,可能为捕获的早期基性岩浆结晶锆石.在 683.4~790.9 Ma范围内分布有7组年龄数据,较 偏离谐和曲线,可能在后期地质过程中发生了铅 丢失,所以它们记录的年龄无实际地质意义.

3.2.2 碱性斜长角闪岩(ZK4001-11)错石 U-Pb年 代学 碱性斜长角闪岩(ZK4001-11)锆石的阴极发 光图像如图7所示.该样品分选出来的锆石粒度和 形态差别不大,锆石多为无色透明,大部分为自 形一半自形的柱状,少量为不规则外形.锆石阴极 发光图像大部分具有明显的岩浆成因环带结构,边 部具有清晰的岩浆振荡生长结构,从形态上判定应





Fig.6 SHRIMP U-Pb Concordia diagrams of zircon from the amphibolite in Datianarea(DT1802)

属于岩浆锆石(图7). 另少数颗粒保留了继承性锆 石残核,呈核一边结构.本次测试的25颗锆石测年 结果如附表2~3所示,25颗锆石Th/U比值均大于 0.1 且大部分大于0.4,应当属于岩浆成因锆石.在 25个测点中,除ZK4001-11-05、ZK4001-11-14两个 分析点的谐和度小于90%予以剔除外,其余23组 年龄数据谐和度均大于90%,故以其所测得的表面 年龄作为真实年龄.测试结果显示,锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄主要集中在776.0~895.5 Ma(17颗锆石)区间 内,其²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为816±15 Ma



图 7 ZK4001-11 锆石阴极发光图像及测点年龄

Fig.7 Zircon CL images from the amphibolite in Datian area(ZK4001-11)

每颗锆石上面的数值为测点年龄(Ma),下面为编号





Fig.8 SHRIMP U-Pb concordia diagrams of zircon from the amphibolite in Datian area(ZK4001-11)

(MSWD=7.3)(图8),代表了其岩浆结晶时间,亦 代表了斜长角闪岩其原岩(玄武岩)的形成时代.其 余测点的年龄较为年轻且较为分散,可能与后期的 热事件作用影响有关.

上述代表亚碱性斜长角闪岩和碱性斜长角闪 岩的两个样品锆石U-Pb谐和年龄在误差范围内较 为一致,反映这两组玄武岩为同一岩浆事件的产 物,其岩浆结晶年龄为816.0~833.6 Ma.

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素特征

由于锆石具有较高的Hf含量,但同时其Lu含量 又极低,从而导致其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf具有非常低的比值, 故锆石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积 累,所测定的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值基本代表了其结晶时体 系的Hf同位素组成(吴福元等, 2007).本次研究了亚 碱性黑云斜长角闪岩样品(DT1802)的锆石Lu-Hf同 位素特征.在锆石U-Pb定年的同一颗锆石相同或邻 近部位测定了Lu-Hf同位素,分析结果见附表4.根据 锆石结晶年龄计算其(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i和ε_{Hf}(t).由于测点 DT1802-26、DT1802-16、DT1802-18、DT1802-19为继 承性锆石或捕获早期岩浆锆石,其Hf同位素特征对本 文无实际意义,故不参与讨论.15颗代表斜长角闪岩 原岩(玄武岩)同期岩浆活动锆石分析点的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值在0.282 08~0.282 38范围之间,以锆石结晶年龄 计算出的(176Hf/177Hf);在0.28206~0.28236范围内, 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t) = -6.8 \sim +3.8$, Hf模式年龄范围较广, $t_{\rm DM1}$ =1 231.7~1 650.4 Ma, $t_{\rm DM2}$ =1 491.2~2 139.4 Ma. 另外有明显 Pb 丢失的 7 颗锆石的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 在0.282 02~0.282 35范围之间,以锆石结晶年龄计算 出的(176Hf/177Hf);在0.282 00~0.282 34范围内,对应 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.4 \sim +2.2$, $t_{\text{DMI}} = 1262.8 \sim 1755.2$ Ma, t_{DM2}=1552.2~2340.6 Ma,从(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf);来看,其与 主体岩浆结晶锆石相似,反映其应来自于同源岩浆.



图 9 大田地区斜长角闪岩(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i与锆石结晶年龄图解(a)和 ε_{HI}(t)与锆石结晶年龄图解(b) Fig.9 Composite plot of (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i vs. U-Pb age (a) and ε_{HI}(t) values vs. U-Pb age (b) of zircons for the rocks form Datian area a. ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.015据Griffin *et al.*(2002); b. Hf亏损地幔演化线据Dhuime(2011)

4 岩石成因及其构造意义

4.1 岩石成因和形成构造环境

锆石的Lu-Hf同位素体系封闭温度较高,稳定 性极强,可以用来示踪岩浆源区性质和探讨地壳演 化(吴福元等, 2007). 大田地区 15 颗代表斜长角闪 岩原岩(玄武岩)同期岩浆活动锆石的(176Hf/177Hf); 在 0.282 06~0.282 36 范围内(图 9a), $\epsilon_{\rm Hf}(t) =$ -6.8~+3.8,位于球粒陨石演化线附近,除2颗锆 石 ε_н(t)值大于0之外,其余均在球粒陨石演化线之 下(图 9b),显示该地区的玄武岩浆可能受到了地壳 物质的混染或来源于富集地幔.对于地幔来源玄武 质岩石来说,如果Hf模式年龄和它的形成年龄相 近,表示该岩石来自亏损地幔;如果Hf模式年龄大 于形成年龄,则说明它的岩浆源区受到地壳物质混 染或来自于富集型地幔(吴福元等, 2007). 前文对 锆石 U-Pb年代学研究结果表明该玄武岩的形成年 龄为833.6±9.0 Ma,小于其模式年龄1231.7~ 1 650.4 Ma, 暗示了其岩浆源区受到了较强的地壳 物质的混染或来自于富集地幔.因此,区内玄武岩 浆应来自于富集地幔或受到了地壳物质的混染.

大田地区的斜长角闪岩在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上表现出明显富集 LREE的特征,与OIB一致;在微量元素原始地幔标准化蛛网图上除部分样品出现 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf等元素相对亏损外,其他的与OIB类似,指示岩浆起源于与OIB类似的富集地幔.在Zr/Nb-Ce/Y图解(图 10a)和 Nb/Yb-Th/Yb图解(图 10b)上,样品大多落于OIB附近,只有部分第2组样品有点偏移,总体也表现出OIB源区特征.

样品出现的Nb、Ta、Ti元素亏损可能与地壳混 染有关,研究表明产于大陆板内裂谷拉张环境的纳 米尼亚遭受地壳混染的 Etendeka 溢流玄武岩也具 有明显的Nb、Ta、Ti负异常(夏林圻等, 2007). 岩 石的Nb/U和Ce/Pb通常被用来约束地壳混染的程 度(唐杰等, 2019),大田地区斜长角闪岩中第1组 样品具有较高的 Nb/U 值(15.77~34.55)和 Ce/Pb 值(13.51~18.74),接近 MORB 和 OIB 组分(Nb/ U=47±10; Ce/Pb=25±5); 第2组样品具有较低 的 Nb/U 值 (3.07~12.38) 和 Ce/Pb 值 (2.91~ 10.22), 接近大陆地壳组分(Nb/U≈10; Ce/Pb≈ 4),表明两组样品均可能受到了地壳混染的作 用,且第2组样品受地壳混染的程度更深.同时, 部分样品也出现 Zr、Hf 元素明显亏损, Zr、Hf 亏 损一般被认为与俯冲带流体交代岩石圈地幔有 关,然而研究表明,板内玄武岩也可能出现Zr、 Hf亏损,如扬子板块西缘石棉冷碛辉长岩部分样 品表现出的Zr、Hf亏损(李献华等, 2002a).

 $\Delta Nb(\Delta Nb=1.74+log(Nb/Y)-1.92×log(Zr/Y))常被用来区分岩浆的来源,来源于地幔柱的基性岩浆的 ΔNb 值大于 0,而来源于亏损地幔和壳源的基性岩浆的 ΔNb 值小于 0(Li$ *et al.*, 2016).大田地区斜长角闪岩的 ΔNb 为 0.42~1.83,普遍大于 0,表明其可能与地幔柱岩浆作用密切相关.

Zr/Nb是判别岩石形成环境的有效指标,大田 地区斜长角闪岩 Zr/Nb 值为 1.35~9.71,平均值为 6.25,明显不同于 N-MORB 玄武岩(多>30),与 P-MORB 和板内玄武岩相近(约 10)(Wilson, 1989).Hf/Th 值为 0.28~1.44,平均值为 0.81,类似 于板内玄武岩(Hf/Th<8)(Condie, 1989).在 Zr/





Fig.10 Zr/Nb-Ce/Y diagram (a) and Nb/Yb-Th/Yb diagram (b) for the amphibolites in Datian area OIB-type. 洋岛型; E-MORB-type. 富集型洋中脊型; N-MORB-type. 正常洋中脊型; SSZ-type. 俯冲带型; 据 Goncuoglu *et al.*(2010)





Fig.11 Zr/Y-Zr diagram (a) and Th-Hf/3-Nb/16 diagram (b) for the amphibolites in Datian area WPB. 板内玄武岩; MORB. 洋脊玄武岩; IAB. 火山弧玄武岩; MORB. 洋脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; IAB. 火山弧玄武岩; a. 据 Pearce (1982); b. 据第鹏飞等(2017)

Y-Zr图上(图11a),第1组3个样品Zr/Y>3,高于 岛弧玄武岩落于板内玄武岩区,第2组样品Zr/Y值 较低,落于洋脊玄武岩区和火山弧玄武岩区;在Th-Hf/3-Nb/16图中(图11b),第1组样品也均落于洋 岛玄武岩区,第2组样品除1个样品落于洋岛玄武 岩之外其余均落于火山弧玄武岩区.在La/10-Y/ 15-Nb/8图上(图12a),多数样品投于大陆玄武岩 区,部分第2组样品落于钙碱性玄武岩和洋脊玄武 岩区,表明岩石遭受了地壳混染,在Ti-V相关图 (图12b)中,岛弧玄武岩的Ti/V应在10~20范 围附近,而大田地区斜长角闪岩的Ti/V比值除 样品DT1802为18.45外,其余的都在20~50范 围内,和岛弧玄武岩存在明显差别,而与大陆溢 流玄武岩及洋岛和碱性玄武岩关系密切.采用

Th/Hf-Ta/Hf图解(图 13a)和Th/Zr-Nb-Zr图解 (图 13b)对斜长角闪岩原岩形成的构造环境作 进一步判别,结果显示样品的Ta/Hf均大于 0.1,Nb/Zr均大于0.03,明显不同于岛弧玄武岩 的特征,而与大陆裂谷密切相关.

康滇地轴新元古代普遍出露地幔柱成因的板 内玄武质岩石,如803±12 Ma的苏雄碱性玄武岩 (Li et al., 2002)、808±12 Ma石棉冷碛辉长岩(李 献华等, 2002a)、736~800 Ma丹巴地区变质玄 武岩(林广春, 2010),842±14 Ma会理北部摩 掌营变基性岩脉(郭春丽等,2007),值得注意的 是这些岩石也常常表现出与岛弧岩浆类似的 Nb-Ta亏损等特征,指示岩浆在上升过程中遭受 了不同程度的混染.综上所述,大田地区斜长









a.据汪云亮等(2001); b.据孙书勤等(2003)

角闪岩的元素地球化学特征和锆石的Lu-Hf同 位素特征均表明其形成于板内裂谷环境,岩浆 起源于与OIB类似的富集地幔源区,并在上升 过程中遭受了岛弧或陆壳物质的混染.

4.2 构造意义

Zhou et al.(2002)在研究康定新元古代花岗质 杂岩时,根据样品具有 P、Ti、Sr、Nb 亏损等与现代 俯冲带火山岩和侵入岩相似的特征,且不具有与壳 源型富铝质花岗岩相同的明显 Eu 负异常而认为花 岗岩具有岛弧性质.颜丹平等(2002)又进一步讨论 扬子地块西缘的一系列变质杂岩的形成时代从 726~864 Ma,岩石的岩石学和地球化学特征为岛 弧型,综合证明这些岩石是与板块俯冲作用具有 成因联系的岛弧型.然而,郭春丽等(2007)认为 花岗岩 P、Ti、Sr、Nb的亏损与陆壳关系密切,可 能是源于亏损的软流圈地幔的基性岩浆以地幔柱 第1期

形式上涌加热地壳使古老地壳熔融产生的.林广 春(2008,2010)认为扬子板块西缘新元古代花岗 岩显示出的岛弧地球化学特征是继承了源区的地 球化学特性,不能用来代表形成时的构造环境. 在 Rio Grande 裂谷,裂谷早期的许多岩石也显示 出了与俯冲带相关的特征(Aldrich *et al.*,1986). 而且大量的研究表明,扬子板块西缘新元古代花 岗岩多具明显的 Eu 负异常,如:苏雄双峰式火山 岩中的花岗岩(李献华等,2002b),瓦斯沟花岗岩 (林广春,2008),石棉花岗岩(林广春,2010)等.

李献华等(2002a)在研究川西新元古代康定 地区的冷碛辉长岩后提出在约950~900 Ma时期 扬子板块西北缘可能存在俯冲带和岛弧,但在 860~750 Ma期间不存在火山弧,这一时期的岩 浆活动很可能与 Rodinia 超级地幔柱活动有关. 李献华等(2002b)同年在研究苏雄组双峰式火山 岩后,认为扬子板块西缘康滇裂谷与现代地幔 柱活动有关的高火山活动型裂谷非常相似,支 持约 825 Ma 华南地幔柱模式. Li et al. (2003)进 一步提出在 860~750 Ma 期间, Rodinia 超级地幔 柱活动导致广泛的非造山岩浆活动和大陆裂谷. 扬子板块西缘和北缘也发现了与非造山裂谷作 用有关的基性岩、双峰式火山岩,如姑咱一石棉 780~760 Ma 基性岩墙(林广春等, 2006), 盐边 790~760 Ma 基性岩墙(Zhu et al., 2008), 西大别 地区 737~740 Ma 双峰式火山岩(朱江等, 2019). 这些基性岩与~780 Ma的北美西部基性 岩事件和~755 Ma的澳大利亚北部基性岩墙群 在时、空上和地幔柱岩浆活动密切相关(林广春 等,2006).

本文所研究的攀枝花大田地区斜长角闪岩样 品原岩为亚碱性一碱性玄武岩,原岩岩浆的形成时 代为816.0~833.6 Ma,在时空分布上与扬子板块西 缘新元古代时期(860~750 Ma)大规模的基性岩浆 活动密切相关.样品的 ε_{Hf}(t)值在一6.8~+3.8之 间,在(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i与锆石结晶年龄图解和 ε_{Hf}(t)与 锆石结晶年龄图解中投点大都在球粒陨石演化线 附近,表明其岩浆来自于与OIB类似的富集地幔源 区且受到了强烈的地壳物质的混染.岩石的主、微 量及稀土元素组成也表现出明显的受地壳物质混 染的特征,但是其微量元素蛛网图显示出与板内 玄武岩类似的"隆起"型,稀土配分模式也是与洋 岛玄武岩类似的右倾型,各微量元素的比值以及 在 Zr/Y-Zr、Th-Hf/3-Nb/16、Ti/Y-Nb/Y 和 Ti/V 图解中大都表现为遭受了陆壳混染的板内玄武岩 特征,故此可以推断其可能形成于 Rodinia 超级地 幔柱活动导致的大陆裂谷环境而不是与板块俯冲 作用具有成因联系的岛弧环境.

5 结论

(1)攀枝花大田地区前震旦纪的斜长角闪岩 SiO₂含量为47.88%~50.05%,其原岩为基性岩, Mg^{*}为44.80~67.73,低于原生岩浆,Zr/TiO₂-Nb/Y 图解表明其原岩为亚碱性一碱性玄武岩.

(2)攀枝花大田地区的斜长角闪岩稀土配分模 式为轻稀土明显富集的右倾型,与洋岛玄武岩类 似;微量元素蛛网图为与板内玄武岩类似的"隆起" 型,指示岩石可能形成于板内环境.岩石的Zr/Nb、 Hf/Th等微量元素比值均表明其与板内玄武岩类 似,而与岛弧玄武岩具有明显的差异,构造环境图 解判别显示其原岩形成于地幔柱活动导致的陆内 裂谷环境,并遭受了地壳物质的混染.

(3)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明斜长 角闪岩的岩浆结晶年龄为 816.0~833.6 Ma,在时、 空分布上与扬子板块西缘新元古代时期(860~750 Ma)大规模的基性岩浆活动密切相关,锆石 Lu-Hf 同位素特征表明同期岩浆结晶锆石的 ε_{Hf}(*t*)值在一 6.8~+3.8之间,岩浆来自于富集地幔且受到了地 壳物质的混染,形成于Rodinia 超级地幔柱活动导致 的大陆裂谷环境.

致谢:在本文撰写过程中得到了导师陈友良教授的悉心指点,两位论文评审专家在审稿中提出了 许多建设性意见,在此一并致以衷心的感谢!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

- Aldrich, M. J. Jr, Chapin, C. E., Laughlin, A. W., 1986. Stress History and Tectonic Development of the Rio Grande Rift, New Mexico. Journal of Geophysical Research, 91(B6): 6199. https://doi.org/10.1029/jb091ib 06p06199
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258. https://doi. org/10.1016/ s0012-821x(97)00040-x

Condie, K. C., 1989. Geochemical Changes in Baslts and An-

desites Across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance. *Lithos*, 23(1-2): 1-18. https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90020-0

- Cong, B. L., 1988. Formation and Evolution of Panxi Ancient Rift Valley. Science Press, Beijing, 1-96 (in Chinese).
- Dhuime, B., Hawkesworth, C., Cawood, P., 2011. When Continents Formed. *Science*, 331(6014): 154-155. https://doi.org/10.1126/science.1201245
- Di, P. F., Wang, J. R., Zhang, Q., et al., 2017. The Evaluation of Basalt Tectonic Discrimination Diagrams: Constraints on the Research of Global Basalt Data. *Bulletin* of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 36(06): 891-896, 879 (in Chinese with English abstract).
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal* of Petrology, 42(11): 2033-2048. https://doi.org/ 10.1093/petrology/42.11.2033
- Goncuoglu, M. C., Sayit, K., Tekin, U. K., 2010. Oceanization of the Northern Neotethys: Geochemical Evidence from Ophiolitic Melange Basalts within the İzmir-Ankara Suture Belt, NW Turkey. *Lithos*, 116(1/2): 175–187. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.007
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICP-MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133– 147. https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3-4): 237-269. https://doi. org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8
- Guo, C. L., Wang, D. H., Chen Y. C., et al., 2007. SHRIMP U - Pb Zircon Ages and Major Element, Trace Element and Nd-Sr Isotope Geochemical Studies of a Neoproterozoic Granitic Complex in Western Sichuan: Petrogenesis and Tectonic Significance. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2457-2470 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Chen, L., et al., 2011. Contrasting Matrix Induced Elemental Fractionation in NIST SRM and Rock Glasses during Laser Ablation ICP-MS Analysis at High Spatial Resolution. J Anal At Spectrom, 26 (2): 425-430. https://doi.org/10.1039/c0ja00145g
- Lai, S. C., Qin, J. F., Zhu, R. Z., et al., 2015. Petrogenesis and Tectonic Implication of the Neoproterozoic Peraluminous Granitoids from the Tianquan Area, Western

Yangtze Block, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2245-2258 (in Chinese with English abstract).

- Li, R. B., Pei, X. Z., Yang, S. H., et al., 2016. Mid-Neoproterozoic Tadong Amphibolites at the Junction of the East Kunlun and Western Qinling Orogens - a Record of Continental Rifting during the Break-Up of Rodinia. *International Geology Review*, 58(4): 455-470. https:// doi.org/10.1080/00206814.2015.1089423
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002a. U-Pb Zircon Geochronological, Geochemical and Nd Isotopic Study of Neoproterozoic Basaltic Magmatism in Western Sichuan: Petrogenesis and Geodynamic Implications. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 329-338 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002. U-Pb Zircon Geochronology, Geochemistry and Nd Isotopic Study of Neoproterozoic Bimodal Volcanic Rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the Initial Rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113(1-2): 135-154. https://doi.org/10.1016/s0301-9268(01)00207-8
- Li, X. H., Zhou, H. W., Li, Z. X., et al., 2002b. Petrogenesis of Neoproterozoic Bimodal Volcanics in Western Sichuan and Its Tectonic Implications: Geochemical and Sm-Nd Isotopic Constraints. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 264-276 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Kinny, P., Zhou, H., 2003. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with other Continents: Evidence for a Mantle Superplume that Broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1-4): 85-109. https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00208-5
- Lin, G. C., 2008. Petrochemical Characteristics of Wasigou Complex in Western Yangtze Block: Petrogenetic and Tectonic Significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(5): 398-404 (in Chinese with English abstract).
- Lin, G. C., 2010. Zircon U-Pb Age and Petrochemical Characteristics of Shimian Granite in Western Sichuan: Petrogenesis and Tectonic Significance. *Earth Science*, 35(4): 611-620 (in Chinese with English abstract).
- Lin, G. C., Li, X. H., Li, X. W., 2006. The Zircon SHRIMP U-Pb Age, Element and Nd-Hf Isotope Geochemistry of Neoproterozoic Basic Dyke Group in Western Sichuan. Science in China. Series D: earth sciences, 36(7): 630-645 (in Chinese).
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas Rom Destructive Plate Boundaries. In Thorps R S, ed. John Wiley and Sons, New York, 525-548.

- Shervais, J. W., 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. *Earth and Planetary Sci*ence Letters, 59(1): 101–118. https://doi.org/10.1016/ 0012-821x(82)90120-0
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U - Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3/4): 311-324. https://doi.org/10.1016/ s0012-821x(04)00012-3
- Sun, S. Q., Wang, Y. L., Zhang, C. J., 2003. Discrimination of the Tectonic Settings of Basalts by Th, Nb and Zr. Geological Review, 49(1): 40-47 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society*, *London*, *Special Publications*, 42(1): 313-345. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, J., Xu, W. l., Li, Y., et al., 2019. Composition Variations of Mesozoic and Cenozoic Basalts in Northern Great Xing' an Range: Implications for Thermal Evolution of Mantle. *Earth Science*, 44(4):1096-1112 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi, Y., Eggins, S., 1995. Subduction zone magmatism. Blackwell Science, Cambridge, 211.
- Wang, Y. L., Zhang, C. J., Xiu, S. Z., 2001. Th/Hf-Ta/ Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 413-421 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. Unwin and Hyman, London, 1-466.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343. https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2007. The Discrimination between Continental Basalt and Island Arc Basalt Based on Geochemical Method. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 26(1): 77-89 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. J., Yu, H. B., Wang, R. C., et al., 2002. Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Ages of Shaba Granulite from West-

ern Sichuan Province and Their Geological Significance. Geological Journal of China Universities, 8(4): 399– 406 (in Chinese with English abstract).

- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2002. Where Was South China Located in The Reconstruction of Rodinia? *Earth Science Frontiers*, 9(4): 249-256 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. H., Zhang, S. F., Zhang, P., 1985. An Archaen Age Information in Dukou District Sichuan, China. Journal of Chengdu College of Geology, 8(3): 79-84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Sun, W. D., Zhao, Y., et al., 2019. New Discrimination Diagrams for Basalts Based on Big Data Research. *Big Earth Data*, 3(1): 45-55. https://doi.org/ 10.1080/20964471.2019.1576262
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Kennedy, A. K., et al., 2002. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-Magmatism along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1/2): 51-67. https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00595-7
- Zhu, J., Peng, S. G., Peng, L H., et al., 2019. Geochronology of Bimodal Volcanic Rocks from Dingyuan Formation in Western Dabie Orogen, Central China: Implications for Extension during Breakup of Rodinia. *Earth Science*, 44(02):5-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. G., Zhong, H., Li, X. H., et al., 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology, Elemental, and Nd Isotopic Geochemistry of the Neoproterozoic Mafic Dykes in the Yanbian Area, SW China. *PrecambrianResearch*, 164 (1-2): 66-85. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.03.006

附中文参考文献

- 丛柏林,1988.攀西古裂谷的形成与演化.北京:科学出版社, 1-96.
- 第鹏飞,王金荣,张旗,等,2017.玄武岩构造环境判别图评 估——全体数据研究的启示.矿物岩石地球化学通报, 36(6):891-896,879.
- 郭春丽,王登红,陈毓川,等,2007.川西新元古代花岗质杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究:岩石成因与构造意义.岩石学报,23(10):2457-2470.
- 赖绍聪,秦江锋,朱韧之,等,2015.扬子地块西缘天全新元古 代过铝质花岗岩类成因机制及其构造动力学背景.岩石 学报,31(8):2245-2258.
- 李献华,李正祥,周汉文,等,2002a.川西新元古代玄武质岩 浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究:岩石

成因与地球动力学意义.地学前缘,9(4):329-338.

- 李献华,周汉文,李正祥,等,2002b.川西新元古代双峰式火 山岩成因的微量元素和Sm-Nd同位素制约及其大地构 造意义.地质科学,37(3):264-276.
- 林广春,2008.扬子西缘瓦斯沟花岗岩的元素-Nd同位素地 球化学--岩石成因与构造意义.岩石矿物学杂志,27 (5):398-404.
- 林广春,2010.川西石棉花岗岩的锆石U-Pb年龄和岩石地球 化学特征:岩石成因与构造意义.地球科学(中国地质大 学学报),35(4):611-620.
- 林广春,李献华,李武显,2006.川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化 学:岩石成因与构造意义.中国科学.D辑:地球科学,36 (7):630-645.
- 孙书勤,汪云亮,张成江,2003.玄武岩类岩石大地构造环境 的Th、Nb、Zr判别.地质论评,49(1):40-47.
- 唐杰,许文良,李宇,等,2019.大兴安岭北段中一新生代玄武 岩成分变异:对地幔热演化过程意义.地球科学,44(4): 1096-1112.

- 汪云亮,张成江,修淑芝,2001.玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图 解判别.岩石学报,17(3): 413-421.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf同位素体系及其岩 石学应用.岩石学报,23(2):185-220.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等,2007.利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩.岩石矿物学杂志,26(1): 77-89.
- 徐士进, 于航波, 王汝成, 等, 2002. 川西沙坝麻粒岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年龄及其地质意义. 高校地质学报, 8 (4): 399-406.
- 颜丹平,周美夫,宋鸿林,等,2002.华南在 Rodinia 古陆中位 置的讨论——扬子地块西缘变质一岩浆杂岩证据及其 与 Seychelles 地块的对比.地学前缘,9(4):249-256.
- 袁海华,张树发,张平,1985.渡口市同德混合片麻岩初获太 古宙年龄信息.成都地质学院学报,8(3):79-84.
- 朱江,彭三国,彭练红,等,2019.扬子陆块北缘西大别地区定 远组双峰式火山岩U-Pb年代学及其地质构造意义.地 球科学,44(2):5-15.